

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

(8) ILAS データ等を用いた雲/極成層圏雲の検出に関する研究

環境庁国立環境研究所

地球環境研究センター

エコフロンティアフェロー

横田 達也

Thomas Paul Kurosu

平成 11～12 年度合計予算額

2,052 千円

(うち、平成 12 年度予算額

1,052 千円)

[要旨] 本研究では、環境庁の開発した衛星センサー ILAS (改良型大気周縁赤外分光計) による測定データから、極成層圏雲 (PSC) を検出するための手法開発を行った。本 PSC 検出手法では、酸素分子の回転 Aバンド付近のスペクトル領域 (波長 753 - 784 nm) の、ILAS の可視チャンネルによる観測情報を利用し、観測光路の接線高度の関数としてエアロゾルの光学的厚さを求めるために、データへの線型または非線形のスペクトル・フィッティングを行った。PSC の光学的厚さは、高度の関数として得られたエアロゾルの光学的厚さに線型関数のフィットを施すことによって求められる。

PSC と判定された事象について、ILAS の運用処理プロダクトと比較したところ、プロダクト上にバイアス誤差を持つ可能性はあるものの、PSC の存在する高度領域において、脱窒現象、水蒸気の除去 (減少)、そして低温現象が認められた。また、ILAS の観測透過率におけるエアロゾルによる多重散乱性について簡単なテストを行ったところ、相対的に光路長が長くなる効果や、濃いエアロゾル層で大気吸収が見られるなどの、多重散乱の証拠となるような現象は見あたらなかった。すなわち、ILAS の観測では、光の多重散乱を考慮に入れて処理を行う必要はないことが解った。

さらに本研究では、高速かつ簡単な手法によって、ILAS の観測データから、PSC を観測している可能性のある候補事象を選定する手法を提示した。

[キーワード] 太陽掩蔽法センサー、非線形推定、スペクトル、酸素

1. はじめに

極成層圏雲 (PSC) は、極域大気中のオゾン破壊の重要な要因の一つである。なぜなら、極域の春季には、粒子の表面上で生じる触媒不均一反応と、PSC の形成に伴う大気の脱硝を介して、オゾンを破壊する塩素のリザーバを活性化する能力を有するからである。ADEOS 衛星に搭載された環境庁の改良型大気周縁赤外分光計 ILAS¹⁾は、1996 年 11 月から 1997 年 6 月までの運用観測期間中に、特に北半球における多くの PSC イベントを観測した。Hayashida *et al.*²⁾ は、PSC の存在の検出とその組成の導出のために、ILAS のレベル 2 データプロダクト (エアロゾル消散係数、気体の体積混合比など) を、PSC の気候値と組み合わせて利用した。一方、ここで提示する PSC 検出手法は、酸素の吸収 Aバンドを含む領域 (0.753~0.784 μ m) の ILAS レベル 1 (透過率) データを利用している。したがって、本手法は、ILAS の運用アルゴリズムに近く、ILAS による運用上の簡易エアロゾル導出手法にフィードバックすることができる^{3~5)}。本報告では、導出手法を提案するとともに、ILAS の観測データに適用して検出された PSC の観測イベントにおいて、観測された気体濃度間に PSC イベントとして科学的な整合性のあることを示し、本手法の有効性を示す。

2. 研究目的

本研究の開始段階では、本研究の目的は、ILAS のような大気周縁観測センサーの観測データから、成層圏と対流圏の雲/エアロゾルの検出手法を開発することであった。しかし対流圏の雲検出は難しいことが判明した。より低い高度の大気圏では光学的厚さが大きくなるため、ILAS のような掩蔽法観測は、対流圏界面レベル付近で終了となってしまふ。このため、対流圏の雲検出は、事実上不可能である。したがって、本研究では、下部成層圏における PSC 検出手法の開発を重点とすることとした。なお、本手法の PSC 検出のスキームは、例えば、ILAS-II、ACE、SCIAMACHY⁶⁾のような、他の大気周縁放射あるいは掩蔽観測センサーにも、比較的容易に応用されることを目的として研究を行った。

3. 研究手法

(1) 利用する ILAS データ

ADEOS 衛星 (1996 年 11 月～1997 年 6 月に運用稼働) に搭載された ILAS は、スペクトル範囲 0.753～0.784 μm (可視チャンネル、O₂ Aバンド) と 6.2～11.7 μm (赤外チャンネル) の大気周縁方向における大気の透過率を観測した。その主な観測対象は、O₃、HNO₃、N₂O、CH₄、H₂O、エアロゾル、極成層圏雲である。観測は極域に限定され、日の出 (北) と日の入り (南) の観測モードで行われた。

大気の周縁観測では、装置は地球大気を通して太陽を見る (図 1 参照)。大気の構成成分による吸収と散乱は、透過太陽光線の減衰として観測される。個々の観測高度は、太陽光線と地球表面の最も近い距離として定義される「接線高度」によって与えられる (接線高度は、図 1 では白い矢印で示されている)。

特に周縁観測方式では、単位光路あたりで小さな光学的厚さであっても積分され、吸収または散乱の影響を検出しやすい。観測の高度範囲は、上限は大気層の頂上 (一般には 80～100km) から、下限は増加する光学的厚さが観測を終了させるおよそ 10km 付近までであるが、下限の高度は、雲やエアロゾルの含有量に左右される。

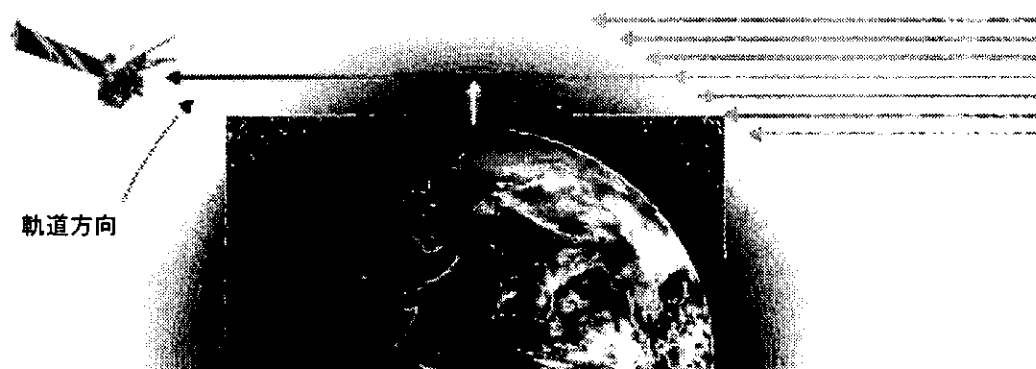


図 1 ILAS 装置による大気周縁観測の概念 (白い矢印は、観測の接線高度を示す)

