

論文の内容の要旨

Characteristics and Environments of Mesoscale Vortices that Develop over the Sea of Japan in Cold Seasons

(冬季日本海のメソスケール渦状擾乱の特性と環境場)

渡邊 俊一

冬季の高緯度海上では、polar mesocyclone や polar low と呼ばれるメソスケールの渦状擾乱 (mesoscale vortex; 以下では MV と略す) がしばしば発生する。日本海はこのような MV が比較的低緯度で発生する興味深い海域である (図 1)。MV は強風や豪雪などを伴うため沿岸地域や海上交通に大きな影響を与えるが、空間スケールが小さく、短期間に発達するため、その正確な予測は現在でも難しい。

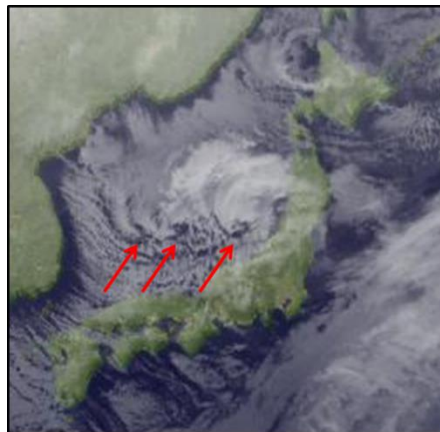


図 1 日本海の MV の衛星画像

衛星観測によると、MV の水平スケールはメソ α スケール (200 km ~ 2000 km) からメソ β スケール (20 km ~ 200km) まで幅広い領域にわたっており、雲域の形もスパイラル状やコンマ状でなど様々である。さらに、発達の途中でこれらの形態が変化することもある。このような違いはそれぞれの MV の発生・発達メカニズムの違いによると考えられる。これまでに多くの事例解析が行われ、日本海の MV の発生・発達メカニズムとして、日本海

寒帯気団収束帯（JPCZ）の水平シアに伴う順圧不安定、強い温度傾度による傾圧不安定、凝結熱の寄与、上層の高渦位の寄与などが示されてきた。しかし、MV の発生・発達にはこれらが複合的に寄与しており、個々の事例解析のみからでは MV の一般的特徴を理解するのは難しい。一方、MV の多様性を理解するため、理想化された環境場を用いた数値実験も行われており、それらによると MV の多様性は周囲の環境場と強い関係があることが示されている。

このような MV の多様性と周囲の環境場の関係を理解するため、統計的な研究も行われてきた。それらの多くは、衛星画像や天気図などから主観的に MV を抽出しているが、このような手法では扱えるデータ量に限界があり、十分な統計的調査を行うのは難しい。それに対して、近年では再解析データなどから客観的に MV を抽出する手法が用いられるようになってきた。しかし、再解析などの粗い解像度のデータセットからでは、メソ α スケールの MV は抽出できるが、メソ β スケールの MV の抽出は難しい。衛星画像を用いた調査ではメソ β スケールの MV も多く発生していることが示されており、メソ β スケールも含めた MV の統計的調査は不十分である。一方、近年では現業モデルの高解像度化が進んでおり、メソ β スケールの MV もよく再現できるようになってきている。

本研究ではまず MV と環境場の統計的調査のために、気象庁メソ解析データ（MANAL）を用いた MV の客観的抽出手法の開発を行い、それを用いて MV の気候学的特徴を調べた。次に、MV を発生位置と経路によって分類し、それぞれの MV ごとにコンボジット解析と数値シミュレーションによって発生環境場と構造の一般的特徴について明らかにした。

本研究で開発した MV の客観的追跡手法では、5 km という高い解像度を持つ MANAL を用いることで、これまで困難であったメソ β スケールの MV や、より大きなスケールの擾乱の中に存在する MV も精度よく抽出することが可能になった。渦の形状や大きさにもとづいて温帯低気圧などの総観規模の擾乱と MV の分離を行う新しい手法を開発することにより、従来の研究とは異なり、成層などの環境場に依らずに分離を行うことが可能になった。

