

オゾン層*

佐々木 徹**

1. オゾン層科学の序章

火花放電の際に独特の臭いを発するガスとして存在が知られていたオゾンは、1840年に新しい気体分子と認識された。その後、オゾンは、光学的な側面を通じて研究が進んでいく。1881年、アイルランド（当時は英国支配下）の Hartley はオゾンが紫外線をよく吸収することを明らかにし、地上で観測する太陽紫外線に300 nm 以下の波長の光が見られないことから、上空にはオゾンが存在することを予言した。1920年代に入って太陽光をプリズムで分光することによって上空のオゾンの全量（気柱内オゾンの積算量）を観測する測器が英国の Dobson によって開発された。また、1930年には英国の Chapman によりオゾンの生成機構が論じられ、成層圏に濃度の極大をもつオゾン層の存在が予言された。そして、高度50 km 付近にあると解析された高温層が、オゾンの紫外線吸収を熱源として形成されていることが推定された。1940年代後半になると、ロケットによって成層圏では地上で観測されなかった短波長の紫外線が観測されたことから、成層圏にはオゾンが広く分布していることが実証された。

その後、1957/58年の国際地球観測年を契機として、日本を始め各国によるオゾン全量の観測網が構築された。さらに、気球に測定器を積んで、主に電気化学的な手法でオゾン濃度を直接測定するオゾンゾンデ観測も1960年代から世界各地で始まり、オゾン層観測・研究は広がりを見せ、探求が進んでいった。

2. オゾン層科学の進展とオゾン層破壊の予測

観測データが揃ってくると、理論予測されたオゾン

の分布と観測値が必ずしも一致しないことが明らかにされた。成層圏の中層から上では観測値が理論予測より明らかに少ない。当時進められていた夜光雲の観測から中間圏に水蒸気が存在することが明らかになり、水蒸気から作られる水素酸化物 HOx が触媒作用により中間圏でのオゾンを消滅させるメカニズムが提案された。1970年代にはいと、スウェーデンの Crutzen が、成層圏で窒素酸化物 NOx が触媒作用でオゾン消滅反応を起こしていることを指摘し、成層圏でのオゾン科学に大きな進展をもたらされた¹⁾。そして、当時計画されていた超音速旅客機が成層圏で NOx を排出すると、オゾン層を破壊する恐れがあることを指摘した。さらに、成層圏における HOx や塩素酸化物 ClOx によるオゾン消滅反応の効果が研究され、1974年には米国の Molina と Rowland が、冷媒や噴射剤などとして使用が増えつつあった CFC 類（フロン）を起源とする ClOx がオゾンを破壊する可能性のあることを指摘した²⁾。こうして提起されたオゾン層破壊問題は社会的な注目も大きく集め、オゾン層科学は、純粋科学という側面以上に、社会的な注目の中で研究が進められていくこととなった。

3. オゾンホールの発見

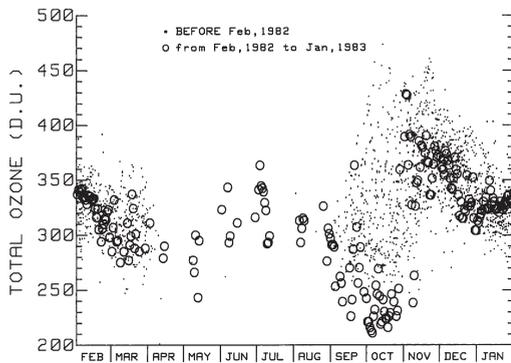
予測されたオゾン層破壊は意外な形で現れた。南極オゾンホールである。その発見には、日本のオゾン層観測が大きく貢献している。

当時、国際プロジェクト「中層大気観測計画 (MAP)」が進められており、これに対応して日本は南極昭和基地でライダーや赤外分光、大気球などを用いた観測を強化していた。その中で1982年はオゾン観測も強化し、通常は観測を休止する極夜期間も月光を使ってオゾン全量を観測し、オゾンゾンデの観測も極夜を含めて通常より大幅に頻度を増やしていた。そし

* Ozone layer.

