

地上・衛星型アクティブセンサの複合利用による ニーオールスンの雲物理量の解析

太田 晃平¹, 岡本 創², 佐藤 可織², 鷹野 敏明³, 塩原 匡貴⁴, 矢吹 正教⁵

¹九州大学院総合理工学府

²応用力学研究所

³千葉大学

⁴国立極地研究所

⁵京都大学

**Analysis of cloud physical properties by using
Ground-base and Spaceborne active sensors at Ny-Alesund**
Kohei OTA¹, Hajime OKAMOTO², Kaori SATO², Toshiaki TAKANO³,
Masataka SHIOBARA⁴, and Masayoshi YABUKI⁵

¹IGSES, Univ. of Kyushu

²Research Institute for Applied Mechanics

³Chiba University

⁴National Institute of Polar Research

⁵Kyoto University

Abstract: In this study, we examined the macro and microphysical properties of clouds by using ground-based and space-borne active sensors. We used the Polarization Micro-Pulse Lidar (PMPL), FMCW 95GHz cloud radar FALCON-A installed in Ny-Alesund, Svalbard. In addition, we also used the Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization (CALIOP Lidar) onboard CALIPSO satellite and 94GHz cloud radar on CloudSat satellite. The first collocated lidar and cloud radar observations conducted in Ny-Alesund was shown for two months from October 1, 2013, two months from January 1, 2014 and from March 9 to April 30 2015. The direct comparisons of PMPL and CALIOP showed underestimation of cloud fraction in optically thick regions in CALIOP cloud mask. Similar comparison were conducted for CloudSat and FALCON-A and good correspondence was found. Differences in cloud vertical structures obtained by PMPL, FALCON-A, CloudSat and CALIOP were discussed.

Key Words: radar, lidar

1. はじめに

北極域の海氷面積の増減がマイクロ波放射計の観測から把握されており、海氷の消長に雲の放射過程が大きく影響すると考えられている。Palm et al., [2010]¹は、海氷面積と雲の年々変動は逆相関にある事を衛星解析から示した。この要因として、Kay et al., [2008]²は、夏季の北極域の雲量の減少が下向き短波放射量の増大につながり、それが海氷の減少に関連していると指摘した。また初秋には海氷の融解が起こった領域で下層雲が卓越する事も示唆されている[Kay and Gettleman 2009]³。これらの物理メカニズムを理解するには、衛星観測や地上観測が不可欠である。雲の観測にはパッシブセンサが広く使われてきたが、放射過程の評価には雲の微物理特性の鉛直分布が必要となり、それには原理的にアクティブセンサが適している。衛星観測では、A-Train 群の衛星型アクティブセンサである CALIPSO 衛星に搭載された CALIOP ライダ (the Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization lidar) と CloudSat 衛星に搭載された 94GHz 雲レーダが 2006 年 6 月以降利用可能である。これらのデータは、広域で三次元の雲の解析が可能になるが、一定時刻のデータしか得られず、またレーダの場合は雲、降水や水蒸気による減衰の影響により雲底付近の観測に不確定性がある。ライダの場合

も雲やエアロゾル等による減衰の影響を検証する必要がある。

地上ライダ・レーダ観測ではこれまでアラスカ Barrow 等数ヶ所で雲レーダやライダの地上観測が実施されてきた。しかしニーオールスンでは、これまで雲レーダとライダを同時に利用した観測がなかったが、GRENE 北極気候変動事業において、2013 年より偏光マイクロパルスライダ PMPL と地上型である雲レーダ FALCON-A の観測が開始された。地上ライダやレーダでは、直上の 24 時間連続したデータの取得が可能である点が衛星と比較して優れた点である。しかし下層雲の卓越する北極域においては、上層の雲の検出が下層の雲の有無に大きく影響され、また降雨や霜等の影響により欠損となる場合がある。それらの影響はライダとレーダでは異なる。また、ライダは雲粒子に加えエアロゾル等の粒子にも検出感度を有するため、雲とエアロゾルの識別が重要になる。また減衰は大きい。雲レーダは 30 ミクロン以上の粒子で構成される氷雲や降水の検出に有利であり、雲中の粒子による減衰の影響はライダと比較すると小さい[Okamoto et al., 2007]⁴。

