

[共同研究成果]

大気大循環・化学輸送結合モデルによる成層圏オゾン再現実験

宮崎 和幸 岩崎 俊樹

東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

東北大学では気象庁・気象研究所と共同で、大気大循環・化学輸送結合モデルを開発している。特に、結合モデルとデータ同化手法を組み合わせ、過去数 10 年の日々のグローバルなオゾン分布を再現し、その変動機構の解明を目指している。このシステムを用いて成層圏オゾンの再現実験を行い、計算されたオゾン分布を衛星観測データと比較した。実験の結果、極渦崩壊時のオゾン分布の激しい変動や、全球分布に関する季節変化も良く再現した。

1. はじめに

オゾンは有害な紫外線から地上の生命を守っている大気中で最も重要な化学種のひとつである。オゾンの約 90 %は成層圏に存在し、紫外から可視領域の太陽放射を吸収する。また、大気の加熱を通して成層圏の温度構造を変化させ、大気大循環に大きな影響を及ぼしている。一方、成層圏オゾンの分布は、輸送過程を通して大気大循環に大きく影響される。特に、下部成層圏ではオゾンの光化学寿命が長く、循環による輸送過程がオゾン分布に決定的な役割を果たしている。また、オゾン分布を決定するもうひとつの要因である化学過程も温度構造の影響を強く受ける。このように、成層圏オゾンの分布は中層大気の化学・放射・力学結合過程によって複雑に変動する。

クロロフルオロカーボンや超高速旅客機から放出される窒素酸化物などの人為起源物質がオゾン分布に影響を与えることが知られている[e.g., Crutzen,1970 ; Molina and Rowland,1974]。人工衛星やゾンデ観測データなどの長期的解析からは成層圏大気の変質傾向が明らかにされ始め、気候変動への影響が懸念されている。近年では、極域での成層圏オゾンの減少(オゾンホール現象)や、全球的なオゾンの減少、気温の低下傾向[WMO,1999]、水蒸気増加[Kley et al., Ed,2000]などの顕著な変動が知られている。これら変動は、人為起源物質の影響に起因する化学・放射・力学過程を介した一連の変動であると考えられているが、その変動機構は明確には理解されていない。このようなオゾン変動機構への理解の不足は、観測により十分な情報を得られないことに起因する。観測データは時間・空間ともに数が十分ではなく、観測データからグローバルな分布を把握することは困難であり、微量成分を含む成層圏大気の変動過程を理解するには限界があると言える。そこで、化学輸送モデルを利用し観測データを補間することによって、オゾンなど成層圏に存在する大気微量成分の3次元分布を再現する実況監視システムが必要とされている。

以上のような状況を踏まえ、気象庁・気象研究所と東北大学では、日々のオゾンの3次元分布を再現し、その変動機構を解明するために、3次元化学輸送モデルを使用した成層圏オゾン実況監視システムを開発している。本稿では、このシステムの概要と、成層圏オゾン再現実験の結果を報告する。

2. 成層圏オゾン実況監視システムの概要

大気大循環モデルと3次元化学輸送モデルを結合し、成層圏オゾン実況監視システムを構築する。3次元化学輸送モデルとは、輸送過程・化学過程の総和としてオゾン等の大気微量成分の3次元分布を計算する数値シミュレーションモデルである。輸送過程の計算には風のデータ、化学過程には気温・気圧のデータが必要である。現在開発中のシステムでは、3次元化学輸送モデルと大気大循環モデルを同時に積分し、大気場のデータを随時供給するオンラインモデルを用いる。大気大循環モデルの全てのタイムステップのデータを使用すると、大気の微細な変動を表現できる。大気大循環モデルには、気象庁と気象研究所が共同開発した全球スペクトルモデルMRI/JMA98 GCM[Shibata et al.,1999]を用いる。大気大循環モデルは、スペクトル法により水平方向に離散化し、球面調和関数を全波数42で三角波数切断する。ガウス格子に変換すると、緯度×経度=128×30の格子点で、水平格子間隔は約2.8°となる。鉛直座標系は、図1に示すように地表面では地形に沿い、対流圏界面付近より上層では気圧座標系をとる。鉛直層は対流圏と成層圏の全域を含む30層とし、モデルの上端は0.4 hPaである。化学輸送モデルでは、大気大循環モデルと同じ解像度で大気微量成分の全球分布を計算する。従って、全球で245760格子点の化学物質の濃度を計算することとなる。

