

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：82109

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05558

研究課題名(和文) 発生初期における巻雲の氷晶発生・成長機構解明に関する実験的研究

研究課題名(英文) Laboratory study on ice nucleation and growth mechanisms in the early stage of cirrus clouds

研究代表者

折笠 成宏(Orikasa, Narihiro)

気象庁気象研究所・気象予報研究部・主任研究官

研究者番号：50354486

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：総観規模擾乱で形成された巻雲の直接観測データから、氷として直接形成し上昇速度の小さい環境条件から発生した氷晶から構成されることが示唆された。氷晶数濃度の観測値と数値モデルによる計算値の比較から、氷晶核形成モードは不均質単独もしくは不均質と均質の両方が働いたものであることを推察した。実大気エアロゾルの氷晶核能を観測し、平均的にはダスト粒子と比べて低いことが分かった。人為起源エアロゾルの一つである金属酸化物の氷晶核能について、ダスト粒子と同程度に有効であることが分かった。実大気エアロゾルの雲核能を観測し、各種エアロゾルが外部混合もしくは内部混合したもので粒径依存性があることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

対流圏上部に出現する巻雲の氷晶核形成モードや環境条件を特定するのは現在も極めて困難で限定的であるが、各種エアロゾルの物理化学特性やその氷晶核能・雲核能に関する室内実験データのほか、これまで得られた野外観測データから推察を行った。特に総観規模の擾乱で形成された巻雲は不均質核形成が卓越していることが示唆され、各種エアロゾルのうちダストのような有効な氷晶核能を持つ粒子の氷晶核能・雲核能を様々な環境条件(温度・湿度・冷却率など)で精度良く定式化することは、巻雲の発生維持の予測には重要な情報であることが分かる。

研究成果の概要(英文)：From in situ measurements of ice crystals in cirrus which has been associated with synoptic-scale disturbances, it is suggested that the ice crystals were generated from the type of in situ origin cirrus, which is characterized by the direct formation of ice with slow updraft. We speculate from the comparison between the measurements and simulation results that the ice crystals would be nucleated from heterogeneous mode only or from both heterogeneous and homogeneous modes. Based on the observations in terms of IN ability of atmospheric aerosols, their ability was lower than that of mineral dust particles. The IN ability of metal oxide particles was investigated, indicating that their ability was comparable to those of surrogates of mineral dust. Based on the observations in terms of CCN ability, the comparison of hygroscopicity suggested that the atmospheric aerosols were composed of external and/or internal mixtures of various types of aerosols which had a size dependency.

研究分野：気象学、雲物理学

キーワード：氷晶発生 氷晶核 雲凝結核 巻雲 ダスト粒子

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

巻雲は地球の放射収支に重要な役割を持つが、発生する高度・層厚などマクロな特性に加えて、雲内氷晶の微物理特性が与える影響は定量的評価の不確実性が大きい。そのため、野外観測、数値実験、室内実験により巻雲に関する多くの研究が三十年以上に渡り行われてきたが、未解決の課題が多く残されている。巻雲は-25 以下の低温下で出現し、構成される氷晶の粒径は 200 μm 以下の小さいものが多く、小さい氷晶が雲の光学的特性を卓越すると考えられている。しかし、高高度で出現する小粒径の氷晶とその周辺環境のエアロゾルの物理化学特性を精度良く直接観測することは現在の観測技術でも限定的であり、室内実験や数値実験の研究手法を組み合わせる巻雲の発生維持機構の解明に取り組むことが求められている。

2. 研究の目的

発生初期における巻雲の微物理特性をエアロゾル・雲生成過程実験施設により再現し、詳細雲微物理ボックスモデルによる定式化改良への反映を通じて、氷晶核形成モード及び環境条件の違いによる巻雲内氷晶の生成・成長機構の解明に取り組む。巻雲内氷晶は、均質核形成と不均質核形成が単独もしくは並行で働き発生するが、気温・湿度・上昇速度等の環境条件、核形成の起点となるエアロゾル種により、氷晶の数濃度・粒径・形状といった微物理特性は多様に変化し、これら要素の相互関係を定量的に解明することが目的である。

