

沖縄偏波降雨レーダ (COBRA) を用いた降雨 の鉛直構造特性に関する研究

VERTICAL CHARACTERISTICS OF RAINFALL USING C-BAND MULTI PARAMETER DOPPLER RADAR (COBRA)

中川勝広¹・北村康司²・花土 弘³・高橋暢宏⁴・井口俊夫⁵

Katsuhiro NAKAGAWA, Yasushi KITAMURA, Hiroshi HANADO, Nobuhiro TAKAHASHI, and
Toshio IGUCHI

¹正会員 博士 (工) 情報通信研究機構 主任研究員 (〒904-0411 沖縄県国頭郡恩納村字恩納4484)

²正会員 博士 (工) 科学技術振興機構 研究補助員 (〒904-0411 沖縄県国頭郡恩納村字恩納4484)

³非会員 理修 宇宙航空研究開発機構 副主任開発部員 (〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1)

⁴非会員 理博 情報通信研究機構 主任研究員 (〒184-9795 東京都小金井市貫井北町4-2-1)

⁵非会員 Ph. D 情報通信研究機構 グループリーダー (〒184-9795 東京都小金井市貫井北町4-2-1)

GPM project has a future plan of rainfall measurement with the core satellite loading dual frequency precipitation radars, accompanied by about eight companion satellites that also mount the microwave radiometers. Microwave radiometer data are expected to be the central data for producing the global maps of rainfall rates for the reason that they are used for the observation from satellite more frequently and have the wider observation swath width. In order to improve the rain retrieval algorithm for space-borne microwave radiometers, it is imperative to improve the microphysics model and the rain distribution models that are used in the retrieval algorithms. One of the important observations was simultaneous measurements of precipitation with COBRA, 400MHz WPR and ground-based measurements of rain drop size distribution. Therefore, we analyze the vertical characteristics of rainfall related to rainfall type observed by the COBRA and the 2D-Video-Distrometer. As a result, in convective rainfall, vertical variations of the polarimetric parameter (ZDR and Do) were very large. Height dependency of the vertical profile of radar reflectivity was become clear.

Key Words: GPM, microwave radiometers algorithm, COBRA, vertical characteristics of rainfall, convective rainfall, stratiform rainfall,

1. 序論

熱帯降雨観測衛星 (TRMM) の後継・拡張ミッション計画として全球降水観測計画 (GPM) がある^{1), 2)}. GPM は, 2 周波降水レーダ (DPR) とマイクロ波放射計を搭載する主衛星と最終的には 8 機程度を目標にしているマイクロ波放射計を搭載した副衛星を用いた降水観測を実施する計画である. 副衛星に搭載するマイクロ波放射計のデータを同一に収集・処理することで 3 時間毎の全球の降水分布を求めようとしている³⁾.

衛星搭載マイクロ波放射計で観測された輝度温度より降水強度を推定するリトリバーアルゴリズムでは, 降水プロファイル等を仮定した降水物理モデルを用い, 放射伝達計算により輝度温度が計算され (フォワード計算), 作成された降水強度と輝度温度のルックアップ

テーブルを参照することにより降水強度が推定される (リトリバー) ^{4), 5)}. 現在使用されている降水物理モデルは単純化されたものであり, 降雨での雨滴粒径分布, 固相から液相に変化する融解層での取り扱い, 融解層より上に存在する固体降水粒子の密度, 数密度, 落下速度, 誘電率などの点が改良すべき点と考えられる. また, リトリバーにおいて, 降雨の空間的な非一様性の効果をどう取り入れるかが重要である. これは, 現状の衛星搭載マイクロ波放射計が降雨システムを空間的に十分分解できていないことによる. マイクロ波放射計のフットプリントは, 衛星により異なるが, AMSR-E を例にとると 10 GHz のチャンネルでは, 29 x 51 km の楕円, 89 GHz では, 3.5 x 5.9 km の楕円であり, 特に低周波で対流性降水を観測する場合は一様性の仮定は困難である. つまり, 降水システムの種類などをパラメータとした, 降水強度の非一様性に関する適切なモデルを構築することが

