

第7回メソ気象セミナー開催報告

メソ気象セミナー事務局

(吉住 蓉子^{*1}・末木 健太^{*2}・下瀬 健一^{*3}
 横田 祥^{*4}・栃本 英伍^{*5}・春日 悟^{*6}
 鵜沼 昂^{*7}・渡邊 俊一^{*8}・加藤 亮平^{*9})

1. はじめに

メソ気象セミナーは「メソスケール気象学(以下、メソ気象)研究のこれまで・今・これから」をコンセプトとし、セミナー形式で議論を行うことでメソ気象の理解を深めることを目的とした集いである。具体的には、メソ気象において、

- ・これまでの研究でどこまで理解されているのか
- ・現在はどのような研究が行われているのか
- ・今後どのような研究を行っていくべきか

について、観測的・数值的・理論的な観点から議論を行う。当セミナーは、メソ気象研究連絡会の傘下で活動している。活動内容は Web ページ (<http://meso.sakura.ne.jp/mesosemi/> 2021.12.7閲覧) または活動報告書(下瀬ほか 2014, 2016; 栃本ほか 2016; 渡邊ほか 2017; 鵜沼ほか 2018; 末木ほか 2020) を参照さ

りたい。

第7回目となる今回のセミナーは、「雲物理に関する観測・実験・数値モデリング研究」をテーマとして、気象研究所の橋本明弘氏、折笠成宏氏、防災科学技術研究所の本吉弘岐氏を講師としてお招きし、2021年7月10日~11日にオンラインにて開催した。オンライン開催ということもあり、参加者数は過去最多の80名となり、今回は Zoom 画面のスクリーンショットにより集合写真とした(第1図)。今回のセミナーの内容は、以下の通りである。

- ・第1部 観測・実験に基づく雲物理学的知見(折笠氏による基調講演)
- ・第2部 地上降雪粒子観測とメソ降水系への洞察(本吉氏、橋本氏による基調講演)
- ・参加者によるポスターセッション
- ・第3部 雲微物理モデリングと数値シミュレーション(橋本氏による基調講演)
- ・総合討論

折笠氏による基調講演では、観測・実験によるこれまでの雲物理学研究の発展と、折笠氏が行われている研究の紹介とともに、観測・実験的研究において今後取り組むべき課題が示された。本吉氏による基調講演では、地上降雪粒子観測の結果と地上で観測される降水粒子をもたらす降水系の解析結果が示された。橋本氏による基調講演では、数値気象モデルにおける雲微物理過程のモデリングに関して、これまでの発展と今後の課題が示され、また、観測・実験との相互研究の重要性が示された。総合討論では、雲物理に関する観測・実験・数値モデリングの相互研究に関する課題や、メソ気象研究の発展のために雲物理研究に求めること

^{*1} (連絡責任者) Youko YOSHIKUMI, 一般財団法人日本気象協会,

y.yoshizumi8@gmail.com

^{*2} Kenta SUEKI, 理化学研究所計算科学研究センター。

^{*3} Ken-ichi SHIMOSE, 防災科学技術研究所。

^{*4} Sho YOKOTA, 気象庁情報基盤部数値予報課数値予報モデル技術開発室。

^{*5} Eigo TOCHIMOTO, 防災科学技術研究所。

^{*6} Satoru KASUGA, 新潟大学大学院自然科学研究科(現: 三重大学生物資源学研究所)。

^{*7} Takashi UNUMA, 気象庁大気海洋部業務課気象技術開発室。

^{*8} Shun-ichi WATANABE, 気象研究所。

^{*9} Ryohei KATO, 防災科学技術研究所。

© 2022 日本気象学会

などについて議論が交わされた。次節以降、セミナー内容の詳細を報告する。

2. 第1部 観測・実験に基づく雲物理学的知見

第1部では、折笠氏より観測・実験に基づく雲物理学の近年の研究動向について紹介された。1950年代以降、雲シーディングによる気象改変への期待から氷晶核 (ice-nucleating particle ; INP) の研究が盛んに行われた。その後、いわゆる第一種間接効果として知られる Twomey 効果 (Twomey 1977) や、生物活動がエアロゾルを介して気候変動に負のフィードバックとして作用するという CLAW 仮説 (Charlson *et al.* 1987) の提唱により、エアロゾル-雲相互作用の研究が盛んとなった。

