

課題名 2-1303 将来の温暖化条件下でのフロン対策強化によるオゾン層の脆弱性回避に関する研究

課題代表者名 秋吉 英治（国立研究開発法人国立環境研究所地球環境研究センター  
気候モデリング・解析研究室室長）

研究実施期間 平成25～27年度

累計予算額 78,656千円（うち平成27年度：25,330千円）  
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード オゾン層、フロン対策、温暖化、化学気候モデル、北半球中高緯度

#### 研究体制

(1) 将来の温暖化条件下でのフロン対策強化によるオゾン層の脆弱性回避に関する研究(国立研究開発法人国立環境研究所)

#### 研究協力機関

岡山大学

### 研究概要

#### 1. はじめに(研究背景等)

フロンなどのオゾン層破壊物質（ODS）濃度は成層圏でも減少傾向に転じ、今世紀後半には1960年レベルまで減少すると思われる。一方、温室効果ガス（GHG）濃度の増加傾向は続いている。ODSおよびGHGの変化シナリオのもとでのオゾン層将来予測実験からは、A) 北半球中緯度のオゾン全量は1960年レベルと比較して今世紀半ばには同程度まで戻り、今世紀末にはさらに5%増加する、B) 低緯度や極域でのオゾン層の長期変化は中緯度とは異なる、と予想されている（オゾン科学アセスメント2010、2014）。また、特に今後10～20年間は、大気中の塩素および臭素濃度がまだ高く、温室効果ガスの濃度が増加することが予想され、このような状況では依然として、成層圏の寒冷化によって極成層圏雲（Polar Stratospheric Clouds, PSC）ができ、その表面で起こる特殊な化学反応によりオゾン層の破壊がある年に突発的に極端に進む恐れがある。2011年春の北極オゾン破壊がその例である。この脆弱期の大規模オゾン層破壊（北極オゾンホールと報じられた2011年春季の北極域のオゾン層破壊）の発生頻度が本課題における科学的な問題点である。この科学的な課題は、a) 使用中あるいは貯蔵中のODSの大気への放出抑制（回収と処理）が大規模オゾン層破壊の発生リスク軽減にどの程度効果的か、b) GHGの増加抑制が成層圏オゾン層の安定化にどの程度効果的か、と言ったオゾン層保護対策と温暖化防止対策の立案や効果の推定に不可欠な科学的知見である。そのために、IPCCの温暖化予測で使われたモデルと同じ大気の運動や放射スキームを備えた成層圏化学気候モデルによる数値予測が望まれ、また、その精度向上・精緻化を行う必要がある。

#### 2. 研究開発目的

本研究ではIPCCの気候変化予測に用いた数値モデルをベースに、物理・化学プロセスを精緻化した化学気候モデルを複数開発し、今後予想されるオゾン層破壊物質および温室効果ガス濃度の組み合わせを複数組想定して温暖化が進行する中でのオゾン層の変動予測計算を行い、今後10～30年程度の期間におけるオゾン層脆弱期の北極域の大気変動とそれに伴うオゾン層破壊の変動幅について解析を行う。そして、ODS、GHG放出削減とオゾン層の回復・安定化を着実に進めるための対策立案にとって必要な科学的知見を提供することを目的とする。具体的には、今後20～30年間の北半球中高緯度での大規模オゾン破壊リスクを回避するため、オゾン量の監視、フロン・ハロン濃度の監視、ハロンバンク対策、温室効果ガス濃度の監視、HCFCやHFC等に関連した温暖化対策との連携、等に関係した対策立案に必要な科学的知見を提供することを目的とする。

#### 3. 研究開発の方法

##### (1) 化学気候モデルの開発

本課題では、気候特性の異なる3つの化学気候モデルを用いる。年々変動の激しい北極域の大規模オゾン破壊の発生頻度の解析に対して、気候特性の異なる3つの化学気候モデルを用いた計算を行い、

その結果から共通の傾向を見いだすことによって、結果の信頼性を高めることが目的である。3つの化学気候モデルの特徴は以下のとおりである。

### 1) CCSR/NIES化学気候モデル

UNEP/WMO Scientific Assessment of Ozone Depletion 2006, 2010に対して、国際プロジェクト Chemistry Climate Model Validation (CCMVal) および CCMVal2 の中でオゾン層の将来予測計算を行って貢献した。本研究課題開始以前からの既存のモデルである。

### 2) MIROC3.2化学気候モデル

CCSR/NIES化学気候モデルの化学計算スキームを、MIROC3.2大気大循環モデルに移植して本課題研究実施中に開発したモデルである。放射スペクトルの分割数がCCSR/NIES化学気候モデルより多い。特にCCSR/NIES化学気候モデルでは、 $O_3$ 、 $NO_2$ 、 $NO_3$ 、 $Cl_2O_2$ 、 $ClONO_2$ 、 $HOCl$ 等、オゾンに関わる化学反応に重要な大気微量成分の吸収帯が集中する  $0.317\mu m \sim 0.690\mu m$  の波長区間を1つの区間として取り扱っていたが、MIROC3.2化学気候モデルでは、この部分が7つの波長区分に分割されるなど、全体的に見ても分割数がCCSR/NIES化学気候モデルに比べてより多くなった(図1)。MIROC3.2放射スキームは、このような放射スペクトル分割を行うにあたり、放射スペクトル分割区域内での平均的な放射特性を計算するための波数積分の最適化が行われている。また、吸収線パラメータデータとして新しいHITRAN2000を使っており(CCSR/NIES化学気候モデルの吸収線パラメータデータはHITRAN92を使用していた)、さらに放射伝達計算法の改良も行われている。これらの改良によって気温の再現性や大気微量成分の光解離率の計算精度が向上した。

### 3) MIROC5化学気候モデル

CCSR/NIES化学気候モデルの化学計算スキームを、MIROC5大気大循環モデルに移植して本課題研究実施中に開発したモデルである。放射スペクトルの分割数はMIROC3.2化学気候モデルと同一となっている。積雲対流スキームや雲の微物理過程の改良、地表面過程の改良等が行われており、海面水温の再現性が向上した。

## (2) 数値実験の方法

複数個のODS濃度レベルとGHG濃度レベルの組み合わせによる100アンサンブル計算を行った(図1)。

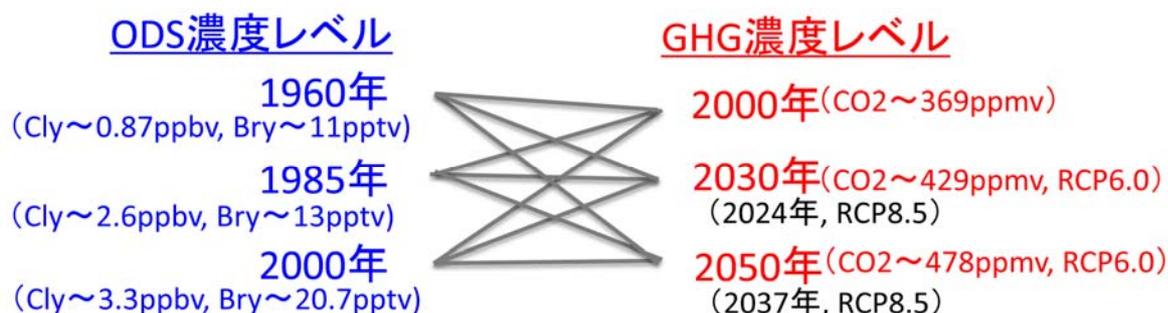


図1 100アンサンブル実験で設定されたODS濃度レベルとGHG濃度レベルの組み合わせ。将来(2030年と2050年)のGHG濃度レベルは、RCP6.0シナリオとRCP8.5シナリオに基づいて記述。RCP6.0シナリオに基づいた二酸化炭素濃度と年代の対応関係は赤字で示され、RCP8.5シナリオに基づいた二酸化炭素濃度と年代の対応関係は括弧書きの黒字で示されている。

具体的にはODS濃度を、ほとんど自然起源によるもので低い状態であった1960年レベル、オゾンホールが出現して数年後の1985年レベル、ほぼピークであった2000年レベルに固定し、それぞれのODS濃度レベルに対して、GHG濃度を2000年レベル、2030年レベル、2050年レベルに固定した110年間の定常計算を行った。RCP6.0シナリオにおける2000年、2030年、2050年の二酸化炭素濃度は、369 ppmv、429 ppmv、478 ppmvである。これらの濃度は、RCP8.5シナリオの場合、それぞれ、2000年、2024年、2037年に対応する(図1)。110年間の定常計算のうち最初の10年間は、モデルの微量成分分布や気象要素が定常

状態に落ち着くまでの遷移期間として解析からは除外し、その後の100年（100アンサンブル）について解析を行った。モデルのODS濃度およびGHG濃度の年代レベルはそれぞれWM02010 A1シナリオ、IPCC RCP6.0シナリオの地表面濃度データに基づいており、110年の計算期間中、これらの地表面濃度値をモデルの地表面濃度としてインプットし続けた。モデルのODS濃度は地表面で固定された濃度によってモデルの大気中に移流・拡散したり、逆に地表に戻ってきたりする。

以上の設定によって、3つの化学気候モデルを使って100アンサンブル実験を行った。具体的にはODS濃度およびGHG濃度を表1のように設定し110年間の連続計算を行った。○印がそれぞれの化学気候モデルで行った実験である。MIROC3.2化学気候モデルを中心に実験を行った。

表1 行った数値実験一覧

ODS濃度レベル	GHG濃度レベル	NAT、氷粒子の個数密度 (cm <sup>-3</sup> )	海水面温度分布、海水密度分布	CCSR/NIES化学気候モデル	MIROC3.2化学気候モデル	MIROC5化学気候モデル
1960	2000	0.005	1995－2004年平均	○	○	○
1960	2030	0.005	2025－2034年平均		○	
1960	2050	0.005	2045－2054年平均	○	○	
1985	2000	0.005	1995－2004年平均		○	○
1985	2030	0.005	2025－2034年平均		○	○
1985	2050	0.005	2045－2054年平均		○	○
2000	2000	0.005	1995－2004年平均	○	○	○
2000	2000	0.005	1995－2004年平均＋エルニーニョ時アノマリ		○	
2000	2000	0.005	1995－2004年平均＋ラニーニャ時アノマリ		○	
2000	2000	NAT：1.0 氷粒子：0.01	1995－2004年平均		○	○
2000	2030	0.005	2025－2034年平均		○	○
2000	2030	NAT：1.0 氷粒子：0.01	2025－2034年平均		○	○
2000	2050	0.005	2045－2054年平均	○	○	○
2000	2050	NAT：1.0 氷粒子：0.01	2045－2054年平均		○	○

### (3) 解析の方法

表1に従ってODS濃度レベルとGHG濃度レベルを設定した110年間の連続計算を行い、そのうち最初の10年間はモデルの微量成分分布や気象要素が定常状態に落ち着くまでの遷移期間として解析からは除外し、残りの100年間の計算結果を同一条件で1月1日0時の初期値だけが異なる100アンサンブルとみなし、解析を行った。解析の目的は、

- 1) 観測データと比較して化学気候モデルのオゾン全量や塩素濃度の検証を行う。
- 2) 北半球中高緯度域オゾン量のODS濃度依存性を抽出する。
- 3) 北半球中高緯度域オゾン量のGHG濃度依存性を抽出する。

これらの解析目的に対して行った具体的な解析項目は以下のとおりである。それぞれ、1)～3)の番号が対応している。

- 1) TOMSによるオゾン全量観測値の1995年－2004年平均値を、ODS濃度2000年レベル－GHG濃度2000年レベルに設定した3つの化学気候モデルによるオゾン全量の計算結果の100アンサンブル平均値と比較した。
- 2) 北緯45度－90度の緯度範囲の北半球中高緯度域で、化学オゾン破壊が最も顕著となる3月－4月の期間におけるオゾン全量最低値を100アンサンブルについて示し、そのばらつき（標準偏差）を、異なるODS濃度レベルを設定した実験間で比較した。
- 3) 北緯45度－90度の緯度範囲の北半球中高緯度域で、日平均オゾン全量が閾値（MIROC3.2化学気候モデルの場合は220DU）以下となる面積×日数の積算値の解析を行った。異なるGHG濃度レベルを設定した実験間でこの量の比較を行った。

## 4. 結果及び考察

### (1) 化学気候モデルのオゾン全量の検証

図2は、本課題で使用または開発した3つの化学気候モデルによって計算された経度平均オゾン全量の時間-緯度断面図である。ODS濃度を2000年、GHG濃度を2000年に固定した実験の100アンサンブル平均が示されている。また、TOMSによる1995-2004年の10年間の平均値も示す。TOMSの観測値に比べてそれぞれのモデルは、オゾン全量の絶対値の差は多少あるが、それぞれの緯度の季節変動をよく再現していることがわかる。CCSR/NIESは南極の10月に起こっているオゾンホール再現性が不十分であることがわかる。また、2-3月の北極のオゾン全量は、北極に近いところで過多となっている。中緯度から極へのオゾン輸送が多すぎるためと思われる。MIROC3.2化学気候モデルは観測値をよく再現しているが、3月頃の北極域でオゾン全量が少しばかり少なくなっている。MIROC5化学気候モデルの結果は、オゾン全量が若干少ないものの、季節変動は全球的に最もよく再現されている。

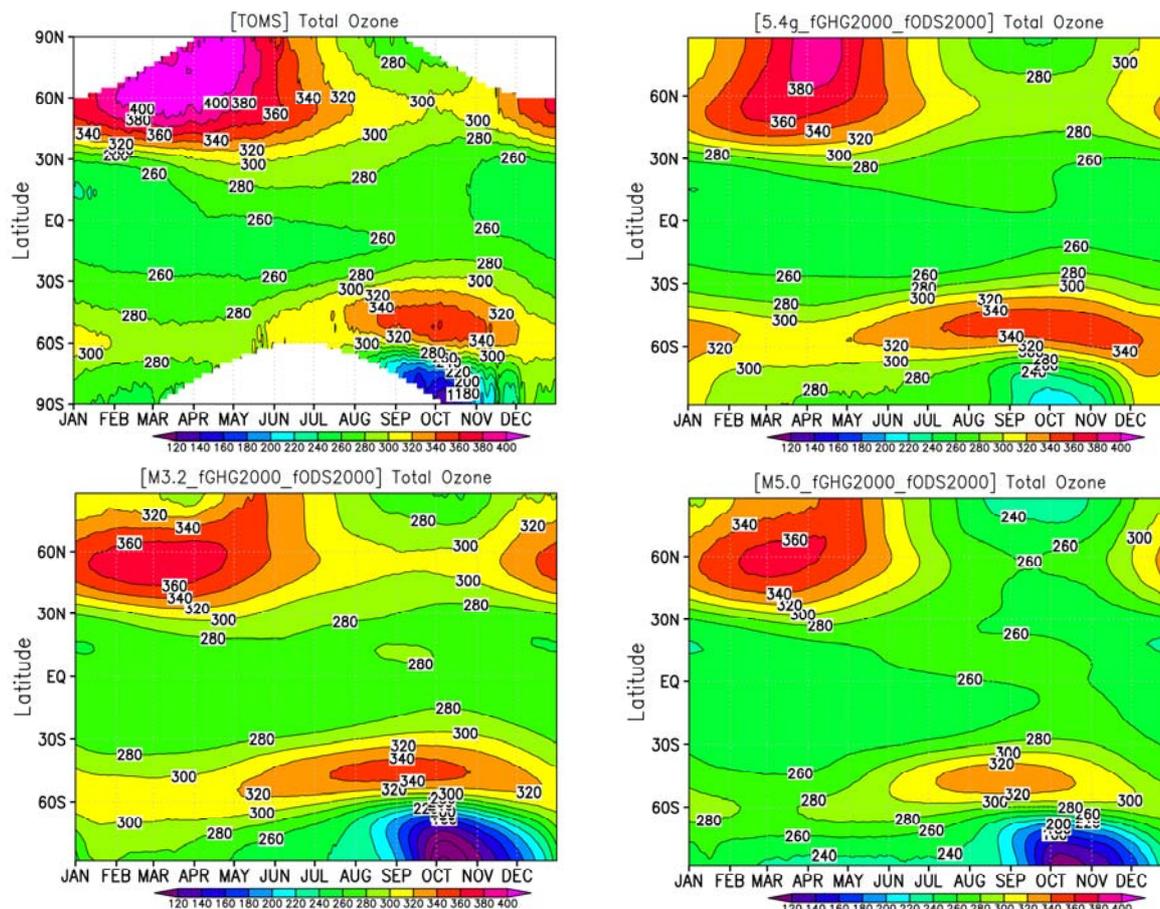


図2 経度平均したオゾン全量の時間変化と緯度分布

- (左上) TOMS 観測の 1995-2004 年の平均値
- (右上) CCSR/NIES 化学気候モデルの 100 アンサンブル平均値。ODS 濃度を 2000 年レベル、GHG 濃度を 2000 年レベルに設定。
- (左下) MIROC3.2 化学気候モデルの 100 アンサンブル平均値。ODS 濃度を 2000 年レベル、GHG 濃度を 2000 年レベルに設定。
- (右下) MIROC5 化学気候モデルの 100 アンサンブル平均値。ODS 濃度を 2000 年レベル、GHG 濃度を 2000 年レベルに設定。

### (2) 北半球中高緯度域オゾン全量のODS濃度依存性

図3に、3つの化学気候モデルによって計算された100アンサンブルメンバーについて、3-4月の北緯45-90度の領域でのオゾン全量最小値の年々変化（アンサンブルメンバーによるばらつき）を、1960年レベルのODS濃度（左）と2000年レベルのODS濃度（右）について示す。図から、どのモデルでも、大気中のODS濃度が1960年レベルの低い値から2000年レベルの高い値に増加することによって、オゾン全量最低値の高い方の値はあまり変わらないが、低い方の値がかなり低くなってアンサンブル平均値を下げ、また、アンサンブルメンバー間のばらつきが大きくなっていることがわかる。ばらつきの大きさは図の右上にSTDの値（100アンサンブルのオゾン全量最低値に対する標準偏差）で示してあ

る。例えば、中段に示してあるMIR0C3.2化学気候モデルの場合、ODS濃度が1960年レベルの低い値から2000年レベルの高い値に増加することによって、標準偏差の値は13.0から31.1へ約2倍以上増加している。ただし、CCSR/NIES化学気候モデルのこのODS依存性は小さい。これは、このモデルではオゾン輸送の効果が北極域・北半球中緯度域で他のモデルに比べて大きいことを示している。このことはまた、図5のオゾン全量を示す図において、このモデルの北極付近の3月－4月のオゾン全量が他のモデルよりも多くなっていることからわかる。MIR0C3.2化学気候モデルのODS依存性が一番大きく、MIR0C5モデルの依存性は、MIR0C3.2モデルより小さくCCSR/NIES化学気候モデルより大きい。これも図5で示された北極域・北半球中緯度域の3月－4月のオゾン全量に対応し、この時期・領域のオゾン全量が大きいモデルほど、オゾン輸送の効果が大きく、ODS依存性は小さくなっていることがわかる。

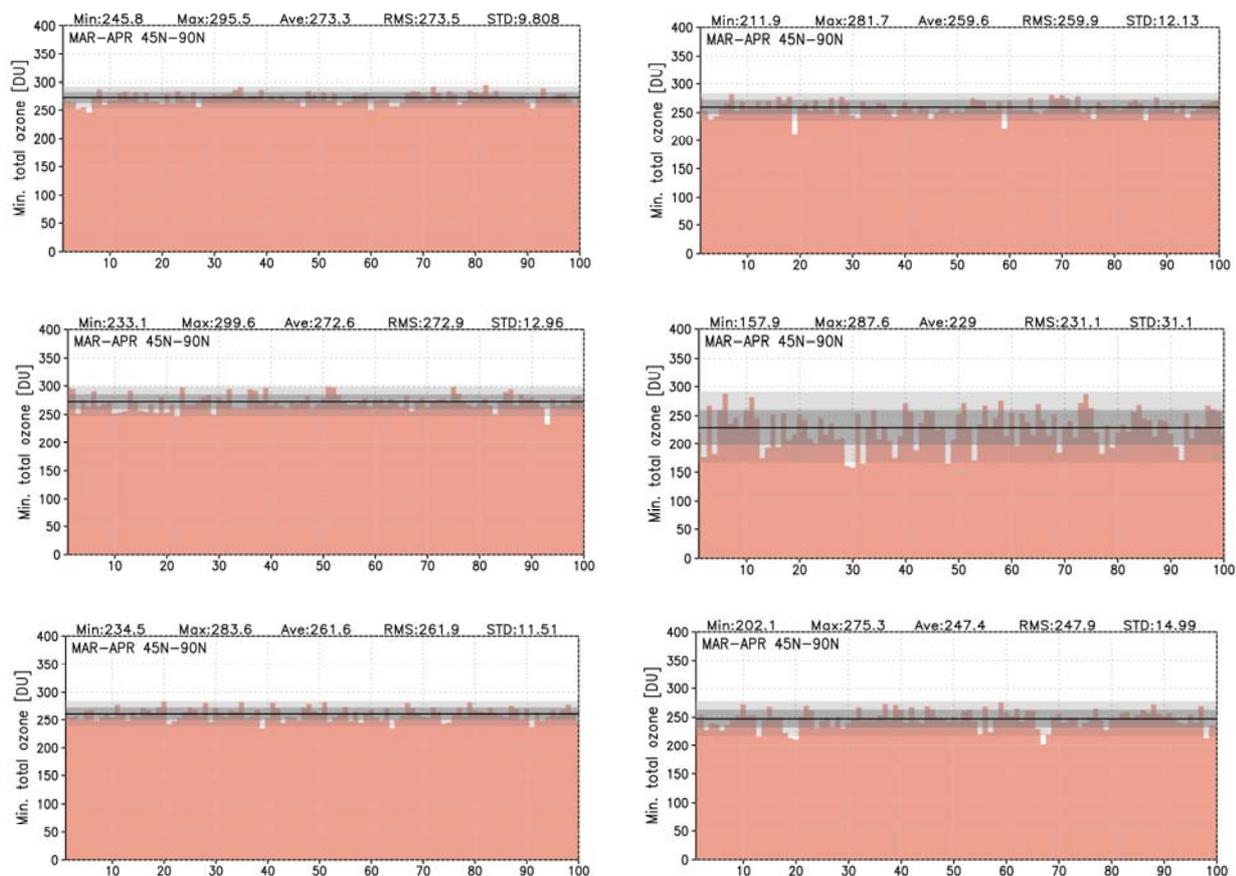


図3 オゾン全量年最小値のアンサンブル間のばらつき。最もオゾン層破壊が起こりやすい3月～4月の北緯45度～90度について、100アンサンブルについて解析を行った。(左) ODS濃度1960年レベル GHG濃度2000年レベルの実験結果、(右) ODS濃度2000年レベル GHG濃度2000年レベルの実験結果。横軸はアンサンブルメンバーを表す(1～100)。図の上部に100アンサンブル間の最低値(Min)、最高値(Max)、平均値(Ave)、二乗平均の平方根(RMS)、標準偏差(STD)を示す。平均値を横実線、標準偏差( $1\sigma$ )を濃い陰影で、 $2\sigma$ を薄い陰影で表す。(上段) CCSR/NIES化学気候モデルによる結果、(中段) MIR0C3.2化学気候モデルによる結果、(下段) MIR0C5化学気候モデルによる結果。

### (3) 北半球中高緯度域オゾン全量のGHG濃度依存性－ODS濃度2000年レベルの場合

#### 1) 極成層圏雲(NATと氷粒子)の個数密度が $0.005 \text{ cm}^{-3}$ の場合－標準実験の結果

ODS濃度が2000年レベル( $\text{Cl}_y \sim 3.3 \text{ ppbv}$ ,  $\text{Br}_y \sim 20.7 \text{ pptv}$ ; 図2を参照)という高い値に対して、極成層圏雲の個数密度が $0.005 \text{ cm}^{-3}$ に設定し(表2を参照)、GHG濃度レベルを2000年、2030年、2050年に設定した3つの100アンサンブル実験結果を使い、日平均オゾン全量がある閾値以下となる面積の解析を行った。この閾値は、いわゆるミニホールなど、気象学的な現象によりオゾンの輸送状態によ

ってのみ生じたオゾン量減少をカウントしないように、かつ高いODS濃度下で起こる不均一反応を介した塩素および臭素が関係した化学オゾン破壊によるオゾン量減少をカウントするような値に設定された。ところで、モデルによって3-4月の北緯45-90度の領域のオゾン全量は若干異なるので、この閾値もモデルによって異なる値を設定することが必要である。北極域では、不均一反応を介した化学オゾン破壊によるオゾン量の極端な減少は、通常、2月下旬～4月・5月に起こることを考慮し、2月下旬～6月初旬以外の期間に閾値以下の値が出ないような閾値をモデル毎に設定した。具体的には、CCSR/NIES化学気候モデルの計算結果に対しては240DUの閾値、MIROC3.2化学気候モデルに対しては220DUの閾値、MIROC5化学気候モデルに対しては230DUの閾値が設定された。

まず、CCSR/NIES化学気候モデルの結果では、春季の北緯45-90度の領域で化学オゾン破壊がほとんど見られなかった（図略）。また、GHG濃度2000年レベルと2050年レベルの結果を比べると、北緯45-90度の領域でのオゾン全量のGHG依存性は不明瞭であった。

次に、MIROC3.2化学気候モデルでは、春季の北緯45-90度の領域で化学オゾン破壊が頻繁に起こった。ただし、オゾン破壊がほとんど起こらなかったアンサンブルメンバーも存在した。オゾン破壊によってオゾン全量が減る時期は、ほとんどが2月下旬～4月にかけてである。また、GHG濃度が2000年レベルから2030年レベル、2050年レベルへと増加するにつれて、オゾン破壊がほとんど起こらなかったアンサンブルメンバーの数が増加した。これは、GHG濃度の増加によって成層圏で赤道から極へと向かう子午面循環が強まることと関係している。また、GHG濃度が2000年レベル→2030年レベル→2050年レベルのように増加するとオゾン全量が220DU以下にならないアンサンブルメンバーが増加する一方で、220DU以下となる期間が極端に長くかつその面積も大きいアンサンブルメンバーが、少数ではあるが現れた。

最後に、MIROC5化学気候モデルの結果について述べる。このモデルの春季の北緯45-90度の領域での化学オゾン破壊は、MIROC3.2化学気候モデルに比べると小さい。オゾン全量のGHG濃度レベル依存性は、GHG濃度2000年レベルと2030年レベルは同程度であるが、GHG濃度2050年レベルでは、オゾン全量の低い領域が減っている結果となり、これはMIROC3.2の結果とは異なる結果となっている。

以上の結果より、北極域・北半球中緯度域では、ODS濃度が高い状態でGHG濃度が増加しても、極端にオゾン全量が低くそれが長時間持続するような事例は依然存在する可能性があることがわかった。

## 2) 極成層圏雲の個数密度を多く設定した場合の結果

前節で示した極成層圏雲のパラメータの設定（NAT粒子と氷粒子の個数密度を $0.005\text{cm}^{-3}$ ）の下に行った実験の結果では、極端なオゾン破壊を引き起こしたアンサンブルメンバーの数がかかなり少なかったため、結果の信頼性の点で疑問が残る。そこでODS濃度は2000年レベル、GHG濃度は2000年、2030年、2050年に設定し、かつ、極成層圏雲のNATの個数密度を $1.0\text{cm}^{-3}$ 、氷粒子の個数密度を $0.01\text{cm}^{-3}$ にし、気体の硝酸や水蒸気と同じ凝縮量に対して極成層圏雲の表面積が大きくなるように設定した。その結果、オゾン全量が閾値以下になる面積は、前節の1)の結果に比べてかなり多くなった。GHG濃度レベル依存性も前節の結果とは若干異なり、MIROC3.2化学気候モデルとMIROC5化学気候モデルの両方でGHG濃度2030年レベルのときに最もオゾン破壊が大きいアンサンブルが出現するような結果となった。

## 3) 北緯45度-90度の領域で極端なオゾン破壊が起こった年の日本への影響について

本節では、1)で取り扱った実験の、MIROC3.2化学気候モデルで行ったODS濃度2000年レベル-GHG濃度2050年レベルの100アンサンブル実験のうち、16番目のアンサンブルメンバーが示す極端なオゾン破壊について、そのオゾン破壊や力学場の状況を示し、このようなオゾン破壊が起こった時の日本への影響について考察する。

まず、オゾン全量の変化の状況について述べる。このアンサンブルメンバーでは、1月初旬の時点ですでにスカンジナビア半島上空にオゾン全量が220 DU以下の領域ができ、その後の1月、2月は少しだけ北極域の最低オゾン全量が上昇したが、オゾン濃度が低い領域が北極渦内に安定して存在し続けた。3月になるとオゾン全量の最低値が急減して220 DU以下の領域が継続して存在した。3月31日～4月3日には、150 DU以下となる領域が北極上空に出現し、この年の北極域の最も低いオゾン量となった。220 DU以下の領域は5月26日まで存在した。オゾン全量の少ない領域は、主に北極上空、グリーンランド上空、スカンジナビア半島上空に位置していたため、この期間中の日本への低オゾン濃度の影響はなかった。その後北極を中心に発達してきたオゾンの少ない空気塊が、6月4日から10日にかけてアリューシャン列島から日本のすぐ東の太平洋域に流れ出し、その影響で北海道～東日本にかけてもオゾン全量が低下したが、このとき日本上空でオゾン全量がいちばん低かった6月8日～9日でもその値は270～280 DUくらいであり、北極域のようにオゾン濃度が極端に低下したわけではなかった。同程度のオゾ

ン全量低下は6月17日にも起こっているが、これは北極のオゾン破壊によるものではなく、むしろ中緯度の気象条件によって起こったものと考えられる。以上から、このアンサンブルメンバーの北半球中高緯度の3月～4月のオゾン破壊の状況は、現在の南極オゾンホールほどではないが、それに近いオゾン破壊と気象場となっていたことがわかる。また、日本への影響は、5月の北極渦崩壊時に270～280 DUまでオゾン全量が低下した程度であった。

#### 4) 熱帯海面水温の北半球中高緯度域オゾン全量への影響

北極域のオゾン量は熱帯海面水温の影響を受けると言われている。例えば、エルニーニョの年とラニーニャの年では熱帯の海面水温、とりわけその経度分布が異なり、それによって大気波動の活動および伝搬が異なり、それが子午面循環の強さに影響して北極域へのオゾンの輸送量を変え、北極域のオゾン全量に影響を及ぼすことが考えられる。MIROC3.2化学気候モデルを用いて、熱帯海面水温をエルニーニョ型とラニーニャ型に設定したODS濃度2000年レベル-GHG濃度2000年レベルの実験を行い、オゾン全量を解析した。その結果、エルニーニョ型の海水面温度を使用して計算した場合、北極のオゾン破壊は少なくなり、ラニーニャ型の海水面温度を使用して計算した場合、北極のオゾン破壊は大きくなることわかる。エルニーニョ型とラニーニャ型の場合のオゾン破壊の差は、GHG濃度2000年レベル、2030年レベル、2050年レベルの間のオゾン破壊の差に匹敵するほどである。しかしながら、これらの実験は海水面温度の影響をかなり過大評価するような設定になっていることに注意する必要がある。すなわち、実際の影響はこれらの実験で示されたより小さいと推測される。

