

## A-10 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

### (1) 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に関する研究

独立行政法人国立環境研究所

社会環境システム研究領域 情報解析研究室

横田 達也

成層圏オゾン層変動研究プロジェクト

笹野 泰弘

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

中島 英彰・杉田 考史

東京大学気候システム研究センター

今須 良一

統計数理研究所 統計基礎研究系 推測決定理論研究部門

栗木 哲

平成13～15年度合計予算額 76,590千円

(うち、平成15年度予算額 24,759千円)

[要旨] 衛星観測スペクトルデータから微量気体量を導出するための手法(アルゴリズム)を高度化するための研究を行った。改良型大気周縁赤外分光計(ILAS)の観測データの処理解析手法の改良並びに実証を実施し、標準プロダクトとして導出していた微量成分のほかに五酸化二窒素( $N_2O_5$ )と硝酸塩素( $ClONO_2$ )を新たに研究用導出対象気体とすることに成功した。これらの導出結果(オゾン等の標準導出対象気体も含む)を、検証用ILAS第6.0版データとして国内外の登録研究者に対して提供した。また、ADEOS-II衛星に搭載された改良型大気周縁赤外分光計II型(ILAS-II)の実観測データに基づいて、導出手法の高精度化を行った。ILASとILAS-IIの観測データを対象として、微量気体とエアロゾルの同時算出手法について検討し、新たな手法を開発した。更に、次世代センサのデータ処理に必要な新たなマイクロウィンドウの選択及び雲・エアロゾルの影響を考慮した導出手法の開発研究を進め、情報理論に基づく新たなマイクロウィンドウの選定基準を提案した。また、赤外波長帯の分光観測による複数の衛星センサデータの複合的な利用によるオゾン等微量成分の観測精度に関する研究を実施した。

[キーワード] オゾン、放射伝達、アルゴリズム、統計処理、数値計算

#### 1. はじめに

環境省では、1988年にわが国独自のオゾン層観測衛星センサの開発・運用に取り込むことを決定し、1996年8月に打ち上げたADEOS衛星搭載の大気環境観測センサ・改良型大気周縁赤外分光計(ILAS)を開発した。また、その後継機として開発したADEOS-II(みどりII)衛星搭載の大気環境観測センサ・改良型大気周縁赤外分光計II型(ILAS-II)は、2002年12月に打ち上げが成功し、初期チェックアウト作業などを経て、2004年4月から衛星本体のトラブルにより観測が停止する2004年10月までの間の約7ヶ月間、南北両極域のオゾン層の定常観測が行われた。更に将来、ILASやILAS-IIと同様な太陽を光源とした観測方式ではあるが、より光学分解能の高い場合の観測データの処理手法の開発研究を実施した。

本研究では、これらのわが国の衛星搭載センサによって得られたデータ、及び将来得られると予想されるデータを用いて、特に極域オゾン層変動の物理・化学的メカニズムの解明と、その変動が極域オゾン層に与える影響を定量的に把握するために、衛星観測スペクトルデータから微量気体量を導出するための手法(アルゴリズム)の高度化のための研究を実施した。

## 2. 研究目的

環境省の開発するオゾン層観測用衛星搭載センサをはじめとする大気衛星観測データが、大気科学研究に有効利用されるために、衛星観測スペクトルデータから微量気体量を導出するアルゴリズムの高度化の研究を行った。特に、2002年12月に打ち上げが成功し、2003年に定常観測を行った改良型大気周縁赤外分光計Ⅱ型(ILAS-Ⅱ)と、その後継機として予定されていた将来型衛星センサの傾斜軌道衛星搭載太陽掩蔽法フーリエ変換分光計(SOFIS)のデータ処理において、実利用を目指した手法の開発研究を行った。すなわち、放射伝達計算に基づく大気微量成分の導出手法の高精度化によって、これらのセンサの観測データよりオゾン層研究に利用するための質の高い情報を導出する手法を開発することを目的とした。更に、複数の大気観測衛星センサデータの複合的な利用によって、新たな情報を抽出する手法開発研究を実施した。また、これらの研究成果により高精度に導出されたデータが他のサブテーマにおける研究に使用され、より高度な科学的知見を得るのに貢献することを目指した。

## 3. 研究方法

大気衛星観測スペクトルデータから微量気体の高度分布を導出する手法において重要とされる研究課題のうち、平成13年度より平成15年度の3年間において、主に4つの観点から、以下に示す項目の研究を推進した。

第1の観点は、導出手法における種々の不確定要素を特定し、より現実の観測に近い状況を反映した導出モデルを用いれば、それまで導出対象とならなかった気体も導出できる可能性がある、また、一つの対象気体であっても単一の吸収帯ではなく、複数の吸収帯の情報を併せて解けば、導出誤差を低減できる可能性があり、これを実観測データに適用して実証する(研究結果(1))。

第2の観点は、赤外の連続分光観測スペクトルには気体の吸収情報とバックグラウンドにある雲・エアロゾルによる散乱情報とが含まれているため、目的とする微量気体を高精度に導出するには、エアロゾルの影響の高精度推定が不可欠であるため、これを改良することである(研究結果(2))。

第3の観点は、将来観測スペクトルがより高分解能となると、データ量が増えるため、そこから効率的に情報を得るための新たな手法(マイクロウィンドウの拡張手法)を、雲・エアロゾルの影響を考慮した手法として開発し、処理の高精度化と高効率化を図ることである。

第4の観点は、単一の衛星センサではなく複数のセンサのデータを複合利用して、オゾンなどの科学的知見に関する新たな情報を得るための手法を検討することとした。これは、既存の衛星データの、科学的な観点からの更なる有効利用に繋がる(研究結果(3))。

研究方法としては、ILASなどの観測データの存在する衛星センサについてはその実観測データを利用して、手法検討と実証を行った。ILAS-Ⅱ(打ち上げが成功し、平成15年度に7ヶ

月間定常観測が行われた)については、理論及び数値シミュレーション上の検討と、実観測データを用いた初期的な実証とを行った。また、SOFISについては、計算機の数値シミュレーションを中心に検討を行った。(研究結果(4))。

研究結果は、以下の4つの項目としてまとめる。

- (1) ILAS、ILAS-IIの観測データの処理解析手法の改良(導出対象ガスの変更)並びに実証
- (2) ILAS、ILAS-IIによる気体・エアロゾル同時算出手法の精度検討
- (3) SOFISのデータ処理に必要な新たなマイクロウィンドウの選択基準の設定と実証
- (4) 赤外波長帯の分光観測による衛星センサデータの相互比較と複合的な利用による新たな物理量抽出のための手法開発

