

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：82109

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23244095

研究課題名(和文) 黄砂バイオエアロゾル及び人為起源のエアロゾルの雲核・氷晶核能に関する研究

研究課題名(英文) Studies on CCN and IN abilities of Dust, Biogenic and Anthropogenic Aerosols

研究代表者

村上 正隆 (MURAKAMI, Masataka)

気象庁気象研究所・予報研究部・室長

研究者番号：30354484

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 38,100,000円、(間接経費) 11,430,000円

研究成果の概要(和文)：つくばサイトに於いて、各種エアロゾル測定・採取装置、雲核計、氷晶核計を用いて通年観測を継続実施した。エアロゾルの物理化学生物特性および雲核・氷晶核活性化スペクトルの季節変化について明らかにした。

大気エアロゾルの主要構成要素である、黄砂粒子・バイオエアロゾル・種々の人為起源エアロゾル(標準粒子)を対象とした雲生成チェンバー実験や雲核計・氷晶核計を用いた測定結果と詳細雲微物理モデルの結果に基づき、その雲核能・氷晶核能を種々の気象条件下で調べ定式化した。その結果を用いて非静力学モデルなどに用いるエアロゾル(雲核・氷晶核)・雲・降水を統一的に取扱う新機軸のパラメタリゼーションを開発した。

研究成果の概要(英文)：Atmospheric aerosols were monitored year around using various instruments such as SMPS, OPC, CCNC and INC at Tsukuba. Seasonal variations in their physico-chemical properties and CCN and IN activation spectra were investigated.

CCN and IN abilities of surrogates for atmospheric aerosols (e.g., dust, biological and anthropogenic aerosols) were formulated based on cloud simulation chamber experiments, laboratory measurements using CCNC and INC and a detailed cloud microphysical model simulations. A novel microphysical parameterization for non-hydrostatic models, which unifies treatments of aerosols acting as CCN and IN, clouds and precipitation, were developed.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、気象・海洋物理・陸水学

キーワード：エアロゾルの間接効果 雲核 氷晶核 雲生成チェンバー 黄砂 バイオエアロゾル 人為起源エアロゾル エアロゾル・雲・降水統一パラメタリゼーション

1. 研究開始当初の背景

(1) エアロゾル・雲・降水過程が、雲の放射特性や降水雲を介したエネルギー・水循環の変調を通して気候に大きなインパクトを持つことへの国際的・学術的関心は高く、エアロゾル粒子が雲核・氷晶核として働き、雲粒・氷晶の数濃度や粒径を変調させ、雲の放射特性に影響を与えること(エアロゾルの第1種間接効果)や雲・降水粒子の成長過程や力学・熱力学構造を変調させ、雲システムの降水効率・空間的分布・寿命に作用すること(エアロゾルの第2種間接効果)に関する研究動向が注目されていた。

(2) 日本上空は、周辺域を起源とするエアロゾルだけでなく、東アジア都市部から放出される人為起源エアロゾルや大陸内陸部から飛来する黄砂粒子の影響を強く受ける。最近、黄砂粒子とともに輸送される微生物粒子(バイオエアロゾル)が発見され大気エアロゾルとしての存在が注目を集めていた。東アジアからの人為起源エアロゾル・黄砂・バイオエアロゾルの雲・降水過程を通じた地球環境への影響が指摘され始めていた。

2. 研究の目的

(1) 黄砂・バイオエアロゾル・人為起源エアロゾル等の標準粒子、およびそれらと吸湿性、有機エアロゾルとの外部・内部混合粒子、さらには大気エアロゾルと、多種多様なエアロゾルの物理化学生物特性と雲核・氷晶核活性化特性との関係および雲核能・氷晶核能に応じた発生初期の雲粒粒径分布・氷晶数濃度を詳細分析し、定式化(エアロゾル・雲過程のモデル化)を目指す。

(2) 気候モデルやメソモデルによる最新数値実験において最も大きな不確定要素の1つである雲過程の効果について、室内実験・モニタリング観測および高性能詳細雲微物理ボックスモデルの結果を有機的に結合し、非静力学モデルに組込むエアロゾル・雲・降水を统一的に取扱う新機軸のパラメタリゼーションを構築する。

