Interpretation of ice cloud signals from space-borne lidar

岡本 創[1], 佐藤 可織[1], 石元 裕史[2], 増田 一彦[2], アナトリ ボロボイ[3],
アレクサンダー コノションキン[3], ナタリア クストバ[3], 西澤 智明[4], 神 慶孝[4]
[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）
[2]気象庁気象研究所（〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1）
[3] ロシア科学アカデミーV.E. Zuev 大気光学研究所（〒634055 Zuev Sq., Tomsk）
[4]国立環境象研究所（〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2）

Interpretation of ice cloud signals from space-borne lidar

Hajime OKAMOTO[1], Kaori SATO[1], Hiroshi ISHIMOTO[2], Kazuhiko MASUDA[2], Anatoli BOROVOI[3], Alexander KONOSHONKIN[3], Natalia KUSTOVA[3], Tomoaki NISHIZAWA[4], Yoshitaka JIN[4]
[1]*Resarch Institute for Applied Mechanics, Kyushu Univ., 6-1 Kasuga-koen, Kasuga, Fukuoka 816-8580*
[2] *V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Rus. Acad. Sci. 1. Academician Zuev. Sq., Tomsk, 634055, Russia*
[3] *Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052*
[4] *National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506*

Abstract: Backscattering properties of ice particles were examined by Physical Optics and Geometrical Optics Integrated Equation methods to interpret spaceborne 355-nm high spectral resolution lidar (HSRL) data from the ATLID onboard the Earth Clouds, Aerosol and Radiation Explorer (EarthCARE). The two dimensional diagram of the lidar-ratio and depolarization ratio is found to be effective for discriminating ice particle habits and orientations. Wavelength dependence of ice cloud backscatter properties exists. Analyses of these properties by using ground-based HSRL showed that the theoretical values can capture the observation ranges. Global analyses of ice particles by using A-train showed that dominant ice particle habits strongly depended on latitude and height. Possible connection for the information content of ice clouds can be established between A-train and EarthCARE to construct long term records of clouds for climate change studies.

Key Words: Ice particles, backscattering, space-borne lidar

1. はじめに

最新の Coupled Model Intercomparison Project である CMIP6 では、気候変動予測における不確定性が、CMIP5 より拡大し、気候変動予測における最大の不確定性が雲によるものである状況が続いていた [1)]。全球非静力学モデル NICAM の相互比較でも、雲微物理特性の鉛直分布は、モデル間で大きく異なっていることがわかった [2)]。これらは、モデルの水平解像度を向上されるだけでは解決するものではなく、雲の生成に関するメカニズムを観測から拘束することの必要性を示していると言える。衛星ライダ観測では、雲の相識別に進展があった [3)]。気温が約−４０度以上０度以下の領域では、氷粒子と水粒子が共存するが、その割合はおおまかには気温に依存するが、衛星ライダプロダクト間では大きな隔たりがある事もわかった [4)]。雲の放射効果は雲の相や微物理特性に依存し、その性質は大きく変動する。氷粒子の全球特性は、衛星ライダによって大きく進展したが、それらの定量的評価はその形状の多様性と散乱特性の計算に関して課題がある。

散乱理論面では physical optics 法や Geometrical Optics Integrated Equation 法などが進展したため、従来困難であったライダ波長における複雑な形状をした氷粒子の散乱計算が可能になってきた [5), 6)]。その結果、ライダの氷粒子の信号の解釈が進展し、衛星ライダから相識別だけでなく、形状などの情報や微物理特性を精度よく求めることが可能になった [7), 8)]。

2023 年度には、日欧共同の雲、エアロゾル、放射観測衛星計画である EarthCARE の打ち上げが予定されている。ドップラー雲レーダ、多波長イメージャ、広帯域の放射計に加えて、波長 355nm の高スペクトル分解ライダ ATLID の搭載が予定されている。本講演では、これら理論的進展、EarthCARE 解析用解析アルゴリズム開発、衛星ライダの全球解析、地上の次世代型観測システムによる解析結果について報告する。

