

Developments of the Middle Atmosphere Dynamics based on Satellite Observations

Isamu Hirota

Department of Geophysics, Kyoto University

108 : 1081 : 5013 (オゾン層, 人工衛星センサー)

2. ILAS による極域成層圏衛星観測プロジェクトの10年

笹野 泰弘*

1. はじめに

フロン等の人工的に作られた化学物質の放出に伴う「成層圏オゾン層の破壊」の問題は、1974年に初めて、モリーナとローランド (Molina and Rawland, 1974) によってその可能性が指摘されたものである。その後、1980年代前半になって、南極上空で春に成層圏オゾン濃度の極端に低い、いわゆる「南極オゾンホール」が発見されるに至り、成層圏オゾン層の破壊が現実のものとして、しかも、モリーナとローランドによって指摘されたよりも早いスピードで進行していることが認識された。

1980年代後半は、これらを受けてオゾン層の保護が声高く叫ばれた時期となった。国際的にはオゾン層保護に関する基本原則を定めた「オゾン層保護のためのウィーン条約」が1985年に採択され、1988年9月に発効した。フロン等の生産量・消費量を国際的に規制するための具体的な行動を定める「モントリオール議定書」が1987年に採択され、1989年1月に発効した。我が国では、これらの国際的な動きを受けて、「特定物質の規制等によるオゾン層の保護に関する法律 (オゾン層保護法)」が1988年5月に制定、公布されている。

ウィーン条約においては、締約国は『研究及び組織

的観測等に協力すること (第3条)』を定めており、また我が国のオゾン層保護法においても、『国は、特定物質のオゾン層に及ぼす影響の研究その他のオゾン層の保護に関する調査研究を推進する (第26条)』ことが規定されている。折しも、宇宙開発事業団 (NASDA) が地球観測プラットフォーム技術衛星 (Advanced Earth Observing Satellite : ADEOS) に搭載するセンサーを公募しており、1988年、環境庁は我が国独自のオゾン層観測衛星センサーの開発・運用に取り組むことを決定し、「改良型大気周縁赤外分光計 (Improved Limb Atmospheric Spectrometer : ILAS)」を搭載センサーとしてこれに応募することとした。

本発表の目的は、このようにして始まった ILAS プロジェクトの全体像と、この10年の流れ (第1表参照) を知って頂くこと、そして比較的大型かつ総合的な衛星観測プロジェクトを我が国の研究者の主導の下に行ってきたことの意義を考えるための材料を提供すること、の2点である。ここでは ILAS プロジェクトの全体像のうち、特に研究者が関与してきた部分を、かいつまんで記していくこととする。

ILAS 機器、観測原理、観測対象気体、観測領域、データ処理運用システム、検証実験、あるいは種々のインタフェース調整会議、サイエンスチームミーティング等々の詳細は、これまでに発刊してきた技術レポート、

* 国立環境研究所大気圏環境部。

第1表 ILAS プロジェクト略年表.

