

2008年秋季オゾン研究連絡会・極域寒冷域研究連絡会 合同研究会の報告

1. 合同研究会の概要

日本気象学会2008年度秋季大会(仙台)1日目(11月19日)のセッション終了後に、オゾン研究連絡会と極域・寒冷域研究連絡会による合同研究会が大会B会場(仙台国際センター・大会議室「萩」)にて行われた。出席者は約30名であった。

今回の合同研究会は、オゾンホールの鉛直構造と最近の話題をテーマに開催された。オゾンホールは発見から20年以上が経過し、人間活動が地球環境に影響を及ぼした問題として社会的な関心を集めてきた。この現象は大気化学と大気力学の両面的な考察を通して理解され、社会的な対策がとられるまでになった。一方で、最近になってClOOC1の光解離に関連したメカニズムの見直しの議論が出てきたり、オゾンホールの発生・解消時期に現れる細かい層状構造の観測や解析ができるようになってきた。

研究会の前半では、2008年6月30日-7月5日に行われた国際オゾンシンポジウムで話題になった内容について、中根英昭(国立環境研究所)氏からその概要を報告していただいた。国際オゾンシンポジウムに関しては、既に天気にも報告(中根ほか2009)があるのでここでは割愛する。後半では、南極昭和基地でのFTIR(フーリエ変換赤外分光計)及びエアロゾルゾンデによる観測結果と、数値計算を使った大気循環の解析とから、3次元的なオゾン分布・輸送について議論した。後半部の講演者より寄せられた講演要旨をまとめる。

オゾン研究連絡会

世話人:

笠井康子(情報通信研究機構)
川上修司(JAXA/EORC)
河本 望(RESTEC)

高島久洋(地球環境フロンティア研究センター)
永島達也(国立環境研究所)
村田 功(東北大学)

極域・寒冷域研究連絡会

代表:

山崎孝治(北海道大学地球環境科学研究院)

世話人:

平沢尚彦(国立極地研究所)
中村 尚(東京大学大学院理学系研究科)
浮田甚郎(新潟大学自然科学系理学部)
高田久美子(地球環境フロンティア研究センター)
阿部彩子(東京大学気候システム研究センター;
現在は東京大学大気海洋研究所に改組)
佐藤 薫(東京大学大学院理学系研究科)
本田明治(地球環境フロンティア研究センター;
現、新潟大学自然科学系理学部)
齋藤冬樹(地球環境フロンティア研究センター)
猪上 淳(地球環境観測研究センター)
高谷康太郎(地球環境フロンティア研究センター)

http://polaris.nipr.ac.jp/~pras/coolnet/cl_index

2. オゾンホール鉛直構造と季節変化

2.1 「南極昭和基地におけるFTIR観測とオゾン・エアロゾルゾンデ観測」

中島英彰(国立環境研究所)

2.1.1 要旨

2006年12月出発、2008年3月帰国の第48次日本南極地域観測越冬隊に、17年ぶりに気水圏隊員として参加してきた。今回は、オゾンホールに関する集中観測を行おうということで、オゾンゾンデによる国際マッチ観測(2003年に引き続き、南極域では2回目)、エアロゾルゾンデによる極成層圏雲(PSC)の観測、高分解能FTIRによる大気微量成分高度分布・気柱全量の分光観測、及び低分解能FTIRによるPSCの観測

を実施してきた。研究会では、現地における観測の概要と、得られたデータについて紹介した。

2.1.2 第48次南極地域観測隊による昭和基地におけるオゾン総合観測

オゾンホールは、1980年代の日・英の研究者による独立発見後、次第に規模を拡大してきている。1987年の「モントリオール議定書」に始まる、オゾン破壊物質である特定フロンの世界的な生産制限にもかかわらず、いまだオゾンホールが回復に転じたという確たる証拠はない。地球史的に見ても、現在は人類が地球上に現れて以来、もっともオゾン層が脆弱な時期に当たると言える。

