

A-1 オゾン層変動の総合的観測及び解析に関する研究

(4) オゾン層変動の解析に関する研究

研究代表者	国立環境研究所	中根 英昭
環境庁 国立環境研究所		
地球環境研究グループ	オゾン層研究チーム	中根 英昭、秋吉 英治
大気圏環境部	大気物理研究室	花崎 秀史
地球環境研究センター		神沢 博
(委託先)	富山高等工業専門学校	川平 浩二
(客員研究員)	名古屋大学	岩坂 泰信
	名古屋大学	近藤 豊
	東北大学	福西 浩

平成5-7年度合計予算額 41,002千円
 (7年度当初予算額 19,333千円)

[要旨] オゾン層の変動機構を解明するためには、①観測的研究、特に集中観測において、観測目的を達成する可能性の高い観測計画の策定、気象データ及びその予報値に基づく観測計画の変更、迅速な解析を行うこと、②長期間のグローバル観測データを解析し、変動傾向や変化しつつある要因を把握すること、③数値モデルにより、解析結果の主要な特徴を再現することによって、変動機構のモデル化を行うことが重要である。本研究においては、①の観点から、第一に、気象庁客観解析データをワークステーションによって迅速に処理し、高層天気図や渦位分布図、トラジェクトリー計算結果を対話的に表示するソフトウェアシステム(STRAS; Stratospheric Research Asisting System)を開発した。第二に、平成6年度に行われた、欧州を中心とした集中観測SESAME(Second European Stratospheric Arctic and Mid-latitude Experiment)に参加し、これによって得られた東シベリアのヤクーツクにおけるエアロゾル、オゾンの気球観測データや国内の観測データをSTRASによって解析した。第三に、平成8年度に実施した本課題におけるサブテーマ横断型集中観測において、欧州中期気象予報センター(ECMWF)のリアルタイム客観解析データを用いた観測計画の実行や変更、予備的な解析を行った。②の観点からは、南北両半球のオゾン変動の力学的要因を、12年間の衛星データを解析することによって明らかにした。③の観点からは、プラネタリー波による外力の働いた極渦崩壊モデルを作成し、極渦崩壊におけるプラネタリー波の効果を調べると共に、更に、数値モデルを三次元に発展させ、その効果を明らかにした。

[キーワード] 北半球のオゾン層破壊、極渦、SESAME、プラネタリー波、突然昇温

1. 序

1980年代にはオゾンの減少トレンドが全球的に明瞭になり、1990年代に入ってオゾン減少速度はますます大きくなっている。1995年初めには北半球中高緯度の極渦中の下部成層圏で、約50%ものオゾンが破壊されていたという例が報告されている。南極のオゾンホールに類似したオゾン層破壊が、北半球の人間が住んでいる地域の上空で起こり始めていることは重大である。このようなオゾン層破壊は、極成層圏雲を含む成層圏エアロゾル表面における不均一反応と極渦の力学の相乗効果によるものと考えられるが、これが温暖化のように、現在進行している大気力学上の変化に関連したものか否かを解明することは、将来のオゾン層破壊を予測し、対策を立てる上で重要である。このような問題へのアプローチの一つは、GCMに光化学モデルを組み込み予測することである。もう一つのアプローチはこれまでの観測データや集中観測によって得られたデータから大気力学的、大気化学的な変化とオゾン層変動の関係を読みとるようなデータ解析研究である。本研究では後者のアプローチを採用し、①観測的研究、特に集中観測の結果の解析のためのソフトウェアシステムの開発と利用、②衛星センサーTOMSの12年間のデータを用いた、南北両半球のオゾン層変動要因の解析、③極渦崩壊の数値モデルによる研究により、南北両半球を比較しつつ北半球に重点をおいて、オゾン層変動の要因を解明してきた。以下、これらの研究成果とA1-(3)①のデータの解析、分野横断的に行われた集中観測の解析結果も含めて報告する。

2. 国立環境研究所の成層圏データ解析システムSTRASS (Stratospheric Research Asisting System) の開発

観測手法の発達や衛星観測の充実、国際的なデータ交換やデータ公開の急速な進展により、オゾン層変動に関する観測研究を行う研究者が、単なるデータ供給者に終わるのか、それとも自らオゾン層変動機構に関してオリジナルな科学的知見を生み出すことができるのかという問題が、より深刻に問われる時代になってきた。研究者や研究支援スタッフの数の飛躍的増大が短期間には望めないとする、ソフトウェアや数値モデルを含むデータ解析システムの充実によって、同一の観測データからのアウトプットをより大きくすることは、極めて有効な問題解決の方向である。データ解析システムの充実の内容としては、次のようなものが考えられる。

- (1) データの入手やフォーマットの変換、データ解析用のソフトウェアツールや表示用のツールの作成から研究者を解放する。
- (2) 高層天気図、極渦の位置や形状に関連する渦位分布図、気塊の輸送経路を表すトラジェクトリー計算結果等の標準的なデータ解析結果が簡単に手に入るようにすることによって、煩わしさのために基本的な解析を省略してしまうことをなくする。
- (3) データ解析に有用な化学輸送モデル等をコミュニティモデル化して研究者に開放すると共に、モデルの出力を観測研究者、データ解析研究者が使えるようにする。
- (4) 気象庁やECMWFの予報値を基にした、渦位や気温、化学輸送モデルの出力をフィールド観測の実行のタイミングの決定に用いることによって、観測の目的を確実に達成する。

これによって、観測研究者によるデータ解析やモデルの利用、モデル研究者による観測データの利用が促され、データ解析を手がける研究者の層が飛躍的に厚くなる。このように、データ解析システムの充実は、日本からデータだけではなく科学的知見を発信できるための不可欠な基盤である。平成5年度～7年度の本研究期間では、国立環境研究所の成層圏データ解析システム、

S T R A S (Stratospheric Research Asisting System) の開発によって、(1)、(2)を実現することができた。また、(3)、(4)については、日英及び日欧研究協力により、集中観測の実施や観測結果の解析に大きな力を発揮してきた。この節では、データ解析システム S T R A S の開発について報告し、後の節において(3)、(4)の成果を含めて報告する。

2. 1 成層圏データ解析システム S T R A S による表示

国立環境研究所では、観測データの比較、トラジェクトリー解析や気象解析を容易に行うために、成層圏データ解析システムを開発してきた(Nakane, et al., 1994)。ワークステーション(Toshiba AS4075; Sun SPARC Station 2 相当)上にメニューシステムで様々なグラフや分布図を描かせるもので、画像ソフトウェアにはPV-WAVEを用いている。トラジェクトリー解析のプログラムはHayashida and Sasano*(1993)、渦位計算コードは田口ら(1991)の大型計算機用のものをワークステーション用に書き換えて作成した。気象データとしては、現在は、気象庁客観解析データを用いているが、E C M W F や N M C データを取り扱えるように改良中である。

S T R A S によるデータ解析及び表示の有用性を、1995年1月～2月の S E S A M E 期間中のデータに基づいて示す。図2.1は高層気象台によるオゾンゾンデによる観測に基づく高度20kmのオゾン濃度変化とE C M W F データに基づく極渦の位置を示したものである。1月23日にはつくばでのオゾン濃度が最低になり、2月2日には高い濃度に戻っていること、1月23日のオゾン濃度は高度14km付近で特に低いことが分かる。この時、極渦は極東方向に強く押しやられ、東シベリアのヤクーツク(62°N, 130°E、図中Yで示す)は極渦内に入っているものの、日本付近は極渦のはるか外にあり、つくば(36°N, 140°E、図中Tで示す)は中緯度の気塊に支配されている可能性が高いことがうかがえる。図2.2には1月23日、図2.3には2月2日の、つくばからの10日間の後方トラジェクトリー計算結果を示す。1月23日の低濃度は、極渦内のオゾン層破壊とは関係がなく、オゾン濃度がもともと低い北アフリカ方面に起源を持つ気塊によるものであること、2月2日には、極渦の縁に近い、オゾン濃度の高い気塊が北方からやってきたことが分かった(Nakane et al., 1995)。

本システムはこの他、衛星データ T O V S によるオゾン全量分布と極渦内のオゾン減少の解析(小竹ら、1996)、衛星データ T O M S と渦位マップによるオゾンホールと力学場の解析(阪本ら、1996)、南極昭和基地上空のオゾンの激しい時間変動の解析(小出ら、1996)等に利用されている他、対流圏の航空機観測データの解析にも利用されている(例えば、Iwasaka et al., 1996)。

2. 2 客観解析データを用いた解析の限界

J M A、E C M W F 等の客観客観解析データを用いた渦位、気温、トラジェクトリー等の解析は、これまでに見てきたように極めて有効であるが、水平分解能や鉛直分解能が不十分なため、小さなスケールの構造や運動を記述できないことがある。このような構造や運動は、気球観測やレーザーレーダー観測においてはしばしば観測され、しかもオゾン層変動にとって重要なものである。その一例を以下に示す。図2.4は東シベリアのヤクーツクにおけるオゾン、エアロゾル、気温の同時気球観測のデータである。エアロゾルとオゾン鉛直分布に微細構造があり、その間に明瞭な逆相関が見られる。高度14.5km付近に見られるオゾン濃度の極めて低い薄い層付近では、図2.5に示されるように、3.6 μ m以上の粒径のエアロゾルがピークを持ち、3.6 μ m以下の粒径のエアロゾル

