

ILASデータ処理運用システム

ILAS Data Processing and Operational System

あらまし

オゾン層破壊現象の機構解明のため、環境省は極域大気中の微量ガスを人工衛星から観測するための改良型大気周縁赤外分光計ILAS (Improved Limb Atmospheric Spectrometer)を開発した。ILASは1996年11月から8か月間、宇宙から南北両極域を観測した。

著者らは、国立環境研究所からの業務委託により「ILASデータ処理運用システム」の開発・運用に携わり、2000年度に主な作業をほぼ終えた。開発の特徴として、衛星データの処理全般にわたる総合的なシステムであったこと、アルゴリズムの開発・改良を継続的に行いデータ品質の向上を図ったこと、膨大な演算と大量のメモリを必要とするデータ処理に並列計算技術を適用したことが挙げられる。

本稿では、ILASデータ処理運用システムの開発内容・基礎技術などを紹介する。

Abstract

The Ministry of the Environment developed the Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) sensor to observe trace gas constituents in the atmosphere over the polar regions from a satellite. ILAS was designed to investigate the mechanism of ozone layer depletion, and observed the atmosphere over the North and South polar regions from space for 8 months between November 1996 and June 1997.

The authors developed and managed the ILAS Data Processing and Operational System under an agreement with the National Institute for Environmental Studies (NIES), and completed most of the major tasks in the year 2000. Our involvement in the project included the following: (1) We developed a comprehensive system to handle all of the satellite data processing; (2) We continuously developed and improved the algorithms to enhance the data quality; and (3) We used parallel computing technology for the data processing which required huge calculation power and large memory capacity.

This paper describes the core technologies and development of the ILAS Data Processing and Operational System.



伊藤康裕 (いとう やすひろ)

富士通エフ・アイ・ピー (株) 環境システム事業推進部システム部所属
現在、ILAS、ILAS-IIデータ処理運用システム開発、SOFIS基本設計に従事。



梶 正典 (かじ まさのり)

富士通エフ・アイ・ピー (株) 環境システム事業推進部システム部所属
現在、ILAS、ILAS-IIデータ処理運用システム開発に従事。



戸上武雄 (とがみ たけお)

富士通エフ・アイ・ピー (株) 環境システム事業推進部システム部所属
現在、ILAS、ILAS-IIデータ処理運用システム開発、SOFIS基本設計に従事。

まえがき

地球上のオゾンの大部分は成層圏に存在し、オゾン層と呼ばれている。オゾン層は、太陽光線の有害な紫外線を吸収するという重要な役割を果たしている。1980年代前半、南極上空で春先に、オゾンホール（オゾン濃度が極端に低い部分）が発見され、年々拡大が進行している。近年は北極域でも春先に確認されている。地上に到達する紫外線が増えると皮膚癌や白内障が増加すると言われている。これが「オゾン層破壊問題」である。破壊の原因物質の主なものは、フロンなどの塩素、臭素を含む人工起源物質と言われているが、 H_2O 、 NO_2 、 CH_4 、 N_2O などもオゾン層の化学的な環境を変化させる可能性があると考えられている。これらの大気中のグローバルな分布に大きな偏りがないにもかかわらず、春先に極域付近にオゾンホールが出現する。この動態の把握と機構解明に科学者達は取り組んでいる。

オゾン層の保護のため、国連環境計画（UNEP）を中心としてウィーン条約が1985年に採択され、国際的に協調してオゾン層やオゾン層を破壊する物質について研究を進めることや各国が適切と考える対策を行うことなどを定めている。同条約に基づいて具体的な規制を盛り込んだ「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」が1987年に採択された。我が国ではウィーン条約およびモントリオール議定書の的確かつ円滑な実施と、国際的に協力してオゾン層の保護を図るため、1988年5月に「特定物質の規制等によるオゾン層の保護に関する法律」が制定された。

環境省^(注1)は、この分野で貢献するために、1996年8月17日にH-IIロケットで打ち上げられた人工衛星ADEOS（打上げ後「みどり」と命名）に、極域大気中のオゾン層破壊にかかわる大気微量成分を観測するためのセンサILAS（Improved Limb Atmospheric Spectrometer：改良型大気周縁赤外分光計）を搭載した。残念ながら、同衛星は1997年6月30日に運用不能となったが、ILASは8か月間1日あたり約28回の頻度で南北両極付近の観測を行った。著者らは国立環境研究所⁽¹⁾からの業務委託で1990年の基礎調査の段階から観測にかかわるデータ処理システムの開発・運用・改定、データ提供に携わり、解析アルゴリズムとデータの改定作業の中心的な部分を2000年度でほぼ終えた。

(注1) 2001年1月の省庁再編により「環境庁」が「環境省」に改組された。

本稿では、この「ILASデータ処理運用システム」の開発内容、基礎技術などを紹介する。

改良型大気周縁赤外分光計ILAS

ILASは太陽掩蔽法（Solar Occultation）^{えんぺい}と呼ばれる観測原理を採用している。⁽²⁾ 太陽掩蔽法は太陽を光源とし、測定機器から見た日の出、日の入り時に地球周縁大気を透過した太陽光を観測する方法である。ILASは太陽方向と同期した高度約800 kmの極軌道面上を周回するため、両半球の高緯度上空を、1日にそれぞれ14回の頻度で観測する（図-1）。

大気中に含まれるオゾンなどの微量成分はそれぞれ特有の波長の光を吸収するので、ILASの観測データの波長ごとの吸収の大きさから微量成分濃度を算出することが可能である。また、地球を周回する衛星から見た日の出、日の入り時に太陽を追跡しながら測定を行うので、地球大気の異なる高度の情報が得られ、データ解析により微量成分濃度、エアロゾル、気温、気圧などの高度分布が得られる。ILASの観測により得られたオゾン濃度の高度分布の例を図-2に示す。

ILASは赤外光と可視光のスペクトルを検出するセンサ、太陽の輪郭を検出するセンサ、太陽追尾機構などから構成される。ILASの外観を図-3に、主要諸元を表-1に示す。

