

擾乱のオイラー統計量における高低気圧性渦の寄与の分離

—2022年度山本賞受賞記念講演—

岡 島 悟*

1. はじめに

この度は名誉ある山本賞を授与いただき、大変光栄に存じます。選考委員会をはじめ、学会関係者のみなさまに厚く御礼申し上げます。

受賞対象となった業績 (Okajima *et al.* 2021) は、東京大学大学院理学系研究科博士課程在学時に着手し、博士学位取得後に出版した論文です。移動性擾乱活動に関する研究において長年見過ごされてきた課題の解決に向けた研究と考えて取り組んで参りましたので、このように評価して頂いた事を大変嬉しく思っております。今回の受賞を励みに、今後なお一層、学術的貢献に尽力して参る所存です。

本稿では、当研究の着想に至った動機の紹介を交えつつ、まず背景となる移動性擾乱活動に関する研究について2節で解説し、本研究の内容を3節以降で解説します。

2. 研究の背景

移動性の擾乱 (低気圧・高気圧) は、中高緯度における日々の天気変動の大部分を説明するだけでなく、運動量や熱の輸送を通じ、大気大循環変動の背景となるジェット気流を維持する役割を果たしており、中高緯度の気象・気候の双方にとって非常に重要です。近年の研究では、中高緯度における極端降水や顕著な強風イベントの大部分が移動性低気圧と関連しているという結果も報告されています (Pfahl and Wernli

2012 ; Roberts *et al.* 2014)。

このような重要性から、移動性低気圧の活動 (集団としての統計的な性質) に関する研究は、古くから行われてきました。19世紀末の時点で、北半球中緯度における“storm”の頻度と典型的な経路が記述されていたのは驚くべき事です (Hinman 1888)。その後の数多くの研究により、北太平洋や北大西洋・南大洋などの領域に、移動性低気圧の高頻度域が存在する事が現在では広く知られており、これらの移動性低気圧の高頻度域は (中緯度における) “storm track” と呼ばれています。これらの研究は個々の低 (高) 気圧中心を追跡するという意味で、「ラグランジュ的」視点から行われていると言えます (Murray and Simmonds 1991 ; Hoskins and Hodges 2002 ; Ulbrich *et al.* 2009)。

一方で、移動性擾乱の活動に関する研究は、局所的な物理量の統計量によっても広く行われています。このような研究は「オイラー的」視点からなされていると言え、大気 (再) 解析の登場後に急速に発展しました。その代表的な先駆的研究である Blackmon (1976) 及び Blackmon *et al.* (1977) は、カットオフ周期2-6.5日のバンドフィルタを施した風や高度、温度の分散や共分散等の統計量の極大が、移動性低気圧活動活発域に対応する事を示し、このような領域を“storm track” と称しました。第1図に、冬季北半球における、気候平均の移動性擾乱に伴う極向き熱輸送の分布を示します。北太平洋及び北大西洋で、移動性擾乱の傾圧的な発達に伴う極向き熱輸送の顕著な極大域が見られます。今日ではこれらの極大域を“storm track” と称する事が広く行われています。

「オイラー的」手法は、「ラグランジュ的」手法と異なり、移動性擾乱の中心を同定し追跡する必要がありません。そのため、全球大気再解析や気候モデルの出

* 東京大学先端科学技術研究センター。

okajima@atmos.rcast.u-tokyo.ac.jp

—2023年1月31日受領—

—2023年3月27日受理—

力データ等に容易に適用可能であるという利点があり (Eyring *et al.* 2021), 現在では移動性擾乱活動の評価手法として広く用いられています. 加えて「オイラー的」手法には, エネルギー収支解析 (Orlanski and Katzfey 1991; Chang *et al.* 2002) や Eliassen-Palm (E-P) flux (Hoskins *et al.* 1983; Plumb 1986; Trenberth 1986) 等の定量的な力学的診断に適しているという長所も存在します. このような長所を背景として, オイラー的手法に基づき, 移動性擾乱活動と背景場との相互作用に関する様々な知見が得られてきました (Lee and Kim 2003; Nakamura *et al.* 2004).

しかしながら, 「オイラー的」手法には同時に短所も存在します. それは, 時間フィルタを施すために, 「ラグランジュ的」手法のように個々の高低気圧を区別して扱う事が出来ず, 我々が日々の天気変動を解釈する主要素である気象現象との関係が不明瞭であるという点です. 実は, 「ラグランジュ的」手法で得られる移動性低気圧経路頻度の分布と, 「オイラー的」手法で得られる移動性擾乱活動度の指標の分布には相違点が見られます (Shaw *et al.* 2016). Blackmon (1976) 及び Blackmon *et al.* (1977) で示された『「オイラー的」な擾乱の統計量の極大が, 「ラグランジュ的」な低気圧活動活動域に対応している』という事実は, 『「オイラー的」な擾乱の統計量の極大は, 低気圧活動によって支配的に説明される』という命題が真である事を必ずしも担保しません. 実際, Wallace *et al.* (1988) では

「storm track」という呼称は低気圧の支配的寄与を前提としているが, 必ずしもそうではなく misleading である』と言及しています (代わりの呼称として “baroclinic waveguide” を提案). こういった少数の先行研究で指摘はなされてきたものの, 「オイラー的」手法と「ラグランジュ的」手法によって得られる移動性擾乱活動度がどのように関係しているのか? という観点は, 長年見過ごされ, オイラー的な統計に基づく “storm track” の活動度に対して, storm = 低気圧がどの程度寄与しているのか? という問いに対する明確な答えは, これまで示されていませんでした.

