

大気透過率の長期変動とその最近の傾向*

中村 圭三^{*1}・三谷 雅肆^{*2}

1. はじめに

大気系における日射エネルギーの収支に大気エアロゾルの関わりは大きい。すなわち、エアロゾルは、直接、間接、日射量に影響するが、エアロゾルは自然起源、人為起源と多種多様であり、それによって日射過程は極めて複雑なものとなる。日射量の継続的観測は重要であり、限られた領域ではあるが、世界各地でかなりの期間、実施されてきている。

1950年代から1980年代にかけての日射量は、欧米、日本、中国等において減少傾向を示し、その後上昇に転じて2000年を境に欧米ではなお上昇、日本では一定水準を維持、中国ではなお減少するといった日射の長期変動が報告されている (Wild 2012)。いわゆる、「地球の暗化と明化」(Global Dimming and Brightening) (Wild *et al.* 2005, 2012; Wild 2007) の問題である。

この日射量の長期変動には、日射エネルギーの消散に関わる人為起源の気体成分や、1次粒子のほか2次粒子としての人為的エアロゾルに起因するところが大きく、これは特定域圏内における産業活動や経済状況、そしてまた国家の環境政策などにも関係するものとなる (Wild 2009)。このように時代を追った大気の日射特性の変化が注目されるが、最近ではその詳細も解析されて、以上の日射の長期変動をエアロゾルの光学的厚さのほか、一次散乱アルベド等の光学特性因子による把握 (Kudo *et al.* 2012) や、その変動の長

期予測の研究 (Haywood *et al.* 2011) も行われている。

そんな中、より簡単、かつ長期継続的に大気の光学的特性を追跡することは極めて重要である。気象庁 (2018a) は、選定された日本国内5地点にて連日1時間毎の直達日射量 (1時間値) を観測し、その結果を公表している。ここでは、年平均大気透過率を評価する方法を新たに導入し、これらのデータを活用した1981年以来の透過率の推移を調査し、特にその最近の傾向を確認したので報告する。

2. 年平均大気透過率の評価

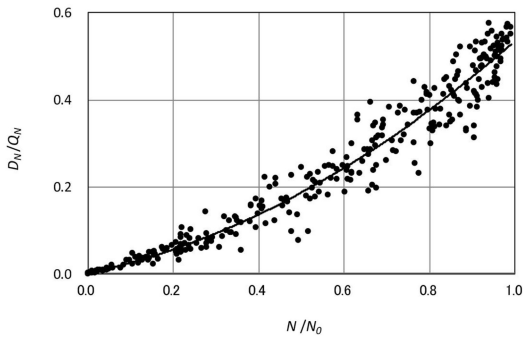
Glover and McCulloch (1958) は、地上の水平面全天日射量日値 G_H の大気外水平面日射量日値 Q_H に対する割合 G_H/Q_H と日照率 (=日照時間 N /可照時間 N_0) との1次の関係を得て、その $N/N_0 = 1$ における G_H/Q_H から雲の無い日の水平面全天日射量日値 G_{H0} を推定し、見かけの大気透過率を得た。ここで、日射量や日照時間は、日々の値のほかその旬間、あるいは月間平均値 (日値) なども含まれる。村井・山内 (1975)、中村・三谷 (2014) は、この方法により日本における見かけの透過率を検討している。ここでは、同様の方法を地上の垂直面直達日射量日値 D_N に適用して、大気透過率 P に関する終日、年間を通しての平均値 \bar{P}_y を定義し、これを求めることとした。

垂直面への大気外日射量日値 Q_N から、まず、1年にわたる D_N/Q_N と N/N_0 との関係性を調査した。その一例を第1図に示す。上記の Glover and McCulloch (1958) の関係では、日射量は、 N/N_0 の1次の関係で表されたが、第1図の D_N/Q_N 対 N/N_0 の関係は、緩やかな曲線を描いている。データが1年間にわたるものだけでなく、1か月間のものについても同様の傾向にあった。この D_N/Q_N を N/N_0 の1次式のほか、2

* The Long-term Variation in the Atmospheric Transmittance in Japan and Its Recent Trend

*1 Keizo NAKAMURA, 敬愛大学名誉教授。
knakamura@u-keiai.ac.jp

*2 Masashi MITANI, 道都大学名誉教授。



第1図 D_N/Q_N と N/N_0 との関係 (2016年, 札幌).

