

## A-1 衛星データ等を活用したオゾン層破壊機構の解明及びモデル化に関する研究

### (4) 化学輸送モデルによる極渦の物理・化学過程に関する研究

#### ① 化学-放射-力学結合化学輸送モデルによる極渦の物理・化学過程の解明

研究代表者 東京大学気候システム研究センター 高橋正明

環境庁国立環境研究所

|            |                  |           |
|------------|------------------|-----------|
| 地球環境研究グループ | オゾン層研究チーム        | 秋吉英治・中根英昭 |
| 大気圏環境部     | 大気物理研究室          | 菅田誠治      |
| (委託先)      | 東京大学気候システム研究センター | 高橋正明      |

平成8-10年度合計予算額 53,088千円  
(平成10年度予算額 14,235千円)

#### 要旨

極渦内及び周辺のオゾン破壊機構を解明するため、光化学結合 GCM、ナッジング CTM の開発を行った。国立環境研において開発を行った鉛直1次元光化学放射結合モデルの光化学スキーム及び光化学-放射結合スキームを、GCM 用に効率化する作業を行い GCM に導入した。CCSR/NIES GCM では計算できない波長 200nm 以下の紫外線による酸素分子の光解離のパラメタリゼーションの導入、GCM の水平空間分解能の改良なども行いながら、現在までに、O<sub>x</sub>、HO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、ClO<sub>x</sub> に関する気相光化学反応と、硝酸三水和物及び氷晶から成る極成層圏雲上での不均一反応の導入を終えた。モデルの計算結果は、TOMS や UARS によるオゾンや大気微量成分のグローバルな観測結果と比較し、その分布・季節変動の妥当性を得た。また、1997年2月と3月のオゾンと硝酸の分布について、環境庁の開発したセンサー-ILAS によって得られたデータとの比較、及びイギリス・ケンブリッジ大学の CTM の分布との比較を行った。CCSR/NIES GCM ではほぼ妥当な分布は得られたが、オゾン混合比のピーク値が少し大きくピーク高度が少し低いこと、硝酸混合比が少しだけ大きいことなどの食い違いが見られた。食い違っている点については検討して、今後のモデル開発によって改善していく。このモデルにより南極及び北極のオゾン破壊を再現し、中緯度からのオゾン輸送と南極上空での光化学反応により局所的に破壊されるオゾン量との関係を調べた。最後に、オゾン破壊の化学的メカニズムと輸送に関するメカニズムを分離して明らかにするために、GCM に気温と風速の観測値をインプットして同化させる、ナッジング CTM の開発も併せて行った。

#### キーワード

成層圏、オゾン破壊、CCSR/NIES 光化学結合 GCM、CTM、極渦

#### 1. 序

約10年前発見されたオゾンホールは、今や南極大陸を越える大きさに発達するようになった。

一方、南極オゾンホールと同様なオゾン破壊は、規模こそ小さいが北極域にも出現し、さらにしばしば中緯度にも影響を及ぼしていることが明らかとなった。このように、人口が集中し経済の中心となっている地域の、オゾン破壊機構を一刻も早く解明することは、緊急の課題である。しかしながらオゾン濃度は、大気中での輸送過程、光化学生成・消滅過程、太陽放射散乱吸収・地球赤外放射吸収過程等から複雑に影響を受けており、近年極渦内及び極渦周辺で起こっているオゾン変動を、簡単な局所的なモデルで説明することは、ほとんど不可能である。最近の計算機の高速度化により、グローバルな3次元モデルの使用が可能になってきた。また、衛星センサーや地上からの成層圏観測の高度化により、3次元モデルの検証が可能になりつつある。ADEOS衛星のILAS/RISセンサーや関連する地上観測等によって、日本のオリジナルなデータが期待されており、これらのデータと3次元モデルを活用して、オゾン層破壊機構を解明しモデル化することが強く求められている。

## 2. 研究目的

衛星センサーや地上観測から得られるデータと3次元モデル等を用いて、極渦内及び周辺のオゾン破壊機構を解明すると共に、モデルの検証と高度化を行い、オゾン層変動予測モデルの構築に資する。

## 3. 研究方法

CCSR/NIES GCM（東京大学気候システム研究センター／国立環境研究所共同開発の3次元大気大循環モデル）に、国立環境研究所で開発した鉛直1次元光化学放射結合モデルの光化学放射結合スキームを導入し、光化学結合GCMの開発を行う。この3次元モデルを基軸として、化学輸送モデル（CTM）の開発を行い、観測事実との直接比較を行って、オゾン層破壊に対する輸送と光化学の相乗効果に対する理解を深める。さらに、高解像度極渦モデルの開発も同時に行い、極渦内外の空気の混合過程が、中緯度のオゾン変動に及ぼす影響を調べる。

## 4. 結果・考察

### (1) 鉛直1次元光化学放射結合モデルへの臭素系物質の導入

臭素系物質の光化学反応のファミリー法計算スキームの開発を行い、これまで国立環境研究所において開発を行ってきた1次元光化学放射結合モデルに導入した。また、このモデルにすでに導入していたOx、HOx、NOx、CHOx、ClOxに関する計算スキームの改良も行い、新たに必要な光化学反応も追加した。この改良により、総数約150種類の光化学反応が、この1次元モデルの中に取り込まれた。図1には、モデルの定常状態での正午の臭素化合物体積混合比の鉛直分布を示す。これらの臭素系化合物の総量Bryは、ほとんどのハロンガスが光解離してしまう成層圏の中・上部で20pptvとなっていて、現在の大気の状態とよく対応している。図2には、ハロンガスの鉛直分布を示す。ブロロホルム(CHBr<sub>3</sub>)の吸収帯は、他のハロンガスの吸収帯より長波長側にあり、従って低い高度での太陽光吸収が盛んで、対流圏内で混合比の鉛直勾配をもつ結果となった。図3には、これらの臭素系物質をモデルに導入した後、オゾン、二酸化窒素、OH、ClOの濃度が臭素系物質導入前の濃度（混合比）に比べてどのくらい変化したのか、その鉛直分布を示す。臭素系物質導入前の濃度を1として、導入後の濃度をその比率で表している。ハロン

ガスは、フロンガスよりも低い高度で分解するので、対流圏上部から成層圏下部にかけて、これらの物質の濃度に対する影響が大きいことがわかる。臭素系物質の増加によって、オゾン、ClO、OH は、最大5%減少し、二酸化窒素は最大6%増加した。

