

昭和基地における月光を用いたエアロゾルの光学的厚さの観測

居島 修*・芦田 裕子**・赤松 濤***

Observation of Aerosol optical depth using moonlight at Syowa station

IJIMA Osamu, ASHIDA Yuko and AKAMATSU Mio

要旨

南極昭和基地では、月光でもエアロゾルの光学的厚さの観測が可能なスカイラジオメーターを導入し、2021年1月から運用を開始した。

スカイラジオメーターは、ヒーターやペルチェ素子を用いて検出器の温度調節を行っているが、この温度調節機能が不十分なため、温度特性検査を実施し観測したデータを補正している。今回、スカイラジオメーター内部に温度センサーを新たに追加したことから、温度特性を詳細に把握するとともに、温度特性の補正に適した測器内部温度を調査し、温度特性の補正手法を確立した。

また、月光を用いたエアロゾルの光学的厚さの計算において、月面における太陽光の反射率を利用するが、この反射率は過小に計算されており、エアロゾルの光学的厚さについても過小に計算された。このため、反射率を簡易的な手法で補正し、月光のエアロゾルの光学的厚さを計算した結果、太陽光の計算結果とほぼ一致した。

1. はじめに

気象庁では、網走、石垣島、南鳥島、南極昭和基地において、プリード社製スカイラジオメーターを用いてエアロゾルの光学的厚さ(Aerosol optical depth: 以下、AOD という)の観測を行っている。

AODは太陽光を利用して観測するため、夜間や南極のような高緯度の極夜期間については観測することができない。このため、近年では月光を利用してAODを観測できる測器が開発されている(Barreto *et al.*: 2013, 2019)。スカイラジオメーターについても、サンセンサーや増幅器を改造し、月光を利用したAODの観測が可能となった(Uchiyama *et al.*: 2019)。

南極昭和基地(以下、昭和基地という)では、極夜期間におけるAODの長期的な変動を把握するため、月光観測用に改造されたスカイラジオメーターが導入され、2021年1月から運用を開始した。また、昭和基地において2023

年1月から運用するスカイラジオメーターについては、新たに温度センサーを測器内部に追加した。

本稿では、①スカイラジオメーターの温度特性の詳細な把握及び温度特性の補正手法、②月光を用いたAODの算出方法について報告する。

なお、温度特性とは、スカイラジオメーターを用いて一定の強さの放射照度を測定した場合に、測器の温度変化に伴ってスカイラジオメーターの出力信号の値(以下、出力値という)が変化する特性のことを言う。スカイラジオメーターの詳細については、大竹ほか(2020)を、月光用に改造したスカイラジオメーターの詳細については、Uchiyama *et al.* (2019)を参照いただきたい。

2. スカイラジオメーターの温度特性の詳細な把握及び温度特性の補正手法

2.1 スカイラジオメーターの概要

スカイラジオメーターの外観を写真1に、内部構造を図1に示す。スカイラジオメーターの測定波長は、340nm, 380nm, 400nm, 500nm, 675nm, 870nm, 940nm, 1020nm, 1225nm, 1627nm, 2200nmの11波長である。遮光筒から入射した光を11波長の干渉フィルターで分光している。分光された光は、340nm~1020nmについては紫外域・可

*高層気象台観測第二課

**気象庁大気海洋部環境・海洋気象課南極観測事務室
(現: 気象庁大気海洋部気象リスク対策課)

***気象庁大気海洋部環境・海洋気象課南極観測事務室
(現: 気象庁大気海洋部業務課父島気象観測所)

視域用検出器(シリコンフォトダイオード)を、1225nm～2200nm については近赤外域用検出器(インジウムガリウムヒ素フォトダイオード)を用いてアナログの電気信号(電流)に変換する。この電気信号をディテクタ基板によりデジタル信号に変換し、各波長の電気信号を電流値として測器制御部に保存する。また、干渉フィルター、紫外域・可視域用検出器、近赤外域用検出器及びディテクタ基板は、一つの筐体に組み込まれている。

スカイラジオメーター内部には温度センサーが取り付けられており、検出器付近等の温度を測定している。旧型のスカイラジオメーター(以下、旧型測器という)では、筐体外側(紫外域・可視域用検出器近傍)と近赤外域用検出器の 2 カ所に取り付けられている。新型のスカイラジオメーター(以下、新型測器という)では、近赤外域用検出器は旧型測器と同じだが、旧型測器において筐体外側に取り付けていた温度センサーを筐体内側(紫外域・可視域用検出器近傍)に変更した。また、筐体と接触しない筐体内部の空間温度(以下、測器内部空間温度という)を測定するための温度センサーが新たに取り付けられた。

なお、旧型測器は現在国内 3 地点と昭和基地で運用されており、新型測器は 2023 年 1 月から昭和基地で運用される予定である。

2. 2 スカイラジオメーターの温度調節機能及び性能

(1) スカイラジオメーターの温度調節機能

シリコンフォトダイオードなどの検出器については、検出器温度の変化に伴い感度が変化する温度特性を持つことが知られており(加藤・斎藤：2008)、検出器温度を一定に保つ必要がある。このため、スカイラジオメーターは、2 種類の温度調節機能を持っている。

1 つは、筐体の温度が 20℃以下とならないように筐体外側にヒーターが取り付けられており、筐体に取り付けた温度センサーが 20℃以下になった場合にヒーターが稼働する仕組みとなっている。この 20℃を感知する温度センサーは、2. 1 で述べたように旧型測器では筐体外側に、新型測器では筐体内側に取り付けられている。もう 1 つは、ペルチェ素子を用いて近赤外域用検出器の温度を約-20℃に調節している。

(2) 温度調節機能の性能

2 種類の温度調節機能の性能を調べるため、新型測器について温度特性検査を実施した。写真 2 に示すように新型測器を温度特性検査装置の恒温槽に設置し、測器周辺の環境温度に相当する恒温槽内の温度(以下、槽内温度という)を-35℃～40℃まで 5℃毎に変化させ、それぞれの槽内温度における各温度センサーの測定温度を調査した。

