地域日射量の算定方法に関する研究

紙 井 泰 典

地域日射量の算定方法に関する研究

紙 井 泰 典

目　次

頁

第1章　緒　論

1.1　斜面日射量推定の必要性と問題点

地域日射量は，地域の農業生産力を量る上でも，また水文水収支の中の蒸発散量を考える上でも重要である．特に我が国には傾斜農地が多く，また流域のほとんどが斜面から成り立っていることから，地域日射量を把握するためには，斜面日射量を把握する必要があると考えられる．

斜面日射量を直接計測している気象官署はなく，平地での水平面日射量から斜面日射量日射量を計算によって求めざるをえない．この場合，地域によって入手できる日射量データにばらつきがあり，場合によっては日射量そのものを他の気象要素（例えば日照時間，雲量など）から推定せざるを得ない場合もある．本論文ではそのような場合の推定方法について，いろいろの式を検討した（第２章）．

全天日射量が得られたとしても，時間直達日射量がわからなければ斜面日射量は求めることができない．そのために全天日射量から直達日射量を求めるための方法を追究したのが第３章である．

さて，全天日射量，直達日射量が推定または実測により判明したとして，日射量の地形から受ける影響は斜面勾配や方位の違いによるものだけではない．地域には凹凸があり，位置によっては太陽が山の端に隠れたり出たりする．そういう周辺地形の遮蔽による影響をも考慮しつつ，いかにして時間量の斜面日射量を計算するか，その具体的方法を追究したのが本論文の第４章である．

現在の気象庁などの斜面日射量観測態勢は，次の点で必ずしも便利にはできていない．

①斜面日射量計測官署は皆無である．

従って斜面日射量そのものの値は分からない．しかし，後述するように，斜面日射量を斜面直達日射量成分と斜面散乱日射量成分とに分けて考えたとき，各々を法線面直達日射量及び水平面散乱日射量から計算によって求めることができる（第４章参照）．

この場合，太陽の高度と方位が時間によって異なるため，時間量斜面日射量を求めるためには時間量法線面直達日射量がわかっていなくてはならない．ところが，

②直達日射量・散乱日射量を観測している気象官署がきわめて少ない．

気象庁が公表している直達日射量観測点は札幌・根室・秋田・宮古・輪島・松本・館

野・米子・潮岬・福岡・鹿児島・（土佐）清水・石垣島・那覇の 14 官署，散乱日射量は館野高層気象台１官署のみである．観測点数が少ないので，たまたまこれら観測点に近接した地域はよいとしても，そうでない地域にあっては，地域ごとの斜面日射量を精度よく推定することは難しい．

しかし，全天日射量観測点は全国で67官署ある．もしこの時間全天日射量を直達日射成分と散乱日射成分とに分離する方法が与えられるならば，67官署の近傍においては，地域日射量をかなりの精度で推定することができるであろう．このため本論文では，相当のスペースをこの時間全天日射量を直達日射量と散乱日射量に分離する方法について割いてある．

それでも，上記全天日射量観測官署からさえも隔たった地域の場合，全天射量自体がわからないわけであるから，まず，全天日射量を推定することから始める必要がある．この場合有力と考えられるのは，全天日射量を日照時間や雲量から統計的に推定するという方法である．過去のデータから全天日射量と日照時間または雲量との回帰式を作成し，それによって全天日射量を推定する（以後この推定方法を「日射量の気候学的推定」という）．そして推定された全天日射量を上記の直達日射量と散乱日射量に分離して，斜面日射量を求める．

実はこの方法には弱点がある．それは法線面直達日射量を斜面直達日射量に変換するためには，上記のように時間量直達日射量が必要であるが，このような統計的方法で全天日射量を精度よく推定できるのは月量か，たかだか日量全天日射量までで，時間量全天日射量を時間毎日照率から精度よく推定することは現状ではかなり難しい．従って全天日射量を日照時間や雲量から推定せざるを得ない地域にあっては，月量全天日射量を推定した場合，月平均時間毎日射量配分モデル（例えば日本気象協会(1989)参照）によって，これを月平均時間全天日射量に換算して，直達日射量と散乱日射量に分離し，月平均時間斜面日射量を推定することが，現状でなし得る限度であろう．しかし，日量全天日射量を求めた場合には，同様の手続きによって，一応その日の時間量の斜面日射量を求めることができる点で，月量推定の場合よりも優れた面があると考えられる．これまで農業気象関係では月量の全天日射量推定で十分とされてきたが，この意味から今後は研究の重点が日量日射量の推定，日量日射量の時間配分へと移っていくことも考えられる．

こうして直達日射量データが無ければ全天日射量を直達日射量と散乱日射量とに分離することによって，またその全天日射量データが無ければ，日照率，雲量から推定して，いかなる場合にあっても地域日射量を推定できるようにと試みた．

1.2　日射量の気候学的推定法

日射量の気候学的推定法の例として，*Black, Bonython, Prescott*(1954)は，月量の全天日射量 Q_T と，月量日照時間 n との間に次のような線型回帰関係を見出した.

$$Q_T / Q_0 = a + b(n/N) \tag{1.1}$$

ここに，Q_T :月量全天日射量(MJ/㎡/month)，Q_0 :地球の大気上層の水平面に，単位時間に単位面積に降り注ぐ日射量，以後「大気外水平面日射量」という (MJ/㎡/month)，Q_T/Q_0 :月平均日射率（「晴天指数」あるいは「晴れ指数」ともいう）. n :月量日照時間(hr/month)，N :月量可照時間(hr/month)，n/N :月平均日照率. a , b :回帰定数・係数.

a , b が与えられれば，日照率 n/N から日射率 Q_T/Q_0 が求められる. (1.1)式は元来月量について提案されたが，その後日量にも使用されるようになった（例：*Ito*(1960)). 本論文では Q_T/Q_0, n/N に添え字 M または D を付けて月量，日量を区別している. 係数 a , b については第２章 Table 2.6, 2.7, 2.9, 2.11, 2.12(1)(2), 2.13(1)(2), 2.14, 2.15 参照.

筆者は 日射率と日照率との関係は，特に日量に関しては，必ずしも直線関係にあるとはいえないことに着目し，(1.1)式を変形して，次式を提案した. (1.2)式の型の式を，以後「べき指数型回帰式」と呼ぶ(第２章 Table 2.8, 2.10, 2.12(1)(2), 2.13(1)(2), 2.16 参照）.

$$Q_T / Q_0 = a' + b'(n/N)^P \tag{1.2}$$

ここに，a', b' : 回帰定数・係数，P : べき指数.

(1.1)式の係数 a , b は，過去，外国も含め，多くの研究者によって提案されてきた. しかし，各研究者が使用した日照計の種類がまちまちなため，a , b の値に互換性がなく，多くの式が現在では使えなくなってしまっている. 例えば現在気象庁で使用している日照計は回転式(気象官署と地域官署)と太陽電池式(AMeDAS)の２つであるが，これらの計器による日照時間を少しく以前まで使われていたジョルダン式日照計による日照時間を用いた推定式などに適用することはできない. そこで本論文では，いくつかの異なる種類の日照計によるべき指数型回帰式（日量）の Q_T/Q_0 （$(Q_T/Q_0)_D$ と表

記する)を等置することによって，各日照計の日照率相互の統計的関係を導き，過去の異なる日照計により導かれた式を利用可能とすることを試みた．（第２章（2.59),(2.60),(2.61) 式参照）．

雲量を用いた日射量推定式もいろいろと提案されている（第２章参照）．本論文では月量値について次のような推定式を試みた（**Table 2.17** 参照）．しかし，日照率によるときに比べ，推定精度は劣ることがわかった．

$$(Q_T/Q_0)_M = a_{CM} + b_{CM} C_M{}^P \tag{1.3}$$

ここに，$(Q_T/Q_0)_M$：月平均日射率，C_M：月平均雲量(0-1)．a_{CM}, b_{CM}：回帰定数・係数，P：べき指数((1.2)式の P とは異なる値)．

前節で述べたように，全天日射量を直達日射量と散乱日射量とに分離することを考えるならば，当面全天日射量だけを推定すればことは足りる．しかし，直達日射量も同時にわかれば，全天日射量から直達日射量を分離する手間が省けていっそう簡便である．日量の直達日射量については，例えば次式で表される(内嶋(1982)，内嶋・桜谷・奥山(1981),中西・木村・橋本・森田・永井(1982),紙井(1983))．

$$(Q_D/Q_T)_D = b_{DT}(n/N)_D{}^P \tag{1.4}$$

ここに，$(Q_D/Q_T)_D$：日平均直達比，Q_D：日量直達日射量（MJ/m²/day)，Q_T：日量全天日射量（MJ/m²/day），$(n/N)_D$：日平均日照率，n：日量日照時間（hr/day），N：日可照時間（hr/day），b_{DT}：係数，P：べき指数((1.2),(1.3)式の P とは異なる)．

厳密にいえば気候学的方法というより，後で述べる直達・散乱日射量分離の一種と見られるが，日量，あるいは月量全天日射量から直達日射量を推定する次のような推定式も考えた（紙井・近森(1986a,（第２章参照））．

$$Q_D/Q_0 = b_{D0}(Q_T/Q_0)^P \tag{1.5}$$

ここに，b_{D0}：係数，P：べき指数((1.2),(1.3),(1.4)式の P とは異なる値)．

1.3 全天日射量の直達・散乱日射量分離

日射量は，太陽光球から直接地上に降り注ぐ直達日射量と，大気の中で水蒸気や塵，空気分子などによって散乱させられ，複雑な経路で地上に到達する散乱日射量とに分けられる．水平面全天日射量 TH，水平面直達日射量 DH，水平面散乱日射量 SH の間には，時間量・日量・月量いずれについても次式が成立する（後述（4.1）式）．

$$TH = DH + SH \tag{1.6}$$

ここに，TH , DH , SH の単位は,例えば時間量では MJ/㎡/hr など.
水平面直達日射量 DH は次式で表される（後述（4.3）式）．

$$DH = DN\cos Z_0 = DN\sin h \tag{1.7}$$

ここに，h ：太陽高度(rad)，Z_0 ：天頂角（天頂と太陽とのなす角度，斜面における Θ に相当する，rad），DN :時間量法線面直達日射量（太陽に正対する単位面積が単位時間に受ける日射量，単位は DH と同じ）．

同様にして，斜面全天日射量 TS，斜面直達日射量 DS，斜面散乱日射量 SS の間には次式が成立する（後述（4.2）式）．

$$TS = DS + SS \tag{1.8}$$

ここに，単位は TH , DH, SH などと同じ.
時間量斜面直達日射量 DS は，法線面直達日射量と斜面への入射角（太陽光線と斜面法線とのなす角度）の余弦に比例し，次式によって表される（後述（3.1),（4.4）式）．

$$DS = DN\cos\Theta \tag{1.9}$$

ここに，DS :時間量斜面直達日射量（単位は DH と同じ），Θ:太陽光線と斜面法

線とのなす角度(rad).

斜面散乱日射量 SS は, SH と斜面勾配 i (rad) から次式によって計算される (後述 (4.6)式) .

$$SS = SH \cdot (1 + \cos i) / 2 \qquad (1.10)$$

(1.10)式は, SH , SS が時間量, 日量, 月量のいずれであっても成立する. しかし, (1.7)式の DH , (1.9) 式の DS の計算には, Θ, Z_0 または h と DN の値が必要である.

しかし, 直達日射量を計測している気象官署が少ないため, 全天日射量の直達・散乱日射量への分離によって DN を推定する必要があるのは前述のとおりである.

全天日射量の直達・散乱日射量への分離は, 斎藤・松尾・落藤(1964)によって提唱され, その後宇田川・木村(1978), 渡辺・浦野・林(1983)が実測日射量を大気外水平面日射量で除して得た無次元化指標を用いる方法を提案し, 後者が現在我が国の直達・散乱分離の標準的方法となっている. 本論文では, 渡辺らの2つの方法 (「渡辺Ⅰ」, 「渡辺Ⅱ」と呼ぶ) とほぼ同等の精度を持つ新しい分離手法を開発 (第3章) , これを用いて周辺地形による遮蔽の影響を考慮した斜面日射量の計算方法を開発し, 実際に高知市三里地区(1990-1994)に適用してその有効性を示した (同じく第4章) .

1.4 本論文の構成

本論文の構成は,

①全天日射量データがない場合にこれを日照時間, 雲量などの気象要素から推定する「日射量の気候学的推定」に関する研究 (第2章) , 及び

②直達日射量データがない場合に, 時間全天日射量から直達日射量と散乱日射量を推定するための直達・散乱日射量分離方法に関する研究 (第3章)

③②までで求めた時間直達日射量・散乱日射量を用いて, 周辺地形によって日射が遮蔽されることを考慮に入れつつ, 実際の地域日射量を具体的に算定方法を述べた第4章の3部構成となっている.

第２章　日量及び月の日射量推定理論

2.1　従来の全天日射量推定式

2.1.1　Ångströmの式

1994 年の気象年報に掲載されている 155 官署のうち，全天日射量を計測しているのは67官署にすぎない．これに対して雲量は 153 官署で計測されており，日照時間は気象官署のほか，AMeDAS（地域気象観測システム，Automated Meteorological Data Aquisition System）地域官署約 840 地点で計測されている．もしも，日照時間・雲量を用いて日射量を求めることができれば，日射量観測網の目の粗さを補うことができるであろう．このような発想に基づき，回帰分析によって日射量と日照時間あるいは雲量との関係定式化しようとしているのが，日射量の気候学的推定に関する研究である．

この研究の端緒は，*Ångström*（1924）によってStockholmでの観測の結果与えられた次式である．

$$Q_T = Q_{cl} \cdot (a_{cl} + b_{cl} \cdot (n/N)) \tag{2.1}$$

ここに，Q_T：日量全天日射量(cal/cm²/day)，Q_{cl}:完全晴天日の１日の日射量(cal/cm²/day)，a_{cl}，b_{cl} ：係数．n/N ：日平均日照率．n ：日照時間．N ：可照時間．

Ångström は a_{cl}= 0.25，b_{cl}=1−a_{cl}= 0.75 を与えた．また *Fritz·MacDonald* (1949) は米国の 11 観測所のそれぞれ 10年以上のデータを基にして，a_{cl}= 0.35，b_{cl}= 0.61 としている．

2.1.2　Black·Bonython·Prescott の式

Black·Bonython·Prescott (1954)は，熱帯の Batavia から北緯 64.8°N の Fairbank に至る世界 32 カ所の 1928－1951年の月量日射量と月平均日照率のデータを各種の器械について集計し，上式の Q_{cl} を大気外水平面日射量Q_0で置き換えた次式で表した．

$$Q_T / Q_0 = a + b \cdot (n/N) \tag{2.2}$$

ただし，Q_T/Q_0：月平均日射率，a, b ：*Black* らによると $a=0.23$, $b=0.48$.

(2.2) 式の a, b については，これまで多くの研究者によって提示されてきている．例えば，*Page* (1961)の $a=0.23$, $b=0.52$, *Glover and McCulloch* (1958)のケニヤの 1938 -1943年の観測値による $a=0.23$, $b=0.62$, *Davies* (1965)の Campbell-Stokes日照計による西アフリカでの観測値に基づく $a=0.19$, $b=0.60$, *Benett* (1964)の米国の10観測所の1950－1960年のエプリー日射計による $a=0.36$, $b=0.45$ などである．多くの研究者によって発表された a, b の値が *de Jong* (1973)によってまとめられているが，測器も場所・年・観測精度ともにまちまちであり，わが国にそのまま適用することには問題がある．

Benett (1964)が米国西部の5観測所の２月のエプリー日射計の資料を用いて，1 inch 以上の積雪の無い月と，積雪1 inch 以上の月量日平均に対し，次の式を得た. 積雪によるAlbedo増加が全天日射量の増加をもたらした例といえよう．

(積雪無し) $$(Q_T/Q_0)_M = 0.262 + 0.5349\cdot(n/N)_M \tag{2.3}$$

(積雪有り) $$(Q_T/Q_0)_M = 0.338 + 0.4701\cdot(n/N)_M \tag{2.4}$$

(全てのデータ) $$(Q_T/Q_0)_M = 0.296 + 0.5039\cdot(n/N)_M \tag{2.5}$$

月量日射率と日照率に関する国内での値としては，エプリー日射計及びジョルダン日照計による1958-1964 年の関原・鈴木(1967)の $a=0.22$, $b=0.52$ (全国６地点)，全国 14 の観測所の1962-1971 年のロビッチ型日射計について村井・山内(1975)が求めた $a=0.21$, $b=0.54$, 吉田・中西(1970)が仙台で 1967 年６ 月－1969 年６ 月のエプリー式日射計とジョルダン式日照計により求めた $a=0.18$, $b=0.534$, 同じくエプリー式日射計とバイメタル式日照計により求めた $a=0.147$, $b=0.583$, 吉田・篠木(1978)がエプリー式日射計とジョルダン式日照計により求めた $a=0.18$, $b=0.53$ (無降雪の場合 $a=0.179$, $b=0.528$) などがある(**Table 2.1** 参照)．関根(1979)がバイメタル式日射計とジョルダン式日照計によって潮岬において求めた係数は，期間によって $a=0.11$～0.21, $b=0.45$～0.67 と幅があり，最も信頼できそうなのは $a=0.19$, $b=0.48$ である．浦野・三木(1980)は，1975 年 12 月 -1979 年 11 月の全国 66 気象官署の非積雪期の月量に関して $a=0.1934$, $b=0.5011$ (相関係数 $R=0.86$) を得ている．

Table 2.1 過去の研究者による月量日射率（ Y ）と日照率（ X ）の回帰定数（a）と回帰係数（b）の例

研究者	発表年	a	b	r	月数	地点	日照計
*Black*ら [1)]	1954	0.23	0.48	-	384	世界各地	Campbell-Stokes
Page [1)]	1961	0.23	0.52	-	742	40°S-40°Nの世界各地	Campbell-Stokes
*Glover*ら [1)]	1958	0.23	0.62	0.85	60	ケニヤ	Campbell-Stokes
Davies [1)]	1965	0.19	0.60	0.86	210	西アフリカ	Campbell-Stokes
関原・鈴木 [1)]	1967	0.22	0.52	0.91	300	日本(6地区)	Jordan
吉田・中西 [2)]	1970	0.18	0.534	0.96	24	仙台	Jordan
〃	〃	0.147	0.583	0.95	24	仙台	Bimetal
吉田 [3)]	〃	0.208	0.480	0.91	33	札幌	Jordan
〃	〃	0.266	0.435	0.93	13	札幌	Jordan
吉田・篠木 [4)]	1978	0.179	0.528	-	676	日本153官署 1941-1970	Jordan

1) 関原 彊・鈴木 正: 日射と日照の相関関係およびロビッチ日射計の観測地について, 気象庁研究時報, , 19 巻 11 号, pp. 48-53, 1967

2) 吉田作松・中西秀二: 東北地方における月平均水平面日射量分布図の作成, 天気, Vol. 17, pp. 273-280, 1970

3) 吉田作松: 水平面日射量におよぼす積雪の影響, 気象庁研究時報, 22 巻 3 号, pp. 85-90, 1970

4) 吉田作松・篠木誓一: 日本における月平均全天日射量およびその年々の変動度のマップの作成, 天気, Vol. 25, pp. 375-389, 1978

大槻・三野・丸山(1984)は1971-1980年の全国65気象官署の熱電堆式（エプリー式）日射計による係数をa= 0.19, b= 0.51 としている.

農業気象研究集録(1980)によると *Sivkov* は次式を提案した.

$$Q_T = Q_0(0.2 + 0.2(n/N)_M + 0.5(n/N)_M{}^2) \tag{2.6}$$

Sivkov は月間日照時数 n と, 正午の太陽高度の月平均値 h_c を用いて月量全天日射量推定式を提案した.

$$Q_T = 49n^{1.31} \cdot 10^{-4} + 10.5 \sin h_c \quad (2.7)$$

ここに，Q_T ：月量全天日射量(cal/cm²/month).

日平均日射率と日平均日照率との間の関係については，*Ito* (1960) が東京(1949年)で求めた $a=0.18$, $b=0.55$ がある．*Ito* が用いた測器は明示されていないが，銀盤日射計とジョルダン式日照計ではないかと思われる．

また斎藤・松尾・落藤(1964)が，エプリー式日射計とジョルダン式日照計(1957年6月‐1959年12月)から日量全天日射量 Q_T を推定する次式を得た．

$$Q_T = b_0(X_0 + n/N) \quad (2.8)$$

ここに，Q_T ：日量水平面全天日射量 (kcal/m²/day)，b_0 ： **Table 2.2** のように季節変化をする係数，X_0 ：定数，0.33.

Table 2.2　斎藤・松尾・落藤の b_0 (斎藤・松尾・落藤(1964)より)

1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
2565	3430	4345	5490	6080	6530	6210	5330	4733	3813	2993	2450

山田 (1983)は新潟県上越市 (高田 1978.11～) の北陸農業試験場と長野県松本市 (1979.11～)の蚕糸試験場の 1 年間の熱電堆型日射計と太陽電池式日照計のデータから，日平均日射率$(Q_T/Q_0)_D$について次式を導いた．

$$(Q_T/Q_0)_D = 0.17 + 0.76(n/N)_{SD} \quad \text{(高田)} \quad (2.9)$$

$$(Q_T/Q_0)_D = 0.19 + 0.77(n/N)_{SD} \quad \text{(松本)} \quad (2.10)$$

ここに，日照率n/Nの添え字Sは太陽電池式を，Dは日平均日照率を表す．

n/Nに対応する $(Q_T/Q_0)_D$ は，高田において，冬季で積雪がある場合は大きく，ない場合は小さい．夏季はその中間であった．

$$(Q_T / Q_0)_D = 0.188 + 0.80\,(n / N)_{SD} \qquad \text{(高田，冬季積雪あり)} \qquad (2.11)$$

$$(Q_T / Q_0)_D = 0.134 + 0.73\,(n / N)_{SD} \qquad \text{(高田，冬季積雪なし)} \qquad (2.12)$$

$$(Q_T / Q_0)_D = 0.164 + 0.74(n / N)_{SD} \qquad \text{(高田，夏季)} \qquad (2.13)$$

氷高(1985)は，中国地方の福山市・大田市における 1978年 11月～1983年 3月及び山口市の 1979年 10月～1983 年 3月の熱電堆式日射計及び MS-90 型太陽電池式日照計による観測から，次に示す日平均日射率推定式を求めた.

$$(Q_T / Q_0)_D = 0.133 + 0.551(n / N)_{SD} \quad \text{(福山，}r = 0.966, CV = 10.49\text{)} \qquad (2.14)$$

$$(Q_T / Q_0)_D = 0.145 + 0.564(n / N)_{SD} \quad \text{(大田，}r = 0.973, CV = 11.40\text{)} \qquad (2.15)$$

$$(Q_T / Q_0)_D = 0.138 + 0.578(n / N)_{SD} \quad \text{(山口，}r = 0.971, CV = 10.57\text{)} \qquad (2.16)$$

$$(Q_T / Q_0)_D = 0.141 + 0.559(n / N)_{SD} \quad \text{(中国地方 3 市，}r = 0.969, CV = 11.09\text{)} \qquad (2.17)$$

ここに，r は相関係数，CV は変動係数を表す.

月量推定式としては，次に述べる吉田・篠木の式が，現在わが国で最も精度が高いとされている.

2.1.3 吉田・篠木の式

吉田・篠木(1978)は1972 年－1976 年2月の気象庁の熱電堆式日射計A型とジョルダン式日照計による全国 39 地点，延べ 966カ月のデータを用いて次式を作成した（太陽定数は1.98 cal/cm^2/min）.

$$(Q_T / Q_0)_M = 0.149 + 0.546\,(n / N)_{JM} + 0.037 G_{10} + 0.048 \sin h_0 \qquad (2.18)$$

ここに，Q_T ：月平均全天日射量（cal/cm^2/day），Q_0 ：大気外水平面日射量の月平均値（cal/cm^2/day），$(n/N)_{JM}$ ：ジョルダン式日照計による月平均日照率，G_{10} ：積雪指数（0.0－1.0），１ヵ月の日数に対するその月で積雪深が 10cm 以上であった日の割合．無降雪の月はG_{10}=0となる．h_0 ：各月15日の南中時刻の太陽高度．

この式による重相関係数は0.965，標準誤差は0.018 であり，これまでのどの推定式よりも誤差が小さい．なお，(2.18)式は当初提案時は IPS-1956 基準（International Pyrheliometric Scale)によっていたが，その後 WRR 基準(World Radiometric Reference)に修正したものを示している．

浦野・三木（1980)は積雪を考慮した全天日射量推定式として次式を提案した．

$$Q_T = (0.1934 + 0.5011\,n/N)(1 + 0.138\,G_{10}) \qquad (r = 0.906) \qquad (2.19)$$

ここでは触れなかったが，月平均の１時間毎の全天日射量を標準的天気（晴天日，曇天日など)毎に，直達日射量と散乱日射量にモデルによって振り分ける研究がある(日本気象協会(1989))．

ただ，時刻毎に変化する実際の斜面日射量の推定には使用できないので，ここではこの月平均モデルによるアプローチは採用しなかった．

2.1.4　日射スケールと太陽定数

ここで，吉田・篠木式（(2.18)式）の項で触れた日射スケールのことと，日射スケールと関係が深い太陽定数のことを述べておこう．太陽と地球の年平均距離において，地球が単位時間に太陽に正対して単位面積で受ける日射エネルギーのことを太陽定数と呼んでいる．この太陽定数は，本来一定のはずであるが，実際には，日射計標準器の定め方によって人為的に変えられてきたということと，技術の進歩によって測定精度が向上し，正しいと信ぜられる数値が変動してきたという２つの側面を持っている．

日射スケールは，1957年以前は太陽定数＝1.94 cal/cm^2/min を使用していたが，1957年，それまでの米国スミソニアン研究所のスミソニアン日射スケールとスエーデンのストックホルム大学のオングストローム日射スケールの平均的差3.5%を合致させるため，世界気象機関（WMO）はスミソニアンスケールを2%下げ，オングストロームスケールを1.5%上げた．

気象庁の日射計は 1935-1945 年には欧州製ロビッチ日射計（バイメタル式）を標準

とし，1946-1957 年には銀盤日射計の観測値から適当な推定法によって検定，1957 年以降は米国製エプリー日射計（熱電堆式）を標準器としてきた(関根(1979))．そして1957年当時はスミソニアン日射スケールを採用していたので太陽定数も2%げて 1.901 cal/cm^2/min となった．その後ロケット観測などによる観測結果からこの値は小さ過ぎるという意見が認められ，国際放射委員会が IGY(International Geophysical Year 1957.7.1 - 1958.12.31）に際して使用した 1.98 cal/cm^2/min が1964年以降用いられるようになった．

その後1981年1月1日から1.96 cal/cm^2/min に改訂することが WRR（世界放射基準）で定められており，理科年表(東京天文台(1982 - 1994)の値もこれに基づいているが，わが国の気象庁は現在でも1.98 cal/cm^2/minを採用している．近年再び 1.94 cal/cm^2/min が正しいという意見が研究者の間では強くなりつつあり，一方個人的に 1.95 cal/cm^2/min，1.93 cal/cm^2/min を用いる人もいて，研究論文によってまちまちになっているのが現状である．

日射率の式に $Q_0\ (=\sum I_0 \sin h)$ が含まれることから，太陽定数の値が係数 a，b の値に影響することは明かである．ただ，どの太陽定数を採用するとしても，ここに掲げた式を利用する場合には，式で使用されている太陽定数と係数をそのまま使用することにすれば，日射量推定上困ることはない．よって本論文では太陽定数を本来いくらにとるべきかの議論は行わず，その都度，太陽定数をできる限り明示するにとどめることとした．

筆者は1995年以前の筆者の学術研究報告，学会論文集は 1.98 cal/cm^2/min を使用してきたが，1995 年農土論集の閲読の際，1.96 cal/cm^2/min に変えるよう求められたため，その後の論文はすべて1.96 cal/cm^2/minを使用している．

本論文では第２章までの筆者提案式についてはおおむね 1.98 cal/cm^2/min = 1.38 kW･/m^{2}を使用したが，第３章以降の紙井ら(1996)，同(1998)を引用している部分では 1.96 cal/cm^2/min = 1.37 kW/m^2 を使用している．

ただし，第２章(2.59)，(2.60)，(2.61)，(2.62) 式などのように，$(Q_T/Q_0)_D$ を等置して $(n/N)_D$ 相互の関係を導くためには，太陽定数を合わせておく必要があったので，第２章の (3.9)～(3.12)式及び **Table 2.12(1)(2)**，**2.13(1)(2)**，**Fig. 2.7, 2.8** では 1.96 cal/cm^2/minを使用した．

2.1.5 雲量を用いた推定式

世界的にみると雲量を用いた日射量推定式も多い．月平均雲量C_M (0 - 1)は月平均で考えると，極端に大きいかまたは小さい月は全然無く（即ちC_M= 0 またはC_M= 1），平均的にC_M= 0.6 付近に分布するため，日射量と雲量との関係は直線的ではなく，一般に日射量は雲量の2次式で表現されている．例えば次のような式である(*Kondratyev* (1969))．

$$Q_T = Q_0\{1-(a_C+b_C C_M)C_M\} \tag{2.20}$$

b_Cはほぼ一定で，*Berland*(*Kondratyev* (1969)，*Berland* (1960))によるとb_C= 0.38，a_C は緯度によって変化し，**Table 2.3** のようである．

Table 2.3 *Berland*の a_C (*Kondratyev* (1969)より引用)

緯度(°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
a_C	0.38	0.40	0.40	0.39	0.37	0.35	0.36	0.38	0.38
緯度(°)	45	50	55	60	65	70	75	80	85
a_C	0.38	0.40	0.41	0.36	0.25	0.18	0.16	0.15	0.14

Black (1960)は北米と西欧の 88 地点の観測値から次式を得た．

$$Q_T = Q_0(0.803-0.34\,C_M-0.458\,C_M{}^2) \tag{2.21}$$

Kimball (1930)は 次式を提案した．

$$Q_T = Q_{cl}(1-0.71\,C_M) \tag{2.22}$$

ここに，Q_{cl} ：完全晴天日の全天日射量．

Berland (1960)によると (2.22) 式のような1次式による日射量推定値は実測値に比較して，夏期には過小，冬期には過大になるという．

また *Savinov-Ångström* 公式がある．

$$Q_T / Q_{cl} = 1-(1-k)c_l \qquad (2.23)$$

ここに，k ：雲の短波放射透過特性に関する経験値，c_l ：Index of sky's dullness $=(1-n/N+C_M)/2$，完全晴天日には $c_l=0$，完全曇天日には $c_l=1$，0 と 1 の間の値をとる．多くの場合 $c_l = C_M$ にとられる．k の値を **Table 2.4** に掲げる．

Table 2.4 (2.23)式の k の値(*Kondratyev* (1969)より引用)

緯度(°)	75	70	65	60	55	50	45	40
k	0.55	0.50	0.45	0.40	0.38	0.36	0.34	0.33
緯度(°)	35	30	25	20	15	10	5	0
k	0.32	0.32	0.32	0.33	0.33	0.34	0.34	0.35

わが国の雲量から日射量を算定する研究は，時間量日射量を算定しようとする試みが木村・宇田川(1970)，荒谷・絵内・鈴木(1973)，赤坂(1985)などによってなされている．木村らは晴天時の日射量に雲量係数 CCF を掛けて曇天時の時間日射量を算定しようとした．木村らの方法では全雲量の外に中層雲と低層雲の雲量が必要である．荒谷らは札幌のデータから透過性の高い雲による散乱日射量の増加の影響を雲量に日照率を加味して評価した．赤坂の研究は時刻別日照率に雲量，天気，水蒸気圧などのデータを加味して，時間日射量推定精度の向上を図ったものである．いずれの方法も日射量データがない場合に有効と考えられるが，時間的な変化に追随した特殊な雲量データが必要であり，日に３回または４回目視で観測して日平均をとるという，現在の気象官署の雲量データでは十分でないという点で実用性に欠けるであろう．

以上の点から推測されるように，雲量は直達日射量と散乱日射量に影響する重要な気象因子ではあるが，以下のような欠点がある．

①観測が自動化されておらず，人の目に頼っていること，このため精度と観測回数に限界がある．

②１日３回観測と４回観測が混在していること，中には１日１回の観測官署もある．

②英・仏・イラン・アフリカのいくつかの国が 1949 年以降従来の 10段階測定から 8 段階測定に移行したことにより，国際的に雲量という気象要素に統一がなくなっていること．

③日射量との関係では，雲の種類（高度を含む）と太陽に対する雲の位置が問題であるが，雲量の中にはそれらの要素が含まれていないこと，などである．

これらの欠陥のため，雲量による日射量推定は，日照率による推定に比べて精度が落ちる．雲量しか手がかりがない地域は別として，多くの観測所で日照時間が観測されているわが国では，雲量による日射量の推定は重要性が低いと考えられる．

(2.22), (2.23) 式などに用いられている，完全晴天日の全天日射量 Q_{cl} あるいは完全晴天時の時刻全天日射量 I_{cl} を推定する式もいくつか提案されている（例えば文献 *Kondratyev* (1969), *Kondo* (1967) 参照）．

2.2　従来の直達・散乱日射量推定式

2.2.1　従来の研究

直達日射量あるいは散乱日射量を求める場合，①全天日射量が予め求まっている場合，②全天日射量が求まっておらず，日照率・雲量などから推定せざるを得ない場合，の２つが考えられる．

日量（月量）の直達日射量・散乱日射量を求める方法としては，日(月)間日射率 Q_T/Q_0 から日(月)間平均散乱比 Q_S/Q_T または日(月)間直達比 Q_D/Q_T を求めるものと，日照率，雲量，太陽高度などから日(月)間散乱比，または同直達比を求めるものとがある．

例えば *Page* (1961)（吉田・篠木(1983)）は 52°N－34°Sの間にある 10地点における月間散乱比 $(Q_S/Q_T)_M$ について，次式を得た．

$$(Q_S/Q_T)_M = 1.00 - 1.13(Q_T/Q_0)_M \tag{2.24}$$

ここに，Q_S：月量散乱日射量，Q_T：月量全天日射量，$(Q_T/Q_0)_M$：月間日射率，Q_0：月量大気外日射量．

IHVE Guide (1970) は完全晴天日の瞬間散乱日射量 *ISH* (W/m^2) について次式を提示している（*Bugler*(1977)）．

$$ISH = 16.0\,h^{0.5} - 0.4\,h \tag{2.25}$$

ここに，h：太陽高度（deg）．

Iqbal (1979) はトロントとモントリオールのデータから，同じく月間散乱比

$(Q_S/Q_T)_M$ に関する次の式を得た.

$$(Q_S/Q_T)_M = 0.958 - 0.982\,(Q_T/Q_0)_M \tag{2.26}$$

Klein(1977)は*Liu and Jordan*(1960)によるヨーロッパの4地点のデータを用いて,月平均散乱比 $(Q_S/Q_T)_M$ に関する次の回帰式を作成した(吉田・篠木(1983)).

$$(Q_S/Q_T)_M = 1.390 - 4.027\,KTM + 5.531KTM^2 - 3.108\,KTM^3 \tag{2.27}$$

ここに, $KTM = (Q_T/Q_0)_M$ (月間日射率).

Collares-Pereira and Rabl(1979)は,米国の5地点のデータから,月平均散乱比 $(Q_S/Q_T)_M$ について(2.28)式,日平均散乱比 $(Q_S/Q_T)_D$ について(2.29)式を導いた.

$$(Q_S/Q_T)_M = 0.775 + 0.347\,(\omega_S - \pi/2) - \{0.505 + 0.261(\omega_S - \pi/2)\} \cdot \cos(2KTM - 0.9) \tag{2.28}$$

ここに, ω_S :日没時の太陽時角(rad).

$$(Q_S/Q_T)_D = 0.99 \qquad (KTD < 0.17) \tag{2.29}$$

$$(Q_S/Q_T)_D = 1.188 - 2.272\,KTD + 9.473\,KTD^2 - 21.856\,KTD^3 + 14.648KTD^4 \qquad (0.17 < KTD < 0.8)$$

ここに, $KTD = (Q_T/Q_0)_D$ (日平均日射率).

Iqbal(1979)はカナダの3観測所のデータから,月平均散乱比 $(Q_S/Q_0)_M$ に関するする次の2個の式を得た.

$$(Q_S/Q_T)_M = 0.791 - 0.635\,(n/N)_M \tag{2.30}$$

$$(Q_S / Q_0)_M = 0.163 + 0.478(n/N)_M - 0.655(n/N)_M{}^2 \qquad (2.31)$$

吉田・篠木(1983)は1964－1989年10月の全国10地点，延べ243カ月の熱電堆式日射計による日射量データ並びにジョルダン式日照計による日照率データから次式を作成した（太陽定数1.98 cal/cm^2/min = 1.38 kW/m^2，標準誤差約 7 %）．

$$Q_S = (Q_T - 0.048\,G_{10}Q_0)(0.950 - 1.336(n/N)_{JM} + 0.702(n/N)_{JM}{}^2 + 0.217\,C_i)$$

$$+ 0.048G_{10}Q_0 \qquad (2.32)$$

ここに，Q_S：月平均散乱日射量(MJ/m^2/day)，G_{10}：積雪指数（前出），Q_0：月平均大気外水平面日射量(MJ/m^2/day)，$C_i = (n/N)_{JM} + C_M - 1$（月平均うす雲指数)，$C_M$：月平均雲量(0 - 1)．

吉田・篠木(1983)は，積雪によって散乱日射量が大いに異なると考え，積雪月を除いた219カ月のデータを用いて，月平均散乱比 Q_S/Q_T に関する次式を作成した（太陽定数 1.98cal/cm^2/min = 1.38kW/m^2）．

$$(Q_S / Q_T)_M = 0.950 - 1.336(n/N)_{JM} + 0.702(n/N)_{JM}{}^2 + 0.217\,C_i$$

$$(r = 0.904,\ s = 0.037) \qquad (2.33)$$

吉田・篠木(1983)は（2.32)式と同じデータから次式を作成した．

$$DR = 3.6\,I_{m0}\,P_M{}^m\,N_{m0}\{0.661(1 - C_M) + 0.474\,C_i\} - 0.84$$

$$(r = 0.963,\ s = 0.85\mathrm{MJ\cdot m^2/day}) \qquad (2.34)$$

ここに，DR：月平均法線面直達日射量(MJ/m^2/day)，I_{m0}：各月の太陽赤緯の平均日における大気外法線面日射強度(kW/m^2)，P_M：各月の大気透過率，m：各月の太陽赤緯の平均日における太陽南中時の air mass（$=\mathrm{cosec}\,h_c$)，N_{m0}：各月の太陽赤緯の平均日における可照時間(hr)，C_i：月平均うす雲指数(0－1)（前出）．

内嶋・桜谷・奥山(1981）は西ヶ原(東京，1978.10－1980.1)，観音台（筑波，1978.

