

A-1 オゾン層破壊の長期変動要因の解析と将来予測に関する研究

(3) 中緯度における長期オゾン変動の解析と変動要因の解明に関する研究

独立行政法人国立環境研究所

大気圏環境研究領域 大気物理研究室	秋吉英治
国土交通省気象研究所	柴田清孝
北海道大学大学院地球環境科学研究科	山崎孝治
奈良女子大学理学部	林田佐智子

<研究協力者> 独立行政法人国立環境研究所 吉識宗佳、坂本圭

平成14～18年度合計予算額 72,634千円
 (うち、平成18年度予算額 13,359千円)

[要旨] 中緯度域のオゾン濃度は様々な要因によって変動を起していると考えられている。中緯度領域の化学的なオゾン破壊のみならず、低緯度あるいは高緯度からオゾン濃度の低い空気が多量に中緯度へ流入することも中緯度のオゾン濃度変動に多大な影響を与える。中緯度域にこれまでに観測されたオゾントレンドに影響を及ぼす要因を明らかにするため、中緯度での化学オゾン破壊に重要な成層圏エアロゾルの長期変動および臭素の影響、熱帯域からのオゾン濃度の低い空気の移流に影響を与える赤道大気の準2年振動(Quasi Biannual Oscillation, QBO), そして、北極域でオゾン破壊が進んだ空気の中緯度オゾン濃度へ与える影響について、衛星データ、化学輸送モデル、トラジェクトリー解析を用いて解析を行った。その結果以下のことが明らかとなった。

(1)1991年6月のピナツボ火山爆発によるオゾン層への影響は1997～1999年くらいまでにはなかった。(2)臭素によって中緯度では10～20DU程度のオゾン量が破壊されている。(3)台湾の東海上の亜熱帯西太平洋域の冬に起こる220DU以下の低オゾン域の出現にはQBOの影響が大きい。(4) QBOの周期にはオゾンによる大気加熱が関係している。(5) QBOはQBOに伴う子午面循環と成層圏の波動活動との相互作用によって中高緯度オゾン量に影響を与えている。(6)1997年のような安定した北極渦の下では極渦内でのオゾン破壊が進んだ空気が極渦外の空気と混合することによって極渦外のオゾン濃度を低下させる働きは、北極渦境界のすぐ外側の領域では大きいとその影響は極渦境界から低緯度側に等価緯度10°の範囲に限られ中緯度全体(等価緯度30-60°N平均)では小さかった。以上の、中緯度オゾンにとって重要と思われる過程を取り込んだ化学気候モデルを使った1980～2004年のオゾン変動の再現実験を行った。その結果、火山爆発によるオゾン濃度の急激な減少とその後の数年かけての回復、QBOによる低緯度および中高緯度のオゾン変動、臭素によるオゾン破壊などが再現された。

[キーワード] 中緯度、オゾン、QBO、極渦、化学輸送モデル

1. はじめに

成層圏オゾン量の減少トレンドは、極域のみならず中緯度でも観測されているが、中緯度の減

少の程度は極域に比べると少ない。しかしながら、多くの人口を抱える中緯度でのオゾン層破壊が、人類に与える影響を考えた場合、その進行の有無や原因を究明することは重要である。極域におけるオゾン層破壊に関しては、フロンやハロンの影響の過程がかなり明らかになりつつあるが、中緯度のオゾン減少に関しては、現在までのところ、そのメカニズムが必ずしも明らかにはなっていない。理由は、中緯度帯のオゾン濃度は、その場所での化学的なオゾン破壊／生成の影響を受けるのに加えて、極域のオゾン破壊によって極端にオゾン濃度が小さくなった空気の移流や、熱帯域のオゾン濃度の低い空気の流入など、極域と熱帯の両方から中緯度と異なる濃度のオゾン輸送の影響があり、それらが季節変動や年々変動を起こしながら複雑に絡み合っただけでその濃度が決まっているからである。そこで、中緯度のオゾントレンドの理解には、中緯度オゾン層に影響を与える化学的影響と輸送効果の長期変動、年々変動、季節変動を詳細に調べ、それぞれがオゾントレンドにどの程度の影響を及ぼし得るかを把握する必要がある。

2. 研究目的

本サブテーマでは、多くの人口を抱える中緯度域でこれまでに観測されたオゾントレンドに影響を及ぼす要因を明らかにすることを目的としている。中緯度での長期のオゾン変動に影響を及ぼす要因としては、臭素化合物濃度の増加や火山爆発による成層圏硫酸エアロゾルの増加に伴う中緯度における化学的なオゾン破壊に加えて、極域のオゾン破壊空気塊の中緯度への輸送・混合、熱帯・亜熱帯域のオゾン変動とその低オゾン濃度空気の中緯度への輸送・混合、赤道大気の準2年振動(Quasi Biannual Oscillation、QBO)に伴うオゾンの変動、などが考えられる。

3. 研究手法

本サブテーマでは、成層圏プロセスを取り入れた3次元化学輸送モデル(CCSR/NIES CTM)およびサブテーマ(1)とも連携した化学気候モデル(CCSR/NIES CCMならびにMJ98 CCM)を用いた数値実験、衛星データの解析、トラジェクトリー解析などの手法を用いた。個々の手法の詳細は結果・考察の項のそれぞれの研究に関する部分で述べる。

4. 結果・考察

(1) 中緯度における化学オゾン破壊

1) 成層圏硫酸エアロゾルの長期変動

1991年のピナツボ火山噴火後の成層圏オゾンの変動からも明らかな様に、成層圏硫酸エアロゾルの増大はオゾン層の破壊を加速する効果がある。火山噴火後の急激なオゾンの変動は噴火後の急激なエアロゾル量の変化に起因するものであるが、その影響は数年以上に及ぶと考えられている。よって、中緯度域でのオゾンの長期変動の一つの要因は成層圏エアロゾルの変動が原因となっている可能性がある。そこで本研究では、1985年から1999年までの15年間の衛星データ(Stratospheric Aerosol Gas Experiment II、以降SAGE IIと略す)による成層圏エアロゾルの消散係数のデータを解析し、エアロゾルの量と粒径に関する長期変動を調べた。

解析にあたっては、SAGE IIのエアロゾルの消散係数データVersion 6.1を用いた。また成層圏硫酸エアロゾルデータの抽出のため、気温情報から得られる対流圏界面高度(最低気温から定義)以下の高度データを除外後、エアロゾル消散係数に含まれるエラーの割合が80%以上のデータも

除外した。更にPSC（極成層圏雲）と判定されるデータも除外した。SAGE IIでエアロゾル消散係数を観測している波長は1019 nm、525 nm、452 nm、386nmの4波長である。このうち観測精度の高い1019 nm、525 nm、452 nmの3つの波長のデータから、消散係数の波長依存性を調べ、オングストローム係数というエアロゾルの粒径に関するパラメタの算出を行った。また、1019nmの消散係数はエアロゾルの体積を反映していると考えられる。

成層圏エアロゾルの長期変動を調べる目的で、エアロゾル消散係数とオングストローム係数の経年変化を1985年から1999年までの15年間について調べた。例として、高度20kmにおける北緯60～65°、35～40°、および10～15°の緯度領域でのデータを図1に示す。各々の図中、上のデータがエアロゾル消散係数（スケール左）で、下のデータがオングストローム係数（スケール右）を示している。図1からも明らかな様に、各緯度帯において1991年のピナツボ火山噴火の影響により、エアロゾル消散係数の増大とオングストローム係数の減少（粒径の増大）が認められる。その後エアロゾル消散係数値はいずれの緯度帯でも減少しているが、高緯度ほど早く一定値に達している。ピナツボ火山噴火後急激に減少したオングストローム係数もその後は徐々に増大しているが、エアロゾル係数と異なり一定値に達するには至っていない。よって、火山の影響がほぼ無いと考えられる1998年以降において、エアロゾルの体積を表すエアロゾル消散係数の値はほぼ一定となるのに対し、粒径は小さくなり続けている事が分かった。

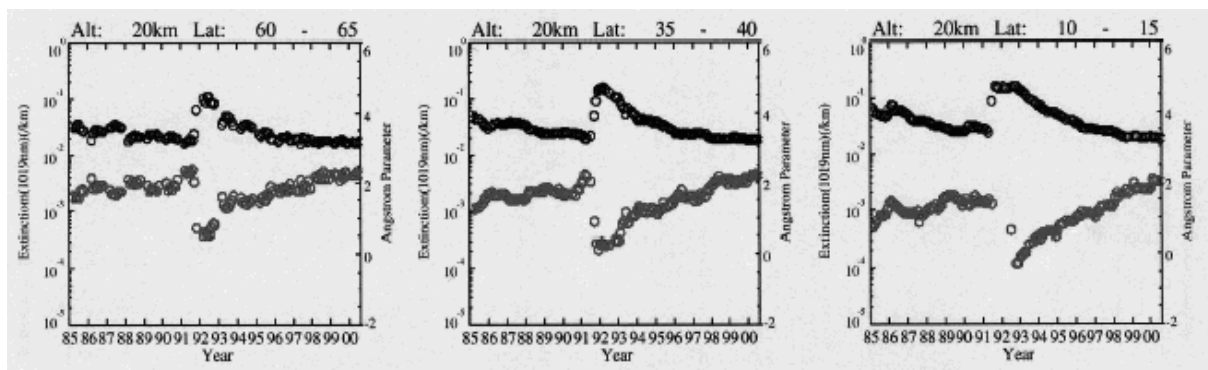


図1 エアロゾル消散係数とオングストローム係数の時系列。横軸は年、縦軸はエアロゾル消散係数(1019nm)（スケール左）とオングストローム係数（スケール右）。上の黒丸はエアロゾル消散係数を、下の赤丸はオングストローム係数を示す。左から北緯60-65°、35-40°、10-15°の高度20kmでの値。

同様の解析を南北両半球において高度18～24kmの領域に対して行った。解析の結果、成層圏エアロゾルの長期変動として次の点が明らかとなった。(1)1991年のピナツボ火山爆発後は、エアロゾル量の急増と共にその粒径が大きくなった。(2)ピナツボ火山爆発によってエアロゾル量が急増した成層圏では、年と共にその影響が徐々に小さくなるが、1999年頃までにはその影響がほとんどなくなり、成層圏エアロゾル量のバックグラウンドレベルといってもよい状態に達した。(3)この1999年の成層圏エアロゾル量は、1982年のエルチチョン火山爆発による成層圏エアロゾル量増加の影響がほぼなくなったと思われていた1989-1991年の量よりさらに少ない量であった。

成層圏エアロゾルの量は1997～1999年頃にはバックグラウンドレベルに戻ったが、粒径は2000年になってもまだ少しずつ小さくなりつつある。ただし、1997年以降のエアロゾルの個数密度がどういう傾向を示しているかは明らかではない。以上のことを考え合わせると、ピナツボ火山に

よる成層圏エアロゾルの増加は中緯度のオゾンを減少させたが(Solomon et al., 1998¹⁾; WMO 1998²⁾、その影響は1997～1999年頃までと考えられる。1997年以降、中緯度でのオゾン減少傾向が緩やかになりつつあるが、これは主に成層圏での塩素・臭素濃度の増加が止まり減少に転じた事による寄与である(WMO 2006³⁾)。

