

# 赤道大気レーダーと偏光ライダーによる層状性降水内の鉛直流・降水粒子落下速度・ 偏光解消度の同時観測

## First simultaneous measurement of vertical air velocity, particle fall velocity, and hydrometeor sphericity in stratiform precipitation: Results from 47-MHz wind profiling radar and 532-nm polarization lidar observations

山本真之<sup>1</sup>, 妻鹿友昭<sup>1</sup>, 阿保 真<sup>2</sup>, 柴田泰邦<sup>2</sup>, 橋口浩之<sup>1</sup>, 西憲敬<sup>3</sup>, 下舞豊志<sup>4</sup>, 柴垣佳明<sup>5</sup>,  
山本衛<sup>1</sup>, 山中大学<sup>6,7,8</sup>, 深尾 昌一郎<sup>9</sup>

M. K. Yamamoto, T. Mega, M. Abo, Y. Shibata, H. Hashiguchi, N. Nishi, T. Shimomai, Y. Shibagaki,  
M. Yamamoto, M. D. Yamanaka, and S. Fukao

1:京都大学生存圏研究所, 2:首都大学東京システムデザイン学部, 3:京都大学理学研究科,

4:島根大学総合理工学部, 5:大阪電気通信大学, 6:海洋研究開発機構,

7: SATREPS-MCCOE Promotion Office, 8:神戸大学理学研究科, 9: 福井工業大学

1: Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University, 2: Faculty of System Design,  
Tokyo Metropolitan University, 3: Graduate School of Science, Kyoto University, 4: Interdisciplinary Faculty of  
Science and Engineering, Shimane University, 5: Faculty of Information and Communication Engineering, Osaka  
Electro-Communication University, 6: Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology,  
7: SATREPS-MCCOE Promotion Office, 8: Graduate School of Science, Kobe University, 9: Fukui University of  
Technology

### Abstract

Results from simultaneous measurements of vertical air velocity ( $W$ ), particle fall velocity, and hydrometeor sphericity in stratiform precipitation are reported for the first time. A case of decaying stratiform precipitation on 8 December 2008 (case A) and that of active stratiform precipitation on 16 December 2008 (case B) observed at Sumatra, Indonesia (0.2°S, 100.32°E) are described. A 47-MHz wind profiling radar measured  $W$  and reflectivity-weighted particle fall velocity relative to the air ( $V_z$ ) simultaneously. Upward  $W$  above the melting layer (ML) in the case B ( $> 0.2 \text{ m s}^{-1}$ ) was greater than the case A ( $< 0.1 \text{ m s}^{-1}$ ).  $V_z$  at 300 m above the 0 °C altitude in the case B ( $1.6 \text{ m s}^{-1}$ ) was greater than that in the case A ( $1.3 \text{ m s}^{-1}$ ). The thickness of ML in the case B (900 m) was greater than the case A (300 m). The results suggest that the size growth of hydrometeors under the presence of upward  $W$  contributed to the formation of thicker ML in the case B. Lidar measured an increase of linear depolarization ratio ( $\delta$ ) and lidar dark band in the ML, and their thickness were consistent with the ML thickness determined by  $V_z$ .  $\delta$  of raindrops was 0.08-0.10 in the case B, while it was close to zero in the case A. In addition to the deformation and oscillation of raindrops, wind disturbance is also a candidate which explains the  $\delta$  increase in the case B. In the case B, a dip of  $\delta$  was measured just below the ML.