## (2)光化学結合 GCM の開発

### ①CCSR/NIES 光化学結合 GCM への気相光化学反応の導入

国立環境研究所において開発を行った1次元光化学-放射結合モデルの光化学スキーム及び光化学-放射結合スキームを CCSR/NIES GCM へ導入した。化学過程を導入した GCM の水平空間分解能は T10 (経度及び緯度にして約  $10^\circ$  )、鉛直方向には地表から高度約 70km まで 30 の大気層に分割されている。1次元モデルの化学スキームを3次元モデルへ移植するために行った具体的な作業は、Ox、HOx、NOx、ClOx に関するファミリー法光化学スキームの簡素化及び GCM 放射コードの太陽放射スペクトルの分割に合わせた平均吸収断面積及びその温度依存性の算出とパラメタリゼーションである。吸収断面積のスペクトル平均値が温度依存性を示す場合には、最小二乗法を用いてその温度依存性を、標準温度からの差に関する3次までの多項式で表現し、3次元モデル内での計算が容易に行えるようにした。この3年間で塩素系物質までの気相反応約 60 種類の光化学反応のモデルへの導入を完了した。

### ②CCSR/NIES 光化学結合 GCM の高分解能化と紫外線放射場の改良

光化学結合 GCM の開発の途中で様々な問題にぶつかったが、改良を行い開発を進めた。一つは空間分解能の問題である。水平空間分解能約  $10^\circ$  の T10 モデルでは、再現できる大気中の波動擾乱に限りがあり、極渦付近の比較的細かい構造のオゾン分布などを再現できないので、より細かい空間分解能のモデルが必要である。現在までに T21 (水平空間分解能約  $5^\circ$  ) まで分解能を上げることに成功した。図 4.1 には、この T21 モデルで得られた経度方向に平均したオゾン全量の季節変動を示す。赤道付近のオゾン量と変動、北極域の春の極大、南半球中緯度春のオゾン極大などが、よく再現されていることがわかる。この計算結果は、極成層圏雲上での不均一反応過程を含んでいないので、南極のオゾン全量値は 300 ドブソンユニット程度までしか減少しない。この南極のオゾン減少は、不均一反応過程をまだ取り入れていないモデルで起こったものであり、南極上空へのオゾンの輸送がこの時期少なくなっていることを示している。

二つめは、CCSR/NIES GCM の紫外線放射場の問題である。CCSR/NIES 光化学結合 GCM の母体である CCSR/NIES GCM は、力学放射モデルであり、波長 200nm 以下の太陽放射紫外線は大気の加熱に重要ではないので取り扱われていない。ところが物質の光解離にとっては、200nm 以下の波長の紫外線は無視できるほど小さいとは言えず、特にシューマン-ルンゲ帯と呼ばれる酸素の吸収帯が 175nm から 205nm にあり、中層大気中での酸素の光解離に寄与している。光解離されてできた酸素原子は、酸素分子と結びついてオゾンを生成するので、この吸収帯は少なからずオゾン量に影響を及ぼすものと思われる。1次元モデルを用いた計算により、オゾン全量に対するシューマン・ルンゲ帯の寄与は約 10%あることがわかったので、この寄与を GCM に取り入れることにした。とはいっても、GCM の中でこの波長帯の厳密な放射計算をする部分を新たに付け加えるのは困難なので、Nicolet(1984)による酸素分子のコラム量を用いたパラメタリゼーションを使って、酸素分子のシューマンルンゲ帯における光解離係数を計算した。図 4.2 は、

この吸収帯による寄与をモデルに取り入れることによって、経度平均のオゾン全量が何ドブソンユニット変化したかを表す時間-緯度断面図である。50 ドブソンユニット近い数値もあるが、全体的に見ると7%から15%の増加といえる。Schumann-Runge帯による太陽光吸収により、気温も増加する。図5.1は、CCSR/NIES光化学結合GCMで計算された12月の気温分布である。一方、図5.2はシューマンランゲ帯の光解離パラメタリゼーションを入れたことによる気温の増加である。大部分は50km以上での気温の上昇であるが、冬の北極域の上・中部成層圏でも温度が上昇している。これは、下降流が少し強まったためであろうと思われる。しかしながら、GCMの下部成層圏の気温が観測値に比べて低いというクーリングバイアスの解決にはならなかった。

モデルの計算結果は、TOMSやUARSによるオゾンや大気微量成分のグローバルな観測結果と比較し、その分布・季節変動の妥当性を得た。

### ③CCSR/NIES GCM への不均一反応過程の導入とオゾンホール再現実験

CCSR/NIES GCM に、オゾンホールの出現にとって重要な働きをするタイプI極成層圏雲( $\text{HNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )と、タイプII極成層圏雲(氷晶)上での不均一反応を導入した。計算では、モデル内部で予報した気温と水蒸気とにより、極成層圏雲に対する硝酸蒸気と水蒸気の過飽和度を計算し、飽和に達したときに雲を発生させ、飽和を下回ると蒸発させた。タイプIのものは半径が $1\mu\text{m}$ 、タイプIIのものは半径が $10\mu\text{m}$ と仮定した。重力落下も考慮している。モデルの南極域の冬季から春期にかけて極成層圏雲が現れ、南極の10月のオゾン全量は、240ドブソンユニット以下に減少した(図6)。北極域でも、グリーンランド北東部・スカンジナビア半島北部でオゾンの少ない領域が現れた(図7)。

### ④ILAS データ及びSLIMCAT-CTM アウトプットとの比較

環境庁の開発したセンサーILAS及びケンブリッジ大学のCTM(SLIMCAT)によるオゾンと硝酸の分布と、このモデルの計算結果とを比較した。北極域の極渦が発達して極成層圏雲が存在した1997年2月と3月で、ILASがデータを取得した緯度( $70^\circ\text{N}$ 付近)について、バージョン3.10のデータとの比較を行った。CCSR/NIESモデルのオゾン混合比の最大値は8~9ppmvで、ILAS、SLIMCATの最大値6~7ppmvと比べて少し大きく、ピークが現れる高度はやや低かった。また、硝酸の混合比の最大値は、SLIMCATがいちばん大きく12~15ppmv、次がCCSR/NIESで8~14ppmv、ILASがいちばん小さく8~12ppmvであった。硝酸は極成層圏雲上での不均一反応の影響を受けるため、再現が難しい部分がある。このCCSR/NIES GCMによる計算は、気温や風速のデータを用いた計算ではないので日々の比較は意味をなさないが、全般的には上述したような傾向があり、今後のモデルの改良によりオゾンと硝酸の分布が観測値とよく一致するようになることが期待される。

