

学位論文題名

Observational Study on Kinematic and Thermodynamical Structures of Longitudinal-Mode Snow Bands over the Sea of Japan during Cold-Air Outbreaks

– Difference in Characteristics under Weak and Large Vertical Shear Environment in the Band-Transverse Direction –

(寒気吹き出し時のLモードのバンド状降雪雲の運動学的、
熱力学的構造に関する観測的研究

– 走向に直交する方向の鉛直シアが弱い場合と強い場合における特徴の違い –)

学位論文内容の要旨

寒気吹き出し時に日本海上に出現するLモードのバンド状降雪雲について、バンドの走向に直交する方向の鉛直シアが強い場合と弱い場合の運動学および熱力学的構造について、ドップラーレーダーデータを主とし、ゾンデや飛行機観測データ等を併用して解析を行った。詳しく解析を行った5つのバンド状降雪雲のうち、3つのバンドは走向に直交する鉛直シアが弱い場に出現したバンドであり、残りの2つは鉛直シアが大きい場に形成されたバンドであった。日本海上のLモード降雪雲については、これまで研究例が比較的少ないだけでなく、鉛直シアが強い場合に出現するバンドの構造については、日本海上のLモード降雪雲やミシガン湖上の“Lake effect snow storm”と呼ばれる降雪雲でもほとんど報告されていない。本研究では、鉛直シアが強い場合と弱い場合のバンドの構造の差異に着目した。バンド内の温位偏差や水蒸気混合比、非降水水物質の空間分布は Hauser and Amayenc (1986) と同様の変分法に基づくリトリーバルによって推定した。運動方程式と熱力学の式、水物質の連続の式を用いた点は彼らの方法と同様であるが、本研究では、3次元的な解析に拡張しただけでなく、運動方程式の加速度項を考慮し、さらに運動方程式や熱力学の式、水物質の連続の式に拡散項を導入した。リトリーバル解析から推定された非降水水物質の空間分布については、デュアルドップラーレーダー観測と同期させて行った飛行機観測による微物理構造とよい対応が得られたこと、また、最下層での温位偏差がドロップゾンデ等による熱力学的構造とよく対応していたことにより、本研究で用いたリトリーバルはバンド内の熱力学的構造や非降水凝結物の空間分布の推定に有効であることが確認できた。

鉛直シアが弱い場合と強い場合のバンド状降雪雲の主たる相違点は、バンド内の気流構造とエネルギー変換率、バンドの組織化の3つに見られた。

鉛直シアの強弱に対応して、バンドの循環の違いは走向に直交する鉛直面内において明瞭に見られた。鉛直シアが強い場合には上昇流域と下降流域とが分離されて長続きする循環の特徴を示しており、しかも上昇流は鉛直シアの上流側に傾いていた。これに対して鉛

直シアが弱い場のバンド状降雪雲では、循環はバンドの軸に対してほぼ対称的であり、いわゆるロール状循環に似た構造であった。走向に直交する鉛直面内の循環とこの方向の鉛直シアの大きさと対応を調べた結果、鉛直シアを雲底付近と混合層中層での風速成分から算出すると、鉛直シアの大きさが $1 \times 10^{-3} \text{ (s}^{-1}\text{)}$ よりも小さい場合には軸対象の気流構造になり、 $1.5 \times 10^{-3} \text{ (s}^{-1}\text{)}$ よりも大きい場合には上昇流と下降流とが分離された構造になることがわかった。

バンド維持に関して、循環のエネルギー変換率を平均流によるものと浮力によるものとに分けて計算した。浮力による生成率は、リトリーバルから求められた温位偏差と水蒸気混合比を用いて仮温位偏差 θ_v から求めた。浮力項は雲内ではほとんどの高度で正の値であり、他の項に比べて卓越している場合が多かったことは、水蒸気の凝結に伴う非断熱加熱がバンド循環のエネルギーとして重要であることを示している。しかし、降雪や非降水凝結物の混合比を含む温度偏差 θ_s で考慮すると生成率がかなり減少したことは、水物質の重みがバンド内の循環を抑制することを示している。走向に直交する方向の平均流による変換率は、鉛直シアが強い場合にはバンド内循環を増加させる方向に作用し、その大きさは浮力による変換率を θ_s で見積もった場合とほぼ同じ大きさになった。これに対して走向に平行な平均流による変換率は、鉛直シアの強弱にかかわらず小さな値であった。