雲内での氷晶の形成過程は、例えば対流雲の 0°C から -40°C 程度の高度間で水と氷がパッチ上に存在する混相雲内では特に複雑である。氷晶には一次氷晶と二次氷晶が存在する。INP 数濃度と (一次) 氷晶数濃度が同程度であれば、氷晶の起源はそこに存在するエアロゾルと考えられるが、氷晶数濃度が INP 数濃度比べオーダーが変わるほど多ければ、二次氷晶生成が働いている可能性がある。二次氷晶生成のプロセスには、大きな氷晶に雲粒が衝突して氷晶が成長する際に微小な氷晶が飛び散る Hallett-Mossop (H-M) プロセス (Hallett and Mossop 1974) などがある。H-M プロセスは温度 -3°C ~ -8°C で生じるが、それより低温な領域での二次氷晶生成の一つには droplet shatter-

ing プロセスによる可能性が考えられる。上層の巻雲内はさらに気温が低いいため、INP による不均質核形成に加え、水滴の自然凍結による均質核形成も起こる。どちらの核形成過程が卓越するかは観測のみではわからず、数値実験に基づく考察が必要である。一般に、雲凝結核 (cloud condensation nuclei ; CCN) 数濃度の増加は雲粒数濃度の増加に寄与するのに対して、INP 数濃度の増加は均質核形成が優位になるまでは氷晶数濃度の増加に寄与するものの、均質核形成のみの場合と比べると氷晶数濃度の減少に寄与する (Kärcher *et al.* 2006)。また、雲内での CCN 活性化や凝結成長、衝突併合成長、落下、蒸発などの雲微物理過程を通じてエアロゾルの物理化学特性が変質し、雲微物理構造や降水効率に変化が生じることを雲過程処理と呼ぶ。雲中の INP の測定機器には、エアロゾル粒子を捕集した後、それを含む水滴を冷却して測定 (オフライン測定と呼ばれる) を行う cold stage などや、流入空気中の INP をそのまま測定 (オンライン測定) できる continuous flow diffusion chamber (CFDC) などがあるが、測定可能な温度や数濃度の範囲は様々である。地上でのサンプリングでは、捕集した粒子を大きなもの (氷晶・雲粒) と小さなもの (INP として働かないエアロゾル粒子など) に分離し、INP として活性化したエアロゾル粒子の組成分析などが行われる。また、in-situ 測定の課題として、水と氷の粒子識別や、測定原理ごとの制限や不確定性が挙げられた。

人工降雨・降雪の原理についても紹介された。雲シーディングには、氷化シーディング (glaciogenic seeding) と吸湿性シーディング (hygroscopic seeding) があり、それぞれ冷たい雨・暖かい雨のプロセスに対するシーディングである。氷化シーディングでは、過冷却水滴が存在する 0°C 以下の高度において、ドライアイスや液化炭酸ガスの散布による空気の急冷により雲粒を凍結させる、または人工的な INP (ヨウ化銀など) の散布により氷晶の生成を促す。吸湿性シーディングでは、0°C 以下



第1図 セミナー参加者との集合写真.

り暖かい雲に対し吸湿性粒子を散布し、大きな水滴の生成を促すことで降雨を増加させる。

また、エアロゾルのCCN能・INP能のパラメタリゼーションについても紹介された。まず、エアロゾルのCCN能のパラメタリゼーションとして κ -ケーラー理論 (Petters and Kreidenweis 2007) が示された。さらに、INP能に関して、氷晶発生の古典理論に基づくパラメタリゼーション、野外観測に基づく経験式、室内実験に基づくパラメタリゼーションなどが紹介された。

