

A-10 衛星データを利用したオゾン層変動の機構解明に関する研究
(4) 衛星データ等を利用した科学的解析とデータ質評価に係る研究

独立行政法人国立環境研究所

成層圏オゾン層変動研究プロジェクト	衛星観測研究チーム	杉田考史
成層圏オゾン層変動研究プロジェクト	衛星観測研究チーム	中島英彰
大気圏環境研究領域		笹野泰弘

文部科学省国立極地研究所

佐藤 薫

京都大学

生存圏研究所	塩谷雅人
生存圏研究所	津田敏隆

東京大学

理学系研究科 地球惑星科学専攻	小池 真
先端科学技術研究センター	近藤 豊

<研究協力者>

国立環境研究所

成層圏オゾン層変動研究プロジェクト	衛星観測研究チーム	入江仁士
成層圏オゾン層変動研究プロジェクト	衛星観測研究チーム	寺尾有希夫
宇宙航空研究開発機構 地球観測利用研究センター		河本 望
名古屋大学大学院環境学研究科		神沢 博
京都大学生存圏研究所		青山雄一
京都大学生存圏研究所		M. Venkat Ratnam

平成13～15年度合計予算額	86,227千円
(うち、平成15年度予算額	34,137千円)

〔要旨〕ADEOS搭載のILASデータ利用を中心にして、その他の衛星データや気球、航空機、ゾンデ等の各種データを利用した成層圏の大気化学・輸送過程に係わる知見の向上を目指すことを目的として、具体的に以下に挙げるいくつかの研究成果をあげた。一つめ、ILASのバージョン6.0データおよびILAS-IIのバージョン1.4データの検証解析を通じてそれらのデータ質を評価した。二つめ、1997年北極の脱窒量を新たに開発した微物理ボックスモデルと比較し、このモデルが脱窒量を再現することを確認した。三つめ、1994年から2000年にかけての北極オゾン破壊速度の年々変動要因を極成層圏雲の発生頻度との関係から世界で始めて明らかにした。四つめ、極域成層圏最下層での窒素酸化物の挙動に関して、特に極成層圏雲の重力落下と昇華で引き起こる再分配過程を定量的に把握した。五つめ、1997年南極の亜酸化窒素から求めた大気下降速度と力学的解析結果が良く一致することを世界で始めて明らかにした。六つめ、GPS衛星掩蔽データからの大気温度測定データの特性と精度を検証した。

[キーワード] 衛星観測、大気化学過程、大気輸送過程、成層圏、ILAS、ILAS-II

1. はじめに

1990年代から2000年代はじめは、特に北極オゾン破壊のメカニズムの観点からの研究が進んできた。その理由として挙げられるのは、地上起源の観測が南極よりも北極の方が容易なことにある。この時期はまた衛星からの成層圏大気微量成分の観測が本格化した時でもある。オゾン破壊速度の定量化、極成層圏雲の生成過程、脱窒過程とその定量化、極渦内大気下降速度の定量化、極渦内外あるいは極渦内空気塊同士の混合過程、また最近ではオゾン破壊と気候変動というキーワードが頻繁に使い出されてきた時期でもある。オゾン層の変動を支配する要因についての知識は1980年代はじめのオゾンホール発見後、急速に進展してきたことは周知の事実であるが、個々の大気化学・輸送過程の定量的な理解やその相互作用といったシステムの把握にはまだ至っていないものも少なくない。本サブテーマでは多成分の同時測定がオゾン破壊のより顕著な極域において連続観測が可能であるという利点をもつILAS/ILAS-IIのデータを利用して素過程の定量的把握を行ってきた。

2. 研究目的

本サブテーマではILAS/ILAS-IIデータの検証解析を通じてデータ質の評価を行ない、そのデータを主に利用した極域オゾン層の物理・化学的変動メカニズムを明らかにする。具体的には以下の項目を明らかにすることを主な目的とする。

- (1) 極成層圏雲の生成過程や硝酸濃度の時空間的変動とその要因の解明。
- (2) 北極成層圏オゾン破壊速度の年々変動の定量的把握とその要因の解明。
- (3) 1997年南極極渦内の大気下降速度の定量化とその要因の解明。

3. 研究方法および結果・考察

(1) ILAS バージョン 6.0 のデータ質検証

研究方法：ILASバージョン6.0は2003年3月に登録研究者に対してデータ提供を開始した最新のILASデータである。このバージョン6.0では、一般研究者に対してデータ公開されているバージョン5.20には取り込みきれなかった以下の点について検討を行い取り込んだ。それらは大雑把に言って、各Limb観測の接線高度を決めるために必要なデータの改訂、最新で信頼性のある分子分光データの採用、フォワードモデル計算に必要な各大気層の気温気圧データの改訂などである。また、各Limb観測データを1 km毎の等間隔に内挿した後、1 km毎にリトリバルする方法を取り入れた。さらに、光路が各大気層を通過する際の光学的厚さの計算方法を改良した。各大気層の光学的厚さの代表値を計算する手法として、従来は粗い近似方法を用いていたものを、新手法ではより正確な近似手法に切り替えた。以上の結果、このバージョン6.0ではToon and Sen（未公表データ、2001）のCFC-11、CFC-12、 ClONO_2 、 N_2O_5 に対する赤外擬似ラインデータを正確に適用したことで、CFC-12のデータ質が向上した。また、 ClONO_2 、 N_2O_5 をリトリバル対象ガスとして取り入れた。

このデータの各化学種毎のデータ質を評価するために、主に環境省のサポートによる大気球実験で取得した検証データを利用した。気球実験はフランスCNESの協力のもと、スウェーデンのキ

ルナ（北緯68度）で1997年2月から3月に実施された。また旧宇宙開発事業団（NASDA）のサポートによるアラスカ州フェアバンクス（北緯65度）での大気球実験において1997年4月と5月に取得したデータも利用している。さらに、ILASに同期した他の衛星データを利用した。表1に検証データとしてこの研究で利用した測定器一覧を化学種毎に示す。

表1: ILASバージョン6.0データの検証のために利用した測定器のリスト

化学種名	測定器名
O ₃	HALOE
HNO ₃	CLD, CAESER, LPMA, MIPAS-B2, FIRS-2, MkIV
NO ₂	LPMA, SAOZ, MIPAS-B2, MkIV
H ₂ O	HALOE
CH ₄	HALOE
N ₂ O	ASTRID, BONBON, LPMA, SAKURA, MIPAS-B2, FIRS-2, MkIV
AEC (*)	SAGE II
ClONO ₂	MIPAS-B2, FIRS-2, MkIV
CFC-12	ASTRID, BONBON, SAKURA, MIPAS-B2, FIRS-2, MkIV

(*) 780 nmで見たときのエアロゾル消散係数

ここで、HALOE, SAGE IIは衛星センサである。用いたデータバージョンは各々、19と6.1である。その他は大気球に搭載させたセンサである。大気球実験によるデータは国立環境研究所のData Handling Facility (DHF) が運用するILAS CMDBに登録されている。

これらの検証データを利用するにあたり、HALOEについてはILASとの観測地点の距離差が300 km以内、時間差が12時間以内の測定ペアを選んだ。また、SAGE IIについては、距離差が300 km以内、時間差が2時間以内の測定ペアを選んだ。大気球搭載センサとの比較では概ね距離差は500 km以内で時間差は12時間以内である。

結果と考察：

① オゾン (O₃) についての結果を図1. 1a, 1. 1bに示す。図1. 1aは北半球（1997年3月から6月）での結果を、図1. 1bは南半球（1996年11月から1997年2月）での結果である。ILASとHALOEの相対的な一致の程度を示す指標として以下の計算を行なった。

$$D(\%) = 100 * 2 * |(ILAS - HALOE) / (ILAS + HALOE)|$$

ここで、ILASおよびHALOEは各々の考えている化学種の混合比である。D値を個々の測定ペアに対して計算した後に、各高度において、中央値および最大値、最小値を計算した。また、測定誤差のトータルとして、お互いの測定誤差の二乗和のルート (Root-sum-square, RSS) を計算し、各高度において、その平均値を計算した。北半球での結果から、高度52 kmから63 kmの範囲でトータル誤差の範囲を超えてD値が小さくなっていることを除き、全ての高度で誤差の範囲内に収まっている。また、概ねD値は±10%の範囲内にある。他方、南半球での結果からは、全ての高度範囲でD値はトータル誤差の範囲内にあり、またD値も高度15 km以下と高度50 km以上を除き、±5%の範囲内にある。

② 水蒸気 (H_2O) およびメタン (CH_4) についての結果をオゾンと同様な形で図1. 2a, 1. 2bと図1. 3 a, 1. 3bに各々示す。水蒸気、メタンともに全高度においてD値はトータル誤差の範囲内に収まっていることが分る。特に南半球の水蒸気については、高度30 km以上ではほぼ+5%のD値となっており、非常に良くHALOEデータと一致していることが分かる。一方北半球の水蒸気は30 km以上で高度と共にD値が小さくなっている。両半球ともに高度30 km以下では-10%程度のD値となっている。メタンについては両半球ともにD値の高度分布の形は類似している。つまり、高度30 km以下で+10-15%程度のD値となっており、それ以上では一旦負の値 (-15-20%) をとった後、50-55 km以上でまた正の値となっている。

③ 硝酸 (HNO_3) と二酸化窒素 (NO_2) についての結果を各々図1. 4と図1. 5に示す。これらの比較はILASと検証データの混合比の絶対値の差分として行なった。また、参考のために、前バージョンの5. 20との比較結果も併せて示されている。硝酸については高度15 kmを除き、 ± 0.5 ppbvの範囲内であり、誤差の範囲で検証データと良く一致している。一方、二酸化窒素については高度15-35 kmで、 ± 0.2 ppbvの範囲内にあり、高度35 kmを除いて、誤差の範囲で検証データと良く一致している。

④ 亜酸化窒素 (N_2O) についての結果を図1. 6に示す。この比較ではILASと検証データの混合比の絶対値の相関関係が示されている。黒のプラスで示されたデータは観測空気塊のポテンシャル渦度 (PV) 値の相対差分が15%を越えたものである。これらを除いた上で、1:1ラインからのズレ量のRMS (root mean square) を計算した結果、それは0.021 ppmvとなり、検証データと良く一致していることが分かる。

⑤ 780 nmで見たエアロゾルの消散係数 (AEC) の結果を図1. 7a, 1. 7bに示す。図1. 7aは北半球 (1997年5月)、図1. 7bは南半球 (1997年2月) の結果である。比較はオゾンの時と同様に相対値差として示されている。北半球ではトータル誤差の範囲を超えて、-10%から-40%のD値となっている。しかしながら消散係数値が大きい高度18 km以下では、D値はほぼ-20%からゼロとなっている。南半球でも高度18 km以下のD値は最下部を除き-20%から+5%の範囲である。高度19 km以上では、両半球ともに、高度と共にD値が小さくなってゆくのが分る。これらの高度領域では絶対値自身が相対的に小さくなるため比較が非常に困難になる。

⑥ 硝酸塩素 (ClONO_2) についての結果を図1. 8に示す。比較対象が3プロファイルしかないため、結論を導くことは困難ではあるが、平均的に30%程度ILASデータが検証データよりも小さくなっていることが分る。

⑦ CFC-12についての結果を図1. 9a, 1. 9bに示す。比較はオゾンの時と同様に相対値差として示されている。図1. 9aは北極極渦内における1997年3月の比較結果を示す。高度20 km以下ではD値はほぼ+10%程度であり、検証データと良く一致していることが分かる。しかしながら、それ以上では高度と共にD値は大きくなり、23-24 kmで100%を超える。図1. 9bは北半球1997年4月と5月の比較結果を示す。高度25 km付近以下では非常に良く検証データと一致しているが、それ以上では高度とともに150%まで大きくなる。しかしながら、このような大きなD値の高度領域では、トータル誤差が非常に大きいため、ILASのCFC-12データに有意な正のバイアスがあるとは言えない。

(2) ILAS-II バージョン 1. 4 の初期的なデータ質検証

研究方法：ILAS-IIデータは2003年4月2日から同年10月24日まで連続して取得された。現在の最新

アルゴリズムはバージョン1.4であり、登録研究者に対して提供されている。ここではデータ質の最も高いオゾンについてのみ検証データとの比較を通じてデータ質評価を行なう。

バージョン1.3データ

ILAS-IIバージョン1.4の高度分布導出アルゴリズムは、基本的にILASのバージョン6.0アルゴリズムと同じである。しかし、各limb観測データの接線高度決定には、高度29 km以下において、可視・近赤外分光計によって観測された酸素分子Aバンドの吸収面積と、各高度での英国気象局（UKMO）の気温気圧から求めた理論計算による吸収面積とが一致する点を求めることから高度を決める手法（Transmittance Spectrum Method, TS-M）を利用している。30 km以上は幾何学的に太陽輪郭センサから高度を決める手法とこのTS-Mの2つを複合利用した手法であるHybrid法を用いている（Nakajima et al., JGR, 2002）。分子分光パラメータについては、HITRAN 2000以降の最新のデータベースを利用している。

検証データとしてはオゾンゾンデからのデータを利用する。検証データ早期取得のために、環境省のサポートによるILAS-II検証コア実験として2003年2-3月にスウェーデン、キルナにおいてECC型ゾンデを用いて、また2003年2月、5月、7-8月には南極昭和基地においてKC型ゾンデを用いて観測を実施した。また、ILAS-II検証共同実験として2003年6-8月に昭和基地において（以下に述べるQUOBIが主目的）、同年8月にアラスカ・フェアバンクスにおいて、各々ECC型ゾンデを用いた観測を実施した。

さらに、EORCU（欧州のオゾン研究調整のための機関）によって組織された、ECのサポートによるいくつかのプロジェクトから構成される、国際衛星観測検証及びオゾン破壊研究計画（VINTERSOL）のデータプロトコルに基づき、北極・南極域を中心としたオゾンゾンデ基地からのデータを利用した。データはEnvisat衛星検証のためのデータベース（Envisat CalVal）と両極域オゾン破壊量の定量的理解のための観測計画（QUOBI）プロジェクトのデータベースから取得した（逆に我々もキャンペーンメンバーとして、これらのデータベースにオゾンゾンデデータを提供している）。**結果と考察：**以上の検証データとILAS-IIの比較のために、まず始めに、時空間的な一致基準として、各々のオゾンゾンデとILAS-IIの観測の距離差が500 km以内、時間差が±12時間以内を満たしたものを測定ペアとして抽出した。3.1節と同様に、各高度でのオゾン濃度の相対差を以下のように定義した。

$$D(\%) = 100 * 2 * |(ILAS-II - Sonde) / (ILAS-II + Sonde)|$$

ここで、ILASおよびSondeは各々のオゾン混合比である。D値を個々の測定ペアに対して計算した後に、各高度において、中央値および最大値、最小値を計算した。また、測定誤差のトータルとして、お互いの測定誤差の二乗和のルート（Root-sum-square, RSS）を計算し、各高度において、その平均値を計算した。比較は高度30 km以下に対して行なわれた。

図2.1a, 2.1bは各々北半球および南半球での結果を示す。北半球の比較では、2003年の2-3月と5-10月に取得されたおよそ30のオゾンゾンデプロファイルが利用された。一方南半球では、2003年2月と5-10月に取得されたおよそ60のオゾンゾンデプロファイルが利用された。両半球ともに、いくつかの高度を除き、D値はトータル誤差の範囲内に収まっていることが分る。また、両半球ともにD値は全高度でほぼ+/-10%以内である。D値プロファイルの傾向として、高度20 km以下で大きく、それ以上で小さくなっている。

(3) 北極成層圏の脱室を引き起こすPSCsの形成過程

研究方法：ILASは1996/1997年冬季に北極成層圏の硝酸(HNO_3)の濃度分布を測定し、1997年2月に低 HNO_3 濃度の空気塊を高度19 km付近で観測した。これは、 HNO_3 を含んだ大粒径($> 5 \mu\text{m}$)のPSC粒子が重力落下し、 HNO_3 がその空気塊から不可逆的に除去(脱室)された結果と考えられる。これまで行われた室内実験は、この大粒径のPSC粒子が形成するメカニズムとして、液滴粒子の均一核形成過程を提唱している。本研究では、均一核形成過程が成層圏の脱室を引き起こすかどうかを調べるために、微物理過程(核形成・凝縮成長・重力落下)を取り入れたボックスモデルを構築し、モデルによって計算された HNO_3 の損失量とILASデータを比較した。以下に、用いたILASデータとモデルについて記述する。

① ILASデータ

本研究では、ILASのversion 5.2の HNO_3 と一酸化二窒素(N_2O)のデータを用いた。PSCsが発生していない条件下での HNO_3 と N_2O の相関関係を利用し、脱室が起きた直前(2月上旬)に観測された相関関係を基準にして、脱室による HNO_3 の除去量(ΔHNO_3)を見積もった。この HNO_3 除去量の定量化方法は我々がこれまで行った研究により確立されている。本研究では、1997年1～2月の北極極渦内の高度19～20 kmにおける ΔHNO_3 値を用いた。この高度での ΔHNO_3 の見積もりの不確定性は 3σ の標準偏差として約2 ppbvである。

図3.1は1997年1～2月の北極極渦内の高度19～20 kmにおける ΔHNO_3 値の時系列プロットを示す。この図には、ヨーロッパ中期天候予報センター(ECMWF)の気象データから計算された、温位面475 K(高度19～20 kmに相当)の日毎の最低気温($T_{\min}$)もプロットされている。 $T_{\min}$ は1月20日頃に氷点(T_{ICE})近くまで低下したが、脱室によって2 ppbv以上の HNO_3 が除去された空気塊はILASによって観測されなかった。2 ppbvを越す HNO_3 の除去は $T_{\min}$ が T_{ICE} まで十分に低下した2月中旬以降に観測された。

② モデル計算

ILASの観測位置を出発点として、高度19～20 kmで観測された空気塊について20日間の等温位面後方トラジェクトリー解析を実施した。このトラジェクトリー上での HNO_3 濃度の変動を調べるために、PSCsの微物理過程を考慮したボックスモデルを構築した。考慮した微物理過程は、 $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{SO}_4$ から成る3成分系の液滴エアロゾル(LTA)による HNO_3 の取り込み、NAT粒子の重力落下と凝縮成長、LTA粒子の内部で起きるNADとNATの均一核形成、である。 HNO_3 や H_2O の初期濃度は、1997年2月上旬に北極極渦内で得られたILASデータを用いた。硫酸量としては0.3 ppbvを用いた。ILASの高度分解能はおよそ2 kmであり、例えば19 kmでは、 $19 \pm 1 \text{ km}$ の空気塊を観測したと考えられる。この場合、NAT粒子が18 km以下まで落下したとき空気塊中の HNO_3 は脱室の影響で除去されたと考えられる。このようにして計算された除去量は ΔHNO_3 に相当する。

単位体積の空気塊中でNATの核が生成する速度(P)は次式で与えられる。

$$P = JV$$

$$J = N(kT/h) \exp(-\Delta G/RT)$$

ここで、Jは核形成速度、VはLTA粒子の体積密度、NはLTA粒子内の HNO_3 の数密度、Tは気温、Rは気体定数、kはボルツマン定数、hはプランク定数である。 ΔG はNATの核が1 mol生成するのに必要なギブズ自由エネルギーで、室内実験の結果を成層圏の条件に外挿し、

NATの飽和度の関数として計算された。成層圏条件下でP値は190K付近(飽和比($S_{NAT} > 2.0$))で極大となる。

NADのP値も同様に計算された。NADは成層圏の条件下では準安定な化学組成であり、30分以内でNATに相変換することが室内実験で示されている。また、NADは $S_{NAT} < 1.0$ で長時間存続できるが、その条件下でのモデル中のNAD形成速度は無視できるほどに遅い。したがって、生成したNADの核は全て瞬時にNATに相変換されると仮定した。

結果と考察：図3.2は、1997年2月20日に、北緯69度、西経63度、極渦内の高度19kmでILASが観測した空気塊について、上記の微物理モデルで計算された後方トラジェクトリー上の HNO_3 濃度の変動を示す。この空気塊の ΔHNO_3 の観測値は -3.7 ppbv だった。このモデル計算にはNADとNATの両方の核形成が考慮されている。

この空気塊が観測された20~14日前に、空気塊の気温は198Kから191Kまで低下し(図3.2a)、 S_{NAT} と S_{NAD} は2.0と4までそれぞれ上昇した(図3.2b)。14~10日前に、LTA粒子は成長し(図3.2c)、ゆえにLTAからの核形成が起き(図3.2d)、NAT粒子の個数濃度(N_{NAT})は $2 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$ に達した(図3.2e)。NAT粒子は平均で $10 \mu\text{m}$ の粒径まで成長し(図3.2f)、低高度へ落下した。図3.2fには N_{NAT} が 10^{-4} cm^{-3} を越した場合の平均粒径だけが示されている。この大粒径のNAT粒子は $0.1 \sim 0.7 \text{ ppbv}$ の HNO_3 を含んでいたため、重力落下によって空気塊中の HNO_3 量は減少する(図3.2h)。ここで計算されたNAT粒子の粒径やNAT粒子に取り込まれた HNO_3 量は、Faheyら(2001)が1999/2000年冬季に航空機観測によって直接測定した値と類似していた。

脱室による 2 ppbv の HNO_3 の除去は、 S_{NAT} が2.0を上回った4日後(観測日の10日前)に起きた。本研究で用いた全てのデータについてモデル計算を行ったところ、 2 ppbv の脱室は空気塊が $S_{NAT} > 2.0$ の過飽和になった 5 ± 2 日後に起きていた。この結果は、ILASデータと温度履歴だけを用いた我々の過去の研究結果とほぼ一致した。ILASの観測日まで計算を行ったところ、 ΔHNO_3 は -4.2 ppbv (不確定性の大きさは $+1.7/-2.0 \text{ ppbv}$)となり、観測値とほぼ一致した。一方、NADの核形成をモデル計算に含めなかった場合、 ΔHNO_3 のモデル計算値は -1.9 ppbv (不確定性の大きさは $+0.9/-1.3 \text{ ppbv}$)となり、観測値に比べて有意に小さかった(図3.2h)。

1997年1~2月にILASが観測した全ての空気塊について、 ΔHNO_3 のモデル計算値をILASの観測値に対してプロットした(図3.3の黒丸)。この図に見られるように、 ΔHNO_3 の計算値は観測値と正の相関を示し、相関係数(R^2)は0.74と高かった。しかしながら、計算値は観測値に比べ平均して $21 \pm 33\%$ 小さかった。

1996/1997年冬季の北極上空では、脱室は21kmまでの高度で起きた。もし19kmの気温がNATの飽和温度より低ければ、高度19~21kmで生成した大粒径のNAT粒子は HNO_3 を取り込みながら落下し、19kmの HNO_3 の除去を増大させると考えられる。この影響をモデル計算に取り込むために、高度19~21kmの層において追加のモデル計算を行った。計算に必要な気温の時間変化は、トラジェクトリー上の気温と、1997年2月の極渦内における気温(ECMWFデータ)の平均的な高度勾配から推定した。

21km以上の高度でのNADやNATの核形成が19kmの脱室を増大させる可能性を調べるために、ECMWFとILASデータから19, 21, 23kmにおける北極上空の S_{NAT}

の最大値を計算した。2月中に19 kmと21 kmでSNATの最大値が20を越えた日は、17～21日間だった。一方、23 kmではわずか6日間だけだった。21 km以上で気温が高かったことを反映していると考えられる。このことは、21 km以上の高度におけるNADやNATの核形成が19 kmの脱室を増大させる影響は非常に小さいことを示唆する。

高度19～21 kmで生成したNAT粒子の落下を考慮したモデル計算値は、図3.3の白丸で示されている。2～7 ppbvの脱室が観測された空気塊では、高高度からのNATの落下の影響は計算値の $25 \pm 11\%$ を占めた。上空からのNATの落下を考慮すると、モデル計算は観測された脱室を定量的によく説明し、相関係数 R^2 は0.77まで達した。これらの結果は、LTA粒子の内部で起きたNADとNATの均一核形成によってNAT粒子が形成し、北極の脱室を引き起こすメカニズムで重要な役割を果たしたことを示す。

1997年1月の北極極渦内は、短時間ではあるが、NADやNATの核形成温度まで冷却された(図3.1)。この時期、ILASによって2 ppbvを越す顕著な脱室は観測されなかった。一方、これらのデータについての ΔHNO_3 の計算値は $-1.5 \sim 0$ ppbvだった。このように、微物理モデルは1月に2 ppbvを越す脱室が起きなかったことを再現した。

図3.4は図3.3と同様であるが、NATの核形成だけを考慮したモデル計算が示されている。図から分かるように、モデル計算は観測値を明らかに過小評価した。このように、NADの核形成を除いた計算はILASの観測データを説明するには不十分であった。

これまでにNAD粒子の直接的な検出は報告されていない。1999/2000年冬季にスウェーデンのキルナ付近で行われた、気球搭載型のエアロゾル質量分析計による観測は、 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ のNAT粒子を検出したが、NADは検出されなかった。これはおそらく、NADがNATに直ちに相変換されてしまい、NADが検出器の検出限界の粒径まで成長できなかったからだと考えられる。このような直接的な検出の代わりに、本研究で示した結果は、NADが成層圏に存在し、 HNO_3 を含むPSC粒子を形成するのに重要な役割を果たしていることを示す。

(4) 北極におけるオゾン破壊速度の年々変動に関する研究

研究方法：オゾン減少のさらなる理解のため、またオゾン層の将来予測のために、極域成層圏オゾン減少量の定量化は重要である。しかし、観測されるオゾン変動には輸送などによる力学的変化と化学的変化の両方が含まれるため、化学過程のみによるオゾン減少量を見積もるためには様々な手法が必要とされる。その中でも、Match解析は、極域成層圏のオゾン破壊量の評価に不可欠な化学過程と輸送過程の分離を直接的に行った解析として高い評価を受けている。Match解析とは、あるオゾンゾンデ観測された空気塊が流跡線によって計算された軌跡で移動したと仮定し、数日後の別の観測地点に十分近付いたとき、これらの2つの観測は同一気塊を捕らえた(matchした)と解釈し、このオゾン濃度の差が力学的影響を除去した化学的な変化を与えると考えるものである。この解析の欠点は、各地のオゾンゾンデ観測にばらつきがありデータの均質性に問題がある点である。本研究では、このMatch解析を人工衛星観測データに適応したSatellite-Match手法を確立した。Satellite-Matchの利点は、人工衛星データからは高緯度での連続観測値が得られ、そのデータが均質である点と、オゾン以外の物質も同時測定できる点である。

