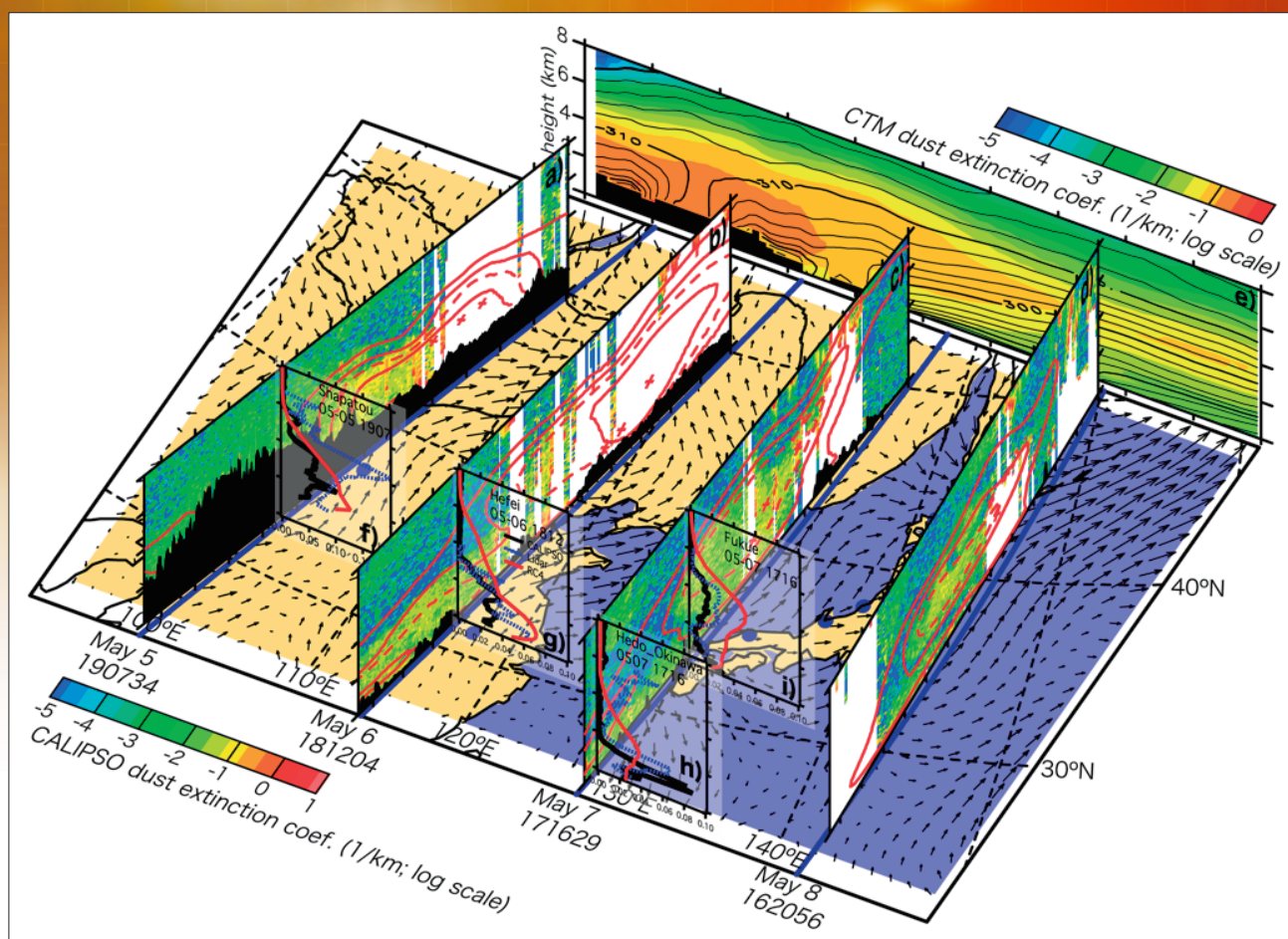


レーザセンシング学会誌

2023
Vol.4 No.1

◆特集◆

ライダーデータ利用 I (エアロゾル・雲)



33 ページの記事参照

レーザセンシング学会誌

Journal of Laser Radar Society of Japan

Volume 4, Number 1 (April 2023)

◆学会法人化について

On the General Incorporated Association

長澤親生 会長 President Chikao Nagasawa 1

◆巻頭言

Prefatory note

ライダー観測とデータ利用

Lidar observation and data utilization

杉本伸夫 Nobuo Sugimoto 2

◆特集「ライダーデータ利用Ⅰ（エアロゾル・雲）」

Special Issue on Lidar Data Utilization I — Aerosols and Clouds

(解説) 衛星搭載ライダー・イメージャの複合解析によるエアロゾル組成の全球三次元分布
(Technical Review) Global 3-D distribution of aerosol composition by synergistic analysis of
space-borne lidar and imager

工藤 玲, 日暮明子, 及川栄治, 藤川雅大, 石元裕史, 西澤智明

Rei Kudo, Akiko Higurashi, Eiji Oikawa, Masahiro Fujikawa, Hiroshi Ishimoto, and Tomoaki Nishizawa 5

(解説) 能動型センサを用いたエアロゾル—雲相互作用研究の紹介

(Technical Review) Introduction of the aerosol-cloud interaction studies using active sensors

河本和明 Kazuaki Kawamoto 12

(解説) 衛星搭載ライダーエアロゾル観測のデータ同化

(Technical Review) Data assimilation of satellite-borne lidar aerosol observations

関山 剛 Tsuyoshi Thomas Sekiyama 21

(解説) 領域化学輸送モデルとライダー観測

(Technical Review) Aerosol research using regional chemical transport model in conjunction with lidar observations

弓本桂也, 原 由香里

Keiya Yumimoto and Yukari Hara 33

(解説) ドップラーライダーを活用した大気汚染物質の動態・拡散過程の研究

(Technical Review) Pollutant diffusion/variations using 3-D coherent Doppler lidar measurement

高島久洋 Hisahiro Takashima

..... 40

(解説) 桜島火山に設置されたライダーによる火山噴出物の観測

(Technical Review) Lidar observations of eruptive products of the Sakurajima volcano

中道治久 Haruhisa Nakamichi

..... 48

◆学会だより 57

- ・「学位論文紹介」投稿のお願い
- ・学会誌への投稿案内
- ・査読者一覧

編集後記 59

学会法人化について

会長 長澤親生

一般社団法人レーザセンシング学会

(305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1 気象庁気象研究所 気象観測研究部 第2研究室気付)

On the General Incorporated Association

President Chikao Nagasawa

Laser Radar Society of Japan

(c/o Meteorological Research Institute, 1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052 Japan)

The Laser Radar Society of Japan, which had been a voluntary organization for 50 years, changed its organization to the General Incorporated Association in 2022. On behalf of the Board of Directors, I would like to once again briefly explain the significance of becoming the General Incorporated Association and progress so far. Change of the organization was performed to ensure social credibility of the organization and transparency of accounting procedures.

任意団体でありましたレーザセンシング学会が、一般社団法人レーザセンシング学会に衣替え致しまして、早一年が経過しました。ここに理事会を代表して、あらためて一般社団法人化の意義とこれまでの経過について簡単に説明させていただきます。

任意団体の問題点と致しまして、組織としての社会的信頼性の低さや会計処理の透明性の不完全さがあります。具体的には任意団体の場合、学会財産である預貯金の管理は学会会長の個人名義で取り扱わざるを得ず、また学会名による公的機関からの受託事業などさまざまな事業、その他法律行為（契約、雇用、売買、賃貸）を行うことの困難さなどがあります。この実例として、法人化することにより、学会として正式にリモート会議を行う場合の法人契約に必需の学会名義のクレジットカードの発行が可能になりました。

一方、法人化するデメリットとしては、学会運営に関して法律上の規制を受けるために従来よりも柔軟な学会運営ができなくなることや税申告に関して税理士費用などが発生することがあります。学会運営に関する具体例を挙げれば、任意団体としての学会においては、総会は年度内の適当な時期に開催することができますが、一般社団法人としては、会計年度の始まりから3か月以内に開催することが法律で義務付けられています。したがって、例年9月に開催してまいりましたレーザセンシング学会の際に、同時に開催してまいりました総会を総会だけ前倒しで開催する必要があります。

2008年12月に施行された一般法人法によりそれまで非常に煩雑であった学会の法人化作業が比較的容易になったことにより、日本学術会議も学会の法人化を支援しております。

小規模の学会におきましては、税務処理費用などの面で法人化することに躊躇する団体もありますが、本レーザセンシング学会と致しましては、会計の透明性を重視するとともに、学会の更なる将来発展を期待して、2021年12月22日に開催した臨時総会におきまして、任意団体でありますレーザセンシング学会を一般社団法人として設立登記することに決定いたしました。2022年2月7日には、法務局において申請が受理され一般社団法人レーザセンシング学会が発足いたしました。

奇しくも1972年のレーザ・レーダー研究会発足以来50年目の節目の年に、一般社団法人レーザセンシング学会として新しいスタートをきることができました。会員の皆様には、社会に貢献する一般社団法人として、今後とも本学会の活動に、ご協力を賜りたくお願い申し上げます。



ライダー観測とデータ利用

杉本 伸夫

¹ 国立環境研究所 (〒305-8506 つくば市小野川 16-2)

Lidar observation and data utilization

Nobuo Sugimoto

¹*National Institute for Environmental Studies,
16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506*

(Received January 10, 2023)

In recent years, data from satellite-borne lidar CALIPSO/CALIOP and ground-based lidar networks, such as AD-Net, have become essential for aerosol and cloud studies related to global warming and the regional environment. In addition, lidars provide valuable data to study urban air pollution and volcanic ash monitoring, etc. This special issue on lidar data utilization presents six review papers on the following subjects: derivation of global three-dimensional aerosol distributions using CALIPSO and MODIS; studies of aerosol-cloud interactions using CALIPSO, CloudSat, MODIS, and microwave radiometers; dust prediction using CALIPSO data assimilation; validation and assimilation of chemical transport models using AD-Net and CALIPSO; study of three-dimensional diffusion/variation of air pollutants utilizing a MAX-DOAS and a scanning coherent Doppler lidar; and study on volcanic ash monitoring near the Sakurajima vent using two Mie scattering lidars.

キーワード：ライダー観測，データ利用

Key Words: Lidar observation, Data utilization

2022 年は、レーザセンシング学会の前身であるレーザ・レーダ研究会が発足して 50 年の節目の年であった。この記念の年に、筆者は、レーザセンシング学会功労賞をいただくという栄誉に与った。お世話になった数多くの皆様に心より感謝申し上げたい。筆者は、1979 年に国立公害研（現国立環境研究所）に入所して以来、ライダー手法の開発とそれを応用した観測研究に携わってきた。その中で、エアロゾルライダーのデータ利用は、この 20 年くらいの研究の主要テーマのひとつであった。今回、巻頭言の執筆依頼をいただいたのもこのような背景によるものと思う。

本号は雲・エアロゾルに関するライダーデータ利用の特集号で、6 件の解説から構成されている。いずれもエアロゾルや雲、大気汚染等の研究におけるライダーデータの利用を主題とする解説であるが、地球規模、領域規模の現象から、比較的小さなスケールの現象まで様々な内容を含んでいる。また、衛星ライダーデータや地上ライダーネットワークのようにデータの仕様が定義されて公開されているデータの利用もあれば、観測研究の中でのライダーの利用、さらにはライダーの利用自体がやや新しいと思われる内容も含まれている。本特集号は、1 巻 1 号「特集：エアロゾル計測 I」、3 巻 1 号「特集：ライダー観測 I」に続くものであるが、ライダー観測とライダーデータ利用はどう違うのかと考えると、おそらくライダーデータ利用という場合は、少し大きな応用や科学的な課題のなかで何らかの目的を持ってライダーデータを利用するというような意味合いであろう。そのような場合には、ライダーデータだけではなく他のデータと共にライダーデータも利用されるということが多い。ライダー研究者としての立場からいえば、いかにユニークでインパクトの大きな情報をライダーが提供できるかが問われることになる。

筆者が関係している東アジアの地上ライダーネットワーク (Asian Dust and lidar observation Network: AD-Net) のミー散乱ライダーのデータ利用 (あるいはデータ利用を意識した解析) について振り返ってみると、初期のものは、大気境界層高度の推定、雲の検知と雲底高度の推定、雲の相 (水雲、氷雲) の判別などであった。黄砂の観測に関しては、当初はライダー研究者の間で一般的に用いられていた、減衰後方散乱係数 (距離2乗補正信号) と体積偏光解消度の高度時間表示を上下に並べた図を使って研究会などで報告していた。しかし、黄砂研究者からそれでは分からないと言われることが多く、必要に迫られて粒子偏光解消度から黄砂とそれ以外の球形エアロゾルの混合比を推定して、黄砂消散係数として1枚の図面に表現する方法を考案した。ライダー研究者からは厳密でないという批判もあった。そもそもミー散乱ライダーから求めた消散係数を消散係数と呼んで良いのかという研究者さえ居た。しかし、要はどのパラメータをデータプロダクトとして提供するかという問題であって、誤差が評価できるならば多少強引な (単純化した仮定に基づく) 解析を行なっても良いだろうと思う。いずれにしても、AD-Net のデータ利用では、利用側の研究者とのインタラクションが非常に重要であった。

衛星観測の分野では「データ利用」はセンサー開発の初期の段階から必須の概念であろう。データ利用のあらゆる可能性を考えて観測要求が策定され、センサーの仕様が決定される。また、データプロダクトが定義され、運用では観測およびデータ処理が定常的に行われる。地上ライダーネットワークなどの定常観測でも、データをネットワークとして有効に利用するためには、衛星観測に倣ってデータプロダクトを定義して、準リアルタイムでデータを集約して一括処理することが必要である。AD-Net でもそのようなデータ処理が行われている。衛星観測のデータプロダクトには、生データに近いものから複雑な解析で導出されるものまで色々なレベルの (レベル0, 1, 2, 3 などと呼ばれる) ものがある。高次のプロダクトでは利用側で取り扱いやすいパラメータが提供されるが、解析に仮定が入っていたり時間空間分解能が低かったりすることが多い。特にライダーの場合はデータ利用側がどのレベルのデータを用いるかというのは考えどころである。

気象モデルや化学輸送モデルと観測データを融合するデータ同化は、ライダーデータを有効に利用するための重要な手法である。これによって、観測地点や頻度の限られるライダーデータからより大きな時間空間スケールの現象に関する有用な情報を引き出すことが可能となる。但し、観測研究を行うものとしては心に留めておくべきこともあるのかもしれない。筆者らがかつて地上ライダーネットワークデータによる黄砂のデータ同化について学会発表を行なった際に、観測研究の研究者から否定的なコメントをもらうことが何度かあった。それは研究内容そのものについてではなく、観測研究者としてデータ解析を放棄することになるのではないかというようなコメントであった。それにも一理あるものと思う。データ同化はあくまでモデルに依存していて、モデルで考えられていない現象は再現されない。まず、モデルの時間空間分解能よりも小さなスケールの現象は再現しようがない。例をあげると、ライダーでは多数の薄いエアロゾル層が見えているのにモデル側に渡すときにはずっと粗い時間・高度の区間の平均値 (あるいは中間値) を取らなくては行けない。「それで役に立つのなら嬉しいけれど、でも、あの縞々は…」というような感じである。モデルは、ある目的をもったモデルであるのでそれで良いわけであるが、観測データに含まれる情報の全てが利用されるわけではない。重要であるかどうかは別として、利用されない情報が観測データには含まれていて、目的の決まったルーチン的な処理のみを行なっているとそれを見逃すことになるのではないかということである。これはしかしデータ同化に限ったことではなくて、何らかの目的をもってデータを利用しようとする場合には普通に起こることである。例えば、AD-Net の場合、応用によっては黄砂が飛来しているかどうか、すなわちその日が黄砂日であるかどうかの判定のみが必要な場合もある。そのような場合は、例えば数時間の区間について、地上付近の黄砂消散係数に閾値を用いて判定するようなデータ処理で十分であって、詳細な分布構造は必要ないわけである。データ同化の話に戻ると、モデルの時間空間分解能より大きなスケールの現象については、データ同化によって観測データに含まれる情報が有効に利用される。もし、モデルで考えられていない現象が観測されている場合にはその部分でモデルとの不一致が大きいということになるが、逆にそのことに着目するならばモデルで見落とされていた現象の発見につながるものでもある。ということで、データ同化は、やはり現象を理解するためにも有効な手法となるものである。

データ同化において、できるだけ直接観測されたパラメータに近いパラメータを同化に用いるのが良いという考えもある。その場合にはデータ解析とデータ同化が融合することになるとも言える。ミー散乱ライダーの場合では、観測から与えるパラメータはライダー信号に近い減衰後方散乱係数と体積偏光解消度など

である。ライダー信号の再現に必要な情報（エアロゾル種毎の分布と光学モデル）をモデル側は持っているはずなので、モデル側でライダー信号を計算して観測されたライダー信号と合わせるというような考えである。実際、本特集号でも解説される関山氏の CALIPSO 衛星搭載ライダーを用いた黄砂のデータ同化ではこのような方法が用いられている。一方、観測側で解析したデータの中で比較的誤差の小さい後方散乱係数と粒子偏光解消度などを同化に用いる方が適当な場合もある。例えば、地上ライダーでは、低層にモデルでは再現が難しい局所的な高濃度のエアロゾルがある場合が多いので減衰後方散乱係数を同化に用いるのは難しい。CALIPSO データについても、最近、データ同化ではないが、レベル2プロダクトの後方散乱係数と粒子偏光解消度を使って、利用側でダスト消散係数プロファイルを計算してダストの輸送などを解析するという論文も出ている。厳密には一貫性がないが、最終的な誤差を考えると妥当な方法と言える。

2023 年度には、高スペクトル分解ライダー ATLID (ATmospheric LIDar) と雲レーダー CPR (Cloud Profiling Radar) を搭載する EarthCARE 衛星が打ち上げられる予定である。また、地上でも高スペクトル分解ライダーなどの一層の展開が期待される。これらによってさらに高度なデータ解析やデータ利用が可能になるものと期待される。

さて、以上が本号特集号の巻頭言としてふさわしいものかどうか心もとないと思いつつ、改めて本号の6報の解説記事を読んで紹介を試みる。

工藤氏らの解説では、CALIPSO 衛星搭載ライダーと Aqua 衛星に搭載されたイメージャー MODIS (Moderate resolution Imaging Spectrometer) による多波長観測の複合的な解析手法による、4 種類のエアロゾル（水溶性、光吸収性、ダスト、海塩粒子）の全球的な三次元的な分布の導出について紹介される。また、得られた全球のエアロゾル三次元分布を用いた、地球温暖化に関わるエアロゾルの直接効果による放射強制力の評価についても紹介される。

河本氏の解説では、エアロゾルの間接効果に関係するエアロゾルと雲の相互作用について、衛星搭載能動センサーである CloudSat 搭載雲レーダーと CALIPSO 搭載ライダー、受動センサーである MODIS やマイクロ波放射計などを複合的に利用した研究事例が紹介される。非常に複雑なエアロゾル雲相互作用に関する研究が分かりやすく簡潔にレビューされている。

関山氏の解説では、データ同化手法が紹介され、CALIPSO データを同化することによって黄砂飛来の推定精度が改善されるという研究事例が紹介される。また、CALIPSO と同等の衛星ライダーが4台あった場合にはさらに改善されるという仮想実験についても紹介される。

弓本氏らの解説では、化学輸送モデルとの比較検証や季節変化、長期トレンドの解析、データ同化における AD-Net データ、CALIPSO データの利用について紹介される。AD-Net データの利用の主要な成果がここで紹介されている。

高島氏の解説では、MAX-DOAS による NO₂ の測定とスキャン式のコヒーレントドップラーライダーを利用した福岡における大気拡散過程の研究が紹介され、大気汚染現象において大気の三次元的な拡散輸送が重要であることが示される。

中道氏の解説では、桜島火山の東西2地点の観測所にミー散乱ライダーを設置して、火口上空を通る光路上の細粒火山灰を連続的に観測した研究について紹介される。また、今後の大噴火時の AD-Net の利用の可能性にも触れられている。

いずれの解説も充実した内容であり、今後の研究の展望なども述べられている。ぜひ一読いただくことをお勧めしたい。

特集 ライダーデータ利用 I (エアロゾル・雲)

衛星搭載ライダー・イメージャの複合解析による エアロゾル組成の全球三次元分布

工藤 玲^{*1}, 日暮 明子², 及川 栄治¹,
藤川 雅大³, 石元 裕史¹, 西澤 智明²

¹ 気象庁気象研究所 (〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1)

² 国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

³ 九州大学大学院総合理工学府 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1)

Global 3-D distribution of aerosol composition
by synergistic analysis of space-borne lidar and imager

Rei Kudo^{*1}, Akiko Higurashi², Eiji Oikawa¹,
Masahiro Fujikawa³, Hiroshi Ishimoto¹, and Tomoaki Nishizawa²

¹ Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency,
1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052

² National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506

³ Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyusyu University,
6-1 Kasuga-koen, Kasuga, Fukuoka 816-8580

(Received November 28, 2022; revised February 14, 2023; accepted February 27, 2023)

Aerosols have significant impacts on the climate changes by modifying the atmospheric radiative balance. It is essential to observe the spatial and temporal variations of the aerosol composition and optical properties. In this paper, we firstly show the global 3-D distribution of the aerosol composition and optical properties estimated from the space-borne lidar and imager. Furthermore, the shortwave direct radiative forcing of aerosols for the downward radiative flux density at the top of the atmosphere, and the aerosol impacts on the shortwave heating rate are investigated. In the last, the future satellite missions regarding to the lidar are introduced.

キーワード：エアロゾル, 光学特性, 組成, 放射強制力

Key Words: Aerosol, Optical property, Composition, Radiative forcing

1. はじめに

大気エアロゾル粒子¹⁾(以下エアロゾル)は、大気中を浮遊する液体または固体の微小な粒子で、1 nm～100 μm の幅広い範囲の粒径を持つ。エアロゾルは、大気汚染物質として環境問題や健康被害の要因となるだけでなく、大気の放射収支を変動させることで気候にも影響する。エアロゾルは、総じて大気を冷やす効果を持つため、地球温暖化問題においては温暖化を抑制する重要な要素として認識されている²⁾。しかし、大気中で滞留する時間が短く(1 日～2 週間程度)、多種多様な排出源(砂漠、森林火災、自動車等)と種類(ダスト、硫酸塩、黒色炭素等)を持つため、観測でその全容を把握することは難しく、数値モデルによる再現も今なお難しい。さらに、エアロゾル—放射相互作用(直接・準直接効果)、エアロゾル—雲相互作用

(間接効果)の物理過程は複雑で、さらなる研究が必要とされている。このため、地球温暖化問題におけるエアロゾルの影響評価には、大きな不確実性が残されており、喫緊の課題とされている。

エアロゾルは、太陽光を直接散乱・吸収することで、大気放射収支に影響を与える(直接効果)。この効果を定量化するためには、エアロゾルの消散係数、一次散乱アルベド、位相関数が必要になる。エアロゾルに入射する光のエネルギーは、散乱と吸収によって消散する。これを表すパラメータが消散係数(=散乱係数+吸収係数)であり、 $1/m$ の単位を持つ。消散係数を光路に沿って積分したものが光学的厚さである。鉛直方向に積分した場合には、光学的深さと呼ばれることもある。気象庁の長期観測によると、国内の光学的厚さは、概ね0.0~0.4の範囲で変動している³⁾。一次散乱アルベドは、消散係数に対する散乱係数の比を示すパラメータで、0.0~1.0の値を持ち、値が小さいほど光を吸収する割合が大きいことを示す。多くのエアロゾルは、0.90~1.0の値を持つが、光吸収性が高い黒色炭素は、0.2~0.3の値を持つとされている⁴⁾。エアロゾルに入射した光のエネルギーが散乱によってどの方向にどれだけ配分されるかを示すパラメータが位相関数となる。この位相関数の角度積分から算出される前方・後方散乱の度合いを示したパラメータが、非対称因子で、-1.0~1.0の値を取る。1.0(-1.0)に近いほど前方(後方)散乱が強く、0.0は等方散乱を示す。大気分子によるレイリー散乱は0.0の値を持つ。エアロゾルは0.6~0.8の値をもつことが多い。ダストや海塩のように粒径の大きいエアロゾルは0.8に近い値を持つ。これらのパラメータは、種類によって異なるため、エアロゾルの組成が重要になる。

地球温暖化への影響評価を考える上では、エアロゾルの三次元分布も重要な要素となる。下層雲の上空に滞留したエアロゾルは、下層雲によって反射される太陽光を吸収し、下層雲の冷却効果を抑制する。また、エアロゾルの鉛直分布は、大気の安定度にも関わる。上空に滞留したエアロゾルが、光吸収によって大気を直接温めることにより、大気の安定度が増し、大気境界層の発達が抑制される⁵⁾。逆に、光吸収性エアロゾルが、地表付近にあった場合、大気不安定度が増し、大気境界層の発達を強化する場合もある。

以上のことから、エアロゾル組成の三次元分布を観測によって把握し、これを活用して数値モデルの再現・予測の精度を向上することが、地球温暖化問題において重要となる。現行の観測システムにおいて、衛星リモートセンシングは、エアロゾルの全球分布を把握できる唯一の方法である。特に、鉛直分布の観測を可能とするためには、衛星搭載ライダーが不可欠となる。そこで本稿では、著者らが開発した衛星搭載ライダーとイメージャの複合解析手法によって得られたエアロゾル組成の全球三次元分布について紹介する(2章)。そして、全球三次元分布から見積もられた直接効果による放射強制力について述べる(3章)。最後に、今後の衛星搭載ライダーによるエアロゾルの観測計画を紹介する(4章)。

2. 衛星搭載ライダー・イメージャによるエアロゾル組成の全球三次元分布

イメージャによる散乱光の多波長分光観測からは、エアロゾルを微小粒子と粗大粒子に分別した上で、それぞれの光学的厚さを推定することができる⁶⁾。ただし、エアロゾルの鉛直分布や地表面反射率を仮定するの必要があり、それが推定の誤差要因となる。一方、ライダーは、観測波長は限られるものの、鉛直分布を直接観測することができる⁷⁾。また、地表面反射を考慮する必要のないことも長所となる。このように、両者は相補的な関係にあり、複合的な解析アルゴリズムを構築することによって相乗効果が期待できる。

著者らは、CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) 衛星に搭載された CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) と、Aqua 衛星に搭載された MODIS (Moderate resolution Imaging Spectroradiometer) を複合解析することで、エアロゾル組成の全球三次元分布を観測する手法を開発している⁸⁾。エアロゾルは多種多様ではあるが、本手法では、粒径と光吸収性の異なる4つの粒子モデル(水溶性、光吸収性、ダスト、海塩粒子)を用いることで、大気中の主要なエアロゾル種を表現することを試みている。水溶性粒子は、硫酸塩、硝酸塩、有機物等の混合粒子である⁹⁾。粒径が小さく(半径0.1~0.2 μm)、光吸収性が弱い(一次散乱アルベド約0.96)、球形の粒子を仮定した。光吸収性粒子には、黒色炭素を核とし、その周囲を水溶性粒子と黒色炭素を均質混合させた膜で覆った内部混合粒子モデル(Core-grey shell model¹⁰⁾)を使用した。粒径は水溶性粒子と同程度であり、一次散乱アルベドは約0.44の値で光吸収性が強く、球形の粒子を仮定した。ダスト粒子は、複雑な形状を持った Voronoi aggregate model¹¹⁾を使用した。粒径は大きく(半径1~5 μm)、中程度の光吸収性(一次散乱アルベド約0.91)を持った、非球形の粒子とした。海塩粒子は、粒径が大きく(半径1~5 μm)、光吸収性の無い(一次散乱アルベド

1.00), 球形粒子とした. これらの粒子の鉛直分布と, 微小粒子(水溶性・光吸収性)と粗大粒子(ダスト)それぞれの粒径を CALIOP と MODIS の観測値から推定する. なお, 海塩粒子は海上のみに存在し, 陸上に海塩粒子はないとした. また, 海塩粒子の粒径は, 観測値から推定するのではなく, 海上風速によるパラメタリゼーションによって与えた¹²⁾. 推定には, CALIOP の全観測データである 532 nm と 1064 nm の減衰付き後方散乱係数と 532 nm の偏光解消度を使用した. MODIS の観測データは, バンド 1 (620–670 nm) とバ

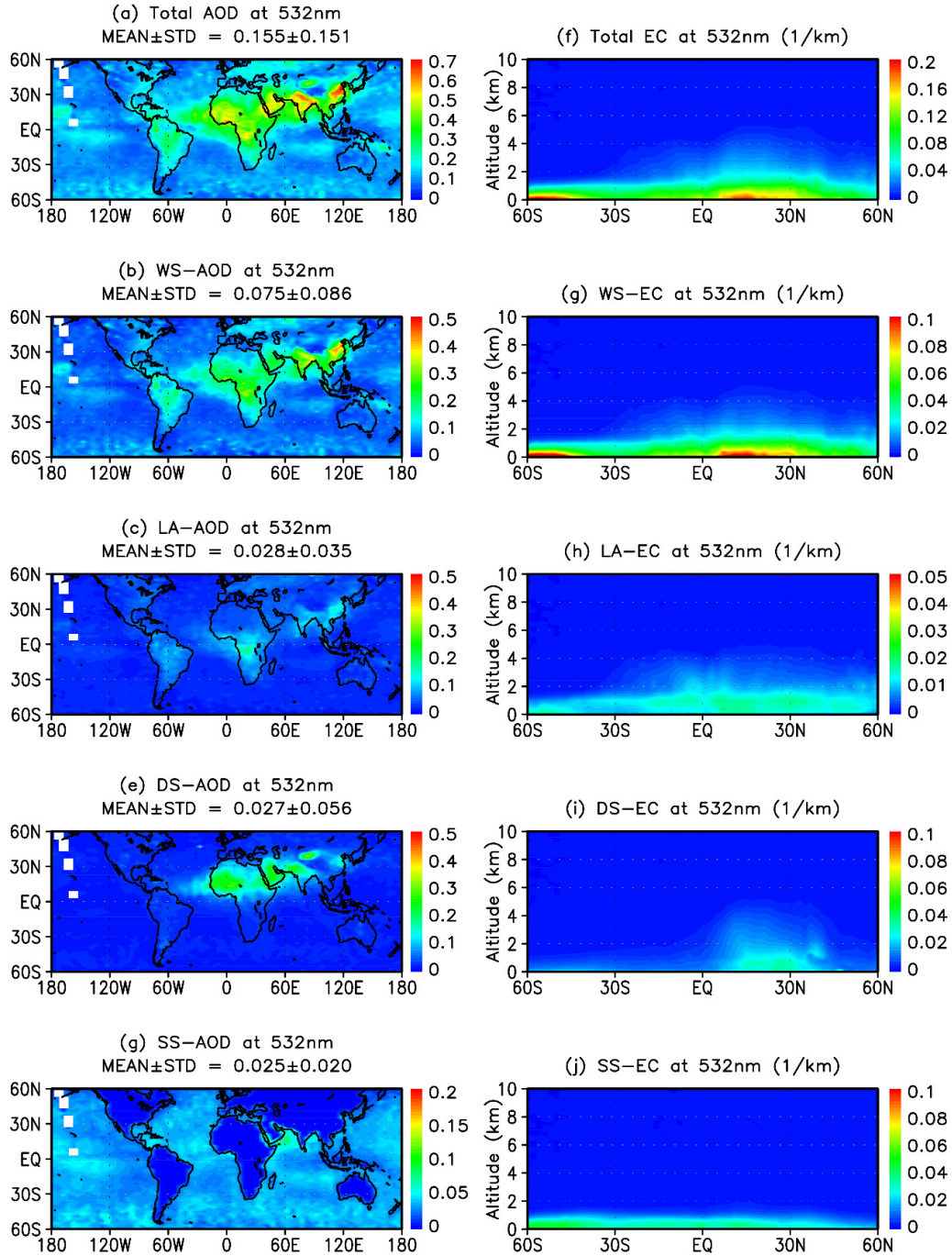


Fig. 1 Left panels are annual means of aerosol optical depth (AOD) for total aerosols (a), water-soluble (WS) (b), light-absorbing (LA) (c), dust (DS) (d), and sea salt (SS) (e) particles. Right panels are zonal means of extinction coefficients (EC) for total aerosols (f), WS (g), LA (h), DS (i), and SS (j) particles. “MEAN±STD” indicates global mean and standard deviation. Note that each panel has a different range of contour values.

