

寒冷渦を抽出・追跡する新手法の紹介と日本域へ到来する寒冷渦の経路の調査

春日悟¹・本田明治²・浮田甚郎²・山根省三³・川瀬宏明⁴・山崎哲⁵
(1 三重大学、2 新潟大学、3 同志社大学、4 気象研究所、5 海洋研究開発機構)

1、はじめに

寒冷渦の日本域へ到来する方角は二つのパターンが知られている。一つは、西北西から北西の方角であり、偏西風蛇行に伴うものと思われる。広沢ら(2006)は気象庁の発行する 500 hPa 高層天気図を用いて春季と夏季に極東域で発生する寒冷渦を統計的(1985 年から 2004 年)に調査し、5 月に出現最頻であり、春は東向き、夏は北東向きに移動するものが多いことを示した。その要因の一部として、5 月は極渦(偏西風ジェット)が強過ぎず尚且つ寒気も比較的極東域の近くにあることを指摘した。もう一つのパターンは、南から南東より到来するものであり、太平洋の中央で生成し西進する寒冷渦である。このような寒冷渦は Tropical upper tropospheric trough cell (TUTT cell, Sadler 1976) と呼ばれ、夏季の対流圏上部に発生するという特徴がある。Wen et al. (2018) は北西太平洋域に発生する TUTT cell を NCEP FNL 再解析データの 200 hPa ジオポテンシャル高度(Z)の極小点を追跡し統計解析(2006 年から 2015 年)を行い、7 月に出現最頻、平均的な移動速度は西から南西向きに 6.6 m/s であることを示した。これらの研究はそれぞれ異なる解析領域で調査されており、尚且つ両領域とも日本の縁辺ではあるが日本直上を通過した寒冷渦を主眼に置いたものではなかった。また、二つのパターンの方向から到来する寒冷渦を画一的に調査した例はこれまでない。

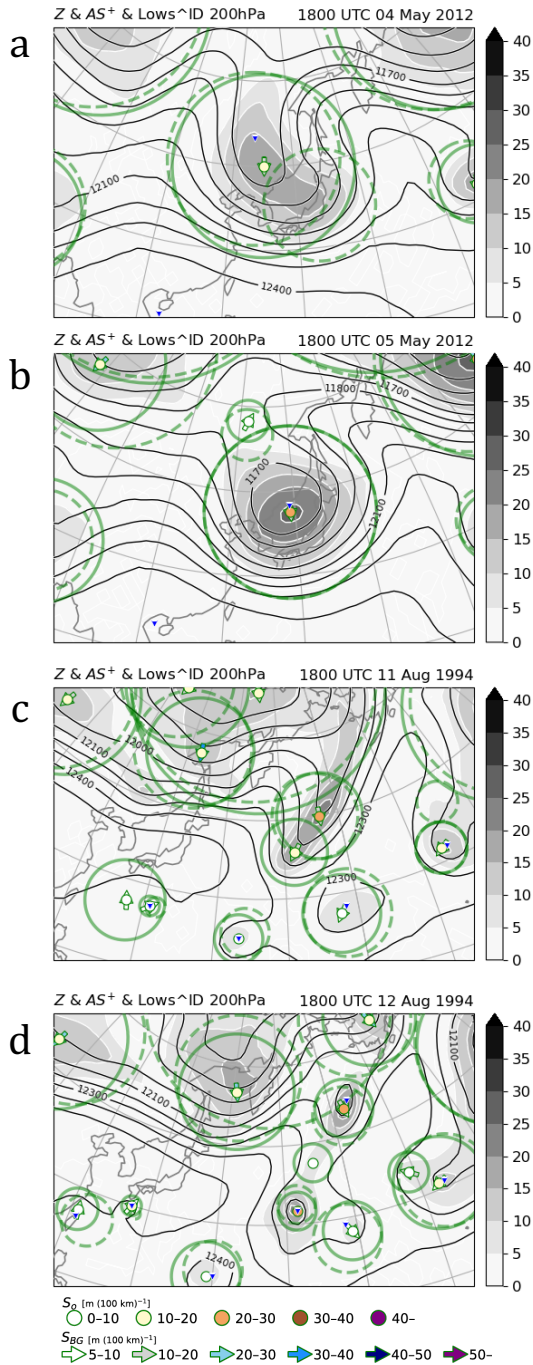
筆者らはこれまで、寒冷渦の強度を客観的に評価することのできる自動抽出手法の開発に着手してきた(Kasuga et al. 2021)。その抽出手法の特徴は、寒冷渦周囲の Z の凹み具合を幾何学的に評価することで、寒冷渦の強度(場の凹み具合)とその水平的なスケール、及びそのスケールに基づく背景の高度勾配を得られる点にあり、抽出の過程でその背景勾配を取り除くため、寒冷渦もその前段階のトラフもどちらも連続した同一な渦として抽出し、シームレスな追跡が可能であることにある。本研究では、Kasuga et

