

回折格子型サンフォトメータ PGS-100 について(第二報)

居島 修*

On the Grating Sunphotometer PGS-100 (Part II)

Osamu IJIMA

要旨

第一報では、干渉フィルター型サンフォトメータとの比較から、回折格子型サンフォトメータの精度を検討した結果、測器定数は2ヵ月半の比較期間において、ほとんど変化がないことが確認された。第二報では、波長ずれの経年変化を調査し、また、回折格子型の350nm～1050nmまでの出力を用いて、直達日射量および可降水量の推定を行った。その結果、波長ずれの調査では、約1年3ヶ月の期間において波長ずれが最大で約3nmあった。直達日射量の推定では、回折格子型サンフォトメータの測器定数と大気外放射照度を用いて、サンフォトメータの測定出力を太陽放射照度に換算し、換算した全測定波長の太陽放射照度を積算して直達日射量を求めた。直達日射計と比較した結果、推定した直達日射量日積算値は直達日射計の約0.7倍であった。また、レーウィンゾンデから求めた可降水量と水蒸気の光学的厚さとの関係を調べた結果、両者の相関は高く、光学的厚さから推定した可降水量は実用上問題ない精度であった。

1. はじめに

第一報では回折格子型サンフォトメータ(プリード製：型番 PGS-100 製造番号 02008 以下、回折格子型という)を2002年12月から2003年2月までの2ヵ月半試験運用し、干渉フィルター型サンフォトメータ(以下、フィルター型という)との比較から、測器定数の経年変化がほとんど見られないことが確認された。また、エーロゾルの光学的厚さの測定についても、フィルター型と同等の精度で測定できることが確認された。しかし、紫外域における出力が小さいという問題点があり、出力の補正方法などを検討する必要があることを報告した(居島：2003)。第二報では、波長ずれの経年変化を調査し、長期安定性について把握するとともに、350nm～1050nmの出力データを用いて直達日射量および可降水量の推定を行ったのでその概要を報告する。

2. 全波長の露光時間補正係数

回折格子型は、太陽光の強度に合わせてできるだけ多くの光を分光器に取り込むため、露光時間を自動的に切り替えて測定しているが、出力の日変化を把握するため

には、それぞれの露光時間で測定した出力を、最小露光時間の5msecで測定したデータとなるように補正する必要がある。第一報では、太陽光を用いて5波長(368, 500, 675, 778, 862nm)について、それぞれの露光時間の出力比(露光時間補正係数)を求めた。太陽光の強度は大気路程によって変化するため、本報告では、ハロゲンランプ(650W)を光源に用いて、350nm～1050nmの連続した露光時間補正係数を求めた。図1に太陽光とハロゲンランプによる露光時間補正係数を示す。ランプと太陽光で求めた露光時間補正係数の誤差は、ほぼ3%以内であった。