### (3) ナッジングCTMの開発

以上開発を行ってきたCCSR/NIES光化学結合GCMによる気温と風の分布には、観測値とのずれがある。GCMの成層圏の気温は観測値に比べて全般的に低い。また、GCMはモデル内部で自身の変動を起こすから、その季節変動には年毎に違いがある。これらの変動と実際の気温や風速の毎年のデータとの間には当然差があり、このことが、化学物質の分布の比較によって大気

中で働く光化学反応過程を明らかにしようとする試みの障害となる。なぜなら、化学物質の分布を決める光化学反応過程は気温に敏感である場合が多く、また、別の場所から輸送されてくる効果も同様に重要であるからである。そこで、現実大気の気温や風速データを使いながら、光化学反応と輸送の計算を行う化学輸送モデル(CTM)が必要となってくる。

このような理由から、開発してきた CCSR/NIES 光化学結合 GCM をベースにして、これに気温、東西風速、南北風速のデータをインプットし同化させながら GCM を走らせる CTM の開発を始めた。本課題で開発している CTM は、世界にはすでにくつかあるいわゆる通常の CTM とは異なっている。通常の CTM は、気温、風速、物質の光解離係数の時空間分布をデータとしてあらかじめ準備しておき、そのデータをそのまま使って光化学生成/消滅と輸送の計算を行う。これに対しここで開発している CTM は、GCM を走らせながら気温、東西風速、南北風速のデータを GCM そのものにインプットしてゆき、GCM 内で計算される気温や風速の値をインプットされたそれらの観測データに同化させて修正していくようなものである。しかしながら、GCM で計算された値をいきなり観測値に変えてしまうのでは、値の急激な飛びが生じてモデル内に人工的な振動を生じかねないので、ある緩和時間をもって観測値に近づける。GCM で計算された値を  $x$ 、観測値を  $X$ 、時間を  $t$ 、緩和時間を  $\tau$  で表すと、  
$$dx/dt = -(x-X)/\tau$$

この方法をナッジングという。実験の結果、緩和時間1日で計算を行えば、人工的な振動も起こらず、モデルの中の気温や風速も観測値に近くなることがわかった。風や気温のデータは、1996年の ECMWF データを使った。ただし、ECMWF データは地表から 10hPa までのデータしかないので、3hPa 以上は月平均の CIRA データを線形に時間補間して与えた。3hPa から 10hPa までの間の高度では、データは与えずに緩衝域とした。

図 8.1 と図 8.2 は、それぞれ光化学結合 GCM とナッジング CTM による 7月15日の経度平均された気温の分布である。GCM では、南極上空の7月の気温は 10hPa 付近で 170K 以下に下がるのに対し、ナッジング CTM では 180K 程度であり、入力された観測データが GCM の気温を修正してより現実的な温度分布となっていることがわかる。ナッジング CTM による計算では、南極域で 10hPa から 0.5hPa の高度での南北温度勾配が大きすぎた GCM の分布が改善されて、西風の最大値も 100m/s 程度に押さえられた (図 9.1、図 9.2)。このナッジング CTM によりオゾン全量の季節変動が、赤道域そして特に南極域で改善された。

