

A-3 衛星利用大気遠隔計測データの利用実証に関する研究

(1) 太陽掩蔽法大気センサーによる温暖化関連物質の導出手法の研究

環境省国立環境研究所

地球環境研究センター

大気圏環境部

地球環境研究グループ 衛星観測研究チーム

文部科学省統計数理研究所統計基礎研究系

法政大学工学部経営工学科

横田 達也

笹野 泰弘

中島 英彰・杉田 考史

栗木 哲

花泉 弘

平成 10～12 年度合計予算額

43,295 千円

(うち、平成 12 年度予算額

14,460 千円)

[要旨] 太陽掩蔽法大気センサーによる温暖化関連物質などの測定に関し、ILAS-II 及び SOFIS の仕様に基づいて、下部成層圏及び上部対流圏における温室効果気体など大気微量成分の鉛直分布導出のための検討を、理論シミュレーションを用いて行った。まず、非線形最小二乗法を用いた精密な放射伝達計算に基づく導出手法を用いた場合に、ILAS-II では、高度 20 km 付近で導出精度が ILAS に比較してオゾンで 5 倍、メタンで 8 倍程度向上する。これは、短波長赤外のスペクトル情報が新たに追加され、導出のための気体吸収に関する情報が改善されたことに起因している。また、解析に使用する温度や圧力情報に誤りがなく、エアロゾルの影響を正確に推定できる場合には、二酸化炭素についても上部対流圏で偏り（バイアス）がなく推定が可能である。さらに、各種の誤差要因の導出濃度誤差への影響量を検討したところ、気温の誤差の影響が大きいことが解った。SOFIS については、二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素、PFC-14、SF₆ などの温室効果気体について、上部対流圏において十分な検出感度を有することが示された。さらに SOFIS の仕様に短波長 (3500-4904 cm⁻¹) 領域の観測データを加えた場合には、これらの温室効果気体が、低高度でより精度良く導出されることが解った。また、FTIR のような高スペクトル分解能を有するセンサーではデータ量が膨大となるため、データ処理に適する波長帯（マイクロウィンドウ）の選定が重要となる。本研究では、エアロゾルの影響を考慮に入れた波長帯の選定手法の改良手法を提案した。さらに、ILAS-II のデータ処理を対象に、一括逆推定手法の高速化に関する検討を行い、過去の観測データに基づいて高速に結果を得るための簡便手法を開発し、ILAS の観測データを用いてその有効性を実証した。

[キーワード] 成層圏、対流圏、温室効果気体、計算アルゴリズム、人工衛星データ、統計手法

1. はじめに

人工衛星を利用したグローバルな大気観測は、オゾン層破壊や地球温暖化など監視・観測にとって不可欠な情報をもたらす。それは、地球規模の現象を理解する上に必要な空間情報を短時間で得ることができるという利点を有するからである。

環境庁（平成 13 年 1 月より環境省）は、これまで極域オゾン層の観測を主目的とした衛星センサー ILAS 及び ILAS-II の開発を行った。さらに、オゾン層破壊の問題に加えて地球温暖化問題をも視野に入れた ILAS-II 後継センサーである SOFIS の開発研究に着手した。これらのセンサーから有用な情報を効率よく抽出するため、温暖化関連物質の高精度導出を目的としたデータ処理手法を開発する必要性が高まっている。

2. 研究目的

オゾン層の監視・研究のために環境庁は衛星センサー ILAS を開発し、観測を行った。その後継機 ILAS-II は、成層圏オゾン層の監視観測を継承するが、その観測波長帯と機器の性能から、上部対流圏中の温暖化関連物質の導出の可能性も指摘されており¹⁾、その手法を開発することが研究課題として重要である。さらに、ILAS-II 後継機の SOFIS では、温室効果ガスの上部対流圏から成層圏にかけての全球分布の測定をミッションの一つにしており、その測定手法並びにデータ処理手法の確立を早急に行う必要がある。

本サブテーマでは、ILAS、ILAS-II、及び SOFIS に共通な観測原理である太陽掩蔽法に基づく大気センサーを対象に、観測データから温暖化関連物質などの大気パラメータを導出する手法を、計算機シミュレーションや統計解析等によって確立することを目的とする。

3. 研究方法

温暖化関連物質の導出において、太陽掩蔽法センサーでは、観測が可能な最も低い高度の大気（下部成層圏及び上部対流圏）における観測精度及び導出精度を向上する必要がある。この空間領域では、太陽光の大気による屈折が比較的大きく、対象とする気体の吸収のほかにエアロゾルなどによる減衰が観測スペクトルに及ぼす影響が大きい。また、圧力が比較的高く、複数の気体分子の吸収線が広がって重なり、甚だしい場合には吸収が強すぎて大気不透明になる（透過率がゼロになる）ため、測定や導出に種々の困難を有している。そこで、下部成層圏及び上部対流圏におけるエアロゾルの影響を考慮に入れて、スペクトル・フィッティングによる非線形最小二乗法を用いた導出手法による温暖化物質の検出精度を検討した。次に、高分解能センサーデータを対象に、エアロゾルの影響を考慮に入れながらデータ処理に適する観測波長（マイクロウィンドウ）のロバストな選定方法について検討した。さらに、今後の高速・高精度データ処理手法開発のための手始めとして、過去の実測データに基づいて入力信号から簡便的に複数ガスの高度分布を推定する簡便手法について検討した。

4. 結果・考察

本研究では、まず ILAS と ILAS-II の装置の仕様に基づいて、エアロゾル等の影響を考慮に入れ

て温暖化関連物質の導出感度の比較検討と影響の大きな誤差要因の検討を行った。次に、SOFISの仕様に短波長（3500-4904 cm^{-1} ）領域の観測データを加えた場合について、温暖化関連物質を含む大気微量成分の導出誤差の検討を行った。はじめに、これらの結果について報告する。

次に、SOFISのような高スペクトル分解能を有するセンサーで、大量の観測データの中から、高速かつ有効な処理が可能となるように、処理に利用する波長帯（マイクロウィンドウ）を選定する手法についての検討結果を示す。

最後に、将来の高速・高精度の一括逆推定法開発のための足がかりとして、透過率データから気体の高度分布を導出する簡便手法についての研究結果について報告する。

（1）温暖化関連物質導出のための感度解析

① ILAS-IIによる温暖化関連物質の検出感度解析

ア. 検討条件

初めに、1996年に打ち上げが成功し、約8ヶ月間の観測を行ったILASと、2000年度に打ち上げが予定されているILAS-IIの、装置の信号特性(S/N)と観測波長範囲に合わせて、オゾン、メタン、一酸化二窒素などの温室効果気体の導出性能の比較を数値シミュレーションによって行った。ILASでは、6~12 μm の赤外波長帯(ch.1)を利用して、オゾン、メタン、一酸化二窒素、二酸化窒素、水蒸気、硝酸、CFC-11などの気体濃度の導出を行っている。ILAS-IIでは、これに加えて、3~5.7 μm の中間赤外波長帯の測定チャンネル(ch.2)が追加されている。この波長帯には、新たに4.7 μm を中心とした二酸化炭素の吸収帯が含まれるほか、オゾンやメタンの吸収帯も存在する。また、ch.1(44素子)もch.2(22素子)も波長分解能はほぼ同等の $\Delta\lambda=0.12\mu\text{m}$ である。オゾン、メタン等について、ch.1のみを利用して導出した場合とch.1及びch.2を利用した場合について、データの量子化の程度を変えて比較した。ch.1のみの場合は10ビットデータ、ch.1及びch.2の場合は12ビットとして処理を行った。これは、前者がILAS、後者がILAS-IIの観測データの処理に相当する。シミュレーションデータは、標準大気状態での観測信号(レベル0データ)を放射伝達理論に基づいて作成した。この信号に想定されるランダムノイズ(シードを変えて25ケースのデータ)を付与し、それらの導出結果を統計処理して誤差を求めた。その際、25のテストケースから気体ごとの高度別導出誤差を、真値からのずれ量の平均(バイアス誤差)と、ずれ量のバラツキ(ランダム誤差)により評価した。これらの値の平方根と平均のルートを総合誤差とした。これらの導出処理には、ILAS-IIの装置の観測条件として、量子化誤差、ランダム誤差(軌道上予測される装置のS/Nを基準)を加えた。さらに、導出処理の際に誤差要因となる、赤外信号のデコンボリューション処理の影響(平滑化パラメータは1/2000とした)、観測信号のドリフト補正、エアロゾル寄与のスペクトルを窓チャンネルからの折れ線近似で推定する際の誤差を誤差要因として考慮に入れた。また、観測信号は、想定する大気層の境界を通る光路として得られることを想定した。なお、気温、気圧及び光路長についてはシミュレーション時に用いた真値を使用し、ガスの気候値は真値を使用した。実際のデータ処理では、エアロゾル補正における気候値のずれの影響は、シミュレーション計算により外部誤差として考慮に入れられる。二酸化炭素については、ch.1には強い吸収帯がないため、ILASとILAS-

IIの比較は行わず、ILAS-IIでの検出感度を検討した。

イ. 結果・考察

上記の条件による検討の結果、ch.1のみを利用した場合よりも、ch.1及びch.2を利用した場合のほうが、高度20kmにおける導出精度が、オゾンで5倍、メタンで8倍程度向上することが解った。

ILAS-IIの場合の、気体別・高度別の導出誤差の推定結果を表1にまとめる。表1には相対誤差の値を示し、値が表示されていない部分については、相対誤差が100%を超えることを意味する。また、導出処理によって得られた統計処理した結果（高度プロファイル）の例として、O₃を図1に、CO₂を図2に示す。

表1 ILAS-IIの仕様に基づく気体の導出誤差 (%)

	10 km	15 km	20 km	30 km	40 km	50 km
H ₂ O	0.9	0.9	1.5	3.8	14.0	43.0
CO ₂	2.2	3.3	5.3	1.5	1.6	1.7
O ₃	14.0	1.0	1.4	1.5	2.6	5.4
N ₂ O	5.3	0.9	1.7	6.1	91.6	-
CO	5.3	9.1	45.9	-	-	-
CH ₄	1.6	1.7	3.0	13.2	31.7	35.5
NO ₂	-	23.7	30.7	15.1	42.6	-
HNO ₃	11.8	2.3	1.2	4.6	-	-
OCS	21.0	22.6	49.8	-	-	-
C ₂ H ₆	-	-	-	-	-	-
ClONO ₂	-	-	44.0	24.2	-	-
CFC-11	1.8	5.3	36.9	-	-	-
CFC-12	4.8	7.5	23.1	-	-	-
N ₂ O ₅	-	-	-	-	-	-