al. (2021) では着手されなかった自動追跡手法を開発し、日本域へ到来する寒冷渦の特徴をあらためて整理し、抽出・追跡手法の精度評価を試みた。

2、データと抽出手法

データは気象庁 55 年長期再解析 JRA-55 を用いた。データの時間解像度は 6 時間、水平解像度は $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ 、鉛直解像度は 37 層である。今回の解析では 500, 400, 300, 200 hPa の気圧面 Z を用いた。寒冷渦の抽出には Kasuga et al. (2021) を用いた。この抽出手法は任意に複数のサーチ半径(r)を用いてある等方な凹みの特徴量(Zの鉛直水平断面内の凹み中心から引いた接線の傾き)を比較し、凹み具合の最大強度(最適傾き、optimal slope、 S_o)を極大探索により求め、その接線と凹み中心までの距離で凹みの半径(最適半径、optimal radius、 r_o)、さらに r_o を用いて凹み周囲の背景場の Z の勾配(背景傾き、local background slope、 S_{BG})を各凹みに対し取得する。本研究では r を 100 km から 2600 km の 100 km 間隔とした。計算領域は北緯 15° から北緯 75° とした。寒冷渦とトラフの判定には抽出中心から半径 $0.63 \cdot r_o$ の円内(2次元ガウシアン形の凹みに線形斜面を重ねた場合に高度極小点の存在できる理論領域(Kasuga et al. 2021))に高度極小点があるかどうかで判定した。抽出手法の詳細は Kasuga et al. (2021) を参照されたい。

第 1 図は寒冷渦指標の抽出例である。それぞれ、(a) 2012 年 5 月 4 日 18 UTC、(b) 2012 年 5 月 5 日 18 UTC、(c) 1994 年 8 月 11 日 18UTC、(d) 1994 年 8 月 12 日 18UTC の 200 hPa の Z へ適用した例である。a、b は「つくば竜巻」ともなった寒冷渦であり、c、d は坪木と小倉(1999)で紹介された南東より日本域へ到来しその後雷雨を伴った寒冷渦である。色点の位置で凹み(渦)の抽出点、その色で強度 [$m / (100 \text{ km})^{-1}$]、緑実線の円でスケール、ベ



