

令和 2 年 5 月 14 日現在

機関番号：82101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00531

研究課題名(和文) 月を光源としたエアロゾル光学特性測定装置の開発に関する研究

研究課題名(英文) Development of a Moon Photometer to Measure Aerosol Optical Thickness

研究代表者

内山 明博(Uchiyama, Akihiro)

国立研究開発法人国立環境研究所・地球環境研究センター・特別研究員

研究者番号：50354460

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：放射計を利用したエアロゾル特性の測定では大部分が日中の測定から得られている。このため夜間のエアロゾル特性のデータが限られている。月を光源にしてエアロゾルの光学的厚さと可降水量を推定できるように既存のスカイラジオメーターの改造を行った。これらの測定には月の反射率のデータが必要であるが、太陽と月に対してLangley法を適用し、正確に反射率を決定し、従来のモデルの補正法を示した。測定の妥当性を示すため、連続観測を行い、独立したデータと比較して、夜間も昼間と同程度の精度で測定できていることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発した放射計を用いて今まで情報がほとんど無かった夜間のエアロゾルの光学的厚さを満月±10日の間測定できるようになった。これにより昼夜連続したエアロゾルの動態解析が進展する。更に、月の正確な反射率が決定できたことにより、衛星搭載の可視・近赤外域センサーの校正に月を利用することで校正精度を上げることが可能となった。校正精度が上がることで衛星プロダクトの精度が上がり、より正確な情報が衛星から得られる。

研究成果の概要(英文)：The majority of aerosol data are obtained from daytime measurements, and there are few datasets available for studying nighttime aerosol characteristics. In order to estimate the aerosol optical depth (AOD) and the precipitable water vapor (PWV) during the nighttime using the moon as a light source, a skyradiometer POM-02 (Prede Ltd., Japan) was modified. The calibration constants for both the sun and the moon were successfully determined by using the Langley method. The ratio of the both constants is the reflectance of moon. Therefore, the reflectance of the moon could be determined to within an accuracy of 1% or less. In order to validate the estimates of the AOD and PWV, continuous measurements with POM-02 were conducted. The results were compared with the AOD and PWV obtained by independent methods. In the results, the AODs (PWVs) during the daytime and nighttime are presumed to have the same degree of precision and accuracy within the measurement uncertainty.

研究分野：大気物理学

キーワード：エアロゾル エアロゾルの月光観測 月の反射率

1. 研究開始当初の背景

エアロゾルは、放射収支に影響を与え、地球の気候形成に重要な役割を果たしている (IPCC,2013)。また、大気質(大気汚染)に影響を与え、健康影響が懸念されている。このため、エアロゾルの全球分布を監視するために衛星による観測(例えば、MODIS や CALIPSO)が行われ、また、衛星観測の検証と地上から監視するための AERONET や SKYNET などの観測網が作られてきた。また、数は限られるが、能動型のライダーによる観測がなされてきた。

しかし、衛星観測の全てが太陽光の反射光を利用した観測であり、また、AERONET、SKYNET は、太陽直達光と天空散乱光を利用した観測である。このため、昼間しかエアロゾル特性の情報が得られず、データのない空白時間・地域が生じる。また、ライダーは、高価であるため観測点が限られている。

夜間のデータが無いことは、昼夜連続したエアロゾルを含む大気化学、エアロゾルの動態、大気汚染物質や黄砂の広域輸送等の研究で、研究進展の大きな阻害要因の一つになっている。また、高緯度の極夜の時期には、定量的にやや問題のある衛星搭載ライダー以外データが全く無く、極域でのエアロゾルの気候影響について、その役割が解明できず、温暖化予測モデルの不確実性の大きな要因の一つとなっている。

2. 研究目的

本研究は、ほとんどデータの無い夜間のエアロゾル特性を測定するため、昼間に使われているスカイラジオメーター(ブリード製 POM-01,POM-02)を改良して、月を光源にして夜間のエアロゾルの光学的厚さ(AOD)と可降水量(PWV)を測定可能にすることを目的とする。

3. 研究の方法

月を光源としてエアロゾルの光学的厚さを推定するためには、装置の開発、必要なソフトウェアの開発、装置の検定、観測値の妥当性の確認(実証観測)を行わなければならない。

装置の開発に関しては、既存のスカイラジオメーター(POM-02)を用いて、出力の調整(増幅器の調整)を行った。また、測器を月に向ける時に微調整を行う位置センサーの開発を行った。ソフトウェアの開発としては、装置に組み込む月の簡易位置計算ソフトウェアの開発、月の反射率計算ソフトウェアの開発を行った。