次にILAS-IIによる二酸化炭素についての導出性能について検討を行った。ノイズやデータの量子化はILAS-IIの仕様に合わせた。本検討では、使用する温度、圧力、接線高度に誤差があった場合とそうでない場合との各導出誤差を算出した。

検討の結果によると、ILAS-IIの機器の仕様に基づく性能では、使用する温度や圧力情報に誤差がない場合は、偏り（バイアス）はなく、高度20km付近でやや大きくなるが、1～3%程度の誤差で導出が可能である。しかし、利用する温度情報に標準偏差で3K程度のランダム誤差がある場合には、高度18kmよりも低い高度で誤差が増加し、高度7～9kmで総合誤差が8%程度にまで及んだ。以上の結果より、上部対流圏と下部成層圏における二酸化炭素の濃度を2～3%の誤差で導出するには、利用する気温の情報の精度が高くないとは言える。

なお、図2で、高度10km以下でのCO₂の総合誤差が大きいのは、エアロゾルの影響推定の際の窓チャンネルデータによる折れ線近似などによるバイアス誤差の影響が大きいためである。低高度における温暖化物質の導出精度は、エアロゾルのスペクトルの推定精度に大きく依存する。したがって、温暖化物質の導出にはエアロゾルのスペクトル形状の正確な推定が必要である。

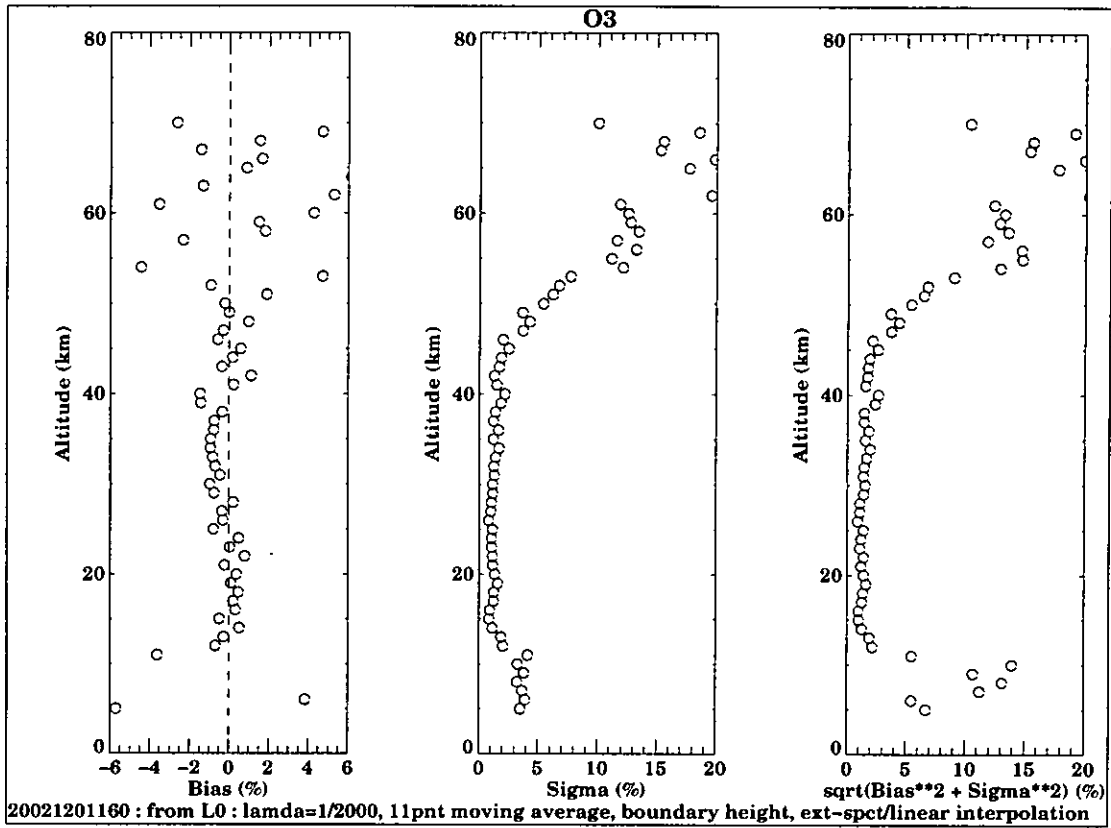


図 1 O₃ の導出誤差 (左) バイアス誤差、(中央) ランダム誤差、(右) 総合誤差

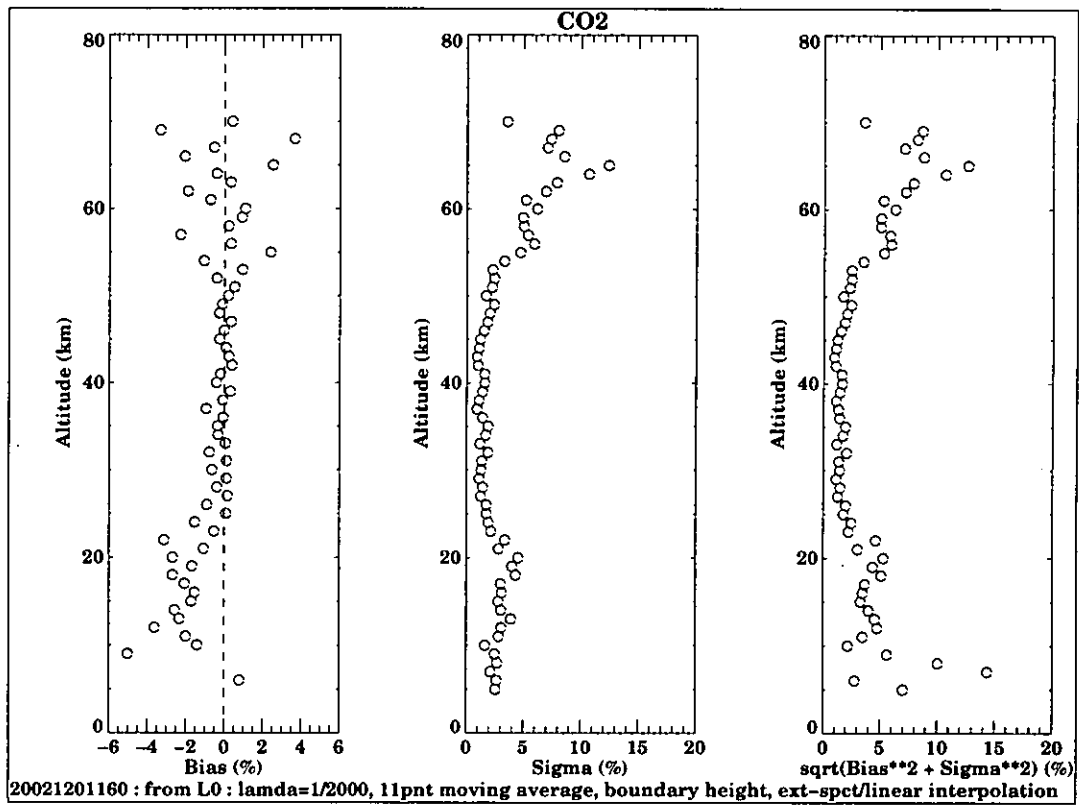


図 2 CO₂ の導出誤差 (左) バイアス誤差、(中央) ランダム誤差、(右) 総合誤差

② SOFISによる温暖化関連物質の検出感度解析

ILAS-II 後継機の SOFIS は、ILAS・ILAS-II と比べて高分解能のフーリエ変換赤外分光計を有する。このことから、ILAS・ILAS-II で観測不可能であった吸収の弱い大気微量成分の導出や、エアロゾルや PSC についてより多くの情報を得ることが可能になると期待されている。また、SOFIS は温暖化関連物質を観測対象とし、対流圏における導出性能も重要視されている。本研究では、SOFIS が観測対象とする大気微量成分の鉛直プロファイルをどの程度の誤差で算出できるかを評価するために、数値シミュレーションによる感度解析を行った^{2,3)}。

ア. 検討条件

ILAS-II の感度解析と同様な方法で観測シミュレーションデータを作成した。ガス種と使用データの一覧を表 2 に示す（肩の*印は導出精度検討対象ガス種を示す）。計算に必要なクロスセクション値は、基本的に HITRAN96 データベース⁴⁾ のラインデータをもとに line-by-line 計算によって作成された補間係数テーブルに対して、気温・気圧の補間を行って使用した。ただし SF₆、PFC、HFC についてはラインパラメータデータベース GEISA⁵⁾ のクロスセクションデータを使用した。大気透過率の計算には、放射伝達計算コード LBLRTM を使用し、さらに上部対流圏と成層圏の状態に近いエアロゾルによる太陽光の散乱効果（スペクトル）も加えて計算を行った。

表 2 SOFIS の感度解析に利用した気体とプロファイルデータの緒元

ガス種	プロファイルデータ
H ₂ O*	ILAS、ILAS-II 用参照大気モデルデータ(気候値 DB)
CO ₂ *	350 ppmv (全高度)
O ₃ *	ILAS、ILAS-II 用参照大気モデルデータ(気候値 DB)
N ₂ O*	ILAS、ILAS-II 用参照大気モデルデータ(気候値 DB)
CO*	AFGL 1976 標準大気モデル(極域冬)
CH ₄ *	ILAS、ILAS-II 用参照大気モデルデータ(気候値 DB)
O ₂	AFGL 1976 標準大気モデル(極域冬)
NO ₂ *	ILAS、ILAS-II 用参照大気モデルデータ(気候値 DB)
HNO ₃ *	ILAS、ILAS-II 用参照大気モデルデータ(気候値 DB)
HCL*	AFGL 1976 標準大気モデル(極域冬)
OCS*	AFGL 1976 標準大気モデル(極域冬)
N ₂	AFGL 1976 標準大気モデル(極域冬)
C ₂ H ₆ *	AFGL 1976 標準大気モデル(極域冬)
COF ₂ *	ILAS、ILAS-II 用参照大気モデルデータ(気候値 DB)
SF ₆ *	7 pptv (全高度、2101 年推定値)
CLONO ₂ *	ILAS、ILAS-II 用参照大気モデルデータ(気候値 DB)
N ₂ O ₅ *	ILAS、ILAS-II 用参照大気モデルデータ(気候値 DB)
CFC-11*	ILAS、ILAS-II 用参照大気モデルデータ(気候値 DB)