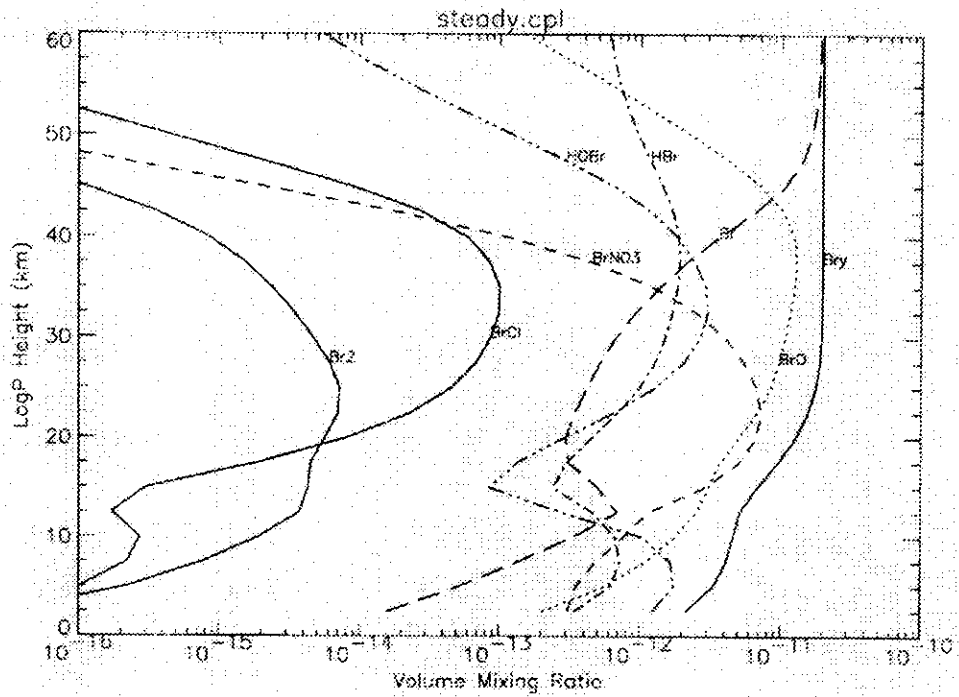


図1：1次元光化学放射結合モデルにより計算された臭素系化合物の正午の混合比の鉛直分布。縦軸は、スケールハイト7kmの対数圧力座標で、ほぼ高度と同じ。

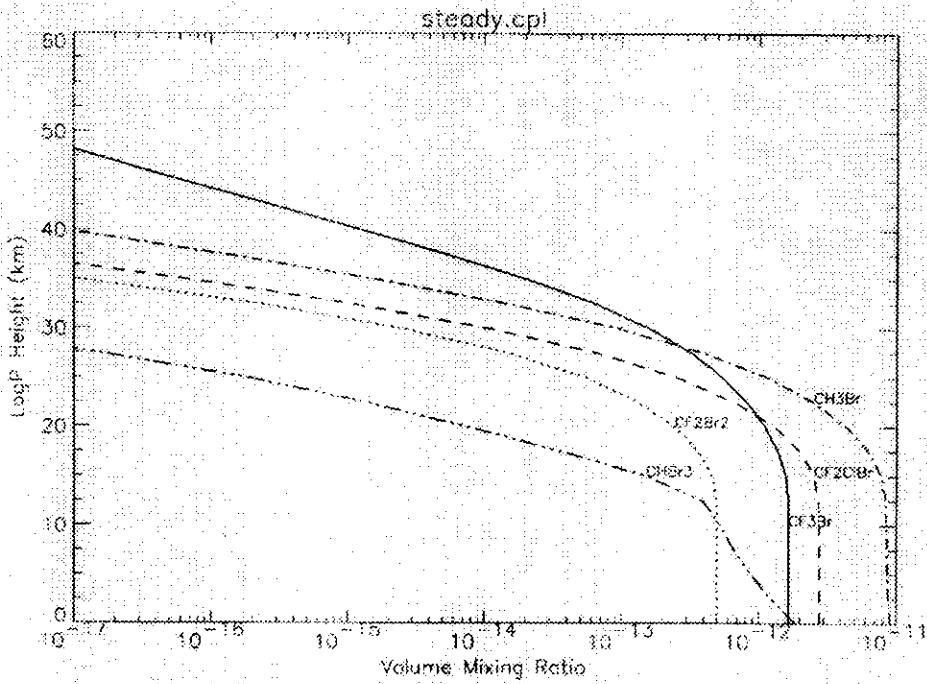


図2：1次元光化学放射結合モデルにより計算された臭素系化合物ソースガスの正午の混合比の鉛直分布。

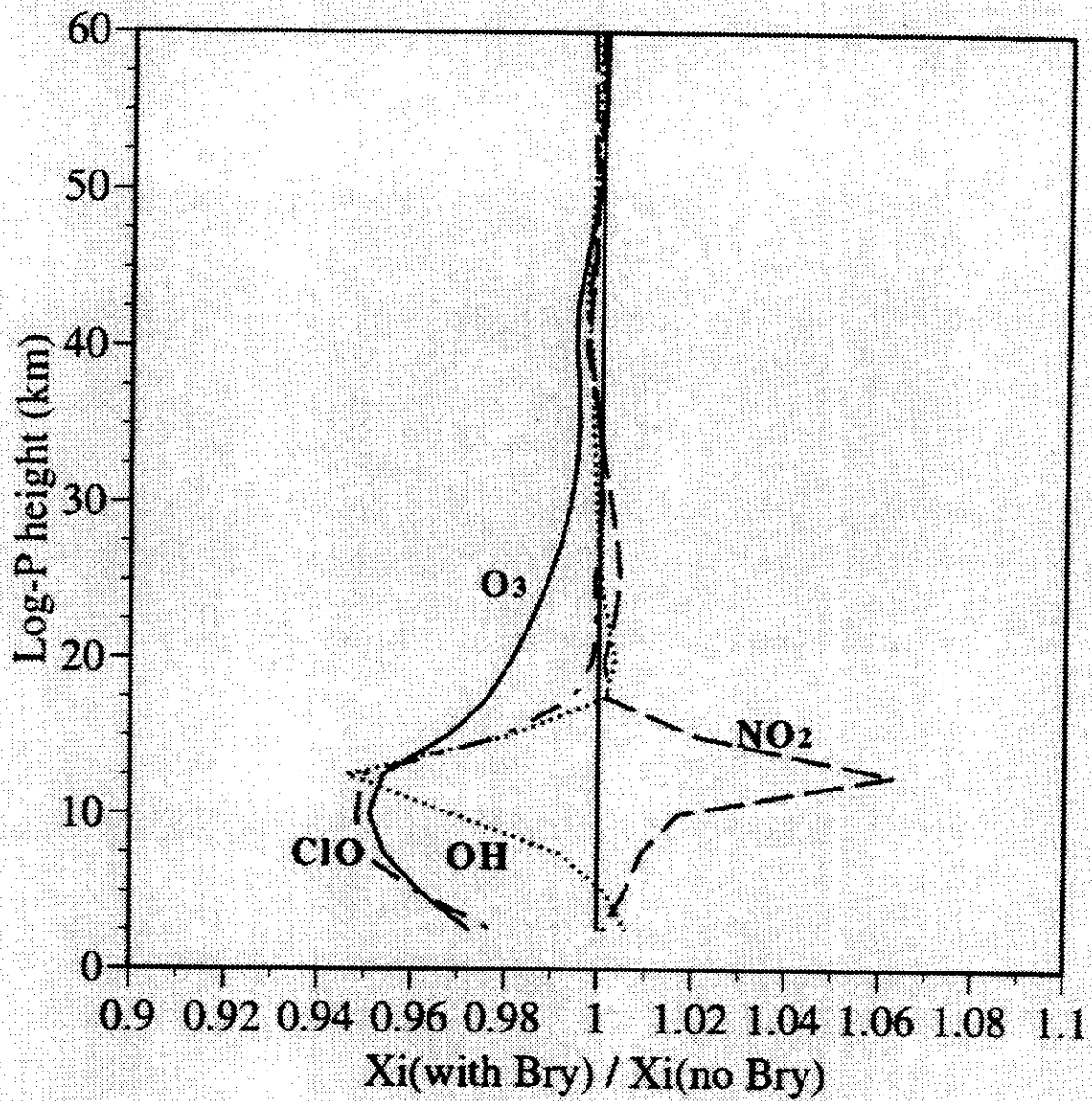


図3：臭素系物質を1次元光化学放射結合モデルに取り入れた後のO<sub>3</sub>、OH、NO<sub>2</sub>、ClOの変化。正午の値の鉛直分布を表す。

