

平成 22年 4月 30日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19340132

研究課題名(和文) 衛星搭載雲レーダー・ライダー・赤外サウンダーを用いた上層雲生成・消滅機構の研究

研究課題名(英文) Study of generation/dissipation mechanisms by space-borne cloud radar, lidar and infrared sounder

研究代表者

岡本 創 (OKAMOTO HAJIME)
 東北大学・大学院理学研究科・准教授
 研究者番号：10333783

研究成果の概要(和文)：

CloudSat 衛星と CALIPSO 衛星のデータから雲域を検出できる手法を開発した。CALIPSO 衛星を用いた標準の雲検出手法には、エアロゾルやノイズを雲域と誤判定してしまう問題があることがわかった。また CALIPSO 衛星から雲粒子の相や配向の情報を求める手法を独自に開発した。CloudSat と CALIPSO に対して適用可能なアルゴリズムを開発し、雲微物理特性が求められるようになった。

研究成果の概要(英文)：

We developed the cloud detection method using CloudSat and CALIPSO data. Our cloud mask results for CALIPSO have less contamination by noise and aerosols compared with the standard CALIPSO mask, Vertical Feature Mask. Then we developed cloud particle type discrimination method for CALIPSO. Finally we developed a new radar-lidar algorithm that can be applied to CloudSat and CALIPSO data in order to retrieve ice cloud microphysics.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2008年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2009年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
年度			
総計	10,000,000	3,000,000	13,000,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・気象・海洋物理・陸水学

キーワード：気象、レーダー

1. 研究開始当初の背景

(1) 大気上層にある巻雲等の氷粒子から成る雲の生成と消滅のメカニズムは、雲-放射の

フィードバック機構を通して気候システムに対して非常に大きな影響を与えているが、その見積もりには大きな不確実性があるとされる(Stephens 2005)。この理由として、

上層にある雲は直接的観測が困難であること、多層構造の雲に衛星に搭載された受動センサーを用いたリモートセンシングで雲頂高度や雲底高度等や雲微物理量を求めることには問題が大きいこと (Rossow et al., 2005)、雲の鉛直分布が全球的によくわかっていないために、数値モデルに組み込まれた雲の生成スキームについての評価が不十分な状況にあること、雲を分解するには全球モデルの水平分解能が粗いこと等、観測とモデルの双方に存在する様々な問題が挙げられる。

(2)このような状況を打開するため、2006年4月にはアメリカNASAの主導で雲レーダーを搭載した CloudSat、可視と赤外の波長を持ったライダーを搭載したCALIPSO衛星がそれぞれ打ち上げられ、全球における観測を開始した。これらの衛星センサーを用いて雲を観測することで、下層雲から上層雲までの対流圏全体にわたり雲の鉛直分布を測定することが可能となる。

2. 研究の目的

(1)ここでは、対象を上層に存在する氷粒子で構成される上層雲とする。この課題では、CloudSat/CALIPSO/AIRS/MODIS の4つのセンサーを統合して解析を行うこととする。
(2)雲域の検出には、CloudSat と CALIPSO を使い、その比較検証にイメージャーセンサーである MODIS も使用する。CloudSat/CALIPSO の組み合わせによる雲微物理情報（有効半径と氷水量の鉛直分布を全球で求める）と AIRS から求められる温度と水蒸気量の組み合わせることで、雲の出現頻度、氷水量、有効半径と過飽和度のそろった初めての全球のデータセットを作成する。これらから上層雲の生成消滅メカニズムについての研究を実施することを目的とする。
ここでは、従来から取得してきた詳細な船舶搭載レーダライダーをもとに、中緯度と熱帯の上層雲のデータについてまず解析アルゴリズムを開発する。それらを衛星用に改良する。

3. 研究の方法

(1)雲域検出には、まず船舶搭載雲レーダとライダー用に雲検出手法を開発、検証する。それを CloudSat と CALIPSO 用に改良し、衛星からの雲域解析に用いる。
(2)氷雲検出には、ライダーの偏光解消度を利用する雲粒子タイプ解析アルゴリズムを作成する。そのために多重散乱の解析にはモンテカルロ法を用いる。
(3)氷粒子の微物理特性抽出には、CloudSat と CALIPSO を組み合わせる。レーダとライダーの解析アルゴリズムは、従来地上レーダ・ラ

