

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：34323

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00528

研究課題名(和文) 大気微小(エアロゾル・PM)粒子の高精度推定：多波長並びに偏光情報の活用

研究課題名(英文) Improved algorithms for aerosol retrieval based on multi-spectral radiance and polarization measurements

研究代表者

向井 苑生(Mukai, Sonoyo)

京都情報大学院大学・その他の研究科・教授

研究者番号：00097411

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：多波長・偏光衛星データを基盤情報とした大気エアロゾル特性導出手法を考案し、実効システムを作成した。3年間の成果・達成度・今後の発展計画をまとめる：

効率的なエアロゾルモデルの提案。偏光・非偏光両放射場に柔軟に対応可能な放射伝達システム作成。近紫外並びに紫バンドデータ比で定義する吸収性エアロゾル識別指標(AAI)を提案。大気汚染やPM粒子解析、地域気象影響評価等に応用。衛星データ検証ツールをNASA/AERONETデータを基に作成。本成果は2017年12月に打ち上げのJAXA/GCOM-C(しきさい衛星)搭載SGLIセンサーデータに適用予定。

研究成果の概要(英文)：This study aimed at performance of efficient system for aerosol retrieval based on the satellite data utilized together with ground-based measurements, radiative transfer algorithms, and the numerical model simulations.

Summary of this work is as follows: 1. Improved description of aerosol models, and validation it by using Terra/MODIS and ADEOS-2/GLI. 2. Development of radiative transfer system for polarization or non-polarization field. 3. An absorbing aerosol index (AAI) has been proposed defined as the ratio of the satellite-observed radiance at a wavelength of 412 nm to that at 380 nm in order to detect the absorbing particles. 4. Application for air pollution, PM analysis and an impact on the environment and climate change. 5. Validation system for satellite observations based on NASA/AERONET data. 6. The obtained results in this study are available for JAXA/GCOM-C/SGLI and other future missions.

研究分野：環境動態解析

キーワード：放射伝達理論 大気エアロゾル 衛星データ解析 地上放射観測 偏光

## 1. 研究開始当初の背景

1 万分の 1 mm にも満たないチッポケな存在にもかかわらず、エアロゾルは大気質の重要な指標として認識されてきた。しかし、時空間を動きまわる希少で微小な粒子の実体(量、大きさ、組成、形)把握は難しい。21 世紀に入り大気微小粒子(エアロゾル)が健康・環境・社会に与える影響の大きさが認識され、人工衛星・地上観測・実験・理論・コンピュータを駆使した研究調査が始まった。特に越境大気汚染(黄砂粒子・PM<sub>2.5</sub>)問題を抱える我が国では大気エアロゾルの高精度解析は緊急課題でもある。しかし地球温暖化問題に関する第 5 次 IPCC レポート(2014 年)においても、大気エアロゾル特性把握や雲との相互作用を含めた放射収支に与える不確定性が指摘されている。

## 2. 研究の目的

「偏光と多波長」情報に基づく大気微粒子解明が本研究の目的である。「偏光やマルチスペクトル」観測は衛星探査では新しいものではない。申請者達は既に JAXA / ADEOS 衛星に搭載されたフランスの偏光センサ(POLDER)データを解析し、エアロゾル推定への有効性を地球規模分布として示した。ヨーロッパでも現行の PARASOL/POLDER-3 センサの改良型後継機の稼働計画が発表されている。新たな偏光センサ時代を迎え、高精度で且つ効率的な偏光情報解析手法が求められている。また JAXA / ADEOS-2 衛星(2003 年)搭載 GLI センサの多波長データ解析にも取り組んだ。GLI センサの後継機 SGLI(second generation GLI)は多波長偏光センサで 2017 年 12 月 23 日に打ち上げられた JAXA / GCOM-C(しきさい)衛星に搭載されている。また 2014 年 10 月 7 日に打ち上げられた気象衛星ひまわり 8 号は従来の気象衛星の常識を一新した多波長チャンネルを持ち、アジア(特に日本周辺)域では高頻度で高空間分解能のデータを提供し「静止地球観測衛星」とも呼ばれる。このように「しきさい」、「ひまわり 8 号」衛星データは精密な大気微粒子探査衛星として、大きな期待が寄せられている。当然、精密な解析アルゴリズムが必要となる。本研究は、これら先進的な衛星データの特徴を生かした実効的かつ高精度なエアロゾル特性推定手法の開発を目指したものである。