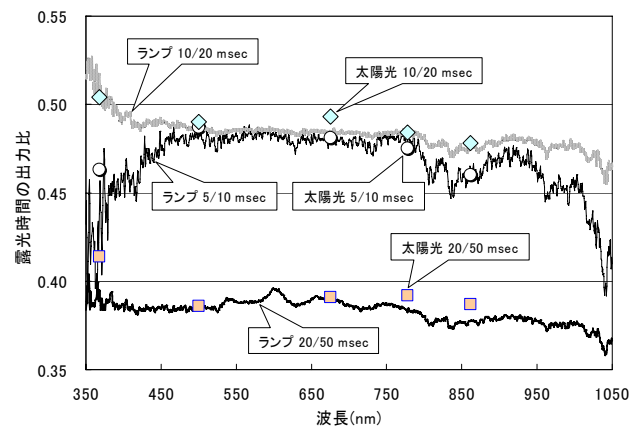


図1 露光時間補正係数

*高層気象台 観測第三課

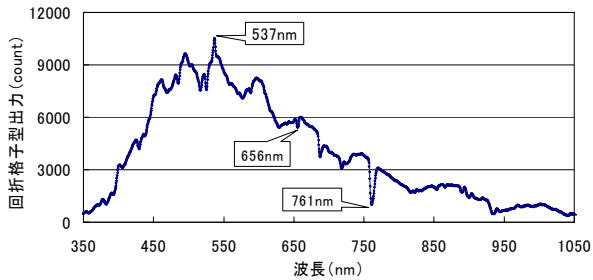


図2 波長ずれを調査した凹凸

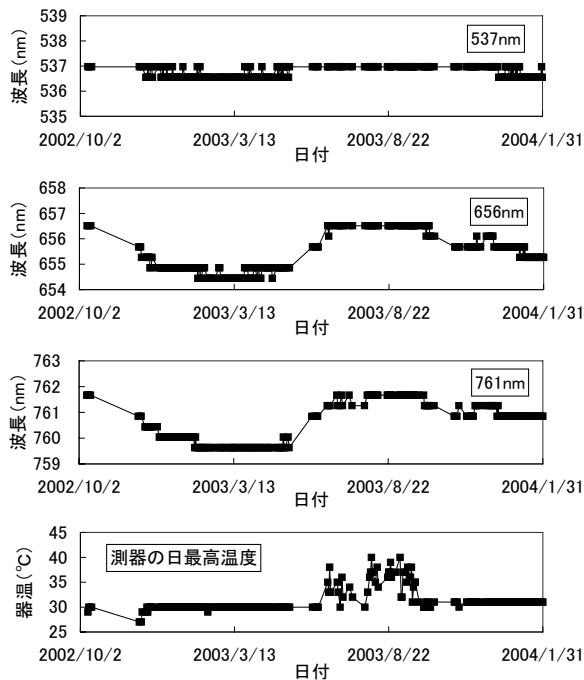
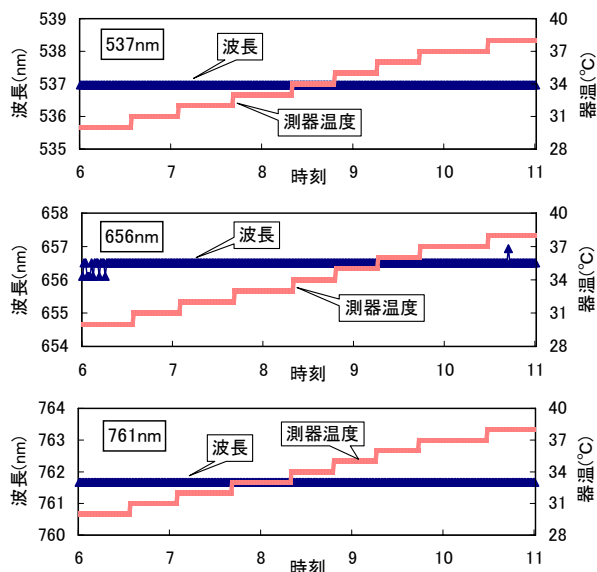


図3 波長ずれの変化および測器温度の季節変化

図4 測器温度の変化に伴う波長の変化
(2003年8月4日 つくば)

3. 波長ずれの調査

3.1 波長ずれの経年変化

回折格子型サンフォトメータの測器温度は、常に 30℃ になるようにヒーターで調整されているが、夏季は外気温および太陽放射の影響で、測器温度は 40℃ まで上昇することがある。測器温度の上昇による光学系への影響を波長ずれの経年変化から調べた。

測定された 350nm～1050nm までの出力には、水蒸気やオゾンの吸収帯に対応して大小いくつもの凹凸があり、調査対象波長として特に凹凸の傾きが大きく、最大または最小出力が明瞭な任意の 3 波長を選択した(図 2)。調査期間は、2002 年 10 月 8 日から 2004 年 1 月 31 日までの約 1 年 3 ヶ月である。調査方法は選択した 3 波長について 1 分毎に凹凸の最大または最小となった波長の回数を積算し、1 日で最も積算回数の多かった波長を、それぞれの凹凸の最大または最小の波長とした。また、雲の多い日などは出力が小さく凹凸が不明瞭なため、直達日射量の日積算値が 5MJ/m² 以上の日だけを抽出して調査した。

