

A-1 衛星データ等を活用したオゾン層破壊機構の解明及びモデル化に関する研究
 (3) 統計的手法によるオゾン層変動に関する研究

研究代表者 北海道大学大学院 地球環境科学研究科 塩谷 雅人

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	笹野 泰弘・鈴木 睦・中島 英彰**
大気圏環境部	中根 英昭***
大気圏環境部 大気物理研究室	神沢 博****
地球環境研究センター	横田 達也*****
(委託先) 北海道大学大学院地球環境科学研究科	塩谷 雅人
名古屋大学太陽地球環境研究所	趙 永浄・小池 真・近藤 豊
奈良女子大学理学部	林田 佐智子

平成8-10年度合計予算額	47,530千円
(平成10年度予算額)	15,839千円)

[要旨] 本研究では、衛星観測データおよび地上測定データを用いてオゾン層変動に係る力学的・化学的要因の関連性を解明するために、統計的手法を用いて利用するデータの質を評価し、パラメータの季節変動、年々変動を解析して、オゾン層変動の特徴（普遍性、特殊性）の解明を行った。具体的には、データ質評価のための統計指標の検討、過去及び研究期間中の大気力学場・温度場の年々変動の解明、衛星及び地上観測データに見られる変動の要因解明等を行った。本研究の中で、解析に用いた衛星データの統計量から、気体ごとの月別・緯度帯別の代表的な高度分布を表す気候値データベースを作成した。また、解析の結果、平成8～9年にかけての冬季北半球下部成層圏は寒冷化傾向であったが、平成9、10年度は逆に比較的暖かであったことが判明した。本研究で解析した個々の気体等のパラメータの変動の特徴は、その傾向を反映したものとなっている。また、成層圏大気中におけるパラメータ間の相互関係等についても、いくつかの特徴が明らかとなった。本報告書では、特に衛星センサーILASによって得られた硝酸(HNO₃)及びエアロゾルのデータ質を評価した結果と、成層圏エアロゾルがオゾン層に及ぼす影響の研究として極域成層圏エアロゾルの出現頻度を明らかにした点について記述した。

[キーワード] 成層圏、季節・年々変動、人工衛星データ、ILAS

-
- ・平成10年10月からは宇宙開発事業団地球観測データ解析研究センター
 - **平成9年9月までは名古屋大学太陽地球環境研究所
 - ***平成10年4月までは地球環境研究グループオゾン層研究チーム
 - ****平成10年3月までは地球環境研究センター
 - *****平成9年3月までは地球環境研究グループ衛星観測研究チーム

1. 序

オゾン層破壊機構を解明するため、近年では地上測定点におけるオゾンゾンデなどによる観測に加えて、人工衛星や大規模な気球による観測キャンペーンによって、広域的・定期的なオゾン層の観測データが取得されている。これらのデータはいずれも大気中の物理的・化学的な現象を捕らえるために、様々な測定器を用いて測定されたデータであるが、その測定誤差や導出結果の傾向がまちまちであるため、データの質を考慮せずにそれらの結果を複合しても、科学的に意味のある結果は単純には得られない。さらに、解析結果を解釈する際には、データを取得した年のオゾン層の変動が平年に比較して特殊であるかどうかを見極める必要がある。

また、平成8年度には、わが国でも国産衛星『みどり』が打ち上げられ、その搭載センサーILASによって極域オゾン層観測の観測が開始され、平成9年6月末までの間、約8ヵ月間の観測密度の高いデータが取得された。さらに、その衛星観測データとの比較を行うため、大規模な検証実験も実施され、それらのデータの解析・評価がなされている。したがって、これら大量に取得され始めた観測データのデータ質を評価して、オゾン層破壊機構を解明するためにパラメータ相互の比較解析を行い、オゾン層変動の特殊性と普遍性を解明するために有効な情報を解析する必要性が高まっている。

2. 研究目的

オゾン層の破壊機構のメカニズムは、極渦の変動に関係が深いことが知られている。しかし、その定量的な把握、極渦内と極渦外の相互作用等についての科学的な知見は十分ではない。本研究の3年間の期間において観測・収集されたデータ（衛星観測データ、地上測定データ、検証観測データ等）に基づいてオゾン層の変動機構に関する研究を行う際、各パラメータの年々変動の見地から、使用するデータが平年に比べて特殊な状況を表しているか普遍的な状況を表しているかを明らかにする必要がある。本研究では、オゾン層変動に係る力学的・化学的要因の関連性について解明するとともに、季節変動や年々変動の解析を通して、本研究実施期間中のオゾン層変動の特徴（普遍性、特殊性）を明らかにすることを目的とする。

3. 研究方法

日本や欧米のオゾン層観測センサーや、その観測に合わせて収集された気球やゾンデによる観測データ、及び世界の気象観測点において測定されたデータなどに対して、それらのデータ質を評価しながら、統計的手法により信頼性の高い情報を抽出する。

具体的には、まず過去の衛星データを解析して、代表値と変動の幅を適切に示す統計量について検討した。次に、オゾン、硝酸、エアロゾルなどの測定パラメータごとに評価・解析を行うための責任者を定め、相互の連携を密にしながら各種の手法による観測データを総合的に解析した。測定パラメータごとにその変動の現象に精通する責任者を定めることにより、観測機器の特殊性や他と異なる傾向などを把握しやすくなるという利点があった。

4. 研究結果、考察、及び成果

3年間の研究を通して、過去と現在の衛星観測データにみられる基本統計量の比較検討、大気力学場・温度場に基づく極渦の安定化に関する年々変動の解明、窒素酸化物の相互間の変動

特徴の解明、成層圏エアロゾルがオゾン層に及ぼす影響に関する研究等を行った。以下に代表的な研究結果とその考察、得られた成果の概要を示す。

(1) データ質評価のための基本統計量の検討

観測データを評価するのに必要な統計量としては、代表的な値を与える指標（平均値、最頻値など）と変動範囲（ばらつき）を与える指標（標準偏差など）が必要である。出現頻度が正規分布に近いものについては、平均値と標準偏差が最も一般的でわかりやすい指標であるが、気温や微量気体の濃度など、気象要素に関連するデータの分布は概ね正規分布を示さない。気体濃度は当然非負であるし、頻度は少ないがオーダーが異なるような高濃度の出現もある。このような非正規性の分布に対しては、順序統計量の変動範囲に関する有効な指標となる。順序統計量とは、サンプルデータを大きさの順に並べて全体を100%としたときにx%目に相当する値をxパーセント値として計上した統計量である。代表的なものに、最小値、10%値、25%値（四分位値）、中央値、75%値、90%値、最大値がある。実際の観測データにおける平均値、標準偏差、順序統計量を比較検討した結果、衛星観測データを評価するための代表値としては「平均値」または「中央値」が適当であると判断した。平均値は広く使用されており、概念的にも解りやすい指標である。「中央値」は、集計する衛星データ等の中で、数値のオーダーが異なるような飛び離れて大きなデータの影響を受けないという特徴がある。また、変動の上下限値の目安としては「90%値」と「10%値」を採用した。この指標を用いる場合には、全体の約2割のデータについては10%値~90%値の範囲を逸脱している点に留意する必要がある。

これらの統計指標を用いて、大気微量成分統計量データベースを作成した¹⁾。内容は、オゾン(O₃)、硝酸(HNO₃)、二酸化窒素(NO₂)、亜酸化窒素(N₂O)、メタン(CH₄)、水蒸気(H₂O)、フロン11(CFC1₃)、フロン12(CF₂Cl₂)、硝酸塩素(クロリン・ナイトレート:ClONO₂)、五酸化二窒素(N₂O₅)の各微量気体成分について、緯度5度おき、高度1kmおきに各月の混合比高度分布の統計量を与える。ここで統計量とは、平均値、標準偏差、中央値、10、25、75、および90%値のことである。統計量の作成に当たっては、米国の衛星であるUARSセンサーの中でも年間のより多くの月に、幅広い緯度帯にわたって観測が行われたセンサーのデータを使用した。現在の版ではO₃、H₂OについてはMLSのVersion 3のデータを、NO₂、N₂O、CH₄、CFC1₃、CF₂Cl₂についてはCLAESのVersion 6のデータを、HNO₃、ClONO₂、N₂O₅についてはCLAESのVersion 8のデータを用いた。このデータベースは主にILASのデータ処理に供する目的で作成したが、対象とする緯度帯をILASの観測する高緯度域に限らず全球について作成したため、大気化学に関する他の科学的解析にも広く利用することが可能と思われる。

(2) 北域下部成層圏における極渦の安定化の解析

本研究における主要な目的は、オゾン層変動の特徴(普遍性・特殊性)を解明するため、衛星データ等を活用しながら、統計的手法を用いてその力学的・化学的要因の関連性を明らかにすることにある。その中でも特に、北半球において最近報告されているオゾン破壊に注目し、それがどのようなメカニズムで引き起こされているのか、さらに北半球極域成層圏循環の長期的変動傾向とどのように関連しているのかについて明らかにする。

まず初年度には、解析の基礎となるデータを収集・整理し、オゾン層変動の特徴を理解する上で必要不可欠な力学場の状況について調べた。

第二年度には、これまで整備してきた力学・微量成分データにもとづき、特に最近北半球冬季に顕著なオゾン減少とその背景となる極渦の安定化に焦点を置いた解析を行った。

最終年度には、成層圏の力学場の解析を進め、最終昇温と考えられる現象が極めて早い時期に起こった1999年の気象状況について解析を行うと共に、これまでの研究結果の整理を行った。

①概要

1990年代に入って、南半球春季に特有の現象であると考えられていたオゾン破壊が、北半球の極域でも起こっているらしいと最近報告されている。ここではまず、全球気象データを用い、北半球極域成層圏循環の長期的変動傾向と季節進行の特徴について記述する。次に、3月の極域下部成層圏が記録的な低温となり、同時に、オゾン全量もこの時期としてはこれまでの最低値を記録した1997年の気象状況について詳しく述べる。さらに、このときのオゾン破壊が光化学的な要因によって引き起こされていた証拠を提示する。この年以降、1998, 99年の冬季北半球下部成層圏は、それまでの寒冷化傾向とは逆に比較的暖かであった。その中でも特に最終昇温と考えられる現象が極めて早い時期に起こった1999年の気象状況について報告する。

②解析方法

この研究では力学場を把握する目的で、英国気象局（UKMO）から提供されている全球同化データ（以下UKMOデータという）を主として用いる。UKMOデータは、初期に（1991年～）米国の上層大気観測衛星（UARS）プロジェクトを支援するために作成された全球同化データで、温度場、ジオポテンシャル高度場、3次元風速場（ u, v, w ）が、地表付近（1000 hPa）から高度 0.32 hPa（下部中間圏）まで提供されている。鉛直グリッドはUARSの標準指定気圧面 $1000 \times 10^{i/6}$ ($i=0, 1, 2, \dots, 21$) で与えられる。対流圏から下部成層圏にかけては主として気象ゾンデデータを、成層圏領域についてはNOAA衛星によって観測された温度データを基礎データとしている。したがって成層圏領域では、上記したような高い鉛直分解能を実質的に持っているわけではないこと、風速場は直接観測によるものではなくモデルによって計算された場であることに注意して利用する必要がある。

また、より長期間をカバーする目的で、補助的にベルリン自由大学で編集されている高層データ（ベルリンデータ）も用いる。

さらに、オゾン破壊のメカニズムについて調べるため、UARS衛星搭載のMLS（Microwave Limb Sounder）の微量成分（ O_3, ClO, HNO_3 など）のデータを用いる。

期間は1991～97年、データの提供されている圧力面はUKMOと同じくUARSの標準指定気圧面（ただし100hPa以高）である。UKMOデータと違って、測定原理の制約から極域を連続的に観測できない、最近では得られるデータ量が少なくなっているなどの問題もあるが、ある程度期間平均をした上で使えば、年々変動など時間スケールの長い問題に対して十分活用できる。

③解析結果

ア 北半球成層圏循環の長期変動

北半球の冬から春にかけてのオゾン減少傾向と関連して、同じ時期の下部成層圏における気温の低下傾向が最近指摘されている（たとえば、WMO, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998²⁾）。ベルリンデータを用い、過去約30年間、北半球極域下部成層圏の温度について見ると、以下のような特徴を見てとることができる。

- 1) 夏から初冬（7月から11月）にかけての時期、気温が年々低下している傾向を明瞭に観測できる（たとえば7月では1 K/10年程度）。
 - 2) 1月、2月については、昇温現象に伴う年々変動が大きく、明瞭な低温化傾向は見られない。ただし、大昇温の起こる頻度は低くなっているようである。
 - 3) 3月にはふたたび低温化傾向が見られる；いっぽう5月は1990年代に入ってから比較的暖かい。これらは、近年、夏型循環への移行時期が遅くなっており、最終昇温の程度が大きいことを示しているものと考えられる。
- 1) については、対流圏における温暖化にともなう成層圏の寒冷化が原因の一つとも考えられるが、WMO (1998)²⁾ では下部成層圏におけるオゾン減少も寄与していると指摘している。2)、3) で見られる傾向は1990年代に入ってから顕著であったが、これは1997年までであり、ここ2年ほどは比較的温暖に推移している（図1、及びカラー口絵3-1）。特に、1999年の冬については、最終昇温と思われる現象が3月上旬という非常に早い時期に起こっている。

イ 1996/97年冬季北半球循環場の特徴

ここでは、特に極渦が長期間維持され、「ウ」の項で見るオゾン破壊が顕著に観測された1996/97年北半球冬季の循環場について記述する。その際、南半球における同時期の季節進行と対比させながら見る。

まず、下部成層圏の帯状平均温度場については、対応する季節の南半球とよく似た季節進行をとるが、特に冬から春の時期について見ると極域の温度が南半球ほどは低くないことがわかる。また一般に、南半球ほど低温域が晩春まで続かない（大体は、4月には夏型循環へ移行する）。この冬、北半球冬季に特徴的な成層圏突然昇温は起こっていない。

