

A-1 オゾン層の回復を妨げる要因の解明に関する研究

(1) 塩素負荷と極渦活動度の変化によるオゾン層破壊の変化とその検出に関する研究

独立行政法人国立環境研究所

大気圏環境研究領域 上席研究官 中根英昭
遠隔計測研究室 杉本伸夫・松井一郎

成層圏オゾン層変動研究プロジェクト

オゾン層モデリング研究チーム 秋吉英治

東北大学大学院理学研究科 福西浩・村田功

東京大学先端科学技術研究センター 近藤豊

名古屋大学太陽地球環境研究所 松見豊

平成 11～13 年度合計予算額 1 5 6, 4 1 3 千円
(うち、平成 13 年度予算額 4 8, 3 2 5 千円)

[要旨] 冬から春にかけての極域オゾン破壊(オゾンホール)の程度を支配する、極渦の強さ、成層圏塩素量とその化学的形態について検討した。その結果、以下の結果が得られた。①1958年～2000年の6時間毎のNCEP/NCAR再解析データ(三次元気象データ)の解析により、過去約40年間の南北両極の極渦強度は共に増大しているが、極渦半径は、北半球では増大、南半球では縮小していることを見出した。②1999/2000年の冬から春にかけて、欧州オゾン層プロジェクト Third European Stratospheric Experiment on Ozone (THESEO 2000)の一環として行われた MATCH(極渦内の同一気塊で2度オゾンゾンデ観測を行いオゾン破壊速度を求める集中観測実験)に参加し、高度20km付近で70%のオゾン破壊があったことを明らかにする一翼を担った。③光化学ボックスモデルを用いて北半球極渦内のオゾン破壊についてシミュレーションを行い、1995/1996年の冬・春季のヤクーツク等のオゾンゾンデ観測結果と比較した。その結果、極渦内部及び極渦の縁で同程度のオゾン破壊が起こっていたこと、3月半ばの極渦分裂以前はシミュレーションと観測結果の一致が良いこと、巨大NATの影響は1、2月には顕著でなく3月になって大きくなること等を見いだした。④極渦内のオゾン層破壊における塩素化合物の振る舞いと、極渦の分裂にともなって中緯度に輸送された極渦気塊の化学的性質を明らかにするために、キルナ、陸別及びつくばにおけるFTIR観測データ、陸別におけるミリ波放射計データ、母子里オゾンゾンデデータ、ILAS衛星観測データを用いた解析を行った。その結果、極渦内ではHClがより化学的に活性の高い分子種に変換されていること、中緯度、について、2001年2月に極渦が北海道及び本州を覆った際に、陸別のミリ波放射計によって高度20kmのオゾン混合比の低下を観測すると共に、つくばにおけるFTIR観測によって、HClとオゾンがHFに対して減少したことを見出した。同様の現象は1996年に陸別においても観測されている。また、ILAS衛星観測データ等の解析により、極渦崩壊後約半月後も極渦起源の気塊と中緯度気塊との混合はそれ程多くないことが明らかになった。⑤塩素負荷とオゾン層破壊の関連を明らかにする際に、気球や航空機に搭載したClOセンサーが必要であるため、ClOを測定する気球搭載用の装置の製作と性能試験を行い、開発された気球搭載用

C10 観測装置は十分な感度を有していることを確認した。

[キーワード] 北極域オゾン層破壊、極渦、渦位解析、トレンド、塩素負荷

1. はじめに

1990年代に入って、北半球の極渦の強化、極渦内の気温の低下が著しくなり極域成層圏雲（PSC）が増加したため、極渦内でこれまでにないオゾン層破壊が進んだ。このような極渦内のオゾン層破壊は、主にフロン等の増大による成層圏塩素負荷の増大によるものか、主に極渦の変動によるものを明らかにする必要がある。それは、21世紀に入ると塩素負荷は徐々に減少すると考えられるのに対して、極渦は温室効果ガスの増大によって徐々に強くなると考えられるからである。また、1990年代の強い極渦が自然のゆらぎの中で生じたものか、長期トレンドの一部なのかという問題も重要である。

本研究では、NCEP/NCAR再解析データから得られた39年間の気象データの解析から極渦のトレンドについて検討すると共に、オゾンゾンデデータと数値モデルによるシミュレーションによって、極渦内オゾン破壊に対する塩素負荷と極渦内の低温の寄与について検討した。また、塩素負荷や成層圏気温の観測のために、フーリエ変換赤外分光計（FTIR）によるHCl等の観測を陸別及びつくばで実施すると共に、陸別において成層圏気温のレーザーレーダー観測を実施した。ここでは、極渦の解析とオゾンゾンデデータの解析に絞って報告する。

1990年代に入って、北半球の極渦が強くなり、極渦内の気温の低下が著しくなった。この結果、極域成層圏雲（PSC）が増加したため、北極極渦内でかつてないオゾン層破壊が進んだ。南極においてもオゾンホール面積、最低オゾン濃度、オゾン破壊量が増え続けて来ており、オゾンの回復を確認するに至っていない。このような極渦内のオゾン層破壊は、中緯度にも影響を与えることが分かってきており、21世紀のオゾン層破壊の推移とその影響を予測し対策を立てるに当たって、極渦内オゾン破壊の動態の把握は重要である。極渦内オゾン層破壊には、当然、フロン等を起源とする塩素濃度とその化学的形態が重要であるが、同時に、温暖化の影響を受けつつ変化している極渦の変化も大きな影響を及ぼす。さらに、これらの相互作用が重要である。

2. 研究目的

本研究では、ヤクーツクにおけるオゾンゾンデ観測を行い、THESEO/SOLVE等の国際集中観測におけるオゾンゾンデ組織的観測による極渦内オゾン破壊の定量的評価（MATCH）に貢献すること、1958年からのNCEP/NCAR再解析データを用いて極渦の属性のトレンドと変動を明らかにすること、国内におけるミリ波等によるオゾン観測及びFTIR観測によって、極渦到来時のオゾン及び塩素化合物の変化を把握すること、これらの観測データを解析して、極渦活動度の変化、塩素負荷の役割を明らかにすることである。

3. 北半球極渦のトレンド及び長期・短期変動

(1) 規格化した渦位傾度（NGPV）を用いた極渦変動図の作成

欧州中期気予報センター（ECMWF）や米国環境予測センター／米国大気研究センター（NCEP/NCAR）、

気象庁 (JMA) 等によって作成される天気予報用の三次元気象データ (客観解析データ) を用いて、渦位と呼ばれる物理量 (等温位面上では保存量なので、一種のトレーサーとして扱える) の分布を求め、極渦の可視化を行うことができることを、これまでの研究で明らかにしてきた。本研究では、最近公開された 1958 年から約 40 年間の NCEP/NCAR 再解析データについて同一の手法を適用して可視化し、さらに極渦の特性を表すパラメータを抽出して、そのトレンド及び長期・短期変動について解析した。

極渦内外の境界には、極渦内外の輸送の壁が存在するため渦位の勾配が大きい。従って、渦位を等価緯度で微分し、渦位によって規格化した量 (normalized gradient of potential vorticity; NGPV)、 $s(\phi_p)$ 、

$$s(\phi_p) = (dQ/d\phi_p)/Q \quad (1)$$

によって、その時刻の極渦の境界の位置 (等価緯度) 及び輸送の壁の強さが分かる。NGPV の値は平均すると 90 分の 1 (0.011) となるが、その約 3 倍の値 0.03 以上のところが極渦の縁にあたる。NGPV のピークは北極でも 0.06 以上、南極では 0.07 以上になっていることが多い。そして、 $s(\phi_p)$ のピークの位置 ϕ_p^{\max} が極渦の境界の位置であり、 $(90 - \phi_p^{\max})$ が緯度で表した極渦の半径となる。また、 $s(\phi_p^{\max})$ がその時刻の極渦の強度である。 $s(\phi_p)$ の時間変化を秋から初夏まで図示すると、その冬 (ここでは、晩秋から晩春までの極渦のある期間を「冬」で代表する) の極渦の強さ、大きさ、継続期間、安定性が一目で分かる。これを「極渦変動図」と称した。

(2) 北半球及び南半球の極渦変動

北半球の 1959 年から 2000 年までの 42 年間の極渦変動図を図 1 に示す。なお、ここでは、1958 年の秋から 1959 年の初夏までの期間を「1959 年 (の冬)」で代表する。) 高緯度側と低緯度側が $s(\phi_p)$ の高い部分によって分離され、それが明瞭になる 11 月終わりから 12 月の始め頃が極渦の生成時期である。この後極渦が成長し半径 20 度〜30 度の極渦ができ、3 月〜5 月のある時期に $s(\phi_p)$ の高い部分が消失する。これが最終昇温による極渦の崩壊にあたる。ところが突然昇温のために、1 月や 2 月に $s(\phi_p)$ の高い部分が突然消えて極渦が無くなること、小さくなることもある。1963 年 2 月初旬や 1973 年 2 月、1977 年 1 月、1985 年 1 月に明瞭に見られる。また、1967 年、1972 年、1976 年、1993 年、1997 年などの年には極渦が強くて安定していたことが分かる。1995 年 2 月初旬にも小さいがはっきりした昇温があったが、その後極渦は再び安定化した。1999 年には極渦はきわめて弱かった。2000 年の極渦は 2 月から 3 月始めにかけて非常に強かった。また、3 月中頃の極渦の分裂後も小さな極渦が 4 月後半まで残ったことが分かる。また、1959 年から 2000 年までの 42 年間の北半球の極渦変動図を眺めると、1997 年までは極渦が徐々に強くなっていること、安定化していることが定性的に分かる。

南半球の 1958 年から 1999 年までの 42 年間の極渦変動図を図 2 に示す。極渦の強度、半径、継続期間、安定性のいずれにおいても北半球より大きい。極渦強度は大きくなってきている。注目すべきは、1960 年代と比較しても南半球においては極渦の半径が増加していないことである。また、1960 年代には、極渦生成から極渦消滅までの間、極渦半径が変わっていないが、1990 年代には極渦生成時には半径が小さく、7 月頃に最大になり、その後縮小している。平均半径としては、1990 年代のほうがむしろ小さい。1970 年代、1980 年代はその中間である。

(3) 南北両半球の極渦強度及び極渦半径の長期変化

極渦変動図から各年の極渦の存在期間について、極渦の強度(NGPV 極大値の極渦期間平均値)、極渦半径(極渦半径の極渦期間平均値)を求めた。北半球では、極渦強度は太陽活動が不活発な時期には、ほぼ準二年周期変動に対応した大きな変動を示すため長期変動を把握するのが困難である。そこで、太陽活動が活発な期間を選んで図3にプロットした。435K(高度約17.5km)、