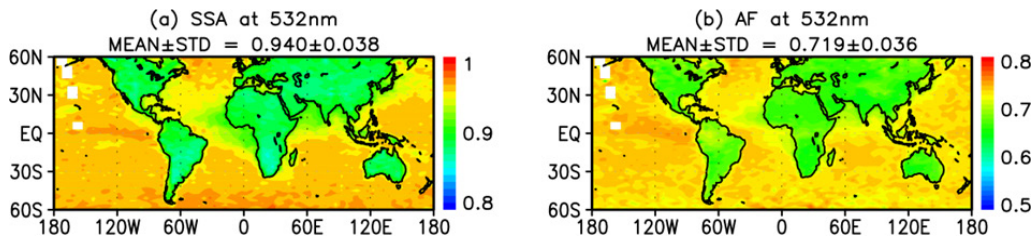


Fig. 2 Annual means of single-scattering albedo (SSA) at 532 nm (a), and asymmetry factor (AF) at 532 nm (b). “MEAN±STD” indicates global mean and standard deviation.

ンド2 (841–876 nm) の散乱輝度データを使用した。CALIOP の2波長の減衰付き後方散乱係数によって、微小粒子（水溶性・光吸収性粒子）と粗大粒子（ダスト・海塩粒子）の鉛直分布を区別して推定することができる。また、偏光解消度のデータによって、非球形粒子（ダスト粒子）と球形粒子（海塩粒子）を分別することができる。一方で、水溶性粒子と光吸収性粒子を分別する独立したライダーの観測データはない。このため、光吸収性粒子の光学的厚さは水溶性粒子よりも小さい、等の先見の知識を元にした拘束条件を設けることで、光吸収性粒子が取り得る範囲を制限した上で推定した。CALIOP と MODIS の4波長の波長依存性によって、微小粒子（水溶性・光吸収性）と粗大粒子（ダスト）の粒径を推定することができる¹³⁾。

Fig. 1 に、推定された各粒子の光学的厚さと消散係数の2010年の年平均値を示す。Fig. 1の等値線の色に対する値の範囲は、図によって異なるので注意してほしい。太陽を光源としたMODISの観測では、極夜のある極域付近での通年観測は望めない。このため、解析範囲を南緯60度から北緯60度に限定している。この領域内での全エアロゾルの光学的厚さの年平均値は0.155となり、その内、水溶性粒子が0.075で約半分を占めた。光吸収性、ダスト、海塩粒子は同程度で0.025から0.028となった。水溶性粒子の光学的厚さの水平分布は、アフリカ大陸から東アジアにかけて大きな値を持っていた。特に、南アジアと東アジアでは、0.5に上がった。光吸収性粒子は、アフリカの中南部、南アジア～東アジアで大きかった。これらの水溶性粒子と光吸収性粒子の分布は、人為起源エアロゾルの排出源や森林火災が頻発する地域と概ね一致する。ダスト粒子は、北アフリカ、西アジア、南アジア、東アジアの砂漠域を中心に広がっていた。海塩粒子は、海上全体に概ね一様に分布していた。消散係数の鉛直分布は、最大高度が約4kmで、高度1km以下の大気境界層内で大きな値を示していた。緯度毎に見ていくと、水溶性・光吸収性粒子は、全緯度帯に分布しているが、特に、赤道から北緯30度の緯度帯で大きかった。水溶性粒子は、南緯60度から40度の緯度帯でも比較的大きな値となった。これは海上の観測データからの推定値を主に反映しており、海洋由来の硫酸塩や有機物、小さい粒径の海塩を捉えたものと考えられる。ダスト粒子は、北緯10度から40度あたりに集中して分布していた。海塩粒子は、全ての緯度帯で高度1km以下に集中していた。

これらの各粒子の推定値を用いて、全エアロゾルの一次散乱アルベドと非対称因子を計算することができる (Fig. 2)。一次散乱アルベドは、全球平均で0.94であった。海上の一次散乱アルベドは、海塩粒子と水溶性粒子が多く存在するため、0.90～1.00となった。陸上では、光吸収性粒子とダストによって値が下がり、0.85～0.95となっていた。海上の非対称因子は、大きい粒径を持つ海塩粒子によって0.7を超える値を持っていた。一方、陸上では、微小粒子と粗大粒子の両方があるため、0.6から0.7の値を取っていた。

3. エアロゾル—放射相互作用による放射強制力

解析結果のエアロゾルの光学的厚さ、一次散乱アルベド、非対称因子（位相関数）を大気放射伝達モデルに入力することで、太陽波長帯における放射収支を計算することができる。エアロゾルの放射影響を評価する際には、放射強制力という物理量が用いられる。放射強制力とは、気候に影響を与える因子が存在する場合と存在しない場合の正味の放射フラックスの差で表される。ここでは、エアロゾルの各粒子が存在する場合と存在しない場合の放射計算を行い、その差によって直接効果による放射強制力を見積もった。なお、IPCC等で参照される放射強制力は現在気候と産業革命以前の状態の差から見積もった人為起源エアロゾルによる放射強制力であり、本稿の定義とは異なることに注意されたい。Fig. 3の左列は、大気上端での放射強制力を示しており、負の値はエアロゾルが気温を下げる影響を持つことを意味する。Fig. 3の等値線の色

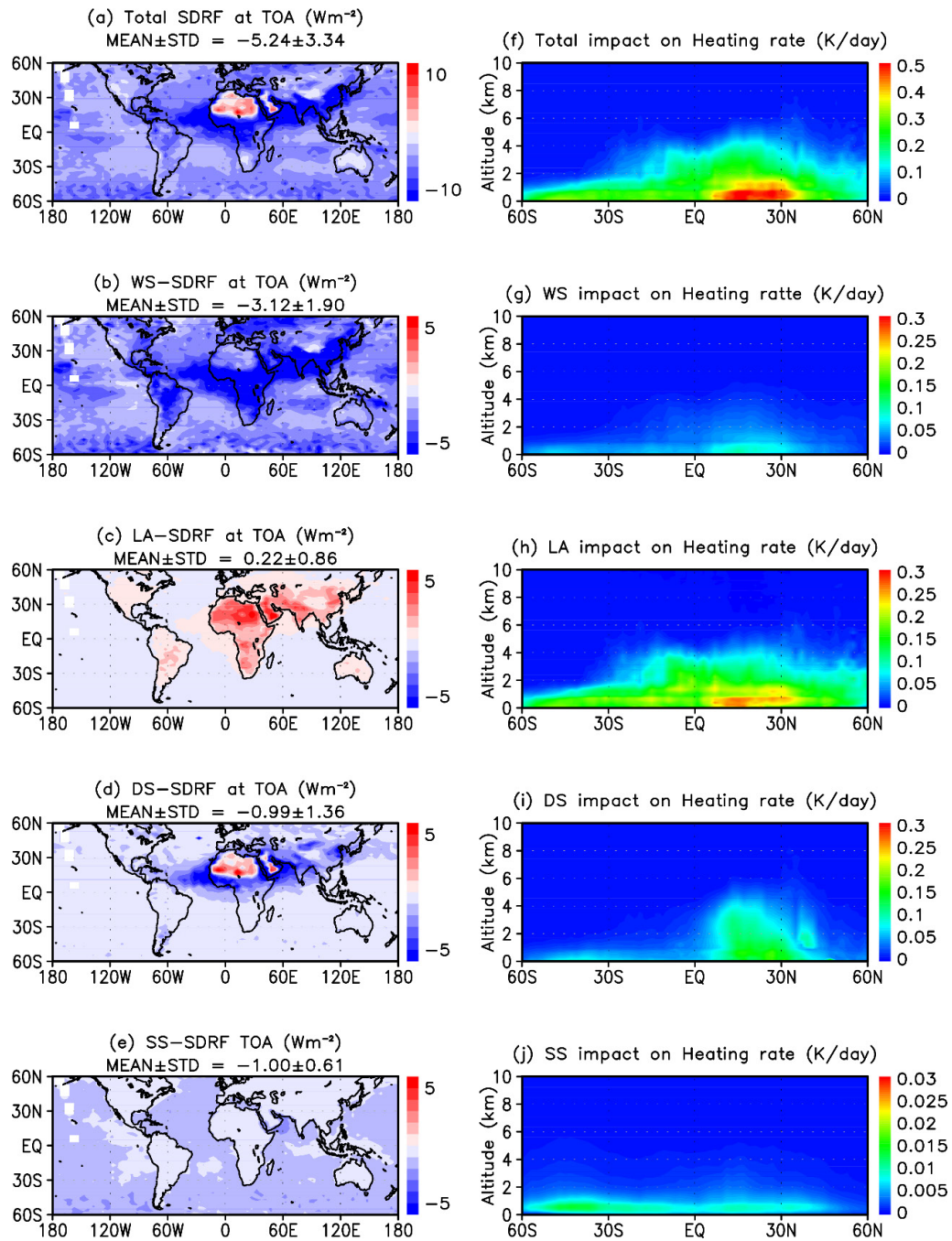


Fig. 3 Left panels are annual means of shortwave direct radiative forcing (SDRF) of total aerosols (a), water-soluble (WS) (b), light-absorbing (LA) (c), dust (DS) (d), and sea salt (SS) (e) particles for the net downward radiative flux density at the top of the atmosphere (TOA). Right panels are zonal means of impacts of total aerosols (f), WS (g), LA (h), DS (i), and SS (j) particles on the shortwave heating rate. "MEAN $\pm$ STD" indicates global mean and standard deviation. Note that each panel has a different range of contour values.

に対する値の範囲は、図によって異なるため注意してほしい。粒子ごとに見ていくと、水溶性粒子は、全域で負の放射強制力を持ち、全球平均値は -3.12 W/m^2 であった。海塩粒子も全海上で負の値を持ち、平均値は -1.00 W/m^2 であった。光吸収性粒子は、ほぼ全域で正の放射強制力を示し、平均で $+0.22 \text{ W/m}^2$ であった。ダスト粒子は、概ね負の放射強制力を持っており、平均値は -0.99 W/m^2 であった。しかし、北アフリカや西アジアの砂漠域では正の放射強制力を持っていた。これは、高い反射率を持つ砂漠域の上空にダスト

が滞留し、地表面からの反射光を吸収したためである。これらの結果、全エアロゾルの全球平均は -5.24 W/m^2 、ほぼ全域で負の値を持っていたが、北アフリカの砂漠域では光吸収性粒子とダスト粒子の影響により、正の値となっていた。Fig. 3の右列は、各粒子が散乱・吸収によって短波(300~3000 nm)放射の加熱率に与える影響を示している。エアロゾルが吸収する光のエネルギーはそのまま大気の加熱に使われる。このため、光吸収性粒子の消散係数は最も小さかったが(Fig. 1h)、加熱率への影響は最も大きく、 0.25 K/day に達していた。このように、光吸収性エアロゾルは、他の要素と比べて特異な影響を放射収支、そして、気象場へ与えるため、重要な研究対象となる。

4. 今後の衛星搭載ライダー計画

上述のような解析手法で数十年規模の長期データを解析することができれば、地球温暖化問題におけるエアロゾルの影響に関して理解を深めることが期待できる。CALIPSO衛星は、2006年に打ち上げられ、現在まで16年以上運用を続けられてきた。その後継として、2023年にEarthCARE衛星¹⁴⁾の打ち上げが予定されている。EarthCARE衛星には、高波長分解能ライダー(ATLID)、ミリ波ドップラーレーダー(CPR)、多波長イメージャ(MSI)、3方向広波長帯放射計(BBR)が搭載される。ATLIDは、355 nmの消散係数とライダー比を分離して測定することができるため、より正確にエアロゾルを定量化できると期待されている。EarthCARE衛星の後には、NASA主導のAOS(Atmospheric Observing System)ミッション¹⁵⁾による衛星群の計画が進められている。このミッションでは、エアロゾル、雲、対流、降水プロセスを解明することが目的とされ、エアロゾルと雲を観測するためのライダーが搭載される予定である。

引用文献

- 1) 岩坂泰信, “気象のABC: エアロゾル,” 日本気象学会機関誌天気, **59** (12), 29–32 (2012).
- 2) IPCC 6th Report. P. A. Arias, N. Bellouin, E. Coppola, R. G. Jones, G. Krinner, J. Marotzke, V. Naik, M. D. Palmer, G.-K. Plattner, J. Rogelj, et al., “Technical Summary. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,” V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. I., et al. (ed.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 33–144 (2021), doi:10.1017/9781009157896.002.
- 3) 気象庁, “エアロゾル: 大気混濁係数とエアロゾル光学的厚さの経年変化,” https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/aerosolhp/aerosol_shindan.html (Accessed 2022.10.11).
- 4) T. C. Bond and R. W. Bergstrom, “Light absorption by carbonaceous particles: an investigative review,” *Aerosol Science and Technology*, **40** (1), 27–67 (2006), <https://doi.org/10.1080/02786820500421521>.
- 5) R. Kudo, T. Aoyagi, and T. Nishizawa, “Characteristics of aerosol vertical profiles in Tsukuba, Japan, and their impacts on the evolution of the atmospheric boundary layer,” *Atmos. Meas. Tech.*, **11**, 3031–3046 (2018), <https://doi.org/10.5194/amt-11-3031-2018>.
- 6) A. Higurashi and T. Hakajima, “Development of a two-channel aerosol retrieval algorithm on a global scale using NOAA AVHRR,” *J. Atmos. Sci.*, **56**, 924–941 (1999).
- 7) A. H. Omar, D. M. Winker, C. Kittaka, M. A. Vaughan, Z. Liu, Y. Hu, C. R. Trepte, R. R. Rogers, R. A. Ferrare, K.-P. Lee, R. E. Kuehn, and C. A. Hostetler, “The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm,” *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **26**, 1994–2014 (2009), <https://doi.org/10.1175/2009JTECHA1231.1>.
- 8) R. Kudo, T. Nishizawa, A. Higurashi, and E. Oikawa, “Remote sensing of aerosols by synergy of CALIOP and MODIS,” *Proc. 28th International Laser Radar Conference*, **176**, 950–953 (2018), <https://doi.org/10.1051/epjconf/201817608012>.
- 9) M. Hess, P. Koepke, and I. Schult, “Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC,” *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **79**, 831–844 (1998).
- 10) M. Kahnert, T. Nousiainen, and H. Lindqvist, “Models for integrated and differential scattering optical properties of encapsulated light absorbing carbon aggregates,” *Opt. Express*, **21**, 7974–7933 (2013), <https://doi.org/10.1364/OE.21.007974>.
- 11) H. Ishimoto, Y. Zaizen, A. Uchiyama, K. Masuda, and Y. Mano, “Shape modeling of mineral dust particles for light-scattering calculations using the spatial Poisson-Voronoi tessellation,” *J. Quant. Spectroscop. Radiat. Transfer*, **111** (16), 2434–2443 (2010), <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2010.06.018>.
- 12) D. J. Erickson III and R. A. Duce, “On the global flux of atmosphere sea salt,” *J. Geophys. Res.*, **93**, 14079–14088 (1988), <https://doi.org/10.1029/JC093iC11p14079>.
- 13) Y. J. Kaufman, D. Tanré, J.-F. Léon, and J. Pelon, “Retrievals of profiles of fine and coarse aerosols using lidar and radiometric space measurements,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **41** (8), 1743–1754 (2003), doi:10.1109/

- TGRS.2003.814138.
- 14) A. J. Illingworth, H. W. Barker, A. Beljaars, M. Ceccaldi, H. Chepfer, N. Clerbaux, J. Cole, J. Delanoë, C. Domenech, D. P. Donovan, et al., "The EarthCARE satellite: The next step forward in global measurements of clouds, aerosols, precipitation, and radiation," *Bull. Am. Meteor. Soc.*, **96**, 1311–1332 (2015), <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00227.1>.
- 15) NASA, "Atmosphere Observing System," <https://aos.gsfc.nasa.gov/home.htm> (Accessed 2022.10.11)

工藤 玲

2001年3月北海道大学理学部地球物理学科卒業, 2003年3月同大学大学院地球環境科学研究所大気海洋圏環境科学専攻中退, 2011年3月同大学大学院地球環境科学院にて博士号(環境科学)取得. 2003年4月気象庁新潟地方気象台, 2005年4月同庁気象研究所, 現在に至る. 大気放射学を専門にし, エアロゾル・雲の地上・衛星リモートセンシング手法の開発と, 大気放射収支への影響に関する研究に従事する. 日本気象学会, 米国地球惑星科学連合に所属.

特集 ライダーデータ利用 I (エアロゾル・雲)

能動型センサを用いた
エアロゾル—雲相互作用研究の紹介

河本 和明

長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科
(〒852-8521 長崎市文教町 1-14 長崎大学環境科学部)

Introduction of the aerosol-cloud interaction studies using active sensors

Kazuaki Kawamoto

*Graduate school of Fisheries and Environmental Sciences, Nagasaki University,
1-14 Bunkyo-machi, Nagasaki, Nagasaki 852-8521*

(Received December 13, 2022; revised January 26, 2023; accepted January 30, 2023)

The aerosol-cloud interaction (hereafter ACI) has been recognized as one of the most uncertain processes in the current climate system. In this paper, several observational studies using active satellite sensors (CloudSat and CALIPSO) on ACI are introduced such as cloud behaviors, cloud classification, precipitation susceptibility, invigoration, buffer-system and cloud phase issues. Although the recent understanding on ACI is advancing, invigoration-related problems are particularly elusive. Synergetic efforts among observations, laboratory experiments and numerical modeling are strongly desired towards the deeper understanding on ACI, especially for mixed-phase and ice clouds whose ACI mechanisms are much more complicated than those of water clouds.

キーワード：エアロゾル—雲相互作用, 能動型センサ, CloudSat, CALIPSO

Key Words: Aerosol-cloud interaction, Active sensor, CloudSat, CALIPSO

1. はじめに

雲は地球表面の 60% 以上を覆い、地球のエネルギー収支や気候の維持・変動、また水循環に大きく影響することが知られている¹⁾。大気浮遊微粒子であるエアロゾルは、その一部が雲粒の種になることから、エアロゾルの量や性質が変われば、雲の性質を変えることにつながる。特にエアロゾルがもたらす雲や降水への影響は、気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) においても、気候への自然および人為影響を定量化する上で最も不確かな過程の一つとして認識されている¹⁾。

Twomey (1977)²⁾によると、エアロゾルが増加することで雲凝結核 (Cloud Condensation Nuclei, CCN) も増加し、雲粒数が増える。使用できる水蒸気量が一定であれば、雲粒数が増えると雲粒径が小さくなり、全雲粒の総断面積は増加するので雲の反射率は増える (光吸収性エアロゾルの場合は、逆に雲の反射率は下がる)。この効果はエアロゾルの第 1 種間接効果 (Twomey 効果) として知られてきた。最近では雲アルベド効果と呼ばれることも多い。また Albrecht (1989)³⁾はエアロゾルの増加に伴って雲粒径 (10 μm のオーダー) が小さくなり、降水粒子 (1 mm のオーダー) の大きさまで衝突併合過程を通して成長するまでに時間がかかるために降水効率が低下し、雲としての寿命が長くなるというアイデアを数値モデル計算によって示した。これはエアロゾルの第 2 種間接効果 (Albrecht 効果)、あるいは雲寿命効果と呼ばれている。これらエ

エアロゾルと雲が関係する振る舞いは雲-エアロゾル相互作用 (Aerosol-Cloud Interaction, 以後は ACI とする) と総称されている。

ACI に関する研究は多岐に亘るが、本稿では、CloudSat に搭載された 94 GHz 雲レーダ Cloud Profiling Radar (CPR, 以後 CloudSat レーダと呼ぶ)、Cloud- Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO) に搭載された 532 nm と 1064 nm の 2 波長ライダ Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization (CALIOP, 以後 CALIPSO ライダと呼ぶ) といった衛星搭載の能動型センサ、あるいは能動型センサと受動型センサの併用による ACI の研究事例の一部を紹介する。受動型センサとしては、可視域-赤外域の放射計 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) やマイクロ波放射計 Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS (AMSR-E) が使われている。

直接観測ではないリモートセンシングは、物理量の推定のためにアルゴリズムを通すためリトリバル誤差を含み、検出限界も存在する。また人工衛星は広域を対象に定常的・反復的に観測でき、全球規模観測が可能な唯一のプラットフォームである。2000 年代初頭より、主に受動型センサを用いて ACI を調べる研究が進展してきた (e.g., Nakajima et al. 2001⁴⁾, Bréon et al. 2002⁵⁾)。一般に太陽光等の自然起源の電磁波を利用する受動型センサは雲とエアロゾルの鉛直分布の特性を把握することが原理的に困難であるが、能動型センサの登場により、この問題を解決する端緒が開かれた。しかし能動型センサは雲やエアロゾルの鉛直方向の情報を観測できるが、シグナルの減衰やグラウンドクラッターの影響を受ける。また受動型センサと違って観測幅も狭い。CloudSat は比較的厚い雲層や多層雲を検出できるが、CALIOP は強い減衰のためにできない。逆に CloudSat は光学的に薄い雲は見落としがちであるが、CALIOP は上層の薄い巻雲を感知できる。2006 年に A-Train 衛星群を構成する CloudSat や CALIPSO が打ち上げられ、Aqua に搭載された MODIS データを併用したシナジー解析が広く行われてきた。以下では具体的な研究事例を報告する。

2. 能動型センサを使った ACI の研究事例

2.1 地域規模または全球規模での雲の振る舞い

Kubar et al. (2009)⁶⁾ は、CloudSat の打ち上げから程ない時期に CloudSat レーダのデータを用いて水雲の降水動態について報告した。熱帯と亜熱帯海上をいくつかの領域に分け、レーダ反射率の最大値を横軸に、雲物理量を縦軸にプロットしたところ、全ての領域でレーダ反射率の最大値が増えるとともに雲頂高度、雲粒径、雲水総量は増加し、雲粒数密度は減少していた (Fig. 1)。レーダ反射率が高くなるとともに一般に降水量は多くなるため、整合的な結果と言える。またメキシコ湾岸やアジア沿岸などエアロゾル量が多いと思われる領域では、他の清澄な領域よりも雲粒径は小さいが雲粒数密度が大きく、Twomey 効果を反映していた。また雲水総量は大きくなっており、Albrecht 効果を支持する結果となった。

Nakajima et al. (2010)⁷⁾ や Suzuki et al. (2010)⁸⁾ は、CloudSat レーダと MODIS から推定された雲の光学的厚さと雲粒径を用いて、Contoured Frequency by Optical Depth Diagram (CFODD) と呼ばれるダイアグラムを提案した。CFODD では、横軸にレーダ反射率、縦軸に雲底から測った光学的厚さを取り、観測値の頻度をプロットする。雲底からの光学的厚さの見積もりには、MODIS からの全層の光学的厚さと雲の断熱凝結成長モデルを用いる。このダイアグラムを、雲粒径の大きさごとに分類したものが Fig. 2 である (各パネル上部の R21 は、MODIS の 2.1 μm チャンネルのデータから推定された雲粒径であることを意味する)。この図から、粒径が小さい場合の非降水雲のレジームから、粒径が大きい場合の降水雲のレジームへ、滑らかに遷移していることがわかる。つまり高頻度の領域が光学的厚さとレーダ反射率の小さい領域から、光学的厚さとレーダ反射率の大きい領域に移る雲の成長段階を抽出していることがわかる。またこの CFODD の頻度の傾きは降水粒子の捕捉効率に関する情報を含んでおり⁸⁾、降水形成過程への定量的洞察を得ることができる。加えて Takahashi et al. (2017)⁹⁾ は、海上雲の方が陸上雲よりもドリズル (100 μm のオーダーの霧粒) の頻度が高いことを CFODD によって図示した。その理由は上昇気流の強さの違いに伴う雲粒子成長過程への影響のためであると明らかにすることで、降水過程の海陸差へのより深い理解に貢献している。

Pan et al. (2018)¹⁰⁾ は、インドを中心とする南アジアを対象に CloudSat データから雲頂高度や雲底高度、雲水量や雲粒数密度、雲粒径、CALIPSO データから煙やダストといったエアロゾルの種別割合を求め、水雲の雲水総量、雲粒数密度、雲の反射率の変化をエアロゾル濃度の関数として評価した。その結果、エアロゾル濃度に対する各物理量の変化率は雲底が高くなるほど概して小さくなること、またこれはエアロゾルの

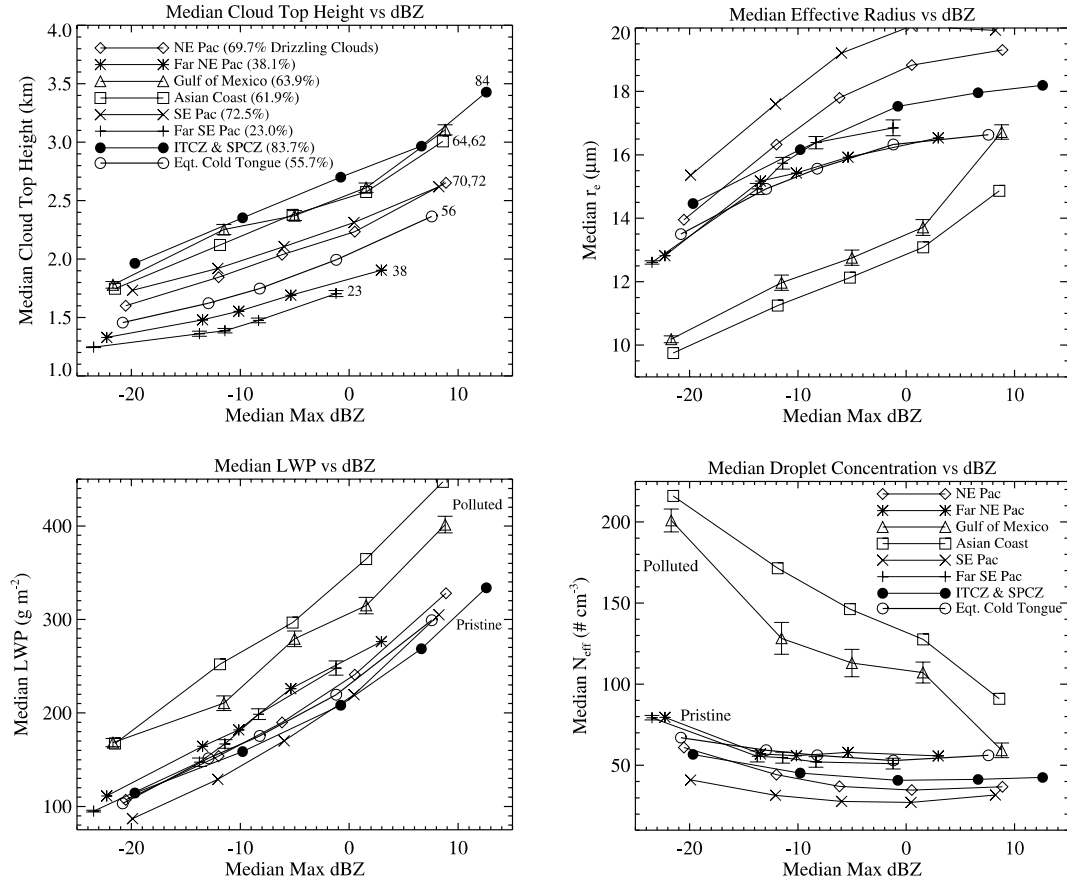


Fig. 1 (Upper-left) Median cloud-top height, (upper-right) median effective particle radius, (lower-left) median liquid water path and (lower-right) median droplet number concentration vs median maximum dBZ for each of the eight regions⁶⁾.