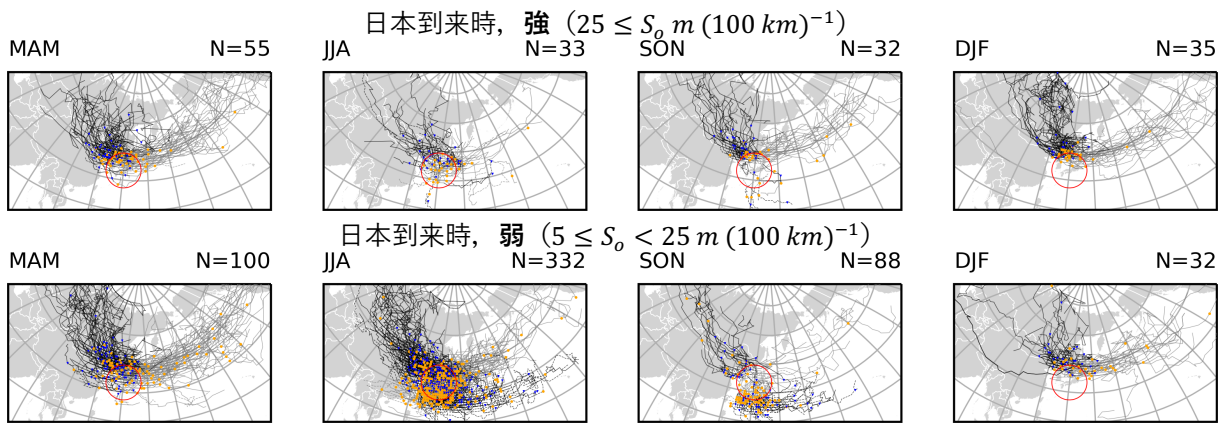
第 1 図、ジオポテンシャル高度 (Z、線) と寒冷渦指標 (Kasuga et al. 2021) の適用結果。時刻は (a) 2012 年 5 月 4 日 18 時、(b) 2012 年 5 月 5 日 18 時、(c) 1994 年 8 月 11 日 18 時、(d) 1994 年 8 月 12 日 18 時、全て UTC。色点は渦の抽出点。色は渦の強度 (最適傾き; S_0 $m (100km)^{-1}$)。実線の緑円は渦のスケール (最適半径; r_0)。ベクトルは背景勾配、色で強度 (背景傾き; S_{BG} $m (100 km)^{-1}$)。破線の緑円は渦のスケール、ただし 6 時間 (1 タイムステップ) 過去のもの。

クトルで背景勾配 (色でその強度 [$m / (100 km)^{-1}$]) を示している。なお、緑破線の円は一つ過去のタイムステップにおける凹みのスケールを描画したものである。2つの事例とも生成から日本域への到来までの全てのタイムステップで連続的に抽出されていることを確認した。ただし、前者の事例では渦同士の併合、後者の事例では渦の分裂が発生しており、それぞれ、a、c とそれらの 1 日後である b、d の間の時刻に併合・分裂は完了したものとみられる。

