



多様な時空間スケールでの気象学・気候学・大気科学 /
中緯度域の海洋変動と大気・生物地球化学への影響

分裂・併合を考慮した PV cutoff の3次元的な トラッキングと特徴量の解析

山本 晃 立¹⁾
伊賀 啓 太¹⁾

**A 3D tracking of PV cutoffs considering split
and merger and analysis of their features**

Koryu Yamamoto, Keita Iga

¹⁾ 東京大学大気海洋研究所

寒気を伴う切離低気圧は、大気的不安定化を通して極端現象の一因となることが知られている。本研究では、高渦位の閉領域で可視化される切離低気圧に着目し、分裂や併合を含む多様な接続形態を保持するようなトラッキング手法を実装した。本稿ではその概略を紹介するとともに、初期的な解析結果を報告する。

1. はじめに

日本付近を含む中緯度の対流圏界面付近では、Rossby 波の碎波などに伴って、冷たく高い渦位 (PV: Potential Vorticity) を持った空気が低緯度側に貫入 (Bell and Bosart 1993; Ndarana and Waugh 2010) し、孤立した低気圧性の渦となることがある。このような渦は、一般的には極側のジェットから切り離されたものとして確認でき、「切離低気圧 (cutoff lows)」や「寒冷渦」と呼ばれる (e.g., Parmén and Newton 1969)。多くの切離低気圧の水平スケールは数百 km のオーダーで、数日間から数週間にわたり持続することが報告されている (e.g., Nieto *et al.* 2005; Reboita *et al.* 2010; Ndarana *et al.* 2020)。切離低気圧は一般に寒気を伴うため、直下の大気安定度を低下させ、極端降水 (e.g., Garreaud and Fuenzalida 2007; Tsuji and Takayabu 2019) や雷雨 (e.g., 二階堂 1986a,b; 坪木・小倉 1999; Mohr *et al.* 2020) などの一因となることが知られている。

切離低気圧には同じ地域に長期間停滞するものもあることが報告されている (Price and Vaughan 1992)。特に、切離低気圧が維持され停滞期間が長くなると災害リスクが高い状態が長く継続することにつながるため、切離低気圧の維持メカニズムを解明することは防災や減災の観点からも重要な課題である。この課題に取り組んでいる先行研究はいくつか存在する。例えば、Gan and Piva (2013, 2016) は南半球における切離低気圧の渦運動エネルギー (EKE: Eddy Kinetic Energy) に着目し、Rossby 波の分散性に伴って波束が伝播する効果 (Orlanski and Katzfey 1991; Chang and Orlanski 1994; Chang 2000; Gan and Piva 2016) が維持に

2012-05-06T00:00:00Z

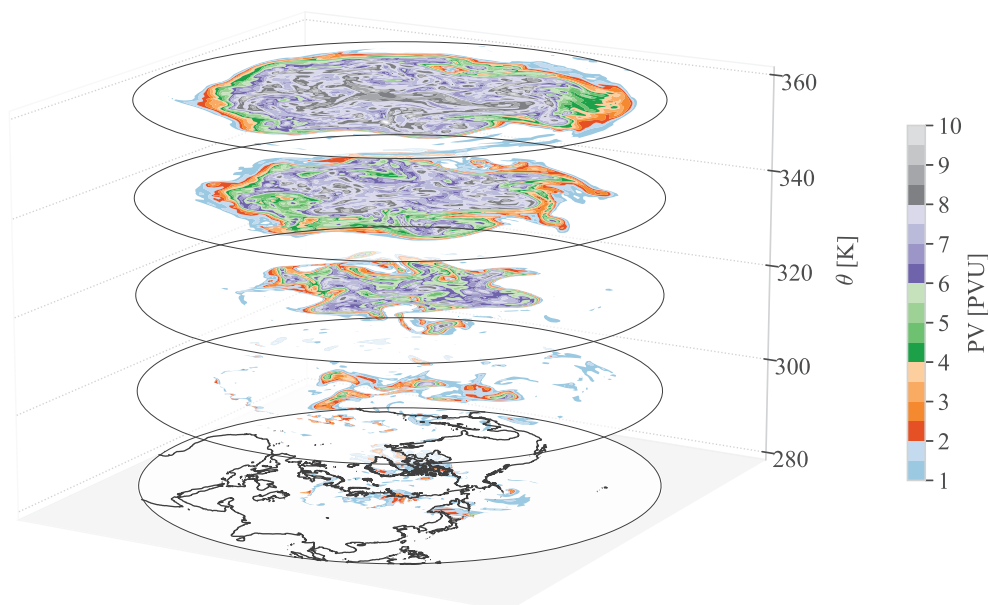


図1 2012年5月6日0000UTCにおける北半球の280, 300, 320, 340, 360 KにおけるPV分布.

