

日射量の評価における大気透過率について

The Atmospheric Transmittance on the Estimation of Solar Radiation Energy

三谷 雅肆 *¹
Masashi MITANI

中村 圭三 *²
Keizo NAKAMURA

Abstract

To evaluate the atmospheric transmittance for the estimation of solar radiation energy, the global and the diffuse solar radiations were observed at Mombetsu in Hokkaido, Japan over five years. Daily averaged atmospheric transmittance $P_{t,av}$ calculated from the daily cumulated global solar radiation on fine days is defined. The $P_{t,av}$ is compared with the atmospheric transmittance P calculated by the data of global and diffuse solar radiations at noon. As the result, $P_{t,av}$ and P are agree well except when the solar radiation influence by cloud. The daily averaged transmittance $P_{t,av}$ is considered to be effective for the estimation of the hourly variations of solar radiation energy in fine days.

It is suggested that the extinction coefficient obtained from the daily averaged atmospheric transmittance may be used to examine the aerosol condition in atmosphere.

キーワード： 大気透過率、消散係数、全天日射、直達日射、散乱日射、

Key Words : Atmospheric transmittance, Extinction coefficient, Global radiation, Direct radiation, Diffuse radiation,

1. 緒言

太陽エネルギー利用に関する技術開発の高まりの中で、各地で日射エネルギーの観測がますます重要なものとなっている。日射量の評価にあたり、これを推算するなど、より簡単で信頼的な事前の評価が望まれる。日射に関する研究は古くからなされ、技術的分野においても、比較的簡便な形で日射量を記述^{(1), (2)}したり、またそのための大気の日射に関する条件、例えば大気透過率などが求められたりしている⁽³⁾。

大気透過率は、日射量を評価する際に重要なものとなるが、これは大気の光学的条件によって決まる。大気の条件は時間的にも空間的にも一様とは考えにくく、一般にこれは太陽高度の季節および時刻変化によって影響される。このような条件の下で、例えば大気透過率の日平均値を定義して、1日積算日射量を評価できれば便利である。また、大気透過率は直達日射と大気外日射、すなわち太陽常数との比として定義され、その直接評価は直達日射の観測によるが、快晴日の散乱日射は大気透過率に直接関係付

けられることから、結局、全天日射量から大気透過率を便宜的に評価する方法も考えられる。しかし、このようにして得られる大気透過率の妥当性、すなわちこれが日射量の経時的变化を予測する上で有効であるか、また全天日射量における散乱日射成分の評価において有効であるかなど、検討すべきことは少なくない。

ここでは比較的大気の清浄な北海道オホーツク海沿岸地域に位置する紋別市において、数年間にわたって水平面全天日射量、および散乱日射量を観測し、正午の水平面直達日射量に基づく大気透過率を求める一方、直達日射量や全天日射量の1日積算値に基づく1日平均大気透過率を定義し、それらを比較検討しながら、その平均値の妥当性について検討した。また、これらの大気透過率を用いて、散乱日射量の評価に対する良く知られた推定式の有効性についても検討した。

得られた大気透過率から消散係数を求め、それと大気水蒸気圧や大気エアロゾルとの関係について考察した。

2. 日射、および大気透過率

大気を通過する日射は、Beer-Bouguer-Lambert の法則に従い、地上に到達する法線面の直達日射強度 $I(\lambda)$ は次のように表される^{(4), (5)}。

*1 道都大学教養部教授 (〒094-8582 紋別市落石町7-1)
e-mail : mmitani@dohto.ac.jp

*2 敬愛大学国際学部教授
(原稿受付 : 2001年9月3日)

$$I(\lambda) = H_0(\lambda) \cdot E_0 \cdot \exp\left[-\left\{k_R(\lambda)\frac{P}{P_0} + k_a(\lambda) + k_g(\lambda)\right\}m\right] \quad (1)$$

ここで $H_0(\lambda)$ は波長 λ の大気外日射量, E_0 は太陽-地球間距離の補正係数, P/P_0 は気圧の実際値と標準値(1,013 hPa)の比, また $k_R(\lambda)$, $k_a(\lambda)$, $k_g(\lambda)$ は, それぞれ, 空気分子, エアロゾル, および水蒸気や二酸化炭素等気体分子の光学的厚みを表す因子, m は大気路程である。

