

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*

佐藤 陽 祐^{*1}・當 房 豊^{*2}・山 下 克 也^{*3}・荒 木 健 太 郎^{*4}
橋 本 明 弘^{*5}・梶 野 瑞 王^{*6}・中 島 孝 孝^{*7}・三 隅 良 平^{*8}
小 池 真^{*9}・岩 崎 杉 紀^{*10}・川 合 秀 明^{*11}・飯 塚 芳 徳^{*12}
高 橋 麗^{*13}・山 内 晃^{*14}・折 笠 成 宏^{*15}・齋 藤 泉^{*16}
藤 田 啓 恵^{*17}・酒 井 健 人^{*18}・郭 威 鎮^{*19}・田 尻 拓 也^{*20}
島 伸 一 郎^{*21}・岩 本 洋 子^{*22}

1. はじめに

エアロゾルと雲と降水粒子との相互作用は気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第5次評価報告書（Boucher *et al.* 2013）で報告されている通り、気候予測に関する最も大きな不確実性要因の一つであり、その科学的な理解度の深化が求められる。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。また、エアロゾル、雲、降水そ

れぞれを対象とした研究を個別に行っているために、相互作用の重要性が問われているものの、互いの研究の理解が希薄であるのが現状である。そこで、研究の相互理解と研究コミュニティの発展を目指し、エアロゾル・雲・降水に関する研究集会を開催した。

2019年2月20日～21日に行われた本研究集会では、22件の研究発表に加え、参加した学生による自己紹介発表を実施した。また当年度からの新たな試みとして、総説の発表（2.2節、2.16節）を企画し、エアロゾルと雲と降水に関する俯瞰的な情報の共有も試み

* A report on “Workshop on the Interaction of Aerosols, Clouds, and Precipitation in 2018 fiscal year”

^{*1}（連絡責任著者）Yousuke SATO, 北海道大学大学院理学研究院。

yousuke.sato@sci.hokudai.ac.jp

^{*2} Yutaka TOBO, 国立極地研究所。

^{*3} Katsuya YAMASHITA, 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター。

^{*4} Kentaro ARAKI, 気象研究所。

^{*5} Akihiro HASHIMOTO, 気象研究所。

^{*6} Mizuo KAJINO, 気象研究所。

^{*7} Takashi Y. NAKAJIMA, 東海大学情報技術センター。

^{*8} Ryohei MISUMI, 防災科学技術研究所。

^{*9} Makoto KOIKE, 東京大学理学系研究科。

^{*10} Suginori IWASAKI, 防衛大学校。

^{*11} Hideaki KAWAI, 気象研究所。

^{*12} Yoshinori IIZUKA, 北海道大学低温科学研究所。

^{*13} Rei TAKAHASHI, 筑波大学大学院生命環境科学研究科。

^{*14} Akira YAMAUCHI, 東京大学大気海洋研究所。

^{*15} Narihiro ORIKASA, 気象研究所。

^{*16} Izumi SAITO, 名古屋工業大学。

^{*17} Hiroe FUJITA, 日本環境調査研究所。

^{*18} Kento SAKAI, 兵庫県立大学シミュレーション学研究科。

^{*19} Wei-Chen KUO, 気象研究所。

^{*20} Takuya TAJIRI, 気象研究所。

^{*21} Shin-Ichiro SHIMA, 兵庫県立大学シミュレーション学研究科。

^{*22} Yoko IWAMOTO, 広島大学大学院統合生命科学研究所。

© 2019 日本気象学会



第1図 研究集会参加者の集合写真。

た。この集会には、大学や研究機関に所属する研究者、8名の学生(学部生4名、大学院生4名)に加え、民間企業からの参加者も含め34人が参加し、盛況に終えることができた(第1図)。本報告では各講演の概要を紹介する。

(佐藤陽祐)

