

雲レーダとライダを用いた雲微物理量のリモートセンシング

Remote sensing of cloud microphysics from the synergy use of cloud radar and lidar

岡本 創¹⁾、西澤智明¹⁾、杉本伸夫²⁾、熊谷博³⁾、中島映至⁴⁾、竹村俊彦⁵⁾
Hajime Okamoto¹⁾, Tomoaki Nishizawa¹⁾, Nobuo Sugimoto²⁾, Hiroshi Kumagai³⁾, Teruyuki Nakajima⁴⁾, Toshihiko
Takemura⁵⁾

1) 東北大学大学院理学研究科大気海洋変動観測研究センター、2) 国立環境研究所、3) 情報通信機構、
4) 東京大学気候システム研究センター、5) 九州大学応用力学研究所

1) Center for Atmospheric and Oceanic Studies, Graduate School of Science, Tohoku University

2) National Institute for Environmental Studies

3) National Institute of Information and Communications Technology

4) Center for Climate System Research, University of Tokyo

5) Research Institute for Applied Mechanics, Kyusyu University

Abstract

We describe the cloud microphysical properties deduced from the synergy use of cloud profiling radar and Mie-lidar. The following parameters can be obtained in the observations; radar reflectivity factor, Doppler velocity and LDR (linear depolarization ratio) from cloud profiling radar, and backscattering coefficients at two wavelengths, i.e., 532nm and 1064nm, and depolarization ratio from the lidar. The combinational use of the two active sensors provides a unique opportunity to study; 1) cloud frequency of occurrence, 2) vertical distribution of cloud microphysics such as effective radius and cloud water content, 3) Relationship between temperature, radius and fall velocity. We apply the algorithms to the shipborne data obtained by Research Vessel Mirai in May 2001 in Pacific Ocean near Japan and in Sep. to Dec. in the same year in Tropics. These systems also seem to be an effective tool to validate the General Circulation Model (GCM) and aerosol transport model based on the GCM. The comparisons between the observations and model results are made for these observational data and it is suggested the overall structure of clouds is well reproduced, while the model underestimates the amount of high clouds.

1. はじめに

地球の放射収支における雲の影響評価を行う上で、大きな不確定性要因として挙げられるのが、雲の多層構造やオーバーラップである。例えば大気大循環モデルでは、サブグリッドスケールの雲量とその鉛直方向での重なり具合の表現に、maximum-, random-, maximum/random-overlap 等の仮定を用いるが、Morcrette and Jacob(2000)は ECMWF モデルを用いて、overlap の表現の違いによって雲の放射場の再現に大きな違いが生じることを示した。これら気候モデルにおける雲の鉛直構造の再現性についての検討は、いまだ不十分であるのが現状である。この問題に対しては従来から広く用いられている受動センサーではなく、近年発展してきた能動型センサーである雲レーダやライダが有効であると考えられる。また、これらのセンサーを組み合わせることで、雲粒子の微物理構造についても詳細な情報を得ることができると期待することができる。本研究では、海洋研究開発機構の観測船「みらい」に 95GHz 雲レーダとライダを搭載した 2001 年の 5 月に実施された航海 MR01/K02 と、9 月から 3 ヶ月におよぶ熱帯海域での航海 MR01/K05 を解析の対象として選んだ。レーダとライダを組み合わせた観測を実施することで、雲粒子の微物理特性を抽出するアルゴリズムをこれらのデータセットに適用した結果についても報告する。

2. 雲の鉛直構造

まずレーダとライダの観測データを1分の時間分解能、82.5mの鉛直分解能とにそろえ、それらに対してレーダとライダを用いた雲域推定アルゴリズムを適用した。雲域推定には、レーダについては、ノイズレベル+0.5dB以上のもので、かつ鉛直方向に隣り合う2つの層にわたって有意な信号となるものを選んだ。ライダについては2つのレンジにわたって後方散乱係数が 10^{55} [1/m/ster]となるものを雲域であるとした。この値はエアロゾルとノイズの信号を除去することを目的として設定した。5月14日から2週間、日本近海太平洋上で取得された雲レーダとライダのデータに対し雲域検出を行ったものを、それぞれFig.1(up),(down)に示した。下層に雲があるとライダの信号は減衰してしまい、レーダでは観測されている上層の雲を捉えきれないことがわかる。下層の雲に関してはライダの方がレーダより感度がある場合があるが、これは水雲の粒子半径が小さいためである。

