

## 2021年度「エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会」 報告

佐藤 陽 祐<sup>\*1</sup>・大友 啓 嗣<sup>\*2</sup>・井村 裕 紀<sup>\*3</sup>・藤野 梨紗子<sup>\*4</sup>  
近藤 誠<sup>\*5</sup>・荒木 健太郎<sup>\*6</sup>・山下 克 也<sup>\*7</sup>・當房 豊<sup>\*8</sup>

### 1. はじめに

標題の研究集会は、世話人らの提案により、雲物理コミュニティ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。翌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）と名前を変え、年1回のペースで開催を続けている研究集会である。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だけでなく、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を目的としてきた。

そのため、研究集会で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で、2022年2月21日～2月22日に実施した。

今回は、昨年度に引き続き、オンライン開催とした。今回は学生18名を含む65名が参加、21件の研究発表（うち総説1件）が行われ、活発な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っている学生参加者も各講演の概要などの執筆を担当した。

（佐藤陽祐）

### 2. 1日目第1セッション

1日目の第1番目のセッションでは、大気海洋結合モデルを用いたエアロゾルの気候影響研究の今後の展望に関する総説や、気候モデルで降雨表現の違いがエアロゾル場に与える影響、雲凝結核（CCN）に対する混合相雲（過冷却水滴と氷晶が混在する雲）の応答、東京における夏季の短時間強雨の発生起源について発表が行われた。

竹村俊彦（九州大学）は総説として、大気海洋結合モデルを用いたエアロゾルの気候影響研究について解説した。エアロゾルの気候影響では、放射収支や大気温度などの速い応答だけでなく、海洋を介した遅い応答も考慮可能な、エアロゾルモジュール SPRINTARS（Takemura *et al.* 2005）が組み込まれた大気海洋結合

\*1（連絡責任著者）Yousuke SATO, 北海道大学大学院理学研究院, 研究集会世話人.  
yousuke.sato@sci.hokudai.ac.jp

\*2 Keishi OTOMO, 筑波大学.

\*3 Yuki IMURA, 岡山大学（現：東京大学）.

\*4 Risako FUJINO, 慶應義塾大学.

\*5 Makoto KONDO, 北海道大学.

\*6 Kentaro ARAKI, 気象研究所, 研究集会世話人.

\*7 Katsuya YAMASHITA, 防災科学技術研究所雪氷防災.

\*8 Yutaka TOBO, 国立極地研究所, 研究集会世話人.

© 2022 日本気象学会



第1図 研究集会参加者の集合写真.

モデル MIROC (Tatebe *et al.* 2019) のようなモデルを用いた研究が重要であること、また、気候影響の定量的評価の改善のためには、不確実性の大きい微物理過程に関する研究や、気候モデルで解像できない雲について数 km の空間解像度の NICAM (Satoh *et al.* 2014) や SPRINTARS (Takemura *et al.* 2005) を利用した実験が重要となることを説明した。

松原大樹 (東京大学) は気候モデル MIROC (Tatebe *et al.* 2019) を用いた数値実験により、降水スキームによる降雨表現の違いが、湿性沈着を介してエアロゾル場を与える影響について調査した結果を報告した。降雨表現の違いは、エアロゾルによる降雨抑制の大きさを変化させ、湿性沈着を介してエアロゾル平均場、エアロゾル直接・間接効果に影響することを示した。また、主に湿性沈着に関するフィードバックによって、異なる降水スキーム間でエアロゾルの直接・間接効果の放射強制力に正の相関が形成されていることも示した。

山崎耕平 (東京大学) は異なる雲相における CCN に対する混合相雲の応答について LES モデルを用いて調査した結果を報告した。混合相雲の光学的厚さに主に影響しているのは雲水であり、雲が氷相に近くなるほど鉛直積算雲水量の応答が小さく、アルベドの応答も小さくなったことが示された。また、海水上和海水上的ような環境場による潜熱フラックスの値の違いにより雲粒数濃度の応答が異なる可能性も指摘した。

大友啓嗣 (筑波大学) は過去16年間のレーダー観測データを用いて東京23区における夏季の短時間強雨の支配的な発生源について調査した結果を報告した。短時間強雨462事例のうち70%にあたる322事例は東京23区起源で、残り30%は山岳・平野部で発生し東京23区へ移動してきたことが示された。また、東京起源の強雨があった日は午前9時に館野の925hPa 高度で北東風が吹く割合が高く、地上における東と南寄りの海風収束との関連を指摘した。

