

2022年度「エアロゾル・雲・降水に関する研究集会」報告

荒木 健太郎*¹・井村 裕紀*²・飯吉 周太朗*³
 梶川 友貴*⁴・近藤 誠*⁵・岡崎 恵*⁶
 山下 克也*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、年1回の開催を継続している。この研究集会は発足した当初よりエアロゾル・雲・降水とそれらの相互作用を対象とした研究発表や議論を軸としつつ、若手研究者に向けたエアロゾル・雲・降水に関する知見の伝達、若手研究者の発表機会の提供という役割にも重きを置いてきた。そこで、相互作用だけでなく幅広い話題を扱い、より活発な議論を行うため、2022年度からは名称を「エアロゾル・雲・降水に関する研究集会」と改めることとした。

研究集会は2023年3月16~17日にオンラインで開催

し、学生35名を含む88名が参加、23件の研究発表（うち総説2件）が行われ、活発な意見交換がなされた（第1図）。前年度に引き続き、研究集会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て、若手研究者や学生参加者に有益となるような取り組みを盛り込んだ。

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。

（荒木健太郎）

2. 1日目第1セッション

1日目の第1セッションは、地上マイクロ波放射計や小型マイクロ波放射計、雲カメラによる観測や機械学習を用いたデータ解析、観測やモデルを用いた雲微物理や降雪を対象とした研究など多岐にわたるテーマが研究者、民間事業者および学生から報告された。

*1 (連絡責任著者) Kentaro ARAKI, 気象研究所, 研究集会世話人.

araki@mri-jma.go.jp

*2 Yuki IMURA, 東京大学大気海洋研究所.

*3 Shutaro IIYOSHI, 日本大学.

*4 Tomoki KAJIKAWA, 筑波大学.

*5 Makoto KONDO, 北海道大学.

*6 Megumi OKAZAKI, 京都大学.

*7 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.

*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.

© 2023 日本気象学会



第1図 研究集会参加者の集合写真.

荒木健太郎（気象研）は日本海寒帯気団収束帯（JPCZ）により山陰地方で大雪となった2023年1月24～25日を対象に、マイクロ波放射計の観測結果を1次元変分法データ同化（IDVAR）によって同化したデータとマイクロ波放射計の観測からニューラルネットワークによって推定した鉛直積算雲水量（LWP）などを用いて大気環境場および雲・降水特性の解析を行った。解析の結果からJPCZ（本体+南側Lモード）でLWPが最大であり、下層水蒸気流入が活発であること、JPCZ北側のTモードで不安定度が最大であることを説明した。

箕輪昌裕（古野電気）は古野電気製の小型マイクロ波放射計および雲カメラ（FURUNO 雲カメラ）を用いた気象観測の結果を報告した。この小型マイクロ波放射計は機械学習モデルを適用することで可降水量（PWV）および水蒸気鉛直分布を推定する。またFURUNO 雲カメラは太陽光パネル駆動が可能であり、発電および日射予測などへの応用が検討されている。発表では過去に行った潮岬、白鳳丸、みらい（海洋研究開発機構）での観測においてマイクロ波放射計の精度が高いことを示す結果が得られたことを説明した。

清水完太（東海大）は機械学習によって全天雲カメラの画像から雲量を推定するアルゴリズムについて報告した。具体的には、SI・BI法（山下・吉村 2008）を画像データに適用して得られたヒストグラムに対し、ロジスティック回帰に基づく機械学習を施すことにより雲量の推定を行うとのことである。発表では、開発されたアルゴリズムの有効性を示す検証結果も報告された。

三隅良平（日大）は都市大気における暖かい雨に関する研究結果を報告した。東京都心で抽出された暖かい対流性降雨を対象としたXバンドおよびKaバンドを用いたレーダー観測から、レーダー反射強度の鉛直分布とレーダー反射因子差（ZDR）の鉛直分布とは変動の仕方が異なること、エコー頂が2 km以下の雲が多く発生していることを示した。後半ではパーセルモデル・シミュレーションを行い、その結果から、巨大雲凝結核（GCCN）は東京都心の暖かい対流性降雨には本質的ではない可能性が示唆されることを報告した。

