

京都大学 博士論文

天空放射輝度分布のモデル化と
それを利用した熱負荷計算手法に関する基礎的研究

2009年3月

細淵 勇人

**Modeling of the Sky Radiance Distribution and
Development the Calculation Method of Heating/Cooling
Load Considered the Sky Radiance Distribution**

by

Hayato Hosobuchi

B.E. in Architectural Engineering, Tokyo Metropolitan University, 2000

M.E. in Architectural Engineering, Tokyo Metropolitan University, 2002

**Submitted to the Graduate School of Engineering
in partial fulfillment of the requirements
for the degree of Doctor of Engineering**



Department of Global Environment Engineering

Kyoto University

March 2009

- 目次 -

第1章 序論

1.1	研究の背景	・・・3
1.2	研究の目的	・・・4
1.3	既往研究と本研究の位置付け	・・・4
1.4	論文の構成	・・・6

第2章 気象測定および天空放射輝度分布モデル

2.1	はじめに	・・・15
2.2	気象測定概要	・・・15
2.2.1	測定地点	・・・15
2.2.2	測定機器概要	・・・16
2.3	気象データ整理	・・・20
2.3.1	壁面日射量計算に用いる気象データの整理	・・・20
2.3.2	熱負荷計算に用いる気象データの整理	・・・20
2.4	天空放射輝度・輝度分布モデル	・・・25
2.4.1	壁面日射量の計算	・・・25
2.4.2	斜面日射モデルと天空放射輝度モデル	・・・25
2.4.3	CIE 標準一般天空	・・・27
2.5	まとめ	・・・29

第3章 天空放射気象分布への**CIE 標準一般天空の流用と天空タイプの集約**

3.1	はじめに	・・・37
3.2	気象データ	・・・38
3.3	CIE 標準一般天空近似タイプ	・・・38
3.3.1	輝度，放射輝度の比較	・・・38
3.3.2	CIE 標準一般天空近似タイプの算出	・・・41
3.3.3	近似タイプの出現頻度	・・・41
3.3.4	鉛直面日射量の算出	・・・43
3.3.5	鉛直面日射量の比較	・・・45
3.4	CIE 標準一般天空天空タイプの集約	・・・48
3.4.1	天空タイプの集約	・・・48
3.4.2	集約タイプの数による鉛直面日射量の RMSE の変化	・・・48
3.4.3	集約タイプの数5の鉛直面日射量	・・・51
3.5	まとめ	・・・52

第4章	日射量を用いた CIE 標準一般天空の天空タイプ推定手法の開発	
4.1	はじめに	・・・61
4.2	天空タイプと日射量	・・・62
4.2.1	Gradation , Indicatrix グループと日射量	・・・62
4.2.2	日射量の分析	・・・65
4.3	天空タイプ推定手法	・・・68
4.3.1	近似タイプ決定のRMSE	・・・68
4.3.2	境界曲線による天空タイプ推定	・・・69
4.3.2	鉛直面日射量	・・・72
4.4	天空タイプ5タイプの推定	・・・73
4.4.1	境界曲線による天空タイプ推定	・・・73
4.4.2	鉛直面日射量	・・・74
4.5	まとめ	・・・75
第5章	天空放射輝度分布が空調熱負荷に与える影響	
5.1	はじめに	・・・83
5.2	天空放射輝度分布測定値を用いた熱負荷計算	・・・84
5.2.1	天空壁面日射量の計算	・・・84
5.2.2	建物モデル・計算条件	・・・85
5.2.3	気象データ	・・・85
5.2.4	壁面日射量	・・・88
5.2.5	最大熱負荷	・・・88
5.2.6	期間熱負荷	・・・92
5.2.7	時別熱負荷	・・・93
5.3	推定した天空タイプを用いた熱負荷計算	・・・94
5.3.1	壁面日射量 $I_{sd,k}$ の計算	・・・94
5.3.2	壁面日射量	・・・94
5.3.3	最大熱負荷	・・・95
5.3.4	期間熱負荷	・・・96
5.3.5	時別熱負荷	・・・97
5.4	日射負荷と壁面日射量の相関	・・・97
5.5	まとめ	・・・102
第6章	天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量計算法の開発	
6.1	はじめに	・・・109
6.2	CIE 標準一般天空を用いた斜面日射量	・・・110
6.3	計算法開発の検討	・・・111
6.4	相対日射の近似	・・・112

6.4.1	Gradation関数の近似	・・・114
6.4.2	Indicatrix関数の近似	・・・118
6.5	壁面相対日射量の比較	・・・125
6.6	計算時間	・・・128
6.7	まとめ	・・・129
第7章 遮蔽物のある場合の熱負荷計算		
7.1	はじめに	・・・135
7.2	遮蔽物がある場合の計算法	・・・136
7.2.1	直達日射の遮蔽判定	・・・136
7.2.2	天空率の算出	・・・136
7.2.3	近似解析法	・・・137
7.2.4	天空要素計算法	・・・138
7.2.5	斜面日射モデル	・・・139
7.2.6	一様天空	・・・140
7.3	遮蔽物のある場合の熱負荷計算	・・・141
7.3.1	建物モデル・計算条件・気象データ	・・・141
7.3.2	壁面日射量	・・・143
7.3.2.1	壁面全天日射量	・・・143
7.3.2.2	壁面天空日射量	・・・144
7.3.3	日射負荷	・・・146
7.3.3.1	最大日射負荷	・・・146
7.3.3.2	期間日射負荷	・・・147
7.4	計算時間	・・・147
7.5	まとめ	・・・149
第8章 結論		
8.1	各章まとめ	・・・155
8.1.1	1章まとめ	・・・155
8.1.2	2章まとめ	・・・155
8.1.3	3章まとめ	・・・156
8.1.4	4章まとめ	・・・157
8.1.5	5章まとめ	・・・157
8.1.6	6章まとめ	・・・158
8.1.7	7章まとめ	・・・159
8.2	総括	・・・160

Appendix

Appendix-1	Inadicatrix近似関数のパラメータ表	・・・163
Appendix-2	Inadicatrix近似関数の近似誤差(%RMSE)	・・・169
Appendix-3	Inadicatrix近似関数の相対日射量の比較	・・・170
Appendix-4	Inadicatrix近似関数, 天空要素計算法の相対日射量の相対誤差	・・・173
Appendix-5	相対日射量の比較	・・・176
Appendix-6	近似関数, 天空要素計算法の相対日射量の相対誤差	・・・179
Appendix-7	日射, 天空輝度分布・天空放射輝度分布に関する各種モデル	・・・189
	1. 直散分離手法	・・・189
	2. 斜面日射モデル	・・・192
	3. 天空輝度・放射輝度分布モデル	・・・195
	発表論文	・・・211
	謝辞	・・・213

- 図表リスト -

第1章 序論

図 1.1	本論文の構成	・・・9
-------	--------	------

第2章 気象測定および天空放射輝度分布モデル

図 2.1	測定地点	・・・15
図 2.2	測定地概要	・・・16
図 2.3	EKO 製 MS-301LR	・・・17
図 2.4	天空要素の配置図	・・・17
表 2.1	天空要素の高度・方位	・・・17
表 2.2	スカイスキャナ概要	・・・17
図 2.5	スカイスキャナ測定例	・・・17
図 2.6	魚眼レンズによって撮影した天空状態	・・・17
図 2.7	MS-801	・・・18
表 2.3	MS-801 機器概要	・・・18
図 2.8	MS-801+ 遮蔽バンド	・・・18
表 2.4	天空要素の高度・方位	・・・18
図 2.9	MS-52・STR-02A	・・・19
表 2.5	MS-52・STR-02A 機器概要	・・・19
表 2.6	計算用気象データ日付	・・・22
表 2.7	計算用気象データと標準年データとの比較	・・・22
図 2.10a) ~ e)	作成気象データと標準年データの比較	・・・23
図 2.10f) ~ h)	作成気象データと標準年データの比較	・・・24
図 2.11	斜面日射量計算フロー	・・・27
図 2.12	太陽と任意の天空要素の概念図	・・・28
表 2.8	CIE 標準一般天空のパラメータ	・・・28
図 2.13	Relative gradation $j(Z)/j(0)$	・・・29
図 2.14	Relative scattering indicatrix $f(c)$	・・・29

第3章 天空放射気象分布への CIE 標準一般天空の流用と天空タイプの集約

図 3.1	輝度・放射輝度の比較	・・・39
表 3.1	$j(Z)/j(0)$ の RMSE(年平均)	・・・39
表 3.2	$f(c)$ の RMSE(年平均)	・・・39
表 3.3	$j(Z)/j(0)$ の近似線の傾き	・・・39
表 3.4	$f(c)$ の近似線の傾き	・・・39
図 3.2	近似タイプ決定フロー	・・・40

表 3.5	近似タイプの出現頻度と順位	・・・41
図 3.3	近似タイプ出現割合	・・・42
図 3.4	修正立体角算出のための天球表面積分割の概念図	・・・44
図 3.5	各モデルによる鉛直面日射量の比較 (2001 年 8 月)	・・・46
図 3.6	各モデルによる鉛直面日射量の比較 (2001 年 2 月)	・・・46
表 3.6	鉛直面日射量の相対誤差の月平均	・・・47
表 3.7	鉛直面日射量の相対誤差の標準偏差	・・・47
表 3.8	天空タイプの集約過程	・・・48
図 3.7	近似する天空タイプの数による近似タイプの出現頻度の割合	・・・49
図 3.8	近似する天空タイプの数による鉛直面日射量の RMSE の変化	・・・50
図 3.9	Overcast sky ,Uniform sky ,Partly cloudy sky ,Clear sky の 4 タイプ に分類した出現頻度の割合	・・・50
図 3.10	近似する天空タイプの数が 5,15 の近似モデルの 鉛直面日射量の比較 (2001 年 8 月)	・・・51
図 3.11	近似する天空タイプの数が 5,15 の近似モデルの 鉛直面日射量の比較 (2001 年 2 月)	・・・51
図 3.12	天空要素の配置図	・・・52
表 3.9	天空要素の高度・方位	・・・52

第 4 章 日射量を用いた CIE 標準一般天空の天空タイプ推定手法の開発

図 4.1	輝度階調関数と日射量測定値の関係	・・・63
図 4.2	散乱関数と日射量測定値の関係	・・・64
図 4.3	日射量測定値の太陽高度 5° 毎の平均値	・・・64
図 4.4	日射の平均化時間	・・・65
図 4.5	Gradation 各グループの基準化標準偏差	・・・67
図 4.6	Indicatrix 各グループの基準化標準偏差	・・・67
図 4.7	基準化標準偏差の変化	・・・68
図 4.8	近似タイプを決定した RMSE の分布	・・・69
図 4.9	日射量の高度別平均値 (15 タイプ)	・・・70
表 4.1	境界曲線の係数 (Gradation 15 タイプ)	・・・70
表 4.2	境界曲線の係数 (Indicatrix 15 タイプ)	・・・70
図 4.10	境界曲線と各グループの出現領域	・・・71
図 4.11	境界曲線と各グループの出現領域	・・・71
表 4.3	Gradation 境界曲線の AIC , 残差平方和 , データ数	・・・71
表 4.4	Indicatrix 境界曲線の AIC , 残差平方和 , データ数	・・・71
図 4.12	鉛直面日射量相対誤差の月平均	・・・72
図 4.13	天空タイプの境界曲線と出現領域 (5 タイプ)	・・・74

図 4.14	鉛直面日射量相対誤差の月平均	・・・74
図 4.15	鉛直面日射量の %RMSE の差	・・・75
第 5 章 天空放射輝度分布が空調熱負荷に与える影響		
図 5.1	壁面日射量計算フロー	・・・85
図 5.2	建物モデル	・・・86
表 5.1	建物概要	・・・86
表 5.2	計算条件	・・・86
表 5.3	計算モデル	・・・87
表 5.4	部材設定	・・・87
図 5.3	壁面全天日射量の比較 (夏季)	・・・89
図 5.4	壁面天空日射量の比較 (夏季)	・・・89
図 5.5	壁面全天日射量の比較 (冬季)	・・・90
図 5.6	壁面天空日射量の比較 (冬季)	・・・90
表 5.5	壁面日射量近似直線 y' の傾き・ R^2 値 (一様天空)	・・・91
図 5.7	最大熱負荷の定義	・・・91
表 5.8	壁面日射量近似直線 y の傾き・ R^2 値 (天空タイプ推定)	・・・91
表 5.6	最大熱負荷 (天空放射輝度分布の測定値)	・・・92
表 5.7	最大熱負荷 (一様天空)	・・・92
図 5.8	最大熱負荷の相対差 (危険率 2.5% 一様天空)	・・・92
図 5.9	期間熱負荷の相対差 (一様天空)	・・・93
図 5.10	時別熱負荷の %MBE, %RMSE (一様天空)	・・・94
図 5.11	壁面日射量計算フロー	・・・95
表 5.9	最大熱負荷 (天空タイプ推定手法)	・・・96
図 5.12	最大熱負荷の相対差 (危険率 2.5% 天空タイプ推定手法)	・・・96
図 5.13	期間熱負荷の相対差 (天空タイプ推定手法)	・・・97
図 5.14	時別熱負荷の %MBE, %RMSE (推定天空タイプ)	・・・97
表 5.10	日射負荷と壁面日射量の相関直線の係数, R^2 値	・・・98
図 5.15	日射負荷と壁面全天日射量との相関 (冬季 基準建物)	・・・99
図 5.16	日射負荷と壁面天空日射量との相関 (冬季 基準建物)	・・・99
図 5.17	推定手法の違いによる壁面天空日射量の度数比較 (冬季)	・・・100
図 5.18	推定手法の違いによる壁面天空日射量の度数比較 (夏季)	・・・101
第 6 章 天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量計算法の開発		
図 6.1	座標変換の概要	・・・112
図 6.2	天頂側, 地平線側近似関数の概要	・・・112
表 6.1	Gradation関数 近似関数の係数	・・・114
図 6.3	Gradation関数の近似	・・・115
表 6.2	近似関数の Gradation関数に対する相対誤差	・・・116

図 6.4	Gradation 近似関数と数値積分、天空要素計算の比較	・・・117
表 6.3	数値積分法に対する相対誤差	・・・117
表 6.4	天空要素計算法に対する相対誤差	・・・117
図 6.5	地平線側近似関数の係数 $f_{g,2}$	・・・118
表 6.5	天頂側近似関数の係数(Indicatrix-2)	・・・119
表 6.6	地平線側近似関数の係数(Indicatrix-2)	・・・120
図 6.6	Indicatrix 関数と近似関の比較(グループ 6)	・・・121
図 6.7	Indicatrix 近似関数の近似誤差	・・・122
図 6.8	Indicatrix 近似関数と数値積分、 天空要素計算法の比較(太陽方位 0° 南面)	・・・123
図 6.9	Indicatrix 関数の分布のみによる相対日射量の比較	・・・124
図 6.10	Indicatrix 関数 近似関数(多項式 : 3 次)	・・・125
図 6.11	相対日射量の比較 (太陽方位 0° 水平面)	・・・126
図 6.12	相対日射量解析解と数値積分、 天空要素計算の比較(太陽方位 45° 東面)	・・・127
図 6.13	相対日射量の比較	・・・128
図 6.14	計算速度の比較	・・・128

第 7 章 遮蔽物のある場合の熱負荷計算

図 7.1	天空率算出の概念図	・・・137
図 7.2	近似解析法の積分区間の決定	・・・138
図 7.3	145 天空要素の遮蔽判定の概要	・・・139
表 7.1	天空率の比較	・・・139
図 7.4	非遮蔽率 f の概要	・・・140
図 7.6	建物モデルの概要	・・・141
表 7.2	天空率	・・・141
図 7.5	対向する建物と仰角の関係	・・・142
図 7.7	壁面全天日射量	・・・144
表 7.3	壁面全天日射量の近似直線の傾きと R^2 値	・・・144
図 7.8	壁面天空日射量	・・・145
表 7.4	壁面天空日射量の近似直線の傾きと R^2 値	・・・145
表 7.5	最大日射負荷(夏季)	・・・146
表 7.6	最大日射負荷(冬季)	・・・146
図 7.9	最大日射負荷の相対差	・・・146
表 7.7	期間日射負荷(夏季)	・・・147
表 7.8	期間日射負荷(冬季)	・・・147
図 7.10	期間日射負荷の相対差	・・・147
表 7.9	各壁面日射計算法における計算プロセスに要する演算時間	・・・148
図 7.11	計算時間の比較	・・・148

1章

序論

第1章

序論

1.1 研究の背景

近年,社会活動に起因するエネルギー消費により,二酸化炭素排出量が増大し地球温暖化といった地球環境問題が顕在化している。これに対し環境配慮,省エネ等の対策が国を挙げて推進され,国際的なレベルでも消費エネルギーをいかに低減して二酸化炭素排出量を抑えるかが人類の将来に対する大きな課題となっている。また,京都議定書に基づく排出権取引が新聞やTVニュースで伝えられたり,「リサイクル」,「エコ」といった言葉も耳にしないうるほど身近なものになるなど,生活レベルでの環境に対する意識も高まっている。

地球温暖化の原因となるCO₂を考えると,その排出量の3分の1が建築関連分野に由来することから,地球環境問題における建設関連分野の責任は重大であり,建設関連のエネルギー消費量の削減は必須である。特にオフィスビルにおいては,運用段階でのエネルギー消費量が全体に占める割合が大きいため,消費エネルギー低減策の導入が望まれる。もちろんエネルギーの有効な利用も考えなくてはならない。このような建物のエネルギーの有効利用,省エネルギーのためには,精度の良い消費エネルギー予測を行わなくてはならない。

建物のエネルギー予測を行う前には熱負荷計算が必要である。国内では,1972年に開発された空気調和・衛生工学会の年間熱負荷計算プログラムHASP/ACLD/7101をはじめとして,欧米各国でも実用的な熱負荷計算プログラムが開発され,研究分野でのエネルギー予測にも使用されている。このような熱負荷計算プログラムは気象データを入力として,室の熱負荷を求めるものであるが,これら熱負荷計算プログラムの開発・進歩にあわせ,直散分離法などにより,各地の気象データも整備されてきた。これは,より現実に近いランダムな自然環境を表現する気象データを用いることで,精度の高い熱負荷・エネルギー予測が可能となるためである。

さて,現在,熱負荷計算はもちろん,都市の熱環境解析等の熱環境シミュレーションにおいては,天空の放射輝度分布を一様であると仮定するのが一般的である。しかし,より精度の高いシミュレーションを行うためには,天空の放射輝度分布を一様と仮定する従来の方法では十分とは言えない。このため近年,天空の放射輝度分布を考慮した気象モデルも提案されている。また,測定機器の進歩に伴い,天空の放射輝度・輝度分布の測定を行うことも可能となり,熱環境シミュレーションに天空放射輝度分布を考慮した精度の高いエネルギー予測を可能とする環境が整備されてきている。

熱環境分野ではないが,光環境分野では,照明,室内照度計算を目的として,天空輝度分布のモデル化に関する研究が古くから行われており,曇天空,晴天空は,CIE標準曇天空¹⁻¹⁾,CIE標準晴天空¹⁻²⁾として,それぞれのモデルが1955,1975年に国際照明委員会(Commission Internationale De L'eclairage(CIE))により推奨されている。さらに2003年にはKittler,Perez¹⁻³⁾らの輝度階調関数と散乱関数という二つの関数で,天頂輝度に対する相対天空輝度分布をモデル化し,これらの関数のパラメータの組合せにより,晴天空から曇天空までの15の天空タイプを規定したモデルがCIE標準一般天

空¹⁻⁴⁾として採用された。

以上のように近年では、各地の気象データが整備され、詳細な気象モデルが開発され、さらに以前は測定されていなかった気象データの測定も可能となってきた。このような気象モデル、気象データを用いて、より精度の高いエネルギー予測が行われ始めている。

1.2 研究の目的

本研究では、以下について検証を行い、従来では一様と仮定されてきた天空放射輝度分布に、その分布を考慮することの重要性を明らかにし、エネルギー（熱負荷）予測時に天空放射輝度分布を考慮し、詳細なエネルギー（熱負荷）予測を可能とする手法の開発を目的とする。

1. CIE 標準一般天空の熱負荷計算への流用と天空タイプの推定法

- 1) 国際照明委員会(CIE)により標準として推奨されている天空輝度分布のモデルである CIE 標準一般天空を、天空放射輝度分布に流用することの妥当性を明示する。
- 2) 天空放射輝度分布において、一般的に測定されている気象要素から CIE 標準一般天空の天空タイプを推定する手法を開発する。

2. 天空放射輝度分布を考慮した熱負荷計算

- 1) 測定した天空放射輝度分布を用いて熱負荷を求め、従来の天空放射輝度分布を一様とする熱負荷との比較を行い、熱負荷計算に天空放射輝度分布を考慮することの必要性を明らかにする。
- 2) 開発した天空タイプの推定手法を用いて熱負荷計算を行い、この手法の熱負荷計算における有効性を示す。

3. 遮蔽物を考慮した熱負荷計算

- 1) CIE 標準一般天空の天空タイプを用いて、天空放射輝度分布を考慮した熱負荷計算において遮蔽物を考慮することを可能とし、計算時間の要する数値積分法等によらない新たな壁面日射量計算法を開発する。
- 2) 都市内にある建物という現実に近い建物を想定するために、周囲に遮蔽物がある場合の天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量計算手法を提案する。

1.3 既往研究と本研究の位置付け

建物の熱負荷計算においては、外壁面、ガラス面に入射する日射量を精度よく求める必要があるが、この入射日射量の計算は、天空の放射輝度分布が一様であると仮定して行うのが現在では一般的である。しかし近年、天空の放射輝度分布を考慮した壁面日射量を推定する斜面日射モデル (Slope irradiance model) モデルが開発・提案されている。これらは天空日射量を一様な天空日射量と、太陽近傍の高輝度天空からの準直達日射量から成るとする Hay¹⁻⁵⁾ のモデルや、さらに、地平線付近からの天空日射量を考慮した Reindl¹⁻⁶⁾ のモデル、Reindl のモデルと同様に、一様な天空日射、準直達日射、地平線付近からの天空日射の割合を、8 種類の天空状態別に決める Perez^{1-7),1-8)} のモデル等がある。Perez のモデルは熱環境シミュレーションソフトウェア ESP-r に組み込まれている¹⁻⁹⁾。

赤坂らは、斜面日射量の推定法の違いを検討し、Perezのモデルと一様天空のモデルでは年間熱負荷で、最大20%程度の差が生じることを報告している¹⁻¹⁰⁾。

一方、光環境分野では、昼光照明シミュレーションを目的として、天空輝度分布そのものをモデル化する研究が古くから行われている。国際照明委員会によりCIE標準曇天空、CIE標準晴天空が推奨されると、この曇天空と晴天空の間の天空をモデル化する研究、提案が行われた。このような中間天空モデルの主なものとしてNakamuraらにより提案された中間天空モデル¹⁻¹¹⁾等がある。このような中間天空モデルとは別に、天空の混濁因子や、雲量等を指標として天空状態を分類する全天候型の放射輝度分布モデルが開発されている。Perezらは太陽の天頂角、Sky clearness、Sky brightnessから求める5つのパラメータを用いて、任意の天空要素の相対輝度を導く天空輝度分布モデルであるAll-weather model^{1-12),1-13)}を提案し、Kittler、PerezらはこのAll-weather modelをもとに、輝度階調関数と散乱関数という二つの関数で、天頂輝度に対する相対天空輝度分布をモデル化した。そして、これらの関数のパラメータの組合せにより、晴天空から曇天空までの15の天空タイプを規定した。この天空タイプを規定するパラメータの値は、天空輝度の実測データを輝度階調、散乱の各関数についてそれぞれ6つに分類、回帰して決定している。このKittlerらのモデルは国際照明委員会にCIE標準一般天空として採用された。

このCIE標準一般天空を用いて、Tregenzaらは沿岸の都市(シンガポール、福岡、英国のガーストン、シェフィールド)における天空輝度分布測定値のCIE標準一般天空による分類の検証と、CIE標準一般天空15タイプのうちの最も適合する4タイプに分類する試み、室内照度計算による検証¹⁻¹⁴⁾を行っている。Royらはシドニーにおいて、デジタルカメラを用いた天空輝度分布測定値とCIE標準一般天空モデルの比較¹⁻¹⁵⁾を行っている。また梅宮は、曇天空を対象として、散乱関数を用いたCIE標準一般天空に大気の状態の不均一性を組み込む試みを行っている¹⁻¹⁶⁾。

Kittler、Perezらの天空輝度分布モデルとは別に、井川らはグローバル照度を基にした正規化グローバル照度を指標として天空輝度分布のモデルであるAll sky modelを提案した。これに続き天空放射輝度分布のモデルとして、全天日射量を基にした晴天指標、およびCloud ratioを基にした澄清指数により天空状態を分類し数式化したAll sky model-Rを提案している。さらにこれと同様な手法によりAll sky model-Lとして天空輝度分布のモデルを改めて提案している^{1-17),1-18),1-19),1-20)}。

以上のように、照明・昼光環境分野では天空の輝度分布のモデル化が行われてきた。熱環境分野では、All sky model-Rのような例もあるが、天空放射輝度分布そのもののモデル化は一般的ではなく、斜面日射量を推定するモデルの開発が一般的である。これは外壁を通じて室内に流入する熱には遅れがあることや、光のように瞬時の変動や、空間的な分布を考えてもそれが平均化されるため、影響が小さくないとし、平均的な入射日射量(熱量)を求めることで十分とするためである。一般的な熱環境シミュレーションプログラムでは、天空放射輝度分布を一様、壁面に入射する日射をその壁面の中心一点で代表させる形で行われている。

しかし、天空放射輝度分布そのものや、そのモデルを利用することで、より精密な熱環境シミュレーション(庇やブラインドのある建物の窓周りの精密な熱取得、ガラスの入射角特性の違いによる影響、周辺建物等の遮蔽物の考慮など)が可能となると考える。ところが熱環境シミュレーションに天空放射輝度分布を考慮した例は少なく¹⁻²¹⁾、熱負荷計算に天空放射輝度分布を考慮し詳細な検討を行ったり、天空放射輝度分布そのもののモデルを用いた例はない。このため本研究のように

天空放射輝度分布が熱負荷に与える影響を詳細に検討すること、天空放射輝度分布そのもののモデルを熱負荷計算に利用する手法を示すことは、より精度の高いエネルギー予測を可能とすることに繋がるものであり、分析、検証すべき課題であると考えられる。

1.4 論文の構成

本論文は以下の構成とする。

1章 序論

序論として、研究の背景、研究の目的を述べ、既往研究を示して本研究の位置付けを行う。

2章 気象測定および天空放射輝度分布モデル

本研究の目的とする、天空放射輝度分布を考慮した熱負荷や壁面日射量の予測を可能とする手法の開発に先立ち、2章では、研究に用いる各種気象要素の測定概要と、この測定した気象要素を、シミュレーション(壁面日射量計算、熱負荷計算)に用いるための気象データとして整理する方法、さらに、天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量の計算フロー、本研究で天空放射輝度分布のモデルとして流用する天空輝度分布モデル(CIE標準一般天空)の概要について述べる。

3章 天空放射輝度分布へのCIE標準一般天空の流用と天空タイプの集約

3章では、通常は天空で一様と仮定される放射輝度に分布を考慮し、より精密な鉛直面日射量を求めるために、天空輝度分布のモデルであるCIE標準一般天空を天空放射輝度分布に流用することが可能かどうかを検証すること、さらに、流用が可能であるならば、精度を大きく損うことなく鉛直面日射量を求めるために最低限必要なCIE標準一般天空の天空タイプの数を決定することを目的として、以下の1)、2)の検討を行う。

- 1) ある天空状態に対して、天空放射輝度分布測定値に対するCIE標準一般天空の各天空タイプのRMSE (Root Mean Square Error) を算出し、RMSEが最小となる天空タイプを選ぶ。これを「その天空タイプで近似する」と表現し、この天空タイプを「近似タイプ」と呼ぶことにする。この近似タイプの出現頻度を把握するとともに、近似タイプの天空放射輝度分布、天空放射輝度分布測定値および一様放射輝度天空を用いて、それぞれの鉛直面日射量を算出し、比較を行い、CIE標準一般天空を天空放射輝度分布に流用し鉛直面日射量を求めることの妥当性を明らかにする。
- 2) 近似タイプの出現頻度の順に、近似する天空タイプの数を15から減らしてゆき、その時の近似タイプの天空放射輝度分布から求めた鉛直面日射量の、天空放射輝度分布測定値から求めた鉛直面日射量に対するRMSEの変化に基づき、精度を大きく損うことなく鉛直面日射量を求めるために最低限必要な天空タイプの数を決定する。

4章 日射量を用いたCIE標準一般天空の天空タイプ推定手法

現在、CIE標準一般天空の天空タイプを推定する指標は標準化されていない。天空放射輝度分布は通常は測定されていないため、CIE標準一般天空の天空タイプを鉛直面日射量の計算に用いるに

は、一般的に測定されている気象要素から、天空タイプを推定する手法の開発が必要である。そこで、この天空タイプを推定する手法の開発を目的として以下の検討を行う。

- 1) 水平面全天日射量や、法線面直達日射量といった気象要素と、天空放射輝度分布の測定値に最も近い天空タイプ(近似タイプ)の関係の分析し、一般的に測定されている気象要素から天空タイプ推定手法を検討する。
- 2) 推定した天空タイプを用いて東西南北四方位の鉛直面日射量を求め、天空放射輝度分布測定値から得られた方位別鉛直面日射量に対する相対誤差を分析し、壁面日射量を基準として、その精度より推定手法の妥当性を検証する。

5章 天空放射輝度分布が空調熱負荷に与える影響

熱環境シミュレーションに天空放射輝度分布を考慮した例は少なく、熱負荷計算に天空放射輝度分布そのもののモデルを用いた例はない。そこで、一様天空の場合の熱負荷、測定した天空放射輝度分布の場合の熱負荷と比較し、天空放射輝度分布の熱負荷へのインパクトを明らかにし、さらに4章で示した天空タイプ推定法を用いて、CIE標準一般天空の天空タイプを用いた熱負荷計算を行い、測定した天空放射輝度分布の場合の熱負荷と比較することで、熱負荷計算における天空タイプ推定手法の有効性を検証するために、以下の検討を行う。

- 1) スカイスキャナで測定した天空放射輝度分布データを用いて求めた熱負荷に対する、天空日射が天空一様と仮定して求めた熱負荷の最大及び期間熱負荷の相対差、特別熱負荷の%MBE、%RMSEを求めて、季節や建物の違いによる差異を検討し、天空放射輝度分布の有無による熱負荷へのインパクトを明らかにして、天空放射輝度分布を考慮する必要性を吟味する。
- 2) 4章で示した手法を用いて天空タイプを推定し、この天空放射輝度分布を用いて熱負荷を計算する。これと、測定した天空放射輝度分布データを用いて求めた熱負荷との比較を行ない、精度良く熱負荷が求められるかどうかを検討して、熱負荷計算における天空放射輝度分布推定手法の有効性を検証する。

6章 天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量計算法の開発

天空放射輝度分布のモデルを熱負荷計算に利用する際には、計算対象建物の壁面に入射する日射量を求める必要がある。天空放射輝度分布のモデルを利用して、壁面に入射する日射量を求めるには、任意壁面から見える天空の放射輝度を積分する。この積分には数値積分を用いることが考えられるが、これには計算時間を要すること、遮蔽物(庇等の建物付属物や、周辺建物)を考慮した場合には、その遮蔽判定が必要になることなど、熱負荷シミュレーションソフトに組み込むには問題がある。そこで6章では、熱負荷シミュレーションソフトに組み込むことを前提とした、CIE標準一般天空の天空タイプを流用して壁面の天空日射量を計算する手法の開発を目的として、以下の検討を行う。

- 1) CIE標準一般天空の天空タイプを用いて、天空放射輝度分布を考慮した熱負荷計算において、遮蔽物を考慮することを可能とし、計算時間の要する数値積分法等によらない新たな壁面日射量計算法を開発することが可能か検討する。
- 2) 開発した壁面日射量計算手法より、相対日射量を計算し、その計算精度の検証を行い、さらにその計算時間と数値積分の場合に要する計算時間との比較を行い、開発した手法の有効性を検証する。

7章 遮蔽物のある場合の熱負荷計算

6章で検討した壁面日射量計算法を用いて、遮蔽物を考慮した場合の壁面日射量計算法を提案し、これを用いて、周囲に遮蔽物のある建物を想定した、より現実に近い熱負荷シミュレーションを行い、手法の有効性を明らかにするために以下の検討を行う。

- 1) 6章で検討した壁面日射量計算法を周囲遮蔽物のある場合に適用する方法を検討する。
- 2) 周辺建物のある建物を想定した壁面日射量、熱負荷の計算を行い、壁面日射量計算法の有効性を検証する。
- 3) 開発した遮蔽物を考慮した壁面日射量計算法に要する計算時間を検討し、計算法の有効性を検証する。

8章 結論

本研究で得られた知見、成果を集約する。

Appendix

本論中に掲載することができなかった計算結果等（6章で検討した、近似関数のパラメータ、近似解析法の近似誤差や、近似解析法の数値積分、天空要素計算法との比較）を追加し、さらに本研究に関連する日射モデルを列記し概要を述べる。

図 1.1 に本論分の構成を示す。

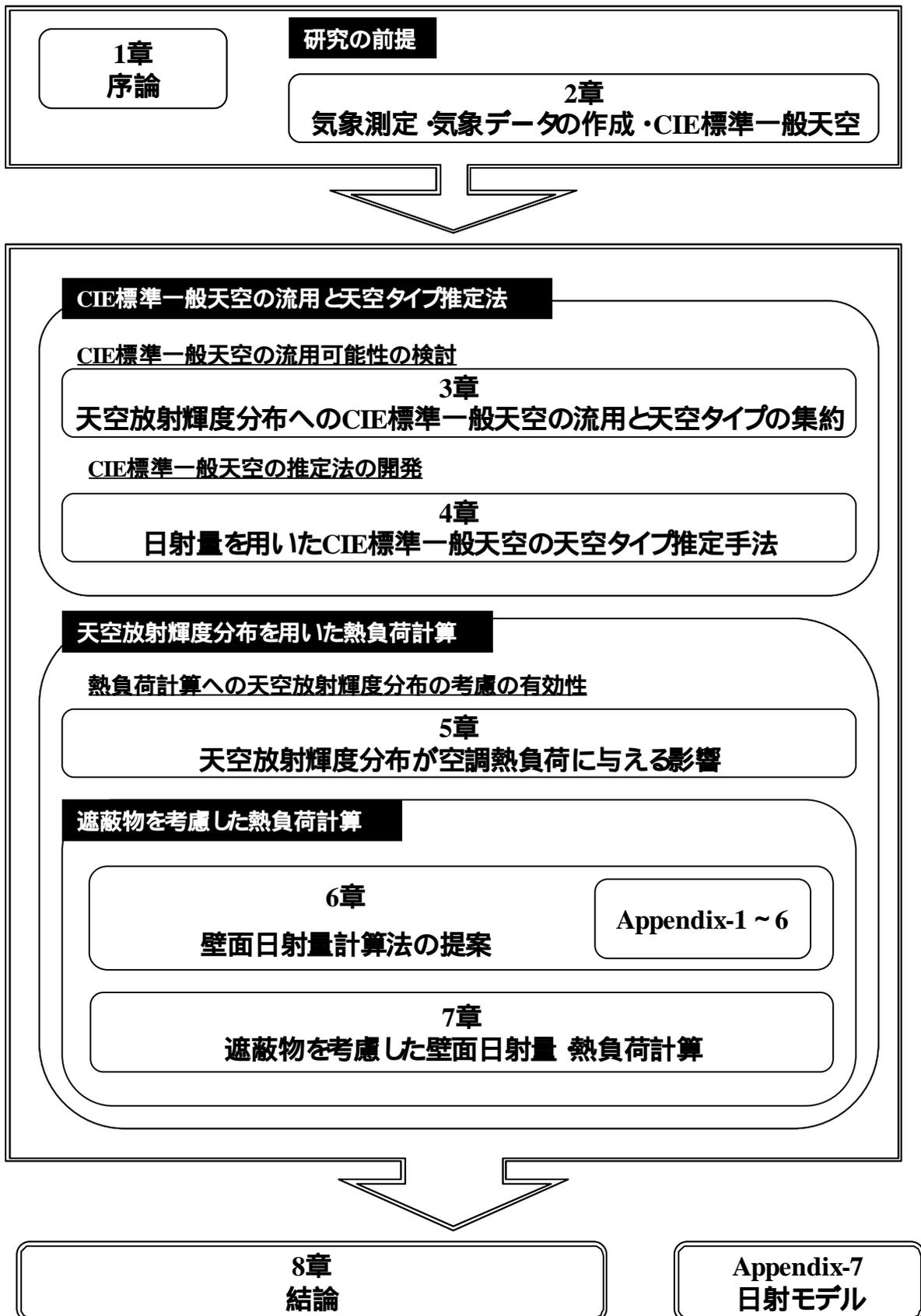


図1.1 本論文の構成

参考文献

- 1-1) Moon, P., Spencer, D.E.: Illumination from a non-uniform sky, *Illum. Energy*, 37, pp.707-726, 1942
- 1-2) Kittler, R.: Standardization of outdoor conditions for the calculation of daylight factor with clear skies, *Proc. the CIE International Conference on Sunlight in Buildings*, Bouwcentrum Internationl, Rotterdam, pp.273-285, 1967
- 1-3) Kittler, R., Perez, R. and Darula, S.: A Set of Standard Skies Characterising Daylight Conditions for Computer and Energy Conscious Design, Final Report of U.S.-Slovak Grant Project US-SK 92 052, 1998
- 1-4) CIE Standard: Spatial Distribution of Daylight-CIE Standard General Sky, CIE S 011.1/E, 2003.
- 1-5) Hay, J.E.: Study of Short-Wave Radiation on Nonhorizontal Surfaces, Canadian Climatic Center Report, No.79-12 Atmospheric Environment Service, Tronto Canada, 1979
- 1-6) Reindl, D.T., Beckman, W.A., Duffie, J.A.: Evaluation of Hourly Tiled Surface Radiation Models, *Solar Energy*, 45(1), pp.9-17, 1990
- 1-7) Perez, R., Seals, R., Ineichen, Stewart, R., and Menicucci, D.: A New Simplified Version of the Perez Diffuse Irradiance Model for Tilted Surfaces, *Solar Energy*, Vol.39, No.3, pp.221-231, 1987
- 1-8) Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, j., and Stewart, R.: Modeling Day Light Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance, *Solar Energy*, 44(5), pp.271-289, 1990
- 1-9) <http://www.esru.strath.ac.uk/>, <http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>
- 1-10) 赤坂裕, 他, 拡張アメダス気象データ, 日本建築学会, 2000
- 1-11) Nakamura, H., Oki, M., Hayashi, Y.: A Study on the Estimation of the Relative Frequency of Occurrences of the Clear Sky, the Intermediate Sky and the Overcast Sky in Japan, *J.Light & Vis.Env.*, Vol.9, No.2, pp.76-85, 1985
- 1-12) Perez, R., Seals, R., and Michalsky, j.: All-Weather Model for Sky Luminance Distribution - Preliminary Configuration and Validation, *Solar Energy*, 50(3), pp.235-245, 1993
- 1-13) Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, j., and Stewart, R.: Modeling Day Light Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance, *Solar Energy*, 44(5), pp.271-289, 1990
- 1-14) Tregenza, P.R.: Standard Skies for Maritime Climates, *Lighting Res. & Technol.*, 31(3), pp.97-106, 1999
- 1-15) Roy, G.G., Kittler, R., Hayman, S., Julian, W.: Comparison of Real Sydney Skies with Model Skies, *Lighting Res. & Technol.*, 32(2), pp.71-78, 2000
- 1-16) 梅宮典子: 天空輝度分布不均一性のモデルへの組み込みについて, 曇天空における散乱関数の仮定による CIE モデルの補正, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.359-360, 2003.9
- 1-17) 井川憲男, 中村洋, 松澤朋子, 古賀靖子, 古城真也: 絶対値で表す天頂輝度と天空輝度分布, 天空輝度分布の分類法に関する研究(その4), 日本建築学会計画系論文集, 第523号, pp.23-30, 1999.9
- 1-18) 井川憲男, 中村洋, 松澤朋子, 古賀靖子, 穴井謙: すべての天空状態の天空放射輝度分布を示す数式と鉛直面日射量の推定, 天空放射輝度分布のモデル化に関する研究(その2), 日本建築学会計画系論文集, 第557号, pp.17-24, 2002.7

- 1-19) 井川憲男, 中村洋, 古賀靖子, 松澤朋子: 全天日射量と天空日射量で推定する天空放射輝度分布と天空輝度分布, 日本建築学会環境系論文集, 第 573 号, pp.33-40,2003.11
- 1-20) Igawa,N., Koga,Y., Matsuzawa,T. and Nakamura, H. :Model of Sky Radiance Distribution and Sky Luminance Distribution ,Solar Energy,77,pp.137-157,2004
- 1-21) 中山哲士, 石野久彌: 天空日射の方位特性と熱負荷特性に関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.353-356,1998.8

2章

気象測定および天空放射輝度分布モデル

第2章

気象測定および 天空放射輝度分布モデル

2.1 はじめに

熱負荷計算等の建築物の熱環境を予測・解析する上で、建物の壁面に入射する日射量を精度良く求めることは重要である。壁面日射量を求める際、天空日射量については、天空で一様と仮定するのが現在一般的であるが、より正確に入射日射量を求めるためには、天空放射輝度分布を考慮する必要がある。本研究はこの天空放射輝度の分布を考慮した壁面日射量の予測と、それを用いた熱負荷を求める手法の開発を目的としている。本章では、この手法の開発に先立ち、本研究に用いる各種気象要素の測定概要、測定した気象要素をシミュレーション(壁面日射量計算、熱負荷計算)に用いるための気象データとして整理する方法、天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量の計算フロー、本研究で天空放射輝度分布のモデルとして流用する天空輝度分布モデル(CIE標準一般天空)の概要について述べる。

2.2 気象測定概要

2.2.1 測定地点

本研究では、主に京都大学吉田キャンパスにおいて測定を行った気象観測データを用いる。京都



図2.1 測定地点

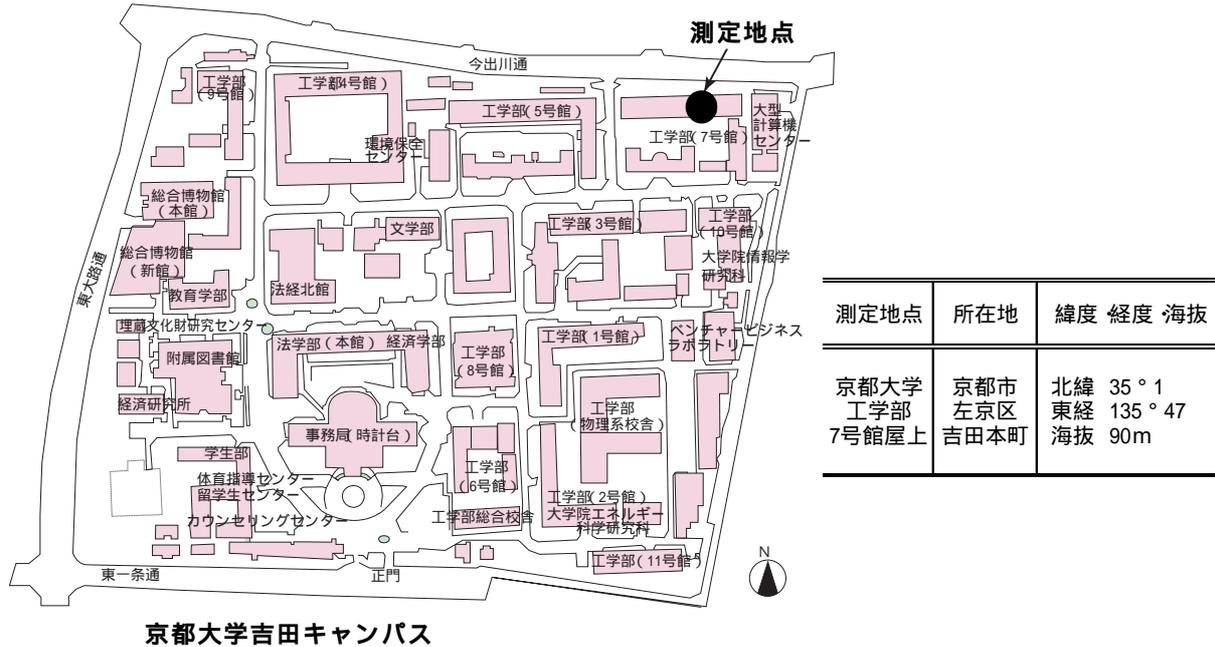


図 2.2 測定地概要

大学における気象データの測定は、国際照明委員会(CIE)が提唱する国際昼光測定プログラム(CIE-IDMP)に則って行われている。CIE-IDMPは同一規格で世界的規模の昼光と日射の測定を行い、昼光と日射に関する標準的な資料作成に役立てるという計画である。測定は世界22ヶ国46都市のIDMP Stationで行われている。CIE-IDMPの測定クラスには一般クラスと研究クラスがあり、京都大学では研究クラスの測定を行っている。IDMP Stationごとに測定項目に違いがあるが、京都大学では、一般的な日射、日照に加え、通常あまり測定されていない天空放射輝度分布・輝度分布の測定も行っている。図2.1に測定地点、図2.2に測定地点概要を示す。

なお、2006年8月の京都大学工学研究科キャンパス移転に伴い、現在、測定機器は京都大学桂キャンパスC-1棟屋上に移設され、引き続き各種気象要素の測定が継続されている。

2.2.2 測定機器概要

本研究では、京都大学吉田キャンパスにおいて測定した1)天空放射輝度分布・天空輝度分布、2)水平面直達日射量、3)水平面天空日射量、4)法線面直達日射量の気象要素測定値を用いる。各気象要素の測定概要を示す。

熱負荷計算に必要な気温、絶対湿度、長波放射、風向・風速といった気象要素については、京都地方気象台(図2.1参照)で測定された地上観測1分値データを利用した(5章 天空放射輝度分布を考慮した熱負荷計算)。

1) 天空放射輝度分布・天空輝度分布

天空放射輝度分布、天空輝度分布の測定には、天空輝度・天空放射輝度分布測定装置(スカイスキヤナ、EKO製、MS-301LR)を用いて行った。図2.3にスカイスキヤナ外観を示す。この装置はセンサー部を水平及び鉛直面内で回転させて145の天空要素(図2.4、表2.1参照)の輝度及び放射輝度を測定する。測定範囲・精度等の概要は表2.2に示す。1回の測定には2分40秒を要する。

図2.5,2.6のように、散在する雲や、天空一様に広がる雲の影響、大気の混濁等により、天空の



図2.3 EKO製 MS-301LR



図2.4 天空要素の配置図

表2.1 天空要素の高度・方位

高度帯	天空要素No.	高度角[°]	方位幅[°]
1	1-30	6	12
2	31-60	18	12
3	61-84	30	15
4	85-108	42	15
5	109-126	54	20
6	127-138	66	30
7	139-144	78	60
8(天頂)	145	90	-

表2.2 スカイスキャナ概要

測定項目	測定機器/メーカー・型番	測定範囲・精度	備考
天空放射輝度分布	スカイスキャナ	300W/m ² ・sr以下 分解能 約1.0W/m ² ・sr	半開口角 5.5°(2-1), 注2-1)
天空輝度分布	EKO製 MS-301LR	50Kcd/m ² 以下 分解能 約15cd/m ²	

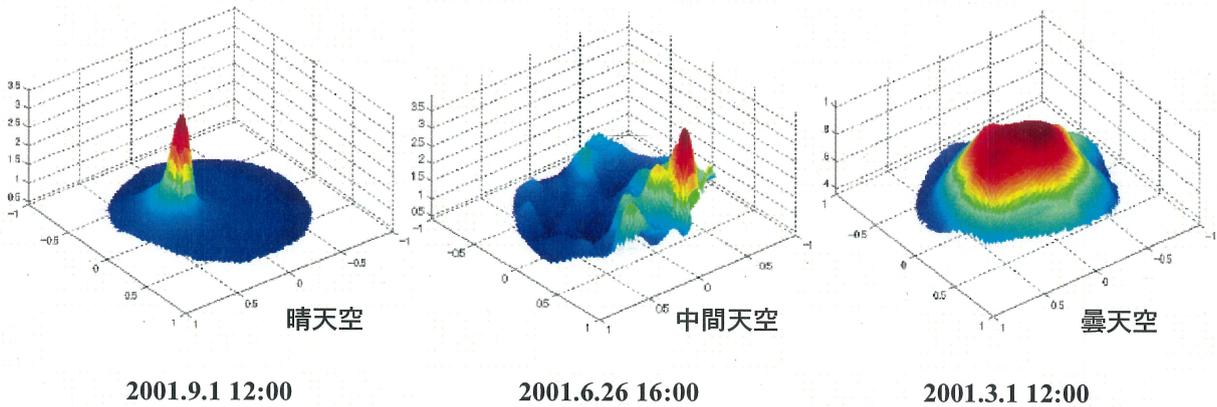


図2.5 スカイスキャナ測定例

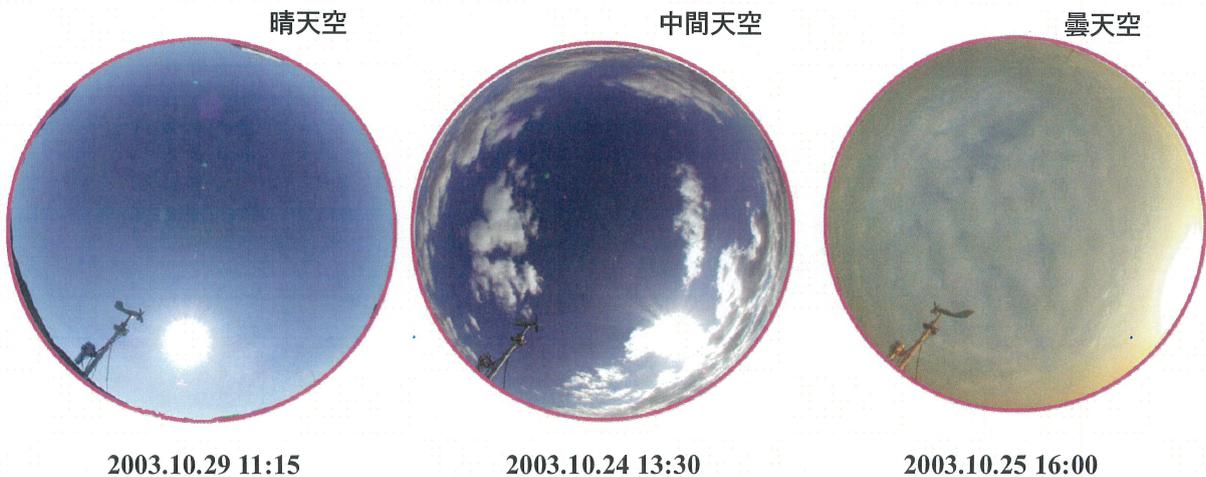


図2.6 魚眼レンズによって撮影した天空状態

放射輝度に分布が生じる。この分布が建築物や都市の熱環境に与える影響を検討することが本研究の目的である。

本研究では、天空放射輝度分布の測定は毎正時を基点として15分サンプルとした。

2) 水平面全天日射量

水平面全天日射量の測定には、EKO製精密全天日射計 MS-801 を用いた。測定は1分サンプルで行っている。図2.7に精密全天日射計 MS-801 の外観、表2.3に機器概要を示す。



図2.7 MS-801

表2.3 MS-801機器概要

測定項目	測定機器/メーカー-型番	測定範囲 精度	備考
水平面全天日射量	精密全天日射計 EKO製 MS-801	精度 ±1.5%以内	

3) 水平面天空日射量

水平面天空日射量の測定には、EKO製精密全天日射計 MS-801 と遮蔽計バンドを用いた。測定



図2.8 MS-801+遮蔽バンド

表2.4 天空要素の高度・方位

測定項目	測定機器/メーカー-型番	測定範囲 精度	備考
水平面拡散日射量	精密全天日射計 EKO製 MS-801	精度 ±1.5%以内	
	直達日射遮蔽バンド EKO製 MB-11	精度 ±1.0%以内	バンド半径 250mm

は正時を基点として1分サンプルで行った。図2.8に精密全天日射計 MS-801 と遮蔽計バンドの外観を、表2.4に測定機器概要を示す。天空日射量をシミュレーションに用いる際には遮蔽バンドの補正²⁻⁴⁾を行う。

4) 法線面直達日射量

法線面直達日射量の測定には、EKO 製直達日射計 MS-52 および EKO 製太陽追尾装置 STR-02A を用いた。測定は全天日射量、天空日射量と同様に、正時を基点として1分サンプルで行った。図2.9にMS-52,STR-02Aの外観を、表2.5に測定機器概要を示す。



図2.9 MS-52・STR-02A

表2.5 MS-52・STR-02A 機器概要

測定項目	測定機器/メーカー-型番	測定範囲 精度	備考
法線面直達日射量	直達日射計 EKO製 MS-52	精度 ±1.5%以内	半開口角 2.5°
	太陽追尾装置 EKO製 STR-02A		

2.3 気象データの整理

前節で示した測定機器を用いて京都大学吉田キャンパスで測定した、天空放射輝度分布・天空輝度分布、水平面直達日射量、水平面天空日射量、法線面直達日射量の測定値、及び5章以降で検討する天空放射輝度分布を考慮した熱負荷計算の際に必要な、気温等の測定値(京都地方気象台で測定された地上観測1分値データを利用する)をシミュレーション(壁面日射量計算、熱負荷計算)に用いるための気象データとして整理する手法を示す。

2.3.1 壁面日射量計算(3,4章)に用いる気象データの整理

3,4章では、京都大学吉田キャンパスにおいて測定した天空輝度・天空放射輝度分布測定値及び、水平面全天日射量、法線面直達日射量、水平面天空日射量を用いる。

天空輝度・天空放射輝度分布測定装置(スカイスキナ, EKO製, MS-30ILR)は、センサーを水平および鉛直面内で回転させて145の天空要素の輝度及び放射輝度を測定する。1回の測定には2分40秒を要する。以下では145個の放射輝度測定値の1組を得るこの一回の測定を1スキャンと呼ぶこととする。

毎日4:00から19:00まで(6月以降は20:00まで)の時間帯において15分間隔で自動測定した天空放射輝度・天空輝度分布測定値、及び各種日射計による1分間隔の24時間自動測定値から天空放射輝度分布測定時刻と同時刻の測定値を抽出した15分間隔の各種日射量測定データに、以下の補正及び品質管理テストを適用した。なお適用に先立ち、太陽高度が5°以下の時刻の測定値は、周辺地物の影響を受けているとして除外した。

3,4章では、直達日射を除く鉛直面日射量によって比較を行うため、鉛直面日射量の算出には、天空放射輝度分布および水平面天空日射量測定値を用いる。水平面全天日射量、法線面直達日射量測定値は、水平面天空日射量にCIEガイドによるデータの品質管理テスト^{2-2), 2-3)}を適用する際に用いる。

- 1) 水平面天空日射量は、遮蔽バンドの補正を1日単位で行う²⁻⁴⁾。
- 2) スカイスキナの測定上限値(放射輝度 $300[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}]$, 輝度 $55,000[\text{cd}/\text{m}^2]$)を超える天空要素の放射輝度測定値は、輝度測定値を用いた補正を行う^{注2-2)}。
- 3) 水平面天空日射量にCIEガイドに基づく自動データ品質管理テストを行う^{注2-3)}。
- 4) スカイスキナ天空要素の第一高度帯(高度角6°, 天空要素No.1 ~ No.30)の測定値は、周辺地物の影響を受けているので、近似タイプの第二高度帯の値を用いた補正を行う^{注2-4)}。

以上の補正、品質管理テストを行った天空放射輝度分布及び、水平面全天日射量、法線面直達日射量、水平面天空日射量を気象データとして用いる。

2.3.2 熱負荷計算(5,6,7章)に用いる気象データの整理

5,6,7章では、2.3.1で整理した天空放射輝度分布及び、水平面全天日射量、法線面直達日射量、水平面天空日射量の気象データに加え、京都地方気象台で測定された地上観測1分値データから気温、絶対湿度、長波放射、風向・風速のシミュレーション用気象データを作成する。

天空放射輝度分布測定値を用いた熱負荷計算には、天空放射輝度分布測定値及び、その他の主要な気象データを入力する必要がある。熱負荷シミュレーションソフトACSES^{注2-5)}の気象入力、気

温，湿度，日射量（法線面直達，水平面天空），長波放射，風向・風速である．これらの気象データのうち，日射量については，2001年に京都大学屋上で測定されたデータ，気温，絶対湿度，長波放射，風向・風速については，同年の京都地方気象台の地上気象観測1分値データ（絶対湿度は時別水蒸気圧，京都気象台の標高から，長波放射は，日照率，露天温度から求める）から，シミュレーション用気象データ（1時間サンプル）を以下の手順で作成する．

- 1) 2001年夏季・冬季に，京都大学屋上で測定した日射量（法線面直達，水平面天空），天空放射輝度分布測定データについて，1日のうち（日射量：1分サンプル，天空放射輝度分布：15分サンプル）に1回も欠測が無い日を取り出す^{注2-6）}．
- 2) 取り出した日のデータについて，日射のCIE品質テスト（10分単位）を行ない，1時間の品質テスト6回のうち，1回もクリアしない時刻のある日のデータは除外する．これと同日の天空放射輝度分布データも除外する．
- 3) 除外されない日の直達・天空日射量データの1時間平均値を求める．このデータと同日同時刻の天空放射輝度分布データ，同日の地上気象観測1分値データから求めた気温，湿度，長波長放射，風向・風速の1時間平均値とを組み合わせ，一日のデータとする．
- 4) 夏季，冬季それぞれ40日分（助走10日）のデータを抽出し，並べる．このデータは日が連続していない場合があるため，日が切り替わる時刻のデータが滑らかになるよう補正し，これを計算用気象データとする^{注2-7）}．

天空放射輝度分布データについては，スカイスキャナ第一高度帯の天空要素，太陽近傍と考えられる天空要素については，15の近似タイプを用いて補正を行なう．

表2.6に，作成した40日分の計算用気象データの日付を示す．

本研究では，一様天空と，天空放射輝度分布を考慮した場合の壁面日射量，熱負荷をそれらの差で比較を行うため，作成した気象データが必ずしも標準的なものである必要はないが，例えば夏季に日射の多い日ばかりを選んだという特殊な気象データを作成していないか確認する必要がある．そこで作成した気象データの概要を示すため，拡張アメダス気象データ1981-2000²⁻⁵⁾添付の年間熱負荷計算用気象データ出力プログラムUf12Hasp/Smashにより，京都標準年データを作成しこれと比較を行った．

表2.7に，作成した気象データと標準年データの平均値，最大値，最小値，標準偏差による比較を示す．図2.10に各気象データの出現頻度の比較を示す．ここで，作成したデータ，標準年データのデータ総数が異なるため，出現頻度をデータ総数で除した相対度数により比較を行う．

作成データの気温は，冬季には低い温度，夏季には高い温度の度数が多くなる傾向が見られる．絶対湿度，風速については良く似た傾向にある．長波放射量は夏季において，標準年データでは 35W/m^2 以下にピークがあり相対度数が大きくなっていたが，作成データでは 35W/m^2 以下の相対度数が小さくなる傾向が見られる．また風向については静穏（0），北北東（1），北東（2）で作成したデータの相対度数が小さくなる違いが見られる．日射量については全天日射量（天空日射量，直達日射量，太陽高度より計算）を見ると，標準年データと比べると，作成データは夏季に大きな日射量の度数がやや多く，小さな日射量の度数が少ない．夏季作成データが標準年データよりも，晴

れた日をやや多く含むことがわかる。このように夏季にやや大きな熱負荷を生ずるデータではあるが、前述したように、本研究では一様天空、天空放射輝度分布を考慮した場合のそれぞれの熱負荷をその差で比較するため、このような特徴は問題にはならないといつてよい。

表2.6 計算用気象データ日付

計算日No.		助走														
冬	年	2001														
	月	12							1							...
	日	25	26	27	28	29	31	1	2	4	6					
夏	月	9														
	日	17	18	19	20	22	23	24	25	29	21					

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
2001															
1							2								...
11	13	14	16	18	19	21	23	24	26	31	3	6	8	9	
7					8					9					
24	25	26	30	31	1	4	5	12	13	14	15	22	24	5	

16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	計算日No.
2001															年
2							3								月
11	12	13	16	17	18	21	24	25	1	2	8	12	29	30	日
9															月
6	7	12	14	15	16	17	18	19	20	22	23	24	25	29	日

表2.7 計算用気象データと標準年データとの比較

		気温[°]		絶対湿度[g/Kg]		長波放射[W/m ²]		直達日射量[W/m ²]		拡散日射量[W/m ²]		風速[m/s]	
		標準年	作成データ	標準年	作成データ	標準年	作成データ	標準年	作成データ	標準年	作成データ	標準年	作成データ
平均値	冬	6.5	5.8	3.9	3.4	62.1	51.7	259.8	203.2	112.9	136.0	1.5	1.7
	夏	25.5	27.2	14.2	13.3	43.2	57.9	183.7	412.7	174.8	148.0	1.6	1.9
最大値	冬	21.8	14.8	9.1	7.0	135.7	110.2	878.1	867.7	382.8	298.1	5.3	4.3
	夏	36.1	37.3	20.1	18.5	114.8	112.5	750.5	937.3	440.8	481.4	5.3	5.5
最小値	冬	-4.2	-1.6	1.6	1.4	12.8	12.8	0.0	0.0	2.3	22.0	0.0	0.4
	夏	12.1	13.7	5.0	4.1	8.1	9.3	0.0	0.0	2.3	24.4	0.0	0.2
標準偏差	冬	4.2	3.2	1.2	1.0	26.7	22.5	291.2	243.2	79.2	65.0	1.0	0.8
	夏	4.3	4.9	3.0	3.3	22.9	24.1	223.1	273.3	117.1	90.3	1.0	0.9

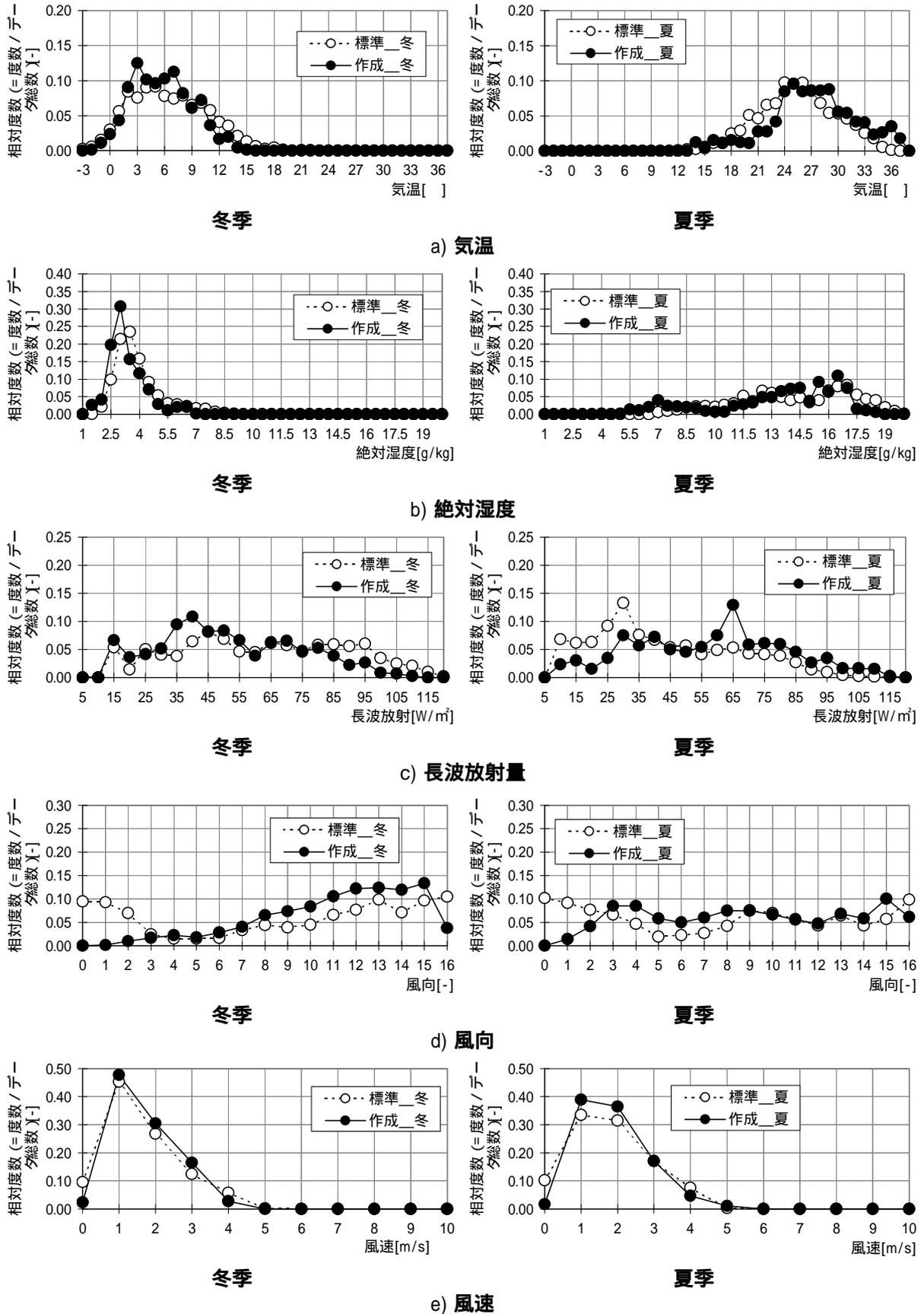


図2.10a) ~ e) 作成気象データと標準年データの比較

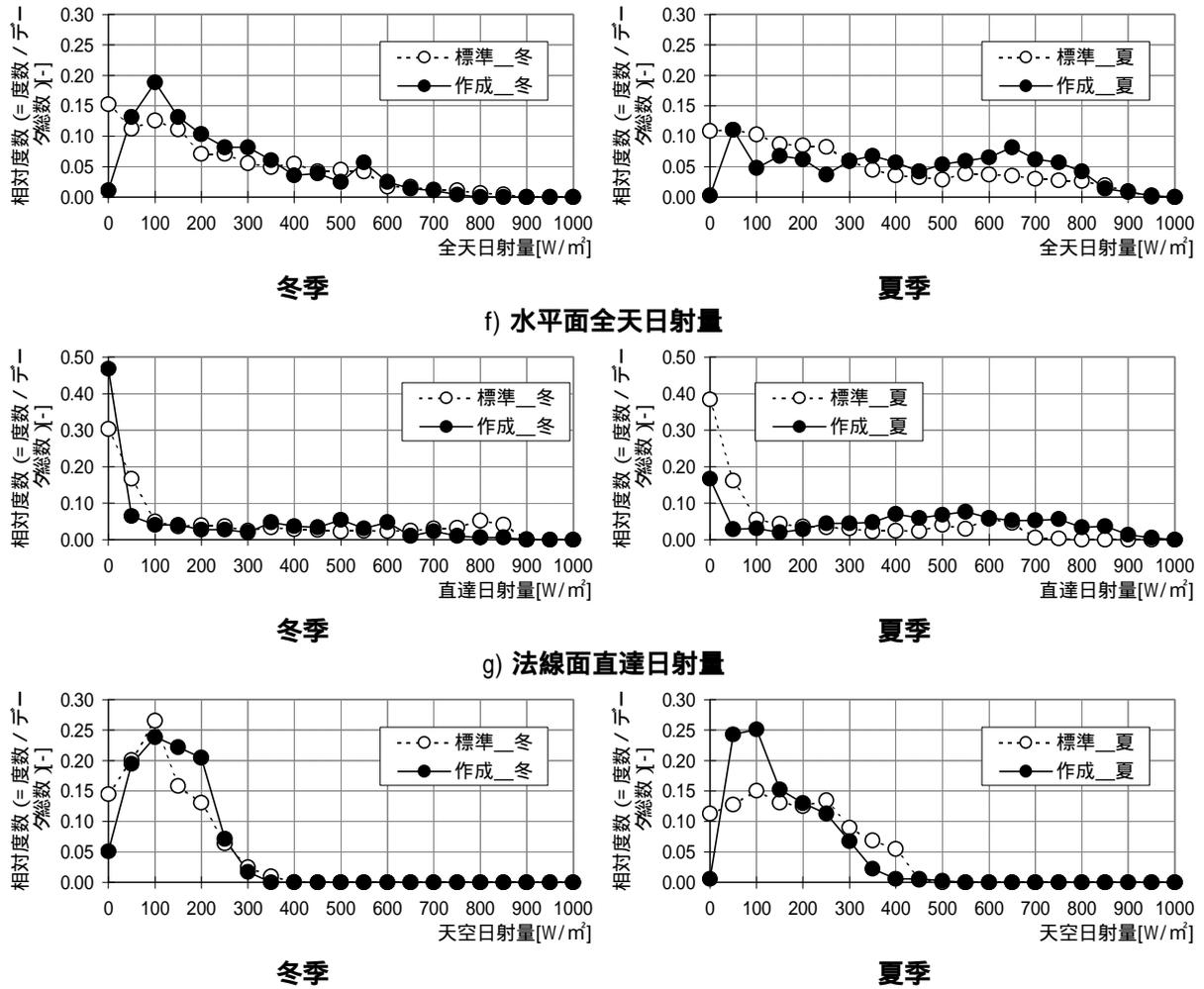


図2.10f) ~ h) 作成気象データと標準年データの比較

2.4 天空放射輝度分布・輝度分布モデル

2.4.1 壁面日射量の計算

熱負荷計算等の建築物の熱環境を予測・解析するためには、任意の方位と傾きを持つ建物の壁面に入射する日射量を求める必要がある。通常、気象台などの気象官署では、日射に関しては水平面全天日射量のみが測定されている。従って任意壁面の日射受熱量を求めるためには、水平面全天日射量を法線面直達日射量、水平面天空日射量に分離し、建物の壁面それぞれの方位角と傾斜角に対する直達日射量、天空日射量を求め、建物の各方位の壁や窓に入射する全日射量を求める必要がある。

年間熱負荷計算を行う際に広く使用されているHASP/ACLDなどの熱負荷計算プログラムにおいては、水平面天空日射量および法線面直達日射量が気象データとして用いられ、窓の透過日射負荷を求める際に直達日射の入射角補正を行い、外表面にできる影から、日照面積率を求めることが可能となり、これより各方位の壁面日射受熱量を求めることができる。

水平面全天日射量 E_{eg} 、水平面天空日射量 E_{ed} および法線面直達日射量 E_{es} には、以下の関係があり、 E_{eg} が既知のとき、 E_{ed} あるいは E_{es} の推定値があれば、もう一方の日射量 (E_{ed} あるいは E_{es}) を求めることができる。

$$E_{eg} = E_{es} \sin h + E_{ed} \quad (2-1)$$

E_{ed} および E_{es} より斜面日射量 I_{sg} を求めるには、以下に示すように斜面に対する、直達日射成分 I_{ss} 、天空日射成分 I_{sd} 、地表面反射日射成分 I_{sr} を求め、合成すればよい。

$$I_{sg} = I_{ss} + I_{sd} + I_{sr} \quad (2-2)$$

$$I_{ss} = E_{es} \cdot \cos i \quad (2-3)$$

$$I_{sd} = E_{ed} \cdot F \quad (2-4)$$

ここで、 F は斜面日射天空日射が水平面天空日射に占める比率

$$I_{sr} = E_{eg} \cdot r \left(\frac{1 - \cos b}{2} \right) \quad (2-5)$$

熱負荷計算等の建築物の熱環境予測・解析には、この関係より、測定された水平面全天日射量に直散分離法^{注2-8)}を適用して、天空日射量と直達日射量に分離し、外壁面の傾斜角と方位角から、その壁面に入射する天空日射量、直達日射量を求めている。

2.4.2 斜面日射モデルと天空放射輝度モデル

壁面日射量を求める際、天空日射量については、天空で一様と仮定するのが一般的であるが、より精度の高い入射日射量を求めるためには、天空の放射輝度分布を考慮する必要がある。しかし天空放射輝度分布の測定が行われていることは稀であり、現在一般的に熱負荷計算では、この分布は考慮されていない。しかし近年、この天空放射輝度分布を考慮するために、以下のような手法の開発が行われている。

a) 斜面日射モデル^{注2-9)}

斜面日射モデルは、天空放射輝度分布を考慮し、任意の方位と傾斜角を持つ斜面に入射する天空

日射量の総量を求めるモデルである。代表的なモデルとして、Hay のモデル²⁻⁶⁾、Reindle のモデル²⁻⁷⁾、Perez のモデル²⁻⁸⁾、赤坂のモデル²⁻⁹⁾、Skartveit のモデル²⁻¹⁰⁾ が挙げられる。これらのモデルは分布をモデル化したものではなく、天空を太陽近傍、地平線近傍、一様な天空などの部分に分け、それぞれの割合を決定し、任意方位の壁面に入射する日射量の総量を予測している。天球上の任意の点の放射輝度をモデル化していないので、周辺建物等の遮蔽物を考慮する場合など、誤差が大きくなることが考えられる。

b) 天空放射輝度分布モデル^{注 2-10)}

天空放射輝度分布モデルは、斜面日射モデルのように、特徴的な放射輝度となる太陽近傍、地平線近傍といった部分の放射輝度のみをモデル化したものではなく、天球上任意点の放射輝度を、天空放射輝度が滑らかに変化する連続な関数でモデル化している。このような分布のモデルの開発は、天空輝度分布モデルとして昼光照明分野で古くから行われているが、天空放射輝度分布に関するモデル化は、Brunger のモデル²⁻¹¹⁾ や、昼光の輝度分布と同様な式で表すモデルとして開発された井川らの All sky model-R²⁻¹²⁾ がある程度であり数少ない。加えてこのような天空放射輝度分布モデルを用いて、熱負荷計算等の建築物の熱環境予測・解析を行い、天空放射輝度分布の影響を明らかにした例はない。これは熱負荷計算等の建築物の熱環境予測・解析では、壁面の中心を考え、ここに入射する日射量の総量が必要となるため、分布そのものをモデル化し、天空の分布を詳細に把握するのではなく、上記の斜面日射モデルのように、太陽近傍、地平線近傍といった、一様とすることで現実の放射輝度との相違が大きくなるような部分の放射輝度のみを考慮して、壁面中心に入射する日射の総量を予測するモデルの開発が行われてきたためである。しかし、任意の位置にある天空要素の放射輝度を予測する天空放射輝度分布モデルであれば、例えば庇やブラインドのあるような建物の窓周りのより精密な熱取得、ガラスの入射角特性の違いによる影響、あるいは周辺建物等の遮蔽物を考慮するなどの、より詳細、精密な検討を行なうことができる。

図 2.11 に、斜面日射モデル、天空放射輝度分布モデルを用いて斜面日射量を推定する流れを示す。天空放射輝度分布を考慮した斜面天空日射量を求めるには、図 2.12 に示すように、任意壁面から見える天空の放射輝度を積分する。この積分には例えば井川らは数値積分を用いているが、斜面日射モデルと比べ計算時間を要する。このため井川らは、毎時の放射輝度絶対値を求める際に、計算の必要な天頂輝度の L_z について、その積分部分 (L_z の分母 式 a-102) を求めるのに計算時間がかかることから、これを回帰分析によって太陽高度、晴天指標、清澄指標の関数 $L_z Ed$ (式 a-103) としてモデル化している。

これまで熱負荷計算等の建築物の熱環境予測・解析に天空放射輝度分布モデルを用い、天空放射輝度分布の影響を明らかにした例がないことから、本研究では、天空放射輝度分布モデルを用いて、天空放射輝度分布を考慮した、より精度の高い熱負荷計算を可能する手法を示し、その影響を把握することを目的のひとつとする。そこで、天空放射輝度分布、天空輝度分布モデルの各モデルを検討した結果、2003 年に国際照明委員会 (Commission Internationale De L'eclairage(CIE)) に標準モデルとして採用された天空輝度分布のモデルである CIE 標準一般天空を、可視域とは波長域の異なる熱 (放射輝度) に流用することの可能性を検討し、天空放射輝度分布の熱負荷、壁面日射量へのインパクトについて検討を行う。

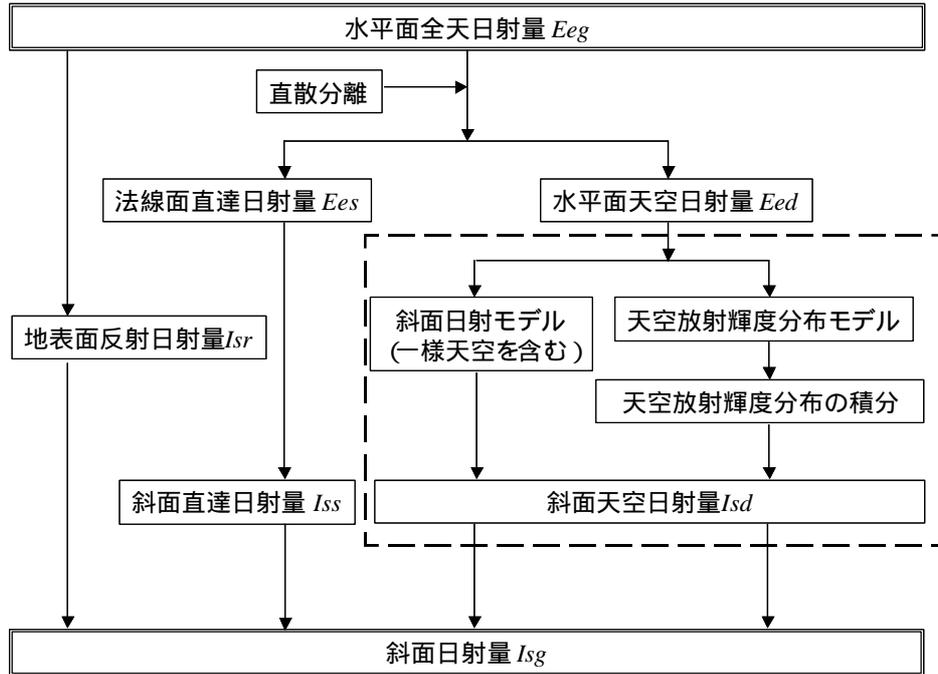


図2.11 斜面日射量計算フロー

2.4.3 CIE 標準一般天空

天空輝度分布のモデルは，1955年に Moon, P, Spencer, D.E の提案による曇天空のモデル²⁻¹³⁾，1973年の Kittler, R. の提案による晴天空モデル²⁻¹⁴⁾が，CIEによりCIE標準曇天空，CIE標準晴天空としてそれぞれ推奨された．以後，晴天空と曇天空の間の輝度分布の標準を規定すべく，各種モデルが提案された^{注2-10)}，このうち Kittler, R., Perez, R. は，輝度階調関数と散乱関数という二つの関数で，天頂輝度に対する任意の天空要素の相対天空輝度分布をモデル化し²⁻¹⁵⁾，これらの関数のパラメータの組合せにより，晴天空から曇天空までの15の天空タイプを規定した．この天空タイプを規定するパラメータの値は，天空輝度の実測データを輝度階調，散乱の各関数についてそれぞれ6つに分類，回帰して決定している．このモデルが2003年CIE標準一般天空²⁻¹⁶⁾として推奨されることとなった．以下にCIE標準一般天空を示す

$$\frac{L_a}{L_z} = \frac{f(c)j(Z)}{f(Z_s)j(0)} \quad (2-6)$$

ここで

$$j(Z) = 1 + a \cdot \exp\left(\frac{b}{\cos Z}\right) \quad (0 \leq Z < \frac{P}{2}) \quad (2-7)$$

$$j\left(\frac{P}{2}\right) = 1 \quad (Z = \frac{P}{2}) \quad (2-8)$$

$$f(c) = 1 + c \cdot \left[\exp(dc) - \exp\left(d\frac{P}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2 c \quad (2-9)$$

$$f(Z_s) = 1 + c \cdot \left[\exp(dZ_s) - \exp\left(d\frac{P}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2 Z_s \quad (2-10)$$

$$\text{ここで } c = \arccos(\cos Z_s \cdot \cos Z + \sin Z_s \cdot \sin Z \cdot \cos |a - a_s|) \quad (2-11)$$

2-6 式を構成する 2-7, 2-8 式を輝度階調関数(Luminance gradation function), 2-9, 2-10 式を散乱関数(Scattering indicatrix function)と呼ぶ。輝度階調関数には a, b , 散乱関数には c, d, e のパラメータ値の組がそれぞれ 6 組決められている。この輝度階調関数, 散乱関数それぞれのパラメータ値の組を, 組み合わせたうちの 15 の組み合わせが CIE 標準一般天空として選択されている。図 2.12 に任意の天空要素の概念図を示す。パラメータ a, b, c, d, e を表 2.8 に示す。図 2.13 に輝度階調関数各グループの *Relative gradation* $j(Z)/j(0)$ を, 図 2.14 に散乱関数各グループの *Relative scattering indicatrix* $f(c)$ を示す。

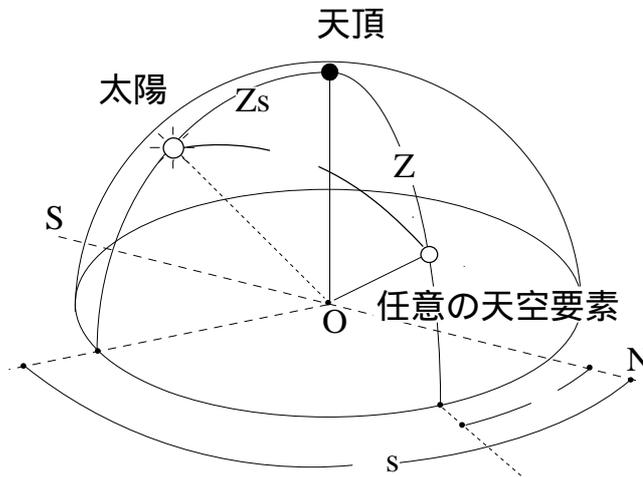
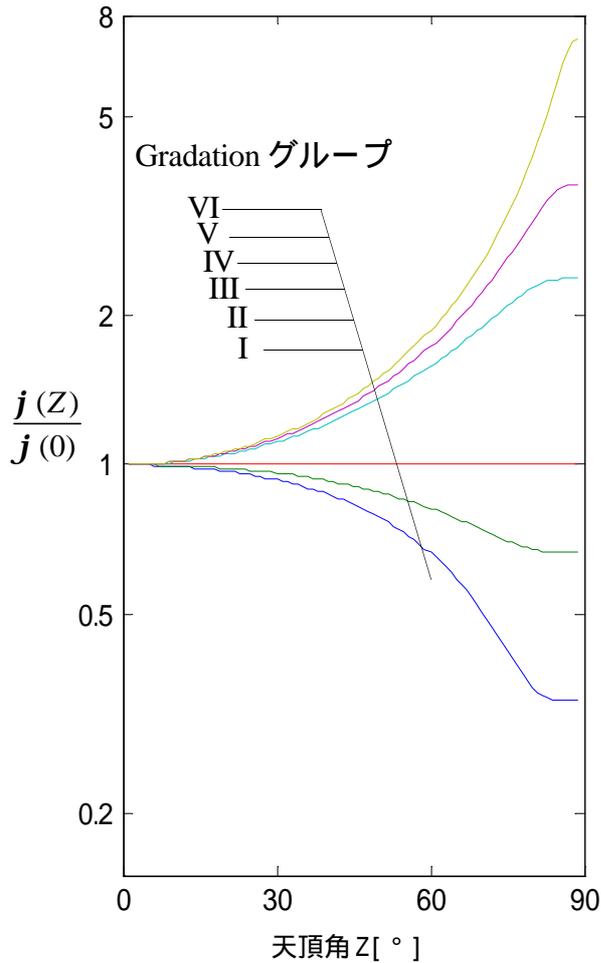
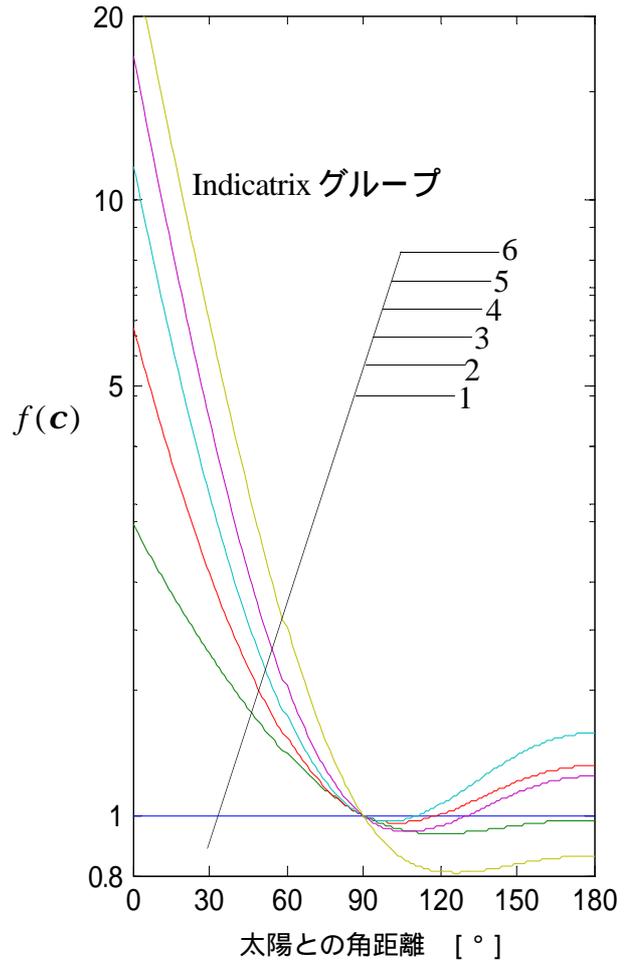


図2.12 太陽と任意の天空要素の概念図

表2.8 CIE標準一般天空のパラメータ

天空タイプ	輝度階調関数	散乱関数	輝度階調関数パラメータ		散乱関数パラメータ			Description of luminance distribution
			a	b	c	d	e	
1		1	4.0	-0.7	0	-1.0	0	CIE standard overcast sky, Steep luminance gradation towards zenith, azimuthal
2		2	4.0	-0.7	2	-1.5	0.15	Overcast, with steep luminance gradation and slight brightening towards the sun
3		1	1.1	-0.8	0	-1.0	0	Overcast, with moderately graded with azimuthal uniformity
4		2	1.1	-0.8	2	-1.5	0.15	Overcast, with moderately graded and slight brightening towards the sun
5		1	0	-1.0	0	-1.0	0	Sky of uniform luminance
6		2	0	-1.0	2	-1.5	0.15	Partly cloudy sky, no gradation towards zenith, slight brightening towards the sun
7		3	0	-1.0	5	-2.5	0.30	Partly cloudy sky, no gradation towards zenith, brighter circumsolar region
8		4	0	-1.0	10	-3.0	0.45	Partly cloudy sky, no gradation towards zenith, distinct solar corona
9		2	-1.0	-0.55	2	-1.5	0.15	Partly cloudy sky, with the obscured sun
10		3	-1.0	-0.55	5	-2.5	0.30	Partly cloudy sky, with brighter circumsolar region
11		4	-1.0	-0.55	10	-3.0	0.45	White-blue sky with distinct solar corona
12		4	-1.0	-0.32	10	-3.0	0.45	CIE standard clear sky, low luminance turbidity
13		5	-1.0	-0.32	16	-3.0	0.30	CIE standard clear sky, polluted atmosphere
14		5	-1.0	-0.15	16	-3.0	0.30	Cloudless turbid sky with broad solar corona
15		6	-1.0	-0.15	24	-2.8	0.15	White-blue turbid sky with broad solar corona

図 2.13 Relative gradation $j(Z)/j(0)$ 図 2.14 Relative scattering indicatrix $f(c)$

2.5 まとめ

熱負荷計算等の建築物の熱環境を予測・解析するためには、建物の壁面に入射する日射量を求める必要がある。壁面日射量を求める際、より精度の高い入射日射量を求めるためには、天空の放射輝度分布を考慮する必要がある。本研究はこの天空放射輝度分布を考慮した熱環境の予測を可能とする手法の開発を目的としている。本章では、この手法の開発に先立ち、研究の前提となる、以下について整理して示した。

1) 各種気象要素の測定概要

本研究で用いる、天空放射輝度分布、水平面全天日射量、水平面天空日射量、法線面直達日射量について、測定地点を示し、各測定に用いる機器を示した。

2) 測定気象要素をシミュレーションに用いるための気象データとして整理する方法について

- i) 測定した気象観測値を、シミュレーションに用いるためのデータとするために行った品質テスト、各種補正を示した。
- ii) 京都大学で測定した気象観測値（天空放射輝度分布、水平面全天日射量、水平面天空日射量、

法線面直達日射量)と、京都地方気象台で測定された地上観測1分値データから、シミュレーションのための気象データを作成する方法を示した。さらに作成した気象データの概要を示し、これが特殊な気象データとなっていないか確認するために、拡張アメダス気象データ1981-2000添付の年間熱負荷計算用気象データ出力プログラムUf12Hasp/Smashにより、京都標準年データを作成しこれと比較を行った。この結果、夏季にやや大きな熱負荷を計算するデータを作成していることがわかった。しかし本研究では一様天空、天空放射輝度分布を考慮した場合のそれぞれの熱負荷を、その差で比較するため問題にはならないと考えた。

3) 天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量の計算フロー

斜面日射モデル、天空放射輝度分布モデルを用いて、壁面日射量を計算する流れを示した。

4) CIE 標準一般天空の概要

これまで熱負荷計算等の建築物の熱環境予測・解析に天空放射輝度分布モデルを用い、天空放射輝度分布の影響を明らかにした例がないことから、本研究では、天空放射輝度分布モデルを用いて、天空放射輝度分布を考慮した、より精度の高い熱負荷計算を可能とする手法を示し、その影響を把握することを目的とする。本研究において、天空放射輝度分布のモデルとして用いることとしたCIE 標準一般天空について概説した。

注記

注 2-1) Ineichen らは、EKO 製スカイキャナ (MS300-LR) の輝度計の入射角度別感度は、その最大値を 100% とした時、半開口角 5.5° においても 50% の感度があり、感度が 0% となるのは半開口角が約 9° であると報告している²⁻¹⁾。

注 2-2) スカイキャナはセンサ保護の為、放射輝度 $300[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}]$ 、輝度 $55,000[\text{cd}/\text{m}^2]$ を測定上限とし、それを超える場合には内部シャッターを閉じて測定を行わない。このため、センサの測定上限値を超えていると考えられる天空要素の放射輝度測定値 $r_{m,i}$ は輝度測定値 $l_{m,i}$ を用いた補正を行う。補正は、1 日単位で行う。最小二乗法を用いて $r_{m,i}$ 、 $l_{m,i}$ から回帰直線を求め、回帰直線から求めた放射輝度計算値を測定上限値を超える天空要素の放射輝度として与える。

注 2-3) CIE のデータ品質自動管理手順に基づき²⁻²⁾、以下のテストを行い、合格した水平面拡散日射量測定値を検討に用いる。

$$0 < E_{eg} < 1.2E_o, \quad 0 < E_{ed} < 0.8E_o, \quad 0 < E_{es} < E_o \quad (2-12)$$

$$E_{eg} = (E_{es} \cos Z_s + E_{ed}) \pm 15\% \quad (2-13)$$

注 2-4) スカイキャナ天空要素の第一高度帯測定値は、周辺地物の影響を受けているため、近似タイプの第一高度帯天空要素の放射輝度と第二高度帯天空要素の放射輝度との比を算出し、同一方位の第二高度帯測定値にこの比を掛けた値を、第一高度帯放射輝度として鉛直面日射量の算出の際に用いる。測定値から鉛直面日射量を算出する際の各天空要素の放射輝度 $r_{m,i}$ は以下のようなになる。

$$r_{m,i} = \begin{cases} r_{m,60-(i-1)} \frac{r_{c,i}}{r_{c,60-(i-1)}} & (1 \leq i \leq 30) \\ r_{m,i} & (31 \leq i \leq 145) \end{cases} \quad (2-14)$$

注 2-5) 京都大学吉田研究室で開発した熱負荷計算プログラム

注 2-6) スカイキャナ第一高度帯の天空要素、太陽近傍と考えられる天空要素については、オーバーフローや、周辺地物の影響で正確な天空放射輝度分布の測定が行えない。そこで、壁面日射量計算、熱負荷計算に先立つデータ整理の段階で、天頂放射輝度測定値(天空要素 No.145 の放射輝度測定値)に対する各天空要素の放射輝度測定値の比と、同時刻の CIE 標準一般天空の 15 の天空タイプの各放射輝度比を求め、測定値の放射輝度比に対する各天空タイプの放射輝度比の RMSE を算出し、RMSE が最小となる天空タイプを近似タイプとする。スカイキャナ第一高度帯の天空要素、太陽近傍と考えられる天空要素、オーバーフローしている天空要素については、この近似タイプの放射輝度比と同等として補正を行った。

注 2-7) 計算用気象データは、現実の日が連続していない場合があるため、気温、湿度、長波長放射、風向・風速それぞれについて、各時刻の前後 1 時間の変化量を求め、この変化量の頻度分布の両周辺部 5% の境界値を補間境界値として決め、それぞれの気象データの各日 24:00 ~ 1:00 間の変化量が補間境界値を超える場合は、22:00 ~ 3:00 のデータが欠測値であるとみなし、これを補正した。

注 2-8) 各種直散分離モデルについては Appendix.7 を参照。

注 2-9) 各種斜面日射モデルについては Appendix.7 を参照 .