CFC-12*	ILAS、ILAS-II 用参照大気モデルデータ(気候値 DB)
PFC-14*	100 pptv (全高度、2101 年推定値)
HFC-32*	1 pptv (全高度、2101 年推定値)
HFC-125*	5 pptv (全高度、2101 年推定値)
HFC-134a*	80 pptv (全高度、2101 年推定値)
HFC-143a*	6 pptv (全高度、2101 年推定値)
HFC-152a*	3 pptv (全高度、2101 年推定値)

SOFIS はフーリエ変換型の分光器であるため、データとしては光の干渉信号（インターフェログラム）が得られる。これを高速フーリエ変換（FFT）して透過率スペクトルが得られる。これらの操作も数値シミュレーションにおいて実施し、有限領域での変換誤差を考慮に入れた。なお、ノイズを軽減するための透過率スペクトル算出時のアポダイズは特に施さなかった。

フーリエ変換型分光器のスペクトル分解能は、装置の可動鏡の走査距離を長くすれば高い分解能が得られる。しかし、太陽掩蔽法センサーの場合は、衛星の移動に伴って観測高度が変化することを考慮してある程度高速（3 Hz）の走査（スキャン）を行う必要があり、SOFIS ではスペクトル分解能が約 0.2cm^{-1} に設定されている。ここでは、そのスペクトル分解能と、走査中の観測高度の変化影響を考慮に入れてシミュレーションを行った。

シミュレーション時に考慮した誤差要因は、検出器ノイズ、走査のジッターなどに起因するランダム誤差、量子化誤差（AD 変換器は 16 ビット）、エアロゾルの評価誤差にともなう誤差である。エアロゾルの評価誤差にともなう誤差は、次のようにして考慮に入れた。シミュレーション時に、重量パーセント濃度 75% の硫酸エアロゾルの Mie 計算による消散係数スペクトル（図 3）を計算に繰り込み、導出時に、この消散係数スペクトルの評価誤差がガス濃度の算出に与える影響をできるだけ正しく評価するために、本検討では、消散係数スペクトルを、 800cm^{-1} から 1800cm^{-1} まで 100cm^{-1} 刻みでの波数点における消散係数を直線で結んだ折れ線で表現し、これらの波数点における消散係数を未知量に加えてガス濃度と共に同時算出した。

検討は SOFIS の仕様のバンド 1（ $780\sim 1723\text{cm}^{-1}$ （ 0.001cm^{-1} 刻み））に、さらに短波長（ $3500\sim 4904\text{cm}^{-1}$ （ 0.002cm^{-1} 刻み））の観測データを加えて行った。これは、短波長のデータが、より低高度での推定精度を高めると考えられるためである。SOFIS のスペクトル分解能での大気透過率スペクトルの例として、バンド 1 をカバーする範囲の高度 5km における透過率スペクトルを図 4 に、高度 15km における透過率スペクトルとを図 5 に示す。

イ. 結果・考察

導出結果についての統計的な解析結果を表 3 に示す。低高度でバイアス誤差が大きくなる傾向が見られるが、これはエアロゾル消散係数スペクトルを折れ線で近似したことによる誤差の影響と見られ、消散係数スペクトルの推定方法を変更することにより改善すると思われる。

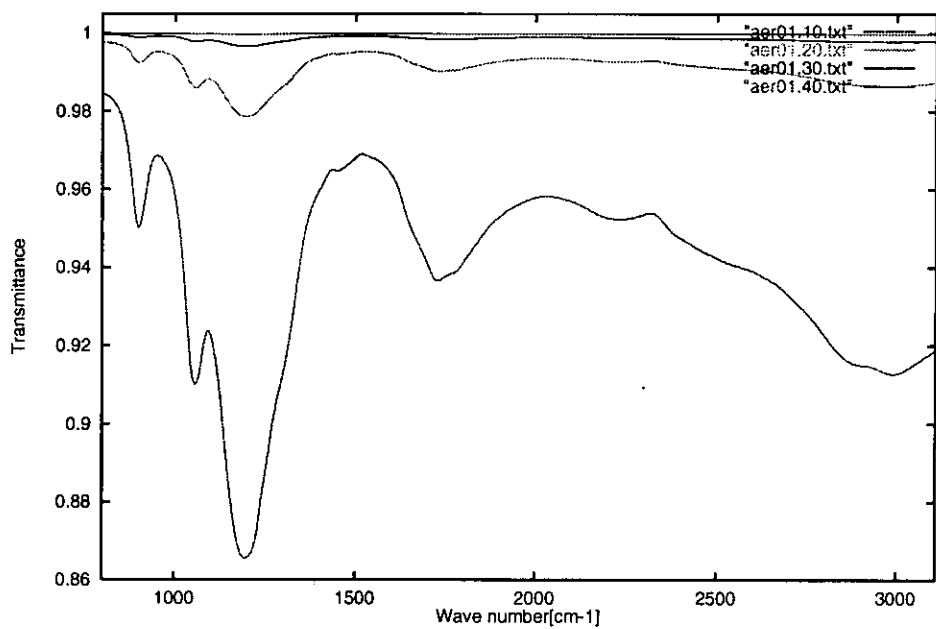


図 3 検討したスペクトル範囲での硫酸エアロゾルの透過率スペクトル例

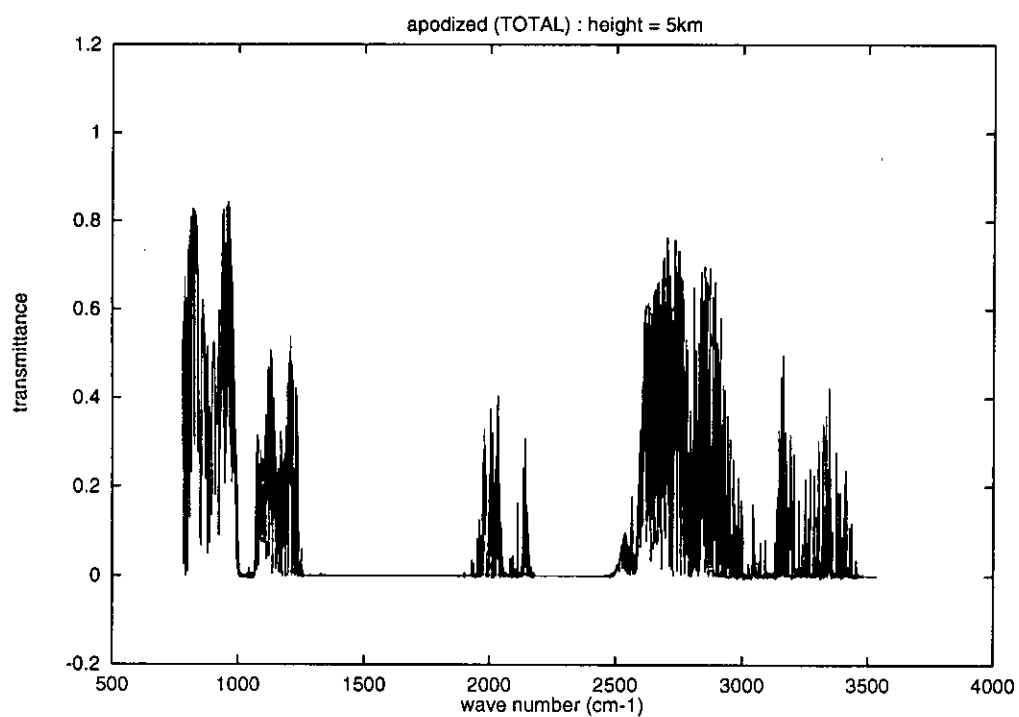


図 4 高度 5km における透過率スペクトル

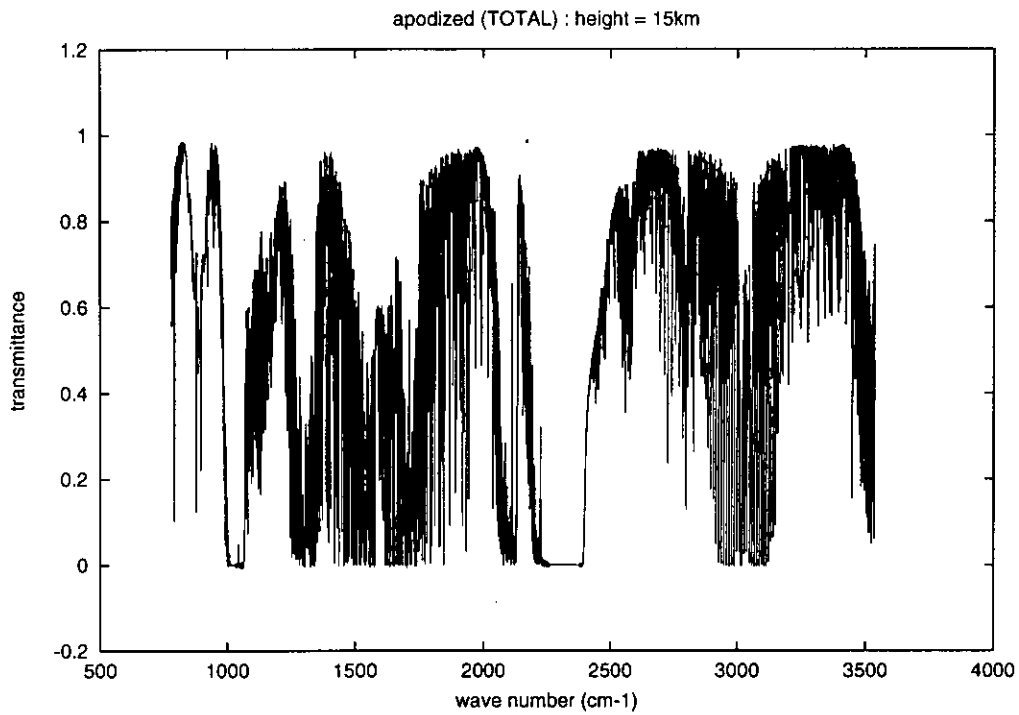


図 5 高度 15km における透過率スペクトル

表 3 SOFIS のバンド 1 に短波長データを加えた場合のリトリバル誤差[%]

