

# 2019/2020 年冬季の極渦発達の力学過程について

九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻 松山裕矢  
九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門 廣岡俊彦  
京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻 向川均

## 1. 序論

オゾンホール(オゾン全量が 220DU 以下の領域)は、冬季から春季にかけての極渦が強い南半球で発生することが知られている。しかし、2019/2020 年の 3 月に、北半球でオゾンホールが発生したことが観測された(NASA Ozone Watch)。オゾンホールの形成には PSCs 等の化学過程と強い極渦が形成される等の力学過程の双方が寄与している。本研究では、オゾンホール形成に寄与する力学過程として挙げられる極渦に着目し、2019/2020 年の極渦強度の統計的な評価を行い、冬季に強い極渦が形成・継続された力学過程を明らかにすることを目的とする。

## 2. 使用データと解析手法

本研究では、MERRA-2 再解析データ(Gelaro R. et al., 2017)を使用し、解析期間は 1980 年から 2020 年の北半球冬季であり、データの水平解像度は  $0.625^\circ \times 0.5^\circ$ 、鉛直層数は 1000hPa から 0.1hPa の 42 層である。3 時間毎のデータを日平均して、解析を行った。極渦の強度の指標として、帯状平均ジオポテンシャルハイトの 40N と 70N の値の差(J.M. Wallace and F.C. Chang, 1982; 以下 difHGT)を用いた。その他帯状平均東西風など 3 つの指標を用いたが、同様の結果が得られた。波の伝播の指標として、Eliassen-Palm flux(Andrews et al., 1987; 以下 EPF)と波の屈折率の 2 乗(Dickinson, 1968; Matsuno, 1970)を用いた。

## 3. 結果

図 1 は、30hPa 面における difHGT の

各年の 2-3 月平均値を棒グラフに示す。解析期間内で 2020 年の値が最も大きく、極渦が最も強いことがわかる。また、1997 年も北半球でオゾンホールが観測された年であり(Manne, G. L. et al., 1997)、1997 年の difHGT の大きさは解析期間内で二番目に大きく、2020 年の値に匹敵している。以降は、2020 年と 1997 年を比較することで、2020 年の極渦強化・継続の力学過程に着目する。

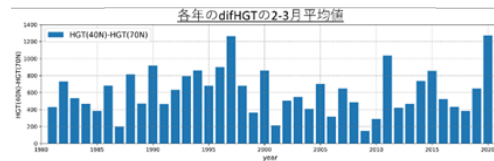


図 1 各年における difHGT(定義は本文参照)の 2, 3 月平均値。

図 2 は、1997 年と 2020 年における 30hPa 面 difHGT と、100hPa 面における EPF の鉛直成分の日変化を示す。2020 年の変化を見ると、2 月上旬の強い上方伝播の後、2 月上旬から中旬において下方伝播が発生し、同時期に極渦が急激に強化されていることがわかる。その後、3 月中旬までは顕著な波活動は見られず、極渦が強い状態が維持している。1997 年の変化を見ると、2020 年のような波の伝播や急激な極渦の強化はなく、緩やかに強化されている、あるいはほとんど変化していないことがわかる。

次に、1997 年と 2020 年の帯状平均東西風の構造を比較する。図 3 は、1997 年と 2020 年の 1-3 月で平均した帯状平均東西風と、それを用いて計算した東西波数 0 の屈折率の 2 乗の緯度高度断面図である。2 つの年の間に QBO の位相の若干の差