本研究では地上・衛星型のレーダ・ライダを複合利用して、まずそれぞれの雲検出特性を明らかにし、次に詳細な雲物理量を求めることにした。このため、地上と衛星搭載

アクティブセンサの同期観測データを抽出し、それらを利用した比較検証解析を実施した。さらにこれらを複合利用した統計解析、雲物理量解析、それらを用いた雲の地表面における放射効果解析を実施する。さらに雲と海氷の相互作用研究を通して、北極域における気候システムと雲の関係解明を最終的な目標としている。

2. 解析手法

CALIPSO 衛星に搭載された CALIOP センサは、波長 532nm と 1064nm における減衰後方散乱係数と、波長 532nm における偏光解消度の観測を行っている。光学的に薄い雲に対して雲レーダより感度が高いこと、上層の雲による減衰の影響を下層の雲が受けることがその特徴である。CloudSat 衛星は 94GHz 雲レーダを搭載し、雲のレーダ反射因子 (dBZe) の観測を行っている。減衰の影響が比較的少ないので、下層の 1km 付近まで雲や雨が観測できる。これらの衛星データを利用した雲検出には KU-Mask[Hagihara et al., 2010]⁵ を改良したものを利用した。これは観測船みらいに搭載されたライダと雲レーダに対して開発・検証された雲マスクの手法を衛星用に改良したものである[Okamoto et al., 2007, 2008]^{4,6}。

PMPL は可視波長(532nm)のライダで、偏光機能も持ち、これから減衰の影響を受けた後方散乱係数と偏光解消度が得られる。雲検出は衛星解析と同様に Hagihara et al., [2010]の方法を改良したものを用いた。FALCON-A は 95GHz レーダでレーダ反射因子の観測を行っている。雲検出には上層の値をノイズとする手法を用い、レンジサイドローブ等の影響を取り除くため下層における値により閾値を変えるなどした。

PMPL と CALIPSO の比較を、2013 年 10 月 1 日から 11 月 30 日、2014 年 1 月 1 日から 2 月 28 日、2015 年 3 月 9 日から 4 月 30 日の期間で実施した。衛星データがニーオルスンの観測サイトから半径 10km 以内に入った場合である 13 シーンを比較解析に用いた。また同様に FALCON-A と CloudSat の同期データである 13 シーンの比較解析も同様に実施した。解析期間は 2013 年 10 月 13 日から 2014 年 3 月 24 日の期間で、衛星データは、CloudSat の解像度である水平 1.1km、鉛直 240m に平均化され、地上のデータは時間分解能が PMPL は 300 秒、FALCON-A は 10 秒であり、鉛直解像度はどちらも 240m に平均化したものを比較に用いた。時間と空間方向の平均化に関しては、衛星データ、PMPL、FALCON-A はそれぞれ 11 レコード、11 レコード、61 レコードの平均化を計算したものを解析に用いた。

3. 解析結果

3.1 地上・衛星ライダの同期解析

地上と衛星の同時観測の 13 シーンにおける、CALIPSO と PMPL で雲判定された β の高度別の平均値を求めた。ここで β は減衰の影響を受けた後方散乱係数の平行成分と垂直成分の合計である。まず初めに FALCON-A で降雨判定を行い、降雨がある場合とない場合に分けて比較解析を行った。Fig.1 は降雨なしの CALIOP と PMPL の 10 シーンの統計解析した解析結果である。これらのシーンでは CALIPSO は高度約 2km 以下で、また PMPL は高度

約 2km 以上でそれぞれ雲がほとんど観測されていなかった。これは衛星ライダでは上層の雲によって、地上ライダでは下層の雲によって信号が減衰されたためと考えられる。下層 2km 付近では衛星と地上ライダの両者のデータが存在していたが、衛星ライダの雲の幾何学的厚さは地上ライダより狭かった。これは衛星ライダの減衰領域における雲マスクの検出が過小評価の可能性があると考えられる。高度 2km 付近で衛星と地上ライダの $\log \beta$ を比較すると、約 0.2 程度衛星ライダの値の方が大きかった。

