

2019年度「エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する 研究会」報告

佐藤 陽 祐^{*1}・當 房 豊^{*2}・山 下 克 也^{*3}・荒 木 健 太 郎^{*4}
 岩 崎 杉 紀^{*5}・三 隅 良 平^{*6}・大 竹 秀 明^{*7}・茂 木 信 宏^{*8}
 齋 藤 泉^{*9}・川 合 秀 明^{*10}・中 島 孝^{*11}・中 野 諭^{*12}
 森 樹 大^{*13}・橋 本 明 弘^{*14}・郭 威 鎮^{*15}・勝 山 祐 太^{*16}
 瀬 戸 里 枝^{*17}・古 藤 慎 之^{*18}・山 田 怜 史^{*19}・折 笠 成 宏^{*20}
 田 尻 拓 也^{*21}・遠 藤 幸 生^{*22}・近 藤 誠^{*23}・大 畑 祥^{*24}
 松 嶋 俊 樹^{*25}

1. はじめに

エアロゾル・雲・降水の相互作用がもたらす気候影響は、気候予測に関する大きな不確実性要因の一つであり、その科学的な理解度を向上させることが求められる。しかしながら、エアロゾル、雲、降水を扱う研究は、雲粒ひとつひとつの振る舞いを対象とするマイクロなものから、気候変動のような大きな時空間スケールを対象とする研究まで多岐にわたる。近年では、北極域を対象としたエアロゾル、雲とそれらの相互作用

に関する研究が精力的に行われはじめるなど、エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究の重要性が増し続けている。このエアロゾル・雲・降水の相互作用を対象とした研究を行う研究者が一堂に会してエアロゾル・雲・降水の相互作用研究の最新の知見を共有することを目的として「2019年度エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会」を2020年2月18日～2月19日に開催した (<https://www.mri-jma.go.jp/Dep/typ/araki/202002cloudstudy.html> 2020. 8. 3閲覧)。

*1 (連絡責任著者) Yousuke SATO, 北海道大学大学院理学研究院, 研究会世話人.

yousuke.sato@sci.hokudai.ac.jp

*2 Yutaka TOBO, 国立極地研究所, 研究会世話人.

*3 Katsuya YAMASHITA, 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター, 研究会世話人.

*4 Kentaro ARAKI, 気象研究所, 研究会世話人.

*5 Suginori IWASAKI, 防衛大学校.

*6 Ryohei MISUMI, 防災科学技術研究所.

*7 Hideaki OHTAKE, 産業技術総合研究所太陽光発電研究センター. (現 産業技術総合研究所福島再生可能エネルギー研究所)

*8 Nobuhiro MOTOKI, 東京大学大学院理学系研究科.

*9 Izumi SAITO, 名古屋工業大学.

*10 Hideaki KAWAI, 気象研究所.

*11 Takashi Y. NAKAJIMA, 東海大学情報技術センター.

*12 Satoru NAKANO, 兵庫県立大学シミュレーション学研究科.

*13 Tatsuhiro MORI, 東京理科大学理学部.

*14 Akihiro HASHIMOTO, 気象研究所.

*15 Wei-Chen KUO, 気象研究所.

*16 Yuta KATSUYAMA, 北海道大学理学研究院. (現 森林総合研究所十日町試験地)

*17 Rie SETO, 東京工業大学.

*18 Noriyuki KOTO, 筑波大学生命環境学群. (現 渋川市市民環境部)

*19 Reiji YAMADA, 兵庫県立大学理学部物質科学科.

*20 Narihiro ORIKASA, 気象研究所.

*21 Takuya TAJIRI, 気象研究所.

*22 Sachio ENDO, 東京大学大学院理学系研究科.

*23 Makoto KONDO, 北海道大学理学部.

*24 Sho OHATA, 名古屋大学宇宙地球環境研究所, 名古屋大学高等研究院.

*25 Toshiki MATSUSHIMA, 理化学研究所計算科学研究センター.