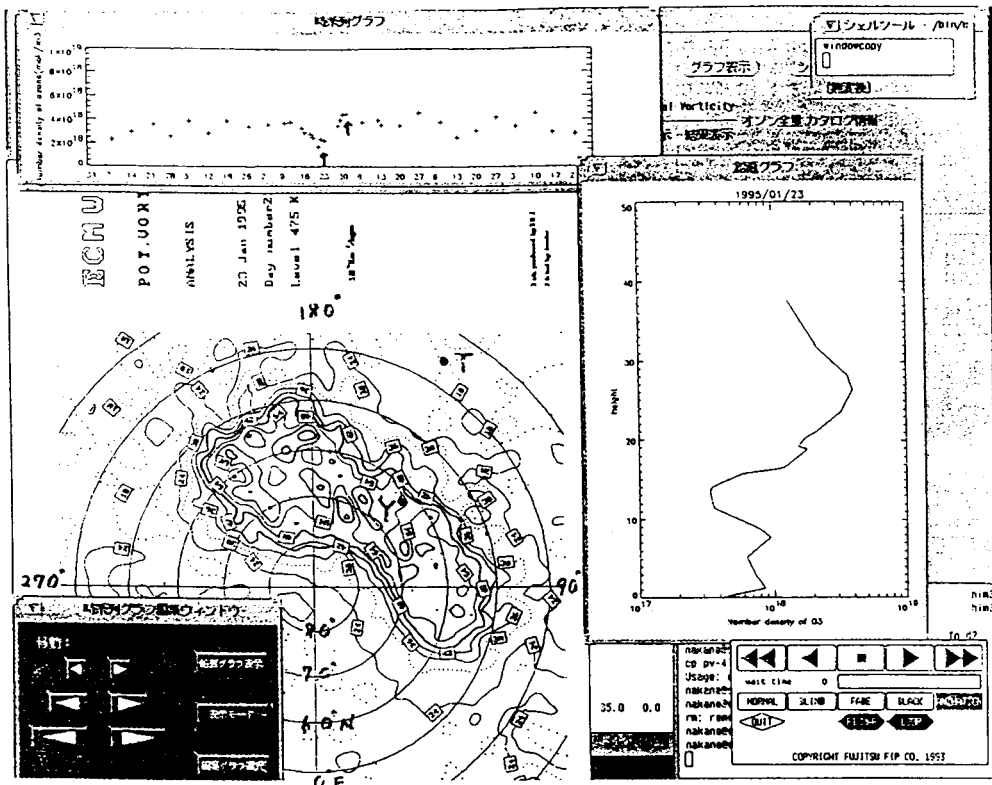


図 2. 1 国立環境研究所の成層圏データ解析システムSTRASの画面の一例。高層気象台によるオゾンゾンデによる観測に基づく高度20kmのオゾン濃度時間変化とECMWFデータに基づく極渦の位置。

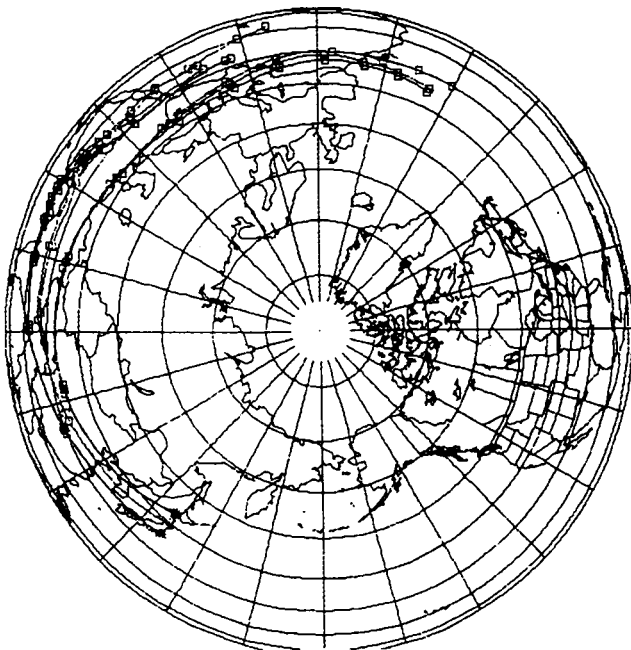


図 2. 2 1995年1月23日の後方トラジェクトリ

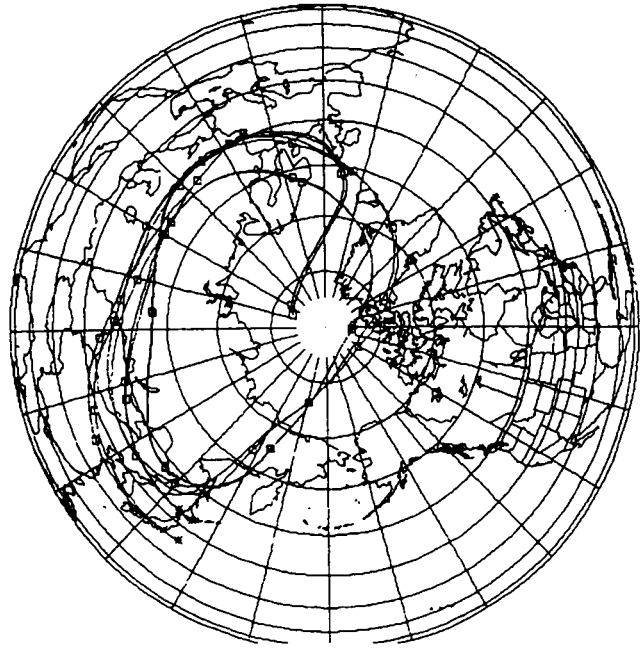


図 2. 3 1995年2月2日の後方トラジェクトリ

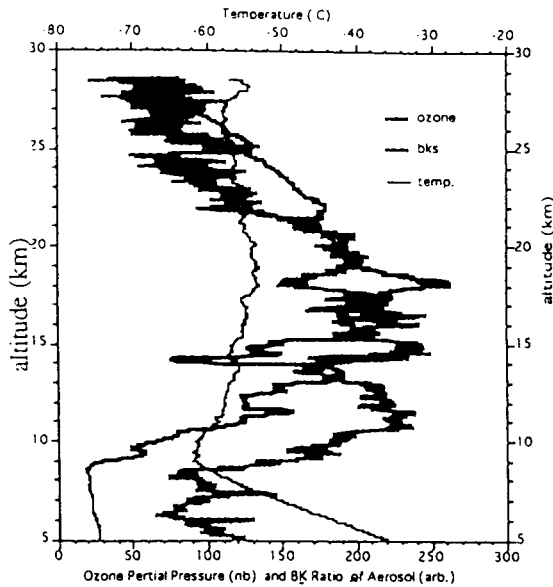


図 2.4 東シベリア ヤクーツクにおいて観測された、エアロゾル後方散乱係数、オゾン分圧、気温鉛直分布

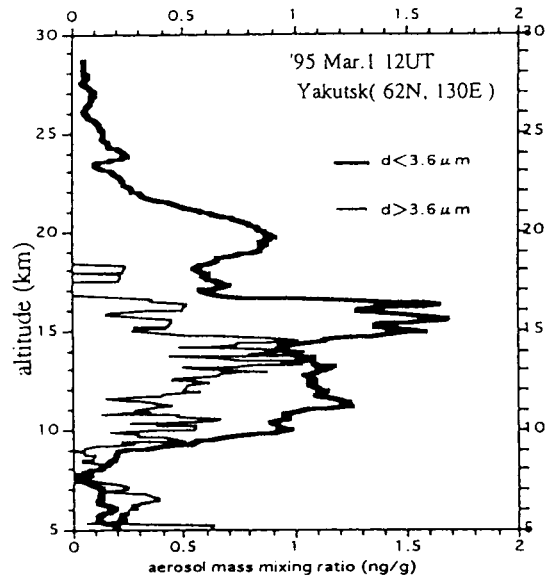


図 2.5 東シベリア ヤクーツクにおいて観測された、直径 $3.6\mu\text{m}$ 以上及び $3.6\mu\text{m}$ 以下のエアロゾルの質量混合比

が逆に少なくなっている。また、気温も局所的に低くなっていることから、高度 14.5km のオゾンの少ない層は、極渦内部のオゾンが破壊され、エアロゾルの多い空気が極渦外に薄い層になって出てきたものであると考えられる。

この日の渦位の分布を見ると、温位 550K （高度 20km ）では極渦の境界は明瞭であり、ヤクーツクは極渦の外にある。オゾンの少ない薄い層に対応する、温位 400K （高度 14.5km ）でもヤクーツクは極渦の外である。しかし、極渦の縁は日本の北方で曖昧になっており、極域の空気が流れ出しやすい条件であることはうかがえる。しかし、構造は不明瞭であり、また、後方トラジェクトリーも極渦の中へと戻るようにはなっていない。高度分解能が数 km の客観解析データによっては十分にとらえられない、極渦－中緯度相互作用のあることを認識する必要があることを示す例である。

