

全天日射量から評価した見かけの大気透過率について

—日本における最近50余年のその推移からの考察—

中村圭三*・三谷雅肆**

要旨

月平均全天日射量（日積算値）の日照率への回帰式から、雲のない状態での月平均全天日射量を予測し、これから見かけの大気透過率を求めた。特に、日本列島の5地域、47地点における全天日射量データを用いて、1961年から2012年にわたる見かけの大気透過率の推移を求め、それが日射に関する世界的傾向と類似する点や、その推移と気温日較差や大気水蒸気圧などの推移との関係を確認するなかで、この見かけの透過率の特性について考察した。

1. はじめに

日射量は、長い期間にわたり変動しており（Wild 2012）、その知見は地球温暖化等の理解に重要である。日射量を決定づける大気の光学的因子として大気透過率がある。これは一般に直達日射の観測から得られるが、その際、雲による日射の遮蔽を避けるため、観測は限られた日時のものとなる。

大気外日射量に対する全天日射量の割合と日照率との間に、相関性の高い回帰式が成立する（Black *et al.* 1954；Glover and McCulloch 1958）。これは、一般には全天日射量の推定に活用される。全天日射量の観測は比較的容易であり、また、より広く実施されていることから、逆にこの回帰式を用いて全天日射量から透過率を得て、それによる大気環境の評価も考えられる。このとき、日射の観測は天候に関係なく連日のものとなり、その評価はより平均的なものとなろう。なお、このとき得られる透過率は、見かけの大気透過率（Glover and McCulloch 1958）、あるいは実効大気透過率（村井・山内 1975）と呼ばれ、直達日射から得られるものと区別される。

本研究では、この月平均全天日射量の回帰式から見かけの大気透過率を得て、その50余年の推移などを検討するなかで、見かけの透過率の特性や、その大気環境を評価する指標としての妥当性について検討した。

2. 日射量の日照時間への回帰式

水平面全天日射量の日照率への回帰式（Glover and McCulloch 1958）は、次のように表される。

$$Q_n/Q_{n0} = a + b \cdot n/N \quad (1)$$

ここで、 Q_n と Q_{n0} は、それぞれ、月平均の水平面全天日射量（日積算値）と大気外水平面日射量であり、 n と N は、それぞれ、1日当りの月平均日照時間と可照時間である。 a 、 b は回帰係数である。

直達日射量に関しても式(1)と同様、回帰係数 a' 、 b' を用いて、次のように表す。

$$D_n/D_{n0} = a' + b' \cdot n/N \quad (2)$$

ここで、 D_n と D_{n0} は、それぞれ、日射方向に垂直な面への月平均の直達日射量（日積算値）と大気外直達日射量である。

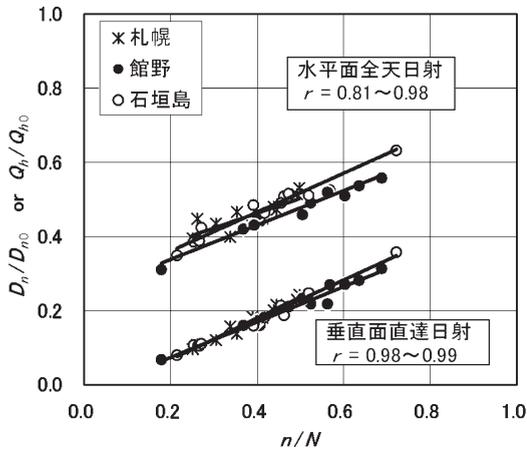
第1図で、2007年の札幌、館野、石垣島を例に、式(1)と式(2)の関係をみた。 Q_n 、 D_n 、 n は、気象庁(2013a,b)の日射データから得た。この図から、 Q_n/Q_{n0} や D_n/D_{n0} は、 n/N との間に極めて高い相関性のあることがわかる。また、式(2)の関係をみたとき、 a' は

* (連絡責任著者) 敬愛大学国際学部。
knakamura@u-keiai.ac.jp

** 道都大学名誉教授。

—2013年7月2日受領—

—2014年2月15日受理—



第1図 月平均全天日射量と同直達日射量の日照率への回帰(2007年, r =相関係数).

ほぼゼロとなり,これが直達日射を対象としている点で妥当といえる.