475K(同19km)、550K(同22km)では、極渦は高度が高くなる程強くなる事が分かる。フィッティングした直線の傾きは、435K、475K、550Kでそれぞれ3.6、4.9、 3.6×10^{-4} であり、年率1%近い速度で極渦が強くなっていったことになる。北半球の極渦半径の長期変動を図4にプロットした。極渦半径は、この高度範囲では同程度であった。フィッティングした直線の傾きは、435K、475K、550Kでそれぞれ9.4、7.0、 11×10^{-2} であり、40年間に極渦半径が3-4度大きくなったことになる。但し、1998年から2002年の5年間で極渦が強かった年は2000年のみであり、1990年-1997年までの期間と明らかに極渦の年々変動が異なっている。このため、上に述べた傾向は必ずしも現在も続いているという訳ではない。

南半球の場合には極渦強度は北半球より1960年頃には5割ほど強かったが、高度と共に強くなる点については同じである。北半球と異なり、太陽活動時期によって年々変動が異なる現象は見られない。フィッティングした直線の傾きは、435K、475K、550Kでそれぞれ2.1、1.9、 1.8×10^{-4} であり、北半球極渦より増加速度が小さい。北半球極渦の強度が南半球に近づいてきたことになる。南半球極渦の半径は1960年頃には北半球の極渦より5割以上大きく30度以上あったが、年々縮小している事が分かる。フィッティングした直線の傾きは、435K、475K、550Kでそれぞれ-1.6、-0.68、 -1.1×10^{-1} であり、40年間に3-4度小さくなったことになる。

4. 極渦内オゾン破壊速度の決定実験(MATCH)

1999/2000年には、欧州による北極成層圏オゾン集中観測実験であるEU Third European Stratospheric Experiment on Ozone (THESEO 2000)と米国によるNASA SAGE III Ozone Loss and

Validation Experiment (SOLVE)が協力して行われた(SOLVE/THESEO)。MATCH Ozone Loss実験はその一環として、欧州、米国、日本、ロシア、カナダ等の29の観測拠点の参加によって行われた。本研究課題においては、東シベリアヤクーツク及び北海道母子里においてMATCH実験に対応したオゾンゾンデ観測を行った。MATCH実験とは、オゾンゾンデ観測が行われた気塊についてその行方をECMWF等の3次元気象データによって予測し、次のオゾンゾンデ観測拠点上空を通過する際に第二のオゾンゾンデ観測を行うことによって、同一気塊内のオゾン濃度の化学的変化(オゾン破壊)速度を求めることを目的とした集中観測実験である。ドイツのアルフレッド・ウェーゲナー極域・海洋研究所が中心になって1995年からほぼ毎年行われてきたが、この年にはSOLVE/THESEOによる集中観測が行われた点においても、北半球極渦における最大のオゾン破壊が観測された点においても特に重要である。MATCH実験によって得られた各高度のオゾン破壊速度の時間変化を図7に、積算オゾン破壊量の変化を図8に示す。1月に500-550K(約21km付近)で日照時間あたりのオゾン破壊速度がもっとも大きい、1日あたりのオゾン破壊速度は3月の450K(約17.5km)付近で最も大きい。極域においては、3月の日照が1月よりも相当大きいからである。この二つのオゾン破壊領域は非断熱下降の線にほぼ沿っており、同一気塊の可能性が高い。この気塊中で極域成層圏雲(PSC)が最も発達したと考えられる。NASAの成層圏観測

用航空機による観測によって直径 10 μ m 以上の巨大な硝酸三水和物 (NAT) が発見されており、これによって脱硝 (denitrification) が起こったため、ClO と NO₂ の反応が抑制され、塩素化合物が活性な ClO の形態を長期間とることができたことによると考えられている。巨大 NAT は確認されていないものの、このような北半球極渦内の脱硝は 1996 年、1997 年にも観測されている。このようなオゾン破壊により、3 月下旬までに 450K の温位高度において 2.8ppm (70%以上) のオゾン破壊のあったことが確認された。ただ、激しいオゾン破壊が起こった高度範囲は 1996 年に比較すると狭く、気柱オゾン破壊量は 100DU (約 25%) であった。

5. 極渦内オゾン破壊のシミュレーションとオゾンゾンデ観測データによる検証

欧州中期予報センター (ECMWF) によって作成された全球気象データの三次元の風と気温を用いたトラジェクトリー光化学ボックスモデルによって 1995 年 12 月 1 日から 1996 年 4 月 31 日の極渦内及び極渦の縁におけるオゾン破壊のシミュレーションを行った。このモデルの特徴は、極渦に伴う下降気流を別途評価せず、ECMWF データに含まれる鉛直風を用いる点にある。すなわち、各等価緯度上に 100 個の粒子を等間隔に配置し、これらの粒子を三次元の風を使って流しつつ光化学ボックスモデルを走らせた。初期条件は 12 月 1 日の UARS/MLS オゾンデータ、SLIMCAT モデルから得た。モデル計算結果をヤクーツク及びスピッツベルゲン島ニオルセンのオゾンゾンデ観測結果と比較した (図 9)。ヤクーツクは極渦の縁に、ニオルセンは極渦内部に位置することが多かった。3 月半ばまでについては、モデルと観測結果は良い一致を示した。3 月半ばには極渦の分裂があり、極域と中緯度の空気の混合があった。観測データは中緯度気塊との混合を反映しているが、光化学ボックスモデルは極渦気塊上で走っているため、モデルはオゾン濃度を過小評価した。極渦の縁では極渦内部よりオゾン濃度は高かったが、これは主に 12 月 1 日における初期濃度の差によるものであり、オゾン破壊速度の絶対値に大きな差はなかった。巨大 NAT の有無についての感度実験を行ったが、その効果は 1 月、2 月には小さかった。

6. 極渦内オゾン破壊が日本を含む極渦外のオゾン層に及ぼす影響に関する観測と解析

(1) 北海道上空で観測された北極極渦内オゾン破壊の影響

① 1972 年と 1996 年の北海道極渦イベントの比較—塩素負荷の違いの影響—

1996 年 4 月中旬から下旬にかけて極渦が北海道上空を通過するとの予報に基づき、国立環境研究所と名古屋大学太陽地球環境研究所は、北海道母子里の名古屋大学太陽地球環境研究所母子里観測所におけるオゾンゾンデ集中観測を行った。また、名古屋大学太陽地球環境研究所は北海道陸別においてフーリエ変換赤外分光計 (FTIR) 観測を行った。この年の極渦内オゾン破壊は、温位高度 475K (約 19km) では 2000 年に次ぐ激しいものであり、北半球極渦内で観測史上最大の気柱全量の減少が見られた。また、MATCH 実験によって脱窒 (Denitrification) が確認されている。

この集中観測において、極渦内で最も顕著なオゾン減少が見られた 1996 年 4 月 23 日に北海道母子里で観測したオゾン鉛直分布と、CFC による成層圏塩素負荷の小さな時期に極渦が上空を通過した 1972 年 4 月 23 日に気象庁が札幌において観測したオゾン鉛直分布を比較すると、1996 年 4 月 23 日には高度 19km 付近で 50%以上オゾンが減少していた。

1996 年 4 月 23 日に見られる下部成層圏のオゾン減少に対する、成層圏塩素負荷の増大と極渦内の低温化による不均一反応の増大の寄与を把握するために、トラジェクトリー上で走る光

化学モデルによる解析を行った。まず、1996年4月23日の母子里及び1972年4月13日の札幌からの後方トラジェクトリーが北極極渦の内部に戻ることを確認した。次に、1996年4月23日の母子里の場合は36個の粒子をECMWFデータを用いて、1972年4月13日の札幌からは9個の粒子をNCEP再解析データを用いて、前年の12月1日の北極極渦内に配置して流した。極渦内の非断熱的な下降流については、1996年のケースについてECMWFデータの水平及び鉛直風を用いてトラジェクトリーを流した結果を極渦内について平均して求めた。1972年についても鉛直風は同じであると仮定した。1996年のケースと1972年のケースの両ケースについて、自然レベルの塩素負荷(0.8ppbv)、1972年の塩素負荷(1.34ppbv)、1996年の塩素負荷(3.35)を仮定して計算を行った。12月1日におけるオゾンの初期濃度は3.6ppmvとした。気塊が北海道上空に到着した時のオゾン混合比の計算値は1996年4月23日では1.6ppmv、1972年4月13日では3.1ppmvで、これらは観測データの1.5ppmv及び3.3ppmvと良く一致している。

オゾン減少量について計算結果をまとめたものが表1である。1996年は1972年よりもオゾン減少が1.5ppmv多い。塩素負荷が1972年レベルの1.34ppmvの場合、極渦内の気温が1996年程低くともオゾン破壊は0.2ppb増加するだけである。他方、塩素負荷が1996年レベルの3.35ppbvの場合にはオゾン破壊は0.8ppbv増加する。すなわち塩素負荷の違いの方がオゾン破壊への寄与が大きい。しかし、塩素負荷の高い状況では気温低下も相当の影響を及ぼす。

表1. 前年12月1日から4月の極渦イベントまでの光化学的オゾン破壊 (ppmv)

塩素負荷(ppbv)	0.8(nat.)	1.34(1972)	3.35(1996)
1972年4月13日	0.35	0.5	1.3
1996年4月23日	0.35	0.7	2.0

(12月1日におけるオゾンの初期濃度; 3.6ppmv)

②北海道陸別におけるフーリエ変換赤外分光計 (FTIR) 観測に現れた1996年4月の極渦イベントにおける塩素分子種の活性化

1996年4月中旬から下旬にかけての北海道への極渦の到来の際に、名古屋大学太陽地球環境研究所は通常観測に加え、国立環境研究所からの極渦情報に基づき、北海道陸別において高分解能フーリエ変換赤外分光計 (FTIR) (Bruker社製 IFS120M; 分解能 0.0035cm^{-1}) による集中観測を行った。主な観測対象はオゾン、HCl、硝酸塩素(ClONO₂)、硝酸(HNO₃)、HFの気柱全量である。これらの分子の成層圏濃度は熱帯から極域への大気大循環(子午面循環)のために、冬場に大きく夏場に小さいという季節変動を示す。極域成層圏(PSC)による不均一反応によるオゾン破壊がなければ、極渦内では上記の分子の濃度がきわめて高くなる。従って、極渦内に特有なPSCによるオゾン破壊にともなう塩素化合物等の挙動を解明するためには、このオゾン破壊の過程で濃度の変化しない化合物であるHFの気柱全量との相関図を作成し、通常相関からの偏差を調べると良い。オゾン、HCl、硝酸塩素、硝酸とHFの相関を、図10、図11、図12、図13に示す。極渦が西に傾いていたために高度20km以上が極渦の外にあった4月13日、14日は負偏差がやや小さいが、1996年4月下旬のオゾンの負偏差は明瞭である。これに比較するとHClにも負偏差はあるもののそれ程大きくない。極渦の縁が北海道上空を通ったもののオゾン減少が認められ

