



国立環境研究所の研究情報誌

# 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



## オゾン層関連のできごと

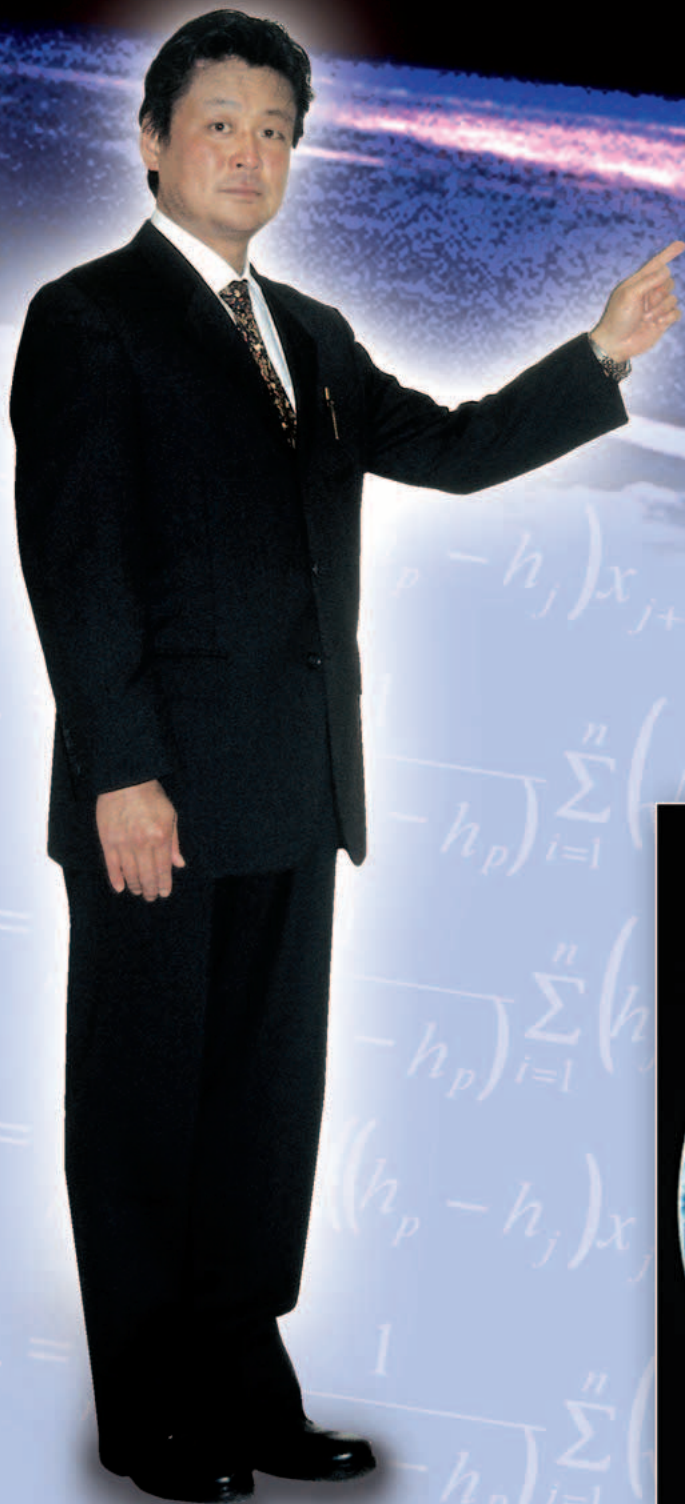
1970.4	NIMBUS-4衛星搭載の観測機器によるオゾン層の観測開始
1984.2	人工衛星「おおぞら」打ち上げ。オゾン観測実験センサー-LAS搭載
1984~85	日英の科学者たちによる南極オゾンホール発見
1985.3	オゾン層保護のためのウィーン条約採択
1987.9	オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書採択
1988.5	「特定物質の規制等によるオゾン層保護に関する法律(オゾン層保護法)」施行(国内)
1996.8	人工衛星「みどり」打ち上げ。本格的オゾン観測センサー-ILAS搭載
1997.6	衛星の太陽電池関連装置故障により「みどり」運用停止
2001.4	家電リサイクル法が施行(国内)
2002.12	人工衛星「みどりII」打ち上げ。ILASの後継センサー-ILAS-II搭載
2003.4	ILAS-II運用観測開始

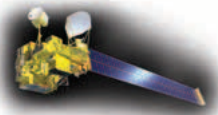
独立行政法人

国立環境研究所

<http://www.nies.go.jp/index-j.html>

人工衛星からのデータは  
オゾン層破壊を防ぐための  
重要なカギとなります。





## 環境儀

国立環境研究所の研究情報誌

宇宙から地球環境を観測する。オゾン層の破壊や地球温暖化など、地球規模の環境問題が表面化し始めた1980年代後半、国際協力による地球環境監視に役立てることなどを目的にした日本独自の衛星打ち上げの気運が高まりました。それから10年近くたった1996年、地球観測プラットフォーム技術衛星(ADEOS: Advanced Earth Observing Satellite)が打ち上げられ、「みどり」と命名されました。

ADEOSには宇宙開発事業団(NASDA)が開発した陸域の環境を監視する可視・赤外線センサーと海域のクロロフィル-aや海水表面温度を把握するセンサー、通産省(当時)の開発した大気中の温室効果ガスを観測するセンサー、環境庁(当時)の開発したオゾン層を観測するセンサー、さらにアメリカやフランスの開発したものを含めて8種類のセンサーが搭載されました。なお、ADEOSは現在は運用観測を停止し、後継のADEOS-II「みどりII」が稼働しています。

国立環境研究所では、1988年から開始した北極や南極付近の成層圏を対象とした「衛星観測プロジェクト」に、ADEOSに搭載する改良型大気周縁赤外分光計(ILAS: Improved Limb Atmospheric Spectrometer)の開発段階から参加しており、成層圏オゾン層の変動に関連した研究に取り組んでいます。本号では、「オゾン層変動とその機構解明」の最新の研究から得られた新しい知見を紹介いたします。

