

偏波レーダーとビデオゾンデの同期観測および 降水粒子タイプ判別

DEVELOPMENT OF HYDROMETEOR CLASSIFICATION SYSTEM USING
POLARIMETRIC RADAR MEASUREMENTS SYNCHRONIZED WITH THE
VIDEO-SONDE OBSERVATION

中北英一¹・山口弘誠²・隅田康彦³・竹畑栄伸⁴・鈴木賢士⁵
中川勝広⁶・大石哲⁷・出世ゆかり⁸・坪木和久⁹・大東忠保¹⁰

Eiichi NAKAKITA, Kosei YAMAGUCHI, Yasuhiko SUMIDA, Hidenobu TAKEHATA,
Kenji SUZUKI, Katsuhiko NAKAGAWA, Satoru OISHI, Yukari SHUSSE,
Kazuhisa TSUBOKI and Tadayasu OHIGASHI

¹ 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

² 学生会員 工修 京都大学博士課程 工学研究科 (〒 615-8530 京都市西京区京都大学桂)

³ 学生会員 工学士 京都大学修士課程 工学研究科 (〒 615-8530 京都市西京区京都大学桂)

⁴ 中部電力株式会社 (〒 461-8680 名古屋市中区東新町 1 番地)

⁵ 非会員 博(理学) 山口大学准教授 農学部生物資源環境科学科 (〒 753-8515 山口県山口市吉田 1677-1)

⁶ 正会員 工博 主任研究員 情報通信研究機構 (〒 904-0411 沖縄県国頭郡恩納村字恩納 4484)

⁷ 正会員 工博 山梨大学大学院准教授 医学工学総合研究部 (〒 400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)

⁸ 非会員 博(理学) 名古屋大学研究員 地球水循環研究センター (〒 464-8601 名古屋市千種区不老町)

⁹ 非会員 博(理学) 名古屋大学准教授 地球水循環研究センター (〒 464-8601 名古屋市千種区不老町)

¹⁰ 非会員 博(理学) 名古屋大学特任助教 地球水循環研究センター (〒 464-8601 名古屋市千種区不老町)

This research is based on a synchronized campaign observation of C-band polarimetric radar, COBRA and video-sonde, which was carried out on Nov. 2007 in Okinawa, Japan. The observation was accomplished by constructing a method to synchronize C-band polarimetric radar, COBRA and video-sonde which observes the real hydrometeors. The observation succeeded to incorporate the polarimetric radar information and hydrometeor observed from video-sonde. Here, we investigate the relationship between the radar observation and hydrometeors, and seek for the possibility of classification as mixture of some types of hydrometeors from polarimetric radar observation.

Key Words: *polarimetric radar, video-sonde, hydrometeor classification, fuzzy logic, differential radar reflectivity, copolar correlation coefficient*

1. はじめに

偏波レーダーは、降水粒子の粒径分布や、雨や雪といった降水の種類を推定できる可能性を秘めており、精度のよい降雨予測や地上雨量計の情報をを用いることなく降雨量推定精度が向上するものと大いに期待が寄せられている。もともと偏波レーダーは約 20 年前から現業用のレーダーに変わるものとして、まずは反射因子差 Z_{DR} を用いた研究開発が進められてきた¹⁾。わが国では X バンド (3cm 波) を中心に研究が開始され、国土交通省レーダ雨量計において C バンド (5cm 波) 偏波レーダーが実用化された。しかし、開発黎明期であったので期待したほどの精度向上は見られなかった。その後 Z_{DR} 以外の偏波情報が利用可能になり、海外では欧米を中心として S バンド (10cm 波) 偏波レーダーの改善が進められた。それに伴い、降雨量推定精度の向

上の見込みが立ち、2007 年から順次、現業配備がなされ始めている。しかし、わが国の現業用と見込まれる C バンド偏波レーダーにおいては取り組みが遅れている。

その C バンド偏波レーダーは現在世界で数機しかなく、その 1 つが情報通信研究機構 (NiCT) 沖縄亜熱帯計測技術センターで開発され、ここ数年実験運用されている COBRA (C-band Okinawa Bistatic polarimetric RADar の略) であり、本研究では主にそのレーダー情報を用いる。COBRA では、水平、垂直偏波面におけるレーダ反射因子 Z_{HH} , Z_{VV} ならびにその反射因子差 Z_{DR} のような従来の二偏波レーダーでも観測されるパラメータ以外に、直線偏波抑圧比 LDR 、偏波間相関係数 ρ_{HV} 、偏波間位相差 ϕ_{DP} とその伝播方向の伝播位相差変化率 K_{DP} といった偏波パラメータも得られる。また 2 つの発信機を用いて取得される Z_{DR} の優位性も旧来より増している。

