

A-3 オゾン層破壊関連大気微量物質の衛星利用遠隔計測に関する研究

(1) 太陽掩蔽法オゾンセンサーによるエアロゾル計測に関する研究

研究代表者 国立環境研究所地球環境研究グループ衛星観測研究チーム 笹野泰弘

環境庁国立環境研究所

地球環境研究グループ 衛星観測研究チーム 中島英彰・鈴木 睦
地球環境研究センター 研究管理官 横田達也
EFF フェロー Oleg Dubovik

研究協力者

奈良女子大学理学部 助教授 林田佐智子
東京大学気候システム研究センター
日本学術振興会特別研究員 岡本 創

平成7-9年度合計予算額 31,448千円

(平成9年度予算額 12,176千円)

[要旨]

太陽掩蔽法を測定原理とする改良型大気周縁赤外分光計 (ILAS) の赤外分光計データの信号処理において、エアロゾル/PSCs (極成層圏雲) 等による連続吸収スペクトル成分を、気体などによる吸収スペクトルと分離し、補正することが要請されている。同時に、分離されたエアロゾル/PSCs等による連続吸収スペクトルは、エアロゾル/PSCsの種類同定や、定量化の情報を与える。本研究では、解析手法の提案、シミュレーションによる検討、実データへの適用を行った。

シミュレーションによれば、提案した方法でエアロゾル/PSCs種類の判定と、粒径分布パラメータの推定が可能であることが示された。実際のILASデータへ適用したところ、気体成分による寄与、エアロゾル/PSCsによる寄与以外に、オフセット成分の存在が認められ、提案した方法そのままでの適用は困難であった。現実的な対処として、線形補間法を採用し気体成分の導出を行った。また、エアロゾル/PSCsによる吸収スペクトルとオフセット分の線形結合で、非気体成分を表現し、気体成分との同時推定を行った。いずれも、合理的な補正が行われている。

[キーワード]

オゾン層、人工衛星、改良型大気周縁赤外分光計、ILAS、極成層圏雲

1. はじめに

成層圏オゾン層破壊、特にオゾンホール発生の機構として、極成層圏雲 (PSCs: polar stratospheric clouds) の表面での不均一反応の関与が、重要なものと考えられている。また、火山の大噴火の後に急増する、硫酸を主成分とする成層圏エアロゾルも同様に、オゾン層破壊に一役買っている。

PSCsそのものの実態把握は、まだ不十分な状況である。硫酸、硝酸、水等を主成分とし、生成時の環境条件によってその構成比が変わったり、固体であるか、液状であるか、あるいはアモルファス状であるかといった相も変わると言われている。いずれにせよ、それらの粒子物質の表面での塩素や窒素を含む化学物質の反応が、オゾンの光化学反応に関与する塩素濃度の決定に大きく関与していることから、成層圏エアロゾルやPSCsの出現状況、種類（相、構成成分比）を正確に把握することが、重要となっている。

メタン等の温室効果気体の濃度増加は、成層圏での水蒸気の増加をもたらす。また、地球温暖化の進行とともに、成層圏では寒冷化すると考えられており、いずれもPSCsの発生にとっては有利な環境条件となる。従って、今後とも成層圏におけるエアロゾル/PSCsの挙動解明は重要な研究課題のひとつである。

エアロゾル/PSCsの観測には、地上からのライダー等の遠隔計測とともに、衛星からの観測が有効である。とりわけ、衛星は観測領域が広いこと、気体成分の同時観測が可能なこと等の理由から、エアロゾル/PSCsの挙動解明に重要な役割を果たす。衛星センサーによるエアロゾル/PSCs情報の抽出ということでは、これまで、HALOE、SAGE-II、POAM-2等の太陽掩蔽法センサー、CLAES、ISAMS等の大気放射観測センサー等が利用されてきた。SAGE-II、POAM-2は主として、可視、近赤外の波長領域を利用しているために、エアロゾル/PSCsの赤外吸収を利用した成分の同定等には向いていない。一方、HALOE、CLAES、ISAMS等は、赤外波長領域での吸収、放射を測定しており、それぞれのエアロゾル/PSCsに特有の吸収・放射特性を利用しての成分の同定の可能性がある。

環境庁がADEOS衛星（1996年8月打ち上げ、1997年6月運用停止）に搭載した改良型大気周縁赤外分光計（Improved Limb Atmospheric Spectrometer、ILAS）は、赤外分光計を主要構成要素とし、太陽掩蔽法による大気微量成分の測定を行うセンサーである。赤外波長域の約 $6\mu\text{m}$ から $12\mu\text{m}$ の範囲を44素子で波長分解して測定する、低スペクトル分解能赤外分光計を採用している。この赤外分光計による測定信号には、太陽からの赤外線の大気成分による吸収の情報とともに、エアロゾル/PSCsによる吸収の寄与が含まれている。そのため、気体成分濃度導出時にエアロゾル/PSCsによる寄与を補正、またはエアロゾル/PSCsによる寄与を同時に推定することが必要となる。これは、単に気体成分濃度導出に必要と言うだけでなく、エアロゾル/PSCs情報そのものとしても、価値の高いものである。

しかしながら、赤外領域の吸収スペクトルから、気体成分と同時にエアロゾル/PSCsに関する情報を抽出するアルゴリズムは、ILASプロジェクト開始同時、未開発であったことから、本研究において研究を行うこととなった。研究の進め方としては、まず、アルゴリズムの概念的な検討を行い、次にシミュレーションによるアルゴリズムの検証、実データへの適用という手順で進めることとした。

基本的には、次の2つの方法を検討することとした。すなわち、ひとつは（1）赤外分光計の44素子のうち、気体成分による吸収の小さな、あるいは吸収量の評価誤差が小さな素子（窓チャンネル）を選び、窓チャンネルでエアロゾル/PSCsによる消散係数の高度分布を求る。次に、これらの消散係数の値を用いて、エアロゾル/PSCsの種類や粒径分布パラメータを推定し、さらに全44素子での吸収スペクトルを算出する、という方法である。他の方法としては、（2）

全4素子の信号を用い、気体成分濃度とエアロゾル/PSCs情報を同時に推定する方法というである。

本報告書は、次章（第2章）で研究の目的と方法を提示する。第3章、第4章で、1番目の方法（窓チャンネルの利用）についてのシミュレーション、実データへの適用について、それぞれ述べる。2番目の方法の概要と、実データに適用した結果は、第5章に記述される。

第6章で、その他の方法の可能性が述べられる。これは、国立環境研究所に滞在したOleg Dubovik博士の国際交流研究としての研究成果によるものである。

2. 目的と方法

2.1 目的と方法

本研究では、太陽掩蔽法センサーデータに含まれるエアロゾル/PSCsによる吸収の寄与を測定信号から分離し、気体成分濃度導出精度の向上を図るとともに、エアロゾル/PSCsに関する情報を抽出するためのアルゴリズムを開発することを目的としている。これらのアルゴリズムは、環境庁が開発した衛星搭載オゾン層観測センサーである改良型大気周縁赤外分光計（ILAS）データ処理のための運用ソフトウェアに反映される。ILASの実データが研究期間中に可能になったことから、具体的な研究方法としては、シミュレーションによるアルゴリズムの検討とともに、実データを利用してアルゴリズムの適用可能性を調べる方法を採用した。

2.2 ILAS観測とデータ処理の概要

本研究では、ILASによる実際の観測データを用いたアルゴリズムの検討を行うことから、ここでILASによる測定と、取得データ処理の状況を簡単に示しておく〔文献、リモセン学会誌特集号〕。

2.2.1 ILAS装置

太陽同期で極軌道を周回するADEOSに搭載されたILASは、北半球では日の出を、南半球では日の入りを経験する。周回中の日の出、日の入り時にILASは太陽の輝度重心を追尾し、太陽光の大気による減衰が接線高度の関数として測定される。また、太陽光の減衰は、可視域及び赤外域の2つの分光計により、波長の関数として計測する。図1に測定の原理（太陽掩蔽法）の模式図を示す。

このため、ILAS機器の基本要素は、太陽を追尾し太陽光を検出系に取り入れるための2軸のジンバルミラーと光学系、太陽の輝度重心を捉えるための検出系、太陽光を分光するための可視域と赤外域の検出系、センサーの瞬時視野が見ている太陽面上での位置を検出するためのサンエッジセンサー、信号処理系、電源系等からなる。

