

# 全天日射量から大気の光消散因子の評価について

The Estimation of the Optical Extinction Factors in Atmosphere from  
the Global Radiation

三谷 雅肆 \* 1  
Masashi MITANI

中村 圭三 \* 2  
Keizo NAKAMURA

## Abstract

For the estimation of the optical extinction factors in atmosphere, such as the transmission factor or the turbidity factor, from the global radiation flux, the formulas developed by many investigators are tested. From the comparison between the radiation flux calculated by use of the formulas and the observed flux by Japan Meteorological Agency, the formula, which is derived from deterministic model of solar radiation process, is found to be more effective for the estimation of the radiation flux or the extinction factors. This formula directly expresses the global radiation flux with only one term.

Applying the global radiation expression to the radiation energy observed at some meteorological observatories in Japan, the turbidity factors of the areas are obtained and then the understanding of the aerosol conditions in atmosphere through the factors is tried.

キーワード：全天日射量、 大気透過率、 混濁係数、 シベリア森林火災

**Key Words :** global radiation, the transmission factor, the turbidity factor, Siberian forest fire

## 1. 緒言

太陽エネルギーの利用やその計画に関して、日射量や日射特性の把握は重要である。日照時間や全天日射量は各地の気象台などで観測され<sup>(1), (2)</sup>、また、大気の光学的条件を知る上で重要な大気透過率や混濁係数についても年報など<sup>(2)</sup>で報告されている。大気透過率は Bouguer の式を用いて定義づけられ、したがって、これの直接評価には直達日射量の観測が望まれる。しかしながら、これを定期的に行なっている公的観測地点は、全天日射量の観測地点に比べて著しく少なくなってきた<sup>(3)</sup>。

大気透過率や混濁係数は、大気を構成する気体成分やエーロゾルの光学的厚さで表され、観測地点の直達日射量と大気外日射量との比較から得られる。散乱日射もこの光学的厚みに関係し、全天日射量から大気透過率を推定する方法<sup>(4)</sup>も考えられる。このとき、全天日射量の、いわゆる直散分離の精度が重要な鍵となる。

雲の無い晴天空の散乱日射量の推定式は、以前から幾つか報告してきた。これらは、日射の物理過程をモデル化し、日射量を大気の光学的厚さ、あるいは大気透過率などの関数として表す。例として、古くは Berlage の式<sup>(5)</sup>がよく知られている。これらの式は、主に全天日射量の散乱日射成分を評価するものであるが、Kondratyev は、日射の直達成分と散乱成分とを、そ

れぞれの項に分けない形の全天日射式を紹介している<sup>(6)</sup>。しかし、その有効性など、あまり検討されてはいない。

以上のような、いわゆる決定論的なモデルに対して、全天日射量や直達、散乱、各日射量成分を大気外日射量などの比として無次元化し、それらの 1 時間積算値を統計的に関係付けることによって直散分離を行なう方法、いわゆる確率論的モデルが多く報告されている。これらの式を活用して、一般的に観測の容易な 1 時間全天日射量から直達日射量を分離評価して、これから大気透過率などの光消散因子が評価できよう。

ここでは、以上の推定式により算出した日射量と全国 10 観測地点の日射量観測データとを比較すると共に、それらの推定式を用いて、全天日射量の観測値から大気透過率や混濁係数を逆算し、直達日射量の観測から得られている透過率<sup>(2)</sup>と比較検討した。次いで、より適当と判断された推定式を用いて、二三の地域の大気混濁係数を評価し、その経年変化や季節的特徴の把握を試みた。

## 2. 全天日射量と大気透過率

地上の法線面に達する波長  $\lambda$  の直達日射量  $I_A(\lambda)$  は、地球と太陽との間の距離が、その平均値にあるときの大気外法線面日射量  $I_0(\lambda)$  を用いて次の Bouguer の式によって表される<sup>(7), (8)</sup>。

$$I_N(\lambda) = RI_0(\lambda)e^{-\alpha(\lambda)m} \quad (1)$$

$$\alpha(\lambda) = (b/b_0)k_R(\lambda) + k_a(\lambda) + k_g(\lambda) \quad (2)$$

ここで、 $R$  は、 $I_0(\lambda)$  に対する地球 - 太陽間距離の、その平均

\* 1 敬愛大学環境情報研究所 客員研究員

(〒 004-0879 札幌市清田区平岡九条 1-14-1 自宅)

e-mail : nomita38@dion.ne.jp

\* 2 敬愛大学国際学部教授

(原稿受付 : 2009 年 10 月 19 日)

値からのずれに対する補正係数<sup>(7)</sup>であり、 $m$  は日射の大気経路である。 $b$  は大気圧、 $b_0$  は標準気圧(1,013 hPa)である。また、 $k_p(\lambda)$  は Rayleigh 散乱に関する大気の光学的厚さ、 $k_a(\lambda)$  はエーロゾルの散乱による光学的厚さ、そして  $k_g(\lambda)$  は水蒸気や二酸化炭素、オゾンなどの光の吸収による光学的厚さである。なお、 $\alpha(\lambda)$  は消散係数と呼ばれる<sup>(9)</sup>。

