

## 2020 年南極オゾンホール の 長 期 間 維 持 に つ い て

九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻 佐竹陸  
九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門 廣岡俊彦  
九州大学応用力学研究所 江口菜穂

### 1. 序論

オゾンホールは 1970 年代末に南極域成層圏で始まった。冬季の成層圏では、極夜域を中心に極渦と呼ばれる巨大な低気圧が形成される。南半球冬季ではこの極渦が北半球に比べ非常に強く、中緯度からの熱輸送が制限され、 $-78^{\circ}\text{C}$ 以下で生成される極成層圏雲 (PSC) が多量に発生する。フロン類を由来とする塩素は、成層圏中では安定な化合物として存在するが、極渦内では PSC を触媒とする化学反応が起こり、安定な塩素化合物から変換された塩素ガス  $[\text{Cl}_2]$  が、極夜の極渦内に蓄積されていく。その後、春季に太陽からの紫外線により塩素ガスが分解され、活性化塩素原子が発生する。この塩素原子がオゾン破壊反応の触媒となり、オゾンホールが発生する。オゾンホールは 1970 年代末に発生し、2000 年頃にピークを迎えた後も、年々変動を示しながら、大きな規模で継続している。そして近年では、フロン類の規制により、南極オゾンホールの値は統計的に有意な縮小傾向にある。しかし、そのような状況下におい

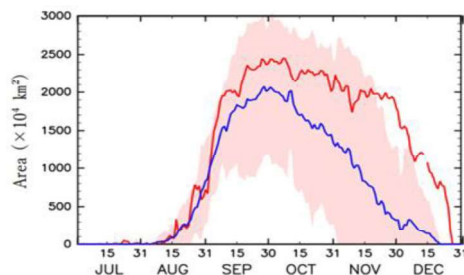


図 1 南極オゾンホールの面積の時間変化図。赤線が 2020 年、青線が過去 10 年平均であり、陰影は標準偏差の 2 倍の範囲である。単位は  $(\times 10^4 \text{ km}^2)$ 。

て、2020 年の南極オゾンホールは広い面積のまま、長期間維持するという現象が確認された。

本研究では、この 2020 年南極オゾンホールが大きさを保持したまま長期間継続した原因について、過去 10 年間のオゾン変動を、気温、プラネタリー波活動度などといった力学的背景場と比較をし、議論を行う。

### 2. 使用データと解析方法

使用データは、Aura/OMI オゾン全量データ・Aura/MLS データ (NASA) と JRA-55 再解析データ (気象庁) であり、解析期間は 2010 年 1 月 1 日から 2020 年 12 月 31 日までである。またデータの水平解像度は順に  $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ 、 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 、 $1.25^{\circ} \times 1.25^{\circ}$  となっている。ただし、MLS データは衛星軌道データから、解析の利便性のために、格子点データへと変換したものを使用している点に注意してもらいたい。

本研究では、オゾンホールは 220DU 以下の領域と定義し、台形近似を用いて面積を計算している。また極渦の強弱に影響を及ぼすプラネタリー波の活動度指標には E-P flux を用いている。

### 3. 結果

#### A) オゾンホールの面積

オゾンホール (オゾン全量が 220DU 以下の領域) 面積の日々の変動を求め、図 1 に示した。この図によると、9 月前半から例年より面積が大きくなり、9 月後半から 10 月前半にかけてピークを迎えている。その後、オゾンホールの面積は減少していくが、例年と比較

して広い水準を保ったまま 11 月末まで推移していることがわかる。その 11 月後半頃からは過去 10 年平均からの標準偏差の 2 倍を超え、12 月後半まで消滅せずにオゾンホールが南極上空に存在していた。

#### B) 下部成層圏の気温

図 2 は 50hPa 面における 2020 年の帯状平均気温と過去 10 年平均からの偏差を示している。5 月中旬から 10 月末にかけて  $-78^{\circ}\text{C}$  以下の領域 (斜線) が南緯 60 度以南に現れている。また、9 月の前半から負の偏差 (青) が現れ、この負の偏差が  $-78^{\circ}\text{C}$  以下の領域が消滅する 11 月にかけて増加していることがわかる。

#### C) 東西風の強さ

2020 年の帯状平均東西風と過去 10 年平均からの偏差を図 3 に示しており、南緯 60 度付近の西風領域において、9 月初旬から 12 月末にかけて強い西風偏差 (赤) を示している。

#### D) E-P flux と DF の時間変化

図 4 はオゾンホール面積減少期 (9-11 月) の E-P flux と加速度項 DF を示している。この図から 2020 年のプラネタリー波背景場の特徴が 2 点見て取れる。1 つ目は高緯度の成層圏上部 (10-1hPa) において、過去 10 年よりも E-P flux の収束域 (西風減速域) が減少している点である。また 2 つ目の特徴として、対流圏界面付近 (100hPa) での E-P flux の鉛直成分  $F_z$  の大きさが過去 10 年よりも小さくなっている