	H ₂ O	CO ₂	O ₃	N ₂ O	CO	CH ₄	NO ₂	HNO ₃	SF ₆	ClONO ₂	N ₂ O ₅	CFC11	CFC12	PFC14
7 km	1.85	0.14	0.68	0.32	1.05	0.40	-	0.77	1.41	18.6	-	0.30	0.31	16.6
	-0.27	0.33	4.41	0.73	0.16	0.03	-	5.48	-4.66	33.5	-	-1.08	1.73	-26.6
10 km	0.10	0.15	1.12	0.30	1.16	0.15	15.9	0.89	2.45	38.4	42.4	0.41	0.47	3.11
	-0.04	0.14	3.01	0.47	-0.40	-0.04	3.51	4.07	-5.30	36.9	15.3	-0.86	1.03	0.34
20 km	0.18	0.44	0.43	0.48	26.3	0.29	3.32	0.29	26.4	5.75	8.89	9.82	3.63	3.37
	-0.07	-0.03	0.18	0.16	-3.08	-0.01	0.35	0.15	-6.0	3.05	-3.53	-0.51	0.19	-0.76
30 km	0.35	0.46	0.49	2.41	62.0	0.88	4.09	0.94	-	12.0	2.43	-	-	5.81
	-0.07	-0.07	0.17	0.99	-24.8	0.42	-0.85	0.37	-	2.0	-0.43	-	-	0.18
40 km	1.83	0.94	1.09	28.8	-	4.69	7.04	90.8	-	-	15.3	-	-	41.0
	-0.07	-0.06	-0.05	5.2	-	1.29	-0.82	-14.3	-	-	-1.7	-	-	9.2
50 km	4.5	3.5	4.5	-	-	9	20	-	-	-	-	-	-	-
	e < 2	e < 2	e < 3	-	-	e < 3	e < 3	-	-	-	-	-	-	-
60 km	4.5	5	13	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-
	e < 2	e < 2	e < 3	-	-	e < 3	-	-	-	-	-	-	-	-

(上段 : ランダム誤差、下段 : バイアス誤差)

(波数領域 : バンド 1 [780-1723 cm⁻¹]及び短波長領域[3500-4904 cm⁻¹])

表 3 の結果から明らかなように、H₂O から HNO₃ までのトレースガスや CFC11, CFC12 については、NO₂ を除いて、高度 7 km と 10 km では、ランダム誤差が 1 % 程度以下の精度で検出できることがわかる。SF₆ については高度 7 km と 10 km では数%の誤差 (ランダム誤差とバイアス

誤差)で導出できるが、PFC14については高度7kmの導出誤差が大きいことがわかる。

また、表3のランダム誤差(偶然誤差成分)とバイアス誤差(系統誤差成分)との比較を行うと、エアロゾルの消散係数スペクトルの評価誤差のために低高度において系統誤差が大きくなる傾向が認められる。このバイアス誤差は、導出手法を改善することによって小さくすることが可能である。

本シミュレーションの結果は、接線高度の決定誤差や、気温・気圧における誤差を含んでいない。つまり、表3に示されている数値は、理論上の最高性能に相当するものと解釈することができる。前節のILAS-IIの仕様における検討では、気温の誤差が気体濃度導出の際の大きな誤差要因の一つであることが示された。SOFISにおいても同様なことがいえると考えられ、今後のより精密な検討が必要である。

なお、図7と図8とを比較すると、高度5kmのような低高度で圧力の高い条件では、吸収スペクトルが飽和してしまう部分が多く、データ処理に利用できるスペクトル範囲は狭いことがわかる。次節では、処理に適するスペクトル領域についての選定手法についての検討結果を示す。

(2) 高スペクトル分解能センサーのデータ処理に適するマイクロウィンドウの検討

FTIRなどの高スペクトル分解能のセンサーでは、光学分解能が良い反面、データ量が膨大となるため、効率の良い導出処理を行うには、使用する波長帯を選定して処理を行うことが有効とされている。これを「マイクロウィンドウ」の選定という。その選定手法には、経験に基づく方法や、数理統計手法に基づいて固有値の高いスペクトル領域から順に選定する方法や、導出誤差が増大しない範囲で選定範囲を狭める方法などがこれまでに提案されている。本研究では、統計手法に基づくRodgersの手法^{6,7)}をSOFISのスペクトル分解能の場合に適用し、上部対流圏と下部成層圏で問題となるエアロゾルの影響を考慮して、その改良手法を検討した。

① Rodgersの方法

濃度を推定したい気体が n 種類あり、 $x=(x_1, \dots, x_n)'$ をそれらの気体の濃度とする(右肩の'は転置を表す)。観測値は適当な波数帯域の透過率データで、個数が m で $y=(y_1, \dots, y_m)'$ とする。 x と y の関係は、 $y=f(x)$ で表され、導出処理は、観測値 y から未知の量 x を推定する操作である。高分解能データでは、一般に m は大きな数である。そのため、観測値のサブセット $\{y_{i_1}, \dots, y_{i_h}\}$ 、 $1 \leq i_1, \dots, i_h \leq m$ 、 $h \ll m$ のみから精度をできるだけ落とさずに x を推定したい。このサブセットあるいはその添字 $\{i_1, \dots, i_h\}$ のことをマイクロウィンドウと呼ぶ。与えられた h について、 x の情報を多く含むようにマイクロウィンドウ $\{i_1, \dots, i_h\}$ を選定することが目的である。

Rodgersの方法では、「情報量(information content)」すなわち

$$I(\{i_1, \dots, i_h\}) = -\frac{1}{2} \log |S_{\{i_1, \dots, i_h\}}| \quad (1)$$

という量を考え、 $\{y_{i_1}, \dots, y_{i_h}\}$ が与えられたときの x の予測誤差すなわち共分散行列 $S_{\{i_1, \dots, i_h\}}$ が最小になるように、すなわち I を最大にするという基準で $\{i_1, \dots, i_h\}$ を探索する。

$S_{\{i_1, \dots, i_h\}}$ の計算方法は、以下の通りである。 $y=f(x)$ を $y_0=f(x_0)$ のまわりで局所線型近似を行って次のような確率モデルを考える。

$$y - y_0 \approx K(x - x_0) + \varepsilon, \quad \text{ただしヤコビ行列 } K = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_0} \quad (2)$$

いろいろなパターンをとり得る気体濃度の高度分布を確率変数とみなすことにより、 x も確率ベクトルと考えることができる。その分布（事前分布）を $x \sim N(x_0, S_0)$ と仮定する。

これにより、 x も y も確率変数となり、 n 次元ベクトル x と m 次元ベクトル y の同時分布である $n+m$ 次元正規分布

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \sim N \left(\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} S_0 & S_0 K' \\ K S_0 & K S_0 K' + \sigma^2 I_m \end{pmatrix} \right) \quad (3)$$

を仮定する。

マイクロウィンドウとして $\{1, 2, \dots, h\}$ を選択した場合の information content の計算は、 $\{1, 2, \dots, h-1\}$ が選択された場合のそれと比較して、逐次式として以下のように表される。（簡単のために $S_{\{1, \dots, h\}}$ を S_h と書くことにする）。

$$\begin{pmatrix} x \\ y_h \end{pmatrix}_{y_1, \dots, y_{h-1}} \sim N \left(\begin{pmatrix} x_{h-1} \\ k_h x_{h-1} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} S_{h-1} & S_{h-1} k_h \\ k_h S_{h-1} & k_h S_{h-1} k_h + \sigma^2 \end{pmatrix} \right) \quad (4)$$

ただし、

$$x_h = x_{h-1} + S_{h-1} k_h (y_h - k_h x_{h-1}) / (k_h S_{h-1} k_h + \sigma^2) \quad (5)$$

$$S_h = S_{h-1} - S_{h-1} k_h k_h S_{h-1} / (k_h S_{h-1} k_h + \sigma^2) \quad (6)$$

である。

② Rodgers の方法による数値実験

放射伝達計算によるヤコビ行列 K に基づいて、Rodgers の方法の適用を行った。計算条件は、接線高度：10, 9, 8, 7, 6, 5 km（6通り）、波数範囲は $4600 \text{ cm}^{-1} \sim 4800 \text{ cm}^{-1}$ を SOFIS の 0.2 cm^{-1} の分解能で測定したとする。すなわち、データ数は $m=1001$ である。考慮する気体は H_2O , CO_2 , N_2O , CH_4 の $n=4$ 通り、測定誤差は装置の $S/N=300$ から $\sigma^2=1/300^2$ とした。また、 H_2O , CO_2 , N_2O , CH_4 の基準プロファイ r からの変動幅が各 80%, 5%, 20%, 10% と仮定して、 x の事前誤差分散行列として、事前共分散を

$$S_0 = \begin{pmatrix} 0.8^2 & & & 0 \\ & 0.05^2 & & \\ & & 0.2^2 & \\ 0 & & & 0.1^2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

とした。

逐次的 Rodgers 法により選定されたマイクロウィンドウの結果を表 4 に示す。

表 4 選択されたマイクロウィンドウ番号 (Rodgers 法)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
高度 10km	: 112	615	77	996	602	713	135	978	610	500	73	896	716	15	875
高度 9km	: 112	615	77	996	602	713	135	841	716	500	73	875	610	56	992
高度 8km	: 602	713	77	996	615	824	135	841	716	112	73	990	730	500	875
高度 7km	: 824	713	135	996	615	77	242	990	716	602	16	976	740	136	968
高度 6km	: 111	713	16	959	740	136	990	792	615	135	824	976	727	13	998
高度 5km	: 501	740	16	959	713	13	533	998	727	136	988	211	615	990	411

表 4 の数値計算結果 から、以下のことがわかる。

(ア) (とくに最初の段階で選ばれるマイクロウィンドウは) プロファイルのピークをとらえる波数から順に選択されている。

(イ) 高度 10km と 9km の選択されたマイクロウィンドウはほぼ同じである。

次に、CO₂ を例に、高度 10km での透過率の変化量スペクトルと選択されたデータの関係を図 9 に、高度 5km の場合を図 10 に示す。

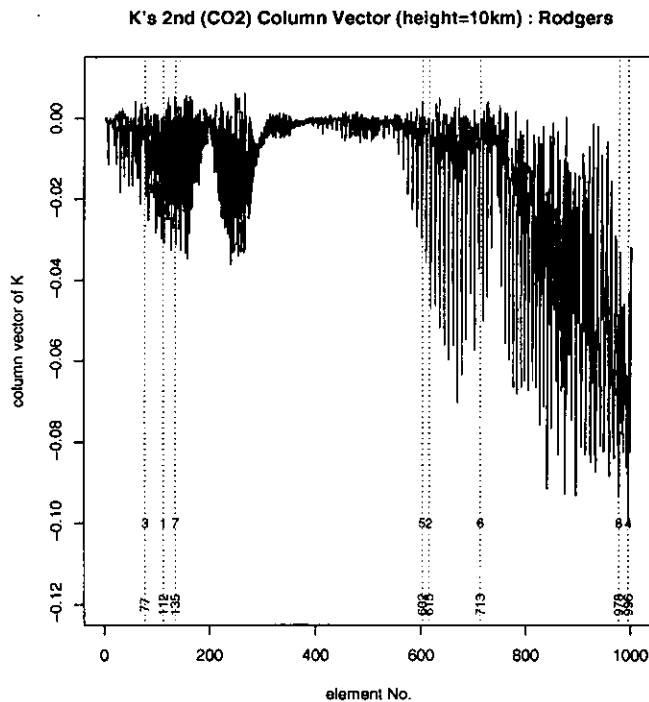


図 9 透過率の変化量スペクトルと Rodgers の方法によるマイクロウィンドウ選択結果 (高度 10km, CO₂)

