

直達日射強度の推定に関する一考察

星川 和 俊*

Estimation of Direct Solar Radiation Intensity

Kazutoshi HOSHIKAWA*

I はじめに

地球上で生じているほとんど総ての物理的プロセスは太陽から入射するエネルギーに起因していると言われている。この放射エネルギーは、大気圏、地圏および水圏での熱交換を規定し、大気内での気象現象や地表面上の生物の生命活動を条件づけている。このため、数多くの科学的ならびに現実的な諸問題を解決するには、この太陽エネルギーの時空間的分布特性を解明することが必要となろう。現在、このような太陽エネルギーの分布状態に関する情報を要求する分野としては、気象・気候学、農学および水文学などがあげられる。また、その応用分野として、近年注目を浴びている太陽エネルギーの利用技術の開発、あるいはその一層の効率化推進のためにも重要となってくる。

筆者等は既報⁽¹⁾において、ある地点の斜面勾配やその方位が変化する場合、つまり地形的要因が理論日射量の分布特性にどのように影響するかを分析した。更に、これらの影響を考慮した上で、理論日射から見た植物生産の推定シミュレーションを試みた。同様な方法で、この植物生産の推定をある一定地域全域に拡張した場合についても検討した。⁽²⁾しかし、ここで推定された入射エネルギーは理論的な値であり、大気の状態、雲の形成、あるいは入射エネルギーの型態的な差などによって、実際に地球表面に射するエネルギーとの間に無視できない量の相違があることも事実である。

このような状況において、全天日射量、直達日射量、ならびに散乱日射量の各日射成分ごとの相対的な変化特性、あるいは時々刻々変化する各日射成分の強度の特性等を検討することが重要な課題となろう。そこで、本報告においては、いくつかの気象資料から直達日射強度(即ち、法線面直達日射強度)を推定する可能性を検討し、短波放射の主要成分の物理的法則性的一端を解明しようと試みたものである。

II 研究方針

1. 日射の観測と測定資料

日射量の観測は19世紀の後半より実験的に始められたが、初期の段階では測定器上の問題を残していたため、

かなり精度の高い資料が集りだしたのは比較的最近になってからのことである。このため、一般的にはデータが質、量ともに不十分であり、実測資料を用いて日射量の時空間的特性を把握することは難しい。

また、日射量に直接関係する観測項目としては、全天日射量(=水平面日射量)、水平面直達日射量、法線面直達日射量ならびに散乱日射量があるが、数多い気象官署でこれら総ての項目を実測しているところはほとんどない。現在、これらの日射量の観測項目の中で、最も数多く測定されているのは全天日射量であり、この場合でも全国で70ヶ所程度と言われている。⁽³⁾ただし、これらの測定が比較的精度の高い逐次熱電准式日射計の観測に切換えられたのは1974年からである。一方、ここで取扱う法線面直達日射量(一般的には、この日射のことを直達日射と呼ぶので以後直達日射量と略す。)の場合も、全国でわずか13地点しかなく、実測値に基づいて詳しい分布特性を把握することは難しい状況である。

他方、現状の気象観測の実態を見た時、日照時間や雲量等の観測点数は気象官署だけに限っても140点以上⁽⁴⁾あり、かなり密度の高い観測網が存在している。このことは、我国のような地形的、かつ気候的な分布が非常に複雑なところにおいて、大変意義深いことであり、これらのデータを積極的に利用して日射量の分布特性を解明していける可能性が大きい。

2. 従来の研究と研究方針

大気を通過して地表面に到達する太陽エネルギーIを表す理論式として、従来Bouguerの(1)式が気象・気候学の分野でよく用いられている。

$$I = I_0 P^{\ell} \dots\dots\dots (1)$$

I_0 : 太陽定数, P : 大気の透過率
 ℓ : 光学的質量 ($\ell = 1/\cos(90^\circ - h)$, h : 太陽高度)

このBouguerの理論は、 ℓ という大気の光学的Pathの影響を考慮した式であったが、日射の大気中での放射減衰を特徴づける透過特性、あるいは雲の形成などの気象要因に関する実際の面での考察がなされておらず、本質的には天文学的影響の説明が中心となっていた。

そこで、現実的な直達放射量の解明には、いくつかの気象要因の考慮が必要となり、種々の気象に関する実測資料を使って統計的に気象要因等を加味しようとする研究

*信州大学教養部環境科学研究室 Fac. Lib. Arts, Shinshu Univ.