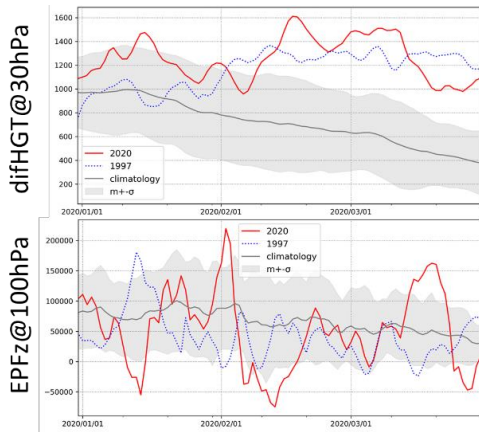


図2 (上)30hPa面の difHGT(定義は本文参照)の2020年の1-3月の日変化。赤実線は2020年の値、青点線は1997年の値、灰色実線は解析期間平均値、灰色の陰影は1 $\sigma$ 区間を示す。(下)100hPa面のEPFの鉛直成分の2020年の1-3月の日変化。各線種が示すものは図2(上)と同様である。

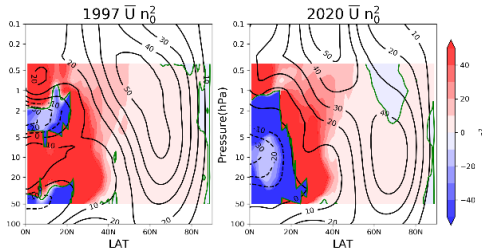


図3 1997年(左)と2020年(右)の1-3月平均した帯状平均東西風( $\text{ms}^{-1}$ )とそれを用いて計算した東西波数0の屈折率の2乗( $n_0^2$ )についての緯度高度断面図

はあるが、赤道域に東風が卓越し、屈折率の2乗が負の領域が存在することが、共通点として挙げられる。一方、両年の高緯度上部成層圏を比べると、2020年には屈折率の2乗が負の領域が広く存在していることがわかる。

成層圏内の波活動をより詳しく解析する。図4は、difHGTと60Nから80Nで平均したDF(EPFの収束発散)の時間高度断面図と、それと対応した期間の100hPa面において60Nから80Nで平均したEPFzの日変化を示す。1997年は、対流圏から成層圏への波の伝播が小さく、成層圏内において顕著なEPFの収束発散は見られない。一方、2020年は、2月上旬の上方伝播と対応するように強い収束が存在し、その後、2/6と2/11をピークに、DFが正の領域が存在していることがわかる。また、発散とほぼ同時に同高度帯にて difHGT の値が大きくなっていることもわかる。

最後に、2/6と2/11に上部成層圏で発生したEPFの発散の要因を明らかにするために、図5で2/6と2/11における帯状平均東西風と帯状平均準地衡渦位の緯度高微分(以下 $\bar{q}_y$ )、EPFとその発散の緯度高

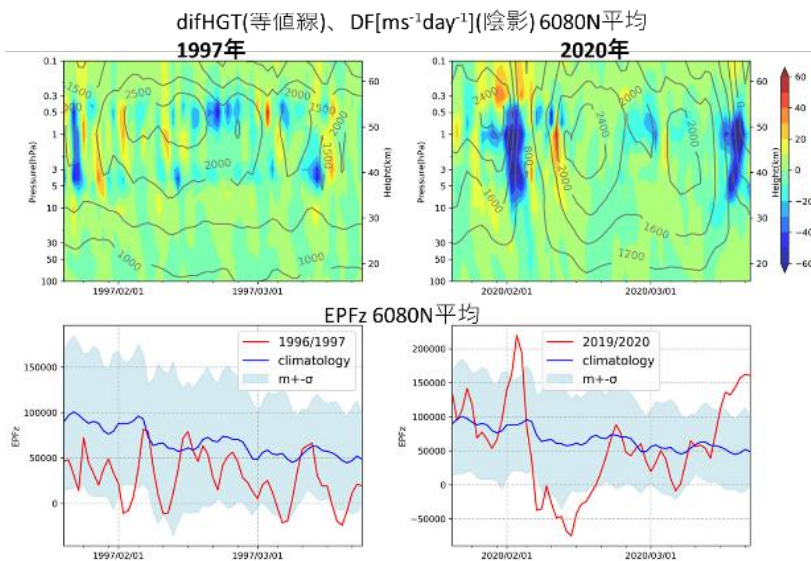


図4 (上)1997年(左)と2020年(右)の difHGT(定義は本文を参照; 等値線)と60N-80N平均したDF( $\text{ms}^{-1}\text{day}^{-1}$ ; 陰影)の時間高度断面図。(下)1997年(左)と2020年(右)の100hPa面で60N-80N平均したEPFの鉛直成分の日変化。赤線は各冬季の値、青線は解析期間の平均値、青の陰影は1 $\sigma$ 区間を示す。

