

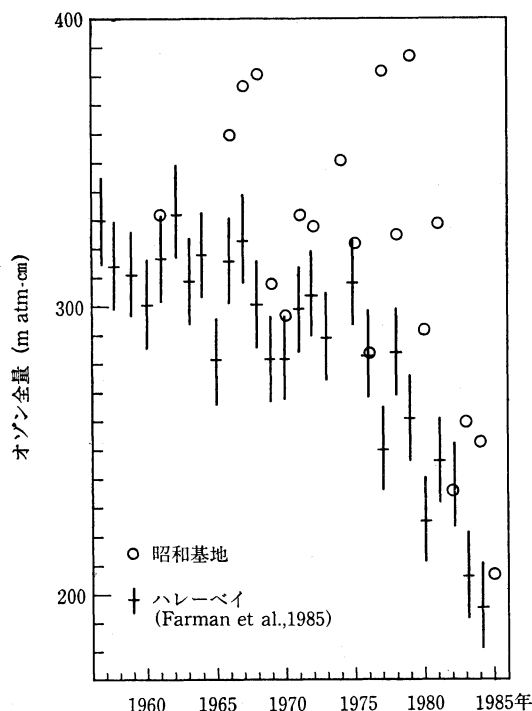
〈特集〉南極オゾンホール

1980年頃から10月のオゾン全量が減少していることが、昭和基地 (Chubachi, 1984) また Halley Bay (Farman *et al.*, 1985) などでの観測によって報告された。このオゾンの減少は、オゾン・ホールとよばれ、研究者の間にとどまらず、世界中の注目を集めている。今回はこの南極オゾンホールをとり上げて特集した。

1. 南極オゾンホールの発見

林田佐智子*,**

第1図は Halley Bay (76°S, 27°W) と昭和基地 (69°S, 39°E) でのオゾン全量観測の10月の値の最近30



第1図 南極昭和基地と Halley Bay で観測された10月月平均値のオゾン全量。
(Chubachi, 1986. Halley Bay のデータは Farman *et al.* (1985) による)。

年間の結果である。Farman *et al.* (1985) は Halley Bay での1957年からのオゾン全量観測に基づき、10月の月平均値が1970年代後半から減少していることを指摘した。昭和基地では1980年頃までは変動が激しく減少傾向はみられないが、1980年代に入って急激に落ちこんでいるのが第1図からわかる。

これらの報告に刺激され、NIMBUS 7号搭載の TOMS のデータが再検討された。そして、それまで異常値として解析対象とされなかったデータが再吟味された結果、南極上空の10月のオゾンが年々減少している様子が見事なまでに現れたのである。この結果は Stolarski ら (1986) によって発表されているが、70°S から 80°S の Zonal mean のオゾン全量値は、1979年の333から1984年に240にまで減少している。オゾンの減少は極渦の中で顕著であり、春の突然昇温による極渦の解消と共に低緯度側の空気と混合されて、みられなくなる。

南極上空の TOMS のデータ (10月の日々変化) はカラーコードで表示されて16ミリ映画になっている*。上記のオゾン全量の年々の減少がおもしろいようにわかる。最後の画面に「THE END OF PENGUIN ?」と出るがさて？

このオゾンの減少の原因については、まだ諸説紛々である。フロン等の影響が南極という特異な環境下で顕著に現れたとする考え方が優勢かに思われたが、力学的な効果とする反論も出ている。

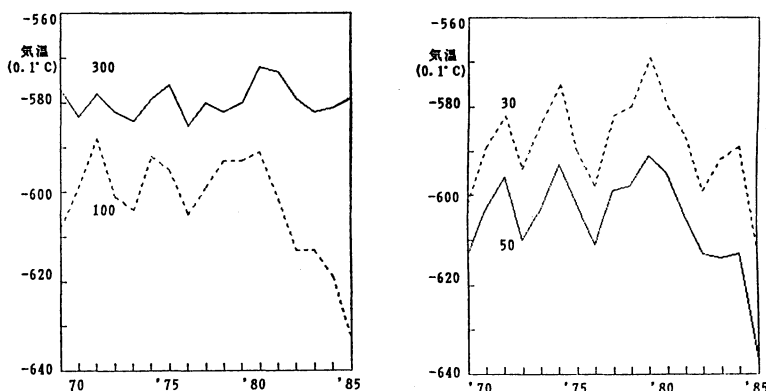
来日中の Aikin 博士 (NASA/Goddard) が10月22日に気象研でこの問題について講演され、オゾンホールを説明するいくつかの異なるシナリオを次の様に挙げられた。