イダに対して開発してきた、ものを衛星用に改良する。氷粒子の非球形性に対しては、レーダ波長の氷粒子の散乱には discrete dipole approximation (DDA)法を、可視波長のライダーに対する後方散乱の計算に対しては、幾何光学領域のキルヒホッフ積分法を用いることで対処する。

(4) MODIS センサによる雲域検出には、従来 AVHRR センサ、GLI センサに対して開発してきたものを適用する。

(5)AIRS センサによる温度と相対湿度抽出には、雲域上空の空気塊に対しても適用可能なものを新たに開発する。

(6)最後にこれらを統一したデータ解析を行う。

4. 研究成果

(1)観測船みらいに搭載した 95GHz 雲レーダと可視・近赤外波長の偏光ライダーデータをもとに、雲域検出アルゴリズムを作成した。観測データは中緯度と熱帯域のものを用いた。

(2)これらに基づいて、CloudSat と CALIPSO 用の雲検出アルゴリズムを開発し全球で雲域の3次元分布を作成した。CALIPSO に関しては、標準雲検出アルゴリズムである Vertical Feature Mask (VFM)があるが、ノイズやエアロゾルの濃度の高い領域で、VFM が雲域を過大評価する傾向であることがわかった。これに対して、我々の独自に開発したものは、それらの問題を解決していること、さらに上層雲では、VFM の水平解像度が最大で80 kmになるのに対し、我々のものは1.1kmであるのも大きな特徴としてあげられる。

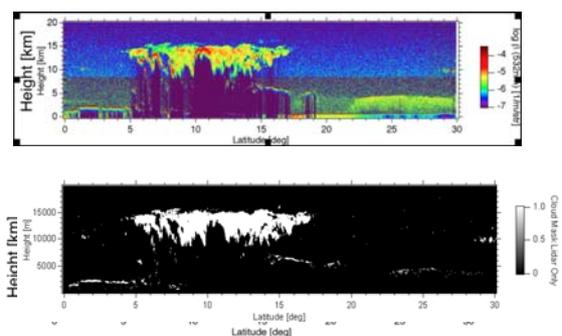


図1 上からCALIPSOに後方散乱係数の高度緯度断面、VFMによる雲検出結果、我々独自の雲検出結果。

(3) MODIS センサを利用した雲検出精度向上のため、雲スクリーニングアルゴリズムの開発を行った。MODISの12のチャンネル情報を元に各観測ピクセルにおける大気の状態を「大気晴天信頼度(Clear Confidence Level, 以下、「CCL」)」とよばれる実数値指標を用いて表現するアルゴリズム、CLAUDIA (Cloud and Aerosol Unbiased Decision Intellectual

Algorithm)を開発した。

(4) 全球で3次元の雲出現頻度を解析し、帯状平均値を求めた。この結果、下層雲ではVFMが30%程度雲出現頻度を過大評価していること、上層雲でも全緯度帯で過大評価していること、我々の雲検出手法をもとにして求めた2次元の雲量は、MODISから求められたものと極域をのぞいて一致すること、極域では、MODIS センサが雲量を過小評価することが定量的に示された。

(5) 同様に、みらい搭載のデータを用いて、雲粒子タイプ識別手法を開発した。それを衛星解析用に改良した。衛星搭載ライダーの地上設置型ライダーとの違いは、多重散乱の寄与の大きさである。モンテカルロシミュレーションを実施した結果、水雲は、地上では偏光解消度が10%以下であるが、衛星からは、多重散乱の影響でそれより大きくなることがわかった。つまり衛星の場合、偏光解消度だけで氷粒子と水粒子の識別をすることが困難となる。この問題に対し、消散係数として、上下の連続する層の後方散乱強度の比を計算し、それに偏光解消度を合わせて解析利用することで水、氷の識別、さらに氷粒子が3次元空間にランダムに配向しているか、水平面にランダムに配向した板状の氷粒子かを区別可能になった。さらに雲粒子タイプの全球分布を求めた。この結果、水と氷粒子の存在比は、-10度付近でほぼ同じくらいになること、緯度帯によって、この比は大きく変化することが示された。また2次元平面に配向した板状粒子は、-10度から-20度の間で、緯度帯によらず全球で出現することがわかった。