10－1980. 12)の熱電堆式日射計及び太陽電池式日照計のデータを用いて日平均直達放射比 $=(Q_D/Q_T)_D$ と日平均日照率の関係を次の様に導いた.

$$(Q_D/Q_T)_D = 0.86\,(n/N)_{SD}^{\ 1.3} \qquad \text{(西ヶ原)} \qquad (2.35)$$

$$(Q_D/Q_T)_D = 0.86\,(n/N)_{SD}^{\ 1.51} \qquad \text{(観音台)} \qquad (2.36)$$

また $(Q_D/Q_T)_D$ と $x=Q_T/Q_{cl}$ に生長曲線をあてはめた次式を導いた(内嶋ら(1981)).

$$(Q_D/Q_T)_D = 0.943/\left[1+\exp\left\{-7.533\,(x-0.557)\right\}\right] \qquad \text{(西ヶ原)} \qquad (2.37)$$

$$(Q_D/Q_T)_D = 0.936/\left[1+\exp\left\{-7.537\,(x-0.613)\right\}\right] \qquad \text{(観音台)} \qquad (2.38)$$

ここに, Q_T ：当日の全天日射量(MJ/m^2/day), Q_{cl} ：完全晴天日の全天射量(MJ/m^2/day)・

中西・木村・橋本・森田・永井(1982)によると1978年12月－1980年12月の熱電堆式日射計, 太陽電池式日照計による善通寺, 高知, 1979年11月－1980年12月の徳島の Q_D/Q_T と n/N との関係は次式であらわされる.

$$(Q_D/Q_T)_D = 0.80\,(n/N)_{SD}^{\ 1.144} \qquad \text{(善通寺)} \qquad (2.39)$$

$$(Q_D/Q_T)_D = 0.84\,(n/N)_{SD}^{\ 0.799} \qquad \text{(高知)} \qquad (2.40)$$

$$(Q_D/Q_T)_D = 0.83\,(n/N)_{SD}^{\ 0.871} \qquad \text{(徳島)} \qquad (2.41)$$

山田・岩切・鴨田(1983)は, 高田・松本の 1979. 11-1980. 10 の日量データから, 直達放射比 Q_D/Q_T と $x=Q_T/Q_{cl}$ についての次式を導いた.

$$(Q_D/Q_T)_D = 0.876/\left\{1+74.4\exp(-6.96x)\right\} \qquad \text{(高田)} \qquad (2.42)$$

$$(Q_D/Q_T)_D = 0.870/\left\{1+184.5\exp(-8.89x)\right\} \qquad \text{(松本)} \qquad (2.43)$$

また，山田・岩切・鴨田(1983)は日間散乱放射比 $(Q_S/Q_T)_D$ と太陽電池式日照計による日照率 $(n/N)_{SD}$ との間には，次の指数関係を見いだした.

$$(Q_S/Q_T)_D = \{1-(n/N)_{SD}\}^{0.67} \qquad \text{(高田)} \qquad (2.44)$$

$$(Q_S/Q_T)_D = \{1-(n/N)_{SD}\}^{0.63} \qquad \text{(松本)} \qquad (2.45)$$

氷高(1985)は，1978年 11月 -1983年 3月の福山・大田，1979年10月-1983年3月の山口の熱電堆式日射計，太陽電池式日照計によるデータから，日平均散乱比 Q_S/Q_T と日平均日照率 $(n/N)_{SD}$ との間に次に示す関係があることを報告している.

$$(Q_S/Q_T)_D = 0.906 - 0.348(n/N)_{SD} - 0.351(n/N)_{SD}{}^2$$

(福山，r = −0. 922) (2. 46)

$$(Q_S/Q_T)_D = 0.915 - 0.529(n/N)_{SD} - 0.192(n/N)_{SD}{}^2$$

(大田，r = −0. 930) (2. 47)

$$(Q_S/Q_T)_D = 0.926 - 0.417(n/N)_{SD} - 0.323(n/N)_{SD}{}^2$$

(山口，r = −0. 931) (2. 48)

2. 3 筆者の全天日射量推定式

2. 3. 1 月間日照率を用いた月量全天日射量の推定

紙井・近森(1986a)は，1978−1984 年の気象庁の熱電堆式日射計とジョルダン式日照計について，全国 16 気象官署の延べ 1, 321 個の月量のデータから a = 0. 19, b = 0. 50 を得た（ Table 2. 5, 2. 6, Fig. 2. 1 参照）.

$$(Q_T/Q_0)_M = 0.19 + 0.50(n/N)_{JM}$$

(月量，全国 16 地区，r^2= 0. 86，s = 0. 028) (2. 49)

Table 2.5　観測地点の位置と測定日射量

観測地点	北緯(度分)	東経(度分)	海抜高度(m)	測定日射量
札幌	43　3	141　20	17.2	全天・直達
根室	43　20	145　35	25.8	〃　〃
秋田	39　43	140　6	9.4	〃　〃
宮古	39　39	141　58	42.5	〃　〃
輪島	37　23	136　54	5.3	〃　〃
松本	36　15	137　58	610.0	〃　〃
館野	36　3	140　8	26.0	全天・直達・散乱
米子	35　26	133　21	6.5	全天・直達
潮岬	33　27	135　46	73.2	〃　〃
福岡	33　35	130　23	2.5	〃　〃
鹿児島	31　34	130　33	4.3	〃　〃
清水	32　43	133　1	31.0	〃　〃
石垣島	24　20	124　10	5.7	〃　〃
那覇	26　14	127　41	34.9	〃　〃
父島	27　5	142　11	2.7	全天
南鳥島	24　18	153　58	8.7	〃
平均	34　01	137　11	56.6	全16・直14・散1

Table 2.6　月間日照率$(n/N)_{JM}$と月間日射率$(Q_T/Q_0)_M$との関係(紙井・近森(1986a)より)

観測地点	a	b	r^2	s	$\overline{n/N}$	$\overline{Q_T/Q_0}$	データ数 N_0
札幌	0.27	0.34	0.40	0.032	0.46	0.43	84
根室	0.24	0.45	0.81	0.028	0.48	0.46	84
秋田	0.18	0.48	0.92	0.018	0.41	0.38	83
宮古	0.20	0.47	0.90	0.018	0.50	0.44	84
輪島	0.16	0.54	0.96	0.017	0.40	0.38	80
松本	0.22	0.47	0.79	0.024	0.52	0.47	84
館野	0.22	0.47	0.94	0.016	0.46	0.43	72
米子	0.19	0.49	0.93	0.015	0.45	0.41	84
潮岬	0.19	0.49	0.89	0.020	0.54	0.46	82
福岡	0.17	0.53	0.89	0.018	0.46	0.41	84
鹿児島	0.19	0.49	0.92	0.014	0.48	0.43	84
清水	0.14	0.58	0.95	0.014	0.57	0.46	83
石垣島	0.24	0.44	0.87	0.029	0.45	0.44	83
那覇	0.19	0.48	0.91	0.023	0.47	0.41	84
父島	0.20	0.53	0.80	0.030	0.51	0.47	84
南鳥島	0.25	0.44	0.66	0.032	0.66	0.53	82
全国	0.19	0.50	0.86	0.028	0.49	0.44	1321

(注) 式：$(Q_T/Q_0)_M = a + b(n/N)_{JM}$

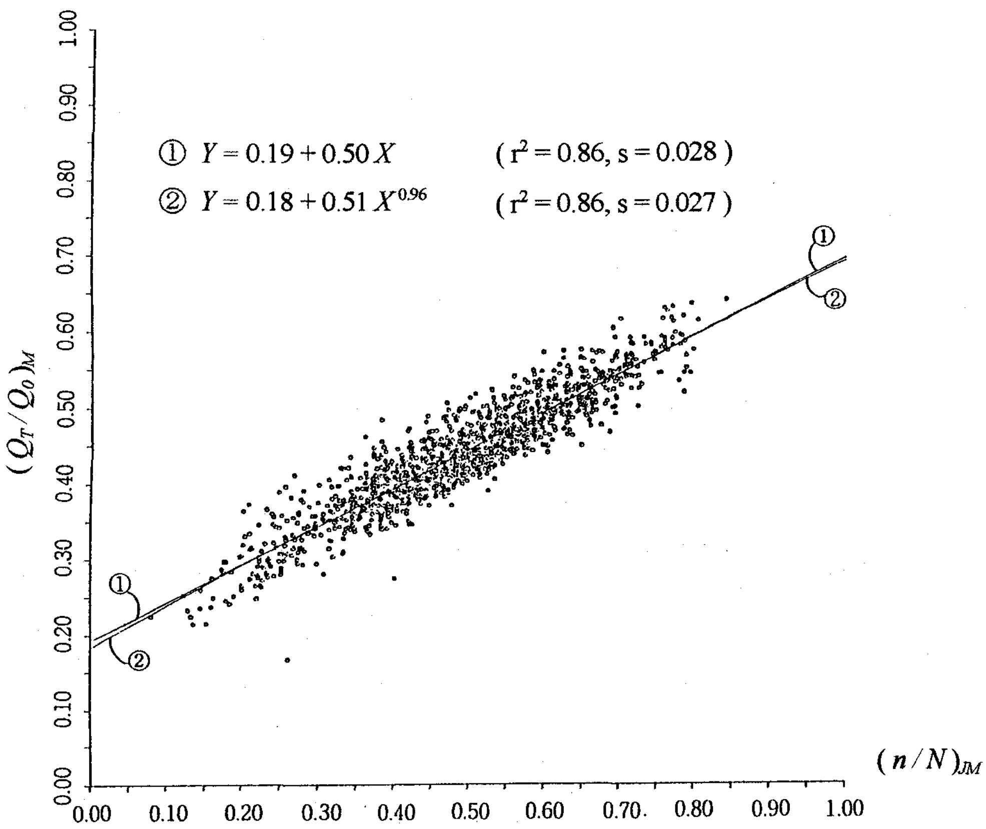

Fig. 2.1 月間日射率 $(Q_T/Q_0)_M$ と月間日照率 $(n/N)_{JM}$ の関係(全国, データ数 N_0=1, 321)

ここに $(Q_T/Q_0)_M$ ：月間全天日射率，Q_T ：月量全天日射量，WRR 放射基準による．ただし，欠測日は対応する Q_0，n，N とともに積算からはずし，1カ月に5日以上の欠測がある場合，その月のデータを解析から外した．Q_0 ：大気外水平面日射量の月積算値．太陽定数＝1.98 cal/cm^2/min＝1.38 kW/m^2（この章では特に断らない限りこの値を用いる）．太陽赤緯δは理科年表（東京天文台，1978-1984）による． $(n/N)_{JM}$ ：ジョルダン式日照計による月間日照率，n ：ジョルダン式日照計による日照時間の月積算値，N ：可照時間の月積算値．気象観測のための気象常用表(1971)による．r^2 ：回帰の決定係数（相関係数の自乗），s ：標準誤差．

同じデータに対し，べき指数型回帰式は月量に関してはほとんど直線であった．

$$(Q_T/Q_0)_M = 0.18 + 0.51(n/N)_{JM}{}^{0.96}$$

（月量，全国16地区，r^2＝0.86，s＝0.027） (2.50)

ここに，指数は相関係数が最大となるように試行錯誤により決定した．

この回帰式は，重相関係数0.965，標準誤差0.018の吉田・篠木式(吉田・篠木(1978))(2.18)式に比較すると精度は落ちる．また，大槻・三野・丸山(1984)が65地区，延べ5,913カ月のデータを用いてa = 0.19, b = 0.51（太陽定数1.95 cal/cm^2/min = 1.36 kW/m^2）を得，地区ごとの係数も算定している．

ただし，これらの式の適用にあたっては，計器について注意が必要である．気象庁の日射計は1957年以降エプリー式（熱電堆式）で現在でも同じであるが，1946－1957年までは銀盤日射計，1935－1945年は欧州のロビッチ日射計を標準としていた(斎藤・松尾・落藤((1964))．一方気象庁の日照計は1986－1987年頃，ジョルダン式日照計から回転式日照計に切り替えられているので，吉田・篠木式，大槻・三野・丸山の係数，(2.49),(2.50)式など，ジョルダン式日照計に基づいて得られた係数をそのまま適用することが現在では困難となっている．ジョルダン式・回転式両日照計の間で換算が可能であればよいのであるが，測定方式も感度も異なるため簡単にはいかない．いずれかの時点で回転式日照計データによる新しい回帰式の作成が必要である．しかし，それまで当分の間は上記のジョルダン式日照計に対応して作成された式を用いざるを得ない．また1987年以前のデータを用いたい場合には，ジョルダン式の回転式への換算が必要となる．これらのときの換算の方法については**2.3.3**で述べる．

2.3.2　日間日照率を用いた日量日射量の推定

次に日間日射率$(Q_T/Q_0)_D$と ジョルダン式日照計による日間日照率$(n/N)_{JD}$との回帰式を検討し(紙井・近森(1986b))，次式を得た（データ数N_0=40,386）．

$$(Q_T/Q_0)_D = 0.17 + 0.55(n/N)_{JD}$$

（日量，全国16地区，r^2=0.91, s=0.056）　(2.51)

$$(Q_T/Q_0)_D = 0.14 + 0.55(n/N)_{JD}^{0.73}$$

（日量，全国16地区，r^2=0.92, s=0.053）　(2.52)

各地区ごとの係数を**Table 2.7**に，(1.2)式のべき指数型推定式を**Table 2.8**に示す(ともに紙井・近森(1986b)より)．また宮古の散布図の例を**Fig.2.2**に示す．データ，太陽定数，WRR基準も上述の月量((2.49),(2.50)式)の場合と同様である．

Table 2.7　日間日照率 $(n/N)_{JD}$ と日間日射率 $(Q_T/Q_0)_D$ との関係その１

観測地点	a	b	r^2	s	$\overline{n/N}$	$\overline{Q_T/Q_0}$	N_0
札　幌	0.19	0.52	0.86	0.061	0.46	0.43	2553
根　室	0.21	0.51	0.89	0.060	0.48	0.46	2556
秋　田	0.16	0.54	0.92	0.050	0.41	0.38	2550
宮　古	0.17	0.53	0.92	0.050	0.50	0.44	2552
輪　島	0.16	0.55	0.93	0.048	0.40	0.38	2525
松　本	0.19	0.54	0.91	0.053	0.52	0.47	2557
舘　野	0.18	0.54	0.92	0.053	0.46	0.43	2191
米　子	0.16	0.55	0.93	0.048	0.46	0.41	2556
潮　岬	0.17	0.54	0.93	0.049	0.54	0.46	2540
福　岡	0.15	0.57	0.93	0.047	0.46	0.41	2550
鹿児島	0.15	0.57	0.93	0.050	0.48	0.43	2550
清　水	0.13	0.56	0.95	0.045	0.57	0.46	2538
石垣島	0.21	0.51	0.88	0.062	0.45	0.44	2528
那　覇	0.18	0.50	0.91	0.052	0.47	0.41	2556
父　島	0.20	0.54	0.88	0.055	0.51	0.47	2557
南鳥島	0.23	0.45	0.85	0.048	0.66	0.53	2526
全　国	0.17	0.54	0.91	0.055	0.49	0.44	40386

（注）式：$(Q_T/Q_0)_D = a + b(n/N)_{JD}$

Table 2.8　日間日照率と $(Q_T/Q_0)_D$ との関係その２

観測地点	a	b	P	s
札　幌	0.15	0.52	0.76	0.059
根　室	0.18	0.51	0.71	0.056
秋　田	0.12	0.54	0.75	0.047
宮　古	0.14	0.53	0.75	0.047
輪　島	0.12	0.55	0.74	0.044
松　本	0.15	0.55	0.73	0.049
舘　野	0.14	0.54	0.63	0.044
米　子	0.13	0.55	0.78	0.046
潮　岬	0.13	0.55	0.74	0.045
福　岡	0.11	0.57	0.73	0.047
鹿児島	0.12	0.57	0.76	0.047
清　水	0.11	0.59	0.84	0.043
石垣島	0.16	0.51	0.64	0.056
那　覇	0.14	0.51	0.71	0.048
父　島	0.15	0.54	0.71	0.051
南鳥島	0.17	0.50	0.70	0.046
全　国	0.14	0.54	0.73	0.052

（注）式：$(Q_T/Q_0)_D = a' + b'(n/N)_{JD}{}^{P}$

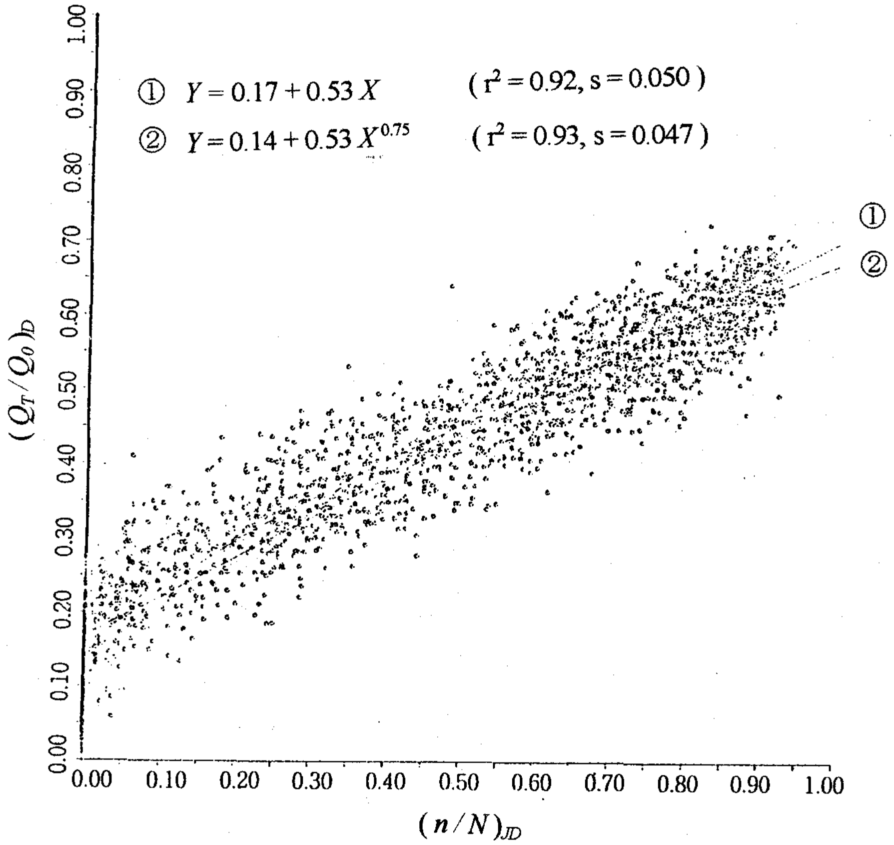

Fig. 2.2 日間日射率 $(Q_T/Q_0)_D$ と日間日照率 $(n/N)_{JD}$ の関係(宮古，データ数 N_0 =2, 552)

参考のために米子のバイメタル式 (1975-1978.11), ジョルダン式 (1975-1985), 旧型太陽電池式 (1978.12-1987.8), 回転式 (1986-1988) の各回帰式の回帰係数・定数を **Table 2.9, 2.10,2.11**に示す(**Fig. 2.3〜 2.6**参照).

Table 2.9 米子における日量日射率と日照率との回帰関係(線型)

Y	X	a	b	r^2	s	N_0
$(Q_T/Q_0)_D$	$(n/N)_{BD}$	0.078	0.613	0.887	0.0622	1409
$(Q_T/Q_0)_D$	$(n/N)_{JD}$	0.163	0.559	0.923	0.0515	3998
$(Q_T/Q_0)_D$	$(n/N)_{SD}$	0.138	0.561	0.906	0.0568	2827
$(Q_T/Q_0)_D$	$(n/N)_{RD}$	0.184	0.550	0.912	0.0546	1094

(注)回帰式: $Y = a + bX$, $(Q_T/Q_0)_D$: 日量日射率, $(n/N)_{*D}$: 日間日照率, 添字*の位置にあるBはバイメタル式, Jはジョルダン式, Sは太陽電池式(旧型), Rは回転式日照率を表す.

Table 2.10　米子における日量日射率と日照率との回帰関係(べき指数型)

Y	X	a'	b'	P	r^2	s
$(Q_T/Q_0)_D$	$(n/N)_{BD}$	0.111	0.609	1.24	0.893	0.0608
$(Q_T/Q_0)_D$	$(n/N)_{JD}$	0.130	0.561	0.77	0.931	0.0486
$(Q_T/Q_0)_D$	$(n/N)_{SD}$	0.131	0.562	0.95	0.906	0.0568
$(Q_T/Q_0)_D$	$(n/N)_{RD}$	0.130	0.550	0.63	0.942	0.0445

(注)回帰式: $Y=a'+b'X^P$, $(Q_T/Q_0)_D$: 日量日射率, $(n/N)_{*D}$: 日間日照率, *はTable 3.5 の(注)を参照.

Table 2.11　米子における日量日射率と日照率との回帰関係(月量, 線型)

Y	X	a	b	r^2	s	N_0
$(Q_T/Q_0)_M$	$(n/N)_{BM}$	0.122	0.532	0.7851	0.0333	47
$(Q_T/Q_0)_M$	$(n/N)_{JM}$	0.189	0.499	0.8982	0.0198	132
$(Q_T/Q_0)_M$	$(n/N)_{SM}$	0.208	0.417	0.7613	0.0273	93
$(Q_T/Q_0)_M$	$(n/N)_{RM}$	0.223	0.449	0.9166	0.0133	36

(注)回帰式: $Y=a+bX$, $(Q_T/Q_0)_M$: 月量日射率, $(n/N)_{*M}$: 月間日照率, *はTable 3.5 の(注)を参照.

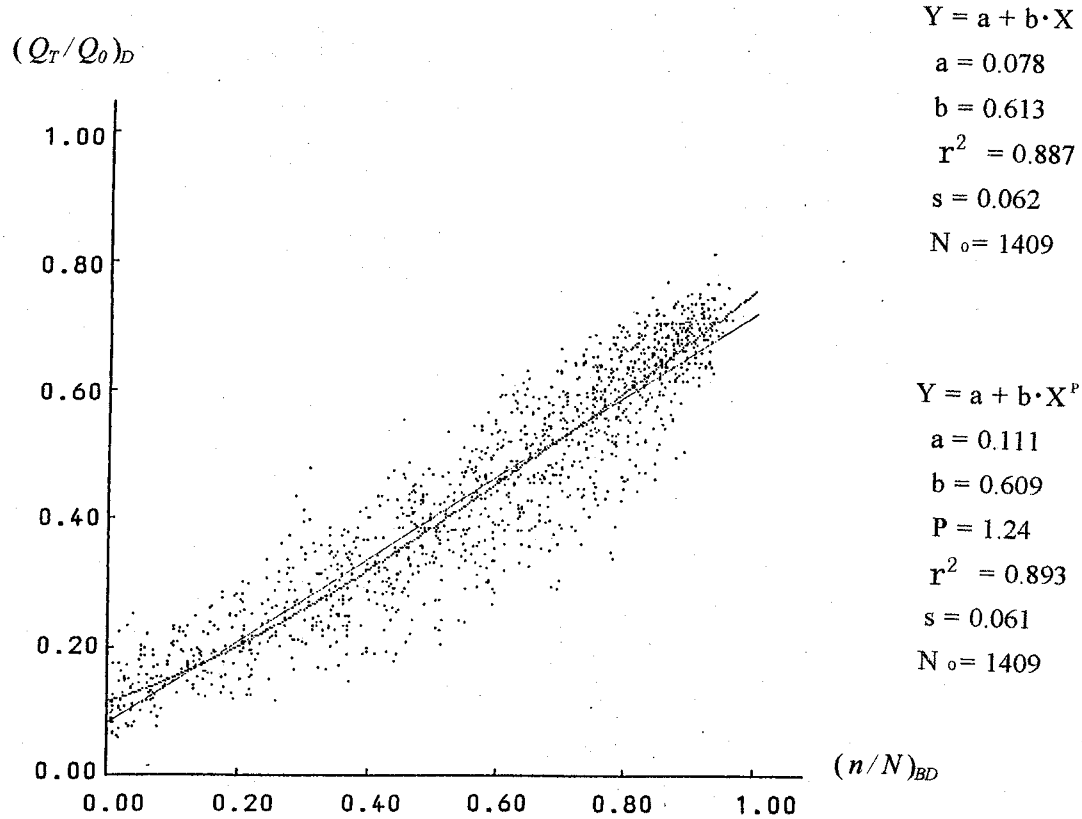

Fig. 2.3　米子における日間日射率 $(Q_T/Q_0)_D$ とバイメタル式日照計による日間日照率 $(n/N)_{BD}$ の関係

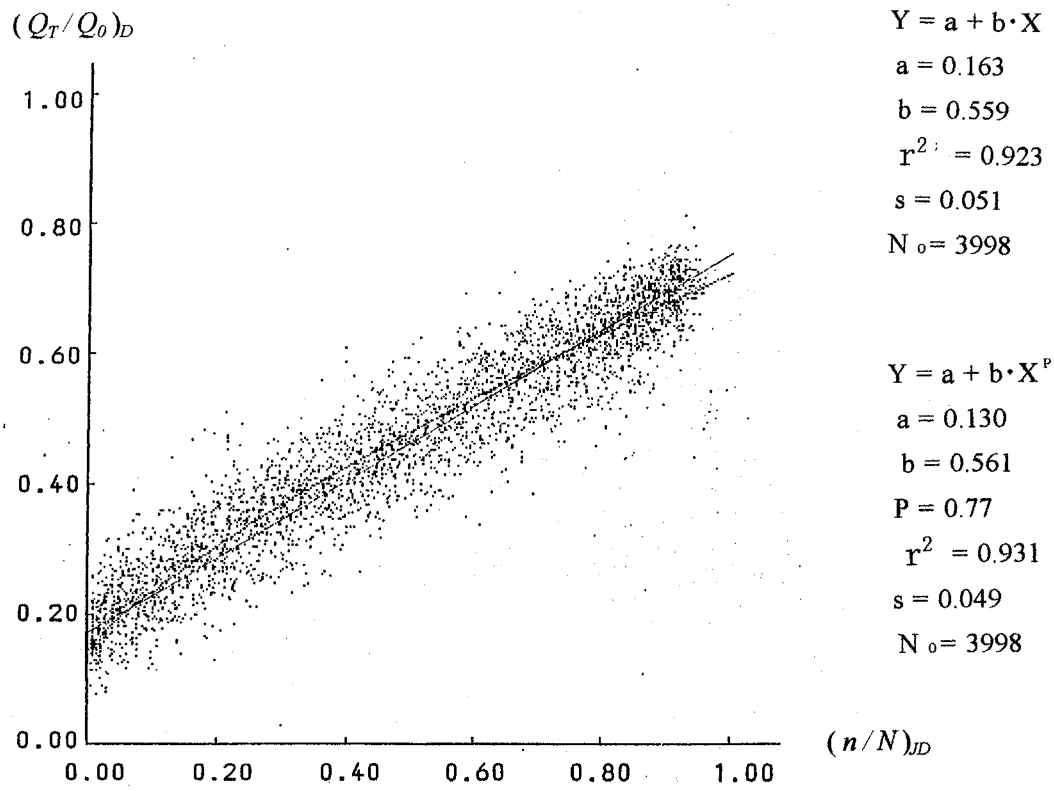

Fig. 2.4 米子における日間日射率 $(Q_T/Q_0)_D$ とジョルダン式日照計による日間日照率 $(n/N)_{JD}$ の関係

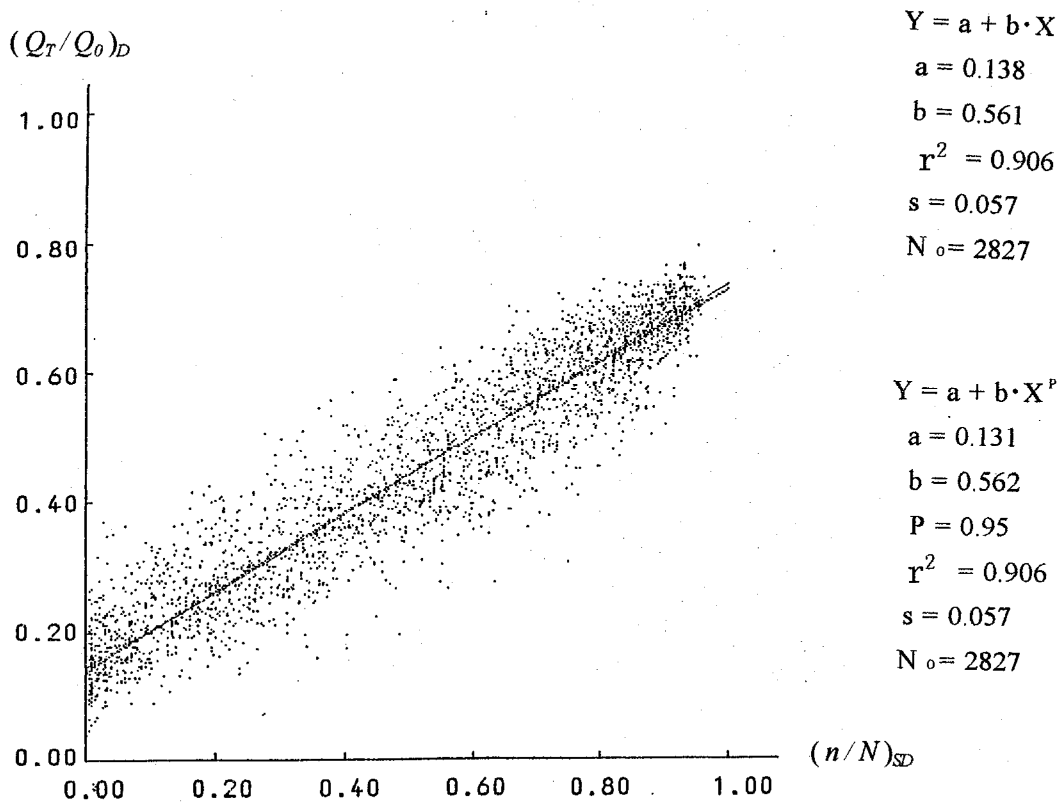

Fig. 2.5 米子における日間日射率 $(Q_T/Q_0)_D$ と(旧型)太陽電池式日照計による日間日照率 $(n/N)_{SD}$ の関係

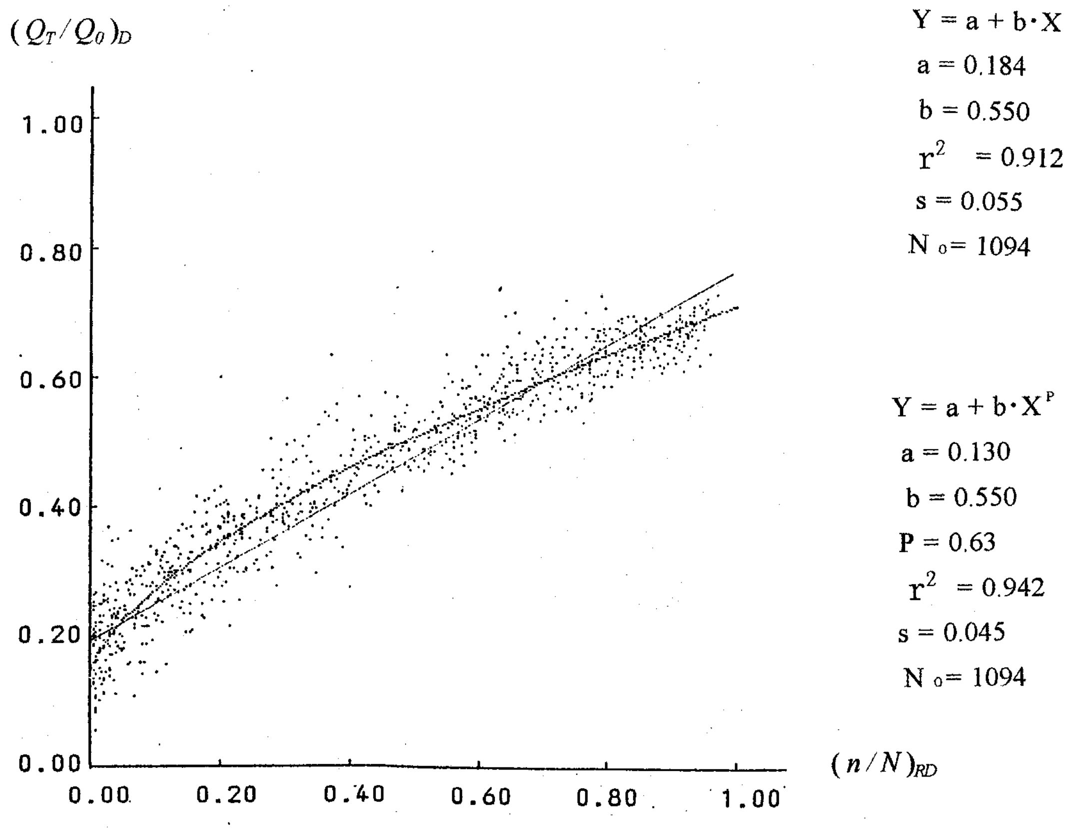

Fig. 2.6 米子における日間日射率 $(Q_T/Q_0)_D$ と回転式日照計による日間日照率 $(n/N)_{RD}$ の関係

筆者は高知市の1978.2－1984.12の日量全天日射量について次式を得た.

$$(Q_T/Q_0)_D = 0.124 + 0.576(n/N)_{JD}{}^{0.69}$$

(日量, 高知, r^2=0.97, s=0.048) (2.53)

$$(Q_T/Q_0)_D = 0.108 + 0.597(n/N)_{SD}{}^{0.86}$$

(日量, 高知, r^2=0.98, s=0.042) (2.54)

ここに, $(n/N)_{JD}$:ジョルダン式日照計による日間日照率, $(n/N)_{SD}$:旧型太陽電池式日照計による日間日照率. 太陽定数1.98 cal/m^2/min = 1.38 kW/m^2 .

全国66気象官署の熱電堆式日射計による日間日射率 Q_T/Q_0 と1971－1987年のジョルダン式日照計による日間日照率 $(n/N)_{JD}$ 及び1986-1990年の回転式日照計による日間日照率 $(n/N)_{RD}$ を用いた回帰式を示す(延べデータ数はそれぞれ N_0=302,350及び N_0=118,367, **Fig.2.7, 2.8, Table 2.12(1)(2), 2.13(1)(2)** 参照).

Table 2.12(1) 熱電堆式日射計による日射率 (Y)とジョルダン式日照計による日間日照率(X)との単回帰分析

熱電堆式日射計・ジョルダン式日照計

No.	Station			Lat.N (° ′)	Long.E (° ′)	H (m)	a	b	R	s	ave.X	ave.Y	N○	a'	b'	P	R	ave.X^P	s
401	稚内	Wakkanai	1973～1985	45.25	141.41	2.8	0.197	0.546	0.943	0.061	0.378	0.403	4660	0.165	0.538	0.73	0.950	0.444	0.057
402	北見枝幸	Kitamiesashi	1975～1987	44.56	142.35	6.7	0.215	0.540	0.932	0.066	0.411	0.437	4743	0.189	0.530	0.76	0.937	0.469	0.064
406	留萌	Rumoi	1974～1985	43.57	141.38	23.6	0.193	0.569	0.951	0.059	0.380	0.409	4316	0.164	0.562	0.77	0.955	0.435	0.056
407	旭川	Asahikawa	1973～1985	43.46	142.22	111.9	0.211	0.507	0.913	0.065	0.411	0.419	4743	0.177	0.502	0.74	0.919	0.483	0.062
409	網走	Abashiri	1973～1985	44.01	144.17	37.6	0.219	0.539	0.936	0.063	0.460	0.467	4742	0.191	0.534	0.77	0.941	0.516	0.060
412	札幌	Sapporo	1972～1985	43.03	141.20	17.2	0.192	0.541	0.934	0.061	0.455	0.439	5108	0.157	0.543	0.76	0.940	0.519	0.059
417	帯広	Obihiro	1975～1985	42.55	143.13	38.6	0.197	0.539	0.949	0.060	0.524	0.480	4017	0.164	0.539	0.71	0.956	0.586	0.056
420	根室	Nemuro	1972～1985	43.20	145.35	25.8	0.223	0.556	0.931	0.073	0.481	0.491	5109	0.191	0.553	0.72	0.937	0.542	0.070
421	寿都	Suttsu	1974～1985	42.47	140.14	15.7	0.193	0.564	0.955	0.055	0.364	0.399	4374	0.160	0.557	0.74	0.961	0.428	0.051
423	室蘭	Muroran	1974～1985	42.19	140.59	42.8	0.185	0.587	0.954	0.057	0.435	0.441	4373	0.148	0.582	0.73	0.961	0.503	0.053
426	浦河	Urakawa	1974～1985	42.10	142.47	33.5	0.180	0.569	0.954	0.059	0.493	0.461	4368	0.152	0.572	0.79	0.958	0.540	0.057
430	函館	Hakodate	1973～1985	41.49	140.45	33.2	0.190	0.514	0.895	0.079	0.450	0.422	4744	0.147	0.517	0.69	0.905	0.532	0.075
575	青森	Aomori	1973～1985	40.49	140.47	3.3	0.191	0.535	0.926	0.067	0.425	0.419	4711	0.162	0.537	0.79	0.929	0.480	0.065
581	八戸	Hachinohe	1974～1985	40.32	141.32	27.1	0.176	0.553	0.951	0.055	0.499	0.452	4372	0.146	0.554	0.78	0.955	0.553	0.053
582	秋田	Akita	1972～1985	39.43	140.06	9.4	0.163	0.567	0.961	0.052	0.405	0.392	5090	0.132	0.565	0.77	0.965	0.460	0.049
584	盛岡	Morioka	1973～1985	39.42	141.10	155.2	0.167	0.564	0.951	0.056	0.455	0.424	4744	0.138	0.559	0.77	0.956	0.512	0.054
585	宮古	Miyako	1973～1985	39.39	141.58	42.5	0.174	0.559	0.959	0.053	0.496	0.451	4408	0.145	0.557	0.77	0.963	0.549	0.050
587	酒田	Sakata	1974～1985	38.54	139.51	3.1	0.175	0.569	0.957	0.056	0.395	0.400	4372	0.142	0.564	0.74	0.963	0.458	0.052
588	山形	Yamagata	1974～1985	38.15	140.21	152.5	0.185	0.549	0.947	0.055	0.425	0.418	4378	0.153	0.543	0.76	0.953	0.488	0.052
590	仙台	Sendai	1971～1985	38.16	140.54	38.9	0.156	0.574	0.957	0.056	0.482	0.433	5479	0.127	0.569	0.76	0.961	0.538	0.053
595	福島	Fukushima	1974～1985	37.45	140.28	67.4	0.160	0.592	0.956	0.055	0.462	0.434	4379	0.133	0.584	0.78	0.961	0.515	0.053
598	小名浜	Onahama	1973～1985	36.57	140.54	3.2	0.175	0.575	0.961	0.056	0.525	0.477	4743	0.143	0.579	0.75	0.966	0.578	0.052
600	輪島	Wajima	1972～1985	37.23	136.54	5.3	0.159	0.573	0.964	0.051	0.393	0.384	5080	0.124	0.570	0.74	0.970	0.456	0.047
604	新潟	Niigata	1973～1985	37.55	139.03	1.9	0.165	0.542	0.949	0.057	0.409	0.386	4704	0.127	0.536	0.70	0.958	0.484	0.052
607	富山	Toyama	1974～1985	36.42	137.12	8.5	0.171	0.574	0.953	0.059	0.393	0.397	4323	0.131	0.566	0.69	0.962	0.470	0.052
612	高田	Takada	1974～1985	37.06	138.15	12.9	0.162	0.563	0.951	0.059	0.408	0.391	4319	0.134	0.554	0.76	0.957	0.464	0.055
615	宇都宮	Utsunomiya	1974～1985	36.33	139.52	118.9	0.164	0.536	0.948	0.061	0.499	0.432	4373	0.132	0.538	0.73	0.954	0.558	0.057
616	福井	Fukui	1974～1985	36.03	136.14	8.8	0.174	0.577	0.953	0.057	0.396	0.402	4378	0.130	0.570	0.68	0.963	0.478	0.051
618	松本	Matsumoto	1973～1985	36.15	137.58	610.0	0.184	0.570	0.955	0.054	0.521	0.481	4734	0.144	0.575	0.73	0.961	0.587	0.051
624	前橋	Maebashi	1972～1985	36.24	139.04	112.1	0.160	0.542	0.948	0.060	0.504	0.433	5096	0.131	0.538	0.73	0.953	0.561	0.058
636	名古屋	Nagoya	1973～1985	35.10	136.58	51.1	0.161	0.576	0.963	0.052	0.494	0.446	4686	0.128	0.574	0.74	0.968	0.554	0.049
638	甲府	Kofu	1974～1985	35.40	138.33	272.8	0.178	0.529	0.897	0.083	0.522	0.454	4275	0.140	0.533	0.71	0.904	0.590	0.080
648	銚子	Choshi	1973～1985	35.43	140.51	27.4	0.156	0.561	0.955	0.059	0.474	0.422	4722	0.120	0.558	0.70	0.963	0.540	0.054
655	御前崎	Omaezaki	1973～1985	34.36	138.13	44.7	0.159	0.571	0.963	0.054	0.546	0.471	4743	0.132	0.575	0.78	0.966	0.591	0.052
656	静岡	Shizuoka	1974～1985	34.58	138.24	14.1	0.173	0.572	0.960	0.056	0.498	0.457	4376	0.135	0.573	0.71	0.967	0.562	0.050
662	東京	Tokyo	1973～1986	35.41	139.46	5.3	0.147	0.528	0.950	0.058	0.461	0.390	5099	0.119	0.520	0.73	0.956	0.521	0.054