- ① 太陽活動の活発な時期に成層圏上部で N_2O_5 が生じ、下部成層圏に沈降してきて NO を生成しオゾンを破壊した。
- ② エアロゾル (Polar Stratospheric Cloud) の表面で不均一反応 (heterogeneous reaction) によって ClONO_2 から Cl_2 や HOCl が生じオゾンを破壊

* 国立公害研究所 大気環境部

** 天気編集委員「会員の広場」担当

* 国立公害研大気化学研究室 秋元氏が一巻所有されている。



第2図 年々冷たくなる成層圏。図中の数字は気圧 (単位 mb)。

(第26次南極観測隊気象定常部門帰国報告会資料より：気象庁南極観測事務室の御好意による)

した (Solomon *et al.*, 1986 の主張)。

②' PSC 内部での化学反応による。

③ Na, Mg, Fe, Al などが高度 50 km 付近で NaCl などの塩になり、水和するなどして沈降し、春になって太陽光が戻ってくると光解離をおこして Cl を放出する (これは Aikin 博士のオリジナルな主張)。

④ 力学的な原因による。Solomon *et al.* (1986) や Farman *et al.* (1985) らは温度構造や大気の循環に大きな変化はないと述べているが、Tung *et al.* (1986) らが力学的原因を検討している。これについては山崎氏の項に詳しい。

①については関口先生 (気象研) がコメントを述べられた。太陽の黒点周期と南極オゾン全量の Correlation はオゾン全量の周期が3年進んでいる (あるいは8年くらい遅れている) とすると一番高いそうである (昭和61年気象学会秋季大会予稿集)。

2. 昭和基地でのオゾンホール観測

話し手 忠鉢 繁*

聞き手 林田佐智子

10月16日(木)、南極オゾンホールの最初の報告者の一人である忠鉢氏をたずね、お話を伺いました。

Interviewer：忠鉢さんが南極へ行かれたのは1981年11月から1983年3月までですね。

忠鉢：そうです。どうせ行くなら従来の気象庁の定常観測のオゾン全量観測に、冬期 (夜間) の月光観測**

を加えようと思ひましてね。これは十数年前にトライされてはいるんですが、その後やられてなかったもんですから。

I：ちょうど MAP 計画の1年目にあたったと思います……。

忠：そうです。おかげで越冬中、気象定常のチームと協力してオゾンゾンデを約50個あげることができました。鉛直分布の時間変化をどうにか図にするとところまでできたんです。今になってみると、オゾンの減少が始まったといわれる頃から現在までの数年間で1年間を通した、オゾンの鉛直分布の観測結果はこれっきりなんですよね。

I：Solomon らの論文にもそのデータが引用されてましたね。大変貴重な観測をしてこられたわけですね。

忠：いやぁ、あの頃は、こんな風に話題になるなんて思いませんでしたよ。1982年の9月4日に、オゾン全量が異常に低くてね、測器の故障かと思って、一緒に観測をしていた梶原さん (現：高層气象台) と、さんざん測器を点検しましたよ。故障じゃないようなので、観測を続けているとね、10月27日までずっと低い値なんです。

I：低い値というのとどれ位なんですか？

忠：過去18年の10月の平均値が340 Dobson Unit くらいなんですが、82年は236 D.U.でした。翌年も同じ位で258 D.U.でした。しかし、10月28日に突然昇温に伴うオゾンの急増が起こり平年値に近い値に戻り、ほっとしました。

I：その発見には驚かれたでしょうね。

* 気象研究所 高層物理研究部

** ドブソン計による全量観測を月を光源として行う。

忠：驚いたというより、誤観測じゃないかと不安でしょうがありませんでしたよ。日本へ帰ってからでも誤観測でないことを証明しようと、いろんな解析をやってみたんです。その結果、ほぼ誤観測でないことがわかり、安心しました。

