

衛星による成層圏オゾン層観測 (ILAS) プロジェクト

—2004年度藤原賞受賞記念講演—

笹野 泰弘*

1. はじめに

我が国が開発した大気成分観測センサーを人工衛星に搭載して宇宙からの本格的な大気環境観測を行うことになりました, その発端は1988年に遡ります. 当時, 宇宙開発事業団 (現在, 宇宙航空研究開発機構) が, 開発を進めようとしていた地球観測プラットフォーム技術衛星 (ADEOS : Advanced Earth Observing Satellite) に搭載するセンサーの公募を行いました. ちょうど, 成層圏オゾン層の破壊の問題がクローズアップされ, ウィーン条約が締結, 特定フロン等の生産・使用を制限するためのモントリオール議定書が発効, また国内的にもオゾン層保護法が制定されたばかりの時期でありました.

環境庁 (現在, 環境省) としても, 調査研究・観測監視の分野で国際貢献を図るべく, 人工衛星による成層圏オゾン層の観測に乗り出すことを決めました. 環境庁においてそのための検討会が設置され, 国立公害研究所 (現在, 国立環境研究所) の研究者も参加して具体的な検討が行われ, 結局, 改良型大気周縁赤外分光計 (ILAS : Improved Limb Atmospheric Spectrometer) を環境庁から ADEOS 搭載機器として提案応募することになったわけです. これが ADEOS 衛星搭載機器として採択され, 環境庁は機器の開発に着手することとなりました. 1989年9月のことです.

国立公害研究所からは, 当初から環境庁の検討作業に研究員が参加し, 機器開発に関する調査検討に協力を行ってきたところでしたが, データ処理運用をはじめとする地上システムの開発を国立公害研究所が担当することが決まり, その作業を本格化させることが必要との判断から, 1990年2月に「衛星観測チーム (仮

称)」を設置し, 研究所として組織的かつ本格的に取り組むこととなりました. 私が, ILAS プロジェクトに関わり始めたのはこのときからです.

私のこのプロジェクトへの関与と成果に関して, このたび図らずも, 藤原賞を頂くことになりました. まことにありがたいことです. 授賞の理由として, 次のようなことが挙げられました. まず, プロジェクトリーダーとしてプロジェクトチームを統括し, プロジェクトの推進に貢献を行ったこと, サイエンスチームを結成し, 機器の仕様検討, データ処理アルゴリズム検討・改訂, 検証計画の推進, ILAS データを用いた科学研究の推進などに役割を果たしたこと, また, オゾン層研究において, 衛星データを用いた「マッチ」解析を世界に先駆けて行いオゾン破壊量の定量化に関する研究を行ったほか, ILAS データを用いた極域成層圏のさまざまな現象解明に貢献を行ったことなどです. その他, 日本主導のプロジェクトの成果として初めて JGR の特集号として発表したこと, プロジェクトを進める中で, 若手研究者に対して大きな影響をあたえ, わが国の大気化学分野の研究の発展に貢献したことも, 高く評価されました.

こうして授賞理由を書き並べてみると容易に気づくことは, 今回の受賞はまさに多くの関係者のご努力, ご協力があったからこそのことであつたということです. 環境省, 国立環境研究所, 宇宙航空研究開発機構の関係者, そして機器開発, データ処理運用システムの開発運用, 検証実験計画運用をそれぞれ担当された民間の企業の方々のご努力の積み重ねに感謝を申し上げる次第です. また, プロジェクト開始当初から, 機器仕様の検討作業, 機器の環境試験などにおいて特段のご協力を頂いた宇宙科学研究所 (現在, 宇宙航空研究開発機構) に感謝申し上げたいと思います.

また, ILAS プロジェクトが成功した大きな理由のひとつは, プロジェクトチーム, サイエンスチーム,

* 国立環境研究所.