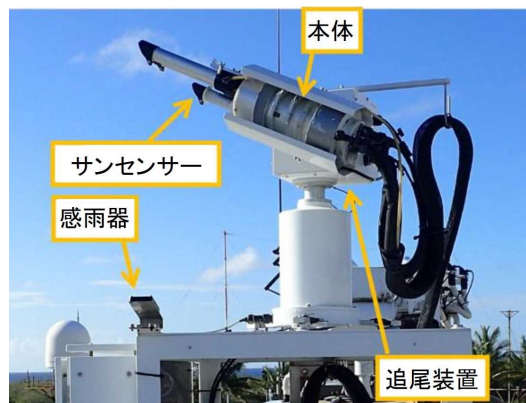


写真 1 スカイラジオメーターの外観

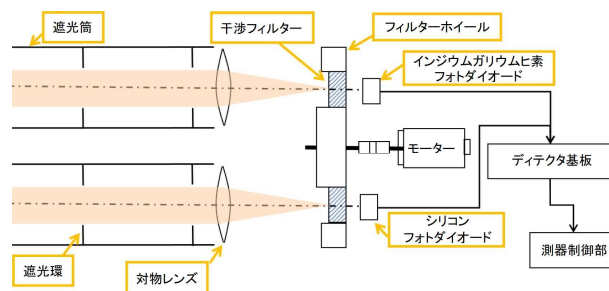


図 1 内部構造



写真 2 温度特性検査装置外観

併せて新型測器の上方からキセノンランプの放射照度を一定の強さで照射し、5℃毎における新型測器の出力値も測定した。また、恒温槽には温度調節機能を有しない直達日射計も設置し、温度調節機能の無い測器の温度(ボディ温度)も確認することとした。

槽内温度と、各温度センサーで測定した温度との関係

を図 2 に示す。測器内部空間温度及び直達日射計ボディ温度は、槽内温度の変化に対応して変化していた。筐体内部温度については、槽内温度が 0℃から 10℃まではヒーターの効果により 20℃を維持したが、氷点下では設定温度の 20℃を保つことができず、また、槽内温度が 10℃以上では筐体内部温度は 20℃以上に上昇することが分かった。同様に、ペルチェ素子による温度調節機能を持つ近赤外線用検出器の温度についても、槽内温度が 0℃から 10℃以外の温度では設定温度の -20℃を保てないことが分かった。

2.3 スカイラジオメーターの温度特性及び温度特性の補正手法

2.2(2)で述べたように、スカイラジオメーターの温度調節機能では、検出器や測器内部の温度を一定に保つことができない。このため、測器の温度変化に伴う出力値の変化を補正する必要がある。

また、WMO(世界気象機関：World Meteorological Organization)では、AOD を 0.02 の精度で観測することを推奨しており、測器の校正の不確かさについては 2%に抑える必要があるとしている(WMO:2016)。この不確かさには温度特性による不確かさも含まれるため、温度特性を補正し、不確かさを最小限に抑える必要がある。

以上の観測精度の要求を踏まえて、新型測器及び旧型測器における温度特性の補正手法について以下に述べる。

2.3.1 新型測器における温度特性の補正

(1) 新型測器の温度特性

2.2(2)において温度特性検査を実施した新型測器について、各温度センサーの測定温度と各波長の出力値の関係について調査した。11 波長のうち、最も温度特性の大きい 380nm について図 3 に示す。380nm では、温度の上昇とともに出力値が低下する温度特性を持っていることが分かる。なお、その他の波長における温度特性については(3)項で述べる。

(2) 温度センサーの選定

温度特性の補正には、温度変化に伴う出力値の変化を補正するための係数(以下、温度補正係数という)が必要となる。また、スカイラジオメーターには複数の温度センサーが取り付けられているため、温度特性の補正に適した温度センサーの選定が重要となる。

補正に適した温度センサーを選定するため、図 3 について 10℃から 30℃の範囲を拡大し、まず筐体内部温度と測器内部空間温度について比較した。図 4 に拡大したグラフを示す。測器内部空間温度は、温度の上昇とともに出