温度場で見た特徴（低温域の持続）とも対応して、この冬は帯状平均東西風も比較的強い西風を維持していた。11月下旬から12月上旬にかけ、高緯度域で弱い東風となる以外は、大昇温現象にもなって起こる西風から東風への反転は観測されなかった。ちなみにこの期間、赤道域下部成層圏における準2年周期振動の風系は東風である。一般に、準2年周期振動の風系が東風であるとき、中高緯度におけるプラネタリー波動の活動性が大きくなって成層圏突然昇温を引き起こしやすいといわれているが、この冬は逆にどちらかという穏やかな（そして冷たく強い極渦が形成されていた）冬であったといえる。

下部成層圏における温度場とポテンシャル渦度および風速場の空間分布についてみると、2月10日には冷たく強い極渦の存在していることが見てとれ、これが3月中旬にかけても持続的に存在していた。2月から3月にかけての温度場の分布は、南半球のそれとよく似て中緯度帯に馬蹄形をした高温部が存在している。ポテンシャル渦度で見ると、これと呼応して極渦のへりが明瞭に観測される。このように、この冬は冷たく強い極渦が非常に長く存在していたといえる。

ウ 冬季北半球微量成分場の特徴

UARS/MLSが観測したオゾンデータからも、これまでTOMSデータにもとづき報告されていたようなオゾン減少³⁾が確認できる。また同時に、極成層圏雲（PSC）の発生を示唆するように、特に1996, 97年については極域でHNO₃濃度が低くなっている。

こういった微量成分以外で、UARS打ち上げ以降、オゾン破壊過程に関する我々の理解を深める上で大きな助けとなったものの一つとして、MLSの観測したClOが挙げられる。ClOはオゾン破壊が進行しているときに生成される大気微量成分で、オゾン破壊の指標となる。この観点から、過去6年にわたる2月から3月にかけてのClO分布を見ると（図2）、1996, 1997年の2冬については特に高濃度となっており、なかでも1996年は南半球同時期の代表的な値にも匹敵している。

以上のことから、北半球におけるオゾン減少が光化学的なオゾン破壊によるものであることは明らかである。

エ 1998/99年冬季北半球循環場の特徴

1990年代に入って、1996/97年の冬まで続いた寒冷化傾向であったが、1998, 1999年は一転して暖かな冬であった。図1からもわかるように、特に1999年の冬は、まず12月の中旬に大規模な昇温現象があり、その後いったん極域は冷えるものの、3月の中旬には最終昇温と考えられる大規模な昇温現象が起こった。

図3には、1997年の半球規模の温度場、風場、ポテンシャル渦度の場を、図4には1999年の同時期の状態を示す。図4を見ると、2月10日には1997年（図3）と同様に、極の上が冷たくそれを取り囲むように暖かい領域が存在している。しかし、この状況は長続きせず、2月の下旬から極域は次第に暖かな空気塊によって占められるようになり、3月に入ると極を中心として暖かな夏型循環になっている。

④結果の考察

近年観測されている北半球におけるオゾン減少が、光化学的なオゾン破壊によるものであることは明らかである。しかしながらそれではなぜ南半球より10年ほど遅れて北半球でオゾン減少が観測されるようになったのか？ その一つの鍵が温度場に見られる寒冷化傾向と関連していることも明らかであると思われる。寒冷化とオゾン破壊をつなぐリンクの中で、いまだに明確でないのは、オゾン破壊のシナリオにおいて強調されるPSCに関して、北半球においてはたしてほんとうにその出現頻度が高くなっているといえるのかどうかという点であり、これについては今後明らかにしていく必要がある。

（図3及び図4の補足説明）

・ 両図は、北半球68.1hPaにおける温度分布図（左）と460K（68.1hPaに近い等温位面）におけるポテンシャル渦度および風速場（右）。温度のコンター間隔は4K、ポテンシャル渦度のコンター間隔は $5 \times 10^{-6} \text{K kg}^{-1} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 。ポーラステレオ図法を用いており、緯度・経度線の間隔は30度。図3は、上から順に1997年2月10日、2月25日、3月12日。図4は、上から順に1999年2月10日、2月25日、3月12日。

UKMO Temperature : 68 hPa

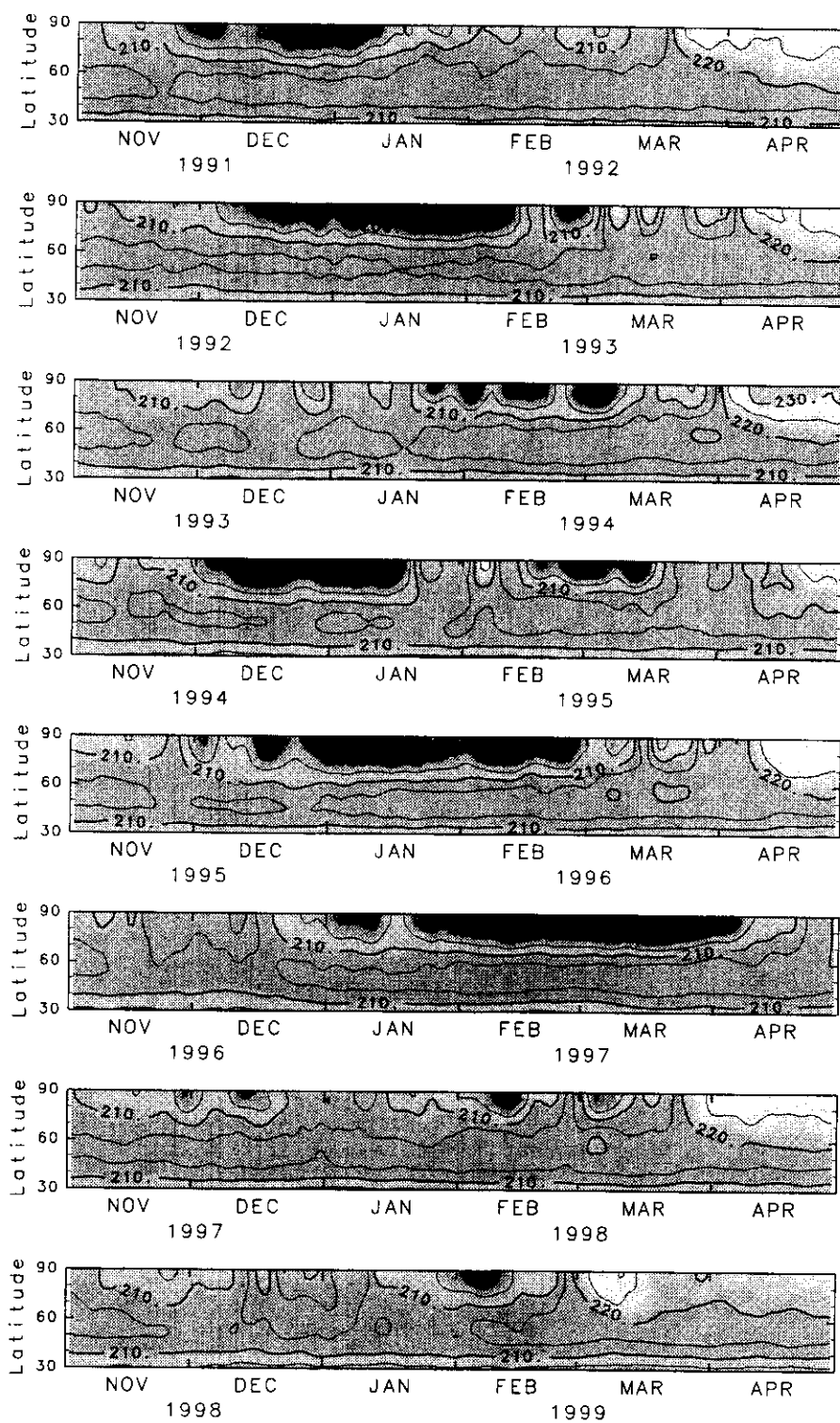


図1 UKMOデータに基づく、68hPaにおける帯状平均した温度場の時間・緯度断面図。冬季を中心にした、1991/92年から1998/99年までの8年分。(カラー口絵3-1と同じ)。

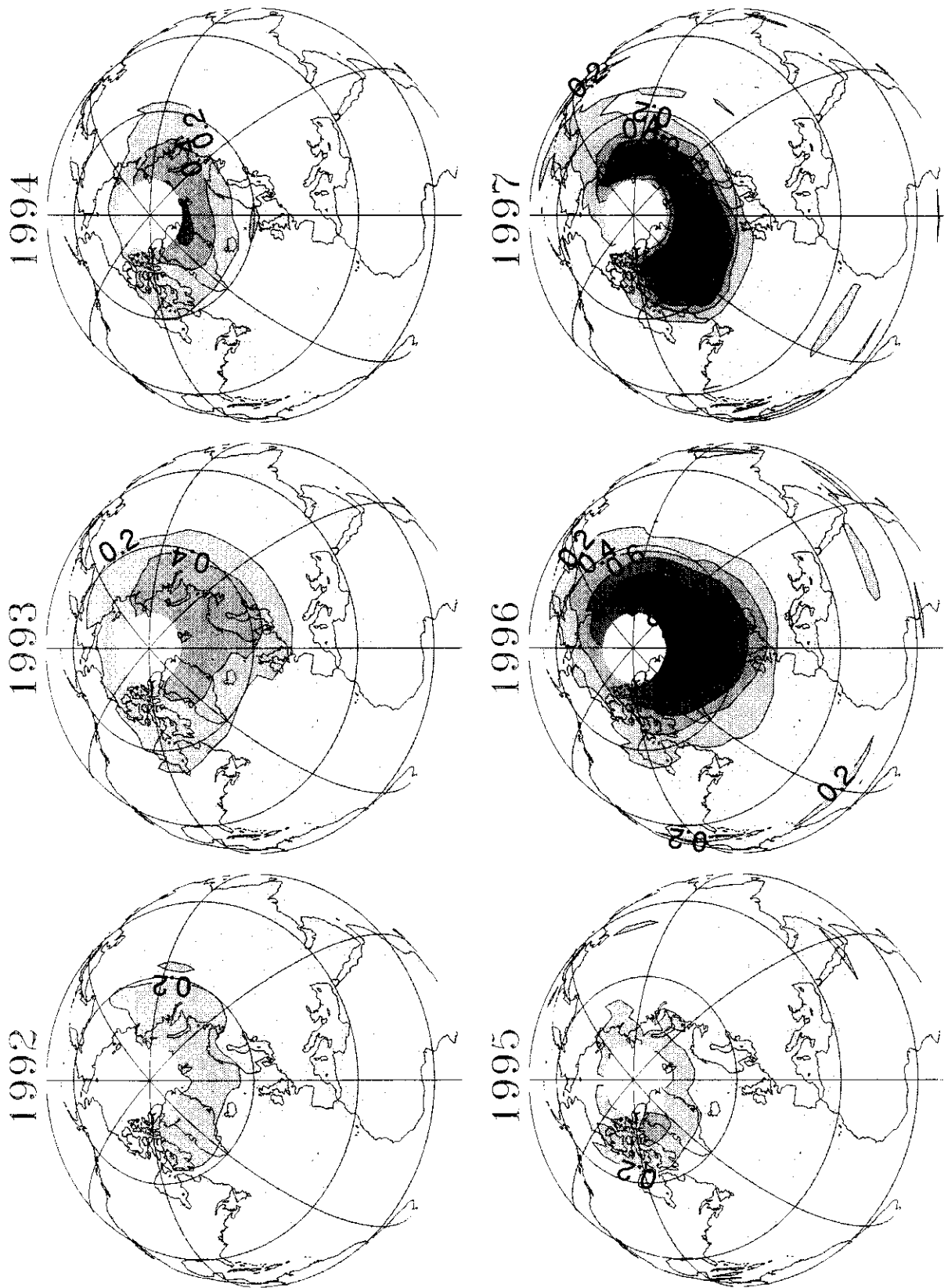
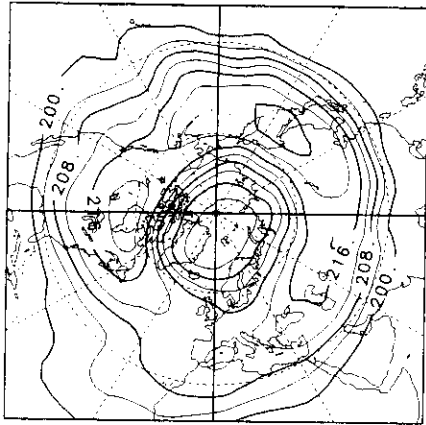


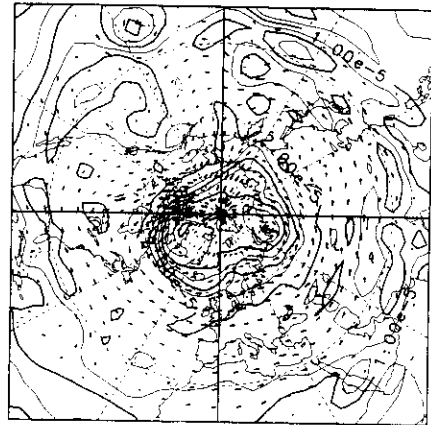
図2 2～3月にMLSが観測した1992年～1997年の480KにおけるCIO分布。(間隔は0.2ppbv)。