なお、2002 年 10 月 18 日から 11 月 29 日までと 2003 年 10 月 15 日から 10 月 29 日までの期間は、本装置のラングレー検定を木曽駒ヶ岳で実施していたため欠測している。また、2003 年 5 月 15 日から 6 月 2 日までは回折格子型の修理のため欠測している。

図 3 に 3 波長付近の最大または最小となった波長の時系列および測器の日最高温度を示す。2002 年 10 月から 11 月の駒ヶ岳でのラングレー検定以降において、537nm 以外は凹凸の最大または最小の波長が最大で約 3nm 小さい方へずれていた。また、2003 年 6 月の測器修理以降は 2002 年 10 月上旬の値にほぼ戻ったが、その後、2003 年 10 月上旬に 537nm を除いて波長は約 1nm 小さい方へずれていた。測器温度が 30℃ を超えていた期間は、2003 年 6 月中旬から 2003 年 9 月中旬までだが、測器温度の季節変化と波長ずれが生じた時期とは一致しなかった。

さらに、測器温度の上昇による光学系への影響を調べるため、測器温度が上昇する夏季の午前中について、測器温度および選択した 3 波長の時間変化を調べた。図 4 に 2003 年 8 月 4 日の測器温度と選択した 3 波長の時系列を示す。午前 6 時から 11 時までの測器温度は、30℃ から 38℃ まで上昇しているが、波長ずれは確認できなかった。

波長ずれが起きた時期は、2002 年 11 月木曽駒ヶ岳からの輸送後、2003 年 6 月修理による輸送後である。10 月上旬の波長ずれが生じた時期は、ランプ点検のため測器を屋内に移動している。以上のことから約 1 年 3 ヶ月の間で生じた波長ずれは、測器温度の影響ではなく、測器輸送時の振動等によって生じた可能性があると考えられる。