このセッションでは、前半3件では主にモデルを、最後の1件では観測を用いた研究について発表があり、それぞれ活発な議論が行われた。発表では、湿性沈着やエアロゾル内部混合など、雲・降水・エアロゾルに関するプロセスの不確実性が大きな課題であることが分かった。観測とモデルの両方を用いた議論が、雲・降水・エアロゾルに関する研究の発展に繋がることを期待したい。

(大友啓嗣)

### 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・雲相互作用を介した、降水特性や光学特性に関する発表や、気象レーダー観測と高解像度数値モデル間での雲検証に関する発表など、エアロゾル・雲・降水に関しての様々な分野の報告があった。

藤野梨紗子 (慶應義塾大学) は、地表面観測データにおける降水量とPM2.5の関係について発表した。神奈川県藤沢市における観測データを解析した結果、降水開始時刻での劇的なPM2.5の濃度値減少に伴い、降水前後1時間にて20%ほどのPM2.5が減少したこと、また除去率の算出から、降水強度が大きくなるにつれ、除去率が大きくなることを示し、湿性除去過程が有効に働いていることが示唆される旨を報告した (Fujino and Miyamoto 2022)。

梶川友貴 (筑波大学) は、エアロゾル・雲相互作用を介して HULIS (フミン様物質) が降水特性に及ぼす影響の推定について発表した。Online\_NHM-Chem (Kajino *et al.* 2021) を用いて、HULIS が与える降水場への影響について数値実験を行った。HULIS の物性値及び最大濃度は実試料の化学分析値を報告した先行研究 (Salma *et al.* 2010; Dinar *et al.* 2006; 山之越ほか 2014; Sugo *et al.* 2019) から推定し、ケルビン効果と溶質効果について Szyszkowski の式 (Szyszkowski 1908; Salma *et al.* 2006) と吸湿パラメータ  $B$  を用いて吸湿成長と CCN 活性の計算を行った。その結果、粒子中 HULIS については、2~5割程度、降水中には最大でも5割程度の再現となったこと、また、HULIS のケルビン効果による降水量減少や、HULIS の溶質効果による降水量増大がみられたことを報告した。

山本真子 (東京理科大学) は、ラマン分光を用いたブラックカーボン (BC) の光熱変換の評価について発表した。大気中の BC 粒子は、太陽放射吸収による加熱作用により大気環境だけでなく雲の微物理特性にも影響を与えており、その光熱変換を調査することは加熱作用の把握に重要である。測定には、ラマン分光装置と、3種類の試料であるエタノールBC、菜種油BC、単層カーボンナノチューブ (SWCNT) が用いられ、測定結果を基に BC 表面の  $1\text{ m}^2$ あたりの温度上昇を見積もった。その結果、波長532nm のレーザーを20秒間照射して得られた室内実験の結果から見積もった太陽光による BC の表面温度上昇は  $10^{-6}\text{ K}$  と小さいオーダーであり、SWCNT と比べて BC の温度上昇が小さいことを報告した。

佐藤正樹（東京大学）は、関東圏ウルトラサイト観測と高解像度数値モデルとの連携研究（ULTIMATE）を紹介し、二重偏波ドップラー気象レーダーによる雲検証について発表した。レーダー観測とNICAM、気象庁領域モデル asuca、SCALE (Nishizawa *et al.* 2015; Sato *et al.* 2015) による数値モデルの比較の結果、モデル間の差異や、レーダーとモデル間の偏波パラメータにおける定量的な差異はみられるものの、観測でみられた前線性対流雲がモデルでも確認できたことや、偏波パラメータにおいても空間分布や定性的な値は再現ができることが報告された。

本セッションでは、観測・測定による研究や数値モデルによる研究、また両者を比較する研究のあらゆる面の重要さを再認識する場となった。観測研究とモデル研究の、それぞれの理解が進み、また、相互が連携することで、エアロゾル・雲相互作用への理解がさらに深まることに期待したい。

（藤野梨紗子）

#### 4. 2日目第1セッション

2日目の第1セッションでは、熱帯域と極域の雲・降水に関する研究と、ドローンや粒子撮像ゾンデなど観測手法に関する研究が発表された。

川合秀明（気象研究所）は、南大洋の雲が熱帯の降水に及ぼす影響について発表した。CMIP6で使用された大気海洋結合モデルMRI-ESM2.0では、南大洋の放射バイアスがCMIP5から大幅に改善されていることを報告した。モデルの雲に関するスキームを古いものに戻す感度実験を行うことで、熱帯収束帯の降水への影響を調査した結果、南大洋の放射バイアスの改善が熱帯域の降水の表現の改善にも繋がることが示された (Kawai *et al.* 2021)。