### 1. はじめに

層状性降水内の降水粒子は落下しながら凝結・併合等により成長し、0°C 高度に達すると降水粒子が融解し雨滴となる。層状性降水の上層に存在する上昇流は、昇華等を通じ雲水量や降水粒子サイズを増大させる主要な要因である。そのため、大気鉛直方向の運動である鉛直流 ( $W$ ) の測定は層状性降水の理解に不可欠である。また、空気に対する降水粒子の落下速度の測定には、正確な  $W$  の同時測定が不可欠である。赤道大気レーダー (Equatorial Atmosphere Radar; EAR) などの 50 MHz 帯大気レーダーは、降水内の鉛直流と降水粒子を同時に観測できる唯一の測器である。また、偏光ライダーにより測定できる偏光解消度 ( $\delta$ ) は、降水粒子の相や非球形性を知る指標となる。本発表ではインドネシア・スマトラ島の赤道大気観測所 (南緯 0.20°, 東経 100.32°) において運用されている赤道大気レーダー (EAR) と偏光ライダーの観測結果を示す。

### 2. 観測データ

生存圏研究所とインドネシア航空宇宙庁が運用する赤道大気レーダー (Equatorial Atmosphere Radar; EAR) は、VHF 帯 (47 MHz) の中心周波数で運用されるドップラーレーダーである。EAR 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、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で風速を測定する。そのため、鉛直向きビームで測定されたドップラーシフトから得られる鉛直流 ( $W$ ) を、雲の内外を問わず観測可能である。また、強い降水に対しては、降水粒子からのレイリー散乱エコーを受信することで、雨滴散乱強度で重みづけされた地面に対する降水粒子落下速度 ( $V_{z+air}$ ) を測定することが可能である。雨滴散乱強度で重みづけされた空気に対する降水粒子落下速度 ( $V_z$ ) は、 $V_z = V_{z+air} - W$  により得ることが可能である。

首都大学東京が赤道大気観測所において運用する多目的ライダーにおいて、2008年に設置された対流圏下層及び中層観測用の偏光解消度観測チャンネルの受信散乱強度 ( $P$ ) と偏光解消度 ( $\delta$ ) の観測データを用いた。測定データ

の鉛直分解能は 30 m、時間分解能は 1 分である。

### 3. 観測結果

図に観測結果を示す。この観測期間においては、地表の雨量計において  $2 \text{ mm h}^{-1}$  を超える継続的な降雨が観測された。図 a に示す  $W$  において、高度約 6.0 km 以上では上昇流である。また、高度約 5.0 km 以下では下降流が卓越している。ラジオゾンデ(気球観測)から見積もった  $0^\circ\text{C}$  高度は約 4.9 km であった(図なし)。図 b に示す  $V_z$  は高度 4.9 km を境に高度の低下とともに増大し、高度 4.0 km で約  $7.6 \text{ m s}^{-1}$  となる。この  $V_z$  の増大は雪片の融解に伴うものであり、層状性降水の特徴である融解層の存在を示している。高度 4.9 km から  $V_z$  の観測上限高度である 8.4 km において、 $V_z$  は高度の低下とともに増大する。上昇流が存在する高度 6.0 km 以上では加熱を伴う昇華等が、上昇流が存在しない高度 4.9-6.0 km では併合が雪片のサイズ増大に寄与したと考えられる。雨滴によるレーザー光の減衰のため  $P$  及び  $\delta$  は高度 5.0 km 以上における測定データが十分得られていないが、高度 4.0-4.4 km における  $P$  の極小や融解層高度である高度 4.0-4.9 km における  $\delta$  の増大は、それぞれライダーダークバンド・雪片への雨滴の付着という融解層の特徴を捉えている。レーザー光は鉛直方向を指向しているため鏡面反射が卓越すること、望遠鏡の視野が  $0.5 \text{ mrad}$  と小さいために多重散乱が抑圧されることを考えると、雨滴における  $\delta$  は 0 に近いことが期待される。しかし、高度 4.0 km 以下の雨滴における  $\delta$  は、0.08-0.10 と大きい。高度 4.0 km 以下における  $W$  の擾乱(標準偏差で定義)は  $0.1 \text{ m s}^{-1}$  と大きく、また  $W$  の高度変化も大きい。これは、雨滴における  $\delta$  がほぼ 0 であった 12 月 8 日のケースとは異なる特徴である(図なし)。雨滴のサイズが比較的大きい(Marshall-Palmer 分布を仮定した推定で雨滴粒径分布の中央値が  $1.1 \text{ mm}$ ) こと、比較的大きいサイズの雨滴は、その変形や振動の影響により off zenith における  $\delta$  の増大を発生させることから、 $W$  の擾乱が雨滴の軸を傾けることにより、雨滴における  $\delta$  の増大に寄与した可能性が示唆される。また、融解層の下端である高度 4.0 km から 3.8 km にかけて、 $\delta$  は極小を持つ。これは、溶け切った水滴の変形度と振動が、高度 4.0 km から 3.8 km にかけて水滴の落下とともに増大した可能性を示唆している。Abstract に記載した観測結果の全ては、講演時に詳細を示す。