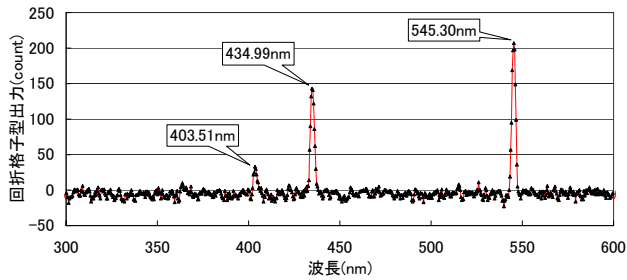


図5 水銀ランプによる波長検定

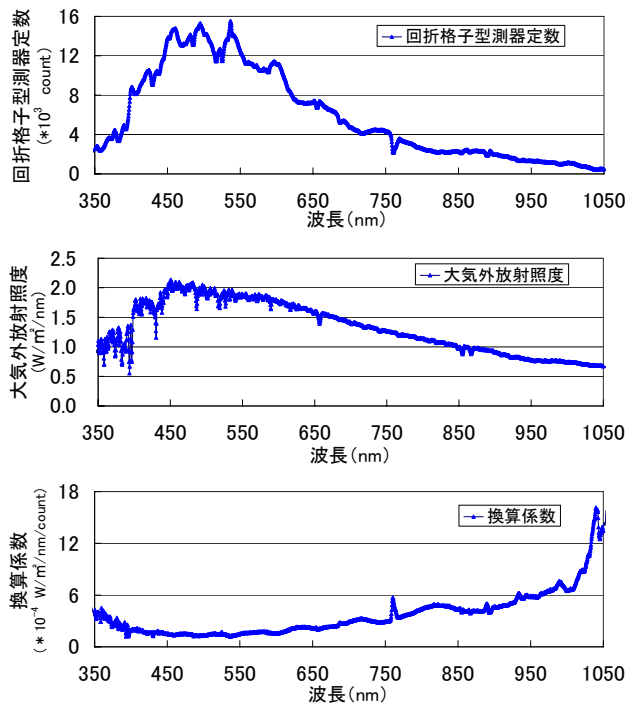


図6 直達日射量の推定に用いた定数および係数
上：回折格子型の測器定数
中：大気外放射照度
下：太陽放射照度への換算係数

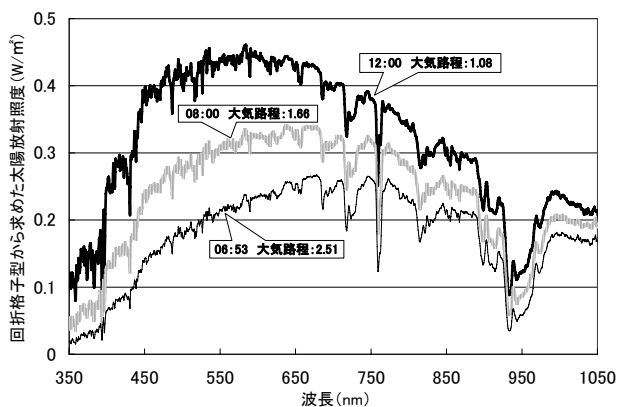


図7 回折格子型から求めた太陽放射照度
(2003年4月28日 つくば)

表1 水銀ランプによる波長点検結果

水銀ランプ基準波長(nm)	435.84	546.07
検定結果(nm)	434.99	545.30
基準と検定との差(nm)	0.85	0.77

3.2 水銀ランプによる波長検定

3.1において波長ずれが確認されたため、2004年2月7日に低圧水銀ランプ(浜松ホトニクス社製:L937-02)を用いて波長検定を行った。水銀ランプによる測定結果を図5に示す。405nm, 436nm, 546nm付近に水銀ランプのスペクトル線がみられる。405nmは出力が小さくノイズの影響で出力が放物線状ではなかったため、436nmおよび546nmのスペクトル線について検定を行った。放物線を4次式で近似し、ピーク値の半分となる2点の波長の平均値を検定値とした。水銀ランプによる測定を4回実施し、平均した結果を表1に示す。水銀ランプの基準波長に比べて回折格子型の波長は、約1nm小さい方へずれていることが分かった。波長ずれは、回折格子型の波長精度である $\pm 0.5\text{nm}$ よりも大きな値であった。

4. 直達日射量の推定

4.1 太陽放射照度への換算

回折格子型はフィルター型とは異なり、350nm～1050nmの波長範囲で約0.5nm毎に出力が得られる。このデータを用いて、回折格子型と直達日射計(Kipp & Zonen製:型番CH-1 製造番号950093)とを比較することにより、回折格子型の感度変化が把握できるかどうかを調査した。

太陽放射照度(WCRP:1986)を回折格子型の測器定数で割った値を換算係数として用いて、回折格子型の出力(count)から太陽放射照度(W/m^2)に換算した。図6に測器定数、大気外放射照度、太陽放射照度への換算係数を示す。また、図7に換算係数を用いて回折格子型の出力を太陽放射照度に換算した測定例を示す。

4.2 直達日射計との比較

回折格子型の出力を太陽放射照度に換算し、全測定波長(350nm～1050nm)の積算値を回折格子型の直達日射量とした。図8に回折格子型から求めた直達日射量日積算値と直達日射計の日積算値との比較結果を示す。比較データは1日の日照時間が1時間以上の日を選択した。回折格子型から求めた直達日射量日積算値は直達日射計の0.671倍(危険率5%: ± 0.003 倍)であった。回折格子型から求めた直達日射量が小さくなった要因として、直達日射計は太陽放射のほぼ全波長(200nm～ $4\mu\text{m}$)を測定しているのに対して、回折格子型は測定する波長範囲が350nm