この客観的追跡手法を 2009 年 11 月から 2015 年 3 月までの 6 冬季の MV に適用し、その気候学的特徴を調べた。MV の発生は 1 月に最も多かった。MV の分布は日本海西部と日本海北東部に集中しており（図 2）、この結果は短期間の衛星画像を用いた先行研究と整合的である。さらに、MV を渦度が最大となった地点によって日本海北部(NJ)、日本海中部(CJ)、日本海西部(WJ)に分類し（図 2b）、それぞれの特徴を調べ、それぞれの海域ごとに大きさ・強度・移動方向の特徴を明らかにした。

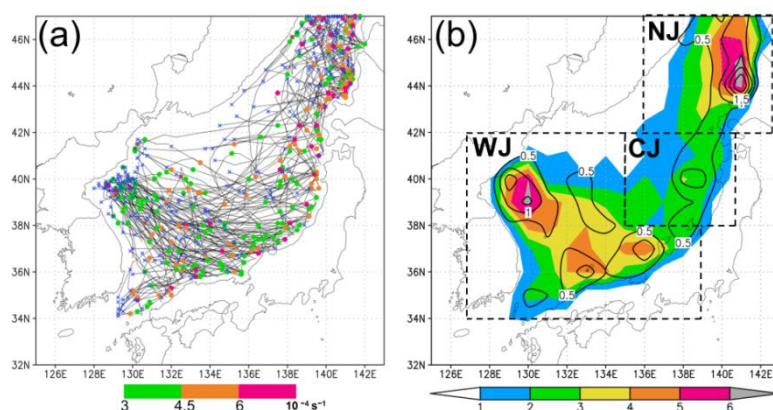


図 2 (左) MV の経路。青の点は MV の発生位置、丸は渦度が最大となった位置とその最大渦度（色）を表す。(右) 1 冬季平均の $1^\circ \times 1^\circ$ の格子を通過した MV の個数（シェード）と $1^\circ \times 1^\circ$ の格子内で渦度が最大となった MV の個数（コンター）。

次に、MV の一般的な発生環境場と構造についてコンボジット解析を用いて調べた。まず、MV を位置と移動方向によって分類した。次に、それぞれの MV について基準となる時刻(KT)

を定義し、前後 48 時間についてラグコンポジットを作成した(以下では KT の x 時間前(後)を $- (+) x \text{ hour}$ と表記する)。コンポジットには MANAL と気象庁全球解析 (GANAL) を用いて、緯度・経度を固定してコンポジットを作成した。

いずれの MV の発生環境場にも下層におけるアジア大陸からの寒気の吹き出しが見られ、MV は傾圧性や水平シアの大きな寒気の先端付近で発生・発達していた。また、上層には寒気を伴うトラフが存在することも MV の発生環境場に共通していた。このトラフによって成層が不安定化されるとともに、トラフの前面には力学的な上昇流が誘起され、対流が起こりやすい環境場が形成されていた。しかし、寒気の吹き出しや上層のトラフの MV に対する位置関係は MV のタイプごとに異なっていた。また、メソスケールの構造も MV のタイプごとに異なっていた。

日本海北東部で発生する MV のうち、南下する MV (NE_s) は東西方向の温度勾配の中で発達しており (図 3a)、このとき上層のトラフに伴う高渦度域は MV の南側を通過していた。このような位置関係は MV の東西方向の温度勾配による傾圧的な発達を示唆している。一方、東進する MV (NE_e) は上層トラフの東側で、南北方向の温度勾配の中で発達しており (図 3b)、南北方向の温度勾配によって傾圧的に発達していると考えられる。

