

—報告—

Report

## 「海鷹丸」南極航海で観測された海洋性エアロゾルの光学的厚さ

小林 拓<sup>1\*</sup>・平譚 享<sup>2</sup>・矢吹正教<sup>3,5</sup>・上田沙也子<sup>4</sup>・長田和雄<sup>4</sup>・  
塩原匡貴<sup>5</sup>・福地光男<sup>5,6</sup>Maritime aerosol optical thickness measured during Antarctic  
research cruises of R/V *Umitaka-Maru*Hiroshi Kobayashi<sup>1\*</sup>, Toru Hirawake<sup>2</sup>, Masanori Yabuki<sup>3,5</sup>, Sayako Ueda<sup>4</sup>,  
Kazuo Osada<sup>4</sup>, Masataka Shiobara<sup>5</sup> and Mitsuo Fukuchi<sup>5,6</sup>

(2010年3月25日受付; 2010年4月27日受理)

**Abstract:** Aerosol optical thickness (AOT) was measured during Antarctic research cruises of R/V *Umitaka-Maru*. The measured AOTs at 500 nm in the Indian sector of the Antarctic Ocean ranged from 0.02 to 0.12. In Antarctic coastal waters, the AOTs were as low as around 0.05. On the other hand, the some AOTs were higher than 0.1 from 40°S to 60°S. In middle and low latitude regions of the Indian Ocean, the AOTs ranged from 0.05 to 0.15. The AOTs were correlated with wind speed. It is indicated that sea-salt particles, generated by wind, dominated optically and wind speed affected the AOT in the Antarctic Ocean. Angström exponent decreased with increasing AOT. In the AOT wavelength spectra, some AOTs in 380 nm and 870 nm tended to deviate from the power function. Comparing calculation methods of Rayleigh optical thickness suggested a possibility of reducing the deviations of these AOTs. In the future, accuracy check of the instrument constant and review of the calculation method of Rayleigh optical thickness are recommended to enhance

<sup>1</sup> 山梨大学大学院医学工学総合研究部, Interdisciplinary Graduate School of Medicine and Engineering, University of Yamanashi, 3-11, Takeda 4-chome, Kofu 400-8511.

<sup>2</sup> 北海道大学大学院水産科学研究院, Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University, 3-1-1, Minato-cho, Hakodate, Hokkaido 041-8611.

<sup>3</sup> (現所属 present affiliation): 京都大学生存圏研究所, Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011.

<sup>4</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601.

<sup>5</sup> 情報・システム研究機構国立極地研究所, National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, Midori-cho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

<sup>6</sup> 総合研究大学院大学複合科学研究科極域科学専攻, Department of Polar Science, School of Multidisciplinary Sciences, The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), Midori-cho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

\* Corresponding author. E-mail: kobachu@yamanashi.ac.jp

the accuracy of maritime AOT measurement.

**要旨:** 東京海洋大学「海鷹丸」の南極海研究航海において、大気エアロゾルの光学的厚さ(AOT)の観測を実施した。南極海インド洋セクターでの500 nmでのAOTは、0.02-0.12の範囲であった。南極大陸沿岸域でのAOTは比較的低く、0.02前後であった。40-60°Sの海域では、0.1以上の値を示すことがあった。インド洋低中緯度帯でのAOTは、0.05-0.15の範囲であった。風速とAOTとに正の相関がみられたことから、南極海では光学的に海塩粒子が卓越し、風速がAOTに影響を及ぼしていると考えられる。AOTが高くなるにつれ、オングストローム指数は減少した。AOTの波長スペクトルにおいて、380 nmと870 nmのAOTはべき関数からずれる傾向がみられた。レイリーの光学的厚さの算出方法を比較したところ、ずれが大幅に改善される可能性が示された。今後、より観測精度を高めていくためには、機器定数の精度を把握するとともに、レイリーの光学的厚さの算出方法の見直しなどが必要である。