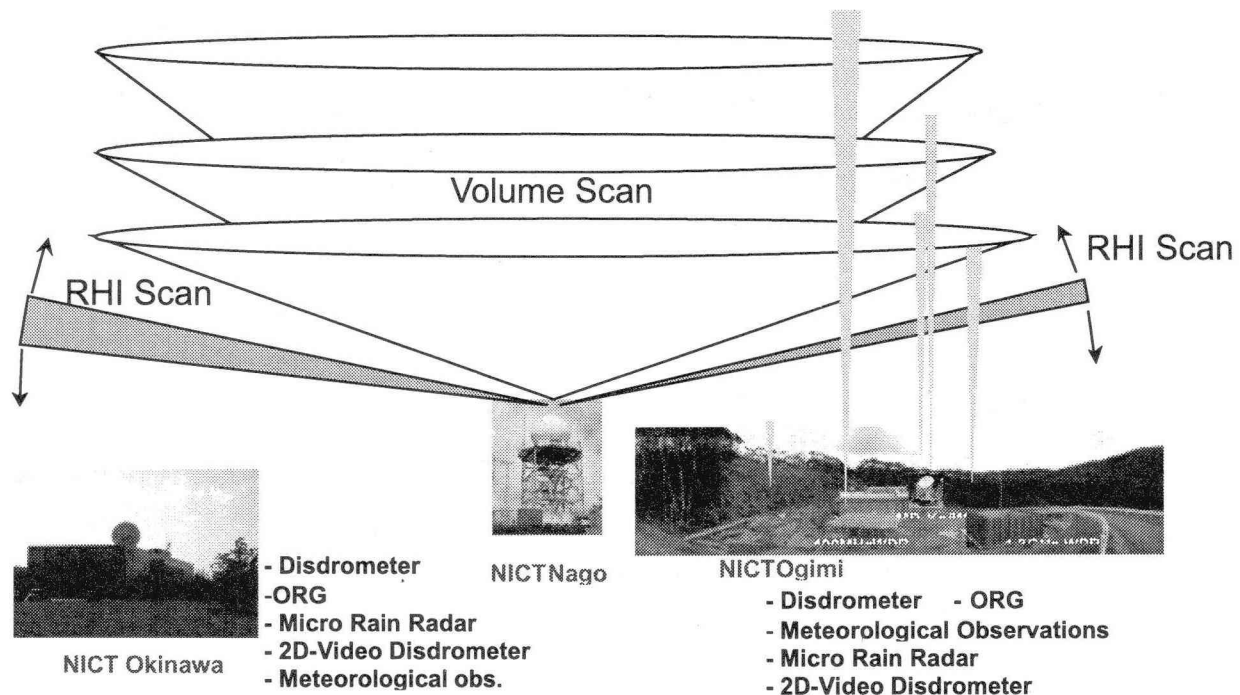


図-2 集中観測概要と観測センサの配置

リトリバルに必要とされている。

マイクロ波放射計降水強度リトリバルアルゴリズムのフォワード計算で用いる降水物理モデルの改良には、降雨の鉛直構造をまず明らかにする必要がある。降雨の鉛直構造解析に関しては、中川らが京都大学のMUレーダ観測所において雨滴粒径分布の鉛直分布と地上同期観測を実施し^{6), 7)}、降雨レーダによる雨量推定手法の構築のための降雨タイプに依存した雨滴粒径分布の鉛直構造の定式化などを行っている⁸⁾。本研究では、情報通信研究機構沖縄亜熱帯環計測技術センターの沖縄偏波降雨レーダ (COBRA)⁹⁾で観測された RHI (Range Height Indicator) データ と地上降雨観測データを用い、降雨タイプ別の詳細な降雨鉛直構造解析を行い、そのモデル化を行うことを目的とする。



図-1 観測サイト位置図

2. 観測概要

2004 年 5 月中旬から 6 月上旬に情報通信研究機構沖縄亜熱帯計測技術センターの沖縄偏波降雨レーダと UHF 帯ウィンドプロファイラを中心に梅雨期の降雨集中観測を行った。集中観測には、CREST「衛星による高精度高分解能全球降水マップの作成」(CREST/GSMaP)、CREST「湿潤・乾燥大気境界層の降水システムに与える影響の解明と降水予測精度の向上」(CREST/LAPS)、名古屋大学地球水循環研究センター (HyARC) との共同研究の 3 プロジェクトが共同で実施した¹⁰⁾。