通常観測される直達日射量は, (1)式を λ に関して積分したものとなる。実用上は λ の関数である各因子の波長平均を定義し, 法線面の直達日射量 J を次の Bouguer の式で表す^{(1), (2), (6)}。

$$J = J_0 \cdot \exp(-\alpha m) = J_0 P^m \quad (2)$$

ここで J_0 は太陽定数, α は消散係数と呼ばれ, (1)式の大気による光学的厚みを表す因子に対応し, その指數関数の逆数 $\exp(-\alpha)$ が大気透過率 P である。

実際の場合, m に大気の厚みを探り, これを単位として太陽高度が h のときの水平面直達日射量 J_H は次式で表される^{(1), (2)}。

$$J_H = J_0 \cdot P^{1/\sin h} \cdot \sin h \quad (3)$$

この式より特定時刻の h と J_H から P を知ることができる。

(3)式を時角 t に関して 1 日間(t_1 から t_2)にわたって積分すれば, 1 日積算水平面直達日射量 S_{JH} を得る。一般に P は時間に関係するが, この積分で P のかわりに時間に関係しない 1 日平均大気透過率 P_{av} を定義できれば S_{JH} は次式で表される。

$$S_{JH} = J_0 \int_{t_1}^{t_2} P_{av}^{1/\sin h} \cdot \sin h \cdot dt \quad (4)$$

一方, 散乱日射については Berlage の式^{(1), (7)}が, またこれを修正した松尾の式^{(1), (7), (8)}が知られており, それぞれ(5)式と(6)式に示した。

$$D_H = \frac{1}{2} \cdot J_0 \cdot \sin h \frac{1 - P^{1/\sin h}}{1 - 1.4 \cdot \ln P} \quad (5)$$

$$D_H = 1.2 \cdot J_0 \cdot \sin h \frac{(1 - P^{1/\sin h})}{1 - 1.4 \cdot \ln P} (1 - P) \quad (6)$$

水平面全天日射量 T_H は J_H と D_H の和として表される。 T_H を時角 t に関して 1 日にわたって積分すれば, 1 日積算水平面全天日射量 S_{TH} がえられることとなる。ここでも先と同様, この S_{TH} に基づく平均大気透過率 $P_{t,av}$ を定義し, S_{TH} を次のように表すこととする。

$$S_{TH} = \int_{t_1}^{t_2} T_H dt = \int_{t_1}^{t_2} (J_H + D_H) dt, \quad P = P_{t,av} \quad (7)$$

特定時刻の水平面直達日射量と全天日射量の観測から, 前者には(3)式を, 後者には(3)式に(5), あるいは(6)式を

加えた T_H を適用して, その時刻における大気透過率が得られることとなる。ここで, 正午の水平面直達日射量から直接得られた透過率を P , また正午の水平面全天日射量から得られたものを P_t として区別する。すなわち、ここで特に次式で P_t を定義する。

$$T_H = J_H + D_H, \quad P = P_t \quad (8)$$

観測される T_H から P_t を評価する際, D_H に(5)式と(6)式いずれを適用するかにより, それぞれ必要に応じて, $P_{t,Berlage}$, $P_{t,Matuo}$ などと区別することとする。

一方, 1 日積算日射量からは, (4)式, および(7)式により, それぞれ水平面の直達日射量および全天日射量に基づく 1 日平均大気透過率 P_{av} および $P_{t,av}$ を求める。このとき, 数値積分によって, 適する透過率を決定する試行錯誤法が有効と考えられる。 $P_{t,av}$ の評価においても, 適用する D_H の式に応じて, 上と同様の添字を付して区別することとする。

3. 日射の観測, および大気透過率の評価

3.1 日射量の測定

観測は, 大気の清浄な北海道オホーツク海沿岸地域のほぼ中央部に位置する紋別市において, 1994 年 1 月から 1999 年 8 月にかけて水平面全天日射量と散乱日射量を測定することによって行った。全天日射量については, この期間中ほぼ継続して測定したが, 散乱日射量については限られた期間の観測となった。

