

# オゾンホール (特集 極地研究の推進 : 南極観測40周年に際して)

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-06 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.24517/00040015">https://doi.org/10.24517/00040015</a>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



特集：極地研究の推進—南極観測 40 周年に際して—

## オゾンホール

岩 坂 泰 信

### 1. はじめに一南極におけるオゾン観測

1985年にオゾンホールの存在が報告され、科学的にも社会的にも大きな関心を呼んだ。その後の成層圏オゾンの研究は、オゾンホールが発見された時に提起された課題に挑戦する形で展開している。オゾンホールの発見以来すでに10年以上もたった今でも、オゾンホールをめぐって生じたさまざまな問題は、挑戦するに値する研究課題として我々の前にある。

オゾンホールの機構解明には、日本の南極観測隊がしばしば大きな貢献をした。この小論では、オゾンホールにまつわる研究の進展状況を、日本の南極観測のすすめ方と関連させながら概観してみたい。

### 2. オゾン層と地球環境

オゾン層の歴史的な変遷やそれと地球環境の関わりについては、現在でも不明な点がおおい。しかし、次のような点は広く信じられている；

- ① (植物群が放出した) 酸素が多量に存在する大気の中かで、オゾン層は形成される。
- ② オゾン層は、有害な太陽紫外線を吸収することで地球上の生態系を守っている。
- ③ オゾン層が吸収した太陽紫外線は、成層

圏を暖める役目をしている。

現在のように陸上に多様な動物や植物が繁栄するようになったのは、大気中の酸素の濃度が次第に高くなりそれにつれてオゾン層も次第にしっかりしたものになって、地上に到達する紫外線が十分に弱くなったためと考えられている。今からおよそ5億年前のことである。そのころから植物が陸上へ進出し、それを追うようにして動物が陸上生活を開始したらしい。

人類が地球上に登場するのはずっと後(数百万年前)のことである。現在、地球上で活動している人類は、自らの生活を向上させるためにさまざまなものを作り出し、かつ捨ててきた。この長い時間のうちに、人間は、資源は無尽蔵であり、住空間は無尽蔵であり、不要なものを捨てるに無尽蔵な空間があり、捨てたものは自然に処理されるのであり、……、と、さまざまな自然観を得るに至った。しかし、今日ではそのような考え方やそれに基づく生活・社会・生産の有り様が、地球環境に強いストレスを与えていると認識されるようになってきた。

フロン(クロロフルオロカーボンを一般にはフロンと呼んでいる)は、1928年に冷媒用として発明された(この時作られたものはフロンにはいろいろのタイプがあり、この時のものはフロン12)。この物質は、すぐれた化学的な性質を多くもっており、中でも化学的な

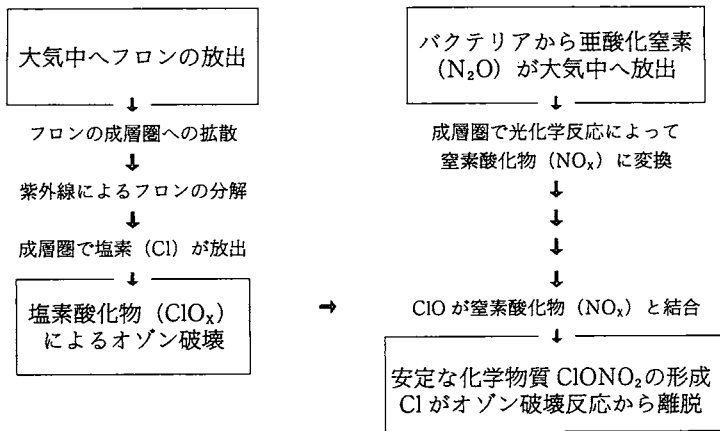


図1 ClO<sub>x</sub>とNO<sub>x</sub>の反応。現在のところ、人間が放出したフロンによって引き起こされている成層圏のオゾン破壊は、バクテリアが放出する亜酸化窒素のおかげである程度抑制されていることになっている。

安定性が高い(人体への害もないことになる)ために、ひろく民需製品にも使用された。使用后、大気中に捨てても直接人体に影響を与えないために(ということは大気中でほとんど破壊されずに存在する)、使用後は気軽に大気中に捨てられてきた。

