



京都大学 防災研究所
Disaster Prevention Research Institute
Kyoto University

一般共同研究
2022G-03

梅雨期豪雨の内部構造解明のための 豪雨追跡による雲内降水粒子直接観測

Storm-tracking mobile observations of precipitation
particles to understand the microphysical structure
in the Baiu monsoon clouds

令和6年5月

May, 2024

研究代表者

鈴木賢士

Principal Investigator

Kenji SUZUKI

目次

1. 目的・実施体制・研究期間	1
1.1 目的	1
1.2 実施体制	1
1.3 研究期間	1
2. 梅雨期 Rainscope 観測	2
2.1 降水粒子撮像ゾンデ Rainscope の概要	2
2.2 Rainscope 観測の意義	4
2.3 線状降水帯観測プロジェクト 2022 への参加	4
2.4 2022 年 6 月 25 日の気象概況	7
2.5 降水粒子の鉛直分布	7
2.6 霰形成と凍結プロセス	9
2.7 円形度の鉛直プロファイル	10
2.8 霰と凍結粒子の形状の違い	12
2.9 粒径と落下速度	12
2.10 まとめ	13
3. 地上設置型 Rainscope による降雪観測	14
3.1 目的と観測方法	14
3.2 2022 年 12 月 24 日の気象概況	14
3.3 霰の融解（みぞれ）事例	15
3.4 落下速度と平均粒径の関係	16
3.5 まとめ	17
4. 外部発表	17
参考文献	18

1. 目的・実施体制・研究期間

1.1 目的

2017年九州北部豪雨のような線状降水帯では活発な雷を伴うが、2018年西日本豪雨では雷はほとんど発生していなかった。雷発生は雲内の雲物理プロセスに密接に関連しており、同じように大量の降水をもたらす豪雨であっても雲内のプロセスが異なることがわかっているが、残念ながらその微物理内部構造を直接的に観測した例は少ない。

雲内の降水粒子の直接観測には、撮像した粒子画像を地上に送信する気球搭載型のビデオゾンデ(Takahashi 1990)が使われてきた(中北ら 2009, Suzuki et al.2014 ほか) が、災害をもたらすような「本物の豪雨」を観測できる機会は稀である。近年、デジタル画像伝送による新しい降水粒子撮像ゾンデが開発され (Suzuki et al. 2023)、鮮明な粒子映像の取得を可能にし、降水粒子の落下速度を測定するこれまでにない観測を可能にした。本研究ではこの新しい粒子撮像ゾンデ Rainscope を用いて、梅雨期に発達する降水雲の観測を行うとともに、地上設置型 Rainscope を用いて冬季降雪観測を実施した。

本研究では、新たに開発された Rainscope ゾンデを用いて、観測サイトの上空を通過する雨雲しか観測できないというこれまでのゾンデ観測の最大の欠点を補うため移動観測を行った。つまり「本物の豪雨」を待つのではなく、「本物の豪雨」を追跡して観測を行うことを目指した。本研究の目的は、Rainscope 観測により得られる雲内の降水粒子とその落下速度の鉛直プロファイルから豪雨をもたらす降水機構の解明に新しい雲物理学的知見をもたらすことである。梅雨期の観測を補うため、冬季には Rainscope を地上設置し、固体降水粒子観測も実施した。

1.2 実施体制

研究代表者	鈴木賢士	教授	山口大学大学院創成科学研究科
研究分担者 所内担当者	山口弘誠	准教授	京都大学防災研究所
研究分担者	大東忠保	主幹研究員	防災科学技術研究所
研究分担者	竈本倫平	研究員	鉄道総合技術研究所
学生参加者	原優里佳	大学院生	山口大学大学院創成科学研究科
学生参加者	古場杏奈	大学院生	山口大学大学院創成科学研究科

1.3 研究期間

令和4年(2022年)4月1日 ～ 令和6年(2024年)3月31日

2. 梅雨期 Rainscope 観測

2.1 降水粒子撮像ゾンデ Rainscope の概要

雲内の降水粒子（雨滴、霰、雪片、氷晶など）を映像として捉え、それらの空間分布を測定するビデオゾンデと呼ばれている気象観測機器は、1980年代後半に Takahashi (1990) により開発され、これまで国内外の多くの地域で観測が行われてきた。近年では Suzuki et al. (2012, 2014, 2018 など) が中心となって、沖縄県恩納村（京都大との共同研究）、新潟県柏崎市（電力中央研究所との共同研究）、種子島宇宙センター（JAXA との共同研究）、新潟県南魚沼市（鉄道総合技術研究所との共同研究）などでの観測を行ってきた。2020～2022年度には既存のビデオゾンデ観測システムをデジタル化・汎用化するため、総務省の SCOPE 電波有効利用促進型研究開発「雲/降水粒子撮像装置ビデオゾンデの 1680MHz 帯実験局から 400MHz 帯気象援助局への移行技術の研究開発」の支援を受け、ビデオゾンデに続く新しい降水粒子撮像ゾンデ（Rainscope, 図 1）を開発した。

図 2 は 2022 年 2 月 20 に茨城県水戸市で試験飛揚を実施した際に得られた粒子画像で、以前のビデオゾンデに比べはるかに鮮明な画像取得が可能になっている。また同時に、Rainscope は降水粒子の落下速度を測定する機能も搭載しており、この測定は世界的に例のない初めての試みで注目されている。この Rainscope の開発に関して、日本気象学会英文レター誌 SOLA に投稿し、2023 年 SOLA 論文賞を受賞することができた (Suzuki et al. 2023)。

Rainscope は、雲内の降水粒子の鮮明な画像と落下速度の情報を得ることができる。Rainscope のサイズは 354(W)×150(D)×199(H)mm、重さは 1100g で、ヘリウムガスを充填したゴム気球にパラシュートと巻下器、GPS ラジオゾンデ (iMS-100 : 明星電気) とともに取りつけて放球し、地上の八木アンテナでデータ受信する。Rainscope とラジオゾンデでそれぞれ異なる周波数を必要とするため気象援助局 400MHz 帯 2 波を使用する。

Rainscope は検出部と送信部から構成されている。検出部は LED とカメラで構成され、粒子を検知すると LED を照射して撮像する。Rainscope には二段の赤外線センサーが搭載されており、取り入れ口から入ってきた降水粒子が上側のセンサーを通過した際にカメラの電子シャッターで撮影される仕組みとなっている。赤外線センサーでは、0.5mm 以上の粒子を検出することができる。送信部では撮影した粒子画像の送信が行われる。撮影された画像は、Rainscope 内にある RaspberryPi で圧縮処理され、400MHz 帯の伝送波として 2 秒に 1 枚のペースで送信される。撮像される画像の画素数は 640×480 ピクセル、カメラの画角は 32×24mm、最大撮影可能枚数は 1 秒間に最大で 5 枚（通常は 2 枚に設定）である。伝送する画像のデジタル化によって、アナログビデオ信号送信とは異なり、距離による画像劣化がなくなり、Rainscope では極めて鮮明な雲内の降水粒子画像の取得が可能となった。画像処理により、粒子の種類、長径、短径、周長、面積、粒径などのデータを得ることができる。そこから粒子の回転楕円体の体積が球に相当すると仮定した粒径、円形度、縦横比の値を算出することができる。粒子は Rainscope で得られた降水粒子画像から、雨滴、融解粒子、凍結粒子、霰、雪片、氷晶などに分類が可能である。

また、Rainscope では、降水粒子が赤外線センサーを通過すると、通過した時刻が 1/1000 秒単位で記録されるように設計されている。二段の赤外線センサーの高さ幅は 28mm である。降水粒子が赤外線センサーの上側と下側を通過した時刻の差と二段の赤外線センサー間の距離から求めた測定値から、ゾンデ自体の上昇速度の値を引くことで、雲内の降水粒子の落下速度を測定することが可能となった。ゾンデの上昇速度は Rainscope と一緒に飛揚する GPS ラジオゾンデ (iMS-100) の 60 秒間の移動平均値の高度データを用いている。