## 3. 研究の方法

### (1) エアロゾルタイプの分類

SGLI データの特長である近紫外データを活用した吸収性エアロゾル識別指標 AAI (Absorption Aerosol Index: 紫波長と近紫外波長の衛星観測値の比で定義)を提案し、SGLI の先行センサである GLI 全球データを用いて、陸域エアロゾルタイプの識別が可能である事を示した。各タイプは AAI の高い順に鉱物塵粒子(mineral dust)・植物燃焼性粒子(biomass burning aerosol)・非吸収性粒子(non absorbing particle)・雲(cloud)となった。エアロゾルタイプ分類のための AAI 閾値の精度には更なる精査が必要であるが、衛星観測の利点である全球規模解析において、簡単な波長比でエアロゾルタイプが把握できる利点は大きい。準備するエアロゾルモデルや放射計算が大幅に簡素化できる。「first & fast aerosol retrieval」と位置づけ、階層的に高精度化を図る事が出来る。

### (2) エアロゾルモデルの簡略表記

様々なエアロゾル種に対応するためには、エアロゾル量、サイズ、吸収特性等を現す複素屈折率、形状等が様々に組み合わせられたエアロゾルモデルを作成する必要がある。前節で提案した陸域エアロゾルタイプの識別が層有用になる。

- A. mineral dust を大粒子型、
  - B. biomass burning aerosol と硫酸塩のような non absorbing particle を小粒子型
- と 2 分すれば、両者は夫々固有の 2 山対数正規サイズ分布で記述でき、全粒子体積に対する小粒子体積比だけが唯一つのパラメタとなる。

#### 屈折率も

- A タイプは mineral dust の値を採用。
- B タイプには吸収性粒子と非吸収性粒子の屈折率を混合すれば良い。但し、種々の混合則があるので十分な考慮が必要である。

#### 粒子形状は

- A. mineral dust は非球形、
- B. 小粒子は球形とする。

自然界は複雑で、種々のエアロゾルタイプが混在しているが、前節でも述べたように「first & fast aerosol retrieval」として A 型と B 型のエアロゾルモデルを出発点とする。

更に AAI 値が低い場合は明らかに「雲」として、エアロゾル解析対象から外せる事も大きな利点である。

### (3) 放射伝達計算

地球大気 - 地表面モデルにおける放射伝達計算を行う必要があるが、ここでは前提案したエアロゾルモデルを採用して簡素化が

図れる。偏光観測値が使用できる場合には、偏光輝度は地表面反射の影響がさほど大きくないので、地表面モデルは POLDER グループが提案する BPDF を採用する事により、放射伝達計算の実行時間を削減することができる。

#### 4. 研究成果

詳細な結果は、次項の研究業績に記した書籍、論文、学会発表などで公表をしているが、以下に研究成果をまとめる。

- (1) 近紫外並びに紫バンドデータ比で定義する指標(AAI: Absorption Aerosol Index)を提案し、この指標を用いてエアロゾルを鉱物粒子、植物燃焼粒子、硫酸粒子、雲に大別できる事を ADEOS-2/GLI 全データを用いて試行した。
- (2) 提案したエアロゾルモデルの効率的表現を広く MODIS データや、ADEOS-2/GLI データに適用し、計算効率だけではなく精度面でも十分な結果が得られる事を実証した。
- (3) 偏光放射伝達モデルの実用化精度向上に努めた。更に、偏光・非偏光両放射場に柔軟に対応可能なシステムへの移行に着手した。
- (4) 衛星データ検証ツールを NASA/AERONET データを基に作成した。4つの選定ルールを提案し、各項目に3段階評価を付して目的に応じた衛星プロダクト検証に非常に有用である事が示された。
- (5) 大気汚染や PM 粒子解析、地域気象影響評価等に応用した。
- (6) 得られた成果は、2014年10月7日に打ち上げられた JMA/HIMAWARI8 (ひまわり8号衛星)搭載センサ AHI や2017年12月23日に打ち上げられた JAXA/GCOM-C (じきさい衛星) SGL センサデータ解析に適用予定である。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計17件)

- Nakata, M., I. Sano and S. Mukai, Air Pollutants in Osaka, *Front. Environ. Sci.*, 査読有, **18**, 2015.  
DOI: 10.3389/fenvs.2015.00018
- Kokhanovsky, A.A., A. B. Davis, B. Cairns, O. Dubovik, O. Hasekamp, I. Sano, S. Mukai, V. Rozanov, P. Litvinov, T. Lapyonok, I. S. Kolomiets, Y. A. Oberemok, S. Savenkov, A. di Noia, F. Xu, M. Duan, D. Diner, R. Munro, Space-Based Remote Sensing of Atmospheric Aerosols: The Multi-Angle Spectro-Polarimetric Frontier, *Earth Science Reviews*, 査読有, **145**, 85-116, 2015.  
DOI: 10.1016/j.earscirev.2015.01.012

