

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：82101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02808

研究課題名(和文) 衛星搭載アクティブ・パッシブセンサーデータの複合利用による全球エアロゾル解析

研究課題名(英文) Global aerosol analysis by synergy use of satellite-borne active and passive sensor data

研究代表者

西澤 智明(Nishizawa, Tomoaki)

国立研究開発法人国立環境研究所・環境計測研究センター・室長

研究者番号：10462491

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：大気エアロゾルの気候への影響評価の高度化を目指し、米NASA主導の2波長偏光ミー散乱ライダーCALIOPと分光放射計MODISの衛星観測データを用いてエアロゾル種毎(大気汚染粒子、海塩粒子、黄砂、ブラックカーボン)の濃度と粒径を推定する複合解析手法の開発を行い、世界初となるエアロゾル種毎の全球3次元分布構造を明らかにした。更に10年以上の長期全球エアロゾルデータセットの構築を果たすと共に、衛星・地上観測データとの光学的厚さや空間分布の比較を行い、アルゴリズムと共にエアロゾルプロダクトの妥当性を示した。

研究成果の概要(英文)：To aim improving assessment for effects of atmospheric aerosols on earth climate, we developed algorithms to retrieve optical concentrations and particle sizes of several aerosol components (air-pollution, sea-salt, mineral dust, and black carbon) from satellite measurements by two-wavelength polarization Mie-scattering lidar CALIOP and spectroradiometer MODIS and succeeded in revealing globally three-dimensional structures of the aerosol components for the first time in the world. Furthermore, we achieved constructing long-term, global aerosol dataset with more than 10 years; we compared the retrieved aerosol products with other aerosol data on aerosol optical depth and its spatial distribution measured by satellite and ground-based sensors, indicating that the our developed algorithms and its aerosol products were appropriate.

研究分野：地球物理学

キーワード：エアロゾル ライダー 分光放射計 衛星観測 地上観測

1. 研究開始当初の背景

エアロゾルは大気放射に直接的に(直接効果)、ないしは雲の生成・消滅過程を介して間接的に(間接効果)作用し気候変動へ影響を及ぼす。このエアロゾルの気候影響を評価するためには、生成、輸送、消失プロセスを内包し、全球規模で時間連続的に評価可能なエアロゾル気候モデルの利用が不可避となる。一方、エアロゾルの影響評価には今なお大きな不確定性があり、エアロゾル気候モデルの高度な検証と改良、そして観測データの同化が待望されている。

大気中には、様々な種類のエアロゾル(鉱物ダスト、海塩粒子、硫酸塩粒子など)が混在している。エアロゾル気候モデルの検証では、遠隔計測で得られた全エアロゾルの微物理・光学特性が用いられてきた。しかし、間接効果による気候影響評価では、雲核となりえる親水性エアロゾルをモデルが適切に再現することが肝要となる。よって、全エアロゾルではなく、エアロゾル種毎の検証が望まれる。航空機や気球観測によるエアロゾル種毎の検証が行われてきたが、時間的にも空間的にも限定的となる。より高度なモデル検証・改良には、長期間かつ時空間連続のエアロゾル種毎の全球分布データが求められる。

ライダーに代表される能動型センサや太陽光を光源とする MODIS 等の受動型センサは、エアロゾルの鉛直構造や水平構造を時間・空間的に密に測定できる一方で、混在する様々なエアロゾル種を分離推定することが困難であると考えられてきた。しかし、これら装置の高度化やエアロゾル特性の理解が進むにつれ、それらを最大限活用することで、エアロゾル種を識別しそれらの濃度を推定する新しいタイプの解析アルゴリズム(エアロゾル種分離推定手法)を我々は開発するに到った。2006年に米 NASA によって衛星搭載2波長(532/1064nm)偏光ミュー散乱ライダー CALIOP が打ち上げられた(現在も運用中)。CALIOP データを用いたエアロゾルの全球分布解析では、エアロゾル種毎の濃度推定は行われていない。また、CALIOP と MODIS のシナジーアルゴリズムも開発されているが、これもエアロゾル種ではなく、全エアロゾルをターゲットとしている。