Table 2. 12(2)　熱電堆式日射計による日射率 (Y)とジョルダン式日照計による日間日照率 (X)との単回帰分析

675	大島	Oshima	1973〜1985	34.46	139.23	190.2	0.139	0.593	0.955	0.057	0.425	0.391	4741	0.104	0.572	0.69	0.963	0.502	0.052
678	八丈島	Hachijojima	1972〜1985	33.06	139.47	79.2	0.163	0.582	0.939	0.062	0.386	0.388	5041	0.134	0.568	0.77	0.944	0.446	0.059
744	米子	Yonago	1973〜1985	35.26	133.21	6.4	0.162	0.558	0.958	0.053	0.448	0.412	4727	0.131	0.560	0.78	0.962	0.501	0.051
750	舞鶴	Maizuru	1975〜1985	35.27	135.19	2.5	0.160	0.605	0.938	0.066	0.390	0.396	4017	0.123	0.592	0.73	0.945	0.462	0.062
755	浜田	Hamada	1974〜1985	34.54	132.04	19.8	0.165	0.585	0.965	0.052	0.424	0.413	4376	0.128	0.587	0.74	0.971	0.487	0.047
761	彦根	Hikone	1974〜1985	35.16	136.15	87.3	0.158	0.570	0.957	0.055	0.460	0.420	4369	0.119	0.573	0.74	0.963	0.525	0.051
762	下関	Shimonoseki	1974〜1985	33.57	130.56	3.3	0.151	0.587	0.967	0.049	0.480	0.433	4368	0.123	0.588	0.80	0.970	0.526	0.047
765	広島	Hiroshima	1973〜1985	34.22	132.26	29.1	0.166	0.540	0.957	0.051	0.504	0.438	4724	0.126	0.544	0.71	0.965	0.574	0.047
772	大阪	Osaka	1972〜1985	34.41	135.31	23.1	0.156	0.495	0.921	0.063	0.490	0.399	5108	0.125	0.495	0.75	0.927	0.552	0.061
778	潮岬	Shionomisaki	1972〜1985	33.27	135.46	73.0	0.168	0.559	0.966	0.050	0.531	0.464	5096	0.130	0.567	0.72	0.972	0.590	0.046
780	奈良	Nara	1974〜1985	34.41	135.50	104.4	0.149	0.570	0.966	0.045	0.476	0.421	4382	0.125	0.569	0.83	0.968	0.519	0.044
800	厳原	Izuhara	1973〜1985	34.12	129.18	20.8	0.145	0.606	0.965	0.052	0.459	0.423	4688	0.116	0.595	0.76	0.969	0.516	0.048
807	福岡	Fukuoka	1972〜1985	33.35	130.23	2.5	0.137	0.558	0.936	0.067	0.451	0.389	5107	0.104	0.557	0.75	0.941	0.511	0.064
813	佐賀	Saga	1974〜1985	33.15	130.18	3.8	0.180	0.568	0.950	0.058	0.457	0.439	4352	0.134	0.564	0.67	0.960	0.542	0.051
815	大分	Oita	1974〜1985	33.14	131.37	4.6	0.156	0.572	0.961	0.052	0.479	0.430	4374	0.118	0.571	0.72	0.968	0.546	0.047
817	長崎	Nagasaki	1972〜1985	32.44	129.52	26.9	0.160	0.565	0.960	0.052	0.462	0.421	5094	0.127	0.563	0.75	0.964	0.523	0.050
819	熊本	Kumamoto	1973〜1985	32.49	130.43	37.7	0.158	0.552	0.943	0.062	0.482	0.424	4684	0.129	0.552	0.77	0.948	0.536	0.059
827	鹿児島	Kagoshima	1972〜1985	31.34	130.33	4.2	0.160	0.567	0.951	0.059	0.473	0.428	5105	0.123	0.570	0.74	0.956	0.536	0.056
830	宮崎	Miyazaki	1973〜1985	31.55	131.25	6.3	0.158	0.593	0.971	0.049	0.527	0.471	3282	0.126	0.599	0.77	0.975	0.576	0.046
887	松山	Matsuyama	1973〜1985	33.50	132.47	32.2	0.171	0.580	0.964	0.050	0.483	0.451	4746	0.133	0.582	0.74	0.970	0.547	0.046
891	多度津	Takamatsu	1973〜1985	34.16	133.45	3.7	0.162	0.535	0.954	0.052	0.524	0.443	4747	0.132	0.539	0.78	0.957	0.577	0.050
893	高知	Kochi	1974〜1986	33.33	133.32	1.9	0.167	0.593	0.968	0.051	0.524	0.478	4603	0.129	0.597	0.72	0.975	0.584	0.046
898	清水	Shimizu(Ashizuri)	1972〜1985	32.43	133.01	31.0	0.142	0.601	0.972	0.048	0.548	0.471	5062	0.114	0.606	0.80	0.975	0.589	0.046
909	名瀬	Naze	1972〜1985	28.23	129.30	2.8	0.154	0.571	0.951	0.054	0.355	0.357	5105	0.120	0.548	0.71	0.959	0.432	0.050
918	石垣島	Ishigakijima	1974〜1985	24.20	124.10	5.7	0.216	0.542	0.935	0.067	0.451	0.460	4316	0.172	0.542	0.67	0.945	0.531	0.062
927	宮古島	Miyakojima	1982〜1985	24.47	125.17	39.9	0.185	0.513	0.952	0.054	0.451	0.416	1459	0.142	0.513	0.66	0.963	0.534	0.047
936	那覇	Naha	1972〜1985	26.14	127.41	34.9	0.185	0.511	0.948	0.054	0.458	0.418	5111	0.146	0.512	0.71	0.955	0.531	0.050
945	南大東島	Minamidaitojima	1974〜1985	25.50	131.14	14.1	0.210	0.526	0.954	0.051	0.498	0.472	4377	0.163	0.533	0.67	0.964	0.581	0.046
971	父島	Chichijima	1975〜1985	27.05	142.11	2.7	0.213	0.545	0.952	0.048	0.510	0.491	3953	0.168	0.550	0.72	0.959	0.586	0.045
991	南鳥島	Minamitorishima	1975〜1986	24.18	153.58	8.3	0.242	0.481	0.931	0.049	0.653	0.556	4355	0.175	0.525	0.69	0.938	0.725	0.046
			平均	35.78	136.92	46.8	0.174	0.558	0.950	0.057	0.463	0.432	4581	0.139	0.557	0.74	0.956	0.526	0.054

Table 2.13(1)　熱電堆式日射計による日射率 (Y)と回転式日照計による日間日照率 (X)との単回帰分析

熱電堆式日射計・回転式日照計

No.	Station			Lat.N (° ')	Long.E (° ')	H (m)	a	b	R	s	ave.X	ave.Y	N	a'	b'	P	R	ave.X^P	s
401	稚内	Wakkanai	1986～1990	45.25	141.41	2.8	0.218	0.551	0.938	0.064	0.334	0.402	1815	0.162	0.540	0.58	0.959	0.446	0.052
402	北見枝幸	Kitamiesashi	1988～1990	44.56	142.35	6.7	0.228	0.540	0.933	0.065	0.368	0.427	1094	0.175	0.528	0.59	0.953	0.477	0.055
406	留萌	Rumoi	1986～1990	43.57	141.38	23.6	0.213	0.546	0.947	0.060	0.343	0.400	1824	0.161	0.544	0.62	0.963	0.441	0.050
407	旭川	Asahikawa	1986～1990	43.46	142.22	111.9	0.247	0.517	0.910	0.068	0.357	0.432	1816	0.185	0.511	0.58	0.932	0.484	0.060
409	網走	Abashiri	1986～1990	44.01	144.17	37.6	0.233	0.515	0.938	0.062	0.444	0.461	1817	0.184	0.520	0.65	0.950	0.532	0.056
412	札幌	Sapporo	1986～1990	43.03	141.20	17.2	0.217	0.512	0.940	0.056	0.398	0.421	1820	0.162	0.518	0.64	0.954	0.501	0.049
417	帯広	Obihiro	1986～1990	42.55	143.13	38.6	0.214	0.531	0.952	0.060	0.481	0.470	1826	0.164	0.534	0.59	0.967	0.572	0.049
420	根室	Nemuro	1986～1990	43.20	145.35	25.8	0.239	0.527	0.936	0.069	0.442	0.472	1822	0.187	0.529	0.58	0.954	0.539	0.059
421	寿都	Suttsu	1986～1990	42.47	140.14	15.7	0.219	0.577	0.948	0.061	0.312	0.399	1821	0.165	0.566	0.61	0.965	0.412	0.050
423	室蘭	Muroran	1986～1990	42.19	140.59	42.8	0.209	0.564	0.943	0.063	0.392	0.430	1825	0.144	0.569	0.59	0.965	0.504	0.050
426	浦河	Urakawa	1986～1990	42.10	142.47	33.5	0.209	0.539	0.942	0.065	0.417	0.433	1811	0.151	0.546	0.60	0.959	0.517	0.055
430	函館	Hakodate	1986～1990	41.49	140.45	33.2	0.216	0.546	0.937	0.064	0.394	0.431	1819	0.151	0.550	0.58	0.958	0.510	0.052
575	青森	Aomori	1986～1990	40.49	140.47	3.3	0.217	0.518	0.935	0.060	0.351	0.399	1812	0.162	0.517	0.62	0.952	0.457	0.052
581	八戸	Hachinohe	1986～1990	40.32	141.32	27.1	0.211	0.546	0.945	0.058	0.415	0.438	1826	0.158	0.542	0.63	0.961	0.516	0.049
582	秋田	Akita	1986～1990	39.43	140.06	9.4	0.205	0.560	0.944	0.062	0.338	0.394	1821	0.146	0.557	0.60	0.964	0.445	0.050
584	盛岡	Morioka	1986～1990	39.42	141.10	155.2	0.195	0.547	0.939	0.061	0.382	0.404	1823	0.140	0.539	0.61	0.956	0.491	0.052
585	宮古	Miyako	1986～1990	39.39	141.58	42.5	0.208	0.546	0.954	0.055	0.438	0.447	1824	0.158	0.541	0.62	0.968	0.533	0.046
587	酒田	Sakata	1986～1990	38.54	139.51	3.1	0.210	0.551	0.939	0.064	0.337	0.396	1823	0.146	0.549	0.56	0.963	0.456	0.050
588	山形	Yamagata	1986～1990	38.15	140.21	152.5	0.220	0.529	0.931	0.060	0.355	0.407	1822	0.167	0.521	0.63	0.947	0.462	0.053
590	仙台	Sendai	1986～1990	38.16	140.54	38.9	0.186	0.582	0.955	0.058	0.405	0.422	1813	0.135	0.572	0.62	0.971	0.501	0.047
595	福島	Fukushima	1986～1990	37.45	140.28	67.4	0.190	0.533	0.943	0.059	0.395	0.401	1824	0.141	0.525	0.62	0.960	0.496	0.050
598	小名浜	Onahama	1986～1990	36.57	140.54	3.2	0.210	0.551	0.953	0.061	0.469	0.469	1824	0.152	0.559	0.58	0.970	0.567	0.049
600	輪島	Wajima	1986～1990	37.23	136.54	5.3	0.181	0.586	0.956	0.057	0.341	0.380	1815	0.125	0.577	0.61	0.973	0.442	0.045
604	新潟	Niigata	1986～1990	37.55	139.03	1.9	0.192	0.518	0.932	0.063	0.356	0.376	1815	0.132	0.514	0.57	0.955	0.474	0.052
607	富山	Toyama	1986～1990	36.42	137.12	8.5	0.184	0.553	0.948	0.060	0.356	0.381	1822	0.132	0.544	0.60	0.966	0.458	0.049
612	高田	Takada	1986～1990	37.06	138.15	12.9	0.193	0.533	0.940	0.062	0.350	0.380	1825	0.138	0.527	0.58	0.961	0.460	0.050
615	宇都宮	Utsunomiya	1986～1990	36.33	139.52	118.9	0.183	0.493	0.950	0.058	0.447	0.404	1811	0.132	0.500	0.57	0.968	0.544	0.047
616	福井	Fukui	1986～1990	36.03	136.14	8.8	0.182	0.524	0.947	0.057	0.372	0.377	1823	0.126	0.521	0.58	0.968	0.483	0.045
618	松本	Matsumoto	1986～1990	36.15	137.58	610.0	0.214	0.545	0.952	0.056	0.481	0.476	1819	0.151	0.557	0.60	0.969	0.584	0.045
624	前橋	Maebashi	1986～1990	36.24	139.04	112.1	0.173	0.537	0.963	0.054	0.491	0.437	1825	0.126	0.544	0.62	0.975	0.571	0.044
636	名古屋	Nagoya	1986～1990	35.10	136.58	51.1	0.177	0.537	0.961	0.053	0.498	0.444	1822	0.131	0.545	0.65	0.972	0.575	0.045
638	甲府	Kofu	1986～1990	35.40	138.33	272.8	0.203	0.502	0.949	0.055	0.509	0.458	1824	0.142	0.516	0.57	0.968	0.612	0.044
648	銚子	Choshi	1986～1990	35.43	140.51	27.4	0.189	0.517	0.953	0.058	0.456	0.424	1818	0.133	0.524	0.56	0.972	0.556	0.045
655	御前崎	Omaezaki	1986～1990	34.36	138.13	44.7	0.194	0.550	0.956	0.060	0.515	0.477	1820	0.129	0.572	0.58	0.974	0.607	0.046
656	静岡	Shizuoka	1986～1990	34.58	138.24	14.1	0.190	0.514	0.948	0.060	0.484	0.439	1820	0.128	0.530	0.56	0.969	0.587	0.046
662	東京	Tokyo	1987～1990	35.41	139.46	5.3	0.167	0.512	0.949	0.060	0.435	0.390	1461	0.115	0.514	0.57	0.966	0.535	0.049

Table 2.13(2) 熱電堆式日射計による日射率 (Y)と回転式日照計による日間日照率 (X)との単回帰分析

675	大島	Oshima	1986～1990	34.46	139.23	190.2	0.155	0.566	0.941	0.064	0.388	0.375	1822	0.100	0.546	0.56	0.960	0.504	0.053
678	八丈島	Hachijojima	1986～1990	33.06	139.47	79.2	0.187	0.586	0.941	0.059	0.332	0.382	1823	0.128	0.551	0.59	0.961	0.454	0.048
744	米子	Yonago	1986～1990	35.26	133.21	6.4	0.185	0.552	0.954	0.056	0.384	0.397	1824	0.129	0.553	0.61	0.970	0.486	0.045
750	舞鶴	Maizuru	1986～1990	35.27	135.19	2.5	0.170	0.588	0.956	0.053	0.339	0.369	1824	0.119	0.565	0.62	0.973	0.442	0.042
755	浜田	Hamada	1986～1990	34.54	132.04	19.8	0.180	0.554	0.959	0.054	0.395	0.399	1826	0.127	0.554	0.62	0.974	0.491	0.044
761	彦根	Hikone	1986～1990	35.16	136.15	87.3	0.194	0.544	0.947	0.059	0.411	0.417	1811	0.130	0.549	0.58	0.968	0.523	0.046
762	下関	Shimonoseki	1986～1990	33.57	130.56	3.3	0.180	0.546	0.956	0.055	0.428	0.414	1824	0.119	0.553	0.59	0.975	0.533	0.042
765	広島	Hiroshima	1986～1990	34.22	132.26	29.1	0.193	0.538	0.950	0.058	0.474	0.447	1823	0.128	0.550	0.58	0.969	0.580	0.046
772	大阪	Osaka	1986～1990	34.41	135.31	23.1	0.194	0.479	0.939	0.056	0.451	0.410	1821	0.133	0.488	0.57	0.960	0.568	0.045
778	潮岬	Shionomisaki	1986～1990	33.27	135.46	73.0	0.193	0.543	0.960	0.056	0.517	0.474	1800	0.130	0.567	0.59	0.976	0.607	0.044
780	奈良	Nara	1986～1990	34.41	135.50	104.4	0.186	0.540	0.953	0.052	0.412	0.408	1826	0.136	0.537	0.65	0.967	0.507	0.044
800	厳原	Izuhara	1986～1990	34.12	129.18	20.8	0.174	0.602	0.959	0.057	0.414	0.424	1796	0.118	0.587	0.58	0.976	0.521	0.044
807	福岡	Fukuoka	1986～1990	33.35	130.23	2.5	0.188	0.541	0.951	0.058	0.428	0.420	1819	0.130	0.548	0.61	0.967	0.528	0.048
813	佐賀	Saga	1986～1990	33.15	130.18	3.8	0.192	0.507	0.939	0.060	0.453	0.422	1826	0.121	0.521	0.54	0.964	0.577	0.046
815	大分	Oita	1986～1990	33.14	131.37	4.6	0.164	0.519	0.958	0.052	0.466	0.406	1822	0.111	0.527	0.61	0.973	0.560	0.042
817	長崎	Nagasaki	1986～1990	32.44	129.52	26.9	0.182	0.554	0.956	0.054	0.428	0.419	1826	0.123	0.551	0.59	0.974	0.537	0.042
819	熊本	Kumamoto	1986～1990	32.49	130.43	37.7	0.184	0.530	0.954	0.055	0.460	0.428	1818	0.123	0.542	0.60	0.970	0.562	0.045
827	鹿児島	Kagoshima	1986～1990	31.34	130.33	4.2	0.190	0.549	0.957	0.055	0.442	0.433	1826	0.130	0.555	0.59	0.974	0.546	0.043
830	宮崎	Miyazaki	1986～1990	31.55	131.25	6.3	0.177	0.528	0.959	0.055	0.488	0.435	1826	0.121	0.541	0.59	0.974	0.580	0.044
887	松山	Matsuyama	1986～1990	33.50	132.47	32.2	0.188	0.549	0.960	0.054	0.467	0.444	1819	0.128	0.561	0.61	0.975	0.563	0.042
891	多度津	Takamatsu	1986～1990	34.16	133.45	3.7	0.197	0.499	0.947	0.055	0.471	0.432	1826	0.139	0.508	0.59	0.964	0.576	0.045
893	高知	Kochi	1987～1990	33.33	133.32	1.9	0.182	0.544	0.956	0.058	0.504	0.456	1461	0.116	0.561	0.55	0.976	0.607	0.043
898	清水	Shimizu(Ashizuri)	1986～1990	32.43	133.01	31.0	0.176	0.581	0.965	0.056	0.513	0.474	1825	0.122	0.595	0.63	0.977	0.592	0.045
909	名瀬	Naze	1986～1990	28.23	129.30	2.8	0.171	0.617	0.948	0.056	0.303	0.358	1822	0.115	0.574	0.59	0.968	0.425	0.044
918	石垣島	Ishigakijima	1986～1990	24.20	124.10	5.7	0.204	0.523	0.955	0.052	0.404	0.416	1825	0.149	0.520	0.59	0.973	0.512	0.041
927	宮古島	Miyakojima	1986～1990	24.47	125.17	39.9	0.210	0.567	0.951	0.055	0.392	0.433	1826	0.150	0.556	0.59	0.970	0.508	0.044
936	那覇	Naha	1986～1990	26.14	127.41	34.9	0.199	0.547	0.947	0.055	0.395	0.415	1825	0.134	0.543	0.58	0.969	0.517	0.043
945	南大東島	Minamidaitojima	1986～1990	25.50	131.14	14.1	0.232	0.502	0.947	0.052	0.472	0.468	1826	0.161	0.522	0.59	0.964	0.588	0.043
971	父島	Chichijima	1986～1990	27.05	142.11	2.7	0.215	0.558	0.948	0.051	0.455	0.469	1826	0.144	0.565	0.61	0.963	0.576	0.043
991	南鳥島	Minamitorishima	1987～1990	24.18	153.58	8.3	0.244	0.458	0.943	0.043	0.637	0.535	1461	0.168	0.507	0.64	0.954	0.725	0.038
			平均	35.78	136.9	46.8	0.197	0.540	0.948	0.058	0.421	0.424	1793	0.140	0.542	0.60	0.966	0.525	0.047

$$(Q_T/Q_0)_D = 0.173 + 0.558(n/N)_{JD}$$

(日量, 全国66地区, r = 0.946, s = 0.061) (2.55)

$$(Q_T/Q_0)_D = 0.140 + 0.558(n/N)_{JD}^{0.75}$$

(日量, 全国66地区, r = 0.952, s = 0.058) (2.56)

$$(Q_T/Q_0)_D = 0.198 + 0.537(n/N)_{RD}$$

(日量, 全国66地区, r = 0.944, s = 0.062) (2.57)

$$(Q_T/Q_0)_D = 0.139 + 0.541(n/N)_{RD}^{0.59}$$

(日量, 全国66地区, r = 0.962, s = 0.051) (2.58)

ただし, 太陽定数は1.96 cal/cm²/min = 1.37 kW/m², rは相関係数, s は標準誤差である.

このほか, 筆者の主な調査フィールドである中国四国及び周辺の若干の気象官署における日射率と日照率の回帰関係を**Table 2.14, 2.15, 2.16**に示す.

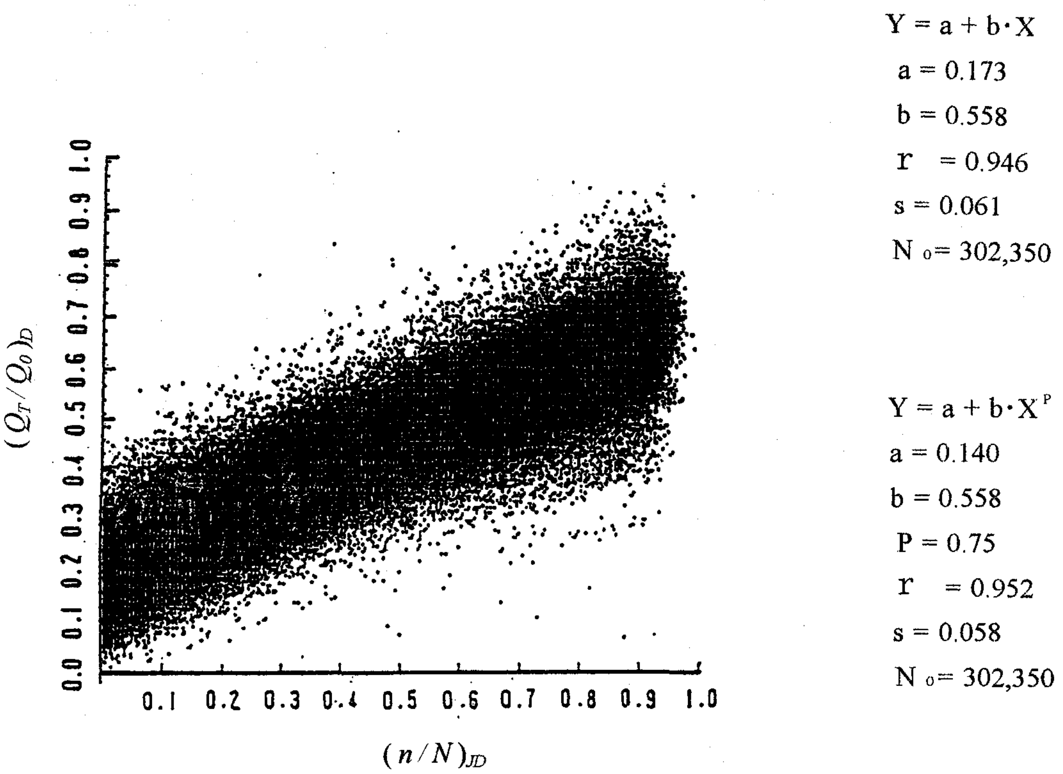

Fig. 2.7 全国66地点における日間日射率 $(Q_T/Q_0)_D$ とジョルダン式日照計による日間日照率 $(n/N)_{JD}$ の関係

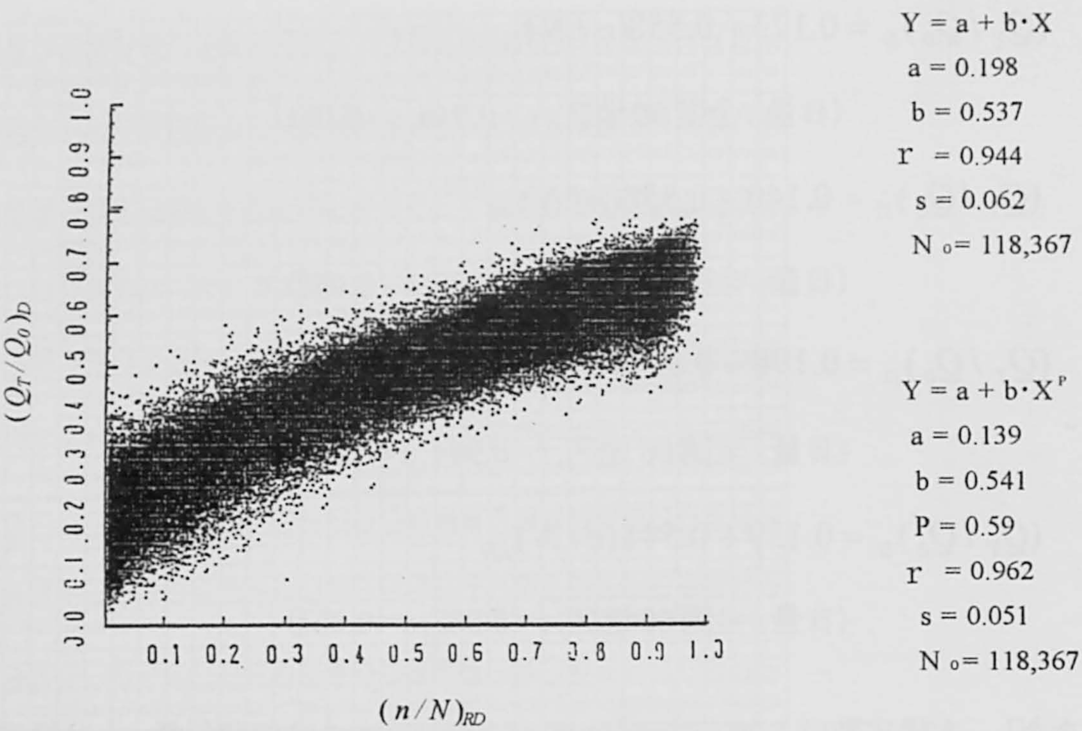

Fig. 2.8　全国66地点における日間日射率 $(Q_T/Q_0)_D$ と回転式日照計による日間日照率 $(n/N)_{RD}$ の関係

Table 2.14　月間日射率(Y)と日照率(X)の回帰定数(a)と回帰係数(b)

観測地	期　間	a	b	r	s	N_0	日照計	$\overline{n/N}$	$\overline{Q_T/Q_0}$
高知	1975-1985	0.194	0.534	0.975	0.014	128	Jordan		
清 水	1975-1985	0.145	0.594	0.958	0.018	132	Jordan		
松 山	1975-1985	0.196	0.519	0.956	0.014	132	Jordan	0.485	0.447
	1979-1985	0.131	0.562	0.963	0.013	74	太陽電池	0.552	0.442
高 松	1975-1985	0.188	0.466	0.835	0.025	131	Jordan		
	1980-1985	0.156	0.465	0.846	0.024	70	太陽電池		
潮 岬	1981-1985	0.184	0.501	0.958	0.017	60	Jordan	0.546	0.457
	1981-1985	0.127	0.561	0.981	0.012	60	太陽電池	0.588	0.457
	1986-1991	0.219	0.484	0.941	0.019	71	回転式	0.509	0.465
米 子	1975-1985	0.189	0.499	0.948	0.020	132	Jordan		
	1978.12-1987.8	0.208	0.417	0.872	0.027	93	太陽電池		
	1986-1988	0.223	0.449	0.958	0.013	36	回転式		
	1975-1978.11	0.122	0.532	0.886	0.033	47	バイメタル		

(注) $Q_T/Q_0 = a + b(n/N)$

Table 2.15　日間日射率(Y)と日照率(X)の回帰定数(a)と回帰係数(b)

観測地	期　間	a	b	r	s	N_0	日照計	$\overline{n/N}$	$\overline{Q_T/Q_0}$
高 知	1975-1985	0.167	0.587	0.966	0.052	3871	Jordan	−	−
清 水	1975-1985	0.141	0.598	0.970	0.050	3968	Jordan	−	−
松 山	1975-1985	0.168	0.575	0.961	0.051	4018	Jordan	0.485	0.447
	1980-1985	0.111	0.598	0.969	0.047	2250	太陽電池	0.552	0.442
高 松	1975-1985	0.159	0.522	0.954	0.050	3986	Jordan	−	−
	1980-1985	0.122	0.525	0.957	0.047	2128	太陽電池	−	−
広 島	1979-1985	0.157	0.534	0.960	0.049	2554	Jordan	0.473	0.447
	1979-1985	0.120	0.545	0.961	0.049	2421	太陽電池	0.560	0.425
	1986-1988	0.191	0.540	0.952	0.057	1095	回転式	0.506	0.427
潮 岬	1981-1985	0.160	0.544	0.967	0.048	1817	Jordan	0.546	0.457
	1981-1985	0.121	0.572	0.978	0.039	1814	太陽電池	0.588	0.457
	1986-1991	0.191	0.539	0.959	0.056	2155	回転式	0.509	0.465
米 子	1975-1985	0.163	0.559	0.961	0.051	3998	Jordan	−	−
	1978.12-1987.8	0.138	0.561	0.952	0.057	2827	太陽電池	−	−
	1986-1988	0.184	0.550	0.955	0.055	1094	回転式	−	−
	1975- 1978.11	0.078	0.613	0.942	0.062	1409	バイメタル	−	−

(注) $Q_T/Q_0 = a + b(n/N)$

Table 2.16　日量日射率(Y)と日照率(X)の回帰定数(a)と回帰係数(b)

観測地	期　間	a'	b'	P	r	s	N_0	日照計
高 知	1978.2-1984	0.124	0.576	0.69	0.970	0.052	−	Jordan
	〃	0.108	0.597	0.86	0.978	0.042	−	太陽電池
高 松	1975-1985	0.130	0.526	0.79	0.958	0.048	3986	Jordan
	1980-1985	0.115	0.526	0.95	0.957	0.047	2128	太陽電池
広 島	1979-1985	0.123	0.536	0.74	0.966	0.045	2554	Jordan
	1979-1985	0.105	0.548	0.89	0.962	0.048	2421	太陽電池
	1986-1988	0.126	0.552	0.58	0.970	0.045	1095	回転式
潮 岬	1981-1985	0.119	0.555	0.70	0.972	0.044	1817	Jordan
	1981-1985	0.107	0.576	0.90	0.979	0.039	1814	太陽電池
	1986-1991	0.131	0.559	0.60	0.975	0.044	2155	回転式
米 子	1975-1985	0.130	0.561	0.77	0.965	0.048	3998	Jordan
	1978.12-1987.8	0.131	0.562	0.95	0.952	0.057	2827	太陽電池
	1986-1988	0.130	0.550	0.63	0.970	0.045	1094	回転式
	1975 1978.11	0.111	0.609	1.24	0.945	0.060	1409	バイメタル

(注) $Q_T/Q_0 = a' + b'(n/N)$

2.3.3 異なる日照計日照率の換算

気象官署がジョルダン式日照計による日照時間データを公表しなくなって久しい．ゆえにジョルダン式日照計を用いた(2.8)，(2.18)，(2.49)，(2.50)，(2.51)，(2.52) 式の係数は，現在の気象官署の回転式日照率に対してはもはや適当ではない．あえてジョルダン式によって作成された式を用いるのであれば，異なる型の日照計相互の関係を求めておく必要がある．そこで，同一地域における各種の日照計による日量の $(Q_T/Q_0)_D$ の推定式から $(Q_T/Q_0)_D$ を消去して，日量 $(n/N)_D$ 相互の関係式を求めることを考えた．

Table 2.9 のジョルダン式日照計による係数 a=0.163，b=0.559と，**Table 2.10**のバイメタル式日照計による係数 a=0.111，b=0.609　P=1.24から両回帰式の日量の Q_T/Q_0 を等置して，バイメタル式日照計による日間日照率 $(n/N)_{BD}$ をジョルダン式日照計による日照率 $(n/N)_{JD}$ に変換する次式を得た．

$$(n/N)_{JD} = -0.093 + 1.09\,(n/N)_{BD}^{\ 1.24} \qquad \text{(日量, 米子)} \qquad (2.59)$$

ただし，太陽定数は1.96 cal/cm^2/min = 1.37 kW/m^2.

この変換式(2.59)は信頼度の点で問題がある．というのは，**Table 2.10** の a' の値をみると，バイメタル式だけが他の3種の日照計に対応する日射量のそれとかけはなれた値を示している．ということは日射量に関して統計的安定性が成り立っていない可能性が考えられるからである．しかし，他の3種類の日照計についてはほぼ同一の a' の値を示している．**Table 2.10** のジョルダン式日照計による日照率 $(n/N)_{JD}$ の係数 $a=0.130$，$b=0.561$ を用いた回帰式と太陽電池式日照計による日照率 $(n/N)_{SD}$ の係数 a=0.131，b=0.562 を用いた回帰式を等置して次式を得た．

$$(n/N)_{JD} = (n/N)_{SD}^{\ 1.23} \qquad \text{(日量, 米子)} \qquad (2.60)$$

(2.56) 式と(2.58) 式の定数項をほぼ等しいとみて，両式の $(Q_T/Q_0)_D$ を等置すると回転式日照計による日照率 $(n/N)_{RD}$ からジョルダン式日照計による日照率 $(n/N)_{JD}$ を求める式は次のようになる．

$$(n/N)_{JD} = 0.97(n/N)_{RD}^{\ 0.787} \qquad \text{(日量, 全国66地区)} \qquad (2.61)$$

(2.61) 式を用いて「回転式」日間日照率 $(n/N)_{RD}$ を「ジョルダン式」日間日照率 $(n/N)_{JD}$

に変換すれば，(2.51),(2.52) 式を用いることができる．また，日毎の「回転式」日照率と可照時間とから(2.57) 式によって「ジョルダン式」日照率・日照時間を算定してその月の日照時間月積算値を求め，月可照時間で割れば，「ジョルダン式」月間日照率が求められ，(2.49),(2.50) 式だけではなく，大槻・三野・丸山式の係数や吉田・篠木式((2.18)式)に用いることも可能であろう．

次に示すのは松山の月間および日間の「ジョルダン式」日照計による日照率 $(n/N)_{JM}$，$(n/N)_{JD}$ に対する旧型「太陽電池式」日照率 $(n/N)_{SM}$，$(n/N)_{SD}$ の回帰式である(1979−1985)．原点を通過しないので，日照率相互の関係としては一方($(n/N)_{SM}$，$(n/N)_{SD}$)が0に近いとき，他方($(n/N)_{JM}$，$(n/N)_{JD}$)が僅かに負の値をとるという不合理があるが，$(Q_T/Q_0)_D$，$(Q_T/Q_0)_D$ を求めるのには支障がないであろう．

$$(n/N)_{JM} = -0.09 + 1.03\,(n/N)_{SM}$$

(月量，松山，r^2=0.931，s = 0.022，N_0=74)　(2.62)

$$(n/N)_{JD} = -0.072 + 0.996\,(n/N)_{SD}$$

(日量，松山，r^2=0.941，s = 0.076，N_0=2,250)　(2.63)

ここに，N_0 ：データ数．

気象官署で使っている回転式日照計と，AMeDASで用いている太陽電池式日照計は，同じ原理に基づいているので，換算可能と思われる．「回転式」日照時間と新旧「太陽電池式」日照時間の換算を三浦・奥野(1993)が次式のように示している．

(旧型「太陽電池式」日照時間(hr) X －「回転式」日照時間(hr) Y)

$$Y = -0.00302\,X^3 + 0.101\,X^2 + 0.207\,X \tag{2.64}$$

(新型「太陽電池」式日照時間(hr) X －「回転式」日照時間(hr) Y)

$$Y = 0.00423\,X^3 - 0.0717\,X^2 + 1.37\,X \tag{2.65}$$

三浦・奥野の式を含め，上式のいくつかを組み合わせることによって，過去の特性の異なる日照率から作られた式を現在の回転式・太陽電池式日照計による日照データに適用することが可能となる．

2.3.4 係数の緯度依存性の検討

この系統の欧米における研究には，少数ながらa，bが緯度，標高に依存性を持つとの報告を見ることがある．そこで X=「回転式」日照率，Y=「熱電堆式」日射率を用いた線型回帰式の回帰定・係数 a，b，べき指数型回帰式の回帰定・係数 a'，b'，べき指数Pの緯度，経度，標高に対する変化を調べてみた．回転式日照計の線型式の係数aは，緯度との相関係数0.322,経度との相関係数0.459,標高との相関係数は0.036,係数bは，緯度との相関係数0.026,経度との相関係数0.132,標高との相関係数は0.090と，いずれも低かった．係数aは多少南北端，あるいは東西端で値が大きく，中央が下がっており，bはフラットとなる傾向が見られるが，それほどはっきりした関係があるとはいえない．我が国においては，係数a，bの緯度及び標高依存性は無いといってよい．

2.3.5 雲量を用いた全天日射量の推定

月平均雲量C_Mを用いて月量の回帰式の作成を試みた（1979－1984, N_0=1,249, **Fig. 2.9, Table 2.17** 参照，紙井・近森(1986a)）．太陽定数1.98 cal/cm²/min＝1.38kW/m².

$$(Q_T/Q_0)_M = 0.74 - 0.43\,C_M$$

（月量，館野を除く15官署，r^2=0.64， s=0.044）　(2.66)

$$(Q_T/Q_0)_M = 0.60 - 0.33\,C_M^{\;2.07}$$

（月量，館野を除く15官署，r^2=0.65, s=0.043）　(2.67)

日平均雲量を用いた日量回帰式については，16官署の1978－1984年のデータ（ただし館野は1979－1984）から次式を作成した(紙井・近森(1986c)．

$$(Q_T/Q_0)_D = 0.61 - 0.35\,C_D^{\;2} - 0.072\,C_{1,0} + 0.079\sin^2 h_0$$

（日量，R^2=0.63， s=0.11， N_0=40,376）　(2.68)

ここに，C_D：日平均雲量（0－1），$C_{1,0}$：C_D=1の時1，C_D<1 のとき0となるステップ関数，h_0：日最大太陽高度．館野における雲量は日1回測定なのでデータから除外した．

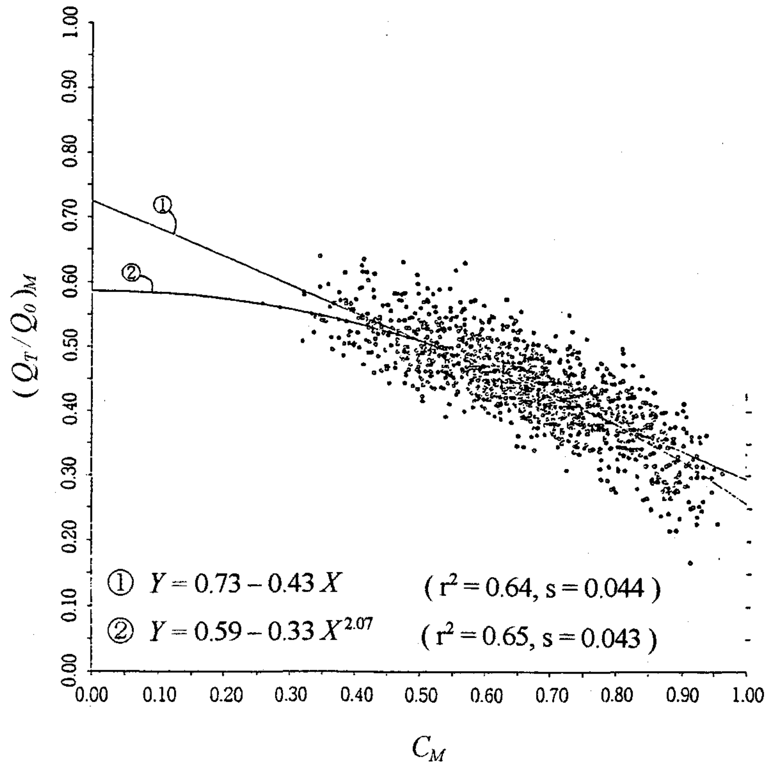

Fig. 2.9 月間日射率$(Q_T/Q_0)_M$と月平均雲量 C_M との関係(全国, N_0 =1, 249)

Table 2.17 月平均雲量と$(Q_T/Q_0)_M$との関係

観測地点	a_{CM}	b_{CM}	r^2	s	$\overline{C_M}$	$\overline{Q_T/Q_0}$	N_0
札 幌	0.55	−0.17	0.13	0.038	0.70	0.43	84
根 室	0.69	−0.35	0.64	0.038	0.65	0.46	84
秋 田	0.76	−0.49	0.68	0.037	0.77	0.38	83
宮 古	0.65	−0.35	0.77	0.027	0.61	0.44	84
輪 島	0.83	−0.62	0.83	0.034	0.73	0.38	80
松 本	0.67	−0.32	0.59	0.033	0.64	0.47	84
舘 野	0.62	−0.30	0.79	0.029	0.64	0.43	72
米 子	0.77	−0.49	0.71	0.032	0.73	0.41	84
潮 岬	0.64	−0.31	0.69	0.033	0.59	0.46	82
福 岡	0.70	−0.44	0.66	0.032	0.66	0.41	84
鹿児島	0.65	−0.34	0.66	0.028	0.65	0.43	84
清 水	0.68	−0.36	0.74	0.031	0.61	0.46	83
石垣島	0.87	−0.61	0.74	0.041	0.72	0.44	83
那 覇	0.86	−0.60	0.62	0.046	0.74	0.41	84
父 島	0.79	−0.51	0.64	0.041	0.64	0.47	84
南鳥島	0.73	−0.38	0.45	0.040	0.62	0.53	82
全 国	0.73	−0.43	0.64	0.044	0.66	0.44	1249

(注) 係数等：$Q_T/Q_0=a_{CM}+b_{CM}\,C_M$.

