【解説】

フロンとオゾン層破壊

林 田 佐智子

国立公害研究所 大気環境部

〒305 つくば市小野川16-2

フロンによるオゾン層破壊の危険性が指摘されて以来、14年間にわたり、オゾン層の将来予測に関する研究が行われてきた。しかし、現実には成層圏オゾン層に異変が起こっていると考えられ始めたのはごく最近のことである。本稿では数値モデルを用いたオゾン層の予測結果、最近発表された観測結果のまとめなどを中心にこの問題を解説する。

1. 成層圏オゾン層

成層圏とは地球大気のうち、高度10km-45km付近まで領域をさしている。対流圏界面から高度約20kmまでの成層圏下部では気温はほぼ一定であるが、それより上へゆくほど大気は暖かい。これは主として成層圏オゾンの加熱効果によっている。このような温度構造のために、成層圏では対流は全く起こらず、きわめて安定な成層状態が保たれている。物質の上下拡散は抑制され、オゾン層のような、水平に広がった層状構造ができる。つまり、オゾンの分布が決める温度構造が、オゾン自身の分布を決めているのである。成層圏大気は非常に乾燥している (H_2O はおよそ5ppm以下)。このため、いったん成層圏に上がった物質は雨に洗い流されることもなく、およそ1~2年かかって赤道から極域へとゆっくり移動し、対流圏へ沈降すると考えられている。この循環はブリューワー・ドブソン循環と呼ばれるものである。

オゾン層は、本質的には成層圏での光の環境の高度変化によって生じている。太陽からの放射は地球大気分子によって吸収され、図1に示すように太陽放射強度スペクトルが、高度によって変化する。特に紫外線は大気上層部で吸収され、光解離反応が引き起こされる。オゾン層は一次近似的には次のような反応のバランスでできている(チャップマン機構とよばれる)[1]。

オゾン生成反応

オゾン消滅反応

光解離反応

ここで $\text{k1}, \text{k2}$ は化学反応の速度定数、 $\text{J1}, \text{J2}$ は光解離定数である。また、 M は大気分子、 $h\nu$ は光子を表す。上の4つの化学式から、 O, O_3 の濃度の時間変化 ($d[\text{O}]/dt, d[\text{O}_3]/dt$) について式を立て、定常状態としてこれらの式を解くと、 $\text{J2} \gg \text{k2}[\text{O}]$ が高度30km-80kmで成り立つという近似を行って、

$$[\text{O}_3] = [\text{O}_2] \sqrt{\frac{\text{J1k1}[\text{M}]}{\text{J2k2}}}$$

Fig.1 Solar fluxes spectrum at various altitudes

[2]

が、導かれる。ここでJ1は上へ行くほど大きく、 $[O_2]$ 、 $[M]$ は上へ行くほど小さくなる（J2は高度変化があまり大きくない）。このため、これらの積であるオゾン濃度はある高さで極大を持つ。これがオゾン層のできる理由である。実際には、チャップマン機構で説明されるオゾン濃度分布は、観測されたオゾン濃度分布とはかなり異なっている。しかし、 NO_x 、 HO_x 系などによる化学反応や、大気運動の効果を考慮に入れることによって、計算されるオゾン濃度は観測値に近づく。特に、成層圏下部から対流圏にかけては、大気運動の効果が大きい[2]。

現在では、50-100の化学反応式と、垂直拡散を考慮した一次元モデルを用いて、観測されるオゾンの高度分布をよく再現できるようになった。これらのモデルを使ってフレオンの影響予測がなされている。また、さきに述べたような低緯度から極域への輸送効果を含む2次元モデルについて研究が進んでおり、オゾンの緯度・高度分布をよく再現している。図2に緯度毎のオゾン高度分布の観測値を示した[2]。モデルを用いたフレオンの影響予測結果については第3節で詳しく述べることにする。

2. フレオンのオゾン層への影響

塩素酸化物とオゾンとの反応は次のようである。

従って、両式を加えると、

となり、これらは実質的に $[Ox](=[O]+[O_3])$ を減らす触媒反応である。[2]

