

筑波山におけるラングレー法を使用した PFR 測器常数の校正試験

島村 哲也* 居島 修*

Absolute Calibration of PFR by the Langley method at Mt. Tsukuba

Tetsuya SHIMAMURA and Osamu IJIMA

要旨

WMO は、サンフォトメータの測器感度の安定性が年 2%未満であることを求めており、日々の観測において、ラングレー法による測器常数の確認が可能なデータの取得を勧告している。本調査では、高層気象台で観測に用いている PFR(Precision Filter Radiometer)型サンフォトメータについて、測器常数の変化の確認が可能かどうか検討するため、2013 年 1 月 28 日～2 月 1 日に観測条件の良い筑波山で観測を行い、ラングレー法による検定を実施した。その結果、当測器の常数は、世界放射センター(WRC: World Radiation Center)であるダボス物理気象観測所(PMOD: Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos)で校正された測器常数に対し、最も観測条件の良かった 1 月 29 日午前において、1%未満の誤差となりほぼ一致した。

1. はじめに

サンフォトメータの測器常数の校正には、主にラングレー法による検定が用いられており、PMOD の基準器もこの方法によって測器常数を校正している。現在、気象庁でエーロゾルの光学的厚さ(以下、AOD: Aerosol optical depth という)の観測に用いている PFR 型サンフォトメータ(以下、PFR という)は、PMOD の基準器との比較観測により測器常数を校正している(気象庁: 2011)。

WMO の勧告(WMO: 1993)によると、品質の高い AOD データを確保するため、測器常数の変化について、1 年に 2%未満の安定性を求めている。また、月に一度は午前(または午後)に 12 回の観測を、ラングレー法が行える大気路程(以下、 m と表記する)2.0～5.5 の範囲で実施すべきとしている。

高層気象台では、2008 年から PFR による観測を開始した(高野・大河原: 2011, 上里: 2011)。この PFR の測器常数の変化については、年 1 回、国内基準器との比較観測で確認している。また、国内基準器は、3 年に一度 PMOD において測器常数を校正している。

本調査では、高層気象台よりも観測条件の良い筑波山において、ラングレー法による検定によって、測器常数の変化の確認が可能かどうか観測を試みた。また、ラングレー法の検定に使用するデータについて、異常値の除去、データ数の均質化等のデータ品質管理を検討した。

2 ラングレー法

2.1 観測条件および測器常数の決定

ラングレー法を行う観測地点の選定について、関根(1980)は以下の条件を挙げている。ア. 年間を通して快晴日が多い、イ. 空気が澄んでいる、ウ. 長時間にわたって大気の状態が安定している、エ. なるべく太陽高度の高い夏至近辺で観測できることが望ましい。また、これらの条件で、注意深く行われたラングレー法では、測器常数の誤差は 1%未満であると報告している。

ラングレー法では、出力電圧の自然対数(以下、 $\ln V$ と表記する)と m について回帰直線を当てはめ、 m を 0 まで外挿し、このときの電圧値(以下、検定値という)が測器常数となる。この $\ln V$ と m の関係を示したグラフをラングレープロットという。条件が良い時に得られた測器常数の誤差は、3%未満であると言われる(Shaw *et al*: 1973)。

2.2 気象庁における測器常数校正の経緯

気象庁におけるサンフォトメータのラングレー法による検定は、1981 年 2～3 月に筑波山山頂の筑波山測候所(当時)において、気象測器工場(当時)作成の試作器に対して実施されている。気象条件の比較的良い 2 日間の観測で得られた検定値には、大きな差があり、強風と砂塵による太陽周辺光の変動がその要因であると考察されている(鈴木・佐々木: 1989)。

1988 年～2005 年には、PFR 以前の MS110 型サンフォトメータ(以下、MS110 という)に対し、木曽駒ヶ岳千畳敷カ

*高層気象台 観測第三課



写真 1 観測地点遠景

中央左より筑波山(標高: 877m)。中央の筑波山中腹に観測地点である筑波山京成ホテル(標高: 560m)がある。撮影地点の高層気象台から山頂までの直線距離は 18.7km。3 月 21 日撮影。