用いたデータはILASバージョン5.20、POAM IIバージョン6.0、そしてPOAM IIIバージョン3.0のオゾン混合比とエアロゾル消散係数である。図4.1は各々のセンサの観測緯度の時間変

化を北半球と南半球の両方について示している。観測期間はPOAM IIが1993年10月から1996年11月まで、ILASが1996年11月から1997年6月まで、そしてPOAM IIIが1998年4月から現在（ここでは2000年10月までのデータを利用）までである。各々のセンサは北半球で55から71度、南半球で64から88度の緯度範囲をカバーしている。これらのデータセットを利用することで、多くの観測空気塊は異なる観測位置において無作為に測定されうる。

ILAS, POAM II/IIIが異なる位置と時間において2度測定された空気塊を“double-sounded”空気塊と考えることで、それらのマッチペアを各々のセンサ観測位置から10日間的前方流跡線解析を等温位面で行うことで探索した。流跡線解析と気象場の解析にはUKMO同化データを利用した。各マッチペアの確度のチェックのために、前方・後方にクラスター流跡線（各々5つ）を計算し、それらの流跡線の分散に対して幾つかの基準を適応した。オゾン破壊速度は非断熱下降を考慮に入れた2つのマッチングプロファイルのサブセットから回帰分析により統計的に計算された。非断熱下降速度はSLIMCATの3次元化学輸送モデルデータから計算した。

結果と考察：図4. 2は北極の1993/94年から1999/2000年までの475Kにおけるオゾン変化率（ppbv/day）を示す。1993/94年では、非常に少数のマッチペアであったために、統計的有意性が非常に低い。1994/95年のオゾン破壊速度の最大値は1月下旬と3月上旬の70 ppbv/dayである。1995/96年のオゾン破壊速度の最大値は1月上旬と下旬、2月中旬に見られる。3月ではオゾン破壊は和らいでいる。1996/97年ではILASがこれら6冬を通して最大のマッチペア数を見出した。オゾン破壊速度の最大値は2月下旬における40 ppbv/dayである。1月下旬にも別のオゾン破壊のピークがある。1998/99年はオゾン破壊がなかった。1999/2000年はこれら6冬の中で最大のオゾン破壊速度が導出された。オゾン破壊速度は局所的には1月中旬に80 ppbv/dayとなっていた。加えて、2月中旬から3月中旬まで40 ppbv/dayと比較的コンスタントに高い値となっていた。

1994/95年のオゾン破壊のパターンは、つまり1月と3月における2つのオゾン破壊ピーク、オゾンゾンデから導出された結果と一致する。1995/96年はオゾン破壊のパターンと値の両方がオゾンゾンデからの結果と異なっている。1996/97年と1998/99年はオゾンゾンデからの結果と良く一致している。1996/97年の40 ppbv/dayというオゾン破壊速度と1998/99年のオゾン破壊ゼロは定量的にも良く一致している。1999/2000年のオゾン破壊の2山パターンはオゾンゾンデからの結果とかなり良く一致する。1月のオゾン破壊速度はゾンデからの値よりも2倍ほど大きい、2月中旬から3月中旬までの連続的に40 ppbv/dayの値は良く一致している。

図4. 2はまた475KでのPSCの出現可能性を示している。それは極渦内観測のうち、PSCイベントとして検出された割合を意味する。PSCイベントとしての閾値は平均値プラス3シグマ標準偏差としている。各年における大きなオゾン破壊はPSCの出現と全体的に同期していることが分る。

図4. 3は475KにおけるPSC出現可能性（%/day）の関数としてのオゾン変化率（ppbv/day）の散布図である。これらの値は各年の1月1日から3月31日までの平均値である。オゾン変化率とPSC出現可能性には線形の関係が見られる。オゾン破壊速度はPSC出現可能性の増加に伴い増加する。この結果からPSC出現可能性の5%の増加は20%のオゾン破壊速度を付加することが示唆される。

（5）北極成層圏最下層における窒素酸化物の挙動に関する研究

研究方法：本研究では、人工衛星ILAS-IやILAS-IIなどの窒素酸化物データのうち、近年注目されている極域成層圏の最下層部の検証手法の検討と、それらの高度領域のデータを用いた解析によってどのよう

な情報が得られるかについての検討を行った。

極域成層圏中の大気組成の検証においては、極渦内外での成分間の相関を使った解析がしばしば行われている。これに対して成層圏の最下層部（高度10-12.5 km）では極渦の境界が明瞭ではなく、中緯度の大気とも交換・混合がおきていると考えられ、さらに場合によっては対流圏大気との交換・混合も起こると予想される。しかしながら、その高度領域における窒素酸化物や他の各成分間の相関がどのようなになっているかは十分に調べられていない。また従来の衛星観測・解析ではこれらの成層圏最下層部の観測精度が十分でないため、その高度領域での窒素酸化物データの解析が十分行われてこなかった。そこで本研究では、アメリカの航空宇宙局（NASA）によって、1999年12月から2000年3月にかけて北極成層圏で実施されたSOLVE（SAGE III Ozone Loss and Validation Experiment：人工衛星SAGE III検証・オゾン破壊解明）観測キャンペーンで得られた、極域成層圏最下層部、高度10-12.5 kmの航空機観測のデータの解析をおこなった。これらの多成分の高精度の直接観測結果を用いることにより、成層圏最下層部では窒素酸化物や他の成分との間にどのような相関関係があるのか調べた。またこれらの観測結果を解析することにより、人工衛星によりどの程度の高度・空間・時間分解能で観測すれば、特徴的な現象が捉えられることができるのかを調べた。

SOLVE航空機観測は、NASAのDC-8（主として高度10-12.5 km）およびER-2（主として高度15-21 km）観測機による観測が実施された。両航空機上において、総反応性窒素酸化物（ $\text{NO}_y = \text{NO} + \text{NO}_2 + \text{NO}_3 + 2\text{N}_2\text{O}_5 + \text{ClONO}_2 + \text{HN}_3$ ）、 N_2O 、 O_3 、 HN_3 などの観測が実施されている。本研究では10秒平均値を用いて解析を行った。

本研究ではまた、窒素酸化物の動態の解釈のために、3次元化学輸送モデルの計算を実施した。このモデルではECMWF（ヨーロッパ中期予報センター）の気象場を用い、55の大気組成間の147の気相反応と、極成層圏雲（PSCs、固相および液相）表面上での不均一反応を入れている。

結果と考察

① NO_y と HN_3 の相関

図5.1にはDC-8により2000年の3月に高度10-12.5 kmで得られた NO_y と HN_3 の相関を示す。この図より、両者は良く一致しており、 NO_y のほとんどが HN_3 であることを示している。3月には極域でも太陽放射があたり HN_3 の光分解やOHとの反応による分解が可能となるが、成層圏の最下層部ではその割合は小さく、 HN_3 により NO_y を10%程度の精度で近似できることが分かった。

② NO_y と N_2O の相関

DC-8により1999年の12月から2000年の3月までに高度10-12.5 kmで得られた NO_y と N_2O の相関を図5.2に示す。 NO_y と N_2O の相関は、1999年12月と2000年1月とで変化がないのに対し、2000年3月では特に N_2O が小さい空気塊で NO_y が0.5-1 ppbv増大していた。しかし相関はどの時期でもコンパクトであることが特徴的である。図5.3は各 N_2O のレンジごとの NO_y の中央値を示した。この図にはさらに北極成層圏の気温がPSCsなどを形成する温度に低下する前の1999年の12月初頭に気球観測によって得られた NO_y - N_2O の相関も示している。DC-8によって得られた1999年12月と2000年1月の相関は、この気球観測の相関と良く一致していた。またER-2の極渦外での相関とも良く一致していた。このことは、成層圏の最下層部においても成層圏全体でみられる相関と一致するコンパクトな相関関係が存在することを示している。このことはこの高度領域においても各成分間の相関関係を用いたデータの検証が有効であることを示している。

③ 2000年3月に見られた NO_y の増大の原因

図5.4には2000年の1および3月にER-2によってより高高度（12-21 km）の極渦内において観測された

$\text{NO}_y\text{-NO}_y^*$ の高度分布を示す。ここで NO_y^* は、その空気塊中での N_2O 濃度と、図5.3の気球観測で得られた $\text{NO}_y\text{-N}_2\text{O}$ の相関から期待される NO_y の値である。高度約16 km以上で見られる $\text{NO}_y\text{-NO}_y^*$ の負の値は、 HN03 (硝酸) を取り込んだPSCs (極成層圏雲粒子) の重力落下による NO_y の除去 (脱窒) によるものと考えられる。一方、14-18 kmにおいて見られる正の値は上空から落下してきたPSCsが蒸発することにより大気中に放出された (昇華した) HN03 によるものと考えられる。このことを検証するために、図5.5には、北極域における氷および硝酸三水和物 (NAT) の飽和温度以下となっていた領域の面積の時間変化を、各高度毎に示した。この図から12月末から1月中旬にかけて北極域の気温が氷の飽和温度以下に低下した領域が存在しており、脱窒がおこりえたことが確認された。一方、NATの存在できる温度条件は14-16 km以上に限定されており、この高度まで落下してきたPSCsが蒸発したことが示唆された。これらのことから、DC-8で2000年3月に見られた NO_y の増大の原因としてはPSCsを介した、窒素酸化物の高度方向の再分配過程であることが示唆された。

④ 3次元化学輸送モデルによる検証

DC-8により成層圏の最下層部で観測された $\text{NO}_y\text{-N}_2\text{O}$ 相関をより定量的に解釈するために、1999-2000の冬の気象条件 (風の場合および気温) を入れた3次元化学輸送モデル計算を実施した。図5.6にはこのモデルの中で計算された $\text{NO}_y\text{-NO}_y^*$ の高度分布を示した。この図から、2000年の1および3月においてPSCsの落下による窒素酸化物の再分配がモデルにより良く再現していることが分かる。また1月よりも3月の方がより下層まで再分配が及んでいることが分かる。これには2つの原因が考えられる。ひとつは1月に高度14km付近で HN03 が昇華することにより NO_y が増大した空気塊が、非断熱的な放射冷却により高度12 km付近まで下がってきたこと、もうひとつは2月には1月よりも低高度までNATの飽和温度以下の温度が現れているため、12 km付近までPSCsが落下しそこで昇華を起こしたことである。このことは成層圏の温度履歴が窒素酸化物の再分配過程において極めて重要な役割を果たしていること、またこのような再分配過程を調べるには高度分解能1 kmで0.5 ppbvよりも高い精度での窒素酸化物の測定が必要であることを示している。

図5.7には同じ3次元化学輸送モデルによって得られた成層圏最下層部における $\text{NO}_y\text{-N}_2\text{O}$ 相関を示した。この図から明らかなように、モデル計算でPSCsの落下による窒素酸化物の再分配過程を入れた場合と入れない場合とで、2000年1月のケースでは差がないのに対し、2000年3月のケースでは再分配過程を入れた場合のみにおいて観測された NO_y の増大 (図5.2, 5.3) が定量的に良く再現されていることが分かる。このことは3月の窒素酸化物の増大がPSCsを介した再分配過程によるものであることを強く示唆している。1月において NO_y の増大が見られないのは上記のように、高度14以下では気温がNATの飽和温度以上になっていたためである。

⑤ 脱窒を再現するためのモデル条件

本研究で用いられている3次元化学輸送モデルでは、脱窒を引き起こすための条件として次の2つの仮定を行っている。第一に、NATは気温がその飽和温度以下となり過飽和度が1.0を越えたら生成すること (NATの生成条件)、第二に、NATは 5×10^{-3} 個/cm³ の濃度を上限として生成し、残りはSTS (硝酸、硫酸、水の3成分系による過冷却液滴) として共存すること (NAT生成の選択性)。モデルの感度実験としてNATを過飽和度1を越えた時点で生成させると、脱窒がおこりすぎ、2000年1月において既に観測されていないような NO_y の増大が成層圏最下層部で生じてしまう。別の感度実験として、NATを 5×10^{-4} 個/cm³ までしか生成させないと、NAT粒子そのものは少ないにもかかわらずやはり2000年1月において観測されていない NO_y の増大が生じる。一方、NATを 5×10^{-2} 個/cm³ まで生成させると、NAT粒子は増加するにもか

かわらず2000年3月においても十分な NO_y の増大が見られない。これはNATの粒子数が多すぎると、限られた水蒸気や HN03 を分配する結果、個々の粒子が十分に大きく成長できず、脱室がおこらないためである。しかしながらこれらのNAT生成条件は自明なものではないことに注意を要する。

Waibel等は、1995年の北極成層圏で観測された脱室を本研究と同様な3次元化学輸送モデルで再現するにあたり、NATを氷の生成温度よりも1.5度低温で、本研究と同じ 5×10^{-3} 個/cm³の濃度を上限として生成すると仮定すると良く再現できることを報告している。これはモデル間において整合的な結果である。しかし一方において、Fahey等は、SOLVEのER-2の観測において、粒径が14.5ミクロンの巨大NAT粒子が密度 2.3×10^{-4} 個/cm³存在していたことを示した。これは本研究のNAT粒子密度の僅か20分の1の量である。ただしFahey等は、粒径3.5ミクロンのNAT粒子が密度 2×10^{-3} 個/cm³存在していたことも報告している。本研究やWaibel等では、ひとつの粒径モードのNATしか計算していないため、複数の粒径モードの取り扱いが可能なモデルの開発が必要であることが示された。

本研究の結果は、脱室はNATの生成条件や生成の選択性が極めて重要である一方、これらのメカニズムの理解が極めて不十分であることを示している。人工衛星により、 NO_y 、 N_2O と同時にエアロゾルを高精度に観測することがこのようなメカニズムの解明に不可欠であることが明らかである。複数の粒径モードを扱ったモデルにより様々な衛星観測の結果を整合的に説明できる条件を見出すことにより、オゾン破壊において重要な窒素酸化物の脱室・再分配過程が解明できる可能性が示された。

⑥ 窒素酸化物の再分配過程の空間的広がり

図5.8には2000年3月における $\text{NO}_y = \text{NO}_y - \text{NO}_y^*$ の空間的な広がりをDC-8の観測結果から示したものである。ただし縦軸、横軸にはそれぞれ断熱過程において保存量である温位と渦位をとっている。この図から窒素酸化物の再分配過程の影響は高度方向に強い依存性をもっている一方で、水平方向にはある程度混合が起きていることが示唆されている。このことから衛星による観測においても、経度方向の観測広がりはあるにこしたことはないが、時間的に密な観測が必要であることを示している。

(6) 寿命の長い大気微量成分分布を通してみた極域成層圏における下降流

研究方法：成層圏における鉛直流は、大気の循環(運動)を理解する上で最も重要なパラメータの一つであるが、値が小さいため直接測定することは難しく、これまでは運動量収支あるいは熱収支の観点から間接的にその値が見積もられてきた。しかし、1991年に打ち上げられた米国の上層大気観測衛星Upper Atmosphere Research Satellite (UARS)により、光化学的寿命の長い大気微量成分(トレーサー)のグローバルな分布が知られるようになってからは、それらの分布をもとに鉛直流の直接的な見積もりがおこなわれるようになった。この方法で鉛直流の見積もりが可能な領域は、空気塊の孤立性が高いと考えられている熱帯域の下部成層圏と冬季の極域(極渦内部)に限られるが、これまで間接的な見積もりしかできなかった中であって、有効な手段の一つとして近年中層大気分野で用いられている。

極域の下降流については、これまでにUARS搭載測器の中でも鉛直分解能に優れたHALOEデータにもとづく研究報告がある。Schoeberl et al. (1995)はHALOEの CH_4 データを用いて1992年の南半球中部成層圏における冬季平均下降速度を1.5–1.8 km/monthと見積もった。これと同じ方法を用いて、Kawamoto and Shiotani (2000)は1992–1997年の6年分の下降速度を見積もり、冬季平均下降速度は波動の活動性が活発な年ほど大きいことを示した。しかし、HALOEは衛星軌道の制約から極域を観測できるチャンスが年に数回しかないため、季節的な平均値としてしか下降速度を見積もることができない。1–2週間程度の短い時間スケールの鉛直流変動も波動の活動性との関連から重要であるが、そういった解析に適したデ

ータはこれまで存在しなかった。このような背景の中でAdvanced Earth Observing Satellite (ADEOS) に搭載された測器Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) が1996年11月から約8カ月の間、両半球極域の大気微量成分の連続観測をおこなった。本研究では、鉛直分解能に優れているこのILASデータを用いて、初冬の南半球極域成層圏における日々の下降速度を見積もり、短い時間スケールでの鉛直流変動と力学場の関係について明らかにする。

解析にはILASが観測した大気微量成分の中でも光化学的寿命の長いN₂OとCH₄ (ILAS Version 5.20) を用いた。ILASの観測期間は1996年11月から1997年6月までの約8カ月間で、本研究の解析にはおもに南半球初秋の1997年2月からデータの最後(6月末)までを用いる。ILASデータは、高緯度域において1日毎にある緯度円に沿い、日出(北半球)と日入(南半球)それぞれの観測モードについて14点ずつ提供されている(鉛直には等高度面に1km間隔)。南半球での観測に相当するILASの日入観測緯度については、図6.1aを参照のこと。

力学場の解析にはUKMO提供の4次元同化データを用いた。物理量は、温度、風(u, v, w)と高度場で、2.5×3.75度の緯度・経度グリッド上(90N–90S)に、高さ方向には1000–0.3 hPaの領域で22の等圧面(約2.7km間隔)上に提供されている。これらのデータを用いて波動活動性の指標であるEliassen–Palm (E–P) フラックスとその発散、およびポテンシャル渦度(PV)の計算をおこない、さらにこのPVデータをもとにN₂OおよびUKMO水平風のEquivalent Latitude (等価緯度) マッピングをおこなった(Butchar and Remsberg, 1986)。

結果と考察：図6.1はILASの観測期間における観測緯度、600K等温位面でのN₂Oの分布、UKMOデータから計算した水平風の分布、および高度場の振幅を示している。水平風の分布から、期間のはじめには極渦が残っていることを見てとれるが、12月に入ると極渦は崩壊し夏型循環へ移行する。極渦が残っている時期には、プラネタリー波の振幅も大きく、N₂Oは極渦の中と外の2つの特徴的な値をとっている。1–3月ごろの夏の期間には、まだ極渦は形成されておらず、風は弱くプラネタリー波の振幅も小さい。また、N₂Oの混合比はばらつきが小さく、時間がたつにつれて値が小さくなっている。これは極域の下降流によって上層から低N₂O混合比の気塊が運ばれてきたためと考えられる。本研究ではまさにこのN₂Oの分布の変化に注目して鉛直流を計算する。

いっぽう4月以降になると、西風ジェットが徐々に成長しはじめ、プラネタリー波の振幅も大きくなってくる。同時にN₂Oの分布にも変化が現われてくる。極渦の縁の西風ジェットが強くなると極渦内外の気塊の混合が妨げられ、極渦の外と、上層から低N₂O混合比の気塊が降りてくる極渦内との間で混合比の差が生じはじめる。またプラネタリー波の活動性が活発になることによって極渦が同心円状の分布から歪むため、ILASの観測も極渦内外の気塊を捉えるようになる。その結果、N₂Oの分布にばらつきが見られるようになる。

図6.2は、2月以降について、水平風同様にN₂Oの分布を等価緯度でマッピングしたものを示している。実際の観測は限られた緯度でおこなわれているものの、等価緯度表示においてはかなりの緯度幅をカバーしていることがわかる。先に説明したように、2–3月では混合比に緯度方向の変化は見られず、単調に時間と共に小さくなるだけであるが、4月以降は、等価緯度方向に大きな勾配が見られるようになる。これは極渦が成長しはじめ、さらにILASが極渦内外両方の気塊をとらえるようになったためである。極渦内部の鉛直流を調べるためには、極渦の内と外のプロファイルを分離する必要がある。水平風の分布によると、西風ジェットの軸は60S–70Sあたりに存在するので、本研究では等価緯度70Sより高緯度側のプロファイルを極渦内部のものと考えたことにした。

図6. 3aは極渦内部 (70S–90S平均) のN20の時間–高度分布を示している。等値線が時間とともに降りてきているのが見てとれるが、この等値線の高さを追うことで下降速度を見積もる。例えば0.12 ppmvの等値線を追うと、2月ははじめには800K付近にあるが、6月には500Kあたりまで下降し、この期間の平均でその速度は2.4 km/monthであると見積もれる。また、他の等値線では、混合比の大きなもの、すなわち下層ほど下降速度は小さくなる。これは空気密度が下層ほど大きいことに起因している (例えば0.18 ppmvだと1.5 km/month)。これらの値は、HALOEデータにもとづくKawamoto and Shiotani (2000) の1997年冬季平均値 (2–10月) と比較すると少し大きい、ILASデータを用いたこの解析では、冬の前半の高度の高い部分のみで計算していることを考えると矛盾はない。

このような考察にもとづいて、0.1 ppmv の等値線を追うことで、高度約20–23 km付近の日々の鉛直流を見積もったものが図6. 3bである。図6. 3aからもわかるように、平均値としては負の値を取るものの、特に4月の後半から1–2週間程度の変動成分が卓越してくる。この時期、波動活動の指標となるE–Pフラックスとその発散 (DF) を見ると (図6. 4)、確かに1–2週間程度の周期性を持って波動活動が変動していることがわかる。

Transformed Eulerian-Mean (TEM) 方程式 (Andrews et al., 1987) にもとづいた論議によれば、波動活動によって負のDFが与えられると、極域側の下層で下降流が駆動され、さらに下降にともなう気塊の断熱圧縮によって昇温がおこる (つまり極域下層の鉛直流とDFは正相関、鉛直流と温度の時間変化は逆相関となる)。そこで、鉛直流とこれら2つの変数との関係について調べた (図6. 5)。DFの変動と同期して鉛直流が変動しており、同時に温度変化が引き起こされていることがわかる。

さらにCH4のデータを用いてより高い高度の鉛直流を見積もった。これは、CH4のプロファイルの方がN20に比べて鉛直方向の変化の大きな領域が高高度に見られるためである。0.5 ppmvと0.2 ppmvの値を追うことでおよそ29kmと 38 km付近の鉛直流を見積もった。0.5 ppmv の値を使った見積もりは N20 とほぼ同位相の時間変化を示すが、より高高度の0.2 ppmvを使った見積もりでは、逆相関的な時間変動を示す。

こういった変動の位相関係を明らかにするために、N20の0.1 ppmv等値線で見積もった鉛直流とそれぞれの緯度・高度での温度変化 (dT/dt) との相関係数を調べた (図6. 6)。これまでの解析結果からも予想されるように、高緯度域 (60Sよりも極側) では、下層 (10 hPaより下) で負の相関が見られるのに対して、上層 (10 hPaより上) では正の相関が見られる。さらに、中緯度域 (30S–60S) ではこの相関関係が逆転していることがわかる。これはちょうど、成層圏の突然昇温現象の際に、DFが与えられる高さの上下で、高緯度側と低緯度側とでそれぞれ逆の下降流・上昇流の組み合わせが見られることと同じ様子を示しているといえる。この期間でのDFの分布 (10日程度のバンドパスフィルターをかけたものの振幅) を図6. 7aに示すが、確かに10hPa付近にDFは極大値を持っていることがわかる。

(7) GPS 掩蔽による温度データの特性と精度検証

研究方法：

① GPS掩蔽観測の原理と特長

GPS掩蔽法では高度500–800kmの傾斜円軌道を周回する低高度 (LEO: Low Earth Orbiting) 衛星にGPS受信機を搭載し、地平線に沈むGPS衛星から大気をかすめて到達する電波を検出する (図7. 1)。大気の効果による伝播遅延長から電波経路の曲がり角の変化を定め、球対称大気を仮定してさらに大気屈折率 (n) の高度変化を得る (Abel変換)。非電離大気の n は大気圧、気温、水蒸気分圧の関数であり、特に乾燥大

気では大気温度に変換できる。一方、対流圏下層では数値予報モデル等で与えられる温度を併用すれば、湿度を推定できる。対流圏上部から成層圏での温度測定精度が極めて良く、かつ高度分解能も約1kmと従来の衛星観測に比べて大変優れている（図7.2）。

GPS大気掩蔽法は人工電波源を用いたActive Limb Scanの大気掩蔽法であり、観測の幾何学的構図はILAS等の受動的放射計測定に似ている。GPS掩蔽は受信信号の強度を用いず、電波位相（伝搬時間）を計測しており、発信源であるGPSの原子時計の安定度に測定精度が依存するため、受信感度のキャリブレーションが不要で、経年変化も少ない特長を持つ。

② 研究計画

現在、ドイツ・GFZとアルゼンチンの研究機関が米国・JPLと共同で、それぞれCHAMP（Challenging Mini satellite Payload）およびSAC-Cと呼ばれるLEO衛星によりGPS掩蔽観測を実施している。この課題では、これらの小型LEO衛星によるGPS掩蔽観測で得られた温度データを用いて以下の研究を行った。

ア GPS掩蔽データの収集と整理

イ GPS掩蔽データの温度精度検証および高度範囲の検討

ウ 対流圏界面付近の温度構造の解析

エ 大気波動による温度変動の解析

結果と考察：

① GPS掩蔽データの収集と整理

CHAMP衛星は2000年7月に打ち上げられ、2001年2月にGPS掩蔽の試験観測を開始した。同年5月以降は定常的に観測を続け、一日におよそ100-150の温度データが得られており、2003年12月25日現在で122,913プロファイルが処理されている。GFZ、JPLそれにUCARはそれぞれ独自にCHAMPデータを解析し、温度プロファイルを公開している。一方、SAC-Cは2000年11月に打上げられ、JPLがデータ処理結果を公開しており、やはり、100-150/日のデータが得られている。我々は、CHAMPとSAC-Cの掩蔽データのほとんど総てを収集し、緯度5度、経度45度のグリッド毎に分類し、5-30kmの高度範囲で1km毎に、月平均値、分散、最小値、最大値、中央値をデータベース化し、ILAS-IIで得られた気温・気圧データの比較・検証用に提供した（図7.3）。特に、CHAMP衛星は軌道傾斜角が大きく（87度）、極域でデータ密度が高いため、ILAS-IIの観測結果の比較対象に適している（図7.4）。

② GPS掩蔽データの温度精度検証および高度範囲の検討

我々が独自に行ったインドネシア・オーストラリアにおけるラジオゾンデ集中観測の結果を用いて、CHAMPとSAC-Cによる成層圏温度の検証を行い、良好な結果を得た。しかし、GFZならびにJPLで開発された解析方法は、基本原理は同じであるが、ソフトウェアの細部では個性があり、解析結果も若干の相違が認められる。我々はGFZのソフトウェアに類似した解析システムを開発し、これにより独自に温度プロファイルを解析し、解析手法の差異が測定精度に与える影響の検討を行った。