1988年	1月	地球観測プラットフォーム技術衛星搭載 (ADEOS) センサの公募[NASDA] 環境庁において検討会 (国立公害研究所[当時]の研究者が参加)
1988年	8月	改良型大気周縁赤外分光計 (ILAS) を環境庁から ADEOS に応募
1989年	9月	ILAS を含む公募センサ選定結果 (6件) を発表[NSADA] ILAS の予備設計、実験モデル (BBM) 製作に着手、以後開発を継続
1990年	2月	国立公害研究所大気物理研究室を中心に衛星観測チーム (仮称) を設置し、研究所として「衛星観測プロジェクト」に組織的に対処する体制 国内外の研究者の参加を得て、サイエンスチームを設立
1990年	7月	国立環境研究所 (組織替え) オゾン層研究チームが引き継ぎ
1990年	9月	第1回 ILAS サイエンスチームミーティング (つくば)
1990年	10月	ILAS 衛星データ処理運用施設の整備に着手、以後開発を継続
1991年	2月	「ILAS サイエンスチームニュース」創刊号発刊
1991年	10月	衛星観測研究チーム新設、引き継ぎ
1992年	3月	ADEOS 衛星打ち上げの一年延期決定 (1996年2月へ)
1992年	6月	第1回 ILAS プロジェクト検討会 (アドバイザリボード) 開催
1993年	9月	共同研究公募[環境庁、NASDA、NASA、CNES]を发出
1993年	10月	地球環境研究センター研究管理官 (衛星担当) ポスト新設
1994年	4月	共同研究公募[環境庁、NASDA、NASA、CNES]の提案課題の選考
1994年	9月	ILAS 衛星搭載用機器を NASDA へ納入 以後、衛星システム試験、初期運用を支援
1994年	12月	第1回 ADEOS シンポジウム/ワークショップ 第8回 ILAS サイエンスチームミーティング (京都)
1995年	1月	ILAS 衛星データ処理運用施設へ計算機設備の導入
1995年	2月	海外コア検証実験参加機関との調整 (キルナ、パリ、ベルリン、ポツダム)
1995年	5月	海外コア検証実験参加機関との調整 (ESA シンポジウム)
1995年	5月	「ILAS ニュースレター (改称)」第19号を発刊
1995年	5月	検証実験チーム設置
1995年	10月	環境庁-CNES 間で、検証実験に係る協定に調印 (パリ)
1996年	4月	ILAS プロジェクト WWW サーバーの立ち上げ
1996年	6月	ILAS 衛星データ処理運用施設運用プログラム Version 1.00 の開発を完了
1996年	8月	ADEOS 衛星の打ち上げ
1996年	9月	ILAS 初期運用チェック
1996年	9月	初データの公開
1996年	10月	第1回 ILAS 検証解析・データ質評価検討会
1996年	11月	ADEOS/ILAS の本格運用開始
1997年	2-3月	キルナ大気球検証実験キャンペーン実施
1997年	2月	Version 1.00 プロダクトを登録研究者に公開
1997年	5月	Version 2.00 プロダクトを登録研究者に公開
1997年	6月	ADEOS の運用停止
1997年	7月	第2回 ADEOS シンポジウム/ワークショップ (横浜) 第6回 ILAS サイエンスチームミーティング (横浜)
1997年	11月	第1回検証実験パリ会議 (パリ)
1997年	11月	Version 3.10 プロダクトを登録研究者及び一般ユーザーに公開
1998年	1月	第3回 ADEOS シンポジウム/ワークショップ (仙台) 第13回 ILAS サイエンスチームミーティング (仙台)
1998年	8月	Version 3.47 プロダクトを登録研究者に公開
1998年	11月	第2回検証実験パリ会議 (パリ)
1999年	9月	Version 4.20 プロダクトを登録研究者に公開
1999年	12月	第4回 ADEOS シンポジウム/ワークショップ (京都) 第16回 ILAS サイエンスチームミーティング (京都)
2000年	7月	Version 5.10 プロダクトを登録研究者に公開
2000年	7月	ILAS 札幌ワークショップ (札幌)
2000年	8月	「ILAS/ILAS-II ニュースレター (改称)」第49号発刊
2000年	9月	第9回 ILAS 検証解析・データ質評価検討会

ニュースレター、論文等を参照して頂きたい。ILAS プロジェクトホームページ (<http://www-ilas.nies.go.jp>)からも、ILAS データプロダクトを含め、種々の情報を入手出来る。

2. ILAS プロジェクトの概要

2.1 国立環境研究所の役割

もともと本プロジェクトは、環境庁のリーダーシップの下に開始されたものであるが、準備段階から研究者の関与が不可欠であったことは言うまでもない。国立公害研究所(当時)の研究者を中心に、所外の大学、国立研究機関等の研究者の助言を頂きながら提案センサーの概念検討、基本仕様の検討が進められた。その後、現在に至るまで、環境庁と研究所の基本的な役割分担は次のようになっている。環境庁は、衛星搭載機器の製作、検証実験の実施、データ利用の促進等を担当することとしている。これに対して、国立環境研究所は本来的には、ILAS で取得されたデータの処理、解析、提供のためのデータ処理運用施設の開発・整備と、実際の運用を担当することとされた。さらに、環境庁が行う上記の事項について、科学的側面から研究者として可能な限りの支援を行うこととしており、事実上、国立環境研究所がプロジェクトの実行面でのリーダーシップを取ってきた。

国内外の研究協力者の存在は、プロジェクトの推進にあたって非常に大きな力となった。当初から仕様の検討作業に加わって頂いた宇宙科学研究所の松崎章好博士(現、三重大学)や、米国航空宇宙局(NASA) Langley 研究センターの McCormick 博士、Park 博士、等、SAGE II、HALOE といった、ILAS と同様の太陽掩蔽法に基づく衛星センサーの開発研究に携わった研究者を、サイエンスチームメンバーとして迎えることが出来たことは、我が国としても初めての本格的な衛星搭載大気センサーの開発プロジェクトにとって、幸いなことであった。この他、サイエンスチームには国内外の多くの研究者の参加を得た。また、後述の検証実験に関連して、国際的な検証実験チームを構築した。この他、NASDA、NASA、フランス国立宇宙研究センター(CNES)、そして環境庁の共同による研究公募(Joint Research Announcement)に応募し、採択された多数の海外の研究代表者(PI)が参加している。