COBRA とデュアルドップラ観測を実施する HyARC

の赤レーダは、沖縄本島中部与勝 (よかつ) 半島に位置する勝連 (かつれん) 町役場屋上に設置されている (図-1 参照)。図-2 に COBRA, UHF 帯と L 帯ウィンドプロファイラ、独立行政法人防災科学技術研究所の MP-Ka レーダ、地上降雨観測装置の配置関係と観測のイメージを示す。COBRA は C 帯の偏波ドップラレーダであり、広範囲の降雨の様子を観測することができるが、融解層の上の固体降水粒子に関して十分な感度を有していない。一方、MP-Ka は Ka 帯の雲レーダで、きわめて高感度であり、アンテナビームが鋭く、空間分解能が高いなどの利点があるが、降水強度が大きい場合には降雨減衰の影響を大きく受ける欠点もある。これらの特徴を考慮し、MP-Ka は COBRA から約 15km 離れ

た UHF 帯 と L 帯 のウインドプラファイラの敷地である大宜味大気観測施設 (NiCT Ogimi) に設置し、主に鉛直上方の固定観測を実施した。COBRA は詳細な3次元観測と地上降雨観測装置が整備されている沖縄亜熱帯計測技術センター (NiCT Okinawa) と NiCT Ogimi 上空の RHI (Range-height indicator) 観測を実施する。ポリウムスキャン観測が約 6 分、RHI 観測が約 4 分の計 10 分を 1 シーケンスとして観測を実施した。勝連の HyARC の赤レーダは、COBRA がポリウムスキャンする前半の 6 分間同期観測を実施し、残りの 4 分間は、低仰角の PPI 観測を実施した。これは、個々の降雨セルの発生、移動、消滅を追跡するためである。

地上における降雨観測装置は図-2 に示した通り、NiCT Ogimi に衝撃型ディストロメータ、2 次元ビデオディストロメータ (2DVD)、光学式雨量計 (ORG)、マイクロレインレーダ (MRR)、シーロメータ、マイクロ波放射計、地上気象観測装置を設置し、NiCT Okinawa には、衝撃型ディストロメータ、2DVD、ORG、MMR、地上降雨観測装置を設置し同時観測を実施した。なお、地上降雨観測装置では、風向・風速、温・湿度、気圧、日射、雨量を観測している。2DVDは、2 台のカメラにより落下する雨滴を映像として捕らえ、画像処理することにより雨滴の扁平率、落下速度、雨滴粒計分布など衝撃型ディストロメータよりも詳細な雨滴粒計分布情報を得ることができる。MRR は、K 帯 (24.2GHz) の送信方式が FM-CW のレーダで高度別 FFT スペクトル、雨滴粒径分布、レーダ反射因子、降水量、含水量、雨滴落下速度を観測することができる。

3. 解析結果

2004 年 6 月 1 日の低気圧に伴う降雨を解析対象とした。まず、今回衝撃型ディストロメータのデータが欠測していたため、2DVD と衝撃型ディストロメータの装置間の雨滴粒径分布比較をすることが出来なかった。そこで、ORG を用いて降雨強度で比較した。解析対象期間中の 2DVD と ORG で観測されたハイトグラフを図-3 に示す。降雨強度が 80mm/h 以上の強雨時に ORG が 2DVD に比べて大きくなっているが、概ね一致していることがわかる。強雨時に ORG と 2DVD の降雨強度に差については、衝撃型ディストロメータとの同期観測が実施できている期間のデータを用いて今後詳細な比較解析を行う。

地上降雨強度データ (図-3) と COBRA で観測された PPI および RHI データから対流性降雨と層状性降雨が観測された期間を特定し、降雨タイプ別の詳細な降雨鉛直構造解析を行った。3:00 ~ 6:00 (UTC) を対流性降雨、7:00 ~ 15:00 (UTC) を層状性降雨とした。COBRA で観測された各降雨タイプのレーダ反射因子 Z

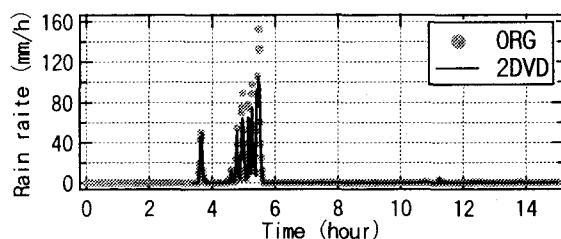


図-3 2DVD と ORG で観測された降雨強度 (2004/06/01)