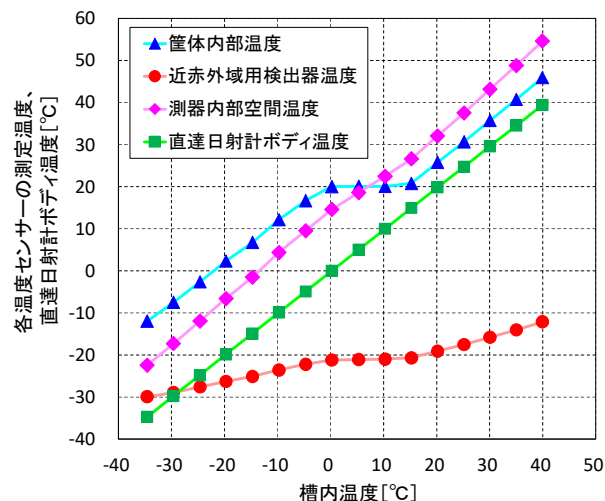


図 2 筐体及び近赤外用検出器の温度変化

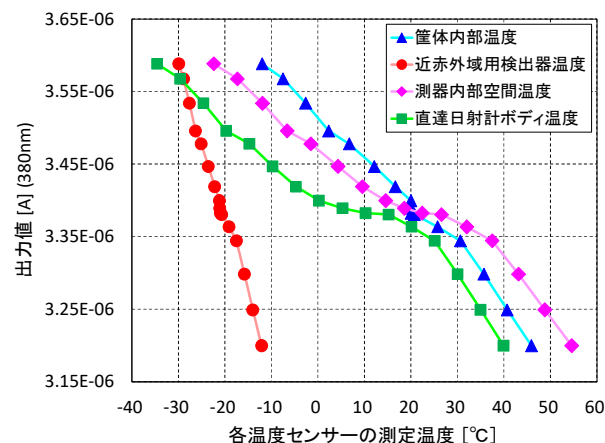


図 3 各温度センサーの測定温度と出力信号(380nm)の関係

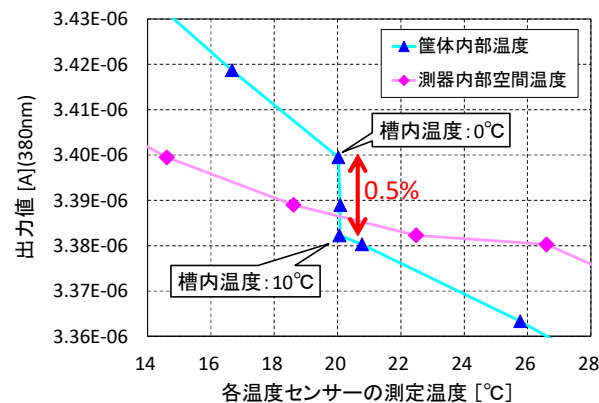


図 4 筐体内部温度及び測器内部空間温度と出力信号(380nm)の関係

力値が徐々に低下している。しかし、筐体内部温度は 20℃において温度が変化せず、出力値のみが変化している。これは図 2 の槽内温度 0℃から 10℃において筐体内部温度が 20℃で一定となっている区間である。この区間では温

度は一定であるが、出力値は 0.5%変化していた。

このように、管体内部温度は変化せず、出力のみ変化する場合は、この温度を用いて温度特性を補正することができない。また、近赤外用検出器温度についても同様に温度が一定となる区間がある。

以上の結果から、温度特性の補正には、測器内部空間温度が適していると判断した。

(3) 新型測器の温度補正係数

槽内温度 0°Cにおける測器内部空間温度は 15.2°Cであった。15.2°Cの出力値を基準として、各測器内部空間温度における出力値との比(以下、温度補正係数という)を決定し、この温度補正係数を用いて温度特性を補正する。なお、本稿では基準の温度を 15.2°Cとしたが、どの温度を基準にしても問題はない。

図 5 から図 7 に各波長の温度補正係数を示す。温度補正係数を用いた出力値の補正は、例えば、測器内部空間温度が 54.6°Cの場合、380nm の温度補正係数は 0.941(図 5)である。このときの出力値を 0.941 で割ることによって温度特性を補正する。また、5°C毎以外の温度における温度補正係数については、その温度を挟む 2 点の温度補正係数を用いて内挿によって求める。

340nm~1020nm の波長は、同じ検出器を用いているが、各波長の温度補正係数(図 5, 図 6)は同じではない。1225nm~2200nm の温度補正係数(図 7)についても同様である。これは干渉フィルターについても温度特性を持っており、波長によって特性が異なるためと考えられる。参考までに気象庁において 2006 年まで AOD 観測に使用されていたサンフォトメータ(英弘精機社製 MS-110)の干渉フィルター(2 波長)について、温度特性検査を実施した結果を図 8 に示す。横軸は槽内温度、縦軸は 0°Cの出力値を基準として各槽内温度における出力値の比である。25°Cでは両者の比に 1.5%の差がみられた。なお、スカイラジオメーターの干渉フィルターについては入手できなかったため、温度特性検査は実施していない。

2. 3. 2 旧型測器における温度特性の補正

(1) 温度センサーの選定

旧型測器の温度センサーは、新型測器とは異なり、測器内部空間温度を測定していないため、新型測器と同じ手法で温度特性を補正することができない。また、旧型測器については、現在昭和基地で運用しており、詳細な温度特性検査を実施することができなかった。このため、国内で使用されている 3 台の旧型測器の温度特性検査データを基に、温度特性の補正手法を検討した。なお、新型測器では調査のため 5°C毎に温度特性を検査したが、国内で使用

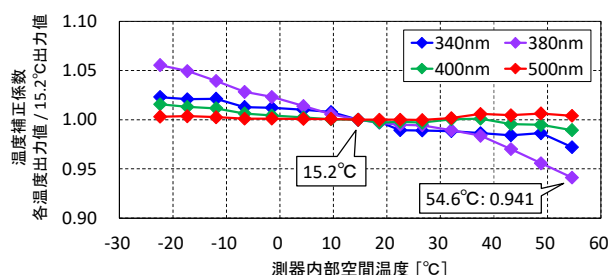


図 5 15.2°Cの出力値を基準とした各温度の出力値との比(340nm, 380nm, 400nm, 500nm)

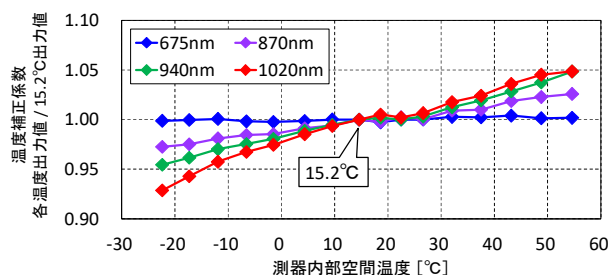


図 6 15.2°Cの出力値を基準とした各温度の出力値との比(675nm, 870nm, 940nm, 1020nm)

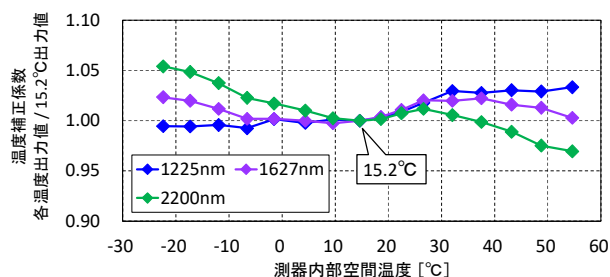


図 7 15.2°Cの出力値を基準とした各温度の出力値との比(1225nm, 1627nm, 2200nm)

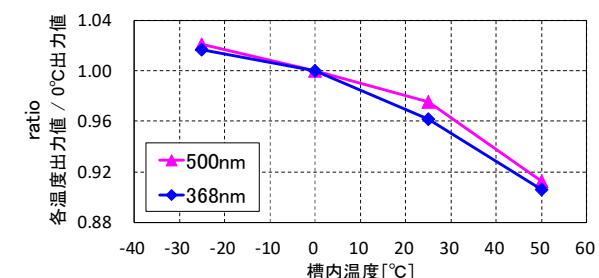


図 8 干渉フィルターの温度特性

(測器：英弘精機社製 MS-110, 波長：368nm, 500nm)