瞬時視野の大きさは可視と赤外の分光計で異なり、接線高度位置で可視は水平2 km、鉛直2 km、赤外は水平1.3 km、鉛直2 kmとなっている。主な仕様を表1に示した。詳細は文献（Suzuki et al., 1994）を参照されたい。

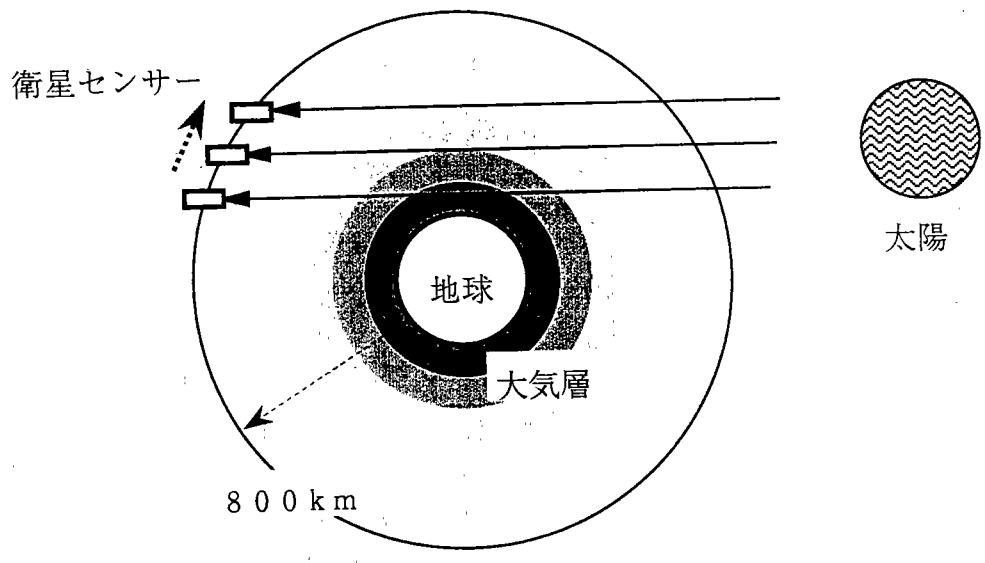


図1 太陽掩蔽法の測定原理図。

表1 ILASの主な仕様

Grating Spectrometers with Linear Array Detectors	
IR detector	44 pixel pyro-electric detector
Visible detector	1024 pixel MOS photo-diode array
Spectral Coverage / Resolution	
IR	850 - 1610 cm ⁻¹ (6.21 - 11.77 micrometer) 0.129 micrometer resolution
Visible	753 - 784 nm 0.1 nm resolution
IFOV	2 km Vertical x 13 km Horizontal in the IR channel 2 km Vertical x 2 km Horizontal in the visible channel
Positioning	Tracking radiometric center of the Sun, 0 km up to 200 km On-board IFOV position measurement relative to the Sun edge with a resolution of 10 arc sec by 1024 pixel linear array detector
Data Rate	12 Hz, 517 kbps
Weight	125 kg
Power	70 W
Size	800 x 1630 x 550 (XYZ in mm)

2. 2. 2 データ処理ソフトウェア

(1) レベル1 (疑似透過率) データ

日の出時の測定ではILASは地平線から顔を出す太陽を捉えた後、大気で減衰する太陽光を分光観測しながら接線高度を上げて行く。接線高度が150 km以上になると大気の影響は無視できて、太陽光の100%値の分光スペクトルが得られる。日の入り時には、まず100%値の観測を行った後、接線高度を下げていく。

大気を透過した信号を大気圏外の100%信号で割ると、透過率スペクトルが得られる。分光計の個々のディテクター(検出器)は有限の波長幅(固有の装置関数)を持っている。また、瞬時視野が高度方向に2 kmの幅を持っている。このために、ここで得られる透過率は疑似透過率と呼ぶべきものであり、これをレベル1データと定義している。

なお、可視チャンネルにおいては、空気分子による消散、エアロゾル等の粒子物質による散乱・吸収、オゾン分子による吸収が、酸素分子による吸収に重畳している。ILASでは、酸素分子による吸収スペクトルの形状から、気温と空気分子密度(したがって、気圧)を算出する。このため酸素分子による吸収に関する情報だけを抽出する目的で、その吸収帯以外の波長領域の信号から、ベースラインカーブを推定し(Yokota et al., 1998)、これを100%信号として疑似透過率を算出する。

可視チャンネル1024素子、赤外チャンネル44素子について、12 Hzでデータが取得されており、これに対してレベル1(疑似透過率)データが計算される。レベル1データには、測定時刻・測定位置情報などが付加されている。

(2) 接線高度の決定

ある瞬間のILASの瞬時視野の方向を向いたベクトルのなす光路から測ったとき、回転楕円体を仮定した標準地球表面との距離が最小となる点の地表面高度(海拔高度)を接線高度と定義する。さらに、接線高度20 kmの時の測定点位置をもって、一回の日の出(または、日の入り)観測の観測地点(緯度、経度)を代表させる。この地点と、接線高度50 kmに対する測定点位置との距離差は、高々50 kmである。

接線高度の算出は、衛星センサーとしては初めての試みとして、太陽面の上端から瞬時視野の中心までの角度を測定するサンエッジセンサーのデータを利用して、太陽の方向、地球の絶対位置、衛星位置の情報から算出することとしていた。しかしながら、サンエッジセンサーの実観測データに基づく、光学特性に関する確認作業に時間を要したため、1998年3月段階までのデータ処理ソフトウェアでは、この方法に代わるものとして、次の方法を採用している。

可視チャンネルでは、酸素分子吸収による太陽光の減衰(透過率)が実測されている。一方、気温・気圧の高度分布データが独立にあると、分光パラメータデータを用いて理論的な透過率が高度の関数として計算出来る。そこで、実測値と理論値の比較から、それぞれの測定データに対する接線高度を推定する。理論値の計算には、英国気象局提供の成層圏アシミレーション(同化)気象データ(Swinbank and O'Neill, 1993)を用いている。また、比較に際しては、透過率のグラフにおいて酸素分子Aバンド吸収のうちRブランチの部分の面積(平均透過率に相当)を算出して比較している。

(3) 気温・気圧プロファイルの導出

ILASでは、衛星観測では初めての試みとして、酸素分子による吸収スペクトル測定から気温と気圧の高度分布を測定することとしている。酸素分子による疑似透過率スペクトルに対して、気温・気圧を未知パラメータとして理論計算されるスペクトルの非線形最小二乗推定を行い、それらの高度分布を同時に導出する。高度分布のリトリーバルにはオニオンピーリング法を採用している(Nakajima et al., 1993; Yokota et al., 1993)。

ILASの可視チャンネルデータから気温と気圧の高度分布が求められることは、ILASの測定方式の大きな特長である。これは赤外チャンネルからオゾンなどの吸収気体の高度分布を導出する際に必要不可欠な情報となり、吸収気体の正確な高度分布の導出が可能となる。

1998年3月段階では、しかしながら、気温・気圧の導出結果に対する検証が完了していないこと、接線高度決定に英国気象局の気温・気圧データを利用していることを考慮して、赤外チャンネルデータの処理にはILASから求めた気温・気圧データではなく、英国気象局提供の気象データを採用している。

(4) 気体成分プロファイルの導出

オゾン、硝酸、一酸化二窒素、メタン、二酸化窒素、水蒸気などの吸収気体の体積混合比の高度分布を未知パラメータとして、非線形最小二乗推定法により、これらの値が同時に導出される。高度方向には、オニオンピーリングの方法によって、大気の上層から下層の方向に順次、導出する(Yokota et al., 1994; Sasano, 1997)。エアロゾル/PSCs等の粒子成分の寄与の扱いについては、第3章以下で述べる。

(5) エアロゾル消散係数の導出(可視チャンネル)