また、大気大循環モデルの大気場を6時間毎の客観解析に近づけるために、ナッジング法と呼ばれる簡単なデータ同化を行う。客観解析データにはNCEP/NCAR再解析データを使用し、東西風、南北風および気温について同化を行う。図2に成層圏オゾン実況監視システムの概念図を示す。

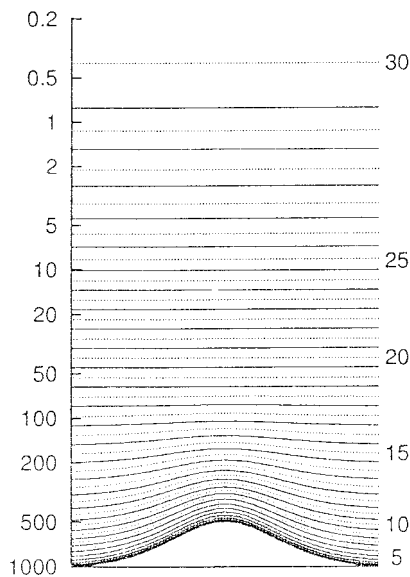


図1 鉛直座標。実線はフルレベル、点線はハーフレベルを示す。左の目盛は気圧(hPa)、右の目盛は高度(km)である。

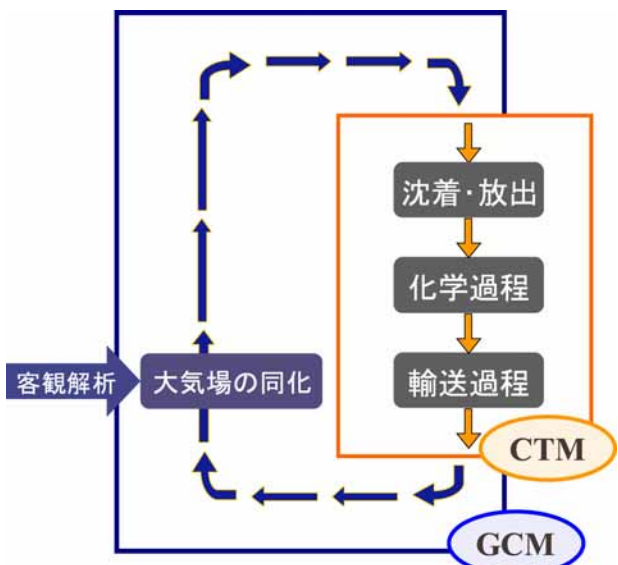


図2 成層圏オゾン実況監視システムの概念図。CTMは化学輸送モデル、GCMは大気大循環モデルを表す。

化学反応計算スキームには米国大気科学研究センター(NCAR)より提供を受けたプログラム[Lefevre et al., 1994]を改良したものをを用いる。酸素系、窒素系、水素系、メタン系、塩素系および臭素系の全部で 39 種類の化学種を扱い、そのうち、化学反応・輸送の積分計算を行う予報化学種(長寿命種)が 25 種類、光化学的な寿命が輸送のタイムスケールよりも十分に小さく、化学平衡を仮定し予報化学種から診断的に濃度が計算される診断化学種(短寿命種)が 14 種類である。モデルで扱う化学種を表 1 に示す。化学反応としては、光化学反応を 23 種類、気相化学反応を 59 種類、極成層圏雲および硫酸エアロゾル上で起こる不均一反応をそれぞれ、5 種類及び 2 種類を扱う。さらに、オゾンの地表面への乾燥沈着過程、HClおよびHNO₃に関しては湿性沈着過程を計算する。輸送計算スキームには、3次元セミラグランジュ法を用いる。計算時間間隔はそれぞれ、大気大循環モデルは 10 分、化学輸送モデルの化学過程は 10 分、輸送過程は 20 分とする。

表 1 モデルで扱う化学種

長寿命種
O _x , NO _y , N ₂ O, NO _x , HNO ₃ , N ₂ O ₅ , CH ₄ , CO, H ₂ O, Cl _x , Cl ₂ , OClO, Cl ₂ O ₂ , ClONO ₂ , HCl, HOCl, H ₂ O ₂ , ClNO ₂ , HO ₂ NO ₂ , ClO _x , BrO _x , HOBr, HBr, BrONO ₂ , PSC(type I and II),
短寿命種
O(¹ D), O(³ O), O ₃ , OH, HO ₂ , N, NO, NO ₂ , NO ₃ , Cl, ClO, Br, BrO, BrCl