本稿で示した観測結果は、鉛直流・降水粒子落下速度を測定できる大気レーダーと降水粒子の相や形状に関する情報を得られるライダーの同時観測が、降雨に関する有用な情報を提供できることを示している。本稿で示した結果が今後の in-situ 観測を含むさらなる大規模な観測の実施に繋がり、降水粒子の形状・成長と鉛直流との関連における定量的理解の飛躍的発展が達成されることを期待している。

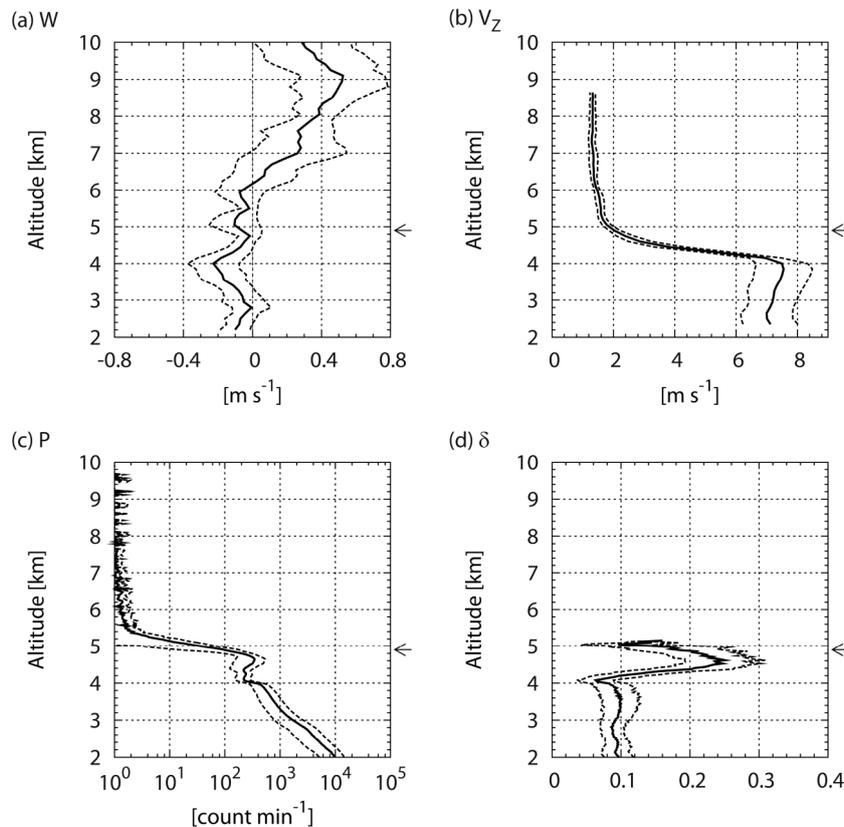


Fig. : Altitude profile of (a)  $W$ , (b)  $V_z$ , (c)  $P$ , and (d)  $\delta$  averaged from 2014 to 2141 LST on 16 December 2008. Positive  $W$  values indicate that wind velocity is upward, and positive  $V_z$  values indicate that hydrometeors fall toward the ground. Arrows at the right of each panel show the altitude of  $0^\circ\text{C}$  estimated by the radiosonde soundings. The thick curves show the average values, and the dotted curves on the both sides of the averaged values show disturbance determined by the standard deviation.