

2023年度「エアロゾル・雲・降水に関する研究集会」報告

山下 克也^{*1}・高橋 和^{*2}・後藤 悠介^{*3}
山崎 耕平^{*4}・金 悠友^{*5}・辻 泰成^{*6}
荒木 健太郎^{*7}・佐藤 陽祐^{*8}・當房 豊^{*9}

1. はじめに

本研究集会は、世話人らの提案により、国内で雲物理研究に取り組む関係者による気軽な意見交換の場として、2016年2月に「エアロゾル-雲相互作用について語らう会」として発足した。2017年度からは「エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会」（荒木ほか 2017）と名称を変え、2022年度からは間口を広げることを目的に、相互作用を除き「エアロゾル・雲・降水に関する研究集会」（荒木ほか 2023）と改めて今回が9回目の開催である。今回の研究集会では、エアロゾル、雲物理、気象、気候や隣接分野などを専門とする研究者が一堂に集まり、室内実験・観測・数値実験など様々な手法による最新の研究結果や動向の共有を行うことを目的とし、2024年2月14～15日に国立極地研究所を会場として対面で開催した。また、本研究集会は、若手研究者や学生に向けたエアロゾル・雲・降水に関する知見の伝達、若手研究者や学生の発

表機会の提供も目的としている。前年度は通常の研究発表に加え、総説や学生参加者による自己紹介セッションを設けたが、議論や情報共有の時間を長くするため、今回は総説と自己紹介セッションを設けず、口頭発表の他にポスター発表セッションを設けた。

学生22名を含む49名が参加し、口頭発表18件（うち学生発表10件）、ポスター発表9件（うち学生発表2件）の計27件の研究発表が行われ、活発な議論と意見交換がなされた（第1図）。本報告では、各講演の概要と、各セッションを通して得られた共通理解について報告する。なお、本報告の作成にあたっては、研究集会の世話人に加えて、エアロゾル・雲・降水に関する研究に高い関心を持つ学生参加者も各講演の概要などの執筆を担当した。

（山下克也）

2. 1日目第1セッション

1日目の第1セッションでは、気候モデルを用いた雲の将来予測に関する発表が1件、雲の観測に関する発表が2件、雲、水蒸気の観測機器開発に関する発表が1件行われた。

神代 剛（気象研究所）は、地球温暖化に伴う下層雲の将来予測について、CMIP5およびCMIP6で使用された気候モデルを用いた解析の結果を報告した。下層雲量は、推定逆転層強度（EIS）と高い正相関をもつことが知られている（Wood and Bretherton 2006）が、モデルによる将来予測では、EISは増加傾向であるにもかかわらず、下層雲量は減少傾向であることが指摘されている（Webb *et al.* 2013 ; Qu *et al.* 2015）。それに対して、水蒸気の効果を含む指標である推定雲

^{*1}（連絡責任著者）Katsuya YAMASHITA, 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター, 研究集会世話人. yamashita@bosai.go.jp

^{*2} Kazu TAKAHASHI, 総合研究大学院大学.

^{*3} Yusuke GOTO, 名古屋大学宇宙地球環境研究所.

^{*4} Kohei YAMASAKI, 東京大学大気海洋研究所.

^{*5} Yu KIM, 兵庫県立大学.

^{*6} Taisei TSUJI, 富山大学.

^{*7} Kentaro ARAKI, 気象研究所, 研究集会世話人.

^{*8} Yousuke SATO, 北海道大学大学院理学研究院, 研究集会世話人.

^{*9} Yutaka TOBO, 国立極地研究所, 研究集会世話人.