使用した日射計は, 精密全天日射計(英弘精機(株), MS-801), およびこれに直達日射を遮る遮光バンドを付けたもの, これらを紋別港に近接する建屋 4 階屋上(北緯 44° 21', 東経 143° 21')に並列設置して使用した。この遮蔽バンドの測定値に対する補正係数は, 年間を通じて 1.023 から 1.102 である。また, 全天空面にしめる日射の障壁として, 若干の山嶺があったが, 立体角投射率⁽²⁾は 0.99 度度で日射の算定には無視できる程度であった。観測は, 昼夜を問わず 30 分あるいは 1 時間毎の瞬間の日射量を自動記録することによった。

直達日射量は, 全天日射量と散乱日射量の差から得た。日射量データの解析では, 特に正午の瞬間値と 1 日積算値に注目し, 積算値については, 全天日射量や直達日射量の経時変化を図積分することによって評価した。

3.2 大気透過率の評価

大気透過率の評価に当たり, 快晴時の日射観測が条件となる。ここではこれを気象庁紋別測候所の発表する昼間(9 時, および 15 時)の雲量がゼロであること, および、測定された全天日射量と散乱日射量の経時変化などにより判定した。Fig. 1 にその経時変化の例を季節毎に示した。この条件を満たす日の正午(地方平均太陽時)の水平面直達日射量 J_H から(3)式によって大気透過率 P を求め, ここでこれを標準的なものとした。この際, 太陽定数には

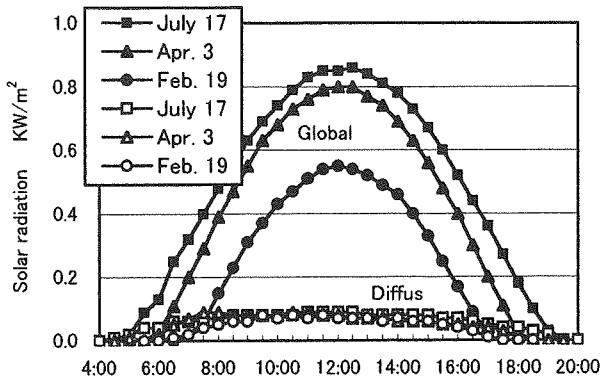
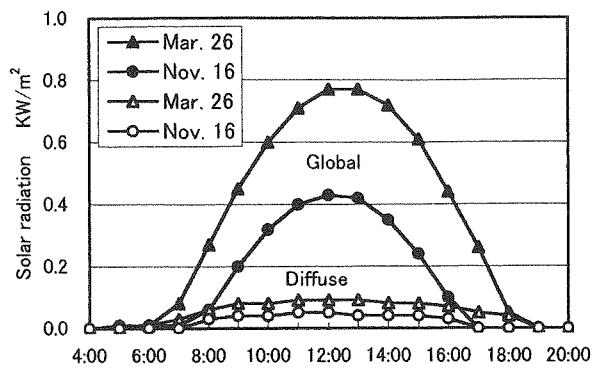


Fig. 1 Examples of the data obtained from the measurement of solar radiation in the study.

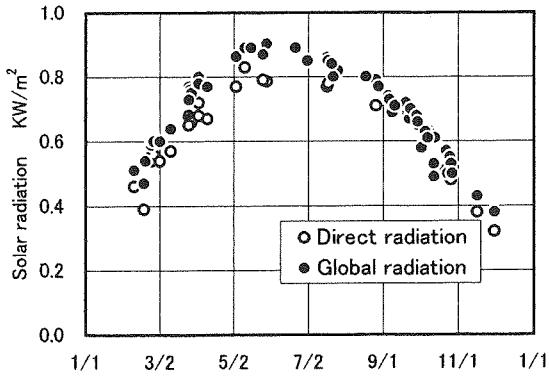


Fig. 2 Annual variations of direct and global radiation energy at noon on horizontal plain.

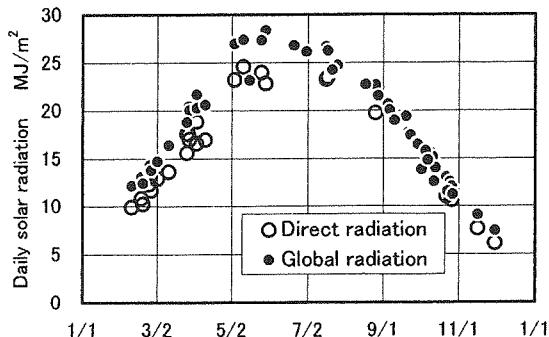


Fig. 3 Annual variations of daily cumulated solar radiation energy on horizontal plain.

