

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25247078

研究課題名(和文) 多重散乱ライダー・雲レーダの複合観測システムの構築と全球雲微物理特性解析

研究課題名(英文) Development of multiple-scattering lidar and radar system to analyze global cloud microphysics

研究代表者

岡本 創 (Okamoto, Hajime)

九州大学・応用力学研究所・教授

研究者番号：10333783

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,200,000円

研究成果の概要(和文)：光学的に厚い雲の観測を実現するため、多視野角・多重散乱・偏光ライダー(MFMSPL)を開発した。MFMSPLによって観測される水雲の偏光解消度は、従来のライダーから得られるものより大きい値を示した。95GHz雲レーダとMFMSPLによる同時観測の結果、雲頂高度はよい一致を示していた。MFMSPLを用いて、衛星搭載ライダーの解析で利用されている雲検出アルゴリズムと、雲粒子タイプ識別アルゴリズムの検証を行った。この結果、現在使用されているCALIPSO衛星解析用のアルゴリズムは、下層雲の雲量を過小評価する傾向のあることがわかった。

研究成果の概要(英文)：We developed a multiple-field-of-view multiple-scattering polarization lidar (MFMSPL) to study the microphysics of optically thick clouds. Depolarization ratios from water clouds were large as observed by MFMSPL compared to those observed by conventional lidar. Co-located 95 GHz cloud radar and MFMSPL observations showed reasonable agreement at the observed cloud top height. The MFMSPL system was used to evaluate an algorithm for cloud mask. It turned out that current algorithm for CALIPSO underestimated low-level cloud fraction.

研究分野：気象学

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 ライダ

1. 研究開始当初の背景

(1) 2006年4月に打ち上げられた CALIPSO 衛星に搭載されたライダーと CloudSat 衛星に搭載された雲レーダによって、全球で雲の物理特性の鉛直分布に関する知見が蓄積されつつある。衛星搭載ライダーはそのフットプリントが、大きいと、ライダー後方散乱光に対する多重散乱の影響も非常に大きくなる。一方従来の地上のライダーは視野角が小さいため、多重散乱の影響は限定的で光学的に厚い雲の雲底付近しか観測する事ができなかった。このような状況のため、衛星ライダーで得られる観測量の解釈は困難であった。

(2) 従来の地上ライダーの観測限界を大きく超える多重散乱ライダーという技術も生まれている(Davis 2005)。多重散乱ライダーは広い視野角を持つことで光学的に厚い雲の観測も可能になると考えられる。この多重散乱ライダーを多視野角し、従来不可能だった偏光解消度の観測を可能にし、さらに雲レーダと組み合わせることで、これまで未解決だった衛星搭載アクティブセンサによって光学的に厚い雲の高精度の解析が可能になると考えた。

2. 研究の目的

(1) 地上において光学的に厚い雲の後方散乱係数と偏光解消度の観測を可能とする多視野角で、後方散乱係数と偏光解消度を観測可能な多視野角・多重散乱・偏光ライダー(Multiple-Field of View Multiple-Scattering Polarization Lidar: 以下 MFMSPL)を開発する。MFMSPL と雲レーダを複合的に利用する観測システムを構築する。

(2) この観測システムを用いて、衛星に搭載されたアクティブセンサの観測量に現れる多重散乱過程を解明し、水雲と氷雲の解析を可能とする衛星観測解析アルゴリズムを確立する。アクティブセンサ解析から得られた雲の物理特性と、赤外サウンダ AIRS から得られた水蒸気量と気温を統合したデータセットを作成する。それらから雲の生成消滅過程を解明し、また大気大循環モデルの比較検証を通して、雲再現性の向上を目指す。

3. 研究の方法

(1) 本課題では、衛星解析で高精度の雲物理特性の抽出を実現するために、衛星に搭載されたライダーの観測値に現れるものと同様な物理過程を観測可能な地上ライダーを開発する。それによって衛星解析で使用するアルゴリズム開発を行う。