しているスカイラジオメーターの温度特性検査では、通常 4 点(-20°C, 0°C, 20°C, 40°C)の検査点により温度補正係数を決定している。

3 台の旧型測器における温度特性検査結果について、槽内温度と管体外部温度の関係を図 9 に示す。図 2 と同様に槽内温度が 0°Cから 20°C付近では、管体外部温度は 20°C付近でほとんど変化しない傾向にあった。また、近赤外域

用検出器については、新型測器とほぼ同じであった(図は省略)。

以上の結果により、筐体外部温度及び近赤外線用検出器温度については、温度特性の補正に利用できないことを確認した。このため、新型測器の測器内部空間温度に相当する温度として、気温又は直達日射計ボディ温度(スカイラジオメーターの近傍に設置されている場合)の利用を検討した。

図 2 において、気温に相当する槽内温度と直達日射計ボディ温度には高い相関がある。また、新型測器の測器内部空間温度と直達日射計ボディ温度の関係を図 10 に示す。両者についても高い相関があることが分かる。

通常、気温は地上付近で観測し、直達日射計やスカイラジオメーターは建物の屋上で観測している。気温と直達

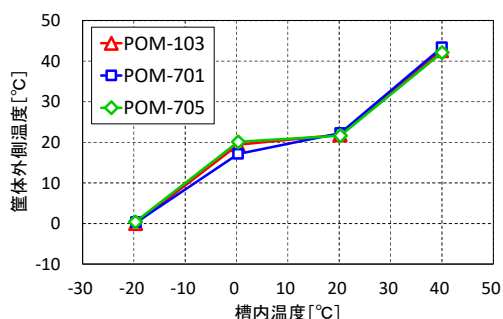


図 9 槽内温度と筐体外部温度の関係(旧型測器)

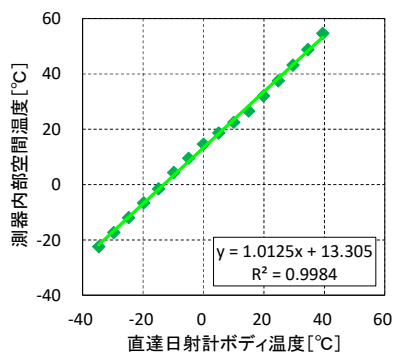


図 10 直達日射計ボディ温度と測器内部空間温度(新型測器)の関係

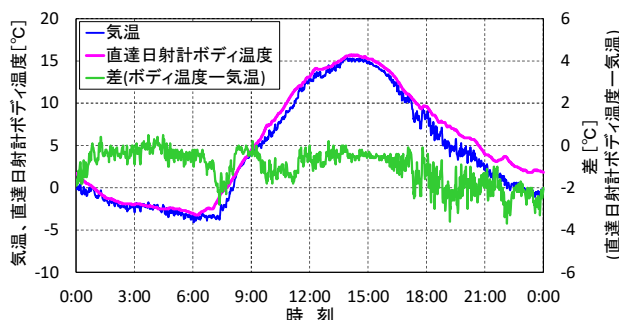


図 11 気温、直達日射計ボディ温度及び両者の差の日変化(2019年1月5日:つくば)

日射計ボディ温度について、設置場所の違いによる両者の差を確認するため、つくばの冬季における気温と直達日射計ボディ温度の日変化(1分平均値)及び両者の差を図 11 に示す。両者は設置場所が異なるため、夜間において一致しない場合があり、また、気温については分単位で変動していることが分かる。測器内部の温度は気温に比べて緩やかに変化すること、また、直達日射計はスカイラジオメーターの近くに設置されていることから、温度特性の補正には、直達日射計ボディ温度が適していると判断した。

(2) 旧型測器の温度補正係数

昭和基地へ持ち込む前に実施した旧型測器の温度特性検査は、国内での比較校正及び南極での観測を考慮し、検査点を -35°C 、 -10°C 、 15°C 、 40°C の4点とした。直達日射計ボディ温度 0°C の出力値を基準として、各直達日射計ボディ温度における出力値との比(温度補正係数)を求める。この4点について3次近似曲線を当てはめ、 $-35^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$

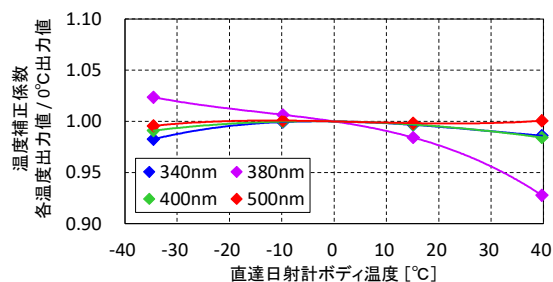


図 12 0°C の出力値を基準とした各温度の出力値との比(340nm, 380nm, 400nm, 500nm)

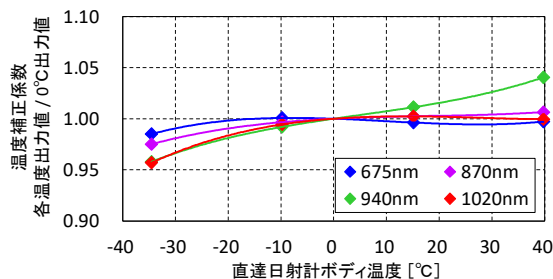


図 13 0°C の出力値を基準とした各温度の出力値との比(675nm, 870nm, 940nm, 1020nm)

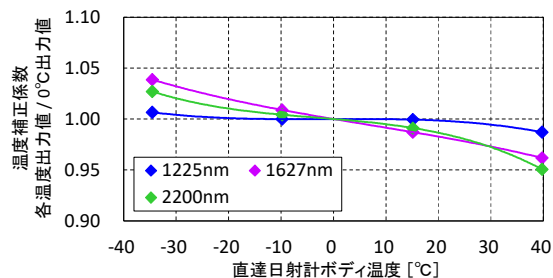


図 14 0°C の出力値を基準とした各温度の出力値との比(1225nm, 1627nm, 2200nm)