注 2-10) 各種天空輝度・放射輝度分布モデルについては Appendix.7 を参照 .

謝辞

本研究で用いた天空放射輝度分布，天空輝度分布，及び各種日射量は，大阪市立大学 梅宮典子助教授(当時 京都大学工学研究科 助手)，安藤 仁氏(当時修士課程学生)により，2001年1月1日から12月31日まで測定されたデータである．ここに謝意を表します．

記号表

I_{sg}	: 斜面全天日射量 [W/m ²]
I_{ss}	: 斜面直達日射量 [W/m ²]
I_{sd}	: 斜面天空日射量 [W/m ²]
I_{sr}	: 斜面に入射する地表面反射日射 [W/m ²]
c	: 太陽と天球上任意点の角距離 [rad]
Z	: 天球上任意点の天頂角 [rad]
Z_s	: 天頂からの太陽高度 [rad]
a, b	: 輝度階調関数のパラメータ [-]
c, d, e	: 散乱関数のパラメータ [-]
a	: 天球上任意点の方位角 (北が基準) [rad]
a_s	: 太陽方位角 (北が基準) [rad]
h	: 太陽高度 [°]
$a_{g,1}, a_{g,2}, a_{g,3}, b_g$: Gradation 境界曲線の係数 [-]
$a_{i,1}, a_{i,2}, a_{i,3}, b_i$: Indicatrix 境界曲線の係数 [-]
E_{eg}	: 水平面全天日射量測定値 [W/m ²]
E_{es}	: 法線面直達日射量測定値 [W/m ²]
E_{ed}	: 水平面天空日射量測定値 [W/m ²]
L_a	: 天球上任意点の輝度 [cd/m ²]
L_z	: 天頂輝度 [cd/m ²]

参考文献

- 2-1) Ineichen, P. and Molineaux, B.: Characterisation and comparison of two Sky Scanners: PRC Krocchmann & EKO Instruments, First draft, IEA Task XVII expert meeting, 1993.
- 2-2) CIE TC 3-07: Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement, CIE, Technical Report 108-1994
- 2-3) 柴田要, 中村洋, 大鶴徹, 古賀靖子, 田中信之: CIEの昼光測定のガイドによる昼光測定データの品質管理の試み, 日本建築学会九州支部研究報告, 第32号, pp.37-40, 1991.3
- 2-4) 日本建築学会: 建築環境工学実験用教材 I, 環境測定演習編, 1982
- 2-5) 赤坂裕, 他, 拡張アメダス気象データ 1981-2000, 日本建築学会, 2005

-
- 2-6) Hay,J.E.: Study of Short-Wave Radiation on Nonhorizontal Surfaces, Canadian Climatic Center Report, No.79-12 Atmospheric Environment Service,Tronto Canada, 1979
- 2-7) Reindl,D.T., Beckman,W.A.,Duffie,J.A.:Evaluation of Hourly Tiled Surface Radiation Models , Solar Energy, 45(1), pp.9-17, 1990
- 2-8) Perez, R.,Ineichen, P.,Seals,R.,Michalsky,j.,and Stewart, R.: Modeling Day Light Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance, Solar Energy,44(5),pp.271-289, 1990
- 2-9) 赤坂裕,黒木荘一郎,稲村悌成,二宮秀與:準直達日射・天空日射量の測定とその推定式の作成,日本建築学会論文報告集, No.405, pp19-28,1989
- 2-10) Skartveit, A.and Olseth,J.A. : Modeling Slope Irradiance at High Latitudes, Solar Energy,36(4),pp.333-344, 1986
- 2-11) Brunger,A.P., Hooper,F.C.A.: Anisotropic sky Radiance Model Based on Narrow Field of View Measurements of Shortwave Radiance, Solar Energy,51(1), pp.53-64, 1993
- 2-12) Igawa,N., Koga,Y., Matsuzawa,T. and Nakamura, H. :Model of Sky Radiance Distribution and Sky Luminance Distribution ,Solar Energy,77,pp.137-157,2004
- 2-13) Moon, P.,Spencer, D.E.: Illumination from a non-uniform sky , Illum. Energy,37, pp.707-726, 1942
- 2-14) Kittler, R.: Standardization of outdoor conditions for the calculation of daylight factor with clear skies,Proc. the CIE International Conference on Sunlight in Buildings, Bouwcentrum Internationl, Rotterdam,pp.273-285, 1967
- 2-15) Kittler, R.,Perez, R. and Darula, S.: A Set of Standard Skies Characterising Daylight Conditions for Computer and Energy Conscious Design, Final Report of U.S.-Slovak Grant Project US-SK 92 052, 1998
- 2-16) CIE Standard: Spatial Distribution of Daylight-CIE Standard General Sky,CIE S 011.1/E, 2003.

3章

天空放射輝度分布への CIE標準一般天空の流用と天空タイプの集約

第3章

天空放射輝度分布への CIE標準一般天空の流用と 天空タイプの集約

3.1 はじめに

熱負荷計算等の建築物の熱環境予測・解析に天空放射輝度分布モデルを用い、天空放射輝度分布の影響を明らかにした例がないことから、本研究では、天空放射輝度分布モデルを用いて、天空放射輝度分布を考慮した、より精度の高い熱負荷計算を可能する手法を示し、その影響を明らかにする。このためにCIE標準一般天空を天空放射輝度分布のモデルとして用いることとした。

CIE標準一般天空は、Perezらの、太陽の天頂角、*Sky clearness*、*Sky brightness*から求める5つのパラメータを用いて、任意の天空要素の相対輝度を導く天空輝度分布モデルであるAll-weather model^{3-1), 3-2)}を元に、Kittler, Perez³⁻³⁾らが開発した、輝度階調関数と散乱関数という二つの関数による、天頂輝度に対する相対天空輝度の分布モデルである。これらの関数のパラメータの組合せにより、晴天から曇天空までの15の天空タイプを規定しており、この天空タイプを規定するパラメータの値は、天空輝度の実測データを輝度階調、散乱の各関数についてそれぞれ6つに分類、回帰して決定している。このKittlerらのモデルは国際照明委員会(Commission Internationale De L'eclairage(CIE))にCIE標準一般天空³⁻⁴⁾として採用された。

このCIE標準一般天空を用いた研究としては、現在までに、Tregenzaらの沿岸の都市(シンガポール、福岡、ガーストン(英国)、シェフィールド(英国))における天空輝度分布測定値のCIE標準一般天空による分類の検証と、CIE標準一般天空15タイプのうちの最も適合する4タイプに分類する試み、室内照度計算による検証³⁻⁵⁾、シドニーにおけるRoyらのデジタルカメラを用いた天空輝度分布測定値とCIE標準一般天空モデルの比較³⁻⁶⁾、そして、梅宮による曇天空を対象とした、散乱関数を用いたCIE標準一般天空に大気の状態の不均一性を組み込む試み³⁻⁷⁾などが行われている^{注3-1)}。

また、Kittler, Perezらの天空輝度分布モデルとは別に、井川らはグローバル照度を基にした正規化グローバル照度を指標として天空輝度分布のモデルであるAll sky modelを提案した。また天空放射輝度分布のモデルとして全天日射量を基にした晴天指標、クラウドレイショを基にした澄清指数により天空状態を分類し数式化したAll sky model-Rを提案している。さらにこれと同様な手法によりAll sky model-Lとして天空輝度分布のモデルを改めて提案している^{3-8), 3-9), 3-10)}。

以上のように、照明・昼光環境分野では天空輝度分布として分布のモデル化が行われてきたが、熱環境分野では、All sky model-Rのような例もあるが、天空放射輝度分布そのもののモデル化は数少ない。さらに、熱負荷計算などの熱環境シミュレーションに天空放射輝度分布を考慮した例は少なく、天空放射輝度分布そのもののモデルを用いた例はない。しかし天空放射輝度分布そのもの

やそのモデルを利用することで、より精密な熱環境シミュレーションが可能となると考える。そこで本研究では天空放射輝度分布そのもののモデルを熱負荷計算に利用する手法を提案し、天空放射輝度分布の熱負荷に与える影響を明らかにすることを目的とする。

3章では、熱負荷計算等のシミュレーションにおいて天空で一様と仮定される放射輝度に分布を考慮し、より精度の高い鉛直面日射量を求めるために、放射輝度と波長域の異なる天空輝度の分布のモデルである CIE 標準一般天空を天空放射輝度分布に流用することが可能かどうかを検証すること、さらに、流用が可能であるならば、精度を大きく損うことなく鉛直面日射量を求めるために最低限必要な CIE 標準一般天空の天空タイプの数を決めることを目的として、以下の 1)、2) の検討を行う。

- 1) ある天空状態に対して、天空放射輝度分布測定値に対する CIE 標準一般天空の各天空タイプの RMSE (Root Mean Square Error)^{注3-2)} を算出し、RMSE が最小となる天空タイプを選ぶ。これを「その天空タイプで近似する」と表現し、この天空タイプを「近似タイプ」と呼ぶことにする。この近似タイプの出現頻度を把握するとともに、近似タイプの天空放射輝度分布、天空放射輝度分布測定値および一様放射輝度天空を用いて、それぞれの鉛直面日射量を算出し、比較を行い、CIE標準一般天空を天空放射輝度分布に流用し鉛直面日射量を求めることの妥当性を明らかにする。
- 2) 近似タイプの出現頻度の順に、近似する天空タイプの手数を 15 から減らしてゆき、その時の近似タイプの天空放射輝度分布から求めた鉛直面日射量の、天空放射輝度分布測定値から求めた鉛直面日射量に対する RMSE の変化に基づき、精度を大きく損うことなく鉛直面日射量を求めるために最低限必要な天空タイプの手数を決定する。

3.2 気象データ

本章では一様天空、測定した天空放射輝度分布、天空放射輝度分布モデルそれぞれの壁面日射量の比較検討を行う。2章で示したように、測定した天空放射輝度分布、水平面全天日射量、法線面直達日射量測定値、水平面拡散日射量に、以下の補正、CIE ガイドに基づく自動データ品質管理テスト^{3-11), 3-12)} を行い、壁面日射量の計算に用いる気象データとする。

- 1) 水平面拡散日射量は、遮蔽バンドの補正を 1 日単位で行う³⁻¹³⁾。
- 2) スカイスキャナの測定上限値(放射輝度 $300[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}]$ 、輝度 $55,000[\text{cd}/\text{m}^2]$) を超える天空要素の放射輝度測定値は、輝度測定値を用いた補正を行う^{注3-3)}。
- 3) 水平面拡散日射量に CIE ガイドに基づく自動データ品質管理テストを行う^{注3-4)}。
- 4) スカイスキャナ天空要素の第一高度帯(高度角 6° 、天空要素 No.1 ~ No.30)の測定値は、周辺地物の影響を受けているので、近似タイプの第二高度帯の値を用いた補正を行う^{注3-5)}。

3.3 CIE 標準一般天空近似タイプ

3.3.1 輝度、放射輝度の比較

Kittler らは測定した輝度分布より $j(z)/j(0)$ 、 $f(c)$ の回帰曲線を求め、輝度階調関数、散乱関数の

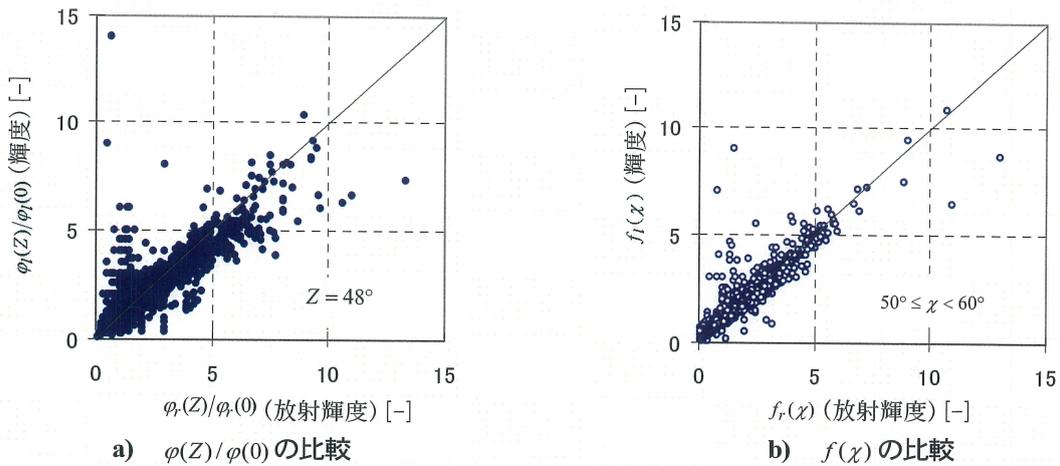


図3.1 輝度・放射輝度の比較

表3.1 $\varphi(Z)/\varphi(0)$ のRMSE (年平均) [-]

Z [°]	72	60	48	36	24	12	0
RMSE	0.40	0.34	0.26	0.22	0.22	0.15	0.00

表3.2 $f(\chi)$ のRMSE (年平均) [-]

χ [°]	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90
RMSE	0.38	0.28	0.15	0.12	0.12	0.11	0.11
	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-150	150-160
	0.11	0.11	0.13	0.13	0.15	0.20	0.34

表3.3 $\varphi(Z)/\varphi(0)$ の近似線の傾き

Z [°]	72	60	48	36	24	12	0
傾き	0.90	0.97	0.97	0.98	0.98	1.00	1.00

表3.4 $f(\chi)$ の近似線の傾き

χ [°]	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90
傾き	0.97	0.98	0.98	0.97	0.96	0.97	0.97
	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-150	150-160
	0.97	0.96	0.97	0.95	0.96	0.98	1.02

パラメータを決定している。そこで、天空放射輝度分布にCIE標準一般天空を流用するのに先立ち、天頂からの角距離 Z における輝度階調関数の天頂における輝度階調関数に対する比 $\varphi(Z)/\varphi(0)$ 、散乱関数 $f(\chi)$ (注3-6, 3-14, 3-15)を、京都大学における放射輝度・輝度分布測定値より輝度、放射輝度それぞれについて求め、比較を行うことで、CIE標準一般天空の天空タイプ、パラメータ値を天空放射輝度分布に流用可能か検証する。図3.1(a)に $\varphi_l(Z)/\varphi_l(0)$ と $\varphi_r(Z)/\varphi_r(0)$ 、図3.1(b)に $f_l(\chi)$ と $f_r(\chi)$ の比較を、表3.1に $\varphi_l(Z)/\varphi_l(0)$ と $\varphi_r(Z)/\varphi_r(0)$ とのRMSEの年平均を天頂角毎に、表3.2に $f_l(\chi)$ と $f_r(\chi)$ とのRMSEの年平均を太陽からの角距離 10° 毎に示す。

表3.1, 3.2に示すように、RMSEの年平均は、 $\varphi(Z)/\varphi(0)$ では天頂角 60° 以下の天空要素、 $f(\chi)$ では太陽からの角距離が $20-30^\circ$ と太陽に近い天空要素と、太陽からの角距離が $150-160^\circ$ の太陽から遠い天空要素においては0.3以上と他の角度帯に比べやや大きな値を示すが、他の角度帯の天空要素ではあまり大きくない。

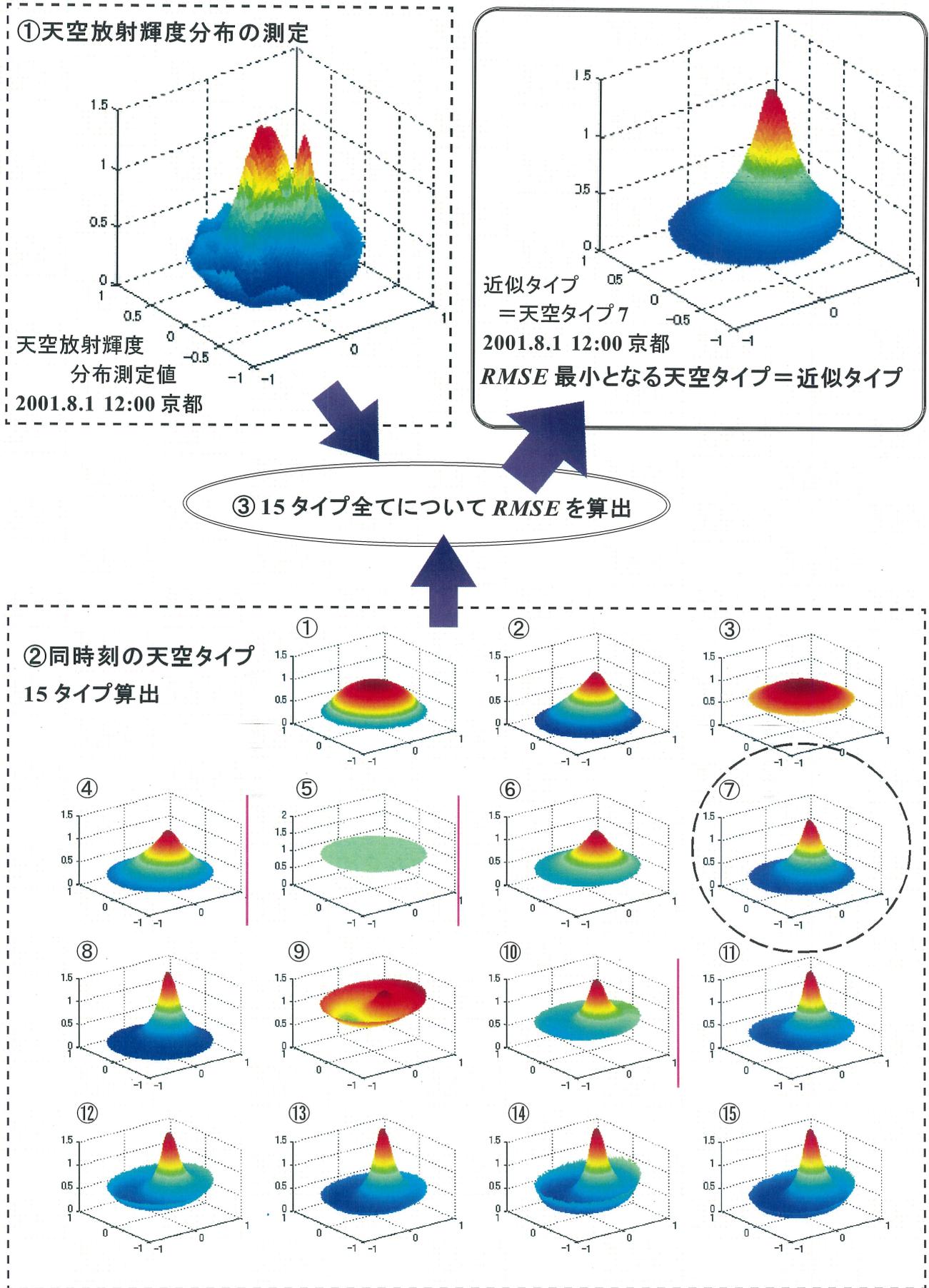


図3.2 近似タイプ決定フロー

また，表3.3に $j_l(Z)/j_l(0)$ と $j_r(Z)/j_r(0)$ ，表3.4に $f_l(c)$ と $f_r(c)$ の近似線の傾きを示す．ともに傾きは1に近いものとなっており，放射輝度と輝度は良く対応しているものとする．

よく知られるように放射の分光分布(0~2000nm)のうち，可視域は380~780nmで，放射と光は一対一に対応するものではないが，本研究では輝度，放射輝度の相対値 $j_l(Z)/j_l(0)$ $j_r(Z)/j_r(0)$ ， $f_l(c)$ 及び $f_r(c)$ を求め，この誤差(RMSE)，相関(近似線の傾き)より，天空輝度分布のモデルであるCIE標準一般天空の天空タイプ，パラメータ値をそのまま天空放射輝度分布に流用できるものと判断し，以後の検討を行う．

3.3.2 CIE標準一般天空近似タイプの算出

1スキャン毎に天空放射輝度分布測定値とCIE標準一般天空15タイプそれぞれとの $RMSE_j$ (式3-1)を算出し， $RMSE_j$ が最小となる天空タイプ(近似タイプ)を求め，各天空タイプの出現頻度の把握を行う．なお近似タイプの決定は，周辺地物の影響を受けている第一高度帯，スカイスキナ測定上限を超える天空要素を除いた天空要素の放射輝度測定値により行う．図3.2に近似タイプの決定フローを示す．

$$RMSE_j = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum \left(\frac{r_{c,ij} - r_{m,i}}{r_{m,145}} \right)^2}}{\frac{1}{n} \sum \frac{r_{m,i}}{r_{m,145}}} \quad (3-1)$$

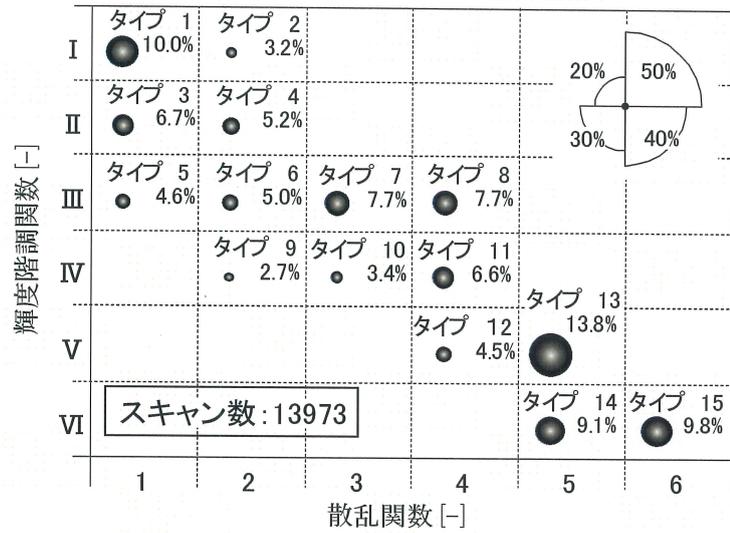
3.3.3 近似タイプの出現頻度

表3.5に近似タイプの出現頻度，出現頻度順位を示す．年間出現頻度の順位第1位は天空タイプ13(1927回)で以下，1，15，14，8と続く．輝度階調関数が，，散乱関数が5，6の天空タイプ13，14，15の出現頻度が高い．これらの天空タイプはClear skyタイプ^{注3-7)}であり，タイプ11，12とあわせると，年間の全データに対する出現頻度の割合で43.8%がClear skyタイプとなる(図3.3 a))．また，年間を通じて天空タイプ1は約10%，タイプ3は7%である．一様な天空放射輝度分布を表す天空タイプ5の出現頻度の割合は5%未満と低い．他の傾向としては，散乱関数が2のグループを除き，散乱関数が同じグループならば輝度階調関数の小さなタイプが高い出現頻度を示す傾向がある．このため天空タイプ5，9，10，12の出現頻度の割合は低い．

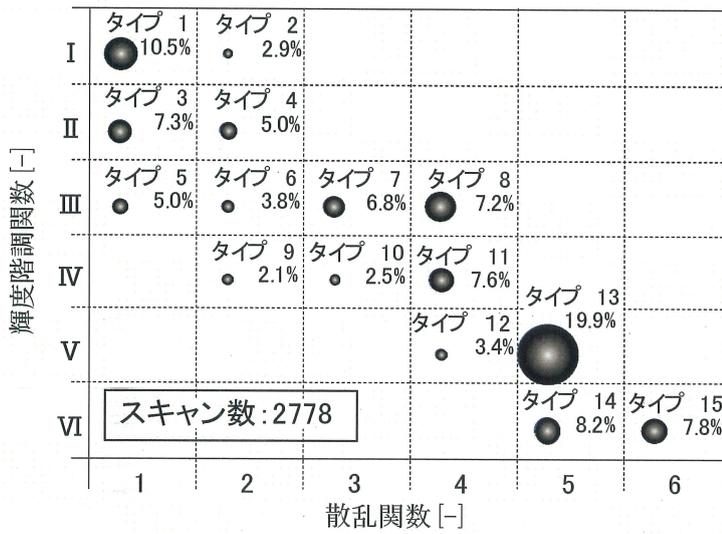
季節毎に出現頻度の割合を見てみると，春季4，5月(図3.3 b))は天空タイプ13が19.9%と非常に高く，Clear skyタイプの割合は46.9%と年間の割合より大きい．夏季6，7，8，9月(図3.3 c))は天空タイプ13，14，15のClear skyタイプの出現頻度は春季ほど高くない．天空タイプ13，14，15の減少により，天空タイプ7，8などのPartly cloudy skyタイプの出現頻度が増加する．全てのClear skyタイプの合計は41.1%で，春季と比べ5.8%低くなっている．秋季10，11月では，天空タイプ13の出現頻度は

表3.5 近似タイプの出現頻度と順位

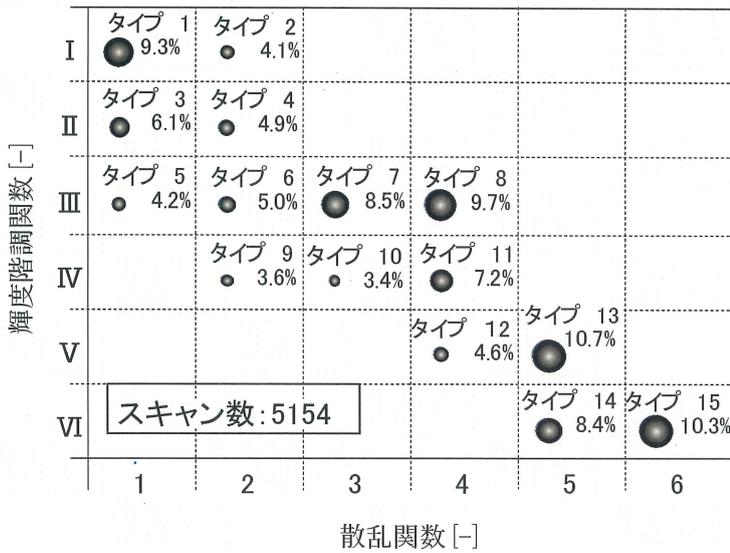
順位	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	計
CIE標準一般天空タイプ	13	1	15	14	8	7	3	11	4	6	5	12	10	2	9	-
出現頻度	1927	1397	1367	1275	1079	1073	942	921	721	692	638	626	481	450	384	13973



a) 年間



b) 春季



c) 夏季

図3.3 近似タイプ出現割合

春季ほど高くはない(16.4%)が、全てのClear skyタイプの出現頻度の割合は53.6%と春季より高い。冬季12, 1, 2, 3月は夏季と似た出現頻度の割合を示し、天空タイプ13, 14, 15の出現頻度の割合の合計は29.0%である。以上のように季節により各天空タイプの出現頻度に特徴がある。すなわち春季、秋季にClear skyタイプの出現頻度は高く、夏季、冬季にやや減少し、Partly cloudy skyタイプの出現頻度が増加する傾向が見られる。また、Overcast sky(天空タイプ1, 2, 3, 4)の年間の出現頻度の割合は約25%で、季節による変化は最大で5%と、Partly cloudy sky, Clear skyタイプが最大でそれぞれ10%, 14%変化するのに比べ小さい。

なお、図3.3のスカン数とは、スカイスキャナが145個の放射輝度測定値の1組を得る一回の測定回数である。

3.3.4 鉛直面日射量の算出

近似タイプ、一様天空、およびスカイスキャナ測定データそれぞれの天空放射輝度分布から、以下の手順で南西北東四方位の鉛直面日射量を算出し比較を行う。以下では各鉛直面日射量の算出手法を近似モデル、一様モデル、スカナモデルと呼ぶこととする。

スカナモデルの放射輝度 $r_{m,i}$ には、3章3節(気象データ)で述べた補正及び品質管理テストを行ったデータを用いる。近似モデルではCIE標準一般天空3-2式を放射輝度に流用し3-3式とする。天頂放射輝度 r_z を天空要素No.145の放射輝度測定値 $r_{m,145}$ で与えると、近似モデルの天空タイプ j 、天空要素 i の放射輝度 $r_{c,ij}$ は3-4式で求まる。

$$\frac{L_a}{L_z} = \frac{f(\mathbf{c})\mathbf{j}(Z)}{f(Z_s)\mathbf{j}(0)} \quad (3-2)$$

$$\frac{r_a}{r_z} = \frac{f(\mathbf{c})\mathbf{j}(Z)}{f(Z_s)\mathbf{j}(0)} \quad (3-3)$$

$$r_{c,ij} = \frac{f_j(\mathbf{c}_i)\mathbf{j}_j(Z_i)}{f_j(Z_s)\mathbf{j}_j(0)} r_{m,145} \quad (3-4)$$

次に、天空要素 i の法線面放射照度を求める。

スカイスキャナの放射輝度計の半開口角は 5.5° であり、これより各天空要素の立体角は等しく3-5式で与えられる。

$$\Omega = p \left[\sin\left(\frac{5.5^\circ}{180^\circ} \times p\right) \right]^2 \quad (3-5)$$

この立体角 Ω の天空要素145領域の総和 $\Omega \times 145$ と全天空の立体角 $2p$ との比を求めると $\Omega \times 145 / 2p = 0.67$ となる。この立体角を用いるならば、スカイスキャナは全天空の約2/3を測定していることになる。しかし、Ineichenら³⁻¹⁶⁾は、EKO製スカイスキャナ(MS300-LR)の輝度計の入射角度別感度は、その最大値を100%とした時、半開口角 5.5° においても50%程度あり、感度が0%となるのは半開口角が約 9° であると報告している。これよりスカイスキャナは実際には天空

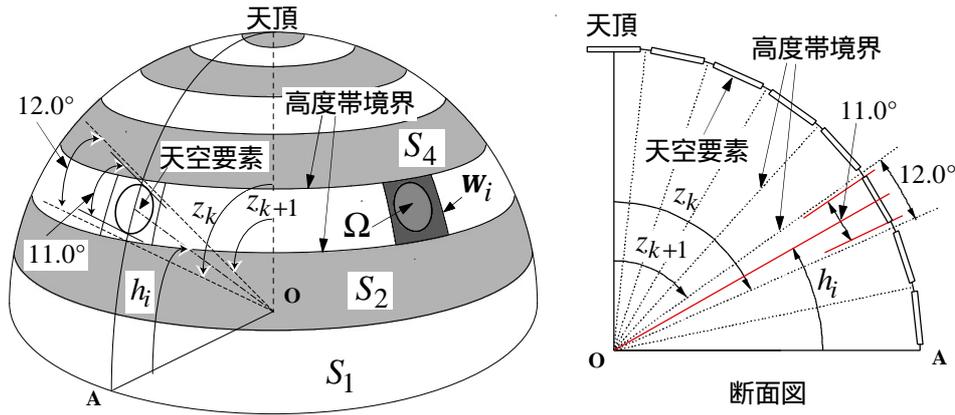


図3.4 修正立体角算出のための天球表面積分割の概念図

の2/3以上を測定していると考えられる。EKO製スカイキャナの輝度計・放射輝度計にはこのような特性があるが、本研究では天空要素の要素間に隙間重複領域がなく全天空を覆っていると仮定し、全天空を145の天空要素に分割し放射照度を求める。このため既往の研究³⁻¹⁷⁾を参考に図3.4に示すように、天球をスカイキャナ測定高度帯毎に帯状に分割し、この面積 S_k をその高度帯の天空要素数 n_k で除して天空要素 i の修正立体角 w_i とする。

$$S_k = 2p(\cos z_{k+1} - \cos z_k) \quad (3-6)$$

$$w_i = \frac{S_k}{n_k} = \frac{2p(\cos z_{k+1} - \cos z_k)}{n_k} \quad (3-7)$$

修正立体角 w_i を用いて、スカイキャナモデルの法線面放射照度 $R_{m,i}$ を求める。各モデルの比較は直達日射成分を除く鉛直面日射量により行うが、この比較には基準として直達日射遮蔽バンド付精密全天日射計を用いて測定した水平面天空日射量を用いる。直達日射遮蔽バンドの幅の1/2は半開口角に換算して 5.71° となるため、太陽からの角距離 5.71° 以内に中心を持つ天空要素には直達日射量が差し込んでいるとして、スカイキャナモデルでは以下のように周辺($5.71^\circ < c_i < 11.42^\circ$)の天空要素の法線面放射照度の平均値 R_{av} をその天空要素の法線面放射照度 $R_{m,i}$ として与える。

$$R_{av} = \left(\sum w_i r_{m,i} \right) / n_{11.42} \quad (5.71^\circ < c_i < 11.42^\circ) \quad (3-8)$$

$$R_{m,i} = \begin{cases} w_i r_{m,i} & (c_i > 5.71^\circ) \\ R_{av} & (c_i \leq 5.71^\circ) \end{cases} \quad (3-9)$$

近似モデルの放射照度 $R_{c,ij}$ については、直達日射の補正は行わず、修正立体角 w_i を用いて3-10式で求める。

$$R_{c,ij} = w_i r_{c,ij} \quad (3-10)$$

また各モデルの鉛直面日射量の比較を行うため、 $R_{m,i}$ 、 $R_{c,ij}$ の水平成分の総和を基準とする直達日射遮蔽バンド付精密全天日射計を用いて測定した水平面拡散日射量 E_{ed} にあわせる。

$$\hat{R}_{m,i} = R_{m,i} \frac{E_{ed} + R_{av}n_{5.71}}{\sum_{i=1}^{145} R_{m,i} \sin h_i} \quad (3-11)$$

$$\hat{R}_{c,ij} = R_{c,ij} \frac{E_{ed} + R_{av}n_{5.71}}{\sum_{i=1}^{145} R_{c,ij} \sin h_i} \quad (3-12)$$

スキャナモデル，近似モデルの鉛直面日射量 $I_{m,sh}$ ， $I_{c,sh}$ は，求めた各天空要素の法線面放射照度 $\hat{R}_{m,i}$ ， $\hat{R}_{c,ij}$ より，次のように求まる．

$$I_{m,sh} = \sum_{i=1}^{145} \hat{R}_{m,i} \cos q_i \quad (3-13)$$

$$I_{c,sh} = \sum_{i=1}^{145} \hat{R}_{c,ij} \cos q_i \quad (3-14)$$

一様モデルの鉛直面日射量 $I_{u,sh}$ は以下のように求める．

$$I_{u,sh} = 0.5(E_{ed} + R_{av}n_{5.71}) \quad (3-15)$$

3.3.5 鉛直面日射量の比較

図3.5に，2001年8月における近似モデルおよび一様モデルの鉛直面日射量とスキャナモデルの鉛直面日射量との比較を示す．南面では近似モデル，一様モデルの鉛直面日射量ともに，スキャナモデルの鉛直面日射量と精度よく対応している(図3.5 a)．西面では近似モデルの鉛直面日射量は精度よく対応しているが，一様モデルはスキャナモデルに比べ最大143[W/m²]大きい鉛直面日射量を計算する(図3.5 b)．北面(図3.5 b)でも，近似モデルの鉛直面日射量は精度よく対応しているが，一様モデルはスキャナモデルに比べ大きな鉛直面日射量を計算する傾向にあり，最大137[W/m²]大きい鉛直面日射量を計算する．東面は西面と同様の傾向を示す．

図3.6に，2001年2月における近似モデルおよび一様モデルの鉛直面日射量とスキャナモデルの鉛直面日射量との比較を示す．南面では，近似モデルでは日射量が大きくなると少しばらつくものの精度良く鉛直面日射量が求められている．これと比べ一様モデルの鉛直面日射量はスキャナモデルに比べ小さくなる傾向がある．これは冬季に太陽高度が低くなると，南面への入射日射が相対的に増加するが，一様天空ではこれが考慮されないためである．(図3.6 a)．西面では近似モデルの鉛直面日射量は精度よく対応しているが，一様モデルにはばらつきが見られる．しかし夏季(8月)と比べ日射量自体が小さいため，8月西面ほどのばらつきは見られない(図3.6 b)．北面も，近似モデルの鉛直面日射量は精度がよい．一様モデルは，8月同様スキャナモデルに比べ大きな鉛直面日射量となる傾向にある．(図3.6 c)．東面は西面と同様の傾向を示すが，一様モデルの散らばりが西面に比べやや大きい．(図3.6 d)．

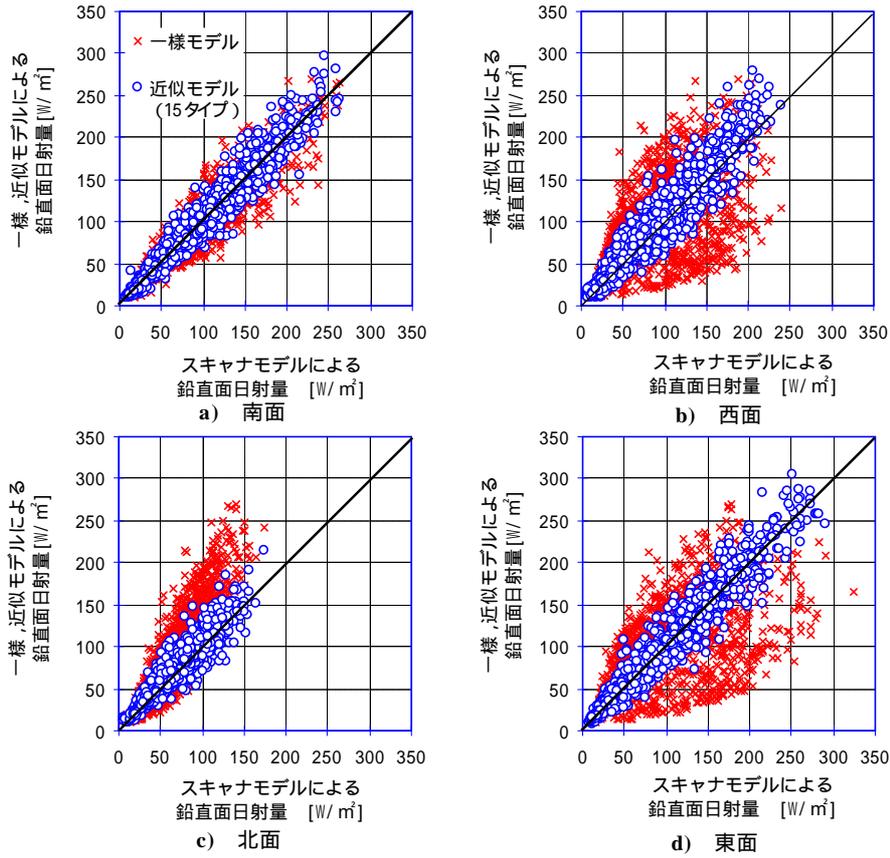


図3.5 各モデルによる鉛直面日射量の比較 (2001年8月)

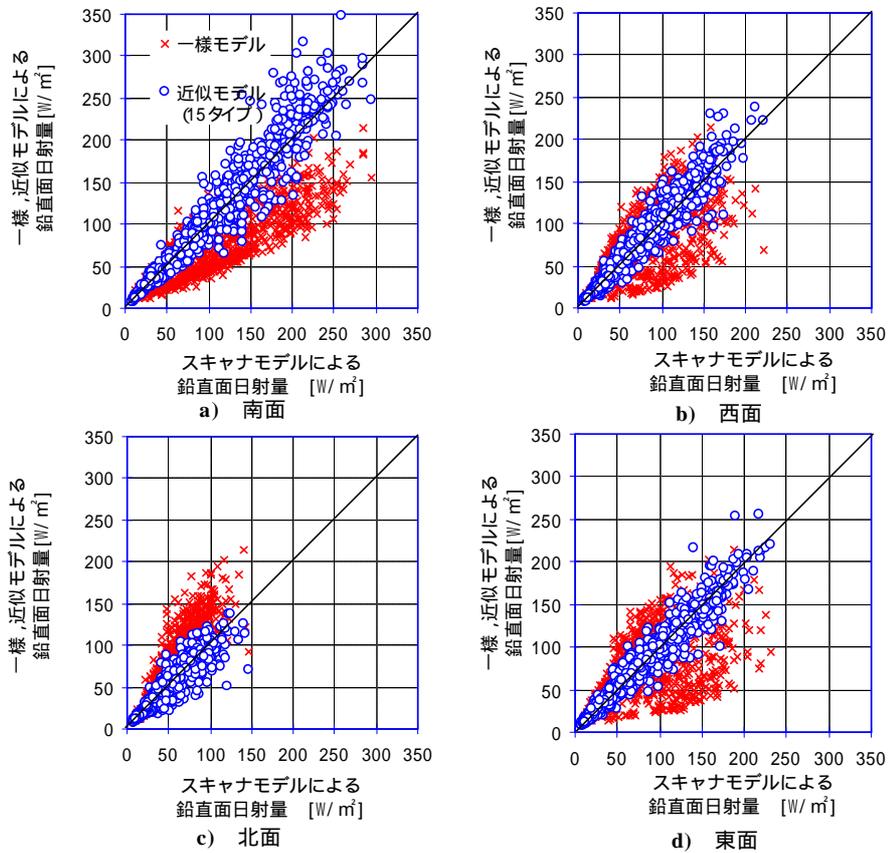


図3.6 各モデルによる鉛直面日射量の比較 (2001年2月)

表3.6 鉛直面日射量の相対誤差^{注3-8)}の月平均

方位	モデル	天空タイプの数	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
南	一樣	-	-24.2	-23.9	-13.0	-3.6	15.0	20.9	15.7	2.4	-10.5	-24.8	-38.7	-34.4
	近似	15	2.3	3.2	4.6	6.9	6.3	3.8	6.3	3.5	5.5	2.8	1.2	2.1
	近似	5	-4.4	-3.0	-1.3	3.5	0.4	-2.3	2.7	-0.7	0.7	-1.8	-3.0	-4.3
西	一樣	-	9.5	11.3	11.1	21.7	26.8	21.1	24.8	23.9	17.9	10.5	3.3	5.2
	近似	15	5.2	3.8	4.1	7.2	6.8	2.8	6.1	6.0	3.1	4.0	4.5	1.9
	近似	5	-2.9	-2.0	-1.6	3.4	0.0	-2.8	2.7	1.7	-2.3	-1.3	-0.5	-4.9
北	一樣	-	34.3	39.5	40.9	38.5	25.7	25.4	23.5	35.5	37.0	39.6	39.6	33.5
	近似	15	1.3	-0.1	2.7	5.8	3.7	4.3	5.2	7.4	1.2	-0.4	-0.9	-2.5
	近似	5	-7.8	-6.1	-3.4	1.3	-2.6	-1.8	0.5	1.2	-4.8	-6.4	-7.0	-9.2
東	一樣	-	7.3	7.1	18.4	15.2	14.6	24.4	16.5	15.2	8.1	6.4	0.5	-0.4
	近似	15	1.1	-0.1	4.3	3.4	1.9	4.1	4.0	3.1	1.0	-0.2	-0.9	0.0
	近似	5	-7.7	-6.6	-2.2	-0.6	-3.3	-2.1	-0.3	-2.7	-4.4	-5.6	-6.6	-7.3

表3.7 鉛直面日射量の相対誤差の標準偏差

方位	モデル	天空タイプの数	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
南	一樣	-	32.8	28.9	28.7	20.8	17.9	19.8	20.1	21.9	26.0	30.9	30.0	33.4
	近似	15	17.6	15.4	15.6	13.1	15.1	15.9	16.8	15.9	14.8	13.7	15.2	17.7
	近似	5	23.9	21.4	19.1	15.6	16.8	17.0	17.6	18.1	18.4	17.5	20.2	23.1
西	一樣	-	37.9	39.4	45.5	52.9	47.4	48.2	57.7	56.1	46.1	44.9	43.3	36.3
	近似	15	18.6	16.0	17.1	16.4	18.4	16.5	19.2	21.9	19.5	17.8	18.7	18.2
	近似	5	20.3	18.8	19.6	17.8	19.5	19.1	20.8	22.8	19.9	18.9	20.5	19.1
北	一樣	-	29.7	32.0	33.3	38.5	36.9	35.4	39.3	39.5	36.3	32.4	31.9	34.3
	近似	15	20.2	18.4	16.5	15.9	16.7	16.8	17.2	18.8	17.3	17.5	22.4	23.6
	近似	5	19.6	19.1	17.8	16.7	17.3	17.4	17.4	19.2	17.9	17.0	20.2	23.1
東	一樣	-	39.5	42.1	46.1	54.1	50.2	46.0	55.6	52.0	46.8	44.5	40.4	41.2
	近似	15	19.0	15.0	17.8	16.0	15.6	17.8	19.8	17.9	16.0	16.2	16.8	16.6
	近似	5	20.0	17.7	19.1	17.0	18.9	19.4	20.6	20.8	18.8	18.0	17.5	17.2

表3.6, 3.7にスカナモデルの鉛直面日射量に対する近似モデル, 一樣モデルによる鉛直面日射量の相対誤差 $I_{c,re}$, $I_{u,re}$ (注3-8)の月平均, 各月の標準偏差を示す。

一樣モデルの相対誤差の月平均は, 各方位最大で, 南面 -38.7%(11月), 西面 26.8%(5月), 北面 40.9%(3月), 東面 24.4%(6月)と大きな値を示すのに対し, 近似モデル(天空タイプの数 15)の相対誤差の月平均は, 各方位の最大でも南面 6.9%(4月), 西面 7.2%(4月), 北面 7.4%(8月), 東面 4.3%(3月)であり, 顕著に小さい。年平均では, 近似モデルはスカナモデルに比べ, 南, 西面で約4%, 北, 東面で約2%大きな鉛直面日射量を計算する傾向が見られる。

標準偏差については, 一樣モデルでは各方位最大で, 南面 32.8%(1月), 西面 57.7%(7月), 北面 39.5%(8月), 東面 55.6%(7月)であるが, 近似モデルでは各方位最大で, 南面 17.7%(12月), 西面 21.9%(8月), 北面 23.6%(12月), 東面 19.8%(7月)となり, 一樣モデルの1/2から1/3となる。年平均では, 一樣モデルでは西, 東面で46%, 北面で35%, 南面で26%と大きいのに対し, 近似モデルでは, 各方位約17%で一定しており, 一樣モデルの1/2から1/2.5と小さい。

以上のように, 近似モデルの相対誤差の月平均, 標準偏差は一樣モデルと比べ顕著に小さく, 相対誤差を年平均で見ると2%から4%と小さな値を示す。一樣モデルにより求めた鉛直面日射量 $I_{u,sh}$ と比べCIE標準一般天空の天空タイプを流用した近似モデルにより求めた鉛直面日射量 $I_{c,sh}$ はスカナモデルにより求めた鉛直面日射量 $I_{m,sh}$ と精度よく対応することがわかる。

表3.8 天空タイプの集約過程

天空タイプ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
輝度階調関数																
散乱関数	1	2	1	2	1	2	3	4	2	3	4	4	5	5	6	
天空タイプの集約	15	1397	450	942	721	638	692	1073	1079	384	481	921	626	1927	1275	1367
15	14	0	0	3	0	102	27	82	19	384	140	0	4	0	7	0
14	13	112	450	29	277	0	0	9	23	0	0	0	0	0	0	0
13	12	2	9	0	27	26	35	231	0	621	197	94	0	0	0	0
12	11	25	4	1	8	9	0	0	0	367	724	212	98	0	0	0
11	10	0	594	30	775	126	2	0	0	10	0	0	13	0	0	0
10	9	32	132	443	0	880	238	1	0	34	0	0	0	0	0	0
9	8	293	618	1472	0	0	540	10	0	11	0	0	0	0	0	0
8	7	6	12	0	0	0	55	564	0	1540	829	73	1	0	0	0
7	6	2079	2343	0	0	0	215	0	0	0	0	49	0	0	0	0
6	5	726	0	0	0	0	2249	1400	0	0	0	98	23	2	0	0
5	4	2163	0	0	0	0	0	3327	0	0	0	994	0	170	0	0
4	3	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	948	1538	542	0	0
3	2	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2064	0	2082	0	0
2	1	6901	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6901	0	0	0	0

太枠スクリーン数が他の天空タイプに集約される

3.4 CIE 標準一般天空天空タイプの集約

3.4.1 天空タイプの集約

近似モデルによる鉛直面日射量は、スキャナモデルによる鉛直面日射量と精度良く対応する。これより CIE 標準一般天空を天空放射輝度分布に流用し、鉛直面日射量を求めることは妥当であるとして、近似する天空タイプの数を出現頻度の低い順に減らしてゆき、近似タイプの出現頻度の変化を把握する。ここで、近似する天空タイプの数を 15 より減らしてゆき、より少ない天空タイプで近似することを「天空タイプを集約する」、天空タイプの近似から除かれた天空タイプを「集約された天空タイプ」と表現することとする。

表3.8は、天空タイプを集約していく過程の各天空タイプに近似されるスクリーン数の前回集約時からの増加数を示す。太枠で示した天空タイプが集約され、そのスクリーン数が他の天空タイプに割り振られる。集約された天空タイプは輝度階調関数の同じグループ、あるいは散乱関数の同じグループの天空タイプにそのほとんどが集約される。例えば、天空タイプの数を 7 から 6 へ集約すると、天空タイプ 3 が近似タイプの算出から除かれ、タイプ 3 で近似されていた 2343 スクリーンのうち、散乱関数のグループが同じ 1 の天空タイプ 1 に 2079 スクリーン集約される。

図3.7に9タイプ、5タイプ、4タイプに集約した時の近似タイプの年間出現頻度の割合を示す。図3.7 b), 図3.7 c) より天空タイプ 8 の Partly cloudy sky タイプの 2/3 が天空タイプ 1 に集約される様子がわかる。

3.4.2 集約タイプの数による鉛直面日射量の RMSE の変化

次に鉛直面日射量の RMSE を求め、その変化より天空タイプの集約がどれほどまで可能であるか検討する。

図3.8に、出現頻度の低い順に天空タイプを集約する時の、近似モデルの鉛直面日射量とスキャナモデルの鉛直面日射量との RMSE を示す。南、西、東面では、天空タイプの数が 4 以下になると RMSE、RMSE の季節差 (RMSE が最大となる月の RMSE から最小となる月の RMSE を差し引いた値) はともに大きくなる。南面では天空タイプの数が 5 の RMSE の年平均は 23.3 [W/m²] であるが、天空タイプの数が 4 の時には 32.5 [W/m²] となり、約 10 [W/m²] 大きくなる (図3.8 a)。西面では天空タイプの数が 4 の

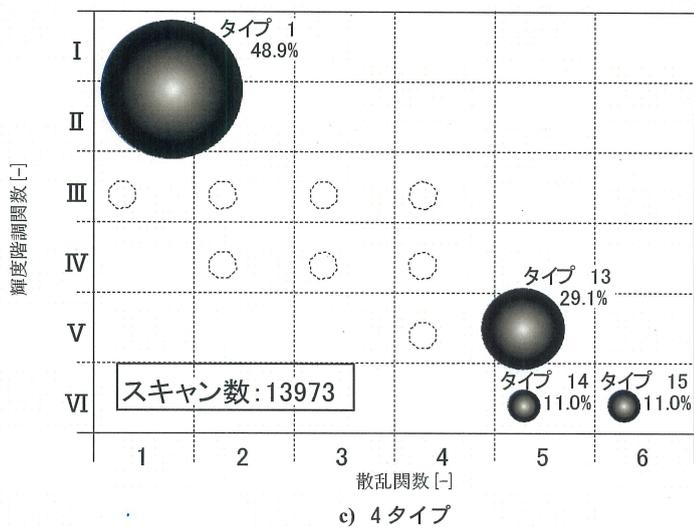
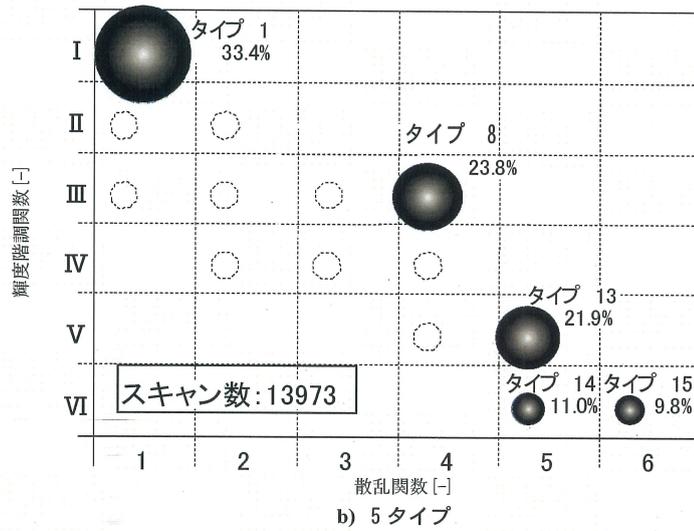
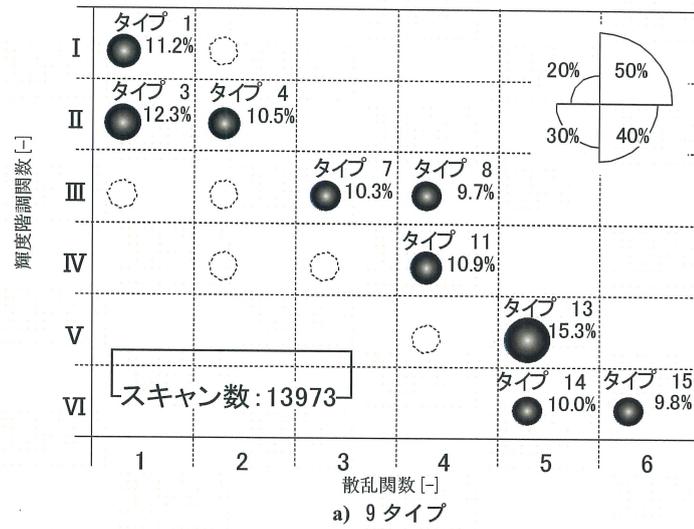


図3.7 近似する天空タイプの数による近似タイプの出現頻度の割合

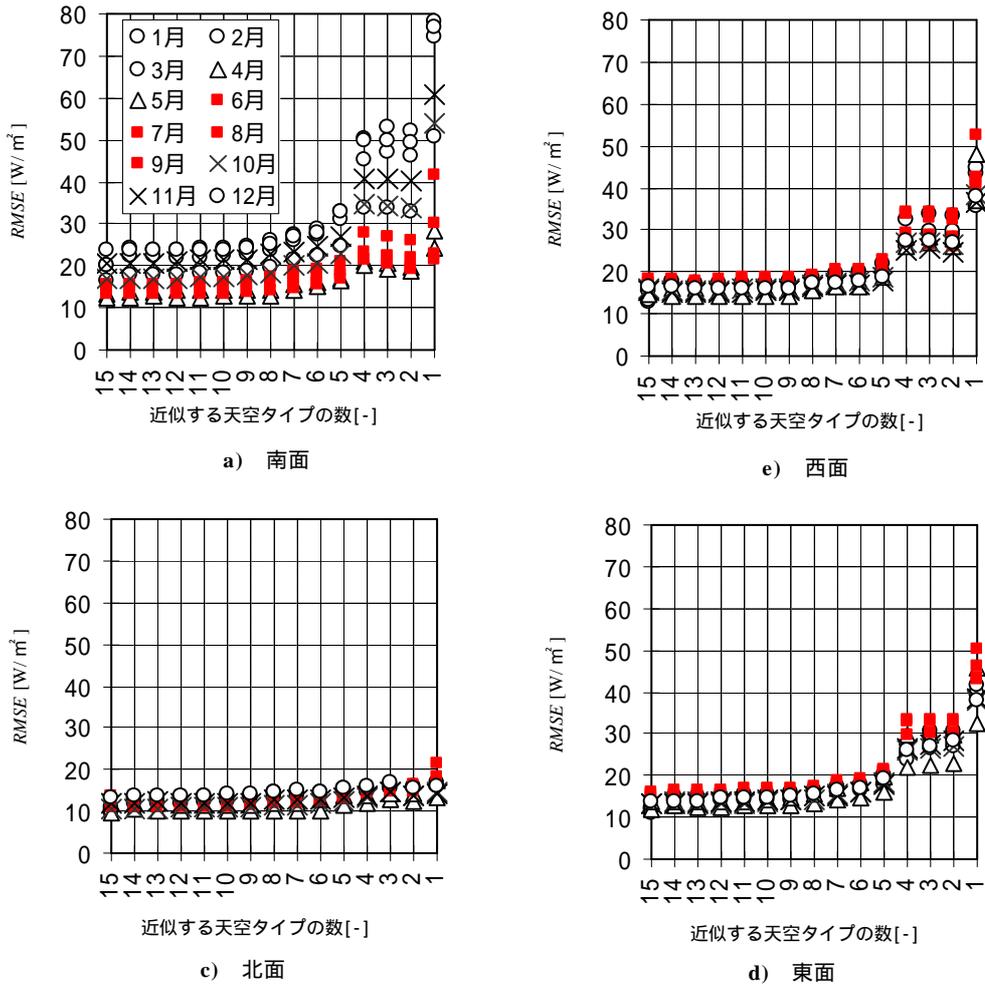


図3.8 近似する天空タイプの数による鉛直面日射量のRMSEの変化^{注3-9)}

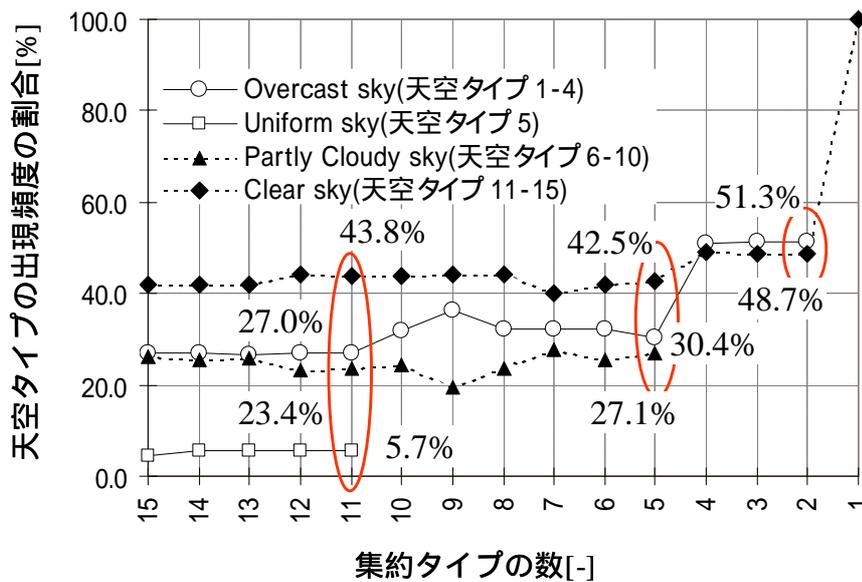


図3.9 Overcast sky , Uniform sky , Partly cloudy sky , Clear sky の4タイプに分類した出現頻度の割合

時のRMSEの年平均は天空タイプの数が5の時に比べ $8.7[\text{w}/\text{m}^2]$ 大きくなり季節差は天空タイプの数, 4の時に $9.3[\text{w}/\text{m}^2]$ となる(図3.8 b) . 東面では天空タイプの数が4になるとRMSEの季節差は, 天空タイプの数が5の時の2.3倍になる(図3.8 d) . 北面は天空タイプの変化によるRMSEの変化, 最大季節差ともに大きくない . 天空タイプの数が15から1までのRMSEの季節差の平均は, 西, 東面の天空タイプの数が15から5までの季節差の平均とほぼ等しく $4.4[\text{w}/\text{m}^2]$ である(図3.8 c) . また各方位共通して, タイプの数を7から5まで集約する際, RMSEは年平均で $1.0[\text{w}/\text{m}^2]$ ほどであるが, わずかに増加する傾向がある . これは7タイプに集約する際, 輝度階調関数がIVのタイプが全て集約され, 近似する天空タイプから除かれるためであると考えられる .

図3.9に15の天空タイプをOvercast sky(天空タイプ1-4), Uniform sky(天空タイプ5), Partly cloudy sky(天空タイプ6-10), Clear sky(天空タイプ11-15)の4タイプに分類した出現頻度の割合を示す . 近似する天空タイプの数が4になったところでPartly cloudy skyタイプに分類される天空タイプが除かれ, 以後Overcast sky, Clear skyの2タイプで近似タイプを決定する . 図3.8で天空タイプの数が4以下でRMSEが大きくなるのは, この2タイプでの近似タイプの決定が原因であると考えられる .

以上のように, 近似する天空タイプを出現頻度の低い順に減少させていくと, 鉛直面日射量のRMSEは北面を除き近似タイプの数が4以下で大きく増加し, 季節差も大きくなる .

3.4.3 集約タイプの数5の鉛直面日射量

前節で見たように近似する天空タイプの数が5以上では, 鉛直面日射量のRMSEの変化は大きくな

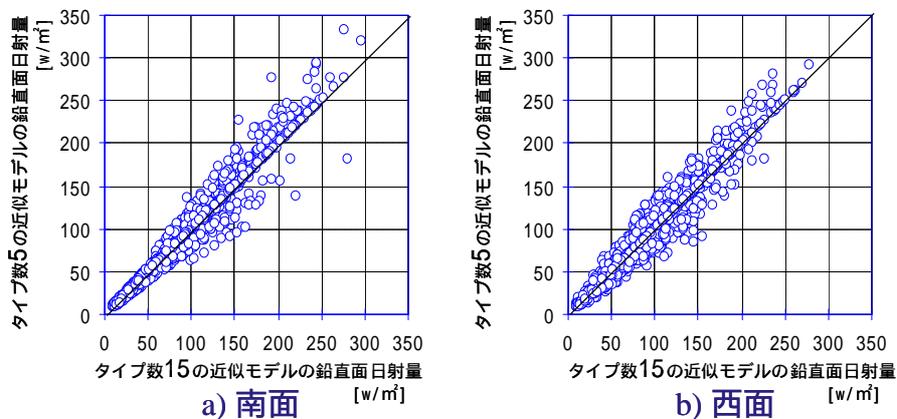


図3.10 近似する天空タイプの数が5, 15の近似モデルの鉛直面日射量の比較 (2001年8月)

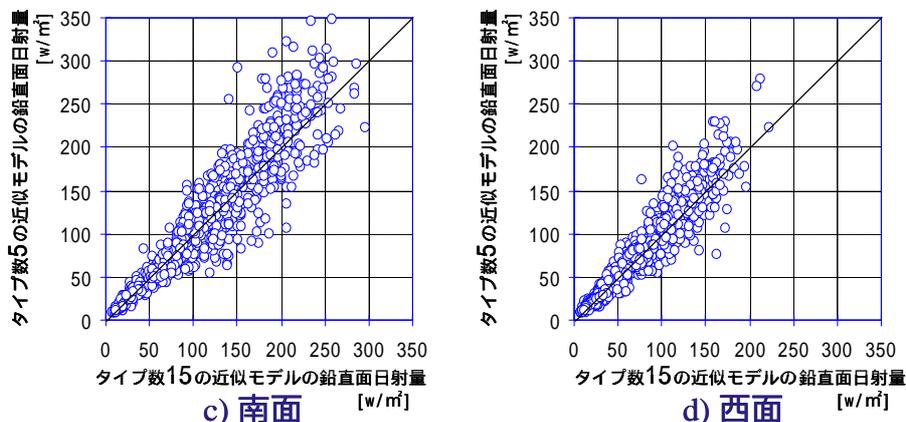


図3.11 近似する天空タイプの数が5, 15の近似モデルの鉛直面日射量の比較 (2001年2月)

い．そこで天空タイプの数をも5まで集約することができると考え、天空タイプの数をも5と15の近似モデルの鉛直面日射量をそれぞれ求め比較を行う．

図3.10に2001年8月の南、西面における、近似する天空タイプの数をも5,15の近似モデルの鉛直面日射量の比較を示す．精度良く対応している様子がわかる．

図3.11に、近似する天空タイプの数をも5,15の近似モデルの2001年2月の鉛直面日射量の比較を示す．8月と比べ、日射が大きい場合にややばらつきが見られるが相関がある．

先に示した表3.4, 3.5に、スカナモデルの鉛直面日射量に対する天空タイプの数をも5の鉛直面日射量の相対誤差の月平均、各月の標準偏差を示す．天空タイプの数をも5の相対誤差の月平均を見てみると、負の値を示す月が多い．スカナモデルより鉛直面日射量を小さく計算する傾向が強いことがわかる．各方位とも冬季に、天空タイプの数をも15の相対誤差の月平均との差が大きくなるものの、それは10%に満たない．また、年平均では天空タイプの数をも15の時と比べ、南面で5%、その他の方位で6%程度の差となっている．標準偏差については、その年平均を見ると天空タイプの数をも15の時と比べ、南面において3.5%の差が見られるが、その他の方位では2%未満である．なお北面の1,10~12月において天空タイプの数をも5の標準偏差が、天空タイプの数をも15の時よりわずかに小さな値を示すが、これは、近似タイプの決定では図3.12, 表3.9に示す第一高度帯(図2.4, 表2.1再録)、測定上限値を超える天空要素を除外して行うが、鉛直面日射量算出には補正を行った第一高度帯も用いることによる影響と考えられる．

以上のように、近似する天空タイプの数をも5まで集約して鉛直面日射量を求め、天空タイプの数をも15の鉛直面日射量と比較しても、スカナモデルの鉛直面日射量に対する相対誤差に大きな差は見られない．すなわち、天空タイプの数をも5まで集約できる．

3.5 まとめ

通常は天空放射輝度分布が考慮がされない熱負荷計算などの熱環境シミュレーションに、天空放射輝度分布を考慮するため、天空放射輝度、あるいは輝度分布のモデルを利用することとした．利用するモデルには、これまで開発された天空輝度分布、天空放射輝度分布モデルのうちで、モデルの係数が煩雑にならない、天空状態を捉えやすいといった利点を持つCIE標準一般天空に着目し、

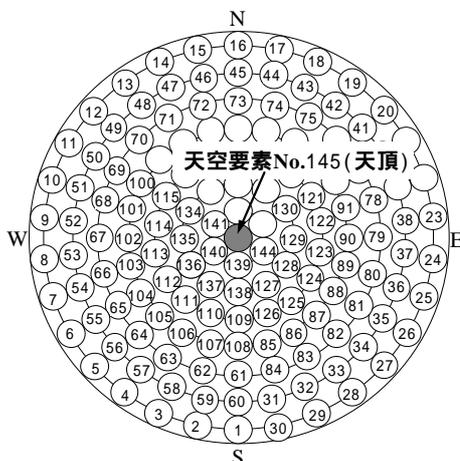


図3.12 天空要素の配置図

表3.9 天空要素の高度・方位

高度帯	天空要素No.	高度角[°]	方位幅[°]
1	1-30	6	12
2	31-60	18	12
3	61-84	30	15
4	85-108	42	15
5	109-126	54	20
6	127-138	66	30
7	139-144	78	60
8(天頂)	145	90	-

このモデルの放射輝度への流用を考えた。京都大学において測定した1年間(2001年1月1日から2001年12月31日)の天空放射輝度分布, 天空輝度分布データを用いて, この輝度分布モデルの流用可能性を検証し, 以下の知見を得た。

1) 輝度と放射輝度の比較

$j_l(Z)/j_l(0)$ と $j_r(Z)/j_r(0)$, $f_l(c)$ と $f_r(c)$ のそれぞれの誤差 (RMSE) は小さく, それぞれ相関の近似線の傾きは, ともに1に近いものとなっており, 放射輝度と輝度は良く対応している。これより, 天空輝度分布のモデルであるCIE標準一般天空の天空タイプ, パラメータ値をそのまま天空放射輝度分布に流用できるものと判断した。

2) 近似タイプの年間出現頻度について

- a) 近似タイプの年間出現頻度の順位第1位は天空タイプ13(1927回)で以下, 1, 15, 14, 8と続く。Clear sky タイプである天空タイプ13, 14, 15の出現頻度が高い。
- b) 春, 秋季にClear sky タイプの出現頻度が高く, 夏季, 冬季にその出現頻度がやや減少し, Partly cloudy sky タイプの出現頻度が増加する傾向がある。
- c) Overcast sky タイプ(天空タイプ1, 2, 3, 4)の出現頻度の割合は約25%。季節による変化は最大で約5%と, Partly cloudy sky, Clear sky タイプに比べ小さい。
- d) 一様な天空放射輝度分布を表す天空タイプ5の出現頻度の割合は年間を通じて5%未満である。

3) 近似モデル, 一様モデルの鉛直面日射量とスカナモデルの鉛直面日射量との比較について

スカナモデルの鉛直面日射量に対する近似モデルの鉛直面日射量の相対誤差の年平均は南面, 西面で約4%, 北面, 東面で約2%, 相対誤差の標準偏差は年平均で, 各方位とも約17%となり, 一様モデルの相対誤差の年平均が南面-10%, 西面17%, 北面34%, 東面11%, 標準偏差の年平均が南面26%, 西面46%, 東面47%, 北面35%となるのに対し, 小さな値を示す。これから, 熱(放射輝度)とは波長域の異なる可視域の天空輝度分布のモデルであるCIE標準一般天空を天空放射輝度分布に流用し鉛直面日射量を鉛直面日射量を求めることに妥当性があると判断した。

4) 天空タイプの集約について

- a) 近似する天空タイプの数を15から出現頻度の低い順に減少させてゆくと, 天空タイプの数が5以上では鉛直面日射量のRMSEに大きな変化は無いが, 4以下になると南, 西面で約10 [w/m²] 大きくなり, 東面ではRMSEの季節差が2.3倍になるなど変化する。北面ではRMSE, 季節差ともにあまり変化しない。
- b) 近似する天空タイプの数を5まで減少させても, 天空タイプの数が15の時と比べ, 鉛直面日射量の相対誤差は, 年平均で南面5%, 他の方位で6%程度, 標準偏差の年平均は南面において3.5%, 他の方位で2%未満の差しか見られず, 大幅な変化はない。これより, 天空タイプを5まで減らすことができる。

以上より, 天空輝度分布のモデルであるCIE標準一般天空を天空放射輝度分布に流用することができる判断した。以後このモデルを用いて, 熱シミュレーションを行ってゆくものとする。

注記

注3-1) Kittler, PerezのモデルがCIE標準一般天空として採用されたのは2003年である。ここで挙げたTregenzaら, Royら, 梅宮の研究は, 正確にはCIEにより標準として採用される以前に, Kittler, Perezのモデルを用いたものである。

注3-2) 3-16式によりRMSEを求める。本研究において観測値とは $j_l(Z)/j_l(0)$, $f_l(c)$, $l_{m,sh}$, 推定値とは $j_r(Z)/j_r(0)$, $f_r(c)$, $l_{c,sh}$, $l_{u,sh}$ とした。(近似タイプ算出時の $RMSE_j$ については3-1式を用いる。)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{\text{標本数}} \sum (\text{推定値} - \text{観測値})^2} \quad (3-16)$$

注3-3) スカイスキャナはセンサ保護の為, 放射輝度 $300[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}]$, 輝度 $55,000[\text{cd}/\text{m}^2]$ を測定上限とし, それを超える場合には内部シャッターを閉じて測定を行わない。このため, センサの測定上限値を超えていると考えられる天空要素の放射輝度測定値 $r_{m,i}$ は, 輝度測定値 $l_{m,i}$ を用いた補正を行う。補正は, 1日単位で行う。最小二乗法を用いて $r_{m,i}$, $l_{m,i}$ から回帰直線を求め, 回帰直線から求めた放射輝度計算値を測定上限値を超える天空要素の放射輝度として与える。

注3-4) CIEのデータ品質自動管理手順に基づき³⁻¹¹⁾, 以下のテストを行い, 合格した水平面拡散日射量測定値を検討に用いる。

$$0 < E_{eg} < 1.2E_o, \quad 0 < E_{ed} < 0.8E_o, \quad 0 < E_{es} < E_o \quad (3-17)$$

$$E_{eg} = (E_{es} \cos Z_s + E_{ed}) \pm 15\% \quad (3-18)$$

注3-5) スカイスキャナ天空要素の第一高度帯測定値は, 周辺地物の影響を受けているため, 近似タイプの第一高度帯天空要素の放射輝度と第二高度帯天空要素の放射輝度との比を算出し, 同一方位の第二高度帯測定値にこの比を掛けた値を, 鉛直面日射量の算出に際して第一高度帯放射輝度として用いる。測定値から鉛直面日射量を算出する際の各天空要素の放射輝度 $r_{m,i}$ は以下ようになる。

$$r_{m,i} = \begin{cases} r_{m,60-(i-1)} \frac{r_{c,i}}{r_{c,60-(i-1)}} & (1 \leq i \leq 30) \\ r_{m,i} & (31 \leq i \leq 145) \end{cases} \quad (3-19)$$

注3-6) Kittlerは, 測定した輝度分布より $j(Z)/j(0)$, $f(c)$ の回帰曲線を求め, 輝度階調関数, 散乱関数のパラメータを決定している。本研究では $j(Z)/j(0)$, $f(c)$ を以下のように求める。

a) $j(Z)/j(0)$

スカイスキャナの1スキャンにおいて, 太陽からの角距離 c が太陽から天頂までの角距離の $\pm 5^\circ$ 以内である天空要素の放射輝度 $r_{m,i}$ 及び輝度 $l_{m,i}$ を天空要素No.145(天頂)の放射輝度 $r_{m,145}$ 及び輝度 $l_{m,145}$ それぞれで除したものを $j(Z)/j(0)$ とした。放射輝度, 輝度の $j_r(Z)/j_r(0)$, $j_l(Z)/j_l(0)$ を以下に示す。スカイスキャナにより測定する天空要素天頂からの角距離 Z は, $84, 72, 60, 48, 36, 24, 12, 0[^\circ]$ の9通りとなる。

$$\mathbf{j}_r(Z)/\mathbf{j}_r(0) = r_{m,i}/r_{m,145} \quad (3-20)$$

$$\mathbf{j}_l(Z)/\mathbf{j}_l(0) = l_{m,i}/l_{m,145} \quad (3-21)$$

b) $f(c)$

スカイスキヤナ天空要素の各高度帯ごとに、太陽からの角距離が 90 ± 5 以内に中心を持つ天空要素がある場合、同一高度帯の天空要素の放射輝度 $r_{m,i}$ 及び輝度 $l_{m,i}$ をこの天空要素の放射輝度 $r_{m,90}$ 、及び輝度 $l_{m,90}$ それぞれで除し $f(c)$ とした^{3-14), 3-15)}。放射輝度、輝度の $f_r(c)$ 、 $f_l(c)$ を以下に示す。

$$f_r(c) = r_{m,i}/r_{m,90} \quad (3-22)$$

$$f_l(c) = l_{m,i}/l_{m,90} \quad (3-23)$$

注3-7) 本研究では、天空タイプ1～4を Overcast sky、天空タイプ5を Uniform sky、天空タイプ6～10を Partly cloudy sky、天空タイプ11～15を Clear sky とする。

注3-8) 近似モデル、一様モデルそれぞれとスカイモデルとの鉛直面日射量の相対誤差は以下の式で求める。

$$I_{c,re} = \frac{(I_{c,sh} - I_{m,sh})}{I_{m,sh}} \times 100 \quad (3-24)$$

$$I_{u,re} = \frac{(I_{u,sh} - I_{m,sh})}{I_{m,sh}} \times 100 \quad (3-25)$$

注3-9) 15タイプに近似した場合にも10%～25%程度の誤差(図3.8 南面)があるので、次章で行う天空タイプの推定においては、これ以上の精度を求められない。

また、集約タイプ15から5まで10%～25%程度の誤差に変化は見られない。4タイプになると、誤差は大きくなる。これから逆に、5タイプを精度良く推定できれば、鉛直面日射量の誤差は大きくないものとする。

記号表

L_u	: 天球上任意点の輝度 [cd/m^2]
L_z	: 天頂輝度 [cd/m^2]
c	: 太陽と天球上任意点の角距離 [rad]
c_i	: 太陽とスカイスキヤナ天空要素 i の中心との角距離 [rad]
z_i	: 天空要素 i の天頂角 [rad]
h_i	: 天空要素 i の高度角 [rad]
Z	: 天球上任意点の天頂角 [rad]
Z_s	: 天頂からの太陽高度 [rad]
z_k	: 第 k 高度帯と第 $k+1$ 高度帯との境界の天頂角 ($z_1 = p/2$, $z_{8+1} = 0$) [rad]
a, b	: 輝度階調関数のパラメータ [-]
c, d, e	: 散乱関数のパラメータ [-]
a	: 天球上任意点の方位角 [rad]

- a_s : 太陽方位角 [rad]
 r_a : 天球上任意点の放射輝度 [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$]
 r_z : 天頂の放射輝度 [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$]
 $r_{c,ij}$: 近似モデル(CIE 標準一般天空), 天空タイプ j , 天空要素 i の放射輝度 [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$]
 $r_{m,i}$: 天空要素 i の放射輝度測定値 [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$]
 S_k : 第 k 高度帯の表面積 [-]
 n_k : 第 k 高度帯の天空要素の個数 [-]
 Ω : 天空要素の立体角 [sr]
 w_i : 天空要素 i の修正立体角 [sr]
 $r_{m,145}$: 天空要素 No.145(天頂)の放射輝度測定値 [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$]
 $R_{m,i}$: スキャナモデル, 天空要素 i の法線面放射照度 [W/m^2]
 $R_{c,ij}$: 近似モデル, 天空タイプ j , 天空要素 i の法線面放射照度 [W/m^2]
 R_{av} : $5.71 < c_i < 11.42$ の天空要素の法線面放射照度の平均 [W/m^2]
 q_i : 天球要素 i の鉛直面への入射角 [rad]
 $\hat{R}_{m,i}$: 拡散日射計にあわせたスキャナモデル, 天空要素 i の法線面放射照度 [W/m^2]
 $\hat{R}_{c,ij}$: 拡散日射計にあわせた近似モデル, 天空タイプ j , 天空要素 i の法線面放射照度 [W/m^2]
 $I_{m,sh}$: スキャナモデルの鉛直面日射量 [W/m^2]
 $I_{c,sh}$: 近似モデルの鉛直面日射量 [W/m^2]
 $I_{u,sh}$: 一様モデルの鉛直面日射量 [W/m^2]
 $I_{c,re}$: 近似モデル鉛直面日射量のスキャナモデル鉛直面日射量に対する相対誤差 [%]
 $I_{u,re}$: 一様モデル鉛直面日射量のスキャナモデル鉛直面日射量に対する相対誤差 [%]
 $l_{m,i}$: 天空要素 i の輝度測定値 [cd/m^2]
 $l_{m,145}$: 天空要素 145(天頂)の輝度測定値 [cd/m^2]
 $r_{m,90}$: 太陽からの角距離が $90 \pm 5^\circ$ 以内の天空要素の放射輝度 [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$]
 $l_{m,90}$: 太陽からの角距離が $90 \pm 5^\circ$ 以内の天空要素の輝度 [cd/m^2]
 E_{eg} : 水平面全天日射量 [W/m^2]
 E_{ed} : 水平面拡散日射量 [W/m^2]
 E_{es} : 法線面直達日射量 [W/m^2]
 E_0 : 太陽定数 (= 1367) [W/m^2]
 n : 第一高度帯, 測定上限値を超える天空要素を除いた天空要素の個数 [-]
 n_k : 第 k 高度帯の天空要素の個数 [-]
 $n_{11.42}$: $5.71 < c_i < 11.42$ の天空要素の個数 [-]
 $n_{5.71}$: $c_i \leq 5.71$ の天空要素の個数 [-]

添え字

- i : スカイスキャナ天空要素番号 ($i=1 \sim 145$)
 j : CIE 標準一般天空天空タイプ ($j=1 \sim 15$)
 k : 天空要素の高度帯番号 ($k=1 \sim 8$) (表 3.9 参照)
 m : スキャナモデル

- c* : 近似モデル
u : 一様モデル
l : 輝度
r : 放射輝度

本章に関する既発表論文

査読付き論文

- 1) 天空放射輝度分布へのCIE標準一般天空の流用と天空タイプの集約:
 細淵勇人, 吉田治典, 上谷芳昭, 日本建築学会環境系論文集, 第583号, pp.29-36, 2004.9

参考文献

- 3-1) Perez, R., Seals, R., and Michalsky, j.: All-Weather Model for Sky Luminance Distribution - Preliminary Configuration and Validation, *Solar Energy*, 50(3), pp.235-245, 1993
- 3-2) Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, j., and Stewart, R.: Modeling Day Light Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiancens, *Solar Energy*, 44(5), pp.271-289, 1990
- 3-3) Kittler, R., Perez, R. and Darula, S.: A Set of Standard Skies Characterising Daylight Conditions for Computer and Energy Conscious Design, Final Report of U.S.-Slovak Grant Project US-SK 92 052, 1998
- 3-4) CIE Standard (Chairman : Uetani, Y.): Spatial Distribution of Daylight-CIE Standard General Sky, CIE S 011.1/E, 2003
- 3-5) Tregenza, P.R.: Standard Skies for Maritime Climates, *Lighting Res. & Technol.*, 31(3), pp.97-106, 1999
- 3-6) Roy, G.G., Kittler, R., Hayman, S., Julian, W.: Comparison of Real Sydney Skies with Model Skies, *Lighting Res. & Technol.*, 32(2), pp.71-78, 2000
- 3-7) 梅宮典子: 天空輝度分布不均一性のモデルへの組み込みについて, 曇天空における散乱関数の仮定によるCIEモデルの補正, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.359-360, 2003.9
- 3-8) 井川憲男, 中村洋, 松澤朋子, 古賀靖子, 古城真也: 絶対値で表す天頂輝度と天空輝度分布, 天空輝度分布の分類法に関する研究(その4), 日本建築学会計画系論文集, 第523号, pp.23-30, 1999.9
- 3-9) 井川憲男, 中村洋, 松澤朋子, 古賀靖子, 穴井謙: すべての天空状態の天空放射輝度分布を示す数式と鉛直面日射量の推定, 天空放射輝度分布のモデル化に関する研究(その2), 日本建築学会計画系論文集, 第557号, pp.17-24, 2002.7
- 3-10) 井川憲男, 中村洋, 古賀靖子, 松澤朋子: 全天日射量と天空日射量で推定する天空放射輝度分布と天空輝度分布, 日本建築学会環境系論文集, 第573号, pp.33-40, 2003.11

- 3-11) CIE TC 3-07: Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement,
CIE, Technical Report108-1994
- 3-12) 柴田要, 中村洋, 大鶴徹, 古賀靖子, 田中信之: CIEの昼光測定のガイドによる昼光測定データの品質管理の試み, 日本建築学会九州支部研究報告, 第32号, pp.37-40, 1991.3
- 3-13) 日本建築学会: 建築環境工学実験用教材 ‡T, 環境測定演習編, 1982
- 3-14) Kittler, R.: Some Qualities of Scattering Functions Defining Sky Radiance Distributions,
Solar Energy, 53(6), pp.511-516, 1994
- 3-15) Kittler, R.: Relative Scattering Indicatrix, Derivation from Regular Radiance, Luminance Distribution
Sky Scans, Lighting Res. & Technol., 25, pp.125-127, 1993
- 3-16) Ineichen, P. and Molineaux, B.: Characterisation and comparison of two Sky Scanners: PRC Krocchmann
& EKO Instruments, First draft, IEA Task XVII expert meeting, 1993.
- 3-17) 中山哲士, 石野久彌: 天空放射輝度分布を考慮した直達・拡散日射量の推定法に関する研究,
日本建築学会計画系論文集, 第557号, pp.33-39, 2002.7

4章

日射量を用いたCIE標準一般天空の 天空タイプ推定手法の開発

第4章

日射量を用いた CIE標準一般天空の 天空タイプ推定手法の開発

4.1 はじめに

前章では、熱負荷計算において現在一般的に一様であると仮定される天空放射輝度分布に、天空輝度分布のモデルであるCIE標準一般天空⁴⁻¹⁾の天空タイプを流用し、以下の結論を得た。

- 1)15の天空タイプと測定値との差のRMSE(Root Mean Square Error)によって、測定された天空放射輝度分布に一番近い天空タイプ(近似タイプ)を決定すれば、これより実際の天空放射輝度分布から得られる方位別鉛直面日射量により近い方位別鉛直面日射量が求められることから、天空輝度分布のモデルであるCIE標準一般天空の天空タイプを天空放射輝度分布に流用し、鉛直面日射量を求めることができる。
- 2)15の天空タイプを出現頻度の高い5つの天空タイプに集約して方位別鉛直面日射量を求めても、測定された天空放射輝度分布より求めた方位別鉛直面日射量に対する相対誤差に大きな差はないことから、鉛直面日射量を求めるにあたってはCIE標準一般天空の15ある天空タイプを5つの天空タイプに集約することが出来る。

このようにCIE標準一般天空の天空タイプを鉛直面日射量の計算に用いることの有効性を示したが、CIE標準一般天空の天空タイプを決定する指標は現在標準化されていない。前章のように15の天空タイプと天空放射輝度分布測定値との差のRMSEを用いて、天空タイプを決定するには天空放射輝度分布の測定値が必要であるが、天空放射輝度分布は通常は測定されていないため、CIE標準一般天空を鉛直面日射量の計算に用いるには、一般的に測定されている気象要素を用いて、天空タイプを推定する手法の開発が必要である。

天空タイプを推定する手法の研究は数少なく、法線面直射照度、全天空照度、全昼光照度の変動パワーを用いた安藤らの検討⁴⁻²⁾や、梅宮らによる雲量と日照率による天空輝度分布タイプの推定に関する研究⁴⁻³⁾がある。またLi⁴⁻⁴⁾らは雲量、日照時間、全天日射量と天空タイプの相関を検討している。

しかし推定に用いる指標との相関があまり高くないことや、天空要素それぞれの輝度値を推定の基準とすることで天空タイプ推定精度が悪いことから、いまだ天空タイプを決定する指標の標準化にはいたっていない。

本章では、熱負荷計算や、壁面日射量の計算に天空放射輝度分布を考慮するために、壁面におけ

る積算値である壁面日射量を基準として、一般的に測定されている気象要素からCIE標準一般天空の天空タイプを推定する手法の開発を目的として以下を行う。

- 1) 水平面全天日射量や、法線面直達日射量といった気象要素のどれが、天空放射輝度分布の測定値に最も近い天空タイプ(近似タイプ)の推定に関係するのかを分析し、この気象要素を用いた天空タイプ推定手法を検討する。
- 2) 推定した天空タイプを用いて東西南北四方位の鉛直面日射量を求め、天空放射輝度分布測定値から得られた方位別鉛直面日射量に対する相対誤差を分析し、壁面日射量を基準とした精度により推定手法の妥当性の検証する。

なお、本章で行う検討、分析に用いる天空放射輝度分布、水平面全天日射量、水平面天空日射量、法線面直達日射量の各測定データは、3章で用いたものと同じである。

4.2 天空タイプと日射量

4.2.1 Gradation, Indicatrix グループと日射量

Kittler, Perezらによれば、CIE標準一般天空を構成する輝度階調関数(Gradation function, 式4-1, 4-2)とは天頂を中心とする円状の輝度分布を、散乱関数(Indicatrix function, 式4-3, 4-4)とは太陽(位置)を中心とする円状の輝度分布を表す関数である。天空タイプと日射量との関係の分析には、それぞれの分布を表現する輝度階調、散乱関数の各グループと気象要素との関係进行分析することで、その関係をより明確に見出せると考える。通常よく測定されている気象要素から天空タイプを容易に推定する手法の開発を目的とするため、天空要素の高度に依存する輝度階調関数(Gradation function)では、より一般的に測定されている気象要素である水平面全天日射量 E_{eg} を、太陽高度、太陽方位といった太陽位置の関数である散乱関数(Indicatrix function)では、太陽位置に関係する法線面直達日射量 E_{es} をそれぞれ分析対象とする。

$$j(Z) = 1 + a \cdot \exp\left(\frac{b}{\cos Z}\right) \quad (4-1)$$

$$j\left(\frac{p}{2}\right) = 1 \quad (4-2)$$

$$f(c) = 1 + c \cdot \left[\exp(dc) - \exp\left(d\frac{p}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2 c \quad (4-3)$$

$$f(Z_s) = 1 + c \cdot \left[\exp(dZ_s) - \exp\left(d\frac{p}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2 Z_s \quad (4-4)$$

ここで、

$$c = \arccos(\cos Z_s \cdot \cos Z + \sin Z_s \cdot \sin Z \cdot \cos|\mathbf{a} - \mathbf{a}_s|) \quad (4-5)$$

図4.1に、測定された天空放射輝度分布と15の天空タイプとのRMSEにより決定した近似タイプの Gradation I ~ VIグループと、同時刻の水平面全天日射量 E_{eg} [W/m²] (スカイキャナ測定開始時刻の瞬時値) との関係を示す。図4.2には Indicatrix 1 ~ 6グループと法線面直達日射量 E_{es} [W/m²] (E_{eg} と同様) の関係を示す。

図4.1から、Gradationには、グループの番号が大きくなるほど水平面全天日射量 E_{eg} が大きくなり、かつ E_{eg} の分散が減る傾向が見られる。グループI, II, グループIII, IV, グループV, VIそれぞれの E_{eg} のとる範囲は、グループで明確に分離されない。また図4.2から Indicatrix も、Gradationと同様にグループの番号が大きくなるほど E_{es} は大きくなる傾向があるが、グループ4では、観測される E_{es} の分散が特に大きい。

以上のように、Gradation, Indicatrixともにグループの番号が大きくなるほど日射量は大きくなるが、その分散が大きかったり、日射量の範囲が、他のグループの日射量の範囲と明確に分離されないグループが見られるため、図4.1, 4.2のような散布図では近似タイプと日射量の関係を明らかにすることは困難である。そこで日射量と Gradation, Indicatrix の各グループの関係をより明確に把

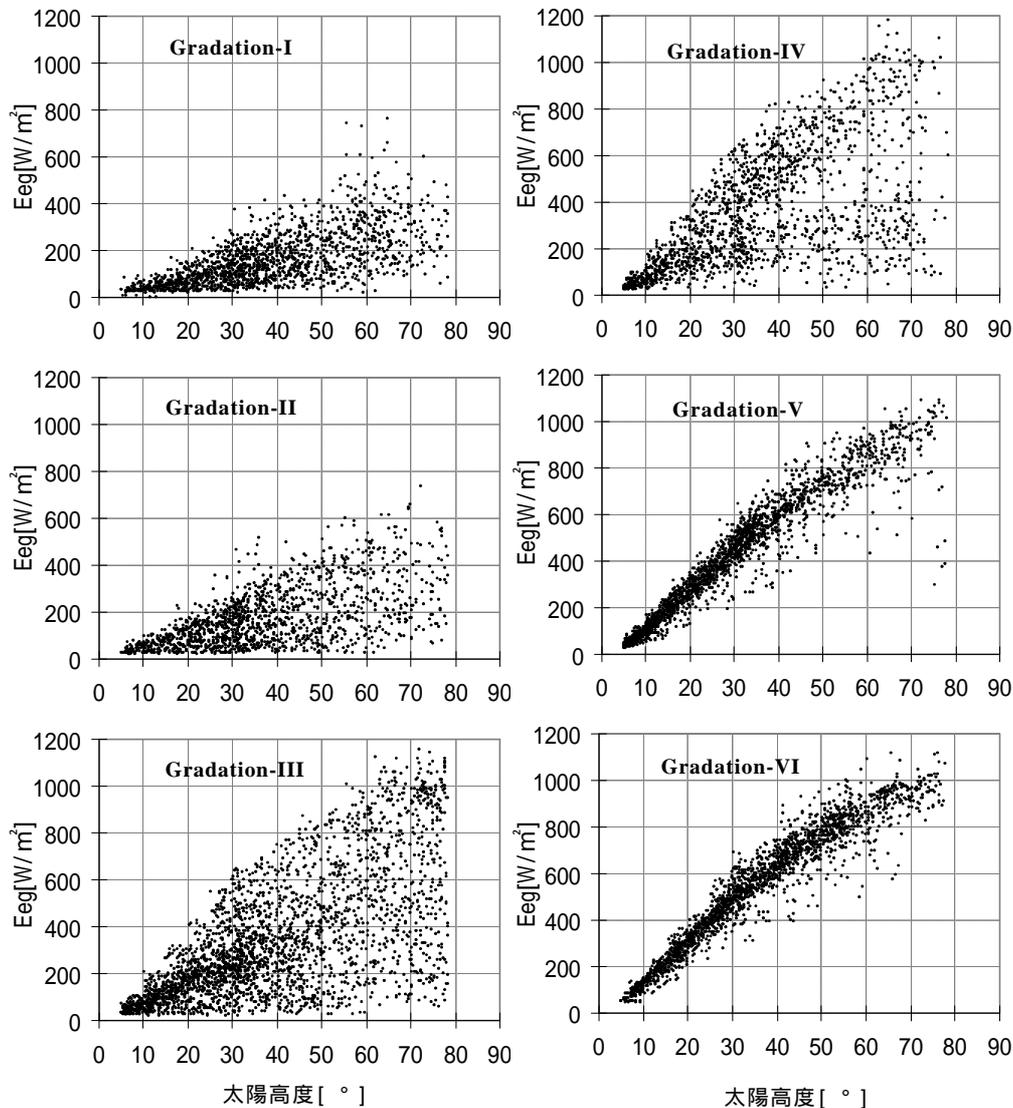


図4.1 輝度階調関数と日射量測定値の関係

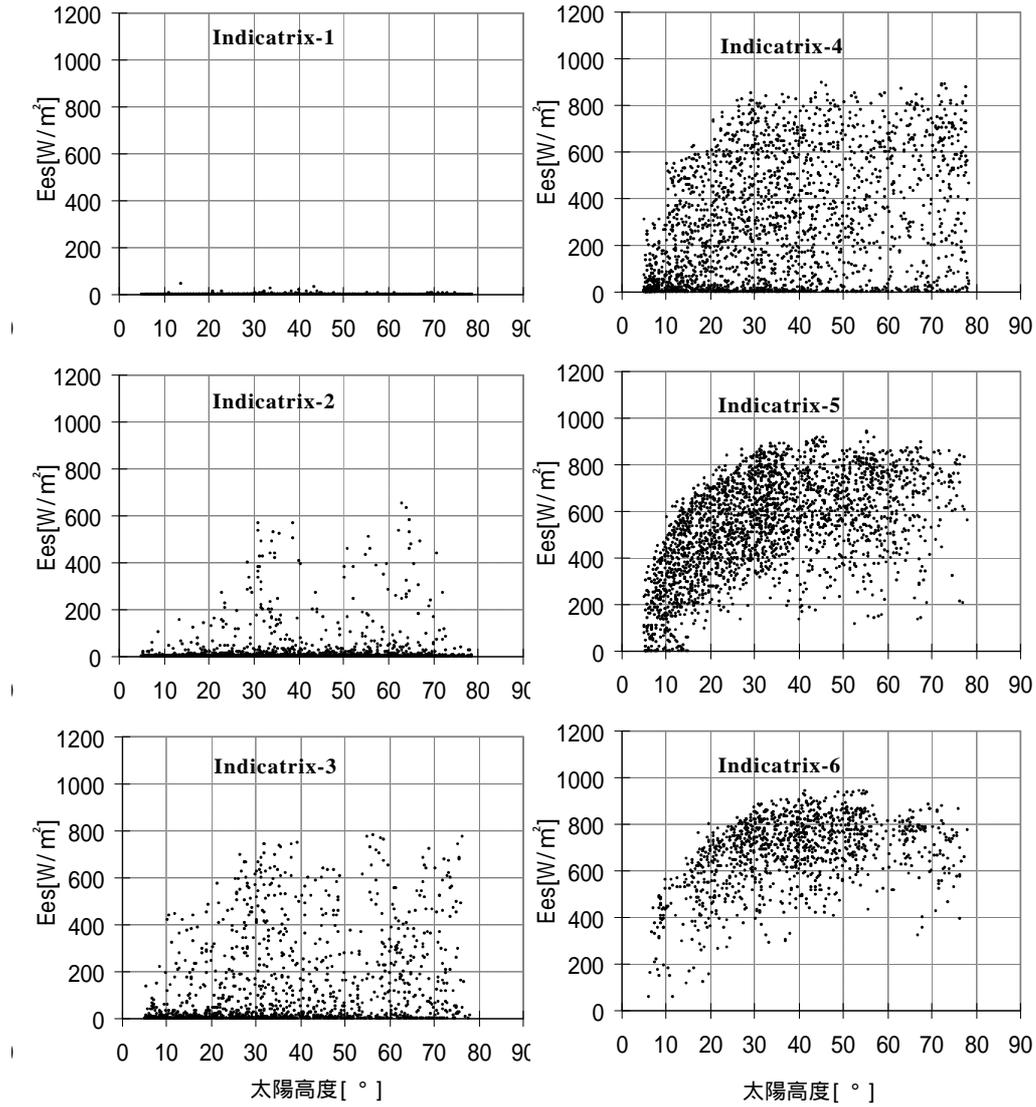


図 4.2 散乱関数と日射量測定値の関係

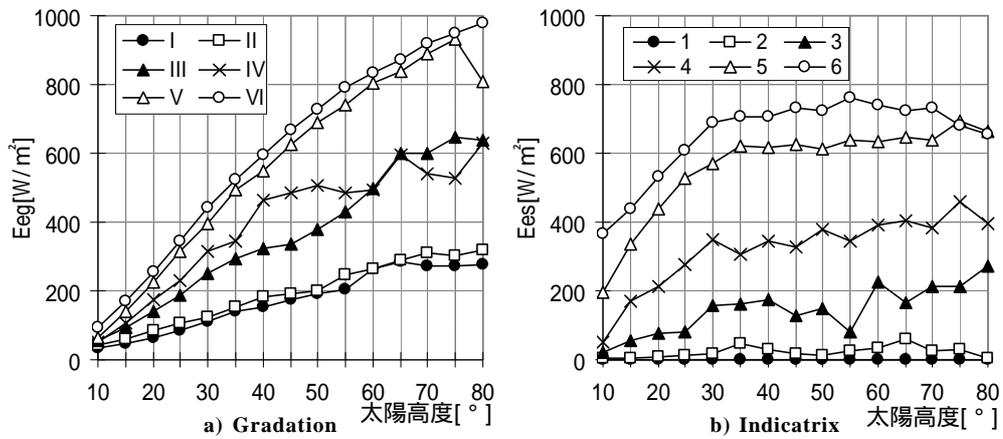


図 4.3 日射量測定値の太陽高度 5° 毎の平均値

握するために、Gradation, Indicatrixの各グループに対応する日射量の平均値を太陽高度幅 5° ごとに求め、その平均値とGradation, Indicatrixの各グループの関係を分析する。図4.3に示すように、Gradation, Indicatrixともに同じ高度に対し、グループの番号が大きくなるほど日射量の平均値は大きくなる。

4.2.2 日射量の分析

天空放射輝度分布は毎正時から15分間隔で、水平面全天日射量 E_{eg} 、法線面直達日射量 E_{es} は同じく1分間隔で測定を行っている。スカイキャナによる天空放射輝度分布の測定にはおよそ2分40秒を要するので、この間に日射量の測定は3回行われる。天空タイプをより精度良く推定する日射量を選定するためには、この3回の測定で得られる日射量測定値のうちから、その時刻の近似タイプと相関が最も高いものがどれであるかを把握する必要がある。また、水平面全天日射量 E_{eg} 、法線面直達日射量 E_{es} は、例えば太陽を覆うような局所的な雲が存在するとその値は短時間のうちに変化することもあるが、天空放射輝度分布を考えた場合、局所的な雲の出現等が分布全体にもたらす変化は大きくないことも考えられる。このため天空放射輝度分布と日射量との関係を分析する際には、ある時刻の天空放射輝度分布を表す天空タイプと日射量との瞬間的な関係だけでなく、その時刻の前後で測定された日射量の影響も考慮して関係を分析する必要がある。

そこで、図4.4に示すように、スカイキャナ測定開始後0, 60, 120secを中心として、それぞれ前後420secの範囲で0, 180, 300, 420, 540, 660, 780, 900secと平均化時間を変えて、 E_{eg} 、 E_{es} の平均値をGradation, Indicatrix各グループごとに算出し、 E_{eg} 、 E_{es} 測定値に代えて分析用データ E_{eg}' 、 E_{es}' とする（つまり、各平均化時間ごとに E_{eg} 、 E_{es} 測定値と同数の E_{eg}' 、 E_{es}' を分析のために造成する）。天空タイプとの相関が最も高くなるものを明らかにするためにこの値の標準偏差を平均化時間ごとに求める。標準偏差が大きいほど、ある天空タイプに対応する日射量の値に散らばりがあり、天空タイプ(Gradation, Indicatrixの各グループ)と日射量との関係が小さい。以下に、標準偏差の算出方法を示す。

標準偏差の算出に際し、まず各平均化時間について、Gradation, Indicatrixの各グループの太陽

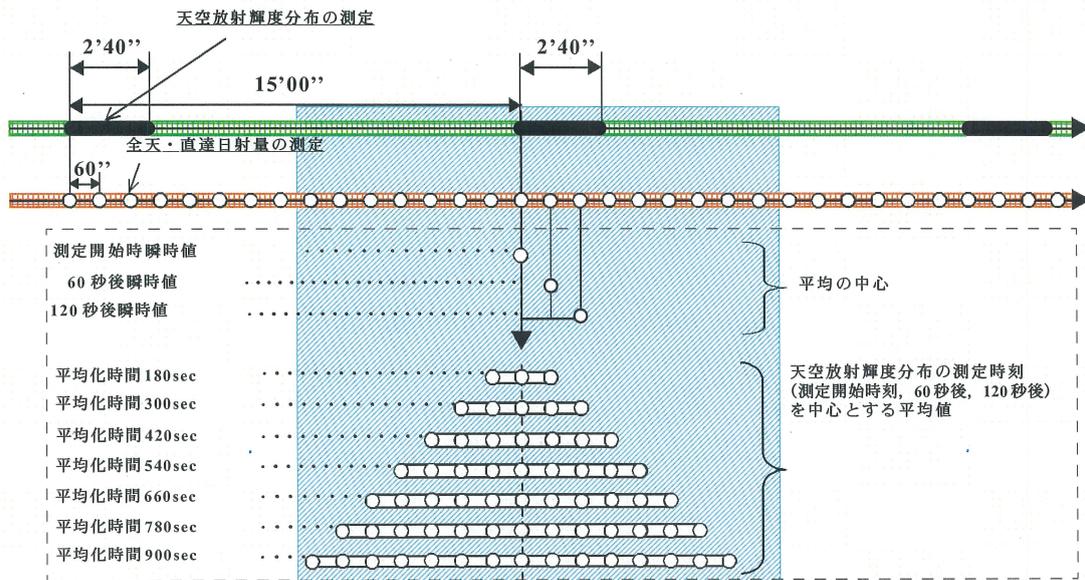


図4.4 日射の平均化時間

高度幅 5° ごとに E_{eg}' , E_{es}' の平均値 $\overline{E_{eg}_{gn,m,\bar{i},T}}$, $\overline{E_{es}_{in,m,\bar{i},T}}$ を求める .

$$\overline{E_{eg}} = \sum_{i=1}^N E_{eg}' / N \quad (4-6)$$

E_{es}' の場合も同様に算出する .