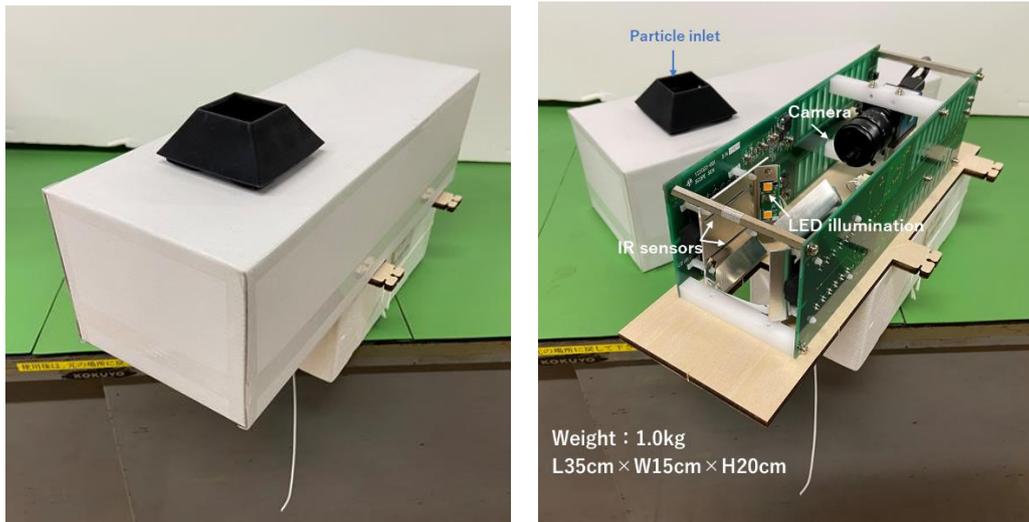
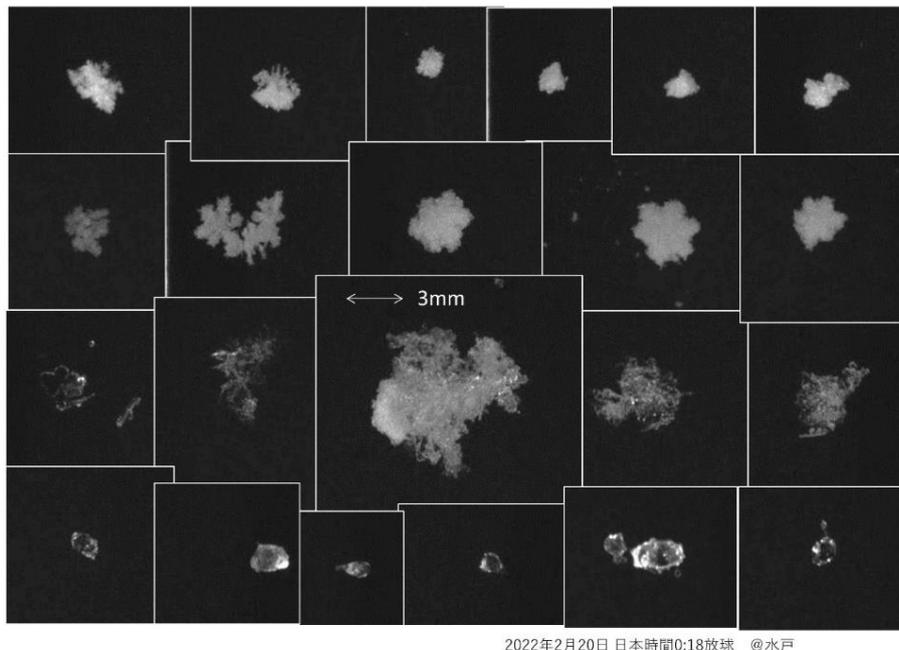


図 1. Rainscope の外観 (左) と内部 (右)



2022年2月20日 日本時間0:18放球 @水戸

図 2. Rainscope がとらえた降水粒子画像

2.2 Rainscope 観測の意義

上空の雲の中には、様々なプロセスを経て、大きさや形状、密度の異なる降水粒子が存在しており、地上へ降水をもたらす要因となる。雲内の降水粒子の大きさやその状態、密度などは、雲の特徴を表しており、降水粒子の成長や相互作用、地上の降水などに影響を及ぼす。特に、大雨をもたらす雲の中にどのような粒子が存在しているのか、その分布を明らかにすることは、雲物理の理解、大雨の降水プロセスの解明に繋がる。

雲内の降水粒子の分布を明らかにするには降水雲の直接観測が必要不可欠である。そこで、雲内の降水粒子を直接観測することができるツールとして、ビデオゾンデが用いられてきた。しかし、ビデオゾンデでは、アナログビデオ信号の送受信により遠く離れると画像が劣化してしまうため、観測状況によっては観測された粒子から得られる情報に限りがあった。ビデオゾンデに代わり、新しく開発された Rainscope から得られる粒子の画像は、従来のビデオゾンデと比べてはるかに鮮明であるため、降水粒子の分布、形状や表面の状態、輪郭など、雲内の降水粒子のありのままの状態をより詳細に捉えることができるようになった。また、Rainscope では降水粒子の落下速度の測定が可能である。落下速度測定は雲内にどれくらいの密度を持った粒子が存在しているかを議論できる点で非常に重要である。雲内の降水粒子の落下速度の測定は世界に類のない観測である。このように、Rainscope 観測から得られるデータは、降水雲内の粒子の鉛直分布や密度の推定、融解度合、乾雪・湿雪などの知見となり、氷層や混合層内部、凍結・着氷・凝集などのプロセスなど、降水雲内の微物理構造の解明につながると考えられる。

2.3 線状降水帯観測プロジェクト 2022 への参加

2022 年 6 月から 7 月の梅雨期に九州にて、線状降水帯の予測精度向上と発生・維持機構の解明を目的とし、気象庁の現業観測の強化に加え、気象庁気象研究所、大学等研究機関との連携による集中観測が実施された。我々もこの観測プロジェクトに参加し、線状降水帯の内部構造、雲微物理特性の把握を目的として、梅雨期の降水雲に Rainscope を飛揚し観測を行った。

Rainscope 観測では、九州地方に 8 か所観測サイト（図 3）を設け、大雨が予想される最も近い観測サイトへ移動して観測を行った。観測機材を搭載したバンを移動手段として、集中観測期間中はいつでも出動できる体制をとっていた（図 4）。バンの車内には、Rainscope とラジオゾンデの受信機やヘリウムガスボンベ、発電機、その他観測に必要な機材を搭載した（図 5, 6）。このような観測機材を搭載したバンでの移動観測は、受信機などの観測機器の小型化により実現した。残念ながら線状降水帯への飛揚は叶わなかったが、6 月 21 日に宮崎県小林市で、6 月 25 日に熊本県阿蘇市で、7 月 16 日に熊本県阿蘇市で、計 3 事例の対流性降水雲の観測データを得ることができ、6 月 25 日に阿蘇市で対流雲に放球した事例について、粒子の形状と落下速度に着目した解析を行った。