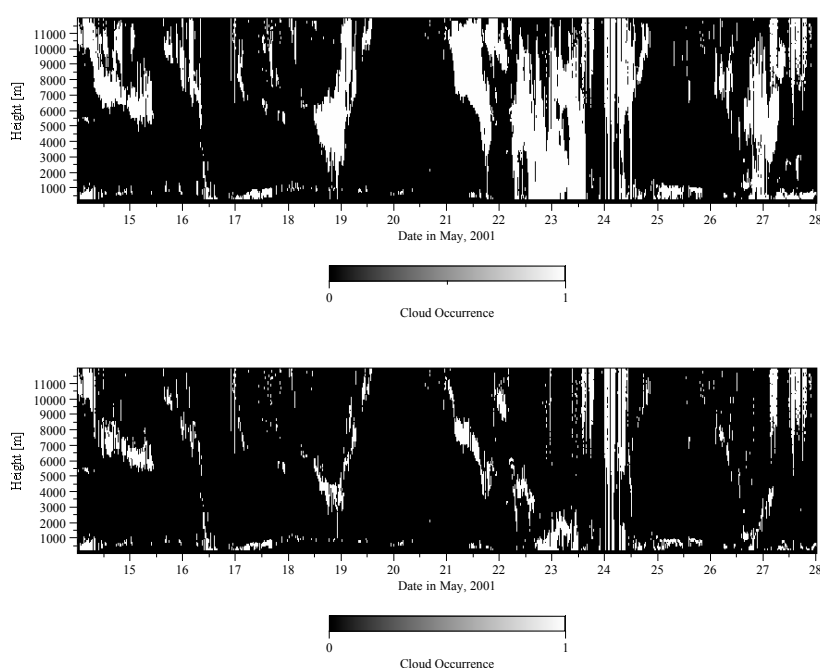


Fig.1(up)Cloud frequency of occurrence detected by cloud radar, (down)the same as (up) but detected by lidar.

この期間の各高度での雲出現頻度分布の平均値を求めた結果を Fig.2 に示す。図中で radar とあるのがレーダ単独で、lidar とあるのがライダ単独で求めた雲域の頻度分布である。Ra & Li はレーダとライダの両方の測器で、Ra or Li とあるのは、レーダかライダかどちらかの測器で検出された雲域を元にしたものに相当する。Ra or Li が真の雲域を示すと考えると、高度1 km程度の低層ではレーダは1/3程度の雲を捉えることに失敗しているが、そこから上の高度では雲域の8割以上を検出することに成功していると結論できる。

Ra & Li と Lidar 単独の値の違いは、上層でもライダとレーダの雲域が一致していない部分があることを示している。いずれにしても、7km付近に雲域のピークがあり、そこでの雲出現頻度は30%くらいであった。またこの観測期間に、平均的に何層の雲が形成されていたのかを調べた結果を Fig.3 に示す。1層になるのが全体の40%、2層になるのが、22%、3層が10%、それ以上が7%であった。

次に、NIES-CCSR の GCM をベースに開発された SPRINTARS との比較を行った。SPRINTARS は水平解像度が約100 kmで、観測結果との比較には6時間平均値を使用した。ここでは SPRINTARS で再現された雲水量、雲量、エアロゾルの量等を元にして雲レーダとライダの信号を再現して、それらを観測値

と比較することにした。比較の結果として、全体のパターンは良い一致を示していた。ただ雲域が一致している領域でも SPRINTARS の方が大きめの値を示しており、これは雲水量の過大評価をしていると理解される (図は省略)。次に出現頻度の高度分布の比較結果を Fig.4 に示す。高度 4km 以下ではモデルが雲量を過小評価し、高度 8km 以上の上層雲に関してモデルが過大評価していることがわかる。Fig.4 と同様の比較を熱帯の航海 MR01/K05 の全データに対して行ったものを図5に示す。熱帯では中緯度 (MR01/K02) の場合と異なり、高度 10 km 付近に雲域のピークが存在すること、その高度での雲量は 20% である等がわかった。全体として雲域をよく再現していたが (図は省略)、高度 10 km 以上の領域では、MR01/K02 の場合と同様にモデルが雲量を過大評価していた。