(2) ILAS 可視チャンネル測定データ

ILAS は、接線高度に対する気温の導出のための酸素 Aバンドを含む可視チャンネルを有する。酸素の吸収量測定は、大気中で酸素の鉛直分布が一定であることを利用して、衛星センサーでしばしば用いられ

ている。図 2 は、さまざまな接線高度での、ILAS によって観測された酸素の吸収スペクトルを示している。酸素の吸収スペクトルの上にある基準線（点線）は、レイリー（Rayleigh）散乱とオゾン・ウルフ（Wulf）バンド⁷⁾を合わせた影響を示している。

本研究では、装置からの視野に沿ったエアロゾルや PSC の光学的厚さを導出するため、酸素の吸収領域付近の ILAS 可視チャンネル・データを利用した。しかし本検出手法は、フィッティングに十分な数のスペクトルポイントが利用できるような波長領域を有するセンサーであれば、基本的にはどれについても適用が可能である。

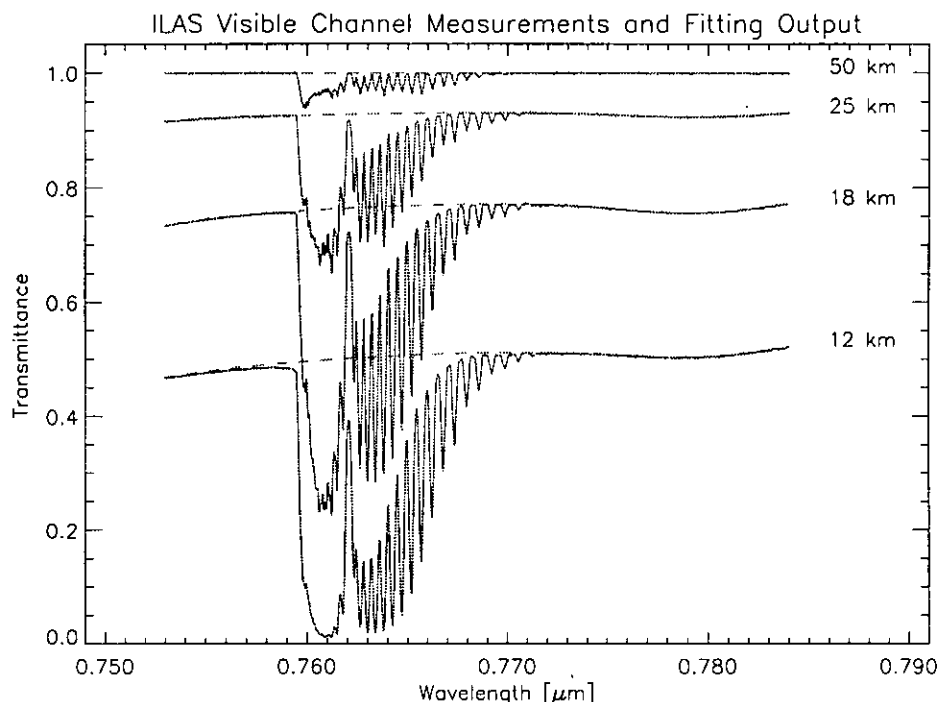


図 2 4つの異なる接線高度の ILAS による酸素分子吸収スペクトル

(3) オゾン参照用スペクトル

オゾンは、酸素 Aバンドのスペクトル領域で吸収を示す。このいわゆるウルフバンド吸収は、比較的弱い（断面積のオーダーで $2\sim 5 \times 10^{-22} \text{cm}^2/\text{分子}$ ）が、大気を通過して観測されるような光路の長い周縁方向観測においては重要になる。

図 3（上段）は、ドイツのブレーメン大学で計測された O_3 の吸収断面積を示している。これらのデータは、5つの異なった温度における SCIAMACHY センサーのフライトモデルにより測定された。断面積計測結果の詳細を表 1 に示す。表 1 は、ブレーメン大学より入手したデータファイルのヘッダ部分を示している。オゾン断面積の計測誤差は、ウルフバンド領域を含むシャピュイ（Chappuis）領域で 3.5%以下である。

図 3 の上段に示されるように、断面積の測定結果は、 $0.765 \mu\text{m}$ あたりで小さな振動を示している。これらは、 O_3 に変換されるガス・セル内のわずかな O_2 により生じる。これらの影響を除去し、全体的な吸収断面積を滑らかにするために、多項式を測定値にフィットさせた（図 3 下段）。

図 4 は、1つの温度に対するフィットによるアウトプットと計測値を重ねて示している（上段）。フィッ

ティング残差は、図の下段に示している。

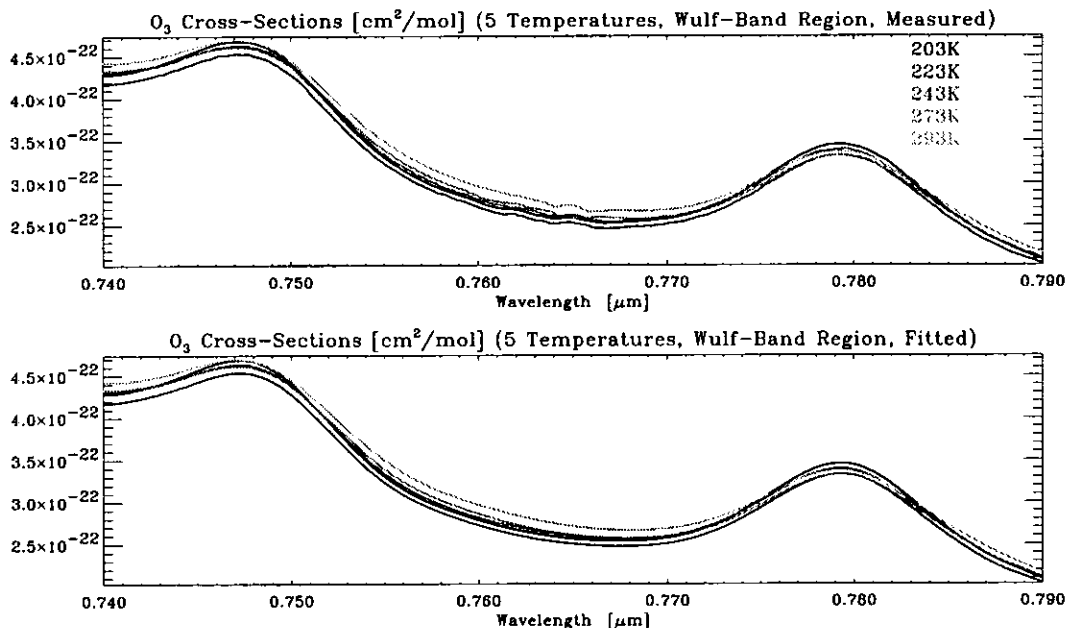


図3 ウルフバンド領域のオゾン参照用スペクトル

上段：SCIAMACHY フライトモデルによってブレーメン大学で測定された 5 つの温度における O₃ 断面積測定結果 (J. Orphal & K. Bogumil、私信)
 下段：オゾン断面積に対する多項式フィッティングの結果