なお、これらの研究を実施する上で担当した研究分担者の主な専門分野は、大気科学、計算科学、応用統計学、数理科学、情報工学である。

#### 4. 結果・考察

以下、上に示した(1)～(4)の各研究項目について、結果と考察を示す。

##### (1) ILAS、ILAS-IIの観測データの処理解析手法の改良並びに実証

###### ①硝酸塩素の導出

ILASの標準プロダクトとして提供されている微量気体成分は、オゾン( $O_3$ )、硝酸( $HNO_3$ )、二酸化窒素( $NO_2$ )、亜酸化窒素( $N_2O$ )、メタン( $CH_4$ )、水蒸気( $H_2O$ )である。また、波長780 nmにおける可視エアロゾル消散係数も標準プロダクトの一つとして提供されている。プロダクトVersion 5.20<sup>1)</sup>までは、更に研究用プロダクトとして、フロン11(CFC-11)、フロン12(CFC-12)、フッ化カルボニル( $COF_2$ )、エアロゾル消散係数(赤外波長)、気温、気圧が導出されていた。平成13年度及び14年度の研究の結果、同時算出する対象気体としては、 $COF_2$ ではなく、これを先験的情報である気候値による分布に固定して、五酸化二窒素( $N_2O_5$ )及び $ClONO_2$ を導出するほうが適することが判明した。この改良手法による気体の導出結果は、検証実験データとの比較などによって精度評価が施され、2002年9月より登録研究者に対して提供されている。これらの導出気体の多くは、数%以内の導出誤差という目標精度を満足している(図1参照)。

これ以降も細かな点において修正項目を検討し、これをILAS Version 6.00データとして、2003年3月に登録研究者に提供した。主な改訂点は、1) HITRAN 2000の酸素分子Aバンドデータの利用など、いくつかの改訂を施した接線高度決定手法を採用した、2) スペクトルフィッティングのための放射伝達フォワードモデル計算において、利用している気温気圧プロファイルを、日々の英国気象局(UKMO)の配信データと、月毎のモデル大気(CIRA)気候値(高度50~55 km以上)とを結合して使用する現状の方式から、高度40~65 kmにおいてのみILASと同期間に観測された衛星センサMLS等の月平均データを利用することにした、3) HITRAN 2000データベースの利用などによる分子分光パラメータの改訂、4) 観測データの層境界高度への補間や各層内における光学的厚さの計算手法の改良、である。この結果、各化学種とも、Version 5.20データに比べて、一般に全高度において濃度が数%から5%程度低くなり、全般的には、検証実験データとの一致性が向上した。なお、これらの研究成果が論文投稿された後

の平成16年度中には、ILAS Version 6.00データは一般ユーザにも公開される予定である。

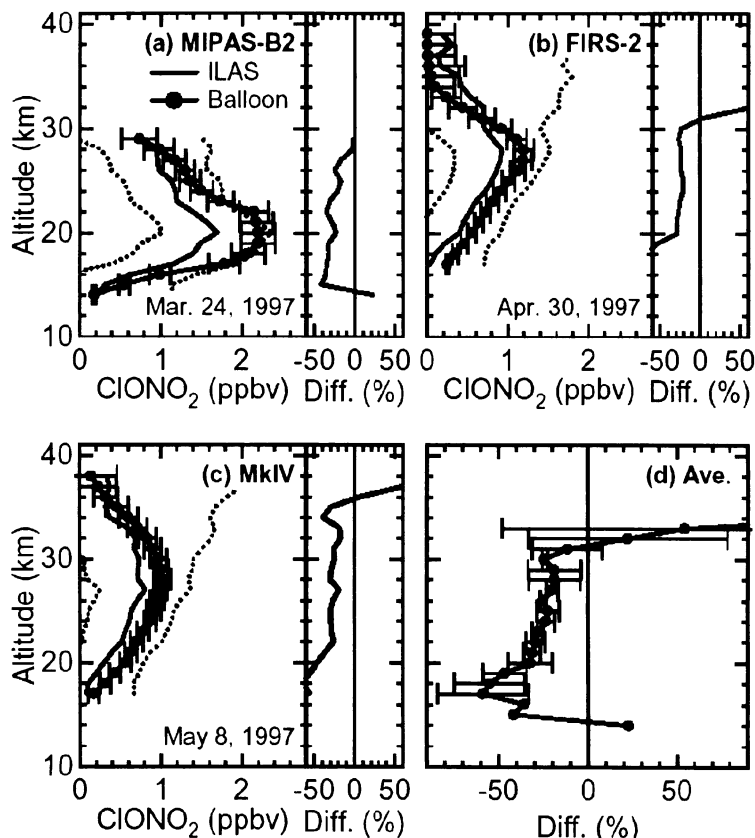


図1 ILAS Version 6.00手法により導出された硝酸塩素 ( $\text{ClONO}_2$ ) の、ILASと同期観測された気球搭載センサによる観測結果との比較結果例。(a)～(c)は気球搭載センサMIPAS-B2, FIRS-2, MkIVとの比較と高度別相対差 (Diff.)。 (d)は気球搭載センサとの高度別の導出結果の差の平均。高度30 km 以下で20～50%のバイアス誤差が見られるが、バイアスを除けば一致性は良い。

## ②吸収波長帯の組み合わせによるメタンの導出精度の向上

ILAS-IIでは、ILASと同様の波長6～12 $\mu\text{m}$ 帯の赤外チャンネル (IR) に加えて、3～5.7 $\mu\text{m}$ の短波長赤外チャンネル (MIR) がある。メタンの吸収帯がこれら二つのバンドのそれぞれに存在することを利用して、メタン濃度の導出精度の向上性について検討した。

これまでのラインパラメータの研究において、MIRの3.3 $\mu\text{m}$ 付近に存在するメタンの吸収帯には強いラインミキシング (※吸収線が密に存在すると、圧力が高い場合に個々の吸収線による吸収量の重ね合わせでは全体の吸収量が決まらなくなる。ラインミキシングがあると、吸収量の理論計算の際に調整が必要となる) がある<sup>2)</sup> ことが知られている。放射伝達計算の際には、その効果を考慮した。なお、メタンは単独に導出するのではなく、オゾン、硝酸、水蒸気などと同時に導出される。使用チャンネルの素子数を変えていくつかのケースで導出を試み、導出結果と誤差情報を比較した。検証用比較対照として、ILAS-IIと10数時間以内に距離差が600 km以内の地点を観測したHALOEセンサのデータと比較した (図2-1、図2-2)。

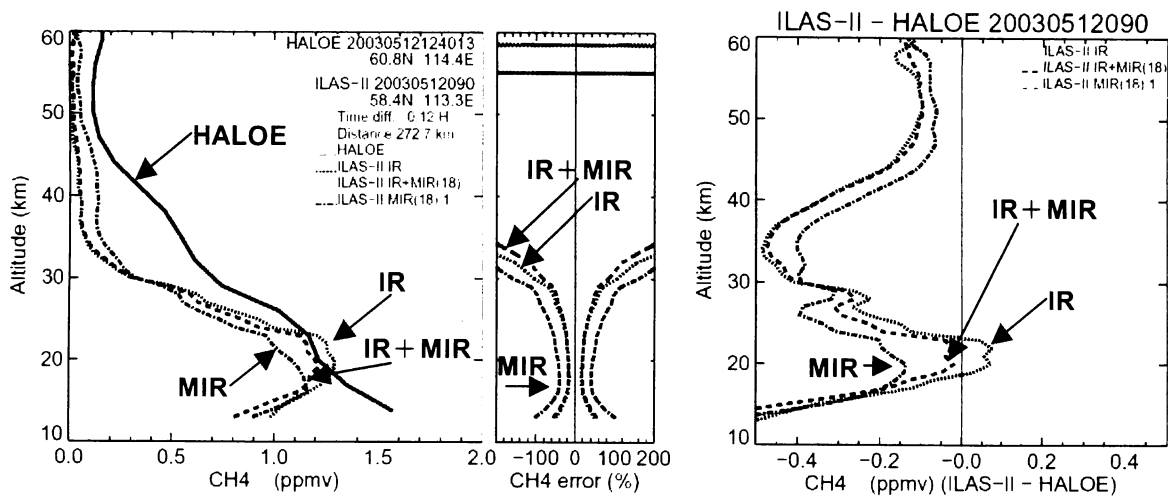


図 2 - 1 使用チャネルの違いによるメタンの導出結果とHALOEデータとの比較（北半球）。左図は個々の分布、中央図は推定誤差（エラー）の比較、右図はHALOEとの差分値