第1図 研究会参加者の集合写真。

2016年度に「エアロゾル・雲・降水の相互作用を語らう会」(荒木ほか 2017)として始まった本研究集会は5年目を迎え、若手研究者・学生22名を含む、45名が参加し、昨年を上回る26件の研究発表が行われ、研究に関する議論がなされた。発表は大学や研究所に所属する研究者のみならず、学生による研究発表が昨年以上を上回る数あり、盛況のうちに研究会を終えることができた(第1図)。本報告では26件の講演の概要と、それらの発表が行われた各セッションを通して得られた共通理解や今後の期待を紹介する。

(佐藤陽祐)

2. 講演概要

2.1 セッション1：全球モデル，リモートセンシング

セッション1ではエアロゾル・雲・降水の相互作用の研究が盛んに行われている全球モデルを用いた研究発表2件と全球モデルを含めたモデリング研究には不可欠なリモートセンシング(地上カメラによる雲画像撮影なども含む)を用いた研究発表が行われた。特に全球モデルで気候研究を進めてきた佐藤と川合の発表とその質疑では、エアロゾル・雲・降水の相互作用研究を行っている研究者とそれ以外の研究者で、エアロゾル・雲・降水の相互作用の捉え方が大きく異なっていること、またその相違によって相互の理解が進んでいないことが浮き彫りとなった。互いの違いを理解して研究を進めていくことの必要性が問われていると感じられた。

【総説】全球モデルでの雲・エアロゾル研究

本発表では佐藤(2019)に基づいて、全球モデルを用いた雲・エアロゾル相互作用、中でも2000年代から2010年代の初めにかけて定説とされてきた「エアロゾルの増加に伴って雲が増加する」ことがいつも起こるわけではなく、安定度などの条件によって雲は増加も

減少もし得ることを近年の研究をもとに紹介した。そして、これらの研究は従来の定説に関して再考を促していることを解説した。また、そのきっかけの一つとなった全球雲解像モデルと従来の気候モデルとの違いや、近年のモデル研究の進展について紹介を行った。

(佐藤陽祐)

「エアロゾルの雲への影響についての認識は適切か？」

以前より、エアロゾルに近いコミュニティと気象庁の現業などに近いコミュニティの間に、エアロゾルの雲に対する影響についての認識に、大きなギャップがあることがずっと気になっていた。エアロゾルに近いコミュニティでは、雲の生成にはエアロゾルの濃度が致命的に大きな影響を及ぼすと考える傾向が強い。一方、毎日の天気予報の曇りや雨の予報にエアロゾルの分布情報は一切考慮されていないがそれなりに精度の高い予報が出されており、気象庁の現業に近い人々はエアロゾルの変動が大局的な雲や雨の分布に無視できない影響を与えているとは基本的に考えていない。両者の認識のギャップを埋めるべく、標記のタイトルで講演した。

(川合秀明)

「衛星から観測された雲識別・雲特性の検証」

SGLIセンサーを搭載した「しきさい」衛星から得られた雲識別及び雲特性の検証手法の紹介と、検証結果について報告した。初期検証の結果、雲プロダクトについてはデータリリース精度を満足していることが明らかになり、JAXAからデータ公開がなされている。

(中島 孝)

「衛星搭載マイクロ波放射計を用いた陸域雲水量の推定手法の提案」

複数波長の衛星マイクロ波観測輝度温度から、陸域の雲水量を数km解像度で推定し、大気陸面結合モデルに同化する新たな手法を提案した。本手法により、海陸を含む時空間4次元的に連続した雲水量データの提供が可能となった(Seto *et al.* 2018)。

(瀬戸里枝)

「Kaバンドレーダとマイクロ波放射計を用いた雲水量推定方法の検証」

本研究では、Kaバンドレーダとマイクロ波放射計を用いて推定された雲水量を、東京スカイツリーにおける直接観測値を真値として検証を行った。結果は、推定値が観測値に対して全体的に過大評価をし、約223%の誤差が生じることを示した。

(古藤慎之)

「積乱雲の雲頂からジャンプする雲」

Jumping cirrus clouds (JC) という積乱雲の雲頂からジャンプする雲の連続写真から、例えば1つのJCから3~10トンの水を下部成層圏に輸送する可能性があることを報告した。発表内容は、Seguchi *et al.* (2019)と瀬口貴文氏の博士論文に沿ったものである。

(岩崎杉形)

2.2 学生参加者らによる自己紹介

昨年に引き続き、参加した学生らがスライド1~2枚で自己紹介の発表を行った。発表を行ったのは石川里桜(筑波大学)、稲垣実央(兵庫県立大学)、大友啓嗣(筑波大学)、後藤悠介(東京学芸大学)、篠原雅貴(京都大学)、谷口瑠菜(京都産業大学)、南 孝太郎(筑波大学)の7名である。この取り組みは、研究集会の目的の一つである、学生の発表機会創出を目指した取り組みの一つとして行った。本年は、昨年度の研究会(佐藤ほか 2019)にて自己紹介を行った学生が、研究発表(下記、近藤 誠、山田怜史による発表など)を行うなど、この取り組みの成果が現れていることが確認できた。