—2004年8月25日受領—

—2005年2月28日受理—

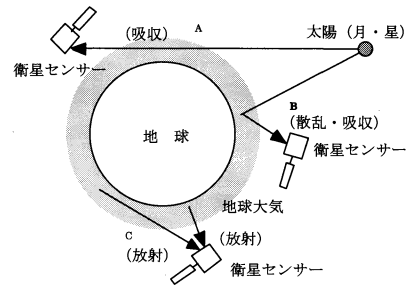
検証実験チームにご参加頂いた内外の研究者や、アドバイザーグループにご参加頂いた有識者の方々の非常に熱心なご協力・ご支援があったからです。この分野では、日本としてはじめての国際的な広がりの中でのプロジェクト推進でした。これらの方々の支援なしには、プロジェクトはまったく進めようもなかったと言って過言ではありません。そういう意味で、今回の藤原賞は、プロジェクトに関わったすべての方々を代表して頂戴したと思っています。

本報告では、ILAS プロジェクトの概要をかいつまんでご紹介したいと思います。もっとも、以前にも気象学会のシンポジウムで話したことをまとめた文章を「天気」に掲載しており(笹野, 2001)、主要な部分の紹介はほとんど重複することになりますので、本稿ではいささか感想文的になることをご容赦頂きたく思います。

2. 改良型大気周縁赤外分光計 (ILAS)

地球大気成分の人工衛星を用いた測定には、いくつかの方式が用いられています(第1図)。このうちILASでは、太陽掩蔽法と呼ばれる方式を採用しており、太陽を光源として地球大気をかすめてセンサーに到達する光を分光測定することにより、大気成分の濃度に関する情報を得ます。また、衛星、太陽、地球の位置関係から高度に関する情報を取得します。赤外線領域の太陽光は、大気を通過する間に大気を構成する微量気体成分により吸収を受けます。また、大気中に存在する粒子成分(エアロゾル、極成層圏雲、巻雲など)による消散(散乱と吸収)を受けます。いずれも、成分による特有の波長特性を有しており、分光測定することにより大気成分の同定と定量が可能となるわけです。ILASによる測定データからは、オゾン、硝酸、二酸化窒素、亜酸化窒素、メタン、水蒸気などの気体成分と、エアロゾルなどの粒子成分の濃度の高度分布が算出されます。また、極成層圏雲のタイプの同定、その組成の推定なども試みられています。詳細は、JGRの特集セクション¹¹等をご覧下さい。

ILASを搭載したADEOS衛星の軌道特性(太陽同期の極軌道衛星)と、太陽掩蔽法という測定手法を採用していることから、ILASは北半球、南半球のそれぞれにおいて、1日のうちにほぼ同一の緯度円上の14地点の上空で測定が行われます。例えば、南極オゾンホー



第1図 人工衛星を用いた大気成分の測定原理。ILASの場合は、太陽光の大気による吸収を測定する太陽掩蔽法を用いている。

ルが形成された時期には、オゾンホールが必ずしも極を中心とする同心円状ではないことから、オゾンホールの内外が観測されることになります。これらの測定地点で得られる高度分布データを用いることにより、高度-経度断面内の高度分布を描くことが出来ます。オゾンだけでなく上記の種々の微量成分の分布が同時に測定され、このような図面が1日に成分毎に、北半球と南半球でそれぞれ1枚ずつ得られることになります。

このようにILASは、成層圏オゾン層の変動の様子を捉えるため、各種の微量成分や、エアロゾル・極成層圏雲の分布を同時測定することを目的としたものです。測定対象緯度範囲は南北両半球の高緯度であることから、南極オゾンホールなどの観測にもっとも適した衛星センサーとなっています。

3. ILAS プロジェクトへの取り組み

2000年の気象学会秋季大会の「人工衛星からの大気観測—その歴史的展開—」と題されたシンポジウムにおいて、「ILASによる極域成層圏衛星観測プロジェクトの10年」というタイトルで話をさせて頂きました。そのときの講演内容が「天気」に掲載されており(笹野, 2001)、プロジェクトの歴史を紹介しています。この他に、プロジェクトで発行している「ILASサイエンスチームニュース」には、リアルタイムに近い形でプロジェクトの主要な事項の記事が掲載されており、プロジェクトの運営の数百ページに上る貴重な記録となっています。ILASプロジェクトのウェブサイト¹²にも登録されていますので、興味のある方は参照されるとよいと思います。