飯吉周太郎（日大）は冬季日本海側の降雪イベントを対象とし、佐渡島および能登半島が降水量に与える影響について、次世代気象気候ライブラリSCALE（Nishizawa *et al.* 2015；Sato *et al.* 2015）を用いた感度実験を行った。山雪型のイベントでは、佐渡島およ

び能登半島の風上側では降水が強化され、風下側では抑制されることを示した。一方、里雪型のイベントでは、能登半島の地形が上空の鉛直流速に影響を与え、それが降水量に反映されている可能性を示した。

本セッションでの議論を通し、さらなる観測手法の高度化や観測測器の気象観測以外への応用、不確実性の大きい雲微物理過程の解明および精度の高い数値モデルの実現が期待される。

（飯吉周太郎）

3. 1日目第2セッション

本セッションでは、5件の講演が行われ人的被害につながるおそれのある雷・雪崩・台風・やませに関連する研究テーマに関して議論が活発に行われた。

富岡拓海（北大）は、雷現象を直接計算可能な気象雷モデル（Sato *et al.* 2019）を現業の予測に適用させることを最終目標に、1モーメント・2モーメントスキームの雲微物理モデルによる日本の夏季・冬季の発雷事例を元にした数値実験を行い、LIDEN 観測と比較した。その結果、雷モデルは使用する雲微物理モデルによって雷頻度、雷分布、時間変化が異なることを報告した。特に2モーメントスキームを用いた場合に雷頻度の再現性が高いことおよび雷の分布や時間変化も従来の手法と同等以上の性能を示すことを報告した。

近藤 誠（北大）は、突風に先行して雷活動が激化する現象である Lightning Jump (LJ) の物理的な理解をすることで悪天候を予測することを目標にした、気象雷モデル（Sato *et al.* 2019）による1994年9月8日の埼玉県美里町でのダウンバーストを模した理想実験を行った。理想実験では積乱雲の成長と突風を再現し、断続的な積乱雲の成長、4回のダウンバースト、LJが確認出来たことを示した。特に2回目のダウンバーストに先行してLJが発生することも示した。LJ発生時やダウンバースト発生時には氷粒子の電荷分離および霰の成長環境が関係していることを示した。

鎌田萌花（北大）は、雪の結晶が気温に依存する成長過程によって形状が異なることを計算可能な Process Tracking Model（Hashimoto *et al.* 2020）を用いて、将来気候において+4°C上昇した場合の冬型の気圧配置時に存在しうる結晶の形状と量を調べた。4°C上昇気候では、現在気候と比較して低温での昇華成長が減少し、雲粒捕捉成長と高温での昇華成長が増加したことを示した。このことは、角柱状結晶が減少し、雲粒付き結晶が増加することにつながり、地面に堆積

した後に結晶同士の接点が多くなり結合力のあるしっかりとした雪となるので、降雪系の弱層で起きる雪崩の発生数は減少すると考察していた。

岡崎 恵 (京大) は、降水物理量の基礎単位である粒径分布の形状に着目し、従来型の近似関数では表現できなかった二峰性分布に対する新しい近似関数を提案し、実際の観測事例に適用した場合の解析事例を示した。新関数を用いた台風の事例解析の結果より、層状性降雨と対流性降雨の遷移の過程で降水強度が減少するタイミングで二峰性分布が形成されることを示した。また、二峰性分布の形成メカニズムには降水強度の減少や衝突併合過程が複合的に関与していることを考察した。

板羽昌之 (e ロボティクス) は、大型ドローンを用いたやませの観測を目的とした福島大学との共同研究計画の取組を紹介した。やませの観測を想定した飛行実験では気象要素の3次元空間情報をリアルタイムで可視化することに成功し、実用化が見込まれる結果が得られたとのことであった。今後は飛行実験で見つかった課題を解決し、気象予測の高度化に向けたドローン気象観測システムの開発を行うとのことであった。