表1 T=293K での SCIAMACHY O₃ 断面積ファイルのヘッダー情報

***** 293KでのO₃吸収断面積*****

1.0版

日付：2000年8月

K. Bogumil, J. Orphal, J. P. Burrows

ブレーメン大学、環境物理学研究所

私書箱33 04 40

D-28334、ブレーメン、ドイツ

e-mail : Konstanze.Bogumil@iup.phisik.uni-bremen.de

1. カラム・タイトル：波長 (真空)

1. カラム・ユニット：nm

1. カラム・タイトル：吸収断面積

1. カラム・ユニット：cm²/molec

波長領域：230~1070 nm

スペクトル分解能：311.2 nm 以下で0.32 nm、311.2 nmと406.7 nmの間で0.21 nm、406.7 nmと598.7 nmの間で0.52 nm、598.7 nmと781.4 nmの間で0.47 nm、781.4 nmと1056 nmの間で0.62 nm、1056 nm以上で1.45 nm (FWHM)

ファイルのデータポイントの数：4243

実験条件：

光源：498.4 nm~697.3 nm波長領域用キセノン・ランプ、QTHランプ

セル：多重反射石英セル (ホワイトセル)

温度：293K

ガス混合：O₃、O₂、N₂

条件：流量測定

全圧：50~900 mbar

スペクトロメーター：SCIAMACHY PFM 衛星搭載用分光器（8チャンネル・グレーティング・スペクトロメーター）

注：スペクトル領域は、290.9 nm、301.4 nm、311.2 nm、316.7 nm、334.4 nm、344.5 nm、406.5 nm、498.2 nm、598.7 nm、697.3 nm、781.4 nm、1056 nmで分断され、連結されている。

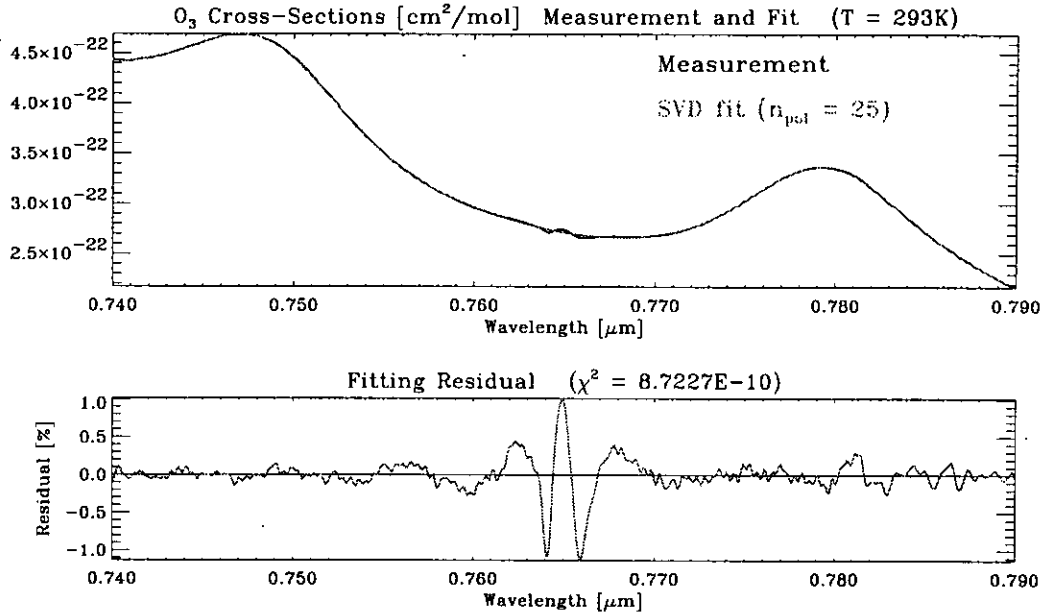


図4 ウルフバンド領域でのオゾン参照用スペクトル (T=293K)
 上段：多項式フィッティングのアウトプットと測定された断面積（点線）
 下段：フィッティング残差

以下の節では、PSC 検出のためのフィッティング手法について説明する。PSC フィッティングに用いられるオゾン参照断面積は、SCIAMACHY による断面積測定結果に対する多項式フィットのアウトプットを用いる。

(4) PSC 検出

ILASの観測スペクトルによるPSC検出は、3段階でなされ、それらの全てが線形あるいは非線形フィッティングを含んでいる。それらは、ILAS装置パラメータの決定、ILAS観測透過率のスペクトル・フィッティング、接線高度の関数としてのエアロゾルの光学的厚さに対する最終的なフィットからなる。

① 第1段階：装置パラメータの決定

100km あるいはそれ以上の接線高度では、大気による消散は実質的に全く観測されず、周縁方向の透過率計測値は直線形となる。しかしながら、高い接線高度での ILAS 透過率は、波長の関数としてやや傾斜を示している。これは、装置の影響によるものであろう。この影響を除くために、直線

$$y(p_0, p_1) = 1.0 + p_0(h) + p_1(h)\lambda, \quad (1)$$

は、最上位接線高度 h_{top} から 110km あるいは $h_{top}-3km$ のどちらか小さい方に向かって（どちらがより小さくても）波長 λ の関数として、ILAS の観測透過率にフィットさせる。その後、 $p_0(h)$ と $p_1(h)$ は接線高度 h にわたって平均する。この平均値 p_0 と p_1 は、第 2 段階でスペクトル・フィッティングのインプットとして

用いられる。

選定した 3 つの ILAS 観測値に対する結果については後述する。これらの事象に対して得られた p_0 と p_1 の値を、表 2 に示す。

② 第 2 段階：ILAS 観測透過率のスペクトル・フィッティング

第 2 段階では、モデル関数 $T_h(\lambda)$ が、各観測接線高度 h ごとに、波長 λ の関数として、透過率 $T_{h,0}(\lambda)$ にフィットされる。0.757 μm と 0.774 μm の間の酸素の吸収帯のデータは、フィットから除外する。つまり、スペクトル・フィッティング・ウィンドウは、[0.753 μm ~0.757 μm] 及び [0.774 μm ~0.784 μm] となる。