¹¹ J. Geophys. Res., 107 (D24), 2002

¹² <http://www-ilas.nies.go.jp/jindex.html>

ILAS プロジェクトにおいて国立環境研究所に期待された役割は、データ処理運用システムの開発と運用、科学的側面からのプロジェクトの支援（機器開発・試験、検証実験企画・実施、データの科学的利用研究）でありました。これらを実施していく上で、プロジェクトの中心として、国内外の多くの研究者を組織化する吸引力となることが必須と考えました。そのことが、その後の運営を進める上での基本的な考え方になっています。

<機器の概念検討>

開始当初、精力的に行われた ILAS 機器の基本概念検討においては、かつて宇宙科学研究所で松崎章好氏が中心になって開発された LAS (Limb Atmospheric Spectrometer: 大気周縁赤外分光計) センサーが、検討開始当初の雛形として想定され、最終的には文字通り「改良型 (Improved) LAS」として、非常に規模の大きな意欲的なセンサー仕様となりました。すなわち、回折格子赤外分光計、回折格子可視分光計、太陽追尾光学系を備え、赤外波長域の分光測定とともに、酸素 A バンド吸収帯測定による気温高度分布の導出、太陽中心の追尾と太陽上下端位置の検出による測定高度（接線高度）の高精度決定をもくろんだものです。

<データ処理運用システムの開発>

一方、国立環境研究所に課せられた任務は、まずはデータ処理運用施設を開発整備することでありました。この仕事は、どの程度の規模のシステムになるのかまったくの手探りの状態から始まりました。システムがなすべきことは、定常処理・運用、再処理、データ管理、データ処理解析、ILAS 運用コマンドの作成・発行、ILAS データ・気象データ等の自動受信、解析済みデータの外部提供、機器特性評価、検証解析支援などで極めて多岐に渡るものでした。

その中で、当然のことながら太陽掩蔽法による測定データの処理（オゾン濃度などの地球物理量の算出）そのもののアルゴリズムの開発が当初の最重要課題でした。このため、この分野において一日の長があった米国航空宇宙局ラングレー研究センターへ研究者を長期（1年間）派遣したことを契機として、国内外の研究者の協力を得ながら、ソフトウェア開発担当会社の技術者の知識の獲得と能力のレベルアップを図りつつ、ILAS 独自のデータ処理アルゴリズムの研究開発を進め、運用プログラムで開発してきたという経緯が

あります。

<衛星の打ち上げと機器運用>

1996年8月17日の種子島における ADEOS 衛星の打ち上げ後、約1か月をかけて衛星本体の機能確認試験が行われ、引き続いて各センサーの機能確認試験が順次行われました。ILAS センサーの機能確認試験は9月17日、18日に行われ、その後の衛星全体の機能確認試験を経て、1996年11月から本格運用が開始されました。1997年6月30日に衛星側のトラブルにより運用を停止し、その間約8か月分のデータを取得して、ILAS 観測は終了しました。

<検証データの収集>

衛星搭載センサーデータの信頼性の評価のために、検証実験は極めて重要なものであるとの認識を当初から持っていました。検証実験というのは、衛星センサー ILAS から導かれたオゾン濃度等の高度分布を、それとは独立に得られたデータと比較して、その妥当性や精度を定量的に評価するためのデータを取得するためのものです。

このため早い時期から、検証実験計画の立案に着手しました。とりわけ、ILAS による観測域が南北両半球の高緯度域であることから、海外の研究チームの協力を得ることが不可欠であろうとの認識から、国際的な検証実験チームを構築することに力を注ぎました。最終的には、フランス国立宇宙研究センター (CNES: Centre National d'Etude Spatiale) との共同による大気球観測実験をスウェーデンのキルナにおいて実施することになったのは幸いでした。この気球実験には、9か国に上る国々からの研究者の参加が得られ、国際共同実験としても、また検証データの取得においても大きな成功を収めることが出来ました。この他にも、検証データの収集に努力が払われ、成層圏変化検出のためのネットワーク (NDSC: Network for the Detection of Stratospheric Change) データ、オゾンゾンデデータ、衛星データなどが収集され、検証に活用されました。

