

台風における鉛直シアと傾圧性の影響について Influences of Vertical Shear and Baroclinicity on Tropical Cyclones

柳瀬 亘^{*1}

Wataru YANASE

The vertical shear at low-latitudes is known to suppress the development of tropical cyclones, and to cause asymmetric structure due to the vortex-tilt process. Because the vertical shear at mid-latitudes is associated with a steep horizontal gradient of temperature due to thermal wind balance, it may affect tropical cyclones differently from that at low-latitudes. This study discusses the influence of vertical shear on tropical cyclones at mid-latitudes based on previous studies and idealized numerical experiments.

1. はじめに

台風の環境場としての鉛直シアは、台風の発生・発達を抑制する効果や、渦軸の傾斜により上昇流や降水の分布を非対称化する効果があることが知られている。一方で、鉛直シアと惑星渦度の積は温度風バランスにより水平温度勾配に比例するため、中緯度の鉛直シアは大きな水平温度勾配を伴うことになる。このため、中緯度まで北上した台風のメカニズムを解釈する上で、低緯度と同様の鉛直シアの効果を考えれば良いのか、あるいは、温帯低気圧化のように水平温度勾配による傾圧性を考えるべきなのかが自明ではない。なお、力学的に厳密な緯度の境があるわけではないので、本稿では目安として、多くの研究で対象としている北緯 20 度以南を低緯度、北緯 30 度以北を中緯度として考える。

本稿では、先行研究のレビューと理想化実験に基づき、主に中緯度での鉛直シアの役割について議論する。本稿で明確な解答が導かれるわけではないが、日本付近の台風における鉛直シアの役割を解釈する上での問題を提起したい。

2. 低緯度の鉛直シアに関する先行研究

まずは一般的な話として、強い水平温度勾配を伴わない低緯度の鉛直シアの役割について簡単に整理する。

鉛直シアが台風の発生・発達を抑制する要因と

しては、上層・中層の暖気核の ventilation 効果や、境界層への低相当温位気塊の下降などが指摘されている(Frank and Ritchie 2001, Riemer et al. 2010)。この効果は台風の発生環境を診断する Genesis Potential Index (Emanuel and Nolan 2004)でも考慮されている。特に夏季モンスーンに伴う鉛直シアが強い北インド洋では、海面水温が 26.5°C 以上であっても熱帯低気圧の活動が著しく抑制されている(Yanase et al. 2012)。

鉛直シアには台風の接線方向に波数 1 の非軸対称構造を形成させる効果もある。鉛直シアによって渦軸がダウンシア側（西風鉛直シアの場合は東側）に傾けられる際に、渦の温度風バランスを維持するようにダウンシア側で断熱冷却を伴う上昇流が励起される(Jones 1995, Ueno 2007)。渦軸はダウンシア側に傾いた後、上層と下層の渦の相互作用により低気圧性の歳差運動を起こし、ダウンシア左側（北側）にまで傾くと上層下層の相互作用と鉛直シアの効果が打ち消し合う (Jones 1995, Reasor et al. 2004)。渦軸が傾いた方向 (down-tilt 側と呼ばれる) では渦の温度風バランスにより低温偏差が存在し等温位面の高度が上がるため、低気圧性の流れが等温位面に沿って鉛直運動すると接線方向に 90 度上流側で上昇流が生じることになる(Jones 1995)。これらのプロセスは湿潤過程が加わっても定性的に似た特徴を有するが、熱収支では凝結熱の効果も大きく寄与する (Ueno 2008)。

*1 気象庁気象研究所 wtryanase@gmail.com
Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

3. 中緯度の鉛直シアに関する先行研究

中緯度では惑星渦度が大きいため、鉛直シアは温度風バランスにより大きな水平温度勾配を伴う。これにより台風の発達や構造への鉛直シアの影響が変化する可能性がある。多くの研究では低緯度での実験・統計や、水平温度勾配なしに鉛直シアを与えられる point-downscaling と呼ばれる実験手法(Nolan 2011)に基づく議論が多く、水平温度勾配に関連した研究は少ないが、手掛かりとなりうる幾つかの研究を紹介する。

鉛直シアによる台風発達の抑制は、緯度が高くなるほど働きにくくなるという統計があり(DeMaria 1996)、この効果は統計的な強度予測モデル SHIPS/TIFS でも考慮されている(DeMaria and Kaplan 1999)。DeMaria (1996)はこの効果について、大きな惑星渦度に伴う Rossby penetration depth の増加が上層下層の相互作用を強めるためと解釈した。この研究では力学プロセスの一部分だけを解析しているので、解析されなかった傾圧性の効果がどのように影響しているかは興味深い。Davis (2008)の温帯低気圧化中のハリケーンの解析では、鉛直シアには質量フラックスや渦のサイズを増加させる効果もあることが示されている。

