

「エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会」報告*

荒木 健太郎^{*1}・當房 豊^{*2}・山下 克也^{*3}・佐藤 陽佑^{*4}
 鈴木 健太郎^{*5}・瀬戸 里枝^{*6}・川合 秀明^{*7}・山内 晃^{*8}
 小池 真^{*9}・三隅 良平^{*10}・三浦 和彦^{*11}・島 伸一郎^{*12}
 橋本 明弘^{*13}・田尻 拓也^{*14}・Tzu-Hsien Kuo^{*15}・岩田 歩^{*16}
 折笠 成宏^{*17}・木ノ内 健人^{*18}

1. はじめに

事の始まりは2013年の春頃だったと思う。本稿著者のうち、荒木、山下、佐藤が気象研究所で顔を合わせた際にこんな話をした。

「国内で雲物理やってる若手って少ないよね」
 「コミュニティがあるといい」
 「とりあえず気軽に意見交換できる場が必要だ」
 「じゃあ手始めにメーリングリストを作ろう」

そして、雲物理に関わりのある国内の若手から中堅の研究者に声をかけ、「国内若手雲物理コミュニティ」(以下、雲物理コミュニティ)を立ち上げた。これに伴いメーリングリスト(cloud_microphysics@googlegroups.com;以下、ML)を作成し、晴れて気軽に意見交換できる場が出来たかに見えた。

しかし、現実はその簡単ではなかった。雲物理コ

ミュニティMLが立ち上がってしばらくは、ML上での議論や論文紹介等の投稿があったものの、研究会の案内がごく稀に投稿される程度に消沈してしまった。このような状況で無情にも1~2年が経過し、危機感を覚えた荒木、山下、佐藤は、コロラド州立大学から日本へ帰ってきた當房を迎え、議論を重ねて次の結論を得た。

「とりあえず顔を合わせて気軽に意見交換できる場が必要だ」

かくして2016年2月に「エアロゾル-雲相互作用について語らう会」が開催された。国立極地研究所研究集会の枠組みで當房が研究代表者となり、雲物理関係者から計10件の講演があった。これに続き、2016年度は同様の枠組みで荒木が研究代表者となり、「エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会」(課題

* Report on “Workshop on the Interaction of Aerosols, Clouds, and Precipitation”.

^{*1} (連絡責任著者) Kentaro ARAKI, 気象研究所, araki@mri-jma.go.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} Yosuke SATO, 理化学研究所計算科学研究機構.

^{*5} Kentaroh SUZUKI, 東京大学大気海洋研究所.

^{*6} Rie SETO, 東京工業大学.

^{*7} Hideaki KAWAI, 気象研究所.

^{*8} Akira YAMAUCHI, 長崎大学.

^{*9} Makoto KOIKE, 東京大学理学系研究科.

^{*10} Ryohei MISUMI, 防災科学技術研究所.

^{*11} Kazuhiko MIURA, 東京理科大学.

^{*12} Shin-ichiro SHIMA, 兵庫県立大学.

^{*13} Akihiro HASHIMOTO, 気象研究所.

^{*14} Takuya TAJIRI, 気象研究所.

^{*15} Tzu-Hsien KUO, 気象研究所.

^{*16} Ayumi IWATA, 金沢大学.

^{*17} Narihiro ORIKASA, 気象研究所.

^{*18} Kento KINOUCI, 金沢大学.

© 2017 日本気象学会

番号28集10；以下、本研究集会）と名を改め、2017年2月16～17日に国立極地研究所で開催した。

そもそも、エアロゾルは雲凝結核（CCN）や氷晶核（IN）として核形成過程を経て雲・降水特性を変調させ、地球の放射収支や積乱雲・低気圧活動にも影響を及ぼすことが知られつつあるが、エアロゾル・雲・降水の相互作用についての科学的知見は不十分である。本研究集会では、エアロゾル・雲・降水の相互作用について、様々な異なるアプローチ（室内実験、現場観測、衛星観測、数値実験など）で取り組む研究者が集まり、各々の最新の研究結果を共有し、気軽に意見交換を行うことを目的とした。

本研究集会の世話人は荒木、當房、山下、佐藤の4名で務め、各関係者への参加を呼び掛けた。前年度は雲物理コミュニティMLのみで告知を行っていたが、今回はこの他にも様々なMLで告知をしてオープンな研究会としたため、前年度の倍近い計18件の講演があった。また、約30名の関係者の参加があり、盛況に終わることができた（第1図）。本研究集会のプログラムや講演資料、講演映像などは研究会ページ (<http://www.mri-jma.go.jp/Dep/fo/fo3/araki/201702cloudstudy.html>, 2017.5.2閲覧) に掲載しているので、参照されたい。本報告では、研究会の概要に加え、今後の雲研究の方向性等について述べたい。