## 1. はじめに

大気エアロゾルは地球の放射収支に対し、太陽放射を散乱・吸収することによる直接的な影響や凝結核として作用することによる間接的な影響を与えることが広く知られている。これらの影響を評価するためには、エアロゾルの量を把握する必要がある。エアロゾルの気柱総量を表す物理量として、光学的厚さがよく用いられる。光学的厚さは、気柱に含まれる散乱体の単位体積もしくは単位質量あたりの散乱断面積を、気柱全体にわたって鉛直方向に積分することにより得られる。大気エアロゾルの光学的厚さ(Aerosol Optical Thickness; 以下、AOT)は、サンフォトメータによる太陽直達光の測定結果から算出される。

地球全体の地表面の7割を占める海洋上のAOTを把握することは、エアロゾルの全球規模での放射影響を評価する上で非常に重要である。しかし、陸上と異なり長期にわたって連続観測をすることが困難であるため、海洋上の測定例は少なく(Smirnov *et al.*, 2009)、特に南極海は、その海域への移動手段が限られるため測定例は少ない。一方で、南極海での基礎生産力を推定する上で、衛星リモートセンシングによるクロロフィル *a* 濃度の観測が重要な役割を果たしている。衛星リモートセンシングにおいては、クロロフィル *a* 濃度を導出する際、大気による影響を精度良く推定して取り除く必要があり、この処理は大気補正と呼ばれている。しかし、南極海ではこの大気補正処理に失敗し、クロロフィル *a* 濃度の推定誤差が大きくなることが指摘されている(村上, 私信)。この原因を検討する上で、大気補正処理での重要な項目であるAOTの南極海での知見が求められている。

日本南極地域観測隊による南極海での観測は、これまで南極観測船「しらせ」で実施してきたが、これを補完する目的で、東京海洋大学練習船「海鷹丸」による南極海研究航海が実施されるようになった(笠松ほか, 2008; 長田ほか, 2010)。そこで本研究では「海鷹丸」の南極海研究航海において、ハンドヘルドサンフォトメータを用いて、AOTの観測を

実施した。

## 2. 測定方法

東京海洋大学「海鷹丸」の第15次航海(ケープタウン2004年12月31日出港~フリーマントル2005年1月25日入港, 以下, UM0405), 第18次航海(ケープタウン2006年1月4日出港~フリーマントル1月30日入港, 以下, UM0506), 第24次航海(ケープタウン2007年12月24日出港~フリーマントル~ホバート2008年2月17日入港, 以下, UM0708), そして第27次航海(ベノア2008年12月1日出港~ケープタウン~フリーマントル2009年2月6日入港, 以下, UM0809)において, サンフォトメータ(Solar Light Co., MICROTOPS II)により太陽直達光の観測を行った。各航海の航跡図を図1に示す。観測波長は, 380, 440, 500, 675, 870 nmの5波長である。観測は太陽周辺に雲がない日に随時実施した。測定手順はKnobelspiesse *et al.* (2003)に基づき, 暗電流を補正するため電源をOFFにしすぐにONにした後, 連続的に5回測定を行う過程を1セットとし, 各測定で4セット以上繰り返した。レイリーおよびオゾンの光学的厚さは, NASAの標準的なプロトコルの算出式(Frouin *et al.*, 2003)より算出した。現地気圧はサンフォトメータに内蔵されている

