



平成16年度（第13回）ブループラネット賞
受賞者記念講演会

財団法人 旭硝子財団

THE ASAHI GLASS FOUNDATION

目次

| | |
|---|----|
| 受賞者紹介 | |
| スーザン・ソロモン博士 | 1 |
| 記念講演 | |
| 「オゾン層破壊と気候変動：極から極へ単独旅行」 | 3 |
| 受賞者紹介 | |
| グロ・ハルレム・ブルントラント博士 | 17 |
| 記念講演 | |
| 「持続可能な開発に向け世界的に 民主主義に則った活動と責任を推進しよう」 | 19 |
| ブループラネット賞 | 29 |
| 旭硝子財団の概要 | 31 |
| 役員・評議員 | 32 |

受賞者紹介

スーザン・ソロモン博士（米国）

Dr. Susan Solomon

米国海洋大気庁 高層大気研究所 上級研究員



受賞業績

『南極のオゾンホール生成機構を世界で初めて明らかにし、オゾン層の保護に大きく貢献した業績』

略歴

1956年 1月19日 米国シカゴで生まれる
1977年 イリノイ工科大学卒業 化学BS取得
1981年 カリフォルニア大学バークレー校 化学PhD取得
1981年 Research Chemist, the Aeronomy Laboratory, NOAA
1985年～ Adjoint Professor, Department of Astrophysical, Planetary and Atmospheric Sciences, University of Colorado
1988年 Program Leader, Middle Atmosphere Group of the Aeronomy Laboratory, NOAA
1990年～ Senior Scientist, Aeronomy Laboratory, NOAA
1992年～ 全米科学アカデミー会員
1995年～ フランス科学アカデミー外国人会員

主な受賞歴等

2000年 米国気象学会 Carl-Gustaf Rossby 賞
2000年 The National Medal of Science

成層圏オゾン層の破壊に伴う太陽からの有害な紫外線の増加の懸念から、二十世紀末の地球環境問題で最も注目を集めた南極上空のオゾンホール。それが発見される前の諸説で、オゾン層の減少は1世紀の間に数パーセントと考えられていた時に、より規模が大きく急激なオゾン層の減少という劇的な発見がなされ問題がクローズアップされました。

ソロモン博士はこのオゾンホールがどのようにして出来るかを世界で初めて明らかにしました。博士らは南極の成層圏に見られる非常に冷たい雲の粒の表面が関わる不均一系の塩素化学反応をとりいれた仮説を提唱し、1986年と87年の二度にわたり南極でオゾン層の実地観測を行って仮説の検証に成功しました。これにより、オゾンホールは大気中に増加した塩素と南極の極低温環境が相まって発生すること、そして塩素供給源としてのフロン(CFCs)との因果関係が明らかになりました。その結果、「オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書」が90年に改定され、全廃の方向が決まり、オゾン層の保護に大きく貢献しました。

ソロモン博士はイリノイ工科大学で化学を学んだ後、カリフォルニア大学バークレー校で大気化学を専攻し、博士号を取得、卒業後、1981年に米国海洋大気庁に入り、現在に至るまで、そこで大気化学の研究を続けています。

70年代末から春先の9月から10月にかけて、南極上空で、その広がり（南極大陸全体）と程度（70年代以前と比較すると半分近くのオゾンが破壊された）において大規模な、極端なオゾン量の減少（オゾンホール）が観測されたことが80年代半ばになって公表されました。博士はこのデータに大変興味を持ち、これを説明するため、南極上空特有のマイナス80度の極低温大気条件の下に形成される雲（極域成層圏雲）が関わる不均一系反応に基づく仮説を発表しました。

この中で博士は、気相中ではあまり起こらない塩酸と硝酸化塩素の反応が、極域成層圏雲中の極低温微粒子表面

では非常に速く起こって硝酸と塩素を生成し、次にこの塩素が、南極に太陽の陽が初めて射す春に、光分解して塩素ラジカルや酸化塩素、二酸化塩素等となり、そして、これらの活性な塩素種がオゾンに極めて高い効率で破壊すると説明しました。この仮説はオゾン破壊に直接関わる塩素ラジカルの生成を説明できるばかりでなく、高濃度の活性な塩素種の存在をも説明できた点で画期的でした。

博士はオゾンホールが存在を確認し、生成機構を明らかにするために、86年8月末に弱冠30歳で調査遠征隊のリーダーとして南極に赴きました。数種類の方法でオゾンの減少を測定し、生成機構解明の鍵となる化学物質の測定を行いました。活性塩素濃度を測定したところ、気相化学反応で説明する濃度のおよそ100倍以上もあり、間違いなく博士の提唱した不均一系反応が関与していることがわかりました。翌年、再び第二次遠征隊を率いて南極に赴き、前年よりさらにオゾン破壊がひどくなっていることを観測しました。

博士はこれまでに150報以上の論文を執筆ないし共同執筆し、2冊の本を著しています。最近出版された「これまでで最も寒い3月」(The Coldest March)では、南極点に到達しながら生還できなかった Scott 隊が何故生還できなかったかを当時の記録と最近の気象データを比較し、彼らが不運にも、南極でも特異な気象条件に遭遇したことが原因であることを示しました。またこの本で、博士はスコット隊の人々の南極探検にあたっての人となり素晴らしく記述し、浮かび上がらせています。

博士は科学者としての社会貢献にも深く関心を持ち、環境問題等について科学の果たすべき重要な役割を認識し大切にしています。科学を通じて、何が起きているのか、何故そうなるのか、自然、そして環境問題の原因、に光を当て、無知により生じる危険から社会を守ることに務めています。

オゾン層破壊と気候変動：極から極へ単独旅行

スーザン・ソロモン博士

1. はじめに

私はこのような素晴らしい賞をいただき大変光栄に存じますとともに恐縮しております。このような大変な名誉に対して深い感謝を表すのに最もふさわしいのは、この講演で、旭硝子財団の理念を十分に踏まえ、環境問題への理解、とりわけ環境の変化は国境、世代そして時には科学的想像力の域さえも超える問題であることへの理解を高めることであると考えています。オゾン層破壊の問題には、多くの側面が関与しています。物質の各相（ガス、固体および液体）という側面、科学的な発見の各段階、そして一般の人々の認識とグローバルな政策決定の各側面です。私は、南極大陸や地球全体で起こるオゾン層の破壊について私の関わりをお話する中で、これらすべての側面にふれてみたいと思います。世界中の科学者が成し遂げた多くの重要な貢献を引用したより広汎な総説に関しては私の1999年の著作を見ていただければと思います。そして最後に、オゾン層の破壊と気候変動の問題の間にある類似点と相違点について私の個人的な見解を手短かに述べたいと思います。

成層圏のオゾン層は、地上の生物を保護する極めて重要な役割を果たしています。オゾン層は地球を有害な紫外線から遮蔽することで保護しており、これは大気中の他の分子にはできないことなのです。しかしながらこのオゾン層は、クロロフルオロカーボン（＝フロンガス）(CFCs) によるオゾン層破壊の可能性が懸念されるようになった1970年代に強調されたように、簡単に他の化学物質の攻撃を受けやすいものです。フロンガスは、高度の低いところでは殆ど反応せず、さらに、断熱材の発泡剤、冷却剤、スプレー缶用の高圧ガスなどの用途で使用するには安全で安定であることが特徴として知られていましたので、フロンガスによるオゾン層破壊の可能性は驚きを持って受け取られました。フロンガスの大気中における寿命は、ガスの種類（CFC-11、CFC-12、CFC-113、CFC-114、CFC-115など）により50年から数百年と幅がありますが、これらの一見無害と思われるガスは化学反応を経て変質し大量のオゾン層破壊をもたらす可能性があるのです。このことは科学的思考法に変化をもたらすとともに関連する政策に様々な挑戦をもたらしました。すなわち人間が作り出す化学物質には作り出した世代を大幅に超えた長い期間、環境に影響するものがあるということが強く認識されるようになったのです。同様の問題が多く温室効果ガスについても生じています（表1 参照）が、この点については後で論じます。ではこれらの寿命の長いフロンガスはどのくらいのオゾン層破壊を引き起こすのでしょうか。それは、どのような化学反応を経てでしょうか。そして、破壊が起こる高度および緯度地域はどこでしょうか。