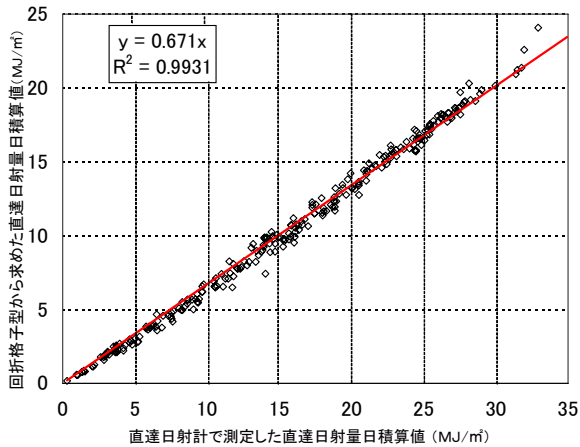


図8 直達日射計との比較

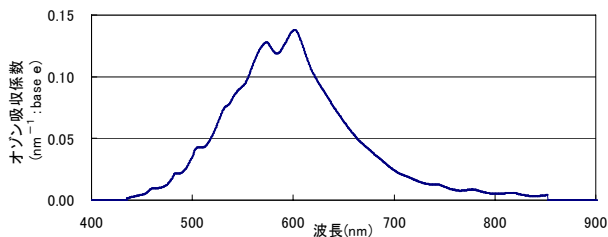


図9 計算に用いたオゾン吸収係数

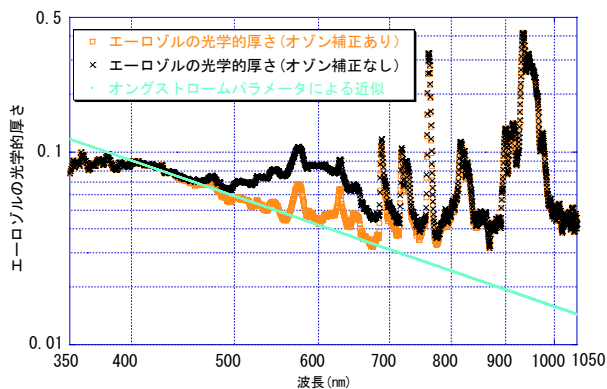
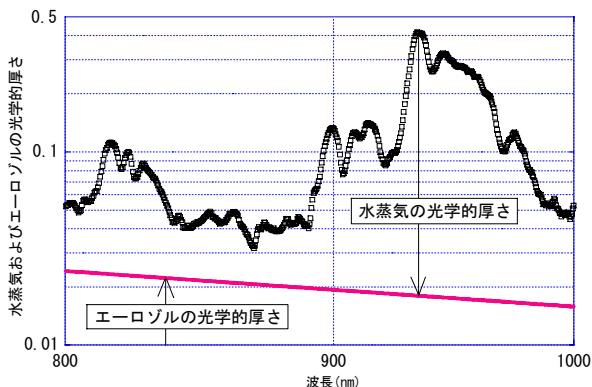
図10 オゾンの吸収を補正したエアロゾルの光学厚さ
(2003年12月28日 09:00 大気路程: 2.96)

図11 水蒸気の光学厚さ(2003年12月28日 09:00)

～1050nm と狭いためと考えられる．大気外放射照度の200nm～4μmの積算値と350nm～1050nmの積算値の比は0.686倍であり，今回の結果とほぼ同じ積算比となった．

5. 水蒸気の光学的厚さおよび可降水量の推定

5.1 オングストロームの経験式

オゾンによる吸収の影響を取り除いたエアロゾルの光学的厚さを求め，400nm～560nmと662nm～680nmのデータについてオングストロームの経験式を当てはめた．オゾン吸収係数は Griggs(1968)の吸収係数を用いた．なお，ベースはeに変換している(図9)．