2. 3 平成7年度冬季（1996年1月～4月）の集中観測

平成7年度冬季には、本課題のサブテーマを横断した集中観測が行われた。この期間、オゾンレーザーレーダー、ミリ波オゾン分光計、赤外ヘテロダイン分光計によるオゾン鉛直分布の観測、北海道、つくば、豊川におけるエアロゾルレーザーレーダー観測、母子里、陸別、木曾における NO_2 とオゾンの可視分光観測が行われた他、北海道北部の名古屋大学太陽地球環境研究所母子里観測所（ 43.5°N , 140.6°E ）とつくばにおけるオゾンゾンデ特別観測、航空機搭載赤外分光観測（2月7日～13日）が特別に実施された。データは解析中のものが多いが、この冬の北半球のオゾン層の特徴を述べると共に、データ的一端について報告する。客観解析データについては、ノルウェーのNILU（Norwegian Institute for Air Research）のデータセンターの、ECMWFデータに基づく渦位、気温、トラジェクトリー解析データと予報データを使用した。特に、渦位の予報は観測計画の変更や緊急観測の実行に極めて有効であった。

この冬の成層圏の気温の変化を図2.6に示す。高度約 20km に対応する 50hPa の気圧面、及び高度 50hPa 及び 30hPa における極成層圏雲type I（硝酸3水和物エアロゾル）の閾値温度は、それぞれ、 195K 及び 192K である。また、極成層圏雲type II（氷粒子）の閾値温度は、それぞれ、 188K 及び 185K である。従って、 50hPa 、 30hPa の両高度において、12月中旬から3月初旬まで、極成層圏雲

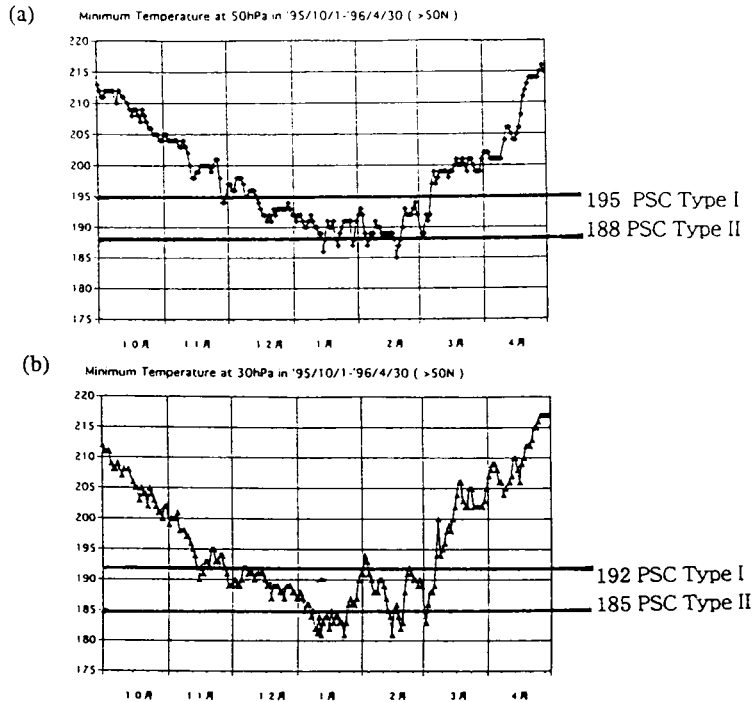


図2. 6 50hPa(a)及び30hPa(b)における、北緯50° N 以上の最低気温の時間変化。

type I ができており、1月と2月にはかなり頻繁に極成層圏雲type II が出来ていたと考えられる。これは、最大級のオゾン層破壊が観測された前年に比べはるかに多くの極成層圏雲が出来ていたことを意味する。極渦は、前年度のように1月頃から東シベリアにやってくることは少なく、スカンジナビア半島、スピッツベルゲン島、グリーンランドの付近にあることが多かった。それでも、2月には東シベリアを通り、2月末には北海道に極渦の一端がかかった。また、3月中旬には極渦が小さく分裂し、その一片が3月19日に極渦が北海道に近づいた。

最終昇温によって極渦が壊れる過程は4月中旬に始まり、4月下旬に完了した。最終昇温の過程で、分裂した極渦の一つが北海道上空を二度通過した。一度目は4月14日、15日であり、二度目は4月22日、23日頃である。5月に入ると、極渦の痕跡は、渦位分布図上から完全に消えた。