3. 研究の方法

氷晶核形成モードや環境条件の違いによる巻雲内の氷晶発生に関する微物理特性の変化を定量的に評価する。具体的な研究の方法は以下の通りである。

- (1) 均質・不均質核形成が働く環境条件の特定
- (2) 種々の環境条件により生成する氷晶の微物理特性の定量的把握
- (3) 各種エアロゾルによる氷晶核能・雲核能の定式化改良

4. 研究成果

巻雲内の氷晶を直接観測した雲粒子ゾンデのデータセットから、起源となる氷晶発生の気塊の分類を先行研究 (Kramer et al. 2016) に基づいて解析した。総観規模の擾乱で形成された巻雲を対象とした観測であることと整合的であるが、下方のより高温な起源ではなくその場の低温の起源であり、上昇速度も比較的小さいことが推定された (図1)。このタイプの巻雲は、観測された環境条件を反映して氷晶発生が起きていることを意味するが、氷晶核形成のモードとして、均質もしくは不均質あるいはその両方が働いたものか直接的に特定するのは観測結果だけでは困難である。詳細雲微物理ボックスモデルによる数値実験結果と観測された氷晶数濃度の関係 (図2) から、不均質単独もしくは不均質と均質の両方が働いたことによる氷晶数濃度を表すと推察された。

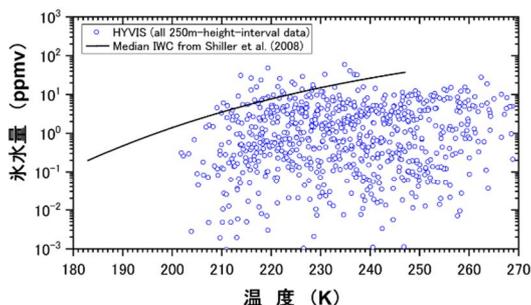


図1 雲粒子ゾンデによる巻雲観測の温度と氷水量の関係。点は雲粒子ゾンデによる観測値。線は先行研究データセットによる氷水量の中央値。

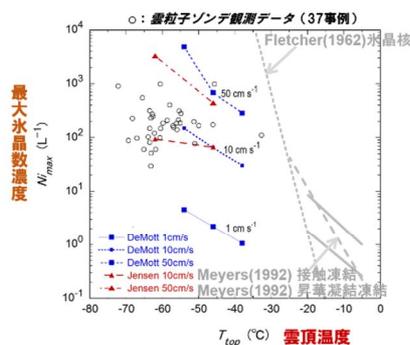


図2 雲粒子ゾンデによる巻雲観測の雲頂温度と最大氷晶数濃度の関係。点は雲粒子ゾンデによる観測値。線は先行研究によるパラメタリゼーション。

各種エアロゾルの氷晶核 (INP) としての活性化スペクトルについて、これまで雲生成チャンバーによる室内実験から調べてきた (図3)。また実大気のエアロゾルについても同様に氷晶核計によるモニタリング観測を行い、その類似性の比較解析を行ってきた。氷晶核能を表すパラメータである INAS (乾燥粒子総表面積当たりの氷晶活性サイト数) 密度から、標準ダストや黄砂イベント時のエアロゾルと実大気を比較して、オーダーが 1-2 程度は低いことが分かった (図4)。これらのデータは地上での観測結果であるが、巻雲が発生する高度で不均質核形成として働く氷晶核能がどの程度かにより、均質核形成も並行して働くかは上昇速度に依存する。地上観測結果が示すようにダストより有効ではない INP が卓越する場合、均質核形成が並行して働く割合も大きくなると考えられる。

