

氏名・（本籍）	こ    たけ    とも    のり 小   竹   知   紀
学位の種類	博   士（理   学）
学位記番号	理博第1598号
学位授与年月日	平成10年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科，専攻	東北大学大学院理学研究科（博士課程）地球物理学専攻
学位論文題目	Stratospheric Ozone Variations over Eastern Siberia Related to the Arctic Ozone Depletion （北極域オゾン破壊に伴う東シベリア上空の成層圏オゾン変動）
論文審査委員	（主査）教授 福 西        浩 教授 大 家        寛，教授 森 岡        昭 教授 田 中 正 之，助教授 渡 部 重 十

## 論 文 目 次

Acknowledgments

Abstract

Contents

- 1 Introduction
  - 1.1 The Role of Stratospheric Ozone
  - 1.2 Ozone Trends in the Northern Stratosphere
  - 1.3 Structure and Dynamics of the Arctic Polar Vortex
  - 1.4 Chemical Ozone Depletion in the Lower Stratosphere
  - 1.5 Purpose of this Thesis
- 2 Data Analysis
  - 2.1 Data
  - 2.2 Calculation of Potential Vorticity and Modified Potential Vorticity
  - 2.3 Determination of the Polar Vortex Boundary
  - 2.4 Trajectory Calculation
- 3 Results
  - 3.1 Ozone Variations at Yakutsk in 1995–1997
  - 3.2 Relationship between Ozone Variations and Dynamics of the Polar Vortex
  - 3.3 Features of Ozone Variations inside, outside, and in the Boundary of the Polar Vortex
- 4 Discussions
  - 4.1 Meteorological Conditions of the Polar Vortex
  - 4.2 Chemical Perturbations inside the Polar Vortex
  - 4.3 Transport of Air Masses to Yakutsk
  - 4.4 Relation to Ozone Depletion Events Observed in Japan
  - 4.5 Unsolved Problems
- 5 Conclusions

## Appendices

### A Derivations of the Potential Vorticity and Modified Potential Vorticity

### B Determination of the Polar Vortex Boundary

## References

# 論文内容要旨

近年、北半球中高緯度において大規模な成層圏オゾン減少が観測されてきており、その減少率は1990年代に入ってから著しく大きいことが指摘されている。そのような状況の中、1994-95年、1995-96年、1996-97年の冬から春にかけて、下部成層圏の極渦内において非常に大きなオゾン減少が観測された。特に1997年の春には過去最大規模のオゾン減少を記録し、その値は南極オゾンホールが発見時と同レベルにまで達した。すでに、近年のオゾン破壊の原因は、極渦（冬期に強化される極ジェットで定義される）内部の低温条件下における複雑な化学過程によるものであることが知られている。極渦内部、特に極夜域で気温が約195Kを下回ると、極成層圏雲（Polar Stratospheric Clouds, PSCs）を形成する固体エアロゾル（硝酸、硫酸、水を主成分とする）が発生する。この固体エアロゾル表面で急速におこる不均一反応によって、反応性の高い塩素種が不活性な分子から生成される。春になり、極渦内部に十分に太陽光が当たり始めるとすでに生成された活性塩素が触媒として働きオゾン分子を大量に破壊する。極渦内での気温やオゾンの化学破壊の程度は極渦の気象学的状態によって決まってくるが、極渦の強度、位置、持続期間は年毎に変動している。南極域の極渦と異なり、北極域の極渦はしばしば成層圏突然昇温等により弱められ、あるいは破壊される。この際にオゾンの少ない極大気とオゾンの多い中緯度大気との混合が起こる。すなわち、北極域の極渦のダイナミクスは北半球中緯度におけるオゾン変動とも密接に関連している。北半球におけるオゾン減少の実体を明らかにするためには、オゾン分布と気象場を北半球全体に渡って観測することが必要となる。

