

氏名・(本籍)	こ いで みち ひろ 小 出 理 史
学位の種類	博 士(理 学)
学位記番号	理博第1522号
学位授与年月日	平成9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	Studies on the Antarctic Ozone Hole Using Infrared Laser Heterodyne Spectroscopy (赤外レーザーヘテロダイン分光法による南極オゾンホールの研究)
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

- 1 Introduction
 1. 1 Stratospheric Ozone and the Antarctic ozone hole
 1. 2 Nitrous oxide and other stratospheric minor constituents
 1. 3 Observation techniques for stratospheric minor constituents
 1. 4 Purpose of thesis
2. Instrumentation
 2. 1 Principle of laser heterodyne spectroscopy
 2. 2 Development of the tunable diode laser heterodyne spectrometer
3. Observations
 3. 1 Outline of the laser heterodyne spectrometer observation at Syowa station
 3. 2 Details of observations
 3. 3 Problems in TDLHS-3 operation
4. Data analysis
 4. 1 Calibration of obtained raw data
 4. 2 Inversion method
 4. 3 Error estimations
5. Results
 5. 1 General feature of the Antarctic ozone hole in 1994
 5. 2 Development of the ozone hole observed by TDLHS-3
 5. 3 Rapid variations of ozone altitude profiles observed in austral spring of 1994
 5. 4 Seasonal and daily variations of nitrous oxide altitude profiles
6. Discussions
 6. 1 Potential vorticity analysis

- 6. 2 Polar vortex wavy structure and rapid variations of ozone profiles
 - 6. 3 Seasonal and daily variations of nitrous oxide
 - 7. Conclusions
- References

論文内容要旨

近年、南極オゾンホール問題は世界的な関心事となっている。この問題については、これまでに観測、理論双方から様々な研究がなされ、その概要についてはほぼ理解された。しかし、時間、空間的に細かい変動は、多くの部分が未解明である。これは極域成層圏大気全般に言えることで、オゾンホールの形成に重要な役割を果たす極渦の構造についても、数値実験などから細かい構造が極渦全体の構造変化に与える影響の重要性が議論されているが、これを検証するような時間、空間の精度および密度を持った観測は行われていない。現在まで明らかにされたオゾンホールと極域成層圏についての理解をより深めるためには、このような観測が不可欠である。しかし、人工衛星からの観測では、高い時間・空間分解能を実現することは難しい。航空機、気球等を用いた観測は、一般に観測精度、空間分解能、時間分解能とも高いが、時間的に密な観測を行うことは現実的に困難である。

このような高時間分解能の観測を実現する可能性を持つ手段として、地上からの赤外分光観測があげられる。オゾンをはじめ、地球の大気にとって重要な大気微量成分の多くは、波長 $10\mu\text{m}$ 付近に、振動・回転遷移に起因する吸収線を持っている。これらを十分に高い波数分解能、かつ高いS/Nで観測すれば、得られたスペクトルからそれらを構成する気体の高度分布を導出することが可能である。この場合、観測に必要な時間は、スペクトルに十分なS/Nを与えるための積分時間であり、分光計の性能によって短縮が可能である。さらに、極地での観測を実現するためには、観測器が可搬型であることが望ましい。本研究の目的は、以上のような条件を満たす可搬型の赤外レーザーヘテロダイン分光計(TDLHS-3)を新規開発し、南極昭和基地(南緯69.0度、東経39.6度)においてオゾンホールの集中観測を行い、 O_3 および N_2O の季節変化・日変化(一時間スケールの変動を含む)を調べ、その原因を解明することである。実際の観測期間は1994年9月から1995年1月までの5カ月間で、これはオゾンホールの成長から衰退までを含み、さらに夏期間に及ぶものである。測定対象はオゾン(O_3)・一酸化二窒素(N_2O)・メタン(CH_4)・硝酸(HNO_3)の4気体による赤外領域の吸収スペクトルである。

TDLHS-3の開発に際しては様々な工夫がなされた。その一つとして、観測波数を決定する局発半導体レーザーを4素子搭載し、 HNO_3 、 O_3 、 N_2O 、 CH_4 の吸収線が存在する 900cm^{-1} 、 1100cm^{-1} 、 1180cm^{-1} 、 1220cm^{-1} 付近の測定を実現した。これらの波数領域において、TDLHS-3は 0.0013cm^{-1} の分解能を持ち、10分間の観測で良質なS/Nのスペクトルを得ることが出来る。得られたスペクトルのS/Nは、オゾンの場合で約1500、一酸化二窒素の場合で約500であった。観測日数は、上記の観測期間内において、各気体毎にそれぞれ O_3 12日、 N_2O 9日、 HNO_3 13日、 CH_4 6日であった。観測した各気体の吸収線は、 O_3 が $1104.076700\text{cm}^{-1}$ 、 N_2O が $1181.050600\text{cm}^{-1}$ 、 CH_4 が $1223.155880\text{cm}^{-1}$ に中心を持つ独立した吸収線であり、 HNO_3 については 904cm^{-1} 付近の複数の吸収線からなる吸収帯を観測した。