が行なわれてきた。それらの代表的な研究例として、⁽⁵⁾⁽⁶⁾Savinov, Kastrov, Ukrainsev ならびに吉田等の成果があげられる。これらの検討の中では、日射の大気中での減衰に関わる気象要因として、日射時間、雲量等が重要な要因であることが指摘された。そして、その影響要因を考慮に入れた幾つかの直達日射量推定式が提案されてきた。これらの推定式の中でKastrov, 吉田等によって導かれた推定は、実測値との適合性が非常に良いものであるが、これらの値は比較的長期間の値(例えば、月平均値など)を推定するものであった。

これまで述べてきた気象観測と従来の研究成果の検討から、本研究では数多くの気象観測所で測定されているデータ、つまり可能な限り入手が容易な要因を利用することをその前提とする。そして、それらの統計的分析を行なうことによって、毎時毎時変化する直達日射を推定するモデルを考察するものである。

II 解析に使用したデータ

1. 観測所と収集資料

この解析に使用したデータは、松本測候所(36°15'N, 137°58'E)のものである。松本測候所は、この日射データの解析に必要なとされる各種の資料に関して、かなり精度の高い測定を行なっている数少ない気象官署の一つである。特に、1953年からは永年気候官署に指定され直達日射量等の精密な観測が実施されており、有効な資料を入手することが可能である。

収集されたデータは、1981年1月1日から同年の12月31日までの一年分の資料であり、それらの各気象項目をまとめたものをTable 1に示す。

Table 1の項目の中で全天日射量の各時間別累積値は後述する資料のチェックのために収集された。また、太陽定数は文献(3)の「大気外日射量 I₀の表」を使用した。尚、本解析では1981年の一年分の資料しか利用していないため、年間を超えるトレンド成分についての検討がなされておらず、別にこの解析が必要となるであろう。ただ、1981年のいくつかの気象要因を他の年度のものと比較する限り、それらの年傾向特性はほとんど影響が少

ないと考えられる。また、直達日射強度の変化の物理的プロセスを考察する時、トレンド成分に依る部分よりその時点毎の物理的要因の方がはるかに大きく関与していると考えられることから、ここではトレンドの影響を考慮せずに解析を進めている。

2. 収集資料のチェック

日射量はその各成分の間に(2)式の関係が成立する。

$$H = H_b + H_d \quad \dots\dots\dots (2)$$

H: 全天日射量

H_b: 水平面直達日射量

H_d: 散乱日射量

したがって、各日射成分の測定のためには同一精度のものが望ましいのであるが、各種の日射計の性能上あるいは測定器の管理上から誤差が介入することもありうる。ここで収集したデータの中にも疑わしいデータが入っている危険性があるわけである。ここでは、資料の直接的なチェックが不可能であり、以下の方法によって疑わしいデータを取り出し、このデータを解析対象外とした。即ち、実測されている全天日射量と直達日射量から、(3)式を使って、各観測時の散乱日射量が計算された。この

$$H_d = H - I \sin h \quad \dots\dots\dots (3)$$

h: 各観測時の実平均太陽高度*

結果、H_dの値が負値となる場合が10数ケースのデータに見られた。この原因として、全天日射量の値か、あるいは直達日射量の値かどちらかが疑わしいものと考えられ、以上の総てのケースのデータを解析には使用しなかった。これ以外にも観測資料の中には疑わしいデータが内在する可能性もあるが、通常日射測定の精度は5%程度と言われていることから、その他のデータチェックは行っていない。

IV 推定式の検討

II. 2. で述べたように、直達日射を推定するための基本はBouguerの(1)式であり、この式を修正して各種の気象要因を組み込んだ幾つかの推定式が提案されてきた。ここでは、既存のこれらの式を吟味し、比較的その物理特性を保存し、直達日射の瞬時瞬時の変化を表現しうる

Table 1. 解析に使用した気象資料

項 目	収 集 デ ー タ	備 考
直達日射量 I	8時～9時, 11時～12時, 14時～15時の各累積値	自記直達電気式日射計による測定
全天日射量 H	8時～9時, 11時～12時, 14時～15時の各累積値	熱電堆式全天日射計による測定
透 過 率 P	9時, 12時, 15時の観測値	但し、観測があった場合
雲 量 Cd	9時, 12時, 15時の定時観測値	
日照時間 Nt	8時～9時, 11時～12時, 14時～15時の各累積値	ジョルダン型日射計による測定