しかし、東ヨーロッパから東シベリアにかけての地域は長い間オゾン観測の空白地帯となっていた。以前には、人工衛星による観測や、わずかにヤクーツクで行われていた地上からのオゾン全量観測から、従来東シベリアはオゾン全量の多い地域であることが知られていた。しかし近年は、この地域においても非常に大きなオゾン減少が報告されていること、また、極渦の崩壊がシベリア上空で起こり、極大気が日本など中緯度へ輸送されるという現象が観測されていることから、オゾン研究におけるこの地域の重要性が認識されるようになり、より詳細な観測研究が必要となってきた。そうした要求から、1995年の冬期以来ヤクーツク（62°N, 130°E）におけるオゾンゾンデ観測が、ロシア中央大気観測所、国立環境研究所、宇宙開発事業団の協力により、毎年冬から春にかけて行われるようになった。それ以前は東シベリア地域でオゾンゾンデ観測は全く行われていなかった。

我々は東シベリア域のオゾン変動の様相を解明するため、ヤクーツクで得られた111のオゾンゾンデデータを用いて、1995年、1995-96年、1996-97年の冬期から春期にかけてのオゾン変動の解析を行った。解析高度範囲は温位 380~625K（高度約12~25km）である。さらに、観測されたオゾン変動と極渦のダイナミクスとの関係を明らかにするために、ECMWF  $T_{1000}$  データを用いてそれぞれの期間における極渦の気象場の解析もあわせて行った。本研究においては、オゾン変動と極渦との関係を正確に見積もるため、観測されたオゾンゾンデデータを3つの条件（ヤクーツクが極渦内部にあるか、外部にあるか、極渦境界領域にあるか）に分類して解析を行った。従来のこの種の研究においては、極渦境界の定義の仕方は様々かつ主観的であった。本研究において、我々はポテンシャル渦度分布から極渦境界を客観的に定義するための新しい解析方法を開発した。この方法を適用することにより、3つに分類されたそれぞれの領域におけるオゾン変動の様相

を定量的に解析することが可能となった。解析の結果求められた極渦内部におけるオゾン減少の傾向は、一つの観測点のデータを用いたにもかかわらず、他の研究による結果とよく一致していることがわかった。また我々は、ヤクーツク上空におけるオゾン減少と極渦内部における大気輸送過程との関係調べるため、トラジェクトリー計算を用いた事例解析を行った。さらに、1997年5月に日本上空で観測されたオゾン減少と、極渦崩壊後に起こった極大気の中緯度への輸送との関連についても考察を行った。

本論文の第1章では、成層圏オゾンの地球大気環境における役割、北半球におけるオゾントレンド、北極極渦の構造と力学、下部成層圏におけるオゾンの化学破壊のメカニズムについてまとめ、その上で本論文の主目的を述べる。第2章では本研究に使用したオゾンゾンデデータと気象データの概略を述べ、本研究において用いた解析方法について、新しく開発した手法も含め解説する。第3章ではヤクーツクにおいて観測されたオゾン変動および極渦との関連の特徴をまとめた後、極渦内部、外部、境界領域におけるオゾン変動を年毎に定量的に見積もった。第4章では前章の結果に加えて、年毎の極渦の形成、発達、崩壊の過程とその内部における気温の変動を詳細に検討した後、化学的オゾン破壊の影響で引き起こされたと考えられる、極渦内におけるオゾン減少率とオゾン減少の総量を求めた結果を示す。さらに、トラジェクトリー解析の結果に関する考察と、日本上空で観測されたオゾン減少と極渦崩壊後の極大気の輸送に関する考察を述べている。

第5章に本論文の結論を示した。結論を以下に示す。

1995年の冬期においては、ヤクーツクが極渦内に位置するときにオゾン減少が観測された。極渦内部におけるオゾン減少率は高度により異なるが、約2.3~18.0ppbv/dayであった。期間中の極渦内部におけるオゾン減少の総量は0.15~1.16ppmvであり、これは5.8~47.2%のオゾン減少に相当する。3月の後半にはこの期間に観測されたオゾン混合比の平均値の半分に当たるオゾン量が観測された。

1995-96年の冬から春にかけての期間においては、極渦はシベリア上空に位置することがほとんどなかったが、極渦内部におけるオゾン減少の傾向をとらえることができた。極渦内部でのオゾン減少率は温位475K（高度約18km）においては10.9ppbv/dayであり、この期間におけるオゾン減少は9.9%であった。