3. 成層圏オゾン再現実験

3.1. 2002 年南半球オゾンホール再現実験

3.1.1. 実験の概要

2002 年の 9 月中旬から下旬にかけて、成層圏プラネタリー波動活動に伴い大規模な成層圏突然昇温が発生し、極渦の分裂に伴うオゾンホールの特異的な変動が観測された。このような比較的長時間・空間スケールが小さなイベントについて再現実験を行い、モデルの性能を検証した。極軌道衛星搭載センサ TOMS により観測されたオゾン全量を化学輸送モデルに同化し作成した 2002 年 9 月 5 日のオゾン分布を初期値として、60 日の積分計算を行った。

3.1.2. 結果

2002 年 9 月から 10 月にかけての TOMS の観測およびモデル計算によるオゾン全量値(鉛直積算値)を図 3 に示す。観測値の空白域は観測の欠損を示す。計算開始後 20 日目の 9 月 25 日のオゾン全量について観測とモデルを比較すると、モデルは極渦の分裂に伴うオゾン全量分布の変動を良く再現した。9 月 30 日では、分裂した渦のひとつが消滅する様子も良く再現した。オゾンについては初期条件以降全く観測データを与えていないにも関わらず、計算開始後 45 日目の 10 月 20 日においても、オゾン全量分布は観測と概ね良く一致する。しかし問題点もあり、モデルは極渦外のオゾ

