

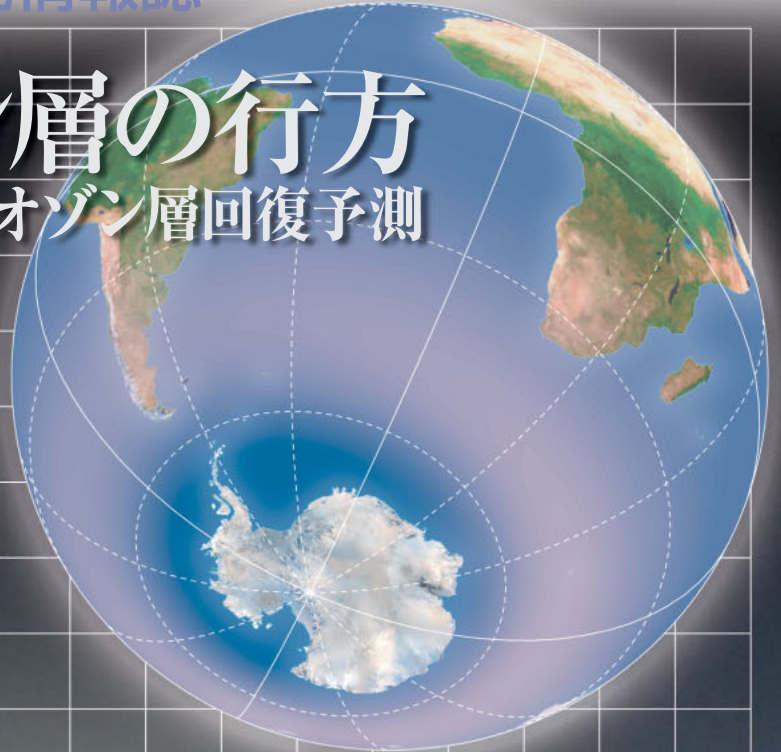


環境儀

NO. 26 OCTOBER 2007

国立環境研究所の研究情報誌

成層圏オゾン層の行方 3次元化学モデルで見るオゾン層回復予測



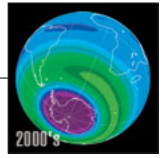
独立行政法人

国立環境研究所

<http://www.nies.go.jp/>

世界が直面した地球規模の環境問題、
オゾン層の破壊とその保護
それを検証する3次元化学モデルは、
スーパーコンピュータ上に
50年後のオゾン層の回復状態を予測しました





1982年、世界で初めてオゾンホールが南極で観測されました。それから四半世紀が過ぎようとしています。この間、観測、理論、室内実験など多方面の研究が精力的に進められ、成層圏オゾン層破壊現象の詳細とそのメカニズムの解明が進みました。世界では1985年にオゾン層破壊物質を規制する「ウィーン条約」の採択、1989年にはフロンなど具体的なオゾン層破壊物質の規制措置を定めた「モントリオール議定書」の発効など、国際的な取り決めも行われています。

一方、成層圏の大気変動を立体的に捉えオゾン層破壊のシミュレーションが可能な3次元化学モデルの開発が本格的に開始されたのは、世界的にも1990年代に入ってからでした。国立環境研究所では、東京大学気候システム研究センターと共同で3次元化学モデルを日本で初めて開発し、その研究成果は国連傘下の世界気象機関(WMO)が発行する「オゾン層破壊の科学的アセスメント」に掲載されるなど、世界的にも評価されています。

本号では、3次元化学モデル(化学輸送モデル、化学気候モデル)を使った成層圏オゾン層モデリング研究の概要と成果を紹介します。

C O N T E N T S



成層圏オゾン層の行方

3次元化学モデルで見るオゾン層回復予測

Interview

研究者に聞く P4 ~ P9

Summary

3次元化学モデルを使ったオゾン層破壊の再現と将来 P10 ~ P11

研究をめぐって

オゾン層モデル研究、世界の視点と動向
..... P12 ~ P13

「オゾン層の将来予測と3次元化学モデルの研究」
のあゆみ

..... P14

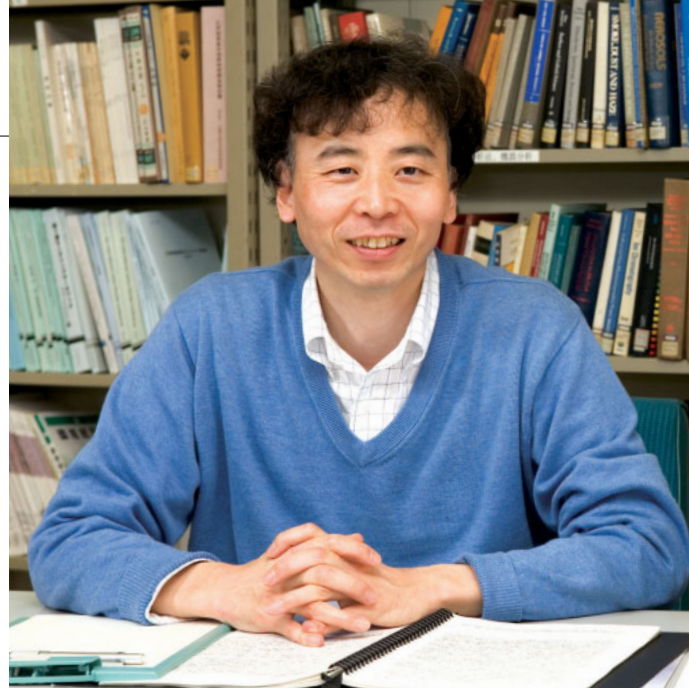
写真：北極で見られたPSC(極成層圏雲)。2005年1月31日、WMO(世界気象機関)のBraathen博士撮影。

本研究の一部は下記国立環境研究所HPに掲載されています。
<http://www.nies.go.jp/kanko/tokubetu/sr70/index.html>



環境儀では「オゾン層の機構解明」を10号で掲載しました。そこでは世界的にも難しかった宇宙からの人工衛星センサーによる成層圏の高度別オゾン濃度の測定が、ゾンデ(気球観測)並みの精度で可能となり、その成果としてオゾン層破壊の実際の状況を見ました。

今回は第二弾として、観測だけでは知ることのできないオゾン層の詳細な動向を解明するモデル研究の考え方や、今後オゾン層はどうなっていくのか、などをお聞きしました。



秋吉英治 / 大気圏環境研究領域・主任研究員

世界に貢献する - 3次元化学モデル

1: 研究までの道程

まず、研究者となったきっかけからお願いします。

秋吉：私は大学では物理学科の地球物理学講座に在籍していましたが、実験室にこもって研究するようなミクロな分野にはあまり興味が持てず、屋外へ出て研究をしたいと考え大気分野へ進みました。

1982年に、気象研究所の忠鉢繁博士が世界に先がけてオゾンホールを観測しましたが、その頃、私は大学院に在学中でした。

まさに、オゾン層破壊が目撃された頃ですね。

秋吉：そうです。レーザーライダー(ライダー)で成層圏エアロゾルの研究をしていました。ライダーとは、地上から天頂へ向けてレーザー光線を一直線に飛ばし、その反射光から大気のエアロゾルの状態を捉える装置です(環境儀第8号7頁参照。http://www.nies.

go.jp/kanko/kankyogi/08/07.html)。上空のエアロゾルは、ある程度の時間が経つといろいろな変動が起こります。ところが、ライダーでは直線上の様子しか分かりません。つまり1次元です。観測データを検討しているときに、「エアロゾルが増えたのはたぶん南風が吹いていたから、あるいは減ったのは北風が吹いていたから」、など何となく推測はつきますが、どうしても全体が見えないこともあり、非常にもどかしい思いをしていました。エアロゾルの動きを3次元でシミュレーションできれば、とっていました。