システム開発の三つの特徴

本システムは、以下の特徴を持っている。衛星データの処理全般にわたる総合的なシステムであること、アルゴリズムの開発・改良を継続的に行いデータ品質の向上を図ったこと、もう一つは、並列計算技術をデータ処理に適用したことである。

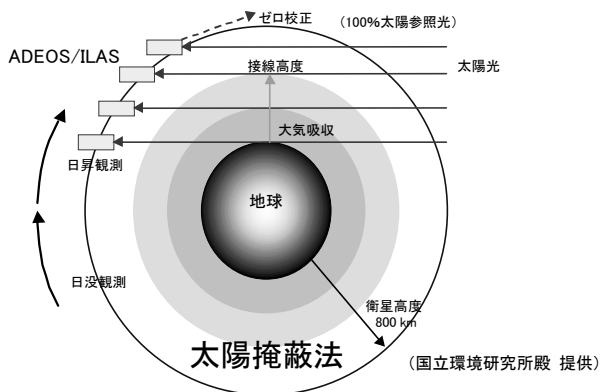


図-1 ILASの観測原理
Fig.1-Principle of the ILAS measurement.

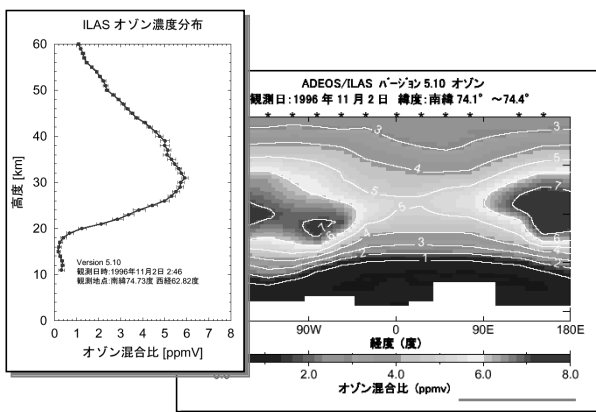


図-2 ILASの観測により得られたオゾン濃度高度分布の例
(左: 1観測点でのオゾン濃度高度分布の例 右: 南半球の1日分約14観測のデータを経度方向に補間して表示したオゾン濃度の高度・経度断面図の例) (国立環境研究所殿 提供)

Fig.2-Examples of the ozone concentration vertical profiles derived from ILAS observations
(left: ozone profile at one observation point, right: "height-longitude" cross-sectional view of the ozone distribution produced using about 14 events observed by ILAS in the Southern Hemisphere on the same day) [courtesy of NIES].

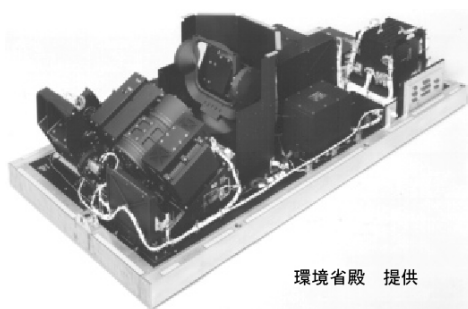


図-3 ILASの外観 (シールドを取り除いた状態)
Fig.3-Appearance of ILAS (without shield).

表-1 ILASの主要諸元

項目	諸元
観測スペクトル範囲	赤外センサ44素子 (850~1,610 cm ⁻¹ , 6.21~11.77 μm) 可視センサ1,024素子 (753~784 nm)
分光方式	1次元アレー検出器を用いた回折格子分光器
瞬時視野 (IFOV) (接線高度換算)	赤外センサ 鉛直2 km×水平13 km 可視センサ 鉛直2 km×水平2 km
観測対象	O ₃ , HNO ₃ , NO ₂ , N ₂ O, H ₂ O, CH ₄ , エアロゾル, 気温, 気圧
観測領域	北緯約55~70度, 南緯約63~87度
質量	126 kg
電力	観測時100 W

(1) 総合的な衛星データ処理運用システム

本システムは、観測計画の作成から観測データの受信、センサ運用に関わる情報交換、データ処理、データ評価・解析、データ(プロダクト)提供までを含む、地上処理系全体をカバーする総合的な衛星データ処理運用システムである。その中でも特に、データの受信から処理、

データの提供に至る一貫した処理の流れを自動化したこと、データの提供に当時ようやく普及しつつあったWebの技術を活用し、ユーザフレンドリなインタフェースを実現したことが特長として挙げられる。

(2) アルゴリズムの開発と継続的な改良

本格的な太陽掩蔽法による衛星観測データの計算処理は、我が国で初めての試みであり、システム開発と並行して、データ処理アルゴリズムの開発が急務であった。また、打ち上げ後も、衛星データの質を見極めながら、継続的なアルゴリズム改良を行うことが必要であった。

(3) 並列計算技術の適用

ILASセンサにより観測されたデータから、オゾンを始めとする微量成分濃度の高度分布を算出するには、1観測イベント約30 Mバイト(1日換算約840 Mバイト)のデータに対して、積和計算だけでも 5×10^{11} 回程度の膨大な演算が必要であり、5 Gバイト以上の大量のメモリを消費する数値計算を約10~15分以内に行わなければならない。こうした問題をクリアするため、最新の並列計算技術を活用する必要があった。

システム開発においては、以上述べた技術開発に並行して取り組まなければならないという難しさがあったが、顧客である国立環境研究所のリーダーシップと研究努力に先導されながら、技術的な様々な取組みの結果、データ品質を大幅に向上させることによって、ILASデータは国際的な信頼を獲得することができた。オゾン層問題の国際的な解明研究に対して、著者らも微力ながら貢献することができたと考える。次章以降、著者らの取組みについて紹介する。

総合的な衛星データ処理運用システム

● システムの目的と諸機能

本システムは、以下に示す諸機能を通じて、オゾン層破壊の現状把握、メカニズムの解明を目指すことを目的として開発された。本システムは、前述のように衛星センサの地上処理系全体をカバーするシステムである。

