

衛星搭載ライダー・雲レーダーによる

雲・エアロゾル・鉛直流の全球観測ミッション

西澤 智明¹, 岡本 創², 鈴木 健太郎³,
神 慶孝¹, 石井 昌憲⁴, 富田 英一⁵

¹ 国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

² 九州大学応用力学研究所 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1)

³ 東京大学大気海洋研究所 (〒277-0882 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

⁴ 東京都立大学 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

⁵ 宇宙航空研究開発機構 (〒305-0047 茨城県つくば市千現 2-1-1)

Global cloud, aerosol, and vertical flow observation mission using space-borne lidar and cloud radar

Tomoaki NISHIZAWA¹, Hajime OKAMOTO², Kentaro SUZUKI³,
Yoshitaka JIN¹, Shoken ISHII⁴, Eiichi TOMITA⁵

¹ National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki-ken, 305-0053

² Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 6-1 Kasugakoen, Kasuga, Fukuoka-ken, 816-8580

³ Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, 277-0882

⁴ Tokyo Metropolitan University, 1-1 Minamioosawa, Hachioji, Tokyo, 192-0397

⁵ Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki-ken, 305-0047

Abstract: A synergy space-borne observation mission using 94GHz Doppler cloud radar and high spectral resolution lidar (HSRL) with doppler, multiple field-of-views (FOVs), and depolarization measurement functions was proposed to study clouds, aerosol and convection. Expected products include (1) microphysics of clouds, aerosols and precipitations, (2) fall velocity of clouds, rain and snow particles, and (3) air motion in cloud, above clouds and in clear sky. Lidar wavelengths are 532nm and 1064nm. HSRL function is considered for 532nm. Direct detection method is used to observe Doppler velocity at 532nm. 94GHz cloud radar and lidar with Doppler function measure three-dimensional air motion in clouds and clear sky. HSRL at 532nm with depolarization distinguishes cloud and aerosol particle types. The multiple FOV capability provides information from thick clouds. The mission will also serve to construct long continuous records of clouds and aerosols for climate change studies with CloudSat, CALIPSO, EarthCARE and future missions such as AOS.

Key Words: HSRL, Aerosol, Cloud, Doppler, Precipitation

1. はじめに

NASA 主導による A-train 衛星群の CALIPSO 衛星搭載ライダーおよび CloudSat 衛星搭載の雲レーダーによる全球観測は、雲・エアロゾルの 3 次元分布を詳らかにすると共に、放射収支や降水の評価に関しても顕著な改善を果たした^[1]。一方で、これらの観測研究を経ても、雲・エアロゾル・放射・対流・降水に関わる克服すべき課題は今なお存在する。例えば、衛星観測データを用いた雲量の推定結果には解析手法によって顕著なばらつきが見られ、その要因として雲層検出・雲相識別・多重散乱の取り扱いの違いが指摘されている^[2]。また、衛星観測データの解析結果と気候変動予測モデルの結果との間に整合が見られず、気候モデルの雲再現性や雲・降水の変換プロセスの改善が必要であることも指摘されている^[3]。更に、雲周辺の水平風の鉛直シアは雲形成に対して大きな影響を与えることが知られているが、気候モデルでは考慮されておらず、これを評価・改善する適切な衛星観測データは無い^[4]。

これらの解決や理解のためには、雲・エアロゾル・対流・放射・降水プロセスを包括的に評価する観測システムが必要である。2024 年 5 月末に打ち上げられた EarthCARE 衛星は、偏光測定機