国立環境研究所の果たすべき役割は、プロジェクトの中心として実質的にプロジェクトを引っ張るととも

に、こうした国内外の多くの研究者を組織化する吸引力となることでもあった。

2.2 ILAS 機器の基本概念検討

ILAS は文字通り、改良型 LAS であり、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 センサーが、検討開始当初の雛形として想定された。機器の概念検討、仕様検討は、当時国立公害研究所の竹内延夫(現、千葉大学)、横田達也(現、国立環境研究所)、鈴木 睦(現、NASDA/EORC)、さらに松崎章好の各氏らが、(株)松下技研、文部省宇宙科学研究所、計量研究所、NASDA 等の研究者、技術者の多くの支援を受けながら、精力的に取り組んだものである。

最終的には、LAS センサーの仕様に比較すれば非常に規模の大きな、また意欲的なセンサー仕様とすることが出来た。多種の気体成分を測定するための赤外波長域をカバーする回折格子赤外分光計と、気温・気圧、さらに可視波長域におけるエアロゾル消散係数を測定するための回折格子可視分光計、さらに太陽を追尾し、追尾中心方向を同定するための太陽追尾光学系を主要構成要素とする、ILAS センサーの基本仕様が固まった。

2.3 データ処理運用施設の整備

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った。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、この仕事は始まった。基礎調査を手がけた(株)富士通エフアイピーが、その後のシステム作りを担当することとなった。

データ処理アルゴリズムの基本的な考え方を修得するために、横田達也氏が NASA/Langley 研究センターの Park 博士のもとへ1年間、長期派遣された。その後、多くの独自の改良が加えられたとは言え、ここで学んだアルゴリズムが、現在の ILAS データ処理アルゴリズムの基本形となっている。

データ処理運用システムは、単にデータ処理解析、データ管理だけではなく、ILAS センサーの運用コマンドの作成・発行、NASDA 地球観測センター(EOC)から伝送される ILAS データの受信、気象データ、太陽像データ等の関連データの自動受信、処理解析されたプロダクトの外部への提供、検証解析支援等、ILAS データ処理に関わるすべての機能を有していなければならない。また、衛星の運用が開始されれば、毎日定期的送信されてくる大量のデータを滞りなく処理出

来る能力はもとより、将来のデータ処理アルゴリズムの改訂、処理パラメータの改訂等に対応してデータ再処理を同時並行で行うための余裕を、計算機設備に持たせておくことが必要不可欠であった。このため、運用システムは非常に規模の大きなものとなった。

この10年の間のインターネット技術、とりわけwww (world-wide web) 機能の充実は見張るものがあつた。開発開始の頃、オンラインデータ提供システムを独自に整備する方向でシステムの設計をし、実際にプログラムの製作に着手したわけであるが、途中でwwwの活用の方針を変更することとなった。ILAS ホームページからのデータ提供は、関連研究者の間で好評であつた。

2.4 ILAS 観測とデータ処理運用

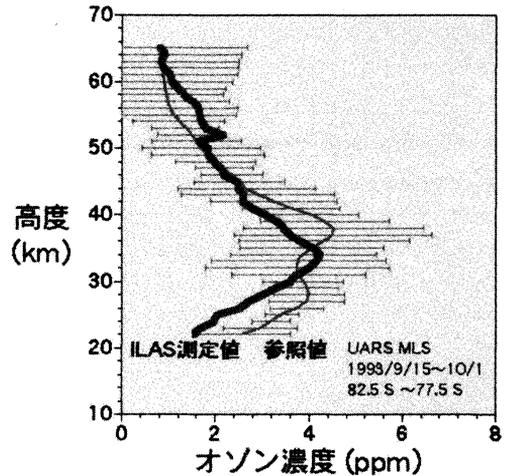
1996年8月17日のADEOSの打ち上げ後、約1か月をかけて衛星本体の機能確認試験が行われ、それに引き続いて各センサーの機能確認試験が順次行われた。ILASの機能確認試験は、9月17日、18日に行われた。衛星が地球を周回し始めてから初めてILASの電源が投入され、衛星が日本上空に回ってくる機会を捉えてコマンドを発行し、太陽追尾機構、検出系等の動作確認を行った。太陽追尾機構の確認の最初の段階で、太陽追尾用ジンバルミラーのロックが予定通りはずれないというアクシデントがあつたが、次の周回を捉えて、ロックがはずれやすくするよう多少変更したコマンドを再発行し、無事、機能の確認を果たすという一幕もあつた。続いて、実太陽の測定機能の確認が行われた。第1図は初取得データ(9月18日)のうちのひとつで、環境庁からの記者発表(9月27日)に使用されたものである。

ADEOSは10月末頃から準定常運用が開始され、11月には本格運用に移行した。翌年の6月30日に太陽電池パネルの事故で電源供給が止まり衛星の運用が停止されるまで、ILASは順調にデータ取得を続け、約6700回ものイベントにおいて太陽掩蔽観測を行った。この間、データ処理運用施設では、6名のシステムエンジニア、オペレーターが運用業務にあたり、ILAS運用のコマンドの作成、発行、ILASデータの処理をこなしていった。