図 3. Rainscope 観測サイト



図 4. 観測時の様子

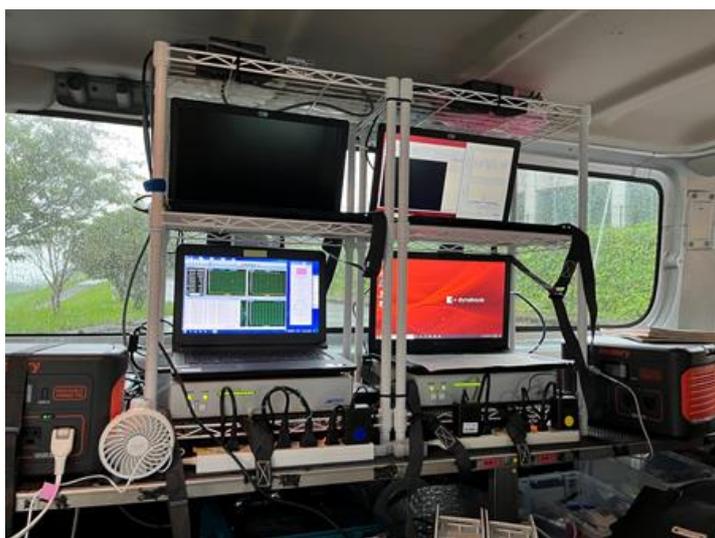


図 5. バン車内の Rainscope とラジオゾンデの受信装置



図 6. 観測機材を搭載したバンの車内の様子

2.4 2022年6月25日の気象概況

2022年6月25日、熊本県阿蘇市農村公園にて、Rainscope 観測を実施した。この日は、九州上空に寒気が流入し、ところどころに活発な対流が立つことが予想されたため、早朝から阿蘇の観測サイトに移動した。図7に12時の地上天気図、13:10のJMAレーダエコー図を示す。阿蘇では、雷とガストを伴う強い降水が断続的にあり、南西から北東にのびるライン上に組織化した降水域が通過するタイミングの13:09にRainscopeを放球した。観測サイト近くのアメダス阿蘇乙姫では、放球直後の13:20に10分雨量で6.5mmを記録している。

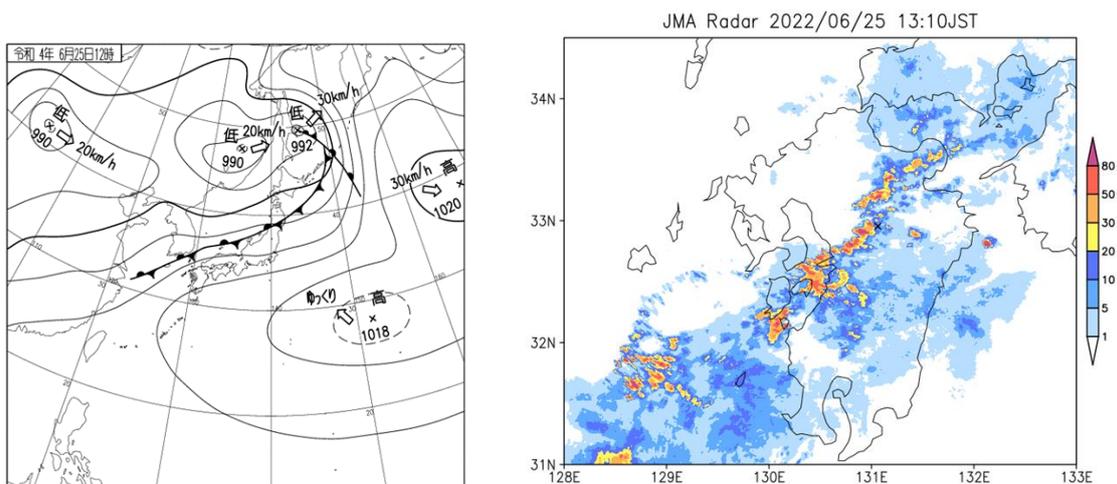


図7. 左：2022年6月25日12時における天気図（気象庁HPより）. 右：同日13:10のレーダエコー（×は阿蘇の観測サイト）

2.5 降水粒子の鉛直分布

図8に6月25日13:09に放球したRainscopeで観測されたいくつかの降水粒子の画像および気温、粒径、落下速度を、図9にその時の降水粒子の粒径と気温・高度の鉛直分布を示す。この事例では、高度12km付近まで様々な降水粒子が観測された。下層では最大4mm程度と比較的粒径の大きな雨滴がみられた。0°C層直下では表面の滑らかな融解途中の粒子、#774のような融解途中で中心に核が残っているとみられる粒子も観測された。0°C層直上では半透明で球形に近い凍結粒子、#853のような半透明で雨滴が凍結したものが衝突によって割れたとみられる粒子も観測されている。また、#796のように小さな凍結粒子がくっつき、雹のもとになるような粒子もみられた。このような凍結粒子が観測されたことにより、今回の梅雨期対流雲内に凍結のプロセスが存在していたと言える。また、上層になるにつれて不規則な形状になり、表面も白く着氷が進んだ霰もみられた。#887のように着氷が進み表面の形状が不規則になった霰も観測された。さらに上層では氷晶も多くみられた。

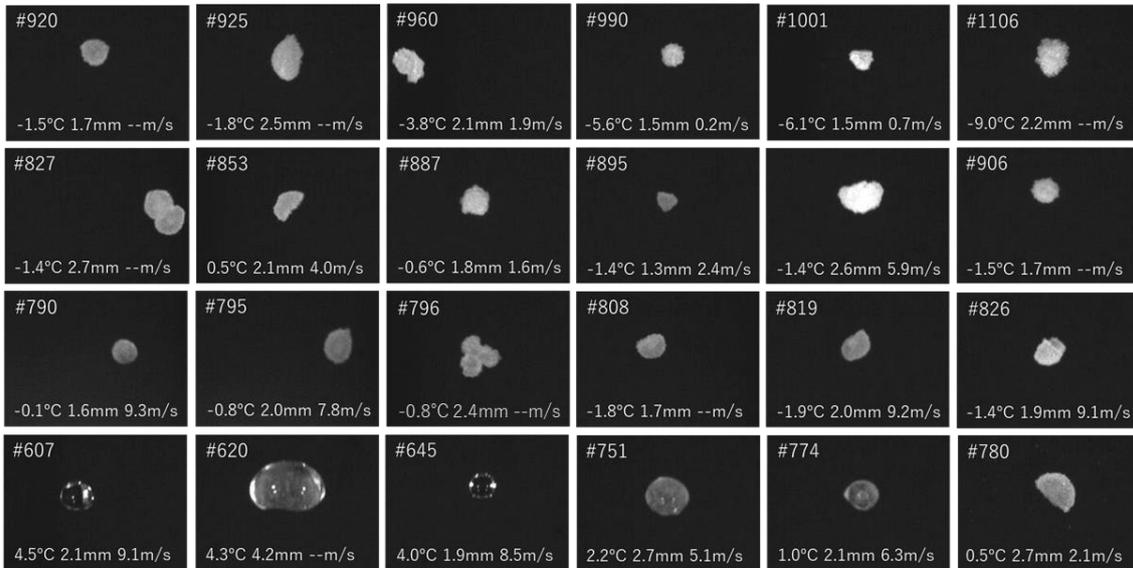


図 8. 6 月 25 日 13:09 に放球した Rainscope で観測された降水粒子画像。記載の数値は気温、粒径、落下速度（#は粒子画像のファイル番号を示す）