#### (4) 北半球中高緯度域オゾン全量のGHG濃度依存性-ODS濃度1985年レベルの場合

ODS濃度を1985年レベルに設定し、MIROC3.2化学気候モデルとMIROC5化学気候モデルによるGHG濃度を2000年レベル、2030年レベル、2050年レベルに設定した実験を行った。その結果、両方のモデルで、オゾン全量が閾値以下となる面積はかなり縮小された。GHG濃度依存性に関しても、両方のモデルでほとんど見られなくなる。

#### (5) 今後10～30年程度の期間に北極域や北半球中緯度域で極端なオゾン破壊の起こる可能性についての検討

3つの化学気候モデルの数値実験結果から、以下のことがわかった。

どのモデルでも、ODS濃度が1960年レベルから2000年レベルに増加すると、3月～4月の期間における北緯45～90度のオゾン全量最低値のアンサンブル間のばらつきが増加した。これは、ODS濃度レベルが増加することによって、その年の北極渦の状態により、この季節・この領域で極端にオゾン破壊が進む年とそうでない年との区別がよりはっきりしてきて、オゾン全量の年々変動が増加することを意味する。北極渦が安定な年はオゾン破壊が一気に進み、不安定な年はオゾン破壊がほとんど進まない、といった状況が出現し、これは2011年3月下旬～4月初旬に起こった北極域での極端なオゾン全量の減少とその前年の同時期の高オゾン全量という観測事実に対応する。

GHG濃度に関しては、今後数十年間の期間はGHG濃度の増加は避けられない。その場合、ODS濃度が高いままでGHG濃度が増加すると、北極域・北半球中緯度域では平均的にはオゾン全量が増加するが、それによって、極端にオゾン全量が低くそれが長時間持続するような事例は少なくなるわけではなく、依然存在し続けることがわかった。MIROC3.2化学気候モデルの結果はGHG濃度が2000年レベル→2030年レベル→2050年レベルと増加するにつれて、極端なオゾン破壊の規模または数は若干増加傾向を示し、MIROC3.2化学気候モデルの極成層圏雲パラメータを変えた実験とMIROC5化学気候モデルの結果は、GHG濃度2030年レベルが最大規模という結果を示した。

さらに、ODS濃度を1985年レベルに設定し、GHG濃度レベルを2000年、2030年、2050年に設定した実験では、GHG濃度の高い2030年レベル、2050年レベルの実験で極端なオゾン破壊を起こすアンサンブルメンバーは現れなかった。

以上より、大気中でODS濃度を1985年レベル(Effective Equivalent Stratospheric Chlorine, EESC ~3.6 ppbv)まで落とせば、今後GHG濃度が増加しても北極域・北半球中緯度域で大規模なオゾン破壊は起こらないことが推定される。

#### (6) まとめと展望

北極域・北半球中緯度域のオゾン量は、大気自身の内部変動によってその年々変動が激しく、オゾン層破壊に対するODS濃度依存性およびGHG濃度依存性の解析が困難であった。このことに関して、モデルの開発・改良および実験方法の改善により、影響の抽出を可能とする道筋をつけた。また、異な

る気候特性をもつ3つのモデルの結果を比較することによって、共通の依存性を見いだすことにより、より一般性のある結論を得ることができた。具体的には、3つのモデルそれぞれについて100アンサンブル実験を行うことによって、北半球中高緯度域のオゾン変化の確率分布を考え、アンサンブル平均的なオゾン濃度と確率分布の端に位置する極端なオゾン破壊とに分けて依存性を解析した。その結果、ODS濃度の増加によって、北半球中高緯度域春季のオゾン全量のアンサンブルメンバー間のばらつきが増加し、また、高いODS濃度下でのGHG濃度の増加によって、アンサンブル平均的にはオゾン量は増加するが極端なオゾン破壊を起こすアンサンブルメンバーはなくなる、あるいは若干増加することがわかった。これらの結果は、ODS濃度の増加に伴って1990年代以降の北半球中高緯度域のオゾン全量の年々変動が増したという観測事実、および2011年のような他大気中のODS濃度がピーク時の2000年レベルより少し下がったにもかかわらず大規模な春季の北極オゾン破壊が起きた事実を説明する。また、北極域・北半球中緯度域へのオゾン輸送の効果の小さいモデルほどODS増加によってアンサンブル間のばらつきが大きくなる傾向がはっきりと見え、極端なオゾン破壊が起こるアンサンブルメンバーが現れやすい傾向にあることもわかった。これは、例えば、エルニーニョやラニーニャ等、熱帯海域での海面温度変化によって大気循環が変化し、北極域へのオゾン輸送が増加／減少した場合のオゾン量変動についての示唆を与える。

本研究課題で行った実験結果より、発展途上国をも含めたフロン対策の国際協力によって大気中のODS濃度レベルが今後徐々に下がっていけば、年々変動の幅は小さくなり、北極域・北半球中緯度域で極端なオゾン破壊がある年に突然起こるといような危険性が少なくなっていくと考えられる。化学気候モデルを使ったアンサンブル数値実験結果によると、今後大気中のGHG濃度がさらに増加する中で、ODS濃度を1985年レベル（Equivalent Effective Stratospheric Chlorine, EESC～3.6 ppbv）まで下げると極端なオゾン破壊が起こらないことがわかった。最新のWMOのODSシナリオで地表付近のODS濃度が1985年レベルまで下がるのは2030年頃になる。成層圏ではさらに数年遅れる。この結果は、国際的にモントリオール議定書に沿ったODS削減を行ったとしても、2030年頃までは極端なオゾン層破壊が北極域・北半球中緯度域で起こり得ることを意味する。そのような好ましくない減少が起る確率をできるだけ低くするためには、最低限、モントリオール議定書に沿ったODS削減が求められる。できればそれ以上の削減が望ましい。また、日本国内ではフロン・ハロンの生産がすでに中止されているので、国内的にはハロンバンク対策を確実に進め、これまでに生産された、または現在使用中のハロゲン類が大気中に漏れないように回収・破壊を徹底することが必要である。

## 5. 本研究により得られた主な成果

### (1) 科学的意義

北極域・北半球中緯度域のオゾン量は、大気自身の内部変動によってその年々変動が激しく、オゾン層破壊に対するODS濃度依存性およびGHG濃度依存性の解析が困難であった。特に人口の集中する北半球中緯度域のオゾン層のODSやGHG濃度依存性を把握しておくことは、この地域の将来のオゾン層の動向を予想し、極端なオゾン破壊を避けるための政策を立案する上で必要である。将来考えられるいくつかのODS濃度とGHG濃度の組み合わせによる100アンサンブル実験を行い結果に確率的な解釈を加えることで、北極域・北半球中緯度域のODSやGHG濃度のオゾン層への影響を明らかにした。すなわち、ODS濃度の増加によって、北半球中高緯度域春季のオゾン全量の年々変動が拡大することがわかった。また、高いODS濃度のままGHG濃度が増加するとアンサンブル平均的にはオゾン量は増加するが、極端なオゾン層破壊を起こすアンサンブル（年）がなくなるわけではなく、依然としてある確率で出現し、ODS濃度が下がらない間は極端なオゾン層破壊が起こる恐れがあることがわかった。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

化学気候モデルを使ったアンサンブル数値実験結果によると、今後大気中のGHG濃度がさらに増加する中で、ODS濃度を1985年レベル（Equivalent Effective Stratospheric Chlorine, EESC～3.6 ppbv）まで下げると極端なオゾン破壊が起こらないことがわかった。最新のWMOのODSシナリオで地表付近のODS濃度が1985年レベルまで下がるのは2030年頃なので、この結果は、国際的にモントリオール議定書に沿ったODS削減を行ったとしても、2030年頃までは極端なオゾン層破壊が北極域・北半球中緯度域で起こり得ることを意味する。

## 6. 研究成果の主な発表状況

### (1) 主な誌上発表

#### <査読付き論文>

- 1) Y. YAMASHITA, H. AKIYOSHI, T. G. SHEPHERD, and M. TAKAHASHI: *J. Meteorol. Soc. Jap.*, 93(6), 613-628 (2015)  
 “The combined influences of westerly phase of the Quasi-Biennial Oscillation and 11-year solar maximum conditions on the Northern Hemisphere extratropical winter circulation”
- 2) H. AKIYOSHI, T. NAKAMURA, T. MIYASAKA, M. SHIOTANI, and M. SUZUKI: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 1361-1380, doi:10.1002/2015JD023334 (2016)  
 ” A nudged chemistry-climate model simulation of chemical constituent distribution at northern high-latitude stratosphere observed by SMILES and MLS during the 2009/2010 stratospheric sudden warming”

#### <査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

### (2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) Akiyoshi, H., T. Nakamura, and M. Shiotani, SPARC 5th General Assembly, Queenstown, New Zealand, 12th-17th January, 2014 (poster presentation on 13th January), Abstract (in USB memory)  
 “A nudged CTM simulation for chemical constituent distribution during the stratospheric sudden warming observed by SMILES in 2010”
- 2) Isobe, H., H. Akiyoshi, WMO/UNEP ozone research managers of the parties to the Vienna convention for the protection of the ozone layer, Ninth meeting, 14-16 May (15 May 2014, oral presentation), Geneva, Switzerland, <http://conf.montreal-protocol.org/meeting/orm/9orm/presentation/default.aspx>  
 “National and regional reports on ozone research and monitoring, Region 2: Asia”
- 3) Ayarzagüena, B., U. Langematz, J. Abalichin, H. Akiyoshi, M. Michou, O. Morgenstern, L. Oman, The third Chemistry-Climate Model Initiative (CCMI) Workshop, 20-22 May 2014 (22 May 2014, oral presentation), Lancaster, UK, <http://www.lancaster.ac.uk/ccmi2014/agenda/>  
 “Future changes in wintertime stratospheric Arctic variability in CCMI models”
- 4) 秋吉英治、門脇正尚、山下陽介、今村隆史、野沢徹、日本気象学会2014年度秋季大会(福岡)、2014年10月21-23日(口頭発表2014年10月22日); 2014年度秋季大会講演予稿集(106)、364。  
 「100年定常実験による温暖化条件下での北半球中・高緯度域のオゾン層破壊」
- 5) 小濱里沙、秋吉英治、門脇正尚、山下陽介、日本気象学会2014年度秋季大会(福岡)、2014年10月21-23日(ポスター発表2014年10月23日); 2014年度秋季大会講演予稿集(106)、443。  
 「札幌のオゾン全量トレンドに対するハロゲンガス増加の影響について」
- 6) 秋吉英治、門脇正尚、山下陽介、今村隆史、野沢徹、第20回大気化学討論会(府中)、2014年10月27日-29日(口頭発表2014年10月28日)、第20回大気化学討論会講演要旨集、16。  
 「化学気候モデルを用いた100年定常実験による北半球中高緯度オゾン全量のODSおよびGHG濃度依存性について」
- 7) 小濱里沙、秋吉英治、門脇正尚、山下陽介、第20回大気化学討論会(府中)、2014年10月27日-29日(ポスター発表2014年10月27-28日)、第20回大気化学討論会講演要旨集、68。  
 「札幌とつくばのオゾン全量トレンドに対するハロゲンガス増加の影響について」
- 8) H. Akiyoshi: 1st International Workshop on SLCPs in Asia: Chemistry-climate modeling and its applications, 1-3 April 2015 (2 April 2015, oral presentation), Seoul, Korea, PROGRAM, p. 17  
 ” Development of CCM and CTM in NIES and their application to ozone layer research”
- 9) 秋吉英治、門脇正尚、山下陽介、今村隆史、野沢徹; 日本気象学会2015年度春季大会、(つくば)、2014年5月21-24日(口頭発表2014年5月22日); 2015年度春季大会講演予稿集(107)、208。  
 「北半球中高緯度域オゾン層破壊規模の塩素濃度および温室効果ガス濃度依存性」

- 10) 小濱里沙、秋吉英治、門脇正尚、山下陽介；日本地球惑星科学連合2015年大会、千葉（幕張メッセ国際会議場）、2015年5月24日-28日（発表2015年5月27日）、AAS21-P19。  
「MIROC3.2ナudging化学気候モデルによるフロン減少期(1979-1996)とフロン増加期(1997-2011)のオゾン全量の季節別全球トレンドマップ」
- 11) Akiyoshi, H., T. Nakamura, T. Miyasaka, M. Shiotani, M. Suzuki : 26th IUGG General Assembly 2015, Prague, Czech Republic, 22 June - 2 July 2015 (Poster presentation on 26 June), M14p-450.  
“A nudged-CCM simulation of chemical constituent distribution at Northern Hemisphere high latitudes observed by SMILES during the 2010 stratospheric sudden warming”
- 12) Akiyoshi, H., T. Nakamura, T. Miyasaka, M. Shiotani, M. Suzuki : The combined AerChemMIP-CCMI workshops, Fraskati, Italy, 7 - 9 October 2015 (Oral presentation on 8 October), Abstracts, p. 2.  
“A nudged-CCM simulation of chemical constituent distribution at Northern Hemisphere high latitude stratosphere observed by SMILES during the 2010 SSW”
- 13) 小濱里沙、秋吉英治、山下陽介、門脇正尚：第21回大気化学討論会、東京工業大学（東京・大岡山）、10月19日-21日（口頭発表10月20日）、公演予稿集 p. 31  
「ナudging化学輸送モデル及び化学気候モデルを用いたハロゲン増加期におけるオゾン全量の季節別緯度別トレンドとその要因分析」
- 14) Akiyoshi, H., M. Kadowaki, Y. Yamashita, T. Imamura, T. Nozawa : Asian Conference on Meteorology (ACM) 2015, 26-27 October 2015, (oral presentation 27 October), Kyoto University (Kyoto), Abstracts 0-3-25  
“ODS and GHG dependences of ozone destruction in the northern mid and high latitudes in a chemistry-climate model”
- 15) Yamashita Y., H. Akiyoshi, T. G. Shepherd, M. Takahashi : Asian Conference on Meteorology (ACM) 2015, 26-27 October 2015, (oral presentation 27 October), Kyoto University (Kyoto), Abstracts 0-3-27  
“The QBO and 11-year solar cycle influences on the Northern Hemisphere extratropical winter circulation”
- 16) 小濱里沙、秋吉英治、山下陽介、門脇正尚：日本気象学会2015年秋季大会、2015年10月28日-30日（口頭発表10月28日）京都、同予稿集 p. 143  
「TOMSとMIROC3.2ナudging化学気候モデルによるオゾン全量の季節別全球トレンドマップ」
- 17) Ayarzagüena, B., S. Oberländer-Hayn, U. Langematz, J. Abalichin, H. Akiyoshi, S. Hardiman, A. Klekociuk, M. Marchand, S. Meul, M. Michou, O. Morgenstern, L. Oman, K. Shibata, A. Stenke : SPARC workshop “Stratospheric Change and its Role in Climate Prediction (SHARP)”, Berlin, Germany, 16-19 February (Oral presentation, 17 February),  
[http://www.sharp2016.de/frontend/index.php?page\\_id=2013&v=List&do=15&day=296&ses=33858#](http://www.sharp2016.de/frontend/index.php?page_id=2013&v=List&do=15&day=296&ses=33858#) “Response of sea surface temperature to climate change and its influence on the wintertime polar vortex in CMIP5 and chemistry-climate models”

## 7. 研究者略歴

課題代表者: 秋吉 英治

九州大学理学部卒業、博士(理学)、現在、国立研究開発法人国立環境研究所気候モデリング・解析研究室室長

研究分担者

1) 今村 隆史

東京工業大学理学部卒業、現在、国立研究開発法人国立環境研究所環境計測研究センター長

## 2-1303 将来の温暖化条件下でのフロン対策強化によるオゾン層の脆弱性回避に関する研究

### (1) 将来の温暖化条件下でのフロン対策強化によるオゾン層の脆弱性回避に関する研究

国立研究開発法人国立環境研究所

地球環境研究センター 気候モデリング・解析研究室 秋吉 英治

環境計測研究センター 今村 隆史

<研究協力者>

岡山大学

野沢 徹

国立研究開発法人国立環境研究所

地球環境研究センター気候モデリング・解析研究室 門脇 正尚

国立研究開発法人国立環境研究所

地球環境研究センター気候モデリング・解析研究室 山下 陽介

平成25(開始年度)～27年度累計予算額：78,656千円（うち平成27年度：25,330千円）

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

北極域を含む北半球中高緯度域のオゾン量に関しては、フロン規制によって期待される大気中のオゾン層破壊物質（ODS）濃度の減少によって今後オゾン層が順調に回復していくかどうか甚だ疑問である。その理由として、北半球中高緯度のオゾン量は、北極渦の大きい年々変動の影響を受けていることがあげられる。また、北半球中高緯度域のオゾン量は成層圏の中・上部や低緯度域からのオゾン輸送の影響を強く受けており、このオゾン輸送を担う赤道から極への成層圏の大気大循環の強さは、温室効果ガス（GHG）濃度の増加の影響を受ける。よって北半球中高緯度のオゾン全量は、ODS濃度、GHG濃度、および北極渦の年々変動の影響を受けODS濃度依存性がはっきりせず予測が困難な状況にある。本研究では今後10～30年程度の期間の北半球中高緯度のオゾン量の動向に関し、ODS濃度とGHG濃度を指定した化学気候モデルを用いた100アンサンブルメンバーのアンサンブル実験を行って、ODS濃度とGHG濃度依存性に関して確率分布的な手法と解釈を導入した。すなわちオゾン全量のアンサンブル平均としてのODSおよびGHG濃度依存性と、アンサンブル分布の端に存在する極端なオゾン破壊を生じる事例のODSおよびGHG濃度依存性とに分けて結果を解釈した。その結果、今後もODSによる大規模オゾン破壊が予想される北半球中高緯度域の春季のオゾン全量について以下のことがわかった。（1）ODS濃度の増加はオゾン全量の年々変動幅を増加させる。1990年代から最近まで観測された北極域オゾン量の激しい年々変動はこの効果によるものと考えられる。（2）ODS濃度の高い状態においてGHG濃度が増加するとアンサンブル平均的にはオゾン全量は増加していく。しかしながら、小さいがある確率で起こり得る極端なオゾン破壊はGHG濃度が増加しても依然存在し続け、場合によってはより大きくなる可能性がある。（3）ODS濃度が1985年レベル、すなわちEquivalent Effective Stratospheric Chlorine

(EESC) で3.6 ppbvくらいまで下がると極端なオゾン破壊が起こらなくなることがわかった。

## [キーワード]

オゾン層、フロン対策、温暖化、化学気候モデル、北半球中高緯度

### 1. はじめに

フロンなどのオゾン層破壊物質 (ODS) 濃度は成層圏でも減少傾向に転じ、今世紀後半には1960年レベルまで減少すると思われる。一方、温室効果ガス (GHG) 濃度の増加傾向は続いている。ODSおよびGHGの変化シナリオのもとでのオゾン層将来予測実験からは、A) 北半球中緯度のオゾン全量は1960年レベルと比較して今世紀半ばには同程度まで戻り、今世紀末にはさらに5%増加する、B) 低緯度や極域でのオゾン層の長期変化は中緯度とは異なる、と予想されている (Scientific Assessment of Ozone Depletion:2010<sup>1)</sup>、2014<sup>2)</sup>)。また、特に今後10~20年間は、大気中の塩素および臭素濃度がまだ高く、温室効果ガスの濃度が増加することが予想され、このような状況では依然として、成層圏の寒冷化によって極成層圏雲 (Polar Stratospheric Clouds, PSC) ができ、その表面で起こる特殊な化学反応によりオゾン層の破壊がある年に突発的に極端に進む恐れがある。2011年春の北極オゾン破壊がその例である。この脆弱期の大規模オゾン層破壊 (北極オゾンホールと報じられた2011年春季の北極域のオゾン層破壊) の発生頻度が本課題における科学的な問題点である。

2011年に起こった北極域の大規模オゾン破壊は以下の2点で、北極域のオゾン量が必ずしも大気中のフロン量 (成層圏では、成層圏の有効塩素量、EESC) と呼応しないことを示している。

- 1) 成層圏の塩素濃度のピークは2000年頃であり、2011年の濃度はピーク値より少し下がっていたとみられるにも関わらず、2000年頃よりも大規模なオゾン破壊が2011年に起こった。
- 2) 前年の2010年のフロン量は2011年のフロン量とほぼ同じにもかかわらず、2010年の北極域では大規模なオゾン破壊はほとんど起こらずオゾン量が多く、一方2011年では大規模なオゾン破壊が起こってオゾン量が少なくなった。つまり、この2年はほぼ同じODS濃度とGHG濃度であったにもかかわらずオゾン破壊量が大きく異なっていた。

このようなことが起こる背景には、北極のオゾン量が単に大気中のフロン量によって決まっているのではなく、北極渦などの状態 (極渦が強くてしっかりしているか、または弱くて北極域全体で大気の混合が頻繁に行われているか) に強く依存することがあげられる。北極渦の状態は年々変動が大きく、ある年はすこぶる安定な状態であり、またある年は極端に不安定であったりする。つまり、大気が本来持っている内部変動の影響をかなり受けている。この大気の内変動は温室効果ガスの濃度やそれに伴う海水面温度の影響を受ける。また、温室効果ガスの増加による極域成層圏の寒冷化の影響も考えられる。成層圏が寒冷化すればオゾン層破壊にとって重要な役割をする極成層圏雲がより発生しやすくなるからである。このようなことから、北極域のオゾン量はフロン量のみならず、温室効果ガスの影響も少なからず受けていることが予想され、その影響の程度とプロセスの解明が課題となっている。

この科学的な課題は、a) 使用中あるいは貯蔵中のODSの大気への放出抑制 (回収と処理) が大規模オゾン層破壊の発生リスク軽減にどの程度効果的か、b) GHGの増加抑制が成層圏オゾン層の安定化にどの程度効果的か、と言ったオゾン層保護対策と温暖化防止対策の立案や効果の推定に

不可欠な科学的知見である。そのために、IPCCの温暖化予測で使われたモデルと同じ大気の運動や放射スキームを備えた成層圏化学気候モデルによる数値予測が望まれ、また、その精度向上・精緻化を行う必要がある。

## 2. 研究開発目的

本研究ではIPCCの気候変化予測に用いた数値モデルをベースに、物理・化学プロセスを精緻化した化学気候モデルを複数開発し、今後予想されるオゾン層破壊物質および温室効果ガス濃度の組み合わせを複数組想定して温暖化が進行する中でのオゾン層の変動予測計算を行い、今後10～30年のオゾン層脆弱期の北極域の大気変動とそれに伴うオゾン層破壊の変動幅について解析を行う。そして、ODS, GHG放出削減とオゾン層の回復・安定化を着実に進めるための対策立案にとって必要な科学的知見を提供することを目的とする。具体的には、今後10～30年間の北半球中高緯度での大規模オゾン破壊リスクを回避するため、オゾン量の監視、フロン・ハロン濃度の監視、ハロンバンク対策、温室効果ガス濃度の監視、HCFCやHFC等に関連した温暖化対策との連携、等に関係した対策立案に必要な科学的知見を提供することを目的とする。

## 3. 研究開発方法

### (1) 化学気候モデルの開発

本課題では、気候特性の異なる3つの化学気候モデルを用いる。年々変動の激しい北極域の大規模オゾン破壊の発生頻度の解析に対して、気候特性の異なる3つの化学気候モデルを用いた計算を行い、その結果から共通の傾向を見いだすことによって、結果の信頼性を高めることが目的である。3つの化学気候モデルの特徴は以下のとおりである。

#### 1) CCSR/NIES化学気候モデル

UNEP/WMO Scientific Assessment of Ozone Depletion 2006, 2010に対して、国際プロジェクト Chemistry Climate Model Validation (CCMVal) および CCMVal2 の中でオゾン層の将来予測計算を行って貢献した (SPARC CCMVal (2010)<sup>3)</sup>)。本研究課題開始以前からの既存のモデルである。

#### 2) MIROC3.2化学気候モデル

CCSR/NIES化学気候モデルの化学計算スキームを、MIROC3.2大気大循環モデルに移植して本課題研究実施中に開発したモデルである。放射スペクトルの分割数がCCSR/NIES化学気候モデルより多い。特にCCSR/NIES化学気候モデルでは、 $O_3$ 、 $NO_2$ 、 $NO_3$ 、 $Cl_2O_2$ 、 $ClONO_2$ 、 $HOCl$ 等、オゾンに関わる化学反応に重要な大気微量成分の吸収帯が集中する  $0.317\mu m \sim 0.690\mu m$  の波長区間を1つの区間として取り扱っていたが、MIROC3.2化学気候モデルでは、この部分が7つの波長区分に分割されるなど、全体的に見ても分割数がCCSR/NIES化学気候モデルに比べてより多くなった(図1)。MIROC3.2放射スキームは、このような放射スペクトル分割を行うにあたり、放射スペクトル分割区域内での平均的な放射特性を計算するための波数積分の最適化が行われている。また、吸収線パラメータデータとして新しいHITRAN2000を使っており(CCSR/NIES化学気候モデルの吸収線パラメータデータはHITRAN92を使用していた)、さらに放射伝達計算法の改良も行われている。これらの

改良によって気温の再現性や大気微量成分の光解離率の計算精度が向上した。

### 3) MIROC5化学気候モデル

CCSR/NIES化学気候モデルの化学計算スキームを、MIROC5大気大循環モデルに移植して本課題研究実施中に開発したモデルである。放射スペクトルの分割数はMIROC3.2化学気候モデルと同一となっている。積雲対流スキームや雲の微物理過程の改良、地表面過程の改良等が行われており、海面水温の再現性が向上した。

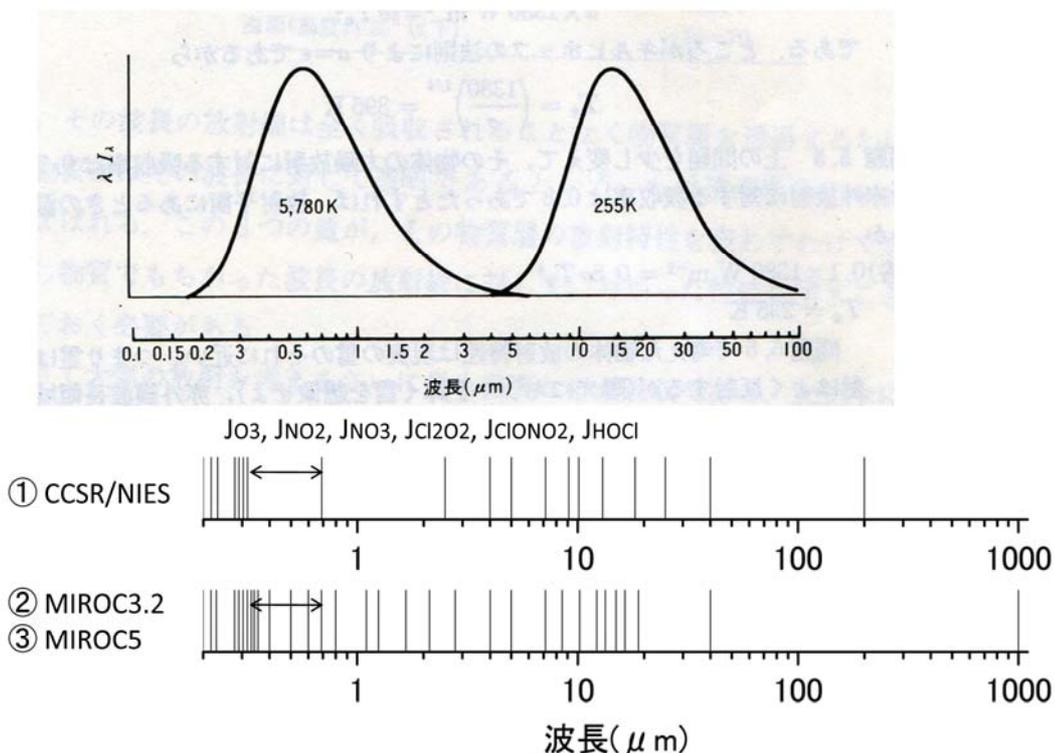


図1 3つの化学気候モデルで使用される放射スペクトルの分割幅の比較。太陽放射スペクトル（左上）および地球赤外放射スペクトル（右上）とともに示す。矢印で示された区間に  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{Cl}_2\text{O}_2$ ,  $\text{ClONO}_2$ ,  $\text{HOCl}$  等の分子の吸収帯が存在する。

1)のCCSR/NIES化学気候モデルは本課題研究が始まる前にすでに完成していたものであり、本課題研究実施中に新たに2)MIROC3.2化学気候モデル、および3)MIROC5化学気候モデルの開発を行った。これらの化学気候モデルの開発・検証・計算解析は、表1のスケジュールに従って行われた。

表1 化学気候モデルの開発・検証・計算解析の工程表

	CCSR/NIES化学気候モデル	MIROC3.2化学気候モデル	MIROC5化学気候モデル
H25	計算・解析	開発	
H26		検証・計算・解析	開発
H27	総合評価	総合評価	検証・計算・解析・総合評価

## (2) 数値実験の方法

複数個のODS濃度レベルとGHG濃度レベルの組み合わせによる100アンサンブル計算を行った(図2)。

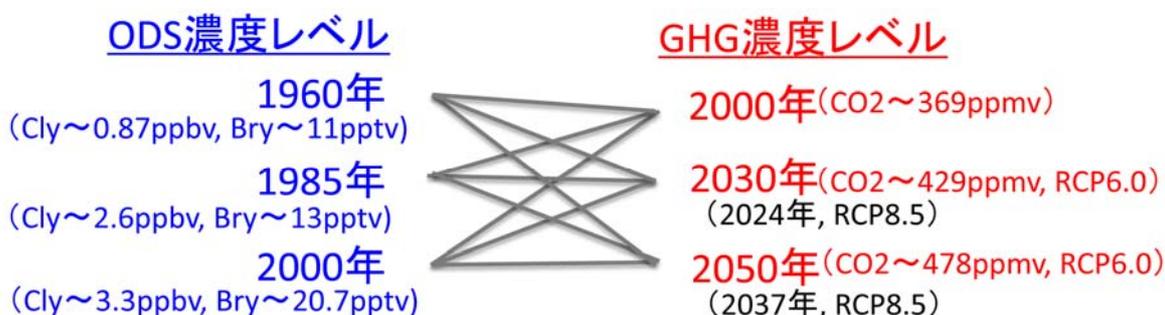


図2 100 アンサンブル実験で設定された ODS 濃度レベルと GHG 濃度レベルの組み合わせ。将来(2030年と2050年)のGHG濃度レベルは、RCP6.0シナリオとRCP8.5シナリオに基づいて記述。RCP6.0シナリオに基づいた二酸化炭素濃度と年代の対応関係は赤字で示され、RCP8.5シナリオに基づいた二酸化炭素濃度と年代の対応関係は括弧書きの黒字で示されている。