2.5 検証実験

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た。そのため、海外の研究者との接触に努めて来たわけであるが、とりわけCamy-Peyret博士

改良型大気周縁赤外分光計による
オゾン濃度(南極点近傍)



第1図 初データとして公表されたデータ。日本時間の9月18日12時58分に南緯88度、東経93度の南極点付近上空において機能確認のために測定されたものを、宇宙開発事業団地球観測センターで受信し、国立環境研究所において処理・加工したものである。このデータ取得は、ILASの機能確認試験を目的として実施されたもので、観測範囲は高度約20 kmより上空であり、機能確認のための速報的処理を施している。

を初めとするフランスの研究者らの絶大な協力を得られたことが、ILASの検証にとっては大きな意味を持っている。フランスCNESと環境庁との協力協定の下に、日本を含む多くの国の研究者の参加を得て、キルナ・エスレンジ(スウェーデン)において大規模な気球実験を行うことが出来た(第2表)。

この他にも、南極昭和基地、フェアバンクス(アラスカ)、ノイマイヤー、ヤクーツク(ロシア)、アライバルハイツ等、各地で協力観測が行われた。検証用データとしては、さらに定常気象官署におけるオゾンゾンデデータ、「成層圏変化検出のためのネットワーク(NDSC)」ステーションデータ、他の衛星センサー(SAGE II, HALOE, POAM II, MLS)データ等が活用されている。

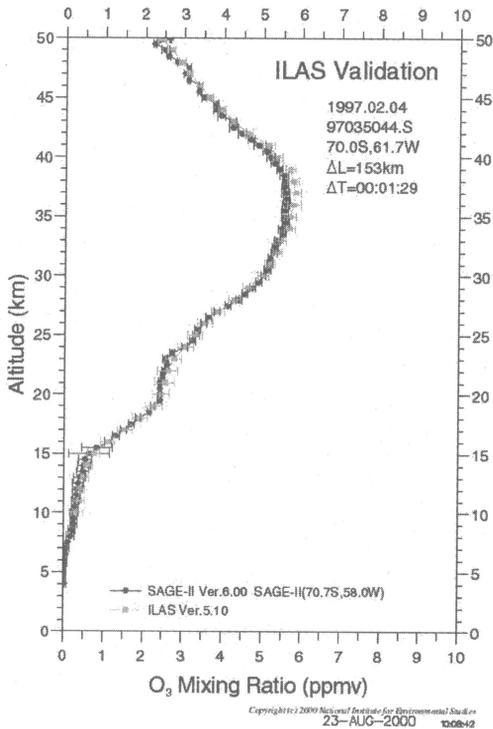
2.6 特性評価、検証、アルゴリズム改訂とデータ再処理

ILASの運用開始以降、国立環境研究所の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、

第2表 キルナ・エスレンジ (68N, 21E) における ILAS 気球実験の概要 (1997年2月1日~3月25日).

No	Date dd/mm/yy	Payload name	Maximum level	Flight profile	PI	Experiment	Objectives
1	09/02/97 07:30 UT	RADIBAL	33 hPa	F= 15 min D= 25 min	C. Brogniez	RADIBAL	aerosol
2	10/02/97 09:11 UT	CLD-1	7 hPa	F= 22 min +	Y. Kondo A. Engel	CLD ASTRID	NO, NOy CH4, N2O, CFC-11
3	10/02/97 19:25 UT	MIPAS-1	8 hPa	descent sampling F= 98 min	P. Fogal T. Deshler H. Oelhaf	CAESR Counter MIPAS	HNO3 aerosol, CN, O3 HNO3, NO2, O3 CH4, N2O, H2O CIONO2, ...
4	11/02/97 09:25 UT	Triple	21 hPa	F= 0 min D= 78 min	C. Schiller F. Stroh A. Engel C. Schiller T. Deshler F. Danis	FISH BROCOLI BONBON Photometer Counter DESCARTES	H2O ClO, BrO CH4, N2O, CFCs JNO2, JO3 aerosol CFC-11
5	14/02/97 12:11 UT	LPMA-1	9 hPa	F= 48 min	C. Camy-Peyret K. Pfeilsticker	LPMA DOAS	CH4, N2O, NO2, O3 H2O, HCl, HF, ... NO2, O3, BrO, ...
6	14/02/97 19:40 UT	ELHYSA	12 hPa	F= 15 min D= 30 min	J. Ovarlez	ELHYSA Counter	H2O aerosol
7	22/02/97 09:03 UT	SAKURA-1	17 hPa	F= 17 min D= 57 min	S. Aoki F. Danis	SAKURA DESCARTES	CH4, N2O, CFCs, CO2, ... CFC-11
8	24/02/97 12:45 UT	SAOZ-1	12 hPa	F= 42 min	J.P. Pommereau	SAOZ	NO2, O3, aerosol (BrO?)
9	25/02/97 09:16 UT	CLD-2	7 hPa	F= 20 min +	M. Koike U. Schmidt	CLD ASTRID	NO, NOy CH4, N2O, CFC-11
10	26/02/97 12:50 UT	LPMA-2	7 hPa	F= 76 min	P. Fogal C. Camy-Peyret	CAESR LPMA	HNO3 CH4, N2O, NO2, O3 H2O, HCl, HF, ...
11	26/02/97 18:58 UT	AMON	6 hPa	F= 93 min	J.B. Renard	AMON	NO2, O3, NO3 (OCIO, OBrO?) aerosol
12	28/02/97 13:45 UT	SAOZ-2	11 hPa	F= 50 min	J.P. Pommereau F. Danis	SAOZ DESCARTES	NO2, O3, aerosol CFC-11
13	18/03/97 07:26 UT	SAKURA-2	12 hPa	F= 0 min D= 93 min	S. Aoki F. Danis	SAKURA DESCARTES	CH4, N2O, CFCs, CO2, ... CFC-11
14	18/03/97 14:45 UT	SAOZ-3	10 hPa	F= 72 min	J.P. Pommereau	SAOZ	NO2, O3, aerosol
15	20/03/97 15:00 UT	SAOZ-4	11 hPa	F= 53 min	J.P. Pommereau	SAOZ	NO2, O3, aerosol BrO, OCIO
16	21/03/97 14:32 UT	LPMA-3	6 hPa	F= 47 min	C. Camy-Peyret P. Fogal	LPMA CAESR	ILAS O2 A-band H2O, ... HNO3
17	24/03/97 17:30 UT	MIPAS-2	9 hPa	F= 74 min	H. Oelhaf	MIPAS	HNO3, NO2, O3 CH4, N2O, H2O CIONO2, ...