可視分光計による測定データのうち、波長780nmに相当する素子付近の12素子の平均の信号について、以下の処理を施す。導出された気温・気圧のデータから、空気分子のレイリー(Rayleigh)散乱分を計算する。ベースラインによって分離された、酸素分子による吸収以外の寄与分から、レイリー散乱の寄与分と、ベースラインカーブ推定の際に評価されたオゾン寄与分とを差し引くと、残りはエアロゾル/PSCsによる透過率となる。エアロゾル/PSCs等の消散係数の高度分布は、透過率の高度分布から、高度方向に一括のインバージョンにより求める。ただし、ここで、気温・気圧データとしては、英国気象局データを用いている。

赤外チャンネルデータからの消散係数算出については、次章以下に詳述する。

2. 2. 3 データ取得、処理状況

ADEOSの運用開始から、1997年6月30日に運用が停止するまでの間に、ILASが取得したデータ総数は約6500イベントに上る。11月から6月の約8ヶ月間であり、1年間のサイクルのデータを取得出来なかったことは残念であるが、南極オゾンホールの消滅期、北半球オゾン層に見られた1997年春期のオゾン低濃度など、興味深いデータが収集されている。これらのデータは、国立環境研究所に設置されたILAS衛星データ処理運用施設において定常業

務として処理がなされている (Kanzawa, 1997)。

3. エアロゾル/PSCs種類の判定と、粒径分布パラメータの推定における、窓チャンネルの利用 (逐次推定法) シミュレーション

ここでは、赤外分光計の44素子のうちの窓チャンネルで求めたエアロゾル/PSCsによる消散係数値を用いて、エアロゾル/PSCsの種類や粒径分布パラメータを推定し、さらに全44素子での吸収スペクトルを算出する、という逐次推定法に関する、シミュレーションの方法について述べる。

3. 1 窓チャンネルの選定

まず、赤外分光計の全44素子のうち、エアロゾル/PSCsによる消散 (吸収) の影響が卓越する、素子として、窓チャンネルを選定する。このため、過去の衛星観測データをもとにして作成したILAS参照大気モデルを用いて、ILASで測定される吸収スペクトルを代表的な接線高度毎にシミュレートする。このとき、参照大気モデルとして用意されている各気体濃度の10パーセント値、90パーセント値を用いて、吸収スペクトルの最大値、最小値を評価する。吸収の大きさそのものが小さい素子 (波長域)、最大値、最小値の差が小さい素子を窓チャンネルとして選定すると、7.12 μm (第7素子)、8.7 μm (第16素子)、10.60 μm (第34素子)、111.76 μm (第43素子) が適当と判断された。これらのチャンネルでは、気体成分濃度の如何に拘わらず、小さな誤差で、気体成分以外の寄与が評価出来ることを意味している。

実際の観測データから窓チャンネルでの、気体成分以外の寄与 (エアロゾル/PSCsの消散係数) を評価するに際しては、上に述べたのと同様の処理がなされる。すなわち、ILAS参照大気モデルから、該当する月、緯度帯の平均としての気体成分濃度の高度分布データを抽出し、これを用いて気体成分の寄与分が計算される。これを実測値から差し引いたものが、気体成分以外の寄与となる。窓チャンネルといえども、多少の気体成分の寄与はあるので、実際の気体成分濃度と参照大気モデルとの差が、エアロゾル/PSCs消散係数の評価誤差の大きな要因となる。

3. 2 エアロゾル/PSCsの光学的性質の理論計算方法

次に、エアロゾル/PSCs等の粒子による光の散乱・吸収の理論的取り扱いについて、簡単に述べておく。一般に、球形均質の粒子に関する光の散乱は、粒子径が波長と同程度以上の場合、ミー散乱理論で記述される。粒子径が波長に比べて、十分に小さい場合には、レーリー散乱理論が適用されるが、これはミー散乱理論の極限の場合として包含される。

ミー散乱理論では、粒子による散乱断面積 k_s 、吸収断面積 k_a は、粒子の半径 r と、粒子の光学的性質 (複素屈折率 m^* で表現される) が与えられると計算出来る。

種々の粒子径の粒子から成る系に対しては、粒径分布 $n(r)$ を重み関数として半径 r で積分することで、系としての散乱係数 β_s 、吸収係数 β_a が計算される。粒子の複素屈折率は、温度依存性を持っている。粒子が液体の場合には、Lorentz-Lorenz式によって温度依存性の補正がなされる。

3. 3 エアロゾル/PSCsタイプ判定と粒径パラメータの推定シミュレーション

シミュレーションではまず、文献調査に基づいて種々のエアロゾル/PSCsモデルを作成し、ミー散乱理論によってその光学的特性を算出する。これに基づいて評価された、消散係数の波長依存性から、エアロゾル/PSCsタイプの識別・判定の可能性の検討を行う。

文献等に基づいて、エアロゾル/PSCsモデルとしては硫酸エアロゾルと各種のPSCsを取り上げる。硫酸液滴であるエアロゾルは、含まれる硫酸の重量パーセントによってその光学的性質(複素屈折率)は変化する。PSCsでは、硝酸水和物として NAT、NAD、NAM、さらに(水の)氷を考える。室内実験等に依れば、硝酸水和物は、その生成形態により α -NAT、 β -NATや、アモルファス(aをつけて記す)が存在し得る。これらの粒子の光学特性は、複素屈折率として、主として室内実験により求められている。

これらのエアロゾル/PSCsについて、消散係数スペクトルをミー散乱理論を適用して求めた。このとき、簡単化のため粒径分布としては対数正規分布を採用し、中心半径、分散は成層圏で通常見いだされる程度の値として、種々の組み合わせについて計算した。具体的には、次表に示した。

表2 エアロゾル/PSCs等のモデルとして与えた粒径分布パラメータの値

	r_g (μm)	σ_g
硫酸エアロゾル	0.075, 0.075 \pm 0.075/4 0.075 \pm 0.075/2 0.075 \pm 0.075*3/4	1.86, 1.86 \pm 0.1, 1.86 \pm 0.2
氷	5, 10, 20, 30, 40, 50, 100	1.5, 1.5 \pm 0.1, 1.5 \pm 0.2
α -NAT, β -NAT, NAD, NAM, a-NAT, a-NAD, a-NAM	0.5, 0.5 \pm 0.5/4 0.5 \pm 0.5/2, 0.5 \pm 0.5/2	1.5, 1.5 \pm 0.1, 1.5 \pm 0.2

図2(a)、(b)に、硫酸エアロゾル、その他のPSCsの代表的なケースの消散係数スペクトルを、ILASで決められた4つの窓チャンネルについて描いた。タイプによって、固有のスペクトル形を示すことが分かる。ILASで決められた4つの窓チャンネルにおける消散係数を4次元のベクトルとして考えると、その絶対値で正規化することでベクトルの方向が表現される。これは、消散係数の大きさに対するエアロゾル/PSCs粒径分布の粒子総数の影響を除去したことに相当する。エアロゾル/PSCsのモデルによる計算結果を正規化をして、ベクトルの方向だけを考えることとする。基本的には、ベクトルの方向はエアロゾル/PSCsの光学的な性質(複素屈折率)により強く依存し、粒径分布パラメータの違いは、そこからのばらつきを与える。

したがって、ここで与えたモデル計算結果と、実測値から得られる規格化されたベクトルの比較によって、およそのタイプの判別は可能となる。具体的には、ベクトル間の距離が最小となるのが、求めるエアロゾル/PSCsタイプであると判定する。さらに、気温を判定の条件に加えることが出来る。すなわち、成層圏では少なくとも215 K以上では、PSCsは存在せず、硫酸エアロゾルのみと考える。