以上に示した発表を通して、災害につながる恐れのある雲降水現象に関する多角的な理解が深まった。特に高解像度のモデルの運用や高頻度観測を行うことが現象のメカニズム解明へつながることが示唆され、気象予測の精度向上へ向けた今後の発展が期待される。

(岡崎 恵)

4. 2日目第1セッション

2日目の第1セッションでは、超水滴法 (SDM; Shima *et al.* 2009, 2020) を用いた比較的小さなスケールの現象を対象としたモデルの性能評価と、全球気候モデルの不確実性に関する研究が発表された。

島 伸一郎 (兵庫県立大) は、離散化された粒子をラグランジュ的に追跡する粒子法に基づく確率的な雲微物理である SDM の現状と今後の展望を紹介した。詳細な雲微物理過程を低コストで扱える SDM は、近年著しい計算高速化に成功し、SDM による数値天気予報の実現可能性も高まっていることを報告した。今後の課題として、現実大気との比較と性能評価を詳細に行う必要性を指摘した。

谷口瑠奈 (兵庫県立大) は、氷晶に付着する過冷却水滴の質量と氷晶質量の比として定義されるライミング比の再現性を、SDM を用いて検証した。山岳性降雪

雲を対象とし実験を行った結果、現実の鉱物ダストの直径・数密度では観測結果と整合的なライミング比が再現されており、バルク法では表現できなかったライミング比の大きな霰粒子が形成されることを示した。

齋藤 泉 (名工大) は SDM を用いて、サブグリッドスケールの影響を取り入れるエディ・ホッピングモデル (Grabowski and Abade 2017) の性能検証を、直接数値シミュレーション (DNS) により実施した。粒径分布の広がり重要なパラメータである、過飽和度揺らぎの振幅とラグランジュ的自己相関時間 (τ_L) の変調を調査したところ、モデルによる解析解とほぼ一致することを示した。 τ_L に対する粒子の軌道変化の影響も考慮したより精緻なモデル開発に取り組むことを、今後の課題として挙げた。

川合秀明 (気象研) はこれまでほとんど陽に論じられることのなかった、数値モデルにおける「マイナーに見える取り扱い」の重要性を示した (Kawai *et al.* 2022)。固体降水が持つ放射効果の考慮の有無と比較して、確率密度関数 (PDF) 雲スキームにおける揺らぎ幅の下限値の設定や、積雲対流スキームからデトレインされた雲の大規模凝結スキームへの渡し方の違いがもたらす放射影響の方がはるかに大きいという結果を定量的に示した。「マイナーに見える取り扱い」のさらなる情報共有や議論の必要性を唱えた。

本セッションでは、SDM に関連する多くの最新の知見が共有された。どんな精緻なモデルであっても潜在する大きな不確実性を理解した上で、慎重に議論する必要性を再認識できる、非常に有意義なセッションであった。

(井村裕紀)

5. 2日目第2セッション

2日目の第2セッションでは、エアロゾル-放射・雲相互作用に関するモデルの精緻化についての総説をはじめ、都市域大気汚染が豪雨に及ぼす影響の推定、降水モデリングの差異が氷晶核粒子 (INP) の数濃度の気候影響に及ぼす影響、エアロゾル粒子と雲残渣粒子の個別分析等、エアロゾル-放射・雲相互作用についての様々な時空間スケールの発表が行われた。

松井仁志 (名大) は総説として、エアロゾルとその放射・雲影響の全球シミュレーションについて解説した。黒色炭素 (BC) の質量混合比と乾燥粒子直径を解像するエアロゾル2次元ピンモデル ATRAS を全球気候モデル CAM と結合した CAM-ATRAS (Matsui

2017; Matsui and Mahowald 2017) を使用した研究を紹介し、エアロゾル-放射・雲相互作用の大きな不確定要因であるエアロゾルの微物理特性やプロセスを精緻化する重要性を指摘した。BC の変質過程や積雲・混合相雲による除去過程に関するモデルの開発・改良に基づくエアロゾル-放射相互作用の推定の高度化、硫酸塩や有機エアロゾル等の新粒子生成や INP に関するモデルの開発・改良に基づくエアロゾル-雲相互作用の推定の高度化について解説した (Matsui and Liu 2022; Liu and Matsui 2022)。