装置の改造、ソフトウェアの開発後、測器の検定は、Langley 法によって行った。Langley 法による検定は、太陽と月のそれぞれに対して行った。両者の検定定数の比から月の反射率を求めた。検定後、連続観測を行い、独立したデータと比較し、夜間データの精度を調べた。

4. 研究成果

(1) 測器の改良

出力調整

スカイラジオメーターは、太陽直達光と天空散乱光を測定する。天空散乱光は太陽直達光の約

1×10^{-6} である。月の直達光は、太陽直達光と比べると満月の時には 1×10^{-5} 、半月の時 1×10^{-6} である (BerKoff et al., 2011)。したがって、スカイラジオメーターは元々月の直達光を測定できる能力を持っている。検出器が Si フォトダイオードの波長域の暗電流、ノイズのランダム成分の大きさを考慮し、太陽直達光の $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-9}$ の出力まで測定できるように調整した。検出器が InGaAs フォトダイオードの波長域は、暗電流、ノイズのランダム成分が大きく、調整した増幅器においても月の直達光を測定することは難しかった。

月・太陽位置センサー

スカイラジオメーターは、太陽や月の位置を計算して鏡筒をその方向へ向ける。ここでは、長沢工(1981)の簡易計算式をファームウェアに組み込み計算した。簡易計算式の誤差、測器の設置方向のズレ、回転軸の誤差のために、正確に月方向に鏡筒を向けるには微調整が必要である。このために太陽位置センサーを改良して、月の位置センサーにも使えるようにした。微調整の機能は、満月 ± 位相角 90 度 (半月) の期間に働くことを確認した。位相角が 90 度以上では、簡易計算式の値で追尾することになるが、簡易計算式の精度が十分あり、位相角約 120 度 (満月 ± 10 日) くらいまで月の直達光を測定できることを確認した。

(2) 測器の検定と月反射率

ここで、検定 (または校正) とは、基準温度で平均太陽地球間距離で大気圏外において太陽または月の直達光が装置に入力した時の出力を決めることを指し、その出力を検定定数と呼ぶ。検定定数が決まれば、測定から透過率が分かり、AOD や PWV を推定できる。

測器の検定のための測定を NOAA マウナ・ロア観測所 (MLO) (標高 3397m) で 2017 年 9 月 28 日 ~ 11 月 7 日の期間実施し、そのデータを用いて Langley 法で検定を行った。

月の直達光の観測値に Langley 法を適用する時には月の反射率の値が必要である。ここでは、月の反射率は、ROLO モデルで計算した (Kieffer and Stone, 2005)。ROLO モデルの計算には、観測者の月の緯度・経度による値、太陽・月・観測者の角度 (位相角)、太陽と月、月と観測者の距離のデータが必要である。これらの量は、NASA SPICE toolkit (Action, 1996) を用いて計算した。

ROLO モデルには誤差があることが知られており、我々は ROLO の反射率に定数 C を掛けて Langley 法を適用し、 C と太陽に対する検定定数 ($V_0\text{sun}$) の積を決定した。月のデータに対して決定された $C \cdot V_0\text{sun}$ を $V_0\text{sun}$ で割れば、 C を決定できる。この C は、ROLO モデルに対する補正定数である。太陽に対する検定定数 ($V_0\text{sun}$) は、昼間のデータを使って決定した。

補正定数 C は、位相角に依存しており、位相角の 2 次式で近似し回帰式を決定した。これによって、月の反射率を 1% 以内で近似できた。

(3) 実証観測の結果

AOD の比較

推定した AOD を国立環境研究所・高スペクトル分解ライダー (NIES/HSRL、波長 : 532nm)

から推定された AOD と比較した。回帰分析の結果、昼間と夜間の回帰直線は、統計的には一致しているとは言えなかったが、POM-2 と HSRL の AOD の相関は高く(昼 0.77 , 夜 0.88)、差の自乗平均誤差(RMSE)の大きさは同程度 (昼 0.087, 夜 0.084) であった。また、図 1 に示したようにスカイラジオメーターと HSRL から の AOD の昼と夜の散布図は、ほぼ重なっている。したがって、昼間と夜間は同程度の精度で測定されていると思われる。