永島：私は高校の頃地学や地理が好きだったので、地学系の講座がある大学へ進みました。とくに研究者になるうなどは考えていませんでしたが、学部の卒論がうまくいかず、納得できる道を求めて修士課程へ進みました。そこで、指導教官からモデルを使ってオゾンホールを再現するというテーマが与えられました。

オゾン層の話

オゾンは、4つの基本的な光化学反応によって赤道近くの上部成層圏(40km以上)で多く発生し極方向へ少しずつ流されていきます。運ばれながら次第に下降し、光化学反応をあまり受けなくなって下部成層圏(25km以下)に多く留まります。高緯度ではオゾンがより多く溜まってその濃度が高くなります。

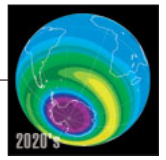
オゾンの生成：大気中の酸素分子は、太陽の紫外線を吸収して2つの酸素原子に分解します(5頁図の)。酸素原子は別の酸素分子と反応してオゾンになります。オゾンは紫外線を吸収し酸素原子と酸素分子に分かれます。の反応は速く、熱帯の高度40km付近では、が1回起こる間に数百回程度繰り返します。やがて、オゾンは酸素原子と反応して2つの酸素分子に戻ります。の反応ではオゾンの生成と消滅が非常に

速く繰り返され、紫外線と気温の速い変動に応じてオゾン濃度も変化しますが、一日以上の少し長い時間スケールで見るときには結局、がオゾン生成の速さを決め、がオゾン消滅の速さを決めることになります。

フロンによるオゾン層の破壊：フロン分子は紫外線を吸収して塩素原子を遊離します。その塩素原子はすぐにオゾン分子と反応して一酸化塩素を生成します。一酸化塩素分子は酸素原子と反応して元の塩素原子に戻ります。の過程でオゾン分子、オゾンを生成する酸素原子を1個ずつ破壊します。その後塩素原子は、新たなオゾンと結びつきオゾンを次々に破壊していくのです。

塩素原子は、それ自身は変わらず接触する物質(オゾン)の化学反応を促進する触媒です。塩素原子一つで数万個のオゾン分子を破壊するといわれています。

ここで、の化学式を足してみましょ。そして、矢印の左



永島達也 / アジア自然共生研究グループ・研究員

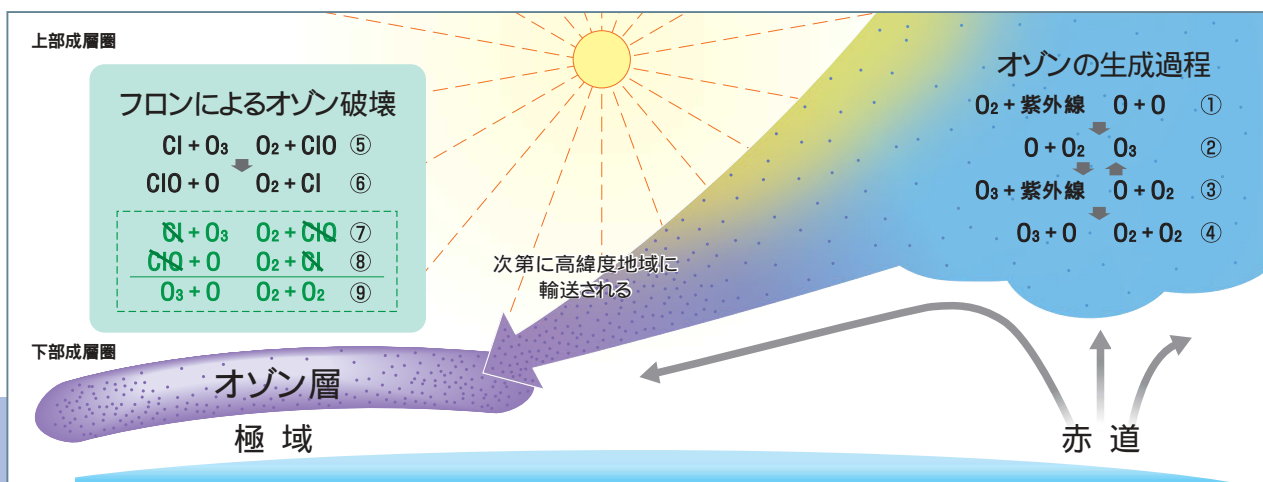
ところが、それもうまくいかなかったのです。悔しかった。そこで、博士課程に進み再度挑戦しました。粘り強く取り組んだ結果、なんとか再現に成功することができました。今思うと、失敗にめげずしつとく研究を続けた結果、いつの間にか研究者の道に進んでいたという感じがします。

2：モデル研究の重要性

オゾン層の研究に関しては、人工衛星からの観測や、南極での地上観測など、さまざま角度からの研究

が行われていますが、その中でモデル研究はどのような位置づけになるのですか。

秋吉：ILAS(10頁、図6参照)などの人工衛星や地上からの観測は、非常に大切です。ただ、そこで得られるオゾンを含む大気中の微量成分のデータは、どうしても空間的・時間的に限られたものとなります。ですから、変動の原因を考える際に、観測データの情報だけを用いた解析では推測の域を出ない場合が多々あるのです。たとえば、先ほどドライダーの話で、「たぶん南風が吹いたからエアロゾルが増加したのだろう」と話しましたが、観測データだけからだと、こうした推測の検証が困難な場合が多いのです。検証作業をスムーズに行うためには、なるべく空間的にも時間的にも連続したデータがあるとよいのですが、現在、世界各地で行われている地上観測ネットワークを駆使しても、ILASなどの人工衛星データを用いたとしても、まだ十分ではありません。そこで、成層圏におけるオゾンなど化学物質の分布やその時間変動をモデル化し、観測の不十分な点を補って大気中の化学物質変動を理解するためのツールとして開発されたのが、私たちが使用している3次元化学モデルです。モデルの計算によって化学成分の挙動が全体的に把握できれば、



側にある反応物質と右側の生成物質に同じ原子・分子が出てきた場合はそれを消去してみましょう(、 、)すると、 は見かけ上 と同じ形となります。このように酸素原子以外の原子・分子によるオゾン破壊の効果も の形で表現されることが多く、それゆえ はオゾンの消滅反応として重要な形なのです。ふつうは何らかの原因でオゾンが減少しても、化学反応系自身が持つフィードバックがかかってオゾン層が一方向的に破壊されることはありません。9月～10月の南極上空は によるオゾンの生成が少ないうえに、極渦(冬季の成層圏に生じる極を中心とした大規模な渦)の発達によって赤道や中緯度地域からのオゾンの供給が断たれ、そのうえに、極成層圏雲を介した特殊な化学反応によって の形の反応が異常に速くなり、オゾン層破壊が一方向的に進む特殊な状況なのです。

地球温暖化とオゾン層

温室効果ガスが増加すると対流圏では温暖化が進みますが、成層圏は逆に寒冷化します。成層圏の温度は、オゾン層の太陽光吸収による加熱とCO₂の赤外線放出による冷却のバランスによって決まっています。成層圏でCO₂が増加すると、その分多くの赤外線を放出して気温が下がり、オゾンによる加熱とCO₂による冷却がより低い温度で落ち着きます。下部成層圏が約-80℃以下になると極成層圏雲(PSC)環境儀10号7頁参照、<http://www.nies.go.jp/kanko/kankyogi/10/07.html>)が発生して、塩素濃度の高い状況ではオゾン層破壊がより促進されます。一方、フロン規制により塩素濃度が低くなった上部成層圏では気温の低下に伴って の活動が活発となり の活動が停滞するため、オゾンの発生が増えると予測されます。