猪上 淳（極地研究所）は、南極地域観測事業における南大洋上の雲の観測計画について紹介した。これまで北極域を対象にCPSゾンデ (Inoue *et al.* 2021a) や船上エアロゾル観測 (Inoue *et al.* 2021b)、汎用ドローン (Inoue and Sato 2022) による大気・雲観測を実施してきた。南大洋では下層の水雲の発生状況が衛星観測から明らかになってきたが (Sato and Inoue 2021)、これまで開発した手法等を応用して船舶による大気・海洋観測を行い、雲形成過程を把握することで南極気候システムの変動メカニズムを解明することを目指している。

板羽昌之（eロボットクス）は、気温・湿度・気圧・

風の気象観測装置を搭載した大型産業ドローンによる隊列飛行による気象観測試験について発表した。このドローン5機を用いて2021年8月に福島県沿岸部で大気下層の大気場の3次元観測を行い、陸上と海上では下層気温に明瞭な違いがあることを確かめた。

鈴木賢士（山口大学）は、新しい降水粒子撮像ゾンデ (Rainscope) の開発と雲内の降水粒子の落下速度の測定の試みについて発表した。地上試験と降水雲への試験飛揚の結果、雨滴の落下速度はGunn and Kinzer (1949) に近い結果が得られた。また、降水粒子の落下速度の鉛直プロファイルが得られること、降雪時の地上試験から雨と雪の落下速度が異なることを確認できた。これにより雲内の微物理構造の理解に貢献できる可能性を示した。

本セッションでは、モデルの不確実性を低減するには物理過程の改善が必要であること、そのためには観測をベースにした雲の形成等のメカニズムの解明が必要であること、そしてそれを実現するためには観測手法の高度化が重要であることが改めて確認された。特に鈴木氏の発表ではこれまでの雲粒子ゾンデの開発状況のレビューが非常に充実しており、学生を含め参加者にとって極めて有益だったと思われる。各発表の議論も活発に行われ、観測・モデルの各手法で連携して研究を進めていくことが重要であることが再認識できるセッションだった。

（荒木健太郎）

#### 5. 2日目第2セッション

2日目の第2セッションでは現場観測や室内実験装置、数値シミュレーションといった様々な研究手法を用いた氷晶核粒子 (INP) についての研究、および北極域における最新の気候モデルの性能評価に関する研究が発表された。

當房 豊（極地研究所）は2019～2020年のMOSAICプロジェクトの観測期間において、北極域にあるスヴァールバル諸島で見られるINP数濃度の季節変動を報告した。春～秋の温暖な時期に雪氷が融解し地表面が露出することで、比較的高い温度で活性を示すINP数濃度が増加していることが示された (Tobo *et al.* 2019)。温暖化に伴い地表面が露出することにより高緯度起源の高い氷晶核能を持つエアロゾル量が増加すると、雲を構成する氷晶と水滴の割合にも影響が及ぶ可能性を示した。

松木 篤（金沢大学）は個別液滴凍結法を用いて、

アジアダスト（黄砂）飛来時とそうでない時における金沢大学で観測された INP の分析結果を報告した。黄砂飛来時にはバイオエアロゾルの影響は限定的であったが、非飛来時に着目したところ、高い氷晶核能を持つ INP 量と大気中の微生物量との間に正の相関が明瞭に見られることを報告した。また、弱い雨が降る時間や湿度の高い時間に、INP として機能するキノコの胞子のような粒子が多く放出される可能性を示した。

田尻拓也（気象研究所）は大気エアロゾルの混合状態に対する理解深化のため、ダスト標準試料の一種である ATD に硫酸アンモニウムを混合させた状態に着目した雲生成チェンバー実験の結果を報告した。エアロゾル単位表面積当たりの INAS 密度の気温依存性を見ると、ATD が硫酸アンモニウムと内部混合・外部混合した場合、ATD のみの場合とは INAS の立ち上がり異なるという結果が得られた。雲粒生成に引き続く内部凍結核形成の環境場依存性やエアロゾル組成への依存性をより詳細に理解するために、他の様々な粒子や実験環境における混合状態を調査する必要性を指摘した。