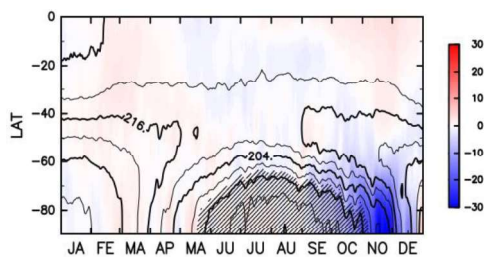


図 2 50hPa 面における 2020 年の帯状平均気温と過去 10 年平均からの偏差の時間緯度断面図。等値線は 2020 年の気温を示しており、等値線間隔は 6(K)である。また斜線部分は 195K ( $-78^{\circ}\text{C}$  以下)の領域である。偏差の値はカラーバーを参照。

ことが挙げられる。

前者について、さらに詳しく示したものが図 5 である。この図は、中高緯度域 ( $75\text{S}-40\text{S}$ ) の各高度における DF の時間変化を表している。図 5 の左右を比較すると、9-10 月の特に成層圏中下部では、例年負の DF が広く現れているが、2020 年は負の DF となっている領域が小さい。また同時期、2020 年の西風が例年よりも強いことが見て取れる。

一方、図 4 のもう一つの特徴であった対流圏界面付近の  $F_z$  の詳しい様子を図 6 に示す。これより、9-11 月にかけて明らかに過去 10 年 (青線) よりも 2020 年 (赤線) の  $F_z$  が減少しており、日によっては標準偏差の範囲を下回るほど小さい値をとっている。

#### 4. 考察

図 1 より、2020 年の南極オゾンホールの面積は過去 10 年間に比べて、比較的大きな値をとり、特に 11 月からは大幅に広く推移し、12 月後半まで継続するという、例年にないほどの長期間、南極上空に現れた。このような結果となった要因として、対流圏からのプラネタリー波伝播の弱化和それに関連する成層圏内での西風の維持が挙げられる。

オゾンホールが最大を迎える 9 月上旬から、対流圏界面付近 (100hPa) では  $F_z$  の減少が確認された (図 6)。つまりこの時期から、例年よりも対流圏から成層圏へのプラネタリー波の上方伝播が弱体化していたことが推測される。また同時期の帯状平均東西風と E-P flux に注

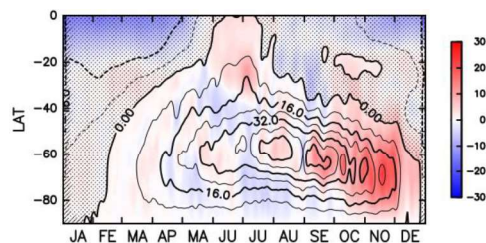


図 3 南緯 60 度以南の 50hPa 面における  $-78^{\circ}\text{C}$  以下の領域面積に関する、図 1 と同様の図。

目する(図5)と、100hPa付近から成層圏上部にかけて、例年よりも西風の強さが維持されており、プラネタリー波がより上方伝播しづらい状態であったと考えられる。極渦が現れる成層圏中下部(10-1hPa)のDFについて比較しても、2020年は収束の値が小さく、プラネタリー波の碎波による背景場への東風運動量変換があまり行われなかったと推測される。その結果、西風の強さが維持され、それがプラネタリー波の上方伝播を阻止し、より西風が維持されるという正のフィードバックが生じたと考えられる。このフィードバックにより、成層圏上部ではこの強い西風(極夜ジェット)に取り囲まれた極渦が長期間維持され、それが極向きの子午面循環を弱体化させ続け、オゾン全量の回復を阻んでいたと結論付けられる。実際、南極上空(10hPa)のジオポテンシャル高度を見ても(図は省略)、極渦は例年11月末までに消滅しているところ、2020年に関しては12月の中旬まで明瞭に確認できている。

今回の研究で対流圏からのプラネタリー波の上方伝播の弱化が確認できたが、なぜ対流圏でのプラネタリー波活動が例年よりも低調

であったのかについては、まだわかっていない。考えられる要因としては、突然昇温(SSW)の原因としてよく引き合いに出される「ブロッキング高気圧」が挙げられる。Nishii and Nakamura (2004)では、2002年9月の南極上空において、このブロッキング高気圧により励起されたプラネタリー波が要因となり、南半球で唯一の大規模SSWが発生したと結論付けている。また、Akiyoshi 他(2018)は、2009年11月の南米大陸南端を覆ったオゾンホールの変形にも、ブロッキング高気圧を起源とするプラネタリー波活動の関与を報告している。このように、ブロッキング高気圧は南半球のプラネタリー波の重要な励起源の1つと考えられるため、今後はこの事例でのブロッキング高気圧の活動度について、解析が必要である。

また興味深いことに、2021年の11月頃までのオゾンホールの面積推移が2020年と酷似していたことが報告されている(気象庁, 2021)。この事例では、2020年と同様に、広い面積を保ったまま長期間維持したが、2020年よりも少し早い時期に崩壊し始めた模様である。今後の研究では、2021年との相違点や、