とって重要な役割を担っていることを示した。Pinheiro *et al.* (2022) は彼らよりも広範囲かつ長期間のデータセットを用いた合成図解析を行い、系の傾圧性が維持に寄与していることを指摘した。その一方で、Yamamoto *et al.* (2024) は2021年7月中旬のヨーロッパ周辺における切離低気圧事例 (Kreienkamp *et al.* 2021) を対象にEKEの収支解析を行い、別の切離低気圧との併合が維持に寄与していたことを明らかにした。

別の同極性の渦との併合による渦の維持については、高気圧に関する研究が行われてきている。ブロッキング高気圧の維持メカニズムを議論したYamazaki and Itoh (2013a,b) は、東進してきた移動性擾乱のうち、低気圧よりも同極性の高気圧を相互作用により選択的に吸収し、自身の維持に寄与するというメカニズムを提唱した。Yamazaki and Itoh (2013b) ではこのメカニズムを数値計算により詳細に確認しているが、等価順圧かつ断熱を前提として議論を行っている。しかし、切離低気圧の場合は対流圏上層で明瞭である

一方、中・下層では不明瞭であることが多い (c.f., 図3aの等値線; Pinheiro *et al.* 2021のfig. 10)ため、対流圏全層で等価順圧であるとはいえない。また、切離低気圧の発達や減衰には非断熱過程が寄与している場合が多い (e.g., Wirth 1995; Forster and Wirth 2000; Cavallo and Hakim 2009; Ferreira *et al.* 2016; Portmann *et al.* 2018)。このように、渦間相互作用の性質には高・低気圧で非対称性が存在する可能性があり、特に低気圧に関しては3次的に調査していくことが求められる。近年では台風に関する3次的渦間相互作用がIto *et al.* (2023) やLee *et al.* (2023) により調査されているが、切離低気圧に関する調査はまだ行われていない。そこで著者らのグループでは、切離低気圧の3次的渦間相互作用を解明するために、再解析データを用いて切離低気圧同士が併合する事例を客観的かつ3次的に抽出する試みに着手している。

切離低気圧の抽出やトラッキングにはいくつかの手法が存在し、対流圏中・上層のジオポテンシャル高度に着目する手法 (e.g., Bell and Bosart

1989; Nieto *et al.* 2005; Kasuga *et al.* 2021) と、PV に着目する手法 (e.g., Wernli and Sprenger 2007; Kew *et al.* 2010; Portmann *et al.* 2021) に大別される。前者は全季節を通して 200 hPa や 500 hPa 面 (Muñoz *et al.* 2020) に着目することが多いが、低気圧の領域を定義しての議論は Kasuga *et al.* (2021) などのわずかな研究しかない。後者は対流圏界面付近に位置する 2 PVU (PV Unit; $1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$) 等値線で囲まれた高 PV 領域を切離低気圧 (このように定義された切離低気圧は PV cutoffs と呼ばれている) と定義することで客観的に領域を定義しやすいが、注目すべき温位面が事例や季節により大きく変動するという欠点がある。例えば、図 1 に示した北半球の PV 場を見ると、オホーツク海付近では 320 K 面において PV cutoff が確認できるが、ベーリング海の南にある PV cutoff は 300 K 面で明瞭である。しかし、近年では複数の温位面を用いて 3 次的に PV cutoff を同定する試みが行われ、この欠点は緩和されている (Portmann *et al.* 2021; Fischer *et al.* 2022)。一般に低気圧は複雑な 3 次的構造を有しているため、単一の面で捕捉しようとしてもその構造の全体を追うことが困難ということ (e.g., Ulbrich *et al.* 2009) から、この試みは切離低気圧をよりよく理解しようとする意味で有効といえよう。

筆者らのグループは、併合事例を抽出するという目的から、切離低気圧の領域を客観的に定めた上でトラッキングを行うことが有効だと考えている。そこで、後者の立場を採用し、分裂や併合をも捕捉する PV cutoff の 3 次的なトラッキング手法の実装と解析を進めている。本稿ではその試みの概略と、併合事例に着目した初期的な解析結果を紹介する。

2. 使用データ

本研究では、気象庁 55 年長期再解析 JRA-55 (Kobayashi *et al.* 2015) を用いる。モデル面 (解像度 TL319L60) で出力されたデータを、緯度・経度方向には 1.25° に、鉛直 (温位面) 方向には 275–360 K まで 5 K ごとに、それぞれ内挿された

データを用いる。補助的に 370 K 温位面に内挿されたデータも用いる。解析期間は 1958 年 1 月 1 日 0000UTC–2021 年 12 月 31 日 1800UTC の 64 年間で、データセットの時間間隔は 6 時間である。

3. トラッキング手法

3.1 3 次的な PV cutoff の同定

図 1 を見ると、320–360 K 面では極域を中心に 2 PVU を超える大きな高 PV (本稿では、北半球における「高 PV」を 2 PVU を超えるものとして定義し、南半球においては -2 PVU を下回るものとして定義する) 領域が広がっていることがわかる。この領域は成層圏の高 PV を反映したものと考えられ、成層圏高 PV のリザーバ (Stratospheric (high PV) Reservoir ; 以下「SR」と略記) と呼ばれている。PV cutoff は温位面において SR から切離された高 PV の閉領域として解釈できるため、PV cutoff の同定に際しては SR を除外する必要がある。

