

## オゾンホール

岩 坂 泰 信\*

昨年3月の気象のABCで「成層圏オゾン」を取り上げた(岩坂 2013)。そして、今度は「オゾンホール」である。大気中のオゾンに関することがこのシリーズで「2度も出てくるのか?」と疑問を持った人もいるかもしれない。もちろん、意図してそうしたのである。いくつかのわけがあるが、最も大きな理由は「南極のオゾンホール」と呼ばれるように現象が特定の空間と関係がある点である。だからと言って、全球的な現象と無関係であると言えない点があることである。オゾンホールが形成される時は、オゾンの消失速度が著しく大きい。このオゾン消失プロセスの主役が大気中に放出されたフロン起因の塩素酸化物(CIOxまたはClx)であるという点が2番目の理由である。そして最後の理由は現象の発見のされ方が気象学や大気科学を勉強しようとする者にとって極めて教訓的であったことである。

これら3つの理由は互いに関係したところがあり、いささか読み取りにくいことがあるかもしれないが筆者の意図を汲んでほしいと願っている。

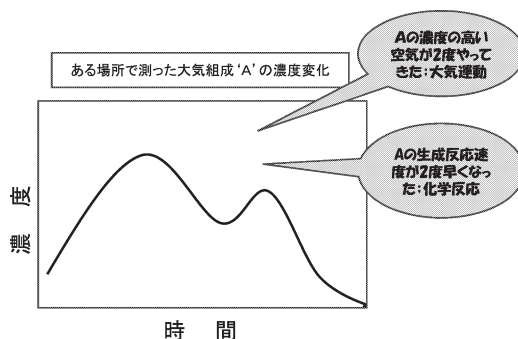
### 1. 大気組成が濃度変化するとき

我々が、大気中の組成を考える場合「ある程度の時間、安定して存在している」組成が圧倒的である。それ故に、ある場所で組成の急激な濃度変化が観測された場合には、化学反応によって変化を生じる可能性とともに、その物質を含んでいる空気塊の動きの効果を合わせて考えるのが普通である。場合によっては、その濃度変化の唯一の原因が空気の動きである場合も多

くある(第1図)。

我々の身近にある空気中の組成である水を考えてみるとよくわかる。湿度が今日は高いと思われる日があったとしよう。我が家の近くの空気中で盛んに水が作られて湿度が高くなったと考える人はまずいないであろう。TVのお天気ニュースの中でも、「今日は南から湿った空気が日本列島に向かって入りこむことから、日本の多くのところはむしむしとしたお天気なりそうです」などの報告はしばしばお目にかかる。

大気組成の変化は多くの場合やや不均一に分布して



第1図 代表的な大気組成はある程度安定しているものが多い。濃度の時間的な変化が観測された場合、どちらかと言えばこれまでの濃度と異なる気塊が観測点にやってきたと、解釈される場合が多い。成層圏のオゾンについても、地球上のある一点で観測される濃度変化は空気の運動に伴って生じたものが多く、オゾンホールに関しても、昭和基地で見られた「オゾン濃度」減少を「オゾンの化学的破壊」に直接に結び付けることは、発見当初は、難しかった。人工衛星観測や、他地点での観測結果等を総合して推理が進んだのである。

\* Yasunobu IWASAKA, 滋賀県立大学。

iwasaka@mti.biglobe.ne.jp

© 2014 日本気象学会

いるので高濃度の組成を含む気塊が移動すると移動先でその組成濃度があがるし、その逆も同じように起きる。

それに対し、南極でオゾンホールが観測される場合には極めて短い間にオゾン濃度が著しく低下するのだが（南極の外から低濃度オゾンの空気が流れ込んでそうなるのではなく）オゾン消失させる化学反応であると言う点で極めて特異的な現象であったのである。

