

CALIPSO-MODIS-CloudSat を用いた雲物理特性の解析

北方 大貴¹, 岡本 創¹, 佐藤 可織¹, 片桐 秀一郎¹

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

Analysis of cloud microphysical properties using CALIPSO · MODIS · CloudSat

Hiroki KITAGATA¹, Hajime OKAMOTO¹, Kaori SATO¹, Shuichiro KATAGIRI¹

¹RIAM, Kyushu Univ., 6-1 Kasugakoen, Kasuga, Fukuoka 816-8580

We developed CALIPSO-MODIS-CloudSat algorithm to retrieve ice microphysics. The method is based on split window method using MODIS with help of cloud boundary-information from CALIPSO and CloudSat. We also compared the conventional split window method based solely on MODIS. The ice clouds were determined by using $8.695 \mu m$ and $11.03 \mu m$ data for MODIS-only method. In the three-sensor method, ice clouds were discriminated by using the cloud particle type product (KU-type) from CALIPSO. Retrieved τ obtained by three-sensor algorithm was about 60% larger than that by the MODIS method. Retrieved effective radius r_{eff} obtained by the three sensor algorithm was about 30% smaller than that by the MODIS method. The differences attributed to the difference in cloud top and bottom heights between the two methods.

Key Words: Laser, LIDAR, CALIPSO, MODIS, CloudSat

1. はじめに

水雲の気候変動への役割については精力的に研究が行われてきたが、氷雲は水雲と比較してその光学的厚さが小さいことや、上層に存在するため正確な観測が困難であったため、理解が不十分である。これまでに受動型センサによる光学的に薄い雲については、赤外窓領域法 (Split Window Method)^{1) -3)} などの方法が有効である事が知られている。また、MODIS グループでは可視光の反射率の組み合わせにより、水雲と氷雲の解析を行っている⁴⁾。近年は計算機資源の発展もあり、MODIS データに対し、赤外窓領域法において放射伝達方程式による前方計算を繰り返し、最適解を得る方法⁵⁾ などにより、雲の微物理量を導出する試みも行われている。それらの手法では、雲頂温度から高度を推定し、また雲の幾何学的厚さは固定して微物理特性の抽出を行うのが一般的であった。一方、2006年に打ち上げられたライダ搭載のCALIPSO衛星と94GHzの雲レーダを搭載したCloudSat衛星によって、雲の高度分布を正確に求めることが可能になった。これら能動型センサとMODISセンサの情報を組み合わせる事で、これまでより精度の高い氷雲微物理特性の推定が可能になると考えた。本研究では同じA-Train軌道上を2分以内に観測するAqua衛星に搭載されたMODIS、CALIPSOに搭載されたライダ、そしてCloudSatに搭載された雲レーダの3つセンサを複合的に利用して氷粒子のプロダクトを作成

することを目的として、事例解析を行った。また、MODISセンサを単独で利用した解析結果との比較も示す。日欧共同で開発し2018年度に打ち上げ予定のEarthCARE衛星は、ドップラー雲レーダ(CPR)、高スペクトル分解ライダ(ATLID)、多波長イメージャー(MSI)、そして広帯域放射計(BBR)の搭載が予定されている。ここで開発した能動型センサと受動型センサを組み合わせる手法は、EarthCARE衛星アルゴリズムへの応用が可能である。

2. 衛星データと解析手法

2008年10月28日に南緯25-26度、東経1.8-2.0度でCALIPSOとCloudSatによって観測された雲の緯度高度断面を示す(Fig. 1)。CALIPSOとCloudSatの両センサで同程度の雲の雲頂と雲底を示している事がわかる。偏光解消度は60%と大きい値を示しており、氷粒子で構成された雲であることがわかる。本研究では、雲域検出にはKU-mask⁶⁾を改良した手法を適用し、また氷粒子の識別にはKU-Type⁷⁾を改良した手法をそれぞれ適用した。

同じ雲域におけるMODISセンサで得られた赤外波長 $8.70 \mu m$ 、 $11.03 \mu m$ そして $12.02 \mu m$ の輝度温度-緯度断面をFig. 2に示す。これらの結果を利用し、Split window法で基本的に用いられる輝度温度差BTDと輝度温度BTの関係をFig.3に示す。ここで、 $8.70 \mu m$ 、 $11.03 \mu m$ に対する輝度温度差

BTD は,

$$BTD(8.70, 11.03) = BT(8.40) - BT(11.03)$$

で与えられる.