3. 回帰式から大气透過率の評価

大气透過率 A は, 一般に次式で表される.

$$I_{nd}/I_{nd,0} = e^{-\alpha_a m} = A^m \quad (3)$$

ここで, I_{nd} は直達日射量瞬間値, $I_{nd,0}$ は大気外日射量, α_a は消散係数, m はエアマス(直達光の大气路程, 垂直入射路程=1)である.

本研究では, 式(2)から雲量ゼロの条件下での月平均日積算直達日射量 $D_{n,cl}$ を, また, 式(1)から同条件の全天日射量 $Q_{n,cl}$ を, それぞれ推定する. そして, それらの日射量に基づく大气透過率 t_d , および, 見かけの大气透過率 t_g (Glover and McCulloch 1958)を定義し, それらの評価を試みた. すなわち, 式(2)と式(1)の $n/N = 1$ への外挿から, それぞれ, $D_{n,cl}/D_{n0} (=a'+b')$ と $Q_{n,cl}/Q_{n0} (=a+b)$ を得て, 各透過率を評価することとなる. t_d を実測された A と比較することによって, 以上の外挿が有効であることを確認し, そのもとで t_g を評価することとした.

式(3)にならって, t_d を次のように表す.

$$D_{n,cl}/D_{n0} = \bar{I}_{nd}/I_{nd,0} = e^{-\alpha_a m} = t_d^m \quad (4)$$

ここで, \bar{I}_{nd} は直達日射量瞬間値の日平均値である.

一方, t_g は次式で定義される (Glover and McCulloch 1958).

$$Q_{n,cl}/Q_{n0} = t_g^m \quad (5)$$

これは, $Q_{n,cl}$ の m に関する減衰率が $Q_{n,cl}$ に比例すると仮定して得られる. この仮定は, 雲のない条件下での全天日射は, そのかなりの部分を直達成分で占めることに依拠し, この点を留意すべきと考える.

日射観測の位置と日時により, m は異なる値をとる. 先ず, この効果を標準化したい. すなわち, 標高ゼロにおいて $m=1$ とした場合(天頂方向)の t_d が必要となる. ここでは, 次式の大気外水平面日射量で重みをつけた年間平均太陽高度 \bar{h} から年平均のエアマス \bar{m} を得て t_d を評価することとした.

$$\bar{m} = \frac{b}{b_0} \sin \bar{h} = \frac{b}{b_0} \frac{\sum_{year} Q_{h0,day}}{J_0 \sum_{year} N} \quad (6)$$

ここで, 右辺の分子は, 大気外水平面日射量 $Q_{h0,day}$ の年積算量, 分母の J_0 は年平均大気外日射量(太陽常数 $J_0=1,367 \text{ W/m}^2$), $\sum N$ は年間可照時間である. また, b_0 と b は, それぞれ, 標準気圧と観測点の気圧である. 式(5)の m にもこの \bar{m} を適用して t_g を評価することとなる.

4. 日射データと見かけの大气透過率

式(2)の回帰式に基づく t_d と通常の日射量瞬間値から得られる A との比較によって, 回帰式から透過率を得ることの妥当性を検討した.

第2図には, 1981年から2010年の間, 札幌から石垣島まで, 日本列島を縦断する気象庁観測網(1981~2007年9月は札幌, 根室, 秋田, 宮古, 館野, 松本, 輪島, 潮岬, 米子, 土佐清水, 福岡, 鹿児島, 那覇, 石垣島の14地点: 2007年10月~2010年3月は札幌, 館野, 福岡, 石垣島の4地点: 2010年4月以降は, 以上に南鳥島を追加した5地点)で得られた正午の年平均の A (気象庁 1999, 2009, 2010, 2011)と, 同地点で観測された D_n の回帰式に基づく t_d との比較を示した. 同図に示した両者間の二乗平均平方根誤差(RMSE)は0.03~0.04で, 地域間で特に大きな差はなく, 両者は概ね一致した. 結局, 式(2)の $n/N = 1$ への外挿値から $D_{n,cl}$ の推定が可能と考えられた. なお, 同図には先に中村・三谷(2011)が千葉県佐倉市で得た水平面直達日射量の正午の瞬間値と1日積算

値, それぞれに基づく A と t_d との関係をも示した. 両者の一致の程度は良好といえる. 以上のことは, 式 (1) の $n / N = 1$ への外挿値によっても $Q_{n,cl}$ の推定が可能であることを示唆する.

