

# 「人間活動は地球大気をどう変えたか」

(F. S. ローランド博士の講演から)

環境管理センター 加瀬野 悟

新聞紙上に掲載されない日がないくらい関心の高まっている地球環境問題の中で、全世界的に最も議論されその取り組みがなされようとしている問題は「フロンガスによるオゾン層破壊」であろう。この問題を世界で初めて指摘、そのメカニズムの理論的解析と予測を明らかにした F. シャーウッド・ローランド博士（カルフォルニア大学）が本年（1989年）の春、日本国際賞授賞のため来日し、4月14日国立京都国際会館で行われた博士の記念講演を聞く機会に恵まれた。「人間活動は地球大気をどう変えたか」と題した卓越した洞察力と最新データに基づく講演であった。以下にその講演の内容を簡単に記してみたい。

1971年にフロン11に代表されるフロンガスが地球大気に広く存在していることが明らかになり、1973年に「研究室でわかっている結果をもとにフロン11は大気中で最終的にどうなるのかを決定できるか」という研究を米国原子力庁に提案しマリオ・J・モリナ博士と共にこの問いに対する答えを捜し始めました。そして1974年に「環境中のクロロフルオロメタン類」と題する論文を発表し、その中でフロンガスの大気中での破壊のメカニズムの解明と将来予測について述べました。その当時世界の全フロンの生産量はすでに年間100万トンに達していました。

大気中での化学物質の破壊は、通常以下の3つのプロセスのいずれかによって行われています。

1) 塩素ガス ( $Cl_2$ ) のような色のついたガスは太陽光線の可視光や紫外線を吸収しばらばらに分解されます。2) 塩化水素ガス ( $HCl$ ) は水滴に解け雨と共に大気中から除去されます。3) メタンガス ( $CH_4$ ) は酸化力の強い分子種（オキシダント）と反応します。

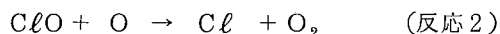
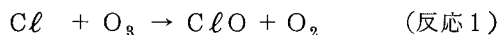
しかしフロンは透明で、水に溶けることもなく、オキシダントに対しても全く不活性です。したがってフロンは破壊されず、何十年も大気中にこもり、漂うこととなります。それではフロンはどのようなプロセス（非常にゆっくりとしたプロセスですが）によって分解されるのでしょうか。

地球の大気圏の一番高い所に届く太陽の紫外線は3つのエネルギーレベル（UV-A, UV-B, UV-C）に分けることができます。フロンはUV-AとUV-Bを透過させますが、最も高いエネルギーをもつUV-Cは吸収し分子が破壊されてしまいます。一方、地表から30~50km上空では大気中の酸素分子 ( $O_2$ ) がUV-Cを吸収して2つの酸素原子に分解されますが、この酸素原子は他の酸素分子とくっつきオゾン ( $O_3$ ) が作られます。これが成層圏オゾン層です。このオゾンはUV-CとUV-Bを吸収するため、太陽からのUV-Cは地表から25kmより低いところには通

り抜けてきません。こうして地表面に届くのはわずかな量の UV-B だけとなります。

フロンはこの「オゾンによる遮蔽層（成層圏オゾン層）」によって守られており、UV-C にさらされるのは高度 30km 以上の  $O_2$  や  $O_3$  の層より上に出ていった場合だけです。この位置では  $CCl_3F$  などのフロンは UV-C を吸収し、非常に反応性の高い自由塩素原子  $Cl$  と反応性の高い  $CCl_2F$  に分解されます。このようにフロンはオゾン遮蔽層の上にある中間成層圏で破壊されますがそれまで平均して 75～100 年間存在し続けます。

さてフロンの分解によって生じた塩素原子はすぐオゾンを攻撃して一酸化塩素ラジカル  $ClO$  を形成し（反応 1），この  $ClO$  は酸素原子と衝突し再び  $Cl$  を放出します（反応 2）。