2) 臭素の影響

次に、最近注目されている臭素のオゾン破壊に関する影響について述べる。成層圏の臭素は、地表から放出されるハロンや臭化メチルがその主な源と考えられている。フロン規制によって、成層圏においても Cl_y (主として $\text{HCl} + \text{ClONO}_2$)の量は減少傾向に転じたと考えられる。一方、臭素のソースガスであるハロンの中には、現在まだ放出量が増加しているものがあり、成層圏の臭素量は、今後もう少しばらくの間は増加する可能性も残されている。臭素は、下部成層圏では塩素に比べてより活性な形をとって存在しており、例えば、塩素化合物では HCl がその大部分を占めるのに対し、 BrO と BrONO_2 が下部成層圏における臭素化合物の大部分を占める。従って、極渦内に限らず中緯度においても BrO が ClO と共にオゾン破壊サイクルを形成してオゾン破壊を起こすことが考えられる。

CCSR/NIES化学輸送モデルを使って、1997年の気象条件の下で、臭素化合物の濃度を強制的にゼロとおいた計算結果と現実の臭素化合物濃度を与えた際の計算結果との差から臭素化合物のオゾン量に対する影響を見積もった。まず、不均一反応過程を除外した場合、その影響は熱帯域で

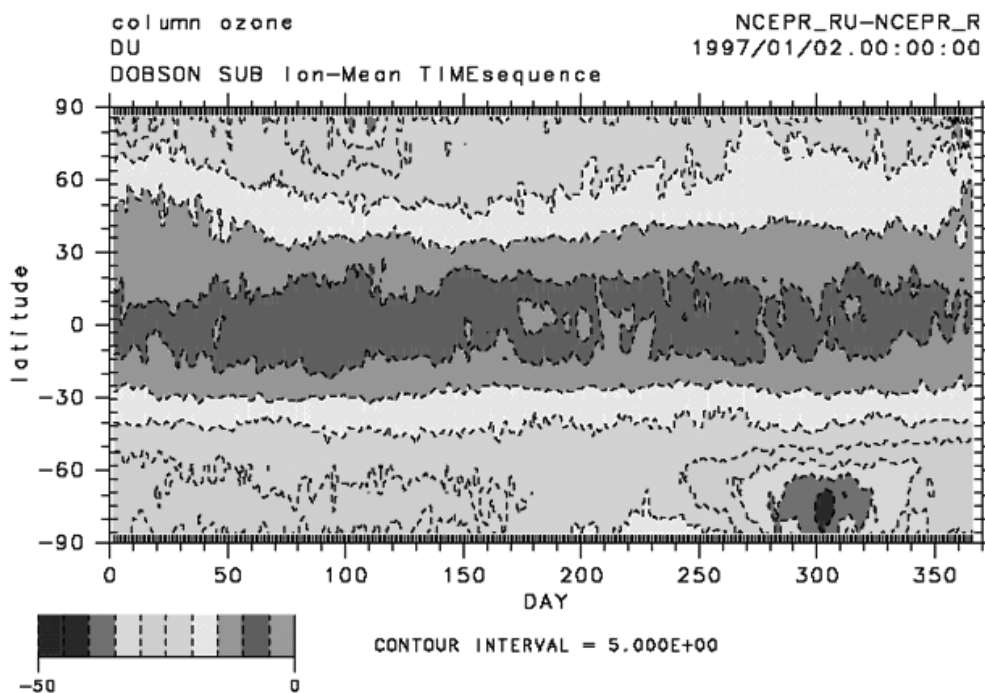


図2 臭素化学反応系を考慮したナッジング化学輸送モデルを用いた、オゾン濃度の時空間分布に対する臭素反応系の影響。図は現実の臭素化合物濃度を与えて計算されたオゾン分布と臭素化合物濃度を強制的にゼロにして計算されたオゾン分布の差を表している。経度平均値を示す。縦軸は緯度、横軸は1月1日からの日数。

10 D.U.以下、中高緯度では10-20 D.U.であった。次に、不均一反応過程を導入した場合、熱帯域と中緯度でも若干影響が増えるが、特に両極域においては30-40 D.U.程度の明瞭なオゾン破壊の増加が見られた（図2）。この極域の冬から春にかけての臭素化合物の影響は、この時期の全オゾン破壊量の30-40%に達する。南北両半球高緯度で臭素化合物のオゾン量への影響を比較すると、その影響は南極と北極で10 D.U.程度しか変わらないのが特徴である。

（2）低緯度および高緯度におけるオゾン濃度の低い事例の解析

（1）では、中緯度における化学オゾン破壊の場を提供する火山性エアロゾルと臭素のオゾン破壊への影響について述べた。この節では、低緯度および高緯度においてオゾン濃度の低い事例を解析した結果を示す。このような低濃度のオゾンを含む空気が中緯度へ流れてくると中緯度のオゾン濃度を減少させる。

1）低緯度におけるオゾン濃度の低い事例の解析

亜熱帯域から中緯度にかけてはオゾン全量の緯度勾配が急な領域のため、わずかなオゾン全量の空間パターンの移動が、ある地域の大きなオゾン変動につながる。長期的に空間パターンが変動しているならば、亜熱帯～中緯度域でのオゾンの長期変動に影響を及ぼす事になる。特に日本の南方に位置する西太平洋の亜熱帯地域には冬季にオゾン全量がオゾンホール並みに低い領域が観測されている。それ故、亜熱帯地域西太平洋のオゾン変動の実態解明とその変動要因は、日本におけるオゾン変動を考える上でも重要となる。Kawahira et al.⁴⁾は、EP-TOMSのオゾン全量データを解析し、2001年の12月に20°N、130°Eの領域（亜熱帯西太平洋）に、オゾン全量が225 DUを下回る領域があることを報告した。また、香港（22.22°N、114.19°E）、と那覇（26.12°N、127.40°E）の地上観測でも200 DU以下のオゾン全量が12月に約1週間～10日間観測され、最低値は190 DUに達したと報告している。この極端に低いオゾン全量値が輸送過程によって引き起こされたのか、あるいは単に年々変動の最低値がこの年にたまたま観測されたのか、を明らかにする。

（a）TOMSオゾン全量データと化学輸送モデルを用いた解析

亜熱帯域のオゾンの年々変動について、国立環境研究所で開発した水平分解能T21（5.6°×5.6°）

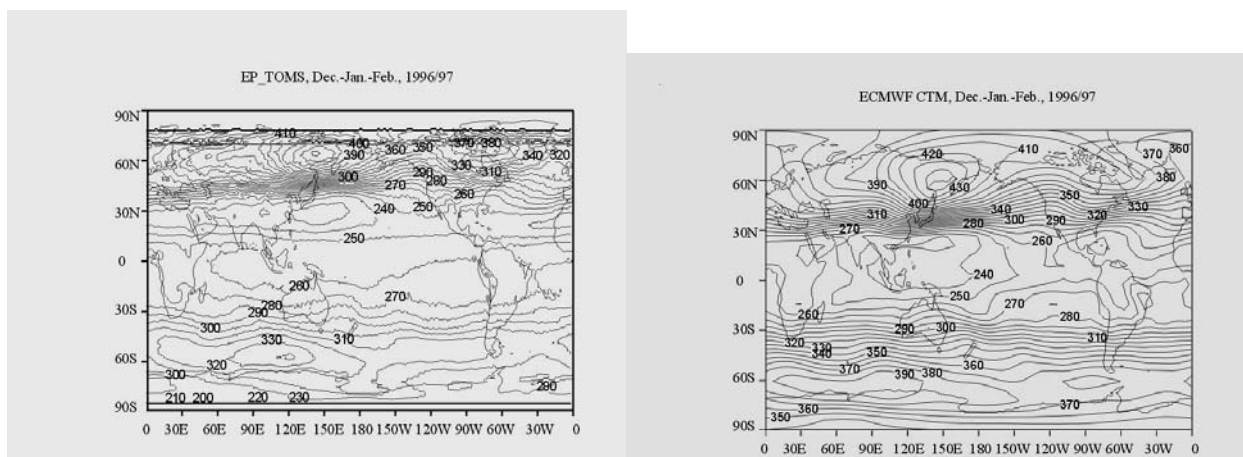


図3 EP-TOMSによるオゾン全量の観測値の1996年12月-1997年2月の平均値（左）と化学輸送モデルによる計算結果（右）。縦軸は緯度、横軸は経度を表す。図中の数値の単位はDU（ドブソンユニット）。

のナッジング化学輸送モデルとECMWFデータを用いて、1996年と1997年についてのオゾンのグローバル分布の計算を行った。図3は、1996年12月から1997年2月までの3ヶ月平均のEP-TOMSのオゾン全量分布（左）と同じ期間の化学輸送モデルによる計算値（右）である。

同様に、図4は1997年12月から1998年2月までの3ヶ月平均のEP-TOMSのオゾン全量分布と化学輸送モデルの計算値である。どちらの年も化学輸送モデルは、EP-TOMSの観測結果を良く再現していることがわかる。すなわち、北半球の高緯度のオゾン全量最大値とその場所、経度方向の等値線のうねり具合、緯度勾配など、特に、北半球でよい一致を示している。亜熱帯西太平洋域のオゾン全量極小域が、1996年は台湾から日本の南部にかけて位置しているのに対して、1997年は赤道東太平洋に移動していることも、化学輸送モデルの計算で良く再現されている。この2年間の亜熱帯オゾン極小域の位置の違いが、亜熱帯西太平洋域の冬季のオゾン全量の、この2年間の変動を引き起こしていることがわかる。また、このようなオゾン極小位置の年々変動は、QBOやEl Ninoの影響を受けているであろうと推測できる。