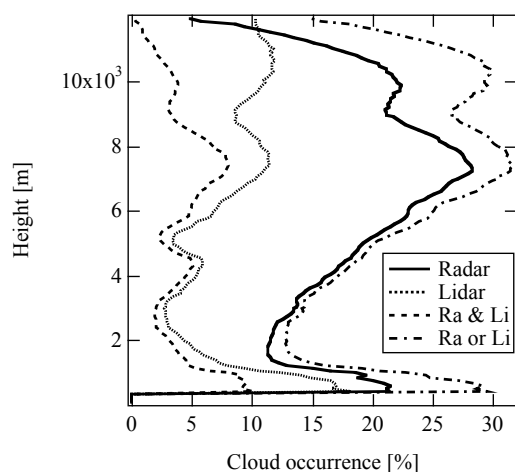


Fig.2 Vertical distribution of averaged cloud occurrence.

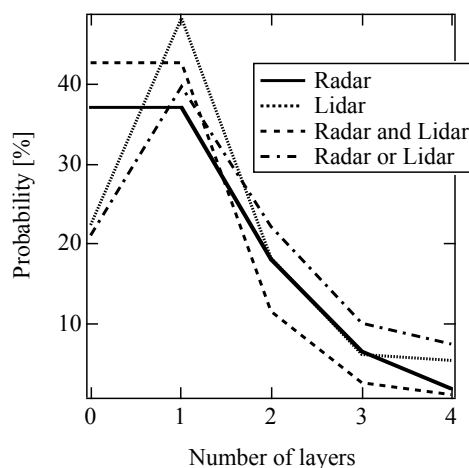


Fig.3. Number of averaged overlapping layers

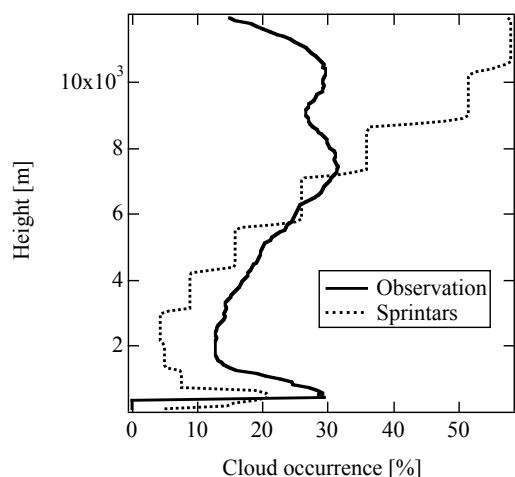


Fig.4 The same as Fig.2 but comparisons with SPRINTARS.

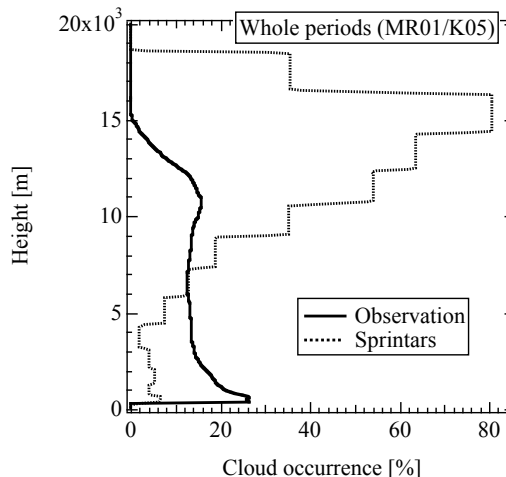


Fig.5 The same as Fig.4 but for MR01/K05 cruise

3. 雲の微物理特性

Fig.2 で見たように、レーダとライダの両方で雲域が検出できている部分は、全体の 20% 程度であったが、その領域に対しては、これまで開発してきたレーダ/ライダアルゴリズムを適用し雲の微物理量を抽出することができる (Okamoto et al., 2003)。ここでは氷雲の解析結果のみを議論する。氷雲であるための条件として、ラジオゾンデから得られた温度の情報を利用し、温度が 0 度以下であることを要請した。有効半径と氷水量の抽出結果をそれぞれ Fig.6 (up),(down) に示す。下層になるほど落下に伴って有効半径が大きくなり、