(佐藤陽祐)

2.3 セッション2:北極

セッション2では近年多くの国際共同研究プロジェクトが行われている北極域を主な対象とした研究紹介や今後の展望(新たな研究アプローチの導入の可能性など)についての議論が行われた。当房の総説では、北極域のエアロゾル粒子の雲凝結核(Cloud Condensation Nuclei:CCN)・氷晶核(Ice Nucleating Particle:INP)としての特性そのものの理解が発展途上であることが示された。これらの理解を深めることは、エアロゾル粒子の大気中での循環過程(湿性除去など)を解釈する上でも重要であることから、今後さらに重点的に研究を続けていく必要があることを参加者間で共有できた。

「【総説】北極域での雲凝結核・氷晶核の研究」

本講演では、北極域混相雲(過冷却雲滴と氷晶が混在する雲)の形成時にCCNあるいはINPとして働くエアロゾル粒子に焦点を当て、これまでの現地観測等で得られてきている科学的な知見の解説を中心に行った。CCNに関しては、累積モード(accumulation mode, 数十~数百nmの大きさ)のエアロゾル粒子が増加する春~初夏にかけて、北極域におけるCCNおよびINPの濃度やそれらの供給源に関しては、依然として不明な点が多く、その主な理由としては現地観測

が不足していることが挙げられる。そのような中、近年発表された研究事例(Jung *et al.* 2018; Koike *et al.* 2019; 当房 2019)からは、北極域のCCNやINPの濃度は大きな季節変動を示すことが見えてきていること、それには低~中緯度から長距離輸送されるエアロゾル粒子だけでなく、北極域内で発生するエアロゾル粒子も寄与している可能性があることなどを紹介した。

(当房 豊)

「Single-Particle Extinction and Scattering (SPES) 法の開発とエアロゾル・雲研究への応用可能性」

本発表では、空気や水などの流体中に浮遊する微粒子についての新しい汎用測定技術(Moteki 2020)を紹介した。外部混合状態で共存する各粒子種について粒子形状情報・複素屈折率・粒径別数濃度を同時推定できることを示した。

(茂木信宏)

「BarrowにおけるBC粒子の湿性沈着に関する研究」

アラスカのBarrowで長期地上観測した、大気中と降水中の黒色炭素(Black Carbon:BC)濃度の季節変化について報告した(Mori *et al.* 2020)。BCの湿性沈着量は、夏に年間の50%を占め、バイオマス燃焼によって放出されたBCの湿性除去が重要であることを示唆した。

(森 樹大)

2.4 大気化学会のロードマップについて

日本大気化学会が作成を目指している大気化学分野の将来構想に関する文書について、その内容と意図などの説明を行った。同時に、エアロゾル・雲・降水の相互作用を対象とした研究を行っている参加者に協力の要請をした。

(大畑 祥・松井仁志)

2.5 セッション3:降雪・豪雨

セッション3では水を含んだ雲が決定的な役割を果たす降雪と豪雨に関する研究発表が行われた。例年に比べ若手研究者による降雪を対象とした研究が増えており、古くから日本で行われてきた降雪研究の復活に向けて徐々に動き始めていることが実感され、質疑では、若手研究者をエンカレッジするコメントが多く寄せられた。

「降雪粒子の粒径・落下速度データへの確率分布フィッティング方法」

複数種の降水粒子で構成された粒径・落下速度の分布を説明する混合同時確率分布を推定するアルゴリズムを開発した(Katsuyama and Inatsu 2020)。また数

値実験により、新しいアルゴリズムの性能を評価した。
(勝山祐太)

「冬季北海道の降雪粒子を対象とした気象モデルの検証と降雪粒子の雲微物理特性」

冬季北海道の水相雲を対象として、モデルの雲微物理スキームの検証を地上観測との比較によって行った。2モーメントバルク法では粒径落下速度分布の再現性が高く、1モーメントバルク法では霰のパラメータを改良することで再現性が改善すること明らかになった。

(近藤 誠)

「首都圏における降雪結晶特性」

冬季首都圏の降雪結晶の特性を議論した。低気圧による層状性降雪では低気圧構造の違いにより低温型結晶の有無が明瞭に分かれ、積乱雲による対流性降雪では雲のライフステージの違いによりライミング率が変化することを示した。

(荒木健太郎)