2. 手法

粒子形状としてボロノイ形状氷粒子、板状氷粒子、六角形状氷粒子、ドロクスタル形状氷粒子、砲弾形状氷粒子、砲弾集合氷粒子などを、配向状態としては、水平ランダム、3 次元ランダムをそれぞれ考慮した。水平ランダムでは、氷粒子の対称軸と鉛直との間の角度に対して、ガウス分布を考慮した。サイズは、有効半径で 10 ミクロン程度から 2 ミリ程度まで考慮し、散乱計算を実施し、ライダ後方散乱係数、偏光解消度、消散係数、それらの波長依存性に関する解析を行った。レーザーの鉛直からの角度として、0.3 度、3 度を考慮した。A-train 衛星データを用いた氷粒子の検出には、我々の解析した KU product を用いた。

3. 結果

波長 355nm における後方散乱係数と粒子サイズの関係を図 1 に示す。氷水量と有効半径が同じでも、粒子タイプによる違いは非常に大きく、3 次元ランダムに配向したボロノイ粒子が最も小さい値を示していた [8)]。ライダ信号から雲微物理特性を抽出するには、粒子タイプの決定が必要であることを示している。偏光解消度やライダ比は、サイズには弱く依存し、形状や配向による違いが大きかった。ATLID で期待される波長 355nm におけるライダ比と偏光解消度の関係は、粒子形状や配向を区別可能であること、さらに微物理特性抽出の高精度解析が期待できることを示している。後方散乱係数の 532nm と 1064nm や 355nm と 532nm の間の波長依存性は、サイズにはあまりよらず粒子形状や配向に大きく依存していた。

CALIPSO 衛星観測では、レーザーの傾斜角を 2007 年 11 月を境に 0.3 度から 3 度に変化した。3 度の場合、0.3 度と比較して水平ランダムの板状氷粒子の後方散乱係数が、大きく減少し、偏光解消度は 3 度でも非常に小さい値であることも示された。実際の CALIPSO 搭載ライダ解析でも、比較的下層の氷粒子の偏光解消度が大きく減少する領域があることがわかっている [9)]。このことは、これらの領域では少なくとも 2 種類の氷粒子が混合していることを示唆しており、粒子サイズ等を抽出するには、異なる粒子の混合状態を考慮する必要性があると言える。

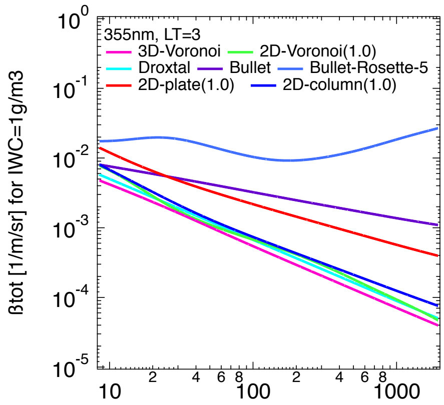

図 1　波長 355nm における氷粒子の後方散乱係数の有効半径依存性。

謝 辞

本研究は、科研費 JSPS JP17H06139, JP18K03745 の支援を受けて実施されました。

参考文献

1）M. D. Zelinka et al.: Geophys. Res. Lett. 47(1)　(2021).
2）W. Roh et al.: J. Meteor, Soc. Japan. 99(6) (2021).
3）R. Yoshida et al.: J. Geophys. Res. 115 (2010).
4）G. Cesana et al.: J. Geophys. Res. (2016).
5）A. Borovoi et al.: Opt. Express 20(27), (2012).
6） K. Masuda and H. Ishimoto: J. Quant. Spectrosc. Radia. Transf. 190 (2017).
7）H. Okamoto et al.: Opt. Express 27(25) (2019).
8）H. Okamoto et al.: Opt. Express 28(20) (2020).
9）K. Sato and H. Okamoto:　*Springer Series in Light Scattering* Vol. 5: Radiative Transfer, Remote Sensing, and Light Scattering, A. Kokhanovsky, ed., Springer Publishing, New York, (2020).