続いて、折笠氏自身の研究に関連して、航空機による観測や雲シーディング実験、巻雲の雲粒子ゾンデ (hydrometeor videosonde; HYVIS) 観測、エアロゾルのCCN能・INP能の室内実験・観測が話題に上った。雲シーディング実験においては、自然の変動幅を超えた有意な効果を示すことが重要であるが、これには航空機による in-situ 測定と地上からのリモートセンシングを合わせて評価する必要がある。越後山脈の地形性降雪雲に対して行われた氷化シーディング実験では、シーディングを行った領域とシーディングを行っていない周辺領域で、算定されたレーダー反射強度や降水強度、雲内の氷晶形状などに変化が見られた。吸湿性シーディングは特定の条件下で効果がある可能性があるものの、明瞭な効果が現れる条件を明らかにするためにはさらなる集中観測が必要である。巻雲用のHYVISの開発に関して、巻雲は氷晶数濃度が少ないため、サンプリング体積を増やすため強制吸引用のファンを付加するなどの改良を行った。HYVISを用いてつくば (36.0°N, 140.1°E) で行われた観測からは、均質核形成と不均質核形成を想定した先行研究のパーセルモデル計算結果と比較し、氷晶数濃度のオーダーや温度依存性から、比較的弱い上昇流のケースで不均質核形成が卓越していた可能性が示唆された (Orikasa *et al.* 2013)。エアロゾルのCCN能・INP能について、室内実験では単一の物質に関する多くのデータが得られているが、実大気では様々な外部混合・内部混合したエアロゾルが分布しているため、実大気観測の結果と合わせて理解する必要がある。さらに、折笠氏はつくば地上モニタリング観測や、アラブ首長国連邦上空でのエアロゾル・雲の直接観測により、実大気エアロゾルのCCN能・INP能の調査を行った (Orikasa *et al.* 2020a, b)。

最後に、実験・観測と数値モデリングとの連携について、進行中の研究も含めた今後の展望について述べられた。室内実験で得られた各種エアロゾルの特性の

違いや混合したエアロゾルの特性から、混合の程度を量的に示すパラメータの提案を探索する。地上観測により明らかとなる実大気エアロゾルの特性や季節・時間変化の要因、混合エアロゾルを用いた室内実験との比較結果から、代表的な気団を表すエアロゾルのモデル化の実現を目指す。航空機で観測されるエアロゾル・雲・降水の微物理構造を数値実験結果と比較することにより、雲物理モデルの検証や開発、改良が進められていることが述べられた。

3. 第2部 地上降雪粒子観測とメソ降水系への洞察

3.1 地上における降雪結晶の観測

本吉氏は、観測技術の進展により詳細な観測が可能となった降雪粒子や降雪結晶の構造や成因と、その情報を関連付けた雪氷災害の研究について述べた。まず、雪氷災害と降雪結晶の関係について概略が述べられ、表層雪崩による災害発生時、雲粒の付着が少ない平板結晶や枝の成長が少ない角柱・角板・交差角板結晶が大量に降ることで、降雪結晶同士の結合が弱い層が形成されることが示された。さらに、多数の車両がスタックした2016年1月24日から25日にかけて発生した新潟県中越地域の集中豪雪の事例について、擾乱と降雪粒子・結晶の関係が詳細に述べられた。観測された降雪粒子・結晶は、降雪初期の渦状擾乱に伴うものは細かい粒子であったが、降雪晩期のLモード擾乱 (北西季節風に平行な筋状雲) においては大きな霰の粒子となっており、この降雪粒子の変化と車両のスタック状況の間に関係があるのではないかと述べられた。また、この事例の際に撮影された降雪結晶をよく見ると、鼓状結晶など非常に細かい構造が見られた。

続いて、長岡における地上での降雪結晶の観測について述べられた。2014年2月の関東甲信地域の大雪時の雪崩災害をきっかけに、降雪結晶と雪崩災害の関係に関心がもたれるようになったことから、降雪結晶をよりはっきりと確認できる自動観測方法が検討され、デジタルカメラを利用した自動観測システムが導入された。2016年1月に導入された一眼レフデジタルカメラとマクロレンズを用いた画像記録装置では画素数が6000×4000あり、降雪粒子・結晶の立体形状や細かい構造が識別可能な解像度での撮影が可能となったことが述べられた。これにより雲粒付着の有無が十分に識別可能になるなど、晶癖図 (小林ダイアグラム: Kobayashi 1961) にはあらわれない複雑な降雪結晶が

