

B-5 気候モデルによる気候変動評価に関する研究

(3) 対流圏と成層圏との間における物質輸送に関する研究

研究代表者 気象研究所 谷貝 勇・山崎 孝治（平成4年4月から）

気象庁 気象研究所

気候研究部	第1研究室	時岡達志
	第2研究室	山崎孝治、谷貝 勇、千葉 長、柴田 清孝
	第4研究室	野田 彰

平成3-5年度合計予算額 22470千円

平成5年度予算額 7560千円

〔要旨〕 温室効果気体の増加によって対流圏では気温が上昇し成層圏では気温の下降することが知られており、温暖化が対流圏と成層圏との間における物質輸送に影響することが考えられる。このことを調べるために、対流圏と成層圏を含んだ大気大循環モデルを用いて、海面水温に温暖化した状態に対応した偏差を与えて数値実験を行った。太陽高度を7月の状態に固定した実験で海面水温を2度変化させた実験では、輸送の効果によってオゾンの鉛直分布に変化が見られた。冬のシミュレーションで成層圏の突然昇温が起こった場合と起こらなかった場合を比較すると、北半球高緯度成層圏のオゾン分布に観測と対応した変化が見られた。また温暖化した場合に対応した海面水温偏差を与えた季節変化実験を行い、気候状態の海面水温を与えた結果と比較解析を行った。

〔キーワード〕 オゾン、物質輸送、対流圏と成層圏、海面水温、地球温暖化

1. 序

地球の大気は高度10 km付近を境として温度成層の安定な成層圏とその下にあるより不安定で対流活動の活発な対流圏に分けられる。温度成層の違いにより成層圏と対流圏では波動の伝はん特性が異なり、結果的に物質輸送の特徴に違いが見られる。温室効果気体の増加によって対流圏では気温が上昇し成層圏では気温の下降することが知られている。これまで鉛直1次元モデルによる放射の計算や運動まで含めた3次元の気候モデルによって、全地球平均或は緯度帯平均の気候変動予測がある程度明らかにされてきた。一方、フロン等によるオゾン層破壊とは別に、温暖化に伴う大気の流れの場や温度場の変化により、オゾンの鉛直分布や地理的分布にも変化が起これると予想されている。地球大気は様々なフィードバックプロセスのバランスし

た結果として現在の状態にあるため、温暖化の影響が広範囲に及ぶことが予想され、社会、経済活動に与える効果と共に、オゾン等の物質輸送の変化を通して農業、生態系及び人の健康に与える影響を調べることが重要である。

2. 研究目的

既存の大気大循環モデルに必要な改良を行い、現在のオゾン分布を精度良く再現できるモデルを作成する。加えて地球温暖化が全球のオゾン分布に及ぼす影響を明らかにする。

3. 研究方法

対流圏と成層圏を含んだ12層の大気大循環モデルを用いて太陽高度を7月の状態に固定して海面水温を変えた三つの数値実験を行った。最初の実験では7月の月平均気候値の海面水温を与えて90日間の計算を行った。2番目の実験では同じ初期状態で海面水温のみ全域で2℃上げて同じく90日間の計算を行った。3番目の実験では海面水温を全域で2℃下げて90日間の計算を行った。これらの実験は炭酸ガスが増加してその温室効果で海面水温が上昇した場合を想定した感度実験になっており、国際的な大気大循環モデルの比較実験に対応している (Cess et.al., [1991] and Randall et.al., [1992])^{1), 2)}。季節変化を除くのは平衡に達するまでの計算時間を短縮するためにとられた。

次に同じ12層の大循環モデルにより、1982年12月15日の初期値から気候値の海面水温を用いて時間積分を始めた。北半球の冬から春先にかけて成層圏では突然昇温とよばれる現象が起こり、このとき振幅が増大するプラネタリー波によりオゾンの輸送状況の変化することが観測の解析結果から知られている。このことをモデルの結果から確かめる解析を行なった。観測によるとこの冬、北半球で突然昇温が発生したが、モデルでも突然昇温が見られた。

