

## 成層圏オゾン層の将来見通し—化学気候モデルを用いた評価\*

永島達也\*\*・高橋正明\*\*\*

### 1. はじめに

南極オゾンホールに象徴される成層圏オゾン層の人為的な破壊に対処するため、国際的なオゾン層保護に関する条約（ウィーン条約；1985年）が締結されてから17年が経過した。その間、同条約の行動計画であり、オゾン破壊物質の生産・排出量の具体的な規制策を定めたモントリオール議定書（1987年）には数回の改正・修正が加えられてきた。これは、その時々における成層圏オゾン層に関連する新たな科学的・技術的・経済的知見の集積が反映されてきた結果である。一般に改正・修正は規制をより厳しくする方向に働き、その結果、近年では対流圏における幾つかのオゾン破壊物質の濃度低下や成層圏上部における無機塩素化合物量の減少が報告されるに至っている（Montzka *et al.*, 1996；Anderson *et al.*, 2000）。同議定書の規定によれば、締約国は、少なくとも4年に1度はその時点での最新の知見を集めて成層圏オゾン層の現状及び将来の規制策について評価を行うことが求められている。その5回目の評価報告書である“Scientific Assessment of Ozone Depletion：2002”が、来年2003年に発表されることになっている。この報告書では、対流圏や成層圏におけるオゾン破壊物質と無機ハロゲン化合物の存在量、トレンド、議定書による規制の有効性、成層圏のオゾンと気温の現状やトレンドに関して、最新の観測データに基づいた詳細な報告がなされる事になっている。更に成層圏オゾン科学に関連した知識の進展・技術の進歩が幅広くまとめられる予定である。

先頃（2002年8月23日）、報告書に先立ち、その内容

を要約した Executive Summary<sup>†</sup> が発表された。この中で、極域成層圏オゾン層の将来見通しが示されており、南極オゾンホールの回復が今世紀の半ばには訪れるであろう事や、北極で南極オゾンホールに匹敵するオゾン破壊の起こる可能性が低い事等が報告されている。このような将来見通しは、近年急速に開発が進んでいる、“化学気候モデル（chemistry-climate models）”による計算結果に基づいている。本稿では、この将来見通しのベースとなった化学気候モデルに関して、我々が独自に開発した化学気候モデルの計算結果を中心に報告する。

### 2. 化学気候モデル開発の背景

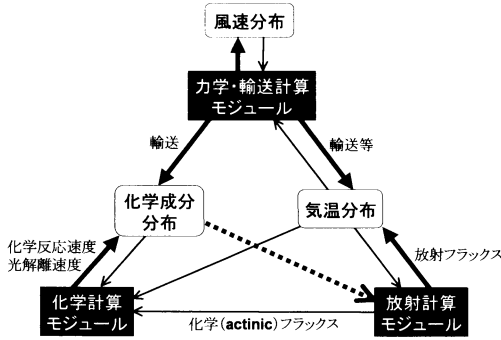
成層圏、特に中部・下部成層圏、におけるオゾンの分布は、化学的な生成・消滅反応だけではなく大気の運動による輸送の影響を大きく受ける。一方、オゾン分布それ自体は短波放射の吸収を通して成層圏の気温場、循環場に作用する。つまり、成層圏はオゾンを中心とした力学・放射・化学の結合系と捉える事が重要である。例えば、成層圏のハロゲン量増加に対する成層圏オゾンの応答は、単に化学的なオゾン破壊のみならず、その破壊されたオゾンによって引き起こされる気温低下や循環の変化を考慮した上で初めて正しく理解することが出来る。このような複雑なフィードバックシステムを持つ系の変動過程を考察するためには、数値モデルを開発し、そのモデルに対して現実大気に対するものと同様の擾乱（今の場合はハロゲン量の増加）を与え、そのモデルの振る舞いを解析する方法が非常に有効である。しかしながら、多くの中層大気（成層圏と中間圏を合わせた領域のこと）大循環モデルにおいて、放射計算に用いられるオゾン分布は、モデル

\* Outlook for the future stratospheric ozone layer—Estimations by chemistry-climate models.

\*\* NAGASHIMA, Tatsuya, 国立環境研究所.

\*\*\* TAKAHASHI, Masaaki, 東京大学気候システム研究センター.

<sup>†</sup> <http://www.unep.org/ozone/publications.shtml> から取得可能.