ン全量を若干過小評価し、また、積分期間の後半には極渦内のオゾン全量を過小評価した。

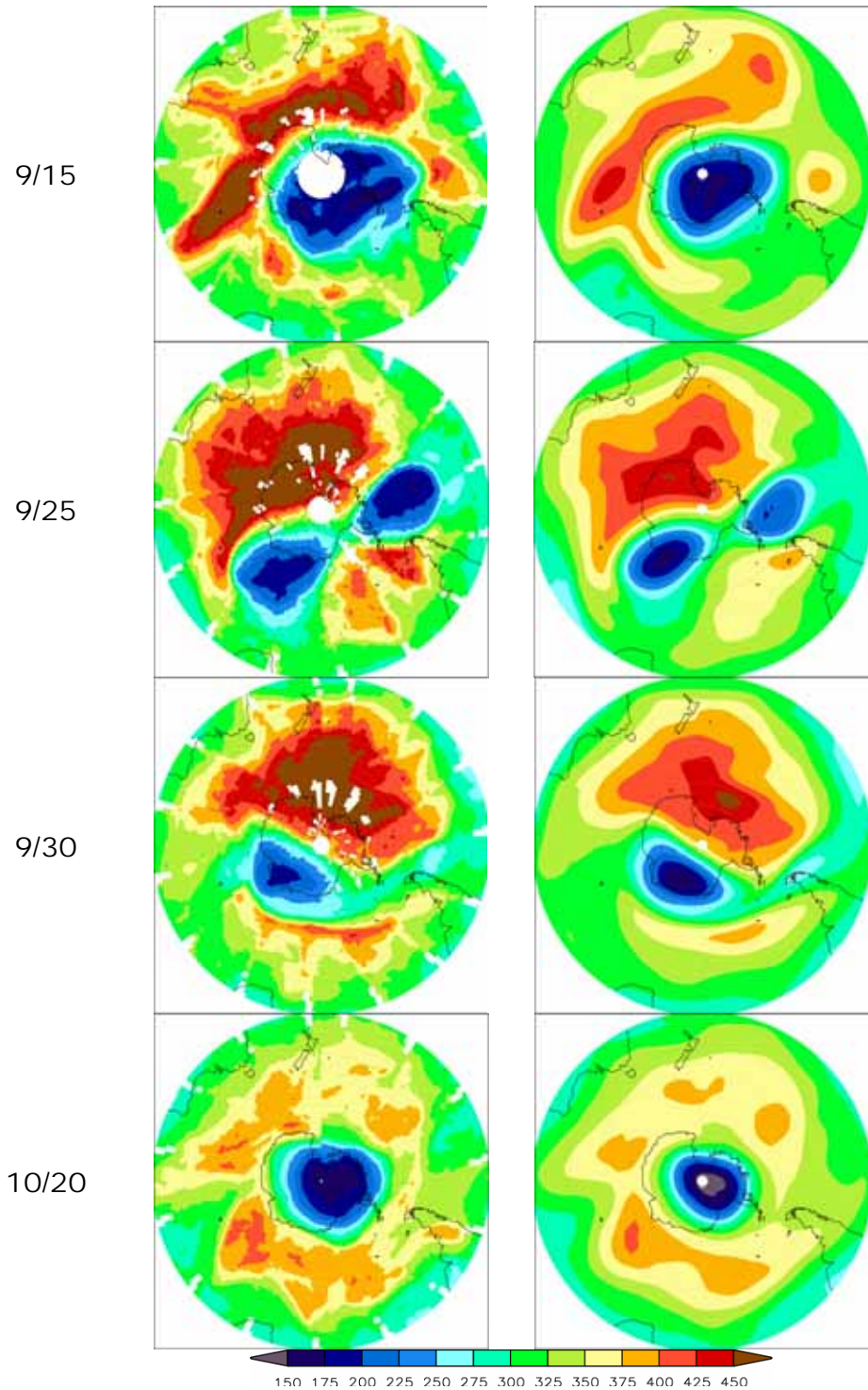


図3 2002年南半球のオゾン全量分布図。単位はDU：標準大気状態で鉛直積算したオゾン量の厚み。(左列) TOMSによる観測値、(右列) モデル計算値。南極上空に存在するオゾンホールが(9/15)、2つに分裂し(9/25)、分裂した一方は中緯度大気との混合により消滅した(9/30)。モデルはこれらの変動を良く再現したが、極渦外のオゾン全量を若干過小評価し、積分期間後半(10/20)では極渦内で過小評価した。

これらオゾン全量の観測との誤差は、大気大循環モデルと客観解析データの気候特性の違いに起因し、大気大循環モデルの成層圏低温バイアスがデータ同化を通して子午面循環を歪めることとなった結果であった。

3.2. オゾン分布の季節変化

3.2.1. 実験の概要

次に、1年間の長期積分を行い、オゾン全量帯状平均値(等緯度線上の東西平均値)の季節変化の再現性を検証した。2次元モデルにより作成された帯状一様な1986年1月1日の各化学種の濃度分布を初期値とし、大気場のみを同化しオゾンの観測値は同化せずに積分を行った。

3.2.2. 結果

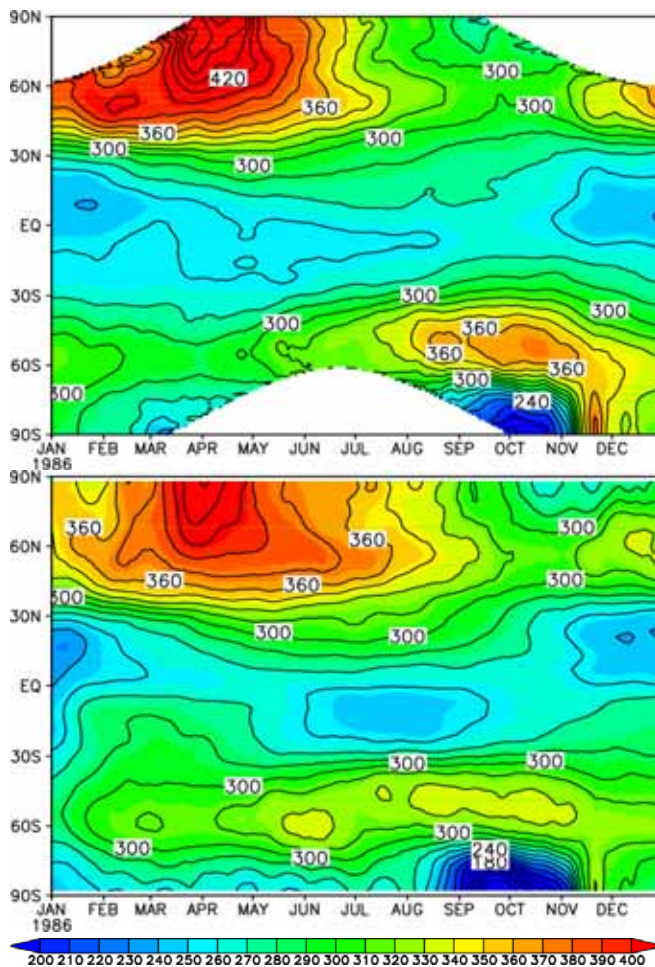


図 4 1986 年の帯状平均したオゾン全量の季節変化。コンター間隔は 15DU。(上) TOMS による観測値、(下) モデル計算値。9 月から 10 月には南極域にオゾンホールが発生し、北半球中高緯度では冬から春にかけてオゾン全量が増加するなど、大まかに観測とモデルは一致する。