これまで用いてきた12層の大気大循環モデルから、100 hPa以下の対流圏での鉛直解像度を5層から8層に上げて15層モデルを作成した。モデルの予報レベルは成層圏で1.39, 2.68, 5.18, 10.0, 19.3, 37.3, 72.0 hPaであり、対流圏は12層モデルの場合が150, 300, 500, 700, 900 hPaであったが、15層モデルは119, 168, 237, 335, 457, 589, 741, 912 hPaである。初期値として観測された1979年1月1日の状態を用いて3年間の時間積分を行った。この時の海面水温は気候値の月平均データを用いて行った(気候値ラン)。さらに、二酸化炭素倍増実験で得られた海面温度偏差を与え、大気中の二酸化炭素を倍増させた実験を同じ初期値と積分期間で行った(温暖化ラン)。ただし現在までの二酸化炭素倍増実験で知られている海面温度偏差は60度以北で2.2度、亜熱帯域で1.2度程度であるが、15層モデルによる温暖化ランではモデルの下層での鉛直解像度が上がって海面水温を上げた際の大気境界層でのショックが大きい。ため、海面温度偏差は60度以北で1.1度、亜熱帯域で0.6度と半分の大きさにした。これらの結果でオゾン分布の解析を行い、温暖化が対流圏と成層圏との間における物質輸送に与える影響を調べた。

4. 実験結果

7月の状態で海面水温を2℃上げた状態と2℃下げた状態を比較すると炭酸ガス増加による温室効果と類似して、対流圏の気温は上昇して成層圏の気温は低下している。2℃上げた状態から2℃下げた状態の帯状平均した気温の差の緯度高度分布を調べると、対流圏では海面からの潜熱、顕熱輸送が増えたことで対流圏の気温が上昇している。また、加熱量の差を比較すると低緯度の下部—中部成層圏では気温の差と加熱量の差が反対符号になっている。すなわち、ここでは運動によって気温変化が生じており加熱項は緩和する方向に働いている。さらにオゾンの鉛直分布を比較すると海面水温を2℃上げた場合、対流圏のオゾン濃度は増大し成層圏でのオゾン濃度が減少する傾向がある。

冬の成層圏突然昇温が起きたときのオゾンの輸送について12層モデルを使った実験結果を解析した。観測による60°Nから70°Nまでの帯状平均された1月のオゾン分布を1979年と8年平均（1979年—1986年）について調べてみると、1979年の1月には突然昇温は起こらなかったが、1月の8年平均（1979年—1986年）の期間内では突然昇温が見られた。1月における8年平均のオゾン分布は1979年に比べて上部成層圏で少なく、5hPa以下の中部成層圏で多くなっている。

12層モデルでは、同じ初期値から出発してモデルの重力波抵抗の作用のあるなしによって結果的にプラネタリー波が弱く、極渦が強くなり、突然昇温の起こらない場合と比較した。60°Nから70°Nまでの帯状平均されたオゾン濃度の差を調べると、モデルと観測結果はよく対応しており、上部成層圏で少なく、5hPa以下の中部成層圏でオゾン濃度が多くなっている。増大のピークは観測で10hPaの高度にあるが、モデル結果では20hPa付近でよりなだらかなピークとなっている。

図1は15層モデルで4年目の1月のオゾン混合比の緯度・高度分布を表している。赤道上空の5hPa付近の高度で夏半球側（南緯5度付近）に現れる極大は観測と対応している。北緯60度までの上部成層圏ではオゾン量の大きい峰が緯度とともに高い高度に移っていくが、これも観測と対応している。

5. 考 察

7月の実験で海面水温が上昇した場合、下部—中部成層圏ではオゾン光化学反応によってオゾンの増える傾向になる。しかしこの場合、気温の場合と同様に輸送の項かが卓越してオゾンは減少している。即ち、温暖化によって成層圏と対流圏の物質輸送が活発になりオゾン濃度の高い成層圏の空気が下降して対流圏のオゾン濃度を増加させ成層圏でのオゾン濃度を減少させている。

図2（a）はオゾン量について15層モデルによる温暖化ランと気候値ランとの差の緯度・高度分布であり、図2（b）はオゾン光化学反応による生成量の差を表している。モデルの対流圏では最下層を除いてオゾンの生成、消滅はないとしている。これをみると、極夜域の上部成層圏におけるオゾンの減少と北緯60度付近の上部成層圏でオゾン

の増加は力学的に起こっていることが分かる。これまでに調べた突然昇温が起こった場合と起こらなかった場合のモデルと観測の比較では、高緯度成層圏におけるオゾン量の変化は力学的な再分配として起こっていた。