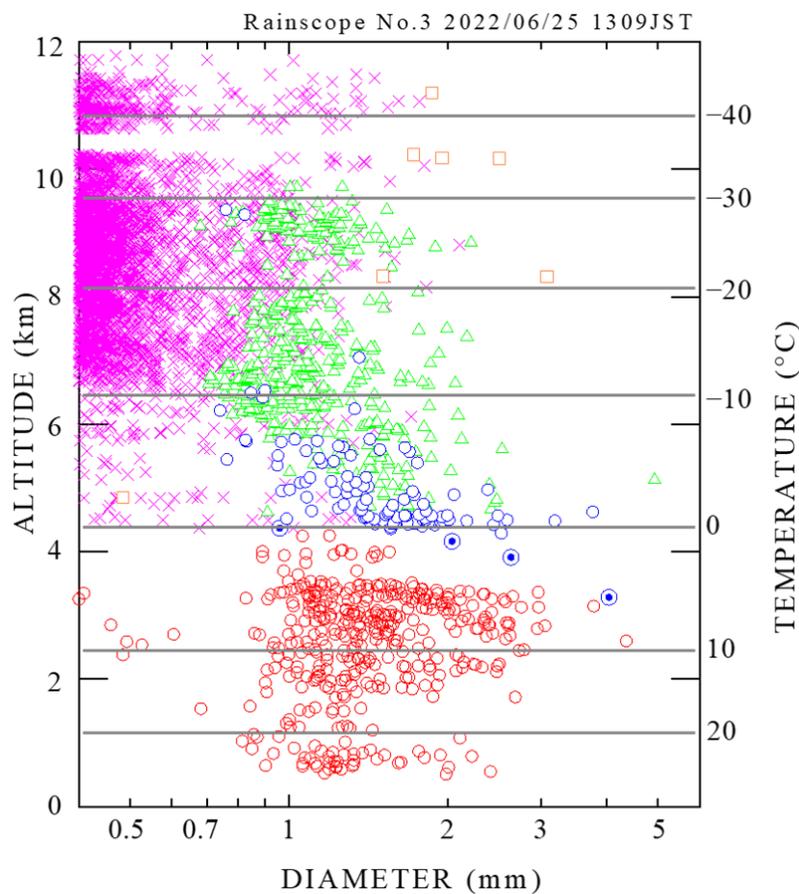


図 9. 6 月 25 日 13:09 に放球した Rainscope で観測された粒径—高度分布（赤○：雨滴， \odot ：融解粒子， \triangle ：霰，青○：凍結粒子， \times ：氷晶， \square ：雪）

2.6 霰形成と凍結プロセス

一般に、霰とは、昇華によって成長した氷晶をエンブリオとして、雲内で過冷却雲粒との衝突を繰り返して着氷成長が進んだものである（図 10）。霰の密度は $0.2\sim 0.8 \text{ g/cm}^3$ と幅を持って定義される。霰は、エンブリオの種類や、雲内での回転運動の有無によって形状が異なることから、形状を用いた分類が行われている。Harimaya (1976) は、霰の形状によって、六花状の Hexagonal graupel、紡錘円状の Conelike graupel、塊状の Lump graupel に分類している。

地上付近の気温が 0°C 以上で強い上昇流がある場合、雲内には雨滴の凍結プロセスが存在する。凍結粒子は、水蒸気が凝結成長および併合成長により形成された雨滴が上昇流によって持ち上げられ凍結したものである。粒径が 5mm より大きくなると雹と定義されるが、本研究では粒径が 5mm 以下の凍結粒子も含めて、霰や雪片とは異なり凍結により形成された粒子を凍結粒子と呼んでいる。凍結粒子は雨滴が凍結したものであるため、輪郭は滑らかで形状は球に近いものが多い。

Rainscope で得られる画像が鮮明になったことで、霰と凍結粒子の判別が容易となった。粒子の形状についての先行研究はあるものの、Rainscope により粒子の表面の状態や輪郭についてより詳細にわかるようになったことから、改めて粒子の形状を定量的に評価するため、霰と凍結粒子に着目して解析を行った。さらに、落下速度という指標を用いることで、雲内の霰形成と凍結プロセスについて考察を行った。

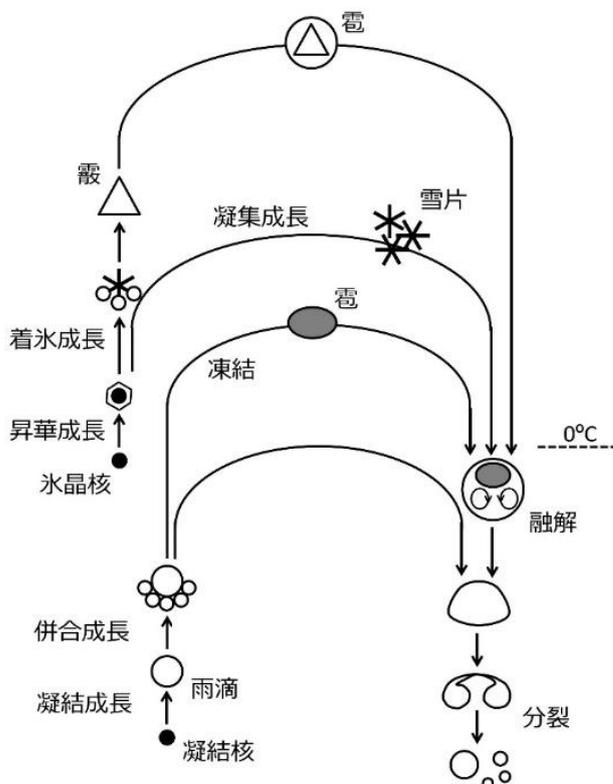


図 10. 降水粒子形成プロセスの模式図

2.7 円形度の鉛直プロファイル

霰と凍結粒子について、粒子の形状を高度変化に着目して解析を行った。形状を定量的に評価するため、以下で定義される円形度 C と縦横比 R を用いた。円形度は、粒子の円形度合いを示す指標であり、Rainscope から得られる粒子の面積 A 、周長 L で定義される。円形度が 1.0 に近いほど粒子は円形に近く、円形度が小さいほど粒子の周長は長く不規則な輪郭をしていることを示す。

$$C = \frac{4\pi A}{L^2}$$

縦横比 R は、粒子の扁平度合いを示す指標であり、粒子の長径 d_1 と短径 d_2 を用いて次式のように表される。

$$R = \frac{d_2}{d_1}$$

図 11 左は、霰と凍結粒子の円形度の鉛直分布を、図 12 左は、霰と凍結粒子の縦横比の鉛直温度分布を示したものである。凍結粒子は青色、霰は、 -10°C 以上にある下層の霰を赤色、 -10°C 以下にある上層の霰を黄緑色で気温によって分けている。粒子のプロットサイズは 0.5mm ごとに示されている。図 11 左に示すように、凍結粒子と下層の霰は比較的粒径と円形度が大きくなっている。それに対し、上層ほど霰の粒径は小さく、円形度も小さくなっている。一方、図 12 左では上層の霰、下層の霰、凍結粒子で縦横比の分布に大きな違いは見られなかった。

図 11 右は、 5°C ごとの円形度平均の鉛直プロファイルを、図 12 右は、 5°C ごとの縦横比平均の鉛直プロファイルを示している。霰を黄色、凍結粒子をピンク色で表している。霰の円形度は凍結粒子よりも全体的に小さくなっている。また、下層の霰は円形度が大きく、上層では小さいという傾向もみられた。一方、縦横比は円形度と比べ、霰と凍結粒子で分布にあまり差はみられず、 $0.8\sim 0.9$ と全体的に大きな値をとっている。また、上層の霰も縦横比では円形度のように小さくなる傾向はみられなかった。

以上をまとめると、上層の霰、下層の霰、凍結粒子では、縦横比の気温分布には違いがみられないものの、円形度の気温分布では霰は凍結粒子より全体的に小さくなっていた。また、上層の霰では円形度がさらに小さくなっていた。上層の円形度が小さいのは、粒子の周長が長くなっており、着氷が進んでいることが推測される。