法線面への直達日射量  $I_N$  は、(1)式の全波長にわたる積分によって表されるが、一般には  $I_0(\lambda)$  や  $k_p(\lambda)$ 、 $k_a(\lambda)$ 、 $k_g(\lambda)$  の全波長域内での平均値、 $I_0$  や  $K_p$ 、 $K_a$ 、 $K_g$  を採って、地上の法線面での全波長にわたる日射量  $I_N$  は、次のように表される<sup>(7), (8)</sup>。

$$I_N = RI_0e^{-(b/b_0)K_p + K_a + K_g)m} \quad (3)$$

$\alpha = (b/b_0)K_p + K_a + K_g$  として、 $I_N$  を次のように表す<sup>(9)</sup>。

$$I_N = RI_0e^{-\alpha m} = J_0P^m \quad (4)$$

$J_0 = RI_0$  は観測時の大気外法線面日射量であり、本研究では世界気象機関(WMO)の勧告する太陽定数  $I_0 = 1,367 \text{ W/m}^2$  を採用した。また、 $e^{-\alpha} = P$  は大気透過率である。太陽高度  $h \geq 20^\circ$  であれば  $m = 1/\sin h$  とみなしうる<sup>(9)</sup>。

雲の無い晴天空の散乱日射について、水平面散乱日射量  $D_H$  に対して古くからよく知られた次の Berlage の式<sup>(5)</sup>がある。

$$D_H = 0.5 \cdot J_0 \cdot \sin h \frac{1 - P^{1/\sin h}}{1 - 1.4 \cdot \ln P} \quad (5)$$

このように  $D_H$  を  $P$  の関数として表わした式には、ほかに松尾ら<sup>(10)</sup>、永田ら<sup>(11)</sup>などの式がある。水平面全天日射量  $G_H$  は、この  $D_H$  と水平面直達日射量  $I_H = I_0 \sin h$  の和として表される。

$$G_H = I_H + D_H = I_N \cdot \sin h + D_H \quad (6)$$

Kondratyev は、日射の地上へ向かう下向きの放射  $G_{H2}$  ( $= G_p$ ) とその逆の上向きの放射  $G_{H1}$ 、それぞれに対する伝達方程式から得られる全天日射式を紹介している<sup>(6)</sup>。光の消散のうち吸収を無視してその方程式は連立式の形をとり、その境界条件とあわせて以下のように表わしている。

$$\frac{dG_{H1}}{d\tau} = \frac{dG_{H2}}{d\tau} = \varepsilon \frac{1}{\sin h} G_{H2} - 2\varepsilon G_{H1} \quad (7)$$

$$\tau = \tau_0 \text{ で } G_{H2} = J_0 \sin h, \quad \tau = 0 \text{ で } G_{H1} = AG_{H2} \quad (8)$$

ここで、 $\varepsilon$  は放射の方向と逆の方向に向かう散乱日射の割合、 $\tau$  は光の消散に関わる大気の光学的厚さである。また、 $A$  は地表面アルベドである。右辺第二項の  $\varepsilon G_{H1}$  の係数 2 は、上向きの放射に等方性を仮定することによる<sup>(6)</sup>。

これを解き、 $A$  をゼロと仮定し、 $\varepsilon$  の指数関数部分を二項まで展開した近似の形で水平面全天日射量は次のようになる<sup>(6)</sup>。

$$G_H = \frac{J_0 \sin h}{1 + \varepsilon \tau_0 (1/\sin h)} = \frac{J_0 \sin h}{1 - \varepsilon \ln P^{1/\sin h}} \quad (9)$$

全天日射量は一定時間の積算値として観測されることも多い。所定時間( $t_1 \sim t_2$ )の積算全天日射量  $S_{Ht}$  について、次式で示されるその推定値 ( $S_{Ht,cal}$ ) と観測値 ( $S_{Ht,obs}$ ) との比較から各推定式の妥当性が検討できよう。

$$S_{GH,cal} = \int_{t_1}^{t_2} G_H dt \quad (10)$$

水平面の直達日射量や散乱日射量も同様、その積算値  $S_{Ht,cal}$  や  $S_{Ht,obs}$  は、それぞれ  $I_H$  や  $D_H$  の積分によって表される。