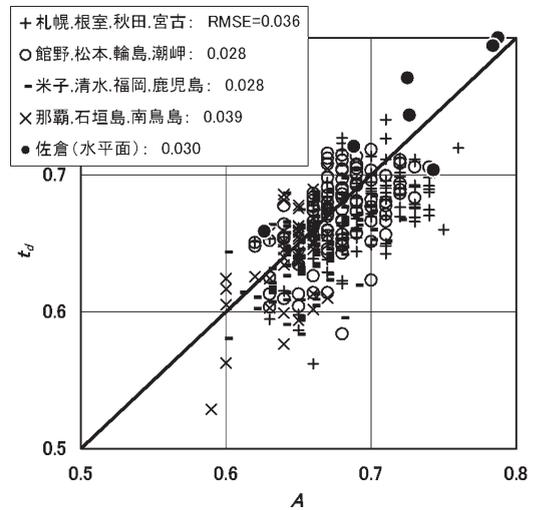
第3図には, 先の14地点の観測網について, 気象庁 (1999, 2009, 2010, 2011) による正午の直達日射量に基づく A , 同じく日射に垂直する面への直達日射量の日積算値 (気象庁 2013b) から得られた t_d , さらに, 以上の14地点 (A , t_d に関する観測地点は, 2007年以降, 札幌, 館野, 福岡, 石垣島の4地点に削減) に加えて計47地点における水平面全天日射量の月平均値 (気象庁 2013a) から得られた t_g , これらの全地点にわたる平均値を経年変化の形で示した. 47地点は次の通りである.

- 沖縄 (4地点) 北緯24~26° : 那覇, 宮古島, 石垣島, 南大東島
- 九州・四国・中国 (12地点) 北緯32~35° : 広島, 米子 (又は松江), 下関, 高松, 高知, 土佐清水, 福岡, 長崎, 熊本, 大分, 宮崎, 鹿児島
- 近畿・中部・関東 (18地点) 北緯33~38° : 前橋, 宇都宮, 館野, 銚子, 東京, 甲府, 松本 (又は長野), 新潟, 高田, 富山, 輪島, 福井, 静岡, 名古屋, 彦根, 舞鶴, 大阪, 潮岬
- 東北 (7地点) 北緯38~41° : 青森, 秋田, 盛岡, 宮古, 仙台, 山形, 福島
- 北海道 (6地点) 北緯42~45° : 稚内, 旭川, 札幌, 帯広, 根室, 函館

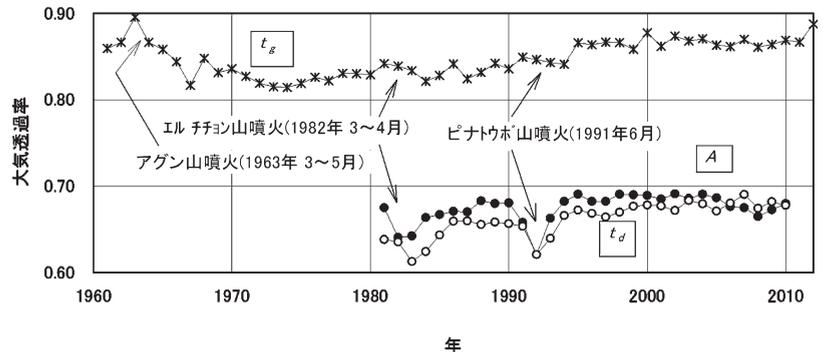
t_d と A は, 共に直達日射量からの評価によるが, 2006年以前では, t_d は, A より 0~6% 小さく, また, それ以降は 0~2% 大きく推移し, 両者は必ずしも単純な一致を示していない. t_d は, 連日の積算日射を対象とするのに対して, A は雲による日射の遮蔽の無い正午の瞬間値のみを対象とし, 観測日時は限られたものとなる. このことや先に記した2007年以降の観測地点の極端な削減が, 以上の t_d と A の推移にいかん影響したか不明である

が, その比較において留意すべき点といえる. すなわち, このような点をも考慮して, t_d と A は, 概ね一致したと考える.