3. 4 エアロゾル/PSCs 粒径分布パラメータの推定

一旦、エアロゾル/PSCs タイプの判定が出来ると、次に、粒径分布パラメータの詳細な値を

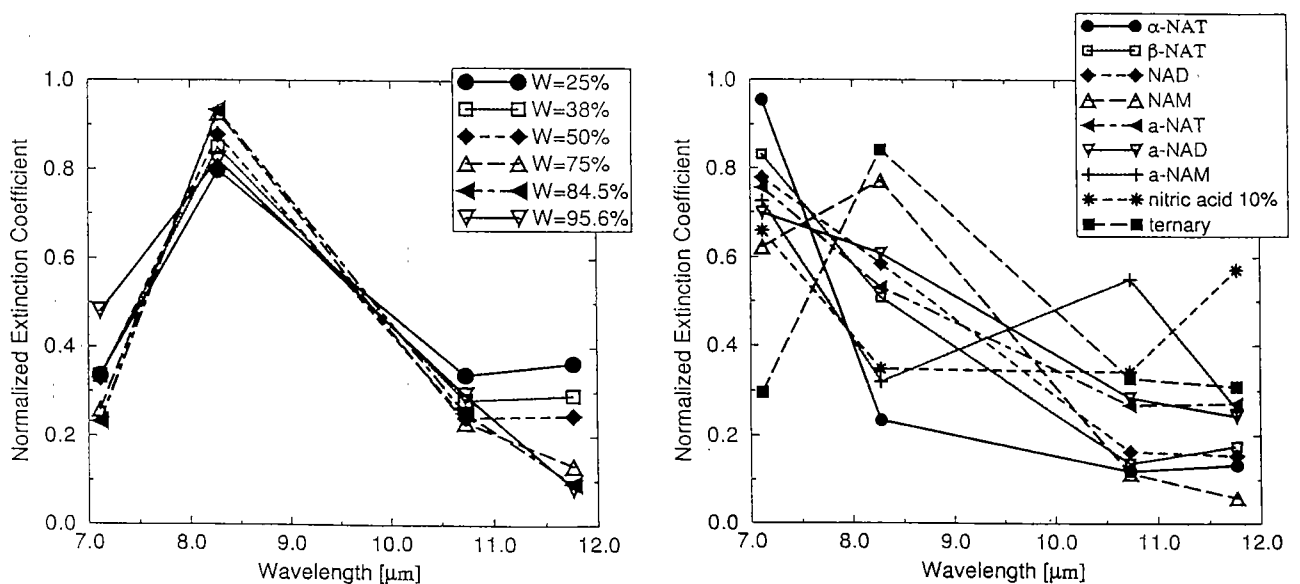


図2 代表的な硫酸エアロゾル（左）、種々のPSCsの消散（右）のスペクトル。硫酸エアロゾルについては、硫酸の重量濃度をパラメータとして変化させた。

決めるための処理に移る。この際には、平均半径 (r_g) と、粒子半径のばらつき (σ_g) を未知パラメータとして、消散係数の波長依存性のより正確なフィッティングを与える値を求めることになる。

実際には、成層圏で見いだされる粒子の粒径は、氷の粒子を除くと、一般にはサブミクロン領域にあり、ILASの赤外測定波長から見れば散乱現象がレーリ理論で記述される領域に入る。赤外波長の消散係数スペクトルは、粒子の光学的性質（複素屈折率の波長依存性）でほぼ決まり、粒径分布パラメータ2つを同時に、正確に推定することは難しい。特に、赤外波長域の消散係数

は平均粒径にあまり依存しない。したがって、平均半径 (r_g) を一定値を与えて、粒子半径のばらつき (σ_g) と、粒子総数 (N_0) とだけを求める方が、より容易である。

このようにして、エアロゾル/PSCsタイプと、粒径分布パラメータが決定されると、これらを用いて理論計算により、赤外分光計の全 44 素子に対する、スペクトル補間計算がなされる。

3. 5 まとめ

少なくともシミュレーションによれば理論的には、ここで提案した方法は機能することが実証された。しかしながら、実際のエアロゾル/PSCsの粒径分布が、解析のために想定したモデルと異なるときの収束性の問題等、未検討事項は残っている。また、各種のPSCsの複素屈折率の波長依存性、温度依存性等、必ずしも正確にはわかっていないために、実際のデータへの適用の際に不確定要素となる可能性がある。さらに本質的には、実際の成層圏で生成しているPSCs等が、ここでモデル化したものでどれくらいよく表現されているかという問題がある。特に、異なるPSCsが混在しているケース等、ここで提案した方法では解が求まらないケースもあると考えられる。

4. 窓チャンネルの利用 (逐次推定法) による実データの解析

前章で提案した手法をILASの実データに適用してみた。ILAS機器、データ、及びデータ処理ソフトウェア自身の検証が終了していないことから、本解析も未検証データを利用してということに成らざるを得ない。しかし、エアロゾル/PSCs寄与の補正法自身もまた検証対象であり、どれかひとつを先に検証を済ませるといふ訳にはいかず、いろいろな観点からの総合的な評価で、検証を進めていく必要がある。

4. 1 4つの窓チャンネルでの消散係数分布の評価

窓チャンネルデータの利用の前提は、そこでの消散係数が正しく求まるということである。3. 1節に述べたように、窓チャンネル信号に含まれる気体成分の寄与を除去するために、まず、その寄与の推定を行う。これには、過去の衛星観測データを利用して作成した参照モデル大気の大気候値を用いる。主にUARS衛星搭載センサーの、1992-3年のデータを用いて、月毎、緯度帯毎(5度刻み)の平均値その他の統計量を用意した。

気体成分濃度として高度分布を気候値で与え、ILASで測定された疑似透過率のうち、気体成分の寄与を補正した。残りは、非気体成分によるものでエアロゾル/PSCsに因るものと仮定した。こうして得られた接線高度の関数としての疑似透過率は、オニオンピーリング法により解かれて、消散係数の高度分布が求められる。消散係数の誤差は、気候値と実際の大気成分分布との差異、信号のランダム誤差、解析上の誤差、等によって決まる。もっとも大きな誤差要因は、気体成分分布の気候値と実大気との差異と考えられる。実際、10パーセント値、90パーセント値を気体成分濃度分布として与えて、同様の計算を施すと、この差異による解の差を見ることが出来る。

図3は、こうして求めた消散係数の値の例である。接線高度17 kmでの値で、各窓チャンネルに対して、3つの値が示されている。これらは、気体成分濃度分布として、10パーセント

ル値、平均値、90パーセント値のそれぞれを用いて、解を求めたものである。特に、第16素子、第43素子は、気体成分濃度分布の影響を比較的、受けやすいことが分かる。これに比較して、第7素子、第34素子は、気体成分濃度に依らない。3つの曲線は、バックグラウンドの小粒子の硫酸エアロゾルを仮定した時の消散係数スペクトル（3つの異なる複素屈折率を用いた0理論計算結果である）。

4. 2 エアロゾルタイプ、粒径分布パラメータの推定

実際にILASで得られたデータを解析する場合、問題の見通しを良くするために、エアロゾル/PSCsとして硫酸エアロゾルだけを考えれば良い場合と、それ以外のPSCsを考慮しなければな

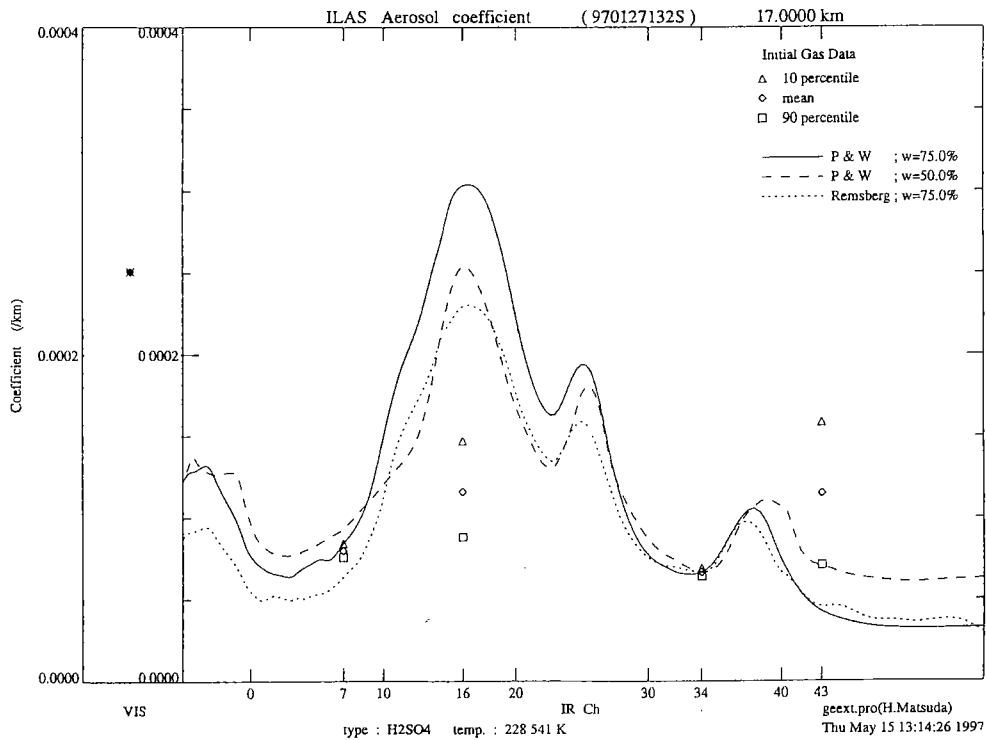


図3 ILAS実データから得られた、窓チャンネルにおける非気体成分による消散係数の値（硫酸エアロゾルの場合）と、バックグラウンドの硫酸エアロゾルを仮定した理論計算値。

