

## 7. コメント：オゾンホールの科学

小池 真\*

### 1. はじめに

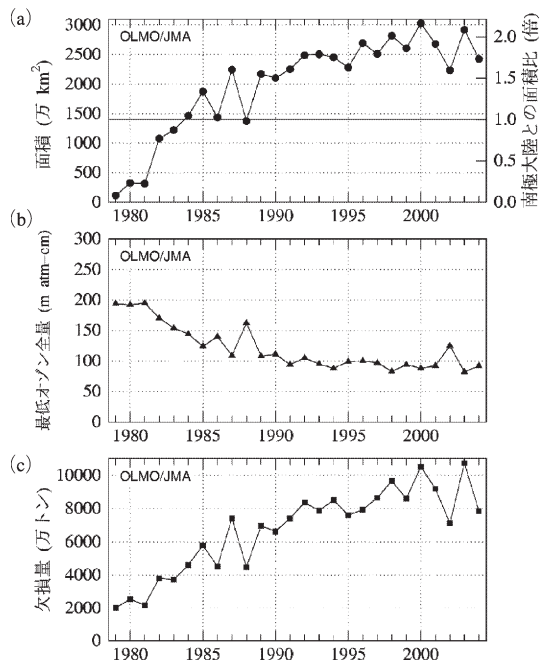
1980年代に、南極の春先においてオゾン量（正確にいうと地表面から大気の上端までの空気の柱の中に存在するオゾン分子の総数である気柱全量）が年々減少しているというショッキングな事実が報告された（いわゆる「オゾンホールの発見」, 第1図）。その後の研究により、その主な原因は人間が放出しているフロンガスから生成する塩素酸化物の増加であることが分かってきた。これを受けて1987年にはフロンガス等のオゾン破壊物質の生産・排出量の規制を定めた「モントリオール議定書」が締結された。モントリオール議定書はその後、数回にわたり規制内容をより厳しいものとする改正が行われて現在に至っている。この結果、対流圏大気（地表から高度約12 kmまでの大気）中のフロンガスの濃度や、オゾン層が存在する成層圏大気（高度約12 km から50 km までの大気）中の無機塩素の濃度が減少、あるいは増加が穏やかになったことが報告されている。

オゾンホールの発見は2つの意味で教訓的である。1つは地球システムに対し、人間活動が破壊的影響を与え得ることを目の当たりにしたということである。オゾン層は長い年月をかけて生物が築き上げてきた、太陽からの紫外線から生物を守るバリアーである。それが僅か数十年の人間活動（フロンガスの放出）により脆くも危機的状況に陥ってしまった。もう1つは、科学者の研究とそれに基づく人類への警告により、基本的にその危機から脱したということである。これは地球科学の研究者にとってはサクセスストーリーである。しかし、解決済みかのように見られるようになったオゾン層の問題には、残された課題も少なくない。

ここでは、これらの問題点を見ていきたい。

### 2. 南極オゾンホールの生成メカニズム

「オゾンホール」という呼び名は、南極上空でその周辺よりもオゾン量の少ない領域が（ドーナツの穴のように）存在しているという空間的な構造に着目してつけられたようである。しかし、このようなオゾンの気柱全量の空間分布はフロンガスの影響が出始める前



第1図 南極オゾンホールの経年変化（気象庁, 2004）。(a) オゾンホール面積。(b) オゾン全量の最小値。(c) オゾン欠損量。オゾンホール面積はオゾン全量が220ドブソン単位(DU)以下の領域の面積、オゾン欠損量は300 DUからの減少量で示している。