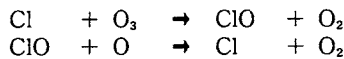
我々の生活のなかにしっかり根をおろした冷蔵庫、冷凍庫、空調設備等はフロンの有り難みを身近に感じさせるものの代表である。化粧品や医薬品にさかんに使われたし、建築建材、自動車部品、にも使われた。洗浄剤としてもすぐれており、精密機械部品や電子部品の洗浄をはじめ広い分野で使われている。

### 3. 塩素酸化物のオゾン破壊：オゾンホールはその証拠なのか

フロンは、弗素と炭素と塩素の重合物である。それ故、フロンが分解すると塩素(Cl)が放出される。前述したように、フロンは極めて安定なために地表面付近の大気中で分解することはない。しかし、成層圏まで拡散していったフロンは、太陽からやってくる紫外線によって分解され、塩素が成層圏に放出される(図1)。

塩素は、オゾン破壊の連鎖反応を引き起こし、ほんの少しの量で効率よくオゾンを壊してしまう(表1)。オゾン破壊に関わるClとClOを一まとめにして塩素酸化物(ClO<sub>x</sub>)と

表1 塩素酸化物(ClO<sub>x</sub>: ClやClO)のオゾン破壊連鎖反応



反応が一巡するとオゾンはO<sub>2</sub>分子に変換され濃度が減るが、ClO<sub>x</sub>は濃度を減ずることなく再びオゾン消失反応にかかわってゆく。オゾンホールのなかではこのような単純な破壊反応ではなくもっと複雑な形を取るがClO<sub>x</sub>がオゾン破壊の主役であることは同じである。