このように、今回の結果も、力学的な効果でオゾン量の顕著な変化が起こったと考えられる。しかし、温暖化した場合、冬季北半球成層圏の突然昇温がどうなるか、それに伴ってオゾンがどう変化するかを調べるにはモデルの年々変動を調べて議論する必要がある、未だ確定的な結論とはいえない。

モデルで2年半経過した7月の状態について同様に温暖化ランと気候値ランとの結果を比較してみると(図3(a)(b))、南緯30度から北緯60度にわたる中部、上部成層圏におけるオゾン量の増加と、光化学反応による生成域とが良く対応していることが分かる。この領域は気温が低下している場所と重なるが、加熱項の変化は別に起こっている。すなわち、7月の中部、上部成層圏におけるオゾン分布の増加は、気温を通した光化学反応の生成によっていることが分かる。

6. まとめ

12層モデルによる冬の解析結果を見ると、突然昇温によるオゾン濃度増大のピークは観測で10hPaの高度だが、モデル結果では20hPa付近でよりなだらかなピークとなっている。このことから、オゾンの輸送過程をより正確に再現するためには、中部成層圏でも更に細かいモデルの鉛直解像度が必要になる。

今回、対流圏での鉛直解像度を上げて行った15層モデルによる温暖化ランと気候値ランとの比較では、7月の中部、上部成層圏におけるオゾン分布の増加は、気温を通した光化学反応の生成によっていることが分かる。これは、これまでの複雑な光化学反応を考慮した鉛直1次元モデルによるな計算結果に対応している。

今回は、海面水温の各緯度で平均した偏差を与えるという簡略化された実験であった。気温の低下に伴うオゾン光化学反応を正確に見積もるためには、温暖化による気温の変化を、しいては海面水温の正確な変化を予想しなければならず、これが可能になるのは、将来の大気海洋結合モデルの精密化とオゾンに関する光化学反応の理解及びシミュレーションの進歩である。しかし、それまでの段階においても、モデルや観測の進展に応じて温暖化とオゾン量の変化について調べていくことが重要であることをこの研究は示唆している。

7. 本研究により得られた成果

格子点モデルでは極域の格子間隔が狭くなるため、小さいスケールの波が偽の発達を起こして数値計算上のトラブルを引き起こすことがある。12層モデルでは、冬の成層圏突然昇温時のように北極を横切る流れが強まった場合に偽の乱れを作ることがあったが、この問題は極

域で用いている空間フィルター操作を工夫することで15層モデルでは解決された。

12層モデルによる冬のランでは成層圏の突然昇温は振幅の増大したプラネタリー波によって引き起こされるが、このプラネタリー波はオゾンの輸送過程にも影響を与える。冬の高緯度帯では日射が弱くオゾンの光化学反応の影響は小さいので、モデルにおけるオゾンの輸送過程を調べるのに都合のよい条件になっている。この実験から、モデルは突然昇温におけるオゾンの輸送の特徴を、観測と対応した形で再現していることが示された。

地球の温暖化が起こった場合の温暖化がオゾン分布に及ぼす影響については、より複雑な光化学反応を入れた鉛直一次元モデルの結果から温暖化による成層圏の気温低下でオゾンの生成量の増えることが予想されているが、大循環モデルからも亜熱帯域ではオゾンの増えていることが示された。それ以外に、大循環モデルの結果からは、オゾンの輸送の変化により、温暖化の影響でオゾンの減少する地域のある可能性が示された。ただし、確定した結論を得るためにはモデルや現実にある年々変動を考慮して、時間積分の期間を延長してより長い期間の解析を行う必要がある。