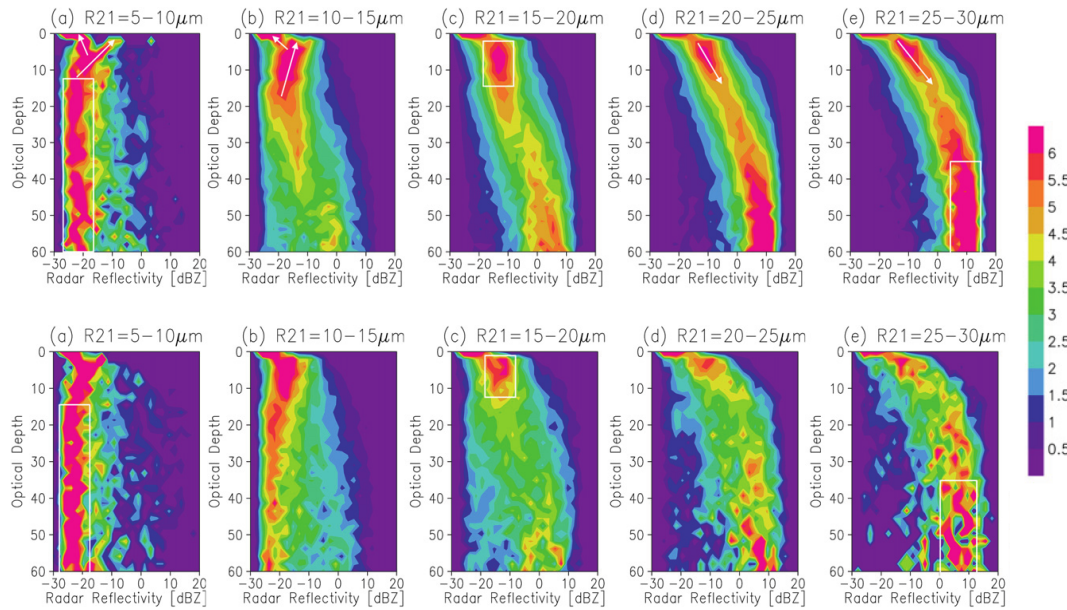


Fig. 2 CFODD over the global (upper panels) ocean and (lower panels) continent for the 2007 JJA season grouped according to the effective particle radius into (a) 5–10, (b) 10–15, (c) 15–20, (d) 20–25, and (e) 25–30 μm ⁸⁾. The unit of color shading is $\% \text{ dBZ}^{-1}$.

鉛直構造と鉛直風に関係していることを示した。さらにこれらの ACI は地域的・季節的に明確に変動しており、その原因を水蒸気量と吸収性エアロゾルの変動のためと結論づけている。

ACI 研究において、CCN 量の代替として（鉛直積算量である）エアロゾルの光学的厚さを使うことが広く行われている。しかし大気全層のエアロゾルの光学的厚さと CCN 量は、エアロゾルが多いところでは一般に正の相関を示す¹¹⁾が、海上のように清澄な環境では相関は弱い¹²⁾。そのため海上での ACI の動態を見積もる場合、エアロゾルの光学的厚さと雲特性を比較すると不確実性が生じる可能性がある。そこで Paine-mal et al. (2020)¹³⁾は MODIS から雲頂高度を決定し、その雲頂高度以下の高さでのエアロゾル消散係数の鉛直分布（CALIPSO から推定）を、MODIS から推定された雲粒数密度と比較した。その結果、エアロゾルの光学的厚さと比較した場合に比べて相関がより強くなったことを確認している。

2.2 雲タイプの分類

能動型センサからのシグナルを用いた雲タイプの新しい分類法も提案されている。Yuter and Houze (1995)¹⁴⁾は、横軸にレーダ反射率、縦軸に高度を取り、高度ごとのレーダ反射率の頻度を表現する Contoured Frequency by Altitude Diagram (CFAD) を提案し、広く使われてきた。Chen et al. (2016)¹⁵⁾は、人為的な大気汚染が顕著な中国東部を対象に、CloudSat のレーダ反射率を用いて CFAD を作成した。エアロゾルで汚染された状況でのレーダ反射率は、背の低い積雲では低くなっているが、背の高い積雲や乱層雲、深い対流雲では高くなっていることがわかり、後述する雲の活性化 (invigoration) との関連が示唆された。

他方、Unglaub et al. (2020)¹⁶⁾は CALIPSO, CloudSat, MODIS 等のデータを用いて、水雲を雲頂高度の不均質性から積雲状と層雲状の2つに分け、また3つの雲底高度を導入して計6つのタイプに区分した。この方法で得られた解析結果は、積雲状と層雲状の雲について、海上と陸上の間、異なる緯度の間の変化を滑らかに描き出している。

このように、受動型センサからは得られない雲内の鉛直方向の情報によって雲タイプの新しい分類や特性抽出が可能になっている。

2.3 Susceptibility

ACI を調べる過程で、「変わりやすさ、敏感さ」を表現する susceptibility という指標がしばしば導入されている。Twomey (1991)¹⁷⁾は、雲粒が1個増えた場合に雲のアルベドがどれほど変化するかを定量化する cloud susceptibility を提起した。この考えを基に、雲粒が1個増えた場合に降水量がどれほど変化するかを定義する Precipitation susceptibility が計算された¹⁸⁾。その結果、エアロゾルの変化に対して (1) 雲水総量が少ない雲は最も敏感でなく、一般に降水はあまり起こらない。(2) 雲水総量が中程度の雲はもっとも効果的に降水に影響する。(3) 雲水総量が多い雲は敏感さが下がり、豊富な雲水のため効率的に降水が発生する等が明らかになっている。しかし Precipitation Susceptibility の値は、計算時に使うデータセットによって不確実性があることが知られている。その定量化のために Bai et al. (2018)¹⁹⁾は CALIPSO や CloudSat, MODIS, AMSR-E などの複数の衛星センサのプロダクトを用いて、海洋性の水雲の Precipitation Susceptibility の差異に関して、雲水総量や大気安定度の度合い、ドリズル形成の観点などから詳細に議論している。

2.4 Invigoration と Buffered-system

Koren et al. (2005)²⁰⁾は、北部大西洋域の MODIS データを解析してエアロゾルの光学的厚さと対流雲の特性の相関を取り、エアロゾルが光学的に厚くなるに連れて雲頂気圧が低く（雲頂高度が高く）なることを見いだした。このメカニズムとして以下を述べている。エアロゾル量が多いために雲粒径が小さくなり、衝突併合が有効に作用しにくくなることで、大粒子の形成が遅くなる。そのため下降気流や暖かい雨の形成の遅れや抑制につながる。その結果、凝結の潜熱の解放もあって上昇気流が強くなり、その上昇気流によって雲頂高度は高くなる (invigoration)。強い上昇気流によってさらに持ち上げられた小さな粒子はより高い高度で凍り、その高度で発された潜熱により対流がより強められる。

その後 Rosenfeld et al. (2008)²¹⁾は、雲の寿命が長くなることで、対流性の雲では上層への水分の輸送が増加し、凍結に伴う潜熱の放出や上昇流が強まることで降水量が増えると提案した（熱力学的活性化）。しかし Fan et al. (2013)²²⁾は、熱力学的活性化のメカニズムは雲の生成段階では機能するかもしれないが、雲

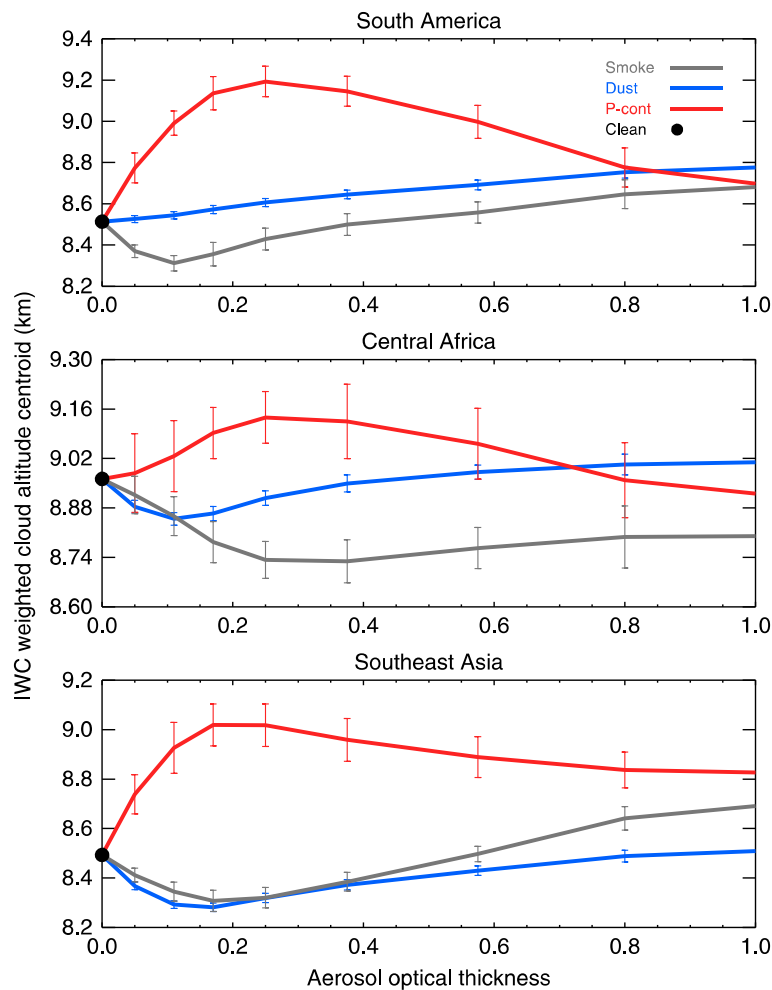


Fig. 3 Ice water content weighted altitude centroid of convective clouds for smoke aerosol (gray line), dust aerosol (blue line) and polluted continental aerosol (red line) as a function of aerosol optical thickness for South America (top panel), Central Africa (middle panel) and Southeast Asia (lower panel)²³⁾.

の成熟段階や消滅段階にて雲量や雲頂高度、雲の厚さを増やすのは微物理的活性化（より多くのより小さい雲粒の発生による）であると主張した。

さらに Jiang et al. (2018)²³⁾ は南アメリカ、中央アフリカ、東南アジアの背の高い対流雲を対象に CloudSat レーダと CALIPSO ライダデータを用いて、エアロゾル種別の光学的厚さの関数として、雲氷の質量の重みをつけた雲の高さを比較した。その結果、平均的には対流はスモークでは抑制され、汚染された大陸性エアロゾルでは活性化されること、ダストはどちらにはたらくかは場所に依存しており、エアロゾルの種類や量によって対流の抑制化か活性化が決まることがわかった (Fig. 3)。

Invigoration の過程としてこれまでに多くのプロセスが考えられているが、最近の進展としては、Douglas and L'Ecuyer (2021)²⁴⁾ が全球海洋上の積雲（雲水総量は 150 から 200 g/m² に限定）を対象に CloudSat レーダから得られた潜熱プロファイルの情報などを用いて、不安定な汚染された環境では降水性の積雲は降水形成や雲頂でのエントレインメント（周囲の空気を取り込み）の割合が著しく高くなることを示している。Invigoration については、若干古いのが Altaratz et al. (2014)²⁵⁾ が包括的なレビュー論文となっており、興味のある読者は参照されたい。

また Stevens and Feingold (2009)²⁶⁾ は buffered-system という概念を提唱した。ACI の諸過程は線形のような単調な変化を示さず、系を安定させる負のフィードバックをもたらす。そのため系全体の変化としては緩

衝されて小さくなるので、評価するのが非常に難しい。Invigoration も buffered-system において生じており、この buffered-system という考え方は、提唱されてからこの 10 数年ほど、雲のフィードバックを検討する際の重要なコンセプトになっている。

2.5 エアロゾル量と雲相の関係

エアロゾルは、その化学成分などによって雲粒の核になる能力が異なっている。例えば硫酸塩や硝酸塩などは CCN となって雲粒（液体）を生成するが、ダストやバイオエアロゾルなどは氷晶核（Ice Nuclei; IN）となって氷晶（固体）を形成する。これまで CCN については詳しく調べられてきたが、IN に関しては未知の部分が多い²⁷⁾。一方、雲相（水滴か氷晶か）は雲の放射特性に大きく影響し²⁸⁾、降水過程にとっても貴重な情報のため、雲相の正確な把握は地球の放射収支を詳しく調べるために不可欠である。

ダストは以前から有効な氷晶核として知られており²⁹⁾、ダストの量と氷雲の割合についてこの 10 年ほど衛星データを用いて調べられている。Choi et al. (2010)³⁰⁾は、アジア、南米、北米、ヨーロッパ、アフリカ、南極域ごとに CALIOP データから推定された過冷却雲の割合を温度に対してプロットした (Fig. 4)。その結果、同じ温度であっても、過冷却雲の割合はアジアや南アメリカでは低く、南極域では高かった。例えば -25°C ではアジアでは 20% ほどであるが、南極域では約 50% もあった。このことはダストなどエアロゾルが多い領域では氷晶が形成される可能性が高いことを示唆している。

Tan et al. (2014)³¹⁾は relative aerosol frequency という指標を用いて Choi et al. (2010)³⁰⁾と同様な解析を行い、エアロゾルの発生頻度が高い場合は氷雲の割合が高いことを示した。その後 Kawamoto et al. (2020)³²⁾は、relative aerosol frequency のような相対的指標ではなく、ダストの消散係数という物理量を用いて気温ご

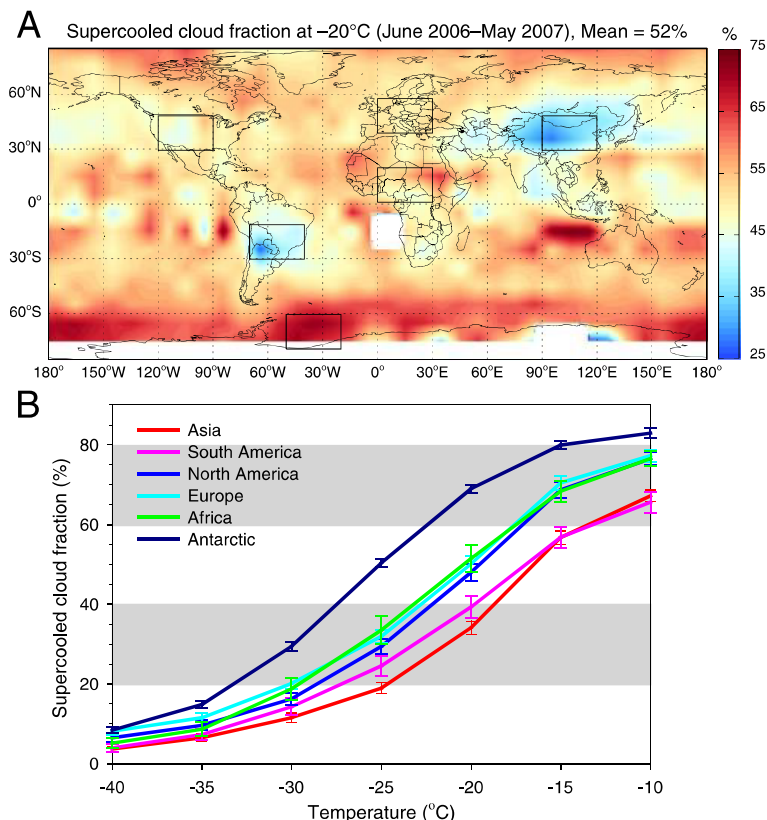


Fig. 4 (A) Annual mean (June 2006–May 2007) supercooled cloud fraction at -20°C isotherm³⁰⁾. (B) Annual mean supercooled cloud fraction with respect to temperature over the selected regions in (A): Asia, South America, North America, Europe, Africa, and the Antarctic³⁰⁾. The error bar corresponds to a standard error of 3.

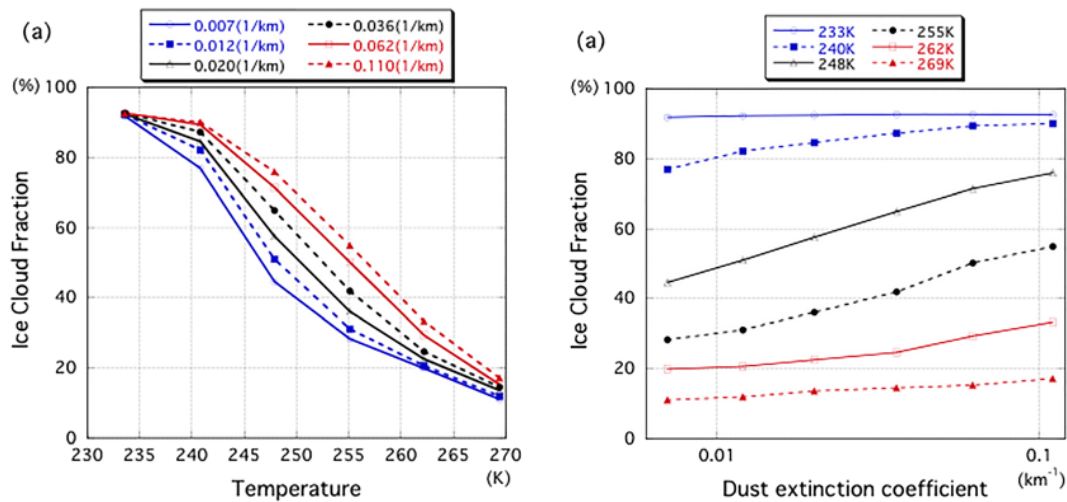


Fig. 5 Relationships between (left) ice cloud fraction and temperature with six dust extinction coefficient bins, and between (right) ice cloud fraction and dust extinction coefficient with six temperature bins³²⁾.

とに氷晶割合を示した。その結果、同じ温度帯でもダストの消散係数が高い方が氷晶割合が高いこと、この傾向は均一核形成をもたらす 235 K 付近と氷の融点である 273 K の中間くらいの 250 K 程度で最も顕著であることがわかった (Fig. 5)。これらの雲相研究では、CALIPSO ライダのデータが不可欠となっている。

3. おわりに

本稿ではこれまで CloudSat レーダ、CALIPSO ライダを中心とした衛星搭載能動型センサによる ACI 研究の事例について紹介してきた。この 10 数年は、衛星データプロダクトの整備も進んでおり、例えば CloudSat データプロダクトは、ホームページに多くの物理量がダウンロードしやすい形式にまとめられている。このことで解析を進める際の利便性が高まり、衛星データを使ったことがなかった研究者や学生も使い始め、ユーザの裾野が広がっている。

また今後の The Earth, Clouds, Aerosols and Radiation Explore (EarthCARE)³³⁾ 搭載センサを使った解析のために、JAXA によって A-Train のセンサを使ったプロダクトが「EarthCARE 研究 A-Train プロダクトモニタ」(https://www.eorc.jaxa.jp/EARTHCARE/research_product/ecare_monitor.html) として公開されている。各種の雲・エアロゾルプロダクトが使いやすい形で集約されており、ユーザにとって利点大きい。Kawamoto et al. (2020)³²⁾ はこのプロダクトモニタからデータを収集した。

一方、ACI は関連するプロセスが非常に多く、雲とエアロゾルの微物理特性のみでなく、力学・熱力学また雲の組織化にも関係する極めて複雑な系である。そのため、観測のみから ACI を解明することは不可能であり、実験や数値モデルを使ったアプローチを併用することも強く求められる。

また 2023 年度に打ち上げ予定の EarthCARE³³⁾ には、95 GHz の雲レーダ、高スペクトル分解ライダ、可視～赤外域での多波長イメージャ、広域放射計が搭載されており、特に雲レーダはドップラー速度を計測できるため、雲層内の鉛直速度を得るという大きな利点を持っている。このような機能とともに水雲よりも諸過程が複雑である混合相雲や氷雲³⁴⁾ を含めて、ACI の理解をさらに深化させていく必要がある。さらに 2018 年の全米科学アカデミーによる地球観測に関する Decadal Survey の提言を受け、エアロゾルに関する諸過程や直接・間接効果、雲のフィードバックや対流雲、降水過程の重要性を認識し、NASA は衛星観測ミッション ACCP (Aerosol and Cloud, Convection and Precipitation)³⁵⁾ を開始した。搭載測器として、能動型センサに加えて放射計や分光計などの測器の組み合わせが検討されている。これまでの衛星観測の成果を引き継ぎ形で 2020 年代末の打ち上げが予定されており、2030 年代のエアロゾル・雲・降水研究をリードする衛星ミッションの 1 つとなるであろう。

引用文献

- 1) IPCC, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 (2021).
- 2) S. Twomey, "Influence of pollution on shortwave albedo of clouds", *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1149–1152 (1977).
- 3) B. A. Albrecht, "Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness", *Science*, **245**, 1227–1230 (1989).
- 4) T. Nakajima, A. Higurashi, K. Kawamoto, and J. E. Penner, "A possible correlation between satellite-derived cloud and aerosol microphysical parameters", *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 1171–1174 (2001).
- 5) F.-M. Bréon, D. Tanré, and S. Generoso, "Aerosol effect on cloud droplet size monitored from satellite", *Science*, **295**, 834–838 (2002).
- 6) T. L. Kubar, D. L. Hartmann, and R. Wood, "Understanding the importance of microphysics and macrophysics for warm rain in marine low clouds. Part I: Satellite observations", *J. Atmos. Sci.*, **66**, 2953–2972 (2009).
- 7) T. Y. Nakajima, K. Suzuki, and G. L. Stephens, "Droplet growth in warm water clouds observed by the A-Train. Part II: A multi-sensor view", *J. Atmos. Sci.*, **67**, 1897–1907 (2010).
- 8) K. Suzuki, T. Y. Nakajima, and G. L. Stephens, "Particle growth and drop collection efficiency of warm clouds as inferred from joint CloudSat and MODIS observations", *J. Atmos. Sci.*, **67**, 3019–3032 (2010).
- 9) H. Takahashi, K. Suzuki, and G. Stephens, "Land-ocean differences in the warm-rain formation process in satellite and ground-based observations and model simulations", *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **143**, 1804–1815 (2017).
- 10) Z. Pan, F. Mao, W. Wang, T. Logan, and J. Hong, "Examining intrinsic aerosol-cloud interactions in South Asia through multiple satellite observations", *J. Geophys. Res.*, **123** (11), 210–11, 224 (2018).
- 11) M. O. Andreae, "Correlation between cloud condensation nuclei concentration and aerosol optical thickness in remote and polluted regions", *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 543–556 (2009).
- 12) P. Stier, "Limitations of passive remote sensing to constrain global cloud condensation nuclei", *Atmos. Chem. Phys.*, **16**, 6595–6607 (2016).
- 13) D. Painemal, F.-L. Chang, R. Ferrare, S. Burton, Z. Li, W. L. Smith Jr., P. Minnis, Y. Feng, and M. Clayton, "Reducing uncertainties in satellite estimates of aerosol-cloud interactions over the subtropical ocean by integrating vertically resolved aerosol observations", *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 7167–7177 (2020).
- 14) S. E. Yuter and R. A. Houze Jr., "Three-dimensional kinematic and microphysical evolution of Florida cumulonimbus. Part II: Frequency distributions of vertical velocity, reflectivity, and differential reflectivity", *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 1941–1963 (1995).
- 15) T. Chen, J. Guo, Z. Li, C. Zhao, H. Liu, M. Cribb, F. Wang, and J. He, "A CloudSat perspective on the cloud climatology and its association with aerosol perturbation in the vertical over East China", *J. Atmos. Sci.*, **73**, 3599–3616 (2016).
- 16) C. Unglaub, K. Block, J. Mülmenstädt, O. Sourdeval, and J. Quaas, "A new classification of satellite-derived liquid water cloud regimes at cloud scale", *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 2407–2418 (2020).
- 17) S. Twomey, "Aerosols, clouds and radiation", *Atmos. Environ., Part A*, **25**, 2435–2442 (1991).
- 18) A. Sorooshian, G. Feingold, M. D. Lebsock, H. Jiang, and G. L. Stephens, "On the precipitation susceptibility of clouds to aerosol perturbations", *Geophys. Res. Lett.*, **36** (13), L13803 (2009).
- 19) H. Bai, C. Gong, M. Wang, Z. Zhang, and T. L'Ecuyer, "Estimating precipitation susceptibility in warm marine clouds using multi-sensor aerosol and cloud products from A-Train satellites", *Atmos. Chem. Phys.*, **18**, 1763–1783 (2018).
- 20) I. Koren, Y. J. Kaufman, D. Rosenfeld, L. A. Remer, and Y. Rudich, "Aerosol invigoration and restructuring of Atlantic convective clouds", *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L14828 (2005).
- 21) D. Rosenfeld, U. Lohmann, G. B. Raga, C. D. O'Dowd, M. Kulmala, S. Fuzzi, A. Reissell, and M. O. Andreae, "Flood or drought: How do aerosols affect precipitation?", *Science*, **321**, 1309–1313 (2008).
- 22) J. Fan, L. R. Leung, D. Rosenfeld, Q. Chen, Z. Li, J. Zhang, and H. Yan, "Microphysical effects determine macrophysical response for aerosol impacts on deep convective clouds", *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **110**, E4581–E4590 (2013).
- 23) J. H. Jiang, H. Su, L. Huang, Y. Wang, S. Massie, B. Zhao, A. Omar, and Z. Wang, "Contrasting effects on deep convective clouds by different types of aerosols", *Nat. Commun.*, **9**, 3874 (2018).
- 24) A. Douglas and T. L'Ecuyer, "Global evidence of aerosol-induced invigoration in marine cumulus clouds", *Atmos. Chem. Phys.*, **21**, 15103–15114 (2021).
- 25) O. Altaratz, I. Koren, L. Remer, and E. Hirsch, "Cloud invigoration by aerosols – Coupling between microphysics and dynamics", *Atmos. Res.*, **140**, 38–60 (2014).
- 26) B. Stevens and G. Feingold, "Untangling aerosol effects on clouds and precipitation in a buffered system", *Nature*, **461**, 607–613 (2009).

- 27) Z. A. Kanji, L. A. Ladino, H. Wex, Y. Boose, M. Burkert-Kohn, D. J. Cziczo, and M. Krämer, "Overview of Ice Nucleating Particles," *Meteor. Monogr.*, **58**, pp. 33, (2017).
- 28) Q. Fu and K. N. Liou, "Parameterization of the radiative properties of cirrus clouds," *J. Atmos. Sci.*, **50**, 2008–2025 (1993).
- 29) K. Isono, M. Komabayashi, and A. Ono, "The nature and the origin of ice nuclei in the atmosphere," *J. Meteor. Soc. Japan*, **37** (6), 211–233 (1959).
- 30) Y.-S. Choi, R. S. Lindzen, C.-H. Ho, and J. Kim, "Space observations of cold-cloud phase change," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **107** (25), 11211–11216 (2010).
- 31) I. Tan, I. T. Storelvmo, and Y.-S. Choi, "Spaceborne lidar observations of the ice-nucleating potential of dust, polluted dust, and smoke aerosols in mixed-phase clouds," *J. Geophys. Res.*, **119**, 6653–6665 (2014).
- 32) K. Kawamoto, A. Yamauchi, K. Suzuki, H. Okamoto, and J. Li, "Effect of dust load on the cloud top ice-water partitioning over northern middle to high latitudes with CALIPSO products," *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL088030 (2020).
- 33) A. J. Illingworth, H. W. Barker, A. Beljaars, M. Ceccaldi, H. Chepfer, N. Clerbaux, J. Cole, J. Delanoe, C. Domenech, D. P. Donovan, et al., "The EarthCARE Satellite: The Next Step Forward in Global Measurements of Clouds, Aerosols, Precipitation, and Radiation," *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **96**, 1311–1332 (2015).
- 34) U. Lohmann, "Anthropogenic aerosol influences on mixed-phase clouds," *Curr Clim Chang Rep.*, **3**, 32–44 (2017).
- 35) NASA, "Aerosol and Cloud, Convection and Precipitation (ACCP)," (Accessed 2023.1.25)

河本和明

1993 年立教大学理学部卒, 1999 年東京大学大学院理学系研究科より博士(理学)取得。バージニア工科大学リサーチサイエンティスト(NASA ラングレー研究センター博士研究員), 総合地球環境学研究所助手, 長崎大学准教授を経て 2013 年より長崎大学教授。専門は衛星データを用いた雲特性の推定, エアロゾル-雲相互作用の解析的研究。

特集 ライダーデータ利用 I (エアロゾル・雲)

衛星搭載ライダーエアロゾル観測のデータ同化

関山 剛^{*1}

¹ 気象庁気象研究所 (〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1)

Data assimilation of satellite-borne lidar aerosol observations

Tsuyoshi Thomas Sekiyama^{*1}

¹ *Meteorological Research Institute,
1-1 Nagamine Tsukuba, Ibaraki 305-0052*

(Received December 1, 2022; revised January 15, 2023; accepted February 08, 2023)

Data assimilation is a mathematical method based on Bayesian statistics for estimating the state of complex systems such as the atmosphere and oceans using observational data and numerical models. While the accuracy of numerical models has been recently improved, the model state can be very different from the real Earth after a few days or weeks of integration. Data assimilation can correct it. Satellite-borne lidars can provide a huge amount of observational data for atmospheric aerosol data assimilation, although the observations are only vertical with a 0-degree view angle. Lidar vertical observations can be extended to horizontally distributed information by data assimilation, in which aerosol concentrations and emissions are optimally estimated. Therefore, the combination of satellite-borne lidar observations and data assimilation is ideal for atmospheric aerosol research. We hope that the atmospheric aerosol products estimated by the combination will be used for global environment monitoring and climate change prediction.