日本海北西部で発生し東進するもの (NW_e)、南東進するもの (NW_se)、日本海南西部で発生するもの (SW_W) は JPCZ の中で発生していた (図 4)。しかし、それぞれで JPCZ の振る舞いと MV との関係に違いが見られた。NW_e は JPCZ が反時計回りに回転し、東西方向に伸びた中で発達する (図 4a)。一方、NW_se は JPCZ が時計回りに回転した後、南下していくときに、JPCZ が東西方向から北西 - 南東方向に折れ曲がる場所で発達する (図 4b)。また、SW_W は JPCZ が南北方向に伸びているときに発生していた (図 4c)。また、上層の高渦度域の経路も異なっており、NW_e と NW_se については上層の高渦度域が朝鮮半島北部を通過するのに対して、SW_W に対しては朝鮮半島の南部を通過していた。

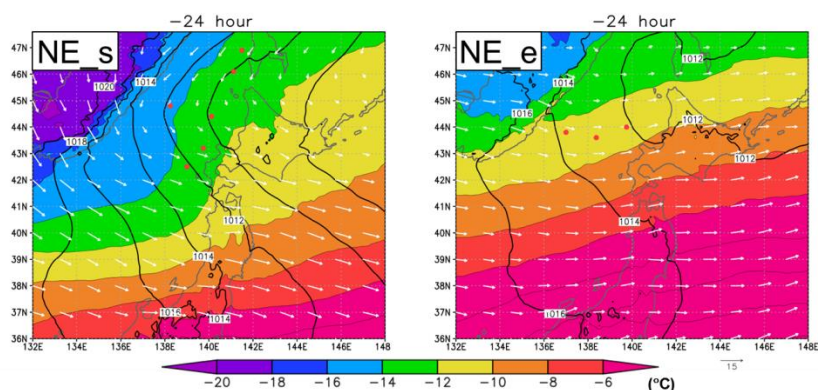


図 3 850 hPa 高度の気温 (シェード; $^{\circ}\text{C}$)、水平風 (ベクトル; m s^{-1})、海面気圧 (コンター; 2hPa 間隔) の -24 hour のコンポジット場。(左) NE_s、(右) NE_e。図中の赤点は MV の位置を表す。

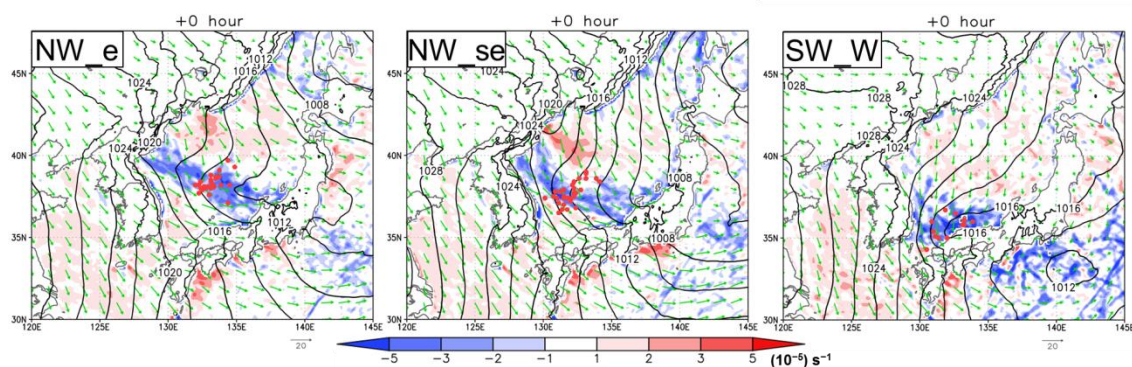


図 4 950 hPa 高度の発散 (シェード; 10^{-5} s^{-1})、水平風 (ベクトル; m s^{-1})、海面気圧 (コンター; 2 hPa 間隔) の 0 hour のコンポジット場。(左) NW_e、(中) NW_se、(右) SW_W。図中の赤点は MV の位置を表す。