### C O N T E N T S

## オゾン層変動とその機構解明

宇宙から探る 地球の大気を探る

#### INTERVIEW

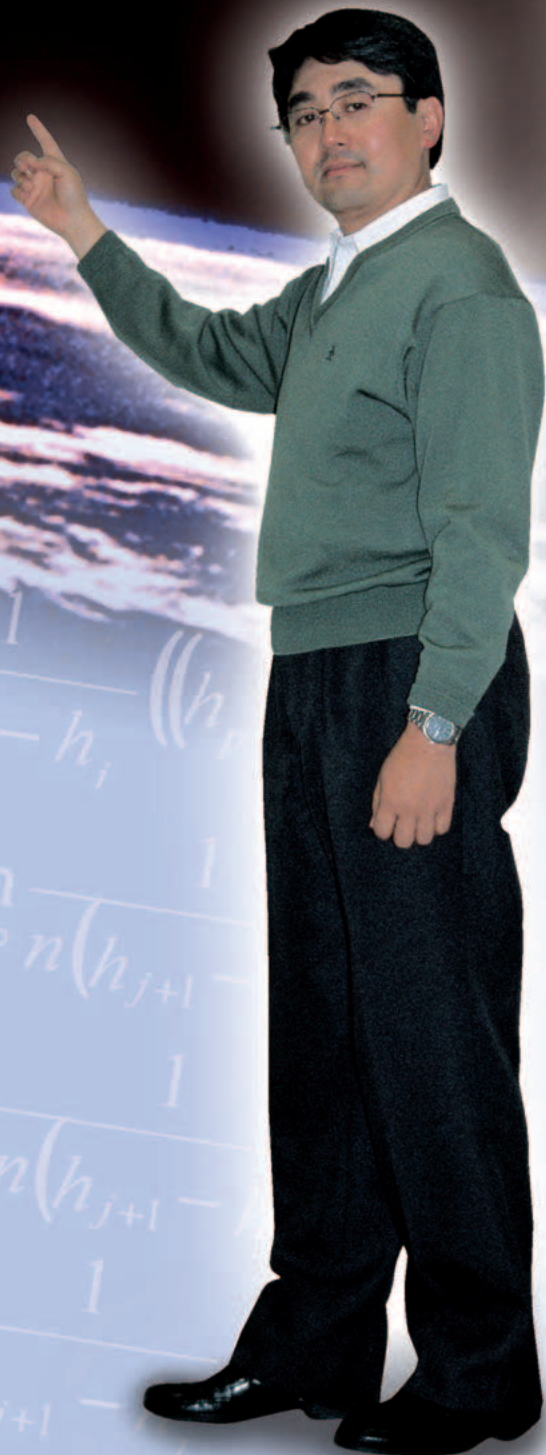
研究者に聞く ..... P4-P9

#### SUMMARY

オゾン層変動の解明研究の概要 ..... P10-P11

衛星観測によるオゾン層研究をめぐって ..... P12-P13

衛星観測によるオゾン層研究プロジェクトのあゆみ ..... P14



## 研究者に聞く



**中島 英彰** 成層圏オゾン層変動研究プロジェクト  
衛星観測研究チーム総合研究官

**横田 達也** 社会環境システム研究領域  
情報解析研究室室長

人工衛星を使って「オゾン層変動の機構解明」の研究に取り組んでいる横田達也さん、中島英彰さんに、研究のねらい、成果などをお聞きしました。現在、横田さんは衛星から送られてくるデータを解析する計算手法の高度化の研究、中島さんはオゾン層破壊機構の研究を続けています。

### ●研究の動機

—— 昨年(2002年)12月に打ち上げられたADEOS-IIにはILAS-II(ILASの後継機)が搭載され、その運用も順調と聞きます。今後の成果が大いに期待されますが、まずILAS-IIの前身であるILASに始まった研究のきっかけからお願いします。

横田 20年ほど前に顕在化したオゾン層破壊の問題は、原因となるフロン等の排出対策は進みましたが、オゾン層の破壊は現在なお進行中で、紫外線による人の健康や生態系への影響が懸念されています。これは地球規模の大気環境問題が、対策をとってもすぐには解決しないことを示しています。

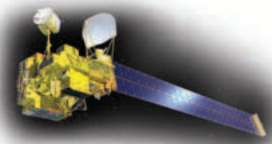
さて、当時もっとも大きな地球環境問題であったこのオゾン層破壊に対して、日本でも「何か世界に貢献できることをしなければ」という気運が高まっていた。すでに南極のオゾンホールも観測されるなどオゾン層の研究は高まりを見せていましたが、オゾン層破壊のメカニズムを知る上で鍵となるオゾン濃度の詳細な高度分布は、オゾンゾンデやオゾンライダーなどによって地上の限られた地点でしか観測できませんでした。

そのような中、1988年に宇宙開発事業団が、地

球環境を観測する人工衛星ADEOS搭載のセンサーの公募を行い、環境庁(当時)は、国立公害研究所(当時)の研究者と協力して大気を測るセンサーを提案しました。それがILASとして採択されたわけです。

当時私は環境情報部に所属し、電子計算機を用いて環境の研究をしていました。その手法の1つに、「人工衛星が観測する光が大気中をどのように伝わるかを計算するシミュレーションプログラム」がありました。それを使えば、センサーから得られたデータを元に、オゾンなどの高度別濃度を正確に見積もることができます。こうした計算機シミュレーションによってILAS装置の仕様を決めるための研究が必要となり、それを機にプロジェクトに参加しました。15年前の話です。

中島 私が国立環境研究所に入ったのは1997年の10月です。それまでは名古屋大学で成層圏や対流圏大気の研究をしていました。もともと人工衛星のデータは大気を直接測ったものではないため、信ぴょう性の確認が必要で、気球や飛行機からのデータと合わせて検証することが要求されます。ILASの場合、人工衛星の軌道の関係から北極や南極の付近しか観測しませんから、気球を使った実験は日本では



できません。そこで、1997年2~3月にスウェーデンのキルナで行われた気球観測や地上分光観測の実験に大学のスタッフとして参加しました。ILASと関わるようになったのはその頃からです。

## ●宇宙からの観測とアルゴリズム計算

—衛星を使って宇宙からオゾン層の観測を行っているんですね。どのような方法で行うのですか。

横田 ILASによるオゾン観測には大きな特徴があります。これまでの多くの衛星搭載観測センサーは、宇宙から地球の方向に視野を向けて測っていました。しかしその方法では、地上から宇宙まで合計したオゾン量はわかっても、オゾンがどの高さにとどれくらいあるかという高度分布の情報は測りにくいのです。私たちが開発したILASは、いわば宇宙から地球の大気層を横方向に「串刺し」に透かして太陽光線を観測する方法をとっています。つまり横方向から観測

することで、衛星の動きによって観測する大気の高さが次々に変わるので、高度ごとの細かな情報を得ることができます。さらに光の通ってくる大気層の距離は長くなり、たとえば垂直に測れば1kmの厚さの大気層を水平方向に観測することにより約230kmにわたって観測することができます。つまり大気中に存在する気体をより多く通過した光のスペクトルを観測することにより、精度の高い観測ができるわけです。このような観測方式を太陽掩蔽法(たいようえんぺいほう)と呼んでいます。

—ILASが観測して、そこから地上に送られてきたデータはどうするのですか。

横田 ここで求めようとしているのは高度別のオゾン濃度ですね。順に説明します。ILASには光を波長によって分ける分光器と、それによって分けられた波長別の光を受ける受光素子があります。大気層を透かしてみた太陽光は、オゾンなどの気体により特定の波長の光が吸収されて減衰します。受光素子

## コラム「太陽掩蔽(えんぺい)法とILASの観測」

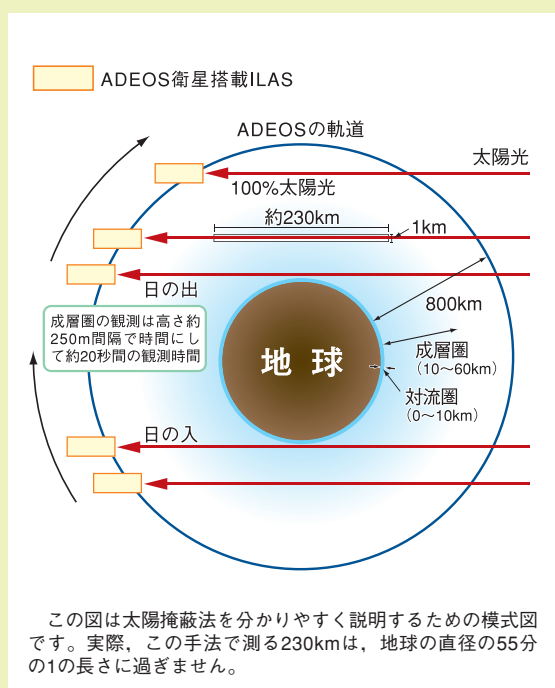
太陽掩蔽法は、太陽を光源として人工衛星(ADEOS)から見た地球からの日の出、日の入り時に地球(周縁)大気を通してセンサー(ILAS)に到達する太陽光の強度を、波長ごとに観測する手法です。輝度の高い太陽を光源としているため高精度の観測が可能となります。