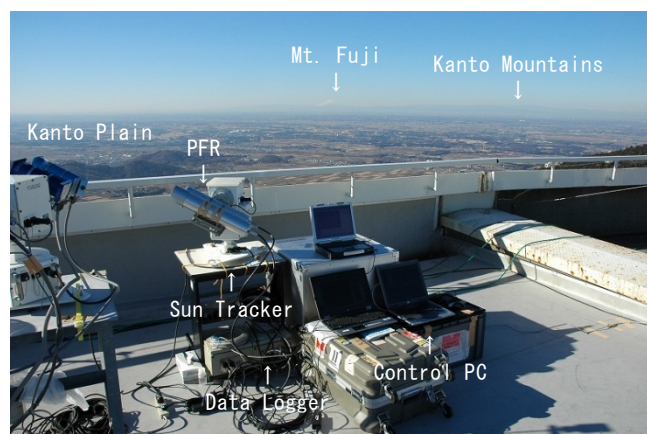


写真 2 観測環境と測定装置

中央遠方に富士山(直線距離: 約 157km)、手前に関東平野が見渡せる。PFR は太陽追尾装置に 2 台設置している。奥側の PFR が本調査で用いた高層気象台の測器(N41)である。1 月 29 日撮影。

ール底(標高 2612m)において、ラングレー法による検定が実施されている。また、昭和基地の MS110 については、現地の観測値を用いて較正している(気象庁: 2011)。

2.3 高層気象台における測器常数較正の経緯

高層気象台における MS110 の較正は、観測当初は現地でのラングレー法による検定は困難としており、実際の解析では気象研究所のサンフォトメータとの比較観測で決定した測器常数が使用されていた(寺坂ほか: 1995)。その後、柴田・廣瀬(2000)は、ラングレー法が有効でない平地において、大気的光学的厚さ τ の変化による影響を補正する方法について考察し、その精度が約 2%であることを示した。さらに、柴田・廣瀬(2001)は、新たな監視方法として、 τ の日変化が、5 波長とも同じ傾向となるように、測器定数を 0.1 ずつ変化させて推定する方法を考案した。

回折格子を用いた PGS-100 型サンフォトメータの較正については、MS110 と同様に、木曾駒ヶ岳千畳敷カール底でラングレー法による検定を行っている(居島: 2003)。

3. 観測環境と測定装置

3.1 観測環境

筑波山(標高 877m)は八溝山地最南端に位置し、観測を実施した筑波山京成ホテルは、山頂から東南東へ 1.5km、標高 560m に位置する。また、筑波山は、冬季の深夜から早朝にかけて、麓から標高 200~300m 付近に気温の逆転層が形成されることが知られている(植田ほか: 2011)。

筑波山の中腹に位置する筑波山京成ホテルは、逆転層より高い標高にあり、平地に比べて大気汚染による影響が少なく、安定した電力供給を含め観測条件が良い(写真 1, 2)。このため、同地点では、5 年毎に開催される WMO

第 II 地区(アジア)放射センターによるアジア地区日射計相互比較観測(WMO: 2009)、ならびに毎年実施される日射計基準器の相互比較観測が行われている。

3.2 測定装置

PFR は、太陽直射光のうち、WMO の勧告を満たすように選んだ 4 波長(368, 412, 500, 862nm)を干渉フィルターで分光し、AOD を測定する測器である(気象庁: 2011)。本調査で用いた PFR は、2012 年 11 月 14 日~12 月 12 日に PMOD で較正された N41 号機である。

4. データの取得と処理

4.1 観測期間・データの取得状況

観測期間は、2013 年 1 月 28 日~2013 年 2 月 1 日である。データについては、南中時刻を境に午前(AM)と午後(PM)に分け、それぞれ 1 セットとした。PFR の電圧値の測定間隔は 1 分毎である。なお、AOD の算出に用いた気圧は、観測地点に設置した可搬型気象測器(Met One Instruments 製)の値を、オゾン全量は、高層気象台で観測した日代表値を、測器常数は、PMOD に値付けされた測器常数(表 2. 以下、較正值という)を用いた。また、4 波長の AOD を用いてオングストローム指数 α (以下、 α という)も算出した。 α が大きい場合、相対的に小さなエアロゾル粒子が、大気中に卓越していることを示している。

