

第33回メソ気象研究会の報告

—冬季のメソ擾乱とそれにもなうストーム—

コンビナー：大東忠保*

1. はじめに

冬季、総観規模低気圧の影響を受けた場の中で発生するメソ擾乱は、雪と風を集中させストームを引き起こす。1963年–1967年の気象庁北陸豪雪特別観測（気象庁 1968）によって本格的に始められた日本における冬季のメソ擾乱の研究は、衛星やレーダーなどの観測測器の充実と、数値モデルの高精度化によって進展し、多くの現象の発見と理解の体系化が行われてきた。

ここ10年ほどの大規模かつ高解像度のシミュレーションからは、古くから存在が知られていたポーラロウや日本海寒帯気団収束帯に関する研究で、その構造や形成メカニズムの理解に大きな進展があった。一方、近年の詳細観測からは新たなメソ擾乱が認識され、数値シミュレーションによる研究と合わせて形成メカニズムが理解されつつある。春季大会前日の2010年5月22日（土）に気象庁講堂で開催した今回のメソ気象研究会では、これら「冬季のメソ擾乱とそれにもなうストーム」について、6名の講演者に依頼し観測・シミュレーションの両方の研究から最新の話題を提供していただいた。当日は約90名の参加者があった。

2. 日本海寒帯気団収束帯に伴う直交型筋状雲の構造と発生機構

永戸久喜（気象庁予報部数値予報課）

寒気吹き出し時に、朝鮮半島の付け根付近から日本列島にかけて形成される日本海寒帯気団収束帯（JPCZ；浅井 1988）上では帯状雲がしばしば観測され、下流にあたる日本海沿岸に大雪をもたらすことが

多い。岡林（1969）によってその存在が初めて報告されて以来、帯状雲については数多くの研究がなされ、その発生機構や構造などが明らかになってきた。帯状雲は主に2種類の雲域によって形成される。1つは帯状雲の南西端に見られる発達したバンド状対流雲であり、もう1つは冬季の一般的な季節風向である北西風に直交する直交型筋状雲である。このうち、直交型筋状雲の構造や発生機構については、まだ十分に明らかにされていない。

冬季日本海メソ対流系観測–2001（WMO–01；吉崎ほか 2001）期間中の2001年1月14日に朝鮮半島の付け根付近から若狭湾付近まで南東方向に伸びる帯状雲が観測され、半日程度ほぼ同じ場所に停滞した。衛星画像に加え、WMO–01で行われた航空機による直接観測及び雲レーダー観測、気象庁観測船による高層観測などの観測データと気象庁非静力学モデルによる水平分解能1 kmでの実験結果を基に、直交型筋状雲の構造と発生機構について調べた。

観測された直交型筋状雲の構造には、混合層内の水平風の鉛直シアベクトルの向きに平行に、北東から南西の方向に伸びている、主に対流雲から形成されており、個々の対流雲は高さとともに鉛直シアの下流方向に傾いている、混合層の発達に伴い南西側ほど背が高く幅が広がっている、などの特徴が見られた。数値実験結果の解析から、直交型筋状雲はロール状循環に付随していたことがわかった。ロール状循環の軸は混合層内の鉛直シアベクトルの方向に平行であった。運動エネルギー収支解析の結果、ロール状循環は基本場の鉛直シアと浮力によって駆動されていることがわかった。

* 名古屋大学地球水循環研究センター。

© 2010 日本気象学会

3. オホーツク海沿岸帯状雲の成因と構造

藤吉康志 (北海道大学低温科学研究所)

オホーツク海沿岸域の雪雲は背が低く、気象庁のレーダーでは十分に捉えることができない。そこで北大・低温研では、2006年に紋別市に、2008年に雄武町に X バンドドップラーレーダーを設置し、オホーツク海上の雪雲と海水の観測を開始した。この観測によって、冬季の北海道オホーツク海沿岸には、長大で長時間持続する帯状雲が頻繁に発生し、オホーツク海沿岸の気象・海象に大きな影響を与えていることが明らかとなった。解析の結果、オホーツク海沿岸帯状雲には「弱い寒気吹き出し時に発生するタイプ I」と、「強い寒気吹き出し時に発生するタイプ II」という 2 つのタイプが存在することがわかった。