© 2024 日本気象学会



第1図 研究会参加者の集合写真。

頂エントレインメント指標 (ECTEI, Kawai *et al.* 2017) を採用すると、温暖化に伴う下層雲量の減少を矛盾なく説明できることを示した (Koshiro *et al.* 2022)。

猪上 淳 (極地研究所) は、南極域の雲の相状態について、観測結果を大気再解析データ ERA5 (Hersbach *et al.* 2020) や CMIP6 で使用された気候モデルと比較した結果を報告した。船上に設置したシーロメーター、雲粒子センサーゾンデ (Inoue *et al.* 2021)、汎用ドローン (Inoue and Sato 2023) を用いた大気や雲の観測の結果から、南大洋上にある大気中層の水雲の割合がモデルにより示される値 (Zelinka *et al.* 2020) よりも大きいことを示した。また、南極域の下層雲の相状態に関して、ERA5 では氷雲が多い傾向にある一方で、観測結果は水雲が多いことを示した。そして、それらの相状態の違いが ERA5 における海面水温の高温バイアスに影響している可能性を示した。

佐藤和敏 (極地研究所) は、南極域と北極域における氷雲の形成とエアロゾル輸送の関係について発表した。南極大陸沿岸域や北極海で発生した大気の川の影響にある環境下での雲粒子センサーゾンデを用いた観測結果から、比較的高温な環境下 (南極域で -10°C 以上、北極域で -15°C 以上) で氷雲が形成されていたことを報告した。そして、水蒸気が低緯度から高緯度に向かって輸送される過程で海洋起源のバイオエアロゾ

ルや山火事起源のエアロゾルが大気中に供給され、氷雲の形成に影響している可能性を示した (Sato and Inoue 2023)。

高島祐弥 (古野電気) は、気温および水蒸気の鉛直プロファイルの推定を目的としたマイクロ波放射計の開発の進捗について報告した。雲や水蒸気の観測機器 (雲カメラ・マイクロ波放射計・GNSS 水蒸気計) の紹介を行ったあと、マイクロ波放射計の開発に関して、ERA5 を教師データとして機械学習を行うことで、時空間分解能ともに従来の方法より細かいスケールでの学習が可能であり、より短期間での学習が可能であることを示した。さらに、今後の発展として、物理プロセスと ERA5 の活用により事前の観測を必要としない学習が可能になる可能性を示した。

本セッションにおいて、さまざまな観測により南極域における雲の相状態が気候モデルや再解析データと異なる特徴を持った混合相雲である事が示された。こうした結果をもたらすメカニズムを明らかにするためには、今回報告されたような観測機器の開発が今後重要な役割を担うだろうと考えられる。また、南極域の大気や雲の観測網の拡充および雲形成メカニズム研究から雲形成に重要な要素を見出すことが、南極域の雲の将来予測の精度向上をもたらすものと見込まれる。そのような研究と同様、今回報告されたような下層雲の変動を説明する指数の提案も将来予測の精度向上に

重要な知見となると考えられる。

(高橋 和)

3. 1日目第2セッション

1日目の第2セッションでは4件の講演が行われ、エアロゾルが雲、降水、放射特性へおよぼす影響について、気候モデルによる数値シミュレーション、航空機観測、室内実験により評価した研究の成果が発表された。

井村裕紀(東京大学)は、全球気候モデル MIROC6 に実装されている降水診断型と降水予報型のスキームを用いて、氷晶核粒子(INP)の数濃度の気温依存性を表す複数の関数関係に対して感度実験を行った。衛星観測と比較したとき、標準のINP数濃度の設定では診断型よりも粒子間の相互作用をより精確に表現できる予報型の方が適切にCFEDを表現できていることから、予報型ではINP数濃度の影響が降雪レジームまで伝わることを報告した。

河合 慶(名古屋大学)は、全球エアロゾル-気候モデルCAM-ATRASを用いて、北極ダストに由来するINPの鉛直分布、数濃度、放射特性への影響について調べた結果を報告した。北極域のINPをシミュレーションする際に、北極ダストの高い氷晶形成能力を考慮したパラメタリゼーションを設定すると、夏から秋にかけての北極圏下層対流圏では北極ダストがINPのほとんどを占める結果になることを示した。

折笠成宏(気象研究所)は、HIWC2022とCPEX-CVの2つのキャンペーン時に実施したエアロゾルと雲の航空機観測の結果を基に、エアロゾルが高濃度氷晶雲の形成におよぼす影響について検証した結果を示した。INP数濃度とエアロゾル数濃度の間には必ずしも正の相関がみられるわけではなく、エアロゾル粒子の数濃度の多寡でINP数濃度を説明することは難しいことなどを報告した。