キーワード：データ同化, エアロゾル, ライダー, 衛星観測

Key Words: Data Assimilation, Aerosol, Lidar, Satellite Observations

1. はじめに

1.1 データ同化とは

データ同化とは複雑な系の状態を観測データと数値モデルを使って推定する数理的手法である。その数理はベイズ統計学に基づく。「同化」という用語は様々な学術分野で使われており、例えば生物学においては光合成のことを炭酸同化作用と呼ぶ。体内に取り入れた炭酸(=二酸化炭素)を原料にして有機物を合成し、その有機物を自らの体の一部に組み込むことから「同化」という言葉が使われる。データ同化は観測データと数値モデルのそれぞれの情報を統合し、現実とよく一致する大気や海洋の状態を計算機で再現する。なお、データ同化と同じ数理的手法は地球科学以外の分野でも使われている。例えば航空機表面やパイプライン内の流体の推定、あるいは人工衛星や自動車(カーナビゲーション)など移動物体の位置推定である。これらはすべて共通して「誤差を含む限られた量の観測データを元にして、系の真の状態を推定すること」を目的としている。

計算機性能の向上に伴い、気象予報モデルや大気化学モデルなど数値モデルの精度は改善が続いている。数値モデルは地球上の任意の場所や時間における様々な物理量を計算することが可能であり、大変便利である。しかし計算機の中の世界では、数日あるいは数週間も積分を続けると現実の地球とは大きく異なる状態

になってしまう。なぜなら数値モデル自体に物理現象のパラメータ近似や離散化（格子化）にともなう誤差や数値解法誤差があり、さらに大気を持つ決定論的カオス性が原因で初期値誤差は指数関数的に増大するからである（ただしそれは瞬間値を再現する場合であり、気候値の再現性は除く）。一方で観測は現実の地球を知る手段であり、誤差の範囲内で世界の真の状態を我々に教えてくれる。しかし任意の場所や時間におけるあらゆる物理量を観測することは不可能である。現実には地球の巨大さに比べて人間が観測できる範囲はあまりに小さい。これら数値モデルと観測データという相補的な二種類の情報を統合できるのがデータ同化の利点である。

もともと歴史的にデータ同化は天気予報の数値シミュレーションにおいて予測初期値を手に入れるための手段として技術開発が進められた^{1,2)}。時々刻々推定される大気の状態、すなわち格子点上の気温・気圧・風向風速・密度・水蒸気量などは客観解析値と呼ばれ、数値予報の初期値として使われる。昨今の天気予報の精度を左右するのは数値モデルの性能だけでなくデータ同化の優劣と言っても過言ではない。一方で客観解析値は気象学の基礎研究において大気全体の状態を広範囲かつ正確に（観測の存在しない物理量も含めて）把握する貴重なデータセットである。エアロゾルのような大気微量成分においてもこのような客観解析値が手に入れば大変便利である。そこで2000年代後半頃から急速に、気象予報技術を活用することで、大気化学分野においてもデータ同化が広く使われるようになってきた^{3,4,5)}。

大気化学分野においては、大気中のエアロゾル濃度を知りたいだけでなく、その地表面放出量や沈着量といった側面境界情報（＝放出・沈着の位置や強度）も重要である。便利なことにデータ同化ではそのような数値モデルの側面境界情報を統計数理的に推定することも可能である。エアロゾルのような大気汚染物質の放出量推定は社会的ニーズが高く、重要な研究分野となっている。しかし大気汚染物質の放出量を広い範囲で直接測定することは不可能であり、その大気中濃度を広範囲に測定することですら困難を伴う。しかしデータ同化を使えば、ライダー観測や衛星イメージャー観測のようなりモートセンシングによる濃度値以外の物理量観測データを使ってエアロゾル放出量の広範囲推定が可能になる。これはいわゆる「逆推計」の一種である。また、データ同化によって得られた大気エアロゾルの情報を気象予報モデルや気候予測モデルにインプットすることで予報・予測計算の精度を向上させることも可能である。エアロゾルのデータ同化は様々な分野への貢献が期待できる重要な技術と言える。

1.2 ライダー観測とデータ同化

雲、エアロゾル及び大気成分を人工衛星によって観測する場合を考える。分光計・サウンダー・イメージャーを使って吸収・放射スペクトル線を水平方向に広く走査しながら測定するか、ライダー・レーダーを使って奥行きを含めて一点方向に測定するか、大きく二つの方法があるだろう（ただしここでは掩蔽観測を除く）。分光計などを使った方法は鉛直分解能が極めて粗い（あるいは全く鉛直分離できない）が、装置の構造上水平走査がしやすいので地球の広い範囲を観測可能である。その視野幅は数百 km あるいは数千 km に及び、得られる画像はいわば風景写真のような体裁となる。一方、ライダーなどは極めて細かな鉛直分解能を誇るが、装置の構造上水平走査が難しく、衛星に搭載する装置では一方向しか観測できないことが普通である。すなわち視野角は0度であり、鉛直方向の1次元情報を時間方向に連続して繋げて描画するため得られる画像は2次元の平面となり、屏風あるいは切断面のような体裁となる。

通常、3次元以上のデータを人の手で解析することは容易ではない。そのため時間平均や鉛直積算、あるいは気象学では東西平均（同じ緯度の気象条件は類似することが多いため）によってデータの次元を2次元以下に減らすことによりデータを取り扱いやすくする。その点で鉛直積算量が得られるイメージャー観測は有利であり、切断面しか得られないライダー観測は不利である。イメージャー観測は観測の時点ですでに次元の圧縮が行われ（鉛直積算量や特定の高度情報のみを取り出し）、理解しやすい図を我々に提供している。一方でライダー観測はそのような次元圧縮をしないし、水平方向の情報も直接的には我々に与えてくれない。しかし得られる情報量の総和で考えると、膨大な鉛直分布情報を含むライダー観測はイメージャー観測に劣るものではない。

大気の流れには上流（風上）と下流（風下）があり、その大気の流れを何らかの方法で知っていれば（例えば数値モデルで推定）、ある一瞬の大気の断面図しか手に入らなかったとしても、原理的には過去（上流）や未来（下流）の姿を再現することができる。データ同化による地球大気の状態推定はまさにそのような作

業と等価である。イメージャー観測のように観測の時点で次元圧縮が行われ、エアロゾル濃度が鉛直積算されてしまった場合は、鉛直分布情報に関してはほとんど何も観測から得ることができない。一方、ライダー観測の鉛直分布情報はデータ同化によって水平方向の分布情報に容易に広げることができる。情報の圧縮が観測の際に行われていない分、むしろライダー観測の方が好ましいとも言える。データ同化によって衛星軌道の左右に広がるエアロゾルプルームを再現できるのであれば、ライダー観測の方がイメージャー観測よりも有用である可能性もある。ライダー観測とデータ同化は大気エアロゾル研究において理想的な組み合わせと言える。

2. データ同化の実際

2.1 データ同化手法

データ同化の数学的操作を極めて簡単に述べるなら、重み付き平均と言ってよい。そこでは単純に数値モデルの結果と観測データを足して2で割るのではなく、より信用できる方の比重を重くする。信用の度合いは誤差の相対的な大きさで決まる。モデルの変数と観測の変数が同一で、全てのモデル格子点上で観測が実施されていれば話はそれだけだが、実際には観測が圧倒的に足りない。言い換えれば、地球大気の状態を精緻に表現するのに必要な自由度の巨大さに比して観測データの数は極めて少ないため、圧倒的な劣決定問題を解く必要に迫られる。そこで各物理量自身の誤差（分散）だけでなく異なる物理量の間の共分散も用いて重み付き平均を計算する。そうすることで離れた場所の観測データや異なるモデル変数の情報が利用可能になる。たとえ離れていても相関が高い（＝共分散が大きい）と想定される観測データの情報は取り込まれるべきだし（例えば風上風下の位置関係）、物理法則で密に関連しているモデル変数間には高い相関（＝大きな共分散）が存在するはずである。具体的な計算方法は次節で概説する。

データ同化（あるいは一般的にベイズ推定）では数値モデルの予測結果を第一推定値あるいは先験情報と呼ぶ。もちろん数値モデルは完璧ではないので、第一推定値には誤差が含まれる。問題はこの誤差がどの程度なのか正確には分からない上に時々刻々変化することである。最新のデータ同化手法では場所・時刻・物理量の種類に応じて第一推定値にどの程度の誤差が含まれるのか推定することでデータ同化の計算精度を向上させている。一方で観測データにも誤差は存在し、それは大まかに測器誤差と時間/空間代表性誤差に分けられる。一般には誤差といえば測器誤差を想像することが多いが、測器の精度を無限に上げていっても観測誤差を無くすことはできない。なぜなら我々が知りたいのは温度計の先端に触れている（あるいはある瞬間に熱赤外線を偶然発した）微小空気塊の温度ではなく、小さな試料セルの中に偶然入ってきたエアロゾルの濃度でもなく、少なくとも数百メートル四方、場合によっては数百キロメートル四方の空気塊における平均温度や平均濃度を知りたいのである。このように極小エリアの観測値と空気塊全体の平均値との差を空間代表性誤差と呼ぶ。時間方向に関しても同様な齟齬は発生し、時間代表性誤差と呼ばれる。データ同化の計算に必要な観測誤差は測器誤差と時間/空間代表性誤差の和であり、それらの正確な見積りが重要となる。

観測データが圧倒的に足りない状況では、空間的に少々離れた観測データも精度良く情報を利用でき、数値モデルで予報している変数以外の物理量の観測データも利用できるデータ同化手法が必要となる。そのような要求を満たすアルゴリズムが四次元変分法（4D-Var）やアンサンブルカルマンフィルタ法（EnKF）である。これらのアルゴリズムでは観測演算子と呼ばれる技法を用いることで、数値モデルが再現する変数以外の観測データも同化できる（次節参照）。ライダー観測のデータ同化にはこの観測演算子が必須である。ただし4D-VarやEnKFは計算機負荷が極めて大きいため、気象予報の分野でもその実用化は計算機性能が著しく向上した2000年代以降のことである。

エアロゾル研究のような大気化学分野でデータ同化が広く行われるようになった要因として、気象予報の分野においてこれらの高精度データ同化手法（4D-VarやEnKF）が実用化されたことが挙げられる。それ以前の気象予報データ同化（例えば最適内挿法）は計算機負荷が低い代わりに観測演算子は使えず、また観測の数と密度が小さい領域ではデータ同化精度が著しく低下する欠点があった。その欠点が、気象予報分野に比べて観測データが圧倒的に少ない大気化学分野でのデータ同化利用を妨げていた。一方で1990年代頃から地球観測衛星が続々と打ち上げられ、大気エアロゾルの広範囲観測データが徐々に得られるようになったことも背景となり、大気化学分野でのデータ同化利用に繋がった。

2.2 アンサンブルカルマンフィルタの導出

ライダー観測で推定できる要素は波長依存の減衰後方散乱係数や消散係数あるいは偏光解消度だけであるが、何故データ同化はエアロゾル濃度を確からしく推定できるのか、以下に簡単な数学的説明を行う。数式の詳細を追う必要はなく、観測演算子の導入というエッセンスを理解して頂ければ幸いである。4D-Var も EnKF も観測演算子を使うことは共通しており、理想条件下では4D-Var と EnKF の解は一致する。そこで本節では、著者が専門とする EnKF を使って観測演算子の便利さを紹介する。この節に興味を湧かなければ次章（大気エアロゾルデータ同化の結果を紹介）へ読み進んで下さっても問題ない。

まず、1時刻先の状態を予測する時間発展の式を

$$\mathbf{x}_{i+1}^f = M(\mathbf{x}_i^a) + \eta \quad (1)$$

と表す。 $\mathbf{x}$ は N 次元の状態ベクトルであり、そのベクトル成分は数値モデルの各格子点上での気象状態やエアロゾル濃度に対応する。下添字は時刻 (i) を表し、上添字は予報 (f) あるいは解析 (a) を表す。 M は非線形な数値モデル（いわゆる気象予報モデルや大気化学モデル等）であり、 η は数値モデルの誤差を表す。次に、数値モデルの計算する大気状態やエアロゾル濃度から観測可能な物理量を得るための式を

$$\mathbf{y}_i^o = H_i(\mathbf{x}_i) + \epsilon \quad (2)$$

と表す。 $\mathbf{y}_i^o$ は p 次元の観測ベクトル（1時刻で入手可能な p 個の観測物理量を並べたもの）であり、 H は非線形な観測演算子（観測モデルとも呼ぶ）である。 ϵ は観測演算子の誤差を表す。最も単純な観測演算子の例は、数値モデルの格子点上の変数の再現であり、その場合 H は単に変数を状態ベクトルから抜き出すだけである。もし観測地点が格子点上にないならば、 H は空間内挿も行う。状態ベクトルに含まれない物理量が観測される場合は（ライダー観測はまさにその好例）、 H は物理法則に基づく変換演算を行う。要するに、気象状態やエアロゾル濃度の値が鉛直方向にすべて手に入ったとして（ $\mathbf{x}_i^f$ が該当）、どのような減衰後方散乱光や消散が観測されるはずなのか計算するのである。この計算では逆問題を解く必要がないため、計算作業としては比較的シンプルである。この観測演算子の存在がデータ同化において大きな利便性をもたらすことを以下に示す。

カルマンフィルタでは、予報値（すなわち第一推定値） $\mathbf{x}_i^f$ と観測値 $\mathbf{y}_i^o$ から、カルマンゲインと呼ばれる係数 $\mathbf{K}_i$ を使った重み付き平均で次式のように解析値 $\mathbf{x}_i^a$ を求める。

$$\mathbf{x}_i^a = \mathbf{x}_i^f + \mathbf{K}_i(\mathbf{y}_i^o - H_i(\mathbf{x}_i^f)) \quad (3)$$

ここでカルマンゲイン $\mathbf{K}_i$ は $N \times p$ 行列であり、 $\mathbf{y}_i^o - H_i(\mathbf{x}_i^f)$ は観測と予報の差を表す p 次元ベクトルである。加重平均の重みであるカルマンゲイン $\mathbf{K}_i$ は解析値 $\mathbf{x}_i^a$ の誤差が最小となるように決めるべきである。そこで、人類が知り得ない地球大気の実値を $\mathbf{x}_i^t$ とすると、解析値の誤差 $\delta \mathbf{x}_i^a$ は

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{x}_i^a &= \mathbf{x}_i^a - \mathbf{x}_i^t \\ &\approx \mathbf{x}_i^f - \mathbf{x}_i^t + \mathbf{K}_i(\mathbf{y}_i^o - H_i(\mathbf{x}_i^f)) - \mathbf{H}_i(\mathbf{x}_i^f - \mathbf{x}_i^t) \\ &= \delta \mathbf{x}_i^f + \mathbf{K}_i(\delta \mathbf{y}_i^o - \mathbf{H}_i \delta \mathbf{x}_i^f) \\ &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_i \mathbf{H}_i) \delta \mathbf{x}_i^f + \mathbf{K}_i \delta \mathbf{y}_i^o \end{aligned} \quad (4)$$

となる。ここで $\delta \mathbf{x}_i^f = \mathbf{x}_i^f - \mathbf{x}_i^t$ は予報値の誤差、 $\delta \mathbf{y}_i^o = \mathbf{y}_i^o - H_i(\mathbf{x}_i^t)$ は観測値の誤差である。 $\mathbf{H}_i$ は観測演算子 H を $\mathbf{x}_i^f$ の周りで線形化した行列である。なお、観測演算子 H が線形ならば(4)式は厳密に成り立つ。しかし非線形であっても通常はかなりの精度で(4)式は成り立つ。この時、解析値の誤差共分散 $\mathbf{P}_i^a$ は

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_i^a &= \langle \delta \mathbf{x}_i^a (\delta \mathbf{x}_i^a)^T \rangle \\ &= \left\langle \left((\mathbf{I} - \mathbf{K}_i \mathbf{H}_i) \delta \mathbf{x}_i^f + \mathbf{K}_i \delta \mathbf{y}_i^o \right) \left((\mathbf{I} - \mathbf{K}_i \mathbf{H}_i) \delta \mathbf{x}_i^f + \mathbf{K}_i \delta \mathbf{y}_i^o \right)^T \right\rangle \\ &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_i \mathbf{H}_i) \mathbf{P}_i^f (\mathbf{I} - \mathbf{K}_i \mathbf{H}_i)^T + \mathbf{K}_i \mathbf{R}_i \mathbf{K}_i^T \end{aligned} \quad (5)$$

と表すことができる．ここで $\mathbf{P}_i^f = \langle \delta \mathbf{x}_i^f (\delta \mathbf{x}_i^f)^T \rangle$ は背景誤差共分散， $\mathbf{R}_i = \langle \delta \mathbf{y}_i^o (\delta \mathbf{y}_i^o)^T \rangle$ は観測値の誤差共分散である．記号 $\langle \rangle$ は期待値を表す．また，予報値の誤差と観測値の誤差の間には相関がないと仮定した（この仮定は実際にほぼ成り立つ）．

誤差がガウス分布に従う場合，最小分散推定によって最尤値を得ることができるから，解析誤差共分散 $\mathbf{P}_i^a$ の対角和 $\text{tr}(\mathbf{P}_i^a)$ の最小値を与える $\mathbf{K}_i$ が求めるべき重みである．そこで対角和 $\text{tr}(\mathbf{P}_i^a)$ を $\mathbf{K}_i$ で偏微分する．

$$\begin{aligned} \frac{\partial \text{tr}(\mathbf{P}_i^a)}{\partial \mathbf{K}_i} &= \frac{\partial \text{tr}(\mathbf{I} - \mathbf{K}_i \mathbf{H}_i) \mathbf{P}_i^f (\mathbf{I} - \mathbf{K}_i \mathbf{H}_i)^T}{\partial \mathbf{K}_i} + \frac{\partial \text{tr}(\mathbf{K}_i \mathbf{R}_i \mathbf{K}_i^T)}{\partial \mathbf{K}_i} \\ &= -2(\mathbf{I} - \mathbf{K}_i \mathbf{H}_i) \mathbf{P}_i^f \mathbf{H}_i^T + 2\mathbf{K}_i \mathbf{R}_i \end{aligned} \quad (6)$$

ここで $\partial \text{tr}(\mathbf{ABA}^T)/\partial \mathbf{A} = \mathbf{A}(\mathbf{B} + \mathbf{A}^T)$ および $\partial \text{tr}(\mathbf{AB})/\partial \mathbf{A} = \mathbf{B}^T$ という公式を使い， $\mathbf{P}_i^f$ および $\mathbf{R}_i$ が対称行列であることを利用した．(6)式の偏微分を0と置き， $\mathbf{K}_i$ について解くと

$$\mathbf{K}_i = \mathbf{P}_i^f \mathbf{H}_i^T (\mathbf{H}_i \mathbf{P}_i^f \mathbf{H}_i^T + \mathbf{R}_i)^{-1} \quad (7)$$

が得られる．これが求めるべきカルマンゲイン $\mathbf{K}_i$ である．(7)式を(5)式に代入すると，解析誤差共分散を計算するために必要な次式が得られる．

$$\mathbf{P}_i^a = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_i \mathbf{H}_i) \mathbf{P}_i^f \quad (8)$$

これらの式を見ると判るとおり，カルマンゲイン $\mathbf{K}_i$ あるいは解析誤差共分散 $\mathbf{P}_i^a$ を計算するには背景誤差共分散 $\mathbf{P}_i^f = \langle \delta \mathbf{x}_i^f (\delta \mathbf{x}_i^f)^T \rangle$ が必要である．そこで，アンサンブル予報シミュレーションを実施し，各アンサンブルメンバーのアンサンブル平均からの差（アンサンブル摂動）を統計サンプルと見なして，背景誤差共分散 $\mathbf{P}_i^f = \langle \delta \mathbf{x}_i^f (\delta \mathbf{x}_i^f)^T \rangle$ の近似値を計算することでこの問題を解決する．アンサンブルメンバーの数を m ($m \ll N$)，アンサンブルメンバーのサンプル番号を k ($1 \leq k \leq m$) とし， k 番目のメンバーのアンサンブル摂動を $\delta \mathbf{x}_i^{f(k)}$ とすると，誤差共分散 $\mathbf{P}_i^f$ は

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_i^f &\approx \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m \delta \mathbf{x}_i^{f(k)} (\delta \mathbf{x}_i^{f(k)})^T \\ &= \frac{1}{m-1} \delta \mathbf{X}_i^f (\delta \mathbf{X}_i^f)^T \end{aligned} \quad (9)$$

と推定できる．ここで $\delta \mathbf{X}_i^f$ は各列が各メンバーのアンサンブル摂動を成分とする $N \times m$ 行列である．そして(9)式を(7)式に代入すればカルマンゲイン $\mathbf{K}_i$ が得られ，それを(3)式に代入することで解析値 $\mathbf{x}_i^a$ が手に入る．なお，(9)式を(8)式に代入すると

$$\delta \mathbf{X}_i^a (\delta \mathbf{X}_i^a)^T = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_i \mathbf{H}_i) \delta \mathbf{X}_i^f (\delta \mathbf{X}_i^f)^T \quad (10)$$

となる．EnKFによるデータ同化サイクルでは解析値 $\mathbf{x}_i^a$ を得るだけでなく，次のサイクルにおいてアンサンブル予報シミュレーションを実行するために初期値（すなわち解析値）のアンサンブル摂動 $\delta \mathbf{x}_i^{a(k)}$ ($1 \leq k \leq m$) が必要である．このアンサンブル摂動を得るための作業をアンサンブル・アップデートと呼び，そのための計算式が(10)である．アンサンブルカルマンフィルタには様々な流儀が存在するが，そのほとんどは(10)式を $\delta \mathbf{x}_i^{a(k)}$ について解くための解法の違いに基づく．

解析値すなわちデータ同化プロダクトを計算するのは(3)式であり，データ同化計算の中で観測値を取り扱うのはこの部分だけである．そこに観測演算子（プログラミング上は一つのサブルーチン）を介入させることで，数値モデルが予報しない物理量の観測データを利用可能にする．また，数値モデルで予報する物理量と観測する物理量の間を結びつける係数がカルマンゲインだと考えることもできる（そのためカルマンゲインの計算自体にも(7)式のように観測演算子のサブルーチンが必要）．その恩恵によりエアロゾルの場合であれば物質濃度それ自身だけでなく減衰や偏光のような光学的な情報も同化することができる上，天気予報

の場合ならば大気放射輝度や GPS の電波遅延量でさえ同化できる。

3. 衛星搭載ライダーによる大気エアロゾル観測とデータ同化

3.1 衛星搭載ライダー CALIOP

大気エアロゾルの観測を主な目的としてこれまで打ち上げられた衛星搭載ライダーはそれほど多くない。世界最初のものは 1994 年にスペースシャトルに搭載された LITE であり、その後は 2006 年に打ち上げられた CALIPSO 衛星に搭載された CALIOP⁷⁾と 2015 年に国際宇宙ステーションに短期間搭載された CATS のみである。これらに加えて 2018 年に打ち上げられた欧州宇宙機関 (ESA) の風観測衛星 ADM-Aeolus 搭載の ALADIN では、スピノフプロダクトとしての扱いでエアロゾル消散係数が公開されている。これらの経緯は西澤ほか⁸⁾に詳しく解説されている。CALIPSO 衛星はアメリカ航空宇宙局 (NASA) とフランス国立宇宙研究センター (CNES) によって A-train と呼ばれる地球観測衛星群の中の 1 台として打ち上げられた。A-train に含まれる人工衛星は隊列を組んで高度約 700 km の太陽同期極軌道を 1 周約 98 分で周回している。CALIOP は 532 nm (緑色の可視光) と 1064 nm (近赤外線) の波長を用いて水平分解能 333 m/垂直分解能 30 m で観測を行っており、532 nm においては偏光解消度も測定している。異なる波長における後方散乱強度はエアロゾル粒子の粒径に強く依存して変化する。また、偏光解消度はエアロゾル粒子の形に強く依存する。そのため、CALIOP が我々に提供する後方散乱係数あるいは消散係数の観測値はエアロゾルの濃度だけでなくその組成の情報を多く含んでおり、観測演算子を用いたデータ同化によって、そのエアロゾルの組成推定も可能となる。このように有益な (しかしそのままでは利用範囲の限られている) ライダー観測データセットを最大限活用するため、関山ほか^{5,9,10)}は世界に先駆けて CALIOP エアロゾル観測のデータ同化を試みた。その詳細を次節以降で紹介する。

3.2 濃度分布の推定

エアロゾル濃度の水平分布を推定するために試みた CALIOP 観測データ同化⁵⁾では、消散係数ではなく減衰後方散乱係数の 532 nm および 1064 nm 観測値を利用した。CALIPSO 衛星打ち上げ当初は消散係数が正式なプロダクトではなかったことが主な理由である。また 532 nm においては偏光解消度の観測値もデータ同化した。減衰後方散乱係数のデータ同化では、観測演算子によってモデル鉛直層毎の後方散乱強度と往復経路上での減衰の大きさを推定する必要がある。その推定には数値モデルが予測したエアロゾルの組成・濃度・粒径分布情報が使われており、その推定値と観測値の差分がカルマンゲインを通じて時空間および物理変数間で伝達されることによりデータ同化が実現される。偏光解消度については非球形エアロゾル粒子が鉱物ダスト (いわゆる黄砂) だけであると仮定して、観測演算子によって数値モデルの鉱物ダスト濃度および粒径分布から偏光解消度の推定値を作成した。また、観測演算子の計算では大気分子による光の散乱や減衰の影響も考慮してある。

このデータ同化実験では EnKF の実装手法として局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF)¹¹⁾と呼ばれるアルゴリズムを利用した。また、大気エアロゾル数値モデルとして気象研究所全球エアロゾル予測モデル (MASINGAR)^{12,13)}を使った。MASINGAR は気象庁の現業黄砂解析予測にも使われている数値モデルであり^{13,14)}、気象研究所の地球システムモデルにもモジュールの一つとして組み込まれて将来気候予測に役立てられている¹⁵⁾。MASINGAR では鉱物ダスト (黄砂) 粒子以外にも硫酸塩粒子・黒色炭素粒子・有機炭素粒子・海塩粒子の挙動を計算しており、観測演算子はそれらすべてのエアロゾル種別の影響を個々に計算したのち合算している。関山ほか⁵⁾は計算機負荷を抑えるため MASINGAR の水平解像度を 2.8 度 (約 300 km) に設定し、EnKF のアンサンブルメンバー数は 20 個のみにした。この原稿を執筆している 2022 年現在では計算機性能が向上し、この解像度とアンサンブルメンバー数は見劣りするものとなってしまうが、それでもこのデータ同化実験は想定以上に成功した。その結果の一例を Fig. 1 で示す。

この例では西日本に大規模な黄砂が飛来した日を図示しており、Fig. 1a と 1b の赤い丸はこの日黄砂を目視観測した気象官署の位置、青い丸は黄砂が観測されなかった気象官署の位置を示している。黄砂が西日本を中心に飛来したことが赤色と青色の気象官署の分布で明瞭に判別できる。一方、データ同化を行わずに数値モデルだけで推定した鉱物ダスト (黄砂) エアロゾルの地上濃度が Fig. 1a であり、CALIOP 観測データ同化によって推定した地上濃度が Fig. 1b である。前者では本州・四国・九州の広範囲が黄砂に覆われてお

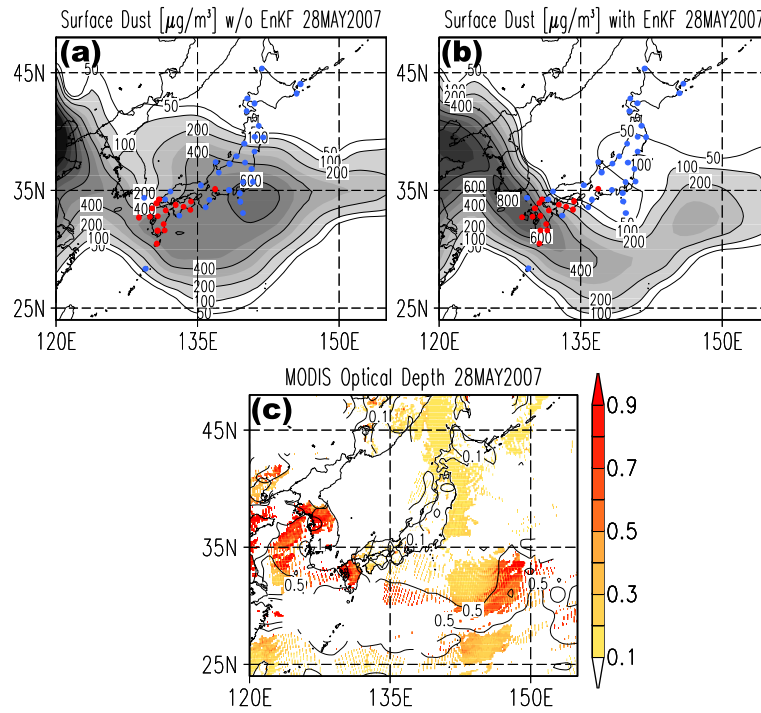


Fig. 1 Simulated surface dust aerosol concentrations on 28 May 2007 (contours and gray shades; daily mean) and the weather stations (red circles) that observed aeolian dust events on the same day. Blue circles indicate the weather stations that did not observe any aeolian dust events on the day. (a) Reference model run without assimilation and (b) CALIOP assimilation results. (c) MODIS optical depth measured on 28 May 2007, in which red shades indicate relatively high values, and yellow shades indicate relatively low values of the optical depth. This figure is taken from the reference⁵⁾.

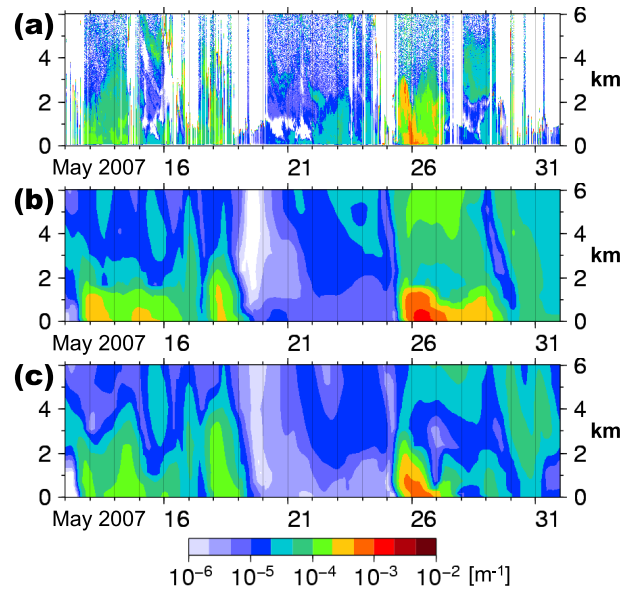


Fig. 2 Comparison of lidar observed and simulated extinction coefficients for non-spherical particles (dust aerosol) at 532 nm [m^{-1}] at the Matsue observatory in western Japan (133°E , 35°N), in May 2007. The X-axis shows the date, in which each tick grid line indicates 00:00UTC. The Y-axis shows the altitude (km). (a) NIES lidar measurements, (b) reference model run without assimilation, and (c) CALIOP assimilation results. Red or yellow shades indicate relatively high values, and blue or blue-gray shades indicate relatively low values of the extinction coefficients. This figure is taken from the reference⁵⁾.