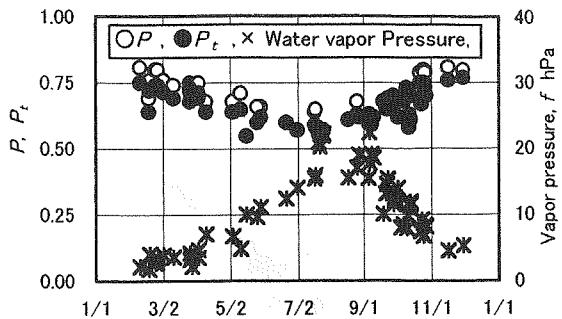


Fig. 4 Annual variations of atmospheric transmittance and humidity.

1981年世界気象機関(WMO)の勧告値、 $J_0 = 1,367 \text{ W/m}^2$ ⁽⁴⁾を採用した。

正午の全天日射量からも(8)式に(5)式、あるいは(6)式を適用し、散乱日射成分にBerlageの式、あるいは松尾の式、それぞれの式に準拠した全天日射量に基づく正午の大気透過率 P_t を得た。

一方、観測される1日積算水平面直達日射量 $S_{H\bar{h}}$ から(4)式で定義した1日平均大気透過率 P_{av} を得るが、このとき(4)式にはシンプソン則による数値積分を行い、積分値が観測値に一致するまで繰り返す試行錯誤法を探った。この数値積分におけるきざみの数を1時間につき4としたが、積分の収束は充分であった。

同様に、1日積算水平面全天日射量 $S_{H\bar{h}}$ に(7)式を適用して $P_{av,t}$ を得るが、この際にも、散乱日射成分に対してBerlageの式、あるいは松尾の式、それに準拠した $P_{av,t}$ が得られることとなる。この場合の積分条件も先と変わることはなかった。

4. 観測結果とその検討

4.1 日射量および大気透過率の年間推移

観測された快晴日の日射量について、直達日射量と全天日射量を正午の瞬間値、および1日積算値に分け、それぞれの季節的変化としてFig. 2とFig. 3に示した。ここには、ほぼ5年間にわたるデータ(全天日射: 59データ、内、直達-散乱成分に分離: 27データ)が含まれるが、年の違いによる日射量の変動は無視し得た。

当然、春・秋分において、水平面全天日射量は年間の平均的な値を示すこととなるが、この地におけるその正午値、および1日積算値は、それぞれ 0.7 KW/m^2 、および 19 MJ/m^2 であり、直達日射量はその90%程度であった。これを挟んで夏至と冬至に至って、全天日射の正午値、および1日積算値で、それぞれ $\pm 30\%$ 、および $\pm 45\%$ 程度まで変動している。

Fig. 4には正午の水平面直達日射量と全天日射量から得た大気透過率、 P および P_t を年間の推移として示した。ここで、全天日射量には(3)式の直達日射量のほか、散乱日射量に対してBerlageの式、(6)式を適応した。ここに

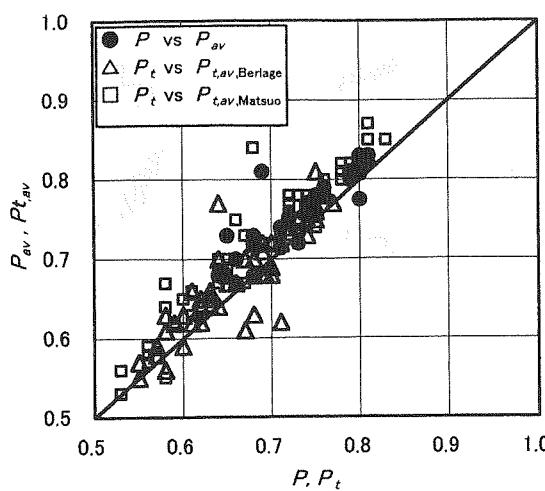


Fig. 5 Comparison between the atmospheric transmittances at noon and daily averaged ones.