バンドの組織化については、走向に直交する鉛直シアが強い場合には、新しいセルはバンドの走向に直交する方向の鉛直シアの風下側に形成される傾向にあった。これに対して、鉛直シアが弱い場合にはほぼ走向に沿って出現するケースが多く観測された。この場合、新しいセルの形成には、既存のセルからの降雪に伴う下降流、あるいはセルの間での下降流が地表付近に到達して引き起こす、走向に平行な方向の下層収束が重要と考えられる。

鉛直シアが弱い場合と強い場合のバンドに見られた類似点には、非断熱加熱に伴う加熱・冷却とバンドの維持に対する下層での正味の質量輸送の重要性、非降水凝結物のバンド内での分布である。

凝結・蒸発に伴う加熱率と熱フラックスの発散による加熱率とをリトリーバルの解析結果から計算すると、バンドの中層から上層にかけては凝結に伴う加熱率が卓越し、下層では蒸発による冷却がかなり大きかった。この冷却は、バンド内下層での冷気塊を維持する上で重要である。

新たに考案した質量収支解析法を用いると、質量収束の大きさの1格子あたりの平均値は、高度の低下とともに大きくなる傾向が見られた。これは、バンドの下層ほど収束が大きいくちと対応している。この収束はバンド内下層の冷気塊とバンド外下層の不安定大気との衝突を引き起こし、その結果として不安定大気が上空に持ち上げられる状態が継続することになるので、バンドを維持する上で重要と考えられる。

単位体積あたりの非降水凝結物の質量が大きな領域は雲の中層から上層にあり、この領域が降雪粒子の成長にとって有利な環境になっていることが推察できた。さらに、非降水凝結物の量は、雲の発達期で大きくなっており、成熟期から衰退期では減少していた。このような非降水水物質の時間変化の特徴は、短寿命の孤立型降雪雲内の微物理構造の時間発展の特性 (Murakami et al. 1994) と同様である。

解析から得られた結果を確認するために、非静力学モデル (Saito et al. 2006) を用いた理想実験により、バンドの走向に直交する鉛直シアの大きさがバンド内の循環に与える影響を調べた。ネスティングによって、水平分解能 5 km, 2 km, 0.5 km のモデルを順次実行し、0.5 km 分解能モデルの結果を解析した。深い対流と浅い対流の2つの場合について、それぞれ実験を行った。数値実験の結果によれば、走向に直交する鉛直面内の循環構造と鉛直シアの大きさと関係は、観測結果とほぼ同様であった。本研究での鉛直シアの大きさは、暖候期の深い対流雲ではすべて弱いシアの範疇にあるが、このような弱い鉛直シアであっても循環構造に違いが生じる一因として、降雪粒子が雪またはあられである

ことが考えられる。また、バンド内のエネルギー変換率についても、変換率に係わる各項の値や相対的な大きさも解析結果と同様であった。したがって、本研究で解析から導かれた、鉛直シアと循環との対応やエネルギー変換率などの結果については、一般性があるといつて差し支えないと考える。数値実験結果の重要な成果の一つは、走向に直交する鉛直シアが大きい場合であっても、鉛直シアの上流側に傾く上昇流域が形成されるためには降雪粒子の蒸発によって形成される冷気塊の存在が必須であるということである。

学位論文審査の要旨

主査	教授	藤吉康志
副査	教授	山崎孝治
副査	教授	渡辺力
副査	准教授	中井專人
副査	助教	川島正行
副査	教授	上田博

(名古屋大学地球水循環研究センター)

学位論文題名

Observational Study on Kinematic and Thermodynamical Structures of Longitudinal-Mode Snow Bands over the Sea of Japan during Cold-Air Outbreaks

– Difference in Characteristics under Weak and Large Vertical Shear Environment in the Band-Transverse Direction –

(寒気吹き出し時のLモードのバンド状降雪雲の運動学的、

熱力学的構造に関する観測的研究

– 走向に直交する方向の鉛直シアが弱い場合と強い場合における特徴の違い –)