さて、偏波レーダーによる正確な降水量推定・降雨予測の向上のためには降水粒子タイプの推定・検証することが必要不可欠であり、偏波情報を用いた降水粒子タイプの推定が試みられている²⁾³⁾。これらの既往研究では、航空機や雲粒子ゾンデ (HYVIS) などを利用した降水粒子の直接観測が行われており、降水粒子と偏波パラメータの関係が比較されている。しかし、降水粒子タイプを判別するに当たっては、降水粒子と偏波パラメータの関係は十分に解明されておらず、統計的に十分な量の観測が行われていないのが現状である。また、降水粒子はある境界値できれいに分けられるものではなく混ざり合った状態で存在しているが、そのあいまいさや粒子の混在を表現できないという問題点も挙げられる。

そこで本研究では、偏波レーダー COBRA とビデオゾンデの集中同期観測を行い、レーダーが電波を出して走査している上空のそのポイントの降水粒子がどういった大きさ・種類であるのかビデオゾンデによる直接観測を行った。そして、この同期観測を通して、偏波レーダーによる降水粒子タイプの判別を行う。特に、ビデオゾンデ観測によって明らかになった降水粒子の混在状態を推定する可能性を示す。

2. 偏波レーダーによる諸因子

気象レーダーの標的である降水粒子は、その大きさ・形、粒子の向きなどによって特徴付けられる。従来型レーダーのような単一偏波による送受信では、後方散乱信号からこのような粒子の形態に関する情報を得ることができない。一方、偏波による散乱特性の違いは標的の形状や粒子の向きに依存するため、複数の偏波を用いれば、形状や粒子の向きに関する情報を得ることができる。こうしたことから、降水粒子の形態に関する情報を得る手段として、複数の偏波を送受信できる偏波レーダーが導入された。

通常的气象レーダーは進行方向に直交し、地表面に水平な偏波面を持つ電波を送受信する。それに対し、二重偏波レーダーは、偏波面が地面に平行な水平偏波と偏波面が地面に直交する垂直偏波の2つの直線偏波を送受信し、様々なパラメータを得ることが可能である。以下では、偏波レーダーによって観測される諸因子について述べる⁴⁾。

(1) レーダー反射因子差 Z_{DR}

水平偏波 Z_{HH} と垂直偏波 Z_{VV} の比として表現されるレーダー反射因子差 Z_{DR} は次式で定義される。

$$Z_{DR}[\text{dB}] = 10 \log_{10} \left(\frac{Z_{HH}}{Z_{VV}} \right), \quad (1)$$

Z_{DR} は水平及び垂直偏波面に対する粒子形状、すなわち粒子の縦横比に関するパラメータである。降雨粒子

は落下時の空気抵抗を受け横長に扁平し、その扁平度は直径が大きいほど大きくなる。したがって粒径が大きくなるにつれて、 Z_{DR} は大きな値をとるようになる。一方、雪やあられの場合は、径の大小によって扁平度が大きく変わることがないため、0dB に近い値をとる。また、融解層においては氷粒子が徐々に溶け出し表面を楕円形に覆うようになる。雨滴は粒径がある大きさ以上になると分裂してしまうが、融解層においては氷粒子の表面に付着しているため大きな粒径でも分裂せず、レーダーでは大きな雨滴として認識されるため Z_{DR} は極大値をとる。

(2) 偏波間相関係数 ρ_{HV}

偏波間相関係数 ρ_{HV} は、水平偏波 Z_{HH} と垂直偏波 Z_{VV} の相関係数であり、降水粒子の大きさ、形に影響を受けるパラメータである。雨のように降水粒子が単一で存在する場合は縦横の比に相関があり、1 に近い値を示す。一方、様々な粒子の種類や形が存在する場合や、山岳等の地表面によって電波が散乱される (グランドクラッター) 場合は相関が小さくなる。特に液体と固体が共存する融解層においては、偏波間相関係数 ρ_{HV} が最も小さくなる。この特性を利用して偏波間相関係数 ρ_{HV} を用いて融解層を特定する。