次や3次の多項式,あるいは累乗式によって近似したときの決定係数 R^2 を,それぞれの式について得て比較検討した.その結果,その近似式を N/N_0 の2次と3次の多項式で表示したとき, R^2 は,両者でほとんど差異は無く,0.9前後と比較的高い値を示した.一方,1次式や累乗式の場合, R^2 は,それぞれ0.8や0.7前後となったものの,これらの式の,特に, $N/N_0 = 1$ において, D_N/Q_N の実測値から偏倚する傾向が見られた.以上のことから,ここではこの D_N/Q_N と N/N_0 との関係を次の2次の多項式によって表すこととした.

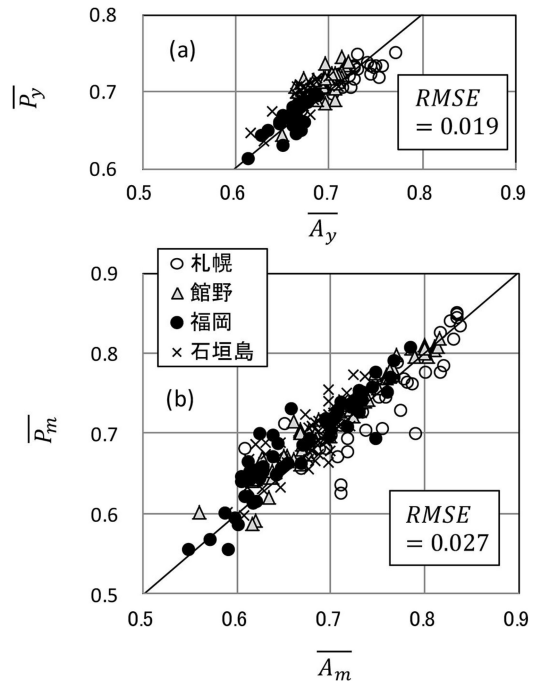
$$\frac{D_N}{Q_N} = a \left(\frac{N}{N_0} \right)^2 + b \left(\frac{N}{N_0} \right) + c \quad (1)$$

ここで, $\overline{P_y}$ のほか終日, 年間にわたる平均エアマス $\overline{m_y}$ を定義して, 雲量が終日ゼロの日, すなわち, $N = N_0$ の場合の $D_N/Q_N = D_{N_0}/Q_N$ を次のように表す.

$$\frac{D_{N_0}}{Q_N} = a + b + c = \frac{\int_{t_1}^{t_2} J_N P^m dt}{\int_{t_1}^{t_2} J_N dt} = \overline{P_y}^{\overline{m_y}} \quad (2)$$

J_N は垂直面への大気外日射量瞬間値, t は時間で t_1, t_2 は, それぞれ, 日の出と日没の各時刻である. なお, 当然ではあるが, $c \approx 0$ を確認した.

いま, 太陽高度 h の終日, および年間を通しての日射量で重みを付けた平均値 $\overline{h_y}$ を定義し, $\overline{m_y}$ を求めよう. 先ず, 年間の日数の順序を i で表し, Q_H の年間総量を次式で表す.



第2図 大気透過率の検証.

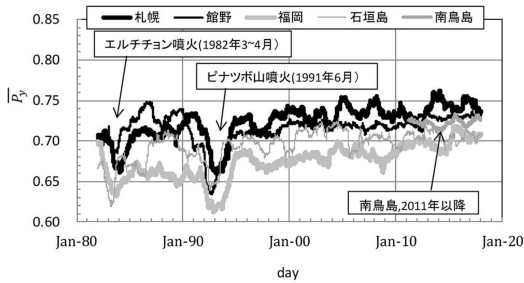
$$\sum_i Q_{H,i} = \sum_i \left(\int_{t_{1,i}}^{t_{2,i}} \sin h_i \cdot J_{N,i} dt \right) = \sin \overline{h_y} \sum_i Q_{N,i} \quad (3)$$

$1/\sin \overline{h_y} = \overline{m_y}$ とおけば, $\overline{m_y}$ は次式で表される.

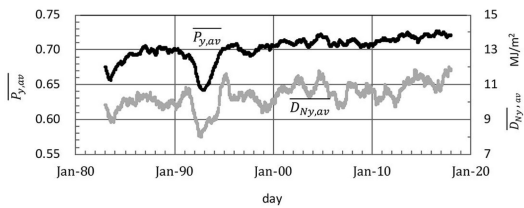
$$\overline{m_y} = \frac{\sum_i Q_{N,i}}{\sum_i Q_{H,i}} \quad (4)$$

結局, 1年にわたる観測値 D_N, N のほか, Q_N, N_0 を算出, これらを式(1)に適用してその係数 a, b, c を得て, 式(2)から $\overline{P_y}$ を得ることとなる.