大気による遅延は高度約35kmで約1mとなるが、高度とともに指数関数的に減少するため、高高度では電離層による遅延を正確に補正しなければ温度誤差が増大する。このため、GFZ、JPLともに温度プロファイル解析の上限高度を35kmに設定している。我々は、温度プロファイルの高度範囲をより上空まで拡大するために、解析アルゴリズムの改良を行った。GPS掩蔽観測の基礎データである電波の位相遅延をGFZ等から入手し、このアルゴリズムで温度プロファイルを解析した。これをアラスカのライダー観測による温度プロファイルや気象庁の数値予報モデルの解析値と比較したところ、従来の解析方法では高度30-50kmで数度に及ぶバイアスが生じていたが、我々の手法では高度30km以下と同程度の精度で解析で

きた（図7.5）。

③ 対流圏界面付近の温度構造の解析

GPS掩蔽法は従来の衛星観測に比べて特に高度分解能が優れており、対流圏界面付近のシャープな温度勾配の変化も忠実に再現できる。これを利用すれば、例えば、赤道域における物質循環で大変重要な対流圏界面のグローバルな温度構造を解析できる。特に、対流圏界面付近で最低温度を示す高度(WM0で定義される対流圏界面とほぼ同高度)の緯度・経度分布を調べた結果、従来、赤道上空で最も高度が高くなると思われていた対流圏界面が、実は緯度20-30度付近の方が高くなるという新発見が得られた。さらに、その特性が経度・季節により変化し、南北(夏冬)半球間で非対称性が現れることも分かった。なお、赤道域で卓越するケルビン波の経度・高度・時間変動特性を解析したところ、経度波数1、2で東向き伝播し、特に対流圏界面付近で擾乱が増大しており、対流圏界面の温度構造に大きな影響を与えていることが分かった。

④ 大気波動による温度変動の解析

GPS掩蔽による温度プロファイルにより、成層圏の中規模温度変動をも検出できる。これらの擾乱は、各種の大気波動によると考えられているが、特に、熱帯域では強烈な太陽放射のために積雲対流が活発で、さらに様々な大気波動が励起される。大気波動は水平・鉛直に伝播し、力学的エネルギーを全球に運ぶことで、大気大循環を駆動する重要な役割を果たしている。GPS掩蔽データを用いて成層圏下部(高度20-30km)における大気重力波のエネルギーの全球分布を解析したところ(図7.6)、予想通り波動エネルギーは赤道域で大きく、特に積雲対流が活発なインドネシア域、南米、アフリカ西岸で増大していた。大気波動の影響はさらに電離層にも到達しており、異なる大気層が波動を介在して密接に結合していることが分かった。

GPS掩蔽データの解析から大気重力波のエネルギーの緯度・経度分布は春分・秋分季には南北半球で綺麗な対象性を示すことが知られている。しかし、2002年の北半球夏季(9-10月)に南極で発生した突然昇温時に大気重力波のエネルギーが通常時の約3倍に増大したことがCHAMPデータから分かった。今後、極渦の構造およびプラネタリ波の活動との相互関係を研究史、さらにオゾンホールへの影響を定量的に調査する。

4. 本研究により得られた成果

ILASデータ質検証に関して：最新のデータ処理アルゴリズムであるバージョン6.0は、国際的に高い水準にあるJ. Geophys. Res. 誌上でデータ質評価がなされたバージョン5.20と同等のデータ質であることが確認できた。また、バージョン6.0ではバージョン5.20の時点では提供されていなかったCFC-12とC10N02を新たに提供できる体制が整った。これらは、オゾン、硝酸など既にデータ質の高さが認められている化学成分とともに、成層圏の大気科学研究に資するデータとして、国内外の関連する研究者からも非常に高く評価されたことは大きな成果である。

大気物理化学的知見の向上に関して：

(1) 1997年1~2月に北極の極渦内で得られたILASのHNO₃データを用いて、北極の脱窒を引き起こすメカニズムを調べた。脱窒によるHNO₃の除去量は、NADやNATからなる粒子の均一核形成を取り入れた微物理モデルによって計算された。NATの均一核形成だけを考慮した場合、モデル計算値はILASの観測値を過小評価した。しかしながら、NADの均一核形成が成層圏で起き、直ちに熱力学的に安定なNATに相変換されることを考慮すると、計算

値と観測値の一致が大きく改善された。このことから、NADの均一核形成が脱窒を引き起こすメカニズムの中で重要な役割を果たしていることが明らかになった。

(2) 1993/94年から1999/2000年に掛けての北極オゾン破壊速度とPSC出現可能性を定量的に調べた。PSCの出現可能性のパターンはオゾン破壊速度のパターンと良く一致していることが分かった。また、PSCの増加がオゾン破壊速度に与える影響を評価した。良く知られるように温暖化気体の増加は成層圏気温を放射的に低下させうる。成層圏気温の低下はPSCをより生成するポテンシャルがある。観測的にPSCの出現の変化に対する北極オゾン破壊の応答の証拠が得られたことは、将来の気候変動がオゾン層に及ぼす影響の知見のを高める上で大きな貢献をした。

(3) ILAS/ILAS-IIなどの窒素酸化物データのうち、近年注目されている極域成層圏の最下層部の検証手法の検討と、それらの高度領域のデータを用いた解析によってどのような情報が得られるかについての検討を行った。検討はアメリカNASAによって、1999年12月から2000年3月にかけて北極成層圏で実施されたSOLVE航空機観測で得られた、成層圏最下層部、高度10-12.5 kmの観測データを用いて行った。この解析の結果、衛星観測・解析の指針として以下のことが明らかとなった。

(a) 北極成層圏最下層部では、12-3月においては HNO_3 は NO_y の90%以上をしめ、人工衛星により HNO_3 を測定すれば近似的に NO_y として扱うことができる。(b) ILASなどの人工衛星によって得られる極域成層圏の最下層部のデータの検証においても、従来のような多成分間の相関を使った手法が有効である。(c) オゾン破壊に影響を与える窒素酸化物の再分配過程の研究においては、窒素酸化物と共に力学的輸送の指標となる N_2O およびエアロゾルに関する情報(組成、粒径分布)が同時に必要である。また高度10 km程度の低高度までのデータが必要である。また高度分解能1 km以上かつ測定精度0.5 ppbv以上の時間的に密な観測が望ましい。(d) 衛星観測と共に3次元の化学輸送モデルを組み合わせた解析は、極成層圏雲の生成過程や窒素酸化物の再分配過程について極めて有効な研究手法である。

(4) 航空機観測データをもとに、窒素酸化物の再分配過程について調べた。(a) 1999-2000年の冬は18 km以上の高度において12月末から1月中旬にかけて氷の飽和温度以下に最低気温が低下し、高度16-21 kmでは脱窒が観測された。これに対応し、高度10-12.5 kmでも2000年3月においてPSCsの昇華にともなう窒素酸化物の増大が見られた。窒素酸化物の再分配過程のおこる時期、高度範囲は、成層圏大気温度の高度分布(脱窒および昇華の高度)とその時間変化が重要であることがわかった。(b) 窒素酸化物の再分配を入れた3次元の化学輸送モデルによって、観測された成層圏最下層での窒素酸化物の増大が再現された。ただし再現のためには、NAT生成条件(選択的なNAT粒子生成)をつけることが必要であった。この条件は過去のグローバルモデルの研究とも整合性がある一方、実際に観測された値とは必ずしも一致していない。複数の粒径モードを扱ったモデルにより様々な衛星観測の結果を整合的に説明できる条件を見出すことにより、オゾン破壊において重要な窒素酸化物の脱窒・再分配過程が解明できる可能性が示された。

(5) ILASが観測した光化学的寿命の長い大気微量成分(N_2O , CH_4)を用いて、1997年南半球初冬の鉛直流を見積もった。 N_2O によって見積もった高度約20-23 kmにおける下降速度は2.1-1.7 km/month (2-6月平均)であった。4月以降、プラネタリー波動の活動性が活発になると、鉛直流は1-2週間の時間スケールで変動する。波動活動性の指標であるE-Pフラックスの発散(DF)と温度変化について調べたところ、鉛直流の変動はこれら力学場の変動と密接に関連していることがわかった。温度の時間変化と高緯度下部成層圏における鉛直流変動の相関を調べると、それは10 hPaと60 S付近に節を持つような構造で正負の

相関パターンを示した。これはちょうど突然昇温のメカニズムを説明する際に用いられる波動にともなう温度変化と一致している。このようにILASデータにもとづいて1-2週間の短い時間スケールの鉛直流変動がはじめて明らかになり、さらにそれがプラネタリー波動の活動性によって引き起こされていることがわかった。

(6) GPS掩蔽観測によりラジオゾンデと同等の測定精度かつ高度分解能で高度約35kmまでの温度プロファイルが得られる。これらはILAS-IIのデータ検証に大変有用であると同時に、対流圏・成層圏の温度構造の解析、および温度擾乱のグローバル特性を解明する研究に活用できる。

[国際共同研究等の状況]

(1) フランス、ドイツ、米国、ニュージーランド、ロシア、日本、韓国などの研究者で組織されているILAS-IIサイエンスチームおよび検証実験チームがある。これは旧NASDA、環境庁の間でJoint Research Announcementとして公募され採択された各研究者グループから構成されている。さらに2003年10月にはLate Proposal Research Announcementとして新たにドイツ、韓国、米国の研究グループが追加となった。

(2) 現在、小型LEO衛星によるGPS掩蔽実験を実施している、ドイツのGFZおよびアルゼンチンと研究者交流を含めた共同研究を行った。また、2005年に予定されているCOSMIC計画を推進している米国UCAR、台湾のNSPO、およびGPS受信システムの開発を担当している米国JPLとの情報交換を行っている。さらに、2006年にはブラジルINPEと共同でEQUARS衛星によるGPS掩蔽観測を、我々独自で実現すべく計画を推進している。これらのGPS掩蔽観測により、ILAS-IIなどの衛星搭載放射計による大気観測と相補的な情報を得ることができることから、今後、比較研究がさらに進展するであろう。

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表(学術誌・書籍)

<学術誌(査読あり)>

- ① Hayashida, N. Saitoh, M. Horikawa, Y. Amemiya, C. Brogniez, T. Deshler, and Y. Sasano : Proc. SPIE, edited by Y. Sasano, J. Wang, and T. Hayasaka, 4150, 76-86 (2001), SPIE, Bellingham, Washington. "Stratospheric background aerosols and polar stratospheric clouds observed with satellite sensors - inference of particle composition and sulfate amount -"
- ② H. Irie, M. Koike, Y. Kondo, G.E. Bodeker, M.Y. Danilin, and Y. Sasano : J. Geophys. Res., 106, No. D19, 23139-23150 (2001) "Redistribution of nitric acid in the Arctic lower stratosphere during the winter of 1996-1997"
- ③ H. Kanzawa, C. Camy-Peyret, H. Nakajima, and Y. Sasano : Proceedings of the 15th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, 305-308 (2001), ESA Publications Division, Noordwijk, The Netherlands. "A plan for ILAS-II correlative measurements with emphasis on a validation balloon campaign at Kiruna-ESRANGE"
- ④ H. Nakajima, A. Kuze, T. Sugita, T. Yokota, and Y. Sasano : Proc. SPIE, edited by Y. Sasano, J. Wang, and T. Hayasaka, 4150, 165-173 (2001), SPIE, Bellingham, Washington. "Solar-Occultation FTS for Inclined-orbit Satellite (SOFIS): Scientific requirements and current status of development"
- ⑤ Y. Sasano, T. Yokota, H. Nakajima, T. Sugita, and H. Kanzawa : Proc. SPIE, edited by Y. Sasano, J. Wang, and T. Hayasaka, 4150, 106-114 (2001), SPIE, Bellingham, Washington. "ILAS-II instrument and data processing system for stratospheric ozone layer monitoring"
- ⑥ T. Sugita, T. Yokota, T. Nakajima, H. Nakajima, K. Waragai, M. Suzuki, Y. Itou, H. Saeki, and Y. Sasano : Proc. SPIE, edited by Y. Sasano, J. Wang, and T. Hayasaka, 4150, 94-105 (2001),

- SPIE, Bellingham, Washington. "Temperature and pressure retrievals from O₂ A-band absorption measurements made by ILAS: Retrieval algorithm and error analyses"
- ⑦ Y. Terao, H. Tanaka, T. Yasunari, and Y. Sasano : Proc. SPIE, edited by Y. Sasano, J. Wang, and T. Hayasaka, 4150, 31-41(2001), SPIE, Bellingham, Washington. "Analysis of chemical perturbation of stratospheric air parcel along the trajectory during the Arctic winter of 1996/1997 using ILAS data"
 - ⑧ N. Uemura, T. Yokota, H. Nakajima, Y. Sasano, C. Yoshigahara, and Y. Uehara : Proc. SPIE, edited by Y. Sasano, J. Wang, and T. Hayasaka, 4150, 174-187(2001), SPIE, Bellingham, Washington. "A preliminary study on data processing algorithms for SOFIS"
 - ⑨ H. Akiyoshi, S. Sugata, T. Sugita, H. Nakajima, H. Hayashi, J. Kurokawa, and M. Takahashi : J. Meteorol. Soc. Jpn., 80, No. 3, 451-463(2002) "Low-N₂O air masses after the breakdown of the Arctic polar vortex in 1997 simulated by the CCSR/NIES nudging CTM"
 - ⑩ W. Choi, S. Kim, W.B. Grant, M. Shiotani, Y. Sasano, and M.R. Schoeberl : J. Geophys. Res., 107, No. D24, 8209(2002), doi:10.1029/2001JD000644 "Transport of methane in the stratosphere associated with the breakdown of the Antarctic polar vortex"
 - ⑪ M.Y. Danilin, M.K.W. Ko, L. Froidevaux, M.L. Santee, L.V. Lyjak, R.M. Bevilacqua, J.M. Zawodny, Y. Sasano, H. Irie, Y. Kondo, J.M. Russel III, C.J. Scott, and W.G. Read : J. Geophys. Res., 107, No. D24, 4420(2002), doi:10.1029/2001JD002012 "Trajectory hunting as an effective technique to validate multiplatform measurements: Analysis of the MLS, HALOE, SAGE-II, ILAS, and POAM-II data in October-November 1996"
 - ⑫ H. Irie, Y. Kondo, M. Koike, M.Y. Danilin, C. Camy-Peyret, S. Payan, J.P. Pommereau, F. Goutail, H. Oelhaf, G. Wetzel, G.C. Toon, B. Sen, R.M. Bevilacqua, J.M. Russel III, J.B. Renard, H. Kanzawa, H. Nakajima, T. Yokota, T. Sugita, and Y. Sasano : J. Geophys. Res., 107, No. D24, 8206(2002), doi:10.1029/2001JD001304 "Validation of NO₂ and HNO₃ measurements from the Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) with the version 5.20 retrieval algorithm"
 - ⑬ K.W. Jucks, D.G. Johnson, K.V. Chance, W.A. Traub, J.M. Margitan, R. Stachnik, Y. Sasano, H. Kanzawa, K. Shibasaki, M. Suzuki, and T. Ogawa : J. Geophys. Res., 107, No. D24, 8207(2002), doi:10.1029/2001JD000578 "Validation of ILAS v5.2 data with FIRS-2 balloon observations"
 - ⑭ H. Kanzawa, C. Schiller, J. Ovarlez, C. Camy-Peyret, S. Payan, P. Jeseck, H. Oelhaf, M. Stowasser, W.A. Traub, K.W. Jucks, D.G. Johnson, G.C. Toon, B. Sen, J.-F. Blavier, J.H. Park, G.E. Bodeker, L.L. Pan, T. Sugita, H. Nakajima, T. Yokota, M. Suzuki, M. Shiotani, and Y. Sasano : J. Geophys. Res., 107, No. D24, 8217(2002), doi:10.1029/2001JD000881 "Validation and data characteristics of water vapor profiles observed by the Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) and processed with the version 5.20 algorithm"
 - ⑮ A. Kuze, H. Nakajima, M. Suzuki, and Y. Sasano : Proc. SPIE, edited by A.M. Larar, and M.G. Mlynchzak, 4485, 69-80(2002), SPIE, Bellingham, Washington. "Measurement of greenhouse gases from space with a SWIR FTS"
 - ⑯ A. Kuze, H. Nakajima, J. Tani, and Y. Sasano : Proc. SPIE, edited by M. Strojnik, and B.F. Andresen, 4486, 356-365(2002), SPIE, Bellingham, Washington. "Instrumentation and laboratory model test result of Solar Occultation FTS for Inclined-orbit Satellite (SOFIS) on GCOM-A1"
 - ⑰ D.S. McKenna, J.-U. Groo, G. Günther, P. Konopka, R. M ller, G. Carver, and Y. Sasano : J. Geophys. Res., 107, No. D24, 4256(2002), doi:10.1029/2000JD000113 "A new Chemical Lagrangian Model of the Stratosphere (CLaMS) 2. Formulation of chemistry scheme and initialization"
 - ⑱ H. Nakajima, M. Suzuki, A. Matsuzaki, T. Ishigaki, K. Waragai, Y. Mogi, N. Kimura, N. Araki, T. Yokota, H. Kanzawa, T. Sugita, and Y. Sasano : J. Geophys. Res., 107, No. D24, 8213(2002), doi:10.1029/2001JD001439 "Characteristics and performance of the Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) in orbit"
 - ⑲ H. Nakajima, M. Suzuki, T. Yokota, T. Sugita, Y. Itou, M. Kaji, N. Araki, K. Waragai, H. Yamashita, H. Kanzawa, and Y. Sasano : J. Geophys. Res., 107, No. D24, 8215(2002), doi:10.1029/2001JD000607 "Tangent height registration for the solar occultation satellite"

- sensor ILAS: A new technique for version 5.20 products"
- ⑳ S. Oshchepkov, Y. Sasano, and T. Yokota : Appl. Opt., 41, No. 21, 4234-4244 (2002) "New method for simultaneous gas and aerosol retrievals from space limb-scanning spectral observation of the atmosphere"
 - ㉑ L.L. Pan, W.J. Randel, S.T. Massie, H. Kanzawa, Y. Sasano, H. Nakajima, T. Yokota, and T. Sugita : J. Geophys. Res., 107, No. D24, 8214 (2002), doi:10.1029/2001JD001164 "Variability of polar stratospheric water vapor observed by ILAS"
 - ㉒ L.L. Pan, W.J. Randel, H. Nakajima, S.T. Massie, H. Kanzawa, Y. Sasano, T. Yokota, T. Sugita, S. Hayashida, and S. Oshchepkov : Geophysical Research Letters, 29, No. 8, (2002), doi:10.1029/2001GL014147 "Satellite observation of dehydration in the Arctic polar stratosphere"
 - ㉓ Saitoh, S. Hayashida, Y. Sasano, and L.L. Pan : J. Geophys. Res., 107, No. D24, 8205 (2002), doi:10.1029/2001JD000595 "Characteristics of Arctic polar stratospheric clouds in the winter of 1996/1997 inferred from ILAS measurements"
 - ㉔ Y. Sasano : J. Geophys. Res., 107, No. D24, 8204 (2002), doi:10.1029/2002JD002155 "Preface"
 - ㉕ T. Sugita, T. Yokota, H. Nakajima, H. Kanzawa, H. Nakane, H. Gernandt, V. Yushkov, K. Shibasaki, T. Deshler, Y. Kondo, S. Godin, F. Goutail, J.-P. Pommereau, C. Camy-Peyret, S. Payan, P. Jeseck, J.-B. Renard, H. Bosch, R. Fitzenberger, K. Pfeilsticker, M. von Konig, H. Bremer, H. Kullmann, H. Schlager, J.J. Margitan, B. Stachnik, G.C. Toon, K. Jucks, W.A. Traub, D.G. Johnson, I. Murata, H. Fukunishi, and Y. Sasano : J. Geophys. Res., 107, No. D24, 8212 (2002), doi:10.1029/2001JD000602 "Validation of ozone measurements from the Improved Limb Atmospheric Spectrometer"
 - ㉖ Y. Terao, Y. Sasano, H. Nakajima, H.L. Tanaka, and T. Yasunari : J. Geophys. Res., 107, No. D24, 8210 (2002), doi:10.1029/2001JD000615 "Stratospheric ozone loss in the 1996/1997 Arctic winter: Evaluation based on multiple trajectory analysis for double-sounded air parcels by ILAS"
 - ㉗ G.C. Toon, B. Sen, J.F. Blavier, Y. Sasano, T. Yokota, H. Kanzawa, T. Ogawa, M. Suzuki, and K. Shibasaki : J. Geophys. Res., 107, No. D24, 8211 (2002), doi:10.1029/2001JD000640 "Comparison of ILAS and MkIV profiles of atmospheric trace gases measured above Alaska in May 1997"
 - ㉘ S.W. Wood, G.E. Bodeker, I.S. Boyd, N.B. Jones, B.J. Connor, P.V. Johnson, W.A. Matthews, S.E. Nichol, F.J. Murcray, H. Nakajima, and Y. Sasano : J. Geophys. Res., 107, No. D24, 8208 (2002), doi:10.1029/2001JD000581 "Validation of version 5.20 ILAS HNO₃, CH₄, N₂O, O₃, and NO₂ using ground-based measurements at Arrival Heights and Kiruna"
 - ㉙ T. Yokota, H. Nakajima, T. Sugita, H. Tsubaki, Y. Itou, M. Kaji, M. Suzuki, H. Kanzawa, J.H. Park, and Y. Sasano : J. Geophys. Res., 107, No. D24, 8216 (2002), doi:10.1029/2001JD000628 "Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) data retrieval algorithm for Version 5.20 gas profile products"
 - ㉚ Y. Zhao, K. Strong, Y. Kondo, M. Koike, Y. Matsumi, H. Irie, C.P. Rinsland, J.B. Jones, K. Suzuki, H. Nakajima, H. Nakane, and I. Murata : J. Geophys. Res., 107, No. D24, 4343 (2002), doi:10.1029/2001JD000748 "Spectroscopic measurements of tropospheric CO, C₂H₆, C₂H₂, and HCN in northern Japan"
 - ㉛ H. Akiyoshi, M. Takigawa, J. Kurokawa, T. Sugita, H. Kanzawa, and M. Takahashi : CGER'S Supercomputer Activity Report, CGER-1054-2002, CGER/NIES, 10-2001, 3-11 (2003) "Study on ozone layer variation using the CCSR/NIES AGCM with coupled chemistry and the CCSR/NIES nudging CTM"
 - ㉜ M.K. Ejiri, K. Shiokawa, T. Ogawa, K. Igarashi, T. Nakamura, and T. Tsuda : J. Geophys. Res., 108, No. D21, 4679 (2003), doi:10.1029/2002JD002795 "Statistical study of short-period gravity waves in OH and OI nightglow images at two separated sites"
 - ㉝ H. Irie, and Y. Kondo : Geophysical Research Letters, 30, No. 4, 1189 (2003),

doi:10.1029/2002GL016493doi:10.1029/2002GL016493 "Evidence for the nucleation of polar stratospheric clouds inside liquid particles"

- ③④ H. Irie, Y. Kondo, H. Nakajima, and Y. Sasano : Proceedings of the Sixth European Symposium on Stratospheric Ozone, Air Pollut. Res. Rep, edited by N.R.P. Harris, G.T. Amanatidis, and J.G. Levine, 79, 209-212 (2003), Eur. Comm., Brussels, Luxembourg. "Evidence for the nucleation of polar stratospheric clouds from liquid particles"
- ③⑤ H. Kanzawa : J. Geophys. Res., 108, No. D4, 8218 (2003), doi:10.1029/2003JD001601doi:10.1029/2003JD001601doi:10.1029/2003JD001601 "Correction to "Validation and data characteristics of water vapor profiles observed by the Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) and processed with the version 5.20 algorithm" by H. Kanzawa et al"
- ③⑥ H. Kanzawa, T. Sugita, and H. Nakajima : Proceedings of the 16th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, edited by B. Warmbein, 493-498 (2003), ESA Publications Division, Noordwijk, The Netherlands. "A plan for ILAS-II correlative measurements"
- ③⑦ H. Kanzawa, T. Sugita, H. Nakajima, G.E. Bodeker, H. Oelhaf, M. Stowasser, G. Wetzel, A. Engel, U. Schmidt, I. Levin, G.C. Toon, B. Sen, J.-F. Blavier, S. Aoki, T. Nakazawa, K.W. Jucks, D.G. Johnson, W.A. Traub, C. Camy-Peyret, S. Payan, P. Jeseck, I. Murata, H. Fukunishi, M. von Koenig, H. Bremer, H. Kullmann, J.H. Park, L.L. Pan, T. Yokota, M. Suzuki, M. Shiotani, and Y. Sasano: J. Geophys. Res., 108, No. D16, 8003 (2003), doi:10.1029/2002JD002458doi:10.1029/2002JD002458doi:10.1029/2002JD002458doi:10.1029/2002JD002458 "Validation and data characteristics of nitrous oxide and methane profiles observed by the Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) and processed with the Version 5.20 algorithm"
- ③⑧ H. Kobayashi, T. Sugita, and Y. Terao : SPARC Newsletter 21 - July 2003, 10-2001, 47-54 (2003) "Start of ILAS-II Operation for the Observation of Stratospheric Constituents"
- ③⑨ Y. Kondo, O.B. Toon, H. Irie, B. Gamblin, M. Koike, N. Takegawa, M.A. Tolbert, P.K. Hudson, A.A. Viggiano, L.M. Avallone, A.G. Hallar, B.E. Anderson, G.W. Sachse, S.A. Vay, D.E. Hunton, J.O. Ballenthin, and T.M. Miller : Geophysical Research Letters, 30, No. 4, 1154 (2003), doi:10.1029/2002GL016539doi:10.1029/2002GL016539 "Uptake of reactive nitrogen on cirrus cloud particles in upper troposphere and lowermost stratosphere"
- ④⑩ K.-M. Lee, J.H. Park, Y. Kim, W. Choi, H.-K. Cho, S.T. Massie, Y. Sasano, and T. Yokota : J. Geophys. Res., 108, No. D7, 4228 (2003), doi:10.1029/2002JD002854doi:10.1029/2002JD002854 "Properties of polar stratospheric clouds observed by ILAS in early 1997"
- ④⑪ F. Lefèvre, and H. Nakajima : CGER'S Supercomputer Activity Report, CGER-1054-2002, CGER/NIES, 10-2001, 47-54 (2003) "Stratospheric denitrification and composition of Polar Stratospheric Clouds inferred from 3D simulations and ILAS data"
- ④⑫ P.K. Patra, S. Maksyutov, Y. Sasano, H. Nakajima, G. Inoue, and T. Nakazawa : J. Geophys. Res., 108, No. D24, 4759 (2003), doi:10.1029/2003JD003661 "An evaluation of CO₂ observations with Solar Occultation FTS for Inclined-Orbit Satellite sensor for surface source inversion"
- ④⑬ E.D. Riviére, Y. Terao, and H. Nakajima : J. Geophys. Res., 108, No. D23, 4718 (2003), doi:10.1029/2003JD003718 "A Lagrangian method to study stratospheric nitric acid variations in the polar regions as measured by the Improved Limb Atmospheric Spectrometer"
- ④⑭ K. Shiokawa, M.K. Ejiri, T. Ogawa, Y. Yamada, H. Fukunishi, K. Igarashi, and T. Nakamura : J. Geophys. Res., 108, No. D2, 4048 (2003), doi:10.1029/2002JD002462 "A localized structure in OH airglow images near the mesopause region"
- ④⑮ T. Sugita, H. Nakajima, H. Hayashi, and Y. Sasano : Proceedings of the Sixth European Symposium on Stratospheric Ozone, Air Pollut. Res. Rep, edited by N.R.P. Harris, G.T. Amanatidis, and J.G. Levine, 79, 446-449 (2003), Eur. Comm., Brussels, Luxembourg. "The effect of stratospheric denitrification on ozone loss as observed by ILAS in the 1997 Arctic polar vortex"
- ④⑯ Y. Terao : Air Pollut. Res. Rep, edited by N.R.P. Harris, G.T. Amanatidis, and J.G. Levine, 79, 454-457 (2003), Eur. Comm., Brussels, Luxembourg. "Arctic ozone loss for the winters from