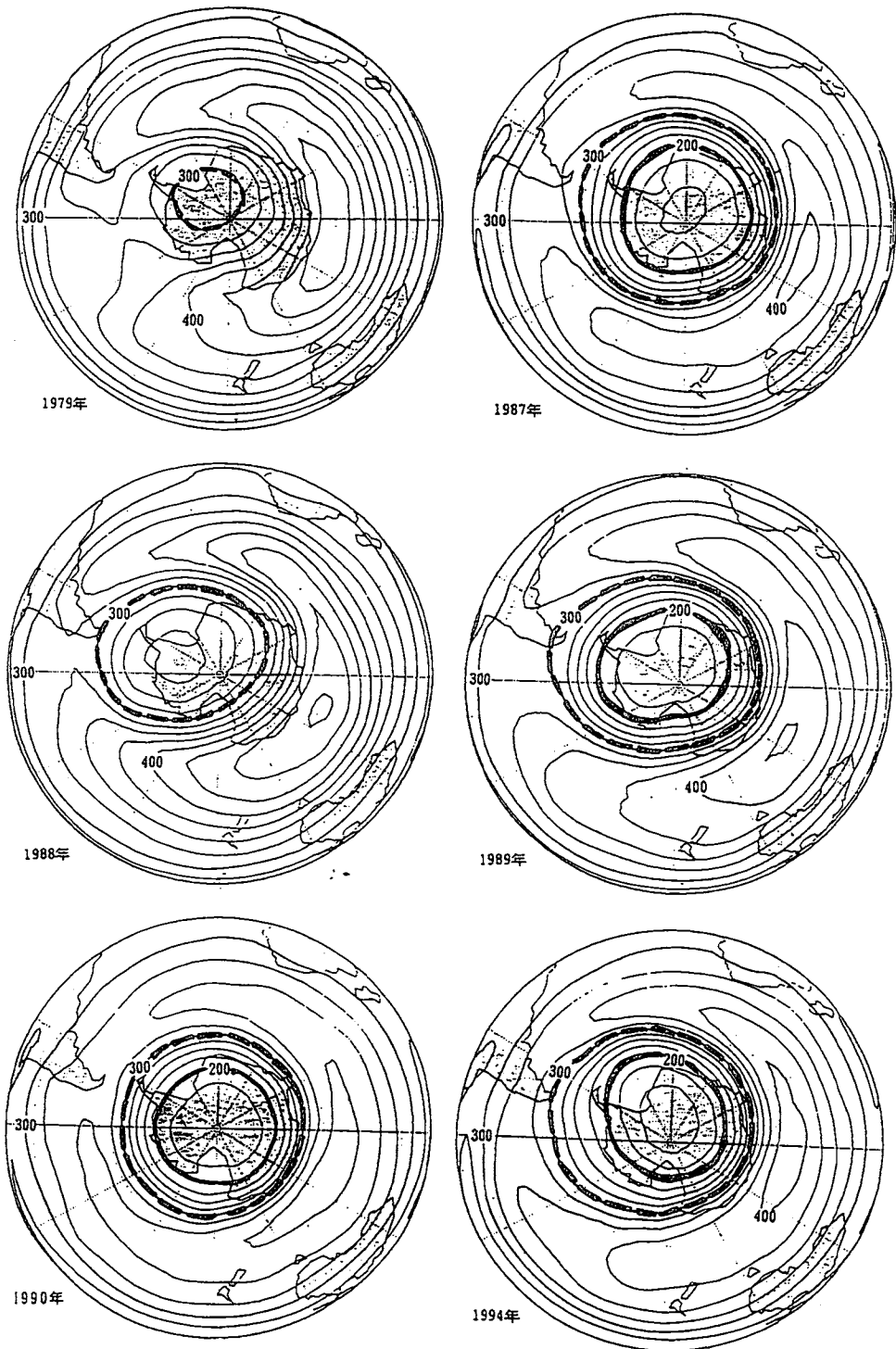


図2 ニンパス7によって観測された南極上空のオゾン全量。1979年および1987～1994年の10月の月平均値。単位は、 $\text{m atm-cm}$  (ミリアトムセンチメートルと呼び標準の大気状態のもとで厚さとしてどれだけになるかを示すもの。ちなみに、300は0.3センチメートルに相当する)。1979年の南極上空では最も低い濃度が300  $\text{m atm-cm}$ であったものが、1990年代には200  $\text{m atm-cm}$ 以下にまでなっている (気象庁提供)。

呼んでいる。フロンから出来る  $\text{ClO}_x$  の危険性は、1974年にカリフォルニア大学のローランドとモリーナによって指摘されたが、当時は、科学的には今日ほど大きな関心と呼ばなかった。しかし、社会的にはこの報告は強い関心を持って受けとめられ、1978年には一部のフロンの規制がアメリカで始められた。

1985年に南極でオゾンホールが発見されると、フロンによるオゾン層破壊が現実のものであったと受けとめられるようになり、社会的にも科学的にも強い衝撃を世に与えた(図2)。オゾンホールの発見は、イギリスの研究者によって明瞭な形でなされたが、日本の南極観測隊が行ってきた観測はその後の研究に大きな貢献をなした。筆者は1983年南極に越冬し、オゾンホール発見前夜を南極で過ごした。すでに春のオゾンの値は常識をこえる程度の低さを示していたのだが、関係者が最も恐れたのは装置のトラブルが原因でこんな低濃度オゾンが記録されたのではないかという点であった。装置の管理を任されていた隊員の悩みは深く日本への問い合わせが何度となく行われたが、装置は正常であるとの結論を得た。さらに関係者を安心させたのは、昨年と同じようにオゾンが極めて低い値を取ったことがあった、という点であった。前の年の越冬隊は多数のオゾンゾンデを放球して丁寧なオゾン観測を行っており、信頼性の高い結果をだしていたと思われるので、その観測にもこのような低濃度のオゾンが観測されているのであれば一安心ということになる。日本の観測隊はこのようにしてオゾンホール発見に先立って、2年続けて春先のオゾン濃度の低さに悩んでいたのである。後述するように、極端に濃度の低いオゾン層が出現するのが春である点がオゾンホールの機構解明に本質的であったのだが。

1983年の観測では、南極成層圏のエアロゾル粒子(大気中に浮遊する細かい粒子で気候

や環境に影響を与えていると考えられている)の観測が初めて行われ、その濃度が冬の期間にきわめて増加することが突き止められた。冬のエアロゾルの増大と、春のオゾンの減少とはオゾンホールをめぐる最も本質的なプロセスである。今から見れば、日本の南極観測隊によってオゾンホール解明に必要な観測はこの時期には終わっていたのである。2年後にはオゾンホール発見のニュースが世を駆けめぐることになる。

#### 4. 南極のオゾンホール

フロンが紫外線によって分解する際に出来る塩素( $\text{Cl}$ )は強力なオゾン破壊物質である。表1のように、 $\text{Cl}$ と $\text{ClO}$ は自らの濃度を減らすことなく、一方的にオゾンを破壊してゆく。