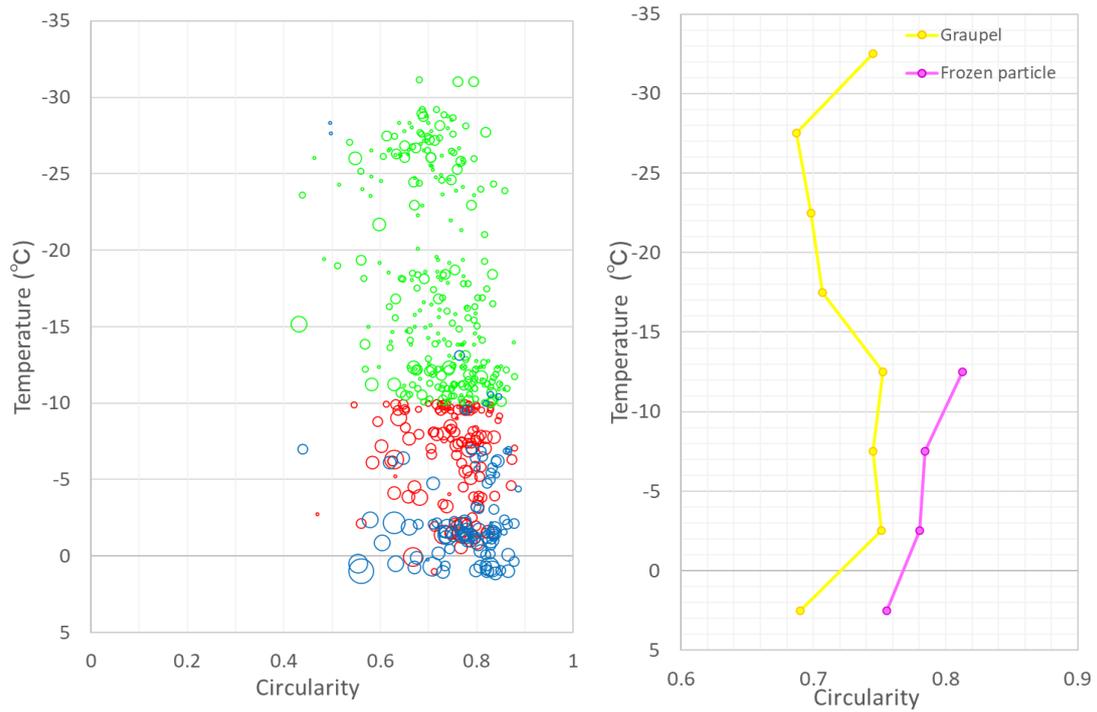


図 11. 粒子の円形度の鉛直分布（左）と 5°Cごと平均した円形度鉛直プロファイル（右）

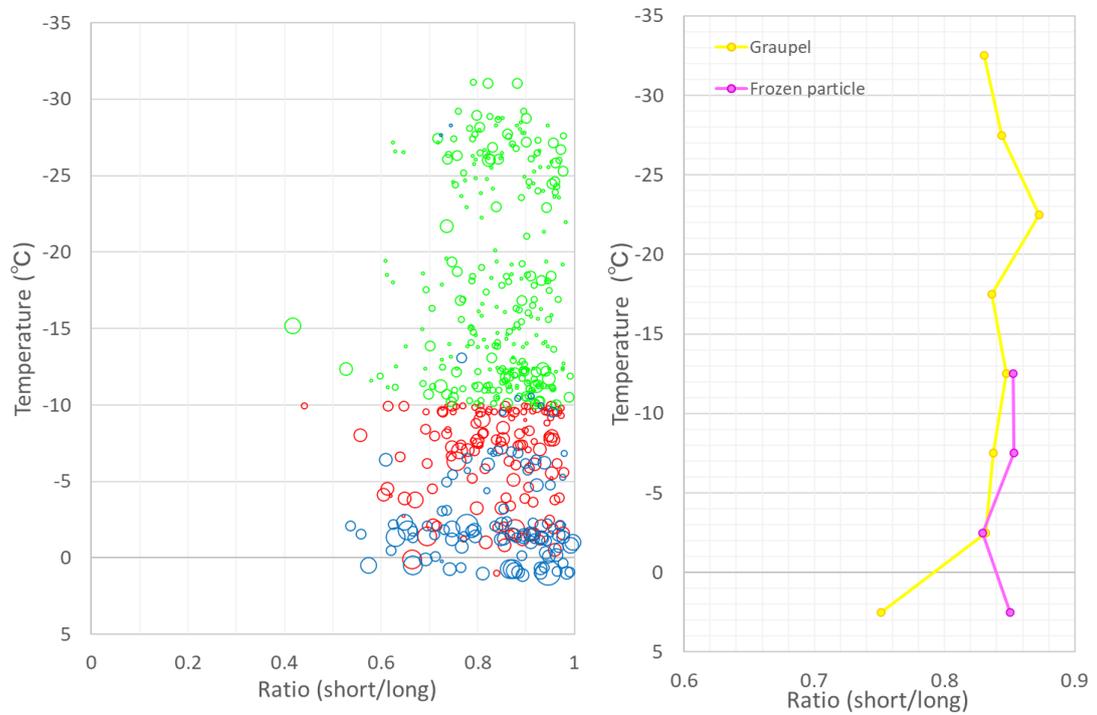


図 12. 粒子の縦横比の鉛直分布（左）と 5°Cごと平均した縦横比鉛直プロファイル（右）

2.8 霰と凍結粒子の形状の違い

図 13 は、霰と凍結粒子の縦横比と円形度の分布を示したものである。凍結粒子を青色、下層の霰を赤色、上層の霰を黄緑色で示している。縦横比は上層の霰、下層の霰、凍結粒子ともに 0.6~1.0 に広く分布している一方で、円形度の分布は粒子間で異なり、凍結粒子、下層の霰、上層の霰の順に小さくなっている傾向がみられた。これより、上層の霰はより長い周長を持った不規則な形状をしていることが考えられる。