50 から 200 μm 程度までになっていた。氷水量は 0.001~0.1 g/m^3 程度であった。次にここで得られた有効半径と温度との関係を調べた (Fig.7)。温度を 5 度毎の領域に区切り、その領域ごとの有効半径の平均値を求めたものを実線で示す。有効半径の高度時間断面を調べた時に示唆されたように、有効半径と温度の間には明らかな相関があることがわかる。またライダーより得られる偏光解消度が 10%以上のものに限って解析した結果 (点線) から、非球形の粒子の方がより大きな温度依存性を示すことがわかった。最後に、ライダーより得られた落下速度と有効半径の関係を調べた (Fig.8)。サイズが大きくなるほど落下速度も大きくなっているが、100 μm 以下で 50 cm/s と一定の値を持つこと、150 μm 以上で落下速度の増加率が下がってることがわかる。偏光解消度 10%以上のものを解析すると、100 μm 以下の小さいもので落下速度がそれ以外を含んだものと比較して小さくなっている。これは非球形粒子の方が球形粒子に比べ終端速度が小さいからであると理解される。

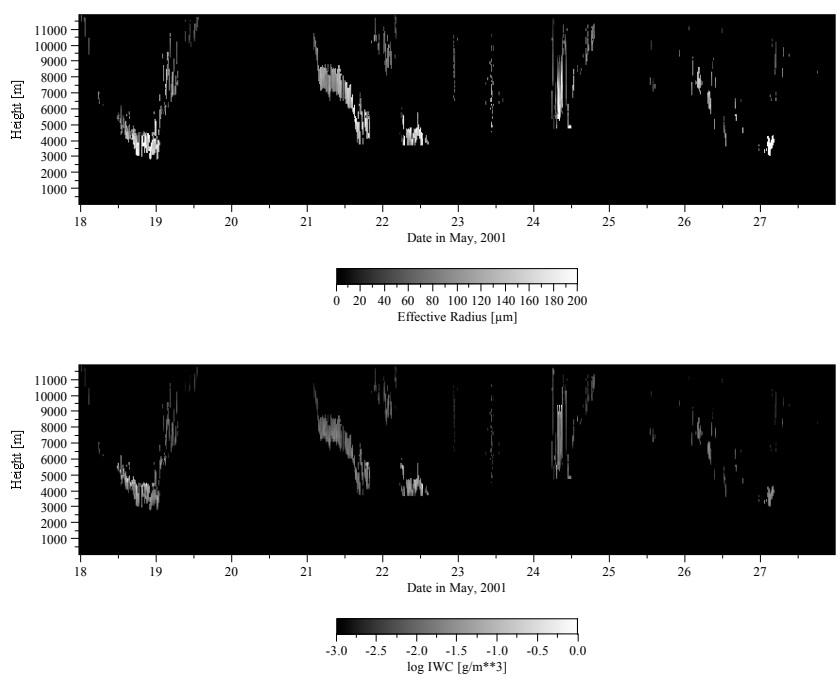


Fig.6 (Up) Time-height cross section of effective radius of ice particles for the observational period of radio sonde during MR01/K02cruise, (down) ice water content.

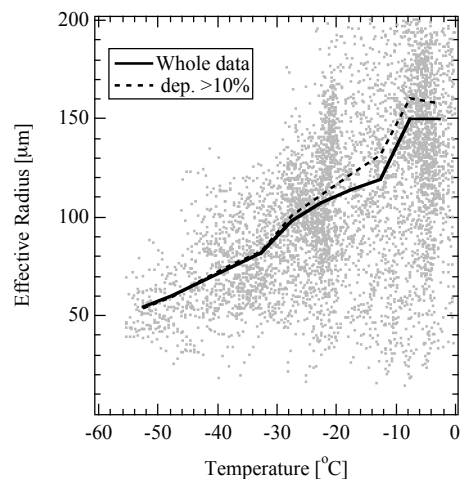


Fig.7 Relation between effective radius and temperature in MR01/K02.

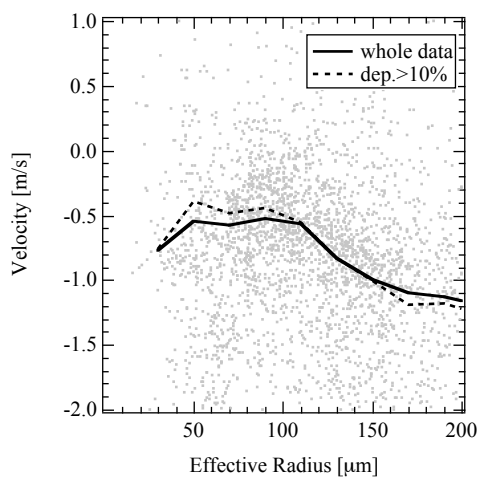


Fig.8 Relation between velocity and radius.