(以下 4-7 ~ 4-10, 4-17 式についても E_{eg}' の場合のみ示す .)

次に Gradation, Indicatrix の各グループの太陽高度幅 5° ごとに E_{eg}' , E_{es}' の標準偏差 $SDg_{gn,m,\bar{i},T}$, $SDi_{in,m,\bar{i},T}$ を求める .

$$SDg = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_{eg}' - \overline{E_{eg}})^2}{N-1}} \quad (4-7)$$

求めた標準偏差 $SDg_{gn,m,\bar{i},T}$, $SDi_{in,m,\bar{i},T}$ には, Gradation, Indicatrix の各グループごとに, E_{eg}' , E_{es}' の平均値, 天空タイプの出現頻度に違いがあるため, 太陽高度幅 5° ごとに, E_{eg}' , E_{es}' の平均値, Gradation, Indicatrix 各グループの出現頻度で重み付けを行い, これを重み付け標準偏差 $SDg'_{gn,\bar{i},T}$, $SDi'_{in,\bar{i},T}$ とする .

$$SDg' = \sum_{m=1}^{15} (SDg \times \frac{1}{E_{eg}'} \times \frac{N}{\sum_{m=1}^{15} N}) \quad (4-8)$$

求めた重み付け標準偏差 $SDg'_{gn,\bar{i},T}$, $SDi'_{in,\bar{i},T}$ の比較には, $\bar{i}=0[\text{sec}]$, $T=0[\text{sec}]$ (測定開始時刻の瞬時値) の重み付け標準偏差 $SDg'_{gn,0,0}$, $SDi'_{in,0,0}$ で基準化した基準化標準偏差 $\widetilde{SDg}_{gn,\bar{i},T}$, $\widetilde{SDi}_{in,\bar{i},T}$ を用いる .

$$\widetilde{SDg}_{gn,\bar{i},T} = \frac{SDg'_{gn,\bar{i},T}}{SDg'_{gn,0,0}} \quad (4-9)$$

図 4.5, 4.6 に Gradation, Indicatrix 各グループの E_{eg}' , E_{es}' の基準化標準偏差 $\widetilde{SDg}_{gn,\bar{i},T}$, $\widetilde{SDi}_{in,\bar{i},T}$ を示す . $\widetilde{SDg}_{gn,\bar{i},T}$, $\widetilde{SDi}_{in,\bar{i},T}$ が大きいほど, ある天空タイプに対応する日射量の値にちらばりがあり, 天空タイプ (Gradation, Indicatrix の各グループ) と日射量の値の関係が小さくなることを意味する .

図 4.5a) によると Gradation グループ I, II では, 平均化時間 T の違いによる E_{eg}' の基準化標準偏差 $\widetilde{SDg}_{gn,\bar{i},T}$ の変化はほとんど見られないが, グループ III では, 平均の中心 \bar{i} が 0, 60, 120sec それぞれにおいて, 平均化時間 T が長くなるにつれ $\widetilde{SDg}_{3,\bar{i},T}$ が小さくなっている . グループ V, VI では, $\bar{i}=0, 60, 120[\text{sec}]$ それぞれに対し $T=0[\text{sec}]$ で $\widetilde{SDg}_{gn,\bar{i},T}$ が一番大きく, $T=540 \sim 780[\text{sec}]$ で最小となる . グループ IV では, $\bar{i}=0, 60, 120[\text{sec}]$ それぞれで $T=0[\text{sec}]$ で $\widetilde{SDg}_{gn,\bar{i},T}$ が一番大きいのはグルー

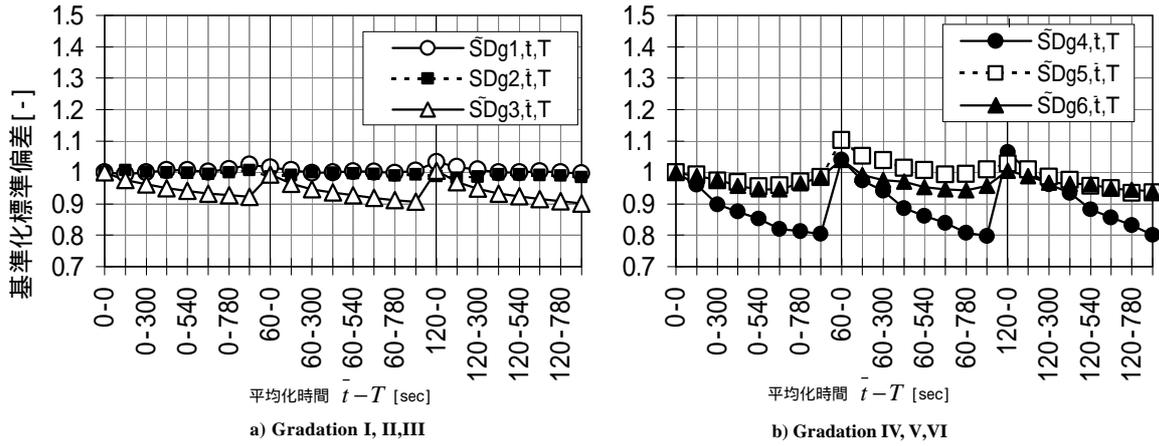


図 4.5 Gradation各グループの基準化標準偏差

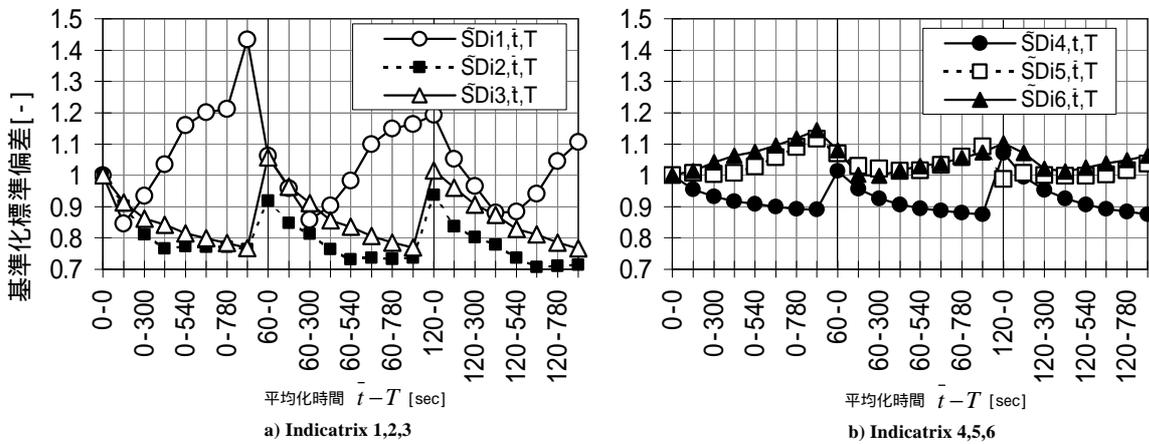


図4.6 Indicatrix各グループの基準化標準偏差

プV, VIと同様であるが, T が長くなるにつれ $\widetilde{SDg}_{4,\bar{t},T}$ は小さくなり, $T=420[\text{sec}]$ の場合に最小となる(図4.5b)。この $\widetilde{SDg}_{4,\bar{t},T}$ の減少は他の Gradation グループと比べて大きく, $T=900[\text{sec}]$ の場合に $\widetilde{SDg}_{4,\bar{t},T}$ はおよそ0.8となる。

図4.6a)の Indicatrix グループ1, 2, 3の場合, グループ2, 3では T が長くなるに従って E_{es} 'の基準化標準偏差 $\widetilde{SDi}_{in,\bar{t},T}$ は小さくなる傾向が見られるが, グループ1では T が長くなるに従って $\widetilde{SDi}_{1,\bar{t},T}$ が増加する傾向があり, 1.4を超えるものも見られる。Indicatrix グループ4~6では(図4.6b)), グループ4では T が長くなるに従って E_{es} 'の基準化標準偏差 $\widetilde{SDi}_{4,\bar{t},T}$ は小さくなる傾向があるが, グループ5,6では, 逆に T が長くなるに従って $\widetilde{SDi}_{in,\bar{t},T}$ が増加する傾向が見られる。

次に, グループごとに求めた $\widetilde{SDg}_{gn,\bar{t},T}$, $\widetilde{SDi}_{i,\bar{t},T}$ を Gradation, Indicatrixそれぞれで平均し, E_{eg} ' , E_{es} 'の基準化標準偏差 $\overline{SDg}_{\bar{t},T}$, $\overline{SDi}_{\bar{t},T}$ を求める。

$$\overline{SDg}_{\bar{t},T} = \sum_{gn=1}^6 \widetilde{SDg}_{gn,\bar{t},T} / 6 \tag{4-10}$$

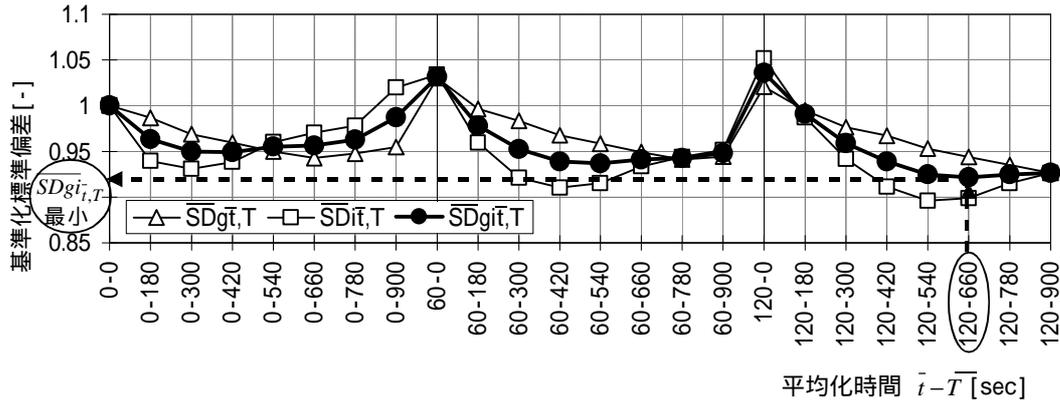


図4.7 標準化標準偏差の変化

さらに、日射量の平均化時間を Gradation 関数、Indicatrix 関数で統一するため、 $\overline{SDg_{i,T}}$ と $\overline{SDi_{i,T}}$ との平均とし、標準化標準偏差 $\overline{SDgi_{i,T}}$ を求める。

$$\overline{SDgi_{i,T}} = \left(\overline{SDg_{i,T}} + \overline{SDi_{i,T}} \right) / 2 \quad (4-11)$$

図4.7に示すように $\overline{SDg_{i,T}}$ では、 i にかかわらず、概ね T が長くなるに従い、 $\overline{SDg_{i,T}}$ の値が小さくなる傾向が見られる。一方、 $\overline{SDi_{i,T}}$ は、 $T=300 \sim 540[\text{sec}]$ までは、 T が長くなるに従い減少するが、さらに T が長くなると増加に転じる傾向が見られる。

$\overline{SDg_{i,T}}$ 、 $\overline{SDi_{i,T}}$ の平均である $\overline{SDgi_{i,T}}$ の変化を見ると、 $T=300 \sim 540[\text{sec}]$ では、 T が長くなるに従い減少するが、さらに T が長くなってもあまり変動は見られなくなる。 $\overline{SDgi_{i,T}}$ が最小となるのは、 $i=120[\text{sec}]$ 、 $T=660[\text{sec}]$ の場合である。以上より、本研究では、スカイキャナ測定開始後120secを中心とした前後300sec ($T=660[\text{sec}]$)の日射量を平均した値と天空タイプとの関係を分析することとする。

4.3 天空タイプの推定手法

4.3.1 近似タイプ決定のRMSE

前章では、測定された天空放射輝度分布に一番近い天空タイプをRMSE^{注4-1)}を規範として決定し、これを近似タイプと定義した。しかしRMSEが小さくその天空タイプに類似度の高い天空状態もあれば、RMSEが大きく類似度が低いものもある。図4.8に各近似タイプのRMSEの累積度数分布を示す。例えば、累積度数80%に達するRMSEが0.3(天空タイプ3)から、0.7(天空タイプ15)までである。前者は主に曇天の天空タイプ(天空タイプ3,1)、後者は晴天の天空タイプ(天空タイプ15,14)である。近似タイプを決定するRMSEの閾値を小さくするほど標準一般天空の天空タイプにより近くなり、日射量と Gradation 関数、Indicatrix 関数各グループの相関を分析することが有意となるが、その一方で絶対的な度数が低下し、分析に必要な十分な度数を確保できない天空タイプが出現する。その結果、度数の極めて少ない天空タイプでは、日射量と Gradation 関数、Indicatrix 関数各グループの相関を分析したところで信頼度が落ちる。そこで本研究では各天空タイプに対するRMSEの累積度数上位10%に入る観測値だけを用いて分析を行うこととする(図4.8

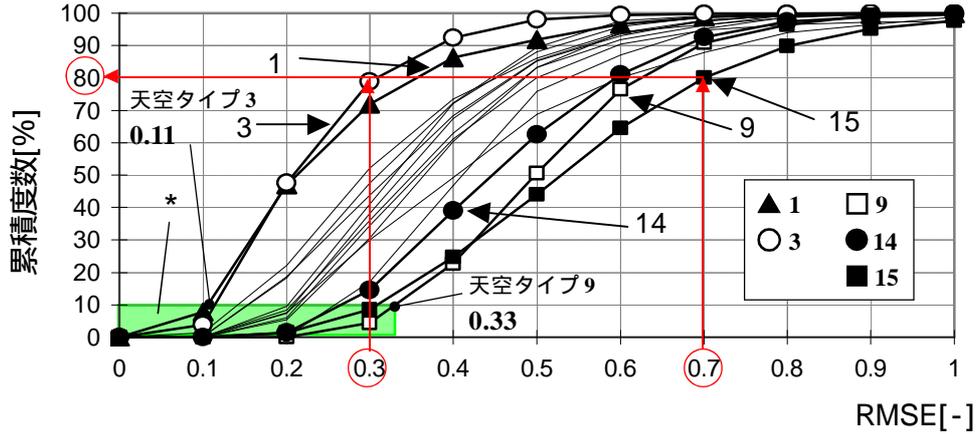


図4.8 近似タイプを決定したRMSEの分布

領域*)。この時、RMSEの最小となる天空タイプ3で0.11，最大となるのは天空タイプ9で0.33である。

4.3.2 境界曲線による天空タイプ推定

図4.3に示すように、Gradation関数、Indicatrix関数ともに同じ高度に対し、グループの番号が大きくなるほど日射量の平均値は大きくなる。各天空タイプに対するRMSEの累積度数上位10%に入る類似度のより高い近似タイプのGradation関数、Indicatrix関数グループと E_{eg}' 、 E_{es}' を用い、図4.3の場合と同様に、太陽高度幅 5° ごとに同一高度帯と定めて、 E_{eg}' 、 E_{es}' の平均値を求め(図4.9)たところ、一部の高度帯で平均値が逆転するところも見られるが、図4.3と同様に各高度帯でグループ番号が大きいものから順に並ぶことがわかった。そこで各グループ間に、以下の手順により境界を求めて、Gradation関数、Indicatrix関数の各グループを推定することとする。

- 1) Gradation関数、Indicatrix関数の各グループにおいて、近似タイプ決定の際のRMSEが上位10%の時刻の近似タイプ、日射量を分析に用い、その他の時刻のデータは除外する。
- 2) 太陽高度帯 5° ごとに、各グループの E_{eg}' 、 E_{es}' ($i=120[\text{sec}]$ 、 $T=660[\text{sec}]$ の平均値)の平均を求める。
- 3) 太陽高度帯毎に、隣あうグループの平均値の中間値 E_{egl} 、 E_{esl} を求める。
- 4) Gradation I, IIの太陽高度 70° の帯域のように平均値の逆転する場合は、3)で求める E_{egl} 、 E_{esl} は存在しないものとする。
- 5) 3)で求めた E_{egl} 、 E_{esl} を以下4-12～4-15式のように、太陽高度 h の3次及び2次の関数として回帰し、これをグループ推定の為の境界^{注4-2)}とする。これをそれぞれGradation境界曲線、Indicatrix境界曲線と称することとする。

i) Gradation 境界曲線 :

$$3 \text{ 次} : B_{g,3} = a_{g,1} \cdot h^3 + a_{g,2} \cdot h^2 + a_{g,3} \cdot h + b_g \quad (4-12)$$

$$2 \text{ 次} : B_{g,2} = a_{g,1} \cdot h^2 + a_{g,2} \cdot h + b_g \quad (4-13)$$

ii) Indicatrix 境界曲線 :

$$3 \text{ 次} : B_{i,3} = a_{i,1} \cdot h^3 + a_{i,2} \cdot h^2 + a_{i,3} \cdot h + b_i \quad (4-14)$$

$$2 \text{ 次} : B_{i,2} = a_{i,1} \cdot h^2 + a_{i,2} \cdot h + b_i \quad (4-15)$$

表 4.1 に Gradation 境界曲線の係数を, 表 4.2 に Indicatrix 境界曲線の係数を, 図 4.10, 図 4.11 に Gradation, Indicatrix それぞれ 3 次 2 次の境界曲線と各グループの出現領域を示す.

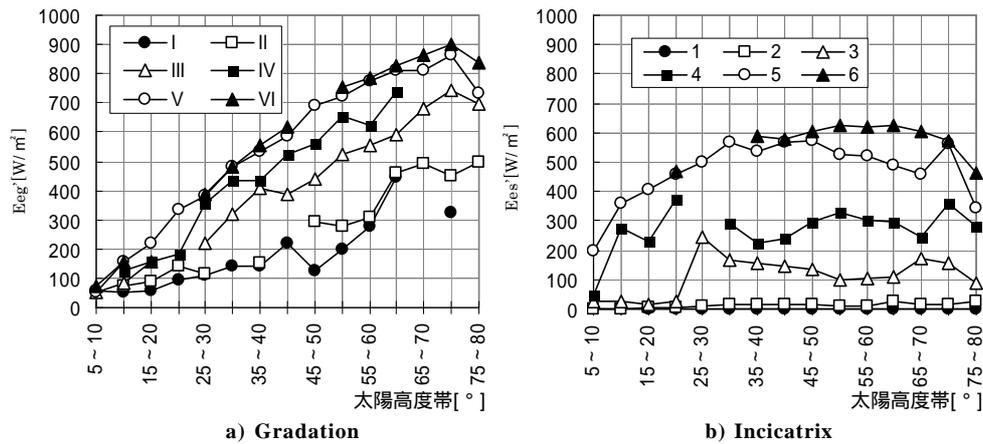


図 4.9 日射量の高度別平均値(15 タイプ)

表 4.1 境界曲線の係数(Gradation 15タイプ)

		GRADATION			
		$a_{g,1}$	$a_{g,2}$	$a_{g,3}$	b_g
3次	I-II	-0.0021	0.35	-10.84	170.93
	II-III	-0.0021	0.31	-4.87	99.05
	III-IV	0.0004	-0.11	17.62	-142.95
	IV-V	-0.0012	0.07	14.11	-93.63
	V-VI	-0.0028	0.24	9.64	-44.82
2次	I-II	0.0583	0.98	-	34.35
	II-III	0.0070	8.01	-	-51.42
	III-IV	-0.0574	15.67	-	-122.63
	IV-V	-0.0823	19.50	-	-150.78
	V-VI	-0.1391	24.08	-	-181.91

表 4.2 境界曲線の係数(Indicatrix 15タイプ)

		INDICATRIX			
		$a_{i,1}$	$a_{i,2}$	$a_{i,3}$	b_i
3次	1-2	0.0001	-0.02	0.82	-7.31
	2-3	0.0009	-0.16	9.09	-82.30
	3-4	0.0019	-0.32	17.05	-79.19
	4-5	0.0030	-0.54	29.20	-67.36
	5-6	-0.0021	0.16	1.82	355.83
2次	1-2	-0.0009	0.24	-	-1.36
	2-3	-0.0379	4.21	-	-32.40
	3-4	-0.0583	6.84	-	23.61
	4-5	-0.1287	13.30	-	92.61
	5-6	-0.1729	18.03	-	116.71

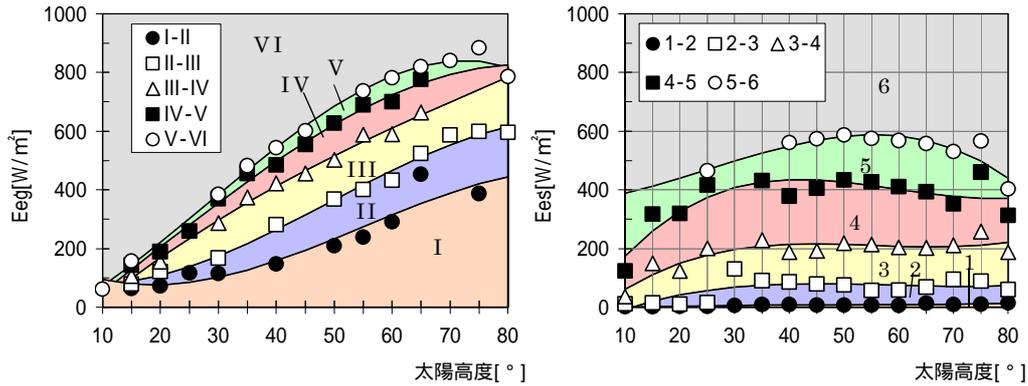


図 4.10 境界曲線と各グループの出現領域

図 4.11 境界曲線と各グループの出現領域

境界曲線の次数選択

以上のような3次, 2次の Gradation, Indicatix 境界曲線のモデルについて, それぞれ以下に示す AIC(Akaike's Information Criterion)⁴⁻⁵⁾ を求め, これが小さくなる次数のものを, グループ推定の為の境界曲線の最適モデルとして選択する.

$$AIC = N \log(Q/N) + 2(p+1) \tag{4-16}$$

$$Q = \sum (E_{egI} - B_{g,p})^2 \tag{4-17}$$

表 4.3, 4.4 に Gradation, Indicatix 境界曲線の AIC, 残差平方和, データ数を示す. AIC については Gradation, Indicatix の各 5 本の境界曲線についてそれぞれ求める.

AIC は, 2次あるいは3次のものの一方がすべての境界曲線について小さくならない. このため, Gradation, Indicatix 境界曲線について, 2次, 3次の AIC の平均を求める. これによれば Gradation, Indicatix 境界曲線ともに, 3次のモデルの AIC が小さくなる. 以上より境界曲線の次数は3次とする.

表 4.3 Gradation 境界曲線の AIC, 残差平方和, データ数

		2次			3次			選択すべきモデル
		AIC	残差平方和	データ数	AIC	残差平方和	データ数	
		Gradation	I-II	79.91	16211.50	10	81.08	
II-III	74.57		5607.53	11	72.06	3721.33	11	3次
III-IV	59.79		2167.51	10	61.71	2150.69	10	2次
IV-V	68.25		3155.65	11	69.72	3007.98	11	2次
V-VI	86.70		9997.76	12	77.83	4040.32	12	3次
average		73.84	7427.99		72.48	5567.95		3次

表 4.4 Indicatix 境界曲線の AIC, 残差平方和, データ数

		2次			3次			選択すべきモデル
		AIC	残差平方和	データ数	AIC	残差平方和	データ数	
		Indicatix	1-2	27.96	64.87	15	27.16	
2-3	103.01		9654.69	15	103.75	8877.57	15	2次
3-4	99.91		11466.46	14	97.72	8499.63	14	3次
4-5	113.87		31071.84	14	112.19	23887.08	14	3次
5-6	72.43		7674.86	10	73.45	6958.05	10	2次
average		83.44	11986.54		82.85	9655.23		3次

4.3.3 鉛直面日射量^{注4-3)}

境界曲線により推定したGradation Indicatixの各関数のグループから決定した天空タイプより、東西南北四方位の鉛直面日射量 $I_{i-15,sh}$ を求め、スカイキャナにより測定された天空放射輝度分布から求めた鉛直面日射量 $I_{m,sh}$ [W/m²] に対する相対誤差を評価することで、開発した天空タイプ推定手法の妥当性を検証する。

$I_{m,sh}$ に対する $I_{i-15,sh}$ 、一様天空の鉛直面日射量 $I_{u,sh}$ 、3章で求めた近似タイプの場合の鉛直面日射量 $I_{c,sh}$ それぞれの相対誤差^{注4-4)} $I_{i-15,re}$ 、 $I_{u,re}$ 、 $I_{c,re}$ の各月平均値を求め、比較を行う。

図4.12から、 $I_{i-15,sh}$ 、 $I_{c,sh}$ は全方位について一様天空の場合と比べ精度良く鉛直面日射量を求めることができていることがわかる。

南面では、 $I_{i-15,re}$ は一年を通し概ね ± 5% 未満で精度は良い、また、一般に壁面日射量計算の際に仮定される一様天空の $I_{u,re}$ は冬季に -12.1%、夏季に +19.5% となり誤差が大きい。

西面では、 $I_{i-15,re}$ は2月に9.0%を超えるが、他の月では概ね +5% 未満で精度は良い。また年間の変動は最大で8%程度である。一方、 $I_{u,re}$ は一年を通して10.0%を超え、最小でも12.5% (12月)、最大で27.9% (8月)である。

北面では、 $I_{i-15,re}$ は2月、11月、12月に10.0%を超えるなど冬季にやや大きいが、その他の月では概ね +5% 程度であり、精度よく鉛直面日射量を求められている。また $I_{u,re}$ は一年を通して20.0%を超え、最小でも21.3% (7月)、最大で38.2% (2月)となり、 $I_{i-15,re}$ と比べ格段に大きい。

東面では、 $I_{i-15,re}$ は、冬季に (2月6.8%) やや大きくなるものの、一年を通し概ね ± 5% 以下と

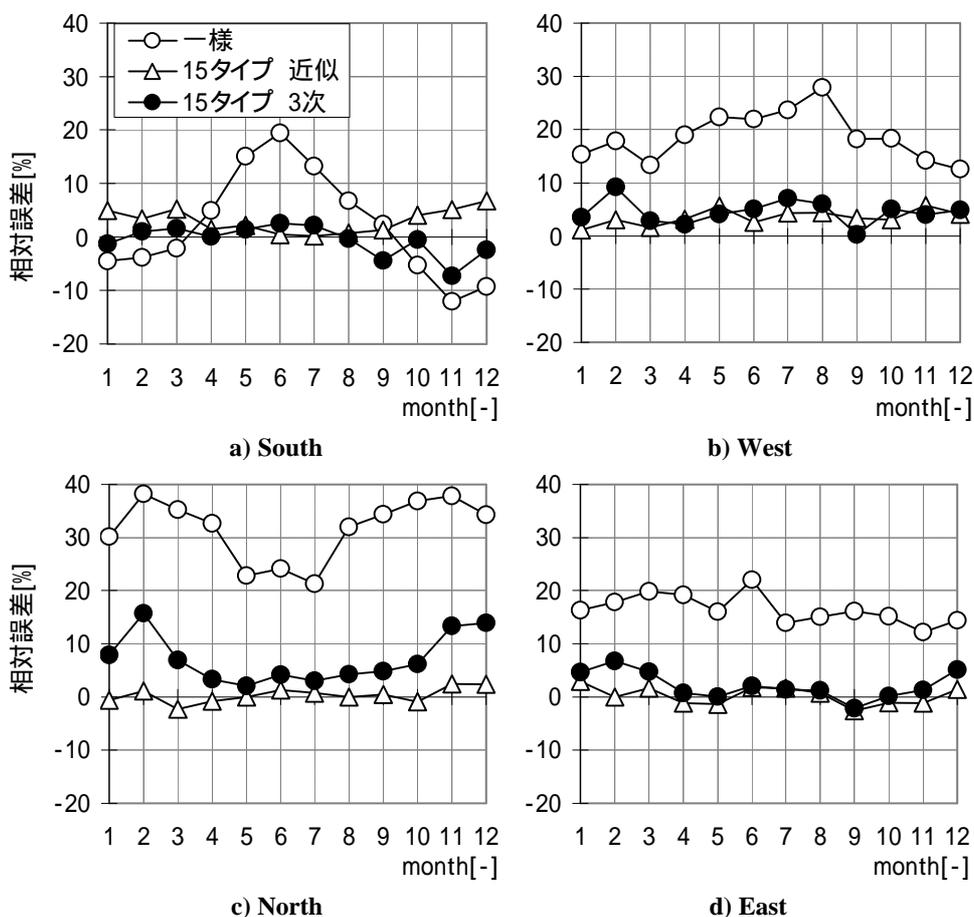


図4.12 鉛直面日射量相対誤差の月平均

小さい $I_{c,re}$ と比べても冬季にやや大きくなる以外はほぼ同程度の値を示しており、精度よく鉛直面日射量を求められている。これに比べ $I_{u,re}$ は一年を通し概ね +15% 以上と大きい。

以上のように、相対誤差 $I_{i-15,re}$ は北面、西面で冬季にやや大きいだが、概ね $\pm 5\%$ 未満であり、精度はよい。3章で求めた $I_{c,re}$ と比較しても遜色の無いモデルである。一方、現在一般的に用いられている一様天空の場合と比べると相対誤差は十分小さい。

4.4 天空タイプ5タイプの推定

4.4.1 境界曲線による天空タイプ推定

3章で示したように、近似する天空タイプを15から出現頻度の低い順に減少させてゆくと、鉛直面日射量のRMSEは天空タイプの数が5以上では大きな変化は無いが、4以下になると南、西面ではそれまでより約 $10[W/m^2]$ 大きくなり、東面ではRMSEの季節差が2.3倍になるなど急に誤差が大きくなる傾向が見られた。CIE標準一般天空の天空タイプは15タイプに規定されているが、天空タイプの数を15から減らすことができれば、より少ない天空タイプを推定すればよいことになり、推定が容易になると考える。そこで本節では、3章に基づき天空タイプを5つに集約した場合に天空タイプ推定手法を適用する。集約した5つの天空タイプは1, 8, 13, 14, 15である。天空タイプ1の輝度階調関数、散乱関数グループの組み合わせはIと1であり、天空タイプ8, 13, 14, 15の組み合わせはそれぞれIIIと4, Vと5, VIと5, VIと6である。これより、集約した5つの天空タイプを推定するには、輝度階調関数(Gradation)グループではI, III, V, VIを、散乱関数(Indicatrix)グループでは1, 4, 5, 6をそれぞれ水平面全天日射量 E_{eg} 、法線面直達日射量 E_{es} から推定すればよいことになる。このためGradationグループではI-III, III-V, Indicatrixグループでは1-4の境界曲線を新たに求める。

図4.13に境界曲線と各グループの出現領域を示す。この時の境界曲線は以下の様になる。境界曲線の係数の表中網掛け太文字のものが新たに求め Gradation, Indicatrix 境界曲線の係数である。

i) Gradation 境界曲線 :

$$3次: B_{g,3} = a_{g,1} \cdot h^3 + a_{g,2} \cdot h^2 + a_{g,3} \cdot h + b_g \quad (4-18)$$

ここで、

	$a_{g,1}$	$a_{g,2}$	$a_{g,3}$	b_g
I-III	-0.0003	0.06	4.62	-9.51
III-V	-0.0025	0.26	4.68	6.88
V-VI	-0.0028	0.24	9.64	-44.82

ii) Indicatrix 境界曲線 :

$$3次: B_{i,3} = a_{i,1} \cdot h^3 + a_{i,2} \cdot h^2 + a_{i,3} \cdot h + b_i \quad (4-19)$$

ここで、

	$a_{i,1}$	$a_{i,2}$	$a_{i,3}$	b_i
1-4	0.0019	-0.29	13.41	-45.23
4-5	0.0030	-0.54	29.20	-67.36
5-6	-0.0021	0.16	1.82	355.83

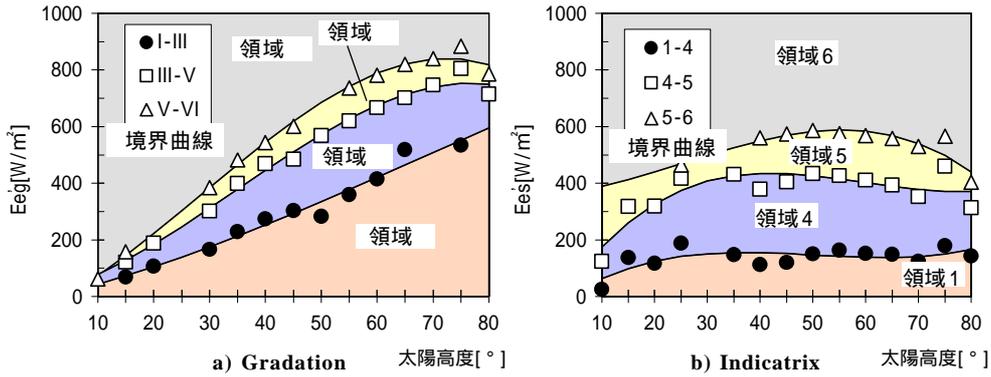


図4.13 天空タイプの境界曲線と出現領域(5タイプ)

4.4.2 鉛直面日射量

境界曲線により推定した天空タイプを用いて鉛直面日射量 $I_{i-5,sh}$ を求め、 $I_{m,sh}$ に対する相対誤差 $I_{i-5,re}$ の各月平均値を求め、精度の検証を行う。図4.14に測定値より求めた鉛直面日射量 $I_{m,sh}$ に対する、本手法で求めた鉛直面日射量 $I_{i-5,sh}$ 、一様天空の鉛直面日射量 $I_{u,sh}$ の相対誤差 $I_{i-5,re}$ 、 $I_{u,re}$ の各月平均値^{注4-5)}を示す。

南面では、 $I_{i-5,re}$ は3月から8月は-5%以下であり、精度はよいが、冬季には $I_{u,re}$ と同程度となり、11月、12月には15%程度と精度が悪くなる。

西面では、 $I_{i-5,re}$ は、9月に-5.8%となり他の月と比べやや大きくなるものの、それ以外の月は±

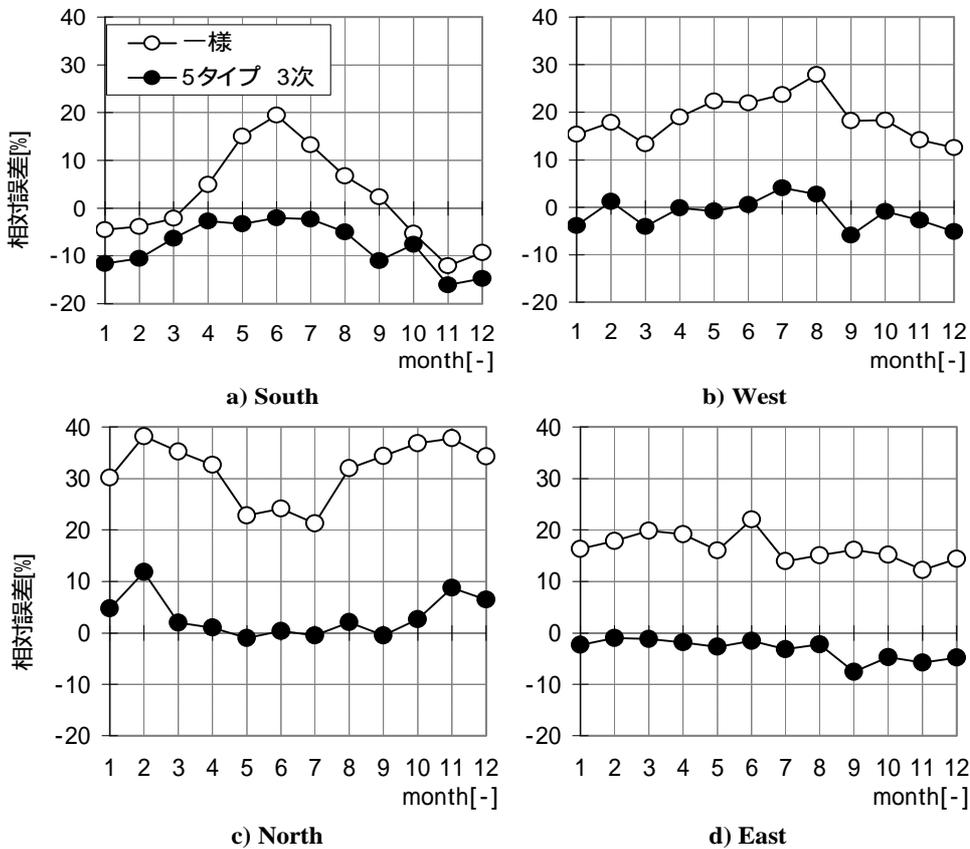


図4.14 鉛直面日射量相対誤差の月平均^{注4-5)}

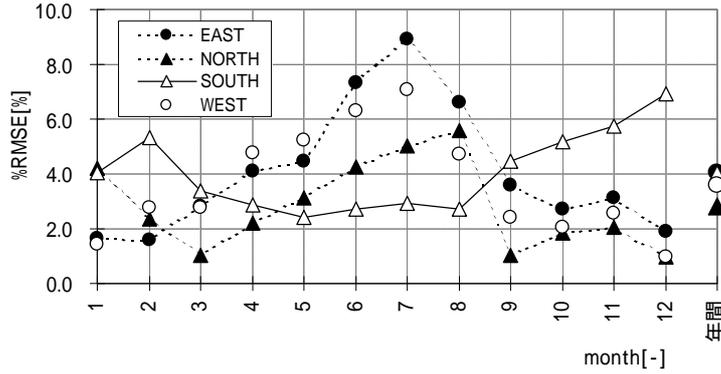


図4.15 鉛直面日射量の%RMSEの差

5%未満であり、精度よく鉛直面日射量を求められている。

北面では、 $I_{i-5, re}$ は、2月に10.0%を超えるものの、その他の月では精度よく、一年を通して20.0%を超える $I_{u, re}$ と比べても格段に小さく、大きな年間変動も見られない。

東面では、 $I_{i-5, re}$ は、一年を通し±5%以下と小さく、精度よく鉛直面日射量を求められている。

また、15タイプ、5タイプの天空タイプを推定し鉛直面日射量を求めた場合のそれぞれについて各方位各月の鉛直面日射量の%RMSEを求め、この差%RMSEより、15タイプの場合からの精度低下を検証する。

$$\%RMSE_5 = 100 \times \frac{\sqrt{\sum (I_{i-5, sh} - I_{m, sh})^2 / k}}{\sum I_{m, sh} / k} \quad (4-20)$$

$$\%RMSE_{15} = 100 \times \frac{\sqrt{\sum (I_{i-15, sh} - I_{m, sh})^2 / k}}{\sum I_{m, sh} / k} \quad (4-21)$$

$$\Delta \%RMSE = \%RMSE_5 - \%RMSE_{15} \quad (4-22)$$

ここで、

k : 各方位各月の鉛直面日射量計算値の個数[-]

図4.15に各方位各月の%RMSEを示す。15タイプの場合と比べ5タイプの場合には年間平均で北面2.8% 南面4.1% 東面3.6% 西面4.1%の精度低下が見られる。月平均では東面・西面夏季、南面冬季に%RMSEが5%を超えることもあるが、最大でも8.9%（東面7月）であり、著しく大きくなることはない判断した。これからも集約した5つの天空タイプを用いて壁面日射量を計算することの妥当性を示すことができたと考える。^{注4-6)}

4.5 まとめ

CIE標準一般天空を利用して、時々刻々の熱環境シミュレーションを行うには、各時刻の天空タイプを決定する必要があるが、天空タイプを決定する指標は現在標準化されていない。そこで、散乱関数(Indicatrix function)のグループと法線面直達日射量 E_{es} 、輝度階調関数(Gradation function)

のグループと水平面全天日射量 E_{eg} の関係を分析し、Gradation、Indicatrix のグループを区分する境界曲線を求め、これを用いて天空タイプを推定する手法を開発した。

1) 天空タイプ推定手法

境界曲線を用いた天空タイプ推定手法を開発した。この手法の妥当性を検証するために、推定した天空タイプを用いて求めた鉛直面日射量に対する相対誤差を分析した。提案した天空タイプ推定手法を用いた場合の鉛直面日射量の相対誤差月平均 $I_{i-15, re}$ は、北面、東面で冬季にやや大きくなる傾向が見られたものの、概ね $\pm 5\%$ 未満であり精度よく鉛直面日射量が求められている。従来と同様天空の場合と比べてもその値は十分小さい。また前章で求めた近似タイプの相対誤差 $I_{c, re}$ と比較しても著しく大きくなることはなかった。これより提案する天空タイプ推定手法の妥当性を示すことができた。

2) 集約した天空タイプの推定

天空タイプ推定手法を、集約した1, 8, 13, 14, 15の5つ天空タイプの場合に適用することが可能か検証を行った。15タイプ、5タイプ場合のそれぞれについて各方位各月の鉛直面日射量の%RMSEを求め、この差%RMSEより、15タイプの場合からの精度低下を分析したところ、東面・西面夏季、南面冬季に%RMSEは5%を超えることもあるが、最大でも8.9%（東面7月）であり、著しく大きくなることはない判断した。これより15の時と同様集約した天空タイプの推定において本章で提案する天空タイプの推定手法を利用すれば精度よく鉛直面日射量が求められることを示した。

以上、日射量を用いて、Gradation、Indicatrix のグループを区分する境界曲線を求め、これから天空タイプを推定する手法を開発した。この手法により、天空放射輝度分布の測定がされていない地点においても、天空放射輝度分布を考慮した熱シミュレーションが可能となる。

注記

注4-1) 近似タイプのRMSEは3章の3-1式を用いて計算した。

注4-2) 3次の境界曲線を求めた時、低高度帯(10°)で曲線が交差するものが見られたが、交差領域のグループ判定はグループ番号の小さいものを優先した。

注4-3) スカイスキャナによる天空放射輝度分布測定値、一様天空、天空タイプを用いた鉛直面日射量の算出方法については、3章を参照。

注4-4) スカイスキャナ測定値から求めた鉛直面日射量に対する相対誤差は以下の式を用いて算出した。

$$I_{c,re} = \frac{(I_{c,sh} - I_{m,sh})}{I_{m,sh}} \times 100 \quad (4-23)$$

$I_{u,sh}$ 、 $I_{i-15,sh}$ 、 $I_{i-5,sh}$ の相対誤差については $I_{c,sh}$ に代えて $I_{u,sh}$ 、 $I_{i-15,sh}$ 、 $I_{i-5,sh}$ を用いる。相対誤差は $I_{u,re}$ 、 $I_{i-15,re}$ 、 $I_{i-5,re}$ となる。

注4-5) 鉛直面日射量の相対誤差の月平均値が正または負に統一されるならば、天空タイプの推定において、何らかの補正を行うことも考えられるが、相対誤差の月平均値は近似5タイプ、推定5、15タイプで方位により正負混在する。このため補正等はするべきではないと考える。

注4-6) 鉛直面日射量の%RMSEの差(図4.15)4%(年間)は精度のよいものとする。また、相対誤差の月平均で見ても、15タイプ推定の場合と比べ誤差の変化は小さい(図4.12, 図4.14)。また、15タイプ、5タイプに近似した場合それぞれの鉛直面日射量のRMSEは10%~25%程度(図3.8 南面)と、近似する天空タイプが増えても改善されない。これから、鉛直面日射量の計算においては、日射量からの天空タイプ推定では5タイプが限界であり、5タイプの推定が精度良くできるならば、15タイプを推定する場合と比べても、RMSEに大きな差が現れないものとする。

記号表

c	: 太陽と天球上任意点の角距離 [rad]
Z	: 天球上任意点の天頂角 [rad]
Z_s	: 天頂からの太陽高度 [rad]
a, b	: 輝度階調関数のパラメータ [-]
c, d, e	: 散乱関数のパラメータ [-]
a	: 天球上任意点の方位角 [rad]
a_s	: 太陽方位角 [rad]
h	: 太陽高度 [°]
$a_{g,1}, a_{g,2}, a_{g,3}, b_g$: Gradation 境界曲線の係数 [-]
$a_{i,1}, a_{i,2}, a_{i,3}, b_i$: Indicatrix 境界曲線の係数 [-]
$I_{m,sh}$: スカイスキャナ測定値から求めた鉛直面日射量 [W/m ²]
$I_{c,sh}$: 決定手法による天空タイプによる鉛直面日射量 [W/m ²]
$I_{u,sh}$: 一様天空による鉛直面日射量 [W/m ²]

- $I_{i-15,sh}$: 3 次の境界曲線で推定した 15 の天空タイプによる鉛直面日射量 [W/m^2]
 $I_{i-5,sh}$: 3 次の境界曲線で推定した 5 の天空タイプによる鉛直面日射量 [W/m^2]
 $I_{c,re}$: $I_{c,sh}$ の $I_{m,sh}$ に対する相対誤差 [%]
 $I_{u,re}$: $I_{u,sh}$ の $I_{m,sh}$ に対する相対誤差 [%]
 $I_{i-15,re}$: $I_{i-15,sh}$ の $I_{m,sh}$ に対する相対誤差 [%]
 $I_{i-5,re}$: $I_{i-5,sh}$ の $I_{m,sh}$ に対する相対誤差 [%]
 E_{eg} : 水平面全天日射量測定値 [W/m^2]
 E_{es} : 法線面直達日射量測定値 [W/m^2]
 E_{eg}' : 各平均化時間で平均した水平面全天日射量 [W/m^2]
 E_{es}' : 各平均化時間で平均した法線面直達日射量 [W/m^2]
 $\overline{E_{eg}}$: 太陽高度幅 5° ごとの E_{eg}' の平均値 [W/m^2]
 $\overline{E_{es}}$: 太陽高度幅 5° ごとの E_{es}' の平均値 [W/m^2]
 SDg : E_{eg} の標準偏差 [W/m^2]
 SDi : E_{es} の標準偏差 [W/m^2]
 SDg' : E_{eg}' の重み付き標準偏差 [W/m^2]
 SDi' : E_{es}' の重み付き標準偏差 [W/m^2]
 \widetilde{SDg} : E_{eg} の基準化標準偏差 [-]
 \widetilde{SDi} : E_{es} の基準化標準偏差 [-]
 \overline{SDg} : Gradation の基準化標準偏差 [-]
 \overline{SDi} : Indicatrix の基準化標準偏差 [-]
 \overline{SDgi} : 基準化標準偏差 [-]
 Q : 残差平方和 [-]
 E_{egI} : 水平面全天日射量の太陽高度帯毎の中間値 [W/m^2]
 E_{esI} : 法線面直達日射量の太陽高度帯毎の中間値 [W/m^2]
 $B_{g,p}$: 次数 p の Gradation 境界曲線による水平面全天日射量 [W/m^2]
 $B_{i,p}$: 次数 p の Indicatrix 境界曲線による法線面直達日射量 [W/m^2]
 p : モデル次数 [-]
 N : データ数 [-]
 k : 各方位各月の鉛直面日射量データ個数 [-]

添え字

- gn : Gradation グループの No.[-]($gn=1 \sim 6$)
 in : Indicatrix グループの No.[-]($in=1 \sim 6$)
 \bar{i} : 平均の中心時刻 [sec]($\bar{i}=0, 60, 120$)
 T : 平均化時間 [sec]
 ($T=0, 180, 300, 420, 540, 660, 780, 900$)
 m : $5 < h \leq 10$ ($m=1$) から $75 < h \leq 80$ ($m=15$) の太陽高度帯 No.[-]($m=1 \sim 15$)

本章に関する既発表論文

査読付き論文

- 1) MODELING OF SKY RADIATION CONSIDERING SKY RADIANCE DISTRIBUTION FOR THE CALCULATION OF THE HEATING/COOLING LOAD OF BUILDINGS : Hayato Hosobuchi, Harunori Yoshida, and Yoshiaki Uetani, 9th International Building Performance Simulation Association Conference, 2005.8, Montreal Canada
- 2) 日射量を用いたCIE標準一般天空の天空タイプ推定手法に関する研究:
細淵勇人, 吉田治典, 上谷芳昭, 日本建築学会環境系論文集, 第609号, pp.31-38, 2006.11

学術講演会発表

- 1) 日射量測定値によるCIE標準一般天空の天空タイプ決定手法の検討:
細淵勇人, 吉田治典, 上谷芳昭, 日本建築学会大会学術講演梗概集D-2, pp.59-60, 2004.8
- 2) 天空放射輝度分布を考慮した日射量モデルに関する研究: 細淵勇人, 吉田治典, 上谷芳昭, IBPSA-JAPAN 講演論文集(2005), pp.287-290, 2005.1

参考文献

- 4-1) CIE Standard: Spatial Distribution of Daylight-CIE Standard General Sky, CIE S011.1/E, 2003.
- 4-2) 安藤仁, 吉田治典, 上谷芳昭: 昼光照度の時系列解析による天空輝度分布の分類と推定に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1 分冊, pp.341-342, 2002
- 4-3) 梅宮典子, 飯沼清明, 他3名: 雲量と日照率による天空輝度分布タイプの推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1 分冊, pp.359-360, 2004
- 4-4) Danny H.W.Li, Chris C. S. Lau, Joseph C.Lam; Standard Skies Classification Using Common Climatic Parameters, Journal of Solar Energy Engineering, Vol126, pp.957-964, 2004
- 4-5) 情報量基準による統計解析入門, 鈴木義一郎, 講談社, 1995

5章

天空放射輝度分布が空調熱負荷に与える影響

第5章

天空放射輝度分布が 空調熱負荷に与える影響

5.1 はじめに

天空放射輝度分布を考慮した鉛直面日射量を求めるにあたり、晴天空から曇天空を15の天空タイプで表す Kittler, Perez ら⁵⁻¹⁾の相対天空輝度分布のモデルである CIE 標準一般天空⁵⁻²⁾を、天空放射輝度分布として流用することを提案し、前章までに以下の知見を得た。

- 1) 15の天空タイプと放射輝度分布測定値との差の RMSE によって、測定された天空放射輝度分布に一番近い天空タイプを選んで決めれば、これを用いて、実際の天空放射輝度分布から得られる方位別鉛直面日射量に近い、精度のよい日射量が求められる。
- 2) 15の天空タイプを出現頻度の高い5つの天空タイプに集約して、方位別鉛直面日射量を求めても、測定された天空放射輝度分布より求めた方位別鉛直面日射量の相対誤差に大きな違いはない。これより天空タイプを5つに集約することができる。
- 3) CIE 標準一般天空の天空タイプを規定する Gradation 関数のグループ、Indicatrix 関数のグループそれぞれは水平面全天日射量、法線面直達日射量と相関があることから、水平面全天日射量、法線面直達日射量を用いて天空タイプを推定する手法により、精度よく鉛直面日射量を求めることができる。

建物の熱負荷計算においては、外壁面、屋根面、ガラス面に入射する日射量を求める必要がある。現在この入射日射量を求める際に一様な天空日射を仮定するのが一般的である。しかし近年、天空日射に放射輝度分布を考慮して、入射日射量を推定するモデルが開発・提案されている。これらは斜面日射モデル (slope irradiance model) と呼ばれ、天空日射量を分布が一様な天空日射量と、太陽光球周辺の高輝度天空からの日射成分である準直達日射量に分ける Hay⁵⁻³⁾のモデルの他、Hayのモデルに、地平線付近からの天空日射量を加えた Reindl⁵⁻⁴⁾のモデルや、Reindlのモデルと同様に、一様な天空日射、準直達日射、地平線付近からの天空日射の3つの成分に分けて、天空状態を8種類に分類して天空日射量に占める各成分の割合を決める Perez^{5-5), 5-6)}のモデル等が挙げられる。このうち Perezのモデルは熱環境シミュレーションソフトウェア ESP-r に組み込まれている⁵⁻⁷⁾。赤坂らは、Perezのモデルと一様な天空のモデルを用い、斜面日射量の推定法の違いが年間空調熱負荷に与える影響を検討し、最大で20%程度の差が生じるという結果を示している⁵⁻⁸⁾。

建築の熱環境分野とは別に、照明分野では、昼光照明シミュレーションを目的として、天空輝度分布をモデル化する研究が行なわれてきた^{例えば5-9)~5-14)}。この分布モデルを天空放射輝度に流用することで、庇やブラインドのあるような建物の窓周りのより詳細な熱取得、ガラスの入射角特性の違いによる影響、あるいは周辺建物等の遮蔽物を考慮するなどの、より詳細なシミュレーションを

行なうことができると考える。しかし、建物の熱負荷計算や都市の熱環境シミュレーションに天空放射輝度分布を考慮した例や、熱負荷計算に天空放射輝度分布そのもののモデルを用いた例はない。そこで本章では、天空放射輝度分布モデルを熱負荷計算に用いて、一様天空の場合の熱負荷、測定した天空放射輝度分布の場合の熱負荷と比較し、熱負荷計算に天空放射輝度分布を考慮することの必要性を明らかにすることを目的として、以下の検討を行う。

- 1) スカイスキャナで測定した天空放射輝度分布データを用いた熱負荷 q_m 、天空日射が天空一様と仮定して求めた熱負荷 q_u をそれぞれ計算し、夏季、冬季について、最大熱負荷、期間熱負荷、及び特別負荷の %MBE, %RMSE^{注5-1)} を比較することで、天空放射輝度分布の有無による熱負荷へのインパクトを明らかにし、天空放射輝度分布を考慮する必要性を示す。
- 2) 4章で示した手法を用いて天空タイプを推定し、この天空放射輝度分布を用いて時々刻々の非定常熱負荷 q_k を計算する。これと q_m との比較を行ない、精度良く熱負荷が求められるかどうかを検討して、熱負荷計算に天空タイプ推定手法を用いることの有効性を検証する。

5.2 天空放射輝度分布測定値を用いた熱負荷計算

本節では、スカイスキャナにより測定した天空放射輝度分布データを用いて q_m を求め、 q_u と比較して、その差異を分析する。

熱負荷計算は、京都大学吉田研究室で開発した熱負荷計算プログラム ACSES に、天空放射輝度分布の測定値 $r_{m,i}$ を入力とし、任意の壁面に入射する日射の天空日射成分 $I_{sd,m}$ を求める機能を新たに付加して行った。

5.2.1 天空壁面日射量 $I_{sd,m}$ の計算

測定天空放射輝度分布、一様天空、推定天空タイプの天空放射輝度分布から、壁面日射の天空日射成分 I_{sd} を求め、それを用いて熱負荷計算を行う。 I_{sd} 、壁面に入射する直達日射成分 I_{ss} 、地面反射成分 I_{sr} の和が壁面入射全日射量 I_{sg} となる。

$$I_{sg} = I_{ss} + I_{sd} + I_{sr} \quad (5-1)$$

図5.1に、測定した天空放射輝度分布データを用いて壁面日射の天空日射成分を求める計算フローを示す。 $I_{sd,m}$ は、天空放射輝度分布測定データ $r_{m,i}$ とスカイスキャナの145天空要素それぞれの修正立体角 w_i (3章参照)、高度 h_i 、求める傾斜面に対する高度 b_i から、傾斜面合計値 $I'_{sh,m}$ 、水平面合計値 $E_{ed}'_m$ を求め、

$$I'_{sd,m} = \sum_i r_{m,i} \cdot w_i \sin b_i \quad (5-2)$$

$$E_{ed}'_m = \sum_{i=1}^{145} r_{m,i} \cdot w_i \sin h_i \text{ (水平面)} \quad (5-3)$$

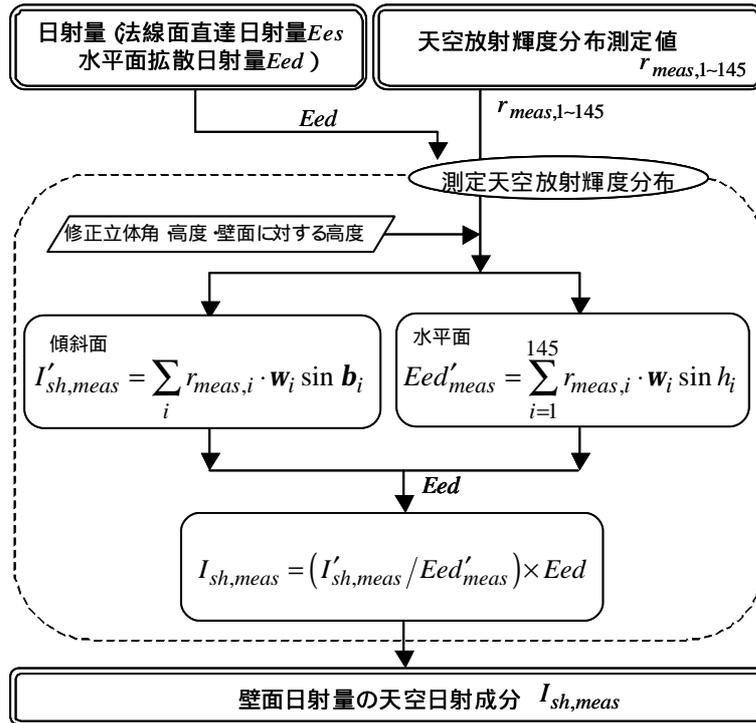


図5.1 壁面日射量計算フロー

以下のように $I'_{sh,m}$ を Eed'_m で除したものに、水平面天空日射量の測定値 Eed を乗じて求める。これは水平面天空日射量が同等の条件で、熱負荷の比較を行うためである。

$$I_{sd,m} = (I'_{sd,m} / Eed'_m) \times Eed \quad (5-4)$$

なお、一様天空の壁面日射の天空日射成分 $I_{sd,u}$ は、 Eed に壁面（傾斜角 q ）の中心から見た天空の形態係数 j を乗じて求める。

$$I_{sd,u} = j Eed \quad (5-5)$$

$$\text{ここで、} j = \frac{1 + \cos q}{2} \quad (5-6)$$

5.2.2 建物モデル・計算条件

熱負荷計算のモデルは、空気調和衛生工学会のオフィス標準問題⁵⁻¹⁵⁾をベースにして、図5.2、表5.1に示すような建物を想定する。5階の基準階に東西南北の4つのペリメータゾーン（ペリメータ幅6m）を設定し、熱負荷計算対象エリアとする。壁面日射量、透過日射量の違いによる影響を把握するため、この建物モデルに、重・軽構造、窓面積の大小のバリエーションを設け、4つの計算モデルを作った。4つの計算モデルのうちオフィス標準問題そのものを基準建物モデル（以下基準建物という）とする。表5.2、5.3、5.4に計算条件、計算モデル、建物モデルの部材設定を示す。

5.2.3 気象データ

熱負荷シミュレーションソフト ACSES により、天空放射輝度分布測定値を用いた熱負荷計算を行うには、天空放射輝度分布測定値及び、気温、絶対湿度、日射量（法線面直達、水平面天空）、長波放射、風向・風速の気象データが必要である。2章で示したように、天空放射輝度分布測定値、

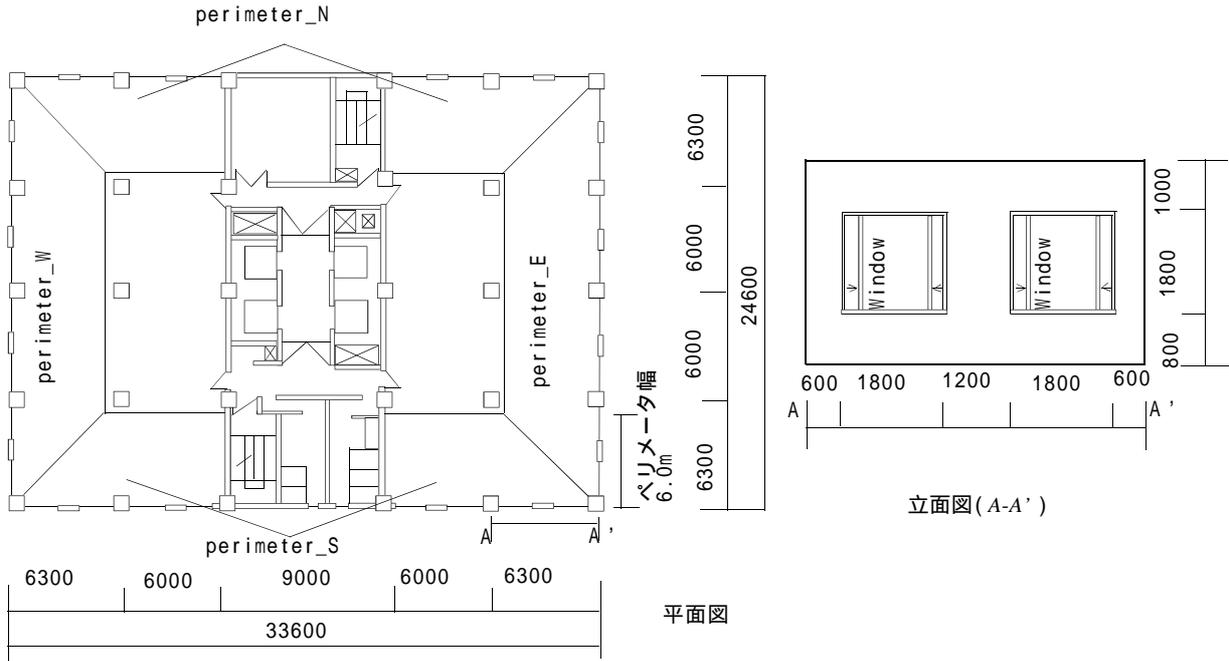


図5.2 建物モデル

表5.1 建物概要

建物モデル概要		
階数	8 階 (検討階5 階)	
想定所在地	東経35° 1' 北緯135° 47' (京都大学吉田キャンパス)	
床面積	826.56 m ²	
軒高	30.2 m	
階高	1F	4.4 m
	基準階	3.6 m
窓面積	3.24 m ² (1ユニット) 各方位 8ユニット これを基準値とする	

表5.2 計算条件

窓ガラス	8mm 吸熱	
ブラインド	中等色	
	基準日射量熱取得 (290 W/m ²)以上、及び不在時の使用率100%、その他の時の使用率0%	
遮蔽係数 (8mm吸熱ガラス・中等色ブラインド)	放射	0.20
	対流	0.34
照明発熱	20 W/m ² (埋込蛍光灯)	
人体	0.2 人/m ²	
室の温湿度設定	冬季	22 40 %
	夏季	26 50 %
空調時間 (日、祝日以外)	8 :00 ~ 18 :00 (土曜 13 :00)	
	8 :00 ~ 9 :00 外気カット	
器具発熱	11.6 W/m ²	

標準ガラス(3mm透明)に対する

熱取得率 g は以下の式で計算^{注5-2)}

$$g = 2.63899\cos b + 1.00185\cos^2 b - 19.9934\cos^3 b + 53.6021\cos b^4 - 79.2915\cos^5 b + 70.6736\cos^6 b - 35.3006\cos^7 b + 7.55907\cos^8 b \quad (5-7)$$

表5.3 計算モデル

	構造	窓面積	窓面積率
基準建物	重	基準値(=3.24 × 8 m ²)	0.29
建物-1		基準値 × 2	0.59
建物-2	軽	基準値(=3.24 × 8 m ²)	0.29
建物-3		基準値 × 2	0.59

表5.4 部材設定

	重構造			軽構造		
	壁材・床材	厚さ [mm]	熱伝導比抵抗 [m ² K/W]	壁材・床材	厚さ [mm]	熱伝導比抵抗 [m ² K/W]
外壁	石膏ボード	12	4.70	石膏ボード	12	4.70
	密閉空気層**	35	0.14	密閉空気層**	20	0.14
	発泡ポリスチレン	25	18.23	ガラス綿	50	22.79
	普通コンクリート	150	0.61	ステンレス	2	0.04
	モルタル タイル	20 8	0.92 0.78			
外壁 (天井内)	発泡ポリスチレン	25	18.23	石膏ボード	12	4.70
	普通コンクリート	150	0.61	密閉空気層**	20	0.14
	モルタル	20	0.92	ガラス綿	50	22.79
	タイル	8	0.78	ステンレス	2	0.04
床(天井)	アスファルトタイル	3	3.10	ゴムタイル	5	2.49
	普通コンクリート	150	0.61	軽量コンクリート	120	1.91
	半密閉空気層**	826	0.07	半密閉空気層**	863	0.07
	石膏ボード	9	4.70	石綿成形板	12	16.34
	石綿成形板	12	16.34			
コア側 内壁	モルタル	20	0.92	モルタル	20	0.92
	ガラス綿	25	22.79	ガラス綿	25	22.79
	普通コンクリート	120	0.61	普通コンクリート	120	0.61
	モルタル	20	0.92	モルタル	20	0.92
間仕切	合板	6	7.74	合板	6	7.74
	半密閉空気層**	70	0.07	半密閉空気層**	70	0.07
	合板	6	7.74	合板	6	7.74

** m² K/W

日射量については、2001年に京都大学屋上で測定されたデータ、気温、絶対湿度、長波放射、風向・風速については、同年の京都地方気象台の地上気象観測1分値データを用いて、計算用気象データ（1時間サンプル）を以下の手順で作成する。

- 1) 2001年夏季・冬季に、京都大学屋上で測定した日射量（法線面直達、水平面天空）、天空放射輝度分布の時系列データについて、1日のうち（日射量：1分サンプル、天空放射輝度分布：15分サンプル）に1回も欠測が無い日を取り出す^{注5-3)}。
- 2) 取り出した日のデータについて、日射のCIE品質テスト⁵⁻¹⁶⁾（10分単位）を行ない、1時間の品質テスト6回のうち、1回もクリアしない時刻のある日のデータは除外する。これと同日の天空放射輝度分布データも除外する。
- 3) 除外されない日の直達・天空日射量データの1時間平均値を求める。このデータと同日同時刻の天空放射輝度分布データ、同日の地上気象観測1分値データから求めた気温、湿度、長波長放射、風向・風速の1時間平均値とを組み合わせ、一日のデータとする。
- 4) 夏季、冬季それぞれ40日分（助走10日）のデータを抽出し、並べる。このデータは日が連続していない場合があるため、日が切り替わる時刻のデータが滑らかになるよう補正し、これを計算用気象データとする^{注5-4)}。

天空放射輝度分布データについては、スカイスキャナ第一高度帯の天空要素、太陽近傍と考えられる天空要素については、15の近似タイプを用いて補正を行なう。

5.2.4 壁面日射量

q_m, q_u の相違は壁面に入射する日射量による。方位別日射量測定値が得られていないため、測定した天空放射輝度分布から求めた壁面日射量を精解値として、一様天空の場合の壁面日射量にどのような傾向があるか検討する。図5.3, 5.4に夏季の壁面全天日射量、壁面天空日射量の比較、図5.5, 5.6に冬季の壁面全天日射量、壁面天空日射量の比較、表5.5に壁面全天日射量、壁面天空日射量の近似直線の傾き、 R^2 値を示す。

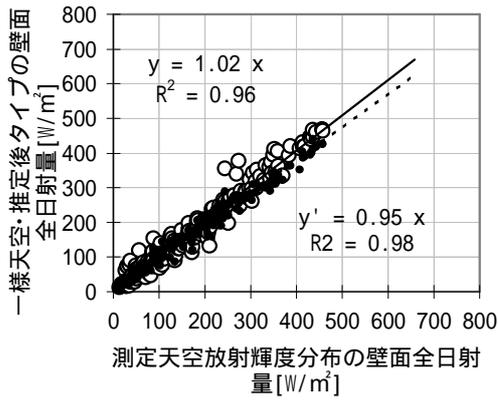
一様天空の壁面全天日射量は、冬季、夏季ともに、南、西、東面で精解値と比べやや小さな日射量を、北面では逆に大きな日射量を計算する傾向がある。

壁面天空日射量でも、南、西、東面で精解値と比べやや小さな日射量を計算する傾向がある。また R^2 値は各方位小さいが、西、東面で特に小さく、精解値と一様天空の壁面天空日射量との相関は低い。従来の一様天空では、精度良く壁面天空日射量が求められないことがわかる。

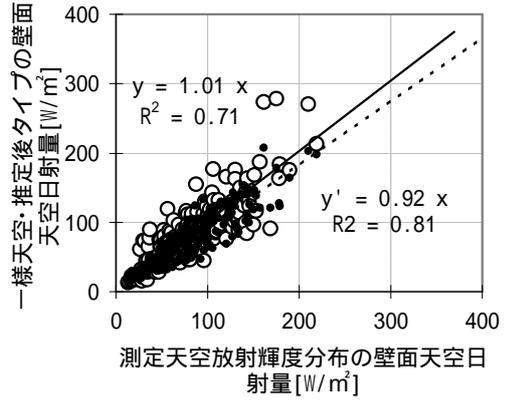
5.2.5 最大熱負荷

計算建物モデル4種、夏季、冬季それぞれについて期間全ての時別熱負荷 q_m, q_u を、暖房熱負荷については昇順、冷房熱負荷については降順に並び替え、上位2.5%、5.0%（危険率2.5%、5.0%）の値を最大冷房負荷 $Q_{m,c}, Q_{u,c}$ 、最大暖房負荷 $Q_{m,h}, Q_{u,h}$ と定義し（図5.7）、差異を検討する。

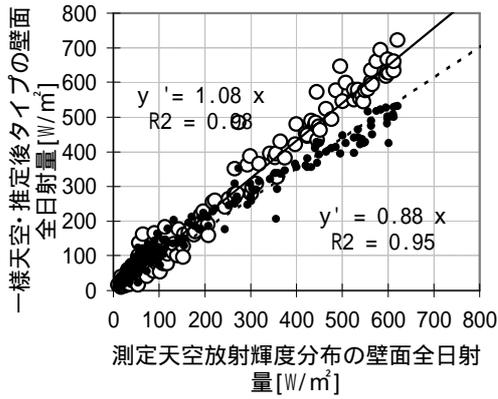
表5.6に天空放射輝度分布の測定値の場合の $Q_{m,c}, Q_{m,h}$ 、表5.7に一様天空の場合の $Q_{u,c}, Q_{u,h}$ を示す。最大熱負荷の比較を行うため、 $Q_{m,c}, Q_{m,h}$ に対する $Q_{u,c}, Q_{u,h}$ の相対差 $P_{u,c}, P_{u,h}$ [%]を以下のように求める。



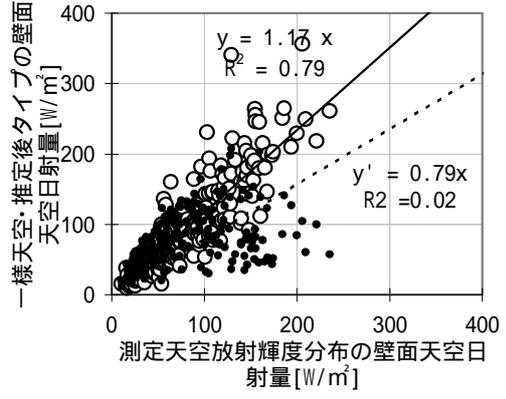
南面



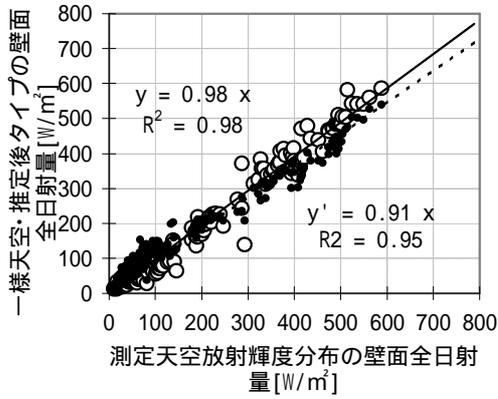
南面



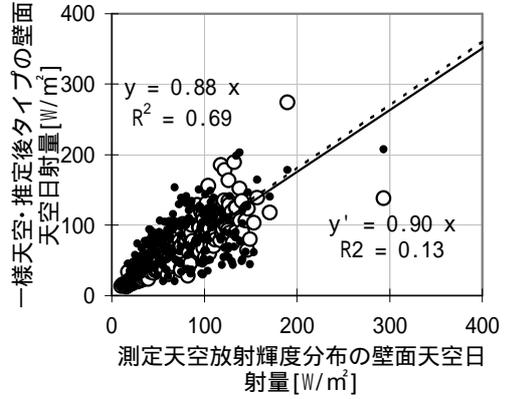
西面



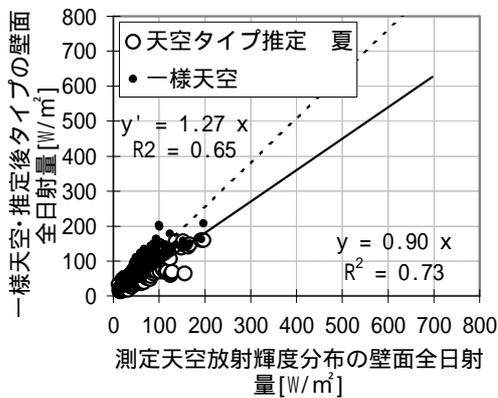
西面



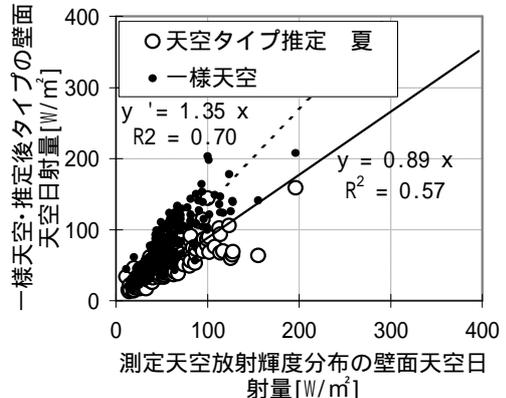
東面



東面



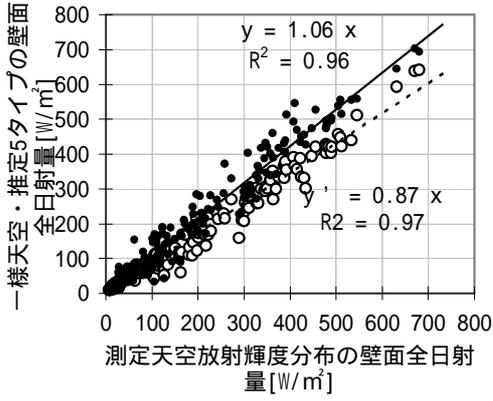
北面



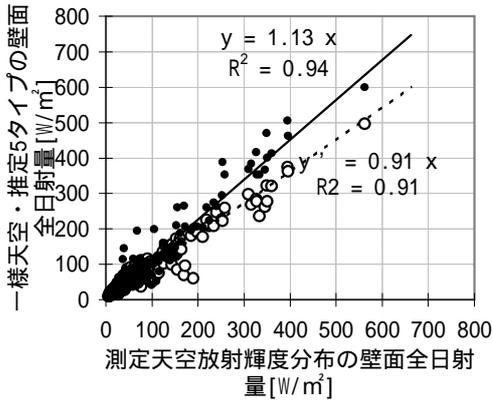
北面

図5.3 壁面全天日射量の比較(夏季)

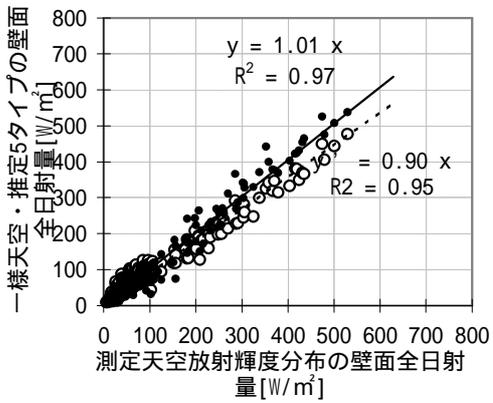
図5.4 壁面天空日射量の比較(夏季)



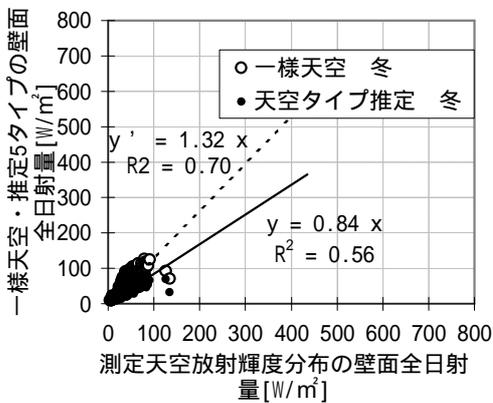
南面



西面

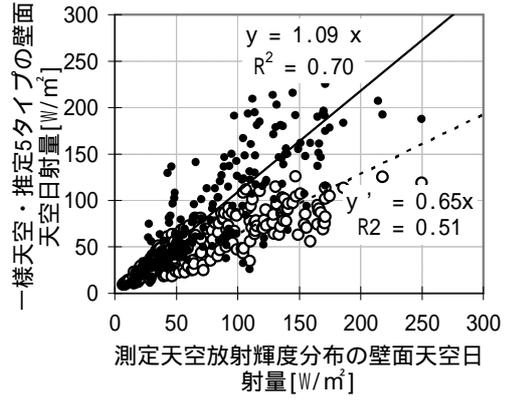


東面

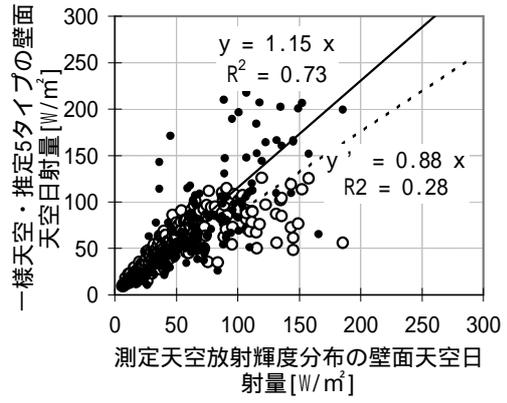


北面

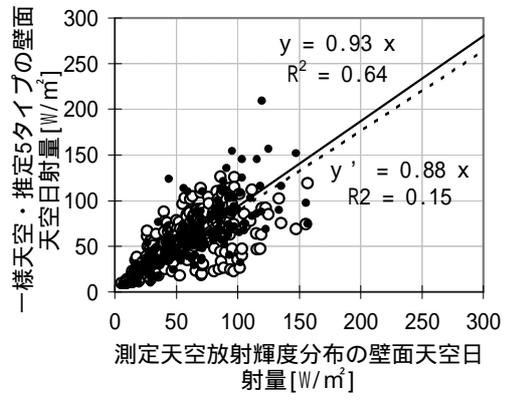
図5.5 壁面全日射量の比較(冬季)



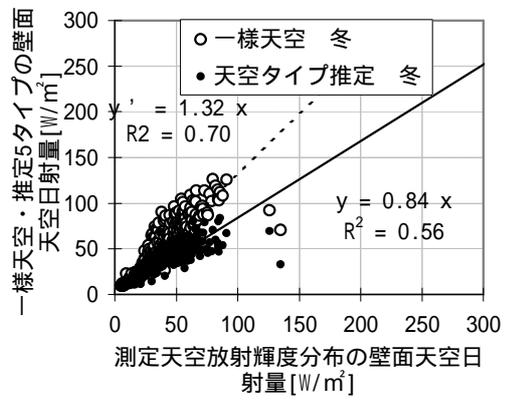
南面



西面



東面



北面

図5.6 壁面天空日射量の比較(冬季)

表 5.5 壁面日射量近似直線 y' 傾き・
R²値(一様天空)

	近似直線の傾き				R ²			
	南	西	東	北	南	西	東	北
全日射	0.87	0.91	0.90	1.32	0.97	0.91	0.95	0.70
全日射	0.95	0.88	0.91	1.27	0.98	0.95	0.95	0.65
天空日射	0.65	0.88	0.88	1.32	0.51	0.28	0.15	0.70
天空日射	0.92	0.78	0.90	1.35	0.81	0.02	0.13	0.70

表 5.8 壁面日射量近似直線 y の傾き・
R²値(天空タイプ推定)

	近似直線の傾き				R ²			
	南	西	東	北	南	西	東	北
全日射	1.06	1.13	1.01	0.84	0.96	0.94	0.97	0.56
全日射	1.02	1.08	0.98	0.90	0.96	0.98	0.98	0.73
天空日射	1.09	1.15	0.93	0.84	0.70	0.73	0.64	0.56
天空日射	1.01	1.17	0.88	0.89	0.71	0.79	0.69	0.57

$$p_{u,c}(h) = (Q_{u,c}(h) - Q_{m,c}(h)) / Q_{m,c}(h) \times 100 \quad (5-8)$$

図 5.8 に危険率 2.5% の $p_{u,c}$, $p_{u,h}$ を示す .

$p_{u,c}$ は基準建物, 建物-2 の南ペリメータで +6~8% と大きくなるのが特徴的である . 誤差が正側に大きくなることから, 一様天空を用いると, 測定した天空放射輝度分布を用いた場合よりも, 過大な最大熱負荷を算出することを示している . これは, 現実には冬季に太陽高度が低くなり南壁面への入射日射量の割合が大きくなるが, 一様天空では, 各方位の入射量を均等とするため, 結果として, 南面への入射日射量が天空放射輝度分布を考慮した場合よりも小さくなるためである . また建物-1, 2, 3 の北ペリメータでも -3.0% を超える . 従来の一様天空の熱負荷計算では, 南ペリメータで過大な最大暖房負荷, 北ペリメータで過小な最大暖房負荷を算出する傾向となる .