なかった2月末の方がHClの負偏差は大きい。オゾン気柱全量の減少はオゾン破壊の積分値であるのに対して、HClの減少はオゾン破壊速度の増大に対応している。4月後半にはオゾン破壊速度は小さくなっているが、オゾン破壊の積分量は最高レベルに達していたと考えられる。硝酸の負偏差が4月後半になっても大きいことは、氷粒子あるいは巨大NATの重力落下による硝酸の除去(脱窒; denitrification)があったことを反映している。このため、ClOと硝酸が分解して生成されるNO₂の反応が抑制され、極渦内でのClONO₂の増加がそれ程大きくならなかったと考えられる。このように、1996年4月後半に北海道を覆った気塊は、北半球としては極めて激しい極渦内オゾン破壊が進行した気塊であったことが判明した。

(2) フーリエ変換赤外分光計 (FTIR) によって観測した2001年2月の極渦到来時のHCl及びオゾンの減少

東北大学と国立環境研究所は、1998年12月よりつくばにおいて高分解能フーリエ変換型赤外分光計(FTIR)を用いオゾンを始めとする大気微量成分の観測を行っている。機種はBruker社IFS120Mで波数分解能は 0.0035cm^{-1} である。この観測装置では2-15 μm という広い赤外領域を観測できるため、O₃, HNO₃, NO, NO₂, ClONO₂, HCl, HF, N₂O, CO, CH₄, C₂H₆, CFCs等、多くの成分の鉛直気柱密度(全量)を求めることが出来る。

2001年2月下旬に日本上空に変形した極渦が到達した。FTIRで多成分を同時観測することにより、各成分の相互比較からオゾン破壊の影響を調べることが出来る。図14に例としてO₃-HF相関を示す。観測される変動には力学的・化学的要因の双方が含まれるが、HFは化学的に非常に安定なため力学的輸送過程のよい指標となる。O₃, HFの相関を取ると、通常の中緯度域では正の相関を示すが、オゾン破壊の影響を受けた気塊を観測すると通常の相関に比べO₃が少なくなる。図14の赤丸で示した2001年2月20-23日の観測結果がちょうどこれにあたる。図15は2月20日と10日目の2月10日の温位475K(高度約19km)における北半球の渦位マップと流跡線解析結果である。赤い×印は観測したつくばの位置を、右図の青色の線は流跡線解析によるつくばで観測した気塊の10日前までの流線を、青い○印は2月10日の気塊の位置を示す。2月20日には極渦が変形して日本上空にまで達しており、またこの日観測した気塊は10日前には極渦中心部あることから、極渦内でのオゾン破壊の影響が日本でも見られたと考えられる。なお、HCl - HF(図16)、HNO₃ - HF相関(図17)ではHClがオゾンと同様に減少しているのに対しHNO₃は通常の相関の範囲内にあり、脱窒の影響は見られなかった。一方、図14の青四角で示した1999年4月等の例では、やはり極渦の一部が日本上空に達したものの、O₃-HF相関は通常の相関の延長線上にあり、特にオゾン破壊の影響は見られなかった。2001年2月の例はつくばでの観測では初めてオゾン破壊の影響を捉えたことになる。2000年3月26日に極渦が分裂して伸びたフィラメントがつくば上空に達したが、図14、図16、図17の全てにおいて極渦内オゾン破壊の影響が現れなかった。2000年には高度17km付近で極渦内オゾン破壊が顕著であったので、オゾン破壊の兆候が見られなかったことは興味深い。フィラメントになっていたことにより、極渦気塊の「厚み」が不十分だったことが一つの可能性として挙げられる。

7. 1997年5月の中部成層圏N₂O分布に表れた極渦崩壊後の極渦内気塊の属性

1997年は北半球の極渦が安定なため南極オゾンホールに類似したオゾン破壊のあった年であ

るが、極渦の崩壊は5月半ばに起こった。この年、東京大学巻出義紘教授、東北大学中沢高清教授、青木周司助教授らのグループによって5月30日に三陸で行われた大気球実験において、高度22kmと26km付近で、CFC類及びメタン、N₂O、CO₂がいずれも著しく低い値を示した。トラジェクトリー解析によって、低濃度をもたらした気塊は崩壊前の極渦内に起源を持つものであることが明らかになった。極渦内の気塊がどの程度属性を保持して日本上空にたどり着いたのか、すなわちどの程度拡散の影響を受けたのかを明らかにするために、ILASデータとトラジェクトリーを用いたReverse Domain Filling (RDF) 解析を組み合わせた解析を行った。

渦位分布図は全球的に得られるが、2.5° × 2.5° メッシュのグリッドでは極渦のフィラメント等の微細構造を表現できない。更に、極渦を取り巻くジェット気流が弱くなると渦位も小さくなってしまう。極渦崩壊前は、等温位面上ではN₂Oと渦位が良い逆相関を示すが、極渦崩壊後はN₂Oと渦位の相関は良くない。そこで、極渦崩壊前に、N₂Oと渦位の相関を用いて渦位分布をN₂O分布に変換して「N₂O分布図(図19)」を得ておく。このN₂O分布が化学変化や拡散の影響を受けずに輸送されると後日にどのようなN₂O分布になるのかを調べるためにReverse Domain Filling (RDF) を用いることができる。RDFとは必要な分解能のグリッド上から後方流跡線を流し、必要な時間遡った時点で、全流跡線上の点における値(渦位、N₂O等)を補完によって得てその値を後方流跡線の開始点のグリッド上の値とする手法である。これは拡散を無視した輸送モデルと見なすこともできる。流跡線を流す日数が長くなるとフィラメント上の構造が細くなるため細かなグリッドが必要となる。本研究では30日近い日数流すため、0.1° × 0.1° メッシュのグリッドを用いた。グリッドが粗いとフィラメントが切れ切れになりノイズが多くなる。極渦崩壊後のN₂O分布を、図19のような極渦崩壊以前のN₂O分布にまで戻すRDFを行うので、結果として得られるN₂Oを「RDF-N₂O」と名付けた。

RDF-N₂Oを検証するために、RDF-N₂OとILAS衛星観測によって得られたN₂O濃度及び三陸大気球観測データと比較した(図20)。良い一致が得られている。特に大気球観測データとの一致の程度が良い。鉛直分布を比較したのが図21である。RDF-N₂Oは大気球観測データを良く再現している。このようなN₂Oの鉛直分布が得られた理由であるが、図22のRDF-N₂O分布図に示すように、660Kと538Kの温位面上では、三陸上空にN₂Oの小さな極渦内部に由来する気塊が来ていたことが分かった。ある程度大きな気塊やフィラメントの場合にはRDF-N₂Oと観測値の一致が良いが、細かなフィラメントに覆われた部分ではRDF-N₂Oをスムージングする方が良い一致が得られる事例もあった。このことは、微細なフィラメント構造は拡散によって鈍らされている可能性がある。しかし、全体としてはRDF-N₂Oと実測値の一致は良く、極渦崩壊時に分裂したそれぞれの気塊は、あまり拡散の影響を受けずに日本付近にまで輸送されていたと思われる。

8. 気球搭載C10直接測定装置の開発

一酸化塩素(C10)は、成層圏の活性な塩素化合物のとして最も重要な化合物であるが、直接測定例が少なく、我が国では例がない。塩素負荷とオゾン層破壊の関連を明らかにする際に、気球や航空機に搭載したC10センサーが必要であるため、本研究ではC10を測定する気球搭載用の装置を製作し、その性能試験を行った。

(1) 装置の概要

この装置では、反応管内で一酸化窒素 (NO) ガスを添加して化学反応により、試料気体に含まれる ClO を Cl 原子に変換する。生じた Cl 原子に真空紫外領域 118.9nm の塩素ランプを照射して、電子励起した Cl 原子を生じさせる。その電子励起 Cl 原子からの共鳴蛍光を真空紫外光電子増倍管にて検出する。気球が低圧かつ低気温の成層圏に到達した時に高電圧関係の部分に予期せぬ放電が起こらないように、塩素ランプおよび光電子増倍管の部分を 1 気圧に保つ圧力容器に収める必要がある。以前に製作した圧力容器はステンレス鋼製なので重量が大きく気球搭載には問題であった。今回、アルミ合金で軽量の圧力容器を製作し、その耐圧試験を行った。耐圧試験は成層圏の低温低圧の大気環境をつくりだすことのできる名古屋大学の気球搭載機器試験装置で行った。その結果、十分な気密度ならびに剛性が得られることを実証した。

(2) 較正

製作した装置の絶対感度をフローリアクターシステムを用いて較正した。このフローリアクターシステムでは、塩素分子 Cl_2 を熱分解して Cl 原子を発生させて、さらに、オゾンガス O_3 を添加することにより、ClO を発生させた。ClO を Cl 原子に変換して測定する際に、Cl 原子の 118.9nm での吸収強度を測定して Cl 原子の絶対濃度の算出を行うことにより絶対感度較正を行った。その結果、製作した装置の ClO 濃度の最低検出限界は 10^5 個/cm³ 以下であった。成層圏での ClO の定常濃度は 10^6 - 10^9 個/cm³ であるので、製作装置が成層圏 ClO を計測するのに十分な性能を有していることを実証した。

(3) 装置の詳細

開発された成層圏 ClO 計測装置の全体図を図 23 に示す。

気球に搭載する装置のコンピューター制御システムを設計・製作した。これにより塩素ランプにより励起した塩素原子の蛍光を検出する光電子増倍管の信号を処理して蛍光強度を測定したり、真空紫外ランプの強度のモニターを行ったり、ClO を Cl に変換する NO ガスのバルブを ON/OFF する制御信号を出したりする。気球に搭載するために、制御システムは消費電力が小さく、放熱量が小さい必要がある。低電力の 80386 をメインプロセッサとするボードコンピュータを中心に制御システムを製作した。光電子増倍管の光電子パルス出力をディスクリミネータにかけてパルス波高を弁別してデジタルパルスとしてから、コンプリメンタリ信号に変換伝送して途中の RF などの干渉を防いだ。コンプリメンタリ信号を復調して 10MHz までカウントできる高速のプリスケアラで処理した後、コンピュータバスに接続したパルスカウンタで計数する。パルスカウンタは 4 チャンネル設置した。書換え可能なスタティックメモリに格納したプログラムにより装置全体のシーケンス制御を行い、データを不揮発性の書き換え可能なメモ리카ードに蓄積する。さらに RS232C を通して無線により地上にリアルタイムでデータを伝送する。