一方, t_g は, t_d や A に比べ20~30%大きくなる. これは, t_g が直達日射のほかに天空日射をも透過光と見なして得られることによる. ここで注目すべきは, A や t_d の経年推移で二つの世界的噴火 (エルチヨン山噴火, およびピナトゥポ山噴火) の影響が明瞭であるのに対し, t_g にはその影響は少ない. これも t_g が火山性エアロゾルによる散乱日射をも透過光と見なして得られたことに起因し, そのエアロゾルで消散された日射のかなりの部分が, 散乱日射として地上に達したことを示している.



第2図 A と t_d との比較 (RMSE: 二乗平均平方根誤差).



第3図 各種の大气透過率の推移 (日本全土の平均).

5. 日本における日射量の変動と大气透過率

5.1 全天日射量の推移と見かけの大气透過率

全天日射量は、世界的には1950年代から80年代にかけていずれの地域でも低下し、その後一部を除き増加に転じ、2000年以降もその長期変動は続いている (Wild 2012)。

日本における t_g の推移は、第3図に示したように、データの入手できた1960年代から低下、1970年中ごろに極小値に達した後、徐々に上昇に転じ、2000年前後からほぼ一定の水準に達している。この推移は、概ね米国や欧州におけるもの (Wild 2012) に類似する。

さらに、日本列島を先の5地域に分け、各地域の t_g と標準化した全天日射量、それぞれの推移を第4図と第5図に示した。透過率の地域差は、1970年代において最も顕著であり、その値は、北海道、東北で高く、近畿、中部、関東で低く、沖縄地域を例外として、透過率に関する地域の人口集中の度合いとの関連が示唆される。80年代に入り、この地域差とその順位を概ね維持しつつ透過率はかなり改善されるが、最近ではその地域差は特に小さい。 t_g は A より大きく、透過率の変化に対して t_g は A に比べその感度の低下が予測されるが、以上の地域差を考えると、特に問題はないと考える。2010年の t_g と A に関する札幌と石垣島の差は、それぞれ、0.03と0.06、同じく札幌と福岡の差は、 t_g , A 共に0.04であった。

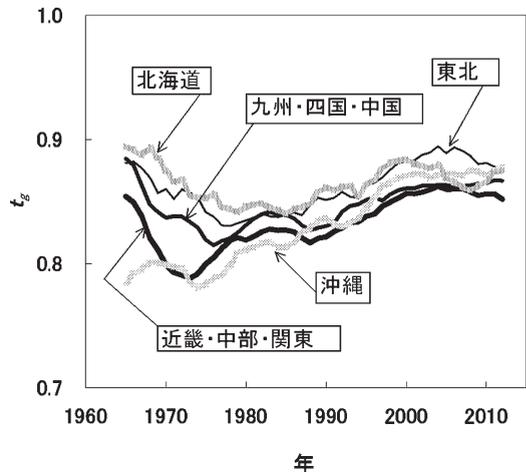
沖縄では透過率や日射量が、1970年前後で比較的低く推移している。この地域の水蒸気圧は、年平均で約23 hPa と他の地域に比べ1.5~2.5倍と高い。日射量への水蒸気とエアロゾルとの相乗的な影響 (中村・三谷 2011) が示唆される。

5.2 日射量変動の影響と見かけの大气透過率

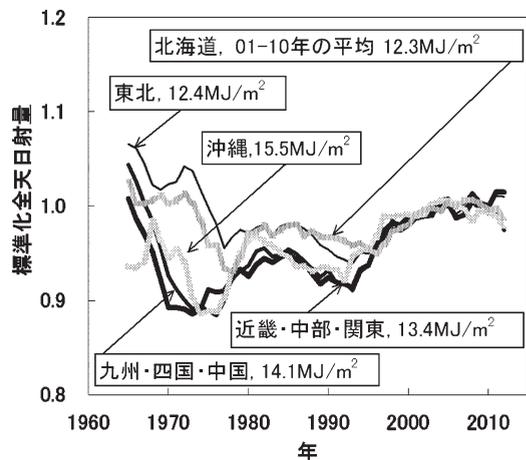
大气透過率の長期的変動は、その気温への影響が重要である。第6図に全国47地点の日平均気温と気温日較差の年平均値を全国平均の推移で示した。気温日較差は1日の日射効果に直接関係し、その経年推移は、日射量の経年推移の指標になる (Wild *et al.* 2007)。比較のため、 t_g と A 、さらには、標準化した全天日射量の全国平均値の推移も同図に示した。