- Mukai, S., M. Nakata, M. Yasumoto, I. Sano, and A. Kokhanovsky, A study of aerosol pollution episode due to agriculture biomass burning in the east-central China using satellite data, *Front. Environ. Sci.*, 査読有, 2015.  
DOI: 10.3389/fenvs.2015.00057

- Nakata, M., I. Sano, and S. Mukai, Relation between aerosol characteristics and impact factor on climate and environment, *Proc. IEEE IGARSS*, 査読有, 2342-2345, 2015.  
DOI: 10.1109/IGARSS.2015.7326278

- Mukai, S., I. Sano, M. Nakata, Detection and/or distinction between haze and/or cloud, *Proc. IEEE IGARSS*, 査読有, 2210 - 2213, 2015.  
DOI: 10.1109/IGARSS.2015.7326244

- Sano, I., S. Mukai, and M. Nakata, Retrieval for PM2.5 distribution from space, *Proc. IEEE IGARSS*, 査読有, 2206 - 2209, 2015.  
DOI: 10.1109/IGARSS.2015.7326243

- Mukai, S., I. Sano, M. Nakata, M. Yasumoto, Detection of severe air pollution from multidirectional perspectives, *Proc. SPIE*, 査読有, **9640**, 964013, 2015.  
DOI: 10.1117/12.2194677

- Nakata, M., I. Sano, S. Mukai, and B. Holben, Spatiotemporal variations in atmospheric aerosols in East Asia: Identifying local pollutants and transported Asian aerosols in Osaka, Japan using DRAGON, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 査読有, 2016.  
DOI: 10.5194/acp-2016-182

- Sano, I., S. Mukai, M. Nakata and B. Holben, Regional and local variations in atmospheric aerosols using ground-based sun photometry during distributed regional aerosol gridded observation networks (DRAGON) in 2012, *Atmos. Chem. Phys.*, 査読有, **16**, 14795-14803, 2016.  
DOI: 10.5194/acp-16-14795-2016

- Mukai, S., I. Sano and M. Nakata, Improvement of retrieval algorithms for severe air pollution, *Proc. SPIE*, 査読有, **10008**, 1000811, 2016.  
DOI: 10.1117/12.2240485

- Nakata, M., I. Sano and S. Mukai, Investigation of air pollution and regional climate change due to anthropogenic aerosols, *Proc. SPIE*, 査読有, **10008**, 1000811, 2016.  
DOI: 10.1117/12.2240153