具体的にはODS濃度を、ほとんど自然起源によるもので低い状態であった1960年レベル、オゾンホールが出現して数年後の1985年レベル、ほぼピークであった2000年レベルに固定し、それぞれのODS濃度レベルに対して、GHG濃度を2000年レベル、2030年レベル、2050年レベルに固定した110年間の定常計算を行った。RCP6.0シナリオにおける2000年、2030年、2050年の二酸化炭素濃度は、369 ppmv、429 ppmv、478 ppmvである。これらの濃度は、RCP8.5シナリオの場合、それぞれ、2000年、2024年、2037年に対応する(図2)。110年間の定常計算のうち最初の10年間は、モデルの微量成分分布や気象要素が定常状態に落ち着くまでの遷移期間として解析からは除外し、その後の100年(100アンサンブル)について解析を行った。モデルのODS濃度およびGHG濃度の年代レベルはそれぞれWMO2010 A1シナリオ、IPCC RCP6.0シナリオの地表面濃度データに基づいており(図3)、110年の計算期間中、これらの地表面濃度値をモデルの地表面濃度としてインプットし続けた。モデルのODS濃度は地表面で固定された濃度によってモデルの大気中に移流・拡散したり、逆に地表に戻ってきたりする。

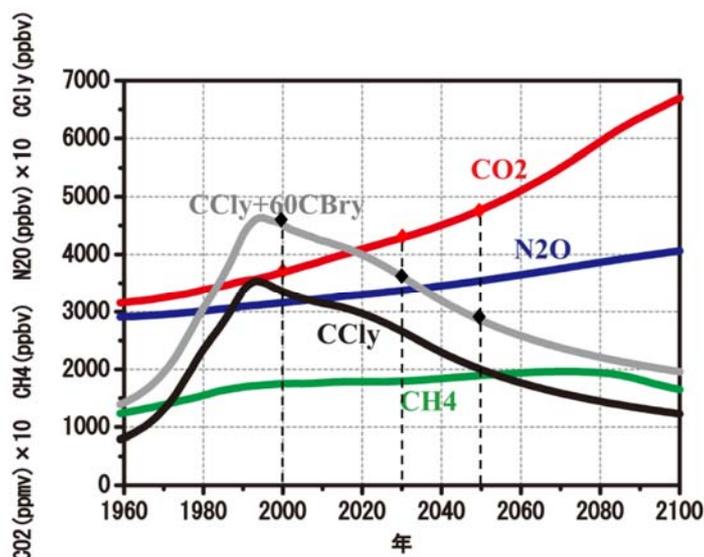


図3 WMO2010 A1 シナリオに基づいた有機塩素量濃度 (CCl<sub>4</sub>)、有機塩素+60倍有機臭素量濃度 (CCl<sub>4</sub>+60CBry)、および IPCC RCP6.0 シナリオの二酸化炭素濃度 (CO<sub>2</sub>)、メタン濃度 (CH<sub>4</sub>)、亜酸化窒素濃度 (N<sub>2</sub>O) の経年変化。それぞれの物質の濃度単位を左側に示す。縦点線は、左から2000年、2030年、2050年を表し、これらの年に対応する濃度が100アンサンブル計算に使われた。

これらの実験では、海水面温度および海氷密度は1年内の季節変動を繰り返すように設定されており、例えば、GHG濃度を2000年レベルに固定する実験の1年間の毎日の海水面温度分布には、それぞれのモデルグリッドについて対応する日の1995年～2004年の10年間の平均値を使った。これにより、本数値実験に対する海水面温度および海氷密度の1年以上～数年にわたる長期変動の影響を除いた。同様に、2030年レベルに固定する実験の海水面温度分布および海氷密度分布は、温室効果ガス濃度のRCP6.0シナリオの下でIPCC-AR5用にMIROC3.2大気海洋結合モデルを用いて実施された地球温暖化の将来予測実験の海水面温度および海氷密度の計算値の2025年～2034年平均値を、2050年レベルに固定する実験の海水面温度分布および海氷密度分布は2045年～2054年平均値を使った。

また、熱帯の海水面温度が北極域のオゾン量およびオゾン層変動に及ぼす影響をみるため、熱帯の海水面温度を上記の10年間平均値からさらにエルニーニョ時およびラニーニャ時の海水面温度に変更した実験も行った。この実験は、ODS濃度2000年レベルーGHG濃度2000年レベルの実験に対してのみ行った。エルニーニョ時およびラニーニャ時の海水面温度の設定は、赤道域の西経150度を中心とした東経135度～西経75度、北緯15度～南緯15度の矩形の熱帯太平洋域において、最大エルニーニョ時の海水面温度 (1997年11月) から月平均海水面温度の気候値 (1992年～2001年の10年間の11月の平均海面水温) を差し引いたもの (最大エルニーニョ時の海水面温度のアノマリ)、および最大ラニーニャ時の海水面温度 (1988年11月) から月平均海水面温度の気候値 (1983年～1992年の10年間の11月の平均海面水温) を差し引いたもの (最大ラニーニャ時の海水面温度のアノマリ) を、1995年～2004年平均の月平均海水面温度 (2000年を代表する月平均海水面温度とみなす) にそれぞれ加えて作成したものである。また、この矩形領域の周囲の南北方向緯度15

度の範囲および東西方向経度15度の範囲は緩衝領域として、アノマリがこの範囲で指数関数的に減衰するように設定した。図4に、計算に用いたエルニーニョ時（左）とラニーニャ時（右）の海水面温度のアノマリの分布を示す。このアノマリを、海水面温度の1995年～2004年の10年間の平均値の毎日の分布に加算した海水面温度分布を使って、エルニーニョ時およびラニーニャ時それぞれの計算を行った。

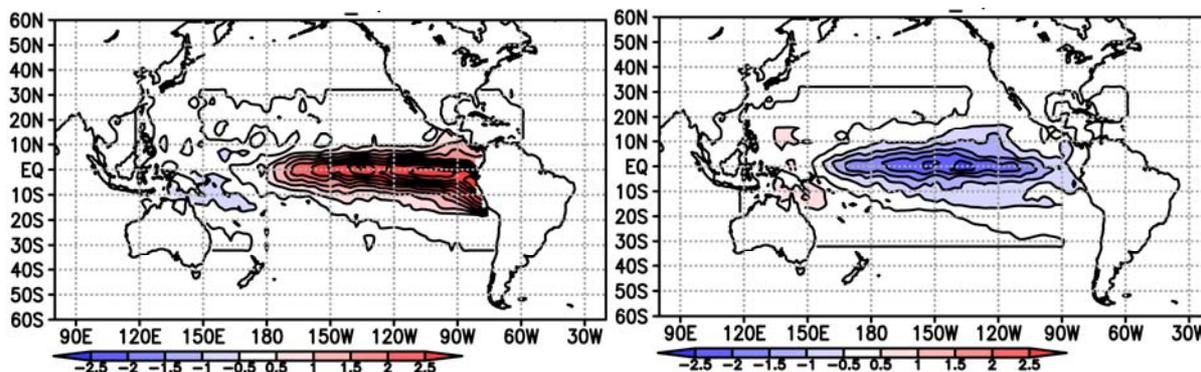


図4 エルニーニョ時（左）とラニーニャ時（右）の海水面温度のアノマリ。エルニーニョ時は1997年11月の月平均海水面温度データから1992年～2001年の11月平均海面水温を差し引いて作成。ラニーニャ時は1988年11月の月平均海水面温度データから1983年～1992年の11月平均海面水温を引いて作成。

さらに極成層圏雲パラメータを変化させた実験を行った。極成層圏雲の粒径や表面積は現状ではデータが少なく不確定性が大きい部分である。例えば、極成層圏雲の粒径は、重力落下速度に影響し、それによって大気中の脱室の程度に影響し、結果として、成層圏のオゾン破壊率に影響することが予想される。また、極成層圏雲の表面積は、不均一反応の効率に影響し、これも成層圏のオゾン破壊率に影響する。行った実験では、硝酸や水蒸気の凝縮量は、それぞれの飽和蒸気圧を超えた蒸気圧による量とし、個数密度と粒径分布を仮定して、粒径分布のモード半径を計算した。そのモード半径は極成層圏雲の落下速度の計算に用いられた。仮定した極成層圏雲の個数密度の粒径分布は対数正規分布であり、

$$n(r) = \frac{N_0}{r \sqrt{2\pi \ln \sigma}} e^{-\left(\frac{\ln \frac{r}{r_0}}{\sqrt{2 \ln \sigma}}\right)^2}, \quad \sigma(\text{分散}) = 1.8$$

で表される。 $r_0$ はモード半径であり、 $N_0$ は個数密度である。化学気候モデルでは、 $N_0$ を仮定して凝縮量から $r_0$ を計算する。すなわち、この粒径分布の下で極成層圏雲の凝縮量の体積は、

$$V = \int_0^{\infty} \frac{4}{3} \pi r^3 n(r) dr$$

で表されるので、右辺を積分すると凝縮体積 $V$ とモード半径 $r_0$ との関係は、

$$r_0 = 3V(N_0 4\pi)^{-\frac{1}{3}}$$

となる。このモード半径を使って極成層圏雲の重力落下速度を計算する。

極成層圏雲のうち、硝酸三水和物（Nitric trihydrate, NAT）と氷粒子の個数密度は、Waibel (1999) によって、 $0.005 \text{ cm}^{-3}$ とした。一方、個数密度を変化させた実験のNATと氷粒子の個数密度は、Ruhnke(1999)、Drdla and Turco (1991)の観測結果に従って、それぞれ、 $1.0 \text{ cm}^{-3}$ 、 $0.01 \text{ cm}^{-3}$ とした。これによって、NAT粒子と氷粒子の個数密度を $0.005 \text{ cm}^{-3}$ とした標準実験に比べて、NAT粒子の半径は約0.17倍、表面積は約6倍、氷粒子の半径は約0.8倍、表面積は約1.3倍となる。つまり、同じ凝縮量でも、不均一反応の場となる粒子の表面積が大きくなる設定となっている。不均一反応の反応係数は表面積に比例するので、この極成層圏雲粒子の個数密度の変更によって、不均一反応が起こりやすくなる。

以上の設定によって、3つの化学気候モデルを使って100アンサンブル実験を行った。具体的にはODS濃度およびGHG濃度を表2のように設定し110年間の連続計算を行った。○印がそれぞれの化学気候モデルで行った実験である。MIROC3.2化学気候モデルを中心に実験を行った。

表2 行った数値実験一覧

ODS濃度 レベル	GHG濃 度レベル	NAT、氷粒子 の個数密度 ( $\text{cm}^{-3}$ )	海水面温度分布、海水 密度分布	CCSR/N IES化学気 候モデル	MIROC3.2 化学気候 モデル	MIROC5 化学気候 モデル
1960	2000	0.005	1995－2004年平均	○	○	○
1960	2030	0.005	2025－2034年平均		○	
1960	2050	0.005	2045－2054年平均	○	○	
1985	2000	0.005	1995－2004年平均		○	○
1985	2030	0.005	2025－2034年平均		○	○
1985	2050	0.005	2045－2054年平均		○	○
2000	2000	0.005	1995－2004年平均	○	○	○
2000	2000	0.005	1995－2004年平均＋ エルニーニョ時アノ マリ		○	
2000	2000	0.005	1995－2004年平均＋ ラニーニャ時アノマ リ		○	
2000	2000	NAT : 1.0 氷粒子 : 0.01	1995－2004年平均		○	○
2000	2030	0.005	2025－2034年平均		○	○
2000	2030	NAT : 1.0 氷粒子 : 0.01	2025－2034年平均		○	○
2000	2050	0.005	2045－2054年平均	○	○	○
2000	2050	NAT : 1.0 氷粒子 : 0.01	2045－2054年平均		○	○

### (3) 解析の方法

表2に従ってODS濃度レベルとGHG濃度レベルを設定した110年間の連続計算を行い、そのうち最初の10年間はモデルの微量成分分布や気象要素が定常状態に落ち着くまでの遷移期間として解析からは除外し、残りの100年間の計算結果を同一条件で1月1日0時の初期値だけが異なる100アンサンプルとみなし、解析を行った。解析の目的は、

- 1) 観測データと比較して化学気候モデルのオゾン全量や塩素濃度の検証を行う。
- 2) 北半球中高緯度域オゾン量のODS濃度依存性を抽出する。
- 3) 北半球中高緯度域オゾン量のGHG濃度依存性を抽出する。

これらの解析目的に対して行った具体的な解析項目は以下のとおりである。それぞれ、1)～3)の番号が対応している。

- 1) TOMSによるオゾン全量観測値の1995年－2004年平均値を、ODS濃度2000年レベル－GHG濃度2000年レベルに設定した3つの化学気候モデルによるオゾン全量の計算結果の100アンサンプル平均値と比較した。
- 2) 北緯45度－90度の緯度範囲の北半球中高緯度域で、化学オゾン破壊が最も顕著となる3月－4月の期間におけるオゾン全量最低値を100アンサンプルについて示し、そのばらつき（標準偏差）を、異なるODS濃度レベルを設定した実験間で比較した。
- 3) 北緯45度－90度の緯度範囲の北半球中高緯度域で、日平均オゾン全量が閾値（MIROC3.2化学気候モデルの場合は220DU）以下となる面積×日数の積算値の解析を行った。異なるGHG濃度レベルを設定した実験間でこの量の比較を行った。

## 4. 結果及び考察

### (1) 化学気候モデルのオゾン全量の検証

図5は、本課題で使用または開発した3つの化学気候モデルによって計算された経度平均オゾン全量の時間－緯度断面図である。ODS濃度を2000年、GHG濃度を2000年に固定した実験の100アンサンプル平均が示されている。また、TOMSによる1995－2004年の10年間の平均値も示す。TOMSの観測値に比べてそれぞれのモデルは、オゾン全量の絶対値の差は多少あるが、それぞれの緯度の季節変動をよく再現していることがわかる。CCSR/NIESは南極の10月に起こっているオゾンホール再現性が不十分であることがわかる。また、2－3月の北極のオゾン全量は、北極に近いところで過多となっている。中緯度から極へのオゾン輸送が多すぎるためと思われる。MIROC3.2化学気候モデルは観測値をよく再現しているが、3月頃の北極域でオゾン全量が少しばかり少なくなっている。MIROC5化学気候モデルの結果は、オゾン全量が若干少ないものの、季節変動は全球的に最もよく再現されている。

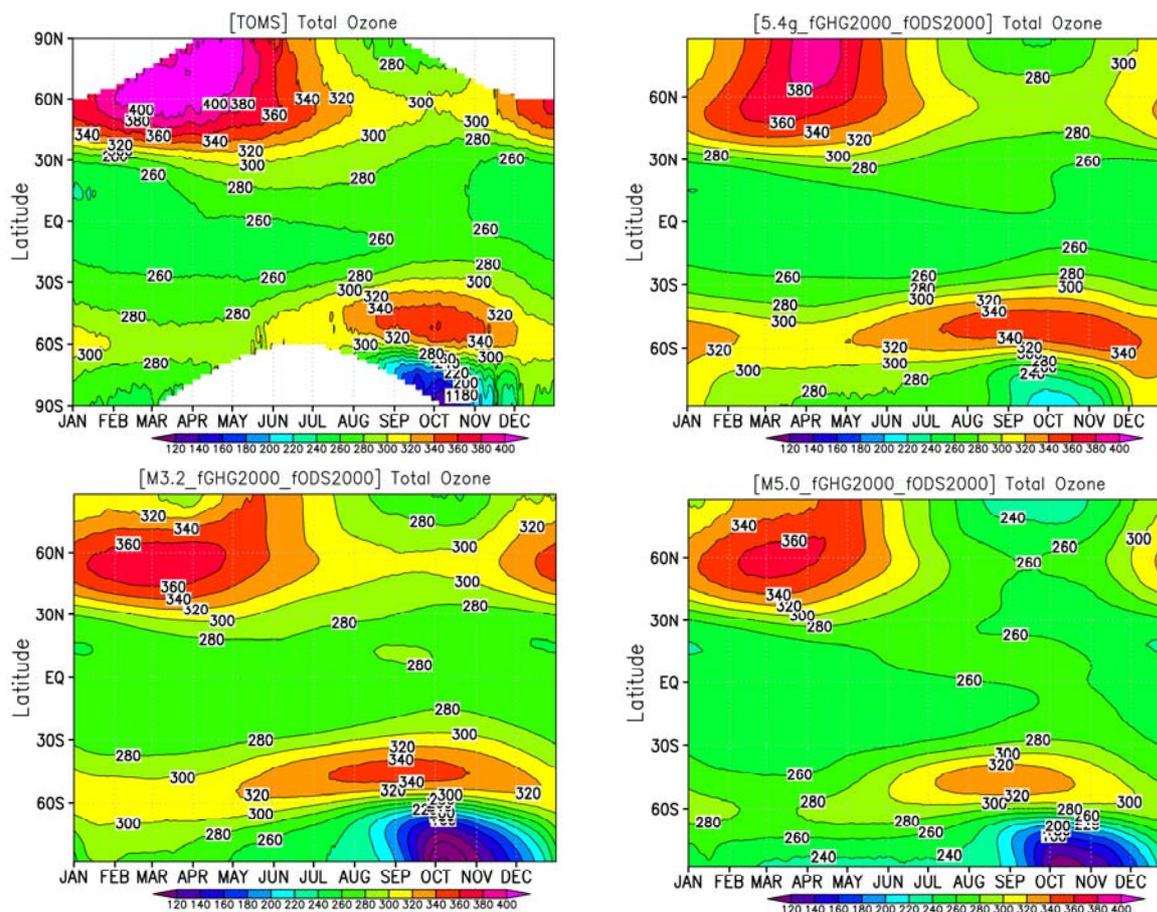


図5 経度平均したオゾン全量の時間変化と緯度分布  
 (左上) TOMS 観測の1995-2004年の平均値  
 (右上) CCSR/NIES 化学気候モデルの100アンサンブル平均値。ODS濃度を2000年レベル、GHG濃度を2000年レベルに設定。  
 (左下) MIROC3.2 化学気候モデルの100アンサンブル平均値。ODS濃度を2000年レベル、GHG濃度を2000年レベルに設定。  
 (右下) MIROC5 化学気候モデルの100アンサンブル平均値。ODS濃度を2000年レベル、GHG濃度を2000年レベルに設定。

## (2) 化学気候モデルの塩素濃度および臭素濃度の検証

表3には、ODS濃度を2000年レベル-GHG濃度を2000年レベル、およびODS濃度を1960年レベル-GHG濃度を2000年レベルに設定した実験について、3つの化学気候モデルの北半球中高緯度域(45-90N)の上部成層圏(0.5-1hPa)および下部成層圏(50hPa)における無機塩素濃度と無機臭素濃度を示す。MLS、HALOE、ACE等の衛星観測データによれば、2000年頃の上部成層圏(~0.5hPa)のHCl濃度は3.2~3.7 ppbvであった(Scientific Assessment of Ozone Depletion:2010<sup>1)</sup>)。上部成層圏あたりでは、Cl<sub>y</sub>のうち95%以上がHClで占められていることを考えると、2000年のMIROC3.2化学気候モデル、MIROC5化学気候モデルの0.5-1 hPa、90S-90N平均の、Cl<sub>y</sub>~3.2 ppbv という値は妥当である。一方、CCSR/NIESの上部成層圏の値はこれより明らかに高く、これはモデルのなかでの微量成分の質量保存がうまく働いていないことを示す。ただし、50hPaの下部成層圏では、3つのモデルのCl<sub>y</sub>、Br<sub>y</sub>はほぼ近い値を示しており、オゾン濃度が高くオゾン全量に最も大きな影響を及ぼす下部成層圏の塩素濃度および臭素濃度が妥当であることから、CCSR/NIESモデルでもオゾン

全量への塩素量・臭素量の影響がある程度正しく反映されていることが期待できる。

また、MIROC3.2化学気候モデルとMIROC5化学気候モデルの無機塩素濃度および無機臭素濃度を比較すると、全球平均、北半球高緯度平均、上部成層圏、下部成層圏で両者ほぼ近い値を示している。両モデルの間で放射スキームはほぼ同一なことから、大気微量成分の光解離係数の値もほぼ同じになっている。それゆえ両モデル間の値の微妙な違いは、モデルの気温や大気循環の強さの違いを反映していると考えられる。

表3 3つの化学気候モデルの北半球中高緯度域の上部成層圏および下部成層圏における無機塩素濃度と無機臭素濃度

			45-90N	45-90N	90S-90N	90S-90N
			0.5-1hPa	50hPa	0.5-1hPa	50hPa
2000年	Cly (ppbv)	MIROC5	3.25	2.19	3.24	1.46
		MIROC3.2	3.30	1.79	3.29	1.23
		CCSR/NIES	4.04	1.83	4.03	1.24
	Bry (pptv)	MIROC5	18.8	17.9	18.7	14.6
		MIROC3.2	20.8	16.6	20.8	13.4
		CCSR/NIES	24.5	16.9	24.5	13.3
1960年	Cly (ppbv)	MIROC5	0.883	0.685	0.880	0.496
		MIROC3.2	0.874	0.534	0.871	0.399
		CCSR/NIES	2.06	0.998	2.01	0.704
	Bry (pptv)	MIROC5	10.0	9.86	9.98	8.66
		MIROC3.2	11.0	9.44	11.0	8.11
		CCSR/NIES	16.7	11.6	16.4	9.45

### (3) 北半球中高緯度域オゾン全量のODS濃度依存性

図6-1、図6-2、図6-3に、3つの化学気候モデルによって計算された100アンサンブルメンバーについて、3-4月の北緯45-90度の領域でのオゾン全量最小値の年々変化（アンサンブルメンバーによるばらつき）を、1960年レベルのODS濃度（上）と2000年レベルのODS濃度（下）について示す。図から、どのモデルでも、大気中のODS濃度が1960年レベルの低い値から2000年レベルの高い値に増加することによって、オゾン全量最低値の高い方の値はあまり変わらないが、低い方の値がかなり低くなってアンサンブル平均値を下げ、また、アンサンブルメンバー間のばらつきが大きくなっていることがわかる。ばらつきの大きさは図の右上にSTDの値（100アンサンブルのオゾン全量最低値に対する標準偏差）で示してある。例えば、図6-2に示してあるMIROC3.2化学気候モデルの場合、ODS濃度が1960年レベルの低い値から2000年レベルの高い値に増加することによって、標準偏差の値は13.0から31.1へ約2倍以上増加している。一方、図6-1で示されるCCSR/NIES化学気候モデルのこのODS依存性は小さい。これは、このモデルではオゾン輸送の効果が北極域・北半球中緯度域で他のモデルに比べて大きいことを示している。このことはまた、図5のオゾン全量を示す図において、このモデルの北極付近の3月-4月のオゾン全量が他のモデルよりも多くなっていることからわかる。MIROC3.2化学気候モデルのODS依存性が一番大きく、MIROC5モデルの依存性は、MIROC3.2モデルより小さくCCSR/NIES化学気候モデルより大きい。これも図5で示された北極域・北半球中緯度域の3月-4月のオゾン全量に対応し、この時期・領域のオゾン全量が大きいモデルほど、オゾン輸送の効果が大きく、ODS依存性は小さくなっていることがわかる。

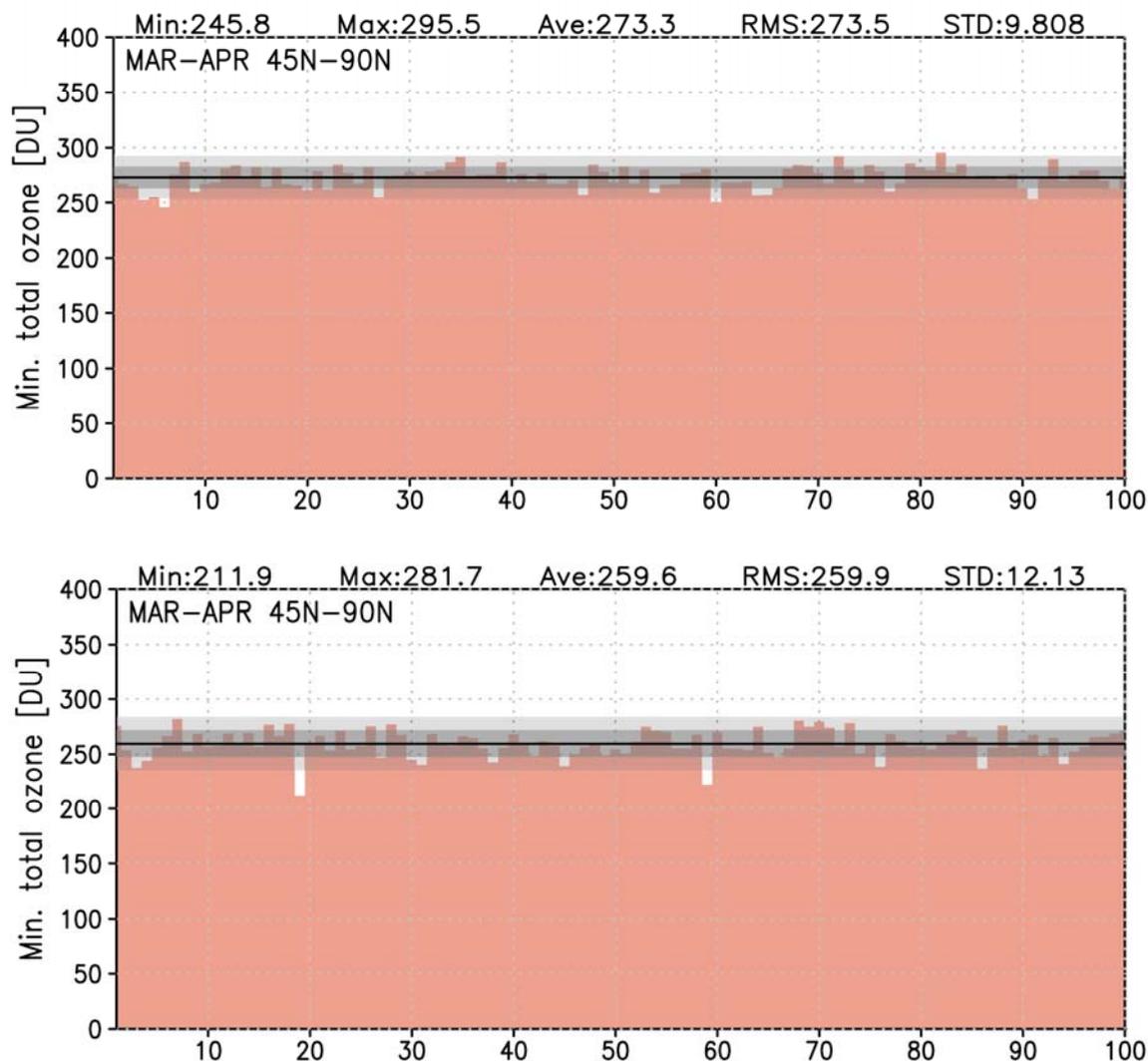


図 6-1 CCSR/NIES 化学気候モデルによるオゾン全量年最小値のアンサンブル間のばらつき。最もオゾン層破壊が起こりやすい3月～4月の北緯45度～90度について、100アンサンブルについて解析を行った。(上) ODS濃度1960年レベル GHG濃度2000年レベルの実験結果、(下) ODS濃度2000年レベル GHG濃度2000年レベルの実験結果。横軸はアンサンブルメンバーを表す(1～100)。図の上部に100アンサンブル間の最低値 (Min)、最高値 (Max)、平均値 (Ave)、二乗平均の平方根 (RMS)、標準偏差 (STD) を示す。平均値を横実線、標準偏差 ( $1\sigma$ ) を濃い陰影で、 $2\sigma$  を薄い陰影で表す。

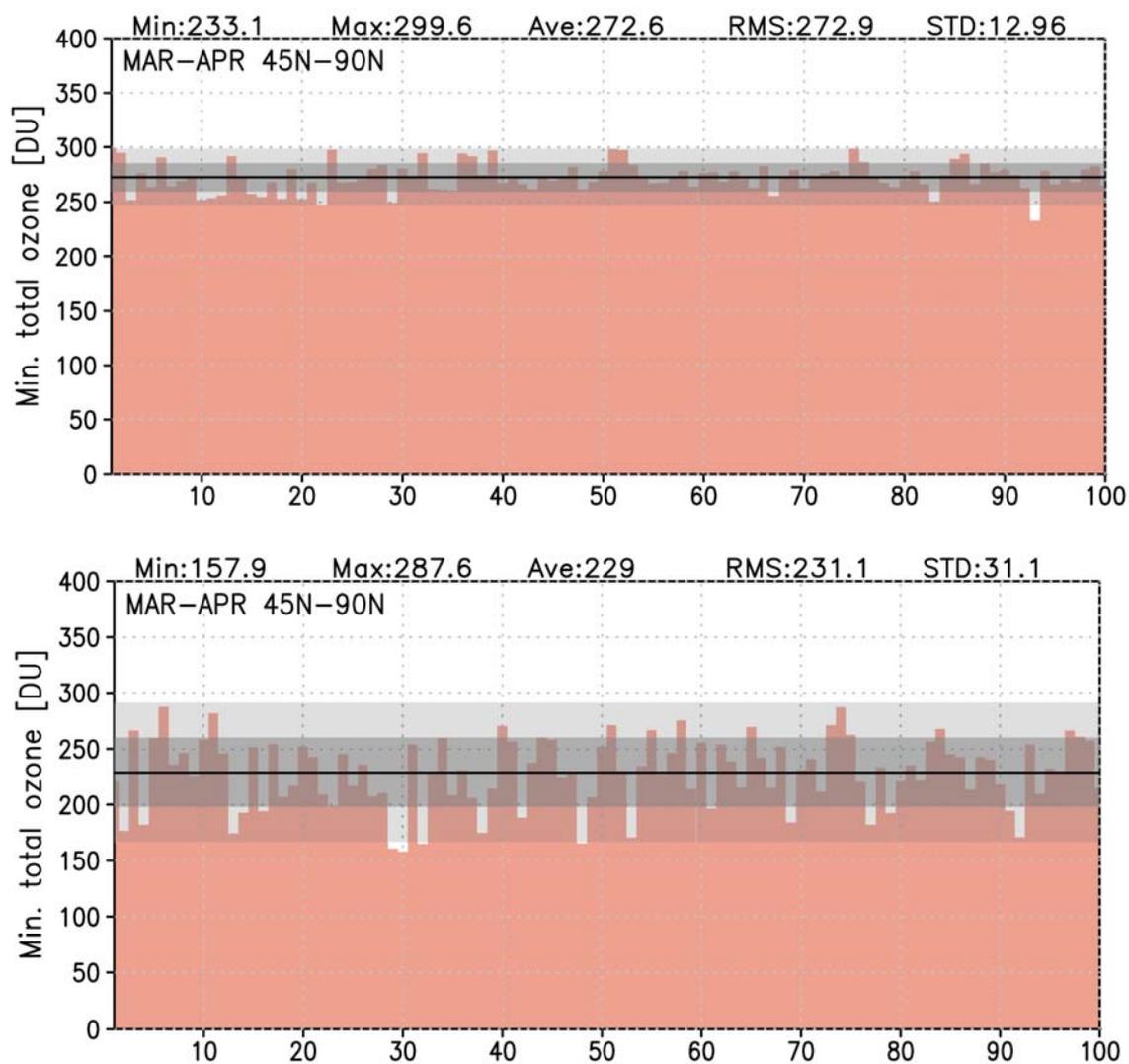


図 6-2 図 6-1 と同じ。ただし、MIROC3.2 化学気候モデルによるオゾン全量年最小値のアンサンブル間のばらつき。(上) ODS 濃度 1960 年レベル GHG 濃度 2000 年レベルの実験結果、(下) ODS 濃度 2000 年レベル GHG 濃度 2000 年レベルの実験結果。