2. 研究会の概要

2.1 オープニング

まず、本研究集会の研究代表である荒木から、これまでの経緯や本研究集会の目的について紹介があった。現在、エアロゾル・雲・降水に関する研究においては、室内実験等を通じたプロセス研究、航空機やレーダー、ゾンデ、地上、衛星等の様々な手法によるエアロゾル・大気・雲・降水の観測研究、データ同化や雲物理過程等も含む数値モデル研究が精力的に取り組まれている。高精度な気候変動予測や天気・気象災害予測のためにはこれらの研究が相互に協力してなされることが必須であり、本研究集会での意見交換を通じた互いの研究発展の可能性や、参加者間での協力関係の構築について呼びかけられた。また、本研究集会の目的である気軽に意見交換ができるよう、学会の場などではしにくいような初歩的な質問も積極的にしてほしいということが強調された。

2.2 第1日目（2017年2月16日）



第1図 研究会第1日目参加者の集合写真。

2日間にわたる本研究集会の第1日目では、全球規模のエアロゾル・雲・降水に関わる話題、衛星データを利活用したデータ同化や雲の気候学的特徴の話題、航空機等によるエアロゾル・雲の直接観測の話題があった。以降、各講演の要旨を紹介する。

エアロゾルの気候影響と雲・降水過程

鈴木健太郎（東京大学大気海洋研究所）、
竹村俊彦、道端拓朗（九州大学）、
五藤大輔（国立環境研究所）

本発表では、エアロゾルの気候影響評価について最近の研究動向が紹介された。気候変化を駆動する有効放射強制力の定量化には、エアロゾル変化による瞬時放射強制力に加えて、それに対する大気の速い応答を定量化する必要がある（Boucher *et al.* 2013）。この中で雲・降水過程は特に重要な役割を果たしている。本発表ではこの点に着目して、(i) 瞬時放射強制力は雲とエアロゾルの成層構造に依存し、観測手法やモデルに依存した不確かさが大きいこと（Oikawa *et al.* 2013）、(ii) 直接効果への速い応答はエアロゾルの光吸収特性に大きく依存し、雲・降水の異なる応答をもたらすこと、(iii) 間接効果への速い応答である雲水の応答は、従来考えられていたよりも小さく、現在の気候モデルは過大評価している可能性があること（Michibata *et al.* 2016）が発表者と共同研究者の最新の結果にもとづいて紹介された。

全球雲解像モデルを用いた雲エアロゾル相互作用に関する数値実験

佐藤陽祐（理化学研究所）、五藤大輔（国立環境研）、
道端拓朗、竹村俊彦（九州大学応用力学研究所）、
鈴木健太郎（東京大学大気海洋研究所）、
富田浩文（理化学研究所）、中島映至（JAXA/EORC）

本研究では全球雲解像モデル NICAM とエアロゾル輸送モデル SPRINTARS を結合した数値実験により、第 2 種間接効果の強さ (λ) を見積もった。同時に NICAM から見積もられた λ 、これまで気候予測に用いられてきた GCM (MIROC-SPRINTARS) で見積もられた λ 、および、A-train 衛星群の観測から見積もられた λ の比較を行った。この λ は $\lambda = d [\ln(\text{LWP})] / d [\ln(N_a)]$ で定義され (LWP は鉛直積算雲水量、 N_a はエアロゾル数濃度)、エアロゾルの変化に対する雲水量の変動を表す。第 2 種間接効果の理解は降水が抑制されることで雲水量が増えるというものであるため、従来の理解通りであれば、 λ は正になると考えられる。比較の結果から、観測から得られる λ は正と負の明確な領域分布を持っている一方、従来の知見に基づき開発されてきた既存の GCM から得られる λ は全球一様に正となっており、第 2 種間接効果を過大評価している可能性が示唆された。一方雲解像モデル NICAM から見積もられた λ は A-train 衛星から得られる領域分布の再現に成功していた。

高精度豪雨予測に向けた陸域の雲データ同化システム

瀬戸里枝 (東京工業大学)、小池俊雄 (東京大学)

洪水予測や最適な貯水池操作を実現するには、降水の時間特性に加えて、数時間先の降水の位置の高精度な予測が不可欠である。このためには、降水の位置と雲水量の情報を広範囲で均質に含む衛星マイクロ波観測の同化が有効である。しかし陸域では、陸面の射出が強く不均一なため、衛星から雲のマイクロ波シグナルを捉えることは困難である。そこで本研究では、異なる感度を持つ複数の波長のマイクロ波を利用して、陸面 (土壌水分) と大気 (LWP、雲域内の水蒸気と温位) を同時に同化するシステムを開発し、陸上の雲を精度良く捉えて同化することを可能とした (Seto *et al.* 2016)。本システムを複数の豪雨事例に適用した結果、雲・降水の水平分布と降水強度が非常に良く再現された。また同化後には雲・降水域に対応して上昇風・収束域が形成され、局地的な大気場も適切に修正されることが確認された。更に、気象庁の現業メソモデルと米国の全球モデルの解析場 (NCEP FNL) を初期値として利用した実験の比較により、降水強度の維持には、広域の大気場の表現が重要であることがわかった。