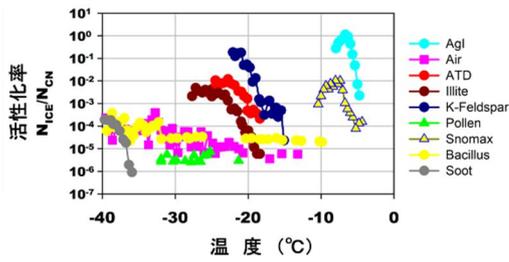


図3 各種エアロゾル粒子の氷晶活性化スペクトル。温度と活性化率の関係。

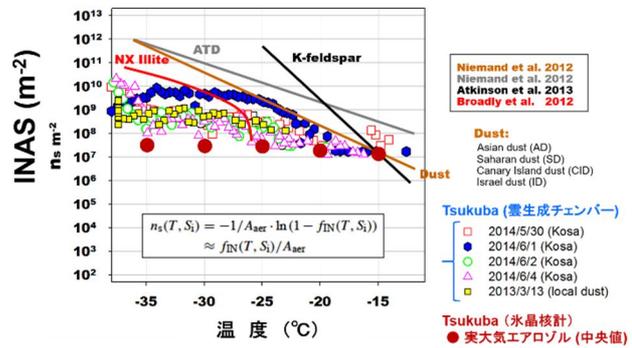


図4 各種ダスト粒子と実大気エアロゾルの氷晶核能。INASと温度の関係。点はつくばでの観測値。線は先行研究の結果。

人為起源のエアロゾルの一つである金属酸化物(酸化鉄と酸化アルミニウム)の氷晶核能について、雲生成チェンバーや氷晶核計による実験から調査した。詳細は Kuo et al. (2019) で記述されているが概要を示す。まず、氷晶核計で測定された INAS は雲生成チェンバーによる値と比べて小さく、特に核形成速度が小さいときはより顕著であることが示唆された。雲生成チェンバーによる金属酸化物の実験結果から、酸化アルミニウムは大気中ダスト粒子と同程度の INAS 値と温度依存性を持つ性質から比較的有效な INP であることが分かった(図5)。

不均質核形成の一つである内部凍結による氷晶発生を把握し定式化するためには、不溶性粒子の吸湿度()パラメータの推定が有益である。各種エアロゾルの雲凝結核(CCN)としての活性化スペクトルについて、これまで雲核計による室内実験から調べてきた(図6)。また実大気のエアロゾルについても同様にモニタリング観測データの取得と比較解析を行ってきた。の中央値は0.1(水過飽和度1.0%)~0.4(同0.1%)程度となり、海塩粒子や硫酸アンモニウムよりは小さく、ダスト粒子や金属酸化物よりは大きいことが分かる。臨界直径の違いから粒径依存性が標準粒子と比べて顕著である点と、実大気エアロゾルは各種エアロゾルの外部混合もしくは内部混合したものと考えられることが分かった。ダスト粒子は長距離輸送の過程で水溶性物質と内部混合している観測が数多く報告されていることから、雲粒に一旦活性化したあと内部凍結による氷晶発生が巻雲においても有効に働くことが示唆された。