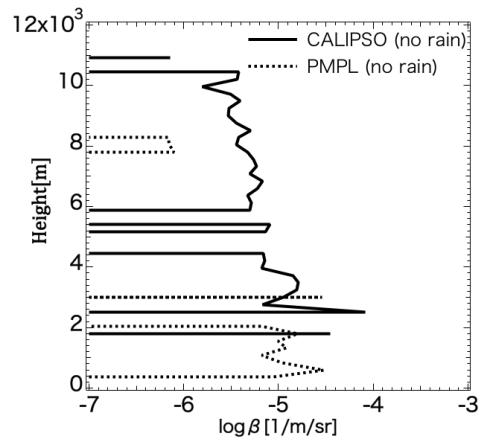


Fig.1. Comparison of the average vertical profiles of attenuated backscattering coefficient β of clouds obtained by CALIPSO and that by PMPL for non-precipitating clouds at CALIPSO overpass during the period from 1 October to 30 November, 2013, from 1 January to 28 February, 2014, and from 9 March to 30 April, 2015.

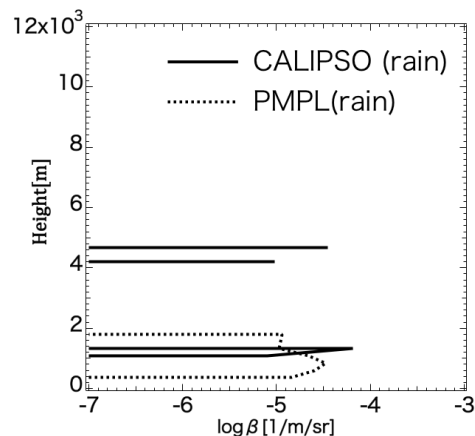


Fig.2. Same as Fig.1 but for precipitating clouds.

Fig.2 は降雨判定された 4 シーンの比較結果である。降水を伴っている場合は、1km 付近で衛星と地上で雲検出が行われているが、下層雲に関しては PMPL がより低い雲底高度と雲頂高度を示しており、やはり衛星の雲検出に過小評価の問題のある事を示唆していた。

3.2 地上・衛星レーダの同期解析

地上と衛星の同時観測の13シーンにおける、CloudSatとFALCON-Aで雲判定されたZeの高度別の平均値を求めた。ライダーの解析と同様に降雨がある場合とない場合に分けて比較解析を行った。Fig.3は降雨なしの9シーンの解析結果である。高度2.5km付近まではCloudSatの校正精度の範囲内でFALCON-AとCloudSatで取得されたZeはよい対応を示しており、両者の差は約3dB程度以内であった。それよりも高い高度ではCloudSatは高度9km付近まで雲を検出しており、高度約2km付近の下層と7km付近の上層で極大を持つ形をしていたが、FALCON-Aでは高度3km以上の雲は得られていなかった。これはこの高度以上の雲のエコー強度が最低検出感度以下であったためと考えられる。

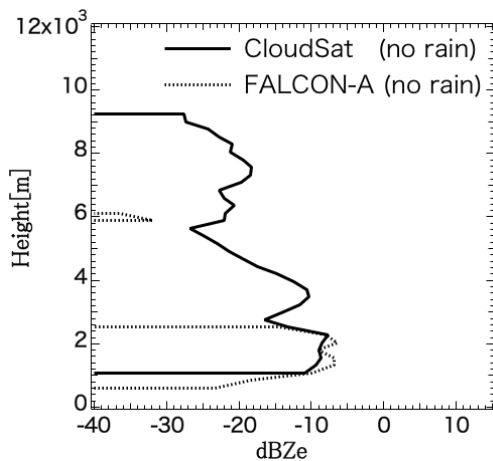


Fig.3. Comparison of dBZe obtained by CloudSat and that by FALCON-A for non-precipitating clouds at CloudSat overpass during the period from 13 October 2013 to 24 March 2014.