資料期間は上記項目と1981年1月1日～12月31日である。

* hは1981年版の理科年表から毎日の赤緯及び標準時刻との地域編差を考慮して求めた各観測時点の平均太陽高度である。

と考えられる二つのタイプの式を選定した。また、従来の研究成果の検討から、直達日射に関連すると考えられるいくつかの要因を選定し、これらの要因に対して重回帰分析(要因増加法)を適用するという方法で推定式を作成する方式も検討した。これらの式の代表的な関数型を示すと、次の三つのタイプである。

$$I = \frac{I_0}{1 + C\ell} \dots\dots\dots (4)$$

C : 大気透明度の特徴量
($C = F(Nt, Cd, Ci \dots\dots)$)

$$I = I_0 \cdot P \cdot \ell (K_1(1 - Cd) + K_2 \cdot Ci + K_3) \dots\dots\dots (5)$$

K_1, K_2, K_3 : 定数

$$I = I_0 \cdot P \cdot \ell \cdot F(Nt, Cd, Ci, Nt^2, Cd^2, Ci^2) \dots\dots\dots (6)$$

(4)式は、1928年にKastrovによって報告された式であり、Savinovが雲量状態だけで直達日射量を表現しようとした結果に改良を加えたモデルとなっている。つまり、光学的質量と大気透明度の関係を考慮し、Cという大気透明度の特徴量を導入した点が優れている。この式によると、主に中緯度帯の比較的長期間の直達日射量の推定に対して、よく一致するという報告がある。(5)

次の(5)式は吉田等によって提案された式である。この式には、直達日射の物理的プロセスをできる限り保存し、それをモデルとして表現するという考慮がされており、式中にうす雲指数Ciが組み込まれている。うす雲指数は(7)式で定義され、雲のすき間を通して入射する放射量に

$$Ci = Nt / N + Cd - 1 \dots\dots\dots (7)$$

Nt/N : 日照率(ただし、ここではNの値、つまり日照時間はすべて1時間でありNtの値に等しい。)

大きく関係する要因として、その有効性が吉田等によって確認されている指数である。(5)式を我国の各地の月平均直達日射量に適用した結果によると、本式の推定結果はかなりの高精度で直達日射量の分布状態を表現するものであった。(6)

さて、(6)式重回帰式の場合は、前述したように、日射時間、雲量、うす雲指数ならびにそれらの自乗値を要因として選択し、要因増加法による重回帰分析を行なった。

尚、直達日射に関連するこの他の要因として、積雪・陸地率、水蒸気圧などがあるが、本解析の目的からこれらの要因は考慮しなかった。また、大気透過率や光学的質量の影響については、従来のBouguer理論が気象・気候

Table 2. 各種要因の相関マトリックス(1981年7月データ)

I	Nt	Cd	Ci	Nt×Nt	Cd×Cd	Ci×Ci	H	ℓ	
I	1.000	0.864	-0.709	0.386	0.886	-0.736	0.307	0.093	-0.103
Nt		1.000	-0.599	0.655	0.976	-0.648	0.545	0.019	-0.035
Cd			1.000	0.213	-0.626	0.979	0.281	-0.060	0.075
Ci				1.000	0.600	0.133	0.931	-0.033	0.029
Nt×Nt					1.000	-0.670	0.528	-0.002	-0.017
Cd×Cd						1.000	0.221	-0.039	0.054
Ci×Ci	I : 直達日射量, Nt : 日射時間						1.000	-0.044	0.035
H	Cd : 雲量, Ci : うす雲指数							1.000	-0.988
ℓ	H : 太陽高度, ℓ : 光学的質量								1.000

学分野で今なおよく用いられているという理由から、(1)式の関数をそのまま使っている。

これまでに述べてきた三つのタイプの関数に対して、いくつかの月々のデータを使用してこれらの関数の直達日射強度の推定への可能性を検討した。ここでは、その結果について簡単に要約して示す。まず、どの式の場合においても、それぞれの要因間の相関関係の程度が問題となるので、代表的な例として7月分の相関マトリックスを示すとTable 2の結果となる。