表 2 3 つの選定された ILAS 観測値に対する方程式 (1) による装置パラメータ p_0 と p_1

パラメータ	ILAS観測事象		
	970514554S	970527575S	970616314S
p_0	-1.1558×10^{-3}	-2.3304×10^{-4}	-6.8006×10^{-5}
p_1	1.4309×10^{-3}	3.8973×10^{-4}	1.6782×10^{-4}

スペクトル・フィッティングには、線形あるいは Levenberg-Marquardt⁸⁾型の非線形最小二乗フィットのどちらかを用いることができる。ただし、モデル関数と実際のフィッティング手順は、これらの 2 つのアプローチによって異なる。

ア. 非線形フィッティング

非線形フィッティングには、以下のモデル関数を用いる。

$$T_h(\lambda) = T_{h,0}(\lambda) \times e^{-\tau_{O_3}(\lambda)} \times e^{-\tau_{Mie}/\lambda} \times e^{-\tau_R(\lambda)} - p_0 - p_1 \lambda, \quad (2)$$

ここで、掩蔽観測による透過率 $T_{h,0}(\lambda) \equiv 1$ である。モデルには、レイリー散乱 τ_R 、オゾン・ウルフバンド吸収 τ_{O_3} ((3)で紹介した SCIAMACHY の断面積測定値に基づく)、ミー (Mie) 散乱 τ_{Mie} (エアロゾル及び雲) の寄与がある。ミー散乱の $1/\lambda$ 波長依存性は、(2)式の τ_{Mie} に含まれないことに注意が必要である。同様に、第 1 段階で求めた 2 つの装置パラメータ p_0 及び p_1 も(2)式に含まれる。 τ_{O_3} 及び τ_{Mie} のみについてフィッティングが施され、他のパラメータは接線高度ごとで固定した値が用いられる。特に、レイリー散乱の光学的厚さは、ILAS 運用処理にも用いられている UKMO の気温と気圧の鉛直プロファイルに手を加えた値から計算される²⁾。レイリー散乱断面積は、Chance & Spurr⁹⁾による数値を用いている：

$$Q_R \times 10^{24} (\text{cm}^2) = \frac{3.99993 \times 10^{-4} \sigma^4}{1 - 1.069 \times 10^{-2} \sigma^2 - 6.681 \times 10^{-5} \sigma^4}, \quad (3)$$

ここで、 $\sigma (\mu\text{m}^{-1}) \equiv 1/\lambda(\mu\text{m})$ である。 τ_R の計算に必要な大気光路長は、屈折を考慮しない単純な幾何学計算から導出している。屈折を考慮している ILAS の運用処理による光路長との差は、最大で 3% のオーダー (低高度の大気層) であり、PSC イベントが最も起こりやすい 15~30km の高度範囲においては、1% をかなり下回る。したがって、本質的な差異は生じないと考えられるため、本検討では簡便な光路計算によって行った。

イ. 線形フィッティング

線形フィッティングには、同じフィッティング・パラメータ τ_{O_3} 、 τ_{Mie} (変数) と、 τ_R 、 p_0 、 p_1 (固定値) を含んでいる。しかし、これには、装置によるベースラインを透過率から引くといった、事前の修正作業

が必要である：

$$\tilde{T}_h(\lambda) = T_h(\lambda) - (p_0 + p_1\lambda). \quad (4)$$

フィッティングは線形であるため、調整後の透過率 $\tilde{T}_h(\lambda)$ の対数を取ることが必要である。 $\ln(T_{h,0})=0$ とすると、以下のモデル関数が、線形の場合のあてはめ結果となる：

$$\ln(\tilde{T}_h(\lambda)) = -\tau_{O_3}(\lambda) - \tau_{Mie}/\lambda - \tau_R(\lambda). \quad (5)$$

(2)式または(4)式のフィットの結果、 $\tau_{Mie}(h)$ 及び $\tau_{O_3}(h)$ が、全ての接線高度 h について得られる。図5及び図6（灰色線）に示されているこれらのパラメータは、PSC 検出手法の第3段階及び最終段階の入力値となる。線形と非線形のフィッティング・アプローチは、厳密に比較できないが、フィッティング・パラメータの値としてほとんど同一の結果をもたらしているということに注目すべきである。非線形フィッティングは、計算コストは高いが、より小さな χ^2 値（残差平方和）をもたらす傾向がある。しかし、この利点以外は、より簡単で高速の線形モデルに比べて非線形フィッティングを選択すべき根拠は、今のところ見あたらない。

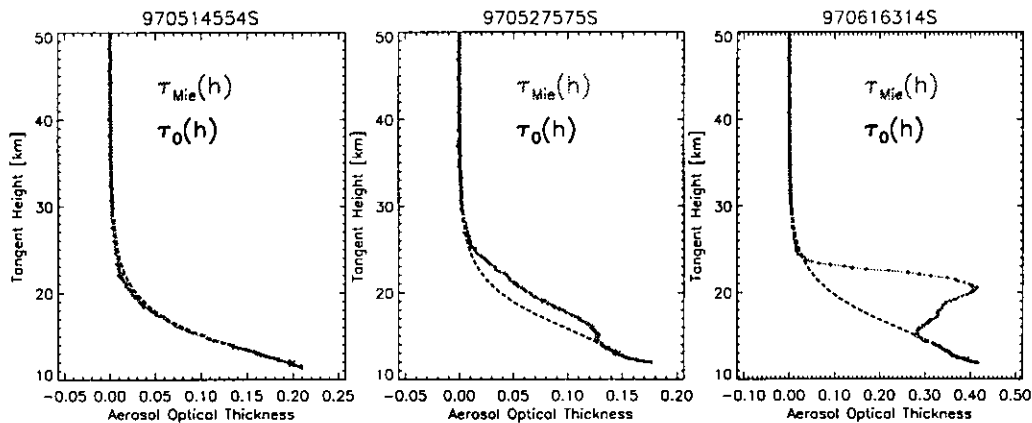


図5 方程式 (2) の非線形モデル関数を用いる、3つのILAS観測値のMie/エアロゾルの光学的厚さ $\tau_{Mie}(h)$ （灰色の点曲線）と $\tau_{O_3}(h)$ （黒色の曲線）。バックグラウンド曲線の点線部分は、方程式(6)によるモデル関数によるその後の線形フィットを除外した高度範囲を示している。