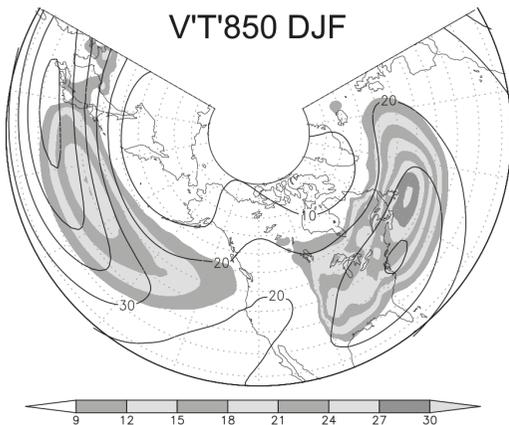
本研究を着想する以前, 私は中緯度海面水温偏差に対する大規模大気循環変動応答の研究をしておりました. その中で, 移動性擾乱に伴う極向き熱輸送などのオイラー的な統計量に基づいて, 北太平洋の海面水温偏差に伴う水温勾配が移動性擾乱活動を変調させるという議論を行っていたのですが (Okajima *et al.* 2014; Okajima *et al.* 2018), そのような統計量が本当に「ラグランジュ的」視点における移動性低気圧の振舞いの変化を表しているのだろうか? という疑問を抱いていました.

「ラグランジュ的」手法と「オイラー的」手法は本質的には相補的だと考えられますが, これらを統合するような研究はこれまで行われてきませんでした. そこで本研究では, 「オイラー的」な擾乱の統計量に対する高低気圧の寄与を分離・定量的に評価する手法を新規に開発し, 各々に対して「オイラー的」手法の枠組みをもとに力学的診断を行いました. これにより, 「オイラー的」視点に対し, 高低気圧を区別して扱うという「ラグランジュ的」視点を融合し, 「オイラー的」視点に基づく枠組みにより得られた従来の知見を拡張する事を目指しました.

3. 高低気圧性渦の寄与の分離手法

本研究では, 全球大気再解析として JRA-55 (Kobayashi *et al.* 2015; Harada *et al.* 2016) の6時間毎の気圧面データを用い, 1958/59-2016/17年の59季節を解析しました. 移動性擾乱に伴う変動成分は, 通常のエイラー的手法と同様に, カットオフ周期8日の Lanczos フィルタを施した低周波成分からのずれとして局所的に定義します. 以下では31日移動平均を施した気候平均を示します.

オイラー的な擾乱の統計量に対する高低気圧の寄与分離は,



第1図 1958/59-2016/17年の冬季(12-2月)における, 気候平均の移動性擾乱(周期8日以下の高周波成分)に伴う850hPa面極向き熱輸送(K m/s). 黒線は300hPa面における気候平均東西風速(m/s). JRA-55に基づく.

- ①高低気圧領域を三次元的に同定
- ②各領域のみで擾乱に伴う局所的統計量を計算
- ③時間積分し、気候平均に対する寄与を得る

という手順で行う事が出来ると考えられます。しかしながら、①の領域同定を相対渦度やジオポテンシャル高度から行うのは困難です。というのは、対流圏上層には強いジェット気流が存在し、その近傍に強いシア渦度やジオポテンシャル高度勾配が不可避免的に存在するためです(第2図a)。

Okajima *et al.*(2021) では、流れの局所的な曲率に着目する事で、高低気圧領域を高低気圧性渦領域として同定し、上述の問題を回避しました。具体的には、相対渦度のシア成分と曲率成分への分離(Holton 2004)

$$\zeta = -\frac{\partial V}{\partial n} + \frac{V}{R_s} \quad (1)$$

(V はスカラー風速、 n は流れの法線ベクトルの方向、

R_s は曲率半径)において、シア渦度

$$-\frac{\partial V}{\partial n} = -\frac{1}{V^2}(-uvu_x - v^2v_x + u^2u_y + uvv_y) \quad (2)$$

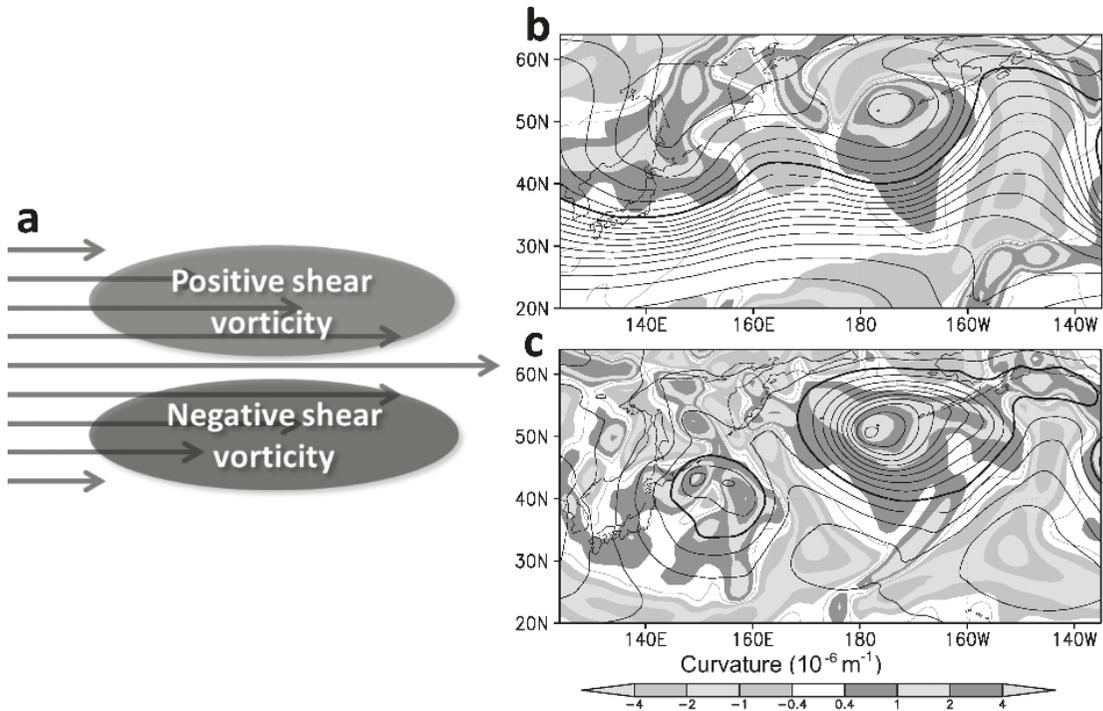
(それぞれ u, v は東西・南北風速、添字の x, y は東西・南北微分)を相対渦度から減ずる事で、