現在この稿を読んでいただいている読者にはピンとこないかもしれないが、当時の南極観測ではオゾン観測の意義としてまず強調されていたのは成層圏の突然昇温現象の理解を深めることであった。1980年代、その理論的な枠組みは概ね出来上がっており、実証面から現象を精査する必要性が指摘されていた。突然昇温時にはオゾン全量が大きく変動することが知られており、オゾンゾンデによって垂直分布の時間変化を観測することで成層圏の空気の流れを詳細に理解できると考えられていた。オゾンは空気の流れの良きトレーサーとして考えられていたのである。

私事にわたるが、筆者が南極観測隊（1982年11月に出発1984年3月に帰国、南極中層大気観測5年計画の2年目）に参加するため多種多様な研究計画書を作ったが、オゾン観測はもちろんのこと筆者が主として担当したライダー観測においてもエアロゾルを突然昇温時の空気の流れのトレーサーとして考えた検討項目が挙げられていて、いま読み返すと人間の自然認識が持っているある種の保守性に何とも言えない感慨を持つのである。

オゾンホールが後述するように「化学（しかもエアロゾルを含んだ）反応によるオゾン消失で起きていた」事実は、想定外の現象であったのである。

## 2. 現象に名前を付ける：オゾン層破壊とオゾンホール

オゾンホールの発見は、近年まれにみるドラマチックな事件であった。何よりもこの現象が明らかになった経過がドラマチックであり、原因が明らかになるにつれて社会（もちろんその中に我が気象学会のような学術の社会も入れても良い）が対応する様子がまたドラマチックであった。なお、ここで近年まれに見ると気軽に書いてしまったがオゾンホールが科学的研究対象として取り上げられたのは30年ほど前である（1985年にファーマン等の論文（Farman *et al.* 1985）が出た年を基準としたい）。若い会員にとっては「生ま

第1表 おもなPSC（PSCs）のタイプ。

PSC	タイプ	II	水と氷を主成分とする結晶
	タイプ I a		硝酸 3 水和物を主成分とする結晶
	タイプ I b		硝酸、硫酸、水の混合液滴
	タイプ I c		硝酸 3 水和物の過冷却水滴
PSC	タイプ	II	氷を主体とする結晶

PSCsのタイプ分類はライダー観測による粒子の偏光状態の解析を主になされている。単に組成だけでなく粒子形成のされ方（例えば、ゆっくり冷えてできたのか急冷されたのかなどの違い）にもよると考えられる。

### しばしば、ごっちゃになる オゾンホールと成層圏オゾン破壊

#### 成層圏オゾン破壊

現象：世界的に見られる  
オゾン濃度の経年的な  
減少

主要プロセス：各種酸化  
物によるオゾン破壊や極  
地の貧オゾン空気の拡散

#### オゾンホール

現象：南極や北極で春  
先の成層圏で観測され  
るオゾンの低濃度現象

主要プロセス：PSC 粒子  
発生に伴う表面反応

第2図 オゾンホールと言う言葉は「成層圏オゾン層の破壊現象」と全く同義ではない。オゾンホールは、オゾン破壊が起きている際に極成層圏雲が関与していることが本質的と考えられている。

れる前の事件」と言う方がいるかもしれないが、このような方にはむしろ40年先、50年先のオゾンホールの行く末に関心を持っていただきたい。

フロンをはじめとする人為起源物質によってオゾン破壊が進行している。この現象を「オゾン層破壊」と呼ぶことが多い。そのような意味合いから言えばオゾンホールもまたオゾン層破壊であって、「特別にオゾンホールと呼ぶ意味があるのか」という意見も出てくるであろう。この方面の専門家の間では、「成層圏のオゾン破壊が（冬の極地方の成層圏に発生する）極成層圏雲（Polar Stratospheric Clouds, PSC, PSCsとも書く）粒子の表面反応が深くかかわって進行する現象をオゾンホールと呼ぶのが適当であろう」と了解されている。PSC粒子には、その出来方や組成の違いによっていくつかの種類がある（第1表）。このよ

うに、「成層圏オゾン層の破壊現象」と「オゾンホール」はまったく無縁でないのであるが全く同じものを言っているわけではない。それにしてもわかりにくい(第2図)。

このわかりにくさは例えばこんな風であろうか。

「北極成層圏のオゾン濃度が〇〇ドブソンまで低下し近年まれにみる低濃度状態にある。北極上空でもオゾンホールが発生か?」と書いた新聞を床屋で読んでいた熊さんと八さん、