り、気象官署観測と矛盾している。しかし後者ではデータ同化による黄砂の推定範囲と気象官署観測の分布がかなりよく一致している。また独立検証データとして、データ同化とは無関係な衛星観測データとして Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) によって測定されたエアロゾル光学的厚さ（地上から大気上端までの消散係数を鉛直積分した値）を Fig. 1c に示す。このエアロゾル光学的厚さには鉱物ダスト（黄砂）以外のエアロゾルの影響も含むが、この日は黄砂の影響が支配的であったため光学的厚さの大小で黄砂ブルームの位置が特定可能である。この Fig. 1c でも黄砂は朝鮮半島から九州を経て太平洋に広がっており、その分布は Fig. 1a よりも Fig. 1b に（すなわちデータ同化による推定結果に）近い。ライダーで得られた視野角 0 度かつ減衰後方散乱係数という間接的な情報からのデータ同化によって地上濃度の広範囲な推定値が得られた好例である。

この時の上空の非球形エアロゾル分布を示したのが Fig. 2 である。縦軸が高度、横軸が日時であり、場所は国立環境研究所が地上ライダーを設置している島根県松江市である。そのライダーによって観測した消散係数が Fig. 2a であるが、この観測値はデータ同化には全く使われていない。そして数値モデルだけで推定した消散係数が Fig. 2b、CALIOP 観測データ同化によって推定した消散係数が Fig. 2c である。2007 年 5 月 26 日に高度約 2 km のブルームが到達し、その後急速に消散係数（おおよそ濃度に比例する）が減少していることが観測値と CALIOP 観測データ同化では示されているが、数値モデルのみでの推定ではブルーム分

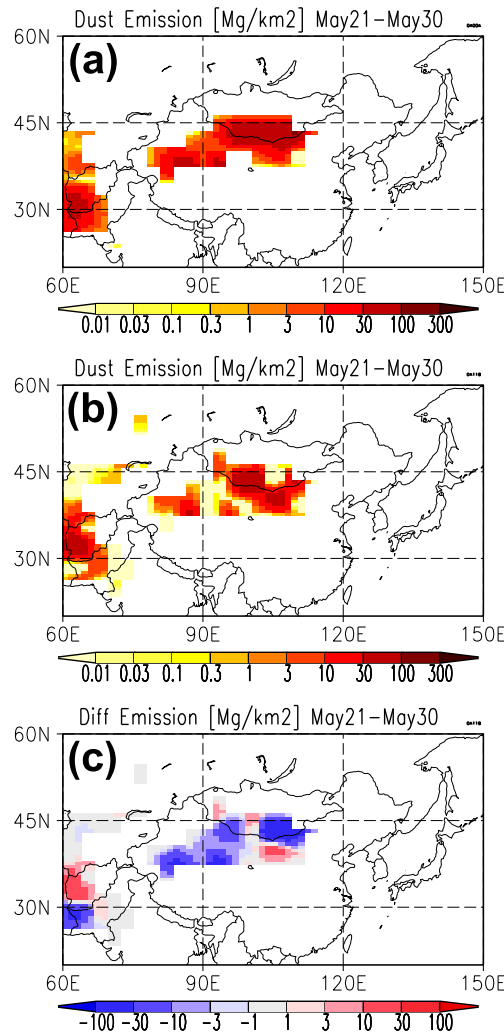


Fig. 3 Dust aerosol emission during a dust storm from May 21 to May 30, 2007. (a) Reference model result without assimilation, (b) optimized model result with CALIOP data assimilation, and (c) difference between the reference and optimized results. Red (blue) shades in the difference map indicate that the optimized dust emission is stronger (weaker) than the reference dust emission. This figure is taken from the reference⁹⁾.

布が実際よりも低く広くなっている。また、5月12-18日にも弱いブルームが到達しているが、これも数値モデルのみでの推定に比べてCALIOP観測データ同化による推定の方が濃度も高度も現実的に即している。なお、CALIPSO/CALIOPが鳥根県松江市の直上を毎日通過することはないため、このデータ同化結果(Fig. 2c)は数百kmあるいは数千km離れた場所を通過したCALIPSO/CALIOPの観測情報に基づいて推定されたものだと考えてよい。データ同化の有用性を示す好例である。

3.3 地表面放出量の推定

前述したとおり、データ同化を使えばエアロゾルの地表面放出量の推定も可能である。その際、使う観測データに地表面放出量が含まれていなくてもよい。実際、地表面放出量の広範囲な直接観測は不可能である。大気中のエアロゾル濃度(あるいは濃度と高い相関のある物理量)の観測値があれば、その風上の地表面放出量もデータ同化によって推定できる。その例がFig. 3である。ここで使ったデータ同化システムは3.2節と同様で、CALIOPによって観測された2波長のエアロゾル減衰後方散乱係数と偏光解消度をデータ同化している⁹⁾。推定したのは鉱物ダスト(黄砂)エアロゾルの地表面放出量である。推定は全球を対象としたが、ここで図示しているのは黄砂の放出源であるアジア域のみである。

データ同化を行わずに数値モデルだけで推定した地表面放出量(Fig. 3a)では図中央のタクラマカン砂漠からゴビ砂漠にかけて比較的一様に黄砂が放出されている。これは数値モデルMASINGARに含まれている植生分布データや礫被覆率分布データに実況値ではなく気候値や精度の粗い推定値が使われており、多様性の少ないことが原因であると考えられる。一方、CALIOP観測データ同化によって推定した地表面放出量(Fig. 3b)では地域ごとの放出強度の差が大きい。これら二つの差分を示したのがFig. 3cであり、タクラマカン砂漠とゴビ砂漠北部で放出が減少するようCALIOP観測データ同化は補正しており、ゴビ砂漠南部では増加するよう補正していることが分かる。最近の研究で他の数値モデルでもゴビ砂漠北部で黄砂発生を過大評価、南部で過小評価していることが分かっており¹⁶⁾、その研究とも矛盾しない補正結果である。しかし残念なことに黄砂に限らずエアロゾルの地上放出量を広範囲に直接観測することは不可能であるため、このCALIOP観測データ同化も直接観測で検証することは難しい。逆に言うと、直接観測の難しい物理量の広範囲推定にもデータ同化は有用であるということが大きな利点である。さらに、その際にライダー観測のような視野角0度かつ濃度自体を表すわけではない間接的な物理量が利用できることはデータ同化の利点を大きく引き立たせる。

3.4 仮想実験

次にデータ同化を使った特殊な仮想実験を紹介する。データ同化に使う観測値を数値モデル(および観測演算子)で擬似的に作成し、その疑似観測値をデータ同化することで(ただしデータ同化で使う数値モデルは疑似観測値を作った数値モデルとは異なる)、疑似観測値を作るために使った数値モデルの状態を外から推定することができる。これを観測システムシミュレーション実験(OSSE)と呼ぶ。なぜこのような実験方法が存在するかというと、天気予報の世界では高額な観測施設や観測衛星を導入する前に天気予報の精度がその追加観測によってどの程度向上するかOSSEによって事前検証したいからである。疑似観測値は数値モデルで作成しているため、その数値モデルが作る仮想地球に関する情報はすべて手に入る(例えばエアロゾルの地上放出量も完全に知ることが可能)。したがってOSSEで黄砂放出量を推定すると、その正確な答え合わせが可能となる。関山ほか¹⁰⁾は前述のCALIOP観測データ同化^{5,9)}のシステムを利用し、CALIOPの疑似観測データを別の数値モデルから作成してエアロゾルライダー衛星観測のOSSEを試みた。その際、現実世界と同じくCALIPSOが1台だけ飛行している仮想世界に加えて、CALIPSOが4台打ち上げられている仮想世界(それぞれのCALIPSOは同じ軌道で90度ずつ位相をずらして飛行)についても鉱物ダスト(黄砂)エアロゾル地表面放出量推定を行った。

その結果がFig. 4である。ここでは東アジア全体の黄砂エアロゾル放出量の積算値を時系列で示している。図中、Nature Run(赤線)が仮想地球の放出量(すなわち正解値)、Free-model Run(緑線)がデータ同化無しでの推定量(全く異なるモデルを使っているため放出タイミングは似ているが放出量は完全に異なっている)、黒線がデータ同化による推定量である。データ同化によって推定量の精度向上が見られるが、CALIPSOが1台しか飛行していない場合は正解値とデータ同化推定量の差が乖離してしまうケースが時折

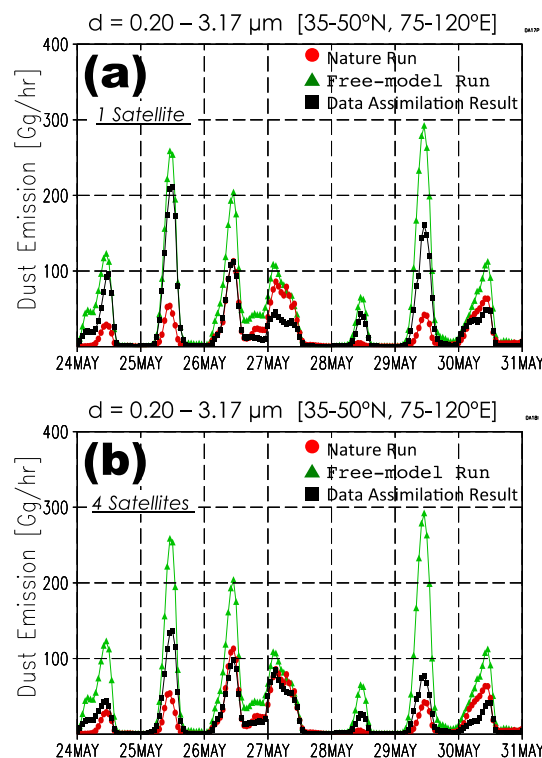


Fig. 4 Time series of the dust emission totaled in the Asian Dust source region (mainly China and Mongolia) in late May 2007. The dust weights of six size bins from $0.200\ \mu\text{m}$ to $3.17\ \mu\text{m}$ in diameter were accumulated. Red circles indicate the true values produced by the Nature Run. Green triangles indicate free-model results without data assimilation. Black squares indicate the data assimilation results with the CALIOP data assimilation. Only one satellite was used for the data assimilation in (a), and four satellites were used in (b). This figure is taken from the reference¹⁰⁾.

見られる (Fig. 4a). それに比べて CALIPSO が 4 台飛行しているとその乖離が大幅に縮小することが分かる (Fig. 4b). OSSE は現実世界の CALIOP データ同化の精度検証に使えるだけでなく (Fig. 4a のケース), 現実では実現不可能な理想条件下 (例えば CALIPSO が 4 台という Fig. 4b のケース) での仮想実験も可能にする。

4. おわりに

ここで大気エアロゾルデータ同化の視点から考えたライダー搭載衛星ミッションについて少し述べたい。CALIPSO/CALIOP は幸いにも設計寿命を大きく超えて稼働し続けたが、後継衛星がいまだ存在しない (2022 年 12 月現在)。衛星搭載ライダーが我々にもたらしてくれる大気エアロゾル情報は膨大であり、データ同化によってさらにその情報を分かりやすく、時空間的に広げることができる。そこから得られる知見は地上観測や衛星イメージャー観測では得られないものが多く (特に鉛直プロファイル情報)、大気エアロゾル観測を主目的としたライダー搭載衛星が上空を飛行し続けてくれることを願ってやまない。その願いを叶えてくれる衛星ミッションが ESA と我が国の宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が共同で進めている Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer (EarthCARE) である^{17, 18)}。EarthCARE は度々打ち上げが延期されてきたが、ついに 2023 年に打ち上げられることになった。この衛星に搭載される大気ライダー ATLID については西澤ほか^{8, 19)}に詳しい。EarthCARE はドップラー雲レーダーも搭載しているため、エアロゾル・雲・対流・降水プロセスの複合的な観測にも期待が持てる。我々大気エアロゾル研究者は EarthCARE に大きな期待を寄せている。

さらに、衛星搭載ライダーの打ち上げ数が限られている中では、エアロゾル観測が主目的ではない衛星搭載ライダーの観測データについても活用が必要だろう。ADM-Aeolus/ALADIN はスピノフプロダクト扱い

ではあるが消散係数などを公開しており、エアロゾルデータ同化での活用に期待が持てる。また、日本でも衛星搭載コヒーレントドップラー風ライダー(CDWL)の実現に向けて活発な動きがあり^{20,21)}、その実現を期待したい。天気予報の分野では高層大気の風観測データが圧倒的に不足しているため、その観測値が得られた場合、天気予報精度向上に与えるインパクトが大きい。高層大気の風速観測は衛星搭載ライダーの得意とするところであり、天気予報は社会的ニーズが大きいため、大気エアロゾル観測を主目的とする場合よりも国民の理解を得やすいのではないだろうか。また、JAXAは超低高度衛星(例えばSuper Low Altitude Test Satellite; SLATS)の運用技術に大きく長けており、SLATS後継機へのドップラー風ライダー搭載にも期待が持てる。そのような衛星が多数打ち上げられるようになれば、3.4節で紹介した仮想実験のように、より高精度な大気エアロゾルデータ同化が実現できるだろう。そのように作成された大気エアロゾルプロダクトが地球環境監視や気候変動予測に役立てられる日が来ることを願う。

謝 辞

EnKFのソースコードは三好建正博士(元気象庁数値予報課, 現理化学研究所)、全球エアロゾル数値モデルのソースコードは田中泰宙博士(元気象庁気象研究所, 現気象庁数値予報課)から提供頂きました。ライダー用の観測演算子開発には清水厚博士(国立環境研究所)から多大な協力を頂きました。

引用文献

- 1) J. M. Lewis, "Sasaki's Pathway to Deterministic Data Assimilation," in *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications*, S. K. Park and L. Xu, ed. Springer, pp. 1-19 (2009).
- 2) I. M. Navon, "Data Assimilation for Numerical Weather Prediction: A Review," in *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications*, S. K. Park and L. Xu, ed. Springer, pp. 21-65 (2009).
- 3) K. Yumimoto, I. Uno, N. Sugimoto, A. Shimizu, Z. Liu, and D. M. Winker, "Adjoint inversion modeling of Asian dust emission using lidar observations," *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 2869-2884 (2008).
- 4) A. Benedetti, J.-J. Morcrette, O. Boucher, A. Dethof, R. J. Engelen, M. Fisher, H. Flentje, N. Huneeus, L. Jones, J. W. Kaiser, S. Kinne, A. Mangold, M. Razinger, A. J. Simmons, and M. Suttie, "Aerosol analysis and forecast in the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Integrated Forecast System: 2. Data assimilation," *J. Geophys. Res.*, **114**, D13205 (2009).
- 5) T. T. Sekiyama, T. Y. Tanaka, A. Shimizu, and T. Miyoshi, "Data assimilation of CALIPSO aerosol observations," *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 39-49 (2010).
- 6) IPCC (ed.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press (2021).
- 7) D. M. Winker, H. H. Hunt, and M. J. McGill, "Initial performance assessment of CALIOP," *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L19803 (2007).
- 8) 西澤智明, 神慶孝, 石井昌憲, 岡本創, "衛星搭載高スペクトル分解ライダーによるエアロゾル・雲の全球観測," *レーザセンシング学会誌*, **1** (2), 55-60 (2020).
- 9) T. T. Sekiyama, T. Y. Tanaka, T. Maki, and M. Mikami, "The Effects of Snow Cover and Soil Moisture on Asian Dust: II. Emission Estimation by Lidar Data Assimilation," *SOLA*, **7A**, 40-43 (2011).
- 10) T. T. Sekiyama, T. Y. Tanaka, and T. Miyoshi, "A simulation study of the ensemble-based data assimilation of satellite-borne lidar aerosol observations," *Geosci. Model Dev. Discuss.*, **5**, 1877-1947 (2012).
- 11) T. Miyoshi and S. Yamane, "Local Ensemble Transform Kalman Filtering with an AGCM at a T159/L48 Resolution," *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 3841-3861 (2007).
- 12) T. Y. Tanaka, K. Orito, T. T. Sekiyama, K. Shibata, M. Chiba, and H. Tanaka, "MASINGAR, a global tropospheric aerosol chemical transport model coupled with MRI/JMA98 GCM: Model description," *Papers in Meteorology and Geophysics*, **53**, 119-138 (2003).
- 13) 田中泰宙, 小木昭典, "気象庁全球黄砂予測モデルの更新について," *測候時報*, **84**, 109-128 (2017).
- 14) 小木昭典, 松本隆則, 北島俊行, 田中泰宙, 弓本桂也, 関山剛, 眞木貴史, "気象庁全球黄砂解析予測モデルにおけるエアロゾルデータ同化手法の導入について," *測候時報*, **89** (1), 1-15 (2022).
- 15) S. Yukimoto, H. Kawai, T. Koshiro, N. Oshima, K. Yoshida, S. Urakawa, H. Tsujino, M. Deushi, T. Tanaka, M. Hosaka, S. Yabu, H. Yoshimura, E. Shindo, R. Mizuta, A. Obata, Y. Adachi, and M. Ishii, "The Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and basic evaluation of the physical component," *J. Meteor. Soc. Japan*, **97**, 931-965 (2019).
- 16) T. T. Sekiyama, Y. Kurosaki, M. Kajino, M. Ishizuka, B. Buyantogtokh, J. Wu, and T. Maki, "Improvement in dust storm simulation by considering stone coverage effects for stony deserts in East Asia," *J. Geophys. Res.*, **128**, e2022JD037295 (2023).

- 17) 菊池麻紀, “雲エアロゾル放射ミッション (EarthCARE)”, 天気, **64**, 59-61 (2017).
- 18) 菊池麻紀, 沖理子, 久保田拓志, 吉田真由美, 萩原雄一郎, 高橋千賀子, 大野裕一, 西澤智明, 中島孝, 鈴木健太郎, 佐藤正樹, 岡本創, 富田英一, “雲エアロゾル放射ミッション「EarthCARE」,” 日本リモートセンシング学会誌, **39** (3), 181-196 (2019).
- 19) 西澤智明, 工藤玲, 日暮明子, 及川栄治, 岡本創, “EarthCARE 衛星搭載ライダーデータを用いたエアロゾル・雲推定アルゴリズム,” 日本リモートセンシング学会誌, **39** (3), 215-224 (2019).
- 20) 石井昌憲, “大気風を診るドップラー風ライダー,” 大気化学研究, **40**, 040A01 (2019).
- 21) 石井昌憲, 岡本幸三, 久保田拓志, 藤平耕一, 松本紋子, 今井正, 境澤大亮, 今村俊介, 石橋俊之, 田中泰宙, 佐藤篤, 西澤智明, 村田健史, 岡本創, 沖理子, 佐藤正樹, 岩崎俊樹, “衛星搭載ドップラー風ライダーによる全球風観測,” レーザセンシング学会誌, **1** (2), 61-66 (2020).



関山 剛

気象庁気象研究所 全球大気海洋研究部 主任研究官. 1995 年, 大阪大学理学部化学科卒. 同大学院理学研究科博士前期課程有機化学専攻中退. 1996 年, 気象庁に入庁. 4 年間の気象庁本庁勤務ののち, 2000 年に気象研究所へ異動. 2005-2006 年, 米国大気研究センター (NCAR) に出向. 2007 年より主任研究官. 2013 年, 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻にて博士 (理学) の学位を取得. 2015-2016 年, 鳥取大学乾燥地研究センター客員教授. 気象予報士, 第 1 種放射線取扱主任者, 甲種危険物取扱者の資格を所持. 専門分野は大気微量成分の数値シミュレーションとデータ同化. ミドルネームは Thomas.

特集 ライダーデータ利用 I (エアロゾル・雲)

領域化学輸送モデルとライダー観測

弓本 桂也^{*1}, 原 由香里¹

¹九州大学応用力学研究所 (〒816-8580 福岡県春日公園 6-1)

Aerosol research using regional chemical transport model
in conjunction with lidar observations

Keiya Yumimoto^{*1} and Yukari Hara¹

¹Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University,
6-1 Kasuga Park, Kasuga Fukuoka, 816-8580

(Received December 19, 2022; revised February 23, 2023; accepted February 27, 2023)

A chemical transport model (CTM) is a numerical model that predicts and represents the three-dimensional spatial distribution of air pollutants, including aerosols, by considering various physical and chemical processes. In particular, the model for urban to regional scales is called a regional chemical transport model (RCTM). This paper briefly describes studies that have been conducted by combining RCTMs and lidar observations from the three viewpoints of “comparison and validations”, “analysis of seasonal variations and long-term trends” and “application to aerosol data assimilation”.

キーワード：ライダー，化学輸送モデル，エアロゾル，データ同化

Key Words: Lidar, Chemical transport model, Aerosol, Data assimilation

1. はじめに

大規模煙源からの排煙，ロンドンスモッグのような都市スケールの汚染を契機に着目された大気環境問題は，産業活動の活発化を背景に，地域スケールそして国境を超える越境大気汚染へとその空間規模を拡げ，対象となる物質も多岐にわたるようになった。このような大気環境問題に対し，黄砂や硫酸塩等の大気浮遊粒子状物質（エアロゾル）の挙動を予測する数値モデルを化学輸送モデル（Chemical Transport Model; CTM）と呼ぶ。CTMでは対流圏の主要なエアロゾルである硫酸塩，黒色炭素，有機炭素，鉱物粒子（黄砂），海塩粒子などを扱う。人為起源エアロゾルの排出量推計（排出インベントリと呼ぶ）を入力または黄砂や海塩粒子の放出過程を組み込み，数値気象モデルで計算された気象場を読み込むことで大気中での輸送・拡散を求め，反応モデルや沈着モデルで化学反応・エアロゾル生成・除去過程を計算し，エアロゾルの空間分布や時間変動をシミュレーションする。特に，都市から領域（たとえば，東アジア）を対象としたものを領域化学輸送モデル（Regional CTM; RCTM）と呼び，大気環境研究の推進だけではなく，硫酸塩やPM2.5濃度，黄砂の飛来等の大気環境予測^{1,2)}にも使われている。一方，国立環境研究所では東アジアの大気環境の連続的な監視を目的として，ミー散乱ライダーによる観測を2001年より開始した（現在のAD-Net（Asian dust and aerosol lidar observation network）^{4,5)}）。また，衛星搭載2波長偏光ライダーCALIOP/CALIPSOが2006年に打ち上げられ，ライダーによるエアロゾルの観測データが蓄積されている。

自然科学では，モデル研究・フィールド観測・室内実験は，理論と応用研究の進展に必要な3つの柱であるとされ，相互に密接に関係し，それぞれの進展に他が追従することで螺旋階段を登るように研究が進展するとされている³⁾。RCTMとライダー観測はまさにこの関係であった。AD-NetおよびCALIOP/CALIPSOで

得られた観測データは、東アジアの大気環境の科学的理解の促進はもとより、黎明期であった RCTM の発展を大きくサポートするだけでなく、データ同化といった新しい技術の応用も導いた。本稿では、東アジアの大気環境、特にエアロゾルを対象に領域化学輸送モデルとライダー観測を結びつけて行われた研究を「領域化学輸送モデルとの比較・検証」、「季節変動、長期トレンドの解析」、「エアロゾルデータ同化への応用」の3つの観点から俯瞰する。

2. 領域化学輸送モデルとの比較・検証

東アジアの大気環境は総観規模の高・低気圧の通過に大きな影響を受ける。例えば、春・秋季の黄砂や人為起源エアロゾルの越境輸送のトリガーとなる温帯低気圧の移動では、付随する寒冷前線や暖気が温暖前線を昇る warm conveyor belt がエアロゾル輸送の大きな役割を担う^{3,6)}。また、移動性高気圧による輸送では、高気圧性の沈降逆転層がエアロゾルを滞留させ長期間にわたり高濃度な状態を引き起こす³⁾。このように、エアロゾルの輸送高度や厚さといった鉛直構造は越境輸送の重要なファクターであり、AD-Net によって得られた時間一高度図はその理解と RCTM の比較・検証^{†1)}に大きく役立った^{7,8)}。また、偏光消滅度を用いた黄砂（非球形）粒子と球形粒子の分離は、大陸内部の砂漠地帯で強風によって放出される黄砂と、主に大陸沿岸の都市域で排出される人為起源エアロゾルを分けて比較・検証することを可能とした⁹⁾。2006年に CALIOP/CALIPSO が打ち上げられ、緯度一高度断面が得られるようになるとより3次元的な比較と検証が行われるようになった^{10, 11, 12, 13)}。Fig. 1 に2007年5月にゴビ砂漠で発生した黄砂に対する RCTM, AD-Net,

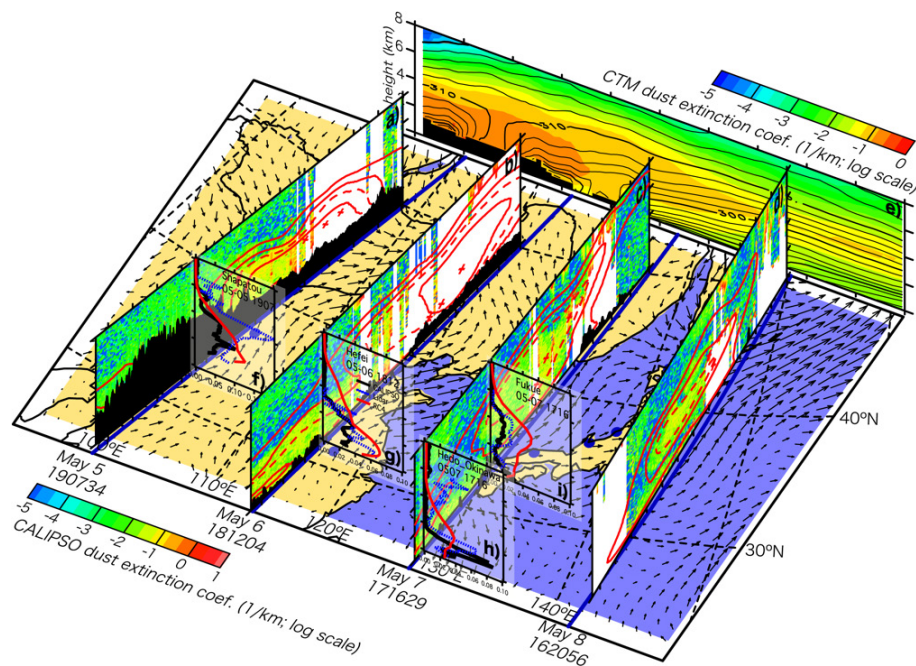


Fig. 1 3D analyses of CALIPSO, NIES AD-Net Lidar and RCTM regional chemical transport model (RCTM) (reproduced from Fig. 4 of Uno et al.¹⁰⁾). (a–d) Vertical cross-sections of dust extinction coefficient from CALIOP (color) and RCTM (red lines). (e) Longitudinal cross-section of dust extinction coefficient from RCTM. Inserted vertical profiles (f–i) show comparison of dust extinction coefficient among NIES AD-Net Lidar (broken blue lines), CALIOP (black lines) and RCTM (red lines).

^{†1)}AD-Net のライダー観測では観測した後方散乱係数から消散係数を推定している⁵⁾。一方、RCTM ではエアロゾルの質量濃度を予測する。RCTM の結果をライダー観測と定量的に比較するためには質量濃度を消散係数に変換する必要がある。このため、半経験・半理論的に質量消散断面積を求め消散係数を推定する方法（質量消散復元法）や OPAC (Optical Properties of Aerosols and Clouds) 等でリスト化された複素屈折率を用いてミー散乱理論により質量消散断面積、そして消散係数を計算する方法がとられている³⁾。後述のデータ同化でライダー観測をモデルに取り込む際も同じように質量濃度一消散係数間の変換が行われている。

CALIOP/CALIPSO を組み合わせた 3 次元空間解析（黄砂の輸送の経過を追うという意味では 4 次元時空間解析と呼べるかもしれない）の結果を示す。東アジアの地図上に立てられた緯度－高度断面は CALIOP/CALIPSO の観測結果（カラー）と RCTM の結果（赤線）を併せて示したもので、鉛直方向に 1,600–3,600 m の厚さを持った黄砂が 600–1,200 km の水平スケールで東進している様子と RCTM がその輸送を良く再現していることがわかる。また、その様子は AD-Net 各サイトで得られた観測結果ともよく一致している。モデル研究者にとって、計算機の中でシミュレートした黄砂や人為起源エアロゾルの分布や輸送過程をこのように 3 次的に比較・検討できたことは画期的であった。この地上・衛星ライダーと RCTM を使った研究は、さらに全球モデルも組み合わせることで、地球を 1 周して輸送される黄砂の発見につながった¹⁴⁾。

3. 季節変動，長期トレンドの解析

AD-Net は 3 地点の頃から考えれば 20 年以上の観測の歴史があり、CALIOP/CALIPSO は打ち上げから 15 年近くのデータの蓄積がある。この長期観測データを活かし、RCTM の結果とも組み合わせることで東アジアのエアロゾルの中長期的なトレンドや季節変動を解析した研究が行われている^{15, 16)}。Fig. 2 に AD-Net, CALIOP/CALIPSO および RCTM のシミュレーションから得られた球形粒子消散係数の季節変化を示す。縦軸（三角のシンボル）はスケールハイト、手前に向かう軸（丸のシンボル）はエアロゾル光学的厚さ（Aerosol Optical Thickness; AOT）である。RCTM の結果はライダー観測から得られた季節変化を概ね再現し、人為起源エアロゾルの輸送パターンの違いが高緯度地方（ここでは北京とソウル）と低緯度地方（ここでは辺戸）間に球形エアロゾル濃度の季節変動の差異を引き起こすことが示唆されている。

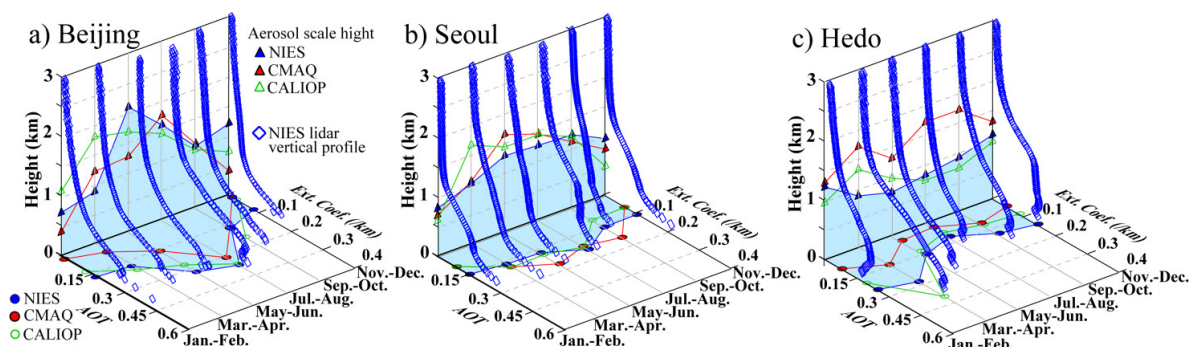


Fig. 2 Two-month-averaged vertical profiles of spherical extinction coefficients of NIES AD-Net Lidar observation (blue diamonds) (reproduced from Fig. 3 of Hara et al.¹⁶⁾). AOT in the horizontal plane (circles) and aerosol scale height in the vertical plane (triangles) based on NIES AD-Net Lidar (blue), CALIOP (green), and CMAQ RCTM (red).