I：どんな解析でしょう？

忠：アムンゼン・スコット（南極点）のデータと比較して、同じ傾向であることを確かめました。また、成層圏の気温とオゾン全量の相関をとってみました。オゾン全量と気温の間に相関があるということは以前からいわれていたんです。1982年、1983年のオゾン全量値は確かに低いですが、気温との相関関係ではそれ以前と大きく変わらないんです。

I：ちょっと待って下さい。そうするとオゾン全量の低かった時期は成層圏は同時に低温であったということですか？

忠：そういうことです。

I：そうするとオゾンホールの原因は力学的要因ということなんでしょうか？

忠：そうとは決められませんが、そういうことを言っている人もいます。

I：ウーン、気温が低いということはオゾンが減少したことの結果とも考えられませんか。つまりオゾンが減少して太陽光による加熱が減少する。

忠：それは難しい問題ですね。とにかく、気温との相関については何人もの人が言ってるんです。そうだ、これをみて下さい（と、一枚の図を取り出す）。これは第26次越冬隊の気象チームが作成した年平均高層気温のデータです（第2図）。

I：エーッ！ 年平均気温が5年で4度も下がったんですか？

忠：50 mb のデータは確かにそうですね。

I：まあとにかく、化学反応だけでなく力学や放射も含めた議論がこれからワッと盛り上がりそうですね。

忠：我々の出したデータが、こんな形で注目されたことは全く幸せなことです。しかしね、我々以前にも多くの人が定常観測を続けてきて、やっとわかったことなんです。地道な仕事ですけどね、多くの人の観測の積み重ねがあって初めて、“Syowa” のオゾンデータがあるんですよ。

I：全くです。1981年以前のデータがなかったら何も言えないですからね。現在、“Syowa” のデータが世界中から注目されていることは、これまでの観測を支

えてこられた方々にとって、素晴らしいことですね。どうも長い間、ありがとうございました。

3. 南極オゾンホールの力学的要因

山崎孝治*

南極域のオゾンの問題には2つの側面がある。1つは、南半球の冬から春にかけてオゾン全量の少ない領域が南極大陸上にあり、オゾン全量の最大領域が50～60°Sに見られることである。このことは以前から知られていた。この南極域のオゾンの少ない領域（オゾン・ホール）で春先、近年オゾンがますます少なくなっている。これが第二の側面である。

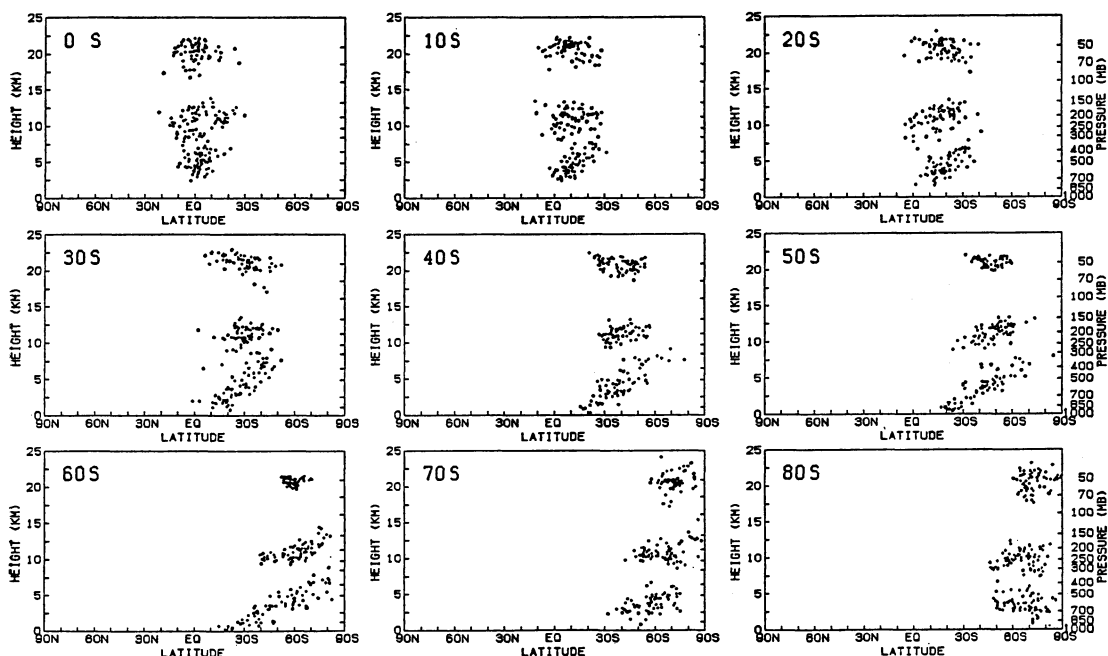
さて、オゾン・ホールの第一の側面について考えてみよう。北半球ではよく知られているように冬季、プラネタリー波の活動が強く、しばしば成層圏突然昇温をひきおこす。プラネタリー波およびそれに伴う子午面循環によってオゾンは低緯度の生成域から極方向下方へと輸送されている。しかし、南半球成層圏では冬季、プラネタリー波の活動が弱く、春になってようやく活発になる。南半球の強い突然昇温は主に10月頃、起こり、昇温以後、上部成層圏では極渦がこわれ夏型循環に移行する。しかし、オゾン濃度が最大である下部成層圏では極渦はこわれずに残る (Yamazaki and Mechoso, 1985; J. Atmos. Sci.). 最終的な極渦の崩壊は11月で、それまで極域は外界と孤立した状況になっている。このことは極渦内で化学反応でオゾンがこわれても周囲と混合されず、反応が顕著に進む可能性を示している。