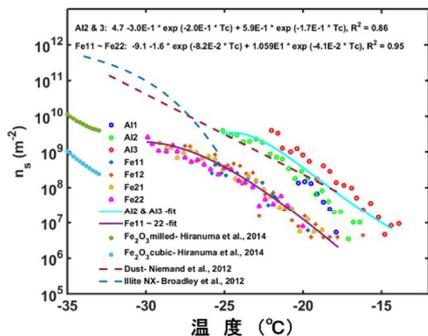


図5 雲生成チェンバー実験による金属酸化物の氷晶核能。INASと温度の関係。点と実線は観測値と回帰曲線。破線は先行研究の結果。

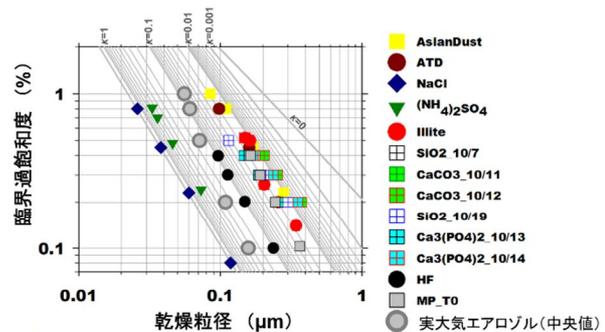


図6 各種エアロゾル粒子と実大気エアロゾルの雲核能。吸湿度 K 、臨界乾燥直径、臨界過飽和度の関係。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kuo, T-H., M. Murakami, T. Tajiri, and N. Orikasa	4. 巻 97
2. 論文標題 Cloud Condensation Nuclei and Immersion Freezing Abilities of Al ₂ O ₃ and Fe ₂ O ₃ Particles Measured with the Meteorological Research Institute's Cloud Simulation Chamber	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Meteorological Society of Japan	6. 最初と最後の頁 597-614
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2151/jmsj.2019-032	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計25件（うち招待講演 0件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Orikasa, N., A. Saito, K. Yamashita, T. Tajiri, Y. Zaizen, T-H. Kuo, and M. Murakami
2. 発表標題 Characteristics of Aerosols, CCN and IN Abilities from Ground-Based Observations at Tsukuba, Japan
3. 学会等名 15th Conference on Cloud Physics, American Meteorological Society (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kuo, T-H., M. Murakami, T. Tajiri, and N. Orikasa
2. 発表標題 CCN and IN Abilities of Metal Oxide Particles Measured with MRI Cloud Simulation Chamber and MRI Continuous Flow Diffusion Chamber-type IN Counter
3. 学会等名 15th Conference on Cloud Physics, American Meteorological Society (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田尻拓也, Tzu-Hsien Kuo, 折笠成宏, 財前祐二, 村上正隆
2. 発表標題 ヨウ化銀粒子の雲核・氷晶核能
3. 学会等名 日本気象学会2018年度春季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 折笠成宏, 斎藤篤思, 山下克也, 田尻拓也, 財前祐二, Tzu-Hsien Kuo, 村上正隆
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本気象学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田尻拓也, Tzu-Hsien Kuo, 折笠成宏, 財前祐二, 村上正隆
2. 発表標題 Hybridフレアー粒子の雲核・氷晶核能
3. 学会等名 日本気象学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田尻拓也, Tzu-Hsien Kuo, 折笠成宏, 財前祐二, 村上正隆
2. 発表標題 内部混合粒子の雲核・氷晶核能
3. 学会等名 エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 折笠成宏, 斎藤篤思, 山下克也, 田尻拓也, 財前祐二, Tzu-Hsien Kuo, Wei-Chen Kuo, 村上正隆
2. 発表標題 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
3. 学会等名 エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 折笠成宏, 斎藤篤思, 山下克也, 田尻拓也, 財前祐二, Tzu-Hsien Kuo, 村上正隆
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本気象学会2017年度春季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tzu-Hsien Kuo, M. Murakami, T. Tajiri, and N. Orikasa
2. 発表標題 Study of CCN and IN abilities of Al ₂ O ₃ and Fe ₂ O ₃ using MRI dynamic cloud chamber and MRI IN counter
3. 学会等名 日本気象学会2017年度春季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田尻拓也, Tzu-Hsien Kuo, 折笠成宏, 財前祐二, 村上正隆
2. 発表標題 シーディング物質の吸湿度と雲粒形成に関する実験
3. 学会等名 日本気象学会2017年度春季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 折笠成宏, 斎藤篤思, 田尻拓也, Tzu-Hsien Kuo, 財前祐二, 村上正隆
2. 発表標題 エアロゾル濃縮器を利用した氷晶核のモニタリング観測 (その2)
3. 学会等名 日本気象学会2017年度秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tzu-Hsien Kuo, M. Murakami, T. Tajiri, N. Orikasa, and K. Yamashita
2. 発表標題 Investigation on CCN and IN abilities of Al ₂ O ₃ and Fe ₂ O ₃ using cloud simulation chamber and parcel model
3. 学会等名 日本気象学会2017年度秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Orikasa, N., A. Saito, K. Yamashita, T. Tajiri, Y. Zaizen, and M. Murakami