4. エアロゾルデータ同化への応用

RCTM の結果がいろいろな角度から比較・検証され、モデル自体が精緻化されていく中で、数値気象予報と同じようにデータ同化¹²⁾によって観測データを RCTM に取り込む研究が行われるようになった。RCTM ではエアロゾルの放出源分布とその強度が予測精度を左右する重要な境界条件となることから、データ同化を応用して放出源の最適化を目指す研究（逆推計、逆解析と呼ばれる）も積極的に行われた。AD-Net は中国・韓国・日本に多数の観測地点をもっていること、エアロゾルの鉛直分布を定量的に得られること、球形粒子と非球形粒子を分離できることから、ライダー観測を用いた黄砂に対するデータ同化研究が進められた^{17, 18)}。Fig. 3 は、4 次元変分法を導入した RCTM に対し、AD-Net の観測データを同化した結果である。AD-Net の黄砂消散係数を同化することで黄砂の発生量分布・強度が最適化され（左図）、RCTM による黄砂予測の再現性が向上している（右図）。これは、ライダーデータを用いた、かつ黄砂シミュレ

¹²⁾統計的推定論を基礎とし、観測データと数値モデルの双方から引き出した情報を統合することで最適な場や条件を求める手法であり、数値天気予報等に用いられている。

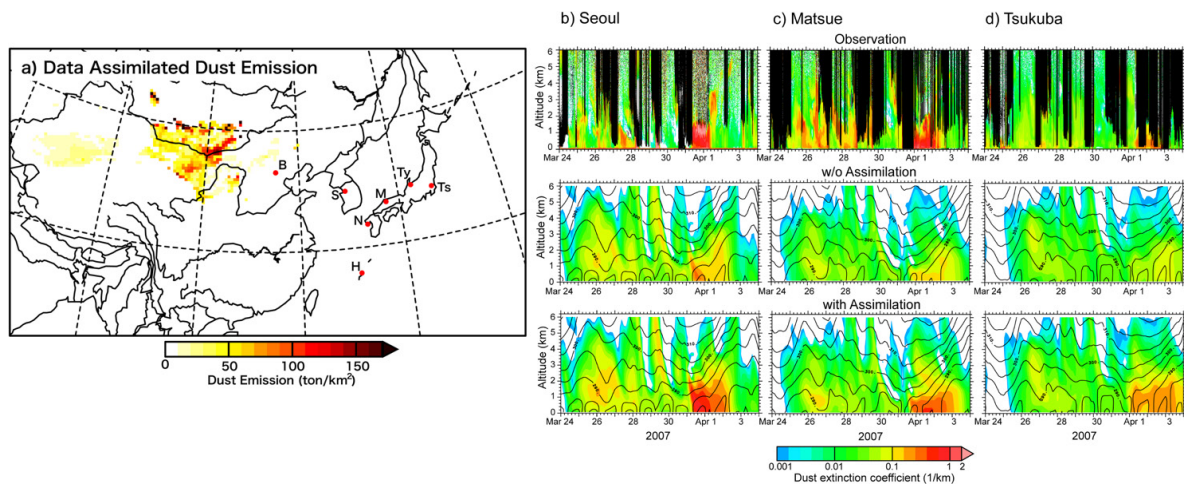


Fig. 3 (a) Horizontal distribution of assimilated dust emission from 20 March to 3 April 2007. Red circles denote NIES AD-Net Lidar observation sites (Tsukuba (Ts), Toyama (Ty), Matsue (M), Nagasaki (N), Hedo (H), Seoul (S), and Beijing (B)). Time-Height plots of dust extinction coefficients at (b) Seoul, (c) Matsue, and (d) Tsukuba. The upper, middle and lower rows show NIES AD-Net Lidar observations, modeled dust extinction coefficient without and with assimilation, respectively (reproduced from Figs. 1 and 3 of Yumimoto et al.¹⁸⁾).

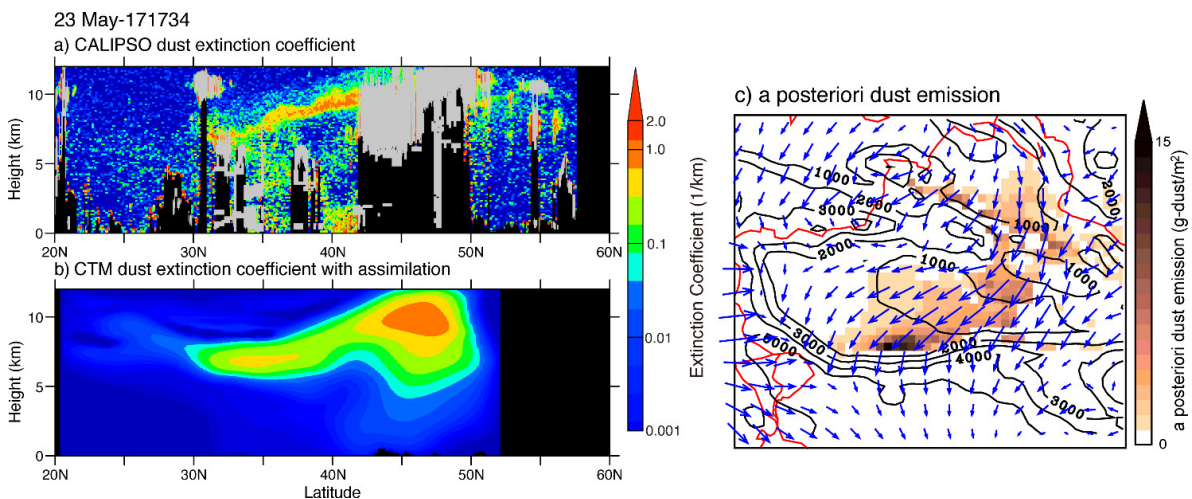


Fig. 4 Assimilation results with CALIOP extinction coefficient. (a–b) Vertical cross-sections of dust extinction coefficient from CALIOP and RC4 RCTM, respectively. (c) Horizontal distribution of assimilated dust emission over the Taklimakan Desert.

ションに対する世界で初めての同化研究成果であった。CALIOP/CALIPSO が打ち上げられると、AD-Net 同様にデータ同化への利用が図られた。Fig. 4 はタクラマカン砂漠起源の黄砂を対象とした CALIOP/CALIPSO データの同化結果である。タクラマカン砂漠起源の黄砂は高い高度を薄い層構造で輸送されることが知られており^{14, 19)}、上空から観測を行う CALIOP のデータを同化することで高度 7–10 km の黄砂層の再現ができています。地上・衛星によるライダー観測は、現在のエアロゾル同化で主に用いられるひまわり 8 号・9 号、MODIS やしきさい (GCOM-C) のようなイメージャーで観測された AOT と比べ、水平方向のカバー範囲では劣るものの (AD-Net のようにネットワークで補うことはできる)、エアロゾルの鉛直プロファイルを得ることができる。また、アクティブセンサーであるので、イメージャーによる観測が難しい夜間の観測が可能であることに加え、Fig. 4 で示したような AOT としては値が小さくイメージャーでは定量的な検出が困難なエアロゾルを捉えることもできる。ライダー観測を同化することによる大気環境予測の精度向上を目指した研究が行われており^{20, 21)}、イメージャー・ライダー双方の長所を活かし両者を複合して同化利用する研究も行われつつある。

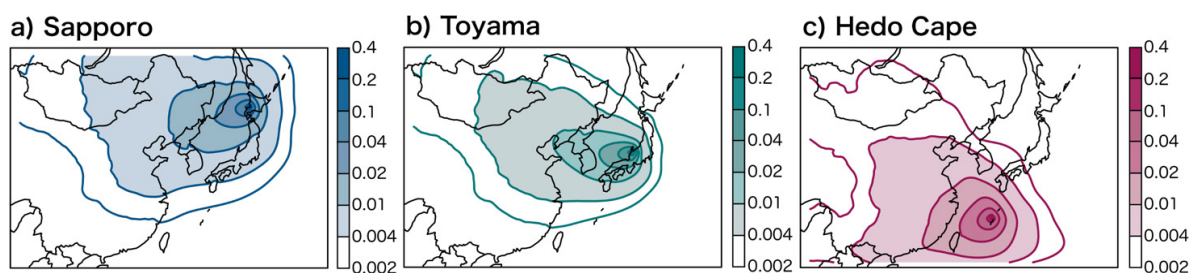


Fig. 5 Horizontal distribution of temporal and vertical averaged adjoint sensitivity for Spring 2006–2008 with respect to observation at (a) Sapporo, (b) Toyama and (c) Hedo Cape NIES AD-Net Lidar stations (reproduced from Fig. 2 of Yumimoto²³⁾).

データ同化は衛星や観測ネットワークの感度・インパクト調査に利用することができる^{22, 23)}。Fig. 5は4次元変分法を導入したRCTMを利用したAD-Netのうち札幌、富山、辺戸におけるエアロゾル重量濃度に対するアジョイント感度（どこからやってきた空気塊が対象地点の濃度にどのくらい影響を与えるか）の水平分布である。札幌は中国東北地方からロシアの森林火災の多い地域に加え、北京付近を起源とした空気塊を捉える機会があり、富山は感度の高い地域が北京・内陸部のゴビ砂漠へと伸び、黄砂から人為起源エアロゾルまでカバーしている。辺戸では、感度の高い領域が台湾・中国東岸と広く覆っており、中国からの越境輸送を広く捉えている。ただし、これらはデータ同化を通じてRCTMの予測に与える影響を定量化しようとしたものであり、黄砂や人為起源エアロゾルの越境輸送を捉える上で最適な配置を必ずしも意味していない点に注意が必要である。

5. おわりに

以上、領域化学輸送モデルとライダー観測を結びつけた研究について3つの観点から解説した。本稿では、AD-Netの標準解析で得られる球形・非球形粒子消散係数を用いた研究を多く紹介したが、国立環境研究所では多波長ラマン散乱ライダーや高スペクトル分解ライダー（HSRL）を用い、得られた光学特性からエアロゾル種をさらに分離・推定する手法の開発が進められている^{5, 24, 25, 26, 27)}。衛星搭載ライダーについては、近い将来、日欧共同地球衛星観測ミッションEarthCAREによってHSRLであるATLIDの打ち上げが予定されており、前述したエアロゾル種の詳細な分離・推定が計画されている²⁸⁾。発生源や化学組成からエアロゾル種を分類シミュレーションするRCTMとどのように“見え方・表現の仕方”が異なるのか、相互の比較とその先にあるデータ同化への応用が楽しみである。今後も、RCTMとライダー観測が研究の螺旋階段を共に登る関係であるように努力し続けたい。

謝 辞

本研究は科研費基盤研究（A）（JSPS Kakenhi JP22H00562）、環境研究総合推進費（5MF-2201）、JAXA 第3回地球観測研究公募およびCollaborative Research Program of the Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu Universityの支援を受けました。

引用文献

- 1) 九州大学・国立環境研究所, “東アジア域の黄砂・大気汚染物質分布予測, 化学天気予報システム CFORS,” <https://www-cfors.nies.go.jp/~cfors/index-j.html> (Accessed 2022.12.5).
- 2) 国立環境研究所, “大気汚染予測システム VENUS,” <https://venus.nies.go.jp> (Accessed 2022.12.5).
- 3) 鵜野伊津志 (編著), 弓本桂也, 板橋秀一 (共著), 大気環境モデリング, 森北出版 (2021).
- 4) 国立環境研究所, “Ad-net, the Asian dust and aerosol lidar observation network,” <https://www-lidar.nies.go.jp/AD-Net/> (Accessed 2022.12.5).
- 5) 清水 厚, “ミー散乱ライダーネットワークによる東アジア域対流圏エアロゾルのモニタリング,” レーザセンシング学会誌, **1** (3), 3–12 (2022).
- 6) M. Uematsu, A. Yoshikawa, H. Muraki, K. Arao, and I. Uno, “Transport of mineral and anthropogenic aerosols during a Kosa event over East Asia,” *J. Geophys. Res.*, **107** (D7), 4059 (2002).

- 7) I. Uno, G. R. Carmichael, D. G. Streets, Y. Tang, J. J. Yienger, S. Satake, Z. Wang, J.-H. Woo, S. Guttikunda, M. Uematsu, K. Matsumoto, H. Tanimoto, K. Yoshioka, and T. Iida, "Regional chemical weather forecasting system CFORS: Model descriptions and analysis of surface observations at Japanese island stations during the ACE-Asia experiment," *J. Geophys. Res.*, **108**, 8668 (2003).
- 8) N. Sugimoto, A. Shimizu, I. Matsui, I. Uno, K. Arao, X. Dong, S. Zhao, J. Zhou, and C.-H. Lee, "Study of Asian dust phenomena in 2001–2003 using a network of continuously operated polarization lidars," *Water Air Soil Pollut. Focus*, **5**, 145–157 (2005).
- 9) A. Shimizu, N. Sugimoto, I. Matsui, K. Arao, I. Uno, T. Murayama, N. Kagawa, K. Aoki, A. Uchiyama, and A. Yamazaki, "Continuous observations of Asian dust and other aerosols by polarization lidars in China and Japan during ACE-Asia," *J. Geophys. Res.*, **109**, D19S17 (2004).
- 10) I. Uno, K. Yumimoto, A. Shimizu, Y. Hara, N. Sugimoto, Z. Wang, Z. Liu, and D. M. Winker, "3D structure of Asian dust transport revealed by CALIPSO lidar and a 4DVAR dust model," *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L06803 (2008).
- 11) K. Yumimoto, K. Eguchi, I. Uno, T. Takemura, Z. Liu, A. Shimizu, and N. Sugimoto, "An elevated large-scale dust veil from the Taklimakan Desert: Intercontinental transport and three-dimensional structure as captured by CALIPSO and regional and global models," *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 8545–8558 (2009).
- 12) Y. Hara, K. Yumimoto, I. Uno, A. Shimizu, N. Sugimoto, Z. Liu, and D. M. Winker, "Asian dust outflow in the PBL and free atmosphere retrieved by NASA CALIPSO and an assimilated dust transport model," *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 1227–1239 (2009).
- 13) S. Itahashi, K. Yumimoto, I. Uno, K. Eguchi, T. Takemura, Y. Hara, A. Shimizu, N. Sugimoto, and Z. Liu, "Structure of dust and air pollutant outflow over East Asia in the spring," *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L20806 (2010).
- 14) I. Uno, K. Eguchi, K. Yumimoto, T. Takemura, A. Shimizu, M. Uematsu, Z. Liu, Z. Wang, Y. Hara, and N. Sugimoto, "Asian dust transported one full circuit around the globe," *Nature Geosci.*, **2**, 557–560 (2009).
- 15) 原由香里, 鵜野伊津志, 清水 厚, 杉本伸夫, 松井一郎, 大原利真, Z. Wang, and S. Yoon, "東アジアにおける人為起源エアロゾルによる光学的厚さの近年のトレンドの解析," *天気*, **59** (8), 702–707 (2012).
- 16) Y. Hara, I. Uno, A. Shimizu, N. Sugimoto, I. Matsui, K. Yumimoto, J. Kurokawa, T. Ohara, and Z. Liu, "Seasonal characteristics of spherical aerosol distribution in eastern Asia: Integrated analysis using ground/space-based lidars and a chemical transport model," *Sci. Online Lett. Atmos.*, **7**, 121–124 (2011).
- 17) K. Yumimoto, I. Uno, N. Sugimoto, A. Shimizu, and S. Satake, "Adjoint inverse modeling of dust emission and transport over East Asia," *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L08806 (2007).
- 18) K. Yumimoto, I. Uno, N. Sugimoto, A. Shimizu, Z. Liu, and D. M. Winker, "Adjoint inversion modeling of Asian dust emission using lidar observations," *Atmos. Chem. Phys.*, **8** (11), 2869–2884 (2008).
- 19) K. Yumimoto, K. Eguchi, K. I. Uno, T. Takemura, Z. Liu, A. Shimizu, and N. Sugimoto, "An elevated large-scale dust veil from the Taklimakan Desert: Intercontinental transport and three-dimensional structure as captured by CALIPSO and regional and global models," *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 8545–8558 (2009).
- 20) X. Cheng, Y. Liu, X. Xu, W. You, Z. Zang, L. Gao, Y. Chen, D. Su, and P. Yan, "Lidar data assimilation method based on CRTM and WRF-Chem models and its application in PM_{2.5} forecasts in Beijing," *Sci. Total Environ.*, **682**, 541–552 (2019).
- 21) H. Ye, X. Pan, W. You, X. Zhu, Z. Zang, D. Wang, X. Zhang, Y. Hu, and S. Jin, "Impact of CALIPSO profile data assimilation on 3-D aerosol improvement in a size-resolved aerosol model," *Atmos. Res.*, **264**, 105877 (2021).
- 22) H. Ye, W. You, Z. Zang, X. Pan, D. Wang, N. Zhou, Y. Hu, Y. Liang, and P. Yan, "Observing system simulation experiment (OSSE)-quantitative evaluation of lidar observation networks to improve 3D aerosol forecasting in China," *Atmos. Res.*, **270**, 106069 (2022).
- 23) 弓本桂也, "データ同化手法を応用した感度実験," 大気化学研究会ニュースレター, No. 22, <https://jpsac.org/wordpress/wp-content/uploads/2017/05/NL22.pdf> (Accessed 2022.12.5).
- 24) 杉本伸夫, "エアロゾル計測用ライダーシステム," *レーザセンシング学会誌*, **1** (1), 14–28 (2020).
- 25) T. Nishizawa, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, Y. Hara, U. Itsushi, K. Yasunaga, R. Kudo, and S.-W. Kim, "Ground-based network observation using Mie-Raman lidars and multi-wave-length Raman lidars and algorithm to retrieve distributions of aerosol components," *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, **188**, 79–93 (2017).
- 26) T. Nishizawa, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, B. Tatarov, and H. Okamoto, "Algorithm to retrieve aerosol optical properties from high-spectral-resolution lidar and polarization Mie-scattering lidar Measurements," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **46** (12), 4094–4103 (2008).
- 27) Y. Hara, T. Nishizawa, N. Sugimoto, K. Osada, K. Yumimoto, I. Uno, R. Kudo, and H. Ishimoto, "Retrieval of aerosol components using multi-wavelength Mie-Raman lidar and comparison with ground aerosol sampling," *Remote Sensing*, **10** (6), 937 (2018).
- 28) 西澤智明, 神 慶孝, 石井昌憲, 岡本 創, "衛星搭載高スペクトル分解ライダーによるエアロゾル・雲の全球観測," *レーザセンシング学会誌*, **1** (2), 55–60 (2020).

弓本桂也

九州大学応用力学研究所教授。2008年九州大学大学院総合理工学府より博士（工学）の学位を取得。2009年日本学術振興会特別研究員（PD），2010年ハーバード大学理工学部客員研究員，2011年気象庁気象研究所研究官，2015年同主任研究官，2017年九州大学応用力学研究所准教授，2021年より現職。

特集 ライダーデータ利用 I (エアロゾル・雲)

ドップラーライダーを活用した
大気汚染物質の動態・拡散過程の研究高島 久洋^{*1}¹ 福岡大学理学部 (〒814-0022 福岡市城南区七隈 8-19-1)

Pollutant diffusion/variations using 3-D coherent Doppler lidar measurement

Hisahiro Takashima^{*1}¹ Faculty of Science, Fukuoka University,
8-19-1 Nanakuma, Jounan-ku, Fukuoka 814-0180, Japan

(Received November 30, 2022; revised December 14, 2022; accepted December 19, 2022)

The Doppler lidar is a powerful tool for direct observation of 3-D wind speed/direction. Combining observations of trace gas/air pollutants with the Doppler lidar allows us to understand the finer diffusion process of air pollutants. In this report, we present a study of pollutant diffusion over the Fukuoka urban areas using the MAX-DOAS trace gas profile and ground-based gas/aerosol observations combined with Doppler lidar wind observations.

キーワード: ドップラーライダー, 大気汚染物質拡散, 二酸化窒素, MAX-DOAS

Key Words: Doppler lidar, diffusion of air pollutant, nitrogen dioxide, MAX-DOAS

1. はじめに

ドップラーライダーは大気中に浮遊している粒子（主にエアロゾル粒子）にレーザー光を照射し、その周波数シフトから、粒子の動き、すなわち大気の流れを可視化できる観測装置である。大気境界層内の気象現象の諸過程、乱流、大気汚染物質の拡散過程等の研究に広く利用されている。福岡都市圏にある福岡大学では『福岡から診る大気環境研究所』を立ち上げるなど、国内最大級の大気エアロゾル・ガス観測拠点を構築してきた。本稿では、3D コヒーレントドップラーライダーによる風観測と大気微量成分観測を組み合わせで実施している大気汚染物質の動態・拡散過程研究について紹介する。

2. 福岡都市圏でのドップラーライダー観測、大気微量成分観測

福岡市は人口 160 万人を超える日本最西端の大都市である。中国・韓国からの越境大気汚染の影響を受けるとともに、福岡市自身から排出される大気汚染物質と越境大気汚染物質が混合する大気化学的に興味深い場所に位置する。福岡市は首都圏のように周辺に大都市がないほか、福岡都市圏での人為大気汚染物質の発生源が都市中心部（天神周辺）に集中している。さらに北側は海に面した平野（福岡平野）が広がり、海陸風循環など支配している気象場も単純であることから、大気汚染物質の輸送・拡散過程を研究する上で適した場所といえる^{1,2)}。福岡大学では、『福岡から診る大気環境研究所』を設置し、学外の研究所や大学等と連携をはかりながら、大気中のエアロゾル組成・ガス成分等の様々な観測を実施し、大気観測の基盤を構築してきた。

ドップラーライダーについては、2016 年 11 月末に北海道大学と共同で三菱電機製 3-D コヒーレントドッ

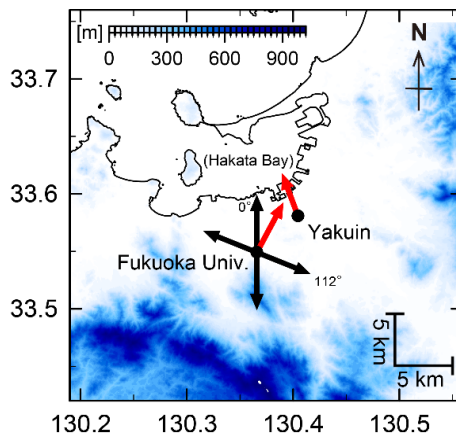


Fig. 1 Locations of observatories (*Fukuoka University* and *Yakuin*). Black arrows indicate the azimuth directions for RHI scanning of 3D-CDL (0° and 112°). Red arrows indicate the lines of sight of MAX-DOAS. Color shows altitude.



Fig. 2 Photograph of the 3D-CDL instrument installed at top of building A of Fukuoka University.

Table 1 Technical specifications of 3-D coherent Doppler lidar system.

Parameter	Specification
Source of light	DFB-Er doped fiber laser
Wavelength	1.54 μm
Pulse energy	1.0 mJ/pulse
Pulse repetition rate	4000 Hz (average power: 4W)
Pulse width	200 ns
Telescope diameter (effective)	120 mm
Range resolution	60 m
Measurable distance	up to 12 km (200 range bins)

プラーライダー（以下 3D-CDL）を福岡大学 A 棟屋上（ 33.549°N , 130.366°E ）に設置し（Fig. 1），福岡平野内の風直接観測を開始した．設置した 3D-CDL の外観を Fig. 2 に，3D-CDL の詳細を Table 1 に示す．観測波長はアイセーフ帯 $1.54 \mu\text{m}$ ，3D-CDL は風の 3 次元分布を直接観測することが可能であり，とくに都市域では大気汚染物質の拡散・輸送・混合過程，さらに微細な気象現象の可視化に利用できる³⁾．Fig. 3 に花火の噴煙の拡散事例を示す．この事例は，観測地点の北側に見られる花火の噴煙が北風に伴って南方向に流れなが

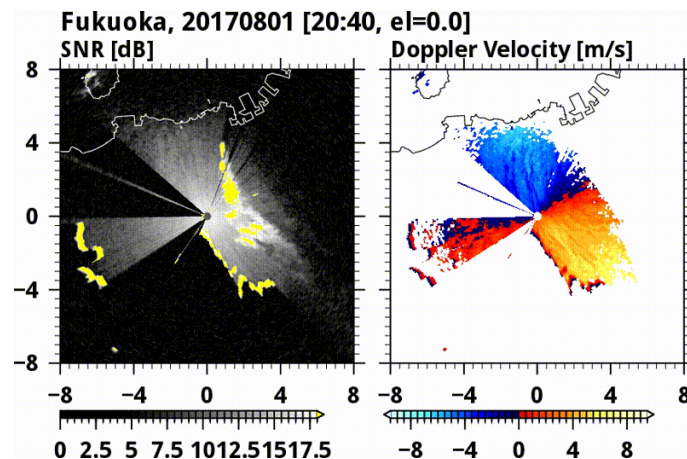


Fig. 3 Horizontal sections of (left) SNR, (right) radial velocity for PPI (Plan Position Indicator) scans with an elevation angle of 0° observed on 1 August 2017 by Doppler lidar in Fukuoka at 20:40 JST.



Fig. 4 Photographs of the compact MAX-DOAS instrument installed at Yakuin, Fukuoka.

ら拡散する様子をとりえている。観測地点の北側では北風がストリーク構造をとまっていることが確認できるほか、観測地点の南東側では、観測地点南側の山（油山；標高 597 m）を迂回するように風が南向きから南東向きに変化している様子も確認できる。このように 3D-CDL は大気拡散過程の可視化に有用な観測機器である。

次に、福岡にて大気微量成分の鉛直分布観測に利用している MAX-DOAS (Multi Axis Differential Optical Absorption Spectroscopy) 法（複数仰角における太陽散乱光分光計測・差分吸収測定法）について述べる。MAX-DOAS 法は、紫外域から可視域の太陽散乱光を地上から複数の低い仰角で測定し、対流圏中の微量ガスやエアロゾルの鉛直分布・鉛直カラム濃度を連続的にリモートセンシング観測する手法である^{4,5)}。二酸化窒素 (NO_2) やエアロゾル、ホルムアルデヒド (HCHO)、二酸化硫黄 (SO_2)、亜硝酸 (HONO) などの大気微量成分に加えて、一酸化ヨウ素 (IO) や一酸化臭素 (BrO) などのハロゲン物質⁶⁾の鉛直分布の観測に利用されている。比較的安価な装置で複数の大気成分を同時に連続観測することができ⁷⁾、大気汚染物質、大気化学過程の研究に広く利用されている。福岡大学では 2012 年に 18 号館屋上 (33.550°N , 130.364°E) に装置を設置し、福岡都市圏の大気汚染物質の観測・人工衛星観測データの検証等に利用してきた¹⁾。またモバイル観測用の小型装置の開発を行い (Fig. 4 に小型観測装置の 1 例を示す)、自動車に搭載して福岡都市圏の NO_2 の空間分布把握や、都市圏からの窒素酸化物排出量推定に利用してきた (Fig. 5)⁸⁾。また次節で紹介するように、福岡平野内の複数地点で NO_2 鉛直分布の同時観測を行い、3D-CDL による風観測と組み合わせることで、福岡都市圏から排出された大気汚染物質の拡散過程を明らかにするための研究に利用してきた。

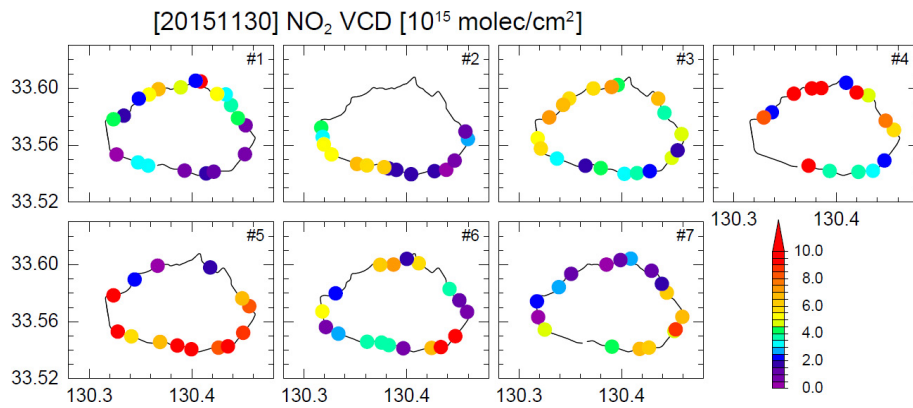


Fig. 5 Tropospheric NO_2 vertical column densities (VCDs) ($\text{molecules}/\text{cm}^2$) observed by Car MAX-DOAS on the Fukuoka Urban Expressway in Fukuoka, along the closed circular route, on 30 November 2015 (7 circles from 8 am to 3 pm; #1–#7) (Yamaguchi et al., 2016)⁸⁾.