UKMO - TEMPERATURE
10-FEB-1997 : 68.1 hPa



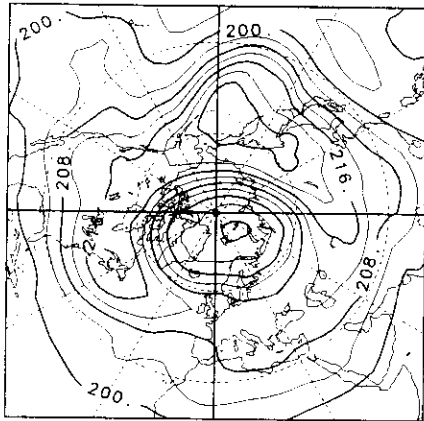
CONTOUR INTERVAL = 4.000E+00

UKMO - POT. VORTICITY
10-FEB-1997 : 460 K



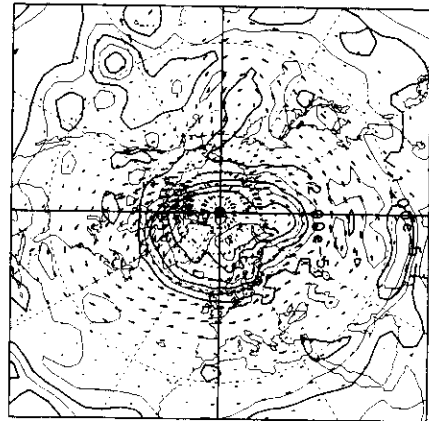
CONTOUR INTERVAL = 5.000E-06

UKMO - TEMPERATURE
25-FEB-1997 : 68.1 hPa



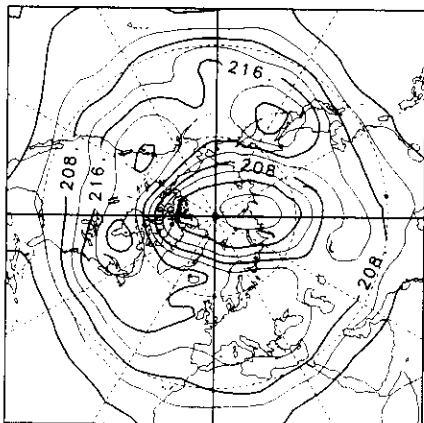
CONTOUR INTERVAL = 4.000E+00

UKMO - POT. VORTICITY
25-FEB-1997 : 460 K



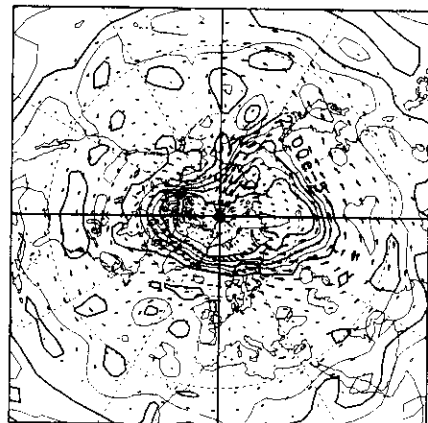
CONTOUR INTERVAL = 5.000E-06

UKMO - TEMPERATURE
12-MAR-1997 : 68.1 hPa



CONTOUR INTERVAL = 4.000E+00

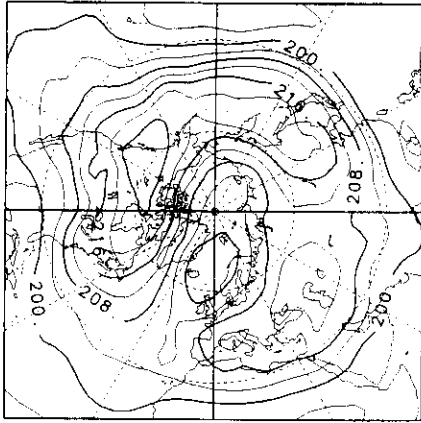
UKMO - POT. VORTICITY
12-MAR-1997 : 460 K



CONTOUR INTERVAL = 5.000E-06

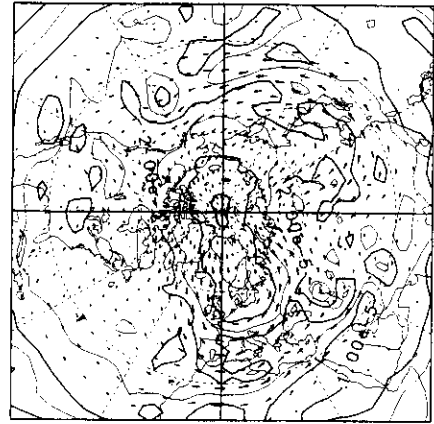
図3 北半球 68.1hPa における温度分布図(左)と460Kでのポテンシャル渦度および風速場(右)。

UKMO - TEMPERATURE
10-FEB-1999 : 68.1 hPa



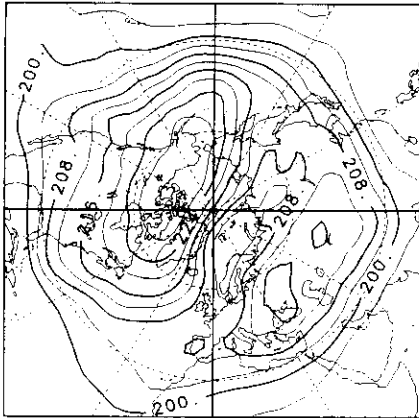
CONTOUR INTERVAL = 4.000E+00

UKMO - POT. VORTICITY
10-FEB-1999 : 460 K



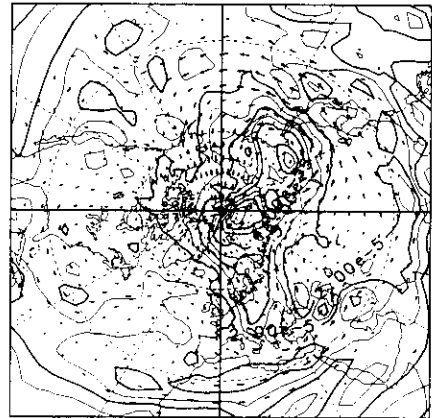
CONTOUR INTERVAL = 5.000E-06

UKMO - TEMPERATURE
25-FEB-1999 : 68.1 hPa



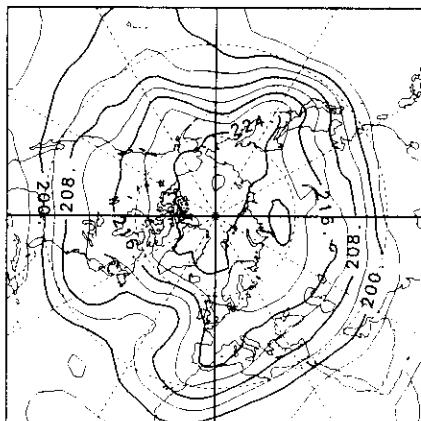
CONTOUR INTERVAL = 4.000E+00

UKMO - POT. VORTICITY
25-FEB-1999 : 460 K



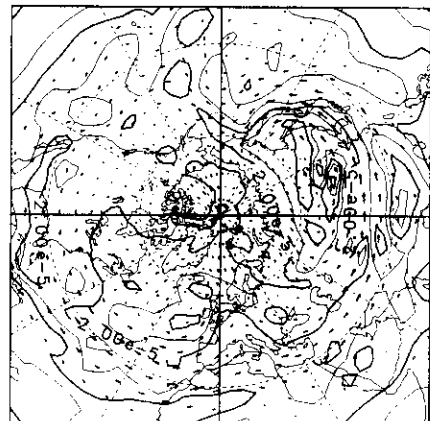
CONTOUR INTERVAL = 5.000E-06

UKMO - TEMPERATURE
12-MAR-1999 : 68.1 hPa



CONTOUR INTERVAL = 4.000E+00

UKMO - POT. VORTICITY
12-MAR-1999 : 460 K



CONTOUR INTERVAL = 5.000E-06

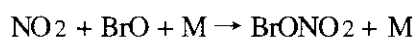
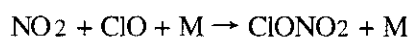
図4 図3と同じ。ただし、1999年2月10日、2月25日、3月12日。

(3) 衛星センサーILASによって得られた硝酸(HNO₃)のデータ質の評価

グローバルなオゾンの収支を定量的に理解するためには、人工衛星によってオゾン破壊に関与する成分を精度良く測定し、そのデータを統計的手法を使って信頼性の高い解析を行うことが不可欠である。ここでは、1996年8月に打ち上げられた人工衛星搭載測定器である大気周縁赤外分光光度計 ILAS のHNO₃データの質および精度の検討を、1997年2～5月にスウェーデンのキルナ(68°N, 21°E) およびアラスカのフェアバンクス(65°N, 148°W)で行われた気球観測との同時観測の結果を用いて行った。これらの解析からILASのHNO₃観測の繰り返し測定精度(precision) および絶対精度(absolute accuracy)が見積もられた。以下にその概要について報告する。

②序

成層圏オゾンの収支には、窒素酸化物が深く関与している。NO_x(=NO+NO₂)はオゾンに直接破壊する反応に関与する一方、以下のように活性な水素酸化物、塩素酸化物、臭素酸化物を不活性化する反応を通じて、極めて重要な役割を果たしている。



ここでMは、N₂やO₂等である。また硝酸(HNO₃)はNO_xの貯蔵種(リザボア)として重要である。従って、NO_xやHNO₃濃度は、NO_x、ClO_x、BrO_x、HO_xの各オゾン破壊反応速度を決定する上で本質的な役割を果たしている。グローバルなオゾンの収支を定量的に理解するためには、人工衛星によってこれらの成分を精度良く測定し、そのデータを統計的手法を使って信頼性の高い解析を行うことが不可欠である。

このような研究の実施においては、人工衛星データの信頼性、質、精度の検討が不可欠である。このような検討なしに信頼性の高い結論を得ることはできない。この様な観点から本研究では、人工衛星搭載測定器であるILASのデータ質およびその精度の検討を行った。

③ILASのHNO₃の観測について

ILASは、人工衛星「みどり(ADEOS)」に搭載されて、1996年8月に打ち上げられた。ILASは地球大気による太陽赤外放射の吸収に基づき、大気の諸成分を観測している⁴⁾。1日に14個の高度分布データが、ほぼ同じ緯度で得られている。測定器に関しては文献5)を参照のこと。HNO₃の高度分布は、ILASの観測している850-1610 cm⁻¹に現れている全ての吸収構造を使って定量されているが、主として879-895 cm⁻¹の吸収構造を使用している⁶⁾。

④気球観測との比較に基づく検討

A 比較方法

ILASの検証気球キャンペーンが1997年2月と3月にスウェーデンのキルナ(68°N, 21°E)にお

いて、また1997年4月と5月にはアラスカのフェアバンクス（65°N, 148°W）において実施された⁷⁾。これらのキャンペーン期間中に、気球からHNO₃の高度分布が赤外放射分光法に基づきアメリカ・デンバー大学のCAESR^{8,9)}、ドイツ・IMKのMIPAS-B2^{10,11)}、アメリカ・ハーバードスミソニアン観測所のFIRS-2^{12,13)}の各測定器によって観測された。また赤外吸収分光法に基づき、フランスCNRSのLPMA¹⁴⁾、アメリカ・JPLのMkIV^{15,16)}によってそれぞれ測定された。また総反応性窒素酸化物（NO_y）がCLDによって直接測定された^{17,18)}。このNO_yの観測値から下部成層圏におけるHNO₃の値を計算した。ここでNO_yとはNO + NO₂ + HNO₃ + 2(N₂O₅) + HO₂NO₂ + ClONO₂ + BrONO₂ + aerosol nitrate の総和をあらわす。計算は各高度の空気塊の等温位面上でのバックトラジェクトリーに基づき（ECMWF気象データを使用）、AERのボックスモデル¹⁹⁾によって行った。これらの気球観測に加えて、NO_yは航空機Falconを用いた観測（DLR）によっても高度12 kmにおいて測定された²⁰⁾。Table 1には各気球観測のリストを示した。また、Table 2にはILAS観測と共に各気球観測の繰り返し測定精度（precision）および絶対精度（absolute accuracy）をそれぞれ示してある。ここでILASを含むリモートセンシングの繰り返し測定精度は、赤外分光スペクトルの計算スペクトルによる再現誤差から推定された。また同様に、絶対誤差は使用されたHNO₃の吸収線のパラメータの不確定性から推定された。

本研究においては、ILASとの比較において2つの方法を採用した。第一に気球観測と同じ日に最も近い点でILASによって得られた値を比較した。この際、気球観測データの得られた温位高度にILASデータを内挿して比較を行った。第二に、気球観測の前後1日以内に得られたILASデータのうち、気球観測データの得られた温位高度においてポテンシャル渦度（PV）の値が10%以内で一致したものを平均した。この平均値のプロファイルを以後、“PV平均高度分布”と呼ぶ。この手順の例を図5に示した。この例では、97年2月10日のCLD気球観測データとの比較のため、2月9日から2月11日の温位高度454 Kの値をプロットしてある。この温位高度において気球データは31.8 PV単位において得られたため、28.6~35.0 PV単位のILASデータを平均した。この方法では、各高度で10から20のILASの値が平均値のために使用されている。第一の方法で比較は本来十分なはずであるが、比較可能な気球観測例が少ないため、一致の度合いはILASの個々の高度分布の質に大きく依存する。従って統計的にILASのデータの質を評価するために、第二のPV平均高度分布も合わせて使用した。

イ 結果および考察

比較結果を、図6(a)~(f)及びカラー口絵3-2に示した。各図において、気球観測結果とその繰り返し測定精度（precision）、ILASの最寄りデータとその繰り返し測定精度、ILASのPV平均値とその標準偏差を、それぞれ示した。Table 3には、5 km毎のILASの最寄り値およびPV平均値と個々の気球観測値との相対差（%）を示した。Table 4には、全ての気球観測の結果を使って、ILASの最寄り値と気球観測値との差の平均値を示した。また図7及びカラー口絵3-3には、ILASの最寄り値と気球観測値との絶対差（ppbv）を示した。これらの結果から以下のことが結論された。