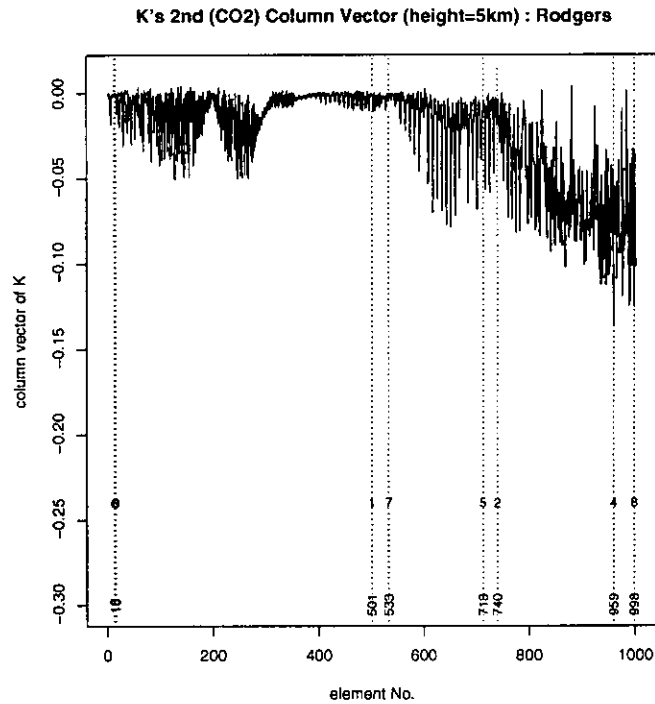


図 10 透過率の変化量スペクトルと Rodgers の方法による
マイクロウィンドウ選択結果 (高度 5km, CO₂)

③ Rodgers の方法の改良

前節で説明した Rodgers の方法は想定するモデルが正しいときは効率的な解法を与える。しかしながら現実と想定する forward モデル $y=f(x)$ との間には食い違いがあると考えるが自然である。食い違いの要因で無視できないもののひとつにエアロゾルの存在が挙げられる。ここでは、エアロゾルの存在する場合においても適用可能であるように Rodgers 法の改良を提案する。

エアロゾルの影響を $y=c+f(x)$ のようにモデル化する。ここで $c=(c_1, \dots, c_m)'$ はランダムな変数で、 c_i はオフセット的に一定値をとるか、もしくはゆるやかな変動しかとらないものとする。

局所線形化の後に c 項の低次の多項式 (q 次多項式, $q=0,1,2$) で近似する。以下では簡単のため (議論の一般性を失うことなく) $x_0=0, y_0=0$ 等とする。近似モデル (ランダム係数線形モデル) は以下のようになる。

$$\begin{aligned}
 y_i &= (z_0 + z_1 i + z_2 i^2 + L + z_q i^q) + k_i x + \varepsilon_i \\
 &= l_i z + k_i x + \varepsilon_i, \quad i=1, \dots, m,
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

ただし、 $l^i = (1, i, i^2, \dots, i^q)'$ で、 z_0, z_1, \dots, z_q はエアロゾルスペクトルの確率挙動を定めるランダム変数で、 $z = (z_0, z_1, \dots, z_q)'$ である。

これをまとめて行列表示で

$$y = Lz + Kx + \varepsilon = (L, K) \begin{pmatrix} z \\ x \end{pmatrix} + \varepsilon = \tilde{K} \tilde{x} + \varepsilon
 \tag{9}$$

と書くことにする。ただし、

$$L = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & L & 1 \\ 1 & 2 & 2^2 & L & 2^q \\ M & M & M & & M \\ 1 & n & n^2 & L & n^q \end{pmatrix} \quad (10)$$

である。(9)式は、Rodgers の方法で扱ったモデル(2)式と同じ形式をしている。 $\tilde{x} = (z', x')$ に適切な事前分布を想定すれば、基本的には Rodgers と同じ方法で $S_h = \text{var}[x | y_1, \dots, y_h]$ が計算できる。

ここでは、 $\tilde{x} = (z', x')$ の事前分布として、平均が 0、分散行列の逆行列が

$$\text{var} \begin{bmatrix} z \\ x \end{bmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & S_0^{-1} \end{pmatrix} \quad (11)$$

である偏りのある正規分布を考える。Rodgers の逐次法における分散行列の更新規則は、

$$S_h = S_{h-1} - S_{h-1} k_h k_h' S_{h-1} / (k_h' S_{h-1} k_h + \sigma^2) \quad (6)$$

すなわち、

$$S_h^{-1} = S_{h-1}^{-1} + \frac{1}{\sigma^2} k_h k_h' \quad (6a)$$

であった。これに対応する逐次式は、

$$\tilde{S}_h^{-1} = \tilde{S}_{h-1}^{-1} + \frac{1}{\sigma^2} \begin{pmatrix} l_h \\ k_h \end{pmatrix} (l_h, k_h) \quad (12)$$

である。 $K_h' = (k_1, \dots, k_h)$, $L_h' = (l_1, \dots, l_h)$ とおけば、

$$\tilde{S}_h^{-1} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & S_0^{-1} \end{pmatrix} + \frac{1}{\sigma^2} \begin{pmatrix} L_h' \\ K_h' \end{pmatrix} (L_h, K_h) \quad (13)$$

となり、 \tilde{S}_h の (2, 2) ブロック S_h は、

$$\begin{aligned} S_h &= \{ (S_0^{-1} + \sigma^{-2} K_h' K_h) - \sigma^{-2} K_h' L_h (L_h' L_h)^{-1} L_h' K_h \}^{-1} \\ &= \{ S_0^{-1} + \sigma^{-2} K_h' (I - L_h (L_h' L_h)^{-1} L_h') K_h \}^{-1} \end{aligned} \quad (14)$$

で、この式に基づいて information content を定義し、計算することができる。 $i=1, \dots, q$ の場合は、

$L_i' L_i$ は非正則であるが、 $(L_i' L_i)^{-1}$ を一般逆行列に置き換えることにより定義可能である。 $i \geq q+1$

では、

$$\tilde{S}_i = \tilde{S}_{i-1} - \tilde{S}_{i-1} \tilde{k}_i \tilde{k}_i' \tilde{S}_{i-1} / (\tilde{k}_i' \tilde{S}_{i-1} \tilde{k}_i + \sigma^2) \quad (15)$$

の (2, 2) ブロックを計算しても同じことである。

以上で提案した方式は、 c の存在 (エアロゾルの影響) の有無にかかわらず適用可能であるという意味でロバスト (頑健) な手法である。

④ 改良手法による計算結果

提案する方法によるマイクロウィンドウの選択結果を表 5 に示す。

表 5 Rodgers の手法と改良手法により選択されたマイクロウィンドウの比較

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
高度 10km															
Rodgers	112	615	77	996	602	713	135	978	610	500	73	896	716	15	875
RCM q=0	112	615	55	741	77	841	602	700	135	114	996	610	876	500	713
RCM q=1	112	615	77	160	602	53	635	135	610	621	114	56	73	55	669
RCM q=2	112	615	77	996	880	543	53	669	602	610	955	135	114	841	727
高度 9km															
Rodgers	112	615	77	996	602	713	135	841	716	500	73	875	610	56	992
RCM q=0	112	114	615	77	996	602	543	713	135	841	549	716	500	73	875
RCM q=1	112	615	55	741	77	996	602	713	114	135	500	929	610	841	51
RCM q=2	112	615	77	157	602	33	635	135	610	549	159	669	590	621	56
高度 8km															
Rodgers	602	713	77	996	615	824	135	841	716	112	73	990	730	500	875
RCM q=0	602	535	77	700	996	549	824	135	713	841	543	112	615	73	990
RCM q=1	602	713	535	741	669	135	63	112	996	615	824	77	549	610	114
RCM q=2	602	713	77	535	741	57	669	87	135	610	112	114	543	652	615
高度 7km															
Rodgers	824	713	135	996	615	77	242	990	716	602	16	976	740	136	968
RCM q=0	824	535	77	996	713	549	135	615	602	990	543	242	716	16	976
RCM q=1	824	713	896	549	135	57	615	996	155	77	242	543	580	880	780
RCM q=2	824	713	135	242	635	63	656	841	740	780	77	56	33	727	602
高度 6km															
Rodgers	111	713	16	959	740	136	990	792	615	135	824	976	727	13	998
RCM q=0	111	232	713	16	959	456	740	990	136	792	549	615	824	135	325
RCM q=1	111	713	3	990	136	824	983	615	135	959	25	580	792	780	200
RCM q=2	111	713	16	824	635	3	959	780	740	200	267	792	852	727	334
高度 5km															
Rodgers	501	740	16	959	713	13	533	998	727	136	988	211	615	990	411
RCM q=0	501	983	740	16	959	713	13	211	998	456	727	136	533	988	325
RCM q=1	501	740	197	990	146	983	136	580	533	25	959	16	615	55	792
RCM q=2	501	740	16	375	868	55	983	31	334	713	959	792	267	136	727

(※RCM は提案する改良手法を示す)。

以上の結果より、概して $q=0$ の場合（すなわちエアロゾルの効果が定数で近似できる場合）は Rodgers の方法と提案した方法がほぼ同じ結果を与えるが、 $q=1$ または $q=2$ では提案した方法は従来法とは異なるマイクロウィンドウを選択しているといえる。