この間、母子里観測所では1月16日から4月26日まで29回のオゾンゾンデ観測が行われた。一例として、3月19日の観測結果を図2.7に示

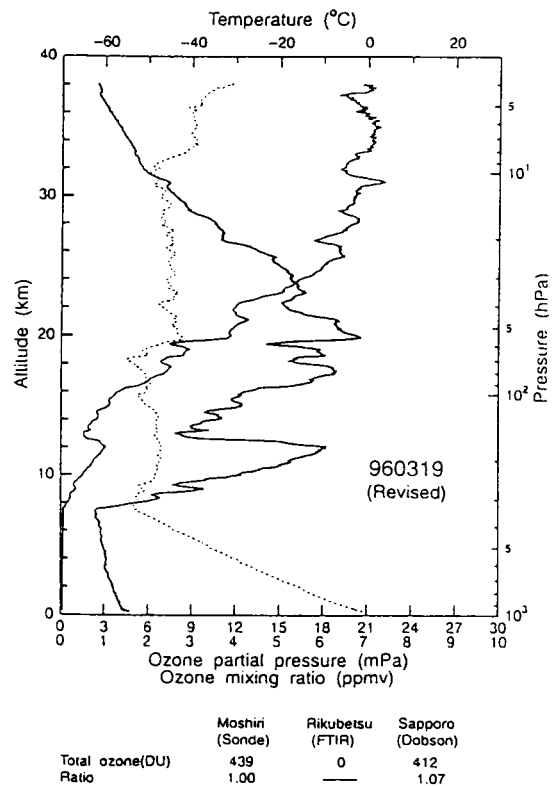


図2. 7 母子里(43.5°N, 140.6°E)におけるECCオゾンゾンデ観測結果。

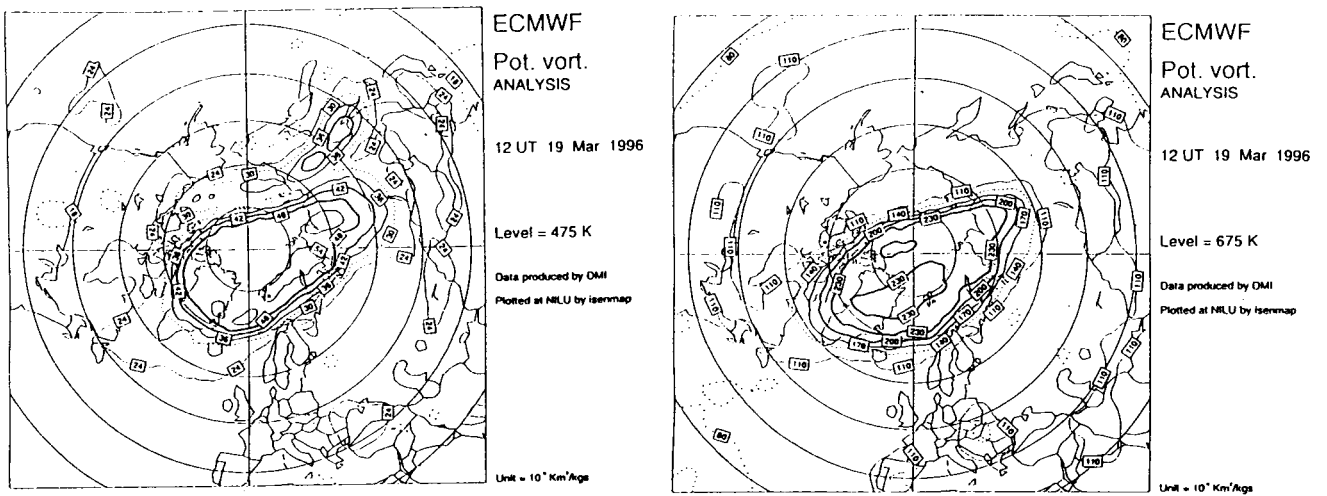


図 2. 8 1996年3月19日の475K (約18km) (a)、及び675K (約26km) (b)の渦位分布図

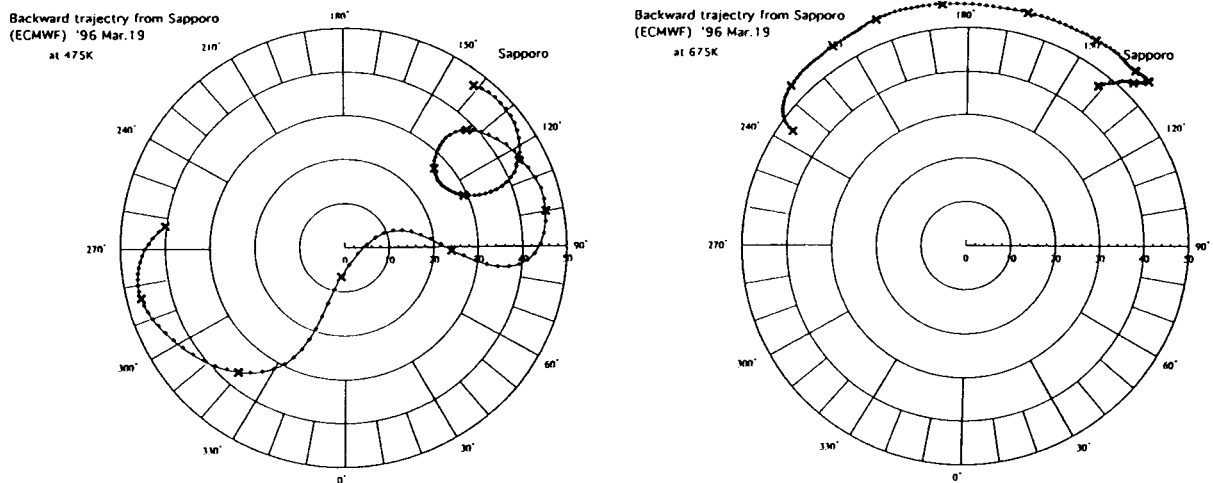


図 2. 9 1996年3月19日の475K (約18km) (a)、及び675K (約26km) (b)の後方トラジェクトリー

す。高度14kmから19kmに低温域があり、この高度域が他の高度域より強く極渦の影響を受けている可能性がある。図2.8に475K (約18km) 及び675K (約26km) の渦位分布図を、図2.9に同温面上の10日間の、札幌からの後方トラジェクトリーを示す。475Kにおいては、分裂した極渦と極渦本体の間を回るような気塊が北海道に届いたが、675Kでは、極渦が分裂しておらず、極渦と無関係な気塊が北海道上空に届いたことが分かる。ケンブリッジ大学の化学輸送モデルによると、母子上空18km付近で化学的なオゾン破壊が予測されている (Chipperfield, 私信)。4月後半の極渦の到来に関しては、現在データ解析中であるが、より大きく極渦の影響を受けているものと思われる。

2. 4 まとめ

これまで見てきたとおり、データ解析システムSTRASや、NILUの欧州データセンターの解析データシステムが、観測研究から得られる知見に大きく寄与する。今後、化学変化と輸送の効果を合わせて記述する三次元化学輸送モデルを解析手段として開発することが重要である。

3. 南北両極域のオゾン層変動

3. 1 研究の目的

南極オゾンホールは、南極の春9、10月に、1989年から1995年まで一方的に減少し、領域の拡大及び減少期間の長期化が続いている。例えば、1995年の南極オゾンホール、すなわち220DU以下の領域の持続は、12月まで出現し異例の長期間の持続となっていた。この変化は1989年以前とは異なり、年々の周期変動が目立たなくなるという特徴も伴っている。すなわち、熱帯の準二年振動と対応したオゾンホールにおけるオゾン量の変動のシグナルが弱くなっているように見える。一方、1991年6月はピナツボ火山の大噴火があり、南北成層圏での大量のエアロゾル増加がもたらされたことはよく知られている。この影響が南極オゾンホールの深まり及び、北半球冬季のオゾン減少に寄与したと考えられている。しかし、この影響は観測より1993年までと考えられるにもかかわらず、1994年以降の更なる深まりが持続している事実は、この影響のみによるとは説明し難

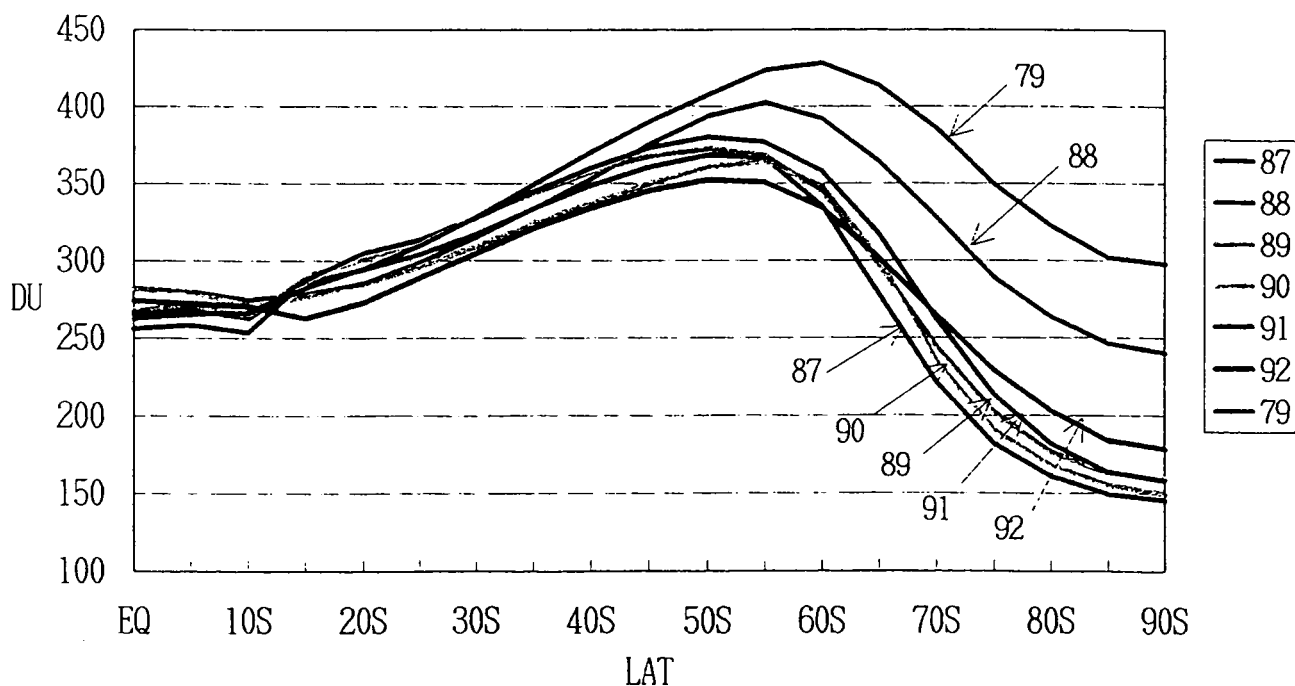


図3. 1 緯度円平均オゾン量の南北分布の年々変化(10月)

い。この問題は極めて重要であり、今後更に多方面からの研究を深める必要があるが、現在の段階ではまだ十分な説明がなされていないといえる。

この問題の解決に向けての課題の一つとして、循環の変動の解明があると考えられる。例えば、極域オゾンの減少は春先の下部成層圏における加熱効果の減少により南北温度傾度の増大をもたらし、温度風の関係式から西風ジェットが増大をもたらすことが予想される。この増大は、極域の循環の'孤立化'およびオゾンホールが発達を促すと考えられる。この役割は、極成層圏雲の表面での不均一反応がオゾンの急激な減少をもたらす化学的效果が有効に働く条件を規定するものと言える。すなわち、極渦を囲む西風ジェットが発達することにより、極域と中・低緯度との間の循環が疎外され、極域の気温の低下及びオゾンの交換が弱くなり、オゾンホールのオゾン減少を促進することになる。極渦の構造はこのようなオゾンホール発達の条件に着目し、渦位の場合の解析を行い、毎年の発達条件を説明することが近年の研究傾向である。しかし、オゾンホールの推移は年々急激な変化を伴っており、特に南極オゾンホールは1989年から最新の1995年までは、一方的にオゾン量の低下および長期化が見られるしたがって、毎年の実態のみでなく年々変動の特徴を明らかにすることも、オゾン減少の今後の推移を解明する上で重要である。

この研究では、オゾン量の衛星観測値の日々のデータに基づき、オゾン量の大規模分布が成層圏循環に重要な役割を担う大規模波動の活動とどのように関連して変化しているかに焦点を当て、オゾン変動の年々変化の最近の特徴を明らかにすることを目的とする。

3.2 南極オゾンホールの最近の水平構造の変動

本研究では、循環の変動に焦点を当てて近年のオゾンホールの水平分布の変化を、オゾン減少と関連づけて研究し、循環の変化が寄与していないかどうかを調べた。解析方法はTOMSが観測したオゾン量の日々の値を緯度円についてフーリエ解析することに基づいた。

図3.1は南半球10月平均のオゾン量の緯度分布を比較した図であるが、88年を除いて92年までのオゾン量は 50° Sより極側で減少が著しく、79年と92年を比べると 80° Sでは92年が150DUも低い。この変化を各波数の月平均および標準偏差を比べると、月平均の波数1の振幅が卓越しておることが図3.2でも明らかである。この振幅の緯度分布の年々変化を比較すると、90年以降のオゾンホールは波数1の月平均成分はオゾン量の大きい88年並みの振幅でありながら、緯度円平均値のオゾン量は著しく低くなっていることが分かる。