本研究では、この積分に対してシンプソン則による数値積分の方法を採った。その積分の刻みの数は、1 時間につき 4 としたが、それによる積分値の収束は充分であった。

(5)式や(9)式は、日射の物理過程をモデル化して日射量を大気の光学的厚さや大気透過率などの関数として表したものであるが、これらに対して無次元化した日射量成分、例えば大気外日射量で除した全天日射量や全天日射量で除した散乱日射量などの各実測値(1 時間積算値)を統計的に関係付け、すなわち、それらの間の実験式を得て、全天日射量の直散分離を行なう方法が多く提案されている。一例として Erbs ら<sup>(12)</sup>の式をここに示す。他の式もこれに類似する。

$$\begin{aligned} k_T \leq 0.22 \text{ のとき, } S_{Ht}/S_{Ht} &= 1.0 - 0.09k_T \\ 0.22 < k_T \leq 0.80 \text{ のとき, } S_{Ht}/S_{Ht} &= 0.9511 - 0.160k_T \\ &+ 4.388k_T^2 - 16.638k_T^3 + 12.336k_T^4 \\ k_T > 0.80 \text{ のとき, } S_{Ht}/S_{Ht} &= 0.165 \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 $k_T$  は 1 時間水平面全天日射量とその大気外水平面日射量の比で晴天指数と呼ばれる。また、 $S_{Ht}$  と  $S_{Ht}$  は、それぞれ散乱、および全天日射量の 1 時間値である。これらの式では、日射量は雲量に関係なく評価されることとなる。

### 3. 日射観測データの収集とその処理

全天日射量の 1 時間値から大気透過率や混濁係数を得る方法を検討するにあたり、気象庁の全天日射量観測データ<sup>(1), (2)</sup>を利用した。多数のデータのうち、全天日射量のほかに直達日射量も観測され、また雲量観測が、その多くの観測地点の中で最も短い間隔、すなわち、3 時間間隔で行われてきた根室、札幌、秋田、宮古、松本、輪島、潮岬、土佐清水(足摺)、福岡、鹿児島の 10 地点をデータ利用の対象地点とした。

全天日射量は、地方真太陽時の正午を含む 1 時間積算値で、その時間帯ばかりではなく 9 時、12 時、および 15 時の各雲量が全てゼロである比較的安定な天気の日の値を選んだ。この選定基準を決めるに当たり、積算時間の前後二回の観測雲量がゼロである場合と、日の出から日没までの全ての観測雲量がゼロである場合についても検討した。

全天日射量のほか、直達日射量も定期的に観測してきた気象台には、以上の 10 地点のほか、館野、米子、那覇、石垣島がある。前二者では正午の雲量は公表されておらず、後二者では上記の時間帯における雲量ゼロの条件の日が極端に少なく、これらはデータ利用の対象から除外した。

以上の条件を満たしながら、極めてわずかな例ではあるが、南中時を含まない時間帯で全天日射量の最高値が現れる例や、積算時間内の日照時間が 1 時間未満である例は除外した。これは、雲量観測の狭間に小さくとも極一時的な雲による日射の遮蔽や反射日射による不自然な日射の可能性を避けるためのもの

である。また、全天日射量にもとづく大気透過率と直達日射量にもとづくそれとの比較の観点から、両日射量が対で得られることも条件とした。

日射量推定式の検証のためのデータは、できるだけ長期にわたるものを狙って、4年間を1単位期間として括り、これを1990～2007年の18年間に均等に配した期間、すなわち1990～1993、1997～2000、および2004～2007年の3期間、計12年間のものであった。そのなかで上記のデータ収集の条件を満たすものは10観測地点で計1543点であった。

検証した推定式により1時間全天日射量から特定地域の大気の光消散因子を評価し、その経年変化などの把握を試みたが、その地域として先の根室のほかに東京を選んだ。そこでも気象庁の観測データ<sup>(1), (2)</sup>を利用したが、採用したデータの条件として、先と同様に9時、12時、および15時の各雲量がゼロである安定な天気の日のデータを選んだ。なお、その対象とした期間は、東京の場合は1990～2008年、根室の場合は1990～2007年であった。根室のデータに関しては、全天日射量から評価した光散乱因子の推移と直達日射量から評価したその推移との比較をも意図した。この地での直達日射量の観測は、2007年9月をもって終了した<sup>(3)</sup>。

#### 4. 日射量推定式の検証および評価

##### 4.1 全天日射式、特に(9)式について

Berlage の式<sup>(5)</sup>や永田らの式<sup>(11)</sup>は散乱日射量の式であり、これらに直達日射量を加えれば全天日射量が得られる。すなわち、大気透過率  $P$  が分かれれば(6)式から全天日射量が算出でき、また逆に、全天日射量の実測値から  $P$  を推定しうる。

Kondratyev の紹介する(9)式<sup>(6)</sup>には未知の  $\varepsilon$  が含まれる。その決定なしに全天日射量は算出できない。ここでは、観測値と(9)式を結ぶ妥当な  $\varepsilon$  を決定しよう。