鉛直シアに伴う水平温度勾配が台風の構造に与える影響は、温帯低気圧化で明瞭である (Jones et al. 2003, Evans et al. 2017)。温帯低気圧化は数時間～数十時間かかる連続的なプロセスであるため、完全に温帯低気圧になる前の台風と分類されている段階であっても、構造はすでに非対称化している場合が多い。この非対称化は水平勾配を持つ温度場の水平移流によるものであり、日本付近では西風鉛直シアにバランスした南北温度勾配の中で、暖気移流に伴う上昇流は台風の東側、すなわちダウンシア側で生じる。

ここで鉛直シア内の台風の非対称化のメカニズムを整理すると、先述の渦軸傾斜と暖気移流の2つの異なるメカニズムに大別される(Jones 1995 の Fig 4a,b)。両者はダウンシア側で上昇流が生じるという点においては似ているが、幾つかの点で違いが見られる。(1)ダウンシア側の温度偏差に関しては、渦軸傾斜では上昇流の強制に伴う断熱冷却により低温偏差となるが、暖気移流では高温偏差となる。(2)この温度偏差場との温度風バランスを考えると、渦軸の傾きに関しては、渦軸傾斜ではダウンシア側に傾くが、暖気移流では傾圧不安定

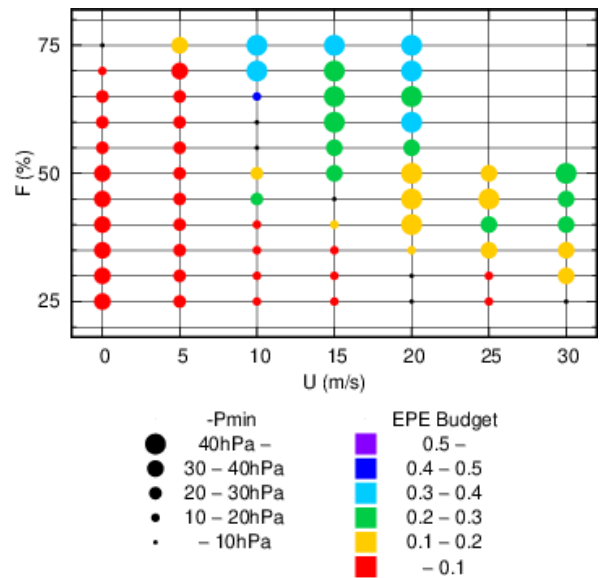


図1 環境場の鉛直シア(横軸; $m s^{-1}$)と惑星渦度(縦軸; %)を変化させた場合の低気圧の最大強度(気圧偏差を丸のサイズで示す)と有効位置エネルギー収支における非断熱項に対する傾圧項の比(丸の色)。Yanase and Niino (2019)から転載。

波の特徴でも見られるようにアップシア側に傾く。(3)水平スケールに関しては、渦軸傾斜は台風の内部コアの強い渦度の傾きを反映するため、上昇流の非対称分布も中心から100km前後の小さなスケールの議論が多い。一方で、暖気移流は内部コアのスケールに限定されないため、より大きなスケールになりうる。

4. 理想化実験

環境場の鉛直シアと惑星渦度を変化させ、その中でどのような構造の低気圧が形成するかを理想化実験で確かめた(Yanase and Niino 2019)。理想化実験には水平格子間隔 10km の気象庁非静力学モデル(Saito et al. 2006)を利用し、雲水・雲氷・雨・雪・霰を予報する Murakami (1990)の雲微物理スキームと Kain and Fritsch (1990)の積雲スキームを用いた。領域は東西 8000km、南北 3000km、高さ 24.52km で、境界条件は東西周期・南北壁のチャネル型とした。初期時刻に領域中心の下層に弱い軸対称渦を置き、1200時間の長時間積分の中で最も発達した擾乱(初期渦起源の擾乱もあれば、積分途中から自然発生する擾乱もある)を各実験で解析した。この実験では必ずしも台風だけを扱っ