(1) センサの運用計画立案

(2) 宇宙開発事業団地球観測センター(NASDA/EOC)

で収集されたILAS観測データの専用線を介した受信

(3) データ処理とデータ評価・解析によるプロダクトの作成

(4) ILASプロジェクト関連研究者・研究機関を始め、一般ユーザなどへのプロダクトの提供

(5) センサ動作のモニタリングやミッション運用にか

かわる情報の管理

● ILASデータ処理運用施設

本システムの運用とILASデータを用いたアルゴリズム検討作業やデータ評価・解析作業を行うことを目的に、1995年、国立環境研究所内にILAS DHF (ILAS Data Handling Facility) が新設された。ILAS DHFには、並列計算機、データベースサーバ、大容量ストレージシステムなどの計算機設備が配置され、この計算機設備上で本システムがオペレータにより運用された。ILAS DHFには、データの受信や提供のため、外部と複数のインタフェースを持たせた。高速デジタル専用回線によって、NASDA/EOCと結ばれていたほか、ILASセンサ開発メーカの松下電器産業(株)〔当時、松下技研(株)〕と本システムの開発を行った富士通エフ・アイ・ピー(株)とデジタル通信網で接続した。さらに研究所外の研究者、研究機関などとは、インターネットを介してデータ交換などを行った。また、インターネットを経由して、英国気象局(UKMO: United Kingdom Meteorological Office)からの客観解析気象データを始め、米国の天文台から太陽像データなどの関連データを定期的に入手した。さらにサイエンスチームメンバ、検証実験チームメンバ、公募研究者などの国内外研究者である特定ユーザおよび一般ユーザに対して、Webなどを通じて各種情報提供などのサービスを行ってきた。

● ソフトウェアシステム

ソフトウェアシステムは、データ処理サブシステムを中心に以下の8サブシステムから構成され、システムメンテナンスや障害の波及防止のため、各機能の独立性を高めている。本システムの機能構成を図-4に示す。

(1) データ受信・受入れサブシステム

ILASの観測データを短時間で入手し、データ品質などを迅速に把握するためにNASDA/EOC間に高速デジタル専用線を敷設し、Eメールによるデータハンドリング方式を採用してFTPを用いた自動的なデータの受信とフォーマットチェックを行うようにした。データ受信状況一覧表示機能を用いた検索および監視により、データ受信状況の把握が可能となった。

(2) ミッション管理サブシステム

NASDA/EOCへ観測計画として送信するデータの生成を主な目的とし、衛星軌道や観測位置の予測計算によってILASセンサの運用制御を行うコマンド群を決定し、そのほかのミッション運用情報の表示や管理を行う。

(3) システム運用管理サブシステム

サブシステム全体の統括とデータ処理の処理スケジュールの設定、データ処理の制御、データ処理状況監視などを行う重要なサブシステムの一つである。これらの機能により、観測データの受信、データ処理の実行からデータ提供用のプロダクト生成までをオペレータの介

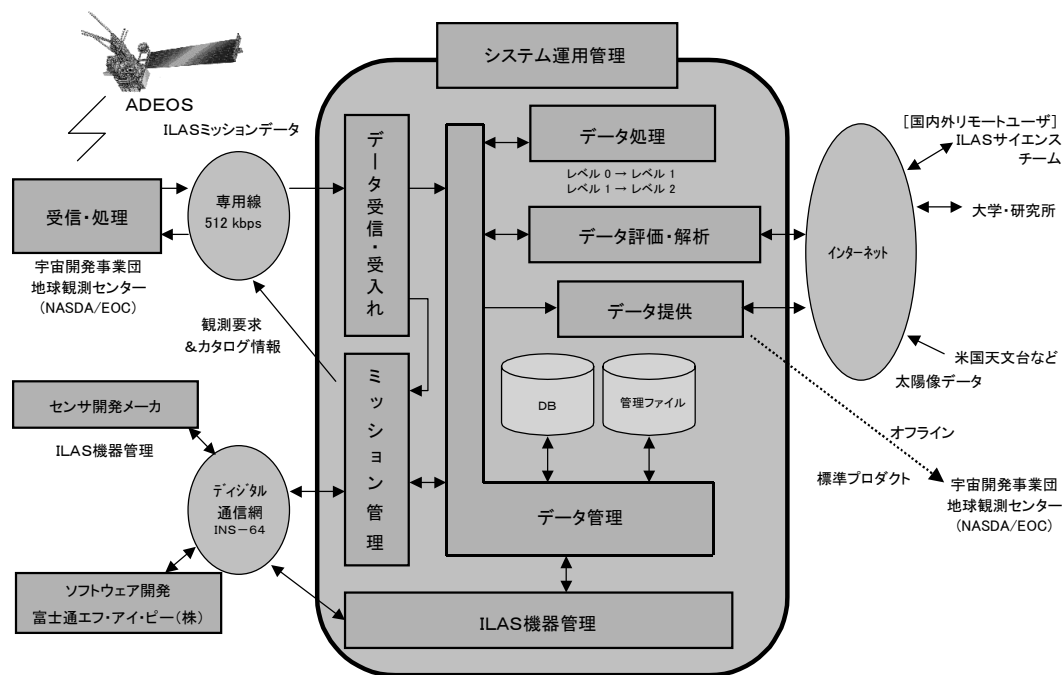


図-4 ILASデータ処理運用システムの機能構成

Fig.4-Functional schema of ILAS data processing and operational system.