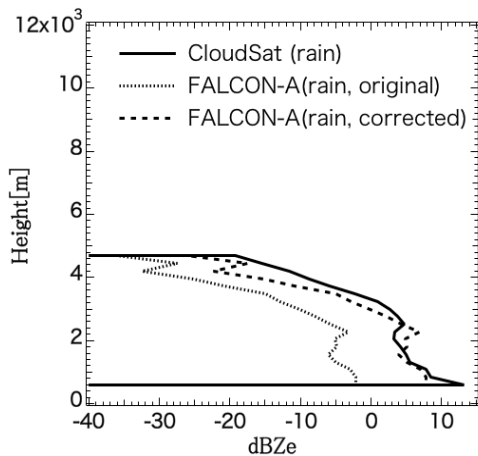


Fig4. Same as Fig3 but for precipitating clouds.

Fig.4は降雨判定された4シーンで比較を行った結果である。FALCON-Aで取得されたZeは、CloudSatの値に比べ10dB程度過小評価になっていた。降雨時にはFALCON-Aの値はレドーム上についた降雨減衰の影響等があると考え、あらかじめ求められている約+10dBの減衰補正を行うと[Okamoto et al., 2007]²、高度5km付近までCloudSatの値とよい一致を示した。またFALCON-A、CloudSatともに高度約4.7kmまで雲を観測しており、雲の観測領域についても良い対応を示していた。これらの結果は地上の雲レーダとの比較が降水のない場合はもちろんの事、降水を伴う雲に対しても、適切な減衰補正を施せば、衛星搭載雲レーダの検証の有効な手段となり得る事を示している。

3.3 地上ライダーの期間別解析と、全センサによる雲頻度の比較

衛星の同期に関係なく2章で示した3つの期間毎にPMPLで得られた β を解析した結果をFig.5に示す。 β の値は高度約4km以下で2013年と2014年が類似しており、2015年はそれらより低い値であった。一方で4km以上、6km以下の領域では2014年と2015年が類似しており、2013年はそれらより高い値であった。6km以上では、それ以下の高度と比べて期間による差は小さかった。またほぼ全ての高度において、2015年が最小の値をとっていた。2013年及び2014年の解析期間は極夜にあたるが、その期間は雲水量や氷水量の大きな雲が発生していた可能性がある。

これらの期間のPMPLによって得られた雲出現頻度の鉛直分布をFig.6に示す。全期間とも雲出現頻度は1km付近と7km付近に極大があるが、高度約6km以上の領域で2013年が低い値となっており、光学的に薄い氷雲が卓越していると考えられる高度約7kmの極大値において、他の期間より4%程度小さい値であった。これは下層の雲頻度は他の期間と差があまりないため、上層の氷雲が少なかったためと考えられる。

最後に、2014年におけるPMPLとFALCON-Aの雲出現頻度の鉛直分布の比較結果をFig.7に、CALIPSOとCloudSatの同様な比較結果をFig.8に示す。PMPLは高度13km付近まで雲の検出を行っていたが、FALCON-Aは5km付近までであった。下層ではFALCON-Aの方がPMPLより雲量が大きく、これは降水の影響と考えられる。衛星観測ではCALIPSOでは11km付近、CloudSatでは9.5km付近まで雲は観測されていた。地上と衛星の比較では、CALIPSOの方がPMPLより高い高度の雲がより多く観測されており、どちらも低い高度と高い高度で極大値を取るような形をしていた。低い高度での極大値の差は約5%、高い高度での極大値の差は約10%であった。またCloudSatとFALCON-Aでは下層はほぼ同じだが、2km以上ではCloudSatが大きい値を示していた。

今後は、地上と衛星ライダーデータの比較解析によって判明した、衛星ライダーの減衰の大きい領域における雲マスクの改良を実施する。またこれら地上、衛星データを複合的に利用し、北極域の雲微物理量解析や持続時間等の統計解析を実施する予定である。

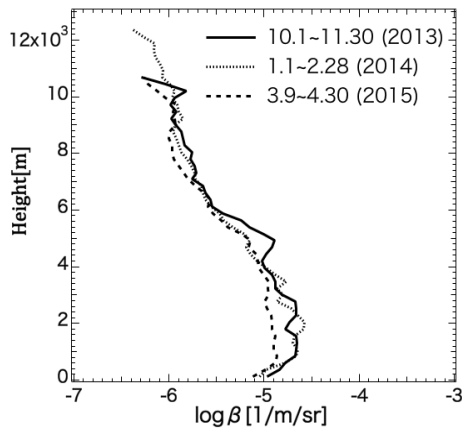


Fig.5. Comparison of lidar backscattering coefficient β of clouds obtained by PMPL for three different observation periods in 2013, 2014, and 2015.