2. 研究の目的

大気エアロゾルの気候への影響評価の高度化を主眼とし、米 NASA 主導の A-Train 衛星群搭載の2波長偏光ミュー散乱ライダー CALIOP と中分解能撮像分光放射計 MODIS の観測データを用いた複合解析を行い、世界初となるエアロゾル種毎(水溶性粒子(大気汚染粒子)、海塩粒子、黄砂)の全球3次元分布構造を明らかにする。そのために、CALIOP と MODIS を同時活用したエアロゾル種推定アルゴリズムを開発し、10年に及ぶ

CALIOP/MODIS の長期データを解析する。エアロゾル気候モデルの検証や同化での利用とその促進を目指し、推定したエアロゾル種毎の全球3次元分布データをデータセット化し、ホームページを介して公開する。

3. 研究の方法

上記目的を達成するために、以下の5つの課題を設定し、取り組んだ。

(1) CALIOP/MODIS 複合解析手法の開発

CALIOP は、波長 532nm と 1064nm での後方散乱強度と波長 532nm での偏光解消度を測定する。我々は、CALIOP 全3チャンネルデータを用いて3種エアロゾル(水溶性粒子、鉱物ダスト、海塩粒子)の消散係数の鉛直分布を推定する解析手法(CALIOP 単体アルゴリズム)を先行研究にて開発した。MODIS は大気による太陽反射光を可視・近赤外波長域で分光測定する。その多波長分光データはエアロゾルの光学的厚さや粒径に強い感度を持っている。以上の知見から、CALIOP と MODIS の両データの同時逆推定により、3種エアロゾルの波長 532nm での消散係数の鉛直分布と共に、気柱平均での Fine モード粒子と鉱物ダストのモード半径を推定する CALIOP/MODIS 複合アルゴリズムを開発する。海塩粒子のモード半径に対しては、海面風速データ(客観解析データ)を用いて推定する。

(2) エアロゾル種毎の微物理・光学モデルの構築

上記の単体・複合アルゴリズムでは、エアロゾル種毎の光学モデルが必要となる。単体アルゴリズムでは、各エアロゾル種の微物理特性(粒径分布、屈折率、形状)が仮定される。粒径分布は対数正規分布を仮定し、モード半径および標準偏差をエアロゾル種毎に仮定している。これらから推定に必要な消散係数-後方散乱係数比(ライダー比)等の光学特性を計算し、モデル化して用いる。CALIOP/MODIS 複合アルゴリズムでも同様にモデル化されるが、モード半径は推定されるために仮定されない。そこで、このモデル化のために、地上放射観測ネットワーク SKYNET や AERONET で得られるエアロゾルの粒径分布と屈折率、そして、地上ライダーネットワーク AD-Net や EARLINET のライダー観測から得られる後方散乱係数の波長比、偏光解消度、ライダー比を用いる。10年以上にわたる多地点観測データを統計解析し、観測値に整合するエアロゾルモデルを構築する。

(3) 長期データ解析

両アルゴリズムを10年に及ぶ CALIOP と MODIS のデータへ適用し、エアロゾル種毎の消散係数とそのモード半径の全球分布を推定し、エアロゾル種毎の空間分布の特徴等を明らかにする。また、それらの長期変動を明らかにする。

(4)地上・衛星観測データを用いた検証
推定値と地上観測データを比較する。これは、アルゴリズムの検証と共に、アルゴリズムで用いたエアロゾル微物理・光学モデルの検証にもなる。また、NASA によって無料配布されている CALIOP や MODIS の標準プロダクトとの比較も行う。

(5)エアロゾル種 3 次元データセットの構築と公開

複合および単体アルゴリズムによって推定されたエアロゾル種毎の消散係数やモード半径をデータセット化する。本データセットをエアロゾル気候モデル等に携わる研究者に広く利用してもらうために、認知度の高い AD-Net や SKYNET のホームページ(データサーバー)を介して公開し、成果の波及と拡大を狙う。