本研究では、まず各時刻の各温位面 (275–360 K ; 5 K 間隔) において、高 PV の閉領域を抽出する。ここから、面積が最大となる高 PV 領域を SR とみなし (Portmann *et al.* 2021)、続いて北極点を含む高 PV 領域も SR とみなす (Wernli and Sprenger 2007)。次に、SR とみなされなかった閉領域に関して、高い温位面から走査していき、3 次的に SR から垂れ下がっているものを 1 つのオブジェクトとして集約し、抽出する。ここで、積乱雲の内部の非断熱加熱に伴い、PV が非断熱的に高まる可能性があるということに注意しなければならない。このように非断熱的に上昇させられた高 PV の領域は PV cutoff から除外する必要がある。そこで本研究では、Škerlak *et al.* (2015) に倣い、比湿が 0.1 g kg^{-1} 以上の格子点を除外した。また、解析対象層の最上層である 360 K 面の PV cutoff を同定するにあたっては、370 K 面における高 PV かつ比湿が 0.1 g kg^{-1} 未満の領域をすべて SR とみなす。3 次的な PV cutoff の同定方法の概念図を図 2 に示す。図 3 には適用例を示す。本手法により、高 PV を示す PV cutoff が抽出される一方で、積乱雲群を有する台風は除去されていることがわかる。

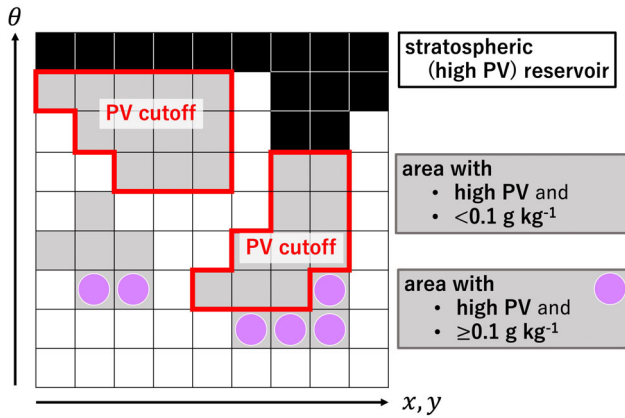


図2 3次元的なPV cutoffの同定方法の概念図。縦軸が温位面、横軸が水平方向の格子点を示す。黒く塗った箇所はSR、灰色で塗った箇所は各温位面で高PVの閉領域として見えるもののうちSRでないものである。紫色の丸印で示したものは比湿が 0.1 g kg^{-1} 以上の箇所である。赤く囲った格子点群をPV cutoffとみなす。

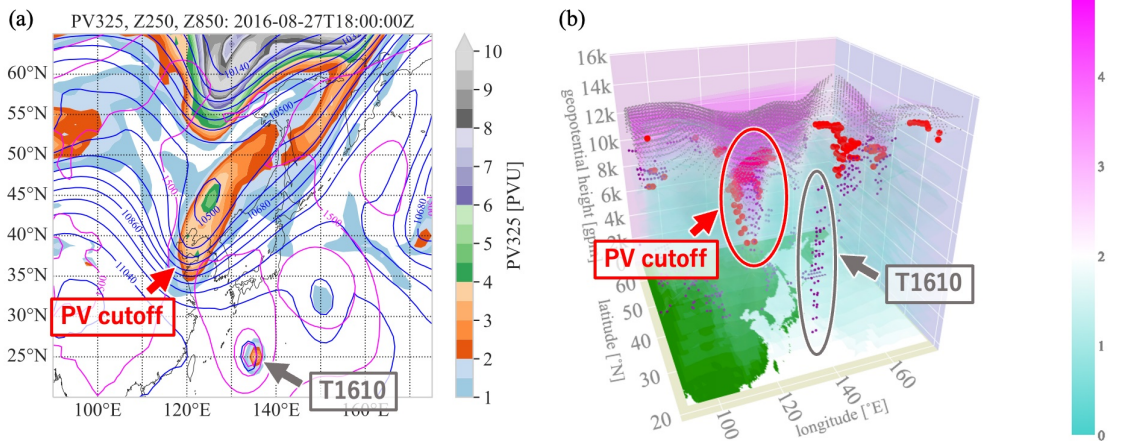


図3 (a) 2016年8月27日1800UTCにおける(色)325 K面PV、(青色等値線)250 hPa面ジオポテンシャル高度、(桃色等値線)850 hPa面ジオポテンシャル高度。等値線の単位はgpmで60 gpmごとに描画。(b) (a)と同時刻におけるPV cutoffの同定例。着色した膜は275–360 Kの温位面を5 Kごとに描いたもので、色はPVを示す。灰色と赤色の点は高PVかつ比湿 0.1 g kg^{-1} 未満の箇所を、紫色の点は高PVかつ比湿 0.1 g kg^{-1} 以上の箇所を示す。赤色の点が本研究においてPV cutoffとして同定された箇所である。

3.2 分裂・併合を考慮したPV cutoffのトラッキング

次に、前節で同定したPV cutoffをトラッキングすることを考える。Portmann *et al.* (2021)で提案されたトラッキング手法は、流跡線を用いてPV cutoffを3次元的にトラッキングするものであるが、簡便さのため分裂や併合は無視したものである。そこで本研究では、時間方向にオーバーラップしていることをトラッキングの条件とする。これ

により、分裂 (merger) や併合 (split)、それらが発生しない接続 (single connection)、また複数のオブジェクトが複数のオブジェクトにトラッキングされる集団的な接続 (group connection) を客観的に捕捉することが可能となる (e.g., Inatsu 2009; Limbach *et al.* 2012)。本研究におけるトラッキング手法の概念図を図4に示す。