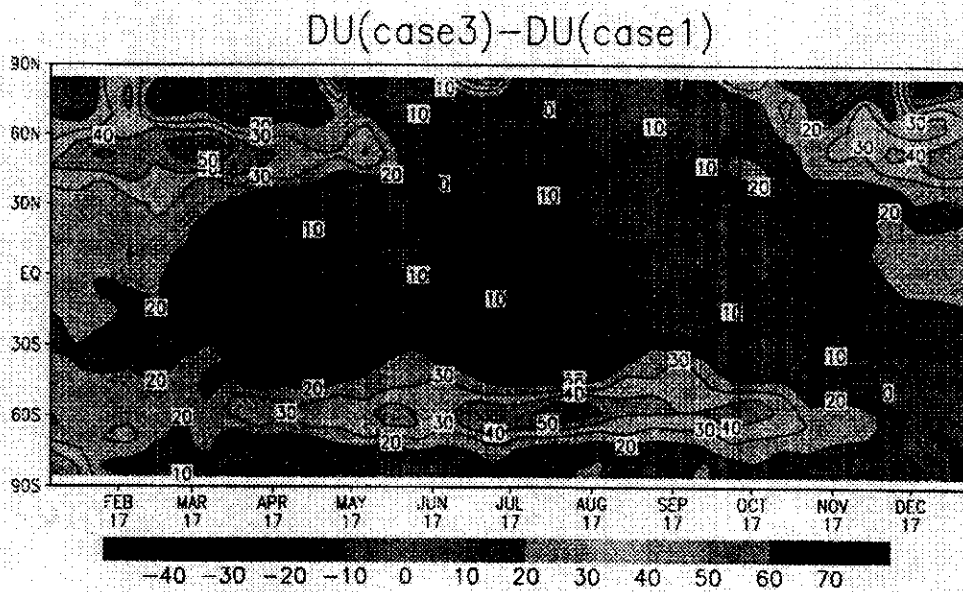
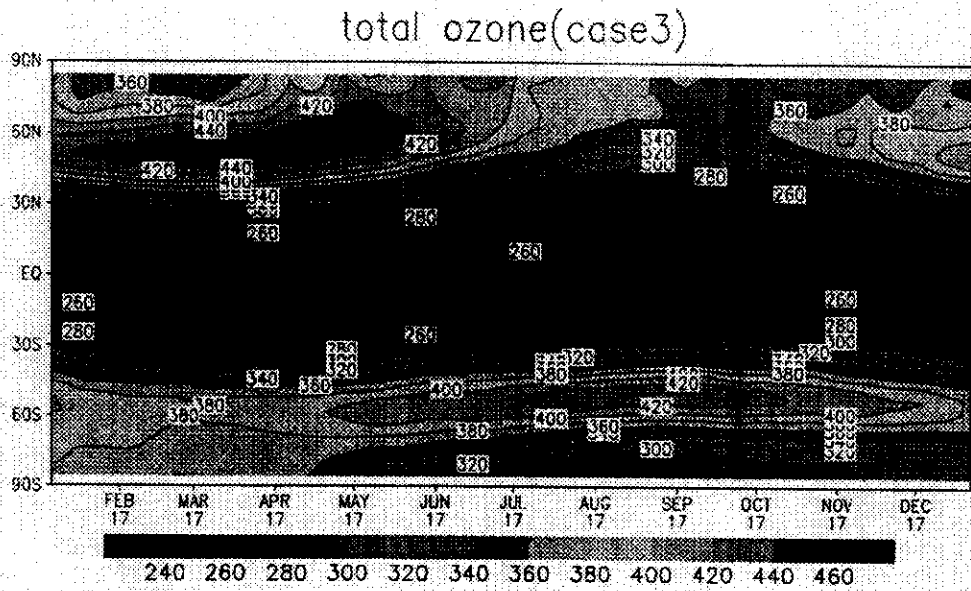


図4.1(上):酸素のSchumann-Runge帯による光解離を導入したCCSR/NIES 光化学結合GCMで計算されたオゾン全量の時間-緯度分布。縦軸は、中央が赤道、上半分が北半球、下半分が南半球を表す。図中の単位はドブソンユニット。

