

博士（理 学） 佐 藤 晋 介

学 位 論 文 題 名

冬期季節風の吹き出し方向に直交する筋状雲の構造

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

大陸で生成された寒気が季節風として日本海上に吹き出す時、季節風の風向に平行な筋状雲（Lモードの雲）以外に、吹き出し方向に直交する走向を持つ筋状雲（Tモードの雲）が発生することが知られている。この時Tモードの雲は、大陸の山による地形効果によって特に発達したLモードの雲から北側に伸びるように現れる。これまでの研究によって、日本海中西部に出現するTモードの雲の走向は、下層風と上層風の間のシアーベクトル（即ち温度風ベクトル）の方向とほぼ一致することが知られており、その理由は線形論によって説明されている。しかしながら、この理論ではシアーベクトルの方向に並ぶ筋状雲の発達率が大きいことを示してはいるが、筋状雲が形成される過程や維持機構については明らかにしていない。また、線形論や室内実験の結果によって予測される2次元のロール状対流構造が、降水を伴うような非線形性が強い場合にも存在し得るかどうかという問題は調べられていない。さらに、Tモードの雲の根元に必ず存在するLモードの雲に関する問題も解決されていない。そこで本研究では、降水を伴うTモードの雲の内部構造をドップラーレーダー観測から明らかにし、その形成維持機構について調べることを目的とする。解析対象としたのは、ドップラーレーダー観測が行われた石狩湾に侵入してくるTモードの雲である。

まず最初に、気象衛星写真によってTモードの雲が石狩湾に侵入した事例を統計的に調べ、天気図やゾンデデータから得られる風速場、温度場との比較を行った。その結果、石狩湾に侵入するTモードの雲についても、その走向が雲底から雲頂高度間のシアーベクトルの方向と一致することが確認された。また、そのようなシアーベクトルは水平温度傾度が最大になる寒気ドームの前面で形成されることが分かったが、Tモードの雲の寿命は3～9時間程度であることから、そのような温度場はそれ程長続きしないことが示唆された。さらに、Tモードの雲の長さは水平温度傾度が大きいほど

ど長くなることから、Tモードの雲は根元のLモードの雲からシアーベクトルの方向に伸びるように発達することが考えられる。

次に、ドップラーレーダーで観測された6事例のTモードエコーについて解析を行った。いずれの事例においても、Tモードエコー（バンド）の走向はVAD法で測定された平均風速のシアーベクトルの方向とよく一致しており、バンドの長さはシアーベクトルの大きさに比例して長くなっていた。また、1本のバンドは幾つかの対流セルが一列に並ぶことによって構成されており、バンドの幅は8～12kmとほぼ一定であった。このことは、1本のバンドのスケールが基本的な対流セル（ベナールセル）の大きさによって決まることを示唆している。内部構造に関する解析は、まず最初に1台のドップラーレーダーによって観測された事例について行った。もっとも典型的なTモードエコーが観測された1987年2月14日の事例解析からは、2～3本のバンドが一塊にまとまって存在することと、それに対応して高度1.0km以下に風速のジェットが存在することが見つかった。また、Tモードエコーの形成過程が観測された1989年10月17日の事例からは、バンドの根元に背の高い対流セルが存在することが分かった。これらの結果の多くは、線形論では説明できない現象として興味が持たれたが、それらの詳しい原因については1台のレーダー観測結果からは解明できなかった。

そこで次に、3台のドップラーレーダーで観測した1992年1月22日の事例について詳しい解析を行った。3台のドップラーレーダーは、石狩湾を取り囲む小樽、石狩、厚田に設置され、これらの同時観測によって石狩湾上の約80km四方に及ぶ広範囲で3次元風速場が算出できることが示された。その算出方法には、3通りの組み合わせによる2台のドップラーレーダー解析結果を、測定精度に対応する重みを掛けた上で平均し、合成するという新たに開発した手法を用いた。また、鉛直速度を算出する方法も従来の方法に改良を加え、水平収束発散を鉛直方向に積分した後に地上と雲頂高度で $w=0$ となるように調整する新しい手法を提唱した。これらの手法を用いることによって得られる水平風速の精度は±0.5m/s程度であり、Tモードの雲の3次元気流構造が十分な精度で解析できることが確認された。

そこでまず、水平断面内の風速分布について調べた結果、バンドの進行方向の風速成分による収束発散場は各々のバンドエコーによく対応しているが、進行方向に直交する風速成分による収束発散はエコーに対応しておらず収束発散量も小さいことが分