CO_2 を例に、高度 10km での透過率の変化量スペクトルと改良手法によって選択されたデータの関係を図 11 に、高度 5km の場合を図 12 に示す。

今回の研究では方式の提案が主目的であり、その優劣についての評価は十分とは言えない。提案した方法ではエアロゾルの効果（スペクトル形状）を低次多項式で近似した。今後は、その多項式が緩やかに変動するものであることを統計モデルの上で表現する必要がある。それには、ベイズ法や罰則法が有望であると考えられる。また、エアロゾルの効果を低次多項式で表すのではなく、スプラインなどの適用も今後検討したい。

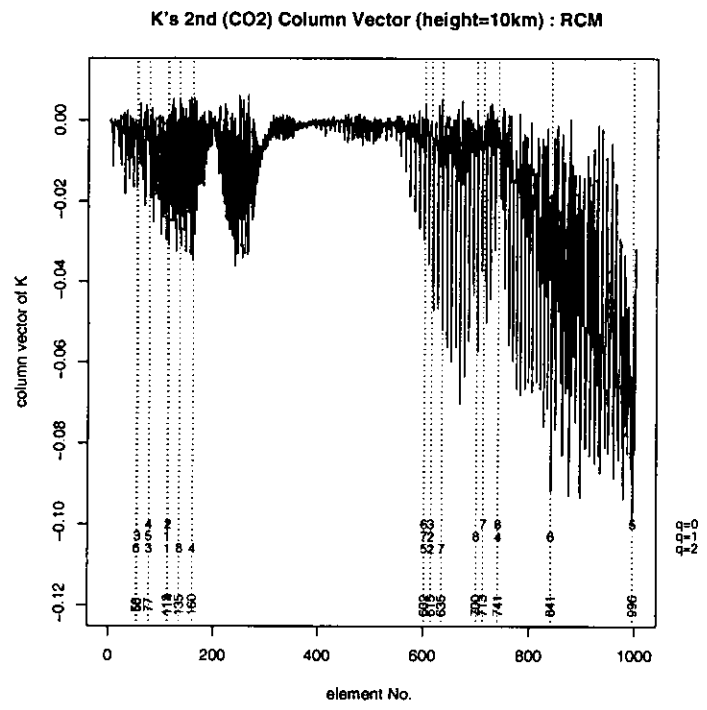


図 11 透過率の変化量スペクトルと改良手法によるマイクロウィンドウ選択結果（高度 10km, CO_2 ）

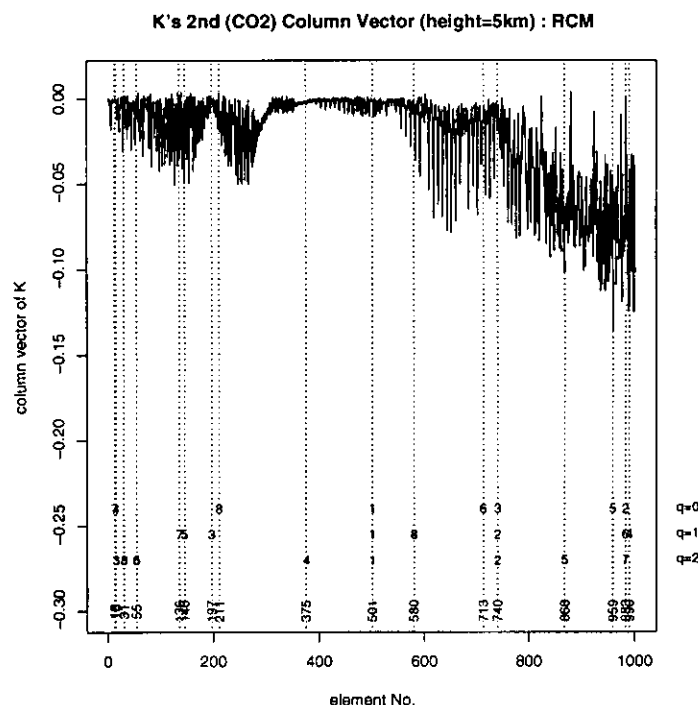


図 12 透過率の変化量スペクトルと改良手法による
マイクロウィンドウ選択結果 (高度 5km, CO₂)

(3) 重回帰モデルによる一括逆推定手法の高速化に関する検討

太陽掩蔽法センサの観測データ（大気分光透過率データ）から複数気体の高度分布を導出するには、精密な放射伝達計算に基づくスペクトル・フィッティング法が利用される。スペクトル・フィッティング法にもいくつかの方法があり、全高度の全未知パラメータを同時に推定する一括逆推定法が、誤差伝播の観点からも理想であるが、計算機システムと処理速度の制約から実現するのは難しく、大気層ごとに順次未知パラメータの値を求める手法や、先見情報を用いて拘束条件を付して導出する手法などが用いられている。

観測される透過率パターンには類似性が高いものが多く、導出される気体成分の高度分布もある範囲内で変化している。これに着目して、すでに精密手法によって導出された結果とその観測データとの関連性を重回帰分析の手法を用いてモデル化し、観測透過率データのセットから、迅速に主要気体の高度分布を導出する手法を開発した。はじめに手法の概念と、数値シミュレーションに基づく検討結果を示す。次に ILAS の観測データに本手法を適用した結果を示す。

気体濃度の鉛直分布は複雑な非線形プロセスを経て Limb 透過率として観測されるが、気体濃度の鉛直分布の典型的な値（気候値）と実際の値との差と、それらの鉛直分布に対応する Limb 方向の大気の透過率の間の差に着目すると、実際の気体濃度の気候値との差の鉛直分布と、気候値に対応する透過率と実測透過率との差は、十分に線形関係で表現されると考えられる。本手法では、これらの線形関係にある両者を重回帰モデルで対応付ける。なお、この対応付けにおいて説明変数の次元が膨大になることが予想されるため、気体濃度の鉛直分布と Limb 透過率との相関構造に着目して、主成分展開によってこの次元を下げ、計算を容易にしている。

図 13 は本手法における入力濃度パターン（気体の鉛直分布）と出力透過率パターン（Limb 透過率）との対応付けを模式的に図示したものである。ILAS-II で観測対象としている気体のうち、 H_2O 、 O_3 、 N_2O 、 CH_4 、 NO_2 、 HNO_3 の 6 種類を本検討の対象とした。図 13 における入力パターンは、横軸がガスの種類、縦軸は高度、さらに画素の濃淡がその高度でのガスの濃度を表す。同様に、出力パターンにおいては、横軸がチャンネル番号、縦軸が高度、さらに画素の濃淡がそこでの Limb 透過率を表す。白いものほど透過率が高い。気候値との差分では、正の差分が白で、負の差分が黒で表されている。変化率（透過率の気候値との差分を、気候値の透過率の値で除した値）についても正の場合は白く、負の場合は黒く表されている。このように、本手法では入力パターンと出力パターンとを直接対応付けて、出力パターンを与えたときにその対応関係から入力パターンを得るものである。すなわち、濃度分布偏差パターンを透過率分布偏差パターンの関数として表すわけである。この関数としては、可能性のある濃度分布パターンを多数与えて得られる透過率パターンを直交展開した際の基底関数を用いる。濃度分布パターンも透過率パターンも全くランダムな値をとるわけではなく、要素間で何らかの相関をもつと考えられるが、直交展開の際の基底関数を使うことによって、こうした相関を考慮せずにパターン間の対応付けが可能となる。

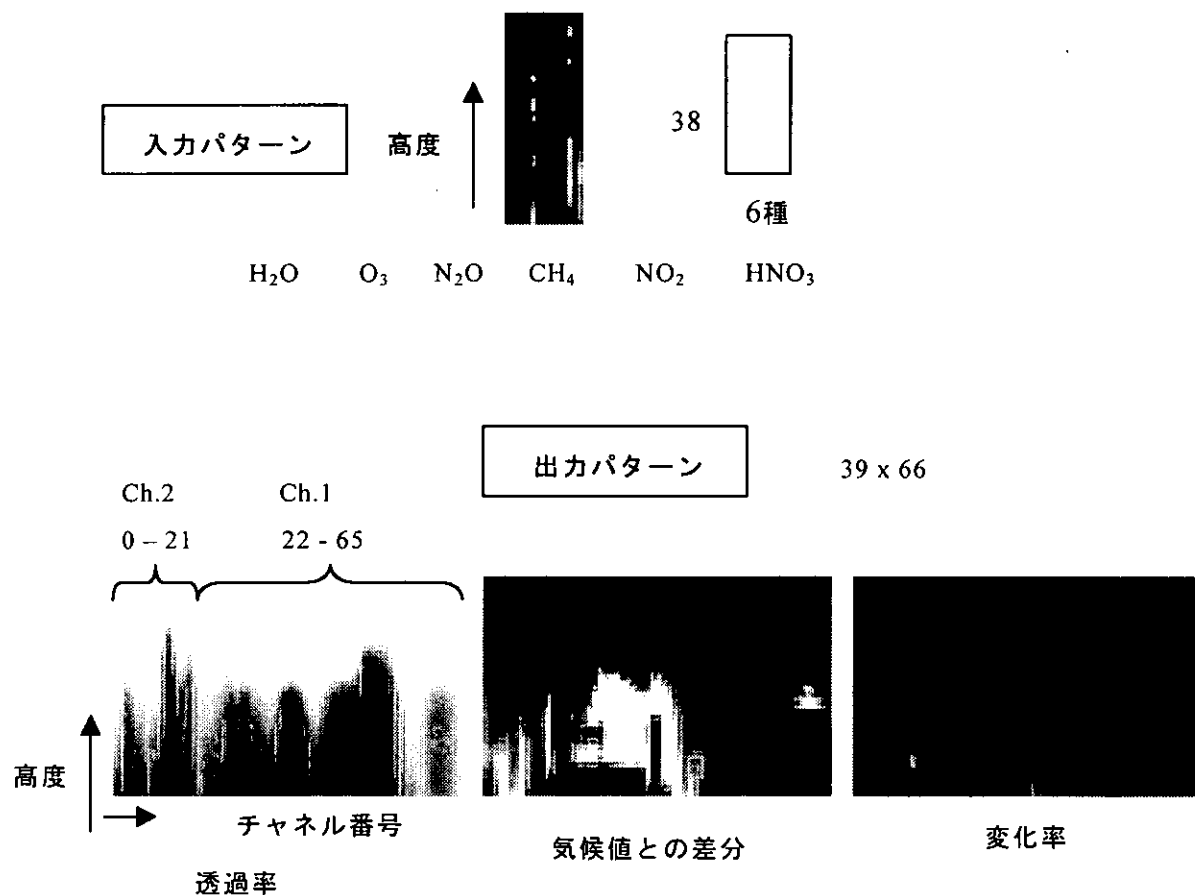
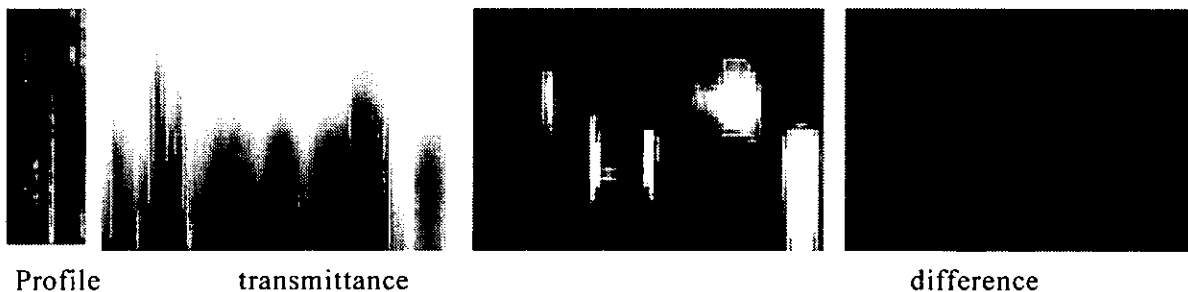