3. 研究の方法

(1) 黄砂・バイオエアロゾル・各種人為起源エアロゾルなどの標準粒子の物理化学生物特性と雲核能・氷晶核能に関する雲生成チェンバー実験を行う。

(2) 大気エアロゾルの物理化学生物特性、雲核・氷晶核活性化特性およびその季節変化に関するデータセットを得るため、つくばサイトにおいて最新測定技術による長期地上モニタリング観測を行う。

(3) 能登半島上空での高高度観測調査および富山県立山での積雪断面調査を実施し、高高度を浮遊するエアロゾルの氷晶核能を調査

する。さらに、雲生成チェンバー実験に使用する大気微生物を分離培養する。同様に、飛散時期が黄砂粒子や大陸起源エアロゾルと重なり、日本の固有種でもあるスギの花粉について、潜在的な生物起源氷晶核としての可能性を検討する。

(4) 雲核・氷晶核として働くエアロゾル粒子の物理化学生物特性を同定するため、雲生成チェンバー実験に合わせて雲粒・氷晶の残渣粒子をCVI(counterflow virtual impactor)採取、電子顕微鏡分析する。また、残渣粒子に含まれる微生物種を同定する。

(5) 各種エアロゾル粒子の雲核・氷晶核能を定式化するため、室内実験と詳細雲微物理モデルによる数値実験からの知見を組合せ、非静力学モデルに組込む新機軸のエアロゾル・雲・降水過程統一パラメタリゼーションを構築する。

4. 研究成果

(1) 黄砂粒子・バイオエアロゾル・種々の人為起源エアロゾル(標準粒子)を対象とした雲生成チェンバー実験を実施し、その雲核能・氷晶核能を種々の気象条件下で調べた。また、大気中エアロゾルを対象とした同様の実験を行い、自然大気中におけるエアロゾルと各エアロゾル種との雲核能・氷晶核能特性の類似性を比較解析した。また、(図1, 2)

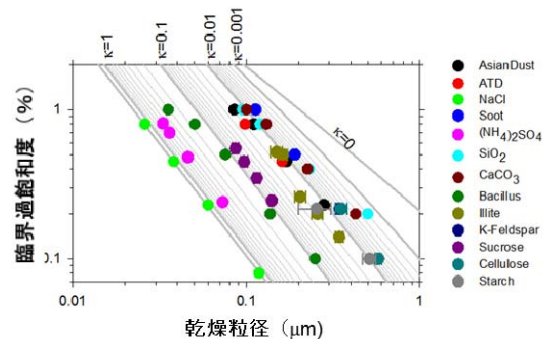


図1 種々のエアロゾル粒子の雲核能。吸湿度、乾燥粒径、臨界過飽和度の関係。

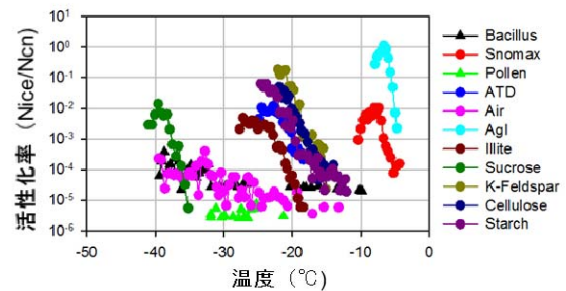


図2 種々のエアロゾル粒子の氷晶核能。氷晶核としての活性化率の温度依存性。

数値感度実験の結果と比較し、幾つかのエアロゾル種に関して物理化学生物特性の関数

としての雲核能・氷晶核能の定式化を行った。雲核 (CCN) 活性化特性は、これらの粒子の吸湿度 κ を推定し、 κ -Köhler 理論を用いて定式化した。氷晶核 (IN) 活性化特性に関しては、活性化比率を温度・過飽和度の関数として求めるとともに活性化速度の温度依存性から活性化エネルギーと接触角を推定し氷晶核形成理論を用いて定式化した。有機エアロゾルや無機吸湿性エアロゾルと標準粒子との外部・内部混合粒子を用いた氷晶発生実験を種々の気象条件下で行った。