能が付与された波長 355nm での高スペクトル分解ライダー (HSRL) と共に、ドップラー測定機能が付与された 94GHz 雲レーダー、多波長イメージャー、広帯域放射計を搭載し、CALIPSO・CloudSat ミッションの後継となる包括的な全球観測ミッションになっている。雲レーダーのドップラー計測機能の付加により、雲・降水微物理特性と対流性雲の内部の鉛直流の推定が可能となり、降水フラックス推定の改善も見込まれている^[5]。また、HSRL 技術の導入により、雲・エアロゾルの消散係数・後方散乱係数の推定精度が向上することによる知見の創出や改善も期待されている^[5]。Decadal Survey 2017^[6]に基づき計画が進められている米 AOS (Atmosphere Observing System) ミッションは 2020 年代末～2030 年代初頭での打ち上げを目指している。計画当初は極軌道衛星と傾斜軌道衛星の 2 台の衛星に雲レーダー、降雨レーダー、ライダー、そして各種受動型センサー (偏光計、イメージャーなど) とこれまでに類を見ない多数センサーを総動員した包括的な全球観測ミッションとなっていたが、予算の観点からライダーを含む複数センサーの搭載が断念され、それらをどうするかを検討が今なお続いている。

EarthCARE、AOS ミッション以降の能動型センサーを用いた雲・エアロゾル計測を主体とした衛星観測ミッションは現在のところ未確定である。そこで本研究では、次世代衛星ミッションを見据えた、能動型センサーを主体とした雲・エアロゾル・鉛直流観測ミッションについての検討を進めている^[7]。本シンポジウムではその概要、進捗状況、課題について報告する。

2. 観測目標、センサー

本ミッションでは雲・エアロゾル・放射・対流・降水の包括的な観測を主眼として、観測目標とセンサーを以下のように設定している。

○ 観測目標

- ・雲・エアロゾル・降水の微物理特性と放射特性
- ・雲・降水粒子の落下速度
- ・雲内部および晴天域の鉛直流

○ 雲レーダー

- ・ドップラー計測機能を有した 94GHz 雲レーダー
- ・レーダ反射因子、ドップラー速度、ドップラー速度幅を計測する。
- ・鉛直下を計測する。ただし、3 方向計測による水平風抽出も視野にいたした検討も行う。

○ ライダー

- ・2 波長 (532nm, 1064nm) での鉛直下・偏光計測ライダー
- ・波長 532nm では、HSRL 技術を導入することで大気粒子の消散係数と後方散乱係数の独立測定を行う。
- ・直接検波方式のドップラー計測機能を併設し、鉛直流測定を実現する。
- ・狭視野角と広視野角の多視野角計測を行い、光学的に厚い雲の内部を測定する。
- ・本ライダーの高機能化として、波長 355nm での HSRL 機能の追加、ドップラー計測の 3 方向化があり、これらの技術検討も進める。

3. 要素技術の開発

科研費助成のもと、EarthCARE 衛星等の観測条件を模擬する能動型センサーによる地上複合観測システムの開発が、情報通信研究機構 (東京都小金井市) の構内にて進められている^[8]。この観測システムの開発やそのデータを用いたアルゴリズム開発は、EarthCARE ミッションを主要なターゲットとして進められているが、本衛星ミッション計画に対する要素技術の開発の場にもなっている。上記観測システムに関する情報を交えながら、本衛星計画で用いられるライダーに関する検討結果を以下に示す。

雲・エアロゾル計測用 HSRL

走査型マイケルソン干渉計を用いた波長 355nm での HSRL システムを開発し、情報通信研究機構

内にて連続観測を実施している^[9]。本システムは波長 532nm での HSRL への転用が可能であり、2 波長 (355nm, 532nm) 同時計測を可能とする HSRL 技術も開発された^[10]。測定された消散・後方散乱係数や偏光解消度は、同時計測されたラマンライダーの測定結果ともよく整合した。衛星観測への応用を見据え、干渉計の走査方式の改良、レーザー・干渉計の波長制御機構の開発、ショット毎の干渉縞の計測手法の検討を進めている。