図 13 入力濃度パターンと出力透過率パターンの対応づけ

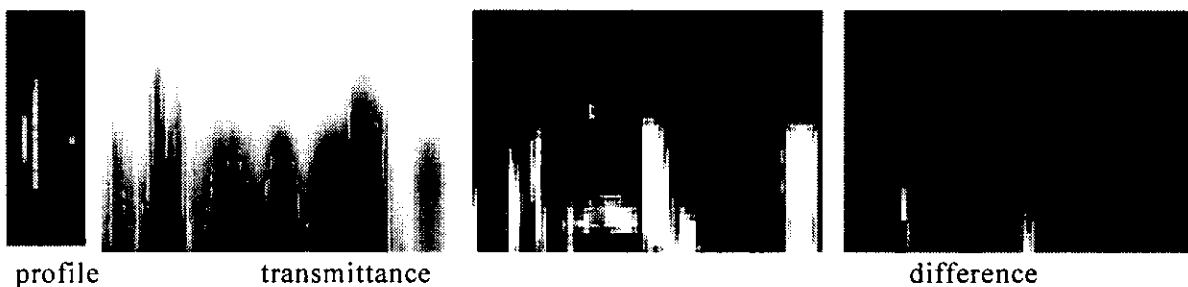
このようなデータセットを 42,300 組計算し、それに基づいて観測透過率データによって気体濃度の鉛直分布が記述されるかどうかを確認した。

MODTRAN による透過率データのシミュレーション結果の例を図 14 に示す。図 14 で n の値は、43,300 組のデータの中から適当に抽出した 3 つのデータセットの番号を示している。

$n = 500$



$n = 1500$



$n = 3500$

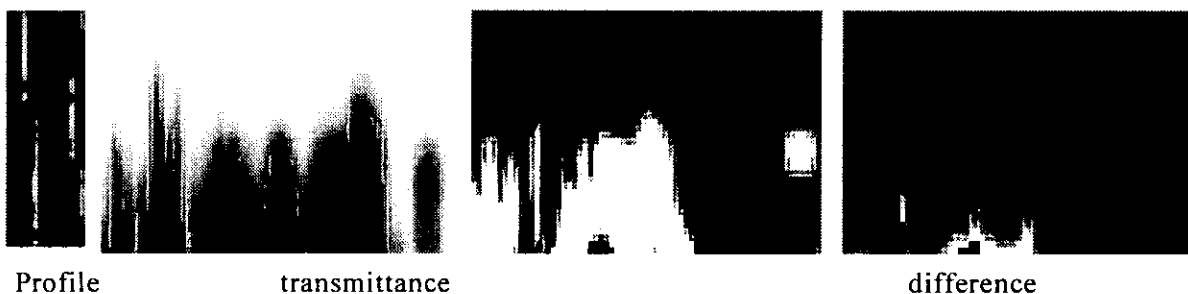


図 14 与えた気体濃度プロファイルとシミュレーション計算による透過率データ (3 例)

発生させた乱数による気体濃度プロファイルから計算された透過率データに対して、分散共分散行列を作成し、固有値を求めた。表 6 は、累積寄与率 R を基にして全体の 99% もしくは 99.9% を説明するのに必要な固有値の数を表している。透過率、透過率の差、透過率の比とも、かなりの圧縮率を達成していることがわかる。気体濃度プロファイルについては、乱数を用いて作成したため、圧縮率はそれほど高くない。これらの結果より、本研究では、気体濃度プロファイルは圧縮せずに、圧縮した透過率データから推定対象のプロファイルを説明することとした。

表 6 分散共分散行列に基づく推定精度と必要な固有値の数

Matrix	Size	Number of Eigen Vectors	
		R > 0.99	R > 0.999
Gas profile	228 x 228	99	138
Transmittance	2574 x 2574	17	43
Difference	2574 x 2574	17	43
Rate	2574 x 2574	12	32

本手法では、固有値に基づいて重回帰モデルの次数を決定している。図 15 に、予測式である重回帰モデルの次数（項数）と推定精度との関係を示す。ここで、項数には0次の項を加えて考えているため、項数=44は表6における項数43（累積寄与率0.999）に相当する。

図15では、例えばNO₂は低高度と高高度において誤差が大きくなっているが、これはもともとこれらの高度でガス濃度が極度に低く導出されにくいことに起因している。図15の3つの結果を比べると、累積寄与率換算で0.999では不十分であり、より多くの項を用いることによってより高い精度での予測が可能となることがわかる。本研究では、観測透過率データに雑音成分を加えなかったが、雑音成分の大きさに依存して最適な項数が定まるものと考えられる。なお、信号と無相関の雑音であれば固有ベクトルで展開する際に雑音成分を効率よく分離できる可能性がある。

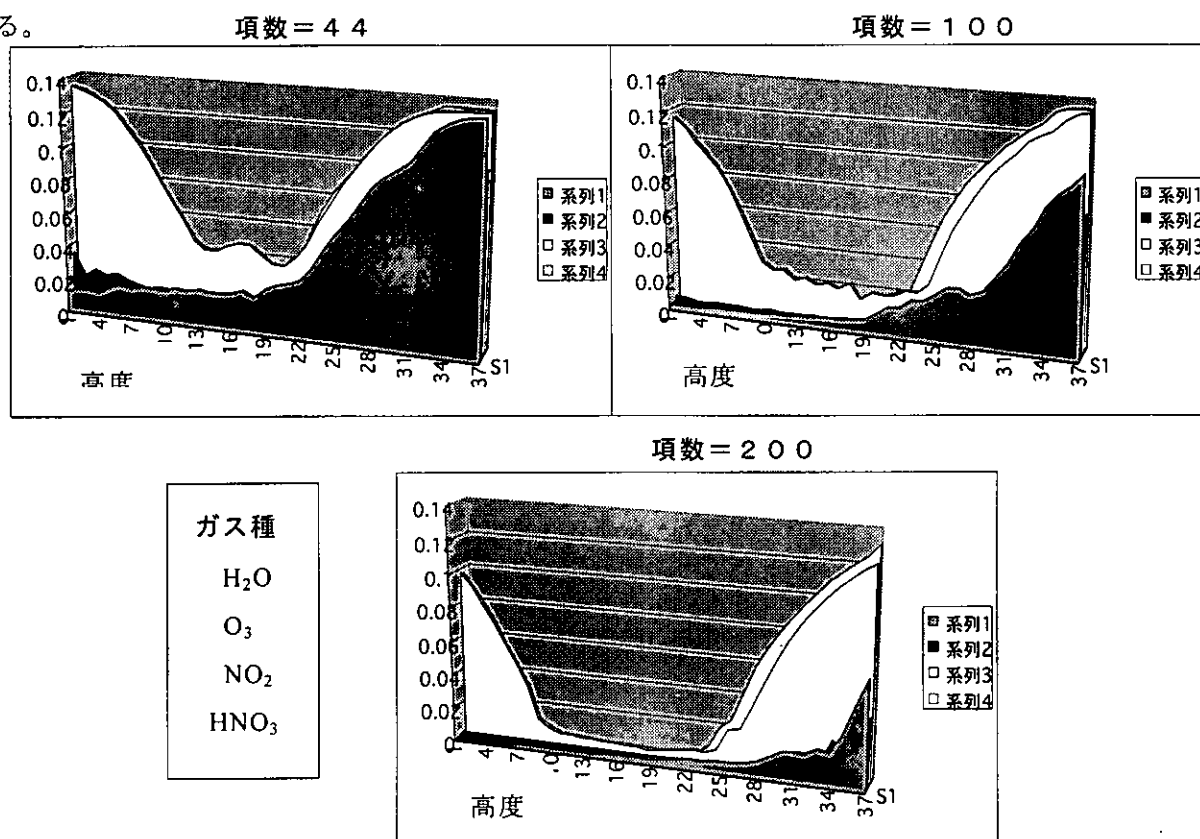


図 15 予測式の項数と気体別・高度別の推定誤差（縦軸）との関係

次に、予測したプロファイルの誤差のヒストグラムを求め、誤差に偏りなどがないかどうかを確認した。その結果、本手法による予測値の誤差には偏りは存在しないものと判断できた。

③ ILAS の観測データへの適用

本手法を、ILAS の観測したデータに適用し、その有効性を確認した。ILAS が約 8 ヶ月の運用期間中に取得した全データの 5800 シーンのうち、高度範囲 13km~50km までのデータが揃っている 3474 シーンを利用してテストを行った。このうち、極域成層圏雲 (PSC) を観測してそれが影響が気体の導出結果に影響していると思われる 34 シーン (北半球の観測データ) と、通常の観測事象 68 シーン (北半球と南半球で各 34 シーンをランダムに選定) の計 102 シーンを除外して、3372 シーンをトレーニングデータとして、簡易推定のための重回帰係数の調整を行った。重回帰係数は 200 次元まで圧縮したモデルを利用している。なお、前節のシミュレーションでは気温・気圧プロファイルは固定したが、透過率パターンは気温・気圧プロファイルに大きく依存するので、気温・気圧プロファイルは別の手段で情報が得られるものとして、これらを説明変数に加えた。