(2) MFMSPL システムは、8つのチャンネル(4つの平行成分と4つの垂直成分)から構成され、1つのチャンネルの視野角は10mradで、奇数チャンネルは10mrad ずつ傾けて設置され、1、3、5、7チャンネルの鉛直方向からの角度はそれぞれ0、10、20、30mradである。偶数チャンネルも同様に、2、4、6、8チャンネルの角度はそれぞれ0、10、20、30mradである。波長は532nmである。MFMSPLの時間

分解能は10秒、鉛直分解能は6mである。MFMSPLの校正は、同じ国立環境研究所の敷地内で稼働しているミーライダーの同じ波長532nmのあらかじめ校正された信号と比較することによって行う。

(3) MFMSPLの観測性能を検証するため、MFMSPLと95GHz雲レーダの同時観測を実施する。2つのアクティブセンサで得られる光学的に厚い雲域の雲頂高度を比較する。MFMSPLによって得られる観測量は、モンテカルロ法によるライダーの多重散乱の計算結果と比較する。

4. 研究成果

(1) つくば国立環境研究所で2015年3月5日に下層雲が出現した時のMFMSPLとミーライダーの同時観測を実施した。ミーライダーの信号は雲底より上層では大きく減衰し、雲底より500m以上高高度では信号が検出されなかった。これに対しMFMSPLの鉛直上向き以外のチャンネル(オフビーム)では雲頂高度が高く、雲の幾何学的厚さはオンビーム2-3倍程度であった(図1)。真上向きのチャンネル(オンビーム)の場合は、ミーライダーと同様に低い雲頂高度を示した。

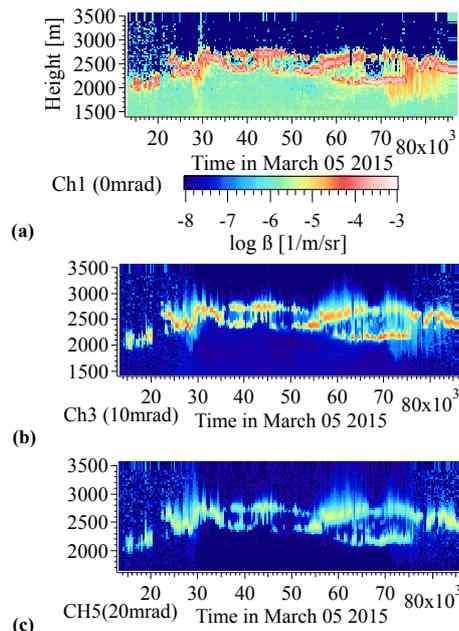


図1 2015年3月5日に多視野角・多重散乱ライダー(MFMSPL)によって観測された下層雲の減衰後方散乱係数。(a)は真上向き、(b)は10mrad傾けたチャンネル、(c)は20mrad傾けたチャンネル(Okamoto et al., 2016から引用)。

(2) オンビームチャンネル1と2から求められる偏光解消度はミーライダーと同様な小さい値を示しているのに対し、オフビームチャンネルから求められる偏光解消度は、最大で80%程度の大きい値を示した(図2)。偏光解消度の値は、雲頂に向かって増加する傾向を示していた。このように光学的に厚い雲域の

偏光解消度を地上ライダで観測したのは、この測器によるものが初めてとなる。

(3) MFMSPL によって観測された減衰後方散乱係数と偏光解消度の値は、CALIPSO 衛星搭載のライダによって取得された値と同様の傾向や値であり、これは本ライダシステムが、衛星ライダの信号を地上において再現するのに適したものであることを示している。

