

# Dynamical Features of Antarctic Sudden Stratospheric Warmings and Their Influences on Ozone Hole Changes

刘, 光宇

<https://hdl.handle.net/2324/4474942>

---

出版情報 : Kyushu University, 2020, 博士 (理学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :

氏 名	刘 光宇			
論 文 名	Dynamical Features of Antarctic Sudden Stratospheric Warmings and Their Influences on Ozone Hole Changes (南極域における成層圏突然昇温の力学的特徴とオゾンホール変動への影響について)			
論文調査委員	主 査	九州大学	教授	廣岡俊彦
	副 査	九州大学	教授	川村隆一
	副 査	九州大学応用力学研究所	助教	江口菜穂
	副 査	国立環境研究所	室長	秋吉英治

### 論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

地球規模の大規模な大気波動であるプラネタリー波は、大規模な山岳や、海陸分布に伴う地表での熱的コントラストを励起源として対流圏で生成され、冬季の西風中を成層圏へと上方に伝播し、成層圏で様々な現象を引き起こしている。ところが、南半球はそのような励起源に乏しいため、プラネタリー波の活動度が北半球に比べて弱く、その結果、南半球成層圏は北半球成層圏とは非常に異なる特徴を有している。例えば、プラネタリー波の大きな非定常性により引き起こされる成層圏突然昇温現象は、北半球では大規模なものがほぼ 2 年に 1 回、小規模なものは年に数回生起するのに対し、南半球では、衛星観測の出現で成層圏の観測が可能となった 1979 年以来、大規模なものは 2002 年 9 月の 1 度のみ、比較的小規模なものでもこれまで数回しか観測されていない。さらに、プラネタリー波は、熱を低緯度から高緯度に輸送する働きを持つため、熱の輸送が弱い冬季の南極域成層圏は中低緯度から孤立し、北極域と比べ非常に寒冷な状態となる。この結果、成層圏の非常に少ない水蒸気が凝結してできる極成層圏雲の発生頻度が南極域では非常に高く、この雲が触媒となる化学反応により引き起こされる、極域成層圏オゾンの大規模な破壊現象であるオゾンホールも、南極域でのみ毎年生じている。ところが、2019 年 9 月の南半球に、非常に顕著な成層圏突然昇温が生起し、南極オゾンホールも、1970 年代末に出現した後急激に拡大し始めた、1980 年代初頭以来の小規模なものとなった。

そこで、本研究者は、気象庁 55 年長期再解析データ (JRA-55) の力学場データと、アメリカ航空宇宙局 (NASA) の地球観測衛星 Aura 搭載の測器 Microwave Limb Sounder (MLS) から取得されたオゾン混合比鉛直プロファイルデータを用いて、2019 年南半球冬季における成層圏突然昇温、およびそれに伴うオゾンホール変動の力学に関する解析的研究を行った。

まず、2019 年 9 月の成層圏突然昇温に関し、温度場と東西風場の変動を調べた。世界気象機関 (WMO) の定義では、10hPa 高度における緯度 60 度より極側で、帯状平均 (緯度円に沿った経度平均) した気温が高緯度ほど昇温し、なおかつ、帯状平均東西風が冬季の西風から東風に逆転したものを大規模昇温としているので、その高度と緯度帯を中心に調べたところ、2019 年 9 月の昇温では、過去に一度しか観測されていない 2002 年 9 月の大規模昇温に匹敵する、約 60°C という大きな極域成層圏の気温上昇を伴っていたが、南緯 60 度 10hPa における東西平均東西風は西風から東風への逆転にまで至らなかったため、WMO の定義に基づけば、小規模昇温に分類される規模であっ

た。そこでその要因を明らかにするため、2002年の大規模昇温と比較しながら、詳細な力学的解析を進めていった。波活動の指標である Eliassen-Palm (EP) フラックスで見ると、2019年の冬季成層圏に伝播する東西波数（緯度円に沿った波数）1のプラネタリー波の寄与は、他の波数成分と比較して圧倒的に大きく、2002年の大規模昇温では東西波数2成分が主要な働きを示していたのと対照的であった。さらに、成層圏極周辺の強い西風極夜ジェットの減速をもたらすEPフラックスの収束を調べたところ、2002年の大規模昇温の値を上回って過去最大級であり、北半球の大規模昇温の値にも匹敵するものであった。このように強いプラネタリー波活動が、大きな西風減速に寄与したにも拘わらず、東風への逆転が生じずに大規模昇温に至らなかったのは、2019年の突然昇温が発生した時期には西風極夜ジェットが非常に強い状態で存在していたのに対し、2002年の大規模昇温事例では、大規模昇温に至る前に複数回のプラネタリー波による間欠的減速が生じる、プレ・コンディショニングと呼ばれる過程が生じていたため、既にある程度弱い西風極夜ジェットになっていたことが原因であると結論づけた。

次に2019年の南極オゾンホールの変化と、成層圏突然昇温に伴う力学過程との関係について解析を行った。南極域オゾンホールの規模は、オゾン層破壊物質の濃度の変化、および南極上空の成層圏気温や成層圏大気循環場の変化などによって年々変動している。モントリオール議定書によりオゾン層破壊物質の濃度は1990年代半ばから緩やかに減少しているが、依然として高いレベルにあるため、オゾンホール規模も2000年頃をピークに縮小傾向にはあるものの、毎春大規模に出現している。本研究者が用いたMLSによるオゾン混合比鉛直プロファイルデータは、観測が開始された2004年以降の期間に限られるため、同じくオゾンホール規模が小さかった2017年のオゾンホールと比較しながら解析を進めた。その結果、2019年のオゾンホールは8月上旬から始まり、9月初めに最大面積に達し、9月中旬から過去の平均より小さく推移していることがわかった。オゾンホール面積の最大値を過去の統計と比較すると、オゾンホールが急激に拡大していた1980年代半ば以降で最も小さな規模であった。2019年は、前述の成層圏突然昇温をもたらしたプラネタリー波の増幅のため、極向きの残差平均子午面循環が強まり、高緯度下部成層圏の気温が上昇し、オゾン層破壊を促進する極成層圏雲の形成・発達抑制されたことが、オゾンホール規模要因の一つと推測される。さらに、2019年のオゾンホールが発達する時期に、突然昇温によって南極上空に強い残差平均下降流が形成され、これにより、オゾンの体積混合比の高い上部成層圏の空気塊が下層により多く輸送されたことで、2019年のオゾンホールが小規模にとどまったと結論づけた。2017年も成層圏突然昇温は生じなかったものの、プラネタリー波の活動度は高く、2019年と共通した特徴が見られ、近年では2019年に次いで小規模なオゾンホールとなっていた。

以上のように、本研究者は、南半球では希有な2019年の成層圏突然昇温現象について詳細な力学的解析を行い、この年の小規模なオゾンホールへの力学的寄与を明らかにしたことで、中層大気の力学的描像の拡大に大きく貢献したものと評価できる。よって、本研究者は博士（理学）の学位を受ける資格があるものと認める。