らない場合に分けることにした。前者は、基本的には気温が215 K程度以上の場合である。後者は、一概に気温だけで判定は出来ず、信号の様子から経験的に選択せざるを得ない。

(1) 硫酸エアロゾルのケース

図3に示した消散係数スペクトルのモデル計算値を見ると、硫酸エアロゾルの場合、第16素子付近に吸収の第1のピーク、第26素子付近に第2のピークがあり、その他の波長範囲は比較的フラットな形状をとる。しかし、図3によれば、実データでは第16素子の値とともに、第4

3素子に相当する消散係数の値が、他の素子の値より大きい。これは、硫酸エアロゾルと見なされる場合のほとんどのケースの20 km以下の高度で見られる特徴であったが、理論的には考えにくい事象であった。

考えられる原因のひとつは、気体成分寄与の除去に用いた参照大気モデルの不備である。しかし、90パーセンタイル値を用いて得た消散係数も依然として、高い値をとることから、それだけでは説明は困難と思われた。他の原因の可能性は、ILASの打ち上げ前の実験データ取得時に指摘された迷光の影響である。しかしながら、迷光の起こる機構が不明で、適切なモデル化も難しいことから、ここではこれ以上の検討を控えている。

他の検討を要すべき事項は、実測で得られた第16素子/第7素子の消散係数値の比の値が、モデル値に比べてかなり小さいという点である。これは、硫酸エアロゾルとして、通常知られているのに比べて、極めて大きな粒子の存在を仮定しないと説明できない。図4には、大粒子の存在を仮定して計算した消散係数スペクトル（点線）を、参考のために示した。第43素子の不一致は別として、一般に大粒子を仮定したときの方が、より実測値に近い値を与える（図3参照）。

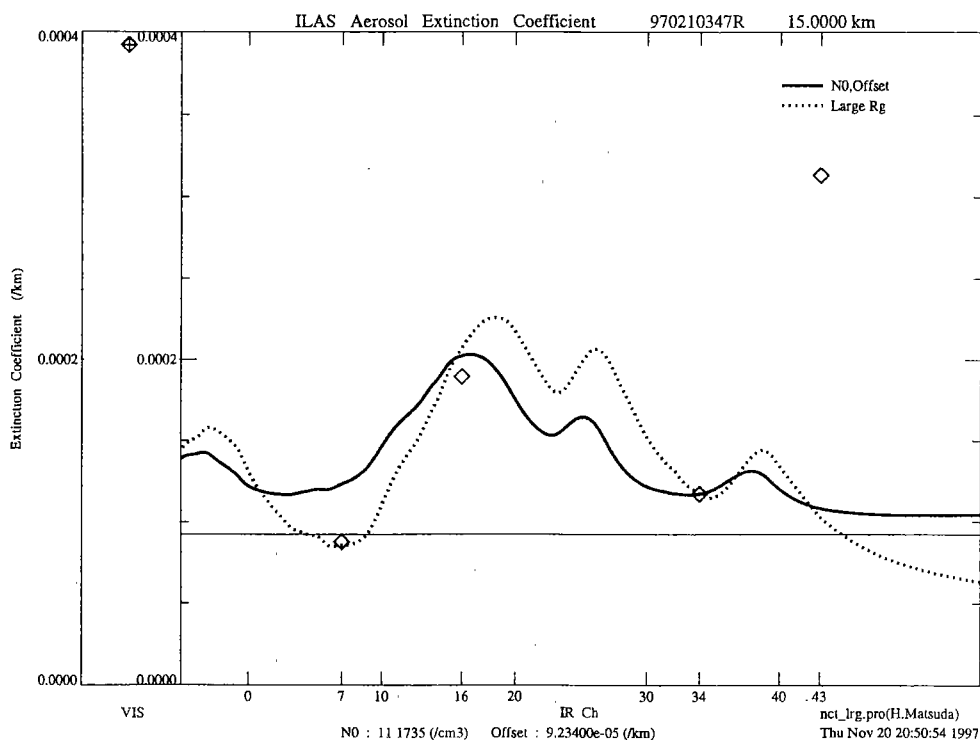


図4 硫酸エアロゾルの消散スペクトル（大粒子の仮定、点線：小粒子+オフセットの仮定）。

この理由として、原因は特定できないものの、波長域全域にわたる何らかのオフセット分が混入している可能性を考える必要がある。消散係数のオフセットの考えられる原因として、1) トラッキングミスによる100%値変動、2) 太陽周縁減光の影響、3) ドリフト補正の影響、4) デコンボリューションの影響、5) クロストークの影響、6) 迷光の影響、等が挙げられる。

このうち、トラッキングミスによる100%値の変動と、太陽周縁減光の影響とは、ほぼ同じ

意味と考えると良い。すなわち、何らかの理由でILASの瞬時視野が太陽の中心からはずれて、太陽の周縁領域を含んだとすると、太陽の周縁領域では中心部に比べて輝度が低いために測定信号は弱まり、あたかも大気中での減衰が大きかったと見誤ることによる。瞬時視野が太陽中心からずれる原因としては、太陽追尾機構の不完全性による場合と、大気低層を観測する場合に大気屈折の影響で見かけ上瞬時視野が拡大し、太陽周縁までをも瞬時視野が見てしまうことに因る。このオフセット原因の解明は、本稿の執筆時点でまだ完了していない。

ILAS測定データの処理では、大気圏外で太陽を測定して求めた100%値について、その時間的変動（直線的に変化すると仮定）から、検出系の感度トレンドを評価して、大気透過の測定時における100%値として期待される値を、外挿により推定することを行っている。この時、時間変動率の推定に誤差があると、大気測定時の100%値に誤った値を与えることとなり、プラスまたはマイナスのオフセットを与える。これは、100%値の時間変動率を評価するデータが安定に与えられることが重要で、太陽補足の直後等、太陽輝度中心を捉え切れていない間のデータを使うべきではない。本件についても、本稿の執筆時点でまだ検討中である。

赤外信号のデコンボリューションとクロストークの影響については、その計算に必要なパラメータを変化させてその効果を見たところ、大きな影響は与えないことが判明した。その他、長波長側で迷光が存在する可能性が、室内実験で指摘されていた。これに対して、長波長側の第35素子以上を除外して気体成分濃度をリトリバルした結果からは、CFC等を除いて、導出された濃度に大きな変化はないことから、少なくとも第34素子以下には迷光の影響は無視できると推定された。

原因はともかく実際のILASデータには、非気体成分による寄与がオフセットの形で現れていると考えられたので、第3章で考察した手法はそのままでは適用できないと判断された。特に、第7素子と第16素子における消散係数比は、硫酸エアロゾルの場合、エアロゾルに含まれる硫酸の重量濃度とよい対応関係があり、重量濃度推定の方法として使うという目論見ははずれた。従来からの知見から言えば、硫酸エアロゾルは半径 $0.1\ \mu\text{m}$ 以下の粒子が卓越していると考えられる。そこで、対数正規分布を粒径分布関数とし、平均粒径 $r_g = 0.075\ \mu\text{m}$ 、粒径の広がり $\sigma_g = 1.86$ 、硫酸重量濃度75%とおいた小粒子径の硫酸エアロゾルを仮定し、これによる消散係数と、波長に依存しないオフセットとの和で、観測値を説明することを試みた（小粒子エアロゾル寄与とオフセットの分離）。このとき、可視分光データから得られる $780\ \text{nm}$ における消散係数の値も用いることとし、可視データ+第16素子、可視データ+第34素子のそれぞれの組み合わせで、小粒子エアロゾルの粒子数とオフセット寄与分を算出した。第34素子の消散係数は、気体成分の影響を受けにくいので、より確からしい値を与える（図4の太実線と細実線）。