3.3 本手法の限界

本手法はオーバーラップを用いてトラッキング

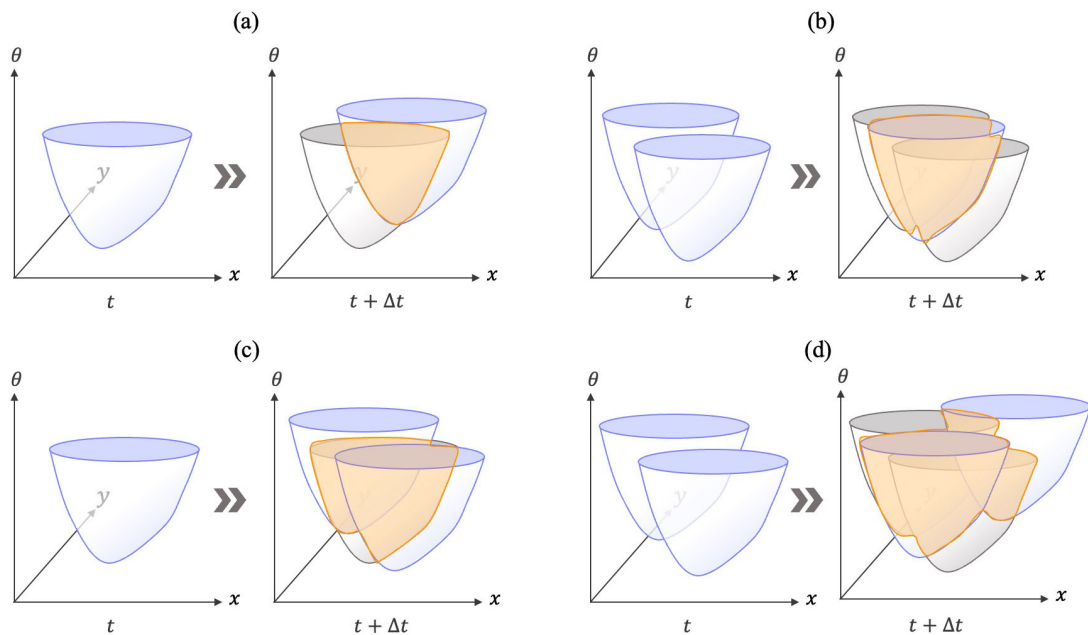


図4 トラッキング手法の概念図. 各図で左側が時刻 t , 右側が時刻 $t+\Delta t$ を示す. ここに, Δt は時間ステップで本研究では6時間である. 青色のオブジェクトは当該時刻におけるPV cutoff, グレーのオブジェクトは時刻 t におけるPV cutoffを示す. 橙色の領域は, 両者のオーバーラップのイメージを示す. (a) single connection, (b) merger (併合), (c) split (分裂), (d) group connection.

を行っているため, 面積が小さいオブジェクトや速く動くオブジェクトに対してはトラッキングの精度が低下する懸念がある. そこで, 断熱かつ摩擦なしの条件下では温位面上のPVはLagrange的に保存される (Hoskins *et al.* 1985) という性質を鑑みて, 流跡線を元にしたトラッキングと, 本手法でのオーバーラップを元にしたトラッキングがどのくらい一致するのかを検証した.

流跡線を元にしたトラッキング手法は, Portmann *et al.* (2021) を参考にして以下のように構成する. 各時刻で275–360 K (5 K 間隔) の各温位面におけるSRでない高PV閉領域を取り出す. ここから比湿が 0.1 g kg^{-1} 以上の格子点は除外し, 2次元的なPV cutoffとみなす. 各閉領域で, 残った内部のすべての格子点をトレーサとし, 30分の時間間隔で6時間先まで流跡線を計算した. 各トレーサは当該の温位面上の水平風に従って移流される. 水平風場の導出については, 時間方向には

線形に内挿し, 空間方向にはトレーサの位置でcubic補間をした. 時間積分のスキームには4次Runge-Kutta法を用いた. 6時間後のトレーサの位置が所属する2次元的なPV cutoffのすべてを, トラッキングされるオブジェクトとみなす.

今回は2020年1月1日0000UTC–2020年12月31日1800UTCの1年間で検証を行った. 検証範囲は北半球とした. 結果を図5に示す. 横軸は面積で, 縦軸は事例の割合である. トラッキング結果が一致したケースとしては, 橙色が次の時刻でトラッキングされたオブジェクトが存在したものの, 緑色が存在しなかったものを示す. また, 両者の和を「一致率」として青色で示している. 一方, トラッキング結果が食い違ったケースとしては, 流跡線を元にした手法ではトラッキングされたオブジェクトが存在した一方でオーバーラップを元にした手法では存在しなかったものを紫色で示し, 黄色はその逆を示す. 面積が小さいときには