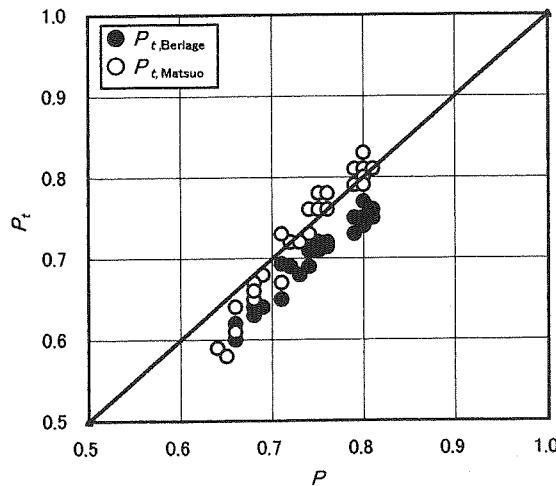


Fig. 6 Comparison of atmospheric transmittance at noon with that estimated from global radiation.

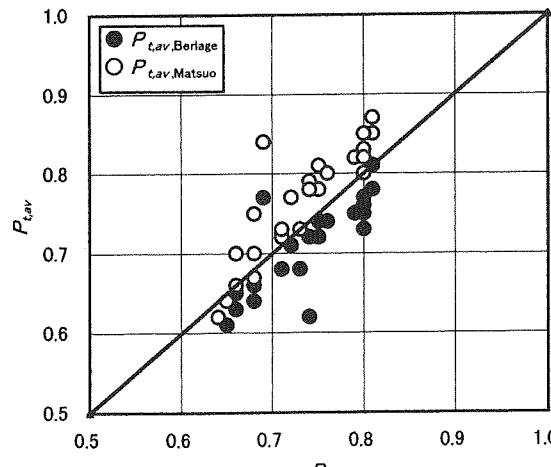


Fig. 7 Comparison of atmospheric transmittance at noon with its averaged value estimated from global radiation.

は、大気の水蒸気圧（紋別測候所観測）も示した。大気透過率と水蒸気圧との年間推移の傾向は対照的なものとなっている。

4.2 大気透過率

4.2.1 大気透過率の正午値と1日平均値

先に1日平均大気透過率を定義したが、これと正午の大気透過率とを、水平面の直達日射量、および全天日射量、それに準拠したもの毎に比較した。ここで正午の大気透過率とは、正午の日射の瞬間値に基づくものである。透過率の正午値と1日平均値との比較は、平均値の特性を知る上で重要であろう。Fig. 5にその比較を示す。

大気透過率は、大気状態の変動のみならず、太陽高度の変化による大気内日射行程の増減にも依存し、その時間的変動が考えられる^{(8), (9)}。しかしながら、全天日射量や直達日射量から得た大気透過率、それぞれについて、それらの1日平均値は、正午値より約5%高い値を探る傾向があるものの、特に季節に関係することなく両者は大略一致しているといえる。一方、直達日射量に基づき評価した大気透過率は年間を通じて0.65～0.82の範囲にあるのに対して、全天日射量から得た透過率はこの範囲を超えており、全天日射と直達日射とから得た大気透過率、両者間の比較は以下に記す。

4.2.2 全天日射、および散乱日射における大気透過率

正午の水平面直達日射量から評価した大気透過率 P を標準的なものとして、これと水平面の全天日射量から得られた大気透過率とを比較検討した。先と同様、全天日射量の散乱日射成分に対しBerlageの式と松尾の式を適用し、全天日射量の評価の観点からこれらの式の妥当性をも比較検討した。

正午の水平面全天日射量とその1日積算値から得た大気透過率 P_t 、および $P_{t,av}$ を P に比較したのが、それぞれ、Fig. 6およびFig. 7である。この場合、 $P_{t,av}$ より P_t の方が P との一致の程度は良好であり、特に、全天日射量における散乱日射成分に松尾の式を適用したものが良好である。 $P_{t,av}$ と P との一致の程度は、散乱日射成分にBerlage式を適用した場合と松尾式を適用した場合とで若干異なり、前者で平均-5%，後者で+5%程度の偏倚がみられる。