表 1 に、データの取得状況及び採用判断を示す。期間中、データを 8 セット取得した。m が 2.0~5.5 までの範囲を取得できなかった場合や、観測時間の 1/3 以上太陽面に雲がかかった場合は、そのデータセットを不採用(表 1 中: ×)とした。なお、期間中、最も天候等の条件が良かった日は、1 月 29 日であった。

表 1 観測期間の観測値取得状況及び採用判断

月日	データ取得範囲[m]	天気概況	備考	採用
1/28 PM	2.5~21.3	晴一時曇	早朝降雪	×
1/29 AM	1.7~14.6	快晴	終日視程良好	○
1/29 PM	1.7~4.3		午前中一時強風	×
1/30 AM	1.7~12.8	快晴	終日視程悪い	○
1/30 PM	1.7~4.5			×
1/31 AM	1.7~20.1	薄曇後一時晴	終日視程悪い	×
1/31 PM	1.7~4.3			×
2/1 AM	1.7~17.0	晴後時々曇	視程悪い	○

4.2 データ処理と品質管理

観測で得られた電圧値のデータ処理は、以下の①から⑤の手順で行った。

- ① 地球-太陽間距離補正
- ② 自然対数へ変換
- ③ m が 2.0 以上 5.5 以下の範囲を抽出
- ④ 回帰曲線(2次近似)を基準にした異常値の除去
- ⑤ データ数の均質化

以上のデータ処理を実施した後、回帰直線の切片($m=0$)の値について逆対数を取り、検定値を決定した。この処理の中で、④⑤は品質管理に相当するが、その詳細については、1月29日AMの例で以下に説明する。

(1) ④ 回帰曲線(2次近似)を基準にした異常値の除去

ラングレー法による観測中は、(ア)太陽面に雲がないこと、(イ)大気の状態が安定していることが必要条件である。しかし、一時的に太陽面を雲が通過した場合、観測値が極端に変動する。そのため、各波長について、以下の手順で異常値を除去した。

(a) m の1分毎の変化は、南中時刻に近いほど小さくなり観測値の数も多くなる。回帰曲線の算出において、南中に近い時刻に重みが増すため、 m を 2.0~2.5, 2.5~3.5, 3.5~5.5 の3区間に分ける。

(b) それぞれの区間について、 $\ln V$ と m から最小二乗法により回帰曲線(2次近似)を求め、二乗平均平方根誤差(RMSE)を算出する。

(c) 回帰曲線と $\ln V$ との差が RMSE の2倍を超えた場合、異常値と判定し、その時刻の観測値を除去する。

(2) ⑤ データ数の均質化

(1)で述べたように、 m の変化は、時刻によって一定ではないため(図1上図)、 m が小さいほどデータ数は多くなる。また、 m に対するデータ数の偏りは、検定値を適正

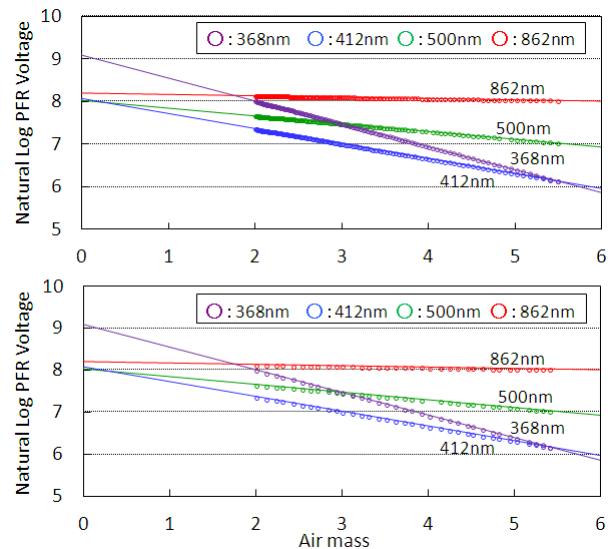


図1 ラングレープロット(1月29日AM)