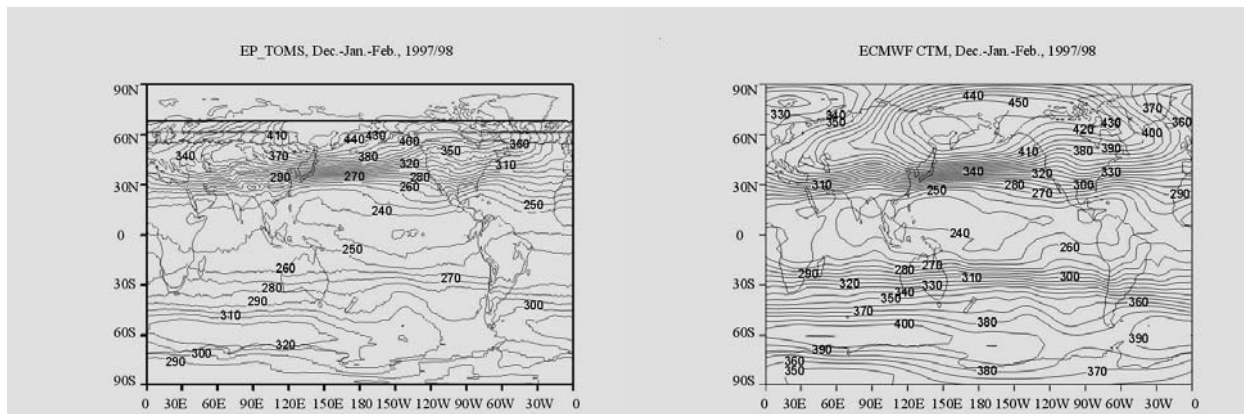


図4 EP-TOMSによるオゾン全量の観測値の1997年12月-1998年2月の平均値（左）と化学輸送モデルによる計算結果（右）。

1996年から2002年までのEP-TOMSによるオゾン全量の観測データを使い、亜熱帯西太平洋域（15-25N、120-150E）での観測値を面積の重みをつけて平均し、この領域平均に関してZiemke（1997）⁵⁾の方法で時系列解析を行った。この時系列解析では、季節変動、太陽活動の11年周期、QBO、El Nino、対流圏上部-成層圏下部気温（対流圏界面高度などに対応）の影響を調べることができる。その結果、振幅の大きい季節変動成分を除いた残りの年々変動成分について、この期間中オゾン全量の特に少なかった96/97、98/99、2001/02の冬季は、QBOの成分が大きいことがわかった。また、これらの年にはこの領域がQBOによって駆動される大気循環の上昇域に入るために、オゾン全量が少なくなっていることがわかった。ECMWF気象データを用い、不均一反応過程を除外したCCSR/NIESナッジング化学輸送モデルによる計算も行い、このモデルがこの領域のオゾン全量の年々変動をよく再現していることを確認し、それによってこの領域のオゾンの長期変動が、オゾンの輸送の長期変動によってほぼ決まっていることが明らかとなった（図5）。さらに、1979-1992年までのNimbus7-TOMSによるオゾン全量の観測データを用いて同様な時系列解析を行ったところ、QBOと対流圏上部-成層圏下部気温の影響が大きく、どちらもオゾン全量に関して5-10ドブソンユニットの寄与をもっていることがわかった。El Ninoの影響は、全般に小さいが、特定の年に限って大きかった（例えば1983年など、約8ドブソンユニットの寄与）。

以上の結果から、1996年から2002年のEP-TOMSの観測データに見られる最近の亜熱帯西太平洋域のオゾン極小は、QBOが特定の位相になったときに発生しており、QBOによるオゾンの輸送効果が主な原因であることがわかった。値としては少し小さいが、他に圏界面高度の影響や、El Ninoの影響も受けていることもわかった。不均一反応を除外した化学輸送モデルで、観測されたこの領域のオゾンの年々変動はほぼ再現できたが、一部観測値とモデルの計算値の一致がよくない部分も見られ、その原因の一つとして、圏界面付近で発生する氷晶などの表面で起こる不均一反応による、オゾン破壊反応の影響が考えられる。

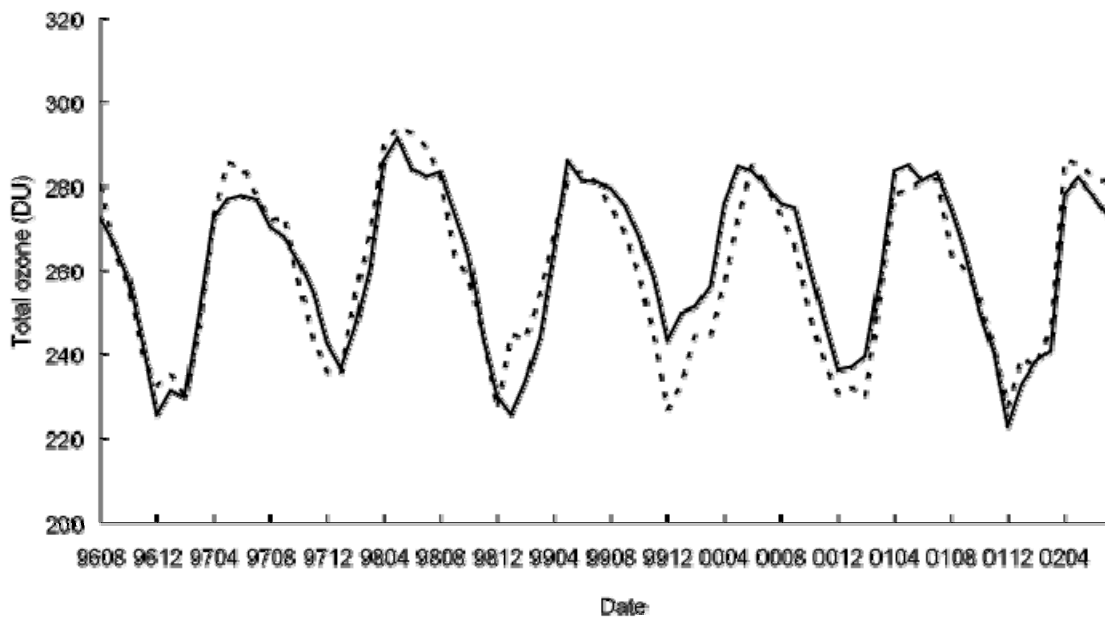


図5 亜熱帯西太平洋域（15-25° N, 120-150° E）のオゾン全量の年々変動。1996年8月から2002年6月までの面積で重みをつけたこの領域での平均値を示す。実線：EP_TOMSによる観測値。波線：化学輸送モデルによる計算結果。

(b) TOMSオゾン全量データとトラジェクトリー解析

1991年～2000年の10年間について、この領域の低いオゾン濃度がどの高度で起こっているのかを衛星データ（HALOE）の解析を通して調べた。衛星データ（HALOE）解析とトラジェクトリー解析の結果、亜熱帯西太平洋域のオゾンが、同じ緯度で、他の経度のオゾン濃度に比べて少なくなっている高度は、40-60 hPa付近（約20km）と10-15 hPa付近（約30km）に2つあり、このうち、40-60 hPa付近のオゾン濃度の低い部分は熱帯からのオゾン輸送の影響を受け、10-15 hPa付近の低オゾン域は、高緯度（アリューシャン高気圧付近）からのオゾンの輸送の影響を受けていることがわかった。

このうち、10-15hPa（約30km）でおこるオゾン濃度極小について、そのメカニズムを詳しく調べた。この領域はオゾン混合比のピークにあたり、その鉛直勾配が他の高度に比べて比較的小さいので鉛直方向のオゾン輸送を無視して、簡略化した2次元化学輸送モデル（10hPa、経度-緯度平面）を作成した。ただし、オゾンの生成・消滅項は、オゾン混合比の光化学平衡値からのずれ

をオゾンの光化学寿命で除して近似した（オゾンの光化学寿命は、例えば、南緯10度で10日、北緯70度で17日となるように与えた。）。輸送項は、ECMWFの1日2回の風速データを使って計算した。1991年10月1日から翌年の3月までの計算を行い、同様な計算を、1999年までの各年について行い、その平均をとった。図6は、1991年から2000年までHALOEによって観測された10hPa面で

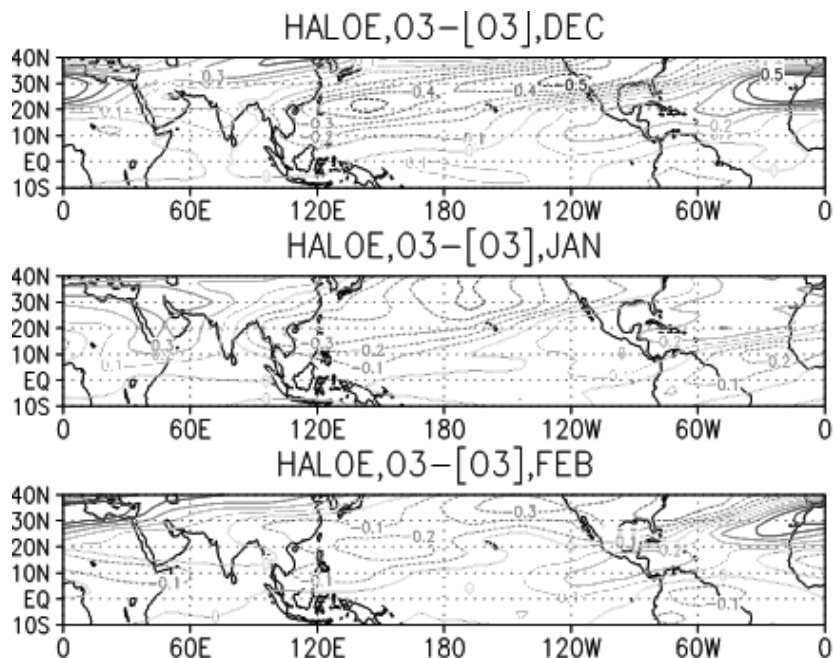


図6 HALOEによるオゾン量の東西平均からの偏差。10hPa面。単位はppmv。上から12月、1月、2月。

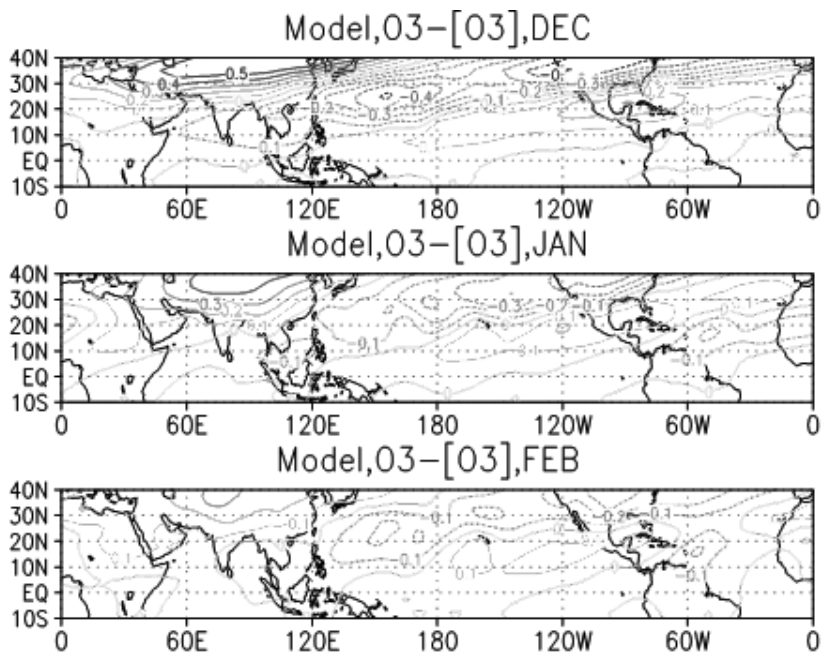


図7 簡単な光化学・輸送モデルでシミュレートされたオゾン量の東西平均からの偏差。単位はppmv。上から12月、1月、2月。

のオゾン混合比の平均値の、東西平均からの偏差（以後、Eddyオゾン場と呼ぶ）を表す。Eddyオゾン場は、北米から亜熱帯太平洋域にかけて負偏差となり、ユーラシア大陸から日本にかけて正偏差となっている。これは、北太平洋北部にあるアリューシャン高気圧循環による輸送によって、高気圧の東と南側では、この高度では高緯度のオゾンの少ない空気が移流される一方、高気圧の西と北側では、低緯度のオゾン濃度の高い空気が移流されるためである。これらの偏差は12月にいちばん強く見られ、2月には弱くなっていることがわかる。