$$\frac{V}{R_s} = \frac{1}{V^2}(-uvu_x + u^2v_x - v^2u_y + uvv_y) \quad (3)$$

として曲率渦度を求めます。そして、曲率渦度をさらにスカラー風速で除する事で、局所的な曲率が

$$\kappa_2 \equiv \frac{1}{R_s} = \frac{1}{V^3}(-uvu_x + u^2v_x - v^2u_y + uvv_y) \quad (4)$$

として求まります。なおこの式は、陰関数表示された二次元曲線の曲率の公式(Goldman 2005)を流線関数



第2図 (a)北半球におけるジェット気流とシア渦度の関係の模式図。(b)2017年1月27日06UTCにおける、300hPa面水平風の局所的な曲率(正が低気圧性回転に対応)。灰点線は曲率のゼロ線、黒線は300hPa面ジオポテンシャル高度を表す(80m毎、太線は8800m)。(c)は(b)と同様、但し1000hPa面の曲率及び海面気圧(6hPa毎、太線は1002hPa)。Okajima *et al.* 2021の Fig. S1を一部改変。

に対して適用する事で得られる

$$\kappa_2 = \frac{\begin{vmatrix} \psi_{xx} & \psi_{xy} & \psi_x \\ \psi_{yx} & \psi_{yy} & \psi_y \\ \psi_x & \psi_y & 0 \end{vmatrix}}{(\psi_x^2 + \psi_y^2)^{3/2}} \quad (5)$$

から、地衡風平衡を仮定して導出する事も可能です。本研究で用いる曲率は二次元曲線の曲率であり、三次元空間上の曲面に対して定義される曲率とは異なる点に注意が必要です。

第2図bに、冬季北太平洋のある時刻における対流圏上層における曲率の分布を示します。北半球においては、渦度と同様に正の曲率が低気圧性回転を表します。曲率は、北緯35-40度付近を吹く強いジェット気流の影響を受けることなく、ジェットの蛇行に伴うトラフやリッジの領域を効果的に表現出来ています。加えて、ベーリング海周辺の切離低気圧に伴う低気圧性渦領域も適切に表現出来ています。さらに、第2図cに示すように、曲率は地表付近の高低気圧に関しても適切にそれらの領域を表現している事が分かります。

曲率は、(4)式のように曲率半径と対応するため、物理的解釈が容易であるという特性があります。この特性のため、第2図b, cに示すように、対流圏上層と地表付近の曲率の値を相互に比較して対応付ける事が可能です。また、風速に依存せず流れの形状にのみ依存するという曲率の特性から、高低気圧性渦の三次元構造の可視化においても、効果的なツールとなります(岡島 2022)。

局所的な曲率によって得られた各々の高低気圧性領域のみにおいて、擾乱の統計量を積算し、気候平均を計算する事で、高低気圧性渦各々の気候平均に対する寄与を得ます。なお本研究では、曲率は時間フィルタを施さない水平風速から計算します。これは、「ラグランジュ的」手法で個々の移動性高低気圧を同定する際に、「オイラー的」手法で用いるのと同じような時間フィルタを通常は施さないためです。言い換えると、本手法においては、ジェット気流の影響の除去と高低気圧領域の同定は時間フィルタではなく局所的な曲率によって行い、擾乱成分の抽出を時間フィルタによって行います。局所的な曲率そのものには、移動性擾乱だけでなく、準停滞性波動や定在波の影響も含まれています。

シア渦度によってジェットストリークのコア領域を

波に伴う成分と区別して描画するというアイデアは Newton and Palmén (1963) で用いられており、その後も客観的なジェット気流軸の同定等に用いられています (Spensberger *et al.* 2017)。また、シア渦度の影響を除去する事で、対流圏中層のトラフの中心を決定しようという研究が過去に存在しています (Lefevre and Nielsen-Gammon 1995)。本研究で提案している手法は、相対渦度からシア渦度を減ずることでジェット気流の影響を取り除いた上で、さらに曲率に着目することでスカラー風速に対する依存性を除去し、高低気圧性渦の「領域」を「三次元的」に決定するという点に特色を有します。三次元的に領域を同定することにより、オイラー的な擾乱の統計量に対する気候平均的な寄与の評価が可能になるのです。

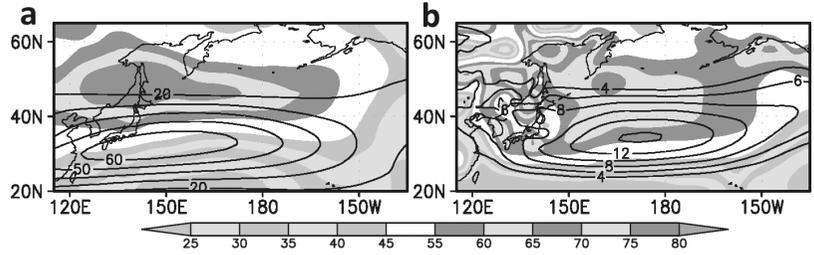
4. 冬季北太平洋における移動性擾乱活動に対する高低気圧性渦の寄与

以下では、高低気圧性渦領域として抽出される曲率の閾値をゼロとして計算した結果を示します。すなわち、各々の寄与の和は純粋なオイラー統計として得られる気候平均の値と一致します。なお、非ゼロの曲率の閾値を設定する事も可能であり、例えば閾値を $\pm 4 \times 10^{-7} \text{m}^{-1}$ (曲率半径2,500km に対応)として計算しても、定性的に同様の結果が得られます。このことは、結果が渦の境界の位置に強くは依存せず、高低気圧性渦による寄与の非対称性が、渦と渦の境界領域のみによってもたらされている訳ではない、という事を示しています。