4. 研究成果

主な以下 4 点の成果を項目毎に記述する。

(1)CALIOP/MODIS 複合解析手法を開発すると共に、CALIOP 単体解析手法を改良した(図 1)。
・単体解析手法の数値解法では、ルックアップテーブル法が用いられていたが、測定ノイズに対して脆弱である欠点があった。そこで Gauss-newton 法をベースとした最適化法を導入した。同手法を複合解析手法にも用いた。
・単体・複合解析手法に光吸収性の強い粒子であるブラックカーボン(以下、BC)を推定する機能を加えた。BC に感度のある測定情報が不足していることから、BC の推定ではその鉛直分布は水溶性粒子(以下、WS)の鉛直分布に類似する、BC の光学的厚さは WS の光学的厚さ以下とする、とした先行研究の知見に沿った強制を加えた。

(2)エアロゾル種毎の微物理・光学モデルの開発及び、解析手法への導入を行った(図 1)。
・BC モデルとして Core-Gray-Shell(CGS)モデルを導入した。BC モデルとしては、黒色純炭素モデルが広く利用されているが、実大気では水溶性粒子と内部混合している。また、湿度依存性も指摘されている。そこでこれらの特性を網羅できる内部混合型モデルとして提唱されている CGS モデルを導入した。
・鉱物ダスト(以下、DS)として Voronoi モデルの導入を行った。非球形粒子である DS のモデルとして、回転楕円体モデルが広く利用されている。一方で、実測定された DS の形状はより複雑であり、回転楕円体形状とは異なる。そこでより現実に近いモデルとして Voronoi 形状のモデルが提唱されている。
・地上ライダーや SKYNET/AERONET 観測で得られたエアロゾル特性を用いて、エアロゾル種毎の粒系分布や屈折率の再設定を行った。
・CGS モデルだけではなく、WS 及び海塩粒子(以下、SS)の湿度依存性も先行研究を参照

してモデル化した。これに応じ、湿度データ(モデル客観解析データ)を用いてエアロゾル種毎の湿度依存性を推定に反映するように単体・複合アルゴリズムを改良した。

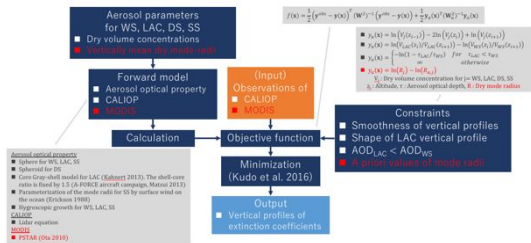


図 1 アルゴリズムの流れ(赤字:複合解析手法でのみ使用される機能)

(3)長期データ解析とデータセット構築を実施した(図 2)

・2006 年~2017 年の 10 年以上にわたる CALIOP 及び MODIS データを解析した。アルゴリズム開発・改良による解析手法の発展が予想以上に進んだ反面、その開発・改良と解析計算自体に予想以上に時間がかかったため、データセット構築自体は終了したものの、季節・経年変動の評価には至らず、長期解析データの吟味は今後の課題となる。
・研究期間中に NASA から CALIOP データの再校正データがリリースされた(ver4)。この ver4 データにも単体・複合アルゴリズムを適用し、新旧データに対するデータセットを構築することができた。これら新旧データ比較も今後進めていく。
・データセット公開へ向け、データ公開ホームページの作成とクイックルック画像作成を進めたが完成には至らなかった。解析データ量は膨大であり、データ配布に関する工夫が今後重要な課題となる。AD-Net や SKYNET サイトへのリンクを実施する予定である。一方で、本課題で開発した単体手法を用いた CALIOP 解析ホームページが JAXA により開設された(6.「主な発表論文等 ホームページ参照」。本研究課題の大きな成果といえる。

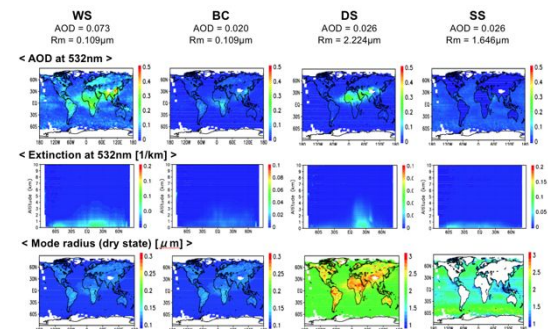


図 2 水溶性粒子(WS)、ブラックカーボン(BC)、鉱物ダスト(DS)、海塩粒子(SS)の波長 532nm での光学的厚さ(AOD)(上段)とモード半径(下段)の全球水平分布と消散係数(中段)の高度-緯度分布(下段)、2010 年の年間平均値が示されている。