- 1994 to 2000 evaluated by the Satellite-Match analysis"
- ④7 S. Tilmes, R. Müller, J.-U. Grooß, D. S. McKenna, J. M. Russell III, and Y. Sasano : J. Geophys. Res., **108**, No. D2, 4048 (2003), doi:10.1029/2002JD002213doi:10.1029/2002JD002213 "Calculation of chemical ozone loss in the Arctic winter 1996-1997 using ozone-tracer correlations: Comparison of Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) and Halogen Occultation Experiment (HALOE) results"
 - ④8 S. Tilmes, R. Müller, J.-U. Grooß, D. S. McKenna, J. M. Russell III, and Y. Sasano : J. Geophys. Res., **108**, No. D2, 4045 (2003), doi:10.1029/2002JD002213 "Calculation of chemical ozone loss in the Arctic winter 1996-1997 using ozone-tracer correlations: Comparison of Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) and Halogen Occultation Experiment (HALOE) results"
 - ④9 H. Akiyoshi, T. Sugita, H. Kanzawa, and N. Kawamoto : J. Geophys. Res., **109**, D03304 (2004), doi:10.1029/2003JD003632 "Ozone perturbations in the Arctic summer lower stratosphere as a reflection of NO_x chemistry and planetary scale wave activity"
 - ⑤0 H. Irie, Y. Kondo, M. Koike, N. Takegawa, A. Tabazadeh, J. M. Reeves, G. W. Sachse, S. A. Vay, B. E. Anderson, and M. J. Mahoney : Geophysical Research Letters, **31**, L01105 (2004), doi:10.1029/2003GL018678 "Liquid ternary aerosols of HNO₃/H₂SO₄/H₂O in the Arctic tropopause region"
 - ⑤1 F. Khosrawi, R. Müller, H. Irie, A. Engel, G. C. Toon, B. Sen, S. Aoki, T. Nakazawa, W. A. Traub, K. W. Jucks, D. G. Johnson, H. Oelhaf, G. Wetzell, T. Sugita, H. Kanzawa, T. Yokota, H. Nakajima, and Y. Sasano : J. Geophys. Res., **109**, D06311 (2004), doi:10.1029/2003JD004325 "Validation of CFC-12 Measurements from the Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) with the version 6.0 retrieval algorithm"
 - ⑤2 H. Nakajima, T. Sugita, T. Yokota, and Y. Sasano : Proceedings of SPIE, edited by R. Meynart, S. P. Neeck, H. Shimoda, J. B. Lurie, and M. L. Aten, **5234**, 36-45 (2004), SPIE-The International Society for Optical Engineering, Bellingham, Washington, USA. "Current status and early result of the ILAS-II onboard the ADEOS-II satellite"
 - ⑤3 M. Koike, Y. Kondo, T. Takegawa, H. Irie, H. Ikeda, F. Lefevre, D. E. Hunton, A. A. Viggiano, T. M. Miller, J. O. Ballenthin, G. W. Sachse, B. E. Anderson, M. Avery, and Y. Masui: J. Geophys. Res., **107** (D20), 8275, doi:10.1029/2001JD001089 (2002) "Redistribution of reactive nitrogen in the Arctic lower stratosphere in the 1999-2000 winter"
 - ⑤4 J. O. Ballenthin, W. F. Thorn, T. M. Miller, A. A. Viggiano, D. E. Hunton, M. Koike, Y. Kondo, N. Takegawa, H. Irie, and H. Ikeda: J. Geophys. Res., **108** (D6), 4188, doi:10.1029/2002JD002136 (2003) "In situ HNO₃ to NO_y instrument comparison during SOLVE"
 - ⑤5 M. Niwano, Yamazaki, K. and Shiotani, M.: J. Geophys. Res., **108**, (D24), 4794, doi:10.1029/2003JD003871, (2003) "Seasonal and QBO variations of ascent rate in the tropical lower stratosphere as inferred from UARS HALOE trace gas data"
 - ⑤6 N. Kawamoto, Kanzawa, H. and Shiotani, M.: J. Geophys. Res., in revision (2004) "Time variations of descent in the Antarctic vortex during the early winter of 1997"
 - ⑤7 K. Hocke and T. Tsuda, GPS World, 34-35, July (2001) "Using GPS satellites to study plasma irregularities"
 - ⑤8 K. Hocke and Toshitaka Tsuda, Geophys. Res. Lett., **28**, 2815--2818, (2001) "Gravity waves and ionospheric irregularities over tropical convection zones observed by GPS/MET radio occultation"
 - ⑤9 T. Tsuda and Klemens Hocke, J. Meteorol. Soc. Japan, **80**, 925-938, (2002) "Vertical wavenumber spectrum of temperature fluctuations in the stratosphere using GPS occultation data"
 - ⑥0 K. Hocke, Toshitaka Tsuda and Alejandro de la Torre, J. Geophys. Res. Atmospheres, **107**, doi:10.1029/2001JD001330, (2002) "A study of stratospheric gravity wave fluctuations and sporadic E at mid latitudes with focus on possible orographic effect of Andes"
 - ⑥1 T. Tsuda, M. V. Ratnam, P. T. May, M. J. Alexander, R. A. Vincent, and A. MacKinnon, submitted to J. Geophys. Res., (2004) "Characteristics of Gravity Waves with Short Vertical Wavelengths Observed with Radiosonde and GPS Occultation during DAWEX (Darwin Area Wave Experiment)"

- ⑥② M. Venkat Ratnam, T. Tsuda, Ch. Jacobi, and Y. Aoyama, in revision, Geophys. Res. Lett., (2004) "Enhancement of Gravity wave activity observed during a major Southern Hemisphere stratospheric warming by CHAMP/GPS measurements"
- ⑥③ T. Tsuda and K. Hocke, Journal of the Meteorological Society of Japan, 82 (1B), 419-426, (2004) "Application of GPS Radio Occultation Data for Studies of Atmospheric Waves in the Middle Atmosphere and Ionosphere"
- ⑥④ H.-F. Tsai, T. Tsuda, G. A. Hajj, J. Wickert, and Y. Aoyama, Journal of the Meteorological Society of Japan, 82 (1B), 397-406, (2004) "Equatorial Kelvin waves observed with GPS occultation measurements (CHAMP and SAC-C)"
- ⑥⑤ de la Torre, T. Tsuda, G. A. Hajj, and J. Wickert, Journal of the Meteorological Society of Japan, 82 (1B), 407-417, (2004) "A Global Distribution of the Stratospheric Gravity Wave Activity from GPS Occultation Profiles with SAC-C and CHAMP"
- ⑥⑥ Pavelyev, T. Tsuda, K. Igarashi, Y. Liou, and K. Hocke, J. Atmos. Solar Terr. Phys., 65(1), 59-70, (2003) "Wave structures in the electron density profile in the ionospheric D-layer observed by radio holography analysis of the GPS/MET radio occultation data"

<学術誌（査読なし）>

該当なし

<報告書類等>

該当なし

（２）口頭発表

- ① H. Irie, Y. Kondo, T. Sugita, and H. Nakajima : 2003 AGU Fall Meeting, San Francisco, Calif. (2003) "Impact of Increased Stratospheric Water Vapor on Denitrification in the Polar Ozone Layer"
- ② H. Nakajima, H. Irie, T. Sugita, T. Yokota, and Y. Sasano : 2003 AGU Fall Meeting, San Francisco, Calif. (2003) "Measurements of ClONO₂ by Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) in the high latitude stratosphere"
- ③ Y. Terao, N. Saitoh, T. Sugita, H. Nakajima, T. Yokota, H. Kobayashi, and Y. Sasano : 2003 AGU Fall Meeting, San Francisco, Calif. (2003) "ILAS-II measurements of trace gases, temperature and pressure: Comparison with solar occultation sensors"

ほか多数あり。省略。

（３）出願特許

なし

（４）受賞等

2001年度日本気象学会、学会賞 近藤 豊
 2001年度日本気象学会、堀内賞 小池 真
 2002年度日本気象学会、学会賞 塩谷雅人
 2003年度日本気象学会、学会賞 津田敏隆
 2003年度日本気象学会、山本・正野論文賞 寺尾有希夫

（５）一般への公表・報道等

平成14年12月30日 毎日新聞朝刊（北極のオゾン1ヶ月で半減）

（６）その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

WCRP-113, WMO/TD-No. 1043 SPARC Assessment of Upper Tropospheric and Stratospheric Water

Vapour (SPARC No. 2, 2000) へのデータ提供・被引用、また、WMO Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002, Global Ozone Research and Monitoring Project, Report No. 47, 2003での被引用を通じて、国際的な政策決定へ科学的立場から貢献した。

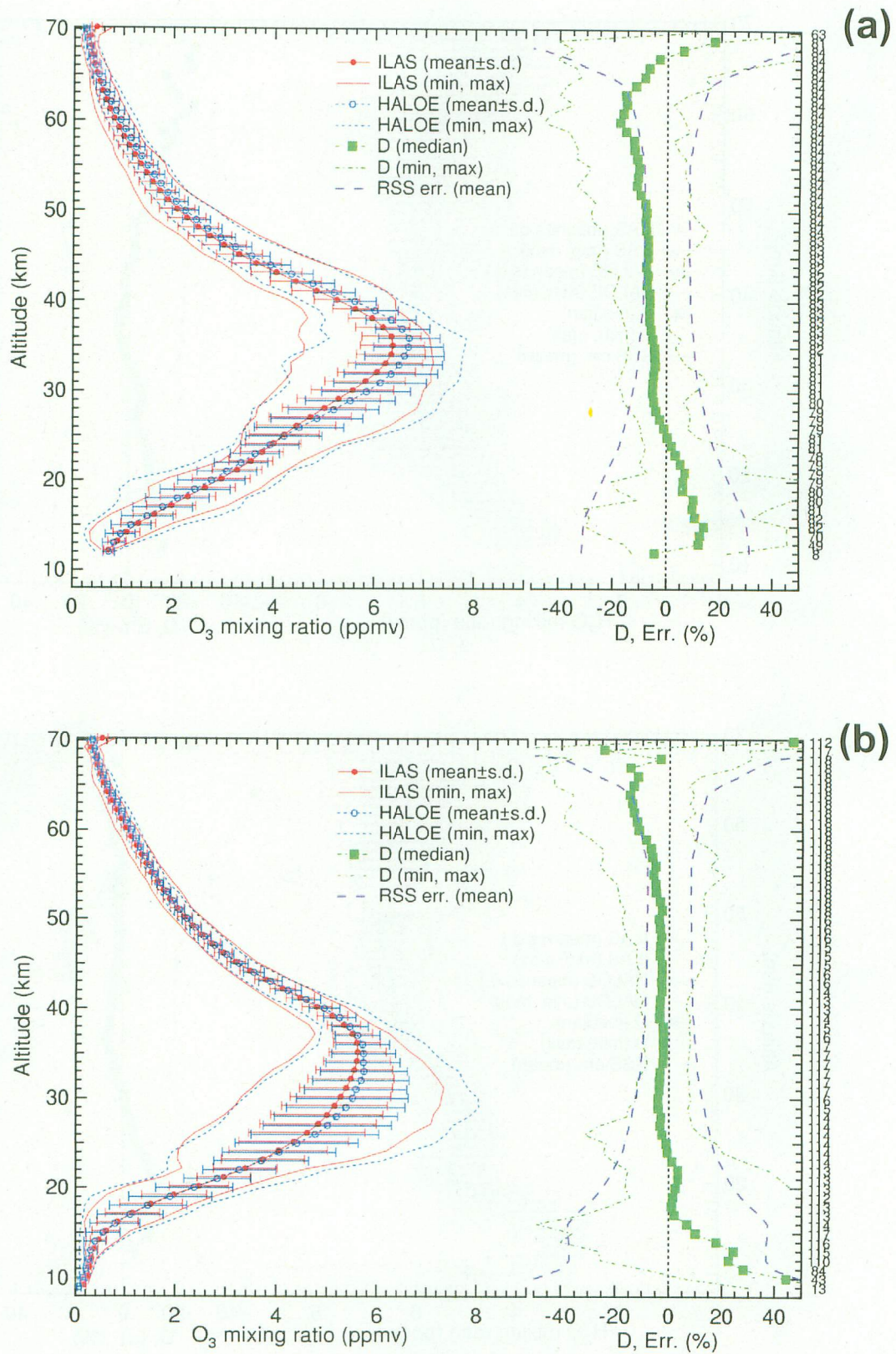


図1.1 ILASバージョン6.0による O_3 とHALOEによる O_3 の比較。(a)の左パネルは北半球での各々の平均値プロファイル。右パネルは相対値差 D (HALOE-ILAS) をパーセントで表わしている。Errはトータルの測定誤差を示す。(b)は南半球であることを除き、(a)に同じ。

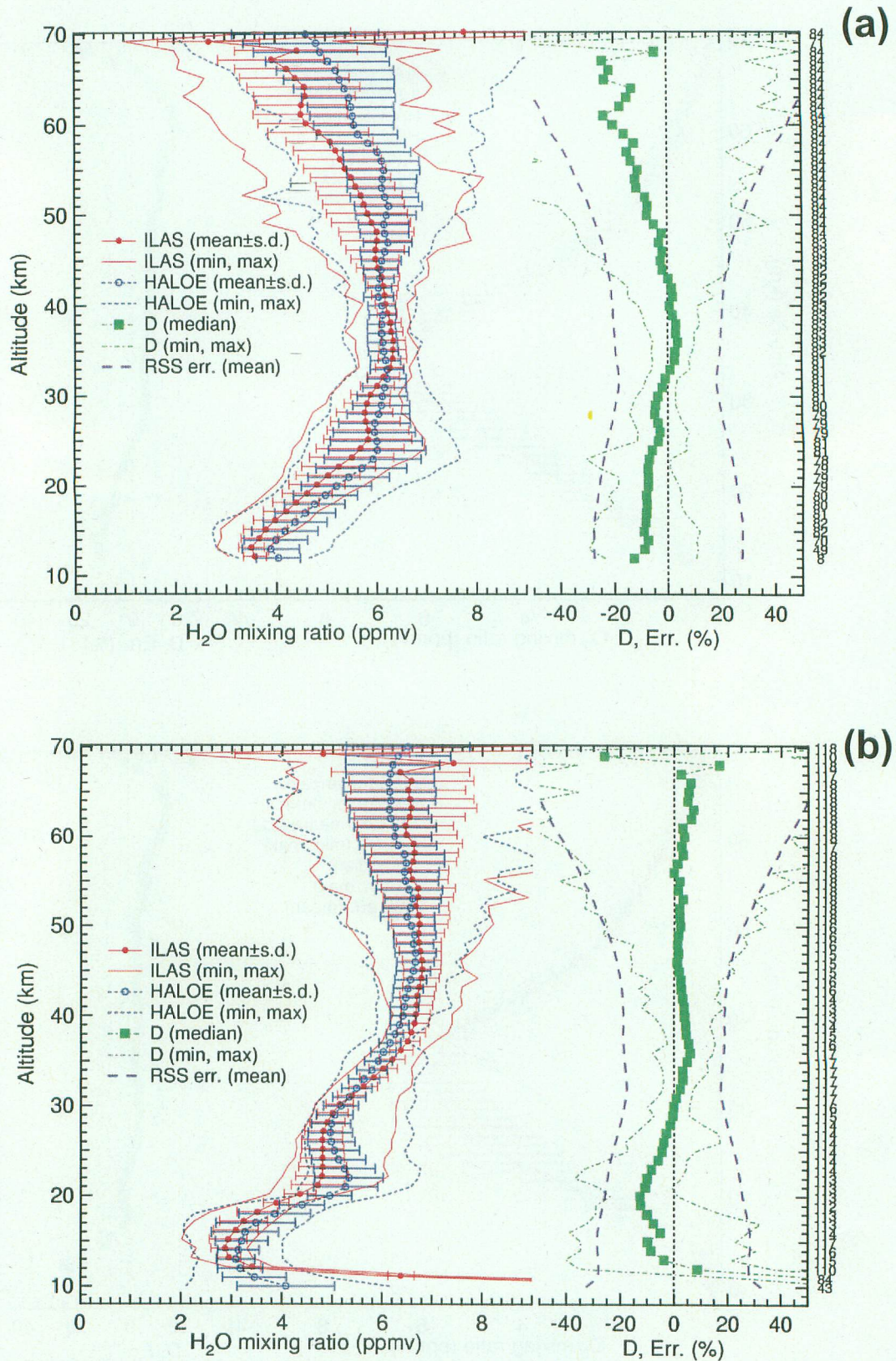


図1. 2 ILASバージョン6. 0 によるH₂OとHALOEによるH₂Oの比較。(a)の左パネルは北半球での各々の平均値プロファイル。右パネルは相対値差D (HALOE - ILAS) をパーセントで表わしている。Errはトータルの測定誤差を示す。(b)は南半球であることを除き、(a)に同じ。

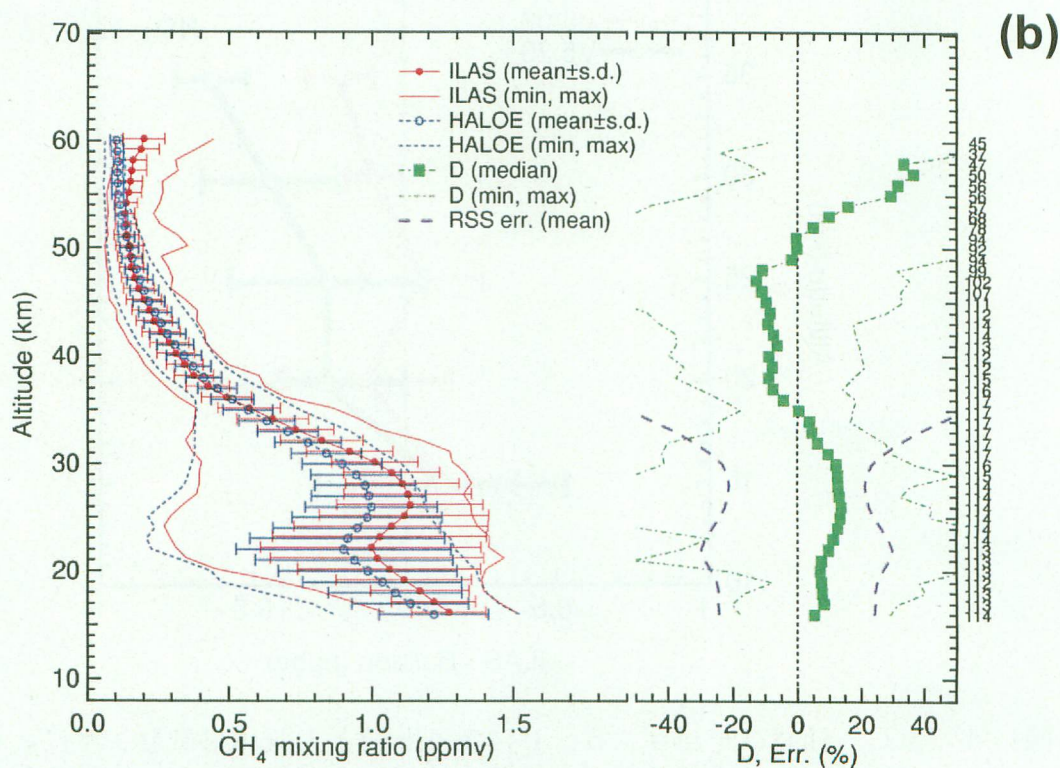
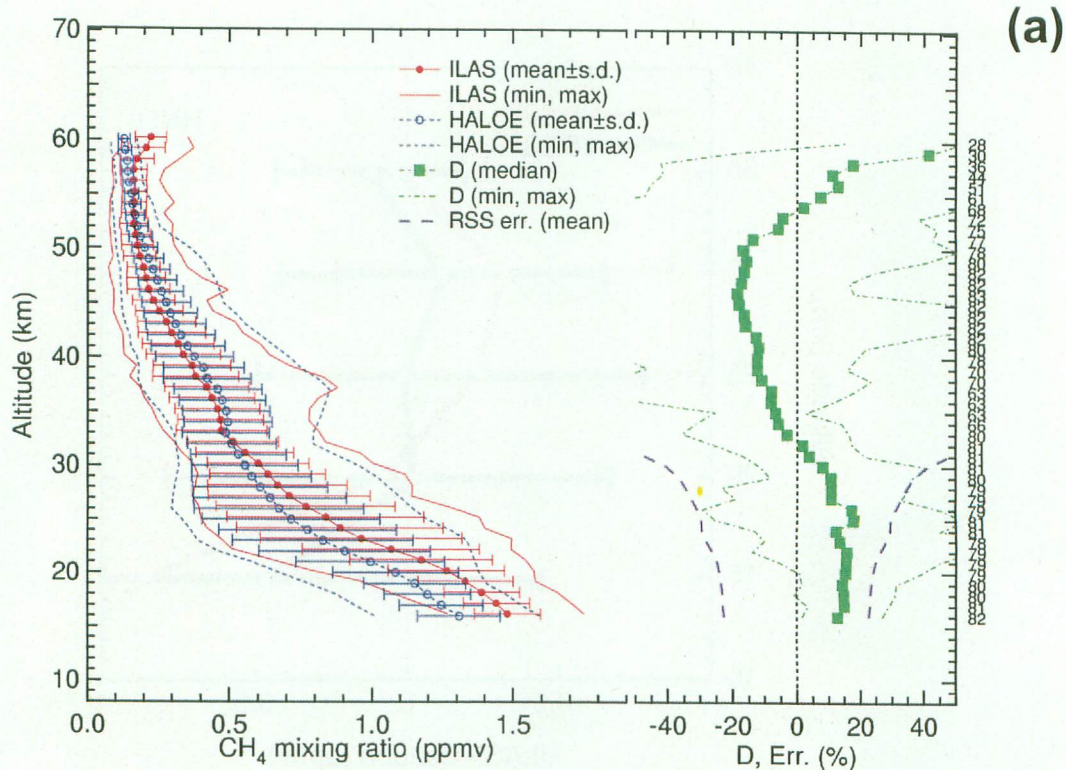


図1. 3 ILASバージョン6. 0によるCH₄とHALOEによるCH₄の比較。(a)の左パネルは北半球での各々の平均値プロファイル。右パネルは相対値差D (HALOE-ILAS)をパーセントで表わしている。Errはトータルの測定誤差を示す。(b)は南半球であることを除き、(a)に同じ。

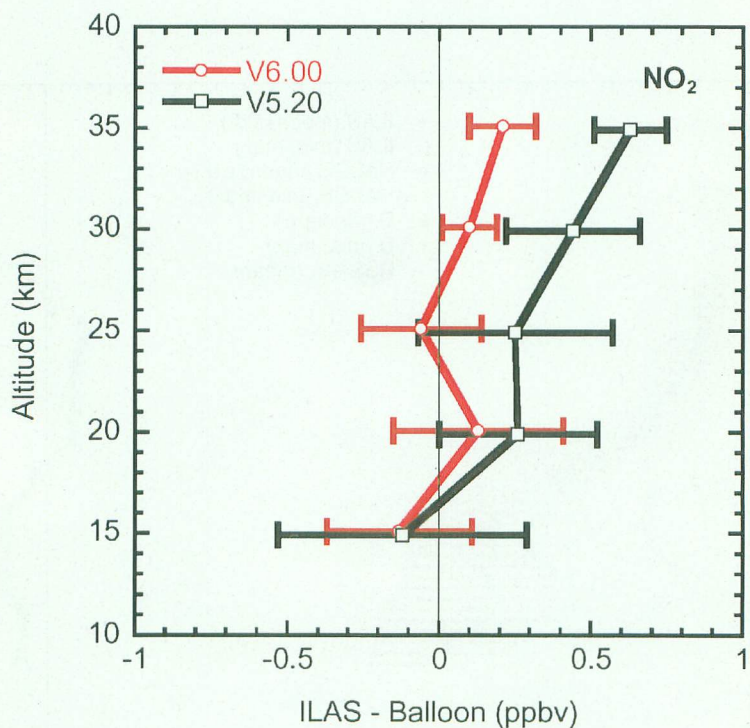
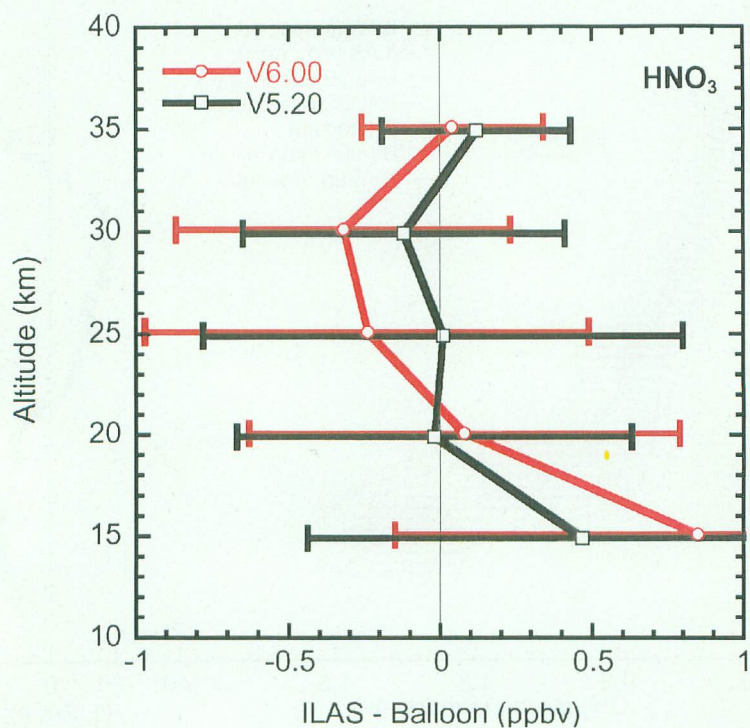