上図：④ 回帰曲線による異常値の除去後

下図：⑤ データ数の均質化後

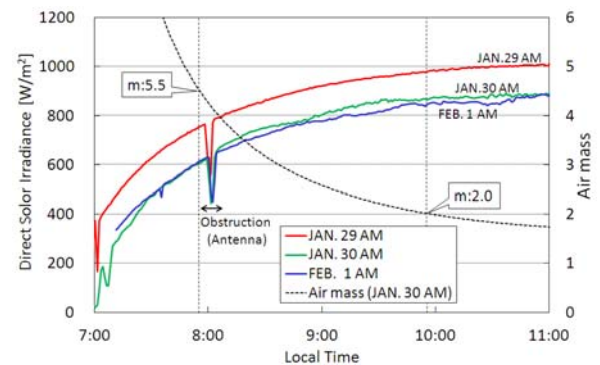


図2 直達日射照度の時間変化

に評価できない場合がある。このため、1分間における m の最大の変化($m_{5.5}$ で 0.09)を考慮し、 $m_{2.0} \sim 5.5$ までは 0.1 毎の 35 区間に分けた。各区間で最大となる電圧値を代表値とし、データ数の均質化を行い、35 個のデータを用いて検定値を算出した。

5. 観測結果と考察

5.1 観測結果

(1) 直達日射照度を用いた各検定日の観測条件の評価

観測結果を評価する前に、直達日射計で観測した直達日射照度を用いて、各検定日における観測条件について評価した。

図2に、各検定日における直達日射照度の時間変化(1分毎)と大気路程を示す。1月29日は、10時30分頃には 1000 W/m^2 を超えていたが、1月30日及び2月1日は、 900 W/m^2 を超えず、直達日射照度も変動していた。平地においても、冬季に空気が非常に澄んだ場合、直達日射照度は 1000 W/m^2 を超えることがある。

1 月 29 日は、直達日射照度の状況から、期間中、最も良い観測条件だったと判断できる。

(2) 観測結果

4.2 のデータ処理及び品質管理の際に、各過程③、④、⑤で算出した検定値と、PMOD の較正值との差の百

表 2 PMOD の較正值と本調査の検定値結果

月 日			368nm	412 nm	500 nm	862 nm
PMOD 較正值			8.783	3.175	3.024	3.626
本調査による 検定値（検定誤差）	1/29 AM	③	8.805 (0.25)	3.176 (0.03)	3.0332 (0.31)	3.635 (0.25)
		④	8.805 (0.25)	3.176 (0.03)	3.0325 (0.28)	3.635 (0.25)
		⑤	8.757 (0.84)	3.193 (0.58)	3.043 (0.62)	3.641 (0.41)
	1/30 AM	③	9.033 (2.85)	3.257 (2.58)	3.096 (2.37)	3.693 (1.84)
		④	9.033 (2.85)	3.257 (2.58)	3.096 (2.37)	3.693 (1.84)
		⑤	9.772 (11.26)	3.497 (10.13)	3.270 (8.14)	3.769 (3.94)
	2/ 1 AM	③	8.075 (-8.06)	2.936 (-7.54)	2.801 (-7.38)	3.480 (-4.02)
		④	8.075 (-8.06)	2.936 (-7.54)	2.801 (-7.38)	3.480 (-4.02)
		⑤	8.488 (-3.36)	3.068 (-3.38)	2.890 (-4.42)	3.525 (-2.78)

本調査の較正值は、AOD と回帰直線による異常値の除去、データの均質化後のもの。下段(カッコ内)は検定誤差(本調査の検定値-PMOD 較正值)/PMOD 較正值×100[%]を示す。赤字は、検定誤差が±2%を超えた値を示す。)