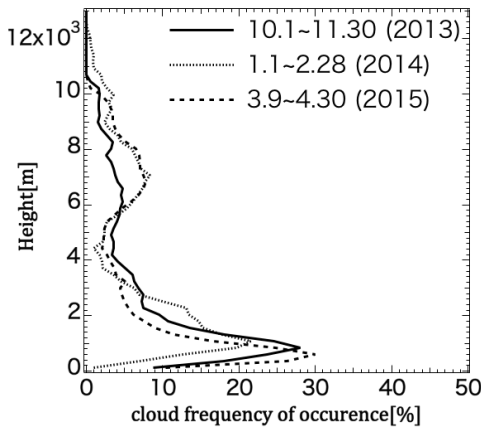


Fig.6. Same as Fig 6 but for the cloud frequency of occurrence.

4. 参考文献

- 1) Palm, S. P., S. T. Strey, J. Spinhirne, and T. Markus (2010), Influence of Arctic sea ice extent on polar cloud fraction and vertical structure and implications for regional climate, *J. Geophys. Res.*, *115*, D21209, doi:10.1029/2010JD013900
- 2) Kay, J. E., et al. (2008), The contribution of cloud and radiative anomalies to the 2007 Arctic sea ice extent minimum, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL.35, L08503, doi:10.1029/2008GL033451, 2008
- 3) Kay, J. E., and A. Gettelman (2009), Cloud influence on and response to seasonal Arctic sea ice loss, *J. Geophys. Res.*, *114*, D18204, doi:10.1029/2009JD011773
- 4) Okamoto, H., et al. (2007), Vertical cloud structure observed from shipborne radar and lidar: Midlatitude case study during the MR01/K02 cruise of the research vessel Mirai, *J. Geophys. Res.*, *112*, D08216, doi:10.1029/2006JD007628
- 5) Hagihara, Y., H. Okamoto, and R. Yoshida (2010)

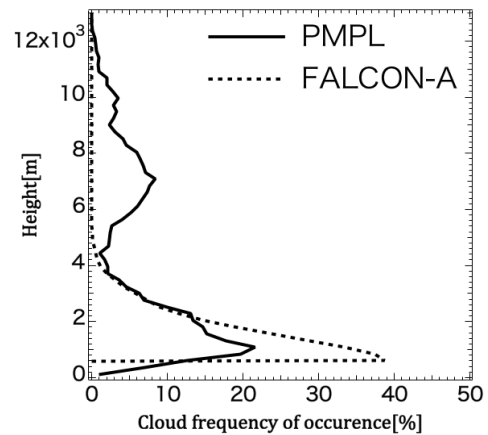


Fig.7. Comparison of cloud frequency of occurrence for PMPL and FALCON-A during the collocated observation period in 2014.

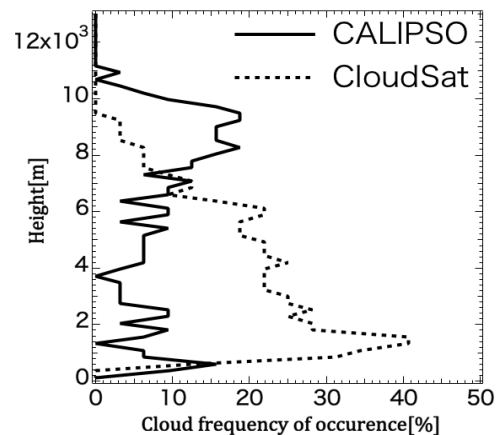


Fig.8. Comparison of cloud frequency of occurrence obtained from one year CALIPSO and CloudSat data in 2014 over the Ny-Alesund observation site.

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

6) 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.*, *113*, D24213, doi:10.1029/2008JD009812.

謝辞: 本研究は JSPS 科研費 25247078, 15K17762, 文部科学省 GRENE 北極気候変動研究事業、及び ArCS 北極域研究推進プロジェクトの助成を受けたものです。