またADEOSの周回運動により、日の出や日の入り時に観測する大気層の高度は徐々に変化します。それを利用して高度分布に関する情報も得ることができ、その高度方向の解像度(高度分解能)はILASの高さ方向の視野の大きさで決まります(ILASの高度分解能は約2km)。ILASはオゾン(O<sub>3</sub>)、硝酸(HNO<sub>3</sub>)、二酸化窒素(NO<sub>2</sub>)、メタン(CH<sub>4</sub>)、亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)、水蒸気(H<sub>2</sub>O)の6気体とエアロゾル量を観測します。大気中に含まれる各種微量気体成分は、それぞれ特有の波長の光を吸収する性質があります。その性質を利用して波長ごとの吸収の大きさからそれら個々の物質濃度を算出します。

ADEOSは地球を1日に約14回周回します。それに伴いILASは南北両半球で、それぞれ約14回の掩蔽観測を行います。そして、同緯度上で経度約25度ずつ離れた地点(地球は自転しているため)を観測します。ADEOSは南極と北極を周回する極軌道衛星のため、ILASの観測緯度範囲は、年間を通して両半球の高緯度域になります。

なお、ILASの後継センサーであるILAS-IIは、オゾンに直接破壊する活性塩素を貯蔵する物質として重要な硝

酸塩素(ClONO<sub>2</sub>)の観測や高度分解能の向上(1km)など、機能の強化が図られています。



## 研究者に聞く

はこの減衰した光を捉え、データとして地上に送ります。地上では、そのデータを大気を通さずに観測した太陽光のスペクトルデータと比較し、大気透過率を算出します。次に、あらかじめオゾン濃度などを想定したシミュレーションモデルで大気透過率を計算し、それらの条件をいろいろ変えた計算を繰り返して、最終的には送られてきた大気透過率とぴったり合うようなオゾン濃度などを求める、というのが大きな流れです。

ところで、衛星から送られてくるデータの中にはちゃんと観測された信号とじゃまなノイズが混じっています。このことに注意しながらデータ処理を行い、正しい結果を出さなければなりません。つまり、計算結果が正確に大気の状態を表わしていることを科学的に示さなくてはならないのです。

そのようなさまざまな状態を想定しながら、ILASが実際に宇宙で測っているものにできるだけ近い状況を、計算機上に作り上げていきます。オゾン、メタン、水蒸気などの気体について、高さごとの濃度や大気温度などを仮定してモデルに入れると、計算機がそれに応じたILASが観測するはずの大気透過率を理論的に算出します。次にILASが実際に観測した大気透過率(スペクトル情報)と比べて、それらの食い違いを小さくするように、仮定した大気中の気体の濃度を調整し直します。これを何度も繰り返して比較と調整を行い、もうこれ以上食い違いが小さくならないという状況になったときに、この仮定した濃度を現実の濃度として答え(処理結果)にします。このような解法を「非線形最小二乗推定法」と呼んでいます。

——衛星で観測した大気透過率を直接加工して答えを得るのではなく、観測した大気透過率と同じような大気透過率データを計算機を使って作り出し、それらを比べることで答えを出すのですか。

横田 はいそうです。このような答えを導き出す手順というか、考え方をアルゴリズムと呼んでいます。

——アルゴリズムとは何ですか。

横田 アルゴリズムは、コンピュータを利用してどのように問題を解決していくか、という考え方を表わしたものです。一つの例として、ILASの観測した大気透過率の計算アルゴリズムを紹介します。

物質はすべてそれ固有の波長の光や熱を吸収する

性質を持っています。そうですね、赤い花を頭に浮かべてください。可視光が当たると赤い色以外の光を吸収し、赤い色を反射するので、私たちは反射して目に入った赤を認識し、「赤い花」だとわかるのです。ILASは太陽光線を分光(プリズムが太陽光を虹の7色に分割するように波長別の光に分けること)して観測します。ターゲットのオゾン、メタンなどが大気中にあれば、それ固有の波長のところに光の吸収(吸収線)が現われますから、成分ごとの濃度がわかります。ILASの観測する赤外波長帯(6~12 $\mu\text{m}$ )の範囲にはいろいろな物質の吸収線が数十万本もあります。これらの1本1本について吸収量を計算します(図1緑線)。さらに観測装置特性などを含めて計算して出てきた結果がこのスペクトルです(図1赤線)。吸収線の数が非常に多いことからこれを得るまでにはたいへんな計算が必要なおわかりと思います。それらをいかに精度を落とさず、しかもむだなくスムーズに計算していくかを考えるのが計算アルゴリズムのプログラミングの技術です。アルゴリズムは常に進歩していかなければなりません。

図1 大気透過率と吸収線のシミュレーション計算例

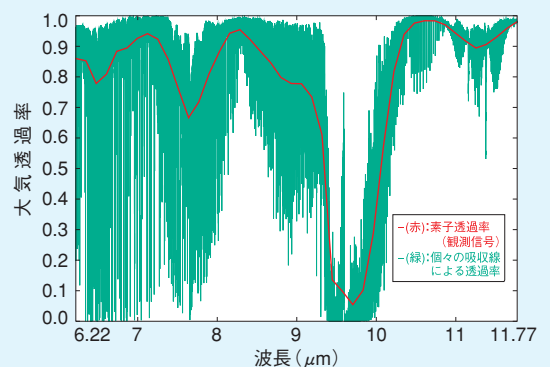
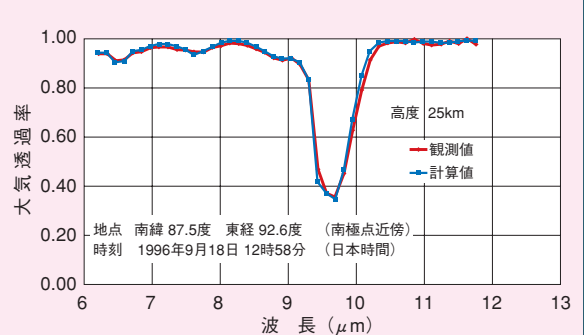
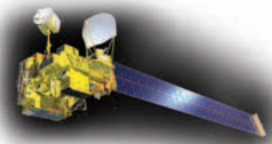


図2 ILASによる初観測データ(赤外波長域)





—どのように進歩していくのですか

横田 たとえばILASが最初に観測した1996年9月18日の赤外観測スペクトルですが(図2), 観測したものが赤, 計算したものが青で示されています。けっこう一致しているように見えますが, 少しずれている部分もあります。この解析によって求めたオゾンや硝酸の濃度は他の手法の方法で観測したデータと比較的よく一致していましたが, 二酸化窒素や水蒸気については思いもよらない値が出てしまいました。対応に四苦八苦していたとき, 当時プロジェクトに招へいしていたアメリカ・デンバー大学のBlatherwick博士から「6 $\mu$ m付近に酸素の吸収があるはず」と指摘され, アルゴリズムを修正して計算したところ, 水蒸気と二酸化窒素の解析結果が格段によくなりました。さらに数年後, 水の連続吸収に関する新しい理論式をアルゴリズムに取り入れたところ, 低い高度での二酸化窒素のデータがさらによくなりました。気体による光の吸収量を計算するための, 室内実験に基づく吸収線に関するデータも