ているわけではないが、与えられた環境場の中で擾乱がどのような性質を持つ傾向にあるかを把握することができる。

環境場の鉛直分布は様々な低気圧が形成する北大西洋の9-11月平均の気候値を基にした。西風鉛直シアのパラメータ(m s^{-1})は、全高度の東西風に定数をかけて850hPaと200hPaの差を調整した。東西風の鉛直シアにバランスした南北温度勾配を考慮し、南北風は 0 m s^{-1} とした。惑星渦度のパラメータは北極での値を100%とした時の相対値(%)で与えており、例えば北緯30度の値は50%となる。海面水温もパラメータは海面水温と全高度の気温に定数を足して調節した。ここでは海面水温 26°C の結果のみを示す。

鉛直シアと惑星渦度の組み合わせを変えた実験における低気圧の最大強度と有効位置エネルギー収支の特性を図1に示す。惑星渦度40%の場合、弱い鉛直シア($0\sim 5 \text{ m s}^{-1}$)では凝結熱が主なエネルギー源とする台風の低気圧が発達し(赤い丸)、中程度の鉛直シア($10\sim 20 \text{ m s}^{-1}$)では低気圧は弱く、強い鉛直シア(20 m s^{-1} 以上)では凝結熱と傾圧性の両方をエネルギー源とするハイブリッド型の低気圧が発達した(黄色・緑・水色の丸)。惑星渦度が大きくなると同じ鉛直シアでも水平温度勾配が大きくなるため、より弱い鉛直シアでもハイブリッド型の低気圧が発達している。このため、低気圧が発達しない鉛直シアの範囲は狭くなる。このことは、惑星渦度が大きいほど鉛直シアによる台風発達の抑制がみえづらくなるという DeMaria (1996)の統計に異なる解釈を与えるかもしれない。

鉛直シアによる構造の非対称化には渦軸傾斜と暖気移流があることを先に述べたが、それぞれの特徴を、鉛直シア 10 m s^{-1} と 25 m s^{-1} の実験(惑星渦度は共に40%)で確認することができる(図2)。ここでは上昇流の代わりとして鉛直積算した雲水・雲氷・雨・雪・霰の分布を灰色シェードで示している。いずれの実験でも上昇流の大部分は低気圧のダウンシア側(東側)で起きているが、渦軸傾斜の実験での水平スケールは 100 km 程度と小さいのに対し、暖気移流の実験での水平スケールは数百 km 以上と大きい。また、低気圧のダウンシア側の温度偏差の分布では(図略)、渦軸傾斜の実験では低温偏差が見られた一方で、暖気移流の実験では高温偏差が見られ、理論で期待される特徴を示していた。

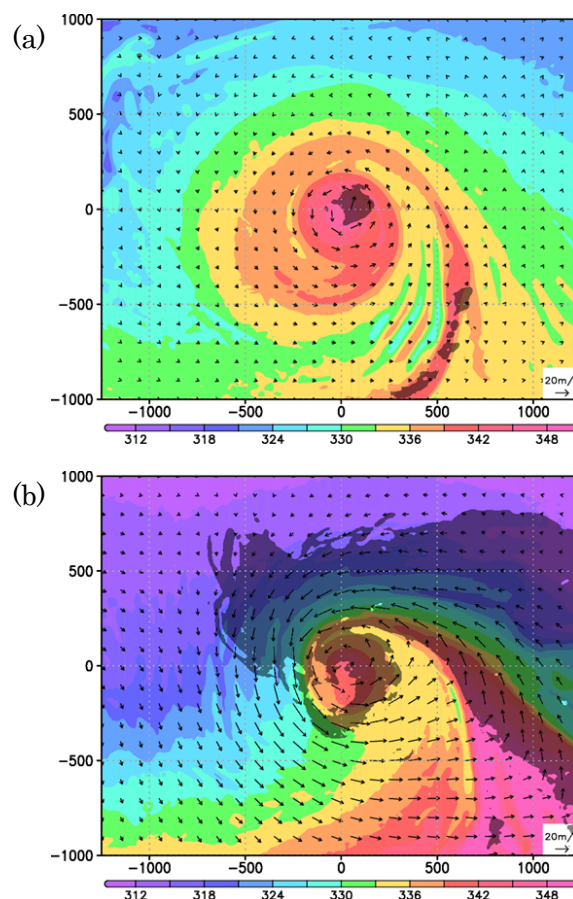


図2 高度1kmの相当温位(カラーシェード; K)、水平風(矢印)、鉛直積算した雲水・雲氷・雨・雪・霰のパターン(灰色シェード)。(a)渦軸傾斜の実験。(b)暖気移流の実験。座標は低気圧中心からの相対的な距離。