捉えられたことが示された。このような複雑な降雪結晶は、上空で生成された結晶が地上へ到達するまでに様々な大気の状態を経ることによって形成されることが示唆された。

複雑な降雪結晶の例として、多重鼓のような特徴を持つ雪結晶（以下、多重鼓様結晶と呼ぶ）について詳細が述べられた。多重鼓様結晶は、柱状結晶にそのc軸（柱の長さ方向）に垂直で互いに平行な複数の板状成長がみられる結晶を総称したものである。多重鼓様結晶について様々な形態種別の分類を行い、それぞれの形成に必要な要件について考察が示された。その中で雲粒付柱状結晶から二次的な板状成長が見られるケースでは、対流性の降雪雲内での鉛直運動によって異なる温度の高度を経ることにより、柱状と板状が組み合わされた複雑な形状を示すとの見解が述べられた。

次に、長岡における地上での詳細な降雪結晶観測を開始後、初めて南岸低気圧の降雪開始から終了までを観測できた事例として、2018年1月22日から23日の南岸低気圧通過時の降雪結晶の変化について示された。降雪結晶観察から、それぞれ特徴的な結晶が卓越する三つの期間があった。降り始めの期間においては、南岸低気圧に伴う雲の影響下で、約5時間と長い時間にわたり交差角板状及び柱状・板状の不規則形状など明らかに -22°C 以下の低温下で成長する結晶形が卓越していた。この南岸低気圧通過時の事例を含む、交差角板状結晶が卓越していた四つの観測事例で粒径・落下速度を比較したところ、雲粒なし結晶として想定されるものよりも落下速度は大きい傾向があり、霰状雪と同程度に大きい場合もあった。同じ結晶分類でも形状に違いが生じうることから、卓越する結晶形毎に粒径・落下速度を考慮する必要があることが示唆された。

最後に、降雪粒子特性に起因する雪氷災害の把握・予測に向けた課題や期待が述べられた。雪氷災害の把握に向けた降雪粒子の粒径や落下速度の観測は、光学的ディストロメータを用いた計測・推定によって大まかには行えるようになってきた。しかし、非常に多様な降雪粒子の構成結晶については高解像度撮影などにより把握が進んできているが、まだ不十分であることが指摘された。この課題を解決する手段として、気象モデルによる多様な降雪粒子の構成結晶を把握するため、素過程を追跡できるバルク法や、晶癖を陽に扱う雲物理モデルの進展への期待と同時に、気象モデルの検証のための真値を得る観測・推定技術の向上の重要性も述べられた。

3.2 地上と上空の素過程的關係

橋本氏は、少し前の時代まで、降雪粒子観測と数値シミュレーションには各観点に乖離があり、観測屋とモデル屋の議論がうまくかみ合わなかったことに言及した。それは以下のことが原因であると指摘した。降雪粒子の直接観測は分類学的に精密なアプローチが可能であるが、物理過程に関する精密な議論ができない。一方、数値気象モデルによるシミュレーションは物理過程をある程度精密に模擬しているが、粒子の形態が極端に粗視化される。しかしながら、近年、観測と数値モデルがともに高度化され、より深い連携研究が可能になってきており、その例として、本吉氏が観測した大雪事例との連携について述べられた。

2018年2月5日に長岡で観測された大雪事例は日本海寒帯気団収束帯（JPCZ）と関連しており、降雪粒子の特徴として背が高く活発な対流を伴うJPCZにおいて霰の寄与率が小さかったことが示された。この特徴を理解するために、降雪粒子の形態と関連する素過程別成長量を追跡する変数を新たに実装した数値モデル（Hashimoto *et al.* 2020）を用いて、降雪粒子の微物理特性を解析した。JPCZに伴う降雪雲は、雲頂温度が低く、強い降雪を伴っており、その特徴は観測と整合的であった。素過程追跡モデルを用いた解析から、JPCZ降雪雲による降雪の間、降雪粒子数濃度は大きく、降水に対する霰の寄与は小さい傾向があるとともに、雪の雲粒捕捉成長が強く働いていたことが示唆された。これらの結果から、活発な対流によって生成された雲水をもとに雲粒捕捉過程が働くが、雪粒子の数が多いため雲粒を奪い合う競合が起き、典型的な霰の形成には至っていないことが明らかにされた。

最後に、本研究では高度化した観測と数値モデルを用いて、JPCZの降雪粒子の生成過程に迫る結果を得られたことが述べられた。しかしながら、観測・モデリングともにさらに高度化して精緻な結果を得ることは可能であり、このような研究に挑戦してくれる研究者が現れることへの期待が述べられた。