(3) 伝搬位相差変化率 K_{DP}

電波は散乱体積内を伝搬するとき、位相のズレを生じる。水平偏波、垂直偏波のそれぞれについてレーダーと対象標的間の往復で生じる位相変化を ϕ_{HH} , ϕ_{VV} とするとき、等方散乱標的であれば両偏波間で位相変化に差は生じないが、非等方性散乱標的では両者は異なる値をとる。粒径の大きい雨滴のような扁平粒子では、水平偏波による位相遅れが垂直偏波の場合に比べて大きくなるため、単位距離当たりでは $\phi_{HH} > \phi_{VV}$ となる。両者の差を ϕ_{DP} とすると、

$$\phi_{DP}[\text{deg}] = \phi_{HH} - \phi_{VV} \quad (2)$$

となり、これを偏波間位相差と呼ぶ。

ϕ_{DP} の距離に対する変化率が伝搬位相差変化率 K_{DP} である。大気のような均質媒質体中でレーダー電波が伝搬する場合、 K_{DP} は伝搬経路上の2点間を往復する間に生じる偏波間位相差 ϕ_{DP} の単位距離当たりの差として、

$$K_{DP}[\text{deg/km}] = \frac{\phi_{DP}(r_2) - \phi_{DP}(r_1)}{2(r_2 - r_1)} \quad (3)$$

で与えられる。ここで、 r_i はレーダーアンテナからの距離である。

伝搬位相差変化率 K_{DP} は、振幅の情報を用いないため降雨減衰の影響を受けることが無く、強雨時の降雨量推定に有力であるとされている。特に、降雨減衰の影響が大きい X バンド気象レーダーにおいては K_{DP} が導入されることで、更なる可能性が期待されている。

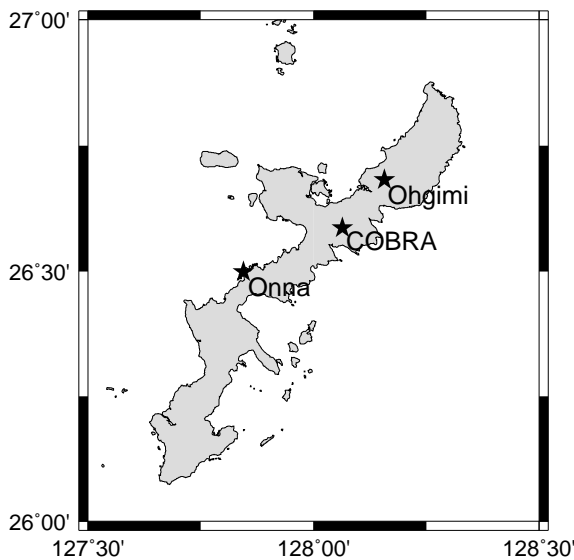


図-1 COBRA と観測点の位置関係

3. 沖縄集中観測の概要

沖縄集中観測は 2007 年 11 月 15 日から 28 日にかけて行われ、独立行政法人情報通信研究機構 (NiCT) 沖縄亜熱帯計測技術センターを拠点とし、様々な大学、機関の水文学、気象学の観測、モデルの専門家が連携して実施した。偏波ドップラーレーダー COBRA は名護降雨観測施設に設置されており、沖縄亜熱帯計測技術センターと大宜味大気観測施設では数多くの地上設置装置によって様々な観測がされた。また、ビデオゾンデの放球は恩名村にある沖縄亜熱帯計測技術センターで行われ、ここから COBRA の遠隔操作も行っている (図-1)。

(1) COBRA の概要

本研究では、独立行政法人情報通信研究機構 (NiCT) 沖縄亜熱帯計測技術センターが試験運用している沖縄偏波降雨レーダ COBRA で得られたレーダ情報を利用する。一般の気象レーダーのアンテナは機械的に 3 次元全体を走査することが可能であり、必要に応じて特定の方位方向を走査する。3 次元の立体的なエコーを観測する場合は、一定仰角で方位方向に全周走査する PPI (Plan Position Indicator) スキャンを、仰角を変えながら繰り返し行うボリュームスキャンが行われる。しかし、ボリュームスキャンでは、そのスキャンが完了し終わるまでに 5 分程度かかってしまうため、きめ細かな同期観測ができない。そのため、特定方位角の鉛直断面を走査する RHI (Range Height Indicator) スキャンによってビデオゾンデとの同期を行った。