梶川友貴 (筑波大) は、大気汚染物質が東京における都市域豪雨 (UHR) の雲微物理過程および化学特性に及ぼす影響について、非静力学モデル NHM および Online_NHM-Chem (Kajino *et al.* 2021) を用いて調査した結果を報告した。雲水の粒径分布やエアロゾルの生成量に課題があると指摘した上で、エアロゾルの化学特性・粒径分布を考慮した雲凝結核 (CCN) 活性を考慮した場合、雲水がより上空に輸送されることで霰の成長が促進され、領域最大 1 時間降水量が 22% 強化されたことを報告した。また、UHR の湿性沈着量に占める局地的な人為排出の寄与は 36~83% であり、特に UHR 事例については実試料と同様に湿性沈着量が多いことを示した。

井村裕紀 (東大) は、降水診断型モデルと降水予報型モデルの構造的な違いが INP 数濃度に対する感度実験の結果に及ぼす影響について、全球気候モデル MIROC6 を用いて調査した結果を報告した。感度実験において INP 数濃度を変更すると、それに応じて雲水の割合も変化した。これが雲・降水にどのように影響するかを確認するため、レーダー反射因子と雲内の光学的厚さを用いて雲の光学特性を可視化する手法である CFODD を用いて両モデルの比較を行った。INP 数濃度が小さい場合、診断型モデルでは降水効率の向上に伴う雲寿命効果が支配的に作用することで短波雲放射効果 (SWCRE) が低下し、予報型モデルでは降水効率の低下による下層雲量の増加と雲相割合における水雲の増加により SWCRE が大きくなることを示し、診断型モデルと予報型モデルでは相反する結果をもたらすことを指摘した。

足立光司 (気象研) は、2017~2021年に北極・スヴァールバル諸島のツェッペリン観測所で採取したエアロゾル粒子と雲残渣粒子について、TEM/STEM-EDS を用いて個別粒子分析を行い、両粒子を比較した結果を報告した (Adachi *et al.* 2022)。雲残渣粒子中では

海塩の個数比率がエアロゾル粒子中よりも高くなることや雲残渣粒子中では鉱物ダストの個数比率は気温が低下するほど高くなることを示した上で、海塩や鉱物ダストが CCN や INP として寄与していた可能性を議論した。また、エアロゾル粒子中での鉱物ダストと海塩との混合割合が 17% であった一方で雲残渣粒子では 43% に増加していることを報告し、雲粒子中での混合過程や氷晶形成過程への影響等を検討する必要性を指摘した。

本セッションでは、エアロゾル-放射・雲相互作用および降水過程に関する数値モデルの精緻化や、CCN や INP の化学成分や混合状態に注目した議論が行われた。依然としてエアロゾル-放射・雲相互作用の推定についての不確実性は非常に大きいのが、観測とモデルの連携の重要性を改めて確認した。

(梶川友貴)

6. 2 日目第 3 セッション

このセッションでは INP の観測と化学特性に着目した INP 能の地域や季節変動に関する研究が 3 件、エアロゾルと高濃度氷晶雲に関する研究が 1 件の計 4 件の発表があった。

當房 豊 (極地研) は、スヴァールバル諸島での INP の通年観測によって得られた季節変動について報告した。北極域下層雲が存在する温度域 ($-30 \sim 0^{\circ}\text{C}$) での活性を示す INP の数濃度を計測した結果、観測所における INP の数濃度は夏季になると増加し、冬季には減少することを示した。この要因として、夏季の地表が雪水に覆われておらず、露出した地表からバイオエアロゾルやダストが供給されること、冬季には、地表が雪水に覆われることで局地的なエアロゾルの供給がなくなり INP の数濃度が減少することが考えられると報告した。