8. 参考文献

- 1) Cess, R.D., G.L. Potter, M.-H. Zhang, J.P. Blanchet, S. Chalita, R. Coloman, D.A. Dazlich, A.D. Del Genio, V. Dymnikov, V. Galin, D. Jerrett, E. Keup, A.A. Lacis, H.Le. Treut, Z.-X. Li, X.-Z. Liang, J. F. Mahfouf, B.J. McAvaney, V.P. Meleshko, J.F.B. Mitchell, J.-J. Morcrette, P. M. Norris, D.A. Randall, L. Rikus, E. Roeckner, J. F. Royer, U. Schlese, D.A. Sheinin, J.M. Slingo, A.P. Sokolov, K.E. Taylor, W.M. Washington, R.T. Wetherald, and I. Yagai, : Interpretation of snow-climate feedback as produced by 17 General Circulation Models. Science, 253, 888-892, 1991.
- 2) D.A. Randall, Cess, J.P. Blanchet, G.J. Boer, D.A. Dazlich, A.D. Del Genio, M. Deque V. Dymnikov, V. Galin, S.J. Ghan, A.A. Lacis, H.Le. Treut, Z.-X. Li, X.-Z. Liang, B.J. McAvaney, V.P. Meleshko, J.F.B. Mitchell, J.-J. Morcrette, G.L. Potter, L. Rikus, E. Roeckner, J.F. Royer, U. Schlese, D.A. Sheinin, J. Slingo, A.P. Sokolov, K.E. Taylor, W.M. Washington, R.T. Wetherald, I. Yagai, and M.-H. Zhang, : Intercomparison and Interpretation of surface energy fluxes in atmospheric general circulation models. J. Geophys. Res., 97, 3711-3724, 1992.

国際共同研究の状況

共同研究名 F A N G I O (Feedback Analysis for GCM Intercomparison and Observations) GCMの相互比較と観測によるフィードバックの解析
カウンターパート ニューヨーク州立大学(米国) R. D. Cess教授
1992年2月17-21日 サンフランシスコ(米国)でワークショップを行い米国、英国、フランス、西ドイツ、ソ連、中国、韓国より参加があった。
1993年5月10-14日 にもボローニャ(イタリア)でワークショップを行った

研究発表の状況

1. Yagai, I. Revisiting the July $\pm 2^\circ$ SST perturbation simulations with the MRI.GCM. AMIP/FANGIO Joint Meeting, Bologna, May.1993
2. 谷貝 勇「対流圏と成層圏との間における物質輸送に関する研究」 スーパーコンピュータによる地球環境研究ワークショップ、国立環境研究所、1994年3月