Seventeen large balloon flights were operated by CNES: (F = duration at float, D = duration of slow descent)

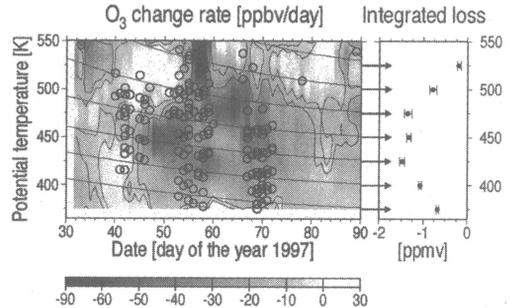


第2図 Version 5.10によるオゾン高度分布。比較のために、ほぼ同時刻、同地点で取得されたSAGE IIによるオゾン分布を描いている。

データ処理アルゴリズムの改訂である。

センサーのフライトモデル（実際に衛星に搭載する機器）については、NASDAへの引き渡しの前に種々の試験、データ取得が行われ、事前に機器特性の評価が行われた。しかしながら、過酷な打ち上げ環境を経験し、また宇宙環境の中に置かれたセンサーが、地上での試験通りの性能、特性を発揮する保証はない。実際のところ、分光計や太陽追尾系の光学特性は、必ずしも事前に期待したものと同じではなかったため、種々の工夫をして特性の再評価を実データに基づいて行うという困難を克服する必要があった。

大気成分の分光パラメータ（吸収特性）についても、最新のしかも信頼性の高いデータの入手可能性に常に気を配り、情報を収集し、データ処理システム中のパラメータテーブルの更新を心がけた。また、細心の注意を払って開発したソフトウェアプログラムであっても、なにかしらのバグは必ずあるものである。これを、事前に完璧につぶすことは不可能であり、実際の運用、データ処理の中で、結果を吟味することによって見つ



第3図 ILAS データから評価されたオゾン濃度変化率の変化と、積分されたオゾン減少量（混合比）(Sasano *et al.*, 2000). 図中の黒丸は、オゾン破壊に重要な働きをする、極域成層圏雲 (PSC) の出現を示す。

けだし、修正を加えて行くことが必要となる。

これらの過程で、検証実験データとの比較作業は有益な情報を与えてくれる。検証解析の作業は、単にILASの結果が他の独立のデータに合ったかどうかの情報だけではなく、合わなければILASデータ処理に何らかの問題があることを示唆するものである。そういう意味で、検証データの取得は1回きりのものではなく、多くの種類の、異なる測器による、異なる期間に渡る、データセットとして整備されていることが望ましい。

結果として、データ処理アルゴリズム、パラメータテーブル、ソフトウェア等は改訂が繰り返され、打ち上げ前に整備されたVersion 1.00から始まって、本原稿執筆時点ではVersion 5.10にまで、バージョンアップがなされている。第2図は、最新のVersion 5.10によるオゾン高度分布の例である。参考のために、ほぼ同時刻、同地点で取得されたSAGE IIによるオゾン分布を合わせて描いている。

3. ILAS データを用いたオゾン層研究

これまで、データ処理に関わる機器特性の再評価、データ処理アルゴリズムの改訂、分光パラメータテーブルの改訂等に多くの時間を費やして来た。最終版としてのデータプロダクトを提供するには、あと一步の改善が必要と考えている。しかしながら、これまでに提供してきた暫定版のデータプロダクトではあっても、オゾン層破壊に関連する興味ある解析例を示すことが出来ている。

ひとつは、極渦内のオゾン破壊速度の評価に関し、

第3表 ILAS 関連の主要な論文リスト.