<プロジェクトスタッフの任務>

ILAS の運用開始以降、プロジェクトメンバーが最も多くの時間を割いて来たのが、分光計等の機器特性の評価、データ質評価、検証解析、データ処理アルゴリズムの改訂、データの再処理・提供といった作業で



第2図 第15回 ILAS サイエンスチーム会合の参加者たち(1999年3月29日~31日, 奈良女子大学にて). 国内外の若手研究者の参加が得られた.

す. こういった仕事は, 地味だけれども, 衛星センサーデータを科学者コミュニティにおいて安心して使って頂くためには, 必要不可欠のものです. 以前にも申し上げたことですが, 論文にはなりにくい, このような仕事に対するモチベーションをどのように維持するかというのは非常に大事なことだと思うのですが, いままでに確固たる答えは見つけていないというのが正直なところです.

〈プロジェクトの運営〉

これまでの ILAS プロジェクトの来し方を振り返って言えることは, まさに試行錯誤で進めてきたと言うことでしょう. どんな研究であれ事業であれ, 何もかもが最初から見通しが利くわけではなく, またそんなに順調に運ぶはずもなく試行錯誤が必要だろうから, 同様の経験をされた方も多かろうと思うので, 特別の感慨にふけるのは適当ではないでしょう. とは言っても, プロジェクトがカバーすべき範囲は広く, 衛星搭載機器の概念設計検討から始まって, 製作・機器試験の支援, 衛星側とのインターフェース調整, データ処理運用設備の設計・開発・運用, データ処理アルゴリズム研究, ソフトウェア開発, データ提供サービス, 検証実験計画立案, 検証実験チーム運営, CNES との調整・契約, 検証実験の実施, 検証実験データベース整備, 機器特性評価, データ処理アルゴリズム改訂, 国内外に対する研究公募, サイエンスチーム運営, データ利用研究まで, さらにこれらのベースとなる予算・要員・協力者の確保, スケジュール管理, 対外折衝,

広報, 研究発表までをこなしていくことは容易なことではありませんでした. 幸いなことは, 然るべき時には要所々々に, 力強い支援者, 協力者が得られたということです.

4. ILAS データを用いたオゾン層研究

ILAS データを用いたマッチ解析によるオゾン破壊量の定量的な仕事は (Sasano *et al.* 2000), ILAS の観測期間がわずか8か月間しかなかった中で, 北極域で記録的なオゾン破壊をもたらした1997年の春季が ILAS データ期間に含まれていたことが大いに幸いしたと言えます. 筑波大学の大学院生だった寺尾さんは, この解析をいっそう精密なものにし, また気温条件や極渦内での位置関係などの関係を詳細に議論した論文 (Terao *et al.*, 2002) で, その後, 気象学会山本賞を受賞されました. ILAS プロジェクトの成果の一端がこのような形で評価されたことは, プロジェクトを進めるものとして嬉しいことでありました.

その他にもオゾン破壊, 極域成層圏雲の発生, 成層圏の脱窒・脱水, モデルとの比較など, 多くのオゾン層化学に関わる研究が ILAS データを用いてなされて来ています. 例えば, 極成層圏雲の組成推定 (Hayashida *et al.*, 2000; Saitoh *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2003), 成層圏中の硝酸濃度変化解析 (Irie *et al.*, 2001), メタン (Choi *et al.*, 2002) や水蒸気の解析 (Pan *et al.*, 2002), モデル研究への利用 (McKenna *et al.*, 2002) 等, その一端は JGR の特集号や GRL 等に掲載されています.