熊さん：おい、ハチ公、この新聞はいったい何を騒いでいるのかさっぱり要領を得ないんだが、説明してくれねいかい。

八さん：オゾン濃度がすごく低いからオゾンホールと言うんだよ。ようはオゾン濃度が低いかどうかポイントってわけだ。

熊さん：するていと何だ、八。俺んちの上のオゾンとやらの濃度が低けりゃ、長屋の上空でもオゾンホールが発生となるのかい。

床屋の親父：そうじゃないんだってよ。南極や北極でオゾン濃度が低くなるとオゾンホールと言うらしいぜ。

熊さん：親父、解ったようなことをぬかすじゃねえか。何で、南極や北極がそれほどありがていんだよ。

と、全く混乱状態なのである。

たしかにわかりにくい点はある(本小論の全体を読んでいただければ上記の問題はわかるはず)が、現象のネーミングの巧さのおかげでオゾンホールと言う言葉は広く流布しフロンの使用や製造規制あるいは紫外線の健康被害対策などを進める上で大きな役目を果たしたと思われる。

オゾンホールと言う言葉は、アメリカのジャーナリズムが南極のオゾン層の破壊状態のすごさを示す言葉として使い始めたと聞いている。あらかじめ定義があって使われた言葉ではないのである。しかし、このネーミングが素晴らしかったことからその後広く使われるようになり、とうとう後追いで「オゾンホールとは何であるか、その規模をどのように表現するか」について基準を作らざるを得ない事態になったのである。

面白いことに研究者たちもしばらくすると盛んにこの言葉を使い始めたのである。このあたりの様子は、オゾンホールを扱った論文のタイトルによく反映している。オゾンホールが取りざたされた直後からしばら

く(1985年から2・3年後)は、

Large depletion of ozone  
Large loss of Antarctic ozone  
Large Antarctic ozone variations  
.....

のように、もっぱら南極成層圏オゾンの濃度低下を意識した言葉がタイトルの中に使われているが、1990年近くになると

Ozone hole  
Antarctic ozone hole

が、頻繁に論文タイトルに出てくるようになる。ちなみに筆者が越冬観測を終えて南極から戻って書いた論文(Iwasaka and Kondoh 1987)のタイトルには、Depletion of Antarctic ozone.....とあり、いま読み返してみてもオゾンホールと言う単語は本文中に見当たらない。もちろん原稿を書いていた時にはこの単語はすでに身近なものになっていた。オゾンホールなる単語を論文に使うことにはためらいがあるものの、この単語が大変印象的でニューズウィーク誌の切り抜きを壁に貼りつけて眺めていた記憶がある。人工衛星で観測した南極上空のオゾン濃度は、南極の春先になるとオゾン層にあたかも穴が開いたようにオゾン低濃度領域が出現する。この映像に「Ozone Hole」と言う単語を並べてあるのを見ると本当にネーミングの巧みさに感心する。

筆者はこの頃から論文のタイトルにこれまで以上に神経を使うようになったし、大学院生たちにも「論文タイトルにこだわれ!」と注文つけるようになった。現在のように多量に情報が出回ってくると、新着の雑誌が届いても以前のように掲載論文すべてに目を通すことはとてもできない相談で、タイトルを見て読むか読まないかを判断するケースが多くなっている。恐らく、筆者ばかりではないのだろう。

オゾンホールは、この素晴らしいネーミングのおかげで荒っぽいながらも、一般の人に「南極では恐ろしい勢いでオゾン層が壊されているらしい」とか「フロンのおかげでオゾン層がひどく傷んでいるらしい」という認識を持ってもらうのに大きな貢献があったと思われる。その後始まった産官学を挙げてのフロン規制や紫外線対策などを進める際に、一般国民の関心を高め支援を得る上で「オゾンホール」の名は幾度となく登場し大きな役目を果たしてきた。