- Burton, S. P., L. W. Thomason, Y. Sasano and S. Hayashida (1999): Comparison of aerosol extinction measurements by ILAS and SAGE II, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 1719-1722.
- Choi, W., S. Kim, and Y. Sasano (1999): Investigation of high-latitude tracer characteristics in the stratosphere by use of ILAS and HALOE data, *Asian-Pacific Remote Sensing and GIS Journal*, **12**, 53-60.
- Dubovik, O. V., T. Yokota and Y. Sasano (1998): Improved Technique for Data Inversion and Its Application to the Retrieval Algorithm for ADEOS/ILAS, *Adv. Space Res.*, **21**, 397-403.
- Hayashida, S., N. Saito, A. Kagawa, T. Yokota, M. Suzuki, H. Nakajima, and Y. Sasano (2000): Arctic polar stratospheric clouds observed with the Improved Limb Atmospheric Spectrometer during the winter of 1996/1997, *J. Geophys. Res.* (in press)
- Jucks, K. W., D.G. Johnson, K. V. Chance, W. A. Traub, J. J. Margitan, G. B. Osterman, R. J. Salawitch and Y. Sasano (1998): Observations of OH, HO₂, H₂O, and O₃ in the upper stratosphere: Implications for HOx photochemistry, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 3935-3938.
- Kanzawa, H., Y. Kondo, C. Camy-Peyret and Y. Sasano (1995): Balloon campaigns at Kiruna -Esrang planned in ILAS correlative measurements program, *Proc. 12th ESA Symp. Rocket & Balloon Programmes & Related Res.*, **ESA-SP370**, 345-349.
- Kanzawa, H. ed. (1997) : ILAS Correlative Measurements Plan, *NIES Technical Report*, **F-105-'97/NIES**, 178pp.
- Kanzawa, H., C. Camy-Payret, Y. Kondo and N. Papineau (1997): Implementation and first scientific results of the ILAS Validation Balloon Campaign at Kiruna-Esrang in February-March 1997, *Proc. 13th ESA Symp. Eur. Rocket & Balloon Programmes & Relat. Res.*, **ESA SP-397**, 211-215.
- Koike, M., Y. Kondo, H. Irie, F. J. Murcray, P. Williams, P. Blatherwick, C. Camy-Peyret, S. Payan, H. Oelhaf, G. Wetzell, W. Traub, D. Johnson, K. Jucks, G. C. Toon, B. Sen, J.-F. Blavier, H. Schlager, H. Ziereis, N. Toriyama, M. Y. Danilin, J. M. Rodoriguez, H. Kanzawa, Y. Sasano (2000): A comparison of Arctic HNO₃ profiles measured by the Improved Limb Atmospheric Spectrometer and balloon-borne sensors, *J. Geophys. Res.*, **105**, 6761-6771
- Kondo, Y., H. Irie, M. Koike, and G. E. Bodeker (2000): Denitrification and nitrification in the Arctic stratosphere during the winter of 1996-1997, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 337-340.
- Lee, K.-M., J. M. McInerney, Y. Sasano, J. H. Park, W. Choi and J. M. Russell III (1999): Intercomparison of ILAS and HALOE ozone at high latitudes, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 835-838.
- Mukai, S., I. Sano, Y. Sasano, M. Suzuki and T. Yokota (1994): Retrieval Algorithms for Stratospheric Aerosols Based on ADEOS/ILAS Measurements, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **32**, 1142-1127.
- Mukai, S., I. Sano, Y. Sasano, M. Suzuki and T. Yokota (1995): Optical Properties of stratospheric aerosols, *Adv. Space Res.*, **17**, 64-70.
- Okamoto, H., Y. Sasano, S. Mukai, I. Sano, H. Ishihara, T. Matsumoto, L. Thomason and M. Pitts (1998): ADEOS/ILAS Aerosol Retrieval Algorithm with 5 channels, *Adv. Space Res.*, **21**, 443-446.
- Payan, S., C. Camy-Peyret, P. Jeseck, T. Hawat, M. Pirre, J.-B. Renard, C. Robert, F. Lefevre, H. Kanzawa and Y. Sasano (1999): Diurnal and nocturnal distribution of stratospheric NO₂ from solar and stellar occultation measurements in the Arctic vortex: Comparison with models and ILAS satellite measurements, *J. Geophys. Res.*, **104**, 21585-21593.
- Sasano, Y., M. Suzuki, T. Yokota and H. Kanzawa (1997): Early Results from Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) Measurements, *GEOCARTO International*, **12**, 61-68.
- Sasano, Y., M. Suzuki, T. Yokota and H. Kanzawa (1999): Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) for stratospheric ozone layer measurements by solar occultation technique, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 197-200.
- Sasano, Y., H. Nakajima, H. Kanzawa, M. Suzuki, T. Yokota, H. Nakane, H. Gernandt, A. Schmidt, A. Herber, V. Yushkov, V. Dorokhov and T. Deshler (1999): Validation of ILAS Version3.10 ozone with ozonesonde measurements, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 831-834.
- Sasano, Y., M. Suzuki, T. Yokota and H. Kanzawa (1999): ILAS for stratospheric ozone layer monitoring: Outline of data processing (Version 3.00 and 3.10) and validation experiments, *IEEE T. G. Rem. Sens.*, **37**(3), 1508-1516.
- Sasano, Y., Y. Terao, H. L. Tanaka, T. Yasunari, H. Kanzawa, H. Nakajima, T. 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**, 213-216.
- Suzuki, M., A. Matsuzaki, T. Ishigaki, N. Kimura, N. Araki, T. Yokota, and Y. Sasano (1995): ILAS, the Improved Limb Atmospheric Spectrometer on the Advanced Earth Observing Satellite, *IEICE Transactions Commun.*, **E78-13**, 1560-1570.
- Yokota, T., M. Suzuki, O.V. Dubovik and Y. Sasano (1998): ILAS (Improved Limb Atmospheric Spectrometer)/ADEOS Data Retrieval Algorithms, *Adv. Space Res.*, **21**, 393-396.