第1図 化学気候モデルの概念図。太矢印は各計算モジュールが影響を及ぼす物理量へ向っており、その際に影響を及ぼす過程も併せて記されている。細矢印及び点線矢印は、各モジュールでの計算に用いるために各物理量のデータが入力される事を意味する。ただし、化学計算モジュールへは放射モジュールから化学フラックス（光解離に利用可能な放射エネルギーのフラックス）が直接入力される。点線の矢印の過程を取り入れたモデルを特に“結合”化学気候モデルと呼ぶ。

の変数として計算されるのではなく、気候値的な分布として与えられており、このようなモデルは成層圏オゾンと力学場・放射場との相互作用を研究する目的に使用できるものではなかった。一方、大循環モデル中で大気光化学反応を陽に計算して、成層圏オゾン及び各化学成分の分布を求めるモデルを一般に“化学気候モデル”と呼ぶ(第1図参照)。このようなモデルでは、多くの化学成分の三次元分布を予報変数としてモデルに組み込まざるを得ず、膨大な計算機資源が必要であった。このことが化学気候モデルの実現に対する大きな壁になってきたわけであるが、近年の計算機環境の急速な進展を背景に、空間分解能の低いモデルであればワークステーションレベルでの開発・実験も可能になってきた。こうした背景の下、最近では多くの研究機関で化学気候モデルの開発が行われており、モデルの概要や試行実験の結果が次々と論文化されている状況である。

さて、化学気候モデルの開発を促進させた要因としてもう1つ挙げられるものは、温室効果ガス（Greenhouse Gases：GHGs）の増加が成層圏オゾン層に及ぼす影響に対する関心の高まりである。一般にGHGsの増加に伴って対流圏の気温は上昇するが、成層圏では大気の赤外放射率の増加により、気温は低下すると考えられている。オゾン分布に影響を与える光化学反応

のうち気相反応のみを考慮すれば良い場合（上部成層圏のような状況）、気温の低下によってオゾン減少反応（ $O_3 + O \rightarrow 2O_2$ ）の反応速度が低下するため、オゾン量は増加すると考えられる。しかしながら、極域下部成層圏のような極低温下では、極成層圏雲（Polar Stratospheric Clouds：PSCs）と呼ばれる雲が発生し、その表面上での不均一化学反応によってハロゲン化合物が活性化され、大規模なオゾンの破壊が引き起こされている。このような領域での気温の低下は、PSCsの発生量を増加させ、オゾン量の減少をもたらすと考えられている。一方、先に触れたように、オゾン層保護対策の結果、成層圏の塩素量は今後減少していくことが予想されており、これは成層圏オゾン層の今後の回復を期待させる要素である。このように現在の状況は成層圏オゾン層の今後を考える上で相反する2つの強制力（GHGs増加と塩素量減少）が共存している状態であり、今後のオゾン破壊物質やGHGsの規制策を考える上からも成層圏オゾン層の将来見通しについて大気科学に基づいた見解が求められている。そのためには、化学気候モデルを用いた数値実験の実行・解析が必要である。1998年に米国航空宇宙局（NASA）ゴダード宇宙科学研究所（GISS）のShindell博士らが発表した論文（Shindell *et al.*, 1998）はこの問題に対して1つの可能性を提示した。彼らはGISSの中層大気大循環モデルに簡略化した化学計算モジュールを組み込んだ化学気候モデルを用いて、1959年から2070年を想定した112年間の実験を行った。その際、モントリオール議定書の規制に即した成層圏塩素総量の変動及びIPCC（気候変動に関する政府間パネル）のIS92aシナリオにほぼ従ったGHGsの増加に基づき、次のような結果を得た。

(1) 南極オゾンホールは成層圏塩素総量がピークを迎える1997年以降も約10年程度は持続する。

(2) 北極でも2010年から2019年間の非常に寒冷な年にはオゾン全量の最低値が150 Dobson Unit (DU)を下回るような、南極に匹敵するオゾン破壊が起こり得る。

つまり、GHGs増加に伴う成層圏の低温化が、同時に起こる塩素量の減少に抗して両極のオゾン減少を維持、或いは拡大する可能性のある事を示したのである。しかしながら、論文中で彼ら自らも指摘しているように、上記のような将来の極域成層圏オゾン層の推定結果は、モデルが計算する下部成層圏の力学場の変動、特に惑星波動の伝播特性の変動(彼らの場合は鉛直伝

