

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24510007

研究課題名(和文)雲・エアロゾルの気候影響評価のためのSKYNETデータ再解析

研究課題名(英文)Re-analysis of SKYNET data for assessment of climate effects of aerosol and cloud

研究代表者

高村 民雄 (Takamura, Tamio)

千葉大学・環境リモートセンシング研究センター・名誉教授

研究者番号：40272356

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、SKYNET(<http://atmos.cr.chiba-u.ac.jp/>)サイトで計測しているエアロゾルの光学的厚さ(AOT)や単一散乱アルベド(SSA)の精度向上を図ることが目標である。既研究から、AOTは精度よく推定されるが、SSAが過大評価傾向であることが指摘されており、本研究では、計測機材に由来するものと解析手法に由来するものの双方について、詳細に検討を行った。新たに全天分光日射計を導入し比較検討を行い、検定ではNASAが運営するAERONETとの比較を実施した。その結果SSAの過大評価は、計測された散乱光評価に主原因のあることが明らかとなり、その補正手法が提案された。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research is to improve the accuracy of Aerosol Optical Thickness(AOT) and Single Scattering Albedo(SSA) estimated in the SKYNET (<http://atmos.cr.chiba-u.ac.jp/>). The SSA has had a trend of a little overestimation compared with other data. In this research, both viewpoints of hardware and software in the SKYNET observation/analysis system are re-examined in detail. The newly developed spectro-pyranometer has been introduced for comparison of AOT and SSA with SKYNET products, and the calibration system has been also examined using an integrating sphere which is operated in AERONET/NASA. As a result, the most plausible reason of the overestimation of SSA in the SKYNET might be due to the small underestimation of the solid-view-angle of sensor of sky radiometer. Based on this result, a new calibration and revised method is proposed.

研究分野：大気放射学

キーワード：エアロゾル SKYNET 光学的厚さ 単一散乱アルベド エアロゾル放射効果 SKYRAD.pack

1. 研究開始当初の背景

エアロゾルの気候影響に関する研究は、極めて多様な側面から実施されている。気候システムの複雑さから、その影響の定量的評価は容易でないが、その直接的な効果と間接的な効果の両面で進んでいる(①Kaufmann et al., 2002)。前者の量的評価は、後者に比較して進んでいるが、それでも全球的な評価には幾つかの課題がある。日射・放射に対する直接効果は、含まれるエアロゾルの量と質で決まり、放射に影響する光学パラメータとして、その光学的厚さ(AOT)と単一散乱アルベド(SSA)が分かれば、ほぼ推定可能である(e.g., ②Takamura et al., 2007)。ここでは、日射影響に焦点を絞り議論する。この影響評価推定のため、衛星計測、地上計測など多様なプラットフォームと観測手法による観測が展開されている。SKYNETは、こうしたエアロゾルの地上観測ネットワークであり、日本のエアロゾルの放射・気候影響研究に関するコミュニティが中心となって発展させてきたもので、現在ではアジアだけでなくヨーロッパから米国にも広がっている。

SKYNETは、この影響評価の目的を達成するために、エアロゾル計測のほかに、雲を計測する能力を有しており、エアロゾルの間接的な効果の評価を行う際にも役立てられる。こうした地上観測システムによるネットワークは、対象自体の光学的性質を高精度に推定するほか、衛星によるエアロゾルパラメータの広域推定値の精度検証等にも使われている。

エアロゾルの直接効果を定量的に評価するには、高精度のAODとSSAの推定が必須である。これまでSKYNETでこうした物理量が広く観測・解析されてきたが、これらの推定精度の絶対的な評価はそれほど多くない。これには、エアロゾル計測と並行して、直達・全天日射量等を同時に計測し、推定されたAODやSSAから別途放射伝達モデルを介して比較検証する手法がとられた(e.g., ③Bi et al., 2014)。これは日射量計測には国際的な基準があり、一定の精度が期待できることによる。

しかしこうした間接的な手法ではなく、直接的な検討を行うことが、絶対的ではないが、わかりやすく望ましい。エアロゾルを同様の目的で計測するネットワークに、NASAが運営するAERONET (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>)がある。これは、世界的な規模でネットワーク化されており、SKYNETの結果と比較するには好都合である。いずれのネットワークでもエアロゾル計測の中心器材は、太陽を直接計測する機能と、天空輝度分布をほぼ同時に計測する機能を併せ持ったラジオメータ(SKYNETではスカイラジオメータ、AERONETではサンスカイホトメータと呼ぶ)を配置しており、ほぼ同様のデータが観測・収集されている。SKYNETとAERONETの観測地点が重複する点は極め