年々改訂されています。このように, 理論を現実に近づけるためにはバージョンアップの作業を続けていく研究が必要となります。この一つひとつが進歩といえます。

## ●オゾン層破壊について, ILASデータの解析から

—アルゴリズムに関してはおぼろげながら理解できました。次にILASのデータから見えてきたことを教えて下さい。

中島 最近, 極成層圏雲(PSC)という特殊な雲がオゾン層破壊に重要な役割を果たしていることがわかってきました。PSCは高さ15~20kmの成層圏にできる硝酸や水蒸気などから成る雲で, 南極や北極で発生します。これらの地域は, 冬の間一日中太陽が地平線から顔を出さない極夜になり, 上空の成層圏は-80℃以下の低温にまで下がります。PSCはそのような条件下で発生します。私たちはILASによってPSCに取り込まれる気体濃度の変動の様子と

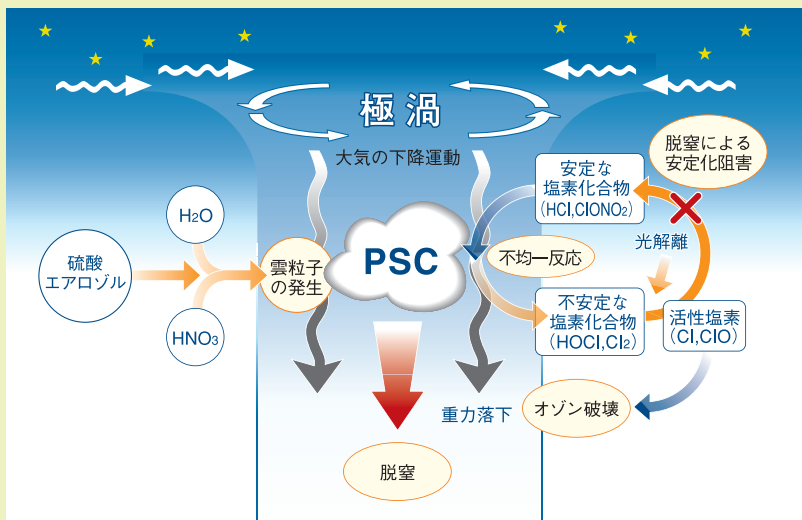
## コラム「PSC(極成層圏雲)と脱窒のメカニズム」

成層圏では秋から冬にかけて, 緯度60度付近を境に極を回る大規模な渦(極渦)が形成され, 高度20km付近では極渦の内と外の空気は一般に混合しにくくなります。また極渦の内部では空気の下降運動が生じます。このような大気の動きの中で気温が-80℃くらいまで冷やされると, それまでガス状だった大気中の水蒸気や硝酸・硫酸などが粒子化し, 雲を形成します。これがPSCです。PSC表面での不均一反応(気体中では起こりにくい反応が, 固体や液体の表面上では起こりやすくなること)によって安定な塩素化合物は不安定な塩素化合物に変換され, 引き続き光解離(分子が光エネルギーを吸収して2つ以上の原子・ラジカル・イオンなどに分離すること)によってオゾンを直接破壊する不安定な塩素原子(活性塩素)を生じます。

この活性塩素は, 硝酸の光解離で生じる窒素酸化物の存在下では気相反応によって再び安定な塩素化合物に戻ります。ところがPSC粒子が数 $\mu$ m以上まで十分に成長すると重くなり, 落下することによって大気中から除去されてしまいます。このと

き, PSCに取り込まれた窒素酸化物も同時に失われる(脱窒)ので, 活性塩素の安定化が阻害され, オゾン破壊が進まされることとなります。

また, 温室効果ガスの増加に伴う成層圏の低温化によってPSCは増加するおそれがあり, オゾン層の回復が遅れるのではないかと懸念されています。したがって今後引き続きオゾン破壊に及ぼす脱窒の影響を監視していく必要があります。



## 研究者に聞く

雲の成長の様子を、非常に精密に観測することができました。

また、ILASが観測を行った1997年の2月から4月にかけて、北極域でこれまでにないほど大きなオゾン破壊が起こり、その状態をILASが高度別に連続して観測することに成功しました。衛星からのオゾン破壊とPSC、さらにそれを構成するガスの同時観測は、世界的に見ても初めての例で、ILASだから可能となったものです。しかも、その後観測データの詳細な解析を行い、オゾン層破壊の速度を求めることにも成功しました。

ILASは1日14回北極上空を観測します。その時に太陽掩蔽法により1km四方で長さ230kmの空気層を順次測定します。数日間観測を続けるうちに、北極上空にある空気塊は移動しますが、これを流跡線解析という手法で計算し、流れてゆく空気塊中の組成変化を追いかけます。具体的には衛星が観測を行った空気塊について複数のペア(日にちを変えて観測した、同じと思われる観測空気塊のペア)を選び出し、それらのオゾン濃度の観測値を比較(マッチ解析と呼ぶ)します。これによって、時間とともにオゾンが破壊されていく速度を見積もっていくわけです。

これまで多数のオゾンゾンデ観測データを使い、マッチ解析によってオゾンの破壊速度を導き出した例はありましたが、宇宙から観測を行う衛星センサーでは「高度分解能が粗いため同様な解析は不可能だろう」というのが世界の研究者の一般的な考えでした。この困難な解析をILASでは、比較的高い高度分解能と数多くの観測データの解析を行うことで成功させたのです。

さらに、ILASがPSCを観測した数日後に、その空気塊が流れていった場所でオゾンが破壊されていることも突き止め、まさに理論的に予測されたことを初めて観測で明らかにすることができました。

—— なんかすごいですね。ところでILASの観測地

点はいつも同じなのですか。

中島 地球は自転していますから、少しずつずれていきます。

—— 流れる風の傾向もまちまちだと思いますが

中島 それらを全部計算します。この風は北極を1周するのにおよそ1週間から10日くらいかかります。

—— その解析を3カ月分行ったのですね。

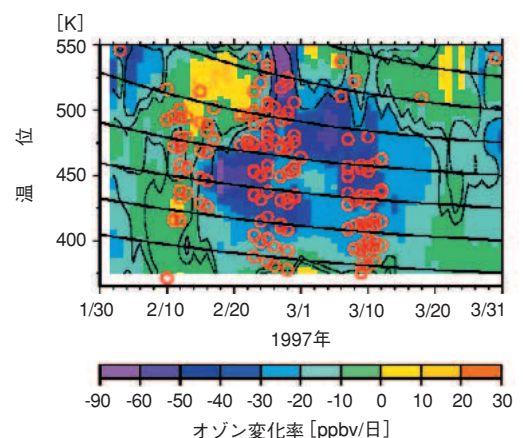
中島 はい。図3は、それらすべての解析結果をまとめて1枚の図に描いたものです。この絵(図3)が最初にできあがった時には、「やった」と思いました。また、多くの海外の研究者からもこの結果は高く評価されました。衛星によるマッチ解析が可能であるということ、世界に先がけて示したわけです。この結果は、ILAS観測の大きな成果の一つです。

## ●ILASプロジェクトの協力体制

—— ILASプロジェクトは15年続いています。その間、実際の研究以外に衛星センサーといったハードの開発など、かなり幅の広い活動が要求されたと思います。苦労話をお聞かせ下さい。

