

VHF 帯大気レーダーとライダーによる熱帯対流圏中層における非降水雲の観測

Cirriform cloud observation in the middle troposphere

by VHF Doppler radar and Mie lidar

山本真之, 岸豊久, 阿保真*, Tri Handoko Seto, 安永 数明**, 西憲敬***,
山本衛, 橋口浩之, 深尾 昌一郎M. K. Yamamoto, K. Kishi, M. Abo*, T. H. Seto, Y. Yasunaga**, N. Nishi***,
M. Yamamoto, H. Hashiguchi, and S. Fukao

京都大学生存圏研究所, *首都大学東京システムデザイン学部,

海洋研究開発機構 地球環境観測研究センター, *京都大学大学院理学研究科

Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University, *Faculty of System Design,
Tokyo Metropolitan University, **Institute of Observational Research for Global Change, Japan Agency for
Marine-Earth Science and Technology, ***Graduate School of Science, Kyoto University**Abstract**

It is demonstrated that a combination of VHF-band Doppler radar and lidar is a key tool for observing vertical air motion (W) in and around cirriform cloud. A case of middle-tropospheric cirriform cloud at the tropical region (West Sumatra; 0.2°S, 100.32°E) on 8 May 2004 is presented. Altitude profiles of W were observed by VHF (47-MHz) Doppler radar. Using characteristics that strong backscattered echoes are received by 532-nm lidar in cloud regions due to Mie scatterings by cloud particles, altitudes where rapid increase (decrease) of the backscattered signal intensity occurred (terminated) were judged as cloud bottoms (tops).

W showed different features in the upper, middle, and lower part of cirriform clouds. Downward motions up to 0.5 m s⁻¹ were dominant in the upper part. Highly turbulent W, which was larger than 0.5 m s⁻¹ both in upward and downward directions, was observed in the middle part. W showed relatively small changes in the bottom part. Features of W in the middle and upper part of the cirriform clouds suggests that microphysical processes play a significant role in regulating dynamical processes in cirriform clouds.

1. 研究の背景

降水を伴わない雲(非降水雲)は、一般に光学的厚さは薄いものの地球上の広い範囲に存在する。そのため日傘効果等により地球の放射収支に大きな影響を与える。インドネシアは赤道直下に位置し、東西5000 kmにわたり広がる1万7500以上の島で構成される海洋大陸である。インドネシア海洋大陸は熱帯域でも最も海水温の高い海洋とその地形が生成する局地循環の影響により、熱帯域でも最も対流活動が活発な地域のひとつである [e.g., Mori et al., 2004]。そのため、この地域での非降水雲の発生・維持・消失の過程を詳細に観測し、これらの過程を解明していくことが地球環境の様態把握に重要である。

大気の上方向の運動(鉛直流)は雲粒や水蒸気の鉛直輸送により雲粒の凝結や蒸発に影響を与える重要な物理量である。また、雲微物理過程による加熱・冷却(凝結加熱・蒸発冷却・放射過程による加熱または冷却)は鉛直流変動を決定する重要な要因である。そのため、鉛直流と雲微物理過程の相互作用は非降水雲の生成・維持・消失を決定する重要な要因である。しかし、鉛直流を直接観測可能な手段は限られているため、非降水雲内の鉛直流変動には未解明の部分が多い。VHF帯の周波数を用いる大気レーダーは、温度や水蒸気変動に起因する屈折率擾乱からエコーを受信し、受信したエコーの周波数パワースペクトルからドップラーシフトを計測することにより風速を測定する。そのため鉛直流を雲の内外を問わず数分・数100mより優れた分解能で観測可能である。

ライダーは数 μ m以上の大きさを持つ雲粒と同程度あるいは短い波長を持つ光を送信することにより雲粒子を検出する。そのため、VHF帯レーダーでは検出が困難な非降水雲中の粒径の小さい雲粒の鉛直分布を観測可能である特長を持つ。そのため、インドネシア・スマトラ島の赤道大気観測所(0.2°S, 100.32°E)に設置されたVHF 帯大気レーダーとライダーの観測を組み合わせることにより、熱帯域対流圏中層における非降水雲中の鉛直流変動を調べた。本報告では、2004年5月8日の観測事例を取り上げる。