4.3 大気透過率による日射量の推定

水平面全天日射量に基づく大気透過率 P_t 、および $P_{t,av}$ の特性について、より一般的な正午の水平面直達日射量に基づく大気透過率 P と比較しながら検討してきたが、ここではより直接に、 P_t 、および $P_{t,av}$ を用いて日射量を評価し、これらの有効性について検討する。

水平面の直達日射量、および散乱日射量の実測値と計算値を、正午値と1日積算値にわけて比較したものが、それぞれ、Fig. 8とFig. 9である。正午値の計算には P_t を用い、1日積算値の計算値には $P_{t,av}$ を用いた。散乱日射量の推算にBerlage式と松尾の式を使用し、日射量評価に關

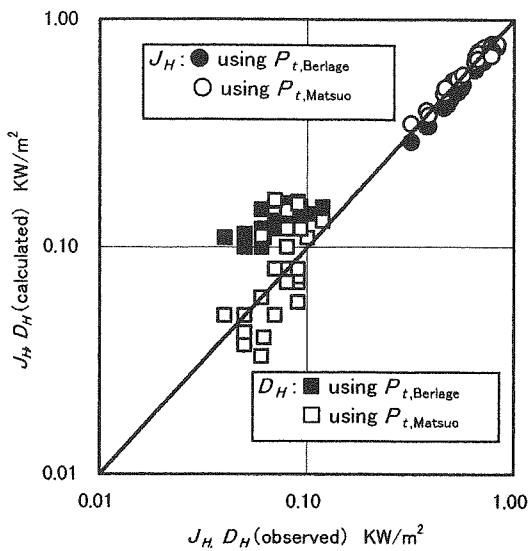


Fig. 8 Comparison between observed and calculated values of solar radiation energy about the direct and diffuse radiations.

して両式を比較した。

これらの図が示すように、日射の正午値、および1日積算値の実測値と計算値との一致の程度に顕著な違いは認められない。すなわち、直達日射量に関しては、正午値、積算値とともに実測値と計算値はよく一致し、しかも大気透過率に $P_{t, \text{Berlage}}$, $P_{t, \text{av}, \text{Berlage}}$ 、および、 $P_{t, \text{Matsuo}}$, $P_{t, \text{av}, \text{Matsuo}}$ 、いずれを探るかに關係なく一致している。また、散乱日射量に関しては、正午値、積算値とともに、ややデータのばらつきが目立つものの、松尾の式を採用して得た $P_{t, \text{Matsuo}}$, $P_{t, \text{av}, \text{Matsuo}}$ 、による計算値が実測値に一致する傾向を示している。散乱日射におけるデータのばらつきは、散乱日射量に比べほぼ10倍にも及ぶ全天日射量を基準にした大気透過率を使用した計算精度の問題と考えられる。

P_t 、および $P_{t, \text{av}}$ の日射量推算に対する有効性をみてきたが、なお日射量の経時変化の予知についての検討が必要である。以下には日射量の大きく異なる夏期と冬期の代表的な快晴日を選び、それぞれ Fig. 10 に示すように、全天、直達、および散乱の各日射量の経時変化について、実測値と計算結果とを比較した。この計算における散乱日射量の評価には松尾の式を採用した。

これらの図より、各日射量の計算結果は実測値に概ね一致しているといえるが、特に、計算結果は、全天日射量の1日積算値に基づく $P_{t, \text{av}}$ を採っていること、および計算値の実測結果からの偏倚が全体を通してほぼ同程度であることに注目したい。一般に日の出や日没近くの大気透過率は、他の時間帯での値に比べて相当異なるものと考えられる。しかしながら、太陽高度の小さい時間帯における極度に少ない日射量のため、結果としてこの時間帯における計算結果の誤差は、問題とはならなかつたものと考えられる。