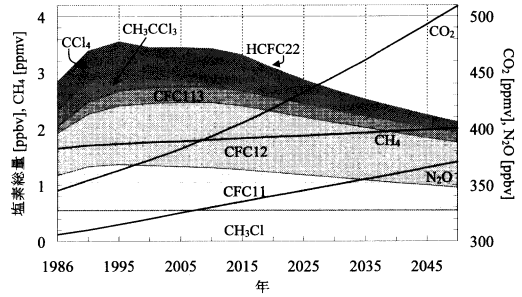
第1表 CCSR/NIES 化学気候モデル中で計算される化学成分。括弧内の化学成分は1つの化学ファミリーとして扱われ、ファミリー内の各成分量は化学平衡を仮定して計算される。

O系	$O_x (= O + O(^1D) + O_3)$
N系	$N_2O, HNO_3, HNO_4, N_2O_5,$ $NO_x (= N + NO + NO_2 + NO_3)$
H系	$H_2O, H_2O_2,$ $HO_x (= H + OH + HO_2)$
Cl系	$HCl, ClONO_2, HOCl, Cl_2, ClNO_2,$ $CCl_4, CFC11, CFC12, CFC113, HCFC22,$ $CH_3CCl_3, CH_3Cl,$ $ClO_x (= Cl + ClO + ClOO + Cl_2O_2)$
CH系	$CH_4$

播が減少した)に大きく影響を受けるため、その妥当性に関しては注意して評価をすることが必要である。これは、GHGsの増加に“伴う”成層圏の低温化が、純粋に放射的な低温化と、(GHGs増加との結び付きは必ずしも明らかではないが)突然昇温頻度の減少による力学的な低温化の2つに分ける事ができ、後者に関しては使用するモデルによって結果が大きく異なるためである(例えば、Schnadt *et al.*, 2002)。また、GISSモデルでは光化学過程の計算が非常に簡略化されており、循環場の変化に応じたオゾン輸送の変化が考慮されていない等の問題が指摘されている。従って、GISSモデル以外の化学気候モデル、特にGISSモデルでは取り扱いが不十分であった過程を組み込んだモデル、についても同様の計算を行いその結果を相互比較する事は、より確かな成層圏オゾン層の将来像を議論するために極めて重要な事である。同時にこの相互比較を通して、各化学気候モデルの問題点が洗い出され、その改善を促す効果も期待出来るよう。

### 3. CCSR/NIES 化学気候モデルの結果

以上のような背景の下、東京大学気候システム研究センター(CCSR)と国立環境研究所(NIES)の共同研究によって成層圏化学気候モデルが開発された(Takigawa *et al.*, 1999)。このモデルは、CCSR/NIES 大気大循環モデル(Numaguti *et al.*, 1995)を基本モデルとしており、これに成層圏化学過程の計算モジュールを第1図のように組み込んだものである。採用されている化学反応の種類や数等により幾つかの異なるバージョンが存在するが、本稿で紹介するバージョンでは、 $O_x$ - $HO_x$ - $NO_x$ - $ClO_x$ 系の気相化学反応・光解

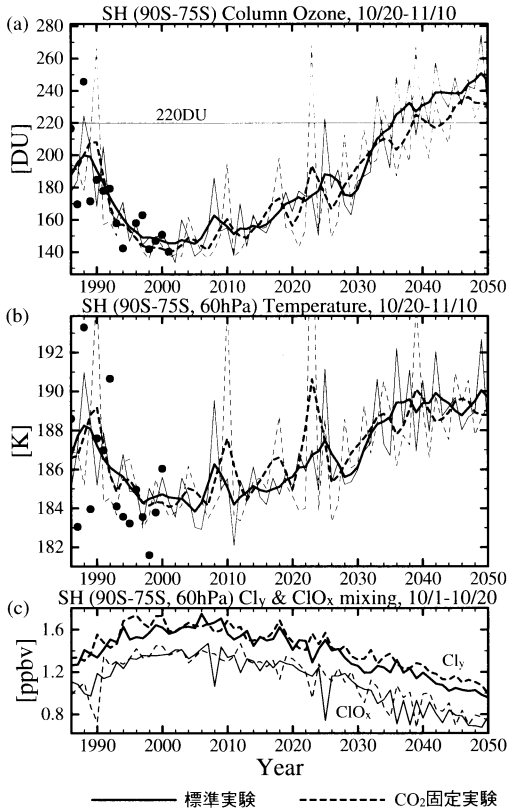


第2図 実験に用いたGHGsとオゾン破壊物質の境界条件時系列。各数値は世界気象機関(WMO)のオゾン減少に関する報告書(WMO, 1999)の第12章を参考にした。CO<sub>2</sub>に関しては全球一様な混合比の値を表しており、CO<sub>2</sub>以外の成分に関しては地表面混合比の値を示した。CO<sub>2</sub>以外の成分の地表面以外の分布は計算によって求める。