2. 観測データ

赤道大気観測所(0.2°S, 100.32°E)に設置された周波数47MHzのVHF帯大気レーダーは、赤道大気レーダー(Equatorial Atmosphere Radar; EAR)と呼ばれ、直径110m・585本の三素子八木アンテナで構成されるアクティブフェーズドアレイアンテナを備えている。最大ピーク出力100kW(最大duty比 5%)である[Fukao et al., 2003]。鉛直流は鉛直向きビームで得られた周波数パワースペクトルのドップラーシフトより求めた。また、鉛直向きビームの周波数パワースペクトルのスペクトル幅のデータを、観測の時間分解能(約 78 秒)及び鉛直分解能(150m)以下のスケールでの鉛直流変動の度合いを知る指標として用いた。スペクトル幅はスペクトルのピーク値からの半値半幅で定義した。

赤道大気観測所に設置・運用されている波長532nmのミーライダーは、1回あたり10mJ、10回/秒のパルス送信を行った。このミーライダーは観測対象に応じて感度の異なる複数の受信系を用いているが、今回は中層雲観測用である直径20cmの望遠鏡とフォトンカウントの受信機で得られたデータを用いた。鉛直分解能は150 m、時間分解能は10分である。

3. 観測結果

雲粒からのミー散乱は大気分子からのレイリー散乱より大きい特徴を用いて、ミーライダーの受信強度の高度方向の傾きから雲頂の高度と雲底の高度を見積もった。図1にミーライダーで観測された2004年5月8日1920LTにおける受信強度を示す。ミー散乱による受信強度の増加(傾きの負から正への符号変化)が見られる高度(5.8km)を雲底とした(図1a)。またミー散乱からレイリー散乱への変化により負の傾きが閾値以下になる高度(7.9km)を雲頂とした(図1b)。図2のグレイスケールの等高図はEARの鉛直向きビームで観測されたスペクトル幅を示している。さらに、上述した手法により非降水雲と判定した範囲を白い実線で示している。雲の中層から雲頂にかけて、 0.4 m s^{-1} 以上の鉛直流擾乱がスペクトル幅に観測されている。

図3に2004年5月8日1600LTから2300LTにおける雲頂付近(8.2 km)、雲の中層(7.6 km)、雲底付近(6.4 km)における鉛直流とスペクトル幅の時系列を示す。非降水雲が存在した1900LTから2200LTの期間において、雲頂付近(8.2 km)では $\pm 0.5 \text{ m s}^{-1}$ 程度のやや大きいサンプリング時間及び空間内の鉛直流擾乱がスペクトル幅に観測されている。しかし、サンプリング時間及び空間内の鉛直流変動には幅がある一方で、平均的には $0-0.5 \text{ m s}^{-1}$ の下降流であることがわかる。雲の中層付近(7.6 km)では 0.5 m s^{-1} を超える大きい上昇流・下降流が 10-30 分程度の時間スケールで入れかわり、大きい鉛直流変動の存在を示している。スペクトル幅に見られる鉛直流擾乱も $\pm 1 \text{ m s}^{-1}$ 程度と大きい。雲底付近(6.4 km)では鉛直流及びスペクトル幅は相対的に小さい。

4. まとめ

2004年5月8日のVHF帯(47MHz)大気レーダー(EAR)と波長532nmのミーライダーの観測結果を用いて、熱帯対流圏中層の非降水雲の雲頂付近・雲の中層・雲底付近における鉛直流変動の詳細をはじめて示した。非降水雲が存在した1900LTから2200LTにおいて、雲頂付近(8.2 km)では $0-0.5 \text{ m s}^{-1}$ の下降流が卓越していた。ただし、下降流は一樣ではなく $\pm 0.5 \text{ m s}^{-1}$ 程度のやや大きい鉛直流擾乱を伴っていた。雲の中層付近(7.6 km)では 0.5 m s^{-1} を超える大きい上昇流・下降流が 10-30 分程度の時間スケールで入れかわり、スペクトル幅に見られる鉛直流擾乱も $\pm 1 \text{ m s}^{-1}$ 程度と大きかった。雲底付近(6.4 km)では鉛直流及びスペクトル幅は相対的に小さかった。

Starr and Cox [1985] は、計算機実験により粒径の小さい(落下速度の小さい)雲粒が卓越する条件下では、凝結加熱と放射効果のバランスにより1km以下の厚さを持つ非降水雲が長時間維持され得ることを示している。Starr and Cox [1985] が示した雲内での強い風速擾乱の存在と雲頂付近での下降流の卓越は、今回我々が示した観測結果と良く合致している。この一致は雲内の微物理過程が力学的過程に大きく影響を与えていることを示唆している。