(2) ビデオゾンデの概要

ビデオゾンデは、センサーのついたビデオカメラを気球に吊り下げ、雲の中の粒子を直接観測する装置であり、Takahashi⁵⁾、Suzuki et al⁶⁾ により、東アジアモンスーン

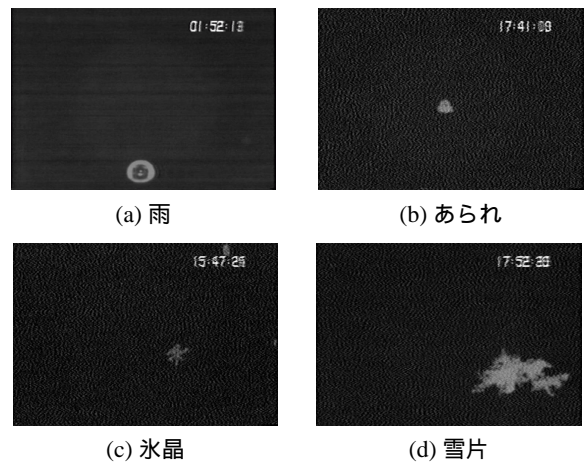


図-2 ビデオゾンデによって観測される粒子

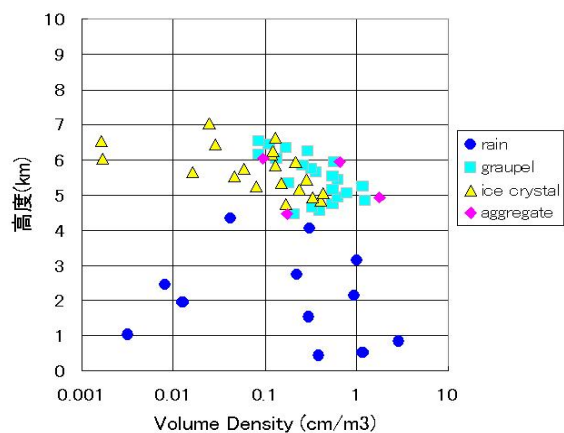


図-3 ビデオゾンデ No.1 の体積濃度

地域の様々な場所で 200 台以上が放球されている。

ビデオゾンデは気球に吊り下げられ、上昇速度が約 5m/s となるように浮力が調整し放球する。ビデオゾンデには、直径 0.5mm 以上の粒子が通ったことを検知する赤外線センサーがついており、粒子がセンサーを横切るとフラッシュが焚かれ、粒子が撮影される。撮影された降水粒子は、雨、あられ、氷晶および雪片の 4 種類に分類する。これら粒子の分類は表面の様子や形、サイズ、色の濃淡などによって一つ一つ目で見て判定を行っている。図-2 にはビデオゾンデで撮影された降水粒子の例を示す。

図-3 はビデオゾンデ No.1 で判別された降水粒子の各高度ごとの体積濃度であり、粒子の空間的な分布を表している。雨と氷粒子 (あられ、氷晶、雪片) の存在する範囲は高度 4~5km の融解層で分かれていることがわかる。また、融解層より上空においては主にあられと氷晶が同じような空間分布しており、混在している様子がわかる。

(3) COBRA とビデオゾンデの同期

ビデオゾンデの位置を特定し、その方位を RHI スキャンすることで同期を行うものとした。しかし、ゾンデの位置を特定して COBRA に指令を出しても、アンテ

表-1 解析対象とする観測期間と観測された降水粒子 (UTC)

	Date	Start time	End time	雨	あられ	氷晶	雪片	計
No.1	2007/11/26	18:37	19:03	17	125	107	5	254
No.2		20:58	21:23	10	447	1487	16	1960
No.3		21:53	22:19	42	38	45	6	131
No.4		22:57	23:57	21	2	1	0	24
No.5	2007/11/27	01:51	02:16	91	8	7	0	106
No.6		02:36	02:57	132	78	64	0	279