入なく自動的に行うことができる。

(4) データ処理サブシステム

システムの核となるサブシステムであり、観測データ受信後に自動的に起動され、オゾンなどの大気微量成分、エアロゾル消散係数、気温、気圧の高度分布データを作成する。

(5) データ評価・解析サブシステム

研究者の視点でデータの可視化を行い、UKMOなどの客観解析気象データを用いた応用解析と関連付けたILASデータの評価・解析に役立たせた。応用解析例として、客観解析気象データを用いて得られた空気の流れの回転度合い^{うずい}について、その指標である渦位のマップ上にILASの観測点を記した図を図-5に示す。

(6) ILAS機器管理サブシステム

機器状態などのトレンドを可視化しセンサモニタリングを行うことで、観測データに対して機器による影響を把握できるようにした。

(7) データ提供サブシステム

当初Motif^(注2)をベースとしたオンラインデータ提供システムの構築を行ったが、インターネット技術の進歩とWebブラウザの利便性と将来性を念頭に入れ、データの検索提供部分をWebブラウザを活用して実現する方針に変更した。Webによるデータ提供機能は、当時としては国内でも少なく、関連研究者の間で好評であった。

(8) データ管理サブシステム

各種データを統合的に管理するサブシステムである。

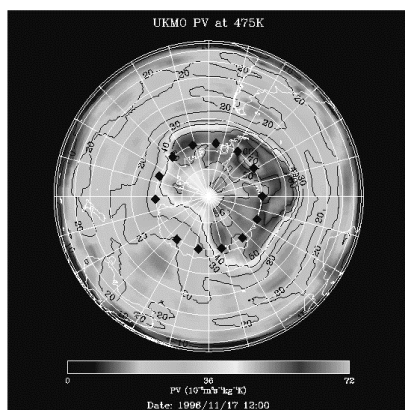


図-5 応用解析例（南極上空の渦位マップとILASの観測点）
（国立環境研究所殿 提供）

Fig.5-An example of applied analysis (potential vorticity map over the Antarctic area and ILAS observation points) [courtesy of NIES].

(注2) OSF (Open Software Foundation) が定義した X window system のユーザインタフェースガイドライン。

各サブシステムからの要求に応じて、データベースやファイルとの入出力を行う。

本システムは、データ処理によるプロダクト作成の機能だけではなく、センサの運用計画、センサ運用状態のモニタリング、およびデータ処理結果を評価・解析する機能も有している。このような総合的なシステムであることのメリットは、何か問題が発生した際に、これら複数機能を活用することで問題の的確な把握やアルゴリズムの問題なのかセンサ側の問題なのかといった切分け、およびその対策を迅速かつ多角的に行うことが可能な点である。

● ハードウェアシステム

ILASにより観測された大量のデータを滞りなく処理するために、ILAS DHFの計算機システムには、「分散処理並列計算機」として、ワークステーション24台が高速なネットワーク（HPS: High Performance Switch）により相互結合されたIBM9076-SP2が採用された。大容量のデータ保存には、合計1Tバイトを超えるデータの保管・検索のために大容量ストレージシステムを2セット、データベース用に180 Gバイトの大容量アレイディスクが導入された。これらは、並列計算機およびそのほかのワークステーションからの利用が可能となっており、システム全体として、計算機設備の柔軟性と拡張性が重視された。ハードウェア構成を図-6に示す。

アルゴリズムの開発と継続的な改良

太陽掩蔽法による衛星からの地球大気の本格的な観測は、日本では初めてであり、開発当初、国立環境研究所の指導のもとに、オゾンなどのガス濃度高度分布算出のためのアルゴリズムを確立することが急務であった。打上げ前においては、これらのアルゴリズムの開発をシミュレーションをベースに行った。また、オゾン層破壊現象やメカニズムにかかわる新たな研究成果や、データ解析手法にかかわる新たな知見を反映するため、アルゴリズムを修正・改良することがたびたび必要となった。打上げ後は、実際に取得した衛星データや処理結果が、シミュレーションによる事前予想と異ならないかどうかの確認作業を行い、異なる部分については現象の解析とアルゴリズムの修正を施した。さらに、ILASの観測と同期して行われた検証のための地上観測実験データや、アメリカ航空宇宙局（NASA: National Aeronautics and Space Administration）などの他衛星の観測結果との比較を行い、それらとの相違の分析や原因の究明を

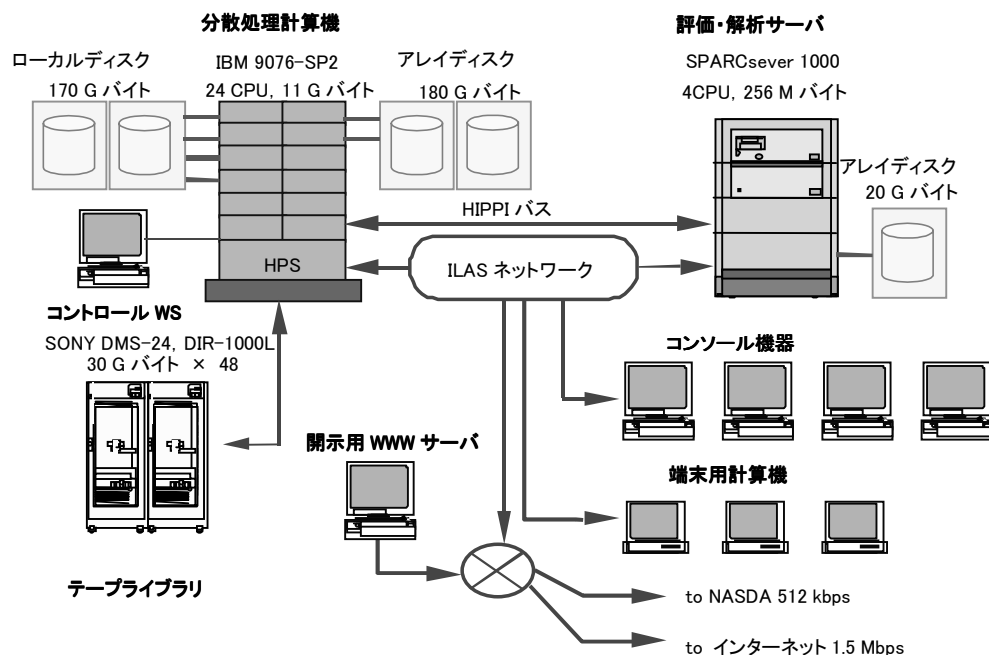


図-6 ハードウェア構成図
Fig.6-Hardware configuration.