近年は複数の波長を用いるライダーあるいはライダーとミリ波レーダーを組み合わせた観測により非降水雲内の雲微物理量の推定手法が開発されている。しかし、これらの雲微物理量の推定において鉛直流は未知のパラメータである。今回の観測結果は、VHF帯大気レーダーによる非降水雲内における鉛直流の直接観測の重要性を強く示すものである。今回は熱帯域での観測結果を示したが、対流システムの生成メカニズムが異なる熱帯域と他の地域における非降水雲に関連する諸過程の差異の解明も重要である。

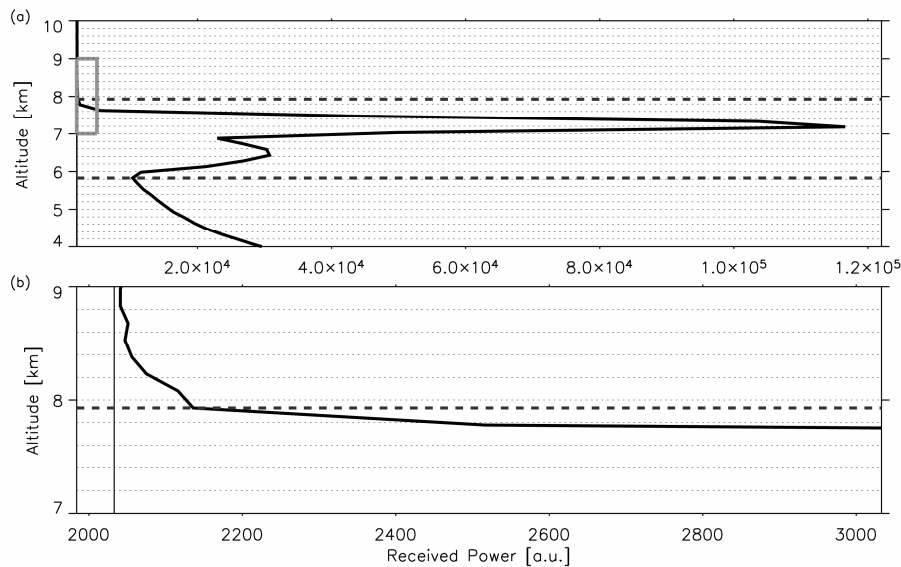


Fig. 1: (a) Altitude profile of backscattered signal intensity observed by the 532-nm lidar at 1920 LT 8 May 2004. (b) Magnified view of a region indicated by the gray rectangle in panel (a). Thick black and solid curve shows a vertical profile of received signal intensity observed by the 532-nm lidar. Horizontal dashed line at 5.8 km (7.9 km) indicates a cloud bottom (top) defined as an altitude where increase (decrease smaller than a threshold value) was observed in received signals of the 532-nm lidar. Vertical thin solid line in panel (b) shows a noise level.

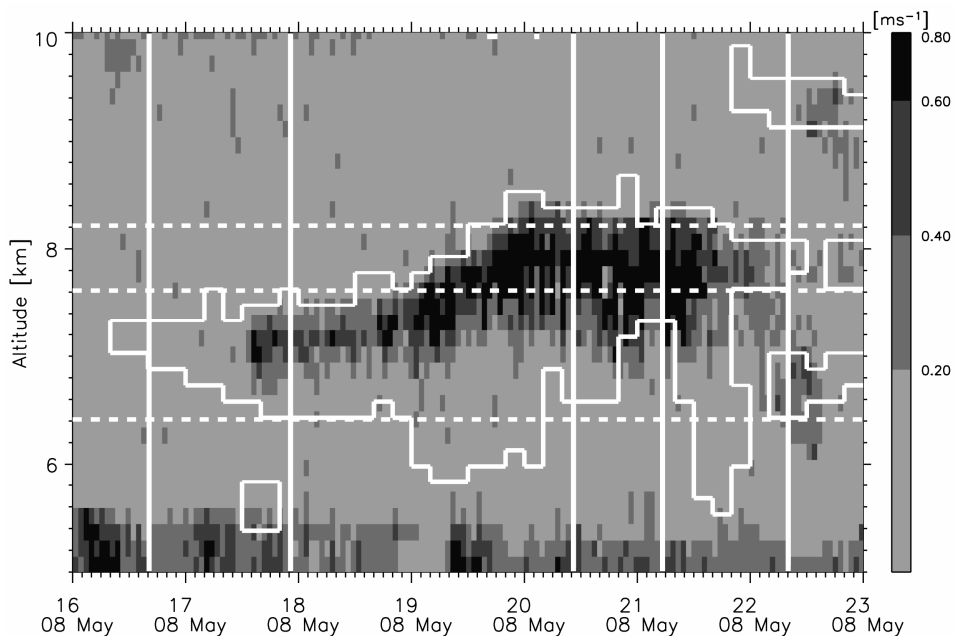


Fig. 2: Time-altitude plot of spectral width observed by the VHF (47-MHz) Doppler radar from 1600 LT to 2300 LT 8 May 2004. Spectral width is defined as half-width of 3-dB point from the spectral peak of atmospheric echo. Cloud region determined by the 532-nm lidar is shown by thick white curve. Thin white lines indicate at 8.2 km, 7.6 km, and 6.4 km altitude, at which vertical air motion and turbulence are plotted in Fig. 3.