$p_{uni,c}$ は, 建物-1, 3 の西, 東ペリメータでは, 従来の一様天空とした熱負荷計算では小さな最大冷房負荷を求めており, その違いが -7.1~-9.7% と大きくなる . 建物-1, 3 では北ペリメータでも +7% 程度と大きくなっている .

また基準建物・建物-2 と, 建物-1, 3 で同様な傾向を示すことから, 構造の違いよりも, 窓面積の影響が大きいことがわかる . これは窓の透過日射が熱負荷に大きな影響を与える為である .

以上より, 従来の一様天空とした熱負荷計算では特に冬季の南ペリメータで, 測定した天空放射輝度分布を用いた場合よりも過大な最大負荷を求めることになる . 夏季では建物-1, 3 の西, 東ペリメータ, 北ペリメータで $p_{u,c}$ が大きくなる . また窓面積の同じ建物で, 相対差に似た傾向があることから, 天空放射輝度分布を考慮し, 透過日射量を詳細に求める必要性があることがわかる .

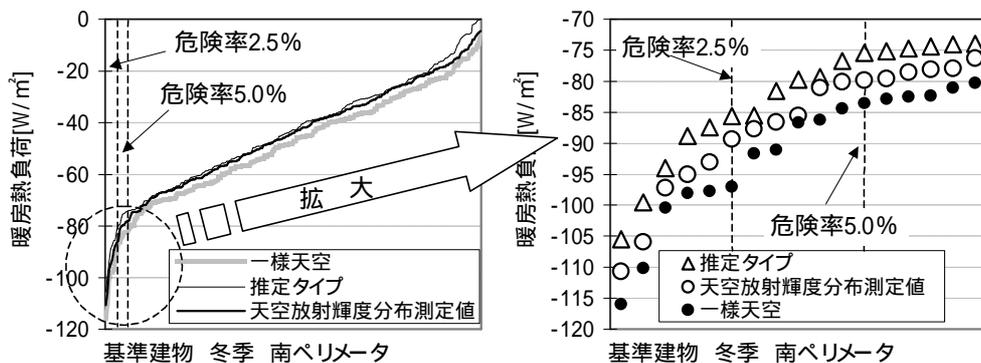


図 5.7 最大熱負荷の定義

表5.6 最大熱負荷 $Q_{m,c}, Q_{m,h}$ (天空放射輝度分布の測定値)

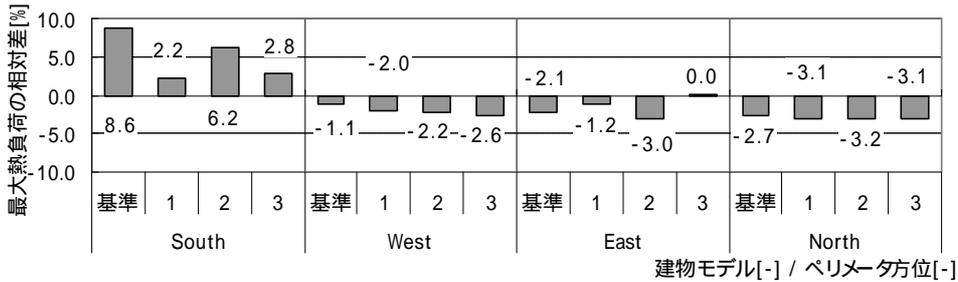
危険率		冬季				夏季			
		南	西	東	北	南	西	東	北
2.5%	基準建物	-89.3	-112.3	-101.1	-120.2	129.0	173.0	149.0	112.1
	建物-1	-113.9	-142.9	-124.1	-154.1	164.9	251.2	210.6	134.4
	建物-2	-78.3	-98.3	-86.8	-106.2	127.8	171.4	147.4	110.2
	建物-3	-110.3	-134.1	-114.2	-153.0	162.6	247.4	215.0	130.5
5.0%	基準建物	-79.8	-99.1	-89.8	-109.6	123.5	162.3	137.2	109.7
	建物-1	-103.2	-134.0	-115.3	-140.6	153.9	234.6	189.7	131.2
	建物-2	-69.8	-90.6	-79.0	-94.8	120.7	160.5	134.5	106.0
	建物-3	-99.8	-127.3	-109.1	-133.8	151.0	230.9	187.0	128.3

単位: W/m²

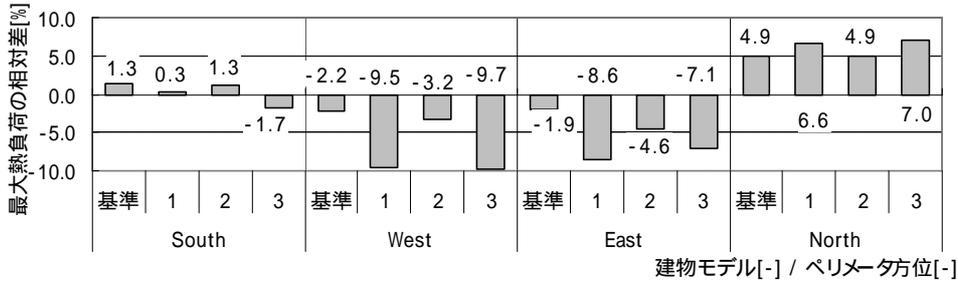
表5.7 最大熱負荷 $Q_{u,c}, Q_{u,h}$ (一様天空)

危険率		冬季				夏季			
		南	西	東	北	南	西	東	北
2.5%	基準建物	-97.0	-111.0	-98.9	-116.9	130.6	169.1	146.2	117.6
	建物-1	-116.4	-140.1	-122.6	-149.2	165.4	227.3	192.5	143.3
	建物-2	-83.2	-96.1	-84.2	-102.8	129.4	165.8	140.6	115.6
	建物-3	-113.3	-130.6	-114.2	-148.3	159.8	223.4	199.8	139.6
5.0%	基準建物	-83.6	-99.3	-90.8	-105.4	123.7	145.3	135.1	114.4
	建物-1	-110.1	-130.3	-116.0	-136.9	154.1	206.3	180.4	138.2
	建物-2	-74.0	-89.0	-79.4	-91.0	121.2	142.2	134.5	111.4
	建物-3	-103.8	-125.6	-108.3	-131.2	150.6	200.1	178.1	136.3

単位: W/m²



a) $P_{u,h}$ (冬季)



b) $P_{u,c}$ (夏季)

図5.8 最大熱負荷の相対差(危険率2.5%) $P_{u,c}, P_{u,h}$

5.2.6 期間熱負荷

期間負荷(30日の積算)について,最大熱負荷と同様に,天空放射輝度分布測定値を用いて求めた期間熱負荷 $\tilde{Q}_{m,c}, \tilde{Q}_{m,h}$ に対する,一様天空の場合の期間熱負荷 $\tilde{Q}_{u,c}, \tilde{Q}_{u,h}$ の相対差 $\tilde{p}_{u,c}, \tilde{p}_{u,h}$ [%] を求め比較し,熱負荷の差異を明らかにする.図5.9に各建物モデルの各ペリメータの $\tilde{p}_{u,c}, \tilde{p}_{u,h}$ を示す.

$\tilde{p}_{u,h}$ は全ての建物で,南ペリメータで特に大きく, +7.7% ~ +8.7% となる.西,東ペリメータでは小さく $\pm 1\%$ 程度である.北ペリメータではやや大きくなり, -4% 程度になる.

$\tilde{p}_{u,c}$ は基準建物・建物-2,建物-1・3の北ペリメータでそれぞれで, +5%, +7% 程度と, $\tilde{p}_{u,h}$ は

南ペリメータほど大きくないものの、他ペリメータの $\tilde{p}_{u,c}$ が小さいことと比べ特徴的である。

以上より一様天空を用いて計算した期間熱負荷は、南ペリメータの $\tilde{p}_{u,h}$ が特に大きくなるなど方位により違いが大きい。

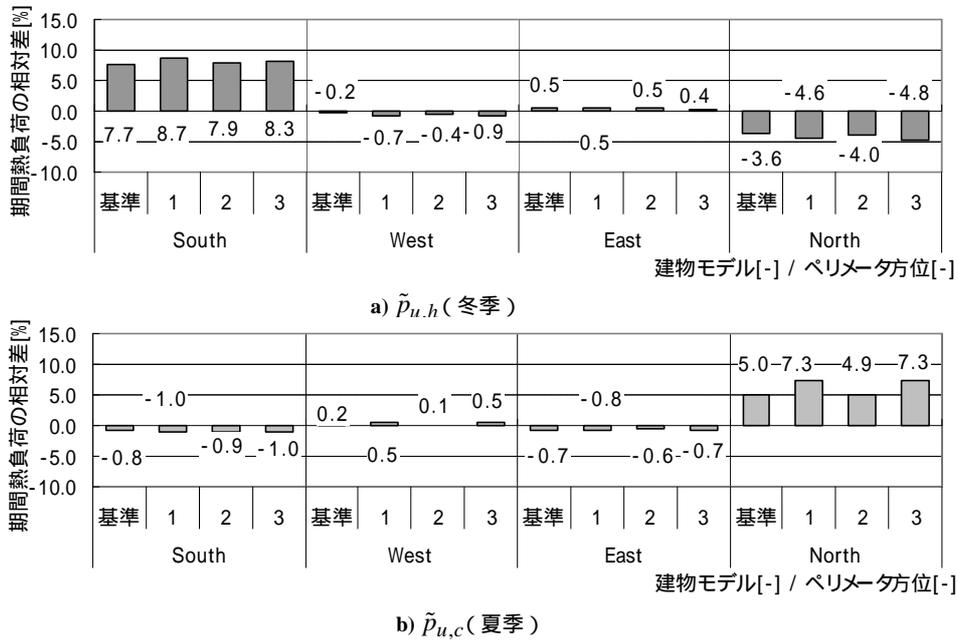


図5.9 期間熱負荷の相対差 $\tilde{p}_{u,c}$, $\tilde{p}_{u,h}$

5.2.7 時別熱負荷

時別熱負荷 q_m に対する q_u の %MBE, %RMSE を求め、一様天空の場合の時別熱負荷が建物モデル、方位、季節によってどの程度の差異 (%RMSE)、その差異が過大なのかあるいは過小なのか (%MBE) を検討する。図5.10に時別熱負荷の %MBE, %RMSE を示す。

各建物共通して冬季の南ペリメータで、-10% を超える大きな %RMSE を示す。これは冬季に太陽高度が低くなり、南壁面への入射日射量の割合が大きくなるが、一様天空では、各方位の入射日射量の割合は太陽高度によらず均等であるため、南壁面への入射日射量が小さくなり、南ペリメータの負荷を大きく求めるためである。この時 %MBE も基準建物、建物-1, 2 でそれぞれ、+8.3%, +9.5%, +8.7% と大きくなる。このように %MBE が大きな正の値を示すことから、一様天空の方が測定された天空放射輝度分布を用いた場合より大きな熱負荷を算出する傾向が強いことがわかる。その他のペリメータの %RMSE は -4.1% ~ +7.1% で、10% を超えることは無い。

夏季の %RMSE では、基準建物、建物-1, 2 の西、東、北ペリメータで大きい。特に建物-1 の西ペリメータで +11.7% と大きく、その他の建物モデルでは +5.0% ~ +8.7% となる。%MBE は北ペリメータで大きく、それぞれ +5.2%, +7.6%, +5.1%, +7.6% となり、冬季南ペリメータと同様に、一様天空を用いた場合には大きな熱負荷を算出する傾向が見られる。

以上の様に、冬季南ペリメータで、一様天空を用いた場合、測定された天空放射輝度分布の天空より大きな熱負荷を求める傾向が強い。また夏季北ペリメータで %MBE が大きくなることから、壁面日射量の違いが影響していることが考えられる。

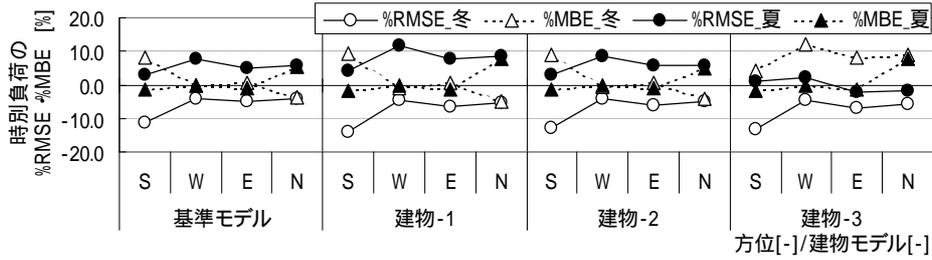


図5.10 特別熱負荷の%MBE,%RMSE(一様天空)

5.3 推定した天空タイプを用いた熱負荷計算

天空タイプを推定し,この天空タイプの天空放射輝度分布から任意の面に入射する壁面日射量を求めて熱負荷を計算する手法の有効性を検証する. 天空放射輝度分布の測定値を用いる代わりに,4章で示した手法により推定した天空タイプ(天空タイプ1,8,13,14,15の5タイプ)から求めた天空放射輝度分布を用いて,熱負荷 q_k を計算し, q_m との比較を行う.

水平面全天日射量 E_{eg} ,法線面直達日射量 E_{es} から天空タイプを推定し,この天空タイプの相対天空放射輝度分布を求め,任意の面に入射する壁面日射量の天空日射成分 $I_{sd,k}$ を計算する機能を,熱負荷計算プログラム ACSES に付加して熱負荷計算を行う. 建物モデル,建物条件,気象データは q_m を計算した場合と同様である.

5.3.1 壁面日射量 $I_{sd,k}$ の計算

図5.11に,4章で示した手法により推定した天空タイプの天空放射輝度分布を用いて,壁面日射量の天空日射成分 $I_{sd,k}$ を算出する計算フローを示す. CIE標準一般天空は,天頂輝度に対する相対輝度のモデルであるため,スカイスキヤナの145の各天空要素の中心の放射輝度値から,水平面相対値合計 $E_{ed'k}/r_{k,145}$,傾斜面相対値合計 $I'_{sd,k}/r_{k,145}$ をそれぞれ求め, $I'_{sd,k}/r_{k,145}$ を $E_{ed'k}/r_{k,145}$ で除したものに,水平面天空日射量の測定値 E_{ed} を乗じて求める.

$$\frac{I'_{sd,k}}{r_{k,145}} = \sum_i \frac{r_{k,i}}{r_{k,145}} w_i \cos b_i \text{ (傾斜面)} \quad (5-9)$$

$$\frac{E_{ed'k}}{r_{k,145}} = \sum_{i=1}^{145} \frac{r_{k,i}}{r_{k,145}} w_i \sin h_i \text{ (水平面)} \quad (5-10)$$

$$I_{sd,k} = \left(\frac{I'_{sd,k}}{r_{k,145}} \Big/ \frac{E_{ed'k}}{r_{k,145}} \right) \times E_{ed} \quad (5-11)$$

5.3.2 壁面日射量

5つの天空タイプを推定し,これより求めた壁面全天日射量,壁面天空日射量と,測定した天空放射輝度分布の場合の壁面日射量を比較する. 図5.3,5.4(89頁に掲載)に夏季の壁面全天日射量,壁面天空日射量の比較, 図5.5,5.6(90頁に掲載)に冬季の壁面全天日射量,壁面天空日射量の比

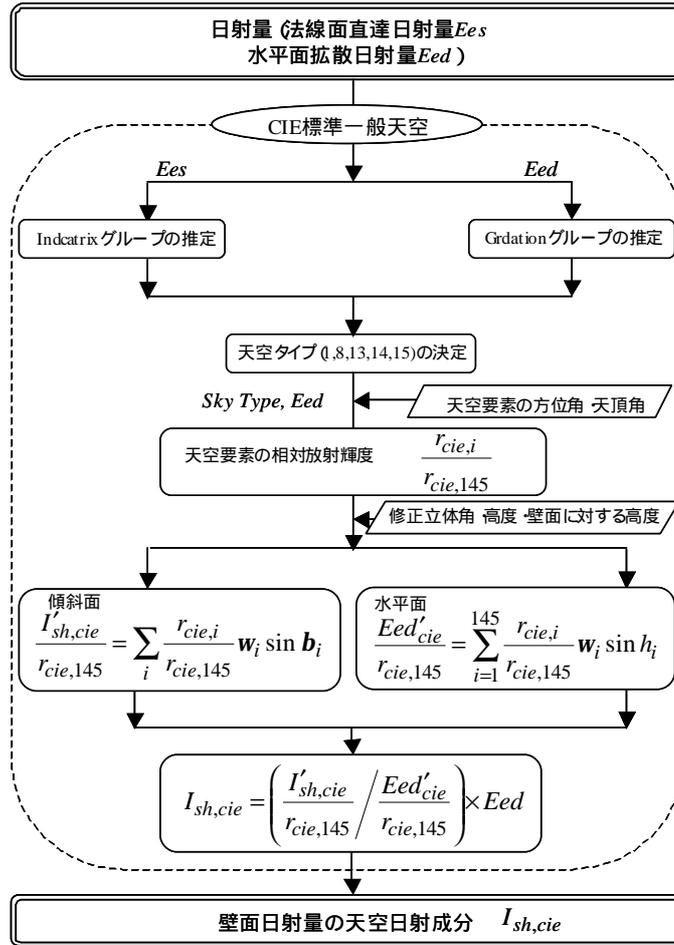


図5.11 壁面日射量計算フロー

較，表5.8に(91頁に掲載)に壁面全天日射量，壁面天空日射量の近似直線の傾き， R^2 値を示す。

壁面全天日射量を見ると，一樣天空とは反対に冬季，夏季ともに，南，西，東面で精解値と比べやや大きな日射量を，北面では逆に小さな日射量を計算する傾向がある．直線の傾きは冬季西面を除き，いずれも一樣天空の場合よりも1に近い値をとり，精解値により近い壁面全天日射量を求めていることがわかる。

壁面天空日射量は，冬季，夏季ともに，南，西面で精解値と比べやや大きな日射量を，東，北面では逆に小さな日射量を計算する傾向がある． R^2 値も一樣天空の場合と比べ大きく，壁面天空日射量の精解値との相関が高い．冬季，夏季西面では，一樣天空の場合の近似直線の傾きが，天空タイプを推定した場合よりやや1に近い値を取るが，その時の一樣天空の R^2 値は小さいため，天空タイプを推定した場合の壁面天空日射量は，一樣天空の場合よりも精解値に近いと考えられる。

5.3.3 最大熱負荷

q_m, q_u の場合と同様に，危険率2.5%，5.0%の最大冷房負荷 $Q_{k,c}$ ，最大暖房負荷 $Q_{k,h}$ を算出する．表5.9に $Q_{k,c}, Q_{k,h}$ を示す． $Q_{m,c}, Q_{m,h}$ との比較を行うために，一樣天空の場合同様，最大熱負荷の相対差 $p_{k,c}, p_{k,h}$ を求める．図5.12に危険率2.5%の $p_{k,c}, p_{k,h}$ を示す。

危険率2.5%の $p_{u,h}$ は基準建物で+8%を超えるなど大きくなっていったが， $p_{k,h}$ では，基準建物，建物-2の南ペリメータで-4.1%，-5.9%となる以外は，概ね±2%以内である． $p_{cie,c}$ も建物-1，3の西

ペリメータでやや大きい(+4.7% , +5.2%)が , $p_{u,h}$ の同じケースで -9% を超える事を考えると小さい .

また , $p_{u,h}$, $p_{u,h}$ には窓面積の同じ建物モデルで相対差が類似する傾向があったが , $p_{k,h}$, $p_{k,c}$ では相対差そのものが小さく , この傾向はあまり明確ではないが , 比較的相対差の大きくなる $p_{k,c}$ の西ペリメータで , この傾向が確認できる .

以上のように $p_{k,h}$, $p_{k,c}$ は , $p_{u,c}$, $p_{u,h}$ と比べ小さい . これより , 推定した天空タイプを用いることで , より精度良く最大熱負荷を求められることがわかる .

5.3.4 期間熱負荷

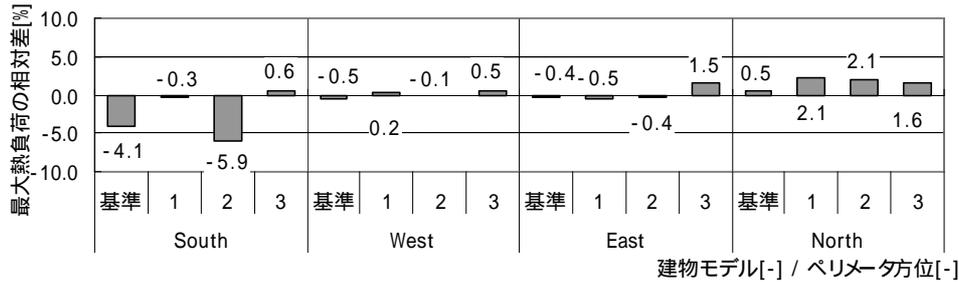
図 5.13 に , 天空放射輝度分布の測定値を用いて求めた期間熱負荷 $\tilde{Q}_{m,c}$, $\tilde{Q}_{m,h}$ に対する相対差 $\tilde{p}_{k,c}$, $\tilde{p}_{k,h}$ [%] を示す .

$\tilde{p}_{k,h}$ は最大でも -3.4% , 概ね $\pm 2\%$ 以内であり十分小さい . 南 , 西ペリメータでは $\tilde{p}_{cie,h}$ が負であることから , 天空タイプの熱負荷 q_k の方が q_m より小さな値を示す . $\tilde{p}_{k,c}$ は建物 -1,3 の東ペリメータで共に -2.3% であるのを除き , 全てのペリメータで $\pm 2\%$ 以内である .

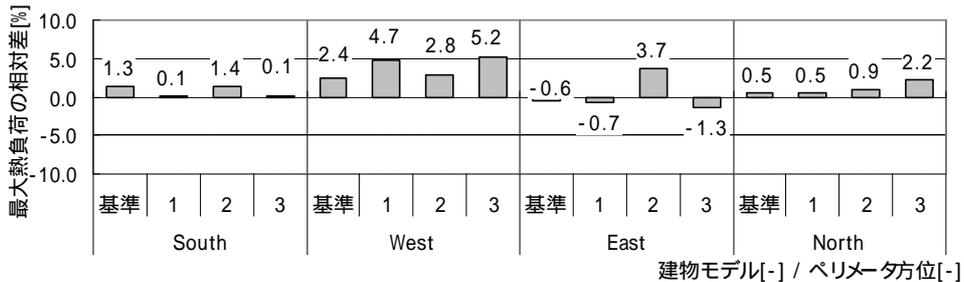
表5.9 最大熱負荷 $Q_{k,c}$, $Q_{k,h}$ (天空タイプ推定手法)

		冬季				夏季			
		南	西	東	北	南	西	東	北
危険率 2.5%	基準建物	-85.7	-111.7	-100.7	-120.8	130.7	177.1	148.2	112.7
	建物-1	-113.6	-143.2	-123.5	-157.4	165.1	263.0	209.1	135.1
	建物-2	-73.7	-98.2	-86.5	-108.4	129.6	176.2	152.9	111.2
	建物-3	-110.9	-134.8	-115.8	-155.5	162.7	260.2	212.3	133.4
危険率 5.0%	基準建物	-75.5	-98.6	-91.3	-112.1	123.7	168.0	134.4	109.2
	建物-1	-100.2	-132.1	-116.5	-142.6	155.3	252.4	186.2	130.5
	建物-2	-67.6	-89.5	-79.6	-97.4	120.2	165.6	134.3	105.8
	建物-3	-96.0	-125.3	-110.2	-137.3	154.8	248.6	184.1	128.0

単位 : W/m²



a) $P_{u,h}$ (冬季)



b) $P_{k,h}$ (夏季)

図 5.12 最大熱負荷の相対差(危険率 2.5%) $P_{k,h}$, $P_{u,h}$

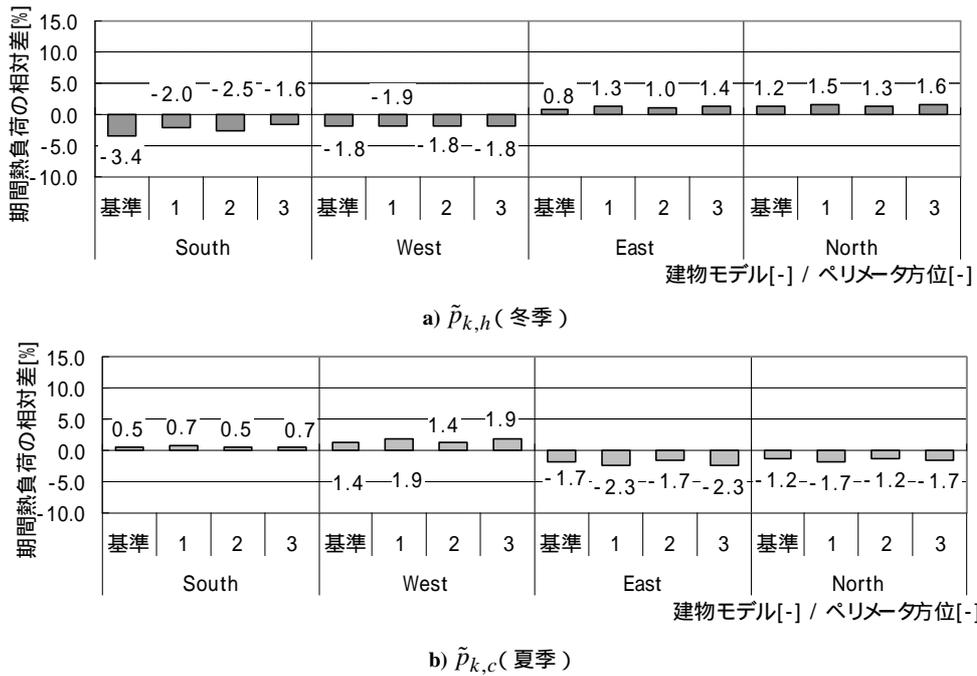


図5.13 期間熱負荷の相対差 $\tilde{p}_{k,c}$, $\tilde{p}_{k,h}$

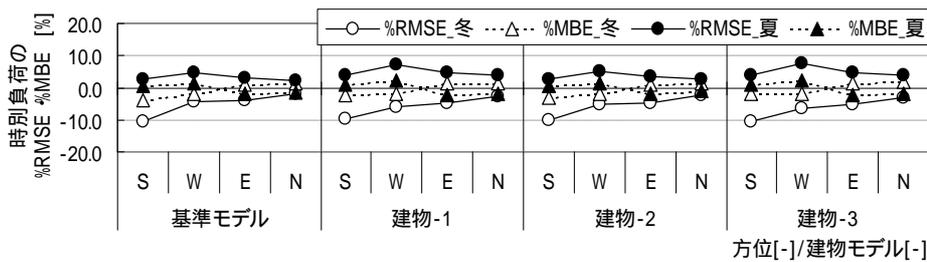


図5.14 特別熱負荷の%MBE, %RMSE(推定天空タイプ)

以上より期間熱負荷についても、 $\tilde{p}_{k,c}$, $\tilde{p}_{k,h}$ が小さいことから、推定した天空タイプを用いて期間熱負荷を計算することが有効であると言える。

5.3.5 特別熱負荷

図5.14に q_k の q_m に対する %MBE, %RMSE を示す。

冬季各建物モデルの南ペリメータで、%RMSEは-10%前後、建物-1, 3の西ペリメータで冬季-6%、夏季+7%とやや大きくなるものの、それ以外のケースでは±5%未満である。%MBEも冬季基準建物の南ペリメータ-3.4%となる以外は、概ね±2%以内であり小さい。

以上の様に%MBE・%RMSE共に、一様天空の場合と比べ小さく、推定した天空タイプを用いて熱負荷計算を行うことは有効であると言える。

5.4 日射負荷と壁面日射量の相関

熱負荷における壁面日射量の影響を検討するために、特別熱負荷 q_k , q_m , q_u から、気象データのうち日射量(直達, 天空)を全ての時刻で $0W/m^2$ として求めた特別熱負荷 q_o を減じたものを日射負荷 q'_k , q'_m , q'_u として、これと壁面全天日射量, 天空日射量との相関を検討する。

$$q'_k = q_k - q_o \tag{5-12}$$

$$q'_m = q_m - q_o \tag{5-13}$$

$$q'_u = q_u - q_o \tag{5-14}$$

図5.15に冬季基準建物の日射負荷と壁面全天日射量との相関を，図5.16に壁面天空日射量との相関を示す．表5.10に冬，夏季各建物モデルの壁面全天日射量，壁面天空日射量との相関直線の係数（傾き，切片）及びR²値を示す．

日射負荷と壁面全天日射量との相関を見ると，冬季基準建物では壁面日射量の推定法による違いはあまり見られないが，天空タイプ推定法，測定天空放射輝度分布に比べ，一様天空の場合のR²値がやや小さい（図5.15）．他のケース（表5.10）を見ると，相関直線の傾きは天空タイプ推定法，測定天空放射輝度分布の場合ほぼ等しく，一様天空の場合はこれらよりやや小さい．また一様天空の場合はR²値もやや小さい傾向が見られる．

日射負荷と壁面天空日射量との相関（図5.16，表5.10）では，天空タイプ推定法，測定天空放射輝度分布ではほぼ等しい相関直線となり，一様天空の場合のみ異なる相関直線となり，R²値も著しく小さい．これから一様天空の場合は，天空タイプ推定法，測定天空放射輝度分布の場合と比べ，日射負荷に対する壁面天空日射量の寄与が著しく小さいことがわかる．

図5.17，図5.18に，推定手法の違いによる壁面天空日射量の度数の比較（冬季，夏季）を示す．

冬季（図5.17）を見ると，各方位において一様天空（uni）の場合の壁面天空日射量は130W/m²で頭打ちとなっている．また60～90W/m²において，一様天空の場合には度数が大きい，測定天空放射輝度分布（measure），推定天空タイプ（CIE）の場合には度数が小さいことに特徴がある．西面についても，大きな日射量の度数は南面と比べ少ないものの，同様の傾向が見られる．これは一様天空の場合の日射量出現頻度が，平均的な頻度分布となっているのに対し，その他の推定手法で

表5.10 日射負荷と壁面日射量の相関直線の係数，R²値

		推定5タイプ			測定放射輝度分布			一様天空			
		傾き	切片	R2	傾き	切片	R2	傾き	切片	R2	
壁面全天日射量	冬季	基準建物	0.10	8.68	0.76	0.10	8.64	0.75	0.10	8.97	0.71
		建物-1	0.19	13.00	0.78	0.19	12.87	0.77	0.18	13.46	0.73
		建物-2	0.11	7.48	0.77	0.11	7.42	0.76	0.10	7.87	0.71
		建物-3	0.19	12.36	0.77	0.19	12.26	0.76	0.18	12.79	0.72
	夏季	基準建物	0.11	13.87	0.76	0.11	14.16	0.74	0.10	15.22	0.66
		建物-1	0.21	19.44	0.84	0.21	19.97	0.82	0.19	21.95	0.77
		建物-2	0.12	11.04	0.82	0.12	11.26	0.79	0.11	12.35	0.73
		建物-3	0.21	17.65	0.85	0.21	18.10	0.83	0.20	20.16	0.77
壁面天空日射量	冬季	基準建物	0.22	5.87	0.47	0.22	5.82	0.37	0.08	13.82	0.04
		建物-1	0.38	7.88	0.53	0.38	7.93	0.43	0.17	19.72	0.08
		建物-2	0.22	4.64	0.50	0.22	4.67	0.40	0.09	12.06	0.05
		建物-3	0.36	7.96	0.50	0.35	8.54	0.40	0.15	19.47	0.07
	夏季	基準建物	0.26	10.53	0.45	0.25	11.03	0.35	0.05	26.20	0.01
		建物-1	0.50	12.40	0.51	0.49	13.21	0.40	0.11	41.59	0.02
		建物-2	0.27	7.59	0.47	0.28	7.88	0.37	0.05	24.43	0.01
		建物-3	0.50	10.88	0.51	0.50	11.54	0.40	0.10	40.55	0.02

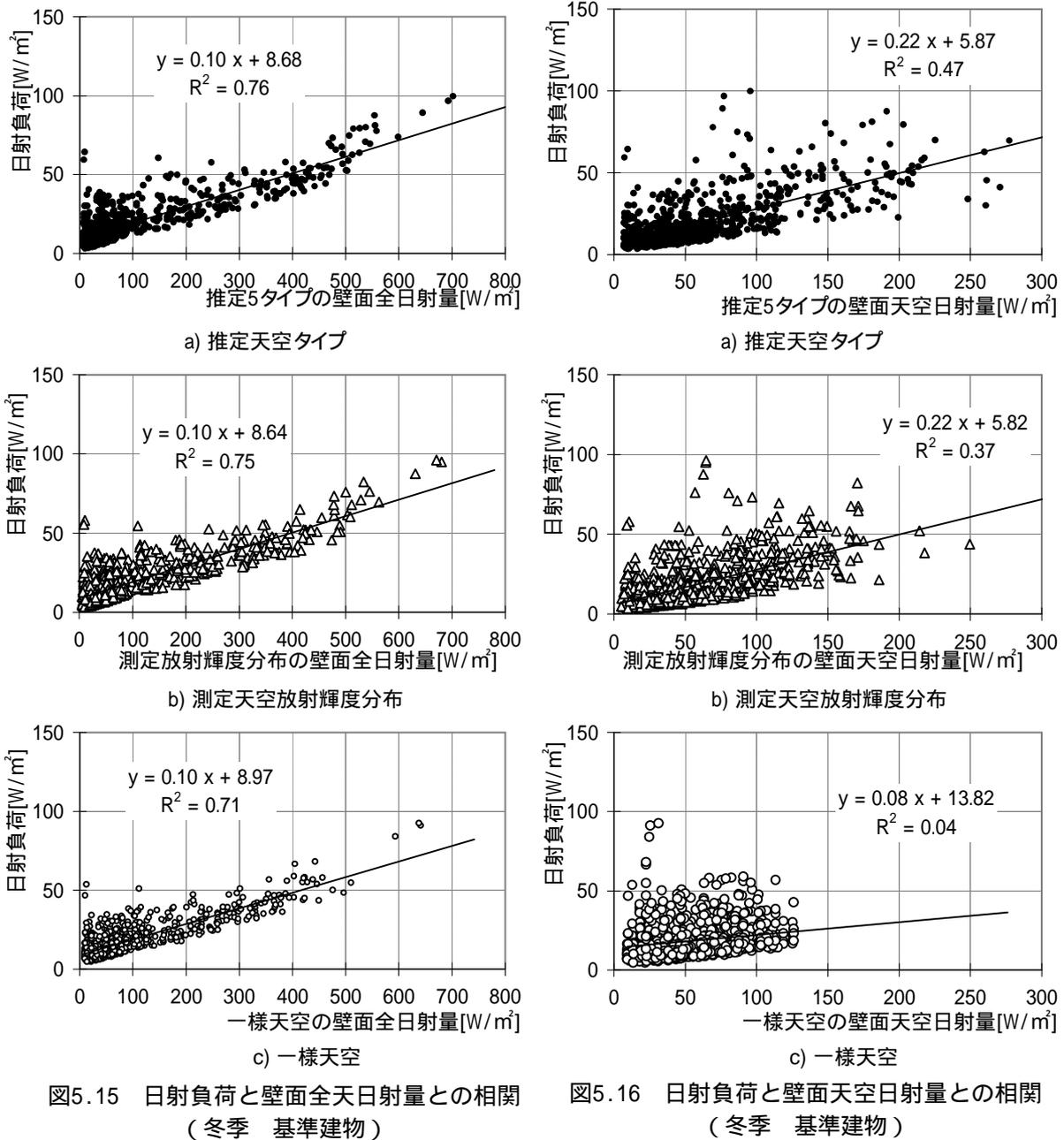
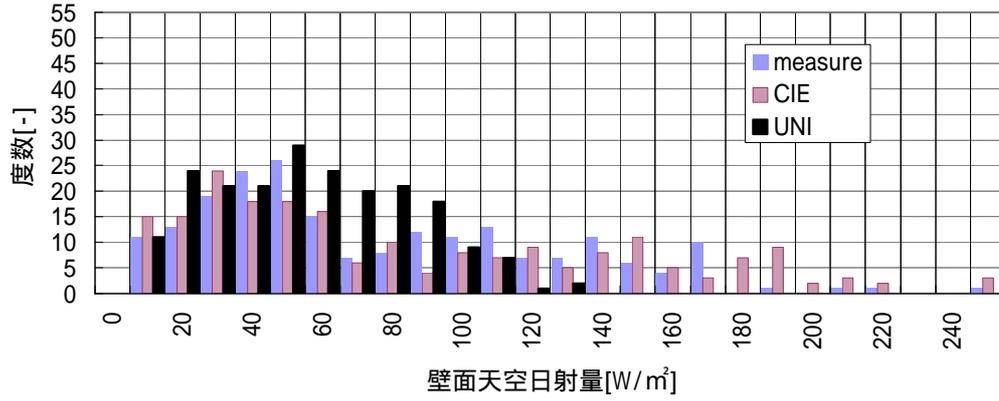


図5.15 日射負荷と壁面全日射量との相関
(冬季 基準建物)

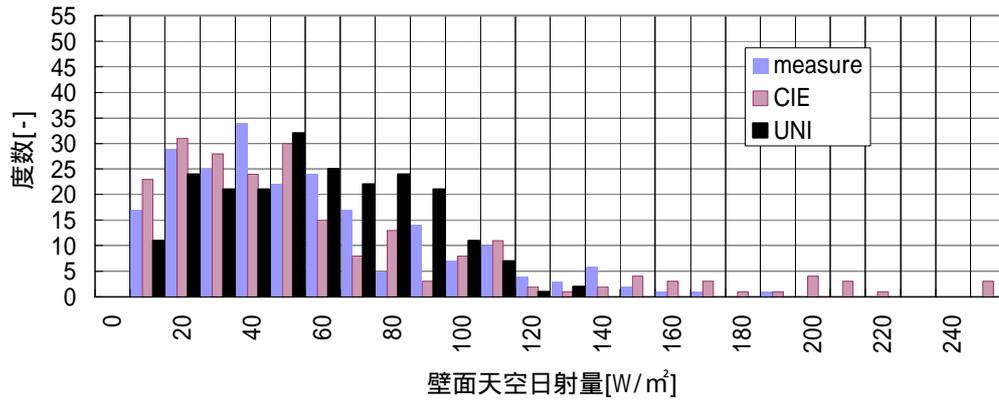
図5.16 日射負荷と壁面天空日射量との相関
(冬季 基準建物)

は、晴天である大きな日射量の出現頻度の分布にばらつきが出ているためである。北面では測定天空放射輝度分布、推定天空タイプの場合に50W/m²以下の日射量の度数が多くなる。以上のように、晴天時の日射量のばらつきや、通常南面は日射量が大きく北面では小さくなる壁面日射量の方位性を、一様天空では表すことができていないことを示した。

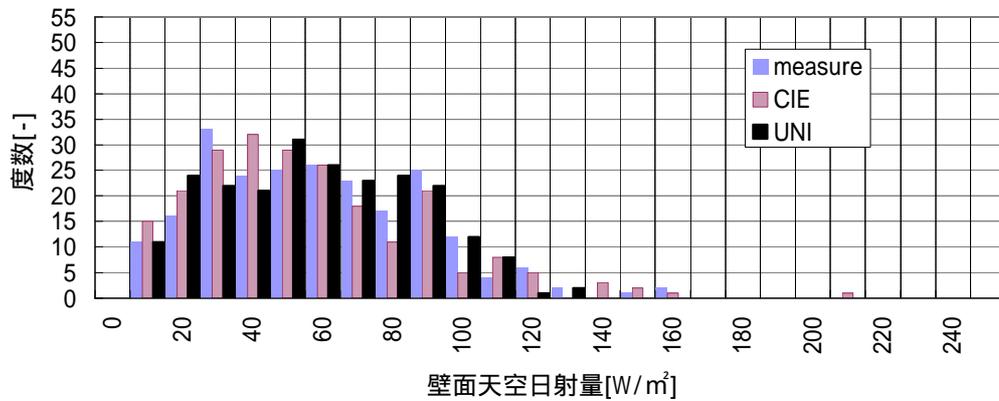
夏季(図5.18)では、西、東面の日射量が小さくなる場合(30W/m²以下)に一様天空とその他の推定手法に大きな違いが見られる。一様天空で日射量が小さくなる場合の度数が少ないが、分布を考慮すれば、晴天空では、太陽方位との方位差が大きい壁面に入射する日射量は小さくなる。また北面では、測定天空放射輝度分布、推定天空タイプの場合に60W/m²以下の日射量の度数が大きく、80W/m²以上の日射量の度数が小さくなる場所に、一様天空との違いが見られる。日射量の



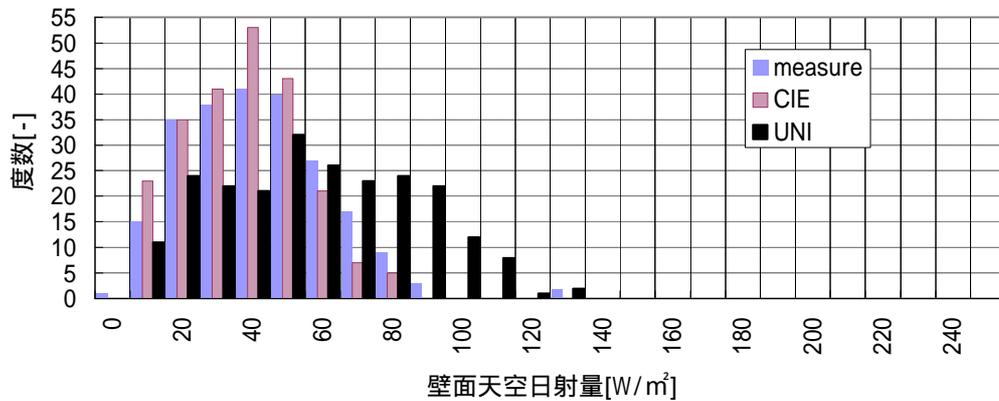
a) 南



b) 西

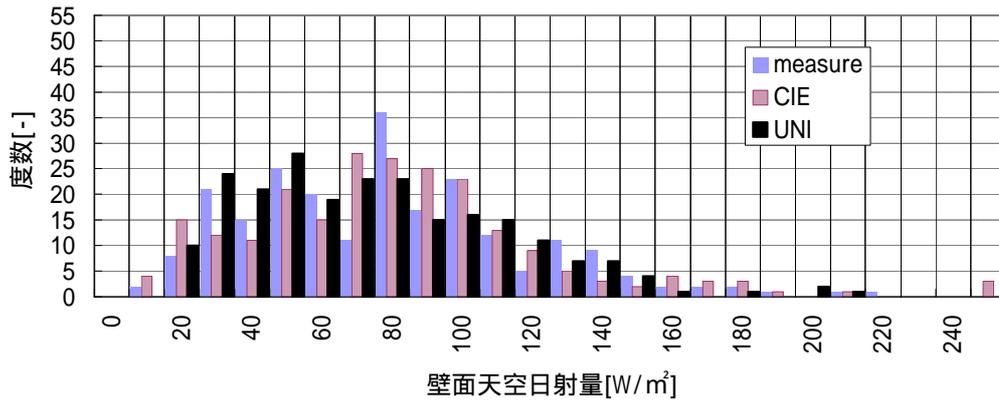


c) 東

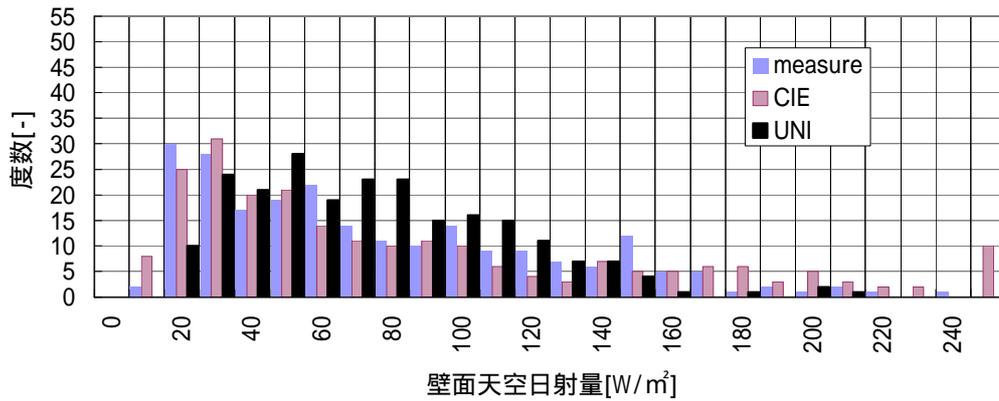


d) 北

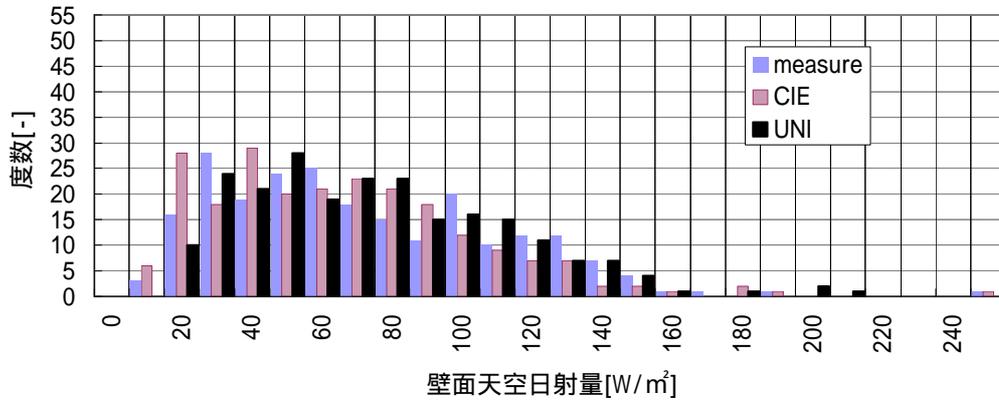
図5.17 推定手法の違いによる壁面天空日射量の度数比較 (冬季)



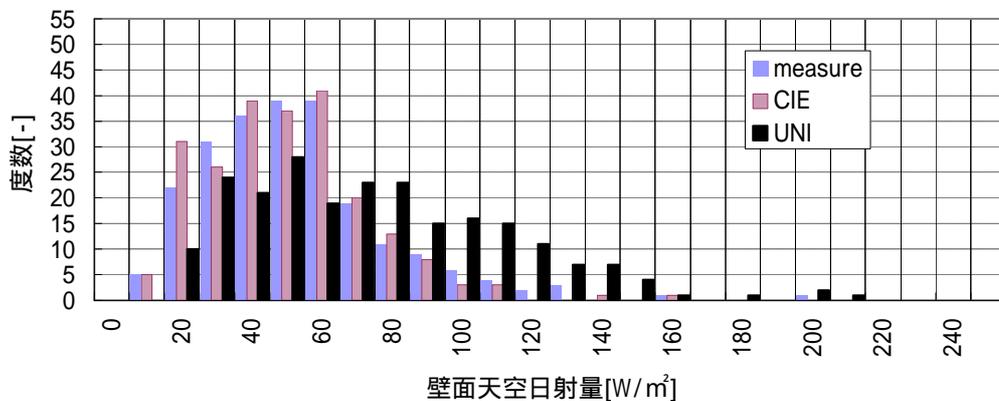
a) 南



b) 西



c) 東



d) 北

図5.18 推定手法の違いによる壁面天空日射量の度数比較 (夏季)

少なくなると考えられる夏季北面において、従来の一様天空では過大な日射量を推定していることがわかる。

以上のように一様天空では表現できない季節における壁面日射量の相違を示すことができた。この相違が、各ペリメータの熱負荷に違いをもたらしている。

5.5 まとめ

本章では、天空放射輝度分布測定値、一様天空、4章で示した手法を用いて天空タイプを推定した天空放射輝度分布、という3種類の分布形を用いて熱負荷を求め、分析を行った。

1) 天空放射輝度分布の熱負荷へのインパクト

スカイスキャナで測定した天空放射輝度分布データを用いた熱負荷 q_m 、天空日射が天空一様と仮定して求めた熱負荷 q_u を求めて比較を行なった。季節、ペリメータ方位により熱負荷に差異が見られること、その差異に窓面積の同じ建物モデルで似た傾向が見られることから、天空放射輝度分布を考慮し透過日射量をより詳細に求め、熱負荷を算出する必要性があることがわかった。以下に知見を示す。

- i) 最大暖房負荷の相対差 $p_{u,h}$ は南ペリメータで +8% を超える建物モデルが見られた。最大冷房負荷の相対差 $p_{u,c}$ でも、建物 -1, 3 の西、東ペリメータで、-7.1~-9.7% と大きい。また窓面積の同じ建物で、相対差に似た傾向が見られた。
- ii) 期間暖房負荷の相対差 $\tilde{p}_{u,h}$ は南ペリメータで特に大きく +8% 程度である。期間冷房負荷の相対差 $\tilde{p}_{u,c}$ は基準建物・建物 -2, 建物 -1・3 の北ペリメータでそれぞれで、+5%, +7% 程度とやや大きい。
- iii) 時別熱負荷の %RMSE は、冬季南ペリメータで -10% を超え、%MBE も基準建物、建物 -1, 2 でそれぞれ、+8.3%, +9.5%, +8.7% と大きく、夏季でも、北ペリメータの %MBE は +5 ~ 7% となり、一様天空の場合、過大な熱負荷を算出する傾向が見られた。

2) 天空タイプ推定法の熱負荷計算への適用

4章で示した手法により推定した天空タイプを用いて、熱負荷計算を行った。最大熱負荷、期間熱負荷の相対差、時別熱負荷の誤差が小さいこと、一様天空の場合と比べても、各熱負荷ともに精度の向上が見られることから、推定した天空タイプによる熱負荷計算が有効である事を示した。以下に知見を示す。

- i) 最大暖房負荷の相対 $p_{k,h}$ では、基準建物、建物 -2 の南ペリメータで -4.1%,-5.9% となる以外は、概ね $\pm 2\%$ 以内であり、最大冷房負荷の相対差 $p_{k,c}$ も建物 -1, 3 の西ペリメータでやや大きいが、 $p_{u,c}$ 、 $p_{u,h}$ と比べ十分小さい。
- ii) 期間暖房負荷の相対差 $\tilde{p}_{k,h}$ は最大でも -3.4% で、概ね $\pm 2\%$ 以内であり十分小さい。期間冷房負荷の相対差 $\tilde{p}_{k,c}$ は建物 -1,3 の東ペリメータで共に -2.3% であるのを除き、全てのペリメータで $\pm 2\%$ 以内である。
- iii) 冬季各建物モデルの南ペリメータで、時別熱負荷の %RMSE は -10% 程度、建物 -1, 3 の西ペリメータで冬季 -6%、夏季 +7% とやや大きくなるものの、それ以外のケースでは $\pm 5\%$ 未満で

ある。%MBEも冬季基準建物の南ペリメータ-3.4%となる以外は、概ね $\pm 2\%$ 以内であり小さい。%MBE・%RMSEは共に一様天空の場合と比べ小さい。

3) 日射負荷

日射負荷 q'_k, q'_m, q'_u と壁面全天日射量, 壁面天空日射量との相関を検討した。壁面全天日射量との相関については, 天空タイプ推定法, 測定天空放射輝度分布でほぼ同様な相関直線となった。壁面天空日射量との相関において, 一様天空の場合に R^2 値が著しく小さいことから, 天空タイプ推定法, 測定天空放射輝度分布と比べ, 日射負荷に対する壁面天空日射量の寄与が著しく小さいことがわかった。

以上より, 熱負荷計算における天空放射輝度分布の考慮の有無による熱負荷へのインパクトを明らかにし, 熱負荷計算に天空放射輝度分布を考慮する必要性を示した。また, 4章で示した手法を用いて天空タイプを推定し, この天空放射輝度分布を用いて, 精度良く熱負荷が求められることから, 熱負荷計算に天空タイプ推定手法を用いることの有効性を示した。

注記

注 5-1) %RMSE, %MBE は以下で定義される。ここで m は測定値, e は推定値, n はデータ数を示す。差異を絶対値で表すよりも, 測定値の平均に対する割合で示すことで, その程度を捉えやすいと考え, 本章では %RMSE, %MBE を用いる。

$$\%RMSE = 100 \cdot \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - m_i)^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i}} \quad (5-15)$$

$$\%MBE = 100 \cdot \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - m_i)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i} \quad (5-16)$$

注 5-2) 熱負荷計算における透過日射熱取得計算の際の, 天空日射の標準ガラス (透明 3mm) に対する熱取得率は, 一様天空では 5-7 式を全天球面について積分平均した 0.808 を, 測定天空放射輝度分布, 推定天空タイプの放射輝度分布については, 壁面に対する各天空要素の高度を入射角として, 直達日射の場合と同様に 5-7 式で天空要素ごとに求めたものを用いた。

注 5-3) スカイスキャナ第一高度帯の天空要素, 太陽近傍と考えられる天空要素については, オーバーフローや, 周辺地物の影響で天空放射輝度分布の正確な測定が行えない。そこで, 壁面日射量計算, 熱負荷計算に先立つデータ整理の段階で, 天頂放射輝度測定値 (天空要素 No.145 の放射輝度測定値) に対する各天空要素の放射輝度測定値の比と, 同時刻の CIE 標準一般天空の 15 の天空タイプの各放射輝度比を求め, 測定値の放射輝度比に対する各天空タイプの放射輝度比の RMSE を算出し, RMSE が最小となる近似タイプ求め, スカイスキャナ第一高度帯の天空要素, 太陽近傍と考えられる天空要素, オーバーフローしている天空要素については, この近似タイプの放射輝度比と同等として補正を行った。

注 5-4) 計算用気象データは, 現実の日が連続していない場合があるため, 気温, 湿度, 長波長放射, 風向・風速それぞれについて, 各時刻の前後 1 時間の変化量を求め, この変化量の頻度分布の両周辺部 5% の境界値を補間境界値として決め, それぞれの気象データの各日 24:00~1:00 間の変化量が補間境界値を超える場合は, 22:00~3:00 のデータが欠測値であるとみなし, これを補正した。

記号表

c	: 太陽と天空要素の角距離 [rad]
h	: 天空要素の高度 [°]
q	: 壁面の傾斜角 [°]
b	: 天空要素の壁面に対する高度 [°]
w	: 天空要素の修正立体角 [sd]
j	: 壁面の中心から見た天空の形態係数 [-]
r	: 天空要素の放射輝度 [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$]
I_{sd}	: 壁面日射量の天空日射成分 [W/m^2]
I_{ss}	: 壁面に入射する直達日射成分 [W/m^2]
I_{sr}	: 地面反射成分 [W/m^2]

I_{sg}	: 壁面入射全日射量 [W/m ²]
E_{eg}	: 水平面全天日射量 [W/m ²]
E_{ed}	: 水平面天空日射量 [W/m ²]
E_{es}	: 法線面直達日射量 [W/m ²]
q	: 時別熱負荷 [W/m ²]
q'	: 時別日射負荷 [W/m ²]
Q	: 最大熱負荷 [W/m ²]
\bar{Q}	: 期間熱負荷 [W/m ²]
p	: 最大熱負荷の相対差 [%]
\bar{p}	: 期間熱負荷の相対差 [%]
p_i	: 相対放射輝度の残差の相対差 [%]

添え字

i	: 天空要素 No.(No.145 の天空要素が天頂となる)[-]
m	: 測定した天空放射輝度分布
u	: 一様天空
k	: 推定した天空タイプ
o	: 日射量を 0 とした
h	: 暖房
c	: 冷房

本章に関する既発表論文

査読付き論文

- 1) 天空放射輝度分布が空調熱負荷に与える影響に関する研究 - 京都実測データによる天空放射輝度分布を考慮した熱負荷計算 -: 細淵勇人, 吉田治典, 日本建築学会環境系論文集 No.631 pp.1101-1108, 2008.9

学術講演会発表

- 1) 天空放射輝度分布の熱負荷への影響に関する検討: 細淵勇人, 吉田治典, 上谷芳昭, 日本建築学会近畿支部研究発表会, pp.125-128, 2007.6
- 2) 天空放射輝度分布の熱負荷への影響に関する検討: 細淵勇人, 吉田治典, 上谷芳昭, 日本建築学会大会, pp.227-228, 2007.8

参考文献

- 5-1) Kittler, R., Perez, R. and Darula, S.: A Set of Standard Skies Characterising Daylight Conditions for Computer and Energy Conscious Design, Final Report of U.S.-Slovak Grant Project US-SK 92 052, 1998
- 5-2) CIE Standard: Spatial Distribution of Daylight-CIE Standard General Sky, CIE S 011.1/E, 2003.
- 5-3) Hay, J.E., S.: Study of Short-wave Radiation on Nonhorizontal Surfaces, Canadian Climatic Center Report, No.79-12, Atmospheric Environments Service, Toronto Canada, 1979
- 5-4) Reindl, D.T., Beckman, W.A. and Duffie, J.A., S.: Evaluation of Hourly Tilted Surface Radiation Models, Solar Energy, Vol.45, No.1, pp.9-17, 1990
- 5-5) Perez, R., Seals, R., Ineichen, Stewart, R., and Menicucci, D.: A New Simplified Version of the Perez Diffuse Irradiance Model for Tilted Surfaces, Solar Energy, Vol.39, No.3, pp.221-231, 1987
- 5-6) Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., and Stewart, R.: Modeling Day Light Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance, Solar Energy, 44(5), pp.271-289, 1990
- 5-7) <http://www.esru.strath.ac.uk/>, <http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>
- 5-8) 赤坂裕, 他, 拡張アメダス気象データ, 日本建築学会, 2000
- 5-9) Moon, P., Spencer, D.E.: Illumination from a non-uniform sky, Illum. Energy, 37, pp.707-726, 1942
- 5-10) Littlefair, P.J.: The Luminance Distribution of an Average Sky, Lightning Res. & Tech., Vol.13, No.4, pp.92-98, 1981
- 5-11) Kittler, R.: Luminance Distribution Characteristics of Homogeneous Skies, A Measurement and Prediction Strategy, Lightning Res. & Tech., Vol.17, No.4, pp.183-188, 1985
- 5-12) Nakamura, H., Oki, M., Hayashi, Y.: A Study on the Estimation of the Relative Frequency of Occurrences of the Clear Sky, the Intermediate Sky and the Overcast Sky in Japan, J.Light & Vis. Env., Vol.9, No.2, pp.76-85, 1985
- 5-13) Perez, R., Seals, R. and Michalsky, J.: All-Weather Model for Sky Luminance Distribution - Preliminary Configuration and Validation, Solar Energy, 50(3), pp.235-245, 1993
- 5-14) Igawa, N., Koga, Y., Matsuzawa, T. and Nakamura, H.: Model of Sky Radiance Distribution and Sky Luminance Distribution, Solar Energy, 77, pp.137-157, 2004
- 5-15) 滝沢博, 標準問題の提案 (オフィス用標準問題), 日本建築学会 環境工学委員会 熱分科会 第15回熱シンポジウム pp.35-42, 1985
- 5-16) CIE TC 3-07: Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement, CIE, Technical Report 108-1994

6章

天空放射輝度分布を考慮した 壁面日射量計算法の開発

第6章

天空放射輝度分布を考慮した 壁面日射量計算法の開発

6.1 はじめに

現在、熱負荷計算を行うにあたって壁面に入射する天空日射については、天空で一様とするのが一般的である。天空放射輝度分布を考慮するため、天空を一様、準直達、地平線部の各部分に分けて、それぞれより受ける天空日射量の割合をモデル化し壁面に入射する天空日射量を求める斜面日射モデルも開発されている。この斜面日射モデルには、天空日射量を分布が一様な天空日射量と、太陽光球周辺の高輝度天空からの日射成分である準直達日射量に分ける Hay⁶⁻¹⁾ のモデルの他、Hay のモデルに、地平線付近からの天空日射量を加えた Reindl⁶⁻²⁾ のモデルや、Reindl のモデルと同様に、一様な天空日射、準直達日射、地平線付近からの天空日射の3つの成分に分けて、天空状態を8種類に分類して天空日射量に占める各成分の割合を決める Perez^{6-3),6-4)} のモデル等がある。

これらの斜面日射モデルは、壁面の受ける日射量をモデル化したものであり、天空放射輝度分布そのもののモデルのように、天球上の積分を必要とせず、熱負荷計算への応用も容易である。しかしこのような斜面日射モデルは、天空の分布を一様、準直達、地平線部といった特徴的な放射輝度となる部分を分離してモデル化したものであり、天空放射輝度分布モデルのように、天球上の任意点の放射輝度を予測する為のものではない。このため周辺建物等の遮蔽物を考慮するなどより現実の環境を想定した場合など、現実との誤差が大きくなるという問題がある。

一方、天空放射輝度分布モデル^{例えば 6-5),6-6)} や、CIE 標準一般天空などの天空輝度分布モデル^{例えば 6-7),6-8)} といった分布そのもののモデルを壁面日射量計算に利用できれば、より現実に近い環境を想定しても、精度よく壁面天空日射量を求めることができると考える。しかしこれらのモデルを用いて壁面日射量を計算するには、分布の積分を計算する必要がある。これには数値積分を用いることが考えられるが、この計算時間は膨大で、年間熱負荷計算のような応用には適さない。また、現実の建物を考えた場合、周囲に他の建物などの遮蔽物が存在し、熱負荷への影響もある。従ってより現実に即した熱負荷を計算するには、このような遮蔽物の考慮も必要となる。この場合に数値積分を用いるならば、積分区間の判定など煩雑なプロセスも必要となることが考えられる。

現在、天空放射輝度分布、遮蔽物（他の建物等）を考慮した壁面日射量を計算し、これを用いて熱負荷計算をする一般的な手法を開発する研究は見られない。天空放射輝度分布、遮蔽物を考慮した、より現実に近い熱負荷を計算するためには、精度はもちろん、計算速度の観点からも、年間熱負荷計算に応用可能な天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量計算法を開発する必要がある。

そこで本章では、CIE 標準一般天空を用いて天空放射輝度分布を考慮した熱負荷計算において、遮蔽物を考慮することを可能とし、計算時間の要する数値積分法によらない、新たな壁面日射量計算法を開発する。

6.2 CIE 標準一般天空を用いた斜面日射量

CIE 標準一般天空の相対輝度分布は、

$$\frac{L_a}{L_z} = \frac{f(\mathbf{c})\mathbf{j}(Z)}{f(Z_s)\mathbf{j}(0)} = \frac{\left\{1 + c \cdot \left[\exp(d\mathbf{c}) - \exp\left(d\frac{p}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2 \mathbf{c} \right\} \times \left\{1 + a \cdot \exp\left(\frac{b}{\cos Z}\right)\right\}}{\left\{1 + c \cdot \left[\exp(dZ_s) - \exp\left(d\frac{p}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2 Z_s \right\} \times \{1 + a \cdot \exp(b)\}} \quad (6-1)$$

で与えられ、これを放射輝度分布に流用し、分布を考慮した傾斜面の天空日射量は、 Z (天空要素の高度)、 a (天空要素の方位) について、この面から天空の可視範囲を積分して、以下で与えられる。

$$I_{sh_CIE} = L_z \times \frac{1}{f(Z_s)\mathbf{j}(0)} \times \int_Z \int_a f(\mathbf{c})\mathbf{j}(Z) \cdot \cos Z_i \cdot \sin Z \cdot dZda \quad (6-2)$$

ここで、検討面に対する入射角の余弦は、以下で与えられる。

$$\cos Z_i = \cos Z_r \cos Z + \sin Z_r \sin Z \cos(\mathbf{a}_r - \mathbf{a}) \quad (6-3)$$

6-2式より、任意の鉛直面に入射する日射量を求めるには、通常、天頂放射輝度 L_z は測定されていないため、水平面、および任意面(鉛直面)について6-2式を求め、以下の操作を行う。

$$I_{sh_CIE} = \frac{I_{vertical_CIE}}{I_{horizontal_CIE}} \times E_{eg} \quad (6-4)$$

ここで、

水平面:

$$I_{horizontal_CIE} = L_z \times \frac{1}{f(Z_s)\mathbf{j}(0)} \times \int_{Z=0}^{Z=\frac{p}{2}} \int_{a=0}^{a=2p} f(\mathbf{c})\mathbf{j}(Z) \cdot \cos Z \cdot \sin Z \cdot dZda \quad (6-5)$$

任意面(鉛直面):

$$I_{vertical_CIE} = L_z \times \frac{1}{f(Z_s)\mathbf{j}(0)} \times \int_{Z=0}^{Z=\frac{p}{2}} \int_{a=a_1}^{a=a_2} f(\mathbf{c})\mathbf{j}(Z) \cdot (\sin Z \cos(\mathbf{a}_r - \mathbf{a})) \cdot \sin Z \cdot dZda \quad (6-6)$$

実際に任意の鉛直面に入射する日射量を求めるには、以下のように式変形し、6-8式を計算すればよい。

$$I_{sh_CIE} = \frac{L_z \times \frac{1}{f(Z_s)\mathbf{j}(0)} \times \int_{Z=0}^{Z=\frac{p}{2}} \int_{a=a_1}^{a=a_2} f(\mathbf{c})\mathbf{j}(Z) \cdot (\sin Z \cos(\mathbf{a}_r - \mathbf{a})) \cdot \sin Z \cdot dZda}{L_z \times \frac{1}{f(Z_s)\mathbf{j}(0)} \times \int_{Z=0}^{Z=\frac{p}{2}} \int_{a=0}^{a=2p} f(\mathbf{c})\mathbf{j}(Z) \cdot \cos Z \cdot \sin Z \cdot dZda} \times E_{ed} \quad (6-7)$$

$$I_{sh_CIE} = \frac{\int_{Z=0}^{Z=\frac{p}{2}} \int_{a=a_1}^{a=a_2} f(\mathbf{c})\mathbf{j}(Z) \cdot (\sin Z \cos(\mathbf{a}_r - \mathbf{a})) \cdot \sin Z \cdot dZda}{\int_{Z=0}^{Z=\frac{p}{2}} \int_{a=0}^{a=2p} f(\mathbf{c})\mathbf{j}(Z) \cdot \cos Z \cdot \sin Z \cdot dZda} \times E_{ed} \quad (6-8)$$

上記6-8式は、数値積分により計算されるのが一般的であるが、年間熱負荷計算への応用を考えた場合、毎時、壁面方位別の数値積分が必要となり、計算時間が膨大となることが考えられる。

6.3 計算法開発の検討

年間熱負荷計算への応用を前提として、計算時間の要する数値積分法によらない新たな壁面日射量計算法の開発を行うため、以下の方法を考え、計算法開発の可能性を検討した。

解析解を求める方法

CIE 標準一般天空の Gradation 関数, Indicatrix 関数そのものの解析解を求める。この方法は c の関数となる Indicatrix 関数の c 部分により解析解が求まらず、不可能である。

解析解の求まる近似式を用いる方法

Gradation 関数, Indicatrix 関数それぞれを簡単な解析解の求まる式に近似する。この方法は Indicatrix 関数が Z_s, Z, θ_s, θ の 4 変数になり近似式が作れないことから不可能であった。

変数変換による方法

Indicatrix 関数を Z_s, Z, θ_s, θ で表す c ではなく $Z_s = 0, \theta_s = 0$ として (太陽位置 Z_s, θ_s が原点), Z_s, θ_s からのずれ Z', θ' の関数として定義しなおすことで, c が含まれるのを回避する。この方法では, θ' の積分区間が太陽高度により変化し、一度の積分で求めることができない。また Indicatrix 関数の値は太陽位置で顕著に大きく、太陽位置で不連続になるため、積分区間を分割する必要があることがわかった。

離散値から近似式を作成する方法

Z' - (Z のみ変数変換)座標で Indicatrix 関数を求め、離散値から近似式を作成する。この場合 θ' の積分区間は一定となるが, Z_s, Z, θ_s, θ の四変数で近似式を求める必要がある。さらに, Indicatrix 関数の値は太陽位置が大きくなるため、太陽位置で不連続になること、によりピークとなる Z' が異なることより Z' 方向の積分が一度にできないことがわかった。

以上の検討の結果 6-8 式の積分部分の解析解を求めること、通常の Z -座標のまま Gradation 関数, Indicatrix 関数それぞれの、簡単な解析解が求まる近似式を求めることは不可能であることがわかった。しかし、上記検討により以下の3点を解決することで、新たな壁面日射量計算法を開発できると考える。

- i) Indicatrix 関数の太陽位置での不連続性
- ii) 水平面, 鉛直面日射量を求める積分の積分区間の不連続性
- iii) 太陽との角距離 c の扱い(解析的に解が求まらない)

そこで、まず $Z' (= Z - Z_s)$, $\theta' (= \theta - \theta_s)$ として、高度方向については太陽高度を原点に、方位方向については太陽方位を原点とする座標に変換することとする。このように座標変換することで、太陽との角距離 c が不要となり、さらに水平面, 鉛直面日射量の積分の際に、積分区間が連続になる。次に、この座標系で Gradation 関数, Indicatrix 関数それぞれ, θ' については、天球を適当な幅に分割し、その区間においては、変化はないと考え、各 θ' ごと ($0 \sim 180^\circ$ と $0 \sim -180^\circ$ は対称) に、解析的に解の求まる Z' の近似関数を求める。Indicatrix 関数については、近似関数が太陽位置で不連続になるのを回避するため、 Z_s の天頂側, 地平線側の二つに分けて近似関数を求めることで、壁面日射量計算法の開発を行う。

図 6.1 に座標変換の概要を、図 6.2 に、天頂側, 地平線側近似関数の概要を示す。

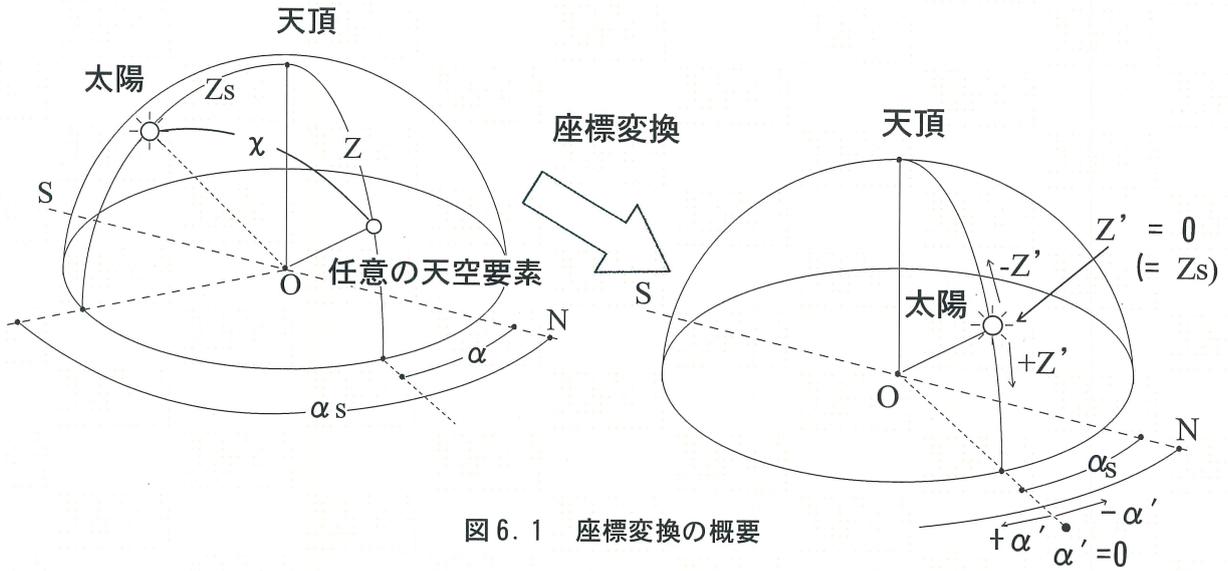


図 6.1 座標変換の概要

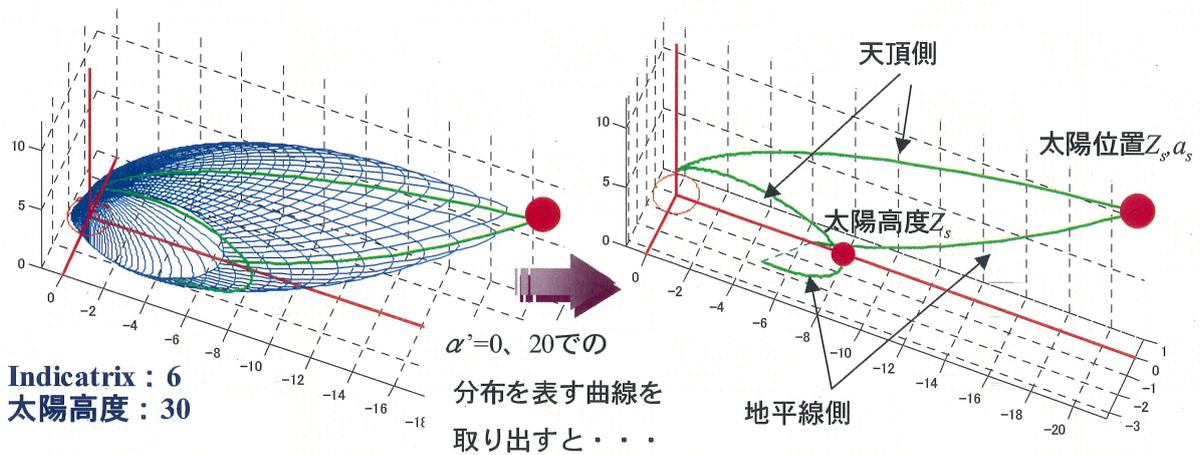


図 6.2 天頂側, 地平線側近似関数の概要

6.4 相対日射量の近似

6-8式でみたように, CIE 標準一般天空を用いて, 天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量を求めるには, 以下の, 水平面, 鉛直面相対日射量を求める必要がある.

$$I'_{horizontal_CIE} = \int_{Z=0}^{Z=\frac{\pi}{2}} \int_{\alpha=a1}^{\alpha=a2} f(\chi)\varphi(Z) \cdot \cos Z \cdot \sin Z \cdot dZd\alpha \quad (6-9)$$

$$I'_{vertical_CIE} = \int_{Z=0}^{Z=\frac{\pi}{2}} \int_{\alpha=a1}^{\alpha=a2} f(\chi)\varphi(Z) \cdot (\sin Z \cos(\alpha_r - \alpha)) \cdot \sin Z \cdot dZd\alpha \quad (6-10)$$

ここで $I'_{vertical_CIE}$ は以下のように展開できる.

$$I'_{vertical_CIE} = \int_{Z=0}^{Z=z2} \int_{a=a1}^{a=a2} f(\mathbf{c}) \mathbf{j}(Z) \cdot \sin Z (\cos \mathbf{a}_r \cos \mathbf{a} + \sin \mathbf{a}_r \sin \mathbf{a}) \cdot \sin Z \cdot dZ da \quad (6-11)$$

$$I'_{vertical_CIE} = \cos \mathbf{a}_r \times \int_{Z=0}^{Z=\frac{p}{2}} \int_{a=a1}^{a=a2} f(\mathbf{c}) \mathbf{j}(Z) \cdot \sin Z \cos \mathbf{a} \cdot \sin Z \cdot dZ da \\ + \sin \mathbf{a}_r \times \int_{Z=0}^{Z=\frac{p}{2}} \int_{a=a1}^{a=a2} f(\mathbf{c}) \mathbf{j}(Z) \cdot \sin Z \sin \mathbf{a} \cdot \sin Z \cdot dZ da \quad (6-12)$$

ここで、座標変換を行い、 Z' の積分で解析解が求まる近似関数を求め、 \mathbf{a}' 方向については、天球を適当な幅に分割し、その区間においては変化のないものとする。これは天球をケーキ状に分割し、分割した各部分ごとに相対日射量を求め、合計することになる。

このような計算を考えると、6-9、6-12式は以下のように表せる。

$$I'_{horizontal_CIE} = \sum_{a'=0}^{2p} \Delta a' \times \int_{Z'=0}^{Z'=\frac{p}{2}} f(\mathbf{c}) \mathbf{j}(Z') \cos Z' \cdot \sin Z' \cdot dZ' \quad (6-13)$$

$$I'_{vertical_CIE} = \cos \mathbf{a}_r \times \sum_{a'=a'1}^{a'2} \Delta a' \times \int_{Z'=0}^{Z'=\frac{p}{2}} f(\mathbf{c}) \mathbf{j}(Z') \sin^2 Z' \cdot \cos \mathbf{a}' \cdot dZ' \\ + \sin \mathbf{a}_r \times \sum_{a'=a'1}^{a'2} \Delta a' \times \int_{Z'=0}^{Z'=\frac{p}{2}} f(\mathbf{c}) \mathbf{j}(Z') \sin^2 Z' \cdot \sin \mathbf{a}' \cdot dZ' \quad (6-14)$$

ここで、 $\Delta a'$ は a' の分割幅 [rad]。

さらに、天頂側及び地平線側関数に分離すると以下のようになる。

$$I'_{horizontal_CIE} = \sum_{a'=0}^{2p} \Delta a' \times \int_{Z'=0}^{Z'=\frac{p}{2}-Z_s} f_a^g(Z', \mathbf{a}', Z_s) \mathbf{j}(Z') \cos(Z'+Z_s) \cdot \sin(Z'+Z_s) \cdot dZ' \\ + \sum_{a'=0}^{2p} \Delta a' \times \int_{Z'=-Z_s}^{Z'=0} f_a^g(Z', \mathbf{a}', Z_s) \mathbf{j}(Z') \cos(Z'+Z_s) \cdot \sin(Z'+Z_s) \cdot dZ' \quad (6-15)$$

$$I'_{vertical_CIE} = \cos \mathbf{a}_r \times \sum_{a'=a'1}^{a'2} \Delta a' \times \cos(\mathbf{a}' + \mathbf{a}_s) \times \int_{Z'=0}^{Z'=\frac{p}{2}-Z_s} f_a^g(Z', \mathbf{a}', Z_s) \mathbf{j}(Z') \sin^2(Z'+Z_s) \cdot dZ' \\ + \cos \mathbf{a}_r \times \sum_{a'=a'1}^{a'2} \Delta a' \times \cos(\mathbf{a}' + \mathbf{a}_s) \times \int_{Z'=-Z_s}^{Z'=0} f_a^g(Z', \mathbf{a}', Z_s) \mathbf{j}(Z') \sin^2(Z'+Z_s) \cdot dZ' \\ + \sin \mathbf{a}_r \times \sum_{a'=a'1}^{a'2} \Delta a' \times \sin(\mathbf{a}' + \mathbf{a}_s) \times \int_{Z'=0}^{Z'=\frac{p}{2}-Z_s} f_a^g(Z', \mathbf{a}', Z_s) \mathbf{j}(Z') \sin^2(Z'+Z_s) \cdot dZ' \\ + \sin \mathbf{a}_r \times \sum_{a'=a'1}^{a'2} \Delta a' \times \sin(\mathbf{a}' + \mathbf{a}_s) \times \int_{Z'=-Z_s}^{Z'=0} f_a^g(Z', \mathbf{a}', Z_s) \mathbf{j}(Z') \sin^2(Z'+Z_s) \cdot dZ' \quad (6-16)$$

つまり、 $f_a^g(Z', \mathbf{a}', Z_s) \mathbf{j}(Z')$ 、 $f_a^g(Z', \mathbf{a}', Z_s) \mathbf{j}(Z')$ について解析解が求まる式で近似し、以下の項の不定積分を求めておけば良いこととなる。

$$f_a^a(Z', \mathbf{a}', Z_s) \mathbf{j}(Z') \cos(Z'+Z_s) \cdot \sin(Z'+Z_s) \tag{6-17}$$

$$f_a^g(Z', \mathbf{a}', Z_s) \mathbf{j}(Z') \cos(Z'+Z_s) \cdot \sin(Z'+Z_s) \tag{6-18}$$

$$f_a^a(Z', \mathbf{a}', Z_s) \mathbf{j}(Z') \sin^2(Z'+Z_s) \tag{6-19}$$

$$f_a^g(Z', \mathbf{a}', Z_s) \mathbf{j}(Z') \sin^2(Z'+Z_s) \tag{6-20}$$

天頂側近似関数 f_a^a , 地平線側近似関数 f_a^g が同様な形の近似式で近似できるならば, その係数を入れ替えるだけでよいことになり, 結果として, 以下の2式について, 解析解が求まる式で近似すればよいことになる.

$$f_a^{a(g)}(Z', \mathbf{a}', Z_s) \mathbf{j}(Z') \cos(Z'+Z_s) \cdot \sin(Z'+Z_s) \tag{6-21}$$

$$f_a^{a(g)}(Z', \mathbf{a}', Z_s) \mathbf{j}(Z') \sin^2(Z'+Z_s) \tag{6-22}$$

本研究では, 6-21, 22式から Indicatrix, Gradation 関数それぞれを分離して, その近似式を求め, これを用いて解析解を求めることとする. これは6-21, 22式のような Indicatrix, Gradation 関数の掛け合わさった式を近似するのではなく, Indicatrix, Gradation 関数それぞれの近似式を求める方が, より精度の高い近似式を求めることができると考えるためである. さらに, Indicatrix, Gradation 関数それぞれの近似関数を求めておくことで, 分布そのものモデルとして利用することも可能となる.

6.4.1 Gradation 関数の近似

近似関数は, 目視により解析解の求まる一般的な関数に当てはめ, 誤差の検討を行い決定する. Gradation 関数については, 以下の式で近似することとする.

$$\mathbf{j}(Z') = g_1 \times g_2^{Z'} + g_3 \tag{6-23}$$

Gradation関数については, Indicatrix関数のように太陽位置によりその値は変化しないため, Z_s による座標変換に際して, 一度求めた近似関数を Z_s だけ並行移動すればよい. 表6.1に近似関数の係数を示す.

図6.3に示すように, グループ1の地平線に近い領域で, Gradation 関数と近似式にやや違いが見られる. 表6.2に近似関数の Gradation 関数に対する相対誤差を示す. 図6.3で見たようにグループ1の地平線に近い領域でやや大きく10%を超えるところが見られるが, それ以外では最大でも-7%程度である. これから6-23式で Gradation 関数が精度良く近似されていることがわかる.