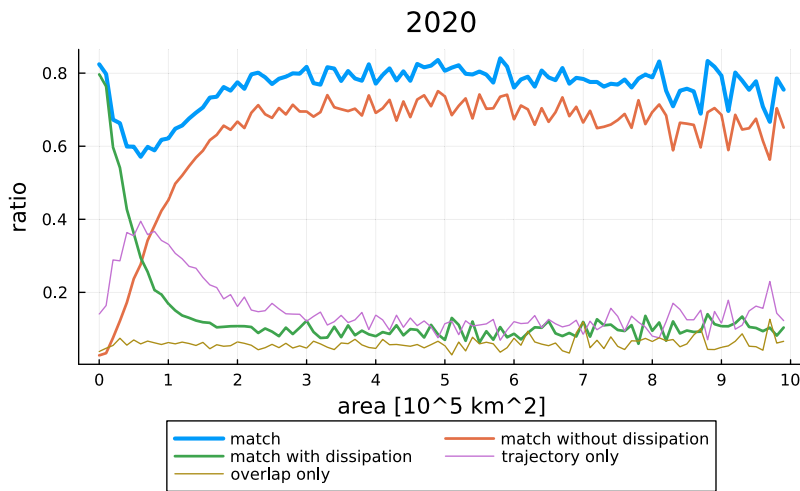


図5 流跡線を元にしたトラッキング手法と、本トラッキング手法の検証結果。軸や色の説明は本文を参照。

橙色の値が低く、流跡線による手法によってのみトラッキングされるケース（紫色）が多い。しかし、面積を大きくしていくと一致率（青色）は $0.5 \times 10^5 \text{ km}^2$ 付近で極小を示した後、 $2.5 \times 10^5 \text{ km}^2$ 付近以降には0.8程度の大きな値をとるようになり、ある程度面積が大きくなると両者の手法はよく一致するようになることが示唆される。

3.4 パラメタ設定

図5の検証結果をもとに、今回トラッキングする PV cutoff の面積の下限は $2.5 \times 10^5 \text{ km}^2$ に設定し、上限は Portmann *et al.* (2021) に倣い $5.0 \times 10^6 \text{ km}^2$ に設定した。今回の PV cutoff は3次元的なオブジェクトとして抽出するが、面積は各温位面で占める領域の和集合を使って計算する。また、24時間以上持続した事例のみを抽出する。

4. 結果

4.1 気候値

本手法では、北半球で 62,800 事例、南半球で 66,815 事例、合計で 129,615 事例が抽出された。40年を解析対象とした Portmann *et al.* (2021) が 152,615 事例を抽出していたことを考慮すると、本研究における抽出数は少ない。

図6に頻度分布の気候値を示す。Portmann *et al.* (2021) の fig. 3 と比較して定性的な分布はよく一致

しているが、どの季節でも本研究の方が高い頻度を示す傾向となっている。全体の抽出事例が少ない一方で分布が高頻度であるため、1つの PV cutoff のトラッキングがその持続時間の中で分裂や併合などを伴っており、それらが決して稀ではないことを示唆している。実際に、図7, 8を見ると分裂や併合を示す事例の存在割合が1%を超える地域も多いことがわかる。

4.2 併合事例と single connection 事例の比較

続いて、併合事例に着目をして解析を行った。ここでは簡単のため、持続時間中に一度しか併合せず、2つの PV cutoff が併合し、かつ分裂や group connection が起こらない事例を解析対象とした。対照事例として、持続時間中に分裂、併合および group connection が一度も起こらなかった事例を抽出し「single 事例」と呼ぶことにする。解析範囲は北半球とした。解析対象とした併合事例は 3,118 事例、single 事例は 40,450 事例であった。

図9に併合事例と single 事例の持続時間の分布を示す。縦軸の数値は事例の割合を示しており、それぞれの合計の事例数で規格化してある。両者を比較すると、持続時間は併合事例の方が長い傾向にあることがわかる。この結果は、PV cutoff 同士の併合が自身の維持に寄与することを反映している可能性がある。しかし、青いヒストグラムは

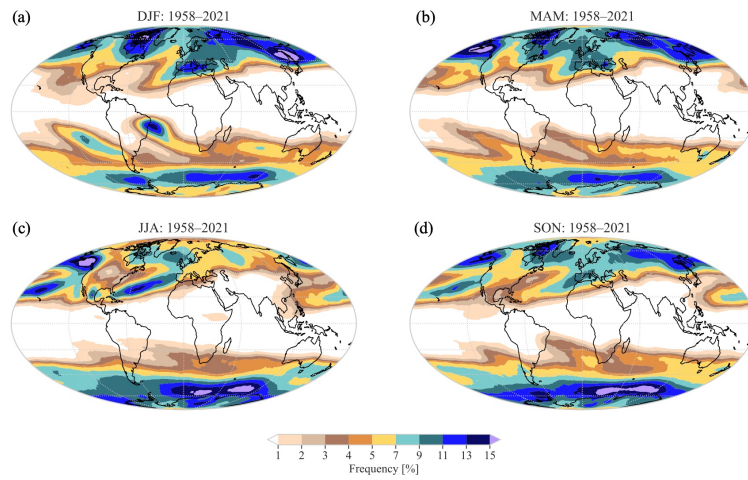


図6 抽出されたPV cutoffの気候分布. PV cutoffが存在した格子点の頻度を色で表示している. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, (d) SON.