行ってきた。1996年の打上げ以来、国立環境研究所と共同で行われた継続的な取組みの積み重ねによって、アルゴリズムの改良とともにデータの品質は格段に向上し、国際的な信頼を得るに至った。以下では、データ処理アルゴリズムの概要、打上げ前と打上げ後のアルゴリズム開発の内容について述べる。

● データ処理アルゴリズムの概要

(1) レベル1処理とレベル2処理

処理は大別してレベル1処理とレベル2処理に分けられる。レベル1処理は、NASDA/EOCを経由して受信したILASの観測データであるレベル0データを処理し、物理的に意味のある透過率データ（100%の強度を持つ光が、大気中の各種のガスによる吸収や大気分子やエアロゾル粒子による散乱により、何%の強度の光になったかという比率）を作り出す処理を行う。この時、大気圏外で太陽を直接観測した100%太陽参照光データと、深宇宙を観測したゼロ校正用データを利用する（図-1）。レベル2処理では、可視センサと赤外センサの透過率データ（レベル1データ）から、オゾンなどの大気微量成分の高度分布データ（レベル2データ）を最終的に算出する。データ処理アルゴリズムの概要を図-7に示す。

(2) レベル2処理の詳細

・観測データの高度決定

可視センサのレベル1データと太陽輪郭センサデータ、衛星位置データなどから、約84 ms周期で観測されているデータの観測高度を決定する。これらの高度はレベル2処理以降の処理の高度情報として使われる。

・気温、気圧の算出

気温、気圧の算出は、可視センサのレベル1データをもとに行われる。可視センサの波長帯には、酸素分子のAバンドと呼ばれる強い吸収帯があり、この吸収による透過率スペクトルの強度、形状の高度別情報から気温、気圧の高度分布を算出する。

・ガス濃度の算出

ガス濃度の算出は、赤外センサのレベル1データをもとに行われる。赤外センサの波長帯には、オゾン、硝酸、水蒸気、二酸化窒素、一酸化二窒素、メタン、CFC-11^(注3)、CFC-12などのガスの吸収帯が存在する。これらのガスの吸収による透過率スペクトルの強度および形状の高度別情報から、各ガス濃度の高度分布を算出する。

・可視エアロゾル消散係数の算出

可視エアロゾル消散係数は、大気中に浮遊する硫酸などの液滴であるエアロゾルや、極成層圏雲^(注4)（PSC：

(注3) CFC-11, 12：クロロフルオロカーボンの一種、代表的なフロン。

(注4) 極成層圏雲は、オゾン層破壊を引き起こす化学的なプロセスの中で重要な役割を持つと言われている。

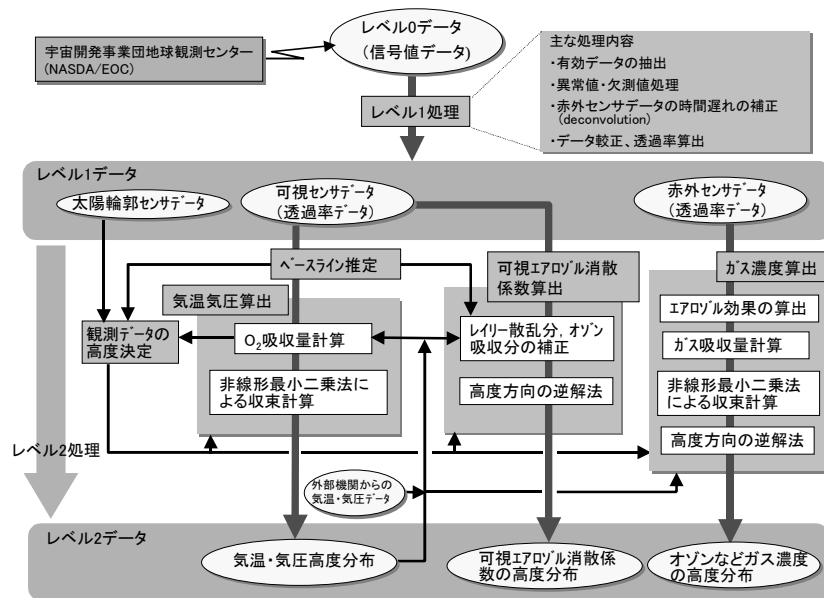


図-7 データ処理アルゴリズムの概要
Fig.7-Schema of data processing algorithms.

Polar Stratospheric Clouds) によって、光の強度が消散する程度を表す量である。したがって、この物理量は、エアロゾルやPSCがどの程度、各高度に存在するかを示す目安となる。可視エアロゾル消散係数は、酸素分子による吸収の影響を受けない波長780 nmの可視センサのレベル1データを用いて算出される。

● 打上げ前のアルゴリズム開発

アルゴリズム開発においては、プログラムを開発する前に処理仕様を打ち合わせて、その仕様どおりに開発すれば事足りる訳ではない。大気放射伝達理論に基づく自然現象の計算機上での理論計算、ILASセンサに搭載されている検出器やアンプ、雑音などの機器特性、地球と観測光路の位置関係を考慮した観測高度の算出、その際の大気屈折の考慮など、どの程度詳細なモデルを採用すれば求められている精度で解を出すことができるのか。また、数値計算上、どのようなテクニックを用いれば精度を保てるのか。さらに、求めた解の誤差情報を算出するのに考慮すべき要因は何で、それはどのように計算すべきなのか。このような問題は、いわゆる情報処理システムの設計だけでは解答を見出せない。つまり、アルゴリズムの開発を行うためには、事前にこれらのことを評価するための検討用のプログラムを作成し、各種ケーススタディを行い、その妥当性と精度を検証しなくてはならない。とくにILASの場合は、日本では初めての本格的な太陽掩蔽法による衛星観測であったため、これら

の検討作業は特に重要であり、本システムの開発初期から、国立環境研究所およびサイエンスチームの研究者のご指導と研究成果をもとに、アルゴリズムの検討作業を継続的に、アルゴリズム設計に随時反映させていった。