「落下中の降雪粒子の雲微物理プロセスに関する調査研究」

落下中の降雪粒子の雲微物理量変化プロセスを調査するために、新潟県長岡市の高度の異なる2つの場所でディスドロメーターを用いた観測を行った。観測データを用いた初期的な解析の結果、雲微物理量の変化を議論するための事例が取得できていることが確認できた。

(山下克也)

「平成30年7月豪雨の雲微物理特性に関する数値実験」

平成30年7月豪雨と平成29年7月九州北部豪雨の再現実験を行い、雲・降水過程の違いを議論した。0°C高度から雲頂付近まで霰粒子と氷晶が共存していた後の方が雷発生には好都合であり、発雷数が前者で少なく後者で多いという観測事実と整合的であった。

(橋本明弘)

「令和元年台風第19号による箱根の記録的な大雨について～偏波レーダを用いた解析～」

令和元年台風第19号による箱根の大雨をXバンド偏波レーダで解析した結果、融解層より下では高度が1km下がるごとに9.2mm h⁻¹の割合で降水強度が増加していたことや、雨滴粒径分布の高度別の特徴が分かった。

(三隅良平)

2.6 セッション4：詳細モデリング

セッション4ではDNSやLES、粒子法モデル(超

水滴法)といった詳細モデル・高解像モデルを用いた研究紹介が行われた。質疑や発表への参加者の反応を見ると、このような詳細モデル・高解像モデルを用いた雲・エアロゾル・降水研究に対する理解度は、残念ながら高くないと感じられた。これは、世界ではこのような詳細モデル・高解像モデルを用いた研究が一般的になってきている現在において、日本のコミュニティが後れをとっていることを顕著に表していると言える。しかしながらセッション4の発表者は全て若手研究者であり、若手研究者の今後の活躍に期待したいと感じられるセッションであった。

「雲乱流チャンバー実験結果との直接比較による雲乱流統計理論に基づく雲粒粒径分布の検証」

雲乱流実験装置「パイチャンバー」から得られた雲粒粒径分布と、フォッカー・プラック方程式に基づく理論予測を比較した研究(Chandrakar *et al.* 2019)について紹介した。

(齋藤 泉)

「LESを用いた混合相雲へのエアロゾルの影響の研究」

混合相雲のモデル間相互比較(SHEBA: Morrison *et al.* 2011, M-PACE: Klein *et al.* 2009)の設定で、氷晶核と雲凝結核の数密度を変化させた数値実験をSCALE(Nishizawa *et al.* 2015; Sato *et al.* 2015)で行い、雲水・雲氷の組成によって雲凝結核の雲特性への感度が系統的に異なることが分かった。

(遠藤幸生)

「超水滴法を用いた孤立積乱雲に対するエアロゾル粒子の影響評価実験」

本研究では、エアロゾル粒子の数濃度が変化した場合の積乱雲の挙動の変化について調査を行った。その結果、対象とした事例ではエアロゾル数密度が50cm³付近で総降水量が最大となることが分かった。

(山田恰史)

「超水滴法を用いた雄大積雲のラージ・エディ・シミュレーション」

Small Cumulus Microphysics Studyで観測された雄大積雲を対象としたLESモデルの実験(Lashertrapp *et al.* 2005)を、超水滴法を用いて行った。解析の結果、エントレインメントで粒径分布の幅は増大し、均質的混合によって小さいサイズの方へと広がっていた。また粒径分布幅は観測に整合した。講演では、雲のVR動画(rikenchannel、微速度撮影された雲の様子を観察してみよう:「京」コンピューターを使った

シミュレーション編2, <https://youtu.be/dxoIdczz-gc>, 2020. 3. 3 閲覧) の紹介も行われた。

(松嶋俊樹)

「金星の雲の共凝結成長ダイナミクスにおける分岐構造の解析」

金星の物質循環に關与する雲粒の多峰性分布に關して、硫酸と水の2成分の共凝結成長ダイナミクスにおける分岐構造を解析し、2成分の飽和蒸気圧の温度依存性の差から雲粒が多峰性の分布をとり得る可能性を示した。

(中野 論)

2.7 セッション5: UAE プロジェクト, 太陽光発電

セッション5では気象研究所で行われているUAEを対象とした航空機観測や、航空機で行われるシーディングに關連する基礎研究の発表、さらには太陽光発電に關する研究発表が行われた。