観測で見た局所的な変動がどのような原因から起きたのか、そしてどのような空間構造を持った変動なのかを理解することができます。また、観測データの存在しない将来のオゾン層がどうなるのかを予測するには、こうしたモデルの利用が必須なのです。

このような背景もあり、私たちは1995年に成層圏化学モデルの開発に着手しました。国内の先駆けとして、東京大学気候システム研究センターとの共同研究プロジェクトを開始し、大気大循環モデル^{メモ}をベースに成層圏での化学プロセスを取り込んだ3次元の化学輸送モデルと化学気候モデルを開発することができました。

3：モデルについて

今回の研究では輸送と気候の2種類の化学モデルが使われています。化学モデルとはなんのでしょうか？そして、輸送、気候の両者はどう違うのでしょうか。

永島：第一に化学モデルの目的ですが、これは、オゾンをはじめとする化学物質の空間分布を時々刻々と計算することです。以下、基本的な考え方を説明しましょう。

ある地点のある高度におけるオゾン量がどのようにして決まるかを考えます。まず、その場所に他の場所からオゾンがどれくらい運ばれてくるか、また逆に他の場所に向かってどれだけ流れ出て行くのかを考えます。両者の差し引きが輸送による正味のオゾン変化量になります。一方、その場所における化学的なオゾンの生成・消滅も考えなければいけません。化学反応の速さは、その場所での気温や日射量、オゾン以外の化学物質の量によって決まります。最終的には双方を用いて、オゾンがどのくらい増減するのかを計算することができます。この計算を、ある初期状態からたとえ



ば数十分の時間間隔で連続して行うことにより、オゾンの空間分布を時々刻々と計算することが可能なのです(図1)。

4：化学輸送モデルと化学気候モデル

なるほど。では化学輸送モデルと化学気候モデルの違いはどこにあるのでしょうか。

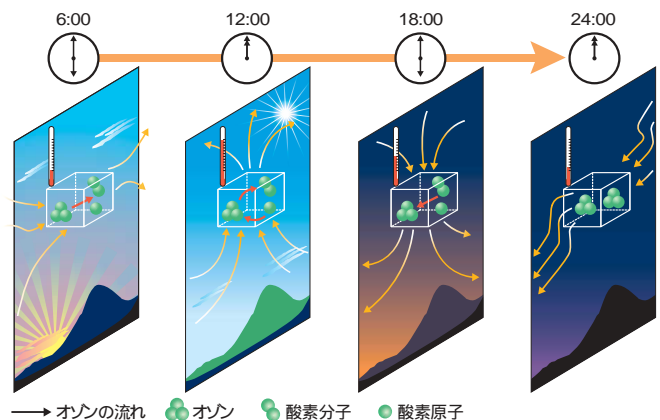
秋吉：両モデルの違いは、技術的にはそう大きなものではありません。今説明した計算で必要になる風と気温のデータとして、化学輸送モデルでは観測値を、化学気候モデルでは流体力学や大気放射の方程式を解いて風と気温を計算した計算値を、それぞれ用いて化学物質の分布を計算します。この点がほぼ唯一の違いです。与えられた風と気温等のデータを使ってオゾンをはじめとする化学物質の分布を計算する手法は、両モデルで共通のものを用いています。

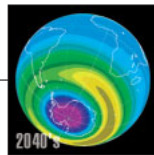
化学輸送モデルは、風と気温のデータとして観測値を用いるので、計算された化学物質分布の時間変化は現実大気を比較的よく再現します。また、再現だけではなく特定の化学物質の量や化学反応の速度などを人為的に調整して計算できますので、その結果から、その化学物質が他の物質に及ぼす影響を定量的に評価することができます。こうした評価は化学物質の観測データだけでは難しく、化学輸送モデルの利用は、実際に観測されたオゾン変動の要因解析などに威力を発

図1 成層圏におけるオゾン量の日変化

上部成層圏のある場所(図中の白い線で囲んだ箱)に入り込んでくるオゾンの流れと逆に出ていく流れ(図中の長矢印)の差し引きで輸送によるオゾン量の変化が見積もれる(入り込む方が多ければ増加し、出ていく方が多ければ減少する)
一方、化学反応は、気温や日射量(図中の温度計と太陽からの光芒で表現)そしてオゾンと反応する化学物質の量で決まる。

- 朝：オゾンの光解離によりオゾンが減少
- 昼：オゾンの光解離と $O_2+O \rightarrow O_3$ によるオゾン生成が均衡
- 夕：日没とともにオゾンの光解離は無くなり、 $O_2+O \rightarrow O_3$ によるオゾン生成が優勢となるため、オゾンが増加する
- 夜：Oが無くなるまでオゾン生成が進み、それ以上は変化がなくなる





揮しています。

永島：化学輸送モデルは、計算を行うために風や気温の観測データが必要なため、観測データのない期間、つまり遠い過去や将来の大気化学物質の挙動を計算することはできません。一方化学気候モデルは、風や気温もモデルで計算しますから、観測データのない期間における化学物質の変動を評価することが可能になります。実際には、過去におけるオゾン層破壊物質や温室効果ガス、海面水温などの観測値、あるいは将来におけるそれらの予想値を用い、化学気候モデルで過去や将来を計算しますが、ここで計算されるデータは100年前や100年後を完全に再現するわけではありません。

たとえば、化学気候モデルに1990年代に観測された温室効果ガスや海面水温のデータを与えて1990年代の再現実験を行っても、実際に観測された日々の大気状態の変化を精密に再現することはできません。これは、実際の大気現象とそれを表現した数値モデルがカオス(予測不確実)的な性質を持っているためです。

しかしながら、計算値を時間平均した値は、観測データから求めた1990年代の平均値をよく再現することが可能です。このような平均値(=気候値)の再現性を確認した上に、同じ化学計算の手法を用いた化学輸送モデルで、実際に観測された化学物質の細かい変動

をよく再現することが確認できれば、それらを根拠にして、化学気候モデルによる過去や将来の評価に信頼性を与えようというのが化学気候モデルを用いる研究の基本的な立場です。

化学気候モデルを用い、オゾンをはじめとする化学物質の将来予測を行う理由はそれだけではありません。実は、成層圏では大気温度や風の分布が決まるのにオゾンによる太陽放射の吸収とそれによる大気加熱が決定的な役割を果たします。50年先、100年先までのオゾン量を予測しようと思ったら、これらの影響変化も加味したフィードバック過程を考えることが必要となります。化学成分、気温、風速の分布を同時に計算する化学気候モデルでは、こうした用途にまさにうってつけといえます(図2)。

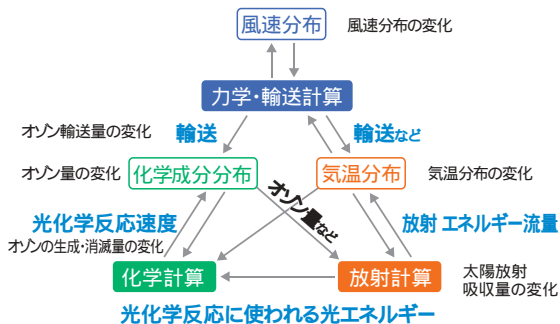
5：世界に発信する

さて、その成果についてはいかがですか。

秋吉：当時(1990年代半ば)こうしたモデルは、計算時間の点から実用的でないといわれ、世界でも米国大気センターと米国航空宇宙局ゴダード宇宙科学研究所、そして英国気象局の3つしか行っていませんでした。しかし、オゾンなどの化学物質の動きや反応を3次元で捉え追いかけていくことは、将来予測をするためには欠かせませんし、日本でも研究が必要でした。幸い国立環境研究所でも1991年にスーパーコンピュータが導入され、そこで世界を目標に追いつけ追い越せと進めたわけです。