筆者はNMCの風データと、連続の式から見積もった上昇流とから、初期に緯度円に沿って等間隔に置かれた空気塊の3次元軌跡を10日間計算して、対流圏、下部成層圏における物質循環を調べた。一例として7月の場合を第3図に示す (Yamazaki, 1986, Geophys. Res. Lett.). 計算結果は10月下旬の最終昇温時まで極渦内の空気は低緯度へほとんど出ていかないことを示している。したがって極域でのオゾンは低いままにとどまり、プラネタリー波の活動が見られる50～60°Sでオゾンが最大になると思われる。

しかし、極渦内のオゾンが9～10月に顕著な季節的減少を示すことは、どう理解したらよいのだろうか。この点に関し、Tung *et al.* (1986, Nature) は興味深い仮説を提案している。春に極域に太陽が戻ってくると、オゾンが日射を吸収し正味の非断熱加熱が一時的に生じる。

* 気象研究所予報部

INITIAL TIME 12Z 21 JUL 1983 DAY 5



第3図 5日目の空気塊の分布図。

初期値は1983年7月21日12Z。初期位置は50, 200, 500 mb で、緯度は0°から80°S (左上から右下へ)。

この加熱が上昇流を生じオゾンの減少が起こるというものである。彼らは一次元モデルによる計算により、8～11月のオゾンの季節的減少を定量的に見つかり、昭和基地や Halley Bay のデータを説明した。

オゾン・ホールの第二の側面である近年のオゾン減少についても、Tung らは、近年の春季極域の上昇流が増大傾向にあるとすれば、オゾンの経年的減少が説明されたとした。上昇流増大の原因として近年の火山爆発による成層圏エアロゾルの増大をあげている。春に極域のエアロゾルが増えると日射吸収が増大し、非断熱加熱による上昇流が増大するというものである。その他、フレオンによるオゾンの破壊とする説や南半球対流圏の春先のプラネタリー波の活動が減少し Brewer-Dobson 循環が弱まったとする説や、太陽活動の11年周期と関係するという説もある。Geophysical Research Letters は11月号でオゾン・ホール特集を行うので、百家争鳴の議論が誌上で展開されるであろう。

つい最近、Bowman (1986, Geophys. Res. Lett.) が、衛星データから北半球の春(3月)にも北極域で、南極域での減少よりやや小さい割合ではあるが着実にオゾン

が減少していることを示した。また、Aikin (1986, 気象研究所での講演) は、衛星データから減少率は少ないものの、ほぼ全球的に(年平均も)オゾンが減少しており、さらに成層圏上部でも減少していることを示した。これらの事はフレオンによる破壊説などの人工起源説に有利な事実であろう。しかし、春季に特に南極で現象が顕著なことについては力学的説明が不可欠と思われる。昭和基地での観測によると下部成層圏の気温もオゾンと平行して下がっている。この事実もオゾン・ホールの機構を解明する鍵となるであろう。