河合 慶（名古屋大学）は、全球エアロゾルモデルを用いてアジアダストが INP 数濃度の分布や雲、放射などに与える影響の調査結果を報告した。モデルでは日本付近の INP 数濃度を比較的精度良く再現できていることが確認された。アジアダストは他の発生源から放出されるダストと比較して、高い高度（低温域）により効率的に輸送されることから、混合相雲内で INP としてはたらくポテンシャルが高いことを示唆する結果が報告された。

井村裕紀（岡山大）は衛星観測データと気候モデル MIROC の比較を行い、従来の降水診断型モデル (Tatebe *et al.* 2019) と最新の降水予報型モデル (Michibata *et al.* 2019) で北極域の雲・降水フェーズの再現性にどのような変化が見られるのかについて報告した。予報型モデルでは雲量や降雪量で大幅な改善が見られたものの、高頻度の弱い雪や混合相雲内を占める過冷却水滴の割合の過小評価が確認されたことを示した。他のモデルが同様のバイアスを抱えている可能性や、従来の多くのモデルが気候感度を誤って評価している可能性を指摘した。

本セッションでは高緯度域で見られる氷雲・混合相雲に関する雲・降水過程や、その発生源となる INP についての知見が共有された。今回多くの研究で見られた多様なエアロゾルが持つ INP 能の差異や、様々な時

空間スケールにおける INP のより詳細な評価に加え、数値シミュレーションの物理過程が高度化されることで、未だに不確実性の大きい混合相雲の微物理過程に関する理解、およびより正確な気候変動予測への貢献につながることが期待される。

(井村裕紀)

## 6. 2日目第3セッション

2日目の第3番目のセッションではアイスコアと過去の雲量の関係についての研究が1件、気象モデルを用いた霰についての研究が1件、気象雷モデルを用いた研究が2件の計4件の発表があった。

渡利晃久（北海道大学）は、グリーンランド南東ドームアイスコアから復元されたエアロゾルプロキシを衛星雲データと比較し、過去の雲量の特定を行った。解析結果から、アイスコアに保存された硫酸イオンフラックスがグリーンランド南東沿岸域で雲量と有意な関係があることを報告した。これはエアロゾルの数濃度が増え、雲粒粒径が小さくなることで雲量が増加するという、Albrecht 効果 (Albrecht 1989) と矛盾せず、硫酸イオンフラックスが過去の雲量を特定する古気候代理指標（プロキシ）となる可能性があることを報告した。

近藤 誠（北海道大学）は、気象モデルを用いた北海道を対象とした1冬季実験から降雪における霰の寄与率を導出し、その変動要因を考察した研究について報告した。この研究では数値実験結果から導出された霰の寄与率の妥当性をディストロメータの観測との比較を通して確認した。ディストロメータの観測値から霰の寄与率を導出しており、霰の寄与率を導出するために、EM アルゴリズム (Katsuyama and Inatsu 2021) と自己組織化マップによる分類を用いた。また、霰の変動要因を解析するために、数値モデルで計算される液水の消費過程を解析した。解析の結果から、モデルで計算された霰寄与率は、観測された霰寄与率の変動をよく再現していたこと、霰の生成にはライミングに適した気温帯（ $-5^{\circ}\text{C}$ ～ $-15^{\circ}\text{C}$ ）に液水が存在することが必要であることを報告した。

富岡拓海（北海道大学）は、気象雷モデルによる雷回数予測結果と雷を予測しないモデルから雷回数を診断的に求める方法とを観測値と比較し、予測性能の検証を行った。予測性能の検証は夏季の豪雨に伴う雷、冬季の北海道と北陸における雷を対象として行われた。検証の結果、診断手法はどの事例でも雷分布の

捕捉性能は高いが雷回数は1桁多く計算されていた。一方で気象雷モデルでは夏季雷と初冬での低気圧に伴う積乱雲での再現性が高く、冬季北陸での背の低い積乱雲での雷の再現性は低いことを報告した。

佐藤陽祐（北海道大学）は、気象雷モデルで計算された気象場と雷の情報を用いて、オフライン化学輸送モデルに雷起源の窒素酸化物の発生を考慮した計算を報告した。対象事例は富士山山頂で雷起源とされる総反応性窒素酸化物を観測した事例（Wada *et al.* 2019）とした。この事例では化学輸送モデル（Kajino *et al.* 2021）による数値実験では、観測された窒素酸化物が再現されなかった。この事例に対して気象雷モデルと化学輸送モデルを組み合わせて数値実験を行った結果、この観測された窒素酸化物が再現された。この結果は窒素酸化物の計算に雷起源の窒素酸化物の発生の考慮が必要であることを示した。