表1 . 主なフロンガスおよび非フロン温室効果ガスの大気中寿命（年）

| フロンガス | | 非フロン温室効果ガス | |
|---------|------|------------------|-------|
| CFC-11 | 45 | 二酸化炭素 | ≈150 |
| CFC-12 | 100 | CH ₄ | 12 |
| CFC-113 | 85 | N ₂ O | 114 |
| CFC-114 | 300 | SF ₆ | 3200 |
| CFC-115 | 1700 | CF ₄ | 50000 |

フロンガスは、どこでも安定なわけではありません。例えば、高度約10～15キロメートルの成層圏まで上がると、強力な太陽光が引き起こす光化学過程によりフロンガスは分解し塩素原子が発生します。これらの塩素原子の一部は硝酸化塩素や塩酸のような反応性の低い安定なリザーバー分子に変換されます。そのため、塩素が特定の化学物質の内どれに分配されるかが（例えばClとHCl）オゾン層にとって大変重要なインパクトを持つのです。遊離した塩素原子がHClのような比較的反応性の低いリザーバー分子に変換される限り、オゾン層の破壊は限定的です。一方、塩素原子が、より化学反応を起こし易いClのような形で残る場合は、オゾン層は触媒的なサイクルで破壊されることとなります。私の研究の多くは、固体と液体を含む表面反応によってどのようにして塩素分配が劇的な影響を受け、それまでに考えられたよりずっと大規模なオゾン層破壊を生じるかについて焦点を当てたものです。

1980年代中頃以前のオゾンの化学は、すべて気体分子同士の反応もしくは気体分子と太陽光との反応が関与すると理解されてきました。すなわちオゾン層の破壊は、気相内だけで起こる化学反応によって進行すると考えられていました。その気相化学反応によれば、地上40キロメートル付近の上層成層圏にあるオゾン層の上部で最も大規模なオゾン層の損失が生じるものと推定していました。1983年には、ナショナル・リサーチ・カウンシル（NRC）は、その報告で、フロンガスを当時の使用量のまま使用し続けた場合、全地球上のオゾン層の破壊は100年で約3%程度と予測していました。この予測による影響は小さく、また遠い先の話であり、不確定要素が多いと論じる人もいましたが、これらの議論は、今日でも地球温暖化を論じる場合にしばしば引き合いに出されます。

2. 遠く離れた両極地：予期せぬ両極地方におけるオゾン層破壊

2.1 南極オゾンホール

1980年代半ばになり、前例が無い、予想を越えた南極のオゾン層の破壊が、春に限って起こるという研究結果が発表され、私達のオゾン層に対する認識が一変しました。オゾン層の破壊は、数パーセントではなく、約1/3に達することが示されたのです。それも、遠い将来のことではなく、NRCがこの100年間は殆ど起こらないと述べたわずか数年後にです。これら初期の観察結果が、世界で最も寒い大陸のとざされた研究基地での地上からの観測によってもたらされたことが多くの人々にとって驚きでした。地上局が何年にもおよび取り組みで徹底して記録してきた内容を、データ分析手法の誤りのため、衛星が見逃してきたことがすぐにわかりました。

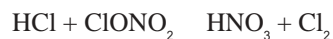
地球の最南端にあるこの広大な大陸で、少なくとも1970年代から長期にわたり質の高いオゾン層の計測データを保存しているのは3箇所だけです。すなわち、英国のハレー基地、日本の昭和基地そして米国の南極点基地です。図1は、これらの3つの基地で観測された10月の全オゾン量測定平均値を時系列で示したものです。英国のデータはその他2つの基地のデータに比べ年毎の変動が少ないことから、1985年の段階から既にハレー基地ではオゾンが奇妙な挙動を示していたことは明白です。観測された基地間のバラツキは、南半球の極成層圏渦の動きが主な要因になっています。両極とも、冬季の冷却化によって緯度の高いところほど非常に低温となり、その一方で緯度の低いところではかなり暖かい状態が支配的になります。そしてこの気温差は、低温の極地気団である渦を取り囲む広大な風系とリンクしています。しかしながら、この渦は、テレビの天気予報の画像でお馴染みの、南北各半球全体にまたがりお天気を動かす波と同様の大気の波で乱されます。英国のハレー基地は、時として渦の外にある大気特有のオゾンの水準を示すことがある日本の昭和基地よりも南極の冷たい渦の中に入る頻度の高い位置にあります。これらの波の頻度と強度が、ローカルに（例えば、昭和基地とハレー基地間で）もしくはより大きなスケールで（渦の内部であっても、年毎に）のオゾン濃度やオゾン損失の経年変動を左右する重要な役割を果たしています。

昭和基地と南極点基地における、1980年代のオゾン破壊の垂直分布測定結果は、南極地方の春季に特定の予期せぬ高度において異常な動きがあることを示唆していました。オゾン濃度の変動は、気相塩素化学から予測された高度40キロメートル付近のオゾン層の最上部ではなく、最も多くのオゾンが存在する、約10から20キロメートルという全く異なる高度で生じていました。(図2参照)

このオゾン破壊の中心が移動したことが、当時、オゾン層全体の3分の1が失われ、また今日でも、破壊の規模がオゾン層全体の半分以上を超えることもしばしばある理由なのです。オゾン層の破壊が想像していたよりも大規模であるだけでなく、まったく性質の異なるものであることは明白でした。オゾン層破壊が地球規模から極地で起こるようになったこと、高度が40キロメートル域から10～20キロメートルに下がったことを説明するため、私達のこれまでの科学的理解を大きく変える必要に迫られました。

2.2 南極オゾン破壊の新メカニズム

私は同僚の研究者とともに、オゾンホールは全く別の化学反応に起因していると提唱しました。それは気相の化学反応ではなく表面での反応です(不均一反応とも言います)。その反応は南極の冬季と春季の極寒の条件下で高度10～20キロメートルに形成される氷状の極域成層圏雲の表面上で起こるものではないかと提唱しました。特に、私達は、HClとClONO₂の両方のリザーバー分子が大きく減少すると、触媒的にオゾンを破壊する塩素種の密度が、このキーとなる高度において著しく増えることに気付きました。こうして私達は、極域成層圏雲の表面上で次の化学反応を通じてこのことが起こるのではないかと提唱しました。



昭和基地のオゾンゾンデのデータは、私達の新しい考えを展開するうえで手助けとなった観測結果の一つです。図2には、Solomon et al. (1986年)で紹介した私達の初期のモデル計算と、10年後に記した改訂モデルの計算(Portmann et al., 1996年)を示すとともに、昭和基地で、様々な年代に測定した10月の平均オゾンプロファイルを示しています。私達の初期のモデルは、約18キロメートルより低い高度はカバーしていませんでしたし、また現在知られている化学サイクルをすべて含んでいただけではありませんでした。しかしながら私達が提唱した表面化学反応はこのプロセスの最も根本的な特徴をとらえていました。とりわけ、オゾン損失が起きる領域が高度40キロメートルからオゾン層のまさに中心に移動した事実です。