図7に、簡略化された化学輸送モデルによって計算された対応するEddyオゾン場を示す。計算結果は、その空間パターンと月ごとの変化をよく再現している。特に、北太平洋のEddyオゾン分布はよく再現されており、前述したメカニズムによってこの高度付近のオゾン極小域が形成されていることが確認された。また、オゾンの光化学寿命や水平方向の渦拡散係数の値を変えて感度実験を行ったが、結果に大きな差はなく、現実的なパラメータの範囲でモデルは観測値を再現していると考えられる。40-60hPa付近（高度約20km）で起こるオゾン濃度の極小は、QBOなどの影響を受けて熱帯域からオゾンの少ない空気が輸送されることによって生じると考えられる。

（c）QBOのオゾンへの影響

前節の結果からわかるように、QBOは低緯度のオゾン濃度の変動に対して重要な役割をもつ。この節では、QBOの低緯度オゾン濃度への影響と、さらに中緯度への影響について詳細な解析を行った結果について述べる。

気象研究所成層圏化学—気候モデル（MJ98-CCM）の長期積分を行い、赤道成層圏準二年振動（QBO）におけるオゾンと東西風速の位相関係を調べた。モデルの水平解像度はT42（緯経度約2.8度、～300km）、鉛直解像度は68層（surface～0.01hPa）のT42L68を使った。QBOを再現するため、Hines（1997）のドップラー・スプレッド重力波抵抗スキームを使い、そのソースを南緯30度から北緯30度の間でガウス型（半値幅15度、振幅1.0m/s）を緯度に独立な均一ソース（1.5m/s）に上乘させた。また、対流圏の大循環を変えず、その影響を出来るだけ小さくするという方針で鉛直分解能と水平拡散を標準的な45層モデル（L45、成層圏で約2kmの層厚）の設定から変化させた。鉛直68層の取り方は、150hPaより上から変え、100hPaから1hPaの間で層厚500m、それから上で0.05hPaの上端まで徐々に増加させた。水平拡散はオゾンのモード（後述）に応じて2つのプロファイルを設定した。1つは時定数が高度150（120）hPaにおいて最大波数42で18時間から徐々に増加させ、100(70) hPaより上で10倍の180時間にし、それぞれv1（v0）と呼ぶ。

輸送過程はハイブリッド・セミ・ラグランジアン法である。鉛直にはフラックス・フォームのセミ・ラグランジアン法、水平には3次関数で内挿を行う“普通の”セミ・ラグランジアン法である。化学過程はファミリー法を使い、成層圏の主な化学種を含み、7種のファミリーを含む34の長寿命種、15の短寿命種、79の気相反応、34の光化学反応を扱っている。タイプI、IIの2種類の極成層圏雲（PSC）と硫酸エアロゾルも含み、PSC上で6種、硫酸エアロゾル上で3種の不均一反応を扱っている。

化学モジュールで予報したオゾンは力学モジュールの放射には反映する場合（Interactive）としない場合（Non-interactive）の2つの選択子がある。現実的なQBO周期を再現するのはv1_Interactive（v1_int）とv0_Non-interactive（v0_non）であり、それぞれ31ヶ月と27ヶ月である。v1_nonでは周期が20ヶ月短くなり、v0_intでは48ヶ月と長くなる（図8）。実際のQBOと比べるといずれも下部

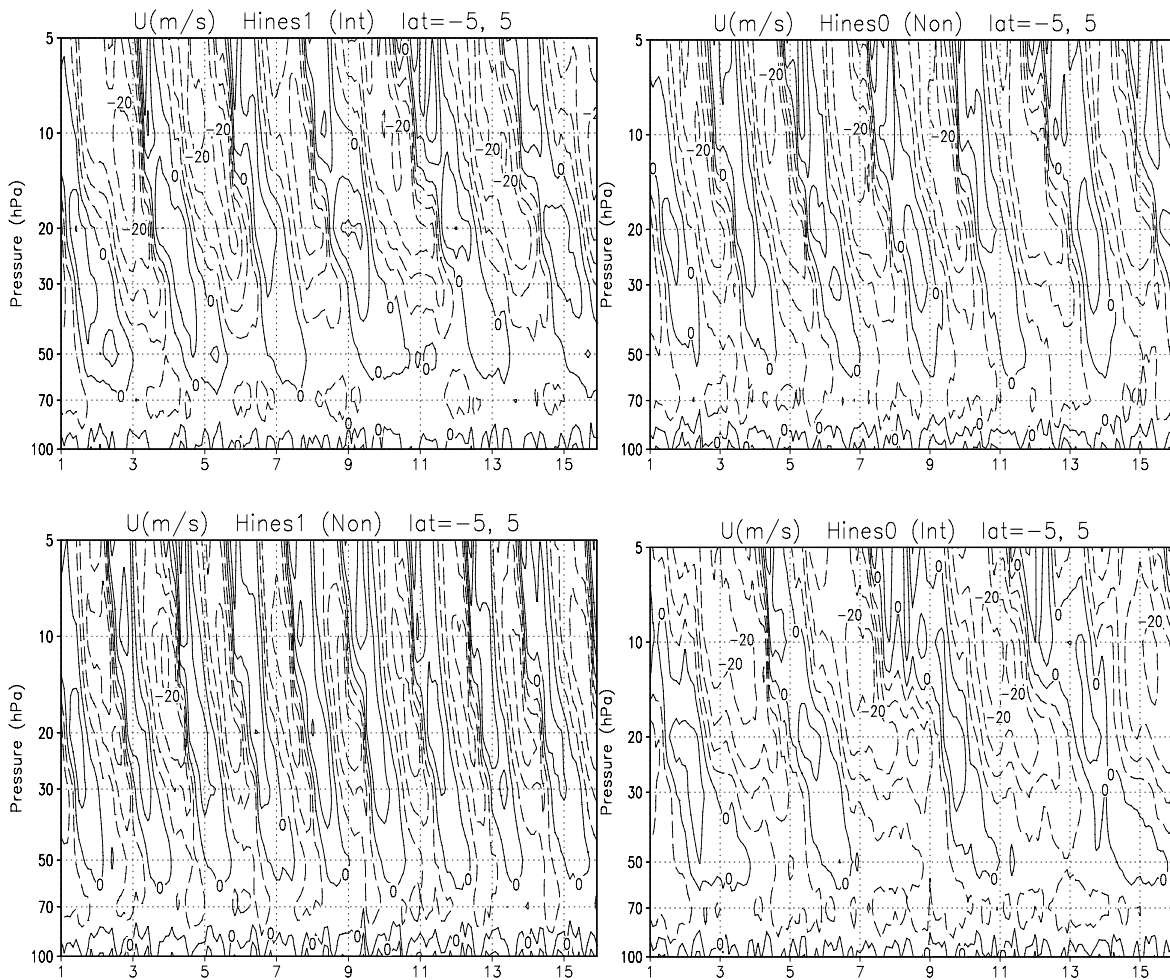


図8 赤道（ $5^{\circ}\text{S}-5^{\circ}\text{N}$ 平均）上空での東西風の時間変化（ $5-100\text{hPa}$ 、15年間）。等値線間隔は 5m/s で、正は実線、負は破線。（左上） $v1_int$ は周期31ヶ月、（左下） $v1_non$ は周期20ヶ月、（右上） $v0_non$ は周期27ヶ月、（右下） $v0_int$ は周期48ヶ月。

成層圏での西風成分が小さく、生の値では 100hPa まで降りていない（アノマリーでは降りている）。詳しく $v1$ と $v0$ を比較すると、 $v0$ の方が下部成層圏のシグナルが弱いことが判る。上部成層圏では逆にモデルのQBOが観測の値より大きいシグナルを示すが、観測自体が乏しいので、観測との比較は注意が必要である。オゾンの放射効果を入れるとQBOの周期が伸び（ $v0_non$ から $v0_int$ の実験）、逆にオゾンの放射効果を抜くと周期は小さくなる（ $v1_int$ から $v1_non$ の実験）。これらからオゾンの放射効果はQBOの周期を長くすることは確認できるがメカニズムはまだ判っていない。

大気場のQBOとオゾンのQBOの関係はずらし相関（図9）に見ることができる。これらの図ではプラス・マイナス24ヶ月までずらしを計算している。 $v1_int$ が最も観測を再現しており、約0.6の相関の極大が $20-30\text{hPa}$ に約マイナス数ヶ月で現れ、 -0.6 の極小値が約プラス12ヶ月で同じ高度に現れる。 15hPa より上では位相が反転しており、この高度ではオゾンに東西風が先行することを意味している。 $v0_non$ も、成層圏の中層での位相の傾きが直線的なのを除けば、 $v1_int$ とよく似ている。 $v1_non$ や $v0_int$ は周期が現実の値からかなりずれているので、一見すると、QBOにおけるオゾンと東西風の間関係を再現していないように見えるが、それぞれのQBO周期でずらしの期間を規

格化すれば、正の極値が現れる時期はほぼ同じの値のQBO周期の1/5位になり、マイナスの極値はその約2倍になることが判る。それ故、この4つのQBO実験は、近似的に等しく、“現実的に(QBO周期と相対的に) ”、QBOにおけるオゾンと東西風の関係を表現していると言える。

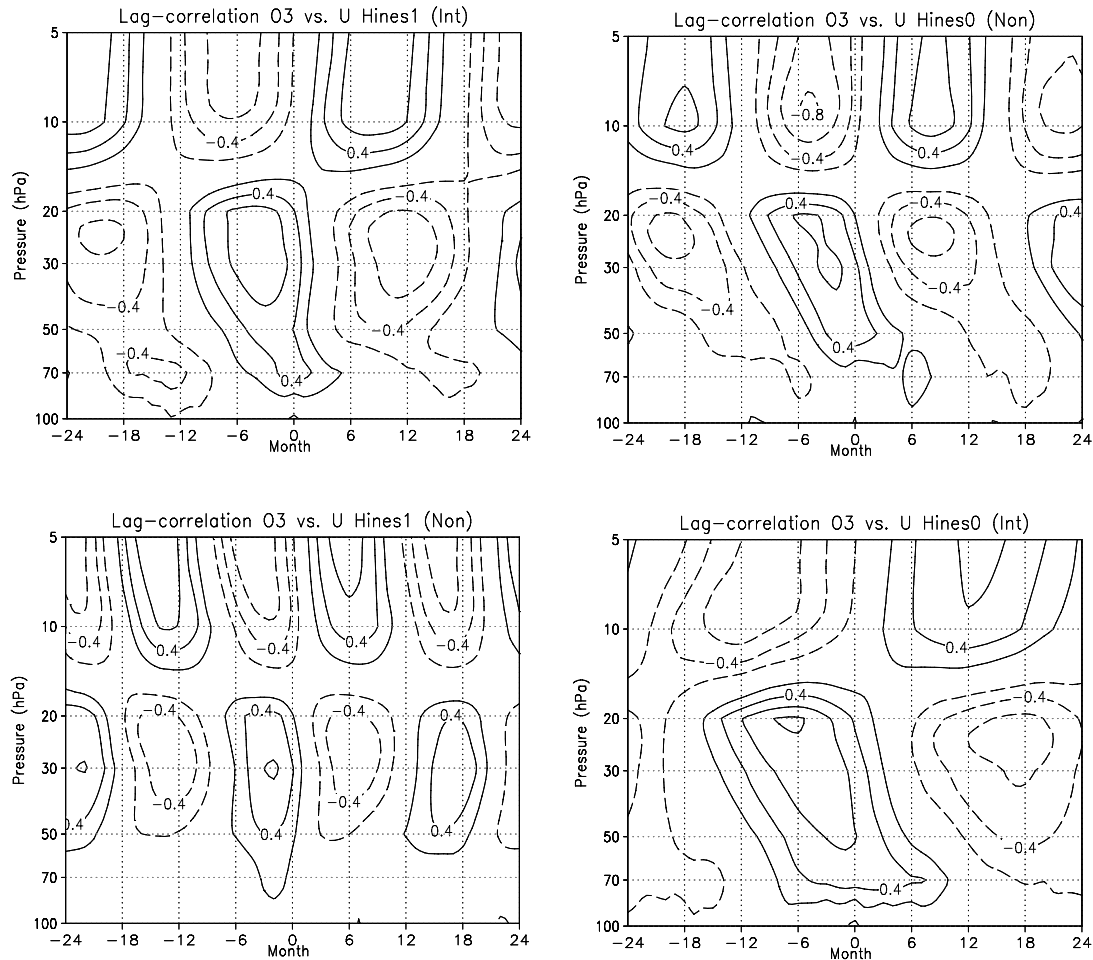


図9 赤道（5°S－5°N平均）上空での東西風とオゾンのずらし相関。横軸のずらしの値がマイナス（プラス）はオゾンが東西風に先行（遅行）することを表している。等値線間隔は0.2で、正は実線、負は破線。（左上）v1_int、（左下）v1_non、（右上）v0_non、（右下）v0_int。