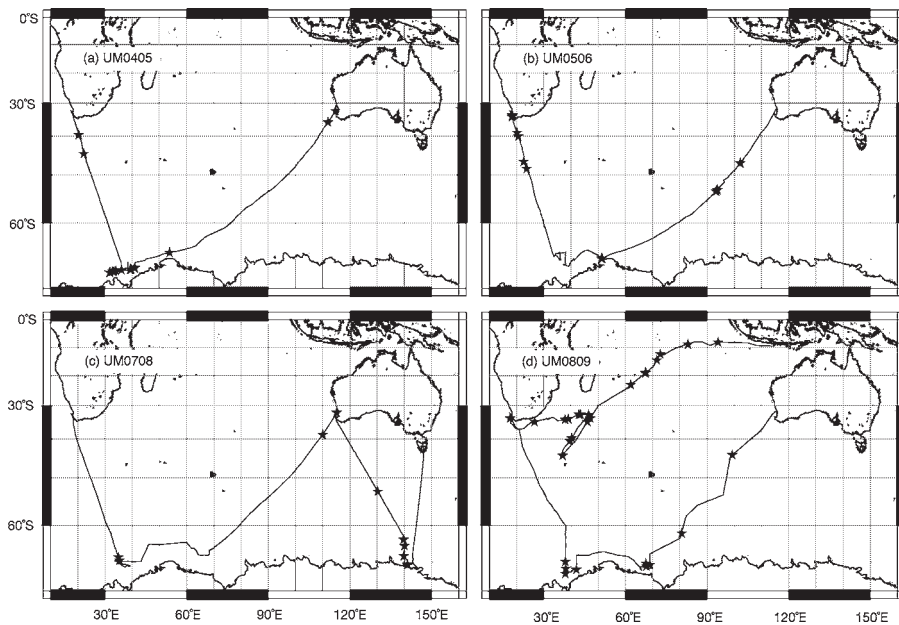


図1 海鷹丸南極観測航海の航跡図。星印は測定地点を表す。

Fig. 1. Ship tracks of Antarctic research cruises of R/V Umitaka-Maru. Stars show measuring points.

気圧計の値を、オゾンの気柱総量は OMI のデータ ([http://toms.gsfc.nasa.gov/teacher/ozone\\_overhead\\_v8.html](http://toms.gsfc.nasa.gov/teacher/ozone_overhead_v8.html)) を使用した。AOT はサンフォトメータから得られた大気全体の光学的厚さから、レイリーとオゾンの光学的厚さを引き算し求めた。太陽追尾に失敗しているデータを除去するために、算出された各測定時の AOT の平均値に対する標準偏差の割合が 5% 以下になるまで、AOT の最大値を削除した (Knobelspiesse *et al.*, 2003)。削除によりデータ数が 3 未満になった場合は、欠測とした。

### 3. 結果および考察

各航海における南極海インド洋セクターでの 500 nm の AOT の測定結果を、測定点の緯度ごとに図示した (図 2)。UM0809 は、インド洋低中緯度帯 (ペノア~ケープタウン) でも観測を実施したため、この区間の AOT は経度ごとに図示した (図 3)。サンフォトメータによる AOT の観測においては、機器定数の精度が測定の精度に大きく影響を与える。サンフォトメータの機器定数とは、大気上端で太陽放射を測定したときの出力に相当する測器固有の値である。本研究では、サンフォトメータの機器定数を決定するための観測、いわゆるラングレー法検定観測を、2006 年 10 月 17 日に富士山須走口五合目で実施した。この観測で得られた機器定数は、納入時の値に対してそれぞれの波長で -1.0~2.7% 変化していた。機器定数は主に干渉フィルターの劣化により経年変化することが指摘されており、例えば、Porter *et al.* (2001) は、MICROTOPS II の機器定数をハワイ島マウナロア山で

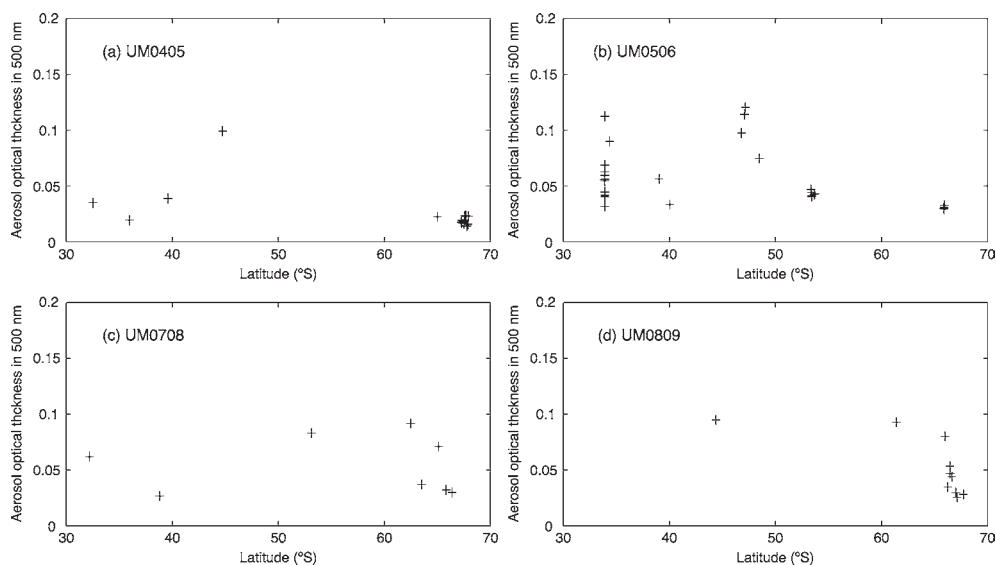


図 2 南極海インド洋セクターの各緯度における 500 nm でのエアロゾルの光学的厚さ  
 Fig. 2. Latitudinal dependence of aerosol optical thickness at 500 nm in the Indian sector of the Antarctic Ocean.