2.4　筆者の直達・散乱日射量推定式

2.4.1 直達・散乱日射量推定式

全天日射量が既知なら，直達日射量か散乱日射量のどちらかが推定できれば，全ての日射成分がわかる((1.6)式参照)．そこでここでは14官署で計測されている直達日射量の推定式を作成することとした．

(2.32),(2.33),(2.34)式は精度が高いと考えられるが，気象要素を多く使うことから，簡便に直達日射量を推定するための次式を作成した．使用したデータは気象庁の1978-1984年(16地区，812個)のデータである（**Table 2.18～ 2.21，Fig. 2.10～ 2.14** 参照,紙井・近森(1986a,1986b))．太陽定数は1.98 cal/cm²/min = 1.38 kW/m² を用いた．

(月量)　$$(Q_D/Q_0)_M = -0.04 + 0.508\,(n/N)_{JM}$$

$$(r^2=0.87,\ s=0.026,\ N_0=812) \tag{2.69}$$

$$(Q_D/Q_0)_M = 0.497(n/N)_{JM}^{\ 1.23}$$

$$(s=0.025,\ N_0=812) \tag{2.70}$$

$$(Q_D/Q_T)_M = 0.783\,(n/N)_{JM}^{\ 0.71}$$

$$(s=0.053,\ N_0=809) \tag{2.71}$$

$$(Q_D/Q_0)_M = 0.51 - 0.46\,C_M$$

$$(r^2=0.75,\ s=0.035,\ N_0=740) \tag{2.72}$$

$$(Q_D/Q_0)_M = 0.37 - 0.35\,C_M^{\ 2}$$

$$(r^2=0.76,\ s=0.034,\ N_0=740) \tag{2.73}$$

$$(Q_D/Q_0)_M = 0.46\,(1-C_M)^{0.71}$$

$$(s=0.034,\ N_0=740) \tag{2.74}$$

(日量)　$$(Q_D/Q_0)_D = 0.537\,(n/N)_{JD}^{\ 1.62}$$

$$(s=0.057,\ N_0=24,658) \tag{2.75}$$

Table 2.18　月間日照率$(n/N)_{JM}$と直達日射率$(Q_D/Q_0)_M$との関係(紙井・近森(1986a))

観測地点	B	P	s	$\overline{n/N}$	$\overline{Q_D/Q_0}$	N_0
札 幌	0.481	1.28	0.025	0.46	0.18	84
根 室	0.470	1.02	0.023	0.49	0.23	48
秋 田	0.547	1.43	0.014	0.41	0.16	48
宮 古	0.480	0.20	0.021	0.51	0.21	60
輪 島	0.483	1.28	0.012	0.41	0.16	48
松 本	0.490	1.10	0.022	0.52	0.24	72
舘 野	0.556	1.20	0.023	0.46	0.22	72
米 子	0.473	1.26	0.014	0.46	0.18	48
潮 岬	0.546	1.28	0.025	0.54	0.25	59
福 岡	0.455	1.12	0.017	0.45	0.18	71
鹿児島	0.498	1.30	0.017	0.48	0.19	36
清 水	0.513	1.33	0.019	0.57	0.24	36
石垣島	0.477	1.15	0.018	0.45	0.19	48
那 覇	0.428	1.15	0.020	0.47	0.18	82
全 国	0.497	1.23	0.025	0.47	0.20	812

(注)式: $(Q_D/Q_0)_M = B(n/N)_{JM}{}^P$

Table 2.19　月間日照率$(n/N)_{JM}$と直達日射比$(Q_D/Q_T)_M$との関係(紙井・近森(1986a))

観測地点	B	P	s	$\overline{n/N}$	$\overline{Q_D/Q_T}$	N_0
札 幌	0.866	0.94	0063	0.46	0.42	84
根 室	0.724	0.54	0.044	0.49	0.48	48
秋 田	0.936	0.96	0.039	0.41	0.39	47
宮 古	0.763	0.67	0.041	0.51	0.48	60
輪 島	0.756	0.72	0.032	0.41	0.39	48
松 本	0.745	0.60	0.055	0.52	0.50	72
舘 野	0.872	0.70	0.048	0.46	0.50	72
米 子	0.760	0.74	0.033	0.46	0.50	48
潮 岬	0.843	0.72	0.048	0.54	0.42	57
福 岡	0.697	0.54	0.040	0.45	0.54	71
鹿児島	0.746	0.69	0.036	0.48	0.45	36
清 水	0.769	0.67	0.042	0.57	0.45	36
石垣島	0.752	0.66	0.040	0.45	0.52	48
那 覇	0.674	0.60	0.042	0.47	0.44	82
全 国	0.783	0.71	0.053	0.47	0.42	809

(注)式: $(Q_D/Q_T)_M = B(n/N)_{JM}{}^P$

Table 2.20　日間日照率$(n/N)_{JD}$と直達日射率$(Q_D/Q_0)_D$との関係(紙井・近森(1986b))

観測地点	B	P	s	$\overline{n/N}$	$\overline{Q_D/Q_0}$	N_0
札　幌	0.527	1.71	0.060	0.46	0.18	2527
根　室	0.547	1.49	0.059	0.49	0.23	1455
秋　田	0.524	1.74	0.051	0.41	0.16	1461
宮　古	0.543	1.73	0.062	0.51	0.21	1819
輪　島	0.526	1.75	0.050	0.41	0.16	1458
松　本	0.565	1.55	0.061	0.52	0.24	2188
舘　野	0.578	1.50	0.050	0.46	0.22	2180
米　子	0.517	1.71	0.056	0.46	0.18	1458
潮　岬	0.562	1.67	0.059	0.54	0.25	1819
福　岡	0.540	1.55	0.060	0.45	0.19	2175
鹿児島	0.519	1.70	0.054	0.48	0.19	1078
清　水	0.540	1.85	0.057	0.57	0.24	1091
石垣島	0.532	1.60	0.052	0.45	0.19	1452
那　覇	0.483	1.59	0.053	0.47	0.18	2497
全　国	0.537	1.62	0.057	0.47	0.20	24658

(注)式:$(Q_D/Q_0)_D = B(n/N)_{JD}^{\ P}$

Table 2.21　日間日照率$(n/N)_{JD}$と直達日射比$(Q_D/Q_T)_D$との関係(紙井・近森(1986b))

観測地点	B	s	$\overline{n/N}$	$\overline{Q_D/Q_T}$	N_0
札　幌	0.736	0.101	0.46	0.34	2523
根　室	0.799	0.090	0.49	0.39	1455
秋　田	0.750	0.085	0.40	0.30	1454
宮　古	0.770	0.097	0.51	0.39	1815
輪　島	0.735	0.083	0.41	0.30	1456
松　本	0.798	0.096	0.52	0.41	2188
舘　野	0.850	0.082	0.46	0.40	2180
米　子	0.729	0.089	0.46	0.33	1457
潮　岬	0.806	0.088	0.54	0.43	1803
福　岡	0.793	0.097	0.45	0.36	2167
鹿児島	0.734	0.081	0.48	0.35	1075
清　水	0.753	0.087	0.57	0.42	1088
石垣島	0.774	0.085	0.45	0.35	1452
那　覇	0.729	0.086	0.47	0.34	2496
全　国	0.772	0.093	0.47	0.37	24609

(注)式:$(Q_D/Q_T)_D = B(n/N)_{JD}$

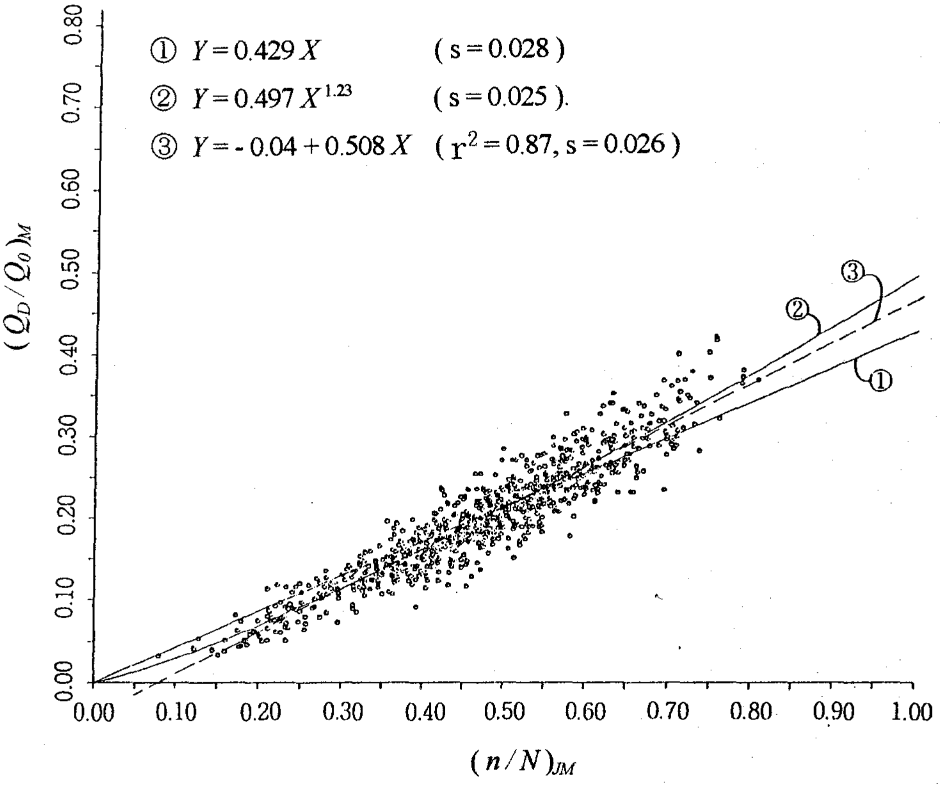

Fig. 2.10 月間直達日射率$(Q_D/Q_0)_M$と月間日照率$(n/N)_{JM}$との関係(全国1982-1984，N_0＝809)

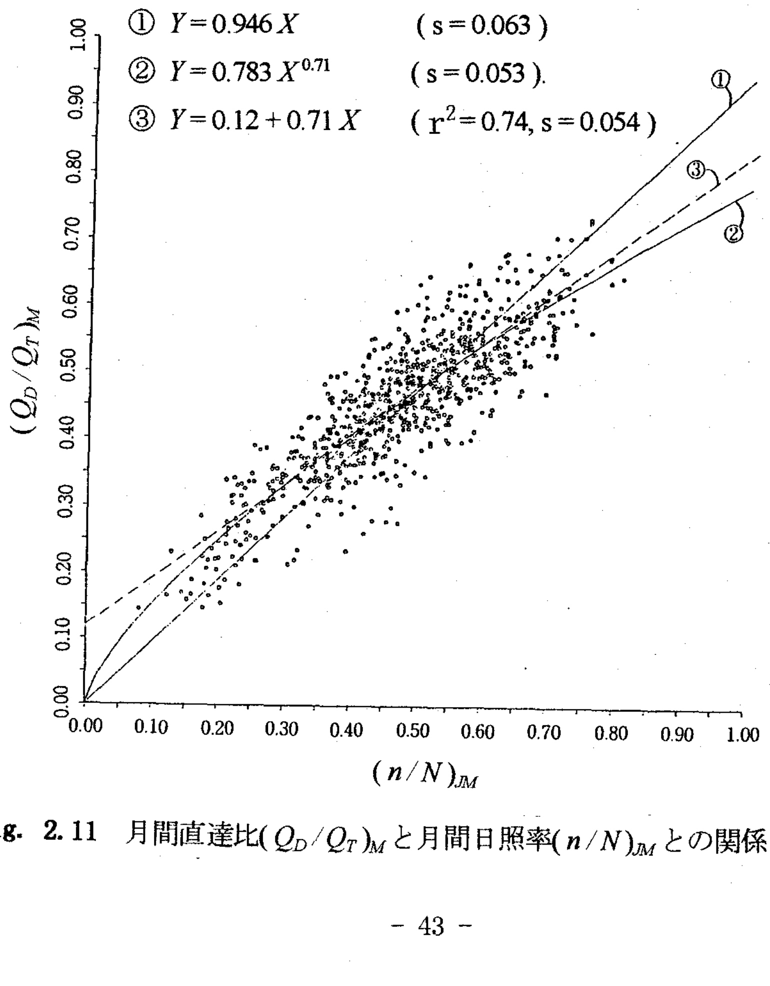

Fig. 2.11 月間直達比$(Q_D/Q_T)_M$と月間日照率$(n/N)_{JM}$との関係

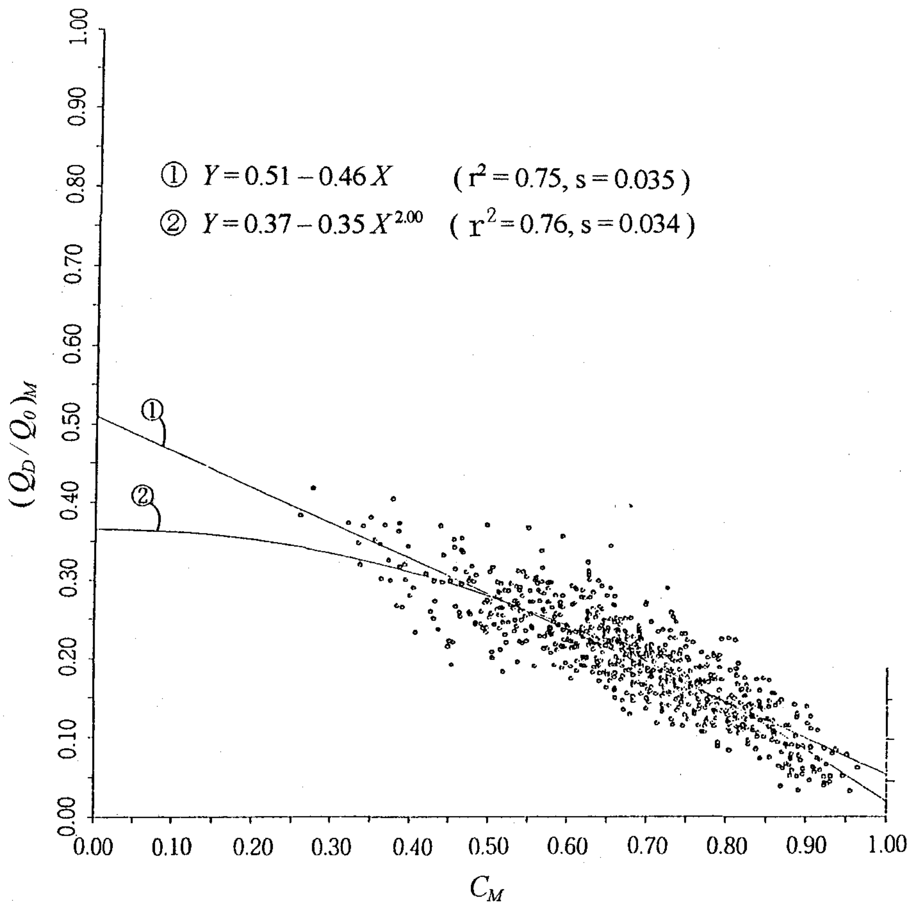

Fig. 2.12 月間直達日射率$(Q_D/Q_0)_M$と月平均雲量 C_M との関係（全国 1982 − 1984, N_0 = 740)

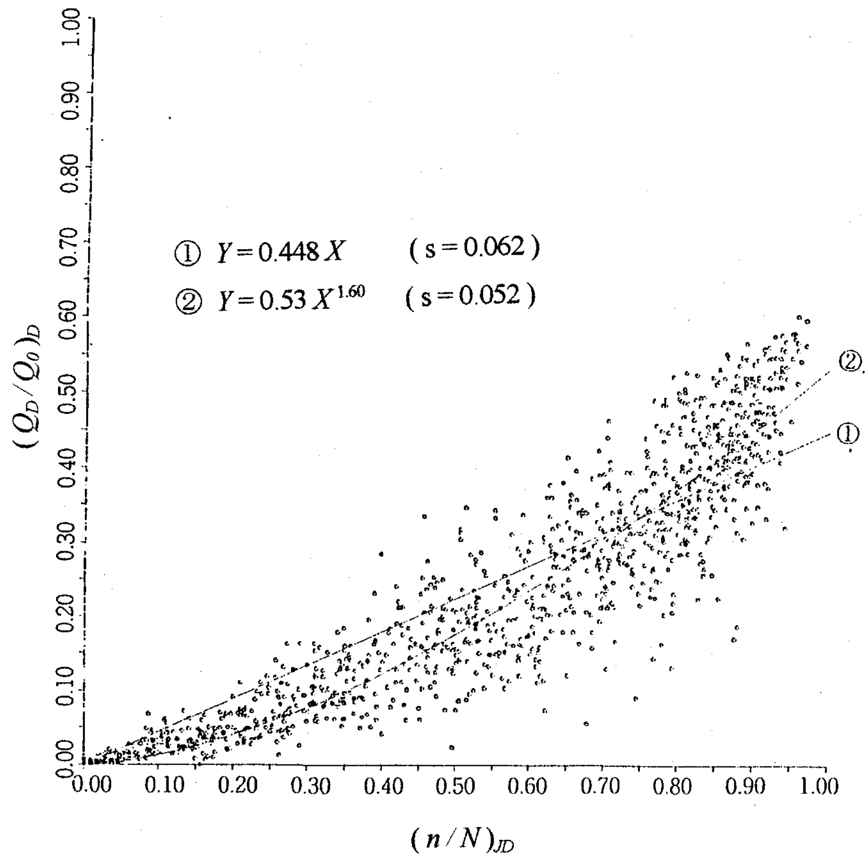

Fig. 2.13 日間直達日射率$(Q_D/Q_0)_D$と日間日照率$(n/N)_{JD}$との回帰関係（石垣島 1981 − 1984； N_0 = 1, 452)

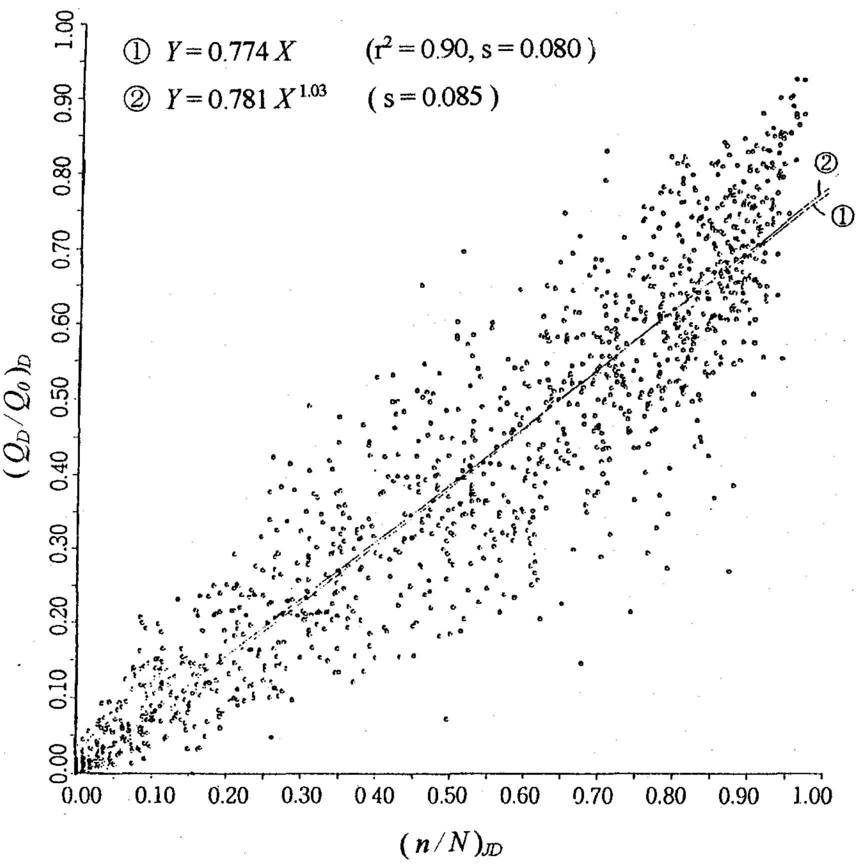

Fig. 2.14 日間直達比$(Q_D/Q_T)_D$と日間日照率$(n/N)_{JD}$との回帰関係(石垣島 1981－1984，N_0＝1,452)

$$(Q_D/Q_T)_D = 0.772(n/N)_{JD}$$

$$(s=0.093,\ N_0=24{,}609) \qquad (2.76)$$

$$(Q_D/Q_0)_D = 0.45 - 0.43\,C_D^{\ 1.6}$$

$$(r^2=0.68,\ s=0.10,\ N_0=24{,}659) \qquad (2.77)$$

ここに，Q_D, Q_T ：月量及び日量水平面直達，全天日射量，$(n/N)_{JM}$，$(n/N)_{JD}$ ：月平均及び日平均「ジョルダン式」日照率．C_M, C_D ：月平均及び日平均雲量.

Q_D/Q_0, Q_D/Q_T を Q_T/Q_0 によって表すとすると，1878－1884 年の全国 16地区に対して次式のようになった（**Table 2.22～ 2.24**, **Fig. 2.15～ 2.17** 参照，紙井・近森(1986a, 1986b)）．

(月量)　$$(Q_D/Q_0)_M = 1.14\,(Q_T/Q_0)_M{}^{2.07}$$

$$(s=0.028,\ N_0=809) \tag{2.78}$$

$$(Q_D/Q_T)_M = -0.07 + 1.25\,(Q_T/Q_0)_M$$

$$(r^2=0.63,\ s=0.064,\ N_0=809) \tag{2.79}$$

$$(Q_D/Q_T)_M = 1.237\,(Q_D/Q_0)_M{}^{0.61}$$

$$(s=0.027,\ N_0=809) \tag{2.80}$$

(日量)　$$(Q_D/Q_0)_D = 1.53\,(Q_T/Q_0)^{2.79}$$

$$(s=0.046,\ N_0=24,612) \tag{2.81}$$

$$(Q_D/Q_T)_D = 1.71\,(Q_T/Q_0)_D{}^2$$

$$(s=0.091,\ N_0=24,610) \tag{2.82}$$

Table 2.22　月間日射率$(Q_T/Q_0)_{JM}$と直達日射率$(Q_D/Q_0)_M$との関係(紙井・近森(1986a))

観測地点	B	P	s	$\overline{Q_T/Q_0}$	$\overline{Q_D/Q_0}$	N_0
札　幌	0.616	1.45	0.039	0.43	0.18	84
根　室	0.930	1.82	0.027	0.46	0.23	48
秋　田	1.987	2.67	0.024	0.38	0.16	47
宮　古	1.164	2.06	0.021	0.44	0.21	60
輪　島	1.220	2.18	0.016	0.38	0.16	48
松　本	0.817	1.65	0.033	0.47	0.24	72
舘　野	1.411	2.23	0.026	0.43	0.22	72
米　子	1.343	2.30	0.016	0.41	0.18	48
潮　岬	1.305	2.12	0.023	0.46	0.25	57
福　岡	0.965	1.85	0.017	0.41	0.18	71
鹿児島	1.187	2.14	0.015	0.42	0.19	36
清　水	1.001	1.82	0.020	0.46	0.24	36
石垣島	1.267	2.24	0.024	0.42	0.19	48
那　覇	1.090	2.08	0.019	0.41	0.18	82
全　国	1.140	2.07	0.028	0.43	0.20	809

(注)式: $(Q_D/Q_0)_M = B\,(Q_T/Q_0)_M{}^P$

Table 2.23　日間日射率$(Q_T/Q_0)_D$と直達日射率$(Q_D/Q_0)_D$との関係(紙井・近森(1986b))

観測地点	B	P	s	$\overline{Q_T/Q_0}$	$\overline{Q_D/Q_0}$	N_0
札 幌	1.30	2.63	0.059	0.43	0.18	2523
根 室	1.53	2.83	0.054	0.46	0.23	1456
秋 田	1.96	3.15	0.033	0.38	0.16	1454
宮 古	1.69	2.91	0.040	0.44	0.21	1815
輪 島	1.61	2.92	0.034	0.38	0.16	1456
松 本	1.35	2.64	0.057	0.47	0.24	2188
舘 野	1.70	2.87	0.038	0.43	0.22	2179
米 子	1.56	2.89	0.035	0.41	0.18	1457
潮 岬	1.70	2.90	0.037	0.46	0.25	1803
福 岡	1.53	2.75	0.043	0.41	0.19	2170
鹿児島	1.56	2.90	0.034	0.42	0.19	1075
清 水	1.48	2.71	0.037	0.46	0.24	1088
石垣島	1.69	2.98	0.047	0.42	0.19	1452
那 覇	1.55	2.81	0.043	0.41	0.18	2496
全 国	1.53	2.79	0.046	0.43	0.20	24612

(注)式:$(Q_D/Q_0)_D = B(Q_T/Q_0)_D{}^P$

Table 2.24　日間日射率$(Q_T/Q_0)_D$と直達日射比$(Q_D/Q_T)_D$との関係(紙井・近森(1986b))

観測地点	B	P	s	$\overline{Q_T/Q_0}$	$\overline{Q_D/Q_T}$	N_0
札 幌	1.49	1.88	0.117	0.43	0.34	2523
根 室	1.79	2.14	0.105	0.46	0.39	1456
秋 田	2.01	2.20	0.075	0.38	0.30	1454
宮 古	1.80	2.03	0.085	0.44	0.39	1815
輪 島	1.65	1.96	0.074	0.38	0.30	1456
松 本	1.52	1.87	0.107	0.47	0.41	2188
舘 野	1.80	1.98	0.081	0.43	0.40	2179
米 子	1.62	1.96	0.078	0.41	0.33	1457
潮 岬	1.79	2.00	0.077	0.46	0.43	1803
福 岡	1.60	1.83	0.091	0.41	0.36	2168
鹿児島	1.62	1.97	0.072	0.42	0.35	1075
清 水	1.62	1.86	0.073	0.46	0.42	1088
石垣島	1.59	2.11	0.093	0.42	0.35	1452
那 覇	1.81	1.96	0.092	0.41	0.34	2496
全 国	1.68	1.97	0.091	0.43	0.37	24610

(注)式:$(Q_D/Q_T)_D = B(Q_T/Q_0)_D{}^P$

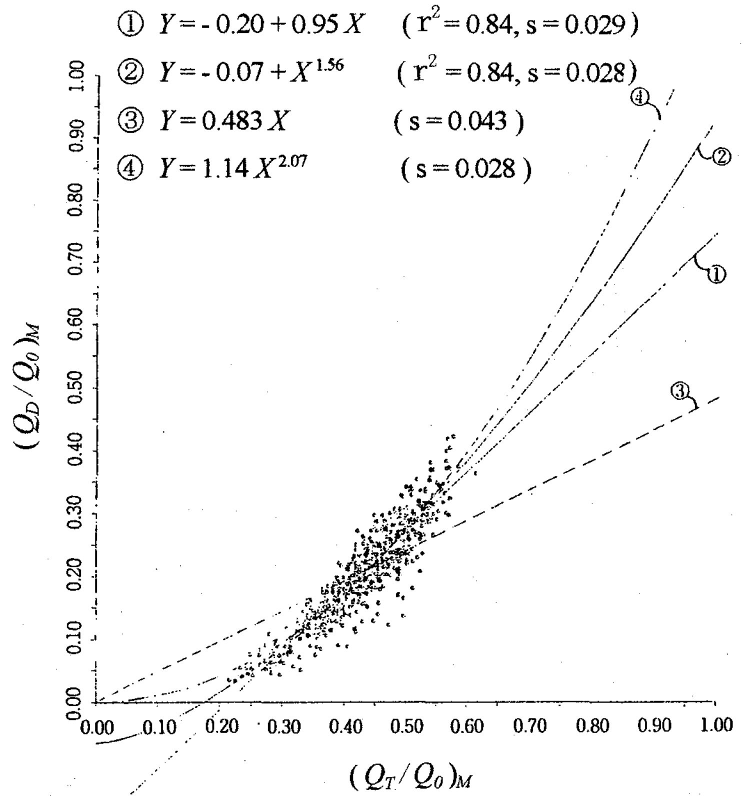

Fig. 2.15 月間直達日射率$(Q_D/Q_0)_M$と月間日射率$(Q_T/Q_0)_M$との関係(全国 1982－1984，$N_0=809$)

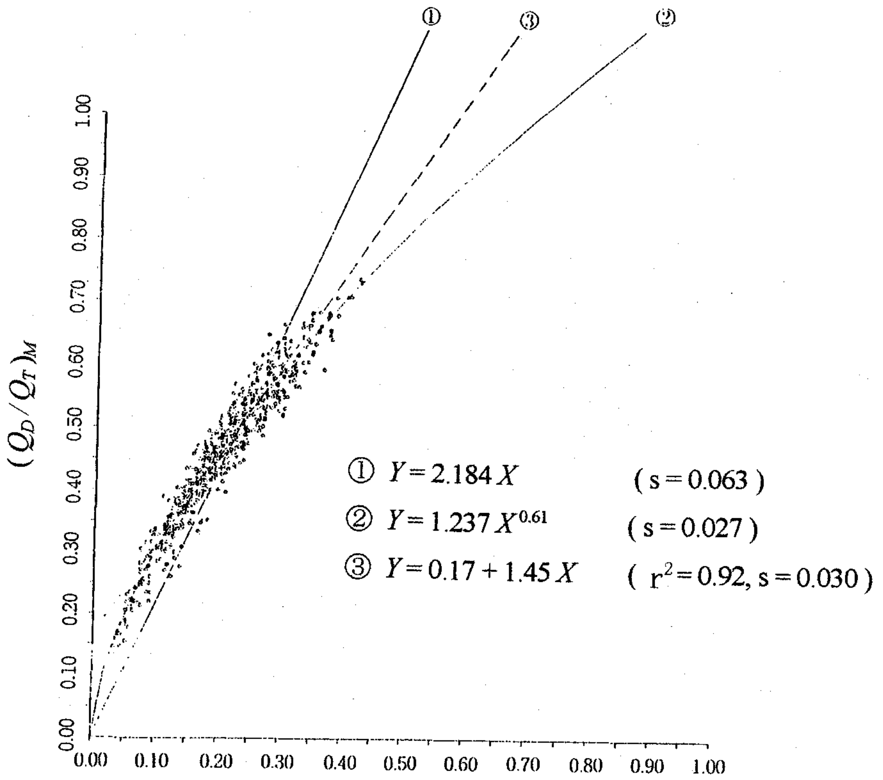

Fig. 2.16 月間直達比$(Q_D/Q_T)_M$と月間直達日射率$(Q_D/Q_0)_M$との関係(全国 1982－1984，$N_0=809$)

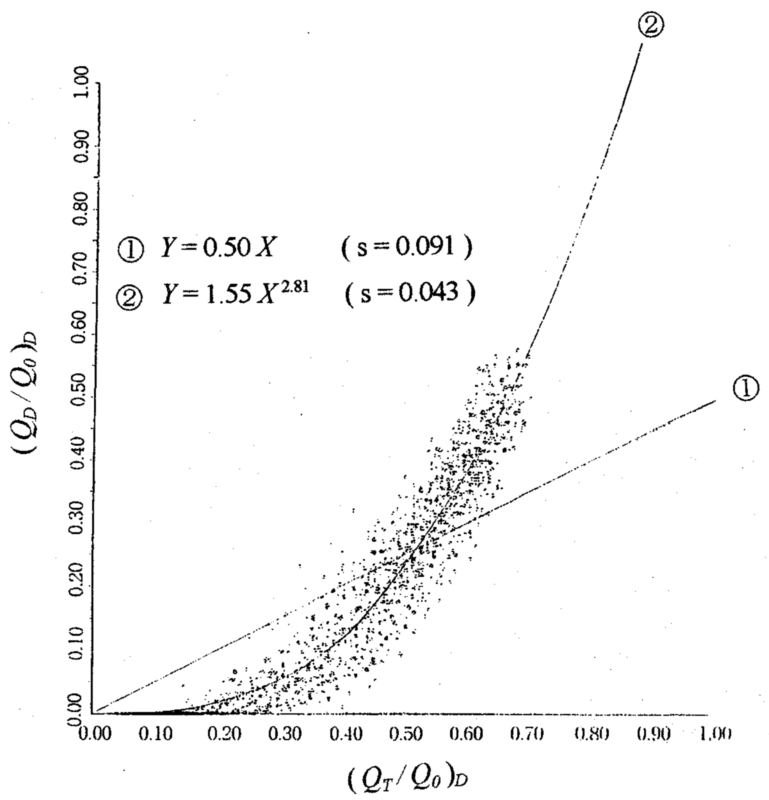

Fig. 2.17 日間直達日射率$(Q_D/Q_0)_D$と日間日射率$(Q_T/Q_0)_D$との関係(那覇 1978－1984, N_0 = 2, 496)

2.4.2　日照率と雲量との関係

日照率と雲量とは，日射率推定の主要要素である．どちらかのデータしかない場合にはそれを用いるしかないが，ここで，両者の関係を調べておくことも意味があるであろう．日間日照率は理論的には 1 (完全晴天日) と 0 (完全曇天日) との間にあるとされているが，館野の 1979 -1984年の日照率のデータを調べてみると日照率= 1 という日は存在せず，完全晴天日と推定される日の日照率でもたかだか $n/N=0.94$くらいである．一方雲量は実測データでも完全晴天日には 0，完全曇天日には 1 となる．また両者の間には直線関係は認められない．従って一見成立しそうに思われる次式は，実際には成立しない．

$$(n/N)_D = 1 - C_D \tag{2.83}$$

実際の両者の関係は次のようなものである (**Fig. 2.18, 2.19** 参照, 紙井・近森(1986)) .

$$(n/N)_{JM} = 0.78 - 0.65C_D^{\ 2.07}$$ （館野を除く全国）

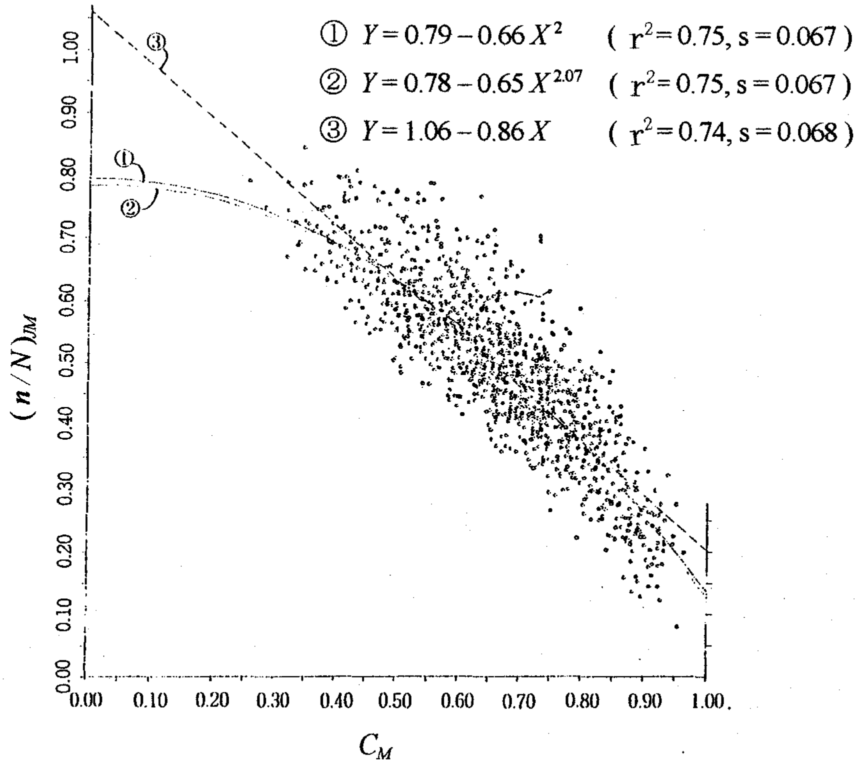

Fig. 2.18 月間日照率$(n/N)_{JM}$と月平均雲量 C_M との関係

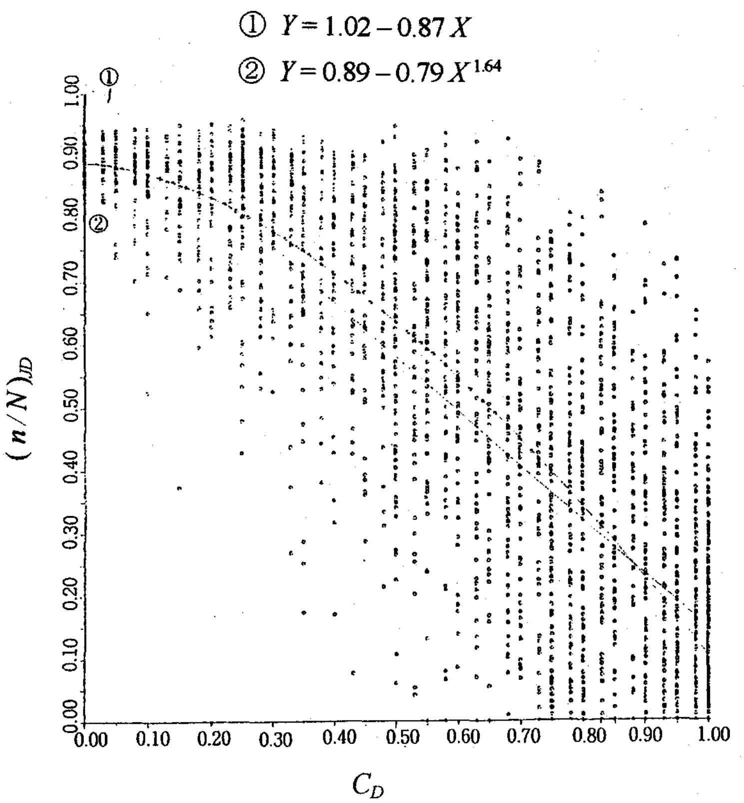

Fig. 2.19 日間日照率$(n/N)_{JD}$と日平均雲量 C_D との関係（全国，1月，N_0 = 3,036）

(月量) $(n/N)_{JM} = 0.79 - 0.66\,C_M{}^2$

(館野を除く全国, r^2= 0.75, s=0.067, N_0=1,260) (2.84)

(日量) $(n/N)_{JD} = 0.88 - 0.74\,C_D{}^2$

(館野・米子を除く全国, r^2=0.67, s=0.186, N_0=35,633) (2.85)

ここに, nは「ジョルダン式」日照時間. 館野 (1日1回観測) , 米子 (1日3回観測) はほかの14地区の1日4回観測と1日観測回数が異なるので外した.

2.4.3 愛媛県内の日射量分布

松山の1979－1985年の「熱電堆式」日射量日射率と 「太陽電池式」日照率との回帰関係を **Fig. 2.20** に, 同じく1975-1985年の「ジョルダン式」日照率との関係を **Fig. 2.21**, (2.86), (2.87) に示す. (2.86) 式の回帰関係を用いて, 「太陽電池式」日照率から愛媛県内の日射量分布を推定した結果を **Fig. 2.22** に示す (太陽定数1.98 cal/cm^2/min=1.38 kW/m^2 , 紙井・近森(1991)).

$(Q_T/Q_0)_D = 0.111 + 0.598\,(n/N)_{SD}$

(日量, 松山, r^2=0.938, s=0.0471, N_0=2,250) (2.86)

$(Q_T/Q_0)_D = 0.168 + 0.575\,(n/N)_{JD}$

(日量, 松山, r^2=0.924, s=0.0513, N_0=4,018) (2.87)

日照時間観測地点は, 大三島, 今治, 丹原, 新居浜, 三島, 松山, 長浜, 久万, 大洲, 三崎, 宇和, 宇和島, 近永, 御荘の14地点である. なお, 各観測地点の日間日照時間相互の単回帰の決定係数と地点間距離との関係を **Fig. 2.23** に示す. 決定係数は地点間距離と共に直線的に低下しているのが分かる.