今回我々第48次南極地域観測隊では、国際極年(IPY) 2007-2008の中のひとつのプロジェクトである「ORACLE-O3」の枠組みの中で、主に以下に述べる4つの手段でオゾンホールの詳細なメカニズム解明を目指した。まず、オゾン破壊量の定量化を行うための、オゾンゾンデによるマッチ観測。次に、エアロゾルゾンデによる、オゾン破壊の引き金を引くといわれている極成層圏雲(PSC)の直接観測。また、南極ではニュージーランド・スコット基地に次いで2箇所目となる、太陽からの赤外線を光源とした、オゾン破壊物質を含む大気微量成分を高度別に測定することができる高分解能FTIRによる観測。さらに、PSCの低分解能FTIRによる観測の3つである。本文では、オゾンゾンデによるマッチ観測と、高分解能FTIRによる観測の概要について紹介する。

2.1.3 オゾンゾンデによるマッチ観測

オゾンは、地球大気中の高度10~50kmの成層圏に最も多く存在し、太陽からの有害な紫外線を吸収することによって、我々生命が陸上で生活できるよう守ってくれている。その大切なオゾン層が南極の春先に破壊されているという現象が前述の「オゾンホール」である。南極では1980年代のオゾンホール発見以前から、各国の基地において継続的にオゾンの観測が行われてきている。ところでオゾンは、フロンから遊離される活性塩素などによる化学反応による破壊のほか、気圧・気温の変化など、気象学的要因によっても見かけの量が変わってくる。そのため、オゾン破壊物質による純粋な化学的オゾン破壊量を正確に見積もるためには、同じ空気塊を流跡線解析によって追いかけ、オゾンの変化量を調べるのが有力な手段となっている。このような解析手法のことを「マッチ解析」と呼び、オゾンゾンデによるオゾン観測に応用したの

が「オゾンゾンデマッチ観測」である。ドイツのP. von der GathenやM. Rexらが最初に提唱したこの手法によって、1990年代から主に北極域を中心にオゾン破壊量の定量化が行われてきた。

オゾンゾンデ観測点の多い北極域では、このようなオゾンマッチ観測は1992年以降ほぼ毎年行われてきているが、観測点の少ない南極域で行われるのは、2007年が2003年について2回目である。しかも2007年は、国際極年2007-2008のプロジェクトの一環として、国際的な協力の下に、7カ国、9つの南極基地が参加して行われた。昭和基地では、オゾンホールが始まる前の2007年6月から、オゾンホールが最盛期を迎える9月~10月をはさんで、オゾンホールの終結する11月はじめまでに、計40回のオゾンゾンデマッチ観測を行った。現在、まだ詳細な解析を行っている途中であるが、今後他の南極基地の観測データとの比較や昭和基地でのPSCの観測結果とあわせ、結果を詳細に解析することにより、オゾン破壊に及ぼすPSCの影響に関する新たな知見を得ることを目標にしている。

2.1.4 高分解能FTIRによる観測

高分解能FTIRを用いると、その場所の上空のオゾン(O₃)や硝酸(HNO₃)、塩酸(HCl)、硝酸塩素(ClONO₂)、亜酸化窒素(N₂O)、メタン(CH₄)などの微量気体成分の量を、高度別に定量的に測定することができる。これは、オゾンホールのメカニズムを定量的に調べるには大変有効な手段である。しかし、FTIRは大変精密な光学機器であり、その取り扱いにもある程度の熟練が必要なことから、これまで南極地域ではニュージーランドのスコット基地において運用が行われているのみであった。

