

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¹¹九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 observationsKeiya Yumimoto*¹ and Yukari Hara¹¹Research 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—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、偏光解消度を用いた黄砂（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—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,

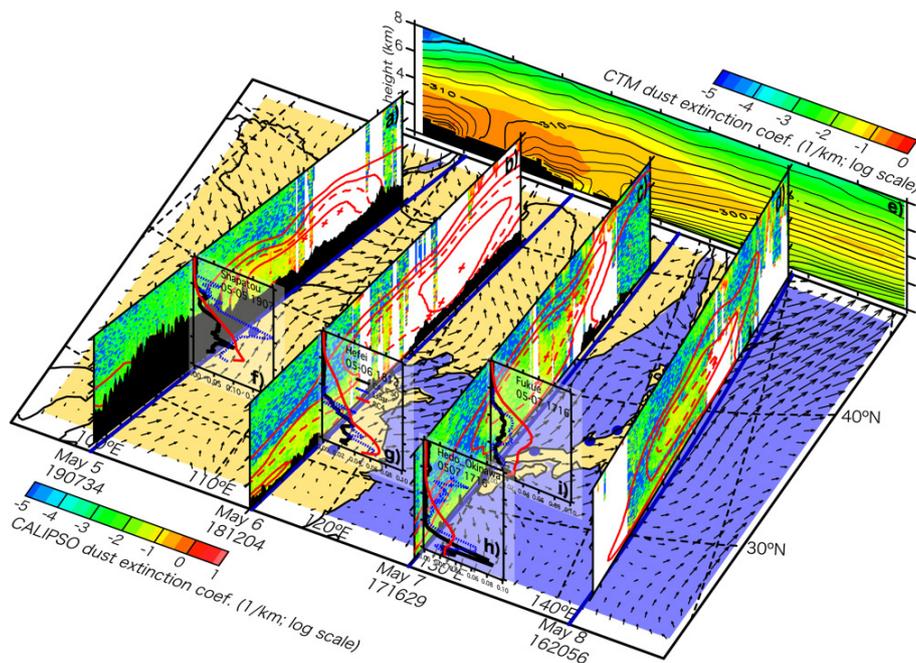


Fig. 1 3D analyses of CALIPSO, NIES AD-Net Lidar and RC4 regional chemical transport model (RCTM) (reproduced from Fig. 4 of Uno et al.¹⁰⁾). (a–d) Vertical cross-sections of dust extinction coefficient from CALIOP (color) and RCTM (red lines). (e) Longitudinal cross-section of dust extinction coefficient 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—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。

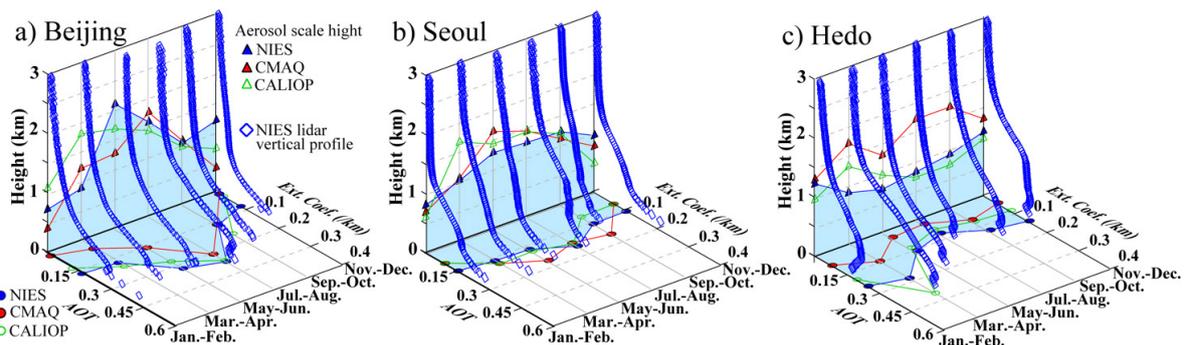


Fig. 2 Two-month-averaged vertical profiles of spherical extinction coefficients of NIES AD-Net Lidar observation (blue diamonds) (reproduced from Fig. 3 of Hara et al.¹⁶⁾). AOT in the horizontal plane (circles) and aerosol scale height in the vertical plane (triangles) based on NIES AD-Net Lidar (blue),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