ClO の観測部に高速で試料空気を流すためのブローワーを設計・製作した。ブローワー本体は自動車のターボチャージャーを流用した。動力源として、ブラシレスの直流モーターを取り付け、ブローワー部とは等速ジョイントを用いてベルトレスの駆動にしている。これを ClO 計測装置の最上部に設置し、装置最下部から試料空気を吸入する。長さ約 100cm で内寸が 5cm 角の気体導入管の中で空気が 5-6m/s の高速で流れるようにし、気体導入管の内壁で ClO が消失するのを防ぐ。このブローワーを実際に取り付けて、気球搭載機器試験装置で成層圏の低温低圧条件下での動作試

験を行った。その結果、十分な気流を得ることができた。

気球搭載 C10 観測装置の電源として、Ni-Cd 電池を使用する。このリチウム電池の充放電特性を測定し十分な電力供給能力があることを検証した。最も電力を消費するのは、試料空気を高速で観測部に流すブローワー部の直流モーターである。このブローワーは気球が成層圏まで到達した時に、作動を開始させ 5-10 時間の計測の間に持続的に回転している必要がある。それに必要な電力を供給できる Ni-Cd 電池をつなげて動作試験を行ったところ、十分な動作時間と回転性能を得ることができた。

以上のように、開発された気球搭載用 C10 観測装置は十分な感度を有していることを確認した。また、アルミ合金を使うことにより軽量コンパクトなものにすることができた。気球搭載のための周辺装置として低電力の装置制御システム部、高速ブローワー部、電池電源部を製作した。

9. まとめ

オゾン層破壊における極渦強度と塩素負荷の寄与を明らかにするために、長期気象データの解析、観測とそのデータ解析、モデルによる評価を通して、極渦強度（特に極渦内の気温）と塩素濃度の役割を定量的に把握することができた。また、1990 年代後半までの約 40 年間に南北両半球の極渦が強くなっていることを明らかにした。また、極渦崩壊後の極域気塊がその属性を保ったまま日本付近まで輸送されることを示した。

[国際共同研究等の状況]

- (1) THESEO (Third European Stratospheric Experiment on Ozone)/SOLVE (NASA SAGE III Ozone Loss and Validation Experiment) におけるオゾンゾンデによる MATCH を用いたオゾン破壊速度の評価に、ロシア中央大気観測所 (CAO) との共同研究による東シベリア Yakutsk のオゾンゾンデ観測により参加。
- (2) NDSC (Network for the Detection of Stratospheric Change) において、つくば、陸別は complementary station として参加している。

[研究成果の発表状況]

- (1) 誌上発表
 - ① N. Taniguchi, K. Takahashi, Y. Matsumi, S. M. Dylewski, J. D. Geiser and P. L. Houston, "Determination of the heat of formation of O₃ using ultraviolet laser-induced fluorescence spectroscopy and two-dimensional product imaging techniques", J. Chem. Phys. **111**, 6350-6355 (1999).
 - ② Schulz, A., et al., Match observations in the Arctic winter 1996/1997: High stratospheric ozone loss rates correlate with low temperatures deep inside the polar vortex, Geophys. Res. Lett., **27**, 205-208 (2000).
 - ③ Kondo, Y., T. Sugita, M. Koike, S.R. Kawa, M.Y. Danilin, J.M. Rodriguez, S. Spreng, K. Gollinger, and F. Arnold, Partitioning of reactive nitrogen in the midlatitude lower stratosphere, J. Geophys. Res., **105**, 1417-1424 (2000).

- ④ Kondo, Y., H. Irie, M. Koike, and G.E. Bodeker, Denitrification and nitrification in the Arctic stratosphere during the winter of 1996-1997, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 337-340 (2000).
- ⑤ Irie, H., M. Koike, Y. Kondo, G.E. Bodeker, M.Y. Danilin, and Y. Sasano, Redistribution of nitric acid in the Arctic lower stratosphere during the winter of 1996-1997, *J. Geophys. Res.*, 106, 23139-23150 (2001).
- ⑥ Schulz, A., et al., Arctic ozone loss in threshold conditions: Match observations in 1997/1998 and 1998/1999, *J. Geophys. Res.*, 106(D7), 7495-7503 (2001).
- ⑦ K. Hitsuda, K. Takahashi, Y. Matsumi, and T. J. Wallington, "Kinetics of the Reactions of $\text{Cl}(^2\text{P}_{1/2})$ and $\text{Cl}(^2\text{P}_{3/2})$ Atoms with C_2H_6 , C_2D_6 , CH_3F , $\text{C}_2\text{H}_5\text{F}$, and CH_3CF_3 at 298K" *J. Phys. Chem.*, **A105**, 5131-5136 (2001).
- ⑧ K. Hitsuda, K. Takahashi, Y. Matsumi, T. J. Wallington, "Kinetics of the Reactions of $\text{Cl}(^2\text{P}_{1/2})$ and $\text{Cl}(^2\text{P}_{3/2})$ Atoms with C_3H_8 , C_3D_8 , $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$, and $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$ at 298K", *Chem. Phys. Lett.*, **346**, 16-22 (2001).
- ⑨ Suorti, T., J. Karhu, R. Kivi, E. Kyro, J. Rosen, N. Kjome, N. Larsen, R. Neuber, V. Khattatov, V. Rudakov, V. Yushkov and H. Nakane, Evolution of the Arctic stratospheric aerosol mixing ratio measured with balloon-borne aerosol backscatter sondes for years 1988-2000, *J. Geophys. Res.*, 106, 20759-20766 (2001).
- ⑩ K. Takahashi, Y. Matsumi, T. J. Wallington, and M. D. Hurley, "Atmospheric chemistry of $\text{CF}_3\text{CFHOCF}_3$: Kinetics of the reaction with Cl atoms and fate of $\text{CF}_3\text{CFO}(\cdot)\text{OCF}_3$ radicals", *Chem. Phys. Lett.*, **352**, 202-208 (2002).
- ⑪ Rex, M., et al., Chemical depletion of Arctic ozone in winter 1999/2000, *J. Geophys. Res.*, in press (2002).
- ⑫ Kopp, G., H. Berg, T. Blumenstock, H. Fischer, F. Hase, G. Hochschild, W. Kouker, I. Langhein, T. Reddmann, R. Ruhnke, U. Raffalski, D. Yashcov, and Y. Kondo, Evolution of chlorine activation and ozone loss over Kiruna during the THESEO 2000-SOLVE campaign retrieved from ground based millimeter wave and infrared observations, *J. Geophys. Res.*, in press (2002).
- ⑬ Zhao, Y., K. Strong, Y. Kondo, M. Koike, Y. Matsumi, H. Irie, C.P. Rinsland, N.B. Jones, K. Suzuki, H. Nakajima, H. Nakane, and I. Murata, Spectroscopic measurements of tropospheric CO , C_2H_6 , C_2H_2 , and HCN in northern Japan, *J. Geophys. Res.*, in press (2002).
- ⑭ Koike, M., Y. Kondo, N. Takegawa, H. Irie, H. Ikeda, F. Lefevre, D.E. Hunton, A. Viggiano, T.M. Miller, G.W. Sachse, B.E. Anderson, D.W. Fahey, R.S. Gao, J. Elkins, and D.F. Hurst, Redistribution of reactive nitrogen in the Arctic lower stratosphere in the 1999-2000 winter, *J. Geophys. Res.*, in press (2002).

(2) 総説・報告書・プロシーディングス等

- ① 村田 功, 宮内 浩志, 福西 浩, 中根 英昭, 趙 永浄, 近藤 豊, つくばにおける

FTIR を用いた大気微量成分観測, 第 9 回大気化学シンポジウム研究集会講演集、p92、名古屋大学太陽地球環境研究所, (1999).

- ② Nakane, H., Long and short term variability in the dynamical attributes of the Arctic polar vortex and its effects on ozone, SPARC newsletter No. 15, 15-16 (2000).
- ③ Kondo, Y., H. Irie, M. Koike, G. Bodeker, Denitrification and nitrification in the Arctic stratosphere, Proceedings of Quadrennial Ozone Symposium, Sapporo 2000, 273-274, 2000.
- ④ Ikeda, H., M. Koike, N. Toriyama, Y. Kondo, D. Fahey, R-S. Gao, Development of an instrument to measure NO₂ from aircraft, Proceedings of Quadrennial Ozone Symposium, Sapporo 2000, 433-434 (2000).
- ⑤ 村田 功、小林 展隆、福西 浩、中根 英昭、つくばにおける FTIR を用いた N₂O, CO 観測、第 10 回大気化学シンポジウム研究集会講演集、p259-260、名古屋大学太陽地球環境研究所(2000).
- ⑥ 福西 浩、村田 功、北極域オゾン減少の日本への影響、食生活科学・文化及び地球環境科学に関する研究助成第 13 巻(平成 9 年度)研究紀要(財団法人アサヒビール学術振興財団)、161-167 (2000).
- ⑦ Shulz, R., Kondo, Y., et al. Chemical ozone loss rates in the arctic stratosphere and their dependence on temperatures as determined with MATCH, Proceedings of Quadrennial Ozone Symposium Sapporo 2000, 103-104 (2000).
- ⑧ Nakane, H., et al., Effects of chlorine loading and Arctic polar vortex behaviors on vertical profiles of ozone in mid-latitude region in Northern Hemisphere, Quadrennial Ozone Symposium Sapporo 2000 (2000).
- ⑨ Blumenstock, T., Hase, F., Fischer, H., Stiller, G., Meier, A., Steen, Ake., Yashcov, D., Kondo, Y. Ground based FTIR measurements of Southern Mid-Latitudes: Results from ground-based measurements and model studies, Proceedings of Quadrennial Ozone Symposium Sapporo 2000, 145-146 (2000).
- ⑩ Nagahama, T., Y. Fukui, H. Nakane and Y. Fujinuma, Ground-based millimeter-wave measurements of stratospheric ozone over Rikubetsu, Japan, Quadrennial Ozone Symposium Sapporo 2000 (2000).
- ⑪ Murata I., H. Fukunishi (Tohoku Univ.), and H. Nakane (NIES), Accuracy of the column amounts of some trace species observed with solar infrared spectroscopy, XIX Quadrennial Ozone Symposium, Sapporo, Japan, July, 2000.
- ⑫ H. Irie, M. Koike, Y. Kondo, and G. E. Bodeker, Redistribution of nitric acid in the Arctic lower stratosphere during the winter of 1996-1997, Proceedings of Quadrennial Ozone Symposium Sapporo 2000, 275-276 (2000).
- ⑬ Hitsuda, K., Toriyama, N., Matsumi, Y., Kondo, Y. High-sensitive in-situ ClO measurement system, Proceedings of Quadrennial Ozone Symposium Sapporo 2000, 433-434 (2000).
- ⑭ Zhao, Y., Kondo, Y., Koike, M., Strong, K., Suzuki, K., Sera, M., Ikegami, Y. Simultaneous measurements of stratospheric species in Japan using ground-based i

nfrared solar spectroscopy, Proceedings of Quadrennial Ozone Symposium Sapporo 2000, 741-742 (2000).