て限られているが、それでも同時に計測したデータが幾つかあり、この両者のデータを解析することにより検討が可能となった。

その結果、AODは両者でよく一致するもののSSAに僅かな違いが見られ、SKYNETの解析結果がやや系統的に大きめに出る傾向が明らかとなってきた。これは、気候影響の観点で言えば、SKYNETによるエアロゾルの直接効果の評価では、日射の反射特性がAERONETよりやや大きく、AERONETでは大気を暖める効果が高いことになる。エアロゾルのSSAの違いによる放射効果の違いは、大気の汚染が強い地域では特に重要になり、局地的な大気の循環を変える力を持つ場合もある(e.g., ④Solmon et al., 2008)。

ほぼ同一の機能をもつ器材をネットワーク化されて観測された結果が、系統的に異なることは、相応の原因があるはずであり、気候学的に影響のない程度の一一致が必要である。

2. 研究の目的

SKYNETは、既に千葉大学環境リモートセンシング研究センターが中心となってデータセンターを運営しており、各サイトで観測されたデータは一元的に収集・解析され、公開されている(<http://atmos.cr.chiba-u.ac.jp/>)。現在公開されているデータは、雲除去を行ったレベル2データである(⑤Khatri and Takamura, 2009)。この解析結果は、上記のような課題を含んでおり、いずれのプロダクトが真値に近いかわかる必要がある。本研究では、この違いの原因を幾つかの手法を用いて明らかにする。また、エアロゾルを含む大気の放射特性を知るために、日射量の直接分光観測を通じて、全体として整合性のある結果を得るためのエアロゾルパラメータ(AOT, SSA)を推定する手法を開発する。また、違いの原因を精査し、これまで観測・蓄積されたSKYNETエアロゾル観測データを再評価し、改善されたエアロゾルパラメータのデータセットを提供する基準を作成する。

3. 研究の方法

気候影響評価のためのエアロゾルの光学パラメータの推定は、その放射効果を精度良く表現できることが条件である。個々のエアロゾル粒子の特性を厳密に知るのではなく、大気中に浮遊する状態における影響を精度良く知ることであり、そのための推定手法の検討が必要である。

このため、本研究ではAOT及びSSAの精度向上を目的に、SKYNETのエアロゾル計測器材であるスカイラジオメータのハード的な面での検討と、得られたデータを一元的に解析する標準解析アルゴリズムであるSKYRAD.pack(⑥Nakajima et al., 1996)を使用する場合のソフト的な面の両面から検討することとした。比較検討は、直接放射観測器材を用いた並行観測に依った。さらに、SKYRAD.pack

を用いて SSA を推定する際に影響を与えるスカイラジオメータの視野角推定手法の再評価、SKYRAD.pack の最新改良版についての検討を加え、総合的に SSA への影響について検討した。

(1) 分光全天日射計 (MS-700) による AOT, SSA の同時推定

本研究で使用する全天分光日射計では、下向き日射量の全量及び直達光を除いた散乱日射量を計測することにより、AOT と SSA を推定する。スカイラジオメータが解析に効果的な特定方向の天空輝度の分布を効率よく計測するのに対して、ここでは、天空光全体の明るさを放射束密度として波長毎に計測する。同時に、この分光日射計は遮蔽バンド装置を有しており、直達光成分を遮蔽して散乱光のみ計測することによって、エアロゾルの吸収効果を評価しようとする機材である。使用した機材は MS-700 (EKO 製) で、これに遮蔽装置を付けて使用する。

全天分光日射量と同時に散乱日射量を計測することにより、間接的に直達日射量を推定する。このため遮蔽バンドを適切な位置に停止させながら、計測を行う。このデータ処理に、次の 2 点に注意する必要がある、いずれも AOD や SSA の推定に誤差を誘引するものである；

① 遮蔽バンドによる前方散乱補正

遮蔽バンドによる散乱光の計測では、太陽周辺光を過剰にカットしている。この過剰分を適切に補正する必要がある。

② センサーの入射角特性の誤差

水平に設置したセンサーに、天頂角 θ で強度 I の光 (radiance) が入射した時、理想状態では $I \cos(\theta)$ の出力を得る。しかし一般に受光面が完全黒体 (通常全天日射計等) でなかったり、Lambert 面でないために、この関係が厳密には成り立たない場合が通常である。とりわけ、この誤差は、本研究で使用する日射計のように、分光のためにセンサー入口に拡散板を取り付けた場合に顕著となる。