そのほかに福岡大学では、ライダーやシーロメータ、スカイラジオメータなどのリモートセンシング観測、エアロゾルの様々な組成の観測、ガス観測（一酸化炭素、オゾン、窒素酸化物、二酸化硫黄など）を学外の研究機関とも連携しながら実施している。

3. 大気汚染物質をトレーサーとした大気拡散過程の観測的研究

大気汚染物質の拡散において、汚染物質の鉛直分布やその要因を明らかにすることは重要である。ここでは、まず二酸化窒素（ NO_2 ）の鉛直分布観測と 3D-CDL を組み合わせた研究事例について紹介する。 NO_2 は短寿命大気汚染物質で、対流圏下層での寿命は最大 1 日程度、そのため発生源付近で濃度が高く、大気汚染物質の輸送や拡散過程を調べる際にトレーサーとして利用が可能である¹⁾。 NO_2 の主な人為起源は化石燃料の燃焼と考えられ、福岡都市圏では自動車やバス等の排気ガスが主要な排出源と考えられる。

Fig. 6 に 2018 年 11 月 29 日に、都市部の薬院と福岡大学にて、MAX-DOAS 法で観測した NO_2 の時間-高度断面を示す。なお Fig. 1 に薬院と福岡大学の場所、MAX-DOAS の視線方向を示している。薬院は都市部

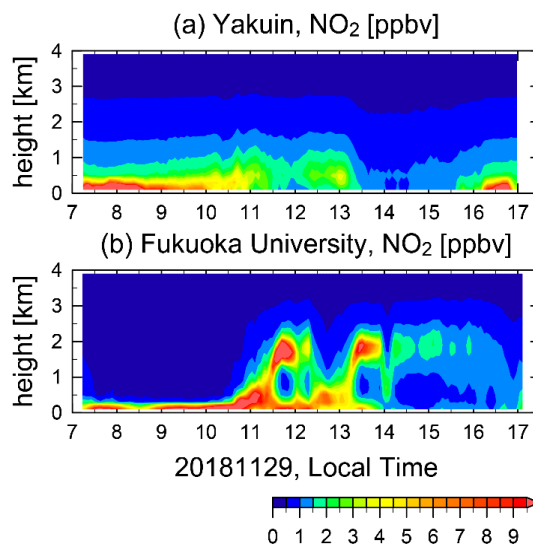


Fig. 6 Time-height section of NO_2 volume mixing ratio (ppbv) observed by MAX-DOAS at (a) Yakuin and (b) Fukuoka University on 29 November 2018 (Ueki et al., 2021)⁹⁾.

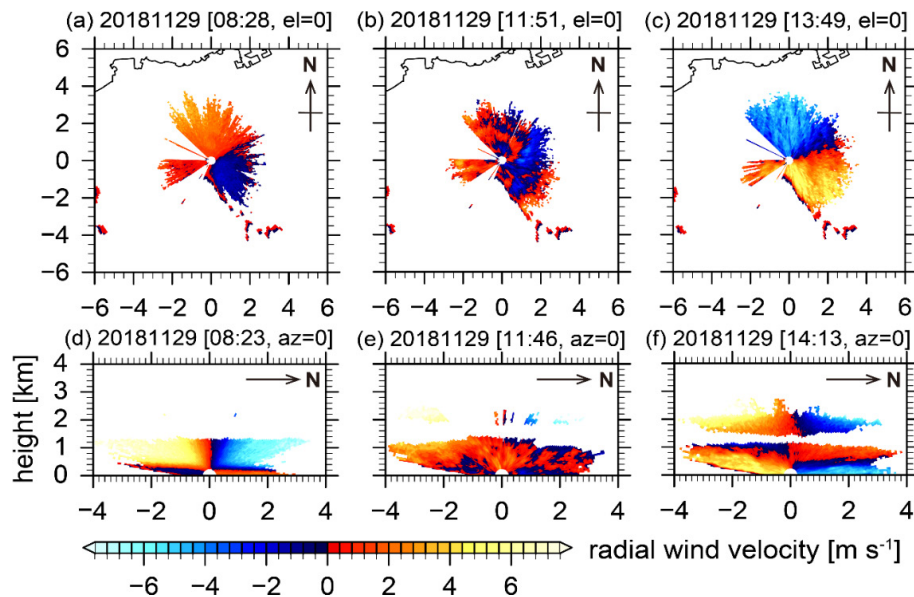


Fig. 7 Horizontal sections of radial wind velocity (m s^{-1}) for PPI scan with elevation angle of 0° at 8:28, 11:51, and 13:49 (top panels) and north-south height sections of radial wind velocity (m s^{-1}) for RHI (Range Height Indicator) with azimuth direction of 0° at 8:23, 11:46, and 14:13 (bottom panels) observed on 29 November 2018 by 3D-CDL in Fukuoka. For the top panels, axes show horizontal distance (km) from 3D-CDL. For bottom panels, the horizontal axis is distance (km) from 3D-CDL. The vertical axis shows height (km). Warm colors represent flow away from 3D-CDL. Cold colors represent flow toward it (Ueki et al., 2021)⁹⁾.

に位置しているが、海方向を観測している。いっぽう福岡大学は海から内陸側約5 kmと離れているが、都市中心部上空の大気を観測している。午前中は地表付近で濃度が高く、特に薬院では、午前10時ころまで高濃度である。都市部上空を見ると (Fig. 6b), 10時半ごろから、より上空での濃度上昇がみられる。その後、薬院では13:30頃以降に地表付近で低濃度になり、30分ほど遅れて福岡大学の観測も低濃度になった。3D-CDLの風観測を合わせてみると (Fig. 7), 朝は弱い海方向の風が地表200–300 mの層内で確認できる (陸風)。それより上空の風向きは下層と逆で海から陸向きである。昼頃になると水平風速は弱まり、ペナールセル状の構造が確認できる (Fig. 7b, e)。さらに午後になり、海側から強い風 (海風) が流入している (ストリーク構造を伴っている)。朝は自動車などから排出された高濃度 NO_2 気塊が地表近傍に捕捉されているが、その後の鉛直混合により徐々に上空に拡散、その後、海風の流入により、高濃度気塊は南側に流れるとともに、海上の清浄な空気が流入したと考えられる。なお本事例のように海風によって高濃度空気塊が水平・鉛直輸送 (拡散) する様子は、1年を通して観測された⁹⁾。3D-CDLは風向風速だけでなく、微細な境界層構造を観測できるので、この事例のように大気汚染物質の拡散研究に極めて有効である。

ドップラーライダーを利用して海風前線の構造について調べた研究はこれまでいくつかある¹⁰⁾。海陸風循環の枠組みで、局地的な前線構造が有り、前線面が通過する際に地上大気組成がわずかに数分間の間に急変する事例がしばしば福岡でも観測されている。3D-CDLで観測するSN比はエアロゾル量にほぼ比例し、局所前線面の後方では近傍で排出されたエアロゾルが捕捉されてエアロゾル濃度が比較的高くなることが予想されるため、SN比の観測からも前線を探すことができる。Fig. 8に福岡平野で観測された海風前線の事例を示す (SN比と視線速度の水平断面および鉛直断面)。Fig. 8aでは南西から北東方向に前線面 (収束帯) がみられ、その前面 (北西側) でSN比が高い (地表付近でエアロゾル濃度が高い)。鉛直断面図 (Fig. 8b左) から前線の鉛直構造が確認できる。前線は南東方向に移動し、この事例では正午過ぎに福岡大学を通過した。通過時に、福岡大学での地表のエアロゾル濃度だけでなく、ブラックカーボン、一酸化炭素 (CO)、二酸化硫黄 (SO_2) についても同じタイミングで短時間での増加が観測された (Fig. 9)。なおこの事例では変化が見られなかったが前線通過時にオゾン (O_3) 濃度の減少もしばしば観測されている¹¹⁾。この事例で

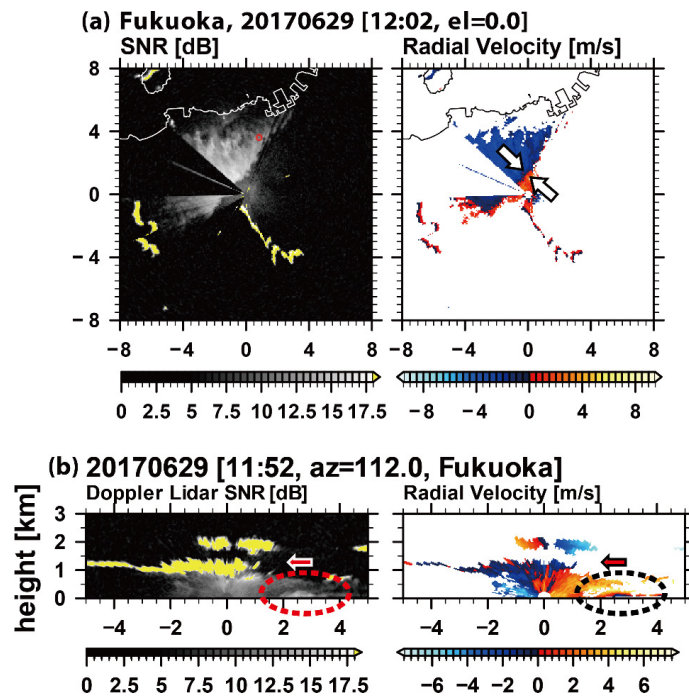


Fig. 8 (Left) SNR and (right) radial velocity for (a) PPI scan with elevation angle of 0° / (b) RHI scan with azimuth direction of 112° observed on 29 Jun 2017 by the Doppler lidar at Fukuoka during local front passage (Takashima et al., 2019)¹¹⁾.

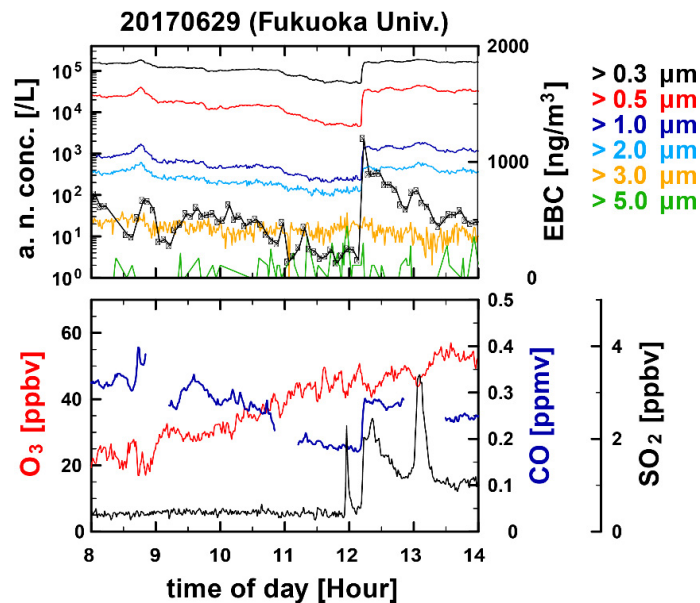


Fig. 9 Time series of aerosol, equivalent black carbon, ozone, carbon monoxide, sulfur dioxide observed in Fukuoka on 29 Jun 2017 (Takashima et al., 2019)¹¹⁾.

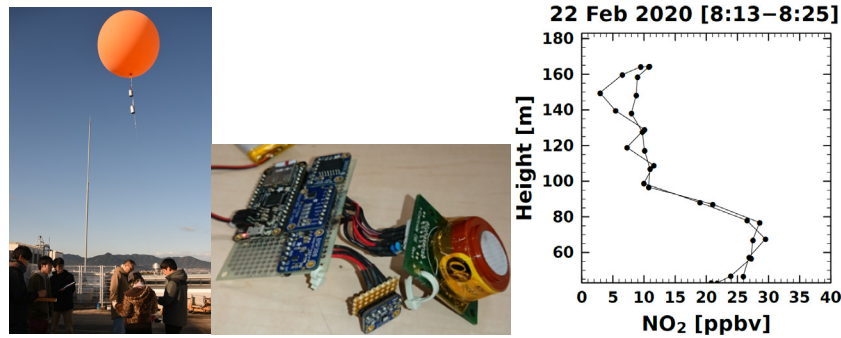


Fig. 10 (left) Photograph of vertical profile measurement using electrochemical sensor (middle) photograph of the electrochemical sensor unit (right) vertical profile of NO₂ observed at Fukuoka University on 22 February 2020.

は前線の深さが 300–400 m 程度と浅く、また前線面通過時の大気汚染物質濃度の変化が比較的大きい事例であった。いくつかの海風前線の福岡平野の事例を解析したところ、前線が鉛直的に浅い方が地上濃度変動で変化が大きい傾向がみられるようである。

さらに直接観測から拡散過程を明らかにするため、3D-CDL, MAX-DOAS, 地上観測に加えて Electrochemical センサと呼ばれる小型センサを用いて大気汚染物質の鉛直分布観測を行う研究も実施している (Fig. 10). 係留気球に気象センサとガス成分センサ (CO や NO₂) を搭載し、鉛直分布測定を行う。Electrochemical センサは安価でありまた省電力でもあり近年国内外で利用されるようになった。多地点での大気汚染物質の面的な動態観測などにも利用されている。このセンサは応答速度が速いという特徴があるので、鉛直分布観測に利用可能である。Fig. 10 に NO₂ 鉛直分布の事例を示す。早朝に地表近傍で濃度が高く、それよりも上空で濃度が低く、明瞭な境界が存在していることがわかる。この例では 3D-CDL の境界層構造の観測と MAX-DOAS NO₂ 鉛直分布観測と合わせて解析を行っている。

4. まとめ

福岡都市圏にて 3-D コヒーレントドップラーライダーによる風観測と大気微量成分観測を実施し、大気汚染物質の拡散過程に関する研究を行っている。太陽散乱光を利用した MAX-DOAS 法と呼ばれるリモートセンシング法による二酸化窒素 (NO₂) の鉛直分布を福岡都市圏の 2 地点で実施し、都市部中心で排出された NO₂ が水平・鉛直方向に拡散・輸送される様子の可視化に成功した。また局地前線通過にともない、地表大気エアロゾル・ガス成分がわずか数分間という短時間で急変動する事例について、局地前線の水平鉛直構造の観測と組み合わせて明らかにした研究を紹介した。大気環境を理解するための大気汚染物質の観測手法、数値計算の高度化が進み、観測、モデルともに、より高時間・高空間分解能で理解が進むようになってきている。たとえば人工衛星観測については、TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument) 衛星センサの分解能は水平分解 5 km にまで向上し、さらに GEMS (Geostationary Environmental Monitoring Spectrometer) など静止大気環境衛星により、時間的に連続した観測が行われるようになってきた。衛星と地上観測、モデル結果のすり合わせにより理解は少しずつ前進しているが、複雑な発生源をもつ都市圏においては、水平・鉛直拡散過程の理解はまだ発展途上段階と言える。その際、ドップラーライダーは大気境界層の構造と風観測を同時に行うことができ、衛星観測と地上観測とモデルをつなぐうえで極めて強力なツールとなる。紹介した短寿命大気微量成分を利用したドップラーライダーとの複合観測による観測は、今後の大気環境を理解する上で必要不可欠な研究手法といえよう。福岡という好立地な場所において、これまで築いてきた観測基盤に強力な観測ツールが追加された。今後も、越境大気汚染、都市大気汚染、大気環境、大気化学の知見向上への貢献が期待される。

謝 辞

福岡大学におけるドップラーライダー風観測は、藤吉康志北海道大学名誉教授の協力のもと実施している。

引用文献

- 1) H. Takashima, Y. Kanaya, and H. Irie, "Spatiotemporal inhomogeneity in NO₂ over Fukuoka observed by ground-based MAX-DOAS," *Atmos Environ.*, **100**, 117–123 (2015).
- 2) K. Hara, H. Takashima, A. Yoshino, A. Takami, C. Nishita-Hara, Y. Fujiyoshi, and M. Hayashi, "Seasonal variations of diurnal cycles of aerosols and gases in the Fukuoka Plain, Japan: Effects of local meteorology and atmospheric chemistry," *Atmos Environ.*, **289** (2022).
- 3) 藤吉康志, "ドップラーライダーによる流れの観測と物質輸送," *ながれ: 日本流体力学会誌*, **32**, 301–306 (2013).
- 4) Y. Kanaya, H. Irie, H. Takashima, H. Iwabuchi, H. Akimoto, K. Sudo, M. Gu, J. Chong, Y. J. Kim, H. Lee *et al.*, "Long-term MAX-DOAS network observations of NO₂ in Russia and Asia (MADRAS) during the period 2007–2012: instrumentation, elucidation of climatology, and comparisons with OMI satellite observations and global model simulations," *Atmos Chem Phys.*, **14**, 7909–7927 (2014).
- 5) H. Irie, H. Takashima, Y. Kanaya, K. F. Boersma, L. Gast, F. Wittrock, D. Brunner, Y. Zhou, and M. Van Roozendael, "Eight-component retrievals from ground-based MAX-DOAS observations," *Atmos Meas Tech.*, **4**, 1027–1044 (2011).
- 6) H. Takashima, Y. Kanaya, S. Kato, M. M. Friedrich, M. Van Roozendael, F. Taketani, T. Miyakawa, Y. Komazaki, C. A. Cuevas, A. Saiz-Lopez *et al.*, "Full latitudinal marine atmospheric measurements of iodine monoxide," *Atmos Chem Phys.*, **22**, 4005–4018 (2022).
- 7) G. Hönninger, C. von Friedeburg, and U. Platt, "Multi axis differential optical absorption spectroscopy (MAX-DOAS)," *Atmos Chem Phys.*, **4**, 231–254 (2004).
- 8) 山口秀芳, 高島久洋, 丸山勇亮, "自動車搭載型装置を用いた MAX-DOAS 法による分光観測: 福岡都市圏の二酸化窒素 (NO₂) の時空間不均質性," *大気環境学会誌*, **51**, 238–244 (2016).
- 9) H. Ueki, H. Takashima, and M. M. Friedrich, "Spatiotemporal Variations of NO₂ over Fukuoka Japan, Observed by Multiple MAX-DOAS and 3-D Coherent Doppler Lidar," *Sola*, **17**, 69–73 (2021).
- 10) H. Iwai, Y. Murayama, S. Ishii, K. Mizutani, Y. Ohno, and T. Hashiguchi, "Strong Updraft at a Sea-Breeze Front and Associated Vertical Transport of Near-Surface Dense Aerosol Observed by Doppler Lidar and Ceilometer," *Bound-Lay Meteorol.*, **141**, 117–142 (2011).
- 11) H. Takashima, K. Hara, C. Nishita-Hara, Y. Fujiyoshi, K. Shiraishi, M. Hayashi, A. Yoshino, A. Takami, and A. Yamazaki, "Short-term variation in atmospheric constituents associated with local front passage observed by a 3-D coherent Doppler lidar and in-situ aerosol/gas measurements," *Atmos Environ-X*, **3**, 100043 (2019).

高島久洋

福岡大学理学部・地球圏科学科, 海洋研究開発機構 (JAMSTEC)・地球環境部門地球表層システム研究センター所属。都市大気質に関する研究や海洋上の大気化学過程に関する研究等に従事。所属学会は日本大気化学会, 日本気象学会等。

特集 ライダーデータ利用 I (エアロゾル・雲)

桜島火山に設置されたライダーによる
火山噴出物の観測中道 治久^{*1}¹ 京都大学防災研究所附属火山活動研究センター
(〒891-1419 鹿児島県鹿児島市桜島横山町 1722-19)

Lidar observations of eruptive products of the Sakurajima volcano

Haruhisa Nakamichi^{*1}¹ Sakurajima Volcano Research Center, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University,
1722-19 Sakurajima-yokoyama-cho, Kagoshima 891-1419

(Received November 15, 2022; revised December 28, 2022; accepted January 13, 2023)

Two lidar instruments were installed at the Sakurajima volcano at the end of November 2014. These Sakurajima lidar instruments were the first to specifically observe the eruptive products of this volcano in Japan. The Sakurajima volcano is one of the most active volcanoes in the world and is in the best location for observing eruptive products. Volcanic ash is the most fine-grain of eruptive products with the particles size of atmospheric aerosols. The lidar instruments can observe such fine volcanic ash. Small eruptions, unreported by the Japan Meteorological Agency, can be detected by the lidar instruments set up at the Sakurajima volcano. Large volcanic eruptions are a concern in Sakurajima Island, during which prevailing westerly winds could disperse volcanic ash to the Japanese Islands. Therefore, this ash is expected to be observed using lidar instruments in the Japanese Islands.

キーワード：ライダー，桜島火山，火山噴火，火山噴出物，火山灰

Key Words: Lidar, Sakurajima volcano, eruption, eruptive products, volcanic ash

1. はじめに

火山噴火によって火口から放出される噴出物は、火山灰、火山レキと火山岩塊といった火山碎屑物と火山ガスがある。これらのうち、最も細粒の火山碎屑物は火山灰である。Fig. 1 に大気エアロゾルと火山灰の粒径毎の体積分率を示す¹⁾。細粒の火山灰の粒径 0.1~50 μm は粗大・蓄積モードのエアロゾルに相当する。本解説ではミー散乱ライダーについて扱うが、レーザー光の波長 (0.5 μm および 1 μm) は細粒火山灰の粒径に近いので、この粒径の火山灰に対する感度が高い。火山噴火をモニタリングするためには火山灰を連続かつ継続して採取するか観測する必要がある。そこで、桜島などの噴火が頻発する火山において自動火山灰採取装置²⁾および光学式ディストロメータ³⁾を設置して火山灰の採取および観測が行われている。しかし、これらの方法では粒径 250 μm 以上の粗粒火山灰しか捉えることができない。火山灰の粒径が小さいほど遠方まで火山灰が拡散する⁴⁾ことから、大気中の火山灰をモニタリングするには細粒火山灰の把握が必要である。そこで、ライダーを用いることで細粒火山灰の把握ができる。

大気中の火山灰を把握することは火山噴火そのものを監視することだけでなく、航空路の安全確保といった実用的な必要性がある。航空機のジェットエンジンが火山灰を吸い込むと、火山灰のガラス成分がエンジ

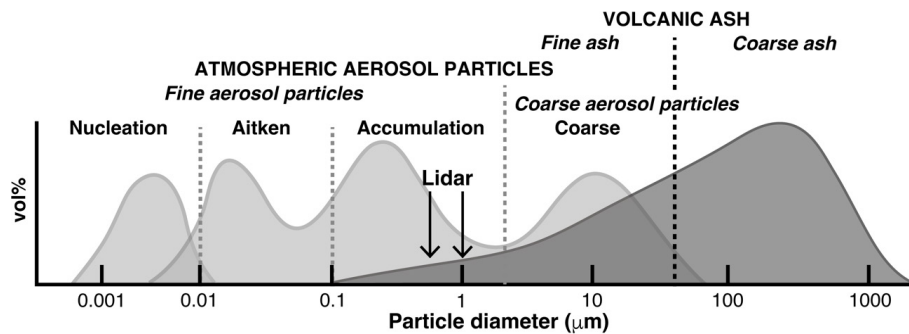


Fig. 1 Particle size distributions of atmospheric aerosol (light gray) and volcanic ash (dark gray). This figure is modified based on the original figure of Durant et al. (2010)¹⁾.

ン内で融解し、エンジンのブレードに火山灰が付着し冷却孔を塞ぐため、エンジンが過熱され、推進力が低下してエンジン停止が起こる。実際に、インドネシアのジャワ島のガルングン火山の1982年噴火において、マレーシア発、オーストラリア行きのボーイング747型機の4基のジェットエンジンが12分停止した。また、リダウト火山の1989年噴火において、アラスカ上空にてボーイング747型機の4基のジェットエンジンが8分停止した⁵⁾。そのため、火山灰の航空路への影響を監視する国際的な仕組みが1990年代に構築され、世界の9箇所の気象監視機関に航空路火山灰情報センター (Volcanic Ash Advisory Center; VAAC) が置かれ、噴火と火山灰に関する情報が発出されている。そのうちの 하나가気象庁に設置されており、東京VAACと呼ばれる⁶⁾。火山噴火によって航空路が大規模に閉鎖された事例として、2010年4月14日のアイスランドのエイヤフィヤトラヨークトル火山の噴火がある。この噴火の噴煙は海拔9 km以上に達し、比較的規模の大きい噴火であったため、火山灰が北西ヨーロッパ全土に拡散した。そのため、翌日からヨーロッパ上空の大部分の空域が閉鎖され、大規模な航空混乱が起こった。飛行禁止区域の設定と解除のための大気中の火山灰濃度基準があり、ヨーロッパのライダー観測網 (European Aerosol Research Lidar NETwork, EARLINET) が火山灰濃度推定に活用された⁷⁾。このように大気エアロゾル観測のために構築されたライダー観測網は火山灰のモニタリングに活用されている。一方、噴火している火山においては火山観測のためにライダーを導入して火山灰モニタリングを行う試みが日本の桜島で始まっている。

本稿では、日本で最も噴火が頻発しており、アクセスが比較的良好な桜島における火山観測専用のライダーによる観測の概要と、繰り返し微小噴火の観測事例について述べる。そして、最新の研究事例である火山灰とエアロゾルの季節変動について簡単に述べ、最後に桜島において懸念されている大規模噴火に対するライダー観測網を用いた広域の火山灰モニタリングの可能性について述べる。

2. 桜島におけるライダー観測の概要

桜島は鹿児島県鹿児島市に所在する火山 (Fig. 2) であり、1955年から現在まで噴火が頻繁に発生している。そのため、桜島において火山研究のための様々な調査および観測が行われている。観測の一環として、京都大学防災研究所 (防災研) は噴火の噴煙に含まれる細粒火山灰を観測するために2014年11月末に桜島に2台のミー散乱ライダーを設置して連続観測を開始した。2台のライダー (桜島ライダー) は防災研の施設である桜島火山観測所 (SVO, 31.590°N, 130.601°E) と黒神観測室 (KUR, 31.584°N, 130.702°E) に設置されている (Fig. 2)。これらの桜島ライダーは水平方向 (180°) および仰角方向 (0~47°) にスキャンする機能を有するが、レーザー光の射出方向をそれぞれのライダーの設置場所から南岳火口上方向に向けている (Fig. 2)。SVOとKURのライダーの仰角はそれぞれ13°と15°である。そして、SVOとKURのライダーから南岳火口までの射距離 (Range) はそれぞれ5.8 kmと4.2 kmである。Fig. 3はSVOのライダー設置風景を示している。また、Fig. 4はKURのライダーから出るレーザー光が噴煙に向かって射出されている夜間の様子を示している。SVOとKURのライダーからのレーザー光は南岳山頂の火口縁よりそれぞれ300 mおよび100 m上部のところへ射出されているため、桜島ライダーにて噴煙の底部 (Fig. 4) の位置や細粒火山灰の有無に関する情報を得ることが出来る。桜島ライダーの仕様は国立環境研究所が中心になって運用している東アジアライダーネットワーク (Asian Dust and aerosol lidar observation Network, AD-Net)⁸⁾にて用いられ



Fig. 2 Locations of lidar instruments installed at SVO (yellow diamond) and KUR (purple diamond) at the Sakurajima volcano. Lines indicate their lines of sight. The open white circle indicates an underground observation tunnel by the Ministry of Land, Infrastructure, Transport, and Tourism (ARI), in which an extension meter and a seismometer are installed.

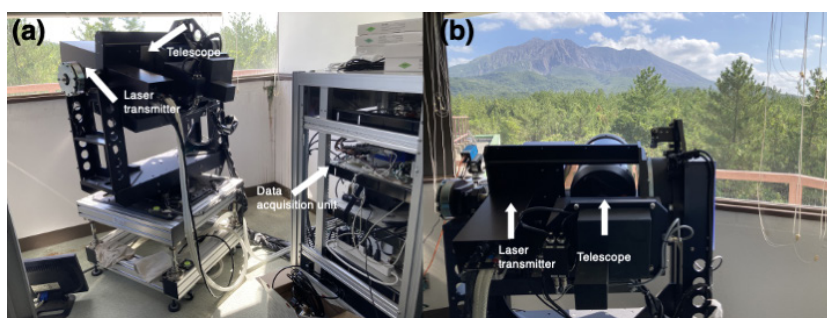


Fig. 3 Lidar instrument at SVO. (a) This unit has a laser transmitter and a telescope (left) and data acquisition unit (right); (b) laser transmitter and telescope directed toward the Minamidake crater of Sakurajima volcano.



Fig. 4 Laser beam is pointed above the Minamidake crater from the KUR lidar (white arrow). This is taken from <https://www.youtube.com/watch?v=HuBgUVqEjqg> (Sakurajima Volcano Live camera on the YouTube by Sakurajima Museum).

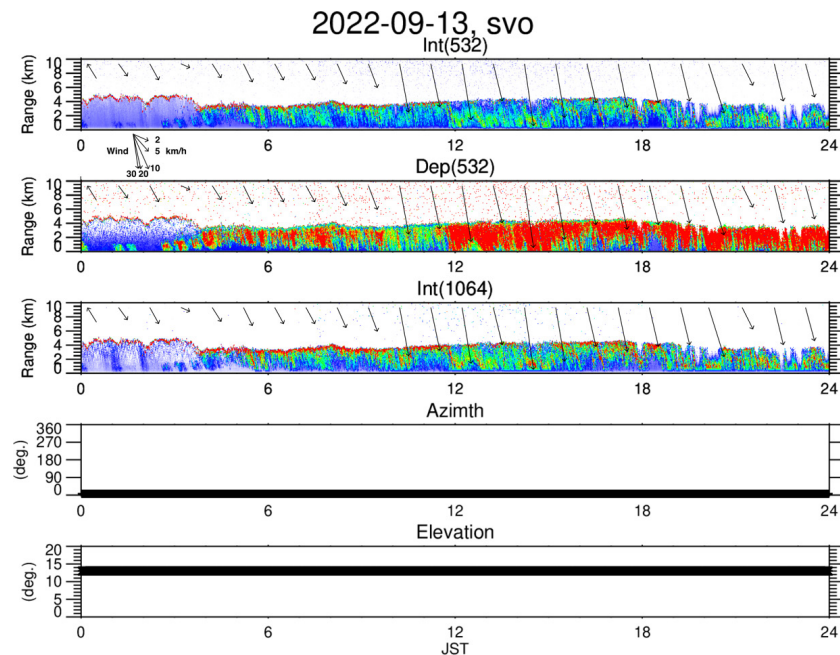


Fig. 5 Example of automatic lidar data processing results on the web by the National Institute for Environmental Studies. The SVO lidar results are displayed for September 13, 2022. Graphs from top to bottom show backscatter intensity at a wavelength of 532 nm (arbitrary units), depolarization ratio at a wavelength of 532 nm (0–0.5), backscatter intensity at a wavelength of 1064 nm (arbitrary units), and azimuth and elevation angles of the telescope of the SVO lidar instrument. Arrows indicate hourly-mean wind speed along the direction laser of the SVO lidar instrument.