オゾンゾンデを多数用いた Match 解析にヒントを得て、ILAS データにこの方法を適用したものである (Sasano *et al.*, 2000). 筑波大学の寺尾有希夫君の修士論文の仕事として解析して貰ったもので、高度分解能がオゾンゾンデに比べれば劣る衛星観測データからでも、オゾン破壊速度の時系列変化を高度 (温位) の関数として求めることが出来た (第3図). 現在、さらに厳密な評価に結びつけるべく、解析方法の高度化を図っている。

奈良女子大学の林田佐智子氏のグループでは、ILAS で観測された可視波長 (780 nm) での消散係数の高度分布データから北極域の極成層圏雲 (PSCs) の出現に関する解析を進め、さらに空気塊の気温履歴等を考慮しながら PSCs のモデル解析と合わせて、その特性の把握などを行っている (Hayashida *et al.*, 2000). 名古屋大学太陽地球環境研究所の近藤 豊氏 (現東京大学先端科学技術研究センター) らは、やはり ILAS データを用いて北極極渦内での硝酸の振る舞いを詳細に調べ、オゾン破壊に密接に関係する脱室過程の解析を行った (Kondo *et al.*, 2000). ここでは、これらの詳細に触れる紙幅はない。それぞれ、論文 (第3表) を参照されたい。

4. 衛星観測プロジェクトの運営

まさに手探り状態で進めてきた ILAS プロジェクトである。最初は、もっぱら衛星搭載センサーの開発、続いてデータ処理運用システムの設計、これに関連して、データ処理アルゴリズムの研究が主要な仕事であった。衛星打ち上げが近づくと、今度は検証実験の準備である。ILAS プロジェクトでは、特に海外の多くの研究者の協力を得ようという努力が、最終的には実を結んだ。ILAS の運用が始まって以降は、データ処理結果の吟味、検証データとの比較に始まり、データ処理アルゴリズムの改訂、新しい分光パラメータの導入、装置特性の再評価、データ処理ソフトウェアの改訂、そしてデータ再処理というループが何度も繰り返されてきた。最近になって、データプロダクトの科学的な利用という段階に入ってきている。

このように、衛星観測プロジェクトにおいては、非常に幅広い事項を含んでおり、あるひとつの専門分野を持つ研究者が関与できるフェーズというのは、ある程度限られたものとならざるを得ない。関与が期待される人材は、プロジェクトの進行、フェーズの移り変わりとともに次第に移り変わっていく。そのため、プ

ロジェクトも10年を経過するようになると、初期の頃に大変お世話になった研究協力者の方々とともに疎遠になってしまう。これを少しでも埋めるために、ニュースレターの送付、会議開催の案内などを通して、パイプが切れないようにと努力はしているものの、誠に申し訳ないことと思っている。

一方、国立環境研究所の研究者の関与とはいうと、プロジェクト開始以来、多少の人の出入りはあったものの、基本的にはマンパワーはほとんど増えず、常に非常に少人数で切り盛りしてきたというのが実情である。少しでも人手不足を解消する目的で、環境庁あるいは国立環境研究所からの業務委託先の技術者に、マネージメント的な仕事を分担して頂いている。また、ソフトウェア開発はもとより、アルゴリズム研究開発等においても民間の技術者の力に負うところが大きい。