こうした補正が適切になされた後に AOT と SSA を求めることになる。

(2) スカイラジオメータの視野角 (SVA)

スカイラジオメータは、太陽直達光と天空散乱光分布をそれぞれ指定の一定時間毎に自動計測する。直達光から AOD を、天空散乱光輝度分布から SSA を推定するが、その際輝度分布の絶対値又は精確なセンサーの入射立体角 (立体視野角 : SVA) の値が必要となる。エアロゾルの吸収能は、直達光量と散乱光量の相対的な比で決められ、高い精度の観測を必要とするが、これには正しい SVA の値を必要とする。

一方、AERONET では SVA を直接計測していない。既知の輝度をもつ積分球を用いて検定を

行うことによって、散乱光の絶対値を計測する。

散乱光計測に関わる両観測ネットの検定手法の違いが、推定されるエアロゾルパラメータ、中でも SSA の違いに影響を与えている可能性がある。これを確認するために、NASA/AERONET グループの協力を得て、検定手法による違いを検討した。

両ネットワークの機材とも、太陽直達光を用いて検定しており、これによる検定値を V_0 とする。この値に対する入射光量は、大気上端での太陽分光放射照度 (定数) F_0 に対応する。一方積分球を用いた場合には、その輝度 I は既知であるので、これを SVA が Ω の機材で計測 (検定) したときの出力を V とすると次の関係が成立する；

$$\frac{I \cdot \Omega}{V} = \frac{F_0}{V_0}.$$

上式の未知数は SVA Ω のみであるので、この関係を利用して光学的に等価な SVA を推定することが可能となり、間接的に両者の検定手法の違いによる評価が可能となる。

本研究では千葉大が所有する検定機材 (PS1207807) を米国海洋大気庁 (NOAA) の気候モニタリングサイトの一つであるマウナロア観測所 (MLO) に送り、まず V_0 を決定し、その後米国航空宇宙局 (NASA) AERONET グループが利用する積分球による検定を行った。

(3) SKYRAD.pack による解析

標準的なスカイラジオメータの解析手法は、直達光による AOD の推定と、直達・散乱光強度比の天空分布を利用してエアロゾルパラメータを推定する 2 段階からなっている。後者は、Phillips-Twomey タイプの Inversion 法 (e. g., ⑦ Twomey, 1963) であり、球形粒子を仮定した Mie 散乱理論に基づく。現在標準解析で使用されている SKYRAD.pack Ver. 4.2 では非球形効果が入れられていない。黄砂のような強い非球形性をもつ粒子の場合、この効果を入れたもので評価する必要がある、新しい解析法 (⑧ Kobayashi et al., 2006) も開発されており、それを用いた比較検討を行う。

4. 研究成果

(1) 全天分光日射計 (MS-700) によるエアロゾルの AOT と SSA 推定

図 1 に、SKYNET 福江島に設置した MS-700 とスカイラジオメータ (POM-02) から求められた AOT の差を、太陽天頂角の関数として示した。これはメーカーが示している入射角補正係数で補正したものであり、500nm のデータである。データは 2009 年 3 月～5 月で、解析可能な全てのデータを利用している。

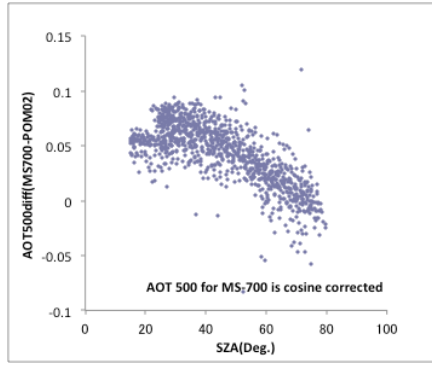


図1 SKYNET 福江島設置のMS700 と同時計測したPOM02のAOTとの違い。

十分な補正がなされていると、両者のAOTは一致するはずであり、図1のように太陽天頂角に依存する傾向は出ない筈である。従ってこれは補正が十分でないことを示している。この両者のAOTの違いを単純平均すると、補正前に $\Delta AOT = 0.07 \pm 0.03$ が、補正後に $\Delta AOT = 0.04 \pm 0.03$ に改善された。太陽高度の高い時にMS-700のAOTが高めに推定される傾向が顕著であり、これはコサイン特性以外にも原因のあることを示している。