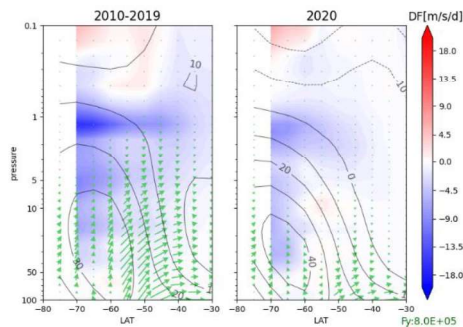


図4 E-P flux と帯状平均東西風を示した緯度高度断面図(9-11月平均)。緑のベクトルがE-P flux (図中のスケール参照)、陰影がDF( $\text{ms}^{-1}\text{day}^{-1}$ )、等値線は帯状平均東西風の大きさを表している。ただし、使用しているMLSデータは衛星軌道データから格子点データへと変換している。

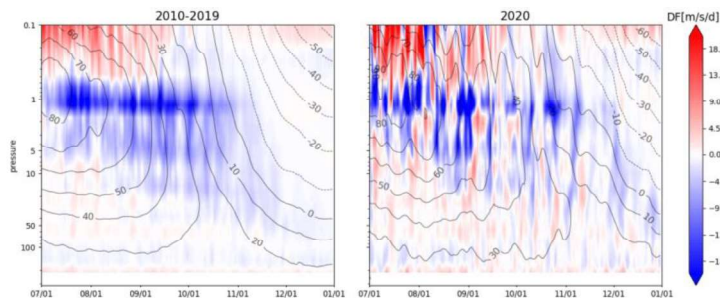


図5 DF と帯状平均東西風の時間高度断面図(75S-40S平均)。陰影と等値線は図4と同様。

直近2年間と過去10年との比較も行ってみる必要がある。

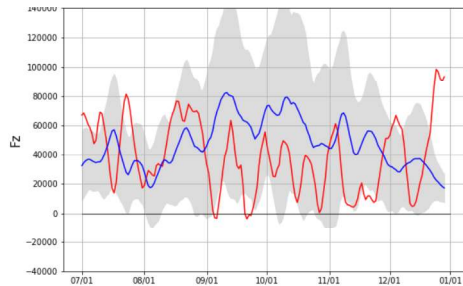


図6 E-P flux の z 成分( $F_z$ ) の時間変化図 (75S-40S 平均)。赤線が 2020 年、青線が過去 10 年平均であり、陰影は過去 10 年平均の標準偏差範囲である。

## 5. まとめ

本研究では、2020 年南極オゾンホールが過去 10 年よりも広い面積を保ったまま長期間維持した原因を明らかにするため、力学背景場の解析を行った。

まず帯状平均気温と帯状平均東西風について、過去 10 年との比較を行った結果、2020 年は極渦が存在する領域において気温が低く、西風が強いことがわかった。次にプラネタリー波に関して、E-P flux を用いて比較すると、2020 年は成層圏上部 (10-1hPa) で DF の収束の値が小さく、また対流圏界面付近 (100hPa) で上方伝播  $F_z$  が小さかった。さらに両者を詳しく解析した結果、どちらも 9-10 月の期間にかけて、過去 10 年間との差が顕著に表れていることが判明した。

9-10 月の間、例年より対流圏界面付近から成層圏上部にかけて西風が卓越していたことと、対流圏からのプラネタリー波の上方伝播が弱かったことが相互作用し、西風を強め、上方伝播がしづらくなる正のフィードバックが形成されていたと考えられる。その結果、オゾンホール面積の減少期にもかかわらず極渦の勢力が維持され、オゾン量が回復せずに、長期間オゾンホールの面積が維持されたと考えら

れる。

対流圏からのプラネタリー波の上方伝播が弱かった原因については、対流圏でのプロッキング活動の低下などが考えられるが、詳しい解析については今後の課題である。また 2021 年も同様の傾向がみられ、並行して解析を行うことで、さらなる原因追究の鍵となりうる可能性がある。

## 参考文献

- Akiyoshi, H., M. Kadowaki, H. Nakamura, T. Sugita, T. Hirooka, Y. Harada, and A. Mizuno, 2018: Analysis of the ozone reduction event over the southern tip of South America in November 2009. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 123, 12,523–12,542, doi:10.1029/2017JD028096.
- Andrews, D. G., 2010: *An Introduction to Atmospheric Physics*, 2nd Edition, Cambridge University Press, 248pp.
- Andrews, D. G., J. R. Holton, and C. B. Leovy, 1987: *Middle Atmosphere Dynamics*. Academic Press, 489pp
- Chapman, S., 1930: A theory of upper atmospheric ozone. *Mem. Roy. Meteor. Soc.*, 3, 103-125.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 reanalysis: General specification and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, 93, 5-48, doi: 10.2151/jmsj.2015-001.
- Nishii, K., and H. Nakamura, 2004: Tropospheric influence on the diminished Antarctic ozone hole in September 2002. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L16103, doi:10.1029/2004GL019532.
- 気象庁, 2021: 今年の南極オゾンホール. 令和 3 年 11 月 17 日報道発表資料, <https://www.jma.go.jp/jma/press/2111/17a/ozonehole2111.html>