次に、QBOの中高緯度オゾンに及ぼす影響について述べる。オゾンとQBOとの関係については、オゾン全量を用いた研究が行われている。赤道成層圏でQBOが西風シアのときは、下降流偏差のために赤道域でオゾン偏差が正で、冬半球側の亜熱帯域では逆にQBOに伴う上昇流偏差のためにオゾンは負偏差になることが知られている。しかし、データの制約からQBOに伴う3次元分布に関する観測的研究はほとんどない。ここでは、欧州中期予報センター（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts; ECMWF）作成の再解析データERA40によるオゾン量（Dethof and Holm, 2002⁶⁾）を用いてQBOとオゾンの関係を解析した。使用した期間は衛星データが同化されている1979-2002年の24年間である。

QBOの指標としては、いくつかのレベルの風の差を試してみたが、30 hPa と 70 hPaの西風の差（シア）が下部成層圏で最も顕著なオゾン差を示すので、 $([U]_{30} \text{ minus } [U]_{70})$ をQBOの指標とし

た。1月で西風シアが正の5年（1983, 1985, 1993, 1999, 2002年）と負の5年（1982, 1984, 1987, 1992, 2001年）を選んでコンポジット解析を行った。

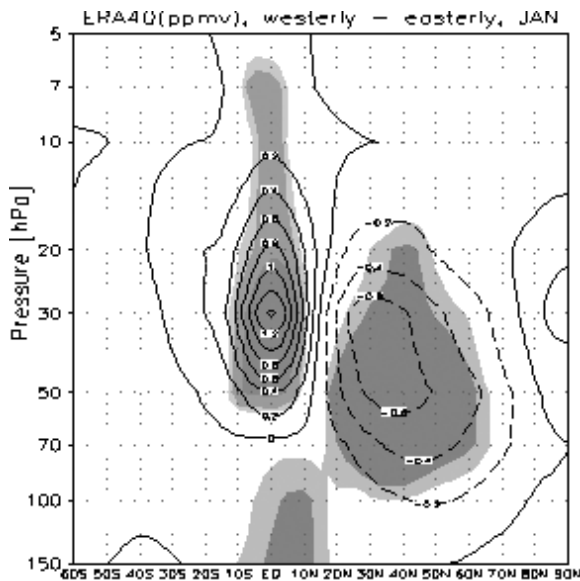


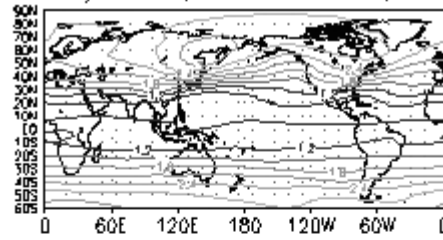
図 10 QBO の西風シアの 5 年と東風シアの 5 年の 1 月の帯状平均オゾン混合比の差（実線）。単位は ppmv。影は、90,95,99%の有意性で差が有意な領域を示す。

図10に東西平均オゾン混合比偏差を示す。偏差はこれまでの研究と同様であり、赤道域では 30 hPaで1.4 ppmvの大きな偏差が見える。この高度での気候値が4 ppmvであることを考えると 35%もの偏差である。また、下部成層圏では65°Nまで有意な差が示された。これは、単純なQBOに伴う子午面循環だけでは説明できず、Brewer-Dobson循環と波動による渦輸送の変化によるものと考えられる。

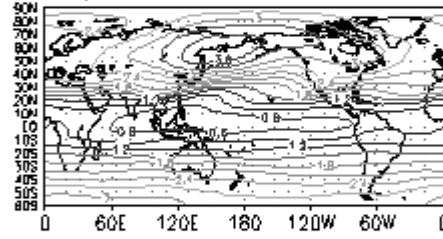
50 hPa面での西風シア年、東風シア年のオゾン分布とその差を図11に示す。赤道域のオゾン分布は両シア年ともほぼ東西一様でQBO偏差も同様であるが、北半球中高緯度ではオゾン分布はオホーツク海に極大を持ち、大きな波動成分を持っている。QBO偏差も大きな波動成分を示している。北半球中高緯度では、東風シア年のほうが、オゾンが多いが、その偏差の大きな領域は極東から太平洋域で大きく北に張り出し、75°Nまで有意な差が見られる。一方、大西洋からヨーロッパ域では有意な差は50°N付近までである。この結果は、東風シアのときのほうが、波の活動が活発で準定常なオゾンの波が西風シアのときと比べて増幅されると解釈できる。

北緯20-30度、東経120-180度付近の亜熱帯北西太平洋域は冬季オゾン全量が少なく、特に、下部成層圏で少ない（Han et al, 2005⁷⁾）。この領域は亜熱帯であるのでQBOの東風シアのときにオゾンが多いが、50 hPaでは有意な差とはなっていない（図11c））。これは、この領域は同緯度の他の経度領域に比較してオゾンが少ないオゾントラフに当たっており、東風シアのときに、オゾン波動が増幅されるためと考えられる。一方、オゾンリッジとなる日本から北太平洋域では顕著で有

a) westerly shear(83,85,93,99,02),50hPa,JAN



b) easterly shear(82,84,87,92,01),50hPa,JAN



c) westerly - easterly, m=7, JAN

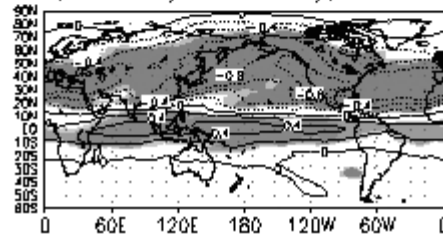


図 11 1 月の 50 hPa におけるオゾン混合比。等値線の単位は ppmv。a) QBO の西風シアの 5 年平均。b) QBO の東風シアの 5 年平均。c) 差（西風－東風）。影は有意性を表し図 1 と同じ。

意な差となる。

2) 高緯度におけるオゾン濃度の低い事例の解析—北極オゾン破壊の中緯度オゾン濃度に与える影響について

ここで使うCCSR/NIESナッジング化学輸送モデル（ナッジングCTM）は、CCSR/NIES 大気大循環モデル（AGCM）に光化学計算ルーチンを載せた化学気候モデル（Takigawa et al., 1999⁸⁾）を、水平方向に分解能を上げ（T42、 $2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$ ）、臭素化合物と硫黄化合物に関する光化学反応を導入し（Akiyoshi, 2000⁹⁾；Takigawa et al., 2002¹⁰⁾）、さらにナッジング（データ同化の簡便法）計算のルーチンを加えたものである（Akiyoshi et al, 2002¹¹⁾、2004¹²⁾）。ナッジングに使うデータとして、ECMWF_Operationalデータの東西風速、南北風速、気温を使った。1996年11月21日から1997年6月1日までの期間について、北極渦の境界の位置を判定しそのデータを使って次の3つの数値実験を行った。

標準実験：化学輸送モデルの全領域で化学過程を働かせる。

極渦内化学ON実験：上部対流圏から下部成層圏にあたる高度220 hPa～8.6 hPaの間の極渦の内側でのみ化学過程を働かせ、外側では、オゾンを化学反応を起こさないトレーサーとして計算する。

オゾントレーサー実験：高度220 hPa～8.6 hPaの間の化学輸送モデルの全領域で、オゾン化学反応を起こさないトレーサーとして計算する。

これらの3つの実験について以下の表に示す。

数値実験の概要

	極渦境界内	極渦境界外
標準実験	化学ON	化学ON
極渦内化学ON実験	化学ON	オゾン化学OFF
オゾントレーサー実験	オゾン化学OFF	オゾン化学OFF

計算は、1996年11月21日から始め、12月1日からそれぞれの実験の設定が働くようにした。したがって、（標準実験）—（オゾントレーサー実験）、あるいは、（極渦内化学ON実験）—（オゾントレーサー実験）で示される化学オゾン破壊量は、1996年12月1日からの積算値と考えてよい。これらの数値実験結果のうち、1997年4月13日18UTの温位450 Kの高度のオゾン体積混合比の、極渦内化学ON実験とオゾントレーサー実験との差の分布を図12に示す。黒の太線は極渦の中間境界を示し、黒の細い線は極渦の内側および外側境界を示す。極渦内で化学反応によってオゾンが減少している様子を示されている。更に日本の北海道上空（図の白っぽく見える部分）で、オゾン減少を起こした空気塊が極渦外へ輸送されていることがわかる。

この実験結果を、さらに、極渦の構造に沿った等価緯度に関して解析した。図13は、高度450Kにおける（極渦内化学ON実験）—（オゾントレーサー実験）の値の、4つの等価緯度帯での時系列を表す。(a)の等価緯度 57.5° - 62.5° Nは極渦のすぐ外側に対応し、(b)→(c)→(d)となるにしたがって 5° おきにより低緯度側に位置する等価緯度帯を表す。図中の(1)～(4)の番号は極渦内から極渦外へ空気の大きな流出イベントが起こった時期を表す。これを見ると、(a)の極渦のすぐ近くでは、最初の流出イベントに対応して極渦内からのオゾン濃度の低い空気がやってきてオゾン濃度の低下が見られる。しかしながら、(c)や(d)の極渦からある程度離れた場所では、(1)および(2)の流出イベ

ントによってオゾン濃度が低下することはなく、4月に入ってから極渦が崩壊前に不安定になり始めた頃に起こった(3)や(4)の流出イベントで初めてその影響が現れたことがわかる。1997年の北極渦では、極渦内のオゾン破壊の影響は極渦外のごく近傍に限られ、45°Nくらいの中緯度には4月になって初めてその影響がみられることがわかった。