フロン起源の塩素すべてが、表1のオゾン破壊反応サイクルを形成するのではない。大部分の $\text{Cl}$ は、化学反応を通して硝酸塩素( $\text{ClONO}_2$ )や塩酸( $\text{HCl}$ )となってオゾン破壊とは無縁の存在となっており、オゾン破壊に関与する $\text{ClO}_x$ になっているものはごく一部分である。言い換えるなら、フロンから生じた塩素のわずかな一部のものであっても、現在のようなオゾン破壊を招くのであって、成層圏にある塩素がすべて $\text{Cl}$ や $\text{ClO}$ の形を取ってオゾン破壊反応に参加していたらオゾン破壊ははるかに深刻なものになるはずである。

塩素化合物の大部分を占めている $\text{ClONO}_2$ が、形成されるプロセスを考えてみると大変おもしろいことに気がつく(図1)。この化合物は、フロンが光分解することで生成する $\text{ClO}_x$ と成層圏の窒素酸化物( $\text{NO}_x$ )からつくられるのだが、この $\text{NO}_x$ の起源がバクテリアが大気中に放出した亜酸化窒素( $\text{N}_2\text{O}$ )なのである。このような化学反応のおかげで、

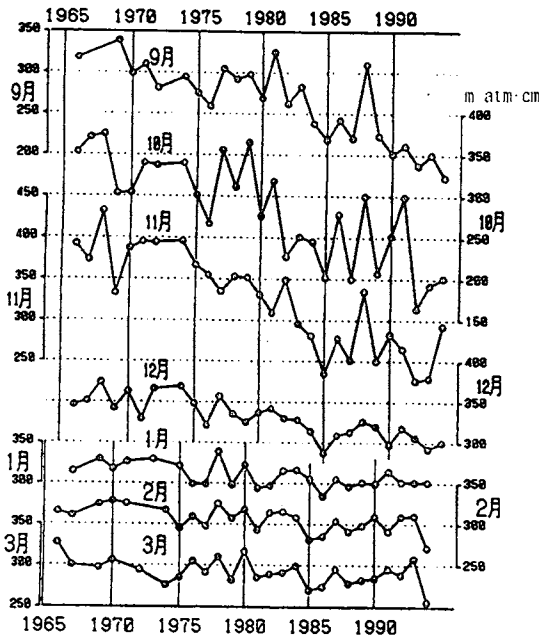


図3 南極の昭和基地で観測されたオゾン全量の月平均値の変化(気象庁提供)。

塩素による(ということはフロンによる)オゾン破壊がいささか緩和されているのであり、'バクテリアが大気中に放出する  $N_2O$  は、今のところフロンによるオゾン破壊を防いでくれている'とも言えるのである。

さて、塩素の(つまりはフロンの)オゾン破壊が地球のいたるところで起きないで南極の上空のみで激しく進行する理由は、これだけではわからない。この謎解きの最もよい手がかりを与えてくれたのが、'南極でのオゾン破壊は強い季節性を持っている'という観測事実であった。

オゾンホールが顕著に観測されるのは8月下旬から11月頃までである。図3には、南極の昭和基地で観測されたオゾン全量の月平均値が年とともにどのように変化しているかを示した。1月や2月の変化は年々の凹凸はあるもののゆっくりとした減少を示しているのに、9月から11月の変化は1970年代の後半から年を追うごとに急速に減少している。す

なわち、オゾンの大減少は南極の春に起きているのである。オゾンホールの特徴に関する疑問、

- ①なぜ、南極だけ顕著にオゾン破壊が見られるのか?
- ②なぜ、春に顕著になるのか?
- ③なぜ、オゾンホールの規模が年々大きくなるのか?

は、フロンによるオゾン破壊を理解する上で最も基本的な疑問である。これらの疑問を解く鍵は一見オゾンと無関係に見えた大気エアロゾル粒子が握っていた。

大気エアロゾル粒子とは、大気中に浮遊する極めて微小な固体や液体の粒状の物質を指す。これらの粒子は、大気状態によって刻々とサイズ、化学成分、濃度などを変えている。冬の南極成層圏が地球上で最も寒冷な場所であることから、中緯度や低緯度ではガス状態で存在している硝酸や水もエアロゾル粒子になってしまう。

## 5. 南極の冬の成層圏エアロゾル：極成層圏雲の発生

南極の冬は(時には北極の冬も)、成層圏に多量のエアロゾルが発生する(図4)。それらのエアロゾルは特別に寒い環境で発生するも

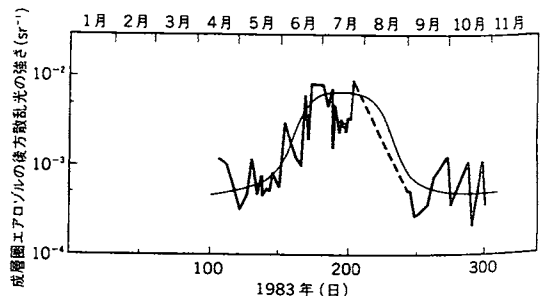
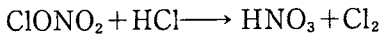


