

**1989年(第5回)日本国際賞受賞者
環境科学技術分野**

受賞対象業績：
クロロフルオロカーボン(フロンガス)による
成層圏オゾン層破壊のメカニズムの研究

**Laureate of the 1989 Japan Prize
in the Environmental Science and
Technology Category**

Citation for award: Studies on the mechanisms of stratospheric ozone depletion by chlorofluorocarbons



F. シャーウッド・ローランド博士(米)
Dr. F. Sherwood Rowland (U. S. A.)

カリフォルニア大学教授。1927年生まれ。
光化学を研究していた博士は1974年、フロンガスによる成層圏オゾン層破壊のメカニズムを世界で初めて指摘、その理論的解明と予測を明らかにした。

すなわち、各種スプレーの噴射剤あるいは冷蔵庫・エアコンなどの冷却ガスとして広く一般に使われているフロンガスが、オゾンを分解して、地上の生物を紫外線から守る成層圏オゾン層が破壊されるおそれがあると発表。フロンガスの放出を減らさなければ、地球の全オゾン層の減少は、最終的には7~13%にも達すると警告した。

博士の卓越した洞察力によって導かれたこの理論の正しさは、その後世界の多くの専門家によって実証され、成層圏オゾン層保護の対応において国際的、社会的に大きな影響を与えた。

Professor at University of California Irvine. Born in 1927.

In 1974, Dr. Rowland, who studied physical chemistry, was the world's first scientist to point out the mechanisms by which chlorofluorocarbons could destroy the ozone layer, which protects life on earth from harmful ultraviolet solar radiation.

He also predicted that if emission of chlorofluorocarbons continues at a current rate, it would eventually result in a 7-13% loss of the total ozone.

Dr. Rowland's theoretical insights and predictions have been verified by scientists throughout the world, and have done much to strengthen international efforts for the preservation of stratospheric ozone.

人間活動は地球大気をどう変えたか

F.シャーウッド・ローランド

1971年、人工の不活性ガスであるトリクロロフルオロメタン（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ました。フロンガスは、クロロフルオロカーボンとも呼ばれ、商品名としてはCFC-11（フロン11）が有名です（化学式は CCl_3F ）。この観察結果は、大気圏を研究している科学者に、まさに異例の難問を提供しました。それは、「研究室の中でわかっている結果をもとに、大気中で最終的にフロン11がどうなるかを断定するのは可能か」という問題でした。私は、1973年に米国原子力庁に対してこのような研究を提案し、その後、同僚のマリオ・J・モリナ博士とともに、この問いに対する答えをさがし始めたのでした。

ところで、当時すでに数種類のフロンガスが産業で使われ、たとえば、冷蔵庫の冷却剤、ポリマーの発泡剤（発泡スチロールを作るときに使う）エアゾールスプレー用のガス、エレクトロニクス部品の洗浄用として成功を収めていました。このような利用の仕方は、ほとんどが、最終的にはフロンを大気中に放出することを意味していました。過去20年間、世界の全フロン生産量は5～7年ごとに倍増し、1974年には年間100万トンの規模にまでなったのです。

大気による化学物質の除去、つまり大気中の化学物質の破壊は、通常3つのプロセスのいずれかによって行われています。まず、緑色の塩素ガス（ Cl_2 ）のように色のついたガスは、太陽光線の中の可視光を吸収し、ばらばらに分解されます。同じようなことは、目に見えない紫外線を吸収したときにも起こります。第2に、塩化水素（ HCl ）のようなガス

は、水滴に溶けることができ、雨とともに大気中から除かれます。第3に、メタン（ CH_4 ）などのガスは、水酸基（ HO ）のような酸化力の強い分子種（オキシダント）と反応してしまいます。

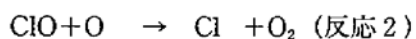
ところが、フロンは透明で、水に溶けることもなく、しかもオキシダントに対して全く不活性なのです。このように、フロンには通常の除去プロセスが通用しないので、何十年にもわたって大気中にこもり、漂うことになるのです。これを破壊するような現象が急速には起こらないとすれば、いったいどんなプロセス（ゆっくりとしたプロセス）が大気中のフロンの運命を定めているのでしょうか。

地球の大気圏の一番高いところに届く太陽紫外線は、3つのエネルギー領域に分けて考えることができます。これらはそれぞれ、UV-A、UV-B、UV-Cと呼ばれていて、3つの中ではUV-Cがもっとも高いエネルギーをもっています。フロンの分子はUV-AとUV-Bに対しては透明で、透過させてしまいますが紫外線UV-Cは吸収して、その過程で分子が破壊されます。

一方、大気中には酸素（ O_2 ）が大量に存在しており、地表から30～50kmの上空では、この酸素が同じくUV-Cを吸収して、2つの酸素原子に分解されます。この酸素原子は、ほかの酸素分子（ O_2 ）とくっつき、3つの酸素原子でできたオゾン（ O_3 ）が作られます。オゾンは、UV-CとUV-Bの両方、あるいはいずれかを吸収するので、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、地表面まで届くのは、わずかな量のUV-Bだけとなるのです。

フロンはこの“オゾンによる遮蔽層”によって守られており、UV-Cにさらされるのは、大気中のO₃やO₂より上に漂い出ていった場合だけです。この高度は30km以上です。この位置では、CCl₃Fなどのフロン分子は紫外線UV-Cを吸収し、そして非常に反応性の高い自由塩素原子Clと、これまた反応性の高いCCl₂Fへと分解されます。フロン分子は、最終的には、オゾン遮蔽層の上にある中間成層圏でUV-Cによって破壊されますが、それまで平均して75~100年間存在し続けるのです。

