

(論文内容の要旨)

建物のエネルギーの有効利用と省エネルギーの為には、精度の良い熱負荷予測が必要である。本論文は、建物の熱負荷計算や熱環境分析の際、従来は天空全体で一様と仮定されてきた放射輝度に分布を考慮することの重要性を示し、放射輝度分布の特性を分析すると共に、その予測と利用手法の開発に関して研究成果をとりまとめたものである。

1章は序論であり、これまで一般的に一様と仮定されてきた天空の放射輝度分布を考慮し、より精度の高い熱負荷を求めることが必要となってきた背景を述べている。また天空輝度分布モデル、天空放射輝度分布モデルに関する既往研究の成果と課題を整理し、本研究の目的及び位置付け、論文構成について述べている。

2章では、研究に用いる各種気象要素の測定概要、及び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に整理する方法を示している。さらに本研究で天空放射輝度分布のモデルとして流用するCIE標準一般天空の概要を述べている。

3章では、国際照明委員会により天空輝度分布の標準モデルとして推奨されているCIE標準一般天空の放射輝度分布への流用可能性を、測定データより輝度、放射輝度それぞれについてGradation関数、Indicatrix関数の値を求め、この相関より検証している。また、測定した天空放射輝度分布測定データと、CIE標準一般天空の晴天から曇天までの15の天空タイプの放射輝度分布とのRMSEより、各時刻で一番近い天空タイプを「近似タイプ」と定義し、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天空それぞれの鉛直面日射量を算出し、測定天空放射輝度分布の場合に対する相対誤差の年平均値を求めた。近似タイプでは南、西面で約4%、北、東面で約2%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%となるのに対し十分小さい。これよりCIE標準一般天空を天空放射輝度分布に流用し、天空放射輝度分布を考慮した鉛直面日射量を計算する妥当性を示した。さらに、出現頻度順に、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、年平均で各方位5%程度の差しか見られず、大幅な変化はないことから鉛直面日射量の計算においては、天空タイプを5つに集約できることを示した。

4章では、CIE標準一般天空のIndicatrix関数のグループと法線面直達日射量、Gradation関数のグループと水平面全天日射量の関係を分析し、現在標準化されていない、天空タイプを推定する手法を開発した。推定した天空タイプを用いて求めた鉛直面日射量の相対誤差を分析したところ、相対誤差の月平均は、概ね±5%未満であり精度よく鉛直面日射量が求められており、従来の一様天空の場合と比べてもその値は十分小さい。また前章で求めた近似タイプの相対誤差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した。また、推定手法を3章で集約した5つの天空タイプに適用したところ、15タイプの場合からの精度低下が著しくないことから、集約した天空タイプにも、天空タイプの推定手法を用いることができることを確認した。

5章では、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ことから、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を行い、そのインパクトを明らかにしている。まず、測定した天空放射輝度分布データを用いた熱負荷、従来の天空日射が天空一様と仮定して求めた熱負荷の比較を行った。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を明らかにした。この時、最大暖房負荷の相対差が+8%、最大冷房負荷の相対差で-7.1~-9.7%、期間暖房負荷の相対差が+8%程度とやや大きくなる建物モデルが見られるなど、一様天空の場合、過大な熱負荷を算出する傾向があることを明らかにした。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の比較を行った。最大暖房負荷、最大冷房負荷、期間暖房負荷、期間冷房負荷の相対差は概ね±2%以内と、一様天空の場合と比べ十分小さいことから、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。

6章では、天空放射輝度分布を考慮した壁面日射量を精度の良く短時間で計算する近似解析法を開発した。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必要がある。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し、年間熱負荷計算には不向きである。そこで、CIE標準一般天空を用いた壁面日射量計算法として、GRADATION関数、INDICATRIX関数それぞれについて解析的に積分可能な近似式を求め、これを用いて壁面日射量を求める近似解析法を開発した。近似解析法を用いて相対日射量を求め、数値積分、145天空要素計算の場合の相対日射量と比較したところ、ほぼ一致する結果となった。また相対日射量の計算に要する時間も、数値積分と比べ1/6程度となることを示した。

7章では、近似解析法を用いて、通常の熱負荷計算では無視されることが多い、周辺の建物などの遮蔽物を考慮した、より精度の高い熱負荷計算法を示した。周辺の建物などの遮蔽物を考慮する方法として、四角形、あるいは三角形として入力した周囲遮蔽物の頂点の座標を天球の極座標上の座標に変換し、近似解析法の積分、非積分区間を決定する手法を示した。次に、都市キャニオン内の建物モデルを想定し、この建物の壁面日射量、熱負荷を、近似解析法、斜面日射モデル、一様天空を用いて計算し、測定した天空放射輝度分布の場合との精度、及び計算時間について比較を行った。その結果、近似解析法を用いることで、天空放射輝度分布、周囲遮蔽物を考慮した壁面日射量、熱負荷を精度良く短時間で計算することができることを示した。

8章は総括であり、本研究で得られた成果を集約し、今後の課題をまとめている。

(論文審査の結果の要旨)

建物のエネルギーの有効利用と省エネルギーのためには、精度の良い熱負荷予測が必要である。本論文は、建物の熱負荷計算や熱環境分析の際、従来は天空全体で一様と仮定されてきた放射輝度の分布を考慮することの重要性を示し、天空放射輝度分布の特性を分析すると共に、その予測と利用手法の開発に関して研究成果をとりまとめたものである。以下に得られた成果の概要を示す。

1. 測定された天空放射輝度分布に一番近いCIE標準一般天空の天空タイプを求め、この分布下における鉛直面日射量と測定された分布の場合の鉛直面日射量を比較した。その結果、天空タイプを用いて計算した鉛直面日射量の、測定分布から求めた鉛直面日射量に対する相対誤差は小さく、CIE標準一般天空を天空放射輝度分布のモデルとして流用することにより鉛直面日射量が精度良く求められることを明らかにした。
2. 天空タイプの数を15から5まで減少させても鉛直面日射量の相対誤差に大きな差がないことを見出し、鉛直面日射量の計算に用いる天空タイプは5つに集約できることを明らかにした。
3. 一般の気象観測で測定されている、法線面直達日射量と水平面全天日射量、および太陽高度を用いて任意の地点の天空タイプを推定する手法を開発した。
4. 測定された天空放射輝度分布と一様天空の場合の熱負荷を求め、それらを比較して、分布の有無による熱負荷へのインパクトを分析し、熱負荷計算や熱環境分析の精度向上には分布を考慮することが不可欠であることを明らかにした。
5. 天空タイプ推定法によって得た天空放射輝度分布で求めた熱負荷と、測定した天空放射輝度分布を用いた熱負荷の比較を行った。その結果、最大冷暖房負荷、および期間冷暖房負荷の相対誤差は概ね $\pm 2\%$ 以内と小さいことを見出し、開発した天空タイプ推定手法が有効であることを明らかにした。
6. CIE標準一般天空のGRADATION関数、INDICATRIX関数それぞれについて解析的に積分可能な近似式を求め、壁面日射量を精度良く短時間で計算する手法を開発した。
7. この計算法を用いて、通常の熱負荷計算では無視されることが多い、周辺の建物等の遮蔽物を考慮することのできる、より精度の高い熱負荷計算法を示した。

以上、本論文では、熱負荷計算や熱環境分析において、天空放射輝度分布を考慮することの重要性を明らかにし、そのために必要となる実用的な計算法の開発を行っており、建築の熱環境やエネルギー分析において、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成21年2月24日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。