(2) SMPS (走査型モビリティ粒径分析装置) や OPC (光散乱式粒子計数器) を用いたエアロゾル粒子の粒径分布 ($0.01 \sim 10 \mu\text{m}$)、電子顕微鏡を用いた化学組成、雲核計や氷晶核計を用いた CCN の活性化スペクトル (過飽和度スペクトル) と IN の活性化スペクトル (過冷却度・氷過飽和度スペクトル) の同時測定システムをほぼ確立した。つくばサイトに於いて、この測定システムを用いて通年観測を実施し、エアロゾルの物理化学生物特性、雲核・氷晶核活性化スペクトルを測定した。観測データを解析し、その季節変化を明らかにした。(図3、4)

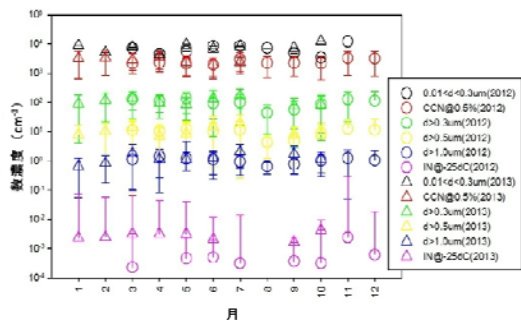


図3 つくばで観測された $0.01 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 、 0.3 、 0.5 、 $1.0 \mu\text{m}$ 以上のエアロゾル数濃度、水過飽和度 0.5% で活性化する CCN、 -25°C で活性化する IN の数濃度の季節変化。○印は 2012 年、△印は 2013 年のデータ。

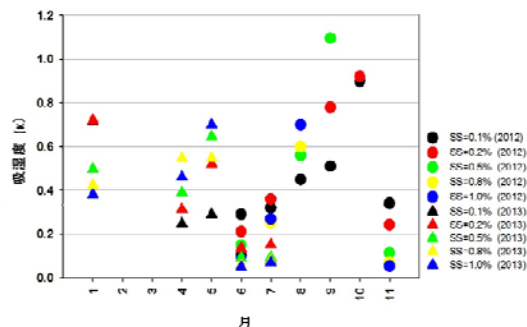


図4 つくばで観測された水過飽和度 0.1% (黒)、 0.2% (赤)、 0.5% (緑)、 0.8% (黄)、 1.0% (青) で活性化するエアロゾルの吸湿度の季節変化。○印は 2012 年、△印は 2013 年のデータ。

低過飽和度 ($SS_w = 0.1, 0.2\%$) と高過飽和度 ($SS_w = 0.5, 0.8, 1.0\%$) の CCN 数濃度はそれ

ぞれ $0.3 \mu\text{m}$ 以上と $0.01 \sim 0.3 \mu\text{m}$ のエアロゾル数濃度と相関が高いこと、 -25°C で活性化する IN 数濃度は $0.5 \mu\text{m}$ 以上の粒径の数濃度と比較的対応が良いことが示された。代表的な大気エアロゾルの吸湿度 κ は、海塩粒子や硫酸アンモニウムの数分の一と小さく、雲核性能の低い各種エアロゾル粒子との外部混合あるいは内部混合が進んでいることが示唆された。エアロゾル粒子の電子顕微鏡 EDX 分析から、大気エアロゾルは海塩、鋳物、硫酸塩、無機炭素、有機炭素などの混合と考えられることが分かった。

(3) 能登半島上空 3000m あるいは立山積雪中から採取したエアロゾル試料を使って、微生物を 50 株以上分離培養した後、その氷晶核能を、小滴凍結法を用いて評価した。高度 3000m から分離された真菌株が高い氷晶核能を示し、チェンバー実験での評価を実施する予定である(図5)。スギ花粉については、小滴凍結法により一定以上の氷晶核能を持つことが確認されたが、用いたサンプル間で差が見られた(図6)。現状では、小滴凍結法から求めた結果と雲生成チェンバーや氷晶核計から求めた結果に大きな乖離がみられる。今後その要因についても検討する。