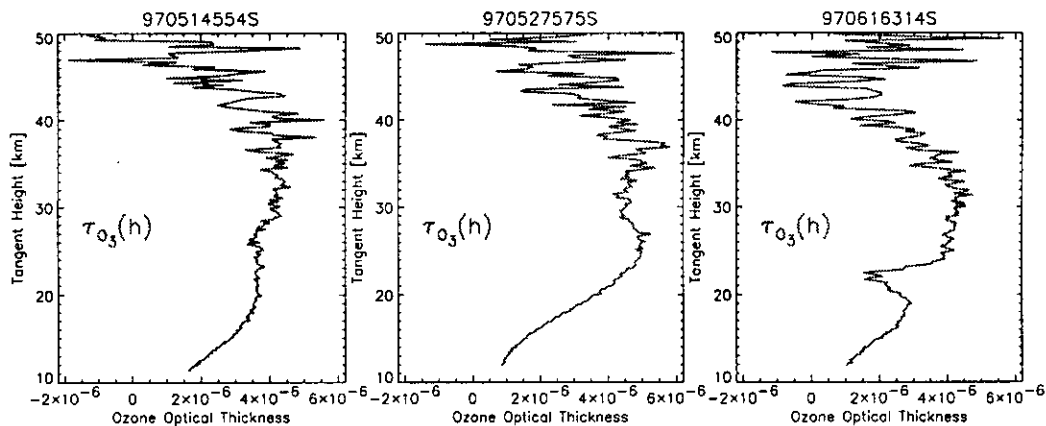


図6 スペクトル・フィッティングによる $\tau_{O_3}(h)$ （第2段階）

③ 第3段階： $\tau_{Mie}(h)$ の鉛直分布に対する多項式フィット

第 2 段階で、ミー散乱（エアロゾル）の光学的厚さ τ_{Mie} は、線形あるいは非線形スペクトル・フィッティングによって決定された。本研究の目的は ILAS 観測スペクトルによる PSC の検出であるため、PSC 形成（～15–30 km）が起こりそうな高度範囲において、エアロゾルの光学的厚さが増加しているような状況を特定する必要がある。それには、バックグラウンド・エアロゾルの大きさ $\tau_0(h)$ についての情報が必要である。 $\tau_0(h)$ は、PSC が形成される 15～30 km の高度範囲を除いて、接線高度の関数として線形多項式フィットを施すことによって、 $\tau_{Mie}(h)$ から導出される。このフィットに用いられるモデル関数は、次のような多項式である：

$$\tau_0(a, h) = \sum_{i=-6}^1 a_i h^i. \quad (6)$$

図 5 は、3 つの ILAS 観測値に対するバックグラウンド値 $\tau_0(h)$ （黒色の曲線）と、それに重ね合わせた $\tau_{Mie}(h)$ （灰色実線で連結された灰色の点）を示している。バックグラウンド曲線の点線部分は、方程式（6）のモデル関数を用いて線形フィットを行う際に除外された高度範囲を示している。3 つの図は、1 つの「バックグラウンド」の事例（左図、ILAS 観測イベント 970514554S）と、2 つの中程度と非常に強いエアロゾルの光学的厚さの事例（中央及び右図、97027575S と 970616314S）を示している。後の 2 つの事例とも、PSC の候補となる可能性があるが、更なる情報がなければ、これらの測定値のいずれかで、PSC が実際に観測されていたかどうかについて言明はできない。この問題に関しては、以下の節で検討する。

4. 結果・考察

（1）PSC の光学的厚さの導出

エアロゾルまたは PSC の光学的厚さは、全体のミー散乱の光学的厚さ τ_{Mie} からバックグラウンド値 τ_0 を引くことにより決定される：

$$\tau_{PSC}(h) = \tau_{Mie}(h) - \tau_0(h). \quad (7)$$

図 7 は、図 5 の 3 つの ILAS 観測イベントに対する τ_{PSC} を示している。左図の全体的に小さな光学的厚さは、「成層圏バックグラウンド」観測を示している。一方、中央及び右図の強い τ 値は、エアロゾルか、あるいは PSC の存在を示している。PSC が実際に観測されたかどうかについては、図 6 で示されるフィッティング結果 τ_{O_3} を見ることで、より明確に見極めることができる。すなわち、観測事象 970616314S（右図）においてのみ、強いエアロゾルの光学的厚さの領域でオゾンの光学的厚さが減少していることがわかる。これは、970616314S が PSC イベントであることを強く示唆している。

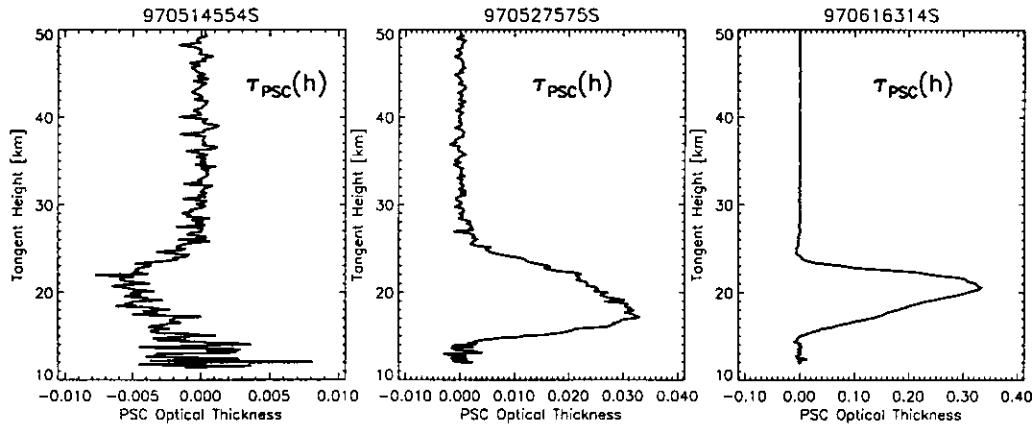


図7 方程式 (7) によるエアロゾル/PSC 光学的厚さ $\tau_{PSC}(h)$

観測事象970616314Sでは、オゾンの破壊は高度領域21~24kmで生じており、その最も強い破壊は約22kmである。これは、約20.5kmでピークとなっている最大値のPSC光学的厚さ(図7)に相当する高度とは、若干異なっている。この原因として、次のような2つの説明が可能である。① PSCの鉛直方向の不均質性のため、20.5kmでは、オゾン破壊を招かない、② τ_{PSC} のピークをより低い接線高度にシフトさせるような、バックグラウンド・エアロゾルの光学的厚さの決定時におけるエラーによる、である。どちらが本当の理由であるかは現段階では断定できない。