(9)式を(10)式に代入し、これに南中時を含む全国10地点の1時間全天日射量  $S_{\text{obs}}$  を、また  $G_H$  式中の  $P$  には気象庁の公表する直達日射量から得られた  $P$  値<sup>(2)</sup>を、それぞれ対応させて個々の観測時の  $\varepsilon$  を逆算した。(10)式の数値積分は、適当する  $\varepsilon$  が得られるまで、これを繰り返す試行法を探った。

10箇所の観測地点で計12年の間に得られた  $\varepsilon$  を  $h$  や  $P$  との関係として、それぞれ図1の(A)と(B)に示す。これらの図から  $\varepsilon$  は  $h$  や  $P$  にほとんど関係しないことが示唆される。データは、全ての観測地点と季節を区別せずに掲げているが、そのことによる顕著なデータのはらつきは認められない。実際、10観測地点、それぞれにおける  $\varepsilon$  の平均値は、緯度などの位置的条件に関係なく0.65から0.74の範囲にあり、平均0.68、変動係数5%であった。また、全観測地点にわたる  $\varepsilon$  の月間値の年間推移は、最小0.62(3月)から最大0.77(9月)の間で緩やかに変化し、その変動係数は7%(平均0.68)であった。以上により、 $\varepsilon$  は太陽高度や大気透過率のほか、日本各地の位置的条件、および季節的条件にほとんど依存しないものと考え、全データの算術平均値からその値を決定した。その結果、 $\varepsilon = 0.68$  (変動係数14%, データ数1,543) が得られた。

前記したように、以上の解析で採用した観測データの条件は、

9、12、15時の雲量がすべてゼロである日のものとしたが、より条件の緩い9、12、15時のうち、南中時を挟む時間の雲量がゼロである日(データ数2,113)、あるいは最も条件の厳しい日の出から日没までに観測された雲量がすべてゼロである日(データ数767)、いずれにおいても  $\varepsilon$  に関する結果は変わらなかつた。このことは、 $\varepsilon$  が雲のない条件下の値に収斂したことを示唆しているといえよう。

$\varepsilon$  に関して、いまひとつの問題がある。 $\varepsilon$  は大略  $10^{-1}$  程度と考えられており<sup>(6)</sup>、以上の  $\varepsilon = 0.68$  はこれから偏倚する。

(9)式は日射量の変動についての定性的記述に関しては良好であるが、この式が大気の日射吸収効果を無視して得られたことにより日射量の過大評価を生むと考える報告が紹介されている<sup>(13)</sup>。また、(9)式で  $\varepsilon \tau_0$  を一変数  $f$  に一括し、その月間値を緯度に関して得て、各地、各季節の全天日射量を評価できるとした報告も紹介<sup>(6)</sup>されている。しかしながら、未だこの式の詳細が研究されたとは言い難く、そのような状況や極度に複雑な実際の大気での散乱過程などを考慮して、当面この  $\varepsilon$  には観測値と推定値を結ぶ補正項の役割を付与することとした。

(9)式の全天日射量は、 $\varepsilon = 0$  では大気外水平面日射量に等しい日射量を、 $\varepsilon = 1$  では、 $1/[1 + \tau_0(1/\sin h)] \approx \exp[-\tau_0(1/\sin h)]$  とみなして、散乱光が全て大気外へ消失した極端の日射量を、すなわち全天日射は直達日射成分のみからなることを、それぞれ表わすこととなるが、 $\varepsilon$  は、この両極端の間に実際の全天日射量を導く因子ともいえよう。以上により、(9)式に得られた  $\varepsilon$  を用いて全天日射量  $G_H$  を次のように表わすこととした。

$$G_H = \frac{J_0 \sin h}{1 - 0.68 \ln P^{1/\sin h}} \quad (12)$$

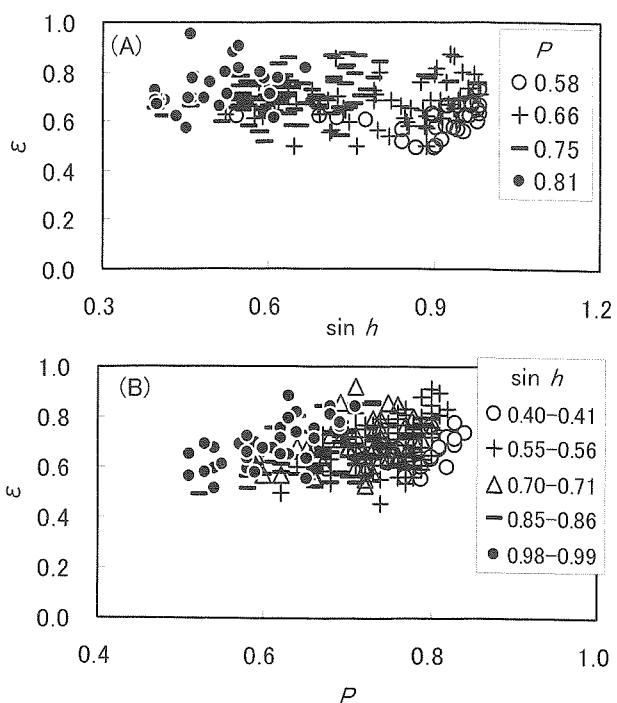


Fig. 1 Dependence of  $\varepsilon$  on the sun's altitude and the atmospheric transparency coefficient.