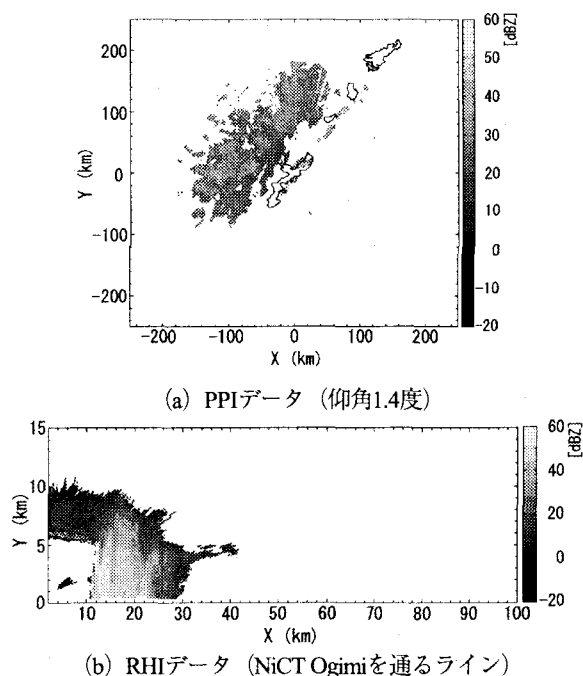


図-4 COBRAで観測された対流性降雨のレーダ反射因子分布 (2004/06/01 05:26 (UTC))

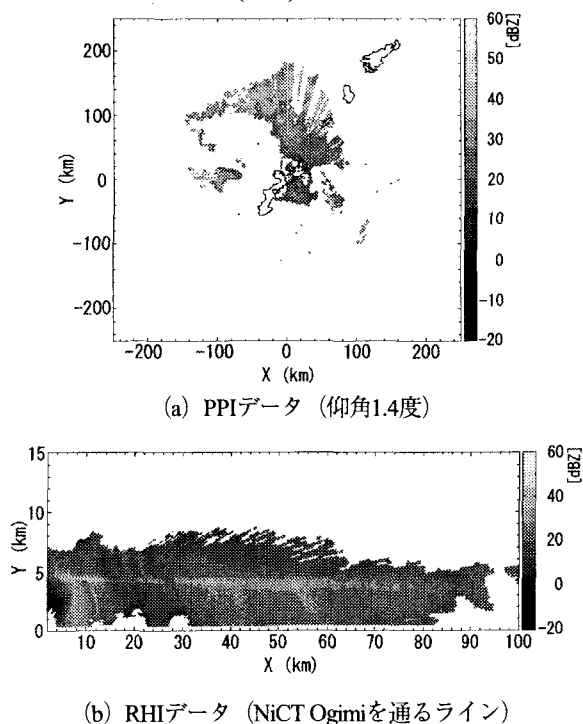


図-5 COBRAで観測された層状性降雨のレーダ反射因子分布 (2004/06/01 13:36 (UTC))

の PPI と RHI をそれぞれ図-4 と図-5 に示す。なお、降雨による減衰の影響を受けない偏波パラメータである偏波間位相差 Φ_{DP} の情報を利用し降雨減衰量を求める Self-Consistent Method¹¹⁾ を適用することにより、レーダ反射因子 Z と水平・垂直偏波のレーダ反射因子の比 ZDR の降雨減衰補正を行っている。

図-4 の対流性降雨では、沖縄本島北西に沖縄本島と平行するかたちで降雨域が存在し、沖縄本島北部には非常に強い孤立したエコーが存在する。大宜味大気観測施設を通る RHI データ (図-4 (b)) から非常に強い対流性降雨であることがわかる。一方、図-5 の層状性降雨は、図-4 (a) の沖縄本島北西部に存在した降水システムが時間の経過とともに南東方向に移動し、沖縄本島に近づくにつれ降水域は分裂し沖縄本島を通過した後、エコーは弱くなった (図-5 (a))。大宜味大気観測施設を通る RHI データ (図-5 (b)) を見ると高度 5km 前後に 0℃層 (ブライツバンド) が存在する。このことは、NiCT Ogimi で実施したゾンデによる高層気象観測データからも確認している。ブライツバンド内の非常に強い領域 (50 dBZ 以上) から下層にスクリーン上に雨の強い領域が存在し、ブライツバンドから雨粒が落下する現象が捉えられている。