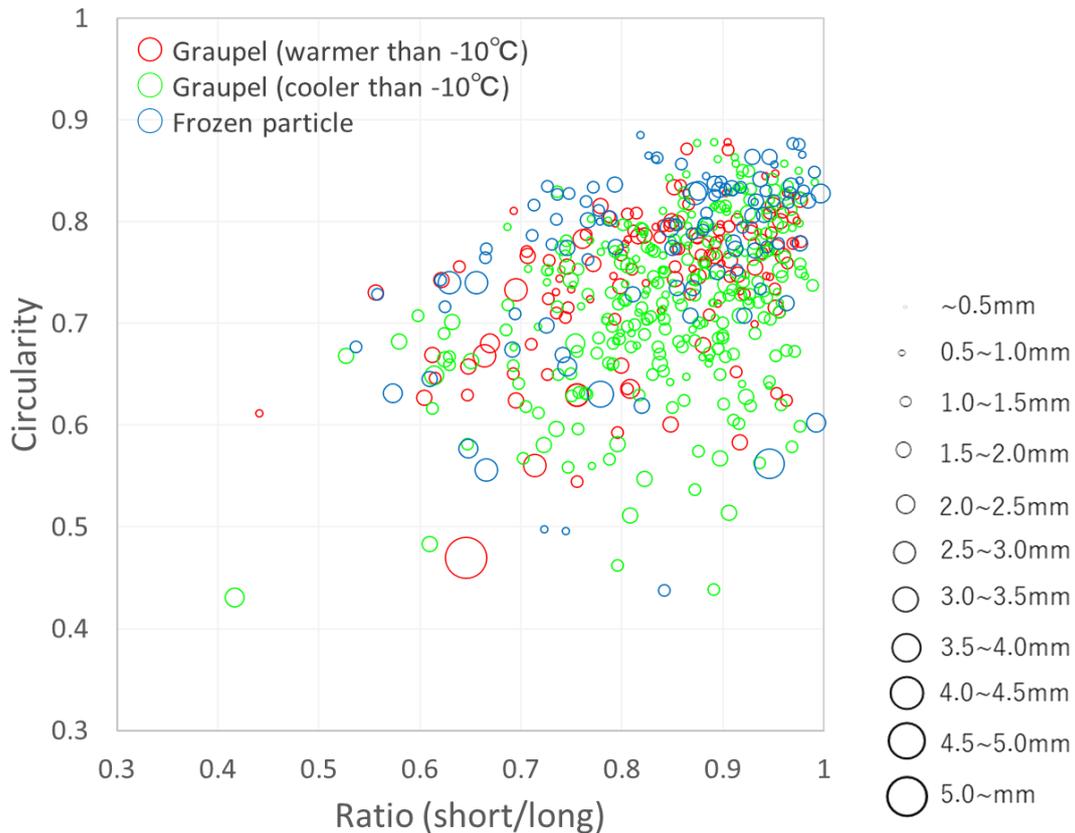


図 13. 霰と凍結粒子の縦横比と円形度の分布

2.9 粒径と落下速度

Rainscope により新しく測定できるようになった落下速度に着目した解析結果を示す。図 14 は、粒子ごとの落下速度の高度分布を示したものである。落下速度が負の値をとるものは除き、粒子のプロットサイズは粒径 0.5mm ごとに変更して表している。雨滴は粒径が大きくなると落下速度も大きくなっている。霰と凍結粒子に注目すると、両者の落下速度には違いが見られ、霰の方が凍結粒子よりも落下速度は小さくなっている。粒径が等しいと仮定すると、霰と凍結粒子の落下速度の違いは密度の違いに起因していると考えられる。凍結粒子は雨滴が凍結したものであるため、霰に比べ密度は大きく落下速度も大きい。一

方、霰はエンブリオに着氷が進んだものであるため、粒径が等しい場合、凍結粒子よりも密度は小さく落下速度も小さくなっている。さらに、霰の中でも、落下速度が小さな霰は密度の小さい氷晶起源の霰、落下速度が大きな霰は密度の大きい凍結粒子起源の霰であることが考えられ、異なる霰形成の存在が示唆される。

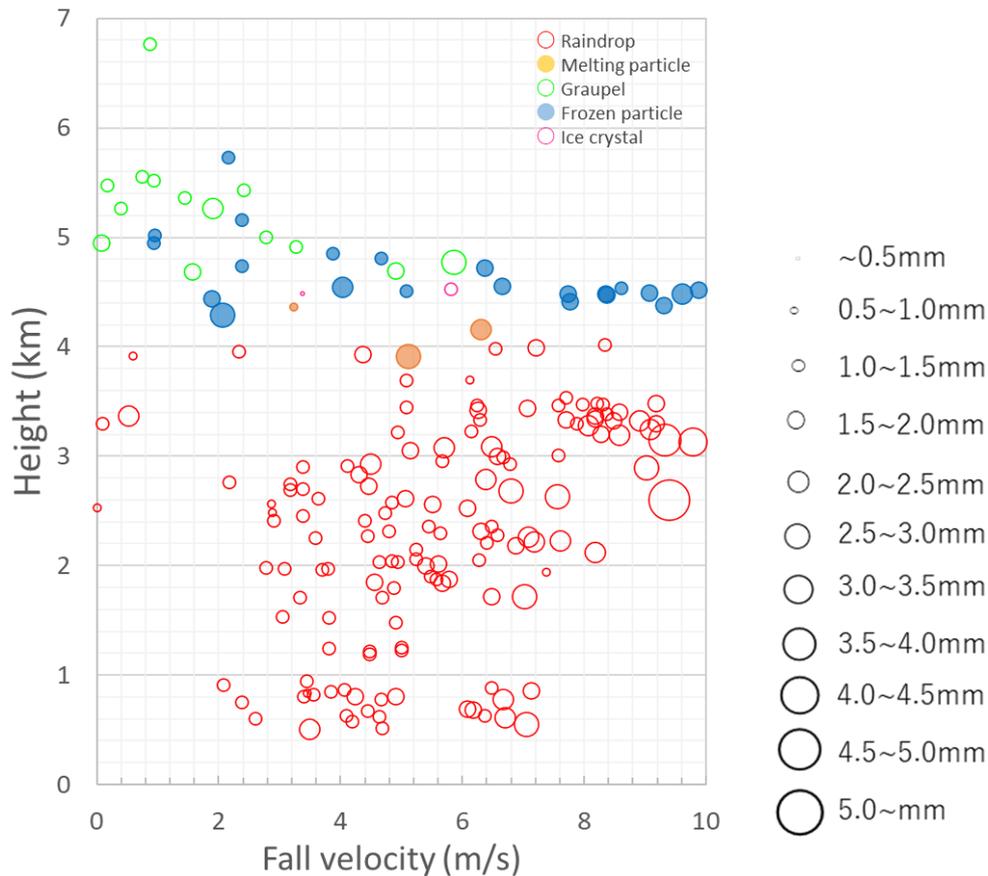


図 14. 粒子別の落下速度の鉛直分布

2.10 まとめ

新たに開発された Rainscope を用いて、2022 年の梅雨期に線状降水帯の内部構造解明を目的とした集中観測に参加し、6 月 25 日の阿蘇市で対流雲に Rainscope を放球した事例について、降水粒子の形状と落下速度に着目して解析を行った結果、以下のことが明らかになった。

梅雨期対流雲の下層の霰と上層の霰では形状に違いがみられ、凍結粒子起源と氷晶起源の異なる霰形成があることが示唆された。特に、下層で観測された霰は、雨滴の凍結とその後の過冷却雲粒の着氷による密度の大きな霰形成プロセスにより形成されていると推測され、氷晶をエンブリオとして着氷成長する一般的な霰形成とは異なる霰形成プロセスであった。

3. 地上設置型 Rainscope による降雪観測

3.1 目的と観測方法

降水雲内には、雨滴、融解粒子、雪片、霰、雹、氷晶といった降水粒子が存在しており、降水タイプや雲の発達段階によってその分布は大きく異なる。雨滴は、雲粒の成長あるいは氷粒子の融解により生成される。雲粒が凝結成長によって大きくなり落下すると、落下速度の異なる他の雲粒と衝突・併合して成長し、雨滴が生成する。また、上空の氷粒子が落下して、0℃高度よりも下で融解したのもも雨滴となる。特に固体降水粒子は、その成長プロセスにより密度も大きく異なることがよく知られており、上空の固体降水形成が地上の降雨量に直接的に影響する。

気球搭載型 Rainscope はこれら降水粒子の鉛直分布を知ることができる強力なツールのひとつであるが、気球の上昇速度は4~5m/sであるため、例えば、Rainscopeは数百mの厚さしか持たない融解層を数分で通過してしまい、十分な粒子情報を得られない。融解層のような高度と共に融解度合いや混在比が刻々と変化する場合、サンプル数が少ないのは大きな欠点となる。そこで、それを補うために地上観測を実施した。G-PIMMSがビデオゾンデの地上設置型改良版であったように、気球搭載型 Rainscope も地上設置型に改造を行い、冬季降雪観測に投入した。ここでは2022年12月24日に観測されたみぞれ（雨、雪、霰の混合状態）から融解を伴う固体降水粒子の雲微物理学的特徴を報告する。

3.2 2022年12月24日の気象概況

2022年12月24日は典型的な冬型気圧配置となり、寒気の流入に伴い全国的に今冬初の本格的な雪となった。南魚沼市塩沢では、みぞれ混じりの雪・霰が断続的に観測された。気温は深夜から7:00ごろまで氷点下であったが、その後、4℃まで気温が上昇し、夜に0℃近くまで低下した（図15）。