TOMS の観測およびモデル計算による帯状平均したオゾン全量の季節変化を図 4 に示す。冬半球中高緯度でのオゾン全量の増加、南半球極域での冬季から春季のオゾン全量の減少など、モデルで計算された季節変化は大まかに観測と一致する。しかし、モデル計算値は両半球ともに冬から春の中高緯度のオゾン全量増加傾向が観測よりも緩やかであった。その結果、モデルは観測と比較して北半球高緯度では最大で約 40DU、南半球中緯度では約 30DU 過小評価した。このオゾン全量の過小評価は、モデルの冬極向きの循環が弱いことに起因すると考えられる。南半球オゾンホールについて比較すると、発生時期・発生緯度帯ともに良く再現しているが、モデルはオゾン全量を最大で 50DU 過小評価した。この誤差は、不均一反応を含む化学過程の計算に問題があるためであると考えられる。赤道域では、定量的には比較的によくオゾン全量を再現したが、北半球夏季に減少傾向であるなど観測と異なる季節変化を示した。

次に、オゾンの鉛直分布を観測と比較する。図 5 は UARS 衛星搭載センサ HALOE および MLS の観測により作成された気候値と、モデル計算による 8 月月平均・帯状平均したオゾン混合比の鉛直断面図を示す。

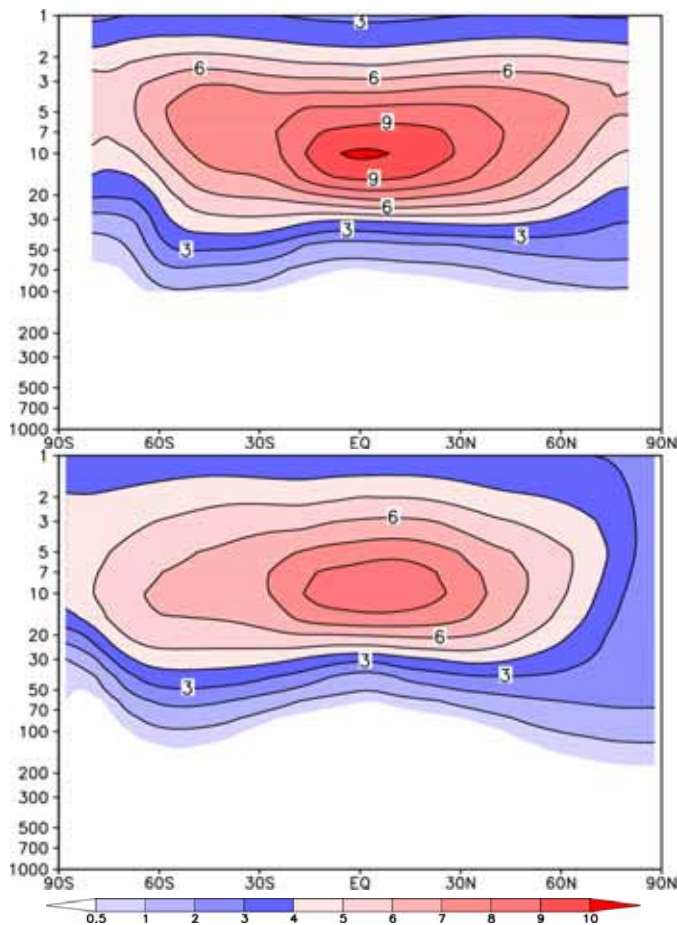


図 5 8 月の月平均、帯状平均したオゾン混合比の緯度-高度断面図。コンター間隔は 1ppmv。(上) UARS 気候値、(下) モデル計算値。

オゾン全量に大きく影響する下部から中部成層圏のオゾン濃度を比較する。赤道域に濃度のピークが位置し、60S 付近を境にする極渦内外ではオゾンの南北緯度勾配が大きいなど、大まかな分布の特徴についてモデルは観測と一致する。しかし、60S 付近（極渦の外）で見られる高オゾン濃度の大気が下部成層圏へ下向き輸送される様子はモデルよりも観測の方が顕著である。また、南極（極渦の中）の下部成層圏ではモデルのオゾン濃度が少なすぎるなど、観測とモデルのオゾンの鉛直分布には違いが見られた。これら下部成層圏のオゾン濃度の誤差は、オゾン全量に関する検証結果と整合するものであった。