(6) 地上設置型レーダとライダー用に開発した微物理量抽出用アルゴリズムをCloudSatとCALIPSO解析に用いることが可能なように改良した。また、今回最大の特徴として、CALIPSOの信号に現れる鏡面散乱を取り扱えることがあげられる。入力データとして、CloudSatから得られるレーダ反射因子とCALIPSOから得られる可視波長におけるライダー後方散乱係数、そして偏光解消度を用いる。これらの観測量から、氷粒子の有効半径、氷水量、そして板状粒子の質量存在比である。これによると、従来のレーダ・ライダーアルゴリズムでは、板状粒子が引き起こすと考えられる鏡面散乱が観測される領域では、氷粒子の雲微物理量を抽出することができなかったが、新しいアルゴリズムでは解析可能になった。これによって解析可能な領域が大幅に増えること、鏡面散乱の起きる領域では、有効半径が100ミクロン以上と大きくなっていたことがわかった。

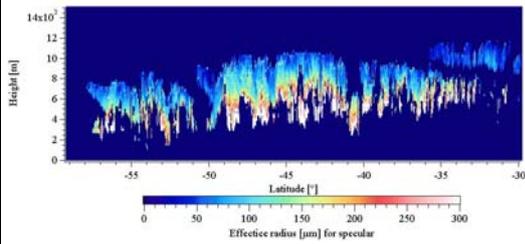


図2 CAIPSOで観測された鏡面散乱を含む雲に対してレーダライダーアルゴリズムを適用することで求められた氷粒子の有効半径の高度緯度断面図。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計26件)

- ① Hagihara, Y., H. Okamoto, R. Yoshida (2010), Development of combined CloudSat/CALIPSO cloud mask to show global cloud distribution. J. Geophys. Res., 査読あり (in press)
- ② Yoshida, R., H. Okamoto, Y. Hagihara, and H. Ishimoto (2010), Global analysis of cloud phase and ice crystal orientation from CALIPSO data using attenuated backscattering and depolarization ratio. J. Geophys. Res., 査読あり (in press)
- ③ Sato, K., H. Okamoto, T. Takemura, N. Sugimoto and H. Kumagai (2010). Characterization of ice cloud properties obtained by shipborne radar/lidar over the tropical western Pacific Ocean for evaluation of an atmospheric general circulation model, J. Geophys. Res., 査読あり (in press)
- ④ Deng, M., G. G. Mace, Z. Wang, and H. Okamoto, (2010), TC4 Validation for Cirrus Cloud Profiling Retrieval Using CloudSat Radar and CALIPSO Lidar, J. Geophys. Res., 査読あり (in press)
- ⑤ Iwasaki, S., T. Shibata, J. Nakamoto, H. Okamoto, H. Ishimoto and H. Kubota, (2010), Characteristic of deep convection measured by using the A-train constellation, (2010), J. Geophys. Res., 査読あり, 115, D06207, doi:10.1029/2009JD013000.
- ⑥ Zubko, E., D. Petrov, Y. Grynko, Y. Shkuratov, H. Okamoto, K. Muinonen, T. Nousiainen, H. Kimura, T. Yamamoto, and G. Videen (2010), Validity criteria of the discrete dipole approximation, Appl. Opt. 査読あり, Vol. 49, issue 8, 1267-1279.
- ⑦ Hagihara Y., H. Okamoto, and T. Y. Nakajima, (2009), Synergy use of MODIS, CloudSat and CALIPSO for improved retrieval of liquid