寒気吹き出し時の日本海上に出現するLモードバンド状降雪雲について、ドップラーレーダーデータを主体に、ゾンデや飛行機観測データを併用して解析を行い、バンドの走向に直交する方向の鉛直シアが弱い場合と強い場合の運動学的、熱力学的構造の違いを明らかにした。用いたデータは、1989年から1993年にかけて東北地方の日本海沿岸部で行われた野外観測実験期間内のうち、1991年～1993年に観測されたものである。詳しく解析した5事例のうち、3事例は走向に直交する鉛直シアが弱い場に出現したバンドであり、残りの2事例は鉛直シアが強い場に形成されたバンドである。バンド内の3次元気流構造は、デュアルドップラーレーダー解析によって算出した。また、バンド内の熱力学的構造や水蒸気混合比、非降水凝結水物質（以後、「雲」と呼ぶ）の空間分布は、この3次元の風と反射強度とを用いたリトリバル法によって推定した。リトリバルでは、運動方程式で加速度項を加えるだけでなく、拡散項を熱力学の式と水物質の連続の式に導入するなどの改良を行い、3次元の解析を行った。この新しい解析方法の有効性は、推定された単位体積あたりの雲の質量の空間分布と飛行機観測によって実測された雲水量との比較、バンド内の熱の鉛直フラックスの大きさと他の研究例で報告されている寒気吹き出し時の対流雲内での大きさととの比較によって確認した。

鉛直シアが弱い場合と強い場合のバンド状降雪雲の主な相違点は、走向に直交する鉛直面内の気流構造である。この鉛直面内の気流構造は、面内の鉛直シアの大きさに応じて変化することを観測から確認した。鉛直シアは、持ち上げ凝結高度付近と、混合層高度の中間付近の高度における水平風から算出した。

鉛直シアが強い場合には上昇流域と下降流域とが分離されて長続きする循環が特徴的であり、上昇流は鉛直シアの上流側に傾いていた。これに対して鉛直シアが弱い場合には、循環はバンドの軸に対してほぼ対称であった。また、走向に直交する方向の鉛直シアの大きさが約 $1.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ よりも小さい場合には軸対称の気流構造になり、この値よりも大きい場合には上昇流と下降流とが分離された構造になることが、解析結果から示された。気流構造とは別に、バンドの組織化についても鉛直シアの強弱に応じて違いがあることがわかった。走向に直交する鉛直シアが強い場合には、走向に直交する方向の下層収束が強いために新しいセルはバンド内の鉛直シアの風下側に形成される。これに対して、鉛直シアが弱い場合には、新しいセルは走向に沿って形成される結果、バンドの走向は平均的な風向にほぼ平行になると考えられる。以上のような新しいセルの発生に関しては、走向に直交する水平風の収束だけでなく、走向に平行な風速成分による収束も重要であることがわかった。

鉛直シアが弱い場合と強い場合の L-モードバンドに見られた共通点として、水蒸気の凝結・蒸発に伴うバンド内下層での冷却率と雲内における加熱率がいずれも卓越していること、熱の鉛直フラックスの発散に伴う加熱率・冷却率が相対的に小さいことである。これらの加熱率と冷却率は、リトリーバルから推定された温位偏差や水蒸気混合比の空間分布を用いて見積もったものである。下層の冷却は、比較的乾燥した大気中で降雪粒子が蒸発するためであり、この蒸発によってバンド内下層の冷気塊が形成、維持されていると考えられる。雲内での加熱率はバンド内での上昇流の平均値に比例して大きくなる傾向があり、しかも最大で 1 時間あたり $4 \sim 4.5 \text{ K}$ と、他の地域での寒気吹き出し時の雲内における加熱率に比べて約 1 桁大きいこともわかった。以上のように、日本海上の L-モードバンド状降雪雲には、下層での大きな冷却率と、雲内での大きな加熱率という熱力学的な特徴があると考えられる。

観測から導かれた、走向に直交する鉛直シアの大きさとバンド内の循環との対応を確認するために、非静力学モデルを用いた理想化数値実験を行った。その結果、走向に直交する鉛直面内の循環構造と鉛直シアとの関係は、観測結果とほぼ同様であることがわかった。数値実験の重要な成果の一つは、走向に直交する鉛直シアが大きい場合であっても、鉛直シアの上流側に傾く上昇流域が形成されるためには、降雪粒子の蒸発によって形成された冷気塊の存在が必須であるということである。また、混合層よりも上空の比較的乾燥した空気が、エントレインメントによって混合層内に絶えず流入することによって、混合層内で降雪粒子が蒸発しやすい環境が維持されているものと考えられる。

以上のように、本研究の結果、冬季に日本海に発生する筋雲の運動学的及び熱力学的構造が、走向に直交する断面内の風の鉛直シアによって大きく異なることが示された。このように、本研究で得られた知見は、降雪雲の形成・維持・組織化と降雪予測の研究の発展に大いに貢献するものである。

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。