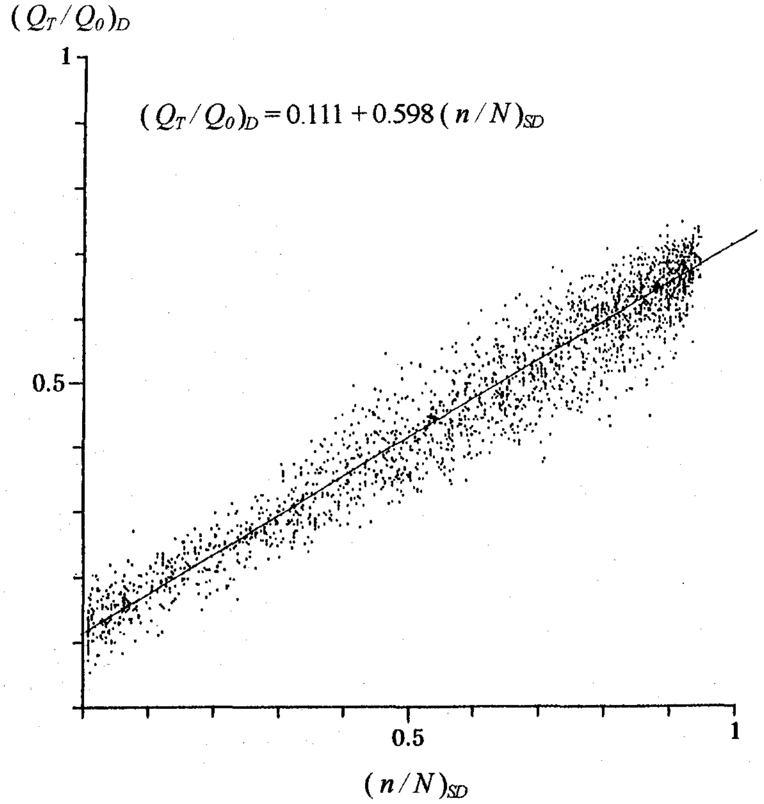

Fig. 2.20 日間日射率 $(Q_T/Q_0)_D$と「太陽電池式」日間日照率 $(n/N)_{SD}$との関係(松山)

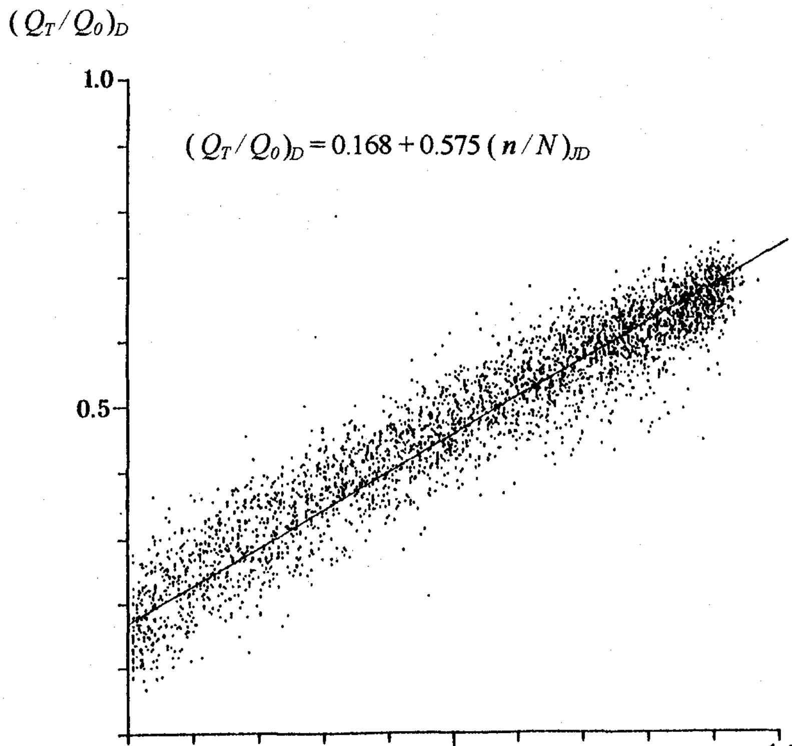

Fig. 2.21 日間日射率 $(Q_T/Q_0)_D$と「ジョルダン式」日間日照率 $(n/N)_{JD}$との関係(松山)

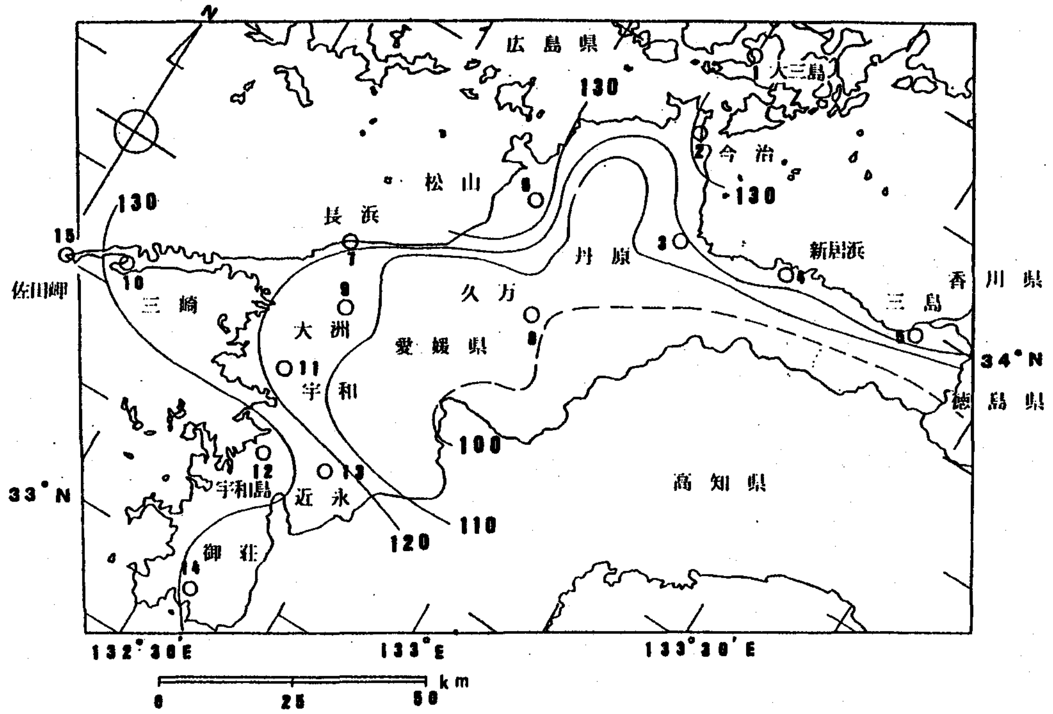

Fig. 2.22 愛媛県の等日射量線図(単位：0.1MJ/m^2/day)

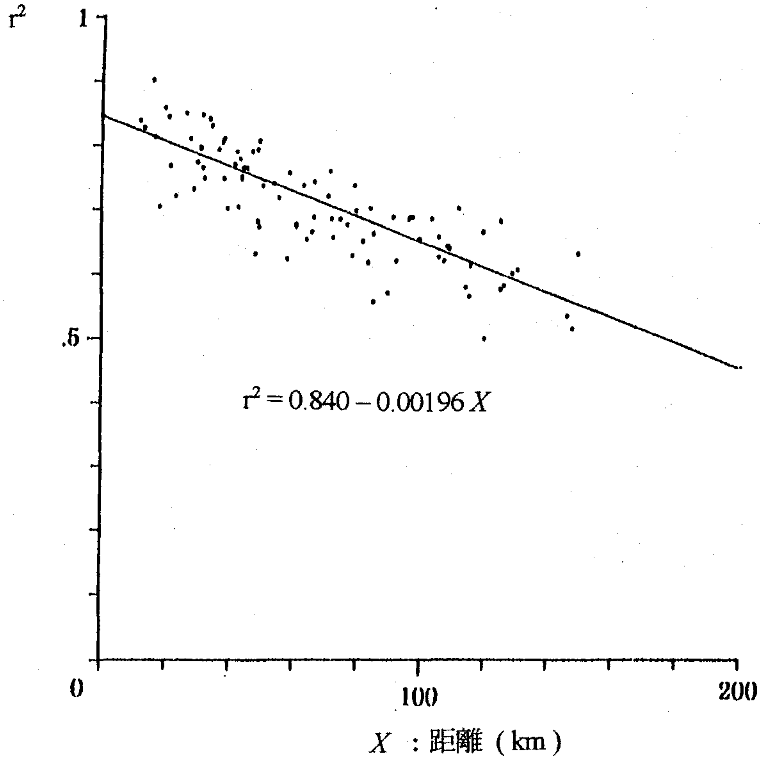

Fig. 2.23 14 地点の太陽電池式日間日照率相互の単回帰決定係数(r^2)と地点間距離との関係

第３章　全天日射量の直達・散乱日射量への分離

3.1　直達・散乱日射量分離の意義

3.1.1　斜面日射量の計算方法と直散分離の意味

斜面日射量は，斜面の勾配，方位によって異なる．斜面勾配・方位は多種多様であり，流域内の各斜面について，一つ一つ実測することは実際的でない．水平面の日射量などから計算によって求めるのが得策である．

斜面日射量も，直達，散乱の２成分に分けることができる（(1.8) 式参照）．このうち直達日射量は法線面直達日射量$DN\cos\Theta$により計算される（(1.9)式）．斜面直達日射量DSは次式によって表される．

$$DS = DN\cos\Theta = DN\{\cos i \sin h + \sin i \cos h \cos(\alpha - \beta)\} \tag{3.1}$$

ここに，DS：斜面直達日射量（例えばMJ/㎡/hr), DN：法線面直達日射量(例えば MJ/㎡/hr), i：斜面勾配(rad)，h：太陽高度(rad)，α：太陽方位角(rad)，南を 0, 西回りを正とする，β：斜面方位角（斜面上に立てた外向き法線ベクトルの向きとして表し，南向きを 0, 西回りを正とする，rad)．(3.1)式を積算すると，日量，月量などの斜面直達日射量が得られる．

斜面散乱日射量の計算方法としては，全天一様散乱を仮定する方法と，天空の散乱日射量分布を考慮する方法とがある．後者の方が理論的には優れているが，精細な天空散乱日射量分布が必要であり，前者の方が実用的と考えられる．全天一様散乱を仮定すると，斜面散乱日射量は (1.10)式で表される．ここに，(1.10) 式の SS：斜面散乱日射量（MJ/㎡/hr），同SH：水平面散乱日射量（MJ/㎡/hr)．

(3.1), (1.10)式を利用すれば，時間量直達・散乱日射量から斜面日射量が計算できる．

斜面日射量には，斜面前方の水平面からの反射日射量も含まれる．アルベドは季節的に夏は小さく冬は大きい．地被状態によっても異なる．反射日射量は(斜面への反射強度)×(反射地物の斜面上への正射影面積)として計算される．仮に周囲の地物が樹木で，そのアルベドが0.16程度とすると，鉛直壁に対して，その壁面上正射影面積は50％であるから，反射を全て無視したときの誤差は8％ということになる．60°斜面の場合4％程度で，日射量データが平均的に2.5％程度の誤差を含むといわれることから（気象庁聞き取り），これはほ

ぼ無視しても差し支えないレベルと考え，ここでは反射日射量は無視することとした.

全国の気象官署において全天日射量が観測されている官署は67，しかし直達日射量が通常観測されているのは，14官署に過ぎない．もしも斜面日射量を検討したい地域がこれら14官署の近傍であれば問題はないが，そうでないときは，全天日射量が計測されている67官署の全天日射量データから直達日射量成分と散乱日射量成分とを分離することが必要となる.

3.2　従来の直達・散乱日射量分離式

直達と散乱日射の分離(以下「直散分離」と略称する)評価する研究は，まず完全晴天日の散乱日射量が，全天日射量，直達日射量あるいは太陽定数，太陽高度などとどのような関係があるかについて行われた．以下にその代表的なものを挙げる.

$$I_{SH} = X - Y\, I_{DH} \qquad (\textit{Parmelee}\,(1954)\text{の式}) \tag{3.2}$$

ここに，I_{SH}：時間水平面散乱日射量（BTU/ft^2/hr)，I_{DH}：時間水平面散乱日射量（BTU/ft^2/hr)，X，Y：太陽高度（度）によって変化する係数.

$$I_{SH} = (0.2710\, I_0 - 0.2939\, I_{DN}) \sin h$$

$$(\textit{Liu and Jordan}\,(1960)\text{の式}) \tag{3.3}$$

ここに，I_0：太陽定数（BTU/ft^2/hr)，I_{DN}：法線面直達日射量（BTU/ft^2/hr)，h：太陽高度（度）.

$$I_{SH} = (1/3)(I_0 - I_{DN}) \sin h$$

$$(\textit{Nehring}\text{の式(宇田川・木村(1978))}) \tag{3.4}$$

$$I_{SH} = I_{DN}\,(\sin h + C) \quad (\textit{ASHRAE}\text{の式(宇田川・木村(1978))}) \tag{3.5}$$

ここに，C は月別に与えられた定数.

しかし，これらはいずれも完全晴天日に対して導かれた式であり，曇天日に対して適用するのは困難である.

直散分離を考えるとき，注意すべきことは，大気の透過率（単位距離の大気を透過する日射量の割合）によって直達日射量と散乱日射量の比は変わるであろう，ということである. 空中に混濁物質が多ければ多いほど，透過して直達する日射量は減少し，散乱日射量は増えるであろう.

今大気圏外おける単位面積が単位時間に受ける日射量をI_0とすると，地表面に到達する法線面直達日射量 I_{DN} は次式で表される（*Bouguer*の式(斎藤・松尾・落藤(1964))）.

$$I_{DN} = I_0 P_A^{\ \mathrm{cosec}\, h} \tag{3.6}$$

ここに，P_A ：大気の透過率(0–1)，h ：太陽高度.

*Bouguer*の式は単一の波長の輻射に対してはよく合うと言われているが，種々な波長からなる日射に対しては成立しないといわれている(斎藤・松尾・落藤(1964)). P_Aは長波長のときに大，短波長のときに小となり，太陽高度，または air mass(「大気路程」,「大気の光学的厚さ」,「大気の光学的質量」ともいう, = cosec h ）に応じて変化する.

しかし次の *Berlage*の式(斎藤・松尾・落藤(1964))はしばしば散乱日射量の推定に利用される.

$$I_{SH} = I_0 / 2 \sin h (1 - P_A^{\ \mathrm{cosec}\, h}) / (1 - 1.4 \log_e P_A) \tag{3.7}$$

(3.7)式は晴天時で，日射波長の短い時は実測とよく合うといわれている.

直達日射量を気象庁が計測開始したのは 1932 年8月，銀盤日射計によってで，1938 年までに 79 地点に及んだ. 樺太・朝鮮・台湾・南洋諸島などの外地を除いても50カ所以上であった. その後減少し，1952 年には 16カ所，1953年には12カ所，(札幌，根室，秋田，輪島，松本，東京，米子，潮岬，清水，福岡，鹿児島)，1964 年 10月に東京が打ち切られ，1972 年那覇，石垣島が加わり，1977 年館野が観測開始した(関根(1979)).

しかし，直散分離の研究が進展したのは比較的最近のことである. これは近年

の太陽エネルギーへの関心の高まりとともに，気象庁の直達日射量観測点数が銀盤日射計当時に比べて大幅に減少したため，直達・散乱日射量を分離推定する必要性が高まったことが原因と考えられる．

米国の *ASHVE Guide Book* (1951) pp. 276には *P. Moon* の水平面全天日射量を直達・散乱日射量成分に振り分ける研究が載っており，これを準用してわが国では内田(1953)が提案値を求め，広く利用されていた(斎藤・松尾・落藤(1964))．その後平山・斎藤・前川は気象庁の公表する大気透過率 P_A を直達日射がある場合の透過率の平均値であると仮定し，それを基にして求めた水平面直達日射量に，時刻毎の日照率を掛けて積算し，月量水平面直達日射量を求め，全天日射量から直達日射量を差し引いた値を水平面散乱日射量とするという方法によって東京における方位別月別平均日射量を試算した(斎藤・松尾・落藤(1964))．

Bugler (1977) は Melbourneの 1966 -1970年の時間量全天日射量データから，時間量散乱日射量を推定する次式を導いた．

$$SH = 0.94\,TH \qquad (0 \leqq K_T \leqq 0.35\text{の場合}) \tag{3.8}$$

$$KST = SH/TH = \{1.29 - 1.19\,(TH/TCL)\} / \{1.00 - 0.334\,(TH/TCL)\}$$

$$(0.4 < TH/TCL \leqq 1.0\text{の場合})$$

$$SH = 0.15\,TH \qquad (TH/TCL > 1.0\text{の場合}) \tag{3.9}$$

ここに，SH ：時間量水平面散乱日射量(MJ/m^2/hr), TH ：時間量水平面全天日射量(MJ/m^2/hr)，TCL ：晴天時間量水平面全天日射量（モデルによって計算)．

斎藤・松尾・落藤(1964)は 1963 年の東京においてのエプリー式日射計での東西南北鉛直壁面上の日射量と水平面日射量の計測結果から，日が当たっていない鉛直壁面日射量の２倍を散乱日射量とみなし，これを水平面全天日射量から差し引いた値を水平面直達日射量とみなすこととすれば，結果的に晴天時の太陽周辺からの指向性の強い散乱光を直達日射量と同じ第２太陽として取り扱うことになり，散乱日射量に関する *Berlage* 式とよく合うことを指摘している．この太陽周辺の指向性の強い散乱光を直達日射量と同一にとり扱い，残りの散乱光を全天一様に分布する散乱日射量として取り扱う考え方は，理論的にはきわめて妥当であると思われる(斎藤・落藤(1964))．その後松尾(1973)が同じように日影の鉛直壁の２倍を水平面日

射量として，雲量，太陽高度をパラメーターとした直散分離手法を提案した．また天空の放射輝度分布に関して永田(1967)が太陽を中心として5度の範囲ではきわめて輝度が高く，太陽そのものとみなして取り扱うとよいとの考え方を示すなど，天空放射分布に研究者の目を向けさせた．

さて，*Bouguer*式と*Berlage*式が成り立つとしたら，直達日射量＋散乱日射量＝全天日射量であるから，もしも単位時間の全天日射量（$I_{TH}=I_{DN}\sin h+I_{SH}$）がわかっておれば，透過率$P_A$をいろいろに仮定し直して，$I_{TH}=I_{DN}\sin h+I_{SH}$を満足する$P_A$を求め，これを用いて(3.6),(3.7)式から$I_{DN}$，$I_{SH}$を求めることができる．この方針に従って空気調和・衛生工学会では初め*Bouguer*式と*Berlage*式，後に*Bouguer*式と永田の式を用いて「動的空調負荷計算プログラム・HASP/ACLD」入力用の標準気象データを作成した．

*Berlage*式は本来晴天時において成立する式であるが，曇天時においても実用的には適用できるとされている．にもかかわらず，この方面の研究はその後あまり進展しなかったようである．その理由は恐らく*Bouguer*式，*Berlage*式共に実用的には問題を抱えていること，すなわち*Bouguer*式(斎藤・松尾・落藤(1964))のP_Aは一定ではなく，太陽高度に応じて変化するし，*Berlage*式は空気分子によるレーリー散乱理論に基づいているが，空気中にはより大きな塵なども存在するため，実際の2/3-2/5の過小の値を与えるといわれている(小木曽・斎藤・松尾(1960)，永田(1975)，鈴木・荒谷(1979))，そして実際の天気は完全晴天ばかりではないことなどによると思われる．松尾の*Berlage*式の修正式(空調設備基準委員会(1976))というものもある．

曇天時も含めた時刻別日射量を求める方法は，多くは時刻別日照率または雲量により，完全晴天日と完全曇天日の日射量を日照率または雲量によって補間して求めるというものが多い(木村・宇田川(1970)，角野(1964)，赤坂(1984)，二宮・赤坂(1984))．

宇田川・木村(1978)は時間全天日射量から時間直達日射量を推定する実用的な方法を提案した．彼らは1968年1-12月の館野高層気象台のゴルチンスキー日射計，遮蔽リングによる散乱日射量の時間量データと，各時間の中央に当たる毎30分毎の太陽高度hを用い，下記に示す全天日射量と直達日射量の無次元指標K_T，K_Dの関係を，K_Tの小さい範囲では原点を通る3次式，K_Tの大きい範囲では1次式とみなすこととした．ただし，これらの形状は$\sin h$（h：太陽高度）によって変化することから，$\sin h$を係数に持つ次式を提案した．

$K_T \geqq K_{TC}$ のとき，

$$K_D = -0.43 + 1.43\ K_T$$

$K_T < K_{TC}$ のとき，　(3. 10)

$$K_D = 2.277 - 1.258\sin h + 0.2396\sin^2 h)\, K_T{}^3$$

ここに，K_T ：全天日射量の無次元指標$= TH/(I_0 \sin h)$ ，TH ：時間量水平面全天日射量(kcal/㎡/hr)，K_D ：直達日射量の無次元指標$= DN/I_0$，DN ：時間量法線面直達日射量(kcal/㎡/hr)，h ：毎30分の太陽高度，I_0 ：大気外法線面日射量 (kcal/㎡/hr)，K_{TC} ：３次曲線近似と直線近似の境界，$K_{TC} = 0.5163 + 0.333\sin h + 0.00803 \sin^2 h$.

三木・徳久(1983)は，1981年 9月-1982 年 9月の大分大学での熱電堆A型日射計及び遮蔽バンドによる全天日射量・散乱日射量から直達日射量を算出し，K_T, K_D の関係を次のように求めた.

$$K_D = (1.2639 + 0.9257\sin h_n - 0.9424\sin^2 h_n)\, K_T{}^{2.5} \quad (3.\ 11)$$

ここに，h_n ：太陽南中高度(rad).

渡辺・浦野・林(1983)は，1980 年 1-12月の福岡市箱崎における，毎正時からの30分間の熱電堆式全天日射計及びそれに遮蔽バンドを取り付けた散乱日射計データを解析し，次の (3. 12) (「渡辺Ｉ」と呼ぶ) , (3. 17), (3. 18)式 (「渡辺Ⅱ」と呼ぶ) を提案した.

$$K_{DS} = K_D + (0.9013 + 1.123\sin h)\, K_D{}^{1.489} (1 - K_D)^{2.525} \quad (3.\ 12)$$

ここに，$K_{DS} = DH/(I_0 \sin h - SH) = K_D/(1 - K_S)$, DH :水平面直達日射量(kcal/㎡/hr)，$I_0 \sin h$ ：大気外水平面日射量(kcal/㎡/hr)，SH ：水平面散乱日射量(kcal/㎡/hr).

(3. 12)式は，両辺にK_D が含まれているので，そのままではK_D を求めることができない. そこで渡辺らはSH , DH をP_A を用いて(3. 13)～(3. 16)式のように表した.

$$SH = I_0 \sin h\, Q/(1+Q) \tag{3.13}$$

$$Q = (0.9013 + 1.123 \sin h)\, P_A^{\,0.489 \operatorname{cosec} h} (1 - P_A^{\,\operatorname{cosec} h})^{2.525} \tag{3.14}$$

$$DH = I_0 \sin h\, P_A^{\,\operatorname{cosec} h} \tag{3.15}$$

$$TH = DH + SH = I_0 \sin h \left\{ P_A^{\,\operatorname{cosec} h} + Q/(1+Q) \right\} \tag{3.16}$$

好都合なことに(3. 16)式はP_A に関して単調増加関数であり，従って TH と$\sin h$ とを定めれば (3. 16) 式から唯一のP_A が求められる. その P_A を用いて(3. 13), (3. 14), (3. 15)式からSH, DH を定めることができる.

渡辺Ⅱは次式で表される.

$$K_{TC} = 0.4268 + 0.1934 \sin h$$

$K_T \geqq K_{TC}$ のとき,

$$K_{DS} = K_T - (1.107 + 0.03569 \sin h + 1.681 \sin^2 h)(1 - K_T)^3 \tag{3.17}$$

$K_T < K_{TC}$ のとき,

$$K_{DS} = (3.996 - 3.862 \sin h + 1.540 \sin^2 h)\, K_T^{\,3} \tag{3.18}$$

ただし,
$$K_D = K_{DS}(1 - K_T)/(1 - K_{DS}) \tag{3.19}$$

$$K_S = (K_T - K_{DS})/(1 - K_{DS}) \tag{3.20}$$

Permelee, Liu & Jordan, Nehring, ASHRAE の方法が，晴天条件下でしか適用可能でなかったのに比べ，宇田川・木村 ((3. 10) 式)，渡辺・浦野・林の方法 ((3. 12)～(3. 17) 式) は，曇天時も含めた全天候型である点にも特色がある. 曇天時も含めた直達・散乱日射量の関係を求める場合，例えば雲量 0 のときと雲量 10のときの関係式を別々に求めておいて，雲量 1～9のときは補間する(松尾(1973)，木村・宇田川(1974)). そのような方法も考慮すべきであるが，雲量データが必要となる.

宇田川・木村の方法及び渡辺・浦野・林の方法では，曇天も含めた日射量データから直達・散乱関係を定めているため，時間量水平面全天日射量だけで直達・散乱を分離できる利便性がある. 精度的にもこれまで提案された時間全天日射量からの

直散分離の方法の中では最良のものである．そこでこの２つの方法が採用している K_T, K_D, K_S などの無次元指標を用いて，精度の高い直散分離法が生み出せるかどうかの検討を行うために案出したのが，次で述べる二段階推定法である．

3.3　二段階推定法の試み

3.3.1　本研究に使用したデータと記号

（1）データ

本研究では，館野高層気象台1982−1984年1−12月測定の時間水平面日射量，直達日射量および散乱日射量を使用した．測器は全天日射量と散乱日射量は熱電堆式，直達日射量は直達電気式である．大気外水平面日射量 Q_0 大気による減衰を無視したときの水平面上での日射量，MJ/m^2/hr）は(3.21)式から5分毎の $\sin h$ を計算し，1時間分12個の $\sin h$ の合計値を12で割って $\sin h$ の1 時間平均値を求め，それに当日の大気外日射量 I_0（後述）を掛けて算出した．

ただし，ϕ ：館野高層気象台の緯度（北緯36°03'），δ（太陽赤緯）は理科年表(1979−1984)からとった．t は時角(deg)，時間の進行方向に角度表示したもの．南中時を0，午後を正，午前を負にとる．（=(時刻−南中時刻)・15°・π/180°）

$$\sin h = \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos t \tag{3.21}$$

データは，$\sin h \geq 0.1$ の時間量水平面全天・直達・散乱日射量データを，その時間の大気外水平面日射量で割って無次元化したものを，時系列順に1時間毎に奇数系と偶数系に取り分け，前者を推定式の係数同定用，後者をその係数を用いたときの推定精度検証用とした．

（2）記号

地上で観測される日射量は、季節毎に周期変動している．　この変動の影響を取り除くため，実測日射量を Q_0 で割って無次元化した指標に直して扱った．水平面全天・直達・散乱日射量の無次元化指標を各々 K_T, K_D, K_S とし，さらに下記に示す無次元化指標を加えて検討した．指標の多くは渡辺・浦野・林(1983)の記法による．

(主な記号等)

TH ：水平面全天日射量（MJ/m^2/h)

DN ：法線面直達日射量（MJ/m²/h）

DH ：水平面直達日射量（MJ/m²/h）（$DH = DN \sin h$）

SH ：水平面散乱放射量（MJ/m²/h）

I_0 ：日本気象協会発行の「気象観測のための常用表Ⅲ」（1971）「大気外日射量 I_0 の表」の I_0 (cal/cm²/min)を単位換算して得た，時間毎の大気外法線面日射量（MJ/m²/h）．太陽定数（太陽と地球との平均距離における大気外日射量の値）は，1981年1月1日から1.96 cal/cm²/min）に改訂することが WRR（世界放射基準）で定められているが，わが国の気象庁では，まだ改訂されていないので，従前どおりの1.98 cal/cm²/minとしている（第２章３参照）．

Q_0 ：大気外水平面日射量（MJ/m²/h）（$Q_0 = I_0 \sin h$）

h ：太陽高度（rad）

P_A ：大気の透過率（無次元）（$P_A = (DN / I_0)^{\sin h}$）

通常の透過率は直達日射量の計測された瞬間だけのものであるが，ここでは直達日射量の計測されなかった瞬間も含めた１時間の平均的大気の透過率を表している．

K_T ： TH / Q_0 （無次元）

K_D ： DH / Q_0 （無次元）

K_S ： SH / Q_0 （無次元）

K_{DT} ： DH / TH （無次元）

K_{ST} ： SH / TH （無次元）

K_{DS} ： $DH / (Q_0 - SH)$ （無次元）

$K_D / 10K_S$ ：$DH / (10SH)$ （無次元）

3.3.2　宇田川・木村式の検討

筆者等は同じ館野で，時期(1982-1984)，太陽高度($\sin h \geq 0.1$)，データの種類（全天・直達・散乱の３種類）が宇田川・木村(1978)とは上記のように異なる条件の下で計算した．筆者らの用いた館野同定用データ(1982-1984年)全てについての K_D と K_T の散布図を **Fig. 3.1** に示す．得られた式は $\sin h \geq 0.1$ に対して(3.22)～(3.23)式のとおりである（**Fig. 3.2** 参照）．

$$K_{TC} = 0.610 - 0.369 \sin h + 0.726 \sin^2 h \tag{3.22}$$

$K_T \geqq K_{TC}$ のとき，

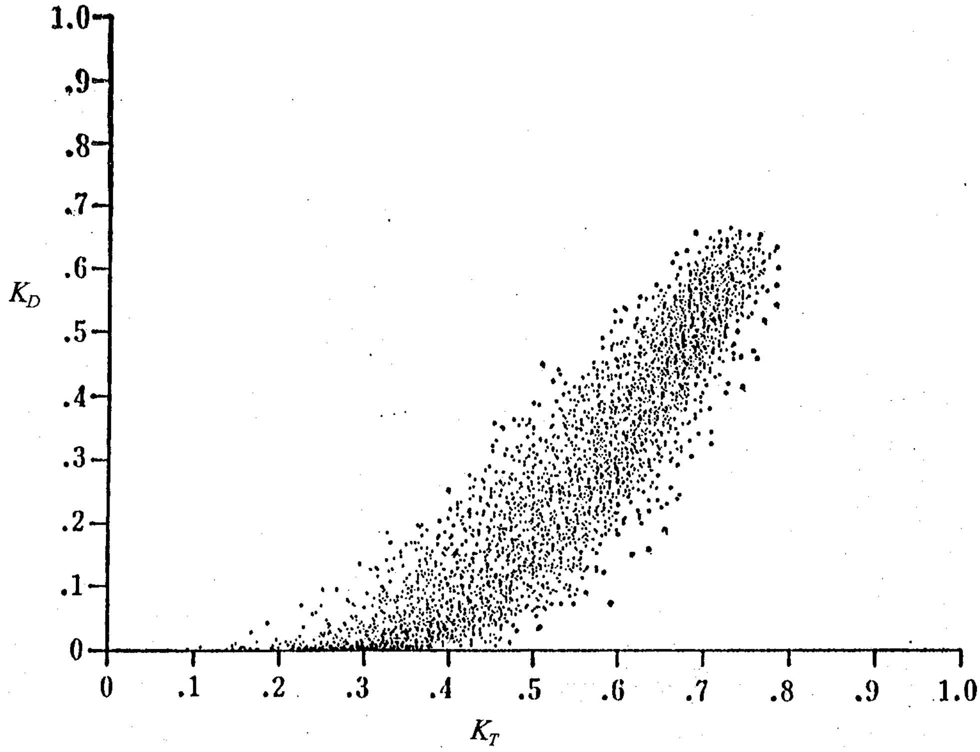

Fig. 3.1 K_D と K_T (館野の同定用データ)

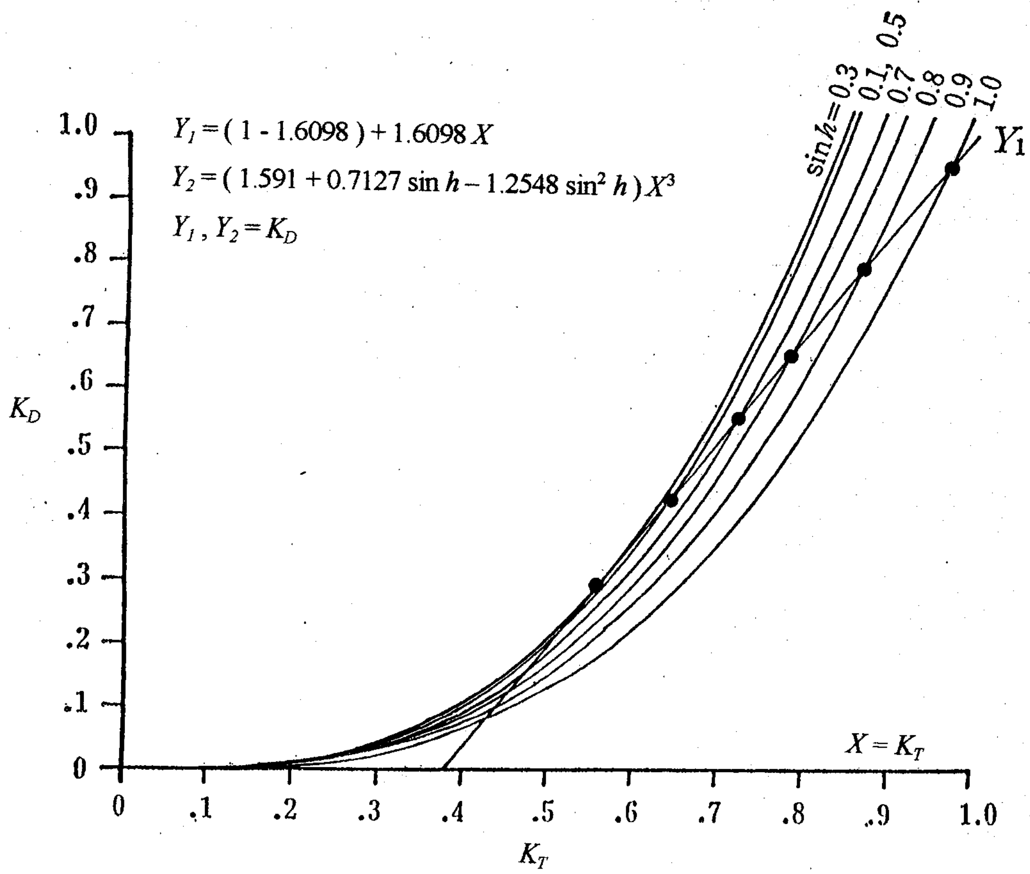

Fig. 3.2 (3.22), (3.23)式(館野 $\sin h \geqq 0.1$)

$$K_D = (1.59 + 0.713\sin h - 1.26\sin^2 h)\,K_T{}^3$$

$K_T < K_{TC}$ のとき， (3. 23)

$$K_D = (1 - 1.610) + 1.610\,K_T$$

3. 3. 3　渡辺・浦野・林の方法の検討

筆者等の館野1982－1984年のデータでは，渡辺Ｉ(1983)と同じ方法によって次の係数を得た.

$$K_{DS} = K_D + (0.519 + 0.391\sin h)K_D{}^{1.10}(1 - K_D)^{1.66} \qquad (3.24)$$

実際の計算に当たっては，$\sin h$ とP_A とを仮定して(3. 14)式からQを計算し，そのQと仮定したP_A, $\sin h$から(3. 16)式により，TH を計算し，TH , P_A, $\sin h$に関するテーブルを作っておく．そして，実測で得たTH の値とその時刻の $\sin h$ の値から, テーブルを使って逆にP_Aを求め，その P_A と(3. 13), (3. 15)式とからSH , DH を求めることとした．　この場合，(3. 16)式のTH がP_A についての単調増加関数であることが，この方法を可能にしている(渡辺・浦野・林(1983))．

筆者等の同定用データの K_D と K_{DS} との散布図を **Fig. 3. 3** に示す。

次に筆者らが渡辺IIと同じ方法によって館野で得た結果では K_{TC} は２次式となった.

$$K_{TC} = 0.629 - 0.283\sin h + 0.345\sin^2 h \qquad (3.25)$$

$K_T \geq K_{TC}$ のとき，

$$K_{DS} = K_T - (4.22 - 9.50\sin h + 9.77\sin^2 h)(1 - K_T)^3$$

$K_T < K_{TC}$ のとき，

$$K_{DS} = (2.37 + 0.423\sin h - 0.271\sin^2 h)\,K_T{}^3 \qquad (3.26)$$

この K_T と K_{DS} の館野の係数同定用データの散布図は, **Fig. 3. 4** に示すとおりである.

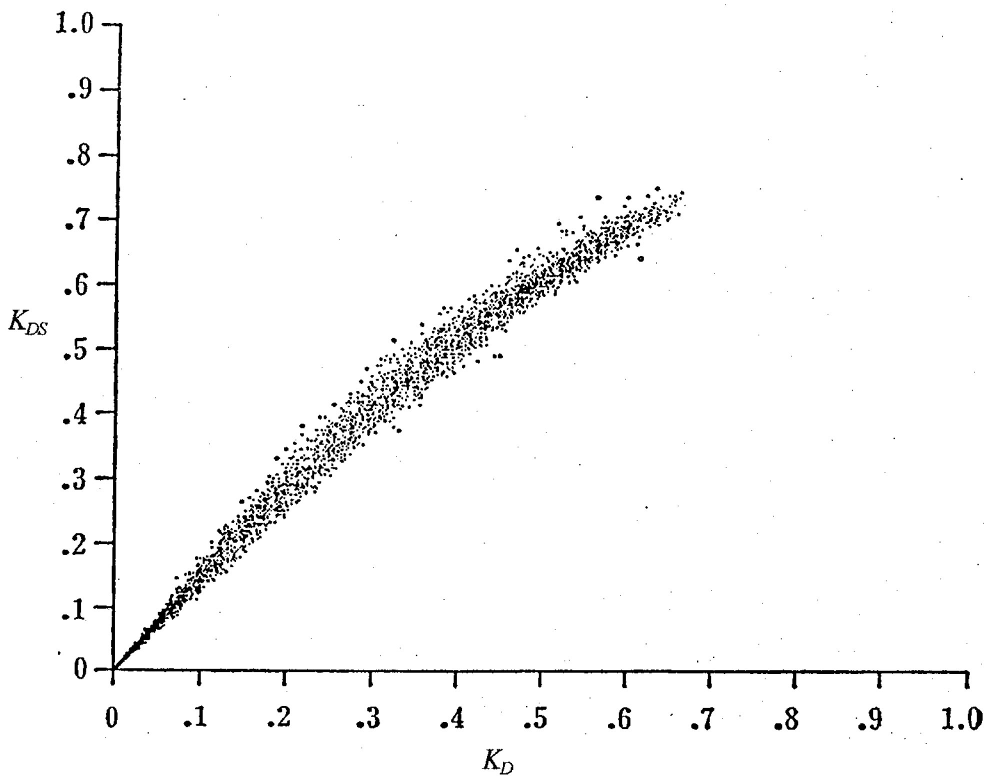

Fig. 3.3 K_{DS} と K_D（館野の同定用データ）

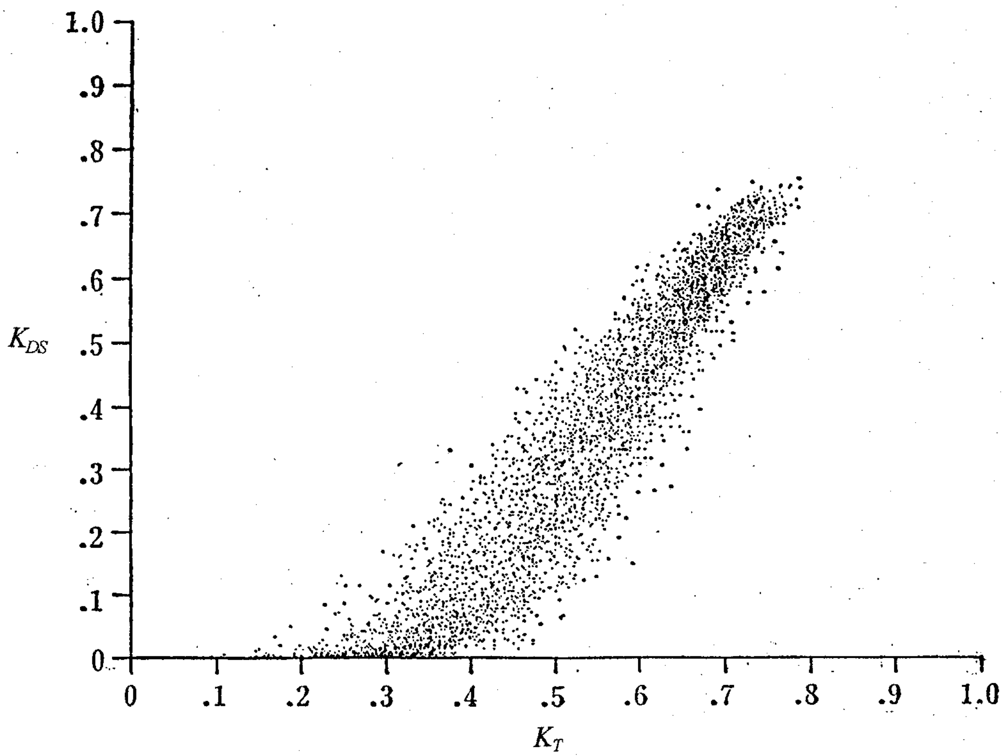

Fig. 3.4 K_{DS} と K_T（館野の同定用データ）

3.3.4 推定精度

これまで述べた従来の方法について，筆者等の精度検証用データを用いて精度を検討した結果を Table 3.1 に示す．推定精度は次式によって評価した．

K_S の評価： $S_{KS}=\sqrt{\sum\left(K_S-\overline{K_{S1}}\right)^2/N_0}$ (3.27)

K_D の評価： $S_{KD}=\sqrt{\sum\left(K_D-\overline{K_{D1}}\right)^2/N_0}$ (3.28)

ここに、K_S，K_D：実測値から計算したK_S，K_D，$\overline{K_{S1}}$ ，$\overline{K_{D1}}$：K_S，K_D の第一次推定値，N_0 ：データ数．

上記(3.27)，(3.28)式の $\overline{K_{S1}}$ ，$\overline{K_{D1}}$ の代わりにK_S，K_D の第二次推定値$\overline{K_{S2}}$，$\overline{K_{D2}}$ を用いたとき，各々 S_{KS2}，S_{KD2} とする．

Table 3.1 従来の方法の推定精度 (×10^{-4})

提案者	同定用データ	境　界　式	S_{KS}	S_{KD}	S_{KS2}	S_{KD2}
宇田川・木村	$\sin h>0.3$	$K_{TC}=0.4624-0.1383\sin h+0.06031\sin^2 h$	568	660	516	589
〃	$\sin h\geq 0.1$	$K_{TC}=0.6102-0.3686\sin h+0.7264\sin^2 h$	448	529	428	495
〃	〃	$K_{TC}=0.65$	426	514	415	494
渡辺・浦野・林Ⅰ	〃	なし	409	501	403	470
渡辺・浦野・林Ⅱ	〃	$K_{TC}=0.629-0.283\sin h+0.345\sin^2 h$	443	512	417	486

(注)検証用データは $\sin h\geq 0.1$ のもの．データ数 N_0＝ 6,018．

渡辺・浦野・林Ⅰは P_A と $\sin h$ の刻みを 0.01 として作成した P_A，$\sin h$，TH のテーブルから作成した．

3.3.5 二段階推定法

（1）基本的考え方

ここに取り上げた各種方法ではK_T，K_D，K_{DS} の関係を考察したが，K_T，K_D，K_{DS} 以外の無次元化指標についても検討を試みることは有意義であろう．推定誤差のもっと小さいものが見つかる可能性もある．そこで次の２段階推定法を考えた．

①一般に任意の２種類の無次元化指標の一方を独立・他方を従属変数に選び，２つの無次元化指標の間の関係を定式化する．このためには，後で **Fig. 3.5** に例示するように，独立変数指標を例えば0.05刻みで区間分けし，各区間毎の独立変数指標の区間中央値と，その区間における従属変数指標の平均値を計算する．後者を前者でもって式に表す方法には，直交多項式を援用する(例えば奥野(1980))．

② ①で定式化した式を用いて，K_D （またはK_S）の第一次推定値$\overline{K_{D1}}$ （または$\overline{K_{S1}}$）を求める．

② sin$h$を，例えば$0.1 \le \sin h < 0.15$，$0.15 \le \sin h < 0.2$，....$0.95 \le \sin h < 1$ のように分級する．②の第一次推定値$\overline{K_{D1}}$（または$\overline{K_{S1}}$）の２乗をX_1，$\overline{K_{D1}}$（または$\overline{K_{S1}}$）をX_2 とし，実際のK_D（またはK_S）$=Y$（従属変数）との重回帰式を$\sin h$の級（区間）毎に作り，回帰定・係数を$\sin h$ の級代表値の例えば３次の多項式$YY=$ ・・・として表すことにより，より精度を高めた第二次推定値$\overline{K_{D2}}$，$\overline{K_{S2}}$ を得ることとする．