この相関マトリックスを見た時、直達日射と比較的相関が強く表れる要因として、日射時間、雲量とそれらの自乗値であり、本質的にはこれらの要因が各推定式の中に組み込まれている必要がある。そこで、同じ7月分のデータを使用して重回帰分析を行ない、三つのタイプの関数型とその係数を同定した。その結果、(4)式の適合度は極めて悪く、変動の50%程度しか説明できなかった。そのため、ここでは(5)、(6)式の場合について、決定された関数型と各々の係数から推定された値と実測値間の散布図を示すと、Fig.1のようになる。Fig.1の結果から見ると(5)、(6)式の適合度はほぼ同じような結果となっているが、分散値では(5)式の方が若干その適合度が優れている。

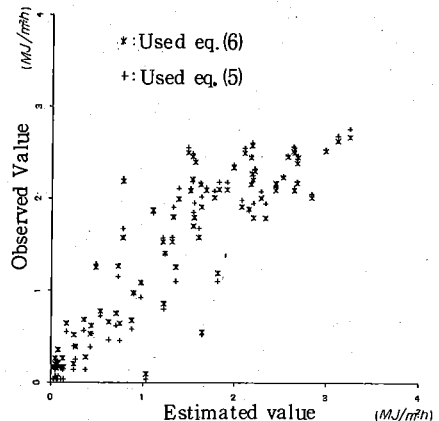


Fig. 1. 観測値と各種推定値の散布図(1981年7月)

更に同様な方法で他のいくつかの月のデータを分析したが、ほとんどの場合において(5)式が最も直達日射の変動をよく説明した。なお、(6)式は分析する月々によって選ばれる説明要因が変化し、具体的な関数型は各月によって異なっている。

一般的に言って、(5)式の推定値を使った場合、実測データの分散の少なくとも70%程度を説明しえたのに対し、(4)式では50%程度、(6)式では65%~85%程度と比較的大きなバラツキが見られた。この原因として、推定のために選ばれた要因間の相関の程度が大きく重共線性の問題が生じたり、あるいは(4)式のような単純な型では直達日射強度の変動を十分に説明しえない結果と考えられる。更に、(6)式の場合もっと数多くの要因を追加したり、2次項以上の高次項などを考えることによって、より適合

性の高い重回帰式を得る可能性もあるが、本研究の目的からこれ以上の検討は行なわなかった。

そのため、これ以後の内容については(5)式による各月別の直達日射強度の推定式の結果とその考察を進めていく。

V 推定結果

松本測候所の各月のデータを使って、各々の月毎に(5)式の回帰分析を行なった。この分析で決定された各月別の係数を用いて推定した直達日射強度の値の代表的な例をプロットした結果がFig.2~Fig.5に示されている。また、同じ月の推定値と実測値の散布図がFig.6~Fig.9である。更に、Table 3には各月の回帰係数値、相関係数値ならびに分散値などの結果をまとめている。

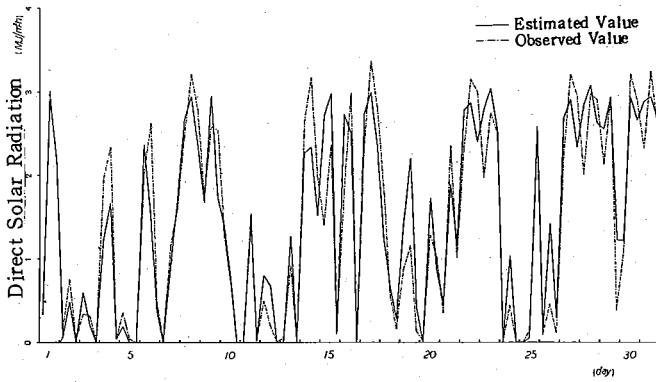


Fig. 2. 直達日射の推定値と観測値 (1981年1月)

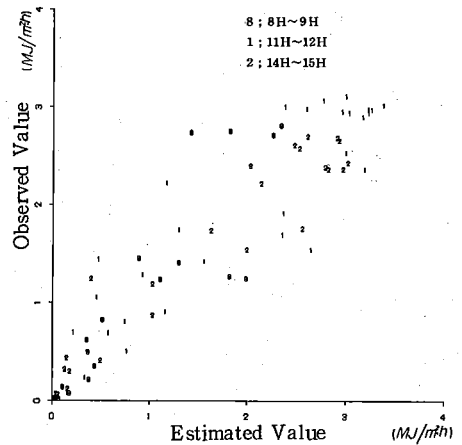


Fig. 6. 推定値と観測値の散布図 (1981年1月)