離反応・不均一反応(PSCs及び硫酸エアロゾル上)を用いて、第1表にある33種類の化学成分の3次元分布を計算する事が出来る。また、PSCs量はモデル中で計算された気温、水蒸気量、硝酸蒸気量を用いて計算される。ただし、成層圏の過乾燥を防ぐため、モデル中の成層圏水蒸気量は、UARS(Upper Atmosphere Research Satellite)の観測値に同化させている。水平分解能はT21(経度×緯度=5.6°×5.6°)であり、鉛直方向の領域は地表面から約80 kmで、その領域を34層に分割して計算を行う。

この化学気候モデルを用いて、異なる強制条件の下で行った2つの65年間積分(1986年から2050年を想定)の結果を紹介する(Nagashima *et al.*, 2002)。1つは標準実験であり、第2図に示したGHGsとオゾン破壊物質の境界条件を外部強制として与えるとともに、GHGs増加に伴う海面水温の変化も与えた(CCSR/NIES 大気海洋結合モデルを用いた、等価CO<sub>2</sub>濃度の1%漸増温暖化実験で計算された海面水温;阿部, 1997)。もう1つの実験(CO<sub>2</sub>固定実験)では、オゾン破壊物質(及びCH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O)の時系列は与えるものの、CO<sub>2</sub>及び海面水温については1986年レベルの値を実験期間中使用し続ける事とした。従って、標準実験とCO<sub>2</sub>固定実験の比較によりCO<sub>2</sub>の増加及び海面水温の変化が成層圏オゾン層に及ぼす影響を議論することが出来る。以下、両極域の計算結果について示す。

第3図(a)は、南極域でのオゾンの減少が最も激しい期間(10/20~11/10)の南緯75度以南で平均したオ



第3図 南緯75度以南で平均した各量の時系列。(a)10/20から11/10で平均したオゾン全量。黒丸は9/20から10/10で平均したTOMSのオゾン全量。(b)10/20から11/10で平均した60 hPa 気温。黒丸は同期間で平均したNCEP/NCAR再解析データの60 hPa 気温(10 K 差し引いて表示)。(c)10/1から10/20で平均した60 hPaにおけるCl<sub>y</sub>とClO<sub>x</sub>の混合比。(a),(b)の細線は各年のデータであり、太線は5年移動平均。(c)の太線はCl<sub>y</sub>、細線はClO<sub>x</sub>の各年のデータ。各図で、実線は標準実験の結果、点線はCO<sub>2</sub>固定実験の結果である(Nagashima *et al.*, 2002より)。

ゾン全量の時系列である。図中黒丸で示したのは、TOMS(Total Ozone Mapping Spectrometer)の観測データから計算した同様の量である。先ず標準実験の結果を見てみると、計算されたオゾン全量値は観測データの存在する期間で、ほぼ TOMS データの変動範囲内に納まっており、減少率もほぼ同様である事が分かる。ただし、モデルの平均をとった期間は、TOMSの平均をとった期間(つまり実際の大気でオゾン減少の最も激しい期間: 9/20~10/10)に比べて1か月遅

い。これは、モデル大気中の極渦が現実大気に比べて持続性が強く、そのためオゾン破壊過程が遅くまで続く事に起因しており、多くの中層大気モデルに共通の問題となっている(Pawson *et al.*, 2000)。モデルで計算されたオゾン全量の長期傾向の特徴は次のようにまとめられる。

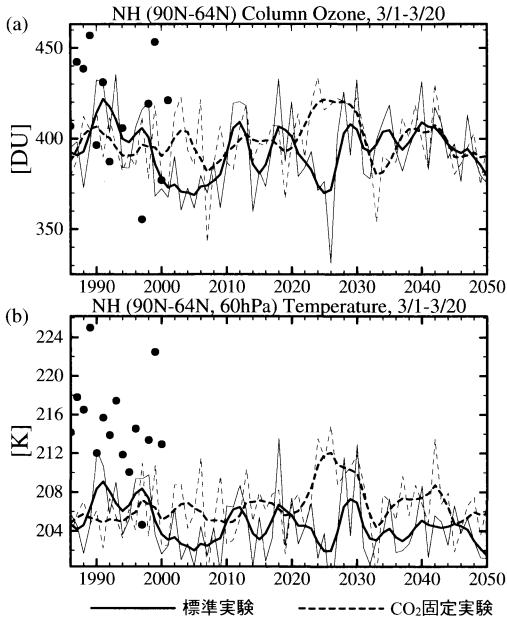
① 1986年から2000年にかけては、ほぼ一様な減少傾向を示す。減少量は15年間で約60 DUであり、2000年のオゾン全量の最小値は約140 DUである。