2. 講演概要

2.1 趣旨説明

まず、世話人の當房から、本研究集会の趣旨についての紹介があった。本研究集会には、研究分野の異なる研究者やこれから研究を始める学生など様々な背景を持つ参加者が集まっているので、初歩的なことでも気軽に質問や議論をどんどんしてほしいという話がなされた。

2.2 【総説】エアロゾル・雲・降水相互作用の数値シミュレーション

大気中のエアロゾルは雲・降水過程との相互作用を通して雲の微物理特性や光学特性、降水機構に影響を及ぼす。本講演では、エアロゾル・雲・降水相互作用に関する研究のレビューを行い、基礎的なエアロゾルの間接効果の考え方や、雲・降水過程の数値モデリング手法、それらを用いた対流の活性化(convective invigoration)についての研究動向等を紹介し、プロセス研究・観測研究・数値モデル研究の連携の重要性について述べた(荒木・佐藤 2018)。

(荒木健太郎)

2.3 ミシガン工科大学滞在報告：雲乱流実験チャンパー「パイチャンパー」と関連研究について

報告者である齋藤は2018年9～10月にかけてミシガン工科大学のRaymond Shaw教授の研究室に滞在した。本発表ではその際見学した雲乱流実験チャンパー「パイチャンパー」と関連研究について説明した。当該チャンパーについてはChang *et al.* (2016)及び後続論文、またミシガン工科大学のWebサイト <http://phy.sites.mtu.edu/cloudchamber/> (2019.3.25閲覧)をご参照頂きたい。

(齋藤 泉)

2.4 Using Parcel Model to Simulate the Particle Distribution of Hygroscopic Flares in CCNC

CCN計における水過飽和度の下限値の制約から、 $0.3\mu\text{m}$ 以上の吸湿性フレアの活性化過程の計測は困難である。このため、Chen and Lamb (1994)のパーセルモデルを基にCCN計との相互比較用に開発したモデル(Yamashita *et al.* 2011)を用いて数値計算を行った。塩化ナトリウム(NaCl)と硫酸アンモニウム $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ について計算した結果、雲粒粒径分布は設定した水過飽和度と吸湿度によって分布が異なっており、モード径はNaClの方が大きいことを確認した。今後は比較事例を増やし、吸湿性フレアの粒径分布を変えた数値実験を行う。

(郭威鎮)

2.5 台風内部の雷にエアロゾルが与える影響評価

台風内部で発生する雷と電荷構造にエアロゾルが与える影響を、雷モデルを実装した気象モデルを用いて評価した。実験を行うために、雷モデルを次世代の気象気候ライブラリSCALE(Nishizawa *et al.* 2015; Sato *et al.* 2015)に実装した。この雷モデルを実装したSCALEを用いてエアロゾルの数密度を変えた数値実験を行い、台風内部の雷と電荷構造にエアロゾルが与える影響を評価した。実験の結果からエアロゾルが台風の強度に与える影響は小さかったが、電荷構造に与える影響が大きいことが示されたと報告した。

(佐藤陽祐)

2.6 アイスコアによる過去のエアロゾルと雲の関係について

2015年にグリーンランド南東部で掘削されたアイスコアは1957年から2014年までの近過去を±2か月の年代精度で復元でき、氷床に堆積してからのエアロゾルの再配分が極めて少ないという特徴を持つ。このアイ

スコアから季節変動スケールの硫酸イオン・硝酸イオン・アンモニウムイオン・海塩などの各種エアロゾルの沈着フラックスのデータベースが公開されている。1979年から2014年における夏の硫酸イオンフラックスとERA-Interim (Dee *et al.* 2011) の中層雲を比較したところ、硫酸イオンの供給地と思われる北米や欧州で有意な相関が見られた。2020年にはこの地域で2本目のアイスコアを掘削し、より古い過去までの各種エアロゾルフラックスのデータベースを構築する。

(飯塚芳徳)