横田 ILASでの衛星観測としての太陽掩蔽法、そしてそれを専用に解析するコンピュータシステムの開発など、これらはすべて日本で初めて行うもので、試行錯誤の連続でした。もともとこのプロジェクトは環境庁(当時)のリーダーシップの下に開始されたものですが、準備段階からILASセンサーの概念、基

図3 ILAS観測によって明らかになった1997年初期の北半球高緯度でのオゾン変化率(図中の赤い丸はPSCの出現を示す。2月中旬～3月にかけて、大きなオゾン破壊がみえる)

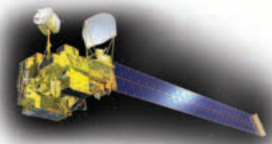


## メモ

## 流跡線解析とは

ある時刻にある地点・ある高度にあった空気塊が、時間とともにどのように流れていくかを全球気象データの3次元風速を元に追跡し、別の時刻にはどの場所のどの高度にあるかという計算を行う手法。





本仕様などに関しては国内外の各大学や国立研究機関の研究者の助言を得ながら、事実上国立公害研究所(当時)が引っ張ってきたという歴史があります。プロジェクトの中心にいたのは衛星観測研究チームの総合研究官だった笹野泰弘さん(現：大気圏環境研究領域長、成層圏オゾン層変動研究プロジェクトリーダー)でした。ILASがADEOSのセンサーとして採択された後、1990年から笹野さんがリーダーとなってプロジェクトを推進し、国内外の研究者を組織化しました。その結果ILASのデータを有効に活用することができ、オゾン層破壊の解明に一歩も二歩も近づいてきました。この功績は非常に大きいと思います。

今回の研究では民間との協力体制の構築も大きな役割を果たしました。たとえば、重要なテーマであったアルゴリズムのソフトウェア化を担当した富士通エフ・アイ・ピーは、開発当初から現在までずっと常駐してプログラミングの構築、バージョンアップを続けています。また当時の研究員の話ですが、鈴木睦さん(現：宇宙開発事業団)は機器のハードウェアに強く、ILASを製作した松下技研(当時)と密にコンタクトを取って指導していました。鈴木さんは計算機についても詳しい方で、当時高速計算にはスーパーコンピュータが主流という中、ILASのデータ処理には小さなコンピュータを並列して使用する分散

処理計算機の方が向いているという結論を出し、日本で初めてIBMの並列処理計算機を本格的に利用した処理システムを導入しました。

導入した計算機システムは、そのままでは持てる性能を十分には発揮しません。鈴木さんは日本IBMの基礎研究所の方と協力してプログラムの高速化を行いました。そういった先人の苦労話はたくさんあります。

——最近ではどうですか。

横田 ILAS-IIからの初めての観測データが今年の1月20日に取得されました。ところがその前日にコンピュータがダウンしたのです。当日朝一番に計算機メーカーの人にきてもらって調べてもらったところ、一番大事な計算機の基板がだめになっていました。メーカーの人に探してもらったら、運良く在庫が水戸にあったのでバイク便で送ってもらい修理が完了しました。データチェックの開始は3時間ほど遅れましたが、なんとか事なきを得ました。最先端といわれる研究ですが、実はバイク便の助けが必要だったんですよ(笑！)。

中島 ILAS-IIの検証実験はこれからです。来年の3月、4月にスウェーデンのキルナで行う計画になっています。そこからまた何か新しい知見が生まれるかも知れません。たいへん楽しみです。

——期待しています。ありがとうございました。

メモ

## オゾンの話：地球と大気の関係

酸素分子( $O_2$ )は安定した物質ですが、紫外線など強烈なエネルギーが加わると反応が起こってオゾン( $O_3$ )が生成します。オゾンは酸化力が強く、その特性を利用して業務用では殺菌・消毒・脱臭に使用されていますが、都市大気中では目やのどの痛みを引き起こす光化学オキシダントの主成分として知られており、人体には有害な物質です。

一方、高度10~60kmにある成層圏ではオゾンは有害な紫外線をカットするフィルターの役割を果たしています。遺伝子の構成物質であるDNAの吸収波長とオゾンの吸収波長がよく一致しているため、結果的にオゾンが生物にとって有害な紫外線を防いでくれるのです。

大気中のオゾンの90%は成層圏にあり、残り10%は地上から高度10kmくらいまでの対流圏にあるといわれています。オゾンは赤道周辺の上層成層圏で発生します。ところがそこに留まらず、大気とともに高緯度地域へ運

ばれ、下降するにつれて数十倍に圧縮されます。その結果、高緯度地域の下部成層圏は高濃度のオゾンがたまることとなります。これがオゾン層です。

オゾンの全量を表わすには、大気中のオゾン全体を地上の標準状態(0℃、1気圧)に圧縮したと仮定して、その厚さをcmで表わし、さらに1000倍した値を使います。これを、ドブソン・ユニット(DU)と呼びます。

大気全体を標準状態に圧縮した場合、その厚さは約8kmに相当しますが、オゾン全量は500DU以下です。厚さは5mmにもなりません。ちなみに地球の直径は約12,700kmですが、地球の大気の厚さは成層圏まで含めても地上から約50km程度です。地球と大気はまるでリンゴとリンゴの皮ともいえます。その皮のさらにほんの薄層に当たるのがオゾン層です。このように、私たちはまさに薄氷のようなオゾン層によって有害な紫外線から守られていることがわかります。

# オゾン層変動の解明研究の概要

## — ILASで見たオゾン層の破壊 —

太陽掩蔽法による人工衛星を用いた本格的な地球大気の観測は、日本ではILASが初めてでした。この新しい衛星センサーから次々と送られてきたデータを解析した結果のうち、オゾン破壊速度、極成層圏雲に関する知見を紹介します。

### 1 オゾン破壊速度

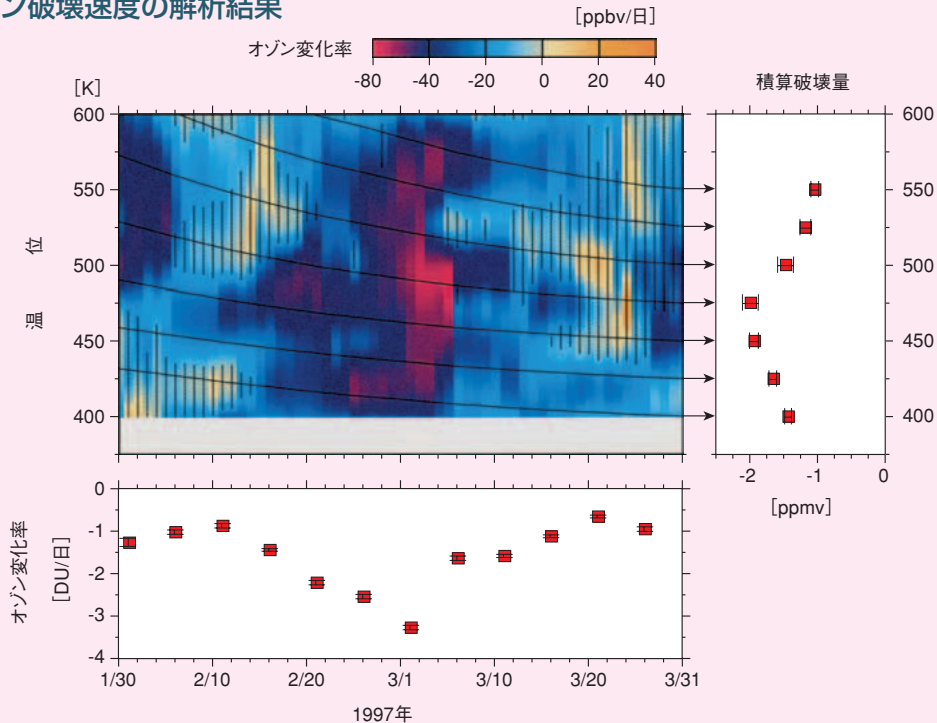
ILASは1日14回北極の上で観測しています。その時に捉えた一つの空気塊を流跡線解析で追跡しました。さらに衛星で観測した空気塊のペアを選び出し、それらの観測値を比較することにより、オゾン濃度の差からオゾン破壊速度を解析しました(図4)。