更に1987年と92年の日々の波数1と2の8月から10月迄の日々の振幅及び位相(極小値)の比較により以下の点が明らかになった。波数1は92年は87年に比べて振幅は大きい、位相の移動が鈍くなっている。又位相の分布は 60° Wの経度あたりにあり、南米の南端に近い。一方、波数2は振幅は変わらないが、移動速度が92年は87年にくらべて速く、約3倍ほど速くなっている様子がみえる。この変化は 60° Sより極側で顕著である。

このような波数1と2の様相の変化は、90年以降に生じておることからピナツボ火山噴火(1991年6月)の影響ではないと考えられる。力学的な性質の観点からは、平均西風が強くなっていることに対応する変化であり、80年代の南半球成層圏冬季の西風が70年代に比べて強化されていたことが、更に90年代でも進んでいるという結果として解釈される。この点は今後力学場の解析から深める予定である。

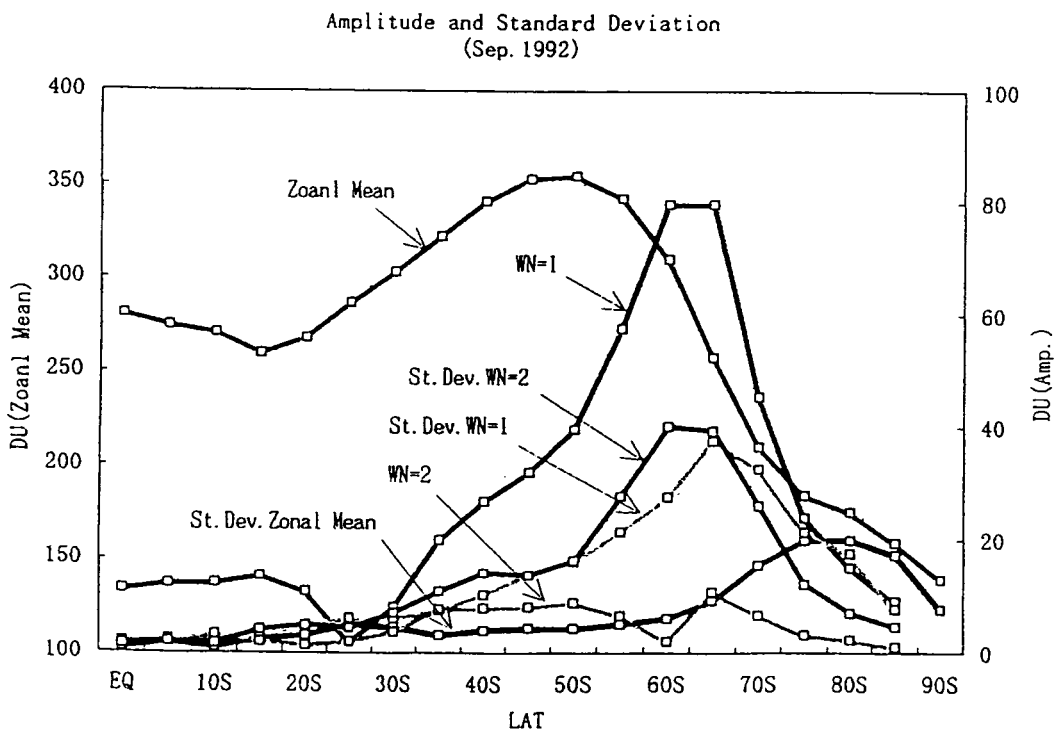
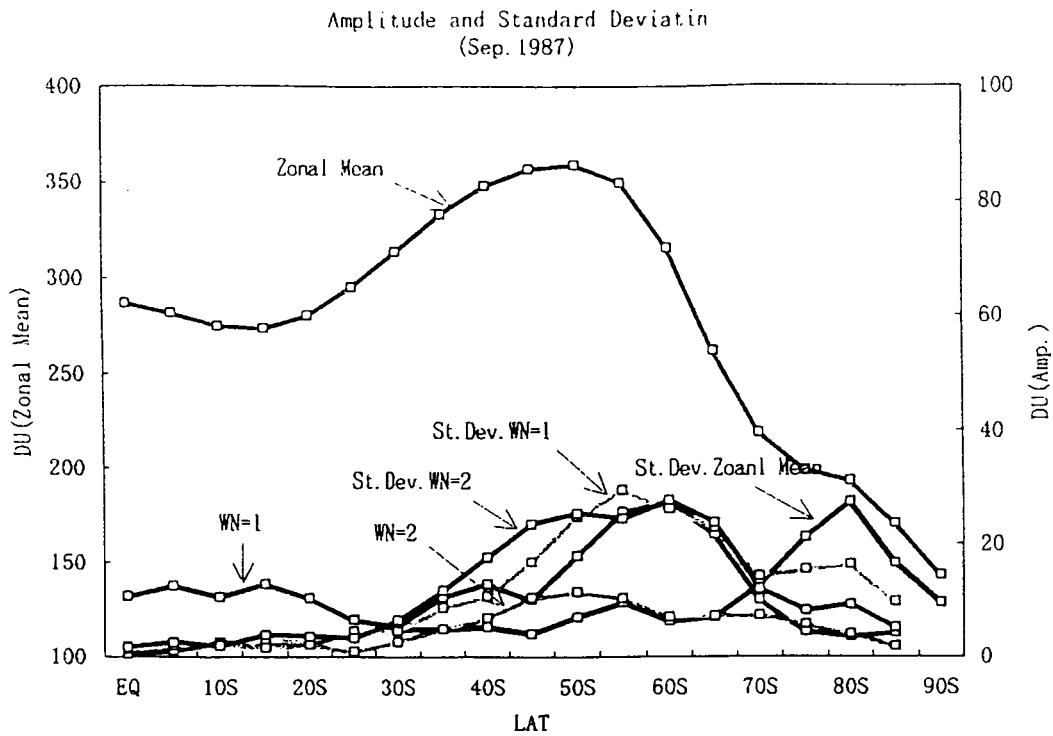


図3. 2 1987年(a)及び1992年(b)における、9月南半球のオゾン量帯状平均値と波数1、2の振幅とそれらの標準偏差

3.3 北半球冬季の最近のオゾン減少の特徴

北半球中・高緯度の冬季において、オゾン全量の減少傾向が最近著しいことは良く知られている[WMO, 1995]。この変化を南極オゾンホールに適用した方法で特徴を求めた。65、55、45° Nの1月及び2月を中心にして年々変化を日々の緯度円分布のフーリエ解析に基づいて調べた。

図3.3は1987年と1993年の2月におけるオゾン量の緯度分布と波数1と2の月平均および標準偏差を比較した図である。まず明らかなことは、オゾン量が中・高緯度において減少が著しいことである。さらに、波数1の月平均振幅が最近増大していることに対し波数1と2の非定常成分が60° Nあたりで近年著しい減衰がある。この特徴は、2月以外にも1月および3月の45、55、65° Nに共通にみられた。この波数毎の変化と緯度円平均のオゾン量との関連が明確なのは、標準偏差との関係であった。

55° Nにおける1および2月の標準偏差と月平均および緯度円平均値との比較により以下の点が明らかになった。1991年から93年にかけてのオゾン量の減少は、波数1~5までの標準偏差と良い対応を示している。この標準偏差の減少は、日々の波の振幅の変動が小さくなったり、移動が遅くなったりすることで生じる。この関係を調べると、波の振幅が減衰していることが判った。何故減衰したか？ は不明であるが、次のように考えられる。直接的な関連は、1987年以降1995/1996年の冬季途続く高緯度側で続く暖冬に関連する循環との対応がある。この循環は、極域の寒波が中緯度帯へ流れ込まないパターンとなっている。つまり南北循環が弱くなっていることが中緯度帯の暖冬をもたらしている。この循環の特徴がオゾン量の中緯度帯での減少も対応する。すなわち、高緯度のオゾン量の高い空気が、南北循環が弱いために中緯度へ運ばれずオゾン減少をもたらしている。

この南北循環の弱まりは、何故生じたかについては、南極オゾンホールの発達の種類から緯度円を取り巻く冬の西風が強くなり、南北循環を弱めていると考えられる。これは南北の温度差の増大により生じているが、北半球の暖冬の循環はこの事実の進行を示すものである。この温度差は今後詳しく調べていく必要があるが、オゾン減少や温室効果気体の増加以外に、対流圏循環の変動が大きく影響している可能性もある。