表6.1 Gradation 関数 近似関数の係数

	Gradation					
	1	2	3	4	5	6
g1	-0.483	-0.175	0.000	0.073	0.020	0.001
g2	3.149	2.607	10.000	4.498	11.130	63.148
g3	3.598	1.706	1.000	0.322	0.242	0.146

零割回避のため

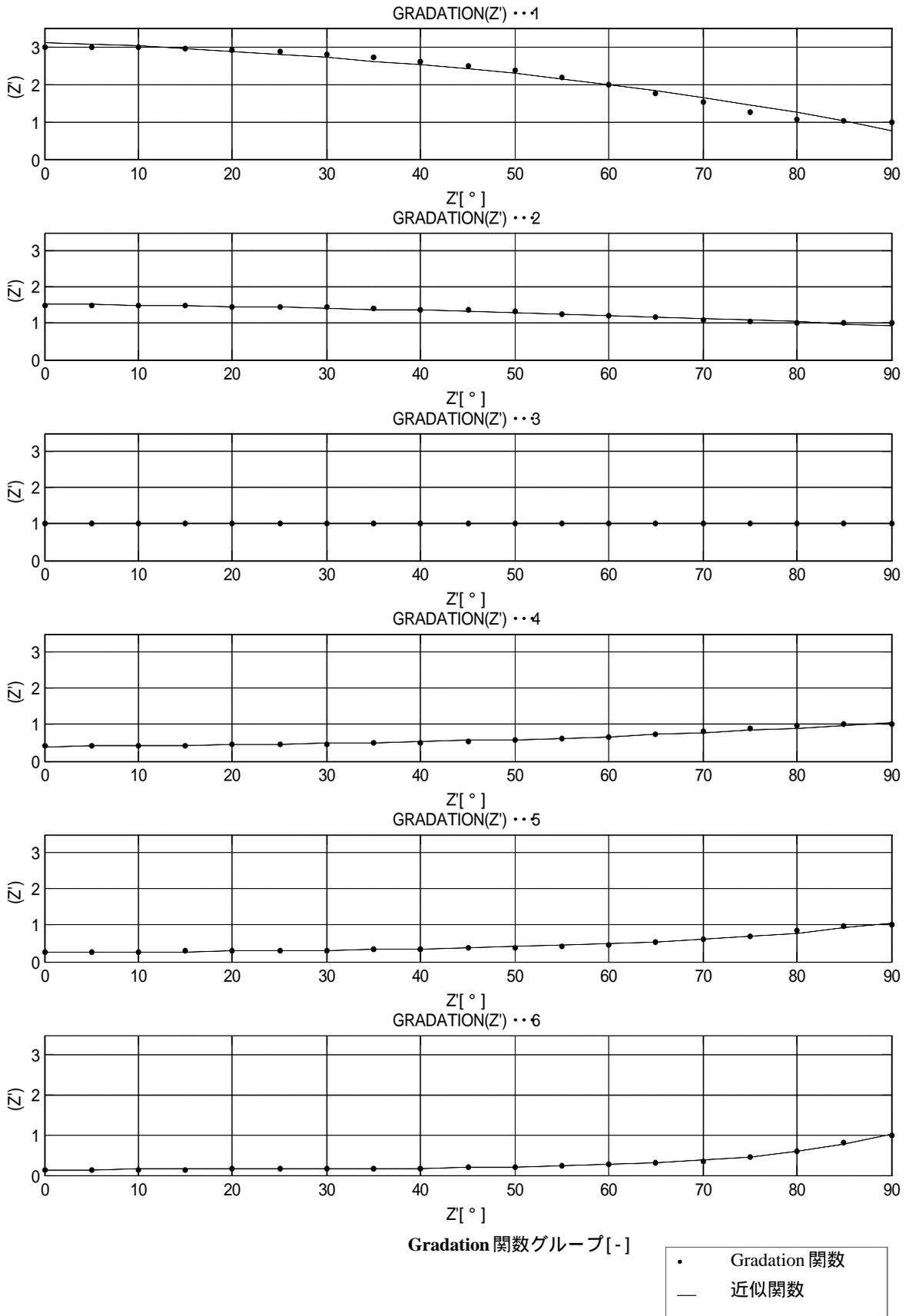


図 6.3 Gradation 関数の近似

表 6.2 近似関数の Gradation 関数に対する相対誤差

		Z' [°]									
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	
GRADATION グループ	I	4.25	2.65	1.24	-0.01	-1.10	-2.03	-2.78	-3.32	-3.61	
	II	2.37	1.42	0.59	-0.14	-0.75	-1.24	-1.60	-1.81	-1.85	
	III	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	IV	-6.83	-4.52	-2.45	-0.63	0.93	2.21	3.20	3.87	4.18	
	V	-5.89	-4.27	-2.89	-1.70	-0.66	0.27	1.10	1.87	2.58	
	VI	2.92	3.13	2.84	2.12	1.07	-0.20	-1.53	-2.74	-3.65	
		Z' [°]									
		45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
...		-3.56	-3.04	-1.86	0.27	3.73	8.83	14.77	15.76	0.25	-25.52
		-1.68	-1.25	-0.51	0.57	2.00	3.59	4.67	3.71	-0.62	-6.51
		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		4.09	3.58	2.60	1.13	-0.79	-3.01	-5.04	-5.56	-1.63	6.93
		3.18	3.63	3.82	3.56	2.65	0.82	-2.07	-5.55	-5.94	6.48
		-4.05	-3.75	-2.65	-0.74	1.70	3.98	4.75	1.85	-6.33	2.15

[%]

また, Gradation 関数のみの分布があるとした場合, 水平面, 鉛直面相対日射量は以下の 6-24, 25 式で表される. この相対日射量と数値積分, 天空要素計算法 (3 章参照) の場合の相対日射量を相対誤差により比較を行った. 数値積分に対する相対誤差は最大で 2.32% と小さく, これからも近似関数が精度のよいものであり, これを用いて精度良く相対日射量を求めることができることがわかる (図 6.4, 表 6.3, 表 6.4).

$$I'_{horizontal_GRA} = \sum_{a=0}^{2p} \Delta a \times \int_{Z'=0}^{Z'=\frac{p}{2}-Z_s} \mathbf{j}(Z') \frac{1}{2} \sin 2Z' \cdot dZ' + \sum_{a=0}^{2p} \Delta a \times \int_{Z'=-Z_s}^{Z'=0} \mathbf{j}(Z') \frac{1}{2} \sin 2Z' \cdot dZ' \quad (6-24)$$

$$\begin{aligned}
 I'_{vertical_GRA} = & \cos a_r \times \sum_{a=a'1}^{a'2} \Delta a \times \int_{Z'=0}^{Z'=\frac{p}{2}-Z_s} \mathbf{j}(Z') \sin^2 Z \cos a' \cdot dZ' \\
 & + \cos a_r \times \sum_{a=a'1}^{a'2} \Delta a \times \int_{Z'=-Z_s}^{Z'=0} \mathbf{j}(Z') \sin^2 Z \cos a' \cdot dZ' \\
 & + \sin a_r \times \sum_{a=a'1}^{a'2} \Delta a \times \int_{Z'=0}^{Z'=\frac{p}{2}-Z_s} \mathbf{j}(Z') \sin^2 Z \sin a' \cdot dZ' \\
 & + \sin a_r \times \sum_{a=a'1}^{a'2} \Delta a \times \int_{Z'=-Z_s}^{Z'=0} \mathbf{j}(Z') \sin^2 Z \sin a' \cdot dZ' \quad (6-25)
 \end{aligned}$$

このときの 6-24, 25 式に含まれる Z' の積分式の解析解 (不定積分) は 6-26, 27 式となる. これを求めることで, 水平面, 鉛直面の相対日射量を求めることができる.

$$\begin{aligned}
 \int_Z \mathbf{j}(Z') \cos Z' \sin Z' \cdot dZ' = & \frac{1}{1 + \tan^2(Z'+Z_s)^2} \left(-\frac{g_1 \exp((Z'+Z_s) \log g_2)}{4 + \log g_2^2} \right. \\
 & \left. + \frac{g_1 \log g_2 \exp((Z'+Z_s) \log g_2) \tan(Z'+Z_s)}{4 + \log g_2^2} + \frac{g_1 \exp((Z'+Z_s) \log g_2) \tan(Z'+Z_s)^2}{4 + \log g_2^2} \right) \\
 & - \frac{1}{4} g_3 \cos(2Z'+2Z_s) \quad (6-26)
 \end{aligned}$$

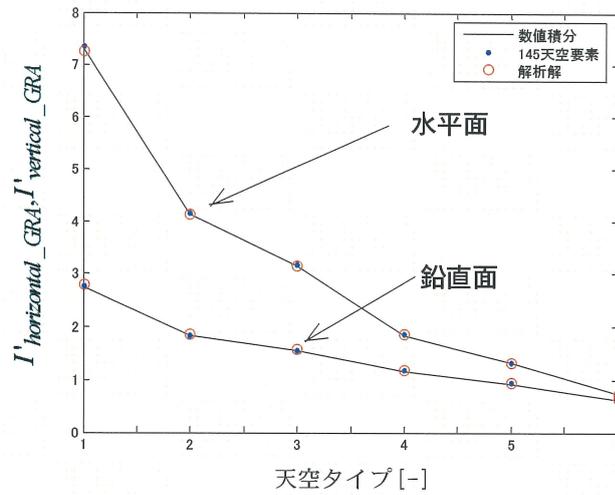


図6.4 Gradation 近似関数と数値積分、天空要素計算の比較

表6.3 数値積分法に対する相対誤差

		GRADATION グループ					
		I	II	III	IV	V	VI
数値積分	水平面	-0.56	-0.23	0.01	0.65	0.61	-0.87
	南面	1.06	1.14	1.13	1.32	1.80	2.32
	西面	1.06	1.14	1.13	1.32	1.80	2.32
	北面	1.06	1.14	1.13	1.32	1.80	2.32
	東面	1.06	1.14	1.13	1.32	1.80	2.32

[%]

表6.4 天空要素計算法に対する相対誤差

		GRADATION グループ					
		I	II	III	IV	V	VI
145天空要素計算法	水平面	-1.02	-0.75	-0.54	-0.07	-0.48	-2.71
	南面	0.83	0.50	0.29	-0.07	-0.29	1.27
	西面	1.51	1.13	0.88	0.46	0.23	1.80
	北面	0.83	0.50	0.29	-0.07	-0.29	1.27
	東面	1.51	1.13	0.88	0.46	0.23	1.80

[%]

$$\begin{aligned}
 \int_{Z'} \varphi(Z') \sin Z' \sin Z' \cdot dZ' &= \frac{1}{\left(1 + \tan\left(\frac{1}{2}Z' + \frac{1}{2}Z_s\right)^2\right)^2} \left(\frac{2g_1 \exp((Z'+Z_s)\log_2) \tan\left(\frac{1}{2}Z' + \frac{1}{2}Z_s\right)^4}{\log_2(4 + \log_2^2)} \right. \\
 &+ \frac{1}{2}g_3 Z' + \frac{4g_1(1 + \log_2^2) \exp((Z'+Z_s)\log_2) \tan\left(\frac{1}{2}Z' + \frac{1}{2}Z_s\right)^2}{\log_2(4 + \log_2^2)} \\
 &+ g_3 Z \tan\left(\frac{1}{2}Z' + \frac{1}{2}Z_s\right)^2 + \frac{1}{2}g_3 Z \tan\left(\frac{1}{2}Z' + \frac{1}{2}Z_s\right)^4 + \frac{2g_1 \exp((Z'+Z_s)\log_2)}{\log_2(4 + \log_2^2)} \\
 &+ g_3 Z \tan\left(\frac{1}{2}Z' + \frac{1}{2}Z_s\right)^3 - \frac{4g_1 \exp((Z'+Z_s)\log_2) \tan\left(\frac{1}{2}Z' + \frac{1}{2}Z_s\right)}{4 + \log_2^2} \\
 &\left. + \frac{4g_1 \exp((Z'+Z_s)\log_2) \tan\left(\frac{1}{2}Z' + \frac{1}{2}Z_s\right)^3}{4 + \log_2^2} - g_3 \tan\left(\frac{1}{2}Z' + \frac{1}{2}Z_s\right) \right)
 \end{aligned}
 \tag{6-27}$$

6.4.2 Indicatrix 関数の近似

Indicatrix 関数は，天頂側，地平線側近似関数同様な以下の式で近似する．

$$\text{天頂側: } f_a^d(Z', \mathbf{a}', Z_s) = f_{a,1} \times \exp(f_{a,2} Z') + f_{a,3} \quad (6-28)$$

$$\text{地平線側: } f_a^g(Z', \mathbf{a}', Z_s) = f_{g,1} \times \exp(f_{g,2} Z') + f_{g,3} \quad (6-29)$$

Indicatrix 関数は， Z_s ， Z' ， θ の関数である．近似関数は Z' の関数として求めた．この時，近似関数の係数を Z_s ， θ の関数として表すことを考え検討を行ったが，係数 $f_{a,1,2,3}$ ， $f_{g,1,2,3}$ は， Z_s により性状が異なることがわかった．これは，図 6.5 に示すように地平線側近似関数の係数 $f_{g,2}$ で顕著であった．このため，Indicatrix のグループごとに天頂側，地平線側近似関数それぞれの係数を， Z_s ， θ に関するパラメータ表として整理しておき，壁面日射量の計算に際しては，このパラメータ表から，対応する係数を取り出してきて計算することとする．表 6.5，6 及び Appendix-1 に近似関数のパラメータ表を示す．

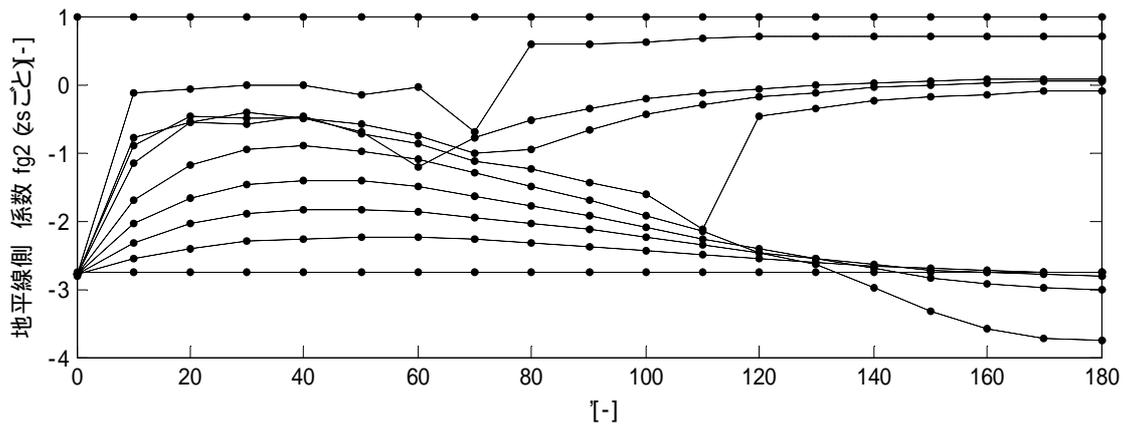


図 6.5 地平線側近似関数の係数 $f_{g,2}$

図 6.6 に Indicatrix 関数と近似関数の比較を示す．太陽位置に近い領域で，Indicatrix 関数と近似式にやや相違はあるものの，精度良く近似しているものとする．

Indicatrix 近似関数の近似誤差を太陽の天頂角 θ ごとに %RMSE として求めた（図 6.7，Appendix-2）．%RMSE はグループ 1～3 では，5% を超えることはなく，グループ 4 で，最大 5.71%，誤差値の 97.5% が 5% より小さい．グループ 5 では，最大 6.53%，誤差値の 93.2% が 5% より小さい．一番誤差の大きくなるグループ 6 においても，最大 7.12%，誤差値の 86.3% が 5% より小さい結果となり，どのグループにおいても近似誤差は小さい．これより近似関数は精度の良い近似であると言える．

表 6.5 天頂側近似関数の係数 (Indicatrix-2)

		Zs									
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$f_{a,1}$	0	1.480	2.181	2.039	2.239	2.220	2.276	2.278	2.271	2.264	2.249
	10	1.480	461.420	2.733	4.071	3.855	3.881	3.009	2.665	2.396	2.191
	20	1.480	441.660	3.575	4.131	8.420	4.459	4.202	3.893	2.812	2.271
	30	1.480	321.930	2.962	3.030	3.086	6.984	3.402	4.005	5.017	2.668
	40	1.480	227.070	2.013	2.492	2.286	2.357	2.498	2.685	2.622	3.278
	50	1.480	134.640	1.108	1.363	1.619	1.531	1.861	1.683	1.736	1.624
	60	1.480	0.952	0.982	0.756	0.707	0.672	0.865	0.958	1.039	1.012
	70	1.480	97.188	0.872	0.627	0.625	0.624	0.677	0.881	1.083	0.945
	80	1.480	7.044	0.782	1.008	0.863	0.637	0.778	0.524	0.387	0.998
	90	1.480	247.650	1.245	1.312	1.163	0.906	0.690	0.500	0.398	1.044
	100	1.480	326.950	1.475	1.792	1.036	0.770	0.578	0.476	0.406	0.248
	110	1.480	363.320	0.849	1.569	1.157	0.652	1.107	0.446	0.399	0.269
	120	1.480	317.690	1.080	0.905	0.771	0.543	0.960	0.073	0.348	0.274
	130	1.480	10.569	0.918	0.804	0.727	0.446	0.822	0.030	0.358	0.263
	140	1.480	13.215	0.766	0.649	0.601	0.269	0.085	0.017	0.002	0.297
	150	1.480	2.713	0.719	0.634	0.545	1.156	0.058	0.009	0.001	0.297
	160	1.480	1.782	0.774	0.638	0.425	0.167	0.046	0.006	0.350	0.297
	170	1.480	1.484	0.862	0.605	0.382	0.150	0.037	0.004	0.348	0.298
	180	1.480	1.415	0.752	0.643	0.370	0.135	0.035	0.005	0.348	0.299
$f_{a,2}$	0	1.000	1.375	1.500	1.332	1.356	1.303	1.302	1.309	1.318	1.337
	10	1.000	0.005	0.813	0.488	0.486	0.450	0.588	0.664	0.756	0.868
	20	1.000	0.004	0.449	0.354	0.151	0.276	0.273	0.280	0.396	0.514
	30	1.000	0.004	0.383	0.340	0.306	0.118	0.238	0.186	0.138	0.275
	40	1.000	0.003	0.356	0.259	0.263	0.238	0.214	0.190	0.191	0.146
	50	1.000	0.003	0.317	0.237	0.192	0.204	0.166	0.189	0.188	0.211
	60	1.000	0.009	0.030	0.071	0.115	0.164	0.159	0.173	0.183	0.214
	70	1.000	-0.003	-0.261	-0.241	-0.146	-0.064	0.008	0.052	0.074	0.118
	80	1.000	-0.090	-0.553	-0.320	-0.259	-0.227	-0.110	-0.064	0.022	0.043
	90	1.000	-0.004	-0.505	-0.356	-0.289	-0.252	-0.214	-0.168	-0.092	0.000
	100	1.000	-0.004	-0.539	-0.331	-0.397	-0.367	-0.322	-0.242	-0.154	-0.094
	110	1.000	-0.004	-1.005	-0.434	-0.414	-0.483	-0.210	-0.297	-0.187	-0.124
	120	1.000	-0.005	-0.911	-0.767	-0.639	-0.608	-0.260	-1.122	-0.220	-0.124
	130	1.000	-0.163	-1.130	-0.905	-0.714	-0.745	-0.311	-1.736	-0.206	-0.107
	140	1.000	-0.140	-1.377	-1.122	-0.865	-1.092	-1.521	-2.188	-2.880	-0.061
	150	1.000	-0.686	-1.503	-1.181	-0.955	-0.369	-1.837	-2.652	-3.772	-0.022
	160	1.000	-1.048	-1.456	-1.202	-1.161	-1.504	-2.036	-2.971	-0.141	0.013
	170	1.000	-1.261	-1.362	-1.265	-1.261	-1.601	-2.233	-3.347	-0.125	0.036
	180	1.000	-1.324	-1.520	-1.216	-1.292	-1.698	-2.268	-3.067	-0.119	0.040
$f_{a,3}$	0	1.480	0.780	0.923	0.721	0.742	0.683	0.682	0.689	0.697	0.714
	10	1.480	-458.540	0.091	-1.307	-1.145	-1.224	-0.384	-0.066	0.191	0.399
	20	1.480	-438.860	-0.893	-1.559	-5.953	-2.074	-1.890	-1.638	-0.588	-0.057
	30	1.480	-319.210	-0.419	-0.644	-0.835	-4.849	-1.354	-2.028	-3.095	-0.764
	40	1.480	-224.420	0.399	-0.279	-0.236	-0.438	-0.680	-0.944	-0.933	-1.622
	50	1.480	-132.060	1.184	0.694	0.253	0.197	-0.243	-0.143	-0.247	-0.162
	60	1.480	1.564	1.200	1.163	1.010	0.892	0.586	0.416	0.285	0.287
	70	1.480	-94.734	1.211	1.173	0.961	0.804	0.637	0.357	0.108	0.223
	80	1.480	-4.647	1.213	0.685	0.611	0.678	0.425	0.607	0.702	0.072
	90	1.480	-245.300	0.669	0.288	0.212	0.313	0.425	0.549	0.616	-0.044
	100	1.480	-324.650	0.369	-0.272	0.259	0.373	0.468	0.514	0.557	0.707
	110	1.480	-361.070	0.940	-0.117	0.071	0.430	-0.117	0.502	0.531	0.661
	120	1.480	-315.470	0.656	0.496	0.406	0.493	-0.009	0.862	0.567	0.648
	130	1.480	-8.377	0.776	0.552	0.407	0.556	0.103	0.898	0.551	0.661
	140	1.480	-11.047	0.897	0.674	0.501	0.714	0.849	0.909	0.929	0.637
	150	1.480	-0.563	0.918	0.663	0.534	-0.212	0.870	0.918	0.937	0.651
	160	1.480	0.355	0.844	0.639	0.641	0.793	0.878	0.923	0.578	0.663
	170	1.480	0.647	0.743	0.662	0.676	0.805	0.888	0.928	0.585	0.670
	180	1.480	0.713	0.852	0.619	0.685	0.820	0.889	0.924	0.587	0.671

表 6.6 地平線側近似関数の係数 (Indicatrix-2)

		Zs										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
地平線側近似関数 INDICATRIX-2	$f_{g,1}$	0	2.250	2.265	2.270	2.270	2.275	2.242	2.106	1.993	2.181	1.480
		10	2.250	2.268	2.336	2.534	3.035	4.361	3.496	3.234	138.310	1.248
		20	2.250	2.247	2.337	2.811	3.382	6.098	2.555	1.334	144.420	1.064
		30	2.250	2.204	2.294	2.753	3.855	2.614	1.853	1.109	15.162	0.917
		40	2.250	2.136	2.176	2.366	2.243	1.841	1.109	1.058	45.233	0.800
		50	2.250	2.060	1.987	1.959	1.762	1.436	1.066	1.037	0.336	0.706
		60	2.250	1.969	1.785	1.596	1.428	1.149	1.044	1.024	-0.023	0.632
		70	2.250	1.884	1.564	1.339	1.117	1.059	1.028	1.013	-0.198	0.574
		80	2.250	1.797	1.406	1.114	0.951	1.040	1.016	1.005	-0.129	0.531
		90	2.250	1.710	1.280	0.909	0.952	1.027	1.006	0.998	-0.087	0.500
		100	2.250	1.640	1.147	0.766	0.495	1.015	0.997	0.991	-0.055	0.480
		110	2.250	1.576	1.048	0.654	0.371	1.006	0.985	0.986	-0.028	0.470
		120	2.250	1.522	0.972	0.568	0.293	0.998	0.978	0.983	-0.004	0.467
		130	2.250	1.474	0.903	0.501	0.987	0.984	0.973	0.980	0.017	0.469
		140	2.250	1.438	0.859	0.453	0.999	0.977	0.969	0.979	0.036	0.475
		150	2.250	1.409	0.821	0.418	1.002	0.972	0.967	0.978	0.050	0.481
		160	2.250	1.388	0.795	0.395	1.003	0.968	0.965	0.978	0.058	0.487
		170	2.250	1.377	0.780	0.380	1.001	0.966	0.964	0.978	0.058	0.490
		180	2.250	1.375	0.777	0.376	1.000	0.966	0.964	0.978	0.053	0.489
	$f_{g,2}$	0	-1.335	-1.317	-1.310	-1.311	-1.304	-1.334	-1.458	-1.549	-1.375	1.000
		10	-1.335	-1.219	-1.071	-0.878	-0.649	-0.402	-0.486	-0.454	-0.007	1.000
		20	-1.335	-1.145	-0.914	-0.613	-0.438	-0.203	-0.448	-0.675	-0.003	1.000
		30	-1.335	-1.092	-0.810	-0.520	-0.297	-0.388	-0.442	-0.524	-0.019	1.000
		40	-1.335	-1.067	-0.764	-0.532	-0.453	-0.443	-0.573	-0.385	-0.004	1.000
		50	-1.335	-1.055	-0.773	-0.579	-0.496	-0.466	-0.455	-0.295	-0.456	1.000
		60	-1.335	-1.068	-0.810	-0.655	-0.534	-0.487	-0.367	-0.233	3.606	1.000
		70	-1.335	-1.083	-0.897	-0.723	-0.611	-0.438	-0.299	-0.186	0.435	1.000
		80	-1.335	-1.114	-0.965	-0.822	-0.633	-0.367	-0.243	-0.148	0.511	1.000
		90	-1.335	-1.162	-1.027	-0.984	-0.531	-0.305	-0.194	-0.113	0.560	1.000
		100	-1.335	-1.199	-1.141	-1.142	-1.123	-0.250	-0.149	-0.081	0.592	1.000
		110	-1.335	-1.242	-1.246	-1.325	-1.497	-0.200	-0.107	-0.050	0.605	1.000
		120	-1.335	-1.282	-1.336	-1.518	-1.868	-0.154	-0.068	-0.021	0.617	1.000
		130	-1.335	-1.327	-1.453	-1.742	-2.260	-0.114	-0.032	0.006	0.621	1.000
		140	-1.335	-1.360	-1.522	-1.927	-2.217	-0.079	-0.001	0.029	0.622	1.000
		150	-1.335	-1.392	-1.604	-2.097	-1.185	-0.050	0.024	0.047	0.619	1.000
		160	-1.335	-1.418	-1.659	-2.210	-0.163	-0.029	0.042	0.060	0.615	1.000
		170	-1.335	-1.430	-1.694	-2.299	-0.150	-0.017	0.053	0.067	0.610	1.000
		180	-1.335	-1.430	-1.699	-2.345	-0.145	-0.012	0.057	0.069	0.612	1.000
	$f_{g,3}$	0	0.713	0.697	0.690	0.690	0.684	0.719	0.859	0.971	0.780	1.480
		10	0.713	0.634	0.497	0.228	-0.337	-1.719	-0.891	-0.676	-135.790	1.248
		20	0.713	0.585	0.349	-0.264	-0.944	-3.758	-0.290	0.861	-142.280	1.064
		30	0.713	0.551	0.245	-0.404	-1.658	-0.533	0.127	0.792	-13.312	0.917
		40	0.713	0.542	0.225	-0.191	-0.244	0.016	0.637	0.606	-43.618	0.800
		50	0.713	0.543	0.290	0.061	0.061	0.234	0.488	0.437	1.092	0.706
		60	0.713	0.565	0.379	0.288	0.244	0.364	0.354	0.298	1.300	0.632
		70	0.713	0.584	0.503	0.426	0.427	0.324	0.244	0.188	1.359	0.574
		80	0.713	0.611	0.573	0.549	0.484	0.236	0.157	0.103	1.202	0.531
		90	0.713	0.647	0.621	0.669	0.389	0.163	0.089	0.040	1.096	0.500
		100	0.713	0.668	0.688	0.739	0.782	0.106	0.039	-0.001	1.022	0.480
		110	0.713	0.691	0.732	0.791	0.849	0.062	0.009	-0.028	0.972	0.470
		120	0.713	0.709	0.759	0.827	0.881	0.030	-0.013	-0.042	0.939	0.467
		130	0.713	0.727	0.790	0.854	0.123	0.014	-0.025	-0.046	0.919	0.469
		140	0.713	0.739	0.802	0.870	0.080	0.000	-0.032	-0.044	0.909	0.475
		150	0.713	0.749	0.817	0.881	0.055	-0.009	-0.034	-0.039	0.905	0.481
		160	0.713	0.758	0.825	0.887	0.039	-0.015	-0.033	-0.033	0.907	0.487
		170	0.713	0.761	0.830	0.891	0.032	-0.017	-0.033	-0.029	0.913	0.490
		180	0.713	0.760	0.830	0.893	0.030	-0.018	-0.032	-0.028	0.920	0.489

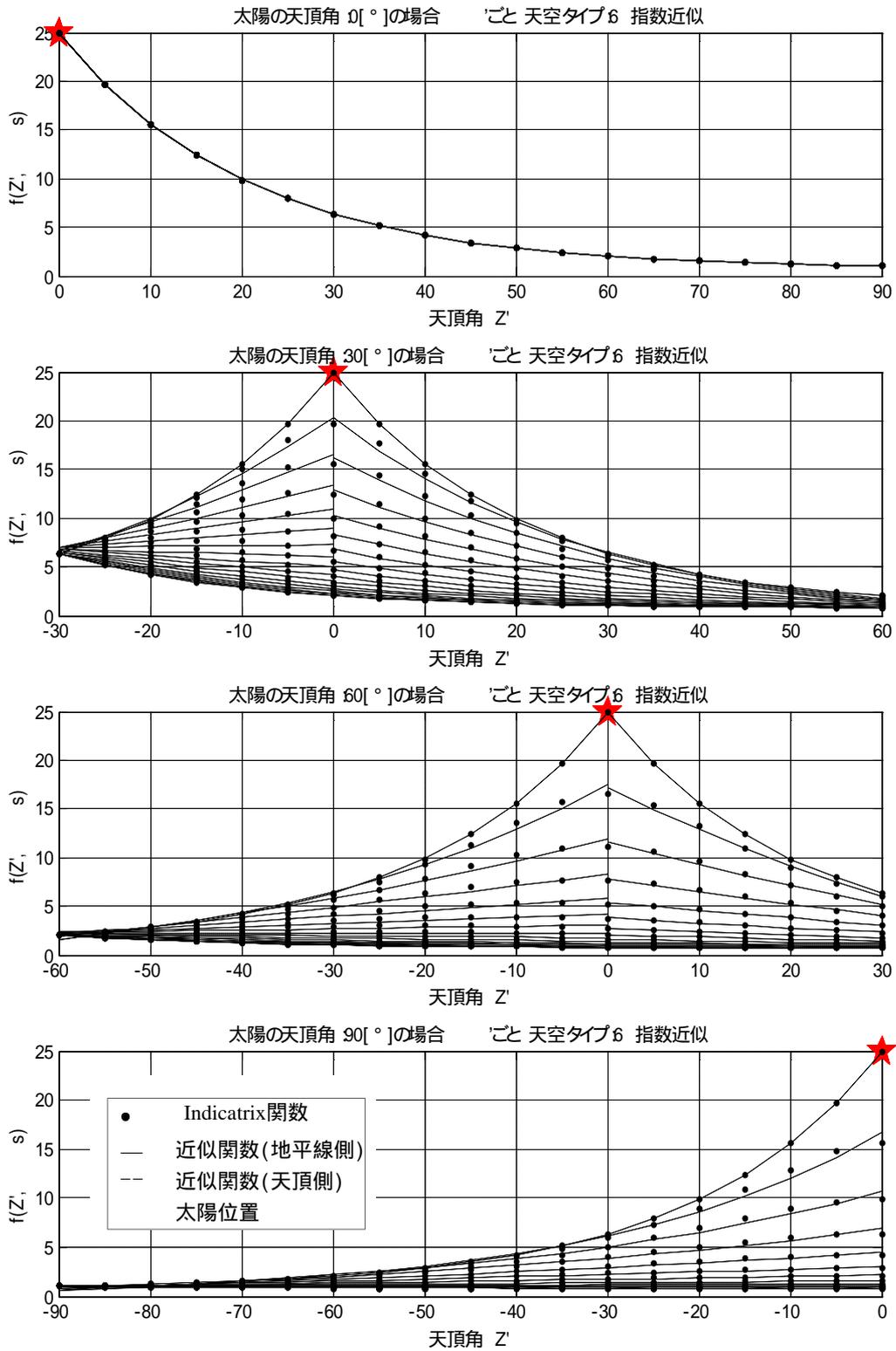


図 6.6 Indicatrix 関数と近似関の比較 (グループ 6)

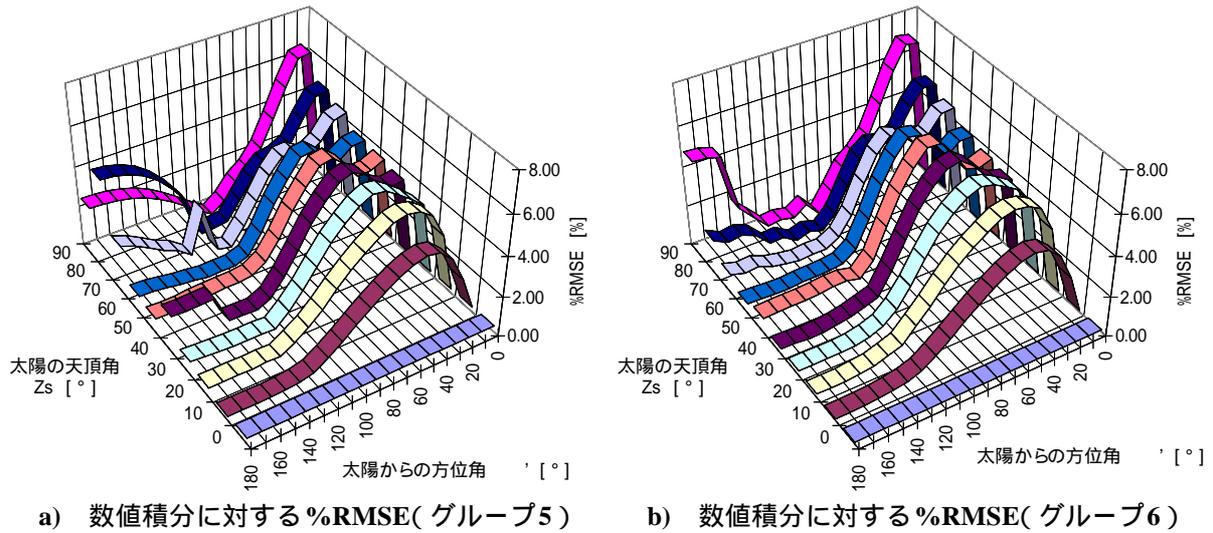


図6.7 Indicatrix近似関数の近似誤差

次に，Gradation 関数の場合と同様に，Indicatrix 関数のみを用いた以下の6-30，31式で表される水平面，鉛直面相對日射量を求め，これと数値積分，天空要素計算法の場合の相對日射量との %RMSE を求め比較を行う．

$$\begin{aligned}
 I'_{horizontal_IND} &= \sum_{a'=0}^{2p} \Delta a' \times \int_{Z'=0}^{Z'=\frac{p}{2}-Z_s} f_{a'}^g(Z', a', Z_s) \cos(Z'+z_s) \cdot \sin(Z'+z_s) \cdot dZ' \\
 &\quad + \sum_{a'=0}^{2p} \Delta a' \times \int_{Z'=-Z_s}^{Z'=0} f_{a'}^a(Z', a', Z_s) \cos(Z'+z_s) \cdot \sin(Z'+z_s) \cdot dZ' \quad (6-30)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I'_{vertical_IND} &= \cos a_r \times \sum_{a'=a_1}^{a_2} \Delta a' \times \int_{Z'=0}^{Z'=\frac{p}{2}-Z_s} f_{a'}^g(Z', a', Z_s) \sin^2 Z_s \cos a' \cdot dZ' \\
 &\quad + \cos a_r \times \sum_{a'=a_1}^{a_2} \Delta a' \times \int_{Z'=-Z_s}^{Z'=0} f_{a'}^a(Z', a', Z_s) \sin^2 Z_s \cos a' \cdot dZ' \\
 &\quad + \sin a_r \times \sum_{a'=a_1}^{a_2} \Delta a' \times \int_{Z'=0}^{Z'=\frac{p}{2}-Z_s} f_{a'}^g(Z', a', Z_s) \sin^2 Z_s \sin a' \cdot dZ' \\
 &\quad + \sin a_r \times \sum_{a'=a_1}^{a_2} \Delta a' \times \int_{Z'=-Z_s}^{Z'=0} f_{a'}^a(Z', a', Z_s) \sin^2 Z_s \sin a' \cdot dZ' \quad (6-31)
 \end{aligned}$$

このときの6-30，31式に含まれる Z' の積分式の解析解（不定積分）は以下の6-32，33式となり，Gradation同様，これを求めることで，水平面，鉛直面の相對日射量を得ることができる．これはGradationの近似関数の不定積分と比べ，項数，演算回数が少なく，計算時間の短縮が可能となる．

$$\begin{aligned}
 \int_{Z'} f_{a'}^g(Z', a', Z_s) \cos(Z'+z_s) \cdot \sin(Z'+z_s) \cdot dZ' &= \\
 \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{2 \exp(f_{a(g),2} Z') \cos(2Z'+2Z_s)}{f_{a(g),2}^2 + 4} + \frac{f_{a(g),2} (f_{a(g),2} Z') \sin(2Z'+2Z_s)}{f_{a(g),2}^2 + 4}\right) - \frac{1}{4} f_{a(g),3} \cos(2Z'+2Z_s) &\quad (6-32)
 \end{aligned}$$

$$\int_{Z'} f_{\alpha'}^g(Z', \alpha', Zs) \sin(Z' + zs) \cdot \sin(Z' + zs) \cdot dZ' =$$

$$\frac{f_{a(g),1} \exp(f_{a(g),2} Z')}{2 f_{a(g),2}} - \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{f_{a(g),2} \exp(bZ') \cos(2Z' + 2Zs)}{f_{a(g),2}^2 + 4}\right) + \frac{2 \exp(f_{a(g),2} Z') \sin(2Z' + 2Zs)}{f_{a(g),2}^2 + 4} + \frac{f_{a(g),3} Z'}{2} - \frac{1}{4} f_{a(g),3} \sin(2Z' + 2Zs)$$

(6-33)

図 6. 8, Appendix-3 に数値積分, 天空要素計算法の場合の相対日射量との比較を示す. 南面の天頂角 40°, 50° の場合に相違が見られたが, 他の場合では数値積分, 天空要素計算法の場合の相対日射量とほぼ一致しており, 精度良く近似式が求められていることがわかる.

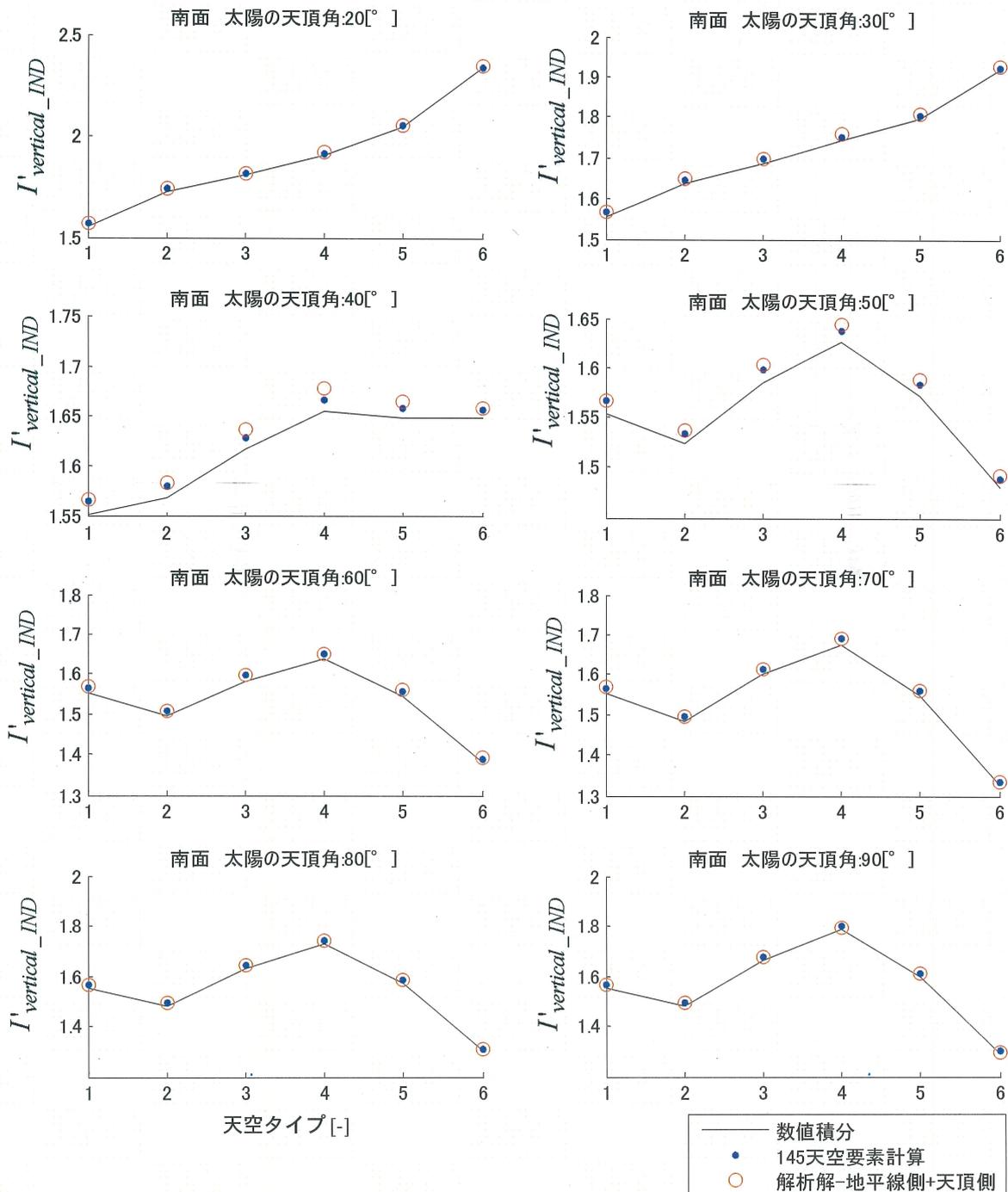


図 6. 8 Indicatrix 近似関数と数値積分, 天空要素計算法の比較 (太陽方位 0° 南面)

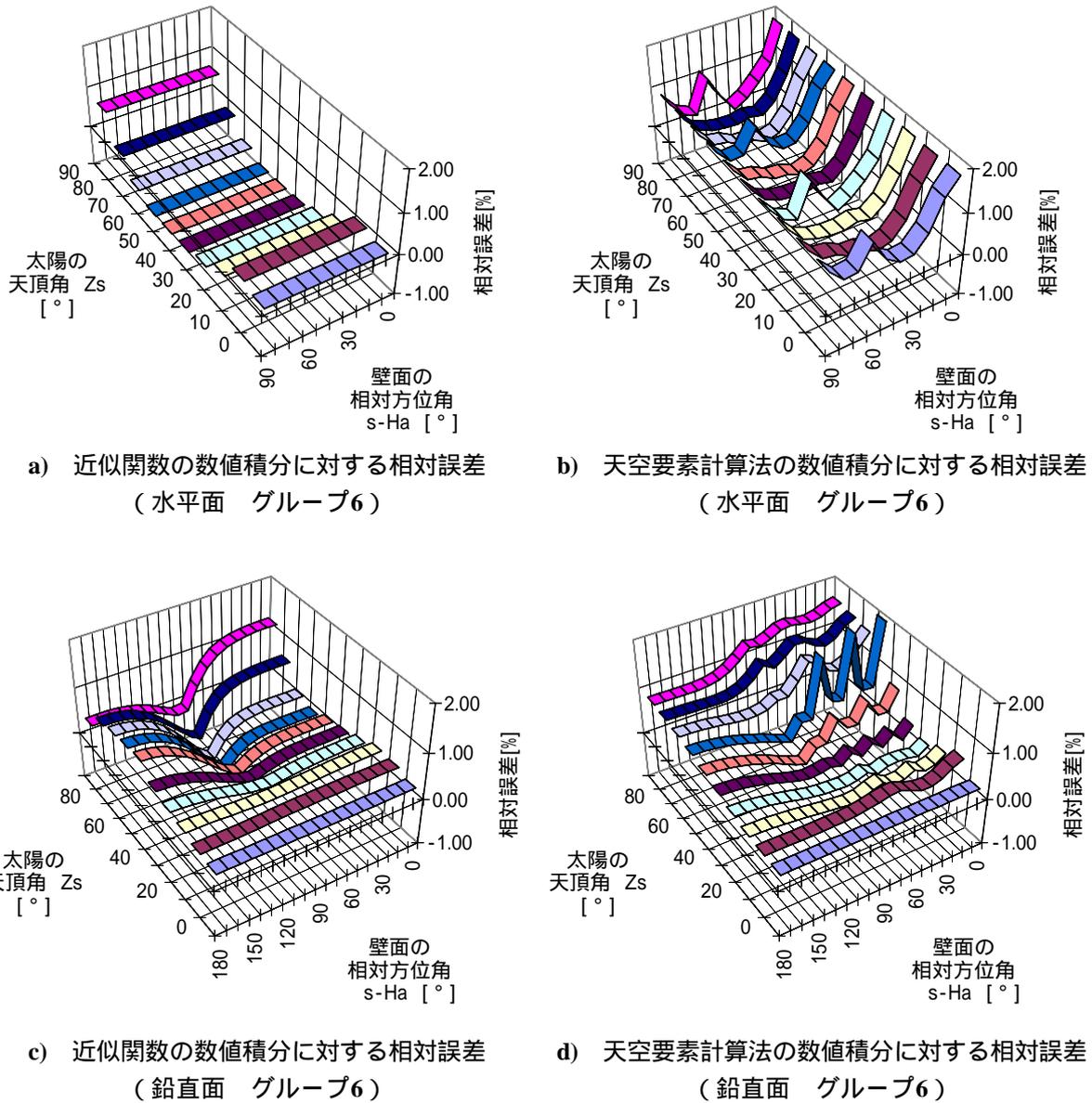


図6.9 Indicatrix関数の分布のみによる相対日射量の比較

図6.9, Appendix-4に近似関数の数値積分に対する相対誤差, 天空要素計算法の数値積分に対する相対誤差を, 壁面の相対方位角 $|a_s - H_a|$ ごとに示す.

近似関数の相対誤差は, 水平面, 鉛直面ともにグループ6で最大値が出現するが, この場合でも水平面 $-0.75\% \sim 0.68\%$, 鉛直面 $0 \sim 1.19\%$ と十分小さい. また天空要素計算法の相対誤差よりも小さくなっている. これからも近似関数が精度のよいものであり, これを用いて精度良く相対日射量を求めることができることがわかる.

なお, 多項式を用いることで精度の良い近似関数を得ることができる(図6.10)が, 解析解を求める際に, 項数が膨大になり, 結果として, 計算時間の短縮に寄与しないことが考えられる. このため, 本研究では Indicatrix 関数の近似関数として, 6-28, 29 式を採用することとした.

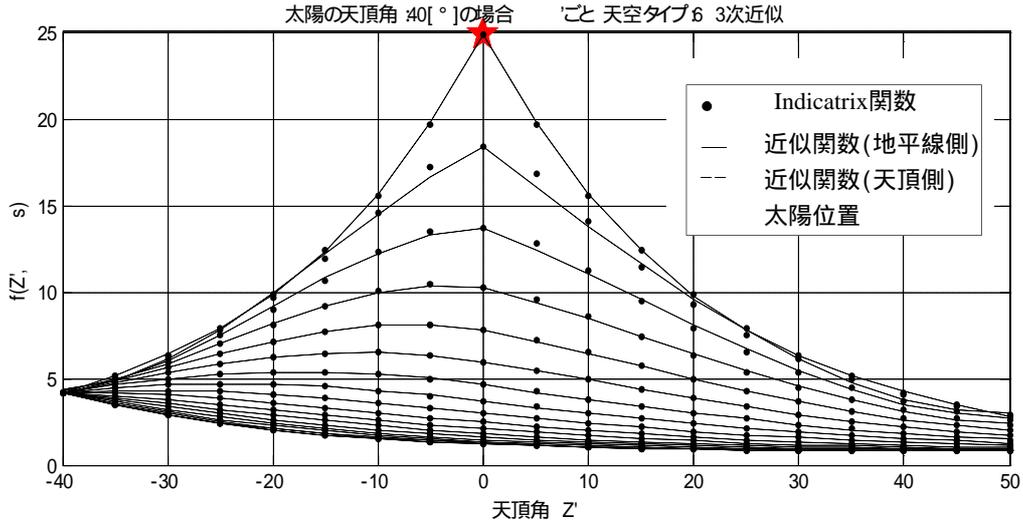


図 6.10 Indicatrix 関数 近似関数 (多項式: 3 次)

6.5 壁面相対日射量の比較

壁面日射量を求めるには, 6-8 式のように

$$I_{sh_CIE} = \frac{\int_{Z=0}^{Z=\frac{p}{2}} \int_{a=a_1}^{a=a_2} f(\mathbf{c}) \mathbf{j}(Z) \cdot (\sin Z \cos(\mathbf{a}_r - \mathbf{a})) \cdot \sin Z \cdot dZ da}{\int_{Z=0}^{Z=\frac{p}{2}} \int_{a=0}^{a=2p} f(\mathbf{c}) \mathbf{j}(Z) \cdot \cos Z \cdot \sin Z \cdot dZ da} \times E_{ed} \quad (6-8)$$

となる. これを求めた近似関数を用いて表すと以下となる.

$$I_{sh_CIE} = \frac{\begin{aligned} & [\cos \mathbf{a}_r \times \sum_{a=a_1}^{a_2} \Delta \mathbf{a} \times \cos(\mathbf{a}' + \mathbf{a}s) \times \int_{Z=0}^{Z=\frac{p}{2}-Zs} f_a^g(Z', \mathbf{a}', Zs) \mathbf{j}(Z') \sin^2(Z' + Zs) \cdot dZ' \\ & + \cos \mathbf{a}_r \times \sum_{a=a_1}^{a_2} \Delta \mathbf{a} \times \cos(\mathbf{a}' + \mathbf{a}s) \times \int_{Z=-Zs}^{Z=0} f_a^a(Z', \mathbf{a}', Zs) \mathbf{j}(Z') \sin^2(Z' + Zs) \cdot dZ' \\ & + \sin \mathbf{a}_r \times \sum_{a=a_1}^{a_2} \Delta \mathbf{a} \times \sin(\mathbf{a}' + \mathbf{a}s) \times \int_{Z=0}^{Z=\frac{p}{2}-Zs} f_a^g(Z', \mathbf{a}', Zs) \mathbf{j}(Z') \sin^2(Z' + Zs) \cdot dZ' \\ & + \sin \mathbf{a}_r \times \sum_{a=a_1}^{a_2} \Delta \mathbf{a} \times \sin(\mathbf{a}' + \mathbf{a}s) \times \int_{Z=-Zs}^{Z=0} f_a^a(Z', \mathbf{a}', Zs) \mathbf{j}(Z') \sin^2(Z' + Zs) \cdot dZ'] \end{aligned}}{\begin{aligned} & [\sum_{a=0}^{2p} \Delta \mathbf{a} \times \int_{Z=0}^{Z=\frac{p}{2}-Zs} f_a^g(Z', \mathbf{a}', Zs) \mathbf{j}(Z') \cos(Z' + Zs) \cdot \sin(Z' + Zs) \cdot dZ' \\ & + \sum_{a=0}^{2p} \Delta \mathbf{a} \times \int_{Z=-Zs}^{Z=0} f_a^a(Z', \mathbf{a}', Zs) \mathbf{j}(Z') \cos(Z' + Zs) \cdot \sin(Z' + Zs) \cdot dZ'] \end{aligned}} \times E_{ed} \quad (6-34)$$

この式を用いることで日射量を求めることができる.

E_{ed} は測定値を用いるので, 6-34 式の分子, 分母つまり, 鉛直面相対日射量 $I'_{vertical_CIE}$ および, 水平面相対日射量 $I'_{horizontal_CIE}$ と, 数値積分, 天空要素計算法それぞれの鉛直面および水平面相対日射量との比較を行うことで, 提案する解析解を用いた, 天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量計算法の有効性を検証する.

図 6. 11, Appendix-5 に数値積分, 天空要素計算法の場合の相対日射量との比較を示す. 太陽方位 0° の場合は, 数値積分, 天空要素計算法の場合の相対日射量とほぼ一致しており, 本手法を用いることで, 数値積分を用いずに天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量を精度良く計算することができるがわかる.

本研究では, Indicatrix 近似関数のパラメータについては, Z_s, α' とともに 10° 間隔で求めている. Z_s, α' がこの 10° 間隔の値と一致している場合の精度は良いが, これを外れると精度の低下が起こる可能性が考えられる. そこで, 10° 間隔の値の間中となる 5° 間隔の太陽方位が 45° の場合の数値積分, 天空要素計算法の場合の相対日射量を比較する (図 6. 12). 天頂角が 50° を超える場合にわずかに精度の低下が見られる. しかし, 精度の低下が一番大きい天頂角 90° 天空タイプ 12 の場合でも相対誤差で 2.2% であり, 十分精度はよいと言える. 天頂角が大きい場合に精度が低下することから, 地平線側近似関数よりも天頂側近似関数の精度が低いことが考えられる.

近似関数の数値積分に対する相対誤差, 天空要素計算法の数値積分に対する相対誤差を, 壁面の相対方位角 $|\alpha_s - H_a|$ ごとに求め比較を行う. 図 6. 13, Appendix-6 に示す. 水平面では天空タイプ

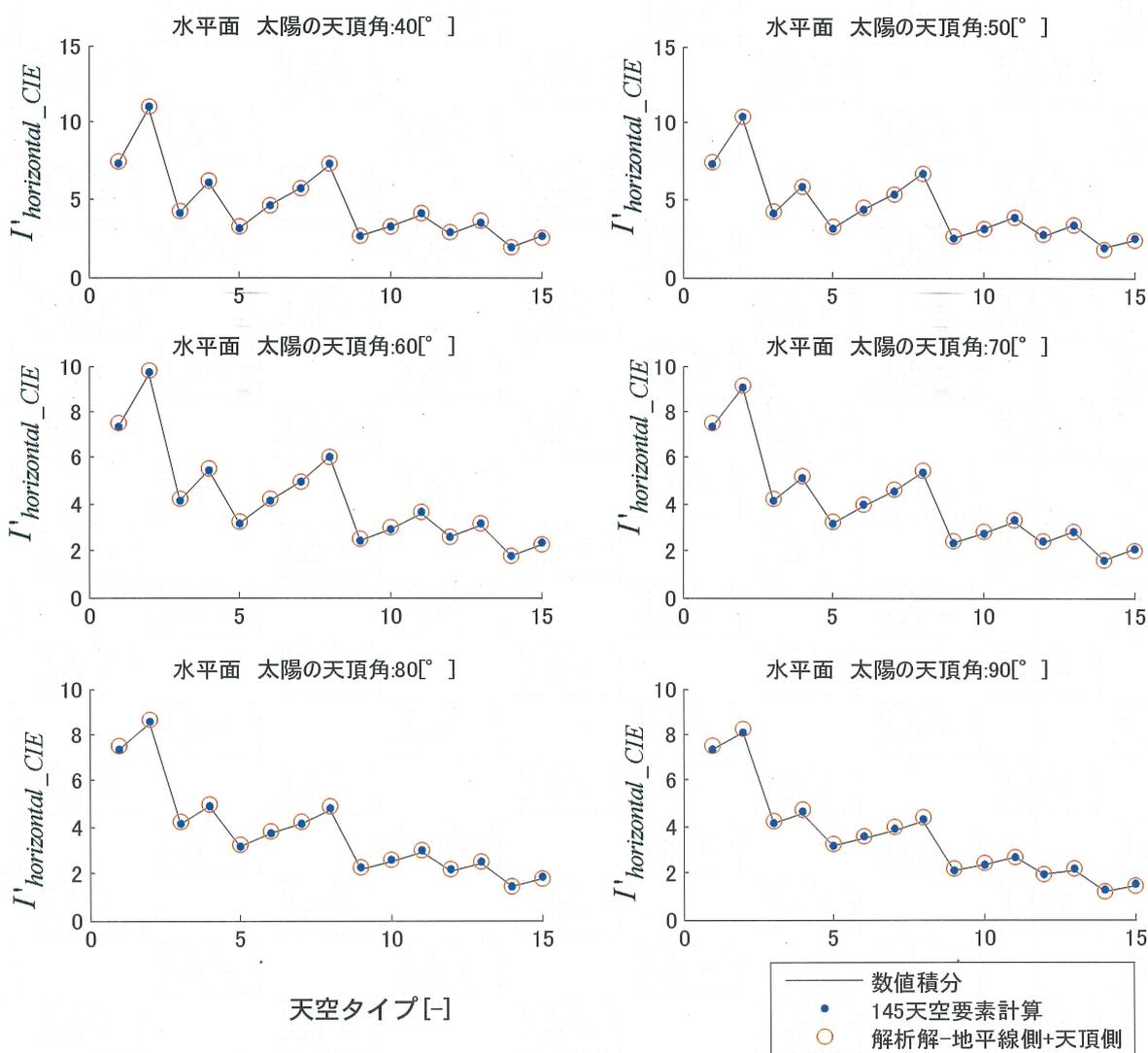


図6. 11 相対日射量の比較 (太陽方位 0° 水平面)

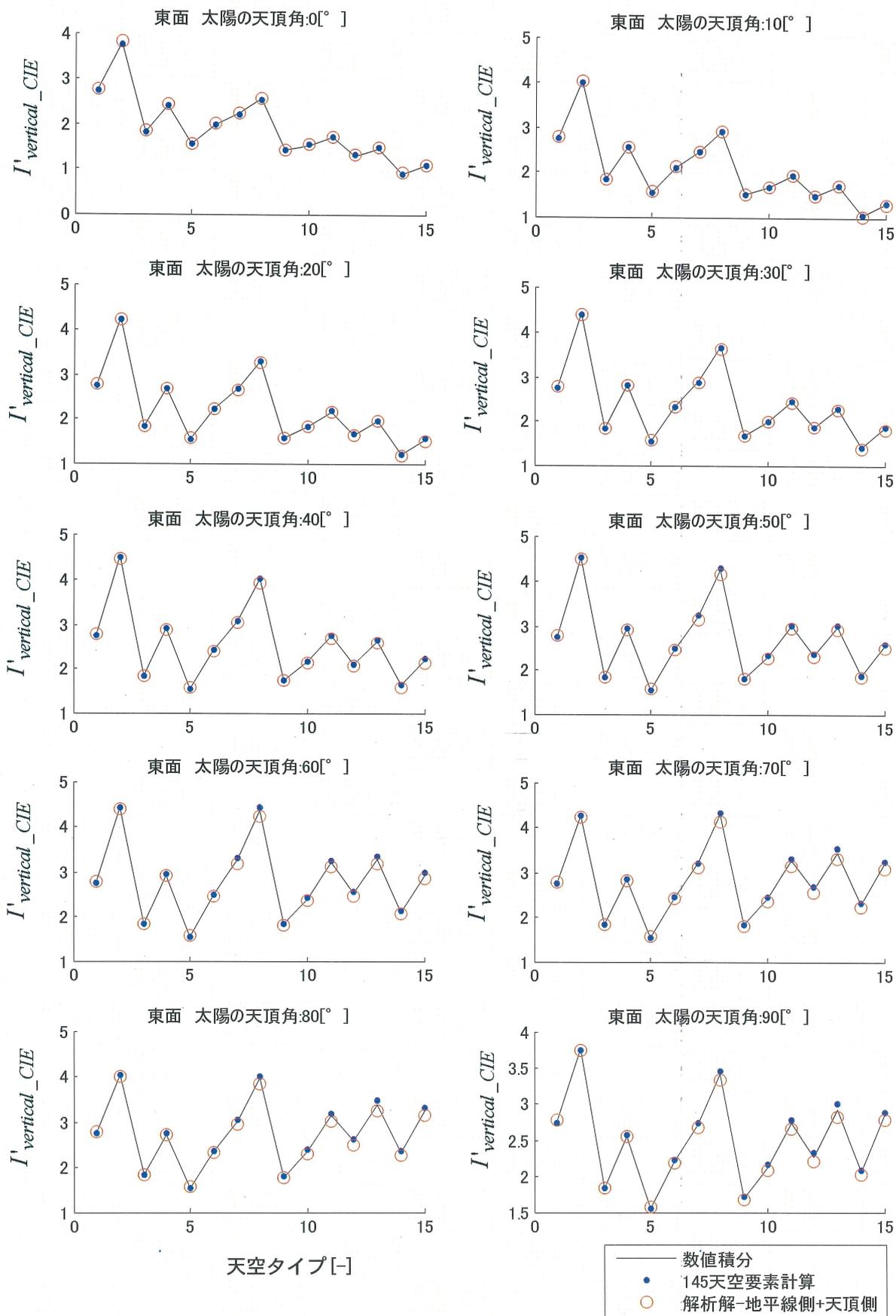


図6.12 相対日射量解析解と数値積分、天空要素計算の比較 (太陽方位45° 東面)

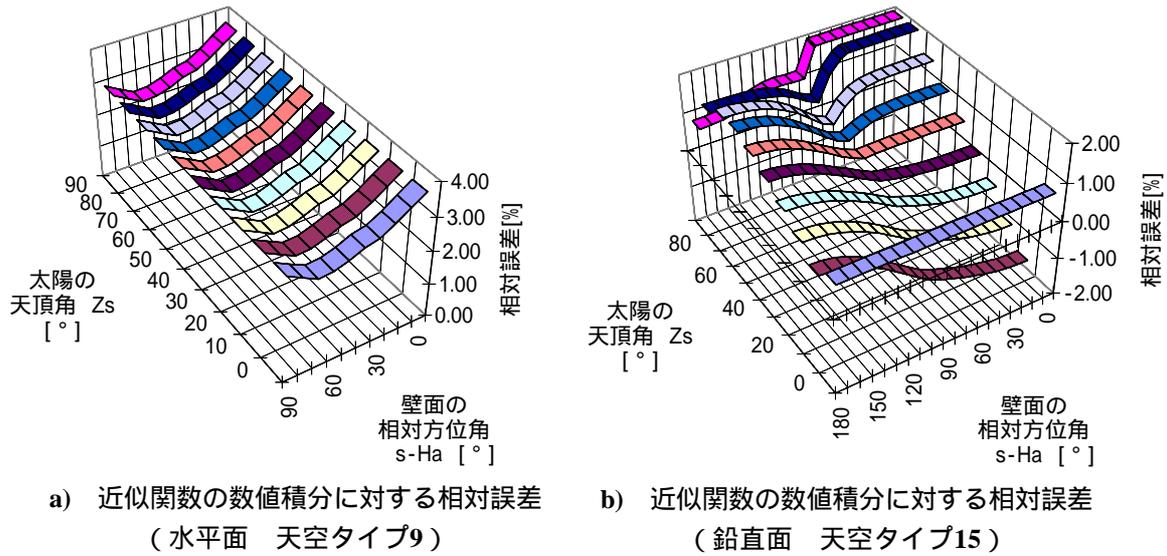


図6.13 相対日射量の比較

9, 鉛直面では天空タイプ15で相対誤差の最大値が出現する. この場合でも水平面3.69%, 鉛直面2.81%と十分小さく, 提案した手法により精度良く相対日射量を求めることができることがわかる.

以上より, 計算精度について, 本章で示した, 解析解を用いた天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量計算法は有効であると言える.

6.6 計算時間

解析解の求まる近似関数を定義し, 壁面日射量を計算する手法の開発を行った. この手法の年間熱負荷計算等への応用を考えるならば, より計算時間のかからないものであることが望ましい. そこで, 開発した壁面日射量計算法, 数値積分(分割幅 高度方向, 方位方向ともに 1°)の計算時間の比較を行い, 開発した手法の計算時間についての有効性を確認する.

6-34式を用いて, 天空タイプ15タイプそれぞれの場合の鉛直面の相対日射量を計算し比較する. 図6.14に計算時間の比較を示す. 鉛直面の相対日射量一回の計算に, 数値積分では 5.22×10^{-2} 秒, 開発した手法では 8.47×10^{-3} 秒を要する. 開発した壁面日射量計算法の計算時間は, 数値積分による方法に比べおよそ1/6(平均)と格段に短い. 一回の計算での計算時間は短い, 年間計算や次章で示す周囲遮蔽物などを考慮した場合や, 熱負荷計算全計算時間に占める壁面日射量

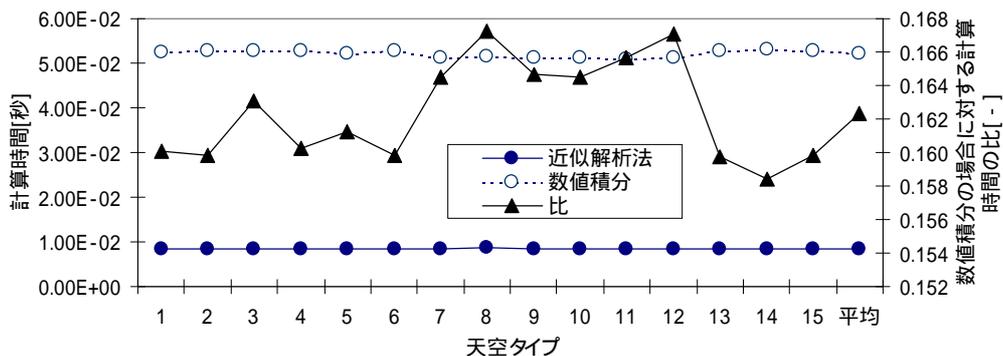


図6.14 計算速度の比較

計算にかかる時間の割合を考えた場合、その違いは大きなものとなる。

以上より、計算速度について、本章で示した、解析解を用いた天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量計算法は有効であると言える。

なお、本研究では熱負荷シミュレーションソフト ACSES を熱負荷計算に利用している。このプログラムは、MathWorks社の数値解析ソフトウェアMATLAB⁶⁻⁹⁾のプログラミング言語により記述されている。このプログラミング言語はインタプリタ言語であり、コンパイル言語に比べ計算時間を要することが考えられる。このため、ACSESより壁面日射量計算のサブルーチンを取り出し、コンパイル言語であるC言語で記述し直して、これを用いて計算時間の比較を行った。

6.7 まとめ

天空放射輝度分布を考慮した熱負荷計算を前提として、計算時間の必要となる数値積分等によらない壁面日射量計算法を、以下の手順で開発した。

- 1) 太陽位置を原点とする座標への座標変換
- 2) Indicatrix 関数については太陽高度を境界として天頂側、地平線側の二つの関数に分離
- 3) Gradation 関数、Indicatrix 関数ともに、解析的に解の求まる式に近似

開発した手法を検証し、以下の知見を得た。

- 1) Gradation 関数と近似関数の比較において、地平線に近い領域でやや違いが見られるグループもあったが、Gradation 関数、Indicatrix 関数ともに精度の高い近似関数が求められた。
- 2) Gradation 関数、Indicatrix 関数の近似関数を組み合わせ、相対日射量を求めた。求めた相対日射量と数値積分の場合の相対日射量との比較を行ったところ、相対誤差は最大でも水平面 3.69%、鉛直面 2.81% と十分小さく、提案した手法により精度良く日射量を求めることができることがわかった。
- 3) 開発した壁面日射量計算法、数値積分それぞれの方法による鉛直面相対日射量の計算時間の比較を行った。開発した壁面日射量計算法の計算時間は、数値積分による方法に比べ約 1/6 と格段に短い。

以上より、開発した解析解を用いた壁面日射量計算法は、精度はもちろん、計算速度の観点からも、年間熱負荷計算等に応用可能な手法であると考えられる。

以後、本手法を近似解析法と呼称することとする。

記号表

L_a : 天球上任意点の輝度 [cd/m^2]

L_z : 天頂輝度 [cd/m^2]

c : 太陽と天球上任意点の角距離 [rad]

Z : 天球上任意点の天頂角 [rad]

Z_s : 天頂からの太陽高度 [rad]

a : 天球上任意点の方位角 [rad]

a_s : 太陽方位角 [rad]

a_r : 傾斜面の方位角 [rad]

Z_i : 検討面への入射角 [rad]

Z_r : 傾斜面の傾斜角 [rad]

a' : 太陽方位を 0 とした方位角 [rad]

Z : 太陽高度を原点とした高度 [rad]

H_a : 壁面方位 [rad]

$f_{g1}, f_{g,2}, f_{g,3}$: Indicatrix 関数の地平線側近似関数のパラメータ [-]

$f_{a1}, f_{a,2}, f_{a,3}$: Indicatrix 関数の天頂側近似関数のパラメータ [-]

g_1, g_2, g_3 : Gradation 関数の近似関数のパラメータ [-]

I_{sh_CIE} : CIE 標準一般天空の傾斜面天空日射量 [W/m^2]

$I_{horizontal_CIE}$: CIE 標準一般天空の水平面天空日射量 [W/m^2]

$I_{vertical_CIE}$: CIE 標準一般天空の鉛直面天空日射量 [W/m^2]

I'_{sh_CIE} : CIE 標準一般天空の傾斜面相対天空日射量 [-]

$I'_{horizontal_CIE}$: CIE 標準一般天空の水平面相対天空日射量 [-]

$I'_{vertical_CIE}$: CIE 標準一般天空の鉛直面相対天空日射量 [-]

I'_{sh_GRA} : Gradation 関数のみの傾斜面相対天空日射量 [-]

$I'_{horizontal_GRA}$: Gradation 関数のみの水平面相対天空日射量 [-]

$I'_{vertical_GRA}$: Gradation 関数のみの鉛直面相対天空日射量 [-]

I'_{sh_IND} : Indicatrix 関数のみの傾斜面相対天空日射量 [-]

$I'_{horizontal_IND}$: Indicatrix 関数のみの水平面相対天空日射量 [-]

$I'_{vertical_IND}$: Indicatrix 関数のみの鉛直面相対天空日射量 [-]

E_{ed} : 水平面天空日射量 [W/m^2]

本章に関する発表論文

査読付き論文

- 1) 天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量計算法の開発: 細淵勇人, 吉田治典, 日本建築学会環境系論文集, 2009.3月投稿予定

学術講演会発表

- 1) 天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量計算法の開発と熱負荷計算への組み込み: 細淵勇人, 吉田治典, 日本建築学会近畿支部研究発表会, 2009.3月投稿予定
- 2) 天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量計算法の開発と熱負荷計算への組み込み: 細淵勇人, 吉田治典, 日本建築学会大会, 2009.4月投稿予定

参考文献

- 6-1) Hay, J.E., S.: Study of Short-wave Radiation on Nonhorizontal Surfaces, Canadian Climatic Center Report, No.79-12, Atmospheric Environments Service, Toronto Canada, 1979
- 6-2) Reindl, D.T., Beckman, W.A. and Duffie, J.A., S.: Evaluation of Hourly Tilted Surface Radiation Models, Solar Energy, Vol.45, No.1, pp.9-17, 1990
- 6-3) Perez, R., Seals, R., Ineichen, Stewart, R., and Menicucci, D.: A New Simplified Version of the Perez Diffuse Irradiance Model for Tilted Surfaces, Solar Energy, Vol.39, No.3, pp.221-231, 1987
- 6-4) Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, j., and Stewart, R.: Modeling Day Light Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance, Solar Energy, 44(5), pp.271-289, 1990
- 6-5) Igawa, N., Koga, Y., Matsuzawa, T. and Nakamura, H.: Model of Sky Radiance Distribution and Sky Luminance Distribution, Solar Energy, 77, pp.137-157, 2004
- 6-6) Brunger, A.P., Hooper, F.C.A.: Anisotropic sky Radiance Model Based on Narrow Field of View Measurements of Shortwave Radiance, Solar Energy, 51(1), pp.53-64, 1993
- 6-7) Kittler, R.: Luminance Distribution Characteristics of Homogeneous Skies, A Measurement and Prediction Strategy, Lightning Res. & Tech., Vol.17, No.4, pp.183-188, 1985
- 6-8) Perez, R., Seals, R. and Michalsky, j.: All-Weather Model for Sky Luminance Distribution - Preliminary Configuration and Validation, Solar Energy, 50(3), pp.235-245, 1993
- 6-9) <http://www.mathworks.com/products/matlab/>

7章

遮蔽物のある場合の熱負荷計算

第7章

遮蔽物のある場合の 熱負荷計算

7.1 はじめに

現在、建物の熱負荷計算においては、建物の壁面の中心に入射する日射量を、その方位の壁面日射量としている。壁面の受ける日射量を各方位で一定と仮定しているわけである。しかし現実の建物では周囲に建物などの遮蔽物が存在するため、同一方位の壁面においても、階の違いにより、壁面日射量に分布がある。より現実の環境を反映した熱負荷計算を行うためには、このような日射量の違いを考慮して熱負荷を計算しなくてはならない。

周辺の建物などの遮蔽物を考慮しないことによる問題点として、上記のような壁面における入射日射量の分布の無視に加え、太陽（直達日射）の遮蔽、非遮蔽が上げられる。都市キャニオンのようなアスペクト比の大きな環境では、日照時間は著しく小さくなると考えられ、天空日射方位、周辺建物の高さとの関係、執務あるいは居住する室の階（の高さ）によっては十分な日射を受けることができず、結果として熱負荷が増大する。また十分な日照を得られないことは照明エネルギーの増大にもつながる。例えば東京の年間日照時間は年間可照時間の40%程度との報告もある⁷⁻¹⁾が、このような環境を考えると天空日射をより正確に評価、予測する必要がある。

現在の熱負荷計算においては、通常、天空日射量は天空で一様と仮定され、加えて周囲遮蔽物は考慮されない。都市キャニオンのように太陽が遮蔽され、直達日射を十分に受けることができない環境の消費エネルギーの予測では、このような周辺に建物が無く、一様天空を仮定した従来の熱負荷計算などのシミュレーションを行っても、精度の高いエネルギー予測はできない。

しかし、天空放射輝度分布や周囲建物を考慮したより精度の高いシミュレーションを行うには、気象や建物情報といった入力条件が増すことや、計算負荷が増大することなど解決すべき点があり、容易に行うことはできない。例えば、天空放射輝度分布のモデルを用いて、天空の放射輝度分布を考慮した熱負荷計算や壁面日射量の計算を行うことを考えると、放射輝度の積分が必要になる。これには数値積分を用いることが考えられるが、計算時間を要するなど、一般的な手法にはなりえないと考える。

以上のような、熱シミュレーション（熱負荷計算）の現状において、6章では解析解を用いた、天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量計算法（近似解析法）を開発した。本章では、これを用いて、より現実の環境を想定した熱負荷計算を可能とするために、現在の熱負荷計算では考慮されない、周辺の建物などの遮蔽物を考慮する方法を検討し、シミュレーションを行う。これにより、現実の環境に即した、より精度の高い消費エネルギー予測を行う手法を検証する。近似解析法を、より現実に近い環境として想定した都市キャニオン内の室の熱負荷計算を行い、最大日射負荷、期間日射負荷、壁面日射量で計算精度の評価を行い、さらに計算に要する時間の比較を行うことで、近似解析法のより現実環境に即した熱負荷計算への応用の有効性を検証する。

7.2 遮蔽物がある場合の計算法

本章では、以下の4つの手法により、遮蔽物のある場合の熱負荷計算を行う。これらの手法を用いる際には、遮蔽物を考慮するために、それぞれ通常の熱負荷計算の際には必要とされない計算プロセスが必要となる。本節では、各手法について、遮蔽物がある場合の熱負荷計算のプロセスについて述べる。

1) 近似解析法（6章で開発）

推定した5タイプの天空タイプを用いた場合と、近似タイプ15タイプを用いた場合の2つの場合の計算を行う。これは推定した5タイプの天空タイプを用いた場合だけでは天空タイプの推定誤差による影響があるため、より現実の天空状態に近い近似15タイプの場合の結果との比較を行うためである。

2) 天空要素計算法（3章参照）

スカイスキャナにより測定した天空放射輝度分布データを用いて壁面日射量を計算する。これを比較の基準とする。

3) 斜面日射モデル

赤坂らの比較検討により、精度の高いとされた Perez のモデルを用いる⁷⁻²⁾。

4) 一様天空

従来の手法。水平面天空日射量に天空率を乗じることで、壁面天空日射量を求める。

天空放射輝度分布、周囲遮蔽物を考慮した計算を行うには、上記4手法に共通して、直達日射の遮蔽判定、壁面の受ける長波長放射量を求める際に必要となる。天空率の計算が必要となる。

7.2.1 直達日射の遮蔽判定

直達日射の遮蔽判定は、検討壁面中心と太陽位置とを結んだ線分が、周囲遮蔽物と交点を持つかどうかで判定できる。このような交点による判定は、天空率を求める際に利用されるが、太陽の遮蔽判定においては1点×遮蔽物の数の計算を行うだけでよいので、天空率算出ほど計算時間を必要としない。

7.2.2 天空率の算出

モンテカルロ法を用いる手法が一般的である。検討壁面の中心から、乱数を用いて以下の仰角 r 、方位角 θ で半球上に射出した点と、検討壁面の中心とを結ぶ線分が、周囲遮蔽物との交点を持つかどうかで判定する。天空率は、交点を持たない場合の射出点数を総射出点数で除すことで求めることができる。

なお、本研究では、一般的な建物の外形がおおむね四角形、三角形で表せると考え、周囲遮蔽物を四角形、あるいは三角形で入力する天空率算出プログラムを作成した。このプログラムにおいて、右周りに遮蔽物の頂点を入力し、右ねじの進行方向を遮蔽面の法線方向とした。なお計算に用いる天空率については、既往の研究により⁷⁻³⁾ 射出点数10000本で計算する。図7.1に天空率算出の概念を示す。

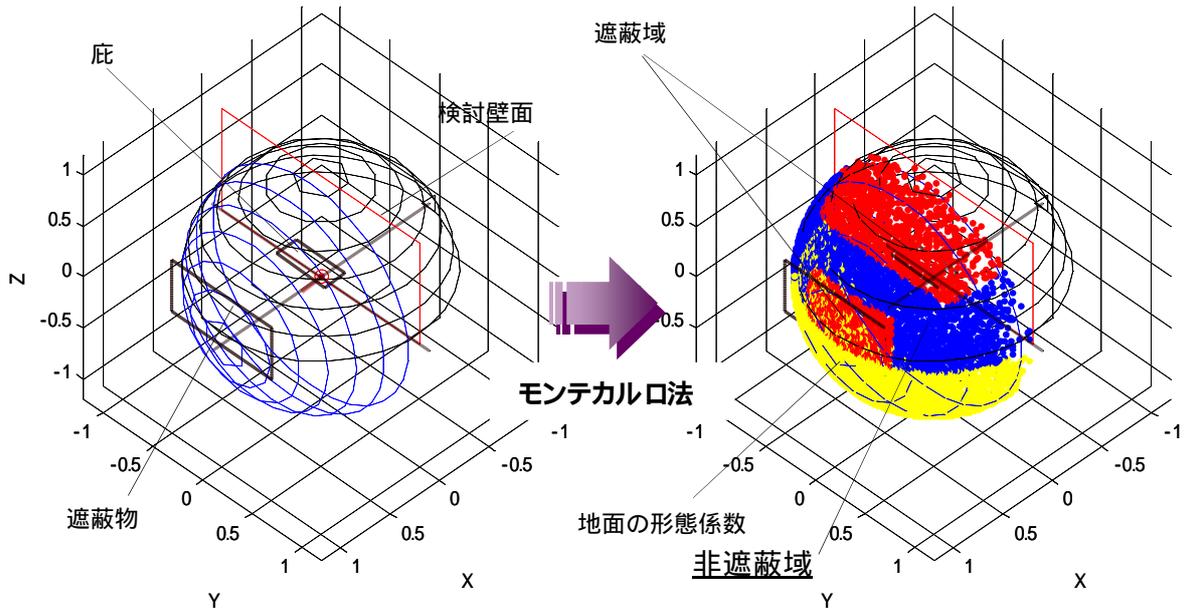


図7.1 天空率算出の概念図

$$r = \cos^{-1}(\sqrt{1 - \text{Rand}_1}) \quad 0 \leq r \leq \frac{p}{2} \quad (7-1)$$

$$a = 2p \text{Rand}_2 \quad 0 \leq a \leq 2p \quad (7-2)$$

7.2.3 近似解析法

近似解析法においては、天空率および直達日射遮蔽判定に加え、周囲遮蔽物が天球のどの部分を遮蔽するかをその高度角、方位角で捉えるプロセスが必要となる。この高度角、方位角がわかれば、方位角 θ ごとの Z' の積分区間を決定することができる。

周囲遮蔽物は、地物（周辺建物）および検討壁面の付属物（庇等）に大別でき、それぞれの遮蔽状況から近似解析法の積分区間を決定するには、以下の方法によることとする。なおそれぞれの遮蔽物の制約条件も合わせて以下に示す。

1) 地物（周辺建物）

- ・制約条件 傾斜角：鉛直，方位角：任意，その他：地面と一辺で接する
- ・積分区間決定法

x-y 平面上で太陽方位から 10° 刻みに交差判定を行い、交差するならば、そのときの上辺を表す空間の直線に交点の x, y 座標を代入することで、z 座標が求まる（遮蔽物が長方形であれば上辺の高さになる）。この z 座標 B と検討壁面中心から x-y 平面上の交点までの長さ A が求めれば、以下に示す Z'' を求めれば、

$$Z'' = \tan^{-1}(B/A) \quad (7-3)$$

これより地物（周辺建物）により遮蔽される区間は $0 \sim Z'' \text{ rad}$ （高度角）となり、 Z' の積分区間は $0 \sim p/2 - Z''$ （天頂角）と決定される。

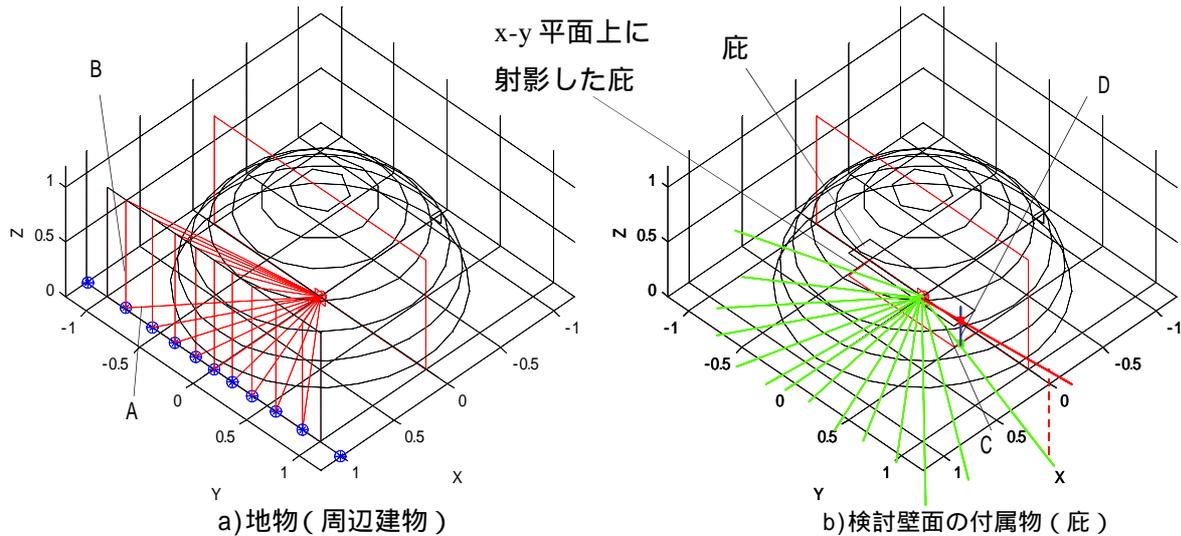


図7.2 近似解析法の積分区間の決定

2) 検討壁面の付属物

・制約条件 傾斜角：任意，方位角：任意，その他：検討壁面と一辺で接する

・積分区間決定法

まず，検討壁面と接しない三線分（二線分）を x - y 平面上に射影する．この三線分と，太陽方位から 10° 刻みの天球の水平線上の点と検討壁面中心とを結ぶ直線との交点を求める．射影前の空間の直線に交点の x ， y 座標を代入することで， z 座標が求まる．この z 座標 D と，検討壁面中心から射影後の線分との交点までの長さ C が求まれば，以下に示す Z''' を求めれば，

$$Z''' = \tan^{-1}(D/C) \quad (7-4)$$

これより検討壁面の付属物により遮蔽されない区間は $0 \sim Z''' \text{rad}$ （高度角）となり， Z' の積分区間は $p/2 - Z''' \sim p/2$ （天頂角）と決定される．

以上のように求めた地物（周辺建物），検討壁面の付属物の積分区間を合成することで，近似解析法の Z' の積分区間が決定される．図7-2に積分区間決定の概要を示す．

なお，数値積分を用いて，遮蔽物のある場合の壁面日射量を計算する際にも，この方位ごとの遮蔽物の高度角が必要となる．数値積分で細密に計算を行うことを考えると，例えば θ' については 1° ごとに Z'' ， Z''' を求める必要があり計算時間が必要となることがわかる．さらに，数値積分のプログラムでは， θ' ， Z' の for ループで計算を行うことになるが，その際に θ' ごとに Z' の積分区間を変化させる操作をする必要があり結果として煩雑なものとなることが考えられる．これからも近似解析法で短時間で精度良く壁面日射量を求めることができるならば，数値積分に代わる計算法として近似解析法を用いる利点がある．

7.2.4 天空要素計算法

この手法では，天空の145の天空要素それぞれについて遮蔽判定を行う．直達日射の遮蔽判定と同様に，検討壁面中心と，145天空要素それぞれの中心とを結ぶ線分が遮蔽物と交点を持つか判定

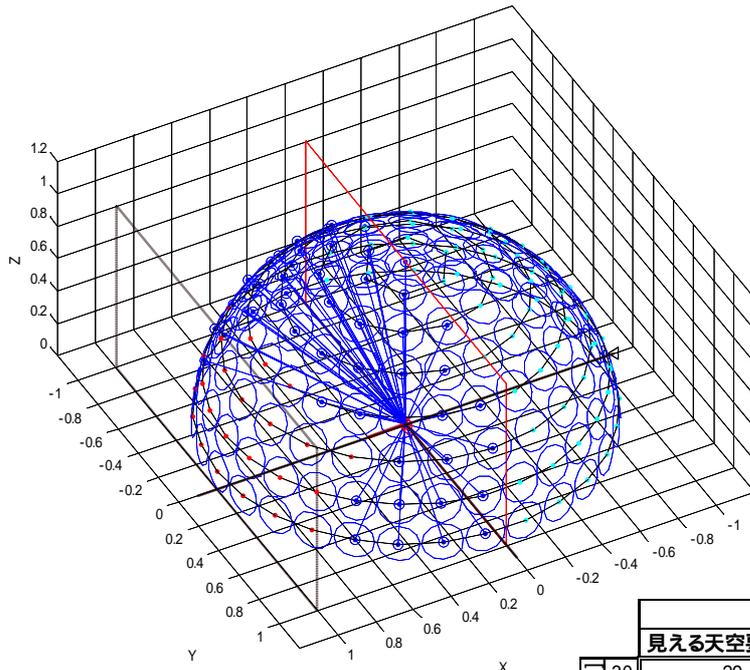


図7.3 145天空要素の遮蔽判定の概要

表7.1 天空率の比較

高度	天空要素計算法		モンテカルロ法
	見える天空要素[個]	天空率[-]	天空率[-]
30	29	0.20	0.07
50	45	0.31	0.18
70	58	0.40	0.33

すればよい。単純計算では太陽の遮蔽判定の145倍の計算量が必要となるが、検討壁面に対する各天空要素の法線の入射角を求め、これが 90° より大きければ、検討壁面からその天空要素は見えないので、遮蔽判定をする必要はない。図7-3に145天空要素の遮蔽判定の概要を示す。

中心が赤い要素が遮蔽された天空要素、水色の要素が検討壁面からは見えない天空要素、青いドットの中心のものが、壁面から見える天空要素である。

この天空要素計算法は、計算速度を要しないという利点はあるが、スカイキャナの測定天空要素を基準に天球を分割したもので、この天球の分割が荒く、都市キャニオンなど高度方向の影響が大きくなる場合には、誤差が大きくなる可能性がある。これは、遮蔽物を設定して求めたモンテカルロ法による天空率と、その場合の遮蔽されない天空要素の全天空要素に対する割合を、天空要素計算法により求められる天空率として比較すると差が大きくなることからわかる（表7.1）。このため天空要素計算法は詳細な建物モデルには不向きであると考えられる。

7.2.5 斜面日射モデル

天空の放射輝度分布を、太陽近傍の準直達日射や、地平線部の日射などに分けて、壁面に入射する天空日射量をモデル化したものが斜面日射モデル^(例えば7-4),7-5)である。これは数値積分のように計算時間を必要としないことや、開発した近似解析法のように、同様な繰り返し計算が必要ないなど利点はあるが、このモデルを遮蔽物を考慮した壁面日射量計算に用いるには、準直達日射量の範囲をどの程度とするか、さらに、準直達域や地平線が一部遮蔽される場合の扱いについて検討する必要がある。

本研究では、Perezモデルを用いて検討を行う。Perezモデル^{7-6),7-7)}は天空日射量を、分布が一般的な天空日射量、太陽光球周辺の高輝度天空からの日射成分である準直達日射量、地平線付近からの

天空日射量という3つの成分に分け、各成分の割合を与えるモデルであるが、シミュレーションにおいては高度 5° 以下についてはすべて遮蔽されるよう設定したため、地平線付近からの天空日射量は考慮せず、準直達日射量の扱いのみを検討した。つまり7-5式で表される Perez モデルの地平線付近からの天空日射量に関する項を除き、7-6式とし、さらに準直達域の非遮蔽率 f および、天空率 F' を用いて、7-7式のように式変形して用いる。

$$F = (1 - F_1) \left(\frac{1 + \cos b}{2} \right) + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin b \quad (7-5)$$

$$F = (1 - F_1) \left(\frac{1 + \cos b}{2} \right) + F_1 \frac{a}{b} \quad (7-6)$$

$$F = (1 - fF_1)F' + fF_1 \frac{a}{b} \quad (7-7)$$

準直達域の非遮蔽率 f については、天空率を求めるプログラムを用いて、準直達域周囲の天球上の射出点座標と太陽位置からの角距離を求め、設定した準直達域の開口角に含まれる射出点のうち遮蔽されないものを、準直達域開口角に含まれる射出点の総数で除したものととして求める。この準直達域の非遮蔽率 f については、熱負荷計算等のシミュレーションにおいて、太陽位置が時々刻々変化するため、計算時間ごとに求める必要がある。モデル式の評価には計算時間を要さないが、遮蔽物のある場合には、このような煩雑な処理が必要となる。なお準直達域開口角は、赤坂らの研究により、半開口角 15° に設定した⁷⁻⁸⁾。図7-4に非遮蔽率 f の概要を示す。

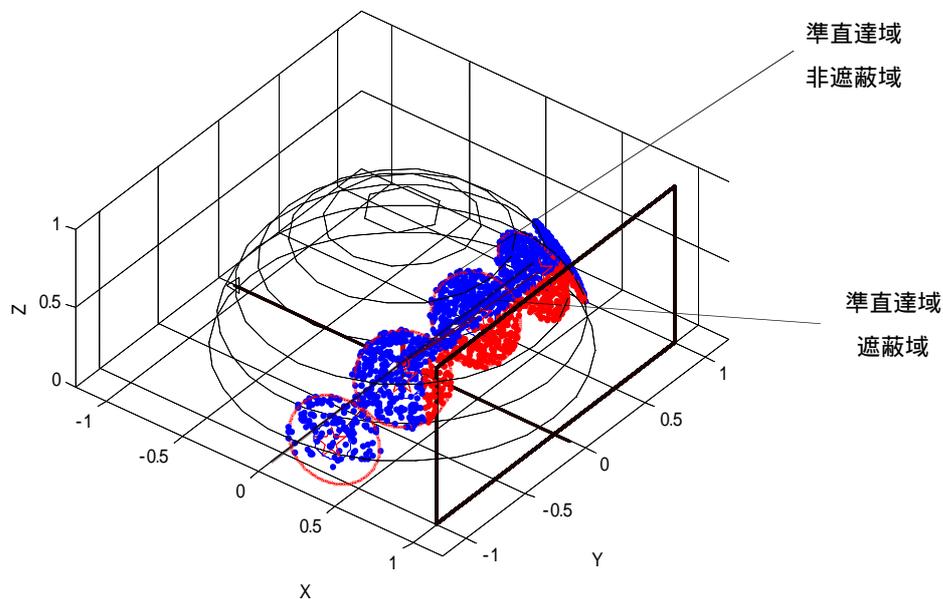


図7.4 非遮蔽率 f の概要

7.2.6 一様天空

一様天空については、天空率の算出、直達日射の遮蔽判定を行えばよい。

7.3 遮蔽物のある場合の熱負荷計算

本章で提示した4つのモデルを用いて、遮蔽物のある場合の熱負荷計算を行う。

4つのモデルとの比較を行い、壁面日射量、最大日射負荷、期間日射負荷、および計算時間を比較し、近似解析法を、遮蔽物を考慮するなど、より現実に近い環境の熱負荷計算に組み込むことの有効性を検証する。

7.3.1 建物モデル・計算条件・気象データ

i) 建物モデル

都市キャニオン空間を想定するため、まず図7.5に示すように7階建ての建物モデルの階の違いによる天空の遮蔽について検討する。図7.5のように下層(2階)、中層(4階)、上層(6階)階を考えた場合、それぞれの階から見える天空は、遮蔽物(対向する建物)の高さと、その遮蔽部までの距離により決まる。このため、都市キャニオンのような建物モデルを設定しなくとも、検討階の壁中心からの仰角の違いによる計算を行えばよい。対向する建物が同じ高さで、建物までの距離が建物自体の1/2であるような、キャニオンが深く、入射日射量が小さくなる都市キャニオン空間の場合、下層階の仰角はおよそ 30° と小さくなる。これとは反対に、対向する建物までの距離が建物自身の高さと同じで、対向する建物の高さが1/2や1/3であるような場合、仰角は $70 \sim 80^\circ$ と大きくなり、遮蔽物のない場合とさほど違いがない。

そこで、熱負荷計算を行うにあたり、仰角を $30, 50, 70^\circ$ と三段階に変化させるような建物モデルを想定する。対向する建物(遮蔽物)については、都市キャニオンが無限に続くものとした。想定する建物は7階建てのオフィス標準問題(5章 基準建物)とし、その5階を検討階とする。つまり、5階壁面中心から天空を望む仰角が $30, 50, 70^\circ$ となる室が、無限に連続する都市キャニオン内に存するように設定する。また方位については、他の方位に比べ太陽の影響が大きくなる南に面しているものとする。図7.6に建物モデルの概要を示す。この時の天空率を表7.2に示す。

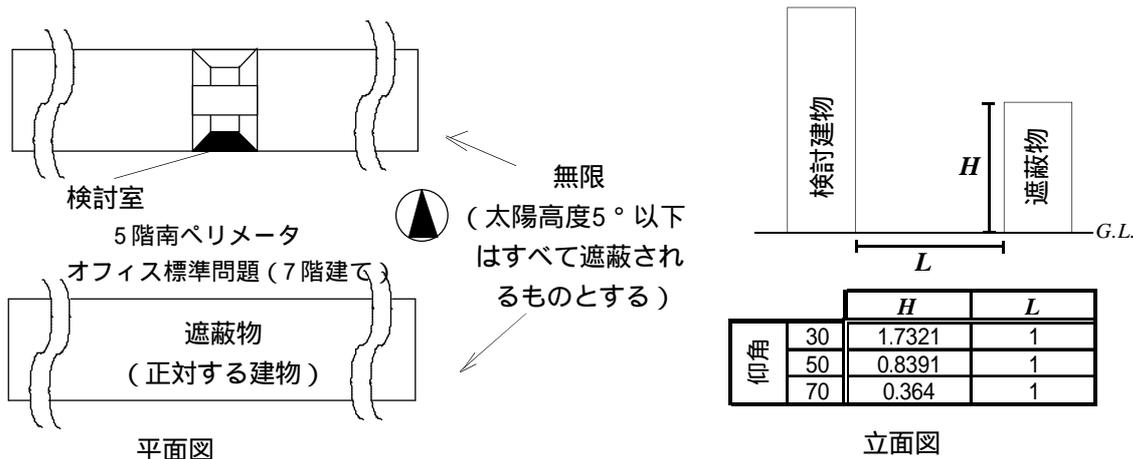


図7.6 建物モデルの概要

表7.2 天空率

	仰角[°]		
	30	50	70
天空率[-] (モンテカルロ法)	0.07	0.18	0.33

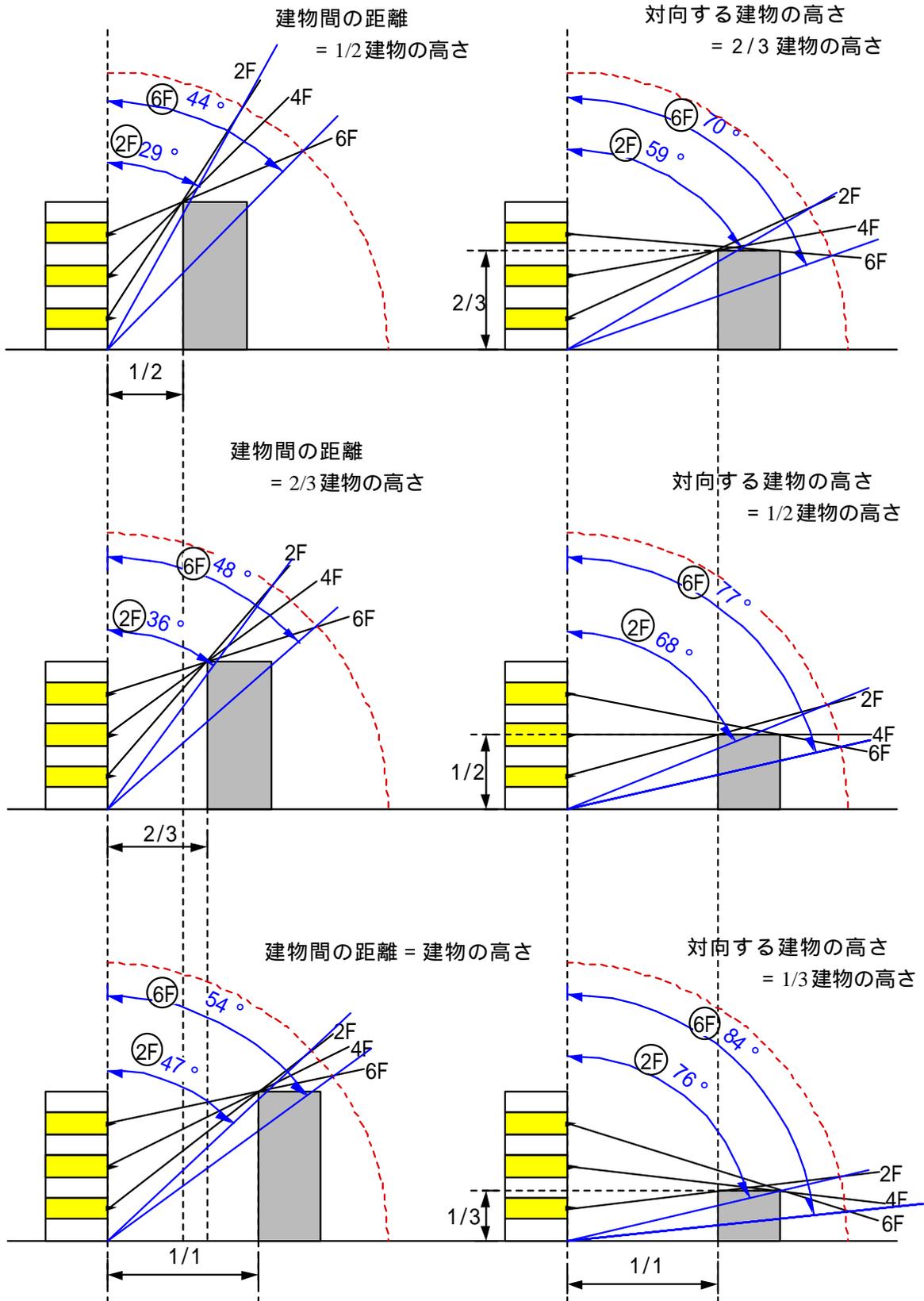


図7.5 対向する建物と仰角の関係

ii) 計算条件

5章と同様とする。所在地は京都大学・吉田キャンパス（東経 $35^{\circ}1'$ ，北緯 $135^{\circ}47'$ ）である。

iii) 気象データ

5章と同様とする。冬季，夏季それぞれ40日間（それぞれ10日間は助走期間とする）で計算を行い，最大日射負荷と，期間日射負荷を求めて比較を行う。日射負荷については5章4節を参照。

7.3.2 壁面日射量

本研究で開発した計算法は，壁面に入射する天空日射量を求めるものであるが，4つの計算法それぞれについて，仰角 30° ， 50° ， 70° ，夏季，冬季の 直達日射量を含む壁面全天日射量と，壁面天空日射量を計算し，測定した天空放射輝度分布より求める各日射量（天空要素計算法）を精解値として比較を行う。

7.3.2.1 壁面全天日射量

図7.7に壁面全天日射量を示す。

夏季については，仰角によらずどの計算法も良く一致している。Perezモデルにやや誤差が見られる。Perezモデルは仰角が小さい場合測定値と比べてやや大きくなる。このPerezモデルの傾向については，斜面日射モデルが，準直達日射，一様な天空日射，地平線部分からの日射（本研究の計算では，地平線付近は遮蔽されるものとして，考慮していない）といった成分だけで表されるため，夏季に，仰角が小さく，太陽が遮蔽されない場合，準直達日射量の占める割合が大きくなることによると考えられる。このため仰角が 70° の様に大きくなると精度が向上している。逆に一様な天空は，仰角が小さい場合には誤差はあまり大きくないが，仰角が大きくなると小さな日射量を求める傾向が見られる。近似解析法の場合は推定5タイプ，近似15タイプともに，仰角によらず精度良く日射量を求めていることがわかる。

冬季については，仰角 30° では，太陽がほぼ全ての時間で遮蔽されているため，全ての計算法で天空日射量と同値となっていたが，他の仰角の場合では，夏季と同様な傾向が見られる。Perezモデルでは，冬季の太陽高度が低いため太陽および準直達域が遮蔽されることにより，ほぼ全ての時間において準直達日射が存在せず，一様な天空日射のみとなり，誤差が大きくなる。一様な天空については，仰角が大きくなれば，それだけ一様な放射輝度とはならない高輝度の天空領域が増すため，結果として小さな日射量を求めることになる。