- ⑮ Murata, I., H. Fukunishi, H. Nakane, and V. V. Koshelev, A plan for the ground-based infrared observation of trace species in siberia, Proceedings of the second international workshop on global change: connection to the Arctic, 2001, Bulletin of Research Center for North Eurasia and North Pacific Regions, Hokkaido University, Vol. 1, p15-16 (2001).
- ⑯ 村田 功、小林 展隆、福西 浩、中根 英昭、つくばにおけるフーリエ変換型分光計を用いた対流圏微量成分観測、科学研究費補助金(特定領域研究(A)(1))「対流圏グローバルダイナミクス」研究成果報告書、p161-164 (2001).
- ⑰ 村田 功、小林 展隆、福西 浩、中根 英昭、FTIR 観測によるつくば上空大気微量成分の変動、第 11 回大気化学シンポジウム研究集会講演集、p48-51、名古屋大学太陽地球環境研究所(2001).
- ⑱ 村田 功、小林 展隆、福西 浩、中根 英昭、中島 英彰、SFIT2 を用いた地上赤外分光観測からの大気微量成分高度分布の導出、第 12 回大気化学シンポジウム研究集会講演集、p55-56、名古屋大学太陽地球環境研究所(2002).
- ⑲ 山崎郁夫、中川和道、中根英昭、V. Yushkov、後方流跡線と渦位解析を組み合わせた手法による成層圏オゾンの変動、第 12 回大気化学シンポジウム研究集会講演集、p10-13、名古屋大学太陽地球環境研究所(2002).
- ⑳ 1997 年 5 月三陸大気球および ILAS によって観測された極渦由来気塊の渦位/トラジェクトリー解析、シン・ジャワ、巻出義紘、中根英昭、青木周司、中澤高清、神沢博、笹野泰弘、第 12 回大気化学シンポジウム研究集会講演集、p14-17、名古屋大学太陽地球環境研究所(2002).
- 21 中根英昭、環境問題における大気化学、天気、49、23-28(2002).

(3) 口頭発表

- ① Nakane. H. , A. Kournossenko, A. Lukyanov, H. Akiyoshi (NIES), and M. Ninomiya (GEF) : INTERANNUAL VARIABILITY OF ARCTIC POLAR VORTEX AND ITS EFFECTS ON OZONE, IUGG1999 (1999).
- ② Nakane, H., Present and potential NDSC complementary measurement activities in NIES, 2000 Western Pacific Geophysics Meeting, Tokyo (2000).
- ③ Murata, I., N. Kobayashi, H. Fukunishi and H. Nakane, Accuracy of the column amounts of ozone and some trace species observed with solar infrared spectroscopy, 2000 Western Pacific Geophysics Meeting, Tokyo (2000).
- ④ Nakane, H., Characteristics of short-term and long-term variations of the Arctic polar vortex, invited talk in the First S-RAMP Conference, Sapporo (2000).
- ⑤ Nagahama, T., H. Nakane, Y. Fujinuma, H. Ogawa and Y. Fukui, 2000 Western Pacific Geophysics Meeting, Tokyo (2000).
- ⑥ Jeannette D. Wild, A. J. Miller, H., I. S. McDermid, H. Nakane, A. Parrish, W. Steinbreck

ht and D. Swart, Using NDSC Instruments to Evaluate A Combined Time Series of Ozone Profiles from SBUV and SBUV/2, NDSC 2001 Symposium, Arcachon, France, September, (2001).

- ⑦ Nakane. H., A. Ikeyanov, T. Nagahama, H. Akiyoshi, I. Yamasaki, K. Nakagawa, K. Saigo, N. Furuhashi, J. Kurokawa, and I. Ikeuchi, Variability of Polar Vortex and Its Effects on Ozone, NDSC 2001 Symposium, Arcachon, France, September (2001).
- ⑧ Nagahama. T., H. Nakane, Y. Fujinuma (NIES), H. Ogawa and Y. Fukui, Intercomparison between Vertical Ozone Profile Measurements by Ground-Based millimeter-Wave Radiometer in Rikubetsu and SAGE - II, NDSC 2001 Symposium, Arcachon, France, September (2001).
- ⑨ Murata I., N. Kobayashi, H. Fukunishi (Tohoku Univ.), H. Nakane (NIES), and Y. Zhao (Univ. of Toronto), Accuracy of the column amounts of ozone and some trace species observed with Fourier transform spectrometer, NDSC 2001 Symposium, Arcachon, France, September (2001).