融解した霰（みぞれ）が観測された日本時間9:00~10:00の気温は1~2℃、雪片の融解が観測された23:00~24:00の気温は約1℃であった。

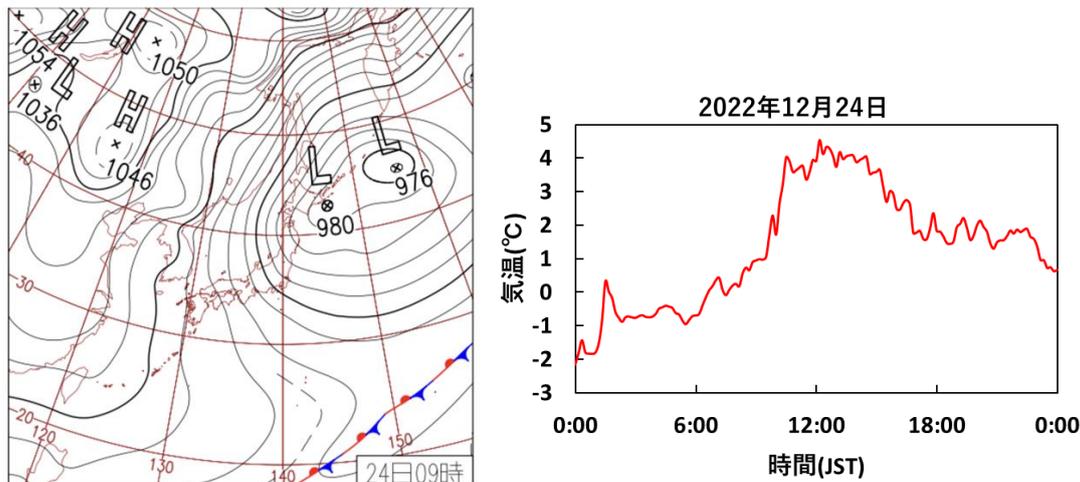


図15. 2022年12月24日09JSTの地上天気図および塩沢での気温の時間変化

3.3 霰の融解（みぞれ）事例

2022年12月24日9:00~10:00（日本時間）は融解した霰を含むみぞれが断続的に観測された。粒子は完全に融解している粒子（雨滴）、一部もしくはほとんどが融解しているが固体部分が残っている粒子、形状に変化はないが表面が灰色に変化して融け始めた粒子（湿った霰）、表面は白く全く融けていない粒子（乾いた霰）に分類された（図16）。(a) ~ (d) は塩沢（気温1~2°C）で、(e) は2023年1月25日に金沢（気温-3.4~-1.7°C）で観測された乾いた霰である。解析期間前半は乾いた霰が多く観測されており、その後、気温の上昇に伴い、雨滴や融解粒子の割合が増加していた。MRRの反射強度は粒子の大きさ、ドップラー速度は落下速度、速度幅スペクトルは異なる落下速度を持つ粒子の存在を示していた。

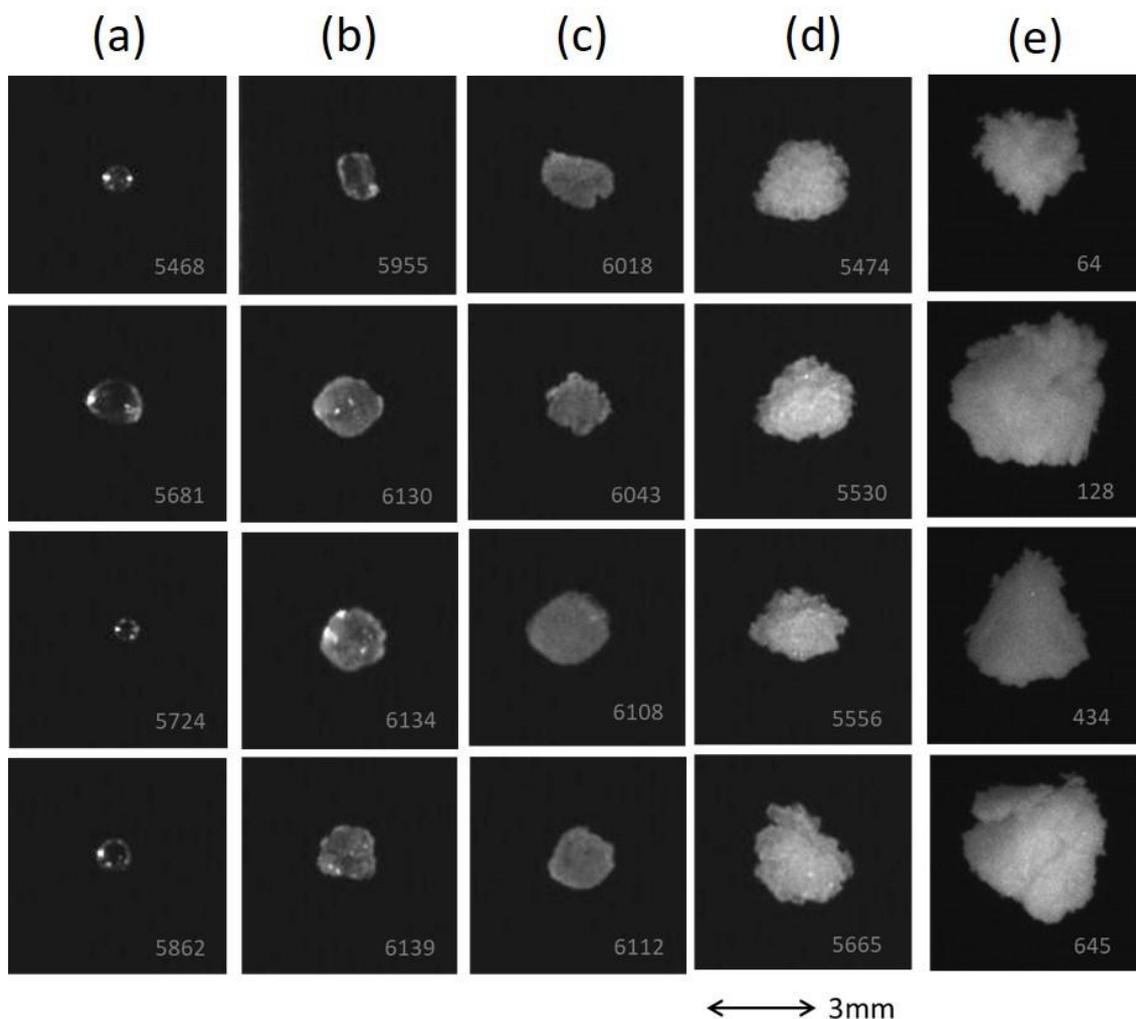


図16. 観測された粒子. (a) 雨滴 (b) 一部もしくは大部分が融解した粒子 (c) 湿った霰 (d) 乾いた霰 (e) 2023年1月25日に金沢で観測した乾いた霰

3.4 落下速度と平均粒径の関係

図 17 は落下速度と平均粒径の関係を示す。図の実線は雨滴、破線・点線は塊状霰、六花霰、長破線、一点破線は雲粒付雪片の落下速度を示す。雨滴から乾いた霰まで綺麗なグラデーションを示しており、融解が進み、粒径が小さくなるとともに落下速度が大きくなるという関係がよく示されている。気温が $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ の塩沢で観測された乾いた霰は Locatelli and Hobbs (1974) の経験曲線よりも上方に分布しており、一方、低温 ($-3.4\sim -1.7^{\circ}\text{C}$) の金沢で観測された乾いた霰は Locatelli and Hobbs (1974) の経験曲線より下方に分布しており、形状や表面状態に加え、温度が霰の湿り具合を示す重要な要素であることが確かめられた。