\* 東京大学大学院理学系研究科。

© 2007 日本気象学会

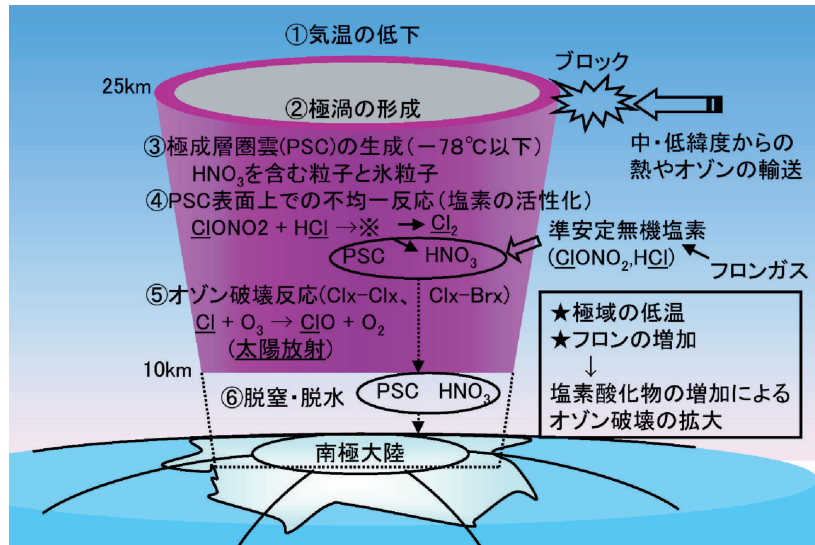
の1970年代でも見られている。これは南極の冬から春先に成層圏に形成される南極点付近を中心とした空気渦（極渦）が、中低緯度からのオゾン濃度の高い空気塊が高緯度側に輸送されるのを阻んでいるためである。従ってオゾンホールの本質（あるいは説明すべき特徴）とは、オゾンの気柱全量（あるいは高度12~22 km、すなわち下部成層圏のオゾン）が9月から10月にかけて季節進行と共に減少すること、またその減少量が1980年代から年々増大していること、そしてそのオゾンの大きな減少が極渦内の下部成層圏に限られていることである。

オゾンホールの生成メカニズムについては幾つかの詳しい解説書があるので、ここでは第2図を使って簡単に説明するのにとどめたい。

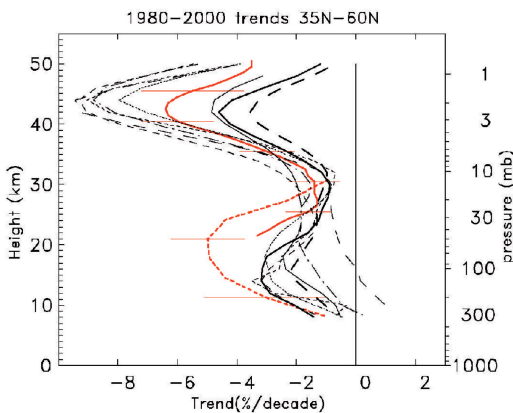
- (1) 秋から冬にかけて南極に注がれる太陽放射量が減少すると南

極上空の成層圏の気温が低下する。

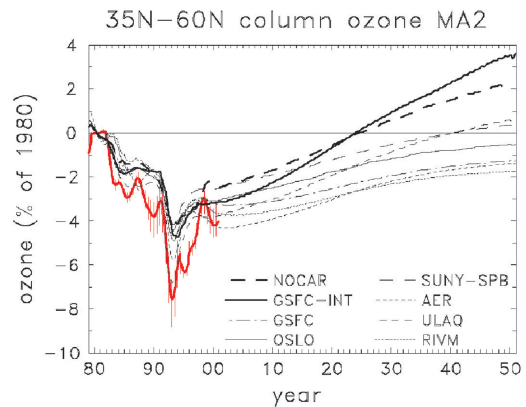
- (2) この結果、西風の循環（極渦）が形成・強化される。極渦が形成されると中低緯度からの温度の高い空気の輸送も阻まれるので、さらに極渦が強化される。
- (3) 気温が約-78°C程度以下まで下がると極成層圏



第2図 南極オゾンホールの生成メカニズムを示す概念図。



第3図 北半球中緯度 (35°N~60°N) における1980年から2000年間のオゾン変化量 (WMO, 2003) の高度分布。10年間あたりの変化量をパーセントで示している。赤色で示したのが観測から求めたもの (実線が人工衛星 SAGE I と II, 点線が気球オゾンゾンデ) で、水平な線分の長さは推定の誤差範囲 (2σ) を示す。黒線が数値モデル計算の結果。