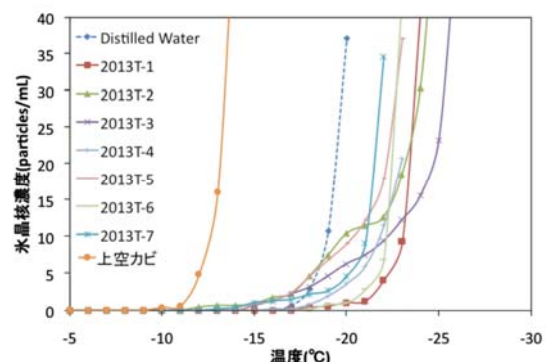


図5 石川県羽咋市上空および立山積雪中から採取したエアロゾルを使って分離培養した微生物の氷晶核として活性化温度。

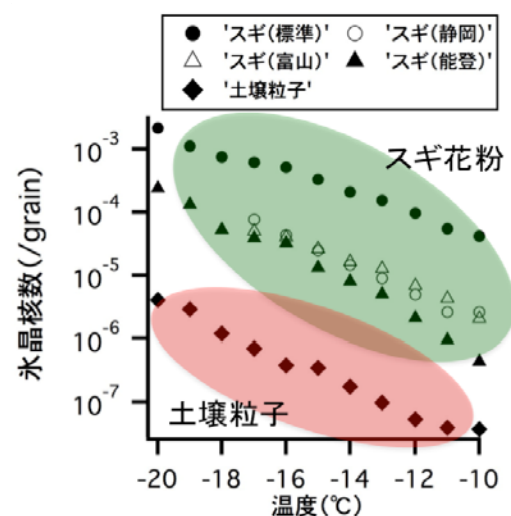


図6 スギ花粉及び土壌粒子の氷晶核として活性化する割合の温度依存性。

(4) CVI を用いてチェンバー実験で生成した雲粒・氷晶を選択的に採集、それら残渣粒子の物理化学特性を電子顕微鏡観察とEDX分析法により同定した。残渣粒子に含まれる微生物を同定した。

(5) 詳細雲微物理モデルを用いて室内実験の結果を再現し、室内実験担当者と協力して対象エアロゾル粒子の雲核能・氷晶核能の定式化を行った。その結果を用いて非静力学モデルなどに用いるエアロゾル（雲核・氷晶核）・雲・降水を統一的に取扱う新機軸のパラメタリゼーションを開発した。（図7）

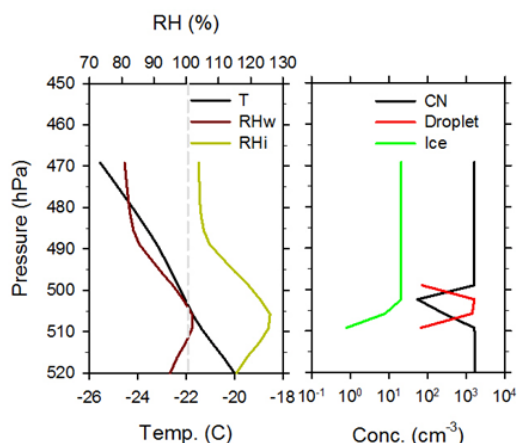


図7 定式化したダスト粒子の雲核能・氷晶核能を組み込んだ詳細雲微物理モデルを用いた雲生成シミュレーションの結果。

(6) エアロゾル（雲核・氷晶核）・雲・降水を統一的に扱う新しいバルク法雲物理パラメタリゼーション及び多次元ビン法を開発した。多次元ビン法に関しては、精度を保って高速・簡略化することで、計算コストを抑えた多次元ビン法も開発してNHMに組み込んだ。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計20件）