2.7 新潟県上越市で測定した降水粒子の落下速度変化

2018年1月22日から24日にかけて新潟県上越市に南岸低気圧通過に伴う降雪(南低降雪)と冬型気圧配置時の降雪(冬型降雪)があった。この事例の降雪粒子の落下速度の鉛直変化を地上での降水粒子の落下速度測定値とウィンドプロファイラーの大気鉛直速度を用いて調べた。その結果、降雪粒子の落下速度に変化を及ぼす雲物理過程は、南低降雪では昇華凝結成長の寄与が大きく、冬型降雪では雲粒捕捉成長の寄与が大きいことが示唆された。

(山下克也)

2.8 外洋域におけるエアロゾル個数粒径分布と雲凝結核特性

海洋大気におけるエアロゾルと雲の相互作用について先行研究や観測事例を交えて紹介した。エアロゾルの前駆気体は、MBL内に豊富に存在する海塩粒子の表面に凝縮する。一方で、雲は前駆気体をMBLから既存粒子の少ない自由対流圏まで輸送し、新粒子生成を促す。生成されたエアロゾルはMBL内に取り込まれ、CCNとして働く。また、エアロゾルは雲過程を経ることで成長し、結果的に海洋大気エアロゾルに特徴的な二峰性の粒径分布を作る。

(岩本洋子)

2.9 高高度隊列飛行による三次元メソスケール空間情報収集ドローン型ロボットの開発

三次元メソスケール(水平2km~2000km×高度2000m)の情報は、気象をはじめとした様々な分野での応用が期待されるが、効率的な取得方法は確立されていない。そこで、ドローン型ロボットに各種測定機器を搭載して自動で隊列飛行させることにより、様々な三次元メソスケール情報をリアルタイムに収集するシステムの開発を進めている。これにより、集中豪雨・竜巻等の異常気象に対する予測精度向上や、有害ガ

ス・粉塵などの拡散挙動分布情報の取得が期待され、防災・減災対策向上につなげることが可能となる。

(藤田啓恵)

2.10 学生参加者らによる自己紹介

参加した学生らがスライド1~2枚で各自自己紹介の発表を行った。この取り組みは、研究集会の場で学生の発表機会を創出することを目的の一つとしている。発表は、学生がこれまでに行ってきた研究内容から、自己紹介、近い将来取り組む研究への意気込みなど、多岐にわたるユニークな発表が多く、盛況であった。

2.11 直接観測による北極下層雲の微物理特性とエアロゾル影響評価

ゼッペリン山観測所(北緯79度、東経12度、標高474m)で雲微物理量の連続直接観測を実施した。雲粒数濃度は夏に極大(65cm⁻³程度)、冬に極小(8cm⁻³程度)となる季節変化を示した。直径30nm程度の小さなエアロゾルまでが雲粒に活性化しており、新粒子生成が雲微物理に影響している可能性があることが明らかとなった(Koike *et al.* 2019)。

(小池 真)

2.12 夏季のスヴァールバル諸島での氷晶核に関する調査研究

夏季のスヴァールバル諸島・ニーオルスンの上空では、北極圏の水河前面に形成されるアウトウォッシュ・ブレーン等から発生するダストの影響によって、氷晶核(INP)の数濃度が大幅に上昇していたことを報告した(Tobo *et al.* 2019)。また、このような北極圏で発生するダストが、INPとしての高い活性を持っていることを示し、さらにその原因の解明に向けた新たな取り組みについて紹介した。

(當房 豊)

2.13 内部混合粒子の雲核・氷晶核能

これまで、純物質や標準粒子に関しCCN・INP特性の評価を進めてきた。一方、実大気中で競合的にCCN・INPとして働く粒子には、生成・輸送・滞留過程を通じて内部混合した粒子が含まれる。内部混合粒子を対象に定量的知見を得るため、高い吸湿度を持つ塩化カリウム(KCl)、塩化カルシウム(CaCl₂)等とINPとして働くヨウ化銀(AgI)から成る内部混合粒子を複数種調べた実験を紹介し、化学組成や混合状態が、粒径分布やCCN・INPとしての働きにどう繋がるのか、解析結果をもとに議論した。