2010年以前, 気象庁 (1999~2011) によって日本の限られた地点の9, 12, 15時の雲の無い条件下での透過率 (瞬間値) A が測られてきた. データは当然連日のものではなく, 月間, 年間に計測された回数にはばらつきがあるものの, そこで観測された A の年間算術平均値 $\overline{A_y}$ を得て, 上記の方法で評価された $\overline{P_y}$ と比較し, この方法の妥当性を検証することとした. なお, ここで日平均の透過率 $\overline{A_d}$ を得る際, 上記の9, 12, 15時の観測値の全てが得られていることを条件とした. また, 以上の方法を月間の大気透過率 $\overline{P_m}$ にも



第3図 各地の年平均大気透過率の推移。



第4図 4地点(札幌, 館野, 福岡, 石垣島)の年平均値 $\overline{P_{y,av}}$ および $\overline{D_{Ny,av}}$ の推移。

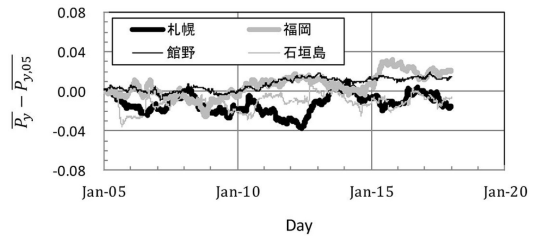
適応し、これについても同様、その瞬間値の月間平均 $\overline{A_m}$ 値と比較検証を行った。その結果を第2図 a, b に、それぞれ、 $\overline{P_y}$ と $\overline{A_y}$ 、および、 $\overline{P_m}$ と $\overline{A_m}$ との対比で示した。同図の評価値に対する RMSE から、 $\overline{P_y}$ は妥当なものと考えた。

以下では、気象庁 (2018a, b) が公表している5地点(札幌, 館野, 福岡, 石垣島, 南鳥島)の連日の D_N と N から $\overline{P_y}$ を得て、日本列島におけるその長期変動について、特に最近の傾向に注目して考察した。

3. 結果と考察

第3図は、 $\overline{P_y}$ の推移を示したものである。横軸の日の $\overline{P_y}$ は、その日付から1年相当日を遡った期間の平均値を示し、得られた推移は、日々の $\overline{P_y}$ の365日移動平均とみなしうる。ここで注目すべきことの1つは、札幌, 館野に比べて福岡の $\overline{P_y}$ は絶えず低く推移している点である。最近、その差は、縮小してはいるものの小さくはなく、鶴野ほか (2017a) が指摘するように、越境大気汚染の影響が示唆される。なお、同図には、推察される2件の大噴火の影響も示した。

第4図は、上記の5地点の内、2010年3月以前のデータが得られていない南鳥島を除く4地点(札幌, 館野, 福岡, 石垣島)、それぞれでの $\overline{P_y}$ を平均して得た透過率 $\overline{P_{y,av}}$ の推移であり、同様に各地点の D_N の年



第5図 $\overline{P_y} - \overline{P_{y,05}}$ ($\overline{P_y}$ の2005年からの偏差) の推移。

間平均値 $\overline{D_{Ny}}$ の4地点にわたる平均値 $\overline{D_{Ny,av}}$ の推移も示した。なお、館野に関して1981年のデータの公表はなく、第4図ではこの年を除くものとなっている。

上記2件の火山噴火による $\overline{D_{Ny,av}}$ や $\overline{P_{y,av}}$ の極端な変動はあるが、1980年代から90年代にかけての日射量の増加傾向や、その後2000年から2010年までに見られる $\overline{P_{y,av}}$ の一定水準の維持が認められ、それらは既に知られているところである (Wild 2012)。