近似解析法は，斜面日射モデルや一様な天空のような傾向は見られず，夏季同様に測定天空放射輝度による壁面全天日射量と一致している。

表7.3に壁面全天日射量の近似直線の傾きと R^2 値を示す。これからも近似解析法の精度の良さを確認できる。

以上より，仰角によって，斜面日射モデル，一様な天空の場合にやや誤差が見られるなどの傾向を把握することができた。近似解析法を用いた場合は，仰角に関わらず他のモデルに比べ精度が良いことから，その有効性を示すことができた。

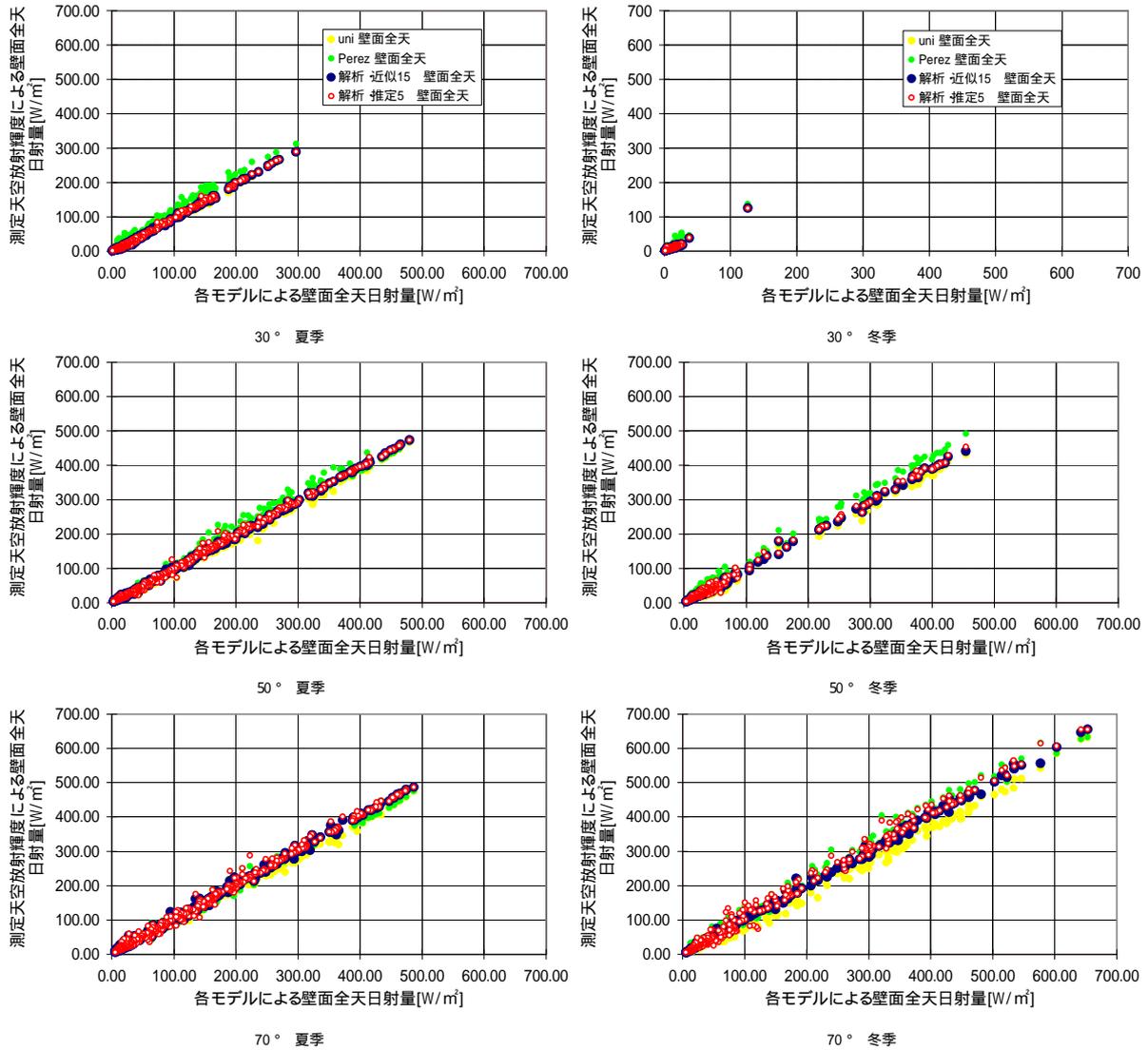


図7.7 壁面全天日射量

表7.3 壁面全天日射量の近似直線の傾きとR²値

		30°				50°				70°			
		近似解析法		Perez	一様天空	近似解析法		Perez	一様天空	近似解析法		Perez	一様天空
		推定5	近似15			推定5	近似15			推定5	近似15		
夏季	傾き	0.97	0.96	1.10	0.95	0.99	0.98	1.02	0.95	1.02	1.01	0.99	0.96
	R2値	1.00	1.00	0.98	1.00	1.00	0.99	0.99	1.00	0.99	1.00	0.99	1.00
冬季	傾き	0.97	0.96	1.10	0.95	0.99	0.98	1.09	0.93	1.04	1.00	1.05	0.92
	R2値	1.00	1.00	0.98	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	1.00	0.99	0.99

7.3.2.2 壁面天空日射量

次に壁面天空日射量の比較を行う。図7.8に壁面天空日射量を示す。夏季，冬季ともに近似解析法の精度が良いことがわかる。全天日射のように直達日射を含まない天空日射では，斜面日射モデルや一様天空が，全天日射量の場合に示した傾向がより顕著になる。特に冬季では，仰角50°

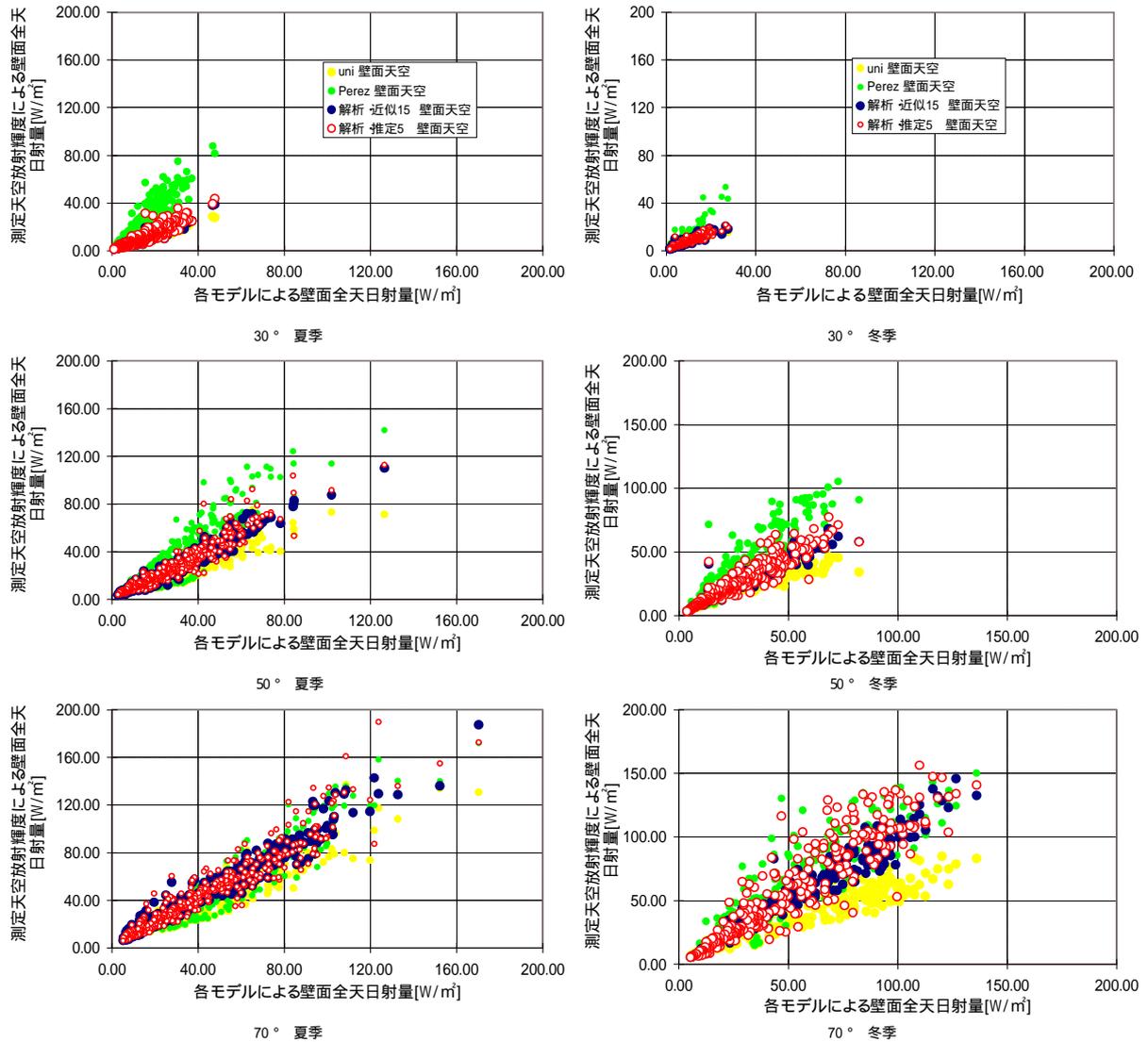


図7.8 壁面天空日射量

表7.4 壁面天空日射量の近似直線の傾きとR²値

		30°				50°				70°			
		近似解析法		Perez	一様天空	近似解析法		Perez	一様天空	近似解析法		Perez	一様天空
		推定5	近似15			推定5	近似15			推定5	近似15		
夏季	傾き	0.78	0.72	1.59	0.66	0.95	0.91	1.17	0.74	1.06	1.04	1.00	0.89
	R ² 値	0.85	0.91	0.81	0.86	0.90	0.95	0.83	0.88	0.89	0.94	0.90	0.87
冬季	傾き	0.81	0.81	1.04	0.84	0.94	0.88	1.30	0.70	1.13	1.02	1.19	0.68
	R ² 値	0.86	0.90	0.65	0.83	0.86	0.92	0.83	0.75	0.84	0.95	0.83	0.68

では斜面日射モデル，仰角70°では一様天空の誤差が大きくなる。

また直達日射量を含む壁面全天日射量と比べ，各モデルの日射量にばらつきが見られる。

全天日射量同様，天空日射量の各モデルの原点を切片とする近似線を求め，この近似線の傾きおよびR²値を求めた(表7.4)。これからも，上記の傾向がわかる。

7.3.3 日射負荷

各計算法による壁面日射量を用いて求めた夏季，冬季30日の特別熱負荷から，全ての時刻で日射量0W/m²として求めた特別熱負荷を差し引いた特別日射負荷から，冷房，暖房の最大日射負荷，期間日射負荷を求め，これを比較する．最大日射負荷の定義は5章と同様に，特別熱負荷を，冷房については降順に，暖房については昇順に並べ替え，それぞれの上位率2.5%，および5%の特別日射負荷を危険率2.5%，および5%の最大日射負荷とする．次に各モデルの各仰角の場合の特別日射負荷を積算して，期間日射負荷を求め，これを比較する．

7.3.3.1 最大日射負荷

表7.5，6に夏季，冬季の危険率2.5%，危険率5%の最大日射負荷を，図7.9に最大日射負荷の相対差を示す．

夏季，仰角が小さい(30°)場合に斜面日射モデルの相対差が危険率2.5%で20.25%，危険率5%で18.98%と大きくなる．一樣天空では仰角が大きくなると最大5%程度の誤差が見られたが，近似解析法では最大でも1.68%(仰角70°危険率5%)と小さく，全てのケースで±2%以内となっていた．

冬季についても，仰角が小さい(30°)場合に斜面日射モデルの相対差が大きくなる傾向が見られた．全ての計算法で冬季の相対差は夏季よりも大きくなる傾向が見られた．このようななか，近似タイプ15タイプを用いた近似解析法の相対差は小さく最大でも3.76%(仰角30°危険率5%)

表7.5 最大日射負荷(夏季)

		夏季 最大日射負荷 [W/m ²]				
		測定値	近似解析法		Perezモデル	一樣天空
			推定5タイプ	近似15タイプ		
30°	危険率 2.5%	20.18	20.49	20.15	24.26	19.82
	危険率 5%	18.00	17.90	17.85	21.40	17.58
50°	危険率 2.5%	66.43	66.06	65.89	68.67	64.68
	危険率 5%	56.14	55.80	55.73	58.23	54.66
70°	危険率 2.5%	69.87	70.77	70.48	70.24	67.21
	危険率 5%	59.22	60.21	59.92	59.83	57.04

表7.6 最大日射負荷(冬季)

		冬季 最大日射負荷 [W/m ²]				
		測定値	近似解析法		Perezモデル	一樣天空
			推定5タイプ	近似15タイプ		
30°	危険率 2.5%	2.42	2.65	2.47	4.11	2.54
	危険率 5%	2.20	2.27	2.28	3.48	2.29
50°	危険率 2.5%	43.77	42.98	42.88	47.73	41.26
	危険率 5%	40.44	40.31	40.12	43.53	39.16
70°	危険率 2.5%	69.85	71.92	70.37	73.66	53.94
	危険率 5%	55.36	56.88	55.33	58.62	50.87

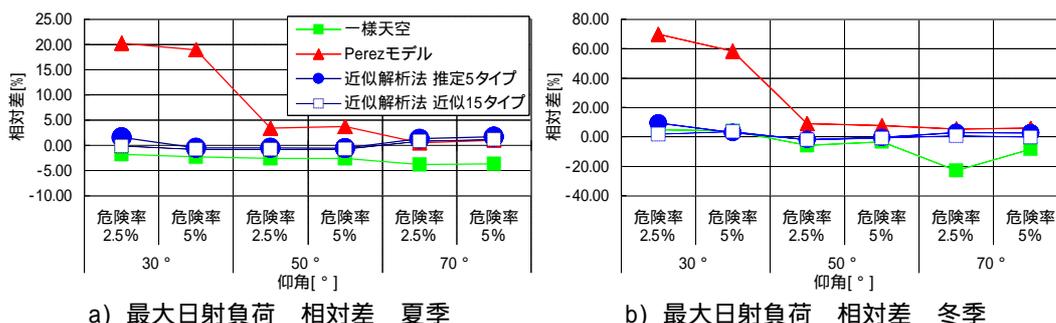


図7.9 最大日射負荷の相対差

表7.7 期間日射負荷(夏季)

	夏季 期間日射負荷 [W/m ²]				
	測定値	近似解析法		Perezモデル	一樣天空
		推定5タイプ	近似15タイプ		
30°	1981.80	1970.55	1939.62	2520.59	1918.31
50°	6118.59	6193.06	6128.17	6579.93	5921.53
70°	7040.63	7326.29	7288.88	7190.58	6933.64

表7.8 期間日射負荷(冬季)

	冬季 期間日射負荷 [W/m ²]				
	測定値	近似解析法		Perezモデル	一樣天空
		推定5タイプ	近似15タイプ		
30°	328.32	339.03	341.57	411.68	357.92
50°	2830.28	2842.62	2783.88	3237.63	2620.57
70°	6966.90	7271.46	7033.72	7454.21	6441.60

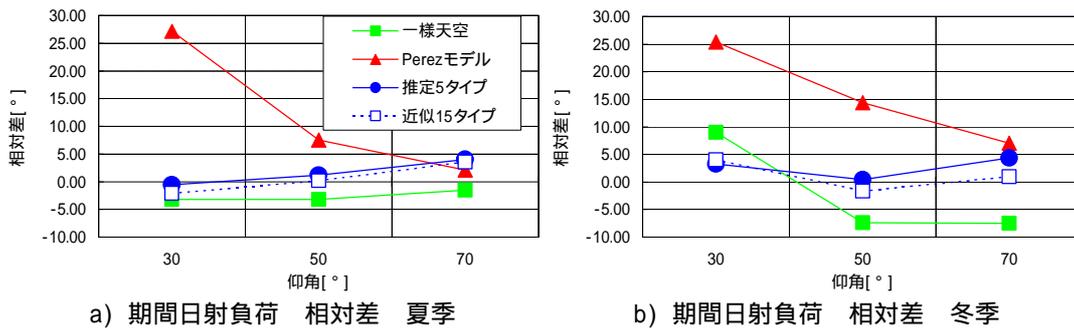


図7.10 期間日射負荷の相対差

である。推定5タイプを用いた近似解析法はやや大きくなり最大は9.45%(仰角 30° 危険率2.5%)である。しかし他のケースでは $\pm 3\%$ 以内であり、十分精度良く最大日射負荷を求めている。

以上より、近似解析法を用いて求めた最大冷房日射負荷、最大暖房日射負荷ともに、精解値とした測定天空放射輝度分布の最大日射負荷に対する相対差が小さく、近似解析法の精度は悪くない。

7.3.3.2 期間日射負荷

表7.7, 8に期間日射負荷を、図7.10に期間日射負荷の相対差を示す。

最大日射負荷同様、仰角が小さい(30°)場合に斜面日射モデルの相対差が大きくなる。一樣天空では仰角が大きくなると最大9.02%の相対差が見られた。一樣天空は冬季全ての仰角の場合で $\pm 7\%$ を超えている。これらに比べ、近似解析法では最大でも4.37%(仰角 70° 冬季)と小さく、全てのケースで $\pm 4.5\%$ 以内となっていた。

以上より、近似解析法を用いて求めた期間日射負荷は、測定天空放射輝度分布の期間日射負荷に対する相対差が小さく、近似解析法の有効性が確認できた。

7.4 計算時間

近似解析法の有効性を示すため遮蔽物を考慮した熱負荷を求める際に要する計算時間の比較を行う。表7.9にそれぞれの計算法の各計算プロセスにおける計算時間を示す。遮蔽判定や積分区間の決定といった初回のみ必要となる計算に要する時間の合計には、計算法による違いはあまり見られない。これは初回のみ必要となる計算に要する時間のうちで、全ての計算法に共通して必要となる

表7.9 各壁面日射計算法における計算プロセスに要する演算時間

		計算時間[s]			
		天空要素計算	近似解析法	数値積分	PereZ
初回のみ	天空率 (モンテカルロ法 10000本)	7.97E-03	7.97E-03	7.97E-03	7.97E-03
	積分区間の決定 (1°刻み)			3.10E-04	
	積分区間 (Z')の決定 (10°刻み)		7.50E-05		
	145天空要素の遮蔽判定	1.55E-04			
	合計	8.12E-03	8.04E-03	8.28E-03	7.97E-03
毎時	準直達域の非遮蔽率 (モンテカルロ法10000本)				3.76E-03
	本計算	2.61E-04	9.03E-03	5.27E-02	9.98E-05
	合計	1.65E-02	2.51E-02	6.93E-02	1.98E-02

天空率(モンテカルロ法)の計算時間の占める割合が多いためである。毎時の計算を見ると数値積分の本計算に要する時間が大きいことがわかる。天空要素計算法の本計算に要する計算時間は小さいが、7.2.4で述べたように天空要素計算法の天球分割は荒く、都市キャニオンなど高度方向の影響が大きくなる場合には、誤差が大きくなる可能性があるため、天空要素計算法は詳細な建物モデルには不向きであると考えられる。

図7.11に特別熱負荷を1回求めるのに必要となる壁面日射計算の計算プロセスに要する計算時間の比較を示す。これは天空要素計算法を1として計算時間の比を求めたものである。これによれば近似解析法は天空要素計算法に対し、およそ1.5倍、数値積分は4.2倍、斜面日射モデルは1.2倍の計算時間を要することがわかる。近似解析法は数値積分に対して1/3の時間で計算することができる。また壁面日射量計算の熱負荷計算全体に占める計算時間の割合を求めたところ、以下のようにおよそ12%である。

- ・熱負荷計算全体に要する時間(24時間) T_{all} : 6.672 秒
- ・壁面日射量計算に要する時間(24時間) T_{app} : 0.802 秒 (近似解析法)

$$\begin{aligned}
 T_{app}/T_{all} \times 100 &= (0.802/6.672) \times 100 \\
 &= 12.0204
 \end{aligned}
 \tag{7-8}$$

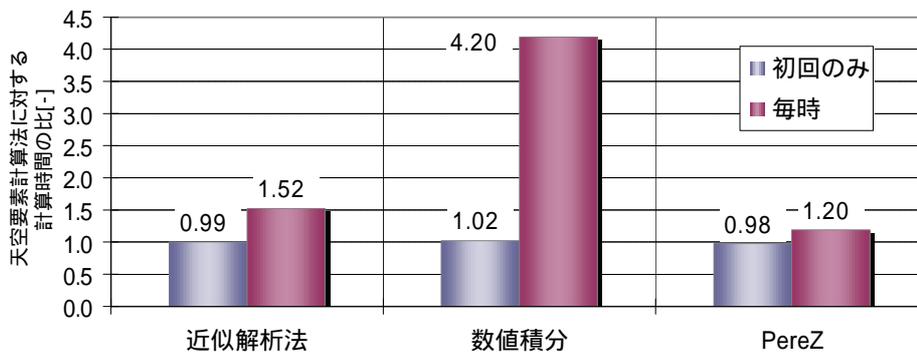


図7.11 計算時間の比較

近似解析法においても、壁面日射量計算の計算時間の熱負荷計算全計算時間に占める割合が10%を超える（正対する遮蔽物が1つあるという比較的単純なモデル）。数値積分を用いた場合にはさらにこの割合は大きくおよそ33.2%となる。熱負荷計算全計算の1/3が壁面日射量の計算に占められている。これから壁面日射量計算の計算時間を短縮することは、熱負荷計算全計算時間の短縮へとつながると考えられるため、近似解析法による壁面日射量計算の計算時間の短縮は有効である。

なお、近似解析法においては、太陽が地物あるいは庇に遮蔽される場合、天頂側あるいは地平線側関数のどちらかの一方のみを計算すればよいことになり、計算時間は太陽が遮蔽されない場合のおよそ1/2になる。これからも近似解析法による計算時間についての有利さがわかる。

7.5 まとめ

6章で開発した近似解析法を、より現実の環境を想定した、周囲に遮蔽物のある建物の熱負荷計算に適用し、最大日射負荷、期間日射負荷を求め、斜面日射モデルや3章で示した天空要素計算法、一様天空を用いて求めた最大日射負荷、期間日射負荷との比較を行った。またその計算に要する時間の比較を行い以下の知見を得た。

1) 壁面日射量について

近似解析法、斜面日射モデル、天空要素計算法（天空放射輝度分測定値）、一様天空の4つの計算法について、仰角30、50、70°、夏季、冬季の場合について壁面日射量を計算した。

壁面全天日射量では、仰角が大きな時に、一様天空の場合にやや小さくなる傾向、斜面日射モデルでは仰角が小さな場合に、やや大きな日射量を計算する傾向が見られた。これらのモデルと比べ近似解析法による壁面全天日射量は、測定天空輝度分布による壁面全天日射量と良く一致していた。

壁面天空日射量では、一様天空、斜面日射モデルが全天日射量の比較の際に見せた傾向がより顕著になった。これらのモデルと比べ近似解析法は精度良く天空日射量を求めていたが、各モデルの日射量にばらつきが見られた。

2) 日射負荷について

各計算法による壁面日射量を用いて求めた夏季、冬季30日の時別熱負荷から、冷房、暖房の最大日射負荷、期間日射負荷を求め、これを比較した。

i) 最大日射負荷

仰角が小さい場合に斜面日射モデルの相対差が大きく、一様天空では仰角が大きい場合に相対差が大きくなる傾向が見られたが、近似解析法では、夏季では最大で1.68%（仰角70°危険率5%）と小さく、全てのケースで±2%以内となっていた。冬季はやや大きくなり最大は9.45%（仰角30°危険率2.5% 推定5タイプを用いた近似解析法）であるが、他のケースでは±3%以内であり、十分精度良く最大日射負荷を求めている。

ii) 期間日射負荷

最大日射負荷同様、仰角が小さい（30°）場合に斜面日射モデルの相対差が大きくなる。一様天空では仰角が大きくなると最大9.02%の相対差が見られた。これらに比べ、近似解析法では全てのケースで±4.5%以内となっていた。

3) 計算時間について

時別熱負荷を1回求めるのに必要となる壁面日射計算の計算プロセスに要する計算時間の比較を行ったところ、近似解析法は天空要素計算法に対し、およそ1.5倍、数値積分は4.2倍の計算時間を要し、近似解析法は数値積分に対して1/3の時間で計算することができたことがわかった。壁面日射量の計算時間の熱負荷計算全計算時間に占める割合も少なく、近似解析法による壁面日射量計算の計算時間の短縮は有効である。

以上より、遮蔽物のある場合の熱負荷において、近似解析法を用いた熱負荷計算は、精度良く日射負荷、壁面日射量を求められることを示した。さらに計算時間を短縮できることもあわせて示した。この計算精度、計算時間の観点より、近似解析法は、天空放射輝度分布、遮蔽物を考慮した熱負荷計算を行う際に有効な手法であると言える。

記号表

r	: 天空率を求める際のモンテカルロ方の射出の高度角 [rad]
Z''	: 遮蔽物の高度角 [rad]
A	: 遮蔽物と検討壁面中心との距離 [-]
B	: 遮蔽物の上辺の高さ [-]
Z'''	: 付属物の高度角 [rad]
C	: 検討壁面付属物の x-y 平面上への射影線分と検討壁面中心との距離 [-]
D	: 検討壁面付属物の高さ [-]
Z_s	: 天頂からの太陽高度 [rad]
a	: 天空率を求める際のモンテカルロ方の射出の方位角 [rad]
$Rand_1$: モンテカルロ法の高度方向の一様乱数 [-]
$Rand_2$: モンテカルロ法の方位方向の一様乱数 [-]
F	: 斜面天空日射が水平面天空日射に占める比率 [-]
f	: 準直達域の非遮蔽率 [-]
F'	: 天空率 [-]
	: 斜面の傾斜角 [rad]
H	: 遮蔽物の高さ (建物モデル) [-]
L	: 遮蔽物までの距離 (建物モデル) [-]
T_{all}	: 熱負荷計算全体に要する時間(24時間)[sec]
T_{app}	: 近似解析法の壁面日射量計算に要する時間(24時間) [sec]

本章に関する発表論文

査読付き論文

- 1) 天空放射輝度分布，遮蔽物を考慮した熱負荷計算の試み：細淵勇人，吉田治典，
日本建築学会環境系論文集，2009.4月投稿予定

学術講演会発表

- 1) 天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量計算法の開発と熱負荷計算への組み込み：細淵勇人，
吉田治典，日本建築学会近畿支部研究発表会，2009.3月投稿予定
- 2) 天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量計算法の開発と熱負荷計算への組み込み：細淵勇人，
吉田治典，日本建築学会大会，2009.4月投稿予定

参考文献

- 7-1) 建築周辺の曇天時照度比・天空率と晴天時日射エネルギー比 - 市街地外部空間の日射・採光
の質を考慮した形態コントロール手法に関する研究(その1):
篠崎道彦，桑田仁，斉藤圭，日本建築学会計画系論文集，第535号，pp.189-196, 2000.9
- 7-2) 赤坂裕，他，拡張アメダス気象データ 1981-2000, 日本建築学会，2005
- 7-3) 建築屋外における日射と長波長放射の計算モデル：
樋口佳樹，宇田川光弘，佐藤誠，木村建一，日本建築学会環境系論文集，第544号，
pp.9-15, 2001.6
- 7-4) Hay,J.E.: Study of Short-Wave Radiation on Nonhorizontal Surfaces, Canadian Climatic Center
Report, No.79-12 Atmospheric Environment Service, Tronto Canada, 1979
- 7-5) Reindl,D.T., Beckman,W.A.,Duffie,J.A.:Evaluation of Hourly Tileded Surface Radiation Models ,
Solar Energy, 45(1), pp.9-17, 1990
- 7-6) Perez, R.,Seals,R.,Ineichen, Stewart, R., and Menicucci, D.: A New Simplified Version of the Perez
Diffuse Irradiance Model for Tilted Surfaces, Solar Energy, Vol.39, No.3, pp.221-231, 1987
- 7-7) Perez, R.,Ineichen, P.,Seals,R.,Michalsky,j.,and Stewart, R.: Modeling Day Light Availability
and Irradiance Components from Dirct and Global Irradiancen,
Solar Energy,44(5), pp.271-289, 1990
- 7-8) 準直達日射・天空日射の測定とその推定式の作成：
赤坂裕，黒木荘一郎，稲村悌成，二宮秀興，日本建築学会環境系論文集，第405号，
pp.19-27, 1989.11

8章

結論

第8章

結論

本研究は、建物の熱負荷計算において、従来では一様と仮定されてきた天空放射輝度分布に、その分布を考慮することの重要性を明らかにし、エネルギー（熱負荷）予測時に天空放射輝度分布を考慮し、詳細なエネルギー（熱負荷）予測を可能とする手法の開発を目的として、1)CIE標準一般天空の熱負荷計算への流用と天空タイプ推定法の開発、2)天空放射輝度分布の熱負荷計算への影響の把握と明示、3)遮蔽物を考慮した熱負荷計算法の開発を行った。本章では各章で得られた結論を集約し総括する。

8.1 各章のまとめ

8.1.1 1章のまとめ

序論として、まず、近年顕在化してきた温暖化といった地球環境問題における建設関連分野の責任は重大であり、このため建物のエネルギーの有効利用、省エネルギーのための精度の良い消費エネルギー予測が求められてきていること、各地の気象データの整備、詳細な気象モデルの開発、さらに以前は測定されていなかった気象データの測定が可能となるなど、より精度の高いエネルギー予測を可能とする環境が整備されてきていることといった研究の背景を示した。次に、このような背景のもと、従来では一様と仮定されてきた天空放射輝度分布に、その分布を考慮することの重要性を明らかにし、エネルギー（熱負荷）予測時に天空放射輝度分布を考慮し、詳細なエネルギー（熱負荷）予測を可能とする手法の開発を研究の目的とすることを述べ、既往の研究を示して本研究の位置付けを行った。さらに本研究の構成を示した。

8.1.2 2章のまとめ

2章では、本研究の目的である、熱負荷計算等の建築物の熱環境の予測・解析の際に、より精度の高い入射日射量を求めることを可能とする手法の開発に先立ち、研究の前提となる、以下の事項について整理した。

1) 各種気象要素の測定概要

本研究で用いる、天空放射輝度分布、水平面全天日射量、水平面天空日射量、法線面直達日射量について、測定地点を示し、各測定に用いる機器を示した。

2) 測定気象要素をシミュレーションに用いるための気象データとして整理する方法

- i) 測定した気象観測値を、シミュレーションに用いるためのデータとするために行った品質テスト、各種補正を示した。
- ii) 京都大学で測定した気象観測値（天空放射輝度分布、水平面全天日射量、水平面天空日射量、法線面直達日射量）と、京都地方気象台で測定された地上観測1分値データから、シミュレーションのための気象データを作成する方法を示した。さらに作成した気象データの概要を示し、これが特殊な気象データとなっていないか確認するために、拡張アメダス気象データ 1981-

2000 添付の年間熱負荷計算用気象データ出力プログラム Uf12Hasp/Smash により，京都標準年データを作成しこれと比較を行った。

3) 天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量の計算フロー

斜面日射モデル，天空放射輝度分布モデルを用いて，壁面日射量を計算する流れを示した。

4) CIE 標準一般天空の概要

これまで熱負荷計算等の建築物の熱環境予測・解析に天空放射輝度分布モデルを用い，天空放射輝度分布の影響を明らかにした例がないことから，本研究では，天空放射輝度分布モデルを用いて，天空放射輝度分布を考慮した，より精度の高い熱負荷計算を可能とする手法を示し，その影響を把握する。本研究において，天空放射輝度分布のモデルとして用いることとした CIE 標準一般天空について概説した。

8.1.3 3章のまとめ

3章では，熱負荷計算などの熱環境シミュレーションに，天空放射輝度分布を考慮するため，分布のモデルを利用することを考え，モデルの係数が煩雑にならない，天空状態を捉えやすいといった利点を持つ天空輝度分布モデルである CIE 標準一般天空について，京都大学において測定した1年間の天空放射輝度分布，天空輝度分布データを用いて，このモデルの放射輝度への流用可能性を検証し，以下の知見を得た。知見より，天空輝度分布のモデルである CIE 標準一般天空を天空放射輝度分布に流用し，壁面日射量の計算に用いることが可能であると判断した。また鉛直面日射量の計算では天空タイプを5まで集約できることを示した。

1) 輝度と放射輝度の比較

$j_l(z)/j_l(0)$ と $j_r(z)/j_r(0)$ ， $f_l(c)$ と $f_r(c)$ のそれぞれの誤差 (RMSE) は小さく，それぞれ関連の近似線の傾きは，ともに1に近いものとなっており，放射輝度と輝度は良く対応している。

2) 近似タイプの年間出現頻度について

- 近似タイプの年間出現頻度の順位第1位は天空タイプ13(1927回)で以下，1，15，14，8と続く。Clear sky タイプである天空タイプ13，14，15の出現頻度が高い。
- 春，秋季に Clear sky タイプの出現頻度が高く，夏季，冬季にその出現頻度がやや減少し，Partly cloudy sky タイプの出現頻度が増加する傾向がある。
- Overcast sky タイプ(天空タイプ1，2，3，4)の出現頻度の割合は約25%。季節による変化は最大で約5%と，Partly cloudy sky，Clear sky タイプに比べ小さい。
- 一樣な天空放射輝度分布を表す天空タイプ5の出現頻度の割合は年間を通じて5%未満である。

3) 近似モデル，一樣モデルの鉛直面日射量とスキャナモデルの鉛直面日射量との比較

スキャナモデルの鉛直面日射量に対する近似モデルの鉛直面日射量の相対誤差の年平均は南面，西面で約4%，北面，東面で約2%，相対誤差の標準偏差は年平均で，各方位とも約17%となり，一樣モデルの相対誤差の年平均が南面-10%，西面17%，北面34%，東面11%，標準偏差の年平均が南面26%，西面46%，東面47%，北面35%となるのに対し，小さな値を示す。

4) 天空タイプの集約について

- 近似する天空タイプの数を15から出現頻度の低い順に減少させてゆくと，天空タイプの数が5以上では鉛直面日射量のRMSEに大きな変化は無いが，4以下になると南，西面で約 $10[\text{w}/\text{m}^2]$ 大きくなり，東面ではRMSEの季節差が2.3倍になるなど変化する。北面ではRMSE，季節差ともに

あまり変化しない。

- b) 近似する天空タイプの数をも5まで減少させても、天空タイプの数15の時と比べ、鉛直面日射量の相対誤差は、年平均で南面5%、他の方位で6%程度、標準偏差の年平均は南面において3.5%、他の方位で2%未満の差しか見られず、大幅な変化はない。

8.1.4 4章のまとめ

CIE標準一般天空を利用して、時々刻々の熱環境シミュレーションを行うには、各時刻の天空タイプを決定する必要があるが、天空タイプを決定する指標は現在標準化されていない。そこで4章では、散乱関数 (Indicatrix function) のグループと法線面直達日射量 E_{es} 、輝度階調関数 (Gradation function) のグループと水平面全日射量 E_{eg} の関係を分析し、Gradation, Indicatrix のグループを区分する境界曲線を求め、これを用いて天空タイプを推定する手法を開発した。この手法により、天空放射輝度分布の測定がされていない地点においても、天空放射輝度分布を考慮した熱シミュレーションが可能となった。

1) 天空タイプ推定手法

境界曲線を用いた天空タイプ推定手法を開発した。この手法の妥当性を検証するために、推定した天空タイプを用いて求めた鉛直面日射量に対する相対誤差を分析した。提案した天空タイプ推定手法を用いた場合の鉛直面日射量の相対誤差月平均 $I_{i-15, re}$ は、北面、東面で冬季にやや大きくなる傾向が見られたものの、概ね $\pm 5\%$ 未満であり精度よく鉛直面日射量が求められている。従来の一様天空の場合と比べてもその値は十分小さい。また3章で求めた近似タイプの相対誤差 $I_{c, re}$ と比較しても著しく大きくなることはなかった。これより提案する天空タイプ推定手法の妥当性を示すことができた。

2) 集約した天空タイプの推定

天空タイプ推定手法を、集約した1, 8, 13, 14, 15の5つ天空タイプの場合に適用することが可能か検証を行った。15タイプ, 5タイプ場合のそれぞれについて各方位各月の鉛直面日射量の%RMSEを求め、この差%RMSEより、15タイプの場合からの精度低下を分析したところ、東面・西面夏季、南面冬季に%RMSEは5%を超えることもあるが、最大でも8.9% (東面7月) であり、著しく大きくなることはない判断した。これより15の時と同様集約した天空タイプの推定において提案した天空タイプの推定手法を利用すれば精度よく鉛直面日射量が求められることを示した。

8.1.5 5章のまとめ

5章では、天空放射輝度分布測定値、一様天空、4章で示した手法を用いて天空タイプを推定した天空放射輝度分布、という3種類の分布形を用いて熱負荷を求め、分析を行い、以下の知見を得た。これより熱負荷計算における天空放射輝度分布の考慮の有無による熱負荷へのインパクトを明らかにし、熱負荷計算に天空放射輝度分布を考慮する必要性を示した。また、4章で示した手法を用いて天空タイプを推定し、この天空放射輝度分布を用いて、精度良く熱負荷が求められることから、熱負荷計算に天空タイプ推定手法を用いることの有効性を示した。

1) 天空放射輝度分布の熱負荷へのインパクト

スカイスキャナで測定した天空放射輝度分布データを用いた熱負荷 q_m 、天空日射が天空一様

と仮定して求めた熱負荷 q_u を求めて比較を行なった。季節、ペリメータ方位により熱負荷に差異が見られること、その差異に窓面積の同じ建物モデルで似た傾向が見られることから、天空放射輝度分布を考慮し透過日射量をより詳細に求め、熱負荷を算出する必要があることがわかった。以下に知見を示す。

- i) 最大暖房負荷の相対差 $p_{u,h}$ は南ペリメータで +8% を超える建物モデルが見られた。最大冷房負荷の相対差 $p_{u,c}$ でも、建物-1, 3の西、東ペリメータで、-7.1 ~ -9.7% と大きい。また窓面積の同じ建物で、相対差に似た傾向が見られた。
- ii) 期間暖房負荷の相対差 $\tilde{p}_{u,h}$ は南ペリメータで特に大きく +8% 程度である。期間冷房負荷の相対差 $\tilde{p}_{u,c}$ は基準建物・建物-2, 建物-1, 3の北ペリメータでそれぞれで、+5%, +7% 程度とやや大きい。
- iii) 時別熱負荷の %RMSE は、冬季南ペリメータで -10% を超え、%MBE も基準建物、建物-1, 2でそれぞれ、+8.3%, +9.5%, +8.7% と大きく、夏季でも、北ペリメータの %MBE は +5 ~ 7% となり、一樣天空の場合、過大な熱負荷を算出する傾向が見られた。

2) 天空タイプ推定法の熱負荷計算への適用

4章で示した手法により推定した天空タイプを用いて、熱負荷計算を行った。最大熱負荷、期間熱負荷の相対差、時別熱負荷の誤差が小さいこと、一樣天空の場合と比べても、各熱負荷ともに精度の向上が見られることから、推定した天空タイプによる熱負荷計算が有効である事を示した。以下に知見を示す。

- i) 最大暖房負荷の相対 $p_{k,h}$ では、基準建物、建物-2の南ペリメータで -4.1%, -5.9% となる以外は、概ね $\pm 2\%$ 以内であり、最大冷房負荷の相対差 $p_{k,c}$ も建物-1, 3の西ペリメータでやや大きい。 $p_{u,c}$, $p_{u,h}$ と比べ十分小さい。
- ii) 期間暖房負荷の相対差 $\tilde{p}_{k,h}$ は最大でも -3.4% で、概ね $\pm 2\%$ 以内であり十分小さい。期間冷房負荷の相対差 $\tilde{p}_{k,c}$ は建物-1, 3の東ペリメータで共に -2.3% であるのを除き、全てのペリメータで $\pm 2\%$ 以内である。
- iii) 冬季各建物モデルの南ペリメータで、時別熱負荷の %RMSE は -10% 程度、建物-1, 3の西ペリメータで冬季 -6%, 夏季 +7% とやや大きくなるものの、それ以外のケースでは $\pm 5\%$ 未満である。%MBE も冬季基準建物の南ペリメータ -3.4% となる以外は、概ね $\pm 2\%$ 以内であり小さい。%MBE・%RMSE は共に一樣天空の場合と比べ小さい。

3) 日射負荷

日射負荷 q'_k, q'_m, q'_u と壁面全天日射量、壁面天空日射量との相関を検討した。壁面全天日射量との相関については、天空タイプ推定法、測定天空放射輝度分布でほぼ同様な相関直線となった。壁面天空日射量との相関において、一樣天空の場合に R^2 値が著しく小さいことから、天空タイプ推定法、測定天空放射輝度分布と比べ、日射負荷に対する壁面天空日射量の寄与が著しく小さいことがわかった。

8.1.6 6章のまとめ

天空放射輝度分布を考慮した熱負荷計算を前提として、計算時間の必要となる数値積分等によらない壁面日射量計算法を、1) 太陽位置を原点とする座標へ座標変換し、2) Indicatrix 関数については太陽高度を境界として天頂側、地平線側の二つの関数に分離し、3) Gradation 関数、Indicatrix 関

数ともに、解析的に解の求まる式に近似するといった手順で開発した。開発した手法「近似解析法」を検証し、以下の知見を得た。これより近似解析法は計算精度はもちろん、計算速度の観点からも、年間熱負荷計算等に応用可能な手法であることを示した。

- 1) Gradation 関数と近似関数の比較において、地平線に近い領域でやや違いが見られるグループもあったが、Gradation 関数、Indicatrix 関数ともに精度の高い近似関数が求められた。
- 2) Gradation 関数、Indicatrix 関数の近似関数を組み合わせ、相対日射量を求めた。求めた相対日射量と数値積分の場合の相対日射量との比較を行ったところ、相対誤差は最大でも水平面 3.69%、鉛直面 2.81% と十分小さく、提案した手法により精度良く日射量を求めることができることがわかった。
- 3) 開発した壁面日射量計算法、数値積分それぞれの方法による鉛直面相対日射量の計算時間の比較を行った。開発した壁面日射量計算法の計算時間は、数値積分による方法に比べ約 1/6 と格段に短い。

8.1.7 7章のまとめ

6章で開発した近似解析法を、より現実の環境を想定した、周囲に遮蔽物のある建物の熱負荷計算に適用し、最大日射負荷、期間日射負荷を求め、斜面日射モデルや3章で示した天空要素計算法、一様天空を用いて求めた最大日射負荷、期間日射負荷との比較を行った。またその計算に要する時間の比較を行い以下の知見を得た。この知見より、近似解析法は、天空放射輝度分布、遮蔽物を考慮した熱負荷計算を行う際に有効な手法となることを示した。

1) 壁面日射量について

近似解析法、斜面日射モデル、天空要素計算法（天空放射輝度分測定値）、一様天空の4つの計算法について、仰角 30、50、70°、夏季、冬季の場合について壁面日射量を計算した。壁面全天日射量では、仰角が大きな時に、一様天空の場合にやや小さくなる違い、斜面日射モデルでは仰角が小さな場合に、やや大きな日射量を計算する傾向が見られた。これらのモデルと比べ近似解析法による壁面全天日射量は、測定天空輝度分布による壁面全天日射量と良く一致していた。壁面天空日射量では、一様天空、斜面日射モデルが全天日射量の比較の際に見せた傾向がより顕著になった。これらのモデルと比べ近似解析法は精度良く天空日射量を求めていたが、各モデルの日射量にばらつきが見られた。

2) 日射負荷について

i) 最大日射負荷

仰角が小さい場合に斜面日射モデルの相対差が大きく、一様天空では仰角が大きい場合に相対差が大きくなる傾向が見られたが、近似解析法では、夏季では最大で 1.68%（仰角 70° 危険率 5%）と小さく、全てのケースで ± 2% 以内となっていた。冬季はやや大きくなり最大は 9.45%（仰角 30° 危険率 2.5% 推定 5 タイプを用いた近似解析法）であるが、他のケースでは ± 3% 以内であり、十分精度良く最大日射負荷を求めている。

ii) 期間日射負荷

最大日射負荷同様、仰角が小さい（30°）場合に斜面日射モデルの相対差が大きくなる。一様天空では仰角が大きくなると最大 9.02% の相対差が見られた。これらに比べ、近似解析法では全てのケースで ± 4.5% 以内となっていた。

3) 計算時間について

時別熱負荷を1回求めるのに必要となる壁面日射計算の計算プロセスに要する計算時間の比較を行ったところ、近似解析法は天空要素計算法に対し、およそ1.5倍、数値積分は4.2倍の計算時間を要し、近似解析法は数値積分に対して1/3の時間で計算することができることがわかった。壁面日射量の計算時間の熱負荷計算全計算時間に占める割合も少なく、近似解析法による壁面日射量計算の計算時間の短縮は有効であると判断した。

8.2 総括

本研究では、熱負荷計算の際に、従来同様と仮定されてきた天空の放射輝度分布を考慮し、より精度が高く、現実の環境を反映したエネルギー予測を目的として、国際照明委員会に天空輝度分布の標準モデルとして推奨されているCIE標準一般天空を、天空放射輝度分布に流用し、熱負荷計算に天空放射輝度分布を考慮することを可能とする手法の開発を行った。

CIE標準一般天空の天空タイプの推定手法は、いまだ標準化されていないため、本研究において、一般的に測定されている気象要素から天空タイプを推定する手法を開発し、提案できたことは有用である。また、天空放射輝度分布の熱負荷へのインパクトも明らかにすることで、精度のよいエネルギー予測には、天空放射輝度分布を考慮すべきであることを明示できた。さらに数値積分のような計算時間の要する手法を用いずに、遮蔽物、天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量を計算する手法を開発した。これは計算時間を要しないことから、年間熱負荷計算などへの応用も可能である。

以上のように、本研究の成果は、考慮されていなかった天空放射輝度分布のインパクトを明らかにしたこと、水平面全天日射量、法線面直達日射量から、CIE標準一般天空の天空タイプを推定する手法の開発、遮蔽物のある場合でも熱負荷計算を行うことを可能とする解析解を用いた壁面日射量計算手法「近似解析法」の開発であり、これらの手法を用いることで、より精度が高く、詳細なエネルギー予測が可能となり、建物のエネルギーの有効利用、省エネルギーに寄与するものと考えられる。

Appendix

- Appendix-1 Inaditrix近似関数のパラメータ表
 - Appendix-2 Inaditrix近似関数の近似誤差(%RMSE)
 - Appendix-3 Inaditrix近似関数の相対日射量の比較
 - Appendix-4 Inaditrix近似関数, 天空要素計算法の相対日射量の相対誤差
 - Appendix-5 相対日射量の比較
 - Appendix-6 近似関数, 天空要素計算法の相対日射量の相対誤差
 - Appendix-7 日射、天空輝度分布・天空放射輝度分布に関する各種モデル
 - 1 直散分離手法
 - 2 斜面日射モデル
 - 3 天空輝度・放射輝度分布モデル
-

Indicatrix 近似関数のパラメータ表

Appendix

天頂側近似関数の係数 Indicatrix-2

	Zs										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
$f_{a,1} \alpha'$	0	1.480	2.181	2.039	2.239	2.220	2.276	2.278	2.271	2.264	2.249
	10	1.480	461.420	2.733	3.855	3.881	3.009	2.665	2.396	2.191	
	20	1.480	441.660	3.575	4.131	4.459	4.202	3.893	2.812	2.271	
	30	1.480	321.930	2.962	3.036	3.086	3.402	4.005	5.017	6.668	
	40	1.480	227.070	2.013	2.492	2.288	2.357	2.498	2.685	2.922	3.278
	50	1.480	134.640	1.108	1.363	1.619	1.531	1.861	1.939	1.624	
	60	1.480	9.952	0.982	0.756	0.707	0.672	0.665	0.958	1.039	1.012
	70	1.480	97.188	0.872	0.627	0.625	0.624	0.677	0.881	1.083	0.945
	80	1.480	7.044	0.782	1.006	0.863	0.637	0.778	0.324	0.387	0.989
	90	1.480	247.650	1.245	1.312	1.163	0.906	0.690	0.500	0.398	1.044
	100	1.480	326.950	1.475	1.792	1.036	0.770	0.578	0.476	0.406	0.248
	110	1.480	363.320	0.849	1.569	1.157	0.652	1.107	0.446	0.399	0.269
	120	1.480	317.690	0.080	0.905	0.771	0.543	0.980	0.073	0.348	0.274
	130	1.480	10.569	0.918	0.804	0.727	0.446	0.822	0.030	0.358	0.263
	140	1.480	13.215	0.766	0.649	0.601	0.269	0.085	0.017	0.002	0.297
	150	1.480	2.713	0.719	0.634	0.545	1.156	0.058	0.009	0.001	0.297
	160	1.480	1.782	0.774	0.638	0.425	0.167	0.046	0.006	0.350	0.297
	170	1.480	1.484	0.662	0.603	0.382	0.150	0.037	0.004	0.348	0.298
	180	1.480	1.415	0.752	0.643	0.370	0.135	0.035	0.005	0.348	0.298

天頂側近似関数の係数 Indicatrix-1

	Zs										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
$f_{a,1} \alpha'$	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	20	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	30	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	40	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	70	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	120	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	130	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	140	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	150	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	160	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	170	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

天頂側近似関数の係数 INDICATRIX-1

	Zs										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
$f_{a,2} \alpha'$	0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	10	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	20	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	30	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	40	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	50	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	60	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	70	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	80	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	90	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	100	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	110	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	120	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	130	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	140	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	150	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	160	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	170	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	180	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

天頂側近似関数の係数 INDICATRIX-2

	Zs										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
$f_{a,3} \alpha'$	0	1.000	1.375	1.500	1.332	1.356	1.303	1.302	1.309	1.318	1.337
	10	1.000	0.005	0.813	0.488	0.486	0.450	0.388	0.664	0.756	0.868
	20	1.000	0.004	0.449	0.354	0.151	0.276	0.273	0.280	0.396	0.514
	30	1.000	0.004	0.383	0.340	0.306	0.118	0.238	0.186	0.138	0.275
	40	1.000	0.003	0.356	0.259	0.263	0.238	0.214	0.190	0.191	0.146
	50	1.000	0.003	0.317	0.237	0.192	0.204	0.166	0.189	0.188	0.211
	60	1.000	0.009	0.030	0.071	0.115	0.164	0.159	0.173	0.183	0.214
	70	1.000	-0.003	-0.261	-0.241	-0.146	-0.064	0.008	0.052	0.074	0.118
	80	1.000	-0.090	-0.553	-0.320	-0.259	-0.227	-0.110	-0.064	0.022	0.043
	90	1.000	-0.004	-0.505	-0.356	-0.289	-0.252	-0.214	-0.168	-0.092	0.000
	100	1.000	-0.004	-0.589	-0.331	-0.397	-0.367	-0.322	-0.282	-0.154	-0.094
	110	1.000	-0.004	-1.005	-0.434	-0.414	-0.463	-0.270	-0.297	-0.187	-0.124
	120	1.000	-0.005	-0.911	-0.767	-0.639	-0.608	-0.260	-0.122	-0.220	-0.124
	130	1.000	-0.163	-1.130	-0.905	-0.714	-0.745	-0.311	-1.736	-0.206	-0.107
	140	1.000	-0.140	-1.377	-1.122	-0.865	-1.092	-1.821	-2.188	-2.880	-0.061
	150	1.000	-0.686	-1.503	-1.181	-0.955	-0.369	-1.837	-2.652	-3.772	-0.022
	160	1.000	-1.048	-1.456	-1.202	-1.161	-1.504	-2.036	-2.971	-0.141	0.013
	170	1.000	-1.261	-1.362	-1.265	-1.261	-1.601	-2.233	-3.347	-0.125	0.036
	180	1.000	-1.324	-1.520	-1.216	-1.292	-1.698	-2.268	-3.067	-0.119	0.040

天頂側近似関数の係数 INDICATRIX-3

	Zs										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
$f_{a,3} \alpha'$	0	1.480	0.780	0.923	0.721	0.742	0.683	0.682	0.689	0.697	0.714
	10	1.480	-458.540	0.091	-1.307	-1.145	-1.224	-0.384	-0.066	0.191	0.399
	20	1.480	-438.980	-0.893	-1.559	-5.953	-2.074	-1.890	-1.638	-0.588	-0.057
	30	1.480	-319.210	-0.419	-0.644	-0.835	-4.849	-1.354	-2.028	-3.095	-0.764
	40	1.480	-224.420	0.399	-0.236	-0.438	-0.438	-0.680	-0.944	-0.933	-1.622
	50	1.480	-132.060	1.184	0.694	0.253	0.197	-0.243	-0.143	-0.247	-0.162
	60	1.480	1.564	1.200	1.163	1.010	0.892	0.596	0.416	0.285	0.287
	70	1.480	-94.734	1.211	1.173	0.961	0.804	0.637	0.357	0.108	0.223
	80	1.480	-4.647	1.213	0.685	0.212	0.313	0.425	0.549	0.616	-0.044
	90	1.480</									

天頂側近似関数の係数 Indicatrix-3

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$f_{n,1}$	3.101	5.143	5.153	5.223	5.260	5.286	5.317	5.332	5.339	5.339
$f_{n,2}$	854.740	16.351	9.782	7.190	5.720	4.994	4.582	4.320	4.165	4.165
$f_{n,3}$	1063.100	15.656	12.390	11.151	8.682	6.261	4.696	3.700	3.235	3.235
$f_{n,4}$	390.390	10.617	11.242	10.897	9.656	7.303	5.849	4.047	2.694	2.694
$f_{n,5}$	374.950	5.346	6.457	6.759	6.633	6.278	5.729	4.284	2.532	2.532
$f_{n,6}$	307.990	3.349	3.103	3.237	3.394	3.391	3.247	2.860	1.933	1.933
$f_{n,7}$	2.070	1.140	1.182	0.980	1.646	1.646	1.508	1.587	1.478	1.230
$f_{n,8}$	299.980	2.321	1.769	1.338	0.579	0.603	0.608	0.685	1.025	0.938
$f_{n,9}$	65.1660	2.942	2.241	1.756	1.005	0.960	0.902	0.386	0.897	0.897
$f_{n,10}$	165.460	3.183	2.402	1.746	1.500	0.941	0.453	0.397	1.044	1.044
$f_{n,11}$	1143.300	3.302	2.457	1.830	1.263	0.502	0.479	0.396	0.997	0.997
$f_{n,12}$	901.570	3.162	2.784	1.495	0.628	0.344	0.113	0.015	0.375	1.022
$f_{n,13}$	377.700	2.562	1.751	0.707	0.425	0.113	0.015	0.004	0.367	1.104
$f_{n,14}$	26.641	2.160	1.043	0.499	0.229	0.051	0.004	0.002	0.364	1.022
$f_{n,15}$	5.204	1.510	0.771	0.399	0.153	0.025	0.002	0.000	0.127	0.970
$f_{n,16}$	3.295	1.220	0.635	0.330	0.103	0.017	0.000	0.000	0.127	0.970
$f_{n,17}$	2.633	1.097	0.596	0.275	0.095	0.009	0.000	0.888	1.008	0.968
$f_{n,18}$	3.101	2.364	1.008	0.595	0.249	0.076	0.007	0.889	0.195	0.846
$f_{n,19}$	3.101	2.287	0.993	0.546	0.241	0.073	0.006	0.890	0.196	0.872

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$f_{n,1}$	1.000	2.429	2.427	2.380	2.353	2.320	2.298	2.281	2.272	2.272
$f_{n,2}$	1.000	0.006	0.439	0.669	0.855	1.053	1.192	1.297	1.396	1.492
$f_{n,3}$	1.000	0.009	0.334	0.354	0.330	0.369	0.471	0.611	0.808	0.989
$f_{n,4}$	1.000	0.011	0.341	0.257	0.204	0.236	0.204	0.265	0.373	0.626
$f_{n,5}$	1.000	0.007	0.421	0.273	0.210	0.179	0.163	0.159	0.200	0.357
$f_{n,6}$	1.000	0.004	0.312	0.273	0.221	0.184	0.166	0.162	0.175	0.271
$f_{n,7}$	1.000	0.015	0.071	0.112	0.177	0.126	0.156	0.159	0.182	0.238
$f_{n,8}$	1.000	-0.004	-0.278	-0.207	-0.140	-0.115	0.015	0.100	0.104	0.145
$f_{n,9}$	1.000	-0.003	-0.418	-0.330	-0.251	-0.242	-0.214	-0.088	0.026	0.045
$f_{n,10}$	1.000	-0.019	-0.534	-0.429	-0.353	-0.289	-0.223	-0.224	-0.098	0.000
$f_{n,11}$	1.000	-0.003	-0.629	-0.502	-0.409	-0.354	-0.464	-0.273	-0.146	-0.015
$f_{n,12}$	1.000	-0.005	-0.744	-0.509	-0.544	-0.682	-0.677	-1.323	-1.149	-0.009
$f_{n,13}$	1.000	-0.004	-0.979	-0.818	-1.042	-0.966	-1.208	-2.232	-2.106	0.013
$f_{n,14}$	1.000	-0.020	-1.205	-1.286	-1.373	-1.463	-2.048	-3.334	-3.030	0.043
$f_{n,15}$	1.000	-1.655	-1.669	-1.644	-1.620	-1.840	-2.234	-3.015	-5.389	3.500
$f_{n,16}$	1.000	-2.057	-2.012	-1.908	-1.840	-2.244	-3.576	-4.441	-3.576	0.068
$f_{n,17}$	1.000	-2.940	-2.911	-2.915	-2.915	-2.950	-3.957	-0.051	2.705	0.210
$f_{n,18}$	1.000	-2.366	-2.402	-2.145	-2.215	-2.594	-3.955	-0.045	0.136	0.242

天頂側近似関数 INDICATRIX-3

天頂側近似関数の係数 Indicatrix-4

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$f_{n,1}$	5.680	10.159	10.193	10.270	10.320	10.363	10.396	10.420	10.434	10.441
$f_{n,2}$	5.680	949.750	26.666	16.139	11.633	9.617	8.563	7.936	7.548	7.339
$f_{n,3}$	5.680	378.680	28.863	28.715	23.164	14.480	8.847	6.664	5.587	5.069
$f_{n,4}$	5.680	361.650	25.783	26.898	24.514	16.960	14.632	8.427	5.046	3.718
$f_{n,5}$	5.680	139.710	15.130	15.540	14.609	13.120	11.584	8.470	6.150	2.989
$f_{n,6}$	5.680	211.050	6.444	7.194	7.100	6.723	6.205	5.545	4.718	2.587
$f_{n,7}$	5.680	3.901	1.514	1.511	1.763	2.111	2.359	2.442	2.163	1.729
$f_{n,8}$	5.680	145.590	3.561	2.863	1.557	0.960	0.534	0.760	1.009	0.916
$f_{n,9}$	5.680	272.310	5.719	4.383	2.901	1.772	1.012	0.626	1.177	0.973
$f_{n,10}$	5.680	321.340	6.710	4.828	3.149	1.906	1.148	0.646	0.394	1.044
$f_{n,11}$	5.680	541.270	6.770	4.367	2.587	1.519	0.963	0.354	0.391	0.999
$f_{n,12}$	5.680	453.710	6.751	3.230	1.717	0.714	0.291	0.052	0.363	1.015
$f_{n,13}$	5.680	1164.300	5.560	1.995	0.908	0.364	0.095	0.009	0.365	1.102
$f_{n,14}$	5.680	17.719	2.948	1.287	0.566	0.221	0.044	0.002	0.360	0.987
$f_{n,15}$	5.680	5.106	1.763	0.780	0.356	0.151	0.021	0.000	0.104	0.971
$f_{n,16}$	5.680	4.231	1.612	0.707	0.303	0.080	0.006	0.912	0.311	0.949
$f_{n,17}$	5.680	3.844	1.543	0.663	0.276	0.070	0.005	0.914	0.357	0.952
$f_{n,18}$	5.680	3.731	1.544	0.648	0.267	0.070	0.004	0.914	0.374	0.990

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$f_{n,1}$	1.000	2.952	2.940	2.905	2.878	2.851	2.826	2.805	2.791	2.784
$f_{n,2}$	1.000	0.019	0.603	0.898	1.183	1.366	1.521	1.624	1.718	1.807
$f_{n,3}$	1.000	0.037	0.423	0.308	0.307	0.423	0.657	0.860	1.094	1.228
$f_{n,4}$	1.000	0.027	0.295	0.211	0.178	0.208	0.198	0.312	0.532	0.807
$f_{n,5}$	1.000	0.045	0.304	0.217	0.175	0.154	0.170	0.170	0.214	0.501
$f_{n,6}$	1.000	0.014	0.331	0.221	0.175	0.151	0.141	0.140	0.152	0.290
$f_{n,7}$	1.000	0.019	0.105	0.157	0.170	0.157	0.149	0.148	0.172	0.225
$f_{n,8}$	1.000	-0.017	-0.348	-0.244	-0.193	-0.109	0.023	0.121	0.144	0.197
$f_{n,9}$	1.000	-0.017	-0.420	-0.303	-0.248	-0.211	-0.173	-0.084	0.011	0.066
$f_{n,10}$	1.000	-0.013	-0.487	-0.389	-0.317	-0.286	-0.249	-0.206	-0.118	0.000
$f_{n,11}$	1.000	-0.015	-0.590	-0.439	-0.448	-0.415	-0.336	-0.423	-0.165	-0.013
$f_{n,12}$	1.000	-0.021	-0.671	-0.707	-0.694	-0.624	-0.524	-0.463	-0.152	0.004
$f_{n,13}$	1.000	-0.009	-0.869	-1.117	-1.178	-1.331	-1.751	-2.302	-0.066	0.041
$f_{n,14}$	1.000	-0.036	-1.548	-1.592	-1.647	-1.788	-2.411	-4.118	0.087	0.106
$f_{n,15}$	1.000	-1.518	-1.996	-1.942	-1.942	-2.173	-3.091	-5.207	0.091	0.183
$f_{n,16}$	1.000	-2.147	-2.379	-2.288	-2.228	-2.529	-3.709	-6.084	2.612	0.270
$f_{n,17}$	1.000	-2.570	-2.587	-2.449	-2.403	-2.829	-4.424	-0.024	2.248	0.349
$f_{n,18}$	1.000	-2.815	-2.687	-2.556	-2.525	-2.984	-4.358	0.005	2.090	0.403
$f_{n,19}$	1.000	-2.896	-2.695	-2.593	-2.566	-2.981	-4.585	0.015	2.042	0.400

天頂側近似関数 INDICATRIX-4

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$f_{n,1}$	5.680	1.202	1.167	1.087	1.033	0.984	0.943	0.912	0.891	0.882
$f_{n,2}$	5.680	-939.220	-16.605	-6.872	-2.847	-1.216	-0.460	-0.043	0.226	0.405
$f_{n,3}$	5.680	-365.840	-18.219	-21.085	-16.931	-8.333	-3.154	-1.276	-0.370	0.099
$f_{n,4}$	5.680	-352.500	-18.163	-20.553	-19.123	-12.282	-10.487	-4.637	-1.448	-0.173
$f_{n,5}$	5.680	-131.190	-8.499	-10.266	-10.504	-9.501	-8.446	-3.658	-3.545	-0.431
$f_{n,6}$	5.680	-203.110	-0.627	-2.787	-3.878	-3.776	-3.389	-2.733	-0.681	-0.681
$f_{n,7}$	5.680	3.926	3.619	2.204	1.081	0.167	-0.433	-0.737	-0.590	-0.223
$f_{n,8}$	5.680	-138.630	0.988	0.518	0.808	0.913	1.039	0.835	0.287	0.331
$f_{n,9}$	5.680	-265.780	-1.631	-1.838	-0.903	-0.199	0.316	0.565	-0.059	0.112
$f_{n,10}$	5.680	-535.400	-3.415	-2.241	-1.077	-0.323	0.179	0.628	0.574	-0.027
$f_{n,11}$	5.680	-448.110	-3.670	-1.314	-0.359	0.382	0.684	0.912	0.598	-0.026
$f_{n,12}$	5.680	-1158.900	-2.695	-0.219	0.352	0.673	0.872	0.863	0.623	-0.063

天頂側近似関数の係数 Indicatrix-5

Table with 13 columns (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90) and 18 rows of coefficients for Indicatrix-5. The table is organized into sections for f_{a,1} and f_{a,2}.

天頂側近似関数の係数 Indicatrix-6

Table with 13 columns (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90) and 18 rows of coefficients for Indicatrix-6. The table is organized into sections for f_{a,1} and f_{a,2}.

天頂側近似関数の係数 Indicatrix-5

Table with 13 columns (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90) and 18 rows of coefficients for Indicatrix-5. The table is organized into sections for f_{a,1} and f_{a,2}.

天頂側近似関数の係数 Indicatrix-6

Table with 13 columns (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90) and 18 rows of coefficients for Indicatrix-6. The table is organized into sections for f_{a,1} and f_{a,2}.

天頂側近似関数の係数 Indicatrix-5

Table with 13 columns (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90) and 18 rows of coefficients for Indicatrix-5. The table is organized into sections for f_{a,1} and f_{a,2}.

天頂側近似関数の係数 Indicatrix-6

Table with 13 columns (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90) and 18 rows of coefficients for Indicatrix-6. The table is organized into sections for f_{a,1} and f_{a,2}.

地平線側近似関数の係数 Indicatix-1

	Zs										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
$f_{s,1}$	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
α'	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	20	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	30	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	40	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	70	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	120	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	130	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	140	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	150	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	160	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	170	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

地平線側近似関数の係数 Indicatix-2

	Zs										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
$f_{s,1}$	0	2.250	2.265	2.270	2.270	2.275	2.106	1.993	2.181	1.480	
α'	0	2.250	2.268	2.336	2.534	3.035	3.496	3.234	3.330	1.248	
	10	2.250	2.247	2.337	2.811	3.382	6.088	2.555	1.334	144.420	
	20	2.250	2.204	2.294	2.753	3.855	2.614	1.853	1.109	15.162	
	30	2.250	2.136	2.176	2.366	2.243	1.841	1.109	1.088	45.233	
	40	2.250	2.060	1.987	1.959	1.762	1.436	1.066	1.037	0.336	
	50	2.250	1.969	1.785	1.596	1.428	1.149	1.044	1.024	-0.023	
	60	2.250	1.884	1.564	1.339	1.117	1.059	1.028	1.013	-0.188	
	70	2.250	1.797	1.406	1.114	1.085	1.040	1.016	1.005	-0.129	
	80	2.250	1.710	1.280	0.909	0.952	1.027	1.006	0.998	-0.087	
	90	2.250	1.640	1.147	0.768	0.849	1.015	0.997	0.991	-0.055	
	100	2.250	1.576	1.048	0.654	0.371	1.006	0.985	0.986	-0.028	
	110	2.250	1.522	0.972	0.568	0.293	0.998	0.978	0.983	0.004	
	120	2.250	1.474	0.903	0.501	0.237	0.984	0.973	0.980	0.017	
	130	2.250	1.438	0.859	0.453	0.199	0.977	0.969	0.979	0.036	
	140	2.250	1.409	0.821	0.418	0.102	0.972	0.967	0.978	0.050	
	150	2.250	1.388	0.795	0.395	0.103	0.968	0.965	0.978	0.058	
	160	2.250	1.377	0.780	0.380	0.101	0.966	0.964	0.978	0.048	
	170	2.250	1.375	0.777	0.376	0.100	0.966	0.964	0.978	0.053	
	180	2.250	1.375	0.777	0.376	0.100	0.966	0.964	0.978	0.049	

地平線側関数 INDICATRIX-1

	Zs										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
$f_{s,1}$	0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
α'	0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	10	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	20	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	30	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	40	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	50	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	60	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	70	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	80	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	90	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	100	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	110	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	120	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	130	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	140	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	150	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	160	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	170	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	180	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

地平線側関数 INDICATRIX-2

	Zs										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
$f_{s,1}$	0	-1.335	-1.317	-1.310	-1.311	-1.304	-1.334	-1.458	-1.549	-1.375	1.000
α'	0	-1.335	-1.219	-1.071	-0.878	-0.649	-0.402	-0.488	-0.454	-0.007	1.000
	10	-1.335	-1.145	-0.914	-0.613	-0.438	-0.203	-0.448	-0.475	-0.003	1.000
	20	-1.335	-1.092	-0.810	-0.520	-0.297	-0.388	-0.442	-0.524	-0.019	1.000
	30	-1.335	-1.067	-0.764	-0.532	-0.453	-0.443	-0.573	-0.395	-0.004	1.000
	40	-1.335	-1.055	-0.773	-0.579	-0.496	-0.466	-0.455	-0.295	-0.456	1.000
	50	-1.335	-1.068	-0.810	-0.655	-0.534	-0.487	-0.233	-0.366	0.000	1.000
	60	-1.335	-1.114	-0.965	-0.723	-0.611	-0.438	-0.299	-0.186	0.435	1.000
	70	-1.335	-1.162	-1.027	-0.984	-0.833	-0.467	-0.243	-0.148	0.511	1.000
	80	-1.335	-1.199	-1.141	-1.142	-1.123	-0.250	-0.149	-0.081	0.582	1.000
	90	-1.335	-1.242	-1.246	-1.325	-1.497	-0.200	-0.107	-0.050	0.605	1.000
	100	-1.335	-1.282	-1.336	-1.518	-1.968	-0.154	-0.068	-0.021	0.617	1.000
	110	-1.335	-1.327	-1.453	-1.742	-2.260	-0.114	-0.032	0.006	0.621	1.000
	120	-1.335	-1.360	-1.522	-1.927	-2.177	-0.079	-0.001	0.029	0.622	1.000
	130	-1.335	-1.392	-1.604	-2.097	-2.185	-0.050	0.024	0.047	0.619	1.000
	140	-1.335	-1.418	-1.659	-2.210	-2.163	-0.029	0.042	0.080	0.615	1.000
	150	-1.335	-1.430	-1.694	-2.299	-2.150	-0.017	0.053	0.087	0.610	1.000
	160	-1.335	-1.430	-1.694	-2.345	-2.145	-0.012	0.057	0.089	0.612	1.000
	170	-1.335	-1.430	-1.694	-2.345	-2.145	-0.012	0.057	0.089	0.612	1.000
	180	-1.335	-1.430	-1.694	-2.345	-2.145	-0.012	0.057	0.089	0.612	1.000

地平線側関数の係数 Indicatix-1

	Zs										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
$f_{s,1}$	0	0.713	0.697	0.684	0.690	0.684	0.719	0.859	0.971	0.760	1.480
α'	0	0.713	0.634	0.497	0.228	-0.337	-1.719	-0.891	-0.676	-1.357	1.248
	10	0.713	0.595	0.349	-0.264	-0.944	-3.758	-0.290	0.861	-142.260	1.064
	20	0.713	0.551	0.245	-0.404	-1.855	-0.533	0.127	0.792	-13.312	0.817
	30	0.713	0.542	0.225	-0.191	-0.244	0.016	0.637	0.606	-43.618	0.800
	40	0.713	0.543	0.290	0.061	0.061	0.234	0.488	0.457	1.092	0.706
	50	0.713	0.565	0.379	0.288	0.244	0.364	0.354	0.288	1.300	0.632
	60	0.713	0.584	0.503	0.426	0.427	0.324	0.244	0.183	1.359	0.574
	70	0.713	0.611	0.573	0.549	0.484	0.236	0.157	0.103	1.202	0.531
	80	0.713	0.647	0.621	0.669	0.389	0.163	0.089	0.040	1.096	0.500
	90	0.713	0.668	0.688	0.739	0.782	0.106	0.039	-0.001	1.022	0.480
	100	0.713	0.691	0.732	0.791	0.849	0.082	0.009	-0.028	0.972	0.470
	110	0.713	0.709	0.759	0.827	0.881	0.030	-0.013	-0.042	0.939	0.467
	120	0.713	0.727	0.790	0.854	0.123	0.014	-0.025	-0.046	0.919	0.469
	130	0.713	0.739	0.802	0.870	0.080	0.000	-0.032	-0.044	0.909	0.475

地平線側近似関数の係数 Indicatix-3

		Zs									
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$f_{s,1} \alpha'$	0	5.339	5.339	5.332	5.318	5.294	5.262	5.228	5.114	5.143	3.101
	10	5.339	5.153	4.999	4.957	5.224	6.862	9.584	15.586	76.6130	2.212
	20	5.339	4.914	4.563	4.480	5.199	7.043	11.960	3.235	303.280	18.28
	30	5.339	4.646	4.098	3.901	4.746	9.536	4.956	3.631	182.630	12.39
	40	5.339	4.367	3.629	3.308	3.500	3.778	2.472	1.157	21.329	0.975
	50	5.339	4.091	3.183	2.688	2.613	2.280	1.475	1.185	56.937	0.795
	60	5.339	3.830	2.781	2.153	1.833	1.567	1.084	1.040	-0.037	0.671
	70	5.339	3.567	2.427	1.725	1.273	1.103	1.048	1.021	-0.160	0.586
	80	5.339	3.312	1.987	1.387	0.945	1.012	1.025	1.008	-0.050	0.531
	90	5.339	3.071	1.685	1.132	0.662	0.880	1.008	0.998	-0.078	0.500
	100	5.339	2.857	1.420	0.931	0.487	0.108	0.985	0.989	-0.023	0.487
	110	5.339	2.657	1.200	0.776	0.353	1.002	0.980	0.984	0.024	0.489
	120	5.339	2.463	1.000	0.657	0.262	0.984	0.972	0.980	0.069	0.502
	130	5.339	2.283	0.822	0.567	0.208	0.965	0.958	0.979	0.111	0.521
	140	5.339	2.116	0.688	0.498	0.168	0.963	0.961	0.982	0.151	0.544
	150	5.339	1.964	0.590	0.447	0.136	0.966	0.958	0.982	0.182	0.567
	160	5.339	1.822	0.513	0.403	0.113	0.968	0.951	0.956	0.216	0.586
	170	5.339	1.692	0.443	0.373	0.093	0.963	0.948	0.954	0.253	0.598
180	5.339	1.573	0.384	0.353	0.082	0.954	0.947	0.954	0.287	0.602	

地平線側近似関数の係数 Indicatix-3

		Zs									
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$f_{s,2} \alpha'$	0	-2.272	-2.272	-2.281	-2.298	-2.321	-2.350	-2.375	-2.457	-2.429	1.000
	10	-2.272	-2.098	-1.902	-1.664	-1.344	-0.892	-0.537	-0.290	-0.004	1.000
	20	-2.272	-1.972	-1.657	-1.299	-0.842	-0.498	-0.242	-0.047	-0.004	1.000
	30	-2.272	-1.887	-1.515	-1.119	-0.637	-0.232	-0.114	-0.389	-0.004	1.000
	40	-2.272	-1.838	-1.445	-1.035	-0.682	-0.445	-0.518	-0.769	-0.019	1.000
	50	-2.272	-1.818	-1.433	-1.047	-0.694	-0.560	-0.620	-0.477	-0.005	1.000
	60	-2.272	-1.819	-1.462	-1.128	-0.818	-0.624	-0.604	-0.371	3.510	1.000
	70	-2.272	-1.840	-1.528	-1.241	-1.014	-0.886	-0.438	-0.261	0.446	1.000
	80	-2.272	-1.876	-1.614	-1.401	-1.164	-0.950	-0.314	-0.179	0.512	1.000
	90	-2.272	-1.921	-1.714	-1.577	-1.527	-0.861	-0.212	-0.110	0.561	1.000
	100	-2.272	-1.974	-1.830	-1.807	-1.896	-0.265	-0.125	-0.050	0.589	1.000
	110	-2.272	-2.025	-1.958	-2.073	-2.509	-0.167	-0.047	0.007	0.602	1.000
	120	-2.272	-2.078	-2.082	-2.387	-3.189	-0.082	0.025	0.060	0.603	1.000
	130	-2.272	-2.130	-2.212	-2.733	-3.626	-0.007	0.088	0.108	0.598	1.000
	140	-2.272	-2.174	-2.334	-3.070	-4.134	0.095	0.143	0.150	0.589	1.000
	150	-2.272	-2.211	-2.443	-3.426	-4.680	0.105	0.168	0.184	0.008	1.000
	160	-2.272	-2.239	-2.530	-3.723	-5.042	0.142	0.221	0.210	0.009	1.000
	170	-2.272	-2.257	-2.575	-3.858	-5.018	0.164	0.242	0.226	0.009	1.000
180	-2.272	-2.263	-2.596	-3.994	-5.011	0.172	0.248	0.231	0.496	1.000	

地平線側近似関数の係数 Indicatix-4

		Zs									
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$f_{s,1} \alpha'$	0	-2.784	-2.791	-2.805	-2.826	-2.852	-2.878	-2.906	-2.930	-2.952	1.000
	10	-2.784	-2.562	-2.331	-2.065	-1.723	-1.204	-0.585	-0.387	-0.016	1.000
	20	-2.784	-2.404	-2.043	-1.655	-1.181	-0.582	-0.374	-0.292	-0.017	1.000
	30	-2.784	-2.301	-1.877	-1.438	-0.936	-0.466	-0.379	-0.470	-0.005	1.000
	40	-2.784	-2.240	-1.796	-1.351	-0.844	-0.290	-0.377	-0.462	-0.002	1.000
	50	-2.784	-2.215	-1.777	-1.359	-0.879	-0.500	-0.596	-0.750	-0.004	1.000
	60	-2.784	-2.218	-1.804	-1.417	-1.026	-0.722	-0.752	-0.539	-0.019	1.000
	70	-2.784	-2.241	-1.865	-1.539	-1.236	-0.974	-0.820	-0.359	0.463	1.000
	80	-2.784	-2.280	-1.950	-1.685	-1.442	-1.079	-0.919	-0.231	0.509	1.000
	90	-2.784	-2.329	-2.056	-1.879	-1.765	-1.420	-1.231	-0.231	0.509	1.000
	100	-2.784	-2.384	-2.176	-2.116	-2.245	-2.559	-2.135	-0.041	0.581	1.000
	110	-2.784	-2.443	-2.304	-2.396	-2.913	-3.180	-2.022	0.039	0.604	1.000
	120	-2.784	-2.507	-2.437	-2.745	-3.538	-3.687	0.078	0.113	0.605	1.000
	130	-2.784	-2.557	-2.574	-3.113	-4.058	-4.048	0.168	0.181	0.608	1.000
	140	-2.784	-2.605	-2.704	-3.589	-4.641	-4.359	0.241	0.239	0.009	1.000
	150	-2.784	-2.646	-2.814	-3.989	-5.274	-4.841	0.205	0.301	0.288	0.011
	160	-2.784	-2.677	-2.907	-4.373	-5.944	-5.485	0.245	0.345	0.324	0.015
	170	-2.784	-2.695	-2.961	-4.578	-6.647	-6.285	0.272	0.346	0.016	1.000
180	-2.784	-2.702	-2.981	-4.684	-7.388	-7.029	0.296	0.380	0.353	0.016	

地平線側近似関数の係数 Indicatix-4

		Zs									
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$f_{s,2} \alpha'$	0	0.882	0.891	0.912	0.943	0.984	1.033	1.089	1.145	1.202	5.680
	10	0.882	0.766	0.592	0.282	-0.379	-2.419	-10.020	-17.246	-438.960	3.635
	20	0.882	0.683	0.408	-0.076	-1.232	-5.736	-10.390	-9.755	-153.900	2.408
	30	0.882	0.640	0.346	-0.156	-1.361	-4.712	-4.982	-1.607	-969.200	1.683
	40	0.882	0.628	0.369	-0.028	-1.002	-5.992	-2.565	-0.424	-271.850	1.203
	50	0.882	0.636	0.440	0.191	-0.385	-1.350	-0.781	-107.350	0.913	
	60	0.882	0.660	0.526	0.399	0.184	0.005	0.456	0.520	-11.969	0.727
	70	0.882	0.669	0.609	0.561	0.527	0.522	0.394	0.288	1.566	0.609
	80	0.882	0.720	0.679	0.677	0.691	0.656	0.223	0.134	1.283	0.538
	90	0.882	0.749	0.735	0.763	0.808	0.863	0.109	0.043	1.096	0.500
	100	0.882	0.774	0.780	0.825	0.884	0.931	0.041	0.002	0.988	0.488
	110	0.882	0.795	0.813	0.870	0.931	0.070	0.012	-0.006	0.930	0.497
	120	0.882	0.812	0.841	0.906	0.962	0.036	0.004	0.008	0.905	0.521
	130	0.882	0.827	0.863	0.931	0.982	0.017	0.014	0.043	-13.970	0.584
	140	0.882	0.838	0.880	0.951	0.987	0.011	0.020	0.087	-16.390	0.626
	150	0.882	0.846	0.892	0.967	0.048	0.012	0.040	0.131	-15.198	0.680
	160	0.882	0.852	0.902	0.977	0.036	0.016	0.069	0.168	-12.422	0.655
	170	0.882	0.855	0.907	0.981	0.030	0.020	0.072	0.192	-12.412	0.674
180	0.882	0.856	0.909	0.984	0.029	0.021	0.077	0.201	-12.713	0.680	

地平線側近似関数の係数 Indicatix-4

地平線側近似関数の係数 Indicatix-5

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
$f_{s,1}$	0	16.289	16.285	16.275	16.259	16.238	16.208	16.169	16.105	16.05	8.578
	10	16.289	15.387	14.574	14.023	14.111	16.311	29.428	30.000	589.450	5.313
	20	16.289	14.364	12.683	11.612	11.821	17.268	25.090	17.343	379.290	3.368
	30	16.289	13.292	10.859	9.365	9.463	13.492	14.553	11.233	263.120	2.204
	40	16.289	12.241	9.209	7.358	6.883	8.533	12.012	4.890	255.510	1.501
	50	16.289	11.251	7.777	5.710	4.798	4.834	4.369	1.171	7.666	1.074
	60	16.289	10.345	6.574	4.409	3.263	2.726	1.884	1.122	75.022	0.811
	70	16.289	9.535	5.586	3.426	2.280	1.711	1.125	1.049	-0.447	0.850
	80	16.289	8.823	4.759	2.701	1.593	1.081	1.084	1.022	-0.264	0.854
	90	16.289	8.206	4.120	2.139	1.160	0.643	1.028	1.005	-0.135	0.950
$f_{s,2}$	0	16.289	8.206	7.678	3.639	1.758	0.847	0.387	1.006	0.993	0.475
	10	16.289	7.323	3.234	1.456	0.625	0.238	0.995	0.885	0.006	0.471
	20	16.289	6.862	2.914	1.226	0.469	1.002	0.972	0.979	0.057	0.481
	30	16.289	6.560	2.665	1.053	0.356	0.979	0.964	0.980	0.101	0.499
	40	16.289	6.321	2.473	0.924	0.275	0.966	0.958	0.979	0.141	0.521
	50	16.289	6.139	2.332	0.830	0.219	0.957	0.954	0.979	0.176	0.544
	60	16.289	6.012	2.235	0.768	0.185	0.951	0.951	0.979	0.211	0.562
	70	16.289	5.937	2.178	0.731	0.161	0.947	0.965	0.980	0.271	0.575
	80	16.289	5.912	2.159	0.718	0.145	0.946	0.965	0.980	0.331	0.579
	90	16.289	5.912	2.159	0.718	0.145	0.946	0.965	0.980	0.331	0.579

地平線側近似関数の係数 Indicatix-6

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
$f_{s,1}$	0	24.151	24.149	24.145	24.137	24.125	24.113	24.080	23.996	24.058	12.427
	10	24.151	22.931	21.845	21.171	21.549	25.504	30.000	30.000	419.240	7.786
	20	24.151	21.509	19.199	17.818	18.587	28.988	29.999	26.944	814.920	4.934
	30	24.151	19.998	16.582	14.540	15.039	23.043	25.008	15.563	686.880	3.179
	40	24.151	18.495	14.169	11.176	11.176	14.615	13.032	6.523	269.800	2.096
	50	24.151	17.087	12.039	8.995	7.778	8.576	11.877	4.028	223.200	1.426
	60	24.151	15.749	10.228	6.979	5.238	5.007	3.209	1.619	137.220	1.011
	70	24.151	14.593	8.732	5.447	3.670	2.691	1.758	1.103	69.595	0.753
	80	24.151	13.514	7.515	4.314	2.613	1.670	1.047	0.595	33.885	0.559
	90	24.151	12.601	6.537	3.476	1.914	1.107	1.071	1.019	-3.860	0.500
$f_{s,2}$	0	24.151	11.818	5.756	2.854	1.441	1.032	1.002	1.001	-0.141	0.445
	10	24.151	10.603	4.645	2.042	0.879	0.955	0.980	0.977	-0.038	0.405
	20	24.151	10.152	4.263	1.781	0.713	0.951	0.968	0.972	0.006	0.404
	30	24.151	9.784	3.970	1.588	0.582	1.002	0.960	0.973	0.031	0.409
	40	24.151	9.523	3.755	1.449	0.508	0.974	0.955	0.972	0.051	0.417
	50	24.151	9.333	3.607	1.356	0.452	0.912	0.951	0.971	0.064	0.423
	60	24.151	9.220	3.521	1.303	0.421	0.863	0.949	0.970	0.070	0.428
	70	24.151	9.183	3.492	1.285	0.411	0.861	0.949	0.970	0.071	0.428
	80	24.151	9.183	3.492	1.285	0.411	0.861	0.949	0.970	0.071	0.428
	90	24.151	9.183	3.492	1.285	0.411	0.861	0.949	0.970	0.071	0.428

地平線側近似関数の係数 Indicatix-5

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
$f_{s,1}$	0	-2.907	-2.910	-2.917	-2.926	-2.937	-2.950	-2.964	-2.982	-3.000	1.000
	10	-2.907	-2.874	-2.431	-1.795	-1.153	-1.264	-0.588	-0.519	-0.919	1.000
	20	-2.907	-2.514	-2.145	-1.747	-1.260	-0.623	-0.394	-0.420	-0.011	1.000
	30	-2.907	-2.411	-1.993	-1.538	-1.008	-0.486	-0.351	-0.329	-0.007	1.000
	40	-2.907	-2.411	-1.910	-1.469	-0.967	-0.505	-0.250	-0.448	-0.004	1.000
	50	-2.907	-2.335	-1.902	-1.480	-1.021	-0.621	-0.435	-0.743	-0.077	1.000
	60	-2.907	-2.343	-1.939	-1.556	-1.164	-0.808	-0.737	-0.737	-0.005	1.000
	70	-2.907	-2.372	-2.010	-1.679	-1.321	-0.951	-0.855	-0.847	0.478	1.000
	80	-2.907	-2.417	-2.099	-1.822	-1.573	-1.147	-0.973	-0.313	0.503	1.000
	90	-2.907	-2.473	-2.206	-1.989	-1.796	-1.567	-1.374	-0.191	0.580	1.000
$f_{s,2}$	0	-2.907	-2.533	-2.323	-2.189	-2.128	-2.166	-2.226	-0.098	0.599	1.000
	10	-2.907	-2.396	-2.442	-2.401	-2.376	-2.334	-0.111	-0.022	0.615	1.000
	20	-2.907	-2.658	-2.561	-2.639	-3.118	-0.181	-0.017	0.042	0.623	1.000
	30	-2.907	-2.716	-2.672	-2.903	-3.856	-0.079	0.062	0.098	0.622	1.000
	40	-2.907	-2.766	-2.776	-3.155	-4.736	0.003	0.126	0.144	0.619	1.000
	50	-2.907	-2.807	-2.863	-3.414	-5.838	0.065	0.176	0.181	0.608	1.000
	60	-2.907	-2.838	-2.934	-3.609	-0.157	0.109	0.213	0.209	0.610	1.000
	70	-2.907	-2.857	-2.977	-3.764	-0.123	0.136	0.232	0.225	0.483	1.000
	80	-2.907	-2.863	-2.993	-3.788	-0.112	0.145	0.239	0.231	0.008	1.000
	90	-2.907	-2.863	-2.993	-3.788	-0.112	0.145	0.239	0.231	0.008	1.000

地平線側近似関数の係数 Indicatix-6

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
$f_{s,1}$	0	-2.771	-2.772	-2.774	-2.776	-2.780	-2.783	-2.791	-2.806	-2.793	1.000
	10	-2.771	-2.554	-2.322	-2.049	-1.692	-1.167	-0.887	-0.784	-0.038	1.000
	20	-2.771	-2.405	-2.051	-1.661	-1.174	-0.547	-0.457	-0.404	-0.008	1.000
	30	-2.771	-2.310	-1.900	-1.468	-0.950	-0.429	-0.311	-0.366	-0.004	1.000
	40	-2.771	-2.288	-1.833	-1.408	-0.889	-0.459	-0.369	-0.507	-0.006	1.000
	50	-2.771	-2.241	-1.831	-1.426	-0.994	-0.535	-0.250	-0.494	-0.004	1.000
	60	-2.771	-2.282	-1.872	-1.507	-1.105	-0.669	-0.678	-0.821	-0.004	1.000
	70	-2.771	-2.282	-1.844	-1.628	-1.284	-0.964	-0.881	-0.782	-0.712	1.000
	80	-2.771	-2.327	-2.035	-1.769	-1.488	-1.228	-1.065	-0.549	0.573	1.000
	90	-2.771	-2.383	-2.138	-1.924	-1.710	-1.464	-0.665	-0.039	0.339	1.000
$f_{s,2}$	0	-2.771	-2.443	-2.246	-2.088	-1.947	-1.735	-0.456	-0.227	0.624	1.000
	10	-2.771	-2.504	-2.355	-2.179	-2.158	-2.158	-0.308	-0.159	0.666	1.000
	20	-2.771	-2.564	-2.461	-2.418	-2.487	-2.631	-0.199	-0.073	0.689	1.000
	30	-2.771	-2.619	-2.555	-2.570	-2.721	-3.220	-0.116	-0.022	0.701	1.000
	40	-2.771	-2.668	-2.641	-2.720	-3.043	-3.448	-0.054	0.018	0.705	1.000
	50	-2.771	-2.707	-2.712	-2.852	-3.344	-0.183	-0.008	0.047	0.705	1.000
	60	-2.771	-2.737	-2.764	-2.941	-3.597	-0.146	0.024	0.068	0.703	1.000
	70	-2.771	-2.755	-2.796	-3.007	-3.763	-0.109	0.042	0.080	0.701	1.000
	80	-2.771	-2.761	-2.807	-3.029	-3.813	-0.100	0.049	0.083	0.700	1.000
	90	-2.771	-2.761	-2.807	-3.029	-3.813	-0.100	0.049	0.083	0.700	1.000

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
$f_{s,1}$	0	0.842	0.848	0.862	0.883	0.910	0.944	0.987	1.052	1.051	8.578
	10	0.842	0.669	0.404	-0.066	-1.076	-4.077	-17.808	-18.746	-578.630	5.313
	20	0.842	0.554	0.161	-0.530	-2.160	-8.700	-17.234	-10.042	-372.410	2.968
	30	0.842	0.498	0.096	-0.578	-2.267	-7.397	-8.183	-6.388	-258.610	2.204
	40	0.842	0.488	0.194	-0.332	-1.433	-4.109	-8.249	-1.355	-252.430	1.901
	50	0.842	0.511	0.273	-0.023	-0.990	-1.534	-1.826	0.628	-5.460	1.074

Indicatrix 近似関数の近似誤差 (%RMSE)

Indicatrix-1

		Zs									
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
α'	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	110	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	120	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	130	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	140	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	150	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	160	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	170	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	180	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

[%]

Indicatrix-4

		Zs									
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
α'	0	0.59	0.46	0.36	0.26	0.19	0.19	0.26	0.36	0.47	0.59
	10	0.59	1.57	2.67	3.27	3.61	3.76	3.87	4.31	4.52	5.35
	20	0.59	2.72	3.78	3.75	3.54	3.43	3.77	4.15	4.37	5.24
	30	0.59	3.22	4.23	4.18	3.86	3.53	3.37	3.32	3.58	4.26
	40	0.59	3.31	4.29	4.49	4.40	4.17	3.75	3.20	2.74	3.12
	50	0.59	3.17	4.11	4.50	4.61	4.49	4.15	3.45	2.59	2.10
	60	0.59	2.88	3.70	4.12	4.30	4.22	3.87	3.27	2.27	1.46
	70	0.59	2.51	3.28	3.63	3.71	3.53	3.15	2.63	1.79	0.80
	80	0.59	2.08	2.82	3.06	3.02	2.77	2.38	1.75	1.08	0.32
	90	0.59	1.64	2.29	2.37	2.21	1.89	1.49	0.87	0.36	0.00
	100	0.59	1.19	1.75	1.67	1.37	1.32	0.66	0.31	0.49	0.31
	110	0.59	0.78	1.29	1.11	0.76	1.04	0.88	1.31	1.36	0.66
	120	0.59	0.47	0.94	0.86	0.67	0.94	0.55	0.78	2.22	1.03
	130	0.59	0.40	0.79	0.79	0.20	0.93	0.62	1.19	2.92	1.36
	140	0.59	0.39	0.83	0.94	2.07	0.93	0.80	1.99	3.45	1.63
	150	0.59	0.40	0.84	1.02	2.10	0.85	1.06	4.97	3.81	1.84
	160	0.59	0.41	0.86	1.16	2.08	0.88	1.24	5.39	2.60	2.01
	170	0.59	0.42	0.90	1.28	2.07	0.80	1.44	5.64	2.67	2.13
	180	0.59	0.42	0.92	1.31	2.06	0.83	1.46	5.72	2.70	2.18

[%]

Indicatrix-2

		Zs									
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
α'	0	0.24	0.12	0.12	0.16	0.19	0.25	0.24	0.30	0.10	0.24
	10	0.24	0.53	1.00	1.18	1.29	1.29	1.38	1.50	1.54	1.77
	20	0.24	0.87	1.40	1.55	1.66	1.73	1.76	1.66	1.61	1.92
	30	0.24	1.02	1.48	1.69	1.92	2.06	1.98	1.77	1.74	1.74
	40	0.24	1.04	1.46	1.77	2.02	2.15	2.16	1.94	1.85	1.55
	50	0.24	1.02	1.34	1.63	2.00	2.11	2.08	1.96	1.73	1.36
	60	0.24	0.94	1.21	1.48	1.72	1.85	1.90	1.81	1.48	1.08
	70	0.24	0.85	1.09	1.29	1.46	1.56	1.54	1.40	1.10	0.65
	80	0.24	0.76	0.96	1.12	1.26	1.28	1.19	1.01	0.72	0.31
	90	0.24	0.65	0.85	0.98	1.05	0.99	0.83	0.60	0.31	0.00
	100	0.24	0.57	0.74	0.80	0.92	0.69	0.45	0.19	0.15	0.29
	110	0.24	0.49	0.60	0.67	0.82	0.51	0.28	0.38	0.59	0.59
	120	0.24	0.44	0.61	0.55	0.87	0.44	0.66	0.85	1.05	0.90
	130	0.24	0.40	0.56	0.42	0.93	0.55	1.06	1.31	1.50	1.20
	140	0.24	0.39	0.53	0.33	1.02	0.74	1.40	0.44	1.89	1.47
	150	0.24	0.38	0.41	0.29	1.11	1.30	1.66	0.44	2.23	1.67
	160	0.24	0.36	0.39	0.30	1.22	1.43	1.92	0.57	2.47	1.80
	170	0.24	0.36	0.41	0.31	1.11	1.57	2.03	0.94	2.61	1.86
	180	0.24	0.39	0.40	0.30	1.12	1.60	0.39	0.74	2.65	1.87

[%]

Indicatrix-5

		Zs									
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
α'	0	0.31	0.23	0.19	0.13	0.10	0.10	0.13	0.18	0.23	0.31
	10	0.31	1.95	3.20	3.81	4.17	4.35	4.48	5.06	5.41	6.53
	20	0.31	3.26	4.43	4.35	4.09	4.05	4.40	4.89	5.30	6.42
	30	0.31	3.85	4.88	4.82	4.43	3.98	3.95	4.06	4.39	5.21
	40	0.31	3.96	5.02	5.25	5.15	4.81	4.34	3.64	3.34	3.84
	50	0.31	3.80	4.88	5.35	5.51	5.36	4.90	4.04	2.98	2.55
	60	0.31	3.47	4.45	5.02	5.28	5.23	4.82	4.00	2.90	1.73
	70	0.31	3.03	3.96	4.46	4.61	4.41	3.95	3.30	2.29	1.22
	80	0.31	2.54	3.40	3.76	3.78	3.50	2.96	2.23	1.41	0.49
	90	0.31	2.01	2.75	2.86	2.70	2.35	1.73	1.17	0.53	0.00
	100	0.31	1.45	2.02	1.95	1.64	1.45	0.82	0.32	0.44	0.45
	110	0.31	0.94	1.41	1.19	0.82	1.03	0.56	0.48	0.38	0.94
	120	0.31	0.50	0.93	0.57	0.53	0.94	0.57	2.78	2.34	1.42
	130	0.31	0.33	0.52	0.61	0.54	0.94	0.53	0.71	3.20	1.82
	140	0.31	0.26	0.56	0.60	0.56	0.89	0.63	1.22	3.88	2.14
	150	0.31	0.22	0.50	0.60	1.98	0.85	0.70	1.49	4.37	2.37
	160	0.31	0.21	0.53	0.64	1.95	0.78	0.81	1.89	4.66	2.51
	170	0.31	0.21	0.51	0.68	1.92	0.78	0.90	2.26	4.84	2.58
	180	0.31	0.21	0.52	0.72	1.95	0.79	0.93	2.50	4.89	2.61

[%]

Indicatrix-3

		Zs									
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
α'	0	0.32	0.28	0.24	0.19	0.16	0.14	0.18	0.23	0.27	0.32
	10	0.32	1.08	1.87	2.23	2.45	2.56	2.73	3.07	3.16	3.65
	20	0.32	1.85	2.64	2.79	2.56	2.53	2.73	2.90	3.11	3.70
	30	0.32	2.18	3.01	3.15	3.02	2.85	2.70	2.50	2.57	3.04
	40	0.32	2.24	2.97	3.26	3.34	3.34	3.11	2.66	2.27	2.25
	50	0.32	2.14	2.81	3.12	3.32	3.36	3.20	2.80	1.98	1.60
	60	0.32	1.95	2.51	2.84	3.04	3.10	2.91	2.48	1.97	1.25
	70	0.32	1.71	2.22	2.50	2.60	2.55	2.34	1.97	1.39	0.65
	80	0.32	1.44	1.94	2.12	2.18	2.04	1.75	1.34	0.86	0.28
	90	0.32	1.16	1.61	1.67	1.60	1.45	1.10	0.70	0.30	0.00
	100	0.32	0.90	1.31	1.17	1.07	1.00	0.53	0.22	0.33	0.28
	110	0.32	0.68	1.06	0.74	0.85	0.73	0.50	0.90	0.98	0.58
	120	0.32	0.55	0.80	0.72	1.48	0.83	0.56	0.41	1.64	0.89
	130	0.32	0.45	0.74	0.68	1.53	0.80	2.16	0.90	2.22	1.17
	140	0.32	0.44	0.73	0.72	1.63	0.78	2.75	1.22	2.68	1.42
	150	0.32	0.44	0.76	0.74	1.68	0.76	3.58	2.99	3.58	1.60
	160	0.32	0.44	0.77	0.81	1.65	0.65	4.01	3.26	3.26	1.73
	170	0.32	0.44	0.78	0.86	1.61	0.67	4.22	3.39	3.39	1.81
	180	0.32	0.44	0.79	0.85	1.60	0.68	4.29	3.44	3.44	1.82

[%]

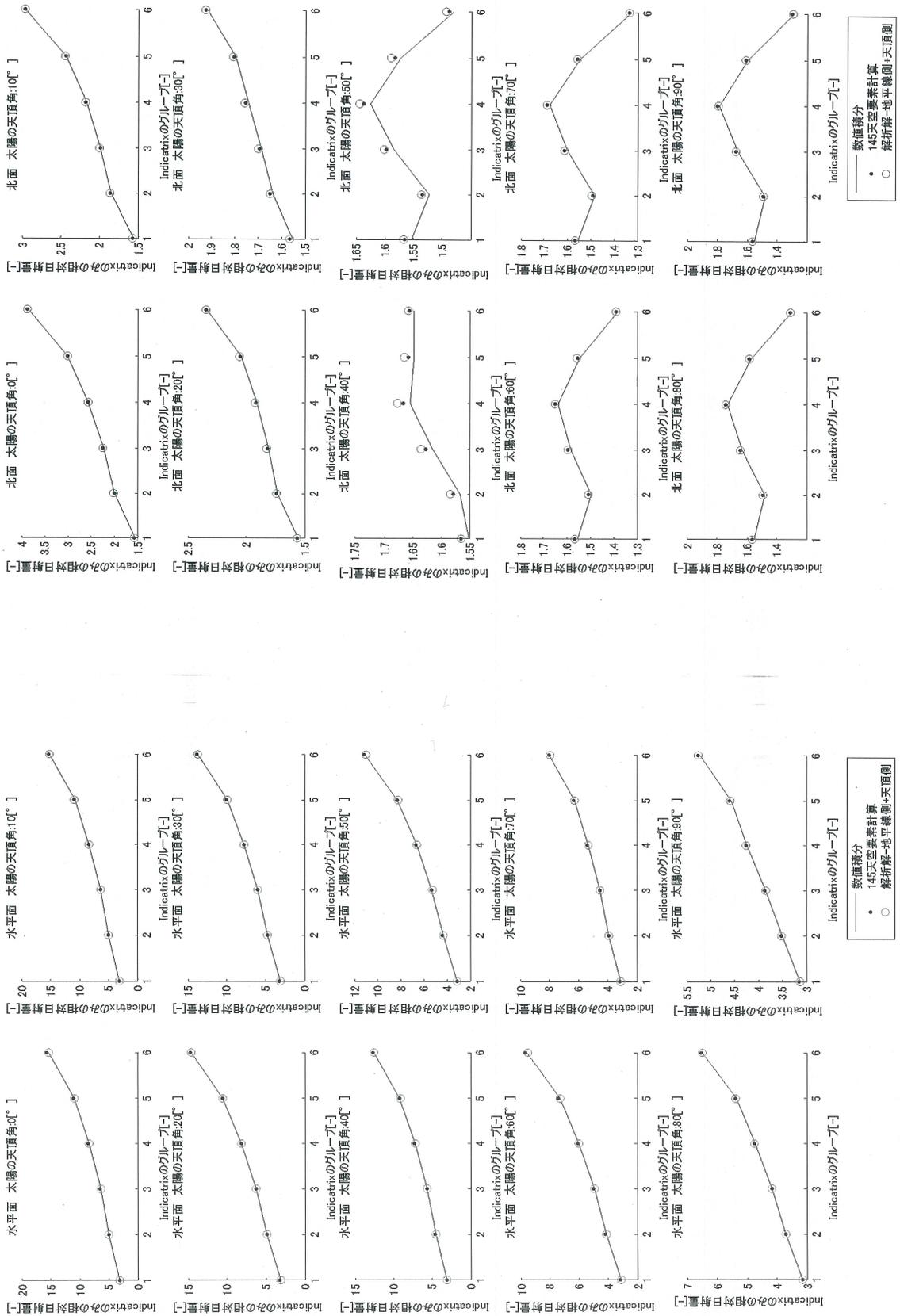
Indicatrix-6

		Zs									
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
α'	0	0.09	0.07	0.09	0.05	0.03	0.03	0.05	0.06	0.07	0.09
	10	0.09	2.06	3.53	3.92	4.21	4.40	4.68	5.29	5.68	6.99
	20	0.09	3.39	4.78	4.79	4.39	4.15	4.68	5.23	5.75	7.12
	30	0.09	3.96	5.14	5.20	4.84	4.36	4.19	4.43	4.99	6.03
	40	0.09	4.10	5.24	5.54	5.60	5.34	4.86	4.17	3.91	4.57
	50	0.09	3.96	5.09	5.71	6.07	6.05	5.65	4.79	3.64	3.20
	60	0.09	3.63	4.68	5.42	5.91	6.09	5.77	5.03	3.78	2.47
	70	0.09	3.20	4.22	4.93	5.31	5.34	5.01	4.35	3.33	1.97
	80	0.09	2.70	3.67	4.23	4.46	4.34	3.91	3.14	2.15	0.97
	90	0.09	2.16	2.96	3.25	3.25	2.97	2.44	1.75	0.90	0.00
	100	0.09	1.60	2.17	2.17	1.97	1.54	1.16	0.87	0.30	0.77
	110	0.09	1.06	1.							