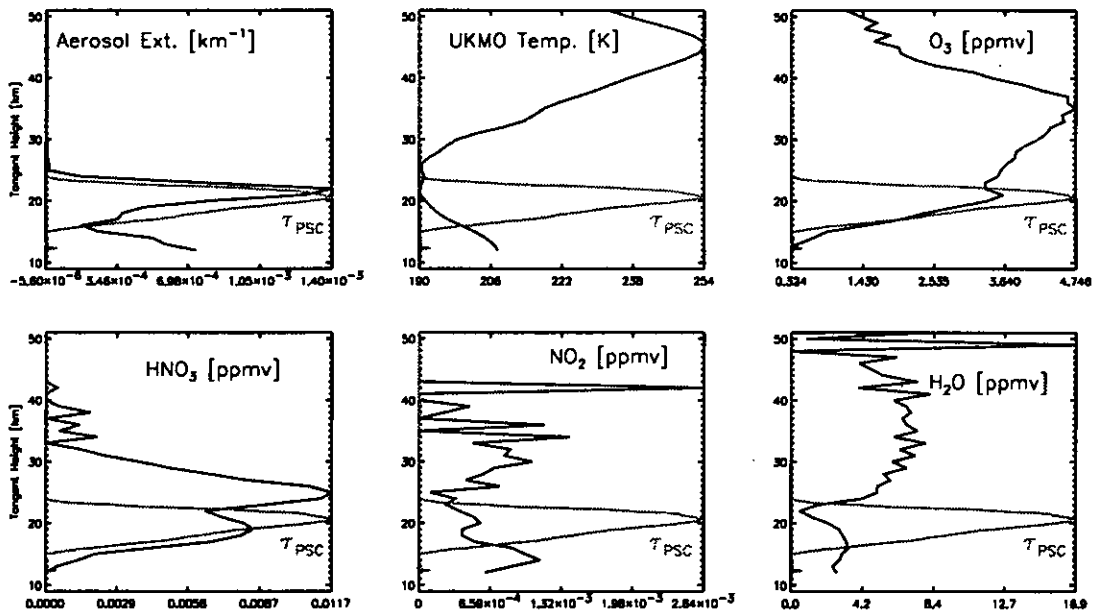


図8 観測事象970616314Sにおける τ_{PSC} と O_3 、 HNO_3 、 NO_2 、 H_2O 、UKMO温度、及びエアロゾル消散係数のILASレベル-2鉛直プロファイルの比較。

(2) ILAS レベル-2 データ・プロダクトとの比較

図8は、運用処理による観測事象970616314SのILASのレベル-2プロダクト(Version 4.20)と τ_{PSC} との比較を示している。図8のプロットは、 τ_{PSC} (灰色の線で、プロット・ウィンドウごとに倍率を変更してある)と重ね合わせた、 O_3 、 HNO_3 、 NO_2 、UKMO温度、及びエアロゾル消散係数(黒い線)の鉛直プロファイルを示している。最小の τ_{O_3} と τ_{PSC} のピークの間に見られる同様のシフトも、図8に示されている。

ILAS のレベル-2 プロダクトでは、窓チャンネルを使用した近似計算によってエアロゾルの影響を推定し、気体濃度が導出されている。通常の硫酸液滴を主成分とするエアロゾルの場合にはこの近似計算による誤差は小さいが、PSC の場合にはバイアス的な誤差が生じる可能性があることが、シミュレーション計算によって確認されている。したがって、気体プロダクト上に相対的に大きな誤差の可能性のあるものの、大きな PSC の光学的厚さを示す高度領域では、エアロゾル消散係数も増加し、オゾン、硝酸、及び水蒸気の減少と、低温 ($T < 190\text{K}$) が観測されていることが図 8 よりわかる。これは、PSC の形成と、その後に発生した O_3 破壊に伴う脱硝の可能性を示唆している。ただし、その現象について確定的な判断を下すには、今後の詳細な検討が必要である。

なお、レベル-2 鉛直プロファイルは、ILAS の Version 4.20 データから導出されているが、PSC の光学的厚さは ILAS Version 5.20 用のレベル-1 データから導出した。この相違の理由は、本研究段階では、観測イベント 970616314S に対する Version 5.20 のレベル-2 プロダクトは、まだ公開されていないためである。

(3) 透過率スペクトルにおける多重散乱効果

次に、濃いエアロゾルが存在する際の重要な問題として、ILAS によって観測されたスペクトルが、多重散乱の影響を受けているかどうかを検討する。掩蔽観測の原理から、一般には多重散乱の影響は小さいはずであるが、特に厚いエアロゾルや PSC が存在する場合には、多重散乱が生じる可能性があり、その効果として光路長が相対的に長くなり、それに伴って大気吸収が増加するため、観測透過率に影響を与えると予想される。

多重散乱効果の有無は、 0.757 及び $0.774 \mu\text{m}$ の酸素 A バンド領域の吸収、すなわち、ILAS の観測透過率のフィットの際に除外されたスペクトル領域の吸収から判断することができる (3-4) 節の第 2 段階を参照)。図 9 は、4-(1) 節及び 4-(2) 節で示した 3 つの観測事例に対して、波長方向に積分した各接線高度での酸素の吸収量を示している。2 本の線があるが、絶対値の積分 $I(\text{O}_2A)$ (灰色の線) は、フィットを施されたベースライン $T_{\text{fit}}(\lambda)$ と観測透過率 $T_{\text{obs}}(\lambda)$ との間の面積を示している。一方、正規化された量 $R(\text{O}_2A)$ は、 $I(\text{O}_2A)$ と同じ面積であるがフィットを施されたベースラインで正規化された面積である (図 2 も参照) :

$$I(\text{O}_2A) = \int_{\text{O}_2A} [T_{\text{fit}}(\lambda) - T_{\text{obs}}(\lambda)] d\lambda. \quad (8)$$

$$R(\text{O}_2A) = \int_{\text{O}_2A} \frac{T_{\text{fit}}(\lambda) - T_{\text{obs}}(\lambda)}{T_{\text{fit}}(\lambda)} d\lambda. \quad (9)$$

観測事象 970527575S や 970616314S のような、強いエアロゾル光学的厚さを示す事象では、エアロゾルがセンサーに到達する光量を減少させるので、 $I(\text{O}_2A)$ の値が小さくなると予想される。しかし、ベースラインに対して正規化して考えると、大気吸収は、多重散乱で強められたことに相当する光路長の増加によって増える可能性がある。もしも実際に、行路長がより長くなったとすれば、 $I(\text{O}_2A)$ が減少する一方、 $R(\text{O}_2A)$ は増加するはずである。