なぜ南極ではもっと早く冬にではなく10月にオゾン層破壊が起きるのでしょうか。私達はもう一つ別のステップが必要であることを強調しました。そのプロセスでは、太陽光がなければオゾンを破壊することができないのです(つまり、塩素分子Cl₂を解離することです)。こうして私たちは、フロンガスから生じた塩素が、表面反応により、気相化学に基づく考え方で想像されていたよりはるかに大きなダメージを、オゾンに対し与える可能性があること、またこれらの表面反応は極域成層圏雲を発生させる低温条件の備わった南極地方で最も効率よく起こること、さらに、極冠に太陽光が戻る春に急速なオゾン破壊が進むことを提唱しました(Solomon et al., 1986年)。この表面化学反応は、Cl₂とCl間の摂動に関わるだけでなく、速い速度で相互に置き換わる一群の塩素分子(一酸化塩素、ClOおよび二酸化塩素、OCIOを含む)に関わり、こうして急速なオゾン破壊を進めることができるのです。南極のオゾンホールが最初に発見された時からほぼ20年間が経過しました。この間、様々な異なる化学物質に関する一連の測定が行われ、気相から表面化学へ、主たる反応相(場)の移行が確認されました(Solomon, 1999年の参考文献参照)。

2.3 観測で得られた証拠：フロンガスと表面化学の役割を検証する

1986年、私は4つの異なる研究グループを含む、南極調査隊を指揮する機会に恵まれ、この表面化学反応が関わっているかどうかを検証するための、初めての測定をいくつか行うことができました。ここでは、私のグループが行った、オゾン、二酸化窒素および二酸化塩素の測定に焦点を絞ります。二酸化塩素は、特に重要な初期の測定項目でした。なぜならその分子は塩素と一酸化塩素の量に比例するからで、それが検出されることは、極域成層圏雲が実際に塩素を放出していることを直接証明することになるからです。提唱した表面化学反応はさらに活性窒素を硝酸に変換します。そしてその硝酸はClONO₂の再形成を妨害し、そのために、さらにオゾン損失が拡大します。これによって二酸化窒素の濃度が減少しますので、二酸化窒素分子も化学的に重要な指標になります。実際、私達が「Solomon et al. (1986)」で強調したように、表面化学反応の結果生じた物質は元の反応物質と同じように重要です。最後に、地上からの可視光線を用いたオゾン自体の観測は、ハレー基地、昭和基地および南極点基地で用いた紫外線吸収法 など他の方法で報告されたオゾンホールを検証する上で有用でした。

私達は、太陽、天空そして月から集光するのに分光器を用いました。そして波長が約 400 から 450 nm (青色光) のスペクトルを分析し、オゾン、二酸化窒素、二酸化塩素に特徴的な吸収の痕跡を求めました。入射光の数パーセントあるいは1パーセントの数十分の一と微量なものを取り出す作業で、発見は骨の折れる仕事でした (Mount et al., 1986; Solomon et al., 1987年。 Sanders et al., 1993; Miller et al., 1999年も参照)。私達が作業を行った米国マクマード基地は、昭和基地のように、成層圏の極渦の中に入ることも、出ていることもあり、そのため私達は南極地方と亜南極地方の両方の空気を測定することになりました。私達は、8月下旬、太陽が水平線に顔を出す前、すなわち大量のオゾン層損失が始まる前にマクマードへ到着することができました。私の研究生活でもっとも驚愕した瞬間は、1986年9月にマクマード基地でオゾン層のレベルが低下するのを目のあたりにしたときです。オゾン量は1986年の8月下旬に私達が南極大陸に到着した時点で300ドブソンユニットであったものが9月下旬には200ドブソン以下に減少しました。またオゾン全体の3分の1が失われたことが、オゾンホールの存在の確からしさとその季節依存性についての他の観測を裏付けていました。オゾンの減少に伴い、二酸化塩素が著しく増加していました (図3)。

8月下旬と9月の低温の条件下、二酸化塩素は、気相化学の解釈に基づく数値より50から100倍も高いものでした。したがってこのデータは、塩素が関係する表面反応がオゾンホールの原因である可能性を示唆していました。対照的に、二酸化窒素の数値は非常に低いものでしたが、これも極域成層圏雲の化学から予測できるものでした。気温が上昇するにつれ二酸化塩素は消滅し二酸化窒素が増加していました。これも予想の範囲でした。このようにこれら両化合物の季節的な挙動は、南極の成層圏中の化学物質の構成を乱し急速なオゾン損失につながる表面化学の重要な役割の理論を裏付けるものでした。

私達は二酸化塩素の測定をするのに、直射の月光と夕暮れの空から注ぐ散乱光を用いました。夜間と夕暮れ時の2回測定を行ったのは、この化合物は一日の中で大きな変動があるからで、その化学反応を調べるためでした。

図4は、例えば、コロラドのように極域成層圏雲が発生することのない緯度において私達が観測したデータに比べ、南極地方で夜間に二酸化塩素がどれだけ異なった動きをするか示したものです。月光を用いた測定データでは、私達は、気相化学の予測より100倍強い測定値を得ました。さらに、月の出あるいは月の入りに際し、私達は、月の角度に応じて体系的にその挙動を測定することができました。月が水平線に近づくにつれ、大気を通る斜めの光の径路の長さが増加するため、大気を通り月に至る斜めの光の径路で観測する二酸化塩素の量は、夜間の観測で、一定のルールに基づきはっきりと増加します。このことは測定結果に重

要なチェックとなります。私が常に感じていたことですが、これは単純ですがデータを確認するエレガントな方法なのです（とりわけ地表温度がマイナス40度以下になる厳しい南極地方の夜中を通して装置を調整する際など、観測者にとって大変な場合もありますが）。

2.4 北極地方における初の測定

南極で二酸化塩素が大幅に増加していることがわかったことから、1988年1月、私は同僚と北へ向かい、グリーンランドのチューレに行き、同様の塩素系化学反応が促進されているか調査を行いました。光源として月光を用いて、私達は、二酸化塩素が北の地でも気相の化学反応に比べ著しく増加していることを確認することができました（Solomon et al., 1988）。その年に私達がグリーンランドで観測した二酸化塩素の水準は、南極ほど大きなものではありませんでした。冬季の北極地方の成層圏は殆どの場合、南極よりも暖かいことから、このことはおおよそ予測通りでした。南極におけると同様に、北極地方のオゾン層の損失も、低温による各種の化学反応の重なり、関連する極域成層圏雲そして太陽光に起因しています。最近、特に気温の低い年には北極地方で著しいオゾン層破壊が観測されています。しかし破壊の水準は南極ほどではありません。この違いの主な要因は、春季の北極地方の気温がほぼ毎年、南極よりもかなり早く暖かくなることから、太陽光照射と低温条件が重複して生じることが少なく、そのためオゾン層の破壊が抑えられることにあります。