弱い寒気吹き出し時に発生するタイプ I の帯状雲は、オホーツク海沿岸域で等圧線の間隔が比較的広く、寒気の吹き出しが弱い日の夕方から明朝にかけて、陸風が吹いていた時に発生する。陸風と弱い北西季節風の間で下層に収束が見られ、海側の風が陸風の上に乗りがあがる。陸風は時間が経過するにつれ衰退していき、それに伴って帯状雲は陸側へと移動していった。これらは、北海道西岸帯状雲の成因や構造とほぼ同じである (藤吉ほか 1988 ; Tsuboki *et al.* 1989)。

一方タイプ II の帯状雲は、オホーツク海沿岸域で等圧線の間隔が比較的狭く、寒気の吹き出しが強い日に、時間帯によらず発生する。タイプ II が発生時した時の AMeDAS データを見ると、タイプ I とは異なって、気温の上昇がみられることもあった。海上の気温分布を見ると、帯状雲の海側よりも陸側の方が高く、タイプ I とは逆に、陸から海に向かう風が海側の風の上に乗りがあがっていた。この気温分布は宗谷暖流の影響によるものと考えられ、宗谷暖流の存在が帯状雲の発生や気流構造にも影響を与えている可能性が

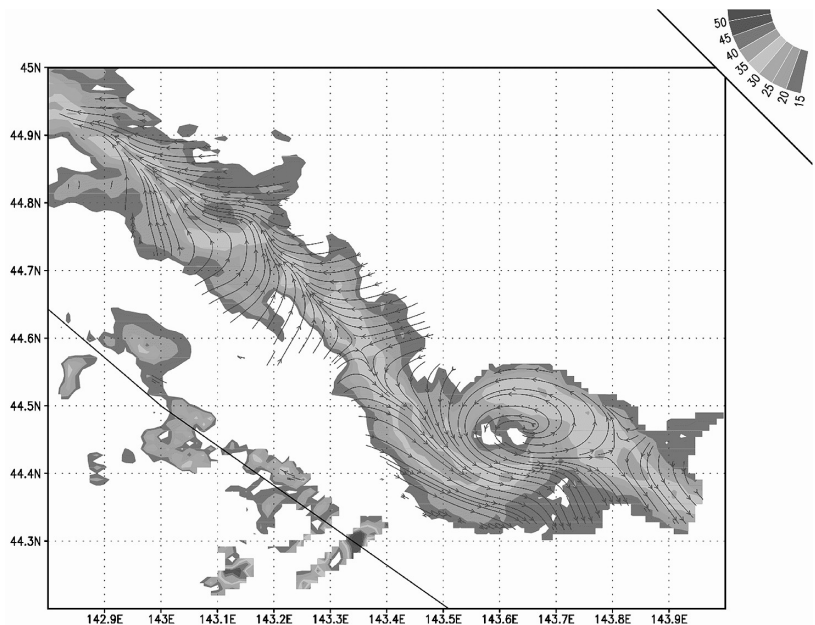
ある。陸から海に向かう風の成因としては、道北から道央にかけて走る山岳による地形効果が考えられる。また、帯状雲内には、直径数 km～数十 km の渦状擾乱も頻繁に発生する (第 1 図)。

2006年11月から2009年3月までの期間におけるオホーツク海沿岸帯状雲の発生回数は、タイプ I に比べてタイプ II が約 2 倍であったが、両タイプ共に、海水が北海道沿岸に接近している期間中は発生回数が減少していた。これは、海水の存在によって海陸の温度コントラストや海面から大気への熱の供給が減少するためと考えられる。また、オホーツク海沿岸帯状雲は多量の降雪をもたらすため、沿岸での海水形成や運動にも影響を与えている。

4. 北陸海岸部に沿って停滞する線状降雪帯の形成機構

岡本宏樹 (名古屋大学地球水循環研究センター)