第4図 北半球中緯度 (35°N~60°N) のオゾン気柱全量の変化量 (1980年の値に対する変化を百分率で示したもの)。赤線は衛星や地上観測から求めたもので、鉛直線分の長さは、各種観測・解析手法の結果のばらつきを示す。黒線は複数の数値モデル計算。温室効果気体については MA2シナリオに基づいている (WMO, 2003)。

雲 (Polar Stratospheric Cloud, 略して PSC) という雲粒 (硫酸, 硝酸, 水などからなる液滴や, これらの成分からなる結晶) が形成される。

- (4) PSC が形成されるとその表面上での化学反応により, フロンガスから生成した無機塩素がオゾン破壊する形へと活性化される (このような気体成分と, PSC など液体や固体からなる物質との間の反応を不均一反応という)。この不均一反応は, 冬から春先にかけて PSC が存在する限り起こる。
- (5) 春先になり南極成層圏に日射が到達するようになると, (日射が最初に到達する極渦付近から) 活性化された塩素酸化物によりオゾン破壊反応が進行する。臭素酸化物を含んだ反応も総オゾン破壊反応量の半分程度寄与していると考えられている。
- (6) 低温下で PSC 粒子が十分な大きさに成長すると, 粒子は重力により落下する。この際その粒子中に窒素酸化物を含んでいるため, この過程は成層圏からの窒素酸化物の除去 (脱窒) 過程となる。窒素酸化物は春先にオゾン破壊物質である塩素酸化物を, オゾン破壊しない他の無機塩素に変換する。このため脱窒過程は PSC の生成が止まる春先でのオゾン破壊の持続において重要である。
- (7) オゾンホールは極渦の崩壊 (最終昇温) により消滅する。低濃度のオゾンを含んだ空気は中緯度へとばら撒かれる。

このようなメカニズムは, 上記のオゾンホールの特徴を基本的に全て説明することができる。大気化学の研究者の立場から言えば, オゾンホールのメカニズムの解明は, 大気化学反応系に不均一反応という考

え方を導入したという点で画期的なものであった。

### 3. 北極およびグローバルなオゾンの経年変化

北極成層圏は南極ほどには気温が低下しない。これは北半球では, それぞれの緯度で経度方向に見たときに海と陸のコントラストが極付近までであるため, 地球規模での大気中の波活動が南半球よりも活発であるためである。この結果, 極渦が安定して存在できず, 熱やオゾン濃度の高い大気が極まで輸送される。北極では従って, PSC の生成が起こりにくく, 脱窒がおきにくい。オゾン破壊は南極に比べて小規模なものとなる。さらにオゾンが減少した空気が中緯度の空気と混合してしまうため, その効果が見えにくい。

グローバルに見ると, オゾンの気柱全量の 1997~2001年の平均値は, 1980年以前と比較して平均で 3%減少している。地域別では, 低緯度ではほとんど変化はなく, 北半球中緯度 (35°N~60°N) では 2% (夏・秋) から 4% (冬・春), 南半球中緯度 (35°S~60°S) では年間を通じて 6%減少している。

高度方向に見てみると, 観測された北半球中緯度のオゾン減少は, 下部成層圏 (高度 20 km 付近) と上部成層圏 (45 km 付近) で最大 (10年間で 5~7%) と