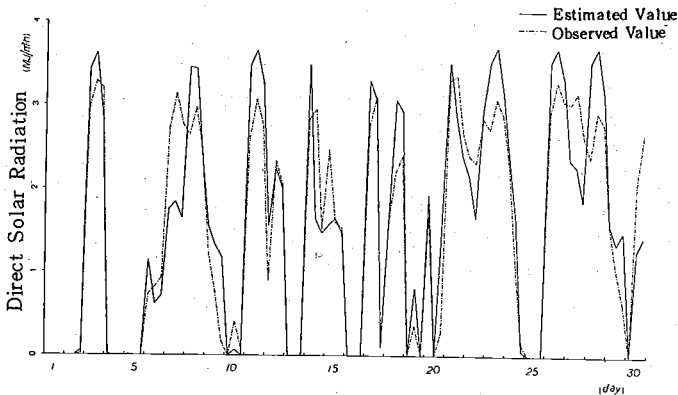


Fig. 3. 直達日射の推定値と観測値 (1981年4月)

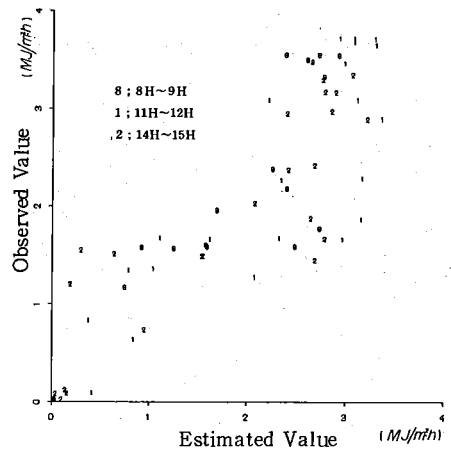


Fig. 7. 推定値と観測値の散布図 (1981年4月)

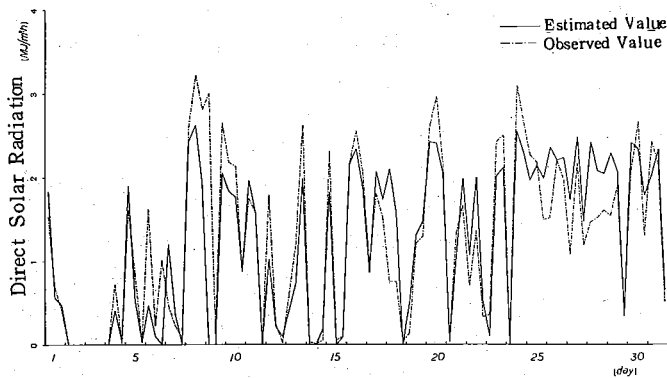


Fig. 4. 直達日射の推定値と観測値 (1981年7月)

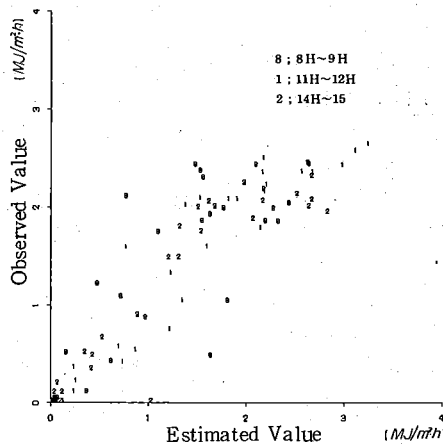


Fig. 8. 推定値と観測値の散布図 (1981年7月)

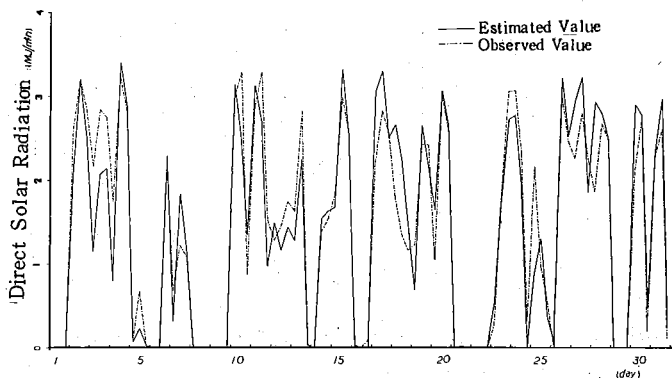


Fig. 5. 直達日射の推定値と観測値 (1981年10月)