図1. 4 (上) ILASバージョン6. 0による HNO_3 と大気球搭載センサによる HNO_3 の比較(○)。絶対値差(大気球-ILAS)を示している。比較のためにILASバージョン5. 2での結果も示してある(□)。

図1. 5 (下) ILASバージョン6. 0の NO_2 であることを除き図4に同じ。

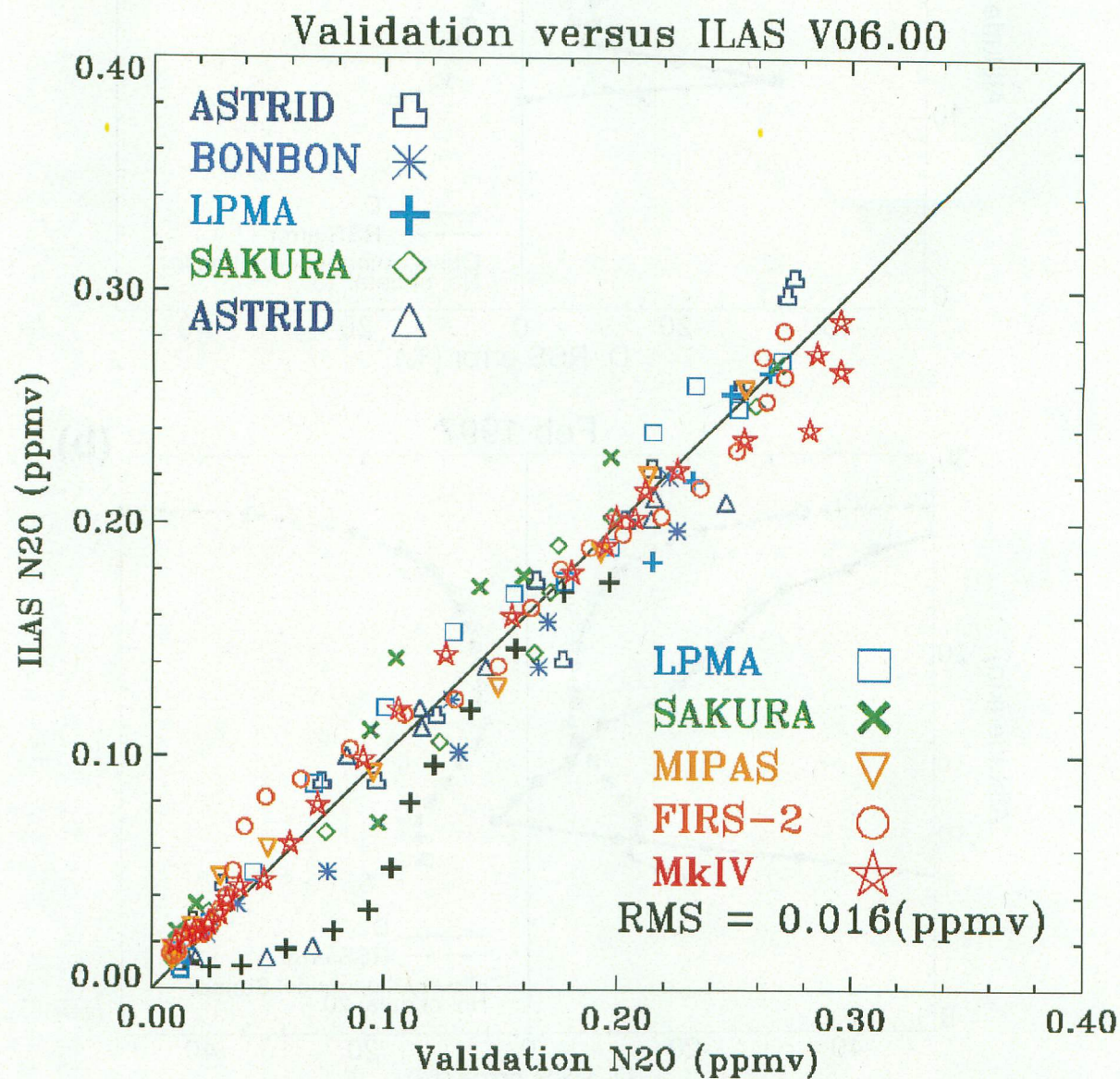


図1.6 ILASバージョン6.0によるN₂Oと大気球搭載の各種センサによるN₂Oの相関図。

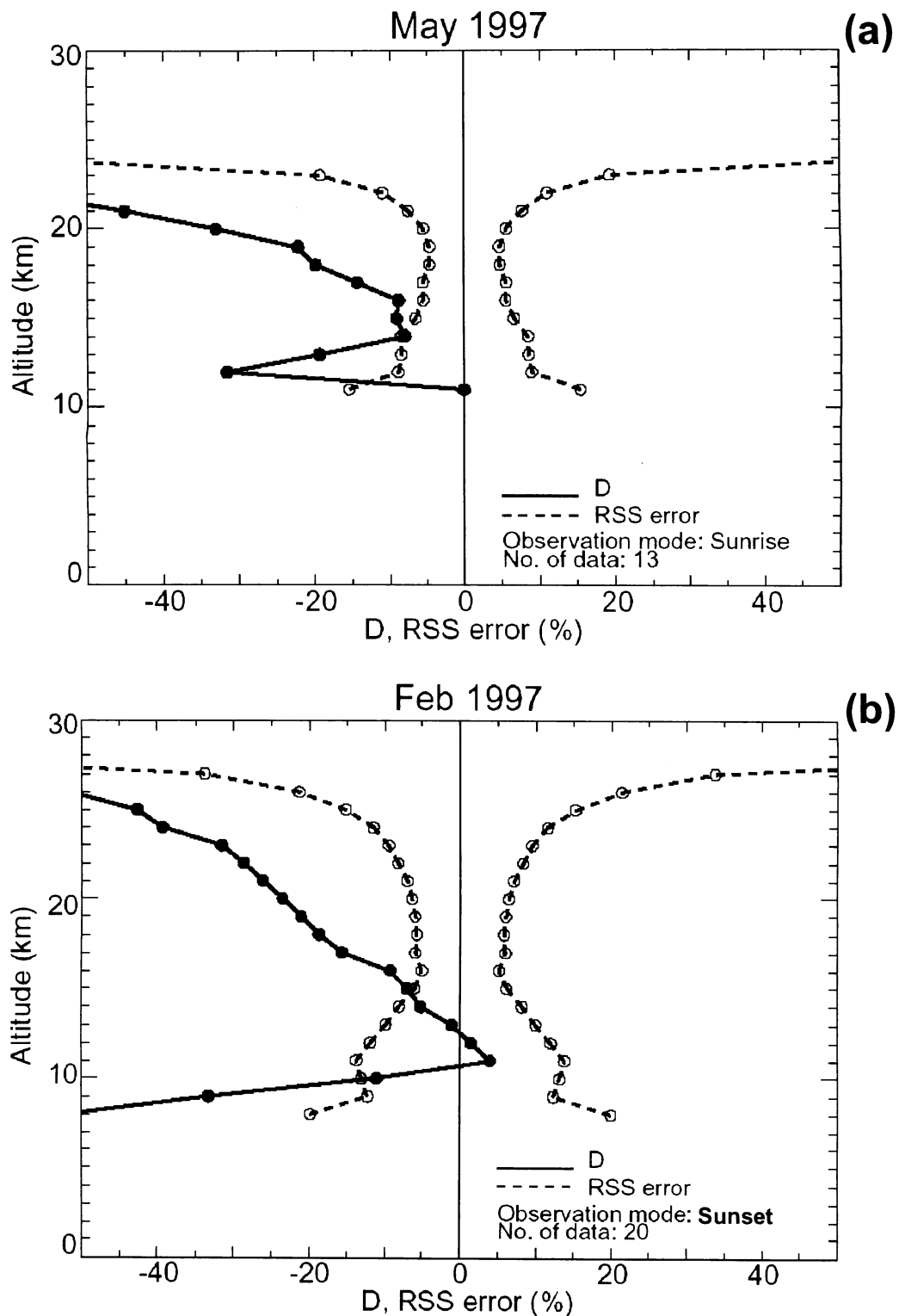


図1. 7 ILASバージョン6. 0による780 nmで見たエアロゾル消散係数 (AEC780) と SAGE IIによるAEC780 (変換値) の比較。(a)は北半球の5月における相対値差D (SAGE II-ILAS) をパーセントで表わしている。RSS errorはトータルの測定誤差を示す。(b)は南半球の2月であることを除き、上の図に同じ。

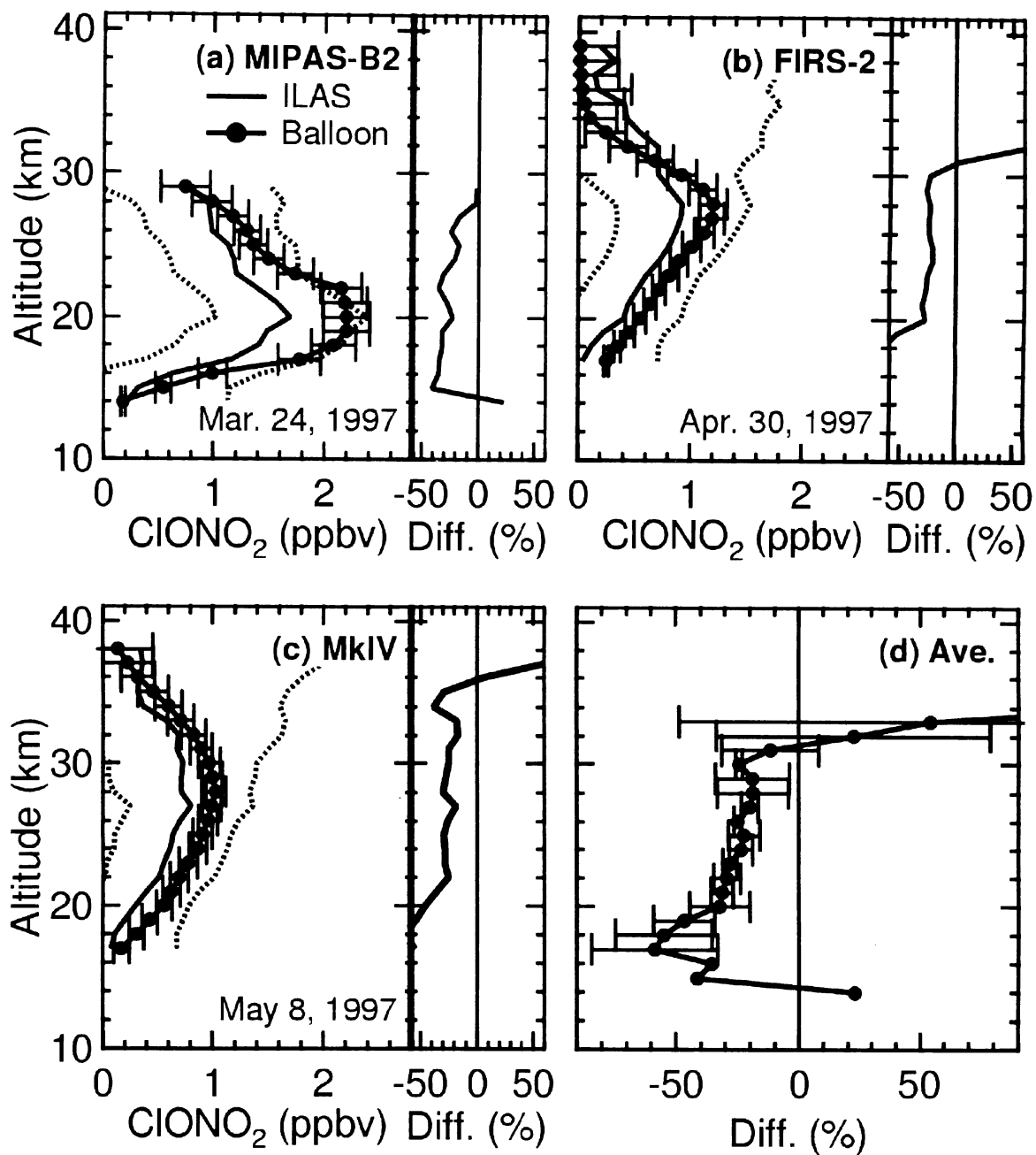


図1.8 ILASバージョン6.0による ClONO_2 と大気球搭載センサによる ClONO_2 の比較。(a)はMIPAS-B2, (b)はFIRS-2, (c)はMkIVとの比較を各々示す。右のパネルは各高度での相対値差(大気球-ILAS)をパーセントで表わしている。(d)はその3つの相対値差の平均値である。

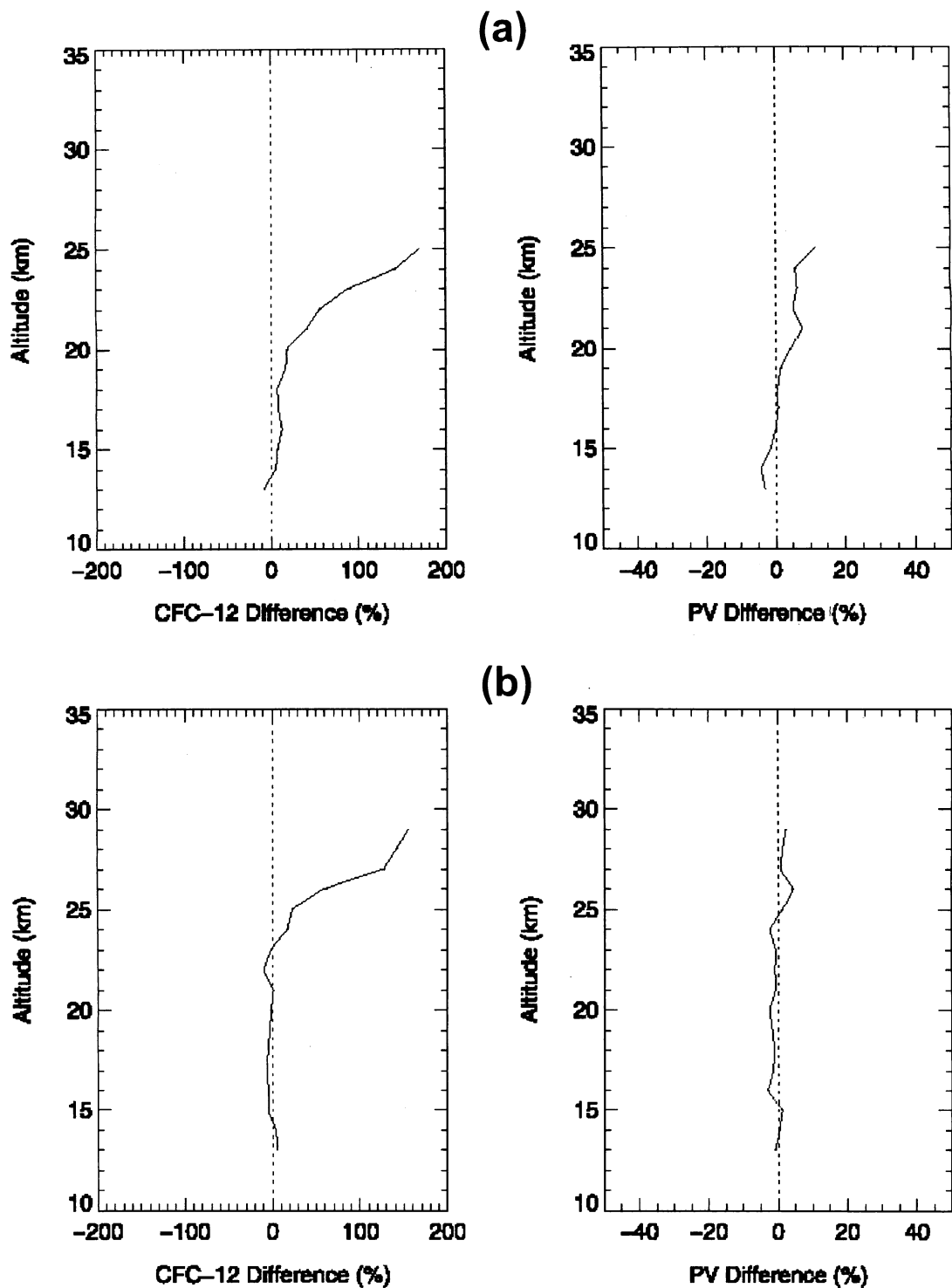


図1.9 ILASバージョン6.0によるCFC-12と大気球搭載センサによるCFC-12の比較。
 (a) は北極極渦内の観測からの結果である。右は相対値差（大気球－ILAS）をパーセントで表わしている。左は観測空気塊のポテンシャル渦度の相対値差をパーセントで表わしている。(b) は北極極渦外の観測の結果であることを除き、上の2つと同じ。

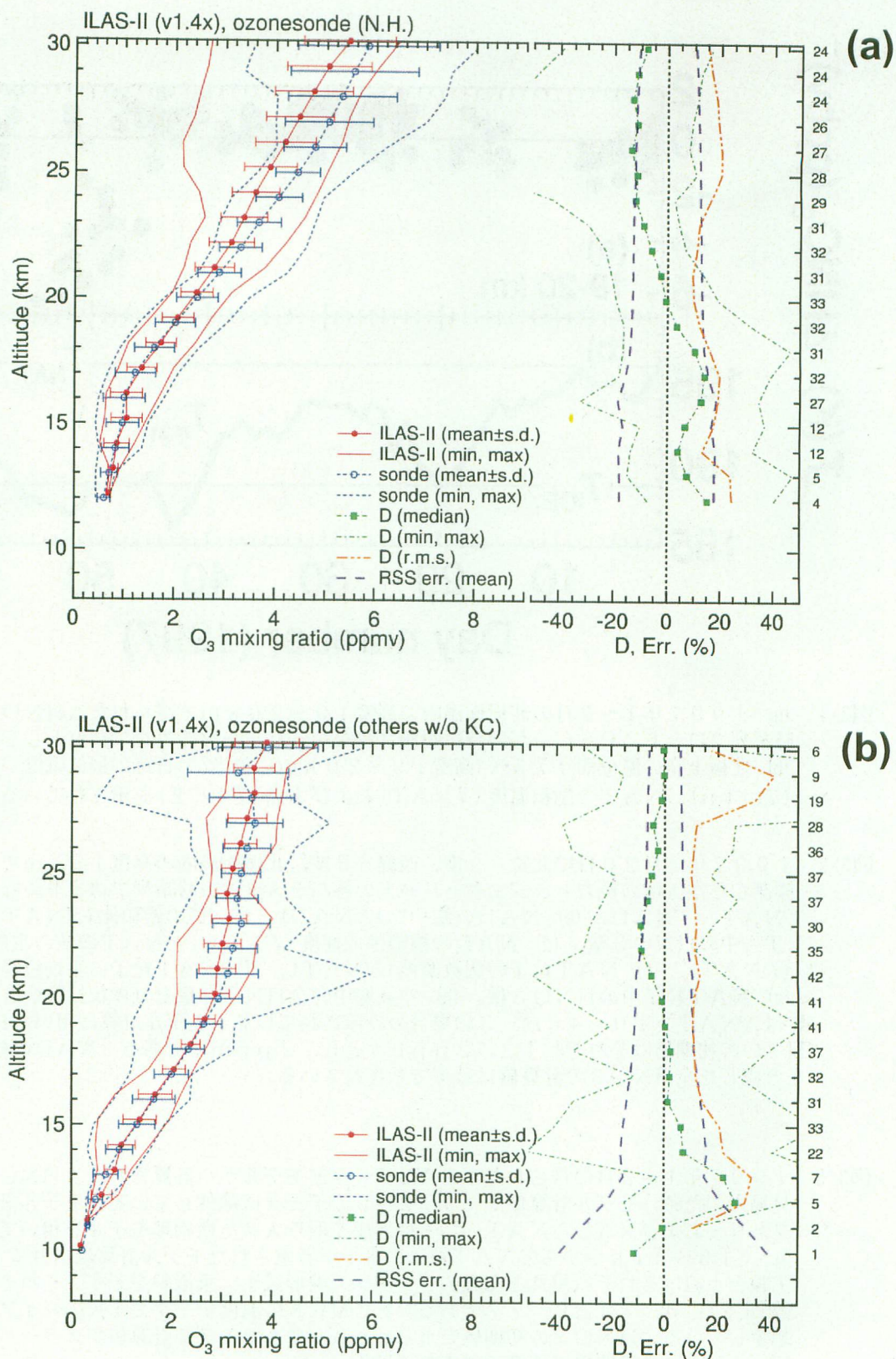


図2.1 ILAS-IIバージョン1.4によるO₃とオゾンゾンデの比較。(a)の左パネルは北半球での各々の平均値プロファイル。右パネルは相対値差D (HALOE-ILAS) をパーセントで表わしている。Errはトータルの測定誤差を示す。(b)は南半球であることを除き、(a)に同じ。

図3.1

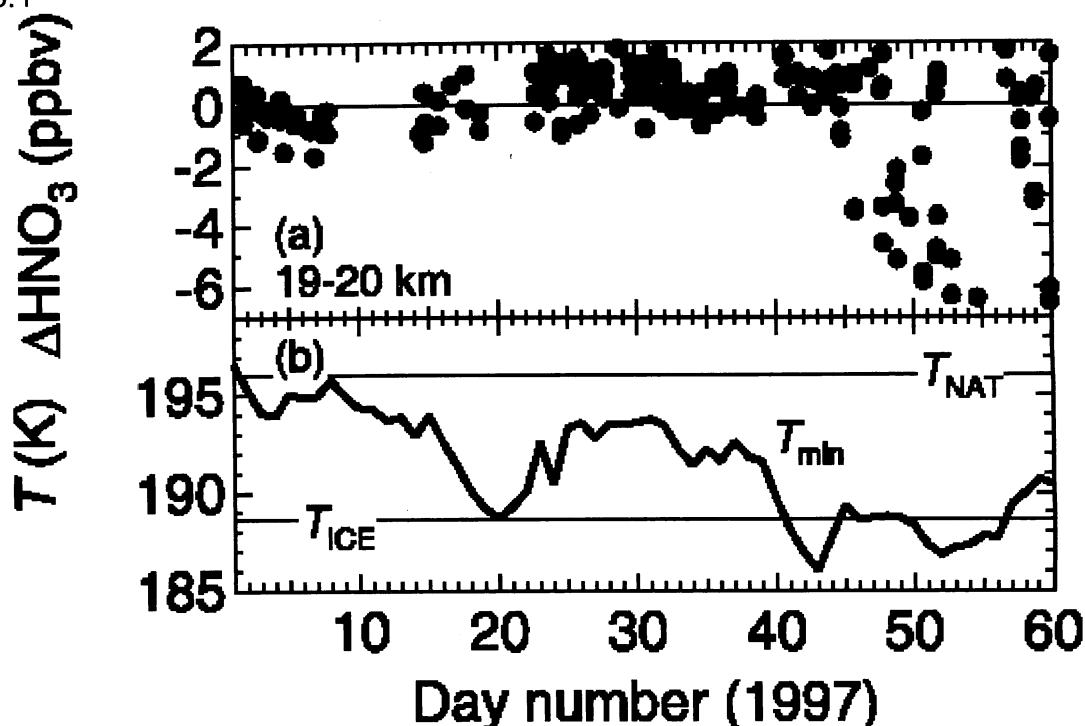


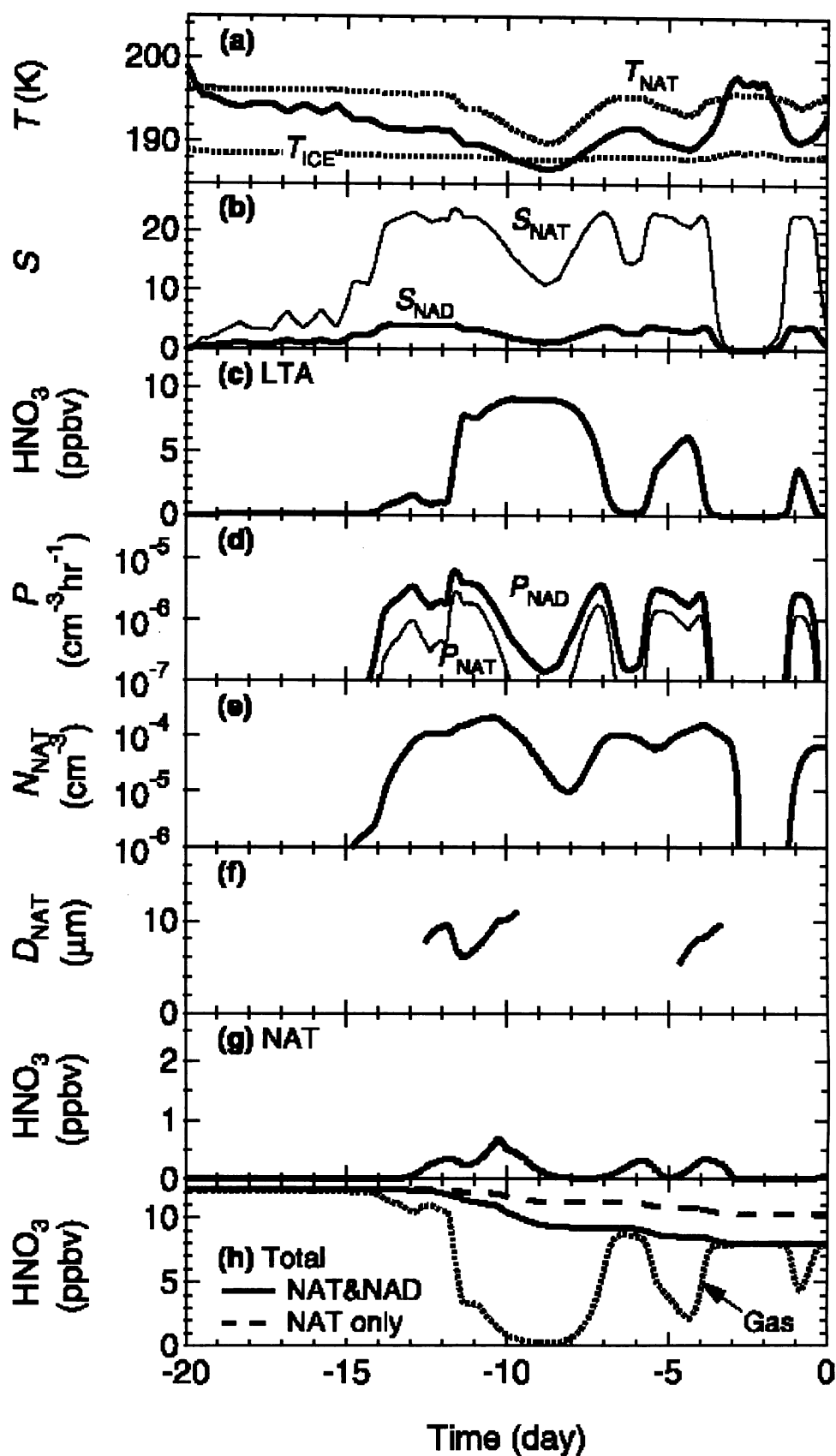
図3.1 (a) 1997年1～2月の北極極渦内の高度19～20 kmで得られた ΔHNO_3 値の時系列プロット。PSCsが同時に観測されなかったデータのみをプロットしている。(b) 北極上空の温位面475 K (高度19～20 kmに相当)の日毎の最低気温($T_{\min}$)。NATの飽和温度(T_{NAT})および氷点(T_{ICE})も示されている。