田尻拓也(気象研究所)は、雲生成チェンバーを用いて、雲シーディングによる台風弱化的可能性を評価することを目的に、台風外縁部での雲発生環境下を想定した室内実験の進捗状況について報告した。既存の雲生成実験では気温20℃、露点温度15℃の実験が可能であったが、高温多湿の環境(気温30℃、露点温度25-28℃)を達成するには加温加湿装置や加熱配管の整備・改修が必要であったことなど本実験への諸課題を取り上げた。

本セッションでは、数値シミュレーションや航空機

観測、室内実験といった様々な手法を用いて核形成能力に関する研究発表がなされた。各々の手法には各々の強みがあることを再認識された。様々な手法の強みを活かした連携が進むことで雲核形成能力やその気候への影響の理解がさらに深まることを期待したい。

(辻 泰成)

4. 2日目第1セッション

2日目の第1セッションでは、ビン法や粒子法の雲モデルを用いた研究の発表が行われた。

宮本佳明(慶應義塾大学)は、ビン法雲モデル(Suzuki *et al.* 2010)を用いた理想実験から、対流雲が発達する条件下でもエアロゾル数濃度が少ない時には対流雲が発達しないことを示した。また独自に構築した雲粒の粒径、過飽和度、温度などの方程式系に基づく解釈から、対流雲が発達するか否かを決める特徴量が導出できること(Miyamoto 2021)を報告した。

三輪香月(兵庫県立大学)は、粒子法雲モデルである超水滴法(SDM, Shima *et al.* 2009, 2020)において、擬似乱数により液滴の自然分裂の発生確率と破片サイズを決定するアルゴリズムの開発について発表した。動作検証では、破片となった水滴がガンマ関数的に分布することを確認したことを報告した。さらに、擬似乱数生成のプログラムをスレッド並列化することで計算の高速化ができることも報告した。

金 悠友(兵庫県立大学)は、降水粒子の後流における雲凝結核活性化過程(WIA, 例えば, Bhowmick *et al.* 2020)について超水滴法を用いた数値実験から検討した結果について発表した。SCALE-SDMにWIAの効果を実装して2次元数値実験を行ったところ、空間内の水溶性エアロゾル、氷晶核の数濃度、氷晶の大きさなどが特定の条件を満たしたときには、WIAの有無で雲内の水滴の混合比や降水量などに違いが現れる可能性があることを報告した。

藤居史弥(兵庫県立大学)は、海洋性の雄大積雲における雨滴粒径分布の超水滴法による再現について発表した。2020年8月~9月のフィリピン東部沖での観測事例をもとにSCALE-SDMを用いた数値シミュレーションを実行し、短時間のうちに激しい降水が起こる海洋性降水の特徴を再現することに成功したことを報告した。また、雨滴粒径分布も計算値と実測値が定性的に整合していたことも報告した。

本セッションでは、SDMやビン法雲モデルといった、精緻な雲微物理モデルを用いた研究に関する発表

があった。前半3件の発表では、従来のモデルでは省略されていた様々な物理過程が雲の振る舞いに与える影響を改めて提示する良い機会となった。また、4件目の観測結果を用いた数値モデルの再現性の検証に関する発表の質疑では、観測のバイアスをモデルで考慮した検証の必要性が議論された。様々な立場の研究者との意見交換の重要性が参加者で共有されたと思われる。

(金 悠友)

5. 2日目第2セッション

2日目の第2セッションでは、雲相がエアロゾル・混合相雲相互作用におよぼす影響についての研究、ダウンバーストに先行する雷の活発化における霰と対流の役割についての研究、降水粒子の粒径分布の形成過程についての研究の計3件の発表が行われた。

山崎耕平(東京大学)は、LES領域モデルSCALE-RM (Nishizawa *et al.* 2015; Sato *et al.* 2015)を用いて様々な氷・液水比率の混合相雲に点源から雲凝結核(CCN)を排出する理想実験を行った結果を報告した。CCN排出に対する雲の応答が雲の氷・液水比率によりどのように変化するか注目し、混合相雲の光学的厚さの応答傾向が環境条件により異なり、その主な原因として雲粒の有効半径の応答傾向の違いが考えられることを示した。また、雲水量の応答要因を調べるには氷・液水比率の鉛直分布や高度ごとの雲水量の収支を考慮する必要があることを指摘した。特に、液水と氷が共存している中層において生成する雲粒と氷粒の相互作用が雲水量の応答に影響を与えている可能性を指摘した。

