九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

Effects of Secondary Ice Production by Ice-Ice Collisions on the Microphysical and Electrical Structures of Snow Clouds in Hokuriku, Japan

木下, 直樹

https://hdl.handle.net/2324/6787420

出版情報：Kyushu University, 2022, 博士（理学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：Public access to the fulltext file is restricted for unavoidable reason (3)

（様式６－２）

氏　　名	木下　直樹
論 文 名	Effects of Secondary Ice Production by Ice-Ice Collisions on the Microphysical and Electrical Structures of Snow Clouds in Hokuriku, Japan （Ice-ice collisions による二次氷晶生成過程が北陸雪雲の微物理的・電気的構造に与える影響）
論文調査委員	主　査　　九州大学　　助教　　川野 哲也 副　査　　九州大学　　教授　　川村 隆一 副　査　　山口大学　　教授　　鈴木 賢士

論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

本研究者は，氷粒子同士の衝突（ice-ice collisions）による二次氷晶生成過程を数値気象モデルに導入する新しい手法を開発し，その数値モデルを用いて，ice-ice collisions による二次氷晶生成過程が冬季北陸雪雲の微物理的・電気的構造に及ぼす影響を明らかにした。

雲内の氷晶は微物理過程において重要な役割を果たす。したがって，氷晶生成過程を数値モデルで適切に表現することは極めて重要である。通常，初期氷晶は氷晶核としての働きを有する大気エアロゾル粒子の助けを借りる不均質核形成過程，あるいは約−40℃以下で過冷却水滴が凍る均質凍結過程によって生成される。ところが，雲内の 0℃～−40℃層に氷晶核数密度より 2，3 オーダーも大きな氷晶数密度が観測されることがあり，これは上記の不均質核形成過程および均質凍結過程では説明できない現象である。この現象を説明するために，既存の氷粒子から新たな氷晶が生成される過程（二次氷晶生成過程）がいくつか提案されてきた。これまで最も有力視されてきた二次氷晶生成過程は，Hallett and Mossop (1974)によって提案された，雪や霰などの氷粒子に過冷却水滴が衝突併合する際に氷晶芽が放出される過程（Hallett-Mossop 過程）である。Hallett-Mossop 過程は多くの数値モデルに導入され，その数値モデルは研究や数値予報に広く用いられている。

Hallett-Mossop 過程は−8℃～−3℃という比較的暖かい温度領域で有効に働くが，その温度領域より低温の雲底高度をもつ雲内でも非常に大きな氷晶数密度が観測されている。この事実は Hallett-Mossop 過程では説明できない。このような低温領域でも有効に働く二次氷晶生成過程として，氷粒子同士が衝突する際に氷粒子の脆い部分が破砕することで氷晶が生成される過程（ice-ice collisions による二次氷晶生成過程）が注目されてきている。Takahashi et al. (1995)は，低温室実験によって ice-ice collisions による二次氷晶生成過程を調査し，その温度依存性や衝突力依存性を明らかにした。その結果に基づいて，Sullivan et al. (2018)は温度依存性のみを考慮した ice-ice collisions スキームを提案した。しかし，そのスキームは衝突力依存性を含んでいないため，小さな氷粒子の衝突による二次氷晶生成を極端に過大に見積もる傾向にあった。本研究者は，この問題点に着目し，衝突力依存性を粒子サイズのべき乗で簡便に表現する新しいスキームを考案した。様々なべき乗の値に設定した数値シミュレーションを実行し，それらの結果と Takahashi et al. (2017)による北陸雪雲の雲微物理直接観測データと比較することで，べき乗の最適値を決定した。ice-ice collisions による二次氷晶生成過程を導入しない場合には，観測された氷晶数密度より 2 オーダー

以上も小さい値しか再現できず, 最適なべき乗の値が設定された ice-ice collision スキームによって観測された氷晶数密度を再現することができた。このことは，本研究で提案された新しいスキームが, 北陸雪雲内の ice-ice collisions による二次氷晶生成過程を適切に表現できることを示している。

さらに本研究者は，この新しいスキームを導入した数値モデルを用いて，ice-ice collisions による二次氷晶生成過程が北陸雪雲の微物理的・電気的構造に与える影響を調査した。雲内の電荷の主な担い手は降水粒子, 特に氷粒子であるため, ice-ice collisions による二次氷晶生成過程の影響は，雪雲の微物理的構造だけに留まらず電気的構造へも及ぶと考えられる。雲微物理スキームにおける各降水粒子の生成・消滅項を丹念に調べることにより，ice-ice collisions による二次氷晶生成過程は，北陸雪雲内の氷晶数密度を 2 オーダー以上，雪数密度を 1 オーダー以上増加させ，それらの増加に伴って雲内の空間電荷密度を 1 オーダー増加させる効果があることを示した。すなわち, ice-ice collisions による二次氷晶生成過程を考慮することによって，北陸雪雲で観測された氷晶数密度と空間電荷密度を同じオーダーで再現できることを示した。このことは，北陸雪雲による冬季雷特有の電気的特徴の理解前進に大きく貢献することが期待される。

以上のように，本研究者は，氷粒子同士の衝突（ice-ice collisions）による二次氷晶生成過程を数値気象モデルに導入するための新しい手法を開発し，その新しいスキームを用いた数値シミュレーションによって，観測された北陸雪雲の氷晶数密度を適切に再現できることを示した。さらに，ice-ice collisions による二次氷晶生成過程が北陸雪雲の微物理的・電気的構造に及ぼす影響を明らかにした。本研究の成果は，国際的な研究水準において高く評価されるべきものであり，気象学の発展に資するものである。よって，本研究者は博士（理学）の学位を受ける資格があるものと認める。