最後に、450 Kの等価緯度55-65Nでは、極渦内オゾン破壊の極渦外オゾン濃度への影響は、20～25%であり、365～525Kの下部成層圏では、12～15DUの影響があることがわかった（オゾン全量の3-4%に達する）。一方、等価緯度30-60N平均では、その影響は3月末までに2 DU、4月末までに4 DU程度となった。以上の結果から、1997年の北極オゾン破壊に関して、そのオゾン減少の中緯度への影響は、極渦の外側約10°の緯度帯のオゾン量に対しては大きいですが、中緯度全体のオゾン量に対する影響は小さいことがわかった。さらに、中低緯度では極渦外のオゾン光化学の影響が強くなるので、極渦内オゾン破壊の影響は、（極渦内化学ON実験）と（オゾントレーサー実験）の差で示された値（どちらも極渦外では、オゾンはトレーサーに設定されている）よりもさらに小さくなることが予想される。

18 UT, 13 April 1997, 450K

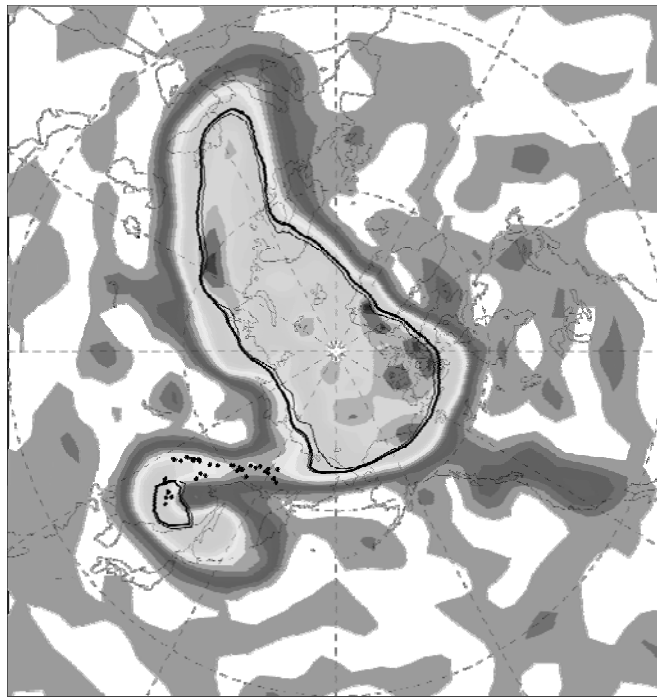


図12 1997年4月13日18UT、温位450 Kの高度のオゾン体積混合比の（極渦内化学ON実験）－（オゾントレーサー実験）の分布。極渦内とその周辺の白っぽい色は負の大きな値を表す。中緯度域の斑になった白い部分は正の小さな値を表す。黒の太い実線は北極渦の中間境界、細い実線は内側と外側境界を表す。黒い粒子はラグランジュ的な計算法によって極渦の内側から外側へ流出したと判定された空気塊を表す。

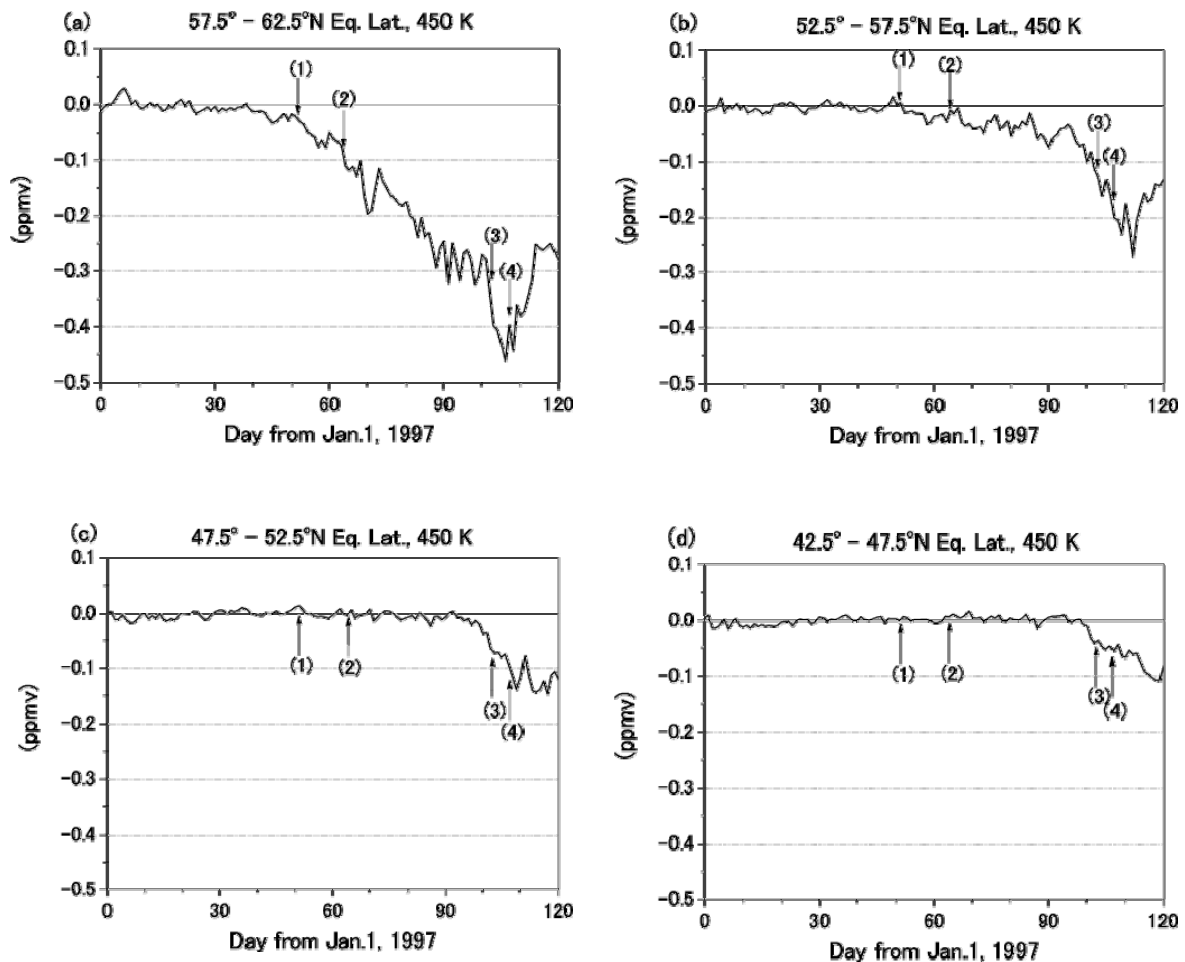


図13 温位450 Kの高度での4つの等価緯度帯でのオゾン体積混合比の（極渦内化学ON実験）－（オゾントレーサー実験）の値の時間変化。1997年1月1日～4月30日までを、1月1日からの日数で表している。図中の(1)-(4)の番号は、北極渦の内側から外側への大空気の大きな流出イベントが起こった時期を表す。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

中緯度のオゾン量のトレンドに影響を及ぼす要因のうち、重要と思われる要因に関してその影響を定量的に明らかにし、また、影響を引き起こすメカニズムについての考察を行った。中緯度のオゾン量に影響をおよぼす要因としては以下のものが考えられる。

中緯度で化学的なオゾン破壊を引き起こす要因としては、成層圏エアロゾルの火山爆発による増加と臭素化合物の影響が考えられる。また、中緯度以外の場所の低いオゾン濃度をもった空気

が中緯度へ流入することによるオゾン濃度低下も重要な要因である。低緯度側からの流入に関してはQBOの影響が重要である。また、高緯度側からの流入に関しては、冬から春にかけての極渦内で起こるオゾン破壊空気塊との混合が重要である。本研究では、これらの過程を明らかにしその中緯度オゾン濃度への影響を定量的に見積もるために、オゾンの衛星データ、化学輸送モデル、トラジェクトリー解析を駆使した。解析の結果、(1)1991年6月のピナツボ火山爆発によるオゾン層への影響は1997~1999年くらいまでにはなくなった (2)臭素によって中緯度では10~20DU程度のオゾン量が破壊されている (3)台湾の東海上の亜熱帯西太平洋域の冬に起こる220DU以下の低オゾン域の出現にはQBOの影響が大きい (4) QBOの周期にはオゾンによる大気加熱が関係している (5) QBOはQBOに伴う子午面循環と成層圏の波動活動との相互作用によって中高緯度オゾン量に影響を与えている (6)1997年のような安定した北極渦の下では極渦内でのオゾン破壊の進んだ空気が極渦外の空気と混合することによって極渦外のオゾン濃度を低下させる働きは、北極渦境界のすぐ外側の領域では大きいとその影響は極渦境界から低緯度側に等価緯度10°の範囲に限られ中緯度全体（等価緯度30-60N平均）では小さかった、ということが明らかとなった。

これらの過程の影響が複雑に絡み合って観測されたオゾントレンドが実現していると考えられる。国際プロジェクトCCMVal（化学気候モデル検証）の下で行われた1980-2004年のオゾン層変動再現実験（CCMVal-REF1）には、これらの過程を導入した化学気候モデルによるオゾン層変動の計算が行われ、CCSR/NIESモデルもこのプロジェクトに参加し再現実験を行った。その結果、火山爆発によるオゾン濃度の急激な減少とその後の数年かけての回復、QBOによる低緯度および中高緯度のオゾン変動、臭素によるオゾン破壊などが再現された（例えば、Eyring et al., 2006¹³⁾; Akiyoshi et al.¹⁴⁾, to be submitted)。今後の課題としては、本研究で取り上げた個々の過程に関してさらに詳しく調べるとともに、これらの過程を取り入れた化学気候モデルあるいは化学輸送モデルを使った数十年の長期計算を行ってそのトレンドを解析し、観測された中緯度のオゾントレンドの再現性の向上に努めることが必要である。

（2）地球環境政策への貢献

- ・ 本課題の成果に関するアウトリーチ活動の一環として、2006年10月に一般向けの講演会を開催、これまでのオゾン層変動に関する講演を行った。
- ・ 環境省環境研修所での地球環境保全研修で極域オゾン層破壊が中緯度に及ぼす影響に関する研究成果の一部を紹介した。
- ・ 兵庫県および愛知県フロン回収・処理推進協議会通常総会での特別講演などで成層圏エアロゾルの影響および低緯度域でのオゾン変動に関する成果の一部を紹介した。

6. 引用文献

- 1) Solomon, S., R. W. Portmann, R. R. Garcia, W. Randel, R. Nagatani, J. Gleason, L. Thomason, L. R. Poole, and M. P. McCormick (1998), Ozone depletion at mid-latitudes: Coupling of volcanic aerosols and temperature variability to anthropogenic chlorine, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1871-1874.
- 2) WMO (1998) Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998, Global Ozone Research and Monitoring Project –Report No.44.
- 3) WMO (2007) Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006, Global Ozone Research and

Monitoring Project –Report No.50.