極洞付近の場合など、空気塊同士の混合などが生じた時には、流跡線解析による空気塊のペアは、必ずしも同じ空気塊であったとはいえません。これらの影響を考慮するために、複数の流跡線解析を行い、疑わしい流跡線を排除しました。また冬季の成層圏

では太陽光が当たらないため、大気の熱が放射によって逃げて、空気塊は冷却によって重くなり下降してしまいます。つまり、観測している高さから、オゾンを含む空気が落下してなくなってしまうのです。この影響を除去するために、全球放射モデルで計算された放射冷却率を用いて、この冷却による下降を補正しています。

このようにして見積もったオゾン変化量は、大気の運動による影響を極力排除したことにより、より正確なオゾンの化学的な変化(破壊)を示していると考えられます。

図4 オゾン破壊速度の解析結果



出典 [ Terao et al, J.Geophys. Res.,2002をもとに作成 ]

この図は、1997年1月30日(年通算日数30日)から3月31日(年通算日数90日)までの間の、成層圏オゾン濃度の変化に関する解析結果を示しています(算出方法は、本文を参照して下さい)。

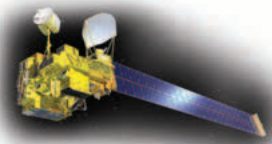
ここでオゾン濃度変化率は、一日当たりの極洞内平均の変化率を意味します。単位は(ppbv/日)で表わし、これは気体の体積混合比で10億分の1の変化(一日当り)に相当します。図中の黄色っぽいところを中心に縦線が描かれているところは、算出結果が統計的に有意でない領域(有意水準99%)です。

縦軸には、高度の指標である温位を使っています。温位は、その場所の空気を地上の気圧まで圧縮したときの温度(絶対温度:K)で示します。一般に成層圏では温位は高度とともに増加します。通常、空気塊は温位の等しい面内を移動しますが、冬の極域付近の成層圏では、放射冷却によって空気塊が冷えるために、空気塊は図に示されるようにゆるやかな曲線に沿って高度を下げていき

ます。

右の積算破壊量の図は、空気塊の下降を考慮した(曲線に沿った)オゾン変化の合計量(ppmv:体積混合比100万分の1)を示します。図中の横線は、推定誤差を表わしています。下段の図は、温位が400 Kから600 Kの間で積算した1日当たりのオゾン濃度変化率(単位DU/日)を通算日数に対して描いています。

2月下旬には、温位で450 Kから500 K(高度で約18 km~20 km)で平均オゾン濃度変化率が最大50-70 ppbv/日に達しています(中央赤い部分)。また、1月30日から3月31日までの間に、オゾン濃度は最大で2.0 ppmvも減少しました(右図)。1月30日の高度20 km付近での極洞内平均オゾン濃度は3.6 ppmvであったことから、この2カ月間で約55%のオゾンが化学的に破壊されたこととなります。1月30日から3月31日の間に、400 Kから600 Kの範囲で積算したオゾン減少量は96DUでした。



## 2. PSCの組成

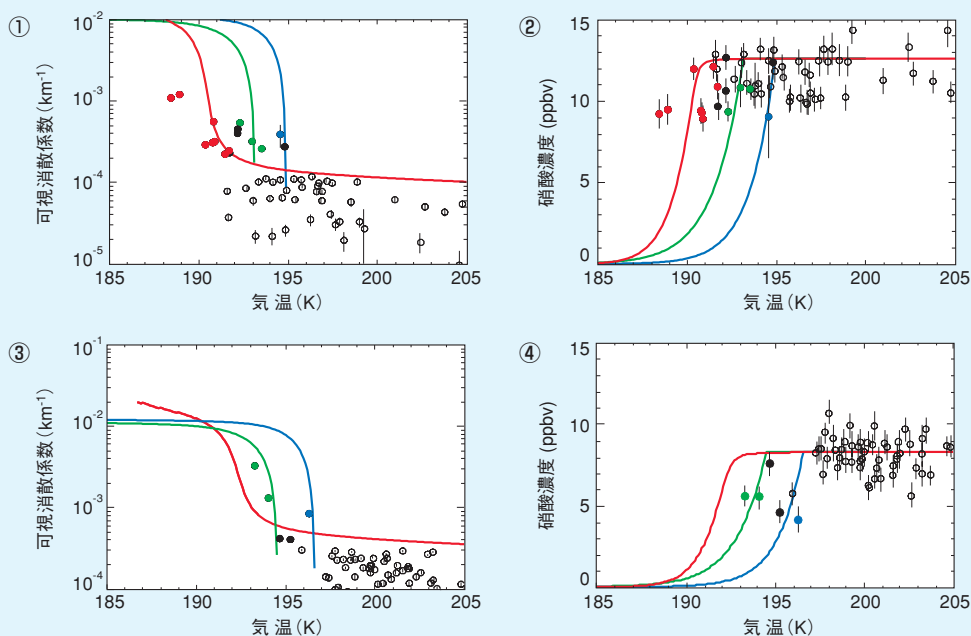
PSCは、フロンから出てきた塩素をオゾン破壊に不活性な状態から活性な状態に変換する反応の場となって極域オゾン破壊を促進させることが最近の研究でわかってきました。しかし、PSCの分布が高緯度の広範囲にわたることや、 $-80^{\circ}\text{C}$ 以下の低温になる冬季の極域成層圏にしか現われないことから、PSCの分布やその形成過程、組成などについては、あまりよくわかっていませんでした。ILASは高緯度の成層圏を連続的に観測することができたため、PSCに関してさまざまな新たな知見を得ることに成功しました。

1997年1月～3月の北極域上空のILAS可視消散係数(大気中の光の減衰量の指標。光路中にエアロソ

ルやPSCがあると、大きな値となる)データを用いて、PSCの発生頻度およびそれが出現する高度と経度の分布の変化を捉えることに成功しました。さらに、この消散係数と観測された空気塊の気温や硝酸濃度との関係から、観測されたPSCの組成を理論的に推定することが可能となりました(図5)。

実際に成層圏大気中で出現しているPSCの組成を明らかにすることは、将来温室効果ガスの増加などにより成層圏大気の温度が変化したときに、PSCの出現頻度がどのように変化するかを予測したり、ひいてはそれによってオゾン破壊がどれだけ長引くかを予測したりする上で、たいへん重要なポイントとなっています。

図5 PSCの組成推定



出典 [ Saitoh et al, J.Geophys. Res.,2002をもとに作成 ]

PSCを構成する粒子にはいくつかのタイプが存在することが知られており、その主なものは、水と硝酸からなる結晶(硝酸と水が1:3で結合しているNAT, 1:2で結合しているNADなど)、水/硝酸/硫酸からなる過冷却状態(本来結水すべき温度でも液状である状態)の液滴(STS)、そして氷晶の、3つのタイプがあるといわれています。