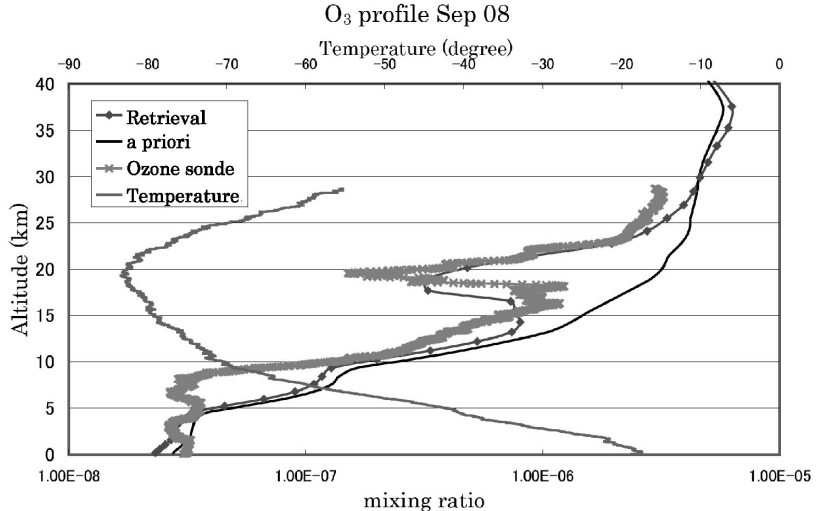
しかし、スコット基地は南緯78度に位置し、オゾンホールが発達する8月~9月にはまだ太陽が昇らず、太陽光赤外線を光源に用いた精度の良い観測ができない(一部月光を光源に用いた観測は実施されている)。それに比べ昭和基地は、南緯69度という南極では比較的低緯度に位置しているため、8月以降は太陽光を観測に用いることができるというメリットがある。また冬季には、ほぼ常時南極全体を覆う「極渦」の勢力圏内に位置する。(たまに、極渦の境界に位置したり、ごくまれに冬期間にも極渦の外に出たりすることもある。)オゾンホールが極渦内に起こる現象であることを考えると、まさに昭和基地は、太陽光を用いてオゾンホールを観測するにはうってつけの場所に位置するわけである。我々はこの昭和基地のメリット

を活用し、高分解能 FTIR による観測を行うこととした。

前述の通り FTIR は大変精密な光学機器であり、しっかりと光学的に調整されていない限り本来の性能を発揮することができない。そこで、今回昭和基地で観測を行うに当たっては、現地での自前の調整はあきらめ、輸送前に FTIR を最高の状態に持つこととした。そのため、南極へ出発前の2006年6月末に FTIR の生産メーカーであるドイツの会社から調整の専門家を日本に招聘し、1週間かけて FTIR を最高の状態に調整してもらった。その結果、彼が経験した中でもこれまでで最高の状態に FTIR を調整することができた。

昭和基地まで「しらせ」とヘリコプターによって細心の注意を払って輸送した FTIR 本体は、越冬開始後に観測棟の海側の観測室に設置し、各種調整を行った。その後晴天となった2007年3月25日、FTIR による初データを取得することができた。その後、2007年3月から2008年1月までの間の晴天日に観測を行い、計87日間のデータを取得することができた。第1図に、昭和基地で得られた2007年9月8日の FTIR の観測スペクトルから解析したオゾン濃度の高度分布と、同日に行ったオゾンゾンデの直接観測によって得られたオゾン高度分布の比較を示す。両者は、高度20km 付近のオゾンが減少している様子も良く一致して捕らえていることがわかる。詳細な解析はまだはじまったばかりであるが、オゾン破壊に関連した O_3 、 N_2O 、 $ClONO_2$ 、 HCl 、 H_2O 、 NO_2 等微量気体成分の吸収スペクトルから、それら微量気体成分の鉛直気柱全量及び高度分布の導出にも成功している。

最近ではほぼ毎年、昭和基地においては9月～11月ごろまではオゾンホール勢力下に位置し、観測隊員は以前より強い紫外線にさらされている。そのため我々は、外出時は日焼け止めクリームやサングラスの使



第1図 FTIR データから解析した、2007年9月8日の昭和基地上空オゾン高度分布。初期プロファイル（実線；UARS (Upper Atmosphere Research Satellite) により得られた9月の南緯65度～70度帯の平均）、導出プロファイル（約1 km おきの曲線；初期プロファイルを観測値に基づいて修正）、オゾンゾンデによるプロファイル（細かい曲線）と、基地上空の気温（20km 付近で最小となる曲線）を示す。