5. 大気化学研究コミュニティとともに

本プロジェクトを推進する中で非常によかったと思うことは、国際的に呼びかけてサイエンスチームや検証実験チームを構築することが出来たことです。また、国際共同による検証実験（大気球実験）を実施出来たことも特筆すべきことかも知れません。さらに、日本主導の国際プロジェクトへの若手研究者の参加、外国人若手研究者の招聘が、ちょうどそのような研究ファンドが利用しやすい時期に入ったこともあって、うまく機能したことは幸いでありました。若手研究者に対しても、大いに刺激になったのではないかと思います（第2図）。

ILASプロジェクトの関係者に対して、これまで気象学会から次のような賞が与えられて来ました。

○神沢 博：堀内賞（1997年）「地球環境観測衛星 ADEOS「みどり」の ILAS（改良型大気周縁赤外分光計）ミッションにおける検証評価実験の推進」

○近藤 豊：学会賞（2001年）「大気オゾンの収支に関わる窒素酸化物の挙動の研究」（功績の一部）

○林田佐智子：堀内賞（2002年）「光学リモートセンシングによる成層圏エアロゾルおよびオゾンの研究」（功績の一部）

○寺尾有希夫：山本・正野論文賞（2003年）
「Stratospheric ozone loss in the 1996/1997 Arctic winter: Evaluation based on multiple trajectory analysis for double-sounded air parcels by ILAS」

そして、この度の藤原賞「ADEOS 衛星搭載センサー、ILASの推進によるわが国における大気化学研究の発展に寄与した功績」です。ILASプロジェクトを進めて来たことが、大気化学コミュニティの発展、そして大気化学分野の研究の発展につながったとしたら、これはプロジェクト関係者一同の努力の賜物に他ならず、今回の受賞の慶びを一同で分かち合いたいと思います。

6. 終わりに

衛星本体に生じた不具合により、ILAS センサーの運用は残念なことに8か月間で終了しました。また、第2号機である ILAS-II センサーが満を持して2002年12月に打ち上げられましたが、これについても衛星本体のトラブルが原因で、同様にして8か月間ほどの運用で終了しました。プロジェクトにとっては非常に

不幸な出来事ではありましたが、ILAS-II で得られたデータもまた、非常に貴重なものであり、データ処理アルゴリズムの改訂と検証のループが繰り返され、また新たな処理アルゴリズムが工夫され、よりよいプログラムが提供されようとしています。それは ILAS データと併せて、衛星観測でなければ得られない、成層圏大気化学の理解に欠かせないデータセットとなることでしょう。

ILAS プロジェクトを通して学んだことは、言うまでもないことかも知れませんが、衛星搭載センサーだけでなく、人工衛星、そして打ち上げロケットの三者に高い信頼性が求められるということ、利用ニーズに立脚した明確なミッションとそれに対応した機器仕様の設定が重要であるということです。さらに、地上検証データの早期の取得が非常に大切です。ILAS の場合、幸いにして衛星の運用が停止する以前に、キルナでの大規模な気球実験を終えることが出来たおかげで、その後のデータ処理アルゴリズムの改訂作業に本質的役割を果たす良質の検証データを取得することが出来ました。また、機器開発、データシステム開発、検証、科学利用というそれぞれの作業の間の緊密な連携を取ることが重要であり、それらを統括出来る立場の人間を確保できるかどうかはプロジェクトを進める上で極めて重要なことと思われます。ここに述べたようなことは、今後の我が国の衛星観測プロジェクトを進めるに当たっては是非とも心に留めておきたい事項だと思います。

衛星観測という仕事は、1人で出来るものではありませんし、多額の費用を必要とし、また非常に長期にわたる仕事です。時として、短期間のうちに運用を終えざるを得ない事態が発生することもあります。確かに、困難な仕事と言えます。

しかし、これからを担う若い人たち、どうか逃げないで、果敢に挑戦してってください。心からそのように願っております。

略号一覧

ADEOS: Advanced Earth Observing Satellite (地球観測プラットフォーム技術衛星)