- ① 田尻拓也, 山下克也, 村上正隆, 広範なエアロゾル種の雲核・氷晶核能, 低温科学, 査読無, 72, 2014, 29-39.
- ② 山下克也, 村上正隆, 田尻拓也, 橋本明弘, ダスト粒子からの雲粒・氷晶発生を扱う詳細雲微物理ボックスモデルの開発, 低温科学, 査読無, 72, 2014, 79-86.
- ③ 村上正隆, 意図的気象変化—エアロゾルの雲・降水影響—, 低温科学, 査読無, 72, 2014, 297-310.
- ④ 松本篤, ラマン顕微鏡を用いた大気エアロゾル研究, エアロゾル研究, 査読有, 28, 2013, 208-213
- ⑤ Tajiri, T., K. Yamashita, M. Murakami, A. Saito, K. Kusunoki, N. Orikasa and L. Lilie, A Novel

Adiabatic-Expansion-Type Cloud Simulation Chamber. J. Meteor. Soc. Japan, 査読有, 91, 2013, 687-704.

- ⑥ T. Maki, M. Kakikawa, F. Kobayashi, M. Yamada, A. Matsuki, H. Hasegawa, Y. Iwasaka, Assessment of composition and origin of airborne bacteria in the free troposphere over Japan, Atmospheric Environment, 査読有, 74, 2013, 73-82.
- ⑦ Murakami, M., N. Orikasa, A. Saito, K. Yamashita, CCN Ability of Atmospheric Aerosols and Microphysical Structures of Shallow Warm Clouds in Western Japan, Nucleation and Atmospheric Aerosols, AIP/Conference Proceeding, 査読有, 1527, 2013, 817-819.
- ⑧ Yamashita, K., T. Tajiri, M. Murakami, CCN and IN parameter of Arizona Test Dust derived from laboratory experiments to simulate ice crystal formation by condensation freezing, Nucleation and Atmospheric Aerosols, AIP/Conference Proceeding, 査読有, 1527, 2013, 918-921.
- ⑨ Yamashita, K., M. Murakami, A. Hashimoto, and T. Tajiri, CCN ability of Asian mineral dust particles and their effects on cloud droplet formation, J. Meteor. Soc. Japan, 査読有, 89, 2011, 581-587.
- ⑩ DeMott, P. J., M. Murakami, A. Saito, 他 23 名, Resurgence in Ice Nuclei Measurement Research, Bull. Amer. Meteor. Soc., 査読有, 2011, doi:10.1175/2011BAMS3119.1

〔学会発表〕（計84件）

- ① 村上正隆, 気候・地球環境研究におけるエアロゾル・雲・降水過程の役割（招待講演）, 日本気象学会 2013 年度春季大会 シンポジウム「変化する地球環境と気象学の役割」, 2013 年 5 月 17 日, 東京
- ② 前島康光, 村上正隆, 橋本明弘, 雲核・氷晶核の多寡による水・エネルギー循環への影響, 日本気象学会 2013 年度秋季大会, 2013 年 5 月 17 日, 仙台
- ③ 齋藤篤思, 山下克也, 張澤鋒, 田尻拓也, 村上正隆, 氷晶核数濃度の地上モニタリング観測, 日本気象学会 2013 年度秋季大会, 2013 年 11 月 19 日, 仙台
- ④ 橋本明弘, 山下克也, 村上正隆, 吸湿性エアロゾル 2 成分系における雲形成に関する数値実験, 第 30 回エアロゾル科学・技術研究討論会, 2013 年 8 月 29 日, 京都
- ⑤ 財前祐二, 足立光司, 五十嵐康人, 関東での 2013 年冬季-春季の大気エアロゾル個別粒子の特徴, 第 30 回エアロゾル科学・技術研究討論会, 2013 年 8 月 27-29 日, 京都