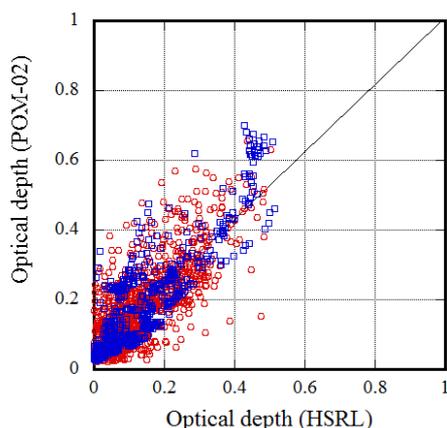


図 1 HSRL と POM-02 のエアロゾルの光学的厚さ(AOD)の散布図。赤が昼間、青が夜間。

PWD の比較

POM-02 の 940nm チャンネルから推定した PWV とラジオゾンデの鉛直分布から推定した PWV、GPS の受信信号から得られた PWV を比較した。

図 2 に POM-02 の PWV とラジオゾンデの PWV の散布図を示した(ただし、POM-02 の透過率の評価式は、ラジオゾンデの PWV で補正してある)。昼と夜の散布図はほぼ重なっている。また、統計的に昼と夜の回帰直線は同等と見なすことができ(95%の信頼限界)、回帰直線の傾きは 1、切片の値はゼロと見なせた。

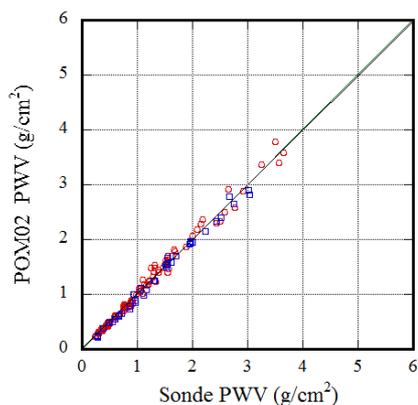


図 2 ラジオゾンデと POM-02 の可降水量(PWV)の散布図。赤が昼間、青が夜間。

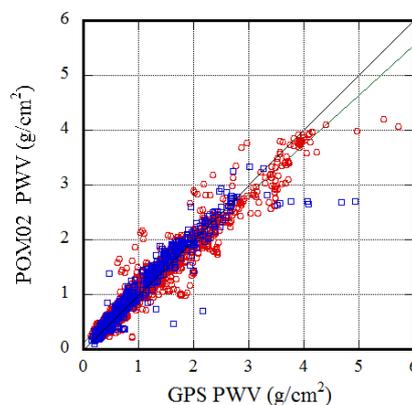


図 3 GPS と POM-02 の可降水量(PWV)の散布図。赤が昼間、青が夜間。

図 3 に GPS からの PWV と POM-02 からの PWV の昼間と夜間の散布図を示した。両者の散布図は、ほぼ重なっていた。昼間と夜間における、両 PWV の相関係数はそれぞれ 0.97 と 0.95

と高かったが、回帰直線の値は、昼が 0.905、夜が 0.913 で 1 と見なすことができなかった。しかし、統計的には両者の傾きは同等であった（95%信頼限界）。今回使用した GPS データにやや問題があったと推測される。

日の出前後、日の入り前後の比較

日の出前後、日の入り前後の AOD や PWV を比較し、夜間と昼間が連続に測定できていることを確かめた。340nm を除いて、統計的に、昼間と夜間の値の回帰係数の傾きは 1、切片は 0 と見なすことができ（95%信頼限界）。昼間と夜間の値は同等（連続）であった。

AERONET との比較

検定用のデータを取得した MLO には、AERONET の測器も設置されており、POM-02 から推定した値を AERONET の値と比較した。夜間には、多くの場合 AOD の値が 0.02 以下であり、検定定数の精度が 0.5～1%であることを考えると比較が難しい。いくつかの波長で回帰式の傾きが 1 から大きくはずれるが、バイアスエラー、RMSE が、0.01 以下であった。夜間も、AERONET と同程度の精度であると思われる。

(4) 今後の課題

今後、測定精度を上げるためには、月の反射率の精度を上げる必要がある。また、現在、ROLO モデルの適用範囲は位相角 95 度くらいまでであるが、本装置では位相角 120 度くらいまで測定できるので、大きな位相角への拡張が必要である。

本装置を用いることで、昼夜を通じた観測ができ、データの空白時間・空間を減らすことができる。今後、POM-02 のユーザーへの普及を図り、観測網を作っていく必要がある。

2019 年度から北極域の極夜のエアロゾル観測網を構築するグループと連携を取っている。

<参考文献>

Acton Jr, C. H.: Ancillary data services of NASA's Navigation and Ancillary Information Facility, *Planet. Space Sci.*, **44**, Issue 1, 65-70, 1996.