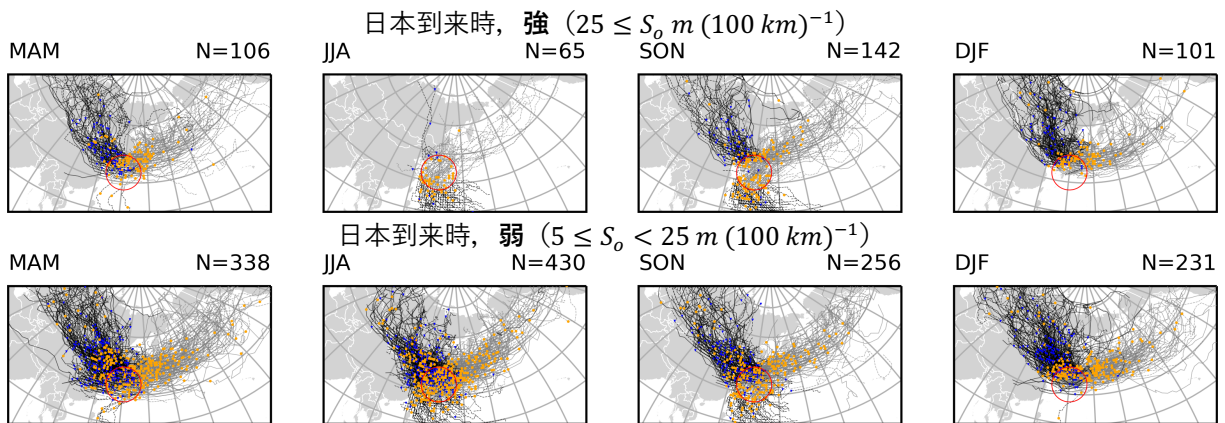
3、追跡手法

第 1 図の多くの抽出点にみられるように、寒冷渦の移動速度がデータの時間解像度よりも十分に遅い場合、 r_0 円の時間的に隣り合った抽出点周囲の重なり (以降、 r_0 円の時間的重複、と表現する) の面積は大きくなる。本研究ではこれに着目し、 r_0 円の時間的重複を寒冷渦の追跡に利用した。現象領域の時間的重複は温帯低気圧 (Inatsu 2009) や成層圏下部の切離渦位 (Kew et al. 2010) の追跡に用いられており、それぞれ渦度、渦位の閉曲線により現象領域を定義している。今回用いる基本的なアルゴリズムはこれら先行研究と相違ないが、 r_0 円による現象領域の定義では同一タイムステップにて既に重複を許すため、複数の候補より一つの経路を客観的に選択する必要がある。そのため、経路の優先度を (i) 移動距離の短さ、(ii) 強度変化の少なさ、(iii) スケール変化の少なさ (iv) 背景勾配変化の少なさ、およびこれらの組み合わせにより数種類検討した。この候補の選択により結果が変わる傾向にあるのは渦の強度が弱いものの経路であり、高強度の渦は基本的には安定して追跡されている傾向にあった。ゆえに、

(i) 移動距離の短さ、のみを用いて簡素に優先経路を決定することとした。ただし、不自然な経路とならないよう最大移動距離を 1500 km に限定し、低強度 ($S_0 < 5 m (100 km)^{-1}$) の抽出を追跡の候補から取り除いた。現象領域の時間的重複を用いる利点として、現象の併合・分裂を比較的簡素に定義できる点にあるが、本研究では併合・分裂より合理的に管理し、相互に関わった渦同士の情報を明示的に得るため、Shimizu



第2図、200hPaにおける寒冷渦の日本域到来経路。赤丸は便宜的な日本域。黒線は到来前、灰線は到来後の経路。到来時の強度により、上段に比較的高強度 ($25 < S_0 \text{ m (100 km)}^{-1}$)、下段に比較的低強度 ($5 < S_0 < 25 \text{ m (100 km)}^{-1}$)、到来時の季節により左から春 (3-5月、MAM)、夏 (6-8月、JJA)、秋 (9-11月、SON)、冬 (12-2月、DJF)、到来時のサイズにより破線で比較的小さな渦 ($r_0 < 500 \text{ km}$)、それ以外は実線、と区別。青点はトラフから寒冷渦へ変化した時刻。橙点は各経路の最大強度。



第3図、第2図に同じ、ただし500hPa。

and Uyeda (2012) の対流セル追跡アルゴリズム (Algorithm for the identification and tracking of convective cells; AITCC) の併合・分裂フラグを参考にした。これにより、今回は示さないが、分裂の以前や併合の以降まで渦を追跡するような解析が可能となる。第1図 a は本追跡手法における併合の瞬間であり、図中央の実線緑円で示された現在の1つの寒冷渦領域に対し、破線緑円で示された過去の寒冷渦領域が2つ重複している状態により判定される。第1図 c は分裂の瞬間であり、図中央の南西から北東へ伸びたトラフ上に現在の2つの渦に対し、過去の渦が1

つ重複している状態により判定される。

4、日本域へ到来する寒冷渦の気候解析

南北の面積差のないよう、本研究では「日本域」を経度 135° 、緯度 35° を中心とした半径 1000 km の円内と定義し、この内部を通過した寒冷渦を集計した。解析期間は1979年から2020年の42年であり、ここでは先行研究で利用されることの多い 200 hPa (第2図) と 500 hPa (第3図) のZより抽出した結果を示す。全ての図に赤丸を記しており、前述した「日本域」を示している。日本域に到来する前の経路を黒線、到