における温度特性係数を決定した。図 12 から図 14 に各波長の温度補正係数を示す。

旧型測器の温度特性の補正手法は以下のとおりである。直達日射計ボディ温度と 3 次近似曲線から温度補正係数を決定し、出力値をその係数で割ることにより補正する。

3. 月光を用いた AOD の計算

太陽からの直達光について、大気外から地上に到達するまでの減衰量を知ることによって AOD を計算することができる。したがって、太陽光を大気外で測定した値(以下、測器定数という)が必要となる。実際に大気外で測定できないため、測器定数については標高の高い場所で太陽光を用いて、ラングレー法と呼ばれる校正方法によって決定する。

月光を用いて AOD を計算するには、①太陽光の月面での反射率(以下、反射率という)を計算し、②この反射率を利用して太陽光で決定した測器定数(以下、太陽光測器定数という)を月光用の測器定数に変換(以下、月光変換測器定数という)する必要がある。

なお、スカイラジオメーターのラングレー法については Uchiyama *et al.*(2018)を、太陽光を用いた AOD の計算方法については居島ほか(2014)を参照いただきたい。また、気象庁が維持・管理する基準器は、ラングレー法で測器定数を決定しているが、国内及び昭和基地で運用されるスカイラジオメーターについては、この基準器との比較観測により測器定数を決定している。

3.1 反射率の計算

反射率の計算については、球面状の月面を Disk(円盤)と仮定する Disk integrated model の代表的な ROLO(Robotic Lunar Observatory)モデルを利用した。

ROLO モデルは、経験的に導き出された解析方程式とパラメータを用いて、32 波長の反射率を算出することができる(Kieffer and Stone : 2005)。この ROLO モデルは、位相角の変化だけでなく秤動現象や月の上弦や下弦における反射面の違いなど、様々な条件に対応している。ROLO モデルの反射率を(1)式に示す。

$$\begin{aligned} \ln A_k &= \sum_{i=0}^3 a_{ik} g^i + \sum_{j=1}^3 b_{jk} \Phi^{2j-1} + c_1 \phi + c_2 \theta + c_3 \Phi \phi + c_4 \Phi \theta \\ &+ d_{1k} e^{-g/p_1} + d_{2k} e^{-g/p_2} \\ &+ d_{3k} \cos\left(\frac{g-p_3}{p_4}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 A_k は波長 k における反射率、 g は観測時の位相角絶対値、 θ と ϕ は、観測者直下点の月面における緯度と経度、 Φ は月面上の太陽直下点経度である。 a, b, c, d, p は観測結果から得られた経験的なパラメータである。このパラメータを用いて 350nm~25000 nm の範囲における 32 波長の反射率が計算される。

(1)式右辺の 7 項から 9 項は、ラジアン単位と度単位が混在しているため、すべて度単位に統一する必要がある。また、Kieffer and Stone の(1)式には誤植があり、本稿では θ と ϕ を入れ替えた。 θ, ϕ 及び Φ の天文に関するパラメータについては、国立天文台(https://eco.mtk.nao.ac.jp/cgi-bin/koyomi/cande/moon_spin.cgi)の計算値を利用した。

なお、位相角(phase angle)とは、図 15 に示すように太陽 - 月 - 観測者(地球)のなす角度で、太陽の位置は「天測暦」(海上保安庁:1987)の計算式を、月の位置は「天体の位置計算」(長沢工:1985)の計算式を使用して算出した。太陽及び月の位置は、国立天文台(<https://eco.mtk.nao.ac.jp/cgi-bin/koyomi/koyomix.cgi>)の計算値と比較した結果、 0.1° 未満の精度で計算されていることを確認した。

(1)式による反射率の計算例を図 16 に示す。図 16 は満月(2020年3月10日2時48分:位相角0度)及び半月(2020年3月16日18時35分:位相角90度)における 350nm~1243nm の反射率である。この図の満月のプロットから月面では短い波長ほど反射率が小さいことが分かる。

これらの反射率に対して 2 次近似曲線を当てはめ、こ

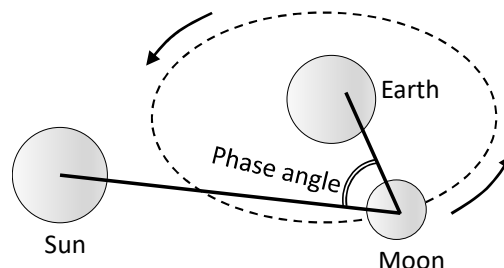


図 15 位相角(Phase angle)

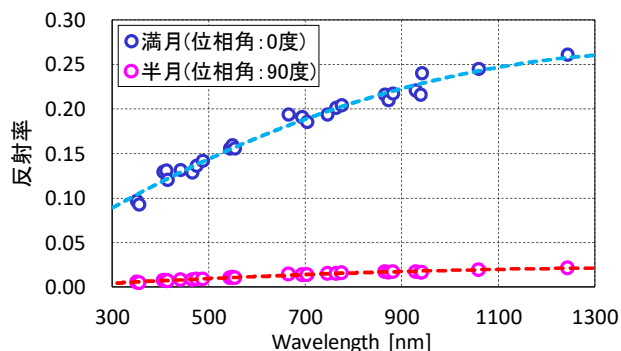


図 16 満月及び半月における反射率の計算例 (位相角 0 度:2020/3/10 2:48, 位相角 90 度:2020/3/16 18:35)

の近似曲線からスカイラジオメーターの6波長(340, 380, 400, 500, 675, 870nm)における反射率を決定した。なお、本稿では気象庁が AOD を計算する波長を対象とし、870nm より長い波長について反射率の計算は行わなかった。また、340nm 及び 380nm については、月光の出力値がバックグラウンドノイズと同程度または僅かに大きい程度で、計算した AOD は大きくばらつくため、400nm～870nm について AOD を計算することとした。