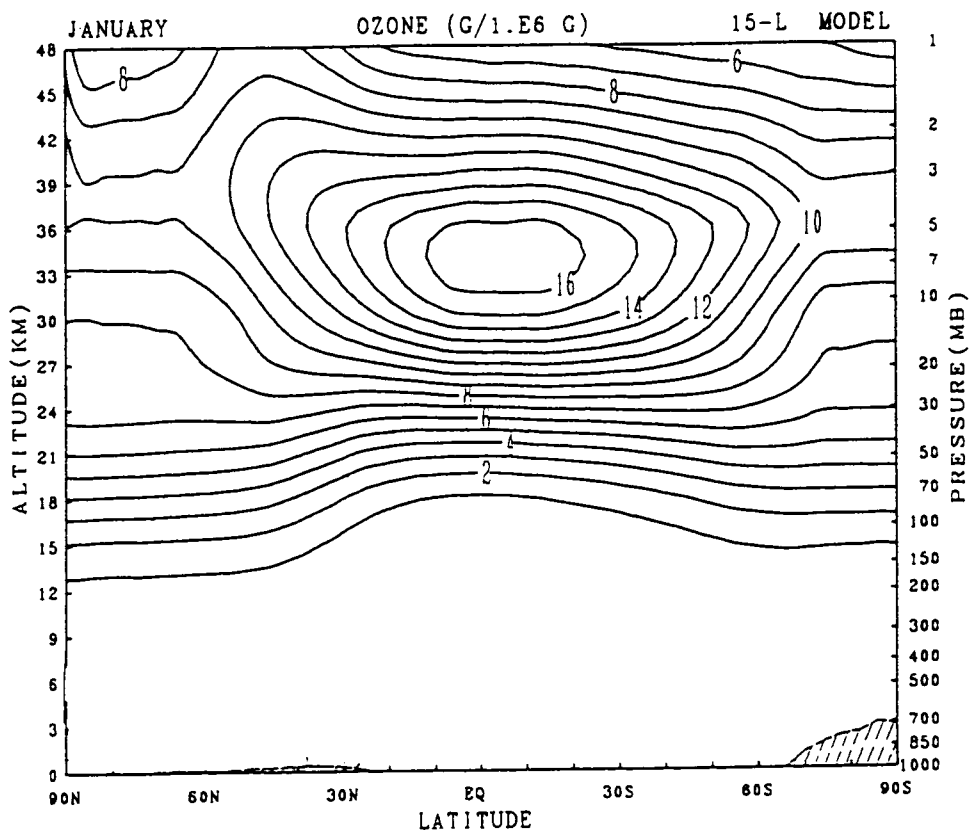


図1 15層大気大循環モデルによる時間積分4年目の1月のオゾン質量混合比 (ppm) の緯度・高度分布。等値線間隔は 1×10^{-6} (1 ppm)。

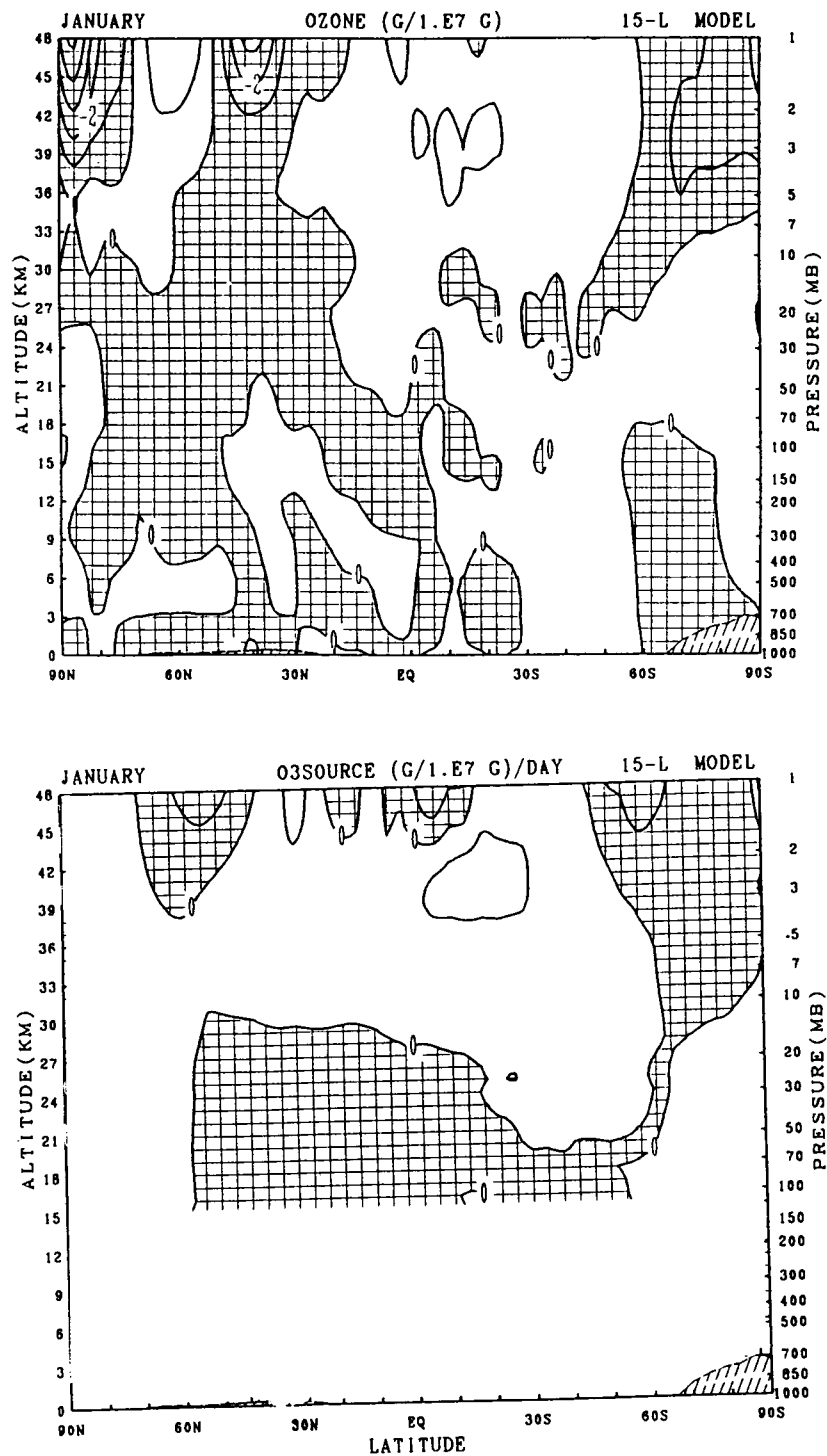


図2 (a) 15層大気大循環モデルによる4年目の1月の温暖化ランと気候値ランとのオゾン量の差の緯度・高度分布。等値線間隔は 1×10^{-7} (0.1 ppm)。