(4)地上・衛星観測データを用いて検証を行

った(図3、4)。

・単体及び複合手法を用いて推定したエアロゾルプロダクトを衛星観測データと比較した(図4)。単体手法により推定された波長532nmの全エアロゾルの光学的厚さ(AOD)は2010年の年間平均で0.12、複合手法では0.145となった。NASAにより配布されているCALIOP標準プロダクトでは0.11、MODIS標準プロダクトでは0.16となる。本課題の結果は両標準プロダクトの中間的な値であり、信頼に足る結果といえる。水平・高度分布性状も類似しており、値だけではなく分布も信頼に足る結果が得られた。

・サンフォトメーターによる地上観測データとの比較も実施した(図4)。複合手法との比較では、極めて良い一致が見られた(2%程度の過小評価)。一方、単体解析との比較では30%程度の過小評価が見られた。しかし、CALIOP標準プロダクトと地上サンフォトメーターとの比較においても、CALIOP標準プロダクトに40%程度の過小評価が見られていることから、本課題のアルゴリズムの問題とは言えない。MODIS標準プロダクトと地上サンフォトメーターでは良い一致が見られていることから、MODISデータの導入が複合手法と地上サンフォトメーター間の良い一致へと導いたと考えられる。

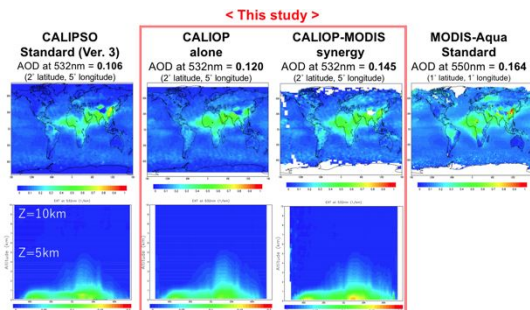


図3 単体(CALIOP alone)及び複合(CALIOP-MODIS synergy)手法により推定された波長532nmでの全エアロゾルのAODの全球水平分布(上段)と波長532nmでの全エアロゾルの消散係数(下段)の高度-緯度分布(下段)。相当するNASAにより配布されているCALIOP標準プロダクト(左端)とMODIS標準プロダクト(右端)も示されている。

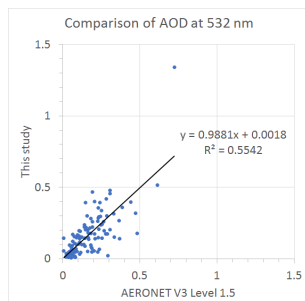


図4 複合手法により推定された波長532nmでのAOD(縦軸)と地上放射観測ネットワークAERONETにより導出されたAODとの比較。CALIOP衛星がAERONETサイトの近傍(距離

28km以内かつ30分以内)を通過した際のデータがプロットされている。2010年のデータを使用した。

5. 主な発表論文等 (雑誌論文)(計15件)

Irie H., Comparisons of spectral aerosol absorption in Seoul, South Korea, Atmos. Meas. Tech., 査読有, accepted, 2018.

Nishizawa T., Kudo R., Ground-based network observation using multi-wavelength Raman lidars and algorithm to retrieve distributions of aerosol components, JQSRT, 査読有, 188, 79-93, 2017.

Nishizawa T., Optical properties of mixed aerosol layers over Japan derived with multi-wavelength Mie-Raman lidar system, JQSRT, 査読有, 188, 20-27, 2017.

Nishizawa T., Kudo R., Aerosol observation using multi-wavelength Mie-Raman lidars of the AD-Net and aerosol component analysis, 28th ILRC, 査読有, 091-046, 2017.