第一に、Table 3から明らかであるように、ILASの最寄り値とPV平均値とで、気球観測値と

の一致の度合いは、同じ程度か、やや最寄り値の方が良いことが分かった。このことは、ILAS最寄り値は特に異常なデータを含んでいることはなく、その値を使った比較は統計的にも信頼性が高いことを示唆している。

第二に、図7（カラー口絵3-3）に見られるとおり、ILASの最寄り値と気球観測値とのランダムな差は、特に高度依存性が見られない。その値は、高度15～30 kmで0.7～0.9 ppbvであった。この値は、15、20～25、30 kmではそれぞれ33、9、14%に相当する。気球観測値を真の値と考えれば、このランダムな差はILAS観測の繰り返し測定精度と見なすことができる。実際には気球観測にも誤差があるため、ILASの測定精度はこの推定よりも良いはずである。Table 2に示されたとおり、ILAS観測自体から推定された繰り返し測定精度は、上記の3つの高度においてそれぞれ、24、15～20および50%以上である。従って本研究により気球観測との比較から推定されたILASの測定精度は、ILASの観測自体から推定された精度よりもやや良いことが分かった。

第三に、図7（カラー口絵3-3）に見られるとおり、ILASの最寄り値と気球観測値との系統的な差は明瞭な高度依存性をもつ。高度20 kmにおいては系統的な差は0.5 ppbv（5%）程度と小さいが、高度25～30 kmにおいてはILASの値は約1 ppbv（14～18%）気球観測値よりも系統的に小さい。Table 2に示されたとおり、HNO₃の吸収線の不確定性から推定されるILASの絶対精度は10%であり、気球観測との系統的な差はこれよりも大きい。FIRS-2およびMkIVはそれぞれ、458 cm⁻¹のHNO₃の吸収線および860～1730 cm⁻¹の間の3つのHNO₃の吸収線を使ってHNO₃の高度分布を導出している。これらの観測スペクトルから、ILASが主として解析に用いている879～895 cm⁻¹の吸収構造を使ってHNO₃の値を計算すると、FIRS-2およびMkIVの結果はそれぞれ8および4%小さくなる。しかしこれらもILASとの差を説明するには小さすぎ、また差の高度依存性を説明することもできない。実際、MIPAS-B2やCAESR観測では、主としてILASと同じHNO₃の吸収構造を使用しているにも関わらず、高度25～30 kmにおいて系統的な差が見られる。

ILASによるO₃の観測結果とオゾンゾンデの観測結果とを比較したところ、ILASの値が高度22～30 kmにおいて10～20%少ないという結果が報告されている²¹⁾。この20%の系統的な差異は、個々の差の標準偏差よりも大きかった。このことからILAS ver. 3.10の大気成分の高度決めのアプローチに起因する誤差であることが指摘されている。この高度領域ではHNO₃はO₃と同様にその数密度が高高度ほど小さいため、ILASデータの高度決め誤差は、HNO₃にも同じ系統的な負のバイアスを生むことになる。従ってO₃と同様にILASのHNO₃の値が同じ高度領域において気球観測値と比較して系統的に小さいという本研究の結果は、その原因がILASの高度決めのアプローチの誤差であることを強く示唆するものである。この高度決め誤差は、高度等に依存するため、今後より詳細な検討が必要であると考えられる。

Table 1. List of balloon experiments

Experiment	PI Name	Technique	Location	Date	d	$\Delta\theta$	ΔT
CLD	Y. Kondo (Nagoya Univ.)	Au converter and chemiluminescence	Kiruna	Feb.10	580	0.6	4:50
				Feb.25	170	1.4	4:40
CAESR	F.J. Murcray (Univ. of Denver)	thermal emission grating radiometer	Kiruna	Feb.10	580	0.6	4:50
				Feb.25	170	1.4	4:40
				Fairbanks	May 8	680	5.9
LPMA	C. Camy-Peyret (LPMA, France)	solar occultation FTIR	Kiruna	Feb.26			
MIPAS-B2	H. Oelhaf (IMK, Germany)	thermal emission FTIR	Kiruna	Mar 24	130	0.2	3:40
FIRS-2	W.A. Traub (Harvard-Smithsonian)	thermal emission FTIR	Fairbanks	Apr. 30	580	5.2	14:40
MkIV	G.C. Toon (JPL)	solar occultation FTIR	Fairbanks	May 8	680	5.9	6:20
DLR (aircraft)	H. Schlager (DLR)	Au converter and chemiluminescence	Kiruna	Jan.28	380	2.7	8:00
				Jan.30	310	2.1	0:23

“d” is the distance between the balloon measurement and the “nearest” ILAS measurement (km). “ $\Delta\theta$ ” and “ ΔT ” are the difference in latitude (degrees) and time (hh:mm) between these two measurements.

Table 2. Precision and absolute accuracy (%)

		15 km	20 km	25 km	30 km	35 km
ILAS	precision	24	15	21	-50/+87	-83/+>100
	absolute accuracy	10	10	10	10	10
CLD*	precision	17	11	7	----	----
	absolute accuracy	9	9	13	----	----
CAESR	precision	5	7	9	8	----
	absolute accuracy	10	10	10	10	----
LPMA	precision	40	6	18	37	----
	absolute accuracy	10	10	10	10	----
MIPAS-B2	precision	5	4	3	2	----
	absolute accuracy	10	10	10	15	----
FIRS-2	precision	3	2	2	3	38
	absolute accuracy	10	10	10	10	10
MkIV	precision	16	5	4	3	5
	absolute accuracy	10	10	10	10	10

* One standard deviation within 1 km layer is provided as the precision. The absolute accuracy includes the uncertainties in the model calculated $\text{HNO}_3 / \text{NO}_y$ ratios.

Table 3. Agreement with the ILAS measurements (%)

		15 km	20 km	25 km	30 km	35 km
CLD	nearest	34 ± 38	-2 ± 12	-2 ± 4	-----	-----
	PV-average	40 ± 36	9 ± 6	1 ± 2	-----	-----
CAESR	nearest	26 ± 52	5 ± 15	-22 ± 11	-1 ± 42	-----
	PV-average	59 ± 106	5 ± 17	-22 ± 7	-3 ± 15	-----
LPMA	nearest	23 ± 8	-12 ± 7	-6 ± 5	-16 ± 11	-----
	PV-average	24 ± 26	-13 ± 8	-8 ± 6	-13 ± 3	-----
MIPAS	nearest	-5 ± 11	-7 ± 8	-14 ± 10	-6 ± 4	-----
	PV-average	-1 ± 9	-5 ± 9	-21 ± 8	-10 ± 1	-----
FIRS-2	nearest	-31 ± 18	-12 ± 2	-15 ± 5	-23 ± 10	-3 ± 20
	PV-average	2 ± 14	-11 ± 7	-16 ± 3	-18 ± 7	2 ± 29
MkIV	nearest	9 ± 41	-4 ± 2	-15 ± 8	-28 ± 12	-7 ± 41
	PV-average	15 ± 38	-5 ± 4	-19 ± 6	-33 ± 4	-30 ± 4

Values provided in 15 km column, for example, are results within 15 ± 2.5 km layer. A positive value indicates that the ILAS value was higher.

Table 4. Systematic and random differences between the ILAS and balloon measurements

		15 km	20 km	25 km	30 km	35 km
Systematic difference	%	9	-5	-14	-18	(-5)
	ppbv	0.28	-0.50	-0.97	-0.93	(-0.20)
Random difference	%	33	9	9	14	(32)
	ppbv	0.87	0.72	0.68	0.71	(0.38)

Values provided in 15 km column, for example, are results within 15 ± 2.5 km layer. A positive value of the systematic difference indicates that the ILAS value was higher.

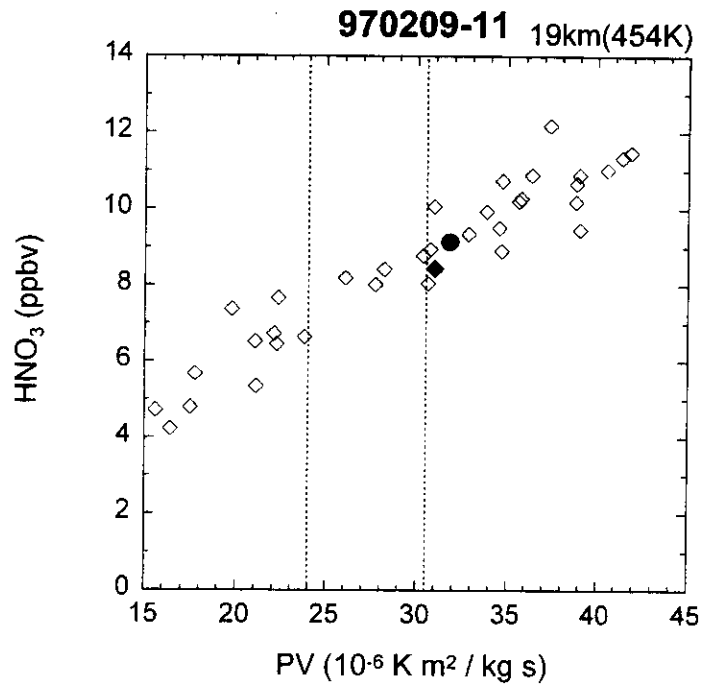


図5 CLD気球観測によって1997年2月10日に温位高度454 K (約19 km) で得られた HNO_3 の値 (丸印) と、人工衛星ILASによって2月9日から2月11日までの期間に同じ温位高度で得られた HNO_3 の値 (ダイヤモンド) をポテンシャル渦度 (PV) に対して示した。ILASによって気球観測に最も近い位置で得られた値を黒ダイヤモンドで示した。2本の破線は Nash et al., [1996]の方法²²⁾によって決められた極渦の境界。

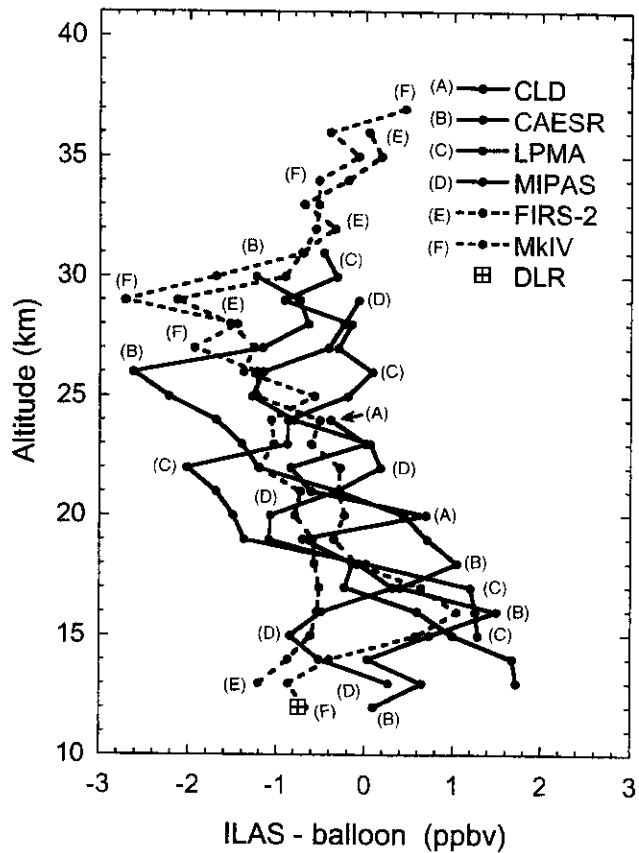


図7 気球観測の HNO_3 の値とILASの気球観測に最も近い位置で得られた HNO_3 の値の差。(カラー口絵3-3 参照)

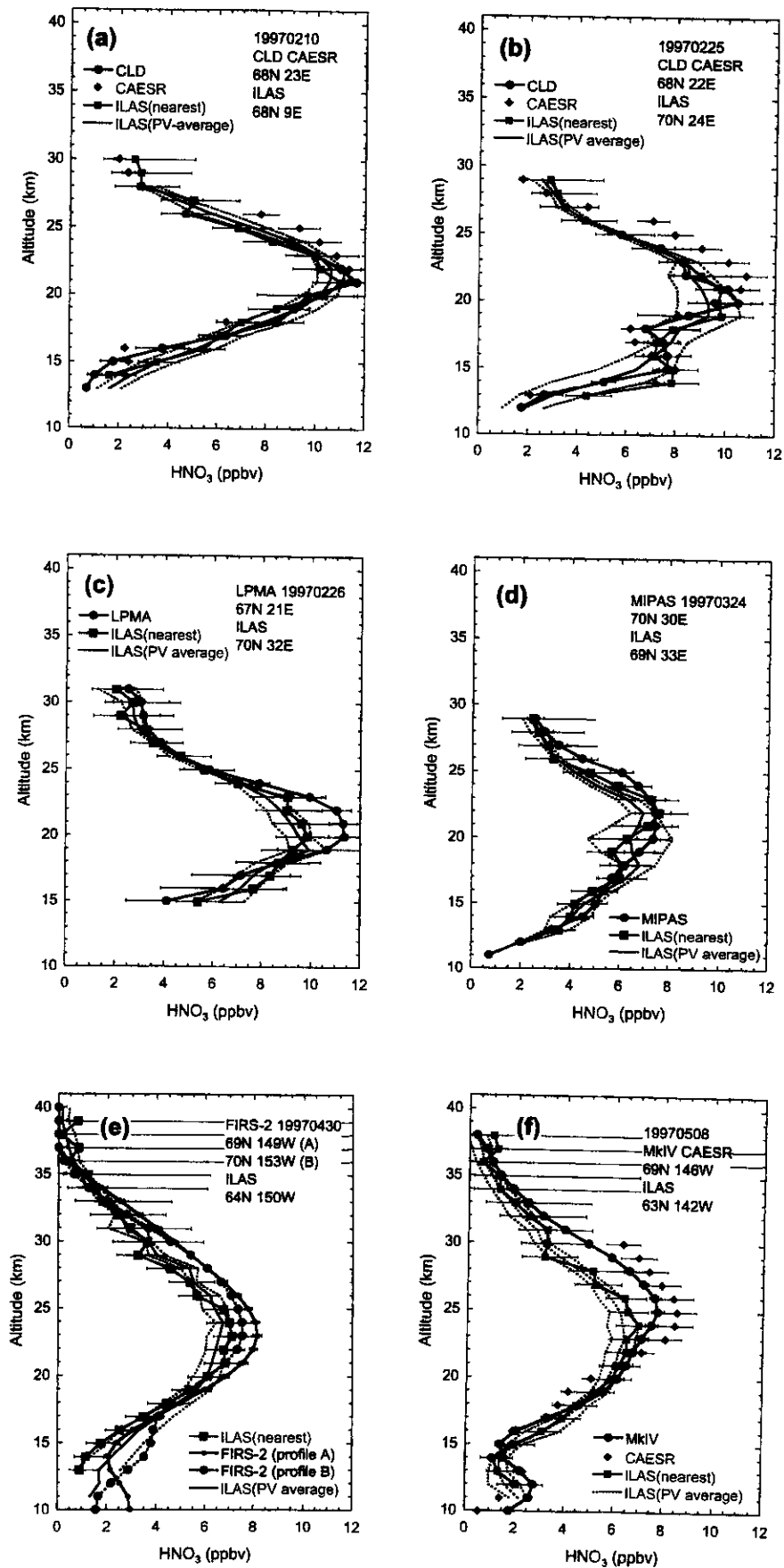


図6 (a)～(f) 気球観測によって得られた HNO_3 の高度分布（黒線と緑ダイヤモンド）とILASの気球観測に最も近い位置で得られた HNO_3 の高度分布（赤四角）。横棒は各測定の繰り返し測定精度（precision）。PV平均高度分布（青実線）とその標準偏差（青破線）もあわせて示した。（カラー口絵3-2と同じ）。