永島：最初の大きな成果は、国連の世界気象機関(UNEP/WMO)が発行する「オゾンアセスメント」^(メモ)の2002年度版に、私たちのオゾン層将来変動予測が

図2 化学気候モデルの概念図



化学気候モデルでは、ある時刻における風速分布や気温分布、化学成分分布を用いて、力学・輸送計算、放射計算、化学計算を行い、次の時刻での各量の分布を計算します。こうした計算を繰り返すことによって各量の時間変化を求めることができます。このような計算手順により、オゾン量の変化、太陽放射吸収量の変化、気温分布および風速分布の変化、オゾンの輸送量、生成・消滅量の変化、オゾン量のさらなる変化、というような、オゾンに関するフィードバック過程(作用のループ)を、モデル計算の時間進行に合わせて適切に再現することが可能になります。

大気大循環モデルとは、地球規模の大気の動き(風)や気温の分布などを、流体力学や大気放射などの物理学の法則に則って計算するコンピュータプログラムのこと

オゾンアセスメント(正式訳は「オゾン層破壊に関する科学的評価」、Scientific Assessment of Ozone Depletion):世界気象機関(WMO)と国連環境計画(UNEP)が世界の科学者の参加を得てオゾン層破壊に関する科学的な評価を行い刊行してきた報告書。1989年、1991年、1994年、1998年、2002年、2006年の6回、報告書が出ている。

Memo

採用されたことです。そこでは「もっとも進んだモデル計算結果」の一つとして扱われており、科学的な成果が出たことはもちろんですが、それを社会に還元できたことは大きな喜びでした。

それは、素晴らしいことですね。

秋吉：ただ、空間分解能が少し粗いとか、化学計算の手法に多少問題があって改良が必要でした。そして、2007年に発表された「オゾンアセスメント2006年度版」を次なる目標に研究を続けました。2002年度版の実績もあり、国立環境研究所のスーパーコンピュータが優先的に使えるようになりました。

6：モデルの改良

具体的には、どのような改良をしたのですか。

永島：いろいろ行いました。分かりやすい例の一つ紹介しましょう。南極では8、9月にオゾンホールが形成が始まりますが、そのとき生じるオゾン破壊率が、モデルでは実際と比べて小さくなっていました。これはなぜだろうと考え検討した結果、太陽光線の進路を計算する手法に問題のあることが分かりました。9月の南極地方は極夜明けといわれる時期にあたり、太陽の位置は非常に低く、成層圏では太陽光線が大気層の下方から差し込むことも可能です。しかし、当初使われていた計算手法では、地表と大気を平行平板と仮定してしまっていたので、太陽光線は必ず大気層の上方から差し込むことになり、薄暮時の南極上空成層圏の状態を再現し得ないことが判明したのです(図3)。

さっそく現実に合わせて球面形状の大気を仮定すると、大気層の下方から進入してくる太陽光線を再現できるようになりましたし、オゾン破壊率を現実に近い

南極で観測されたPSC(中島英彰博士撮影)
成層圏の気温が低く広範囲でPSCが見られます。

ものにすることができました。

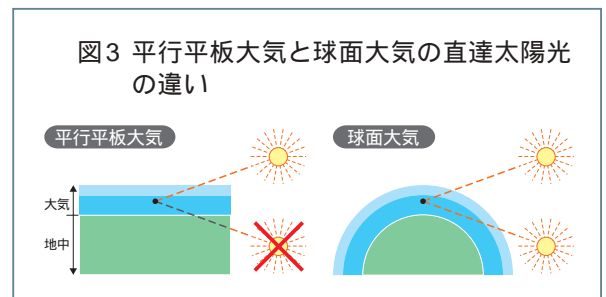
7：オゾン層破壊の科学アセスメント 2006年版へ

そして、いよいよ目標ですね。

秋吉：オゾンアセスメント2002年度版では8つの研究機関が行ったモデル実験がまとめられていますが、それぞれの研究機関が採用したモデル実験の設定が実はバラバラで、個々のモデルの評価はできるのですが、モデル同士の比較はできませんでした。今回はWMOから共通の設定案が事前に提示され、それに沿った形でモデル開発を進めました。

今回は世界の11の研究グループが参加し(図4)、私たちの研究では、「2020年頃にはオゾンホールの回復傾向が認められ、今世紀半ば頃にはオゾンホールが解消される」という将来見通しが得られました。

評価はいかがでした。

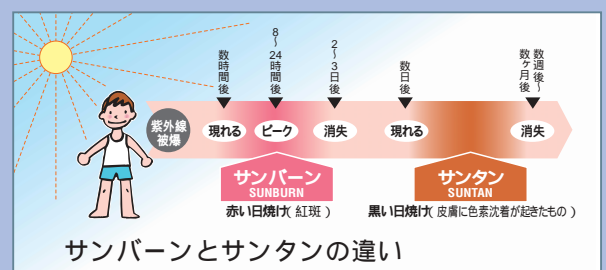


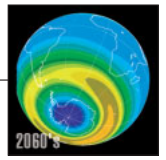
オゾン層破壊と紫外線曝露 による健康影響

国連環境計画(UNEP)の最新報告(2006)によれば、オゾン層破壊による紫外線増加は確実なものの、紫外線照射量の将来予測に関しては、オゾン層破壊だけでなく気候変動の影響を受けるため、不確実性が大きいとされています。同報告では、紫外線の増加により、健康、陸域生態系、水域生態系、などさまざまな影響が指摘されています。

紫外線による健康影響は大きく分けて、皮膚に対する影響、眼に対する影響、免疫機能に対する影響があります。一方、プラス的作用として、ビタミンDの合成に関わっていることが知られていますが、現在のように食事から十分なビタミンを摂取している限りその必要性はわずかです。

皮膚に対する影響としては、日焼けや、しみ・しわ、そして、良性腫瘍、前がん症、皮膚がんの発生率の上昇といったものがあります。日焼けには、日光にあたった数時間後くらいから起きる赤い日焼け(サンバーン)と数日してから現れる黒い日焼け(サンタン)があります。日焼けサロンは人工的にサンタンを作り出しますが、悪影響も指摘されています(WHO)。また、オー





北極で観測されたPSC (Braathen博士撮影)
南極に比べ成層圏の気温が高く、狭い範囲でPSCが発生します。

永島：信頼性の高いモデルとの評価を受けています。ただ、今回のオゾンアセスメントでは、南極上空の塩素量が観測に比べるとやや少ない値のモデルが多かったのです。私たちの場合もそうでした。これは、何が原因なのかはまだ分かりません。モデル大気と現実大気が完全に一致することは理想ですが実は難しい。計算手法の問題や科学的にまだ把握されていない、あるいは実証されていないような化学物質の反応や輸送のプロセスなどは、モデルに入っていません。おそらく塩素の件もその辺に原因があると考えています。

秋吉：その辺を念頭にモデルに手を加えた研究者もいました。そうしたらオゾンホールは非常にうまくいきましたが、他の地域がおかしくなっていました。つまり、全球的に見ると信頼できないおかしな予測になってしまったわけです。

永島：今回の研究に使ったモデルは、計算にかなり時間がかかります。1年間分の計算に約60時間。これは地球温暖化のモデルなどに比べるとはるかに長い時間です。これを100年分を行いますからすべての計算が終わるのに8カ月以上かかることになります。計算の途中でミスなどをしてしまうと、それまでの時間が無駄になりますから、本当に慎重な作業が必要でした。

