

**次世代型アクティブセンサ搭載衛星の複合解析による  
雲微物理特性・鉛直流研究**

Analysis of cloud microphysics and vertical velocity  
by synergy use of the next generation space-borne  
active sensors

課題番号：17H06139

**岡本 創** (OKAMOTO, HAJIME)

九州大学・応用力学研究所・教授



研究の概要（4行以内）

雲の物理特性やその生成メカニズムの詳細はわかっておらず、気候変動予測の最大の不確定性要因とされる。本課題では雲微物理・質量フラックス・鉛直流の全球分布と、水平風鉛直シア相互作用の解明を目指す。そのため、ドップラー機能を有するアクティブセンサ搭載衛星観測を包含する次世代型地上観測システムの構築を行う。

研究分野：大気物理学

キーワード：気象学、地球観測、リモートセンシング、気候変動

**1. 研究開始当初の背景**

雲の物理特性は、地球放射収支や水循環と密接な関係があるが、大循環モデル(GCM)を用いた雲微物理特性の再現性はモデル間で大きな開きがあり、最大の気候変動の不確定性要因であるとされる。2018年以降には高スペクトル分解機能を持つドップラーライダーを搭載する ADM-Aeolus 衛星、ドップラー雲レーダと高分解ライダーを搭載する EarthCARE 衛星の打ち上げがそれぞれ予定されている。それらの抽出手法は確立していない。

**2. 研究の目的**

本課題では雲微物理・質量フラックス・鉛直流の全球分布と、水平風鉛直シア相互作用の解明を目指す。そのため、衛星観測を包含する次世代型地上観測システムの構築を行う。このシステムを用いた雲微物理特性抽出法を確立する。地上と衛星解析から得られる雲・降水・エアロゾル粒子の微物理量と鉛直流の情報から雲パラメタリゼーションの検証と高度化を狙う。

**3. 研究の方法**

衛星搭載ライダーと同等な信号を地上で再現可能な多視野角・多重散乱偏光ライダー、多波長・多重散乱高スペクトル分解ライダー(HSRL)、そして直接検波方式のドップラーライダー新たに開発する。これらにドップラー雲レーダを組み合わせた次世代型雲観測システムを構築し、衛星観測よりはるかに情報の多い観測を実現し、雲・降水・エアロゾル粒子の微

物理特性と鉛直流を求める。また衛星解析アルゴリズムの開発と検証を実施する。衛星全球解析から得られる雲微物理特性、雲内鉛直流や雲・降水粒子の質量フラックスと、雲周囲の風速の鉛直シアを統合解析し、雲パラメタリゼーションの検証を行う。

**4. これまでの成果**

世界初の波長355nmの多重散乱ライダーである多視野角・多重散乱偏光ライダーは5つの視野角(合計90mrad)で平行成分と直交成分を測定可能な10チャンネルのシステムで、校正と改良を重ね小金井の情報通信研究機構内に完成し、2018年より連続観測を開始している。このシステムによって CALIPSO、EarthCARE や 2018年に打ち上げられた Aeolus 衛星搭載ライダーのフットプリントサイズを網羅することが可能になった。

波長355nmの高スペクトル分解ライダー HSRL は、分子の後方散乱光と雲やエアロゾル粒子の後方散乱光を分離するために、初めて走査型マイケルソン干渉計を用いて波長355nmで高スペクトル分解機能を達成した。この新しいライダーによって、ラマンライダーのように夜間だけでなく、減衰の影響を受けないエアロゾルや雲の後方散乱係数と消散係数を独立して24時間連続抽出可能となった。このシステムは偏光解消度の観測も可能であり、EarthCARE 衛星搭載ライダー ATLID と同じ観測量がすべて得られる事になった。このライダーはそのSNRの高さから、消散係数をラマンライダーと比べ2から5倍程度精度よく求めるこ