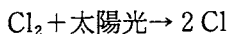
図4 南極の昭和基地で観測された成層圏のエアロゾルの量。冬の期間(6~8月)、成層圏エアロゾルの量は、極成層圏雲(PSCs)発生のために著しく増加する(岩坂泰信, 科学, 63巻, 1993年による)。

のであり、極に特有のものである。一般のエアロゾルと区別するために極成層圏雲 (Polar Stratospheric Clouds; PSCs) と呼ばれている。この PSCs の組成の主なものは、硝酸や水である。氷粒や氷粒に硝酸が混じったものを想像すれば当たらずとも遠からずと言えよう。この PSCs は、通常の成層圏の状態ではガス状態にある硝酸や水が、極めて寒冷な状態に置かれたためにエアロゾル化することによって出来たものである。PSCs が発生すると大気中の硝酸ガス濃度や水蒸気濃度は著しく低下する。特に、硝酸ガス濃度の低下は、硝酸ガスと平衡状態を保って存在している NO<sub>x</sub> の濃度低下を引き起こす (NO<sub>x</sub> が ClO<sub>x</sub> のオゾン破壊反応を抑制していることはすでに述べた)。抑制物質である NO<sub>x</sub> が少なくなるので、ClO<sub>x</sub> のオゾン破壊は極めて効率よくなるのである。

さらには、氷の粒子表面では次のような反応が進行して、化学的に活性が低い硝酸塩素 (ClONO<sub>2</sub>) を分解して塩素分子 (Cl<sub>2</sub>) に変換する；



生成した硝酸 (HNO<sub>3</sub>) は水和物を作って氷粒子のなかに留まり、Cl<sub>2</sub> は大気中に放出される。この反応は、結果としてせっかく ClO<sub>x</sub> が NO<sub>x</sub> によって不活性になったのに不安定な Cl<sub>2</sub> に換えられることになる。Cl<sub>2</sub> は、春になって太陽光をあびると容易に



のように分解してオゾン破壊反応のサイクルを形成する。南極の季節の変化を追って行くところなふうになるだろう；

冬の到来→成層圏の温度の低下→南極特有の PSCs の生成



NO<sub>x</sub>濃度の低下、水蒸気濃度の低下、Cl<sub>2</sub> の発生



春の到来→成層圏に太陽光が差し込み始める→Cl<sub>2</sub>が分解しClへ



ClO<sub>x</sub>によるオゾン破壊開始、NO<sub>x</sub>の抑制作用は働かない



オゾンホール出現

冬の始まりとともに、南極の成層圏には PSCs が発生し、それにつれて‘NO<sub>x</sub>濃度の低い’大気が出る。一方では、安定化していた塩素化合物の ClONO<sub>2</sub> が分解し‘ClO<sub>x</sub>の前駆物質となる Cl<sub>2</sub>が多量に生成する’。太陽のない南極の冬は、春のオゾンホールを生み出す準備がなされる時期なのである。寒冷な南極の冬の成層圏の存在こそ、オゾンホールが南極で顕著であり、春に顕著である原因であった。年々の拡大は、フロン濃度の年々の増加を反映している。

オゾンホールの中を飛行機で観測した結果は、図5に見るように NO<sub>x</sub>濃度は低下し、ClO<sub>x</sub>濃度が著しく増加していた。

このような理解を得るにあたって、日本の南極観測隊の貢献はきわめて大きかった。例

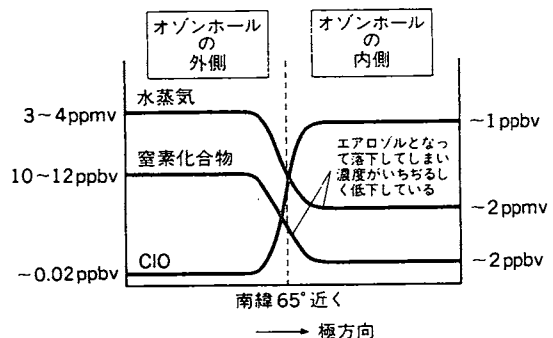


図5 オゾンホールの内側と外側では、オゾン濃度、NO<sub>x</sub>濃度、ClO<sub>x</sub>濃度に大きな差がある。オゾンホールの内部では、NO<sub>x</sub>の濃度が著しく低下しており逆に ClO<sub>x</sub>濃度が高くなっている (岩坂泰信, 科学, 63 巻, 1993 年による)。