以上は、いわば決定論的方法によって得られたモデルである。一方、(11)式で代表した形の確率論的モデルでは、大気外水平面日射量や全天日射量に対する直達日射量や散乱日射量（1時間値）の比の形で無次元化した日射量を、同じく全天日射量と大気外水平面日射量の比（晴天指標）などの多項式として表わす。観測された全天日射量をこの式に適応して直散分離を行なうが、得られた散乱日射量  $S_{DH,cal}$  は、それらの実測値  $S_{DH,obs}$  と比較して検証され、また、得られた直達日射量から  $P$  を逆算することができる。

以下では、大気の光消散因子を評価することを狙って、決定論的モデルのほか、Erbs ら<sup>(12)</sup>、渡辺ら<sup>(14)</sup>、Reindl ら<sup>(15)</sup>、Chandrasekaran ら<sup>(16)</sup>、紙井ら<sup>(17)</sup>、稻沼ら<sup>(18)</sup>の各直散分離式について検証する。

#### 4.2 全天日射量、および散乱日射量の推定

全観測地点に関する正午を挟む 1 時間散乱日射量の観測値  $S_{DH,obs}$  と各推定式によるその推定値  $S_{DH,cal}$  との二乗平均平方根誤差 (RMSE) を求め、表 1 に総括した。ここで、 $S_{DH,obs}$  は、気象庁の水平面全天日射量と法線面直達日射量の各 1 時間値から評価した。その直達日射量の水平面の値を得る際、太陽高度  $\sin h$  にはその時間帯の平均値を採ったが、それによる誤差は無視できる程度と推定された。また、 $S_{DH,cal}$  の算出で  $P$  を要するとき、気象庁の公表する正午の値を採用した。

表 1 に挙げた最初の三種のモデル、(12)式、(5)式、永田らの式<sup>(11)</sup>は決定論的方法で得られたモデルであり、他は確率論的モデルである。確率論的モデルの組み立てにおいて、しばしばそのモデルの適応条件に応じて、二三種の推定式が同時に提案されている。表中の各モデルに関して、渡辺らのモデルについては同時に報告された二種のモデルのうち、直達日射量を晴天指標で回帰した式<sup>(14)</sup>を、同じく Reindl らのモデルについては散

乱日射量を晴天指標のみで回帰した式<sup>(15)</sup>を、Chandrasekaran らのものについては散乱日射量を晴天指標で回帰した式で季節区分のない式<sup>(16)</sup>を、紙井のものについては散乱日射量を晴天指標と太陽高度を考慮して回帰した式<sup>(17)</sup>を、それぞれ採りあげた。

$S_{DH,cal}$  の RMSE は大略 0.1 から 0.2 MJ/m<sup>2</sup> にあるが、ここで  $S_{DH,obs}$  の平均的な値である 0.5 MJ/m<sup>2</sup> と比較して、この RMSE は小さくない。観測された日射量は全天日射量と直達日射量であり、その差として散乱日射量が評価されている。ここで、全天日射量の平均的な値は 2.7 MJ/m<sup>2</sup>、直達日射量のそれはそのほぼ 80%であることを考慮すれば、以上の RMSE は首肯しうる範囲といえよう。確率論的モデルにもとづく  $S_{DH,cal}$  の推定誤差は、決定論的モデルにもとづくものより若干大きい。前者のモデルにおいては、その実験式は雲量に無関係に得られているのに対して、表 1 の検証結果は雲量ゼロを条件にして得られている。このことが上記の  $S_{DH,cal}$  の推定誤差に関係したとも推測される。

表 1 は、 $S_{DH,cal}$  の RMSE に関して、式(12)がより満足な結果を示しているが、その地域的、および季節的偏りについても他に比較して小さい。この RMSE の季節的变化は冬季に低く夏期に高くなる傾向にあったが、この傾向は全天日射量の季節的变化とほぼ並行したものであり、推定式を取り扱う上で問題ないものと考えた。

決定論的モデルには、このほか Berlage の式<sup>(5)</sup>の係数項を実際の日射量をもとに修正した松尾らの式<sup>(10)</sup>がある。確率論的モデルについても、ほかに宇田川らの式<sup>(19)</sup>、さらには表 1 で挙げた渡辺ら<sup>(14)</sup>、Reindl ら<sup>(15)</sup>のいまひとつの式がある。これらについても表 1 と同様に検証したが、 $S_{DH,cal}$  の RMSE は 0.16 から 2.4 MJ/m<sup>2</sup> であり、(12)式の精度を超えるものではなかった。

#### 4.3 大気透過率の評価

通常、大気透過率  $P$  は、直達日射量瞬間値の観測結果から得

Table 1 RMSEs of the hourly diffuse radiation on a horizontal surface  $S_{DH,cal}$  and the transparency  $P_{HG}$  estimated from each models.