5. まとめ

中緯度の鉛直シアは温度風バランスにより大きな水平温度勾配を伴うため、低緯度の鉛直シアと同じ影響を台風に及ぼすかは自明ではない。本稿では、中緯度の鉛直シアの役割に関する先行研究と、関連する理想化実験の結果を紹介した。

発達に関しては、惑星渦度が大きいほど鉛直シアによる抑制効果が小さくなることが DeMaria (1996)で指摘されている。理想化実験では、傾圧的な効果により低気圧が発達しない鉛直シアの範囲は狭いことが示された。

非対称構造に関しては、渦軸傾斜と暖気移流の2つのメカニズムがあることに注意が必要である。両者ともダウンシア側に上昇流を励起するという点は似ているが、温度構造・渦軸の傾き・水平スケールなどがメカニズムを区別する手掛かりになりうる。

現実大気では様々な台風が形成するため、上記

の特徴が常に当てはまるかどうかについては、より詳細な研究で確かめていく必要がある。また、鉛直シアの定義についても、水平平均の範囲、風速差を求める高度、風ベクトルの向きの変化など、考慮すべき点が多い。また、水平平均を行う範囲の風が、理論で想定するように一様な分布なのか、北側だけで強いジェットなのか、特定の方向に強いアウトフローなのか、などの点にも注意して解釈する必要がある。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 19H05696, 21H01164 の助成を受けたものです。

参 考 文 献

- Davis, C. A., 2008: The impact of extratropical transition on the downstream flow: An idealized modelling study with a straight jet. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 134, 69–91.
- DeMaria, M., 1996: The effect of vertical shear on tropical cyclone intensity change. *J. Atmos. Sci.*, 53, 2076–2087.
- DeMaria, M., and Kaplan, J., 1999: An updated statistical hurricane intensity prediction scheme (SHIPS) for the Atlantic and eastern North Pacific basins. *Wea. Forecasting*, 14, 326–337.
- Emanuel, K. A., and D. S. Nolan, 2004: Tropical cyclone activity and global climate. *Proc. 26th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology*, Miami, FL, Amer. Meteor. Soc., 240–241.
- Evans, C. et al., 2017: The extratropical transition of tropical cyclones. Part I: Cyclone evolution and direct impacts. *Mon. Wea. Rev.*, 145, 4317–4344.
- Frank, W., and Ritchie, E., 2001: Effects of vertical wind shear on the intensity and structure of numerically simulated hurricanes. *Mon. Wea. Rev.*, 129, 2249–2269.
- Jones, S. C., 1995: The evolution of vortices in vertical shear. 1. initially barotropic vortices. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 121, 821–851.
- Jones, S. C., et al., 2003: The extratropical transition of tropical cyclones: Forecast challenges, current understanding, and future directions. *Wea. Forecasting*, 18, 1052–1092.
- Kain, J., and Fritsch, J., 1990: A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, 47, 2784–2802.
- Murakami, M., 1990: Numerical modeling of dynamical and microphysical evolution of an isolated convective cloud - The 19 July 1981 CCOPE cloud. *J. Meteor. Soc. Japan*, 68, 107–128.
- Nolan, D. S., 2011: Evaluating environmental favorableness for tropical cyclone development with the method of point-downscaling. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 3, M08001.
- Reasor, P. D., Montgomery, M. T., and Grasso, L. D., 2004: A new look at the problem of tropical cyclones in vertical shear flow: vortex resiliency. *J. Atmos. Sci.*, 61, 3–22.
- Riemer, M., Montgomery, M. T., and Nicholls, M. E., 2010: A new paradigm for intensity modification of tropical cyclones: thermodynamic impact of vertical wind shear on the inflow layer. *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 3163–3188.
- Saito, K. et al., 2006: The operational JMA nonhydrostatic mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 1266–1298.
- Ueno, M., 2007: Observational analysis and numerical evaluation of the effects of vertical wind shear on the rainfall asymmetry in the typhoon inner-core region. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85, 115–136.
- Ueno, M., 2008: Effects of ambient vertical wind shear on the inner-core asymmetries and vertical tilt of a simulated tropical cyclone. *J. Meteor. Soc. Japan*, 86, 531–555.
- Yanase, W., and Niino, H., 2019: Parameter sweep experiments on a spectrum of cyclones with diabatic and baroclinic processes. *J. Atmos. Sci.*, 76, 1917–1935.
- Yanase, W., Satoh, M., Taniguchi, H., and Fujinami, H., 2012: Seasonal and intraseasonal modulation of tropical cyclogenesis environment over the Bay of Bengal during the extended summer monsoon. *J. Climate*, 25, 2914–2930.