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

2000年10月24日、北海道新聞夕刊にカラー版4分の1面を使って、「極渦に注目」というタイトルで本研究の内容の一部が紹介された。

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

環境省の平成「11、12、13年度オゾン層の監視結果に関する年次報告書」作成のための分科会において、本研究の成果を踏まえて検討を行った。

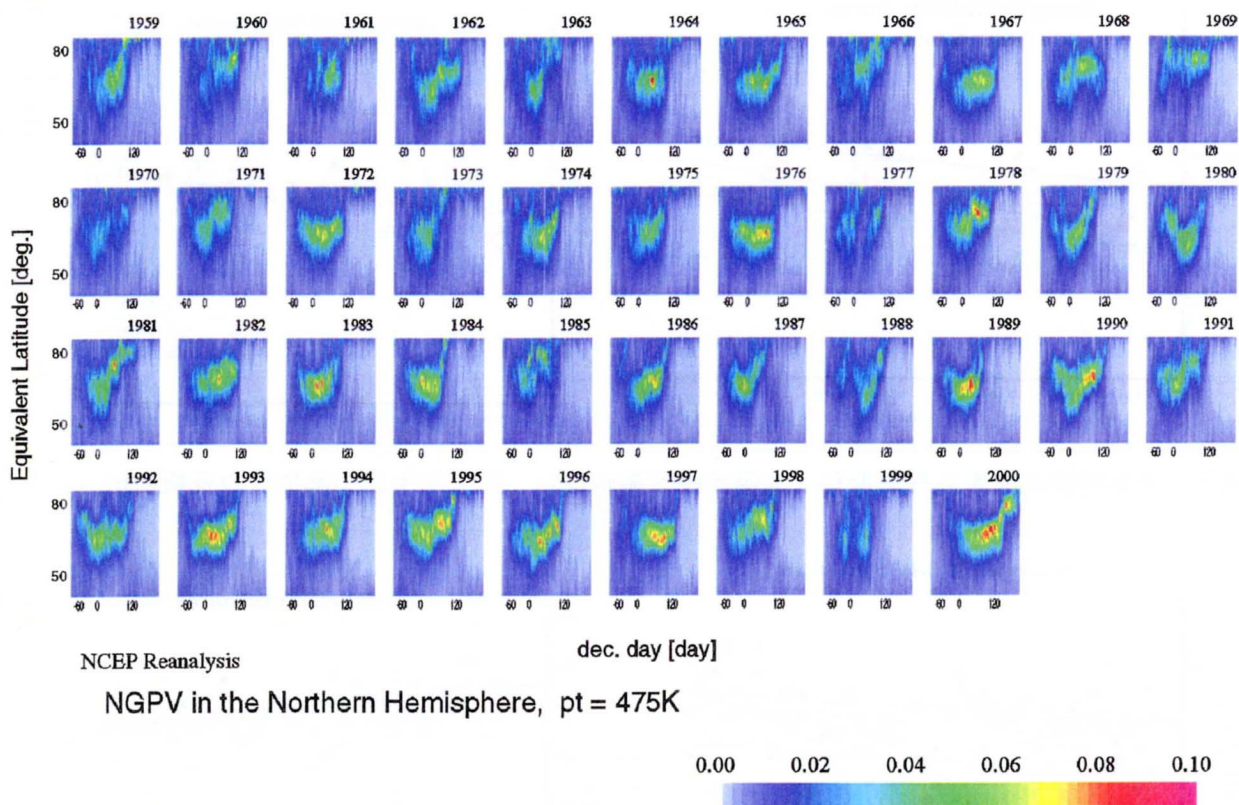


図1 1959年－2000年の北半球極渦変動図。規格化渦位傾度の時間－等価緯度面上マップ。

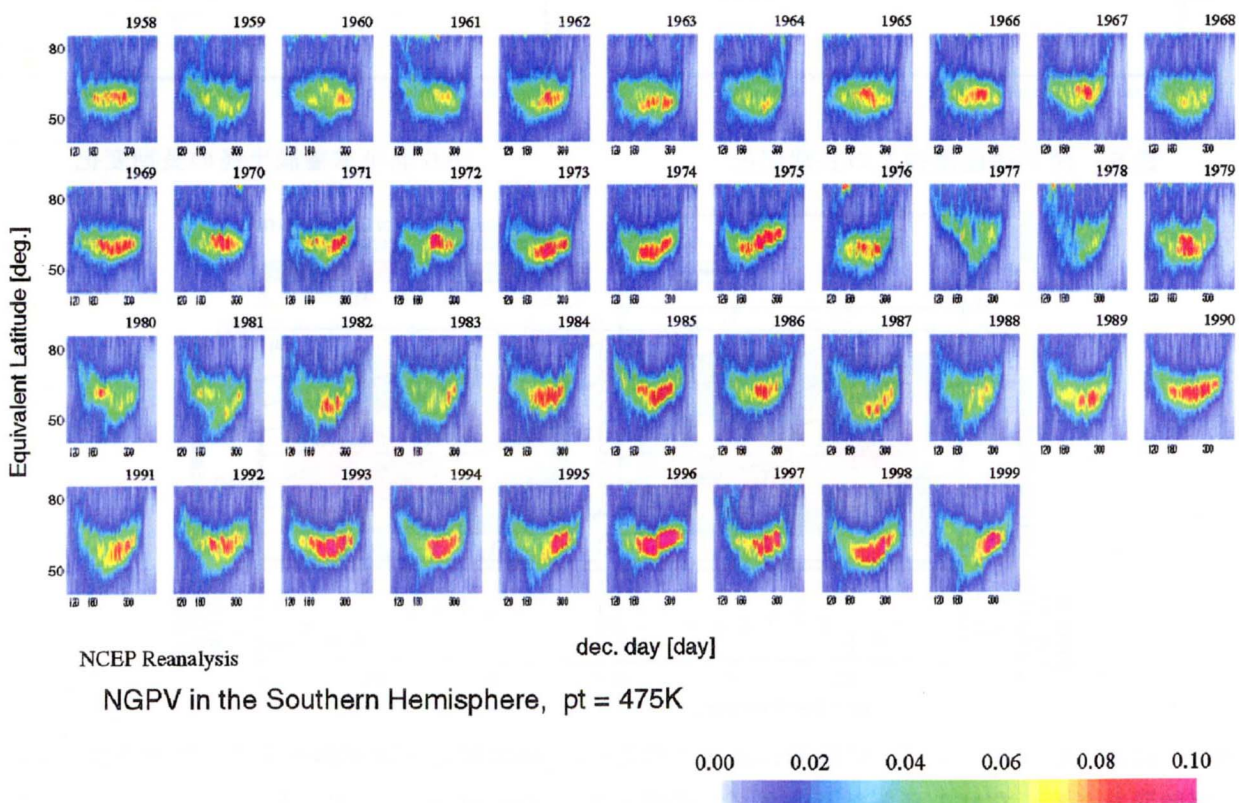


図2 1958年－2000年の南半球極渦変動図。規格化渦位傾度の時間－等価緯度面上マップ。

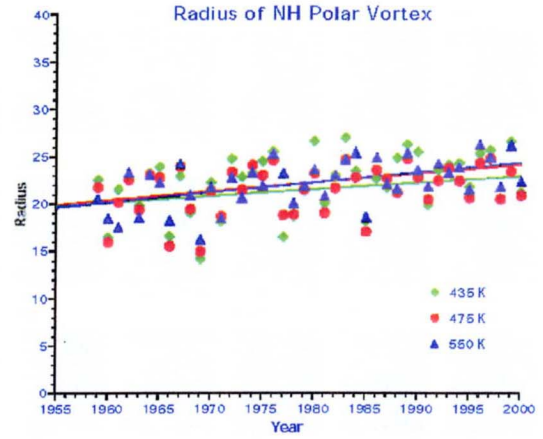
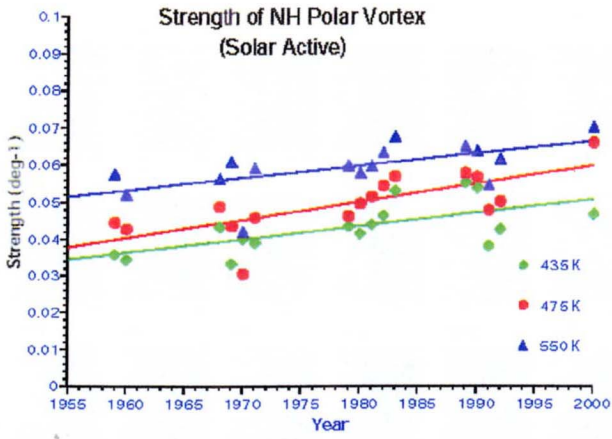


図3 北半球極渦強度の長期変化（太陽活動活発時期）

図4 北半球極渦半径の長期変化

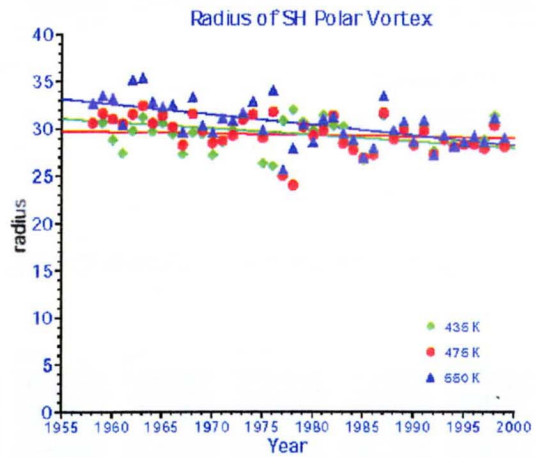
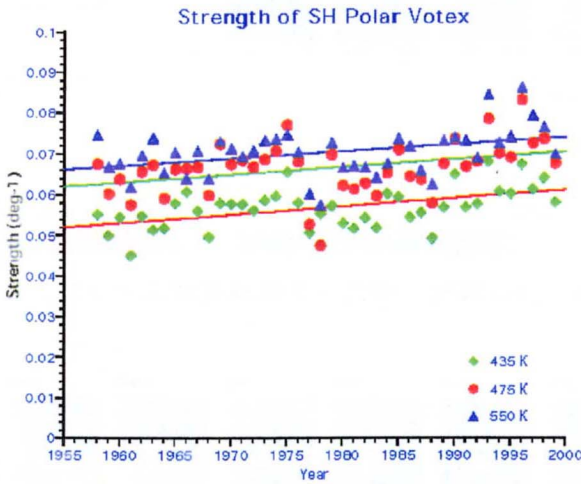


図5 南半球極渦強度の長期変化

図6 南半球極渦半径の長期変化

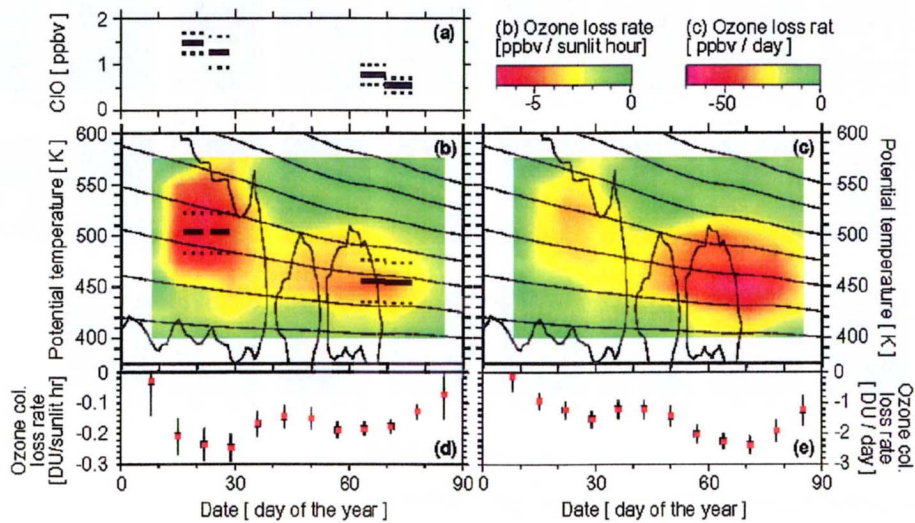


図7 MATCHオゾンゾンデ観測によって得られた2000年北半球極渦内オゾン破壊速度。左は日照時間あたり、右は1日あたりのオゾン破壊速度。[Rex et al., 2002]より。

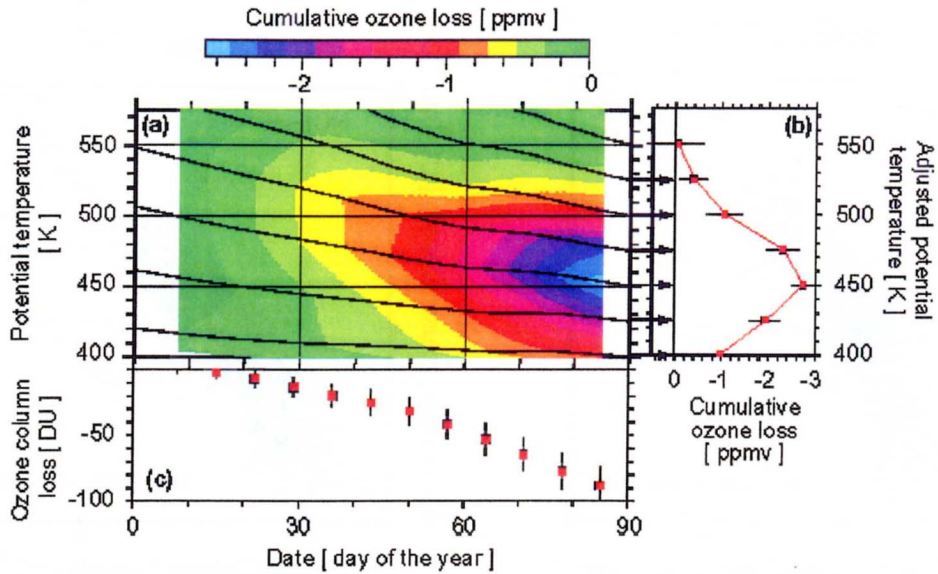


図8 MATCHオゾンゾンデ観測によって得られた2000年北半球極渦内の積算オゾン破壊量。図中の黒い曲線は気塊が時間と共に沈降する線。温位 (potential temperature) 400K は約16km、500K は約20kmの高度に相当する。右の図は2000年3月下旬の積算オゾン破壊量の鉛直分布。450K (18km) において2.8ppm (70%以上) のオゾン破壊があったという結果が得られた。[Rex et al., 2002] より。

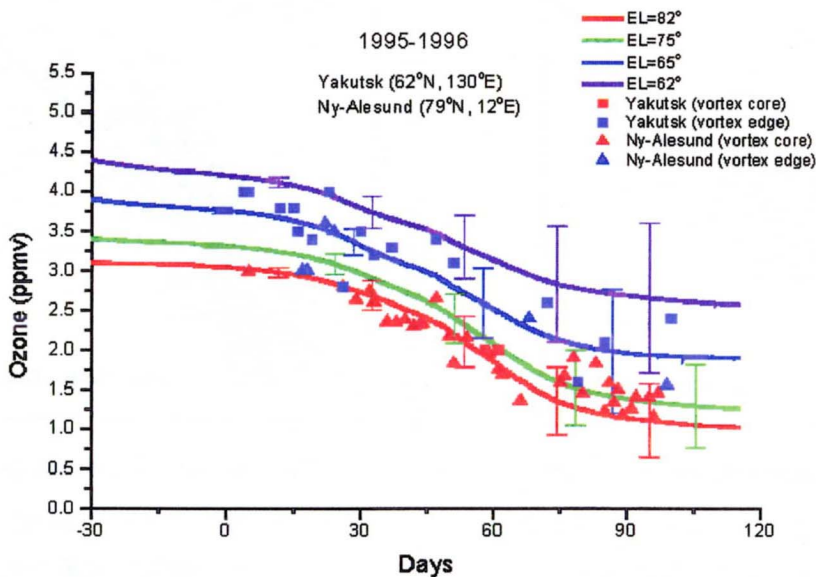


図9 極渦内 (等価緯度 82°、75°)、極渦の縁 (65°、62°) におけるオゾン破壊。実線はモデル計算結果、▲及び■はニオルセン及びヤクーツクにおけるオゾンゾンデ観測結果。