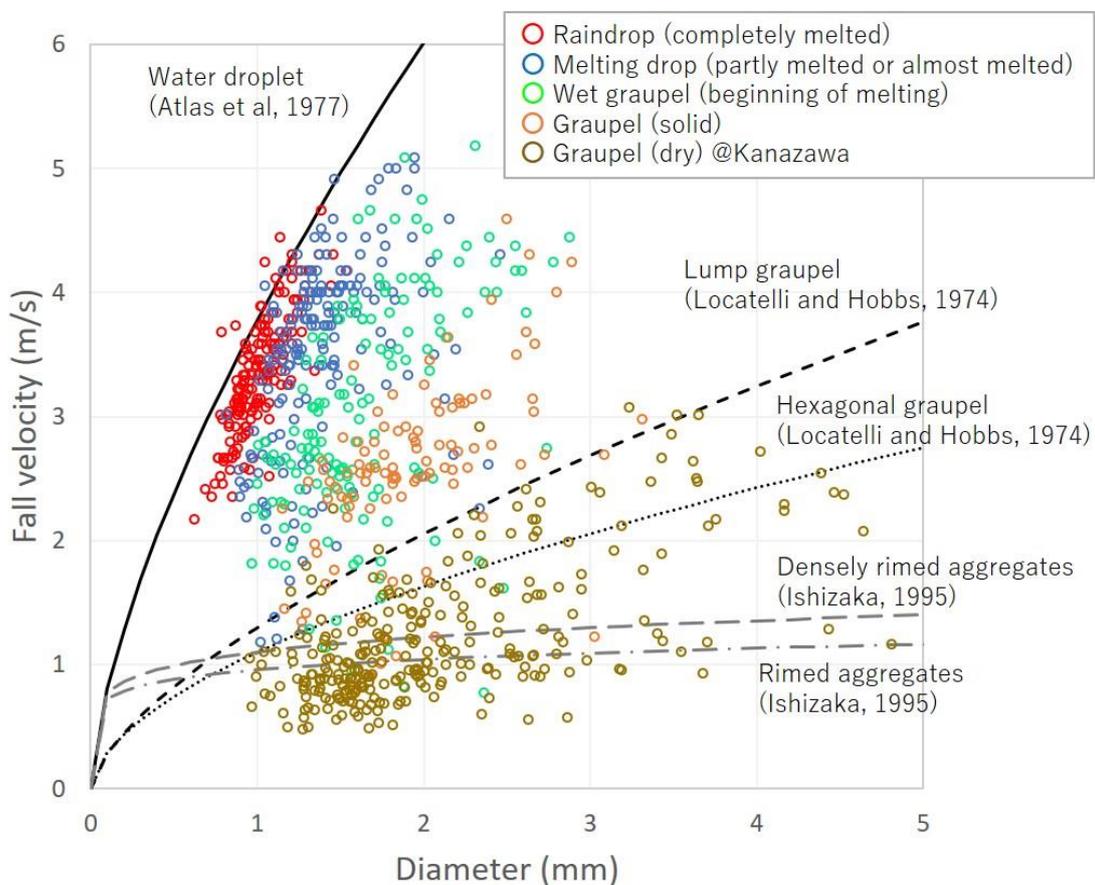


図 17. 2022 年 12 月 24 日 9:00~10:00 (日本時間) に地上版 Rainscope で観測された粒子の粒径と落下速度の関係。赤：雨滴、青、融解粒子、緑：湿った霰、橙：乾いた霰 @塩沢、茶：乾いた霰@金沢 ($-3.4\sim -1.7^{\circ}\text{C}$) を示す。

3.5 まとめ

2022年12月24日の新潟県南魚沼市塩沢での地上降雪観測において得られた霰の融解に関して、雲物理学的な視点から粒子解析を行った結果、融解度合いによって粒径-落下速度分布がきれいなグラデーションを描くことが確認された。Rainscope はよく使われている Parsivel や 2DVD とは異なり、落下速度とともに鮮明な個々の粒子画像と粒子落下速度の情報が得られる。これはこれまでは得られなかった貴重なデータであり、異なる温度域でのさらなるデータ収集が継続され、統計的な解析に十分なデータが蓄積されれば、地上における雪質の知見が得られることが期待される。さらには、Rainscope ゾンデの飛揚結果とあわせた議論が進めば、上空の降水雲内における固体降水形成とその融解プロセスに貴重な情報を提供できるだろう。

4. 外部発表

(論文)

Hara, Y., K. Suzuki, and T. Kawano (2024): Quantitative evaluation of graupel shape observed by new particle imaging radiosonde, Rainscope - A case study of a convective cloud on 25 June, 2022. SOLA, Vol. 20, 144-148, doi:10.2151/sola.2024-025 (査読あり)

(口頭発表)

Suzuki, K., Y. Hara, R. Kamamoto, T. Kawano, K. Shimizu (2023): Development of a new balloon-borne particle imaging radiosonde and first flight into a convective cloud. American Meteorology Society 40th Conference on Radar Meteorology, 30 August 2023, Minneapolis, U.S.A.

Hara, Y., K. Suzuki, T. Kawano (2023): Quantitative evaluation of graupel shape observed by particle imaging radiosonde "Rainscope" in Baiu convective cloud. AOGS2023, 31 July 2023, Singapore

鈴木賢士, 原優里佳, 川野哲也 (2023): 降水粒子の形状から考える対流雲内の固体降水形成プロセスー2022年梅雨期集中観測における Rainscope 観測報告ー, 2023年度日本気象学会春季大会

原優里佳, 鈴木賢士, 川野哲也 (2023): 雲内での落下速度測定による固体降水粒子の雲微物理学的考察, 2023年度日本気象学会秋季大会

鈴木賢士, 高見和弥, 大東忠保, 山口弘誠 (2024): 豪雨をもたらす雲物理メカニズム解明のための降水粒子直接観測, 令和5年度京都大学防災研究所発表講演会 B307

参考文献

- Harimaya, T., 1976: The embryo and formation of graupel. *J. Meteor. Soc. Japan*, 54, 42–51.
- Ishizaka, M.: Measurement of falling velocity of rimed snowflakes, *Seppyo*, 57, 229–238, doi:10.5331/seppyo.57.229, 1995.
- Locatelli, J. D., and P. V. Hobbs, 1974: Fall speed and mass of solid precipitation particles. *J. Geophys. Res.*, 79, 2185–2197.
- Nakakita, E., K. Yamaguchi, Y. Sumida, H. Takehata, K. Suzuki, K. Nakagawa, S. Oishi, Y. Shusse, K. Tsuboki, and T. Ohigashi, 2009: Development of hydrometeor classification system using polarimetric radar measurements synchronized with the video-sonde observation. *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, 53, 361–366.
- Suzuki, K., K. Shimizu, T. Ohigashi, K. Tsuboki, S. Kawamura, K. Nakagawa, K. Yamaguchi, and E. Nakakita, 2012: Development of a new videosonde observation system for in-situ precipitation particle measurement. *SOLA*, 8, 1–4.
- Suzuki, K., M. Matsuo, E. Nakano, S. Shigeto, K. Yamaguchi, and E. Nakakita, 2014: Graupel in the different developing stages of Baiu monsoon clouds observed by videosondes. *Atmos. Res.*, 142, 100–110.
- Suzuki, K., K. Nakagawa, T. Kawano, S. Mori, M. Katsumata, F. Syamsudin, and K. Yoneyama, 2018: Videosonde-observed graupel in different rain systems during Pre-YMC project. *SOLA*, 14, 148–152.
- Suzuki, K., Y. Hara, T. Sugidachi, K. Shimizu, and M. Fujiwara, 2023: Development of a new particle imaging radiosonde with particle fall velocity measurements in clouds. *SOLA*, 19, 261–268.
- Takahashi, T., 1990: Near absence of lightning in tropical rainfall producing Micronesian thunderstorms. *Geophys. Res. Lett.*, 17, 2381–2384.