高い輝度温度は光学的に薄い雲域に対応し, $11.03 \mu m$ の輝度温度が $277K$ 以上の領域では輝度温度差が負になっていた.

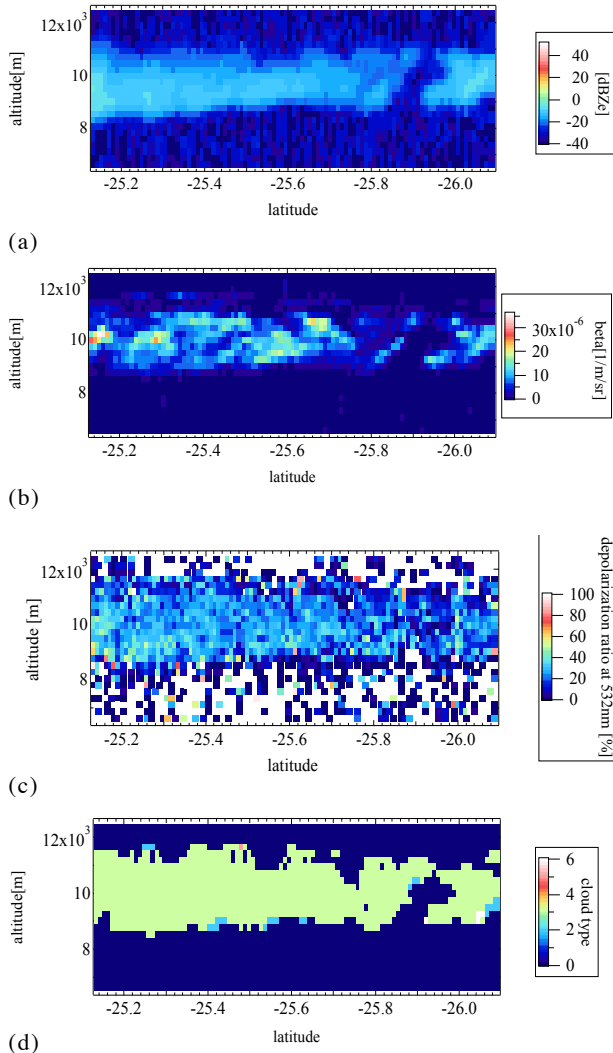


Fig.1 (a) Time-altitude cross section of radar reflectivity by CloudSat on 28 Oct. 2008. (b) Attenuated backscattering coefficient at 532nm from CALIPSO. (c) Depolarization ratio at 532nm from CALIPSO. (d) Particle type. Green color (3) indicates randomly oriented ice.

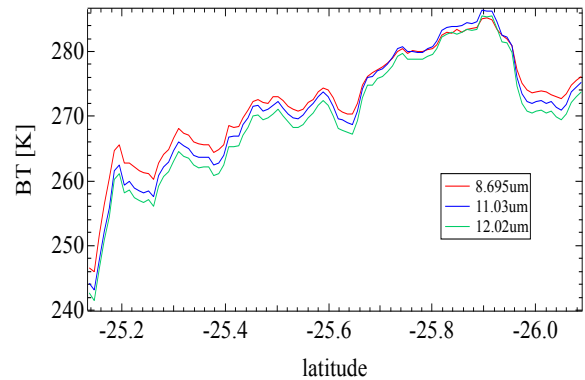


Fig.2 Latitude distribution of brightness temperature at $8.70 \mu m$, $11.03 \mu m$ and $12.02 \mu m$.

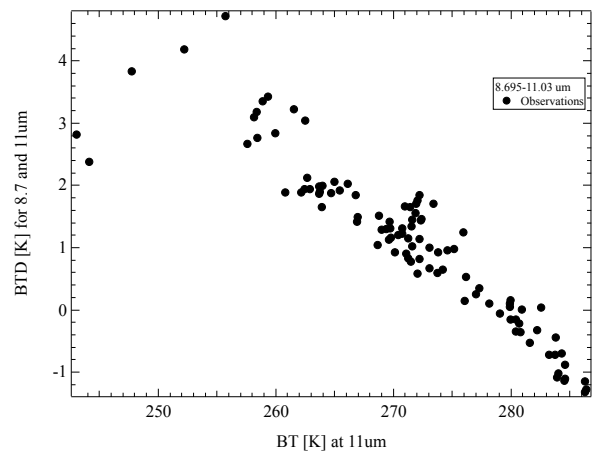


Fig.3 Relationship between brightness temperature at $11.03 \mu m$ and brightness temperature difference for 8.7 and $11.03 \mu m$ by using MODIS on 28 October 2008.