衛星打上げ前の最終テストでは、実際にNASDA/EOCを経由して衛星から送られてくるレベル0データを想定した総合テストを実施した。本運用にできるだけ近いテストデータを作成するため、透過率スペクトルデータ（レベル1データ）をシミュレーションで作成した。さらに衛星の軌道情報とも連動させ、ノイズやセンサの装置特性なども付加してレベル0データを作成し最終テストで用いた。以上のような準備を経て、打上げを待つこととなった。

● 打上げ後のアルゴリズムの継続的な改良

ILASを搭載した衛星ADEOSが、H-IIロケットで打ち上げられた1か月後、ILASセンサとしては初めての観測となる機能確認試験が1996年9月17日、18日に行われた。この時得られたデータは、数時間後にオンラインでILAS DHFに届けられ、実観測データによるデータ処理が初めて行われた。著者らの予想に反して順調にガス濃度の高度分布を算出することができ、9月27日に当時の環境庁からプレス発表が行われた。

初データ取得後、1996年11月から定常運用に入り、地上からILAS観測に同期して行われた検証実験データや、NASAなどの他衛星からの同期したデータとの比較

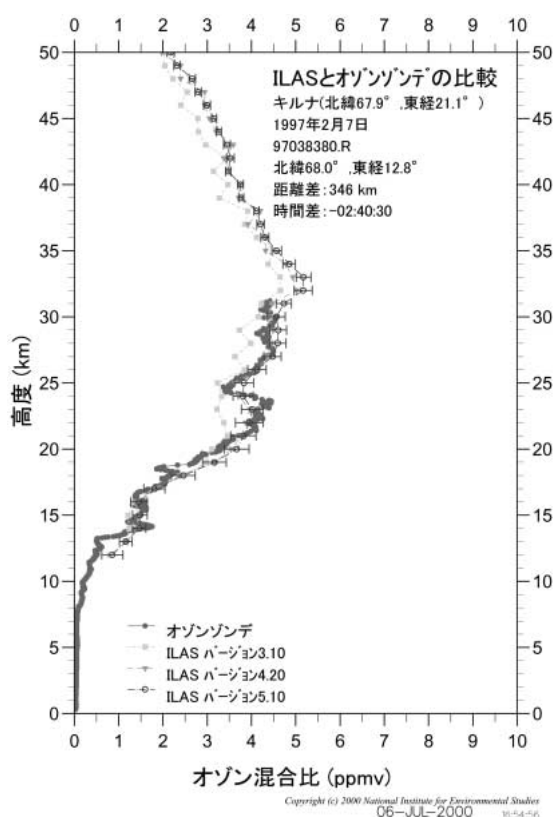


図-8 検証実験データとILASデータの比較例
(オゾンゾンデデータとの比較)
(国立環境研究所殿 提供)

Fig.8-Example of the comparison between validation experiment data (ozone sonde data) and ILAS data [courtesy of NIES].

など、詳細なデータ解析を進めて行く中で、次第にいくつかの問題点も明らかになり、現在に至るまで継続的な改良を続けることとなった。改良を加えた理由を大きく分類すると、実際に取得されたデータが当初予想と異なる特性を持っていたケース、最新の研究成果の反映、装置特性データの更新結果の反映、モデルの精緻化などとなる。打上げ前には想定できない部分の方が多く、打上げ後も継続的にアルゴリズムの改良を進め、データ品質の改善を図っていくことが重要であった。未だに改良が進まない課題も残されており、その解明と検討を現在更に進めている。検証実験データとILASの各バージョンデータとの比較を図-8に示す。国内外の研究者がILASデータに高い関心を持ち続け、注目しているのも、アルゴリズムの継続的な改良により、着実にデータ品質が改善されていることによる。

並列計算技術の適用

● 処理性能上の課題

ILASの赤外観測データは、大気を透過した赤外太陽

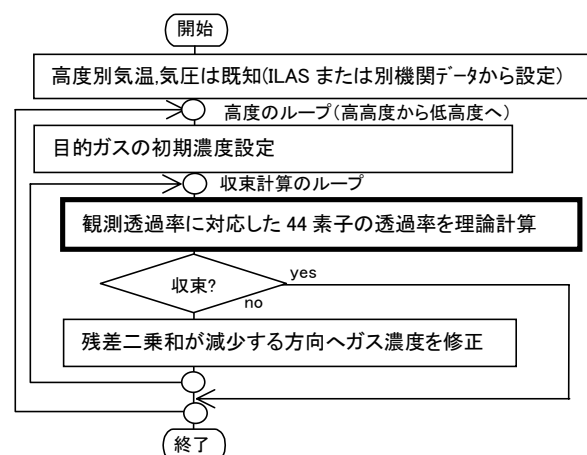


図-9 ガス濃度算出フロー

Fig.9-Flowchart of gas concentration calculation.

光を波長方向に分解したスペクトルを44素子で検出し、約84 msの頻度で測定したものである。同データは、太陽光の強度を測定したものであり、校正用0%, 100%データを用いて観測透過率(レベル1データ)に変換後、極域大気のオゾン層破壊にかかわる微量成分濃度の高度分布の算出に利用される。44素子による観測データを理論的に説明するには、波長軸上で52万点での詳細な放射伝達理論による透過率の計算と44素子への集約計算が必要なのが判明している。観測データを用いたガス濃度算出フローの概要を図-9に示す。

この種の算出には膨大な演算を要するが、1日あたり28回の観測頻度のデータを停滞させることなく処理し、さらにアルゴリズム改訂に伴う再処理が可能であることが求められた。そのためには、膨大な演算を要する図-9の太枠部分の演算時間を短縮する計算機とアルゴリズムの選択が必要であり、

- (1) 観測データを、理論計算で説明する52万点の透過率計算と44素子への集約計算の高速化
- (2) 放射伝達の理論計算における、非線形性が強く計算時間を要する吸収係数(Voigt関数)計算の飛躍的な高速化

が課題となった。52万点の透過率の理論計算結果の一部(10,000点)を図-10(a)に、52万点を44素子に集約計算した結果を図-10(b)に示す。

● 処理方式の選定

上記課題を解決するため、データパラレル型並列処理を採用した。データパラレル型とは、同種の大量データに対し同じ演算をするのに適した方法で、データを複数のPE(Processing Element)に分散配置し、演算を並