- ⑥ 山下克也, 田尻拓也, 斎藤篤思, 村上正隆, 牧輝弥, 松木篤, 原和崇, 岩田歩, バイオエアロゾルの CCN・IN 能, 日本気象学会 2013 年度秋季大会, 2013 年 11 月 21 日, 仙台
- ⑦ 田尻拓也, 山下克也, 村上正隆, 広範なエアロゾル種の雲核・氷晶核能に関する研究(その 4), 日本気象学会 2013 年度秋季大会, 2013 年 11 月 21 日, 仙台
- ⑧ 山下克也, 田尻拓也, 村上正隆, 橋本明弘, ダスト粒子の雲粒・氷晶発生を扱う詳細雲微物理ボックスモデルの開発, 日本気象学会 2013 年度春季大会, 2013 年 5 月 17 日, 東京
- ⑨ 田尻拓也, 山下克也, 斎藤篤思, 村上正隆, 牧輝弥, 松木篤, バイオエアロゾルの雲核・氷晶核能に関する雲生成チェンバー実験, 第 7 回大気バイオエアロゾルシンポジウム, 2013 年 02 月 01 日, 彦根
- ⑩ 山下克也, 斎藤篤思, 田尻拓也, 村上正隆, つくばにおける CCN・IN・エアロゾル濃度の地上モニタリング観測, 日本気象学会 2012 年度秋季大会, 2012 年 10 月 04 日, 札幌
- ⑪ Murakami, M., N. Orikasa, T. Tajiri, A. Saito and K. Yamashita (招待講演), Effectiveness of Asian dust particles as ice nuclei in orographic snow clouds, The 16th International Conference on Cloud and Precipitation, 2012 年 08 月 03 日, Leipzig, Germany
- ⑫ Hashimoto, A. and M. Murakami, A numerical modelling study for the issues on the planned and inadvertent weather modification in Japan, The 16th International Conference on Cloud and Precipitation, 2012 年 08 月 03 日, Leipzig, Germany
- ⑬ Tajiri T., K. Yamashita, A. Saito and M. Murakami, Laboratory studies of ice formation by soot and mineral dust particles, The 16th International Conference on Cloud and Precipitation, 2012 年 7 月 31 日, Leipzig, Germany
- ⑭ Yamashita, K., T. Tajiri and M. Murakami, CCN ability of soot and mineral dust particles, The 16th International Conference on Cloud and Precipitation, 2012 年 7 月 31 日, Leipzig, Germany
- ⑮ 財前祐二, 直江寛明, 高橋宙, 黄砂イベントにおける微小鉱物粒子の粒径分布と混合状態, 日本気象学会 2011 年度春季大会, 2011 年 11 月 16 日, 名古屋
- ⑯ Murakami, M., Recent activity of ice initiation study at MRI (Invited), The International Workshop on Ice Nucleation in Tropospheric Clouds, 2011 年 5 月 23 日, Ettingen, Germany

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
村上 正隆 (MURAKAMI, Masataka)
気象庁気象研究所・予報研究部・室長
研究者番号：30354484
- (2) 研究分担者
折笠 成宏 (ORIKASA, Narihiro)
気象庁気象研究所・物理気象研究部・主任研究官
研究者番号：50354486
- (3) 研究分担者
斎藤 篤思 (SAITO, Atsushi)
気象庁気象研究所・予報研究部・主任研究官
研究者番号：90391234
- (4) 研究分担者
田尻 拓也 (TAJIRI, Takuya)
気象庁気象研究所・予報研究部・研究官
研究者番号：40414510
- (5) 研究分担者
橋本 明弘 (HASHIMOTO, Akihiro)
気象庁気象研究所・予報研究部・主任研究官
研究者番号：20462525
- (6) 研究分担者
財前 裕二 (ZAIZEN, Yuji)
気象庁気象研究所・環境応用気象研究部・主任研究官
研究者番号：70354496
- (7) 研究分担者
牧 輝弥 (MAKI, Teruya)
金沢大学・物質化学系・准教授
研究者番号：70345601
- (8) 研究分担者
荒木 健太郎 (ARAKI, Kentaro)
気象庁気象研究所・予報研究部・研究官
研究者番号：40636031
- (9) 連携研究者
松木 篤 (MATSUKI, Atsushi)
金沢大学環日本海域環境研究センター・准教授
研究者番号：90505728
- (10) 連携研究者
久芳 奈遠美 (KUBA, Naomi)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変動領域・研究員
研究者番号：50399581