② 2015年位までは微増しながらも、オゾン全量の値は低レベル(150 DU程度)で推移する。

③ 2010年代後半からオゾン全量の回復が本格化し、2030年代後半には、南極オゾンホール発生以前の典型的なオゾン全量の最小値とみなせる220 DUを上回る値にまで回復する。

先に紹介した Shindell *et al.* (1998) の結果とは異なり、同様な長期傾向がCO<sub>2</sub>固定実験においても見ることが出来る。つまり、標準実験ではCO<sub>2</sub>増加及びそれに伴う海面水温の変動が強制条件として考慮されているため、CO<sub>2</sub>固定実験に比べて成層圏気温が低下し、PSCsの生成量が多くなり、Shindellらが指摘したようなより大きなオゾン減少やオゾンホール回復の遅れが計算される可能性があった。しかしながら、最もオゾン数密度が高い下部成層圏での気温の長期変動傾向は両実験間で殆ど差の無いものであり(第3図b)、従ってオゾン全量の長期傾向にも両実験で顕著な差が見られなかったのである。これは、CO<sub>2</sub>増加及び海面水温の変動が南極オゾンホールの将来には殆ど影響を与えない事を示している。また、第3図cに見られるように、南極域下部成層圏のCl<sub>y</sub>及びClO<sub>x</sub>の混合比は、第1図に示したオゾン破壊物質の強制条件を反映して、1986年から2005年位まで増加を続け、それ以降は緩やかに減少している。このように、下部成層圏での塩素量は丁度オゾン全量の長期傾向と同期し、かつ逆相関するような長期傾向を示す。この事は、南極オゾンホールの長期傾向を主導しているのは、下部成層圏における塩素量であり、GHGs増加に伴う効果は殆ど無い事を強く示唆している。

一方、北極域春季におけるオゾン全量は、第4図aから分かるように顕著な長期傾向を示さない。標準実験の1986年から2010年にかけては、統計的に有意なオゾン全量の減少が計算されており、同時に下部成層圏気温にも有意な低温化傾向が現れるが(第4図b)、この期間中最も低い気温を記録した幾つかの年におい



第4図 北緯64度以北で平均した各量の時系列。(a), (b) 第3図 (a), (b)と同様。ただし3/1から3/20で平均を取った (TOMS, NCEP についても同じ期間の平均) (Nagashima *et al.*, 2000の Fig. 3を一部改変)。

でも局所的なオゾン全量の最低値は240 DU程度であり、南極オゾンホール中で観測される200 DUを下回るような大規模オゾン破壊は計算されなかった。また、2010年以降は両実験とも年々変動が卓越し、顕著な長期傾向を見出すことは出来ない。つまりこの実験からは、年々変動が卓越する北極域においては、GHGs増加や海面水温の変動が原因となって南極オゾンホールのような大規模オゾン破壊が起こるという状況は実現しにくいと結論される。

#### 4. 他モデルとの比較

以上のような CCSR/NIES 化学気候モデルによる我々の計算結果を含め、Executive Summaryにある極域のオゾン層将来見通しのベースとなった化学気候モデルの計算結果の相互比較や各モデルの詳細に関しては、Austin *et al.* (2002) にまとめられている。第2表に、同論文で比較検討されている各化学気候モデルの概要をまとめた。各モデルを用いて実施された実験には大きく分けて2種類ある。1つは CCSR/NIES モデルが行ったような長期連続実験 (transient run) であり、他方は時間断面実験 (time-slice run) である。

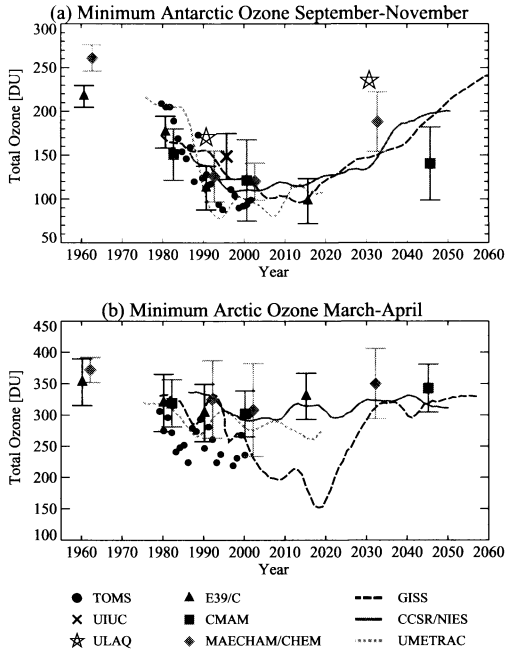
第2表 Austin *et al.* (2002) で相互比較された化学気候モデル。積分期間の表示で、CMAM, MAECHAM/CHEM, E39/C, UIUC, ULAQ に関しては、時間断面実験の (境界条件を想定した年) × (積分年数) という形式で表示。