3. 表面理解の新しい局面：液体粒子と火山

オゾンホールが発見された時点では、極域成層圏雲は主に氷つまり水の固体粒子のみで全体ができていると考えられていました。固相に加えて、液相も成層圏化学には重要であり、成層圏の固体と液体の粒子は、今では水以外に他の化学種を含んでいることがわかっています。実際、極域成層圏雲の表面は過冷却液体でできていることもあります。液体の硫酸と水の粒子、そして硝酸水和物と水溶液も極域成層圏雲を形作るのに関わる様々な表面構成要素の一部です。これらで出来た表面はすべて、同様の表面化学反応を行わせることがわかっていますが、これによって、表面化学反応に関わるオゾン損失の促進という現象についてその反応制約条件を緩和し、（水氷が形成されるほど）気温が非常に低くなければならないというものから、極地域以外の緯度地方にも影響を及ぼすはるかに一般的な現象へと広げたのです。鍵となる要因は、表面内部および表面上の水の存在であり、これが反応性を高めます。（Hanson et al., 1994; Solomon, 1999）。これらの条件はさらに、極オゾン層の破壊の経年変動に大きな影響を与えていると思われ、このことについてこれから述べたいと思います。

1980年代後半までに、何人かの科学者が、極域成層圏雲の固体粒子表面で起こる表面化学反応が、今日では低高度成層圏でも広く存在が知られている液体表面においても起きるかどうかを調べるため、実験室での研究を始めました。これらの表面は主に硫酸と水でできています。さらに、その量は、大量の二酸化硫黄を成層圏の高さまで放出する火山の噴火で大幅に増加することがあります。二酸化硫黄は、酸化され硫酸になりますが、その硫酸が成層圏の粒子サイズを大きくし表面積を拡大します。私は同僚と共に、成層圏における液相化学反応、特に火山活動の影響を把握することにも貢献しました。

複数のグループによる実験室での研究で、固体状の極域成層圏雲では非常に重要なHClとClONO₂の間の表面反応が液体表面上でも起こりうることを示されました。ただし、温度により速度が大きく左右されます。他の重要な表面化学反応も液体表面上で発生することがあり（例えば、N₂O₅とBrONO₂の加水分解）、オゾン層破壊を増長します。

数人の同僚と、私はこの新しい液相化学についてモデリング研究を数多く行いました。私達はまず、このような反応が、1980年代前半のメキシコのエル・チチョン火山の噴火後、中緯度地方にオゾン層破壊が生じた際に、おそらく重要な役割を果たしたであろうということを示しました (Hofmann and Solomon, 1989)。これによって、北半球の中緯度地方における、人間が作り出した塩素に起因するオゾン層の変化の早期検出を促したと思います。南極のオゾンホールが発見とその生成理由の説明は政策を考慮する上で重要でしたが、中緯度地方でのオゾン損失の確認と説明はおそらく、政策立案者にフロンガスの排出量を削減させるための行動を起こすことにつながったと思います。その時点では、その後も、大気中のフロンガスの量は増え続けることが予想されていました。そして私達は、塩素がこのような高濃度の水準にある中で大規模な噴火があった場合には、さらにオゾン損失が増えると主張しました。1991年に発生したフィリピンのピナツボ火山の噴火が、このことを検証する機会を与えてくれました。観測の結果、ピナツボ火山の噴火後、北半球の中緯度地方にオゾン損失が広がったことが明らかになりました。しかしながら、当時、南半球の中緯度地方には際立ったオゾン損失は見られませんでした。そのことは今日でも、説明を要する重要な問題となっています。とはいえ、両半球における二酸化窒素、一酸化塩素そしてその他の化学物質の観測結果は、主な火山噴火の後で重大なオゾン層破壊を起こす表面反応が中緯度地方の成層圏の液体表面上で起こるという考えを裏付けています。

私は同僚と、極地域でも火山性物質の表面が重要な影響を与える可能性があることについて論じました。なぜならそれらは極地域でも化学反応を起こす場となる表面積を拡大し、極域成層圏雲をさらに増やし反応を効率的に起こさせる可能性があるからです (Solomon et al., 1993; Portmann et al., 1996)。私達は、火山性物質の表面反応が、メキシコのエル・チチョン火山の噴火後、1980年代前半に見られた南極のオゾン損失に重要な役割を果たしたであろうことを示唆しました。また私達は、1990年代前半のピナツボ火山に続いて発生した大規模なオゾン層破壊と北極地方のオゾン層破壊についても論じ合いました (Solomon et al., 1996; Solomon et al., 1998)。図5は、1980年代前半と1990年代前半にそれぞれ発生した2つの大規模な火山噴火の後、増え続ける塩素と火山活動による極域成層圏雲の変化が重なった結果、どれほど南極地方のオゾン層に影響を与え、オゾン層の破壊を拡大したかを、噴火がなかったと想定した場合と比較して計算を行った結果を示しています。

図5は、もし1980年代前半のエル・チチョン火山の噴火がなかったら、多くの科学者の研究人生、そして国際的政策の進展がまったく異なるものになっていた可能性があることを示唆しています。火山噴火で発生したエアロゾルによる破壊の増大がなかったとしたら、塩素の影響が大きくなりオゾンホールがはっきりと検知可能になるまでにはおそらくあと数年を要したと思われる。しかし、人間が作り出した塩素が気温や火山によってどのような影響を受けるかを考察すると、1966年のアグン火山や1974年のフエゴ火山のようなエル・チチョン火山以前の噴火の後には大きなオゾン層破壊はなかったと明言できるのではないかと思います。低温、固体状の極域成層圏雲そして液状の火山性粒子のすべてがオゾン層破壊をもたらす要因となるものの、オゾン損失の根本的な原因は、フロンガスと、程度は少ないもののプロモカーボン人間が使用することで発生する、大量のオゾン層を破壊する塩素と臭素なのです。

このように、モデル実験や観測を行う中でオゾン損失の化学を理解する上での多くの局面に関与することができたことを私は光栄に思っています。その反応の図式は、気相のみの考え方から始まり、固相や液相まで拡大しました。さらに、液相化学を理解することで、極低温からそれほど低温でない状況へと新しい考えの展開につながり、考慮すべきプロセスおよび発生する可能性のある高度および緯度地方の範囲を広げました。今日、南極では、気象条件や火山活動によって、その程度は年ごとに変化していますが、オゾン層は大

きく破壊されています。北極地方のオゾン層もまた破壊が進み、気温が低い年には約25%に達し、気象条件の変動が年毎のオゾン損失の変動に非常に大きく影響しています。南半球の中緯度では、北半球に比べオゾン層の破壊の程度は大きく、中緯度地帯のオゾン変化への気候の経年と十年毎の変動の役割についてはまだ疑問があります。しかしながら両半球とも中緯度では約5~8%という著しい破壊が見られます。その結果、世界の人口の大部分は、一世代前に比べ、オゾンによる遮蔽効果が減少した下で、より多くの紫外線にさらされながら生活をしています。中緯度のオゾン損失に関する重要な科学的疑問は、高緯度から流れ込むオゾンの少ない空気による希釈効果と、極地方の外にある低温の空気で起こる表面化学の範囲が低緯度にも広がり、オゾン損失を拡大しているかもしれないということです。

4. オゾン層破壊、気候変動と環境問題の意思決定過程における科学の役割を振り返る

1980年代後半から1990年代にかけて、次々に報告されるオゾン層破壊についての新たな知見を論じるため政策立案者は繰り返し会合を開きました。そして原因となる気体の排出を抑制し究極的には廃止すべく世界的な合意文書を漸次策定しました。現在では、地球全体のフロンガスの年間排出量は、ピーク時に比べ90%以上も減少しており、策定したそれら政策の有効性を実証しています。しかしながらフロンガスの濃度が減少する割合は非常にゆるやかです。これは大気の浄化がフロンガスの寿命に制約されるためです。例えば、CFC-113は主に、溶剤として用いられましたが、今では、世界中ほとんどで、他の化学物質やプロセスがそれにとって代わるようになり、そのため今では世界中の排出量がほぼゼロになっています。しかし、大気中の寿命は約80年と長いため、排出が完全になくとも、この気体の減少は1年に約1%というゆっくりとしたものととどまります。このように、例えば1980年代に最盛期を迎え、今日の私達が享受しているライフスタイルをもたらした電子製品の部品の半導体素子の洗浄に用いられた溶剤は、そのまま大気に残り、今後も何十年にわたりオゾン層を破壊し続けるのです。