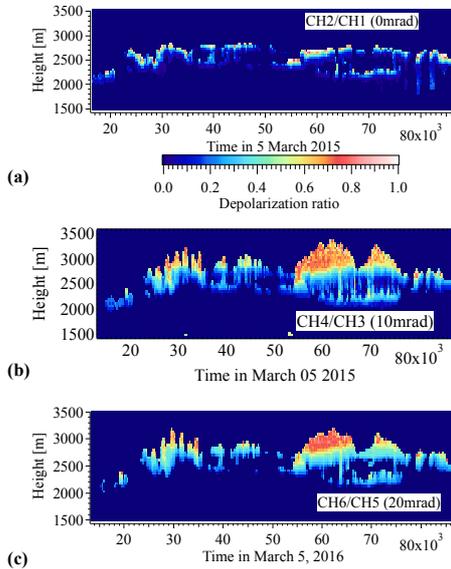


図2 図1と同様だが、下層雲の偏光解消度 (Okamoto et al., 2016 から引用)。

(4) MFMSPL によって取得された雲域の検証として、雲レーダを用いた同時観測を実施した (図3)。雲レーダに雲マスクを適用した結果を図3 a に示した。同様の雲で MFMSPL のオンビームチャンネル、10mrad 傾けたオフビームチャンネルで観測された結果に、このシステム向けの雲マスクを新たに開発して適用した結果得られた雲域を図3 a, b, c にそれぞれ示した。比較のため雲レーダで得られた雲頂を桃色で示しているが、オンビームチャンネルの雲頂高度は雲レーダと同等で、オフビームチャンネルの雲頂高度は雲レーダのものと同様か、それよりやや高いことがわかる。

(5) このような MFMSPL の雲レーダとの比較による観測的検証に加えて、理論的解析も行った。MFMSPL によって得られた雲頂がライダ光の多重散乱による (時間の遅れた) フォトンによって現れたみかけのものでない事を示すため、ライダに対する時間に依存した放射伝達方程式をモンテカルト法によって解析した。雲の上に大気分子の層を考慮した計算の結果、各チャンネルとも、雲頂の信号強度は、その上にある大気分子のものより4桁以上大きな値を示しており、雲と大気分子の区別は十分可能であると結論された。よって MFMSPL で示される雲頂高度は、妥当なものであることがわかった。均質の雲微物理特性を仮定した理論計算の結果、平行成分と垂直成分の信

号強度の和は雲底より少し上の高度で最大を示し、その上の高度では減衰傾向を示し、一方偏光解消度は雲頂に向かって概ね増加する傾向であった。これらの結果は CALIPSO 衛星の観測結果とも同様な傾向であり、衛星ライダと同様の多重散乱過程を再現する MFMSPL の観測結果の妥当性を示している。

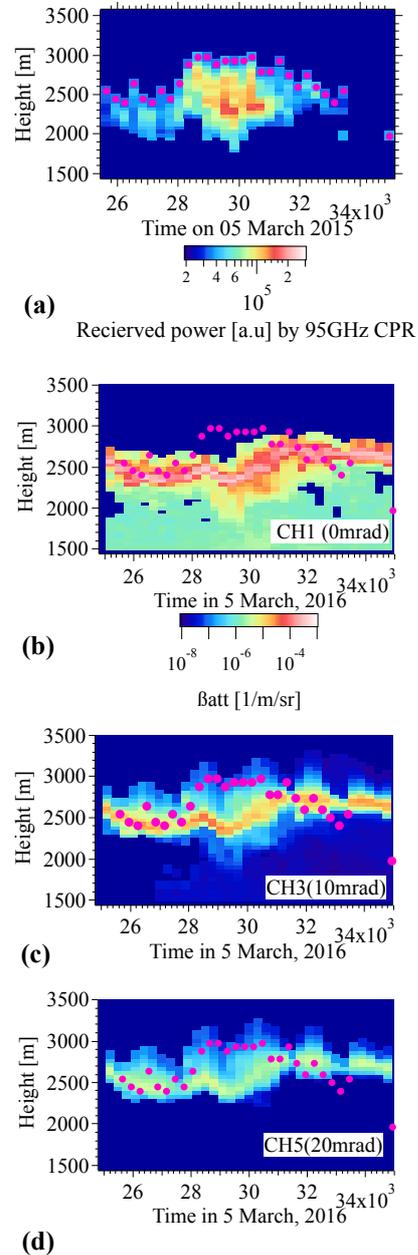


図3 雲レーダによる MFMSPL から求められた雲域検出結果の検証。(a)雲レーダによるもの、(b)MFMSPL のオンビームチャンネルによるもの、(c) 10mrad 傾けたオフビームチャンネルによるもの、(d) 20mrad 傾けたもの (Okamoto et al., 2016 から引用)。