冬季寒気吹き出し時、北陸地方西部沿岸では、しばしば西南西から東北東方向に伸びる線状降雪帯の停滞が観測される。しかし、このような海岸部に沿って停滞する線状降雪帯については過去あまり研究されておらず、その実態についてよくわかっていない。本研究



第 1 図 タイプ II の帯状雲内に発生した、渦状擾乱のレーダーエコー構造 (高度 0.75km) と渦に相対的な気流の流線 (2008年 2 月 13 日 09 時 30 分 (日本時))。

では、北陸地方西部沿岸に発生する停滞性線状降雪帯を対象とし、2009年1月24日～26日に発生した事例について、雲解像モデルを用いたシミュレーションとレーダー観測により、線状降雪帯の形成・維持メカニズムを調べた。

まず、2003年12月から2009年3月までの過去6冬季間の北陸西部において停滞する線状降雪帯の発生件数と発生時の環境場の特徴を調べた。過去6冬季間では、8事例の発生が確認された。このときの環境場は、いずれの事例においても北陸西部下層において強い西～西南西風が卓越しており、通常の寒気吹き出し時と季節風の風向に違いがみられた。

2009年1月24日～26日に発生した事例について雲解像モデルCReSSを用いて再現実験を行った。計算結果は、気象庁レーダーの観測値と比較して、降水量、停滞位置ともによく現象を再現していた。再現された線状降雪帯の下層では、海上の西寄りの風と、陸側の南寄りの風との間で収束場が形成されており、この収束によって降雪帯が形成・維持されていた。また、この線状降雪帯下層の収束は、名古屋大学Xバンドマルチパラメーターレーダーによる観測からも確認された。この陸側の南寄り風の形成要因を調べるため、地形・陸面粗度・陸面の熱的性質についての感度実験を行い、再現実験の結果と比較した。その結果、地表温度の海陸差をなくした実験のみ、線状降雪帯・収束帯がまったく形成されなかった。そのほかの感度実験では、すべての効果が含まれている標準実験と比較して、線状降雪帯・収束帯は弱まったものの、形成・維持されていた。この結果は、3つの効果のうち、地表温度の海陸差の効果が最も本質的であったことを意味している。

この地表温度の海陸差の効果がどう陸側からの南寄りの風に影響しているかを調べるために、収束帯付近の空気塊に対し地形をなくした感度実験の結果を用いてバックトラジェクトリー解析を行った。トラジェクトリー解析結果では、収束帯付近の空気塊の経路は、収束帯の南北で海上を吹走してきた西風と、陸上を吹走してきた南寄りの風に分かれていた。そこで陸側の南寄り風の空気塊にかかっていた力の時間変化を運動方程式の各項毎に調べたところ、この空気塊は北向き気圧傾度力の増加によって東西方向の非地衡風成分が大きくなっており、これが北向き加速度の増大につながったと考えられる。一方、収束帯の北側に到達した空気塊は、日本海上を吹走中、収束帯南側に達した空

気塊より大きな北向き気圧傾度力を受けていたが、風の東西成分が場から見積もられた地衡風の東西成分とほぼ一致しており、北向き加速度の増加にはつながらなかったと考えられる。

5. ポーラーロウの理想化実験

柳瀬 亘(東京大学大気海洋研究所)

ポーラーロウ(以下、PL)は冬季高緯度の海洋上で発生する水平スケール200～1000kmの低気圧であり、本研究会のテーマの中では比較的大きなスケールの現象である。日本海に発生するPLは里雪型豪雪、6千トン級船舶の海難事故、強風による列車転落事故などを引き起こし、防災的な観点からも重要な現象である。PLの雲パターンは実に多様であり、スパイラル状やコンマ状、それ以外の形状なども見られる。PLの発達メカニズムには、台風のように積雲対流の凝結熱で発達するという説(ここでは熱的不安定と呼ぶ)や、温帯低気圧の様に傾圧不安定で発達するという説など幾つかの説が提案されている。実際のPLの事例を解析すると、複数のメカニズムが同時に働いているようであるが、現実の複雑な大気プロセスから明瞭な結論を導くのは困難である。