(b) 同じく温暖化ランと気候値ランで計算されたオゾン光化学反応生成量の差。等値線間隔は 1×10^{-8} / day (0.01 ppm / day)

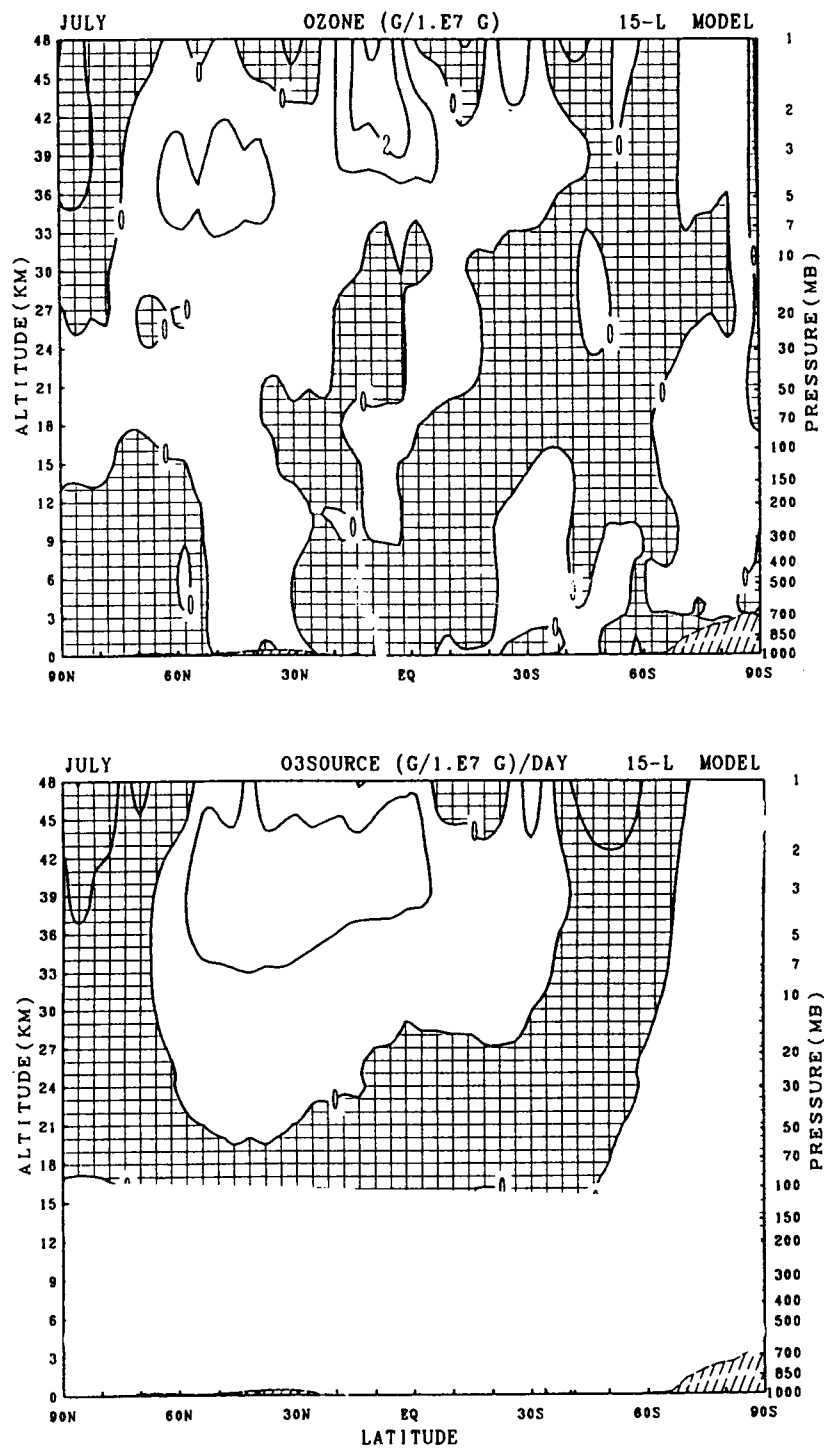


図3 (a) 図2と同様で3年目の7月の温暖化ランと気候値ランとのオゾン量の差の緯度・高度分布。

(b) 同じく温暖化ランと気候値ランで計算されたオゾン光化学反応生成量の差。