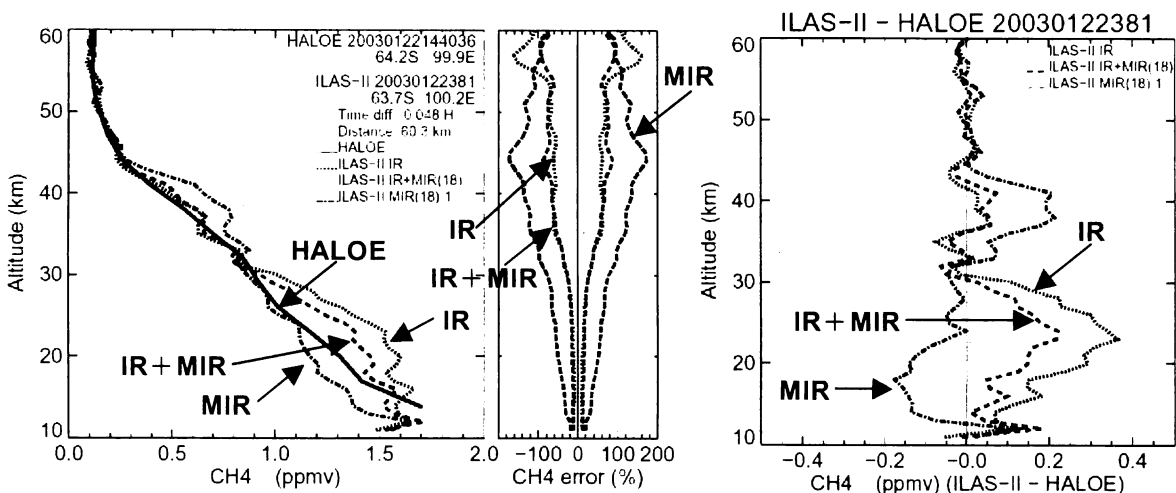


図 2 - 2 使用チャネルの違いによるメタンの導出結果とHALOEデータとの比較（南半球）。左図は個々の分布、中央図は推定誤差（エラー）の比較、右図はHALOEとの差分値

検討結果より以下のことがわかる。

- ・北半球ではHALOEに比べて負のバイアスがあるが、「IRのみ」または「IR+MIR」が良い。
- ・南半球では「MIRのみ」または「IR+MIR」が、HALOEの結果と最も近くなる。
- ・北半球では「IR+MIR」の方が「IRのみ」よりも推定誤差の大きさが全高度で小さい。
- ・南半球では「IRのみ」の方が「IR+MIR」よりも推定誤差の大きさが全高度で小さい。
- ・MIRのみでリトリバルを行った場合、エラーが大きい。

ILAS-IIの初期データでは、観測高度決定の誤差と、観測信号の振る舞いから、北半球と南半球で、高度別のバイアス状況などの導出結果の傾向が異なる。现阶段のILAS-IIのデータからチャネルの組み合わせの優劣を正確に議論することはできないが、少なくとも推定誤差の大きさの状況から、二つのチャネルの情報を組み合わせて導出するのが最適であるといえ、これは数値シミュレーションの結果とも一致する。

## (2) ILAS、ILAS-IIによる気体・エアロゾル同時算出手法の精度検討

地球大気の太陽掩蔽法に基づく衛星センサによる赤外分光測データより、複数気体濃度の高度分布を導出する際、気体の吸収スペクトルにエアロゾル散乱によるスペクトルが重畳することが、気体濃度導出に影響を与えていた。これまでILASとILAS-IIでは、エアロゾル散乱によるスペクトルを気体吸収の影響の少ない波長のデータから近似的に推定することによって気体濃度の導出を行ってきた。それを改良し、気体とエアロゾルを同時算出する新たな手法を用いれば、気体濃度の導出精度の向上が期待される。特に、従来のエアロゾル散乱によるスペクトルの近似的な推定時に大きな誤差を与える特殊なエアロゾル（極成層圏雲；PSC）が存在する場合には、気体の導出結果に大きな誤差が生ずるため、本手法の研究開発が望まれている。そこで、気体とエアロゾルを同時に推定する種々の手法を検討した。

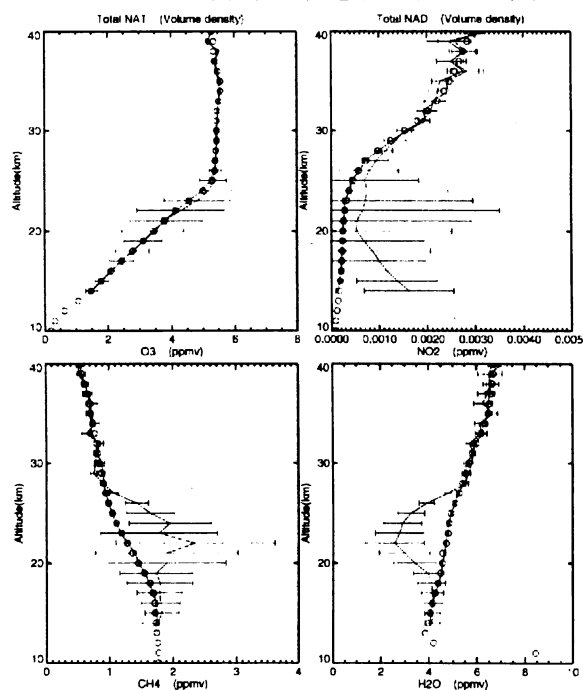


図3 気体・エアロゾルの同時算出シミュレーション（ノイズを付加しない場合）。

従来手法（細線）に比べて、同時算出の結果（太線）は真の値（○）に近く導出され、特に $\text{NO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ で改善されることがわかる。

平成14年度にはエアロゾル（PSCを含む）の典型的なスペクトルパターンをエアロゾルの組成に基づいて12種類用意し、その線形結合のパラメータを気体濃度と同時に推定する手法を開発提案した。その結果、図3に見られるように、従来法では水蒸気（ $\text{H}_2\text{O}$ ）が小さく、メタン（ $\text{CH}_4$ ）が大きく導出された結果が、本手法により改善されることが数値シミュレーションにより確認された。

平成15年度には、その手法に改良を加え、エアロゾルのスペクトルパターンの他に、粒径分布を推定するためのパラメータを組み込んだ同時推定手法を開発した。

PSCの典型成分として、STS、NAT、NAD、Water Iceの4種類を用意し、それぞれに相対的な粒径分布を決定するためのパラメータを6つ用意した。即ち同時推定での未知パラメータ

は、未知ガスの数 ( $O_3$ ,  $HNO_3$ ,  $NO_2$ ,  $N_2O$ ,  $CH_4$ ,  $H_2O$ , CFC-11, CFC-12,  $N_2O_5$ ,  $ClONO_2$ の10ガス) に  $4 \times 6 = 24$ を加えた34である。本手法の最大の特徴は、理論的なスペクトル計算の際に、エアロゾルの総合的なスペクトルに対して折れ線近似を行わずにガスの導出ができる点にある。なお、PSCの各成分は、その大気温度により生成が制限されるため、気温を条件として推定に含める成分を制限した。これにより、現実の大気状況に即した安定した導出結果が得られた。

