

オゾン層は修復できるか？

Protection and Production of Ozone in the Stratosphere

山部長兵衛*

Chobei Yamabe

1. はじめに

イギリスのジム・ラブロックが1970年に大気圏内のクロロフロロカーボン（CFCsまたはフロンと略称）の量の測定を開始し、フロンを検出した。その結果によると、測定されたフロンの量は過去数10年にわたり生産された総量に匹敵するものであった。この結果に注目したカリフォルニア大学のシェリウッド・ローランド、マリオ・モリナー等は対流圏に放出されたフロンの行方に注目した。その結果、対流圏で分解されなかったフロンの一部は成層圏に達し、それらが太陽光に含まれる紫外光によって分解し、塩素原子を生成して、この塩素原子がオゾンと反応しオゾンを破壊するというメカニズムを提案した¹⁾。1976年には、アメリカ気象庁と連邦大気研究センター（略称NCAR）が成層圏でのフロンの検出に成功し、また、ミンガン大学のジム・アンダーソンは成層圏での一酸化塩素ClOの検出（即ち、 $\text{Cl} + \text{O}_3 \rightarrow \text{ClO} + \text{O}_2$ の反応によりオゾン（ O_3 ）が分解されて生成される）を行ない、 O_3 とClの反応が実際生じていることを明らかにした。その後、1987年9月にはNASAにより南半球（南緯約60～70度）の高度18kmで観測されたオゾン（ O_3 ）濃度と一酸化塩素濃度との関係において、 O_3 の増減とClOの増減には、強い相関関係のあることが明らかとなった。

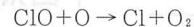
1984年にイギリスのジョ・ファーマンが南極上空でオゾンホールが生じることを発見し、この結果が1985年のネーチャ誌に掲載され²⁾、全世界がこの現象に注目するようになった³⁾。この測定結果によれば1975年から1984年にかけて、南半球の春（10月）におけるオゾン層は約半分減少しているというジョッキングなものであった。これらの警告がきっかけとなり、その

後、世界的規模のオゾン層保護に関する国際会議などが開かれ、1989年には特定フロンを2000年までに全廃するという「ヘルシンキ宣言」がなされている。

このような動向に対して、これまで我が国内では、上層大気気象関係者、放電工学関係者、化学・物理・通信関係の専門家および環境関係の専門家など個々の分野で研究・討論がなされていたが、近年になって、これらの異なった分野の人達が互いの情報交換や討論を行ない有機的・効率的な研究を行おうとする研究会が放電工学分野の人達を中心にもたれた。

2. フロンによるオゾン破壊

フロン（クロロフロロカーボンを一般的にフロンと呼ぶ）は、1928年に冷媒用として発見され、すぐれた化学的性質を多くもっていた。このため、冷媒としてのみならず、精密機械部品や電子部品の洗浄剤など、広い分野で使われてきた。フロンは、フッ素、炭素および塩素の重合体であり、フロンが分解すると、塩素（Cl）が放出される。ただし、フロンは化学的に極めて安定で地表面付近の大気中で分解することはほとんどなく、長時間をかけて成層圏まで拡散する。成層圏まで拡散したフロンは、太陽光線に含まれる紫外光により分解され、塩素が成層圏に放出される。塩素は次式で示されるオゾン破壊反応により、少量の塩素で効率よくオゾンを壊す。



（正味の反応） $\text{O}_3 + \text{O} \rightarrow 2\text{O}_2$

オゾン破壊に関わるClとClOをまとめて塩素酸化物（ ClO_x ）と呼ぶ。上記反応が一巡すると、オゾン（ O_3 ）は O_2 分子に変換され、濃度が減るが、 ClO_x は濃度を減ずることなく、再びオゾン消滅反応にかかわっていく。

他方、フロンが光分解することにより生じる ClO_x

* 佐賀大学理工学部電気電子工学科教授
〒840-8502 佐賀市本庄町1番地

とバクテリアが大気中に放出した亜酸化窒素 (N_2O) から窒素酸化物 (NO_x) が生じ、 ClONO_2 なる塩素化合物が形成され、成層圏のオゾン破壊は、ある程度抑制されていると考えられる。