3.4 まとめ

日々のオゾン量の緯度円分布を波数解析することにより、南北両極域の最近のオゾン量減少の特徴について研究を行った。研究成果は以下のようにまとめられる。

- (1) オゾン量の緯度円に関する波数分布は、大気の大規模波動と密接な関係があり、500mbから成層圏下部の循環と対応が良く、オゾン量の変動から力学場の変動が求められる。
- (2) 南半球における南極オゾンホールが1989年以降最近に至るまで深まっていることの解析から、オゾンホールの水平構造が変化していることが判明した。つまり、波数1の月平均振幅が増大しており、同時に極域の平均オゾン量が減少している。更に、波数1の日々の様相から、波の位相速度は遅くなり、その極小値は南アメリカ南端に位置する傾向にある。一方、波数2は、移動速度が速くなり1987年と1993年を比較すると3倍ほど1993年が速くなっている。
- (3) 北半球中緯度の冬季のオゾン量減少は、波の変動部と関連し南北循環が弱い最近の暖冬の循環と関係しており、力学条件の変化が大きい役割を果たしていることが求まった。

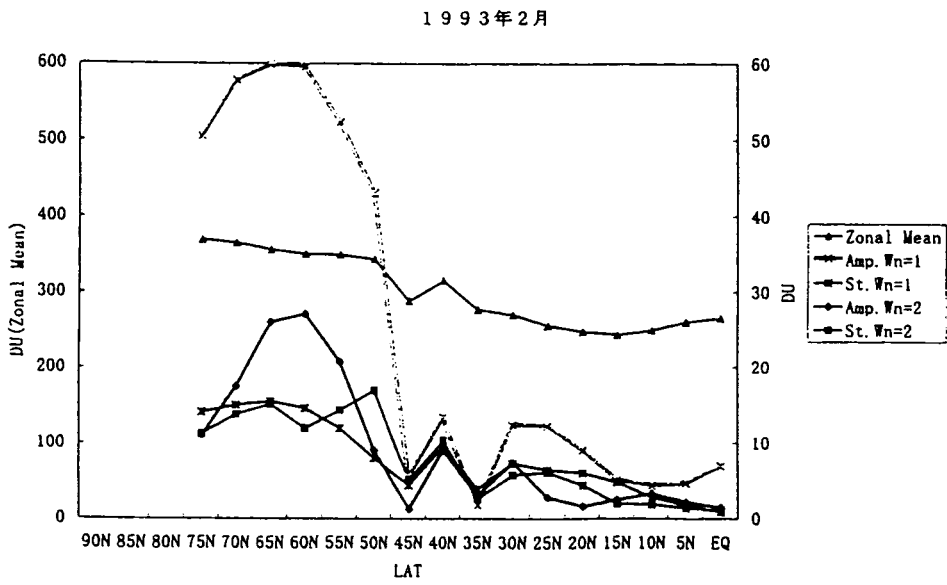
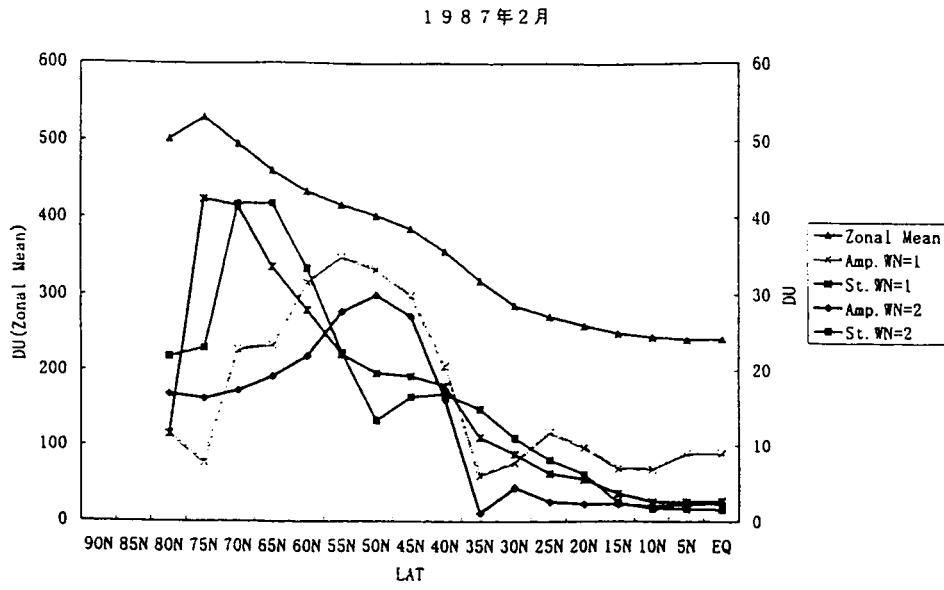


図 3. 3 1987年(a)及び1993年(b)における、北半球2月の帯状オゾン量南北分布波数1と2の振幅の平均及び標準偏差

4. 極渦崩壊モデルの開発

4. 1 背景

オゾンホールが発生は、極渦の力学過程とも密接に関係しており、極渦の崩壊過程は、オゾンホールの解消と同時に、オゾン濃度が低くなった大気の中緯度への輸送（希釈効果）をもたらす。したがって、極渦の安定性に関する理論的研究および、それらに関連した数値シミュレーションは、オゾンホール現象の解明にとって重要であると同時に、地球規模でのオゾン減少の予測にとっても重要である。本研究では、数値モデルの開発と同時に、極渦の安定性の理論的解析を行うことにより、極渦崩壊現象の本質を解明し、将来の予測に役立てることを目標とする。

4. 2 極渦崩壊の数値シミュレーション

対流圏などから成層圏に伝播してくる地形性ロスビー波などの効果を外力項として取り入れた、高分解能の水平二次元モデルを用いて、典型的な場合についての数値シミュレーションを実行した。図4.1には一例として、初期条件として極に関して対称な極渦を与え、それに波数1（渦の中心が極からずれるように作用する）の外力を初期の12日間にわたって与えた場合の渦位の時間発展を示した。渦位は、粘性効果が無視できる範囲においては、流れに沿っての保存量であるため、物質濃度分布とみなすことができる。初期（0日）には、鉛直上方初期の西風ジェット（最高風速約80m/s）は緯度60度にあり、低緯度（10度以下）では、弱い東風（最大風速約20m/s）を与えた。これは、冬季成層圏での帯状平均流の典型として与えたものである。また、外力の強さは、Juckes & McIntyre (1987) にならった。水平分解能はT159である。波数1の外力というのは、よく知られたロスビー波の分散関係により、対流圏から上方へ伝播可能なロスビー波の波数が低波数（波数1から2程度以下）に限られることを反映させたものである。尚、計算の安定化のため6階微分の粘性項を渦度保存方程式に加えてある。ただし、その効果を最小限に留めるため、波長が1度分の長さの波が30日程度で減衰する程度の値の粘性係数にしてある。これにより、粘性効果が顕著となる30日以上長時間積分結果にはあまり意味がなくなってくるが、それ以下程度の計算では、粘性効果はそれほど影響しないと言える。

図4.1の0日から10日目までは、波数1の外力項が働いているため、極渦（図の白ぬき部分が渦位の高い領域）は、中心が極からずれる変形をし、初期には同心円であった等高線が変形していく。4日目のような変形状態は、図2.1に見られるように、冬季に典型的に観測されるものである。中心部の極渦本体の変形と同時に、低緯度でも細かいフィラメンテーション（細かい糸状に渦がのびて変形すること：10日目の図に顕著）が生じて、小さいスケールでの物質混合が行われる。16日目以降は、このシミュレーション例では外力が0となるため、変形した極渦はまた、もとの円形に戻りはじめ、100日積分するとほとんど円形に戻ってしまう。（これは、小スケールの構造が粘性によって消滅してしまうことも一因ではある。）すなわち、この例では、極渦の分裂などが起こるほどは外力（強制ロスビー波）の効果が強くはなかったことになる。

図4.2には、図4.1に対応する流線（等圧線）を示した。極渦の変形に伴い、4日目には、冬季の典型的な成層圏での気圧分布となり、さらに外力が働くことにより、6日目には、一時的に、高気圧が二つの低気圧にはさまれた、突然昇温時に見られるような気圧配置となっている。12日目を過ぎ、外力が消滅すると、気圧分布は、再び円対称に戻っていく。以上のことから、観測で見られるような典型的な極渦の形が維持されるためには、適当な強さの波数1の外力と、適度の散逸