RMSE of $S_{DH,cal}$ (MJ/m <sup>2</sup> ) and $P_{HG}$ (-) for each model										
model tested	Kondratyev, Eq.(12)	Berlage, Eq.(5)	Nagata et. al. et. al.	Erbs et. al., Eq.(11)	Watanabe et. al.	Reindl, et.al	Chandrasekaran et. al.	Kamii et. al.	Inanuma et. al.	
$S_{DH,cal}$	all data (1543 data)	0.097	0.139	0.165	0.154	0.184	0.170	0.188	0.186	0.217
	av. of 10 sites	0.101	0.142	0.166	0.160	0.189	0.177	0.195	0.194	0.224
	$\sigma$	0.020	0.022	0.027	0.030	0.038	0.040	0.042	0.050	0.047
	av. of all months	0.101	0.138	0.158	0.161	0.187	0.180	0.201	0.202	0.233
$P_{HG}$	$\sigma$	0.029	0.046	0.057	0.046	0.042	0.057	0.064	0.086	0.074
	all data (1543 data)	0.04	0.04	0.06	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05
	av. of 10 sites	0.04	0.04	0.06	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05
	$\sigma$	0.006	0.005	0.009	0.006	0.015	0.008	0.008	0.010	0.009
av. of all months	0.04	0.04	0.06	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05
	$\sigma$	0.008	0.010	0.016	0.008	0.007	0.011	0.013	0.017	0.014

Sites and number of observations:  
Nemuro(142), Sapporo(94), Akita(61), Miyako(154), Matsumoto(153), Wajima(60), Shionomisaki(271), Shimizu(280), Fukuoka(159), Kagoshima(171)

Number of observations in each month:  
Jan(130), Feb(149), Mar(186), Apr(179), May(111), Jun(62), Jul(52), Aug(67), Sep(67), Oct(154), Nov(203), Dec(185)

av.: average,  $\sigma$ : standard deviation

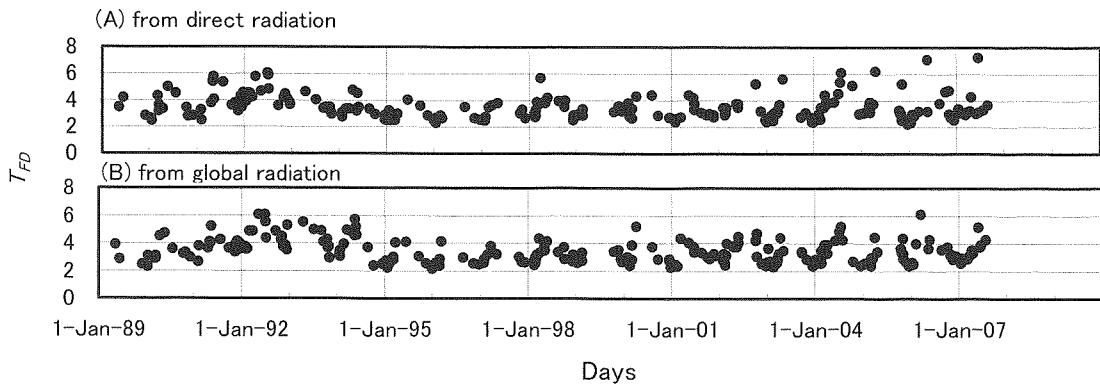


Fig. 2 Variations of the turbidity factor for years at Nemuro and comparison between the turbidity factors based on direct radiation and those based on global radiation.

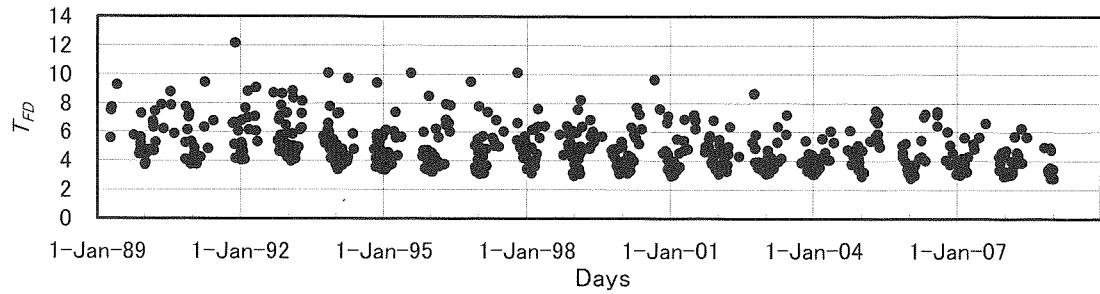


Fig. 3 Variations of the turbidity factor at Tokyo within a period from 1989 to 2008.