用を喚起している。オゾンホールは、モントリオール議定書に伴うフロン規制にもかかわらず、まだ回復に転じたという報告はなく、今後少なくともあと数十年は引き続きモニタリングしていく必要があるものと考えられる。

2.2 粒跡線解析を利用した南極オゾンホール内オゾン層状構造の研究

富川喜弘（国立極地研究所）

中高緯度の下部成層圏に現れるオゾン層状構造は、オゾンゾンデ観測に携わる人々の中ではよく知られた現象である。オゾンという化学種の分布に現れる構造ではあるが、下部成層圏ではオゾンの光化学寿命が長いいため、通常は輸送過程によって形成される。下部成層圏のオゾン層状構造は、おおまかに重力波起源のものとロスビー波起源のものに分類される。重力波起源の層状構造が重力波そのものと同程度の時空間スケールを持つのに対して、ロスビー波起源の層状構造はロスビー波と同程度の時間スケールとロスビー波よりもずっと小さな鉛直スケールを持つ。これは、時間スケールの長いロスビー波による移流が背景風の鉛直シアと組み合わせることで引き起こされる差分移流に起

因する。こうして形成されるロスビー波起源の層状構造は、水平にもロスビー波よりずっと小さなスケールを持ち、しばしばフィラメント構造と呼ばれる。

ロスビー波起源のオゾン層状構造の同定にしばしば用いられるのが、粒跡線解析、およびそれを応用した手法 (RDF, CAS など) である。粒跡線解析は、空気塊の起源や行く末を知る手法として、広く利用されている。粒跡線解析と、長寿命のラグランジュ的保存量 (通常は渦位) を組み合わせることで、通常の観測や客観解析では得られない高分解能なトレーサー分布を得るための手法が Reverse Domain Filling (RDF) 法である。RDF 法で得られる高分解能トレーサー分布は、しばしば実際の観測結果と良く一致する。国立極地研究所では、Web 上で粒跡線計算の結果を提供するシステム (NITRAM : <http://www.firp-nitram.nipr.ac.jp/>) を公開しているのでご利用いただきたい。

このような背景を踏まえ、本研究では南極オゾンホール内に現れるオゾン層状構造に着目し、その成因とオゾンホール回復への寄与を調べた。2003年の南極オゾンホール回復期に南極昭和基地、および Neumayer 基地で行われたオゾンゾンデ観測では、22回の観測中7回の観測で下部成層圏にオゾン増大層が検出された。オゾン増大層の濃度、および RDF 解析の結果から、これらのオゾン増大層は極渦境界領域

に起源を持ち、波数 1 - 3 のプラネタリ波と極夜ジェットの前直シアに起因する差分移流によって形成されたことがわかった。観測結果を用いた見積もりから、オゾン増大層のオゾンホール回復への寄与は小さいと考えられる。しかし、本研究では高度19km以下に現れるオゾン増大層のみを検出しているため、より高高度での極渦境界領域、あるいは極渦外起源の空気塊の流入を考慮に入れると、オゾンホールの回復に無視できない寄与をしている可能性がある。また、オゾンホール内でのオゾン増大層の発生頻度や濃度は、プラネタリ波の内向き砕波の頻度や空気塊の起源の指標となるため、オゾンホール内オゾン層状構造の解析はプラネタリ波砕波の研究にも有用であると考えられる。

謝 辞

初めての合同開催にあたり、講演を快く引き受けてくださった諸氏に感謝申し上げます。また、報告の掲載が遅れたことをお詫びいたします。

参 考 文 献

中根英昭, 中島英彰, 長浜智生, 桑原利尚, 宮川幸治, 忠鉢 繁, 柴崎和夫, 水野 亮, 滝川雅之, 柴田清孝, 宮崎和幸, 村田 功, 佐伯浩介, 廣岡俊彦, 2009: 国際オゾンシンポジウム2008報告. 天気, 56, 145-156.