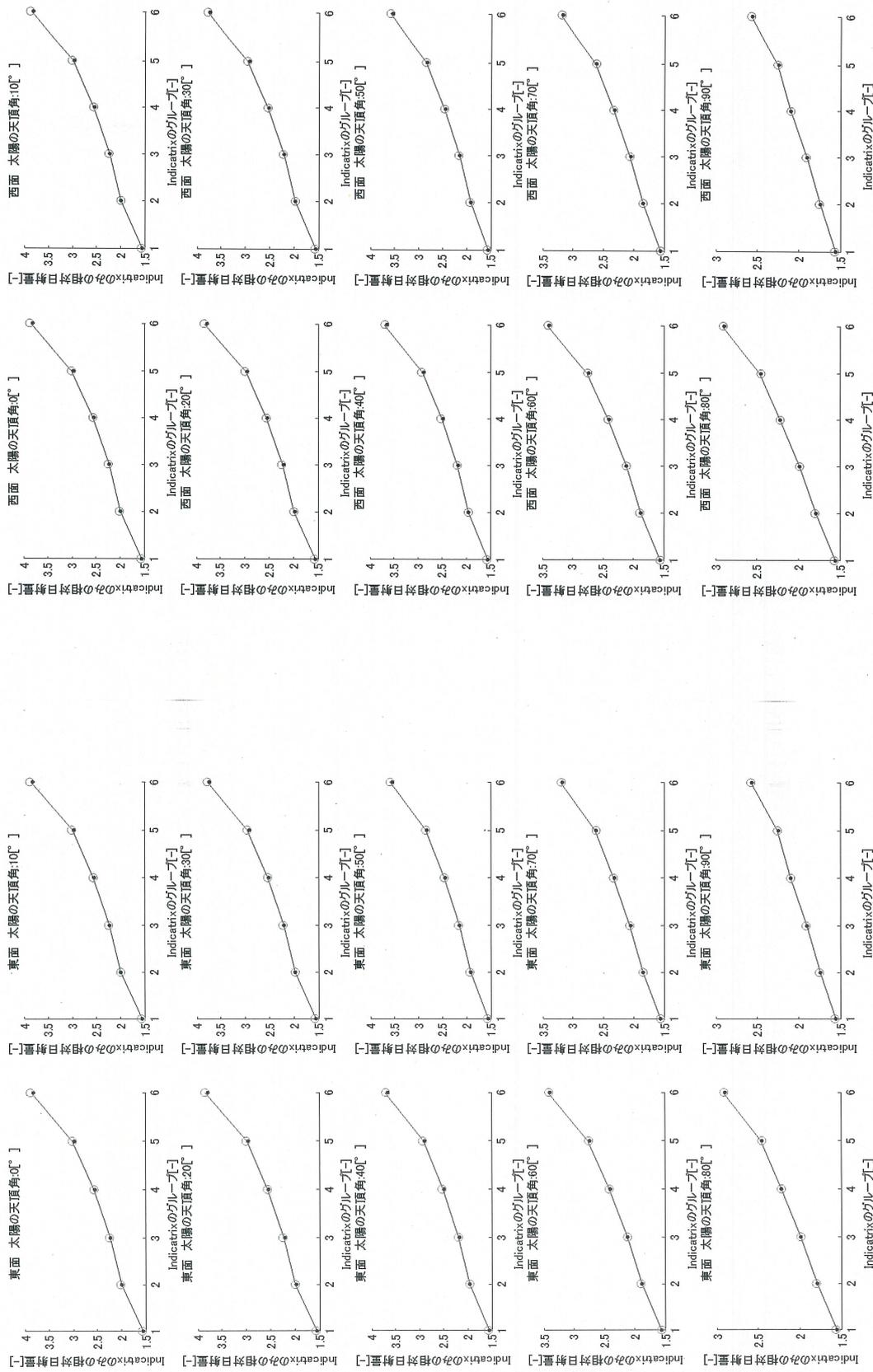
Appendix-3

Indicatrix 近似関数の相対日射量の比較

Appendix

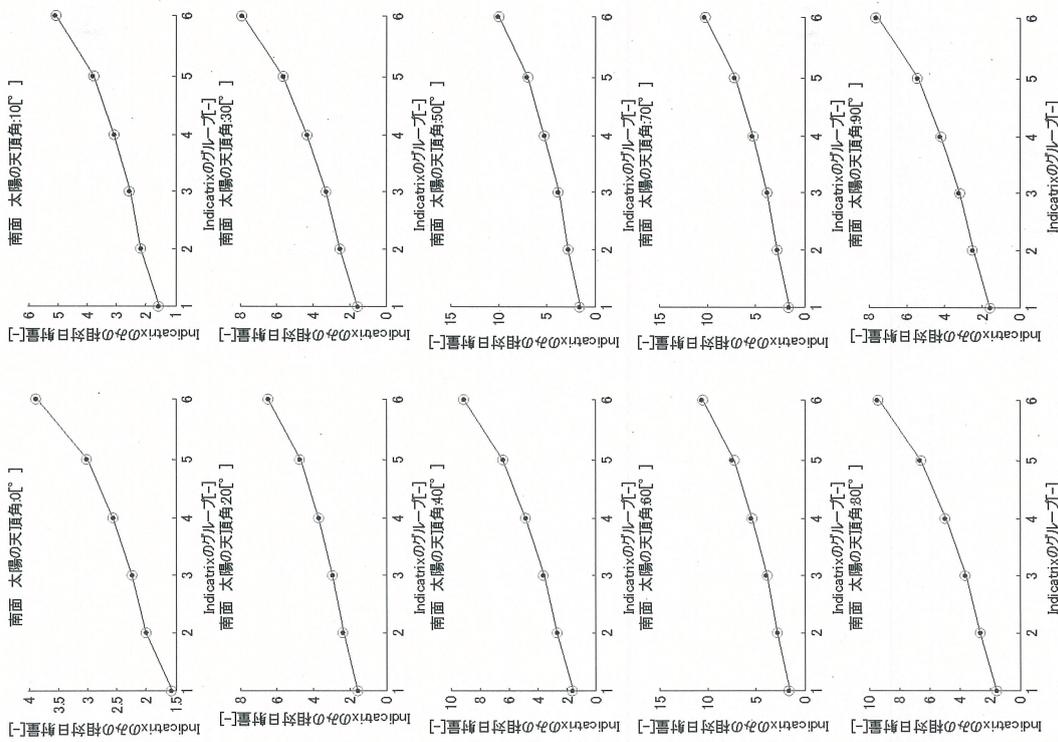


天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量計算法の開発



— 数値積分
 • 145天空要素計算
 ○ 解析解-地平線側+天頂側

— 数値積分
 • 145天空要素計算
 ○ 解析解-地平線側+天頂側



数値積分
 145°天頂角計算
 解析解-地平線側+天頂側

Indicatrix 近似関数, 天空要素計算法の相対日射量の相対誤差 (鉛直面)

数値積分に対する近似関数の相対誤差

Appendix

Indicatrix-5

zs	zs										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
0	0.39	0.39	0.42	0.42	0.31	0.21	0.16	0.10	0.18	0.65	1.21
10	0.39	0.39	0.42	0.31	0.21	0.16	0.11	0.11	0.18	0.65	1.20
20	0.39	0.39	0.42	0.31	0.21	0.16	0.11	0.11	0.18	0.65	1.19
30	0.39	0.39	0.42	0.31	0.22	0.17	0.11	0.11	0.18	0.64	1.17
40	0.39	0.40	0.42	0.31	0.22	0.17	0.12	0.12	0.19	0.63	1.14
50	0.39	0.40	0.41	0.30	0.21	0.17	0.12	0.12	0.18	0.59	1.08
60	0.39	0.41	0.41	0.29	0.18	0.13	0.06	0.09	0.41	0.80	
70	0.39	0.42	0.41	0.29	0.18	0.10	0.10	0.09	0.41	0.80	
80	0.38	0.43	0.42	0.28	0.15	0.07	-0.05	-0.06	0.20	0.53	
90	0.39	0.43	0.42	0.28	0.13	-0.01	-0.20	-0.30	-0.13	0.20	
100	0.39	0.44	0.44	0.32	0.23	0.13	-0.02	-0.09	0.05	0.25	
110	0.39	0.44	0.46	0.38	0.32	0.23	0.15	0.28	0.38		
120	0.39	0.45	0.49	0.45	0.53	0.52	0.45	0.36	0.49	0.52	
130	0.38	0.45	0.52	0.52	0.67	0.69	0.63	0.51	0.66	0.62	
140	0.39	0.46	0.54	0.59	0.80	0.83	0.77	0.61	0.78	0.69	
150	0.39	0.46	0.57	0.64	0.81	0.93	0.86	0.67	0.86	0.74	
160	0.39	0.47	0.59	0.68	0.98	1.00	0.91	0.71	0.91	0.77	
170	0.39	0.47	0.60	0.70	1.02	1.04	0.94	0.72	0.94	0.78	
180	0.38	0.47	0.61	0.71	1.04	1.06	0.95	0.73	0.95	0.79	

Indicatrix-3

zs	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.58	0.61	0.59	0.50	0.43	0.36	0.31	0.40	0.68	0.96
10	0.58	0.61	0.59	0.50	0.43	0.36	0.32	0.40	0.68	0.96
20	0.58	0.61	0.59	0.51	0.44	0.37	0.32	0.41	0.68	0.95
30	0.58	0.62	0.59	0.51	0.44	0.38	0.33	0.41	0.67	0.94
40	0.58	0.62	0.59	0.51	0.45	0.40	0.35	0.42	0.66	0.91
50	0.58	0.63	0.60	0.52	0.46	0.41	0.36	0.42	0.65	0.87
60	0.58	0.64	0.61	0.52	0.47	0.43	0.37	0.42	0.62	0.82
70	0.58	0.65	0.62	0.53	0.49	0.44	0.37	0.40	0.57	0.73
80	0.58	0.66	0.63	0.55	0.51	0.45	0.36	0.37	0.50	0.63
90	0.58	0.67	0.64	0.56	0.55	0.47	0.35	0.31	0.41	0.52
100	0.58	0.68	0.66	0.60	0.63	0.57	0.47	0.43	0.51	0.55
110	0.58	0.68	0.68	0.64	0.69	0.69	0.59	0.55	0.62	0.61
120	0.58	0.69	0.71	0.69	0.84	0.80	0.71	0.65	0.71	0.67
130	0.58	0.69	0.73	0.73	0.95	0.89	0.79	0.73	0.79	0.72
140	0.58	0.70	0.75	0.77	1.04	0.96	0.86	0.78	0.85	0.75
150	0.58	0.70	0.77	0.80	1.12	1.02	0.91	0.82	0.89	0.77
160	0.58	0.71	0.78	0.82	1.18	1.05	0.94	0.85	0.92	0.79
170	0.58	0.71	0.79	0.84	1.21	1.07	0.95	0.86	0.94	0.79
180	0.58	0.71	0.80	0.84	1.23	1.08	0.96	0.86	0.94	0.80

Indicatrix-1

zs	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
10	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
20	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
30	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
40	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
50	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
60	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
70	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
80	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
90	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
100	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
110	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
120	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
130	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
140	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
150	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
160	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
170	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
180	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87

Indicatrix-6

zs	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.23	0.35	0.38	0.25	0.16	0.11	-0.01	0.11	0.61	1.19
10	0.23	0.35	0.38	0.25	0.16	0.11	-0.01	0.11	0.61	1.19
20	0.23	0.35	0.38	0.25	0.15	0.11	-0.01	0.11	0.60	1.18
30	0.23	0.34	0.37	0.24	0.15	0.11	-0.01	0.11	0.60	1.16
40	0.23	0.34	0.36	0.24	0.15	0.10	-0.01	0.11	0.58	1.13
50	0.23	0.34	0.35	0.22	0.13	0.09	-0.02	0.09	0.54	1.06
60	0.23	0.34	0.34	0.21	0.11	0.06	-0.05	0.05	0.46	0.95
70	0.23	0.34	0.33	0.18	0.07	0.00	-0.12	-0.04	0.32	0.75
80	0.23	0.34	0.32	0.15	0.00	-0.11	-0.26	-0.24	0.04	0.41
90	0.23	0.33	0.30	0.11	-0.08	-0.25	-0.49	-0.58	-0.42	-0.06
100	0.23	0.33	0.30	0.13	-0.03	-0.16	-0.34	-0.40	-0.29	-0.08
110	0.23	0.32	0.30	0.17	0.06	0.01	-0.09	-0.13	-0.08	0.02
120	0.23	0.30	0.30	0.22	0.21	0.21	0.16	0.13	0.14	0.14
130	0.23	0.29	0.31	0.28	0.27	0.40	0.38	0.35	0.33	0.23
140	0.23	0.29	0.32	0.33	0.37	0.57	0.55	0.52	0.47	0.30
150	0.23	0.28	0.33	0.37	0.44	0.68	0.67	0.64	0.57	0.33
160	0.23	0.28	0.34	0.41	0.49	0.78	0.75	0.71	0.62	0.35
170	0.23	0.27	0.35	0.43	0.52	0.83	0.79	0.75	0.65	0.35
180	0.23	0.27	0.36	0.44	0.53	0.84	0.80	0.76	0.66	0.35

Indicatrix-4

zs	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.51	0.47	0.47	0.38	0.30	0.25	0.19	0.29	0.66	1.12
10	0.51	0.47	0.47	0.38	0.30	0.25	0.19	0.28	0.66	1.12
20	0.51	0.47	0.47	0.38	0.30	0.25	0.20	0.28	0.66	1.11
30	0.51	0.47	0.47	0.38	0.31	0.26	0.20	0.29	0.65	1.09
40	0.51	0.48	0.48	0.39	0.31	0.27	0.21	0.29	0.64	1.05
50	0.51	0.49	0.49	0.39	0.32	0.28	0.22	0.29	0.61	1.00
60	0.51	0.50	0.49	0.40	0.32	0.28	0.22	0.28	0.57	0.91
70	0.51	0.52	0.51	0.40	0.33	0.28	0.20	0.23	0.49	0.77
80	0.51	0.53	0.53	0.41	0.34	0.26	0.15	0.14	0.34	0.56
90	0.51	0.55	0.55	0.43	0.36	0.24	0.07	0.01	0.13	0.33
100	0.51	0.56	0.58	0.49	0.48	0.38	0.24	0.19	0.28	0.37
110	0.51	0.58	0.61	0.55	0.63	0.56	0.44	0.40	0.45	0.46
120	0.51	0.59	0.65	0.63	0.79	0.74	0.62	0.59	0.59	0.54
130	0.51	0.60	0.68	0.70	0.94	0.86	0.75	0.71	0.69	0.60
140	0.51	0.61	0.72	0.76	1.08	0.98	0.85	0.80	0.76	0.64
150	0.51	0.62	0.75	0.81	1.19	1.06	0.92	0.87	0.82	0.66
160	0.51	0.63	0.77	0.85	1.27	1.12	0.96	0.90	0.85	0.67
170	0.51	0.63	0.79	0.87	1.32	1.16	0.98	0.92	0.86	0.68
180	0.51	0.64	0.79	0.88	1.33	1.17	0.99	0.93	0.87	0.69

Indicatrix-2

zs	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.70	0.72	0.69	0.63	0.56	0.52	0.50	0.58	0.73	0.82
10	0.70	0.72	0.69	0.63	0.56	0.52	0.50	0.58	0.73	0.82
20	0.70	0.73	0.69	0.63	0.56	0.52	0.51	0.58	0.73	0.82
30	0.70	0.73	0.69	0.63	0.57	0.53	0.52	0.59	0.72	0.81
40	0.70	0.73	0.69	0.63	0.57	0.54	0.53	0.59	0.72	0.80
50	0.70	0.73	0.69	0.63	0.58	0.56	0.54	0.60	0.71	0.78
60	0.70	0.73	0.70	0.64	0.59	0.57	0.55	0.60	0.69	0.76
70	0.70	0.73	0.70	0.64	0.61	0.59	0.56	0.60	0.67	0.73
80	0.70	0.74	0.70	0.64	0.63	0.60	0.57	0.59	0.64	0.70
90	0.70	0.74	0.70	0.65	0.65	0.63	0.58	0.59	0.61	0.67
100	0.70	0.74	0.71	0.67	0.70	0.68	0.64			

数値積分に対する天空要素計算法の相対誤差

Indicatrix-1

		zs									
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
as-Ha	0	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	10	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	20	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	30	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	40	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	50	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	60	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	70	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	80	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	90	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	100	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	110	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	120	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	130	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	140	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	150	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	160	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	170	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	180	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83

Indicatrix-3

		zs									
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
as-Ha	0	0.51	0.61	0.53	0.46	0.54	0.80	1.43	1.22	1.27	1.26
	10	0.51	0.57	0.46	0.40	0.43	0.60	0.76	1.10	1.21	1.28
	20	0.51	0.52	0.44	0.42	0.53	0.61	0.77	0.96	1.11	1.21
	30	0.51	0.49	0.49	0.43	0.44	0.78	1.38	0.91	1.06	1.18
	40	0.51	0.50	0.45	0.44	0.53	0.59	0.73	0.94	1.09	1.17
	50	0.51	0.53	0.45	0.41	0.44	0.61	0.76	1.04	1.14	1.17
	60	0.51	0.57	0.51	0.47	0.53	0.72	1.17	1.06	1.12	1.13
	70	0.51	0.57	0.49	0.45	0.46	0.55	0.67	0.91	1.01	1.06
	80	0.51	0.55	0.47	0.45	0.51	0.56	0.68	0.81	0.94	1.01
	90	0.51	0.54	0.47	0.48	0.51	0.50	0.59	0.81	0.96	1.00
	100	0.51	0.53	0.49	0.50	0.53	0.55	0.64	0.77	0.89	0.93
	110	0.51	0.53	0.51	0.53	0.56	0.61	0.68	0.77	0.85	0.89
	120	0.51	0.53	0.53	0.55	0.60	0.65	0.72	0.79	0.84	0.87
	130	0.51	0.54	0.55	0.58	0.63	0.69	0.75	0.80	0.84	0.86
	140	0.51	0.54	0.56	0.61	0.66	0.72	0.77	0.82	0.85	0.87
	150	0.51	0.54	0.58	0.63	0.68	0.74	0.80	0.84	0.86	0.87
	160	0.51	0.54	0.59	0.64	0.70	0.76	0.81	0.85	0.87	0.88
	170	0.51	0.55	0.59	0.65	0.71	0.77	0.82	0.85	0.88	0.88
	180	0.51	0.55	0.59	0.65	0.71	0.77	0.82	0.85	0.88	0.88

Indicatrix-5

		zs									
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
as-Ha	0	0.32	0.61	0.40	0.36	0.84	2.05	1.56	1.56	1.59	1.59
	10	0.32	0.51	0.25	0.08	0.12	0.44	0.68	1.28	1.44	1.54
	20	0.32	0.37	0.20	0.14	0.34	0.45	0.70	0.89	1.24	1.44
	30	0.32	0.30	0.31	0.16	0.14	0.82	1.98	0.91	1.15	1.39
	40	0.32	0.31	0.20	0.16	0.33	0.41	0.64	0.89	1.23	1.41
	50	0.32	0.40	0.19	0.08	0.13	0.44	0.69	1.23	1.38	1.45
	60	0.32	0.50	0.33	0.22	0.31	0.70	1.67	1.32	1.38	1.41
	70	0.32	0.49	0.28	0.15	0.14	0.31	0.50	0.99	1.19	1.29
	80	0.32	0.44	0.20	0.14	0.23	0.30	0.34	0.76	1.04	1.20
	90	0.32	0.40	0.19	0.17	0.21	0.10	0.25	0.78	1.16	1.23
	100	0.32	0.38	0.23	0.20	0.22	0.21	0.37	0.69	0.97	1.07
	110	0.32	0.37	0.27	0.25	0.28	0.33	0.47	0.68	0.86	0.95
	120	0.32	0.36	0.31	0.31	0.36	0.44	0.56	0.70	0.82	0.89
	130	0.32	0.36	0.34	0.37	0.43	0.52	0.63	0.73	0.82	0.86
	140	0.32	0.37	0.37	0.42	0.50	0.59	0.69	0.77	0.83	0.86
	150	0.32	0.37	0.40	0.46	0.55	0.64	0.73	0.80	0.84	0.87
	160	0.32	0.37	0.42	0.49	0.59	0.68	0.76	0.82	0.85	0.87
	170	0.32	0.37	0.43	0.51	0.61	0.70	0.78	0.83	0.86	0.88
	180	0.32	0.37	0.43	0.52	0.62	0.71	0.78	0.83	0.87	0.88

Indicatrix-2

		zs									
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
as-Ha	0	0.61	0.64	0.63	0.63	0.67	0.79	1.04	1.01	1.06	1.08
	10	0.61	0.63	0.61	0.60	0.64	0.73	0.82	0.97	1.04	1.07
	20	0.61	0.62	0.60	0.61	0.67	0.73	0.82	0.92	1.00	1.05
	30	0.61	0.61	0.62	0.62	0.64	0.78	1.01	0.90	0.98	1.03
	40	0.61	0.61	0.61	0.62	0.66	0.72	0.80	0.90	0.98	1.02
	50	0.61	0.62	0.60	0.61	0.64	0.72	0.80	0.92	0.98	1.01
	60	0.61	0.63	0.62	0.62	0.66	0.74	0.91	0.92	0.96	0.98
	70	0.61	0.63	0.62	0.62	0.64	0.69	0.75	0.86	0.92	0.95
	80	0.61	0.63	0.61	0.62	0.65	0.69	0.75	0.82	0.88	0.92
	90	0.61	0.62	0.61	0.62	0.65	0.67	0.72	0.81	0.87	0.90
	100	0.61	0.62	0.62	0.63	0.65	0.68	0.73	0.78	0.84	0.87
	110	0.61	0.62	0.62	0.64	0.66	0.69	0.74	0.78	0.82	0.85
	120	0.61	0.62	0.63	0.65	0.67	0.71	0.75	0.78	0.82	0.84
	130	0.61	0.62	0.63	0.66	0.69	0.72	0.75	0.79	0.81	0.83
	140	0.61	0.62	0.64	0.66	0.69	0.73	0.76	0.79	0.82	0.83
	150	0.61	0.63	0.64	0.67	0.70	0.74	0.77	0.80	0.82	0.83
	160	0.61	0.63	0.65	0.68	0.71	0.74	0.78	0.80	0.82	0.83
	170	0.61	0.63	0.65	0.68	0.71	0.75	0.78	0.81	0.82	0.84
	180	0.61	0.63	0.65	0.68	0.71	0.75	0.78	0.81	0.83	0.84

Indicatrix-4

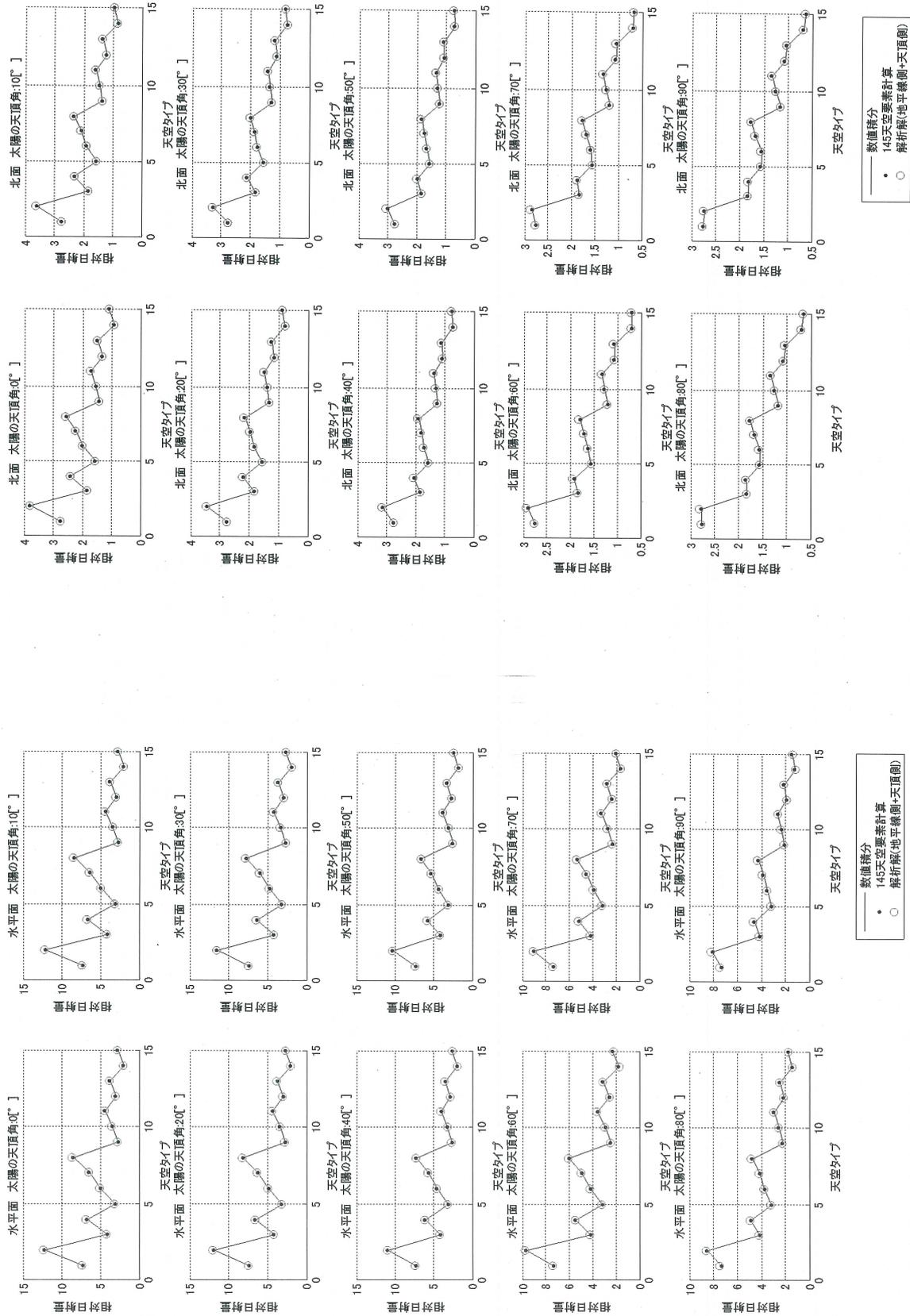
		zs									
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
as-Ha	0	0.41	0.62	0.45	0.33	0.43	0.84	1.86	1.42	1.45	1.47
	10	0.41	0.54	0.34	0.20	0.23	0.50	0.71	1.22	1.36	1.43
	20	0.41	0.44	0.30	0.25	0.41	0.51	0.72	0.97	1.19	1.35
	30	0.41	0.38	0.39	0.27	0.25	0.51	1.79	0.90	1.11	1.30
	40	0.41	0.39	0.31	0.27	0.41	0.48	0.67	0.97	1.17	1.31
	50	0.41	0.46	0.30	0.21	0.25	0.51	0.72	1.16	1.28	1.33
	60	0.41	0.53	0.41	0.32	0.40	0.71	1.30	1.23	1.27	1.29
	70	0.41	0.53	0.37	0.28	0.28	0.41	0.57	0.96	1.11	1.19
	80	0.41	0.49	0.32	0.28	0.36	0.42	0.61	0.78	1.00	1.11
	90	0.41	0.47	0.32	0.31	0.35	0.29	0.41	0.80	1.07	1.12
	100	0.41	0.45	0.35	0.35	0.37	0.38	0.51	0.75	0.94	1.00
	110	0.41	0.45	0.39	0.39	0.43	0.48	0.60	0.75	0.87	0.92
	120	0.41	0.44	0.42	0.44	0.49	0.57	0.67	0.77	0.85	0.89
	130	0.41	0.45	0.45	0.49	0.53	0.60	0.69	0.77	0.83	0.87
	140	0.41	0.45	0.47	0.53	0.60	0.69	0.77	0.83	0.87	0.89
	150	0.41	0.45	0.49	0.56	0.64	0.73	0.80	0.85	0.88	0.90
	160	0.41	0.46	0.51	0.58	0.67	0.75	0.82	0.87	0.90	0.91
	170	0.41	0.46	0.52	0.60	0.69	0.77	0.84	0.88	0.91	0.91
	180	0.41	0.46	0.52	0.60	0.69	0.77	0.84	0.89	0.91	0.91

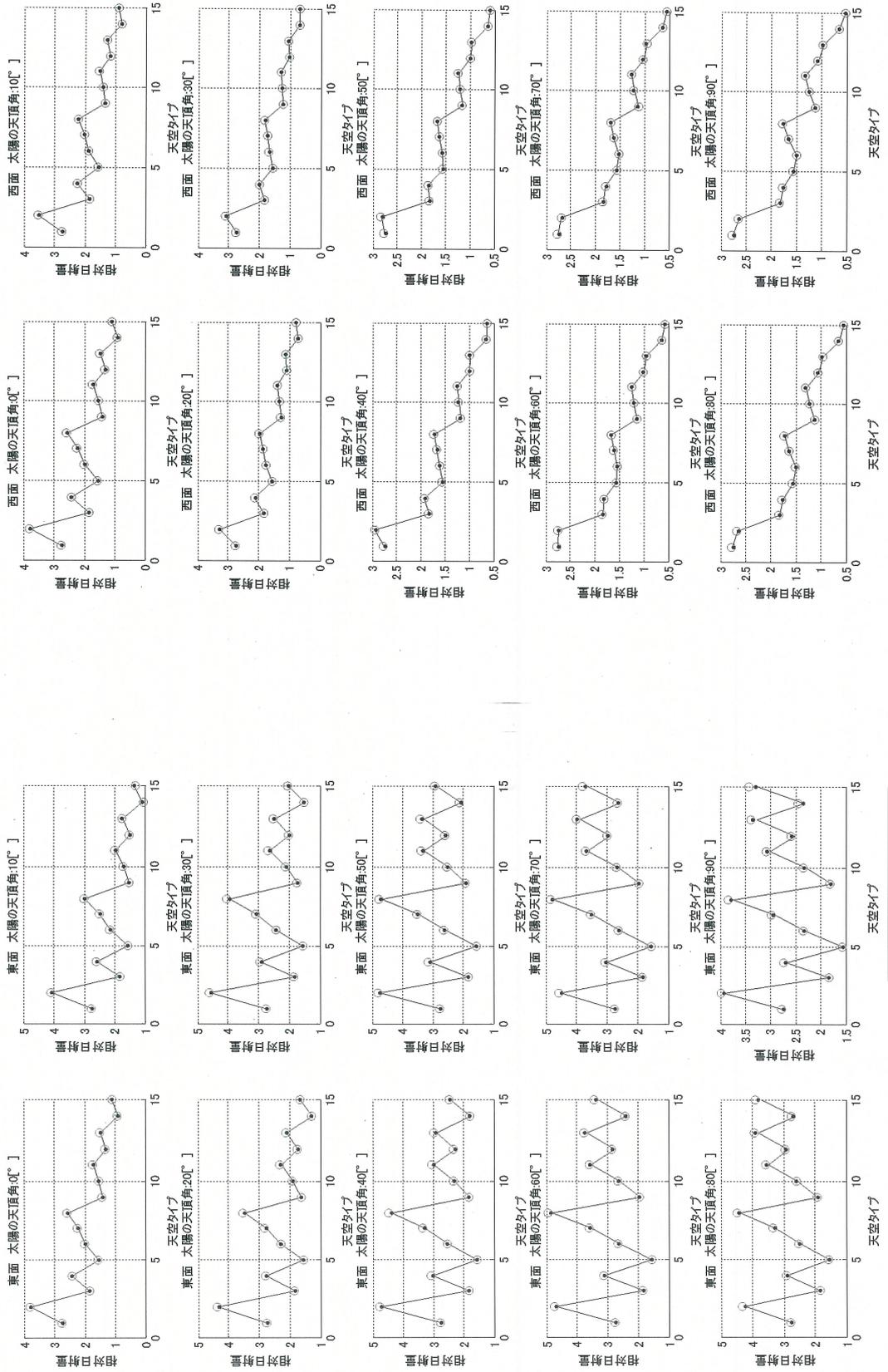
Indicatrix-6

		zs									
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
as-Ha	0	0.21	0.54	0.34	0.19	0.33	0.82	2.02	1.53	1.59	1.65
	10	0.21	0.44	0.18	0.04	0.09	0.42	0.68	1.29	1.48	1.60
	20	0.21	0.29	0.13	0.09	0.31	0.43	0.70	1.01	1.28	1.50
	30	0.21	0.21	0.24	0.11	0.10	0.79	1.96	0.93	1.20	1.45
	40	0.21	0.22	0.13	0.10	0.29	0.39	0.63	1.01	1.28	1.48
	50	0.21	0.32	0.11	0.01	0.08	0.41	0.68	1.25	1.43	1.53
	60	0.21	0.41	0.24	0.14	0.25	0.66	1.68	1.35	1.44	1.50
	70	0.21	0.40	0.18	0.05	0.05	0.24	0.46	1.01	1.24	1.39
	80	0.21	0.34	0.06	0.04	0.07	-0.05	0.13	0.75	1.09	1.30
	90	0.21	0.30	0.27	0.25	0.28	0.33	0.47	0.68		

相対日射量の比較

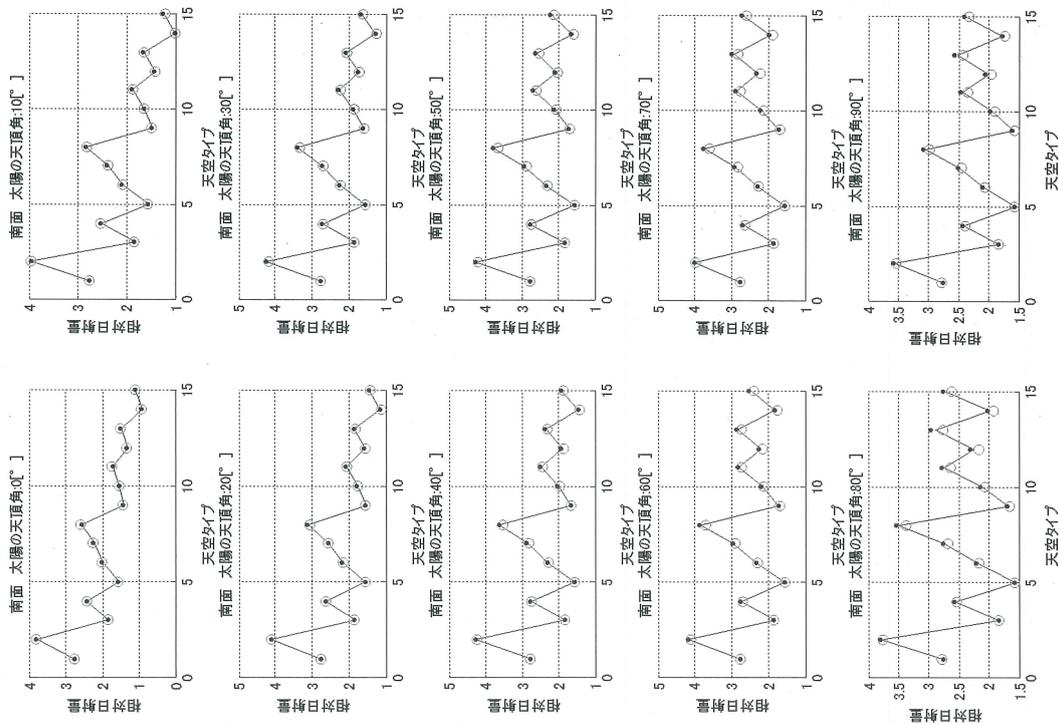
天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量計算法の開発





数値積分
 145天空要素計算
 解折線(地平線側+天頂側)

数値積分
 145天空要素計算
 解折線(地平線側+天頂側)



数値積分
 ● 145天空要素計算
 ○ 解析解(地平線側+天頂側)

近似関数，天空要素計算法の相対日射量の相対誤差（水平面）

天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量計算法の開発

数値積分に対する近似解析法の相対誤差

Sky type 7

		ζ_s										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
<i>as-Ha</i>	0	2.72	2.31	1.82	1.50	1.43	1.35	1.42	1.85	2.35	2.70	
	10	2.72	2.31	1.82	1.50	1.43	1.35	1.42	1.85	2.35	2.70	
	20	2.72	2.31	1.82	1.50	1.43	1.35	1.42	1.85	2.35	2.70	
	30	2.72	2.31	1.82	1.50	1.43	1.35	1.42	1.85	2.35	2.70	
	40	2.72	2.31	1.82	1.50	1.43	1.35	1.42	1.85	2.35	2.70	
	50	2.72	2.31	1.82	1.50	1.43	1.35	1.42	1.85	2.35	2.70	
	60	2.72	2.31	1.82	1.50	1.43	1.35	1.42	1.85	2.35	2.70	
	70	2.72	2.31	1.82	1.50	1.43	1.35	1.42	1.85	2.35	2.70	
	80	2.72	2.31	1.82	1.50	1.43	1.35	1.42	1.85	2.35	2.70	
	90	2.72	2.31	1.82	1.50	1.43	1.35	1.42	1.85	2.35	2.70	

Sky type 4

		ζ_s										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
<i>as-Ha</i>	0	2.44	2.08	1.76	1.54	1.50	1.47	1.52	1.67	2.13	2.47	
	10	2.44	2.08	1.76	1.54	1.50	1.47	1.52	1.67	2.13	2.47	
	20	2.44	2.08	1.76	1.54	1.50	1.47	1.52	1.67	2.13	2.47	
	30	2.44	2.08	1.76	1.54	1.50	1.47	1.52	1.67	2.13	2.47	
	40	2.44	2.08	1.76	1.54	1.50	1.47	1.52	1.67	2.13	2.47	
	50	2.44	2.08	1.76	1.54	1.50	1.47	1.52	1.67	2.13	2.47	
	60	2.44	2.08	1.76	1.54	1.50	1.47	1.52	1.67	2.13	2.47	
	70	2.44	2.08	1.76	1.54	1.50	1.47	1.52	1.67	2.13	2.47	
	80	2.44	2.08	1.76	1.54	1.50	1.47	1.52	1.67	2.13	2.47	
	90	2.44	2.08	1.76	1.54	1.50	1.47	1.52	1.67	2.13	2.47	

Sky type 1

		ζ_s										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
<i>as-Ha</i>	0	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	
	10	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	
	20	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	
	30	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	
	40	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	
	50	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	
	60	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	
	70	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	
	80	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	
	90	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	

Sky type 8

		ζ_s										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
<i>as-Ha</i>	0	2.57	2.16	1.50	1.09	0.97	0.92	1.06	1.66	2.17	2.72	
	10	2.57	2.16	1.50	1.09	0.97	0.92	1.06	1.66	2.17	2.72	
	20	2.57	2.16	1.50	1.09	0.97	0.92	1.06	1.66	2.17	2.72	
	30	2.57	2.16	1.50	1.09	0.97	0.92	1.06	1.66	2.17	2.72	
	40	2.57	2.16	1.50	1.09	0.97	0.92	1.06	1.66	2.17	2.72	
	50	2.57	2.16	1.50	1.09	0.97	0.92	1.06	1.66	2.17	2.72	
	60	2.57	2.16	1.50	1.09	0.97	0.92	1.06	1.66	2.17	2.72	
	70	2.57	2.16	1.50	1.09	0.97	0.92	1.06	1.66	2.17	2.72	
	80	2.57	2.16	1.50	1.09	0.97	0.92	1.06	1.66	2.17	2.72	
	90	2.57	2.16	1.50	1.09	0.97	0.92	1.06	1.66	2.17	2.72	

Sky type 5

		ζ_s										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
<i>as-Ha</i>	0	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	
	10	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	
	20	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	
	30	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	
	40	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	
	50	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	
	60	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	
	70	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	
	80	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	
	90	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	2.79	

Sky type 2

		ζ_s										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
<i>as-Ha</i>	0	2.03	1.64	1.30	1.08	1.04	1.05	1.16	1.37	1.91	2.28	
	10	2.03	1.64	1.30	1.08	1.04	1.05	1.16	1.37	1.91	2.28	
	20	2.03	1.64	1.30	1.08	1.04	1.05	1.16	1.37	1.91	2.28	
	30	2.03	1.64	1.30	1.08	1.04	1.05	1.16	1.37	1.91	2.28	
	40	2.03	1.64	1.30	1.08	1.04	1.05	1.16	1.37	1.91	2.28	
	50	2.03	1.64	1.30	1.08	1.04	1.05	1.16	1.37	1.91	2.28	
	60	2.03	1.64	1.30	1.08	1.04	1.05	1.16	1.37	1.91	2.28	
	70	2.03	1.64	1.30	1.08	1.04	1.05	1.16	1.37	1.91	2.28	
	80	2.03	1.64	1.30	1.08	1.04	1.05	1.16	1.37	1.91	2.28	
	90	2.03	1.64	1.30	1.08	1.04	1.05	1.16	1.37	1.91	2.28	

Sky type 9

		ζ_s										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
<i>as-Ha</i>	0	3.69	3.41	3.13	2.89	2.81	2.63	2.50	2.48	2.71	2.94	
	10	3.69	3.41	3.13	2.89	2.81	2.63	2.50	2.48	2.71	2.94	
	20	3.69	3.41	3.13	2.89	2.81	2.63	2.50	2.48	2.71	2.94	
	30	3.69	3.41	3.13	2.89	2.81	2.63	2.50	2.48	2.71	2.94	
	40	3.69	3.41	3.13	2.89	2.81	2.63	2.50	2.48	2.71	2.94	
	50	3.69	3.41	3.13	2.89	2.81	2.63	2.50	2.48	2.71	2.94	
	60	3.69	3.41	3.13	2.89	2.81	2.63	2.50	2.48	2.71	2.94	
	70	3.69	3.41	3.13	2.89	2.81	2.63	2.50	2.48	2.71	2.94	
	80	3.69	3.41	3.13	2.89	2.81	2.63	2.50	2.48	2.71	2.94	
	90	3.69	3.41	3.13	2.89	2.81	2.63	2.50	2.48	2.71	2.94	

Sky type 6

		ζ_s										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
<i>as-Ha</i>	0	2.83	2.50	2.18	1.95	1.89	1.80	1.79	1.88	2.27	2.58	
	10	2.83	2.50	2.18	1.95	1.89	1.80	1.79	1.88	2.27	2.58	
	20	2.83	2.50	2.18	1.95	1.89	1.80	1.79	1.88	2.27	2.58	
	30	2.83	2.50	2.18	1.95	1.89	1.80	1.79	1.88	2.27	2.58	
	40	2.83	2.50	2.18	1.95	1.89	1.80	1.79	1.88	2.27	2.58	
	50	2.83	2.50	2.18	1.95	1.89	1.80	1.79	1.88	2.27	2.58	
	60	2.83	2.50	2.18	1.95	1.89	1.80	1.79	1.88	2.27	2.58	
	70	2.83	2.50	2.18	1.95	1.89	1.80	1.79	1.88	2.27	2.58	
	80	2.83	2.50	2.18	1.95	1.89	1.80	1.79	1.88	2.27	2.58	
	90	2.83	2.50	2.18	1.95	1.89	1.80	1.79	1.88	2.27	2.58	

Sky type 3

		ζ_s										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
<i>as-Ha</i>	0	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	
	10	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	
	20	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	
	30	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	
	40	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	
	50	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	
	60	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	
	70	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	
	80	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	
	90	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	

数値積分に対する近似解析法の相対誤差

Sky type 10

	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	3.52	3.26	2.91	2.65	2.57	2.32	2.14	2.25	2.56	2.85
10	3.52	3.26	2.91	2.65	2.57	2.32	2.14	2.25	2.56	2.85
20	3.52	3.26	2.91	2.65	2.57	2.32	2.14	2.25	2.56	2.85
30	3.52	3.26	2.91	2.65	2.57	2.32	2.14	2.25	2.56	2.85
40	3.52	3.26	2.91	2.65	2.57	2.32	2.14	2.25	2.56	2.85
50	3.52	3.26	2.91	2.65	2.57	2.32	2.14	2.25	2.56	2.85
60	3.52	3.26	2.91	2.65	2.57	2.32	2.14	2.25	2.56	2.85
70	3.52	3.26	2.91	2.65	2.57	2.32	2.14	2.25	2.56	2.85
80	3.52	3.26	2.91	2.65	2.57	2.32	2.14	2.25	2.56	2.85
90	3.52	3.26	2.91	2.65	2.57	2.32	2.14	2.25	2.56	2.85

Sky type 12

	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	2.91	2.67	2.29	2.06	2.06	1.97	1.90	2.08	2.27	2.61
10	2.91	2.67	2.29	2.06	2.06	1.97	1.90	2.08	2.27	2.61
20	2.91	2.67	2.29	2.06	2.06	1.97	1.90	2.08	2.27	2.61
30	2.91	2.67	2.29	2.06	2.06	1.97	1.90	2.08	2.27	2.61
40	2.91	2.67	2.29	2.06	2.06	1.97	1.90	2.08	2.27	2.61
50	2.91	2.67	2.29	2.06	2.06	1.97	1.90	2.08	2.27	2.61
60	2.91	2.67	2.29	2.06	2.06	1.97	1.90	2.08	2.27	2.61
70	2.91	2.67	2.29	2.06	2.06	1.97	1.90	2.08	2.27	2.61
80	2.91	2.67	2.29	2.06	2.06	1.97	1.90	2.08	2.27	2.61
90	2.91	2.67	2.29	2.06	2.06	1.97	1.90	2.08	2.27	2.61

Sky type 14

	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	2.71	1.95	0.99	0.14	-0.39	-0.61	-0.45	0.02	0.66	0.91
10	2.71	1.95	0.99	0.14	-0.39	-0.61	-0.45	0.02	0.66	0.91
20	2.71	1.95	0.99	0.14	-0.39	-0.61	-0.45	0.02	0.66	0.91
30	2.71	1.95	0.99	0.14	-0.39	-0.61	-0.45	0.02	0.66	0.91
40	2.71	1.95	0.99	0.14	-0.39	-0.61	-0.45	0.02	0.66	0.91
50	2.71	1.95	0.99	0.14	-0.39	-0.61	-0.45	0.02	0.66	0.91
60	2.71	1.95	0.99	0.14	-0.39	-0.61	-0.45	0.02	0.66	0.91
70	2.71	1.95	0.99	0.14	-0.39	-0.61	-0.45	0.02	0.66	0.91
80	2.71	1.95	0.99	0.14	-0.39	-0.61	-0.45	0.02	0.66	0.91
90	2.71	1.95	0.99	0.14	-0.39	-0.61	-0.45	0.02	0.66	0.91

Sky type 11

	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	3.29	3.09	2.69	2.42	2.30	2.02	1.77	1.89	2.16	2.64
10	3.29	3.09	2.69	2.42	2.30	2.02	1.77	1.89	2.16	2.64
20	3.29	3.09	2.69	2.42	2.30	2.02	1.77	1.89	2.16	2.64
30	3.29	3.09	2.69	2.42	2.30	2.02	1.77	1.89	2.16	2.64
40	3.29	3.09	2.69	2.42	2.30	2.02	1.77	1.89	2.16	2.64
50	3.29	3.09	2.69	2.42	2.30	2.02	1.77	1.89	2.16	2.64
60	3.29	3.09	2.69	2.42	2.30	2.02	1.77	1.89	2.16	2.64
70	3.29	3.09	2.69	2.42	2.30	2.02	1.77	1.89	2.16	2.64
80	3.29	3.09	2.69	2.42	2.30	2.02	1.77	1.89	2.16	2.64
90	3.29	3.09	2.69	2.42	2.30	2.02	1.77	1.89	2.16	2.64

Sky type 13

	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	2.91	2.51	2.02	1.75	1.69	1.63	1.52	1.48	1.81	2.25
10	2.91	2.51	2.02	1.75	1.69	1.63	1.52	1.48	1.81	2.25
20	2.91	2.51	2.02	1.75	1.69	1.63	1.52	1.48	1.81	2.25
30	2.91	2.51	2.02	1.75	1.69	1.63	1.52	1.48	1.81	2.25
40	2.91	2.51	2.02	1.75	1.69	1.63	1.52	1.48	1.81	2.25
50	2.91	2.51	2.02	1.75	1.69	1.63	1.52	1.48	1.81	2.25
60	2.91	2.51	2.02	1.75	1.69	1.63	1.52	1.48	1.81	2.25
70	2.91	2.51	2.02	1.75	1.69	1.63	1.52	1.48	1.81	2.25
80	2.91	2.51	2.02	1.75	1.69	1.63	1.52	1.48	1.81	2.25
90	2.91	2.51	2.02	1.75	1.69	1.63	1.52	1.48	1.81	2.25

Sky type 15

	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	2.82	1.93	0.81	-0.18	-0.86	-1.10	-1.04	-0.53	-0.01	0.19
10	2.82	1.93	0.81	-0.18	-0.86	-1.10	-1.04	-0.53	-0.01	0.19
20	2.82	1.93	0.81	-0.18	-0.86	-1.10	-1.04	-0.53	-0.01	0.19
30	2.82	1.93	0.81	-0.18	-0.86	-1.10	-1.04	-0.53	-0.01	0.19
40	2.82	1.93	0.81	-0.18	-0.86	-1.10	-1.04	-0.53	-0.01	0.19
50	2.82	1.93	0.81	-0.18	-0.86	-1.10	-1.04	-0.53	-0.01	0.19
60	2.82	1.93	0.81	-0.18	-0.86	-1.10	-1.04	-0.53	-0.01	0.19
70	2.82	1.93	0.81	-0.18	-0.86	-1.10	-1.04	-0.53	-0.01	0.19
80	2.82	1.93	0.81	-0.18	-0.86	-1.10	-1.04	-0.53	-0.01	0.19
90	2.82	1.93	0.81	-0.18	-0.86	-1.10	-1.04	-0.53	-0.01	0.19

数値積分に対する天空要素計算法の相対誤差

Sky type 1

zs	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
10	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
20	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
30	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
40	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
50	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
60	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
70	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
80	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
90	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46

Sky type 4

zs	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.76	0.70	0.58	0.51	0.49	0.51	0.56	0.50	0.51	0.54
10	0.76	0.67	0.55	0.48	0.46	0.47	0.47	0.49	0.51	0.54
20	0.76	0.64	0.54	0.49	0.49	0.47	0.47	0.49	0.51	0.54
30	0.76	0.63	0.56	0.50	0.46	0.51	0.55	0.48	0.51	0.54
40	0.76	0.64	0.54	0.49	0.49	0.49	0.47	0.47	0.49	0.51
50	0.76	0.67	0.55	0.48	0.46	0.47	0.47	0.49	0.51	0.54
60	0.76	0.70	0.58	0.51	0.49	0.51	0.56	0.50	0.51	0.54
70	0.76	0.67	0.55	0.48	0.46	0.47	0.47	0.49	0.51	0.54
80	0.76	0.64	0.54	0.49	0.49	0.47	0.47	0.49	0.51	0.54
90	0.76	0.63	0.56	0.50	0.46	0.51	0.55	0.48	0.51	0.54

Sky type 7

zs	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	1.14	0.97	0.64	0.48	0.46	0.55	0.75	0.55	0.55	0.64
10	1.14	0.90	0.57	0.41	0.37	0.43	0.44	0.51	0.54	0.64
20	1.14	0.80	0.54	0.43	0.45	0.43	0.44	0.48	0.53	0.64
30	1.14	0.77	0.59	0.45	0.37	0.55	0.74	0.47	0.53	0.63
40	1.14	0.80	0.54	0.43	0.45	0.43	0.44	0.48	0.53	0.64
50	1.14	0.90	0.57	0.41	0.37	0.43	0.44	0.51	0.54	0.64
60	1.14	0.97	0.64	0.48	0.46	0.55	0.75	0.55	0.55	0.64
70	1.14	0.80	0.57	0.41	0.37	0.43	0.44	0.51	0.54	0.64
80	1.14	0.80	0.54	0.43	0.45	0.43	0.44	0.48	0.53	0.64
90	1.14	0.77	0.59	0.45	0.37	0.55	0.74	0.47	0.53	0.63

Sky type 2

zs	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.77	0.70	0.56	0.48	0.46	0.47	0.50	0.44	0.44	0.46
10	0.77	0.67	0.53	0.46	0.43	0.43	0.43	0.43	0.44	0.46
20	0.77	0.63	0.52	0.46	0.46	0.43	0.43	0.43	0.44	0.46
30	0.77	0.62	0.54	0.47	0.43	0.47	0.50	0.43	0.44	0.46
40	0.77	0.63	0.52	0.46	0.46	0.43	0.43	0.43	0.44	0.46
50	0.77	0.67	0.53	0.46	0.43	0.43	0.43	0.43	0.44	0.46
60	0.77	0.70	0.56	0.48	0.46	0.47	0.50	0.44	0.44	0.46
70	0.77	0.67	0.53	0.46	0.43	0.43	0.43	0.43	0.44	0.46
80	0.77	0.63	0.52	0.46	0.46	0.43	0.43	0.43	0.44	0.46
90	0.77	0.62	0.54	0.47	0.43	0.47	0.50	0.43	0.44	0.46

Sky type 5

zs	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
10	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
20	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
30	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
40	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
50	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
60	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
70	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
80	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
90	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56

Sky type 8

zs	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	1.57	1.26	0.71	0.43	0.42	0.59	0.98	0.57	0.54	0.72
10	1.57	1.14	0.58	0.30	0.24	0.36	0.38	0.50	0.53	0.71
20	1.57	0.86	0.52	0.34	0.41	0.38	0.38	0.43	0.51	0.71
30	1.57	0.80	0.61	0.38	0.25	0.59	0.97	0.41	0.50	0.70
40	1.57	0.86	0.52	0.34	0.41	0.36	0.38	0.43	0.51	0.71
50	1.57	1.14	0.58	0.30	0.24	0.36	0.38	0.50	0.53	0.71
60	1.57	1.26	0.71	0.43	0.42	0.59	0.98	0.57	0.54	0.72
70	1.57	1.14	0.58	0.30	0.24	0.38	0.38	0.50	0.53	0.71
80	1.57	0.86	0.52	0.34	0.41	0.36	0.38	0.43	0.51	0.71
90	1.57	0.80	0.61	0.38	0.25	0.59	0.97	0.41	0.50	0.70

Sky type 3

zs	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
10	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
20	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
30	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
40	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
50	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
60	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
70	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
80	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
90	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52

Sky type 6

zs	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.74	0.69	0.58	0.51	0.50	0.53	0.59	0.54	0.55	0.58
10	0.74	0.66	0.55	0.49	0.47	0.49	0.50	0.53	0.55	0.58
20	0.74	0.64	0.54	0.50	0.50	0.49	0.50	0.52	0.54	0.58
30	0.74	0.62	0.56	0.51	0.48	0.53	0.59	0.52	0.54	0.58
40	0.74	0.64	0.54	0.50	0.50	0.49	0.50	0.52	0.54	0.58
50	0.74	0.66	0.55	0.49	0.47	0.49	0.50	0.53	0.55	0.58
60	0.74	0.69	0.58	0.51	0.50	0.53	0.59	0.54	0.55	0.58
70	0.74	0.66	0.55	0.49	0.47	0.49	0.50	0.53	0.55	0.58
80	0.74	0.64	0.54	0.50	0.50	0.49	0.50	0.52	0.54	0.58
90	0.74	0.62	0.56	0.51	0.48	0.53	0.59	0.52	0.54	0.58

Sky type 9

zs	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.77	0.72	0.64	0.60	0.60	0.64	0.73	0.70	0.72	0.78
10	0.77	0.71	0.62	0.58	0.58	0.61	0.63	0.69	0.72	0.78
20	0.77	0.68	0.62	0.59	0.60	0.61	0.63	0.67	0.72	0.78
30	0.77	0.67	0.63	0.59	0.58	0.64	0.73	0.67	0.71	0.78
40	0.77	0.68	0.62	0.59	0.60	0.61	0.63	0.67	0.72	0.78
50	0.77	0.71	0.62	0.58	0.58	0.61	0.63	0.69	0.72	0.78
60	0.77	0.72	0.64	0.60	0.60	0.64	0.73	0.70	0.72	0.78
70	0.77	0.71	0.62	0.58	0.60	0.64	0.73	0.70	0.72	0.78
80	0.77	0.68	0.62	0.59	0.60	0.61	0.63	0.67	0.72	0.78
90	0.77	0.67	0.63	0.59	0.58	0.64	0.73	0.67	0.71	0.78

数値積分に対する天空要素計算法の相対誤差

Sky type 10

0	z _s									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
0	1.06	0.82	0.67	0.54	0.53	0.64	0.91	0.73	0.74	0.89
10	1.06	0.86	0.61	0.48	0.45	0.52	0.57	0.69	0.73	0.89
20	1.06	0.79	0.59	0.50	0.53	0.52	0.57	0.63	0.71	0.88
30	1.06	0.76	0.62	0.51	0.46	0.64	0.91	0.62	0.71	0.88
40	1.06	0.79	0.59	0.50	0.53	0.52	0.57	0.63	0.71	0.88
50	1.06	0.86	0.61	0.48	0.45	0.52	0.57	0.69	0.73	0.89
60	1.06	0.92	0.67	0.54	0.53	0.64	0.91	0.73	0.74	0.89
70	1.06	0.86	0.61	0.48	0.45	0.52	0.57	0.69	0.73	0.89
80	1.06	0.79	0.59	0.50	0.53	0.52	0.57	0.63	0.71	0.88
90	1.06	0.76	0.62	0.51	0.46	0.64	0.91	0.62	0.71	0.88

Sky type 12

0	z _s									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
0	1.52	1.28	0.86	0.66	0.69	0.91	1.47	1.18	1.24	1.62
10	1.52	1.19	0.76	0.56	0.54	0.69	0.80	1.08	1.22	1.61
20	1.52	1.05	0.72	0.59	0.68	0.69	0.80	0.97	1.18	1.60
30	1.52	1.00	0.79	0.62	0.55	0.91	1.46	0.94	1.16	1.59
40	1.52	1.05	0.72	0.59	0.68	0.69	0.80	0.97	1.18	1.60
50	1.52	1.19	0.76	0.56	0.54	0.69	0.80	1.08	1.22	1.61
60	1.52	1.28	0.86	0.66	0.69	0.91	1.47	1.18	1.24	1.62
70	1.52	1.19	0.76	0.56	0.54	0.69	0.80	1.08	1.22	1.61
80	1.52	1.05	0.72	0.59	0.68	0.69	0.80	0.97	1.18	1.60
90	1.52	1.00	0.79	0.62	0.55	0.91	1.46	0.94	1.16	1.59

Sky type 14

0	z _s									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
0	1.92	1.64	1.15	0.93	1.00	1.34	2.16	1.39	2.32	3.04
10	1.92	1.52	1.02	0.80	0.81	1.07	1.31	1.86	2.28	3.02
20	1.92	1.36	0.97	0.84	0.98	1.07	1.31	1.70	2.21	2.99
30	1.92	1.30	1.05	0.87	0.82	1.33	2.16	1.65	2.17	2.88
40	1.92	1.36	0.97	0.84	0.98	1.07	1.31	1.70	2.21	2.99
50	1.92	1.52	1.02	0.80	0.81	1.07	1.31	1.86	2.28	3.02
60	1.92	1.64	1.15	0.93	1.00	1.34	2.16	1.39	2.32	3.04
70	1.92	1.52	1.02	0.80	0.81	1.07	1.31	1.86	2.28	3.02
80	1.92	1.36	0.97	0.84	0.98	1.07	1.31	1.70	2.21	2.99
90	1.92	1.30	1.05	0.87	0.82	1.33	2.16	1.65	2.17	2.88

Sky type 11

0	z _s									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
0	1.39	1.15	0.69	0.47	0.47	0.66	1.16	0.78	0.75	1.03
10	1.39	1.04	0.58	0.36	0.31	0.43	0.49	0.69	0.73	1.02
20	1.39	0.90	0.54	0.39	0.46	0.44	0.49	0.59	0.70	1.01
30	1.39	0.85	0.61	0.42	0.32	0.66	1.16	0.56	0.68	1.00
40	1.39	0.90	0.54	0.39	0.46	0.44	0.49	0.59	0.70	1.01
50	1.39	1.04	0.58	0.36	0.31	0.43	0.49	0.69	0.73	1.02
60	1.39	1.15	0.69	0.47	0.47	0.66	1.16	0.78	0.75	1.03
70	1.39	1.04	0.58	0.36	0.31	0.43	0.49	0.69	0.73	1.02
80	1.39	0.90	0.54	0.39	0.46	0.44	0.49	0.59	0.70	1.01
90	1.39	0.85	0.61	0.42	0.32	0.66	1.16	0.56	0.68	1.00

Sky type 13

0	z _s									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
0	1.67	1.37	0.84	0.57	0.59	0.86	1.57	1.19	1.26	1.82
10	1.67	1.25	0.70	0.44	0.40	0.58	0.70	1.06	1.23	1.81
20	1.67	1.08	0.65	0.48	0.57	0.58	0.70	0.91	1.17	1.78
30	1.67	1.01	0.74	0.51	0.41	0.86	1.57	0.87	1.15	1.77
40	1.67	1.08	0.65	0.48	0.57	0.58	0.70	0.91	1.17	1.78
50	1.67	1.25	0.70	0.44	0.40	0.58	0.70	1.06	1.23	1.81
60	1.67	1.37	0.84	0.57	0.59	0.86	1.57	1.19	1.26	1.82
70	1.67	1.25	0.70	0.44	0.40	0.58	0.70	1.06	1.23	1.81
80	1.67	1.08	0.65	0.48	0.57	0.58	0.70	0.91	1.17	1.78
90	1.67	1.01	0.74	0.51	0.41	0.86	1.57	0.87	1.15	1.77

Sky type 15

0	z _s									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
0	1.83	1.54	1.02	0.78	0.84	1.21	2.10	1.96	2.39	3.32
10	1.83	1.42	0.89	0.65	0.65	0.92	1.19	1.81	2.34	3.30
20	1.83	1.25	0.84	0.69	0.83	0.92	1.19	1.64	2.26	3.26
30	1.83	1.19	0.92	0.72	0.66	1.20	2.10	1.59	2.22	3.25
40	1.83	1.25	0.84	0.69	0.83	0.92	1.19	1.64	2.26	3.26
50	1.83	1.42	0.89	0.65	0.65	0.92	1.19	1.81	2.34	3.30
60	1.83	1.54	1.02	0.78	0.84	1.21	2.10	1.96	2.39	3.32
70	1.83	1.42	0.89	0.65	0.65	0.92	1.19	1.81	2.34	3.30
80	1.83	1.25	0.84	0.69	0.83	0.92	1.19	1.64	2.26	3.26
90	1.83	1.19	0.92	0.72	0.66	1.20	2.10	1.59	2.22	3.25

近似関数，天空要素計算法の相対日射量の相対誤差 (鉛直)

天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量計算法の開発

数値積分に対す近似解析法の相対誤差

Skv type 5

0	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
10	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
20	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
30	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
40	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
50	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
60	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
70	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
80	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
90	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
100	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
110	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
120	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
130	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
140	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
150	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
160	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
170	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
180	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87

Skv type 3

0	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
10	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
20	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
30	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
40	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
50	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
60	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
70	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
80	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
90	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
100	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
110	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
120	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
130	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
140	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
150	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
160	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
170	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
180	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89

Skv type 1

0	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
10	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
20	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
30	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
40	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
50	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
60	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
70	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
80	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
90	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
100	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
110	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
120	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
130	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
140	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
150	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
160	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
170	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
180	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81

Skv type 6

0	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.70	0.72	0.69	0.63	0.56	0.52	0.50	0.58	0.73	0.82
10	0.70	0.72	0.69	0.63	0.56	0.52	0.50	0.58	0.73	0.82
20	0.70	0.73	0.69	0.63	0.56	0.52	0.51	0.58	0.73	0.82
30	0.70	0.73	0.69	0.63	0.57	0.53	0.52	0.59	0.72	0.81
40	0.70	0.73	0.69	0.63	0.57	0.54	0.53	0.59	0.72	0.80
50	0.70	0.73	0.69	0.63	0.58	0.56	0.54	0.60	0.71	0.78
60	0.70	0.73	0.70	0.64	0.59	0.57	0.55	0.60	0.69	0.76
70	0.70	0.73	0.70	0.64	0.61	0.59	0.56	0.60	0.67	0.73
80	0.70	0.74	0.70	0.64	0.63	0.60	0.57	0.59	0.64	0.70
90	0.70	0.74	0.71	0.67	0.70	0.68	0.64	0.63	0.61	0.67
100	0.70	0.74	0.71	0.68	0.75	0.73	0.66	0.66	0.68	0.73
110	0.70	0.74	0.72	0.70	0.81	0.79	0.74	0.73	0.72	0.76
120	0.70	0.74	0.72	0.70	0.86	0.84	0.79	0.76	0.76	0.79
130	0.70	0.73	0.73	0.73	0.91	0.88	0.82	0.79	0.78	0.82
140	0.70	0.73	0.74	0.75	0.95	0.90	0.85	0.81	0.80	0.84
150	0.70	0.73	0.74	0.76	0.96	0.93	0.86	0.83	0.81	0.85
160	0.70	0.73	0.75	0.76	1.00	0.94	0.87	0.84	0.82	0.86
170	0.70	0.73	0.75	0.76	1.00	0.94	0.87	0.84	0.82	0.86
180	0.70	0.73	0.75	0.76	1.00	0.94	0.87	0.84	0.82	0.86

Skv type 4

0	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.60	0.63	0.58	0.51	0.47	0.50	0.57	0.70	0.83	0.90
10	0.60	0.63	0.58	0.51	0.47	0.51	0.58	0.70	0.83	0.90
20	0.60	0.63	0.58	0.51	0.47	0.51	0.58	0.70	0.83	0.90
30	0.60	0.63	0.58	0.51	0.48	0.52	0.58	0.70	0.82	0.88
40	0.60	0.64	0.58	0.52	0.49	0.53	0.58	0.70	0.81	0.87
50	0.60	0.64	0.59	0.52	0.50	0.54	0.59	0.69	0.79	0.85
60	0.60	0.64	0.59	0.53	0.52	0.55	0.59	0.67	0.76	0.82
70	0.60	0.65	0.60	0.54	0.54	0.56	0.59	0.65	0.72	0.79
80	0.60	0.65	0.60	0.55	0.56	0.58	0.58	0.62	0.68	0.76
90	0.60	0.65	0.61	0.56	0.59	0.59	0.58	0.60	0.65	0.74
100	0.60	0.65	0.62	0.58	0.65	0.65	0.63	0.64	0.68	0.76
110	0.60	0.65	0.63	0.60	0.71	0.70	0.68	0.68	0.73	0.80
120	0.60	0.65	0.64	0.62	0.77	0.76	0.73	0.73	0.78	0.85
130	0.60	0.65	0.65	0.64	0.83	0.81	0.78	0.77	0.83	0.90
140	0.60	0.65	0.65	0.66	0.89	0.85	0.81	0.80	0.88	0.94
150	0.60	0.65	0.66	0.68	0.93	0.88	0.84	0.83	0.91	0.98
160	0.60	0.65	0.67	0.69	0.96	0.90	0.85	0.85	0.93	1.00
170	0.60	0.65	0.67	0.69	0.98	0.91	0.86	0.86	0.94	1.01
180	0.60	0.65	0.67	0.70	0.99	0.92	0.87	0.86	0.94	1.02

Skv type 2

0	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.37	0.41	0.32	0.22	0.21	0.33	0.53	0.76	0.89	0.92
10	0.37	0.41	0.3							

数値積分に対する近似解析法の相対誤差

Skv type 7

0	z ^s									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.58	0.61	0.59	0.50	0.43	0.36	0.31	0.40	0.68	0.96
10	0.58	0.61	0.59	0.50	0.43	0.36	0.32	0.40	0.68	0.96
20	0.58	0.61	0.59	0.51	0.44	0.37	0.32	0.41	0.68	0.95
30	0.58	0.62	0.59	0.51	0.44	0.38	0.33	0.41	0.67	0.94
40	0.58	0.62	0.59	0.51	0.45	0.40	0.35	0.42	0.66	0.91
50	0.58	0.63	0.60	0.52	0.46	0.41	0.36	0.42	0.65	0.87
60	0.58	0.64	0.61	0.52	0.47	0.43	0.37	0.42	0.62	0.82
70	0.58	0.65	0.62	0.53	0.48	0.44	0.37	0.40	0.57	0.73
80	0.58	0.66	0.63	0.55	0.51	0.45	0.36	0.37	0.50	0.63
90	0.58	0.67	0.64	0.56	0.55	0.47	0.35	0.31	0.41	0.52
100	0.58	0.68	0.66	0.60	0.63	0.57	0.47	0.43	0.51	0.55
110	0.58	0.68	0.68	0.64	0.74	0.69	0.59	0.55	0.62	0.61
120	0.58	0.69	0.71	0.69	0.84	0.80	0.71	0.65	0.71	0.67
130	0.58	0.69	0.73	0.73	0.85	0.89	0.79	0.73	0.79	0.72
140	0.58	0.70	0.75	0.77	0.94	0.96	0.86	0.78	0.85	0.75
150	0.58	0.70	0.77	0.80	1.12	1.02	0.91	0.82	0.89	0.77
160	0.58	0.71	0.78	0.82	1.18	1.05	0.94	0.85	0.92	0.79
170	0.58	0.71	0.79	0.84	1.21	1.07	0.95	0.86	0.94	0.79
180	0.58	0.71	0.80	0.84	1.23	1.08	0.96	0.86	0.94	0.80

Skv type 9

0	z ^s									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	1.05	1.07	1.09	1.07	0.97	0.84	0.69	0.66	0.81	0.92
10	1.05	1.07	1.09	1.06	0.97	0.84	0.70	0.67	0.81	0.92
20	1.05	1.07	1.09	1.06	0.97	0.85	0.72	0.69	0.81	0.92
30	1.05	1.07	1.09	1.06	0.97	0.85	0.72	0.69	0.81	0.92
40	1.05	1.07	1.08	1.05	0.97	0.86	0.73	0.70	0.82	0.91
50	1.05	1.07	1.08	1.04	0.97	0.87	0.75	0.72	0.82	0.92
60	1.05	1.07	1.07	1.04	0.97	0.88	0.77	0.75	0.83	0.89
70	1.05	1.07	1.07	1.03	0.97	0.89	0.79	0.77	0.82	0.86
80	1.05	1.07	1.06	1.02	0.97	0.90	0.81	0.79	0.80	0.83
90	1.05	1.07	1.06	1.02	0.98	0.92	0.83	0.80	0.78	0.79
100	1.05	1.07	1.06	1.02	1.00	0.96	0.88	0.86	0.80	0.80
110	1.05	1.07	1.06	1.02	1.03	1.00	0.94	0.91	0.83	0.81
120	1.05	1.07	1.06	1.04	1.07	1.05	0.98	0.94	0.83	0.82
130	1.05	1.06	1.06	1.04	1.10	1.09	1.02	0.97	0.83	0.82
140	1.05	1.06	1.06	1.05	1.14	1.12	1.05	0.99	0.83	0.82
150	1.05	1.06	1.06	1.06	1.17	1.14	1.07	1.00	0.82	0.81
160	1.05	1.06	1.06	1.07	1.19	1.16	1.08	1.01	0.82	0.80
170	1.05	1.06	1.06	1.07	1.20	1.17	1.08	1.01	0.81	0.80
180	1.05	1.06	1.07	1.07	1.20	1.17	1.09	1.01	0.81	0.80

Skv type 11

0	z ^s									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	1.36	0.85	1.08	1.18	1.09	0.80	0.33	0.02	0.32	0.97
10	1.36	0.85	1.08	1.18	1.08	0.80	0.33	0.02	0.32	0.96
20	1.36	0.85	1.07	1.17	1.08	0.80	0.34	0.03	0.33	0.96
30	1.36	0.86	1.07	1.16	1.07	0.80	0.35	0.03	0.34	0.95
40	1.36	0.87	1.07	1.15	1.06	0.80	0.37	0.08	0.35	0.93
50	1.36	0.88	1.07	1.13	1.04	0.80	0.39	0.11	0.36	0.90
60	1.36	0.89	1.06	1.11	1.01	0.79	0.41	0.15	0.36	0.84
70	1.36	0.91	1.06	1.08	0.98	0.77	0.42	0.17	0.34	0.73
80	1.36	0.93	1.06	1.05	0.94	0.73	0.39	0.16	0.26	0.54
90	1.36	0.94	1.06	1.02	0.91	0.69	0.35	0.09	0.10	0.30
100	1.36	0.97	1.08	1.03	0.96	0.79	0.52	0.32	0.33	0.41
110	1.36	1.00	1.09	1.04	1.05	0.92	0.71	0.53	0.52	0.55
120	1.36	1.03	1.11	1.07	1.14	1.05	0.87	0.67	0.66	0.65
130	1.36	1.06	1.12	1.10	1.24	1.16	0.98	0.76	0.74	0.72
140	1.36	1.08	1.14	1.13	1.34	1.24	1.06	0.80	0.79	0.75
150	1.36	1.10	1.15	1.15	1.41	1.31	1.10	0.82	0.82	0.77
160	1.36	1.11	1.17	1.17	1.47	1.35	1.13	0.83	0.83	0.78
170	1.36	1.12	1.17	1.19	1.50	1.38	1.15	0.83	0.84	0.79
180	1.36	1.12	1.18	1.19	1.51	1.39	1.15	0.83	0.84	0.79

Skv type 8

0	z ^s									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.51	0.47	0.47	0.38	0.30	0.25	0.19	0.23	0.66	1.12
10	0.51	0.47	0.47	0.38	0.30	0.25	0.19	0.28	0.66	1.12
20	0.51	0.47	0.47	0.38	0.30	0.25	0.20	0.28	0.66	1.11
30	0.51	0.47	0.47	0.38	0.31	0.26	0.20	0.29	0.65	1.09
40	0.51	0.48	0.48	0.39	0.31	0.27	0.21	0.29	0.64	1.05
50	0.51	0.49	0.49	0.39	0.32	0.28	0.22	0.29	0.61	1.00
60	0.51	0.50	0.49	0.40	0.32	0.28	0.20	0.23	0.49	0.77
70	0.51	0.52	0.51	0.40	0.33	0.28	0.20	0.23	0.49	0.77
80	0.51	0.53	0.53	0.41	0.34	0.26	0.15	0.14	0.34	0.56
90	0.51	0.55	0.55	0.43	0.36	0.24	0.07	0.01	0.13	0.33
100	0.51	0.56	0.58	0.49	0.48	0.38	0.24	0.19	0.28	0.37
110	0.51	0.56	0.61	0.55	0.63	0.56	0.44	0.40	0.45	0.46
120	0.51	0.59	0.65	0.63	0.79	0.72	0.62	0.58	0.59	0.54
130	0.51	0.60	0.68	0.70	0.84	0.86	0.75	0.71	0.69	0.60
140	0.51	0.61	0.72	0.76	1.08	0.98	0.85	0.80	0.76	0.64
150	0.51	0.62	0.75	0.81	1.19	1.06	0.92	0.87	0.82	0.66
160	0.51	0.63	0.77	0.85	1.27	1.12	0.96	0.90	0.85	0.67
170	0.51	0.63	0.79	0.87	1.32	1.16	0.98	0.92	0.86	0.68
180	0.51	0.64	0.79	0.88	1.33	1.17	0.99	0.93	0.87	0.68

Skv type 10

0	z ^s									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	1.15	1.00	1.11	1.13	1.04	0.81	0.48	0.30	0.52	0.91
10	1.15	1.00	1.11	1.13	1.04	0.81	0.48	0.30	0.52	0.91
20	1.15	1.00	1.11	1.13	1.04	0.81	0.49	0.31	0.53	0.90
30	1.15	1.00	1.10	1.12	1.03	0.82	0.51	0.33	0.54	0.90
40	1.15	1.01	1.10	1.11	1.02	0.83	0.53	0.36	0.55	0.89
50	1.15	1.01	1.10	1.10	1.01	0.83	0.55	0.39	0.56	0.87
60	1.15	1.02	1.09	1.08	1.00	0.84	0.58	0.43	0.57	0.83
70	1.15	1.02	1.09	1.06	0.98	0.84	0.60	0.46	0.57	0.77
80	1.15	1.03	1.09	1.05	0.97	0.83	0.61	0.47	0.54	0.68
90	1.15	1.04	1.09	1.04	0.97	0.83	0.61	0.46	0.47	0.56
100	1.15	1.05	1.09	1.04	1.01	0.90	0.73	0.60	0.60	0.63
110	1.15	1.06	1.10	1.05	1.07	0.99	0.85	0.71	0.70	0.70
120	1.15	1.07	1.11	1.09	1.14	1.08	0.95	0.79	0.78	0.76
130	1.15	1.08	1.11	1.09	1.21	1.15	1.02	0.84	0.83	0.80
140	1.15	1.09	1.12	1.11	1.27	1.21	1.07	0.86	0.86	0.82
150	1.15	1.09	1.13	1.13	1.33	1.25	1.11	0.87	0.87	0.83
160	1.15	1.10	1.14	1.14	1.37	1.28	1.13	0.87	0.88	0.83
170	1.15	1.10	1.14	1.15	1.39	1.30	1.14	0.87	0.88	0.84
180	1.15	1.10	1.15	1.15	1.40	1.30	1.14	0.87	0.88	0.84

Skv type 12

0	z ^s									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	1.74	0.78	1.02	1.28	1.40	1.36	1.10	0.81	0.93	1.43
10	1.74	0.78	1.02	1.28	1.40	1.36	1.10	0.81	0.93	1.43
20	1.74	0.79	1.03	1.28	1.39	1.36	1.10	0.82	0.94	1.43
30	1.74	0.81	1.04	1.28	1.39	1.35	1.11	0.83	0.94	1.42
40	1.74	0.83	1.05	1.28	1.38	1.35	1.11	0.85	0.95	1.40
50	1.74	0.85	1.08	1.27	1.36	1.34	1.11	0.86	0.95	1.37
60	1.74	0.88	1.10	1.27	1.34	1.31	1.11	0.87	0.95	1.32
70	1.74	0.94	1.13	1.27	1.32	1.28	1.07	0.86	0.91	1.22
80	1.74	0.94	1.15	1.27	1.29	1.22	1.01	0.79	0.82	1.04
90	1.74	0.98	1.18	1.27	1.27	1.18	0.92	0.67	0.62	0.79
100	1.74	1.04	1.22</							

数値積分に対す近似解析法の相対誤差

Skv type 13

	Skv type 13										
	°S										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
as-Ha	0	1.50	0.36	0.83	1.21	1.38	1.34	1.05	0.68	0.84	1.40
	10	1.50	0.37	0.83	1.21	1.38	1.34	1.05	0.68	0.84	1.40
	20	1.50	0.38	0.84	1.21	1.37	1.34	1.05	0.68	0.85	1.40
	30	1.50	0.40	0.85	1.21	1.37	1.33	1.05	0.69	0.85	1.39
	40	1.50	0.43	0.87	1.20	1.35	1.32	1.05	0.70	0.86	1.37
	50	1.50	0.47	0.89	1.20	1.33	1.30	1.05	0.72	0.86	1.34
	60	1.50	0.51	0.91	1.19	1.30	1.26	1.03	0.72	0.85	1.28
	70	1.50	0.55	0.94	1.18	1.25	1.20	0.97	0.69	0.79	1.15
	80	1.50	0.60	0.97	1.17	1.19	1.11	0.86	0.59	0.65	0.89
	90	1.50	0.66	1.00	1.16	1.14	1.01	0.70	0.39	0.33	0.50
	100	1.50	0.74	1.05	1.18	1.17	1.07	0.84	0.63	0.59	0.66
110	1.50	0.83	1.10	1.22	1.22	1.19	1.04	0.88	0.83	0.85	
120	1.50	0.91	1.15	1.25	1.30	1.32	1.23	1.06	0.99	1.00	
130	1.50	0.98	1.19	1.29	1.37	1.44	1.37	1.16	1.08	1.08	
140	1.50	1.05	1.22	1.33	1.44	1.53	1.47	1.22	1.12	1.13	
150	1.50	1.10	1.25	1.36	1.50	1.61	1.53	1.25	1.13	1.15	
160	1.50	1.14	1.26	1.38	1.54	1.66	1.57	1.26	1.13	1.16	
170	1.50	1.16	1.28	1.40	1.56	1.69	1.59	1.27	1.13	1.16	
180	1.50	1.17	1.28	1.40	1.57	1.70	1.59	1.27	1.13	1.16	