（計算手順）

①任意の２つの無次元指標を$X=K_1$, $Y=K_2$ とする．

②係数同定用データを，例えば$X_i=0.05i\,(i=1,2,3,\cdots)$が中央値となるように級(区間)分けする．

③ i級のX_i に対応するYの平均値Y_iを計算する．

④直交多項式の方法によりY_i をX_i の，例えば３次の多項式で表す．

$$YY = A_0 + A_1X + A_2X^2 + A_3X^3 \tag{3.29}$$

⑤ $\sin h$ の値によって級分けする．$\sin h$の中央値は，上の③の例では$\sin h = 0.075 + 0.05i$となる．

⑥ (3.29)式を用いて，$\sin h$の級毎に，K_D（またはK_S）の推定値$\overline{K_{D1}}$ （または$\overline{K_{S1}}$）を求める．

⑦$X_1=\overline{K_{D1}}^2$，$X_2=\overline{K_{D1}}$，$Y=K_D$ として$\sin h$ の級毎に重回帰式を作る．

$$K_D = B_0 + B_1\overline{K_{D1}}^2 + B_2\overline{K_{D1}} \tag{3.30}$$

⑧級 i毎の B_{0i}，B_{1i}, B_{2i}を級代表値 $\sin h_i$と対応させ，直交多項式の方法によってB_0，

B_1，B_2を，例えば$\sin h$の３次の多項式で表す．

$$B_0 = b_{00} + b_{01}\sin h + b_{02}\sin^2 h + b_{03}\sin^3 h$$

$$B_1 = b_{10} + b_{11}\sin h + b_{12}\sin^2 h + b_{13}\sin^3 h \qquad (3.31)$$

$$B_2 = b_{20} + b_{21}\sin h + b_{22}\sin^2 h + b_{23}\sin^3 h$$

これらの係数と(3.30)式から，第二次推定値 $\overline{K_{D2}}$ が求まる．

（２）第一次推定値の求め方

前節では，第一次推定値$\overline{K_{D1}}$（または$\overline{K_{S1}}$）の求め方には触れていない．X，Yに何を選ぶかによってこれらの求め方が変わってくるからである．例えば，$X = K_T$，$Y = K_D$ にとれば，K_T からそのまま推定値が求められる． しかしそれ以外の，例えば$X = K_D$，$Y = K_{DS}$ 等の場合，次のようにするとよい．

① K_Dの値を適当に仮定する$(= K_{DH})$．（例：$K_{DH} = 0.01, 0.02, 0.03, \cdots, K_T$）．

② K_{DH}を(3.29) 式に代入してK_{DS} の仮定推定値K_{DS}' を求める．

③ K_Dの仮定推定値K_D' を，$K_D' = K_{DS}'(1-K_T)/(1-K_{DS}')$として求める（注：$K_D'$の算定式は指標によって異なる）．

④ K_{DH} とK_D' の相対誤差 $E = |K_{DH} - K_D'|/K_{DH}$ を計算する．

⑤ K_{DH} の値を僅小量、例えば0.01増加させる．

⑥ $K_T - K_{DH} \geq 0$ であれば$K_{SH} = K_T - K_{DH}$ として②に戻る．

⑦ $K_T - K_{DH} < 0$ ならば，繰り返し計算を終了し，繰り返し計算の途中で最小のEを与えたK_{DH} を$\overline{K_{D1}}$ とする．

K_Sの推定値$\overline{K_{S1}}$ は$\overline{K_{S1}} = K_T - \overline{K_{D1}}$ として求める．

⑧ $\overline{K_{D1}} \leq 0.01$ のときは，$\overline{K_{D1}} = 0$，$\overline{K_{S1}} = K_T$ とする．

この方法を一般化していうと，まずK_D の仮定値K_{DH} を適当に仮定し，K_{DH}（とK_T）から推定したX の推定値X_H（上の例ではK_{DH} そのもの）を用いて(3.29)式からYY（同じく$\overline{K_{DS}}$）を推定する．

このYY（とK_T）から再度推定したK_Dの推定値K_D'とK_{DH}との相対誤差

$E=|K_{DH}-K_D'|/K_{DH}$ を最小にするK_{DH}を，求める推定値$\overline{K_{D1}}$とする．　これを仮に「アルゴリズムA」と呼ぶ．

ところで，$X=K_{DS}$, $Y=K_{DT}$ のような場合、アルゴリズムAでは，K_{DH} から $K_{SH}=K_T-K_{DH}$, $K_{DSH}=K_{DH}/(1-K_{SH})$ として K_{DSH} を(3. 29)式のXに代入して 仮定的 K_{DT}' ($=YY$)を求め，$K_D'=K_{DT}'K_T$ とする．　これと違い，先に$K_{DTH}=K_{DH}/K_T$ として K_{DTH} を求め，これと上のK_{DT}'との相対誤差をとり，その最小となるときのK_{DH} を$\overline{K_{D1}}$とすることも考えられる．（ $E=|K_{DTH}-K_{DT}'|/K_{DTH}$ ）．　これを仮に「アルゴリズムB」と呼ぶ．

（3）二段階推定法 $X=K_{DS}$, $Y=K_S$ の例

$X=K_{DS}$, $Y=K_S$ の例を示す．同定用データの散布図を **Fig. 3.5** に，また，X について区間分けして，Yの区間平均値とXの区間中央値と対比して **Fig. 3.6** に示す．(3. 29)式の係数A_0，A_1，A_2，A_3は，**Fig. 3.6** に示してある．

実際の K_D と、アルゴリズムAによって得た第一次推定値$\overline{K_{D1}}$との関係を **Fig. 3.7**，これに（3. 30）式を適用して$\sin h$の級別中央値と，これに対する係数B_0，B_1，B_2とその直交多項式の （(3. 31)式） の係数及び3次曲線形を **Fig. 3.8** に示す．

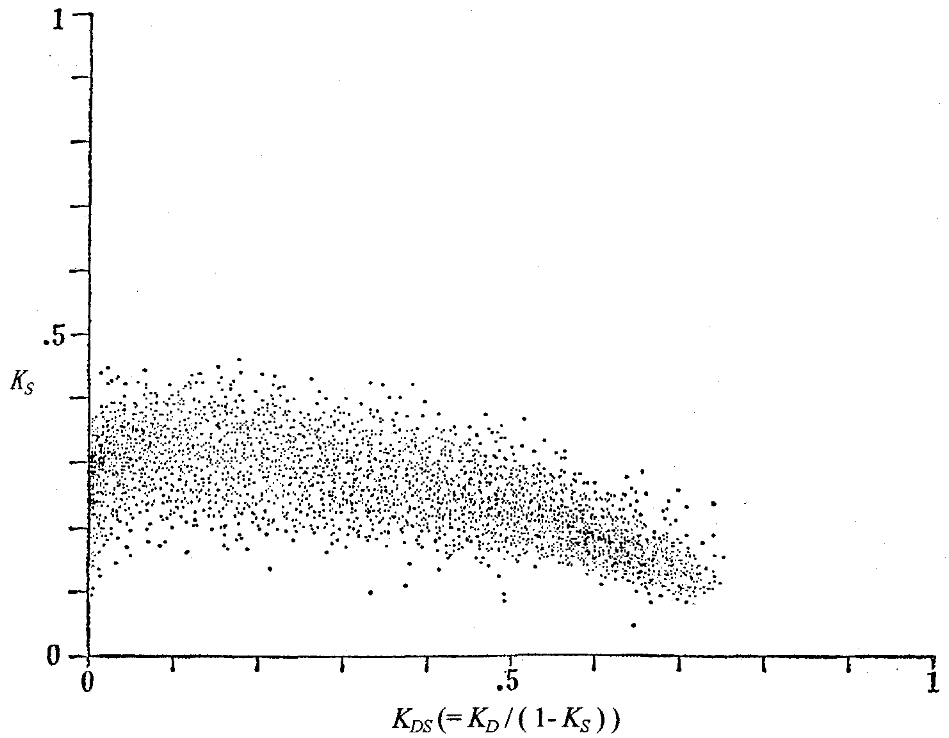

Fig. 3.5 K_S と K_{DS} の散布図

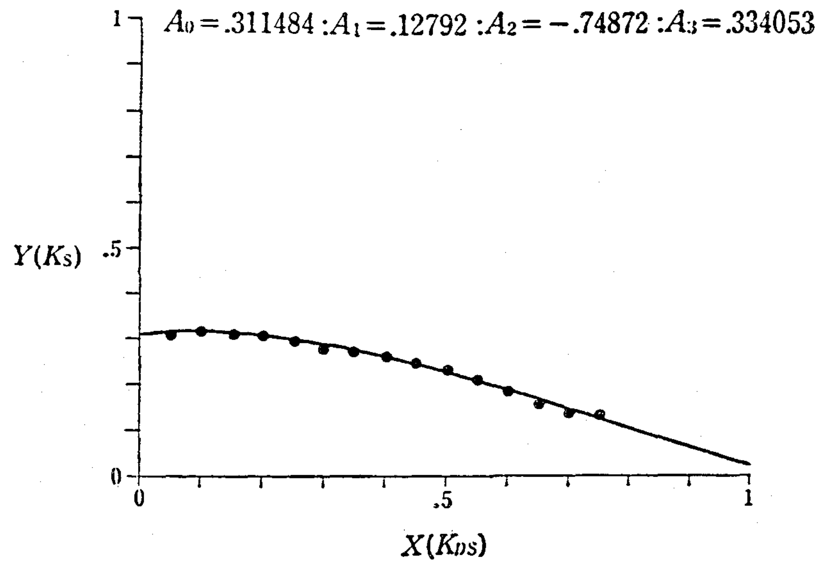

Fig. 3.6 級分けした $X(=K_{DS})$ ごとの $Y(=K_S)$ の平均値と三次直交多項式近似曲線

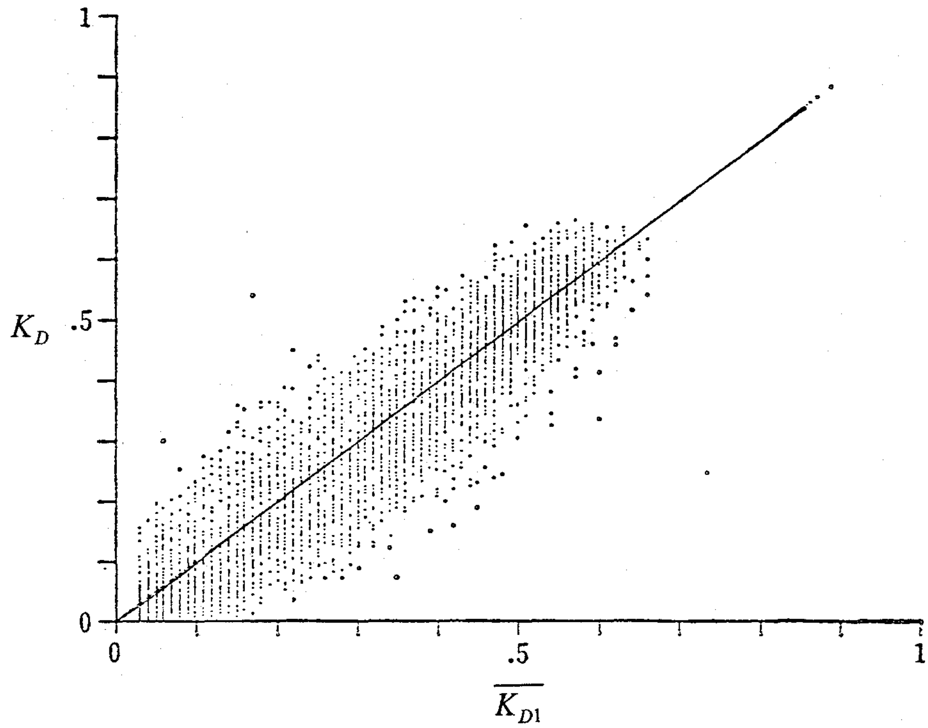

Fig. 3.7 実際の K_D と第一段階推定値

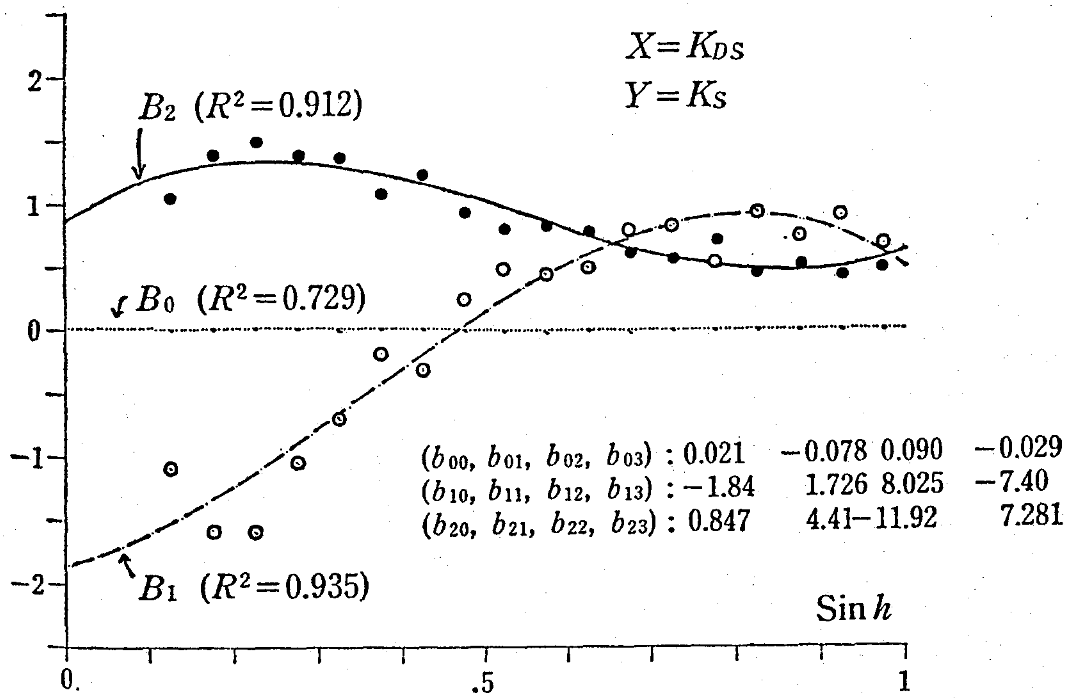

Fig. 3.8 $K_D = B_0 + B_1\overline{K_{D1}}^2 + B_2\overline{K_{D1}}$ の係数 B_0，B_1，B_2 と sin h

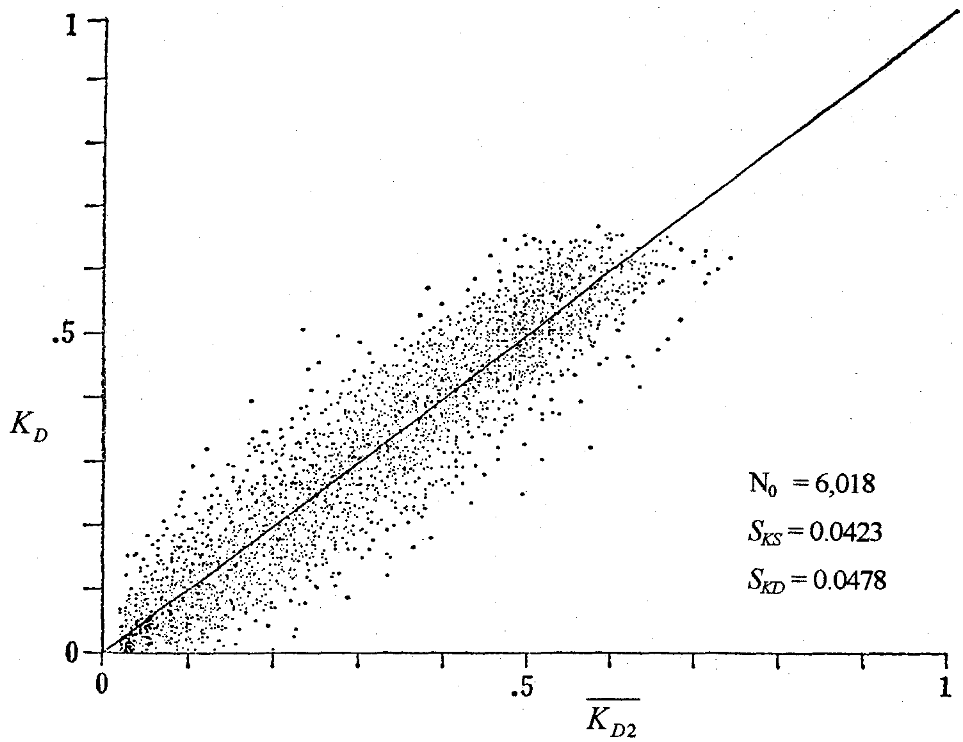

Fig. 3.9 実際の K_D と推定値$\overline{K_{D2}}$

実際の検証用K_Dと(3.30),(3.31)式とから得た$\overline{K_{D2}}$ の関係を **Fig. 3.9** に示す．

係数等は省略するが，同様にして実際の同定用K_Sと第一次推定値 $\overline{K_{S1}}$ との関係を **Fig. 3.10** に，実際の検証用K_Sと第二次推定値 $\overline{K_{S2}}$ の関係を **Fig. 3.11** に示す．

（4）推定誤差

（2）の方法による，検証データを用いた推定誤差を **Table 3.2,3.3** に示す．ただし， **Table 3.2** の( )書きは，本来K_Dを求めるための推定式の，K_T からの残差として求めた S_{KS} の方が，K_S を求めるための推定式から計算したS_{KS} よりも精度が高かったときの，高い方の値であり，また，S_{KD} を計算した **Table 3.3** の（ ）は、反対にK_S を求める式の残差として求めたS_{KD} の方が，K_D を求めるための推定式から計算したS_{KD} よりも精度が高かったことを示す．**Table 3.2,3.3** の＊印は，アルゴリズムＢによる方がアルゴリズムＡによるよりも推定精度が高かったことを示す． 無印はアルゴリズムＡが良かったことを示す．

3.3.6 考察

3.3.5（3）で述べた二段階推定法の第一次推定値の求め方は，Xを区分分けしての直交多項式に限らない．宇田川・木村の方法，あるいは渡辺・浦野・林Ⅰ，Ⅱでもよい．それらの方法で求めた第一次推定値を，$\sin h$の級毎に（3.30）式の重回帰計算をし，直交多項式によって（3.27),(3.28）式(ただし，式中の $\overline{K_{S1}}$, $\overline{K_{D1}}$ は$\overline{K_{S2}}$, $\overline{K_{D2}}$ を以て読み替える)のように求めた第二次推定値の推定誤差を， **Table 3.1** の右端にS_{KD2}, S_{KS2}として示した．

Table 3.1 を見ると，S_{KD2}, S_{KS2}はもとの推定誤差 S_{KD}, S_{KS} より1.5-10.8%誤差が減少している． もとのS_{KD}, S_{KS} の大きかったもの程，小さかったものに比べ改善の幅が大きい．また，S_{KD2}, S_{KS2}は各方法の精度改善余地の程度を示していると考えられる．

その意味で，渡辺ⅠはK_Sの推定に関し，極めて高い精度を与えたことがわかる．

Table 3.2 にはS_{KS} を示す．$X=K_T$，$Y=K_{DT}$ のときの 0.0400 が誤差最小であるが、($X=K_T, Y=K_D$)，($X=K_{DT}, Y=K_T$)，($X=K_T, Y=K_S$)，($X=K_T, Y=K_{ST}$) も略同等の精度である．S_{KD}, S_{KS} ともに精度が高かったのは，($X=K_T, Y=K_{DT}$)，($X=K_{DT}$, $Y=K_T$)，($X=K_T$, $Y=K_{ST}$) であった．

Table 3.3 には，筆者らの二段階推定法による S_{KD} を示す．$X=K_T$，$Y=K_D/10K_S$ のときの0.0470がもっとも精度が高そうであるが，($X=K_T$, $Y=K_{DT}$)， ($X=K_{DS}$, $Y=K_D$) ， ($X=K_{DT}, Y=K_S$)，($X=K_{DT}, Y=K_T$)，($X=K_T, Y=K_{ST}$) も略同等の

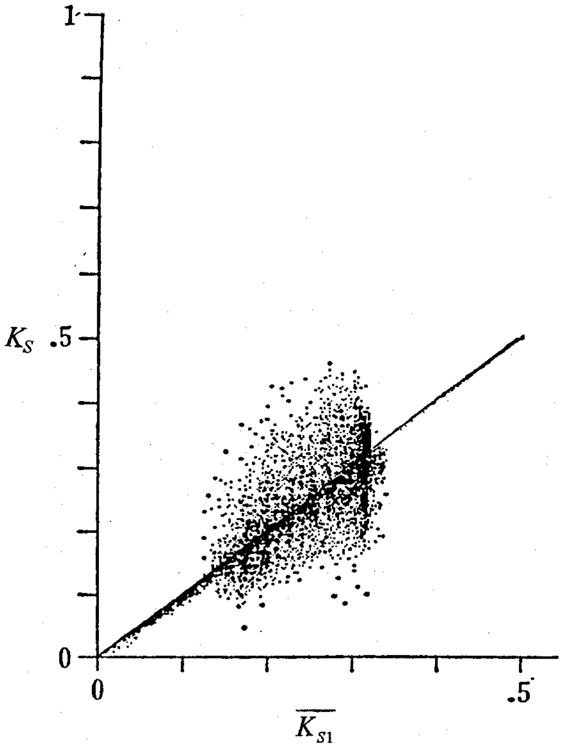

Fig. 3.10 実際の K_S と第一段階推定値 $\overline{K_{S1}}$

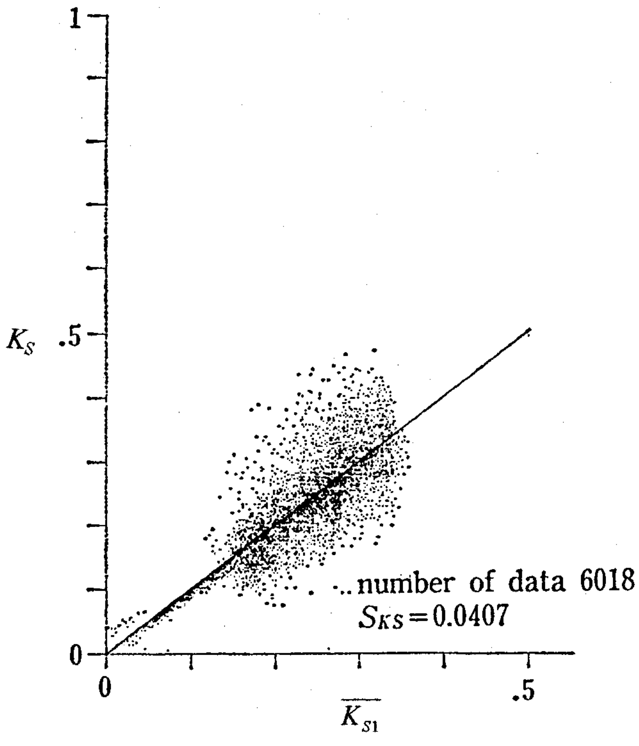

Fig. 3.11 実際の K_S と第二段階推定値 $\overline{K_{S2}}$

レベルである． $X = K_T$, $Y = K_D/10K_S$ のときの 0.0470は，Table 3.1の渡辺Ⅰの S_{KD2} と同じレベルであった．

Table 3.2 S_{KS} (×10^{-4})

Y \ X	K_T	K_D	K_S	K_{DT}	K_{DS}	K_{ST}	$K_D/10K_S$
K_T		434	469*	402	426*	430*	439*
K_D	402		475	408	412	427	438
K_S	403	417		431*	407	553	505
K_{DT}	400*	434	428		414*	631	674
K_{DS}	416	422	469*	405*		421	440
K_{ST}	403	409	422	539*	406*		688
$K_D/10K_S$	408	431	522	(599)	440*	699	

(注) ( ) は $\overline{K_{D2}}$ を算出し，K_T からの残差 ($\overline{K_{S2}} = K_T - \overline{K_{D2}}$) として求めた S_{KS} の方が，直接 $\overline{K_{S2}}$ を算出して求めた S_{KS} よりも小さかったときのその値.

*はアルゴリズムBによる方がアルゴリズムAによるよりも推定精度が高かったときのその値.

Table 3.3 S_{KD} (×10^{-4})

Y \ X	K_T	K_D	K_S	K_{DT}	K_{DS}	K_{ST}	$K_D/10K_S$
K_T		489	(556)*	477*	486	490*	532*
K_D	485		562	479	473	512	528
K_S	485	485		475*	478	(642)	(590)
K_{DT}	473	507	(517)		487*	(717)	(758)
K_{DS}	501	494	(559)*	479*		501	530
K_{ST}	478	491	(512)	769*	481*		772
$K_D/10K_S$	470	(521)	(607)	647	528*	785	

(注) ( ) は $\overline{K_{S2}}$ を算出し，K_T からの残差 ($\overline{K_{D2}} = K_T - \overline{K_{S2}}$) として求めた S_{KD} の方が，直接 $\overline{K_{D2}}$ を算出して求めた S_{KD} よりも小さかったときのその値.

*はアルゴリズムBによる方がアルゴリズムAによるよりも推定精度が高かったときのその値.

Table 3.3 は，二段階推定法だけでなく，宇田川・木村の方法や渡辺・浦野・林の方法の場合にも，どの無次元指標をX , Y に選ぶとよいかを示唆しているとも考えられる．そして，渡辺・浦野・林Ⅰ((3.24) 式)は，$X = K_{DS}$, $Y = K_D$ に入れ換えた方が良いかも知れず，また，$X = K_T$, $Y = K_{DT}$ 等も試みる価値があるのかも知れない．しかし，この点は確かめてはいないので何とも言えない．

3.3.7 まとめ

時間積算量の全天日射量データから，時間積算量の直達・散乱放射量を分離する試みの中でも有力と思われる無次元化指標を用いた推定式の精度の改善方法をここでは論じた．筆者等がここで提案した二段階推定法は，従来の宇田川・木村、渡辺・浦野・林の方法と比べると，**Table 3.1，3.2，3.3** に見るとおり，無次元指標の推定誤差は1.5－28.8％程度小さくなった．

この精度比較に際し，1982−1984年の $\sin h > 0.1$ のデータを１時間毎に奇数グループと偶数グループに分けて，各々から欠測データを除去し，一方を同定用、他方を検証用とした．このため，両データの性格が極めて等質的となった．僅か３年分のデータでは，同定年・検証年というように年単位に分けることには無理があり，しかも館野1984年データは，1982，1983年データと比べ，日射量分布の性質が相当に異なることが筆者等のこれまでの研究を通じて分かっていたため，上記のように分割したのであるが，問題を残したと言えるかもしれない．

係数の数が，(3.31) 式が３次式の場合，(3.29)，(3.31) 式の $A_0 \sim A_3$, $b_{00} \sim b_{23}$ の計16個あるので，ここで求めた係数を館野以外の地で適用しようとするとき，適用範囲が限定されるなど，問題がないとはいえない．しかし，所要計算労力は，パソコンのキーボード操作時間とディスクからのデータ読み込み時間のトータルで ，非線形式係数の残差平方和最小化を要する渡辺Ⅰ（PC9801vm2 パソコン計算時間１～２週間程度）より少なく，２～３回の試行錯誤計算を要する宇田川・木村の方法，渡辺Ⅱ（8～16時間程度）と同等かそれ以下であった．

3.4 新しい直達・散乱日射量分離式の提案

3.4.1 はじめに

前章で述べた二段階推定法は，全天日射量と直達日射量または散乱日射量のどちらかのデータが何年分か与えられた場合の推定法としては，これまでのいずれの方法よりも精度が高い．また，種々の無次元係数どうしの関係から，最終的にどの程度の精度の推定式が可能であるかを判定する方法として役に立つ．そして前章の結論として K_D の推定法としては K_T と $K_D/10K_S$ の関係から，また K_S の推定法としては K_T と K_{DT} の関係からよい推定法ができそうなことがわかった．ただ，使用している係数の数が16個と多い．このため同定すべきデータが与えられていない場合，任意の地区の全天日射量に館野で得られた係数群をあてはめて，果して高い精度で直達日射量または散乱日射量が推定できるかどうか，他の地区での検証が行われていないというのが弱点である．このように多くの係数を用いる推定法は，地域によってかなり係数値に違いが出て来るのが普通である．このことに鑑み，更に少ない係数を有する推定式を模索し，また渡辺らと違い散乱日射量推定に重点をおいて次に示す式を調べた．

3.4.2 提案式

K_S と K_T との関係をプロットしたのが **Fig. 3.12** である．K_S は K_T の大きい領域では広範囲に散らばるため，このままでは良い関係式はできそうにもない．そこで，前章の渡辺らの式 (3.24), (3.25) 式を参考に，無次元化指標 K_T, K_D, K_S の和・積・商・べき乗などの散布図を描き，また相関をとって試行した後，次の４つの散乱日射量推定式を作成した．

各式の係数同定用のデータは，館野高層気象台の 1979 – 1984 年 12 月までの時間全天日射量と散乱日射量，及び1981年-1984年の館野の時間直達日射量（1980 年以前の観測値がなかったため，1981年以降のデータを用いた）である．ただし，$\sin h < 0.1$ ではデータのばらつきが大きく，良い推定式が得られそうになかったため，$\sin h \geq 0.1$ のデータのみを用いることとした．また欠測や相互に矛盾したデータを除去するため，$0 < K_T, K_S, K_D < 1$ の条件を付け加えた．

右辺を独立変数，左辺を従属変数にとったときの単回帰の標準誤差 s と，そのときのデータ数 N_0 とともに推定式を次に示す．

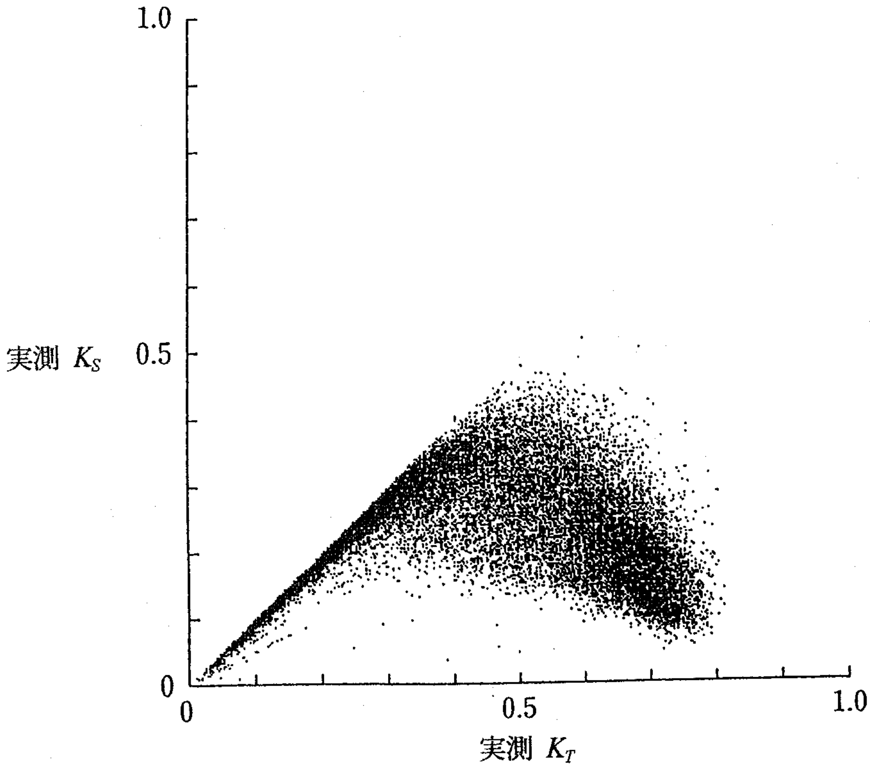

Fig. 3.12 K_S と K_T との関係
(実測値, 1979 - 1984, 館野, N_0 = 20, 245)

$$K_S = A\,K_T{}^B (1-K_T)^C \tag{3.32}$$

$$A = 0.878 + 13.8\sin h - 19.32\sin^2 h + 10.03\sin^3 h$$
$$B = 1.33 + 0.476\sin h$$
$$C = 1.60 + 4.11\sin h - 7.36\sin^2 h + 3.76\sin^3 h \qquad (\ s\ =\ 0.0458,\ N_0 =\ 20{,}245)$$

$$K_S = A\,K_T{}^B (1-K_D)^C \tag{3.33}$$

$$A = 0.973 + 0.0933\sin h - 0.120\sin^2 h$$
$$B = 1.03 + 0.0774\sin h - 0.109\sin^2 h$$
$$C = 2.60 - 1.65\sin h + 0.819\sin^2 h \qquad (\ s\ =\ 0.0149,\ N_0 =\ 20{,}245)$$

$$K_S / (1-K_D)^B = A\,K_T \tag{3.34}$$

$$A = 0.827 + 0.292\sin h - 0.214\sin^2 h$$
$$B = 2.12 - 0.593\sin h + 0.112\sin^2 h \qquad (\ s\ =\ 0.0424,\ N_0 =\ 20{,}245)$$

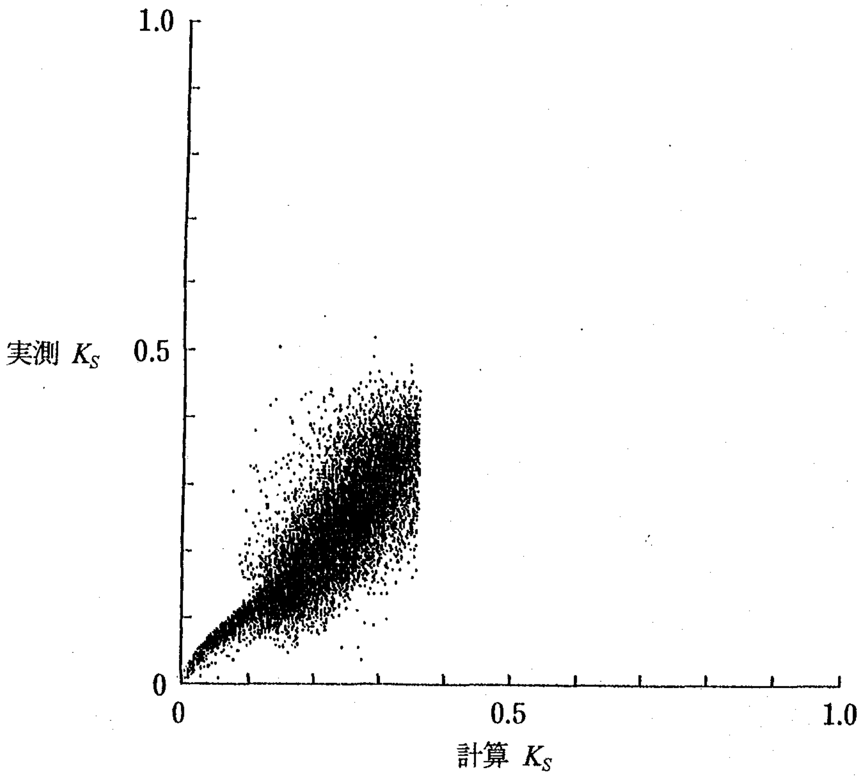

Fig. 3.13 K_S の実測値と計算値（(3.32)式）との関係
（実測値, 1979 - 1984, 館野, N_0 = 20,245）

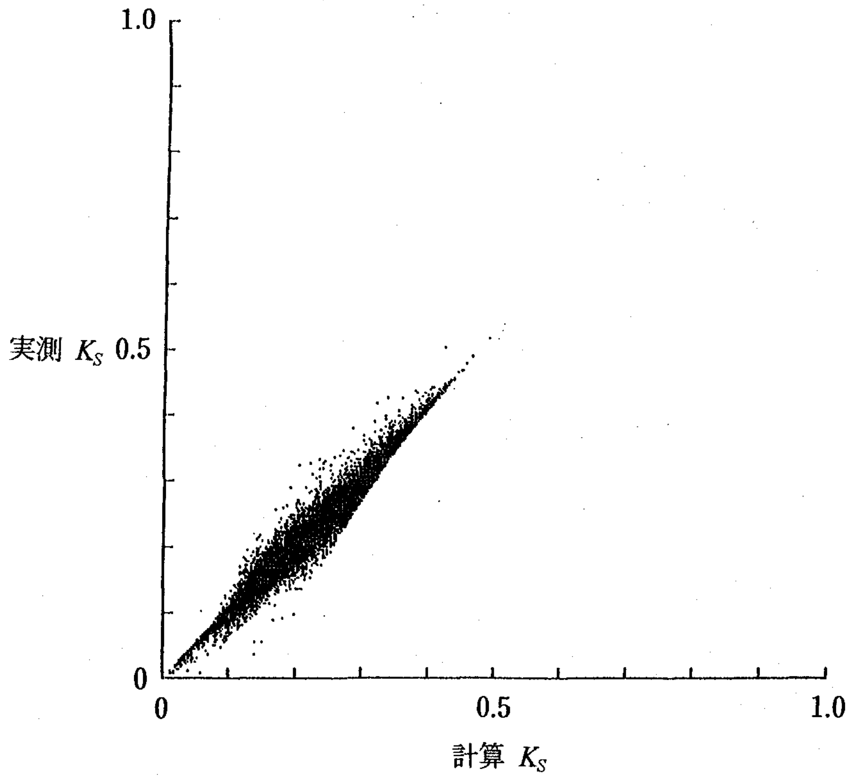

Fig. 3.14 K_S の実測値と計算値（(3.33)式）との関係
（1979 - 1984, 館野, N_0 = 20,245）

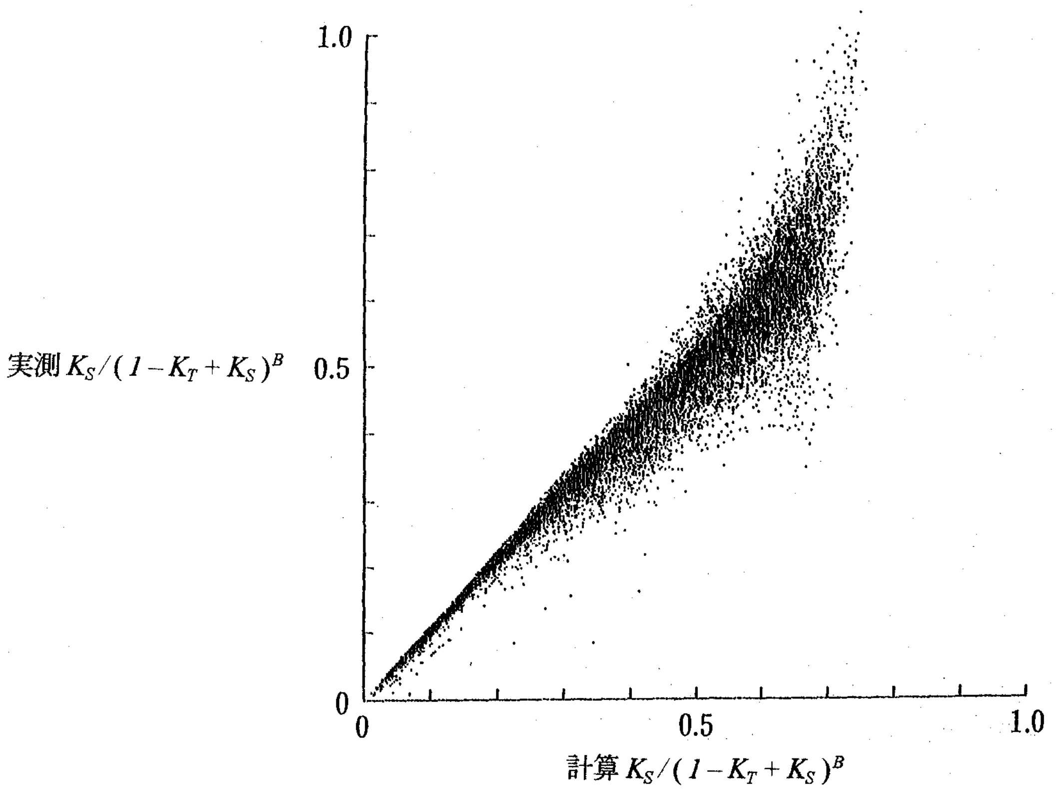

Fig. 3.15 $K_S/(1-K_T+K_S)^B$ の実測値と計算値((3.34)式)
(1979 − 1984, 館野, N_0 = 20,245)

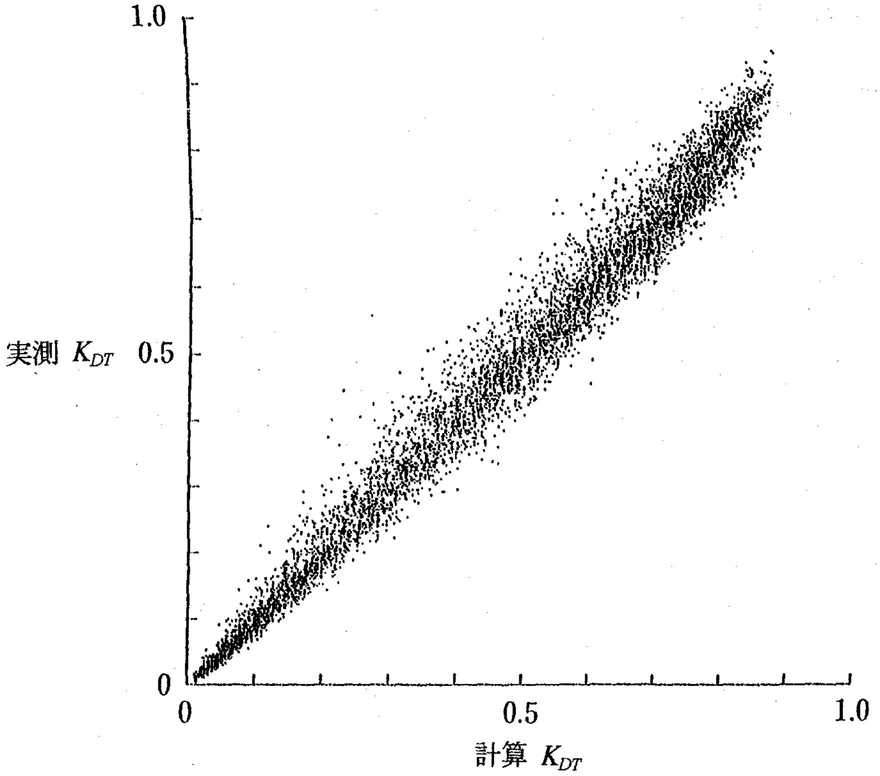

Fig. 3.16 K_{DT} の実測値と計算値((3.35)式)
(1981−1984, 館野, N_0 = 8,724)

$$K_{DT} = K_D + (0.786 - 0.280\sin h)\, K_D^{\ 0.657}(1 - K_D)^{0.716} \quad (\ s\ =\ 0.0321,\ N_0 =\ 8{,}724) \tag{3.35}$$

各推定式の散布図を，1979年から（直達日射量については1981年から）1984年までの館野のデータについて **Fig. 3. 13～3. 16** に示す.