4. ポスターセッション

ポスターセッションでは、日本気象学会2021年度春季大会でも用いられたオンラインコミュニケーションツールである「Gather.Town」を用い、全7件の発表が行われた（第1表）。7件のうち3件は本セミナーのテーマである雲物理と密接に関連する内容であり、機械学習による雲粒子ゾンデ観測データの解析手法の提

案、豪雨を対象とした数値モデルの雲物理過程（1モーメントバルク法と2モーメントバルク法）の比較、数値モデルの乱流過程における水相過程の気候予測へのインパクト調査について紹介された。残り4件は豪雨やその環境場の解析に関する内容であり、豪雨の発生環境条件の統計解析、数値モデルによる対流表現の解像度依存性の調査、地上レーダー観測による線状降水帯の解析、寒冷渦を抽出するための指標について発表が行われた。今回はオンライン開催ということも影響してか、例年より発表件数が少なかったが、その分各発表について深く議論する時間をとることができ、充実したポスターセッションになった。一方で、「Gather.Town」の利用に慣れていない参加者も多く、ファイルの共有や質疑応答にあたって戸惑う場面もあった。この点は今後の課題である。

5. 第3部 雲微物理モデリングと数値シミュレーション

第3部では、橋本氏により、雲微物理モデリングと数値シミュレーションに関する講演が行われた。橋本氏は、まず雲微物理モデリングにおける代表的な手法である、バルク法、ビン法、超水滴法について紹介した。

バルク法は、粒子属性や粒径などを数少ない分布関数で置き換える手法であり、計算コストをより低く抑えられるメリットがある。気象庁や世界各国の数値モデルでは、雲微物理モデリングにバルク法が用いられている。気象庁の数値予報に使用されていた気象庁非静力学モデルでは、粒子クラスを雲粒・雨滴・氷晶・雪・霰に分類し、その混合比が予報されていた。また、より雲微物理モデルを精緻化する方法として、主に多次元化と多クラス化があり、多次元化としては、数濃度を増やした2モーメントスキーム、多クラス化とし

ては雹、エアロゾル、drizzle（微細な霧粒）といった粒子クラスを増やすなどの方法があると述べられた。さらに橋本氏は、従来とは異なる精緻化の方法として、Morrison and Milbrandt (2015) が提案したP3スキームについて紹介した。この手法では、粒子クラスは雲粒、雨滴、氷粒子の三つのみだが、各粒子の混合比、数濃度に加えて氷粒子の体積と粒子の捕捉過程で獲得した混合比を変数に加える多変数化を行っている。橋本氏は、この手法は氷粒子が持っている素過程の情報をモデルの中でも表現できるようにするという思想であると述べた。

続いて紹介されたビン法は、ある有限の粒径幅を持ったビンを考えて、それぞれのビンでプロセスを計算する手法である。例えば、粒径分布を一次元方向に整列させてビンで区切り、ビンの間の質量移動を移流計算で求める方法が考えられる。橋本氏は、水溶性の物質の質量や粒子形状などのパラメータを加えて多次元化する方法もあることを紹介した。

さらに、粒子法の中の一つの手法として超水滴法が紹介された。Shima *et al.* (2020) は超水滴法 (Shima *et al.* 2009) を ice phase まで拡張し、モデルが自分で粒子のアスペクト比を作り出すことに成功した。また、同じ粒径でも異なる落下速度を持つ粒子を再現するなど、より現実的な分布を模擬できるモデリングに成功したことを示した。観測で得られている粒径と落下速度の関係を再現することは次の課題だが、フレームワークはできている。さらに、このモデルの重要な点として、凝集体を構成している小粒子の数もモデルの中に含まれているという点を挙げた。