CNES: Centre National d'Etude Spatiale (フランス国立宇宙研究センター)

GRL: Geophysical Research Letters (American Geophysical Union の学術雑誌)

ILAS: Improved Limb Atmospheric Spectrometer (改

良型大気周縁赤外分光計)

JGR : Journal of Geophysical Research (American Geophysical Union の学術雑誌)

LAS : Limb Atmospheric Spectrometer (大気周縁赤外分光計)

NDSC : Network for the Detection of Stratospheric Change (成層圏変化検出のためのネットワーク)

参 考 文 献

- Choi, W., S. Kim, W. B. Grant, M. Shiotani, Y. Sasano and M. R. Schoeberl, 2002 : Transport of methane in the stratosphere associated with the breakdown of the Antarctic polar vortex, *J. Geophys. Res.*, **107** (D24), 8209, doi : 10.1029/2001JD000644.
- Hayashida, S., N. Saitoh, A. Kagawa, T. Yokota, M. Suzuki, H. Nakajima and Y. Sasano, 2000 : Arctic Polar stratospheric clouds observed with the Improved Limb Atmospheric Spectrometer during winter 1996/1997, *J. Geophys. Res.*, **105** (D20), 24715-24730.
- Irie, H., M. Koike, Y. Kondo, G. E. Bodeker, M. Y. Danilin and Y. Sasano, 2001 : Redistribution of nitric acid in the Arctic lower stratosphere during the winter of 1996-1997, *J. Geophys. Res.*, **106** (D19), 23139-23150.
- Lee, K.-M., J. H. Park, Y. Kim, W. Choi, H.-K. Cho, S. T. Massie, Y. Sasano and T. Yokota, 2003 : Properties of polar stratospheric clouds observed by ILAS in early 1997, *J. Geophys. Res.*, **108** (D7), 4228, doi : 10.1029/2002JD002854.
- McKenna, D. S., J. Grooß, G. Günther, P. Konopka, R. Müller, G. Carver and Y. Sasano, 2002 : A new Chemical Lagrangian Model of the Stratosphere (CLaMS) 2. Formulation of chemistry scheme and initialization, *J. Geophys. Res.*, **107** (D15), 4256, doi : 10.1029/2000JD000113.
- Pan, L. L., W. J. Randel, H. Nakajima, S. T. Massie, H. Kanzawa, Y. Sasano, T. Yokota, T. Sugita, S. Hayashida and S. Oshchepkov, 2002 : Satellite observation of dehydration in the Arctic Polar stratosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **29** (8), 1184, doi : 10.1029/2001GL014147.
- Saitoh, N., S. Hayashida, Y. Sasano and L. L. Pan, 2002 : Characteristics of Arctic polar stratospheric clouds in the winter of 1996/1997 inferred from ILAS measurements, *J. Geophys. Res.*, **107** (D24), 8205, doi : 10.1029/2001JD000595.
- 笹野泰弘, 2001 : ILAS による極域成層圏衛星観測プロジェクトの10年, *天気*, **48**, 452-460.
- Sasano, Y., Y. Terao, H. L. Tanaka, T. Yasunari, H. Kanzawa, H. Nakajima, Y. Yokota, H. Nakane, S. Hayashida and N. Saitoh, 2000 : ILAS observations of chemical ozone loss in the Arctic vortex during early spring 1997, *Geophys. Res. Lett.*, **27** (2), 213-216.
- Terao, Y., Y. Sasano, H. Nakajima, H. L. Tanaka and T. Yasunari, 2002 : Stratospheric ozone loss in the 1996/1997 Arctic winter : Evaluation based on multiple trajectory analysis for double-sounded air parcels by ILAS, *J. Geophys. Res.*, **107** (D24), 8210, doi : 10.1029/2001JD000615.

Stratospheric Ozone Layer Observation Project with the Satellite-borne Instrument ILAS

Yasuhiro SASANO

National Institute for Environmental Studies, 16-2, Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 300-8506 Japan

(Received 25 August 2004 ; Accepted 28 February 2005)