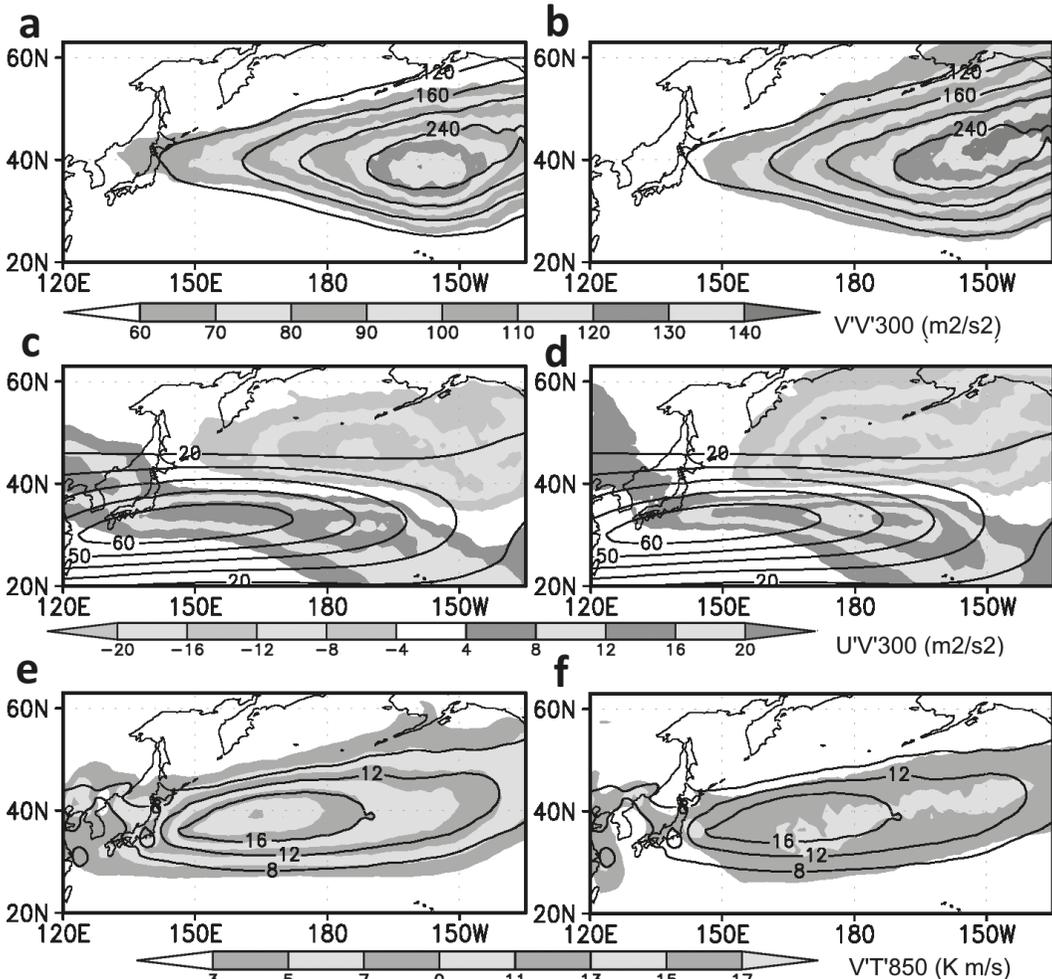
まず、低気圧性曲率の気候平均的な存在頻度について第3図に示します。なお、曲率の閾値をゼロとしているため、高気圧性曲率の存在頻度は低気圧性渦曲率を100%から減ずる事で得られ、その分布は低気圧性曲率の鏡像となります。対流圏上層では、ジェット気流の軸の極側で低気圧性曲率が、赤道側で高気圧性曲率がより頻繁に抽出されます(第3図a)。対流圏下層においては、対流圏上層と同様の傾向に加えて、下層ジェットの軸付近でも低気圧性曲率の頻度が比較的高くなっています(第3図b)。対流圏下層における低気圧性・高気圧性曲率の分布は、特に北太平洋上において、ラグランジュ的トラッキングに基づく先行研究の結果 (Hoskins and Hodges 2002等) と概ね整合的であると言えます。

次に、オイラー的な擾乱の統計量 (例えば南北風の分散) の気候平均に対する高低気圧性渦の寄与を第4

図に示します。対流圏上層の擾乱活動の指標として用いられる南北風の分散に関しては、低気圧・高気圧性渦の寄与はともに東部北太平洋で最大となり、その類似性は高いものの、高気圧性渦の寄与はより大きく、下流に伸びています(第4図a, b)。対して、対流圏上層の擾乱に伴う西風



第3図 1月24日を中心とする31日移動平均を施した、(a) 300hPa、(b) 850hPaにおける1958/59-2016/17年の気候平均の低気圧性曲率存在頻度(%)。黒線は各気圧面における気候平均東西風速(m/s)。Okajima *et al.*(2021)のFig. 1を一部改変。



第4図 (a) 1月24日を中心とする31日移動平均を施した、300hPa南北風の擾乱成分の分散に対する低気圧性渦の寄与 (m^2/s^2) の気候値 (1958/59-2016/17年)。黒線は純粋なオイラーの統計量としての分散を表す (m^2/s^2)。 (c) は (a) と同様、但し300hPaにおける擾乱成分の東西風と南北風の共分散 (m^2/s^2)。黒線は気候平均300hPa面東西風速 (m/s)。 (e) は (a) と同様、但し850hPaにおける擾乱成分に伴う極向き熱輸送 ($K m/s$)。 (b, d, f) は (a, c, e) とそれぞれ同様、但し高気圧性渦による寄与。Okajima *et al.*(2021)のFig. 2を一部改変。