3. 2 月光用の測器定数の算出及び補正

3. 2. 1 月光用の測器定数の算出

月光用の測器定数は(2)式で見積もられる(Kieffer and Stone : 2005)。

$$I'_k = \frac{1}{f_d} A_k \Omega_M \frac{E_k}{\pi} \quad (2)$$

$$f_d = \left(\frac{D_{S-M}}{1AU} \right)^2 \left(\frac{D_{V-M}}{384,400km} \right)^2 \quad (3)$$

ここで、 I'_k は波長 k における月光変換測器定数、 A_k は反射率、 Ω_k は 384,400km(地球 - 月間の平均距離)の距離から見た月の立体角(6.4177×10^{-5} sr)、 E_k は 1AU(太陽 - 地球間の平均距離)における太陽光測器定数である。(3)式の f_d は(2)式の補正項で、 D_{S-M} は観測時の太陽 - 月間距離、 D_{V-M} は観測者 - 月間距離である。なお、本稿では D_{S-M} については太陽 - 地球間距離で代用した。代用することによる不確かさは 0.3% 未満である。また、Kieffer and Stone(2005)の論文では、 I'_k は波長 k における月光の放射照度、 E_k は太陽光の波長 k における放射照度としている。

3. 1 の反射率及び(2)式によって AOD を計算するための月光変換測器定数が算出される。しかし、Barreto *et al.* (2017)や Uchiyama *et al.* (2019)によると、ROLO モデルの反射率((2)式: A_k)は過小に計算されており、その不確かさは位相角に依存していることを指摘している。つまり(2)式で算出した月光変換測器定数は、実際の値より小さいと考えられる。

3. 2. 2 月光用の測器定数の補正

3. 2. 1 で算出した月光変換測器定数は、実際の値より小さいと考えられることから、Uchiyama *et al.* (2019)は月光変換測器定数について、次の①～④の手順で補正している。

①位相角 $10^\circ \sim 90^\circ$ の範囲について、月光を用いてラングレー法によりそれぞれの位相角における月光の測器定数(以下、月光測器定数という)を決定する。②月光測器定数(V_{m0})と太陽光測器定数(V_{s0})の比(V_{m0}/V_{s0})を位相

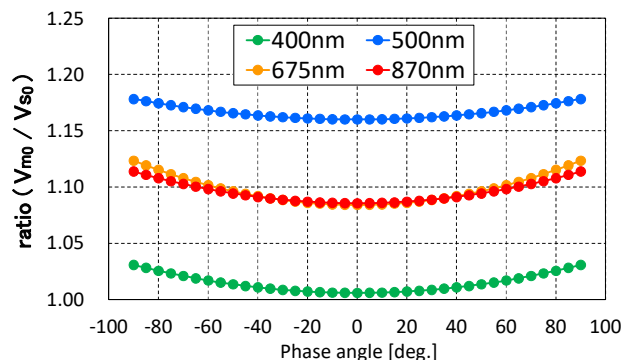


図 17 月光と太陽光の測器定数の比(V_{m0}/V_{s0}) (Uchiyama *et al.* : 2019)

角毎に算出する。③横軸に位相角、縦軸に測器定数の比(V_{m0}/V_{s0})をプロットし、位相角 0° を中心とした放物線(2次式)で近似する。④観測時の位相角と2次近似式から得られた V_{m0}/V_{s0} を反射率((2)式: A_k)に掛け、月光変換測器定数を補正する。

図 17 に2次近似式で求めた V_{m0}/V_{s0} を示す。なお、本稿では2次近似式で導出した V_{m0}/V_{s0} を「反射率補正係数」と呼び、また、反射率補正係数を用いて補正した月光変換測器定数を「月光補正測器定数」と呼ぶこととする。

3. 3 月光を用いた AOD の計算

3. 3. 1 月光補正測器定数を用いた AOD の計算

昭和基地の2021年9月17日12時から9月19日12時までの太陽光及び月光の出力値についてAODを計算した。反射率を補正していない月光変換測器定数を用いて計算したAODを図18に、反射率を補正した月光補正測器定数を用いて計算したAODを図19に示す。この期間の天気は18日15時過ぎに雲がかかった他は快晴であった。

反射率を補正しない場合(図18)は、測器定数が実際の値より小さいため、ほとんどの月光のAODはマイナスの値となった。AODはその定義からマイナスの値にはならないため、AODがマイナスとなった場合、計算に用いた測器定数が明らかに小さいことになる。

また、反射率を補正した場合(図19)についても、400nm及び675nmの月光のAODはマイナスの値となった。これは、反射率補正係数を導出した測器と、昭和基地の測器が異なることが原因の一つと考える。すなわち、Uchiyama *et al.* (2019)の手法を用いて反射率補正係数を導出するには、昭和基地の測器を用いて、位相角 0° (満月)から 90° (半月)におけるラングレー法で決定した月光の測器定数が必要となる。しかし、昭和基地ではまだ十分なデータが蓄積されていないため、この手法では反射率を補正することができなかった。

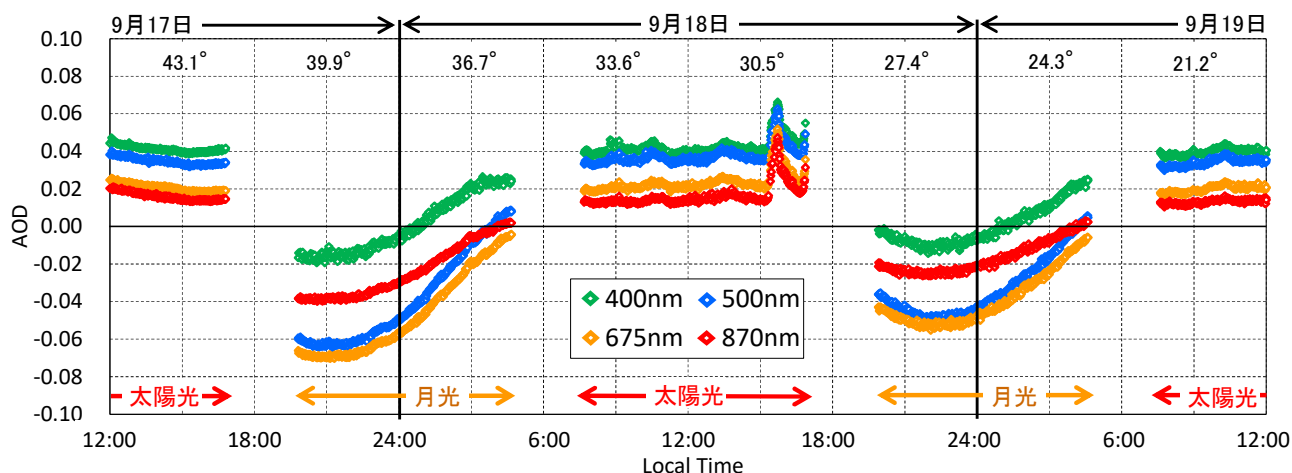


図 18 昭和基地における AOD 計算結果(反射率補正なし) : 2021/9/17 12:00~9/19 12:00 (図中の数値は位相角)