(4) 成層圏エアロゾルがオゾン層に及ぼす影響に関する研究

ここでは、オゾン層変動に関する個々のパラメータのうち、エアロゾル消散係数とエアロゾル粒径分布に関する衛星観測・地上測定等による過去の測定データを収集整備するとともに、過去のデータの解析を行った。また、ADEOS搭載センサーILASによって観測されたエアロゾルデータのデータ質を評価し、観測されたデータに基づいて、極成層圏エアロゾルの出現頻度を明らかにした。

①研究の背景と研究の経緯

オゾンホールが発見以来、成層圏オゾン破壊過程にはエアロゾル表面での不均一反応が大きく関与していることが注目されてきた。エアロゾルは不均一反応を通して不活性塩素の活性化に大きく寄与するが、単にそれだけではなく、大気中から窒素酸化物を取り除くため、活性塩素の寿命を長くし、オゾン破壊を長期化させる。成層圏エアロゾルは主として中・低緯度では硫酸を主成分としているが、極域で発達するPSC (Polar Stratospheric Cloud, 以下PSCと略記) では硝酸が主要な成分である。成層圏エアロゾルはオゾン層の将来の動態を予測する上で大きな影響を持つ要因であり、研究の推進が望まれている。

平成8年8月に打ち上げられたADEOS衛星に搭載されたILASは、オゾンとともに関連微量成分NO₂/HNO₃/H₂Oおよびエアロゾルなどを測定することになっている。これらの微量成分の地球規模での分布・挙動を解析するとともに、それらの相互関係を解析し、同時にADEOSに搭載される他センサーのデータを総合的に比較・解析することによって、オゾン層破壊過程を解明することが期待されている。

本研究では、特に成層圏エアロゾルについて、過去のデータの統計的解析と、ILASデータの質評価および統計的解析を行った。研究成果は以下のように大きく3つに分けることができる。

1) SAGE II (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment II) など既存のセンサーで得られた過去10年間の地球規模での成層圏エアロゾルデータを解析した。この研究成果はILAS参照用データセットの作成に反映された。

2) ILAS/ADEOSのデータ質評価を気球搭載センサーなどと比較して行った。

3) ILASの観測期間のうち、特にオゾン減少の著しかった1996/97年の北極に着目し、PSC発生の頻度などを明らかにした。

以下に詳細を述べる。

②SAGE IIで観測された成層圏エアロゾル消散係数の波長依存性について

本研究では、SAGE IIで観測された過去11年間の1.02 μm、0.525 μm、0.453 μm、0.385 μmの消散係数を用いて、消散係数の波長依存性を詳細に解析し、検討を行った。SAGE IIは米国NASAラングレー研究所が開発した成層圏エアロゾルおよび微量気体観測用センサーである。SAGE IIはエアロゾルの他、二酸化窒素、オゾン、水蒸気が観測されている。SAGE IIはILASと同様、太陽掩蔽法 (Solar Occultation) で観測を行うセンサーである。SAGE IIでは衛星軌道の軌道傾斜角を小さくしており、観測領域は中・低緯度を包括して南北79度までとなっているが、高緯度付近では観測頻度が少ない。観測緯度は時間とともにずれてゆくので全球を網羅するのに数カ月かかる。本解析では上記のような太陽掩蔽法の制約をふまえ、帯状平均(経度方向平均)

を基本とし、緯度・高度断面図は3ヵ月（季節）平均で作成した。

ア 成層圏エアロゾル分布の時間的変動の解析

まず、エアロゾル量の時間変化を概観するために、 $1.02\mu\text{m}$ 消散係数の時系列の一例を示す。図8は北緯30-35度の $1.02\mu\text{m}$ 消散係数（緯度5度の帯状平均）の時間変化である。高度は21.5 kmから25.5 kmまでを2 kmごとに示した。データ数が10個未満の場合はグラフから除いた。この図から11年間の経年変化の特徴が見てとれる。まず顕著なのは1991年6月12日に噴火したピナツポ火山（フィリピン）の影響である。1991年後半からエアロゾルが大幅に増加しているのがわかる。ピナツポの噴火以前の状況をみると、1982年4月に噴火したエルチチョン火山噴火の影響は1985年にはほぼなくなり、1986年のネバデルルイツ火山噴火の影響がわずかに見られる程度である。1989～1990年頃はいわゆるバックグラウンド状態（静穏時）の時期である。

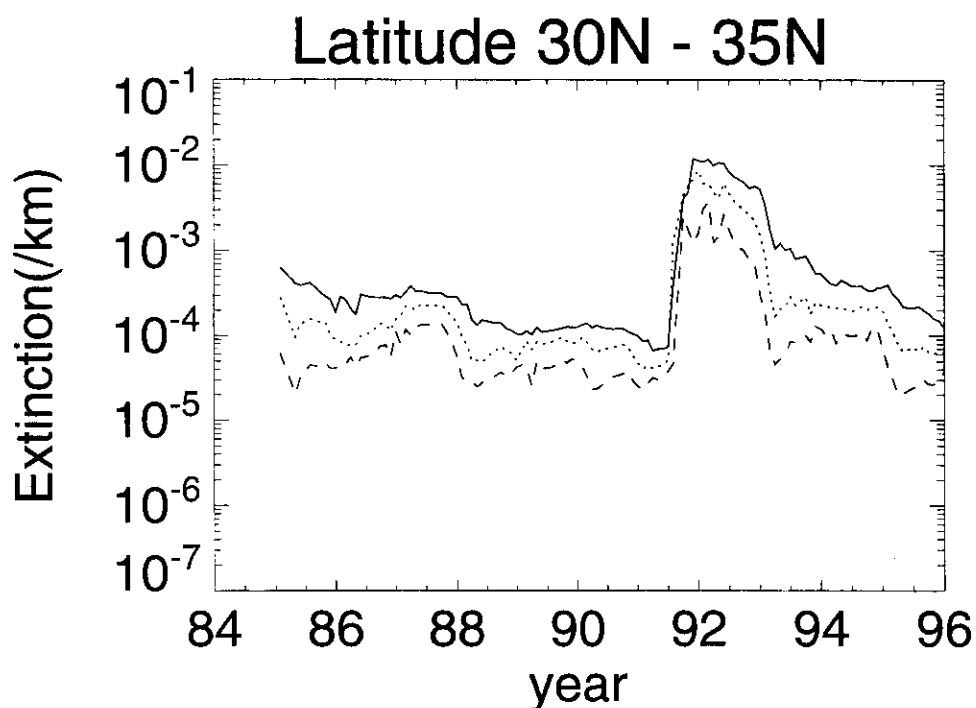


図8 北緯30-35度の $1.02\mu\text{m}$ 消散係数（緯度5度の帯状平均）の時間変化。高度は21.5 kmから25.5 kmまでを2 kmごとに示した。

イ バックグラウンド状態と火山噴火後の消散係数の空間分布

図9は緯度1度毎に帯状平均した、3ヵ月間の消散係数の緯度・高度断面図である。(a)は1988年12月から1989年2月（バックグラウンド時期）、(b)は1991年12月から1992年2月（ピナツポ火山噴火後約半年）である。3ヵ月分のデータを重ね合わせると観測緯度のかなり広い範囲を網羅でき、このような緯度・高度断面図が得られた。本解析では、圏界面以下のデータは除いたため、高度10km付近以下で空白となっている。すべての高度領域について空白になっている緯度領域では、この時期観測が行われていない。

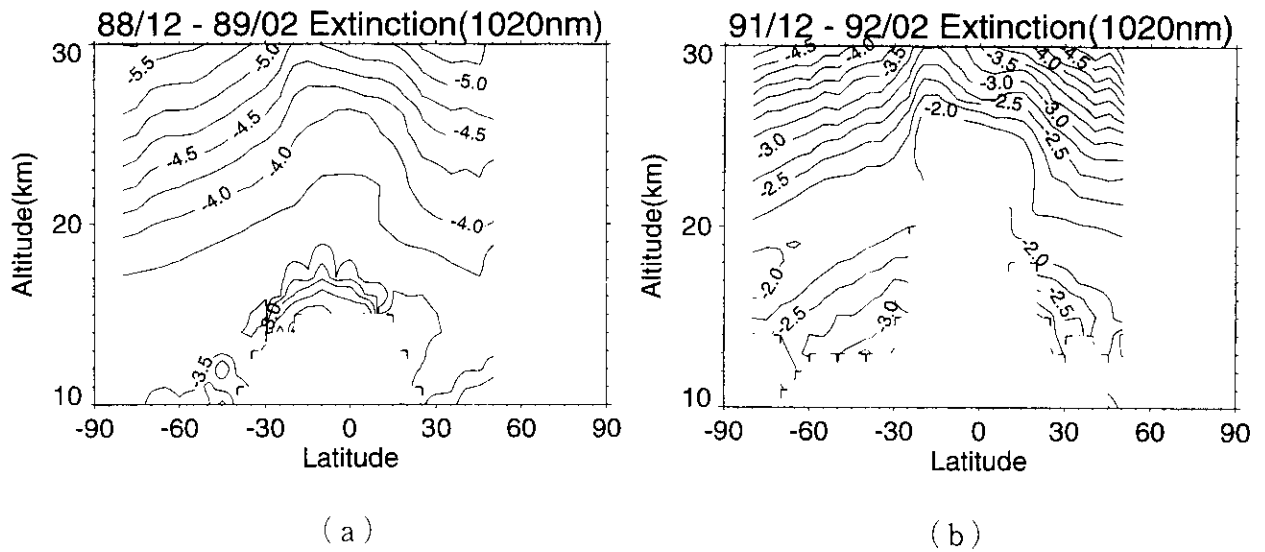


図9 緯度1度毎に帯状平均した、3ヵ月間の消散係数の緯度・高度断面図。(a)は、1988年12月から1989年2月（バックグラウンド時期）、(b)は1991年12月から1992年2月（ピナツボ火山噴火後約半年）である。

図9をみると、全体に20km付近にピークがあり、下部成層圏にエアロゾル層が存在する様子が示されている。熱帯でエアロゾル層のピークが高く、等値線が「お椀を臥せた」ような形になっているのが特徴であるが、これは対流圏から成層圏への大気の流れの様子を反映している²³⁾。他の季節についても同様の解析を行ったが、季節ごとの特徴の差異は、あまり顕著でなかった。ピナツボ火山噴火後には高度20～30kmぐらいのところでは消散係数が非常に大きくなっている。

ウ 消散係数の波長依存性について

消散係数の波長依存性には過去の多くの観測結果から

$$\sigma = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (3-1)$$

の関係があると考えられてきた。ここで σ は消散係数、 λ は波長で、 α はオングストローム係数と呼ばれる。 α は4～0の値を取り、成層圏エアロゾルの粒径分布に依存している。レイリー散乱のときは、 α の値は4に近づき、雲粒子のような大粒径粒子による散乱のときは、 α は0に近づく。大気エアロゾルの典型的な値は1.3であるとこれまでの研究から推定されている。エアロゾルの粒径分布関数を、粒子個数密度 n 、半径を r で表したとき

$$dn/dr = Nr^{-p} \quad (3-2)$$

と仮定すると、およそ

$$\alpha = p-3 \quad (3-3)$$

の関係があり、 α は粒径分布を反映しているパラメータである。すなわち、 α が大きいほど小粒径の粒子が多い。

消散係数の波長依存性が式(3-1)のような関係であれば、パラメータ α の変化を粒径分布の

変化を示す指標として代表させることができる。波長依存性は厳密に式 (3-1) を満たしてはいないが、バックグラウンド時期にはほぼ式 (3-1) で近似できる。また、ピナツボ火山噴火後であっても近似的に式 (3-1) を当てはめられる例も多い。従って、粒径分布の変化を示す一つの指標として、オングストロームパラメータ α を用いることは有意義であろう。

検討の結果、SAGE IIの4波長のうち最も短い385nmについては精度が十分でないこと、オングストローム係数の決定には必ずしも必要ではないことがわかったので、ここでは385nmを除いた結果を示す。図10はオングストローム係数の緯度高度断面図である。図9で示した消散係数と図10で示したオングストローム係数の間には顕著な負相関があることがわかった。ミー散乱理論を応用した計算を行うと、凝結・蒸発による成長・消滅過程を反映していることが示唆された。