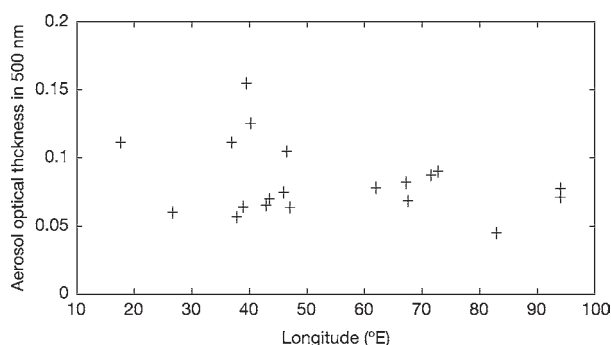


図3 インド洋低中緯度帯での各経度における 500 nm でのエアロゾルの光学的厚さ

Fig. 3. Aerosol optical thickness at 500 nm in the middle and low latitude regions of Indian Ocean.

1年間にわたり観測し、機器定数の平均値に対する標準偏差の割合が0.28%~0.9%程度であったと報告した。本研究で使用したサンフォトメータについては、2006年以外は大気の状態が悪く、良好な機器定数を得ることができなかった。そのため、本報告のAOTは納入時の機器定数を用いて算出しており、機器定数の経年変化に相当する誤差が含まれる可能性がある。前述のとおり、サンフォトメータの納入時から2年経過した2006年の時点で機器定数が-1.0~2.7%変化しており、機器定数が±3%変化したと仮定した場合、AOTの誤差は、各波長において±0.02程度であると見積もられる。

南極海インド洋セクターの500 nmでのAOTは、0.02-0.12の範囲であった。これらの値は、インド洋や太平洋の島嶼<sup>とうしょ</sup>で観測された値と一致していた(Smirnov *et al.*, 2009)。一方、日本各地域で観測された500 nmでのAOTの季節ごとの平均値は0.18-0.45であり(Aoki and Fujiyoshi, 2003)、南極海でのAOTが低いことがわかる。AOTの緯度ごとの分布は、南極大陸沿岸域では比較的強く0.02前後であった。一方、暴風圏として知られている40-60°Sの海域では0.1以上の値を示すことがあった。インド洋低中緯度帯でのAOTは0.05-0.15の範囲であり、南極大陸沿岸域で測定された0.02程度の低い値はみられなかった。海洋上では風速が強いほど、海塩粒子が生成される(Lewis and Schwartz, 2004)。そこで、風速とAOTの関係を図4に示した。風速は、「海鷹丸」のマストに設置された航海用の風向風速計のデータを使用した。風速とAOTとに正の強い相関がみられたことから、南極海では、海上風により生成された海塩粒子が卓越して存在し、その結果、風速がAOTに影響を及ぼしていると考えられる。この風速とAOTの関係式を用いることで、風速からAOTを推定することができ、海洋リモートセンシングにおける大気補正処理に風速データを取り込むことにより、南極海における大気補正を改善できる可能性が考えられる。また、AOTと風速の関係式から外れた測定結果は、他の地域からエアロゾル濃度が異なる気塊が輸送されてきた可能性を示唆する。これらのように、AOTと風速との関係式は、南極海域での

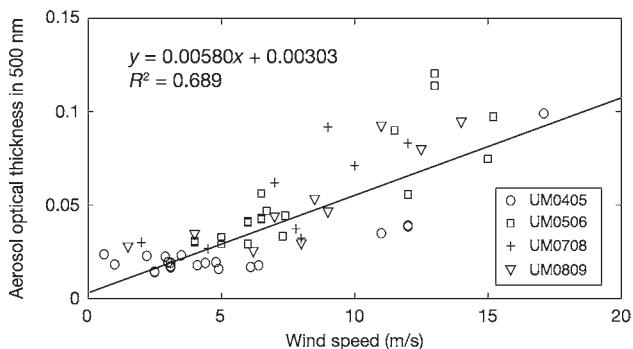


図4 500 nmでのエアロゾルの光学的厚さと風速との散布図  
 Fig. 4. Plot of aerosol optical thickness at 500 nm as a function of wind speed.