近藤 誠(北海道大学)は、ダウンバースト(DB)に先行する雷の活発化現象であるライトニングジャンプ(LJ, Williams *et al.* 1999)について、気象モデルSCALEを用いた理想実験を行った結果を発表した。DBが発生しやすい環境場とLJが発生しやすい環境場には気温の高低や霰の大粒子の多寡といった環境条件の差異があることを報告した。また、力学的な場に注目し、対流の傾きがこのような差異を生じさせた可能性を指摘した。さらに環境場の鉛直シアを強化する追加実験を行ったところLJは発生せず、対流の傾きの遷移がLJの先行に寄与するという本研究の考察を支持する結果となったことを示した。

岡崎 恵(京都大学)は、ピン型雲微物理スキームの設定でLES領域モデルSCALE-RMを用いてマルチ

セルを再現する実験を行い、降水粒子の二峰性分布の形成過程について調べた結果を発表した。粒径の時空間分布を解析した結果として、粒径ごとに上昇流やインフローといった力学的な場による粒径分布への影響が異なることが報告された。さらに先行研究との二峰性分布の形成要因の違いを明らかにするには、雨滴の分裂過程をモデルに組み入れる必要があることを示した。

本セッションでは、雲微物理過程におけるメカニズムについて調べる上でモデルを用いた研究が効果的であることが改めて示された。今後はモデル研究と観測研究の比較がより活発に行われ、モデル研究で得られたメカニズムに関する知見が観測結果の考察に用いられることで、雲微物理過程の理解がより一層進むことを期待したい。

(山崎耕平)

6. 2日目第3セッション

2日目の第3セッションでは、雪の単結晶写真を自動分類するアルゴリズム開発、気象と大気のレーダを用いた個体降水粒子の粒子種推定の研究、地上と衛星レーダを用いた石川と北海道の氷晶や雪片の粒径分布の違いに関する研究の計3件の発表が行われた。

中野博文(千葉大学)は、畳み込みニューラルネットワークを用いてスマートフォンで撮影した雪の単結晶の写真を、角板、角柱、樹枝の3種類に自動分類するアルゴリズムの開発と、その精度に関する発表を行った。自動画像分類にはアンサンブル学習の一種である平均投票、もしくは類似率投票を用い、類似率投票を用いることでより精度の良い自動判別ができることを報告した。また、固体降水粒子を撮影する際の背景(布など)が自動判別の精度に影響することを指摘した。

篠原雅貴(京都大学)は、気象レーダおよび大気レーダによる観測によって推定された鉛直ドップラー速度を組み合わせることで降水粒子の落下速度を算出し、その落下速度とレーダ反射強度の関係から固体降水粒子の粒子種の推定を行った結果について発表を行った。推定された固体降水粒子の落下速度とレーダ反射強度の関係は、 $V=a \times D^b$ の形(べき乗則)で近似し、パラメーターaとbの関係を示す近似曲線(Protat and Williams 2011)から近いデータ点では雪片、近似曲線から落下速度が速い方向に離れたデータ点では霰、遅い方向に離れたデータ点では氷晶などの小粒子が卓越していると推定したが、地上観測による固体降水粒子

の粒子種判別とは一致しない事例もあったことを報告した。

後藤悠介（名古屋大学）は、地上レーダと衛星レーダを複合利用した解析から氷晶や雪片の粒径を推定し、石川と北海道において推定された氷晶や雪片の粒径の差について、気温や相対湿度に着目した解釈を行った。推定された粒径は石川の方が北海道よりも大きかった。その理由が、石川の方が北海道と比べて地上や上空の気温が高く凝集成長が促進されやすい環境であったこと、並びに樹枝状結晶の成長がよく見られる -15°C 付近では、石川の方が北海道よりも過飽和度が高く樹枝状結晶がより多く存在したことで凝集成長が促進されやすい環境であったことにあとと報告した。