8：研究の今後について

さて、研究の今後についてお聞かせ下さい。

オーストラリアやアメリカのデータで、紫外線の強い地域ほど皮膚がん発生率が高いといった研究や近年皮膚がんが増加しているという報告はありますが、日本人でみると紫外線の強さによる皮膚がんの発生率や増加率についての公式の統計データはありません。一方、神戸大学の市橋教授のグループが兵庫県加西市と沖縄県伊江村で実施した住民検診によれば、日光角化症(前がん症の一つで、将来がんに進展する可能性がある)は伊江村が加西市に比べて高率であり、また同一地区でも屋外作業者に高率であることが示されています。

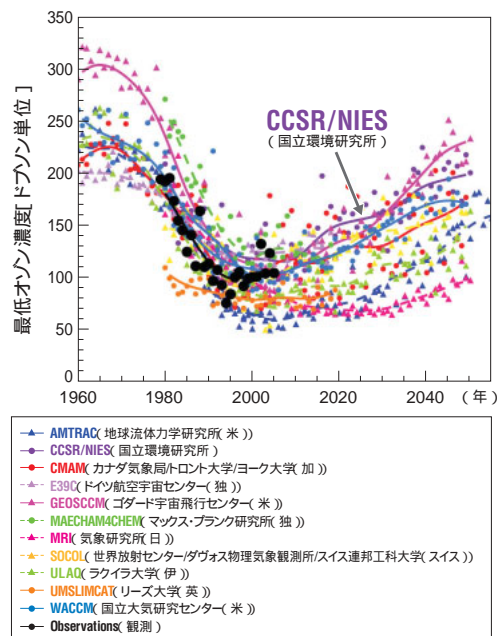
眼に対する影響としては、第一に翼状片(鼻側の結膜が角膜上に侵入してくる)が上げられます。国立環境研究所の調査でも、紫外線曝露量の多い人に翼状片が高率に発生することが確かめられています。その他、白内障(レンズの役割を果たしている水晶体が濁る)のうち、皮質白内障が紫外線曝露と関連していることが知られていましたが、最近の研究で、核白内障についても温度とともに紫外線が関連していることが示されています。

秋吉：今回の研究を総括しますと、オゾンホールは今世紀半ばには消える可能性が高いと予測されます。これは喜ばしいことですし、科学と政策が結びついて成果を上げた数少ない成功例といえます。地球環境にとっても画期的なことです。

ただし、オゾンホールからの回復が実現したとしても、その時点での成層圏の大気組成は、オゾンホールが出現する1980年代以前とは違っていると予想されています。たとえば、CO₂のような温室効果ガスは成層圏でも増えています。その増え方が今回の将来予測で仮定したシナリオと違って来るかもしれません。そうした違いがオゾン層の今後はどう影響してくるのかはまだわかっていません。このような新たな状況を評価することは残された課題です。また、化学気候モデルをより詳細に検証するためにWMO傘下の国際プロジェクトも発足しています。研究はこれからも続きます。

世界中が協力してオゾン層保護対策を行っています。その成果がこのような形で見えてくるのは、本当に画期的だと思います。今後もモデルの精緻化が進むことを期待しています。ありがとうございました。

図4 オゾンアセスメント2006で11カ国の研究機関が示した2050年までのオゾン濃度予測



免疫機能に関しても、紫外線曝露により免疫機能の低下が起こり、その結果、皮膚がん、感染症(ウイルスの再活性化)の発生率の上昇、ワクチンの効果低減、といったさまざまな影響を引き起こしていることが明らかになってきています。

(協力：環境健康研究領域 小野雅司室長)

3次元化学モデルを使った

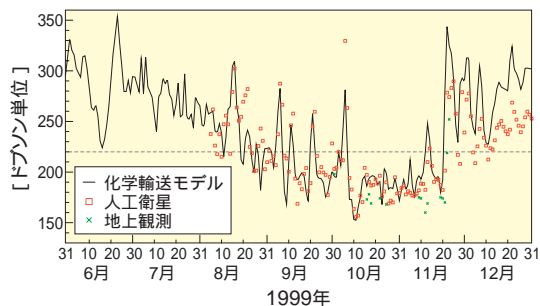
3次元化学モデルは、大気中に存在する化学物質の分布やその変動を捉える数値モデルで、化学輸送モデルと化学気候モデルに大別されます。このうち「成層圏化学気候モデルによるオゾンホールの回復予測」研究の成果は、WMOの「オゾン層破壊の科学アセスメント2006」でも紹介されています。なお、これらの3次元化学モデルは東京大学気候システム研究センターと共同で開発されました。

観測データによる化学モデルの検証

まず、化学輸送モデルの計算結果を観測データと比較し、再現性の検証を行いました。1990年代後半の気象場と地表付近でのフロンガス濃度などを入力データとしてモデルに与え、計算されたオゾンの分布や時間変動の様子を、同時期に人工衛星や地上観測で測定されたデータと比較しました。その結果、オゾンの濃度、時間変動は観測データをよく再現していることが確認されました。図5は、1999年6月～12月の南極昭和基地におけるオゾン全量(地上から大気頂上までのオゾン濃度の積算値)に関して、人工衛星および地上観測による観測値と化学輸送モデルの計算値を比較したものです。8月下旬から9月にかけてのオゾン減少(オゾンホールの発達)、10月のオゾンの極小、11月から12月にかけてのオゾン量の回復の様子をモデルはよく再現しています。

このような極域のオゾン量の変動は、化学反応の影響に加えて他の場所からの輸送の影響を強く受けます

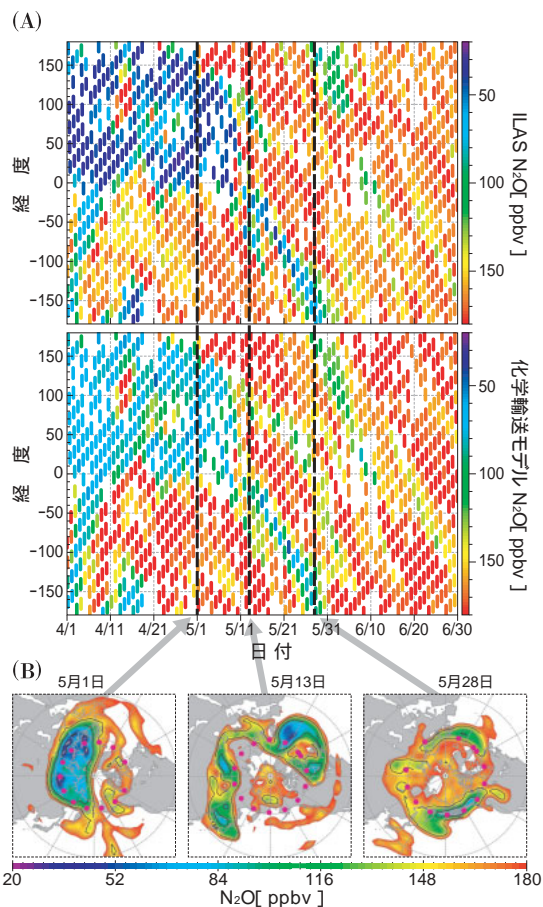
図5 南極昭和基地におけるオゾン全量(モデル計算)と衛星観測、実測データの比較



化学輸送モデルで計算された1999年の6月～12月のオゾン全量と人工衛星(TOMS:オゾン全量分光計)および地上観測データとの比較。太陽光が到達しない時期(極夜:6、7月)の観測データは存在しないことに注意