本手法をPSCが存在する場合のILAS実観測データに適用し、気体の導出結果が大幅に改善されることを確認した(図4)。本手法により、PSCの構成要素も推定される。図4の例では、エアロゾルが主にSTSとNATで構成されていることがわかる。特に水蒸気とメタンの導出結果には大幅な改善が見られる。9つの事例について、ILASの従来の運用処理 Version 6.0の処理結果と本手法との水蒸気とメタンの導出結果の比較を図5に示す。本手法に基づいたILASデータの処理結果は、平成16年度以降に新たな処理バージョンデータとしてユーザへの提供を検討中である。

### (3) SOFISのデータ処理に必要な新たなマイクロウィンドウの選択基準の設定と実証

SOFISはスペクトル分解能が $0.2 \text{ cm}^{-1}$ で赤外波長域 $3 \sim 13 \mu\text{m}$ を測定するフーリエ変換型分光器によるセンサである。高波長分解能で広いスペクトル範囲をカバーするため、1回の観測で取得されるデータ量が膨大となる。そのため、処理に用いるスペクトル領域を効率的に選定する必要がある。この利用領域(マイクロウィンドウと呼ぶ)をエアロゾルの組成別の赤外スペクトル変化を考慮して様々なケースにも対応できるように選定するための、新たな手法を開発した。その手法の概要は、解析に適するスペクトル領域をある程度幅を持って自動的に抽出し、その個々の幅の範囲ではエアロゾルのスペクトルは一定値(または直線で近似できる)と仮定して、その値を未知パラメータに加え、気体濃度と同時に算出する。この個々の抽出領域を「ミディアムウィンドウ」と呼ぶ。3年間の研究により、様々なエアロゾルのタイプに対応し、導出結果のオフセット誤差を低減するという基準に基づいてミディアムウィンドウを汎用的に設定する手法を開発した。更に、数値シミュレーションに基づいてその感度解析を実施して実用性を示した。

また、ミディアムウィンドウを選定する際に利用されるRodgers法<sup>3)</sup>における線形近似の妥当性について統計学的に検討し、エアロゾル存在下で最適な基準を与える改良手法を提案した。すなわち、マイクロウィンドウ選定時に仮定している気体濃度に対する観測スペクトルの線形近似性についてより厳密に検討し、非線形性が存在する場合の影響の程度について、大規模乱数実験により検討した。その結果、マイクロウィンドウ(ミディアムウィンドウを含む)として選定する波数の数が小数(例えば、全波数の $1/10 \sim 1/40$ )では、非線形性を考慮したウィンドウの選択するほうがよく、ウィンドウを多く選択できる場合には従来法でも情報量が損失しないことを示した。

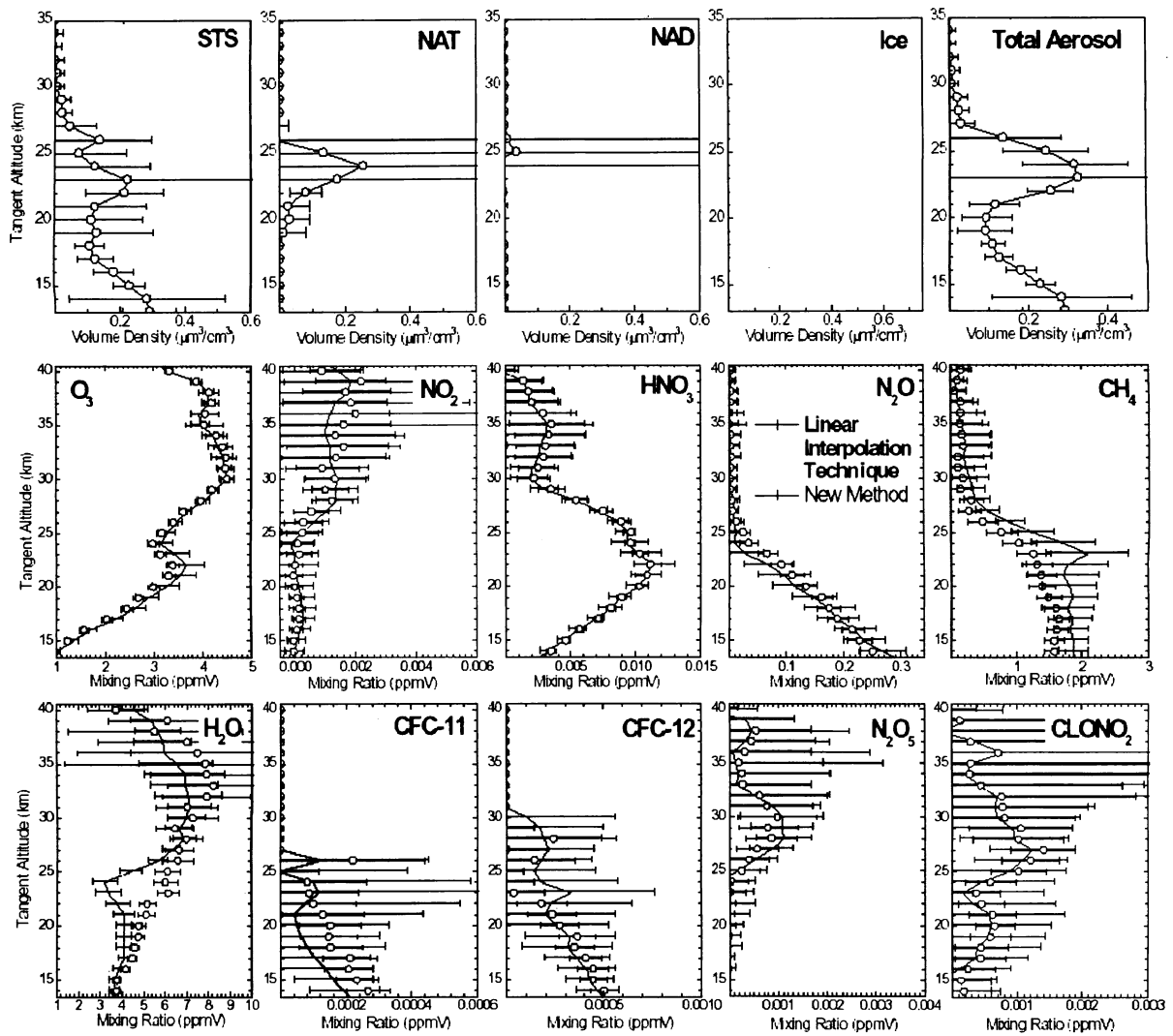


図4 微量成分導出手法の従来手法と同時算出手法との比較（ILASの実観測データに適用した結果例）。シンボル無しの実線は従来手法、白丸の実線は同時算出手法の結果。CH<sub>4</sub>とH<sub>2</sub>Oに差が見られる。