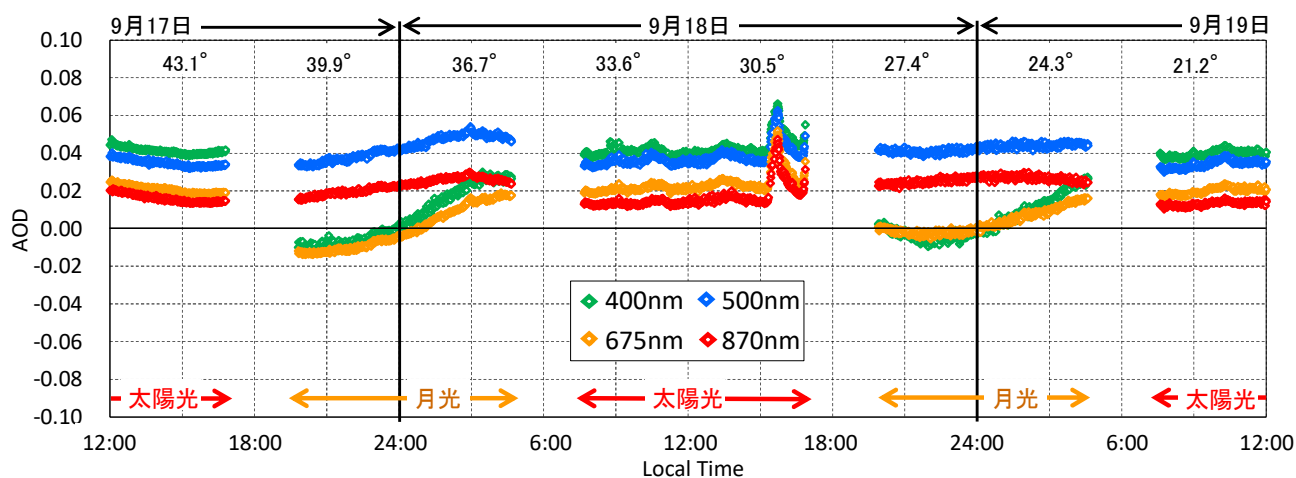


図 19 昭和基地における AOD 計算結果(反射率補正あり) : 2021/9/17 12:00~9/19 12:00 (図中の数値は位相角)

3.3.2 太陽光と月光の AOD を用いた反射率補正係数の修正及び AOD の計算

3.3.1 で述べた方法では、月光の AOD がマイナスの値となる場合があることから、太陽光の AOD を用いた補正手法を検討した。

Barreto *et al.* (2017)は、太陽光と月光の AOD を連続で測定した日のデータを蓄積し、月光の AOD を位相角及び月の天頂角を用いて補正係数を決定した。Barreto *et al.* (2017)の手法は 10 カ月間のデータを用いてこの補正係数を導出しているが、昭和基地では太陽光と月光の連続データを取得できる期間が少なく、この手法を利用することは困難と判断した。

そこで、本稿では太陽光と月光の AOD を連続で観測できた 3 日間(2021 年 9 月 17 日~9 月 19 日)のデータを用いて、図 17 の反射率補正係数を簡易的に補正することとした。

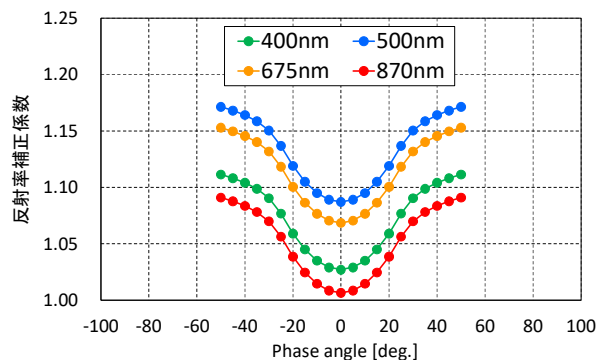


図 20 任意に決定した反射率補正係数

補正手順は次のとおりである。①出力値の大きい 870nm について、月光の AOD が太陽光の AOD と一致するように Uchiyama *et al.* (2019)の反射率補正係数(図 17)を修正する。②その他の波長については、①で修正した 870nm の反射率補正係数について、AOD がおよそ一致するように一定のバイアスを加えて波長毎に修正する。修正した反射率補正係数を図 20 に示す。なお、修正した反射率補正係数については、位相角 41° までで決定したため、横