(田尻拓也)

2.14 つくば地上モニタリング観測による実大気エアロゾルの雲核能・氷晶核能の変動

2012年3月から実施しているつくばでの地上モニタリング観測から、実大気中のエアロゾルに関するCCN能・INP能の季節変動を報告した。CCN能を表す吸湿度は、9月頃に極大、6月頃に極小となった。さらに起源となる気塊を調べる後方流跡線解析から、領域区分として海上が大、大陸遠方が小の傾向となった。INP能を表すINAS(乾燥粒子総表面積当たりのice nucleation active site数)密度は、年々変動が大きいものの5月と9月頃に高く、2月頃に低い傾向を示した。起源となる気塊の領域区分として中国東部や日本周辺で概して小となったが、季節分布として共通的な特徴は見出されなかった。変動要因として気象場や環境場との関連を調査することが課題である。

(折笠成宏)

2.15 東京における下層雲の雲粒数濃度の季節変化について

雲粒数濃度は、地球の放射収支や降水形成に影響する重要なパラメータである。東京スカイツリーの高度458mに取り付けた雲粒スペクトロメータ観測により、東京における下層雲の雲粒数濃度は平均213個 cm^{-3} (標準偏差177個 cm^{-3})であることが明らかにされている(Misumi *et al.* 2018)。本報告ではその季節変化について調べたところ、雲粒数濃度が冬期(2月)に高く、8~9月に極小となることが分かった。

(三隅良平)

2.16 【総説】大気エアロゾルの環境動態シミュレーション

同題で「安全工学」誌に寄稿した原稿(梶野 2018)に基づき総説として発表した。本稿は著者の20年近いエアロゾルのモデリング研究の経験から、専門家でない読者に向けて、詳細は省きながらも、網羅的かつより本質的な事項について解説したものである。発表ではエアロゾルの成長を支配する化学反応過程や様々な除去過程について概説した。また、強い非線形過程の例として、前駆物質(NO_x)が減少することでオゾンの生成量が逆に増加する現象や、既存粒子が増加することで新粒子生成が抑制され逆にCCN数濃度が減少する現象を紹介した。

(梶野瑞王)

2.17 エアロゾルが雲や降水に与える影響~平成27年9月関東・東北豪雨を対象として~

平成27年9月関東・東北豪雨を対象として、気象庁非静力学モデル(NHM)を用いたエアロゾルの感度実験を行った。その結果、エアロゾル数濃度と多降水・強雨(少雨・弱雨)には、正(負)の相関がみられた。すなわち、雲寿命効果と対流の活性化(invigoration)が確認された。またエアロゾル数濃度が増加すると、わずかだが台風第17号から吹き込む東風に伴う下層の水蒸気フラックスと比湿に増加傾向が見られたことから、invigorationにより上昇流が強化され、それに伴い下層収束が強化される可能性が示唆された。

(高橋 麗)

2.18 Particle based cloud modelling (粒子ベース雲モデリング)に関する国際研究ネットワークの立ち上げ

Particle-based cloud model(粒子ベース雲モデル)とは、雲微物理過程に関する運動論的な数値モデルを、粒子法を使って解く数値モデルのことである。Lagrange Cloud Model(LCM)とも呼ばれる。詳細な雲微物理素過程の直接計算を可能とすることから、近年particle-based cloud modelへの期待が高まってきている。講演では、Grabowski *et al.* (2019)に沿って、その特徴と将来展望を説明した。また、現時点で最も高性能な数値解法として、超水滴法(Super-Droplet Method, SDM; Shima *et al.* 2009)を紹介した。さらに、2018年末に立ち上げた国際研究ネットワーク(<http://particle-based-cloud-modelling.network/> 2019.3.25閲覧)の紹介をした。

(島 伸一郎)