[%]

Skv type 14

	Skv type 14										
	°S										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
as-Ha	0	1.43	-0.84	-0.56	-0.10	0.29	0.72	1.17	1.58	2.23	2.78
	10	1.43	-0.83	-0.55	-0.10	0.29	0.72	1.17	1.58	2.22	2.78
	20	1.43	-0.80	-0.51	-0.07	0.31	0.73	1.17	1.58	2.22	2.76
	30	1.43	-0.75	-0.46	-0.03	0.33	0.74	1.17	1.58	2.21	2.74
	40	1.43	-0.68	-0.38	0.03	0.37	0.76	1.18	1.57	2.19	2.70
	50	1.43	-0.60	-0.28	0.11	0.43	0.79	1.18	1.56	2.15	2.63
	60	1.43	-0.51	-0.16	0.21	0.50	0.82	1.18	1.53	2.08	2.51
	70	1.43	-0.41	-0.03	0.34	0.59	0.86	1.15	1.45	1.93	2.30
	80	1.43	-0.30	0.11	0.47	0.70	0.91	1.09	1.27	1.64	1.92
	90	1.43	-0.17	0.25	0.61	0.81	0.97	1.02	1.01	1.13	1.35
	100	1.43	0.00	0.43	0.79	0.98	1.14	1.18	1.17	1.28	1.42
110	1.43	0.19	0.61	0.96	1.14	1.33	1.40	1.40	1.44	1.53	
120	1.43	0.38	0.77	1.11	1.29	1.52	1.62	1.58	1.55	1.60	
130	1.43	0.54	0.90	1.23	1.41	1.69	1.80	1.71	1.61	1.65	
140	1.43	0.68	1.00	1.33	1.51	1.83	1.94	1.79	1.63	1.67	
150	1.43	0.79	1.08	1.40	1.58	1.94	2.03	1.84	1.64	1.68	
160	1.43	0.87	1.14	1.46	1.63	2.01	2.10	1.87	1.64	1.68	
170	1.43	0.92	1.17	1.49	1.66	2.06	2.13	1.89	1.64	1.69	
180	1.43	0.93	1.18	1.50	1.67	2.07	2.14	1.89	1.64	1.69	

[%]

Skv type 15

	Skv type 15										
	°S										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
as-Ha	0	0.72	-1.56	-0.99	-0.36	0.12	0.63	1.08	1.53	2.21	2.81
	10	0.72	-1.55	-0.98	-0.36	0.12	0.63	1.08	1.52	2.21	2.81
	20	0.72	-1.52	-0.95	-0.34	0.13	0.63	1.08	1.52	2.20	2.80
	30	0.72	-1.47	-0.91	-0.31	0.15	0.64	1.08	1.52	2.19	2.78
	40	0.72	-1.40	-0.84	-0.27	0.17	0.64	1.07	1.51	2.17	2.75
	50	0.72	-1.33	-0.75	-0.21	0.20	0.65	1.06	1.49	2.14	2.69
	60	0.72	-1.24	-0.65	-0.13	0.25	0.65	1.03	1.44	2.06	2.59
	70	0.72	-1.14	-0.53	-0.03	0.30	0.65	0.97	1.34	1.91	2.38
	80	0.72	-1.02	-0.41	0.07	0.37	0.64	0.85	1.11	1.59	1.97
	90	0.72	-0.89	-0.27	0.19	0.44	0.63	0.70	0.74	0.97	1.24
	100	0.72	-0.69	-0.08	0.36	0.59	0.74	0.81	0.88	1.10	1.24
110	0.72	-0.46	0.12	0.53	0.75	0.90	1.01	1.12	1.29	1.27	
120	0.72	-0.25	0.30	0.68	0.91	1.09	1.24	1.35	1.44	1.24	
130	0.72	-0.04	0.46	0.82	1.07	1.27	1.45	1.54	1.53	1.16	
140	0.72	0.13	0.59	0.94	1.21	1.42	1.62	1.68	1.58	1.06	
150	0.72	0.27	0.70	1.04	1.32	1.55	1.75	1.77	1.60	0.96	
160	0.72	0.38	0.77	1.11	1.41	1.64	1.84	1.84	1.61	0.89	
170	0.72	0.44	0.82	1.16	1.46	1.69	1.89	1.87	1.62	0.85	
180	0.72	0.46	0.83	1.17	1.47	1.71	1.91	1.88	1.62	0.84	

[%]

数値積分に対する天空要素計算法の相対誤差

Skv type 1

	z _s									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
us-Ha	0	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	10	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	20	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	30	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	40	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	50	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	60	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	70	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	80	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	90	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	100	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	110	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	120	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	130	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	140	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	150	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	160	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	170	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	180	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24

Skv type 3

	z _s									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
us-Ha	0	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
	10	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
	20	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
	30	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
	40	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
	50	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
	60	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
	70	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
	80	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
	90	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
	100	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
	110	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
	120	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
	130	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
	140	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
	150	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
	160	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
	170	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
	180	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64

Skv type 5

	z _s									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
us-Ha	0	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	10	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	20	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	30	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	40	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	50	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	60	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	70	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	80	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	90	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	100	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	110	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	120	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	130	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	140	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	150	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	160	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	170	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	180	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83

Skv type 2

	z _s									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
us-Ha	0	0.10	0.16	0.14	0.13	0.17	0.30	0.53	0.42	0.43
	10	0.10	0.14	0.11	0.10	0.12	0.21	0.28	0.38	0.42
	20	0.10	0.12	0.10	0.10	0.17	0.21	0.27	0.34	0.39
	30	0.10	0.11	0.12	0.11	0.12	0.28	0.49	0.32	0.37
	40	0.10	0.11	0.10	0.10	0.15	0.19	0.25	0.31	0.37
	50	0.10	0.12	0.09	0.08	0.11	0.18	0.24	0.32	0.36
	60	0.10	0.13	0.11	0.10	0.13	0.21	0.36	0.31	0.33
	70	0.10	0.13	0.10	0.08	0.09	0.13	0.18	0.25	0.29
	80	0.10	0.12	0.08	0.08	0.10	0.12	0.16	0.20	0.25
	90	0.10	0.11	0.08	0.08	0.09	0.03	0.11	0.18	0.24
	100	0.10	0.10	0.08	0.08	0.08	0.09	0.12	0.17	0.21
	110	0.10	0.10	0.08	0.08	0.09	0.10	0.13	0.17	0.20
	120	0.10	0.10	0.09	0.09	0.10	0.12	0.14	0.17	0.20
	130	0.10	0.10	0.09	0.09	0.11	0.13	0.15	0.18	0.20
	140	0.10	0.10	0.09	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20
	150	0.10	0.10	0.10	0.11	0.12	0.15	0.17	0.19	0.21
	160	0.10	0.10	0.10	0.11	0.13	0.15	0.18	0.20	0.22
	170	0.10	0.10	0.10	0.11	0.13	0.16	0.18	0.20	0.23
	180	0.10	0.10	0.10	0.11	0.13	0.16	0.18	0.20	0.23

Skv type 4

	z _s									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
us-Ha	0	0.44	0.48	0.46	0.46	0.50	0.63	0.88	0.82	0.87
	10	0.44	0.47	0.44	0.43	0.46	0.55	0.64	0.78	0.85
	20	0.44	0.45	0.43	0.44	0.50	0.56	0.64	0.73	0.82
	30	0.44	0.44	0.45	0.44	0.46	0.61	0.84	0.71	0.79
	40	0.44	0.44	0.43	0.43	0.46	0.54	0.62	0.71	0.79
	50	0.44	0.45	0.43	0.43	0.46	0.54	0.62	0.73	0.79
	60	0.44	0.46	0.45	0.45	0.48	0.57	0.74	0.72	0.76
	70	0.44	0.46	0.44	0.44	0.45	0.51	0.57	0.66	0.72
	80	0.44	0.45	0.43	0.43	0.46	0.50	0.56	0.62	0.68
	90	0.44	0.45	0.43	0.44	0.46	0.47	0.52	0.60	0.67
	100	0.44	0.45	0.43	0.44	0.46	0.49	0.53	0.59	0.64
	110	0.44	0.44	0.44	0.44	0.45	0.47	0.50	0.54	0.58
	120	0.44	0.44	0.44	0.45	0.46	0.48	0.51	0.55	0.58
	130	0.44	0.44	0.45	0.44	0.45	0.49	0.52	0.56	0.62
	140	0.44	0.45	0.46	0.48	0.50	0.53	0.57	0.60	0.62
	150	0.44	0.45	0.46	0.48	0.51	0.54	0.57	0.60	0.62
	160	0.44	0.45	0.46	0.49	0.52	0.55	0.58	0.61	0.63
	170	0.44	0.45	0.46	0.49	0.52	0.55	0.58	0.61	0.63
	180	0.44	0.45	0.46	0.49	0.52	0.56	0.59	0.61	0.63

Skv type 6

	z _s									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
us-Ha	0	0.61	0.64	0.63	0.63	0.67	0.79	1.04	1.01	1.06
	10	0.61	0.63	0.61	0.60	0.64	0.73	0.82	0.97	1.04
	20	0.61	0.62	0.60	0.61	0.67	0.73	0.82	0.92	1.00
	30	0.61	0.61	0.62	0.62	0.64	0.78	1.01	0.90	0.98
	40	0.61	0.61	0.61	0.62	0.66	0.72	0.80	0.90	1.02
	50	0.61	0.62	0.60	0.61	0.64	0.72	0.80	0.92	0.98
	60	0.61	0.63	0.62	0.62	0.66	0.74	0.91	0.92	0.96
	70	0.61	0.63	0.62	0.62	0.64	0.69	0.75	0.86	0.92
	80	0.61	0.63	0.61	0.62	0.65	0.69	0.75	0.82	0.88
	90	0.61	0.62	0.61	0.62	0.65	0.67	0.72	0.81	0.87
	100	0.61	0.62	0.62	0.63	0.65	0.68	0.73	0.79	0.84
	110	0.61	0.62	0.62	0.64	0.66	0.69	0.74	0.78	0.82
	120	0.61	0.62	0.63	0.65	0.67	0.71	0.75	0.78	0.82
	130	0.61	0.62	0.63	0.66	0.69	0.72	0.75	0.79	0.81
	140	0.61	0.62	0.64	0.66	0.69	0.73	0.76	0.79	0.82
	150	0.61	0.6							

数値積分に対する天空要素計算法の相対誤差

Skv type 7

	z ^s										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
0	0.51	0.61	0.53	0.46	0.54	0.80	1.43	1.22	1.27	1.28	
10	0.51	0.57	0.46	0.40	0.43	0.60	0.76	1.10	1.21	1.26	
20	0.51	0.52	0.44	0.42	0.53	0.61	0.77	0.96	1.11	1.21	
30	0.51	0.49	0.49	0.43	0.44	0.47	0.78	1.38	0.91	1.06	
40	0.51	0.50	0.45	0.44	0.53	0.59	0.73	0.94	1.09	1.17	
50	0.51	0.53	0.45	0.41	0.44	0.61	0.76	1.04	1.14	1.17	
60	0.51	0.57	0.51	0.47	0.53	0.72	1.17	1.06	1.12	1.13	
70	0.51	0.57	0.49	0.45	0.46	0.55	0.67	0.91	1.01	1.06	
80	0.51	0.55	0.47	0.45	0.51	0.56	0.68	0.81	0.94	1.01	
90	0.51	0.54	0.47	0.48	0.51	0.50	0.59	0.81	0.96	1.00	
100	0.51	0.53	0.49	0.50	0.53	0.55	0.64	0.77	0.89	0.93	
110	0.51	0.53	0.51	0.53	0.56	0.61	0.68	0.77	0.85	0.89	
120	0.51	0.53	0.53	0.55	0.60	0.65	0.72	0.79	0.84	0.87	
130	0.51	0.54	0.55	0.63	0.69	0.75	0.80	0.84	0.86		
140	0.51	0.54	0.56	0.61	0.66	0.72	0.77	0.82	0.85	0.87	
150	0.51	0.54	0.58	0.63	0.68	0.74	0.80	0.84	0.86	0.87	
160	0.51	0.54	0.59	0.64	0.70	0.76	0.81	0.85	0.87	0.88	
170	0.51	0.55	0.59	0.65	0.71	0.77	0.82	0.85	0.88	0.88	
180	0.51	0.55	0.59	0.65	0.71	0.77	0.82	0.86	0.88	0.88	

Skv type 9

	z ^s										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
0	1.14	1.14	1.13	1.13	1.18	1.18	1.28	1.33	1.55	1.62	1.64
10	1.14	1.14	1.12	1.12	1.15	1.23	1.33	1.51	1.60	1.63	
20	1.14	1.13	1.12	1.13	1.17	1.23	1.33	1.45	1.55	1.61	
30	1.14	1.13	1.13	1.13	1.16	1.28	1.51	1.43	1.53	1.59	
40	1.14	1.13	1.12	1.13	1.18	1.23	1.32	1.44	1.54	1.59	
50	1.14	1.14	1.13	1.13	1.16	1.24	1.33	1.47	1.55	1.58	
60	1.14	1.14	1.14	1.15	1.18	1.27	1.44	1.47	1.53	1.56	
70	1.14	1.15	1.14	1.15	1.18	1.23	1.30	1.42	1.49	1.52	
80	1.14	1.15	1.14	1.15	1.19	1.24	1.31	1.38	1.46	1.49	
90	1.14	1.15	1.14	1.16	1.20	1.23	1.29	1.38	1.46	1.48	
100	1.14	1.15	1.15	1.17	1.21	1.24	1.30	1.37	1.42	1.45	
110	1.14	1.15	1.16	1.18	1.22	1.26	1.31	1.36	1.40	1.43	
120	1.14	1.15	1.17	1.20	1.23	1.27	1.32	1.36	1.39	1.41	
130	1.14	1.16	1.18	1.21	1.25	1.29	1.33	1.36	1.38	1.40	
140	1.14	1.16	1.18	1.21	1.24	1.28	1.32	1.36	1.39	1.40	
150	1.14	1.16	1.19	1.22	1.26	1.30	1.34	1.36	1.39	1.40	
160	1.14	1.16	1.19	1.23	1.27	1.31	1.34	1.37	1.39	1.40	
170	1.14	1.16	1.19	1.23	1.27	1.31	1.34	1.37	1.39	1.40	
180	1.14	1.16	1.19	1.23	1.27	1.31	1.34	1.37	1.39	1.40	

Skv type 11

	z ^s										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
0	0.88	0.98	0.85	0.76	0.84	1.19	2.20	1.96	2.06	2.07	
10	0.88	0.93	0.77	0.67	0.69	0.92	1.15	1.75	1.94	2.02	
20	0.88	0.86	0.75	0.71	0.83	0.93	1.17	1.48	1.74	1.92	
30	0.88	0.83	0.81	0.72	0.72	1.18	2.15	1.41	1.65	1.87	
40	0.88	0.84	0.76	0.73	0.84	0.92	1.13	1.49	1.74	1.89	
50	0.88	0.89	0.77	0.70	0.74	0.96	1.19	1.71	1.88	1.94	
60	0.88	0.94	0.85	0.80	0.86	1.14	1.92	1.79	1.90	1.91	
70	0.88	0.94	0.84	0.78	0.79	0.92	1.09	1.54	1.72	1.80	
80	0.88	0.93	0.81	0.80	0.87	0.95	1.16	1.38	1.61	1.73	
90	0.88	0.92	0.83	0.85	0.89	0.87	1.02	1.44	1.73	1.77	
100	0.88	0.92	0.87	0.89	0.93	0.98	1.13	1.38	1.58	1.63	
110	0.88	0.92	0.91	0.94	1.00	1.08	1.21	1.37	1.49	1.54	
120	0.88	0.93	0.94	0.99	1.07	1.16	1.27	1.38	1.45	1.49	
130	0.88	0.93	0.97	1.04	1.13	1.22	1.31	1.39	1.45	1.47	
140	0.88	0.94	1.00	1.08	1.18	1.27	1.35	1.41	1.45	1.46	
150	0.88	0.95	1.02	1.11	1.21	1.30	1.38	1.43	1.46	1.46	
160	0.88	0.96	1.04	1.14	1.24	1.33	1.40	1.44	1.46	1.47	
170	0.88	0.96	1.05	1.15	1.25	1.34	1.41	1.45	1.47	1.47	
180	0.88	0.96	1.05	1.16	1.26	1.35	1.41	1.45	1.47	1.47	

Skv type 8

	z ^s										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
0	0.41	0.62	0.45	0.33	0.43	0.84	1.86	1.42	1.45	1.47	
10	0.41	0.54	0.34	0.20	0.23	0.50	0.71	1.22	1.36	1.43	
20	0.41	0.44	0.30	0.25	0.41	0.51	0.72	0.97	1.19	1.35	
30	0.41	0.38	0.39	0.27	0.25	0.81	1.79	0.90	1.11	1.30	
40	0.41	0.39	0.31	0.27	0.41	0.48	0.67	0.97	1.17	1.31	
50	0.41	0.46	0.30	0.21	0.25	0.51	0.72	1.16	1.29	1.33	
60	0.41	0.53	0.41	0.32	0.40	0.71	1.50	1.23	1.27	1.29	
70	0.41	0.53	0.37	0.28	0.28	0.41	0.57	0.96	1.11	1.19	
80	0.41	0.49	0.32	0.28	0.36	0.42	0.61	0.78	1.00	1.11	
90	0.41	0.47	0.32	0.31	0.35	0.29	0.41	0.80	1.07	1.12	
100	0.41	0.45	0.35	0.35	0.37	0.38	0.51	0.75	0.94	1.00	
110	0.41	0.45	0.39	0.39	0.43	0.48	0.60	0.75	0.87	0.92	
120	0.41	0.44	0.42	0.44	0.49	0.57	0.67	0.77	0.85	0.89	
130	0.41	0.45	0.45	0.49	0.55	0.64	0.72	0.80	0.86	0.88	
140	0.41	0.45	0.47	0.53	0.60	0.69	0.77	0.83	0.87	0.89	
150	0.41	0.45	0.49	0.56	0.64	0.73	0.80	0.85	0.89	0.90	
160	0.41	0.46	0.51	0.60	0.69	0.75	0.82	0.87	0.90	0.91	
170	0.41	0.46	0.52	0.60	0.69	0.77	0.84	0.88	0.91	0.91	
180	0.41	0.46	0.52	0.60	0.69	0.77	0.84	0.88	0.91	0.91	

Skv type 10

	z ^s										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
0	1.01	1.04	0.98	0.93	0.99	1.22	1.85	1.76	1.86	1.87	
10	1.01	1.02	0.94	0.89	0.91	1.07	1.24	1.63	1.79	1.84	
20	1.01	0.99	0.93	0.91	0.99	1.07	1.25	1.48	1.67	1.78	
30	1.01	0.97	0.96	0.92	0.93	1.22	1.80	1.43	1.61	1.75	
40	1.01	0.98	0.94	0.93	1.00	1.07	1.23	1.47	1.65	1.75	
50	1.01	1.01	0.95	0.92	0.95	1.09	1.26	1.59	1.73	1.73	
60	1.01	1.03	0.99	0.97	1.02	1.19	1.65	1.63	1.72	1.73	
70	1.01	1.04	0.99	0.97	0.99	1.08	1.21	1.48	1.61	1.66	
80	1.01	1.03	0.98	0.99	1.04	1.10	1.24	1.39	1.54	1.61	
90	1.01	1.03	1.00	1.02	1.05	1.07	1.18	1.41	1.58	1.61	
100	1.01	1.03	1.02	1.04	1.08	1.13	1.23	1.38	1.50	1.53	
110	1.01	1.04	1.04	1.07	1.12	1.18	1.27	1.37	1.45	1.48	
120	1.01	1.04	1.06	1.11	1.16	1.23	1.30	1.37	1.43	1.45	
130	1.01	1.05	1.08	1.14	1.20	1.26	1.33	1.38	1.42	1.44	
140	1.01	1.05	1.10	1.16	1.23	1.29	1.35	1.40	1.42	1.44	
150	1.01	1.06	1.11	1.18	1.25	1.31	1.37	1.41	1.43	1.44	
160	1.01	1.06	1.12	1.19	1.26	1.33	1.38	1.42	1.44	1.44	
170	1.01	1.07	1.13	1.20	1.27	1.34	1.39	1.42	1.44	1.44	
180	1.01	1.07	1.13	1.20	1.28	1.34	1.39	1.42	1.44	1.44	

Skv type 12

	z ^s										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
0	1.47	1.52	1.39	1.31	1.40	1.76	2.75	2.69	2.98	2.82	
10	1.47	1.49	1.32	1.23	1.27	1.52	1.80	2.48	2.84	2.76	
20	1.47	1.42	1.30	1.27	1.39	1.53	1.82	2.23	2.61	2.65	
30	1.47	1.39	1.37	1.29	1.30	1.76	2.71	2.15	2.51	2.60	
40	1.47	1.41	1.33	1.31	1.42	1.54	1.80	2.23	2.61	2.63	
50	1.47	1.46	1.34	1.29	1.34	1.57	1.85	2.45	2.77	2.69	
60	1.47	1.51	1.42	1.38	1.47	1.75	2.52	2.53	2.78	2.67	
70	1.47	1.51	1.43	1.39	1.42	1.57	1.79	2.29	2.57	2.56	
80	1.47	1.51	1.42	1.42	1.51	1.62	1.88	2.14	2.42	2.49	
90	1.47	1.51	1.45	1.48	1.55	1.58	1.77	2.21	2.54	2.55	
100	1.47	1.51	1.49	1.54	1.61	1.6					

数値積分に対する天空要素計算法の相対誤差

Skv type 13

	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	1.32	1.40	1.24	1.14	1.26	1.70	2.88	2.79	3.12	2.94
10	1.32	1.35	1.15	1.05	1.10	1.41	1.75	2.55	2.96	2.87
20	1.32	1.27	1.13	1.09	1.25	1.42	1.76	2.24	2.69	2.74
30	1.32	1.23	1.21	1.11	1.13	1.70	2.83	2.16	2.58	2.68
40	1.32	1.25	1.15	1.13	1.27	1.42	1.73	2.25	2.69	2.73
50	1.32	1.31	1.16	1.10	1.17	1.46	1.80	2.52	2.91	2.81
60	1.32	1.38	1.27	1.21	1.31	1.67	2.63	2.63	2.94	2.80
70	1.32	1.39	1.26	1.20	1.24	1.43	1.70	2.33	2.69	2.68
80	1.32	1.37	1.24	1.23	1.34	1.48	1.80	2.14	2.51	2.61
90	1.32	1.37	1.27	1.30	1.37	1.39	1.63	2.24	2.70	2.72
100	1.32	1.37	1.32	1.36	1.43	1.52	1.76	2.14	2.45	2.52
110	1.32	1.38	1.38	1.43	1.52	1.65	1.85	2.09	2.28	2.35
120	1.32	1.39	1.43	1.51	1.61	1.75	1.91	2.07	2.19	2.25
130	1.32	1.41	1.47	1.57	1.69	1.83	1.96	2.07	2.15	2.19
140	1.32	1.42	1.51	1.63	1.76	1.88	2.00	2.08	2.14	2.17
150	1.32	1.43	1.54	1.67	1.81	1.93	2.02	2.10	2.14	2.16
160	1.32	1.44	1.57	1.70	1.84	1.95	2.04	2.11	2.14	2.16
170	1.32	1.45	1.58	1.72	1.86	1.97	2.06	2.11	2.15	2.16
180	1.32	1.45	1.59	1.73	1.86	1.98	2.06	2.12	2.15	2.16

Skv type 14

	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.81	0.88	0.92	0.88	1.01	1.40	2.38	2.24	2.34	0.88
10	0.81	0.93	0.84	0.80	0.88	1.15	1.41	2.02	2.16	0.81
20	0.81	0.86	0.81	0.83	1.00	1.15	1.42	1.75	1.85	0.78
30	0.81	0.82	0.87	0.84	0.89	1.37	2.33	1.66	1.72	0.73
40	0.81	0.83	0.81	0.84	0.89	1.12	1.37	1.73	1.86	0.82
50	0.81	0.87	0.80	0.79	0.88	1.13	1.40	1.95	2.10	0.87
60	0.81	0.91	0.86	0.85	0.86	1.28	2.08	2.03	2.13	1.04
70	0.81	0.90	0.83	0.81	0.86	1.03	1.24	1.72	1.84	1.04
80	0.81	0.87	0.78	0.79	0.89	1.01	1.26	1.49	1.61	1.14
90	0.81	0.85	0.77	0.80	0.86	0.87	1.05	1.51	1.78	1.48
100	0.81	0.84	0.78	0.80	0.84	0.89	1.06	1.33	1.48	1.38
110	0.81	0.83	0.79	0.80	0.84	0.91	1.04	1.20	1.28	1.26
120	0.81	0.82	0.80	0.81	0.85	0.92	1.01	1.11	1.16	1.17
130	0.81	0.82	0.80	0.81	0.85	0.91	0.88	1.05	1.10	1.12
140	0.81	0.81	0.80	0.82	0.86	0.91	0.86	1.02	1.06	1.09
150	0.81	0.81	0.81	0.82	0.85	0.90	0.95	1.00	1.04	1.07
160	0.81	0.81	0.81	0.82	0.85	0.89	0.94	0.98	1.03	1.06
170	0.81	0.81	0.81	0.82	0.85	0.89	0.93	0.98	1.02	1.06
180	0.81	0.81	0.81	0.82	0.85	0.89	0.93	0.98	1.02	1.06

Skv type 15

	zs									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.78	0.97	0.90	0.88	1.03	1.43	2.41	2.28	2.37	1.00
10	0.78	0.91	0.82	0.79	0.89	1.18	1.46	2.06	2.19	0.83
20	0.78	0.84	0.79	0.83	1.02	1.19	1.47	1.79	1.89	0.80
30	0.78	0.80	0.85	0.83	0.90	1.41	2.37	1.71	1.77	0.75
40	0.78	0.80	0.79	0.83	1.00	1.15	1.42	1.79	1.90	0.84
50	0.78	0.85	0.78	0.78	0.88	1.17	1.45	2.02	2.16	0.88
60	0.78	0.90	0.84	0.84	0.97	1.32	2.16	2.11	2.21	1.06
70	0.78	0.89	0.81	0.79	0.86	1.06	1.30	1.81	1.94	1.06
80	0.78	0.86	0.75	0.77	0.89	1.03	1.33	1.58	1.72	1.17
90	0.78	0.83	0.74	0.77	0.84	0.87	1.09	1.63	1.96	1.59
100	0.78	0.81	0.74	0.77	0.82	0.89	1.11	1.44	1.64	1.50
110	0.78	0.80	0.75	0.77	0.82	0.91	1.09	1.29	1.40	1.35
120	0.78	0.79	0.76	0.78	0.83	0.92	1.05	1.18	1.25	1.24
130	0.78	0.79	0.77	0.79	0.84	0.92	1.01	1.10	1.15	1.15
140	0.78	0.78	0.78	0.80	0.85	0.91	0.98	1.04	1.09	1.10
150	0.78	0.78	0.78	0.81	0.85	0.91	0.96	1.01	1.05	1.07
160	0.78	0.78	0.79	0.81	0.85	0.90	0.95	0.99	1.03	1.05
170	0.78	0.78	0.79	0.82	0.85	0.90	0.94	0.98	1.02	1.05
180	0.78	0.78	0.79	0.82	0.85	0.90	0.94	0.98	1.02	1.04

Appendix-7

日射，天空輝度分布， 天空放射輝度分布に関する各種のモデル

直散分離手法，斜面日射モデル，天空放射輝度分布モデル，天空輝度分布モデルの代表的なものを，本文中で引用したモデルを参考のために列記する．

1. 直散分離手法

本研究では，直散分離モデルは用いず，水平面全天日射量，法線面直達日射量，水平面天空日射量の測定値を用いた．しかし水平面全天日射量のみ測定している地点が一般的であるため，そのような地点に，本研究で示した天空タイプ推定手法，天空放射輝度分布を考慮した熱負荷計算法を適用する際には，直散分離を施す．4章「天空タイプ推定手法の開発」において，水平面全天日射量，法線面直達日射量測定値により，天空タイプを推定する手法を示した．この天空タイプ推定手法を用いるにあたっては，水平面全天日射量のみ測定している地点については，直散分離モデルを用いて，水平面全天日射量測定値から法線面直達日射量を推定する必要がある．また5章「天空放射輝度分布を考慮した熱負荷計算法」において示したように，天空放射輝度分布を考慮した熱負荷計算の際，任意方位・傾斜角の壁面に入射する天空日射量を求めるには，まず天空タイプを推定し，次に天頂放射輝度に対する壁面相对天空日射量を水平面及び，任意の傾斜面それぞれについて求め，傾斜面相对天空日射量を水平面相对天空日射量で除したものに，水平面天空日射量を乗じる（図 5.12 参照）．このため水平面天空日射量が必要になる．そこで，天空タイプ推定手法と同様に水平面全天日射量のみ測定している地点については，直散分離モデルを用いて，水平面全天日射量測定値から法線面直達日射量を推定する必要がある．

以下に，水平面全天日射量 E_{eg} を，天空日射量 E_{ed} と直達日射量 E_{es} とに分離する際に用いる，直散分離モデルの代表的なものを示す．

赤坂らは Erbs モデル，Watanabe モデル，Udagawa モデル，Nagata モデル，Perez モデルについて，水平面全天日射量，法線面直達日射量の測定を行っている 14 のアメダス観測地点の 1990 から 1996 のデータを用いて比較を行っている．その結果として，Erbs モデル，Perez モデルで RMSE，MBE が小さくなると報告している^{a-1)}．

1) Berlage モデル

天空を等輝度拡散面として，快晴日の水平面日射量測定値より導いたもので，太陽定数（大気圏外法線面日射量）と大気透過率から水平面天空日射量を求めるモデルである．

$$E_{ed} = \frac{1}{2} J_o \sin h \frac{1 - P \sin h}{1 - 1.4 \ln P} \quad (\text{a-1})$$

2) Bouguer モデル

太陽定数 J_0 , 大気透過率 P , 太陽高度 h を用いて , 水平面全天日射量 E_g から法線面直達日射量 E_{es} を推定するもので , Berlage モデルとともに , 熱負荷計算シミュレーション HASP/ACLD 用の標準気象データを開発する際に用いられていた . しかし Nagata により , 計算値は法線面直達日射量の観測値より小さくなる傾向があることが示された .

$$E_{es} = J_0 P^{\frac{1}{\sin h}} \quad (\text{a-2})$$

3) Nagata モデル^{a-2),a-3)}

Nagata は Berlage モデルによる計算値が観測値より小さくなることから , Berlage モデルを使用することに疑問を呈し , 福井大学における日射量観測値を用いて , 時別の大気透過率と太陽高度から水平面天空日射量の推定モデルを開発した . このモデルは快晴時を前提にしており , 曇天時への適用に問題が残る . 旭川以降の標準気象データの開発においては , Berlage 式にかわりこの永田モデルが用いられている .

$$E_{ed} = J_0(0.66 - 0.32 \sin h) \times \{0.5 + (0.4 - 0.3P) \sin h\} \sin h \frac{1}{(1 - P^{\sin h})} \quad (\text{a-3})$$

4) Udagawa モデル^{a-4)}

Nagata モデルが快晴時を前提にしており , 曇天時への適用に問題が残ることから , Udagawa は館野高層気象台の日射量観測値より , 晴天 , 曇天にかかわらず法線面直達日射量を推定する以下のモデルを開発した .

$$K_c = (0.5163 + 0.333 \sin h + 0.00803 \sin^2 h) J_0 \sin h \quad (\text{a-4})$$

$$E_{eg} < K_c$$

$$E_{es} = J_0 (2.277 - 1.258 \sin h + 0.2396 \sin^2 h) K_t^3 \quad (\text{a-5})$$

$$E_{eg} \geq K_c$$

$$E_{es} = J_0 (-0.43 + 1.43 K_t) \quad (\text{a-6})$$

ここで ,

$$K_t = \frac{E_{eg}}{J_0 \sin h} \quad (\text{a-7})$$

5) Erbs モデル^{a-5)}

晴天，曇天にかかわらず水平面天空日射量を推定するモデルである．アメリカ5都市の水平面全天日射量，水平面天空日射量の観測値を回帰することでモデル化している．

$$K_t \leq 0.22$$

$$E_{ed} = E_{eg}(1 - 0.09K_t) \quad (a-8)$$

$$0.22 < K_t < 0.80$$

$$E_{ed} = E_{eg}(0.9511 - 0.1604K_t + 4.388K_t^2 - 16.638K_t^3 - 12.336K_t^4) \quad (a-9)$$

$$K_t \geq 0.80$$

$$E_{ed} = 0.165E_{eg} \quad (a-10)$$

6) Watanabe モデル^{a-6)}

Erbs モデル同様，晴天，曇天にかかわらず水平面天空日射量を推定するモデルである．

$$E_{ed} = J_o \sin h \frac{Q}{1+Q} \quad (a-11)$$

$$Q = (0.8672 + 0.7505 \sin h) P^{0.421m} (1 - P^m)^{2.277} \quad (a-12)$$

7) Perez モデル^{a-7)}

Perez は晴天，曇天にかかわらず，水平面全天日射量と露点温度から法線面直達日射量を推定するモデルを開発した．ヨーロッパ，アメリカの15都市における水平面全天日射量，法線面直達日射量の観測値を用いてモデル化を行った．赤坂らによれば，このモデルはErbs モデルとならんで，精度良く法線面直達日射量を推定するモデルであるが，露点温度が必要であったり，同定した係数 X が膨大であるなど，やや利便性に欠ける．

$$E_{es} = J_o [K_{nc} - \{A + B \exp(m_r C)\}] X(K'_t, Z, W, \Delta K'_t) \quad (a-13)$$

$$K_{nc} = 0.866 - 0.122m_r + 0.0121m_r^2 - 0.000653m_r^3 + 0.000014m_r^4 \quad (a-14)$$

$$K_t \leq 0.6$$

$$A = 0.512 - 1.560K_t + 2.286K_t^2 - 2.222K_t^3 \quad (a-15)$$

$$B = 0.370 + 0.962K_t \quad (a-16)$$

$$C = -0.280 + 0.932K_t + -0.2048K_t^2 \quad (a-17)$$

$$K_t > 0.6$$

$$A = -5.743 + 21.77K_t - 27.49K_t^2 + 11.56K_t^3 \quad (a-18)$$

$$B = 41.40 - 118.5K_t + 66.05K_t^2 + 31.90K_t^3 \quad (a-19)$$

$$C = -47.01 + 184.2K_t - 222.0K_t^2 + 73.81K_t^3 \quad (a-20)$$

$$K'_t = \frac{K_t}{\left\{1.031 \exp\left[-1.4/(0.9 + 9.4/m_r)\right] + 0.1\right\}} \quad (\text{a.21})$$

$$\Delta K'_t = 0.5 \left(\left| \Delta K'_{t_i} - \Delta K'_{t_{i+1}} \right| + \left| \Delta K'_{t_i} - \Delta K'_{t_{i-1}} \right| \right) \quad (\text{a.22})$$

$$W = \exp(0.07T_d - 0.075) \quad (\text{a.23})$$

$$m_r = \frac{1.0}{\sin h + 0.15(93.885 - Z_d)^{-1.253}} \quad (\text{a.24})$$

以上、代表的な直散分離モデルを示した。

水平面全天日射量のみ測定している地点に、本研究で示した天空タイプ推定手法、天空放射輝度分布を考慮した熱負荷計算法を適用するには、曇天から晴天までの天空状態を表す天空タイプを推定する必要があるため、曇天、晴天の別なく推定することが可能なモデルである、Erbs モデル、Watanabe モデル、Udagawa モデル、Perez モデルのいずれかを使用すべきであり、その中でも、赤坂らが示したように精度良く法線面直達日射量をするモデルで、必要となる気象要素にも特別なものが不要でない、Erbs モデルを使用するのが良いと考える。

2. 斜面日射モデル *Slope Irradiance model*

水平面全天日射量を天空日射量と直達日射量とに分離した後、斜面日射量の天空日射成分を求める際に用いるモデルである。従来は天空の輝度分布が一様であると仮定して、斜面天空日射が水平面天空日射に占める比率(F)をその壁面から見た天空の形態係数で与える一様分布モデルが一般的であった。しかし、より詳細に壁面入射日射量を求めるためには、天空の放射輝度分布を考慮する必要がある。このため、天空の放射輝度分布を考慮した斜面日射量の推定手法である斜面日射モデルが開発・提案されている。斜面日射モデルは、日射量を受ける壁面側でモデル化したもので、天空日射量を太陽近傍、地平線部分、一様部分などの日射成分に分け、任意の方位・傾斜角の斜面に入射する天空日射の日射成分それぞれの、天空日射量全体に対する割合を決定し、任意方位・傾斜角の壁面に入射する日射量の総量を推定するもので、天空の放射輝度分布を詳細にモデル化したものではない。天空放射輝度分布モデルのように、天球上の任意点の放射輝度を予測する為のものではないので、周辺建物等の遮蔽物を考慮する場合など、現実との誤差が大きくなる問題がある。本研究では、このような斜面日射モデルの問題を克服するものとして天空放射輝度分布モデルを捉え、天空放射輝度分布モデルを熱負荷計算や壁面日射量計算といったシミュレーションに適用する手法の検討を行った。

斜面日射モデルの代表的なものを以下に示す。

1) 一様分布モデル

天空が等輝度発散面であると仮定したモデル。従来の熱環境シミュレーションで一般的に使用されている。このモデルは、太陽位置にかかわらず壁面のどの方位についても天空日射量が同じである。このため、例えば天空放射輝度分布を考慮した場合には、太陽高度が低い冬季では北面の受ける天空日射量が小さくなるが、このモデルでは方位によらず壁面天空日射量が一樣になり、北面に入射する天空日射量を大きく推定してしまう。結果として北面の暖房負荷を小さく求めることになるなどの問題がある。

$$F = \frac{1 + \cos b}{2} \quad (\text{a-25})$$

2) Hay モデル^{a-8)}

天空日射量を、分布が一様な天空日射量と、太陽光球周辺の高輝度天空からの日射成分である準直達日射量とに分けるモデルである。この工夫により、太陽周辺の高輝度部分の影響を考慮できるが、準直達日射量の範囲を与えてはいず、太陽光球周辺の高輝度天空をどの程度の範囲とするかという問題が残る。

$$F = (1 - A_I) \left(\frac{1 + \cos b}{2} \right) + A_I R_b \quad (\text{a-26})$$

$$A_I = \frac{E_{es}}{J_o} \quad (\text{a-27})$$

$$R_b = \frac{\cos i}{\sin h} \quad (\text{a-28})$$

3) Reindl モデル^{a-9)}

Hay モデルに、地平線付近からの天空日射量を加えたモデルである。

Hay モデルのモデル式で明らかのように、地平線付近からの天空日射量や、太陽光球周辺の高輝度天空がどの程度の範囲であるかという情報は含まれて要らず、遮蔽物のあるような場合、地平線付近からの天空日射量や、太陽光球周辺の高輝度天空の日射成分がどの程度遮蔽されるのか判断できないため、高輝度天空の範囲を仮定したり、太陽位置とするなどする必要があり正確ではない。

$$F = (1 - A_I) \left(\frac{1 + \cos b}{2} \right) \left(1 + f \sin^3 \frac{b}{2} \right) + A_I R_b \quad (\text{a-29})$$

ここで、 A_I, R_b は Hay モデルと同様である。

$$f = \sqrt{\frac{J_o \sin h}{E_{eg}}} \quad (\text{a-30})$$

4) Perez モデル^{a-10)}

天空日射量を、分布が一様な天空日射量、太陽光球周辺の高輝度天空からの日射成分である準直

達日射量、地平線付近からの天空日射量という3つの成分に分け *Atomospheric clearness parameter* , *Atomospheric brightness parameter* の二つの指標で決定される8種類の大気の状態別に天空日射量に占める各成分の割合を与えるモデルである。このモデルは建築熱環境シミュレーションソフトウェア ESP-r^{a-11)} に組み込まれている。

$$F = (1 - F_1) \left(\frac{1 + \cos b}{2} \right) + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin b \quad (\text{a-31})$$

ここで、

$$a = \max(0, \cos i) \quad (\text{a-32})$$

$$b = \max(0.087, \cos Z) \quad (\text{a-33})$$

$$F_1 = F_{11}(e) + F_{12}(e)\Delta + F_{13}(e)Z \quad (\text{a-34})$$

$$F_2 = F_{21}(e) + F_{22}(e)\Delta + F_{23}(e)Z \quad (\text{a-35})$$

ここで、 e : *Atomospheric clearness parameter*

Δ : *Atomospheric brightness parameter*

パラメータ $F_{11}, F_{12}, F_{13}, F_{21}, F_{22}, F_{23}$ を表 Ap.7.1 に示す。

$$e = [(E_{ed} + E_{es}) / E_{ed} + 1.041Z^3] / [1 + 1.041Z^3] \quad (\text{a-36})$$

$$\Delta = E_{ed} \cdot m_r / J_o \quad (\text{a-37})$$

ここで m_r は標高 H_t [m] , 天頂角 Z [°] から決定される

$$m_r = (1 - 0.0001H_t) / [\sin h + 0.15(93.885 - Z)^{-1.253}] \quad (\text{a-38})$$

表 Ap.7.1 Perez モデルのパラメータ

	F11	F12	F13	F21	F22	F23
1.000 ~ 1.065	-0.008	0.588	-0.062	-0.060	0.072	-0.022
1.065 ~ 1.230	0.130	0.683	-0.151	-0.019	0.066	-0.029
1.230 ~ 1.500	0.330	0.487	-0.221	0.055	-0.064	-0.026
1.500 ~ 1.950	0.568	0.187	-0.295	0.109	-0.152	-0.014
1.950 ~ 2.800	0.873	-0.392	-0.362	0.226	-0.462	0.001
2.800 ~ 4.500	1.132	-1.237	-0.412	0.288	-0.823	0.056
4.500 ~ 6.200	1.060	-1.600	-0.359	0.264	-1.127	0.131
6.200 ~ -	0.678	-0.327	-0.250	0.156	-1.377	0.251

5) Akasaka モデル^{a-12)}

天空日射量を、分布が一様な天空日射量、準直達日射量の2つの日射成分に分けるモデル。太陽からの角距離を θ , 直達日射計の半開口角を θ_0 として準直達日射は以下の I_c で表される。曾我ら^{a-10)} は 2.5° から 25° を準直達域として他のモデルとの比較を行っている。

$$F = (1 - A_c) \left(\frac{1 + \cos b}{2} \right) + A_c R_b \quad (\text{a-39})$$

ここで、 R_b は Hay モデルと同様である。

$$A_c = I_c(\mathbf{q}_o, \mathbf{q}) / E_{ed} \quad (\text{a-40})$$

$$I_c(\mathbf{q}_o, \mathbf{q}) = J_o \cdot \sin h(1 - P^m) \left[0.3 \sqrt{\mathbf{q} - \mathbf{q}_o} \sin h P^{4/3} \times (1 - P)^{\{1/(1.13 - 0.75 \sin h)\}} \right] \quad (\text{a-41})$$

$$\mathbf{q}_o > 4^\circ$$

$$I_c(\mathbf{q}_o, \mathbf{q}) = I_c(4, \mathbf{q}) - I_c(4, \mathbf{q}_o) \quad (\text{a-42})$$

$$2^\circ < \mathbf{q}_o < 4^\circ$$

$$I_c(\mathbf{q}_o, \mathbf{q}) = I_c(4, \mathbf{q}) + (4 - \mathbf{q}_o) I_c(4, 5) \quad (\text{a-43})$$

6) Skartveit モデル^{a-13)}

Hay モデルを修正し、天空日射量を分布が一様な天空日射量、準直達日射量、天頂からの天空日射、地平線付近の障害物に遮蔽される天空日射量に分けるモデル。

$$F = A_I R_b + Z \cos \mathbf{b} + (1 - A_I - Z_f) \cos^2 \frac{\mathbf{b}}{2} - \sum_j \frac{(1 - A_I - Z_f)}{p} \mathbf{w}_j \cos i_j \quad (\text{a-44})$$

$$Z_f = 0.3 - 2A_I \quad (\text{a-45})$$

以上、代表的な斜面日射モデルを示した。

斜面日射モデルは天空日射量を、分布が一様な天空日射量、準直達日射量、地平線近傍からの日射といった成分に分け、それぞれの比率を決定し、壁面に入射する日射量を予測するモデルである。天球上の任意の地点の放射輝度を予測するわけではないので、周辺建物等の遮蔽物を考慮する場合など、誤差が大きくなることが考えられる。

3. 天空輝度分布・放射輝度分布モデル

3.1 天空輝度分布モデル

昼光照明シミュレーションに利用することを目的として、古くから天空輝度分布のモデル化が行われてきた。1955年に Moon, P, Spencer, D.E の提案による曇天空のモデル、1973年の Kittler, R. の提案による晴天空モデルが、それぞれ CIE (国際照明委員会) により CIE 標準となった。それ以後、晴天空と曇天空の間の中間天空の輝度分布の標準を規定すべく、各種モデルが提案されたが、2003年に Kittler, R., Perez, R. が提案する晴天から曇天空を 15 に分類する相対天空輝度分布モデルが CIE 標準一般天空として採用されることとなり、天空輝度分布のモデル化は一応の結論をみた。

この Kittler, R. らのモデルは輝度階調関数と散乱関数という二つの関数をそれぞれ 6 つのグループに分け、それらを組み合わせることで、晴天空から曇天空までの 15 の天空タイプを定め、天頂輝度に対する任意の天空位置の相対天空輝度を表すモデルである。このモデルはどのようにして天空状

態を決定するののかという問題が解決しておらず、現在もこの方法に関する研究^{例えばa-14), a-15), a-16)}が行われている。しかし性状の異なる分布を表す関数(輝度階調関数, 散乱関数)の組み合わせでモデル化する手法は, CIE標準晴天モデルを構成する2つの関数から発展したもので、現在のところ、分布を表す最適なモデルとされている。それゆえ All sky model-Lなども、このような性状の異なる分布を表す関数の組み合わせにより輝度分布をモデル化している。

1) CIE 標準曇天空^{a-17)}

1955年に Moon, P, Spencer, D.E により提案された曇天空のモデルである。CIE 標準曇天空の輝度は、任意の天空位置の高度 h_o , その輝度 L_o , 天頂輝度 L_Z として次式で表される。全ての天空位置の輝度はその高度のみに依存し、天空の方位、太陽高度、太陽方位には関与しない。

$$\frac{L_o}{L_Z} = \frac{1 + 2 \sin h_o}{3} \quad (\text{a-46})$$

ここで、

$$L_Z = 9 \times (300 + 21000 \sin h) \quad (\text{a-47})$$

2) CIE 標準晴天^{a-18)}

1973年の Kittler, R. の提案によるモデルである。 $f(c)$, $j(Z)$ という性状の異なる2つの関数の積でモデル化されている。CIE 標準晴天の輝度は、その天空位置の天頂角 Z と方位、太陽の天頂角 Z_s と太陽方位 c の関数として表されており、天頂輝度 L_z をかけることで、任意の天空位置の輝度を求めることができる。

$$L(Z_s, Z, c) = L_z \frac{f(c)j(Z)}{f(Z_s)j(0)} \quad (\text{a-48})$$

ここで、

$$L_z = (300 + 3000 \tan Z_s) \quad (\text{a-49})$$

$$j(Z) = 1 - \exp(-0.32 / \sin Z) \quad (\text{a-50})$$

$$f(c) = 0.91 + 10 \exp(-3c) - \exp\left(d \frac{P}{2}\right) + 0.45 \cdot \cos^2 c \quad (\text{a-51})$$

は、太陽と天空位置の角距離を表し、次式で求まる。

$$c = \arccos(\cos Z_s \cdot \cos Z + \sin Z_s \cdot \sin Z \cdot \cos |a - a_s|) \quad (\text{a-52})$$

3) 中村の中間天空^{a-19)}

中村らは、晴天と曇天空の中間の天空(中間天空)の輝度分布を、太陽高度、天空位置の高度、天空位置と太陽との角距離をパラメータとして以下のように、天頂輝度に対する相対輝度のモデルとして提案している。このモデルは晴天と曇天空の中間の天空であり、これと晴天、曇天空モデルを組み合わせても、天空の状態を大まかに3つに分類したことのみであり、天空状態が連続に変化するモデルある All sky model-L や、天空状態15の天空で表す CIE 標準一般天空などと比べ、詳細な検討を行うことはできない。

$$L(h, h', c) = \frac{l(h, h', c)}{l(h, p/2, p/2 - h)} \quad (\text{a-53})$$

ここで,

$$l(h, h', c) = a(h, h') \cdot \exp\{b(h, h') \cdot c\} \quad (\text{a-54})$$

$$a(h, h') = 0.43 \left[h' + 0.4799 + 1.35 \{ \sin(3.59h' - 0.009) + 2.31 \} \times \sin(2.6h + 0.316) \right] \quad (\text{a-55})$$

$$b(h, h') = -0.563(h + 1.056)(h' - 0.008 + 0.812) \quad (\text{a-56})$$

$$l(h, p/2, p/2 - h) = 0.988 \{ \sin(2.60h + 0.316) + 2.772 \} \cdot \exp\{1.481(h + 0.301)(h - 1.571)\} \quad (\text{a-57})$$

中村らのモデルは天頂輝度に対する任意天空位置の相対輝度のモデルであり, 下式でモデル化した中間天空の天頂輝度をかければ, 相対天空輝度分布から, 絶対値で表す天空輝度分布を求めることができる。

$$L_z(h) = 9.90 \cdot \sin^{1.68} h + 3.01 \cdot \tan^{1.18}(0.846 \cdot h) + 0.112 \quad (\text{a-58})$$

4) Littlefair モデル^{a-20)}

Littlefair, P., J. は, Wegener, J. がベルリンで測定した天空輝度分布をもとに, 直射日光, 太陽周辺光, 天空光の成分に関する太陽高度の関数として天空輝度分布をモデル化した。一般的に天空輝度分布モデルは直射日光を含めずモデル化されているが, 本モデルは直射日光も含めた天空輝度分布のモデルである。

熱負荷計算等の熱シミュレーションでは, 直達日射と天空日射量を分離する必要があるが, このモデルは上記のように直射成分も含めたモデルであるため, 熱シミュレーションに用いるには適切でない。

$$L(h, h', c) = a \cdot \exp(-c/40) + d \cdot (5 - 2 \sin h') / 3 \quad (\text{a-59})$$

ここで,

$$a = 0.1 + 0.42h - 0.7 \cdot \sin(7.2 \cdot h) \quad (\text{a-60})$$

$$d = \left\{ (9/11) \cdot p \right\} \left(0.3 + 0.434h - 0.00424h^2 \right) \quad (\text{a-61})$$

5) Homogeneous Sky^{a-21)}

Kittler, R. は, CIE 標準晴天空から CIE 標準曇天空へと天空が均等に混濁してゆくものとして, 混濁因子を指標に用い, CIE 標準晴天空, CIE 標準曇天空の間の天空輝度分布をモデル化した。このモデルはこれまでの晴天空モデル, 曇天空モデル, 中間天空モデルのように特徴的な特定の天空状態のモデルでは異なり, 混濁因子により天空状態が晴天空から曇天空へと連測的に変化するものとしてモデル化されている。

$$L(h, h', \mathbf{c}) = \frac{Co}{m_s} \left[\frac{G(h, \mathbf{r})}{Z} + \frac{A-B}{m_s - m_r} \{m_s \cdot m_r \cdot f(\mathbf{c}) - X - 3\} - 2(A+B) \right] \quad (\text{a-62})$$

ここで,

$$Co = \frac{3}{16p} Evo \quad (\text{a-63})$$

$$G(h, \mathbf{r}) = 0.8 + r^3 + 1.64(1 - 0.7r^3) \cdot \sin h' + (1 - r)(1 - 1.5 \sin h') \cdot A \quad (\text{a-64})$$

$$A = \exp(-a_{vR} \cdot m_r \cdot T_{vL}) \quad (\text{a-65})$$

$$B = \exp(-a_{vR} \cdot m_s \cdot T_{vL}) \quad (\text{a-66})$$

$$Z = 1 + T_{vL}(0.075 - 0.025X)(1 - r) \quad (\text{a-67})$$

$$X = 0.115375N \quad (1.52)$$

$$f(\mathbf{c}) = 1 + N \{ \exp(-3\mathbf{c}) - 0.009 \} + M \cos^2 \mathbf{c} \quad (\text{a-68})$$

$$N = 4.3T_{vL}^{1.9} \cdot \exp(-0.35T_{vL}) \quad (\text{a-69})$$

$$M = 0.71/T_{vL}^{0.5} \quad (\text{a-70})$$

6) Perraudau モデル^{a-22)}

Perraudau, M. は *Cloud ratio* を用いて *Nebulosity index* を定義し, これをもとに, 天空状態を5つに分類し, それぞれの天空輝度分布を表すモデルを提案している. Homogeneous Sky のように天空状態を連測的に変化するものとしてモデル化されていないが, 従来の中間天空をより細かく分類しモデル化を行ったものである.

Nebulosity index:

$$I_N = \frac{1 - Ce_M}{1 - Ce_T} \quad (\text{a-71})$$

$$0.00 < I_N < 0.05 \quad : \quad \text{Overcast sky}$$

$$0.05 < I_N < 0.20 \quad : \quad \text{Intermediate overcast sky}$$

$$0.20 < I_N < 0.70 \quad : \quad \text{Intermediate mean sky}$$

$$0.70 < I_N < 0.90 \quad : \quad \text{Intermediate blue sky}$$

$$0.90 < I_N < 1.00 \quad : \quad \text{Blue sky}$$

天空輝度分布は以下式で表され, $f(x), g(h'), h(Z_s)$ を決定する係数 $a_{1-3}, b_{1-3}, c_{1-3}$ は天空状態ごとに与えられる (表 Ap.7.2).

$$L(\mathbf{c}, h', Z_s) = Eed \cdot f(\mathbf{c}) \cdot g(h') \cdot h(Z_s) \quad (\text{a-72})$$

$$f(\mathbf{c}) = a_1 + b_1 \exp(-3\mathbf{c}) + c_1 \cos^2 \mathbf{c} \quad (\text{a-73})$$

$$g(h') = a_2 - b_2 \cos^{0.6} h' \quad (\text{a-74})$$

$$h(Z_s) = a_3 + b_3 \cos Z_s + c_3 \sin Z_s \quad (\text{a-75})$$

表Ap.7.2 Perraudauモデルのパラメータ

	<i>a1</i>	<i>b1</i>	<i>c1</i>	<i>a2</i>	<i>b2</i>	<i>a3</i>	<i>b3</i>	<i>c3</i>
overcast sky	32.33	13.16	3.24	1.18	0.28	0.76	0.13	0.20
intemediate overcast sky	17.82	23.99	13.35	1.70	0.89	0.45	0.10	0.59
intemediate mean sky	14.41	69.70	10.18	2.03	1.31	0.83	-0.29	0.38
intemediate blue sky	13.05	124.96	7.49	2.21	1.54	0.83	-0.28	0.42
blue sky	12.89	243.38	3.26	1.59	1.59	1.04	-0.41	0.20

7) Harrison のモデル^{a-23)}

Harrison, A., W. はカナダ・カルガリーにおいて天空輝度分布の測定と同時に、自ら開発した雲量測定器により雲量の測定を行った。天空の任意位置の相対輝度を測定した雲量 C の関数としてモデル化し提案した。雲量 C の関数としているところに特徴がある。雲量の正確な測定は困難であり、例えば現在の日本の気象台では雲量の測定は目視により行われている。このことから、このモデルを分布モデルとして利用するには汎用性の点で難点がある。

$$L(Z, \mathbf{a}, Z_s, C) = C \cdot L_{ve}^o(Z, \mathbf{a}, Z_s) + (1 - C) \cdot L_{ve}^c(Z, \mathbf{a}, Z_s) \quad (\text{a-76})$$

ここで、

$$L_{ve}^o(Z, \mathbf{a}, Z_s) = 0.40 + 0.21Z_s + 0.27 \cos Z + 1.45e^{-2.41c} \quad (\text{a-77})$$

$$L_{ve}^c(Z, \mathbf{a}, Z_s) = \left(1.28 + 1457^{-11.1c} + 4.28 \cos^2 c \cos Z_s \right) (1 - e^{-0.42 \sec Z}) (1 - e^{-0.67 \sec Z_s}) \quad (\text{a-78})$$

絶対値で表す天空輝度は、全天空照度の関数として以下が提案されている。

$$La(Z, \mathbf{a}, Z_s, C) = \frac{Evd \cdot L(Z, \mathbf{a}, Z_s, C)}{p} \quad (\text{a-79})$$

8) All-weather-model^{a-24)}

Perez, R. は、*Sky brightness* 及び *Sky clearness* を指標として天空輝度分布を分類し、以下のモデルを提案した。CIE 標準一般天空として採用された Kittler, R., Perez, R. の相対天空輝度分布モデルのもととなるものであるが、CIE 標準一般天空と比べ、天空の状態を決定する指標が煩雑である。

$$L = \{1 + a \cdot \exp(b/\cosh')\} \{1 + c \cdot \exp(d \cdot c) + e \cdot \cos^2 c\} \quad (\text{a-80})$$

$$\mathbf{e} = \left\{ (Eed + Ees)/Eed + 1.041Z_s^3 \right\} / (1 + 1.041Z_s^3) \quad (\text{a-81})$$

ここで、 a, b, c, d, e の各係数は \mathbf{e} により決定される $a_{1-4}, b_{1-4}, c_{1-4}, d_{1-4}, e_{1-4}$ (表 Ap.7.3) を用いて以下の式により求める。

$$a = a_1(\mathbf{e}) + a_2(\mathbf{e}) \cdot Z_s + \Delta \cdot \{a_3(\mathbf{e}) + a_4(\mathbf{e}) \cdot Z_s\} \quad (\text{a-82})$$

ここで、

$$\Delta = m \cdot Eed/Jo \quad (\text{a-83})$$

が 1.000 ~ 1.065 の場合, c, d は次式で求める. この場合以外は a, b, e 同様の式で求める

$$c = \exp \left[\left\{ \Delta \cdot (c_1 + c_2 \cdot Z_s) \right\}^{c_3} \right] - c_4 \tag{a-84}$$

$$d = -\exp \left\{ \Delta \cdot (d_1 + d_2 \cdot Z_s) \right\} + d_2 - \Delta \cdot d_4 \tag{a-85}$$

表 Ap.7.3 All-weather-model モデルのパラメータ

		<i>a</i>				<i>d</i>			
		1	2	3	4	1	2	3	4
Sky Clarness	1.000 ~ 1.065	1.3525	-0.2576	-0.2690	-1.4366	1.8734	0.6297	0.9738	0.2809
	1.065 ~ 1.230	-1.2219	-0.7730	1.4148	1.1016	-1.5798	-0.5081	-1.7812	0.1080
	1.230 ~ 1.500	-1.1000	-0.2515	0.8952	0.0156	-5.0000	1.5218	3.9229	-2.6204
	1.500 ~ 1.950	-0.5484	-0.6654	-0.2672	0.7117	-0.5000	0.0016	1.1477	0.1062
	1.950 ~ 2.800	-0.6000	-0.3566	-2.5000	2.3250	-3.5000	-0.1554	1.4062	0.3988
	2.800 ~ 4.500	-1.0156	-0.3670	1.0078	1.4051	-3.4000	-0.1078	-1.0750	1.5702
	4.500 ~ 6.200	-1.0000	0.0211	0.5025	-0.5119	-4.0000	0.0250	0.3844	0.2656
	6.200 ~ -	-1.0500	0.0289	0.4260	0.3590	-7.2312	0.4050	13.3500	0.6234

		<i>b</i>				<i>e</i>			
		1	2	3	4	1	2	3	4
Sky Clarness	1.000 ~ 1.065	-0.7670	0.0007	1.2734	-0.1233	0.0356	-0.1246	-0.5718	0.9938
	1.065 ~ 1.230	-0.2054	0.0367	-3.9128	0.9156	0.2624	0.0672	-0.2190	-0.4285
	1.230 ~ 1.500	0.2782	-0.1812	-4.5000	1.1766	-0.0156	0.1597	0.4199	-0.5562
	1.500 ~ 1.950	0.7234	-0.6219	-5.6812	2.6297	0.4659	-0.3296	-0.0876	-0.0329
	1.950 ~ 2.800	0.2937	0.0496	-5.6812	1.8415	0.0032	0.0766	-0.0656	-0.1294
	2.800 ~ 4.500	0.2875	-0.5328	-3.8500	3.3750	-0.0672	0.4016	0.3017	-0.4844
	4.500 ~ 6.200	-0.3000	0.1922	0.7023	1.6317	1.0468	-0.3788	-2.4517	1.4656
	6.200 ~ -	-0.3250	0.1156	0.7781	0.0025	1.5000	-0.6426	1.8564	0.5636

		<i>c</i>			
		1	2	3	4
Sky Clarness	1.000 ~ 1.065	2.8000	0.6004	1.2375	1.0000
	1.065 ~ 1.230	6.9750	0.1774	6.4477	-0.1239
	1.230 ~ 1.500	24.7219	-13.0812	-37.7000	34.8438
	1.500 ~ 1.950	33.3389	-18.3000	-62.2500	52.0781
	1.950 ~ 2.800	21.0000	-4.7656	-21.5906	7.2492
	2.800 ~ 4.500	14.0000	-0.9999	-7.1406	7.5469
	4.500 ~ 6.200	19.0000	-5.0000	1.2438	-1.9094
	6.200 ~ -	31.0625	-14.5000	-46.1148	55.3750

以上, 代表的な天空輝度分布モデルを示した.

天空輝度分布モデルには, 天空状態を晴天, 曇天, 中間などのいくつかのタイプで表すモデル, 天空状態が晴天から曇天に連続して変化するとしてモデル化したものがある. 前者は天空状態を把握しやすく, 天空状態を表すモデルの係数も煩雑にならない利点がある. 後者には天空状態を連続して表現することができる利点があるものの, モデルの係数が煩雑になり, 天空状態そのものを把握することに困難が生じる.

本研究では, CIE標準一般天空が, モデルの係数が煩雑にならない, 天空状態を捉えやすいといった利点を持つことに着目し, このモデルの放射輝度への流用を検討し, 天空放射輝度分布を考慮した熱負荷計算等の熱シミュレーションに利用する手法を示した.

3.2 天空放射輝度分布モデル

天空放射輝度分布モデルは、斜面日射モデルのように壁面に入射する日射量を予測するために、特徴的な放射輝度となる太陽近傍、地平線といった部分の放射輝度のみ、その分布を考慮してモデル化したものではなく、地球上任意点の放射輝度をモデル化するものである。天空放射輝度が滑らかに変化するものとして、連続な関数でモデル化している。このようなモデルを用いた熱負荷計算等の建築物の熱環境予測・解析は、これまで行われていない。

しかし、天空放射輝度分布モデルを用いれば、斜面日射モデルでは困難な周辺建物等の遮蔽物を考慮した、より詳細な検討を行なうことができると考える。そこで本研究では、天空放射輝度分布モデルの熱負荷計算への利用を可能とする手法、天空放射輝度分布の熱負荷へのインパクトを示し、熱負荷計算等の建築物の熱環境予測・解析に天空放射輝度分布を考慮する必要性を示した。

以下に代表的な天空放射輝度分布モデルを示す。

1) All sky model-R, All sky model-L^{a-25)}

井川らは、はじめグローバル照度を基にした正規化グローバル照度を指標として天空輝度分布のモデルである All sky model を提案した。このモデルは、正規化グローバル照度と天空輝度分布測定値の相関が低い場合も含めてモデル化するなど疑問の残るものであったが、後にこれを改良し、全天日射量を基にした晴天指標 K_c 、Cloud ratio を基にした澄清指数 Cle により天空状態を分類し数式化した天空放射輝度分布のモデル All sky model-R を提案している。さらにこれと同様な手法により All sky model-L として天空輝度分布のモデルを改めて提案している。ここで R は放射輝度を、 L は輝度を示す

$$L(Z_s, Z, c) = \frac{f(c)j(p/2 - Z)}{f(Z_s)j(p/2)} \quad (a-86)$$

ここで

$$j(p/2 - Z) = 1 + a \cdot \exp\left(\frac{b}{\sin(p/2 - Z)}\right) \quad (a-87)$$

$$f(c) = 1 + c \cdot \left[\exp(dc) - \exp\left(d\frac{p}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2 c \quad (a-88)$$

パラメータ a, b, c, d, e は以下の式より求める。

$$a = 4.5 / [1 + 0.15 \cdot \exp(3.4Si)] - 1.04 \quad (a-89)$$

$$b = -1 / [1 + 0.17 \cdot \exp(1.3Si)] - 0.05 \quad (a-90)$$

$$c = 1.77(1.22Si)^{3.56} \times \exp(0.2Si) \times (2.1 - Si)^{0.8} \quad (a-91)$$

$$d = -3.05 / [1 + 10.6 \cdot \exp(-3.4Si)] \quad (a-92)$$

$$e = 0.48 / [1 + 245 \cdot \exp(-4.13Si)] \quad (a-93)$$

ここで、 Si は晴天指標 K_c と澄清指標 Cle から決定される天空指標 (sky index)

$$S_i = K_c + Cle^{0.5} \quad (a-94)$$

$$K_c = E_{eg} / Se_{eg} \quad (a-94)$$

$$Se_{eg} = 0.84J_o / m \cdot \exp(-0.0675m) \quad (a-96)$$

$$Cle = \frac{1 - C_e}{1 - C_{e_s}} \quad (a-97)$$

$$C_e = E_{ed} / E_{eg} \quad (a-98)$$

$$C_{e_s} = 0.01299 + 0.07698m - 0.003857m^2 \\ + 0.0001054m^3 - 0.000001031m^4 \quad (a-99)$$

$$m : (= 1 / [\cos Z_s + 0.50572 \cdot (96.07995 - Z_s)^{-1.6364}]) \quad (a-100)$$

上記で求めた相対天空放射輝度分布 $L(Z_s, Z, c)$ に天頂放射輝度 L_z をかけることで、放射輝度相対値を絶対値に変換する。この絶対値で表す放射輝度分布のモデルが All sky model-R である。

$$L_o(Z_s, Z, c) = L_z(Z_s) L(Z_s, Z, c) \quad (a-101)$$

$$L_z(Z_s, K_c, Cle) = \frac{E_{ed}}{\int_{Z=0}^{p/2} \int_{a=0}^{2p} (L(Z_s, Z, c) \sin Z \cos Z) dZ da} \quad (a-102)$$

井川らはさらに、天頂輝度 L_z の積分部分 (L_z の分母) を求めるのに計算時間がかかることから、これを相対天空放射輝度分布の積分値の逆数 $L_z Ed$ (式 a-103) とし、回帰分析によって太陽高度、晴天指標、清澄指標の関数としてモデル化している。

$$L_z Ed = \frac{1}{\int_{g=0}^{p/2} \int_{a=0}^{2p} L(Z_s, Z, c) \sin Z \cos Z dZ da} = \sum_{k=0}^4 [A(k) \cdot Kc^k] \quad (a-103)$$

$$A(k) = \sum_{j=0}^6 [B(j, k) \cdot Cle^{0.5j}] \quad (a-104)$$

$$B(j, k) = \sum_{i=0}^5 [C(i, j, k) \cdot (p/2 - Z_s)^i] \quad (a-105)$$

パラメータ $C(i, j, k)$ を表 Ap.7.4 に示す。

表Ap.7.4 相対天空放射輝度分布の積分値の逆数の計算のためのパラメータ $C(i,j,k)$

k	j	i					
		5	4	3	2	1	0
4	6	-79.2551	181.5249	-178.8391	86.4222	13.7469	-9.3016
	5	259.0233	-599.2154	558.7982	-273.5933	-28.3222	36.8154
	4	-323.93	758.4764	-665.1001	327.9505	2.5328	-52.2028
	3	178.5947	-422.7656	343.9805	-171.1919	27.4527	32.8606
	2	-34.0204	80.2519	-57.2731	28.9888	-17.6413	-8.0731
	1	-0.9299	2.9337	-2.739	2.0469	1.9924	-0.1519
	0	-0.0673	0.12	-0.5003	-0.0077	0.2274	0.1944
3	6	178.9761	-414.3978	382.3517	-189.0674	-19.1604	26.7019
	5	-585.76778	1369.3651	-1197.9089	597.8211	18.6492	-98.6168
	4	719.1565	-1698.494	1398.0054	-701.8434	57.7891	133.1647
	3	-377.9488	899.2027	-681.3328	345.6662	-99.9641	-79.6806
	2	63.7066	-149.2886	93.5278	-47.5262	47.1414	17.6094
	1	2.2956	-7.2571	6.1345	-5.5006	-4.1306	1.0003
	0	0.4479	-1.032	1.7185	-0.3234	-0.5077	-0.3754
2	6	-140.165	329.5323	-283.3008	142.5802	0.0588	-24.2309
	5	450.5763	-1067.6426	872.1058	-442.3932	38.0638	85.2745
	4	-530.7575	1266.6167	-971.174	496.1507	-112.2037	-109.9849
	3	258.314	-617.6864	428.3022	-220.7694	112.7302	61.4569
	2	-37.2452	86.0313	-44.2429	20.6861	-41.5866	-11.1184
	1	-1.1026	3.9671	-2.6865	3.9616	2.8287	-1.2699
	0	-0.3572	0.8603	-1.097	0.3359	0.3435	0.0863
1	6	41.7667	-101.3222	83.3628	-44.0612	8.0616	7.835
	5	-128.3895	313.3116	-245.8816	131.5008	-38.0729	-26.2167
	4	140.6794	-344.9908	254.23	-137.6762	64.8618	31.5218
	3	-61.5252	150.9138	-100.4209	54.5553	-48.3263	-15.2722
	2	7.8043	-18.4959	9.7897	-3.9888	14.3852	1.6549
	1	0.199	-0.7237	0.3678	-0.806	-0.8417	0.2509
	0	0.0888	-0.2173	0.2446	-0.0842	-0.0767	-0.0509
0	6	-2.3236	3.8397	1.3678	-2.8773	0.5302	-0.9167
	5	5.9466	-8.437	-8.4637	11.3017	-0.896	2.7842
	4	-4.8599	4.1516	15.9467	-16.8828	0.093	-2.8711
	3	1.1362	1.8522	-12.3903	11.6859	0.3772	1.0626
	2	0.2833	-1.9825	4.3546	-3.7111	-0.0829	-0.146
	1	-0.0817	0.33	-0.4699	0.4062	-0.0316	-0.0564
	0	-0.0068	0.0177	-0.02	0.009	0.0044	0.4015

2) Brunger モデル^{a-26)}

Brunger, P., A. は, Diffuse function k , Atmospheric clearness index k_t により天空放射輝度分布を, 以下の式でモデル化し提案している.

$$L = E_{ed} \cdot \left\{ \frac{a_0 + a_1 \cdot \cos Z + a_2 \cdot \exp(-a_3 \cdot c)}{\mathbf{p} (a_0 + 2a_1/3) + 2a_2 \cdot I(Z_s, a_3)} \right\} \quad (\text{a-106})$$

ここで,

$$I(Z_s, a_3) = \frac{\{1 + \exp(-a_3 \cdot \mathbf{p} / 3)\}}{a_3^2 + 4} \\ \times \left[\mathbf{p} - \left[1 - \frac{2\{1 - \exp(-a_3 \cdot \mathbf{p})\}}{\mathbf{p} \cdot a_3 \cdot \{1 + \exp(-a_3 \cdot \mathbf{p} / 2)\}} \right] \right] \\ \times \{2Z_s \cdot \sin Z_s - 0.02\mathbf{p} \cdot \sin(2 \cdot Z_s)\} \quad (\text{a-107})$$

係数 $a_0 \sim a_3$ は Diffuse function k , Atmospheric clearness index k_t により決定される (表 Ap.7.5) .

表 Ap.7.5 Brunger モデルのパラメータ

		kt (=Eed/Eeg)									
		a	0.05	0.15	0.25	0.35	0.45	0.55	0.65	0.75	0.85
k (=Eeg/(Eeo sinh))	0.95	0	0.1864	0.2002	0.1380	0.1508	0.1718	0.2060			
		1	0.1979	0.1772	0.0930	0.5472	0.0566	-0.0294			
		2	0.0000	0.0000	0.2890	0.6659	0.8734	2.9511			
		3	1.0000	1.0000	0.9667	1.6755	2.4129	3.7221			
	0.85	0	0.1431		0.3477	0.2664	0.2139	0.1520	0.1151		
		1	0.1420		-0.2153	-0.1559	0.0307	0.1497	0.1805		
		2	2.6360		5.3170	1.7758	1.6099	1.8315	2.2284		
		3	5.5250		4.4211	2.8590	3.7260	3.7221	4.1553		
	0.75	0			0.3687	0.2684	0.2019	0.1870	0.1842	0.1566	
		1			-0.2927	-0.1615	-0.1275	-0.0632	0.0253	0.3003	
		2			2.6268	4.5224	1.4096	1.2819	1.3080	1.8486	
		3			2.8413	4.0842	2.2453	2.5932	3.1127	14.7440	
0.65	0			0.3851	0.2843	0.2713	0.1597	0.2088	0.1273		
	1			-0.2726	-0.1615	-0.1837	-0.1715	-0.0520	-0.0500		
	2			4.1962	4.5224	2.8220	1.2964	1.3225	1.5961		
	3			5.2590	4.0842	3.4860	1.9183	2.8364	2.0993		
0.55	0			0.6079	0.2892	0.2816	0.2465	0.2070	0.2477		
	1			-0.4838	-0.1953	-0.1945	-0.1245	-0.0927	-0.0711		
	2			11.0780	2.1346	3.8606	2.9163	1.1098	1.5836		
	3			4.5880	3.7268	3.7447	4.0760	2.5586	3.4500		
0.45	0				0.2337	0.2822	0.2916	0.2583	0.2457	0.2315	
	1				-0.1015	-0.1842	-0.2065	-0.1654	-0.1398	-0.2028	
	2				11.7920	6.0300	2.7327	1.9525	1.5120	1.5803	
	3				5.3698	4.5241	3.7624	3.3769	2.9640	2.3229	
0.35	0					0.3162	0.3006	0.2871	0.2491	0.2510	
	1					-0.2039	-0.2172	-0.2184	-0.2224	-0.0907	
	2					6.2226	4.5443	2.6467	1.5992	0.9733	
	3					5.8975	4.2660	3.5940	2.6404	2.6775	
0.25	0						0.3417	0.3153	0.3071	0.2971	
	1						-0.2574	-0.2338	-0.2576	-0.3126	
	2						4.1918	3.8860	2.3127	1.3594	
	3						4.3268	4.3920	3.5189	2.3970	
0.15	0							0.3360	0.3243	0.3061	
	1							-0.2600	-0.3003	-0.4531	
	2							4.2481	1.9157	1.6120	
	3							4.3727	3.2680	2.3190	

以上, 天空放射輝度分布モデルの代表的なものとして, Brunger のモデル, All sky model-R を示した .両モデルともに係数が多く煩雑であったり, 係数を決定する指標から天空状態を把握することが困難であること, All sky model-R では, 天頂輝度を求める際の相対天空放射輝度分布の積分値の逆数を L_zEd (式 a-103) としてモデル化しているが, 相対天空放射輝度分布 (式 a-101 $L(Z_s, Z, c)$) については数値積分を前提としており, その結果, 放射輝度絶対値を求める際に計算時間を要するなど, 応用上, 斜面日射モデルのような簡便さはない .

記号表

1. 直散分離手法

E_{ed}	: 水平面天空日射量測定値 [W/m ²]
E_{es}	: 法線面直達日射量測定値 [W/m ²]
E_{eg}	: 水平面全天日射量測定値 [W/m ²]
J_0	: 太陽定数 [W/m ²]
h	: 太陽高度 [°]
P	: 大気透過率 [-]
m	: 大気路程 [-]
m_r	: 天空要素の高度 r の時の大気路程 [-]
Z	: 天頂角 [rad]
T_d	: 露点温度 [°]

2. 斜面日射モデル

F	: 斜面天空日射が水平面天空日射に占める比率 [-]
E_{ed}	: 水平面天空日射量測定値 [W/m ²]
E_{es}	: 法線面直達日射量測定値 [W/m ²]
E_{eg}	: 水平面全天日射量測定値 [W/m ²]
	: 斜面の傾斜角 [rad]
J_0	: 太陽定数 [W/m ²]
h	: 太陽高度 [°]
Z	: 天頂角 [rad]
m	: 大気路程 [-]
m_r	: 天空要素の高度 r の時の大気路程 [-]
P	: 大気透過率 [-]
i	: 斜面に対する太陽の入射角 [rad]
	: クリアネスインデックス [-]
	: ブライトネスインデックス [-]
H_i	: 標高 [m]
θ	: 斜直達日射計の半開口角 [°]
	: 太陽からの角距離 [°]
i_j	: 遮蔽物に対する太陽の入射角 [rad]
ω_j	: 遮蔽物の立体角 [sr]

3. 天空輝度分布モデル・天空放射輝度分布モデル

3.1 天空輝度分布モデル

1) CIE 標準曇天空

h_o	: 任意の天空位置の高度 [rad]
L_o	: 任意の天空位置の輝度 [cd/m ²]

L_Z : 天頂輝度 [cd/m^2]

2)CIE 標準晴天空

Z : 天頂角 [rad]
 : 太陽と天球上任意点の角距離 [rad]
 Z_s : 天頂からの太陽高度 [rad]
 : 天球上任意点の方位角 [rad]
 s : 太陽方位角 [rad]

3) 中村の中間天空

h' : 天球上任意点の天頂角 [rad]
 : 太陽と天球上任意点の角距離 [rad]
 h : 太陽高度 [°]
 L_o : 任意の天空位置の輝度 [cd/m^2]
 L_Z : 天頂輝度 [cd/m^2]

4)Littlefair モデル

h' : 天球上任意点の天頂角 [rad]
 : 太陽と天球上任意点の角距離 [rad]
 h : 太陽高度 [°]
 L : 任意の天空位置の輝度 [cd/m^2]

5)Homogeneous Sky

h' : 天球上任意点の天頂角 [rad]
 : 太陽と天球上任意点の角距離 [rad]
 h : 太陽高度 [°]
 E_{vo} : 大気圏外法線照度 [lx]
 m_s : 太陽高度 s の時の大気路程 [-]
 m_r : 天空要素の高度 r の時の大気路程 [-]
 : 地面反射率 [-]
 T_{vL} : 昼光混濁因子 [-]

6)Perraudeau モデル

I_N : *Nebulosity index* [-]
 Ce_M : 測定値によるクラウドレイシヨ [-]
 Ce_T : 晴天空の理論平均クラウドレイシヨ [-]
 L : 任意の天空位置の輝度 [cd/m^2]
 : 地面反射率 [-]
 h' : 天球上任意点の天頂角 [rad]
 : 太陽と天球上任意点の角距離 [rad]
 Z_s : 天頂からの太陽高度 [rad]

7)Harrison のモデル

Z : 天頂角 [rad]
 : 太陽と天球上任意点の角距離 [rad]

Z_s : 天頂からの太陽高度 [rad]
 C : 雲量 [-]
 : 天球上任意点の方位角 [rad]

8) All-weather-model

h' : 天球上任意点の天頂角 [rad]
 : 太陽と天球上任意点の角距離 [rad]
 Z_s : 天頂からの太陽高度 [rad]
 : 天球上任意点の方位角 [rad]
 E_{ed} : 水平面天空日射量測定値 [W/m²]
 E_{es} : 法線面直達日射量測定値 [W/m²]
 E_{eg} : 水平面全天日射量測定値 [W/m²]
 : クリアネスインデックス [-]
 : ブライトネスインデックス [-]
 m : 大気路程 [-]
 J_0 : 太陽定数 [W/m²]

3.2 天空放射輝度分布モデル

1) All sky model-R, All sky model-L

Z : 天頂角 [rad]
 : 太陽と天球上任意点の角距離 [rad]
 Z_s : 天頂からの太陽高度 [rad]
 K_c : 晴天指標 [-]
 Cl_e : 清澄指標 [-]
 Se_{eg} : 基準全天日射量 [W/m²]
 m : 大気路程 [-]
 P : 大気透過率 [-]
 J_0 : 太陽定数 [W/m²]
 E_{ed} : 水平面天空日射量測定値 [W/m²]
 E_{eg} : 水平面全天日射量測定値 [W/m²]
 $L_z E_d$: 対天空放射輝度分布の積分値の逆数

2) Brunker のモデル

Z : 天頂角 [rad]
 : 太陽と天球上任意点の角距離 [rad]
 Z_s : 天頂からの太陽高度 [rad]
 E_{ed} : 水平面天空日射量測定値 [W/m²]
 k : Diffuse function [-]
 k_t : Atmospheric clearness index [-]

参考文献

- a-1) 赤坂裕, 他, 拡張アメダス気象データ, 日本建築学会, 2000
- a-2) 永田忠彦: 天空日射に関する Berlage の式に対する疑問, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp381-382, 1975
- a-3) 永田忠彦, 沢田康二: 晴天空による水平面散乱日射の式の試案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp519-520, 1978
- a-4) 宇田川光弘, 木村建一: 水平面全天日射量観測値よりの直達日射量の推定, 日本建築学会論文報告集, No.267, pp83-90, 1978
- a-5) Erbs, D.G., Klein, J.A., Estimation of the Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly-Average Global Radiation, Solar Energy, 45(1), pp.1-7, 1990
- a-6) 渡辺俊行, 浦野良美, 林徹夫: 水平面全天日射量の直散文意と傾斜面日射量の推定観測値よりの直達日射量の推定, 日本建築学会論文報告集, No.330, pp96-108, 1983
- a-7) Perez, R., Ineichen, P., Maxwell, E.L., Seals, R., Zelenka, A.: Dynamic Global to Direct Conversion Models, ASHRAE Transactions Research Series, pp.154-168, 1992
- a-8) Hay, J.E.: Study of Short-Wave Radiation on Nonhorizontal Surfaces, Canadian Climatic Center Report, No.79-12 Atmospheric Environment Service, Toronto Canada, 1979
- a-9) Reindl, D.T., Beckman, W.A., Duffie, J.A.: Evaluation of Hourly Tiled Surface Radiation Models, Solar Energy, 45(1), pp.9-17, 1990
- a-10) Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., and Stewart, R.: Modeling Day Light Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance, Solar Energy, 44(5), pp.271-289, 1990
- a-11) <http://www.esru.strath.ac.uk/>, <http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>
- a-12) 赤坂裕, 黒木荘一郎, 稲村悌成, 二宮秀與: 準直達日射・天空日射量の測定とその推定式の作成, 日本建築学会論文報告集, No.405, pp19-28, 1989
- a-13) Skartveit, A. and Olseth, J.A.: Modeling Slope Irradiance at High Latitudes, Solar Energy, 36(4), pp.333-344, 1986
- a-14) 安藤仁, 吉田治典, 上谷芳昭: 昼光照度の時系列解析による天空輝度分布の分類と推定に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1 分冊, pp.341-342, 2002
- a-15) 梅宮典子, 飯沼清明, 他 3 名: 雲量と日照率による天空輝度分布タイプの推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1 分冊, pp.359-360, 2004
- a-16) Danny H.W.Li, Chris C. S. Lau, Joseph C.Lam: Standard Skies Classification Using Common Climatic Parameters, Journal of Solar Energy Engineering, Vol.126, pp.957-964, 2004
- a-17) Moon, P., Spencer, D.E.: Illumination from a non-uniform sky, Illum. Energy, 37, pp.707-726, 1942
- a-18) Kittler, R.: Standardization of outdoor conditions for the calculation of daylight factor with clear skies, Proc. the CIE International Conference on Sunlight in Buildings, Bouwcentrum International, Rotterdam, pp.273-285, 1967
- a-19) Nakamura, H., Oki, M., Hayashi, Y.: A Study on the Estimation of the Relative Frequency of Occurrences of the Clear Sky, the Intermediate Sky and the Overcast Sky in Japan, J.Light & Vis.Env., Vol.9, No.2, pp.76-85, 1985

- a-20) Littlefair, P.J.: The Luminance Distribution of an Average Sky, *Lightning Res. & Tech.* , Vol.13, No.4 , pp.92-98, 1981
- a-21) Kittler, R.: Luminance Distribution Characteristics of Homogeneous Skies, A Measurement and Prediction Strategy, *Lightning Res. & Tech.* , Vol.17, No.4 , pp.183-188, 1985
- a-12) Perraudau, M.: Luminance Models, National Lighting Conference 1988, Cambridge, pp.291-292, 1988
- a-23) Harrison, A.W.: Directional sky luminance versus cloud cover and solar position, *Solar Energy*,46(1), pp.13-19, 1991
- a-24) Perez, R., Seals,R. and Michalsky,j. :All-Weather Model for Sky Luminance Distribution - Preliminary Configuration and Validation,*Solar Energy*,50(3),pp.235-245,1993
- a-25) Igawa,N., Koga,Y., Matsuzawa,T. and Nakamura, H. :Model of Sky Radiance Distribution and Sky Luminance Distribution ,*Solar Energy*,77,pp.137-157,2004
- a-26) Brunger,A.P., Hooper,F.C.A.: Anisotropic sky Radiance Model Based on Narrow Field of View Measurements of Shortwave Radiance, *Solar Energy*,51(1), pp.53-64, 1993

発表論文

本論文に関する発表論文

審査付論文

- 1) 天空放射輝度分布への CIE 標準一般天空の流用と天空タイプの集約:
日本建築学会環境系論文集, 第 583 号, pp.29-36, 2004.9
- 2) 日射量を用いた CIE 標準一般天空の天空タイプ推定手法に関する研究
日本建築学会環境系論文集, 第 609 号, pp.31-38, 2006.11
- 3) 天空放射輝度分布が空調熱負荷に与える影響に関する研究
- 京都実測データによる天空放射輝度分布を考慮した熱負荷計算 -
日本建築学会環境系論文集 第 631 号, pp.1101-1108, 2008.9
- 4) 天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量計算法の開発: 細淵勇人, 吉田治典,
日本建築学会 環境系論文集, 2009.3 月投稿予定
- 5) 天空放射輝度分布, 遮蔽物を考慮した熱負荷計算の試み: 細淵勇人, 吉田治典,
日本建築学会環境系論文集, 2009.4 月投稿予定

審査付国際会議論文

- 1) MODELING OF SKY RADIATION CONSIDERING SKY RADIANCE DISTRIBUTION FOR
THE CALCULATION OF THE HEATING/COOLING LOAD OF BUILDINGS
9th International Building Performance Simulation Association Conference,
2005.8, Montreal Canada

学術講演会発表

- 1) 放射輝度測定データの時系列モデルに関する研究: 細淵勇人, 石野久彌
日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.227-228, 2002.8 月)
- 2) 日射量測定値による CIE 標準一般天空の天空タイプ決定手法の検討: 細淵勇人, 吉田治典,
上谷芳昭, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.59-60, 2004.8
- 3) 天空放射輝度分布を考慮した日射量モデルに関する研究: 細淵勇人, 吉田治典,
上谷芳昭, IBPSA-JAPAN 講演論文集 (2005), pp.287-290, 2005.1
- 4) 天空放射輝度分布の熱負荷への影響に関する検討: 細淵勇人, 吉田治典, 上谷芳昭,
日本建築学会近畿支部研究発表会, 2007.6
- 5) 天空放射輝度分布の熱負荷への影響に関する検討: 細淵勇人, 吉田治典, 上谷芳昭,
日本建築学会大会, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.227-228, 2007.8
- 6) 天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量計算法の開発:
細淵勇人, 吉田治典, 日本建築学会近畿支部研究発表会, 2009.6 月
- 7) 天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量計算法の開発と熱負荷計算への組み込み:
細淵勇人, 吉田治典, 日本建築学会大会, 2009.4 月投稿予定

その他

研究報告（日本建築学会 伝熱小委員会 建築・都市環境ワーキンググループ）

- 1) 天空放射輝度分布の時系列モデルに関する基礎的研究 - 平均分布モデルとしての CIE 標準一般天空モデルの検討, 2003.7.12
- 2) CIE 標準一般天空天空タイプの決定手法に関する研究 - 日射量測定値による天空タイプの決定, 2006.3.17
- 3) 天空放射輝度分布が空調熱負荷に与える影響に関する研究
- 京都実測データによる天空放射輝度分布を考慮した熱負荷計算 -, 2008.10.4

研究助成

- 1) 平成 16 年度 公益信託エスベック地球環境研究・技術基金
助成対象研究テーマ：
建築熱環境シミュレーションに使用する天空放射輝度分布を考慮した日射量モデルの開発
研究代表者：細淵 勇人

その他の発表論文

- 1) オフィスビルにおける先端熱源の総合効率
空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp.29-32, 2006.3
- 2) 環境配慮技術を適用した K ビルの実測研究, 第 6 報 代表パッケージユニットの冷凍サイクルと各部温度特性日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp. 123-124 (2001 年 9 月)
- 3) パッケージ型水熱源ヒートポンプユニットの運転特性及び室熱環境の実測研究
空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, II, pp. 969-972 (2001 年 9 月)
- 4) 人体形状を考慮した部位別作用温度に関する研究 第 3 報 壁面からの熱放射による影響
空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, III, pp. 1317-1320 (2000 年 9 月)
- 5) 人体形状を考慮した部位別作用温度に関する研究
第 4 報 サーマルマネキン各部位に相当するとグローブ球等価直径の算出
空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, III, pp. 1321-1324 (2000 年 9 月)
- 6) 人体形状を考慮した部位別作用温度に関する研究
第二報 サーマルマネキン内部温度・表面温度とグローブ温度の比較実験
日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.419-420, 2000.8

謝辞

本研究を進め、学位論文として取りまとめるにあたり、京都大学都市環境工学専攻 教授 吉田治典博士には、指導教官として、永きに渡り並々ならぬご指導ご鞭撻を賜りました。ここに深甚なるの謝意を表します。

京都大学都市環境工学専攻 教授 高橋大弐博士、建築学専攻 教授 銚井修一博士にはお忙しい中、学位審査の副査を引き受けていただき、研究に関する貴重なご意見をいただきました。篤く感謝いたします。

東京都立大学大学院在籍時の指導教官であった首都大学東京 名誉教授 石野久彌博士には、筆者が京都大学大学院博士課程に進学した後も何かと気にかけていただき、学会や委員会といった公式の場はもちろん、私的な場においても大学院在籍時と変わらぬご指導、ご鞭撻を賜りました。篤く謝意を表します。

京都大学工学研究科都市環境工学専攻 准教授 上谷芳昭博士にはいつも変わらぬ暖かいご指導、ご助言をいただきました。ここに記して深く謝意を表します。

京都大学工学研究科都市環境工学専攻 助教 王福林博士には研究上の相談に乗っていただくなどお世話になりました。謝意を表します。

博士課程の先輩であるリジャル・ホム・バハドゥル博士、花平愛博士、鈴木圭一博士、同年度に学位取得されました社会人博士課程の三浦克弘博士、山口弘雅博士、潘嵩氏とはともに励ましあい、研究させていただきました。ここに記して深く謝意を表します。

天空輝度分布・天空放射輝度分布の第一人者であられる大阪市立大学 教授 井川憲男博士には、学会等で研究について貴重なご意見をいただきました。ここに記して深く謝意を表します。

委員として参加させていただきました日本建築学会 伝熱小委員会 建築・都市環境ワーキンググループにおいては、大阪市立大学 准教授 西岡真稔博士をはじめとして、諸先生から貴重なご意見、ご指導を賜りました。深く謝意を表します。

エスベック株式会社には、平成16年度公益信託エスベック地球環境研究・技術基金として研究助成していただきました。深く感謝いたします。

研究室の後輩諸氏、友人諸氏には、筆者が落ち込んでるときには慰めていただくなどしました。筆者が挫けず学位取得できましたのは、後輩諸氏、友人諸氏の励ましの言葉によるところが大きいと考えます。深く謝意を表します。

私生活では、婚約者 奈名子に深く謝意を表します。彼女の存在無しには学位の取得は無かったのではないかと思います。加えて、両親、兄弟、祖母、宇治橋家のご両親、ご家族の並々ならぬサポートを受け研究を続けられたことはこの上ない幸せでありました。深く謝意を表します。

最後に、私の学位取得を楽しみにしていながら、逝ってしまった祖父に、学位取得した姿を見せられなかったことを謝りつつ、長い間支援し、期待してくれていたことに深く深く謝意を表します。

2009年3月