AOTが大きくなった場合のMS-700から推定されるAOTへの前方散乱の影響は、AOTの過小評価になる傾向となるので、太陽天頂角が大きくなった場合に ΔAOT が小さくなることは、整合性があるものである。

| 表1 スカイラジオメータ (POM-02) と全天分光日射計 (MS-700) によるSSAの比較 | | | |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|
| SKYNET 辺戸岬(沖縄), 2009年3月~5月 | | | |
| | 500nm | 675nm | 870nm |
| POM-02 | 0.969 ± 0.044 | 0.952 ± 0.062 | 0.965 ± 0.052 |
| MS-700 | 0.965 ± 0.021 | 0.926 ± 0.046 | 0.952 ± 0.043 |

更に、3(1)で述べた手法を用いて、同様にSSAを推定した。その結果を図2に示す。SKYNET 辺戸岬(沖縄)に設置した、MS-700のデータから求めたもので、同時にスカイラジオメータも稼働しており、その比較を示している。いずれの機材でもSSAは幅広く変動するが、スカイラジオメータの方が、より1に近いところに集中しているように見える。本来、図中の破線で示す一対一の線上に乗るはずであるので、その違いは大きい。しかし、期間中の両者の平均を取ると、その違いは表1に示すように比較的小さく、系統的にMS-700によるSSAが小さくなる傾向がある。表1には、それぞれの機材の、期間中の平均値と標準偏差(それぞれの下段に示す)を示したが、両者の違いは、標準偏差内でありその違いが顕著に優位とは言えない。

この結果は、スカイラジオメータから推定されるSSAが真値より大きい傾向を示すのではないかというこれまでの研究結果と符号し

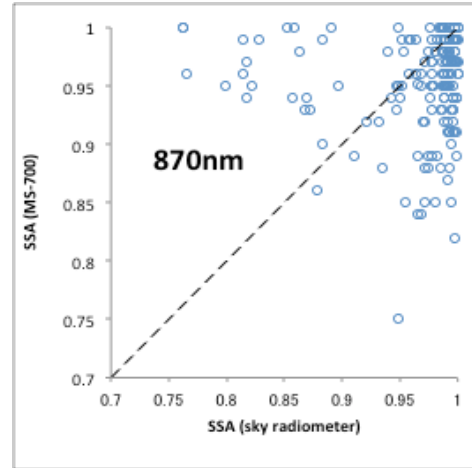


図2 スカイラジオメータと全天分光日射計 (MS-700) から推定されるSSAの相関。

ているが、その精度は更に精査する必要がある。

(2) スカイラジオメータの視野角(SVA) SKYRAD.packでは、視野角(SVA)の値は、直達・散乱光比を理論値と比較する上で必須であり、その精度がSSAの推定精度に直接影響する。機器の違いによるSVAの多少の違いは、太陽直達光計測では問題とならないが、散乱光計測ではそのSVAに比例するので、その精度が重要となる。このために、使用機材のソフトウェアでは、快晴時に太陽を光源にして、観測サイトで随時計測することが出来、ルーチン観測に組み込むことも可能で、経年的な変動も確認出来るようになっている。

現在の仕様では、太陽を中心にして $1^\circ \times 1^\circ$ の走査範囲でSVAを決定している。今回新たに集光する実質的な視野角を確認するために点光源を用いて再確認した。その結果、中心(点光源)から 1° 離れた点でまだ1%程度の入力があることが分かった。これをSVAに変換すると、従来の推定より1.5~3%程度の過小評価となることが分かった。

一方、AERONETでは既述のように、直接積分球を用いて値付けし、散乱光の絶対値を計測する手法を採用している。今回、SKYNETの標準的な手法であるSVAを用いた手法とAERONETで採用している、積分球を用いた検定手法による違いを、初めて確認した。これには、千葉大学が所有するスカイラジオメータの基準機(PS1207807)を、積分球のあるNASA/GSFCに送り、NASAの協力を得てAERONETの手順で検定することで対応した。NASA積分球による検定の結果、Siセンサーを用いる可視中心部では極めて安定に計測された。既述のように、大気上端での太陽常数(F_0)が分かれば、MLOでの検定値と、分光放射照度が既知の積分球での計測から波長毎のSVAが推定される。図3に比較結果を示す。上図にはSVAを、下図にはその相対誤差を示している。文献により太陽常数には僅か