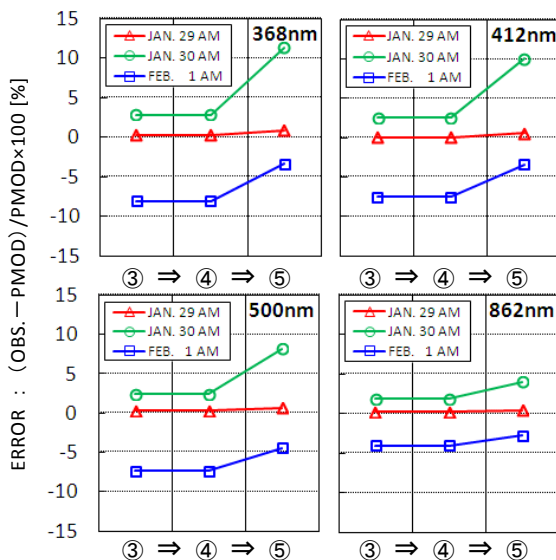


図 3 データ処理過程における検定誤差の変化

OBS.: 本調査による検定値, PMOD: PMOD による較正值
③: m2.0~5.5 抽出後, ④: 回帰曲線による異常値除去後,
⑤: データ数の均質化後。

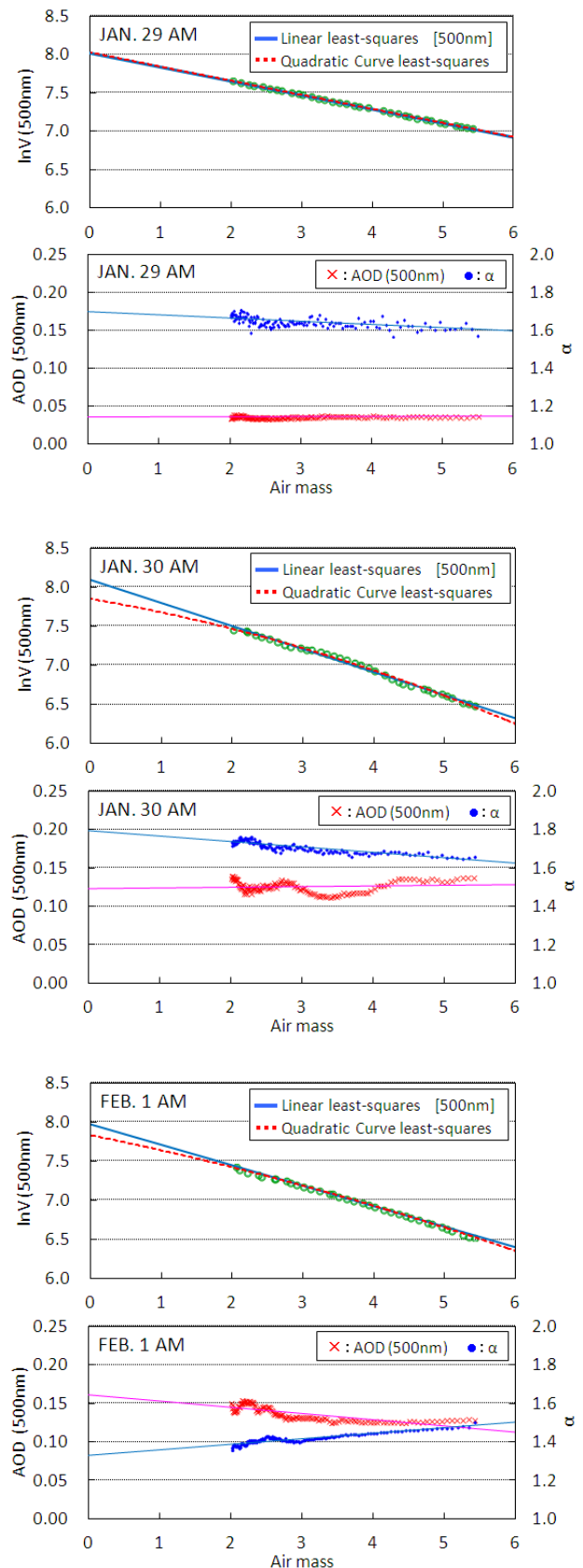


図 4 データ数の均質化後のラングレーブプロット (500nm)及び AOD(500nm)と α の m に対する変化

上: 1 月 29 日 AM, 中: 1 月 30 日 AM, 下: 2 月 1 日 AM

分率(以下、検定誤差という)を表 2 に、また、データ処理過程における検定誤差の変化を図 3 に示す。

表 2 に示すように、各検定日の検定誤差は、1 月 29 日 AM では、データ数の均質化前、均質化後ともに 1% 未満、1 月 30 日 AM では、データの均質化前は 2~3%、均質化後は 4~11%、2 月 1 日 AM では、データの均質化前は 4~8%、均質化後は 3~4% であった。

WMO の勧告では、サンフォトメータの測器常数の変化は、1 年で 2% 未満としている。今回の検定では、1 月 29 日 AM のみ 2% 未満であった。通常、ラングレー法は、高所で空気の澄んでいる場所で実施することが望ましく、観測条件の良い場所では、ラングレープロットに使用するデータを、4.2(2)のように均質化する必要はない。1 月 30 日と 2 月 1 日については、データ数の均質化後、検定値は均質化前に比べて、2~8% 変化している。この原因は、均質化前では、 m に対するデータ数に偏りがあり、検定値を決定する回帰直線は、 m の小さいデータに重みが増したためと考えられる。

5.2 考察

各検定日の検定結果について、ラングレープロット及び AOD, α を用いて評価した。