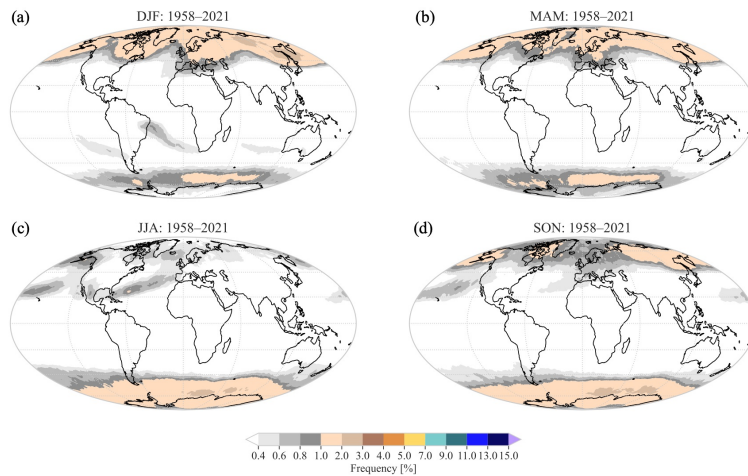


図7 図6と同様. ただし, 次の時刻に分裂する事例の頻度を描画している.

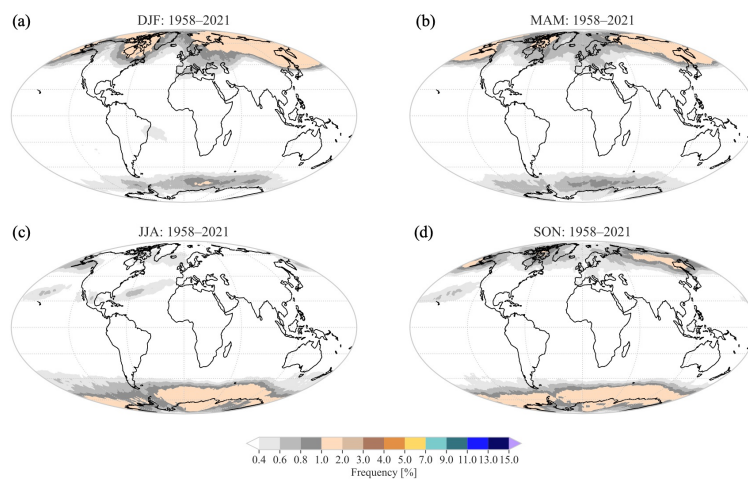


図8 図6と同様. ただし, 次の時刻に併合する事例の頻度を描画している.

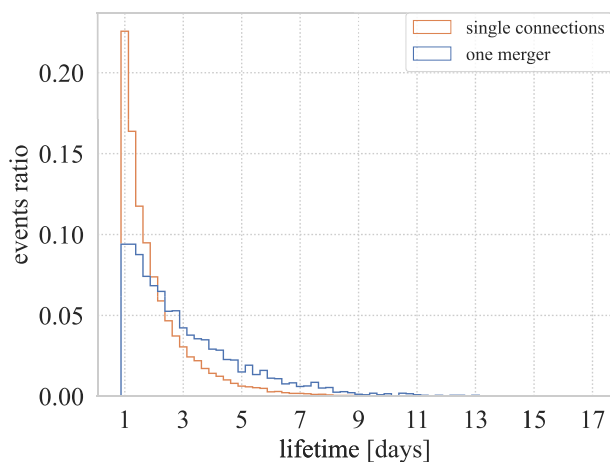


図9 併合事例 (青色)とsingle事例 (橙色)の持続時間のヒストグラム。

2つの PV cutoffの持続時間を単純に合計した時間を示している可能性もある。今後は、併合の前後で力学的に維持に寄与するような構造になっているかどうかを詳細に調査する必要がある。

5. まとめと今後の展望

本研究では、併合・分裂など多様な接続形態も捕捉する PV cutoffのトラッキングを実装した。面積が小さいオブジェクトや速く動くオブジェクトに対してはトラッキングの精度が低下するという欠点はあるながらも、先行研究と概ね整合する気候分布を得ることができた。また、併合する事例に対しては、single connectionのみの事例よりも持続時間が長くなる傾向にあることを見出した。今後は併合過程が維持に寄与するかを考慮しながら、併合時における物理的なプロセスを詳細に解明していくことが求められる。

切離低気圧の研究はまだ発展途上であるといえる。対流圏と成層圏の中間に位置するということもあり、多様な観点から論点が提示されている。実際、定義や抽出に使用する物理量の依存性 (e.g., Pinheiro *et al.* 2019) から、成層圏-対流圏混合 (e.g., Bourqui 2006) に至るまで多岐にわたる。本研究では 64 年間の再解析データから約 13 万事例を抽出することができた。また、新たに多様な接続形態も情報として付加されている。この大き

なデータセットが、今後の切離低気圧にまつわる研究で有効に利用されることを期待したい。

謝辞：本研究は、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2108 の支援を受けたものです。本研究で用いた JRA-55 は気象庁で提供されているもので、<https://jra.kishou.go.jp/> よりダウンロード可能です。作図には Python の matplotlib, seaborn, Plotly および Julia の Plots.jl を用いました。また、2023 年度の大槌シンポジウム開催に尽力してくださった山崎哲氏、西川はつみ氏、田中潔氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] Bell, G. D., and L. F. Bosart, 1989: A 15-year climatology of Northern Hemisphere 500 mb closed cyclone and anticyclone centers. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 2142–2164, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<2142:AYCONH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<2142:AYCONH>2.0.CO;2).
- [2] Bell, G. D., and L. F. Bosart, 1993: A case study diagnosis of the formation of an upper-level cutoff cyclonic circulation over the Eastern United States. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 1635–1655, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1993\)121<1635:ACSDOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121<1635:ACSDOT>2.0.CO;2).
- [3] Bourqui, M., 2006: Stratosphere-troposphere exchange from the Lagrangian perspective: A case study and method sensitivities. *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 2651–2670, <https://doi.org/10.5194/acp-6-2651-2006>.
- [4] Cavallo, S. M., and G. J. Hakim, 2009: Potential vorticity diagnosis of a tropopause polar cyclone. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 1358–1371,