2.19 氷水混相雲微物理過程に対する多孔性回転楕円体モデルの性能検証と改良

混相雲内の氷粒子の成長はとても複雑である。最も詳細な数値モデルとして、氷粒子を多孔性の回転楕円体で近似する粒子ベースモデルが知られている。しかし、そもそも混相雲の雲微物理過程の科学的理解は十分ではないため、多孔性回転楕円体モデルも確立されたものではない。そこで我々は、既往の数値実験や室内実験の結果との比較を通し、多孔性回転楕円体モデルの性能の検証と改良を行った。

(酒井健人)

2.20 UAE 雲観測事例に関する再現実験

アラブ首長国連邦(UAE)を対象とする気象再現

実験のために行った気象庁非静力学モデルの地表面パラメータの最適化と、それを適用して行った通年実験の検証、および、2017年9月に実施された航空機観測事例の再現実験の結果を示し、乾燥・半乾燥地帯における雲・降水の再現性を左右する因子や今後の課題について議論した。発表後、モデルの地面温度や気温に見られる夜間の低温バイアスに関する質問を受け、放射効果をもつエアロゾルの時空間変動をはじめ、モデルに組み込まれていない因子が原因である可能性を述べた。

(橋本明弘)

2.21 衛星からの雲特性観測による雲成長ステージの把握

本講演では、衛星観測で得られた雲特性のスナップショットから雲成長ステージを特定できるのではないかとという仮説に基づいた議論を行った。極軌道衛星搭載イメージャーと雲レーダーの複合解析により、イメージャーで推定した雲粒半径から雲の成長ステージを一意に特定できる可能性が示された。一方、ひまわり8号衛星の登場により、アジア・オセアニア・太平洋領域を10分という短い間隔で観測できるようになった。そこで、ひまわり衛星のスナップショット観測から雲の成長ステージを特定することで、雲モデル開発の一助とするアイデアに結びつく。講演では、森林火災から発生した煙が雲に変化していく様子の動画も示し、本アイデアのイメージを具体化した。

(中島 孝)

2.22 CloudSat とひまわり 8号を用いた雲物理特性の時間変化について

雲は地球の水循環・放射収支に大きな影響を与え、気候システムを変化させる。雲のこれらの影響は、雲の微物理特性に依存しており、実際の大气で起こっている現象を理解するために、雲内部の構造や雲特性の時間的変化を調べるのが重要である。本研究では、CloudSat 衛星から得られる雲の鉛直構造の情報と静止気象衛星ひまわり8号の10分毎に得られる雲特性データを組み合わせることで、雲の成長・減衰過程を衛星データから捉えられる可能性について紹介を行った。

(山内 晃)

2.23 中高緯度に広がる肉眼では見えない・見えにくい雲の衛星・地上観測

衛星搭載ライダ CALIOP では観測しにくい、衛星搭載 CloudSat では有意に観測できる雲の報告をし

た。CALIOP と CloudSat が推定する粒径分布の中では、このような雲の粒径は大きく個数密度は少なくなければならないので、便宜上これを Large-and-Sparse particle Cloud (LSC) と呼んだ。LSC の粒径の上下限は、半径が50 μm 以上で個数密度は 10^4m^{-3} 以下と推定された。Pruppacher and Klett (1997) といった先行研究と比較すると、典型的な巻雲より1桁程度個数密度は少ない。地上観測やパーセルモデルの結果から、LSC は上昇流によって生成されると考えることが妥当ではないかと報告した。

(岩崎杉紀)

2.24 温暖化時の北太平洋の海霧変化のメカニズム

気候変動に伴い、夏季の北太平洋の海霧分布がどのようなメカニズムで変化するかを、CMIP5マルチモデルデータを用いて明らかにした結果を報告した (Kawai *et al.* 2018)。調査の結果、北太平洋の高気圧の変化と、北太平洋の海霧分布の変化には、極めて明瞭な関係があることが示された。例えば、海面水温を上昇させた場合には、北太平洋の高気圧は弱体化し、それに伴い、北太平洋西部では南風 (暖気移流) が弱まることで海霧が減少し、東部では南風が強まることで海霧が増加する。CMIP5のほとんど全てのモデルでこうした変化は一致しており、信頼性は非常に高いことが示された。