** Toru SASAKI, 気象庁オゾン層情報センター
(現：気象庁宇都宮地方気象台)。

© 2007 日本気象学会

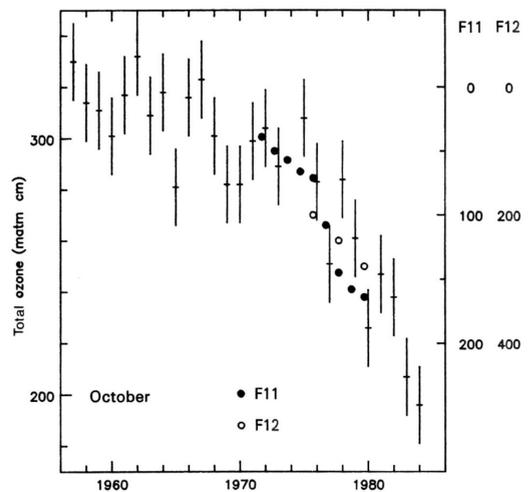


第1図 昭和基地におけるオゾン全量の観測結果³⁾。1982年のオゾン全量は以前の値に比べ大きく減少していた。

て、まさにこの時に、昭和基地上空のオゾン層に異変が起こった。極夜期間に高い値を示していたオゾン全量が極夜明けから急速に減少し（第1図）、その時、オゾン層の中心高度でオゾンが著しく少なくなったのである。

当時観測を行っていた忠鉢らは、測器やデータ処理を何度も点検した上でデータの信頼性に確信を持ち、1984年、ギリシャでのオゾンシンポジウム等で発表した³⁾。しかし、この発表の持つ大きな意味に気づいた研究者は少なかった。翌年、英国のFarmanらが、ハレーベイ基地でのオゾン全量が経年的に減少している状況をCFC濃度の増加と関連づけて発表してから、ようやくオゾン層研究者の世界は騒然となった（第2図）⁴⁾。そして、1978年以降、TOMSにより衛星観測を続けていた米国のStolarskiらは、オゾン全量の平均的な値300DUに比して小さすぎるため、誤データとしてそれまで単純に切り捨てていた180DU以下のデータを再検討した結果、南極の春にオゾンの少ない領域が広がる「オゾンホール」現象が進行していたことを発表したのである⁵⁾。オゾンホール発見の端緒を開いたと言ってもいい日本の観測成果は気象学会の歴史においても誇れるものといえる。

オゾンホールの発見は、当時の研究者にとって大きな驚きであった。このような劇的な変動が自然の大気中で起こることに対して誰もが大きな興奮を覚え、世界中でその成因探求の競争が始まった。オゾン減少が、南極域の低温と関係しているらしいことから、力学的な成因も唱えられたが、米国のSolomonらが指揮して行ったNASAとNOAAによる南極成層圏での観測プロジェクトによって、塩素が原因であること



第2図 英国ハレーベイ基地におけるオゾン全量の経年変化。CFC類の増加とともにオゾン全量が減少している⁴⁾。

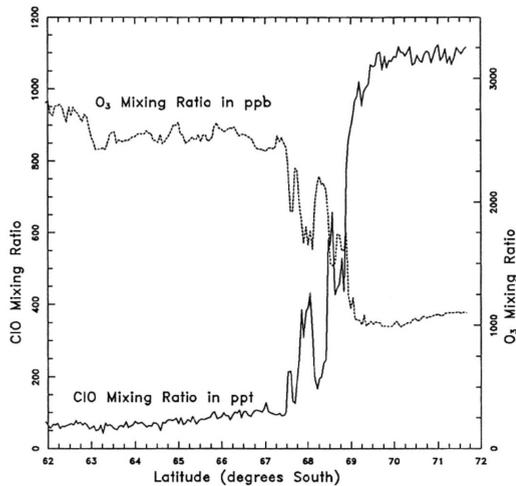
が明確に示された（第3図）⁶⁾。

Solomonらは観測の前にオゾンホール形成の有力な仮説を提示していた⁷⁾。これは、南極域成層圏で -78°C 以下の低温下で出現する極域成層圏雲（PSC）の粒子表面で起こる化学反応—不均一反応—によって、HClやClONO₂などオゾン消滅に関わらないりザボア成分から、オゾン消滅に導く塩素ガスを発生させるというものであった。このアイデアは、気相反応の反応速度定数を測定する実験で反応チャンパー内の壁面で急速に進む不均一反応が測定に誤差をもたらすため、その誤差要因を抑える対策に苦慮していたことを伝え聞いたことから、逆に、南極域成層圏で冬季に多量に発生するPSC粒子表面での不均一反応の役割に発想が進んだことから浮かび上がったものという。

オゾンホール発見の端緒を開いた日本の研究者は、その後、極域オゾンの破壊メカニズムの探求でも、大気球観測や衛星観測を通じて顕著な貢献をした。その中でもILAS/ILAS-IIプロジェクトは、国内外の多くの研究者が関係して進められた点で、特筆される成果を取めたといえる⁸⁾。