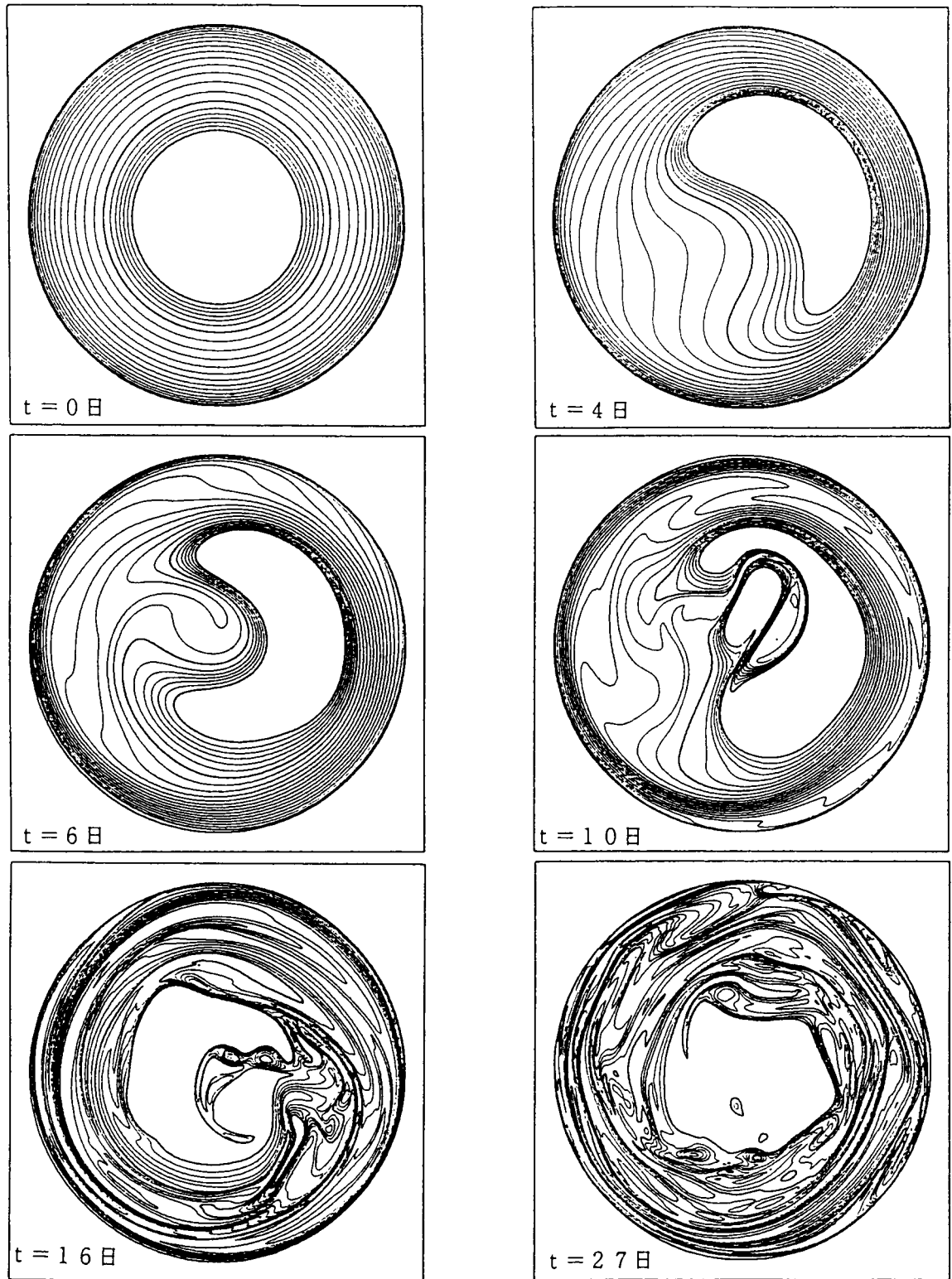


図 4. 1 渦位 (potential vorticity) の時間発展。白抜き部分は、地球の自転角速度を単位とした渦位が 2 以上の高渦位領域を示す。また等高線のうち、2本の太線はそれぞれ、渦位が 2 と 1.4 の等高線を示す。

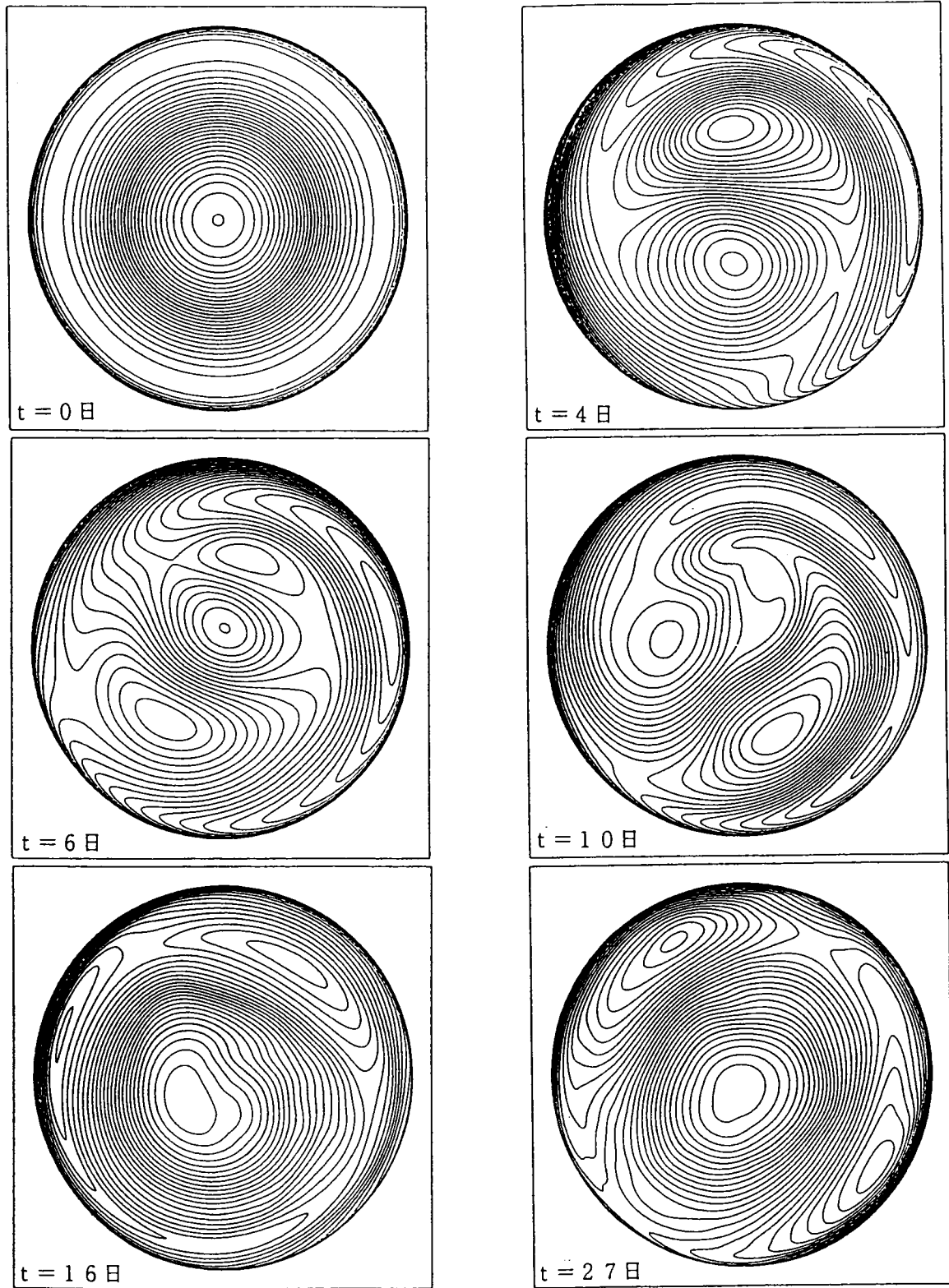


図 4. 2 図 4. 1 に対応する流線（等圧線）の時間発展.

(粘性)効果のバランスが重要であることが推測される。北半球と南半球での極渦の振るまいの違いは、南半球では、地形による下部強制が弱いため、そもそも極渦の変形が弱いこと、また、北半球では(地形の複雑さにより)波数2の成分による強制も南半球よりも強いことなどが考えられる。そこで、波数2の外力も波数1の20%の強さで加えた条件での数値シミュレーションも行い、図4.1、4.2との比較を行った。その結果、波数2も含まれている場合は、図4.1、4.2に比べ、複雑な小スケールでの崩壊が顕著になることがわかった。波数2の強制力の強度は、波数1に比べて通常かなり小さいので、極渦の大規模構造の決定にはあまり影響しないと考えられる。

4.3 準地衡渦の安定性理論

地球流体系ではしばしば秩序渦構造が姿を現し、その運動や安定性が準地衡風近似にもとづいて、精力的に調べられている。平成2年~4年度に行った楕円渦領域の三次元(傾圧)不安定性理論の研究に続いて、平成5年度~7年度は、より一般的な風速のシアが存在する場合の楕円渦の三次元安定性を調べた。これは、将来の極渦モデルの三次元化、あるいは、鉛直成層状態の変化による極渦の安定性の変化を予測する目的で行ったものである。