本論文では、第1章をイントロダクションとして、今回観測した気体の地球大気における働き、これまでになされた観測についてまとめ、この論文の主目的を述べる。第2章ではレーザーヘテロダイン分光計の原理を説明した上で、TDLHS-3の構成と性能を詳細に紹介する。第3章では、今回の南極昭和基地における観測の概要を説明し、各気体毎の観測状況を詳しく述べた後、観測時に問題となったノイズについ

て議論する。第4章では、観測で得られる生データを透過率スペクトルに変換し、インバージョンによって O_3 と N_2O の高度分布を求める手法を、エラーの見積もりとともに紹介する。今回の観測から求められた物理量は、オゾンおよび一酸化二窒素の高度分布であり、導出範囲は、 O_3 については7 kmから30 kmまで、 N_2O については5 kmから27 kmまでであった。高度分解能はいずれも約5 kmであり、時間分解能は10分以下を実現した。

第5章では、 O_3 と N_2O の季節変化、日変化、およびより短周期（1時間スケール）の変動に関して得られた結果を紹介する。その概要は以下の通りである。

1. 1994年9月の中旬から下旬にかけて、オゾンホールが発達に伴うオゾン混合比の減少が観測された。 O_3 混合比の減少が著しかった高度領域は12 kmから23 kmであり、この結果は、同じ時期に行われた昭和基地における気象庁オゾンゾンデ観測の結果とよい一致を示した。
2. 1994年9月26日と10月14日には、23 kmから30 kmの高度領域で O_3 混合比の激しい変動が観測された。この変動の時間スケールは1時間以下であり、振幅は10月14日の方が大きかった。
3. 1994年9月から1995年1月までの春期から夏期にかけて、南極成層圏における N_2O の明瞭な季節変動が観測された。9月および10月の観測では、23 km以上の高度領域で極端に低い N_2O 混合比が観測され、11月、12月では成層圏全般でより高い N_2O 混合比が得られた。
4. 1994年9月27日と11月12日には、 N_2O が1時間以下の時間スケールで変動している様子が捕らえられた。変動の見られた高度領域と振幅はこの2日間で大きく異なった。9月27日においては高度10 km付近で、時間とともに N_2O 混合比が低下する現象が観測された。11月12日には、高度15 kmから27 kmの領域で極端に激しい N_2O 混合比の変動が観測された。

以上得られた結果の中で、特に2から4について、第6章で考察する。これら得られた結果の考察に限らず、南極成層圏の現象を考察する上では、大気の力学的状態、特に極渦の状態を把握することは不可欠なことである。このため、大気の運動状態を示す保存量として、ポテンシャル渦度（以下PVと略す）の分布図を気象庁客観解析データから計算した。計算されたPVは、おもに500 Kと700 Kの等温位面に内挿され、検討された。これらの温位面はそれぞれ約18 km、約25 km高度に相当し、大気はこの面上を運動すると見なせる。その上で、PVマップ上においてコンターの最も密なところを各高度における極渦の境界と定義し、これらの日における南極成層圏の極渦境界の状態を調べた。このPVマップを用いた考察の概要は以下のとおりである。

2に示した1994年9月26日と10月12日においては、両日とも昭和基地付近において極渦境界が1000 km以下のスケールで蛇行し、さらに高度毎にその構造が異なるという共通の特徴が見いだされた。9月26日においては、昭和基地は極渦境界の内側に位置していた。これに対して10月14日には、高度25 km付近の極渦境界がほぼ昭和基地上空に存在していた。以上から、9月26日と10月14日に観測された O_3 混合比の短周期変動は、ともに極渦の蛇行によってもたらされたものであり、9月26日のものは蛇行に伴い中緯度大気が極渦内部に流入してきた影響による極渦内での変化、10月14日に観測された O_3 混合比のより大きな変動は、25 km付近の高度で極渦の内部と外部を短時間のうちに観測した結果と考える。