太陽光発電に關する研究発表の質疑では、気象データに対する分野間の認識の違いが浮き彫りとなった。このような分野間の認識の違いは、セッション1のエアロゾル・雲・降水の相互作用に關する捉え方に關して同様の指摘がなされた。このような分野間の認識の違いはいたるところに存在している。質疑での議論を通して、これらの違いを埋めていくには時間を要するが、まず認識の違いをお互いを知ることができたという点、また相互に理解を進めるために、今後も互いの分野の交流が必要であるということで意見が一致することができた。その点で、本研究集会在このような相互理解に一定の役割を果たせたことを実感できるセッションであった。

「UAE 上空におけるエアロゾル・雲の直接観測」

夏季UAE山岳域に出現した日周対流雲を対象として、航空機観測による事例解析を発表した。対流トリガーの成因として温位偏差が陽に表れていない点や、上昇流コア内では周辺と比べて氷晶の数濃度が小さく粒径が大きい点を示し、数値実験と比較検証すべき特徴を報告した。

(折笠成宏)

「雲核計内における吸湿性フレアー粒子の雲核活性と雲粒粒径分布に關する数値計算」

パーセルモデル (Chen and Lamb 1994) を基に雲核計との相互比較用に開発したモデル (Yamashita *et al.* 2011) を使って、活性化された塩化ナトリウム粒子の最も大きな1%粒径を計算して、雲核計の結果と比

較することができた。今後は吸湿性フレアー粒子の吸湿度推定を行う予定である。

(郭威鎮)

「混合核の形態的特性と雲粒子生成に關する考察」

気象研によるこれまでの地上モニタリング観測から得られた代表的な大気エアロゾルのCCN濃度とINP濃度は、それぞれ 10^3cm^{-3} と 10^{-3}cm^{-3} のオーダーである。主要な氷晶発生過程である内部凍結モードの理解には、CCN・INP能を兼ね備えたサブミクロンの混合核の挙動把握が重要であり、解析結果をもとに議論した。

(田尻拓也)

「太陽光発電とエアロゾル・雲に關する実課題」

太陽光発電が導入された電力運用時の雲・エアロゾル・積雪に關する問題提起を行い、特に予測が大きく外れた事例として積雪の事例報告をし、太陽光発電システム上での積雪の有無、発電予測への課題を述べた。

(大竹秀明)

3. まとめ

本年度の開催で5回目を数える本研究集会は、修士論文の内容を発表した大学院生の発表が増え、学部生による研究発表も行われた。また金星の雲に關する研究や、太陽光発電に關する研究の話題提供など、雲・エアロゾル・降水に關連する幅広い研究テーマでの発表が行われた。

昨年この会の報告 (佐藤ほか 2019) でも記載した通り、この研究集会的目的は「エアロゾル・雲・降水に關するフランクで活発な意見交換の場を創出すること」に加えて、「学生の発表機会を創出し、エアロゾル・雲・降水研究の裾野を広げること」である。昨年の研究集会では、学生発表は修士課程の学生による発表のみであったが、今回の研究集会では学部学生も研究発表を行い、徐々にではあるが確実に研究の裾野が広がってきたことを実感できた。これは、この研究会を5年継続したことによって得られた成果であろう。

一方、総合討論では、本研究集会をきっかけにして立ち上がった共同研究が少ないということも話題になった。次の5年は、裾野を広げるという役割を保ちつつ、共同研究など、研究活動という観点からより直接的な連携につながる取り組みをしていくことが重要である。これらの共同研究の少なさは、セッション1、5の発表や質疑から明らかになったように、互いの研究に關する相互理解が進んでいないことに起因するこ

とが大きいように思われる。しかし同時に、若手研究者を中心にして、日本が世界から後れをとっている分野（エアロゾル・雲相互作用に関する高解像モデリング）や、日本の伝統はあるがしばらく研究が行われてこなかった分野（降雪研究）での研究が始まっている。彼らのような若手研究者の芽を摘み取ることがないように、研究コミュニティ間の相互理解を深め、若手研究者をエンカレッジできる共同研究の立ち上げに本研究集会所が寄与できれば研究会の意義が大きいものになるであろう。

いずれにせよ、今後もこのような研究会を継続し、エアロゾル・雲・降水に関する研究に取り組む機運が高まり続けることを切に願うばかりである。

最後に、本研究集会所は国立極地研究所・研究会制度の支援を受けて開催された。研究会の実施にあたり協力をいただいた国立極地研究所の関係者の方にこの場を借りて御礼申し上げます。

(佐藤陽祐)