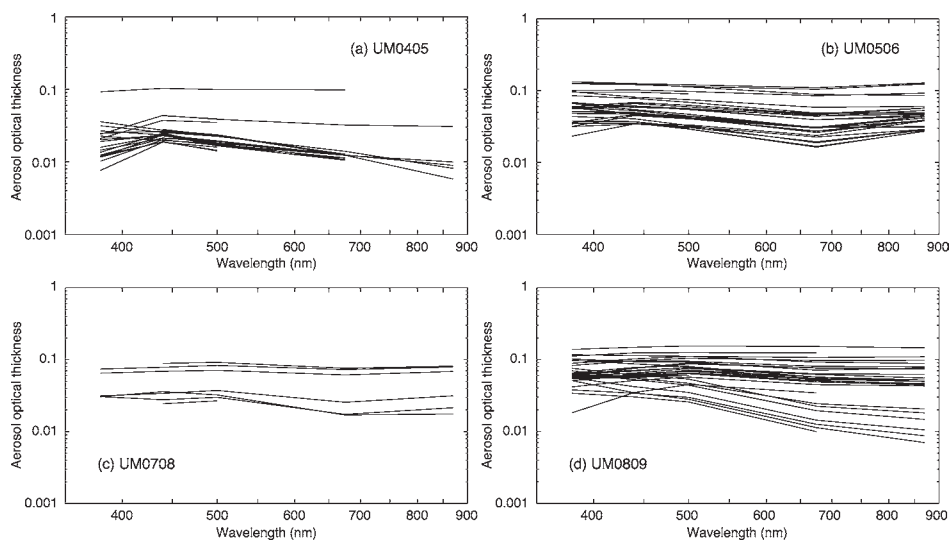


図5 エアロゾルの光学的厚さの波長スペクトル  
 Fig. 5. Spectral curves of aerosol optical thickness.

物質循環を考える上で有効な情報となりうるだろう。

測定された AOT の波長特性を図 5 に示す。1 連の測定のうち、ある波長だけが前述のように AOT のばらつきが基準を満たさず欠測となった場合には、図中で直線が途切れている。一般的に AOT は波長に対してべき関数で近似でき、べき関数の指数はオングストローム指数と呼ばれ、大気エアロゾルの粒径に関係している。両対数のグラフ上では AOT と波長の関係は直線となるが、380 nm と 870 nm の AOT は直線からずれた値もみられた。440 nm の AOT も 380 nm ほどではないが、ずれていたケースがみられた。そのため、比較的安定した値が得られた 500 nm と 675 nm の AOT から算出した、南極海でのオングストローム

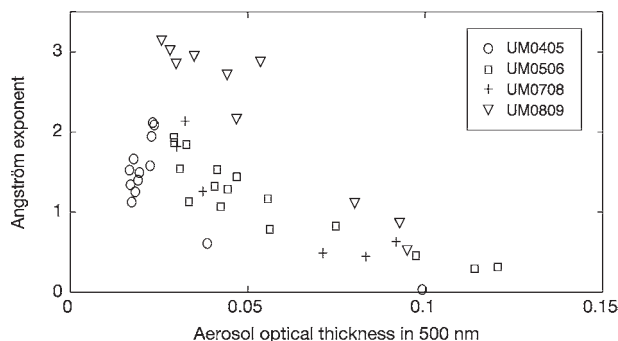


図6 オングストローム指数と500 nmでのエアロゾルの光学的厚さとの散布図

Fig. 6. Plot of Angström exponent as a function of aerosol optical thickness at 500 nm.