Berkoff, T. A., Sorokin, M., Stone, T., Eck, T. F., Hoff, R., Welton, E., and Holben, B.: Nocturnal aerosol optical depth measurements with a small-aperture automated photometer using the moon as a light source, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **28**, 1297–1306, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-10-05036.1>, 2011.

IPCC, 2013: IPCC Fifth Assessment Report: Climate Change 2013. UNEP/WMO.

Kieffer, H. H., and Stone, T. C.: The spectral irradiance of the moon. *Astron. J.*, **129**, 2887–2901, 2005.

長沢工：天体の位置計算，地人書館，p. 239, 1981, p. 239, 1981.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Uchiyama Akihiro, Matsunaga Tsuneo, Yamazaki Akihiro	4. 巻 11
2. 論文標題 The instrument constant of sky radiometers (POM-02) - Part 1: Calibration constant	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Atmospheric Measurement Techniques	6. 最初と最後の頁 5363 ~ 5388
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.5194/amt-11-5363-2018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Uchiyama Akihiro, Matsunaga Tsuneo, Yamazaki Akihiro	4. 巻 11
2. 論文標題 The instrument constant of sky radiometers (POM-02)-? Part 2: Solid view angle	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Atmospheric Measurement Techniques	6. 最初と最後の頁 5389 ~ 5402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.5194/amt-11-5389-2018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Uchiyama A., B. Chen, A. Yamazaki, G. Shi, R. Kudo, C. Nishita-Hara, M. Hayashi, A. Habib and T. Matsunaga	4. 巻 96
2. 論文標題 Aerosol Optical Characteristics in Fukuoka and Beijing Measured by Integrating Nephelometer and Aethalometer: Comparison of Source and Downstream Regions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Meteorological Society of Japan	6. 最初と最後の頁 215-240
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2151/jmsj.2018-026	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Uchiyama, A., M. Shiobara, H. Kobayashi, T. Matsunaga, A. Yamazaki, K. Inei, K. Kawai, and Y. Watanabe	4. 巻 12
2. 論文標題 Nocturnal aerosol optical depth measurements with modified sky radiometer POM-02 using the moon as a light source	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Atmospheric Measurement Techniques	6. 最初と最後の頁 6465-6488
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.5194/amt-12-6465-2019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 内山明博、塩原匡貴、小林拓、菱田晃介、山崎明宏、江井和則、河合和宏、渡部義明、松永恒雄
2. 発表標題 改造スカイラジオメーターによる月を光源としたエアロゾル光学的厚さの推定（2）
3. 学会等名 日本気象学会2018年度春季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 内山明博、松永恒雄、山崎明宏
2. 発表標題 スカイラジオメーター(POM02)の特性(Part 2) (衛星推定エアロゾルプロダクト検証に向けて)
3. 学会等名 日本気象学会2018年度春季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 内山明博、塩原匡貴、小林拓、菱田晃介、山崎明宏、神慶孝、西澤智明、江井和則、河合和宏、渡部義明、松永恒雄
2. 発表標題 改造スカイラジオメーターによる月を光源としたエアロゾル光学的厚さの推定（3）
3. 学会等名 日本気象学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 内山明博、塩原匡貴、小林拓、菱田晃介、江井和則、河井和弘、渡部義明、松永恒雄
2. 発表標題 改造スカイラジオメーターによる月を光源としたエアロゾル光学的厚さの推定
3. 学会等名 日本気象学会2017年度春季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 内山明博, 松永恒雄, 山崎明宏
2. 発表標題 スカイラジオメーター (POM02) の特性 (衛星推定エアロゾルプロダクト検証に向けて)
3. 学会等名 日本気象学会2017年度春季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 内山明博、松永恒雄、山崎明宏
2. 発表標題 スカイラジオメーター(POM02)の特性(Part 2)(2) (衛星推定エアロゾルプロダクト検証に向けて)
3. 学会等名 日本気象学会2019年度春季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	小林 拓 (Kobayashi Hiroshi) (20313786)	山梨大学・大学院総合研究部・准教授 (13501)	
研究分担者	松永 恒雄 (Matsunaga Tsuneo) (70302966)	国立研究開発法人国立環境研究所・衛星観測センター・研究センター長 (82101)	