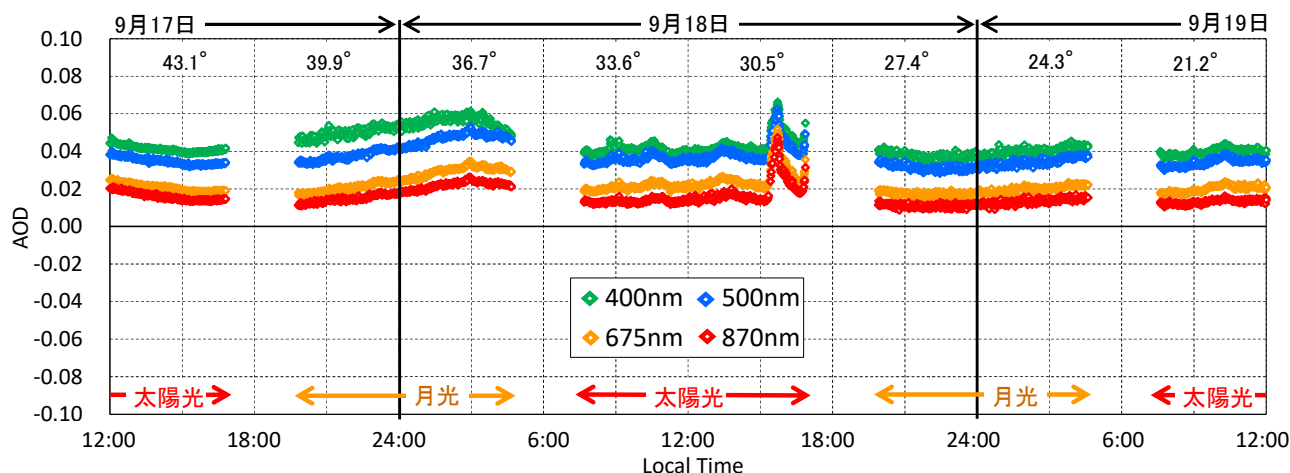


図 21 昭和基地における AOD 計算結果(任意に決定した反射率補正係数による補正あり)

軸の位相角は $-50^{\circ} \sim 50^{\circ}$ とした。

修正した反射率補正係数を用いて計算した AOD を図 21 に示す。9 月 17 日から 18 日の月光の AOD は前後の太陽光の AOD とずれはあるものの、9 月 18 日から 19 日にかけてはおおよそ前後の太陽光の AOD と一致した。

4. まとめ

(1) スカイラジオメーターの温度特性

スカイラジオメーターの温度特性検査を実施し、各波長における温度特性を詳細に把握するとともに、温度特性の補正手法を確立した。

(2) 月光を用いた AOD の計算

AOD の計算に用いる月光用の測器定数は、太陽光で決定した測器定数と、太陽光の月面での反射率から求めた。しかし、この反射率は過小に計算されることから、月光用の測器定数についても実際の値に比べて過小となり、月光の AOD は過小に計算された。このため、太陽光と月光の AOD が一致するように反射率を補正する係数を任意に求め、月光の AOD を計算した結果、両者の AOD はほぼ一致した。

(3) 今後の課題

スカイラジオメーターの温度特性をより適切に補正するには、測器内部の代表的な温度を用いる必要があることが分かった。そのため、旧型測器については、測器内部空間温度を測定できるように改良することが望まれる。

太陽光の月面での反射率を補正する係数については、3 日間のデータによって決定しており、あくまでも簡易的な手法である。今後は、ラングレー法を用いた月光の測器定数のデータを蓄積し、それぞれの位相角における月光の測器定数と太陽光の測器定数の比を用いて反射率を補正することが望まれる。

謝 辞

本調査は、気象庁 大気海洋部 環境・海洋気象課 南極観測事務室の協力を得て、南極昭和基地へ持ち込む前のスカイラジオメーターの動作確認を兼ねて実施させていただいた。ここに厚くお礼申し上げます。

引用文献

- Barreto, Á., Cuevas, E., Damiri, B., Guirado, C., Berkoff, T., Berjón, A.J., Hernández, Y., Almansa, F., and Gil, M.(2013) : A new method for nocturnal aerosol measurements with a lunar photometer prototype. *Atmos. Meas. Tech.* **6**, 585–598.
- Barreto, Á., Román, R., Cuevas, E., Berjón, A.J., Almansa, A.F., Toledano, C., González, R., Hernández, Y., Blarel, L., Goloub, P., Guirado, C., Yela, M.(2017) : Assessment of nocturnal aerosol optical depth from lunar photometry at the Izaña high mountain observatory. *Atmos. Meas. Tech.* **10**, 3007–3019.
- Barreto, Á., Román, R., Cuevas, E., Perez-Ramirez, D., Berjón, A., Kouremeti, N., Kazadzis, S., Grobner, J., Mazzola, M., Toledano, C., Benavent-Oltra, J. A., Doppler, L., Jurysek, J., Almansa, F., Victori, S., Maupin, F., Guirado-Fuentes, C., Gonzalez, R., Vitale, V., Goloub, P., Blarel, L., Alados-Arboledas, L., Woolliams, E., Greenwell, C., Taylor, S., Antuna, J. C., and Yela, M.(2019) : Evaluation of night-time aerosol optical depth measurements and lunar irradiance models in the frame of the first multi-instrument nocturnal intercomparison campaign, *Atmos. Environ.*, **202**, 190-211.
- 居島 修・鈴木 健司・辰己弘(2014) : 気象庁におけるエアロゾルの光学的厚さの。トレーサビリティについて。日本エアロゾル学会, エアロゾル研究, Vol.29 No.3, 159

- 165.

海上保安庁(1987):天測歴(1987年版). 海上保安庁水路部,
pp466.

加藤昌弘・齋藤則生(2008): 光の強度を図る II—シリコン
フォトダイオード—. 日本放射光学会, 放射光, Vol.21
No.3, 168-175.

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

長沢工(1985):天体の位置計算(増補版). 地人書館社, pp255.

大竹潤・斎藤篤思・佐々木駿・丹治菜摘・岡嶋真吾・佐藤
幸隆(2020) : スカイラジオメーターによるエーロゾル
観測について. 測候時報, 気象庁, **87**, 83 - 98.

Uchiyama, A., Matsunaga, T., and Yamazaki, A.(2018) : The
instrument constant of sky radiometers (POM-02) – Part 1:
Calibration constant, *Atmospheric Measurement Techniques.*,
Vol.11, 5363 - 5388.

Uchiyama, A., Shiobara, M., Kobayashi, H., Matsunaga, T.,
Yamazaki, A., Inei, K., Kawai, K., and Watanabe, Y. (2019) :
Nocturnal aerosol optical depth measurements with modified
sky radiometer POM-02 using the moon as a light source.
Atmospheric Measurement Techniques., Vol.12, 6465 - 6488.

WMO(2016) : WMO/GAW Aerosol Measurement Procedures,
Guidelines and Recommendations, 2nd edn., WMO-No.1177.