ム指数を図6に示す。AOTが高くなるにつれてオングストローム指数が低くなる傾向が見られ、よってAOTが高くなるにつれ、大気エアロゾル粒子の粒径が大きくなると考えられる。海塩粒子は他の粒子と比較して大きいことから、図4から推定された風速が増すにつれ海塩粒子の濃度が高くなり、AOTが高くなることと合致していた。

AOTの波長スペクトルでの380 nmと870 nmのずれであるが、これらの波長帯は、太陽光の放射照度が他の波長帯と比較して弱く、そのため、直達光測定のス/N比が悪い。そのため、AOTの測定誤差が大きくなったと考えられる。また、380 nmはAOTに対してレイリーの光学的厚さが非常に厚く、その値のわずかな誤差がAOTの算出に大きな影響を与える(Tomasi *et al.*, 2010)。そこで、本研究で使用したNASAのプロトコルで算出したレイリーの光学的厚さと、他の方法(Bodhaine *et al.*, 1999; Tomasi *et al.*, 2010)による値とを比較した。380 nmでのAOTの落ち込みが大きかったUM0405の2009年1月8日0934 (GMT) 前後の測定を対象とした。Bodhaine *et al.* (1999)による方法では、昭和基地で実施されたレーウィンゾンデによる気温の鉛直分布の測定結果から求めた、単位体積あたりの分子数を使用した値も算出した。Tomasi *et al.* (2010)の方法では、緯度がもっとも近いNeumayer基地(70°39'S, 8°15'W)の値を使用して算出した。計算結果を表1に示す。レイリーの光学的厚さは最大で0.005小さくなった。すなわち、AOTは0.005大き

表1 各方法によるレイリーの光学的厚さの算出結果

Table 1. Rayleigh optical thickness at 380 nm calculated by different methods.

	Rayleigh optical thickness in 380 nm	Difference from NASA protocol
NASA protocol (Frouin <i>et al.</i> , 2003)	0.43354	—
Bodhaine <i>et al.</i> , 1999	0.43304	-0.00050
Bodhaine <i>et al.</i> , 1999 using with RS data	0.42859	-0.00495
Tomasi <i>et al.</i> , 2010	0.43446	0.00092

くなることを意味している。この測定時の平均した AOT は 380 nm で 0.009, 440 nm で 0.014 であった。380 nm の AOT に 0.005 を加えると 0.014 となり、ずれが大幅に改善されることがわかった。

MICROTOPS II を用いた船上での AOT の観測の精度は、Porter *et al.* (2001) の見積もりによるとそれぞれの波長ごとに 0.026, 0.018, 0.016, 0.013 そして 0.017 である。この値は、実際より高いと著者らは指摘しているが、南極海での AOT の測定は、サンフォトメータによる観測精度の限界付近で実施していることに間違いはない。今後、より精度を高めていくために、数多くのラングレー法検定観測を実施し、機器定数の精度を把握するとともに、レイリーの光学的厚さの算出方法の見直しなどが必要である。

#### 4. ま と め

東京海洋大学「海鷹丸」の南極海研究航海において、大気エアロゾルの光学的厚さの観測を実施した。南極海インド洋セクターの 500 nm での AOT は、0.02-0.12 の範囲であった。AOT は、南極大陸沿岸域では比較的 low, 0.02 前後であった。一方、暴風圏として知られている 40-60°S の海域では、0.1 以上の値を示すことがあった。インド洋低中緯度帯では 0.05-0.15 の範囲であり、南極大陸沿岸域で測定された 0.02 程度の低い値はみられなかった。風速と AOT とに正の相関がみられたことから、南極海では海塩粒子が卓越して存在し、風速が AOT に影響を及ぼしていると考えられる。この風速と AOT の関係式を用いることで、風速から AOT を推定することができ、南極海における海洋リモートセンシングでの大気補正処理を改善できる可能性が考えられる。また、AOT と風速の関係式から外れた測定結果は、他の地域からエアロゾル濃度が異なる気塊が輸送されてきた可能性を示唆する。