度断面図を示す。2/6 は、図4で見られた2度の発散のうち、1度目の発散のピークの日であり、5hPa付近と0.5hPa付近に発散が見られ、5hPa付近での発散は、 $\bar{q}_y$ が負になっている領域と重なっているように見える。2度の発散のうち2度目のピークである2/11においても、発散している領域と $\bar{q}_y$ が負の領域が重なっている。この図のみ見ると、2/11の $\bar{q}_y$ が負の領域が非常に小さいが、2/10においては2/11で発散が見られる領域と同程度に $\bar{q}_y$ が負の領域も大きかった。また、2/6から2/11の間に、中緯度上部成層圏において、 $\bar{q}_y$ が負の領域が完全になくなることはなかった。

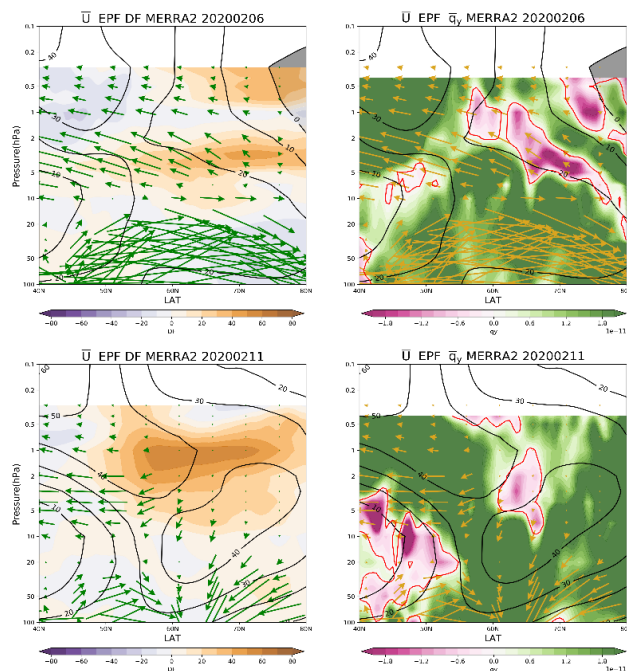


図5 2020年2月6日(上)と2020年2月11日(下)における帯状平均東西風( $\text{ms}^{-1}$ ; 等値線)とEPF( $\text{kg s}^{-2}$ ; ベクトル)とDF( $\text{ms}^{-1}\text{day}^{-1}$ ; 左図の陰影)と $\bar{q}_y$ (右図の陰影)の緯度高度断面図。右図の赤線は $\bar{q}_y=0$ を示す。

#### 4. 考察

図3からわかるように、1997年と2020年冬季のQBOの位相はやや異なるが、波の屈折率の2乗はどちらの冬季とも赤道域で負であった。このことより、1997年と2020年の冬季には、どちらも波が赤道域を避けるように伝播する傾向があるという共通点があり、極渦発達における両冬季の差は中高緯度にあると考えられる。これ以降、中高緯度に着目して、考察を行う。

図1、図2より、2019/2020年冬季の2-3月において解析期間内で最も強い極渦が形成され、継続されたことがわかった。この要因として三点考えられる。

一つ目は、図3で見られる屈折率の分布により、上部成層圏へ波が伝播できなかったことである。2月上旬に発生した小規模昇温の後に上部成層圏において屈折率の2乗が負の領域が形成された。これにより、上部成層圏に波が伝播できず、下方伝播に転じ、極渦を弱めなかったと考えられる。