オングストロームの経験式(Angstrom: 1930)は次式で定義される．

$$\tau_a = \beta \cdot \lambda^{-\alpha}$$

ここで， τ_a はエアロゾルの光学的厚さ， λ は波長(nm)， α はエアロゾルの粒径分布に関するパラメーター(波長指数)， β は気柱内のエアロゾル粒子の総量に対して増減する量(波長1μmにおける混濁係数)である．上式両辺について対数をとると $\log \tau_a = \log \beta - \alpha \log \lambda$ が得られ，図10に示すように横軸に $\log \lambda$ ，縦軸に $\log \tau_a$ をとると，400nm～560nmと662nm～680nmのエアロゾルの光学的厚さはほぼ直線上に乗る．この回帰直線の傾きが α であり，直線上の1000nm(1μm)における光学的厚さが β となる．

5.2 水蒸気の光学的厚さ

図11は図10の波長範囲を800nm～1000nmに拡大した図である．938nm付近には水蒸気の吸収帯があるが，回折格子型で測定した光学的厚さは，図11にみられるように最大の光学的厚さが934nm付近にある．波長ずれの調査では，約1nm小さい方に波長がずれていること，回折格子型の分解能が3.6nmであることを考慮すると，934nm付近で測定された最大の光学的厚さは水蒸気の光学的厚さと考えられる．オングストロームの回帰直線で得られた934nm付近の光学的厚さから，エアロゾルの光学的厚さを取り除いた光学的厚さを水蒸気の光学的厚さとした．

5.3 レーウィンゾンデデータを用いた可降水量の計算

可降水量 $W(\text{g/cm}^2)$ とは，単位断面積を持つ地上から大気上端までの気柱に含まれる水蒸気が全て凝結した場合の水の量であり，次式で表される．

$$W = \frac{1}{g} \int_0^{p_s} q dp$$

ここで, g は重力加速度(つくば: 9.7995m/s^2), P_s は地表気圧(hPa), q は比湿(g/kg), dp は任意の厚さを持つ大気層上下端の気圧差(hPa)である.

また, 比湿は $q = (0.622e_w) / (p - 0.378e_w)$ から求めることができる. p は平均気圧(hPa), e_w は露点温度の水蒸気圧(hPa)で次式を用いて求めた(気象庁: 1959).

$$\begin{aligned} \log_{10} e_w = & +10.79574 \cdot \left(1 - \frac{T_1}{T}\right) \\ & - 5.02800 \cdot \log_{10} \left(\frac{T}{T_1}\right) \\ & + 1.50475 \times 10^{-4} \cdot \left(1 - 10^{-8.2969 \cdot \left(\frac{T}{T_1} - 1\right)}\right) \\ & + 0.42837 \times 10^{-3} \cdot \left(10^{4.76955 \cdot \left(1 - \frac{T_1}{T}\right)} - 1\right) \\ & + 0.78614 \end{aligned}$$

ここで, T は絶対目盛りで表した温度(K), T_1 は水の三重点の温度 273.16(K) である.

5.4 可降水量と水蒸気の光学的厚さとの関係

レーウィンゾンデデータから求めた可降水量と 5.2 で求めた水蒸気の光学的厚さとの関係を調べた. 調査に用いたデータは, 午前 9 時 00 分に太陽面に雲がかかっていなかった日を抽出し, 午前 9 時 00 分に測定した水蒸気の光学的厚さとつくばにおける 00UTC のレーウィンゾンデデータから計算した可降水量を用いた.

なお, 2003 年 6 月から 8 月にかけては天候が悪く, 可降水量の多い時期のデータが少なかった.

図 12 に可降水量と水蒸気の光学的厚さとの関係を示す. 可降水量の多いデータにばらつきがあるが, 可降水量と水蒸気の光学的厚さには高い相関がみられた.

5.5 光学的厚さからの可降水量の推定

水蒸気の光学的厚さから可降水量の推定は以下の手順により行った.