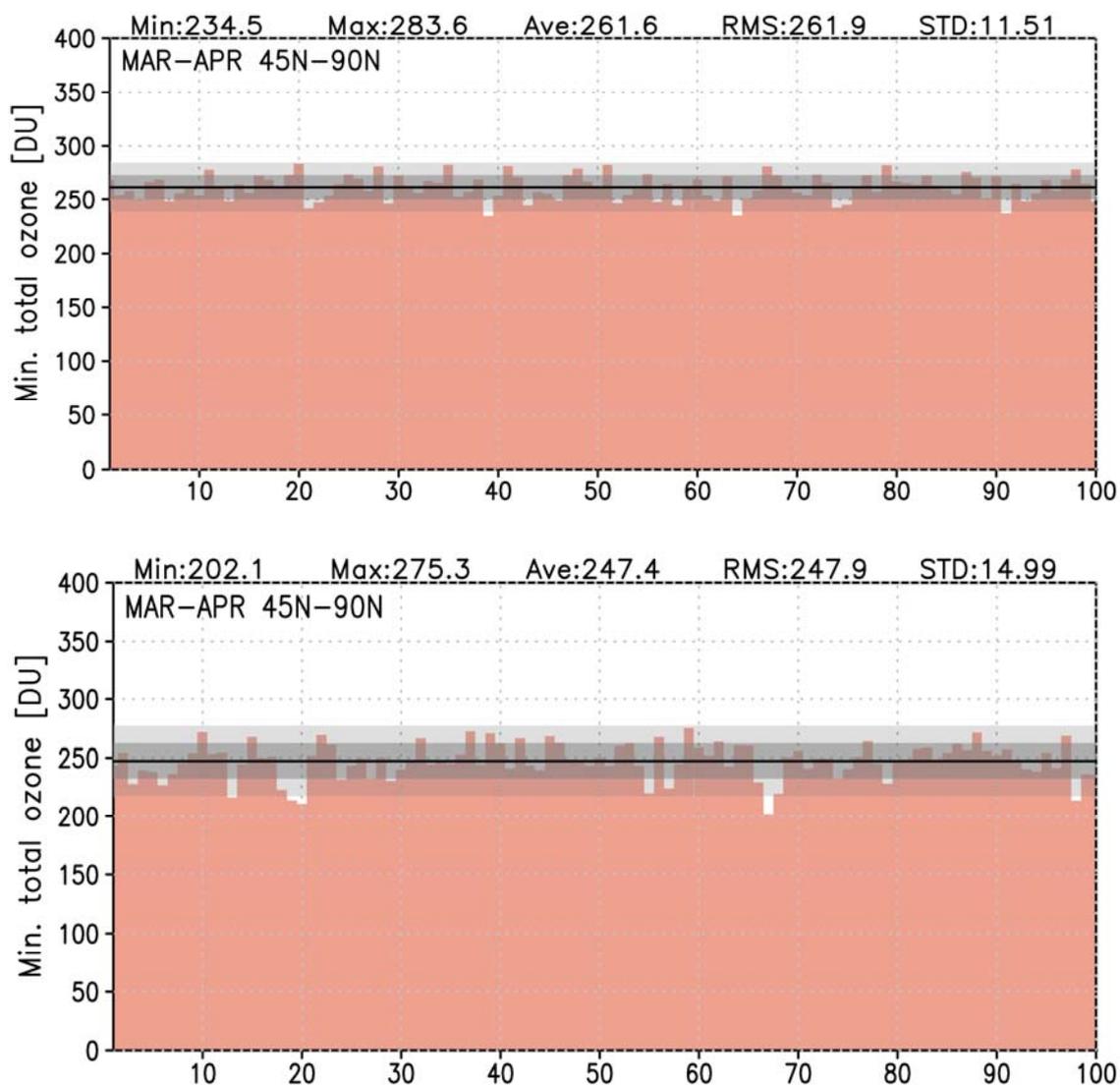


図 6-3 図 6-1 と同じ。ただし、MIROC5 化学気候モデルによるオゾン全量年最小値のアンサンブル間のばらつき。(上) ODS 濃度 1960 年レベル GHG 濃度 2000 年レベルの実験結果、(下) ODS 濃度 2000 年レベル GHG 濃度 2000 年レベルの実験結果。

図 7-1, 図 7-2, 図 7-3 に、それぞれ図 6-1, 図 6-2, 図 6-3 をもとに作成した、アンサンブルメンバーのオゾン全量最低値の個数分布を示す。どのモデルにおいても、ODS 濃度が 1960 年レベル (上図) から 2000 年レベル (下図) に増加することによって分布の中央の位置が左にずれてオゾン全量最低値が低くなり、また、分布の左端のすそのが左側の値の小さい方へ拡大していることがわかる。

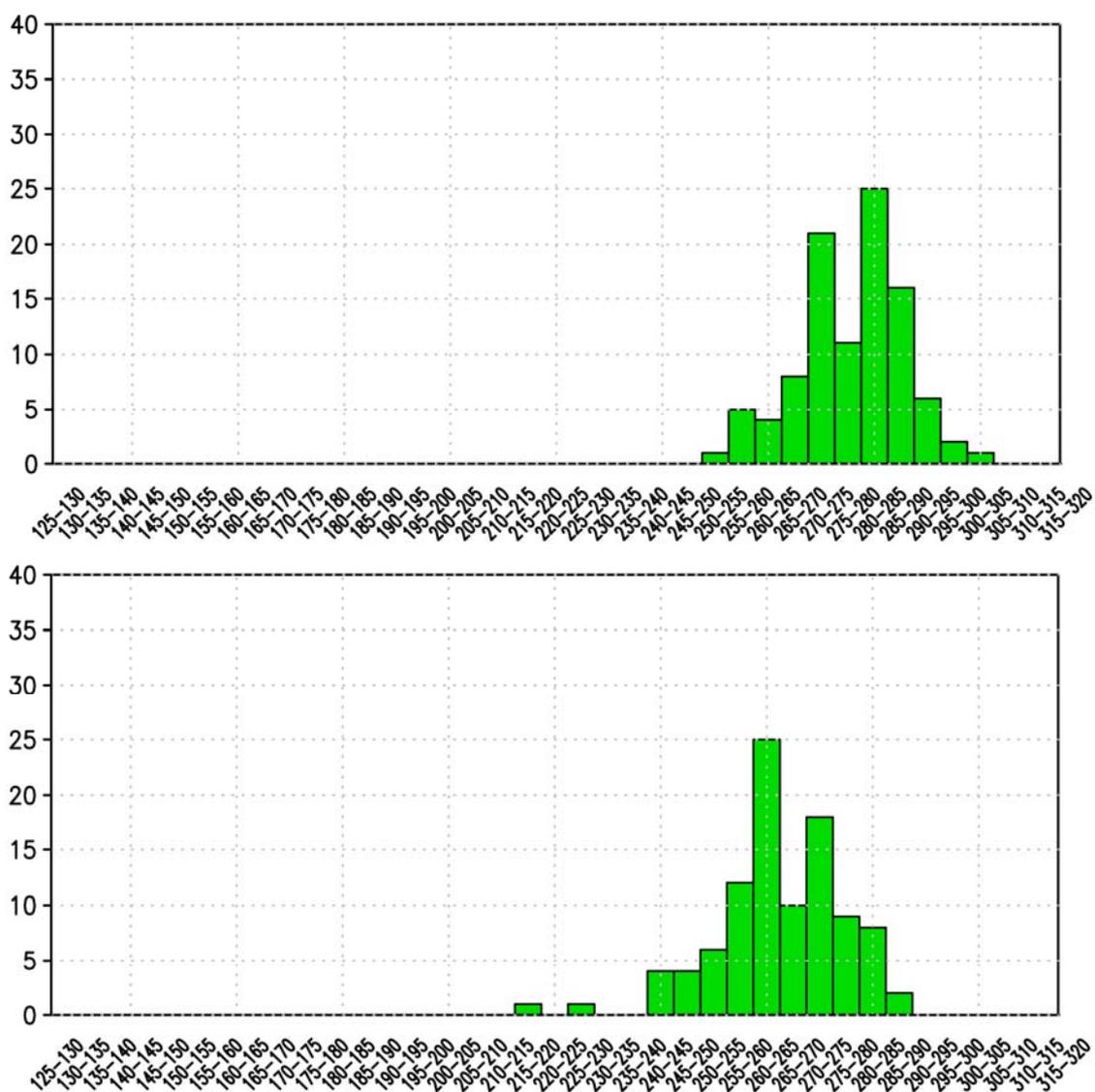


図7-1 図6-1をもとに作成したCCSR/NIES化学気候モデルによる100アンサンブルメンバーのオゾン全量年最小値の頻度分布。最もオゾン層破壊が起こりやすい3月～4月の北緯45度～90度についての解析結果。(上) ODS濃度1960年レベルGHG濃度2000年レベルの実験結果、(下) ODS濃度2000年レベルGHG濃度2000年レベルの実験結果。縦軸はアンサンブルメンバーの個数、横軸はオゾン全量最低値を表す。

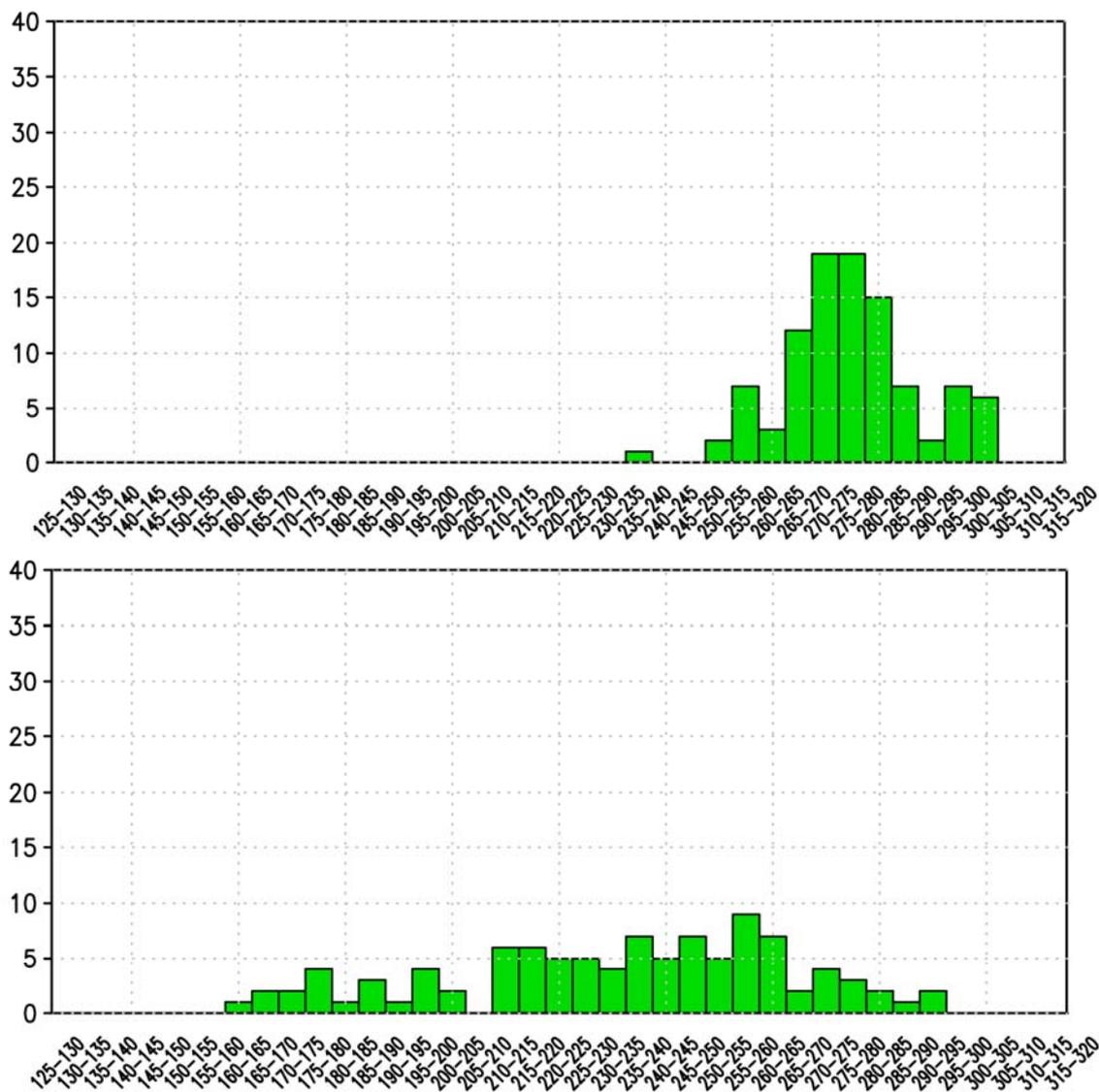


図 7-2 図 6-2 をもとに作成した MIROC3.2 化学気候モデルによる 100 アンサンブルメンバーのオゾン全量年最小値の頻度分布。最もオゾン層破壊が起こりやすい 3 月～4 月の北緯 45 度～90 度についての解析結果。(上) ODS 濃度 1960 年レベル GHG 濃度 2000 年レベルの実験結果、(下) ODS 濃度 2000 年レベル GHG 濃度 2000 年レベルの実験結果。縦軸はアンサンブルメンバーの個数、横軸はオゾン全量最低値を表す。

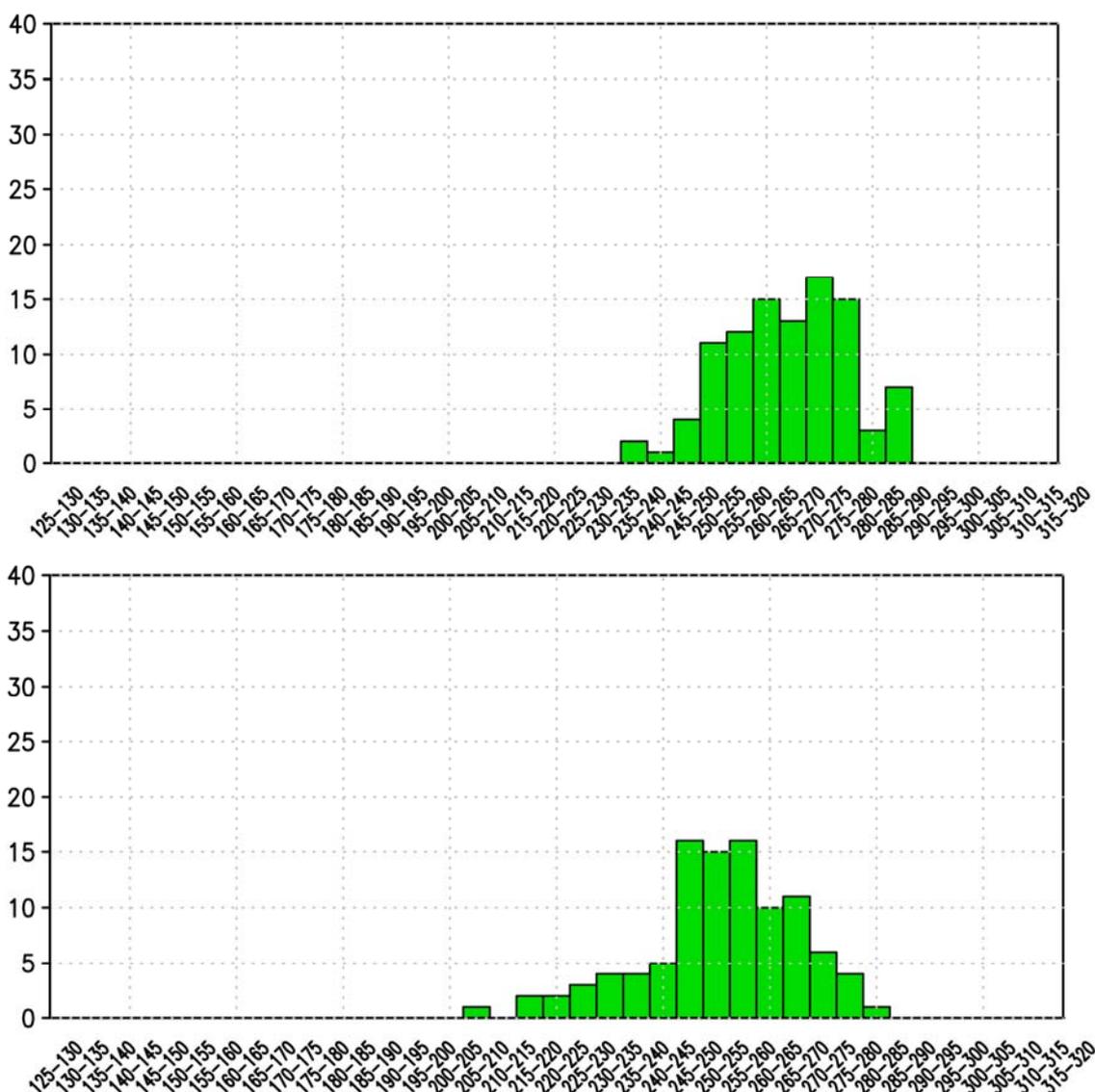


図 7-3 図 6-3 をもとに作成した MIROC5 化学気候モデルによる 100 アンサンブルメンバーのオゾン全量年最小値の頻度分布。最もオゾン層破壊が起こりやすい 3 月～4 月の北緯 45 度～90 度についての解析結果。(上) ODS 濃度 1960 年レベル GHG 濃度 2000 年レベルの実験結果、(下) ODS 濃度 2000 年レベル GHG 濃度 2000 年レベルの実験結果。縦軸はアンサンブルメンバーの個数、横軸はオゾン全量最低値を表す。

#### (4) 北半球中高緯度域オゾン全量の GHG 濃度依存性—ODS 濃度 2000 年レベルの場合

##### 1) 極成層圏雲 (NAT と氷粒子) の個数密度が $0.005 \text{ cm}^{-3}$ の場合—標準実験の結果

ODS 濃度が 2000 年レベル ( $\text{Cly} \sim 3.3 \text{ ppbv}$ ,  $\text{Bry} \sim 20.7 \text{ pptv}$ ; 図 2 を参照) という高い値に対して、極成層圏雲の個数密度が  $0.005 \text{ cm}^{-3}$  に設定し (表 2 を参照)、GHG 濃度レベルを 2000 年、2030 年、2050 年に設定した 3 つの 100 アンサンブル実験結果を使い、3-4 月の北緯 45-90 度の領域でのオゾン全量最小値の解析を ODS 濃度依存性と同様にを行った。しかしながら、ODS 濃度依存性の場合と異なり、GHG 濃度依存性はこの 3 つの実験の間でオゾン全量の最低値に関する違いがはっきりとは現れなかった。つまり、この領域・期間中の最低値だけを見ていたのでは、GHG 依存性がほとんど

ど見えなかった。

この領域・期間中のオゾン破壊のODS濃度依存性をより精度良く見るため、日平均オゾン全量がある閾値以下となる面積の解析を行った。この閾値は、いわゆるミニホールなど、気象学的な現象によりオゾンの輸送状態によってのみ生じたオゾン量減少をカウントしないように、かつ高いODS濃度下で起こる不均一反応を介した塩素および臭素が関係した化学オゾン破壊によるオゾン量減少をカウントするような値に設定された。ところで、モデルによって3-4月の北緯45-90度の領域のオゾン全量は若干異なるので、この閾値もモデルによって異なる値を設定することが必要である。北極域では、不均一反応を介した化学オゾン破壊によるオゾン量の極端な減少は、通常、2月下旬~4月・5月に起こることを考慮し、2月下旬~6月初旬以外の期間に閾値以下の値が出ないような閾値をモデル毎に設定した。具体的には、CCSR/NIES化学気候モデルの計算結果に対しては240DUの閾値、MIROC3.2化学気候モデルに対しては220DUの閾値、MIROC5化学気候モデルに対しては230DUの閾値が設定された。図9-1、2、3は、それぞれのモデルのオゾン全量が閾値以下となる面積を、日付を横軸にして色で表したものである。縦軸はアンサンブルメンバーを表し、いちばん下がアンサンブルメンバー1、いちばん上がアンサンブルメンバー100の結果を表している。

まず、図8-1で示されるCCSR/NIES化学気候モデルの結果は、春季の北緯45-90度の領域で化学オゾン破壊がほとんど見られないということを示している。このことは図9-1で表される日平均オゾン全量が閾値（CCSR/NIES化学気候モデルの場合は240DU）以下となる面積×2月~6月の期間における日数の積算値の頻度分布を見てもわかる。アンサンブルメンバーの分布は値のゼロか非常に小さいところに限られている。一方で現実には、近年の大気中の高いODS濃度により春季のこの領域で化学オゾン破壊が起こっている。CCSR/NIES化学気候モデルの100アンサンブル実験が示す結果は、モデルのオゾンや熱の北極への輸送効果が過大であるために、ほとんどのアンサンブルメンバーで北緯45-90度の領域でオゾン量が増加し気温が上昇したことで、極成層圏雲が減り不均一反応およびその後の塩素・臭素によるオゾン破壊の触媒サイクル反応が働かなかったことによると考えられる。また、GHG濃度2000年レベルと2050年レベルの結果を比べると、CCSR/NIESモデルの北緯45-90度の領域でのオゾン全量のGHG依存性は不明瞭である。

次に、図8-2で示されるMIROC3.2化学気候モデルの結果は、春季の北緯45-90度の領域で化学オゾン破壊が頻繁に起こったことを示している。ただし、オゾン破壊がほとんど起こらなかったアンサンブルメンバー（図の白色領域）も存在することがわかる。オゾン破壊によってオゾン全量が減る時期は、ほとんどが2月下旬~4月にかけてである。これは、この時期北極域が太陽光に照らされるようになり、その時期までに不均一反応を介して生じた塩素・臭素化合物によるオゾン破壊触媒サイクル反応が一気に進むようになるためである。また、GHG濃度が2000年レベルから2030年レベル、2050年レベルへと増加するにつれて、図の白い部分が徐々に増加してきていることがわかる。これは、GHG濃度の増加によって成層圏で赤道から極へと向かう子午面循環が強まることと関係している。その様子は図10に示される。GHG濃度の増加によって、対流圏の気温は上昇し、成層圏の気温は下降、3月-4月の極域の西風（極渦）は弱まり、赤道から北極へ向かう大気循環が強まるような変化が、100アンサンブルメンバーの平均として起こることを示している。この気温と風の変化によって、北極域ではこの時期に成層圏のオゾン量が増加し（図11）、それによってオゾン全量が増加する。従って、GHG濃度が増加するとオゾン全量が220DU以下を

示す面積が少なくなり、図8-2で白い部分を示すアンサンプルメンバーが増加する。また、図8-2では、GHG濃度が増加するとオゾン全量が220DU以下にならないアンサンプルメンバーが増加する一方で、220DU以下となる期間が極端に長くかつその面積も大きい（図では赤色や黄色で示される部分）アンサンプルメンバーが、少数ではあるが現れることを示している。このことは、日平均オゾン全量が閾値（MIROC3.2化学気候モデルの場合は220DU）以下となる面積×2月～6月の期間における日数の積算値の頻度分布を見てもわかる（図9-2）。数は少ないが、GHG濃度が増加するにつれて、図で値の大きい右の方にアンサンプルメンバーが現れるようになる。この原因については以下のように考えている：

図12は、3月～4月に極端なオゾン破壊が起こり5月末まで持続したODS濃度2000年レベル-GHG濃度2050年レベル実験のアンサンプルメンバー16に対して、その前年にあたるアンサンプルメンバー15の10月平均の水蒸気濃度および硝酸濃度の、ODS濃度2000年レベル-GHG濃度2000年レベル実験の100アンサンプル平均値からのアノマリを示す。下部成層圏（30～100hPa付近）の硝酸や水蒸気は、その後の11月以降、北極の成層圏の気温が低下したときにはその一部または大部分が極成層圏雲となるので、その直前の10月の濃度は極成層圏雲の材料となる水蒸気や硝酸の量が、多いか少ないかを示す目安となる。図から、その後の春に極端なオゾン破壊が起こったアンサンプルメンバーでは、秋口に極成層圏雲の材料となる水蒸気や硝酸が、北極周辺の下部成層圏で、GHG濃度2000年レベルの100アンサンプル平均値に比べて多くなっていることがわかる。これによって、GHG濃度2000年レベルの場合に比べてより多く極成層圏雲が発生し、オゾン破壊を大きくし、それによって極渦がさらに安定化し、オゾン破壊の期間を長引かせたことが推察される。ところで、なぜこのモデルの成層圏で水蒸気が増加したかについては、今のところはっきりとしたことはわからない。対流圏でGHG濃度が増加するのは対流圏大気の気温と海面温度が上昇することに因る。このとき成層圏で水蒸気が増加するのかどうかの決定的な説明は現在までのところされていない。このモデルの結果に関してもどのようなプロセスで増加したのか不明である。おそらく、熱帯のみからではなく他の緯度からも対流圏から成層圏への水蒸気の輸送が行われたと考えられる。一方、硝酸に関しては、この計算に使ったGHGの将来シナリオでは2050年の亜酸化窒素（ $N_2O$ ）濃度が2000年に比べて増加し（図3）、それによって硝酸も増加すると考えられる。このように、MIROC3.2化学気候モデルのGHG濃度2050年レベル実験では、極成層圏雲の材料となる成層圏の水蒸気や硝酸が秋口に増加したために、その後の冬季になんらかの原因で一旦安定な極渦ができて気温が低下するとオゾン破壊が一気に進み、それによって極渦内の気温がさらに低下し、中緯度との温度差が増して極渦がさらに安定化し、オゾン全量の少ない状態が長期間持続するアンサンプルメンバーが出現しやすくなると考えられる。

最後に、MIROC5化学気候モデルの結果について述べる。このモデルの春季の北緯45～90度の領域での化学オゾン破壊は、MIROC3.2化学気候モデルに比べると小さい（図8-3および図9-3）。オゾン全量のGHG濃度レベル依存性は、GHG濃度2000年レベルと2030年レベルは同程度であるが、GHG濃度2050年レベルでは、オゾン全量の低い領域が減っている結果となり、これは図8-2および図9-2で示されたMIROC3.2の結果とは異なる結果となっている。

以上の結果より、北極域・北半球中緯度域では、ODS濃度が高い状態でGHG濃度が増加しても、極端にオゾン全量が低くそれが長時間持続するような事例は依然存在する可能性があることがわかった。

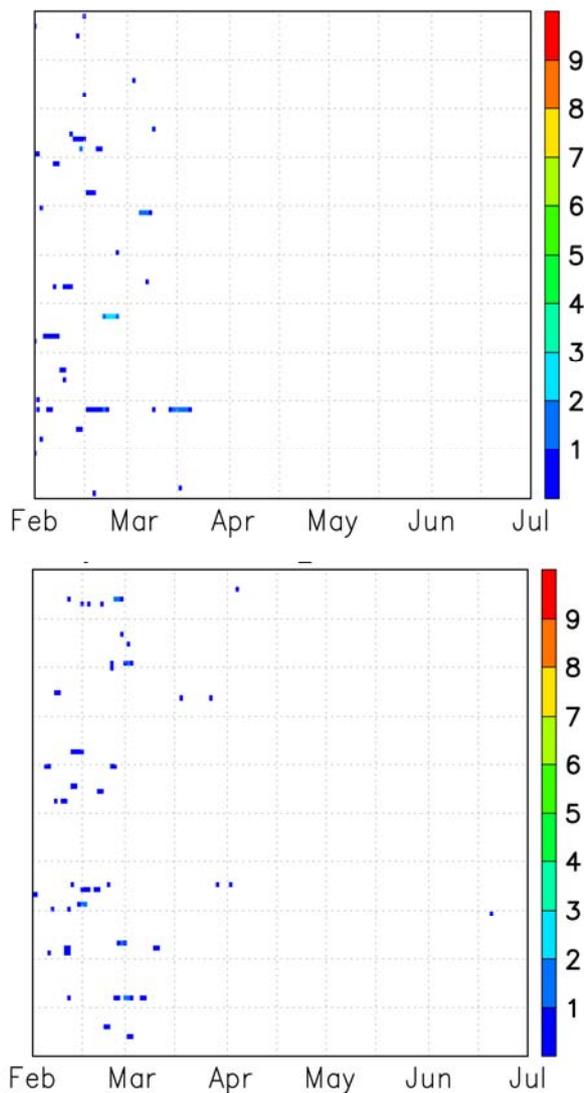


図 8-1 CCSR/NIES 化学気候モデルの北緯 45 度～90 度の領域について、オゾン全量が 240DU 以下になる面積を色で表したもの。右に色のスケールを表す。単位は  $10^6\text{km}^2$ 。横軸は日付、縦軸はアンサンブルメンバーを表す。いちばん下がアンサンブルメンバー 1、いちばん上がアンサンブルメンバー 100 となっている。色のついていない白色領域は、オゾン全量が 240DU より多いことを示している。(上) ODS 濃度 2000 年レベル GHG 濃度 2000 年レベルの実験結果、(下) ODS 濃度 2000 年レベル GHG 濃度 2050 年レベルの実験結果。