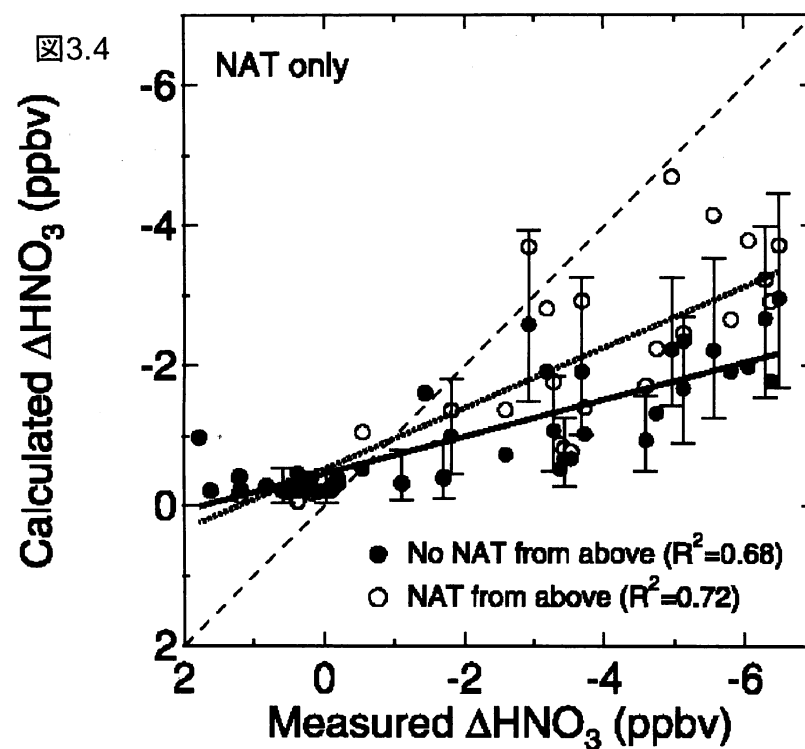
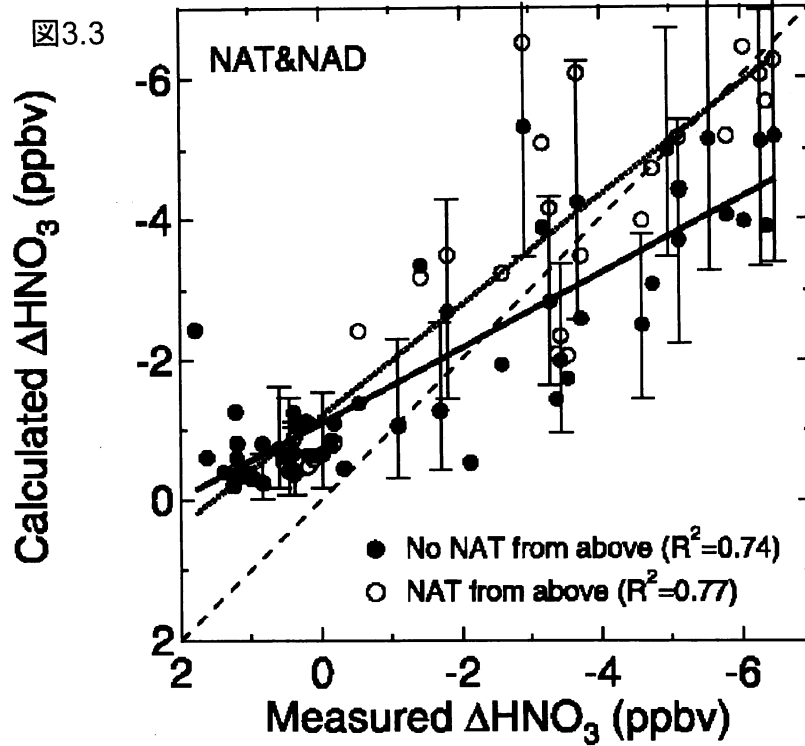
図3.2 1997年2月20日に北緯69度、西経63度、北極極渦内の高度19 kmでILASが観測した空気塊の後方トラジェクトリー上の各パラメーターの時系列プロット。(a) 気温(T)、 T_{NAT} 、 T_{NAD} 、(b) NADの飽和比(SNAD)とNATの飽和比(SNAT)、(c) LTA中の HNO_3 量、(d) NADの核の生成速度(PNAD)とNATの核の生成速度(PNAT)、(e) NAT粒子の個数濃度(NNAT)、(f) NAT粒子の平均粒径(DNAT)、(g) NAT粒子中の HNO_3 量、(h) 空気塊中の全 HNO_3 量と気体状 HNO_3 量。 DNAT は $\text{NNAT} > 10 - 4 \text{ cm}^{-3}$ の場合のみ示されている。モデル計算に用いた HNO_3 と H_2O の初期値はそれぞれ 12.2 ppbv と 5.2 ppmv である。NADの核形成のみを考慮した全 HNO_3 の計算値は破線で示されている。

図3.3 1997年1～2月に得られたILASデータとモデルから計算された ΔHNO_3 の比較。見易さのため、モデル計算値が $-0.2 \sim 0$ のデータは除外している。モデル計算はトラジェクトリーおよびNADとNATの均一核形成を取り入れた微物理モデルを用いて行われた(黒丸)。19～21 kmからのNAT粒子の落下が考慮されたモデル計算は白丸で示されている。実線と点線はそれぞれ黒丸と白丸のデータへの線形最小二乗直線を示す。それぞれの相関係数(R^2)は0.74と0.77である。ECMWFの温度データに1 Kのバイアスがあると想定している。 HNO_3 の初期値を $\pm 2 \text{ ppbv}$ 変えたモデル計算値がエラーバーで示されている。1:1の関係は破線で示されている。

図3.4 図3.3と同様であるが、NADの核形成を考慮しなかった場合のモデル計算。

Fig. 3.2





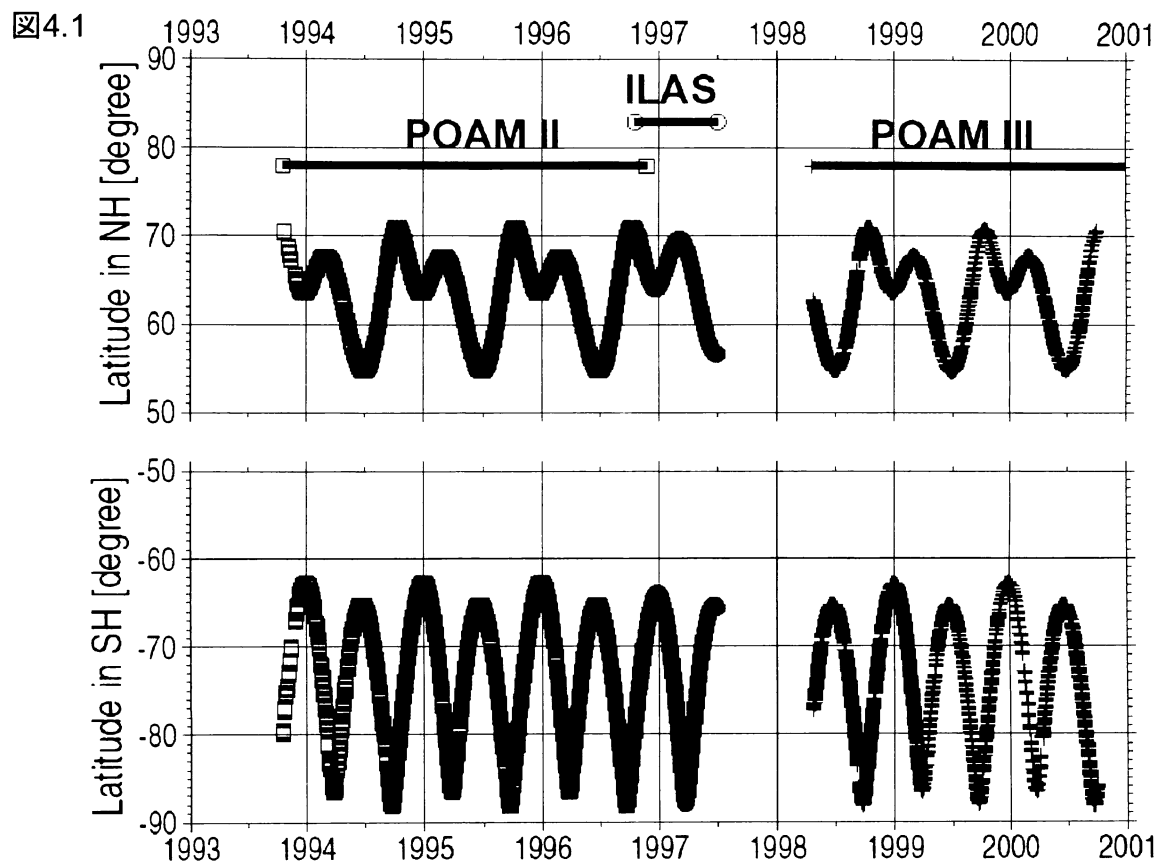
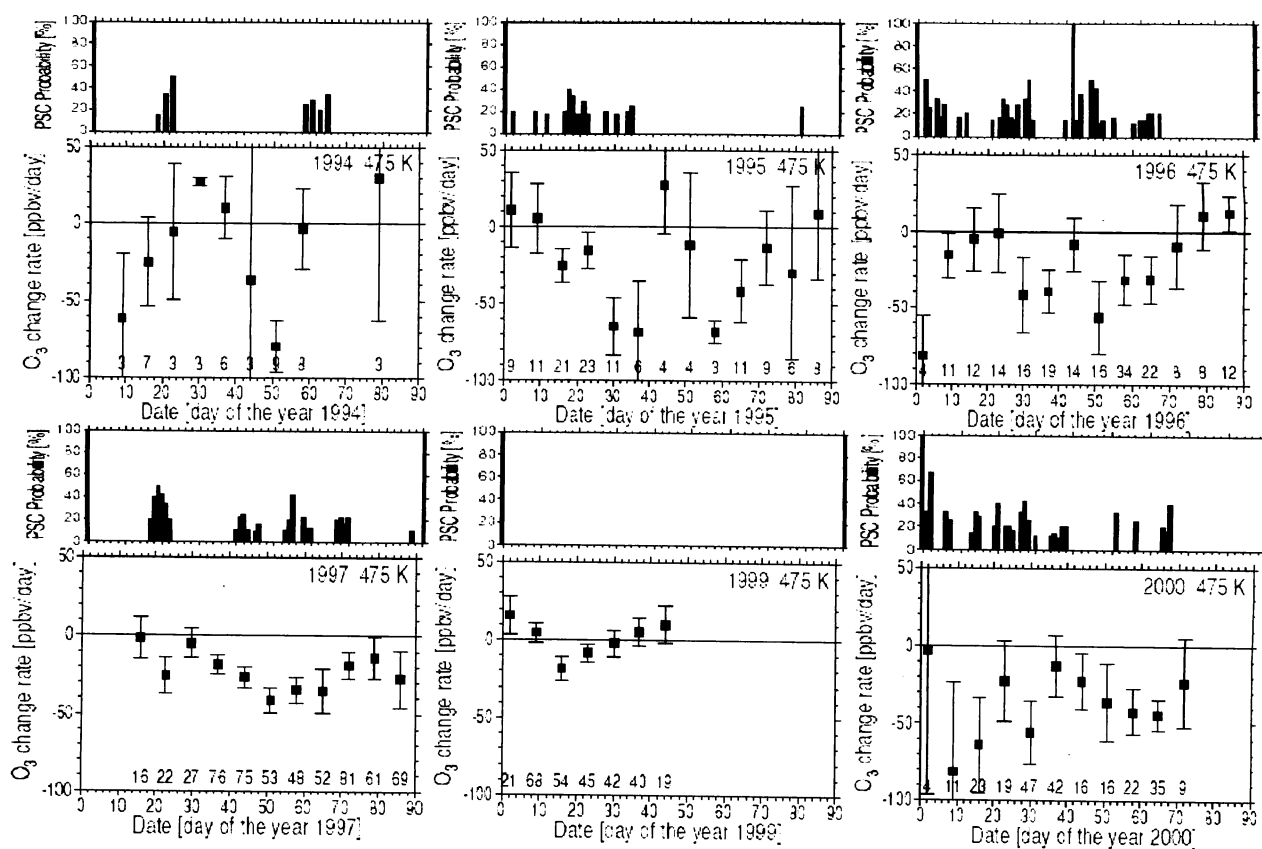


図4.1 POAM II, ILAS, POAM IIIの観測緯度の年々変化

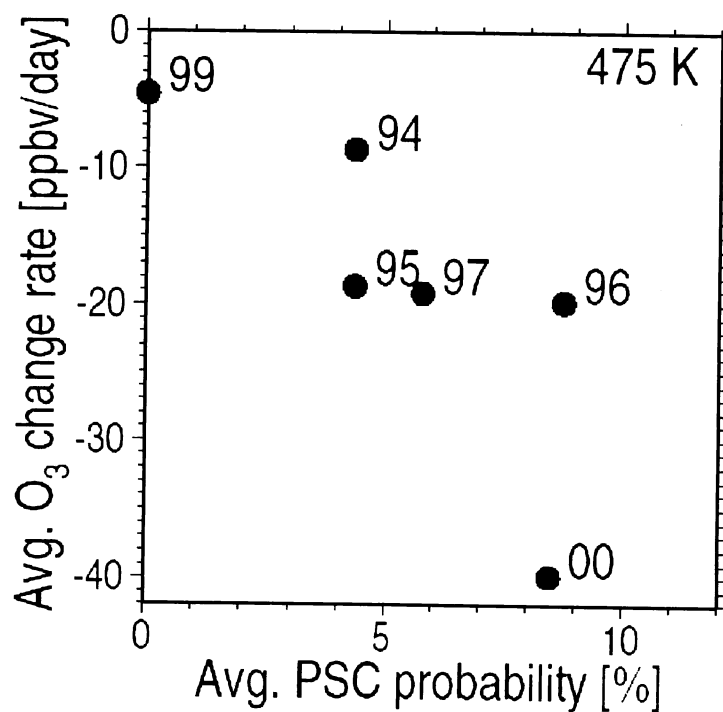
図4.2 1993/94年から1999/2000年の冬季北極475Kにおけるオゾン変化率 (ppbv/day) とPSCの出現確率 (%/day)

図4.3 475KにおけるPSCの平均出現確率と平均オゾン変化率の散布図

☒ 4.2



☒ 4.3



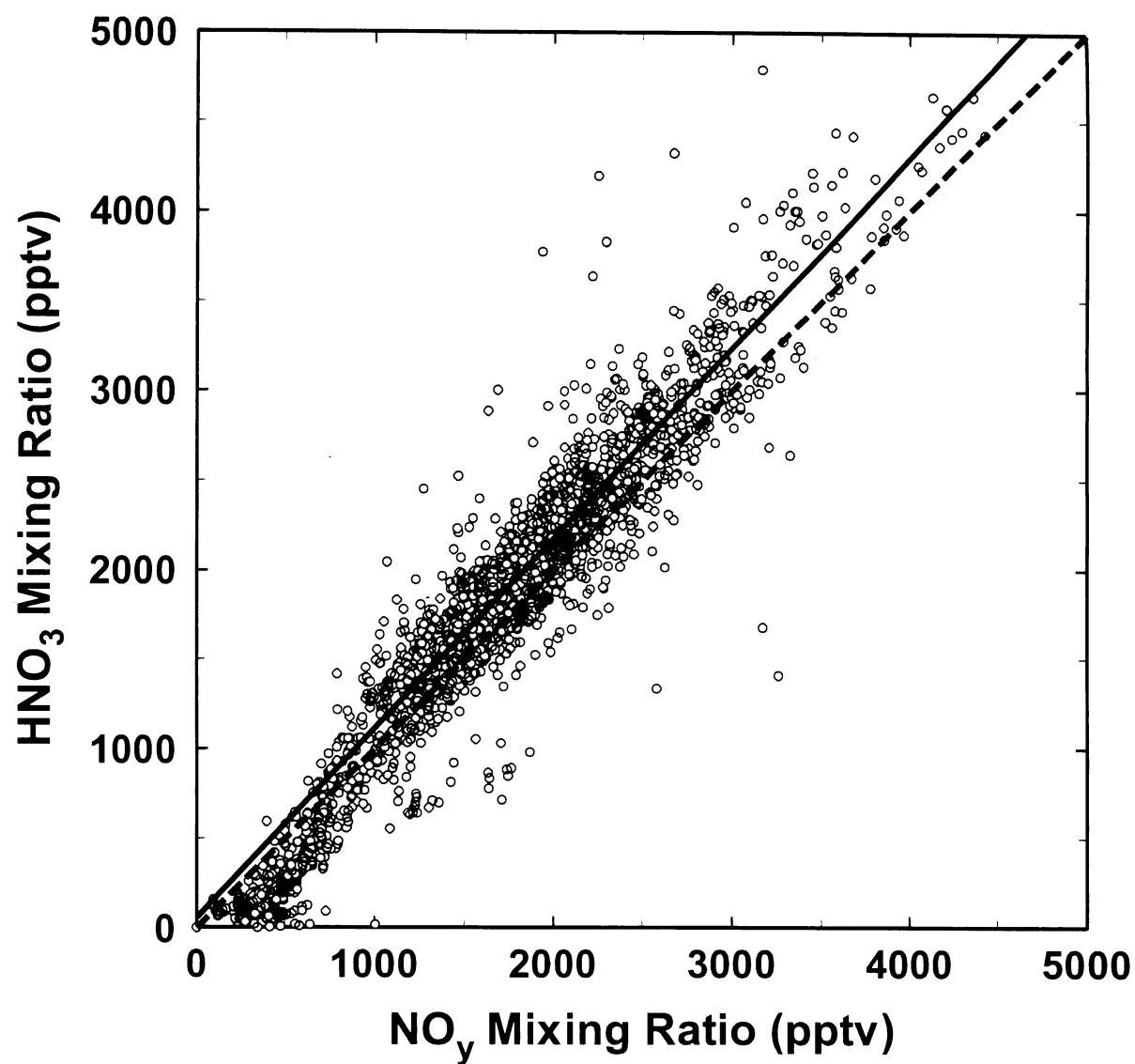


図5.1 SOLVE航空機観測により2000年3月に高度10-12.5 kmで得られた NO_y と HNO_3 の相関

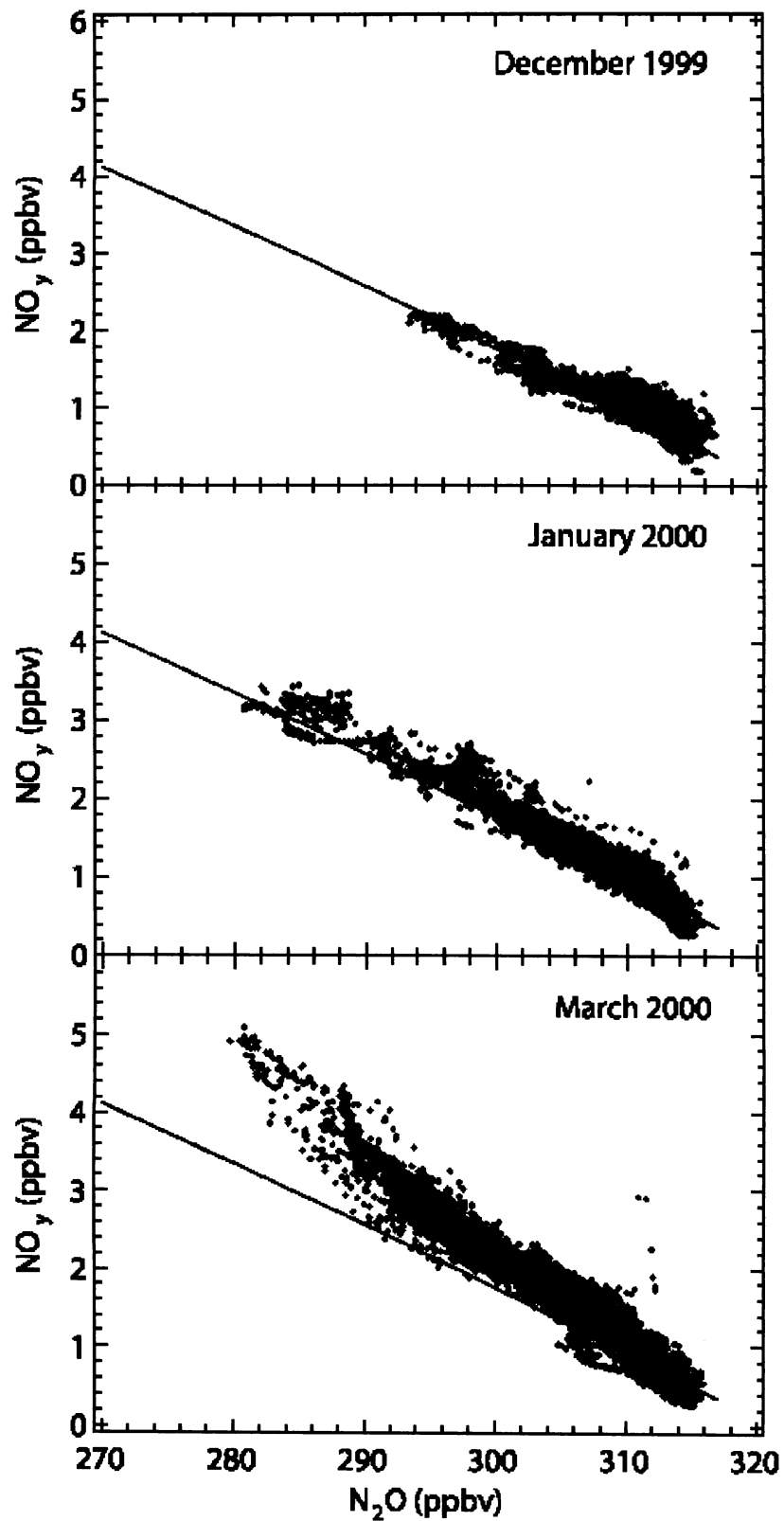


図5.2 SOLVE航空機観測により得られた NO_y と N_2O の相関。実線は脱窒が生じる以前に測定された基準相関を示す。

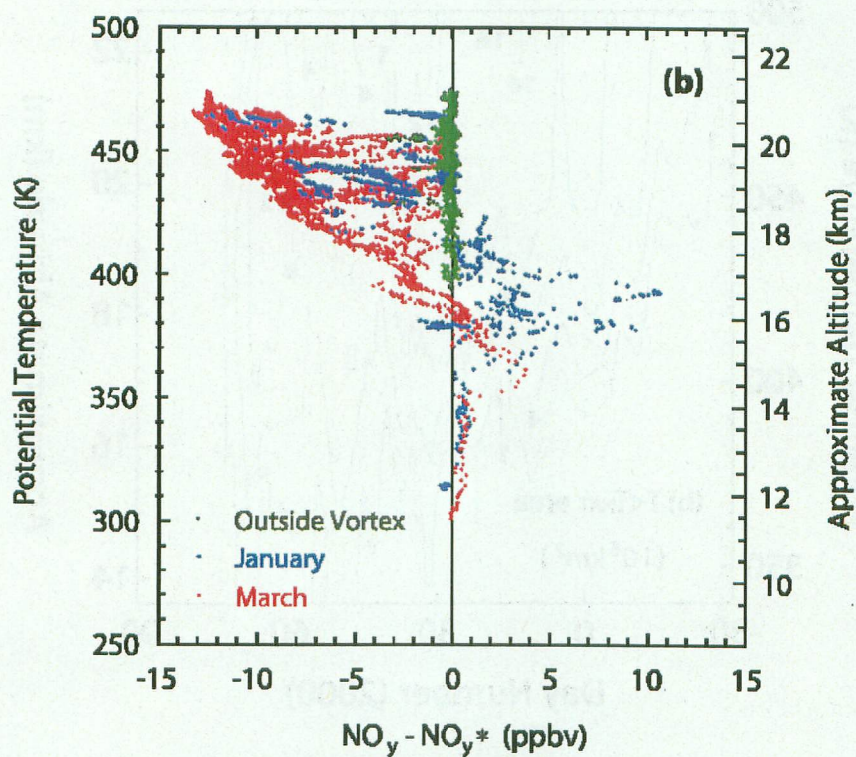
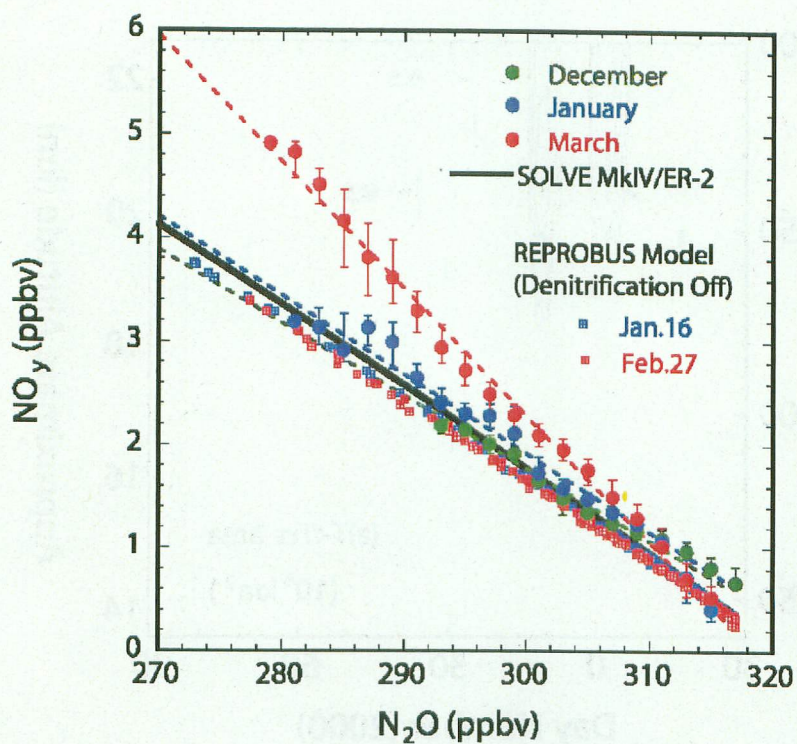