基礎方程式としては、準地衡風近似(f 平面近似)の渦位保存の方程式を用いた。種々のストレイン場(風速のシア) e と楕円渦の強さ γ に対する渦の安定性を調べた。まず、渦の周方向の波数 m が奇数のモードについて。この場合、シアによるバックグラウンドの渦度と楕円渦の渦度が同符号の場合、渦の不安定性は弱くなり、最も不安定なモードは「二次元的」である。それに対して、異符号の場合には、3次元不安定性が重要となることがわかった。例えば、異符号である $\gamma = -0.15$ の場合、楕円渦の長軸と短軸の長さの比 a/b によらず、楕円渦は渦の周方向の波数 $m = 1$ の Bending モード(渦の中心を振らすようなモード)に対して不安定化する。この不安定モードは、 $a/b = 0$ の極限では、鉛直波数 $k = 0.93$ 付近にのみ存在し、三次元 Bending 波動とシヤ一場の共鳴に起因していると考えられる。 $\gamma = -0.35$ の場合(やはり異符号)、 $m = 1, 3, 5, 7$ の不安定モードが見られる。このうち、 $m = 1, 3$ のモードは、 $a/b = 0$ の極限でそれぞれ、 $k = 3.23, 1.39$ 付近に局在し、やはり、シヤ一場との共鳴現象を示唆している。次に、渦の周方向の波数 m が偶数の場合。この場合も、シアによるバックグラウンドの渦度と楕円渦の渦度が同符号の場合、渦の不安定性は弱くなり、最も不安定なモードは二次元的である。逆に、異符号の場合には、二次元的なモードがより不安定性となり、例えば $\gamma = -0.35$ の場合、すべての a/b に対し、 $m = 2$ のモードが不安定化される。この不安定モードも、 $a/b = 0$ の極限では $k = 2.53$ 付近に局在することから、その起源はシヤ一場と Baroclinic な慣性振動との共鳴に求められる。

4.4 まとめ

以上、数値シミュレーションに関しては、対流圏起源による強制(外力)項の入った水平2次元数値モデルを作成し、それを用いた極渦崩壊の数値シミュレーションを行った。そして、波数1および2の強制項の効果を調べ、南北半球での崩壊スケールの差についても検討を行った。一方、渦の三次元的な不安定性を理論的に解析し、二次元渦よりも不安定化しやすい三次元渦の特性を明らかにした。今後は、外力項の違い(波数、強さ、継続時間)による効果、初期条件の差による時間発展の違いなどについて、細部の検討が必要である。

5. 結論

本研究においては、成層圏オゾン層データ解析ソフトウェアシステムを開発し、集中観測によって取得したデータを解析することによって、その有効性を示すことができた。また、オゾン濃度の変動及びオゾン層破壊にとって、プラネタリー波（ロスビー波）の活動性の年々変動及びトレンドが重要であることが明らかになった。また、プラネタリー波による外力が極渦のフィラメンテーション（はがれ）や極渦の崩壊をもたらすことを数値モデルによって示したが、この結果は、集中観測時に見られた極渦の構造や変動を本質的に良く再現している。

今後、これらの研究成果を発展させ、A 1-3-②の成果とも統合して、三次元化学輸送モデルと観測を組み合わせたオゾン層の動態の理解、これに基づく光化学モデルを組み込んだ大循環モデルの開発へと研究を進めて行くことが重要である。

6. 引用文献

Hayashida, S. and Y. Sasano (1993), *Geophys. Res. Lett.*, 20, 575-578.

Juckes, M. N. & M. E. McIntyre (1987) A high-resolution one-layer model of breaking planetary waves

in the stratosphere. *Nature* 328, pp. 590 - 596.

Juckes, M. (1989) A shallow water model of the winter stratosphere.

J. Atmos. Sci. 46, pp. 2934 - 2955.

田口 真・岡野章一・福西 浩(1991)、気象学会1991年春季大会予稿集、P180.

Yoden, S. & K. Ishioka (1993) A numerical experiment on the breakdown of a polar vortex. *J. Met. Soc. Japan* 71, pp. 59 - 72.

[国際共同研究等の状況]

研究計画名；	SESAME、OSDOC、日-EC、日英、日ノルウェー
カウンターパート；	EU、ロシア中央大気観測所(CAO)、ケンブリッジ大学 NILU
連携状況；	共同観測、データ解析及びモデル開発における協力

「研究発表の状況」

(印刷発表)

- Dorokhov, V., V. Khattatov, T. Potapova, V. Yushkov, I. Zaitcev, F. Goutail, J.-P. Pommereau, A. Sarkissian, H. Nakane, T. Ogawa (1996): Ozone monitoring in Eastern Siberia in 1994/1995. submitted to J. Atmos. Chem.
- Dorokhov, V., V. Khattatov, V. Yushkov, I. Zaitcev, H. Nakane, T. Ogawa (1996): Evidence of ozone depletion over Yakutsk, Eastern Siberia. submitted to J. Atmos. Chem.
- Iwasaka, I. Mori, Y., M. Nagatani, H. Nakada, K. Matsunaga, and H. Nakane (1996): Size distribution of Aerosol Particles in the Free Troposphere: Aircraft Measurements in the Spring of 1991-1994 over Japan. TAO, 7, 43-60.
- Kawahira, K., and M. Wakashima: Year-to-year variations of the horizontal ozone distributions in the Northern Hemisphere winter, Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol., vol. 9, pp169-179, 1995.
- Kawahira, K., Ecological effects by the material circulation-A cause of the recent slow rate in the CO₂ increase-, Proceedings of the Asian Symposium on Ecotechnology Toyama '94, pp.189-200, 1995.
- Kawahira, K., and M. Wakashima, Dynamical link of the ozone variations to large-scale disturbances in the Northern Hemisphere winter, Proceedings of the Asian Symposium on Ecotechnology Toyama '94, pp. 279-292, 1995.
- 川平浩二、白鳥和賀子：南極オゾンホールの最近の発達と水平構造の変化、第10回大気圏シンポジウム、宇宙航空研究所（印刷中）
- Miyazaki, T. & H. Hanazaki (1994) Baroclinic instability of Kirchhoff's elliptic vortex. J. Fluid Mech. 261, pp. 253 - 271. (1994年度日本流体力学会 電門賞 受賞)
- Miyazaki, T. K. Hirahara & H. Hanazaki (1996) Baroclinic instability of elliptic vortex in an imposed strain field. (submitted to Fluid Dyn. Res.)
- Nakane, H., H. Akiyoshi, I Matsui, N. Sugimoto, Y. Iwasaka, M. Hayashi, T. Itabe, K. Mizutani, T. Uekubo, K. Matsubara, T. Kotake, H. Fukunishi, V. Yushkov, V. Dorokhov and V. Khattatov(1995): variation of ozone and aerosols in Eastern Asia during SESAME. European Commission Air pollution reserch report 56, Proceedings of the 3rd European workshop, 18 to 22 September 1995, Schliersee, Germany, 492-497

(口頭発表)

- 川平浩二：CO₂増加の停滞と暖冬の相互関連、第5回大気化学シンポジウム1995.1.9（名古屋大学）
- 川平浩二、白鳥和賀子：南極オゾンホールの最近の発達と水平構造の変化、第10回気水圏シンポジウム、1995.7.18、極地研究所。

- 川平浩二、白鳥和賀子：南極オゾンホールの最近の発達と水平構造の変化、エコテクノロジーに関するアジア国際シンポジウム富山'95、1995.10.3.
- 川平浩二：二酸化炭素増加の停滞と植生活動の変化、エコテクノロジーに関するアジア国際シンポジウム富山'95、1995.10.3.
- 川平浩二、白鳥和賀子：南極オゾンホールの特徴、日本気象学会1995秋季大会、1995、10.16.
- 川平浩二、白鳥和賀子：南極オゾンホールの特徴と水平構造の変化、第10回大気圏シンポジウム、1996.2.29、宇宙航空研究所
- 小出理史、田口真、福西浩、中根英昭：レーザーヘテロダイン分光計で観測された南極昭和基地上空のオゾン層変動、日本気象学会1996春季大会.
- 小竹知紀、福西浩、中根英昭：NOAA/TOVSデータとポテンシャル渦度を用いた1995年1月から3月の北半球におけるオゾン減少と極渦の関係について、日本気象学会1996春季大会.
- 小竹知紀、福西浩、中根英昭：1992年北半球冬季におけるポテンシャル渦度とオゾン混合比との相関解析、日本気象学会1994秋期大会
- 小竹知紀、福西浩、中根英昭：ポテンシャル渦度を用いた1992年1、2月の北半球中緯度オゾン現象の解釈、地球惑星科学関連学会1995年合同大会
- 宮崎、平原、花崎（1993）シヤール場における槽円渦領域のBaroclinic不安定性。日本気象学会1993年秋期大会。
- Nakane et al., Stratosphere data analysis system at NIES, International Symposium of Polar and Tropical atmosphere, Nagoya, Nov. 1994.
- Nakane, H., H. Akiyoshi, I Matsui, N. Sugimoto, Y. Iwasaka, M. Hayashi, T. Itabe, K. Mizutani, T. Uekubo, K. Matsubara, T. Kotake, H. Fukunishi, V. Yushkov, V. Dorokhov and V. Khatatov(1995): variation of ozone and aerosols in Eastern Asia during SESAME. European Commission Air pollution reserch report 56, Proceedings of the 3rd European workshop, 18 to 22 September 1995, Schliersee, Germany, 492-497
- 中根英昭、秋吉英治、二宮真理子、林政彦、岩坂泰信、渡辺征春：エアロゾル、オゾン層気球観測に現れた北半球極渦内外の相互作用、日本気象学会1996春季大会.
- 阪本麻友、福西浩、渡辺重十、中根英昭：TOMSデータとポテンシャル渦度解析から得られた1994年10月の南極オゾンホールと力学場について、日本気象学会1996春季大会.