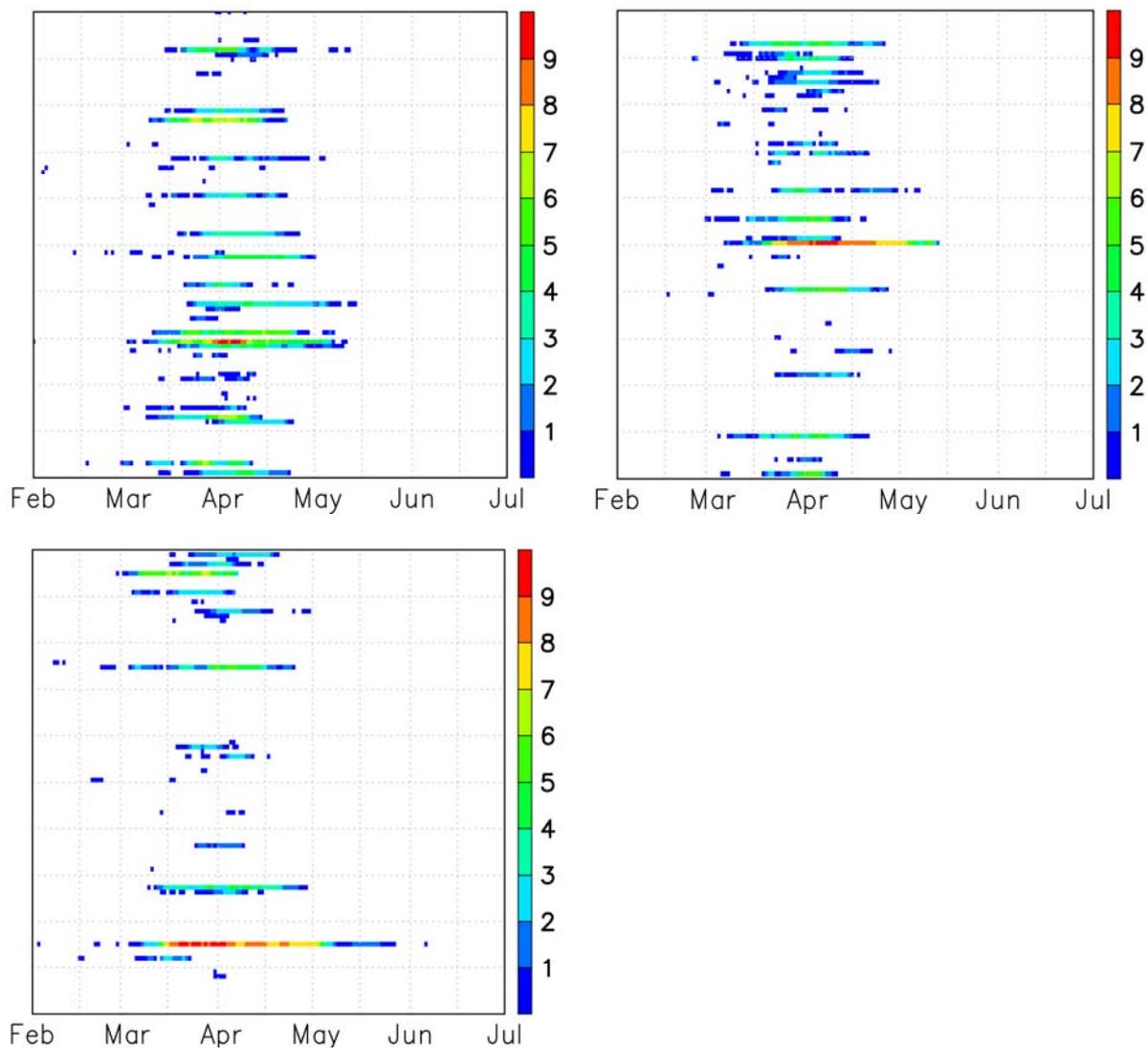


図 8-2 MIROC3.2 化学気候モデルの北緯 45 度～90 度の領域について、オゾン全量が 220DU 以下になる面積を色で表したものの。右に色のスケールを表す。単位は  $10^6\text{km}^2$ 。横軸は日付、縦軸はアンサンブルメンバーを表す。いちばん下がアンサンブルメンバー 1、いちばん上がアンサンブルメンバー 100 となっている。色のついていない白色領域は、オゾン全量が 220DU より多いことを示している。(左上) ODS 濃度 2000 年レベル GHG 濃度 2000 年レベルの実験結果、(右上) ODS 濃度 2000 年レベル GHG 濃度 2030 年レベルの実験結果、(左下) ODS 濃度 2000 年レベル GHG 濃度 2050 年レベルの実験結果。

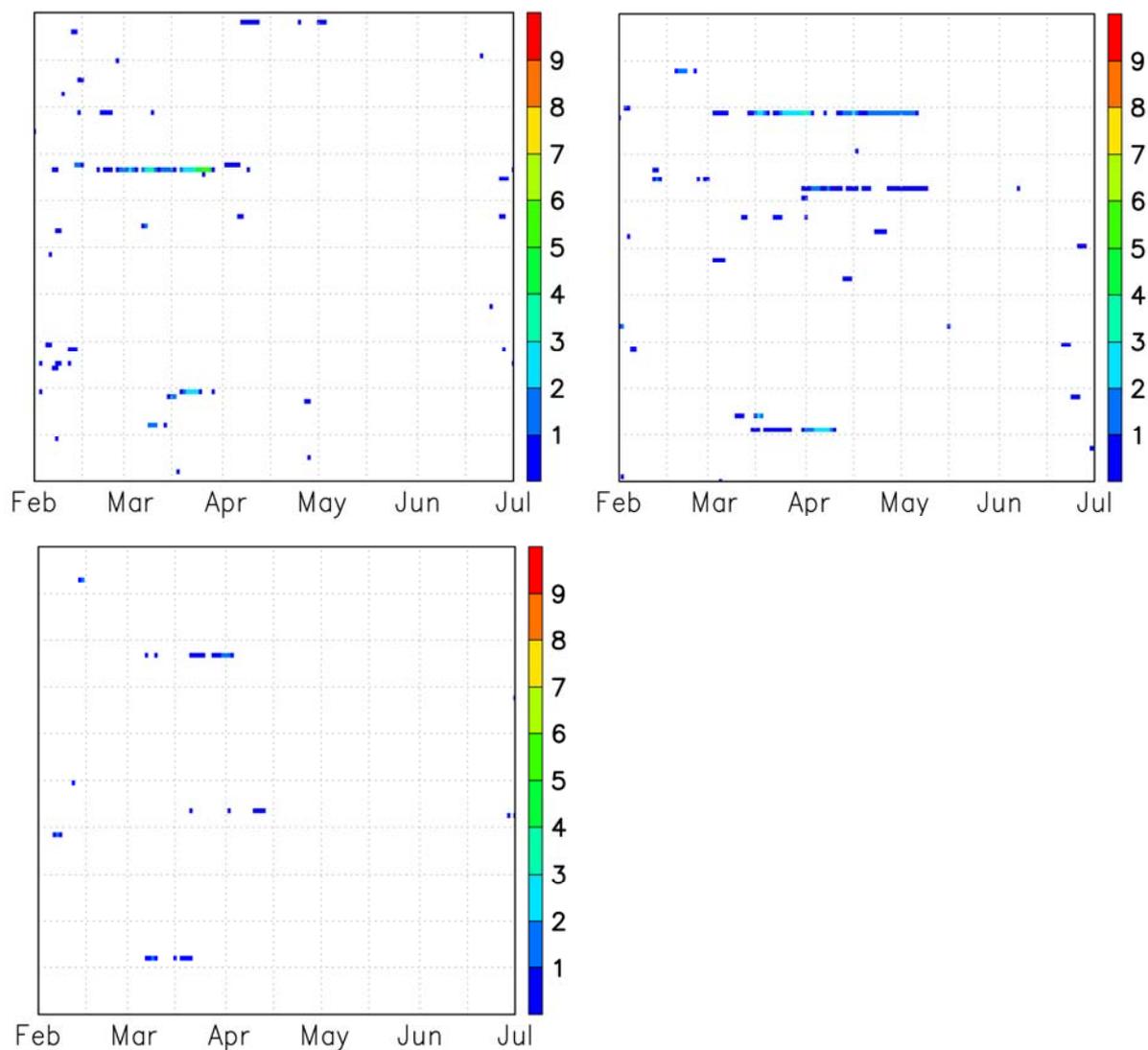


図8-3 MIROC5 化学気候モデルの北緯45度～90度の領域について、オゾン全量が230DU以下になる面積を色で表したもの。右に色のスケールを表す。単位は $10^6\text{km}^2$ 。横軸は日付、縦軸はアンサンブルメンバーを表す。いちばん下がアンサンブルメンバー1、いちばん上がアンサンブルメンバー100となっている。色のついていない白色領域は、オゾン全量が230DUより多いことを示している。(左上) ODS濃度2000年レベル GHG濃度2000年レベルの実験結果、(右上) ODS濃度2000年レベル GHG濃度2030年レベルの実験結果、(左下) ODS濃度2000年レベル GHG濃度2050年レベルの実験結果。

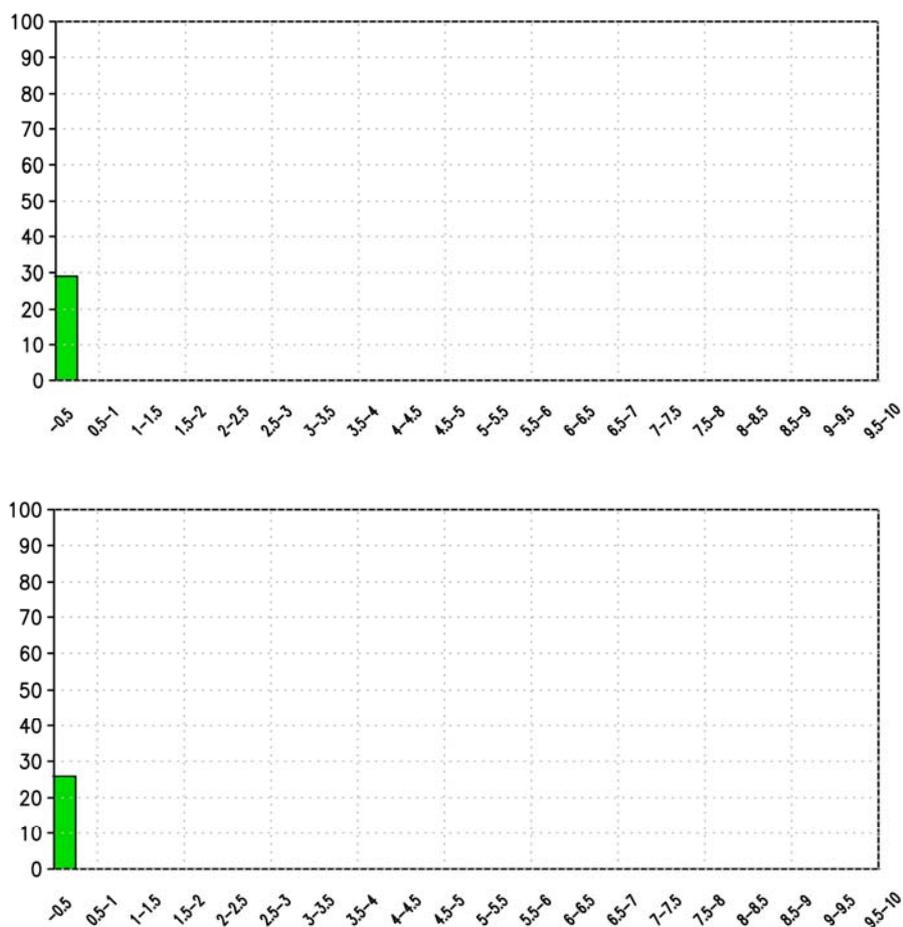


図 9-1 CCSR/NIES 化学気候モデルの北緯 45 度～90 度の領域において、オゾン全量が 240DU 以下を示す面積×日数の 2 月～6 月の期間における積算値のアンサンブルメンバーの個数分布。図 8-1 をもとに作成。縦軸はアンサンブル数。横軸の単位は  $10^8 \text{km}^2 \cdot \text{day}$ 。  
 (上) ODS 濃度 2000 年レベル GHG 濃度 2000 年レベルの実験結果  
 (下) ODS 濃度 2000 年レベル GHG 濃度 2050 年レベルの実験結果

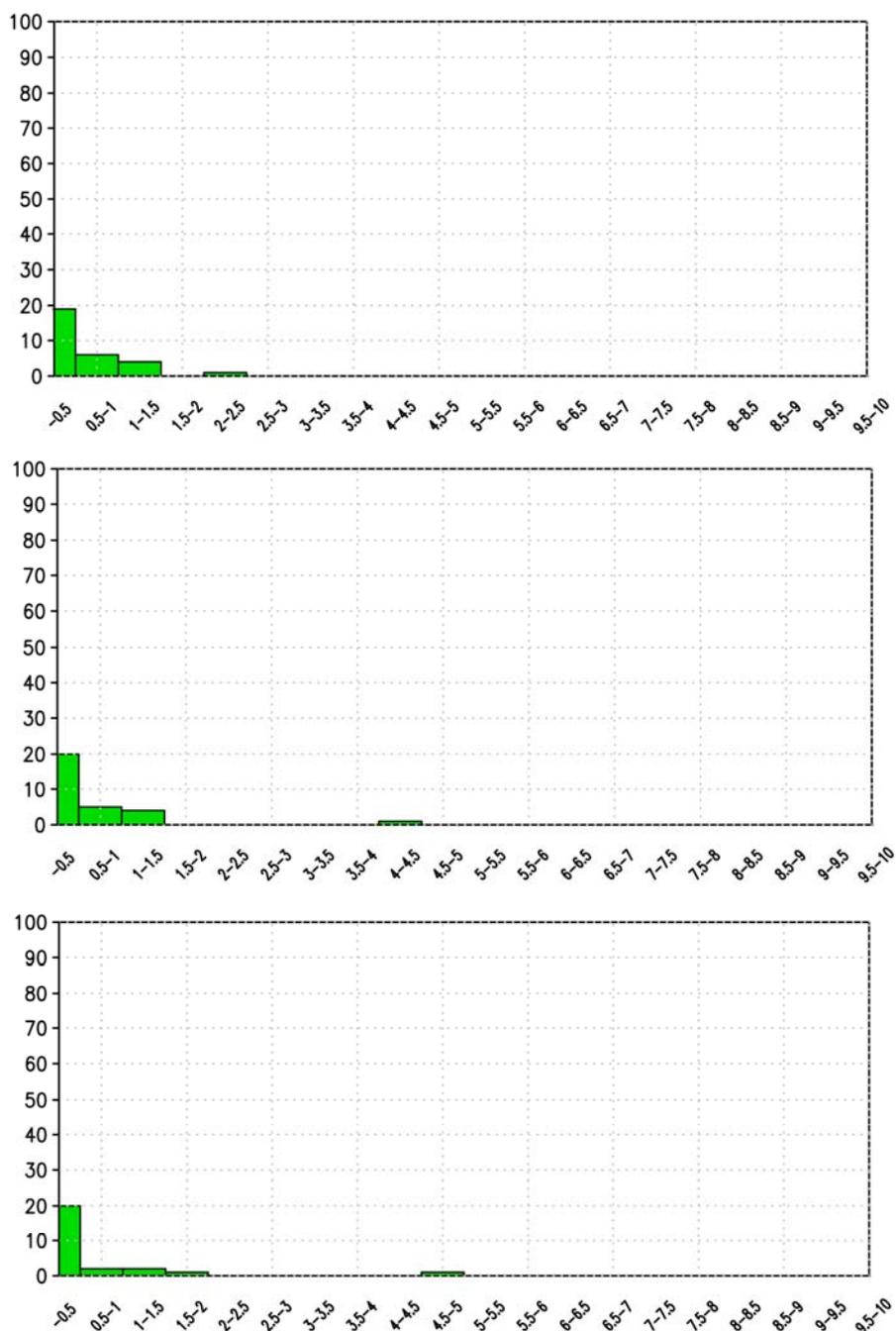


図9-2 MIROC3.2化学気候モデルの北緯45度～90度の領域において、オゾン全量が220DU以下を示す面積×日数の2月～6月の期間における積算値のアンサンブルメンバーの個数分布。図8-2をもとに作成。縦軸はアンサンブル数。横軸の単位は $10^8 \text{km}^2 \cdot \text{day}$ 。  
 (上) ODS濃度2000年レベル GHG濃度2000年レベルの実験結果  
 (中) ODS濃度2000年レベル GHG濃度2030年レベルの実験結果  
 (下) ODS濃度2000年レベル GHG濃度2050年レベルの実験結果

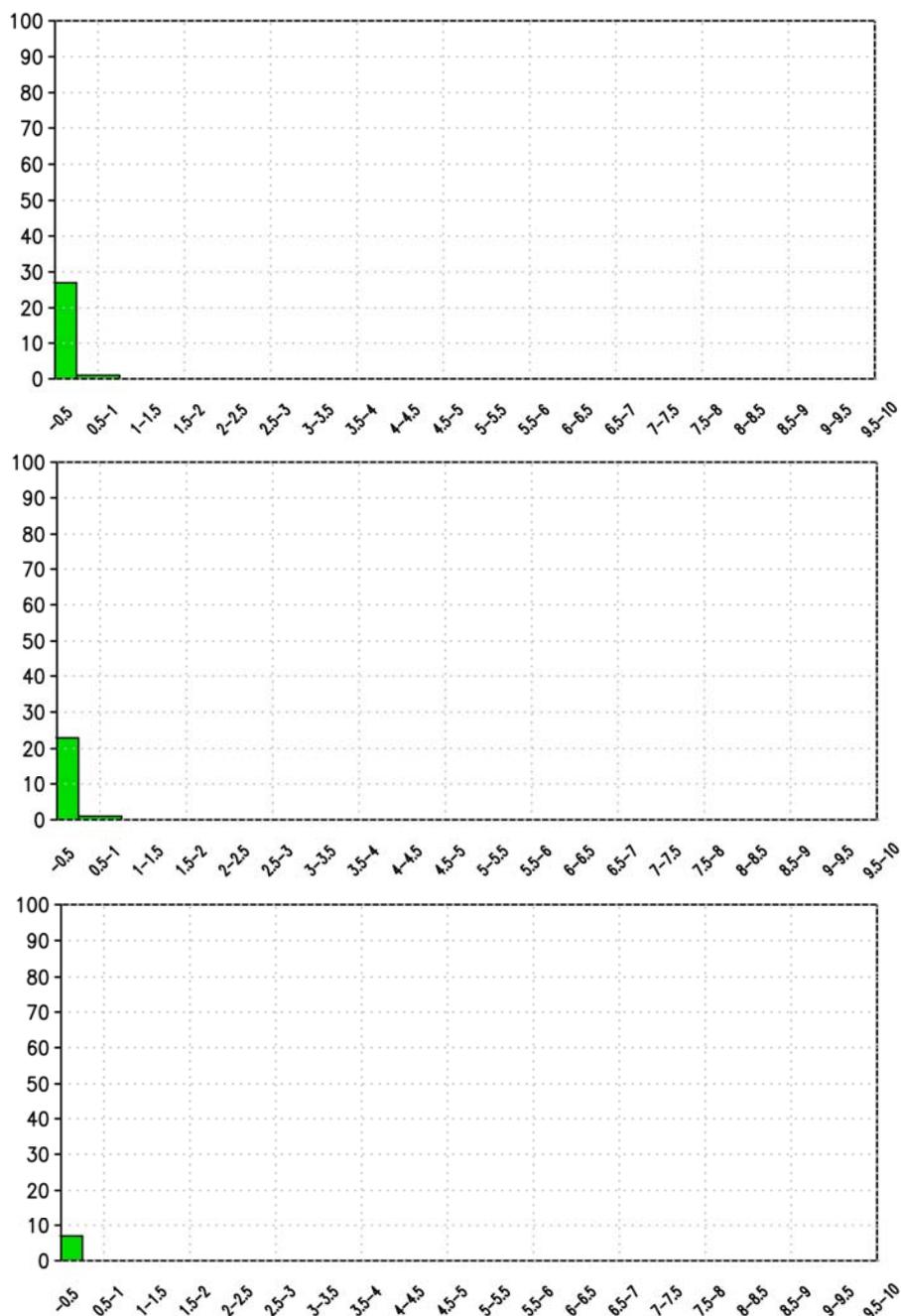


図9-3 MIROC5 化学気候モデルの北緯45度～90度の領域において、オゾン全量が230DU以下を示す面積×日数の2月～6月の期間における積算値のアンサンブルメンバーの個数分布。図8-3をもとに作成。縦軸はアンサンブル数。横軸の単位は $10^8 \text{ km}^2 \cdot \text{day}$ 。  
 (上) ODS濃度2000年レベル GHG濃度2000年レベルの実験結果  
 (中) ODS濃度2000年レベル GHG濃度2030年レベルの実験結果  
 (下) ODS濃度2000年レベル GHG濃度2050年レベルの実験結果

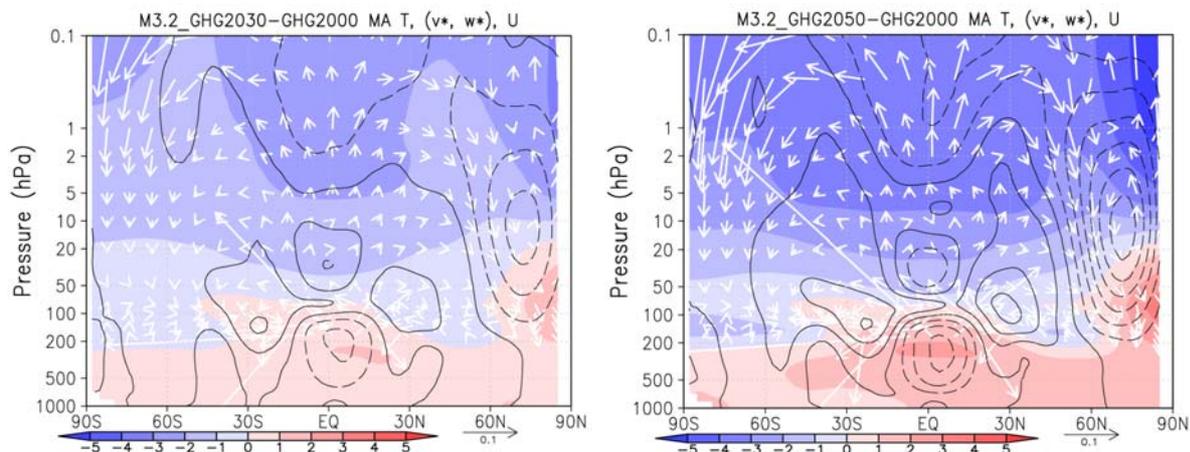


図 10 3月-4月平均の気温、経度平均東西風速、平均子午面循環（残差循環）に関するMIROC3.2化学気候モデルのODS濃度2000年レベル-GHG濃度2030年レベル実験の100アンサンブルメンバー平均値からODS濃度2000年レベル-GHG濃度2000年レベル実験の100アンサンブルメンバー平均値を差し引いたアノマリ（左）、およびODS濃度2000年レベル-GHG濃度2050年レベル実験の100アンサンブルメンバー平均値のアノマリ（右）。縦軸は気圧で表された高度、横軸は緯度を表し、右端が北極、左端が南極となっている。色は気温差を表し、赤色が正の値（GHG2000年レベルの結果に対し気温の上昇）、青色が負の値（気温の下降）を表す。変化量に対する色のスケールをパネルの下部に示す。等値線は経度平均の東西風速の差を表し、実線が正の値（GHG2000年レベルの結果に対し西風の強化または東風の弱化）、破線が負の値（西風の弱化または東風の強化）を表し、等値線の間隔は $1\text{ ms}^{-1}$ である。白い矢印は、残差循環のGHG濃度2000年レベル実験の100アンサンブルメンバー平均値からのアノマリを表す。矢印の長さのスケールはそれぞれのパネルの右下部に表示されている。

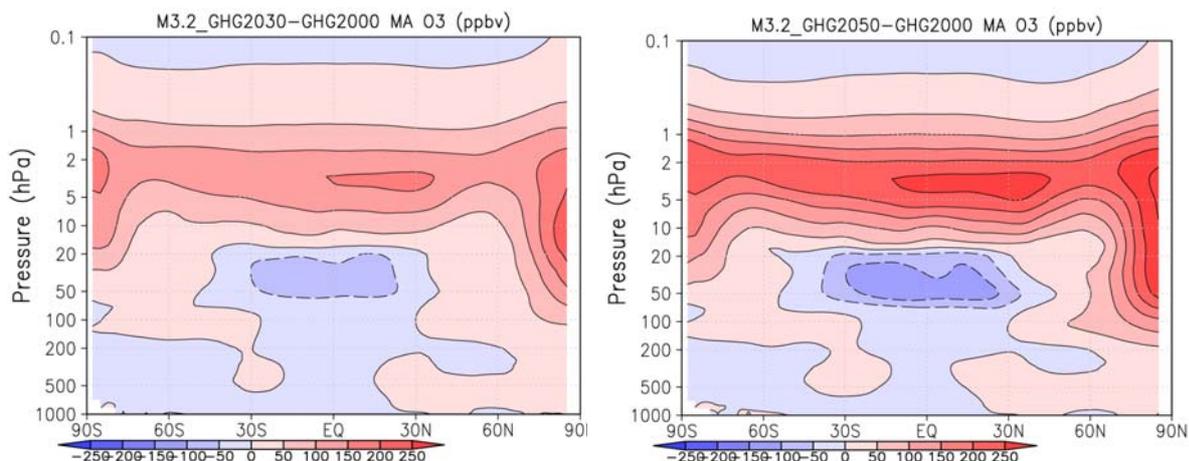


図 11 3月－4月平均のオゾンの体積混合比 (ppbv) に関する MIROC3.2 化学気候モデルの ODS 濃度 2000 年レベル－GHG 濃度 2030 年レベル実験の 100 アンサンブルメンバー平均値から ODS 濃度 2000 年レベル－GHG 濃度 2000 年レベル実験の 100 アンサンブルメンバー平均値を差し引いたアノマリ (左)、および ODS 濃度 2000 年レベル－GHG 濃度 2050 年レベル実験の 100 アンサンブルメンバー平均値のアノマリ (右)。縦軸は気圧で表された高度、横軸は緯度を表し、右端が北極、左端が南極となっている。色はオゾン混合比の差を表し、赤色が正の値 (GHG2000 年レベルの結果に対し増加)、青色が負の値 (減少) を表す。変化量に対する色のスケールをパネルの下部に示す。

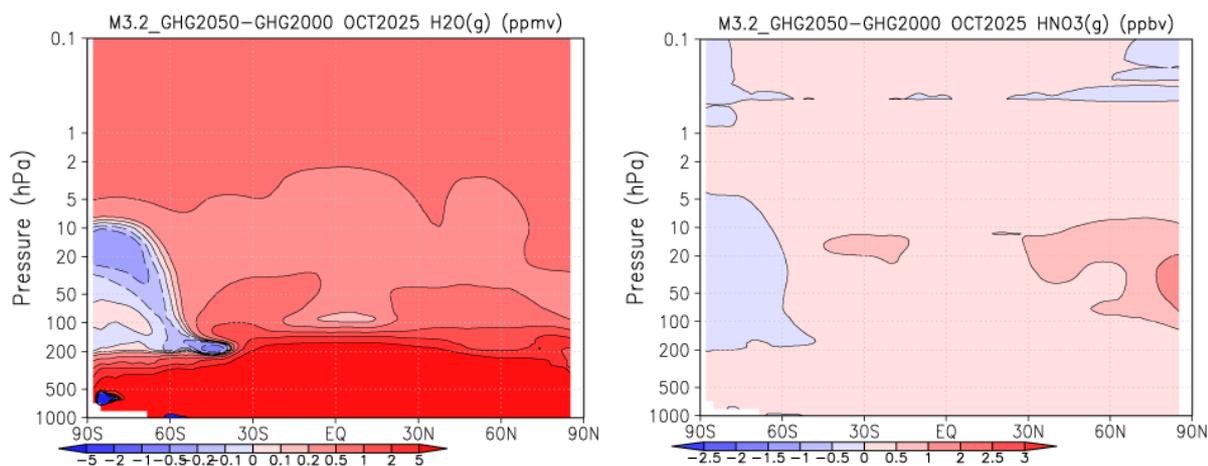


図 12 10月平均の水蒸気の体積混合比 (ppmv) に関する MIROC3.2 化学気候モデルの ODS 濃度 2000 年レベル－GHG 濃度 2050 年レベル実験のアンサンブルメンバー15 の値から ODS 濃度 2000 年レベル－GHG 濃度 2000 年レベル実験の 100 アンサンブルメンバー平均値を差し引いたアノマリ (左) および硝酸の体積混合比 (ppbv) のアノマリ。縦軸は気圧で表された高度、横軸は緯度を表し、右端が北極、左端が南極となっている。色は体積混合比の差を表し、赤色が正の値 (GHG2000 年レベルのアンサンブル平均の結果に対し増加)、青色が負の値 (減少) を表す。変化量に対する色のスケールをそれぞれのパネルの下部に示す。

## 2) 極成層圏雲の個数密度を多く設定した場合の結果

前節で示した極成層圏雲のパラメータの設定（NAT粒子と氷粒子の個数密度を $0.005\text{cm}^{-3}$ ）の下に行った実験の結果では、極端なオゾン破壊を引き起こしたアンサンブルメンバーの数がかなり少なかったため、結果の信頼性の点で疑問が残る。そこで本節では、ODS濃度は2000年レベル、GHG濃度は2000年、2030年、2050年に設定し、かつ、極成層圏雲のNATの個数密度を $1.0\text{cm}^{-3}$ 、氷粒子の個数密度を $0.01\text{cm}^{-3}$ にし、気体の硝酸や水蒸気と同じ凝縮量に対して極成層圏雲の表面積が大きくなるように設定した場合の結果について述べる。この場合、同じODS濃度レベルに対してオゾン破壊量が大きくなることが予想され、極端なオゾン破壊を起こすアンサンブルメンバーの数が増加することが期待される。前節で得られたものと同様な、北半球中高緯度オゾン全量のGHG濃度依存性が得られるかどうかについて調査した。

図13および図14は、前節の図8と図9にそれぞれ対応するものである。CCSR/NIESモデルに関しては、極成層圏雲パラメータの設定を変えた実験は行わなかったため、MIROC3.2化学気候モデルとMIROC5化学気候モデルの結果についてのみ示す。オゾン全量が閾値以下になる面積は、前節の図8や図9に比べてかなり多くなっている。GHG濃度レベル依存性も図8や図9と異なり、MIROC3.2化学気候モデルとMIROC5化学気候モデルの両方でGHG濃度2030年レベルのときに最もオゾン破壊が大きいアンサンブルが出現するような結果となっている。