来後の経路を灰線で示し、寒冷渦の到来した方向を視認しやすくしてある。季節を横に並べており、左から春、夏、秋、冬である。寒冷渦強度の分類は縦に並べており、上段は比較的高強度、下段は比較的低強度である。さらにスケールの分類も行なっており、比較的小さい渦 ($r_0 < 500$ km) は破線、それ以外を実線で示した。経路上の青三角点はトラフが寒冷渦へ変化した瞬間を描画してある。例えば日本域到来時はトラフでもその内部で寒冷渦に変化した場合、黒線は日本域の内部まで描画される。なお、寒冷渦経路の季節、強度、スケールの分類には寒冷渦として日本域へ侵入した、あるいは日本域内で寒冷渦に変化した瞬間の値を用いた。経路上の橙点は各経路における最大強度を示した時刻の位置を描画してある。また、各パネルの N は 42 年間に於ける各季節・強度別で集計された寒冷渦到来数である。

200 hPa の寒冷渦経路 (第 2 図) から読み取れることは、以下である。

- ・ どの季節でも主に西北西～北西より到来する。夏秋では南～南西からも到来する。
- ・ 南～南西の寒冷渦は比較的弱くて小さい。
- ・ 冬に最も少なく、夏に最も多い。
- ・ 強い寒冷渦は春に多く、弱い寒冷渦は夏に多い。
- ・ 北寄りの経路ではより早い段階で寒冷渦化する。
- ・ 特に冬では強い寒冷渦ほど日本域に接近して最大発達する傾向にある。

500 hPa の寒冷渦経路 (第 3 図) の特徴は概ね 200 hPa と似ているが、異なる点は以下である。

- ・ 500 hPa では季節を通して抽出数が多い。
- ・ スケールも概ね小さい。
- ・ 南東から到来する経路は減り、南西から到来する経路が増える。

これらの結果は、冒頭の章で紹介した広沢ら (2006) や Wen et al. (2018) の結果と概ね整合的であり、寒冷渦の抽出と追跡はある程度の精度があることが確認できた。ただし、先行研究で議論された、季節による経路分布の異なり、極渦との対応、ライフサイクルに応じた寒冷渦の構造変化など、未検証な点は多く今後の課題

である。また、500 hPa の夏と秋の到来経路は台風や熱帯低気圧の経路を含む疑いがあり、確認が必要である。

5、まとめと今後の展望

本研究では Kasuga et al. (2021) により提唱された寒冷渦抽出手法により得られるパラメタ、特に寒冷渦の水平スケールを推定する最適半径 (r_0) を利用し、 r_0 円の時間的重複を基に寒冷渦の自動追跡手法を開発した。まだ調査は初期段階ではあるものの、高度別・季節別・強度別・スケール別の寒冷渦の特徴は先行研究と整合的であった。今後は、生成地点、分裂・併合の統計、寒冷渦パラメタの時間変化、到来経路と極渦や偏西風ジェットや亜熱帯高気圧等との関連性、統計量の経年変化など、日本域へ到来する寒冷渦を多角的に調査する予定である。

参考文献

- 広沢ら, 2006: 東アジアにおける寒冷渦の発生と分布特性. *日本大学紀要*.
- Inatsu, 2009: The neighbor enclosed area tracking algorithm for extratropical wintertime cyclones. *ASL*.
- Kasuga et al., 2021: Seamless detection of the cutoff lows and preexisting troughs. *MWR*.
- Kew et al., 2010: Potential vorticity anomalies at the lowermost stratosphere: A 10-yr winter climatology. *MWR*.
- Sadler, 1997: A role of the tropical upper tropospheric trough in early season typhoon development. *MWR*.
- Shimizu and Uyeda, 2012: Algorithm for identification and tracking of convective cells based on constant and adaptive threshold methods using a new cell-merging and -splitting scheme. *JMSJ*.
- 坪木と小倉, 1999: 雷雨を伴った寒冷渦の渦位事例解析. *天気*.
- Wen et al., 2018: A statistical analysis of tropical upper-tropospheric trough cells over the western North Pacific during 2006–15. *JAMC*.