上記のように雲微物理モデリングの精緻化は進展してきているが、観測とモデルの乖離は依然として残されていることが指摘された。これは、モデルの粗視化

第1表 ポスター発表者の氏名・所属・発表タイトル。

氏名	所属	ポスター発表タイトル
鶴沼 昂	気象庁大気海洋部業務課気象技術開発室	2017年および2018年の7月に日本において発生した豪雨期間の降雨特性およびその環境条件
渡邊俊一	気象研究所気象予報研究部	asuca を用いた線状降水帯理想化実験における対流の表現
梶川友貴	筑波大学生命地球科学研究群	2モーメントバルク法が都市域豪雨事例の降水特性に与える影響の検討
吉村飛鳥	名古屋大学宇宙地球環境研究所	Automatic Image Identification of Solid Particles Using Deep Learning Method
春日 悟	新潟大学大学院自然科学研究科	新寒冷渦指標の紹介
大野知紀	海洋研究開発機構	上層雲とその温暖化応答に対する乱流スキームにおける水相プロセスのインパクト
大屋祐太	北海道大学大学院工学院	ドップラーレーダを用いた線状降水帯の気象場解析

や、雲物理の全てが明らかになっていないことによる不定なパラメータに起因するものがあると述べられた。橋本氏は、モデルを精緻化し、粗視化を解消することで、不定パラメータを直接拘束することができることを述べた。また、観測とモデリングの潜在的な連携研究の一例として Matsui *et al.* (2019) の研究を紹介し、モデル結果から偏波パラメータを抽出し、観測と比較研究することで、降水メカニズム解明へ有用な情報を得る可能性があることを示した。

また、橋本氏自身が実施した観測とモデルの連携研究についても紹介された。橋本氏は、従来のバルク法を改良した素過程追跡型モデリングの手法 (Hashimoto *et al.* 2020) を用いた研究結果を紹介した。従来型のモデルでは、粒子クラスの質量と数を出力するが、素過程追跡型モデリングでは、各雲微物理プロセスに起因する質量・数を出力する。この手法を用いて、日本海季節風下における山岳性降雪を想定した2次元モデルの数値実験を行い、日本海の海上では、雲粒捕捉過程 (ライミング) の卓越によって霰が形成していたことが示された。一方、内陸ではライミングの割合が減少し、昇華成長の割合が増えることが示され、実際の観測に近い結果であることが述べられた。

続いて、過去の研究で得られた粒子特性とモデルの結果を比較した研究についても紹介された。観測とモデルには不整合な点も存在しており、観測とモデルの結果を比較することでモデルの不完全な点を炙り出すことができるため、有用な情報を得ることができると述べられた。一方、モデルには不完全さが残るが、観測された雲粒寄与率や雪粒子タイプをある程度再現できるという結果も示した。このように、現在まで発展してきている観測データや過去の埋もれている観測データと連携した研究の可能性が示された。

最後に橋本氏から、将来に向けた展望と課題について述べられた。粒子法モデルを用いた研究のための解析手法の開発や、粒子観測の多点展開、データ共有・保全などの課題を挙げた。粒子観測の多点展開を実現することで、レーダー観測や衛星観測との比較研究が可能になることが述べられた。

6. 総合討論

折笠氏、本吉氏、橋本氏の講演を踏まえ、次の2点を軸に議論が行われた。

①室内実験、観測、数値シミュレーションの連携研究のために今後推進すべきこと、互いに求めること

②雲物理研究と、メソ気象や時間・空間スケールの大規模な現象の研究が互いに求めること

まず、JPCZに伴う降雪粒子について議論された。観測では霰は少ない一方、素過程モデリングではライミングの効果が主体的であり、一見矛盾する。この説明として、ライミングと典型的な霰の形で降ってくるかどうかは一対一の関係でなく、霰の前段階の粒子を観測していた可能性が指摘された。ここから、モデル出力の観測へのフィードバックに関する議論へと発展した。例えば霰を細分化して観測するためには、撮影写真から霰の「雲粒の付着度合い」を定量化することが次の課題であり、雪片中の構成粒子数を自動抽出するシステム開発の研究の必要性が提示された。具体案として、ディストロメータと降水強度計を併用し、落下速度、サイズおよび粒径、降水量の関係を考慮することで現実的にアプローチ可能であることが提案された。

次に、観測データの利用に関して議論が行われた。過去の観測データはフロッピーディスクなど世代の古い媒体で保存している可能性が高く、当時に公表していないデータもあることから、データを有効活用するためにも、状態よく保存・共有することの重要性が指摘された。また観測は、例えば数値シミュレーション等に比べその導入コストは高いため、観測を行う機関は限られている。そのため、観測を行う機関にはデータを学生でも入手しやすいような運用をして欲しいという要望も出た。かつてのような学生も教授も大所帯で一つの研究室で観測からデータ解析・モデリングまで総合的に行える研究グループは今では少なく、研究グループ同士で緩やかに繋がり、データを共有し、人材も育ててゆく重要性が指摘された。