本研究では大気環境場を単純化した理想化実験を行うことで、PLの発達に重要と考えられる熱的不安定と傾圧不安定との関係を理解することを試みた。実験では対流雲の組織化を現実的に表現できるよう、水平格子間隔5kmの気象庁非静力学モデルを利用した。実験では環境場の傾圧性をパラメータとして変化させ、PLの性質を体系的に調べた。傾圧場の弱い実験では、台風に似たスパイラル状のPLが発達し、凝結熱のみが有効位置エネルギーを生成していた。一方で傾圧場の強い実験では、温帯低気圧に似たコンマ状のPLが発達し、凝結熱と基本場からの変換が同程度に有効位置エネルギーを生成していた。この実験のPLは、凝結熱により発達率と内部構造が変化した傾圧不安定波として解釈できる。中間の傾圧場の実験ではPLの構造や性質も中間的であったが、PLが北向きに移動するという特有の性質も見られた。その他、傾圧場の違いにより、PLの発達における初期値依存性や地表面摩擦の役割などが異なることも確かめられた(Yanase and Niino 2007)。

一方で、上記のような環境場の不安定によるPLの発達過程の研究では、初期に下層の渦を形成するメカニズム(発生過程)までは十分に説明されていない。

その候補の1つである上層擾乱の影響について今後も研究を進めることが、より現実的なPLの理解のために重要である。

6. 日本海側で冬季に突風をもたらすじょう乱の観測

楠 研一 (気象研究所)

高速鉄道など交通システムへの自然災害の1つに突風災害があり、その対策は重要な課題である。そのため私たちは、鉄道用の突風探知システム開発に向けたプロジェクトを2007年から行っている。突風は、サイズが小さく寿命が短いため捉えることが難しく、謎に包まれているといっても過言ではない。そのためこのプロジェクトは突風の自動探知という工学的な側面に加え、突風やそれをもたらす気象じょう乱の解明という自然科学のアプローチを色濃く持っているのが特徴である。今回は主に後者の取組みについて紹介した。

私たちは山形県に大規模な高密度観測網を立ち上げ、冬季日本海側の突風事例を包括的に抽出しその特徴を明らかにしようとしている。これまでの調査(2007-2008年冬季および2008-2009年冬季)から、地上で被害をもたらした事例は1例しか観測されなかったものの、突風の9割弱は上空に渦を伴う、渦のほとんどは日本海上で発生して上陸する、など興味深いことがわかった。このような結果を踏まえ、渦を探知してその移動を追跡することを基本として昨年度開発した突風探知システムの初期試作モデルを紹介した。

突風事例の詳細な解析を重ねるにつれ、渦の自動探知に全面的に依存した手法だけではしのげない突風の複雑な様相が見えてきている。たとえば海上の渦が上陸すると渦の強さが不連続に変化する場合が見られる。特に渦が上陸して急激に強まる場合を想定し安全係数を模索する必要がある。また陸上付近で初めて渦が形成される事例も解析されている。この場合、海上から流れてくる渦よりも探知後の余裕時間が短いケースもありえるだろう。さらに基本的な問題として、レーダーが見る上空の様相と地上付近の突風との関係を把握し、手法に反映させることも重要となる。

このように突風探知システムの開発・改良は突風のメカニズム解明につながっているため、実用化へ向けた課題は多く、探知システムの初期試作モデルの利用として主に始まっているのは、レーダーでとらえられた渦状突風の諸特性を自動解析する「道具」としてである。とはいえ、これまではこのような渦じょう乱は

稀にしか捉えられず、研究者が長い時間をかけ1つの事例を手作業で解析してきたものであった。私たちのチームは、観測網で捉えた多くの事例を高速で自動解析し、統計的にも扱えるようになってきたことで、このような現象の理解を飛躍的に進めることも目指している。