オフセット成分を波長の一次関数と見なすならば、可視データ+第16素子+第34素子の組み合わせで、オフセット成分の波長に対する傾きまで一意に決めることが原理的に可能である。いずれにせよ、これらの方法による推定精度は、各素子の消散係数の確からしさに依存する。

(2) PSCsのケース

第7素子と第16素子の消散係数の比は、硫酸エアロゾルに対してはその重量濃度の推定値を

与えるものであるが、他のPSCsでは、また異なる値を与えることが、モデルに基づく理論値から明らかになっている。実データにおいても、第7素子と第16素子の消散係数の比に、硫酸とは異なるPSCsの特徴が見出せる。しかしながら、前項で採用したのと同じように、オフセットの存在を仮定してPSCs成分の分離を図ることは困難と言わざるを得ない。これは、PSCsには種々の可能性があり、代表的なタイプを事前に仮定することが難しいことに因る。

(3) 単純内外挿法によるスペクトル推定と、非気体成分の寄与の補正

エアロゾル/PSCs情報の導出は、その情報そのものが大気化学上有用な情報であると同時に、ILASによる気体成分導出に際して、エアロゾル/PSCs寄与分を除去するという意味からも不可欠である。ILASの実データでは、前節でみたようにエアロゾル/PSCs寄与分だけではなく、その他の、現状では原因不明のオフセット分が存在することが分かってきたところで、エアロゾル/PSCs寄与分とオフセット分とをあわせて、「非気体（ノンガス）成分の寄与」と呼ぶことにする。

赤外分光計の全素子に対応する非気体成分の寄与（スペクトル）を推定する際に、明らかに硫酸エアロゾルと判別できる場合には、前項で述べたように小粒子硫酸エアロゾルとオフセットという形で、それぞれの寄与を推定することが出来る。一般には、気温を判定条件とすることになるだろうが、判定基準気温の近辺では判定が難しい、あるいは、判定基準以下の場合にはどう処置するかという問題が生じる。大量のデータをルーチ的に処理するには、別の方法を採用する必要がある。そこで、データ処理運用ソフトウェアのVersion 3.10で採用した方法は次の通りである。

4.1節に述べた方法で求めた、4つの窓チャンネル（第7、16、34、43素子）の消散係数の値を波長に関して直線補間し、第7素子から第43素子までの間の各素子の消散係数とする。第7素子より短波長側（素子番号の小さい方）については、第7素子の消散係数に等しいものとおく。クロストークの寄与の計算に必要な、第0素子、第43素子の直ぐ外側については、それぞれ第0素子、第43素子の消散係数と等しいと置く。これを各高度毎に計算し、消散係数値の高度分布を全素子について与える。図5には、小粒子硫酸エアロゾルとオフセットの2成分として推定したスペクトルと、本節で提唱する直線補間スペクトルを示した。硫酸エアロゾルの場合、窓チャンネルが、偶然に、吸収スペクトルのピーク付近に当たっていることから、第43素子付近を除いて両者の差は比較的小さい。

次に、こうして得られた非気体成分の寄与（消散係数）の高度分布を用いて、あらかじめ赤外44素子の疑似透過率に補正を加え、気体成分のみよる疑似透過率を作成し、気体成分濃度の高度分布を求める。図6は、明らかに硫酸エアロゾルと判定されるケースで、非気体成分寄与の補正を施して得られたメタン成分高度分布（Version 3.10）を示している。併せて、非気体成分補正を全く施していない場合のメタン高度分布（Version 3.00）を描いている。補正をしないと、その寄与分がすべて気体によるものとみなされ、一般に気体濃度が過大評価される。

PSCsのスペクトルを、窓チャンネルの補間で得たスペクトルと比較すると、不一致が目立つケースもあり限界があることが分かる。しかし、PSCsと考えられるような場合、いずれかの種類のPSCsとオフセットという形で評価することは容易ではないので、直線補間の方法は現実的な対応といえる。PSCsケースについて、補正後のメタン成分高度分布の例を図7に示す。

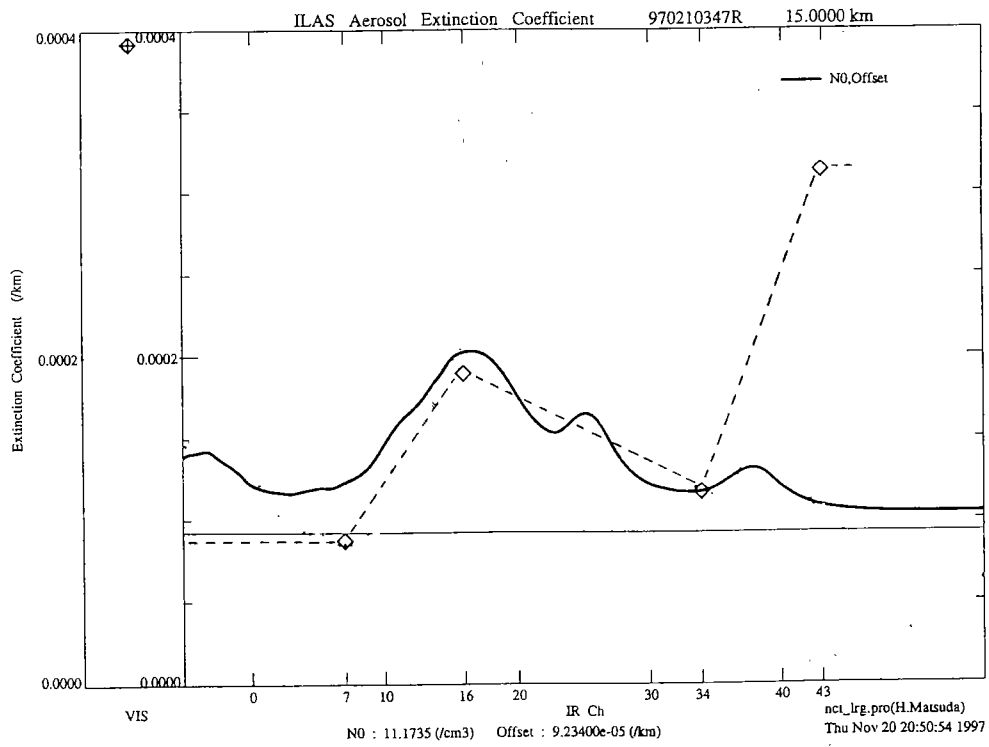


図5 代表的な成層圏エアロゾル（硫酸）とオフセットの合成で評価されたそれぞれの寄与と、線形内挿で与えるスペクトルの例。

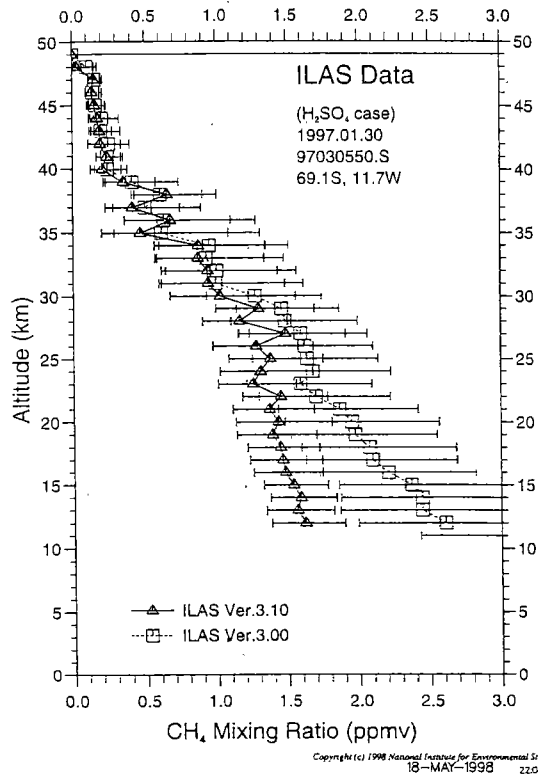


図6 エアロゾル/PSCs補正されたメタン濃度分布（硫酸エアロゾルの場合：Version 3.10）。補正なしのメタン分布（Version 3.00）を併せて示した。