図 4.2 (下): Shumann-Runge 帯の導入によって変化したオゾン全量の時間-緯度分布。



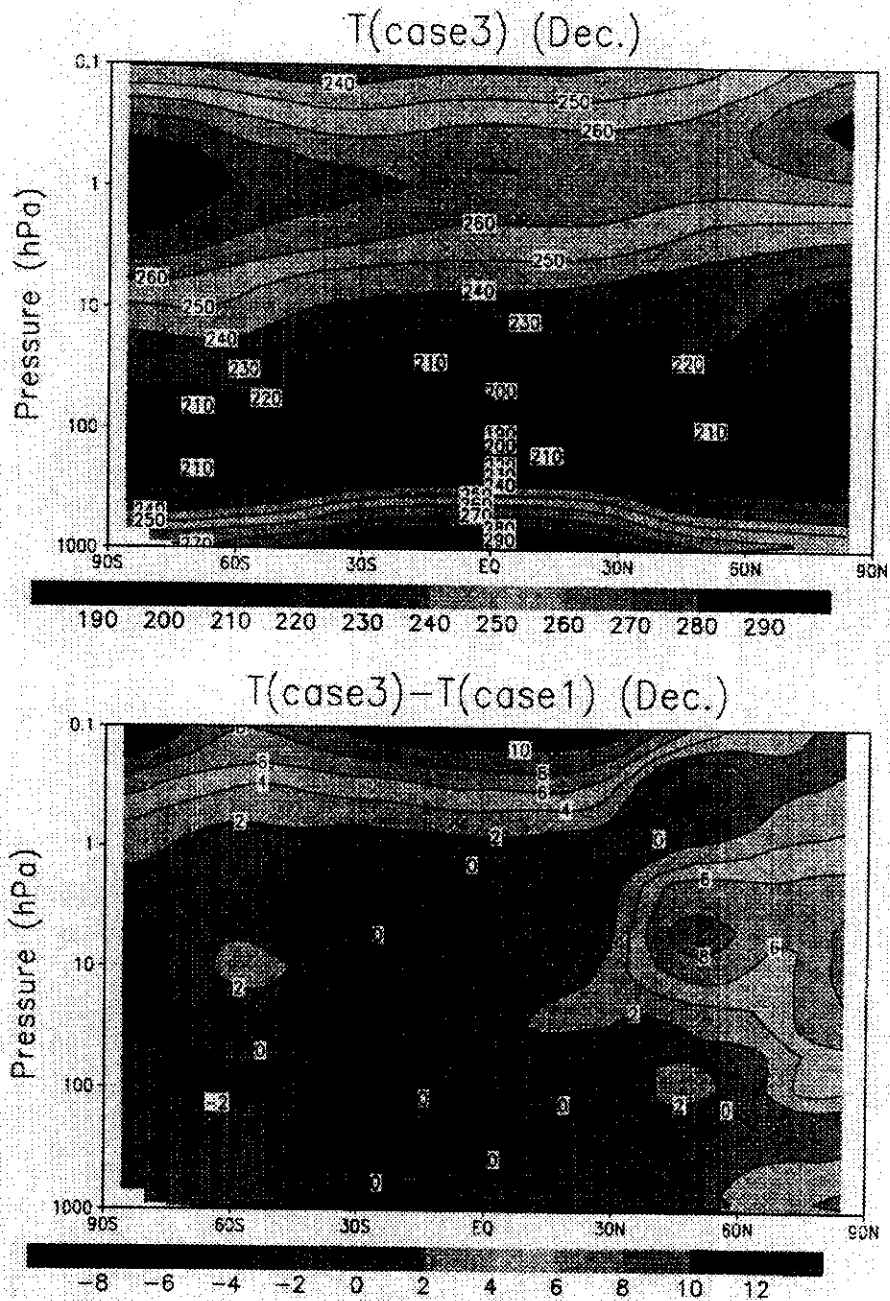


図5.1(上):酸素のSchumann-Runge帯による光解離を導入したCCSR/NIES 光化学結合GCMで計算された12月の気温分布(K)。

図5.2(下): Shumann-Runge帯の導入によって変化した温度 (K)。

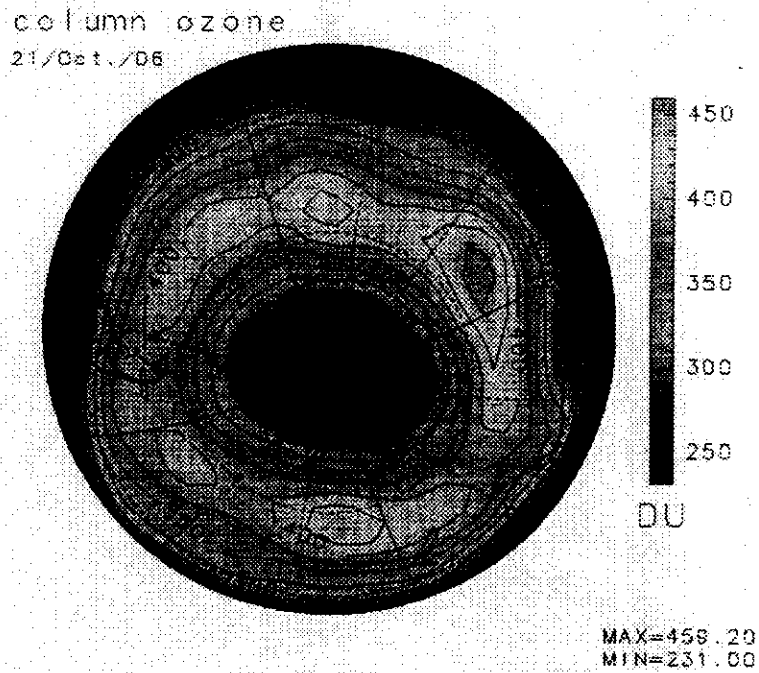


図6：極成層圏雲上での不均一反応を導入したCCSR/NIES光化学結合GCMによって計算された10月の南半球のオゾン全量の分布。単位はドブソンユニット。弱いオゾンホールが再現された。