本セッションでは、主に観測データに基づき、固体降水粒子に関する議論が行われた。観測データの重要性を改めて認識する場となった。今後、観測に基づく固体降水粒子の成長過程の理解がより深まることを期待したい。

（後藤悠介）

7. ポスターセッション

ポスターセッションは、熱帯域の降水、線状降水帯、日本海寒帯気団収束帯、穴あき雲と飛行機の関係、亜熱帯下層雲と亜熱帯高気圧、霧の微物理特性、雷放電の中和電荷量、北極域の氷晶核、パウダースノーの雪質、エアロゾル・雲・降水の観測と多岐にわたるテーマについて発表があった。

青木俊輔（京都大学）は、衛星搭載レーダ TRMM PR を用いて、熱帯全域にわたる沿岸降水と下層風の関係について調査した結果を発表した。

荒木健太郎（気象研究所）は、気象庁地上マイクロ波放射計を用いた気温・水蒸気量の高度分布の推定精度評価と、線状降水帯や日本海寒帯気団収束帯での大気・雲・降水過程の観測結果について発表した。

岩崎杉紀（防衛大学校）は、2020年11月30日に出現した穴あき雲について気象衛星ひまわりの2.5分ごとの可視画像と Flightradar24 の飛行機情報を用いて実施した解析の結果を発表した。

川合秀明（気象研究所）は、亜熱帯下層雲を含む全球下層雲の再現性のよい気候モデルを用いて、「亜熱帯の下層雲は夏の亜熱帯高気圧を強めるか？」という問いについて放射冷却と低 SST 維持の観点から調査した結果を発表した。

小長井佑馬（北海道大学）は、ひまわり 8 号・9 号

の観測データと衛星解析アルゴリズム CAPCOM を用いて、2015年から2020年の7、8月に釧路付近で観測された霧の微物理特性の解析結果を発表した。

佐藤陽祐（北海道大学）は、雷を直接計算する気象雷モデルを使った実験により、関東の夏季に観測された雷放電の中和電荷量の違いについての考察を発表した。

當房 豊（極地研究所）は2019年度の海洋地球研究船「みらい」北極航海で得られた北太平洋～ベーリング海～北極海における氷晶核粒子の粒径別数濃度を報告した。

橋本明弘（気象研究所）は、パウダースノーの雪質を学術的に検証するプロジェクトの一環として、富良野盆地に降る降雪粒子の特徴を把握することを目的として実施した素過程追跡モデル（Hashimoto *et al.* 2020）を用いた数値実験の結果を発表した。

山下克也（防災科研）は、エアロゾルと雲の相互作用がもたらす大気の物理・化学現象の理解を目指す研究の一環として、孤立峰である筑波山山頂で始めたエアロゾル・雲・降水の連続直接観測の概要と初期的な観測結果を発表した。

ポスターセッションは、口頭発表申込件数が多かったことから申込者の中からアンケートによりポスター発表で良いという方に発表いただいた。1日目と2日目に40分のコアタイムを設けた上に、研究集会中の2日間にわたり掲示を続けたので研究内容を参加者に十分に知ってもらい議論する機会を与えることができたものと思われる。

（山下克也）

8. まとめ

本研究集会は2019年度以来4年ぶりの対面開催であった。今回の49名という参加者数は、オンライン開催であった2020年度（75名）、2021年度（65名）、2022年度（88名）から減少したが、対面開催では過去最多であり、本研究集会で扱う分野への興味・関心が高まっていることが伺える。学生参加者数は22名と約半数を占めており、学生への知見伝達や発表機会の提供の場として機能し始めてきたことも伺える。2024年度も開催予定であるので、興味のある方は是非参加いただきたい。

研究集会では、エアロゾル・雲・降水について実験・観測・シミュレーションをはじめとした多岐にわたる手法を用いた研究成果の発表が行われ、活発な議

論や研究内容へのアドバイスがなされた。その中の一例を紹介する。学生による発表の中で「降水粒子のブレークアップ過程をモデルに組み込みたいが、3重積分があるので難しくて手を付けられていない」という発言に対し、研究者から過去に取り組んだことがあるので解決に向けてこれからやり取りを継続して行いましょうというやり取りがあった。学生に発表の場を与え、知見の伝達につなげるというよい例であると思われる。