4. オゾントレンドパネル

オゾンホールの発生とその科学的な解明とは別に、国際社会はすでに、CFC規制のための国際条約を締結し（1985年）、さらにその規制内容を定めたモントリオール議定書も採択し（1987年）、オゾン層保護に



第3図 南極上空での航空機観測の結果，オゾンの減少が一酸化塩素の増加と明確に関連していることを見つけた⁹⁾。

向かって動き出していた。

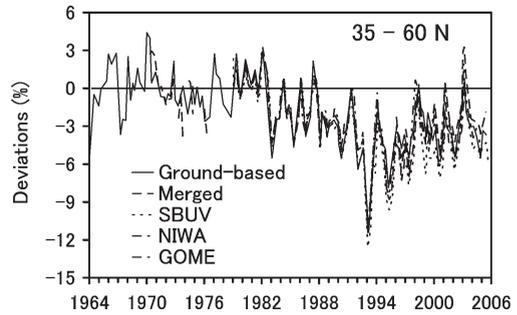
オゾン減少が極域，しかも南極域だけに限った現象であるのか，それとも予測されていたように世界規模で起こっていることなのか，オゾン層保護に向けて世界が動き出した時点では確認されていなかった。

1986年，NASA，NOAA，WMO等とは共同でオゾントレンドパネルを組織し，全球的なオゾン変化について調査を開始した。地上観測，衛星観測について詳細な品質評価を行い，その結果，南極域ばかりでなく北半球中緯度でも冬に大きなオゾン減少があることを報告した（第4図）。

オゾンホールがCFCによってもたらされたものであること，さらにオゾントレンドパネルが世界的な規模でオゾン破壊の起こっていることを発表したことは，オゾン層研究の一大エポックであった。

5. ピナトゥポ火山噴火

1991年6月，フィリピン・ルソン島にあるピナトゥポ火山が大爆発し，火山灰や二酸化硫黄などの火山ガスを成層圏にまで吹き上げた。火山ガスはやがて硫酸エアロゾルとなり，数年にわたり成層圏に滞留した。生成した硫酸エアロゾルは1年程度の時間をかけて，北半球，南半球の高緯度まで運ばれ，日射への影響を通じて1993年の日本での大冷害など世界的な低温をもたらしたが，オゾン層にもかつてない大変動をもたらした。特に，1993年の北半球の春のオゾン量はかつて



第4図 北半球中緯度でのオゾン全量の経年変化⁹⁾。1980年代を中心に長期的な減少が見られ，1993年には大きく減少した。1990年代半ば以降は増加に転じているように見える。

ない規模で減少した（第4図）。

ピナトゥポ火山噴火後のオゾン減少は，硫酸エアロゾル粒子表面での不均一反応もオゾン化学に大きな影響をもたらすことを示した。この不均一反応は一般に低温下で速く進む。PSCが生成されるほどは低温とまらない条件下でも，硫酸エアロゾルの存在によって塩素の活性化が進む。特に，普段PSCがあまり生成する環境にない北半球高緯度では，硫酸エアロゾル表面での不均一反応が，大規模なオゾン減少をもたらした。高緯度ほど低温とならない中緯度でも，塩素の活性化によるオゾン破壊が一定程度進んだことと，高緯度でのオゾン破壊によってオゾン濃度の低くなった空気が流入したことにより，オゾン減少がみられた。

ピナトゥポ火山噴火は，硫酸エアロゾルのオゾン反応過程における役割を明らかにする上で，重要なイベントであったといえる。

6. オゾン層保護の効果の検出と輸送場の長期変化

オゾン層保護のためのオゾン層破壊物質の規制は，当初，主なCFC類を中心に先進国で基準年の半分以下まで生産・消費量を減らそうというところから始まった。しかし，全球的なオゾン減少で規制はたびたび厳格化に向けて改正され，ついに1996年には，先進国において主なオゾン層破壊物質を全廃するところとなった。規制の進展にともない，オゾン層破壊物質の濃度増加は減速し，地上付近での総量は1990年代前半にピークを迎えた。成層圏においてはそれより少し遅れて1990年代後半にピークを迎えたとみられる。

オゾン層破壊物質に規制の効果が現れると，次にはオゾン量の変化にも規制の効果を検出することが課題

となった。これを検出するには、既知の自然変動である季節、太陽活動、準2年振動(QBO)に伴う変動を除去する必要がある。これらの変動成分を除去してもなお、オゾン量は様々な変動を含んでおり、その中から長期的な変化を検出するのは容易でない。しかし、破壊物質のピークから10年近くを経てようやく、2006年のアセスメントレポート⁹⁾において、1980年代を中心に減少していたオゾン量は、1990年代半ば以降は減少が見られないという評価を得るにいたった。