略語一覧

BC : Black Carbon
 CCN : Cloud Condensation Nuclei
 DNS : Direct Numerical Simulation
 INP : Ice Nucleating Particle
 JAXA : Japan Aerospace Exploration Agency
 JC : Jumping Cirrus Cloud
 LES : Large Eddy Simulation
 M-PACE : Mixed-Phase Arctic Cloud Experiment
 SCALE : Scalable Computing for Advanced Library and Environment
 SGLI : Second generation GLocal Imager
 SHEBA : Surface Heat Budget of the Arctic Ocean
 UAE : United Arab Emirates

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会」報告. 天気, 64, 483-491.
 Chandrakar, K. K., I. Saito, F. Yang, W. Cantrell, T. Gotoh and R. A. Shaw, 2019: Droplet size distributions in turbulent clouds: experimental evaluation of theoretical distributions. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 146, 483-504.
 Chen, J.-P. and D. Lamb, 1994: Simulation of cloud microphysical and chemical processes using a multicomponent framework. Part I: Description of the microphysical model. J. Atmos. Sci., 51, 2613-2630.
 Jung, C. H., Y. J. Yoon, H. J. Kang, Y. Gim, B. Y. Lee, J.

Ström, R. Krejci and P. Tunved, 2018: The seasonal characteristics of cloud condensation nuclei (CCN) in the arctic lower troposphere. Tellus B, 70, 1-13.
 Katsuyama, Y. and M. Inatsu, 2020: Fitting precipitation particle size-velocity data to mixed joint probability density function with an expectation maximization algorithm. J. Atmos. Ocean. Technol., 37, 911-925.
 Klein, S. A. *et al.*, 2009: Intercomparison of model simulations of mixed-phase clouds observed during the ARM mixed-phase Arctic cloud experiment. I: single-layer cloud. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 135, 979-1002.
 Koike, M., J. Ukita, J. Ström, P. Tunved, M. Shiobara, V. Vitale, A. Lupi, D. Baumgardner, C. Ritter, O. Hermansen, K. Yamada and C. A. Pedersen, 2019: Year-round in situ measurements of Arctic low-level clouds: Microphysical properties and their relationships with aerosols. J. Geophys. Res. Atmos., 124, 1798-1822.
 Lasher-trapp, S. G., W. A. Cooper and A. M. Blyth, 2005: Broadening of droplet size distributions from entrainment and mixing in a cumulus cloud. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 131, 195-220.
 Mori, T., Y. Kondo, S. Ohata, Y. Zhao, P. R. Sinha, N. Oshima, H. Matsui, N. Moteki and M. Koike, 2020: Seasonal variation of wet deposition of black carbon in Arctic Alaska. J. Geophys. Res. Atmos., 125 (16), e2019JD032240, doi:10.1029/2019JD032240.
 Morrison, H. *et al.*, 2011: Intercomparison of cloud model simulations of Arctic mixed-phase boundary layer clouds observed during SHEBA/FIRE-ACE. J. Adv. Model. Earth Syst., 3, M06003, doi:10.1029/2011MS000066.
 Moteki, N., 2020: Capabilities and limitations of the single-particle extinction and scattering method for estimating the complex refractive index and size-distribution of spherical and non-spherical submicron particles. J. Quant. Spectro. Rad. Trans., 243, 106811, doi:10.1016/j.jqsrt.2019.106811.
 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.
 佐藤陽祐, 2019: 全球モデルによるエアロゾル雲相互作用に関する研究. 大気化学研究, (41), 041A01.
 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.

- 佐藤陽祐ほか, 2019: 2018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. 天気, **66**, 3-8.
- Seguchi, T., S. Iwasaki, M. Kamogawa, T. Ushiyama and H. Okamoto, 2019: Observation of jumping cirrus with ground-based cameras, radiosonde, and Himawari-8. J. Meteor. Soc. Japan, **97**, 615-632.
- Seto, R., T. Koike and S. Kanae, 2018: Representing cloud water content of extensive cloud systems over land using satellite-based passive microwave observations with a coupled land and atmosphere assimilation method. J. Geophys. Res. Atmos., **123**, 12829-12856.
- 當房 豊, 2019: 混相雲内でのエアロゾルの氷晶核としての役割. 大気化学研究, **41**, 041A02.
- Yamashita, K., M. Murakami, A. Hashimoto and T. Tajiri, 2011: CCN ability of Asian mineral dust particles and their effects on cloud droplet formation. J. Meteor. Soc. Japan, **89**, 581-587.
-