今回初めて導入したポスター発表は、1日目と2日目に40分ずつコアタイムを設けた。学会と比較し参加者数が少なかったことで混雑することなく、研究者同士の議論が行われていた。若手研究者や学生も発表者へ話しかけたり、行われている議論に参加したりする場面も見られた。ポスター発表が議論や情報共有の時間として十分機能していたものと思われる。

総合討論では、学生からは「勉強になり刺激になった」という意見や「今回発表しなかったが次回は発表したい」などの意見があった。また研究者からも「最新の研究動向の把握および若い研究者とのふれあいや議論ができて楽しかった」という意見があった。今後このような研究集会を継続する予定である。それにより、エアロゾル・雲・降水に関連する研究に取り組む研究者が増え、当該分野の研究が活性化していくことが世話人一同の願いである。

最後に、本研究集会は国立極地研究所・研究集会制度の支援を受けて開催された。開催にあたり協力いただいた関係者の方々に、ここに記して謝意を表します。
(山下克也)

略語一覧

CAM-ATRAS : Community Atmosphere Model with the Aerosol Two-dimensional bin module for foRmation and Aging Simulation 全球気候モデルの1つ
CAPCOM : Comprehensive Analysis Program for Cloud Optical Measurements MSI (Multi-Spectral Imager) の雲特性解析アルゴリズム
CCN : Cloud Condensation Nuclei 雲凝結核
CFED : Contoured Frequency by tEmperature Diagram 温度別頻度分布図
CMIP5 : Coupled Model Inter-comparison Project Phase5 第5期結合モデル相互比較計画
CMIP6 : Coupled Model Inter-comparison Project Phase6 第6期結合モデル相互比較計画
CPEX-CV : Convective Processes Experiment - Cabo

Verde (<https://asdc.larc.nasa.gov/project/CPEX-CV>, 2024.3.15閲覧)
DB : DownBurst ダウンバースト
ECTEI : Estimated Cloud-Top Entrainment Index 推定雲頂エントレインメント指標
EIS : Estimated Inversion Strength 推定逆転層強度
ERA5 : ECMWF Reanalysis version5 ECMWF (欧州中期予報センター) が気候変動の理解や監視等を目的に再解析プロジェクトの中で作成された GPV
Flightradar24 : 飛行中の民間航空機の現在位置をリアルタイム表示するウェブサイトならびにスマートフォン・タブレット向けアプリケーション
GNSS : Global Navigation Satellite System 全地球航法衛星システム
HIWC2022 : High Ice Water Content2022 (https://www.eol.ucar.edu/field_projects/hiwc-2022, 2024.3.15閲覧)
INP : Ice Nucleating Particle 氷晶核粒子
LES : Large Eddy Simulation
LJ : Lightning Jump 雷頻度の顕著な増加
MIROC : Model for Interdisciplinary Research on Climate 全球気候モデルの1つ
SCALE-RM : Scalable Computing for Advanced Library and Environment-Regional Model 理化学研究所を中心に開発されている基盤ライブラリーを利用した領域気象気候モデル
SCALE-SDM : Scalable Computing for Advanced Library and Environment-Super Droplet Method 理化学研究所を中心に開発されている基盤ライブラリーを利用した超水滴法を組み込んだ領域気象モデル
SDM : Super Droplet Method 超水滴法
SST : Sea Surface Temperature 海面水温
TRMM PR : Tropical Rainfall Measuring Mission Precipitation Radar 熱帯降雨観測衛星降雨レーダ
WIA : Wake-Induced Activation 降水粒子後流における雲凝結核活性化過程

