

学 位 論 文 題 名

Analytical studies on the variation
of the ozone layer over Antarctica

(南極上空のオゾン層の変動に関する解析的研究)

学位論文内容の要旨

上空約10 km以上の高度にオゾンを多く含む大気層があり、オゾン層と呼ばれている。オゾン層は太陽光線に含まれる有害紫外線を吸収し、有害紫外線(UV-B)が直接地上に達することを防いでいる。このため、オゾン層の変動は、UV-Bの変動を通して、我々の健康、さらに陸上の生物全体に対しても影響を与える。また、オゾン層は太陽光線中の紫外線を吸収することにより、上層大気の気温を上昇させ、成層圏を形成する。オゾン層が人間生活に対して大きな影響を持つために、今日まで数多くの研究が進められてきている。

オゾン層の変動は大気中の光化学反応の効果及び大気の運動の力学的効果の両方の影響を受けていると考えられている。高緯度の極夜は日射があたらないために光化学反応の効果は小さくなり、大気の運動の効果が卓越すると考えられている。このため高緯度のオゾン層の変動は特に興味を持たれていた。しかし、高緯度においては、悪天候や、オゾン層の観測に必要な日射が得られない極夜があることなどのために、十分なオゾンのデータが得られていなかった。

南極上空のオゾン層の変動のよりよい理解を求めるために、著者らは国際共同研究MAP(Middle Atmosphere Program)の一環として1982年2月から1983年1月まで南極昭和基地(69°00'S, 39°35'E)においてオゾン全量及びオゾン垂直分布の観測を実施した。

さらに昭和基地における極夜のオゾン全量の観測を行うために、著者らは昭和基地のオゾン観測に月光によるオゾン全量観測を導入した。すなわち内部に集光レンズを取り付けた月光用サンデレクターを作成した。月光によるオゾン全量観測をもとに一

夜間の中で月の高度角が最大の時のオゾン全量を夜間代表値とし、夜間代表値とその前後の日の太陽光によるオゾン全量の日代表値との比較を行い、月光によるオゾン全量の変化が太陽光によるオゾン全量の変化と良く対応していること、さらに月光によるオゾン全量が太陽光によるオゾン全量に比べ約18 DU大きな値を示すことを明らかにした。

その結果、昭和基地のオゾン全量及びオゾン垂直分布を1年を通して観測することに成功した。解析の結果、1982年の9月から10月にかけて、1981年以前には観測されたことのないオゾン全量の低い値を観測したことがわかった。この異常に低いオゾン全量は、英国の南極基地 H a l l e y B a y (75°35' S, 26°40' W) でも観測され、また人工衛星 N i m b u s 7 に搭載された T O M S (オゾン全量分布観測用分光器) の観測にも記録されており、南極オゾンホールとして知られるようになった。昭和基地におけるオゾン観測は、南極上空のオゾン全量の春期の著しい減少を最初にとらえることに成功した。

南極オゾンホールは、発見されて以後拡大傾向を示し続けており、オゾンホール発生のメカニズムを明らかにする事が急務となっている。このためには南極オゾンホールの発達の特徴を明らかにしなければならない。そのために、南極点、昭和基地、H a l l e y B a y で観測されたオゾンデータ及び T O M S により観測されたオゾンデータなどの解析を行い、南極上空のオゾン全量の減少が何時頃から始まったかを調べた。その結果、南極大陸上空で1980年頃から顕著なオゾン全量の減少が観測されていることが示された。

さらに、昭和基地で観測されたオゾン及び100 m b 気温の観測データを基に、オゾン全量の減少が昭和基地で観測されていない期間(1961-1981)と観測された期間(1982-1991)に分け、それぞれの平均を月毎に比較した。その結果オゾン全量の減少は9、10、11月に大きいこと、12月にもオゾン全量の減少が観測されていることがわかった。100 m b 気温についても、やはり9、10、11月に気温の低下が観測されていること、11月の気温の低下は8°Cを超えることが示された。さらにオゾンゾンデにより観測された昭和基地上空のオゾンの垂直分布の比較を行い、最大のオゾン分圧の減少の最大は10月から11月にかけての下部成層圏に出現していることを示した。