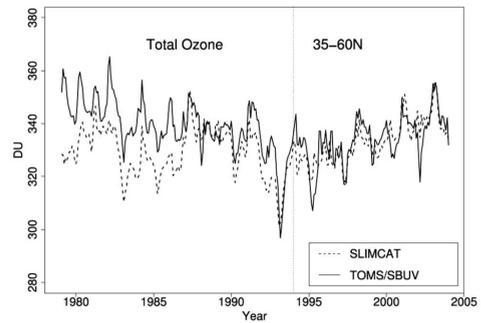
長期的な変化傾向を検出しようとする研究の中から、輸送場の長期的な変化によるオゾン量の変化への影響が明らかにされてきた。北半球中高緯度のオゾンは、1990年代半ば以降、むしろ増加傾向にある(第4図)。この大きさは、オゾン層破壊物質のピーク後の減少から期待されるものを超えている。様々な力学パラメータとの関係を調べた解析的な研究から、北極振動(AO)インデックスと北半球中高緯度のオゾン量との間の関係が見いだされた。AOインデックスが正(中緯度に対して高緯度の地上気圧が負偏差)の時、一般に成層圏の極渦は強まり、オゾンを中高緯度に運ぶ成層圏のブリュワー・ドブソン循環は弱まる。また圏界面高度では、大西洋周辺でよく発生する「オゾンミニホール」に見られるような、低緯度対流圏のオゾンの少ない空気を、圏界面高度を上昇させながら中高緯度に運ぶ擾乱が発生し易くなり、いずれも中高緯度のオゾン量を少なくするように作用する。AOインデックスに表れる循環場の変化が、1990年代半ば以降のオゾン量増加のほとんどすべてと1980年代のオゾン量減少の約20%から50%に寄与しているとみられる。長期再解析ERA40の気象場で化学輸送モデルSLIMCATを駆動した実験においても、オゾン量の長期変化が再現されている(第5図)。

このように、オゾン量の長期的な変化には、人間活動の影響ばかりでなく、輸送場の変化も寄与していることが明らかになってきた。ただ、この輸送場の変化をもたらした原因は解明されていない。

7. 地球温暖化時代のオゾン層

今後、成層圏のオゾン層破壊物質が減少するにつれ、オゾン層は「回復」へと進む。しかし、進んできた道と同じ道をたどって回復する保証はない。

地球大気は、オゾン層破壊物質ばかりでなく、二酸化炭素、メタンなどの温室効果ガス濃度が大きく上昇している。これらは対流圏では温暖化をもたらすが、



第5図 化学輸送モデルによる北半球中緯度のオゾン全量の推移。この実験では塩素濃度を一定にしているが、ERA40の気象解析場で駆動することにより、1980年代の減少の一部と1990年代半ば以降の増加が再現された¹⁰⁾。

成層圏では逆に寒冷化をもたらし、化学過程や輸送過程の変化を通じて、オゾン量に影響を与えられ。前項で北半球中高緯度のオゾン量に影響を与える循環場の変化について述べたが、今後は地球温暖化との関係で、オゾン量に変化をもたらす循環場の変化が大きな研究テーマとなろう。

反対に、成層圏の気温場を作っているオゾンの変化は、成層圏気温の変化を通して地球温暖化のゆくすえにも影響を与える。今後のオゾン層研究は、地球温暖化との関係で進められることが多くなるであろう。

参考文献

- 1) Crutzen, P. J., 1970 : Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 96, 320.
- 2) Molina, M. J. and F. S. Rowland, 1974 : Nature, 249, 810.
- 3) Chubachi, S., 1984 : Mem. Natl. Inst. Polar Res. Jap., Spec. Issue, 34, 13-20.
- 4) Farman, J. C. *et al.*, 1985 : Nature, 315, 207.
- 5) Stolarski, R. S. *et al.*, 1986 : Nature, 322, 808.
- 6) Anderson, J. G. *et al.*, 1989 : J. Geophys. Res., 94, 11465-11479.
- 7) Solomon, S. *et al.*, 1986 : Nature, 321, 755-758.
- 8) 国立環境研究所, ILAS-IIプロジェクト最終報告書, 2006 : 国立環境研究所研究報告第194号.
- 9) WMO, 2007 : Scientific assessment of ozone depletion : 2006, Global ozone research and monitoring project, Report No. 50, Geneva.
- 10) Hadjinicolaou, P. *et al.*, 2005 : Geophys. Res. Lett., 32, L12821.