(6) 次に MFMSPL の観測データをもとにして、衛星ライダの雲マスクを検証した。現在我々のグループで開発・データ解析に利用してい

る CALIPSO 衛星搭載ライダーに対する雲マスクを、MFMSPL のデータに適用したところ、雲頂付近の雲域を大きく過小評価（衛星ライダーの場合雲底付近の雲域を過小評価）する結果となった。これに対して、今回新たに開発した衛星ライダー解析用の雲マスクは雲レーダと同様もしくはそれ以上の高度に雲頂を検出することから、衛星ライダー解析でも雲域検出を改善する事が期待できる。

(7) 従来我々のグループで開発してきた雲粒子タイプ識別アルゴリズムをこのデータに対して実施したところ、今回開発した雲マスクで検出可能で、従来のものでは検出されない領域では、水雲であるところを氷雲と誤判定する可能性があることが判明した。この誤判定は改良された雲粒子タイプアルゴリズムでは改善された。

(8) 現在 CALIPSO 衛星搭載ライダーを用いた全球の氷雲と水雲解析結果は、NASA ラングレー研究所の提供する標準プロダクト、フランスの GOCCP プロダクト、そして我々のグループの KU-type プロダクトが存在する。これらを比較した結果、氷雲・水雲とも3つのプロダクト間で大きく結果が異なっていた (Cesana et al., 2016)。この要因として、3つのプロダクト作成で利用されたアルゴリズム間で、雲域におけるライダー多重散乱光の取り扱いの違いが大きいためと考えられる。

(9) MFMSPL を利用して改良された雲マスクを CALIPSO の全球データに適用したところ、我々の結果は、従来の我々のものと比較して下層で大きく雲量が増加し、特に水雲はその雲量が10%程度増加した。この結果、水雲の3つのプロダクトの差は減少した。

(10) AIRS センサを用いて従来より水平解像度で3倍、鉛直解像度で2倍程度の高分解能で、水蒸気量と気温を解析した。これらのデータと CloudSat と CALIPSO 衛星との同期したデータを比較し、雲の出現頻度と過飽和度の関係を全球で解析した。その結果、氷粒子の生成に鉛直流や氷の凝結核の影響が強く示唆される結果が得られた。

(11) 今後は地上の MFMSPL のデータと、そのデータによって開発されたアルゴリズムを衛星搭載アクティブセンサに適用し、従来よりも格段に精度の高い、雲の物理特性解析を行うことが可能になると期待できる。

<引用文献>

- ① Davis, A. B., Multiple-scattering lidar from both sides of the clouds: Addressing internal structure, *J. Geophys. Res.* 113(D14), D14S10, 2008.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 41 件)

- ① Okata, M., T. Nakajima, K. Suzuki, T. Inoue, T. Y. Nakajima, H. Okamoto, A

study on radiative transfer effects in 3D cloudy atmosphere using satellite data, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 査読あり, 121, 2017, 443-468, doi:10.1002/2016JD025441.

- ② Konoshonkin, A., A. Borovoi, N. Kusutova, H. Okamoto, H. Ishimoto, Y. Grynko, J. Foestner, Light scattering by ice crystals of cirrus clouds: From exact numerical methods to physical-optics approximation, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 査読あり, 192, 2016, 132-140, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.12.024>.
- ③ Okamoto, H., K. Sato, T. Nishizawa, N. Sugimoto, T. Makino, Y. Jin, A. Shimizu, T. Takano, and M. Fujikawa, Development of a multiple-field-of-view multiple-scattering polarization lidar: comparison with cloud radar, *Opt. Express*, 査読あり, 24, 26, 2016, 30053-30067, doi:https://doi.org/10.1364/OE.24.030053.
- ④ Cesana, G., H. Chepfer, D. Winker, B. Getzewich, X. Cai, O. Jourdan, G. Mioche, H. Okamoto, Y. Hagihara, V. Noel, M. Reverdy, Using In-Situ Airborne measurements to evaluate three cloud phase products derived from CALIPSO, *J. Geophys. Res., Atmos.*, 査読あり, 121, 2016, 5788-5808, doi:10.1002/2015JD024334.
- ⑤ Hashino, T., M. Satoh, Y. Hagihara, S. Kato, T. Kubota, T. Matsui, T. Nasuno, H. Okamoto, M. Sekiguchi, Evaluating Arctic cloud radiative effects simulated by NICAM with A-train, *J. Geophys. Res., Atmos.*, 査読あり, 121, 2016, 7041-7063, doi:10.1002/2016JD024775.
- ⑥ Seiki, T., C. Kodama, M. Satoh, T. Hashino, Y. Hagihara, H. Okamoto, Vertical grid spacing necessary for simulating tropical cirrus clouds with a high-resolution AGCM, *Geophys Res Lett*, 査読あり, 42, 10, 2015, 4150-4157, DOI: 10.1002/2015GL064282.
- ⑦ Hirakata, M., H. Okamoto, Y. Hagihara, T. Hayasaka, Comparison of global and seasonal characteristics of cloud phase and horizontal ice plates derived from CALIPSO with MODIS and ECMWF, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 査読あり, 31, 10, 2014, 2114-2130, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00245.1>.
- ⑧ Ishimoto, H., K. Okamoto, H. Okamoto, K. Sato, One-dimensional variational

