

## 別紙 4

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 凍雨の形成機構と微物理過程に関する研究  
(Formation mechanism and microphysics of ice pellets)

氏 名 南雲 信宏

## 論 文 内 容 の 要 旨

冬季に中緯度地域で発達した低気圧は、温暖前線面に融解層と再凍結層を構成して凍雨をもたらすことがある。凍雨は一般に雪片が融解したあと、氷点下の層で過冷却水滴の状態を経て、再び凍結して氷粒として降る現象である。そのため、凍雨の形成高度が低ければ、森林や送電線の倒壊、さらに陸空の交通網などの社会インフラに著しい着氷災害をもたらすことがある。凍雨は形成高度によって災害の範囲や特徴も異なるが、大気中の過冷却水滴がいつ凍結するかは依然として明らかになっていない。また大気中における凍結状態の有無を把握する手段も厳密には確立していない。氷点下の大気中における着氷危険域を把握するためには、凍雨の形成機構や微物理過程を解明し、リモートセンシング技術を用いて、凍雨の形成高度を検知する必要がある。

本研究では、初めに、2005年4月10日に札幌市で10時間弱という記録的に長時間持続した凍雨事例を解析した。非静力学モデルで再現された前線構造を解析したところ、前線に沿って南北から収束する風に伴う二次循環によって、長時間にわたって上層の暖かく湿った層と下層の低温の層が持続し、また総観規模スケールの沈降性の乾燥環境場を形成していた。さらに降水域の南側に広がる乾燥域が強い地衡風で降水域に持続的に流入したことも明らかになった。融解した雪片は、乾燥した大気を通過すると急速に蒸発冷却する。この過程を一次元数値モデルで計算した結果、降水粒子は接触凍結核で凍結可能な過冷却度に達しえることが示された。また、下層大気が水温の低い海上を長時間吹走し、中層から下層にかけて一様な低温の空気に変質し、持続的に流入する構造であったことも、接触凍結の温度条件を満たす上で重要な要素であった。

上記事例で観測した凍雨の微物理過程を、北海道大学低温科学研究所に設置した光学式降水粒子計 2D-Video-Distrometer (2DVD) と地上接写画像を用いて調べた。その結果、落下速度が大きく異なる2種類の粒子、すなわち“遅い粒子”と“速い粒子”が同時に降っていたことが分かった。“遅い粒子”は粒子の一部に鋭い突起な

ど顕著に変形した粒子が多く、割れたり欠けたりした粒子もあった。一方、多くを占めていたのは“速い粒子”で、破損の痕跡はほとんどみられず、歪んだ球か涙型の小さなこぶへの変形が多く、雨滴の終端速度に近い落下速度の粒子だった。この形状と速度の違いから、“遅い粒子”は凍結中の大きな変形に伴って内部の液水が抜け出した軽い密度の粒子で変形に伴う非球形の影響も大きい粒子であったと示唆された。一方、“速い粒子”は液水を包含したままの凍結進行中の高密度の粒子で、比較的球に近い形状であったことがわかった。大きな変形の点から“遅い粒子”は表面からの急速な凍結が要因と考えられ、本事例では強い過冷却をもたらす乾燥空気層の昇華蒸発が重要な要素と示唆された。一方、“速い粒子”は、強い過冷却状態では凍結せず、その下の弱い過冷却の層で氷晶と接触しゆっくり凍結した結果として、変形や破損の少ない粒子が生じたと示唆された。

また本研究では、凍雨の形成域特定に、二重偏波レーダー情報が有効であることが示された。これまでの先行研究から、凍雨時に上空の氷点下の再凍結層で、二重偏波パラメータの反射因子差 ( $Z_{DR}$ ) が局所的に大きい値を示すことが知られていたが、その理由は明らかではなかった。そこで、凍雨粒子の幾何学的特徴とレーダーの偏波情報の関係を明らかにするために、関東平野全体で6時間以上凍雨が降った2016年1月29日の事例を解析した。用いた観測データは、つくばの気象研究所に設置した二重偏波レーダーと2DVDのデータ、さらに関東平野の地方気象台の目視記録である。

この事例も、2005年4月10日の札幌事例と同様に、2種類の異なる落下速度を有する凍雨粒子が同時に存在する時間帯があり、“遅い粒子”と“速い粒子”の形状や数の特徴も札幌事例と共通していた。すなわち、異なる形成段階の凍雨が生じる凍結システムであった。地上で凍雨が通報された時刻は、直上の氷点下の層内の  $Z_{DR}$  が相対的に大きい値を示していた。一方、 $Z_{DR}$  が小さい領域では、雨または凍雨が混在する雨と通報された。2DVDデータの解析から、大きい  $Z_{DR}$  値の直下では“遅い粒子”と“速い粒子”が同時に降ったが、涙型のこぶや歪んだ形状の“速い粒子”が卓越していた。この“速い粒子”には長軸を横に向けた落下姿勢をとるものが多く、その結果、 $Z_{DR}$  の増大に寄与していたことがわかった。一方、 $Z_{DR}$  が小さいときには、目視では雨や氷粒の混ざった雨と判断されたが、実際にはほとんどが凍結初期の雨滴より丸い凍雨粒子であるとわかった。以上のことから、地上観測データを併用することで、二重偏波レーダーの偏波パラメータ  $Z_{DR}$  の大小が凍結の始まりのシグナルや凍結過程の形状変化の特徴を表していることが明らかになった。

本研究では、凍雨の持続性に起因する環境場の特徴を考察するとともに、凍雨の微物理過程、すなわち凍結中の粒子の落下速度や形状・落下挙動の変化の特徴を明らかにした。これらの凍雨の環境場と微物理過程の解明は、雪片が解けて氷点下で凍雨が形成されるまでの直接観測ができない上空の広範囲の降水粒子の状態と二重偏波レーダーのシグナルを関係づけ、着氷危険域を特定することに寄与するため、きわめて重要な成果である。