この反応には 2 つの重要な側面があります。第 1 にはオゾンが酸素に転換することです。第 2 にはこの連続反応によって塩素原子が再び塩素原子に戻り、再び一連の反応が開始できることで、何等かの別のプロセスで中断されるまで何千回も繰り返されます。一つの塩素原子が降下して雨滴に捕らえられるまで約 10 万個のオゾン分子を破壊してしまいます。すなわち何百万トンというフロンの大気中への放出が 10 万個の連鎖によって増幅されて大気中のオゾン量を地球規模で減少させることとなります。1974 年にモリナ博士と私（ローランド博士）はフロンを大気中に放出し続けるならば世界中のオゾンは平均で 7～13% 減少するだろうと予測しました。

地球規模のオゾンの大規模な減少は 2 つの重要な結果をもたらします。第 1 に UV-C と UV-B の一部が、上部大気圏で吸収されるため高い高度で大きなエネルギーが投入され、成層圏（高度が上がるにつれて温度が高くなる領域）が作られること、第 2 には成層圏オゾンが失われこれまで以上の UV-B が地上に到達するということです。

成層圏オゾンの遮蔽層は地上のあらゆる生物を保護しています。UV-B は人間の皮膚ガンの大きな原因となっていますし、オゾンの減少はプランクトン、農作物の収穫、その他の生物システムにも大きな影響を与えると予測されています。また成層圏の温度構造の変化によって風向きのパターンが変化し気候の変動をもたらすでしょう。

フロンの大気圏内の濃度は過去 15 年間着実に増加してきており、その他の微量ガスの大気中の濃度も急速に高くなっています。炭酸ガスは 1958 年以来 10%、メタンは 1978 年以来 12% 増加し、一酸化二窒素 ( $N_2O$ ) も毎年 0.2% づつ増えています。また地球表面に近いオゾン濃度も着実に増加し続けており、これらのガスは地球から外へ向かう赤外線を遮るため「温室効果」によって大気圏を温暖化させています。この温室効果の最も大きな原因は石炭、石油、ガス、熱帯林などの燃焼で放出される炭酸ガスです。これらの微量ガス濃度の増加に伴い、地球の平均気温が上昇し 21 世紀半ばまでには約 3℃ 上がるでしょう。こうした気温の上昇は海面の上昇など様々な地球物理学的変化をもたらします。

1980年代には、大気圏に新しい現象が現れました。南極上空では毎年、オゾンの大規模な減少が起こっており、ある高度での減少率は98%に達し、大気圏全体でも60%にもなっています。この南極上空の「オゾンホール」が発生するのは、先ほど述べたC<sub>l</sub>Oによる連鎖反応によってであり地上の研究室や南極上空を飛ぶ飛行機での実験から、大気中に大量に存在する塩素（特にフロンから塩素）が原因であることが確認されました。過去50年間の北緯30度から65度の観測ステーションでのオゾンの測定から、北半球でも数%のオゾンの減少が認められています。また1989年の北極探検でも成層圏のC<sub>l</sub>O濃度が高くなっていることが明らかになり、北極でも南極と非常に似ていることがわかりました。

1970年代後半にはこの成層圏オゾンの減少についての懸念が高まり、米国、カナダ、スウェーデン、ノルウェーではエアゾール製品に使用するフロンの使用が禁止されました。しかし別の分野、特にエレクトロニクス部品の洗浄でフロン113が大量に使用され始め、1974年以降もフロンの放出量は毎年100万トンの水準にあります。このフロンの放出を世界的に規制することが最初に合意されたのは、1987年の国連環境計画のモントリオール議定書によってでした。当初の目標は1998年までにフロンの放出量を現行水準の50%まで削除しようというものでした。そしてこの1年ほどの間にフロン規制の強化をめぐるいくつかの大規模な国際会議が開かれ、特定フロンの今世紀のできるだけ早期の全廃が世界的動向になってきました。そしてフロンの代替品の開発も積極的に進められています。

しかしフロンの寿命は最初に述べたように非常に長いので、どのような規制措置がとれたとしても、大気中の塩素濃度は今後100年から200年にわたって高い値を示すでしょう。さらにフロンの大気圏から成層圏に移動するには数年かかるので、成層圏オゾンの減少が最大になるのは、フロンの大量放出が停止してから10年もしくはそれ以上たってからのことになるでしょう。

フロン以外の微量ガスの規制はフロン以上に難しいでしょうが、その濃度が高まり続けるならば何等かの規制が必要になるかもしれません。