1996-97年の冬から春にかけては非常に大きなオゾン減少が観測された。極渦内部におけるオゾン減少率は8.2~21.9ppbv/dayにも達した。この期間の極渦内部のオゾン減少総量は0.55~1.34ppmvであり、これは28.9~39.7%の減少に相当する。この大きなオゾン減少は、この年の極渦の崩壊が非常に遅かったために、極渦内部の化学的オゾン破壊がより長く続いたためと考えられる。

すべての観測において、ヤクーツク上空の気温はPSC粒子の形成温度より高いことが確認されており、これはヤクーツク上空においてオゾンを破壊する活性塩素が生成され得なかったことを示している。そこで、ヤクーツク上空でオゾン減少が観測された1997年3月6日の温位435K上でのトラジェクトリー解析の結果、気塊がヤクーツク上空にやってくる前にPSC形成温度以下の領域を通過してきており、かつ通過以前にはオゾン量がヤクーツクよりも多いことがわかった。これは気塊がヤクーツク上空に輸送されてくる前に化学的オゾン破壊を受けていることを示唆している。

1997年の5月上旬に極渦が崩壊した後、5月12日には崩壊した極渦大気の一部が北海道上空を通過したことが確認された。同日には、北海道の母子里上空においてオゾン減少が観測され、そのオゾン量はヤクーツクが極渦内部にあった5月1日のオゾン量とほぼ等しいことがわかった。このことは、極渦崩壊後に極大気が中緯度へ輸送されることが中緯度のオゾン減少の一因となっていることを示している。

以上のように、我々は新しく開発された極渦境界決定法を用いて、今まで詳しく知られていなかった東シベリア域におけるオゾン変動の実体、特に極渦内部におけるオゾン減少率を定量的に見積もることに成功した。また、トラジェクトリー解析およびポテンシャル渦度解析から、オゾン減少に対する大気輸送の影響を明らかにした。今後は、本研究において開発した新しい解析方法を含む詳細な気象データ解析をより多くのオゾンゾンデデータ解析とともに進めていくことで、北半球中高緯度における複雑なオゾン変動メカニズムが解明されていくことが期待される。

## 論文審査の結果の要旨

1990年代に入り北半球中高緯度では南極オゾンホールに類似した大規模な成層圏オゾン減少が観測され始めた。オゾン破壊の原因は極渦内の低温条件下（195 K以下）で形成される極成層圏雲（PSC）による不均一反応であることが明らかになりつつあり、オゾン減少のメカニズムを解明するためには極渦のダイナミクスとオゾン変動の関係を明らかにする必要がある。しかし、これまでの北半球での観測は北アメリカとヨーロッパ地域に限定されており、ヨーロッパから東シベリアにかけての広大な地域は観測の空白域になっていた。特に、オゾンゾンデ観測はこの地域でこれまで一度も行われたことがなかった。

本研究の目的は、東シベリアのヤクーツク（62°N, 130°E）で1995～1997年の毎年冬から春にかけてロシア中央大気観測所と我が国の国立環境研究所および宇宙開発事業団の協力により実施されたオゾンゾンデ観測から得られた111のオゾン高度分布データを用いて、東シベリア域におけるオゾン変動の実体を明らかにし、極渦内部におけるオゾン減少率を正確に見積もることである。そのために、気象データから計算で求めたポテンシャル渦度分布から極渦境界を客観的に定義するための新しい解析方法を開発した。この方法を適用することによってヤクーツクオゾンゾンデデータを3つのカテゴリー（ヤクーツクが極渦の内部にあるか、外部にあるか、境界領域にあるか）に分類し、それぞれの領域におけるオゾン変動の様相を定量的に示した。さらに、極渦内がPSC形成温度以下になった期間だけのデータを取り出すことによって、極渦内の化学過程によるオゾン減少率を正確に見積もることに成功した。また、トラジェクトリー解析の手法によって、ヤクーツク上空にやって来る気塊がPSC形成温度以下の領域を通過してきたこと、極渦の崩壊によってオゾンが減少した極渦内の大気が日本上空にもやって来ることを確認した。

このように、本研究によって極渦境界を客観的に決定する手法が確立し、東シベリア地域における成層圏オゾン減少に関する重要な知見が得られた。これは著者が自立して研究活動を行うに必要な高度な研究能力と学識を有することを示している。よって、小竹知紀提出の論文は博士（理学）の学位論文として合格と認める。