モデルの名称	開発機関 [reference]	積分期間
UMETRAC	英国気象局 (英) [Austin, 2002]	1979-2020
CMAM	ヨーク大学 (加) [de Grandpre <i>et al.</i> , 2000]	1980, 2000, 2045 × 12
MAECHAM/CHEM	マックス・プランク研究所 (独) [Steil <i>et al.</i> , 2002]	1960, 1990, 2000, 2030 × 22
E39/C	ドイツ航空宇宙センター (独) [Schnadt <i>et al.</i> , 2002]	1960, 1980 × 22 1990, 2015 × 20
UIUC	イリノイ大学 (米) [Rozanov <i>et al.</i> , 2001]	1995 × 15
CCSR/NIES	東京大学/国立環境研究所 (日) [Nagashima <i>et al.</i> , 2002]	1986-2050
GISS	ゴダード宇宙科学研究所 (米) [Shindell <i>et al.</i> , 1998]	1959-2070
ULAQ	ラクイラ大学 (伊) [Pitari <i>et al.</i> , 2002]	1990 × 20 2030 × 5

時間断面実験とは、ある年を想定した各種境界条件の下でモデルを何年か走らせてその境界条件に対する平衡状態を求め、それを他の年を想定した平衡状態と比較し、その差を用いて両境界条件間の違いが成層圏オゾンに及ぼす影響を議論しようとするものである。

さて、第5図aに示したのは、各モデルが計算した、南極域の9月から11月におけるオゾン全量最小値の時系列である。連続実験に関しては各年における最小値から計算された10年移動平均値のみが示されており、時間断面実験に関しては平均値と標準偏差の2倍の値が示されている。図中の黒丸はTOMSデータによるオゾン全量最小値の時系列であり、1980年から2000年にかけては大体どのモデルでもTOMSデータに見られる一様な減少傾向を再現出来ている事が分かる。この減少傾向は、CCSR/NIESやUMETRACでは2000年頃までで底を打ち以後は若干の増加傾向を示すが、GISSとE39/Cでは逆に2010年頃まで減少傾向が持続されている。2020年よりも先を計算しているモデルの結果は全て2000年代に比べてオゾン全量が回復している。回復の速さにモデルによる違いはあるが、GISSとCCSR/NIESの2つの連続実験の結果は、2035年から2045年にかけての時期に1980年レベルの値に回復している、という部分では一致している。

一方、第5図bは北極域の3月、4月におけるオゾン全量最小値の時系列である。全てのモデルでTOMSデータに比べると50 DU程度の過大評価が見られる。また、1980年から2000年においてTOMSデータに見られる減少傾向が多くモデルでも見られる



第5図 (a) 各モデルが計算した9月から11月の期間における南緯60度以南でのオゾン全量最小値の時系列。各モデルの名称については第2表を参照。実線は長期連続実験の各年における最小値から計算した、ガウス重み付きの11年移動平均値である。ULAQ以外の時間断面実験については、各年の平均値と $2\sigma$ の値が示されており、ULAQに関しては平均値のみが示されている。なお、同じ年の計算結果が2つある場合(1960, 1980, 1990, 2000, 2030)は、見易いようにいずれかを2年ずらして示している。黒丸はTOMSの観測データから求めたオゾン全量の各年における最小値である。(b) 3月、4月における北緯60度以北での(a)と同様の時系列(Austin *et al.*, 2002のFig. 9, Fig. 10より作成.)