運動量の南北輸送について見ると、高気圧性渦の寄与は低気圧性渦と比較して、ジェット軸の極側の負領域・赤道側の正領域共に、より大きな振幅を示す事が分かります(第4図c, d)。その一方で、擾乱の傾圧的発達の際指標である対流圏下層の極向き熱輸送に対しては、低気圧性渦の寄与が支配的である事が分かります(第4図e, f)。これは、例えば Shapiro and Keyser (1990) のモデルにおいて見られるように、移動性低気圧が移動性高気圧に比べてより傾圧的に発達しているという認識と整合的であると言えます。しかし、同様の解析を曲率ではなくシア温度の正負に基づいて決定した「高低気圧性領域」に対して行くと、「高低気圧性領域」の寄与の相対的重要性は逆転してしまいます(第5図)。この事は、高低気圧の寄与を評価する際に、相対温度の曲率成分の計算が本質的に必要である事を示します。

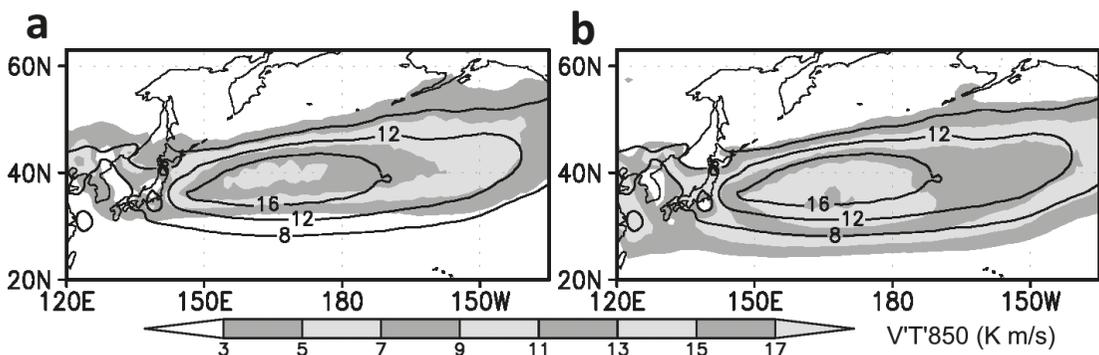
これらの結果により、オイラー的な統計に基づく“storm track”の活動度に対して、storm=低気圧がどの程度寄与しているのか? という、第2節で言及した疑問への解を得る事が出来ます。これらのオイラー的統計への高低気圧性渦の寄与は、ラグランジュ的トラッキングにおける高低気圧の個数だけでなく、それらの強度や大きさなどの要素を全て反映したものであると考えられます。

上述の移動性擾乱に伴う運動量・熱フラックスに対する高低気圧性渦の寄与の非対称性は、背景のジェット気流に対するフィードバック強制にも非対称性が存在する事を示唆します。それを評価するため、得られたオイラー的な統計量に対する高低気圧性渦の寄与をもとに三次元の高度変化傾向方程式を解き(Lau and Holopainen 1984; Nishii *et al.* 2009)、地衡風を仮定し

て西風に対する加速・減速強制を評価しました。このような擾乱による西風加速のフィードバック強制によって維持される西風を渦駆動ジェットと呼びます。

第6図a, bに、真冬の北太平洋における移動性擾乱に伴う西風加速・減速への低気圧・高気圧性渦の寄与を示します。低気圧性渦による北緯40度付近の西風加速への寄与は対流圏下層でより顕著です。つまり、低気圧性渦は地表面付近の渦駆動ジェット気流の維持・強化にとって本質的に重要であり、これはE-P (Eliassen-Palm) fluxの下層から上方への伝播が高気圧性渦によるものより顕著である事も整合的です。加えて、低気圧性渦の寄与は対流圏下層から中層のジェットの極側での西風減速に対しても支配的であり、特に地表付近で西風の南北シアを維持・強化する働きをしています。一方、高気圧性渦の寄与はより順圧的で、低気圧性渦の寄与と比較して、対流圏上層における亜熱帯ジェット気流軸周辺の西風減速及びその極側での加速と、それに伴うE-P fluxの赤道向き伝播がより顕著です。この事は、亜熱帯ジェット軸から中緯度への極向き西風運動量の輸送において、高気圧性渦がより重要な役割を果たしている事を示します。低気圧性・高気圧性渦の寄与におけるE-P fluxの伝播経路の差異は、Thorncroft *et al.*(1993)で示されたような、ロスビー波の碎波の振舞いの差異と整合的であり、曲率に基づく低気圧性・高気圧性渦の気候平均への寄与が、ロスビー波の低気圧性・高気圧性碎波と関連している事が示唆されます。

なお、上述のような西風加速・減速に対する高低気圧性渦の寄与は、北大西洋や南半球夏季のインド洋においても北太平洋と定性的に同様で(第6図c-f)、高低気圧性渦の寄与の非対称性が普遍的な性質である事



第5図 (a, b)は第4図e, fとそれぞれ同様、但しシア温度に基づいて高低気圧性渦の寄与に分離した結果。Okajima *et al.*(2021)のFig. S7e, S7fを一部改変。