衛星から見た極域・高緯度の下層雲の特徴

川合秀明 (気象研究所)、簗 将吉 (気象庁)、
萩原雄一郎 (宇宙航空研究開発機構)、
神代 剛 (気象研究所)、
岡本 創 (九州大学応用力学研究所)

まず、南極海の雲は、気候モデルにおいて非常に再現が困難であり、世界の多くのモデルにおいて、この領域では短波放射の雲による反射が少なすぎることに説明した。また、CALIPSO 衛星データ (九州大学雲マスクデータ) を用い、南極海、北極海の下層雲の特徴を北半球中緯度の下層雲と比較した。北半球中緯度の雲の雲頂高度には明瞭な季節変化があるのに対し、南極海の下層雲は季節変化がほとんどない。また、夏季の南極海の下層雲は、高緯度ほど雲頂が高くなるという北半球では見られない性質がある (Kawai *et al.* 2015)。北極海では、海水の少ない場所の下層雲は中緯度下層雲と同様の性質を持つが、海水上の下層雲は中緯度下層雲とはかなり異なる性質を持つことがわかった。

CloudSat/CALIPSO 併用データから得られた太平洋上の多層雲特性について

山内 晃、河本和明 (長崎大学)、
岡本 創 (九州大学応用力学研究所)

近年では水雲や氷雲だけではなく上層雲と下層雲が鉛直的に重なり合う構造 (雲のオーバーラップ) についても注目を浴びてきている (Christensen *et al.* 2013; Li *et al.* 2015 など)。本研究では多層構造の場合の下層雲の特性について、CloudSat/CALIPSO 衛星データを使用した解析結果について紹介した。北太平洋上で雲がオーバーラップしている場合、下層雲の幾何学的厚さは単層雲に比べて減少しており、最大レーダー反射率も低くなる傾向が見受けられた。特にその傾向は冬季の北太平洋北部で顕著であり、これは冬季と夏季の上層雲形に違いがあることが原因であることが示唆される。これらの結果は、雲がオーバーラップした場合の下層雲は単層雲とは異なる特性を持っていることを示している。本研究で有益なアドバイスを多数頂いたため、そのアドバイスをもとにより研究を進展させていきたい。

西部北太平洋の下層雲の航空機観測

小池 真 (東京大学理学系研究科)、
AF2013S サイエンスチーム

下層雲は地球の放射収支に重要な役割を果たしている。これまで亜熱帯東太平洋の下層雲については、その放射収支への影響の重要性から、多くの航空機観測や数値モデル研究が実施されてきた。一方、同様に放射収支への重要性を持ちながらも、中緯度に位置する北太平洋の下層雲に関する研究は少なく、特に西部北太平洋の航空機からの直接観測は皆無である。私たちは2013年の7月に北海道東方沖で航空機観測 AF2013 Sを実施し、エアロゾル、雲、降水の直接観測にもとづき、それらの相互作用について調べた。観測の結果、降水性の雲は非降水性の雲と比較して雲粒数濃度や雲底下のエアロゾル数濃度が低く、降水によるエアロゾルの除去が降水しやすい雲微物理的状況を作り出すという正のフィードバックを生み出していることが確認された。また非降水性の雲の雲水量は高度とともに単調増加し、断熱的な雲の構造と定性的に整合的である一方、降水性の雲の雲水量は高度方向・水平方向に不均一な構造をもっていることが明らかとなった。これは亜熱帯の東太平洋ではほとんど見られていない特徴である。本研究では夏期の西部北太平洋の下層雲の雲微物理量やエアロゾルとの相互作用の基本的な描像を描くことができたが、今後、気候変化の上でも重要なこの海域の下層雲の研究を、日本が主導して進めていくことが重要である。

東京スカイツリーで観測された下層雲の特徴

三隅良平, 宇治 靖, 前坂 剛, 岩波 越
(防災科学技術研究所),
三浦和彦, 岩本洋子* (東京理科大学, *現 広島大学),
當房 豊, 植竹 淳 (国立極地研究所)

都市におけるエアロゾルやIN, 大気微生物, 下層雲の実態を解明するとともに、リモートセンシングや数値シミュレーションの検証データを提供する目的で、防災科学技術研究所, 国立極地研究所, 東京理科大学の三機関が共同で、東京スカイツリーに機器を設置して2016年6月から連続観測を始めた。設置している機器は、雲粒スペクトロメータ (DMT製 Fog Monitor), ドリズル計 (DMT製 Meteorological Particle Spectrometer), 雲凝結核計 (DMT製 CCNC), エアロゾルスペクトロメータ (TSI製 SMPS Spectrometer), 光学式エアロゾルカウンター (RION製 KA-03), エアロゾルサンプラー (東京ダイレック製 GS-10, 柴田科学製 LV-40BW) 等である。