列処理する方式である。採用理由は以下のとおりである。

- (1) 図-9の収束計算の反復過程でのガス濃度の修正処理では、52万点×9ガスのヤコビアン（ガス濃度変動に対する透過率の変化率）も必要となる。透過率やヤコビアンの計算には、ある点の計算をしてから別の点の計算をしなければならないというような従属関係はない。時間を短縮するには、波数点（波数は波長の逆数，単位 cm^{-1} ）を分割し別々の計算機に分担させ、並列に処理を進める方式が有効である。
- (2) 吸収係数計算の高速化のため、事前に補間用のテーブルを作成しておき、吸収係数計算を補間計算に置き換える手法を採用した。この手法では5 Gバイト以上のテーブルデータをメモリ上に蓄える必要があり、当時の1 PEの計算機では実現は困難であった。メモリ上のデータを複数PEに分散するデータパラレル型を採用することで、この問題を解決した。

● HPFの採用

1995年当時、並列処理が効率良く記述できる言語HPF⁽³⁾ (High Performance Fortran) も実現されつつあり、著者らは選定にかかわらなかったが、IBM社製の並列機SP2とHPFが採用された。効率の良い並列処理の実現には、「適切な分散記憶」、「演算の分散とPE間

データ通信 (message passing) の極小化」が必要である。HPFは自動的に並列処理を実現するといっても、その限界を理解し利用しなければ効率の良いプログラムは実現できない。

HPF宣言文で並列処理を記述する。HPF宣言は、普通のコンパイラでは注釈行になるが、HPFコンパイラでは有効になり、演算の並列化やPE間のデータ通信を自動化する。

```
(例) *hpf$ processors proc(12)                ! 127 プロセッサの使用宣言
      real(8) a(MWV,MLY)
      *hpf$ distribute a(block,*) onto proc    ! 配列aの分割宣言
      .....
      do i=1,MWV
        a(i,N) = .....                      ! iの値に対応したPEで演算される
      enddo
      .....
```

HPFでは、distribute宣言により配列は複数のPEに分散配置される。演算は、代入文の左辺が配置されているPEで実行される。演算に必要なデータがほかのPEに配置されていれば自動的に転送されるという owner computing ruleが適用される。

● HPF利用上の工夫 (その1)

52万点の透過率、ヤコビアンの計算には、HPFで簡単に並列処理を実現できる。しかし、次段階の44素子に集約（装置関数による畳込み積分）に適用すると、owner computing ruleにより message passingが増大する。当演算は、52万要素のベクトルと52万×44の装置関数行列との積で表される。素子別透過率は非分散配列であり、各要素の計算には52万点の透過率ベクトルと装置関数全体が必要になり、反復計算ごとに、約180 Mバイトの message passingが発生する。この問題を解決するため、非HPFルーチン^(注5)を用いて分散記憶された

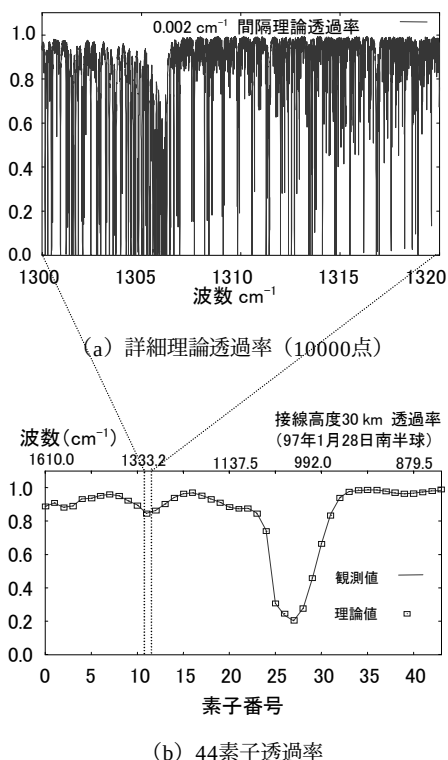


図-10 詳細理論透過率と44素子透過率

Fig.10-Theoretical hi-resolution transmittance and transmittance of 44 elements.

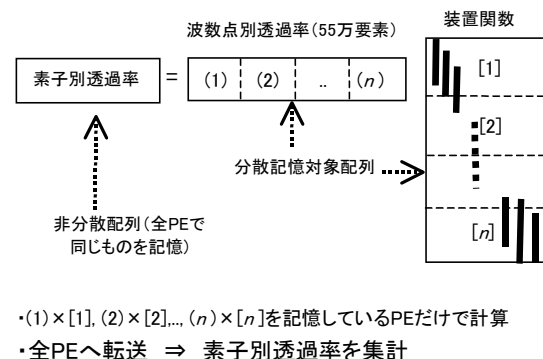


図-11 ベクトル・行列積演算並列化の工夫

Fig.11-Effective method for parallel computation of the vector-matrix product.

(注5) extrinsic (HPF_LOCAL) subroutine 宣言により、非HPFルーチンの手続きを記述する。

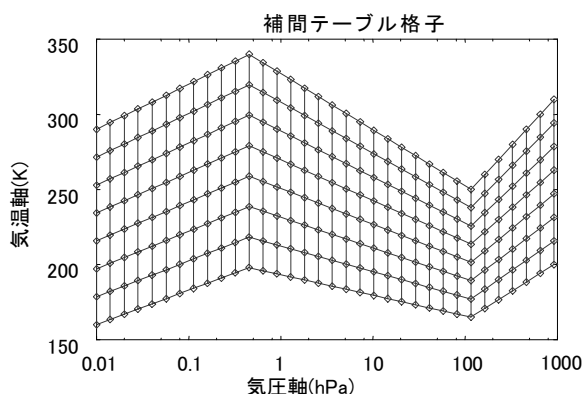


図-12 補間係数テーブル気圧・気温格子点
Fig.12-Pressure-temperature grid points of interpolation coefficient table.