4.4 大気透過率と消散係数

大気透過率から(2)式の消散係数 α が得られる。先に記

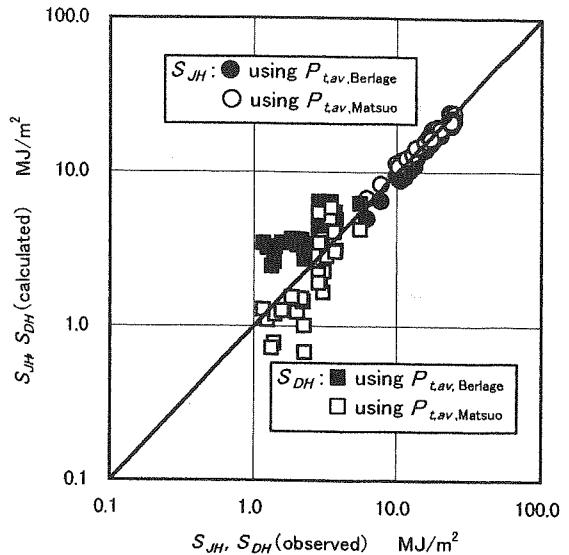


Fig. 9 Comparison between observed and calculated values of daily cumulated solar radiation energy about the direct and diffuse radiations.

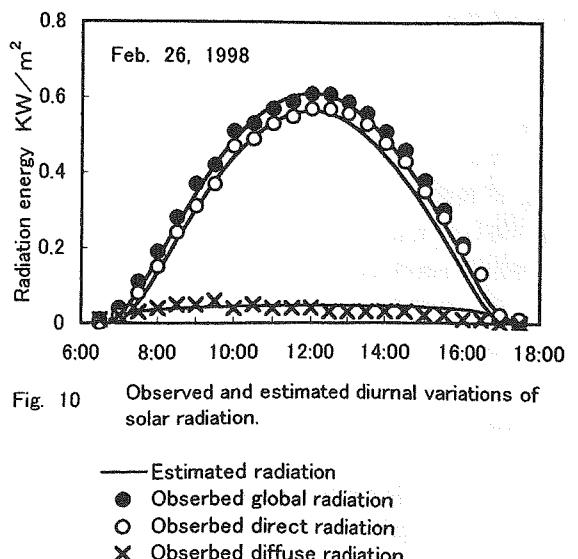
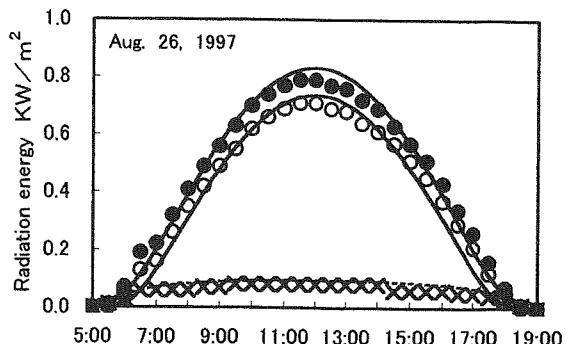


Fig. 10 Observed and estimated diurnal variations of solar radiation.

- Estimated radiation
- Observed global radiation
- Observed direct radiation
- × Observed diffuse radiation

したように、これは大気中の空気分子、エアロゾル、および、水蒸気や二酸化炭素等気体分子、それぞれによる大気の光学的厚みを表す因子、 $k_R(\lambda)$, $k_a(\lambda)$, $k_g(\lambda)$ に關係

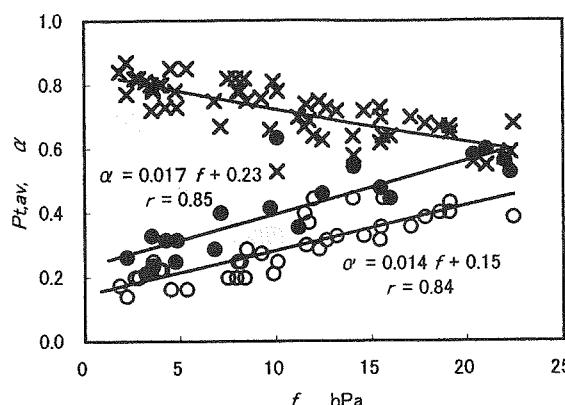


Fig. 11 $P_{t,av}$ and α as a function of water vapor pressure, f in atmosphere.

× $P_{t,av}$
● α (late in Mar. to late in July)
○ α (early in Aug. to middle of Mar.)