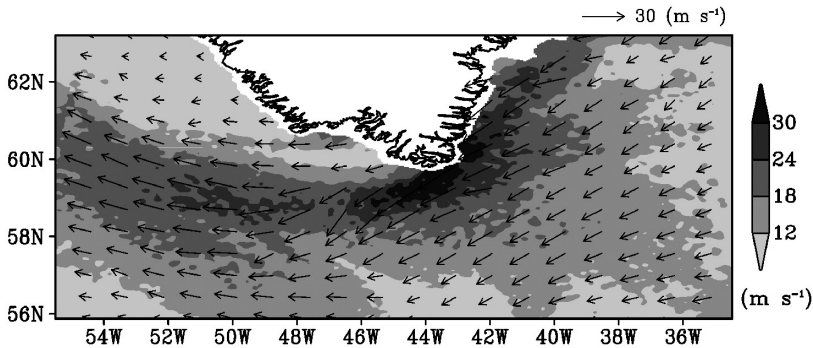
発表の最後に、最近の取組みとして高解像度モデルで再現された非スーパーセル型竜巻についても紹介した。メカニズム解明に加え探知手法の改善につながることを期待される。更に新しい取組みとして、突風の前兆といわれている雷放電の精密観測のための機器開発と初期観測結果を紹介した。

7. グリーンランド南端で東風中に生じる tip jet の形成メカニズム

大東忠保 (名古屋大学地球水循環研究センター)

冬季においてグリーンランド南端に位置するフェアウェル岬の沖は、世界中で最も頻繁に強風が起こる場所である (Sampe and Xie 2007)。このグリーンランドの先端付近に生じる強風域は tip jet とよばれており (Doyle and Shapiro 1999)、海洋との大きな熱・運動量交換によって海洋の沈み込みとの関連が示唆されている重要な現象である (Pickart *et al.* 2003)。tip jet は総観規模低気圧の位置によって決まる環境場の風向が東か西かによって大きく2種類に分類されており、本研究では東風中に生じるものを対象とした。東風中に生じる tip jet は、英語では easterly tip jet (以下、ETJ) もしくは歴史的に先に指摘された西風中の tip jet とは反対向きであるという意味で reverse tip jet とよばれている。

ETJ に関しては気候学的な解析からその存在が示されてきたが、事例解析はほとんど皆無であり、詳細な構造や形成メカニズムは不明であった。そこで、本研究では Cloud Resolving Storm Simulator (CReSS) を用いたシミュレーションによってその構造と形成メカニズムを調べた。シミュレーションでは、衛星観測で 30ms^{-1} を越える地上風が観測された事例 (第2図) を再現した。ETJ は風上にあたるグリーンランドの東海岸に沿った北寄りの風として形成され始め、高気圧性の回転を示しながら下流に向かう。この高気圧性回転を示す最大風速付近は超地衡風的な風速分布を示した。環境場と比べて風速が著しく増大する高度は3000m以下に限定されていて、大部分はグリーンランド内陸の標高よりも低い高度であっ



第2図 Quick Scatterometer (QuikSCAT) により得られたETJに伴うグリーンランド南端沖の海上風の分布 (2000年12月21日21時37分 (世界時))。

た。また、グリーンランドの風下側のETJの内部では、海岸部のフィヨルド地形の起伏に対応するように比較的スケールの小さな強風域の極大がいくつか形成されていた。これらの構造から、ETJ全体の形成メカニズムは2000m以上に及ぶグリーンランド地形によってブロックされた気塊の減速により地衡風速より遅い風速がまず形成され、その気塊が地衡風速に調整される途中で超地衡風のETJが形成されると説明される。ETJの中に生じるより小スケールの風速の極大域は、無次元の山の高さ(フルード数の逆数)の議論によって、山と谷をもつフィヨルド地形への応答として生じていると説明できる (Ohigashi and Moore 2009)。

なお、ETJを含むグリーンランドの地形効果に関してはこれまで十分な観測が行われていなかったが、2007年にアイスランドを拠点とした航空機観測が行われたことによって大きな進展があった (Renfrew *et al.* 2008)。これらの結果についてはQuart. J. Roy. Meteor. Soc.の第135巻645号に特集号が組まれているので参考にさせていただきたい。また、琉球大学の遊馬教授からtip jetと同様の現象がカムチャツカ半島の南端部でも起こるといったコメントがあったことを付記しておく。