係数同定のデータの使い方として，渡辺らは単回帰分析の結果から，K_T, K_S だけを用い，K_D は$K_T - K_S$ として算出する方法が精度がよいとしている．ここでもその考え方に従ったが，ただ（3. 35）式については，K_T, K_D, K_S の３種類とも用いた方が検証時の精度（(3. 27) 式）が優っていたことから，K_T, K_D, K_Sの全てを用いて係数を決定した．このため同定時のデータ数が他と異なっている.

渡辺Ｉ，Ⅱ を館野の同定データに対して適用して得た最適式を次に示す.

(渡辺Ｉ)

$$K_{DS} = K_D + (0.718 + 0.660\sin h)\, K_D^{\ 1.272}(1 - K_D)^{2.104} \tag{3.36}$$

(s = 0.0145, N_0= 20,245)

渡辺Ｉによる K_{DS} の実測による値と計算値との関係を **Fig. 3. 17** に示す.

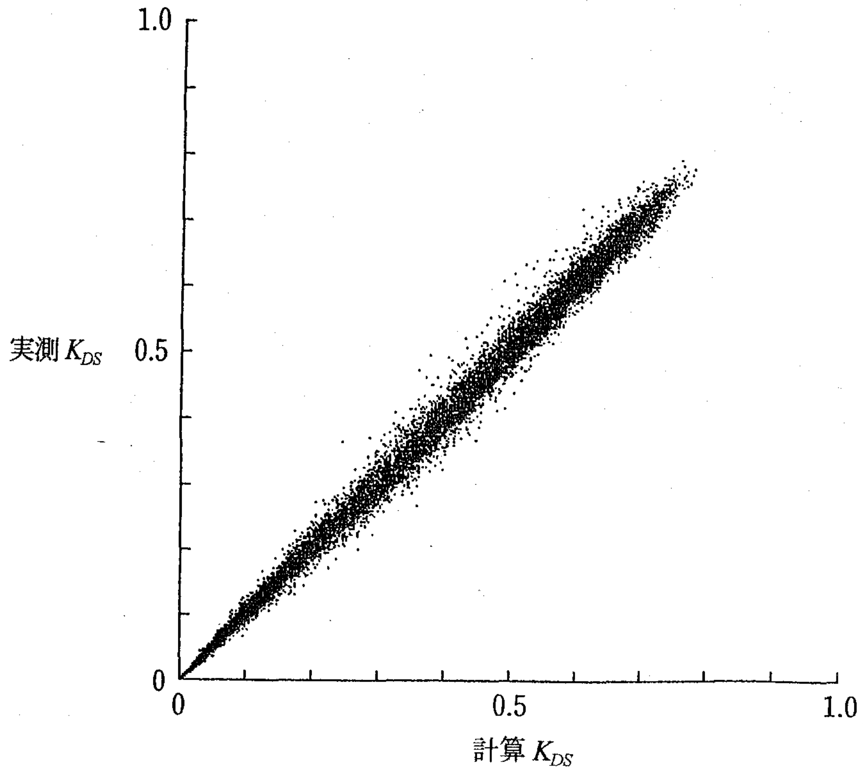

Fig. 3. 17 K_{DS} の実測値と計算値（(3. 36)式）
（1979－1984，館野，N_0 = 20, 245）

(渡辺Ⅱ)

$K_{TC} = 0.479 + 0.206 \sin h$ として,

$K_T \geq K_{TC}$ のとき,

$$K_{DS} = K_T - (1.34 + 0.252 \sin h + 1.83 \sin^2 h)(1 - K_T)^3 \tag{3.37}$$

$K_T < K_{TC}$ のとき,

$$K_{DS} = (3.41 - 3.34 \sin h + 1.84 \sin^2 h) K_T{}^3 \tag{3.38}$$

(s = 0.0399, N_O= 20,245)

渡辺Ⅱによる K_{DS} の実測による値と計算値との関係を Fig. 3.18 に示す.

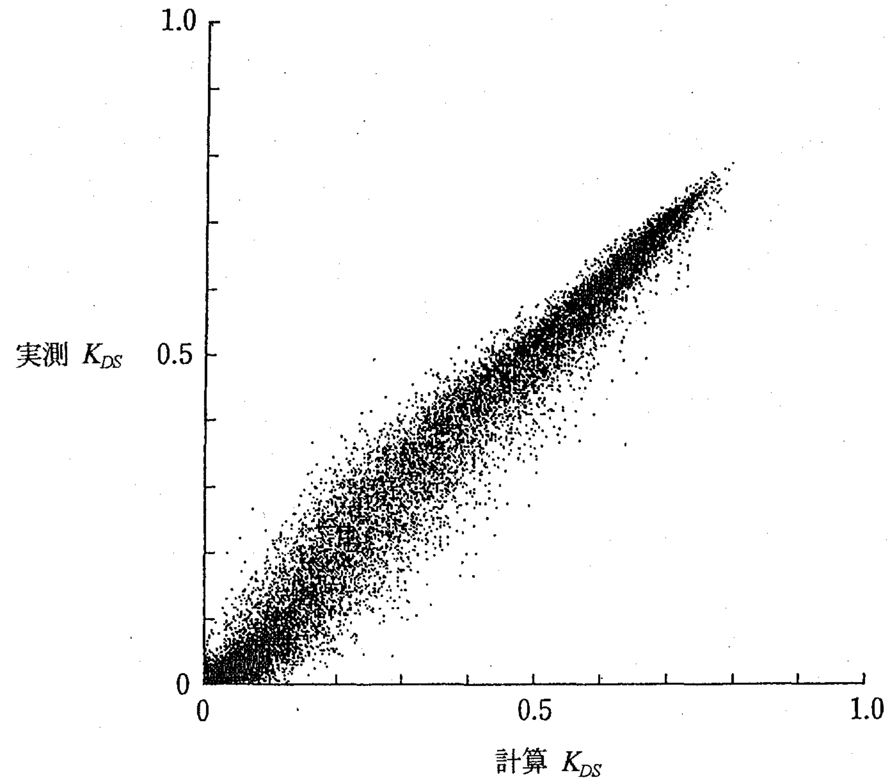

Fig. 3.18 K_{DS} の実測値と計算値((3.37), (3.38)式)
(1979−1984, 館野, N_0 = 20, 245)

3.4.3 誤差評価

各推定式によるK_Sの推定誤差（(3.27)式による）は，Table 3.4 に示すとおりである．なお，式によっては，右辺に未知数であるK_SあるいはK_Dが含まれているため，K_Sを求める計算には若干工夫の必要なものがあり，その計算方法と共に示してある．係数の最適化は (3.32)～(3.38) 式のいずれも角屋・永井のＳＰ法(Standardized Powell Method, 角屋・永井(1980)により概略の最適化を行った後，マニュアルで有効数字3桁に調整した．

Table 3.4 各推定式の K_S 推定誤差(標準誤差)

式	s	計算アルゴリズム
(3.12)	0.0469	$0.1 \le \sin h \le 1$の $\sin h$の値 0.001 ごとに，やはり 0.001 刻みのPに対するK_Tの値を(3.14)，(3.16)式で計算しておき，与えられた$\sin h$，K_Tに対応するP_Aの値を求め，$\sin h$，(3.15)，$K_S = SH/Q_0$，$K_D = K_T - K_S$式からK_D，K_Sを求める．
(3.36)	0.0460	
(3.17) (3.18)	0.0459	(3.17)，(3.18)または(3.37)，(3.38)式から，与えられたK_Tに対応するK_{DS}を求め，$K_S = (K_T - K_{DS})/(1-K_{DS})$から$K_S$を求める．
(3.37) (3.38)	0.0455	
(3.32)	0.0458	(7.1)式の右辺にK_Tを代入して，直接K_Sを推定する．
(3.33)	0.0463	$KD = K_T/2$を仮定し，$KS_1 = K_T - KD$とする．このKDを(3.33)式に代入して推定値KS_2を得る．$\|KS_1 - KS_2\| < 0.001$ならば，KS_2を求める推定値とし，そうでなければ$KD = K_T - KS_2$と仮定し直してKS_1とKS_2を再計算し，$\|KS_1 - KS_2\| < 0.001$となるまで計算を繰り返す．
(3.34)	0.0464	$KS = K_T$を仮定し，$KD = K_T - KS$とする．このKS，KDを用いて$Q = KS/(1-KD)$，また与えられたK_Tを用いて(3.34)式の右辺 $P = A K_T$を求め，$\|P-Q\| < 0.001$ならば，このときのKSを求める推定値とし，そうでなければ$KS = P(1-KD)^B$，$KD = K_T - KS$と仮定し直して，P，Qを再計算し，$\|P-Q\| < 0.001$となるまで計算を繰り返す．
(3.35)	0.0451	$KD = K_T$を仮定し，$P = KD/K_T$，$Q = KD + A\ KD^B(1-KD)^C$を計算し，$\|P-Q\| < 0.001$ならば$KS = K_T - KD$を求める推定値とし，そうでないならば$KD = Q\,K_T$としてP，Qを再計算し，$\|P-Q\| < 0.001$となるまで計算を繰り返す．ただし，$A = 0.786 - 0.28\sin h$，$B = 0.657$，$C = 0.716$．

(注) 精度検証用データは 1985-1988 年の館野の N_0=16, 096.
(ただし, $0.1 \le \sin h \le 1$, $0 < K_T, K_S < 1.0$)

Table 3.4 によると，各式ともに誤差評価値は s = 0.046 程度で大差はない．計算方法によって誤差も多少異なるので，ここで使用した以外の計算方法も 2，3 試した後，結果の良好なものについて示している．ここでは (3.35) 式による K_S の推定精度が最も高い．前報（紙井・近森・丸山(1989) において，K_T から K_D，K_S を推定する場合，K_{DT} を用いるとよさそうであると予想したが，この点についてはそのとおりとなっている．ただし，(3.35) 式の場合，**Table 3.4** の計算アルゴリズムにより K_S を求めたとき，1 個だけ僅かながら負値となるものがあったが，誤差はそのまま計算している．なお，(3.32)式，(3.35) 式の K_S 推定値の算術平均をとり，誤差評価したところ，s = 0.0447，N_0= 16,096 (1985 -1988，館野) と僅かに誤差が改善された．

3.4.4 まとめ

時間全天日射量から散乱日射量を推定する方法の検討を行った．推定式の係数決定は，全天日射量，直達日射量，散乱日射量のデータが揃っている館野高層気象台の観測値を用いた．係数の最適化は (3.32)～(3.38) 式の右辺を独立変数，左辺を従属変数として，単回帰分析の標準誤差を最小にすることを目標として，永井・角屋のＳＰ法により行い，最後に手動で有効数字 3 桁に調整した．結果は **Table 3.4** に示すように，渡辺らの提案した(3.24)，(3.25)，(3.26)式及び渡辺らの式をもとに筆者らが求めた(3.36)，(3.37)，(3.38) 式の精度が K_S 推定にも有用であることを確認したが，本報告で提案した (3.32)～(3.35) 式も，遜色ない精度を示した．1985-1988 年の館野の時間全天日射量，散乱日射量で検証したところ、比較した各式の中では (3.35) 式の推定精度が良好であった．

(3.24)，(3.25)及び(3.26)，(3.32)～(3.38)の各式は，いずれも全天日射量から直達・散乱日射量を推定する方法としては，係数の数が少なく，精度が高い．中でも館野に関しては (3.35) 式が最良であることは，K_D，K_S 推定誤差だけではなく，法線面直達日射量 DR，水平面散乱日射量 SH についてもあてはまる．館野の 1985-1988年のデータによって，各式による推定精度を，推定値と実測値の単回帰分析における標準誤差((3.27)，(3.28)式) によって **Table 3.5** に示す．
直達日射量を計測している14官署すべてについて，渡辺・浦野・林の方法Ⅰ，Ⅱと比較しても，(3.35)式の精度が優れている (**Table 3.5**に示すとおりである)．また，

実測値から求めたK_Sと(3.35)式により推定した K_Sとの関係を **Fig. 3.19** に示す.

Table 3.5 有力推定式の館野(1985-1988)におけるK_D, K_S推定誤差

推定式	(3.24)	(3.25)	(3.36)	(3.37)	(3.35)
K_D 誤差	0.5562	0.05505	0.05398	0.05407	0.05395
DR 誤差	27.316	26.744	26.726	26.545	26.516
K_S 誤差	0.4788	0.04635	0.04475	0.04551	0.04510
SH 誤差	13.757	13.695	13.376	13.496	13.143

注) データ数 16,096.「誤差」は単回帰分析による標準誤差. DR 誤差とSH 誤差の単位は MJ/m^2/hr, 太陽定数は 1.96 cal/cm^2/min= 1.37 kW/m^2. (3.24), (3.36) は渡辺 I, (3.25), (3.37)は渡辺 II, (3.35)は筆者らの方法.

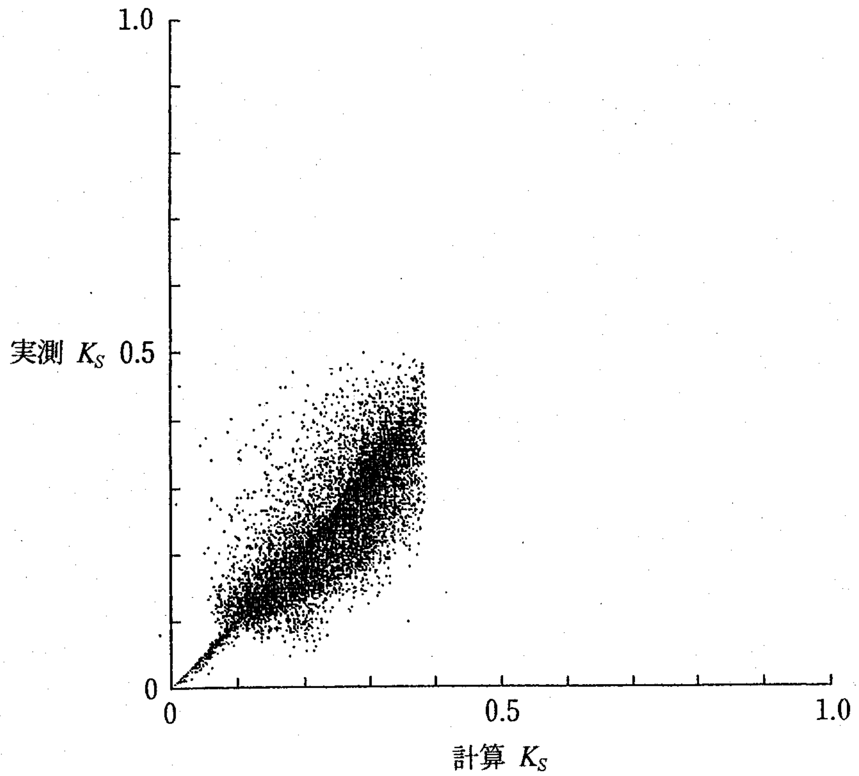

Fig. 3.19 K_S の実測値と計算値((3.35)式)との関係
(1985－1988, 館野, N_0 = 16,096)

第４章　斜面日射量の推定

4.1　直達・散乱日射量を用いた斜面日射量の推定

4.1.1　全天日射量の直達日射量・散乱日射量分離の必要性

流域水収支を明かにする上で，蒸発散に影響を与える流域の様々な斜面の日射量を適切に求めることは重要な意味を持つ．しかし，流域には様々な勾配・方位の斜面があるため，その全てについて斜面日射量を実測することは困難であり，水平面日射量から斜面日射量を求めるのが現実的である．

斜面日射量推定の方法としては日照率・雲量などから気候学的に推定する方法（古藤田(1986)，赤坂(1985)），月平均時間水平面直達日射量・同散乱日射量の変化を，月平均水平面直達日射量・散乱日射量と，時角の余弦の２次関数との積で表す方法（清野・内嶋（1985)），月平均時間散乱日射量のモデルを用いる方法　（*Liu and Jordan*(1960)）などがある．日照率や雲量などを用いた気候学的方法は，全天日射量のデータがない場合の便法であり，全天日射量を用いる場合に比較して精度が低い．また月平均モデルを用いる方法は，月平均値としては精度が高いと思われ，農業気象上十分な価値があるが，日量・時間量日射量の推定が必要な場合には適していない．そこで，全国67カ所の気象官署で計測されている時間全天日射量データを直達日射量と散乱日射量とに分けて(直散分離)，これら各々を斜面上の値に変換し，再合成して斜面日射量とする実際的方法を開発した．

全天日射量を直達と散乱とに分離する理由は，それぞれの水平面上での値を斜面上の値に変換するときの方法が異なるためである．無論直達・散乱日射量をともに計測している気象官署が多ければ，このような方法はとらなくともすむ．しかし，直達日射量と散乱日射量の両方を計測している気象官署は館野のみであり，直達日射量（と全天日射量）を計測している気象官署は全国でも14官署（Table 2.5 参照)にすぎない．一方全天日射量は全国67官署で計測されており，直達日射量，散乱日射量計測官署よりはるかに多い．このため全天日射量を直散分離して使用することが有力なのである．

4.1.2直達日射量・散乱日射量の斜面日射量への変換

水平面及び斜面全天日射量は，太陽光球から直接地上に到達する直達日射量と，大

気中で屈折，散乱して複雑な経路で地上に到達する散乱日射量とに分けられる（(1.6)，(1.7) 式参照）．

$$TH = DH + SH \tag{4.1}$$
$$TS = DS + SS \tag{4.2}$$

ここに，TH ：水平面全天日射量（MJ/m^2/hr)，以下日射量は全て同じ単位），DH ：水平面直達日射量，SH ：水平面散乱日射量，TS ：斜面全天日射量，DS ：斜面直達日射量，SS ：斜面散乱日射量.

DH，DS は次式で表される（武田（1963)，小沢（1962)）．

$$DH = DN \sin h \tag{4.3}$$
$$DS = DN \cos\Theta \tag{4.4}$$
$$\cos\Theta = \left\{\sin h \cos i + \sin i \cos h \cos\left(\alpha - \beta\right)\right\} \tag{4.5}$$

ここに，DN ：法線面直達日射量，Θ ：太陽光線と斜面法線とのなす角度（rad），h : 太陽高度　(rad），α ：太陽方位角（rad），β : 斜面方位角（rad），α，β ともに南向きを 0，西回りを正にとる．i ：斜面勾配（rad）．

斜面散乱日射量 SS は，天空輝度分布の非等方性を考慮した *Klutcher*（1979) や *Hay*（1979) のモデルがあるが，取扱いに便利で，精度も悪くない等方性モデル（*Liu and Jordan*(1960)）を用いることとした（(1.10) 式参照）．

$$SS = SH(1 + \cos i)/2 \tag{4.6}$$

(4.6) 式は次のように考えることができよう．**Fig. 4.1** において，一様散乱を仮定し，天球半径を1，単位面積の天球部分から地上に達する散乱放射強度を q_{SN} とすると，高度 h の単位幅，面積 ds の天球面から水平面 上の観測点 0 に到達する放射量は $q_{SN}\ ds \sin h$ である．$\sin h$ は 単位天球部分の水平面正射影面積に等しいから，全天について積算した水平面散乱日射量は q_{SN} ×天球面の水平面正射影面積（＝短径 $\cos i$，長径 1の半楕円の面積＋半径 1の半円の面積 $= \pi \cdot 12 \cdot (1 + \cos i)/2$）となる．斜面が存在しないときの水平面散乱日射量は $q_{SH} = q_{SN} \cdot \pi$（$\pi$ ＝半径 1 の円の面積）であるから，(4.6) 式の左辺を斜面が存在するときの水平面散乱日射量としたときについて(4.6) 式が成り立つ．　ところで斜面散乱日射量は，**Fig. 4.1** 全体を角度 i

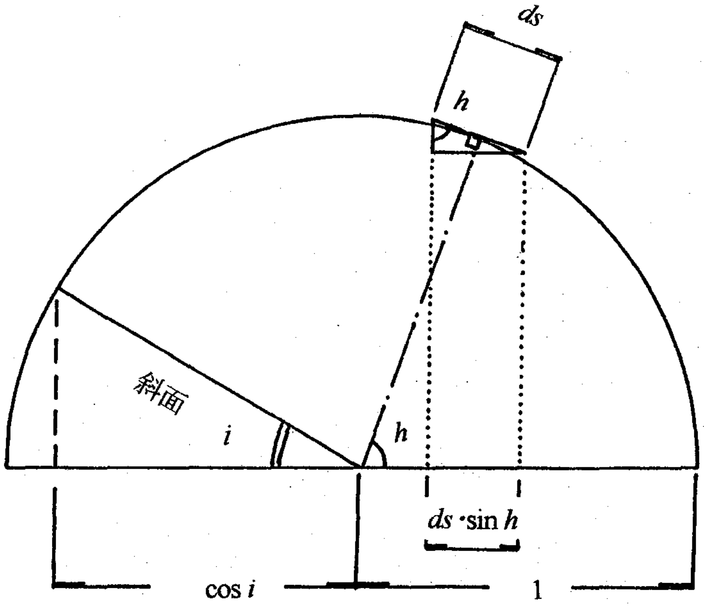

Fig. 4.1 斜面が存在し，かつ全天一様散乱を仮定したときの水平面散乱日射量の説明図

だけ反時計回りに回転してみると，斜面が存在するときの水平面のそれに等しいことがわかる．よって (4.6) 式が成り立つ．

太陽高度は次式で表される（武田(1963)，小沢(1962)）．

$$\sin h = \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos t \tag{4.7}$$

ここに，ϕ ：観測地点の緯度，δ ：太陽赤緯，t ：時角（rad）．

太陽方位は次式で表される（武田(1963)，小沢(1962)）．

$$\sin\alpha = \cos\delta \sin t / \cos h \tag{4.8}$$

$$\cos\alpha = (-\sin\delta \cos\phi + \cos\delta \cos t \sin\phi) / \cos h \tag{4.9}$$

4.2 直達・散乱日射量の分離評価

4.2.1 無次元化指標の計算

太陽高度の季節変化による影響を考慮した，次のような無次元化指標を用いた（宇田川・木村(1978)，渡辺・浦野・林(1983)）．

$$K_T = TH / Q_0 \tag{4.10}$$

$$K_D = DH / Q_0 = DN / I_0 \tag{4.11}$$

$$K_S = SH / Q_0 \tag{4.12}$$

ここに，K_T, K_D, K_S ：TH , DH , SH の無次元化指標.

大気外水平面日射量 Q_0は，次式によって表される.

$$Q_0 = I_0 \sin h \tag{4.13}$$

ここに，I_0 ：地球大気外で太陽に正対した単位面積が単位時間に受ける日射量で，地上気象常用表(1971)「大気外日射量 I_0の表」によることとし，理科年表(1979-1984)の 1.37 kW/m^2(=1.96 cal/cm^2/min)に合わせて修正して用いた．$\sin h$ ：(4.7)式の 5 分毎の $\sin h$の時間平均値.

4.2.2 太陽高度が高い($\sin h \geq 0.1$)場合の直達・散乱日射量分離式

太陽高度が高い($\sin h \geq 0.1$)場合について，次の直達日射量・散乱日射量分離式を用いた（紙井ら(1996)）.

$$K_D / K_T = K_D + (A_0 + A_1 \sin h) K_D{}^B (1 - K_D)^C \tag{4.14}$$

ここに，A_0, A_1, B , C ：係数.

係数A_0, A_1, B , Cは，**Table 2.5** に掲げた各直達日射量観測官署の，1985−1988年の時間全天日射量と時間直達日射量データに (4.10)～(4.13) 式を適用し，K_T, K_Dを

求めた後，次の手順によって決定した.

［係数A_0, A_1, B , Cの決定］

① 係数A_0， A_1 ，B , Cを仮定する（筆者らは初期値として紙井ら(1996)で得た館野の A_0, A_1, B , Cの値を用いた）.

② $SQERR = 0$ とおく（$SQERR$: K_D の実測値と推定値の誤差平方和）．

③ K_T, K_D のデータを読み込む．

④ K_T, K_D, $\sin h$ が $0 < K_T < 1$， $0 \le K_D < 1$， $0.1 \le \sin h < 1$ の条件を満足すれば⑤に進み，満足しなければ③へ戻る．

⑤ $KD = K_T / 2$ とおく（KD : K_D の推定値）．

⑥ $P = KD / K_T$ とおく．

⑦ $Q = K_D + (A_0 + A_1 \sin h) K_D{}^B (1 - K_D)^C$ とおく．

⑧ $DIF = |P - Q|$ とおく．

⑨ $DIF < 0.001$ ならば ⑫に進み，そうでないならば⑩に進む．

⑩ $KD = Q\,K_T$ とおく（推定値 KD の修正）．

⑪ $KD \ge 1$ ならば $KD = 1$ とおき，⑫に進む．そうでないならば⑥へ戻る．

⑫ $SQERR$ に $(KD - K_D)^2$ を加算する．

⑬ ③〜⑫ をデータが尽きるまで繰り返す．

⑭これで１組の A_0, A_1, B, C の評価関数 $SQERR$ が求められたことになる．さらに異

Table 4.1 全天日射量と直達日射量を計測している 14 気象官署の係数

(1985-1988 年のデータより計算)

観測点	A_0	A_1	B	C	s	N_0
札　幌	0.841	−0.0708	0.727	1.085	0.0701	15,814
根　室	0.840	−0.1236	0.790	1.024	0.0610	15,828
秋　田	0.728	−0.0351	0.725	0.915	0.0521	16,008
宮　古	0.770	−0.0983	0.705	0.918	0.0616	15,949
輪　島	0.787	−0.1004	0.696	0.940	0.0464	15,088
松　本	0.949	−0.1398	0.772	1.132	0.0531	16,045
舘　野	0.911	−0.2554	0.734	0.909	0.0451	16,091
米　子	0.649	0.0128	0.651	0.826	0.0550	16,034
潮　岬	0.885	−0.2632	0.710	0.793	0.0524	16,110
福　岡	0.777	−0.1404	0.658	0.859	0.0507	16,191
鹿児島	0.731	−0.1184	0.661	0.850	0.0613	16,210
清　水	0.647	−0.0499	0.666	0.840	0.0504	16,119
石垣島	0.826	−0.1342	0.703	0.831	0.0612	16,210
那　覇	0.819	−0.0551	0.716	1.066	0.0551	16,223
全　国	0.761	−0.0931	0.690	0.902	0.0601	224,920

(注)「全国」は，札幌から那覇までの 14 地区のデータ全てを用いた．

A_0, A_1, B, C : 係数．s : 標準誤差．N_0 : データ数．

なる A_0, A_1, B, C を仮定し，その $SQERR$ を計算するために①に戻る．

$SQERR$ を評価関数とする係数の最適化計算は，例えば角屋・永井(1980)のＳＰ法によって行う．

Table 4.1 に14気象官署の1985－1988年の全天日射量と直達日射量から本項の方法によって得た係数 A_0, A_1, B, C を示す．

4.2.3　太陽高度が低い($\sin h < 0.1$)場合の直散分離式

館野の1979－1984年の $\sin h < 0.1$ の場合の K_S と K_T の散布図を **Fig. 4.2** に示す．

Fig. 4.2 は原データが 0.01MJ/m^2 単位で整数化されているため，太陽高度が小さいときにはこのような直線的プロットの多い，一見奇妙なグラフとなる．またこのグラフだけでは判別できないが，実際には K_T, K_S の小さい場合には，大部分のプロットが直線 $K_S = K_T$ 上に乗っている．そして K_T が大きくなると直達日射成分が大きくなり，大多数が $K_S < K_T$ となる．そこで K_S の推定値 KS を，ある値 KT_c を境とする，K_T に関する２本の直線式によって（4.15）式のように表す．

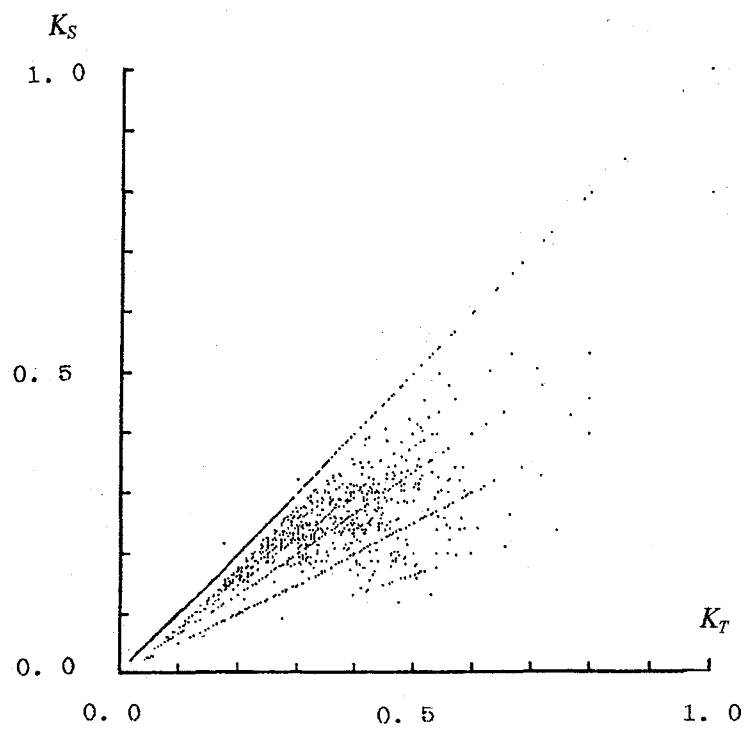

Fig. 4.2　館野(1979－1984) $\sin h < 0.1$ のときの K_S と K_T の関係

$K_T < KT_c$の場合

$$KS = K_T \tag{4.15}$$

$K_T \geq KT_c$の場合

$$KS = KT_c + KT_b(K_T - KT_c)$$

KT_b，KT_cの値は，館野1979−1984のK_T，K_Dデータを用い，$SQERR = \sum(KS - K_S)^2$ として，SP法により同定したところ，KT_b= 0. 507, KT_c= 0. 193となった．全国で散乱日射量を計測している官署は館野だけなので，館野で作成した上式を全国に適用する．

4. 2. 4　直達・散乱日射量分離の手順

K_Tを直散分離するには，(4. 14)，(4. 15) 式を用い，次の手順によって行う．

［直散分離の手順］

① 14地区の最寄りの A_0, A_1, B, C または全国の A_0, A_1, B, Cを選択する．

② K_Tデータを読み込む．

③ $0 < K_T < 1$ の場合，$0.1 \leq \sin h < 1$の場合には④に進み，$0 \leq \sin h < 0.1$の 場合には⑪に進む．$\sin h < 0$ または$K_T < 0$ の場合は，KD（K_Dの推定値）=−99，KS（K_Sの推定値）= −99（−99は欠測データ扱い）などとして⑫に進む．$K_T = 0$の場合は$KD = 0$，$KS = 0$として⑫に進む．

④ $KD = K_T / 2$と置く．

⑤ $P = KD / K_T$と置く．

⑥ $Q = KD + (A_0 + A_1 \sin h)KD^B(1 - KD)^C$ と置く．

⑦ $DIF = |P - Q|$と置く．

⑧ $DIF < 0.001$ならば，$KS = K_T - KD$として⑫へ進み，そうでないならば⑨へ進む．

⑨ $KD = Q\,K_T$ と置く．（推定値KDの修正）

⑩ $KD \geq 1$のときは$KD = K_T$，$KS = 0$と置いて⑫へ進む．$KD < 0$のときは $KD = 0$，$KS = K_T$と置いて⑫へ進む．そのどちらでもないときは⑤へ戻る．

⑪ $K_T < 0.193$の場合

$KS = K_T$，$K_D = 0$とする．

$K_T \geq 0.193$の場合

$KS = 0.193 + 0.507(K_T - 0.193)$，$K_D = K_T - KS$とする．

⑫推定値KD，KSをファイルに書き込む．

⑬②～⑫をデータが尽きるまで繰り返す.

1985-1988年の全国14直達日射量観測官署(Table 2.5)の全天日射量・直達日射量データから同定された係数 $A_0 = 0.7607, A_1 = -0.09307, B = 0.6897, C = 0.9021$ を，検証のために1989-1992年の14地区の全天日射量に適用して得たK_Dの推定値KDと実際のK_Dとの関係を，**Fig. 4.3** に示す．回帰の決定係数 $R^2 = 0.914$ と良好であった．また館野(1979-1984)の全天日射量データに適用して得たKSと実際のK_Sの関係を **Fig. 4.4** に示す($r^2 = 0.743$).

こうして得た推定値KD，KSを用いて，法線面直達日射量DN，水平面散乱日射量SHを次式により求める.

$$DN = KD\,Q_0 / \sin h \tag{4.16}$$

$$SH = KS\,Q_0 \tag{4.17}$$

この DN，SHを用いて，(4.4)～(4.6) 式から DS，SSを求め，(4.2)式により合成して斜面全天日射量TSを求める.

4.3 斜面方位と勾配

(4.4) 式よりDSを求めるためには，斜面方位角βと斜面勾配 i を求めておく必要がある．流域各斜面を地図上で表現する方法としては，複雑な斜面を的確に表現しやすい三角形分割による方法(三浦ら(1980))を採用することとした．なお，三角形を3次元座標によって表したとき「斜面三角形」，地図上で2次元的に捉えたとき「平面三角形」と呼んで区別することとする.

地図上に分割表示された斜面三角形の座標から斜面方位と勾配を計算するには，次のようにする.

まず座標系を設定する．例えば東向きにx軸，北向きにy軸，鉛直上向きに z 軸をとる．斜面三角形の頂点の座標を(x_j, y_j, z_j ; $j = 1,2,3$)とすると，斜面三角形の単位法線ベクトルの座標，すなわち方向余弦(l_N，m_N，n_N) は次式によって表される.

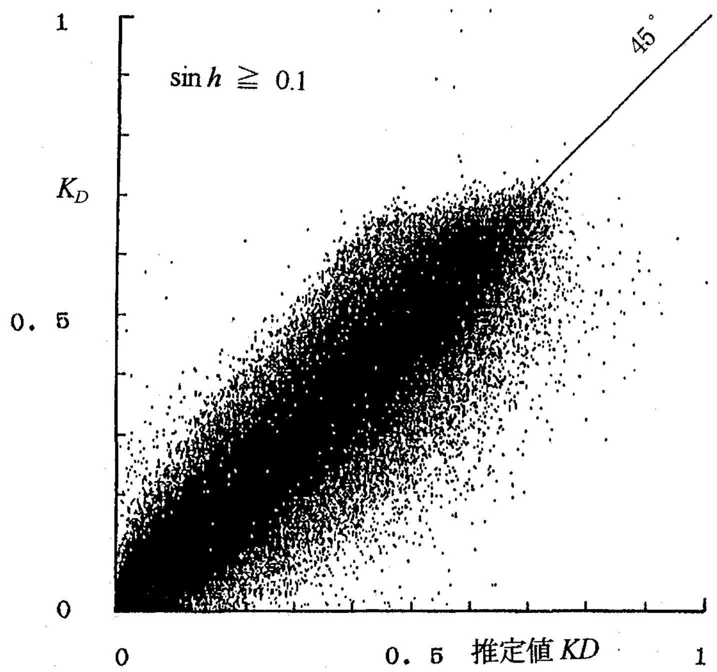

Fig. 4.3 全国係数を1989－1992年の14地点の時間全天日射量と直達日射量に適用して求めた K_D（実測値の無次元化指標）と KD（推定値）との関係

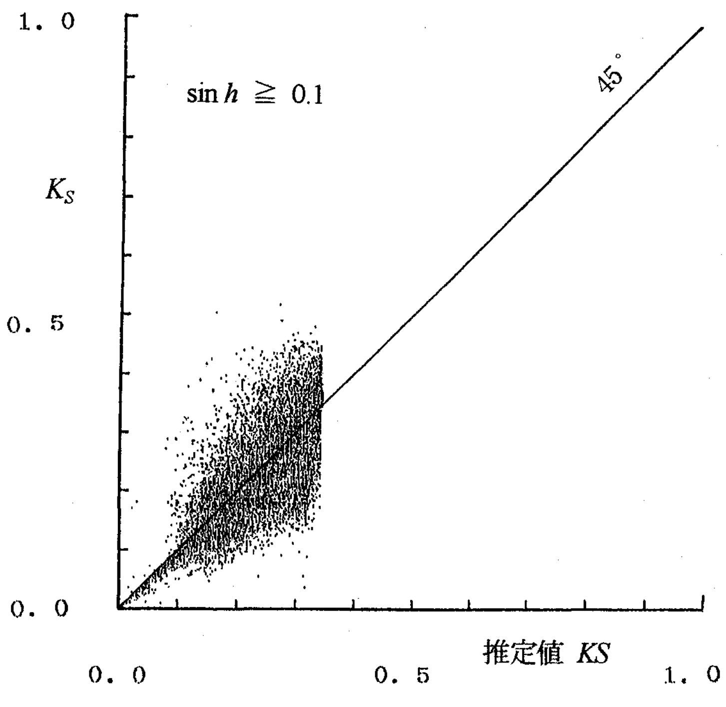

Fig. 4.4 館野1979－1984年の実測値による K_S と，1985－1988年の全国係数（Table 4.1）を同じ期間の K_T に適用して得た無次元化指標の推定値 KS との関係

$$l_N = x_N / |X|$$

$$m_N = y_N / |X| \tag{4.18}$$

$$n_N = z_N / |X|$$

$$x_N = (y_1 - y_2)(z_3 - z_2) - (y_3 - y_2)(z_1 - z_2)$$

$$y_N = (z_1 - z_2)(x_3 - x_2) - (z_3 - z_2)(x_1 - x_2) \tag{4.19}$$

$$z_N = (x_1 - x_2)(y_3 - y_2) - (x_3 - x_2)(y_1 - y_2)$$

$$|X| = \sqrt{x_N^{\ 2} + y_N^{\ 2} + z_N^{\ 2}} \tag{4.20}$$

ただし，$z_N < 0$のときは，$-x_N$，$-y_N$，$-z_N$をx_N，y_N，z_Nとする（つまり各々の符号を逆にする），$|X|$:斜面三角形の面積の２倍.

l_N，m_N，n_Nを用いて斜面勾配i及び斜面方位角βは次のように表される.

$$i = \cos^{-1} n_N \tag{4.21}$$

$$\beta = \tan^{-1}(l_N / m_N) \qquad (m_N > 0 \text{　のとき})$$

$$\beta = \tan^{-1}(l_N / m_N) + \pi \quad (m_N < 0 \text{　のとき}) \tag{4.22}$$

斜面三角形の重心の座標（OX, OY, OZ）は次式で表される.

$$OX = (x_1 + x_2 + x_3)/3$$

$$OY = (y_1 + y_2 + y_3)/3 \tag{4.23}$$

$$OZ = (z_1 + z_2 + z_3)/3$$

4.4　遮蔽高度と斜面日射量

4.4.1　遮蔽高度を考慮した直達日射量

実際の斜面が受ける直達日射量を考える場合，周囲の地物による遮蔽を考慮する必要がある．遮蔽地物には斜面自身も含まれるとする．ここでは遮蔽地物の高度を遮蔽高度(θ)，方位を遮蔽方位(γ)と呼ぶこととする．

三浦ら(1980)は，今，地図上，対象として考えている平面三角形(「当該三角形」と呼ぶ)の重心 0 からその時刻の太陽方位方向に半直線を引き，自らの辺も含め複数の平面三角形の辺との交点と重心 0 との水平距離Dを求め，交点と重心との標高差H_0から，$\tan^{-1}(H_0/D)$によって仰角を計算し，半直線上，その最大のものを遮蔽高度θとした．さらに，遮蔽高度θと太陽高度hとを比較し，$h>\theta$であれば日が出ており，$h<\theta$であれば日は没しているとして，10分ごとの，日の出ているときの斜面日射量を計算し，これを積算して日量斜面日射量とした．

この方法では，太陽方位方向の遮蔽高度計算を日の出，日没前後少なくとも 2～3 回づつ毎日行う必要がある．遮蔽高度計算は計算手間が大きいので，これを斜面日射量を求めたい全ての三角形について行うとすれば，大きな計算労力となる．そこで次の方法を工夫した．

予め各平面三角形の重心から周囲に水平面上1度刻みに360方位に半直線を引き(以後「遮蔽方位線」という)，上述の方法によって360遮蔽方位線毎の遮蔽高度を求めておく．そして時刻毎の太陽方位とこれを挟む相隣る2つの遮蔽方位線の遮蔽高度から内挿によってθを求めることとする．この360方位の遮蔽高度は，後述のように直達日射量だけではなく，散乱日射量の計算にも用いることができ都合がよい．