ナが走査する方位を向いてスキャンを開始するまでには時間が経過してしまう。その間にもビデオゾンデは時々刻々と移動しているため、同期を行うためにはビデオゾンデの位置の特定だけでなく、その後の移動予測が必要不可欠である。そこで、1つ前と現在の位置から線形外挿することで RHI スキャンが行われる時のビデオゾンデの位置を推定した。この位置の特定・移動予測および COBRA の RHI スキャンを1分サイクルで行った。このようにして推定されたゾンデの位置と実際の誤差は多くの場合 300 m 程度と大きく外れておらず、うまく同期ができたものと考えられる。

(4) 使用したデータとその処理

本研究で解析の対象とするデータは表-1 の通りである。2007 年 11 月 26 日夜半前から 27 日の昼過ぎまで、台風 23 号から伸びる外側の降雨バンドが次々とかかり、その間にビデオゾンデを 6 台放球した。

使用するレーダーデータはビデオゾンデと同期された1分ごとに存在する RHI 観測のデータである。RHI のデータはレーダーサイトを中心とした極座標となっているため、まずビーム方向鉛直断面の直交座標系に変換を行った。直交座標のメッシュのサイズは 100m×100m とし、メッシュの中心に一番近傍の極座標のメッシュを探索してその値をメッシュの値とした。次に、ビデオゾンデが存在する位置における偏波パラメータの連続的な変化を見るために時系列データを作成した。時系列データは、1分毎に存在する RHI 画像のそれぞれにおいて、ビデオゾンデが位置する場所を中心として水平 1km 幅の鉛直断面を切り出し、一つの断面を1分間として時間順に並べていったものである (図-4)。

4. 同期観測における降水粒子タイプの判別

(1) 偏波パラメータによる降水粒子タイプの推定

降水粒子をファジー理論で推定するにあたって、入力とするデータは、COBRA によって得られるレーダー反射因子 Z_{HH} 、レーダー反射因子差 Z_{DR} 、偏波間相関係数 ρ_{HV} 、伝搬位相差変化率 K_{DP} を用いる。また推定する降水粒子のタイプはビデオゾンデで特定した雨、あ

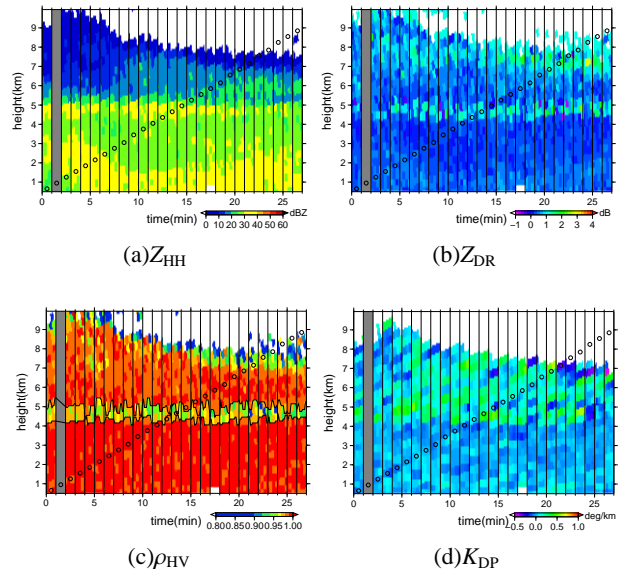


図-4 ビデオゾンデ No.1 の偏波パラメータの時系列画像。灰色の部分は RHI のデータが無い欠損部分。

られ、氷晶、雪片の4種類であり、ある粒子を表す場合、添え字 j で表すものとする。

ファジー理論では、メンバーシップ関数によってある属性にどの程度属しているかを表す。このメンバーシップ関数を No.2~No.6 のビデオゾンデで観測された降水粒子用いて、その出現頻度によって決定した。図-5 が作成されたメンバーシップ関数である。

今回の観測においては、限られた数のビデオゾンデ観測しかできておらず十分な数の降水粒子を観測できていないため、得られたメンバーシップ関数には不十分な点が見られる。特に雨のメンバーシップ関数は、層状性降雨の弱い雨でしか観測がなされず、 Z_{HH} 、 Z_{DR} などでは弱い数値を示している。そこで、Straka et al⁷⁾ によって得られている偏波パラメータと降水粒子との関係を参考に、メンバーシップ関数の境界値を修正した。