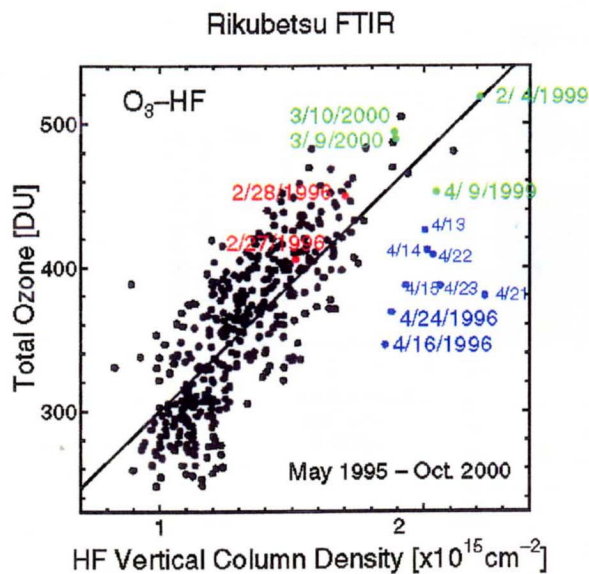


図 1 0 陸別における FTIR 観測から得られた O₃ と HF 気柱全量の相関。1996 年 4 月 13-24 日のオゾンの負の偏差は極渦内オゾン破壊による。

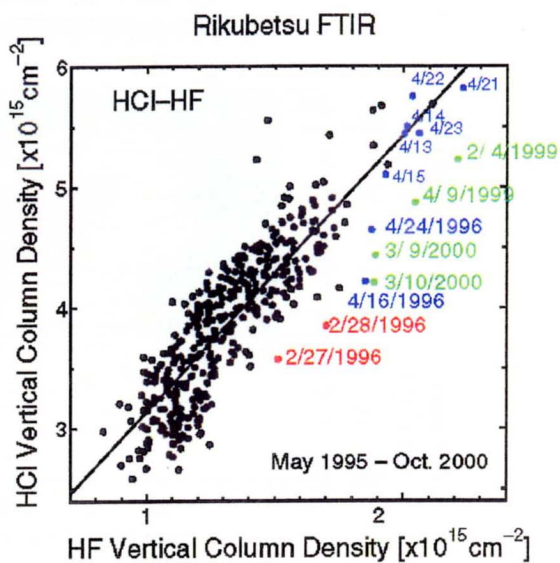


図 1 1 陸別における FTIR 観測から得られた HCl と HF 気柱全量の相関。図 1 0 に対応した HCl の負の偏差は不均一反応の影響を示す。

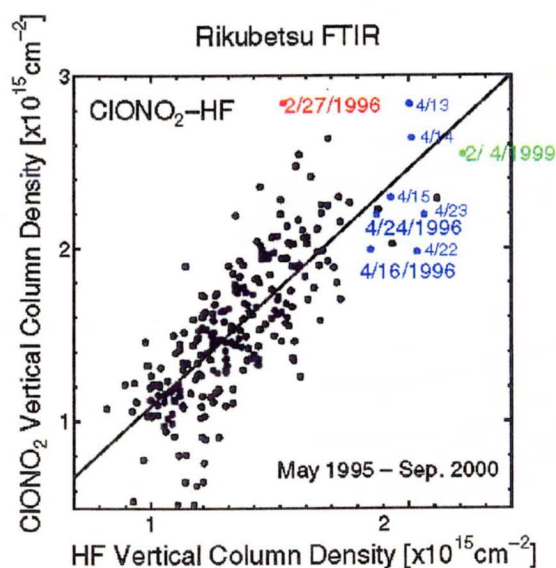


図 1 2 陸別における FTIR 観測から得られた 硝酸塩素と HF 気柱全量の相関。

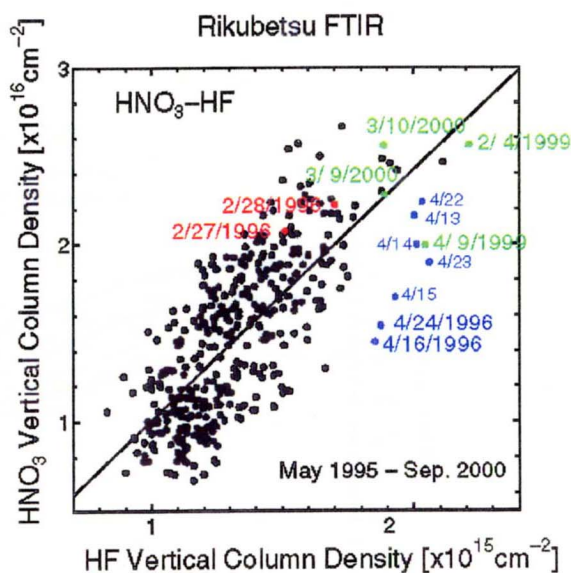


図 1 3 陸別における FTIR 観測から得られた HCl と硝酸気柱全量の相関。硝酸の負偏差が大きい気塊中では、ClO と NO₂ の再結合反応が抑制され、オゾン破壊が継続し易い。

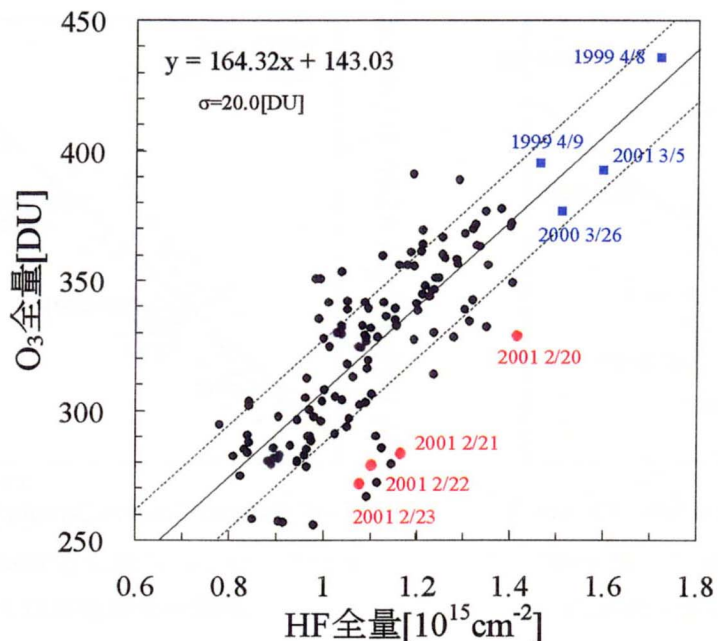


図 14 つくばにおける FTIR 観測から得られた O_3 - HF 全量の相関。2001 年 2 月 20 日頃の極渦通過にともなうオゾン気柱全量の減少が認められる。2000 年 3 月 26 日は極渦から伸びたフィラメントが通過したがオゾンの負偏差は顕著ではなかった。

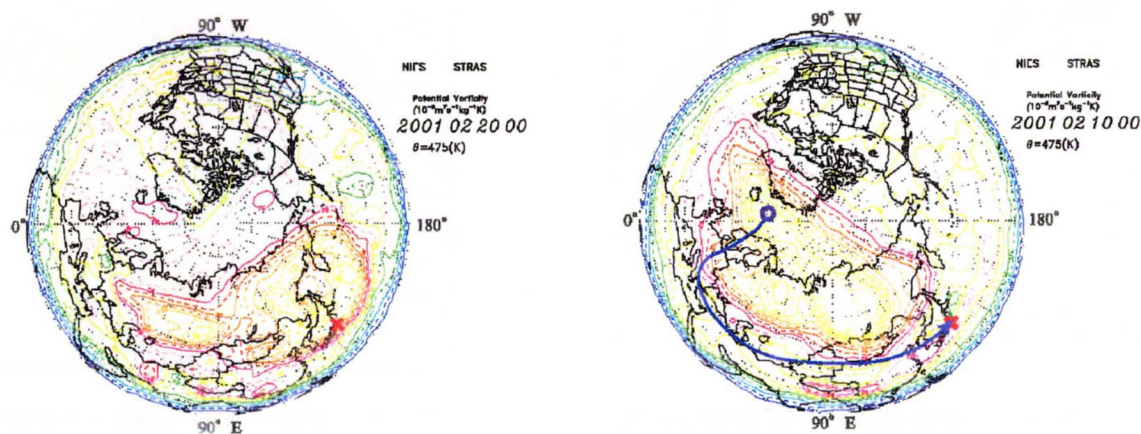


図 15 2001 年 2 月 20 日(左)と 2 月 10 日(右)の温位 475K (高度約 19 km)におけるポテンシャル渦度マップと流跡線解析結果。赤い×印はつくばの位置を、右図の青色の線は流跡線解析によるつくばで観測した気塊の 10 日前までの流線を、青い○印は 2 月 10 日の気塊の位置を示す。なお、右図の流線は 2 月 10 日から 20 日間での 10 日間にわたる気塊の軌跡を示すものであり、2 月 10 日のポテンシャル渦度マップと対応するのは青い○印の位置のみであることに注意。