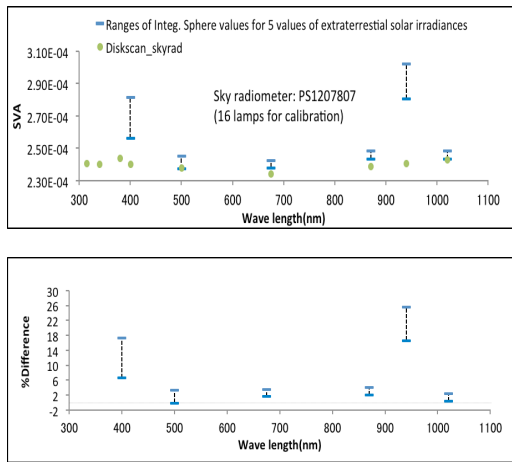


図3 千葉大基準機の従来手法による SVA と NASA 積分球による検定から求められた SVA(上図)。下図は、相対誤差を示す。

に違いがあり、その違いによる誤差がバーで示されているが、SKYNET と AERONET の手法の差による SVA の違いが、可視の中心部で 2% 前後となっていることが分かった。この結果を視野角推定におけるこれまでのずれと併せて考えると、SKYNET の SVA 決定手法が不十分であった可能性が高く、今後この点を改良する必要があり、改善手法が提案された。

(3) SKYRAD. pack による解析
 アルゴリズムの違いによる SSA への影響を調べるために、現行の Version 4.2 に加えて、Hashimoto et al. (2012, ⑨) のアルゴリズム (Version 5)、また、これに非球形粒子の効果を入れたもの (Version 5+)、さらに Kobayashi et al. (2006, ⑧) のアルゴリズム (MRI) の 3 種類を比較検討した。使用されたデータは、SKYNET Pune サイト (2008 年 5 月～2009 年 5 月末) のもので、観測値を再現する条件を 5% とした。

図 4 に 4 つのアルゴリズムに対する SSA の波長依存性を示した。Version 4.2 の結果が SSA を大きめに推定していることが分かる。

Version 4.3, Version 5, Version 5+ はいずれも類似の傾向を示しており、500nm 以下の波長では、その違いは小さい。波長の増大で SSA を小さく評価する傾向があり、Version 5 にその傾向が強くなる。しかし、これに非球形粒子の効果を入れると、吸収効果は小さくなり、これは非球形粒子の後方散乱の特徴に基づくものと整合性がある傾向である。長波長側にこの効果が強く出るのも、非球形効果が粗大粒子 (Coarse mode) 側に出やすいことと符合している。

これに対して、MRI のアルゴリズムは異なった傾向の結果を示しており、短波長側で低めに、長波長側でやや大きくなるか、あまり変化しない特徴を示す。AERONET では 500nm で、 $AOT < 0.4$ で SSA 推定を行わない。しかし、全球的に見るとこの条件は厳しく、一部の高濃

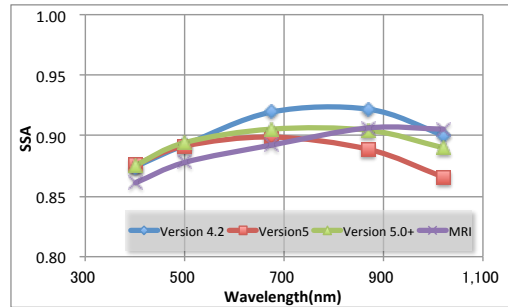


図4 Pune サイトにおける SSA の、アルゴリズムの違いによる波長依存性

度 (域) のエアロゾルが対象になるのみとなる。図 4 ではこうした SSA 推定上の誤差が含まれているが、MRI による結果のこの系統的な違いは、アルゴリズムに依存することが十分想定される。

解析アルゴリズムの違いによる SSA への影響をまとめると、

- ① 非球形粒子の効果は、Pune の高濃度の解析で明らかに出ており、特に長波長側に顕著に出る。一方 500nm 以下の波長ではその傾向が顕著でないことが明らかとなった。
- ② Kobayashi et al. (2006) の示した手法は、他の手法と系統的な違いを生んでおり、その原因を明確にする必要がある。このためには、エアロゾル起源による分類を取り入れ、同質と予想されるエアロゾルでの精度の高い比較検討を必要とする。