(2) 融解層の特定

ビデオゾンデの観測 (図-3) からわかる通り、雨と氷粒子は融解層を境界にして別れている。そこで、融解層を特定する⁸⁾⁹⁾ ことによってレーダー情報のみによって、雨と氷粒子の領域を判別する。融解層は、レー

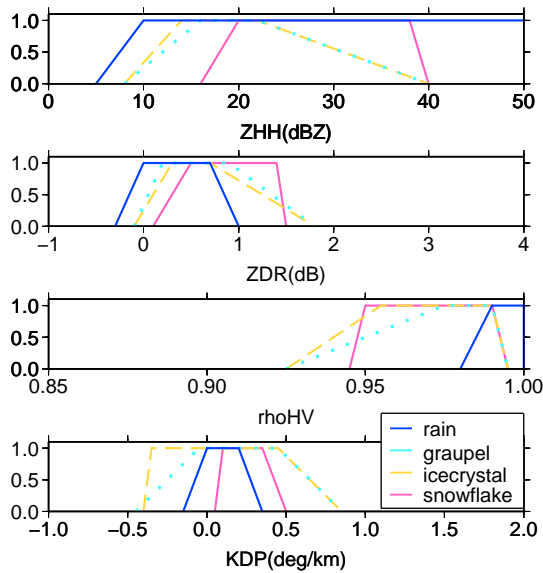


図-5 メンバーシップ関数 μ_j

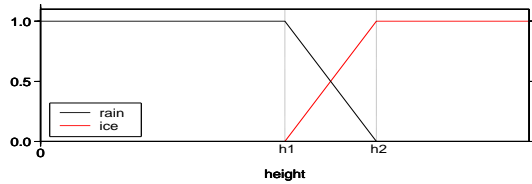


図-6 高度 h のメンバーシップ関数． h_1, h_2 はそれぞれ融解層の下端と上端を表している．ice は氷粒子を表す．

ダー反射因子 Z_{HH} やレーダー反射因子差 Z_{DR} などによりブライトバンドとして検出されるが、本研究では偏波間相関係数 ρ_{HV} による融解層の特定を行った． ρ_{HV} の鉛直プロファイルは、降水粒子が存在する部分ではほとんど 1 に近い値をとるが、融解層の数百 m の範囲では急激に低下して最小値をとる．この性質を利用して ρ_{HV} の値が低下した部分を自動的に特定することにより融解層を求めたものが図-4 の (d) の黒線ではさまれた領域である． ρ_{HV} によって特定された融解層の高度を用いて各鉛直断面について、融解層高度 h に関するメンバーシップ関数 $\mu_j^h(h)$ を作成した図-6．融解層においては液相と固相が混在していると考えられるので、融解層高度のメンバーシップ関数も台形関数の裾野を対応させ混在を表現した．

(3) 降水粒子タイプの決定

以上のようにして決定されたメンバーシップ関数を用いて、降水粒子ごとの評価値 Q_j を

$$Q_j = \mu_j^h(h) \times \left(\mu_j^{Z_{HH}}(Z_{HH}) + \mu_j^{Z_{DR}}(Z_{DR}) + \mu_j^{\rho_{HV}}(\rho_{HV}) + \mu_j^{K_{DP}}(K_{DP}) \right) \quad (4)$$

と定める．式 (4) のように融解層高度のメンバーシップ関数についての積をとることによって、氷粒子が存在し得る高度を決めている．そして、偏波パラメータの組に対して評価式 Q_j が最大となる粒子 j が降水粒子のタイプとなる．

