

筋状降雪雲の3次元構造に関する観測的研究

学位論文内容の要旨

冬期、ユーラシア大陸からの寒気吹き出し時に日本海上に多数の筋状雲が発生する。筋状雲は寒気の吹走距離とともに発達し、日本列島の日本海沿岸に達するときには多量の降積雪をもたらす筋状降雪雲となる。筋状降雪雲内部の組織化した気流は気団変質過程の中で境界層内の熱、水蒸気、運動量、化学物質の鉛直輸送に重要な役割を果たすと考えられるため、筋状降雪雲の3次元気流構造や維持機構を十分理解しておく必要がある。

筋状雲の形成は線形論が示す水平ロール渦によって説明できるが、ロール構造は水蒸気の凝結により大きく変化することが観測的研究及び数値的研究によって示されている。したがって、筋状雲の構造及び維持機構は水平ロール渦だけでは説明できない。さらに筋状降雪雲では降雪形成過程が筋状降雪雲の構造に影響を及ぼすと考えられるが、筋状降雪雲の詳細な3次元構造や維持機構は不明である。寒気吹き出し時には、一般に複数の筋状降雪雲が同時に出現している。筋状降雪雲間の相互作用によって筋状降雪雲の構造が大きく変化することが示唆されているが、筋状降雪雲間の気流について調べられたことはない。そこで、本研究では筋状降雪雲の構造及び維持機構を明らかにするため、以下の3つのことを目的とした。1) 筋状降雪雲の3次元構造を詳細に記述する、2) 筋状降雪雲間の相互作用について調べる、3) 降雪形成過程が筋状降雪雲の構造に及ぼす影響について調べる、である。

名古屋大学大気水圏科学研究所の2台のドップラーレーダを用いて、1991年12月から1992年2月にかけて北海道石狩湾周辺において筋状降雪雲の観測を行った。寒気吹き出し時に、2本の主風向に平行な走向を持つ降雪バンド（バンドIとII）が観測された。石狩湾中部に位置するバンドIは石狩湾内でドップラーレーダの反射強度に大きな変化は見られず、石狩湾周辺の地形の影響を受けていないと考えられた。一方、石狩湾南部に位置するバンドIIは石狩湾上で急激に反射強度を増加させており、石狩湾周辺の地形の影響を受けていると考えられた。本研究ではこれら2本の降雪バンドの運動学的構造を3次元的に詳細に調べ、筋状降雪雲の3次元気流構造及び維持機構を明らかにした。

バンドIは始めその走向に沿ってほぼ等間隔で並んだ水平スケール5~10 kmのセル状レーダエコーによって構成されていた。やがて、いくつかのセル状レーダエコーが合併し、一つのメソγスケール（~20 km）の対流性雲システムが形成された。メソγスケールの対流性雲システムの気流構造は、セル状レーダエコーの移動速度よりも速い rear-to-front current の出現、発達によって特徴づけられた。rear-to-front current はメソγスケール対流性雲システムの後部北側上層で現れ、発達しながらメソγスケール対流性雲システムの前方下層及び南側下層に向かって下降した。下層では下降してきた rear-to-front current とメソγスケール対流性雲システムの北側から進入する場の風とが衝突し、強い収束が起きた。その結果、上昇気流が強化され、メソγスケール対流性システム内に新たな対流セルが形成された。rear-to-front current は、その進行方向前方に次々と新しい降雪雲を形成し、メ

メソスケール対流性雲システムの組織化及び維持に重要な役割を果たした。この rear-to-front current は、大きな運動量を持つ上層の空気が、雲頂付近での雪粒子の蒸発冷却によって下降するという過程によって説明できた。すなわち、筋状降雪雲の組織化と維持に、ロール状対流のような力学過程のみではなく、降雪形成過程が重要な役割を果たしていることを示すことができた。

バンド II はそのレーダエコー構造から3つの領域に分けることができた。すなわち、風上域、強化域、発達域である。バンド II の風上域はその走向に沿ってほぼ等間隔で並んだセル状レーダエコーで構成されていた。バンド II の強化域と発達域は、降雪バンドの走向に沿った準定常的な帯状の強反射強度域によって特徴づけられた。バンド II の強化域及び発達域は、降雪バンドの走向に直交する鉛直断面内の循環によって支配された気流構造を持っていた。解析期間中、この気流構造は定性的に維持されていた。下層の気流分布及びセル状レーダエコーの軌跡から、石狩湾上でのバンド II の急激な発達は西北西の季節風と積丹半島を迂回する西風との収束によって起きたと考えられた。バンド II の強化域及び発達域の構造はバンド I の構造と本質的に異なっており、地形が筋状降雪雲の構造に及ぼす影響が大きいことがわかった。