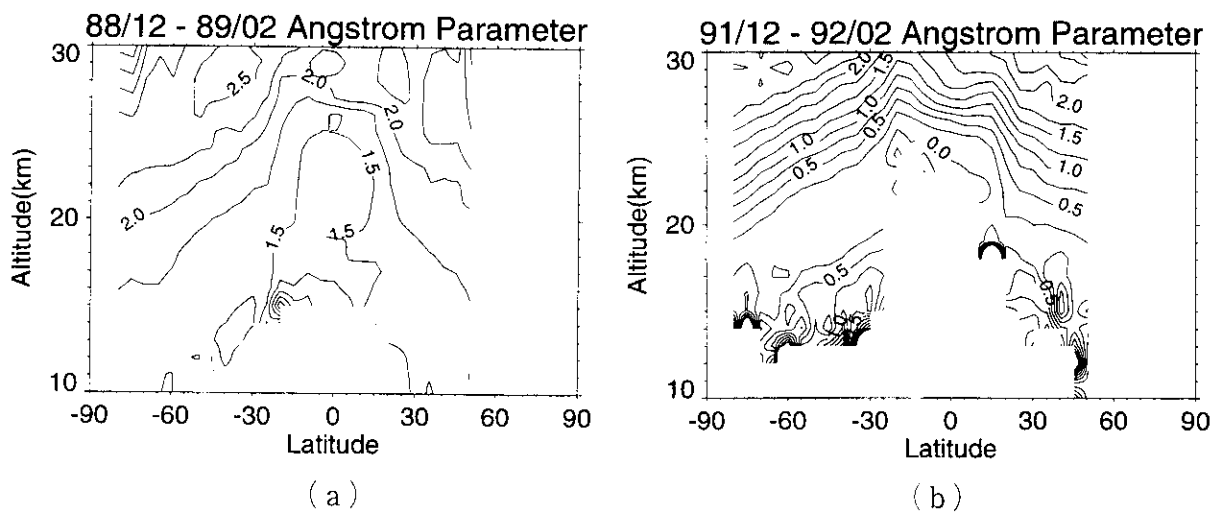


図10 オングストローム係数の緯度高度断面図。時期は図9と同じ。

③ILASエアロゾルデータ(780 nm消散係数)のデータ質検証について

ILASデータより、1996/1997年のエアロゾルデータの解析を行った。データはアルゴリズム改訂に伴い順次アップデートされたが、ここでは平成10年5月に公開されたバージョン3.10を中心に報告する。ILASの詳しい内容は文献5), 6), 21), 24)などを参考にされたい。

ILASは可視分光計(753-784nm)と赤外分光計(6.21-11.76ミクロン)からなり、エアロゾルの観測は可視の780nmと、赤外の4波長で行われている。しかし、赤外分光計の観測スペクトルには原因不明のオフセットレベルが観測されたことからバージョン3.10では赤外のエアロゾル波長(窓チャンネル)での透過率を線形内挿してオフセットとエアロゾルによる消散の影響を同時に引いて、ガスのスペクトルを求めている。従って、バージョン3.10ではエアロゾルの赤外スペクトルデータは最終成果物としては求められていない。ここでは可視780nmのデータだけを解析した。

可視チャンネルのエアロゾルデータ自体はバージョン3.10でSAGE IIとの比較などで良好な検証結果が得られている²⁵⁾。ところが、1997年2月にスウェーデン・キルナで行われた大気球を用いて行われた検証実験では、一致が必ずしも良好でなかった。この不一致の理由を明らかにするために、再解析を行った結果、気球観測との不一致はILASのデータの問題ではなく、PSCの発生で空間的不均一な状況であったことが原因とわかった。

④ILAS/ADEOSで観測された1996/1997年冬季の北極極成層圏エアロゾルの発生について
 ア PSC判定基準の決定

PSCの判定基準については、おおよそPool and Pitts (1994)²⁶⁾に基づいているがさらに改良を加えた。まず、データを極渦の中・外・境界に分類した。極渦境界の情報はNash et al. (1996)²²⁾を元にBodeckerによって計算されILAS/DHFによって公表されている値をもとに判定した。期間を10日毎に区切り、気温が200K以上の暖かい領域でのエアロゾルをバックグラウンドエアロゾル (PSCでない) と推定し、極渦の中での消散係数値の平均と標準偏差を求めた。平均+標準偏差の4倍を閾値として設定し、閾値を越えた消散係数の値はすべてPSCと判定した。Pool and Pitts (1994)²⁶⁾では判定の際、低温 (200度未満) という条件を加えているが、今回の我々の判定方法ではこれを加えていない。使用している気温のUKMO (United Kingdom Meteorological Office) データには1.7 Kほどの正のバイアスがあることが報告されており²⁷⁾、また観測地点の気温が高温でもそれ以前の気温が低温であることもあり得るからである。最近 POAM (Polar Ozone and Aerosol Measurement) のデータを解析したFromm et al. (1998)²⁸⁾の報告でも低温であることを判定の基準に加えてはいない。

イ 解析結果

上記のような判定基準に基づき、125個のPSCプロファイルを抽出した。PSCプロファイルとは、少なくとも一高度においてPSCと判定された値を含むプロファイルである。図11に1月、2月、3月の典型的なPSCプロファイルを示した。図中、NAT (硝酸三水和物) の発生する理論的な気温を Hanson, and Mauersberger(1988)²⁹⁾を元に計算して示した。ダイヤモンドがPSCと判定された値を示している。PSCと判定された高度領域とNAT飽和温度以下の高度領域の対応がみられる。ここでは硝酸を7ppbv, 水蒸気を4.5ppmvと仮定しているが、NAT温度は硝酸・水蒸気にも依存するので、硝酸の値を変えた場合についても合わせて示してある。

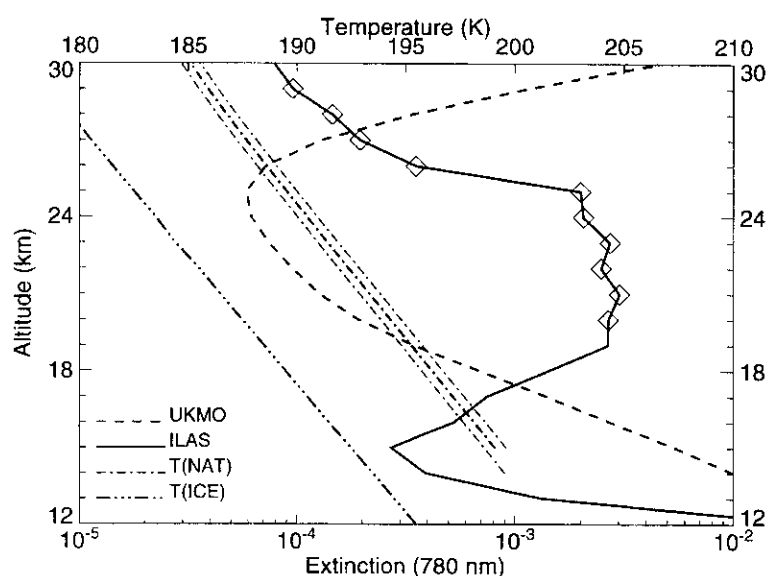


図11 (a) 1997年1月に得られた典型的なPSCプロファイル。

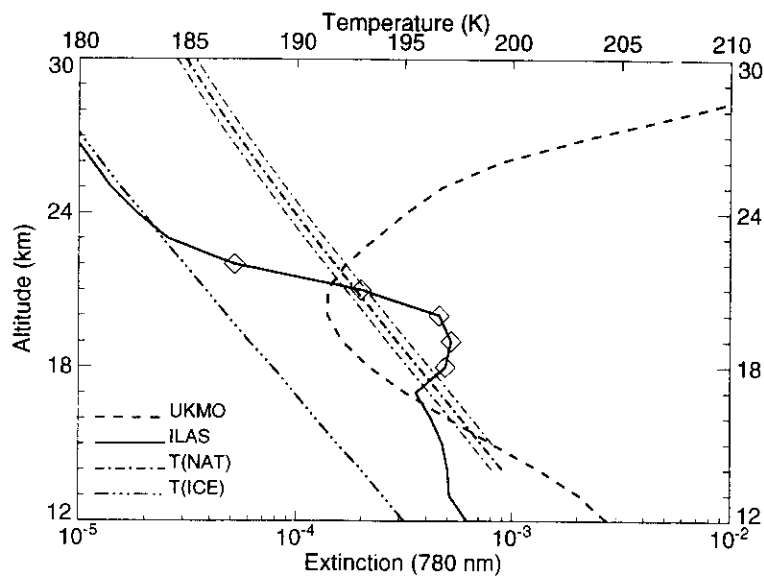


図11 (b) 1997年2月に得られた典型的なPSCプロファイル。

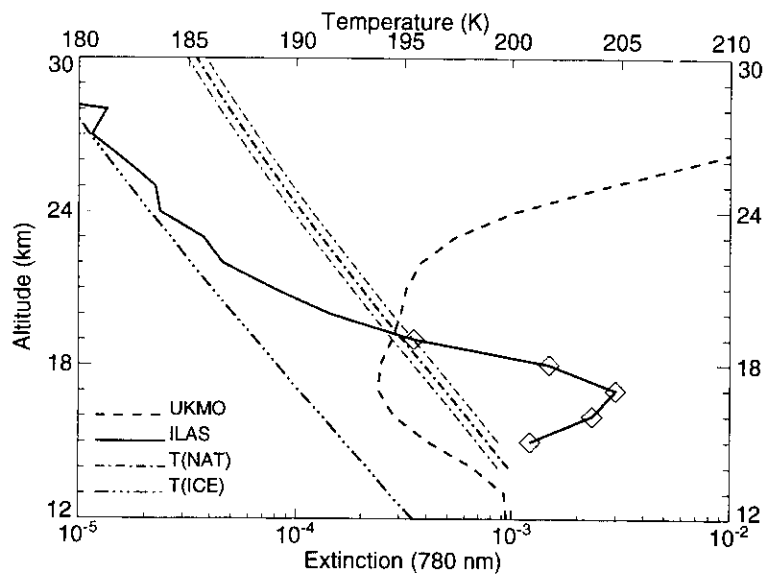


図11 (c) 1997年3月に得られた典型的なPSCプロファイル。ダイヤモンドはPSCと判定された値を示している。 T_{NAT} : 理論的に推定される硝酸三水和物の発生する気温。 T_{ICE} : 同様に理論的に推定される氷粒子の発生する気温。ここでは硝酸を7ppbv, 水蒸気を4.5ppmvと仮定しているが、NAT温度は硝酸・水蒸気にも依存するので、硝酸の値を10ppbv, 5ppbvと変えた場合についても合わせて波線で示してある。

図12 は、PSCの出現確率の高度時間断面図である。出現確率はPSCと判定されたデータの数を観測数で割ったものである。図13 (カラー口絵3-4 参照) は、NAT温度と観測地点温度との差を消散係数に対してプロットした散布図である。ダイヤモンド (または赤い印) がPSCと判定されているところである。ここでは1月の高度22~24 km について描いてあるが、2月、3月についても同様に低温とPSC発生に強い相関傾向が見られた。