二つ目は、2月上旬から中旬に見られた上部成層圏における2回のEPFの発散が起きたことである。EPFが発散することで帯状平均東西風を強め、極渦強化に寄与したと考えられ、発散が生じた理由として、図5よりEPFが発散している領域と $\bar{q}_y$ が負の領域が重なっていることから、不安定波の発生が考えられる。この不安定は、2月上旬の顕著な上方伝播によって起きた小規模昇温によ

って発生したと考えられ、それ以降2/11まで $\bar{q}_y$ が負の領域が上部成層圏内に存在していたことから、2/6における不安定波発

生では不安定を解消しきれず、2/11 に二回目の不安定波が発生したと考えられる。なお、図 2 において見られた極渦の急激な発達と下方伝播発生の時期の一致は、一つ目の要因である屈折率の分布による下方伝播の発生と、二つ目の要因である上部成層圏での不安定波の発生が重なって起きたため見られたと考えられる。

三つ目は、2 月中旬以降に対流圏から成層圏への波の活動度が小さかったことである。図 2、3 において、2 月中旬に極渦が急激に強化した後、顕著な上方伝播はなかったことがわかった。

さらに、2020 年と同様に極渦が強くオゾンホールが発生した 1997 年と比較すると、上記の一つ目と二つ目の要因が 2020 年の極渦強化の特筆すべき特徴であると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、2019/2020 年北半球冬季においてオゾンホールが発生した際の、極渦の強度の統計評価と強い極渦が形成・継続された力学過程を明らかにすることを目的に解析を行った。

まず、各年の 2-3 月の極渦強度を比較した結果、2019/2020 年冬季の極渦強度は解析期間内で最も強いことがわかった。また、次に強いのは同様にオゾンホールが発生した 1997 年であったことから、それら 2 つの年の比較を行った。

2 つの年の極渦強度の日変化を比較すると、1997 年冬季は緩やかに極渦が発達していたのに対し 2020 年の方は 2 月上旬から中旬にかけて、極渦が急激に発達していることがわかった。また、冬季を帯状平均東西風と屈折率の 2 乗を比較すると、どちらの冬季においても赤道域では波の屈折率の 2 乗が負の領域が広がっており、両年の差は中高緯度にあると考えられた。

2020 年冬季が上記のような極渦発達・強化の特徴を示したのは、2 月上旬から中旬に波の屈折率の 2 乗の分布により上部成層圏への上方伝播が制限されたこと、同時期に上部成層圏で不安定波が 2 回発生したことによる EPF の発散が生じたこと、そして 2 月中旬以降の波の活動度が穏やかであったことの 3 点が寄与したためと考えられた。1997 年と 2020 年と比較すると、そのうちの三点目以外の二点が 2020 年の特筆すべき特徴であることがわかった。不安定波発生についての詳細な解析を行うことが今後の課題である。

## 参考文献

- [1] Andrews, D. G., J. R. Holton and C. B. Leovy, 1987: Middle Atmosphere Dynamics. Academic Press
- [2] Dickinson, R. E., 1968: Planetary Rossby waves propagating vertically through weak westerly wind wave guides. *J. Atmos. Sci.*, 25, 984-1002.
- [3] Manney, G. L., Froidevaux, L., Santee, M. L., Zurek, R. W. & Waters, J. W., 1997 MLS observations of Arctic ozone loss in 1996-97. *Geophys. Res. Lett.* 24, 2697-2700.
- [4] Matsuno, T., 1970: Vertical propagation of stationary planetary waves in the winter Northern Hemisphere. *J. Atmos. Sci.*, 27, 871-883.
- [5] Gelaro, R et al., 2017, The Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, version 2 (MERRA-2). *J. Cli.*, 30(14), 5419-5454.
- [6] Wallace J. M., Chang F. C. 1982. Interannual variability of the wintertime polar vortex in the northern hemisphere middle stratosphere. *J. Met. Soc. Japan* 60: 149-155.