この現象の観測面での定義付けは、その後日本の気象庁がある意味で世界に先駆けて行ったと言え言えるのである。オゾンホールが拡大しているのか縮小し始めたのかを記述しようとするオゾンホールなる現象をパラメータ化する必要が出てくる。

日本の気象庁では、南緯45度以南で相当の広がりを持って、オゾン濃度が(オゾン全量で測って) 220 m atm-cm 以下を示す現象をオゾンホールと呼ぶことにしている。こうすれば、オゾンホールの空間的な広さも計測可能になってくる。このような定義をめぐっては関係者の中で何度も議論されて、定められたものである。日本の気象庁の定義と言ってしまうとそれまでであるが、多くの国でオゾンホールの規模などを議論したり表現したりする時には、一つの重要な基準として受け入れられている。伊藤朋之他によってそれらの詳細がまとめられている(伊藤 1993)。メディアによって華々しく取り上げられて10年近くたって、定義が出来上がったのである。

日本初の定義が世界に広く受け入れられているこの現状は、日本の南極観測隊や気象庁が南極で質の良いオゾン観測を長期間にわたってやってきていると言う実績によっていることは言うまでもない。

### 3. 極地方のオゾン層破壊

オゾンホールは、極地方とりわけ南極の成層圏で観測される。この現象が発見された経緯は、いろいろなトピックスに彩られており、当時の新聞や週刊誌をはじめいろいろなメディアでそれらが取り上げていた。国立極地研究所だけでなく、当時の南極観測隊員や気象庁職員等関係の者はその対応に相当忙しい思いをしたはずである。

1980年代後半から1990年代にかけて、大学では教職員に社会貢献に努めるよう求めるようになった(今では、多くの大学が地域や社会への貢献を目的とした専門の部局を持つのが普通である)。「象牙の塔から出で

よ」と言うわけである。

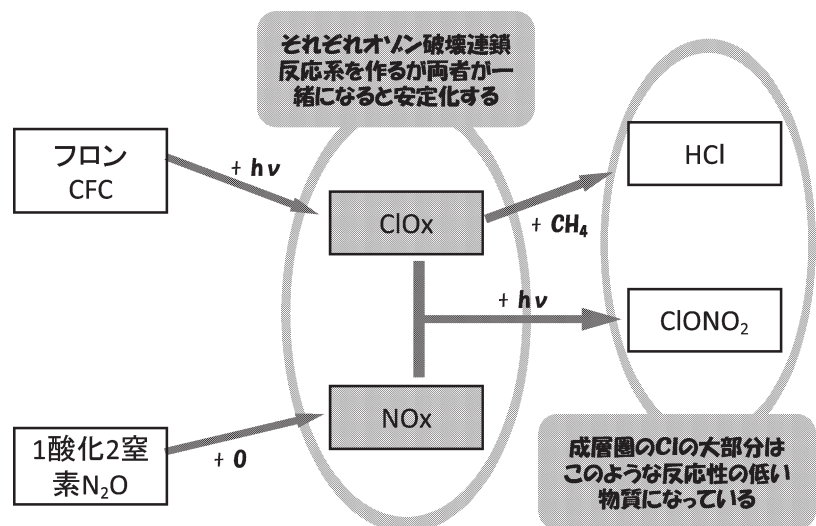
こんな風潮も重なって、「オゾン層が壊れて大変(らしい)」ことに関心を持った所(時には個人)から頻々とやってくる問い合わせに、むげに断れない。挙句には、講習会や勉強会での講師やチューターの依頼となる。講演が終わって受けた質問の中で記憶にあるのは、