東京スカイツリーで観測された境界層内の下層雲

は、雲粒数濃度の平均が 351.4 cm^{-3} 、有効直径の平均が $10.8 \mu\text{m}$ であり、大陸性の下層雲の一般的な値を示した。

山岳および都市大気エアロゾルの新粒子生成と雲生成に関する研究

三浦和彦, 岩本洋子*, 片岡良太, 佐藤光之介,
佐藤丈徳, 前田麻人, 小西理愛
(東京理科大学, *現 広島大学),
植松光夫 (東京大学大気海洋研究所),
三隅良平, 宇治 靖 (防災科学技術研究所),
當房 豊, 植竹 淳 (国立極地研究所)

放射強制力に与える雲調整効果に関しては、いまだ大きな不確かさを持っており科学的理解度が低い。そのため、さまざまな地域でCCN特性を測定する必要がある。そこで、都市大気に関しては東京スカイツリーで、山岳大気に関しては富士山頂にある気象庁旧測候所において観測した。どちらのプラットフォームも雲に覆われることが多く、雲生成過程の実験所として最適である。

2015年度7月、8月に富士山頂において、CCNカウンターで測定した雲凝結核数濃度 (N_{CCN}) と雲 (霧) 粒数濃度 (N_{fog}) の関係を調べたところ、雲水量がある程度高いと、 N_{fog} は N_{CCN} と比例することが示された。また、 N_{CCN} と雲粒の有効半径 (R_{eff}) の関係は、 N_{CCN} が高くなると R_{eff} は小さくなるというTwomey効果を確認することができた (藤田ほか 2017)。

2016年6月に東京スカイツリーにおいて、CCNカウンターで N_{CCN} を測定した。非降水性の雲に対し、防災科研グループが測定した N_{fog} と比較したところ、山頂のような N_{CCN} と N_{fog} の正の相関、 N_{CCN} と R_{eff} の負の相関は見られなかった。しかし、これは N_{CCN} の値が高いデータしかなかったため、 N_{CCN} が低い時は N_{fog} の値も小さくなり R_{eff} の値も大きくなる可能性はある。また、吸湿パラメータの値は富士山頂の値より低かった。

2.3 第2日目 (2017年2月17日)

本研究集会の第2日目には、エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する数値モデル研究、地上降雪粒子等の観測研究、雲物理の素過程に関する数値モデル・室内実験・野外観測研究、核形成に寄与するエアロゾルのモニタリング研究に関する話題があった。

超水滴法によるエアロゾル-雲相互作用の定量化に向けた取り組み

島 伸一郎 (兵庫県立大学)

超水滴法 (SDM) は粒子法による確率的な雲微物理モデルである (Shima *et al.* 2009)。これにより、比較的少ない計算コストで効率よく雲微物理素過程の直接計算を行うことが可能となった。本発表では、発表者が SDM を活用し行っている、エアロゾル-雲相互作用の定量化に向けた各種取り組みについて報告した。まずは、海洋性の低層雲への適用結果を幾つか紹介した。次に、SDM の水相過程への拡張の進捗状況や、電気過程やエアロゾル過程の精緻化に向けた将来展望を示した。最後に、ソースコードは学術目的や個人利用であれば無償で提供しており、ぜひ多くの研究者に利用してもらいたいと考えていることを説明した。

関東降雪の観測・数値モデル研究

荒木健太郎 (気象研究所)

関東の降雪現象は正確な予測が難しい現象であり、特に雲物理については理解が不十分であるため、観測・数値モデル研究を進めている。2014年2月14~15日の大雪事例では、山梨県と東京都で実施した降雪粒子・地上リモセン観測と数値シミュレーションから、地形性の下層雲形成による Seeder-Feeder メカニズム (落下する降水粒子が下層の雲に作用して降水効率が上がるメカニズム) が内陸部の大雪に重要であり、降雪粒子特性に地域差があることがわかった。同事例で IN 数 (氷晶発生数) を変える感度実験を行ったところ、IN 数が降雪量予測に大きな影響を与えることがわかった (Araki and Murakami 2015)。また、関東甲信の市民から降雪時の雪結晶画像を募集している気象研究所「#関東雪結晶 プロジェクト」(<http://www.mri-jma.go.jp/Dep/fo/fo3/araki/snowcrystals.html>, 2017.5.2閲覧) について紹介し、市民科学による新たな観測データ創出が降雪現象の実態解明や数値予報モデルの評価に有益であることを示した。

2014年2月大雪時の東京西部と山梨東部の降雪粒子種の特徴

山下克也, 中井専人, 本吉弘岐, 石坂雅昭

(防災科学技術研究所雪氷防災研究センター),

荒木健太郎, 斎藤篤思^{*1}, 田尻拓也, 村上正隆^{*2}

(気象研究所, ^{*1}現 仙台管区気象台,

^{*2}現 名古屋大学宇宙地球環境研究所)