不活性なフロンとは異なり、新たに放出された塩素原子は、すかさずオゾンを攻撃し、オゾン分子から酸素原子を1つ取り込んで、一酸化塩素ラジカルClOを形成します（反応1）。このClOは、素早く自由な酸素原子と衝突し、再びClを放出します（反応2）。



反応1と反応2の組合せには、2つの重要な側面があります。第1に、これらの反応のネットの変化は、オゾンが通常の酸素に転換することだという点です。第2に、塩素原子は、こうした一連の反応を再び開始できるということです。こうした連続する反応は「触媒連鎖反応」と呼ばれ、何らかの別のプロセスによって中断されるまで、何千回も繰り返されます。成層圏においては、平均的なCl原子は、降下して雨滴に捕らえられるまでに、最終的には約10万個ものオゾン分子を破壊してしまいます。何百万トンというフロン分子の大気中への放出は、10万個の連鎖によって増幅され、大気中のオゾン量を地球規模で減少させる大きな原因となるのです。1974年に、

モリナ博士と私は、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%から13%減少してしまう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つの重大な結果をもたらします。第1に、太陽光線のうちのすべてのUV-CとUV-Bの一部が、上部大気圏で吸収されてしまうので、高い高度で大きなエネルギーの投入が起こり、実際には成層圏（高度が上がるにつれて温度が高くなる領域）が作り出されてしまうことです。第2は、成層圏オゾンが失われるために、これまで以上の太陽のUV-Bが地上にやってくることです。

成層圏オゾンによる“遮蔽層”は、地上に生きるあらゆる生物を保護しています。そこで、UV-Bの量が増えることは、多くの生命システムに危害をもたらすこととなります。太陽の紫外線UV-Bは、人間の皮膚ガンの大きな原因となっています。したがって、オゾンが減少すれば皮膚ガンが増えることになるでしょう。この病気は、すでに米国だけで毎年40万件も新たに発生しており、その数は全世界ではもっと大きくなります。オゾンの減少は、プランクトン、農産物の収穫、その他多くの生物システムにも影響を与えると予想されます。そして、成層圏内の温度の構造が変化し、風向きのパターンが変わり、最終的には気候の変動がもたらされるでしょう。

主なフロンの大気圏内の濃度は、過去15年間に着実に増加してきています。この事実は「フロンの大気圏における寿命は75~100年である」という当初の推定の正しさを確認するものです。と同時に、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（二酸化炭素）は1958年以来約10%増えました。メタンは1978年以来12%増えています。一酸化二窒素（ N_2O 、亜酸化窒素）も毎年0.2%ずつ増えています。また、地球表面に近いオゾン濃度も着実に増え続けています。これらのガスは、いずれも地球から外へ向かう赤外線をさえぎってしまうので、「温室効果」によって大気圏を温暖化させています。温室効果をもたらしている大きな要因は、石炭、ガス、石油、熱帯林などの燃焼で放出される炭酸ガスです。

これら微量ガスの濃度が高まるにつれて、地球の平均気温が上昇し、21世紀の半ばまでには約3℃は上がるでしょう。こうした気温の上昇は、さまざまな地球物理学的な変化を伴うでしょう。海面の上昇、より強力なハリケーンの多発、湿地帯と乾燥地帯の交替、南極や北極の水の溶解などが見られるでしょう。

1980年代には、大気圏に新しい現象が現われました。いまや南極上空では、毎春、オゾンの大規模な減少が起こっているのです。ある高度での減少率は実に98%にもものほり、大気圏全体を通してみると、その率は60%に達します。こうしたオゾンの減少は、化学反応と気象現象の組合せで起こっています。冬の暗い期間には、南極の成層圏は非常に寒くなり、極成層圏雲(PSC)が形成されます。PSCは、成層圏での塩素と窒素の化学反応を乱し、春になって成層圏が暖かくなり、PSCがなくなるまで、ClOによる触媒反応が何週間も中断されることなく続くのです。地上の研究室や南極上空を飛ぶ飛行機での実験によって、南極上空の「オゾンホール」の主な原因は、

大気中に大量に存在する塩素（特にフロンからの塩素）であることが確認されました。

過去50年間、オゾンの測定は多数の地上ステーションから行われてきました。これらの観測ステーションのほとんどは、北緯30度から65度の間にあります。こうして得られたオゾンのデータを統計的に分析した結果、平均すると北半球でも数%のオゾンの減少が認められました。減少は冬期に顕著で、夏期はそれほどではありません。1989年の北極探検では、北極でもPSCが存在すること、また、成層圏の一酸化塩素ラジカル(ClO)濃度が非常に高くなっていることが明らかになりました。北極も南極の場合と非常によく似ていることがわかりました。

塩素が引き起こす成層圏オゾンの減少についての懸念が高まり、1970年の終わりになって、米国、カナダ、スウェーデン、ノルウェーの各国で、エアゾール製品に使われるフロンの使用が禁止されることになりました。ところが、別の分野、特にエレクトロニクス部品の洗浄で、フロン113が新たに大量に使われるようになり、1974年以降も、フロンの放出量は毎年少なくとも100万トンという水準が続いています。

フロンの寿命は非常に長いので、将来どのような規制措置がとられるかとは関係なく、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保ち続けるでしょう。さらに、フロンが大気圏から成層圏に移動するのに数年はかかるので、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になるでしょう。

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%にまで削減しようというものでした。しかし、こうした部分的な禁止が実施されても、大気中の塩素の総量は何十年にもわたって増加し続けます。主要なフロン生産企業、生産国の多くは、今後数十年の間に、フロンの生産を完全に停止することに同意しています。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。フロン以外の微量ガスの規制はもっとむずかしいでしょうが、その濃度が高まり続けるようであれば、何らかの規制が必要になるかも知れません。