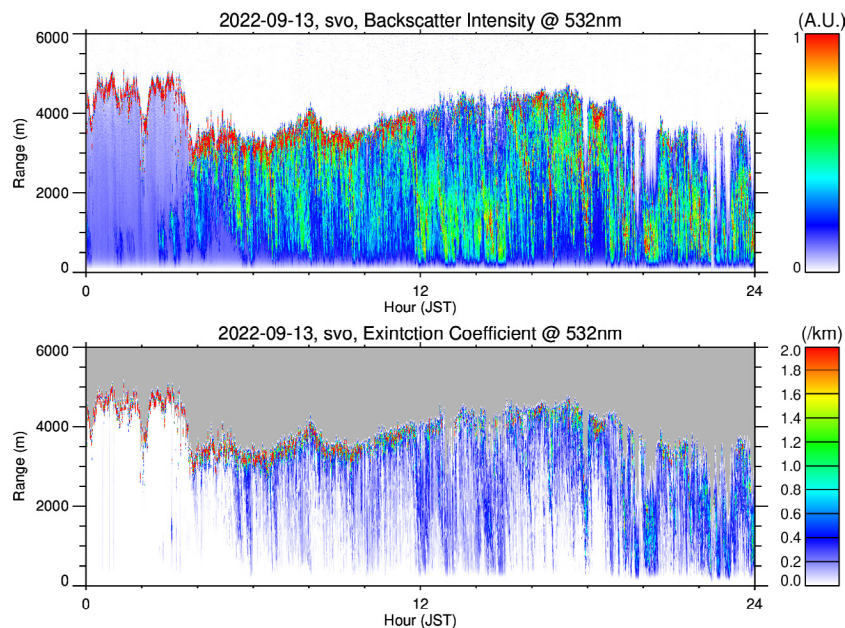


Fig. 6 Backscatter intensity (top) and extinction coefficient (bottom) at a wavelength of 532 nm obtained with the SVO lidar instrument. The time scale is the same as Fig. 5.

ているライダーと同様、エアロゾル計測用ライダーシステム⁹⁾の一種である。桜島ライダーは波長 532 nm と 1064 nm の Nd:YAG レーザーパルスを 1 秒間に 20 回射出している。パルスあたりの出力は 30 mJ であり、アイセーフではない。なお、火口周辺は飛行禁止区域であるため、航空機等にレーザーが照射される恐れはない。大気中のエアロゾルで散乱された光は、受信望遠鏡で集光され、そして光電子増倍管 (photo-multiplier tube PMT, 波長 532 nm) およびアバランシェ・フォトダイオード (avalanche photodiode APD, 波長

1064 nm) にて検知され、電気信号に変換され、信号波形として記録される⁹⁾。また、桜島ライダーは波長 532 nm のレーザー光を偏光させて射出しており、その偏光面に平行および直交の方向の後方散乱光を同時に検知し記録している⁹⁾。なお、桜島ライダーはレーザーを 2 秒間 (40 パルス) 射出して 8 秒間休止するというサイクルにて連続的に運用されている。桜島ライダーの時間分解能は 10 秒で、距離分解能は 6 m で、測定可能距離は 0~24 km である。記録されたデータはライダー制御 PC を通じてインターネット経由にて国立環境研究所に転送され、AD-Net と同様の方法でデータ処理が自動的に行われている。そして、データ処理の結果を web ブラウザにて国立環境研究所のサイトにて随時確認することが可能である¹⁰⁾。Fig. 5 と Fig. 6 はデータの自動処理結果の例で、前者は各波長の後方散乱強度と波長 532 nm の偏光解消度とレーザー光の方位角と仰角の図示で、後者は波長 532 nm における後方散乱強度と消散係数の図示である。

3. ライダーによる繰り返し微小噴火の検知

Fig. 5 は桜島火山観測所 (SVO) のライダーによる 2022 年 9 月 13 日午前 0 時 (日本時間) から 24 時間のライダー設置場所を原点として南岳火口方向の射距離における波長 532 nm における散乱強度 (送信レーザーの偏光面に平行および直交する成分の合計) および波長 532 nm の偏光解消度と波長 1064 nm における散乱強度を示している。散乱強度は白色がバックグラウンドを示し、強度の上昇に応じて青色、緑色、赤色を示す。高濃度エアロゾルでは、通過する送信レーザー光およびエアロゾルからの後方散乱光とも強い減衰を受けるためライダーの受信信号強度は微弱になるため、散乱強度がノイズレベルに近くなりバックグラウンドと差がわずかとなる。なお、散乱強度は規格化された任意単位で示され、偏光解消度は 0 から 0.5 の範囲で示されている。鹿児島地方気象台におけるこの日の天候は晴れで、最低気温 27℃、最高気温 33℃であった。そして、1 時間毎の風向は 0 時から 4 時は時間毎に西南西、東北東、南南東、東北東に変化した。4 時から 9 時まで北東が卓越し、9 時から 22 時まで東が卓越し、22 時から 24 時は東北東が卓越した。Fig. 2 に示す通り南岳火口から桜島火山観測所 (SVO) は西北西の位置あり、SVO は南岳火口からの向かい風の方角に近い。そのため、噴火すると南岳火口における噴出物の一部は SVO 方向に向かってくると考えられる。Fig. 5 に示す SVO からレーザー射出方向の距離と散乱強度の時間変化において上記の風の変化に対応が見られる。0 時から 3 時ごろまでは散乱強度の高い距離は 4 km から 5 km の間に線状に分布し、この距離より長距離においてはレーザー光の強度が減衰するため散乱強度はかなり小さく、短距離において散乱強度は小さい。一方、3 時ごろから 4 時ごろにかけて線状の散乱強度の高い部分は短距離である 3 km から 4 km に分布が移り、その後 12 時までにこの距離に位置していた。この時間帯においては散乱強度の高まりが、スジ状に短距離へ分布した。そして、12 時ごろから 24 時までの間は距離 4 km 以内において散乱強度の高まりが時間経過とともに変動している。また、この時間帯においては距離 0~4 km 間で偏光解消度が高い値が卓越している。つまり、散乱強度の高まりの移動は非球形の固体の存在つまり、噴出物の存在と移動を示唆している。特に、15 時以降においては時間経過とともに散乱強度の高まりが短距離へと短時間に移動したためスジ状に見える部分が複数ある。この傾向は Fig. 6 に示す波長 532 nm の後方散乱強度および消散係数においても見られる。これらのスジ状の散乱強度の高まりは、噴火後に噴出物が風に流されて SVO 方向に近づいてくるのを反映している可能性がある。なお、鹿児島地方気象台による 2022 年桜島噴火観測表¹¹⁾によれば 9 月 13 日の噴火は 16 時 28 分に発生した噴煙高度が火口縁から上へ 1600 m で噴煙の流向が西の噴火のみであった。しかし、噴火観測表に記載されないような小規模な噴火による噴出物の移動にてスジ状の散乱強度の高まりが見られた可能性がある。

そこで、9 月 13 日の 17 時から 24 時における SVO のライダーの散乱強度と国土交通省有村観測坑道 (ARI) における地震のスペクトル振幅と伸縮計 (南岳火口と ARI を結ぶ直線に直交する方向) の記録を比較する (Fig. 7)。Fig. 7a に示す散乱強度は波長 532 nm の偏光面に平行および直交の方向の成分の散乱強度の合計である。Fig. 7b の地震スペクトルに周波数 1 Hz から 5 Hz 帯に顕著な振幅があり縦のスジ状見える部分 (白矢印) があり、Fig. 7c に示す伸縮計の記録において伸長 (Expansion) から急激に収縮 (Contraction) に変化する部分に対応しており、これらは噴火に伴う地震記録および伸縮計の記録の特徴¹²⁾と同じである。したがって、この時間帯において鹿児島地方気象台の噴火観測表¹¹⁾には記載されていないような微小な噴火が繰り返し発生したと考えられる。微小噴火の発生時刻 (Fig. 7b の白矢印) のほぼ全てについて、Fig. 7a に示す散乱強度において距離 4 km の散乱強度の高い部分が時間経過とともに短距離へ移動するのが確認で

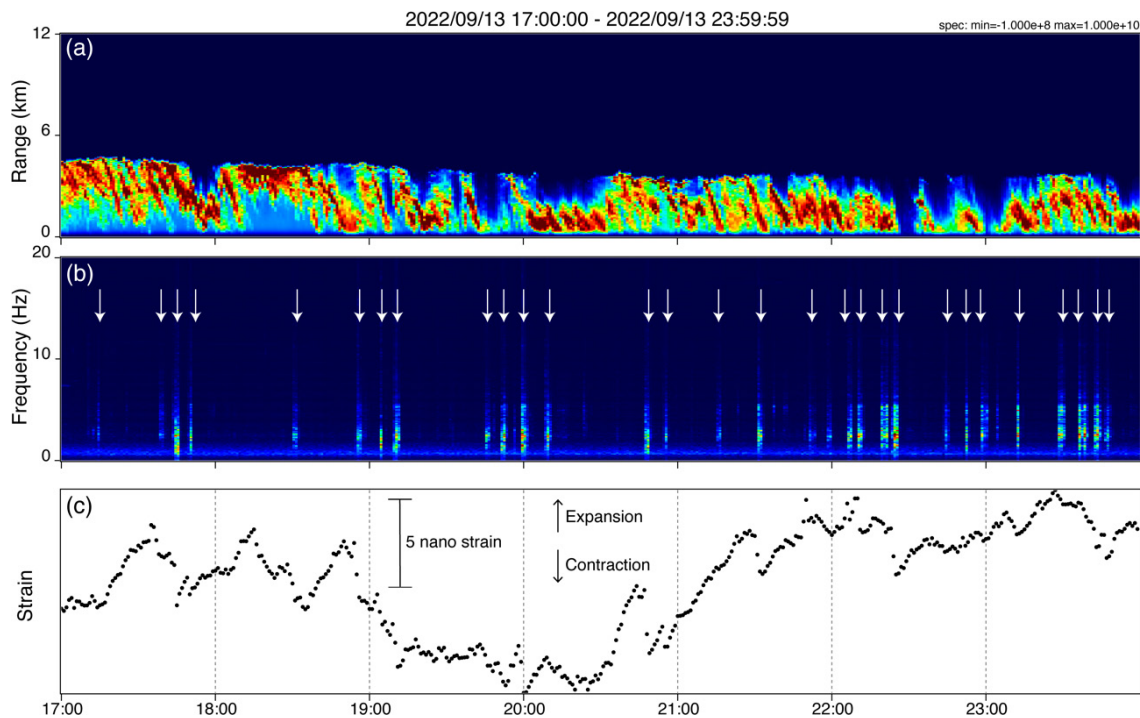


Fig. 7 (a) Backscatter intensity obtained with the SVO lidar instrument. (b) Amplitude spectrum of seismic waves at ARI, and (c) the strain record of an extension meter at ARI. (a) The backscatter intensity and (b) amplitude spectrum are shown in dark blue, blue, green, yellow, red, and red-brown as they increase, and their units are dimensionless.

きる。散乱強度の高い部分は、火口から噴出したエアロゾルと考えられる。この移動時間はおおよそ 10 分であるので、移動速度は 6.7 m/s である。これは 9 月 13 日の 17 時から 24 時の平均風速の 6.0 m/s と大まかに対応していることから散乱強度が高い部分が噴出エアロゾルであることが支持される。噴火後に噴出物が構成される噴煙が風で移流し、拡散していく過程において、同時に噴煙から噴出物が降下する過程をライダーにて捉えたと考えられる。したがって、ここで紹介した観測事例は、風向き次第ではあるにせよ、ライダーを用いることで微小噴火を検知することが可能であることを示している。

4. 最新の研究成果と今後の展開

4.1 桜島における火山灰とエアロゾルの放出の季節変動

前述では桜島ライダーで捉えられた短時間での散乱強度の距離分布の時間変化を卓越する風向きと噴火との対応で示した。より長期間については、桜島のライダーを用いて火山灰の月毎の消散係数平均値と桜島の噴火活動と消散係数と風向との比較が月毎になされ、消散係数と風向の季節変動の関係が明らかになった¹³⁾。Fig. 8 は SVO のライダーにおける 2018 年の月平均の消散係数と鹿児島地方気象台による月毎の噴火回数、爆発回数、単位面積当たりの火山灰量、月毎の火山灰降下日数と推定火山灰降下量を比較している図である。消散係数の距離分布からは 5 月から 8 月の期間で高い値が卓越している。特に、6 月と 7 月の距離 5.5 km に高い値が見られ、この距離は前述の通り SVO のライダーから南岳火口への射距離である。5 月から 8 月の期間は噴火回数が他の月よりも多く、火山灰降下量が多い。また、鹿児島地方気象台における降下火山密度が 6 月が特に高い。鹿児島地方気象台における 1 時間毎に卓越する水平風向の月毎の頻度分布からは、夏季において SVO が南岳に対して風下に対応する風向が卓越する¹³⁾。したがって、2018 年の夏季において、火口上に噴出によるエアロゾルが多くあり、それが SVO のライダー方向に流れてきていることが示唆された。

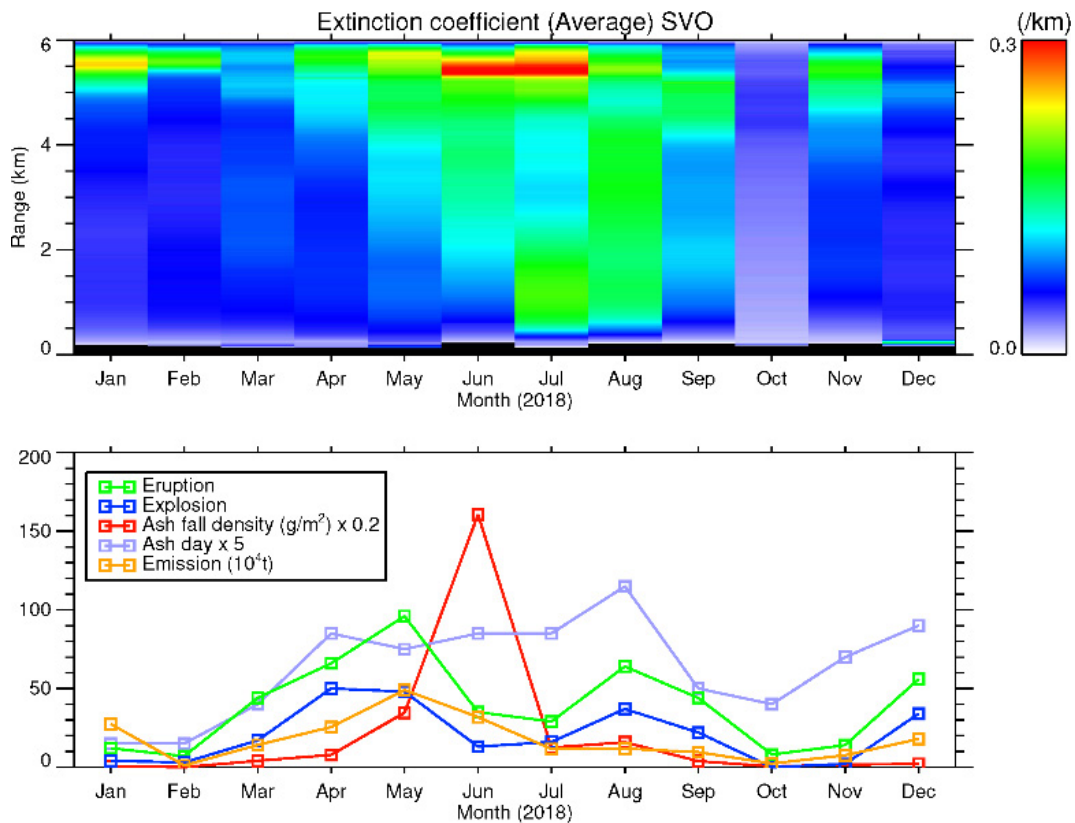


Fig. 8 Monthly average of extinction coefficients at a wavelength of 532 nm obtained with the SVO lidar instrument in 2018 (top). Monthly numbers of eruptions and explosions at the Sakurajima volcano (bottom). Monthly amount of ash fall density at Kagoshima weather observatory, the monthly number of confirmed ash fall days, and the estimated total amount of ash fall around Sakurajima (bottom). Eruptions and explosions are not associated and associated with strong infrasound caused by eruptions, respectively. Ash fall density and the number of ash fall days are rescaled by a factor of 0.2 and 5, respectively. This figure was taken from the publication of Shimizu et al. (2021)¹³⁾.

4.2 桜島の大規模噴火のライダーによるモニタリングの可能性

前述の通り桜島は噴火が頻発している火山である一方、将来的に大規模噴火の発生が懸念されている¹⁴⁾。なぜならば、1914年1月に桜島において大正噴火と呼ばれる大規模噴火が発生した¹⁵⁾ことと、その後において桜島のある始良カルデラの直下にてマグマの蓄積が示唆されているからである¹⁶⁾。1914年の桜島大正噴火では、火山灰が偏西風にて運ばれて、日本列島の広範囲にて降灰が確認された。Fig. 9のハッチで描かれた範囲は降灰が確認された領域を示しており、領域は九州地方、中国地方、四国地方、関西地方、中部地方、関東地方、福島県、宮城県といった広範囲に及んだ¹⁵⁾。桜島において大規模噴火が発生すれば、噴煙は成層圏まで到達し、偏西風によって東向きに流されるため日本列島の各所へ火山灰が運ばれる可能性が高い。また、日本周辺における主要航空路の一つが桜島上空周辺を通り関東へ向かうルートで、アジア各国から北米へ向かうトラフィックが非常に多い航空路でもある¹⁴⁾。したがって、桜島が大規模噴火するとこの主要航空路に影響があることは確実である。幸い、Fig. 9に示すAD-Netのライダーが日本各地に設置されているため、アイスランドのエイヤフィヤトラヨークトル火山の2010年噴火と同様に、桜島の大規模噴火についても火山灰濃度測定が迅速に行われることが期待されるとともに、現在の桜島の噴火の頻発を利用して、AD-Netのライダーの火山灰検知能力の検証を行うなどの研究を進めることが期待される。

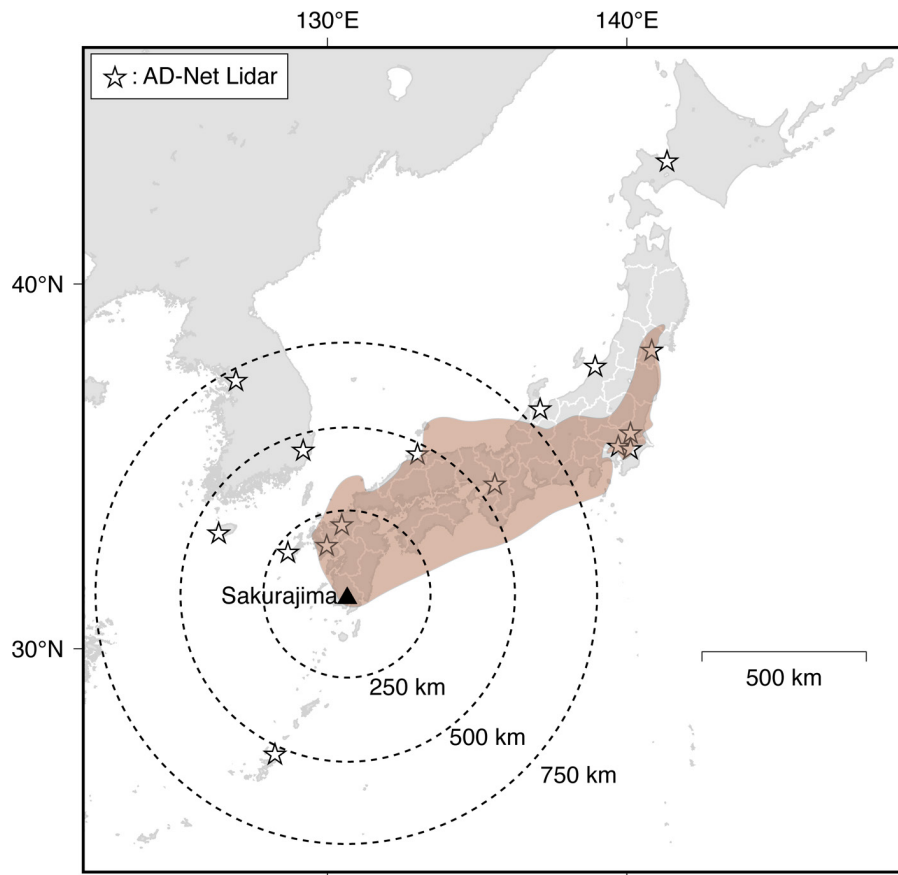


Fig. 9 Map showing the area of fallen volcanic ash of the 1914 Sakurajima Taisho eruption, as reported by Omori (1916)¹⁵⁾, and the lidar distribution of AD-Net.

謝 辞

桜島では文部科学省 2014 年度施設整備補助金によって 2 台のライダーが整備された。そして、2016 年度以降は文部科学省の次世代火山研究・人材育成プロジェクトの次世代火山研究推進事業による委託研究にて運用されている。桜島ライダーのデータは次世代火山研究推進事業にて整備された Japan Volcanological Data Network (JVDN) にて提供されている¹⁷⁾とともに、京都大学防災研究所の共同利用にてデータを提供している¹⁸⁾。桜島ライダーからのデータ伝送および自動解析と表示は国立環境研究所の清水厚氏の貢献であり、また同氏から本稿について貴重なコメントを頂いた。桜島ライダーの維持管理には桜島火山観測所の所員、清水厚氏および株式会社 mss の松井一郎氏が貢献してきている。関係各位に感謝するとともに、多くの研究者によるデータの利用を期待したい。本解説の執筆の機会を与えて下さった京都大学生存圏研究所の矢吹正教氏と匿名の査読者に感謝します。

引用文献

- 1) A. J. Durant, C. Bonadonna, and C. J. Horwell, "Atmospheric and environmental impacts of volcanic particulates," *Elements*, **6**, 235–240 (2010).
- 2) 嶋野岳人, "火山噴出物の特徴と試料採取," *エアロゾル研究*, **30** (3), 183–189 (2015).
- 3) T. Kozono, M. Iguchi, T. Miwa, M. Maki, T. Maesaka, and D. Miki, "Characteristics of tephra fall from eruptions at Sakurajima volcano, revealed by optical disdrometer measurements," *Bulletin of Volcanology*, **81**, 41 (2019).
- 4) C. Bonadonna, C. B. Connor, B. F. Houghton, L. Connor, M. Byrne, A. Laing, and T. K. Hincks, "Probabilistic modeling of tephra dispersal: Hazard assessment of a multiphase rhyolitic eruption at Tarawera, New Zealand," *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, **110**, B03203 (2005).
- 5) 澤田可洋, "火山灰と航行の安全に関する第一回国際シンポジウム," *火山*, **36** (4), 457–459 (1991).

- 6) 気象庁, “東京航空路火山灰情報センター,” <https://www.data.jma.go.jp/vaac/data/indexj.html> (Accessed 2022.11.10)
- 7) A. Ansmann, M. Tesche, S. Grob, V. Freudenthaler, P. Seifert, A. Hiebsch, J. Schmidt, U. Wandinger, I. Mattis, D. Muller, and M. Wiegner, “The 16 April 2010 major volcanic ash plume over central Europe: EARLINET lidar and AERONET photometer observations at Leipzig and Munich, Germany,” *Geophysical Research Letters*, **37** (13), L13810 (2010).
- 8) A. Shimizu, T. Nishizawa, Y. Jin, S.-W. Kim, Z. Wang, D. Batdorj, and N. Sugimoto, “Evolution of a lidar network for tropospheric aerosol detection in East Asia,” *Optical Engineering*, **56** (3), 031219 (2017).
- 9) 杉本伸夫, “エアロゾル計測用ライダーシステム,” *レーザセンシング学会誌*, **1** (1), 14–28 (2020).
- 10) 国立環境研究所, “桜島ライダーの自動処理結果表示,” <https://www-lidar.nies.go.jp/Sakurajima/fig> (Accessed 2022.11.13)
- 11) 鹿児島地方気象台, “2022 年桜島火山噴火観測表,” https://www.jma-net.go.jp/kagoshima/vol/data/skr_exp_2022.html (Accessed 2022.11.9)
- 12) M. Iguchi, T. Yamada, and T. Tameguri, “Sequence of volcanic activity of Sakurajima volcano, Japan, as revealed by non-eruptive deflation,” *Frontiers in Earth Science*, **10**, 727909 (2022).
- 13) A. Shimizu, M. Iguchi, and H. Nakamichi, “Seasonal variations of volcanic ash and aerosol emissions around Sakurajima detected by two lidars,” *Atmosphere*, **12**, 326 (2021).
- 14) 井口正人, 中道治久, “桜島の大規模噴火を考える,” *自然災害科学*, **38** (3), 279–345 (2019).
- 15) F. Omori, “The Sakura-jima eruptions and earthquakes II,” *Bulletin of the Imperial Earthquake Investigation Committee*, **8** (2), 35–179 (1916).
- 16) J. Hickey, J. Gottsmann, H. Nakamichi, and M. Iguchi, “Thermomechanical controls on magma supply and volcanic deformation: application to Aira caldera, Japan,” *Scientific Reports*, **6**, 32691 (2016).
- 17) 防災科学技術研究所, “Japan Volcanological Data Network,” <https://jvdm.bosai.go.jp/portal/ja> (Accessed 2022.11.14).
- 18) 京都大学防災研究所, “共同利用施設,” <https://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/shared> (Accessed 2022.11.14).



中道治久

2001 年東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻博士課程修了・博士（理学）取得。2001 年東京大学地震研究所研究員。2003 年防災科学技術研究所日本学術振興会特別研究員。2005 年名古屋大学大学院環境学研究科助手。2013 年から現在は京都大学防災研究所准教授。国内の複数の火山およびインドネシアの火山について主として地震学的手法にて研究をしてきた。また、2014 年の桜島ライダーの導入および、2016 年から現在までライダーの運用に関わってきているとともに、2017 年に桜島を含めた南九州の火山において X バンド偏波レーザーの導入と現在まで運用に関わってきた。日本地球惑星科学連合、日本火山学会、米国地球物理学連合、国際火山学及び地球内部化学協会会員。

「学位論文紹介」投稿のお願い

レーザセンシング学会誌では、学会員が発表した博士論文および修士論文の紹介を行っています。下記の要領に従って投稿をお願いいたします。

1. 掲載条件

2022年4月1日から2023年3月31日の間に授与された博士および修士の学位に対する学位論文を対象とします。博士論文は題目リストおよび要旨を、修士論文は題目リストのみを掲載します。(2023年10月発刊の第4巻2号に掲載。)

2. 投稿方法

下記の情報をレーザセンシング学会編集委員会 (lrsj-edit_office@laser-sensing.jp) へお送りください。様式は任意です。

(1) 大学院, 研究科, 専攻の名称

(2) 取得学位, 学位取得年月

(3) 著者名

(4) 論文題目

※博士論文の場合は、下記(5)～(7)もご提出ください。

(5) キーワード (4～5ワード)

(6) 要旨 (1500字以内, 図表掲載可。)

※図表に対応する文字カウント数は、標準的な大きさ、縦横比の図の場合で400字/個程度となる。

(7) 顔写真 (任意)

3. 投稿期限

2023年6月10日

4. その他

掲載料は無料です。

学会誌への投稿案内

レーザセンシング学会誌では、レーザセンシングに関する研究・技術や最新の研究成果に関する、「論文」、「総説(レビュー)」、「小論文(レター)」、および「解説」記事を、会員・非会員を問わず随時応募しています。投稿に関する手続きや要件については、学会ホームページをご参照ください。学会誌は年2回(4月および10月)の発刊となっています。皆様の投稿をお待ちしています。

学会誌

<https://laser-sensing.jp/gakkaishi.html>

*最新版の投稿規定、執筆要領、テンプレート、および投稿フォームは、画面上部のリンクからダウンロードいただけます。

査読者一覧

学会誌の発刊にあたり、お忙しいなか時間を割いてくださった査読者の皆様、そして編集にご尽力いただきました編集委員会の皆様に感謝申し上げます。第2巻1号～第3巻2号に掲載された論文・解説記事の査読では、次の方々にご協力いただきました。

[五十音順・敬称略]

* 公表のご承諾をいただいた方のみ掲載しております

阿保 真	(東京都立大学)
市川 幸司	(合同会社フィールドレーザ研究所)
市川 祐嗣	(四国総合研究所)
今城 勝治	(三菱電機株式会社)
甲斐 憲次	(名古屋大学)
久世 宏明	(千葉大学)
齊藤 保典	(信州大学)
酒井 哲	(気象研究所)
佐藤 篤	(東北工業大学)
神 慶孝	(国立環境研究所)
染川 智弘	(レーザー技術総合研究所)
中嶋 善晶	(東邦大学)
西澤 智明	(国立環境研究所)
橋本 真喜子	(宇宙航空研究開発機構)
眞子 直弘	(千葉大学)
矢吹 正教	(京都大学)

●●● 編集後記 ●●●

当学会は、1972年のレーザ・レーダー研究会発足から50年目となる2022年に「一般社団法人 レーザセンシング学会」として新たなスタートを切りました。一般社団法人化の意義とこれまでの経緯についての記事を、長澤親生会長より本号にご寄稿いただきました。レーザセンシング研究の発展の中で、多くのライダー手法が提案され、また技術や機器の進化に伴い次々と新しい観測データが得られてきました。本特集記事では、研究成果の利活用の一環として重要視されているデータ利用に焦点をあてます。ライダーデータの適用分野は多岐にわたりますが、ここでは、エアロゾルや雲、大気汚染等の研究におけるライダーデータの利用を主題として、それぞれの分野の最前線でご活躍の研究者による6本の解説記事を採録しました。巻頭言は、長きにわたりライダー手法の開発とそれを応用した観測研究に貢献され、2022年のレーザセンシング学会功労賞を受賞されました国立環境研究所の杉本伸夫氏にご執筆いただきました。今号特集が、ライダーデータ利活用に関する最新の動向把握はもちろんのこと、ライダー技術発展の方向性を探るヒントとなることを期待します。最後になりますが、ご多忙中にもかかわらず、ご執筆をお引き受けいただきました著者の皆様、そして有意義なご意見を賜りました査読者の皆様にこの場を借りて深くお礼申し上げます。

編集委員会 副委員長 矢吹 正教

■編集兼発行人：レーザセンシング学会 (<http://laser-sensing.jp/>)

■企画：レーザセンシング学会編集委員会

石井昌憲（委員長）、佐藤 篤（副委員長）、西澤智明（副委員長）、矢吹正教（副委員長）、
亀山俊平、及川栄治、伊澤 淳、今奥貴志、香川直己

■連絡先：〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1 気象庁気象研究所 台風・災害気象研究部
第3研究室気付 レーザセンシング学会編集委員会

■電子メール：lrsj-edit_office@laser-sensing