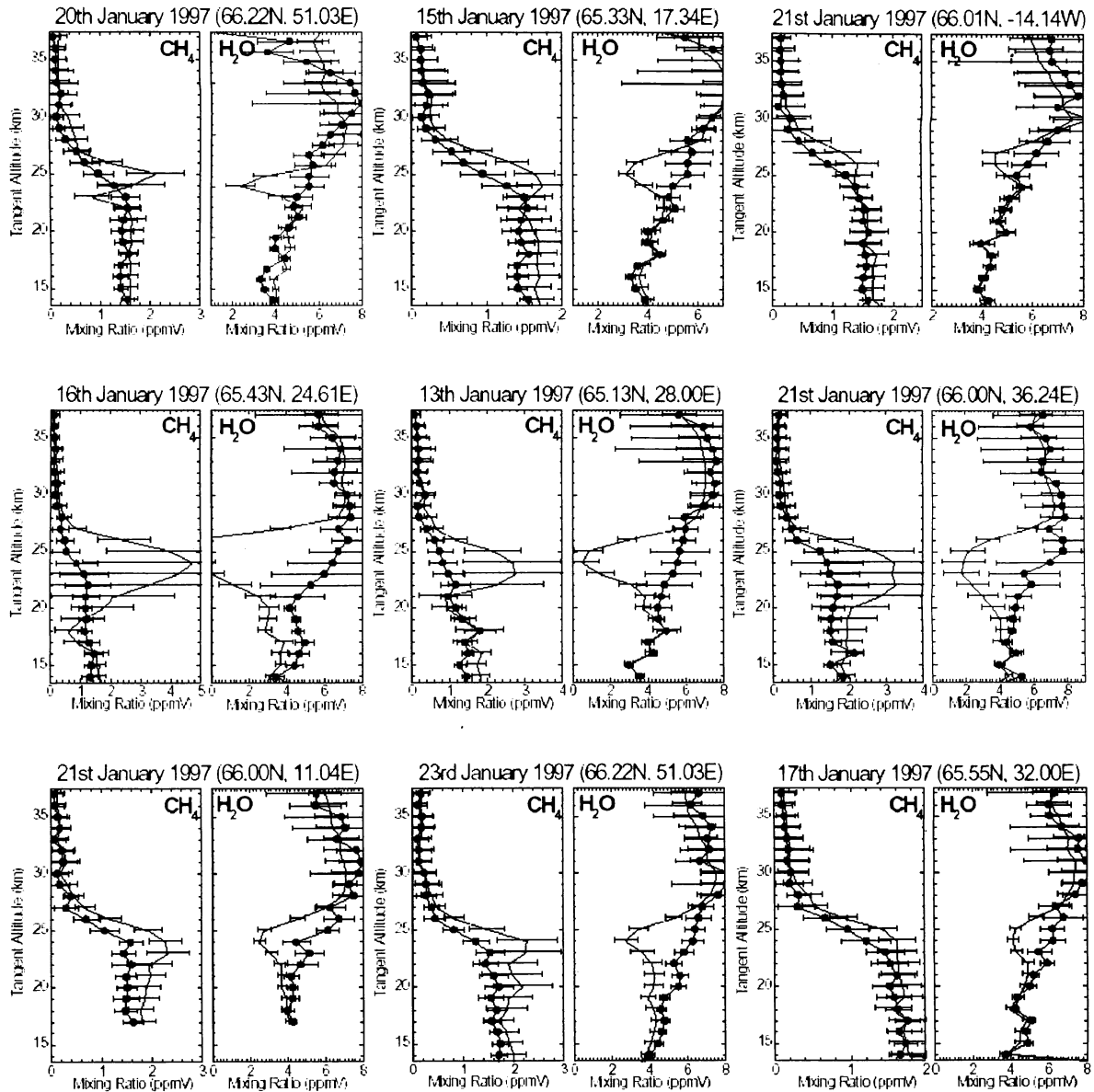


図5 CH<sub>4</sub>とH<sub>2</sub>Oにおける従来手法と同時算出手法との比較（ILASの9つの実観測データ適用例）。シンボル無しの実線は従来手法、黒丸のある実線は同時算出手法の結果。

本手法により自動抽出されたメディアムウィンドウの例として、高度10 kmの場合のメディアムウィンドウ抽出例とウィンドウ内で推定されたエアロゾルスペクトル値を図6に示す。

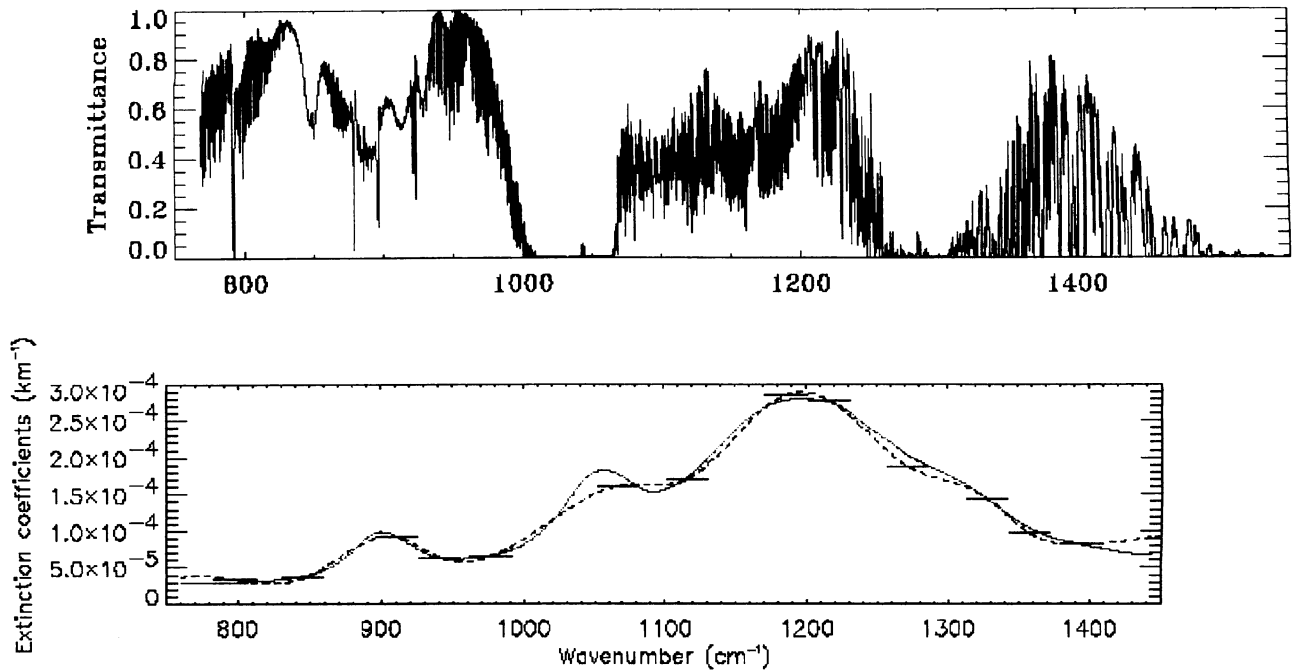


図6 高度10 kmの場合の観測スペクトル（上図）とエアロゾル及び気体導出用に選択されたミディアムウィンドウ（図の薄いハッチ）、及びエアロゾルスペクトル（下図）

#### (4) 赤外波長帯の分光観測による衛星センサデータの相互比較と複合利用

人工衛星搭載の赤外高分解能分光センサによるオゾン関連物質、及び、温室効果気体の全球濃度分布解析のための手法の高精度化を行った。特に、掩蔽観測手法や天底観測手法といった異なるタイプのデータから気体成分の統合的なデータセットを作成するための手法を検討し、その有効性を検討した。また、赤外線データ解析時に問題となる雲の影響の除去手法を開発し、実際の観測データの解析に適用してその有効性を評価した。