3. オゾン層修復案

3.1 大電力電磁波を上空に照射

地上から周波数 2 MHz前後の大電力ラジオ波を放射し、電離層下部における加熱効果を利用して電離を促進して電子密度を増す。電気的に負性ガスである塩素原子Clは容易に塩素イオン Cl^- に変換される。Cl⁻はClに比べて $\text{Cl}^- + \text{O}_3 \rightarrow \text{Cl}^- + \text{O}_2$ の反応速度が小さく、 O_3 を破壊させる働きがClに比べ小さい。また、HClなどの形にして除去する可能性もある。

この研究グループとしては、カリフォルニア大学 (UCLA)、米国連邦大気研究センター (NCAR)、ロスアラモス国立研究所、ローレンスリバモア国立研究所 (LLNL)、海洋大気庁などの大学、研究機関と我国の郵政省通信総合研究所などがある。

世界的共同研究では、米国、アラスカにある電波照射施設を使い、室内実験で証明された電波によるオゾン層保護の効果を実際の大气中で確かめるのが目的である。

3.2 高層航空機によるオゾン発生装置の曳航

高層航空機としては、すでにジャンボ機が成層圏近くの高度を飛び、コンコルドなど超音速飛行機は成層圏を飛行している。これらの高層用航空機を利用して、高度約20~25km (この高度での気圧は約 5×10^3 Pa)の上空において、これらの後部よりグローまたはコロナ放電発生用ケーブルを延ばし、オゾンを生ずる。また、周囲にフロンまたは塩素原子Clが存在すれば、放電により塩素原子を負イオン化させ、オゾンとの反応を抑制することも可能であろう。この場合には、コロナ放電等による通信ノイズ防止用として、例えばメッシュ状シールドの様なものを設置する必要がある。更に、超音速飛行機から排出されるNOによるオゾンの減少が心配であるが、この割合が以前に考えられていたよりも著しく少ないことが明らかになってきた。

この方式は、物理的に可能であるが、航空機を飛ばすに必要なエネルギーが余分に必要であり、また化石燃料を消費することになれば、地球温暖化の面から別の問題が生じるかもしれない。

3.3 バルーン搭載式オゾン発生装置による補給

バルーンを利用してオゾン層を修復する考えは、

1989年4月にイギリスの環境保護団体 (Ozone Help : OH) により提案された。この内容は、オゾン発生器を積み込んだ気球3台を北極圏の約45km上空にあげてオゾン層の修復を試みるものである。オゾン層修復に用いられるオゾン発生器は、家庭で使われているものの大型版で、15kVの高電圧でオゾンを生ずさせる。電源としては、太陽電池を利用し、他の観測用計器と合わせて気球3台に積む機器の重さは約2トンである。予定の空域にうまくとどまれば、太陽電池を利用して6ヶ月間オゾンを生ずし続けることになる。また、バルーンに紫外光発生用ランプを搭載して、高度約30kmのところでおゾンを生ずさせる方法も提案されている。この方式では、静止または気流にまかせた状態でオゾンを生ずさせることになり、拡散のみで供給領域が決定されるという問題がある。従って、特定の限られた領域を対象とした補給に適している。