測定された AOT の波長特性からオングストローム指数を算出した。AOT が高くなるにつれ、オングストローム指数が低くなる傾向が見られ、よって AOT が高くなるにつれ、大気エアロゾルの粒径が大きくなると考えられる。380 nm と 870 nm の AOT は直線からずれる傾向がみられた。これらの波長帯は、太陽光の放射照度が他の波長帯と比較して弱く、そのため、直達光測定の S/N 比が悪い。また、380 nm は AOT に対し、レイリーの光学的厚さが非常に厚く、その値のわずかなずれが AOT の算出に大きな影響を与える。そこで、本研究で使用した NASA のプロトコルで算出したレイリーの光学的厚さと他の方法による値とを比較したところ、レイリーの光学的厚さは最大で 0.005 小さくなり、ずれが大幅に改善されることがわかった。今後、機器定数の精度向上およびレイリーの光学的厚さの算出方法の再検討などが必要である。



## 謝 辞

研究の遂行にあたり、東京海洋大学「海鷹丸」小池船長はじめ乗組員の方々、また、同航海に乗船した研究者および学生の方々にはたいへんお世話になりました。なお、本研究で使用した昭和基地でのレーウィンゾンデデータは、気象庁から提供されたものである。本研究は、科学研究費基盤研究(S)16101001により実施された。

## 文 献

- Aoki, K., and Fujiyoshi Y. (2003): Sky radiometer measurements of aerosol optical properties over Sapporo, Japan. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **81**, 493-513.
- Bodhaine, B.A., Wood, N.B., Dutton, E.G. and Slusser, J.R. (1999): On rayleigh optical depth calculations. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **16**, 1854-1861.
- Frouin, R., Holben, B., Miller, M., Pietras, C., Knobelspiesse, K.D., Fargion, G.S., Porter, J. and Voss, K. (2003): 5. Sun and sky radiance measurements and data analysis protocols, from Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation, ed. by Muleler J.L. *et al.* Greenbelt, MD, NASA Goddard Space Flight Center, 60-78. (Radiometric measurements and data analysis protocols, revision 4: v. 3, NASA/TM-2003-211621/Rev.-v. 3)
- 笠松伸江・堀本奈穂・茂木正人・高橋邦夫・長田和雄・平譯 享・石丸 隆・福地光男 (2008):「海鷹丸を用いた南極研究ワークショップ2008」報告. 南極資料, **52**, 516-526.
- Knobelspiesse, K.D., Pietras, C. and Fargion, G.S. (2003): Sun-Pointing-Error correction for sea deployment of the MICROTOPS II handheld sun photometer. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **20**, 767-771.
- Lewis, E.R., and Schwartz, S.E. (2004): Sea salt aerosol production: mechanisms, methods, measurements and models: a critical review. Washington, D.C., American Geophysical Union, 413 p. (Geophys. monogr.: 152)
- 長田和雄・原圭一郎・矢吹正教・西田千春・小林 拓・三浦和彦・上田紗也子・林 政彦・橋田元・塩原匡貴・和田 誠・山内 恭 (2010): 海洋観測専用船による南極海の大气エアロゾル観測. 南極資料, **54**, 449-464.
- Porter, J.N., Miller, M., Pietras, C. and Motell, C. (2001): Ship-based sun photometer measurements using microtops sun photometers. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **18**, 765-774.
- Smirnov, A., Holben, B.N., Slutsker, I., Giles, D.M., McClain, C.R., Eck, T.F., Sakerin, S.M., Macke, A., Croot, P., Zibordi, G., Quinn, P.K., Sciare, J., Kinne, S., Harvey, M., Smyth, T.J., Piketh, S., Zielinski, T., Proshutinsky, A., Goes, J.I., Nelson, N.B., Larouche, P., Radionov, V. F., Goloub, P., Krishna Moorthy, K., Matarrese, R., Robertson, E.J. and Jourdin, F. (2009): Maritime aerosol network as a component of aerosol robotic network. *J. Geophys. Res.*, **114**, D06204, doi:10.1029/2008JD011257.
- Tomasi, C., Petkov, B., Stone, R.S., Benedetti, E., Vitale, V., Lupi, A., Mazzola, M., Lanconelli, C., Herber, A. and von Hoyningen-Huene, W. (2010): Characterizing polar atmospheres and their effect on Rayleigh-scattering optical depth. *J. Geophys. Res.*, **115**, D02205, doi:10.1029/2009JD012852.