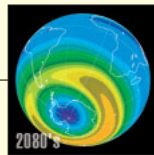
ので、極渦付近での物質の輸送過程を検証することも重要です。そのため、極渦内外での濃度差が大きく、化学的な変化が非常に小さい N_2O (亜酸化窒素)の濃度を、人工衛星による観測値と比較し輸送の検証を行いました。図6に600K(高度約22～24km)の等温位面上における北極域の N_2O 混合比の時間-経度変化の比較と代表的な時期における N_2O 水平分布の計算値を示しました。期間は1997年4月1日からILAS観測が中止される6月30日までです。5月10日以前には、安定した北極渦の内部に低濃度の N_2O が安定して存在しています。一方、5月10日の極渦崩壊後は、極渦内にあった低い N_2O 濃度を示す空気がちぎれてバラバラになります。そのうちのいくつかは、その後数カ月間

図6 600K等温位面上の N_2O 体積混合比



(A)時間-経度断面。1997年4月1日から6月30日のILAS観測値(上)および計算結果(下)。(B)化学輸送モデルによって計算された北極渦の安定時(左:5/1)、崩壊直後(中:5/13)、崩壊後(右:5/28)における水平分布図。図中の紫点はILASの観測地点を表す。

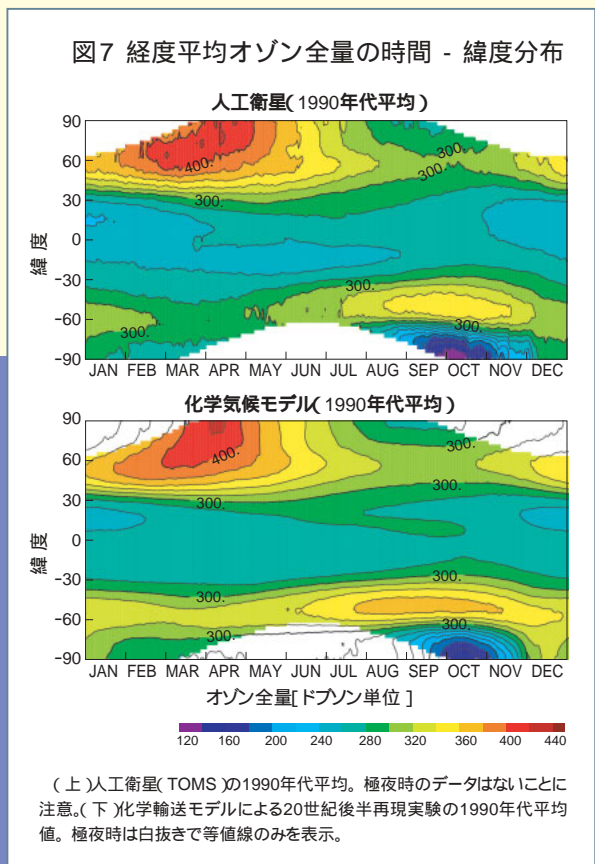
ppbv: 体積混合比10億分の1
 温位: その場所の空気を断熱的に地上気圧に圧縮した場合の温度(絶対温度:K)
 ILAS: 極域成層圏のオゾンを監視・研究するために、環境省(旧環境庁)が開発し、地球観測プラットフォーム技術衛星ADEOSに搭載された大気センサー



オゾン層破壊の再現と将来

にわたって周囲の空気となかなか混じらずに穏やかな夏の成層圏中を漂う様子がよく再現されています。これによりモデルの物質輸送過程の妥当性が確認され、また水平拡散の時定数など観測データだけでは導き出すことが難しい知見を得ることもできました。

次に、化学気候モデルで計算されたオゾン分布の検証を行いました。化学気候モデルに20世紀後半のフロンガス濃度などを与えて20世紀後半の再現実験を行い、その結果を観測データと比較しました。化学気候モデルの場合、気象場モデルが計算しますので、日々の大気現象の持つカオス的性質のために図5のように実際に観測された日々のオゾン変化を再現することは困難です。したがって、ある程度の期間で平均した値の検証を行うこととなります。図7に1990年代の平均した緯度平均オゾン全量の観測値と化学気候モデル計算値の時間 - 緯度分布を示します。モデルはオゾン全量の緯度分布と時間変動の様子をよく再現していることがわかります。こうした再現性はモデル開発の進展(たとえば、大気の球面形状効果や臭素化合物の導入など)や計算機性能の向上に合わせて改善されてきており、今後もさらなる再現性の向上が期待されています。



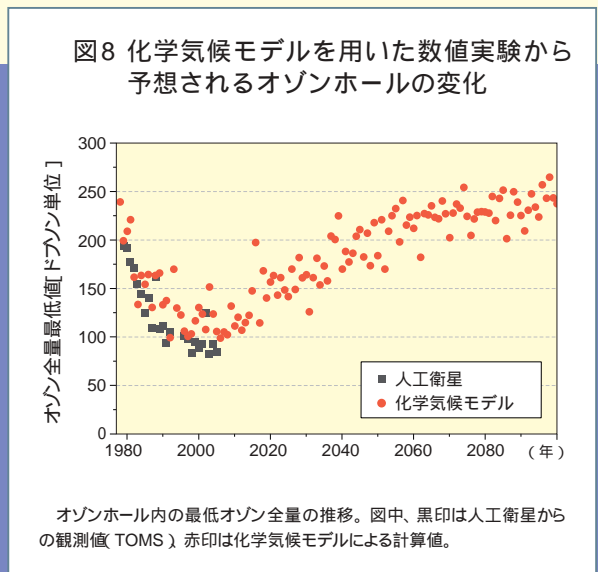
成層圏化学気候モデルによるオゾンホール回復予測について

化学気候モデルを使って将来のオゾン層変化を調べました。化学気候モデルには、フロン類や二酸化炭素をはじめとする温室効果気体、さらには海面水温や太陽放射を入力するデータとして用いて、1970年代後半からのオゾン層変化について数値実験を行いました。その結果、

- 1980年から1990年代半ば
観測されたものと同様なオゾンホールの面積の拡大、オゾンホール内におけるオゾン全量の最低値の大幅な減少
- 1990年代半ばから2010年代半ば
大規模なオゾンホールの出現が持続
- 2020年代
オゾンホールの面積が縮小し、オゾン全量の最低値も増加しオゾンホールは回復基調
- 今世紀半ば頃
南極のオゾン層は1980年レベルに回復との予測が得られました(図8)。

今回のモデル計算から、オゾンホールの回復には大気中の塩素、臭素量の減少が不可欠であり、オゾン層保護対策は有効に働いていることが示されました。

また、モデル実験結果は、オゾン層は今後数十年にわたって脆弱な状況が続くことを示しており、モデル計算に用いた以上のフロンやハロンの使用・放出がなされた場合には、オゾンホールの回復はさらに遅れるものと予測されています。



〈オゾン層モデル研究、

オゾンホール発見を端緒とした成層圏オゾン層の保護をめぐっては地上、観測気球、衛星にそして、今、世界中の大型コンピュータを使った数値モデルに



世界では

1984～1985年にかけての日本の忠鉢繁とイギリスのファーマンによる南極オゾンホールの報告以来、オゾンホールは毎年南極の上空でその発生が確認されています。そして、そのオゾン減少の様子は人工衛星や地上に設置されたドブソン分光光度計によって観測・記録され続けています。この人類が初めて経験するオゾン層の大規模な減少に対し、大気化学、大気物理、大気放射、フィールド観測、衛星観測、データ解析を専門とする世界中の科学者がそのメカニズムの解明に取り組みました。この活発な研究活動によって得られたオゾン層破壊に関する科学的知見は、1987年のモントリオール議定書の採択とそれに引き続く改訂の重要な根拠となり、フロン・ハロン規制という形で先進諸国の政策に生かされ、それによって大気中のフロン・ハロン量は減少を始めつつあります。こうした科学と国際社会との迅速で密接な連携により、今まさにオゾン層はその減少に歯止めがかかろうとしているのです。