水蒸気の透過率 T_w は次式(Schmid *et al.*: 1996)で表される.

$$T_w = \exp(-a(m \cdot U)^b)$$

ここで, m は大気路程(Air mass), U は可降水量(g/cm^2), a および b は測器固有の定数である. 水蒸気の透過率の式を可降水量 U について整理する.

$$U = \frac{1}{m} \left[-\frac{1}{a} \log(T_w) \right]^{1/b}$$

$$U = \frac{1}{m} \left[\frac{1}{a} (m \cdot \tau - m \cdot \tau_R - m \cdot \tau_a) \right]^{1/b}$$

$$U = \frac{1}{m} \left[\frac{1}{a} (m \cdot \tau_{H_2O}) \right]^{1/b}$$

ここで, τ は全光学的厚さ, τ_R は空気分子の光学的厚さ, τ_a はエアロゾルの光学的厚さ, τ_{H_2O} は水蒸気の光学的厚さである. 測器固有の定数 a , b については, 二乗平均平方根誤差(RMSE)が最小となるように経験的に求めた. また, RMSE は次式で得られる.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (U_{sp} - U_{sonde})^2}{n}}$$

ここで, U_{sp} は回折格子型から推定した可降水量, U_{sonde} はレーウィンゾンデから求めた可降水量, n は観測個数である. 経験的に求めた係数 a , b は, $a=0.737$, $b=0.641$, この a , b における RMSE は 0.133 であった.

5.6 推定した可降水量の比較

図 13 にレーウィンゾンデから求めた可降水量と回折格子型から推定した可降水量との比較結果を示す. 経験的に求めた係数を用いて推定した可降水量の RMSE は, 可降水量が 0 から 6g/cm^2 で 0.133g/cm^2 であった.