図5.3 (上) N_2O 混合比ビン毎の NO_y の中央値。実線は脱窒が生じる以前に測定された基準相関を示す。

図5.4 (下) ER-2により高高度 (12-21 km) の極渦内で測定された $NO_y - NO_{y*}$ の高度分布。

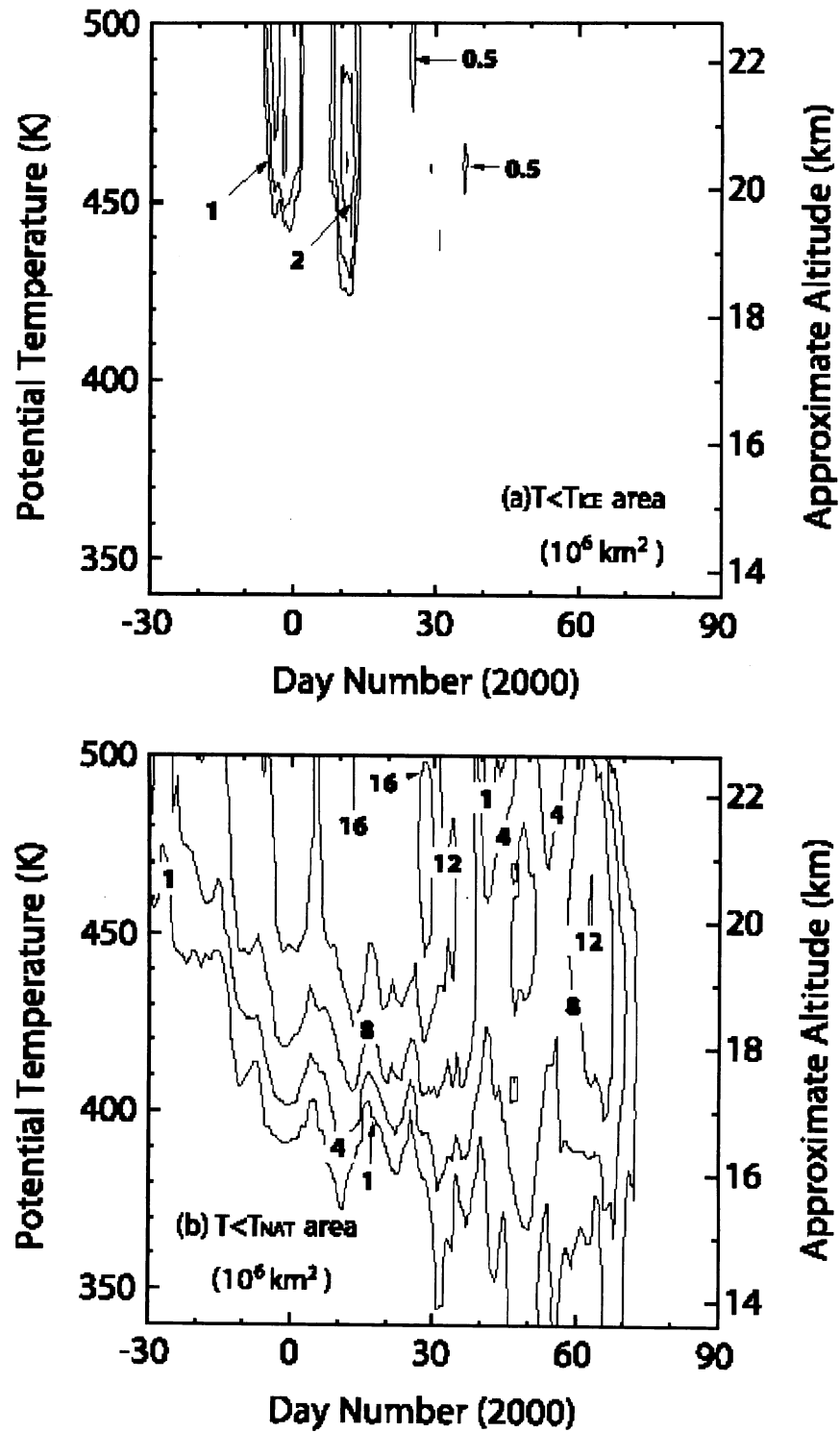


図5.5 北極域における氷（上）および硝酸三水和物（下）の飽和温度以下となっていた領域の面積の時間変化の高度分布。

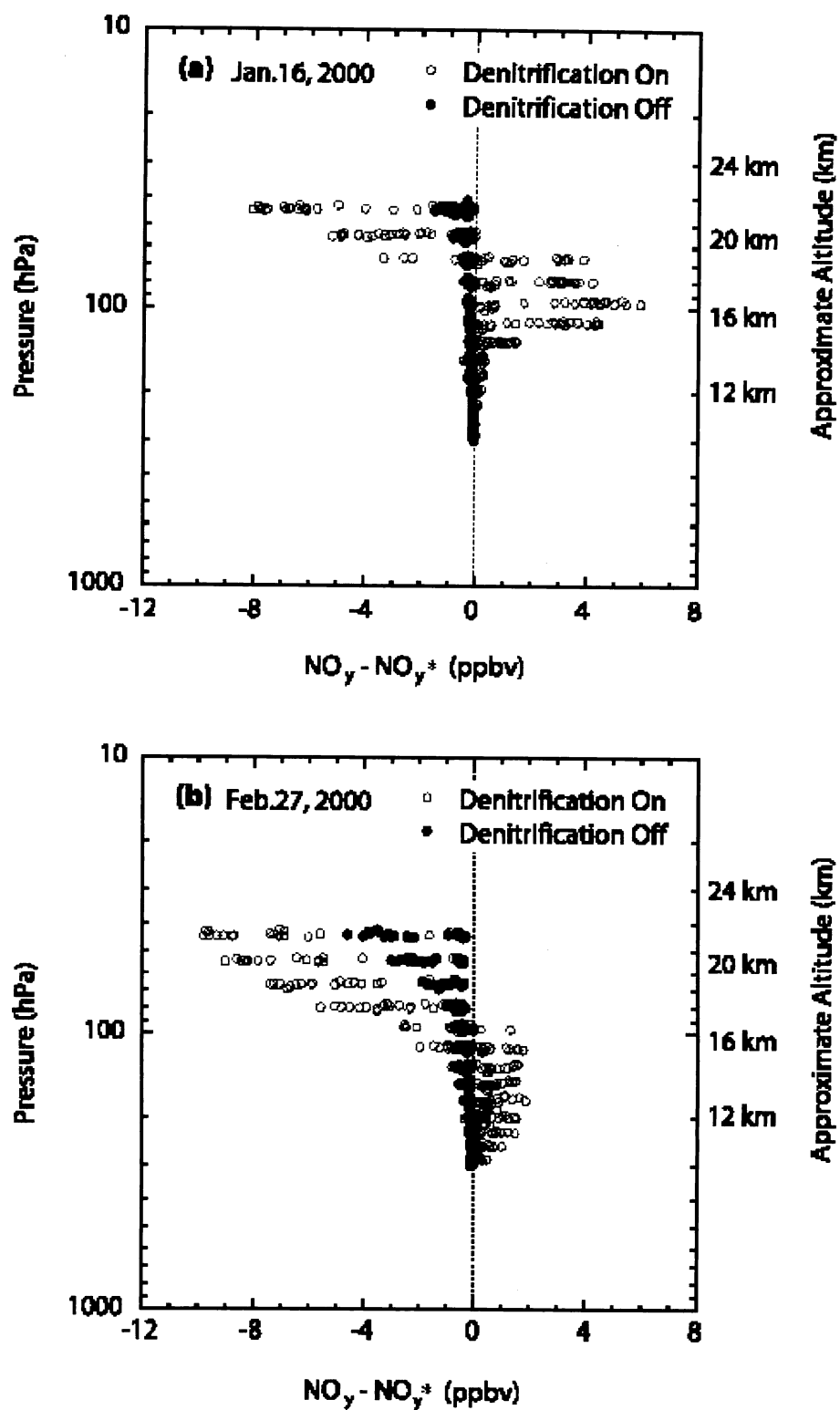


図5.6 3次元化学輸送モデル計算による $\text{NO}_y - \text{NO}_y^*$ の高度分布。白丸は脱窒スキームを考慮した場合。黒丸は考慮しなかった場合。上は2000年1月、下は3月（2月27日）。

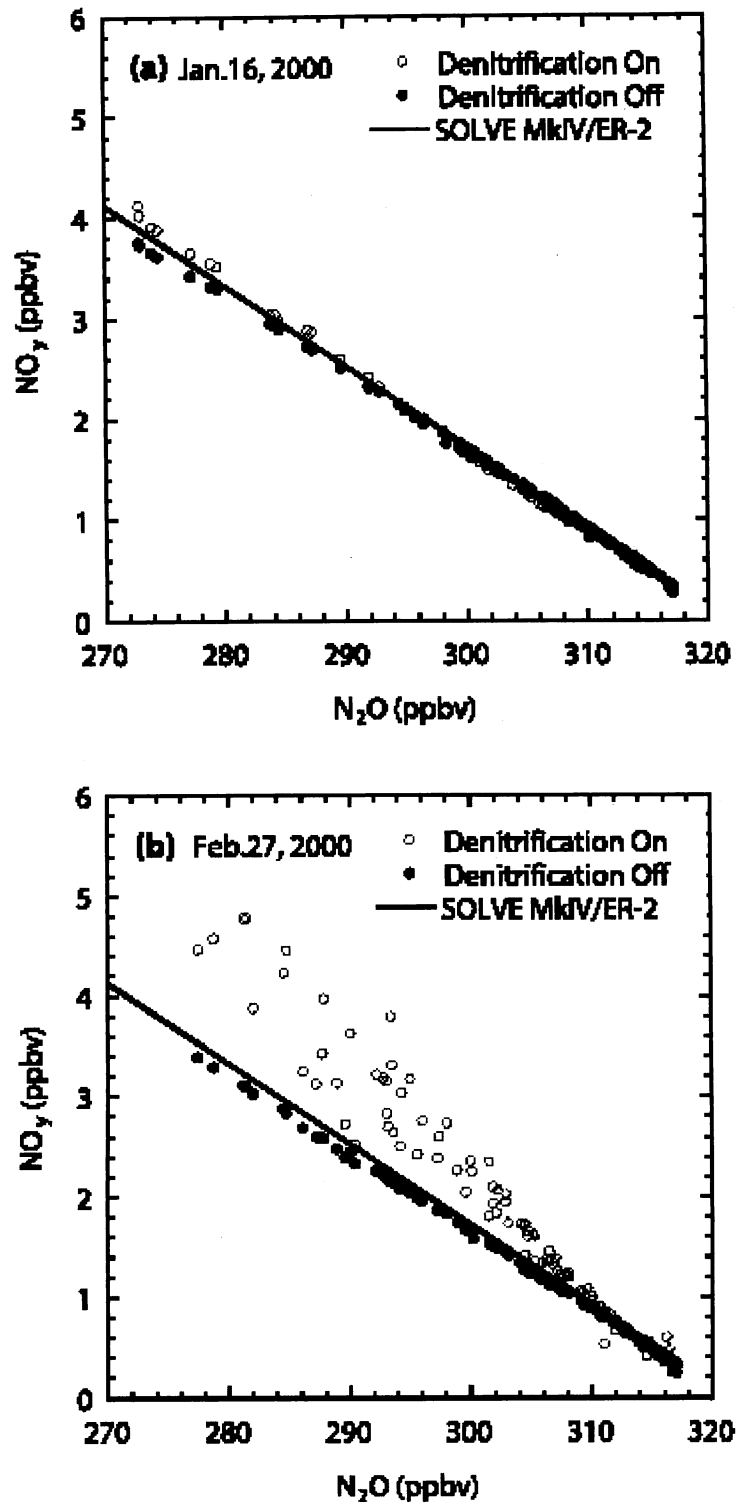


図5.7 3次元化学輸送モデル計算によるNO_yとN₂Oの相関。白丸は脱窒スキームを考慮した場合。黒丸は考慮しなかった場合。実線は脱窒が生じる以前に測定された基準相関を示す。上は2000年1月、下は3月（2月27日）。

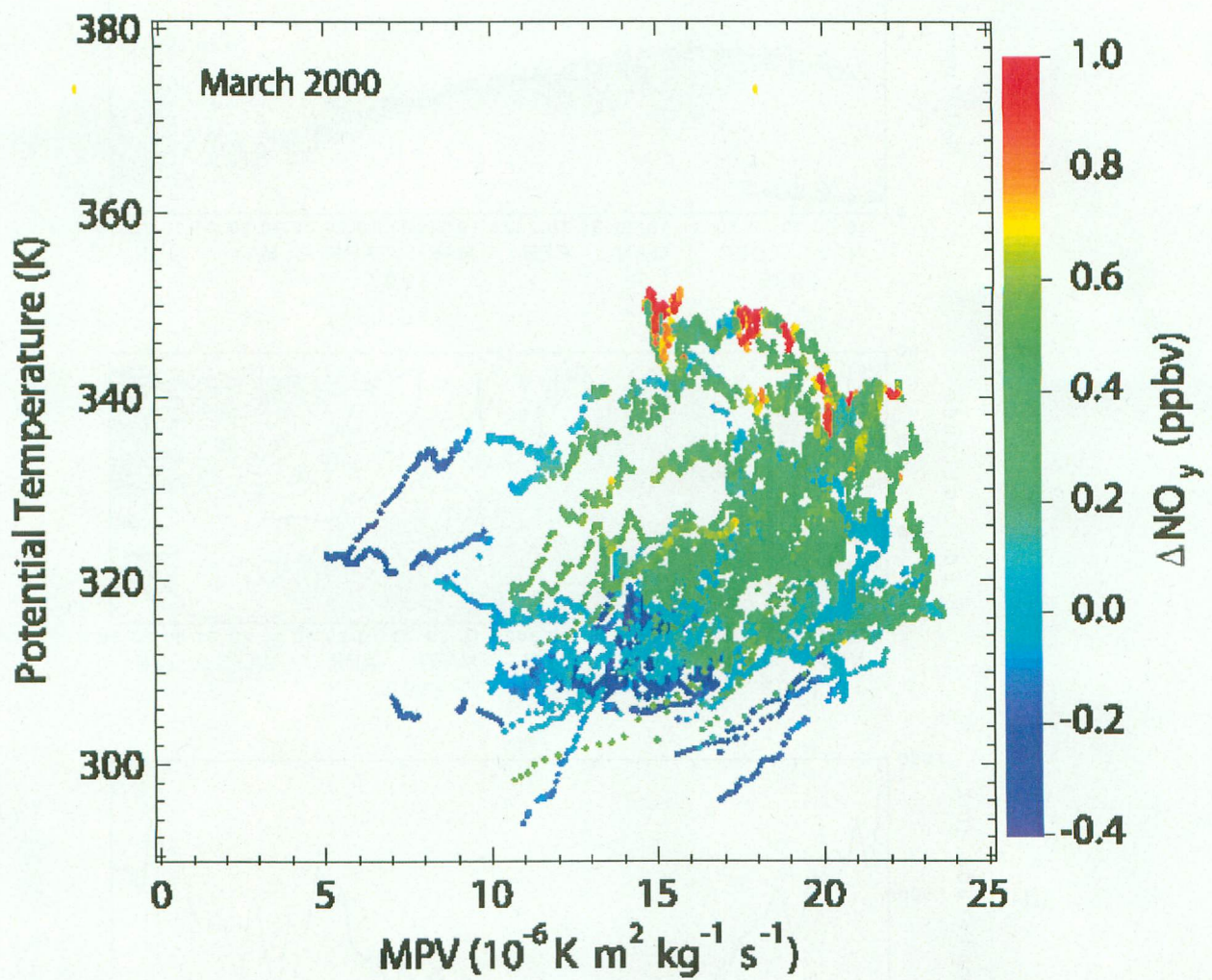


図5.8 2003年3月の ΔNO_y ($= \text{NO}_y - \text{NO}_{y*}$)の空間分布。横軸は渦度、縦軸は温位を示す。

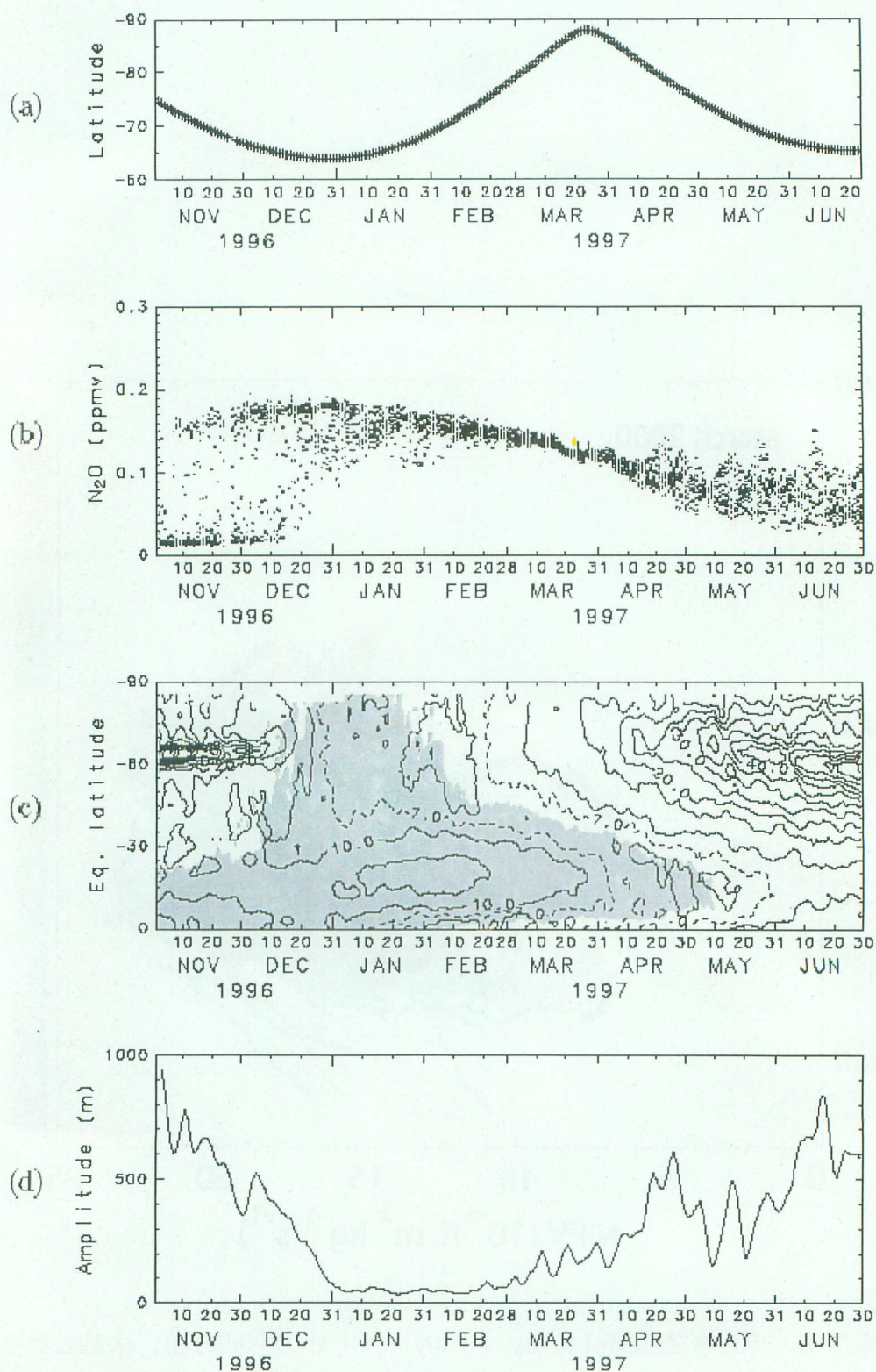


図6.1: (a) ILASの観測緯度. (b) 600K等温位面(約23 km)上における N_2O の分布. (c) UKMOデータから計算した600K等温位面上における水平風(絶対値)の時間・等価緯度断面(コンター間隔 5 m/s; 東風の領域には影が付けてある). (d) 10 hPa (約30 km), 60Sにおける高度場の振幅.

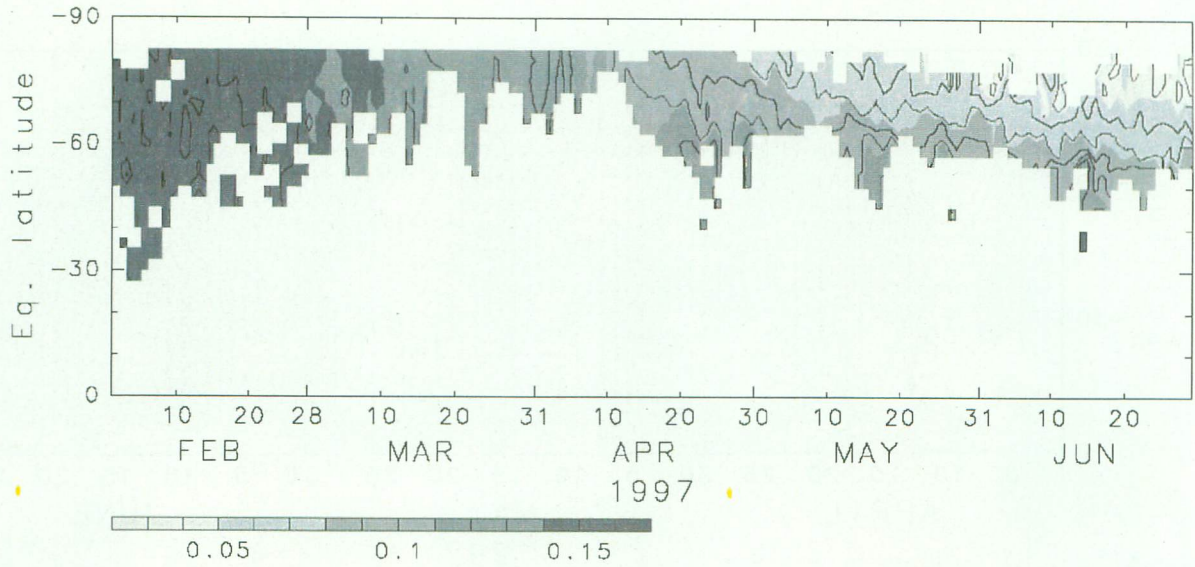


図6.2： 600K等温位面上におけるN₂Oの時間・等価緯度断面 (コンター間隔0.015 ppbv)。

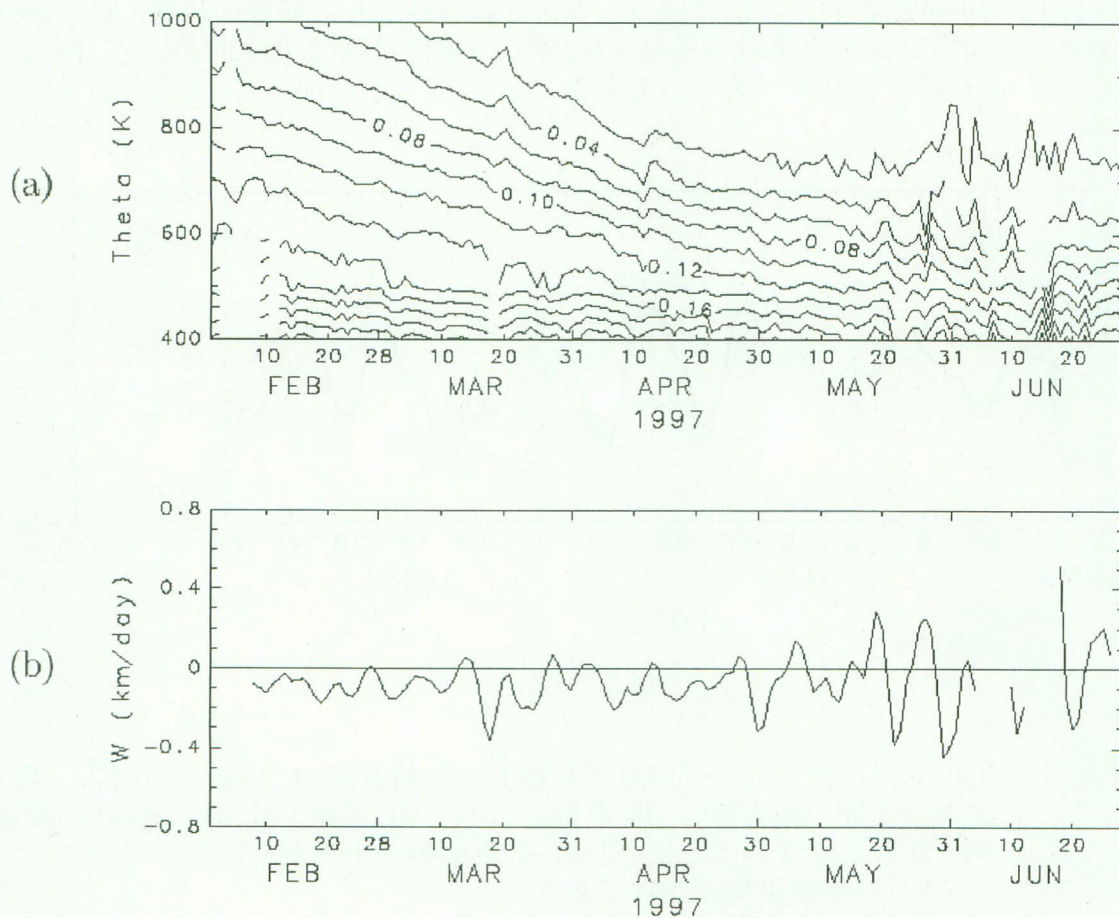


図6.3： (a) 極渦内 (90S-70S) で平均したN₂Oの時間・高度断面 (コンター間隔0.02 ppbv)。(b) N₂Oの分布より計算した鉛直流 (0.12 ppbvの等値線にもとづくもの)。

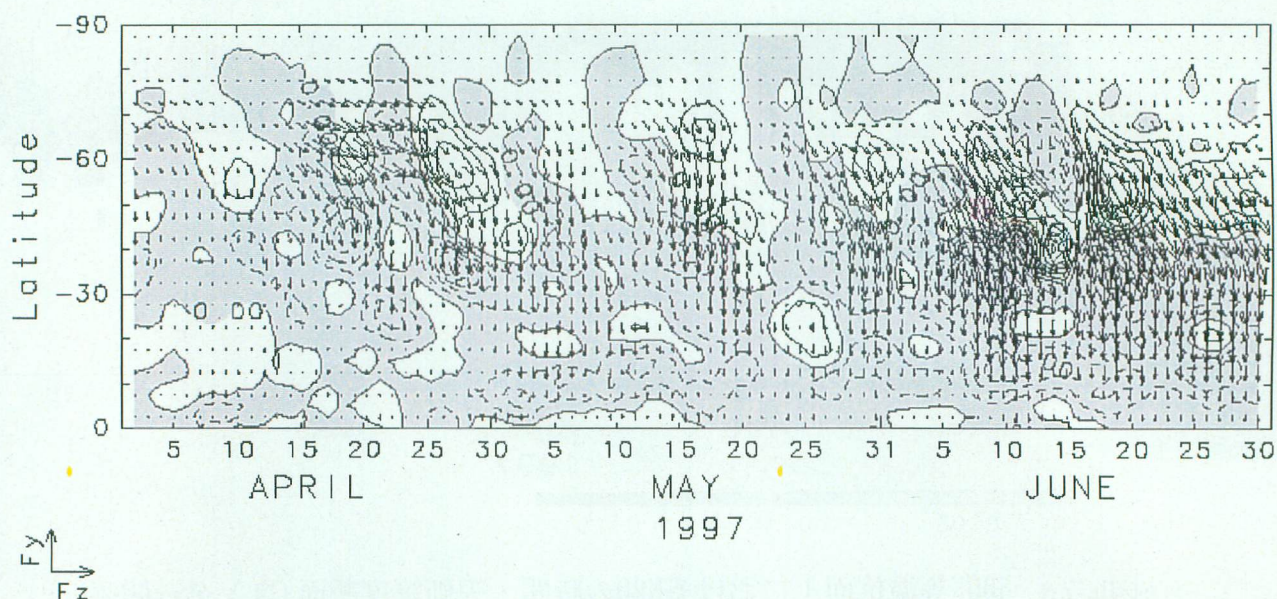


図6.4: 10 hPa におけるE-Pフラックス (F_y , F_z) とその発散の時間・緯度断面図 (コンター間隔 0.5 m/s^2). F_y の単位長は $3.0 \times 10^6 \text{ kg/s}^2$. F_z は 125 のファクターをかけてある.