が、統計的な有意性は無い。2000年から先は多くのモデルで長期的に顕著な変動が見られない。ところが、GISSでは2000年代、2010年代に顕著にオゾン全量が減少し、10年移動平均値で見て200 DUを下回るような状況が計算されている。一方、E39/Cでは若干ながら2015年のオゾン全量値が1990年の値を統計的に有意に上回っている。これは、成層圏塩素量の減少に加えて、GHGs増加に伴う惑星波動の鉛直伝播の増加がもたらしたオゾンの増加である。

## 5. まとめと今後に向けて

上記のような各化学気候モデルを用いた計算結果は、Executive Summaryにおいて次のようにまとめられている。

- ・南極春季のオゾン量は、成層圏ハロゲン量の減少に応じて2010年までには増加に転じる
- ・北極域のオゾン破壊は年々変動が非常に激しく、将来の推定は難しいが、南極のように“北極オゾンホール”ができる可能性は低い。
- ・全球的なオゾン層の回復は、主に成層圏ハロゲン量の変化に規定されるが、その他の要素( $\text{CH}_4$ や $\text{N}_2\text{O}$ の変化、成層圏の寒冷化、物質輸送の変化)が何らかの影響を与えることも考えられる。

このように、全体に定性的な記述になっており、将来予測結果としては物足りない面があるかもしれない。しかし、このような結果をもたらした化学気候モデルは、現時点で最も進んだ力学・放射・化学結合系の取り扱いを含んでおり、上のような成層圏オゾン層の将来見通しは現時点で最も信頼の置ける結果と言える。

勿論、さらに考慮すべき点は残っている。先ず、近年その存在が明らかになってきた成層圏水蒸気量の増加傾向(Kley *et al.*, Ed., 2000)が、どのモデルでも再現出来ておらず(過小評価している)、これが成層圏オゾンの将来に及ぼす影響に関しては評価出来ていない事が挙げられる。成層圏水蒸気量の増加は、GHGsの増加と同様の理由で成層圏を低温化させると考えられ、これが各化学反応の速度に影響し結果的にオゾン分布に変化を及ぼす可能性がある。また、水蒸気は化学反応過程に様々な影響を及ぼすHOx系化学物質のソースであり、PSCsの生成量にも影響を及ぼすため、成層圏水蒸気量の増加がオゾンに及ぼす影響を評価するのは簡単ではない。更に、水蒸気の増加をもたらすメカニズムそのものが良く分かっておらず、今後どれだけ増加するのかも含めて、大きな課題として残されている。また、中層大気モデルが計算する南極渦の強さに依然として問題が残されており、「そんなモデルで計算した結果に意味はあるのか？」という批判は常に付いて回る。その批判は甘受し、例えば非定常重力波パラメタリゼーションの導入やモデルの高分解能化を進めて、中層大気モデルの力学場の改善を図る事が重要であろう。

北極域の将来推定に関して、今回紹介した化学気候モデルの多くがやや楽観的な将来像を示したわけであ

るが、この結果をより確実に検証するためには、更なる計算結果の蓄積が必要である。そもそも、北極オゾンの将来推定は、今後の北半球成層圏の循環場を推定するという面を多分に持つ。今後の北半球成層圏の循環に影響を及ぼさうる要因として、GHGs増加及びそれに付随する海面水温変動や対流圏循環の変化、太陽活動の変化、または気候系が持つ内部的な変動の影響などが考えられる。これらに対する各モデルの応答をより詳しく検証するためには、アンサンブル計算等、今より更に計算量を増やし、統計的な処理を行うことが不可欠である。幸い、計算機や計算手法の開発が進み、化学気候モデルの高速化も今後ますます期待されている所である。

## 謝 辞

CCSR/NIES 化学気候モデルの開発にあたっては、地球フロンティア研究システムの滝川雅之氏、国立環境研究所の秋吉英治氏に多大なご協力を頂いた。また、英国気象局の J. Austin 氏をはじめ、Austin *et al.* (2002) の共著者一同には本稿の第 5 図の使用を許可して頂き、多くの助言を頂いた。国立環境研究所の中根英昭氏には、本稿の執筆を助めて頂き、多くの有益な助言を頂いた。第 5 図の作成には筑波大学の望月茂徳氏の協力を仰いだ。ここに記して感謝する。

## 参 考 文 献

阿部彩子, 1997: 大気海洋結合モデルによる温暖化等の気候変動研究, 第 9 章, 気候研究の最前線, 気候システム研究叢書 No. 2, 東京大学気候システム研究センター, 117-130.

Anderson, J., J. M. Russell III, S. Solomon and L. E. Deaver, 2000: Halogen Occultation Experiment confirmation of stratospheric chlorine decreases in accordance with the Montreal Protocol, *J. Geophys. Res.*, **105**, 4483-4490.

Austin, J., 2002: A three-dimensional coupled chemistry-climate model simulation of past stratospheric trends, *J. Atmos. Sci.*, **59**, 218-232.