本研究ではこれらの波長で光学的厚さ τ と有効粒径 r_{eff} を変化させ波長 $8.695 \mu m$ と $11.03 \mu m$ における輝度温度と輝度温度差を CloudSat-CALIPSO merged dataset の各レコードごとに求める. 観測値との比較から, 最も近い値を与える光学的厚さ τ と有効粒径 r_{eff} をそのレコードにおける氷雲の物理特性とする. MODIS のみによるものでは, 雲頂高度は雲頂気圧より推定し, 層厚を約 2km と仮定した. 水蒸気量は ECMWF のデータを, 海面水温は NOAA のデータをそれぞれ利用した. MODIS, CloudSat, CALIPSO を複合利用したものは, 雲頂・雲底高度を Ku-mask から求めた.

3. 結果および考察

波長 $8.695 \mu m$ と $11.03 \mu m$ の輝度温度差と波長 $11.03 \mu m$ 輝度温度の関係を観測値と理論計算値で調べた結果の比較を Fig. 4 に示した. MODIS のみの理論計算値と 3 センサによる計算値をそれぞ

れ Fig.4 (a), (b)に載せた.

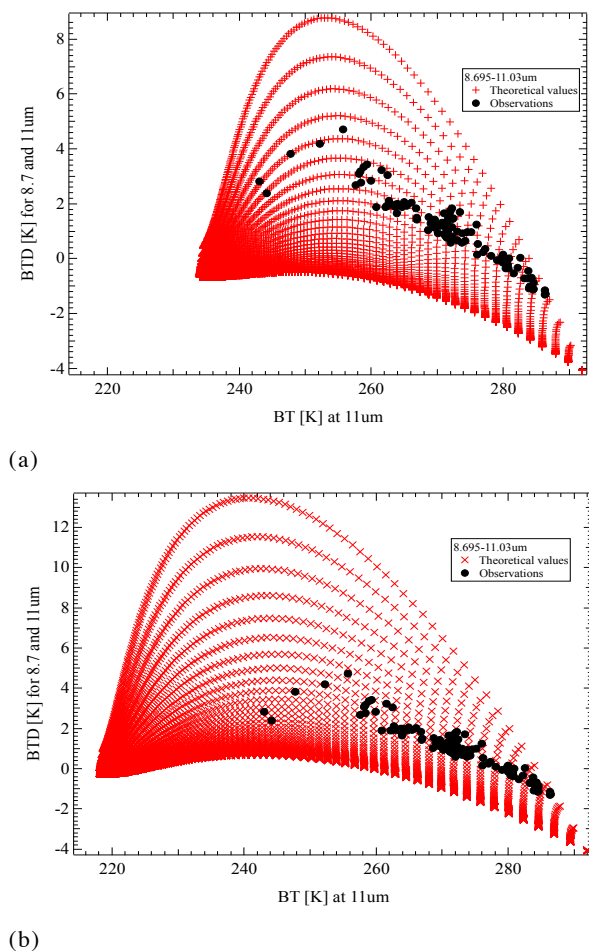


Fig.4 Observed and theoretically estimated relationship between BT and BTD. Theoretical values are estimated for optical thickness τ for 0, 0.1, 0.2, 0.3, ..., 23.0 and effective radius for 5, 6, 7, 8, ..., 60 μm of ice clouds. (a) MODIS-only method and (b) CALIPSO-MODIS-CloudSat algorithm on 28 October 2008.

これらの理論値から観測値に最も近い有効半径と光学的厚さをそれぞれ解析した(Figs.5, (a), (b)). 氷雲の光学的厚さ τ は MODIS only による解析値より MODIS, CloudSat, CALIPSO の複合利用による解析値の方が約 60%程度大きいことがわかる. 有効粒径 r_{eff} は MODIS のみの手法による解析値より MODIS, CloudSat, CALIPSO の複合利用による解析値の方が 30%位程度小さいことがわかった. この差は MODIS のみによる解析は、雲頂高度を過小評価しているせいであると考えられる.