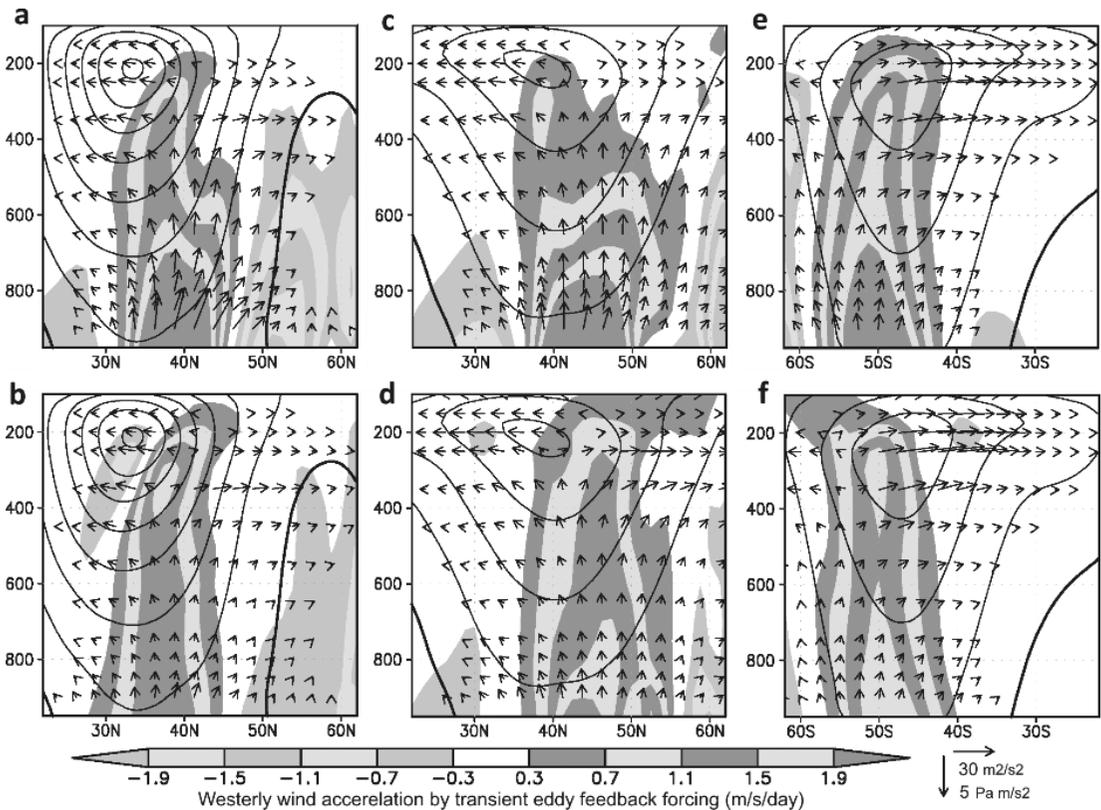
を示唆します。

気候平均的なオイラー的な擾乱の統計量が得られたため、高低気圧性渦のそれぞれに対し、移動性擾乱活動に関するエネルギー収支解析を適用可能です。本稿ではエネルギー収支解析の詳細は省きますが（詳細は Okajima *et al.* (2022) をご覧ください）、北太平洋における移動性擾乱活動に対する収支を評価するため、各項を北太平洋領域で三次元的に積分し、各々の相対的重要性を評価しました。

第7図に示すように、高気圧性渦の擾乱に伴う運動エネルギー（EKE：Eddy Kinetic Energy）に対する寄与は全EKEの45%程度を占めており、中緯度の移動性擾乱活動において、低気圧性渦だけでなく高気圧性渦も重要である事を示します。また、低気圧性渦のより傾圧的な性質を反映し、EKEに対する擾乱に伴う

有効位置エネルギー（EAPE：Eddy Available Potential Energy）は、低気圧性渦の寄与においてより高くなっています。

各エネルギー変換・生成項について見てみると、移動性擾乱に伴うエネルギーの維持に最も重要である傾圧的な変換（CP）においては、低気圧性渦の寄与が高気圧性渦の寄与と比較して60%程度大きい事が分かります。その一方、順圧的な変換（CK）においては、高低気圧性渦の寄与はいずれも擾乱に伴うエネルギーを背景場に戻しており、両者の寄与は同程度です。非断熱加熱に伴うEAPEの生成への寄与（CQ）は高低気圧性渦ともに正ですが、低気圧性渦の寄与がより大きい事が分かります。一方で、エネルギーフラックス項（EF、北太平洋領域からの正味のエネルギー流出）に対しては、高気圧性渦の寄与が支配的です。これは、



第6図 1月24日を中心とする31日移動平均を施した、擾乱成分に伴う西風の加速・減速の気候値（1958/59-2016/17年）. (a-b) 北太平洋（150°-180°E）における、(a) 低気圧性渦及び (b) 高気圧性渦の寄与（m/s/day）. 矢印は Trenberth（1986）に基づく拡張 E-P flux に対する各々の寄与. 黒線は気候平均東西風速（10m/s 毎、太線は 0 m/s）. (c-d), (a-b) と同様、但し北大西洋（80°-50°W）における気候平均. (e-f), (a-b) と同様、但し南半球夏季南インド洋（75°-105°E）における気候平均. Okajima *et al.* (2021) の Fig. 3 を一部改変.

主に北太平洋から下流側へのエネルギー流出に伴いません。

5. まとめ

本研究では、流れの局所的な曲率に基づいて高低気圧性渦領域を三次元的に同定する簡便な新手法を開発し、オイラー的な擾乱の統計量、ジェット気流へのフィードバック強制、エネルギー収支への高低気圧性渦各々の寄与を初めて定量的に評価しました。そしてこれらの結果から、擾乱と背景場との相互作用において、低気圧性・高気圧性渦がそれぞれ異なる役割を果たしている事を示しました。これは、これまでのオイラー的手法・ラグランジュ的手法からのみでは得られない知見であるとともに、高気圧の役割が見過ごされるべきではない事を示唆します。

本研究で提案した手法は、渦位の逆変換などの計算コストの高い処理を必要としないため、気候モデルの大アンサンブル実験の解析やマルチモデル解析などに適用する事が実用的に可能です。「オイラー的」視点と