3で得られた N_2O の季節変動は、最近の力学理論および観測結果と良く一致する。すなわち、9月、10月に観測された低混合比は、低い N_2O 混合比を持った高い高度領域の気塊が、極夜期間中に下部成層圏まで下降したためと考えられ、11月、12月の高混合比は極渦の崩壊過程に伴い、 N_2O 混合比が高い中低緯度の大気が、昭和基地上空まで流入してきたためと考える。

4に示した N_2O の短周期変動についても、オゾンの場合と同様にPVマップを用いて考察した。9月27日においては、変動が見られた高度領域が10 km付近であるので、PVマップも10 km付近に相当する温位面（320 K）で作成した。その結果、この日の昭和基地付近では、この高度領域に下降流に伴うと考

えられる渦位の増大が確認された。この下降流が、短時間における N_2O 混合比の低下をもたらしたと考える。一方、11月12日の PV マップをみると、高度18km 付近での極渦境界は昭和基地上空付近に位置していた。高度25km 付近では、昭和基地付近の極渦は高緯度側に大きく後退しており、昭和基地上空では中低緯度起源と考えられる低い PV の気塊と、極渦起源と考えられる高い PV の気塊が複雑に入り交じった構造が見られた。中低緯度大気は N_2O 混合比が高く、極渦起源の大気は N_2O 混合比が低いので、これにより、観測された急激な N_2O 混合比の変動は良く説明される。さらに、25km 付近に見られた複雑な構造についてその成因を調べるため、この日の前後の極渦変動を PV マップを用いて調べた。その結果、11月11日に、この高度領域の昭和基地西方に位置する極渦境界上で 'Wave breaking' と呼ばれる現象が発生し、その後極渦が後退していく過程が確認された。今回の観測は、この過程における大気混合の状態を捕らえたものとする。

今回の観測は、成層圏微量気体の高時間分解能の観測手段として、小型化が可能なレーザーヘテロダイナミクス分光法の優位性を示した。得られた結果を総合すると、南極オゾンホール形成に重要な役割を持つ南極成層圏の構造は、これまで考えられていたような単純なものではなく、9月から10月にかけては、高度毎に異なる1000km スケールの細かい波動構造を持ち、この構造が極渦内外の物質輸送に重要な役割を果たしていることが示された。また、11月の極渦崩壊時には、中低緯度地方との活発な大気混合が起こっていることが示された。

論文審査の結果の要旨

1985年に発見された南極オゾンホールは、地球環境問題として大きな関心を集め、これまでに観測と理論の両面から様々な研究がなされてきた。その結果、オゾンホールが形成されるための物理・化学過程はかなりの程度まで解明されてきた。しかし、オゾンホールの微細構造やオゾン高度分布の速い時間変動に関しては、これまでほとんど観測が行われておらず、未解明の問題として残されている。

本研究は、高い時間・空間分解能をもつ赤外レーザーヘテロダイン分光計を開発し、これを用いた観測を1994年9月から1995年1月まで南極昭和基地(69.0°S, 39.6°E)で行い、オゾンホール領域でのオゾン(O_3)と一酸化二窒素(N_2O)の高度分布の時間変動の原因を明らかにした。赤外レーザーヘテロダイン分光計の開発に際しては、装置の小型・可搬型化、局発半導体レーザーの複数化等、厳しい自然条件下にある南極での観測のために様々な工夫を行った。得られた吸収線スペクトルデータからインバージョン法によりこれらの微量気体濃度の高度分布をもとめ、以下の重要な結果を得た。

まず、オゾンに関しては、オゾンホールの発達期にあたる9月、10月に高度23-30kmで時間スケール1時間以下の激しい変動が観測されたが、この原因は、極渦境界に発達する波動波長1000km程度の中規模によるオゾンホール境界の蛇行と境界を横切ったオゾンホール内への大気の流れによることが明らかとなった。一方、一酸化二窒素に関しては、9月、10月に23-30km高度領域で極端に低い N_2O 混合比が観測されたが、その原因は、極夜期間中の極渦内での強い下降流によること、11月に N_2O の1時間以下のスケールの激しい変動が観測されたが、その原因は極渦の崩壊に伴い中低緯度大気が流入してきたためであることが明らかになった。

このように、本研究により、地上から成層圏のオゾンや一酸化二窒素の高度分布を高時間・空間分解能でリモートセンシングする赤外レーザーヘテロダイン分光法が確立し、南極オゾンホールの発達・崩壊過程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の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。したがって、小出理史提出の論文は博士(理学)の学位論文として合格と認める。