<引用文献>

- ① Kaufmann, Y.J., D. Tanre and O. Boucher, 2002: A satellite view of aerosols in the climate system, *Nature*, 419, 215-223.
- ② Takamura, T., N. Sugimoto, A. Shimizu, A. Uchiyama, A. Yamazaki, K. Aoki, T. Nakajima, B. J. Sohn, and H. Takenaka, 2007: Aerosol radiative characteristics at Gosan, Korea, during the Atmospheric Brown Cloud East Asian Regional Experiment 2005, *J. Geophys. Res.*, 112, D22S36, doi:10.1029/2007JD008506.
- ③ Bi, J., J. Shi, Y. Xie, Y. Liu, T. Takamura, P. Khatri, 2014: Dust Aerosol Characteristics and Shortwave Radiative Impact at a Gobi Desert of Northwest China during the Spring of 2012, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 92A, 33-56. DOI:10.2151/jmsj.2014-A03.
- ④ Solmon, F., M. Mallet, N. Elguindi, F. Giorgi, A. Zakey, and A. Konare, 2008: Dust aerosol impact on regional precipitation over western Africa, mechanisms and sensitivity to absorption properties, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L24705, doi: 10.1029/2008GL035900.
- ⑤ Khatri, P. and T. Takamura (2009), An algorithm to screen cloud-affected data for sky radiometer

data analysis, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 87 (1), 189-204.

- ⑥ Nakajima, T., G. Tonna, R. Rao, P. Boi, Y. Kaufman and B. Holben, 1996: Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions, *Appl. Opt.*, 35(15), 2672-2686.
- ⑦ Twomey, S., 1963: On the Numerical Solution of Fredholm Integral Equations of the First Kind by the Inversion of the Linear System Produced by Quadrature, *J. Assoc. Comp. Mach.*, 10, 97-101.
- ⑧ Kobayashi, E., A. Uchiyama, A. Yamazaki and K. Matsuse, 2006: Application of the Statistical Optimization Method to the Inversion Algorithm for Analyzing Aerosol Optical Properties from Sun and Sky Radiance Measurements, *J. Meteor. Soc. Jpn*, 84(6), 1047-1062.
- ⑨ Hashimoto, M., T. Nakajima, O. Dubovik, M. Campanelli, H. Che, P. Khatri, T. Takamura and G. Pandithurai, 2012: Development of a new data-processing method for SKYNET sky radiometer observations, *Atmos. Meas. Tech.*, 5, 2723-2737.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① BI, J., J. SHI, Y. XIE, Y. LIU, T. TAKAMURA, P. KHATRI, 2014: Dust Aerosol Characteristics and Shortwave Radiative Impact at a Gobi Desert of Northwest China during the Spring of 2012, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 92A, 33-56. DOI:10.2151/jmsj.2014-A03.
- ② Khatri, P., T. Takamura, A. Shimizu, and N. Sugimoto (2014): Observation of low single scattering albedo of aerosols in the downwind of the East Asian desert and urban areas during the inflow of dust aerosols, *J. Geophys. Res.*, Vol. 119(2), doi:10.1002/2013JD019961.
- ③ Hashimoto, M., T. Nakajima, O. Dubovik, M. Campanelli, H. Che, P. Khatri, T. Takamura, and G. Pandithurai (2012): Development of a new data-processing method for SKYNET sky radiometer observations, *Atmos. Meas. Tech.*, 5, 2723-2737.

[学会発表] (計 18 件)

- ① 眞子直弘、高村民雄、久世宏明、プラディーブカトリ、山崎明宏、2014: SKYNET/スカイラジオメーターの立体視野角校正、日本気象学会2014年度秋季大会講演予稿集、C355、P576、福岡国際会議場(福岡県福岡市博多区石城町)、2014/10/21-23.
- ② Khatri, P., T. Takamura, H. Irie, H. Kuze, T. Nakajima, and B. Holben (2014), Comparison of single scattering albedo retrieved from PREDE sky radiometer and CIMEL sun photometer, 2014: *Proc. of the*

2014 International workshop on SKYNET and Asian Lidar Network, Hefei, China, 10-12 September, 2014, 15-19.

- ③ T. Takamura, P. Khatri, H. Irie, B.J. Sohn, N. Tugisuren, B. Thana, M. Campanelli, and G. Pandithurai, 2013: Aerosol optical properties and aerosol direct effects over typical sites of SKYNET network, International Conference for Climate Change in Arid and Semi-Arid Region 2013(ICCASR2013), Sept. 19-21, Ulaanbaatar, Mongolia.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

<http://atmos.cr.chiba-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高村民雄 (TAKAMURA Tamio)
千葉大学・環境リモートセンシング研究センター・名誉教授
研究者番号：40272356

(2) 研究分担者

なし ()

研究者番号：

(3) 連携研究者

プラディーブカトリ (Pradeep KHATRI)
千葉大学・環境リモートセンシング研究センター・特任助教
研究者番号：80377986