(川合秀明)

3. まとめ

本年度の開催で4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、民間企業から観測機器の紹介をする発表があるなど、規模が拡大するだけでなく、発表内容に多様性が生まれてきた。この研究集会は前身である「エアロゾル・雲相互作用について語らう会」(2016年に開催、荒木ほか2017)を立ち上げた際に、世話人4人の間で、エアロゾル・雲・降水に関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を目的として掲げていた。4回目の開催となり複数の学生が研究発表を行い、活発な議論が行われ、目的に即した研究会に成長してきたことが実感できる。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ることを切に願うばかりである。

最後に、本研究集会は国立極地研究所・研究会制

度の支援を受けて開催された(研究集会 No. 14)。研究集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る。
(佐藤陽祐)

略語一覧

CALIOP : Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization

CCN : Cloud Condensation Nuclei

CMIP5 : Coupled Model Intercomparison Project Phase 5

ECMWF : European Centre for Medium Range Weather Forecasts

ERA : ECMWF Re-Analysis

INAS : Ice Nucleation Active Site

INP : Ice Nucleating Particle

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

LCM : Lagrange Cloud Model

LSC : Large-and-Sparse particle Cloud

MBL : Marine Boundary Layer

NHM : Non-Hydrostatic Model

SCALE : Scalable Computing for Advanced Library and Environment

SDM : Super-Droplet Method

UAE : United Arab Emirates

参考文献

荒木健太郎, 佐藤陽祐, 2018 : エアロゾル・雲・降水相互作用の数値シミュレーション. エアロゾル研究, 33, 152-161.

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.

Boucher, O. *et al.*, 2013: Clouds and aerosols. In Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley, Eds., Cambridge University Press, 571-657.

Chang, K. *et al.*, 2016: A laboratory facility to study gas-aerosol-cloud interactions in a turbulent environment: The II chamber. Bull. Amer. Meteor. Soc., 97, 2343-2358.

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.

Dee, D. P. *et al.*, 2011: The ERA-Interim reanalysis:

configuration and performance of the data assimilation system. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 137, 553-597.

Grabowski, W. W., H. Morrison, S. Shima, G. C. Abade, P. Dziekan and H. Pawlowska, 2019: Modeling of cloud microphysics: Can we do better? Bull. Amer. Meteor. Soc., 100, doi: 10.1175/BAMS-D-18-0005.1.

梶野瑞王, 2018 : 大気エアロゾルの環境動態シミュレーション. 安全工学, 57, 433-441.

Kawai, H., T. Koshiro, H. Endo and O. Arakawa, 2018: Changes in marine fog over the North Pacific under different climates in CMIP5 multimodel simulations. J. Geophys. Res. Atmos., 123, 10911-10924.

Koike, M. *et al.*, 2019: Year-round in situ measurements of arctic low-level clouds: microphysical properties and their relationships with aerosols. J. Geophys. Res. Atmos., 124, doi: 10.1029/2018JD029802.

Misumi, R., Y. Uji, Y. Tobo, K. Miura, J. Uetake, Y. Iwamoto, T. Maesaka and K. Iwanami, 2018: Characteristics of droplet size distributions in low-level stratiform clouds observed from Tokyo Skytree. J. Meteor. Soc. Japan, 96, 405-413.

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.

Pruppacher, H. and J. D. Klett, 1997: Microphysics of Clouds and Precipitation (2nd ed.). Kluwer Academic Publisher, 955pp.

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 contributes to the diversity in a large eddy simulation? Prog. Earth Planet. Sci., 2, 23, 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, 1307-1320.

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. Nature Geosci., 12, 253-258.

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.