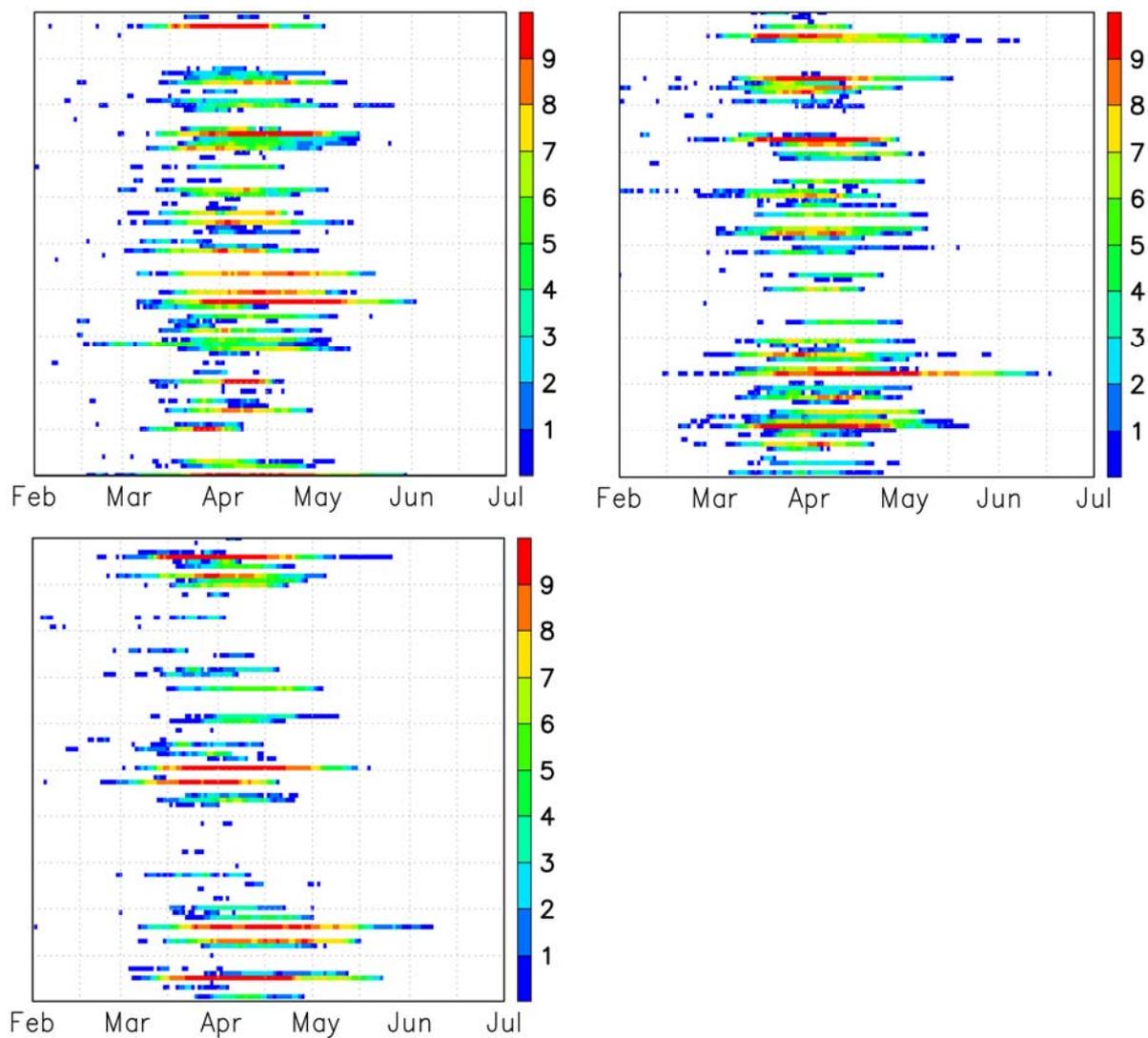


図 13-1 極成層圏雲のパラメータを変えた実験結果。NAT 粒子の個数密度を  $1.0 \text{ cm}^{-3}$ 、氷粒子の個数密度を  $0.01 \text{ cm}^{-3}$  に変更。MIROC3.2 化学気候モデルの北緯 45 度～90 度の領域について、オゾン全量が 220DU 以下になる面積を色で表したもの。右に色のスケールを表す。単位は  $10^6 \text{ km}^2$ 。横軸は日付、縦軸はアンサンブルメンバーを表す。いちばん下がアンサンブルメンバー 1、いちばん上がアンサンブルメンバー 100 となっている。色のついていない白色領域は、オゾン全量が 220DU より多いことを示している。  
 (左上) ODS 濃度 2000 年レベル GHG 濃度 2000 年レベルの実験結果、(右上) ODS 濃度 2000 年レベル GHG 濃度 2030 年レベルの実験結果、(左下) ODS 濃度 2000 年レベル GHG 濃度 2050 年レベルの実験結果。

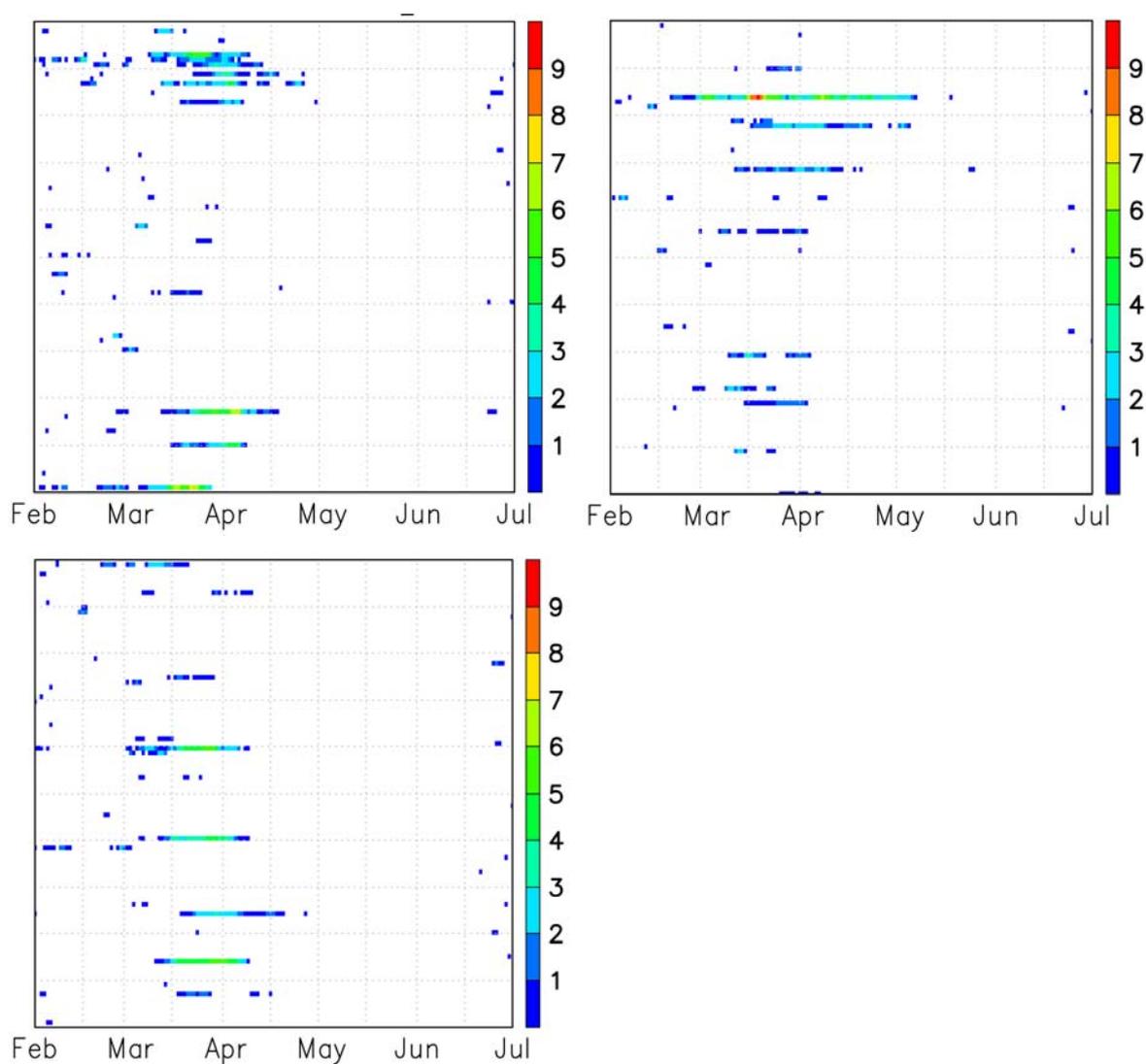


図 13-2 極成層圏雲のパラメータを変えた実験結果。NAT 粒子の個数密度を  $1.0 \text{ cm}^{-3}$ 、氷粒子の個数密度を  $0.01 \text{ cm}^{-3}$  に変更。MIROC5 化学気候モデルの北緯 45 度～90 度の領域について、オゾン全量が 230DU 以下になる面積を色で表したもの。右に色のスケールを表す。単位は  $10^6 \text{ km}^2$ 。横軸は日付、縦軸はアンサンブルメンバーを表す。いちばん下がアンサンブルメンバー 1、いちばん上がアンサンブルメンバー 100 となっている。色についていない白色領域は、オゾン全量が 230DU より多いことを示している。  
 (左上) ODS 濃度 2000 年レベル GHG 濃度 2000 年レベルの実験結果、(右上) ODS 濃度 2000 年レベル GHG 濃度 2030 年レベルの実験結果、(左下) ODS 濃度 2000 年レベル GHG 濃度 2050 年レベルの実験結果。

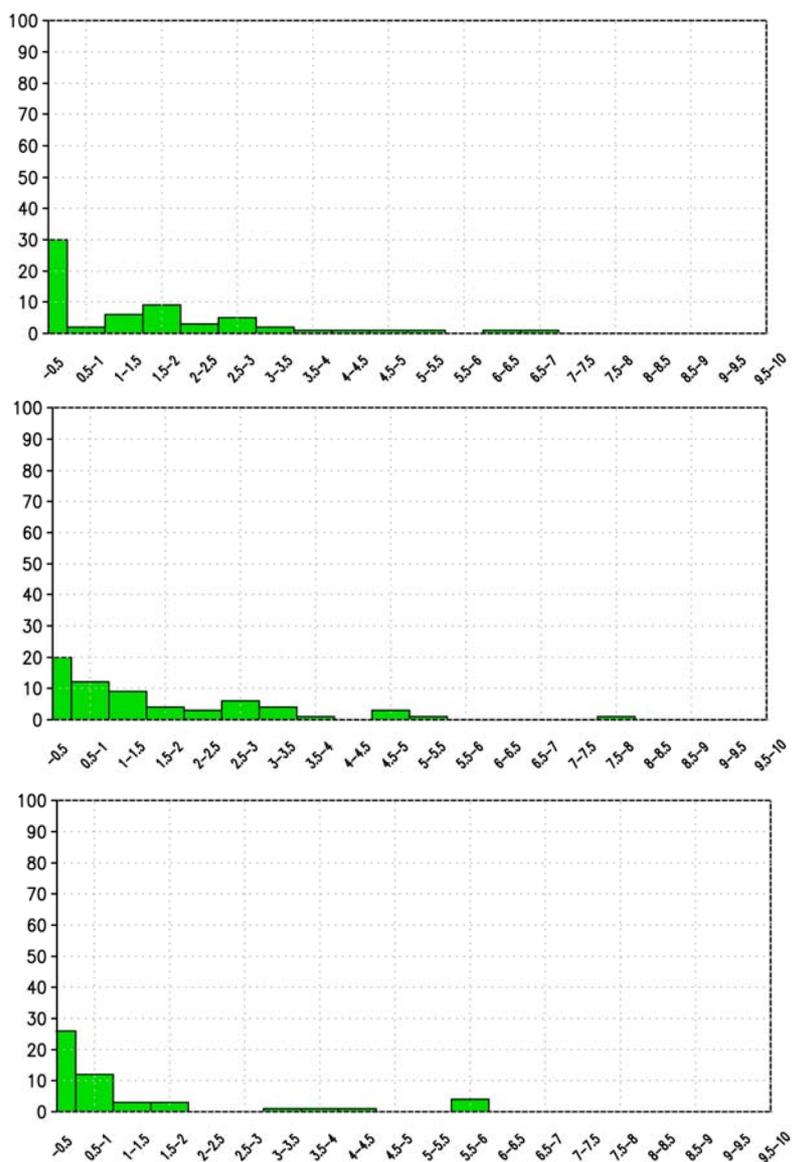


図 14-1 極成層圏雲のパラメータを変えた実験結果。NAT 粒子の個数密度を  $1.0 \text{ cm}^{-3}$ 、氷粒子の個数密度を  $0.01 \text{ cm}^{-3}$  に変更。MIROC3.2 モデルの北緯 45 度～90 度において、オゾン全量が 220DU 以下を示す面積×日数の 2 月～6 月の期間における積算値のアンサンブル個数分布。図 13-1 をもとに作成。縦軸はアンサンブル数。横軸の単位は  $10^8 \text{ km}^2 \cdot \text{day}$ 。  
 (上) ODS 濃度 2000 年レベル GHG 濃度 2000 年レベルの実験結果  
 (中) ODS 濃度 2000 年レベル GHG 濃度 2030 年レベルの実験結果  
 (下) ODS 濃度 2000 年レベル GHG 濃度 2050 年レベルの実験結果

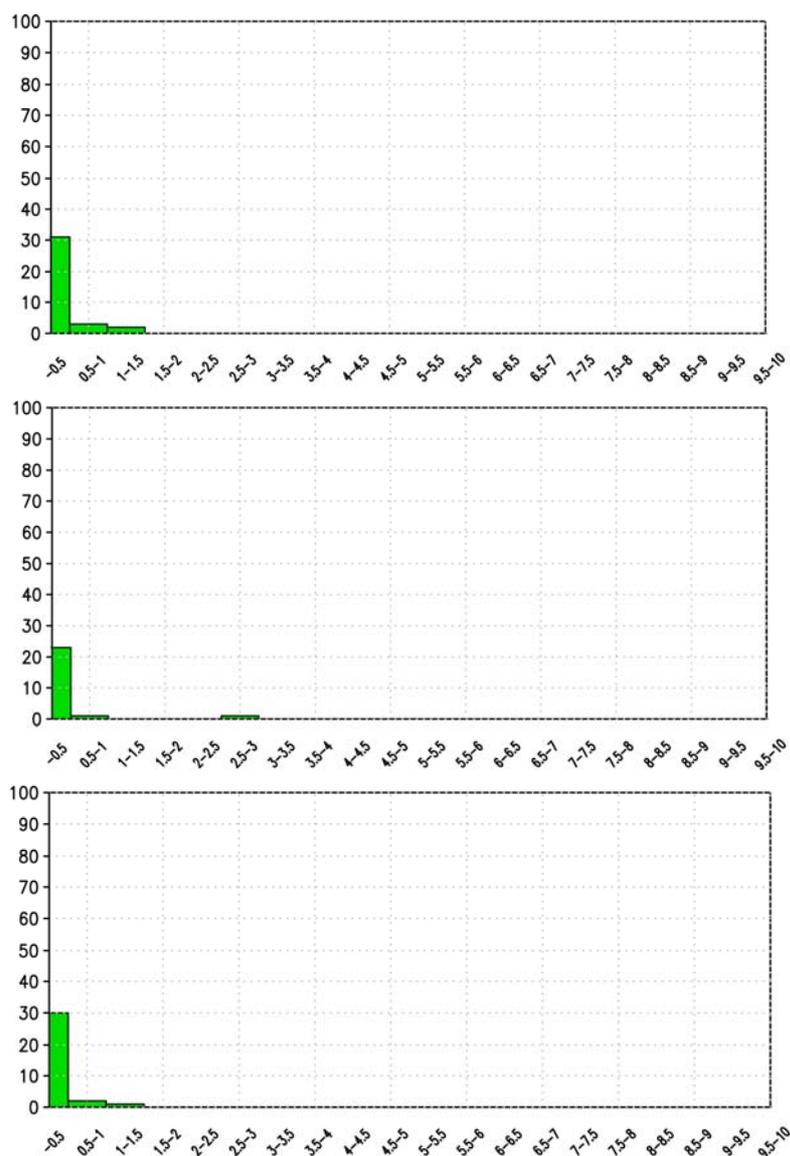


図 14-2 極成層圏雲のパラメータを変えた実験結果。NAT 粒子の個数密度を  $1.0 \text{ cm}^{-3}$ 、氷粒子の個数密度を  $0.01 \text{ cm}^{-3}$  に変更。MIROC5 モデルの北緯 45 度～90 度において、オゾン全量が 230DU 以下を示す面積×日数の 2 月～6 月の期間における積算値のアンサンブル個数分布。図 13-2 をもとに作成。縦軸はアンサンブル数。横軸の単位は  $10^8 \text{ km}^2 \cdot \text{day}$ 。  
 (上) ODS 濃度 2000 年レベル GHG 濃度 2000 年レベルの実験結果  
 (中) ODS 濃度 2000 年レベル GHG 濃度 2030 年レベルの実験結果  
 (下) ODS 濃度 2000 年レベル GHG 濃度 2050 年レベルの実験結果

### 3) 北緯45度－90度の領域で極端なオゾン破壊が起こった年の日本への影響について

本節では、1) で取り扱った実験の、MIROC3.2化学気候モデルで行ったODS濃度2000年レベル－GHG濃度2050年レベルの100アンサンブル実験のうち、図8-2左下のパネルで示した下から16番目のアンサンブルメンバーの、長期間にわたり色のついた部分が示す極端なオゾン破壊について、そのオゾン破壊や力学場の状況を示し、このようなオゾン破壊が起こった時の日本への影響につ

いて考察する。

まず、オゾン全量の変化の状況について述べる。このアンサンブルメンバーでは、1月初旬の時点ですでにスカンジナビア半島上空にオゾン全量が220 DU以下の領域ができ、その後の1月、2月は少しだけ北極域の最低オゾン全量が上昇したが、オゾン濃度が低い領域が北極渦内に安定して存在し続けた。3月になるとオゾン全量の最低値が急減して220 DU以下の領域が継続して存在した。3月31日～4月3日には、150 DU以下となる領域が北極上空に出現し、この年の北極域の最も低いオゾン量となった（図15）。220 DU以下の領域は5月26日まで存在し、その結果、図8-2左下のパネルに示されるようにこのアンサンブルメンバーが極端なオゾン破壊を示した。オゾン全量の少ない領域は、主に北極上空、グリーンランド上空、スカンジナビア半島上空に位置していたため、この期間中の日本への低オゾン濃度の影響はなかった。その後北極を中心に発達してきたオゾンの少ない空気塊が、6月4日から10日にかけてアリューシャン列島から日本のすぐ東の太平洋域に流れ出し、その影響で北海道～東日本にかけてもオゾン全量が低下したが、このとき日本上空でオゾン全量がいちばん低かった6月8日～9日でもその値は270～280 DUくらいであり、北極域のようにオゾン濃度が極端に低下したわけではなかった。同程度のオゾン全量低下は6月17日にも起きているが、これは北極のオゾン破壊によるものではなく、むしろ中緯度の気象条件によって起こったものと考えられる。

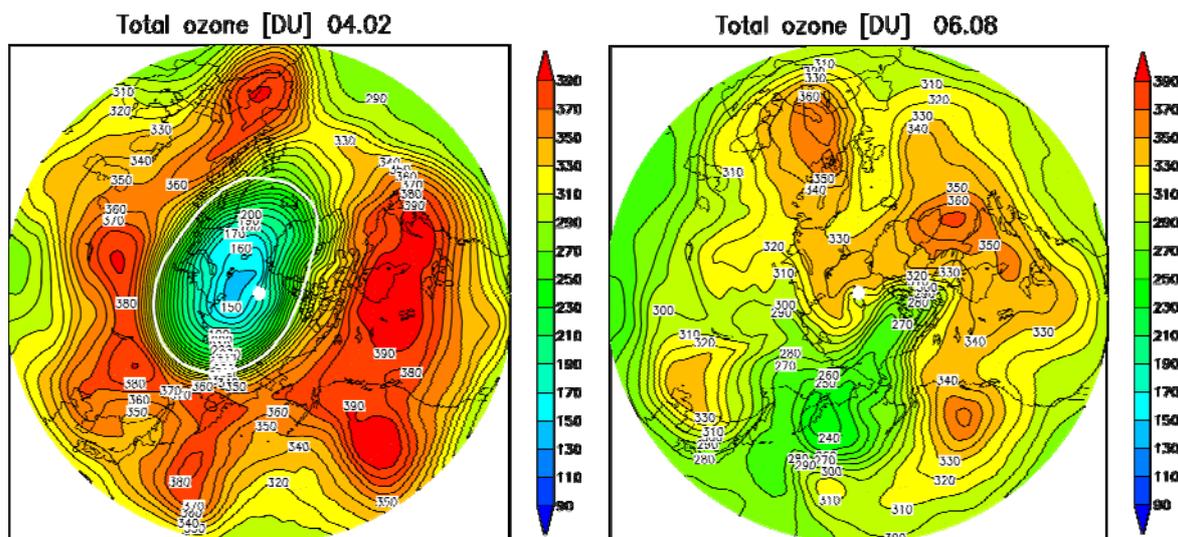


図15 ODS濃度2000年レベル-GHG濃度2050年レベルに設定したMIROC3.2モデルを用いた100アンサンブル実験（図8-2左下のパネル）の16番目のアンサンブルメンバーが示すオゾン全量分布。上が経度0度、下が経度180度で、北極を中心とした北緯30度までの分布。白実線は北極渦の境界を表す。（左）北極域で最大のオゾン破壊が起こった4月2日の分布（右）北極域オゾン破壊の日本への影響が大きいと思われる6月8日の分布

次に、このアンサンブルメンバーの気象場を示す。このアンサンブルメンバーの気象場は、ODS濃度2000年レベル-GHG濃度2050年レベル実験の他のアンサンブルメンバーに比較するとかなり特異なものとなっている。図16に、このアンサンブルメンバーと、オゾン全量最低値が高かった

アンサンブルメンバー（36番目のアンサンブルメンバーで、図8-2で示されるほとんどの期間でオゾン全量が220DU以上の白色となっている）の1月～5月の期間の毎日のジェット気流（西風）の中心の緯度・高度を示す。この2つのアンサンブルメンバーのジェット気流を比較すると、特に4月（図中の●印）、5月（図中の□印）のジェット気流の強さと緯度高度が異なっており、オゾン破壊が大きいアンサンブルメンバーでは、4月、5月になっても成層圏（およそ100 hPa以上）にジェット気流が存在した。これは、4月、5月になっても安定した北極渦が存在していたためである。

以上から、このアンサンブルメンバー北半球中高緯度の3月～4月のオゾン破壊の状況は、現在の南極オゾンホールほどではないが、それに近いオゾン破壊と気象場となっていたことがわかる。また、日本への影響は、5月の北極渦崩壊時に270～280 DUまでオゾン全量が低下した程度であった。

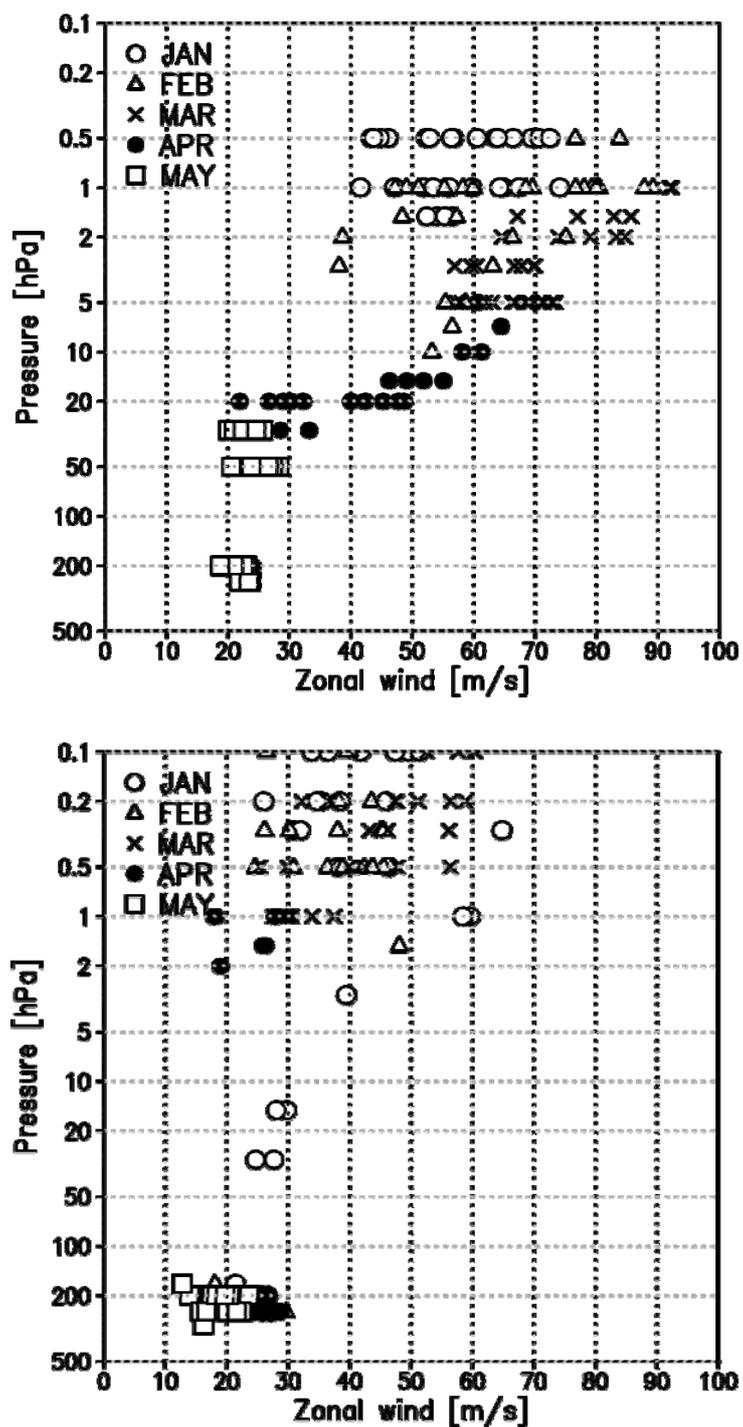


図 16 ODS 濃度 2000 年レベル-GHG 濃度 2050 年レベルに設定した MIROC3.2 モデルを用いた 100 アンサンブル実験のうち、2つのアンサンブルメンバーの 1 月～5 月の期間の毎日のジェット気流の中心（西風最大）の緯度・高度を月毎に別記号で表す。オゾン破壊が極端に大きかったアンサンブルメンバー（上、図 8-2 の左下のパネルにおいて下から 16 番目のアンサンブルメンバー）とオゾン破壊がほとんど進まなかったアンサンブルメンバー（下、図 8-2 の左下のパネルにおいて下から 36 番目のアンサンブルメンバー）について示す。

#### 4) 熱帯海面水温の北半球中高緯度域オゾン全量への影響

北極域のオゾン量は熱帯海面水温の影響を受けると言われている。例えば、エルニーニョの年とラニーニャの年では熱帯の海面水温、とりわけその経度分布が異なり、それによって大気波動の活動および伝搬が異なり、それが子午面循環の強さに影響して北極域へのオゾンの輸送量を変え、北極域のオゾン全量に影響を及ぼすことが考えられる。本節では、MIROC3.2化学気候モデルを用いて、熱帯海面水温をエルニーニョ型（図4左）とラニーニャ型（図4右）に設定したODS濃度2000年レベル-GHG濃度2000年レベルの実験を行い、オゾン全量を解析した。図17と図18の結果を見ると、エルニーニョ型の海水面温度を使用して計算した場合、北極のオゾン破壊は少なくなり、ラニーニャ型の海水面温度を使用して計算した場合、北極のオゾン破壊は大きくなることわかる。エルニーニョ型とラニーニャ型の場合のオゾン破壊の差は、GHG濃度2000年レベル、2030年レベル、2050年レベルの間のオゾン破壊の差に匹敵するほどである。しかしながら、実験で使用したエルニーニョ型およびラニーニャ型の海水面温度は、記録されている中でそれぞれ最大と考えられるイベントの最盛時の海水面分布をもとに作成されており（エルニーニョ型の海水面温度アノマリは1997年11月のデータを元に作成、ラニーニャ型の海水面温度アノマリは1988年11月のデータを元に作成）、エルニーニョ型およびラニーニャ型実験の計算では図4で示された海水面温度のアノマリは1年中続くと仮定しているため、これらの実験は海水面温度の影響をかなり過大評価するような設定になっていることに注意する必要がある。すなわち、実際の影響はこれらの実験で示されたより小さいと推測される。

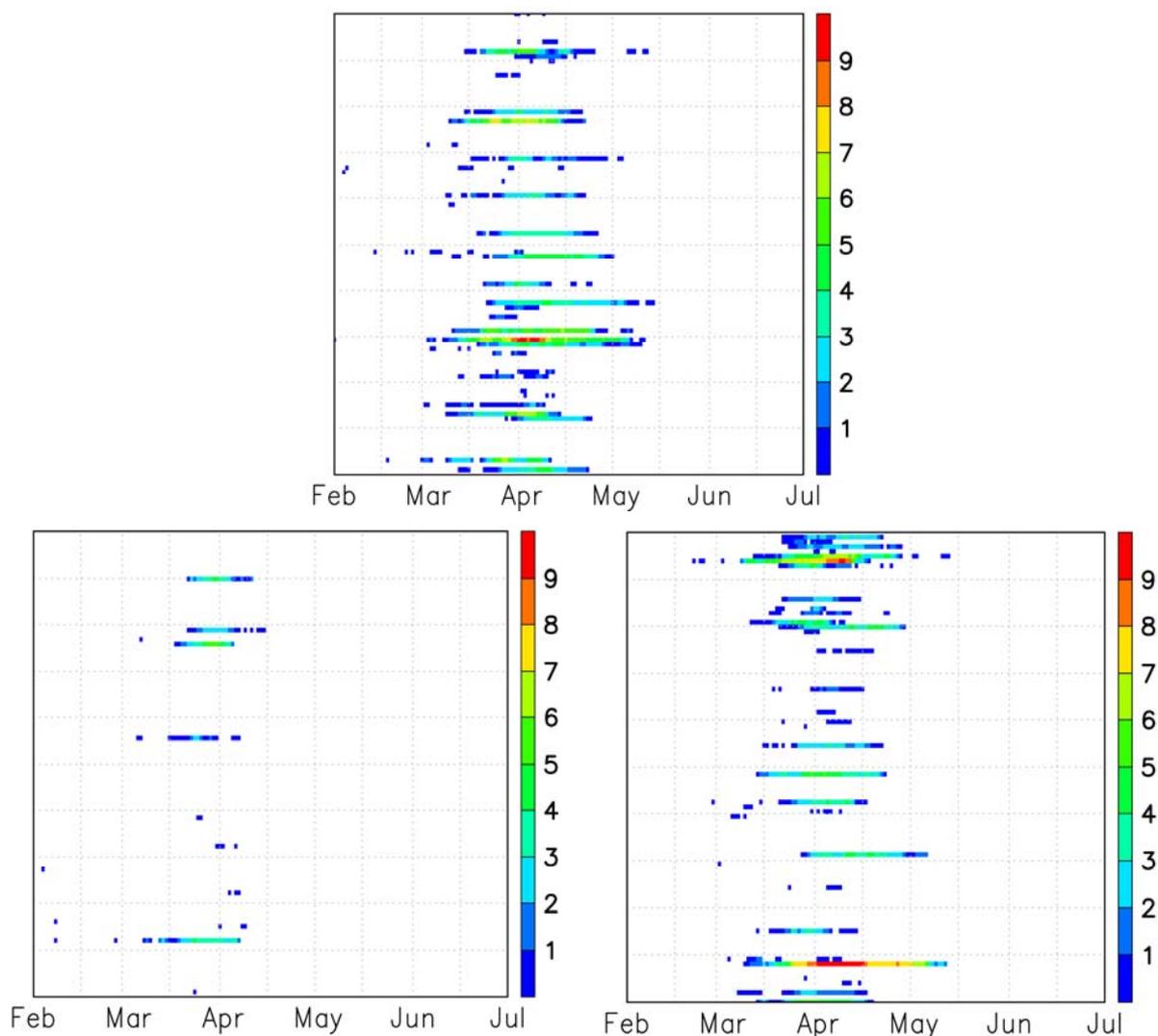


図 17 MIROC3.2 化学気候モデルを使った ODS 濃度 2000 年レベル GHG 濃度 2000 年レベルの実験の北緯 45 度～90 度の領域について、オゾン全量が 220DU 以下になる面積を色で表したものを、右に色のスケールを表す。単位は  $10^6\text{km}^2$ 。横軸は日付、縦軸はアンサンブルメンバーを表す。いちばん下がアンサンブルメンバー 1、いちばん上がアンサンブルメンバー 100 となっている。色のついていない白色領域は、オゾン全量が 220DU より多いことを示している。(上) 海面水温 1995 年～2004 年の 10 年平均の海面水温を使用した計算結果で図 8-2 左上図と同じもの、(左下) 図 4 左のエルニーニョ型の海面水温を使用した結果、(右下) 図 4 右のラニーニャ型の海面水温を使用した結果。