注目すべきは、2010年代に入って $\overline{D_{Ny,av}}$ や $\overline{P_{y,av}}$ の新たな増加傾向が、特に館野や福岡において認められる点である (第3図, 第4図)。これを2005年の年平均透過率 $\overline{P_{y,05}}$ からの偏差、 $\overline{P_y} - \overline{P_{y,05}}$ の推移として第5図に示した。これらから、2010年以降の館野や福岡では、 $\overline{P_y}$ の新たな増加傾向が示唆される。一方、札幌や石垣島におけるその推移は著しく変動し、その傾向は明瞭ではない。なお、この期間の地上年平均水蒸気圧 (気象庁 2018b) を4地点(札幌, 館野, 福岡, 石垣島)にわたって平均した結果は、2001, 2010, 2016年に、それぞれ15, 16, 17 hPa と増加の推移を示し、このことから可降水量の増加の推移も推測される。すなわち、この期間、 $\overline{P_{y,av}}$ に含む大気の水蒸気の効果を除いた混濁係数の低下傾向が示唆され、この点は、気象庁 (2018c) の観測結果 (綾里, 南鳥島, 与那国島での大気混濁係数やエアロゾル光学的厚さ) の推移にも多少は認められ、今後注目したい。

鶴野ほか (2017b) は、特に最近、中国大陸からの越境大気汚染の改善によって、日本列島における $PM_{2.5}$ の濃度の低下が顕著であることを報告しているが、そのことから館野や福岡での傾向は首肯され、 $\overline{P_{y,av}}$ の2010年以降の増加傾向が理解できる。

4. おわりに

気象庁 (2018a) の公表する年間を通しての直達日射量 (日値) と日照率から晴天日 (雲量ゼロ) の年平

均直達日射量を推定し、これにより、札幌、館野、福岡、石垣島における35余年の透過率の推移を得た。「地球の暗化と明化」の観点から、最近の透過率の増減について調査した。その結果、2000年代に安定化したといわれる日射量や大気透過率が、2010年代に入りその再度の上昇傾向が示唆され、今後の観測結果が注目される。

参 考 文 献

- 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.
- Haywood, J. M., N. Bellouin, A. Jones, O. Boucher, M. Wild and K. P. Shine, 2011: The roles of aerosol, water vapor and cloud in future global dimming/brightening. *J. Geophys. Res.*, **116**, D20203, doi: 10.1029/2011JD016000.
- 気象庁, 1999~2011: 気象庁年報 (CD-ROM), 1998年版~2010年版 (各年刊). 気象業務支援センター.
- 気象庁, 2018a: 各種データ・資料, 地球環境・気候, 地球環境・気候の観測・解析データ, 日射・赤外放射に関するデータ集. http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/radiation/data_rad.html (2018.3.1閲覧).
- 気象庁, 2018b: 各種データ・資料, 気象, 気象観測データ, 過去の気象データ検索. <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (2018.3.1閲覧).
- 気象庁, 2018c: 各種データ・資料, 地球環境・気候, 地球環境・気候の長期変化傾向, エアロゾル: 大気混濁係数とエアロゾル光学的厚さの経年変化. http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/aerosolhp/aerosol_shindan.html (2018.3.1閲覧).
- Kudo, R., A. Uchiyama, O. Ijima, N. Ohkawara and S. Ohta, 2012: Aerosol impact on the brightening in Japan. *J. Geophys. Res.*, **117**, D07208, doi:10.1029/2011JD017158.
- 村井潔三, 山内豊太郎, 1975: 日本における全日射量の分布と実効大気透過率について. *天気*, **22**, 557-562.
- 中村圭三, 三谷雅肆, 2014: 全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—. *天気*, **61**, 373-378.
- 鶴野伊津志, 桑原昇平, 王 哲, 板橋秀一, 弓本桂也, 長田和雄, 山本重一, 2017a: ソース・レセプター手法を用いた西日本・日本海沿岸へのPM_{2.5}越境輸送の解析. *エアロゾル研究*, **32**, 188-198.
- 鶴野伊津志, 王 哲, 弓本桂也, 板橋秀一, 長田和雄, 入江仁士, 山本重一, 早崎将光, 菅田誠治, 2017b: PM_{2.5}越境問題は終焉に向かっているのか? *大気環境学会誌*, **52**, 177-184.
- Wild, M., 2009: Global dimming and brightening: A review. *J. Geophys. Res.*, **114**, D00D16, doi:10.1029/2008JD011470.
- Wild, M., 2012: Enlightening global dimming and brightening. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 27-37.
- Wild, M., H. Gilgen, A. Roesch, A. Ohmura, C. N. Long, E. G. Dutton, B. Forgan, A. Kallis, V. Russak and A. Tsvetkov, 2005: From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at earth's surface. *Science*, **308**, 847-850.
- 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.