本研究により、以下に示す事項が明かとなった。

- ・熱赤外スペクトルデータからオゾン濃度、特に対流圏におけるオゾン濃度の鉛直分布を導出する手法について検討し、波数分解能と鉛直分解能の関係や導出精度などについて考察した。その結果、波数分解能が  $0.1 \text{ cm}^{-1}$  程度の観測では、オゾン濃度の高い成層圏においては、鉛直分解能は数 km であるのに対し、オゾン濃度の低い対流圏（全量に占める割合は約 10%）では 3~5 km 程度と、対流圏の上部、中部、下部程度の分離がcaろうじてできる程度であることが分かった（図7 (a)）。また、測定精度についても成層圏では濃度の 10%程度の精度があるものの、対流圏では 30%程度と、相対的に悪い結果となった。図7 (b)は、オゾン濃度解析の初期推定値の背景誤差を 20%としたとき、観測によりその誤差がどれだけ減少するかを中緯度の大気モデルについて計算した例である（誤差の定義は Smith et al. (1991)<sup>4)</sup>による）。観測により最も多くの情報がもたらされるのは 100 hPa 付近であり、一方、対流圏においては背景誤差の 10%程度の改善しか見込めないことがわかる。しかし、初期値用統計データの高精度化などにより、背景誤差の絶対値を小さくすることができれば、実際の対流圏内で起きているオゾン濃度変動と同程度の観測精度を実現することも可能であり、これを如何に実施するかが今後の課題である。このような結果は、スペクトル測定の波数分解能が  $0.5 \text{ cm}^{-1}$  程

度まではあまり変わらない。しかし、それより低分解能になると途端に鉛直分解能が低下する。これは、もともとの  $9.6 \mu\text{m}$  帯のオゾン吸収バンドの線構造のスケールに由来するところが多い。

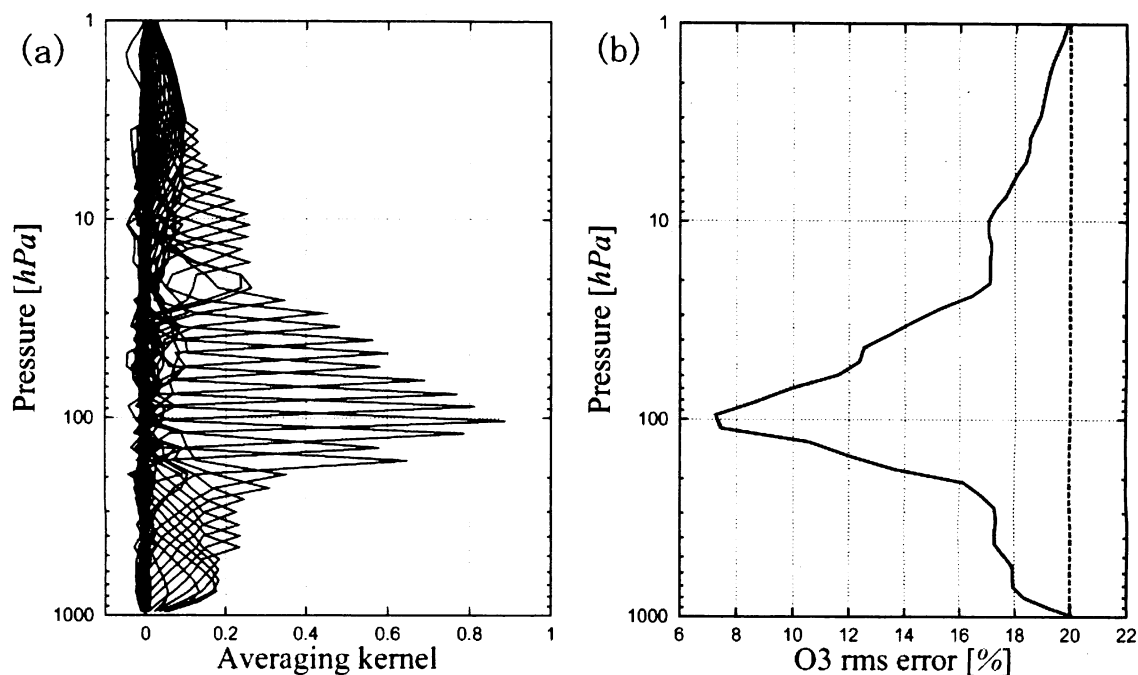


図7 光路差=10 cmのFTSによる (a) 鉛直分解能関数と、(b) 反転解析誤差 (初期推定値の誤差=20%と仮定)

- 鉛直分解能測定精度に優れる掩蔽観測データ (ILAS)、水平分解能の優れる天底観測データ (IMG)、さらに、鉛直積算量の絶対精度に優れる紫外光観測データ (TOMS) を組み合わせることにより、それらの相互比較、および、オゾン等の3次元的な空間分布を導出するための手法を検討した。このような多種センサの複合的なデータ利用方法を、1997年春季における北極近傍のオゾン減少域の解析に適用し、オゾンホール的な現象の立体的な描像を捕らえる方法として有効であることを示した。
- 熱赤外天底観測データの解析において問題となる、センサの視野内雲の除去手法の開発を行った。この方法は、 $\text{CO}_2$ 等の吸収帯データをもとに晴天大気を仮定して反転解析された気温減率の情報から雲頂高度を推定し、オゾン解析のために使用する初期推定値データセット (主にヤコビアン行列式) を再構築することにより、曇天域や極域でのオゾン反転解析精度を向上させるものである。その概念図を図8に示す。その結果を北極のオゾンホール的な現象の解析に適用したところ、熱赤外データ (IMGデータ) による気柱オゾン量の解析において、雲補正を行わない場合と比べ、雲補正を実施した場合には、高精度であるとされる TOMS センサによる観測結果と良い相関が得られることが確認された (図9)。このような解析と併せ、オゾンの気球観測データ (環境研神沢氏提供) との比較により、本研究で開発した雲補正手法の有効性が示された。