4. まとめ

開発中の成層圏オゾン実況監視システムを用いて、成層圏オゾンの再現実験を行った。モデルは数週間程度先まで日々のオゾン分布を精度良く再現し、大気波動活動に伴うオゾン分布の変動も精度良く再現した。長期積分の結果、オゾン分布の季節変化も大まかに再現したが、若干の系統的な誤差を示した。この系統的誤差は、大気大循環モデルと客観解析データの気候特性の違いに起因している。大気大循環モデルの成層圏低温バイアスがデータ同化を通して子午面循環を歪め、その結果、オゾンの再現性にも悪影響を及ぼした。

5. 今後の課題

成層圏オゾンの再現性を向上するためには、大気大循環モデルの改良および大気場の同化手法の高度化を図る必要がある。特に、オゾンのように比較的長寿命の微量成分については平均子午面循環の再現性に注意を払う必要がある。また、化学過程は大変複雑で未解明の部分が多い。最新の知識に基づいて、化学反応モデルを改訂する必要がある。

大気場の気候値や平均子午面循環の再現性は、大気大循環モデルの水平解像度の増加に伴い向上する可能性がある。他方、化学輸送モデルでは、成層圏オゾンの鉛直濃度勾配が急であるため、鉛直解像度を向上し輸送計算精度を高める必要がある。しかしながら、解像度が増加すると、その計算量も膨大となる。研究効率を向上するには、大気大循環モデルの気候特性および化学輸送モデルの輸送計算精度の解像度依存性を調べ、システムの計算精度と経済性を考慮し、最適なシステムのデザインを決定する必要がある。一方で、計算アルゴリズムの改良も必要である。成層圏オゾン実況監視システムでは、特に化学反応計算に多くの時間を費やす。そこで、化学反応計算アルゴリズムの改良を中心として、システムのベクトル化率および並列化率を更に高め計算効率の向上を図りたい。

謝辞：

本研究は、東北大学情報シナジーセンターとの共同研究「気候モデルの高速化に関

する研究」として行われた。ソースコードの SX への移植と高速化については、東北大学情報シナジーセンターに多大な御協力を頂いた。

参考文献：

- [1] Crutzen, P, The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, *96*, 320-325, 1970.
- [2] Molina, M. and F. Rowland, Stratospheric sink for chlorofluoromethanes; chlorine atom-catalysed destruction of ozone, *Nature.*, *249*, 810-812, 1974.
- [3] Kley, D., M. Russell III and C. Phillips, editors, SPARC Assessment of upper tropospheric and stratospheric water vapor, *WCRP-113, WMO/TD No.1043, SPARC report No.2*, 2000
- [4] WMO/UNEP, Scientific assessment of ozone depletion; 1998, *Global ozone research and monitoring project.-Report No.44*, World Meteorological Organization, 1999.
- [5] Shibata, K., H. Yoshimura, M. Ohizumi, M. Hosaka, and M. Sugi, A simulation of troposphere, stratosphere and mesosphere with an MRI/JMA 98 GCM, *Pap. Meteorol. and. Geophys.*, *50*, 15-53,1999
- [6] Lefevre, F., G. P. Brasseur, I. Foskins, A. K. Smith, and P. Simon, Chemistry of the 1991-1992 stratospheric winter: Three-dimensional model simulations, *J. Geophys. Res.*, *99*, 8183-8195, 1994.

略語一覧：

SPARC : Stratospheric Processes And their Role in Climate

WMO : World Meteorological Organization

NCEP/NCAR : National Center for Atmospheric Research/National Centers for Environmental Prediction

TOMS : Total Ozone Mapping Spectrometer

UARS : Upper Atmosphere Research Satellite

HALOE : HALogen Occultation Experiment

MLS : Microwave Limb Sounder

DU : Dobson Unit (オゾン全量の単位。単位断面積を持つ大気柱に存在するオゾンの総量を標準大気状態での高さに換算して 10^{-2} mm単位で表した値。)