えば、オゾンホール形成時にはどの高度でオゾンが減っているのか?という問題があった。人工衛星でみたオゾンホールは、オゾンの気柱濃度を表したものであり高度方向にどのような変化が起きているかは不明である。また、どの季節からどの高度でオゾンが消失し始めるのか?についても人工衛星からはわからない。エアロゾルについても同様なものであった。オゾン消失する高度を知ることや、エアロゾル濃度の分布状態とオゾン消失高度との対応、などオゾン破壊プロセスを明らかにするうえで最も重要な作業であったが、これらの多くが日本の南極観測隊の努力によってなされた。

そうそうたる観測陣を越冬させて、厳冬期にも本格的な観測を行っている国は少ない。そのようなわけで、日本の南極観測隊が行っている冬から春先の観測例は、大変貴重なものとなる。冬を迎えてPSCsが発生し、晩冬から早春にかけて急速に成層圏下部でオゾン破壊が進行してゆく様子を日本の観測隊は見事に捕まえていた。日本の観測のやり方が世界から絶賛されたのは当然であった。

オゾンホール形成について大枠が理解されると、そのような視座から新たな大気化学的な課題が続々と出されてきた。

・南極と北極の差はどのようなもので、なぜその差が生まれるのか?

・PSCsはどのようにして生まれるのか?

・PSCs表面での反応の詳細なメカニズムはどのようなものか?

・PSCs以外の大気中の微粒子はオゾン層破壊とは無関係なのか?

・微生物から大気中に放出されるガスのうちオゾンの消長に関係するものは何か?

・南極のオゾンホールは地球全体のオゾン消失にどのようにして関係しているのか?

・地球温暖化傾向とオゾン層破壊との関係はどんなものか?

また、太陽紫外線に対する関心が急速に高まり、この方面でも新たな研究領域が生まれた。南北差を明らかにすることは、取りもなおさずこれまでの南極や北極の理解をより深いものにすることになるが、新たに北極においても本格的な観測が必要になってくる。南極観測に携わった研究者のかなりの人が北極の観測にも関わるようになるのは当然といえ、当然であるが、これまでの体制のままで出来る仕事の範囲は知っている。やらねばならぬ仕事は急増しているのに、その仕事にたずさわっている研究者の数は増えないのだから。若い研究者が参加しやすくし、外国の研究者との共同作業がもっと容易になるような環境の整備も急がれる。微生物の放出する物質と大気グローバルな環境との関係を理解するには、これまでの学問分野の壁をこえた幅の広いアプローチが必要であり、既存の分野の研究を単線的にすすめて行くだけではなし得ないだろう。分野の壁を越えた本格的な研究が望まれるが、現状の体制は、このような分野をまたがる研究活動には必ずしも充分対応していないように感じる。その他の課題についても、新たな研究手法や研究体制の導入なくしては解決し得ない点がある。

## 6. むすび

オゾンホールの発見とそれにつづいて生まれた新たな研究領域の大きさを見ると、南極観測がはたした役割の重大さに改めて考えさせられる。しかし、日本の南極観測のすすめ方が絶賛される一方で、多くの研究者が長期間にわたって南極に滞在していることにびつくりもされている(良くそんなことをやっているなあ、というところか)。質の高い観測を継続してゆく必要性は、地球環境の時代をむかえて高くなる一方である。しかし、環境の厳しいところでの長期間の滞在については、



昨今の社会風潮は必ずしも好意的ではないように見受けられる。古き良き時代を讃えるばかりでは進歩はありえないであろう。今一つ知恵を絞って、多くの人の情熱と献身がもっともっと有効に働くよう工夫したいものである。

地球環境の時代を切り開いてきたオゾンホールの研究は南極から始まったが、南極だけを見ていたのではことの本質は見抜けな

かったであろう。中低緯度での観測との比較検討がなされて、南極で起きている現象の理解が深まることも多い。そのような意味から、今後はますます、南極と同時に北極もあるいは中低緯度も視野に入れた南極観測が望まれるであろう。

岩坂 泰信 (いわさか・やすのぶ, 1941年生)  
名古屋大学太陽地球環境研究所 教授。