- water cloud microphysical properties, Current Problems in Atmospheric Radiation (IRS2008), Proc. International Radiation Symposium, 査読あり, 259-262
- ⑧ Nishizawa T., N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, T. Takemura, and H. Okamoto, (2009), Aerosol Retrieval from Dual-wavelength Polarization Lidar Measurements over Tropical Pacific Ocean and Validation of a Global Aerosol Transport Model, Current Problems in Atmospheric Radiation (IRS2008), Proc. International Radiation Symposium, 査読あり, 303-306
- ⑨ Okamoto, H., K. Sato, S. Otomo, Y. Hagihara, R. Yoshida, K. Iwanami, T. Maesaka, M. Murakami, N. Orikasa, M. Nakazato, H. Yamauchi, H. Inoue, (2009), Multi-wavelength radar algorithm, with Doppler function for the retrieval of cloud microphysics with precipitation, Current Problems in Atmospheric Radiation (IRS2008), Proc. International Radiation Symposium, (査読あり), 307-310
- ⑩ Sato K., H. Okamoto, and Y. Hagihara, (2010), Sensitivity study for the interpretation of Doppler signal of space-borne 95-GHz cloud radar, Current Problems in Atmospheric Radiation (IRS2008), Proc. International Radiation Symposium, 査読あり, 323-326
- ⑪ Okamoto, H., K. Sato and Y. Hagihara, (2009) Retrieval of ice cloud microphysics by synergy use of CloudSat and CALIPSO data, Current Problems in Atmospheric Radiation (IRS2008), Proc. International Radiation Symposium, 査読あり, 412-415
- ⑫ Sato, K., H. Okamoto, M. K. Yamamoto, S. Fukao, H. Kumagai, Y. Ohno, H. Horie, and M. Abo, (2009), 95-GHz Doppler radar and lidar synergy for simultaneous ice microphysics and in-cloud vertical air motion retrieval, J. Geophys. Res., 査読あり, 114, D03203, doi:10.1029/2008JD010222
- ⑬ Fujiwara, M., S. Iwasaki, A. Shimizu, Y. Inai, M. Shiotani, F. Hasebe, I. Matsui, N. Sugimoto, H. Okamoto, N. Nishi, A. Hamada, T. Sakazaki, and K. Yoneyama, (2009), Cirrus Observations in the Tropical Tropopause Layer 1 Over the Western Pacific, J. Geophys. Res., 査読あり, 114, D09304, doi:10.1029/2008JD011040
- ⑭ Zubko, E., H. Kimura, Y. Shkuratov, K. Muinonen, T. Yamamoto, H. Okamoto and G. Videen, (2009) Effect of absorption on light scattering by agglomerated debris particles, J Quant Spectrosc radiative Transfer, 査読あり, ,doi:10.1016/j.jqsrt. 2008.12.006,110, 1741-1749.
- ⑮ Nakajima, T. Y., H. Masunaga, T. Nakajima, (2009), Near-global scale retrievals of the cloud optical and microphysical properties from the Midori-II GLI and AMSR data. *Journal of Remote Sensing Society of Japan*, 査読あり, **29**, 29-39.
- ⑯ Ishida, H., and T. Y. Nakajima, (2009), Development of an unbiased cloud detection algorithm for a spaceborne multispectral imager. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 査読あり、doi:10.1029/2008JD010710.
- ⑰ Ishimoto, H., (2009), Retrieval of upper tropospheric relative humidity profiles over low clouds from the atmospheric infrared sounder, Geophys. Res., Lett., 査読あり, 36, L11814, doi:10.1029/2009GL037665
- ⑱ Ishimoto, H., (2008), Radar backscattering computations for fractal shaped snowflakes, J. Meteor. Soc. Japan, 査読あり、86, 459-469.
- ⑲ Okamoto, H., T. Nishizawa, T. Takemura, K. Sato, H. Kumagai, Y. Ohno, N. Sugimoto, A. Shimizu, I. Matsui, and T. Nakajima, (2008), Vertical cloud properties in the tropical western Pacific Ocean: Validation of the CCSR/NIES/FRCGC GCM by shipborne radar and lidar, J. Geophys. Res., 査読あり、113, D24213, doi:10.1029/2008JD009812.
- ⑳ Nishizawa, T., H. Okamoto, T. Takemura, N. Sugimoto, I. Matsui, and A. Shimizu, (2008), Aerosol retrieval from two-wavelength backscatter and one-wavelength polarization lidar measurement taken during the MR01K02 cruise of the R/V Mirai and evaluation of a global aerosol transport model, J. Geophys. Res., 査読あり、113, D21201, doi:10.1029/2007JD009640.
- ㉑ Hamada A., N. Nishi, S. Iwasaki, Y. Ohno, H. Kumagai and H. Okamoto, (2008) Cloud type and top height estimation for tropical upper-tropospheric clouds using GMS-5 split-window measurements combined with cloud radar measurements, SOLA, 査読あり、4, 057-060
- ㉒ Yamamoto, M., Y. Ohno, H. Horie, N. Nishi, H. Okamoto, K. Sato, H. Kumagai, M. Yamamoto, H. Hashiguchi, S. Mori, N. O. Hashiguchi, H. Nagata and S. Fukao, (2008), Observation of particle fall velocity in cirriform cloud by VHS and millimeter-wave Doppler radars, J. Geophys. Res., 113, 査読あり、D12210, doi:10.1029/2007JD009125.
- ㉓ Nishizawa, T., N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, B. Tatarov and H. Okamoto, (2008), Algorithm to Retrieve Aerosol Optical Properties From High-Spectral-Resolution Lidar and Polarization Mie-Scattering Lidar Measurements,

IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 査読あり、
vol. 46, no. 12, pp. 4094-4103.

- ㊸ Heymsfield, A. J., A. Protat, R. Austin, D. Bouniol, R. Hogan, H. Okamoto, K. Sato, G. Zadelhoff, D. Donovan, and Z. Wang, (2008), Testing and evaluation of ice water content retrieval methods using radar and ancillary measurements, *J. Appl. Meteor. Climate*, 査読あり、47, 135-163.
- ㊹ Okamoto, H., T. Nishizawa, T. Takemura, H. Kumagai, H. Kuroiwa, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, A. Kamei, S. Emori, and T. Nakajima, (2007), Vertical cloud structure observed from shipborne radar and lidar: mid-latitude case study during the MR01/K02 cruise of the R/V Mirai, *J. Geophys. Res.*, 査読あり、112, D08216, doi:10.1029/2006JD007628.
- ㊺ Nishizawa, T., H. Okamoto, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, K. Aoki, (2007), An algorithm that retrieves aerosol properties from dual-wavelength polarized lidar measurements, *J. Geophys. Res.*, 査読あり、112, D06212, doi:10.1029/2006JD007435.

[学会発表] (計 23 件)

- ① Okamoto, H., (2009), Global analysis of ice properties from CloudSat and CALIPSO, Fourth Japan-China-Korea Joint conference on Meteorology, 2009年11月8日, つくば.
- ② Okamoto, H., K. Sato and Y. Hagihara (2007), Retrieval of ice cloud microphysics by synergy use of CloudSat and CALIPSO data, International radiation Symposium (IRS2008), 2008年8月5日, ブラジル イグアス.
- ③ Okamoto, H., (2007), Cloud vertical structure observed by ship-based and space-borne radar and lidar, The International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG2007), 2007年7月8日, イタリア ペルージャ.

[図書] (計 1 件)

- ① 岡本 創, 杉本伸夫 (2008) 第7章 アクティブセンシングで見るエアロゾルと雲, (中島映至、早坂忠裕 (編) 気象研究ノート 218号「エアロゾルの気候と大気環境への影響」日本気象学会, p. 95-109

[その他]

ホームページ等

<http://caos-a.geophys.tohoku.ac.jp/housha/project/index.html>

(1) 研究代表者

岡本 創 (OKAMOTO HAJIME)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号: 10333783

(2) 連携研究者

中島 孝 (NAKAJIMA TAKASHI)

東海大学・情報デザイン工学部・准教授

研究者番号: 70408029

(H19-H20: 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

研究者番号: 70281136

(H19-H20: 研究分担者)