とができる。

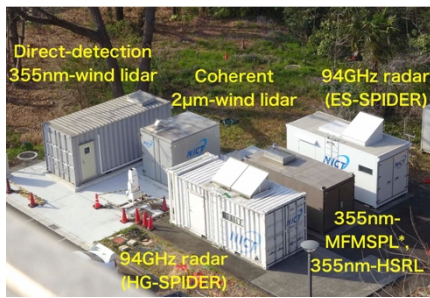


図 次世代型地上複合観測システム

光学的に厚い水雲や対流性の雲の場合、衛星ライダー信号には多重散乱の影響が卓越するが、従来はモンテカルロ法しかなく時間がかかりすぎて微物理特性抽出解析に利用できなかった。n 回の散乱後の位相関数を解析的に求め、散乱光を代表的な経路のもののみでモデル化し、モンテカルロ法と比較して遜色ない精度で多重散乱光の影響を受けた後方散乱係数を高速に計算可能な手法 Physical Model (PM 法)を開発した[5]。さらに、偏光解消度を計算可能にするために Vectorized Physical Model (VPM)法を開発した。VPM によって初めて衛星ライダーの偏光情報を高速かつモンテカルロ法と比較して 2-3%以内の誤差という非常に高精度で計算可能になった([2], Editor's pick 論文に選出)。これらの理論と多視野角・多重散乱ライダーの観測値との整合性も確認した[1]。

衛星搭載 HSRL の観測条件を考慮し、様々な氷粒子形状を網羅し幅広いサイズ分布を考慮した初めての後方散乱解析を実施した。消散係数と後方散乱係数の比で定義されるライダー比と偏光解消度の 2 次元ダイアグラムを利用することで、氷粒子の形状と配向状態の識別が可能になることを示した[3]。これらの理論的進展は衛星解析アルゴリズムに組み込まれて解析に適用されている[6]。

CALIPSO 衛星搭載ライダーで粒子識別した結果を用いて、CloudSat 衛星搭載雲レーダを用いた雲・降水粒子タイプ識別アルゴリズムを開発した。その結果初となる鉛直に解像された雲・降水粒子タイプの全球解析が可能になった[7]。さらに雹粒子と降雪粒子の識別が可能になった。CloudSat レーダと CALIPSO ライダーを複合的に利用して氷粒子の微物理特性の全球解析を行い、山岳地帯で氷粒子密度や氷水量が非常に大きい値をとること、それらは気温にはあまりよらなかったため上昇速度に依存している事が示唆された[4]。

## 5. 今後の計画

波長 355nm のドップラーライダーを現在開発中である。これらの新しいシステムによって EarthCARE 衛星搭載雲レーダと高スペクトル

分解ライダー ATLID、Aeolus 衛星搭載ドップラーライダーと同等な信号を地上で再現できる。地上と衛星から雲微物理特性と鉛直流・水平風鉛直シア解析から雲パラメタリゼーション解析を実施する。

## 6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

[1] Sato K., Okamoto H., Application of single and multiple-scattering theories to analyses of space-borne cloud radar and lidar data, In: Kokhanovsky A. (eds) Springer Series in Light Scattering, Springer, Vol.5, pp.1-37, 2020.

[2] Sato K., Okamoto H., Ishimoto H., Modeling the depolarization of space-borne lidar signals. Optics Express, 27, A117-A132, doi.org/10.1364/OE.27.00A117, 2019 (Editor's Pick に選出)。

[3] Okamoto H., Sato K., Borovoi A., Ishimoto H., Masuda K., Konoshonkin A., Kustova N., Interpretation of lidar ratio and depolarization ratio of ice clouds using spaceborne high-spectral-resolution polarization lidar. Optics Express, 27, 36587-36600, doi.org/10.1364/OE.27.036587, 2019.

[4] Seiki T., Kodama, C., Satoh, M., Hagihara, Y., Okamoto H., Characteristics of ice clouds over mountain regions detected by CALIPSO and CloudSat satellite observations, J. Geophys. Res.-Atmosphere, 10.1029/2019JD030519, 124, 1-20, 2019

[5] Sato K., Okamoto H., Ishimoto H., Physical model for multiple scattered space-borne lidar returns from clouds, Optics Express, 26, A301-A319, doi.org/10.1364/OE.26.00A301, 2018.

[6] Okamoto H., Sato K., Cloud Remote Sensing by Active Sensors: New Perspectives from CloudSat, CALIPSO and EarthCARE, Remote Sensing of Clouds and Precipitation, In Andronache C. (eds), Springer Remote Sensing/Photo-grammetry, Springer, doi.org/10.1007/978-3-319-72583-3\_8, 2018.

[7] Kikuchi M., Okamoto H., Sato K., Suzuki K., Cesana G., Hagihara Y., Takahashi N., Hayasaka T., Oki R., Development of Algorithm for Discriminating Hydrometeor Particle Types with a Synergistic Use of CloudSat and CALIPSO, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 122., doi.org/10.1002/2017 JD027113, 2017.

受賞 科学技術分野の文部科学大臣表彰「科学技術賞」(2018年)

## 7. ホームページ等

<https://www.riam.kyushu-u.ac.jp/gfd/KIBANS.html>