多視野角・多重散乱ライダー

偏光 Mie 散乱ライダー技術を利用した 5 本の受信鏡筒からなるシステムを開発し、情報通信研究機構構内にて連続測定を実施している^[11]。本システムではレーザーは直上に送信され、5 本の受信鏡筒の内、一本は真上向き、残りの 4 本は真上から 10mrad ずつ傾けられている。各鏡筒の全視野角は 10mrad であり、真上向きの鏡筒には一回散乱成分+多重散乱成分が入り (on-beam)、その他の鏡筒には多重散乱成分のみが入る (off-beam)。各鏡筒は偏光も測定する。多重散乱計算によりシミュレーションされた雲に対する on-beam 及び off-beam の受信強度や偏光解消度の高度分布は、測定値と定性的な一致が見られた。複数鏡筒を用いる本システムを衛星観測へそのまま導入することは、コストやサイズの観点から困難である。そこで、集光望遠鏡は一つとし、集光されたイメージを CCD 等によって分割測定することが検討されている。

直接検波式風ライダー

ADM-Aeolus 衛星搭載の風計測ライダーで採用されたファブリ・ペロー干渉計を用いたダブルエッジ法によるライダーシステムが情報通信研究機構内にて開発され^[12]、改良が進められている。これと共に、雲・エアロゾル計測に対して開発が進められてきたマイケルソン干渉計を用いた HSRL 技術を応用した新たな計測手法 (イメージングマイケルソン干渉計を用いた自己共分散法) の検討も進められている^[13]。これにより、風測定と雲・エアロゾル測定を効率的に共存・一体化させることが可能となり、コスト・サイズ・重量の低減にも繋がることが期待できる。

データ解析手法

地上観測および CALIPSO・CloudSat を用いた雲・エアロゾルの検出・タイプ識別・微物理特性等の推定手法の開発を先行して行い、これらの解析手法を応用した EarthCARE 観測を用いた雲・エアロゾル解析手法の開発を JAXA 助成の下で進めた^[14-16]。EarthCARE 観測の実データを用いた解析と検証が今後実施され、これらアルゴリズムはより精錬されていく。本ミッションでは、これらのデータ解析手法を応用する。

4. 衛星搭載ライダーシステム

要素技術の検討結果や EarthCARE 等のこれまでの衛星搭載ライダーの緒言を元に、衛星搭載ライダーシステムの構成を図 1 (左) に示す。送信系には狭い線幅を持つシーダーレーザーとレーザー増幅器で構成される単一縦モード Nd:YAG レーザーを使用し、基本波 (波長 1064 nm) および第二高調波 (波長 532nm) を直線偏光状態で出力する。レーザーの線幅は半値幅 50MHz、繰り返し率を 50Hz、2 波長の出力をそれぞれ 50mJ 以上とする。レーザーのビーム拡がりはビームエクspアンダを通した後で 45 μ rad とする。受信系には視野角 65 μ rad を持つ直径 60cm の反射望遠鏡を使用する。検出器は、波長 532nm では ATLID や ALADIN でも使われている高感度 CCD や PMT を、波長 1064nm では CALIOP でも使われている APD が候補となる。サンプリング周波数は ATLID と同様に 1.5 MHz とする (高度分解能で 100m に相当)。高スペクトル分解のための干渉計にはマイケルソン干渉計ないしはファブリ・ペロー干渉計が候補となる。送信レーザーおよび干渉計は波長制御機能を持ち、レーザーの中心波長と干渉計のスペクトルのピークが一致するようにチューニングされる。多重散乱ライダーシステムおよび直接検波式風ライダーシステムの効率的な組み込みは今後の課題となる。

