

# Formation and maintenance processes of a thick cloud band over the northern part of the Sea of Japan during the cold air outbreaks

(冬季日本海北部に発生する太い筋雲の形成・維持機構)

## 学位論文内容の要旨

冬季日本海上では、大陸から寒気の吹き出しが起これると、気団変質に伴い筋雲が発生する。中でも、ロシア沿海州のシホテアリン山脈風下の特定の場所には、周辺の筋雲よりも幅の広い降雪バンド(太い筋雲)がしばしば発生し、北海道西部沿岸地域に局地的な豪雪をもたらす。この筋雲の成因について、過去に衛星画像と風上の地形から議論した研究があるが、筋雲の発生点付近での観測は皆無であり、提案された発生メカニズムは推測の域を出ていない。また、北海道西岸に設置されたドップラーレーダで観測に基づいて発達した筋雲の気流構造や内部構造について調べた研究は複数あるが、太い筋雲の発生・発達について調べた例はこれまでにない。そこで、本研究では非静力学モデルを用いて筋雲の数値実験を行い、特に風上の山岳地形の役割に着目して筋雲の形成、維持メカニズムについて調べた。

まず北海道西岸でX-Bandドップラーレーダを用いて太い筋雲の観測を行い、太い筋雲の構造とこの太い筋雲を起点として筋雲の走向とほぼ直交した方向に伸びる長さの短い雲(Transverse mode, 以下、T-mode と略す)のレーダエコーの構造について調べ、過去の研究例と比較を行った。2005年2月9日から13日にかけて筋雲が観測され、特に11日に最も太く筋雲が発達し、日本海から太平洋へ移動した低気圧の通過後のやや寒気の吹き出しが弱い時期にあたる。太い筋状雲が石狩湾に侵入すると、レーダ反射強度は小樽の高島岬沖で一時的に強まった。筋雲は石狩湾周辺の地形の影響を受けて発達することが先行研究により指摘されている。また、T-mode降雪雲は、対流性の雲が筋雲の北側に長さ20~30kmに並んでできていた。これらの観測された太い筋雲の水平、鉛直構造は過去の研究で報告されている特徴と類似していた。

次に、この筋雲の形成・維持過程について明らかにするために、非静力学モデルを用いた再現実験と風上地形に関する感度実験を行った。数値モデルは米国オクラホマ大学が開発したARPS (Advanced Regional Prediction Systems) を使用し、NCEP(National Center for Atmospheric Prediction)による客観解析値を初期・境界条件として計算を行った。下部境界条件として、海面水温は2月の気候値を固定して与えた。先行研究から筋雲の発生には風上山地の地形効果が重要であることが指摘されているため、ロシア沿海州のシホテアリン山脈全体を含むように計算領域を設定した。モデルの水平格子間隔は5 km, 鉛直格子間隔は最下層で200mとし上部にかけてストレッチさせた。初期時刻は2005年2月10日12UTC(日本時間午後9時)とし、36時間積分を行った。

モデルで再現された太い筋雲の発生位置や雲の分布などは衛星画像と良く一致し、また再現実験の温度、風の鉛直プロファイルなども札幌におけるゾンデ観測の結果と整合的で

あった。これから、モデルは筋雲の構造と環境場を良く再現していると考えられ、数値実験の結果を用いて太い筋雲の発生・維持過程を詳細に調べた。

太い筋雲は過去の研究で指摘されているシホテアリン山脈中央部（ロシア沿海州）にある海岸付近に位置する特定の山岳の風下で発生していた。また、筋雲の南西側の北西風は北東側の北北西風よりも温度が低く、筋雲に伴い前線構造が確認された。山岳周辺の大気場を調べた結果、シホテアリン山脈北部の標高は北東側が南西側に比べて高く（ $\sim 1.2\text{km}$ ）、風速は約 $10\text{ms}^{-1}$ で、強い安定成層（浮力振動数 $\sim 0.02\text{s}^{-1}$ ）をしていることから、フルード数は約0.4と見積もられた。そのため、下層の寒気はブロックされ、上空の高温位の空気が海上に吹き出していた。一方、南西側では山脈の標高が低く（ $\sim 0.8\text{km}$ ）、弱い安定成層（浮力振動数 $\sim 0.008\text{s}^{-1}$ ）をしており、フルード数は約1.6と見積もられ、下層の寒気は山脈を越えて海上に吹き出していた。これらの温度の違う気流により海上に前線帯が形成され、海岸付近の特定の山岳によって発生した筋雲はそこでさらに発達したと予想される。