2014年2月8, 9日の南岸低気圧に起因する大雪事例について、山梨県東部の甲州市, 東京都西部の奥多摩町及び青梅市, 新潟県中部の長岡市で得られた光学式ディストロメーターによって観測された降雪粒子の粒径と落下速度から、降雪粒子種の推定を行った。山梨県東部は、新潟県中部で観測されたような主に -20°C 以下の低温環境下で生成される砲弾, 角柱, 角板結晶とそれらが落下中の多湿環境で成長した鼓状, 広幅六花, 樹枝状結晶から構成される雪片であったものと推定された。東京都西部は降水開始からおよそ6時間は、山梨県東部と同様の降雪粒子種であったと推定された。6時間後からは、南岸低気圧の温暖前線面の下層の沿岸前線が存在しており、前線面付近に存在する過冷却雲粒をライミングして、雲粒付着雪片となっていたことが推定された。

吸湿性エアロゾルを用いた雲シーディング

橋本明弘 (気象研究所),

山下克也 (防災科学技術研究所雪氷防災研究センター)

吸湿性エアロゾルを用いた雲シーディングに関わる物理過程を領域気象モデルに導入するために、バックグラウンド (BG) エアロゾルと散布物質である塩粒子が外部混合した空気塊を一定の上昇速度で持ち上げ雲粒生成過程を再現する数値実験を、多次元ビン法微物理モデルを用いて行った。BG エアロゾルとして初期数濃度 9000 cc^{-1} の硫酸アンモニウム粒子を仮定した。塩粒子の初期数濃度を1から 3000 cc^{-1} , 上昇速度を 0.3 から 10 ms^{-1} の間で変化させ、生成される雲粒数濃度の変化を調べたところ、塩粒子が数 100 cc^{-1} の場合に、雲粒数濃度が極小 (雲粒サイズが極大) となり、雨滴生成強化に好都合であることを示唆していた。上昇速度に対しては、 0.3 ms^{-1} の場合に雲粒数濃度が最も小さくなった。この感度実験の結果を参照値として気象庁非静力学モデルに組み込み、吸湿性シーディングを3次元モデル内で再現できるようにした。予備的な実験結果として、浅い対流雲に対する吸湿性シーディングにおいて、塩粒子の散布量に応じて雲粒数濃度や雨滴の生成量が変化する様子を捉えることができた。

吸湿性粒子シーディングに用いる物質の物理化学特性と雲生成過程への影響

田尻拓也, Tzu-Hsien Kuo, 折笠成宏,

財前祐二, *村上正隆 (気象研究所,

*現 名古屋大学宇宙地球環境研究所)

雲物理学の観点からエアロゾルの間接効果の解明を図るボトムアップアプローチとして、室内実験による広範なエアロゾル種の CCN 能の計測に基づく、詳細雲微物理モデル (リファレンスモデル) の改良および発生初期の雲粒特性 (数濃度・粒径分布) に関する雲生成チェンバー実験との比較検証を軸に実験研究を進めている。背景エアロゾルへの人為起源エアロゾル排出による非意図的気象変化だけでなく、降水強化を目的とした吸湿性粒子シーディングによる意図的気象変化 (人工降雨) に関してもこの研究手法は有効である。

UAE 政府による「降雨強化科学プログラム」(<http://www.uaerep.ae/>, 2017.5.2閲覧) のもとで 2016 年から開始した研究プロジェクト「乾燥・半乾燥地域における降水強化に関する先端的研究」の一環として、取り組んでいる室内実験のうち、暖かい雲へのシーディングに用いる物質の CCN 能の評価結果を紹介した。実用的な雲シーディングスキームを構築するため、吸湿性粒子と同時に大気中に散布する固結防止剤やその他の含有物質との混合状態を考慮したシーディング効果について、今後リファレンスモデルによる数値実験を行っていききたい。

Cloud condensation nuclei (CCN) and ice nuclei (IN) abilities of Al_2O_3 and Fe_2O_3 using MRI dynamic cloud chamber and IN counter

Tzu-Hsien Kuo, *村上正隆, 田尻拓也, 折笠成宏
(気象研究所,

*現 名古屋大学宇宙地球環境研究所)

酸化アルミニウム (Al_2O_3) および酸化鉄 (Fe_2O_3) 粒子は、自然界や工業地域の近郊で観測されるものである。後者は人為的排出であり、エアロゾル・雲相互作用への影響があるかもしれないが、この観点からの詳細に調査された研究事例は少ない。本研究では、 Al_2O_3 および Fe_2O_3 粒子の粒径分布・CCN 能・IN 能と言った物理化学特性を CCN 計、気象研の雲生成チェンバー・連続流熱拡散型氷晶核計 (CFDC INC) およびその他のエアロゾル計測装置を用いて調査した。

結果として、吸湿度 (hygroscopicity) パラメータ κ 値は 0.01 と実験用ダスト粒子と同等であり、大気エアロゾルの典型的な値よりも小さな値であった。雲生成チェンバー実験から、 Al_2O_3 の 3 事例では -20°C より高温、二種類の Fe_2O_3 の各事例からは -25°C より高温で連続した氷晶発生を計測した。氷晶核活性化サイ