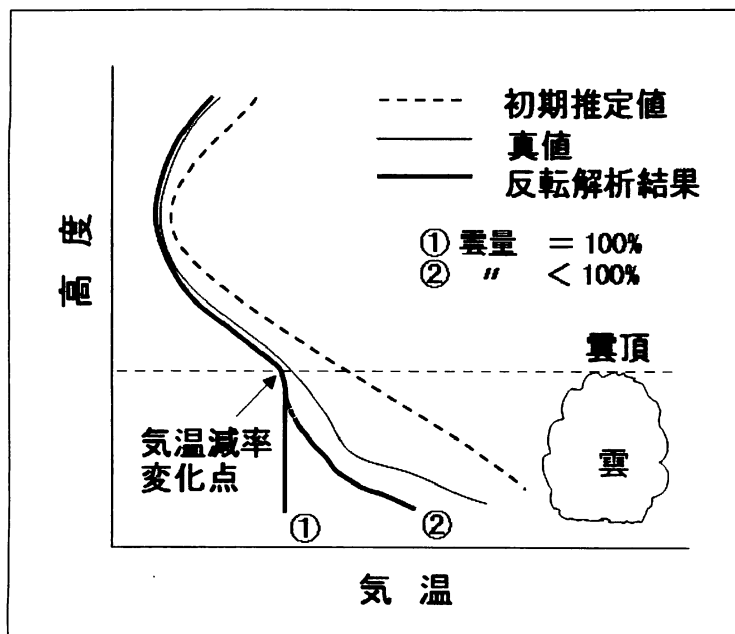


図8 雲を考慮しない気温反転解析結果から、視野内の雲頂高度を推定する方法の概念図

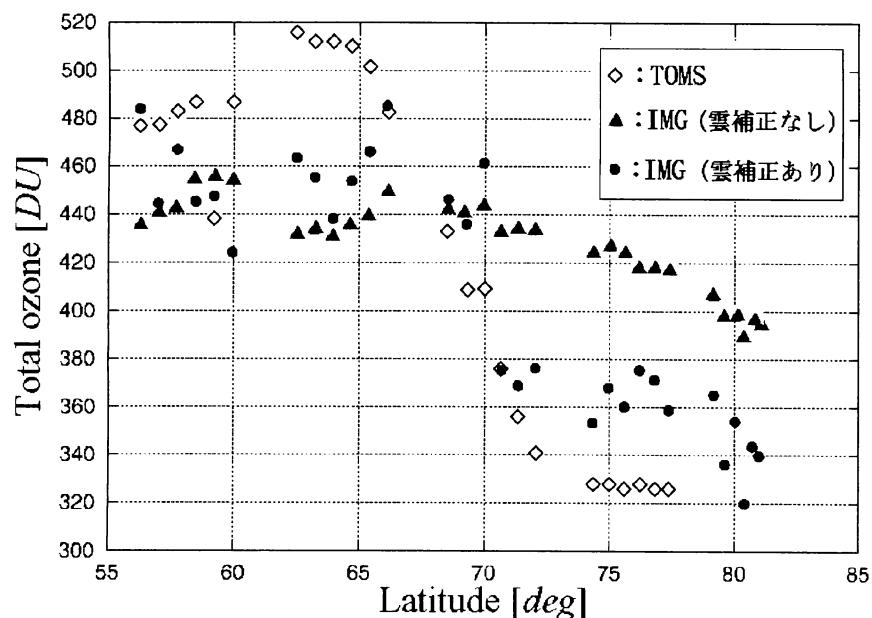


図9 IMGセンサのデータ解析において、雲影響を考慮しないで解析した場合と考慮して解析した場合のオゾン全量の比較。データは1997年3月9日の北極付近におけるオゾン減少領域の例。比較のために同日、同領域付近におけるTOMSによる観測結果も示す。

### 5. 本研究により得られた成果

(1)については微量気体濃度の導出手法の高度化研究によって、ILASの観測データから新たな微量気体 ( $N_2O_5$ と $ClONO_2$ ) の導出が可能となり、登録研究者に公開するという成果が得られた。この手法は、ILAS-IIのデータ処理手法にも反映され、ILAS-IIで目標としている硝酸塩素 ( $ClONO_2$ ) の導出に繋げることが可能となった。また、ILAS-IIの新たな中間赤外チャネル

データを用いて、チャンネルの組み合わせによるメタンの導出精度の検討を行ったところ、装置の特性に起因すると思われる南北の観測結果に差が見られるものの、二つの吸収波長帯を組み合わせる場合に推定誤差が小さくなることを確認し、衛星センサとして広い波長帯の観測を行うことの有効性を実証できた。(2)については、エアロゾルと微量気体の同時算出手法の有効性を数値シミュレーションとILASの観測データへの適用結果により示した。オゾン破壊が顕著であった2003年の南極オゾンホールを観測したILAS-IIデータに本手法を適用した場合の結果と、それを用いた科学的な解析が期待される。(3)については、衛星によるフーリエ分光センサのデータ処理手法として、新たな手法の実用的手法を提案するという成果が得られた。(4)については、天底観測で最も問題となる視野内雲の影響の除去手法を提案し、高精度な紫外線センサとオゾン全量解析の結果を比較することにより、開発した雲影響除去手法の有効性を示した。また、鉛直分解能、水平分解能、気体の鉛直積算量のそれぞれにおいて優れる複数センサのデータを組み合わせることは、オゾンなどの立体的な空間分布を求める上で極めて有効であることを、実際のデータ解析結果に基づいて示した。

以上は、個々の研究事項の成果の概要であるが、本サブテーマにおいては、太陽掩蔽法による観測センサを中心に、微量気体の高精度導出手法を研究開発し、ILASの観測データへの適用により、その有効性を実証した。これらの成果はILAS-IIの観測したデータの今後の処理手法の改良（高精度化）に役立てる。また、天底観測や提要掩蔽観測などの種々のセンサに対するより一般的な複合利用方法についての具体的な解析手法を示した。

## 6. 引用文献

- 1) 独立行政法人国立環境研究所衛星観測プロジェクト編：改良型大気周縁赤外分光計ILAS Version 5.20 Level 2 data products, R-173(CD)-2003/NIES, 国立環境研究所 (2003)
- 2) Chris Benner, D.; Rinsland, C. P.; Malathy Devi, V.; Smith, M. A. H.; Atkins, D., Line mixing in methane and application to HITRAN, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 53, 705-721 (1995)
- 3) Rodgers C. D.: *Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice*, World Scientific, Singapore, (2000)
- 4) Smith, W.L, H. M. Woolf, and H. E. Revercomb, "Linear simultaneous solution for temperature and absorbing constituent profiles from radiance spectra," *Appl. Opt.*, 30, pp.1117-1123, (1991)

## 7. 国際共同研究等の状況

エアロゾルと微量気体の同時算出手法の検討に当たっては、カナダ・ウォータールー大学のJames Sloan博士のグループとの情報交換と討論を行った。彼らは独自に手法を研究している。また、SOFISのデータ処理アルゴリズムの検討については、米国ジェット推進研究所のG. C. Toon 博士との協力研究を実施した。更に、放射伝達計算に必要な分子分光吸収線パラメータデータベースとして著名な HITRAN のコミッティ（米国ハーバード・スミソニアン

L. S. Rothman博士が代表)にデータ利用者として関与し、直接情報交換を行っている。また、衛星搭載用フーリエ分光センサに関する研究として、米国及び欧州（フランス、ドイツ等）との定期的なワークショップによる情報交換を行っている。また、IMGセンサなどの観測データの解析には、日本からの研究協力の申し入れによりロシアウラル大学の Zakharov博士と Grivanov博士のグループが開発したプログラムを使用した。これらの結果は、国際誌への論文投稿や国際学会での発表の形で報告され、高い評価を得るに至っている。

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表（学術誌・書籍）

#### <学術誌（査読あり）>

- ① Oshchepkov, S., Sasano, Y., Yokota, T.: New method for simultaneous gas and aerosol retrievals from space limb-scanning spectral observation of the atmosphere, *Appl. Opt.*, 41, 21, 4234-4244, (2002)
- ② Yokota, T., Nakajima, H., Sugita, T., Tsubaki, H., Itou, Y., Kaji, M., Suzuki, M., Kanzawa, H., Park, J. H., Sasano, Y.: Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) data retrieval algorithm for Version 5.20 gas profile products, *J. Geophys. Res.*, 107, D24, 8216, 10.1029/2001JD000628, (2002)
- ③ Zakharov, V.I., R. Imasu, K.G. Grivanov, G. Hoffmann, and J. Jouzel: Latitudinal distribution of the deuterium to hydrogen ratio in the atmospheric water vapor retrieved from IMG/ADEOS data, *Geophys. Res. Lett.*, in press (2004)
- ④ Uemura N., S. Kuriki, K. Nobuta, T. Yokota, H. Nakajima, T. Sugita, and Y. Sasano: Retrieval of trace gases from aerosol-influenced infrared transmission spectra observed by low spectral resolution Fourier transform spectrometers, *Appl. Opt.*, in press (2004)