本手法により推定された結果の一例 (通常シーンの O_3 , H_2O) を図 16 に示す。また、これらのシーンの統計量 (平方和平均誤差 RMSE) により、PSC 観測を含まないトレーニング用データ (3372 シーン) に対する推定誤差 (RS_no_PSC) と、PSC を含まない推定対象用データ (R:34, S:34 の各 34 シーン) に対する推定誤差 (R_no_PSC と S_no_PSC)、そして PSC を含む推定対象用データ (R のみ 34 シーン) に対する推定誤差 (R_PSC) の比較を各気体について高度別に行った。

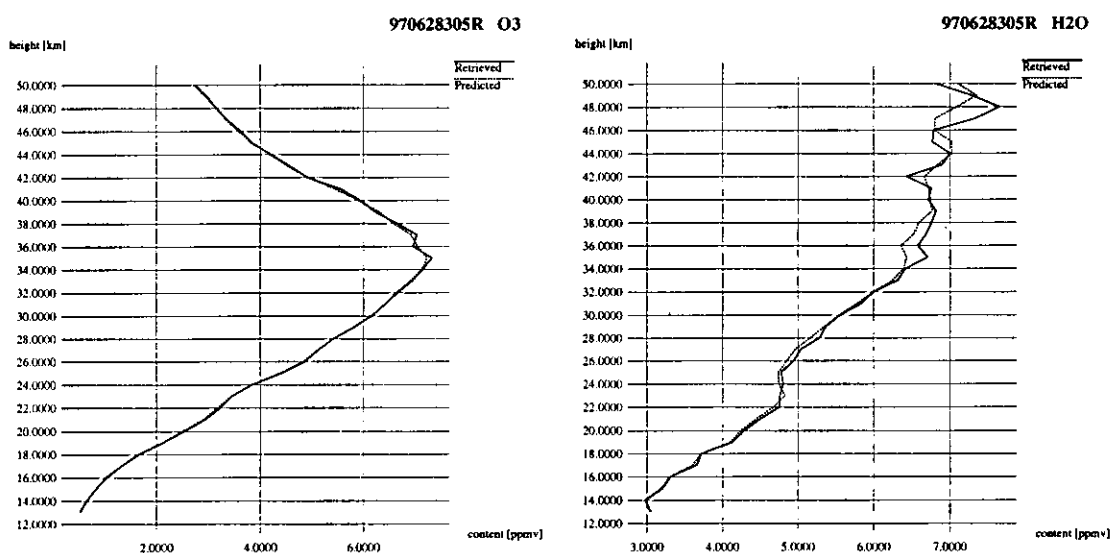


図 16 ILAS 観測データへの本手法の適用結果例 (通常シーンの O_3 (左) と H_2O (右))

O_3 と H_2O に対する RMSE の結果を図 17 に示す。図 17 より、 O_3 は高度 34 km 以下で RMSE が 0.1 ppmv 以下となっていることが解る。簡易推定としては十分な精度である。また、PSC の

対象シーンの RMSE は、高度 26 km 以下で他に比べて大きくなっていることがわかる。これは特に H₂O で顕著である。

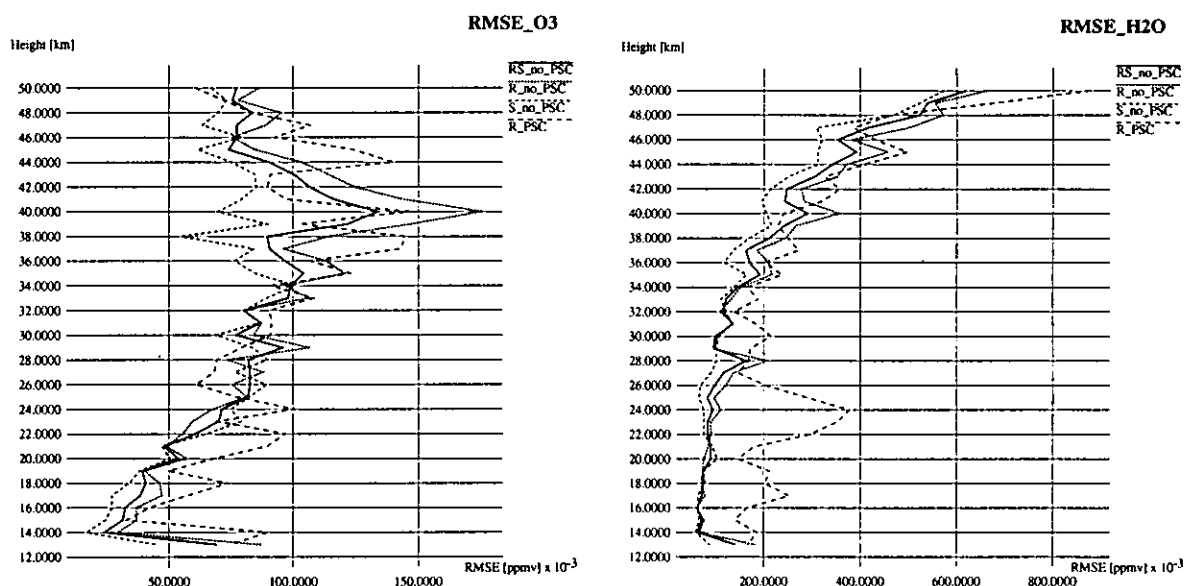


図 17 ILAS 観測データ適用した場合の推定誤差 (O₃ (左) と H₂O (右))

PSC 観測を含まないトレーニング用データ (RS_no_PSC)、PSC を含まない推定対象用データ (R_no_PSC と S_no_PSC)、PSC を含む推定対象用データ (R_PSC) に対する平方和平均誤差 RMSE の比較

本研究では、複数気体の全高度における一括リトリーバル処理の高速化について研究を行った。その結果、気体濃度パターンと各素子によって得られる Limb 透過率測定値パターンとが精度よく対応付けられることをシミュレーションと ILAS の実測データへの適用例から示した。本手法のほかにも、ニューラルネットワークによる方法も考えられるが、ニューラルネットワークによるアプローチがボトムアップ的に係数を決めていくのに対して、本手法ではトップダウン的に決定していくところが異なる。トップダウン的アプローチの優れている点は、例えば、固有値ベクトルを解析することによりあるガスの濃度プロファイルを決定するのに有用なチャンネルを特定できる点にあると考える。

本簡便手法により導出された結果を初期値に用いることにより、精密な導出処理が、より高速・高精度化されると期待される。

5. 本研究により得られた成果

本研究によって確認された事項と得られた成果は以下の通りである。

- ILAS-II では、高度 20 km 付近で導出精度が ILAS に比較してオゾンで 5 倍、メタンで 8 倍程度向上する。これは、短波長赤外のスペクトル情報が新たに追加され、導出のための気体

吸収に関する情報が改善されたことに起因している。

- ・ ILAS-II では、解析に使用する温度や圧力情報に誤りがなく、エアロゾルの影響を正確に推定できる場合に、二酸化炭素についても上部対流圏で偏り（バイアス）がなく推定が可能である。
- ・ 気体濃度の導出には、気温の誤差の影響が大きい。
- ・ SOFIS では、非線形最小二乗法を用いた精密な放射伝達計算に基づく導出手法を用いた場合、ILAS-II では、上部対流圏でも、メタンや CFC-11, CFC-12 などの温暖化関連物質を 2~5% の誤差で導出することができ、二酸化炭素についても、全項度範囲に渡って 1~7% の誤差で推定が可能である。
- ・ SOFIS では、二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素、PFC-14、SF₆ などの温室効果気体について、上部対流圏においても十分な検出感度を有する。
- ・ 赤外フーリエ分光装置（FTIR）のように高スペクトル分解能でデータ量がセンサーデータを対象に、エアロゾルの影響を考慮に入れた新たな波長帯（マイクロウィンドウ）の選定手法を開発した。
- ・ ILAS-II のデータ処理を対象に、一括逆推定手法の高速化に関する検討を行い、過去の観測データに基づいて高速に結果を得るための簡便手法を開発した。
- ・ 本研究の成果に基づいて、ILAS-II データ処理のための運用システムへの反映が検討され、実用化される。また、SOFIS データ処理運用システムの設計に本研究成果が反映される。

6. 引用文献

- 1) Park Jae H.: Atmospheric CO₂ monitoring from space, *Appl. Opt.*, **36**, 12, 2701-2712, (1997).
- 2) Uemura N., T. Yokota, H. Nakajima, T. Sugita, T. Sasano, C. Yoshigahara, Y. Uehara: Preliminary Study on Data Processing Algorithms for SOFIS, *Proc. SPIE*, **4150**, 174-187, (2000).
- 3) Yokota T., T. Sugita, H. Nakajima, Y. Sasano: Study on data retrieval for the SOFIS abroad GCOM-A1, *Proc. 9th Intn'l Workshop on Atmos. Sci. from Space Using Fourier Trans. Spectrometry ASSFTS9*, 58-60, (2000).
- 4) Rothman, L. S., *et al.*, The HITRAN molecular spectroscopic database and HAWKS (HITRAN atmospheric workstation): 1996 edition, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **60**(5), 665-710, (1998).
- 5) N. Jacquinet-Husson *et al.*, The 1997 spectroscopic GEISA databank, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **62**(2), 205-254, (1999).
- 6) Rodgers, C. D.: Information content and optimization of high spectral resolution remote measurements, in *Optical and Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research II*, P. B. Hays & J. Wang eds., *Proc. SPIE*, **2830**, 136-147, (1996).
- 7) Rodgers, C. D.: *Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice*, World Scientific, Singapore, 238p., (2000).

[国際共同研究等の状況]

本サブテーマに関しては、国際共同研究として、特に米国航空宇宙局（NASA）・ラングレー研究センター及びジェット推進研究所の衛星搭載または気球搭載 FTIR の開発を担当している研究者との意見交換を行った。

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表（学術雑誌）

- ① Uemura N., T. Yokota, H. Nakajima, T. Sugita, T. Sasano, C. Yoshigahara, Y. Uehara: Preliminary Study on Data Processing Algorithms for SOFIS, *Proc. SPIE*, 4150, 174-187, (2000)

(2) 口頭発表

- ① Yokota T., Nakajima H., Sugita T., Sasano Y.: Study on data retrieval for the SOFIS aboard GCOM-A1, 9-th International Workshop on Atmospheric Science from Space Using Fourier Transform Spectrometry, Kyoto, Abstracts, p.18, (2000.5)
- ② H.Hanaizumi and T.Yokota, "Simplified Method for Measuring Minor Gas Constituents from ILAS-II Transmittance Spectra," *Proc. SPIE* 4539, (Sept. 2001 予定)

(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