フレオンは水に解けず、化学的にも安定であるが、高度40km付近まで到達すると強い紫外線にさらされて分解する。分解されたフレオンから放出されたCl原子が上の触媒反応を繰り返し、オゾンを破壊する。

また、フレオンは、紫外線を吸収するばかりでなく、赤外線も吸収する。フレオンの吸収領域はちょうど他の分子による吸収がないところであるため、大気の温室効果にも大きな影響を持っている。

3. 数値モデルを用いた予測結果

大気中成分の数密度 $[X]$ の時間変化は一般に以下のようにかける。

Fig.2 Ozone concentration profiles in March [2]

$$\frac{d[X]}{dt} = (\text{生成項}) - (\text{消滅項}) + (\text{輸送項})$$

生成項、消滅項は化学反応、光化学反応から決まる。また、それ以外に対流圏での雨や雲に取り込まれる過程を含むこともある。

一次元の場合、輸送による項は、

$$\Phi = K \left\{ \frac{d[X]}{dz} + \left(\frac{1}{T} \frac{dT}{dz} + \frac{1}{H} \right) [X] \right\}$$

とかける。ここに、 T は気温、 H は大気のスケーラハイト（密度が $1/e$ になる高さ）、 K は3次元的な運動を一次元的に表現したときの渦拡散係数である。実際には運動は3次元的であるから、 K は、経験的にしか決まらない。2次元モデルの場合は、輸送項に南北循環の項が入り、取り扱いがより複雑になるが、3次元の運動を2次元に置き直していることに変わりはない。最近、化学反応を、大気大循環モデルとよばれている3次元モデルに組み入れて走らせる研究も始められている。

図3は、一次元数値モデルを用いて計算した、フレオンのオゾン層への影響予測結果の一例である（ローレンス・リバモア研究所のモデルによる）[3]、[4]。CFC11、CFC12の1980年の放出量を、オゾン層が定常状態になるまで続けたというシナリオで計算した例である[3]。オゾン濃度の減少量を、1980年のオゾン濃度に対する相対比で表わしてある。地表に到達する紫外線の光量は、気柱あたりのオゾン量（オゾン全量という）と直接関係するが、図3と同じシナリオで計算

したオゾン全量は、7%~5%減少している[3]。計算に用いる数値モデルに依存して、結果に若干のばらつきがある。図3が示すように、オゾン破壊の効果はフレオンの光解離がおこる高度40km付近で顕著である。ただし、オゾン層の中心は25~30kmであるから、オゾン全量の減少率は、40km付近のオゾン濃度減少率より小さくなる。しかし、フレオンのオゾン層破壊効果は、高度40km付近で顕著に検出されるので、オゾン層異変を早期に検出するためには40km付近を重点的に観測するのが有効である。

また、図3の実線は気温を固定した時、破線は気温のフィードバックを考慮に入れたものである。3節で述べたように、フレオンは赤外に吸収領域を持っているため、大気上層では再放出により、大気を冷却する。このため、成層圏上部では気温が低下し、化学反応速度が遅くなるので、オゾンの減少率がやや小さくなっている。炭酸ガスやメタン、亜酸化窒素の増加による効果を入れたら、この傾向はもっと顕著になる。しかし、だからといって炭酸ガスをフレオンと一緒に放出すればオゾン層の破壊を防止できる、などという議論は全く無意味である。地球の気温分布が変われば、大気の循環が変わってしまう可能性があり、異常気象、気候の変化などの、深刻な事態を引き起こされることは必至だからである。

図4は時間変化を追ってオゾン全量の減少を調べた結果の一例である[4]。地上から放出されるフレオンによってオゾン層が破壊されるまでには時間がかかるので、将来予測には、時間発展モデルが有効である。図4に示した計算では、CFCの放出量が1980年から2000年まで毎年3.0%づつ増加したとし、2000年以降は3.0%づつ増加（IV）、一定（V）、3.0%づつ減少（VI）を仮定している。放出量が増加し続けた場合にはオゾン全量が非線形的に減少しているのが注目される。