次に私はオゾン層破壊と気候変動の類似点と相違点について考えを簡単に述べたいと思いますが、これはまったくの私見です。

オゾン層破壊と気候変動は異なる現象です。オゾン損失は地表面の気候に影響を及ぼしますが、そしておそらく南極でその影響は最大になるとは思いますが(参照: Thompson and Solomon, 2002)、それにしてもこれは地球の気候変動の主要因ではありません。実は、オゾン損失自体は温暖化ではなく冷却化をもたらします。地球温暖化は二酸化炭素の増加が主な原因になりますが、二酸化炭素は、フロンガス類と同様に大気中の平均寿命が100年以上もある気体です(表1参照)。このように、これら二つの環境問題は、人間の寿命以上に長い時間残存する物質が関与しています。したがってこれらの問題は、人のその子供や孫に引き継がれる負の遺産なのです。それらは、自分の世代の枠を超えて各世代の役割、次世代へ残す足跡、さらには文明に残す足跡という、より長期的な視野に立って考えることを迫る問題なのです。

オゾン層破壊と気候変動に関して、既によく分かっている物理的あるいは物理化学的プロセスから見れば、これらの気体は間違いなく大気に影響を与えています。フロンガスの場合には、塩素を増加させオゾン層を破壊し、二酸化炭素の場合には、地球のエネルギー収支を変化させています。つまり、地球による放射エネルギーの滞留時間を増し、それによって地球の温暖化をもたらしています。

オゾン層破壊と気候変動については、ともに変動をもたらす気体の観測データは両極地方の氷に閉じ込められた昔の空気から、そして世界各地から報告されていて、今日の濃度上昇を人類がもたらしていることが

明らかになっており、二酸化炭素の場合では、少なくともこの50万年の間で最高水準に達するまでの上昇をしているのです。

オゾン層破壊の場合には、人間が産み出した塩素が化学反応、とりわけ表面化学反応を経ることで直接に大規模なオゾン損失をもたらします。しかし、それに関わるプロセスは、破壊が進むにつれて大気がどのように変化していくか（フィードバックの可能性）にそれほど依存しません。しかし気候変動の場合には、フィードバックが大きいことが知られており、安定化のメカニズムとあわせ不安定化のメカニズムを含むことから、克服すべき大きな科学的課題があります。気候変動は地表面温度を上昇させ水蒸気量を増加させます。増加した水蒸気がさらに気候温暖化に拍車をかけます。しかしその程度は変動の度合いと高さ方向の分布に微妙に依存します。さらに気候変動は雲量の変動をもたらす、これは宇宙への放射熱の増加（安定冷却効果）として、あるいは逆に放射熱の吸収の形（温暖化を増幅）で現れることがあります。このように、様々な大規模なフィードバックの持つ役割は気候にとっては極めて重大であり、オゾン層破壊という大規模で直接的な影響とは異なる科学的な挑戦課題となっています。

南極のオゾン層破壊に顕著な季節性があること、およびその化学メカニズムが、オゾン破壊の発見とフロンガスを原因として特定化することを容易にしました。南極のオゾンホールは毎年発生しますが、複数の手法を用いて観測することのできる多くの化学物質の劇的な変化を伴うことから（例えば、本文でも取り上げている二酸化塩素、二酸化窒素などで）、塩素化学とオゾン層破壊の関係は、1980年代にあったように、ただ一回の季節（シーズン：南極の春）について観測をすることで示すことができます。当時、私達がそのような測定を行わなかったとしても、今から南極に出かけて、一シーズン観測を行えば、何故オゾンの減少が急激でかつ劇的であるか、その理由を示すことができるでしょう。地球温暖化は、ゆっくりとした速度で広がる現象で、それを確かめるには、数十年に及ぶ精緻な測定が必要です。それは短期的キャンペーンにではなく長期間の測定に対して周到な注意を払うことを必要とします。また、重要な因子（雲、海面温度、水蒸気、粒子など）すべてを測定することには非常に困難を伴います。したがって、関連する観測結果を組み合わせさせてジグソーパズルを作り上げることは、さらに困難なことなのです。

地球全体の平均気温が20世紀の間に、約0.6度C上昇したことについては確たる証拠があります。さらに、過去50年間の全地球的規模の平均的温暖化現象のほとんどは人間活動に起因するといえます。このような現象が大きく現れた地域もあれば、それほどでない地域もあり、さらには局地的には冷却化したところもあります。気候の地域的な変動はよく知られた現象で、過去にも地域的な変動があったことを示す証拠は十分にあります。各地で観測された地域的な変動は、地球全体の平均的な変動とどのようなつながりがあるのでしょうか。またどれだけ自信を持って、世界的規模および地域的なレベルについて将来の予想を立てられるのでしょうか。これは重要な科学的な課題ですが、ここで私は、地球温暖化が、何故、より大きな社会的課題であるかを示したいと思います。それは温暖化というのが、私たちに個人の枠を超えて考えることを求めているからです。今起きていること、あるいは今後自分の身近に起こる可能性があることを検討するだけでなく、隣人あるいは、山々、海洋、経済、文化を越えて遠く離れた人々のことも考えることを求めているのです。

オゾン層破壊と同様に、気候変動の主な問題は氷に関係しているかもしれません。地球温暖化に関連した氷の生成と融解は、細心の注意を払う必要がある問題です。なぜなら気温のわずかな変化が物質の相変化（固体 - 液体間）に重大な影響を及ぼすことがあるからです。南極の海氷の動きはまだはっきりとは分かっていませんが、北極地方の海氷は、この数十年の間、減少しています。さらにここ数年では急激な変化が指

摘されています。氷原や氷河もまた多くの地域で変化してきており、このことは水資源に大きな影響を及ぼす可能性があります。最後に、グリーンランドや西南極の大氷床で氷が融け出していることは、将来の気候変動に重大な問題を投げかけています。大氷床は必ずしも今日のように多量の水を常に保持してきたわけではありません。その結果、地質学的に過去何千年も前には、それが地球上の海水位に与える影響には大変大きなものがありました。多くの科学者は、地球温暖化に伴いグリーンランドの氷床が融けてしまい、そのため海面が3～6メートル上昇するのではないかと問うています。地球の気温が上昇した場合に、北極地方の氷床と南極の氷床のどちらが変化する可能性が高いかという興味のある科学的疑問があります。両極地方で氷に関連するプロセスが変化することが気候システムの持つ大きな脆弱性であり、おそらく、皮肉なことに、同じ問題が、オゾン問題にとっても、私の科学研究歴にとっても、基軸になっているのです。

しかしながら、氷や雪への影響が安定化する可能性もまた注意深く見極めなければなりません。嵐のコースが変わり、暖かく湿った地域に積雪が増加することで、グリーンランドでの気温上昇を相殺し、氷の状態が変わらないということがあるのでしょうか。恐らく、私たちは幸運で、氷の融解がもっと起こっても、きちんとバランスが保たれるか、場所によっては、もっと雪が降ることでそのバランスが行過ぎるということが起こるかもしれません。つまり気候変動の重大な課題はリスクを見極めることなのです。