次に、GANALによるコンポジット場を初期値・境界値とする数値シミュレーションを行った。数値シミュレーションには気象庁非静力学モデル（JMA-NHM）を用いた。モデルの水平格子間隔は 10 km、計算領域は−24 hour における上層のトラフの位置が領域内に含まれるように設定した。−48 hour のコンポジットを初期値、6 時間ごとのコンポジットを境界値として与え、+24 hour まで計算を行った。GANAL のコンポジットを用いているため、初期場におけるメソスケールの擾乱はほぼ平滑化されていた。

このような数値シミュレーションをそれぞれの MV について行ったところ、対応する MV の特徴が再現された。このことから、コンポジット解析で得られた大規模な環境場がそれぞれの MV に対する環境場としての一般的な特徴を持つことが確かめられた。さらに、初期場に MV のもととなる擾乱がないことから、総観スケールの環境場から MV を発生・発達させるメカニズムがあることが示唆される。そこで、再現された MV に対して感度実験を行い、NE_s、NW_e、NW_se、SW_W の発生・発達メカニズムについて考察した。

NE_s に対して凝結熱の効果を取り除いた感度実験を行ったところ、発生段階・発達段階いずれにおいても MV の発達が急激に弱まった。このことから、MV の発生・発達に凝結熱が大きく寄与していることが分かった。さらに、海面水温・海水の分布・地形を変化させた感度実験を行ったところ、間宮海峡および北海道西方の高い海面水温とユーラシア大陸東岸の山岳による寒気のブロックが北海道西方の大気の成層を弱め、MV が発達しやすい環境場を形成していることが明らかになった。

NW_e、NW_se、SW_W では下層の JPCZ に対して上層の高渦度域が作用することで MV が発生していた。さらに MV の発達には凝結熱の効果が大きかった。朝鮮半島北方の山岳および朝鮮半島の地形を変化させた感度実験を行ったところ、朝鮮半島の北方の山岳を取り除いた実験では JPCZ、MV いずれも形成されず（図 5）、JPCZ・MV の発生・発達にこの山岳による寒気のブロックが非常に大きな役割を果たしていることが明らかになった。一方、従来の研究とは異なり、朝鮮半島の熱的な影響は小さいことが明らかになった。また、JPCZ の向きは JPCZ そのものを含めたメソスケールの現象ではなく、より大きなスケールの風向で決まることも明らかになった。

本研究では、冬季日本海上の MV の統計的な特徴、一般的な環境場および構造について、詳細に明らかにした。特に、総観スケールの環境場と日本海とその周辺の地形・海面水温などが日本海のそれぞれの領域に特徴的な MV を発生させていることを初めて明らかにした。本研究による理解は、社会的に大きな影響を持つ MV を予報する上でも有用であると考えられる。

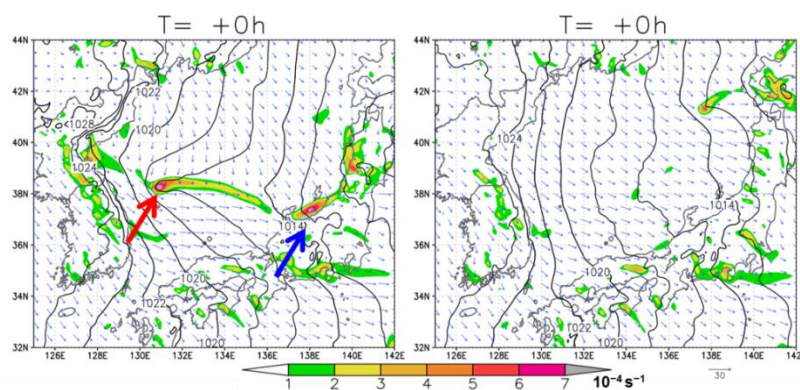


図 5 NW_se のコンポジット場を用いたシミュレーションの 0 hour における 950 hPa 高度の渦度（シェード; 10^{-4} s^{-1} ）、水平風（ベクトル; m s^{-1} ）、海面気圧（コンター; 2hPa 間隔）。（左）標準実験、（右）朝鮮半島北方の山岳の標高 500m 以上の部分を取り除いた感度実験。矢印は MV を示す。