ト (INAS; 乾燥粒子総表面積当たりの IN active site 数) 密度の気温依存性は、イライト粒子 (大気中を浮遊するダスト粒子の代用試料) と比較的類似していた。CFDC INC 計測 (試料粒子のカットオフ径は $1\ \mu\text{m}$) より、二種類の Fe_2O_3 が -35°C より高温では良い IN ではなかったのに対して、 Al_2O_3 はおよそ -30°C から IN として働くことが示唆された。僅かな先行研究の結果とは異なり、これらの金属酸化物は対流圏中下層において有効な IN であるかもしれない。

今後は、計測に基づく吸湿度パラメータ κ と INAS 密度を数値モデルに適用することで、室内実験と数値シミュレーションとのより良い関連付けを行い、更なる微物理過程の解明を進めたい。

単一液滴凍結法に基づく、大気中氷晶核粒子における個別粒子特性の解明

岩田 歩, 松木 篤 (金沢大学)

大気中の氷晶形成の予測は、未だ不確定性が大きく、実大気中の IN の理解が必要不可欠である。そこで今回、黄砂飛来日 (2016 年 2 月 28 日および 4 月 10 日) において金沢大学屋上にてインパクト捕集した実大気エアロゾル粒子 (粒子直径 $>1.1\ \mu\text{m}$) において、 -30°C までに IN 活性する粒子を詳細に分析するため、個々のエアロゾル粒子をモニタリングしながら凍結することのできる個別液滴凍結法を用いた。凍結した大気エアロゾル粒子に対して、原子間力顕微鏡、顕微ラマン分光法、エネルギー分散型 X 線分光法による個別粒子分析を行った。その結果、IN 活性粒子の約 55% が鉱物粒子であったものの、それらの鉱物組成の違いによる氷晶形成への影響は見受けられなかった。非凍結粒子においては、海塩粒子が最も多く観察された (58%)。また大気中における海塩粒子との内部混合は、IN 活性粒子において多く観察された鉱物粒子などの IN 活性を阻害することが示唆された。また今回示した個別液滴凍結法により、これまで室内で実験が行われた単一組成のエアロゾル粒子による氷晶形成の実大気中での実証や氷晶形成に及ぼす粒子の混合状態の重要性を示すことができた。

大気中での氷晶核数濃度のモニタリング体制の構築

當房 豊 (国立極地研究所)

最近の研究では、フィルター上に捕集されたエアロゾル粒子に対して、水滴凍結法 (エアロゾル粒子を含む水滴を低温プレート上で冷やす方法) を適用するこ

とにより、大気中のエアロゾル粒子の数濃度を計測できることが示されてきている。本発表では、東京スカイツリー観測所（2016年8月に開始）と北極圏のスパールバル諸島・ニーオルスンのゼッペリン山観測所（2017年3月より開始予定）の2箇所にフィルターの自動交換が可能なエアロゾルサンプラーを設置することで、連続的にエアロゾル試料を捕集し、それらを独自に改良した水滴凍結法（Tobo 2016）を用いて分析することによって、世界的にも例のない「氷晶核数濃度の通年モニタリング」を行う構想について紹介した。

つくばでの地上モニタリング観測によるエアロゾル・雲核・氷晶核数濃度の変動

折笠成宏，斎藤篤思^{*1}，山下克也^{*2}，田尻拓也，
財前祐二，Tzu-Hsien Kuo，村上正隆^{*3}
（気象研究所，^{*1}現 仙台管区气象台，
^{*2}現 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター，
^{*3}現 名古屋大学宇宙地球環境研究所）

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・CCN・IN数濃度の季節変動や日変化の結果を中心に報告した。

全期間を通じた数濃度の中央値（但し月平均値の統計，以下同様）として、CCN数濃度は水過飽和（SSw）0.5%設定時で約 2300 cm^{-3} となり、北東アジア域や北半球汚染大気に特有な高濃度の値といえる。IN数濃度は活性化温度（ T ） -25°C 、SSw=0~5%設定範囲で約 5 L^{-1} となり、北半球での典型的な値といえる。季節変化として、CCN数濃度は11~3月に極大、8~9月に極小となり、一方でIN数濃度は年々変動が大きく、5~6月にやや極大となる傾向が見られた。

さらに、CCN能として吸湿度の特徴を調べ、吸湿度は中央値として0.1（SSw=1.0%）~0.35（SSw=0.1%）の範囲を占め、全体的には過飽和度が増加するにつれ吸湿度は減少する傾向が見られたものの、外れる傾向を示すものも一部あった。IN能としてINAS密度の特徴を調べ、INASは中央値として 1×10^7 （ $T=-15^{\circ}\text{C}$ ）~ $4\times 10^7\text{ m}^{-2}$ （ $T=-35^{\circ}\text{C}$ ）の範囲を占めたが、ダストと比べオーダーが1以上小さく温度依存性は弱い結果となった。