られる<sup>(2)</sup>。ここでは、以上で検証した散乱日射式や全天日射式、あるいは直散分離の方法を活用して、正午を含む1時間全天日射量観測値から得られる大気透過率 $P_{\text{tr}}$ の評価を試みた。すなわち、決定論的モデルからの $P_{\text{tr}}$ の評価においては、各推定式を含む(10)式に全天日射量観測値を対応させて $P_{\text{tr}}$ を求め、また、確率論的モデルからの評価においては、推定された1時間水平面直達日射量を積分形式で示したBouguerの式に対応させて $P_{\text{tr}}$ を求めた。この際の積分でも先に示したようにシンプソン則による数値積分の方法を探り、適当する $P_{\text{tr}}$ が得られるまでこれを繰り返す試行法に頼った。

各日射式を活用して得られた $P_{\text{tr}}$ についても、 $S_{\text{H}, \text{cal}}$ の場合と同様、その推定誤差の程度を地域や季節などの偏りの有無を考慮して表1に総括した。これからわかるように、全体として(12)式による $P_{\text{tr}}$ と実測値 $P$ との一致の程度は良好であり、その誤差に関する地域的、および季節的偏りも少ない。

## 5. 全天日射量から評価した大気混濁係数

大気透過率には空気分子による散乱効果も含まれ、これは真的大気混濁の指標とはいえない。このことから、観測地点における清澄な大気の光学的厚さと実際の大気のそれとの比としてLinkeの混濁係数 $T_L$ が定義された<sup>(8)</sup>。

$$T_L = 1 + \frac{K_a + K_g}{(b/b_0)K_R} \quad (13)$$

Rayleigh散乱による大気の光学的厚さ $K_R$ は、太陽高度が同じ

でも気圧によって変化するので、これを標準気圧 $b_0=1013\text{hPa}$ に標準化したものがFeussner-Duboisの混濁係数 $T_{FD}$ である<sup>(8)</sup>。

$$T_{FD} = 1 + \frac{K_a + K_g}{K_{R0}} = 1 + (T_L - 1) \frac{(b/b_0)K_R}{K_{R0}} \quad (14)$$

ここで、 $K_{R0}$ は、標準気圧( $b=b_0$ )におけるRayleigh散乱による大気の光学的厚さである。

ここでは、先に得られた $P_{\text{tr}}$ から $T_{FD}$ を評価したが、その際、 $K_R$ と $K_{R0}$ の計算には気象庁が採用する方法、すなわち、浅野らの方法を採った<sup>(7), (8)</sup>。

図2には、根室を例にあげ、直達日射量の観測から得られている $T_{FD}$ <sup>(2)</sup>と全天日射量<sup>(1), (2)</sup>から得たものとの多年にわたる推移を比較しながら示した。図の各点はデータが得られた1日ごとの値であり、連続してはいない。前者による $T_{FD}$ は正午の瞬間値であるのに対し、後者によるそれは正午を含む1時間の平均値である。それにより両者間にある程度の不一致が生まれることも考えられるが、図の $T_{FD}$ の推移は両者間で概ね一致している。このことは、検討した他の二三の観測地点についても、 $T_{FD}$ の大小に関係なく同様であった。

以上の比較的清澄な大気をもつと考えられる根室の例に加え、大都会の大気環境をもつ東京<sup>(1), (2)</sup>をも同様に挙げ、両地域における $T_{FD}$ の推移について比較した。東京における全天日射量から推定した $T_{FD}$ の推移を図3に示す。両地域ともに $T_{FD}$ の季節的変動の特徴、すなわち冬期に低く、夏期に高くなる推移は同じであるが、その変動の幅は明らかに異なる。その幅は、根室では

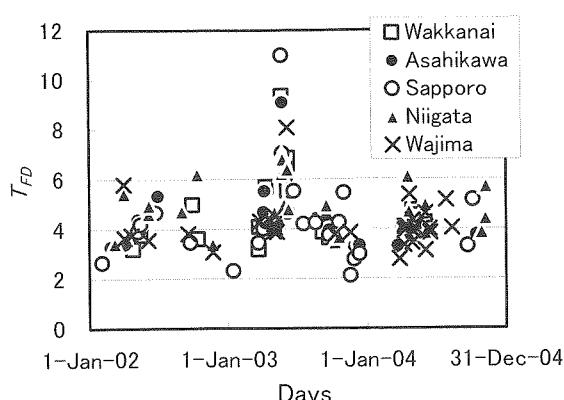


Fig. 4 The outstanding values of  $T_{FD}$  which might be caused by the forest fire in Siberia.