「なぜ南極で見つかったのか？」

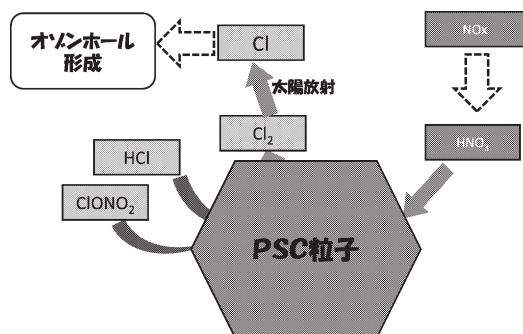
「ほかの場所でもまじめに続けて観測すればオゾンホールのようなものが見つかる可能性があるのか？」と言うものであった。前者の質問は、いみじくもこの小節のタイトルに対応している。後の質問は、「日本南極観測隊の40年以上もかけて成層圏オゾンを観測してきたのでいち早くオゾン層の異常を検知出来た」と紹介することが多かったのでそれに対して出た質問だろう。

極域(特に南極)の冬の成層圏は、極成層圏雲(PSC)が生まれるほど寒冷になる。このPSC粒子の素性は、一応第1表のようにまとめてはあるが、それらの粒子間の関係をはじめいまでも不明な点が多い。オゾンホール形成の上では、PSC粒子の表面反応が成層圏の比較的安定な塩素化合物(代表的なものは硝酸塩素  $\text{ClONO}_2$  である)を不安定な塩素分子( $\text{Cl}_2$ )に変換させる反応が本質的である(第3、4図)。

不安定な組成は何か機会があればたちまち次のス



第3図 オゾンホールの形成時のオゾン消失反応の主役は塩素酸化物である。通常の成層圏では塩素は塩酸や硝酸塩素のように反応性の低い化合物になっている。



第4図 極成層圏雲（PSC）が発生すると、塩酸や硝酸塩素のように反応性の低い化合物がPSC粒子表面で反応し塩素分子（Cl<sub>2</sub>）を作りだす。この分子は太陽放射の無い極夜には安定しているものの、春になって太陽放射が成層圏に差し込むとたちまち光分解しClO<sub>x</sub>に変換される。その時の成層圏ではNO<sub>x</sub>はPSCを作るのに消費されているので、ClO<sub>x</sub>は連続してオゾン破壊を続けることになる。

トップに進む。南極成層圏で起きているのは、次の光分解反応であり、



生まれた塩素原子（Cl）は極めて活性が高くオゾン破壊の連鎖反応系を形成することになる（第2表）。春先にオゾン破壊が急速に進むのは、春になって成層圏に太陽放射が見られるようになることに対応しているのである。

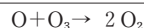
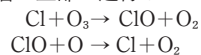
このように、成層圏が水蒸気や硝酸を粒子化してしまうほど低温状態になることがオゾンホールが出来るための条件とも言うべきものであり、その条件を満たしてくれる場所が南極であったということになる。初めの質問への答えであると同時にこの節で言いたかった主要な点である。

この頃の研究や教育の現場では「余裕がない」と言う声を聞く。一方で、「外国の○○では大学院の初年級で一流専門誌に論文を公表することがザラで、それに比べ日本ではまだまだ、もっと先生にはしっかりとやってもらわねば・・・」と日本の学術や教育の現場に見られる「ある種ののんびりした空気」を非難する声もよく聞く。そんな雰囲気の中では「同じ観測を40年間もよく続けて来てるなあ。無駄じゃないの」となりかねない。

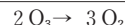
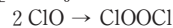
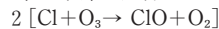
質問の答えになってないが、観測を継続するか止め

第2表 オゾンホールの形成に寄与している塩素酸化物の反応。

南極のオゾン層の上部で進行しているオゾン破壊反応



南極オゾン層の中・下部で進行しているオゾン破壊反応



るかは南極観測に限らず調査や研究を長年行ってきた多くの組織が常に抱えている問題である。そして、その答えを出すのはその組織の文化と時代の風潮とも言うべきもののような気がする。

#### 4. 原因物質からみたオゾンホール

オゾンホールが世の耳目を集める前の、オゾン層の研究がどんな状態にあったかについて簡単に触れておきたい。既にこのことは「成層圏オゾン」の稿で述べたが話の流れの都合もあり簡単に繰り返す。