まず、降雨タイプ別の降雨の鉛直構造特性を明らかにするために COBRA で観測されたレーダ反射因子 Z 、水平・垂直偏波のレーダ反射因子の比 ZDR 、雨滴粒径分布の中央値 (median volume diameter) Do の鉛直構造について解析を行った。図-6 に降雨の各パラメータ (Z , ZDR , Do) の高度分布を示す。図中の●印は平均値、エラーバーは標準偏差を表している。高度毎の標準偏差に着目すると、層状性降雨に比べて対流性降雨の方が大きいことが分かる。これは、層状性降雨は水平方向に一樣で、対流性降雨は水平方向に非一樣であることを表している。

レーダ反射因子 Z の高度分布 (各図の一番左) に着目すると、対流性降雨の高度 2km 付近のレーダ反射因子 Z の値が小さくなっていることがわかる。これは、図-4 (b) の水平距離が 4~6km 付近に存在する弱いエコーの影響であり、高度 2km 付近の点を除いた鉛直プロファイルは、高度が低くなるにしたがってレーダ反射因子 Z が大きくなるという高度依存性がある。一方、層状性降雨の場合、鉛直方向にも一樣であることからレーダ反射因子 Z の鉛直方向の変化量は小さく一樣である。上記の結果は、中川らが実施した TRMM/PR を用いた山岳域における降雨の鉛直構造解析で得られた結果^{8), 12)} と一致している。次に、水平・垂直偏波のレーダ反射因子の比 ZDR の高度分布 (各図の真中) に着目する。ここで、水平・垂直偏波のレーダ反射因子の比 ZDR は、一般的に降雨中では正の値となり、降雨が強いほど大きくなる。しかし、レーダ反射因子 Z が強い場合でも雪や霰が存在するとゼロに近い値となる。対流