降雪粒子の多点観測について最適な時空間スケールについて議論が行われた。理想的には降雪雲のスケール、1 km の稠密さで多点観測できれば良いが、安価で十分な質・量の情報を得られるような機器が開発されないことには非現実的であり、当面は現在展開している観測ポイントを利用するほかないという。また、多点観測の実現にはマンパワーと予算が必要であり、民間も含めた様々な機関が連携する必要性も指摘された。

気候モデルの観点からは、雲物理の知見を全球モデルに反映し、気候感度や気候場にどう影響するかまで視野に入れてほしいという要望が上がった。海洋研究開発機構の大野知紀氏の全球モデルにおける氷に対する飽和調節と温暖化応答に関するポスター発表 (第1

表)が取り上げられ、全球モデルにおける雲物理の重要性が改めて強調された。また、CALIPSOやEarth-CARE等の衛星観測データを用いた雲フェーズの解析においても雲物理の知見が必要という意見が上がった。

観測・モデル間の整合性に関する議論も行われた。一般に論文では両者の整合した事例を取り上げることが多いが、基本的には合わないことだらけであり、その一例として降水量と降水粒子の量(数濃度)を合わせ込むことの困難さが指摘された。また氷雲と水雲の存在比率や霰の量の合わせ込みも今後の課題として指摘された。

最後に橋本氏より総評をいただき、メソ気象学と雲微物理学との分野の近さに相反して新鮮な議論ができたことを評価いただいた。議論は観測や数値シミュレーションに留まらず、観測データの共有、人材育成、多点観測への戦略、気候モデルへの応用など多岐に渡り、これまでの知見や現在ある課題を整理するとともに、今後の雲物理研究の方向性について議論することができた。

7. まとめ

本セミナーはメソ気象現象の理解を深めるとともに、研究者同士の交流を図る場を提供してきた。当初、第7回目は2020年7月頃の開催を予定していたが、新型コロナウイルス感染症の影響で延期となり、またオンラインでの開催を余儀なくされた。現地開催と比べて、目的の一つである研究者同士の交流が希薄となったことは非常に残念ではあった。しかし、オンライン開催であるからこそ、これまで以上に多数の参加者が集まり、交流の幅は広がり、議論も活発に行われた。

今回のセミナーでは、メソ気象よりもスケールは小さいが、メソ気象に密接に関わる雲物理に焦点を当てた。観測・実験・数値モデリングの各観点から雲物理のこれまでの研究の発展、現在の研究、今後の課題について、橋本氏と折笠氏、本吉氏にわかりやすく講演していただき、雲物理という広いテーマについて、一人あたり1コマという短い時間でご紹介いただきたいという無茶なお願ひにもご快諾いただいた。また参加者の皆様のおかげで有意義な議論を行うことができた。この場をお借りして深く御礼申し上げる。これを機に雲物理にさらに興味を持ち、研究したいと思った学生や若手研究者がいれば幸いである。さらに有意義な議論を行うために、専門外の方も含め、多くの方にご参加をご検討いただきたい。今後もメソ気象の理解

を深める場を提供する役割を担うため、本セミナーは持続していきたいと考えている。

謝辞

本セミナー初のオンライン開催にあたり、メソ気象研究会の運営方法を参考にさせていただきました。また、ポスター発表で用いたGather.Townに関して日本気象学会講演企画委員会から助言を頂きました。