一方、これらの科学知識を集大成して組み立てられた数値モデルを用いてオゾンホールの再現シミュレーションを行い、どのような個々のプロセスがどのようなタイミングで組み合わせられて南極上空での大規模なオゾン破壊が起こるのかについての検証が行われ、さらにこうしたモデルを用いて将来のフロン・ハロン放出シナリオに基づいたオゾン層の将来予測実験が行われています。初期の数値モデルは、地球の周りの3次元大気を経度方向に平均し緯度 - 高度面でのオゾン分

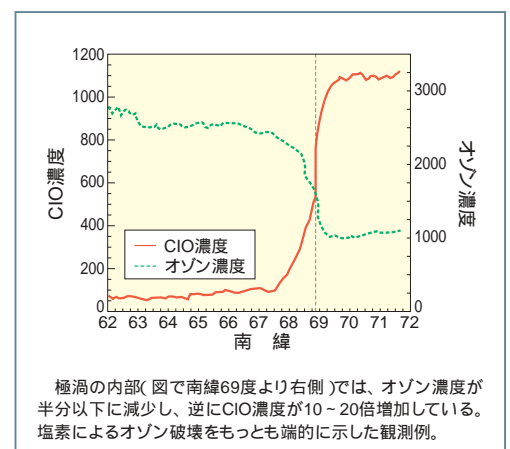
布を計算する2次元化学モデルといわれるものでしたが、最近のコンピュータの処理能力の向上により、3次元大気をそのまま表現する3次元化学モデルが主流になりつつあります。3次元モデルによって経度方向の変動が激しい極域のオゾンの輸送と破壊プロセスをよりの確に再現することが可能になりました。2002年の国連環境計画(UNEP)/世界気象機関(WMO)発行のオゾンアセスメントレポートに3次元化学気候モデルによるオゾンホールの将来予測結果が初めて登場し、CCSR/NIES化学気候モデルは、2050年までの連続計算を行った数少ないモデルの一つとして紹介されました。その後の2006年のUNEP/WMOオゾンアセスメントレポートでは、CCSR/NIESを含む世界で11のオゾン層将来予測モデルの結果が紹介されています。また、WMOの下で化学気候モデル検証(CCMVal)という国際プロジェクトが2003年から始まり、3次元化学気候モデルを使ったオゾン層変動と気候変動に関する研究を行っています。国立環境研究所はこのプロジェクトに設立当初から参加しています。

日本では

日本では、国立環境研究所が東京大学気候システム研究センターと共同で、CCSR/NIES気候モデルをベ



2003年にドイツで行われた成層圏化学気候モデルの会議参加者



世界の視点と動向

よる観測とデータ解析、それらの科学的知見に基づく世界規模のフロン規制が進んでいます。
よるオゾン層の将来予測が次々と新たな知見を発信しています。



ースに3次元化学モデルの開発を1990年代後半から始めました。当時は、オゾンホールを再現しオゾン層将来予測のできる3次元化学モデルというものにはなく、その開発は国内における初めての試みでした。数々の困難を克服し2000年代に入ってようやくその最初のバージョンが完成し、このモデルを使ってオゾン層の将来予測実験を行いました(2002年のUNEP/WMOオゾンアセスメントレポート)。その後、モデルにおける化学・力学両プロセスの改良を行い、CCMValプロジェクトの下で推奨されたフロン・ハロンおよび温室効果気体の将来シナリオを使ってオゾン層の将来予測実験を行いました。その結果は2006年のUNEP/WMOオゾンアセスメントレポートに掲載され、信頼性の高いモデルとの評価を得ています。2006年のオゾンアセスメントには、日本からは国立環境研究所の他、気象庁気象研究所の化学気候モデルも参加しました。

国立環境研究所では

成層圏オゾン層の研究について、国立環境研究所では、今回紹介したモデル研究の他に実際に成層圏を観測する3つの研究が行われています。それぞれを紹介しましょう。

ライダーによるオゾン層観測

ライダーを使って1988年からつくば上空のオゾン層の観測を行っています。ライダーによって得られたデータは高度分解能がよく、晴天である限り毎晩でもデ

ータを取ることが可能です。オゾン濃度の季節変化が高さによって異なることや、1991年のピナツポ火山爆発後のオゾン濃度の変化などをとらえることができました。得られたデータは国際的なオゾンのデータベースNetwork for the Detection of Stratospheric Change(NDSC)へ提供されました。

ミリ波オゾン分光計によるオゾン層観測

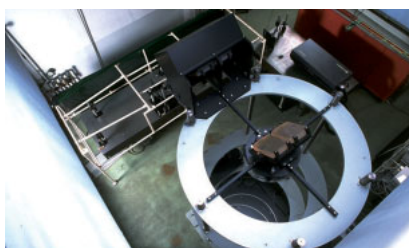
1996年10月より、ミリ波オゾン分光計を用いたつくば上空のオゾン層観測が始められました。ミリ波によるオゾン観測の特徴は、ライダーでは困難だった50km以上の高い高度のオゾン濃度が数分おきに、しかも昼夜得られることです。これによって、60kmおよび76kmの高度でオゾン濃度の半年周期の変動があることがわかり、しかもその変動のしかたがお互いに逆になっていることがわかりました。

衛星観測

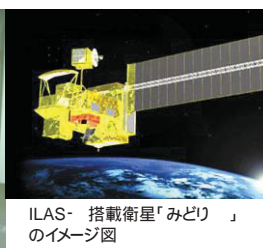
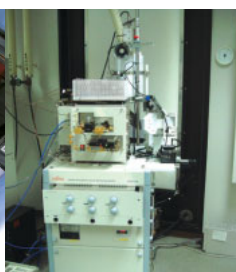
1996年に環境庁(当時)と国立環境研究所が開発を行ったセンサーILASが搭載された人工衛星みどり(ADEOS)が打ち上げられました。ILASは1996年11月から1997年6月までの約8カ月間にわたり北極と南極のオゾン、硝酸、水蒸気、エアロゾルなどの観測を行いました。また、ILASの後継機として、ILAS- が人工衛星みどりに搭載されて打ち上げられ、2003年4月から10月まで観測を行いました。

フィールド観測

現在第48次南極観測隊に参加し、オゾンゾンデやフーリエ変換赤外分光光度計を使って、昭和基地上空のオゾンなどの大気微量成分の観測を行っています。



オゾン層観測用ライダー



ILAS- 搭載衛星「みどり」のイメージ図

ミリ波オゾン分光計



南極昭和基地からのオゾンゾンデの放球

「オゾン層の将来予測と3次元化学モデルの研究」のあゆみ

国立環境研究所における成層圏オゾン層をめぐる研究は1996年以来、以下の課題について行われています。

課題1

「衛星データ等を活用したオゾン層破壊機構の解明及びモデル化に関する研究」

平成8～10年度(環境庁地球環境研究総合推進費)

サブテーマ:化学輸送モデルによる極渦の物理・化学過程に関する研究

化学 - 放射 - 力学結合化学輸送モデルによる極渦・化学過程の解明

化学輸送モデルによる極渦の物理・化学過程の解明

極渦内および周辺のオゾン層破壊機構を解明するために、化学輸送モデルの開発を行いました。また、化学輸送モデルに組み込まれている光化学反応の検証やモデルの改良を行いました。

課題2

「オゾン層回復を妨げる要因の解明に関する研究」

平成11～13年度(環境省地球環境研究総合推進費)