- <https://doi.org/10.1175/2008MWR2670.1>.
- [5] Chang, E. K. M., 2000: Wave packets and life cycles of troughs in the upper troposphere: Examples from the Southern Hemisphere summer season of 1984/85. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 25–50, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2000\)128<0025:WPALCO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128<0025:WPALCO>2.0.CO;2).
- [6] Chang, E. K. M., and I. Orlanski, 1994: On energy flux and group velocity of waves in baroclinic flows. *J. Atmos. Sci.*, 51, 3823–3828, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1994\)051<3823:OEFAGV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1994)051<3823:OEFAGV>2.0.CO;2).
- [7] Ferreira, A. P., J. M. Castanheira, and L. Gimeno, 2016: Water vapour stratification and dynamical warming behind the sharpness of the Earth’s midlatitude tropopause. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 142, 957–970, <https://doi.org/10.1002/qj.2697>.
- [8] Fischer, C., and Coauthors, 2022: A novel method for objective identification of 3-D potential vorticity anomalies. *Geosci. Model Dev.*, 15, 4447–4468, <https://doi.org/10.5194/gmd-15-4447-2022>.
- [9] Forster, C., and V. Wirth, 2000: Radiative decay of idealized stratospheric filaments in the troposphere. *J. Geophys. Res.*, 105, 10169–10184, <https://doi.org/10.1029/2000JD900052>.
- [10] Gan, M. A., and E. D. Piva, 2013: Energetics of a Southeastern Pacific cut-off low. *Atmos. Sci. Lett.*, 14, 272–280, <https://doi.org/10.1002/asl2.451>.
- [11] Gan, M. A., and E. D. Piva, 2016: Energetics of southeastern Pacific cut-off lows. *Climate Dyn.*, 46, 3453–3462, <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2779-7>.
- [12] Garreaud, R. D., and H. A. Fuenzalida, 2007: The influence of the Andes on cutoff lows: A modeling study. *Mon. Wea. Rev.*, 135, 1596–1613, <https://doi.org/10.1175/MWR3350.1>.
- [13] Hoskins, B. J., M. E. McIntyre, and A. W. Robertson, 1985: On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 111, 877–946, <https://doi.org/10.1002/qj.49711147002>.
- [14] Inatsu, M., 2009: The neighbor enclosed area tracking algorithm for extratropical wintertime cyclones. *Atmos. Sci. Lett.*, 10, 267–272, <https://doi.org/10.1002/asl.238>.
- [15] Ito, K., S. Hirano, J.-D. Lee, and J. C. L. Chan, 2023: Three-dimensional Fujiwhara effect for binary tropical cyclones in the Western North Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, 151, 1779–1795, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-22-0239.1>.
- [16] Kasuga, S., M. Honda, J. Ukita, S. Yamane, H. Kawase, and A. Yamazaki, 2021: Seamless detection of cutoff lows and preexisting troughs. *Mon. Wea. Rev.*, 149, 3119–3134, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-20-0255.1>.
- [17] Kew, S. F., M. Sprenger, and H. C. Davies, 2010: Potential vorticity anomalies of the lowermost stratosphere: A 10-yr winter climatology. *Mon. Wea. Rev.*, 138, 1234–1249, <https://doi.org/10.1175/2009MWR3193.1>.
- [18] Kobayashi, S., and Coauthors, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, 93, 5–48, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001>.
- [19] Kreienkamp, F., and Coauthors, 2021: Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021. *World Weather Attribution*, 51 pp, <https://hdl.handle.net/1854/LU-8732135>.
- [20] Lee, J.-D., K. Ito, and J. C. L. Chan, 2023: Importance of self-induced vertical wind shear and diabatic heating on the Fujiwhara effect. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 149, 1197–1212, <https://doi.org/10.1002/QJ.4448>.
- [21] Limbach, S., E. Schömer, and H. Wernli, 2012: Detection, tracking and event localization of jet stream features in 4-D atmospheric data. *Geosci. Model Dev.*, 5, 457–470, <https://doi.org/10.5194/GMD-5-457-2012>.
- [22] Mohr, S., and Coauthors, 2020: The role of large-scale dynamics in an exceptional sequence of severe thunderstorms in Europe May–June 2018. *Wea. Climate Dyn.*, 1, 325–348, <https://doi.org/10.5194/wcd-1-325-2020>.
- [23] Muñoz, C., D. Schultz, and G. Vaughan, 2020: A midlatitude climatology and interannual variability of 200- and 500-hPa cut-off lows. *J. Climate*, 33, 2201–2222, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0497.1>.
- [24] Ndarana, T., and D. W. Waugh, 2010: The link between cut-off lows and Rossby wave breaking in the Southern Hemisphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 136, 860–885, <https://doi.org/10.1002/qj.627>.
- [25] Ndarana, T., T. S. Rammopo, H. Chikooore, M. A. Barnes, and M.-J. Bopape, 2020: A quasi-geostrophic diagnosis of the zonal flow associated with cut-off lows over South Africa and surrounding oceans. *Climate Dyn.*, 56, 2631–2644, <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05401-4>.
- [26] Nieto, R., and Coauthors, 2005: Climatological features of cutoff low systems in the Northern Hemisphere. *J. Climate*, 18, 3085–3103, <https://doi.org/10.1175/JCLI3386.1>.
- [27] 二階堂義信, 1986a: Q-map (等温位面上で解析された渦位分布図) — その 1 Q-mapの原理 —. *天気*, 33, 289–299.
- [28] 二階堂義信, 1986b: Q-map (等温位面上で解析された渦位分布図) — その 2 Q-mapの実際 —. *天気*, 33, 300–331.
- [29] Orlanski, I., and J. Katzfey, 1991: The life cycle of a cyclone wave in the Southern Hemisphere. Part I: Eddy energy budget. *J. Atmos. Sci.*, 48, 1972–1998, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1991\)048<1972:TLCOAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1991)048<1972:TLCOAC>2.0.CO;2).
- [30] Parmén, E., and C. W. Newton, 1969: *Atmospheric Circulation Systems: Their Structure and Physical Interpretation*. Academic Press, 603 pp.
- [31] Pinheiro, H., K. Hodges, and M. Gan, 2019: Sensitivity of identifying cut-off lows in the Southern Hemisphere using multiple criteria: implications for numbers, seasonality and intensity. *Climate Dyn.*, 53, 6699–6713, <https://doi.org/10.1007/S00382-019-04984-X>.
- [32] Pinheiro, H., M. Gan, and K. Hodges, 2021: Structure and evolution of intense austral cut-off lows. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 147, 1–20, <https://doi.org/10.1002/qj.3900>.
- [33] Pinheiro, H., K. Hodges, M. Gan, S. Ferreira, and K. Andrade, 2022: Contributions of downstream baroclinic development to strong Southern Hemisphere cut-off lows.

- Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 148, 214–232,
<https://doi.org/10.1002/qj.4201>.
- [34] Portmann, R., B. Crezee, J. Quinting, and H. Wernli, 2018: The complex life cycles of two long-lived potential vorticity cut-offs over Europe. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 144, 701–719, <https://doi.org/10.1002/QJ.3239>.
- [35] Portmann, R., M. Sprenger, and H. Wernli, 2021: The three-dimensional life cycles of potential vorticity cutoffs: A global and selected regional climatologies in ERA-Interim (1979–2018). *Wea. Climate Dyn.*, 2, 507–534, <https://doi.org/10.5194/wcd-2-507-2021>.
- [36] Price, J., and G. Vaughan, 1992: Statistical Studies of cut-off-low systems. *Ann. Geophys.*, 10, 96–102.
- [37] Reboita, M. S., R. Nieto, L. Gimeno, R. P. da Rocha, T. Ambrizzi, R. Garreaud, and L. F. Krüger, 2010: Climatological features of cutoff low systems in the Southern Hemisphere. *J. Geophys. Res.*, 115, D17104, <https://doi.org/10.1029/2009JD013251>.
- [38] Škerlak, B., M. Sprenger, S. Pfahl, E. Tyrlis, and H. Wernli, 2015: Tropopause folds in ERA-Interim: Global climatology and relation to extreme weather events. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 120, 4860–4877, <https://doi.org/10.1002/2014JD022787>.
- [39] 坪木和久, 小倉義光, 1999: 雷雨を伴った寒冷渦の渦位事例解析. *天気*, 46, 453–459.
- [40] Tsuji, H., and Y. N. Takayabu, 2019: Precipitation enhancement via the interplay between atmospheric rivers and cutoff lows. *Mon. Wea. Rev.*, 147, 2451–2466, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0358.1>.
- [41] Ulbrich, U., G. C. Leckebusch, and J. G. Pinto, 2009: Extra-tropical cyclones in the present and future climate: A review. *Theor. Appl. Climatol.*, 96, 117–131, <https://doi.org/10.1007/S00704-008-0083-8>.
- [42] Wernli, H., and M. Sprenger, 2007: Identification and ERA-15 climatology of potential vorticity streamers and cutoffs near the extratropical tropopause. *J. Atmos. Sci.*, 64, 1569–1586, <https://doi.org/10.1175/JAS3912.1>.
- [43] Wirth, V., 1995: Diabatic heating in an axisymmetric cut-off cyclone and related stratosphere-troposphere exchange. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 121, 127–147, <https://doi.org/10.1002/qj.49712152107>.
- [44] Yamamoto, K., K. Iga, and A. Yamazaki, 2024: Mergers as the maintenance mechanism of cutoff lows: A case study over Europe in July 2021. *Mon. Wea. Rev.*, accepted, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-23-0024.1>.
- [45] Yamazaki, A., and H. Itoh, 2013a: Vortex–vortex interactions for the maintenance of blocking. Part I: The selective absorption mechanism and a case study. *J. Atmos. Sci.*, 70, 725–742, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-11-0295.1>.
- [46] Yamazaki, A., and H. Itoh, 2013b: Vortex–vortex interactions for the maintenance of blocking. Part II: Numerical experiments. *J. Atmos. Sci.*, 70, 743–766, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-12-0132.1>.