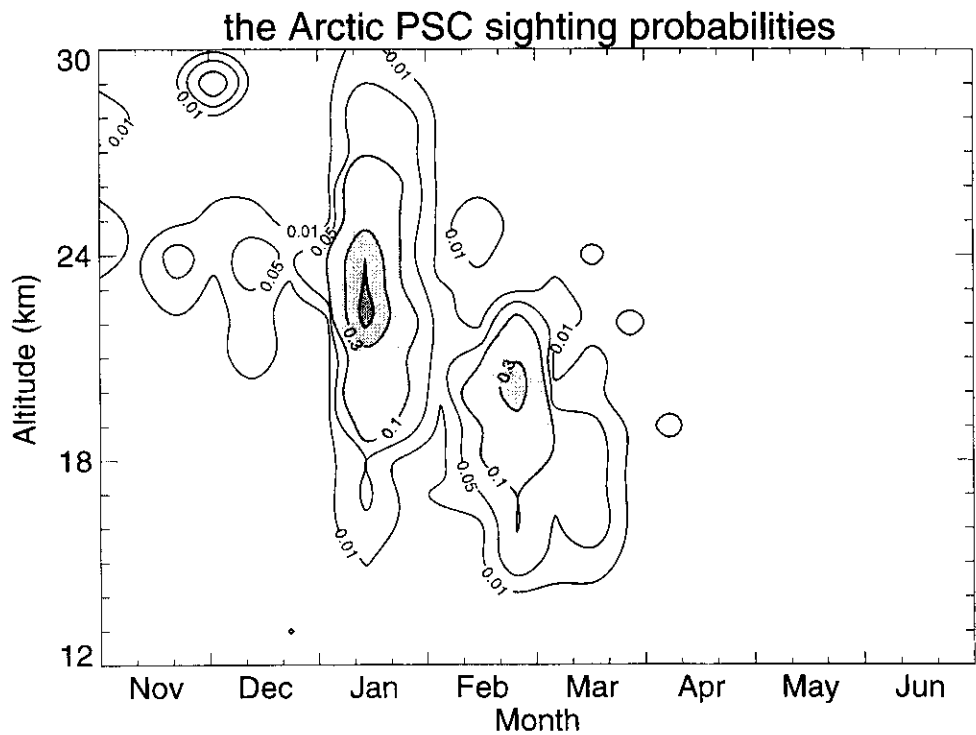


図12 PSCの出現確率の高度時間断面図。出現確率は、PSCと判定されたデータの数を観測数で割ったものである。

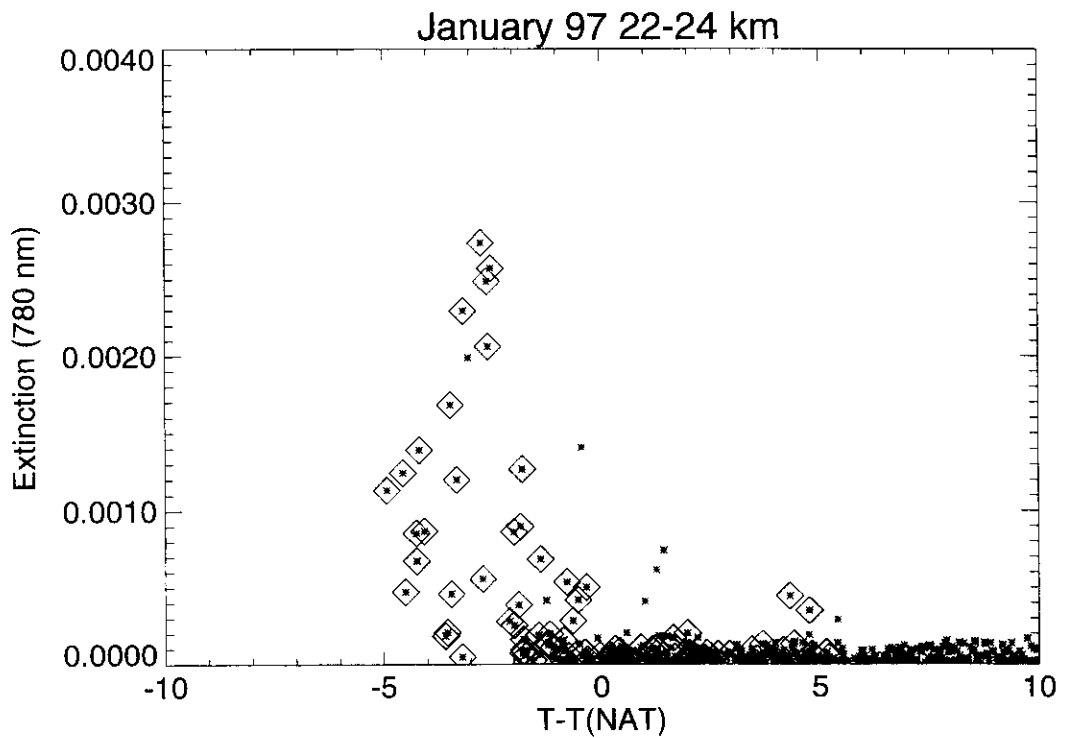


図13 NAT温度と観測地点温度との差を消散係数に対してプロットした散布図。ダイヤモンドの印がPSCと判定されているところ。1997年1月の高度22~24km。(カラー口絵3-4 参照)。

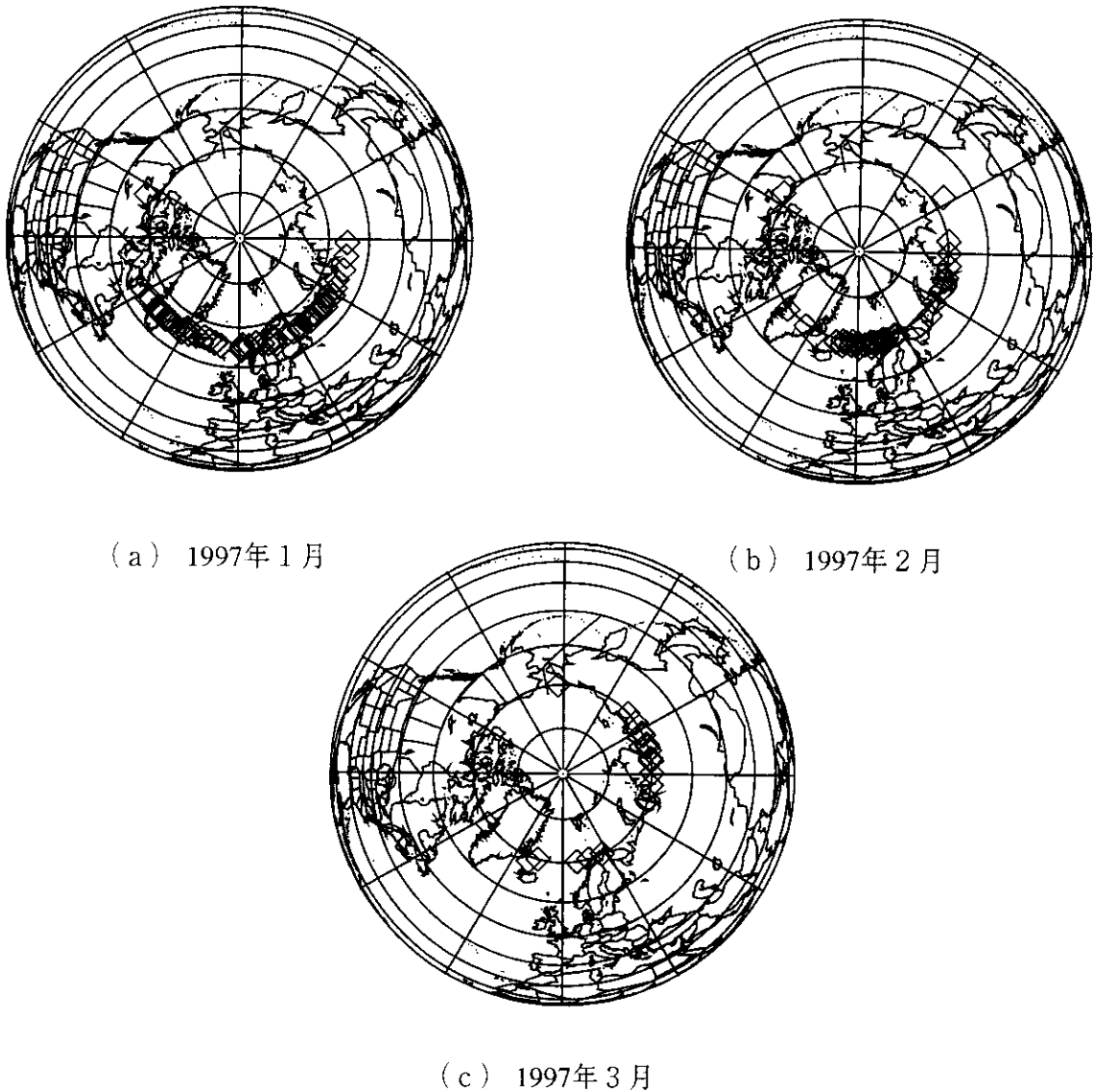


図14 PSCの発生した場所を地図上に月毎に示したもの。(カラー口絵3-5 参照)。

図14 (カラー口絵3-5) はPSCの発生した場所を地図上に月毎に示したもので、1月～2月はグリニッジ付近を中心としているのに対し、3月のPSC発生場所が東へ移動していることがわかる。1～3月に極渦の場所が移動しており、PSCの出現場所が極渦の移動とともに変わっているのがわかった。

⑤まとめ

1) 成層圏エアロゾル量および粒径の空間分布とその時間的変動を把握するためにSAGE II センサーで観測された $1.02 \mu\text{m}$ 、 $0.525 \mu\text{m}$ 、 $0.453 \mu\text{m}$ 、 $0.385 \mu\text{m}$ の4波長の消散係数を解析した。その結果、以下の事項が判明した。

◎エアロゾル量の時間変化：1985年から1995年までの11年間の時系列解析の結果は、1991年ピナツボ火山の噴火に伴うエアロゾル量の急激な変化を示している。1994年においてもまだ

ピナツボ火山の影響が残っていることがわかる。

◎波長依存性の緯度・高度変化：粒径を反映する消散係数の波長依存性を解析したところ、バックグラウンドの時期でも高度・緯度によって波長依存性に差が見られた。粒径は低緯度で大きい傾向がみられる。成層圏上部では粒径が小さい傾向が明らかである。蒸発によって粒子が小さくなっていると考えられる。

◎ピナツボ火山噴火による粒径の変化：ピナツボ火山の噴火後、火山性エアロゾルの大量発生とともに4波長の消散係数の波長依存性も大きく変化している。エアロゾル量の多いところで粒径が大きい傾向が明らかである。さらに詳細な解析を行うことで、粒子の消長を明らかにしてゆくことができると考えられる。

2) ILAS可視チャンネルのエアロゾルデータ（バージョン3.10）はSAGE IIとの比較などで良好な検証結果が得られているにもかかわらず、1997年2月にスエーデン・キルナで行われた大気球を用いて行われた検証実験では、一致が必ずしも良好でなかった。この不一致の理由を明らかにするために、再解析を行った結果、気球観測との不一致はILASのデータの問題ではなく、PSCの発生でエアロゾルが空間的不均一な状況であったことが原因とわかった。

3) ADEOS衛星搭載のILAS（データバージョン3.10）は5766個のエアロゾル消散係数（北極2864/南極2880）プロファイルを十分な精度で1996年11月から1997年6月まで観測した。一方、ADEOS/TOMSでは1997年1～3月に北極で大規模なオゾン減少が観測され、北極オゾンホール の出現であると注目された。

この期間中、ILASでは多数のPSC（極成層圏エアロゾル）を北極上空で観測した。1月には高度23km付近を中心にPSCの発生が多く観測された。2月、3月には発生高度が少し低下しているがこれは重力沈降の影響ではなく、低温域が極渦とともに移動していることによる。1～2月はPSCの発生場所はグリニッジ付近であるが3月にはずっと東へ移動し、東経120度付近である。これは極渦の移動と関係している。我々がSAM IIの解析を行った結果では、PSCの発生が3月まで見られたのは1980、1986、1988年だけで、これらの年は特に極渦の持続が長かったことが知られている。1997年においても、突然昇温が遅く、長期間極渦が持続して低温領域が維持されたことが、PSCの出現が3月まで見られたことの原因であるといえる。このように極渦が3月まで維持されたことがオゾン破壊の誘因であったといえよう。

1997年ほとんどのPSCイベントはNAT形成温度以下の温度に対応している。いくらか高温の場合にもPSCが見られるが、NAT温度の評価方法、UKMOの気温の誤差が影響していると考えられる。あるいは過去の気温が低温であり観測時に昇温している場合もあったと考えられる。

5. 引用文献

- 1) 中島英彰, 横田達也, 飯田隼人, 笹野泰弘: UARSデータに基づく大気微量成分統計量データベースの作成, 「天気」, 1999年9月号, 1999 (印刷中).
- 2) Chanin, M-L., Ramaswamy, V., Gaffen, D., Randel, W., Rood, R. and Shiotani, M.: Trends in stratospheric temperatures. World Meteorological Organization (WMO)/United Nations Environmental Programme (UNEP) 1998 Report, Part 1, Chapter 5, 1998.

- 3) Newman, P. A., Gleason, J. F., McPeters, R. D. and Stolarski, R. S., Anomalously low ozone over the Arctic, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 2689-2692, 1997.
- 4) Sasano, Y., M. Suzuki, T. Yokota, and H. Kanzawa, Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) for stratospheric ozone layer measurements by solar occultation technique, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 197-200, 1999.
- 5) Suzuki, M., A. Matsuzaki, T. Ishigaki, N. Kimura, N. Araki, T. Yokota, and Y. Sasano, ILAS, the Improved Limb Atmospheric Spectrometer, on the Advanced Earth Observing Satellite, *IEICE TRANS. Commun.*, E78-B, 12, 1560-1570, 1995.
- 6) Yokota, T., M. Suzuki, O. V. Duvobik, and Y. Sasano, ILAS (Improved Limb Atmospheric Spectrometer)/ADEOS data retrieval algorithms, *Adv. Space Res.*, 21, 393-396, 1998.
- 7) 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.
- 8) Murcray, F. J., J. R. Starkey, W. J. Williams, W. A. Matthews, U. Schmidt, P. Amedieu, and C. Camy-Peyret, HNO₃ profiles obtained during the EASOE campaign, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 1223-1226, 1994.
- 9) Williams, W. J., F. J. Murcray, R. D. Blatherwick, P. Fogal, P. Sullivan and C. Camy-Peyret, Nitric Acid Observations During Arctic Winter, *Proceedings of the 3rd European Workshop 18 to 22 September 1995*, edited by J. A. Pyle, N. R. P. Harris, and G. T. Amanatidis, pp.179-182, Eur. Comm., Brussels, Luxembourg, 1996.
- 10) Oelhaf, H., et al., Remote sensing of the Arctic stratosphere with the new balloon-borne MIPAS-B2 instrument, in Polar stratospheric ozone, *Proceedings of the 3rd European Workshop 18 to 22 September 1995*, edited by J. A. Pyle, N. R. P. Harris, and G. T. Amanatidis, pp.270-275, Eur. Comm., Brussels, Luxembourg, 1996.
- 11) Wetzell, G., H. Oelhaf, T. von Clarmann, H. Fischer, F. Friedl-Vallon, G. Maucher, M. Seefeldner, and O. Trieschmann, Vertical profiles of N₂O₅, HO₂NO₂, and NO₂ inside the Arctic vortex, retrieved from nocturnal MIPAS-B2 infrared limb emission measurements in February 1995, *J. Geophys. Res.*, 102, 19,177-19,186, 1997.
- 12) Johnson, D. G., K. W. Jucks, W. A. Traub, and K. V. Chance, Smithsonian stratospheric far-infrared spectrometer and data reduction system, *J. Geophys. Res.*, 100, 3091-3106, 1995.
- 13) Kumer et al., Comparison of correlative data with HNO₃ version 7 from the CLAES instrument deployed on the NASA Upper Atmosphere Research Satellite, *J. Geophys. Res.*, 101, 9621-9656, 1996.
- 14) Camy-Peyret C., Balloon-borne Fourier transform spectroscopy for measurements of atmospheric trace gases, *Spectrochim. Acta*, 51A, 1143-1152, 1995.
- 15) Toon, G. C., JPL Mark IV interferometer, *Opt. Photonics News*, 2, 19-21, 1991.