上記のシステム諸元を元にした、シミュレーション解析も進められている。例として、波長 532 nm

での HSRL 計測に対する消散係数および後方散乱係数の推定誤差に対するシミュレーション結果の例を図 1(右)に示す。ここでは、全球エアロゾル輸送モデル SPRINTARS により再現された雲・エアロゾル場が用いられた(エアロゾルが洋上に流入し、対流圏上部に氷晶雲が存在している)。晴天域・夜間ではミー・レイリーの両散乱信号に対して全高度に対して信号対雑音比 (SNR) > 10 の信号品質が確保されている。消散係数の誤差は $0.05\text{--}0.1\text{km}^{-1}$ 程度 (図 1b-f)、後方散乱係数については最大で $0.002\text{km}^{-1}\text{sr}^{-1}$ 程度 (図 1b-c) が見込まれ、相対誤差ではエアロゾルの濃い低層域では、後方散乱係数で 10% 程度、消散係数で数十% 程度となる。日中では SN は半分以下となり、消散係数・後方散乱係数の誤差 (図 1b-b, e) は増大する。雲層に対しても、夜間では後方散乱係数で 10% 程度、雲内部の濃度の濃い領域で数十% 程度の誤差が見込まれる。本シミュレーションでは雲等の多重散乱が考慮されていない。シミュレーション自体の性能向上も今後の課題である。

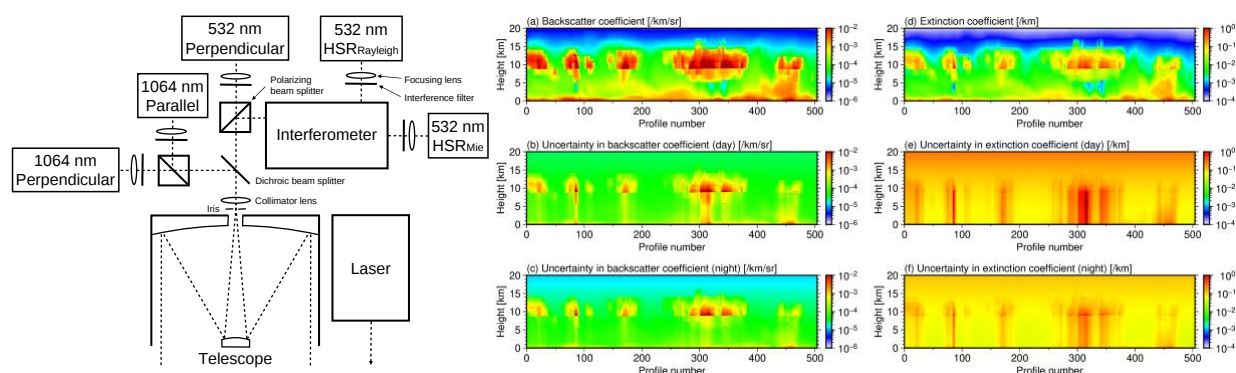


Fig.1 Lidar system configuration (left) and simulation analysis results (right)

謝辞

本研究は、科研費 (JP17H06139, JP24H00275) および JAXA 受託研究 (EarthCARE RA) の支援を受けた。

参考文献

- [1] Stephens et al., B. Am. Meteorol. Soc., **99**, 569-581 (2018).
- [2] Cesana et al. J. Geophys. Res., **121**, 5788-5808 (2016).
- [3] Jing et al., J. Climate, **32**, 4409-4430 (2019).
- [4] J.-L. Lin and B. Mapes, Geophys. Res. Lett., **31**(L16118) (2004).
- [5] Illingworth et al., Bull. Am. Meteor. Soc., **96**, 1311-32 (2015).
- [6] The National Academies Press, (2018), <https://doi.org/10.17226/24938>.
- [7] 西澤他, LSS38, G2 (2020).
- [8] Okamoto et al., EPJ Web Conferences 237, 07011 (2020).
- [9] Jin et al., Opt. Express, 28 (2020).
- [10] Jin et al., Appl. Opt., 61, 3523-3532 (2022).
- [11] Nishizawa et al., JQSRT, 271, 107710 (2021).
- [12] Ishii et al., Appl. Opt., 61, 7925-7936 (2022).
- [13] 神他, 日本気象学会 2023 年度秋季大会, 220 (2023).
- [14] Okamoto et al., AMTD (2024) <https://doi.org/10.5194/amt-2024-103>.
- [15] Sato et al., AMTD (2024) <https://doi.org/10.5194/amt-2024-99>.
- [16] Nishizawa et al., AMTD (2024) <https://doi.org/10.5194/amt-2024-100>