8. 総合討論

楠氏の発表では「突風探知システム」が実用化に向けて開発中であるとのことで、メソ気象の研究が自然災害の対策に役立るということは大変喜ばしいことである。しかしながら、そのような工学的な応用の基

礎となっているのは、個々の現象の構造の解明とメカニズムの理解という理学的な側面であることを深く認識しなければならない。気象庁の現業の方からも「メカニズムの理解が予報を出す際の自信となっており、今後もメカニズムの解明とその概念の普及を期待する」とのコメントがあった。メソ気象の研究者としては大変励みとなるコメントであるとともに、なお一層現象の理解に励まなければ

ならない必要性を実感・共有できたと思う。

現象の理解のためには、時間的・空間的にさらに高解像度で構造を明らかにすることが今後も1つの基礎となると思われる。この点に関して、国内においても雲・降水システムの3次元構造を数十秒おきに観測できるフェイズドアレイレーダーの開発が進行中であり、こういった測器ができることを念頭に新たな観測計画が進められることが期待される。一方、数値モデルについても高解像度化が進められなければならないが、これは単純に格子間隔を小さくしていけばよいという場合ばかりではないようである。その例として、乱流のパラメタリゼーションにおいて、積雲のパラメタリゼーションに似た格子依存の問題が残されているというコメントが新野理事長からあった。乱流に限らずパラメタリゼーションには格子間隔を暗に想定している部分があるため、高解像化は十分気をつけて行う必要があるだろう。

なお、今回のメソ研究会では冬季のメソ擾乱と題しながら、主要な現象の1つである冬季雷雲を取り上げなかった。雷の発生には雲内の粒子が深く関わっていることが知られており、ここ数年国内に多く導入された偏波レーダーによる研究の進展が期待される。また同時に数値モデルによる雷のシミュレーションの高度化にも期待したい。

謝辞

会場の準備と進行の補助をしていただいた気象庁本庁の職員の皆様、および名古屋大学の学生の方々に感謝いたします。

参 考 文 献

- 浅井富雄, 1988 : 日本海豪雪の中規模の様相. 天気, 35, 156-161.
- Doyle, J. D. and M. A. Shapiro, 1999 : Flow response to large-scale topography : The Greenland tip jet. *Tellus*, 51A, 728-748.
- 藤吉康志, 坪木和久, 小西啓之, 若濱五郎, 1988 : 北海道西岸带状収束雲のドップラーレーダー観測 (I)—温暖前線型—. 天気, 35, 427-439.
- 気象庁, 1968 : 北陸豪雪調査報告. 気象庁技術報告, (66), 481pp.
- Ohigashi, T. and G. W. K. Moore, 2009 : Fine structure of a Greenland reverse tip jet : A numerical simulation. *Tellus*, 61A, 512-526.
- 岡林俊雄, 1969 : 昭和44年1月上旬の日本海側大雪のときの気象衛星写真. 天気, 16, 79-80.
- Pickart, R. S., M. A. Spall, M. H. Ribergaard, G. W. K. Moore and R. F. Milliff, 2003 : Deep convection in the Irminger Sea forced by the Greenland tip jet. *Nature*, 424, 152-156.
- Renfrew, I. A. *et al.*, 2008 : The Greenland Flow Distortion experiment. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 89, 1307-1324.
- Sampe, T. and S.-P. Xie, 2007 : Mapping high sea winds from space : A global climatology. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 88, 1965-1978.
- Tsuboki, K., Y. Fujiyoshi and G. Wakahama, 1989 : Structure of a land breeze and snowfall enhancement at the leading edge. *J. Meteor. Soc. Japan*, 67, 757-770.
- Yanase, W. and H. Niino, 2007 : Dependence of polar low development on baroclinicity and physical processes : An idealized high-resolution numerical experiment. *J. Atmos. Sci.*, 64, 3044-3067.
- 吉崎正憲, 加藤輝之, 永戸久喜, 足立アホロ, 村上正隆, 林 修吾, WMO-01観測グループ, 2001 : 「冬季日本海メソ対流系観測-2001 (WMO-01)」の速報. 天気, 48, 893-903.