- 16) Sen, B., G. C. Toon, G. B. Osterman, J.-F. Blavier, J. J. Margitan, and R. J. Salawitch, Measurements of reactive nitrogen in the stratosphere, *J. Geophys. Res.*, 103, 3571-3585, 1998.
- 17) Kondo et al., NOy-N2O correlation observed inside the Arctic vortex in February 1997: Dynamical and chemical effects, *J. Geophys. Res.*, 104, 8215-8224, 1999.
- 18) Sugita, T., Y. Kondo, H. Nakajima, U. Schmidt, A. Engel, H. Oelhaf, G. Wetzell, M. Koike, and P.A. Newman, Denitrification observed inside the Arctic vortex in February 1995, *J. Geophys. Res.*, 103, 16221-16233, 1998.
- 19) Kotamarthi et al., Evidence of heterogeneous chemistry on sulfate aerosols in stratospherically-influenced air masses sampled during PEM-West B, *J. Geophys. Res.*, 101, 28,425-28,436, 1997.
- 20) Feigl C., H. Schlager, M. Kuhn, H. Ziereis, J. Curtius, F. Arnold, C. Schiller, Observation of NOy uptake by particles in the Arctic tropopause region at low temperatures, *Geophys. Res. Lett.*, submitted, 1999.
- 21) Sasano, Y, H. Nakajima, H. Kanzawa, M. Suzuki, T. Yokota, H. Nakane, H. Gernandt, A. Schmidt, A. Herber, V. Yushkov, V. Drokhov, and T. Deshler, Validation of ILAS version 3.10 ozone with ozonesonde measurements, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 831-834, 1999.
- 22) Nash, E. R., P. A. Newman, J. E. Rosenfield, and M. R. Schoeberl, An objective determination of the polar vortex using Ertel's potential vorticity, *Geophys. Res. Lett.*, 101, 9471-9478, 1996.
- 23) Hitchman, M. H., M. McKay, and C. R. Trepte, A climatology of stratospheric aerosol, *J. Geophys. Res.*, 99, 20,689-20,700, 1994.
- 24) Sasano, Y., M. Suzuki, T. Yokota, and H. Kanzawa, Improved limb atmospheric spectrometer (ILAS) project: ILAS instrument, performance and validation plan, in *SPIE*, pp. 193-204, 1995.
- 25) Burton, S.P., L.W. Thomason, Y. Sasano, and S. Hayashida, Comparison of aerosol extinction measurements by ILAS and SAGE II, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 1719-1722, 1999.
- 26) Poole, L. R., and M. C. Pitts, Polar stratospheric cloud climatology based on stratospheric aerosol measurement II observation from 1978 to 1989, *J. Geophys. Res.*, 99, 13083-13089, 1994.
- 27) Pullen, S., and R.L. Jones, Accuracy of temperatures from UKMO analysis of 1994/1005 in the arctic winter stratosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 24 , 845-848, 1997.
- 28) Fromm, M.D., J.D. Lumpe, R.M. Bevilacqua, E.P. Shettel, J. Hornstein, S.T. Massie, and K.H. Fricke, Observations of Antarctic polar stratospheric clouds by POAM II: 1994-1996, *J. Geophys. Res.*, 102 , 23,659-23,672, 1997.
- 29) Hanson, D., and K. Mauersberger, Laboratory studies of the nitric acid trihydrate: Implications for the south polar stratosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 15 , 855-858, 1988.

[国際共同研究等の状況]

検証実験データの解析に関しては、ドイツ気象・気候研究所、フランスCNES及び分子応用科学研究所、及びニュージーランド大気水圏研究所等との共同研究が実施された。

[研究発表の状況]

(1) 口頭発表

- ①横田達也：ADEOS/ILASによる極域オゾン層の気体分布導出手法と推定精度の検討，第20回日本リモートセンシング学会，東京，1996年5月，第20回講演論文集，127-128，1996.
- ②林田佐智子・栗原尚子：SAM IIデータから見たPSCの消長と気温の関係，1996年日本気象学会春季大会，つくば市，1996年5月，1996.
- ③林田佐智子・西村亜紀：SAM IIおよびSAGE IIで観測された成層圏エアロゾル消散係数の解析，1996年日本気象学会春季大会，つくば市，1996年5月，1996.
- ④西村亜紀・林田佐智子：人工衛星データを用いた成層圏エアロゾルの光学的パラメータの解析(2)，1996年気象学会秋季大会，名古屋，1996年11月，1996.
- ⑤林田佐智子・西村亜紀：SAGE IIデータに見られるエアロゾルと微量成分変化の対応について，1996年気象学会秋季大会，名古屋，1996年11月，1996.
- ⑥横田達也，椿広計，笹野泰弘：ADEOS衛星搭載センサーILASのデータ処理における誤差評価：日本リモートセンシング学会第21回学術講演会，盛岡，1996年11月，第21回講演論文集，45-46，1996.
- ⑦Shiotani, M., Stratospheric conditions in 1996 September to the present. 12th ILAS Science Team Meeting, The Second ADEOS Symposium/Workshop, Yokohama, Japan, March, 1997.
- ⑧横田達也，飯田隼人，笹野泰弘：衛星センサーILASの参照大気データベースの作成，日本リモートセンシング学会第22回学術講演会，東京，1997年5月，第22回講演論文集，265-266，1997.
- ⑨林田佐智子・西村亜紀：SAGE IIデータで観測された成層圏エアロゾル消散係数の波長依存性について，第22回日本リモートセンシング学会学術講演会，東京，1997年5月，1997.
- ⑩Shiotani, M., Stratospheric circulation during the 1996- 1997 Arctic winter, ILAS validation experiments interim report meeting, Paris, France, September, 1997.
- ⑪林田佐智子，齊藤尚子，中川理恵，上杉清子，田中愛，横田達也，鈴木睦，神沢博，笹野泰弘：ILASで観測されたエアロゾル消散係数での解析(1)，日本気象学会1997年秋季大会，札幌，1997年10月，1997年秋季講演予稿集，p.220，1997.
- ⑫横田達也，椿広計，笹野泰弘：ADEOS衛星搭載センサーILASのデータ処理における誤差評価（その2）：日本リモートセンシング学会第23回学術講演会，広島，1997年11月，第23回講演論文集，199-200，1997.
- ⑬長崎祐和・塩谷雅人：冬季北半球の極渦内におけるオゾン減少，第8回大気化学シンポジウム，豊橋，1998年2月，122-125，1998.
- ⑭笹野泰弘，神沢博，鈴木睦，横田達也，中島英彰，中根英明，塩谷雅人，近藤豊，林田佐智子：ILAS for Stratospheric Ozone Layer Monitoring: Data Processing and Validation Experiments，第8回大気化学シンポジウム，豊橋，1998年2月，155-159，1998.

- ⑮林田佐智子, 斉藤尚子, 上杉清子, 中川理恵, 田中愛, 横田達也, 鈴木睦, 神沢博, 笹野泰弘: Polar Stratospheric Cloud Occurrence Observed with Improved Limb Atmospheric Spectrometer over the Arctic in the Winter of 1996/1997 and Comparison with Total Ozone Mapping Spectrometer Board on ADEOS, 第8回大気化学シンポジウム, 豊橋, 1998年2月, 166-169, 1998.
- ⑯香川晶子, 林田佐智子: 成層圏オゾン破壊に及ぼす不均一反応影響の評価, 第8回大気化学シンポジウム, 豊橋, 1998年2月, 1998.
- ⑰横田達也, 中島英彰, 神沢博, 笹野泰弘: ILASプロジェクトにおける参照大気モデルの作成, 第8回大気化学シンポジウム, 豊橋, 1998年2月, 177-179, 1998.
- ⑱塩谷雅人: 最近の北極オゾン減少をもたらす気象場と微量成分分布(招待講演), 日本気象学会, 東京, 1998年5月, 日本気象学会1998年春季大会講演予稿集, p.30, 1998.
- ⑲香川晶子, 林田佐智子: 成層圏の気温変化による不均一反応速度変化の評価, 日本気象学会, 東京, 1998年5月, 日本気象学会1998年春季大会講演予稿集, p.27, 1998.
- ⑳林田佐智子, 斉藤尚子, 中川理恵, 中島英彰, 笹野泰弘: 1996/97年冬季にILASで観測された北極上空のPSCの解析, 日本気象学会, 東京, 1998年5月, 日本気象学会1998年春季大会講演予稿集, 1998.
- ㉑中島英彰, 笹野泰弘, 林田佐智子, 岡本創, 石原博成: ILASで観測された赤外波長域エアロゾル/PSC消散係数スペクトルの特徴とガス成分導出への寄与について, 地球惑星科学関連学会1998年合同学会, 東京, 1998年5月, p.122, 1998.
- ㉒林田佐智子, 斉藤尚子, 上杉清子, 田中愛, 中島英彰, 笹野泰弘: 1996/97年冬季北極成層圏のPSC発生と微量成分変化について: ADEOS搭載のILAS・TOMSデータの解析, 地球惑星科学関連学会1998年合同学会, 東京, 1998年5月, 1998.
- ㉓Hayashida, S., Saitoh, N., and M. Horikawa: Analysis of wavelength dependence of extinction coefficients for the stratospheric aerosols observed with SAGE II, 32nd Scientific Assembly of COSPAR, Nagoya, Japan, 12-19 July 1998. (Abstracts, 7), 1998.
- ㉔Hayashida, S., Saitoh, N., Nakagawa, R., Suzuki, M., Yokota, T., Kanzawa, H., and Sasano, Y.: Preliminary analysis of PSCs observation with ILAS/ADEOS over both polar regions, 32nd Scientific Assembly of COSPAR, Nagoya, Japan, 12-19 July 1998. (Abstracts, 7), 1998.
- ㉕Yokota T., Suzuki M., Kanzawa H., Sasano Y.: ILAS data comparisons with CIRA and other data sets, 32nd Sci. Assem. COSPAR, Nagoya, July 1998, 1998.
- ㉖Shiotani, M., Dynamical field and ozone decrease of the northern polar stratosphere in the 1990s. The Second ILAS Paris Meeting, Paris, France, November, 1998.
- ㉗斉藤尚子, 林田佐智子, 中島英彰, 笹野泰弘: ILASがとらえた1996/97年冬季北極域PSCの特徴と空間分布, 日本気象学会, 仙台, 1998年10月, 日本気象学会1998年秋季大会講演予稿集, p.160, 1998.
- ㉘横田達也, 椿広計, 笹野泰弘: ADEOS衛星搭載センサーILASのデータ処理における誤差評価(その3): 日本リモートセンシング学会第25回学術講演会, 京都, 1998年11月, 第25回講演論文集, 75-76, 1998.

- ②⑨横田達也，笹野泰弘：ILASデータに基づくオゾン気候値，第9回大気化学シンポジウム，豊橋，1999年1月，1999.
- ③⑩神沢博，笹野泰弘，横田達也，中島英彰，鈴木睦，塩谷雅人：ILAS長寿命トレーサーデータ質の評価とその解析，第9回大気化学シンポジウム，豊橋，1999年1月，1999.

(2) 論文発表

- ①Kanzawa, H., Shiotani, M., Suzuki, M., Yokota, T. and Sasano, Y., : Structure of the polar vortex of the northern hemisphere winter of 1996/1997 as observed from long-lived tracer data of ILAS, *Proceedings of The Tsukuba International Workshop on Stratospheric Change and its Role in Climate and on the ATMOS-C1 Satellite Mission*, 158-162, 1997.
- ②林田佐智子：SAM II/SAGE/SAGE IIによる成層圏エアロゾル観測，エアロゾル研究，12巻，13-17，1997.
- ③Chanin, M-L., Ramaswamy, V., Gaffen, D., Randel, W., Rood, R. and Shiotani, M.: Trends in stratospheric temperatures. World Meteorological Organization (WMO)/ United Nations Environmental Programme (UNEP) 1998 Report, Part 1, Chapter 5, 1998.
- ④林田佐智子，西村亜紀，斎藤尚子：SAGE IIで観測された成層圏エアロゾル消散係数の波長依存性の時間・空間変動について，日本リモートセンシング学会誌，18巻，32-41，1998.
- ⑤Sasano, Y., M. Suzuki, T. Yokota, and H. Kanzawa: Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) for stratospheric ozone layer measurements by solar occultation technique, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 197-200, 1999.
- ⑥Sasano, Y, H. Nakajima, H. Kanzawa, M. Suzuki, T. Yokota, H. Nakane, H. Gernandt, A.Schmidt, A. Herber, V. Yushkov, V. Drokhov, and T. Deshler: Validation of ILAS version 3.10 ozone with ozonesonde measurements, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 831-834, 1999.
- ⑦Koike M., Y. Kondo, W.A. Matthews, P.V. Johnston, H. Nakajima, A. Kawaguchi, H. Nakane, I. Murata, A. Budiyono, M. Kanada, and N. Toriyama: Assessment of the uncertainties in the NO₂ and O₃ measurements by visible spectrometers, *J. Atmos. Chem.*, 32, 121-145, 1999.
- ⑧ 中島英彰，横田達也，飯田隼人，笹野泰弘：UARSデータに基づく大気微量成分統計量データベースの作成，「天気」，1999年9月号，1999（印刷中）。
- ⑨Koike et al., : A comparison of Arctic HNO₃ profiles measured by ILAS and balloon-borne sensors, *J. Geophys. Res.*, submitted in 1999.

(3) 受賞

【平成10年度(社)日本リモートセンシング学会論文賞受賞】

林田佐智子，西村亜紀，斎藤尚子：SAGE IIで観測された成層圏エアロゾル消散係数の波長依存性の時間・空間変動について，日本リモートセンシング学会誌，18巻，32-41，1998.