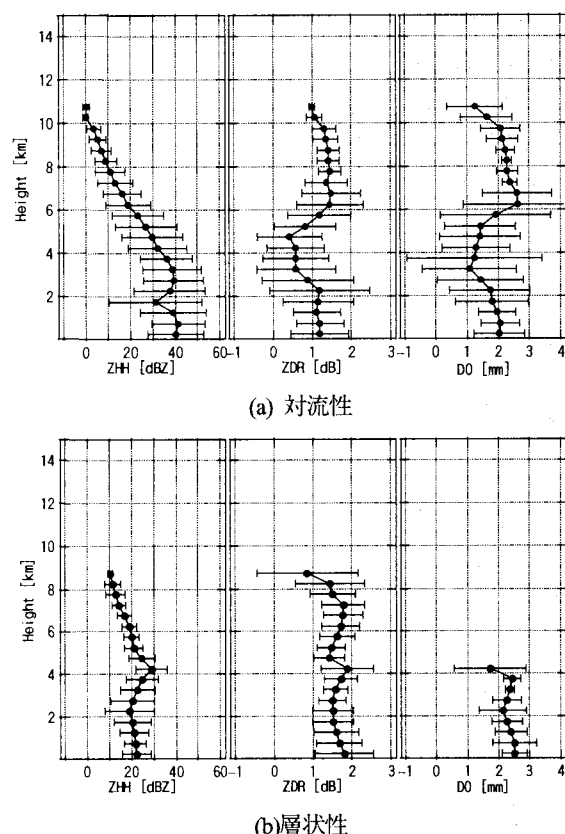


図-6 レーダ反射因子 Z 、水平・垂直偏波のレーダ反射因子の比 ZDR 、雨滴粒径分布の中央値 Do の高度分布

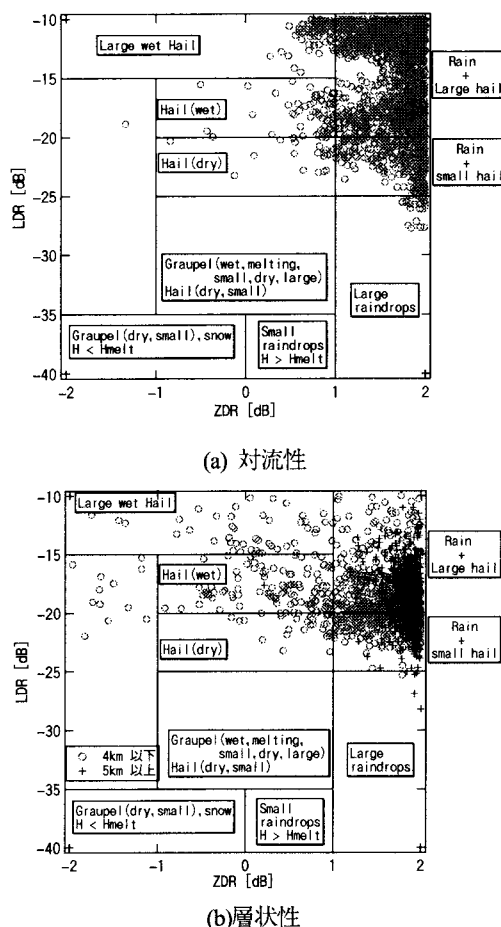


図-7 ZDR と LDR のスカットプロット

性降雨の場合、ZDR の値がゼロから 2 dB 前後と鉛直方向の変化量が大きく、多種の粒径の雨滴が存在することがわかる。図示していないが、図-4 (b) の水平距離 10km ~20km 付近の非常に強いエコーの領域での ZDR の値は 2dB 前後と大きくなっている。層状性降雨の場合、鉛直方向の ZDR の変化量が小さく鉛直方向に様な雨粒が分布していることがわかる。

最後に、雨滴粒径分布の中央値 (median volume diameter) D_0 の高度分布 (各図の一番右) に着目する。ここで、層状性降雨の D_0 が高度 4km 以上で表示されていない。これはブライトバンド高度以上では固体降水粒子となるため D_0 を算出していないためである。すなわち、 D_0 は降雨粒子のみで議論する。対流性降雨の場合、 D_0 は 1mm 前後から 3.5mm 前後と鉛直方向の変化量が大きく、ZDR の高度分布と同様に多種の粒径の雨粒が存在していることがわかる。特に高度 4km 付近では 1mm 前後と比較的小さな粒径の雨粒が多く存在し、地上に近づくにつれ 2mm 前後と大きな粒径が多く存在していることがわかる。層状性降雨の場合は、 D_0 についても鉛直方向の変化量が小さく、粒径の揃った雨粒が存在しているものと考えられる。

次に、各降雨タイプの降水粒子特性について調べた。図-7 に水平・垂直偏波のレーダ反射因子の比 ZDR と交差偏波成分の電力と主偏波成分の電力の比 LDR のスキヤットプロットを示す。図中の分類は、Höller *et al.* の降水粒子判別アルゴリズム¹³⁾より導出されたものである。対流性降雨の場合、ほとんどの粒子が雨粒と雹に分類されている。Höller *et al.* の降水粒子判別アルゴリズムでは、雨粒と雹を厳密に分類することは困難であるが ZDR が 1dB 以上であり雨粒が多く存在していると思われる、降水粒子判別は妥当なものであると考えられる。一方、層状性降雨の場合、高度 5km 以上のブライトバンドよりも上層において雨粒に分類され、高度 4km 以下のブライトバンドよりも下層において固体降水粒子と判別されている。今回の COBRA による偏波観測は、+45 度の直線偏波観測を実施したため、交差偏波成分と主偏波成分の相関が悪くなり、結果として交差偏波成分の電力と主偏波成分の電力の比 LDR の観測精度が悪化したことが原因であると考えられる。LDR の値は通常よりも大きくなる傾向であった。降水粒子判別を行う際には、COBRA の送信偏波パターンは、交差偏波成分と主偏波成分の相関が保持される水平偏波 (H 偏波) と垂直偏波 (V 偏波) を交互に送信する HV 送信で行う必要がある。さらに沖縄の亜熱帯地域にも適合した降水粒子判別アルゴリズムの開発も今後の課題である。

最後に、地上における降雨タイプ別の雨滴粒径分布特性について調べた。解析対象の各降雨タイプに分類した全期間における 2DVD で観測した雨滴粒径分布を図-8 に示す。なお、雨滴粒径分布 $N(D)$ は積分時間 1 分で算出した。対流性降雨の場合 (図-8 (a))、雨滴直径が