する。これらの因子に対して、それぞれ波長 λ の全範囲にわたる平均値, K_R , K_a , K_g が定義できれば、(1)式の λ に関する積分結果から、 α は次のようになる⁽⁶⁾。ただし、 p/p_0 は 1, $H_0(\lambda) \cdot E_0$ の λ に関する平均を J_0 とする。

$$\alpha = K_R + K_a + K_g \quad (9)$$

Fig. 11 には観測で得られた $P_{t,av}$ のほか、それに基づく α を大気の水蒸気圧 f との関係として示した。すなわち、 K_g の代わりに f を用いて、 α に (9) 式を適応した。 $P_{t,av}$ 、あるいは α と f との間に有意の関係が認められるが、特に f 対 α の関係で示したように、1年を大きく二つに分けた期間、すなわち、3月下旬から7月下旬、および8月上旬から3月中旬、それぞれの期間に応じて、 α 軸切片の異なる直線関係（相関係数 $r = 0.85$ および 0.84 ）が得られた。(9)式において、この切片は K_R と K_a に対応する。この地での大気からの沈着イオン種の観測により、前者の期間、特に4月から6月にかけて月間の土壤成分に起因するカルシウムイオンの沈着が $30 \sim 40 \text{ mg/m}^2$ 、後者の期間では 10 mg/m^2 前後となり、春期から初夏にかけて土壤成分の沈着が著しく増加することが確認されている⁽¹⁰⁾。上記の α の季節的特徴がこのことによるものか明確ではないが、 α が大気エアロゾルに関係することから興味ある結果と思われる。

5. 結言

北海道オホーツク海沿岸地域に位置する紋別市において、数年間にわたり、特に大気透過率に注目して、水平面

での日射の観測を行った。正午の水平面直達日射量から大気透過率 P を求める一方、1日積算水平面直達日射量に基づく1日平均大気透過率 $P_{t,av}$ を定義し、これらを比較した結果、両者間に良好な一致が認められた。水平面の全天日射量についても、その正午値と1日積算値とにに基づく大気透過率、 P_p と $P_{t,av}$ は互いによく一致した。この際、日射の散乱日射成分に対して Berlage の式のほか、これの修正式である松尾の式を採用した。一方、 P を基準にして、これと P_p や $P_{t,av}$ とを比較した結果、 $P_{t,av}$ に幾分ばらつきがみられるものの、これらは基準値と概ね一致した。

P_p と $P_{t,av}$ を用いて算出した水平面直達日射量と散乱日射量を、それらの実測値と比較した結果、直達日射量については、計算値と実測値との一致は良好であったが、散乱日射量については、Berlage の式による計算値は、松尾の式によるものに比べ、実測値から偏倚する傾向が大きかった。特に、散乱日射量の低下に伴い計算値の実測値からの偏倚が増す傾向にあった。

$P_{t,av}$ を用いて水平面の直達日射量、および散乱日射量の1日の経時変化を算出し、その実測結果と比較した。計算結果は実測値に概ね一致し、 $P_{t,av}$ は日射の経時変化を大略予測する上で有効であることが確認された。

$P_{t,av}$ を消散係数 α に変換して、これと大気の水蒸気圧との関係を求ることによって、地域の日射に対する大気条件をある程度まで把握することの可能性が示唆された。

文献

- 空気調和・衛生工学会、空気調和・衛生工学便覧第11版、II巻(1987)、68-70、オーム社、東京。
- 日本建築学会、建築学便覧第2版、I巻計画(1980)、1099-1101、丸善、東京。
- 国立天文台、理科年表、第74冊(2001)、265、丸善、東京。
- 柴田和雄・内嶋善兵衛編、太陽エネルギーの分布と測定(1987)、20、学会出版センター、東京。
- 浅野正二・村井潔三・山内豊太郎、研究時報、35-4(1983)、135。
- 藤本文彦、研究時報、24-4(1972)、113。
- 田中 授、太陽エネルギー、9-4(1983)、20。
- 小木曾定彰・斎藤平蔵・松尾 陽、日本建築学会論文報告集、66-10(1960)、21
- 斎藤平蔵、建築気候(1974)、134-135、共立出版、東京。
- 三谷雅肆・野口 和泉・横平 弘、日本化学会誌、2000-5(2000)、347。