図 4 に、それぞれの検定日について、データ数を均質化した後のラングレープロット(500nm)及び AOD(500nm)と α の m に対する変化を示す。ラングレープロットについては、35 個のデータに対して、最小二乗法により回帰直線と回帰曲線(2 次近似)を当てはめた。また、 $m2.0 \sim 5.5$ の範囲における AOD(500nm)及び α の最大値、最小値、標準偏差を表 3 に示す。

標高が高く空気が非常に澄んでいる場合、AOD 及び α はほとんど変化しないため、ラングレープロットに当てはめた回帰直線と回帰曲線(2 次近似)は一致する。1 月 29 日については、ラングレープロットに当てはめた回帰直線と回帰曲線(2 次近似)はほぼ一致し、AOD(500nm)については、0.05 未満(標準偏差: 0.001)と小さく、 $m2.0 \sim 5.5$ の範囲でほぼ一定であった。 α については、 m に対してやや変化しているものの、4 波長の検定誤差は 1% 未満で、基準の 2% 未満に収まっていた。1 月 30 日及び 2 月 1 日については、ラングレープロットに当てはめた回帰直線と回帰曲線(2 次近似)は一致せず、AOD(500nm)については 0.1 を超え、 m に対して AOD 及び α は変化していた。また、検定誤差については、1 月 30 日は 4~11%、2 月 1 日は 3~4% と基準の 2% を超えていた。

以上のことから、検定値は、ラングレープロット及び AOD, α を用いて、次に示す観測条件で総合的に判断し、

表 3 AOD 及び α における最大値、最小値、標準偏差

日付・要素		最大値	最小値	標準偏差
1/29 AM	AOD(500nm)	0.040	0.034	0.001
	α	1.710	1.572	0.027
1/30 AM	AOD(500nm)	0.140	0.111	0.007
	α	1.760	1.648	0.029
2/1 AM	AOD(500nm)	0.154	0.125	0.009
	α	1.501	1.360	0.028

評価することができる。

[筑波山におけるラングレー法の観測条件]

- ・ラングレープロット：回帰直線と回帰曲線の一致
- ・AOD(500nm)：0.05 未満
- ・AOD 及び α ：一定
- ・(参考) 直達日射照度：日最大値で 1000W/m²以上