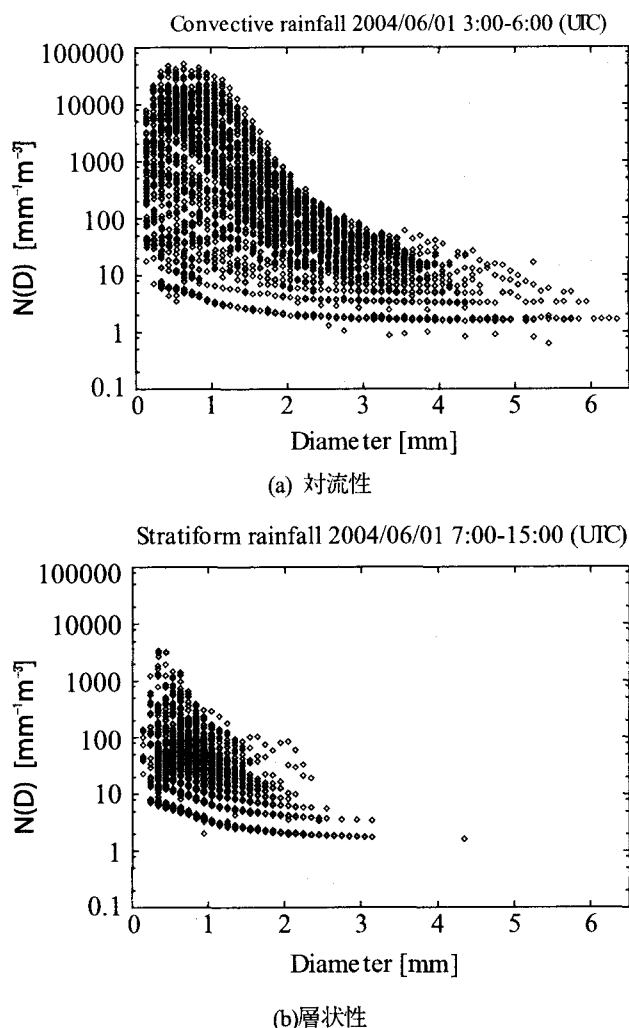


図-8 2DVDで観測された降雨タイプ別雨滴粒計分布

1mm 前後でピークとなる上に凸のガンマ分布が卓越し、雨滴直径が 4mm 以上の大きな雨滴も多く存在している。大きな雨滴が存在することは、図-6 (a) の雨滴粒径分布の中央値 D_0 が上空では 1mm 前後と比較的小さな粒径の雨粒が多く存在し、地上に近づくにつれ 2mm 前後と大きな粒径が多く存在していたことと一致する。一方、層状性降雨の場合 (図-8 (b))、全体的に雨滴の個数が少なく、最大粒径も 3mm 前後で下に凸のガンマ分布となっている。以上のことより、降雨タイプによる雨滴粒径分布は異なり、分布特性も明らかになった。

4. 結論

本研究では、マイクロ波放射計降水強度リトリバルアルゴリズムのフォワード計算で用いる降水物理モデルの改良のために詳細な降雨の鉛直構造解析を行った。解析には 2004 年 5 月中旬から 6 月上旬に沖縄で実施した梅雨期の集中観測のデータを用いた。まず、対流性降雨と層状性降雨の降雨タイプ別の降雨鉛直構造特性を明らかにするために COBRA で観測されたレーダ反射因

子 Z , 水平・垂直偏波のレーダ反射因子の比 ZDR , 雨滴粒径分布の中央値 (median volume diameter) Do の鉛直構造について解析を行った。その結果, 各パラメータに共通して対流性降雨の高度毎の標準偏差は層状性降雨に比べて大きく, ZDR と Do の鉛直方向の変化量も対流性降雨の場合が大きい。このことより, 対流性降雨には多種の粒径の雨滴が存在し, 層状性降雨では水平・鉛直方向に一様であることがわかる。さらに, レーダ反射因子 Z の高度分布には上空から地上へ高度が低くなるにしたがって値が大きくなる高度依存性があり, 筆者らが TRMM/PR を用いた山岳域における降雨の鉛直構造解析で得られた結果と一致した。次に, 各降雨タイプの降水粒子分布特性について調べた。対流性降雨の降水粒子判別結果は概ね妥当なものであったが, 層状性降雨についてはブライドバンド高度以下で固体粒子が存在するという結果になり, COBRA の観測モードの選択と降水粒子判別アルゴリズムの改良が課題である。最後に, 降雨タイプ別の雨滴粒径分布特性を 2 次元ビデオディストロメータの雨滴粒径分布データを用いて行った。解析の結果, 降雨タイプによる雨滴粒径分布は異なり, 分布特性が明らかになった。