サブテーマ:温暖化および大気組成変動がオゾン層破壊に及ぼす影響のモデル化に関する研究

地球温暖化や成層圏エアロゾル変動がオゾン層破壊に及ぼす影響をみるために、化学輸送モデルの改良や整備を行いました。

課題3

「オゾン層破壊の将来予測のためのモデル開発および検証に関する研究」

平成13年度(環境省地球環境研究総合推進費 FS)

サブテーマ:成層圏オゾン変動のモニタリングと機構解明

オゾン層変動の将来予測に向けて、成層圏プロセスを取り入れた大気大循環モデルの問題点を明確にしました。次に数値モデル、データ解析、反応実験、観測などの研究者が分野を超えた共通の問題意識のもとに、モデルの抱える問題点の克服と今後の予測を行う上での必要となる観測データや反応データの整備戦略の検討を行いました。

課題4

「成層圏オゾン層変動のモニタリングと気候解明プロジェクト」

平成13～17年度(重点特別研究プロジェクト)

ILAS、ILAS-、オゾンライダー、ミリ波オゾン分光計によるオゾン層破壊の監視と共に、化学輸送モデル、化学気候モデルの開発を行い、オゾン変動解析およびオゾン層の将来変化の予測を行いました。

課題5

「オゾン層破壊の長期変動要因の解析と将来予測に関する研究」

平成14～18年度(環境省地球環境研究総合推進費)

サブテーマ:温室効果気体の増加がオゾン層に与える影響の定量化に関する研究

化学気候モデルの整備とモデルによるオゾン分布などの再現性の評価を行いました。さらに二酸化炭素などの温室効果気体の増加やそれに伴う海面水温の変化がオゾン層変動に及ぼす影響を、化学気候モデルを使って調べました。

これらの研究は以下の組織・スタッフにより実施されてきました。

<研究担当者>

成層圏オゾン層変動研究プロジェクトグループ

中根 英昭、今村 隆史、高橋 正明(東大気候システム研究センター)、笹野 泰弘、神沢 博(現 名古屋大学)、中島 英彰、杉田 考史、横田 達也、林田 佐智子(現 奈良女子大学)、杉本 伸夫、塩谷 雅人(京都大学)、Lukyanov Alexander(ロシア中央大気観測所)、滝川 雅之(地球環境フロンティア)、黒川 純一、菅田 誠治、吉識 宗佳(現 ポストンコンサルティング)、坂本 圭(現 全日空)、Zhou Libo(中国科学院大気物理研究所)、秋吉 英治、永島 達也



成層圏オゾン層の破壊は、空間スケールの大きさ、原因物質であるフロン類による破壊プロセスの特異性、健康を害する紫外線量の増加などから、世界中の人々に大きな衝撃をもたらしました。一方で、迅速に始まった研究の成果に裏打ちされた国際合意により、解決策が実行された好例でもあります。その後も進展を続けるオゾン層研究では、さまざまな観測と並んでモデル解析が重要な役割を果たしています。

本号では、国際的に高く評価されている3次元化学モデルを開発した研究者が、どのように研究に取り組んできたか、そしてモデル研究が果たす意義について、さまざまな角度から語り解説しています。とくに観測研究との連携は、オゾン層に限らず環境研究の真髄ともいえます。

モデル研究の重要な目的の1つは将来予測にあります。3次元化学モデルによって得られた、「オゾンホールは2020年頃から回復傾向に入り、今世紀半ば頃には解消される」という成果は画期的なものです。その上で、成層圏の大気組成が今後どのように変化し、オゾン層にどのような影響を及ぼすかに研究者は注目しています。

本号の内容が、成層圏オゾン層の変動はもちろん、環境研究におけるモデル研究の意義の理解にも役立つことを期待しています。読者のみなさまには、成層圏オゾン層の観測を特集した環境儀No.10もご覧いただくと幸いです。

2007年10月
理事長 大塚柳太郎

環境儀 No.26

— 国立環境研究所の研究情報誌 —

2007年10月31日発行

編集 国立環境研究所編集委員会

(担当WG: 高橋 善幸、秋吉 英治、永島 達也、村上 正吾、柴田 康行
植弘 崇嗣、岸部 和美)

発行 独立行政法人 国立環境研究所

〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2

問合せ先 (出版物の入手) 国立環境研究所情報企画室 029(850)2343

(出版物の内容) // 広報・国際室 029(850)2310

環境儀は国立環境研究所のホームページでもご覧になれます。

<http://www.nies.go.jp/kanko/kankyogi/index.html>

編集協力 社団法人国際環境研究協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-1-13

『環境儀』既刊の紹介

NO.1	環境中の「ホルモン様化学物質」の生殖・発生影響に関する研究	2001年 7月
NO.2	地球温暖化の影響と対策 — AIM：アジア太平洋地域における温暖化対策統合評価モデル	2001年 10月
NO.3	干潟・浅海域 — 生物による水質浄化に関する研究	2002年 1月
NO.4	熱帯林 — 持続可能な森林管理をめざして	2002年 4月
NO.5	VOC — 揮発性有機化合物による都市大気汚染	2002年 7月
NO.6	海の呼吸 — 北太平洋海洋表層のCO ₂ 吸収に関する研究	2002年 10月
NO.7	バイオ・エコエンジニアリング — 開発途上国の水環境改善をめざして	2003年 1月
NO.8	黄砂研究最前線 — 科学的観測手法で黄砂の流れを遡る	2003年 4月
NO.9	湖沼のエコシステム — 持続可能な利用と保全をめざして	2003年 7月
NO.10	オゾン層変動の機構解明 — 宇宙から探る 地球の大気を探る	2003年 10月
NO.11	持続可能な交通への道 — 環境負荷の少ない乗り物の普及をめざして	2004年 1月
NO.12	東アジアの広域大気汚染 — 国境を越える酸性雨	2004年 4月
NO.13	難分解性溶存有機物 — 湖沼環境研究の新展開	2004年 7月
NO.14	マテリアルフロー分析 — モノの流れから循環型社会・経済を考える	2004年 10月
NO.15	干潟の生態系 — その機能評価と類型化	2005年 1月
NO.16	長江流域で検証する「流域圏環境管理」のあり方	2005年 4月
NO.17	有機スズと生殖異常 — 海産巻貝に及ぼす内分泌かく乱化学物質の影響	2005年 7月
NO.18	外来生物による生物多様性への影響を探る	2005年 10月
NO.19	最先端の気候モデルで予測する「地球温暖化」	2006年 1月
NO.20	地球環境保全に向けた国際合意をめざして — 温暖化対策における社会科学的アプローチ	2006年 4月
NO.21	中国の都市大気汚染と健康影響	2006年 7月
NO.22	微小粒子の健康影響 — アレルギーと循環機能	2006年 10月
NO.23	地球規模の海洋汚染 — 観測と実態	2007年 1月
NO.24	21世紀の廃棄物最終処分場 — 高規格最終処分システムの研究	2007年 4月
NO.25	環境知覚研究の勧め — 好ましい環境をめざして	2007年 7月

『環境儀』

地球儀が地球上の自分の位置を知るための道具であるように、『環境儀』という命名には、われわれを取り巻く多様な環境問題の中で、われわれは今どこに位置するのか、どこに向かおうとしているのか、それを明確に指し示すべしという意図が込められています。『環境儀』に正確な地図・行路を書き込んでいくことが、環境研究に携わる者の任務であると考えています。

2001年 7月
合志 陽一
(環境儀第1号「発刊に当たって」より抜粋)



本誌は再生紙を使用しております



このロゴマークは国立環境研究所の英語文字N.I.E.Sで構成されています。
N=波(大気と水)、I=木(生命)、E・Sで構成される○で地球(世界)を表現しています。
ロゴマーク全体が風を切って左側に進もうとする動きは、研究所の躍動性・進歩・向上・発展を表現しています。