次にこれらの地形効果が具体的にどのように筋雲の形成、維持に関わっているのかを確認するために、風上地形を変えた感度実験を行った。初期値、境界条件については基本条件と同じである。まず、筋雲の起点となるシホテアリン山脈中央部（ロシア沿海州）にある海岸付近に位置する特定の山岳の標高を変えた実験を行った。山岳標高を小さく設定した実験では、海上で前線帯が形成されたが筋雲に伴うバンド状の上昇流はやや南の位置から筋雲が発生した。この結果から海岸付近の特定の山岳が筋雲形成のトリガーとして重要であり、太い筋雲の発生点を固定する役割を持つことが分かった。次にシホテアリン山脈全体の標高分布の効果に着目し、水平約 $100\text{km}$ の移動平均をかけた滑らかな地形をモデル領域に与えた実験を行った。その結果、基本実験と同様に相対的に寒冷的な南側の北西風と相対的に温暖な北側の北北西風の間に筋雲が再現された。また、シホテアリン山脈北部の標高の高い領域に現れる北寄りの風の形成は定性的にはポテンシャル渦度の保存により説明できることが分かった。すなわち、山脈全体の地形効果が、日本海北部海上における風の場合と温度分布の形成に重要で、海上で筋雲を維持・発達させる役割があることが確認できた。この他に初期場の風を水平一様とし風速を変えた実験も行った。風速を十分大きくすると標高の高い山脈北側でも下層の寒気が海上に吹き出し、海上に明瞭な温度フロントが形成されず太い筋雲も不明瞭になった。寒気吹き出しが強い時には太い筋雲が不明瞭になることが衛星画像から確認されているが、この実験結果は観測と整合的であり、山脈全体の標高分布に起因した寒気ブロック強度の違いが太い筋雲の形成・維持において重要であることを裏付けるものである。

以上により、本研究ではロシア沿海州に広がるシホテアリン山脈中央部の海岸付近に位置するある特定の山岳の力学的地形効果と、シホテアリン山脈の大規模な地形の標高差に起因した山脈に沿った方向の寒気ブロック強度の違いが太い筋雲の形成・維持において重要であることを示した。このメカニズムは、日本海北部のみではなく、世界各地に発生する太い筋雲の形成・発達・維持過程にも適用でき、豪雪機構の解明に大きく寄与することが期待される。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 藤 吉 康 志

副 査 教 授 久保川 厚

副 査 教 授 三 寺 史 夫

副 査 助 教 川 島 正 行

副 査 准教授 坪 木 和 久 (名古屋大学地球水循環

研究センター)

## 学 位 論 文 題 名

### Formation and maintenance processes of a thick cloud band over the northern part of the Sea of Japan during the cold air outbreaks

(冬季日本海北部に発生する太い筋雲の形成・維持機構)

寒気吹き出し時、冬季日本海上に筋雲が多数発生する。中でも、ロシア沿海州のシホテ・アリニ山脈風下の特定の場所には、周辺の筋雲よりも太い筋雲がしばしば発生し、北海道西部沿岸地域に局地的な豪雪をもたらすことが知られている。この筋雲の成因については、これまで衛星画像と発生点付近の地形から推測されているに過ぎなかった。また、太い筋雲の維持過程について調べた研究もこれまでになかった。そこで本研究では、非静力学モデルを用いた数値実験を行い、風上の山岳地形の役割に着目して、筋雲の形成・維持機構について調べた。

まず北海道西岸でドップラーレーダを用いた観測を行い、太い筋雲のレーダエコー構造について調べ、過去の研究例と比較を行った。対象は、2005年2月9日から13日にかけて発生した筋雲であり、特に11日に最も太く筋雲が発達した。観測された太い筋雲の水平・鉛直構造は、過去の研究で報告されている特徴と類似していた。