これらの3つのタイプの粒子は各自の熱力学的な特徴を持っています。実験室データから予測される気温と消散係数および硝酸ガス濃度との理論的關係を図中に実線(青: NAT, 緑: NAD, 赤: STS)で示します。

①は1997年1月中旬に北極域の高度22kmでILASで測定された消散係数と気温の關係を示しています(縦軸の消散係数はPSC量を表わす指標で、可視光線が1km進むときに減衰する割合を表わしています)。PSCが出現すると光が大きく減衰するため、消散係数は増加します。この図では消散係数が $10^{-4}(\text{km}^{-1})$ 以上の時にPSCがあったと判断しています(図中の赤丸はSTS由来、緑丸はNAD由来、青丸はNAT由来と判断できる。黒丸は由来不明。なお白丸はPSCが存在すると判断されなかったケース)。②は、これに対応する大気中の

硝酸ガス濃度と気温の關係を示しています。PSCは硝酸ガスを吸収して成長するため、大気中の硝酸ガス濃度は粒子の成長に伴って減少します。

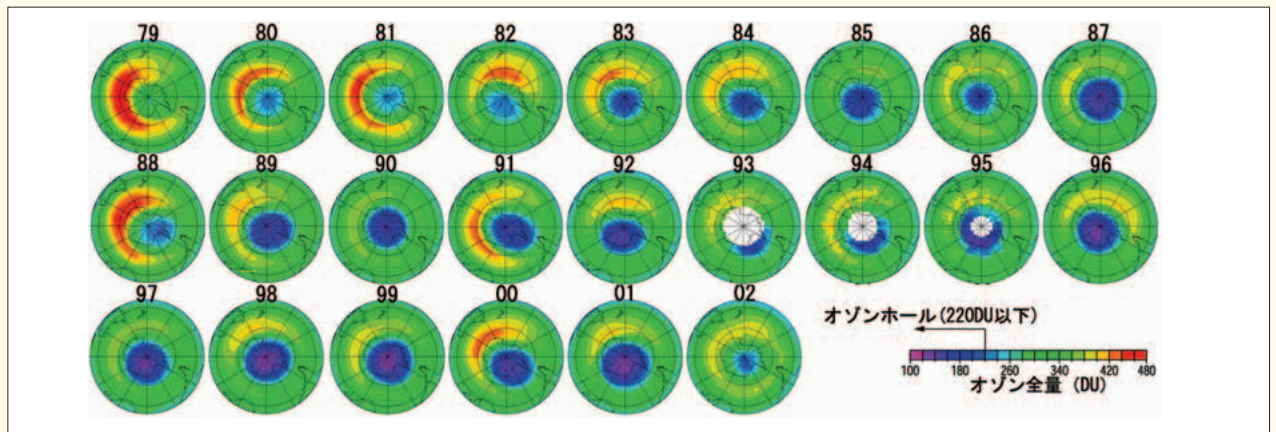
①②の時期・高度では、ILASデータの多く(図中赤丸)は赤線で示されたSTSの理論成長曲線にもっとも近く、STSの成長曲線に沿ってエアロゾル量が増加し①、同時に硝酸ガス濃度が減少しています②。このことから、1月中旬にILASで観測されたPSCは、STSがもっとも多かったことが明らかになりました。

③④は、1997年3月初旬に北極の高度18kmで観測された消散係数と気温③、および硝酸ガス濃度と気温④との關係を示します。③④とも消散係数の値が $5 \times 10^{-4}(\text{km}^{-1})$ 以上のものをPSC(図中の青丸と緑丸)と判定しています。これらの図では、気温と消散係数や硝酸ガス濃度との關係は、緑のNADや青のNATの予測理論曲線により近いことがわかります。これらのことより、3月初旬にはNADやNATからなるPSCが主に発生していたことがわかります。

このようにILAS観測では、PSCの発生を検出するだけでなく、そのタイプ(成分)まで推定することに世界に先駆けて成功しました。

# 衛星観測によるオゾン層研究をめぐって

1980年代に人間活動により大気中に大量にばらまかれたフロンなどのオゾン破壊物質は、いまだに成層圏のオゾン層を破壊し続け、オゾンホール回復の兆しも見られません。さらに、近年の地球温暖化がオゾン層の破壊にも影響を及ぼしている可能性が指摘されています。対策がどのように効果を示しているかなど、今後のオゾン層破壊の推移に関し、衛星によるグローバルな監視の必要はさらに高まっています。



TOMSによる南極上空オゾン全量（1979～2002年10月平均値）

## 世界では

成層圏オゾンの研究は、1880年代にヨーロッパでシャピユイとハートレーによる太陽光の分光観測によって始まった後、1931年英国のドブソンが観測点上空にあるオゾンの全量を観測する分光光度計を完成させました。その後、1957年から始まった国際地球観測年(IGY: International Geophysical Year)を契機に、オゾンの全世界的な観測網が作られ、現在に至っています。このドブソン分光光度計は、現在でも世界のオゾン観測網の主力機器です。

またちょうどこの頃、英国オックスフォード大学のブリューワとミルフォードが、定常観測に使用可能な気球搭載オゾン観測器である、オゾンゾンデの原型を作り上げるのに成功しました。これによって、高度約30kmまでのオゾンの分布を観測することが可能となりました。

さらに、1971年には米国の人工衛星Nimbus-4号にBUVというオゾン観測器が搭載され、全球的なオゾン観測が開始されました。Nimbus-4号の成果は、Nimbus-7号に引き継がれ、この衛星にはSBUVとTOMSという2つのオゾン観測センサーが搭載されました。

1982年には日本の忠鉢繁とイギリスのファーマンがそれぞれ独自に、南極昭和基地とハレー基地のオゾン観測データからオゾンの異常な減少に気づき、1984年から1985年にかけて世界的に報告し、い

わゆる「南極オゾンホール」の発見となったのです。

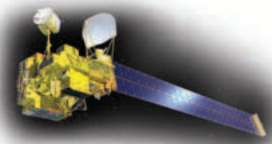
オゾンホールは、その後TOMS等の衛星観測データでも確認され、連続的にモニターされ続けています。1991年打上げの米国のUARS衛星には、CLAES、MLS、HALOEなどの大気観測用の複数のセンサーが搭載され、より詳細なオゾン破壊メカニズムに関する観測がなされています。また最近では、北極上空でのオゾン減少も人工衛星観測などによって報告されています。

## 日本では

日本では、前述の国際地球観測年(1957年)から、気象庁によって南極昭和基地や国内の気象庁の各観測点(札幌、つくば、鹿児島、後に那覇が追加)で、オゾンの連続観測が始まりました。またオゾンゾンデに関しても、日本独自のゾンデ(KC型)が1966年に開発され、現在も観測に使われています。

また、東京大学等により、紫外吸光法を用いたロケット搭載型のゾンデを用いて1970年代から鹿児島県内之浦のロケット実験場で高度70km以下のオゾンの観測が行われてきました。最近では、差分吸光レーザーレーダーや赤外吸光、ミリ波分光などさまざまな手法によるオゾン観測もいくつかの研究グループによって行われてきています。

日本の人工衛星によるオゾン層の観測は、宇宙科学研究所による1984年打上げのEXOS-C衛星(おお



2000年の会議に集まった各国の研究者たち  
(最前列右から4人目が笹野プロジェクトリーダー)