参 考 文 献

荒木健太郎ほか, 2017:「エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会」報告。天気, 64, 483-491。
荒木健太郎ほか, 2023: 2022年度「エアロゾル・雲・降水に関する研究集会」報告。天気, 70, 357-362。
Bhowmick, T., Y. Wang, M. Iovieno, G. Bagheri and E. Bodenschatz, 2020: Supersaturation in the wake of a precipitating hydrometeor and its impact on aerosol activation. Geophys. Res. Lett., 47, 22, e2020GL091179, doi:10.1029/2020GL091179。
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.
- Hersbach, H. *et al.*, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 1999–2049, doi:10.1002/qj.3803.
- Inoue, J. and K. Sato, 2023: Challenges in detecting clouds in Polar regions using a drone with onboard low-cost particle counter. *Atmos. Env.*, **314**, 120085, doi:10.1016/j.atmosenv.2023.120085.
- Inoue, J., Y. Tobo, K. Sato, F. Taketani and M. Maturilli, 2021: Application of cloud particle sensor sondes for estimating the number concentration of cloud water droplets and liquid water content: case studies in the Arctic region. *Atmos. Meas. Tech.*, **14**, 4971–4987, doi:10.5194/amt-14-4971-2021.
- Kawai, H., T. Koshiro and M. J. Webb, 2017: Interpretation of factors controlling low cloud cover and low cloud feedback using a unified predictive index. *J. Climate*, **30**, 9119–9131, doi:10.1175/JCLI-D-16-0825.1.
- Koshiro, T., H. Kawai and A. T. Noda, 2022: Estimated cloud-top entrainment index explains positive low-cloud-cover feedback. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **119** (29), e2200635119, doi:10.1073/pnas.2200635119.
- Miyamoto, H., 2021: Effects of number concentration of cloud condensation nuclei on moist convection formation. *J. Atmos. Sci.*, **78**, 3401–3413.
- Nishizawa, S., H. Yashiro, Y. Sato, Y. Miyamoto and H. Tomita, 2015: Influence of grid aspect ratio on planetary boundary layer turbulence in large-eddy simulations. *Geosci. Model Dev.*, **8**, 3393–3419.
- Protat, A. and C. R. Williams, 2011: The accuracy of radar estimates of ice terminal fall speed from vertically pointing Doppler radar measurements. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 2120–2138, doi:10.1175/JAMC-D-10-05031.1.
- Qu, X., A. Hall, S. A. Klein and P. M. Caldwell, 2015: The strength of the tropical inversion and its response to climate change in 18 CMIP5 models. *Clim. Dyn.*, **45**, 375–396, doi:10.1007/s00382-014-2441-9.
- Sato, K. and J. Inoue, 2023: Ice cloud formation related to oceanic supply of ice-nucleating particles: A case study in the Southern Ocean near an atmospheric river in late summer. *Geophys. Res. Lett.*, **50**, e2023GL106036, doi:10.1029/2023GL106036.
- Sato, Y., S. Nishizawa, H. Yashiro, Y. Miyamoto, Y. Kajikawa and H. Tomita, 2015: Impacts of cloud microphysics on trade wind cumulus: Which cloud microphysics processes contribute to the diversity in a large eddy simulation? *Prog. Earth Planet. Sci.*, **2**, doi:10.1186/s40645-015-0053-6.
- 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**, 1307–1302, 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.
- Suzuki, K., T. Nakajima, T. Y. Nakajima and A. Khain, 2010: Correlation Pattern between effective radius and optical thickness of water clouds simulated by a spectral bin microphysics cloud model, SOLA, 2, 116–119.
- Webb, M. J., F. H. Lambert and J. M. Gregory, 2013: Origins of differences in climate sensitivity, forcing and feedback in climate models. *Clim. Dyn.*, **40**, 677–707, doi:10.1007/s00382-012-1336-x.
- Williams, E., B. Boldi, A. Matlin, M. Weber, S. Hodanish, D. Sharp, S. Goodman, R. Raghavan and D. Buechler, 1999: The behavior of total lightning activity in severe Florida thunderstorms. *Atmos. Res.*, **51**, 245–265.
- Wood, R. and C. S. Bretherton, 2006: On the relationship between stratiform low cloud cover and lower-tropospheric stability. *J. Climate*, **19**, 6425–6432, doi:10.1175/JCLI3988.1.
- Zelinka, M. D., T. A. Myers, D. T. McCoy, S. Po-Chedley, P. M. Caldwell, P. Ceppi, S. A. Klein and K. E. Taylor, 2020: Causes of higher climate sensitivity in CMIP6 models. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2019GL085782, doi:10.1029/2019GL085782.