科学は、社会が危機への対処法を選択する上で、重要な情報を提供します。しかし、科学だけでは危機に対処するための決定はほとんどできません。決定には、科学だけでなく、文化的価値、経済、外交など様々な角度で検討がなされます。科学および政策の両方にとって、重要な問題は、いかにして客観的に科学を活用するかということです。そうすれば将来、歴史の本は、人類は気候変動についてもオゾン層破壊の場合と同様に賢明に対処したと記すことでしょう。今回の講演で私が強調してきたように、この問題は私達だけの問題でなく、世代を超えた、私達の住むこの美しい青い地球全体の問題として、深く考える必要があるのです。

引用文献

- Solomon, S., R.R. Garcia, F.S. Rowland, and D.J. Wuebbles, On the depletion of Antarctic ozone, *Nature*, 321, 755-758, 1986.
- Mount, G. H., R.W. Sanders, A.L. Schmeltekopf, and S. Solomon, Visible spectroscopy at McMurdo Station, Antarctica, 1. Overview and daily variations of NO₂ and O₃, austral spring, 1986, *J. Geophys. Res.*, 92, 8320-8328, 1987.
- Solomon, S., G.H. Mount, R.W. Sanders and A.L. Schmeltekopf, Visible spectroscopy at McMurdo Station, Antarctica, 2. Observation of OClO, *J. Geophys. Res.*, 92, 8329-8338, 1987.
- Solomon, S., G.H. Mount, R.W. Sanders, R.O. Jakoubek, and A.L. Schmeltekopf, Observation of the nighttime abundance of OClO in the winter stratosphere above Thule, Greenland, *Science*, 242, 550-555, 1988.
- Hofmann, D., and S. Solomon, Ozone destruction through heterogeneous chemistry following the eruption of El Chichon, *J. Geophys. Res.*, 94, 5029-5041, 1989.
- Sanders, R. W., S. Solomon, J. P. Smith, L. Perliski, H. L. Miller, G. H. Mount, J. G. Keys, and A. L. Schmeltekopf, Visible and near-ultraviolet spectroscopy at McMurdo Station, Antarctica, 9. Observations of OClO from April-October, 1991, *J. Geophys. Res.*, 98, 7219-7228, 1993.
- Solomon, S., R. W. Sanders, R. R. Garcia, and J. G. Keys, Increased chlorine dioxide over Antarctica caused by volcanic aerosols from Mount Pinatubo, *Nature*, 363, 245-248, 1993.
- Hanson, D. H., A. R. Ravishankara, and S. Solomon, Heterogeneous reactions in sulfuric acid aerosols: a framework for model calculations, *J. Geophys. Res.*, 99, 3615-3629, 1994.

- Portmann, R. W., S. Solomon, R. R. Garcia, L. W. Thomason, L. R. Poole, and M. P. McCormick, Role of aerosol variations in anthropogenic ozone depletion in polar regions, *J. Geophys. Res.*, 101, 22991-23006, 1996.
- Solomon, S., R. W. Portmann, R. R. Garcia, L. W. Thomason, L. R. Poole, and M. P. McCormick, The role of aerosol variations in anthropogenic ozone depletion at northern mid-latitudes, *J. Geophys. Res.*, 101, 6713-6727, 1996.
- Solomon, S. R. W. Portmann, R. R. Garcia, W. Randel, F. Wu, R. Nagatani, J. Gleason, L. Thomason, L. R. Poole, and M. P. McCormick, Ozone depletion at mid-latitudes: Coupling of volcanic aerosols and temperature variability to anthropogenic chlorine, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1871-1874, 1998.
- Miller, H. L., R. W. Sanders, and S. Solomon, Observations and interpretation of column OCIO seasonal cycles at two polar sites, *J. Geophys. Res.*, 104, 18769-18783, 1999.
- Solomon, S., Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history, *Rev. Geophys.*, 37, 275-316, 1999.
- Thompson, D. W. J., and S. Solomon, Interpretation of recent southern hemisphere climate change, *Science*, 296, 895-899, 2002.

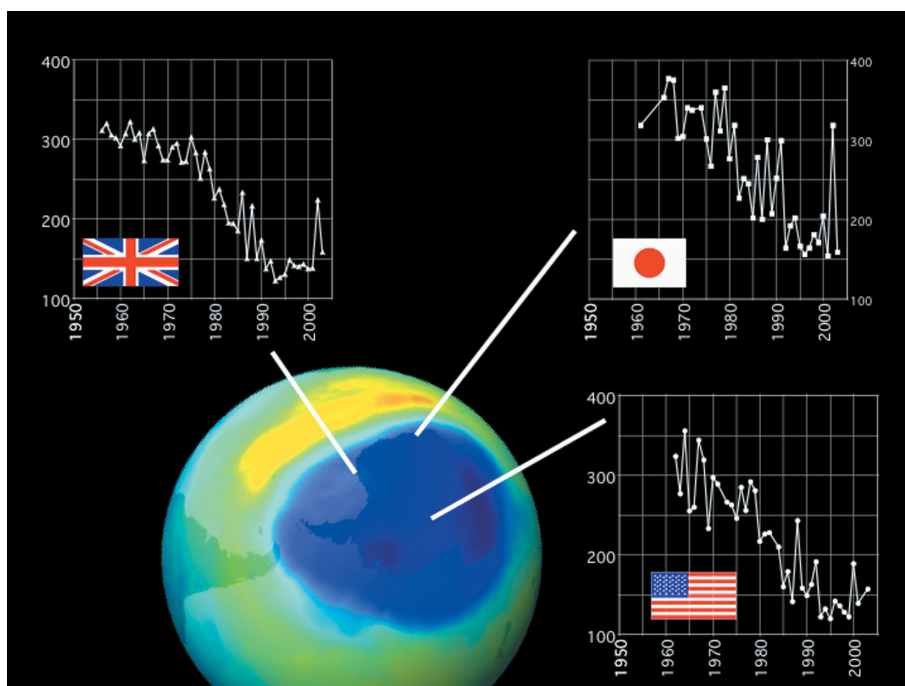


図 1. Halley 基地（左上図）、昭和基地（右上図）および南極点基地（右下図）の10月の月平均オゾン量記録（ドブソン単位）；世界オゾン・紫外線データセンターから引用。2000年9月6日の衛星観測オゾンマップ（提供NASA）も示す。この日、昭和基地が極渦の端に非常に近く位置していることがこの衛星観測マップからわかる。

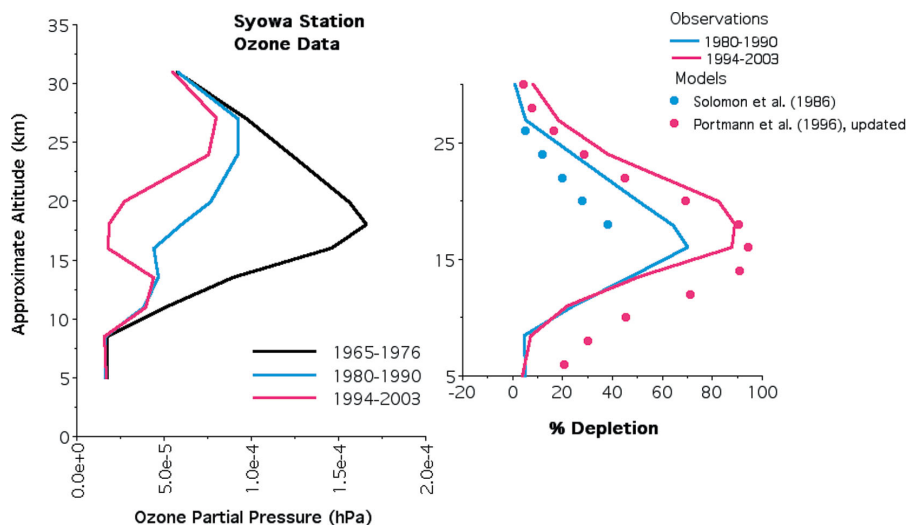


図 2. 左図に10月の昭和基地上空における高さ方向のオゾン分布を示す。オゾンホールが発生する前の正常なオゾン層を形成していた1965～1976年平均値と、オゾン破壊が深刻化する状況を表した1980～1990年および1994～2003年の平均値を併せて示す。モデル計算結果を右図に示すが、オゾン破壊百分率と高度との関係の実測値を、表面化学反応を取り入れたモデルと比較している。Solomonらによる最初のもの（1986）およびPortmannらのモデル（1996）をベースに現在まで更新したものを示す。