Kudo R., T. Nishizawa, K. Aoki, Remote sensing of aerosol optical properties and solar heating rate estimated by the combination of sky radiometer and lidar measurements, AIP Conference, 査読有, 1810, 2017.

Nishizawa T., Evolution of a lidar network for tropospheric aerosol detection in East Asia, Optical Engineering, 査読有, 56(3), 031219, 2016.

Kudo R., Nishizawa T., Vertical profiles of aerosol optical properties and the solar heating rate estimated by combining sky radiometer and lidar measurements, Atmos. Meas. Tech., 査読有, 9, 3223-3243, 2016.

Nishizawa T., Irie H., Aoki K., Aerosol characteristics in Phimai, Thailand determined by continuous observation with a polarization sensitive Mie-Raman lidar and a sky radiometer, Environmental Research Letters, 査読有, 10:065003, doi:10.1088/1748-9326/10/6/065003, 2015.

(学会発表)(計43件)

Irie H., Validation of GCOM-C atmosphere products by SKYNET, Joint PI Meeting of Global Environment Observation Mission, Tokyo, 2018.

入江仁士, 衛星および地上リモートセンシングから浮かび上がった大気環

境の現状、大気環境学会近畿支部 反応と測定部会、大阪、2018.

Aoki K., Validation of satellite aerosol optical properties over land and ocean measured by sky radiometer, 3rd International A-Train Symposium, Pasadena, CA, USA, 2017.

工藤玲, CALIOP と MODIS の複合解析によるエアロゾル組成の全球三次元プロダクトの開発, 第 35 回レーザセンシングシンポジウム, 東京, 2017.

Kudo R., Remote sensing of aerosol optical properties and solar heating rate estimated by the combination of sky radiometer and lidar measurements, International Radiation Symposium, Auckland, New Zealand, 2016.

Nishizawa T., The Asian dust and aerosol lidar observation network (AD-Net): Current status & Progress, International SKYNET workshop, Rome, 2016.

西澤智明、ライダーを用いた雲・エアロゾル・大気微量気体の観測、光・量子ビーム科学連携推進室第 5 回ワークショップ, 仙台、2016 (招待講演).

西澤智明、地上ライダーネットワークおよび衛星搭載ライダーデータを用いたエアロゾル光学特性の観測研究. RIAM フォーラム 2015, 福岡、2015 (招待講演).

〔図書〕(計 2 件)

西澤 智明, 岡本 創, 2017 年 日本気象学会 気象研究ノート第 234 号 「地球観測の将来計画に関わる世界動向の分析」(編集 TF 地球科学研究 高度化ワーキンググループ) 第 6 章 ライダ 74pp.

岡本 創, 2017 年 気象研究ノート第 234 号 「地球観測の将来構想に関わる世界動向の分析」(編集 TF 地球科学研究 高度化ワーキンググループ) 第 5 章 降雨・雲レーダ 74pp.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕ホームページ等

【AD-Net】

<http://www-lidar.nies.go.jp/AD-Net/>

【International SKYNET DataCenter】

<http://www.skynet-isdc.org/index.php>

【EarthCARE 研究 A-Train プロダクトモニタ】

http://www.eorc.jaxa.jp/EARTHCARE/research_product/ecare_monitor.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西澤 智明 (NISHIZAWA TOMOAKI)

国立研究開発法人国立環境研究所・環境計測

研究センター・室長

研究者番号: 10462491

(2) 研究分担者

日暮 明子 (HIGURASHI AKIKO)

国立研究開発法人国立環境研究所・環境計測

研究センター・主任研究員

研究者番号: 20311326

(3) 研究分担者

工藤 玲 (KUDO REI)

気象庁気象研究所・気候研究部・研究官

研究者番号: 00414508

(4) 研究分担者

岡本 創 (OKAMOTO HAJIME)

国立大学法人九州大学・応用力学研究所・教授

研究者番号: 10333783

(5) 研究分担者

入江 仁士 (IRIE HITOSHI)

国立大学法人千葉大学・環境リモートセンシング研究センター・准教授

研究者番号: 40392956

(6) 研究分担者

青木 一真 (AOKI KAZUMA)

国立大学法人富山大学・大学院理工学研究部・教授

研究者番号: 90345546