4.4.2　方向 γ ごとの遮蔽高度の計算方法

360遮蔽方位線毎の遮蔽高度の考え方は，次のとおりである．

当該三角形の重心を出発点として，$x-y$平面上 x軸（東）から反時計回りに1度刻みで360本の半直線を引き，周囲の三角形（「比較三角形」と呼ぶ）の辺（の水平面投影）との交点を求め，（交点の標高－当該三角形の重心標高）／（交点と重心との

距離）の arctan によって仰角を計算する．遮蔽方位線と辺が交差する三角形（「交差三角形」と呼ぶ）の交点の中で最大の仰角をその方向 γ の遮蔽高度 θ （γ）とする．

360 遮蔽方位線毎の遮蔽高度をコンピュータープログラムによって計算する手順は，次に示すとおりである．

① 地域の西南隅を原点とし，真東方向を x 軸，真北方向を y 軸，鉛直上向き方向を z 軸とする．

②地形図において地域を三角形に分割し，三角形と頂点にそれぞれ番号をつける．

③三角形の頂点の x，y，z 座標を読み込む．

④当該三角形の重心の座標（OX, OY, OZ）を求める．

⑤(8.18)～(8.20)式により l_N, m_N, n_N を求める．

⑥当該三角形の重心を出発点とし，$x-y$ 座標上で x 軸と角度 γ をなす半直線の方程式を次式で表す．

$$y - OY = \tan\gamma\,(x - OX) \tag{4.24}$$

（半直線の条件）γ に応じて例えば $0<\gamma<\pi/2$ ならば半直線の条件を $y>OY$，あるいは $x>OX$ などとする．γ がその他の象限にあるときも，OX, OY との位置関係に応じて適宜同　様の条件をつける．

最初 $\gamma=1$ 度とし，⑥ に戻る度に1度刻みで 360 度まで順次増加させる．

⑦三角形番号順に比較三角形の辺（の $x-y$ 平面投影，2頂点を結ぶ直線として式化する）と半直線とが交わるか否かをチェックする．交点が三角形の2頂点の間に存在し，かつ，⑥の半直線の条件を満足する場合は半直線と三角形の辺（の $x-y$ 平面投影）が交わるとして⑧に進み，そうでないときは三角形は半直線と交わらないので，$KOTEN=0$ として次の比較三角形に進む（⑦の初めにもどる）．

⑧ 1) $\gamma \neq \pi/2$，$\gamma \neq 3\pi/2$ のとき

3頂点から勾配 $\tan\gamma$ の3直線を引き，$x=OX$ との交点の y 座標の最大・中位・最小のものを各々 max, mid, min とする．

2) $\gamma=\pi/2$ または $\gamma=3\pi/2$ のとき

3頂点から勾配 $\tan\gamma$ の3直線を引き，$y=OY$ との3交点の x 座標の最大・中位・最小のものを各々 max, mid, min とする．

3) y または x の 最大・中位・最小に対応する三角形の 3 頂点を $a(x_{\max}, y_{\max}, z_{\max})$，$b(x_{mid}, y_{mid}, z_{mid})$，$c(x_{\min}, y_{\min}, z_{\min})$ とする（ **Fig. 4.5** 参照）．

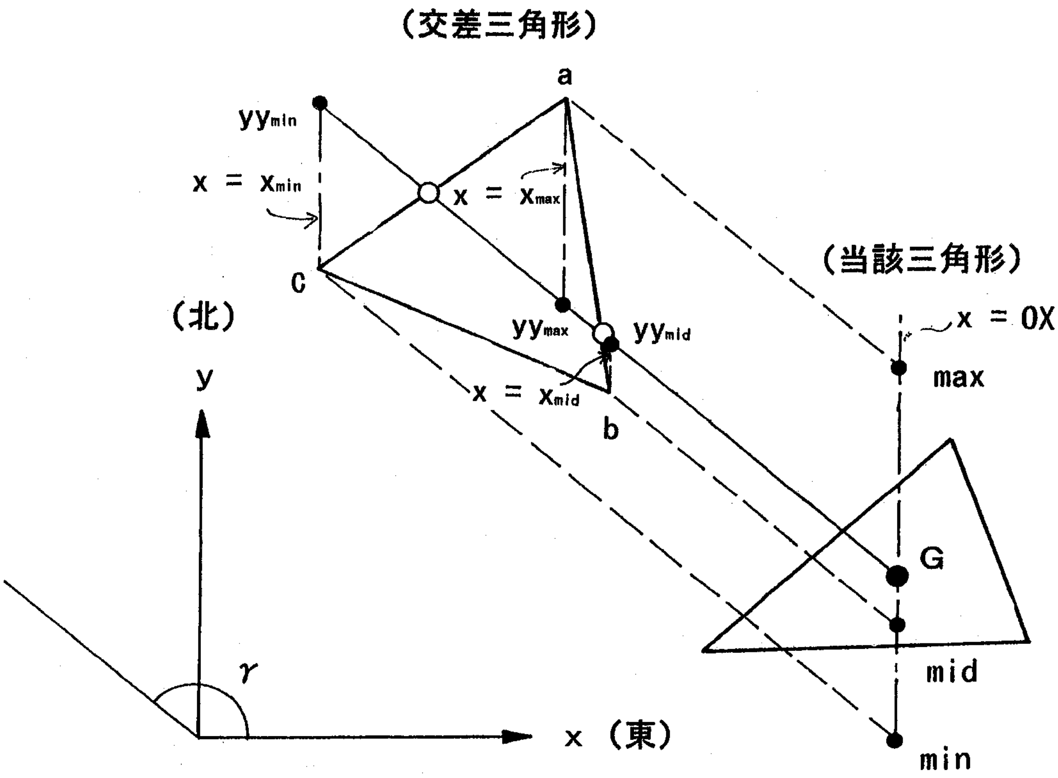

Fig. 4.5 当該三角形の重心 G から引いた半直線と交差三角形との交点の図

4) $\gamma \neq \pi/2$, $\gamma \neq 3\pi/2$ のとき

重心から比較三角形に向かって勾配$\tan\gamma$の直線を引く．この直線上 $x = x_{\max}$, x_{mid}, x_{mid} との交点のy座標を各々$yy_{\max}$, yy_{mid}, $yy_{\min}$ (**Fig. 4.5** の黒丸印) とする．

$y_{\max} \geq yy_{\max}$, $y_{mid} \leq yy_{mid}$ のときは，辺abが半直線と交わり ($KOTEN = 1$ とする，**Fig. 4.5** の白丸印)，

$y_{mid} \geq yy_{mid}$, $y_{\min} \leq yy_{\min}$ のときは，辺 bc が半直線と交わる ($KOTEN = 2$ とする)．

$KOTEN = 1$ または$KOTEN = 2$ のどちらの場合でも，半直線は辺 ac とも交わる．

5) $\gamma = \pi/2$ または$\gamma = 3\pi/2$ のとき

$x_{\max} \geq OX$, $x_{mid} \leq OX$ のときは$KOTEN = 1$, $x_{mid} \geq OX$, $x_{\min} \leq OX$ のときは $KOTEN = 2$ とする．

⑨ 比較三角形の辺acと，半直線との交点の座標を(XX, YY)とし，⑩ に進んで仰角を求める．次に$KOTEN = 1$のときは 辺 ab と半直線との交点を(XX, YY)とし，$KOTEN = 2$のときは辺 bc と半直線の交点を (XX, YY)として再び ⑩ に進み仰角を求める．

⑩交点(XX , YY) と重心との間の距離で，交点と重心の標高差を割り，その arctan を仰角とする．１つの交差三角形との２つの交点のうち，大きい方の仰角をこの交差三角形の仰角とする．

⑪⑦に戻り，次の比較三角形について⑩までの計算を繰り返す．

⑫半直線の全仰角中最大のものを，その方向 γ の遮蔽高度 $\theta(\gamma)$ （以後単に θ と書く）とする．

⑬⑥へ戻り，次の方向 γ について，⑦～⑫の計算を繰り返す． γ=360 度まで繰り返して１つの当該三角形の360方位の遮蔽高度が計算されたことになる．計算したい全ての当該三角形について，以上の計算を繰り返す．

なお当然のことながら，半直線と当該三角形自身の辺との交点から計算される仰角は，その斜面自身による遮蔽高度である．

4.4.3 遮蔽を考慮した散乱日射量

周辺地物の遮蔽によって天空面積が減少すると，散乱日射量も減少する．この場合，水平面（斜面）散乱日射量は，天空各部の高度の正弦に比例するので，天空面積そのものにではなく，天空の水平面（斜面）上への投影面積に比例する．天球半径を１とすると，天空の水平面（斜面）垂直投影は円となり（以後「天空円」という），その面積は $\pi \cdot 1^2$ となる．よって遮蔽を考慮した斜面散乱日射量 SS' は，次式によって表される．

$$SS' = SH\ A_N / \pi \tag{4.25}$$

ここに， A_N :天空の斜面上への垂直投影面積．

天空の斜面上への垂直投影面積は，前述の360方位の遮蔽高度を利用して求めることができる．まず斜面主傾斜方向を y'' 軸，斜面上 y'' 軸の時計廻り直角方向に x'' 軸，斜面法線方向に z'' 軸をとり，座標原点（天球中心，以後「中心」と呼ぶ）から遮蔽方位・高度の方向に延ばした半直線が天球面とぶつかる位置（遮蔽点と呼ぶ）の座標 x'' , y'' , z'' を求める（方法については後述）．隣り合う２つの遮蔽点が，ともに斜面より上方にあるときは（後述(4.26)式の $z''>0$ ），それぞれの斜面上への垂直投影点（以後「投影点」と呼ぶ）の座標を求め，これら投影点と中心とを結ぶと「三角形」ができる．遮蔽点には斜面自らによるものも含まれるから，これが斜面より下方にあるということはありえない．必ず $z'' \geq 0$ である． $z''=0$ ならば，天空は遮蔽されず，相隣り合う２

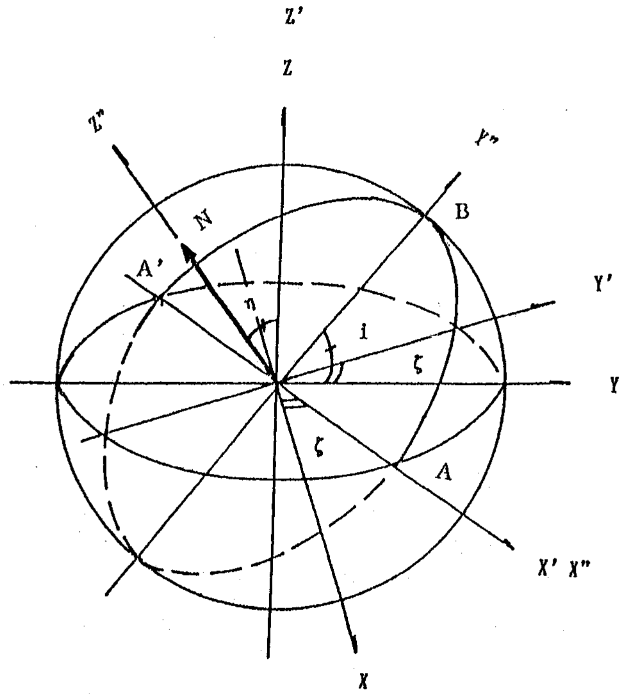

Fig. 4.6 斜面 *ABA'* と座標軸の回転
(*N*: 法線ベクトル, $\eta = i$ (斜面勾配))

本の遮蔽方位線の斜面上への垂直投影線（以後「投影線」と呼ぶ）と中心とを結ぶと「扇形」ができる．そしてこれら「三角形」と「扇形」の面積を加え合わせると，遮蔽を考慮した天空の斜面上垂直投影面積となる．なお，相隣り合う遮蔽点の一方が斜面より上（$z''>0$），他方が天空円周上（$z''=0$）にある場合は，「三角形」として計算した．

鉛直に近い急勾配の斜面の場合，天球円の半分近くが遮蔽される．この場合は投影点が投影半直線上にあれば投影点と中心を結んでできる三角形は天空部分になり，そうでなければ遮蔽部分になるので，投影点の座標 x'', y''の値から判断して，前者であれば天空投影面積に加え，後者であれば差し引く．

ただし，**4.4.5 斜面日射量の計算例** で対象とした地域には，このような急勾配斜面は存在しなかったため，計算例の中ではこのケースは取り扱っていない．

斜面上に投影した遮蔽点の３次元座標位置を求めるには次のようにする（ **Fig. 4.6** 参照）．

水平面上，東を x 軸，北を y 軸，天頂方向を z 軸とし，遮蔽方位 γ (deg, 実は 1 度刻み）を東向きを 0，北回りに正にとると，遮蔽点の座標は（$\cos\theta\cos\gamma$, $\cos\theta\sin\gamma$,

$\sin\theta$)，その水平面投影座標は（$\cos\theta\cos\gamma$，$\cos\theta\sin\gamma$，0）となる．この $x-y-z$ 座標系を，水平面上で z 軸を中心として反時計回りに角度 ζ (deg) だけ回転し，y 軸が斜面主方向の水平面投影線に一致するようにしたとき，座標軸が x'，y'，z' となったとする（z' 軸はもとの z 軸と同じ）．次に $x'-y'-z'$ 座標系を，主傾斜鉛直面上で，x’ 軸を中心として角度 i だけ回転し，z' 軸が斜面法線方向と一致したとする．このときの 3 軸を x''，y''，z'' とすると，x'' 軸はもとの x' 軸に一致し，y'' 軸は斜面主傾斜方向に一致する．このとき360遮蔽点の座標（x''，y''，z''）は，元の $x-y-z$ 座標系における遮蔽点座標（x，y，z）から次式によって求めることができる．

$$
\begin{aligned}
x'' &= x\cos\zeta + y\sin\zeta \\
y'' &= (y\cos\zeta - x\sin\zeta)\cos i + z\sin i \, \mathrm{y} \\
z'' &= -(y\cos\zeta - x\sin\zeta)\sin i + z\cos i
\end{aligned}
\qquad (4.26)
$$

ここに，x，y，z，i，ζ は次式で表される．

$$
\begin{aligned}
x &= \cos\theta\cos\gamma \\
y &= \cos\theta\sin\gamma \\
z &= \sin\theta
\end{aligned}
\qquad (4.27)
$$

$$i = \cos^{-1} n_N \qquad (4.28)$$

$$\zeta = \tan^{-1}(-l_N / m_N) \qquad (4.29)$$

（但し，$m_N > 0$ のときには $\zeta = \zeta + \pi$ とする）

4.4.4 斜面日射量の合成

遮蔽を考慮した斜面日射量を求めるには，全天日射量を直散分離して（4.16）式から法線面直達日射量 DN を求め，(4.4)，(4.5) 式によって $h>\theta$ 場合の DS を1時間毎に求める．また (4.17)，(4.25) 式によって SH と遮蔽を考慮した SS' を求め，(4.2) 式の SS の代わりに SS' として（$TS = DS + SS'$），時間量斜面日射量 TS を求め，これを１日（あるいは１ヵ月間）積算して日量（月量）斜面日射量を得る．

4.4.5 斜面日射量の計算例

高知の1990-1994年の時間全天日射量を，1985－1988 の全国 14 官署による係数 A_0＝

0.7607, A_1= - 0.09307, B= 0.6897, C= 0.9021によって直散分離して，時間斜面日射量を算出し，これを月間集計して，東南西北斜面の月平均の日量全天・直達・散乱日射量（単位：0.01MJ/m^2/day)）を計算した結果を **Table 4.2** に示す．**Table 4.2** は単一斜面としての日射量であり，斜面自身による遮蔽を除いては，周辺地物による遮蔽は考慮されていない．この表から，高知市においては夏季に散乱日射量が卓越すること，そして冬季において直達日射量が卓越することがわかる．高知市三里地区の山地部を対象として，三角形分割と遮蔽を考慮した斜面日射量を1月及び 7 月について **Fig.4.7**，**4.8** に示す．**Fig.4.7** は冬季の斜面の特徴，すなわち南斜面の直達日射量が多いのに比較して北斜面のそれが著しく少ないこと，隣接する高地の陰になって日当りが悪くなりやすいことを如実に表わしている．**Fig.4.8** は夏季の直達日射量の特徴，すなわちそれほど勾配のきつくない場合には，東西南北方向いずれの斜面においても日射量はそれほど大きく違わないことを表している．

Table 4.2 高知市の４方位別斜面勾配別の 1990-1994 年の月平均日量全天・直達・散乱日射量　　　(単位：0.01MJ/day)

方位・勾配／月・日射種別		平地	東斜面			南斜面			西斜面			北斜面		
		0°	30°	60°	90°	30°	60°	90°	30°	60°	90°	30°	60°	90°
1月	*TS*	932	837	576	241	1296	1369	1133	834	570	237	439	318	212
	DS	508	442	258	29	900	1051	921	439	252	26	43	0	0
	SS	424	395	318	212	395	318	212	395	318	212	395	318	212
2月	*TS*	1173	1053	721	293	1499	1492	1155	1047	712	287	634	385	257
	DS	659	574	335	36	1019	1107	898	568	327	30	635	155	0
	SS	514	479	385	267	479	385	257	479	385	257	479	385	257
3月	*TS*	1317	1187	824	351	1508	1379	965	1179	809	342	870	470	313
	DS	690	602	354	38	923	909	651	594	339	29	285	0	0
	SS	627	585	470	313	585	470	313	585	470	313	585	470	313
4月	*TS*	1655	1491	1036	443	1731	1450	889	1483	1022	434	1246	660	401
	DS	852	743	434	42	982	849	488	734	421	33	498	59	0
	SS	802	748	602	401	748	602	401	748	602	401	748	602	401
5月	*TS*	1709	1546	1092	497	1674	1314	725	1537	1078	488	1410	863	460
	DS	788	687	402	37	815	624	265	679	388	28	551	173	0
	SS	920	859	690	460	859	690	460	859	690	460	859	690	460
6月	*TS*	1508	1371	988	480	1438	1104	595	1363	973	472	1295	857	451
	DS	606	529	311	29	596	427	144	520	296	20	453	180	0
	SS	902	842	677	451	842	677	451	842	677	451	842	677	451
7月	*TS*	1735	1573	1123	527	1673	1295	702	1565	1108	519	1465	938	494
	DS	748	652	382	34	752	554	208	643	367	25	544	198	0
	SS	988	921	741	494	921	741	494	921	741	494	921	741	494
8月	*TS*	1640	1486	1056	490	1651	1342	795	1476	1040	480	1312	776	455
	DS	730	637	374	35	802	660	340	628	358	25	463	93	0
	SS	910	849	682	455	849	682	455	849	682	455	849	682	455
9月	*TS*	1378	1249	889	414	1472	1274	837	1241	874	405	1023	581	382
	DS	614	536	315	32	759	700	454	527	301	23	310	7	0
	SS	765	713	573	382	713	573	382	713	573	382	713	573	382
10月	*TS*	1153	1042	731	328	1371	1300	962	1036	722	323	725	447	298
	DS	557	485	284	30	814	853	664	480	275	25	169	0	0
	SS	596	556	447	298	556	447	298	556	447	298	556	447	298
11月	*TS*	952	858	596	258	1267	1303	1051	852	586	251	492	342	228
	DS	496	433	255	30	841	961	823	427	244	23	67	0	0
	SS	456	425	342	228	425	342	228	425	342	228	425	342	228
12月	*TS*	888	781	539	226	1234	1323	1111	776	529	220	390	298	198
	DS	471	411	241	27	864	1026	912	405	232	22	20	0	0
	SS	397	370	298	198	370	298	198	370	298	198	370	298	198
通年	*TS*	1335	1206	848	379	1485	1329	910	1199	835	372	942	578	346
	DS	643	561	329	33	838	810	564	554	317	26	297	59	0
	SS	692	645	519	346	645	519	346	645	519	346	645	519	346

(注) *TS*：斜面全天日射量，*DS*：斜面直達日射量，*SS*：斜面散乱日射量.

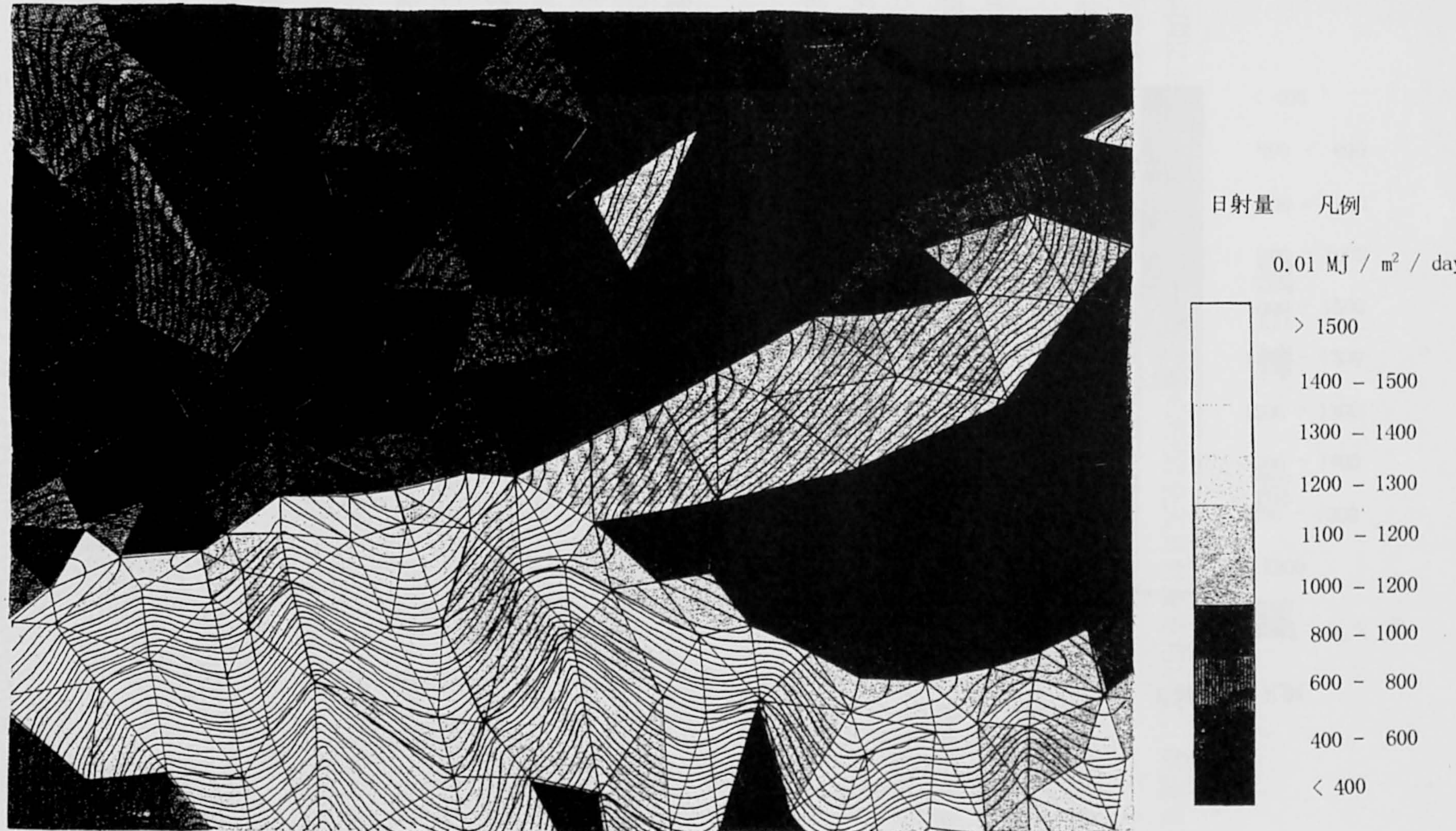

Fig. 4.7　高知市三里山麓の1990－1994年1月の平均日量日射量

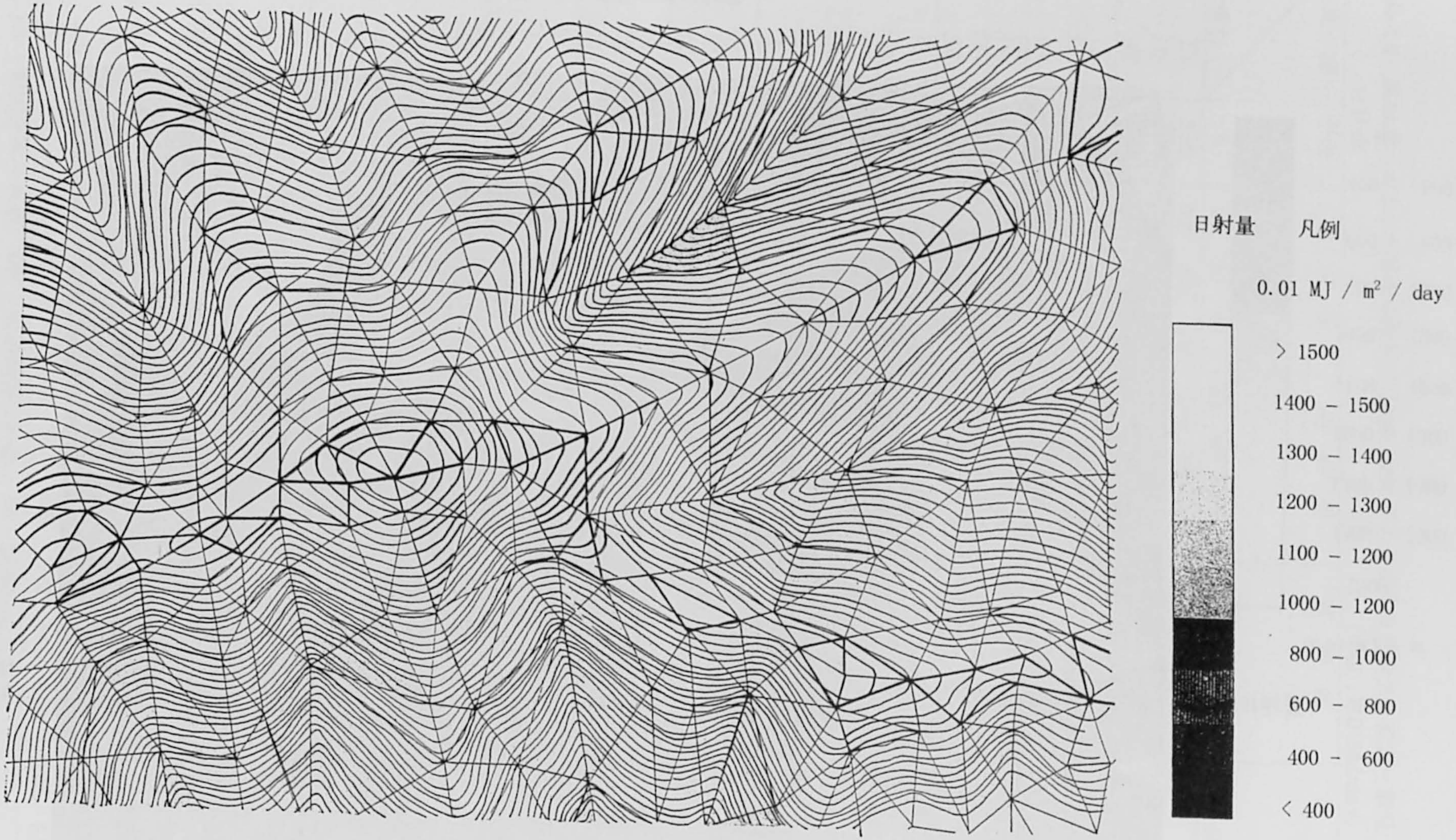

Fig. 4.8　高知市三里山麓の1990－1994年7月の平均日量日射量

第5章　結　論

わが国において，最寄りの気象官署の時間全天日射量を用いて，斜面日射量を計算する方法について述べた．　この論文の要点は，

(1)周辺地形による遮蔽を考慮した実用的な時間斜面日射量の計算方法を提示したこと．その中には 360 方位遮蔽高度計算を利用した斜面散乱日射量及び直達日射量の計算方法，(4.18)～(4.29)式等を含む．

(2)時間全天日射量を直達日射量と散乱日射量に分離するための具体的方法を示したこと．その中には係数決定方法，直散分離の手順，(4.15)式，**Table 4.1** に示した係数を含む．

の２点である．なお，この方法により実際計算が可能であることを示すために，**Table 4.2** 及び **Fig. 4.3, 4.4, 4.7, 4.8** を添付した．

本論文は 1983 年の農水省農業土木試験場技報と 1986(３篇),1991,1999 年の高知大学学術研究報告計 5篇，及び 1989,1996,1998 年の農業土木学会論文集掲載論文をとりまとめたものである．内容的には２部に分かれており，第２章には農土試技報および 1986,1991 年の学術研究報告の内容，日射量の地域分布と日照率・雲量等による日射量の推定に関する研究がまとめられている．また第3，4章には農業土木学会論文集に収められた３篇及び 1998 年の学術研究報告の内容，多くの斜面を含む地域の日射量の計算方法に関する研究が述べられている．第１部の研究も，月量・日量の日射量を推定する手法について述べているが，意識としては地域日射量計算方法を確立したいという思いからなされており，第２部(第３，４章)は主として斜面からなる地域日射量算定のためには，斜面日射量算定手法が欠かすことができない，との考えから，斜面日射量の推定の問題を取り上げた．

やり残したと思えることもある．例えば第１部で月量・日量の全天日射量，直達日射量の推定方法に関する研究を行いながら，それらを時間全天日射量・時間直達日射量に直す方法を確立するに至らなかった．また月量モデルに関する研究があるが，今回はほとんど触れることができなかった．これらの点については後日を期したい．

引　用　文　献

Angstrom, A(1924):Solar and terrestrial radiation, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 50, pp. 121-126

Benett, I(1964):A Method for Preparing Maps of Mean Daily Global Radiation, Arch. Met. Geophys. Bioklimatol, Ser. B, 13, pp. 216-248

Berland, T. G. (1960):Methods for climatological computations of global radiation, Meteorol. Hydrol., No. 6

Black, J. C. N., ·W. Bonython and J. A. Prescott(1954) : Solar radiation and duration of Sunshine. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 80, pp. 231-235

Black, J. N. (1960):The Distribution of Solar Radiation over the Earth's Surface, Archiv fur Meteorol. Geoph. und Bioklimat., ser B, Bd 10, H 2

Bugler, J. W. (1977) : The Determination of Hourly Insolation in an Inclined Plane Using a Diffuse Irradiance Model Based on Hourly Measured Global Horizontal Insolation, Solar Energy, Vol. 19, pp. 477-491

Collares-Pereira, M. and Rabl, A. (1979) : The Average Distribution of Solar Radiation-Correlations between Diffuse and Hemispherical and between Daily and Hourly Insolation Values, Solar Energy, Vol. 22, pp. 155-164

Davies, J. A. (1965) : Estimation of Insolation for West Africa, Quart. J. Roy. Met. Soc., 91, pp. 359-363

de Jong, B., (1973):Net Radiation Received by a Horizontal Surface at the Eaeth, Delft Unuv. Press, 51P

Fritz, S. and MacDonald, T. H. (1949):Average Solar Radiation in the United States, Heating and Ventilating, July, pp. 61-64

Glover, J. and J. S. G. McCulloch(1958):The Empirical Relation between Solar Radiation and Hours of Bright Sunshine in the High-Altitude Tropics, Quart. J. Roy. Met. Soc., 84, pp. 56-60

Hay, J. E. (1979) : Study of Shortwave Radiation on Non-horizontal Surfaces, Report No. 79-12, Atmospheric Environment Service, Downsview, Ontario (古藤田(1986)から再引用)

Iqbal, M. (1979) : Correlation of Average Diffuse and Beam Radiation with Hours of Bright Sunshine, Solar Energy Vol. 23, pp. 169-173

Ito, N(1960):On the Evaporation from a Few Lakes in Japan, Journ. Met. Soc. Japan, pp. 200-206

Kimball, H. (1930) : On the Amount of Solar Radiation Received on the Terrestrial surface of the Earth and Sea and Methods of its Measurement,

Monthly Weather Review vol.55,no,4
Klutcher,T.M.(1979):Evaluation of Models to Predict Insolation on Tilted Surfaces, Solar Energy,23,pp.111-114
Kondo,J.(1967):Analysis of Solar Radiation and Downward Long-wave Radiation Data in Japan,Sci.Rep.Tohoku Univ.,Ser.5,Geophysics,18,pp.91-124
Kondratyev,k.ya(1969):Radiation in the Atmosphere,International Geophysics Series, Academic Press,NewYork,San Francisco,London
Liu,B.Y.H. and Jordan,R.C.(1960) :The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct,Diffuse and Tortal Solar Radiation,Solar Energy,4(3),July
Page,J.K.(1961):The Estimation of Monthly Mean Values of Daily Total Short Wave Radiation on Vertical and Inclined Surfaces from Sunshine Records for Latitude 40° South,United Nations Conference on New Sources of Energy,16 May
Parmelee ,G.V.(1954) :Irradiation of Vertical and Horizontal Surfaces by Diffuse Solar Radiation from Cloudless Skies,Transactions American Soc. of Heating and Ventilating Engineers,Vol.60,pp.341-358
赤坂 裕(1984):日照率による時刻別日射量の推定法 その1．気象台のジョルダン日照計による日照率を用いる場合，建築学会学術講演梗概集（関東),4397,pp.793-794
赤坂 裕(1985):日照率・雲量等による時刻別日射量の推定，建築論集（計画系)352,pp.20-31
荒谷 登・絵内正道・鈴木憲三(1973):雲量・日照時間と天空・直達日射量の関係，建築学会講演梗概集，（東北）,4168,pp.335-336,1973
宇田川光弘・木村建一(1978):水平面全天日射量観測値よりの直達日射量の推定，建築論集 267,pp.83-89
内嶋善兵衛(1982):農林水産と気象，pp.21,朝倉書店
内嶋善兵衛・桜谷哲夫・奥山富子(1981):関東地方南部の日射気候，農技研報A27,pp.91-145
浦野良美・三木信博(1980):日照時間による月平均日射量の近似，建築学会学術講演梗概集，4251,pp.501-502
大槻恭一・三野徹・丸山利輔(1984):気象資料から推定したわが国の蒸発散量－実蒸発散量推定に関する研究（Ⅲ），農土論集 No.112, pp.25-32
小木曽定彰・斎藤平蔵・松尾 陽(1960):快晴時の日射について－日射量に関する研究2－，建築論集 661,pp.21-24

奥野忠一（応用統計ハンドブック編集委員会編）（1980）：応用統計ハンドブック，養賢堂，　pp.93,1980
小沢行雄(1962)：斜面の日射量について，農業気象，18(1),pp.39-40
角野迪夫(1964)：日照時間から水平面日射量の推定について，気象庁研究時報第16巻1号，pp.64-68
角屋　睦・永井明博(1980)：流出解析手法（その 12 ）ータンクモデルとＳＰ法による最適同定ー，農土誌 48 (12),pp.935-943
紙井泰典(1983)：回帰手法による直達日射量の推定精度，農業土木試験場技報，149(WM-1),pp.27-48
紙井泰典・近森邦英(1986a)：地域別日射量分布に関する研究(1) ー月量日射量の回帰分析ー，高知大学学術研究報告第34巻自然科学，pp.195-224
紙井泰典・近森邦英(1986b)：地域別日射量分布に関する研究(2) ー日量日射量の回帰分析ー，高知大学学術研究報告第34巻自然科学，pp.225-252
紙井泰典・近森邦英(1986c)：地域別日射量分布に関する研究(3) ー雲量等による日量日射量の推定ー，高知大学学術研究報告第35巻自然科学，pp.169-183
紙井泰典・近森邦英・丸山利輔(1989)：直達・散乱日射量の分離推定法に関する一考察　ー　二段階推定法導入の試み　ー，農土論集 No.143,pp.1-9
紙井泰典・近森邦英(1991)：地域日射量分布に関する研究(6)ー愛媛県の日射量分布ー，高知大学学術研究報告第40巻自然科学，pp.147-167
紙井泰典・近森邦英・丸山利輔(1996)：時間全天日射量からの散乱日射量の推定，農土論集 No.183,pp.41-46
紙井泰典・近森邦英(1998):周辺地形の影響を考慮した斜面日射量の計算方法，農土論集 No.197,pp.29-35
紙井泰典・近森邦英(1998)：斜面日射量の計算方法について，高知大学学術研究報告第47巻自然科学,pp.1-12
木村建一・宇田川光弘(1970)：雲量係数による曇天時日射量の推定法，建築学会学術講演梗概集，(関東) 3097,pp.193-194
木村建一・宇田川光弘(1974)：雲量による曇天時直達・拡散日射量の推定，気象研究ノート第 119 号，日本気象学会，pp.109-116
空調設備基準委員会，斎藤平蔵委員長(1976)：大阪地方の標準気象データ，空気調和・衛生工学，第50巻第4号,pp.479-488
古藤田一雄(1986)：直達・散乱成分を考慮した斜面全天射量の簡易推定法，農業気象，42(3)，pp.249-259
斎藤平蔵・松尾　陽・落藤　澄(1964)：日射とその応用上の問題点，空気調和・衛生工学，第38巻第4号，pp.260-279
斎藤平蔵・落藤　澄(1964)：天空日射量に関する一考察ーいわゆる第２太陽とそ

れを除いた天空日射量についてー，建築論集 103,pp.295
鈴木憲三・荒谷　登(1979)：日射量計算式の開発，建築論集 279,pp.97-105,1979
清野　豁・内嶋善兵衛：複雑地形地（阿蘇カルデラ）における太陽放射資源量の評価，農業気象，41(3),pp.247-255
関根正幸(1979)：日射の観測資料とその利用について，Soler Energy,Vol.5,No.2,pp.42-57
関原　彊・鈴木　正(1967)：日射と日照の相関関係およびロビッチ日射計の観測値について，気象研研究時報，19(11),pp608-613
武田京一(1963)：斜面の日射量について，農業気象，19(2),pp.19-20
東京天文台(1979-1984)：理科年表，暦 1-30,丸善
中西松太郎・木村　悟・橋本博好・森田純行・永井洋三(1982)：四国地方の日射気候，四国農試報，No.40,pp.16-40
永田忠彦(1967)：晴天空の太陽近傍による水平面照度について，建築学会論文集，号外，pp. 600
永田忠彦(1975)：天空日射に関する Berlage の式に対する疑問，建築学会学術講演梗概集(関東），4191,pp.381-382
永田忠彦・沢田康二(1978)：晴天空による水平面散乱日射の式の試案，建築学会学術講演梗概集（計画系）
二宮秀与・赤坂　裕(1984)：日照率による時刻別日射量の推定法その２．AMeDASの日照率を用いる場合，建築学会学術講演梗概集（関東），4398,pp.795-796
日本気象協会(1971)：気象観測のための常用表Ⅲ
日本気象協会(1989)：昭和６３年度新エネルギー産業技術総合開発機構委託業務成果報告書，太陽光発電システム実用化技術開発「利用システムに関する調査研究」
農林水産省農業技術研究所気象科(1980)：農業気象研究集録　第２１冊，pp.55-56,1980から再引用
農林水産省農林水産技術会議事務局連絡調整課(1981)：エネルギー関連文献翻訳シリーズ４，大陸上での太陽放射量の分布及び斜面の放射状態，1981の中，″Ｉ．世界日射気候学，T.G.Berlyand,水文気象出版局，レニングラード，1961″より．
氷高信雄(1985)：中国地方における日射気候，中国農試報A33,pp.1-140
松尾　陽(1973)：天空日射量の推定と直散分離，建築学会学術講演梗概集（東北），4167,pp.333-334
三木信博・徳久雅光(1983)：日射遮蔽装置の形態係数と日射量の直散分離，建築学会九州支部研究報告，第27号，pp.101-104
三浦健志・三野　徹・丸山利輔・四方田　穆(1980)：傾斜地の日射量分布計算法ー傾斜地における温度環境形成機構に関する研究（1)，農土論集 No.88,pp.1-7,

三浦健志・奥野林太郎(1993)：ペンマン式の計算を容易にするための工夫と提案，農土論集 No.164,pp.165-170
村井潔三・山内豊太郎(1975)：日本における全天日射量の分布と実効透過率について，天気22,pp.557-562
山田一茂(1983)：太陽電池式日照計のデータから水平面日射量を推定する一方法について，農業気象学会北陸支部会誌第8号，pp.15-22
山田一茂・岩切　敏・鴨田福也(1983)：北陸地方及び信州における日射気候，北陸農試報告，第25号，pp.109-191
吉田作松・中西秀二(1970)：東北地方における月平均水平面日射量分布図の作成，天気，Vol.17(6),pp.273-280
吉田作松・篠木誓一(1978)：日本における月平均全天日射量およびその年々の変動度のマップ作成，天気25(5),pp.375-389
吉田作松・篠木誓一(1983)：日本における月平均水平面散乱日射量・同直達日射量の平年値および年々の変動係数のマップの作成，天気30巻第4号,pp.201-216
渡辺俊行・浦野良美・林　徹夫(1983)：水平面全天日射量の直散分離と傾斜面日射量の推定，建築論集 330,pp.96-108

謝　　辞

最後にこの論文をご指導下さいました元京都大学教授（現石川県農業短期大学長）丸山利輔先生，京都大学教授三野　徹先生，終始論文の作成を激励下さいました高知大学名誉教授近森邦英先生，元京都大学学長沢田敏男先生に深謝いたしますとともに．高知大学の卒業生で当時学生として計算面等でご助力頂いた都築利雄氏，多田康信氏，藤本武志氏，データを提供して下さった気象庁測候課及び館野高層気象台観測第　1・3課の方々に厚く御礼申し上げます．