4. 観測結果の解析

1986年に、100名以上の科学者が参加してオゾントレンドパネルが組織され、成層圏オゾンの地上観測データ及び、人工衛星のデータの詳細な再検討が行われた[5]。地上観測ではドブソン計によるオゾン全量観測が最も古くから行われており、長期トレンドを検出するに適していると考えられる。しかし、実際のデータには、季節変動、準2年変動（26ヶ月）、太陽の11年周期など様々なスケールの自然の変動がのっており、長期トレンドを求めるのは容易でない。オゾン

Fig.3 Calculated percentage change in local ozone at steady state for constant CFC-11 and CFC-12 fluxes at 1980 rates relative to the atmosphere with no CFC. [3]

Fig.4 Changes in total ozone as a function of time relative to background atmosphere [4]

トレンドパネルにおいて、1969年から1986年までのドブソンデータが再検討され、自然現象に起因する変動を取り除いて長期トレンドが報告された。1969-1986年のデータから求めた 53° - 63° N, 40° - 52° N, 30° - 39° Nのそれぞれの緯度帯でのオゾン全量の減少率を求めたところ、年平均値で1.7-3.0%の減少率が求められた。特に冬に減少率が大きい。このようなはっきりとした減少傾向が発表されたのは、このオゾントレンドパネルが初めてである。

人工衛星のデータや、ウンケル法によるオゾン鉛直分布のデータも再検討された。成層圏上部までのオゾン観測は難しく、あまり多くのデータがないが、SAGEとよばれる衛星センサーによる観測結果とウンケル法、モデルによる予測値との比較がなされた(図5[5])。白い三角、四角は、SAGEの観測結果で、それぞれ北半球と南半球の、1979~1980年の観測値と1984~1985年の観測値との差を示している。また、モデルによる予測値、ウンケル法の観測値が示されている。ウンケル法は、精度や信頼性に問題が多いと考えられる。成層圏上部でのオゾン減少率はモデルとSAGEとの観測結果に食い違いがあり、モデルの妥当性や観測の信頼性にまだ検討の必要がある。

一方、南極では著しくオゾン濃度が減少しており、オゾンホールとして知られている。南極オゾンホールの形成には、特殊な気象条件と極域の冬季に出現するエアロゾル層が密接に関連しており、中緯度、低緯度で同じ現象がおこるというわけではない。しかし、フロンによるオゾン破壊を示す典型的な例であることには間違いないと考えられている。南極オゾンホールの詳細については、他の文献を参考にされたい(例えば[6])。

最近、オゾン層の異変を早期に検出しようとする努力が各国でおこなわれており、国立公害研究所でもオゾンレーザーレーダーを導入して高度45km付近までのオゾン濃度の観測を始めている。成層圏オゾン層の破壊はゆっくり進行するがゆえに、いったん起こってしまえばとにかえしのつかない環境問題であり、早期発見、予防に各方面の努力が必要なときである。

文 献

- [1]永田武、等松隆夫、「超高層大気の物理学」
物理学選書6、142-146頁(裳華房、1973)
- [2]松野太郎、島崎達夫、「成層圏と中間圏の大気」
大気科学講座、3巻、2章(東京大学出版会、1981)
- [3]Atmospheric Ozone 1985, WMO Report, NO. 16.

Fig.5 Changes (%) in mid-latitude ozone profiles from 1979 to 1987. [5]

- [4]Wuebbles, D. J., J.Geophys. Res., 88(1983), 1433-1443.
- [5]Watson, R.T., the ozone trends Panel, M. Prather, Ad-Hoc Theory Panel, M.J.kurylo, NASA Panel for data evaluation, NASA Reference publication, June 1988.
- [6]Polar ozone workshop, Abstracts, NASA Conference Publication, NO. 10014(1988).

On the destruction of ozone layer by CFC

Sachiko Hayashida-Amano
National Institute for
Environmental Studies
Onogawa 16-2, Tsukuba, Ibaraki 305

For more than a decade many researches have been done to study the harmful effects of CFC on the stratospheric ozone layer. Only recently, it became recognized that the total column of ozone is decreasing globally. The results of model assessments of the CFC effects on the stratospheric ozone layer and the recent analysis of ozone data are reviewed.

(Received on Feb. 1, 1989)