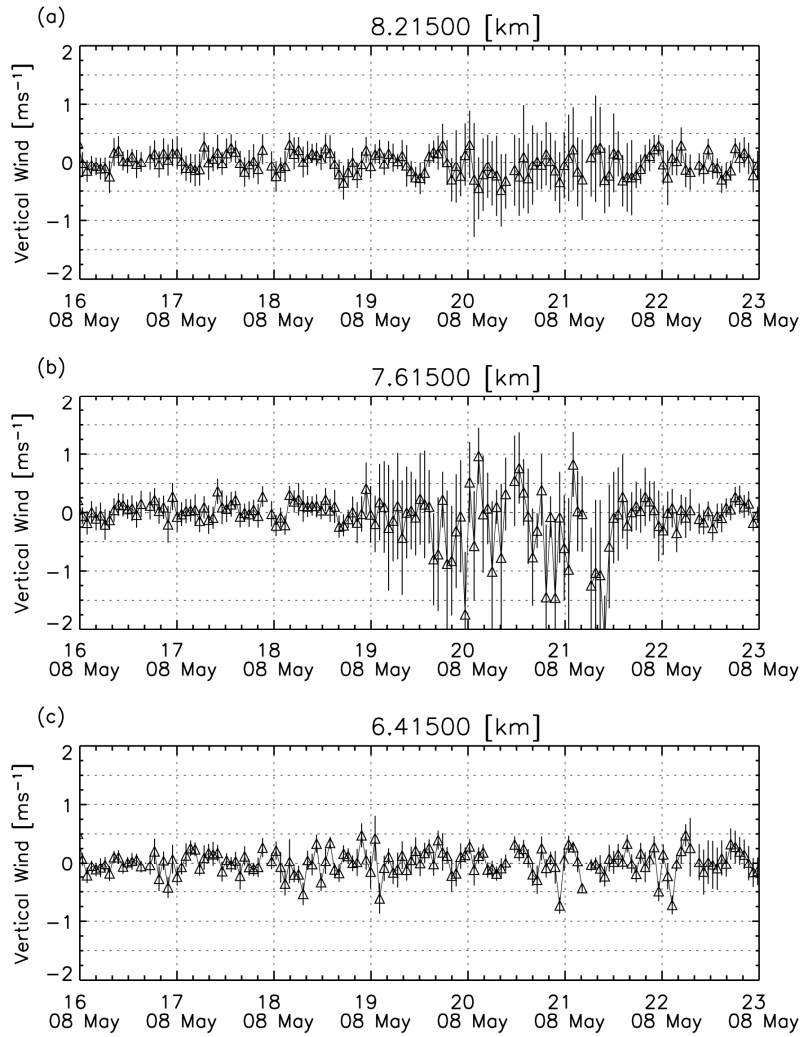


Fig. 3: Time series of vertical air motion (triangles) and spectral width (vertical lines) observed in at (a) 8.2 km, (b) 7.6 km, and (c) 6.4 km from 1600 LT to 2300 LT 8 May 2004. Vertical air motion and spectral width were observed by the 47-MHz Doppler radar.

4. 参考文献

Fukao, S., H. Hashiguchi, M. Yamamoto, T. Tsuda, T. Nakamura, M. K. Yamamoto, T. Sato, M. Hagino, and Y. Yabugaki, Equatorial Atmosphere Radar (EAR): System Description and First Results, *Radio Sci.*, **38**, 1053, doi:10.1029/2002RS002767, 2003.

Mori, S., J.-I. Hamada, Y. I. Tauhid, M. D. Yamanaka, N. Okamoto, F. Murata, N. Sakura, H. Hashiguchi, and T. Sribimawati,, Diurnal land-sea rainfall peak migration over Sumatera Island, Indonesian maritime continent observed by TRMM satellite and intensive rawinsonde soundings, *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 2021-2039.

Starr, D. O'C., and S. K. COX, Cirrus Clouds. Part II: Numerical Experiments on the Formation and Maintenance of Cirrus, *J. Atmos. Sci.*, **42**, 2682-2694, 1985.