4. アメリカの研究の動向

—米国滞在研究者からの報告—

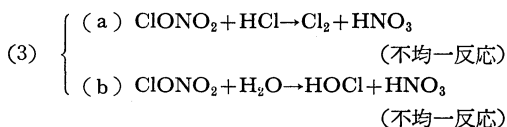
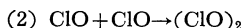
畠山史郎*

南極のオゾン・ホール問題はアメリカでは地球物理学、大気化学者をはじめとする様々な分野で科学者か

* 国立公害研究所大気環境部大気化学研究室。
現在 Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, Pasadena, California

ら多大の関心を寄せられています。JPL から NASA Head Quarters に出向している J.J. Margitan の話では、NASA でもこの問題の解明は第一ランクの重要課題となっているそうです。

既存のモデルでは説明できない現象だったので、様々な角度から原因の究明が試みられており、1986年8月から11月まで十数人の研究者がマクマード基地にのりこみ、南極でフィールド調査を行っています。現在のところまだ断定的な結論は得られていませんが、化学的な原因それもハロカーボンの蓄積に由来する可能性の高い、ハロゲンを含む原子・分子・ラジカルの反応が重視されています。極夜の期間に蓄積された低温、かつ暗条件下で安定な物質が春になって光分解を受けてオゾン破壊をもたらす原子、ラジカルを生成するという機構です。具体的には



などによる OClO , $(\text{ClO})_2$, Cl_2 , HOCl などが原因になるものと考えられています。従って今 (1)~(3) の反応の実験室的研究と ClO , BrO などの XO_x 分子種の濃度測定が精力的に進められています。

筆者が現在所属している Jet Propulsion Laboratory の研究グループでは (1)~(3) の反応がすべて研究されています。筆者自身は (3) の反応を研究しました。

(3a) の反応は以前の研究では $\sim 10^{-16} \text{ cm}^3 \text{ molecule}^{-1} \text{ s}^{-1}$ の大きな気相均一反応速度定数を持つものと報告されましたがその後ずっと小さな値が報告がされ、筆者の研究でも $8.4 \times 10^{-21} \text{ cm}^3 \text{ molecule}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 以下との値が得られ、気相均一反応は重要ではありません。(3b) も均一反応の上限値は $3.4 \times 10^{-21} \text{ cm}^3 \text{ molecule}^{-1} \text{ s}^{-1}$ でやはり重要とはなり得ません。Solomon ら [Nature, 321, 755 (1986)] の計算ではエアロゾル表面上での不均一反応の速度定数が (3a), (3b) に対しそれぞれ 2×10^{-14} および $1 \times 10^{-17} \text{ cm}^3 \text{ molecule}^{-1} \text{ s}^{-1}$ となれば、(3) の反応でオゾン・ホールが説明できるということですが、少なくとも (3a) のように速度定数が7桁も大きくなり、かつ、ともに trace gas である ClONO_2 と HCl が1つのエアロゾルに付着して反応して行くという可能性は低いように思われます。(3b) の場合には、速度定数の違いは4桁程度であり、反応物である水はエアロゾル自

身ですから多少可能性が高くなります。いずれにしても、正確にこれらの反応の寄与を知るためには、氷粒子や硫酸粒子の成層圏エアロゾルに対する sticking coefficient (衝突による反応効率) を正確に求めることが必要で、この研究は現在進行中です。

(1) や (2) の反応も JPL に限らず、アメリカやヨーロッパにおいて既に数カ所の研究室で研究が開始されており、結果が報告されるのも遠いことではないと思われるます。

南極オゾン・ホールの現象がハロカーボンによる成層圏オゾン層破壊の前兆なのか、重要な問題です。結論を出すためには、フィールド観測、室内実験、モデル研究の三者が一体となって研究を進めることが必要で、少くともアメリカではこの三者が緊密に連絡をとりつつ研究を進めているように見受けられます。