「ラグランジュ的」視点は、大気再解析データや気候モデル出力データを土台としてこれまで別々に発展してきましたが、本研究で提案した手法は、それらを部分的に統合する事で「ハイブリッド」な視点を与え、移動性擾乱活動に関して得られてきた従来の知見を大きく発展させる事が可能であると考えています。

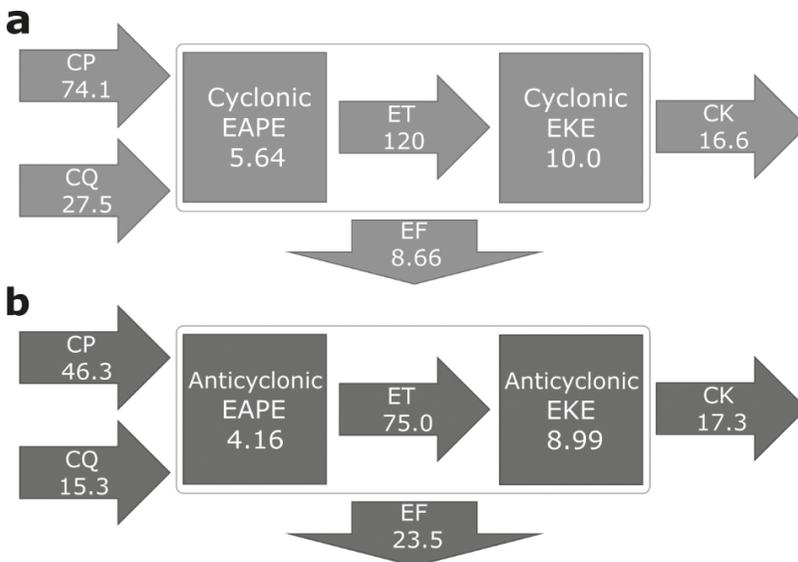
様々な現象や出力データに対して、本研究で提案した手法は適用可能です。移動性擾乱活動についての、全球的な比較、北太平洋における真冬の振幅低下(Nakamura 1992)をはじめとする季節性の評価、中緯度における大気海洋相互作用の調査、環状モードやブロッキングといった他の気象現象への適用などが想定されます。このような幅広い現象・データへの適用を通じ、移動性擾乱と大気大循環の関係の理解に対して新たな枠組みの提唱に繋げる事が出来ればと考えています。さらに本手法は、大気の流れに留まらず、海洋におけるジェットと渦の分離等にも応用可能であると考えています。

最後に、本研究で提案した手法はあくまで *ad hoc* な

ものであると私は捉えています。Okajima *et al.* (2021)は、本手法が移動性擾乱活動に対する高低気圧の寄与分離の唯一かつ最良の手法だと主張するものではありません。例えば、渦位の逆変換に基づくような手法もあり得るだろうと考えています。本研究を通じて、大気循環場における高低気圧の寄与に関する議論が活発化する事で、移動性擾乱と背景流との相互作用をはじめ、大気力学に関する理解がより深化する事を、私は期待しています。

謝辞

本研究は、東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻博士課程在学中に実施したものです。論文の共著者であり、修士・博士課程の指導教員である中村 尚先生（東京大学先端科学技術研究セン



第7図 1月24日を中心とする31日移動平均を施した、北太平洋域 (130°E-130°W, 20-65°N) における移動性擾乱活動に関するエネルギー収支 (1958/59-2016/17年の気候値)。 (a) が低気圧性渦、 (b) が高気圧性渦の寄与を示す。各項は地表面から100hPaまで鉛直積算した後に水平積分している。EAPE, EKEが擾乱に伴う有効位置エネルギー及び運動エネルギーを、CK, CP, CQ, EF, ETがそれぞれ順圧エネルギー変換、傾圧エネルギー変換、非断熱加熱に伴うエネルギー生成、水平エネルギーフラックス項、EAPEからEKEへのエネルギー変換を表す。エネルギー、エネルギー変換・生成の単位は各々 10^{18} J (=EJ), 10^{12} W (=TW)である。Okajima *et al.* (2021) の Fig. 4を一部改変。

ター)には、研究実施・論文執筆のご指導だけでなく、研究に必要な心構えや取り組み方等、多くをご教授いただきました。ワイツマン科学研究所の Yohai Kaspi 先生には、共著者としての研究に関する助言だけでなく、論文執筆に関する考え方について貴重なコメントを多く頂きました。また、博士論文審査の主査を引き受けて下さった渡部雅浩先生や、升本順夫先生、三浦裕亮先生、伊賀啓太先生をはじめ、東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻の先生方には、本研究についての貴重な助言を頂きました。また、先端科学技術研究センターの中村・小坂研究室の皆様、その他お世話になった多くの方々に、この場をお借りして深く感謝申し上げます。