2. 発表標題 Seasonal variations of aerosol, CCN, IN concentrations from ground-based observations at Tsukuba, Japan
3. 学会等名 17th International Conference on Clouds and Precipitation (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Tajiri, T., Y. Zaizen, and M. Murakami
2. 発表標題 Immersion freezing ice nucleation ability of atmospheric aerosol particles: an experimental study on asian dust and local dust
3. 学会等名 17th International Conference on Clouds and Precipitation (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 折笠成宏, 斎藤篤思, 田尻拓也, 財前祐二, 村上正隆
2. 発表標題 エアロゾル濃縮器を利用した氷晶核のモニタリング観測
3. 学会等名 日本気象学会2016年度秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 田尻拓也, 村上正隆
2. 発表標題 鉱物ダスト粒子氷晶核能の温度依存性(その2)
3. 学会等名 日本気象学会2016年度秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 折笠成宏, 斎藤篤思, 山下克也, 田尻拓也, 財前祐二, Tzu-Hsien Kuo, 村上正隆
2. 発表標題 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
3. 学会等名 平成28年度国立極地研究所「エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会」
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tzu-Hsien Kuo, M. Murakami, T. Tajiri, and N. Orikasa
2. 発表標題 Cloud condensation nuclei (CCN) and ice nuclei (IN) abilities of Al ₂ O ₃ and Fe ₂ O ₃ using MRI dynamic cloud chamber and IN counter
3. 学会等名 平成28年度国立極地研究所「エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会」
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 折笠成宏, 斎藤篤思, 山下克也, 田尻拓也, 財前祐二, Tzu-Hsien Kuo, Wei-Chen Kuo, 村上正隆
2. 発表標題 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(その2)
3. 学会等名 日本気象学会2019年度春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田尻拓也, 郭威鎮, 折笠成宏, 財前祐二, 村上正隆
2. 発表標題 内部混合したサブミクロン粒子の吸湿度
3. 学会等名 日本気象学会2019年度春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田尻拓也, 郭威鎮, 折笠成宏, 財前祐二, 村上正隆
2. 発表標題 内部混合粒子の吸湿度と氷晶形成に関する研究(その2)
3. 学会等名 第36回エアロゾル科学・技術研究討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Orikasa, N., A. Saito, K. Yamashita, T. Tajiri, Y. Zaizen, T.-H. Kuo, W.-C. Kuo, and M. Murakami
2. 発表標題 Seasonal variations of aerosols focused on IN and CCN abilities from ground-based observations at Tsukuba, Japan
3. 学会等名 3rd Atmospheric Ice Nucleation Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tajiri, T., N. Orikasa, Y. Zaizen, W.-C. Kuo, and M. Murakami
2. 発表標題 Internal structure and INP ability of AgI flare particles mixed with hygroscopic materials
3. 学会等名 3rd Atmospheric Ice Nucleation Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tajiri, T., N. Orikasa, Y. Zaizen, T.-H. Kuo, W.-C. Kuo, and M. Murakami
2. 発表標題 CCN and INP Abilities of Hybrid Flare Particles Measured with MRI Continuous Flow Diffusion Chamber-type IN Counter and MRI Cloud Simulation Chamber
3. 学会等名 22nd Conference on Planned and Inadvertent Weather Modification (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田尻拓也, 折笠成宏, 郭威鎮, 財前祐二, 村上正隆
2. 発表標題 混合核の形態的特性と雲粒子生成に関する考察
3. 学会等名 2019年度エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

気象研究所ホームページ https://www.mri-jma.go.jp/Member/phy/roorikasanarishi.html
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	田尻 拓也 (Tajiri Takuya) (40414510)	気象庁気象研究所・気象予報研究部・主任研究官 (82109)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	橋本 明弘 (Hashimoto Akihiro) (20462525)	気象庁気象研究所・気象予報研究部・主任研究官 (82109)	
連携研究者	山下 克也 (Yamashita Katsuya) (30772925)	国立研究開発法人防災科学技術研究所・雪氷防災研究部門・特別研究員 (82102)	