本セッションでは、前半2件では観測データから雲に関する情報を抽出し、数値モデルの検証や、観測データと雲の関係を考察に利用していた。後半2件では、気象モデルに雷という新しい物理過程を導入することで既存の手法で再現できなかった現象の再現ができることが示された。ここでの議論を通して、観測で得られた情報の有効利用や数値モデルの発展につながることを期待したい。

（近藤 誠）

## 7. まとめ

今回で7年目となる本研究集会では、昨年に引き続きエアロゾル・雲・降水を対象とした実験・観測・シミュレーションと、多岐に渡るアプローチでの研究に関する発表が行われ、非常に活発な意見交換が行われた。昨年の研究集会ではオンラインであったため、発表者に対して個別に質問や議論をすることが難しいという意見があった。そこで本年度は、休憩時間に各発表者に対してブレイクアウトルームを設定し、個別の質問や議論ができるようにした。また昼休みの時間にブレイクアウトルームによる若手交流会の時間を設けて学生参加者が交流できるようにした。これらのブレイクアウトルームを利用した交流や議論によって昨年に比べて個別の議論・交流がやりやすくなった。

また今回の研究集会では、昨年の7件を超える10件の学生参加者による発表が行われた。これは全体の講演数21件に対してほぼ半数であった。同時に、研究発表に対しては学生参加者からの質問が年々増えてきて

おり、若手研究者や学生参加者に対する発表機会の提供や知識の伝達といった本研究集会の目的が徐々に達成されつつあることを実感している。

総合討論では、本研究集会のこれまでの振り返りと、今後について議論を行った。その中で、初めて参加する研究者、発足当初から参加している研究者、学生参加者とさまざまな立場の参加者から本研究集会に対する意見や要望があった。研究者からは基礎的な内容から研究レベルの内容まで気軽に質問や議論ができる本研究集会に対して好意的な意見と共に、このような雰囲気を保って今後も本研究集会を続けて欲しいという要望が出た。この点は研究集会を開催してきた世話人として嬉しい限りである。

一方、学生参加者や研究分野が異なる参加者からは、求められる知識レベルが高いといった意見も出た。さまざまなバックグラウンドや立場の参加者が一堂に会する本研究集会では、専門性の高い研究内容も含まれるため、すべての参加者が完全に理解できる話題を提供できているかと言えば、難しい部分もある。それらを認識した上で、学生参加者や若手研究者に配慮して研究集会を実施してきたが、そのような配慮が必ずしも十分でないことも実感しており、このような意見を今後の研究集会の運営に反映させていただければと考えている。

いずれにせよ、今後もこのような研究集会を継続し、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、当該分野の研究がますます活性化されることを願うばかりである。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。開催にあたって協力して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。

（佐藤陽祐）

## 略語一覧

asuca：気象庁非静力学モデル

ATD：Arizona Test Dust アリゾナテストダスト

BC：Black Carbon 黒色炭素

CCN：Cloud Condensation Nuclei 雲凝結核

CMIP5：Coupled Model Intercomparison Project Phase 5  
第5期結合モデル相互比較プロジェクト

CMIP6：Coupled Model Intercomparison Project Phase 6  
第6期結合モデル相互比較プロジェクト

CPS：Cloud particle sensor 雲粒子センサー

HULIS：Humic-Like Substances フミン様物質

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

INP : Ice Nucleating Particle 氷晶核粒子  
 LES : Large Eddy Simulation ラージ・エディター・シミュレーション  
 MIROC : Model for Interdisciplinary Research on Climate 全球気候モデルの1つ  
 MOSAiC : Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate  
 MRI-ESM2.0 : Meteorological Research Institute Earth System Model Version 2.0 気象研究所地球システムモデル  
 NHM : Non-Hydrostatic Model 非静力学モデル  
 NICAM : Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model 非静力学正二十面体格子大気モデル  
 PM<sub>2.5</sub> : particulate matter<sub>2.5</sub> 微小粒子状物質 (粒径が2.5 μm以下の粒子)  
 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  
 SPRINTARS : Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species 全球3次元エアロゾル気候モデル  
 SWCNT : Single-walled carbon nanotubes 単層カーボンナノチューブ  
 ULTIMATE : ULTra-sIte for Measuring Atmosphere of Tokyo metropolitan Environment 関東圏ウルトラサイト観測の包括的利用による高解像度数値モデルの連携研究推進