ぞら)搭載LASによる実験的観測を除くと、1996年打上げのADEOS衛星搭載ILASによる定常観測が初めてです。

## 国立環境研究所では

オゾン層の衛星観測について、国立環境研究所では1988年以来、今日まで15年にわたって研究を行ってきました。そして現在は、ILASの後継機であるILAS-IIの観測データの処理と応用の研究を続けています。

2002年12月に無事ADEOS-IIが打上げられた後、ILAS-IIは機能確認試験も終了し、2003年4月からは連続的にオゾン層の監視のための良質なデー

タを取得しております。そこでまず私たちは、ILASの時には実現できなかった南半球でのオゾンホール形成から消長までの過程(8月から11月頃まで)を監視し、オゾン層破壊の研究に役立てることを第一の目標としています(下トピック参照)。

また、ILAS-IIの連続的な分光スペクトルの取得という特徴を生かした、オゾン層破壊の鍵となる極成層圏雲(PSC)の組成同定の研究においても、その成果が期待されます。なお現在の研究体制としては、専属の職員(研究者)のほかには5名の非常勤研究者(ポスドクフェロー)を加え、オゾン層変動に関するよい研究成果を得るために、ILAS-IIの観測データを活用した大気科学研究を実施しています。

## トピック

### 2003年の南極ではオゾン破壊が一層進む —ILAS-IIの観測結果から

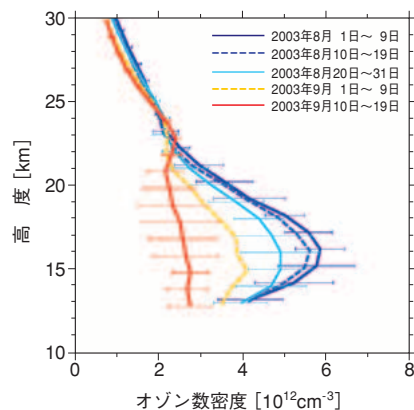
2002年12月に打ち上げられたADEOS-IIに搭載されたILAS-IIは、2003年4月から定常運用に移行しています。そこで、ILAS-IIがとらえた最新の南極上空の観測結果を紹介します。

2003年の南極上空成層圏の気温は、オゾンホールが顕在化した1980年以降もっとも低温で推移しています。それに伴い、オゾンホール形成に重要な役割を果たすPSCの大量発生が2003年5月から観測されました。発生頻度は1980年代以降で最大規模となっています。

2003年9月までの観測結果から、2003年の南極ではすでに8月末の段階で約30%のオゾン破壊が起きていることが確認されました。これはこの時季としては過去最大のオゾン破壊です。9月半ばには、オゾン破壊は約60%に拡大しました。

2002年の南極上空のオゾンホールは、1991年以降もっとも小さなものでした。このため、オゾン破壊はピークを越えたとの声も一部には聞かれました。ところが、今回のILAS-IIの観測では一転、2003年の南極では今後大規模なオゾン破壊が起こる可能性を示唆しています。

### ILAS-IIが観測した南極上空でのオゾンの高度分布



ILAS-IIが観測した南極上空でのオゾン濃度の平均値(曲線)と標準偏差(横棒)。8月初めの観測値に比べ、それ以降の10日おきのオゾン量は高度13~21kmで明らかに減少傾向を示し、この高度で南極上空のオゾン破壊が進行していることが確認されました。オゾン破壊は、高度15kmで9月半ばには8月初めの約60%にも達しました。

# 衛星観測によるオゾン層研究プロジェクトのあゆみ

## ●研究の全体構成

### ●1995～1997(平成7～9年)

#### 「オゾン層破壊関連大気微量物質の衛星利用遠隔計測に関する研究」

1996年8月打上げ「地球観測プラットフォーム技術衛星ADEOS(みどり)」搭載センサー、改良型大気周縁赤外分光計ILASによるオゾン層の観測に向け、太陽掩蔽法センサーによるエアロゾル計測に関する基礎的研究を行った。

### ●1996～1998(平成8～10年)

#### 「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」

上記課題と並行して、オゾン層破壊に関連した諸問題を解明するため、オゾン層破壊における極渦変動の影響、極域・中緯度域相互作用とオゾン層変動の関係、統計的手法によるオゾン層変動の解析、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、不均一反応によるオゾン破壊促進機構に関する研究、中層大気における力学・光化学結合過程に関する観測的研究等を行った。

### ●1998～2000(平成10～12年)

#### 「衛星利用大気遠隔計測データの利用実証に関する研究」

1996～1997年に運用を行ったILAS及び2003年から運用を行っているILAS-IIのデータ利用に関連して、太陽掩蔽法センサーによる温暖化関連物質の導出手法の研究、ILAS-II等による観測気体の分子分光パラメータの高度化、極域成層圏エアロゾルに関する地上及び衛星観測データの解析、ILAS等衛星データの品質評価と高層大気環境の解析、ILASデータを用いた3次元化学輸送モデル(REPROBUS)によるオゾン層破壊に関する研究、ILASデータ等を用いた雲／極成層圏雲の検出に関する研究等を行った。

### ●2001～2003(平成13～15年)

#### 「衛星データを利用したオゾン層変動の機構解明に関する研究」

引き続き、ILAS及びILAS-IIのデータ利用に関連して、衛星観測スペクトルデータからの微量気体高度分布導出手法、大気微量気体のリモートセンシングのための分光データ精密化、衛星データ検証のための極成層圏雲・地上観測データの特長評価、衛星データ等を利用した科学的解析とデータ質評価、3次元化学輸送モデルを用いたオゾン破壊量の定量化、光化学ラグランジアンモデルと気球観測データを用いた極域成層圏化学等に関する研究を行っている。

この研究は現在、以下の組織・スタッフにより実施されています。

#### <国立環境研究所の研究担当者(2003年10月現在)>

##### 成層圏オゾン層変動研究プロジェクト

中島 英彰, 杉田 考史, 秋吉 英治

(ポストフェロー

入江 仁士, 江尻 省, 寺尾 有希夫, 齋藤 尚子, 田中 智章)

##### 大気圏環境研究領域

笹野 泰弘, 菅田 誠治

##### 社会環境システム研究領域

横田 達也

##### 共同研究機関

気象庁気象研究所, (独)通信総合研究所, (独)産業技術総合研究所, 文部科学省統計数理研究所, 文部科学省国立極地研究所, 北海道大学大学院地球環境科学研究科, 東北大学大学院理学研究科, 茨城大学理学部, 東京大学大学院理学研究科, 東京大学気候システム研究センター, 名古屋大学太陽地球環境研究所, 京都大学大学院理学研究科, 京都大学宇宙電波科学研究センター, 奈良女子大学理学部, 福岡大学理学部, 法政大学工学部,

## 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<sub>2</sub>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)

## 『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しるべとしたいという意図が込められています。『環境儀』に正確な地図・航路を書き込んでいくことが、環境研究に携わるものの任務であると考えています。

2001年7月

理事長 合志 陽一

(環境儀第1号「発刊に当たって」より抜粋)

## 環境儀 No.10

— 国立環境研究所の研究情報誌 —

---

2003年10月31日発行

編集 国立環境研究所編集委員会

(担当WG：横内 陽子，横田 達也，中島 英彰，内山 政弘，椿 宜高，  
清水 英幸，松本 公男)

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) // 企画・広報室 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。

編集協力 (社)国際環境研究協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-1-13



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ただけ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。



本誌は再生紙を使用しております