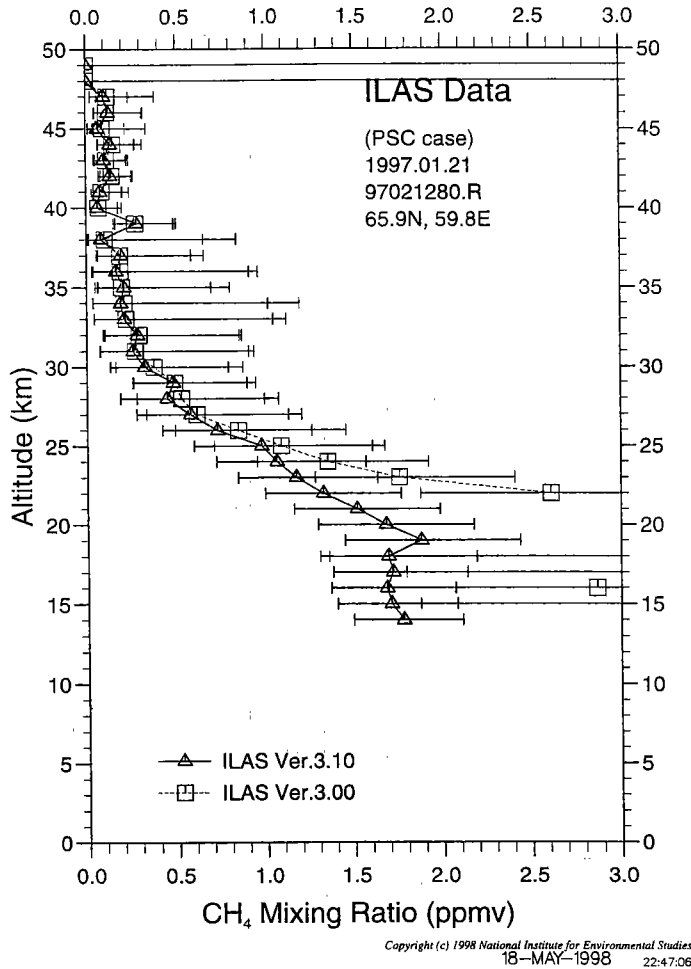


図7 エアロゾル/PSCs補正されたメタン濃度分布 (PSCsのケース: Version 3.10)。補正なしの場合のメタン分布 (Version 3.00) を併せて示した。

(4) 検証データ

一般に、衛星センサーによる観測データの信頼性を確認する目的で、検証実験が実施される。これは、衛星観測と同期させて衛星とは独立の測定を行い、両者を比較することにより、衛星センサーの動作性能の確認、データ処理解析アルゴリズムの妥当性確認を行い、データプロダクトの正当性を評価するものである。ILASについても、種々の測定パラメータに対する検証データが収集された。

エアロゾルに関して、光学式粒径分布測定器によるデータの収集が本研究の一環として、米国ワイオミング大学のDeshler博士の協力により実施された。これは、気球に搭載された光学式粒径分布測定器により、粒径区分毎の粒子数を計測するもので、その高度分布が得られる。ILASデータと比較するためには、ミー散乱理論に基づいて、粒径分布を消散係数に換算される。ここで、粒子の屈折率を与えるために、粒子のタイプ(硫酸エアロゾルか、いずれかのPSCsか)を仮定する必要がある。図8には、硫酸を仮定したときの計算結果を例として示した。

4.3 まとめ

本章では、ILASの実際の観測データに対して、エアロゾル/PSCsタイプの判定と粒径分布パラメータの推定の、窓チャンネルデータを利用する方法を適用することを試みた。しかしながら、

実データには、気体成分による吸収、エアロゾル/PSCsによる消散（吸収）以外に、オフセット分が存在するため、当初提案の方法そのままでは適用出来ないことが判明した。このため、窓チャンネルデータを利用するものの、タイプの判定、粒径分布パラメータの推定はせず、直線補間により非気体成分寄与のスペクトルを推定し、気体成分濃度導出の補正に適用することとした。

結果は第一近似として、非気体成分寄与の補正は成功したと考えている。この手法は、Version 3.10 としてILASデータの処理に採用されている。

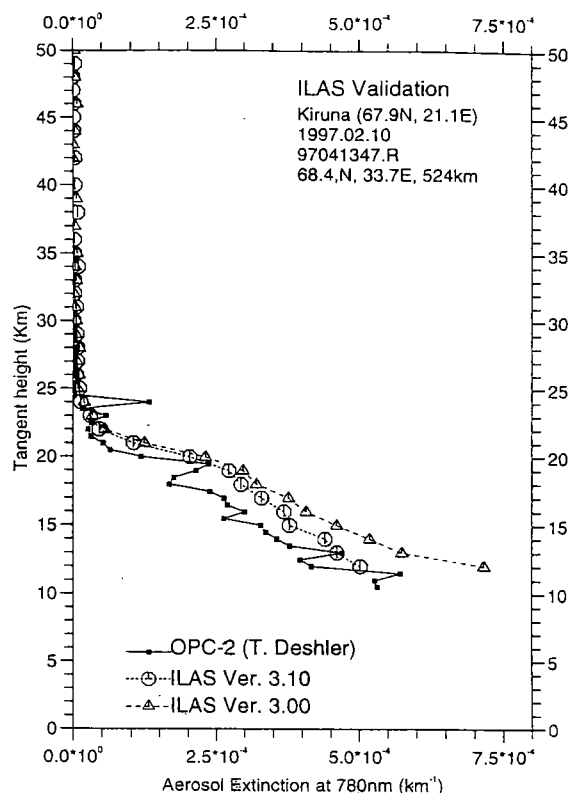


図8 検証データ（光学粒径分布測定器：協力Deshler）から計算された消散係数（波長780nm）の高度分布と、ILASデータ（硫酸エアロゾルのケース：Version 3.10）。

5. 気体・エアロゾル成分同時推定（全チャンネル信号の利用）

第3章、第4章で見てきたように、窓チャンネルデータを利用する方式では、窓チャンネルでの消散係数を算出する際に使用する気体成分濃度高度分布が、結果に影響する。過去の衛星センサーデータから構築された気候値を用いているが、これが実際のILAS観測時の値と異なっている可能性もある。したがって、気候値に頼らない解析法の使用が望ましい。本章では、ILAS赤外分光計の全チャンネルデータを用いて、気体成分とエアロゾル/PSCs成分、オフセット寄与分を、同時に推定する方法を提案する。この方法では、気候値を用いる必要はない。

5.1 スペクトル線形結合法

ILASの赤外分光計データから気体成分濃度を算出するとき、非線形の最小自乗法を用いて、複数のパラメータ（気体種濃度）を同時に推定している。これは、それぞれの気体固有の吸収断

面積スペクトルは気温・気圧の関数として既知であるとして、気体の濃度を未知数として解くものである。気体の吸収断面積スペクトルは、波長（波数）方向に非常に細かく振動しているため、低分解能分光計であるILASの各素子の信号値をシミュレートするために複雑な計算を要する。

エアロゾル/PSCs等による消散（吸収）についても、その種類、光学特性が既知であるとすると、消散スペクトルは事前に計算出来る。したがって、それぞれのエアロゾル/PSCsの数濃度を未知数と考えれば、気体成分を算出するのと同様の手順で、同時に推定することが可能である。これは、オフセット寄与分についても同様である（スペクトルがフラットであると考ええる。）この方法では、赤外分光計の全チャンネルデータを利用することが出来る。さらに、この方法では、異なる種類のエアロゾル/PSCsが混在するような場合にも、これらの線形和と考えて良いことから、個別にその寄与を評価できるという利点がある。

この方法の適用で必要になることは、エアロゾル/PSCsのモデル化である。代表的なエアロゾルタイプと、それぞれの代表的な粒径分布形を与える必要がある。ここでは、表3に示したパラメータでエアロゾル/PSCsをモデル化した。

表3 エアロゾル/PSCs等のモデル

	成分比	r_g	σ_g
硫酸エアロゾル	75% H ₂ SO ₄	0.075	1.86
氷	H ₂ O	10.0	1.5
硝酸	22.3 % HNO ₃	0.5	1.5
β -NAT		0.5	1.5
オフセット	-	-	-

実際のILASデータを用いた、気体成分とエアロゾル/PSCsの寄与の同時推定を試みた。解釈が簡単なケースとして、硫酸エアロゾルのみと考えられるケースに適用して求めた、メタン成分濃度高度分布を図9に示した。