### 参考文献

- Albrecht, B. A., 1989: Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness. *Science*, **245**, 1227-1230.
- 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.
- Dinar, E., I. Taraniuk, E. R. Graber, S. Katsman, T. Moise, T. Anttila, T. F. Mentel and Y. Rudich, 2006: Cloud Condensation Nuclei properties of model and atmospheric HULIS. *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 2465-2482.
- Fujino, R. and Y. Miyamoto, 2022: PM<sub>2.5</sub> decrease with precipitation as revealed by single-point ground-based observation. *Atmos. Sci. Lett.*, e1088, doi:10.1002/asl.1088.
- Gunn, R. and G. D. Kinzer, 1949: The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. *J. Meteor.*, **6**, 243-248.
- Inoue, J. and K. Sato, 2022: Toward sustainable meteorological profiling in polar regions: Case studies using an inexpensive UAS on measuring lower boundary layers with quality of radiosondes. *Environ. Res.*, **205**, 112468, doi:10.1016/j.envres.2021.112468.
- Inoue, J., Y. Tobo, K. Sato, F. Taketani and M. Maturilli, 2021a: 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.
- Inoue, J., Y. Tobo, F. Taketani and K. Sato, 2021b: Oceanic supply of ice-nucleating particles and its effect on ice cloud formation: A case study in the Arctic Ocean during a cold-air outbreak in early winter. *Geophys. Res. Lett.*, **48**, e2021GL094646, doi:10.1029/2021GL094646.
- 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.
- Katsuyama, Y. and M. Inatsu, 2021: Advantage of volume scanning video disdrometer in solid-precipitation observation. *SOLA*, **17**, 35-40.
- Kawai, H., T. Koshiro and S. Yukimoto, 2021: Relationship between shortwave radiation bias over the Southern Ocean and the double-intertropical convergence zone problem in MRI-ESM2. *Atmos. Sci. Lett.*, **22**, doi:10.1002/asl.1064.
- Michibata, T., K. Suzuki, M. Sekiguchi and T. Takemura, 2019: Prognostic precipitation in the MIROC6-SPRINTARS GCM: Description and evaluation against satellite observations. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **11**, 839-860.
- 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.
- Salma, I., R. Ocskay, I. Varga and W. Maenhaut, 2006: Surface tension of atmospheric humic-like substances in connection with relaxation, dilution, and solution pH. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **111**, D23205, doi:10.1029/2005JD007015.
- Salma, I., T. Mészáros, W. Maenhaut, E. Vass and Z. Majer, 2010: Chirality and the origin of atmospheric humic-like substances. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 1315-1327.
- Sato, K. and J. Inoue, 2021: Seasonal change in satellite-retrieved lower-tropospheric ice-cloud fraction over the Southern Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **48**, e2021GL095295, doi:10.1029/2021GL095295.
- 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.

- Satoh, M. *et al.*, 2014: The non-hydrostatic icosahedral atmospheric model: description and development. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **1**, doi:10.1186/s40645-014-0018-1.
- Sugo, T., H. Okochi, R. Uchiyama, E. Yamanokoshi, H. Ogata, N. Katsumi and T. Nakano, 2019: The role of humic-like substances as atmospheric surfactants in the formation of summer-heavy rainfall in downtown Tokyo. *City Environ. Interact.*, **3**, 100022, doi:10.1016/j.cacint.2020.100022.
- Szyszkowski, B. von, 1908: Experimentelle studien über kapillare Eigenschaften der wässrigen Lösungen von Fettsäuren. *Z. Phys. Chem.*, **64**, 385-414.
- Takemura, T., T. Nozawa, S. Emori, T. Y. Nakajima and T. Nakajima, 2005: Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **110**, D02202, doi:10.1029/2004JD005029.
- Tatebe, H. *et al.*, 2019: Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. *Geosci. Model Dev.*, **12**, 2727-2765.
- Tobo, Y., K. Adachi, P. J. DeMott, T. C. J. Hill, D. S. Hamilton, N. M. Mahowald, N. Nagatsuka, S. Ohata, J. Uetake, Y. Kondo and M. Koike, 2019: Glacially sourced dust as a potentially significant source of ice nucleating particles. *Nat. Geosci.*, **12**, 253-258.
- Wada, R. *et al.*, 2019: Ground-based observation of lightning-induced nitrogen oxides at a mountaintop in free troposphere. *J. Atmos. Chem.*, **76**, 133-150.
- 山之越恵理, 大河内 博, 緒方裕子, 小林由典, 2014: 東京都心部における大気エアロゾル中水溶性フミン様物質の動態と起源の推定. *大気環境学会誌*, **49**, 43-52.
-