Ohkawara (2012) によれば、日本列島の14地点にわたる A の年平均値は、1930年代から40年代にかけて0.74から0.75に、その後80年代中頃までに0.69まで低下し、2000年に入り0.71に達して安定したとしている。この図の A は、その推移を略記したものである。

Wild *et al.* (2007) は、温室効果ガスによる地球規



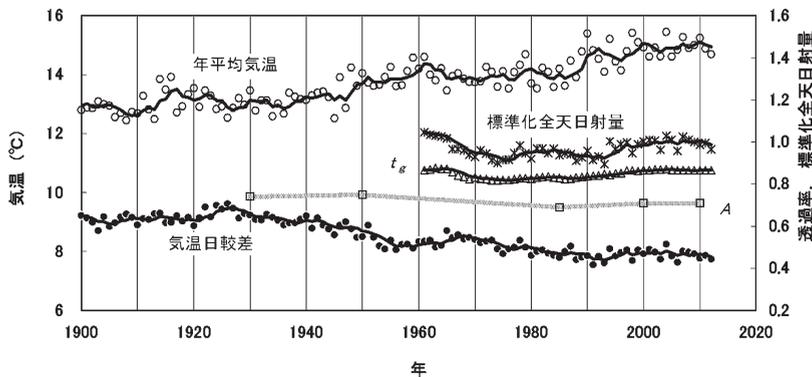
第4図 日本各地域における t_g の推移 (5年移動平均)。



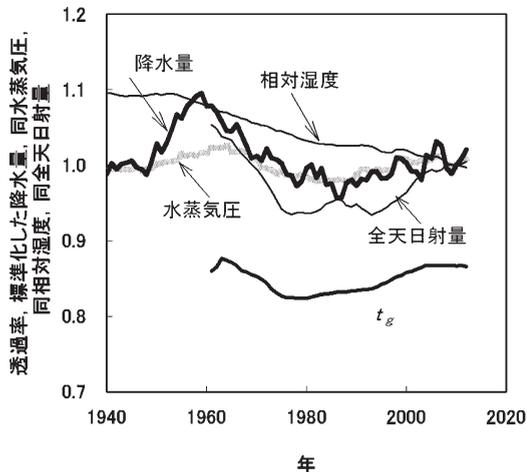
第5図 日本各地域における標準化した全天日射量の推移 (2001~2010年の平均値で標準化, 5年移動平均)。

模の温暖化について、大气汚染による日射量の減少によって温暖化は抑制され、また逆に大気の清浄化による日射量の回復で、その温暖化が促進されたことを示した。第6図からも、70年代の日射量の顕著な減少期間に全国平均気温は上昇せず、若干の低下傾向さえ示したことがわかる。長年にわたって観測されてきた気温日較差の推移は、概ね全天日射量、あるいは見かけの大气透過率の推移に並行する傾向にある。

日射量変動の水循環系への影響も重要である。第7図には、各地の水蒸気圧、降水量、相対湿度、および



第6図 年平均気温、年平均気温日較差、標準化した全天日射量(=日射量/2001~2010年の日射量平均値)、および大气透過率(t_g , A)の推移(Aを除く各推移は4年移動平均)。 A は、Ohkawara(2012)の結果から、その傾向を略記。



第7図 降水量(2001~2010年の平均値で標準化)、水蒸気圧(同)、相対湿度(同)、全天日射量。

全天日射量を、それらの2001年から2010年までの10年間の平均値との比で標準化し、全国47地点の平均値の推移として t_g と共に示した。水蒸気圧は地上値であり、これは可降水量とほぼ比例する(中村・三谷2011)。

この図において、1960年以降、水蒸気圧や降水量は、 t_g とほぼ並行に推移し、それらの全天日射量との関係が示唆される。相対湿度も透過率と相互に関係しようが、 t_g が70年代を境に減少から増加に転じても相対湿度は単調に低下し続けており、両者の関係は単純ではない。