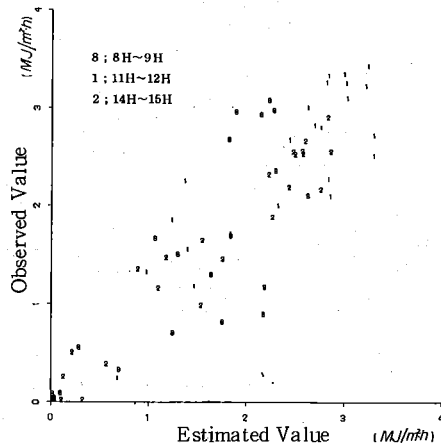


Fig. 9. 推定値と観測値の散布図 (1981年10月)

Table 3. 推定式の係数とその統計値

月	重相関係数	分散	標準誤差	透過率 (P)	回帰係数值		
					K ₁	K ₂	K ₃
1	0.910	0.828	0.158	0.773	0.947	0.440	-0.0029
2	0.911	0.830	0.149	0.739	0.945	0.437	0.0032
3	0.927	0.860	0.142	0.724	0.963	0.435	0.0009
4	0.876	0.767	0.213	0.686	1.128	0.500	0.0083
5	0.905	0.818	0.171	0.641	0.935	0.560	0.0543
6	0.887	0.787	0.193	0.604	1.000	0.417	0.0417
7	0.835	0.697	0.218	0.611	0.854	0.613	0.0576
8	0.877	0.768	0.174	0.663	0.901	0.531	0.0355
9	0.834	0.696	0.220	0.633	0.906	0.532	0.1014
10	0.886	0.786	0.203	0.728	0.994	0.313	0.0484
11	0.828	0.687	0.262	0.756	0.960	0.374	0.0974
12	0.889	0.791	0.177	0.776	0.937	0.537	0.0317

これらの結果を見ると、比較的ランダムに変動する直達日射の時間的変化を(5)式はかなりの精度で表現していると云えよう。これらの適合性を Table 3 の統計的分析結果から判断すれば、相関係数で0.83~0.93であり、その分散値で0.69~0.86となっている。つまり、分散の少くとも70%程度以上が説明できたこととなる。ただし、これらの統計値は各々の月によって若干の相違があり、7月、9月ならびに11月の値は精度が悪く、他方1月、2月、3月ならびに5月の推定は比較的精度が良くなっている。これは、松本地域の気候的要因と大気状態に大きく関連していることが原因している結果であろう。

以上のように、単純な型をした(5)式を使うことによって、直達日射量の時間的変動特性のその定性的傾向をほぼ推定しうることが可能となった。しかし、この

式から推定される値の精度そのものには、まだいくつかの検討を残していることも事実であろう。例えば、推定値の誤差の指標として二乗平均誤差率を採用すると、ほとんどの月で20%~35%程度であるが、最大の6月の場合になると50%もあり、気象現象の時間的従属性等をも考慮していかなければならない。

VI 推定誤差

物理的現象を保存した(5)式は、直達日射強度のおおよその変動について説明しえることが実証されたが、前章のいくつかの結果はその変動の推定に未だかなりの誤差を残しているという事実をも示している。この誤差の原因として数多くの要因が考えられるが、以下にそれらの中から主要なものについて、若干の検討を加えておく。

1. 測定データ自身あるいは測定方法に起因する誤差
採用した気象資料の測定は、雲量等のように目測で観測するものがあり、そこには人的誤差が入ることがありうる。また、日射時間などはジョルダン日照計による観測が行なわれており、その測定器自身の精度上に問題を残していることも事実である。

一方、測定項目によっては観測された累積値を扱うもの、例えば多くの日射資料のように自記連続記録からその積算値を算出するものがあるのに対して、逆に雲量のようにある時刻の瞬間値だけを対象とするものもある。つまり、気象資料の中にはその気象現象を連続的な変量としてそのデータを採取する場合と、離散的な変量として採取する場合が混在しているのである。このことによって、対象とする気象現象を忠実に反映することが出来ないことも起こる。そのため、上述したような測定方法の相違に由来する誤差も相当大きく関与してくるものと考えられる。

2. 気象現象を的確に表現しえないための誤差

上記1の原因とも関連するが、現在の気象資料だけでは十分に直達日射強度に関係する物理的要因を表現出来ない場合もありうる。例えば、瞬時瞬時の雲の発生やその動きを見る時、雲はいつも平均的に全天空を覆うとは限らず、一部の天空に発生したり、あるいはいくつかの点状の天空に発生したり千変万化することが多い。そのため、放射の経路上に雲が発生した場合などは、その到達点に入射する直達日射量が大きく変化してくる。このような雲の発生位置、雲の高度、雲の形状あるいは雲の性質等は、直達日射の遮断やその透過特性に直接的に影響しており、これらの物理的要因を具体的に表現できる指標の検討が必要である。