能登半島での地上通年観測に基づく雲粒初期成長の時間的特徴

木ノ内健人，表野宏之，古家正規，

鶴丸 央，松木 篤（金沢大学）

エアロゾルはCCNとして働き、雲の微物理構造や水循環を変化させることで、気候に対する間接効果を持つ。しかし、エアロゾルの化学組成が雲粒初期成長に及ぼす影響は未解明であり（Shantz *et al.* 2010）、雲粒初期成長の抑制が起きた場合には雲粒濃度と粒径分布に大きな影響を与えると示唆されている（e.g., Lance *et al.* 2004）。本研究は粒径選別したエアロゾルのCCN活性、活性化した雲粒径とPM1.0（粒子直径が概ね $1.0\text{ }\mu\text{m}$ 以下のエアロゾル）の化学組成を同時通年観測することで、エアロゾルの組成による雲粒成長への影響とその季節変化を捉えることを目的とした。観測は、石川県珠洲市の先端に位置するNOTOGROで行い、エアロゾル数粒径分布、CCN数濃度及びCCNから活性化した雲粒径、PM1.0化学組成はそれぞれSMPS、CCNC（CCN-100、DMT）、ACSM（Aerodyne Inc.）を用いて測定した。

硫酸アンモニウムから活性化した雲粒径（DAS）と実大気エアロゾルから活性化した雲粒径（Dambient）を比較すると、冬季以外の季節ではDambientはDASに比べて顕著に小さな値をとり、雲粒初期成長が抑制される時間があった。この雲粒径の変動はPM1.0に占める有機物の割合の増減と相関があり、ACSMから得られた質量スペクトルを解析したところ、雲粒初期成長が抑制される時間には疎水性の特徴を示す有機物のスペクトルの割合が高くなることが分かった。

3. 今後の雲研究の方向性について

本研究集会では国内で雲研究に携わる関係者が多く集まり、多岐にわたるアプローチの雲研究の取り組みや最新の成果について紹介され、活発な議論がなされた。趣旨説明で初歩的な質問も積極的にを行うよう呼びかけていたため、プロセス研究、観測研究、数値モデル研究の各アプローチ間で初歩的な質問も含めてやりとりでき、また学生からの積極的な質問もあり、2日間にわたって濃密で良質なセミナーのような雰囲気で行うことができた。

この中で特に印象的だった話題を紹介しておきたい。いくつかの講演では全球規模のエアロゾル・雲・降水過程についての話題があり、衛星観測と数値モデルによる研究が進められている。その中では主に雲水に着目してエアロゾルの第2種間接効果の議論がなされているが、氷雲を介した影響についてはまだ理解が

進んでいないのが現状である。一方、下層の水雲についても西部北太平洋をはじめ、雲物理的特徴についての航空機観測の行われていない未開の地がある。衛星観測データの評価も含め、航空機観測などをはじめとする雲の直接観測の重要性が再確認された。

また、東京スカイツリーや気象研究所、NOTO-GRO、北極圏など、国内外でのエアロゾルや雲のモニタリング観測が始められてきている。特に CCN、IN についてのモニタリング観測は世界的にも新しい試みであり、これらの観測結果や室内実験結果を用いた数値モデルにおける雲物理過程の高度化が望まれる。精緻な過程を導入したリファレンスモデルに加えて、メソモデル・全球モデル等の水平解像度や対象とする現象に応じて最適なパラメタリゼーションを開発することが重要である。これらの数値モデルの結果を検証するためにも観測が必要不可欠であることは言うまでもないが、数値モデルの雲物理過程を実際の現象で検証しようとする際には、まず大気場が正確に予測できていることが前提となる。そのため、データ同化研究とも連携して研究を進めることも求められるという意見があった。

エアロゾルの第2種間接効果は全球規模の気候変動影響だけでなく、総観・メソスケールの現象に対しても影響を及ぼすことがわかってきている。特に CCN については様々な観測・数値モデル研究が進められているが、IN の影響について議論している例は多くはない。そもそも氷相の雲物理過程に関しては、関東の降雪現象をはじめとして物理特性の理解が不十分なものも多い。そのため、氷相に着目したエアロゾル・雲・降水の相互作用に関して、総観・メソスケールの現象毎にどのような特性があるかの実態解明についても進めていく必要があるだろう。

現状ではプロセス研究、観測研究、数値モデル研究の各アプローチにおいて、国内で同一なアプローチを行っている研究グループでは協力して研究を進められているが、異なるアプローチを行っているグループとの連携はなかなか出来ていない印象があった。しかし、本研究集会を通して互いの最新状況を把握し、今後の協力関係について議論される場面も見受けられた。また、各グループがどのような観測機器、手法を用いて研究を進めているかを共有できたことは非常に有益であった。特に、直接観測結果を使ってリモセン観測結果や数値モデルの結果を検証する際には、測器の特性を把握した上で観測結果の品質管理を適切に行