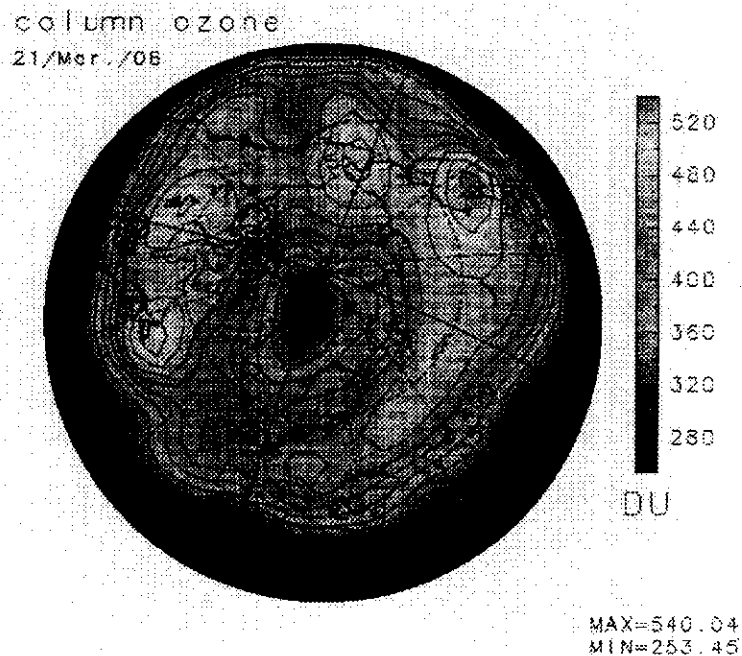


図7：極成層圏雲上での不均一反応を導入したCCSR/NIES光化学結合GCMによって計算された3月の北半球のオゾン全量の分布。単位はドブソンユニット。

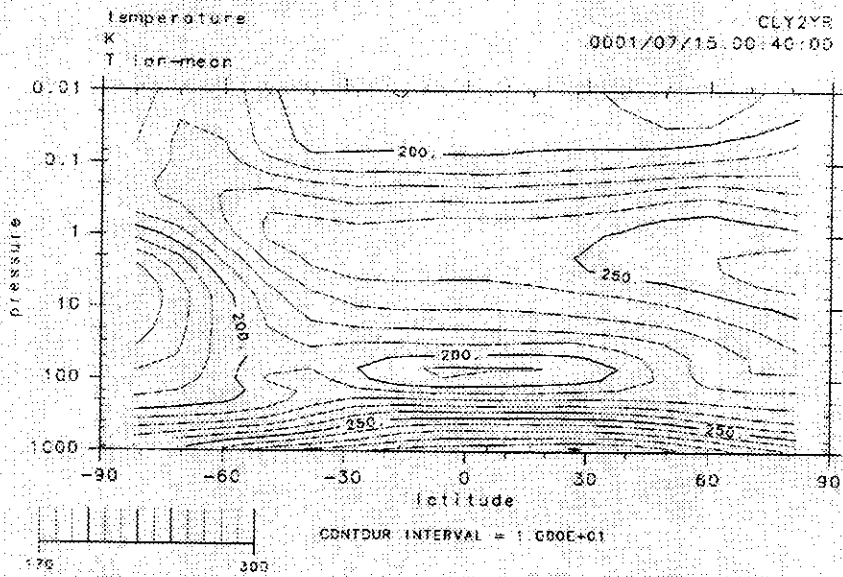


図 8.1 : CCSR/NIES 光化学結合 GCM により計算された、経度方向に平均された 7 月 15 日の気温分布

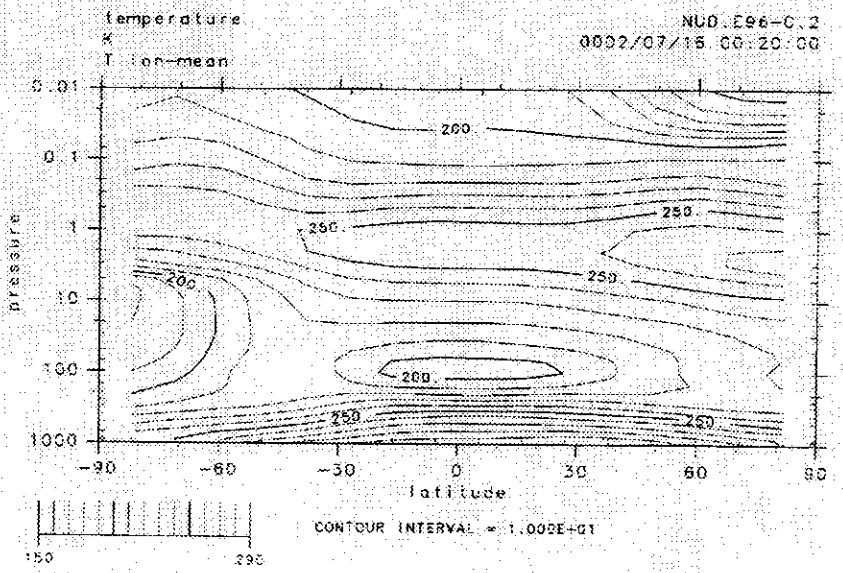


図 8.2 : CCSR/NIES ナッジング CTM により計算された、経度方向に平均された 7 月 15 日の気温分布。

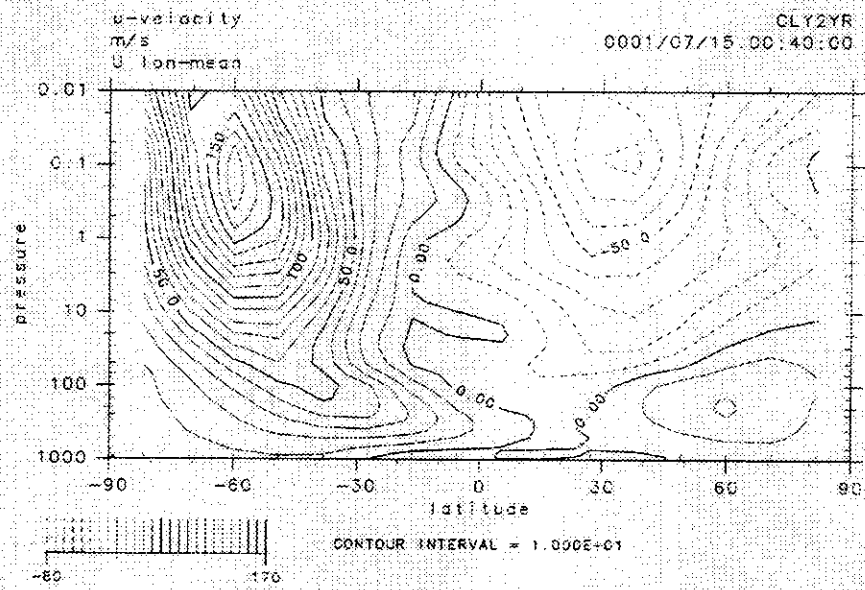


図9.1：CCSR/NIES 光化学結合 GCM により計算された、経度方向に平均された7月15日の東西風速分布。西風は正の値で、東風は負の値でそれぞれ表される。

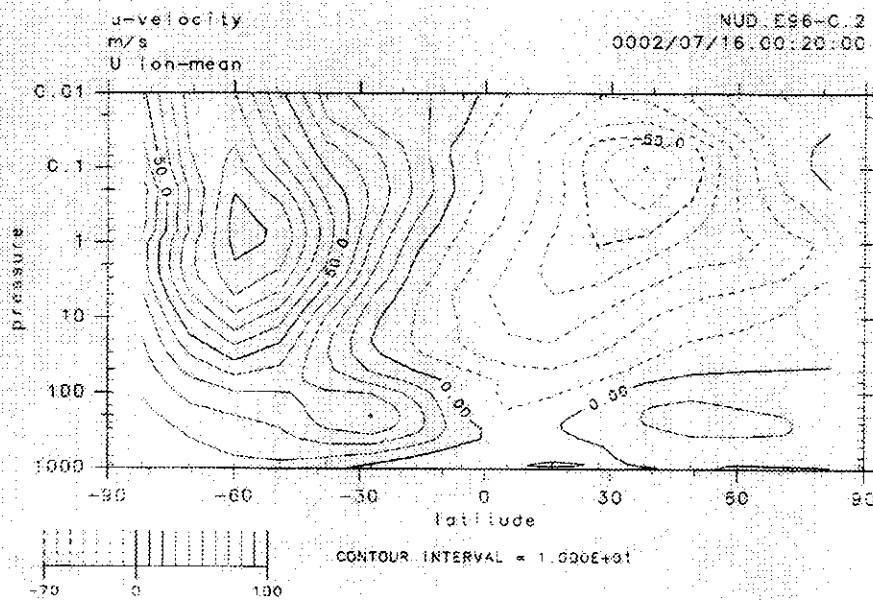


図9.2：CCSR/NIES ナッジング CTM により計算された、経度方向に平均された7月15日の東西風速分布。

## 5. 参考文献

1. Chipperfield, M. P., D. Cariolle, P. Simon, R. Ramarosan, and D. J. Lary (1993); A three-dimensional modeling study of trace species in the Arctic lower stratosphere during winter 1989-1990, *J. Geophys. Res.*, 98, 7199-7218.
2. Chipperfield, M. P. (1999); Multiannual simulations with a three-dimensional chemical transport model, *J. Geophys. Res.*, 104, 1781-1805.
3. Douglass, A. R., C. J. Weaver, R. B. Rood, and L. Coy (1996); A three-dimensional simulation of the ozone annual cycle using winds from a data assimilation system, *J. Geophys. Res.*, 101, 1463-1474.
4. Lefevre, F., G. P. Brasseur, I. Folkins, A. K. Smith, and P. Simon, (1994); Chemistry of the 1991-1992 stratospheric winter: Three-dimensional model simulations, *J. Geophys. Res.*, 99, 8183-8195.
5. Rash, P. J., B. A. Boville, and G. P. Brasseur (1995); A three-dimensional general circulation model with coupled chemistry for the middle atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 100, 9041-9071.
6. Sasano, Y., M. Suzuki, T. Yokota, and H. Kanzawa (1999); Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) for stratospheric ozone layer measurements by solar occultation technique, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 197-200.

## 6. 研究発表の状況

### (1) 口頭発表

中根英昭, 秋吉英治, 二宮真理子, 林政彦, 岩坂泰信, 渡辺征春, V. Yushkov, V. Dorokhov, V. Khattatov: エアロゾル, オゾン気球観測データに現れた北半球極渦内外の相互作用, 日本気象学会春季大会 (大宮), 1996年5月, 第69回日本気象学会春季大会講演予稿集, 165, (1996).

秋吉英治: 1次元光化学放射結合系における成層圏下部のオゾン変動, 日本気象学会春季大会 (大宮), 第69回日本気象学会春季大会講演予稿集, 172, (1996).