#### <学術誌（査読なし）>

- ① Sugita T., Yokota T., Nakajima T., Nakajima H., Waragai K., Suzuki M., Matsuzaki A., Itou Y., Saeki H., Sasano Y.: Temperature and pressure retrievals from O<sub>2</sub> A-band absorption measurements made by ILAS: Retrieval algorithm and error analyses, *Proc. SPIE*, 4150, 94-105 (2001)
- ② Sasano Y., Yokota T., Nakajima H., Sugita T., Kanzawa H.: ILAS-II instrument and data processing system for stratospheric ozone layer monitoring, *Proc. SPIE*, 4150, 106-114 (2001)
- ③ Nakajima H., Kuze A., Sugita T., Yokota T., Sasano Y.: Solar-Occultation FTS for Inclined-orbit Satellite (SOFIS): Scientific requirements and current status of development, *Proc. SPIE*, 4150, 165-173 (2001)
- ④ Uemura N., Yokota T., Nakajima H., Sugita T., Sasano Y., Yoshigahara C., Uehara Y.: A Preliminary Study on Data Processing Algorithms for SOFIS, *Proc. SPIE*, 4150, 174-187 (2001)
- ⑤ Yokota T., Nakajima H., Sugita T., Sasano Y.: Study on data retrieval for the SOFIS aboard GCOM-A1, *Proc. 9th Intn'l Workshop on ASSFTS*, ESTO 00P0A1-D005, pp.58-60 (2001)
- ⑥ Imasu, R. and Y. Ota, Ozone retrieval from high-resolution spectrum data observed by IMG/ADEOS sensor, *Proc. SPIE*, 4897, 57-64, (2002)
- ⑦ Zakharov, V.I., R. Imasu, and K.G. Gribanov, D/H latitudinal distribution in the atmosphere retrieved from IMG spectra, *Proc. SPIE*, 4897, 65-71, (2003)

<書籍>

- ① 椿広計・横田達也：清水邦夫編 データサイエンスシリーズ第8巻「地球環境データ～衛星リモートセンシング～」第3章 ADEOS/ILASデータ（分筆，pp. 103-137），共立出版，東京（2002）
- ② 中島英彰，（竹内均監修）：衛星センサーによるオゾン層破壊関連分子の観測（調査事例），地球環境調査計測辞典，第1巻 陸域編1，431-434，（2003）

(2) 口頭発表

- ① Yokota, T., Sugita, T., Nakajima, H., Sasano, Y.: ILAS data retrieval status and radiative transfer calculation, *24th Annual Rev. Conf. Atmos. Transmission Models*, Boston, USA (2001)
- ② Yokota, T.: ILAS/ILAS-II spectroscopic problems and measurement plan in 753-784 nanometer, 3.0-5.7 micrometer, and 6.2-11.8 micrometer, *Workshop on Laboratory Spectroscopy Needs for Atmospheric Sensing*, San Diego, USA (2001)
- ③ Yokota, T., Nakajima, H., Sugita, T., Sasano, Y.: Updates of Spectroscopic Data used in the ILAS Version 6 Data Retrieval Algorithm, *The 7<sup>th</sup> HITRAN Database Conference*, Cambridge, MA, USA (2002)
- ④ Sasano, Y., Yokota, T., Nakajima, H., Sugita, T., Kanzawa, H.: ILAS achievements and ILAS-II science plan, *2002 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Toronto, Canada (2002)
- ⑤ Yokota, T., Nakajima, H., Sugita, T., Usami, M., Kawasaki, H., Sasano, Y.: Data retrieval simulation of the Improved Limb Atmospheric Spectrometer-II (ILAS-II) aboard the ADEOS-II satellite, *Remote Sensing of the Atmosphere, Ocean, Environment, and Space*, Conference 4891, Hangzhou, China (2002)
- ⑥ Imasu R. and Y. Ota: Ozone Retrieval from High Resolution Spectrum Data Observed by IMG/ADEOS Sensor, *Remote Sensing of the Atmosphere, Ocean, Environment, and Space*, Hangzhou, China (2002)
- ⑦ Zakharov, V.I., R. Imasu, and K. G. Gribanov: D/H latitudinal distribution in the atmosphere retrieved from IMG spectra, *Remote Sensing of the Atmosphere, Ocean, Environment, and Space*, Hangzhou, China (2002)
- ⑧ 栗木哲，横田達也，植村暢之：大気衛星観測データ処理におけるマイクロウインドウの最適設計について，*ISM シンポジウム「環境科学と統計科学の新たな融合」*，東京（2002）
- ⑨ 中島英彰，入江仁士，杉田考史，横田達也，笹野泰弘：ILAS Version 6.0によるC10N02及びN205の観測，第13回大気化学シンポジウム，豊川（2003）
- ⑩ 杉田考史，横田達也，中島英彰，入江仁士，神沢博，小林博和，笹野泰弘：ILAS最新バージョン6.0のデータ質，第13回大気化学シンポジウム，豊川（2003）
- ⑪ 今須良一，太田芳文，横田達也，衛星搭載赤外分光放射計によるCO<sub>2</sub>濃度の測定，日本気象学会 2003年度秋季大会，予稿集 p. 81，仙台（2003）
- ⑫ 太田芳文，今須良一，小熊健太郎，IMG/ADEOSによる地表面射出率の測定，日本気象学会 2003年度秋季大会，予稿集 p. 255，仙台（2003）
- ⑬ 今須良一，IMG/ADEOSデータから解析されたHDOの緯度分布，日本気象学会 2003年度春季大会，予稿集 p. 103，つくば，（2003）
- ⑭ 太田芳文，今須良一，衛星搭載赤外線センサーによるオゾン空間分布導出手法の検討，日本気象学会 2003年度春季大会，予稿集 p. 105，つくば（2003）

- ⑮ Ota, Y. and R. Imasu: Characteristics of spectral emissivity for various types of the surface derived from IMG spectrum data, *Atmospheric Science from Space using Fourier Transform Spectrometry*, Bad Wildbad, Germany (2003)
- ⑯ Zakharov V.I., Griбанov K.G., Imasu R.1, Khain A., Shmelev V.M., Vasiliev A.P.: From Industrialization to Greenhouse Explosion?, *World Conference on Climate Change (WCCC2003)* (2003)

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

本研究の成果の一部は、環境省の開発したオゾン層観測センサILAS及びILAS-IIのデータ処理アルゴリズムとして活用され、それによって処理された結果は国内外の大気科学コミュニティーに提供され、それらの研究成果を通じて環境施策上の貢献を行っている。また、本研究の別の成果の一部は、環境省、国立環境研究所、宇宙航空研究開発機構が開発に着手した温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)に搭載される予定の熱赤外センサのデータ解析における基礎となる知見として利用されようとしている。