かった。このことから、進行方向の風速成分はバンドエコーの形を維持しており、対流構造が基本的には2次元的であることを示している。次に、バンドの進行方向に沿った鉛直断面内では、各々のバンドエコーに対応してその進行方向前面に上昇流、後面に下降流が位置しており、反時計回りのロール状循環が存在することが分かった。このロールは片回りの循環であり、線形論で予測される時計回りと反時計回りのロールが一対になるものとは明らかに異なっている。このロール状循環は発達期のバンドでは雲底高度（約1km）より上層にのみ存在しており、雲底下には対流循環は存在していないかった。また、進行方向の風速成分には87年2月14日の事例にも見られたようなジェットが存在し、2～3本のバンドエコーにまたがっていた。この風速のジェットは片回りのロール状循環の下降流によって加速されることから、ロール下部の進行方向に向かう流れが2～3本のバンドエコーにまたがることによってジェットを形成すると考えられる。次に、衰退期のバンド内の対流循環の時間変化を調べたところ、雲底下では降雪粒子の蒸発冷却によって新たな下降流が励起され、ロール状対流の下降流が地上に達することが分かった。また、発達期には見られなかったバンドの根元に向かう流れが下層に現れた。この流れは、Tモードの雲の根元に存在するLモードの雲の下層に収束場を形成し、Lモードの雲を発達させると考えられる。そして、発達して背の高くなったLモードの雲の対流セルで生成される雪粒子は、シアーベクトルの方向に向かう上層の強い風によって流され、熱的不安定によって発生するTモードの雲の発達を種蒔き効果によって強めると考えられる。最後に、10分毎に得られた3次元空間内の風速データから発達期と衰退期のバンド内における流跡線を計算した結果、ロール状対流循環は3次元的には螺旋型の構造をしていることが分かり、ジェットに相当する流れは発達期にはバンドの先端に向かうが、衰退期には下降してバンドの根元に向かう流れになることが確認された。

以上ドップラーレーダー観測によって得られたTモードの雲の内部構造に関する結果は、（1）Tモードの雲は片回りのロール状対流で維持されている、（2）2～3本のバンドは一塊になり雲底高度付近に風速のジェットを伴う、（3）衰退期にはバンドの根元に向かう流れが下層に現れ、根元のLモードの雲を発達させる、というようにまとめられる。これらの結果は、いずれも線形論では説明できないものであり、降雪粒子の蒸発等による非線形効果が大きく効いていることが示唆される。

学位論文審査の要旨

主査 教授 竹内謙介
副査 教授 菊地勝弘
副査 助教授 遠藤辰雄
副査 助教授 上田博
副査 助教授 藤吉康志（名古屋大学）

学位論文題名

冬期季節風の吹き出し方向に直交する筋状雲の構造

冬季、ユーラシア大陸北部からの季節風の吹き出しが日本海を渡るとき、海上に一斉に筋状の雲が発生する。この筋状の雲は、ほぼ季節風の方向を向いている。これは寒冷な季節風が比較的高温な海面で熱せられて生じる対流によって起きると考えられている。しかし、これらの筋状雲から直交方向に伸びる雲のバンドの列が見られる事がある。前者をL型、後者をT型と区別する。

L型については多くの研究がなされてきたが、T型に関しては日本海中部に発生するものに関して若干あるだけである。これらは衛星画像の解析等によっているため、その構造については解らなかった。また、成因に関しては、線形乾燥対流理論が示すシアーの方向の対流である、あるいは根元のL型降雪雲の雲粒子が風で流されて出来たもの、等の説が示唆されていたに過ぎない。申請者の研究は、このT型の筋状雲を気象レーダーにより観測し、その詳細な構造を明らかにしたものである。

申請者は先ず、気象衛星データから石狩湾にT型降雪雲が進入している時の気象条件を解析した。その結果、T型が現れる時には雲底と雲頂の間の風速シアーが雲のバンドの走向と一致している事、雲のバンドの長さとシアーの強さに相関が有る事、寿命は3-9時間である事、寒気ドームの前面に発生する事等を明

らかにした。石狩湾で発生する頻度は一冬に5回程度、2回の季節風の吹き出しに対し1回程度であることも示された。

次にドップラーレーダーによる観測データの解析から、T型降雪雲の構造を詳細に調べた。解析は1987年から6冬季にわたって低温研究所のレーダーで観測されたデータが用いられた。1992年には名古屋大学の2台のレーダーも加わり、日本で初めて3台のドップラーレーダーによる観測がなされた。観測されたT型降雪雲は6例にのぼり、この内3台のレーダーでの観測例は3例である。この解析でもバンドの方向がシアーより一致する事、バンドがシアーより強いほど長くなる傾向が確認された他、次の様な事が明らかになった。

- 1) 雲頂高度は2-3km、バンドの幅は8-12km、間隔は幅の1.5-2倍で雲頂高度が高いほどバンドの間隔が広くなる傾向がある。
- 2) バンドはバンドの走向と直角方向(季節風の方向)に進行する。
- 3) 降雪バンドに伴ってロール状の対流が存在する。
- 4) 対流は基本的に2次元的なロール状循環である。
- 5) 対流は雲底高度より上に限定される。
- 6) 対流セルはすべてバンドの根元からみて半時計回りの循環である。
- 7) 2-3本のセル毎にまとまる傾向がある。
- 8) 下層に進行方向のジェットが存在する。このジェットは前述のまとまった2-3本のセル毎にまとまる傾向がある。
- 9) 衰退期には対流の下降流が地上に達し、また下層にバンドの根元に向かう流れが現れる。
- 10) バンドの根元を発した空気塊は螺旋状にバンド内を進行し、1回転程度で先端に達する。

これらの事から、T型降雪雲はそれ自身の対流で維持されること、また、基本的には線形の乾燥対流理論で説明される事が示された。しかし、線形理論では説明のつかない事(6、7、8)もあり、潜熱の放出等による非線形性の効果が示唆された。また、根元の対流(主としてL型降雪雲)との密接な関連も示された。

日本海上における対流現象を解明するためにはL型とT型両者の総合的な理解が必要であるが、申請者の研究は、これに信頼できる基礎を築いたものとして評価される。申請者はこの研究を通じて観測、解析プログラムの作成、解析のそれに高い能力を示しており、審査員一同は博士(理学)の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認定した。