秋吉英治: 成層圏下部の長期オゾン変動 (1次元光化学-放射結合モデルによる計算結果), 衛星による成層圏・対流圏化学の研究に関するワークショップ (札幌), 衛星による成層圏・対流圏化学の研究に関するワークショップ報告書, 209-218, (1996).

高橋正明, 秋吉英治, 滝川雅之, 庭野将徳, 長谷部文雄: 気候センターでの成層圏化学モデル, 衛星による成層圏・対流圏化学の研究に関するワークショップ (札幌), 衛星による成層圏・対流圏化学の研究に関するワークショップ報告書, 235-260, (1996).

秋吉英治, 橋本訓, 松見豊, 川崎昌博, 高橋けんし: 大気微量成分濃度のO(1D)生成量子効率に関する依存性, 日本気象学会秋季大会 (名古屋), 第70回日本気象学会秋季大会講演予稿集, 257, (1996).

滝川雅之, 高橋正明, 秋吉英治: CCSR/NIES気候-化学モデル(1), 日本気象学会秋季大会 (名古屋), 第70回日本気象学会秋季大会講演予稿集, 259, (1996).

秋吉英治: 1次元光化学-放射結合モデルによるピナツボエアロゾル増加実験, 大気化学シンポ

- ジウム (豊橋), 第7回大気化学シンポジウム研究集会講演集, 26-31, (1996).
- 秋吉英治, 高橋正明: 成層圏光化学放射結合モデル, 日本気象学会春季大会 (つくば), 第71回日本気象学会春季大会講演予稿集, (1997).
- 滝川雅之, 高橋正明, 秋吉英治: CCSR/NIES気候-化学モデル (2), 日本気象学会春季大会 (つくば), 第71回日本気象学会春季大会講演予稿集, 182, (1997).
- 秋吉英治: 1次元光化学放射結合モデルによるピナツボエアロゾル増加実験, 日本気象学会春季大会 (つくば), 第71回日本気象学会春季大会講演予稿集, (1997).
- Akiyoshi, H. : A 1-dimensional chemical-radiative coupling model study of the effects of Pinatubo aerosols, Scientific Assembly of IAGA with ICMA and STP Symposia, Uppsala (Sweden), 8th Scientific Assembly of IAGA with ICMA and STP Symposia Abstracts, 216, 1997.
- 秋吉英治, 菅田誠治, A. Lukyanov, 中根英昭, 滝川雅之, 高橋正明: 光化学輸送モデル (CTM) の開発 (1), 日本気象学会秋季大会 (札幌), 第72回日本気象学会秋季大会講演予稿集, 231, (1997).
- 永島達也, 高橋正明, 滝川雅之, 秋吉英治: CCSR/NIES AGCM を用いたオゾンホール再現実験, 日本気象学会秋季大会 (札幌), 第72回日本気象学会秋季大会講演予稿集, 232, (1997).
- 滝川雅之, 高橋正明, 秋吉英治: CCSR/NIES 気候-化学モデルにおける成層圏水蒸気量の季節変動, 日本気象学会秋季大会 (札幌), 第72回日本気象学会秋季大会講演予稿集, 252, (1997).
- Akiyoshi, H. : Development of 1-D chemical-radiative coupling model for Pinatubo aerosol study and 3-D chemical models: The Tsukuba International Workshop on Stratospheric Change and its Role in Climate and on the ATMOS-C1 Satellite Mission, つくば, Proceedings of the Tsukuba International Workshop on Stratospheric Change and its Role in Climate and on the ATMOS-C1 Satellite Mission, 184-185, (1997).
- Nagashima, T., M. Takigawa, M. Takahashi, and H. Akiyoshi: Ozone hole Simulation using CCSR/NIES AGCM, The Tsukuba International Workshop on Stratospheric Change and its Role in Climate and on the ATMOS-C1 Satellite Mission, つくば, Proceedings of the Tsukuba International Workshop on Stratospheric Change and its Role in Climate and on the ATMOS-C1 Satellite Mission, 186-189, (1997).
- 秋吉英治: 1次元結合モデルにおける臭素系反応のオゾン定常値およびその変動に及ぼす影響, 日本気象学会秋季大会 (仙台), 第74回日本気象学会秋季大会講演予稿集, 168, (1998).

## (2) 論文発表

- 高橋正明, 1996: 気候センターでの成層圏モデリング. *Tenki*, 43, 468-473.
- Takahashi, M., M. Takigawa, M. and H. Akiyoshi: Chemical modeling at CCSR/NIES. CAS/JSC WORKING GROUP NUMERICAL EXPERIMENTATION, RESEARCH ACTIVITY IN ATMOSPHERE AND OCEAN MODELING, (1996).
- 高橋正明: 気候センターでの成層圏モデリング. 気候システム研究叢書, 2, 1-12, (1997).
- Akiyoshi, H., M. Takahashi, and M. Takigawa: Development of a chemical coupling GCM, CGER's Supercomputer Activity Report, 5, 3-4, (1997).

- Akiyoshi, H. : Development of a global 1-D chemically radiatively coupled model and an introduction to the development of a chemically coupled General Circulation Model, CGER's Supercomputer Monograph Report, 4, 69pp, (1997).
- Akiyoshi, H. : Development of 1-D chemical-radiative coupling model for Pinatubo aerosol study and 3-D chemical models, Poceeding of the Tsukuba international workshop on stratospheric change and its role in climate and on the ATMOS-C1 satellite mision, 184-185, (1998).
- Nagashima, T., M. Takigawa, M. Takahashi, and H. Akiyoshi : Ozone hole simulation using CCSr/NIES AGCM, Poceeding of the Tsukuba international workshop on stratospheric change and its role in climate and on the ATMOS-C1 satellite mision, 186-189 (1998).
- Nagashima, T, M. Takahashi and F. Hasebe, 1998: The first simulation of an ozone QBO in a general circulation model. Geophys. Res. Letters, 25, 3131-3134.
- Takigawa, M., M. Takahashi, and H. Akiyoshi: Simulation of ozone and other chemical species using a CCSR/NIES AGCM with coupled stratospheric chemistry, J. Geophys. Res, in press, (1999).
- Takahashi, M., 1999: The first realistic simulation of the stratospheric quasi-biennial oscillation in a general circulation model. Geophy. Res. Letters, in press.
- Akiyoshi, H. : Steady states of the year 1991 atmosphere and the year 2050 atmosphere and Pinatubo aerosol increase experiments by a 1-D chemical-radiative coupled model, submitted, (1999).