岩田 歩 (気象研) は、都市域 (横浜) と遠隔地 (能登) で捕集した粒子の INP 濃度と粒子化学特性を比較した結果を報告した。生物起源粒子の影響については、捕集した粒子の INP 濃度と熱処理によって失活した INP 濃度の比較によって調査を行った。その結果、都市域における -15°C 以上での IN 活性を示す INP 濃度は遠隔地のものよりも高く、熱処理によって失活する高い IN 活性を示す生物起源物質を含む粒子濃度も都市域の方が高いという結果を示した。また、熱処理によって失活しない INP 濃度は両地域で異なるが、INP 濃度の変動は水溶性の鉱物成分濃度によって説明

できること示した。一方で、 -15°C 以下でIN活性を示すINP濃度の変動は粒子化学成分だけでは説明できないことも報告した。

折笠成宏(気象研)は、ジェット機の安全運航に問題となるアンビル雲を飛行中に遭遇する高濃度氷晶着氷の原因となる高濃度氷晶雲の実態を把握するために亜熱帯西部大西洋沖(フロリダ沖)とアフリカ北西沖(カーボベルデ)で実施された航空機観測について初期解析結果を報告した。高濃度氷晶雲の特徴として、氷水量が -40°C 以下で最大 $3\sim 3.5\text{ g m}^{-3}$ であったこと、霰粒子も検出されたこと、事例によってエアロゾルのCCN/INP特性が異なっていたことを示した。アフリカ北西沖では、サハラ砂漠からのダストによる高濃度のエアロゾルの層がしばしば観測されたことも報告した。今後は、CCN/INP特性の定量化、高濃度氷晶雲の微物理特性の明確化、高濃度氷晶雲のメカニズム解明に向けて取り組むと報告した。

田尻拓也(気象研)は、大気エアロゾルのCCN能およびINP能を定式化するために気象研で行っている地上モニタリング観測および室内実験の結果について報告した。この研究では、CCN能およびINP能のパラメータとして、吸湿度 k および氷晶核形成活性部位(INAS)密度の気温依存性に着目し、大気エアロゾルと各種エアロゾルとの比較評価を行った。その結果、月平均の大気エアロゾルの k に関しては、鉍物ダスト標準粒子や金属酸化物より高く、バイオエアロゾル相当以上であること、INAS密度に関しては、室内実験に用いた標準試料に比べて緩やかな温度依存性を示すことを報告した。

本セッションでは、主にINPに関する観測研究が報告された。INPの特性が観測から明確化され、そのINP能がより精緻に定式化されると数値シミュレーションにおける雲相の再現が向上し雲寿命や放射収支の表現がよくなることが考えられる。今後も観測に基づくエアロゾルからの雲粒・氷晶の発生プロセスの理解の向上に期待したい。

(近藤 誠)

7. まとめ

本研究集会では、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による研究発表が行われ、非常に活発な議論がなされた。感染症対策のために2020年度からはオンラインでの開催としており、Zoomのブレイクアウト

ルームを設定することで参加者が個別に議論をできる環境を用意した。

現地開催だった2019年度までは参加者数は30~45名ほどだったが、オンライン開催となってからは参加のしやすさから参加者数が2020年度は75名、2021年度は65名と大幅に増えた。今回(2022年度)からは研究会の名称を「エアロゾル・雲・降水に関する研究会」と幅広に設定したこともあり、参加者数は過去最多(88名)だった。学生参加者数も今回最多(35名)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。2023年度以降は状況を見ながら対面とオンラインを同時に行うハイブリッドでの開催することを検討している。

これまで本研究集会をきっかけとしていくつかの共同研究が実施されており、今回も総合討論で研究会の関係者らによる科研費研究課題の採択の報告があった。今後もこのような研究会を継続し、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を期待している。

本研究集会は国立極地研究所・研究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、この場を借りて御礼申し上げる。

(荒木健太郎)

略語一覧

IDVAR: 1-Dimensional VARIation 鉛直1次元変分法データ同化

ATRAS: Aerosol Two-dimensional bin model for foRmation and Aging Simulation エアロゾル2次元ビンモデル