5. おわりに

現在、環境庁及び国立環境研究所では、2001年秋の打ち上げを控えた ADEOS-II 搭載のオゾン層観測センサー ILAS-II プロジェクト、さらに2007年頃の打ち上げを目指したオゾン層・温室効果ガス観測センサー SOFIS プロジェクトを、並行して進めている。これらのプロジェクトにおいても、ILAS の時と同様に、内外の多くの研究機関、研究者の協力がなくては遂行しがたいものである。国内外を問わず、ご協力頂く研究者にとって、そうすることによって得るものが大きい、そんな関係を築くことが大事だろうと思う。

最後に、プロジェクトリーダーとして、これまで ILAS プロジェクトを進めてきた中での個人的な雑感をメモ風書き留めておくことにする。

- (1) 衛星プロジェクトは、個人が思い立ったからといって出来るものではない。省庁の研究所では、科学的な興味だけでは、衛星観測プロジェクトは成立しない。時代、場所、環境が必要。我々が ILAS プロジェクトに取り組めたのは、地球環境問題 (オゾン層の破壊問題) 華やかなりし頃に、環境庁国立公害研究所 (現国立環境研究所) に所属し、行政 (環境庁) の強い意志があったからと言える。
- (2) 機器開発からデータ利用研究まで、興味・関心、必要能力に大きな隔たりがある。したがって、ひとり (少人数) でやりきれるものではない。チーム作業が必須となる。また、どうしても新規開発研究よりは、既存の技術・知見の応用、改良研究が中心 (サ

イエンスは別)となる。おもしろくない(論文にならない)仕事も多い。そこで、研究者のモチベーションをどう維持するか、業績をどう評価するのかという問題も大いに絡む。

- (3) 衛星観測プロジェクトに直接関わっている専任研究者は、国立環境研究所の中のわずか3名というのが実態である。内外の研究者の多くの支援が不可欠であり、我が国の研究者層は決して厚くないことから、海外研究者の協力への期待大ならざるを得ない。
- (4) 国内外の協力研究者との Give and Take の関係をどう築くか。検証作業、予備的なデータ解析研究等における優先的なデータ利用が、協力研究のモチベーションとなり得るか。その一方で、一部の人間によるデータの抱え込みになってはならない、という相矛盾する要素を含む。
- (5) 我が国の、衛星による地球観測はどうあるべきか。「データを必要とする機関が機器開発からデータ処理までを担当すべし」という発想の兆しが見える。そうなると、宇宙開発事業団(特に地球観測担当部門)の任務は何になるか。
- (6) 日本が、独自の衛星センサーを持って、データを出していく意味は何か。「他人(他国)のデータだけに頼った研究のあり方は健全ではない。自らデータを取り提供する立場に立つことで、研究の発展に寄与できる。若い研究者の育成に、大いに有効である。」これらは、本当にそうだろうか。
- (7) 将来を見据えるならば、目的指向の、もっと自由な新しい発想のセンサーの開発に取り組む必要がある。新しいセンサーの芽を育てる仕組み(予算、体制)、プロジェクトに人材が集える体制をも育てていくことも必要ではないか。

謝 辞

ILAS 機器の初期の概念検討に参加された竹内延夫氏、松崎章好氏、また機器開発、データ処理運用システム開発の両面で当初から活躍された鈴木 睦氏を初め、ここに一人一人のお名前を記すことは出来ないが、ILAS プロジェクトの推進にご尽力、ご協力を下さった多くの皆様に、感謝の意を表す。現在、国立環境研究所において引き続き ILAS 等の衛星観測プロジェクトに携わっている、横田達也、中島英彰、杉田考史、神沢 博の各氏にも感謝申し上げます。

参 考 文 献

- Hayashida, S., N. Saito, A. Kagawa, T. Yokota, M. Suzuki, H. Nakajima and Y. Sasano, 2000 : Arctic polar stratospheric clouds observed with the Improved Limb Atmospheric Spectrometer during the winter of 1996/1997, *J. Geophys. Res.*, **105**, 24, 715-724, 730.
- Kondo, Y., H. Irie, M. Koike and G. E. Bodeker, 2000 : Denitrification and nitrification in the Arctic stratosphere during the winter of 1996-1997, *Geophys.*
- Molina, M. J. and F. S. Rowland, 1974 : Stratospheric sink for chlorofluoromethanes : chlorine atom-catalysed destruction of ozone, *Nature*, **249**, 810-812.
- Sasano, Y., Y. Terao, H. L. Tanaka, T. Yasunari, H. Kanzawa, H. Nakajima, T. 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**, 213-216.

The 10-year History of ILAS Project for Polar Stratospheric Ozone Layer Monitoring

Yasuhiro Sasano

National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Ibaraki 305-0053 Japan