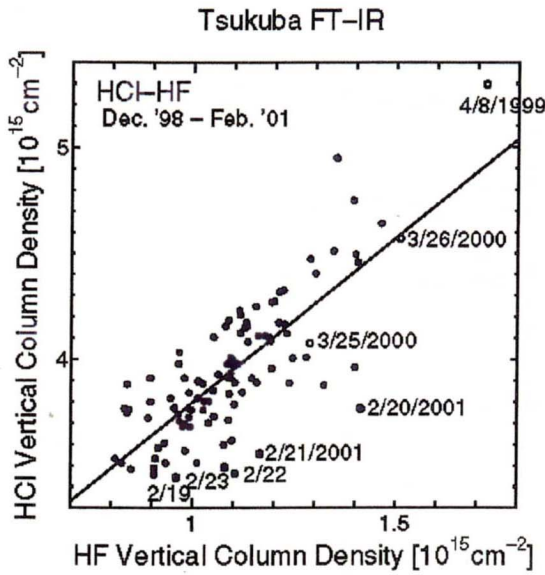


図 16 つくばにおける HCl-HF 相関。
2001 年 2 月 20 日頃の極渦内での
HCl の減少が認められる。

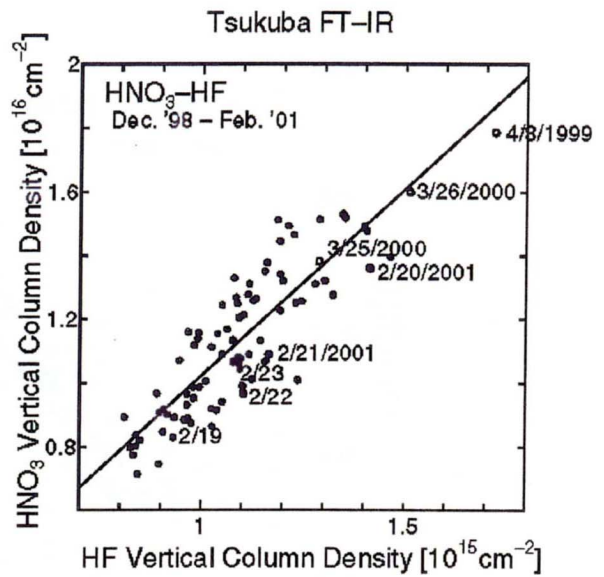


図 17 つくばにおける HNO₃-HF 相関。
硝酸の負偏差はほとんどなく、
極渦内でこの時期までには脱室が
起こっていないことを示している。

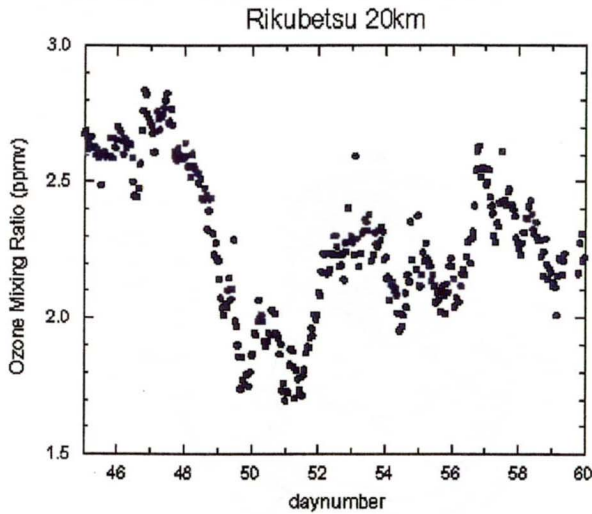


図 18 北海道陸別町立陸別宇宙地球科学館
（「銀河の森天文台」）内の国立環境研究所成
層圏総合観測室に設置されたミリ波放射計によ
って観測された高度 20km (±5km) の 1 時間毎
のオゾン濃度変化。Daynumber 46 が 2 月 15 日
に対応。2 月 19-20 日にオゾンが最も減少した。
このオゾン減少には化学的なオゾン破壊と輸送
の影響の両者が含まれている可能性がある。

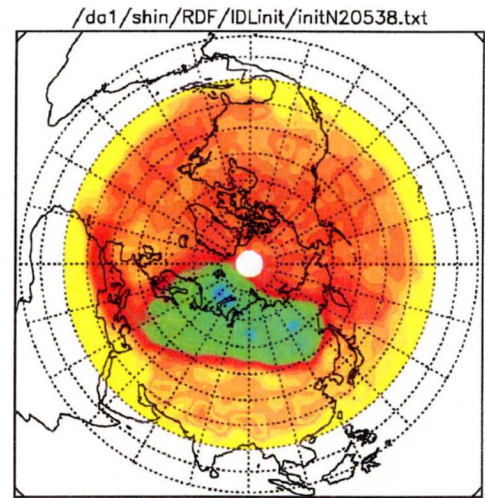


図 19 渦位分布を「渦位-N20 相関」
を用いて変換して得た 1997 年 5 月 4 日
の 538K 温位面上の N20 分布。この N20
分布を基に、後の日時の RDF-N20 を求め
た。

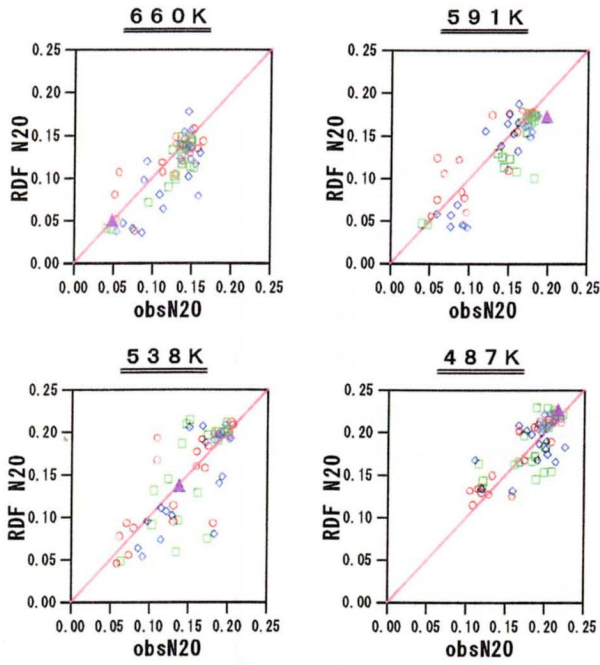


図 20 N₂O 観測データと RDF-N₂O の比較。
▲は三陸大気球データ。他は ILAS データ。

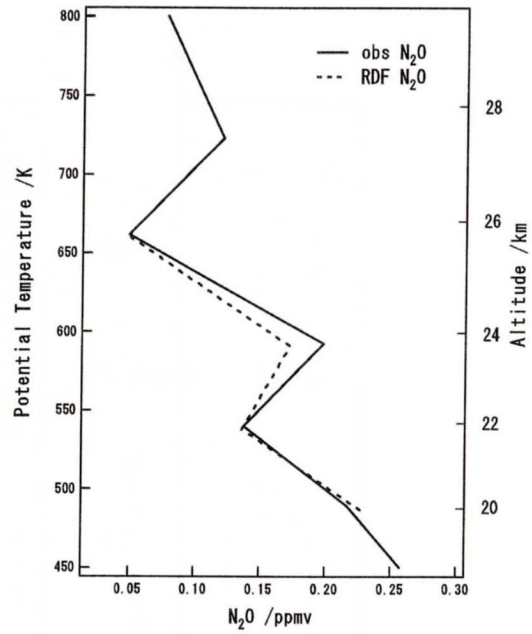


図 21 三陸気球観測所上空の RDF-N₂O (破線) と大気球観測による N₂O (実線) の鉛直分布。
大気球データは東北大学中沢高清教授、青木周司助教授らのグループによる。

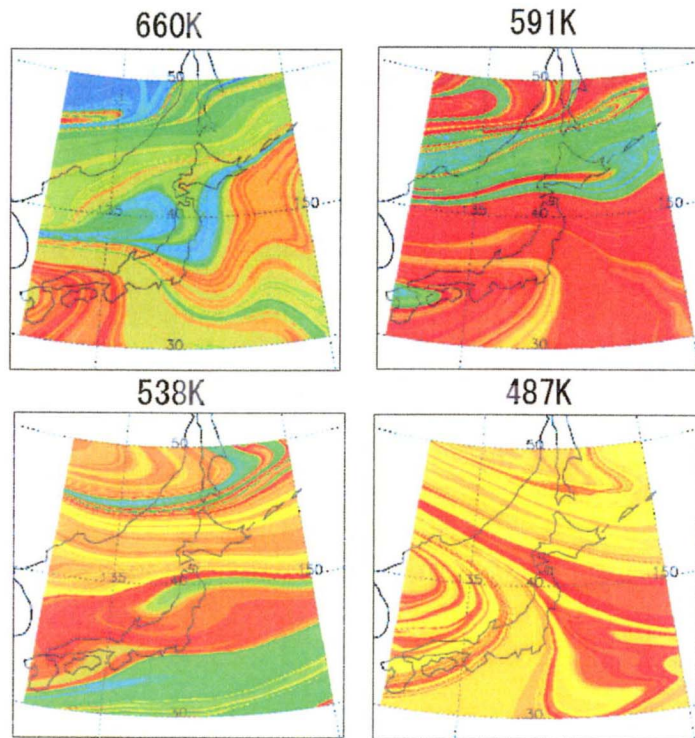


図 22 5月30日の RDF-N₂O 分布図。660K 及び 538K では極渦気塊が三陸上空にある。

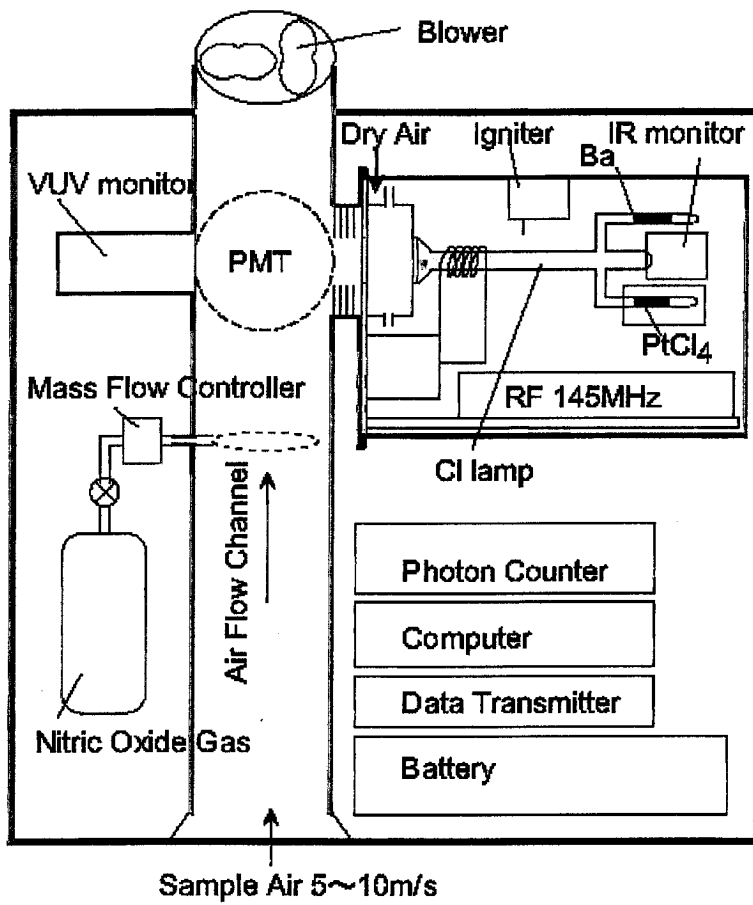


図 2 3 成層圏 C10 計測装置の全体図