6. まとめ

本調査では、筑波山においてラングレー法による検定によって、測器常数の変化の確認が可能かどうか観測を試みた。観測期間が短く、観測条件の悪い日もあったが、期間中に 3 個の検定値が得られた。最も観測条件の良かった 1 月 29 日 AM において、4 波長の測器常数の変化は、WMO の勧告である 2% 未満に収まっていた。以上のことから、筑波山でのラングレー法による測器常数の変化の確認は、有効である判断できる。また、ラングレー法で得られた検定値は、データの品質管理及び AOD, α 等を用いて適正に評価できることを確認した。

今後も筑波山において、観測条件の良い日のデータを追加し、測器常数の変化について、定期的に再検証する必要がある。また、平地にある高層気象台は、観測条件は筑波山に比べて良くないが、日々の観測データの中から、良好なデータを選別し、高層気象台におけるラングレー法による検定の可能性を検討する。さらに、ラングレー法による検定結果を用いて、1 年に一回の国内準器との比較較正を補完し、測器常数の監視の有効性についても検討を行う。

謝 辞

本調査で用いた観測値は、筑波山において実施された平成 24 年度日射計基準器相互比較の際に得られたものである。

筑波山での観測に際し、気象庁地球環境・海洋部環境気象管理官付の大河原望調査官、辰己弘輻射係長、小木昭典エーロゾル観測係員、藤原宏典エーロゾル観測係員にご協力頂いた。 m 及び AOD, α の算出には大河原調査

官作成のプログラムを利用させて頂いた。高層気象台観測第三課の皆様には、数々のご教示やご支援を頂いた。これらの方々に厚くお礼申し上げます。

引用文献

居島修 (2003) : 回折格子型サンフォトメータ PGS-100 について(第一報). 高層気象台彙報, **63**, 25 - 30.

気象庁 (2011) : 大気・海洋環境報告第 11 号 平成 21 年観測成果. 気象庁, DVD - ROM.

関根正幸(1980): サンフォトメーターについて. 測候時報, **47**, 73 - 79.

Shaw, G. E., J. A. Reagan, B. M. Herman (1973) : Investigations of atmospheric extinction using direct solar radiation measurements made with A Multiple wavelength radiometer. *J. Appl. Meteorol.*, **12**, 374 - 380.

柴田誠司・廣瀬保雄 (2000) : サンフォトメータ測器定数監視方法の改良(I). 高層気象台彙報, **60**, 63 - 66.

柴田誠司・廣瀬保雄 (2001) : サンフォトメータ測器定数監視方法の改良(II). 高層気象台彙報, **61**, 33 - 36.

鈴木宣直・佐々木泉(1989): サンフォトメータ. 測候時報, **56**, 246 - 254.

高野松美・大河原望 (2011): エーロゾルの光学的厚さ観測の Precision Filter Radiometer(PFR)への移行に伴う試験—観測データの信頼性の確認及び現行測器との比較観測に必要な測器定数の決定—. 高層気象台彙報, **69**, 55 - 58.

寺坂義幸・志村英洋・上野丈夫 (1995) : サンフォトメーターによるつくば上空のエーロゾルの光学的厚さと粒径の季節変化. 高層気象台彙報, **55**, 37 - 42.

植田宏昭・小埜祐人・大庭雅道・井上知栄・釜江陽一・池上久通・竹内茜・石井直貴 (2011) : 筑波山の東西南北 4 斜面における高度 100m 間隔での通年観測—斜面温暖帯に着目して—. 天気, **58**, 15 - 22.

上里至 (2011) : PFR(Precision Filter Radiometer)と MS110 (フィルター型サンフォトメータ)のエーロゾルの光学的厚さの比較観測. 高層気象台彙報, **69**, 59 - 62.

WMO (1993) : Report of the WMO Workshop on the Measurement of Aatmospheric Optical Depth and Turbidity. Global Atmosphere Watch Report, **101**, 13p.

WMO (2009) : Second WMO Regional Pyrheliometer Comparison of RA II. Instruments and Observing Methods Report, **97**, 43p.