Austin, J., D. Shindell, S. R. Beagley, C. Brühl, M. Dameris, E. Manzini, T. Nagashima, P. Newman, S. Pawson, G. Pitari, E. Rozanov, C. Schnadt and T. G. Shepherd, 2002: Uncertainties and assessments of chemistry-climate models of the stratosphere, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, **2**, 1097-1130.

de Grandpré, J., S. R. Beagley, V. I. Fomichev, E. Griffioen, J. C. McConnell, A. S. Medvedev and T.

G. Shepherd, 2000: Ozone climatology using interactive chemistry: Results from the Canadian Middle Atmosphere Model, *J. Geophys. Res.*, **105**, 26475-26491.

Kley, D., J. M. Russell III and C. Phillips Ed., 2000: SPARC Assessment of Upper Tropospheric and Stratospheric Water Vapor, WCRP-113, WMO/TD No. 1043, available online from <http://www.aero.jussieu.fr/~sprac>.

Montzka, S. A., J. H. Butler, R. C. Myers, T. M. Thompson, T. H. Swanson, A. D. Clarke, L. T. Lock and E. W. James, 1996: Decline in the tropospheric abundance of halogen from halocarbons: Implications for stratospheric ozone depletion, *Science*, **272**, 1318-1322.

Nagashima, T., M. Takahashi, M. Takigawa and H. Akiyoshi, 2002: Future development of the ozone layer calculated by a general circulation model with fully interactive chemistry, *Geophys. Res. Lett.*, **29**(8), 3.1-3.4.

Numaguti, A., M. Takahashi, T. Nagajima and A. Sumi, 1995: Development of an atmospheric general circulation model, in *Climate system dynamics and modeling*, edited by T. Matsuno, Report of A New Program for Creative Basic Research Studies: Studies of Global Environmental Change with special reference to Asia and Pacific Regions, vol I-3, pp1-27, Center for Climate System Research, University of Tokyo.

Pawson, S., *et al.*, 2000: The GCM-Reality Inter-comparison Project for SPARC (GRIPS): Scientific issues and initial results, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **81**, 781-796.

Pitari, G., E. Mancini, V. Rizi and D. T. Shindell, 2002: Impact of future climate and emission changes on stratospheric aerosols and ozone, *J. Atmos. Sci.*, in press.

Rozanov, E. V., M. E. Schlesinger and V. A. Zubov, 2001: The University of Illinois, Urbana-Champaign three-dimensional stratosphere-troposphere general circulation model with interactive ozone photochemistry: Fifteen-year control run climatology, *J. Geophys. Res.*, **106**, 1-22.

Schnadt, C., M. Dameris, M. Ponater, R. Hein, V. Grewe and B. Steil, 2002: Interaction of atmospheric chemistry and climate and its impact on stratospheric ozone, *Clim. Dyn.*, **18**, 501-517.

Shindell, D. T., D. Rind and P. Lonergan, 1998: Increased polar stratospheric ozone losses and

delayed eventual recovery owing to increasing greenhouse-gas concentrations, *Nature*, **392**, 589-592.

Steil, B., C. Brühl, E. Manzini, P. J. Crutzen, J. Lelieveld, P. J. Rasch and E. Roeckner, 2002: Interactive chemistry-climate modeling of the middle atmosphere, Part 1: Present conditions, validation with 9 years of HALOE/UARS satellite data, *J. Geophys. Res.*, submitted.

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.

World Meteorological Organization (WMO), 1999: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998, Global Ozone Research and Monitoring Project, Rep. No. 44, Geneva, Switzerland.



## 計算科学技術活用型特定研究開発推進事業 (ACT-JST) 研究開発終了シンポジウム

理論・実験に次ぐ第三の科学技術と呼ばれている「計算科学技術」を活用した研究開発課題を募集・推進している。今般、平成11年度採択4課題が2002年9月末で研究開発を終了し、平成12年度採択4課題が2003年3月末で3年間の研究開発期間を終了する。そこで、各課題の研究開発内容並びにこれまでに得られた成果を報告。

**研究開発分野:** ①物質・材料分野 ②生命・生体分野  
③環境・安全分野 ④地球・宇宙観測分野

**日 時:** 2003年1月29日(水) 13:00~19:00

**会 場:** 日本科学未来館

**参加費:** 無料 (レセプションは有料)

**申込締切:** 1月23日(木) 予定

**主 催:** 科学技術振興事業団

**問い合わせ先:** 「ACT-JST シンポジウム事務局」  
(財) 日本科学技術振興財団 振興部

〒102-0091 東京都千代田区北の丸公園2番1号

Tel: 03-3212-2454, Fax: 03-3212-0014

E-mail: actjst@jsf.or.jp

URL: <http://ppd.jsf.or.jp/shinko/actjst/>