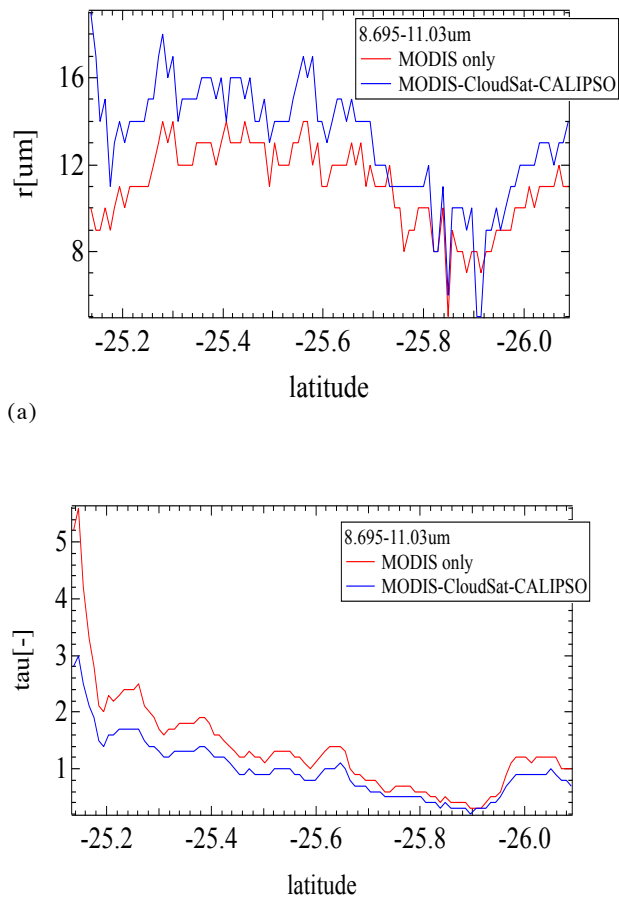


Fig.5 (a) Latitudinal dependence of ice effective radius retrieved from MODIS-only (red) and CALIPSO-MODIS-CloudSat method (blue) on 28 October 2008. (b) Same as but for optical thickness.

4. まとめと展望

本研究では、Aqua 衛星に搭載された MODIS センサに、CALIPSO と CloudSat 衛星に搭載された能動型センサの情報を組み合わせる事で、赤外窓領域法の改良を行い、氷雲の光学的厚さと有効粒径の導出を行った。得られた知見は以下の通りである。

- MODIS のみの手法によって推定された光学的厚さ τ は、MODIS, CloudSat, CALIPSO の複合利用による解析値より過小評価であった。
- MODIS only による有効粒径は MODIS, CloudSat, CALIPSO の複合利用によるものと比較して過大評価であることがわかった。
- 3 センサの複合利用により、これまでよりも正確な雲物理解析が期待出来る。
- これらを結果は CloudSat/CALIPSO の複合利用から得られた氷微物理特性^{8),9)}と比較・検証を行う予定である。

- ・ 本研究で開発した手法はEarthCARE衛星の解析にも拡張可能である。

5. 参考文献

- 1) T. Inoue (1987), A cloud type classification with NOAA7 split-window measurements, *J. Geophys. Res.*, 92, 3991-4000.
- 2) K. Kawamoto et al., (2006), Retrieval of Optical Thickness and Effective Particle Radius of Thin Low-Level Water Clouds using the Split Window of Meteosat-8, *SOLA*, 2, 144-147, doi:10.2151/sola.2006-037
- 3) S. Katagiri and T. Nakajima, (2004), *J. Meteor. Soc. Japan*, Radiative Characteristics of Cirrus Clouds as Retrieved from AVHRR, 82, 81-99.
- 4) S. Platnick et al., (2017), The MODIS Cloud Optical and Microphysical Products: Collection 6 Updates and Examples From Terra and Aqua, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 27, 502-525.
- 5) H. Iwabuchi et al., (2014), 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. Climatol.*, DOI:10.1175/JAMC-D-13-0215.1
- 6) Y. Hagihara, H. Okamoto, and R. Yoshida (2010),

Development of a combined CloudSat - CALIPSO cloud mask to show global cloud distribution, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 115, D00H33, doi:10.1029/2009JD012344.

7) R. Yoshida, H. Okamoto, Y. Hagihara, and H. Ishimoto (2010), Global analysis of cloud phase and ice crystal orientation from Cloud - Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO) data using attenuated backscattering and depolarization ratio, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 115, D00H32, doi:10.1029/2009JD012334.

8) H. Okamoto, K. Sato and Y. Hagihara (2010), Global analysis of ice microphysics from CloudSat and CALIPSO: Incorporation of specular reflection in lidar signals, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 115, D22209, doi:10.1029/2009JD013383.

9) K. Sato and H. Okamoto (2011), Refinement of global ice microphysics using spaceborne active sensors, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 116, D20202, doi:10.1029/2011JD015885.

謝 辞

本研究は科研費 JP17H06139, JP15K17762 の助成を受けたものです。