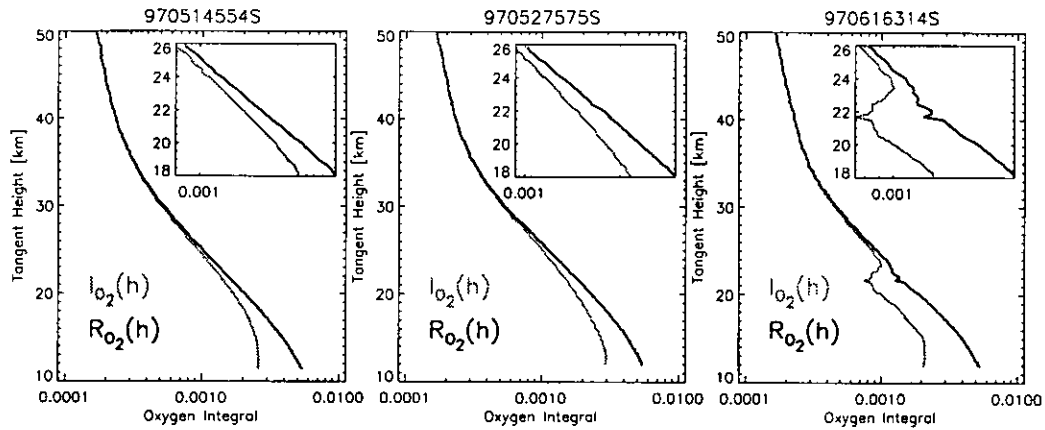


図9 積分された酸素の吸収量

I_{O_2} は絶対値、 R_{O_2} はフィットされたペースラインで正規化されている。

しかし、図9における3つの事象のどれについても、このように正規化された吸収量が増加したことを示す証拠は見られない。各図の右上にある小さな図は、PSCの可能性のある高度範囲について拡大したものである。PSCの観測イベントであると確認されている観測事象970616314Sの $I(O_2A)$ のみが、著しい減少を示している。また、対応する $R(O_2A)$ は、同じ領域において小さな振動を示しているが、大気吸収が強められたことを示すような決定的証拠は何も見られない。

多重散乱効果は、観測事象970616314Sよりも厚いエアロゾルの場合でのみ見られるという可能性はある。ILASの観測事象にしてこの解析を行えばそうであるかどうかは明らかになるはずであり、今後調査する予定である。

(4) PSC候補の抽出

ここでは、PSCを含んでいる可能性のある事象を、ILASデータセットから抽出するための、高速で簡単な手法を提示し、検証する。この手法によって、より精密なPSC解析を行うための候補の数を減らすことができる。処理時間が極めて重要な運用のデータ処理環境においては、このような事前選択は、往々にして重要である。

図5は、方程式(6)で示したモデルによる、 $\tau_{Mic}(h)$ に対する線形鉛直フィットによる結果を示している。このフィットは、バックグラウンド値 $\tau_0(h)$ を決定するために、 $\sim 15-30$ kmの高度領域を除外して行った。PSC高度領域の除外を意味するために χ_{exc}^2 と表記する残差平方和によりフィットの良さを示した。同じモデル関数でPSC領域を含んで同様のフィットを行うと、 χ_{inc}^2 を得る。ここで、 $\tau_{Mic}(h)$ が970514554Sのような「バックグラウンド」エアロゾルの状態とは著しく異なる事例では、 $\chi_{inc}^2 > \chi_{exc}^2$ となる。

図10は、図5と同様の図を示している。ただし、この図では全ての接線高度(黒灰色の曲線)を含む $\tau_{Mic}(h)$ に対する鉛直方向のフィットによる結果も示している。観測事象970514554Sでは、2つの鉛直フィットの間に大きな差は認められなかったが、顕著な差は、事象970527575Sで明らかとなり、事象970616314Sでは非常に大きくなった。各図に示されている χ^2 の値は、これらの観測結果の様子を反映していることがわかる。

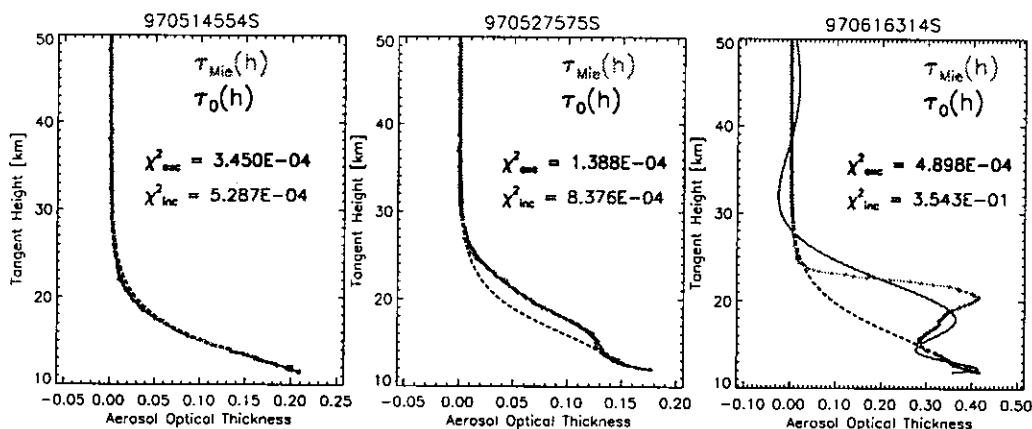


図 10 全ての接線高度 (黒灰色の線) を含む方程式 (6) を用いた鉛直線形フィットによるフィッティング・アウトプットと、図 5 の τ_{Mie} (灰色の線) 及び τ_0 (黒い線)。2 つの鉛直フィットによる χ^2 値も示す。

図 11 は、方程式 (6) による $\tau_{Mie}(h)$ に対する 2 つの線形鉛直フィットの結果についての χ^2 値の散布図「 χ^2_{exc} 対 χ^2_{inc} 」を示している。各 χ^2 値のペアを、黒の三角形で示す。点線は、(経験的に決定した) 等値線を表す。

$$\chi^2_{inc} = 0.3 \times [\chi^2_{exc}]^{1/2}. \quad (10)$$

薄い灰色の三角形は、(11) 式に当てはまる $\chi^2_{inc}(\tau_{Mie})$ と $\chi^2_{exc}(\tau_{Mie})$ の全てのペアを示している。

$$\chi^2_{inc}(\tau_{Mie}) \geq 0.3 \times [\chi^2_{exc}(\tau_{Mie})]^{1/2}. \quad (11)$$

図 11 には、黒灰色のプロットマークで示された上記の 3 つの事象も含まれている。図 11 より、方程式 (10) と (11) の選択基準を用いることによって、PSC の可能性のある観測事象が選定され、候補の数が著しく減少させることができることを示している。ILAS の事例では、全部で約 5700 の掩蔽観測イベントのうち、180 の可能性のある PSC イベントが抽出された。その後、ILAS の観測スペクトルによる PSC の組成の決定に関する、カナダのウォータールー大学教授 J. Sloan 氏との共同研究の結果、これらの候補事例のいくつかには、PSC の化学組成に関する情報を得るために十分に顕著な PSC が含まれていることが判明した。