次に、この太い筋雲の形成・維持過程について明らかにするために、非静力学モデルを用いた再現実験と感度実験を行った。数値モデルは米国オクラホマ大学が開発したARPS (Advanced Regional Prediction Systems) を使用し、NCEP (National Center for Atmospheric Prediction) による客観解析値を初期・境界条件として計算を行った。下部境界条件として、海面水温は2月の気候値を固定して与えた。先行研究から筋雲の発生には風上山地の地形効果が重要であることが指摘されているため、ロシア沿海州のシホテ・アリニ山脈全体を含むように計算領域を設定した。モデルの水平格子間隔は5km、鉛直格子間隔は最下層で200m

とし、上部にかけてストレッチさせた。初期時刻は2005年2月10日12UTC（日本時間午後9時）とし、36時間積分を行った。モデルで再現された太い筋雲の発生位置や雲の分布などは衛星画像と良く一致し、また再現実験の温度、風の鉛直プロファイルなども札幌におけるゾンデ観測の結果と整合的であった。これらから、モデルは筋雲の構造と環境場を良く再現していると考えられ、数値実験の結果を用いて太い筋雲の発生・維持過程を詳細に調べた。

太い筋雲は、過去の研究でも指摘されていたように、シホテ・アリニ山脈中央部（ロシア沿海州）にある海岸付近に位置する特定の山岳の風下で発生していた。また、筋雲の南西側の北西風は、北東側の北北西風よりも温度が低く、筋雲の発生地点に前線構造が見出された。シホテ・アリニ山脈北部の標高は北東側が南西側に比べて高く（ $\sim 1.2\text{km}$ ）、風速は約 $10\text{ms}^{-1}$ で強い安定成層（浮力振動数 $\sim 0.02\text{ s}^{-1}$ ）をしていることから、フルード数は約0.4と見積もられた。そのため、下層の寒気はブロックされ、上空の高温位の空気が海上に吹き出していた。一方、南西側では山脈の標高が低く（ $\sim 0.8\text{km}$ ）、弱い安定成層（浮力振動数 $\sim 0.008\text{ s}^{-1}$ ）をしており、フルード数は約1.6と見積もられ、下層の寒気は山脈を越えて海上に吹き出していた。これらの温度の違う気流によって海上に前線帯が形成され、海岸付近の特定の山岳によって発生した筋雲は、前線帯に沿ってさらに発達したと考えられる。

次に、大小の山岳地形が具体的にどのように筋雲の形成、維持に関わっているのかを明らかにするために、山岳標高を変えた感度実験を行った。大気場の初期値、境界条件については、再現実験と同じである。まず、シホテ・アリニ山脈中央部の海岸付近に位置する、筋雲の起点となる特定の山岳の標高を変えた実験を行った。標高を低くした実験では、海上で前線帯が形成されたが、筋雲の発生地点は再現実験と比べてやや南であった。この結果から、海岸付近の特定の山岳が筋雲形成のトリガーとして重要であり、発生点を固定する役割を持つことが分かった。次にシホテ・アリニ山脈全体の効果を明らかにするために、水平約100kmの移動平均をかけた滑らかな地形をモデル領域に与えた実験を行った。その結果、再現実験と同様に、相対的に寒冷的な南側の北西風と相対的に温暖な北側の北北西風の間に筋雲が形成された。また、シホテ・アリニ山脈北部の標高の高い領域に現れる北寄りの風の形成は、定性的にはポテンシャル渦度の保存により説明できた。この他に初期場の風を水平一様とし、風速を変えた実験も行った。風速を十分大きくすると標高の高い山脈北側でも下層の寒気が海上に吹き出し、海上に明瞭な温度フロントが形成されず、その結果太い筋雲も不明瞭になった。太い筋雲が強い寒気吹き出時には不明瞭になることは、衛星画像を用いた研究から知られている。実験結果はその結果と整合的であり、山脈全体の標高分布に起因した寒気をブロックする強さの違いが、太い筋雲の形成・維持において重要であることを裏付けるものである。

以上のように、本研究では、シホテ・アリニ山脈中央部の海岸付近に位置するある特定の山岳と山脈全体の地形効果が、日本海北部海上に発生する太い筋雲を維持・発達させる上で重要な役割を果たしていることを定量的に明らかにした。このメカニズムは、日本海北部のみではなく、世界各地に発生する太い筋雲の形成・発達・維持過程にも適用でき、豪雪機構の解明に大きく寄与することが期待される。

審査委員一同はこれらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院博士課程における研鑽や修得単位などもあわせ、申請者が博士（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。