本研究の実施にあたり、文部科学省、環境省、日本学術振興会から支援を受けました。論文に用いた図の描画には、Grid Analysis and Display System (GrADS) を使用しました。最後に、実生活においていつも私のことを支えてくれている妻に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- Blackmon, M. L., 1976: A climatological spectral study of the 500 mb geopotential height of the Northern Hemisphere. *J. Atmos. Sci.*, **33**, 1607–1623.
- Blackmon, M. L., J. M. Wallace, N. C. Lau and S. L. Mullen, 1977: An observational study of the Northern Hemisphere wintertime circulation. *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1040–1053.
- Chang, E. K., S. Lee and K. L. Swanson, 2002: Storm track dynamics. *J. Climate*, **15**, 2163–2183.
- Eyring, V. *et al.*, 2021: Human influence on the climate system. In *climate change 2021: The Physical Science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Masson-Delmotte, V., *et al.*, eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 423–552.
- Goldman, R., 2005: Curvature formulas for implicit curves and surfaces. *Comput. Aided Geom. Des.*, **22**, 632–658.
- Harada, Y. *et al.*, 2016: The JRA-55 reanalysis: representation of atmospheric circulation and climate variability. *J. Meteor. Soc. Japan*, **94**, 269–302.
- Hinman, R., 1888: *Eclectic Physical Geography*. American Book Company, 382pp.
- Holton, J. R., 2004: *An Introduction to Dynamic Meteorology* (4th ed.). Academic Press, 535pp.
- Hoskins, B. J. and K. I. Hodges, 2002: New perspectives on the Northern Hemisphere winter storm tracks. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 1041–1061.
- Hoskins, B. J., I. N. James and G. H. White, 1983: The shape, propagation and mean-flow interaction of large-scale weather systems. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 1595–1612.
- Kobayashi, S. *et al.*, 2015: The JRA-55 reanalysis: general specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5–48.
- Lau, N. C. and E. O. Holopainen, 1984: Transient eddy forcing of the time-mean flow as identified by geopotential tendencies. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 313–328.
- Lee, S. and H. K. Kim, 2003: The dynamical relationship between subtropical and eddy-driven jets. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 1490–1503.
- Lefevre, R. J. and J. W. Nielsen-Gammon, 1995: An objective climatology of mobile troughs in the Northern Hemisphere. *Tellus A*, **47**, 638–655.
- Murray, R. J. and I. Simmonds, 1991: A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part II: Application to January and July general circulation model simulations. *Aust. Meteorol. Mag.*, **39**, 167–180.
- Nakamura, H., 1992: Midwinter suppression of baroclinic wave activity in the Pacific. *J. Atmos. Sci.*, **49**, 1629–1642.
- Nakamura, H., T. Sampe, Y. Tanimoto and A. Shimpo, 2004: Observed associations among storm tracks, jet streams, and midlatitude oceanic fronts. *Earth Climate: The Ocean-Atmosphere Interaction* (C. Wang, *et al.*, eds.), *Geophys. Monogr.*, **147**, 329–345.
- Newton, C. W. and E. Palmén, 1963: Kinematic and thermal properties of a large-amplitude wave in the west-erlies. *Tellus*, **15**, 99–119.
- Nishii, K., H. Nakamura and T. Miyasaka, 2009: Modulations in the planetary wave field induced by upward propagating Rossby wave packets prior to stratospheric sudden warming events: A case study. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **135**, 39–52.
- 岡島 悟, 2022: 3次元格子データの materialization—3D プリンタによる“物質化”—。 *天気*, **69**, 489–492.
- Okajima, S., H. Nakamura, K. Nishii, T. Miyasaka and A. Kuwano-Yoshida, 2014: Assessing the importance of prominent warm SST anomalies over the midlatitude North Pacific in forcing large-scale atmospheric anomalies during 2011 summer and autumn. *J. Climate*, **27**, 3889–3903.
- Okajima, S., H. Nakamura, K. Nishii, T. Miyasaka, A. Kuwano-Yoshida, B. Taguchi, M. Mori and Y. Kosaka, 2018: Mechanisms for the maintenance of the winter-

- time basin-scale atmospheric response to decadal SST variability in the North Pacific subarctic frontal zone. *J. Climate*, **31**, 297-315.
- Okajima, S., H. Nakamura and Y. Kaspi, 2021: Cyclonic and anticyclonic contributions to atmospheric energetics. *Sci. Rep.*, **11**, 1-10.
- Okajima, S., H. Nakamura and Y. Kaspi, 2022: Energetics of transient eddies related to the midwinter minimum of the North Pacific storm-track activity. *J. Climate*, **35**, 1137-1156.
- 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.
- Pfahl, S. and H. Wernli, 2012: Quantifying the relevance of cyclones for precipitation extremes. *J. Climate*, **25**, 6770-6780.
- Plumb, R. A., 1986: Three-dimensional propagation of transient quasi-geostrophic eddies and its relationship with the eddy forcing of the time-mean flow. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 1657-1678.
- Roberts, J. F., A. J. Champion, L. C. Dawkins, K. I. Hodges, L. C. Shaffrey, D. B. Stephenson, M. A. Stringer, H. E. Thornton and B. D. Youngman, 2014: The XWS open access catalogue of extreme European windstorms from 1979 to 2012. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **14**, 2487-2501.
- Shapiro, M. A. and D. Keyser, 1990: Fronts, jet streams and the tropopause. *Extratropical Cyclones, The Erik Palmén Memorial Volume* (C. W. Newton and E. O. Holopainen, eds.), Amer. Meteor. Soc., 167-191.
- Shaw, T. A. *et al.*, 2016: Storm track processes and the opposing influences of climate change. *Nat. Geosci.*, **9**, 656-664.
- Spensberger, C., T. Spengler and C. Li, 2017: Upper-tropospheric jet axis detection and application to the boreal winter 2013/14. *Mon. Wea. Rev.*, **145**, 2363-2374.
- Thorncroft, C. D., B. J. Hoskins and M. E. McIntyre, 1993: Two paradigms of baroclinic-wave life-cycle behaviour. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **119**, 17-55.
- Trenberth, K. E., 1986: An assessment of the impact of transient eddies on the zonal flow during a blocking episode using localized Eliassen-Palm flux diagnostics. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 2070-2087.
- Ulbrich, U., G. C. Leckebusch and J. G. Pinto, 2009: Extratropical cyclones in the present and future climate: a review. *Theor. Appl. Climatol.*, **96**, 117-131.
- Wallace, J. M., G. H. Lim and M. L. Blackmon, 1988: Relationship between cyclone tracks, anticyclone tracks and baroclinic waveguides. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 439-462.

Evaluating Cyclonic and Anticyclonic Contributions to Eulerian Eddy Statistics

Satoru OKAJIMA *

* *Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo, Tokyo 153-8904, Japan*
E-mail: okajima@atmos.rcast.u-tokyo.ac.jp

(Received 31 January 2023; Accepted 27 March 2023)