本研究では、筋状降雪雲間の相互作用についても、観測事実に基づいて新しい知見を得た。興味深い事実として、下層で2本の降雪バンドを繋ぐレーダエコーの橋が観測された。レーダエコーの橋はバンド I を構成するメソスケール対流性雲システムからの下層の外出気流に関連して形成された。下層の外出気流は時間とともにバンド II に向かって移動し、ついにはバンド II 内部に進入した。下層の外出気流は、バンド II 内部で強い収束を引き起こした。その結果、バンド II の上昇気流は強化され、バンド II は急速に発達した。地形の影響によってバンド II の南側から進入する気流が存在していたため、下層の外出気流の進入がバンド II に及ぼす影響がより顕著に現れたと考えられた。2本の降雪バンドを繋ぐレーダエコーの橋の形成は、下層の外出気流がメソスケール対流性雲システムで生成された雪粒子をバンド II へ輸送したことを示す。レーダエコー構造からバンド II の強化域及び発達域は多量の霰が存在することが示唆された。また、バンド II の強化域及び発達域の上昇気流は小さな雪粒子を持ち上げるのに十分な大きさであった。これらのことから下層の外出気流によってバンド II へ輸送された雪粒子が、強化した上昇気流によってバンド II を構成する雲の中へ持ち上げられ、雲粒捕捉過程によって急速に成長したと推察された。バンド II の急速な発達は主に下層の外出気流の進入という力学的効果によって引き起こされたと考えられるが、バンド II の降雪量の増加には雪粒子の再成長という雲物理学的効果も寄与していたと考えられる。

以上の観測事実に基づいて詳細に議論した結果、主風向に平行な走向を持つ筋状降雪雲の構造について以下の知見が得られた。

- 1) 多量の降雪をもたらす筋状降雪雲に起こり得る重要な特徴として、降雪形成過程が筋状降雪雲の組織化と維持に重要な役割を果たし、気団変質過程における運動量の鉛直輸送に重要な役割を果たす。
- 2) 隣接する筋状降雪雲に起こり得る重要な特徴として、筋状降雪雲の気流及び雪粒子の作用が隣接する筋状降雪雲の発達に大きく影響する。

今後、様々な地域(すなわち大気状態)で観測を行うことにより、降雪の量、形態によって降雪形成過程が筋状降雪雲の構造に及ぼす影響がどのように変化するのかが明らかになり、筋状降雪雲が気団変質過程において果たす役割をさらに解明することができると期待される。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 藤 吉 康 志

副 査 教 授 竹 内 謙 介

副 査 教 授 上 田 博

(名古屋大学大気水圏科学研究所)

副 査 助 教 授 沼 口 敦

学 位 論 文 題 名

筋状降雪雲の3次元構造に関する観測的研究

ユーラシア大陸からの寒気吹き出し時には、日本海上に多数の筋状降雪雲が発生する。筋状降雪雲内部の組織化した気流は、気団変質過程の中で境界層内の熱、水蒸気、運動量、化学物質の鉛直輸送に重要な役割を果たしていると考えられるが、これまで筋状降雪雲の3次元気流構造や維持機構は明らかにされていなかった。そこで、本研究では、寒気吹き出し時に2台のドップラーレーダを用いて北海道石狩湾上に発生した筋状降雪雲の観測を行い、主風向に平行な走向を持つ降雪バンドの運動学的構造を詳細に調べ、筋状降雪雲の3次元気流構造や維持機構を明らかにした。

筋状降雪雲は、メソスケール(～20 km)の対流性雲システムから構成されていた。この雲システム内には、上層後方から前方下層に向かう3次元 rear-to-front current が存在し、この気流によって次々と新しい雲システムが進行方向前方に形成されることによって、筋状降雪雲が維持されていた。この rear-to-front current は、大きな運動量を持つ上層の空気が、雲頂付近での雪粒子の昇華蒸発冷却によって下降するというプロセスによって説明できた。すなわち、筋状降雪雲の組織化と維持に、ロール状対流のような単なる力学過程のみではなく、降雪過程が重要な役割を果たしていることを示すことができた。

また、寒気吹き出し時には、複数の筋状降雪雲が同時に出現している。本研究では、筋状降雪雲間の相互作用についても、観測事実に基づいて新しい知見を得た。すなわち、筋状降雪雲を構成するメソスケールの対流性雲システムからの下層の外出気流が、隣接する降雪雲に進入し、その結果隣接する降雪雲が急速に発達するという現象が見られた。解析の結果、下層の外出気流は、隣接する降雪雲下層の気流の収束を強めるばかりではなく、この気流によって運ばれた雪粒子が隣接する降雪雲内で再成長するプロセス(一種の種まき効果)が降雪雲の発達に寄与したと考えられた。このような筋状降雪雲の気流及び降雪粒子の作用は、隣接する筋状降雪雲で起こり得る重要な特徴であると考えられる。

以上の通り、著者は多量の降雪をもたらす筋状降雪雲について、降雪形成過程が組織化と

維持機構に重要な役割を果たすという、新知見を得たものであり、寒気吹き出し時の降雪・豪雪の発生メカニズムの解明にも貢献するところ大である。

よって、著者は博士（地球環境科学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。