- Nakata, M., I. Sano and S. Mukai, Response of the climate system to anthropogenic aerosols, *Proc. IEEE/IGARSS*, 査読有, 978-1-5090-4951-6/17, 5946-5949, 2017. DOI:10.1109/IGARSS.2017.8128363
- Mukai, S., M. Nakata, I. Sano, M. Yasumoto, and T. Fujito, Regional and seasonal effects of biomass burning aerosols, *Proc. of IEEE/IGARSS*, 査読有 978-1-5090-4951-6/17, 5958-5961, 2017. DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8128366
- Nakata, M., A. Yoshida, I. Sano, and S. Mukai, Evaluation of ground-based particulate matter in association with measurements from space, *Proc. SPIE*, **10424**, 査読有, 104240W, 2017. DOI: 10.1117/12.2277825
- Mukai, S., T. Fujito, M. Nakata, I. Sano, Role of near ultraviolet wavelength measurements in the detection and *Proc. SPIE*, **10424**, 査読有, 104240X, 2017. DOI: 10.1117/12.2277826
- Sano, I., S. Mukai, M. Nakata, An effective method for retrieval of three kinds of aerosol properties focusing on a coming GCOM-C1 / SGLI in December of 2017, *Proc. SPIE*, **10424**, 査読有, 1042403, 2017. DOI: 10.1117/12.2278159
- Holben, B.N., J. Kim, I. Sano, S. Mukai et al., An overview of meso-scale aerosol processes, comparison and validation studies from DRAGON networks, *Atmos. Chem. Phys.*, 査読有, **18**, 655–671, 2018. DOI: 10.5194/acp-18-655-2018
- [学会発表] (計 16 件)
- Sano, I., et al., On relationship between aerosols and PM2.5, EGU meeting(Vienna, Austria), 2015.
- Mukai, S., I. Sano, M. Nakata and A. Kokhanovsky, Detection of haze and/or cloud in the biomass burning episodes in East Asia, EGU meeting(Vienna, Austria), 2015.
- Mukai, S., I. Sano and M. Nakata, An update model for 1D vector radiative transfer problem, IRS (International Radiation Symposium), April 16-22, Auckland, New Zealand, 2016.
- Mukai, S., I. Sano, T. Fujito, M. Nakata and A. Kokhanovsky, Feasibility study for GCOM-C/SGLI: Retrieval algorithms for carbonaceous aerosols, EGU, April 17-22, Wien, Austria. Geophysical Research Abstracts, **18**, EGU2016-3481, 2016.
- Mukai, S., I. Sano, M. Yasumoto, M. Nakata and N. Nishi, feasibility study of aerosol retrieval for GCOM-C/SGLI with simulated data, AGU, December 12-16, San Francisco, USA, 2016.
- 藤戸 俊之, 向井 苑生, 中田 真木子, エアロゾル・リトリーバルシステムの効率化, 日本リモートセンシング学会学術講演会, 11月1-2日, 新潟市, 2016,
- 保本 正芳, 向井 苑生, 衛星及び地上から観たバイオマスエアロゾル, 日本リモートセンシング学会学術講演会, 11月1-2日, 新潟市, 2016.
- Sano, I., S. Mukai, A. Yoshida, M. Nakata, H. Minoura and B. Holben, Monitoring of Siberian biomass burning smoke from AHI on board geostationary satellite Himawari-8, AGU, December 12-16, San Francisco, USA, 2016.
- Sano, I., S. Mukai and M. Nakata, Aerosol retrieval for second global imager on gcom-C1, EGU General Assembly, 23-28 April, Vienna, Austria, 2017.
- Mukai, S., I. Sano, M. Nakata and A. Kokhanovsky, Regional variation of carbonaceous aerosols from space and simulations, EGU General Assembly, 23-28 April, Vienna, Austria, 2017.
- Yasumoto, M., M. Nakata, I. Sano and S. Mukai, Effectiveness of near-UV data by satellite for detection/derivation of absorbing aerosols, ISRS, 17-19 May, Nagoya, Japan, 2017.
- 吉田 晃仁, 中田 真木子, そらまめ君を用いた衛星導出 PM2.5 濃度プロダクト (SPM25GE) の検証, 第 34 回エアロゾル科学・技術研究討論会, 3-4 Aug., 芝浦工業大学, 2017.
- 藤戸 俊行, 向井 苑生, 衛星からの炭素性エアロゾルの検知と特性導出, 第 34 回科学・技術研究討論会, 3-4 Aug., 芝浦工業大学, 2017.
- Sano, I., S. Mukai and M. Nakata, A method of aerosol retrieval for the second generation global imager (SGLI) on GCOM-C1, 1<sup>st</sup> International Workshop on “Advancement of polarimetric observations: calibration and improved aerosol retrievals” APOLO2017, Hefei, China, 24-27 Oct, 2017.
- 中田 真木子, 向井 苑生, アジアにおけ

る大気エアロゾルの季節変化特性,日本リモートセンシング学会 平成 29 年度秋季学術講演会, 21-22 Nov., 酪農学園大学, 2017.

工藤 良祐, 岩崎 翔太郎, 向井 苑生, B. Holben, しきさい□衛星からのエアロゾル・プロダクト検証ツールの開発, 日本リモートセンシング学会 平成 29 年度秋季学術講演会, 21-22 Nov., 酪農学園大学, 2017.

〔図書〕(計 3 件)

— 向井 苑生, 大気エアロゾル観測; 人工衛星によるリモートセンシング, オンライン版 ”エアロゾル用語集 (日本エアロゾル学会 編 ) ” , 2016.  
<https://sites.google.com/site/aerosolpedi/yong-yurisuto/da-qiearozoru-guan-ce/5>

Sandro.F., S. Gilardoni, A. Kokhanovsky, W. Di Nicolantonio, S. Mukai, I. Sano, M. Nakata, C. Tomasi, C. Lanconelli, Chap.9 Aerosol and Air Quality, in Atmospheric Aerosols” pp.553-596 in “*Life Cycles and Effects on Air Quality and Climate*” (John Wiley) ISBN: 978-3-527-33645-6, 704 pages, doi: 10.1002/9783527336449, 2016.

— Nakata, M. and S. Mukai, Cha.4 An Investigation into Dust Storms Using Satellite Measurements and Model Simulations in “*Advances in Environmental Research*” (Nova Science Publishers), ISBN: 978-1-53612-789-8, 2017.

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

向井 苑生 (Mukai, Sonoyo)  
京都情報大学院大学・教授  
研究者番号 : 00097411

### (2)連携研究者

佐野 到 (Sano, Itaru)  
近畿大学・大学院総合理工学研究科・教授  
研究者番号 : 10247950

保本 正芳 (Yasumoto, Masayoshi)  
近畿大学・総合社会学部・講師  
研究者番号 : 40340765

中田 真木子 (Nakata, Makiko )  
近畿大学・大学院総合文化研究科・准教授  
研究者番号 : 80525791