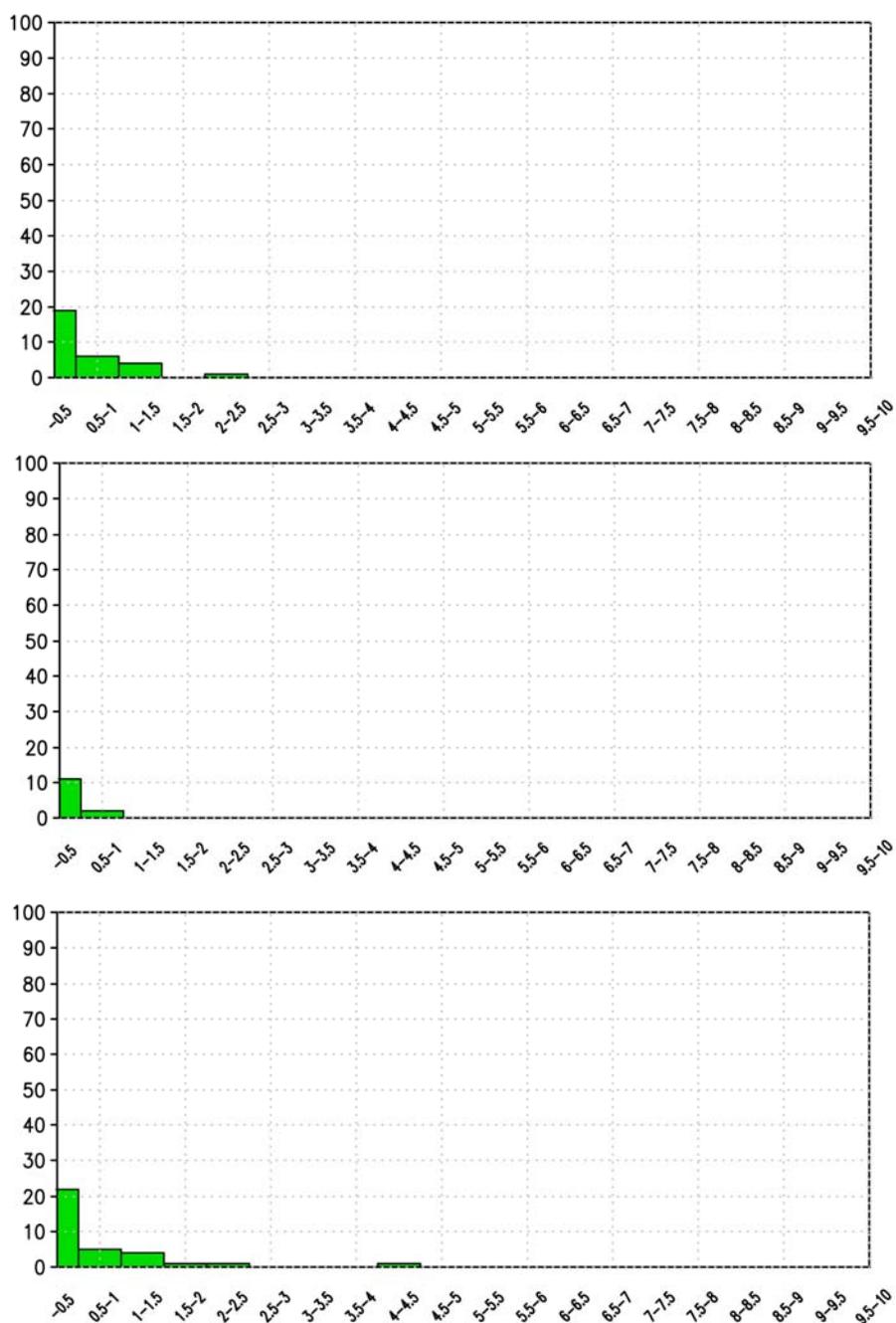


図 18 MIROC3.2 化学気候モデルを使った ODS 濃度 2000 年レベル GHG 濃度 2000 年レベルの実験の北緯 45 度～90 度の領域において、オゾン全量が 220DU 以下を示す面積×日数の 2 月～6 月の期間における積算値のアンサンブルメンバーの個数分布。図 17 をもとに作成。縦軸はアンサンブル数。横軸の単位は 10<sup>8</sup>km<sup>2</sup> · day。  
 (上) 海面水温 1995 年～2004 年の 10 年平均の海面水温を使用した計算結果で図 9-2 上図と同じもの  
 (中) 図 4 左のエルニーニョ型の海面水温を使用した結果  
 (下) 図 4 右のラニーニャ型の海面水温を使用した結果

#### (5) 北半球中高緯度域オゾン全量のGHG濃度依存性－ODS濃度1985年レベルの場合

この節では、ODS濃度を1985年レベルに設定した実験について、MIROC3.2化学気候モデルとMIROC5化学気候モデルによる結果を、図8および図9と同様な図に示す（図19および図20）。MIROC3.2化学気候モデルの場合もMIROC5化学気候モデルの場合も、ODS濃度を1985年レベルに設定すると、オゾン全量が閾値以下の面積はかなり小さくなることがわかる。GHG濃度依存性に関しても、MIROC3.2化学気候モデルとMIROC5化学気候モデルの両方の場合でほとんど見られなくなる。

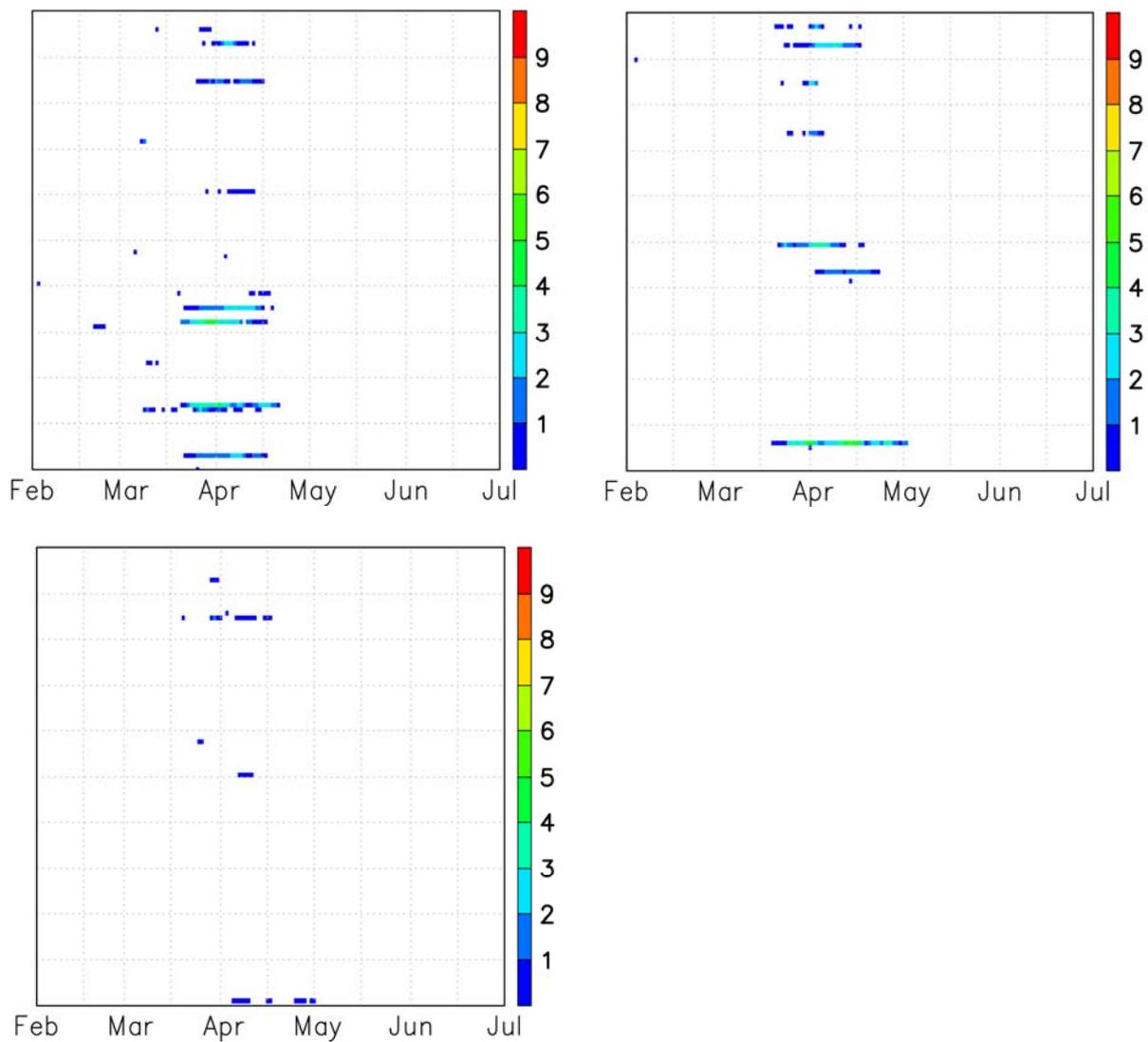


図 19-1 MIROC3.2 化学気候モデルにおいて ODS 濃度を 1985 年レベルに設定した計算結果。北緯 45 度～90 度の領域について、オゾン全量が 220DU 以下になる面積を色で表したものの。右に色のスケールを表す。単位は  $10^6\text{km}^2$ 。横軸は日付、縦軸はアンサンブルメンバーを表す。いちばん下がアンサンブルメンバー 1、いちばん上がアンサンブルメンバー 100 となっている。色のついていない白色領域は、オゾン全量が 220DU より多いことを示している。（左上） ODS 濃度 1985 年レベル GHG 濃度 2000 年レベルの実験結果、（右上） ODS 濃度 1985 年レベル GHG 濃度 2030 年レベルの実験結果、（左下） ODS 濃度 1985 年レベル GHG 濃度 2050 年レベルの実験結果。

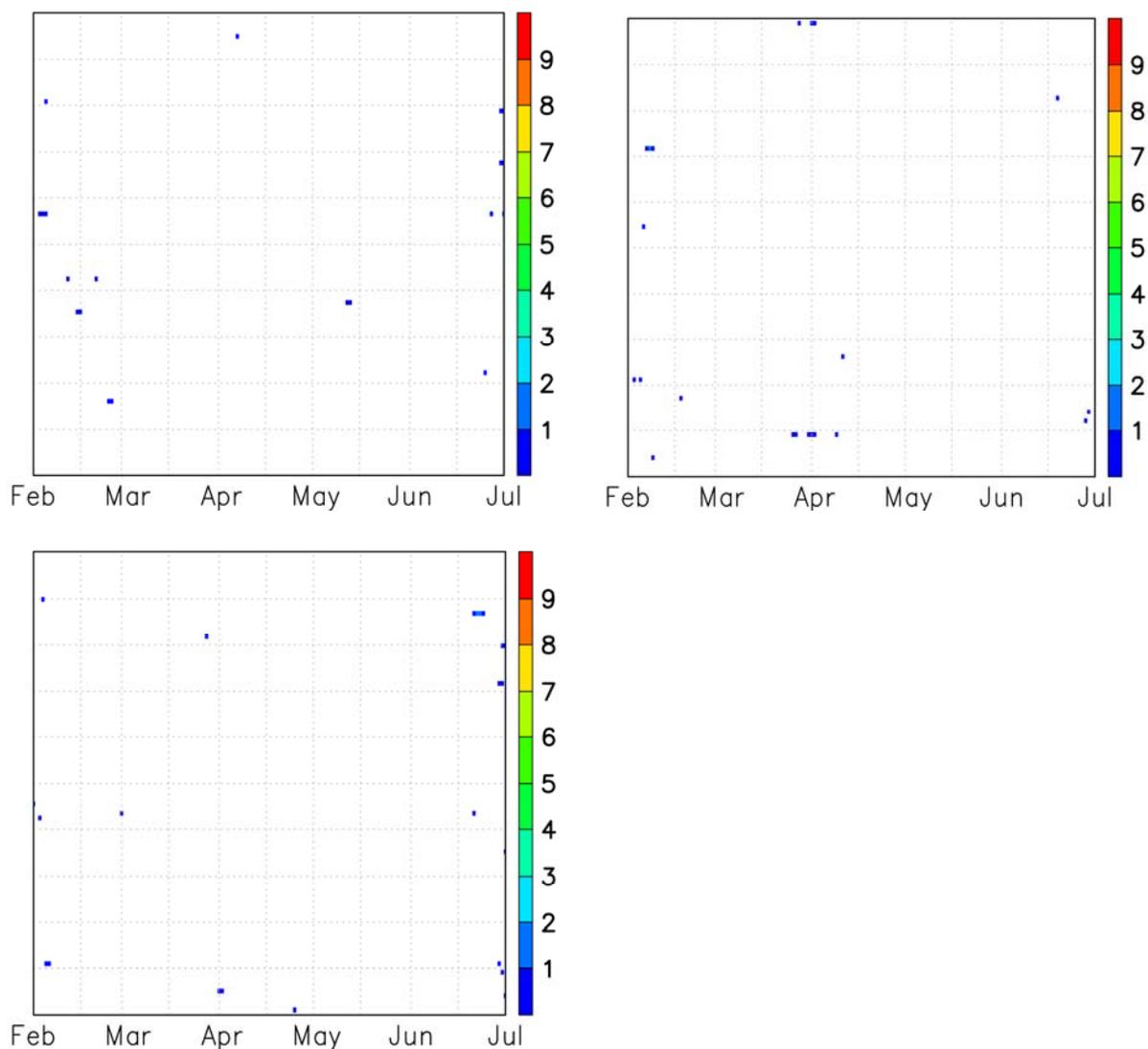


図 19-2 MIROC5 化学気候モデルにおいて ODS 濃度を 1985 年レベルに設定した計算結果。北緯 45 度～90 度の領域について、オゾン全量が 230DU 以下になる面積を色で表したものの。右に色のスケールを表す。単位は  $10^6\text{km}^2$ 。横軸は日付、縦軸はアンサンブルメンバーを表す。いちばん下がアンサンブルメンバー 1、いちばん上がアンサンブルメンバー 100 となっている。色のついていない白色領域は、オゾン全量が 220DU より多いことを示している。（左上） ODS 濃度 1985 年レベル GHG 濃度 2000 年レベルの実験結果、（右上） ODS 濃度 1985 年レベル GHG 濃度 2030 年レベルの実験結果、（左下） ODS 濃度 1985 年レベル GHG 濃度 2050 年レベルの実験結果。

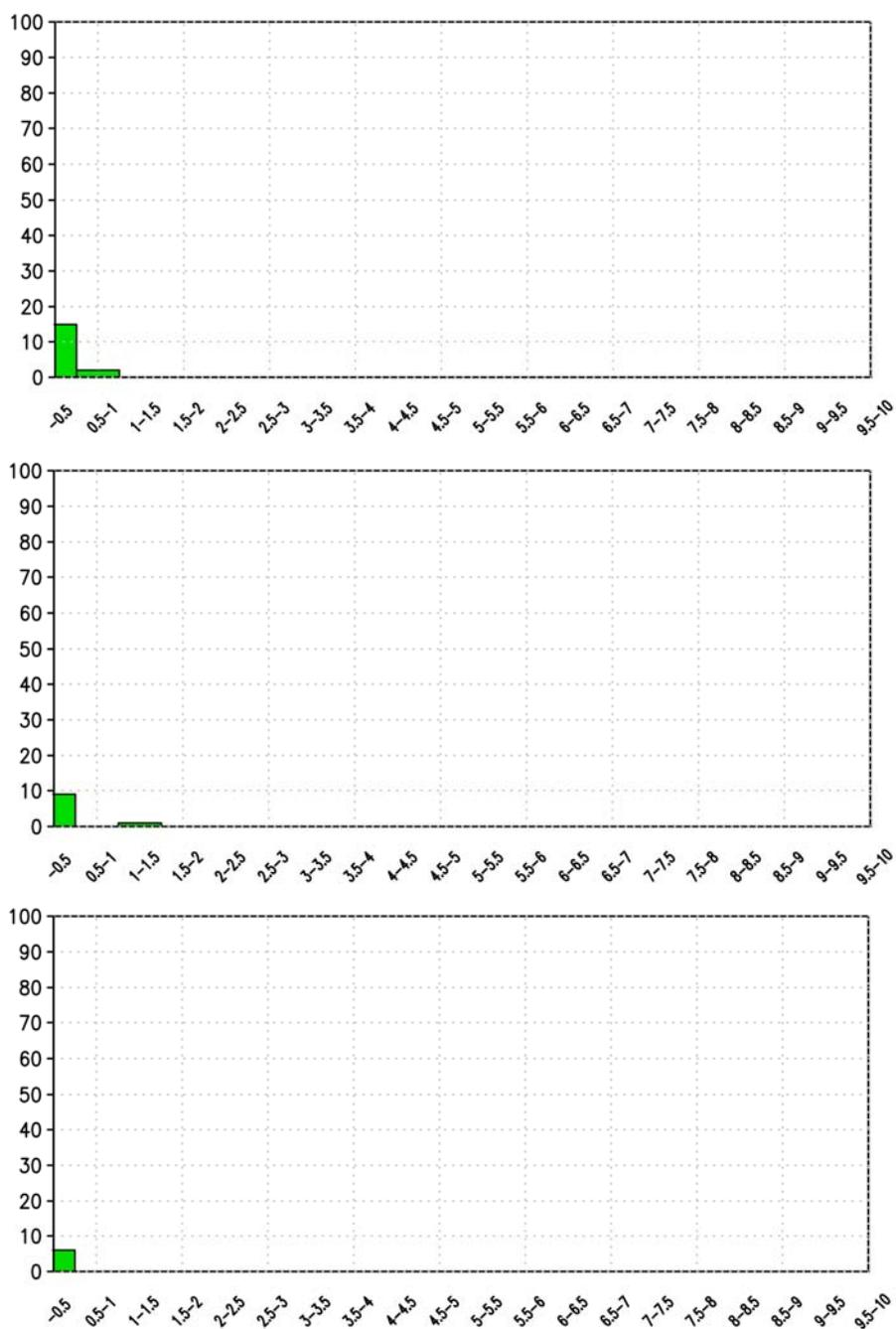


図 20-1 MIROC3.2 化学気候モデルにおいて ODS 濃度を 1985 年レベルに設定した計算結果。北緯 45 度～90 度の領域において、オゾン全量が 220DU 以下を示す面積×日数の 2 月～6 月の期間における積算値のアンサンブルメンバーの個数分布。図 19-1 をもとに作成。縦軸はアンサンブル数。横軸の単位は  $10^8 \text{km}^2 \cdot \text{day}$ 。  
 (上) ODS 濃度 1985 年レベル GHG 濃度 2000 年レベルの実験結果  
 (中) ODS 濃度 1985 年レベル GHG 濃度 2030 年レベルの実験結果  
 (下) ODS 濃度 1985 年レベル GHG 濃度 2050 年レベルの実験結果

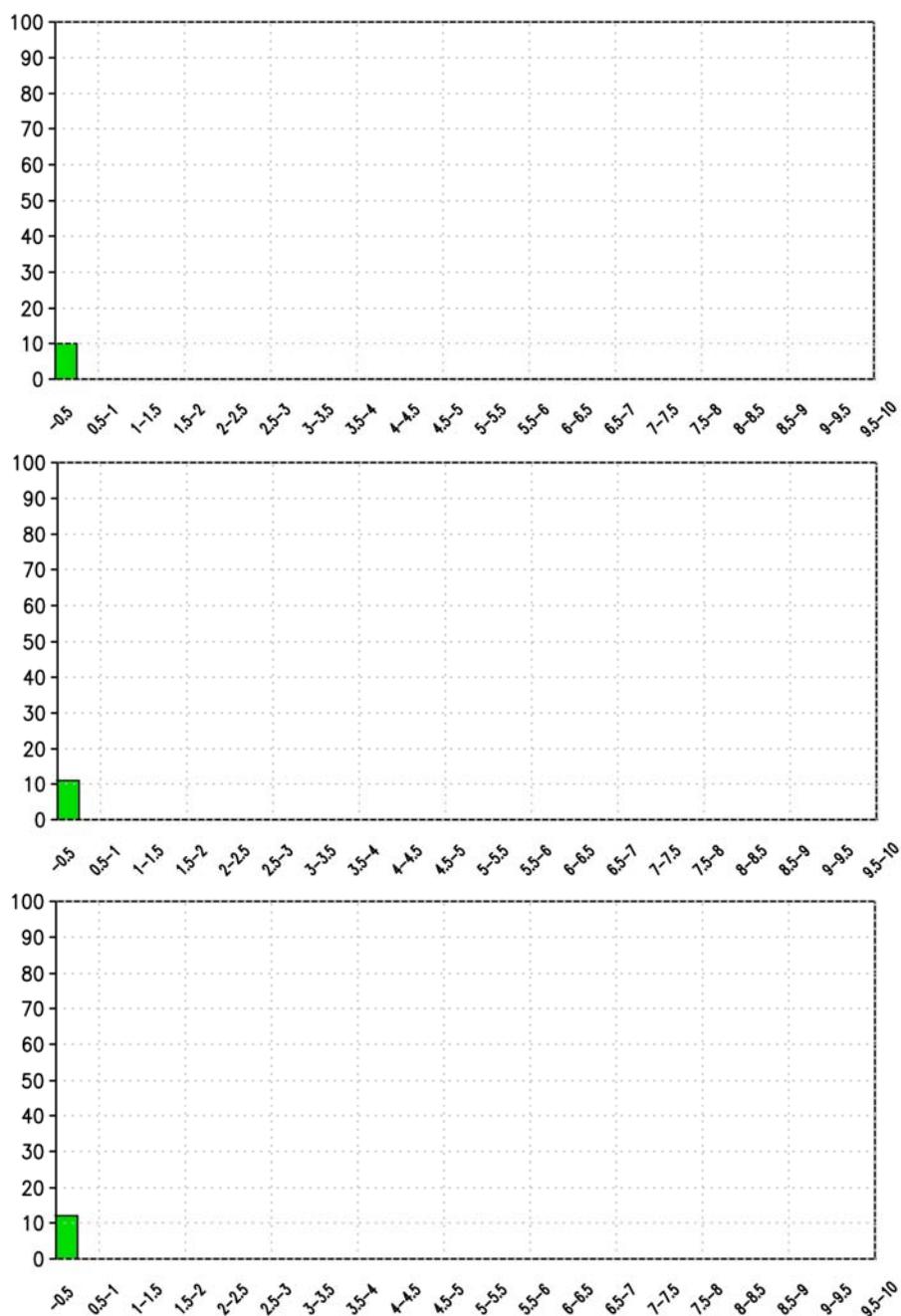


図 20-2 MIROC5 化学気候モデルにおいて ODS 濃度を 1985 年レベルに設定した計算結果。北緯 45 度～90 度の領域において、オゾン全量が 230DU 以下を示す面積×日数の 2 月～6 月の期間における積算値のアンサンブルメンバーの個数分布。図 19-2 をもとに作成。縦軸はアンサンブル数。横軸の単位は  $10^8 \text{km}^2 \cdot \text{day}$ 。  
 (上) ODS 濃度 1985 年レベル GHG 濃度 2000 年レベルの実験結果  
 (中) ODS 濃度 1985 年レベル GHG 濃度 2030 年レベルの実験結果  
 (下) ODS 濃度 1985 年レベル GHG 濃度 2050 年レベルの実験結果

## (6) 今後10～30年程度の期間に北極域や北半球中緯度域で極端なオゾン破壊の起こる可能性についての検討

本研究課題で行った3つの化学気候モデルの数値実験結果から、以下のことがわかった。

どのモデルでも、ODS濃度が1960年レベルから2000年レベルに増加すると、3月～4月の期間における北緯45～90度のオゾン全量最低値のアンサンブル間のばらつきが増加した。これは、ODS濃度レベルが増加することによって、その年の北極渦の状態により、この季節・この領域で極端にオゾン破壊が進む年とそうでない年との区別がよりはっきりしてきて、オゾン全量の年々変動が増加することを意味する。北極渦が安定な年はオゾン破壊が一気に進み、不安定な年はオゾン破壊がほとんど進まない、といった状況が出現し、これは2011年3月下旬～4月初旬に起こった北極域での極端なオゾン全量の減少とその前年の同時期の高オゾン全量という観測事実に対応する。

GHG濃度に関しては、今後数十年間の期間はGHG濃度の増加は避けられない。その場合、ODS濃度が高いままでGHG濃度が増加すると、北極域・北半球中緯度域では平均的にはオゾン全量が増加するが、それによって、極端にオゾン全量が低くそれが長時間持続するような事例は少なくなるわけではなく、依然存在し続けることがわかった。MIROC3.2化学気候モデルの結果はGHG濃度が2000年レベル→2030年レベル→2050年レベルと増加するにつれて、極端なオゾン破壊の規模または数は若干増加傾向を示し、MIROC3.2化学気候モデルの極成層圏雲パラメータを変えた実験とMIROC5化学気候モデルの結果は、GHG濃度2030年レベルが最大規模という結果を示した。

さらに、ODS濃度を1985年レベルに設定し、GHG濃度レベルを2000年、2030年、2050年に設定した実験では、GHG濃度の高い2030年レベル、2050年レベルの実験で極端なオゾン破壊を起こすアンサンブルメンバーは現れなかった。

以上より、大気中でODS濃度を1985年レベル（Effective Equivalent Stratospheric Chlorine, EESC～3.6 ppbv）まで落とせば、今後GHG濃度が増加しても北極域・北半球中緯度域で大規模なオゾン破壊は起こらないことが推定される。

## (7) まとめと展望

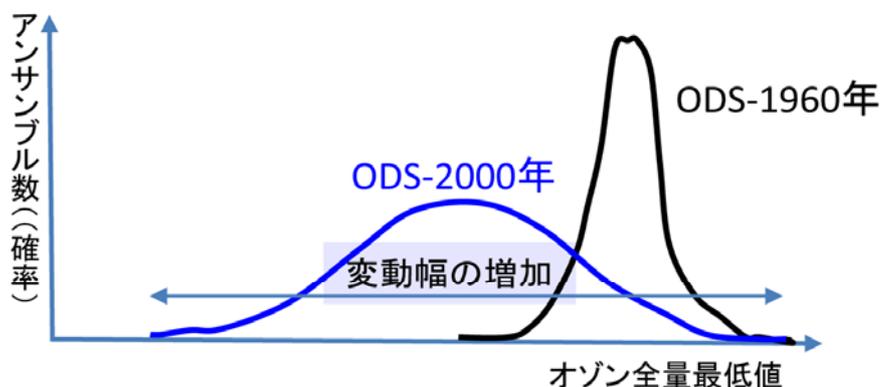
北極域・北半球中緯度域のオゾン量は、大気自身の内部変動によってその年々変動が激しく、オゾン層破壊に対するODS濃度依存性およびGHG濃度依存性の解析が困難であった。このことに関して、モデルの開発・改良および実験方法の改善により、影響の抽出を可能とする道筋をつけた。また、異なる気候特性をもつ3つのモデルの結果を比較することによって、共通の依存性を見いだすことにより、より一般性のある結論を得ることができた。具体的には、3つのモデルそれぞれについて100アンサンブル実験を行うことによって、北半球中高緯度域のオゾン変化の確率分布を考え、アンサンブル平均的なオゾン濃度と確率分布の端に位置する極端なオゾン破壊とに分けて依存性を解析した。その結果、ODS濃度の増加によって、北半球中高緯度域春季のオゾン全量のアンサンブルメンバー間のばらつきが増加し、また、高いODS濃度下でのGHG濃度の増加によって、アンサンブル平均的にはオゾン量は増加するが極端なオゾン破壊を起こすアンサンブルメンバーはなくなる、あるいは若干増加することがわかった（図21）。これらの結果は、ODS濃度の増加に伴って1990年代以降の北半球中高緯度域のオゾン全量の年々変動が増したという観測事実、および2011年のような他大気中のODS濃度がピーク時の2000年レベルより少し下がったにもかかわらず大規模な春季の北極オゾン破壊が起きた事実を説明する。また、北極域・北半球

中緯度域へのオゾン輸送の効果の小さいモデルほどODS増加によってアンサンブル間のばらつきが大きくなる傾向がはっきりと見え、極端なオゾン破壊が起こるアンサンブルメンバーが現れやすい傾向にあることもわかった。これは、例えば、エルニーニョやラニーニャ等、熱帯海域での海水面温度変化によって大気循環が変化し、北極域へのオゾン輸送が増加／減少した場合のオゾン量変動についての示唆を与える。