参考文献

- Charlson, R. J., J. E. Lovelock, M. O. Andreae and S. G. Warren, 1987: Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate. *Nature*, **326**, 655-661.
- Hallett, J. and S. C. Mossop, 1974: Production of secondary ice particles during the riming process. *Nature*, **249**, 26-28.
- Hashimoto, A., H. Motoyoshi, N. Orikasa and R. Misumi, 2020: Process-tracking scheme based on bulk microphysics to diagnose the features of snow particles. *SOLA*, **16**, 51-56, doi:10.2151/sola.2020-009.
- Kärcher, B., J. Hendricks and U. Lohmann, 2006: Physically based parameterization of cirrus cloud formation for use in global atmospheric models. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **111**, doi:10.1029/2005JD006219.
- Kobayashi, T., 1961: The growth of snow crystals at low supersaturations. *Philos. Mag.*, **6**, 1363-1370.
- Matsui, T., B. Dolan, S. A. Rutledge, W.-K. Tao, T. Iguchi, J. Barnum and S. E. Lang, 2019: POLARRIS: A POLARimetric Radar Retrieval and Instrument Simulator. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **124**, 4634-4657, doi:10.1029/2018JD028317.
- Morrison, H. and J. A. Milbrandt, 2015: Parameterization of cloud microphysics based on the prediction of bulk ice particle properties. Part I: Scheme description and idealized tests. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 287-311, doi:10.1175/JAS-D-14-0065.1.
- Orikasa, N., M. Murakami and A. J. Heymsfield, 2013: Ice crystal concentration in midlatitude cirrus clouds: In situ measurements with the balloonborne hydrometeor videonode (HYVIS). *J. Meteor. Soc. Japan*, **91**, 143-161.
- Orikasa, N., M. Murakami, T. Tajiri, Y. Zaizen and T. Shinoda, 2020a: In situ measurements of cloud and aerosol microphysical properties in summertime convective clouds over Eastern United Arab Emirates. *SOLA*, **16**, 185-191.
- Orikasa, N., A. Saito, K. Yamashita, T. Tajiri, Y. Zaizen, T.-H. Kuo, W.-C. Kuo and M. Murakami, 2020b: Seasonal variations of atmospheric aerosol particles

- focused on cloud condensation nuclei and ice nucleating particles from ground-based observations in Tsukuba, Japan. *SOLA*, **16**, 212-219.
- Petters, M. D. and S. M. Kreidenweis, 2007: A single parameter representation of hygroscopic growth and cloud condensation nucleus activity. *Atmos. Chem. Phys.*, **7**, 1961-1971.
- Shima, S., K. Kusano, A. Kawano, T. Sugiyama and S. Kawahara, 2009: The super-droplet method for the numerical simulation of clouds and precipitation: A particle-based and probabilistic microphysics model coupled with a non-hydrostatic model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **135**, 1307-1320, doi:10.1002/qj.441.
- Shima, S., Y. Sato, A. Hashimoto and R. Misumi, 2020: Predicting the morphology of ice particles in deep convection using the super-droplet method: development and evaluation of SCALE-SDM 0.2.5-2.2.0, -2.2.1, and -2.2.2. *Geosci. Model Dev.*, **13**, 4107-4157, doi:10.5194/gmd-13-4107-2020.
- 下瀬健一, 津口裕茂, 栃本英伍, 鷗沼 昂, 2014: 第1回メソ気象セミナー開催報告. *天気*, **61**, 947-951.
- 下瀬健一, 津口裕茂, 栃本英伍, 鷗沼 昂, 加藤亮平, 2016: 第2回メソ気象セミナー開催報告. *天気*, **63**, 125-129.
- 末木健太, 横田 祥, 栃本英伍, 加藤亮平, 吉住蓉子, 鷗沼 昂, 渡邊俊一, 下瀬健一, 春日 悟, 2020: 第6回メソ気象セミナー開催報告. *天気*, **67**, 55-62.
- 栃本英伍, 渡邊俊一, 末木健太, 吉住蓉子, 下瀬健一, 津口裕茂, 加藤亮平, 鷗沼 昂, 2016: 第3回メソ気象セミナー開催報告. *天気*, **63**, 929-935.
- Twomey, S., 1977: The influence of pollution on the short-wave albedo of clouds. *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1149-1152.
- 鷗沼 昂, 吉住蓉子, 春日 悟, 下瀬健一, 加藤亮平, 栃本英伍, 渡邊俊一, 末木健太, 津口裕茂, 横田 祥, 2018: 第5回メソ気象セミナー開催報告. *天気*, **65**, 757-763.
- 渡邊俊一, 下瀬健一, 栃本英伍, 末木健太, 横田 祥, 加藤亮平, 鷗沼 昂, 春日 悟, 2017: 第4回メソ気象セミナー開催報告. *天気*, **64**, 827-833.