南極におけるオゾンの減少という現象は日本において先駆的に報告されたことでもあり、現象の持つ意味あいや、それをもたらす原因を究明するモデル研究や室内実験が密に連絡をとり合って研究を進める体制が日本でもできあがることを期待しています。

5. “オゾンホール” 米国事情

住 明正*

たまたま米国に出張中、テレビを見ていたら、10月20日(月)にNSF(全米科学財団)のオゾン・ホールに関する記者会見の様子を放映していた。その道具立てが、いかにも、アメリカらしいのでこの小文を書く気になった次第である。

つまり、NSFは、この8月から、13名の調査団を南極に派遣しており(その団長が、Susan Solomon である—30前後の女性科学者)、この記者会見でも、直接、電話でS. Solomonを呼びだして、記者会見をさせていた。第三者的にみると、「長い間云い続けて来たフレオンの影響がやっと見つかった」とでもいうように、かなり皆熱くなっているようすであった。最大手であるデュポンが、フレオンの規制に賛成にまわったので、今後、フレオンをめぐる状況は、注目される、と、新聞も報じていた。

とにかく、S. Solomon の活躍の印象が心に残った。

おわりに

今回の会員の広場は、最近話題の南極オゾンホールを

* 東京大学理学部

とりあげて特集しました。今後も関連情報がありましたら逐次掲載してゆきたいと思いますので、どんどん記事をお寄せ下さい。また次に挙げる文献は主として本文中に出てきたものですが、情報源として大いに活用していただけたと思います。

“天気をおもしろくするための” 試みとして、今回のような特集企画を組みました。会員の皆様の御感想をお待ちしております。

文 献

- Bowman, K.P., *Geophys. Res. Lett.* 13, 1193-1196, 1986.
 Chubachi, S., *Mem. Nat. Inst. Pol. Res. (Tokyo), Spac. Iss.*, No. 34, 13-19, 1984.
 Chubachi, S., *Geophys. Res. Lett.*, 13, 1197-1198, 1980.

- Farman, J.C., B.G. Gardiner, and J.D. Shanklin, *Nature*, 315, 207-210, 1985.
 Hatakeyama, S. and M.-T. Leu, *Geophys. Res. Lett.*, 13, 1343-1346, 1986.
 McElroy, M.B., R.J. Solawitch, S.C. Wofsy, and J.A. Logan, *Nature*, 321, 759-762, 1986.
 (本文中に引用なし)
 Solomon, S., R.R. Garcia, F.S. Rowland, and D.J. Wuebbles, *Nature*, 321, 755-758, 1986.
 Stolarski, R.S., A.J. Krueger, M.R. Schoeberl, R.D. McPeters, P.A. Newman, and J.C. Alpert, *Nature*, 322, 808-811, 1986.
 Tung, K.-K., M.K.W. Ko, J.M. Rodriguez, and N.D. Sze, *Nature*, 322, 811-814, 1986.
 Yamazaki, K., *Geophys. Res. Lett.* 13, 1312-1315, 1986.
 * また *Geophysical Research Letters* Vol. 13, No. 12はオゾン・ホールの特集号です。

4年毎のオゾン・シンポジウム開催のお知らせ

IAMAPの国際オゾン委員会主催の4年毎のオゾン・シンポジウムが1988年8月8～13日に西ドイツの Göttingenにおいて開催される事が決まり、first circularが配布されました。次のような題目を取り上げる予定です。

- ① 観測技術の最近の発展
- ② 地上および衛星観測の解析
- ③ 化学-放射-力学モデル
- ④ 関係する微量成分の観測とその収支
- ⑤ 化学反応係数と吸収断面積の実験室内での測定
- ⑥ オゾンと循環との相互作用
- ⑦ オゾンと気候
- ⑧ 対流圏オゾン

⑨ オゾン層の自然および人為的擾乱

このシンポジウムの詳細を知りたい方は、国際オゾン委員会の委員である清水正義氏（舞鶴海洋気象台）に問い合わせられたい。また、second circularを希望される方は下記に連絡されたい。

Dr. Rumen D. Bojkov
 Secretary International Ozone Commission
 Atmospheric Environment Service
 Downsview, Ontario
 M3H 5T4
 CANADA

(文責 山元龍三郎)