- 4) Kawahira, K., Y. Iwasaka, and G.-Y. Shi (2002) The western Pacific ozone low in December 2001, In International Symposium on Stratospheric Variations and Climate, 220-221.
- 5) Ziemke, J. R., S. Chandra, R. D. McPeters, and P. A. Newman (1997) Dynamical proxies of column ozone with applications to global trend models, *J. Geophys. Res.*, 102(D5), 6117-6129.
- 6) Dethof, A. and E. Holm (2004) Ozone assimilation in the ERA-40 reanalysis project. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 131, In press.
- 7) Han, J., Yamazaki, K., and M. Niwano (2005) The winter ozone minimum over the subtropical northwestern Pacific, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 83, 57-67.
- 8) Takigawa, M., M. Takahashi, and H. Akiyoshi (1999) Simulation of ozone and other chemical species using a Center for Climate System Research / National Institute for Environmental Studies atmospheric GCM with coupled stratospheric chemistry, *J. Geophys. Res.*, 104, 14003-14018.
- 9) Akiyoshi, H. (2000) Modeling of chemistry and chemistry-radiation coupling process for the middle atmosphere and a numerical experiment on CO₂ doubling with a 1-D coupled model, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 78, 563-584.
- 10) Takigawa, M., M. Takahashi, and H. Akiyoshi (2002) Simulation of stratospheric sulfuric acid aerosol using a Center for Climate System Research / National Institute for Environmental Studies atmospheric GCM with coupled chemistry: Part I, nonvolcanic simulation, *J. Geophys. Res.*, 107(D22), 4610, doi:10.1029/2001JD001007.
- 11) Akiyoshi, H., S. Sugata, T. Sugita, H. Nakajima, H. Hayashi, J. Kurokawa, and M. Takahashi (2002) A low-N₂O air mass simulated by the CCSR/NIES nudging CTM and observed by ILAS in 1997, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 80, 451-463.
- 12) Akiyoshi, H., T. Sugita, H. Kanzawa, and N. Kawamoto (2004) Ozone perturbations in the Arctic summer lower stratosphere as a reflection of NO_x chemistry and planetary scale wave activity, *J. Geophys. Res.*, 109, D03304, doi:10.1029/2003JD003632.
- 13) Eyring, V., N. Butchart, D. W. Waugh, H. Akiyoshi, J. Austin, S. Bekki, G. E. Bodeker, B. A. Boville, C. Bruhl, M. P. Chipperfield, E. Cordero, M. Dameris, M. Deushi, V. E. Fioletov, S. M. Frith, R. R. Garcia, A. Gettelman, M. A. Giorgetta, V. Grewe, L. Jourdain, D. E. Kinnison, E. Mancini, E. Manzini, M. Marchand, D. R. Marsh, T. Nagashima, P. A. Newman, J. E. Nielsen, S. Pawson, G. Pitari, D. A. Plummer, E. Rozanov, M. Schraner, T. G. Shepherd, K. Shibata, R. S. Stolarski, H. Struthers, W. Tian, and M. Yoshiki (2006) Assessment of temperature, trace species and ozone in chemistry-climate model simulations of the recent past, *J. Geophys. Res.*, 111, D22308, doi:10.1029/2006JD007327.
- 14) Akiyoshi, H., L. B. Zhou, K. Sakamoto, M. Yoshiki, T. Nagashima, M. Takahashi, J. Kurokawa, M. Takigawa, and T. Imamura, Delay of the Antarctic polar vortex breakup time in the year 1980-1999 due to ozone depletion simulated by the CCSR/NIES CCM, to be submitted.

7. 国際共同研究等の状況

SPARC (成層圏プロセスとその気候に対する役割) の活動の1つであるCCMVal(Chemical Climate

Model Validation:化学気候モデル検証プロジェクト)に参加。モデル間の比較のためのデータ等を提供している。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) H. Akiyoshi, J. Meteorol. Soc. Japan, 80, 361-385 (2002). "Chemistry and temperature perturbations calculated by a chemical-radiative coupled 1-D model due to Pinatubo aerosols"
- 2) H. Akiyoshi, S. Sugata, T. Sugita, H. Nakajima, H. Hayashi, J. Kurokawa, and M. Takahashi: J. Meteor. Soc. Japan, 80, 451-463 (2002). "A low-N₂O airmass simulated by the CCSR/NIES nudging CTM and observed by ILAS in 1997"
- 3) M. Takigawa, M., M. Takahashi, and H. Akiyoshi: J. Geophys. Res., 107, 10.1029/2001JD001007, 2002. "Simulation of stratospheric sulfuric acid aerosol using a Center for Climate System Research / National Institute for Environmental Studies atmospheric GCM with coupled chemistry: Part I, nonvolcanic simulation".
- 4) T. Nagashima, M. Takahashi, M. Takigawa, and H. Akiyoshi: Geophys. Res. Lett., 29, 8, 10.1029/2001GL014026, (2002). "Future development of the ozone layer calculated by a general circulation model with fully interactive chemistry".
- 5) N. Saitoh, S. Hayashida, Y. Sasano, and L. L. Pan: J. Geophys. Res., 107, 10.1029/2001JD000595, 2002. "Characteristics of Arctic polar stratospheric clouds in the winter of 1996/1997 inferred from ILAS measurements" L. B. Zhou, H. Akiyoshi, and K. Kawahira: J. Geophys. Res., 108, D20, 4627, doi:10.1029/2003JD003412 (2003). "Analysis of year-to-year ozone variation over the subtropical western Pacific region using EP_TOMS data and CCSR/NIES nudging CTM"
- 6) A. Kagawa and S. Hayashida: J. Geophys. Res., 108, D22, 1-20, doi:10.1029/2002JD002824 (2003). "Analysis of ozone loss in the Arctic stratosphere during the late winter and spring of 1997, using the Chemical Species Mapping on Trajectories (CSMT) technique"
- 7) N. Taniguchi, N., S. Hayashida, K. Takahashi, and Y. Matsumi: Atmos. Chem. Phys., 3, 1293-1300 (2003). "Sensitivity studies of the recent new data on O(¹D) quantum yields in O₃ Hartley band photolysis in the stratosphere".
- 8) T. Nakayama, K. Takahashi, Y. Matsumi, N. Taniguchi, and S. Hayashida: J. Geophys. Res., 108, 1-7, doi:10.1029/2003JD003709 (2003). "Quantum yield for N(⁴S) production in the ultraviolet photolysis of N₂O".
- 9) H. Hatsushika and K. Yamazaki: J. Geophys. Res., 108, D19, 4610, doi:10.1029/2002JD002986 (2003). "Stratospheric drain over Indonesia and dehydration within the tropical tropopause layer diagnosed by air parcel trajectories"
- 10) M. Ogi, Y. Tachibana, and K. Yamazaki: Geophys. Res. Lett., 30, 13, 1704, doi:10.1029/2003GL017280 (2003). "Impact of the North Atlantic Oscillation (NAO) on the Summertime Atmospheric Circulation"
- 11) M. Niwano, K. Yamazaki, and M. Shiotani: 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”
- 12) H. Akiyoshi, T. Sugita, H. Kanzawa, and N. Kawamoto: *J. Geophys. Res.*, 109, D3, D03304, doi:10.1029/2003JD003632 (2004). “Ozone perturbations in the Arctic summer lower stratosphere as a reflection of NO_x chemistry and wave activity”
- 13) M. Ogi, Y. Tachibana, and K. Yamazaki, *J. Meteor. Soc. Japan*, 82, 905-913 (2004). “The connectivity of the winter North Atlantic Oscillation (NAO) and the summer Okhotsk high”.
- 14) M. Ogi, K. Yamazaki, and Y. Tachibana, *J. Geophys. Res.*, 109, D20114, doi:10.1029/2004JD004514 (2004). “Summertime annular mode in the Northern Hemisphere and its linkage to the winter mode”.
- 15) J. -Y. Han, K. Yamazaki, and M. Niwano, *J. Meteor. Soc. Japan*, 83, 57-67 (2005). “The winter ozone minimum over the subtropical northwestern Pacific”.
- 16) K. Shibata, M. Deushi, T. Sekiyama, and H. Yoshimura, *Papers in Geophysics and Meteorology*, 55, 75-119 (2005). “Development of an MRI chemical transport model for the study of stratospheric chemistry”.
- 17) J. Kurokawa, H. Akiyoshi, T. Nagashima, H. Nakane, H. Masunaga, T. Nakajima, M. Takahashi, Effects of atmospheric sphericity on the stratospheric chemistry and dynamics over Antarctica, *J. Geophys. Res.*, 110(D21), D21305, doi:10.1029/2005JD005798 (2005).
- 18) K. Shibata and M. Deushi: *Geophys. Res. Lett.*, 32, L24802, doi:10.1029/2005GL023433 (2005). “Radiative effect of ozone on the quasi-biennial oscillation in the equatorial stratosphere”.
- 19) H. Akiyoshi, S. Sugata, M. Yoshiki, and T. Sugita: *J. Geophys. Res.*, 111, D22311, doi:10.1029/2005JD006540 (2006). “Ozone decrease outside Arctic polar vortex due to polar vortex processing in 1997”.
- 20) 吉識宗佳、木津暢彦、佐藤薫：天気、53(2)、123-133 (2006)、「昭和基地連結飛揚観測に基づくラジオゾンデデータ品質比較」
- 21) Eyring, V., N. Butchart, D. W. Waugh, H. Akiyoshi, J. Austin, S. Bekki, G. E. Bodeker, B. A. Boville, C. Bruhl, M. P. Chipperfield, E. Cordero, M. Dameris, M. Deushi, V. E. Fioletov, S. M. Frith, R. R. Garcia, A. Gettelman, M. A. Giorgetta, V. Grewe, L. Jourdain, D. E. Kinnison, E. Mancini, E. Manzini, M. Marchand, D. R. Marsh, T. Nagashima, P. A. Newman, J. E. Nielsen, S. Pawson, G. Pitari, D. A. Plummer, E. Rozanov, M. Schraner, T. G. Shepherd, K. Shibata, R. S. Stolarski, H. Struthers, W. Tian, and M. Yoshiki: *J. Geophys. Res.*, 111, D22308, doi:10.1029/2006JD007327 (2006). “Assessment of temperature, trace species and ozone in chemistry-climate model simulations of the recent past”.
- 22) Charlton, J. A., L. M. Polvani, J. Perlwitz, F. Sassi, E. Manzini, K. Shibata, S. Pawson, J. E. Nielsen, and D. Rind: *J. Climate*, in press (2007). “A new look at stratospheric sudden warmings. Part II. Evaluation of numerical model simulations”

<報告書（査読あり）>

- 1) Bodeker, G. E., and D. W. Waugh (Lead Authors), H. Akiyoshi, P. Braesicke, V. Eyring, D. W.