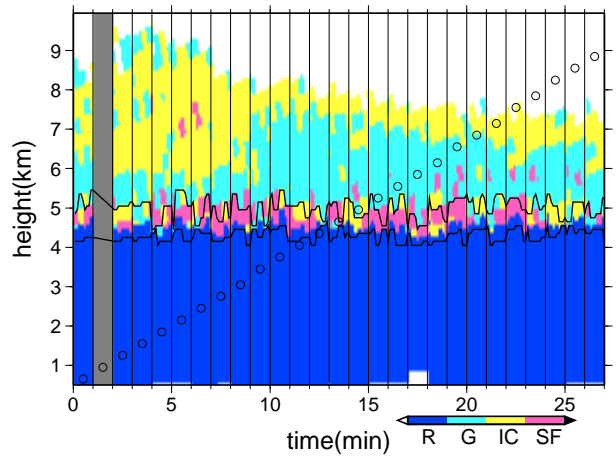


図-7 ビデオゾンデ No.1 の粒子タイプ判別．R は雨、G はあられ、IC は氷晶、SF は雪片を表している．

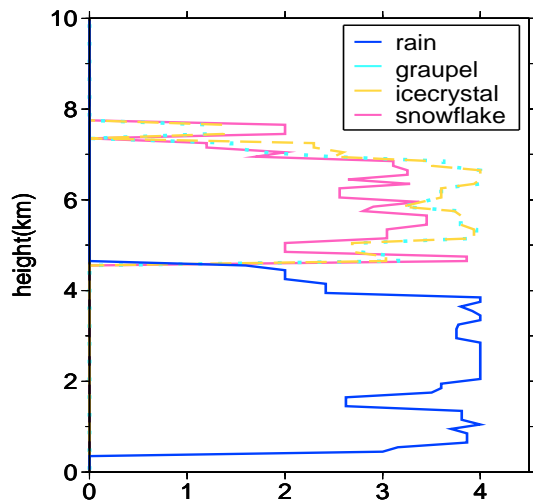


図-8 ビデオゾンデの飛行経路に沿った評価値 Q_j の変化

図-7 は融解層を特定し評価式 (4) を用いて行った降水粒子判別の結果である．図-7 にも、 ρ_{HV} によって特定された融解層が黒線で描いており、この融解層付近においては主に雪片が分布していることがわかる．また、融解層以上ではあられの領域、氷晶の領域が存在している．この降水粒子の分布の特徴は図-3 で見たものと一致している．図-3 と比較するために、ビデオゾンデの飛行経路に沿った降水粒子ごとの評価値 Q_j を表したものが図-8 である．2 つの図を見比べてみるとかなりうまく降水粒子判別がなされていることがわかる．またそれだけではなく、降水粒子の体積濃度と評価値 Q_j の分布は非常に似通っている．

(4) 粒子の混在を考慮した降水粒子タイプ判別

前述したように、ビデオゾンデの観測から、融解層より上空では異なるタイプの降水粒子が混在していることがわかり、降水粒子のタイプの判別の過程で種類に降水粒子のタイプを決定してしまうのは適切ではない．この混ざり具合を表現するために、式 (4) の評価値 Q_j の大きさの違いに着目して推定を行う．

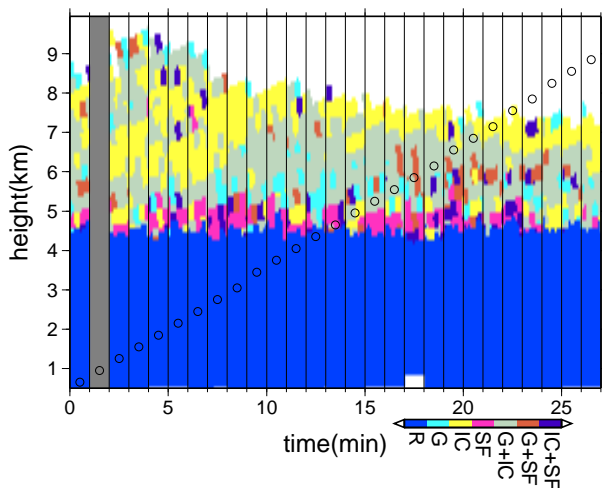


図-9 降水粒子の混在を考慮した粒子判別．G+IC（あられ+氷晶），G+SF（あられ+雪片），IC+SF（氷晶+雪片）が新たに追加された区分である．

融解層より上層においてはあられ、氷晶、雪片が混ざり合って存在しており、降水粒子の混在を表現する新たな判別区分として、あられ+氷晶、あられ+雪片、氷晶+雪片の3つの区分を追加した。図-8からわかる通り、氷粒子の評価値 Q_j は非常に近い値をとっているため、評価値 Q_j が第1位、第2位になり、その2つの評価値の差が0.1以内となる場合は粒子が混在しているとして、新たな区分に分類した。この混在を考慮した降水粒子タイプの推定をおこなった結果を図-9に示す。