3.4 人工衛星からのレーザー光またはイオンビームの照射による補給

レーザー光を用いる方法は、酸素分子の吸収のうちシューマン・ルンゲ連続吸収帯の特に、波長157nm付近に着目するものである。 O_2 および O_3 に対する吸収断面積を図1に示す。即ち、図1よりこの波長付近では酸素分子の吸収断面積 $\sigma(\text{O}_2) \approx 6.32 \times 10^{-22} \text{m}^2$ がオゾンのそれ $\sigma(\text{O}_3) \approx 1.6 \times 10^{-22} \text{m}^2$ に比べて約4倍大きい。従って、発振波長157nmのフッ素 (F_2) レーザを空气中または酸素中に照射した場合には、紫外光によるオゾンの分解よりも酸素分子の紫外光吸収による解離とオゾンの生成が十分に期待できる。デュッセルドルフ大学のピオール等は繰り返し動作15Hzの F_2 レーザ (最大出力4 mJ/パルス) を用いて、 $3.75 \text{Torr} (= 4.9 \times 10^2 \text{Pa}) \leq P(\text{O}_2) \leq 37.5 \text{Torr} (= 4.9 \times 10^3 \text{Pa})$ の圧力範囲で生成オゾン濃度を封じ切り容器を用いて測定し、オゾンの生成と破壊が平衡に達するには各々約15分 ($4.9 \times 10^2 \text{Pa}$) および80分 ($4.9 \times 10^3 \text{Pa}$) を要し、このときの最大生成オゾン濃度 $n(\text{O}_3)/n(\text{O}_2)$ は1.6% (O_2 中) および4.1% (空气中) であった。また、数ppmのクロロフロロカーボン CF_2Cl_2 (CFC12) を純酸素に加えると、10~20%のオゾン生成効率の減少が測定されている。他方、我国の F_2 レーザの現状としては、動作圧力範囲8~13気圧でレーザーの出力エネルギー110~180mJ/パルス (出力エネルギー密度 $1.3 \text{J}/\ell \sim 2.7 \text{J}/\ell$) のものがすでに報告されている。

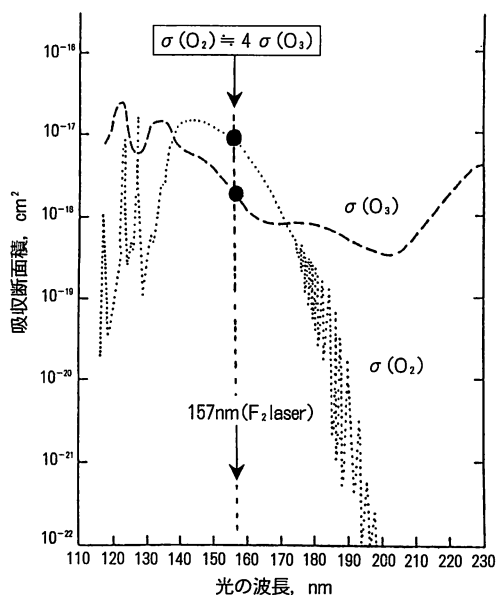
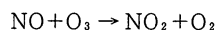


図1 O₂およびO₃の光の吸収断面積 ($\sigma(O_2)$, $\sigma(O_3)$)

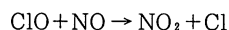
3.5 地上での赤外レーザーの利用

地上の相対する二つの山を利用して、波長8.5~12 μm の赤外レーザーによるクロロフロロカーボン (CFCs) を多光子解離を利用して分解する方法がプリンストン大学のスティックスにより提案されている。これは、二つの山に設置された大きさが2 m \times 2 mの多数のミラーを用いて、レーザービームを山と山の間で500回往復させることにより、山と山の間を通過して上空に上昇途中のCFCsを分解、イオン化することによりHClなどに転換して雨などで地上に戻してしまい、上層のオゾンの破壊を抑制しようとするものである。エネルギー的な検討が行われているが、現状では経済的に問題があるようだ。

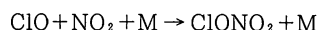
上記で述べた他に、NO_xの利用が考えられる。ClOとNOは共にO₃を減少させる働きをするが、共存する場合には次に示すような別の反応が生じる。成層圏における



反応速度定数が $10^{-16} \sim 10^{-14} \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ であるのに対して、



のそれは $10^{-11} \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 程度で反応が進みやすい。



の反応では $10^{-31} \text{cm}^6 \cdot \text{s}^{-1}$ 程度であるが、大気粒子密度が $10^{17} \sim 10^{18} \text{cm}^{-3}$ であるから、はじめの反応式に比べて起こりやすい。また、ClONO₂はHClと共にClを

地上に運んでくるので、O₃の分解を減少させ、Clの除去をも行うことになる。

4. オゾン発生器によるオゾン層修復の可能性^{4)~8)}

オゾン層を保護する手段としては、前述のごとく(1)オゾンの破壊をもたらすClO_xの放出の制限、抑止、(2)成層圏大気中のClO_xの除去、(3)O₃の直接補給が考えられる。工業的ないしは実験的に得られている数値をもとに、主に(3)に注目して、エネルギーの面から検討する。