以上のように、 t_g によっても通常の大気透過率と同

様、大気環境の光学的評価が可能と考えられるが、 t_g は式(1)の回帰式からの誘導であり、瞬間値として得られるわけではない。むしろ、一定期間を網羅したより平均的なものとしての特徴を持つ。式(1)の Q_h や Q_{h0} に月平均値を採ったが、これらに旬平均値や日値(Glover and McCulloch 1958)なども考えられ、 t_g に季節や月ごとの平均値を採って、より詳細な大気環境の評価も期待される。

6. まとめ

月平均直達日射量(日積算値)の日照率への回帰式から雲のない日の直達日射量を推測し、これから大気透過率を得た。これは気象庁が公表する直達日射量瞬間値に基づく大気透過率と一致した。同様な方法で月平均全天日射量(日積算値)の日照率への回帰式から、天空日射をも透過光と見なした見かけの大気透過率を評価した。

日本列島の47地点にわたる見かけの透過率を得て、その50余年に及ぶ推移を求めた。それが、大気透過率や全天日射量の長年の変動についての世界的傾向に類似することを確認し、その推移を気温や気温日較差、大気水蒸気圧などの推移と比較した。気温やその日較差、あるいは水蒸気圧の推移は、大気透過率や全天日射量の推移に並行する傾向を示した。

以上のように、見かけの透過率によって大気環境の評価を行ったが、使用した水平面全天日射量データは、その入手が比較的容易である上に、年間を網羅するものであることから、この方法を、年間のより平均的な大気環境に対するより簡単な評価法と考える。

参考文献

Black, J. N., C. W. Bonython and J. A. Prescott, 1954: Solar radiation and the duration of sunshine. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 80, 231-235.
 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. Meteor. Soc.*, **84**, 56-60.
- 気象庁, 1999: 直達日射(1)(1981-1998). 気象庁年報 (CD-ROM), 1998年版, surftxt (1998,RADIAT), 気象業務支援センター.
- 気象庁, 2009: Direct solar radiation(1) (1996 - 2008). 気象庁年報 (CD-ROM), 2008年版, correct year (radiat), 気象業務支援センター.
- 気象庁, 2010: 直達日射(1)(2009). 気象庁年報 (CD-ROM), 2009年版, radiat, 気象業務支援センター.
- 気象庁, 2011: 直達日射(1)(2010). 気象庁年報 (CD-ROM), 2010年版, radiat, 気象業務支援センター.
- 気象庁, 2013a: 気象統計情報 | 過去の気象データ検索. <http://www.jma.go.jp/jma/index.html> (2013.1.21閲覧).
- 気象庁, 2013b: 気象統計情報 | 地球環境・気候 | 日射・赤外放射. <http://www.jma.go.jp/jma/index.html> (2013.1.21閲覧).
- 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大气透過率について. *天気*, **22**, 557-562.
- 中村圭三, 三谷雅肆 2011: 関東地方における大气混濁係数の推移について—全天日射量からの評価の試み—. *天気*, **58**, 855-864.
- Ohkawara, N., 2012: Long-term variations of atmospheric transmittance from pyrhelimeter measurements. 12th BSRN Science and Review and Workshop (1 Aug. 2012, Potsdam), http://www.gewex.org/BSRN/BSRN-12_presentations/Ohkawara_WedM.pdf. (2013.1.21閲覧).
- Wild, M., 2012: Enlightening global dimming and brightening. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 27-37.
- Wild, M., A. Ohmura and K. Makowski, 2007: Impact of global dimming and brightening on global warming. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L04702, doi:10.1029/2006GL028031.

Consideration of the Apparent Atmospheric Transmittance
Obtained from the Global Solar Radiation
—Study of Its Change for about Fifty Years from 1961 in Japan—

Keizo NAKAMURA* and Masashi MITANI**

* (Corresponding author) Faculty of International Studies, Keiai University, Anagawa 1-5-21, Inage-ku, Chiba, 263-8588, Japan.

** Honorary Professor, Dohto University, Nakanosawa 149, Kitahiroshima, 061-1196, Japan.

(Received 2 July 2013; Accepted 15 February 2014)