大略2から6前後、東京では1990年代は4あるいは3から10前後であった。その後、2000年代に入って3から8、さらに2007年以降は3から7前後へと変化していることがわかる。

東京における $T_{FD}$ の季節的変動幅の減少とともに、 $T_{FD}$ 自体の年を追っての低下傾向も認められ、この点は注目すべきことといえよう。根室においても、特に1992年頃から2000年頃にかけて $T_{FD}$ は低下傾向を示しているが、同様な傾向が他の地域、例えば土佐清水などにおいても認められる。これについては1991年6月のピナツボ山（フィリピン）噴火の影響とその後の推移を考えられよう。この噴火の大気への影響、例えば噴火前と比べたエーロゾル中の高いイオウ濃度は数年にもおよんだ<sup>(20)</sup>。

$T_{FD}$ の変化に関して、それがごく一時的に異常に高い値を示した例を図4に示す。これは2003年5月に発生したとされるベラルニアの森林火災の影響<sup>(21), (22)</sup>とみられ、特に北海道で顕著であったことがわかる。このように $T_{FD}$ の時間的、地域的広がりがある程度まで把握できたことは興味深い。

## 6. 結言

全天日射量を予測する推定式や観測された全天日射量をその構成成分に分離する直散分離式が多く提出されている。気象庁の公表する全国10観測地点の全天日射量や直達日射量観測データを活用して、これらの式の有効性を検証した。また、これらの観測地点における晴天日の直達日射量の観測から年間を通じて得られている正午の大気透過率を収集し、これらと1時間積算全天日射量から以上の推定式や直散分離式を用いて得た大気透過率とを比較した。

多くの日射量推定式や直散分離式のうち、従来、ほとんど使用されることのなかった(9)式を検討し、式中の未知定数を定めて示した(12)式が、日射量の推定や大気透過率の評価に対して極めて有効であることを確認した。

この式を活用することにより、各地の気象台で観測されている1時間積算全天日射量のうち、雲量ゼロと推定される場合の

日射量から大気透過率を評価した。さらにこれから混濁係数を得て、地域の大気環境の把握を試みたが、混濁係数の季節的変化や地域差、そしてその長期にわたる変化、さらには森林火災などの一時的な混濁係数の変化に対して、以上の全天日射量から得られた大気の光消散因子が有効であると考察された。

## 参考文献

- (1) 気象庁、気象統計情報、<http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>.
- (2) 気象庁、1998-2007、気象庁年報(CD-ROM)1998年版-2007年版、気象庁。
- (3) 気象庁、2007、気象庁年報(CD-ROM)2007年版、気象庁。
- (4) 三谷雅肆・中村圭三、太陽エネルギー、28-2(2002), 39.
- (5) H. P. Berlage jur., Meteorol. Zeitschr., 45-5(1928), 174.
- (6) K. Ya. Kondratyev, "Radiation in the Atmosphere" (1969), pp. 203-209, pp. 463-465, Academic Press, New York.
- (7) 村井潔三、"太陽エネルギーの分布と測定(柴田和雄・内嶋善兵衛編)" (1987), pp. 13-36, 学会出版センター, 東京。
- (8) 浅野正二・村井潔三・山内豊太郎、研究時報、36-4(1983), 135.
- (9) N. Robinson, "Solar Radiation" (1966), pp. 48-52, Elsevier, Amsterdam.
- (10) 小木曾定彰・齋藤平蔵・松尾 陽、日本建築学会論文報告集, 66-10(1960), 21
- (11) 永田泰彦・沢田康二、日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), (1978), 519.
- (12) D. G. Erbs, S. A. Klein and J. A. Duffie, Solar Energy, 28-4(1982), 293
- (13) K. Ya. Kondratyev, "Radiation in the Atmosphere" (1969), pp. 380-381, Academic Press, New York.
- (14) 渡辺俊行・浦野良美・林徹夫、日本建築学会論文報告集, 330-8(1983), 96
- (15) D. T. Reindl, W. A. Beckman and J. A. Duffie, Solar Energy, 45-1(1990), 1
- (16) J. Chandrasekaran and S. Kumar, Solar Energy, 53-1(1994), 505
- (17) 紙井泰典・近森邦英・丸山利輔、農業土木学会論文集, 183-6(1996), 395
- (18) 稲沼 寛・武田 仁、日本建築学会論文報告集, 575-1(2004), 41
- (19) 宇田川光弘・木村建一、日本建築学会論文報告集, 267-5(1978), 83
- (20) 岩坂泰信・藤原玄夫、"北極圏の大気科学(岩佐泰信編)" (2000), pp. 64-74, 名古屋大学出版会, 名古屋。
- (21) 気象庁、異常気象レポート2005、(2005), pp. 215-216, 気象庁。
- (22) N. Kaneyasu, Y. Igarashi, Y. Sawa, H. Takahashi, H. Takada, H. Kumata, and R. Holler, J. Geophys. Res., 112, D13214, doi:10.1029/2007JD008544 (2007).