図-9を見ると、図-7ではあられが単独に存在するとして判別がなされていた広い領域であられ+氷晶やあられ+雪片の分類に変化している。この事実は粒子を1種類に判別していることに無理があったということである。融解層近辺においては雪片が卓越している領域やあられ+雪片の分類がなされている領域が多く見られる。さらに、雲頂付近の雲の切れ目においては氷晶が卓越している。これらの結果はビデオゾンデの観測に一致するものであり、偏波パラメータによって混ざり具合を表現することも可能であることを示している。

今回、この降水粒子の混在を表現する上で評価式 Q_j の境界値は、0.1という値を仮に与えたものである。それにもかかわらず、降水粒子の混在の様子はある程度再現されている。またそれだけではなく、図-8の評価値 Q_j の分布は、降水粒子の体積濃度（図-3）と非常に似ており、種類の判別だけではなく降水粒子の存在比や存在量を求める可能性も秘めている。今後は降水粒子の存在比や存在量を推定する手法を構築し、降水粒子判別のさらなる発展を目指す。

5. まとめ

以上、本研究では、2007年秋に実施した沖縄集中観測において、偏波レーダー COBRA とビデオゾンデの同期を行い、その中で降水粒子タイプの推定の可能性を探った。特に、ビデオゾンデ観測によって明らかに

なった降水粒子の混ざり具合が、偏波レーダーを用いた判別の中で表現できるのか検証をおこなった。

今回の観測ではデータが限られているため、降水粒子のタイプと偏波パラメータを関係付けるメンバーシップ関数の設定に不十分な部分が残っている。しかし、このように限られた条件においても、粒子のタイプ推定はある程度可能であり、偏波パラメータは降水粒子タイプを推定する能力を持っている。そしてさらに、粒子が混在しているという状態を表現する可能性を示すことができた。さて、従来の研究においては、ファジー理論によって特定される粒子は分類数を増加させるだけで、最終的に1種類の降水粒子を特定するだけであった。しかし、本研究の最終的な目的は、降水粒子のタイプを特定することだけではなく、何と何が存在し、加えてその存在比や存在量はどのくらいであるのか、偏波レーダーによる観測によって明らかにし、降水予測モデルと同化することで、予測精度の向上をはかることにある。引き続きビデオゾンデによる降水粒子の直接観測を実施することで粒子の混在の様子と偏波パラメータの関係を明らかにし、様々な降水タイプに対応できる判別法の構築を図っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 吉野文雄, 水野雅光, 水野秀幸, 五十嵐久敬: 二重偏波・ドップラレーダによる降水観測について, 第32回水理講演会論文集, pp.383-388, 1988.
- 2) Lim, S., Chandrasekar, V. and Bringi, V.N.: Hydrometeor classification system using dual-polarization radar measurements: Model improvements and in situ verification, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 43, No. 4, 2005.
- 3) 岩波越, 楠研一, 折笠成宏, 真木雅之, 三隅良平, 村上正隆: Xバンド偏波レーダーによる降水粒子判別(1) - HYVISデータとの比較による粒子別の偏波パラメータ出現頻度 -, 日本気象学会2006年度秋季大会予稿集, pp.162, 2006.
- 4) 深尾昌一郎・浜津亨助: 気象と大気のレーダーリモートセンシング, 京都大学学術出版会, 2005.
- 5) Takahashi, T.: Precipitation mechanisms in east Asian monsoon: Videosonde study, J. Geophys. Res., Vol. 111, 2006.
- 6) Suzuki, K., Shigenaga, Y., Kawano, T. and Yoneyama, K.: Videosonde observations during the R/V mirai MR04-08 cruise, The Marine Meteorological Society, UMI to SORA, Vol. 82, No. 2, 2006.
- 7) Straka, J.M., Zanic, D.S. and Ryzhkov, A.V.: Bulk hydrometeor classification and quantification using polarimetric radar data: Synthesis of relations, American Meteorological Society, Vol. 39, pp. 1341-1372, 2000.
- 8) Brandes, E.A. and Ikeda, K.: Freezing-level estimation with polarimetric Radar, Journal of Applied Meteorology, Vol. 43, pp. 1541-1553, 2004.
- 9) Matrosov, S.Y., Clark, K.A. and Kingsmill, D.E.: A polarimetric radar approach to rain, melting-layer, and snow regions for applying corrections to vertical profiles of reflectivity, Journal of Applied Meteorology and Climatology, Vol. 46, pp. 154-166, 2006.