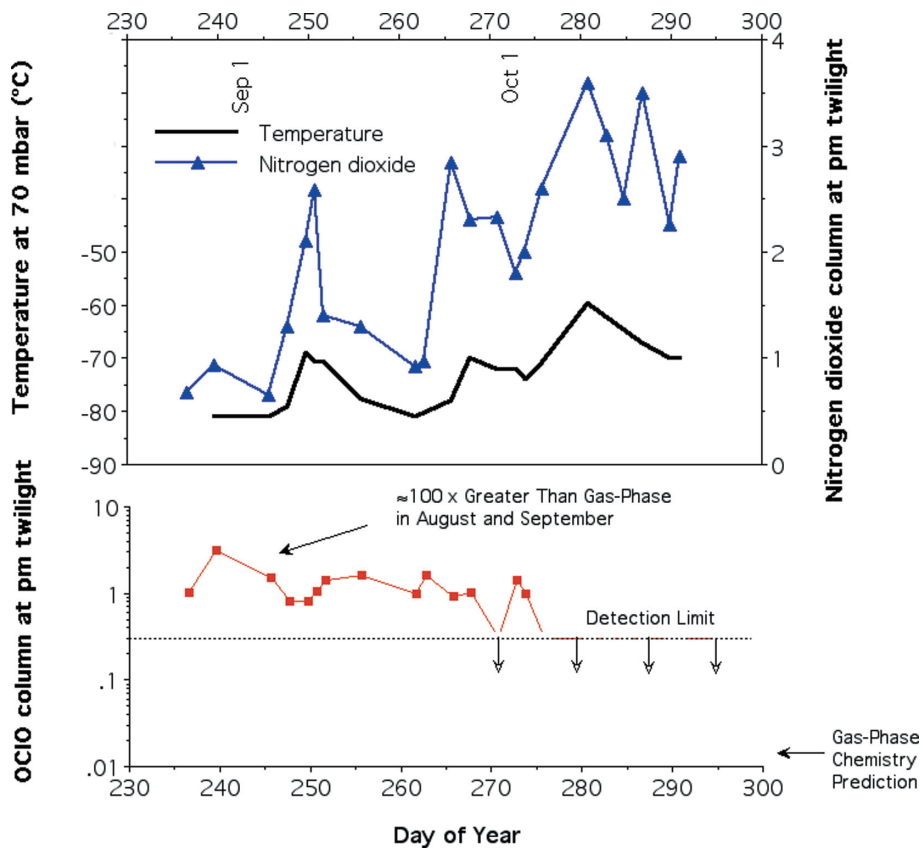


図3. Solomonら(1987)およびMountら(1987)による1986年のMcMurdo基地での二酸化塩素(OClO)と二酸化窒素(NO₂)に関する毎日の薄暮観測記録。70ミリバール(約18km上空)における気温を比較のために示す。8月と9月にはNO₂濃度が低く、OClOが非常に高濃度で存在したことを示すと共に、高濃度NO₂と低濃度OClOが暖かい大気の流れと関係していたことも示している(例えば250日目前後)。10月に気温が上がるとOClOは消失し、NO₂は成層圏の典型的な水準まで増加した。

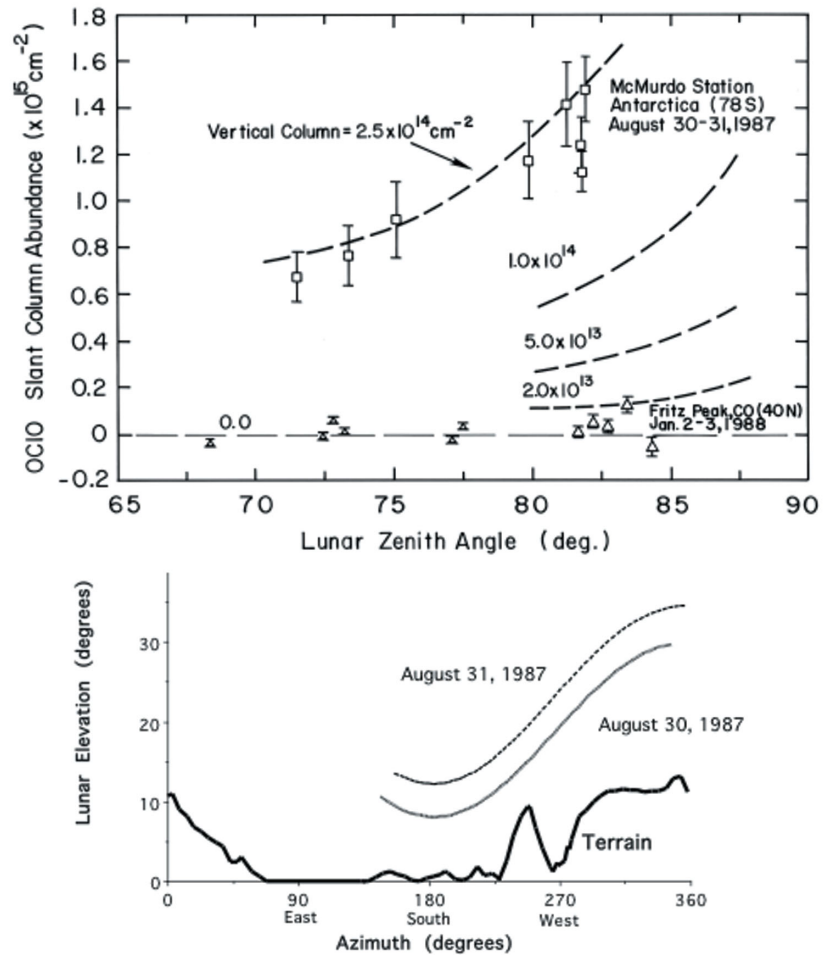


図4 . 上図は光源として月の直射光を利用した夜間のOCIOの観測記録。実験室から見た月の位置を下図に示した。月の角度(上図)と共にOCIOは変化し、McMurdo基地での観測記録は夜間を通して予想値を系統的になぞるものであった。対照的に、冬季のColoradoではOCIO濃度は、図示のように測定器の検出限界以下であった。