(1D-Var) retrieval of middle to upper tropospheric humidity using AIRS radiance data., J. Geophys. Res. Atmos., 査読あり, 119, 12, 7633-7654, 2014, DOI: 10.1002/2014JD021706.

- ⑨ Iwabuchi H., Yamada, S., S. Katagiri, P. Yang, H. Okamoto, Radiative and Microphysical Properties of Cirrus Cloud Inferred from Infrared Measurements Made by the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Part I: Retrieval Method, J. Appl. Meteor. and Clim., 査読あり, 53, 5, 2014, 1297-1316, doi:10.1175/JAMC-D-13-0215.1.
- ⑩ Hagihara, Y., H. Okamoto, Z. Luo, Joint analysis of cloud-top heights from CloudSat and CALIPSO: New insights into cloud-top microphysics, J. Geophys. Res. Atmos., 査読あり, 119, 2014, 4087-4106, doi:10.1002/2013JD020919.

[学会発表] (計 88 件)

- ① Okamoto, H., Relationship between ice supersaturation and ice microphysics inferred from CloudSat, CALIPSO and AIRS, International Radiation Symposium 2016, 2016年4月20日, 「オークランド(ニュージーランド)」.
- ② Okamoto, H., Development of multiple scattering polarization lidar to observe depolarization ratio of optically thick low-level clouds, International Radiation Symposium 2016, 2016年4月20日, 「オークランド(ニュージーランド)」.
- ③ Okamoto, H., Depolarization ratio of clouds measured by multiple-field of view multiple scattering polarization lidar, 27th International Laser Radar Conference, 2015年7月7日, 「ニューヨーク (アメリカ)」.
- ④ Okamoto, H., Evaluation of ice cloud retrievals using CloudSat/CALIPSO/MODIS/AIRS and EarthCARE, 2014 American Geophysical Union Fall meeting, 2014年12月15日, 「サンフランシスコ (アメリカ)」.
- ⑤ Okamoto, H., Ice particle type and microphysics in high latitudes by spaceborne active sensors: regional characteristic and annual variability, Davos-Atmosphere and Cryosphere Assembly 2013 (DACA-13), 2013年7月8日, 「ダボス (スイス)」.

[その他]

<http://www.riam.kyushu->

u.ac.jp/gfd/okamoto_project1.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 創 (Okamoto, Hajime)
九州大学・応用力学研究所・教授
研究者番号: 10333783

(2) 研究分担者

佐藤 可織 (Sato, Kaori)
九州大学・応用力学研究所・助教
研究者番号: 00584236

(3) 研究分担者

西澤 智明 (Nishizawa, Tomoaki)
国立研究開発法人国立環境研究所・環境計測センター・室長
研究者番号: 10462491

(4) 研究分担者

鷹野 敏明 (Takano, Toshiaki)
千葉大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 40183058

(5) 研究分担者

石元 裕史 (Ishimoto, Hiroshi)
気象庁気象研究所・気象衛星・観測システム研究部・室長
研究者番号: 70281136