成層圏オゾンの観測結果が蓄積されるに従い、理論的予測値が観測値より系統的に高いことが判ってきた。この問題はヨーロッパやアメリカでは強い関心もたれ、従来のオゾン層形成理論に含まれてないオゾン消失反応探しが盛んに行われていた（Dütsch 1970）。当然、反応定数などを推定するには大掛かりなチャンバー実験が必要で、その種の研究を維持するための財政基盤が望めない当時の日本の状況では、ごく限られた人たちの間での関心事にすぎず、気象学会でもあまり取り上げられていなかったのは無理からぬことと考えられる。

従来からの反応系に追加すべき物質（オゾン消失反応サイクルを作る）としてまず水素酸化物（HO<sub>x</sub>）が有力視された。

その頃、アメリカとヨーロッパで成層圏を飛行する商業用航空機の運航計画が浮上していた。1970年代は社会的に環境問題が強い関心を引きはじめていたこともあって、そのような高々度飛行が地球にもたらす影響をあらかじめ評価しておく必要ありとの機運が強かった。素早く反応したのはアメリカで、アメリカの運輸局が中心になって影響評価に関する研究プログラム（CIAP, Climate Impact Assessment Program）

を立ち上げた。このプログラムには、日本は参加しなかったが、ヨーロッパ各国が参加し極めて大掛かりな成層圏研究プログラムであった。

このプログラムが立ち上がる前後、オゾン層に大きな影響を与える可能性の高いものとして窒素酸化物( $\text{NO}_x$ )が多くの研究者によって指摘されるようになった。航空機のエンジン内の高温燃焼過程を通して大気中の $\text{N}_2$ が酸化し大量の $\text{NO}_x$ が生じ、それが成層圏に放出されるとオゾン破壊に影響するのではないかと言うのである。

このプログラムが実際に始めるとこの問題も含めて成層圏の化学的なプロセスを左右するさまざまな要素の検討も行われ、1975年に出た最終報告書には各種汚染物質の成層圏への流入、それらがもたらすかもしれないオゾン化学への影響、超音速飛行から生じる可能性のある多様な化学的擾乱、化学反応実験面のこまごまとした(しかし重要な)結果と評価、あるいは飛行ルートと高温燃焼反応の対応、飛行ルートの経済的な影響、など、成層圏の気象学上の基本的な要素はもちろん多方面にわたる問題が挙げられ論じられている。ただ、塩素酸化物( $\text{ClO}_x$ あるいは $\text{Cl}_x$ )の脅威についてはほとんど注目されておらず、火山噴煙の影響(当時は大きな火山噴火が続けて起きていた)の一つとして塩酸( $\text{HCl}$ )がわずかに述べられている。

一方で、オゾンの観測値と理論的な予測値のギャップは水素酸化物( $\text{HO}_x$ )と窒素酸化物( $\text{NO}_x$ )の効果を考慮すればほぼ埋まるという見解が受け入れられるようになってきた。

フロン起源の $\text{ClO}_x$ によるオゾン層破壊が指摘されるようになるがこの当時はまだ机の上の議論の感があり、破壊の規模を強調した論文などでは2000年を越す頃にはオゾン層が壊滅的になるであろうとする見方も出ていた。あわせて、オゾン消失に関係する反応の候補が飛躍的に増え、それらの反応定数を定めるための実験に関係する研究はなかなか追いつかない現実があり、予測値も大きなあいまいさを含まざるを得ないのが現状であった。そんなこともあるので、少し驚くような予測結果が出ててもそれを尊重して考えて見るという風にはなりにくい雰囲気があったのではないかと想像している。

その後、 $\text{NO}_x$ と $\text{ClO}_x$ が互いに反応して反応性の低い物質(例えば硝酸塩素)等になる可能性が指摘されたりして、フロンによるオゾン破壊の程度は当初に予想されたほど激しいものではないとされるようには

なった(第3図)。しかし、多くの反応の反応速度乗数の詳細はまだあいまいさが残っているものの、濃度が増えれば大きな脅威となることを論じている研究者も居た(例えば、Rowland and Molina 1975)。