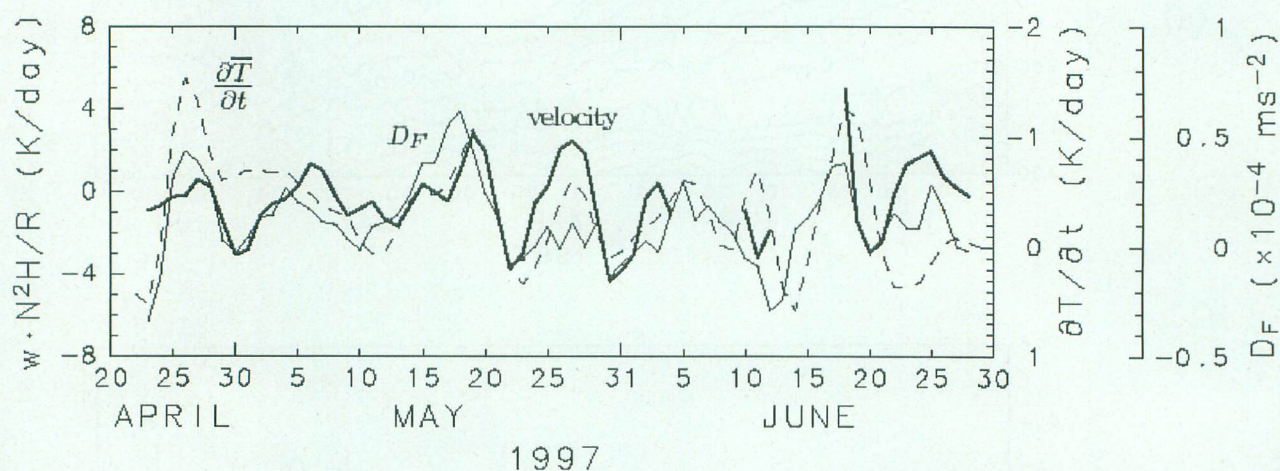


図6.5: N_2O (0.1 ppmv ; $600-500 \text{ K}$) で見積もった鉛直流 (太実線), 10 hPa, 70S におけるDF (細実線), 46.4 hPa , 70S-90S平均の dT/dt (破線) の時系列. 比較しやすいように dT/dt のみ縦軸の上下が逆になっている. すべて3日の移動平均をかけてある.

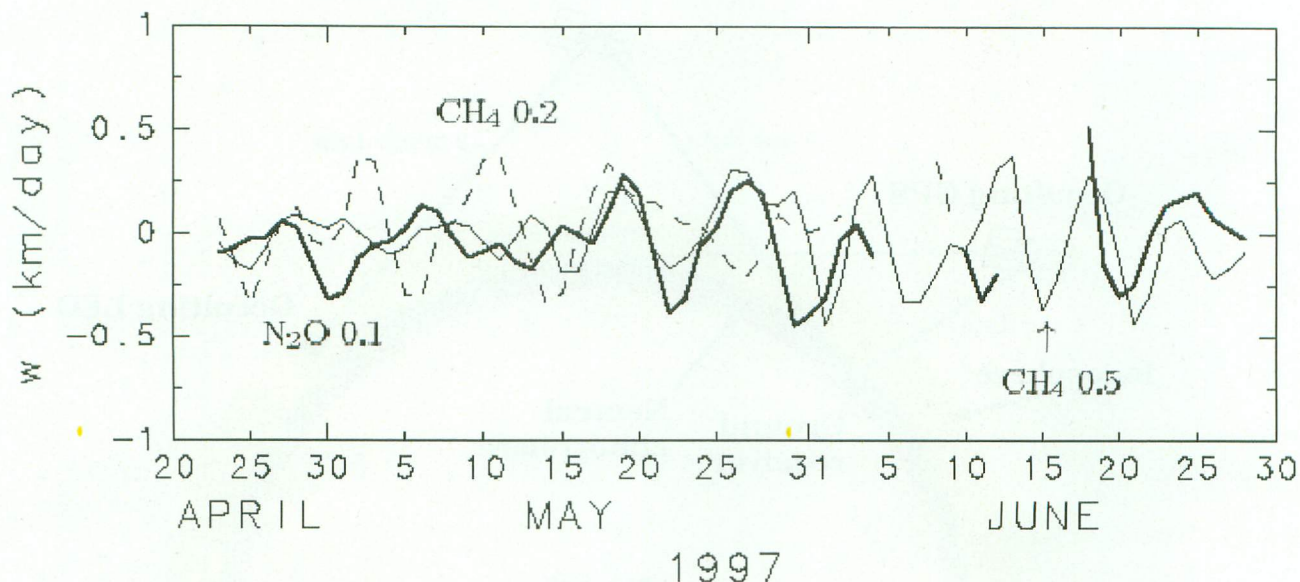


図6.6： N2Oの 0.1 ppmv 等値線で見積もった鉛直流 (太実線)，CH4の0.5 ppmv と0.2ppmvで見積もった鉛直流 (細実線と細破線)，

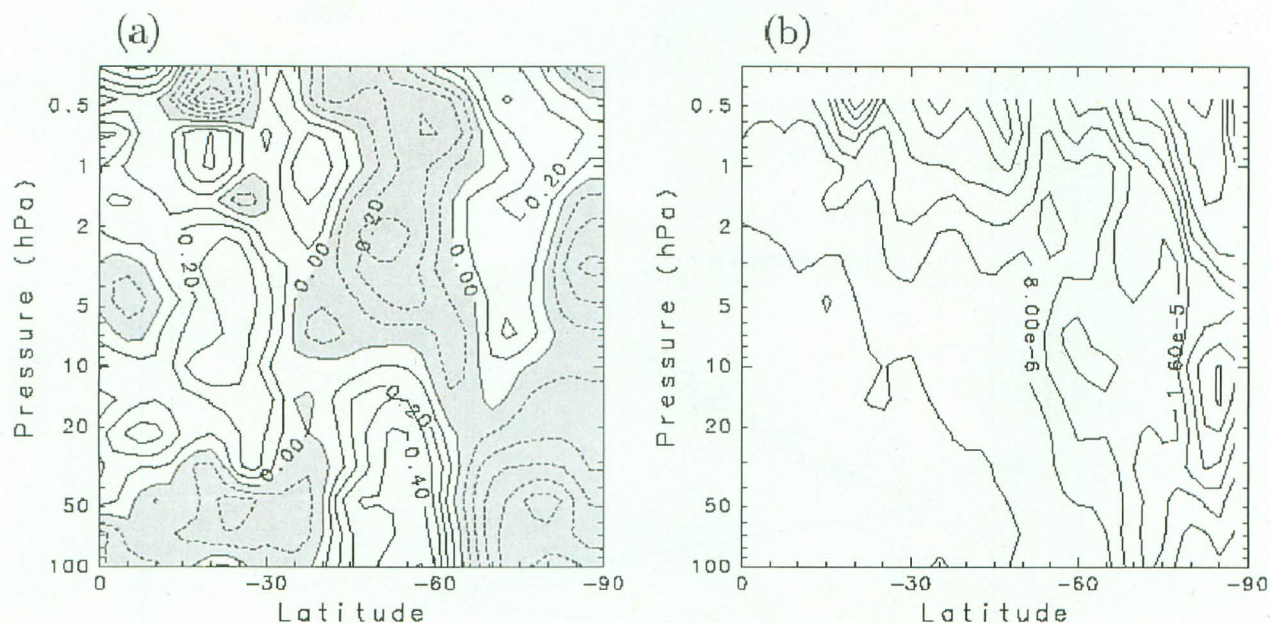


図6.7： (a) 1997年4月20日から6月5日の期間について，N2O の 0.1 ppmv 等値線で見積もった鉛直流とそれぞれの緯度・高度での温度変化 (dT/dt) との相関係数を示した図 (コンター間隔 0.1, 負の値に影を付けてある). (b) 同じ期間，5-15日周期成分のDFの振幅 (コンター間隔 4×10^{-6} m/s²).

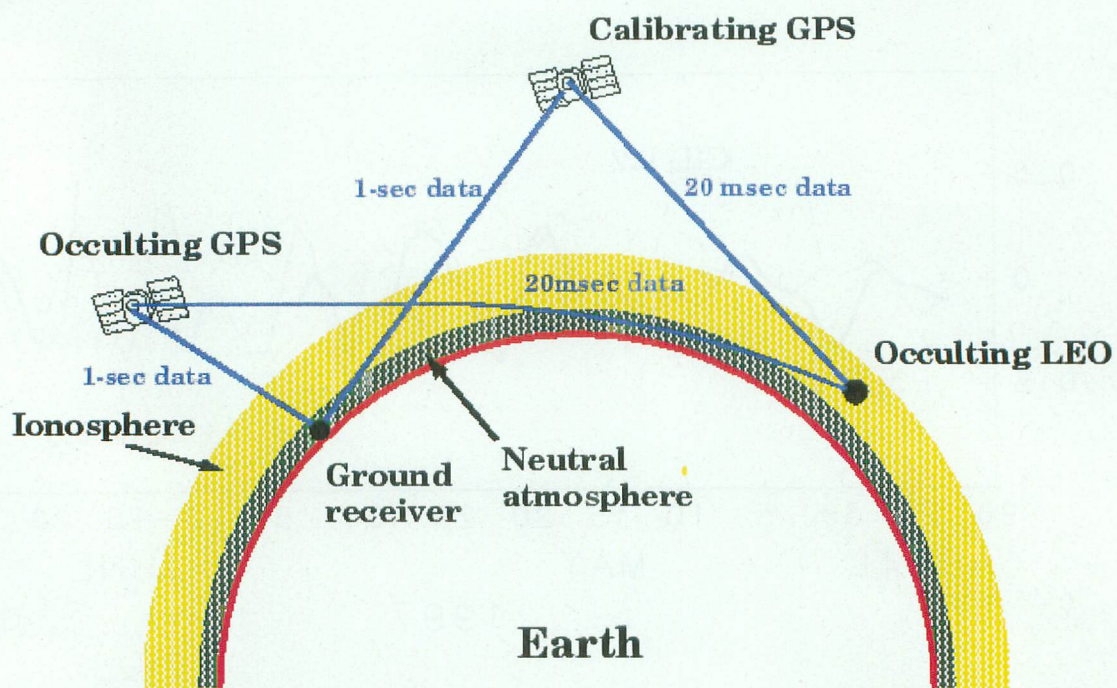


図7.1 : GPS掩蔽観測の原理。低高度衛星 (LEO) に搭載したGPS受信機によりGPS衛星からの電波を検出する。

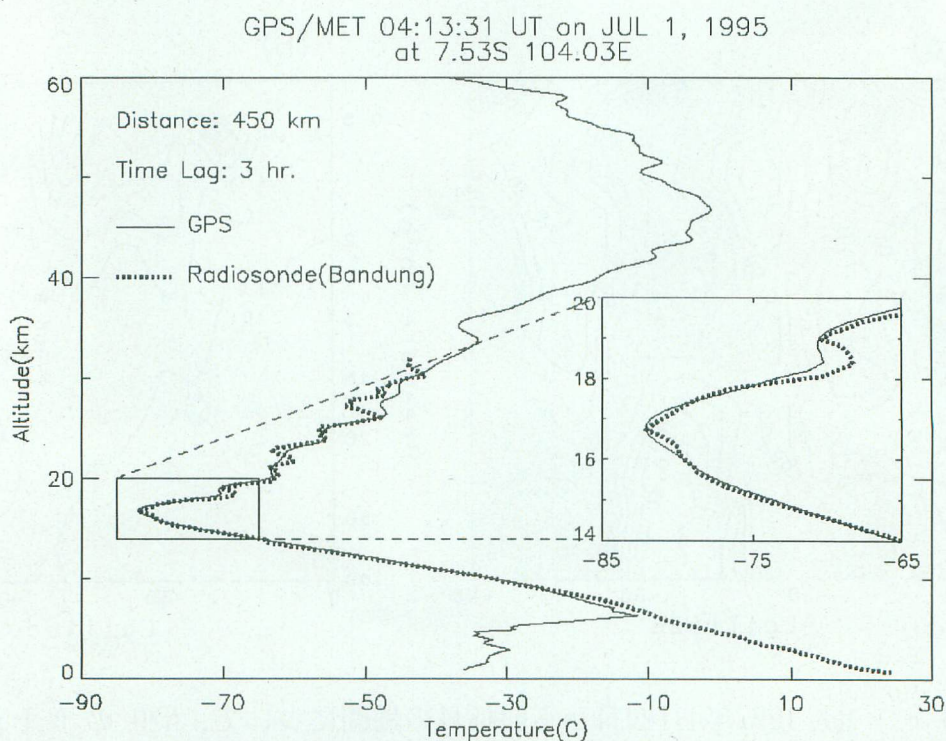


図7.2 : GPS掩蔽観測による気温高度分布の導出例。同期したラジオゾンデの観測は高度30kmまで太い実線で示されている。

Temperature Profiles during May 28 – June 3, 2001 observed by CHAMP

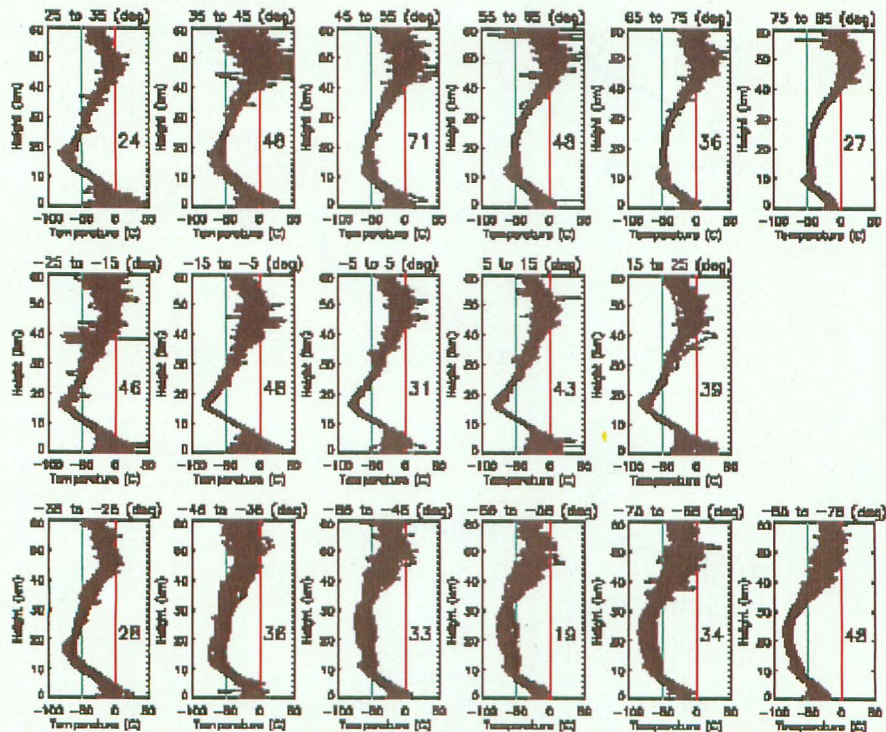


図7.3：CHAMP衛星により測定された気温高度分布の統計処理例。5度の緯度ビン毎の観測数が各パネルに示されている。

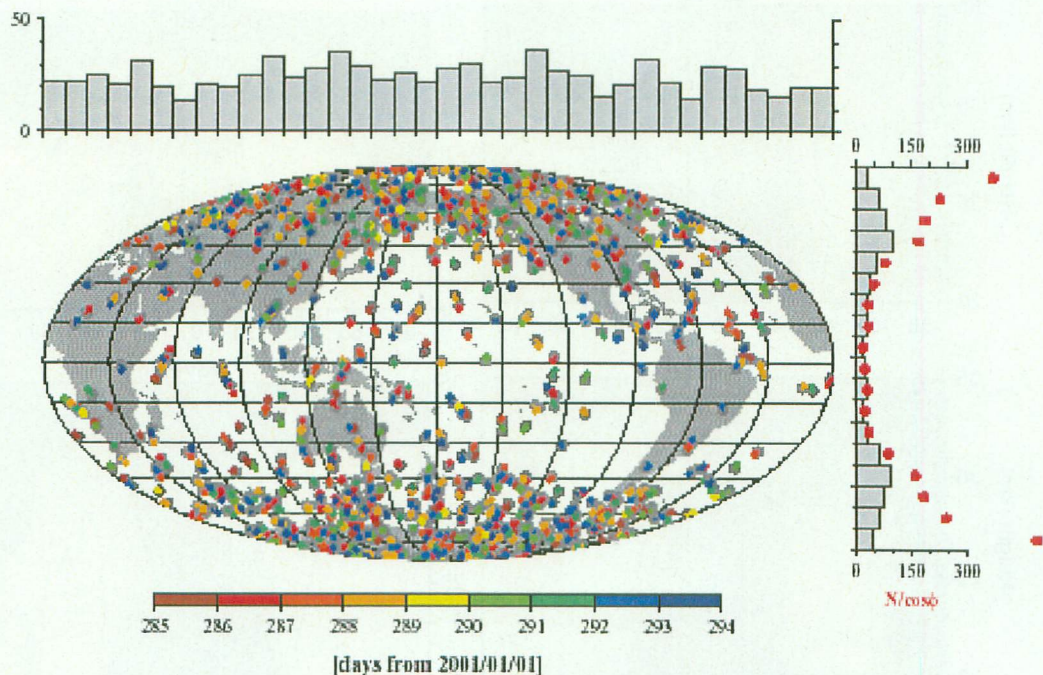


図7.4：CHAMP衛星により測定された気温高度分布の地理的位置。右のパネルは各緯度ビン（10度）毎の測定数。上のパネルは各経度ビン（10度）毎の測定数。

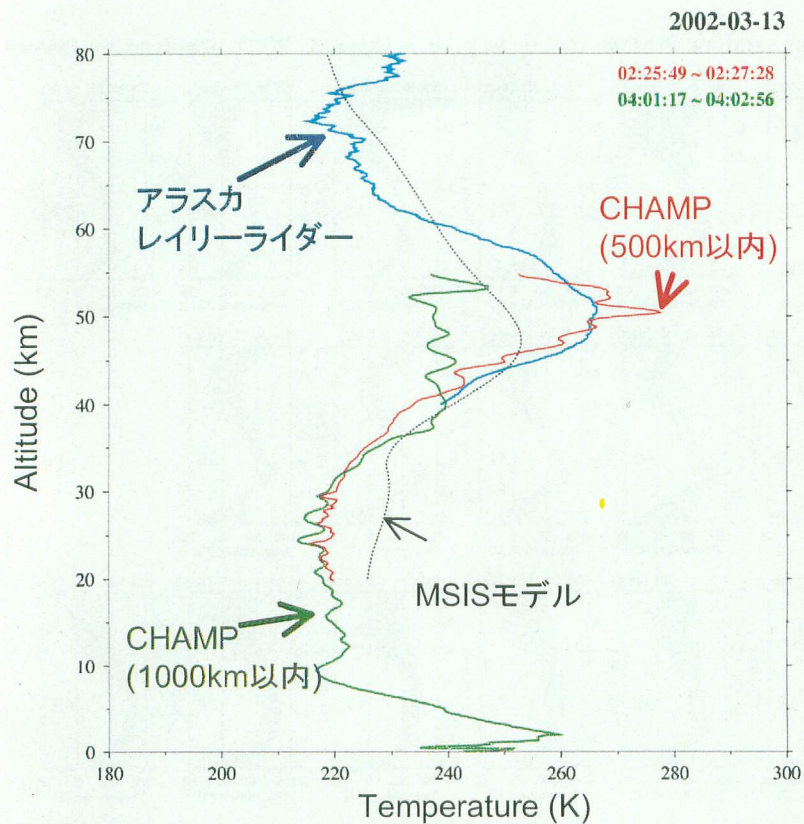


図7.5：CHAMP衛星により測定された気温高度分布とレイリーライダーによる気温高度分布の比較。

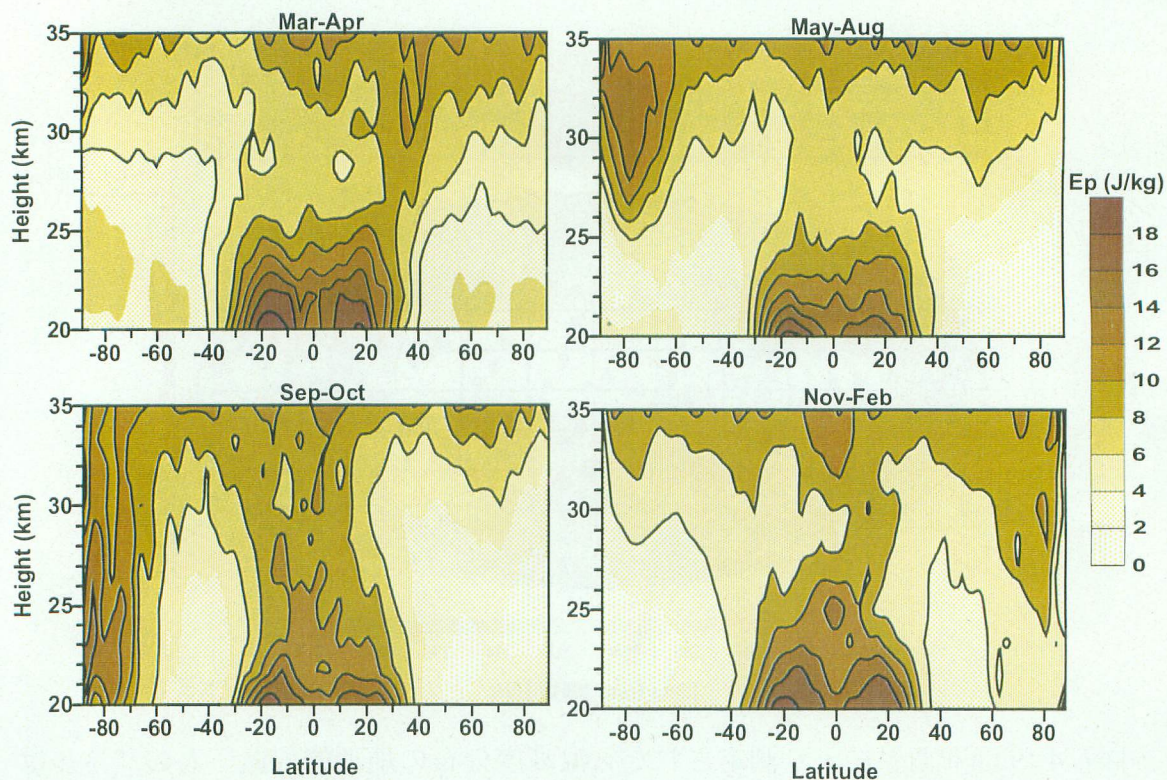


図7.6：CHAMPによる観測から得られた大気重力波のエネルギーの季節分布。2001年5月から2003年8月までのデータを利用。