以上のことから, 定性的ではあるが偏波レーダを用いた降雨タイプ別の降雨の鉛直構造特性が明らかになった。今後は, 降雨タイプ別の事例解析を増やし, 偏波パラメータを用いた降雨の鉛直構造特性を明らかにするとともに降雨の鉛直構造のモデル化を行う。さらに, 400MHz WPR, MP-Ka レーダのデータと複合し解析を行い, COBRA では観測が困難なブライドバンド内の構造についてのモデル化も試みる。

謝辞: 沖縄における梅雨期集中観測の実施に際して, CREST/GSMaP, CREST/LAPS, 名古屋大学地球水循環研究センター (HyARC) から多大なる金銭的・人的ご協力を頂きました。ここに深く感謝する次第であります。

参考文献

- 1) http://www.eorc.jaxa.jp/GPM/contents/index_j.htm
- 2) K. Nakamura, T. Iguchi and R. Oki: Japan's progress for the Global Precipitation Measurement (GPM), Proc. IGARSS 2003, Toulouse.
- 3) T. Iguchi, H. Hanado, N. Takahashi, S. Kobayashi, and S. Satoh:

The dual-frequency precipitation radar for the GPM core satellite, Proc. IGARSS 2003, Toulouse.

- 4) C. Kummerow, Y. Hong, W. S. Olson, S. Yang, R. F. Adler, J. McCollum, R. Ferraro, G. Petty, D.-B. Shin, and T. T. Wilheit: The Evolution of the Goddard Profiling Algorithm(GPROF) for Rainfall Estimation from Passive Microwave Sensors. *J. Appl. Meteor.*, Vol. 40, pp.1801-1820, 2001.
- 5) K. Aonashi, and G. Liu: Passive microwave precipitation retrievals using TMI during the Baiu preiod of 1999. Part I: ALgorithm description and validation. *J. Appl. Meteor.*, Vol. 39, pp.2024-2037, 2000.
- 6) 中川勝広, 中北英一, 池淵周一, 佐藤亨, Baxter E. VIEUX, 高埴琢馬: 降雨の3次元構造を考慮したレーダー雨量推定手法の構築, 水工学論文集, 第40巻, pp.297-302, 1996.
- 7) 中川勝広, 中北英一, 佐藤亨, 池淵周一: 降雨タイプに依存した雨滴粒径分布パラメータとその鉛直部分布, 水工学論文集 第41巻, pp.141-146, 1997.
- 8) 中川勝広, 中北英一, 佐藤亨, 池淵周一: 雨滴粒径分布の鉛直構造解析とレーダー雨量推定手法の構築, 水工学論文集 第42巻, pp.7-12, 1998.
- 9) K. Nakagawa, H. Hanado, S. Satoh, N. Takahashi, T. Iguchi and K. Fukutani: Development of a new c-band bistatic polarimetric radar and observation of typhoon events, 31st Conference on Radar Meteorology, Vol. II, pp. 863-866, 2003.
- 10) 中川勝広, 花土弘, 岩波越, 北村康司, 岡本謙一, 中村健治, 上田弘, 坪木和久: 沖縄梅雨集中観測2004, 水文・水資源学会2004年研究発表会要旨集, pp.126-127, 2004.
- 11) V. N. Bringi, T. D. Keenan and V. Chandrasekar: Correcting C-Band Radar Reflectivity and Differential Reflectivity Data for Rain Attenuation: A Self-Consistent Method With Constraints, *IEEE GE*, Vol. 39, No. 9, pp.1906-1915, 2001.
- 12) 中川勝広, 中北英一, 鈴木善晴, 大石哲, 池淵周一: TRMM/PRを用いた山岳域における地上降雨量分布推定, 水工学論文集, 第46巻, pp. 31-36, 2002.
- 13) H. Höller, V. N. Bringi, J. Hubbert, M. Hagen, and P.F. Meischner, P.F.: Life cycle and precipitation formation in a hybrid-type hailstorm revealed by polarimetric and Doppler radar measurement. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 51, pp. 2500-2522, 1994.

(2004. 9. 30 受付)