成層圏にある硝酸塩素 $\text{ClNO}_2$ のもとになっている成分は、それぞれ対流圏起源の $\text{N}_2\text{O}$ とフロンである。

$\text{N}_2\text{O}$ は成層圏で種々の窒素酸化物となり、フロンは塩素酸化物を作る。窒素酸化物と言い塩素酸化物と言い、それぞれ単独ではオゾン破壊の連鎖反応系を形成するが両者が混合している状態では硝酸塩素 $\text{ClNO}_2$ を作って安定化する(=オゾン破壊しなくなる)。この様子を「毒を持って毒を制している」と言った人が居るが、けだし名言である。

事態が突如変わったのは、南極のハーレイ基地での観測をまとめた研究がネイチャーに発表されてからであった(Farman *et al.* 1985)。しかも、この論文は「南極成層圏の春に観測されている長期にわたるオゾン減少傾向はフロンによる可能性がある」ことを指摘したのである。フロンによるということとは $\text{ClO}_x$ によるオゾン破壊だと言うことである。彼の論文で示唆されたオゾン破壊プロセスは間違っていたが、フロンが原因物質であると言う点では間違っていなかった。極端な言い方をすれば、彼らがフロン原因説を出すまではフロンの脅威は真剣に取り上げられていなかったのである。彼らの論文を見ると、南極の春の時期のオゾンの減少傾向がフロン濃度の増加傾向と極めて良く対応することが強調されており、以前から指摘されて来た「急激なフロン濃度上昇の脅威」を思考の基礎に置いていたと伺える。

その後、オゾンホールが形成されるメカニズムで大きな役割を果たしているものに極成層圏雲(PSC)があり、ファーマン等のように気相反応だけで説明しようとする春に現象が急速に進むことがうまく説明できないことがわかってきた。PSC粒子の表面で生じる塩素化合物(化合物中のClはフロン起源である)の化学反応がオゾン破壊に繋がっていたのである。

こうして見ると、フロンによるオゾン破壊の状況をモニターするには南極成層圏のオゾンホールを見ておくのが最良の選択であったことが良く分かる。

現在フロンは世界的に規制を受けておりフロン規制が次第にその効果を表し始めると、やがて成層圏では $\text{NO}_x$ の反応相手となる $\text{ClO}_x$ が少なくなるために硝酸塩素 $\text{ClNO}_2$ を作るのに使用される $\text{NO}_x$ は少量で

足りてしまう。余った窒素酸化物はオゾン破壊に向かうことになる。この場合のオゾン破壊はPSCがなくとも進行するわけであるから、極地方にかぎらずどこでもオゾン破壊が進むと言うことになる。

PSCが関与する反応が重要プロセスとして登場したおかげで、多くの研究者がエアロゾル粒子の存在や機能に関心を向ける経緯となった。それまで気象学でエアロゾル粒子の取り扱い「放射学的に見た散乱と吸収物質」、「雲物理学的に見た氷晶核や凝結核」の分野に集中していた感があったがオゾンホールが研究対象になると同時にエアロゾル粒子の表面反応や落下運動に大きな関心が寄せられるようになり、それは同時に大気組成の一つとしてのエアロゾル粒子というごく素直な見方につながるものであった。

### 5. 新たな課題

フロン製造・使用に関しては厳しい規制がかかっており、現在ではフロンによるオゾン層破壊は峠を越えつつあるとの見方が強い（例えば、環境省 2012）。

そして次に問題化すると取りざたされているのがN<sub>2</sub>Oなのである。この組成もまた人間活動の拡大に伴って大気中濃度が急増している組成である。オゾン層に対する影響については、フロンの陰に隠れた形になってやや議論されることが少なかった感があるが（温室効果ガスとしてはしばしば取り上げられている）、フロン規制の効果が明確になれば（その時までN<sub>2</sub>Oの濃度は相変わらず増加するであろうから）N<sub>2</sub>O問題はさらに重大化するだろう。増加しているのは主として農業活動に起因すると考えられその規制は相当の困難が伴うだろうと思われる。なによりも、肥料の使用状況と土壌中微生物生態系の実態にかかる膨大な情報（当然ながら自然科学のほかに人文社会の広い範囲の情報）が必要になってくる。これを世界規模で収集するとなると前代未聞の大仕事である。農業は古くからおこなわれて来た生産活動で、人類が地球上に広がるにつれて多種多様なやり方が生まれ（しかもそれはその社会の制度のありようと不可分であることが多い）、そして今でも各地で変化を遂げている生産活動なのである。