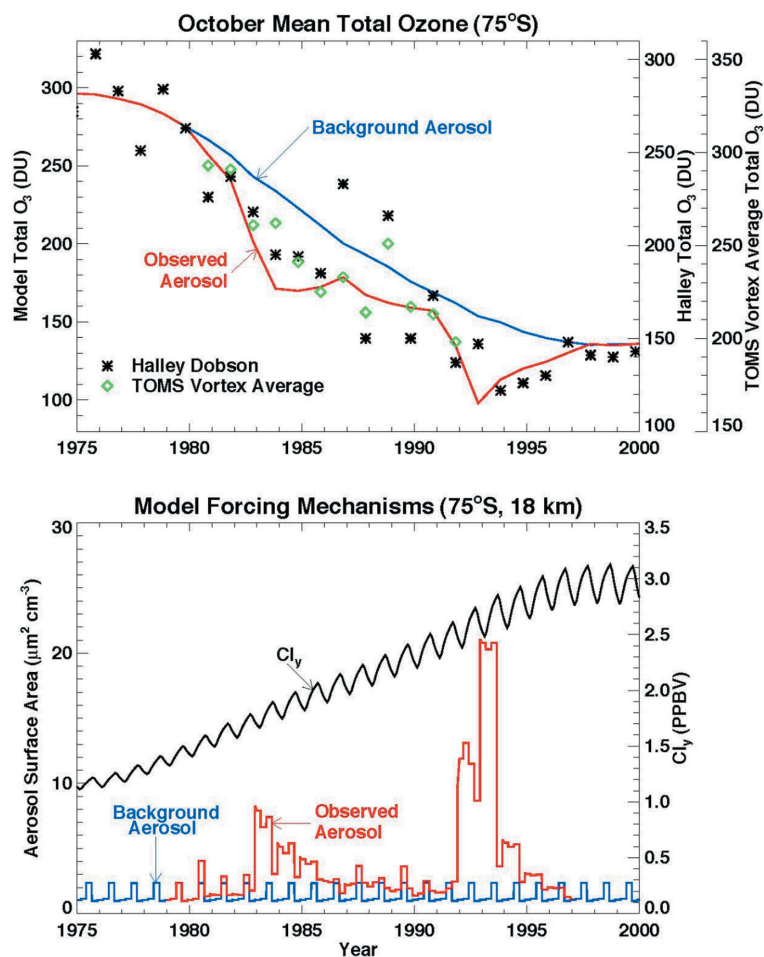


図5 . 上図は南緯75度における10月の月平均オゾン濃度の推移を示す。Halley基地データおよび極渦上方の衛星平均データに基づく全オゾン量測定記録を、観測したエアロゾル表面積の変化を考慮した時とそうでない時のモデル計算結果（Portmannらのもの（1996）を更新）と比較している。下図はモデル計算結果を導いた因子を示しており、CFC排出により増加中の活性塩素（Cl_y）衛星観測データから求められたエアロゾル表面積がこれらに相当する。1980年代初めのエル・チヨン火山および1990年代初めのピナツボ火山の噴火が、極成層圏雲微粒子の表面積増大に大きく作用していることが図からわかる。

受賞者紹介

グロ・ハルレム・ブルントラント博士（ノルウェー）

Dr. Gro Harlem Brundtland

「環境と開発に関する世界委員会」委員長
元ノルウェー首相 / WHO 名誉事務局長



受賞業績

『環境保全と経済成長の両立を目指す画期的な概念「持続可能な開発」を提唱し世界へ広めた業績』

略歴

1939 4月20日、ノルウェー・オスロ市で生まれる
1963 オスロ大学医学部卒業
1964 米国ハーバード大学にて公衆衛生の修士号取得
1965-67 ノルウェー保健省医務官
1968-74 オスロ市保健委員会医務部長補佐、後に部長
1974-79 ノルウェー環境大臣
1981 ノルウェー内閣総理大臣
労働党党首
1983-87 国連「環境と開発に関する世界委員会」委員長
1986-89 ノルウェー内閣総理大臣
1990-96 ノルウェー内閣総理大臣
1998-2003 世界保健機関（WHO）事務局長

主な受賞歴等

1988 Third World Prize（第三世界賞）
1989 Indira Ghandi Prize
1992 Earth Prize
The Onassis Prize
1994 Karls Preis
2001 World Ecology Award
Global Leadership Prize of UN Association of the USA
2002 Four Freedom Award

博士はHarvard、Oxford、Louvain、Cape Town、All India Institute、the Public Health Institute of Mexico 等世界の有名大学から数々の名誉学位を授与されています。

現在、地球環境問題に取り組むうえで、「持続可能な開発」という考えは世界各国で共通の基本概念となっていますが、このコンセプトはブルントラント博士が委員長としてリーダーシップを発揮した国連「環境と開発に関する世界委員会」が報告書「我ら共有の未来」（Our Common Future）で世界に提唱したものです。

幼い時から医師を志望していた博士は、オスロ大学で医学を学び、60年にArne Olav Brundtlandと結婚、卒業後の63年には夫の留学に伴って米国に渡り、奨学金を得てハーバード大学で公衆衛生学を学びました。65年に帰国した博士は保健省やオスロ市保健委員会に勤め、子どもの健康を守ることに尽力する傍ら、子供の生長と育成に関する研究活動も続けました。

74年、博士が35歳の時に予期しなかった環境相への就任を要請され、環境問題に取り組むことになりました。酸性雨対策や国立公園の設置等、様々な環境問題に取り組んでいた77年、北海のEkofisk油田で原油の噴出という大事故が発生しました。博士は現場近くに飛んで直接指揮をとり、環境被害を最小限に留めると共に内外記者へも積極的に情報を開示しました。これがノルウェーの国民、政治家の両方にとって一つの転換点となり、環境問題は環境保護主義者だけの問題ではなく、国の経済発展の中核となる政策領域の問題であり、環境投資は国家の将来のための総合的な投資の一部なのだとして深く認識されました。環境相としての仕事ぶりが高い評価を受け、81年には歴代で最も若い41歳で、ノルウェー初の女性首相に就任しました。

83年12月には、国連「環境と開発に関する世界委員会」委員長への就任を要請されました。当時、労働党党首であった博士は、極めて多忙でしたが、デクエヤル国連事務総長から、「環境相として数年間、国の内外で奮闘した上で一国の首相になったのは、世界広しといえどもあなただけである。」と説得され、未来を直視し、次の世代の利益を守るといふこの挑戦に立ち向かうことになりました。

委員会では、博士の卓越した指導力と情熱、公正と平等に基づく価値観、さらに、変革への強い意志が発揮され、84年から3年間にわたりインドネシアやブラジル等を含む世界各地で、委員会と合わせて公聴会を開いて、一般市民の意見を聞くなど、精力的な活動が行われました。そして、87年に「我ら共有の未来」("Our Common Future")と題する有名な報告書を公表しました。この報告書は、「将来の世代のニーズを満たす能力を損なうことなく、今日の世代のニーズを満たすような開発」即ち「持続可能な開発」(Sustainable Development)をメインテーマに、人口、食糧、種と生態系、エネルギー、工業、国際経済などの様々な分野での問題の構造を分析し、「持続可能な開発」に向けて世界が早急に講ずるべき方策を示すものとなっています。

この報告書の内容が原動力となって、92年にリオデジャネイロで「環境と開発に関する国連会議」(地球サミット)が開催されることとなり、このサミットで、「持続可能な開発」を実現するための具体的な行動計画である「アジェンダ21」が採択されました。

博士の保健と環境、開発に関するリーダーシップは国際的にも高く評価され、98年に女性としては初めて世界保健機関(WHO)の事務局長に選任されました。

WHOでの業績には、貧しい国の人々にも医薬品の入手が可能な支援システムの確立、小児麻痺の地球規模での根絶、タバコ喫煙を世界的に抑制するための枠組み条約の採択、SARS、マラリア、HIVのような地球規模の疾病に対処する大胆なモデルの構築等があげられます。

4人の子どもの母親である博士は、ご自身の生き立ちとご主人の献身的な協力もあって、これらの業績を成し遂げることができました。博士は最近、自叙伝「Madame Prime Minister」を著し、その足跡を振り返っておられます。