PSCsのケースにも、同様に適用した。すべてのPSCsを未知パラメータとすることは原理的には可能であるが、解の安定性、現実性の点から適当とは言えない。どのPSCsを解の対象とするかに、任意性がある。また、PSCsのモデルそのものに、不確定な部分があること、オフセットの原因が未だ不明であることから、今後、検討の余地は大きい。

5. 2 まとめ

本節では、ILAS赤外分光計の全チャンネルデータを用いた、気体成分、エアロゾル/PSCs成分寄与の同時推定の方法を提案し、実データへの適用を試みた。いくつかの問題のために、安定な解法であると言いうに至っていない。特に、個々のエアロゾル/PSCsのスペクトルの独立性が十分であるかということと、オフセットの寄与がエアロゾル/PSCsの寄与を上回った結果を与

えており、異なる種類のエアロゾル/PSCsの寄与を評価できるほどの有意な信号を含んでいるかという点が問題である。

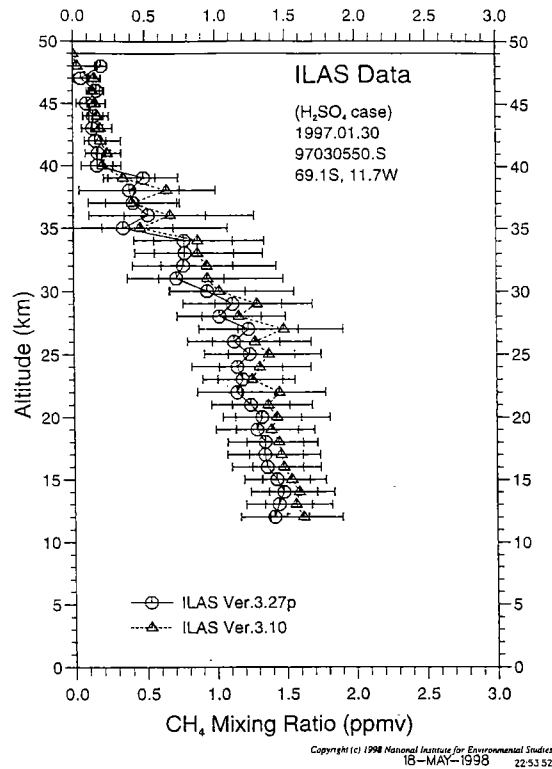


図9 エアロゾル/PSCsの代表的スペクトルの線形結合法を用いて同時推定されたメタン濃度分布（硫酸エアロゾルの場合：Version 3.27p）。Version 3.10のメタン分布を併せて示した。

6. その他の方法

Dubovikは、次の二つの方法を提案している。ひとつは、エアロゾル/PSCsによる消散スペクトルそのものを折れ線で近似することとし、その折れ線を表現するパラメータを未知数として推定する方法である。他のひとつは、エアロゾル/PSCsの粒径分布を、同様に折れ線で近似し、その折れ線を表現するパラメータを未知数として推定する方法である。後者の場合には、エアロゾル/PSCsがどの種であるかをあらかじめ知っておく必要がある。

前者の方法では、エアロゾル/PSCsがどの種であるかをあらかじめ知っておく必要はない。さらに、この方法は、第5章で提案した方法の変形と見ることが出来る。すなわち、第5章でモデル化した個々のエアロゾル/PSCsの消散係数スペクトルの代わりとして、次に示すように適当な素子間隔で三角形のスペクトルを用意する。そして、この三角形スペクトルの線形結合として、未知のエアロゾル/PSCs消散係数スペクトルを表現すると考える。すると、線形結合の係数を未知数とすることが出来、前章と同様の方法で、同時推定を行うことが出来る。

いずれの方法についても、簡単なシミュレーション解析を行ったところ、原理的には適用可能

であることが示された。さらに詳細な解析、検討が必要である。

7. おわりに

当初の研究計画では、第一の方法としてILAS 赤外分光計の窓チャンネルデータを利用して、エアロゾルタイプの識別、粒径分布パラメータの推定、理論計算によるスペクトル補間、という逐次解法の採用を予定していた。シミュレーションでは、この方法が十分機能することが示されたが、実際のILASデータからは、オフセットの存在が推定され、現実的な対応（線形補間法によるスペクトル推定）への変更が必要となった。ILASデータ処理運用ソフトウェア（Version 3.10）は、この線形補間法によるスペクトル推定法を採用しており、これで求めた気体成分濃度分布は、その他の問題に起因する不都合を除いては、ほぼ妥当なものとなっている。

第2の方法は、赤外分光計の全チャンネルデータを利用して、気体成分とエアロゾル/PSCs成分の寄与を同時推定するものである。やはり、オフセットを考慮する必要があるため、オフセット分をも未知数として解くことを試みている。エアロゾル/PSCsの場合、特に赤外波長領域の消散係数、あるいはPSCsの種類、濃度等の直接的な検証データを得ることが極めて難しい。そのため、導出された結果の妥当性の評価が難しい。将来的に、有効な検証の方法を検討していく必要がある。

[国際共同研究等の状況]

本研究は、ILASサイエンスチーム活動の一環として、サイエンスチームのメンバーである、P. M. McCormick 博士、L. Thomason 博士（いずれも、NASA/LaRC）らとの協力の下に行われている。

[研究成果の発表状況]

(1) 口頭発表

Okamoto, H., Mukai., S., Sano. I., Sasano, Y. : Aerosol retrieval algorithms from ADEOS/ILAS measurements, The NATO Advanced Study Institute: Remote Sensing of Processes Governing Energy and Water Cycles in the Climate, Ploen, Germany, May 10, 1995

(2) 論文発表

Dubovik, O. V.; T. Yokota, Y. Sasano: An improved technique for statistically optimum inversion applied to the retrieval algorithm for ADEOS/ILAS, Proc. of the 63th Ann. Conf. of Statistical Society of Japan (Oita, Japan, July 25-27, 1995), 127-128, (1995)

○Dubovik, O. V., T. Yokota, Y. Sasano: Improved technique for data inversion and its application to the retrieval algorithm for ADEOS/ILAS, Adv., Space Rev., 21, 397-403, (1998)

Kanzawa, H., C. Camy-Peyret, Y. Kondo, and N. Papineau: Implementation and first scientific results of the ILAS validation balloon campaign at Kiruna-Esrange in February - March 1997. Proc. 13th ESA Symp. European Rocket and Balloon Programmes and Related Research (Oland, Sweden, 26-29 May 1997), ESA SP-397, 211-215, (1997)

- Mukai, S., I. Sano, Y. Sasano, M. Suzuki, T. Yokota: Retrieval algorithms for stratospheric aerosols based on ADEOS/ILAS measurements, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 32 (5), 1124-1127, (1994)
- 岡本 創：ILASによる赤外波長でのエアロゾル観測、エアロゾル研究、12 (1), 18-22, 1997.
- Okamoto, H., Y. Sasano, S. Mukai, I. Sano, H. Ishihara, T. Matsumoto, L. Thomason, M. Pitts: ADEOS/ILAS aerosol retrieval algorithm with 5 channels, Adv., Space Rev., 21, 4-446, (1998)
- Sasano, Y., M. Suzuki, T. YOkota, H. Kanzawa: Early results from Improved Limb ATmospheric Spectrometer (ILAS) measurements, Geocarto International, 12, (4), 61-68, (1997)
- Sasano, Y., M. Suzuki, T. YOkota, H. Kanzawa: Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) measuements of the stratospheric ozone layer: its early results, J. Japan Remote Sensing Soc., 17, 493-499, (1997) (in Japanese)
- Suzuki, M., A. Matsuzaki, T. Ishigaki, N. Kimura, N. Araki, T. Yokota, Y. Sasano: ILAS, the Improved Limb Atmospheric Spectrometer, on the Advanced Earth Observing Satellite, IEICE TRANS. Commun., E78-B, 12, 1560-1570, (1995)
- Yokota, T., M. Suzuki, O. V. Dubovik, Y. Sasano: ILAS (Improved Limb Atmospheric Spectrometer)/ADEOS data retrieval algorithms, Adv., Space Rev., 21, 393-396, (1998)

(3) 出願特許、授賞等
なし