本研究によって、将来のオゾン層の動向を推定する上で新たな問題点も明らかとなった。その一つは、成層圏水蒸気量の将来の動向である。現在までのところ、過去に観測された成層圏の水蒸気量の変化のメカニズムが説明できていない状況にある。従って、将来の成層圏の水蒸気量もどうなるのかわからないのが実情である。本研究に用いたモデルでは、成層圏の水蒸気は将来増加する傾向を示したが（図12左）、化学気候モデルの中で成層圏水蒸気の増加を引き起こしたメカニズムが正しいものかどうか不明である。化学気候モデルで高いODS濃度下でのGHG増加によって大規模なオゾン破壊がなくなる原因の一つは、モデルの成層圏の水蒸気量の増加であった。これによってオゾン破壊を促進する極成層圏雲量が増加したことが原因であった。それゆえ、成層圏の水蒸気量変化のメカニズムを解明することは、大規模オゾン破壊の将来の動向を予測する上で重要である。もう一つは、熱帯海面水温の影響である。MIROC3.2化学気候モデルを用いた数値実験によって、エルニーニョ型の海水面温度のときは北半球中高緯度域のオゾン量が増加し、ラニーニャ型の海水面温度のときは減少することがわかった。モデルの実験設定はこれらの海水面温度の変化の影響を過大評価している可能性があるが、同じODS濃度・GHG濃度でも熱帯海面温度がエルニーニョ型かラニーニャ型かによって北極域のオゾン破壊の程度が異なる可能性がある。北半球中高緯度域のオゾン全量を議論する場合、熱帯海面水温の影響もある程度加味する必要がある。ちなみに、大規模なオゾン破壊が起こった2011年3月～4月はラニーニャが終息した時期でもあるので、本研究の実験結果は事実と整合的である。

本研究課題で行った実験結果より、発展途上国をも含めたフロン対策の国際協力によって大気中のODS濃度レベルが今後徐々に下がっていけば、年々変動の幅は小さくなり、北極域・北半球中緯度域で極端なオゾン破壊がある年に突然起こるといような危険性が少なくなっていくと考えられる。化学気候モデルを使ったアンサンブル数値実験結果によると、今後大気中のGHG濃度がさらに増加する中で、ODS濃度を1985年レベル（Equivalent Effective Stratospheric Chlorine, EESC～3.6 ppbv）まで下げると極端なオゾン破壊が起こらないことがわかった（図22）。最新のWMOのODSシナリオで地表付近のODS濃度が1985年レベルまで下がるのは2030年頃になる。成層圏ではさらに数年遅れる。この結果は、国際的にモントリオール議定書に沿ったODS削減を行ったとしても、2030年頃までは極端なオゾン層破壊が北極域・北半球中緯度域で起こり得ることを意味する。そのような好ましくない現象が起る確率をできるだけ低くするためには、最低限、モントリオール議定書に沿ったODS削減が求められる。できればそれ以上の削減が望ましい。また、日本国内ではフロン・ハロンの生産がすでに中止されているので、国内的にはハロンバンク対策を確実に進め、これまでに生産された、または現在使用中のハロゲン類が大気中に漏れないように回収・破壊を徹底することが必要である。

### ODS依存性 (GHG濃度: 2000年レベルの下で)



### GHG依存性 (ODS濃度: 2000年レベルの下で)

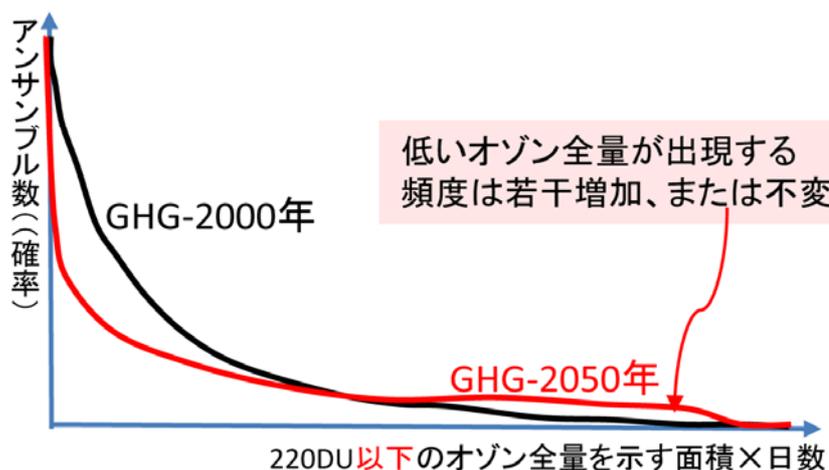


図 21 化学気候モデルを用いた 100 アンサンブル実験結果による春季の北半球中高緯度域のオゾン全量のアンサンブル分布の説明図。(上) ODS 濃度依存性 (下) GHG 濃度依存性を表す。ODS 濃度の増加によってオゾン全量最低値の分布の幅が広がること、および高い ODS 濃度下での GHG 濃度の増加によって大規模でかつ極端なオゾン破壊はなくなることを示す。

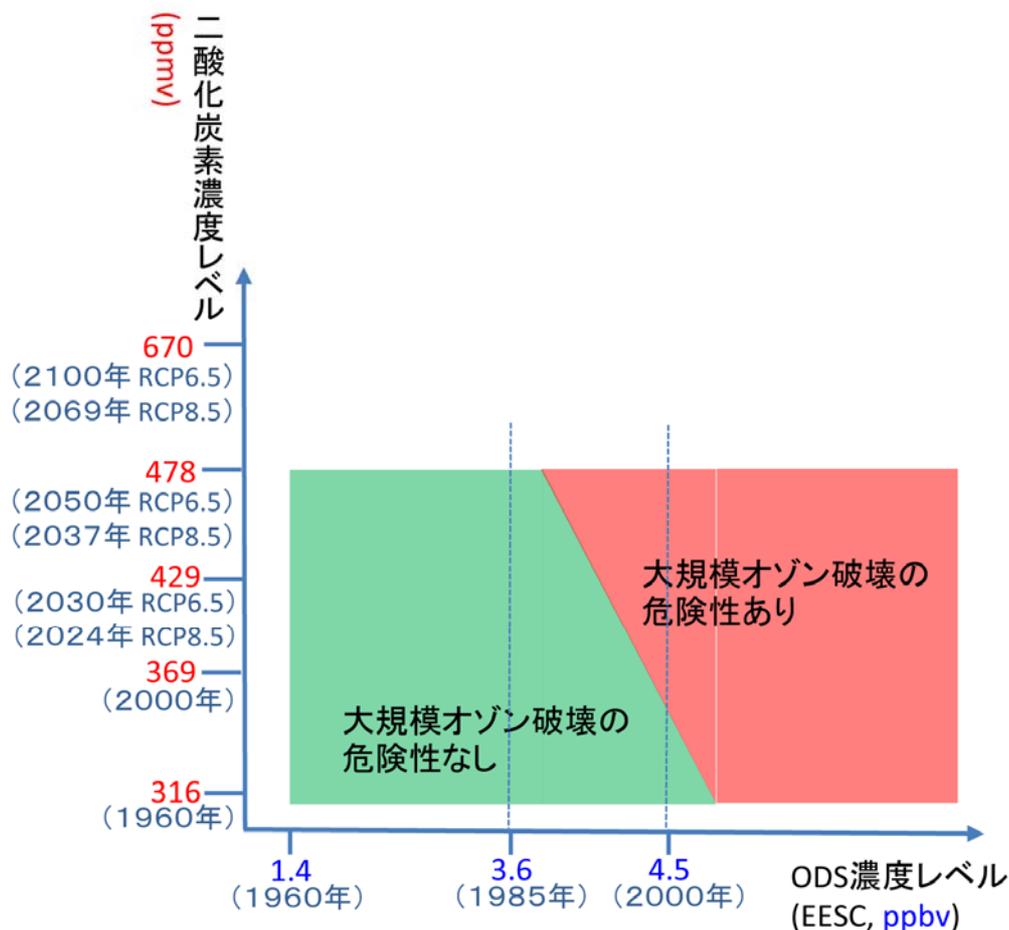


図 22 化学気候モデルを用いた 100 アンサンブル実験結果から、大規模オゾン破壊の危険性のある ODS 濃度レベルおよび GHG 濃度レベルを推定した結果。縦軸は GHG 濃度レベル（代表的に二酸化炭素濃度で表されている）、横軸は ODS 濃度レベルを表し、縦軸と横軸の目盛りがついている ODS 濃度と GHG 濃度の組み合わせで実験を行った。ただし本研究では、二酸化炭素濃度を 670ppmv に指定した実験は行っていない。縦軸に表示されている GHG 濃度に対応する RCP6.5 および RCP8.5 シナリオ上の年が括弧書きで表示されている。右の縦点線で示される ODS 濃度 2000 年レベルの場合、GHG 濃度が増加すると大規模オゾン破壊の危険性があるが、左の縦点線で表される ODS 濃度が 1985 年レベルの場合はその危険性がないことを表す。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

北極域・北半球中緯度域のオゾン量は、大気自身の内部変動によってその年々変動が激しく、オゾン層破壊に対する ODS 濃度依存性および GHG 濃度依存性の解析が困難であった。特に人口の集中する北半球中緯度域のオゾン層の ODS や GHG 濃度依存性を把握しておくことは、この地域の将来のオゾン層の動向を予想し、極端なオゾン破壊を避けるための政策を立案する上で必要である。将来考えられるいくつかの ODS 濃度と GHG 濃度の組み合わせによる 100 アンサンブル実験を行い結果に確率的な解釈を加えることで、北極域・北半球中緯度域の ODS や GHG 濃度の

オゾン層への影響を明らかにした。すなわち、ODS濃度の増加によって、北半球中高緯度域春季のオゾン全量の年々変動が拡大することがわかった。また、高いODS濃度のままGHG濃度が増加するとアンサンブル平均的にはオゾン量は増加するが、極端なオゾン層破壊を起こすアンサンブル（年）がなくなるわけではなく、依然としてある確率で出現し、ODS濃度が下がらない間は極端なオゾン層破壊が起こる恐れがあることがわかった。

## （２）環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

化学気候モデルを使ったアンサンブル数値実験結果によると、今後大気中のGHG濃度がさらに増加する中で、ODS濃度を1985年レベル（Equivalent Effective Stratospheric Chlorine, EESC～3.6 ppbv）まで下げると極端なオゾン破壊が起こらないことがわかった。最新のWMOのODSシナリオで地表付近のODS濃度が1985年レベルまで下がるのは2030年頃なので、この結果は、国際的にモントリオール議定書に沿ったODS削減を行ったとしても、2030年頃までは極端なオゾン層破壊が北極域・北半球中緯度域で起こり得ることを意味する。

## 6. 国際共同研究等の状況

WCRP（World Climate Research Programme, 世界気候研究プログラム）のコアプロジェクトである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CCMI (Chemical Climate Model Initiative: 化学気候モデルイニシアチブ)に参加している。国立環境研究所の化学気候モデルを使ってCCMIから提供されたODS濃度シナリオやGHG濃度シナリオ等に基づいたオゾン層将来予測計算を行い、計算結果のデータを提供している。世界の他のモデルの結果と共に解析を行って国際共同研究を行っている。

## 7. 研究成果の発表状況（※別添.報告書作成要領参照）

### （１）誌上発表

#### <論文（査読あり）>

- 1) Y. YAMASHITA, H. AKIYOSHI, T. G. SHEPHERD, and M. TAKAHASHI: *J. Meteorol. Soc. Jap.*, 93(6), 613-628 (2015)  
 “The combined influences of westerly phase of the Quasi-Biennial Oscillation and 11-year solar maximum conditions on the Northern Hemisphere extratropical winter circulation”
- 2) H. AKIYOSHI, T. NAKAMURA, T. MIYASAKA, M. SHIOTANI, and M. SUZUKI: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 1361-1380, doi:10.1002/2015JD023334 (2016)  
 ”A nudged chemistry-climate model simulation of chemical constituent distribution at northern high-latitude stratosphere observed by SMILES and MLS during the 2009/2010 stratospheric sudden warming”

### <査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

### <その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 秋吉英治、菅田誠治、山下陽介、門脇正尚、中村哲、高橋正明：国立環境研究所スーパーコンピュータ利用研究年報 平成26年度 平成26年度地球環境研究センター報告、CGER-I125-2015, 24-34 (2015)  
「MIROCモデルをベースにした化学気候モデルの開発とオゾン層の将来予測」
- 2) 秋吉英治：地球環境研究センターニュース、Vol.26, No.11, 27-29 (2016)  
「環境研究総合推進費の研究紹介 変動の激しい北半球中高緯度のオゾン層破壊を理解する 環境研究総合推進費2-1303「将来の温暖化条件下でのフロン対策強化によるオゾン層の脆弱性回避に関する研究」」

### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) 中村哲、山崎孝治、秋吉英治、日本気象学会2013年度春季大会、（東京）、2013年5月15-18日（発表2013年5月18日）；2013年度春季大会講演予稿集(103)、336。  
「成層圏オゾン減少に伴う対流圏循環の変化におけるeddy feedbackの役割について」
- 2) 中村哲、山崎孝治、秋吉英治、日本地球惑星科学連合2013年大会、千葉（幕張メッセ国際会議場）、2013年5月19日-24日(発表2013年5月20日)、AAS22-04。  
「成層圏オゾン減少に伴う対流圏循環の変化におけるeddy の役割について」
- 3) 秋吉英治、山下陽介、門脇正尚、関口健太郎、中井陽一、今村隆史、望月優子、日本地球惑星科学連合2013年大会、千葉（幕張メッセ国際会議場）、2013年5月19日-24日(発表2013年5月20日)、AAS22-11。  
「太陽プロトンイベントが極域大気硝酸およびオゾン濃度に及ぼす影響に関する数値実験」
- 4) 今井弘二、鈴木睦、佐野琢己、光田千紘、眞子直弘、内藤陽子、秋吉英治、塩谷雅人、日本地球惑星科学連合2013年大会、千葉（幕張メッセ国際会議場）、2013年5月19日-24日(発表2013年5月20日)、AAS22-P06(ポスター発表)。  
「SMILES によるオゾン及び塩素化合物観測データの検証」
- 5) Nakamura, T, K. Yamazaki, and H. Akiyoshi, The 10th Annual Meeting of the Asia Oceania Geoscience Society (AOGS 2013), Brisbane, Australia, 24-28 June 2013(oral presentation, 28 June 2013), AS07-A004  
“A role of eddy feedback on the tropospheric circulation trend corresponding to the stratospheric ozone reduction in boreal summer”
- 6) Yamashita, Y., H. Akiyoshi, M. Takahashi, Davos atmosphere and cryosphere assembly DACA-13, Davos, Switzerland, 8-12 July 2013(oral presentation, 12 July 2013), abstract, p.990  
“CCSR/NIES CCM simulations for 11-year solar cycle and QBO effects on the Northern Hemisphere extratropical winter circulation”
- 7) 秋吉英治、中村哲、塩谷雅人、日本気象学会2013年度秋季大会、（仙台）、2013年11月19-21日（口頭発表2013年11月19日）；2013年度秋季大会講演予稿集(104)、82。

- 「2010年1月の突然昇温時の下部成層圏微量成分分布とオゾン収支」
- 8) Akiyoshi, H., T. Nakamura, and M. Shiotani, SPARC 5th General Assembly, Queenstown, New Zealand, 12th-17th January, 2014 (poster presentation on 13th January), Abstract (in USB memory)  
“A nudged CTM simulation for chemical constituent distribution during the stratospheric sudden warming observed by SMILES in 2010”
  - 9) Kadowaki, M., H. Akiyoshi, Y. Yamashita, and T. Nakamura, SPARC 5th General Assembly, Queenstown, New Zealand, 12th-17th January, 2014 (poster presentation on 13th January), Abstract (in USB memory)  
“Relationship between ozone chemical forcing and wave activities for the period 1990-2011 using the MIROC3.2 nudged CTM”
  - 10) Sakazaki, T., M. Fujiwara, C. Mitsuda, K. Imai, N. Manago, Y. Naito, T. Nakamura, H. Akiyoshi, D. Kinnison, T. Sano, M. Suzuki, and M. Shiotani, SPARC 5th General Assembly, Queenstown, New Zealand, 12th-17th January, 2014 (poster presentation on 13th January), Abstract (in USB memory)  
“Diurnal variations in stratospheric O<sub>3</sub> and HCl as observed the superconducting submillimeter-wave limb-emission sounder (SMILES)”
  - 11) Kadowaki, M. and H. Akiyoshi,南極昭和基地大型大気レーダー計画(PANSY)研究集会、2014年3月10日－11日（発表3月10日）、東京大学理学部（東京都文京区本郷）  
“Relationship between total ozone, ozone destruction processes and wave activities in the Antarctic region”
  - 16) 村田功、森野勇、中島英彰、秋吉英治、日本地球惑星科学連合2014年大会、横浜（パシフィック横浜 会議センター）、2014年4月28日－5月2日（発表2014年4月30日）、AAS21-17.  
「FTIR で観測されたつくば上空HCl, HF 全量の再増加」
  - 17) Isobe, H., H. Akiyoshi, WMO/UNEP ozone research managers of the parties to the Vienna convention for the protection of the ozone layer, Ninth meeting, 14-16 May (15 May 2014, oral presentation),  
Geneva, Switzerland,  
<http://conf.montreal-protocol.org/meeting/orm/9orm/presession/default.aspx>  
“National and regional reports on ozone research and monitoring, Region 2: Asia”
  - 18) 鈴木睦、今井弘二、佐野琢己、眞子直弘、光田千紘、井上陽子、尾関博之、秋吉英治、D. Kinnison、内藤陽子、西本絵里子、塩谷雅人、日本気象学会2014年度春季大会、（横浜）、2014年5月21-24日（口頭発表2014年5月21日）；2014年度春季大会講演予稿集(105)、60.  
「JEM/SMILESからのVLSL Bryの推定（その2）」
  - 19) Yamashita, Y., H. Akiyoshi, The third Chemistry-Climate Model Initiative (CCMI) Workshop, 20-22 May 2014 (20 May 2014, poster presentation), Lancaster, UK,  
<http://www.lancaster.ac.uk/ccmi2014/agenda/posters.php>  
“The analysis of the influences of solar 11-year and 27-day cycles in CCSR/NIES-MIROC3.2 comparing to the previous CCSRNIES CCM”
  - 20) Ayarzagüena, B., U. Langematz, J. Abalichin, H. Akiyoshi, M. Michou, O. Morgenstern, L. Oman, The third Chemistry-Climate Model Initiative (CCMI) Workshop, 20-22 May 2014 (22 May 2014, oral presentation), Lancaster, UK, <http://www.lancaster.ac.uk/ccmi2014/agenda/>

“Future changes in wintertime stratospheric Arctic variability in CCMI models”

- 21) Oberländer, S., H. Garny, M. Dameris, U. Langematz, J. Abalichin, H. Akiyoshi, B. Ayarzagüena, A. Kubin, M. Michou, O. Morgenstern, L. Oman, The third Chemistry-Climate Model Initiative (CCMI) Workshop, 20-22 May 2014 (20 May 2014, poster presentation), Lancaster, UK, <http://www.lancaster.ac.uk/ccmi2014/agenda/posters.php>  
 “Changes in the residual circulation of the stratosphere and mesosphere”
- 22) Meul, S., G. Bodeker, H. Garny, J. Abalichin, S. Oberländer, M. Kunze, U. Langematz, O. Morgenstern, H. Akiyoshi, The third Chemistry-Climate Model Initiative (CCMI) Workshop, 20-22 May 2014 (20 May 2014, poster presentation), Lancaster, UK, <http://www.lancaster.ac.uk/ccmi2014/agenda/posters.php>  
 “Hemispheric asymmetries in midlatitude total ozone column return dates”
- 23) Yamashita, Y., H. Akiyoshi, T. Shepherd, M. Takahashi, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 11th annual meeting 2014, 28 July - 1 August 2014 (28 July 2014, oral presentation), 札幌、<http://www.asiaoceania.org/aogs2014/>  
 “Combined Influences of the QBO and 11-year Solar Cycle on the Stratosphere-troposphere Circulation in the Northern Hemisphere Winter”
- 24) 秋吉英治、門脇正尚、山下陽介、今村隆史、野沢徹、日本気象学会2014年度秋季大会（福岡）、2014年10月21-23日（口頭発表2014年10月22日）；2014年度秋季大会講演予稿集(106)、364.  
 「100年定常実験による温暖化条件下での北半球中・高緯度域のオゾン層破壊」
- 25) 山下陽介、秋吉英治、日本気象学会2014年度秋季大会（福岡）、2014年10月21-23日（ポスター発表2014年10月21日）；2014年度秋季大会講演予稿集(106)、211.  
 「CCSR/NIES-agcm5.4g, および, CCSR/NIES-MIROC3.2化学気候モデルにおける太陽11年周期の影響の比較」
- 26) 小濱里沙、秋吉英治、門脇正尚、山下陽介、日本気象学会2014年度秋季大会（福岡）、2014年10月21-23日（ポスター発表2014年10月23日）；2014年度秋季大会講演予稿集(106)、443.  
 「札幌のオゾン全量トレンドに対するハロゲンガス増加の影響について」
- 27) 秋吉英治、門脇正尚、山下陽介、今村隆史、野沢徹、第20回大気化学討論会(府中)、2014年10月27日-29日（口頭発表2014年10月28日）、第20回大気化学討論会講演要旨集、16.  
 「化学気候モデルを用いた100年定常実験による北半球中高緯度オゾン全量のODSおよびGHG濃度依存性について」
- 28) 小濱里沙、秋吉英治、門脇正尚、山下陽介、第20回大気化学討論会(府中)、2014年10月27日-29日（ポスター発表2014年10月27-28日）、第20回大気化学討論会講演要旨集、68.  
 「札幌とつくばのオゾン全量トレンドに対するハロゲンガス増加の影響について」
- 29) H. Akiyoshi : 1st International Workshop on SLCPs in Asia: Chemistry-climate modeling and its applications, 1-3 April 2015 (2 April 2015, oral presentation), Seoul, Korea, PROGRAM, p.17  
 ”Development of CCM and CTM in NIES and their application to ozone layer research”
- 30) 秋吉英治、門脇正尚、山下陽介、今村隆史、野沢徹；日本気象学会2015年度春季大会、（つくば）、2014年5月21-24日（口頭発表2014年5月22日）；2015年度春季大会講演予稿集(107)、

208.

「北半球中高緯度域オゾン層破壊規模の塩素濃度および温室効果ガス濃度依存性」

- 31) 山下陽介、秋吉英治、T. G. Shepherd、高橋正明；日本気象学会2015年度春季大会、（つくば）、2014年5月21-24日（口頭発表2014年5月21日）；2015年度春季大会講演予稿集(107)、63.

「QBO と太陽11年周期が極渦の季節変化に及ぼす影響に関する成層圏BDC と成層圏-対流圏結合の役割」

- 32) 小濱里沙、秋吉英治、門脇正尚、山下陽介；日本地球惑星科学連合2015年大会、千葉（幕張メッセ国際会議場）、2015年5月24日-28日（発表2015年5月27日）、AAS21-P19.

「MIROC3.2ナッジング化学気候モデルによるフロン減少期(1979-1996)とフロン増加期(1997-2011)のオゾン全量の季節別全球トレンドマップ」

- 33) Akiyoshi, H., T. Nakamura, T. Miyasaka, M. Shiotani, M. Suzuki : 26th IUGG General Assembly 2015, Prague, Czech Republic, 22 June - 2 July 2015(Poster presentation on 26 June), M14p-450.

“A nudged-CCM simulation of chemical constituent distribution at Northern Hemisphere high latitudes observed by SMILES during the 2010 stratospheric sudden warming”

- 34) Yamashita, Y., H. Akiyoshi, T. Shepherd, M. Takahashi : 26th IUGG General Assembly 2015, Prague, Czech Republic, 22 June - 2 July 2015 (Oral presentation on 27 June), IUGG-1589.

“Combined influences of westerly phase of the QBO and 11-year solar maximum on the Northern Hemisphere extratropical winter circulation”

- 35) Akiyoshi, H., T. Nakamura, T. Miyasaka, M. Shiotani, M. Suzuki : The combined AerChemMIP-CCMI workshops, Fraskati, Italy, 7 - 9 October 2015 (Oral presentation on 8 October), Abstracts, p.2.

“A nudged-CCM simulation of chemical constituent distribution at Northern Hemisphere high latitude stratosphere observed by SMILES during the 2010 SSW”

- 36) Yamashita Y., H. Akiyoshi, T. Shepherd, M. Takahashi : The combined AerChemMIP-CCMI workshops, Fraskati, Italy, 7 - 9 October 2015 (poster presentation on 8-9 October), Abstracts, p.50.

“Influences of QBO and solar cycle on the Arctic ozone”

- 37) Sasaki, T., M. Shiotani, M. Deushi, H. Akiyoshi, D. Kinnison : The combined AerChemMIP-CCMI workshops, Fraskati, Italy, 7 - 9 October 2015 (poster presentation on 8-9 October), Abstracts, 39.

“Comparisons of dynamical field in the lower stratosphere at mid-high latitudes between the free-run and specified dynamics modes”

- 38) Sinnhuber, B.-M., S. Versick, O. Kirner, S. Strahan, P. Braesicke, P. von der Gathen, T. von Clarmann, P. Jöckel, S. Bekki, R.-M. Hu, M. Marchand, M. Deushi, H. Akiyoshi, Y. Yamashita, M. Kadowaki, D. Kinnison : The combined AerChemMIP-CCMI workshops, Fraskati, Italy, 7 - 9 October 2015 (poster presentation on 8-9 October), Abstracts, 41-42.

“A multi-model comparison of CCMI C1SD simulations with NDACC data”

- 39) 小濱里沙、秋吉英治、山下陽介、門脇正尚；第21回大気化学討論会、東京工業大学（東京・大岡山）、10月19日－21日（口頭発表10月20日）、公演予稿集 p.31

「ナッジング化学輸送モデル及び化学気候モデルを用いたハロゲン増加期におけるオゾン

全量の季節別緯度別トレンドとその要因分析」

- 40) Akiyoshi, H., M. Kadowaki, Y. Yamashita, T. Imamura, T. Nozawa : Asian Conference on Meteorology (ACM) 2015,26-27 October 2015, (oral presentation 27 October) ,Kyoto University (Kyoto), Abstracts O-3-25  
 “ODS and GHG dependences of ozone destruction in the northern mid and high latitudes in a chemistry-climate model”
- 41) Yamashita Y., H. Akiyoshi, T. G. Shepherd, M. Takahashi : Asian Conference on Meteorology (ACM) 2015,26-27 October 2015, (oral presentation 27 October) ,Kyoto University (Kyoto), Abstracts O-3-27  
 “The QBO and 11-year solar cycle influences on the Northern Hemisphere extratropical winter circulation”
- 42) 小濱里沙、秋吉英治、山下陽介、門脇正尚：日本気象学会2015年秋季大会、2015年10月28日－30日（口頭発表10月28日）京都、同予稿集 p.143  
 「TOMSとMIROC3.2ナッジング化学気候モデルによるオゾン全量の季節別全球トレンドマップ」
- 43) 佐々木拓也、塩谷雅人、出牛真、秋吉英治：日本気象学会2015年秋季大会、2015年10月28日－30日（ポスター発表10月28日）京都、同予稿集 p.213  
 「化学気候モデルにより得られたフリーラン実験のバイアスについて2－TTL (tropical tropopause layer)について」
- 44) 山下陽介、秋吉英治：日本気象学会2015年秋季大会、2015年10月28日－30日（ポスター発表10月30日）京都、同予稿集 p.471  
 「QBOと太陽11年周期の位相と北極域オゾン量との関係」
- 45) Ayarzagüena, B., S. Oberländer-Hayn, U. Langematz, J. Abalichin, H. Akiyoshi, S. Hardiman, A. Klekociuk, M. Marchand, S. Meul, M. Michou, O. Morgenstern, L. Oman, K. Shibata, A. Stenke : SPARC workshop "Stratospheric Change and its Role in Climate Prediction (SHARP)", Berlin, Germany, 16-19 February (Oral presentation, 17 February),  
[http://www.sharp2016.de/frontend/index.php?page\\_id=2013&v=List&do=15&day=296&ses=33858#](http://www.sharp2016.de/frontend/index.php?page_id=2013&v=List&do=15&day=296&ses=33858#)  
 “Response of sea surface temperature to climate change and its influence on the wintertime polar vortex in CMIP5 and chemistry-climate models”

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

### (5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

## (6) その他

特に記載すべき事項はない。

## 8. 引用文献

- 1) WMO (2011) *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010*, Global Ozone Research and Monitoring Project—Report No. 52, 516 pp., Geneva, Switzerland.
- 2) WMO (2014) *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014*, Global Ozone Research and Monitoring Project—Report No. 55, 416 pp., Geneva, Switzerland.
- 3) SPARC CCMVal (2010), SPARC Report on the Evaluation of Chemistry–Climate Models, V. Eyring, T. G. Shepherd, and D. W. Waugh (Eds.), SPARC Report No.5, WCRP–132, WMO/TD–No.1526.

## **Effects of Additional CFC Regulation on Fragility of Ozone Layer under Future Global Warming**

Principal Investigator: Hideharu AKIYOSHI

Institution: National Institute for Environmental Studies (NIES)  
16-2 Onogawa, Tsukuba-City, Ibaraki 305-8506, JAPAN  
Tel: +81-29-850-2393 / Fax: +81-29-851-4732  
E-mail: hakiyosi@nies.go.jp

[Abstract]

**Key Words:** Ozone layer, CFC Regulation, Global Warming, Chemistry-Climate Model, Northern Hemisphere mid- and high latitudes

It is uncertain that the ozone amount in the mid- and high latitudes of the northern hemisphere will recover as ozone depleting substances (ODSs) in the atmosphere decrease in the future by the regulation of chlorofluorocarbons (CFCs), because the ozone amount is affected by a large year-to-year variation in the Arctic polar vortex. Besides, the ozone amount is considerably affected by ozone transport from the middle and upper stratosphere and from the low latitudes. The stratospheric circulation from the low latitudes toward the high latitudes facilitates the transport of ozone and is affected by greenhouse gas (GHG) concentrations in the atmosphere. Thus, the ozone amount in the mid- and high latitudes of the northern hemisphere is affected by ODS concentrations, GHG concentrations, and year-to-year variations in the Arctic vortex, and is therefore unpredictable.

In this study, we conducted 100 ensemble numerical experiments with fixed ODS and GHG concentrations in order to investigate ozone change in the mid- and high latitudes of the northern hemisphere for the near future around the years 2030 and 2050. We analyzed an ensemble distribution of ozone amounts to explain the future ozone change. The ODS and GHG dependences were analyzed not only in terms of the ensemble mean but also in terms of the extreme events that exist at the edge of the ensemble distribution. We obtained the following results concerning ozone amount in the mid- and high latitudes of the northern hemisphere for the spring season:

- (1) The increase in ODS concentration in the atmosphere from the concentration for the year 1960 to that for the year 2000 magnifies the year-to-year variation in the ozone amount. The observed large year-to-year variation of the ozone amount from the 1990s to the present is due to the ODS increase.
- (2) The increase in GHG concentration under the high ODS concentration in the year 2000 causes an increase in the ensemble mean value of ozone amount. Extremely low ozone

events do not decrease, and in some cases, show an increase under the higher GHG concentrations.

- (3) Extremely low ozone events do not occur at ODS concentration levels lower than that of the year 1985, which is 3.6 ppbv of the Equivalent Effective Stratospheric Chlorine (EESC).