第 1 表 今後の予想される成層圏中の大気成分の変化とそれに伴うオゾンの変動。

成層圏中の大気成分の変化	対応するオゾンの変動
フロンの減少	極域およびグローバルなオゾンの回復。ハロゲンの寄与が小さい化学反応系へと移行。
一酸化二窒素 (N <sub>2</sub> O) とメタン (CH <sub>4</sub> ) の増加	2050年までは影響小さい。それ以降は相対的重要性が増す。N <sub>2</sub> O の増加はオゾン減少させる可能性あり。
二酸化炭素 (CO <sub>2</sub> ) など温室効果気体の増加	成層圏の気温の低下 → ● 上部成層圏オゾンの回復を加速。 ● 下部成層圏オゾンの回復を加速する可能性あり (気相反応のみ)。 ● PSC の増加により極域オゾンの回復を減速させる可能性あり。中緯度下部成層圏もこの影響により回復が減速する可能性あり。
	大気の循環等の変化 → 大気の波動活動や対流圏界面高度などに変化が起これば影響大。
水蒸気の増加 (増加の程度などに不確定性大)	成層圏の気温の低下 → 温室効果気体の増加に準ずる。
	水酸化ラジカル (HO <sub>x</sub> =OH+HO <sub>2</sub> ) の増加 → 下部成層圏オゾンの回復を減速。
	極域水蒸気の増加 → PSC の増加により極域オゾンの回復を減速させる可能性あり。中緯度下部成層圏もこの影響により回復が減速する可能性あり。

なっている(第3図)。このうち上部成層圏のオゾンは、化学反応による消失の時定数が大気の輸送の時定数よりも短い、いわゆる「化学反応コントロール」領域にあり、その減少は、増加した塩素酸化物などによる気体成分だけの化学反応(気相反応)により定量的にもほぼ説明が可能である。一方、下部成層圏のオゾンは「輸送コントロール」領域にあり、その場でのオゾン破壊反応とともに、北極からのオゾン濃度の低い大気の輸送も少なからぬ寄与をもっていると考えられている。またオゾンの破壊を引き起こす化学反応についても、下部成層圏に存在する硫酸エアロゾル上での不均一反応が重要な役割を果たしていると考えられている。

単位体積当たりのオゾンの数濃度は下部成層圏で大きいいため、気柱全量のオゾンの経年変化は、基本的に下部成層圏のオゾン変化に対応している。これらの下部成層圏のオゾン減少は、現在の数値モデルでは定量的には説明できていない。観測からのこの高度のオゾン減少の見積もりはやや過大である可能性があるが(観測数が少なく、また気柱全量オゾンの減少よりも大きい減少を示しているため)、その点を考慮してもまだ十分ではない。

#### 4. 今後のオゾン変動の予想とその課題

フロンガス等のオゾン破壊物質の生産・排出量の規制により今後は成層圏大気中の塩素酸化物が減少し、極域においても、中緯度においても、オゾン層が回復していくことが予測されている(第4図)。しかし、その回復の時期などについては、フロンガス以外の要素を考慮する必要がある。その1つとしては、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)などの温室効果気体の増加と、それに伴う成層圏の気温の低下や、大気の循環の変化がある。

また成層圏の観測から報告されている水蒸気濃度の経年の増加も成層圏の気温の低下と、オゾン破壊物質である水酸化ラジカルの増加を引き起こす。これらの今後のオゾン変動に関係すると予想される要素について第1表にまとめた。

現在の大気化学の知見について言えば、中緯度下部成層圏のオゾン減少が定量的に説明できないこと、極域のPSCの生成過程や脱窒過程に不明な点があることが残された課題と言えよう。また今後のオゾンの変動予測においては、気象場の将来予測が極めて重要である。例えば、気温が2°C変化するだけでも化学反応係数やPSCの生成を通じてオゾン量に大きな影響を与え得る。また、対流圏から成層圏に入った後の大気の鉛直輸送速度や、極域と中緯度との大気の混合、あるいは突然昇温の強度や時期の変化の予測など課題は多い。特に、北半球高緯度のオゾン量は北極極渦のモデルによる表現が鍵となる。これらの課題に答えるために、オゾンの将来予測では従来主流であった大気を2次元(緯度と高度)で表現したモデルに代わって、近年では3次元モデルが使用されるようになってきている。今後も注意深いオゾン層の監視が必要であると共に、気象学・気候学と大気化学の研究の知見を結集し、より信頼性の高いモデルを構築していく必要がある。

#### 参 考 文 献

- 気象庁, 2004: オゾン層観測報告: 2004, 気象庁, ISSN 1344-7335, 52pp.
- WMO, 2003: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002, Global Ozone Research and Monitoring Project Report, World Meteorological Organization, 47.