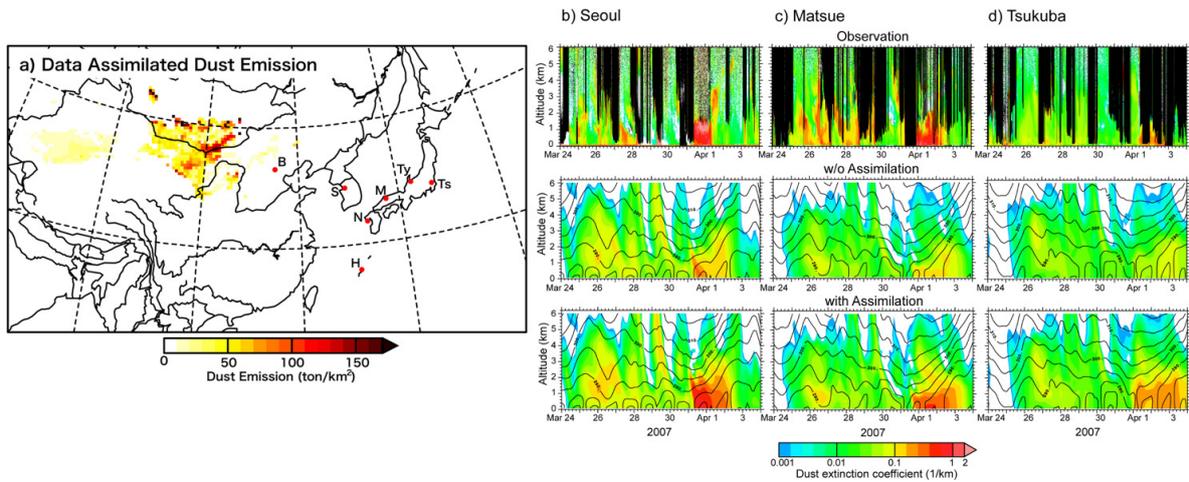


Fig. 3 (a) Horizontal distribution of assimilated dust emission from 20 March to 3 April 2007. Red circles denote NIES AD-Net Lidar observation sites (Tsukuba (Ts), Toyama (Ty), Matsue (M), Nagasaki (N), Hedo (H), Seoul (S), and Beijing (B)). Time-Height plots of dust extinction coefficients at (b) Seoul, (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⁾).

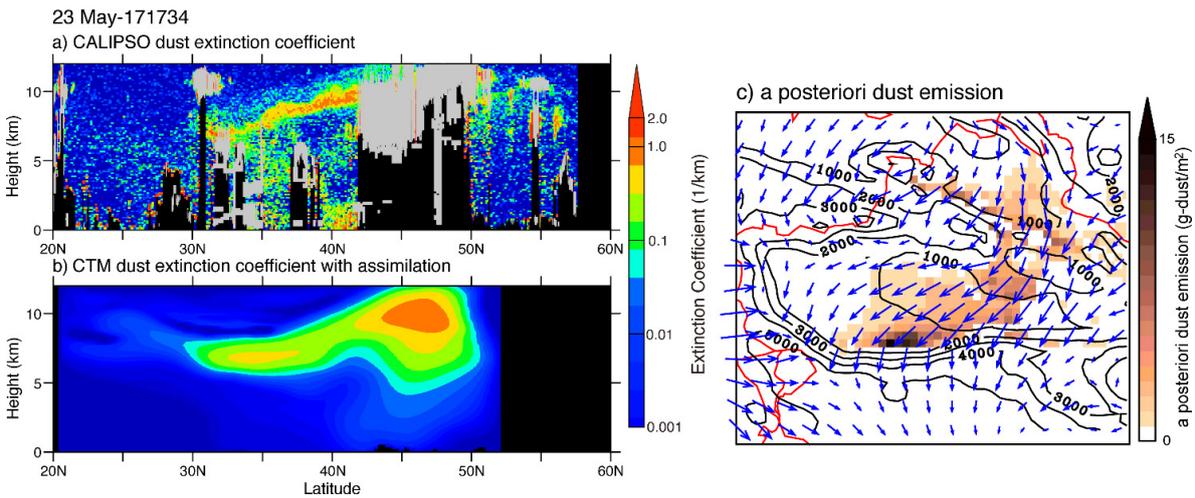


Fig. 4 Assimilation results with CALIOP extinction coefficient. (a–b) Vertical cross-sections of dust extinction coefficient from CALIOP and RC4 RCTM, respectively. (c) Horizontal distribution of assimilated dust emission over the Taklimakan Desert.

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。

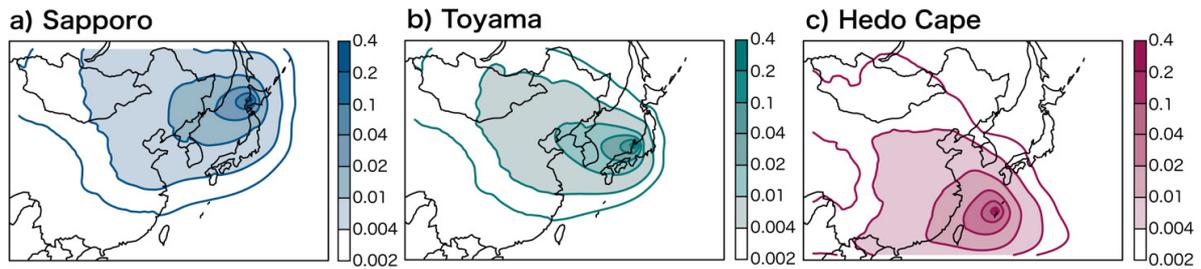


Fig. 5 Horizontal distribution of temporal and vertical averaged adjoint sensitivity for Spring 2006–2008 with respect to observation at (a) Sapporo, (b) Toyama and (c) Hedo Cape NIES AD-Net Lidar stations (reproduced from Fig. 2 of Yumimoto²³).

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・内陸部の戈壁砂漠へと伸び、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

- 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).
- 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).
- 鶴野伊津志(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).
- 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).
- 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).
- 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. Arai, 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. Arai, 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," *レーザーセンシング学会誌*, **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," *レーザーセンシング学会誌*, **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。