3. 大気透過率(P)の誤差

ここで直達日射強度推定のために使用した(5)式は、基

本的な大気の透過特性に関して Bouguer の理論を踏襲している。この Bouguer の透過率 P は、厳密に考えると単色光放射についてだけ成立する関係である。それゆえ、一般的にかなりの波長域を有する太陽放射に対して、この理論を使った時、フォールブス効果に基づく誤差が生じることが多い。このフォールブス効果は波長と大気の透過率の関係を条件づけるものであり、このため放射スペクトルの全域について求めた透過率 P は、光学的 Path の長さによって変化してくることになる⁽⁵⁾。例えば、松本測候所の各月別の観測値から時刻別の平均透過率を求め、その結果をプロットすると Fig. 10 のようになる。

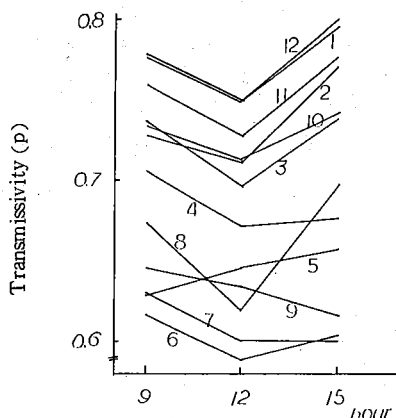


Fig. 10. 各月別の透過率の変化(図中の数字は月を示す)

この Fig. 10 の結果によると、透過率 P は月々の値においても、あるいは一日内の各時間値においても比較的大きな変動が存在している。このことは、(5)式の推定を使う場合、透過率の値のとり方を少し変えることにより、推定精度が5~10%程度変化する可能性があることも示している。

以上のように、Bouguer 理論に基づいて直達日射量の推定を行なっていく際、放射波長域、光学的 Path ならびにここではその要因として採用しなかったが大気中の水蒸気量等を総合的に検討した上で、適切な透過率を吟味する必要がある。

VII あとがき

直達日射強度の分布特性を明確にするため、本報告では松本測候所の観測資料を使ってその推定の可能性を検討した。その結果、比較的単純な型ではあるがある程度物理特性を表現する(5)式が、実際の直達日射強度の70%以上の変動を説明し、おおよその定性的な変動特性を表現することが可能であると結論づけられた。しかし、実測データと推定値との間の誤差は各々の月によって異なっているが、二乗平均誤差で25%~50%程度もあり、定

量的な推定に関しては問題を残している。特に、この推定の精度向上のためには、(1)気象測定方法の改良、(2)大気透過率に関する理論的な再検討が必要と考えられ、今後その理論的、実証的両面からの研究が望まれる。

最後に、本研究を行なうにあたって気象資料収集の便宜をはかって頂いた松本測候所の皆様と、いろいろ示唆を与えて頂いた信州大学教養部松田松二教授に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 松田松二，星川和俊；“地域生産力評価への一試み—一日射・地形・生産諸条件からの考察—”，信州の自然環境モニタリングと環境科学の総合化に関する研究（信州大学環境問題研究教育懇談会編），1982,3
- (2) 信州大学教養部環境科学研究室編；“農業地域におけるポテンシャル生産力評価法に関する基礎的研究，

農林水産業特別試験研究報告，1983,3

- (3) 財)日本気象協会；“気象データ使用に際しての指針，太陽エネルギーシステム気象資料No.2,昭和50年3月
- (4) 財)日本気象協会；“全天日射量，日照時間の観測資料，太陽エネルギーシステム気象資料No.3,昭和50年3月
- (5) T. G. Berlyand；“大陸上での太陽放射量の分布—世界日射気候学—”ソビエト水文気象出版局，1961，（農林水産技術会議訳：大陸上での太陽放射量の分布及び斜面の放射状態，昭和55年3月において所収）
- (6) 財)日本気象協会；“太陽エネルギーシステムの研究（気象調査）”，サンシャイン計画委託調査研究成果報告書，昭和56年3月
- (7) 吉田，篠木；“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 25.5，1978,5