BC: Black Carbon 黒色炭素

CAM: Community Atmosphere Model アメリカ大気研究センターのコミュニティ大気大循環モデル

CCN: Cloud Condensation Nuclei 雲凝結核

CFODD: Contoured Frequency by Optical-Depth Diagram レーダー反射因子と雲内の光学的厚さを用いて雲の光学特性を可視化する手法

DNS: Direct Numerical Simulation 直接数値シミュレーション

EDS: Energy-Dispersive x-ray Spectrometer エネルギー分散型X線分光計

GCCN: Giant Cloud Condensation Nuclei 巨大雲凝結核

INAS: Ice Nucleation Active Site 氷晶核形成活性部位

INP: Ice Nucleating Particle 氷晶核粒子

JPCZ: Japan sea Polar air mass Convergence Zone 日本海寒帯気団収束帯

LIDEN: LIghtning DEtection Network system 雷監視

システム

LWP : Liquid Water Path 鉛直積算雲水量
 NHM : Non-Hydrostatic Model 非静力学モデル
 PDF : Probability Density Function 確率密度関数
 PWV : Precipitable Water Vapor 可降水量
 SCALE : Scalable Computing for Advanced Library and Environment 理化学研究所を中心に開発されている次世代気象気候ライブラリ
 SDM : Super-Droplet Method 超水滴法
 SI・BI法 : 天空指標 (Sky Index, Brightness Index) を用いた画像解析手法
 STEM : Scanning TEM 走査型透過電子顕微鏡
 SWCRE : Short-Wave Cloud Radiative Effect 短波雲放射効果
 TEM : Transmission Electron Microscopy 透過型電子顕微鏡
 UHR : Urban-induced Heavy Rain 都市域豪雨
 ZDR : Differential Reflectivity レーダー反射因子

参考文献

- Adachi, K., Y. Tobo, M. Koike, G. Freitas, P. Zieger and R. Krejci, 2022: Composition and mixing state of Arctic aerosol and cloud residual particles from long-term single-particle observations at Zeppelin Observatory, Svalbard. *Atmos. Chem. Phys.*, **22**, 14421-14439, doi:10.5194/acp-22-14421-2022.
- 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.
- Grabowski, W. W. and G. C. Abade, 2017: Broadening of cloud droplet spectra through eddy hopping: Turbulent adiabatic parcel simulations. *J. Atmos. Sci.*, **74**, 1485-1493, doi: 10.1175/JAS-D-17-0043.1
- 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.
- Kajino, M. *et al.*, 2021: Comparison of three aerosol representations of NHM-Chem (v1.0) for the simulations of air quality and climate-relevant variables. *Geosci. Model Dev.*, **14**, 2235-2264.
- Kawai, H., K. Yoshida, T. Koshiro and S. Yukimoto, 2022: Importance of minor-looking treatments in global climate models. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **14**, e2022MS003128, doi:10.1029/2022MS003128.
- Liu, M. and H. Matsui, 2022: Secondary organic aerosol formation regulates cloud condensation nuclei in the global remote troposphere. *Geophys. Res. Lett.*, **49**, e2022GL100543, doi:10.1029/2022GL100543.
- Matsui, H., 2017: Development of a global aerosol model using a two-dimensional sectional method: 1. Model design. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **9**, 1921-1947.
- Matsui, H. and M. Liu, 2022: Substantial uncertainties in Arctic aerosol simulations by microphysical processes within the global climate-aerosol model CAM-ATRAS. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **127**, e2022JD036943, doi:10.1029/2022JD036943.
- Matsui, H. and N. Mahowald, 2017: Development of a global aerosol model using a two-dimensional sectional method: 2. Evaluation and sensitivity simulations. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **9**, 1887-1920.
- 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.
- 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**, 23, doi:10.1186/s40645-015-0053-6.
- Sato, Y., Y. Miyamoto and H. Tomita, 2019: Large dependency of charge distribution in a tropical cyclone inner core upon aerosol number concentration. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **6** (1), 1-13.
- 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.
- 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.
- 山下 恵・吉村充則, 2008: 全天カメラを用いた空の状態観測手法の開発. *写真測量とリモートセンシング*, **47** (2), 50-59.