1980年代においては極夜のオゾン全量観測のデータの蓄積が不十分だったため、南極上空のオゾン全量の減少が季節的に何月から始まっているかについては不明であった。本研究においては昭和基地で観測された月光によるオゾン全量データ、TOMSデータをを用いて解析を行い、昭和基地上空では8月にもオゾン全量の減少が起こっていることを明らかにした。

一方、昭和基地で観測されたオゾン全量と成層圏気温の解析を行い、オゾン全量の減少が大きな10月、11月に、オゾン全量と下部成層圏気温の間に強い正の相関があることを明らかにした。同様の正の相関は日々の値にも成立し、成層圏の気温から逆にオゾン全量を推定することも可能であることを指摘した。また、観測された期間を1981年以前と1982年以後に分け、10日毎の日々のオゾン全量と日々の100 hPaの気温との回帰式を計算した。その結果、計算された回帰式と、NOAAの全球解析から得られた100 hPaの気温から昭和基地と同じ69°Sの緯度のオゾン全量を推定し、TOMSにより観測されたオゾン全量とよく一致する事を示した。

昭和基地上空ではオゾンの減少とともに成層圏気温の低下が進行している。オゾン減少が観測されていない期間(1966-81)と、オゾンの減少が観測された期間(1982-91)のオゾンの垂直分布の差を、気温の垂直分布の差と比較し、両者の対応が良いことを示した。このことは、成層圏におけるオゾン分圧の低下が成層圏における気温の低下の原因となっていることを示しているものと考えられる。さらに、成層圏の風の東西成分の変化とも比較し、オゾンの減少が観測された期間の11月の風の東西成分が30 hPa付近で大きくなっていることを示した。このことから、南極オゾンホールのはだは気温の低下を通じて成層圏の風の東西成分を増加させ、極渦を安定化させる働きを持つ効果があると考えられる。

最近、著者らはTOMSデータを用いてオゾン全量の減少領域の広がりを解析し、1979-81と1989-91の月平均オゾン全量の変化を比較し50 DU以上の減少を示している領域が50°Sのチリ南部に達していることを示した。南極大陸上空の広い領域で100 DU以上のオゾン全量の減少が示されている。また、北半球の1月の同様の比較を行い、ヨーロッパ東部及び極東のサハリン上空で50 DU以上のオゾン全量の減少が記録されていることを示した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 菊 地 勝 弘
副 査 教 授 播磨屋 敏 生
副 査 助 教 授 上 田 博

学 位 論 文 題 名

Analytical studies on the variation of the ozone layer over Antarctica

(南極上空のオゾン層の変動に関する解析的研究)

高度約10km以上に存在するオゾン層は、太陽光線に含まれる有害紫外線を吸収し直接地上に達することを防いでいる。このようにオゾン層の変動は、人類を含む陸上の生物全体に大きな影響を与えている。

本研究では、南極昭和基地(69° 00' S, 39° 35' E)におけるオゾン層の長期的な変動を中心に、南半球高緯度におけるオゾン全量の減少傾向を世界で初めて指摘し、さらに北半球のオゾン全量の長期変化についても述べたものである。

本論文は七章から構成されており、第一章の序論では、オゾン層に関する一般的な知識が述べられており、さらにオゾン層の研究がフロンガス規制に結びついた経過についても述べられている。

第二章では、これまでのオゾン層の研究の歴史的な流れが紹介されている。

第三章では、オゾン全量の観測及びオゾン分圧の高度分布の観測の原理および方法について述べられている。

第四章では、1982年2月から1983年1月まで南極昭和基地で実施されたオゾン層の強化観測の観測結果を中心に議論されている。オゾン全量はドブソン分光光度計を用いて観測されるが、これまでの観測では太陽光のみによる観測しか主として行われていなかったが南半球の冬の極夜においても積極的に月光の分光を試み、それらを組み合わせ、1年を通しての昭和基地上空のオゾン全量の季節変化が得られた。その結果1982年の6月から7月にかけてオゾン全量の極大が観測され、また9月から10月にかけて