Ravishankara *et al.* (2009) はオゾン層の破壊物質と言う点から見ると農業に起因するN<sub>2</sub>Oの放出がフロンの影響を凌駕していることを、サイエンス誌上で強調したことから、この議論が活発に行われるようになっていく。

農業生産の向上を目指すために人類はさまざまな工夫をしてきたが、施肥は中でも重要な工夫の一つである。農作物を育てる際の肥料の中で最も重要なのは、窒素肥料である。なぜ、肥料をやるのか？という問いに答えるには相当込み入った説明をせねばならないが、荒っぽく言えば「植物が（そして動物も）空気中の窒素を生命維持のために直接利用することが出来ないようになっている」と言うことに尽きる。

よくよく考えて見れば、大気組成の中でもっとも目立つものは分子状態の窒素であり、大気が地球上の生き物にとって安全なものとなっているのはこの窒素のおかげと言ってもよい。安全であると言うことは、化学的に安定で利用しにくいということでもある。農業を始めた人類は大地（あるいは農作物）に利用しやすい形にした窒素（肥料）を与えることで農業生産が向上することを発見し、現在では人工的に作られた肥料を多量に使用する農法が普通になっていると言うことであろう。

N<sub>2</sub>O問題のような難儀さに比べると、フロンの問題は極地で地域限定的に顕在化したため現象を監視する上では取り組みやすかった面があるとも言える。

最後に注意しておきたいのは、オゾンホールが極成層圏で現れることにこだわり過ぎて地球全体を見ることを忘れてはいけないということである。PSCを作り出す大気状態は極渦の形成と深い関係がありそれは言うまでもなく極地方の熱・放射バランスとグローバルな大気の流れとの兼ね合いが作りだしているものである。また、極渦が消滅する時期になれば極地方に局在していた貧オゾンの気塊は低緯度方向に流れ出し、結果として地球全体の濃度の低下を引き起こしているのである。

人間活動に伴って排出される温室効果ガスの動向は大きな検討課題となっている。極成層圏の温度分布は温室効果ガスの濃度変化に大きく左右される。全球規模の大気状態とオゾンホールとの関係については、まだまだ興味ある課題が残されている。

### 参考文献

- Dütsch, H. U., 1970: Atmospheric ozone - A short review. *J. Geophys. Res.*, **75**, 1707-1712.  
 Farman, J. C., B. G. Gardiner and J. D. Shanklin, 1985: Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO<sub>x</sub>/NO<sub>x</sub> interaction. *Nature*, **315**, 207-210.  
 伊藤朋之, 迫田優一, 上窪哲郎, 長沼 弘, 柴田誠司,

- 1993: 南極オゾンホールの強さ・規模の定量的表現と経験的予測に関する研究. 研究時報, 45, 1-16.
- 岩坂泰信, 2013: 成層圏オゾン. 天気, 60, 199-202.
- Iwasaka, Y. and K. Kondoh 1987: Depletion of Antarctic ozone: Height of ozone loss region and its temporal changes. Geophys. Res. Lett., 14, 87-90.
- 環境省, 2012: 平成23年度オゾン層などの監視結果に関する年次報告書. 210pp.
- Ravishankara, A. R., J. S. Daniel and R. W. Portmann 2009: Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century. Science, 326, 123-125.
- Rowland, F. S. and M. J. Molina 1975: Chlorofluoromethanes in the environment. Rev. Geophys. Space Phys., 13, 1-35.
- オゾンホールの人工衛星観測結果は, アメリカ航空宇宙局 (NASA) のホームページで見ることが出来る。
-