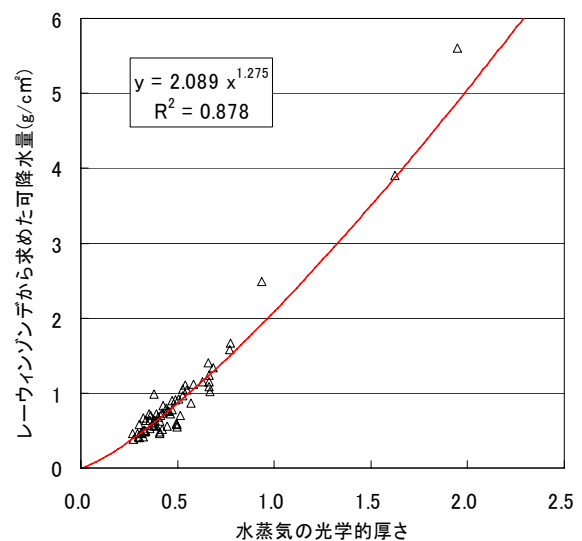


図 12 可降水量と水蒸気の光学的厚さとの関係

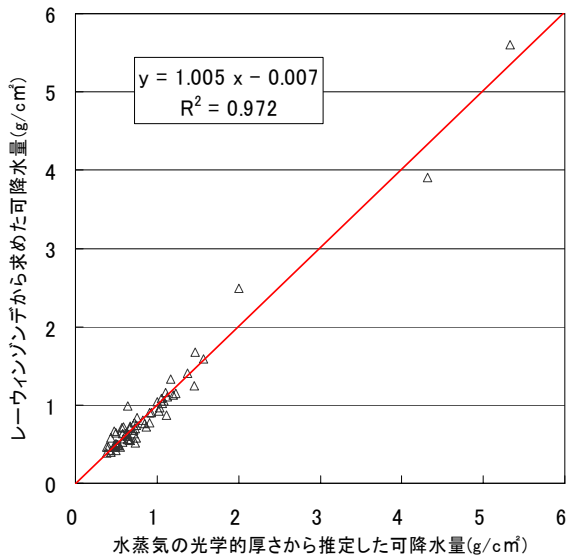


図 13 可降水量の比較

6. まとめ

露光時間補正係数による出力補正を正確に行うため、第一報では、標準光源を用いた補正方法を検討することを報告した。

(1) 本報告では、標準光源を用いて 350nm～1050nm の全測定波長について、それぞれの露光時間補正係数を求めることができた。

(2) 約 1 年 3 ヶ月間での波長ずれの経年変化の調査では、最大で約 3nm の波長ずれがあった。波長ずれが大きかった時期をみると、2002 年 11 月の木曽駒ヶ岳からの輸送後、2003 年 6 月の測器修理による輸送後および 2003 年 10 月上旬に行ったランプ点検後であった。測器温度上昇による光学系への影響がなかったことから、波長ずれの原因の一つとして、輸送等による振動の影響が考えられる。定期的な水銀ランプによる波長検定に加え、輸送前後において波長検定を実施し、引き続き波長ずれの監視を行う必要がある。

(3) 直達日射計の日射量と、回折格子型から推定した直達日射量を比較した結果は、回折格子型の推定直達日射量が直達日射計の約 0.7 倍であった。この値は、大気外放射照度の 200nm～4μm の積算値と 350nm～1050nm の積算値との積算比とほぼ同じ値であった。サンフォトメータの測器定数の把握は、大気混濁度を求める上で重要であり、回折格子型から推定した直達日射量と直達日射計で測定した直達日射量を比較することで、回折格子型の感度変化の推移を把握できるかどうかさらに調査を進めたい。

(4) レーウィンゾンデから求めた可降水量と水蒸気の光学的厚さとの関係を調べた結果、両者の相関は高かった。水蒸気の光学的厚さから推定した可降水量とレーウィンゾンデから求めた可降水量との RMSE は、0 から 6g/cm² で 0.133g/cm² となり、1g/cm² 以下の一部のデータを除いて 20%以内の精度で推定することができた。

第一報では、フィルター型と回折格子型との比較測定を定期的に行い、測器定数の経年変化を監視する必要性を報告した。今回の調査期間において、最大約 3nm の波長ずれが確認され、フィルター型と回折格子型を比較するためには、波長ずれの影響を考慮する必要がある。本報告では、測器の経年変化を検討するまでには至らなかったが、今後、波長ずれを考慮した比較方法を検討し、回折格子型の経年変化の監視を引き続き行う必要がある。

謝 辞

本稿を草するに際し、助言を賜った当台観測第三課の多田一正課長、伊藤真人主任研究官、駒ヶ岳千畳敷カール底での測器検定において多大なご協力を頂いた観測部環境気象課エーロゾル観測係の皆様には厚くお礼申し上げます。

なお、本論は文部科学省科学技術振興調整費「風送ダストの大気中への供給量評価と気候への影響に関する研究」に基づく研究の一環であり、御支援いただいた関係各位に深く感謝致します。

引用文献

- Angstrom A.(1930) : On the atmospheric transmission of sun radiation. II. *Geografiska Annaler*, **2 and 3**, 130 - 159.
- Griggs M.(1968) : Absorption coefficients of ozone in the ultraviolet and visible regions. *J.Chem.Phys*, **49**, 857 - 859.
- 居島 修(2003): 回折格子型サンフォトメータ PSG-100 について(第一報). 高層気象台彙報, **63**, 25 - 30.
- 気象庁(1959) : 地上気象常用表. 気象庁, 144pp.
- Schmid B., Thome K.J., Demoulin P., Peter R., Matzler C. and J. Sekler(1996) : Comparison of modeled and empirical approaches for retrieving columnar water vapor from solar transmittance measurements in the 0.94-μm region. *J.Geophys.Re.*, **101**, 9345 - 9358.
- WCRP(1986) : Revised instruction manual on radiation instruments and measurements (October 1986). WMO/TD, **No.149**, 133pp.