Fahey, E. Manzini, M. J. Newchurch, R. W. Portmann, A. Robock, K. P. Xhine, W. Steinbrecht, and E. C. Weatherhead (2007), The ozone layer in the 21st century, Chapter 6 in *Scientific assessment of ozone depletion: 2006*, Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 50, 572pp., World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 林田佐智子：天気、50, 6, 415-423 (2003). 「『光学 リモートセンシングによる成層圏エアロゾルおよびオゾンの研究』－2002年度堀内賞記念講演－」
- 2) H. Akiyoshi, M. Takigawa, J. Kurokawa, T. Sugita, H. Kanzawa, M. Takahashi: CGER's Supercomputer Activity Report, 10, 3-11 (2003). “Study on ozone layer variation using the CCSR/NIES AGCM with coupled chemistry and the CCSR/NIES nudging CTM”
- 3) 木田秀次他：天気、51, 3, 175-199 (2004). 「第23回国際測地学・地球物理学連合総会（IUGG2003・札幌）の報告(1)」
- 4) 秋吉英治、第23回国際測地学・地球物理学連合総会(IUGG2003・札幌)の報告(2) 6.火山活動と地球大気、天気,51(4):24-25 (2004)
- 5) 秋吉英治、オゾンホールを予測する手立て、152-159, 第18回「大学と科学」公開シンポジウム公演収録集－オゾンのゆくえ－気候変動とのかかわりをさぐる、宮原三郎編集、クバプロ、ISBN4-87805-049-7 (2004)
- 6) H. Akiyoshi, T. Imamura, J. Kurokawa, M. Takigawa, S. Sugata, H. Nakane, and M. Takahashi (2004), A study on polar ozone destruction due to bromine species, CGER's Supercomputer Activity Report, 11, 3-10.
- 7) 柴田清孝、出牛真、気象研究所成層圏化学輸送モデル(MJ98-CTM)で再現されたQBOによる大気場と化学種の位相関係、第15回大気化学シンポジウム研究集会講演集、111-113 (2005)
- 8) Akiyoshi, H., L. B. Zhou, and M. Takahashi, Northern hemisphere lower stratospheric N₂O distributions in the early and late polar vortex breakup years, CGER's Supercomputer Activity Report, 13, 3-13 (2006)
- 9) Shibata, K. and M. Deushi, Radiative effect of ozone on the relation between dynamical field and ozone in the QBO: Simulation by the stratospheric chemical transport model of meteorological research institute, CGER's Supercomputer Activity Report, 13, 19-24 (2006)
- 10) 柴田清孝・出牛真、2006、QBOにおける大気場と化学種の位相関係について（その2）、第16回大気化学シンポジウム研究集会講演集、76-78 (2006).
- 11) Akiyoshi, H., M. Yoshiki, T. Nagashima, M. Takahashi, T. Imamura, J. Kurokawa, M. Takigawa, K. Sakamoto, and L. B. Zhou (2007) A future ozone layer prediction using CCSR/NIES chemical climate model with T42 horizontal resolution, CGER's Supercomputer Activity Report, 14, 3-9.
- 12) Shibata, K. and M. Deushi, Solar signals of 11-year cycles in temperature and ozone in the middle atmosphere simulated with a chemistry-climate model of Meteorological Research Institute, CGER's Supercomputer Activity Report Vol.14-2005 19-24, National Institute for Environmental Studies, Japan, 2007.
- 13) Matthes, K., K. Kodera, L. Gray, J. Austin, A. Kubin, U. Langematz, D. Marsh, J. McCormack, K.

Shibata, D. Shindell 2006: Report on the first SOLARIS workshop, SPARC Newsletter, 28, 19-22.

- 14) 秋吉英治、坂本圭、永島達也、今村隆史、2100年までのオゾン層将来予測実験、第17回大気化学シンポジウム研究集会講演要旨集、30-31 (2007).
- 15) 坂本圭、秋吉英治、永島達也、L. B. Zhou、高橋正明、太陽11年周期変動に対応する熱帯下部成層圏オゾンの変動に関する解析、第17回大気化学シンポジウム研究集会講演要旨集、33-34 (2007).

(2) 口頭発表 (学会)

- 1) 秋吉英治、周立波、川平浩二：日本気象学会、札幌、2002年。「台湾近辺の12月と1月のオゾン全量の年々変動」
- 2) H. Akiyoshi, S. Sugata, T. Sugita, H. Nakajima, H. Hayashi, H. Kanzawa, J. Kurokawa, N. Kawamoto, and M. Takahashi: Internatinal Symposium on Stratospheric Variations and Climate, Fukuoka, 2002年. “A study on transport and chemistry in the summer lower stratosphere using CCSR/NIES nudging CTM and the ILAS observation”
- 3) K. Yamazaki and H. Hatsushika: The 2002 GRIPS (GCM-Reality Intercomparison Project for SPARC) Workshop, つくば、2002年、[招待講演] ”Circulation and transport in the tropical tropopause layer”
- 4) S. Hayashida, AWAJI Symposium and Workshops, 淡路、2003年、[招待講演] “Arctic ozone destruction and PSC appearance observed with ILAS/ADEOS in winter and early spring of 1997”.
- 5) 小木雅世、山崎孝治、立花義裕：日本気象学会2004年度春季大会 (2004) 「夏季北半球環状モードの維持過程について」
- 6) H. Akiyoshi, T. Imamura, J. Kurokawa, M. Takigawa, S. Sugata, and H. Nakane, 3rd SPARC General Assembly, Victoria, Canada, 2004年. “A CTM study of lower stratospheric ozone destruction due to bromine species inside/outside the Arctic polar vortex”
- 7) 秋吉英治、L. B. Zhou、黒川純一、菅田誠治、今村隆史、滝川雅之、川平浩二、中根英昭、第23回レーザセンシングシンポジウム、筑波山、2004年。「極成層圏雲と硫酸エアロゾルを介した臭素のオゾン層への影響ーライダー観測に望むことー」
- 8) 秋吉英治、菅田誠治、吉識宗佳、杉田考史、日本気象学会2004年秋季大会、福岡、2004年。「北極渦内オゾン破壊の極渦外への影響について」
- 9) 柴田清孝・出牛真、日本気象学会2004年秋季大会、福岡、2004年。「熱帯成層圏準2年振動(QBO)のシミュレーション：その1 Non-interactiveオゾン」
- 10) 柴田清孝・出牛真、日本気象学会2004年秋季大会、福岡、2004年。「熱帯成層圏準2年振動(QBO)のシミュレーション：その2 Interactiveオゾン」
- 11) 林田佐智子、池田奈生、戸田庸子、入江仁士、中島英彰、日本気象学会2004年秋季大会、福岡、2004年。「CIONO₂/ILASとHCl/HALOEの解析に基づく極域成層圏における塩素化学種分配とCly推定」
- 12) 秋吉英治、分子化学研究所研究会、大気科学における不均質系の分子化学、岡崎、2005年。「3次元モデルを用いたオゾン層破壊のシミュレーションと不均一反応」
- 13) 秋吉英治、菅田誠治、黒川純一、滝川雅之、今村隆史、中根英昭、化学輸送モデルを用いた

- 94/95 95/96 96/97年冬の北半球中高緯度域オゾン破壊の緯度別解析、日本気象学会春季大会、東京、2005年5月15-18日；2005年度春季大会講演予稿集(87)、106
- 14) 庭野将徳、古屋望、秋吉英治、林田佐智子、SAGE IIデータを用いた成層圏エアロゾルの解析～季節変動および準2年周期振動～日本気象学会春季大会、東京、2005年5月15-18日；2005年度春季大会講演予稿集(87)、138
- 15) 柴田清孝・出牛真、2005：熱帯成層圏準2年振動（QBO）のシミュレーション：その3 QBOの中高緯度への影響（於Interactiveオゾンラン）、日本気象学会春季大会、東京、2005年5月15-18日；2005年度春季大会講演予稿集(87)、217
- 16) H. Akiyoshi, M. Yoshiki, T. Nagashima, J. Kurokawa, M. Takahashi, M. Takigawa, and T. Imamura, Calculation of ozone variation using CCSR/NIES CCM with T42 horizontal resolution and bromine chemistry, CCMVal wrokshop 2005, Boulder, USA, 2005年10月17－19日；CCMVal 2005 - agenda and abstracts p.19.
- 17) Deushi, M., and K. Shibata, 2006: Impacts of assimilation towards observed wind on the long-term trends of inorganic chlorine in the CCMVal REF1 simulation with MRI chemistry-climate model. AGU, 87(52), Fall Meet. Suppl., Abstract A51B-0065.
- 18) 出牛真・柴田清孝, 2006: 化学気候モデルバリデーション (CCMVal) シナリオに基づいたオゾン層の再現および将来予測実験のトレンドを含む長期変動の解析. 日本気象学会2006年度春季大会講演予稿集, B109.
- 19) 出牛真・柴田清孝, 2006: 成層圏化学気候モデルによる塩素リザーバーの長期的な濃度変動の再現精度の向上について. 日本気象学会2006年度秋季大会講演予稿集, D103.
- 20) 柴田清孝・出牛真、2006: 気象研究所・化学-気候モデルによる成層圏オゾンの過去再現と将来予測実験、第17回大気化学シンポジウム研究集会講演要旨集、K-24.
- 21) 柴田清孝・出牛真、2006: 赤道成層圏QBOによる二次子午面循環の季節変化について、日本気象学会2006年度春季大会講演予稿集、B109.
- 22) 柴田清孝・出牛真、2006: 重力波パラメタリゼーションとQBO、日本気象学会2006年度秋季大会講演予稿集、B157.
- 23) Shibata, K and M. Deushi, 2006: QBO, volcanic, solar, and long-term signals in the past 25-year simulation of the middle atmosphere by the chemistry-climate model of Meteorological Research Institute, 4th IAGA/ICMA/CAWSES Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere.
- 24) Shibata, K and M. Deushi, 2006: Impacts of transport scheme on the global distribution of chemical species as revealed in the CCMVal REF1 simulation with MRI chemistry-climate model, AGU, 87(52), Fall Meet. Suppl., Abstract A51B-0068.
- 25) Shibata, K and M. Deushi, 2006: Solar signals in the past 25-year simulation of MRI-CCM under CCMVal REF1 scenario, 1st SOLARIS workshop.
- 26) 秋吉英治、吉識宗佳、永島達也、L. B. Zhou、今村隆史、高橋正明、黒川純一、滝川雅之、CCSR/NIES化学気候モデルを用いたオゾン層の将来予測実験、日本気象学会、東京、2006年5月21-24日；2006年度春季大会講演予稿集(89)、106
- 27) 秋吉英治、坂本圭、オゾン層将来予測実験で得られたオゾンホール小さい年についての解

- 析、日本気象学会、名古屋、2006年10月25-27日；2006年度秋季大会講演予稿集(90)、205
- 28) 坂本圭、秋吉英治、永島達也、L. B. Zhou、高橋正明、太陽活動に対する熱帯下部成層圏のオゾンの変動、日本気象学会、名古屋、2006年10月25-27日；2006年度秋季大会講演予稿集(90)、206
- 29) L. B. Zhou、秋吉英治、北半球中緯度におけるオゾンQBOの経度依存性、日本気象学会、名古屋、2006年10月25-27日；2006年度秋季大会講演予稿集(90)、207
- 30) 秋吉英治、オゾン層の破壊と回復のメカニズム、太陽紫外線防御研究委員会第17回シンポジウム「生物環境としての太陽紫外線」、東京、2007年3月16日；講演要旨集、13-15

(3) 出願特許

なし。

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

一般講演会「オゾン層破壊問題－今後の予測と紫外線影響－」、（2006年10月28日、ウィルあいち、観客90名）

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 毎日新聞（2006年5月20日、全国版）
- 2) 読売新聞（2006年5月20日、全国版）
- 3) 日本経済新聞（2006年5月20日、全国版）
- 4) 東京新聞（2006年5月20日）
- 5) 日刊工業新聞（2006年5月22日、全国版）
- 6) 朝日新聞（2006年5月30日、全国版）
- 7) 日刊工業新聞（2006年7月31日、全国版）

(6) 授賞等

日本気象学会2002年度堀内賞（林田佐智子、「光学リモートセンシングによる成層圏エアロゾルおよびオゾンの研究」）