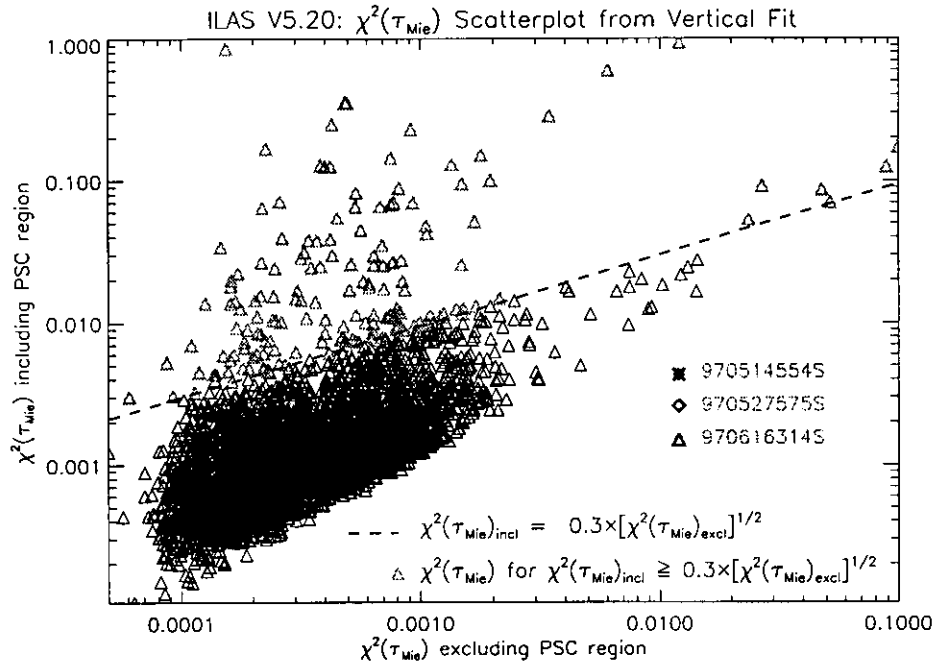


図 11 方程式 (6) によるモデル関数を用いた、 $\tau_{Mie}(h)$ に対する 2 つの線形鉛直フィットによる χ^2 値の 散布図「 χ^2_{exc} 対 χ^2_{inc} 」。なお、残差平方和 χ^2_{inc} と χ^2_{exc} は、PSC 発生の可能性のある高度を含むか除外するかの相違を示す。

5. 本研究により得られた成果

本研究では、環境庁の開発した衛星センサ ILAS (改良型大気周縁赤外分光計) による測定データから、極成層圏雲 (PSC) を検出するための手法開発を行った。

本 PSC 検出手法によって PSC と判定された事象について、ILAS の運用処理プロダクトと比較したところ、PSC の存在する高度領域において、脱窒現象、水蒸気の除去 (減少)、そして低温現象が確認され、その有効性が確認された。

また、ILAS の観測透過率におけるエアロゾルによる多重散乱性について簡単なテストを行ったところ、相対的に光路長が長くなる効果や、濃いエアロゾル層で大気吸収が見られるなどの、多重散乱の証拠となるような現象は見あたらず、ILAS の観測では光の多重散乱を考慮に入れて処理を行う必要はないことが解った。

本研究では、ILAS の観測データから、PSC を観測している可能性のある候補事象を高速に選定する手法を提示した。本手法は、今後の ILAS-II データの運用処理にも応用が可能である。

6. 引用文献

- 1) Sasano, Y., M. Suzuki, T. Yokota, and H. Kanzawa, Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) for stratospheric ozone layer measurements by solar occultation technique, *Geophysical Research Letters*, **26**(2), 197–200, (1999).
- 2) Hayashida, S., N. Saitoh, A. Kagawa, T. Yokota, M. Suzuki, H. Nakajima, and Y. Sasano, Arctic polar stratospheric clouds observed with the improved limb atmospheric spectrometer during the winter of 1996/1997, *Journal of Geophysical Research*, **105**(D20), 24715–24730, (2000).

- 3) Dubovik, O., T. Yokota, and Y. Sasano, Improved technique for data inversion and its applications to the retrieval algorithm for ADEOS/ILAS, *Advances in Space Research*, **21**(3), 397–403, (1998).
- 4) Okamoto, H., Y. Sasano, S. Mukai, I. Sano, H. Ishihara, T. Matsumoto, L. Thomason, and M. Pitts, ADEOS/ILAS aerosol retrieval algorithm with 5 channels, *Advances in Space Research*, **21**(3), 443–446, (1998).
- 5) Yokota, T., M. Suzuki, O. Dubovik, and Y. Sasano, ILAS (Improved Limb Atmospheric Spectrometer)/ADEOS data retrieval algorithms, *Advances in Space Research*, **21**(3), 393–396, (1998).
- 6) Bovensmann, H., J. Burrows, M. Buchwitz, J. Frerick, S. Noël, V. Rozanov, K. Chance, and A. Goede, SCIAMACHY: Mission objectives and measurement modes, *Journal of the Atmospheric Sciences*, **56**, 127–150, (1999).
- 7) Brion, J., A. Chakir, J. Charbonnier, D. Daumont, C. Parisse, and J. Malicet, Absorption Spectra Measurements for the Ozone Molecule in the 350 - 830 nm Region, *Journal of Atmospheric Chemistry*, **30**, 291–299, (1998).
- 8) Marquardt, D., *J. Soc. Indust. Appl. Math.*, **11**, 431, (1963).
- 9) Chance, K. V. and R. J. Spurr, Ring effect studies: Rayleigh scattering including molecular parameters for rotational Raman scattering, and the Fraunhofer spectrum, *Applied Optics*, **36**(21), 5224–5230, (1997).

[国際共同研究等の状況]

本研究は、必要に応じて国立環境研究所、スミソニアン天文学物理学研究所、及びカナダ・ウォータール大学の研究者との議論を行って進めた。

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表 (学術雑誌) なし

(2) 口頭発表

- ① T.P. Kurosu, K. Chance, T. Yokota, and Y. Sasano: Proceedings of the SPIE 2nd international Asia-Pacific Symposium on Remote Sensing of the Atmosphere, Environment, and Space, at Sendai, Japan (2000), “Polar Stratospheric Cloud Detection from the ILAS Instrument”
- ② T.P. Kurosu, K. Chance, T. Yokota, and Y. Sasano: Poster Presentation at AGU Spring Meeting at Washington, DC, USA (2001), “Polar Stratospheric Cloud Detection from the ILAS Instrument”
- ③ T.P. Kurosu, K. Chance, T. Yokota, and Y. Sasano: Poster Presentation at 6th HITRAN Conference, at Cambridge, MA, USA (2001), “Polar Stratospheric Cloud Detection from the ILAS Instrument”

(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