オゾン全量の極小が観測された。解析の結果1982年9月から10月にかけてのオゾン全量が1961年から1981年までの同じ季節のオゾン全量に比べて著しく低い値であることが示された。この異常に低いオゾン全量は、イギリスの南極基地Halley Bay($75^{\circ} 35' S$, $26^{\circ} 40' W$)でも観測され、また人工衛星Nimbus 7に搭載されたTOMS(オゾン全量分布観測用分光器)の観測にも記録されており、南極オゾンホールとして知られる契機となった。さらに月光によるオゾン全量の精度を確かめるために月光によるオゾン全量と、その前後の日の太陽光によるオゾン全量との比較を行い、両者の変化がよく対応していること、月光によるオゾン全量が約18DU大きな値を示すことを明らかにした。

第五章では、月光観測によるオゾン全量及びTOMSデータの解析により、昭和基地上空ではオゾン全量の減少は8月から起こっていることを明らかにした。また、昭和基地でオゾンの減少が観測される以前の期間(1961-1981)とオゾンの減少が観測された以後の期間(1982-1991)に分け、それぞれの期間の平均のオゾン全量を月毎に比較した。その結果、南極上空の顕著なオゾン全量の減少は1980年頃から徐々に始まっていることを明らかにした。また昭和基地では、9、10、11月に60DUを越える大きなオゾン全量の減少が起こっており、12月にも30DUを越えるオゾン全量の減少が起こっていることを示した。更にTOMSによる南半球の1979-1981の10月の月平均オゾン全量分布図を1989-1991の分布図と比較することにより、50DU以上のオゾン全量の減少が $50^{\circ} S$ のチリの南端に達していることを示した。

また、昭和基地の月平均オゾン全量及び月平均成層圏気温の相関解析により、10月及び11月に両者の間に強い正の相関があることが示された。また、1981年以前と1982年以降のそれぞれの期間において、日々のオゾン全量と日々の100hPa気温に対して月の旬毎に回帰分析を行い、得られた回帰直線を用いて昭和基地で観測された100hPa気温から推定されたオゾン全量は、ドブソン分光光度計により観測されたオゾン全量を良く再現しているを示した。

昭和基地でオゾン全量の減少が観測される以前の期間(1966-1981)とオゾンの減少が観測された以後の期間(1982-1991)のオゾン分圧、気温、風の東西成分の鉛直分布の変化の比較から、昭和基地上空では、9、10、11月のオゾン分圧の減少に対応する高度で気温が低下しており、また11月に気温が低下している高度の上部で、成層圏の風の東西成分の増加が起こっていることを示した。このことから、成層圏におけるオゾン分圧の減少は南極大陸上空の極渦を安定させる効果をもつことを明らかにした。

また、北半球の1月の1979-1981と1991-1993の平均オゾン全量の分布の比較により、ヨーロッパ東部と極東のサハリン上空でも50DU以上のオゾン全量の減少が記録されていることを示した。第六章では、第四章および第五章のいくつかの問題に対しての総合的な議論が、第七章は、結論である。

このように申請者は、南極昭和基地での越冬という苛酷な条件の下で月光分光を含めたこれまであまり観測例のなかった極夜のオゾン全量観測をも精力的に行い通年観測を遂行し、南極の春先に今日注目されるようになった南極オゾンホール現象を世界で初めて明らかにした点、またそれに伴う種々の現象を明らかにした点は高く評価される。今日までに公表した論文は欧文13篇を含め19篇あり、この分野で高い評価を得ている。

以上により審査員一同は、申請者が博士（理学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める次第である。