1970年~1990年にかけて南極の昭和基地で観測されたオゾン量の平均値は約300DU (ドブソンユニット; 1DUは1気圧の状態でもオゾン層の厚さが0.01mmになる)である。近年、オゾン量はほぼ0.7%/年で減少していると言われている⁷⁾。単純にこの減少量のオゾンを電氣的に生成する場合、地球の表面積(=510.9 $\times 10^6 \text{km}^2 = 510.9 \times 10^{16} \text{cm}^2$) \times 0.3cm \times 0.007 = 1.07 $\times 10^{16} \text{cm}^3$ の体積に相当する。これはほぼ2.29 $\times 10^{18} \text{g}$ のオゾンに相当する。今、実験室で酸素原料を用いて得られているオゾン生成効率約200gO₃/kWhのものを使用するとして1.1 $\times 10^{11}$ kWhの電力が必要になる。オゾン発生器が100%稼動するものと仮定すると、1.26 $\times 10^7 \text{kW}$ という非常に大きな発電装置が必要となる。この値は、約100万kWの大規模発電所10個分に相当する。このような莫大な電気をどのようにして得ることができるであろうか?

今、これを太陽光エネルギーから得ることを考えてみる。成層圏では太陽光エネルギーは、ほぼ1.2kW/m²と見積もることができる。太陽電池の電力変換効率をほぼ15%と見積もる。発電可能時間を平均12時間/日とすると、期待できるオゾン生成量は、1.2 $\times 12 \times 0.15 \times 200 = 432 \text{g/日}$ となる。これを標準状態に換算するとほぼ200 μl 、厚さに換算すると1m²として1.1cmとなる。以上は1m²で計算しているの、1km²当り10m²の太陽電池を用いたとして1.1 $\times 10^{-5} \text{cm} = 11 \times 10^{-5} \text{mm}$ である。極端な単純化であるが、前述の減少3mm \times 0.7 (%/年)を365日で割れば、1日の減少量は5.8 $\times 10^{-5} \text{mm}$ となり、それほど不可能な値とは言えない。

実際には、ClO_xなどの量などによりオゾンの減少量も変わる。このため、ClO_xやO₃の分解速度の詳細な実測やシミュレーションをもとに、今後さらに検討する必要がある。

5. おわりに

ここでは、オゾン層破壊に対する修復のためのごく初歩的な方法を提案、紹介し、その概略を述べた。本文で述べた対象がグローバルなものであり、種々のパラメータが関与しており、解析が難しい。しかしながら、おおざっぱな評価であるが、局所的なオゾン層修復もあながち不可能ではないとの感触が得られた。

参考文献

1) F. S. Rowland and M. Molina ; Nature, 249 (1974)

810-812.

- 2) J. Farman ; Nature, 315 (1985) 207-210.
- 3) 山部長兵衛, 堀井憲爾; オゾンホールに対する補給の可能性, 放電研究No.131 (1991) 30-35.
- 4) 山部長兵衛; オゾン発生器によるオゾン層修復の可能性, 日本物理学会シンポジウム, 29pYF3 (1997)
- 5) 堀井憲爾, 山部長兵衛; オゾン層は放電で救えるか, 電気学会誌, 111 (5) (1991) 413-416.
- 6) 堺孝夫; オゾン層保護のためのプラズマ化学, 応用物理, 60 (7) (1991) 691-694.
- 7) 岩坂泰信; オゾンホール, 学術月報, 50 (5) (1997) 446-453.

協賛行事ごあんない

日本機械学会関西支部ウィークエンドセミナー'99

「今話題の新製品開発成功のポイント」

〔日 時〕 1999年11月12日 (金) 9 : 15~17 : 00

〔申込先〕 日本機械学会関西支部

〔会 場〕 建設交流館 グリーンホール

Tel : 06-6443-2073, Fax : 06-6443-6049

(大阪市西区)

[http : //www.jsme.or.jp/ks/](http://www.jsme.or.jp/ks/)

〔内 容〕 乗り物と情報関連機器について7件