うことが必要であるため、協力関係が必要不可欠である。エアロゾル・雲・降水の相互作用の理解のためには各アプローチの研究グループが連携して研究を進めることが必須であり、本研究集会において様々なアプローチで取り組んでいる研究者同士が気軽に意見交換をできたのは大きな成果であった。

4. おわりに

「エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会」を実施し、国内の雲研究関係者によって各々の最新の研究結果の共有、意見交換がなされた。雲物理コミュニティを立ち上げてから4年が経過し、今回2回目となる研究集会で、改めて「とりあえず顔を合わせて気軽に意見交換できる場が必要だ」ということを再認識した。2017年度以降も同様な研究集会を継続していきたい。

なお、本研究集会では企画段階で学生による自己紹介や雲研究に興味を持っていること・取り組んでみたいことなどを紹介する LT (Lightning Talks, 持ち時間5分程度の簡単な発表) のセッションも予定していたが、参加希望者がいなかったため取り止めとなった。次回以降、大学関係者には近くの学生と一緒に参加してもらうことや、告知方法の工夫等をして、国内で雲研究に携わる若手を増やしていきたい。雲物理コミュニティの ML は雲研究に興味のある方は誰でも参加可能であるため、希望者は荒木まで連絡いただければ幸いである。

最後に、本研究集会に参加していただいたみなさま、研究会実施にあたってご協力いただいた国立極地研究所の関係者のみなさまに、この場を借りてお礼申し上げます。次回も多くの方のご参加をお待ちしています。国内の雲研究がより一層進むことを願います。

略語一覧

ACSM : Aerosol Chemical Speciation Monitor
 AF2013S : Aerosol Radiative Forcing in East Asia 2013 Summer
 A-train : Afternoon Constellation 地球観測衛星隊列
 CALIPSO : Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations
 CCN : Cloud Condensation Nuclei 雲凝結核
 CCNC : CCN Counter
 CFDC INC : Continuous Flow Diffusion Chamber-type IN Counter
 GCM : General Circulation Model 大気大循環モデル

IN : Ice Nuclei 氷晶核

INAS : Ice Nucleation Active surface Site

LWP : Liquid Water Path 鉛直積算雲水量

MIROC : Model for Interdisciplinary Research on Climate

NCEP FNL : the National Centers for Environmental Prediction Final Operational Global Analysis data

NICAM : Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model

NOTOGRO : NOTO Ground-based Research Observatory

SDM : Super-Droplet Method

SMPS : Scanning Mobility Particle Sizer

SPRINTARS : Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species

UAE : United Arab Emirates アラブ首長国連邦

参 考 文 献

- Araki, K. and M. Murakami, 2015: Numerical simulation of heavy snowfall and the potential role of ice nuclei in cloud formation and precipitation development. CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling, (45), 4.03-4.04.
- 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. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 571-657.
- Christensen, M. W., G. G. Carrió, G. L. Stephens and W. R. Cotton, 2013: Radiative impacts of free-tropospheric clouds on the properties of marine stratocumulus. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 3102-3118.
- 藤田慎一, 三浦和彦, 大河内 博, 速水 洋, 松田和秀, 櫻井達也, 2017: 越境大気汚染の物理と化学 改訂増補版. 成山堂, 139-141.
- Kawai, H., S. Yabu, Y. Hagihara, T. Koshiro and H. Okamoto, 2015: Characteristics of the cloud top heights of marine boundary layer clouds and the frequency of marine fog over mid-latitudes. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 613-628.
- Lance, S., A. Nenes and T. A. Rissman, 2004: Chemical and dynamical effects on cloud droplet number: Implications for estimates of the aerosol indirect effect. *J. Geophys. Res.*, **109**, D22208, doi:10.1029/2004JD004596.
- Li, J., J. Huang, K. Stamnes, T. Wang, Q. Lv and H. Jin, 2015: A global survey of cloud overlap based on CALIPSO and CloudSat measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, **15**, 519-536.
- Michibata, T., K. Suzuki, Y. Sato and T. Takemura, 2016: The source of discrepancies in aerosol-cloud-precipitation interactions between GCM and A-Train retrievals. *Atmos. Chem. Phys.*, **16**, 15413-15424.
- Oikawa, E., T. Nakajima, T. Inoue and D. Winker, 2013: A study of the shortwave direct aerosol forcing using ESSP/CALIPSO observation and GCM simulation. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **118**, 3687-3708.
- Seto, R., T. Koike and M. Rasmy, 2016: Heavy rainfall prediction applying satellite-based cloud data assimilation over land. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **121**, doi: 10.1002/2016JD025291.
- Shantz, N. C., R. Y.-W. Chang, J. G. Slowik, A. Vlasenko, J. P. D. Abbatt and W. R. Leitch, 2010: Slower CCN growth kinetics of anthropogenic aerosol compared to biogenic aerosol observed at a rural site. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 299-312.
- 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., 2016: An improved approach for measuring immersion freezing in large droplets over a wide temperature range. *Sci. Rep.*, **6**, 32930, doi:10.1038/srep32930.