部分ベクトルと部分行列の積（44要素の演算結果）だけを転送させるという方法を実現した（図-11）。

● HPF利用上の工夫（その2）

放射伝達の理論計算で必要となる吸収係数（Voigt関数）の計算についても飛躍的に高速化しなければならない。Voigt関数は、気体の種類、波数、気温、気圧により決まる値であり、

- ・必要時に計算しては間に合わない（実運用時構成の12 PEで1観測分の計算に25時間が必要）
 - ・波数方向の変化は急激（波数方向の補間不可）
 - ・気温方向、気圧方向の変化は滑らか（補間可能）
- という性質がある。気圧・気温面では補間可能という性質を利用して、spline補間用テーブルを事前計算し、必要時に必要な部分を入力し補間する方式で高速化を図った。

各ガスの補間テーブルは、気圧軸×気温軸×波数軸の3次元となる。気温・気圧軸は全PE共通なデータ構造とし、波数軸は、各PEで計算する波数点域に対応させ分散配置した。補間テーブルの気圧・気温格子点を図-12に示す。

HPFによる入出力は、トップのPEのみが代表して実行し、PE間はmessage passing同期が取られるため、並列入力による処理時間の短縮はできない。この部分も前と同様の非HPFルーチンで入力処理を記述し、並列入力を実現した。

全補間テーブルの事前計算には、4 PEを用いて約1週間の時間を要し、総量5.5 Gバイトとなった。1観測分の吸収係数を求めるのにテーブル入力と補間計算で約2分という性能を実現した。

● 並列計算技術適用のまとめ

並列向きの演算にはHPFを適用し、不都合な部分に

表-2 処理時間の削減

	処理時間削減効果	備考
工夫1	52万×10種類★1×8バイト×120回★2を44×10種類★1×8バイト×120回★2に削減（3.5分のデータ転送時間削減に相当）	1観測8.3 GバイトのPE間データ転送削減
工夫2	25時間 ⇒ 2分	実測値

★1：透過率および9ガスのヤコビアン，★2：大気層数 × 反復回数

は非HPFルーチンを用いることにより、12 PEを用いた並列処理で1観測あたり平均10分の処理時間を実現し、所期の要求性能を満足した。処理時間短縮に最も貢献したのは、今回紹介した工夫部分である（表-2）。

HPFは、並列処理に習熟していない技術者でも簡単な場合なら並列処理を実現できる。しかし、今回のように工夫を要することがあると苦勞することになる。今回は、IBMのHPF開発者から非HPFルーチンの開発などでサポートを受けることができた。HPFの仕様は統一されているが、実現方法はベンダにより異なり、同じ記述であっても性能に差が出る可能性がある。新たにHPFの適用を検討している開発者は、できるだけ早い段階でベンチマークテストを実施すべきである。

HPFの最大の利点は、message passingの自動生成である。「どの部分で、どのようにしてmessage passingを行うべきか」をよく理解している開発者は、HPFを使用せずにMPI（Message Passing Interface）などを直接利用するプログラムを開発した方が効率が良いかも知れない。ILASの後継機であるILAS II用のデータ処理では、今回の経験を踏まえHPFを採用しなかった。

今後の展開

ILASの後継機ILAS-II（Improved Limb Atmospheric Spectrometer-II：改良型大気周縁赤外分光計II型）は、2002年2月に打上げが予定されている。同機では観測波長域が拡張され、測定ガス項目もクロリンナイトレート（ClONO₂）などが追加される。現在、同機のデータ処理運用システムの最終的なテストを行っている。さらに、ILAS-IIの後継機（SOFIS：Solar Occultation FTS for Inclined-orbit Satellite）は、全球観測のために傾斜軌道が採用され、赤外分光計が波長分解能の高いフーリエ変換分光計（FTS）に変更されて温室効果ガスの観測も開始される。この基本設計も開始した。

富士通エフ・アイ・ピー（株）ではほかに、通信総合研究所からの業務委託による国際宇宙ステーションの「きぼう（JEM：Japanese Experiment Module）」に設置される「SMILES（Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder）」の地上処理システム、

アラスカ中層大気環境観測システム、沖縄を中心とする亜熱帯環境計測ネットワークシステムなどの地球環境問題の研究支援を行うシステム開発も担当している。ILAS-IIの検証実験では、アラスカ中層大気環境観測での観測データの利用も予定されている。

む す び

ILASデータ処理運用システムの開発における様々な経験を経て、衛星データの総合的な地上系処理システムを構築する上での考え方や手法、技術を習得、蓄積することが少なからずできたと考える。今後は、これらの経験を、ILAS-IIやSOFISのシステム開発に有効に生かしていかなければならない。

科学者は、衛星からの観測結果を地球環境問題の現状把握、原因分析、将来予測、社会への提言へと利用する筈である。著者らはその重要部分を担当していると自負している。今後とも、システム開発、コンピュータの利用技術およびアルゴリズム開発を通じて地球環境分野で社会へ貢献し続けたい。

最後に、国立環境研究所の笹野泰弘部長、横田達也研

究管理官、中島英彰総合研究官、杉田考史主任研究員、神沢博室長、また、現在は宇宙開発事業団地球観測データ利用研究センターに勤務される鈴木睦主任研究員には数々のご指導を頂き、心から感謝の意を表するとともに、その研究姿勢に敬意を表する。ILASサイエンスチームの一員としてご助言、ご協力を頂いた国内外の研究者の方々、ILASセンサの実験データや情報を提供して頂いた開発メーカーの方々、計算機設備面からご協力を頂いた計算機メーカーの方々にこの場を借りて感謝申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 国立環境研究所ホームページ (<http://www.nies.go.jp>).
同研究所ILASホームページ (<http://www-ilas.nies.go.jp>).
- (2) Y. Sasano, M. Suzuki, T. Yokota, and H. Kanzawa :
Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) for stratospheric ozone layer measurements by solar occultation technique, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.26, p.197-200 (1999).
- (3) JAHPF (Japan Association for High Performance Fortran) : HPF/JA言語仕様書.