

CO₂ 増加時の Brewer-Dobson 循環の変化

小玉知央*・岩崎俊樹(東北大・理)・柴田清孝・行本誠史(気象研)

1 はじめに

成層圏の子午面循環である Brewer-Dobson 循環は、CO₂ 増加によって強まることが様々な研究で指摘されている(例えば Rind et al., 1990; Butchart et al., 2001; Rind et al., 2002; Sudo et al., 2003; Sigmond et al., 2004)。変化のメカニズムも議論されているが、まだ十分な理解が得られていない。

Brewer-Dobson 循環が変化する原因を議論するために、大気モデルを用いて図 1 のような実験を行った。まず現在気候を再現するコントロールラン(図 1 左)、および 2×CO₂ 時の CO₂ 濃度と SST 分布(海水を含む)を与えた温暖化ラン(図 1 中央)を行った。次に理想実験を行い、2×CO₂ 時の変化を 2 つの寄与に分離することを試みた。

第一の実験は、CO₂ 濃度を 2 倍にして SST を現在のままに固定する実験である(図 1 右上)。CO₂ の変化が直接成層圏の子午面循環に影響を及ぼすという意味で、このインパクトを「CO₂ の直接効果」と呼ぶ。第二の実験は、CO₂ 濃度を現在のままに固定して SST を上昇させる実験である(図 1 右下)。CO₂ の変化が SST の変化を通じて間接的に成層圏の子午面循環に影響を及ぼすという意味で、このインパクトを「CO₂ の間接効果」と呼ぶ。以上のように温暖化時の変化(これを全効果と呼ぶ)を直接効果と間接効果に分けることによって、Brewer-Dobson 循環が変化した原因を考察する。

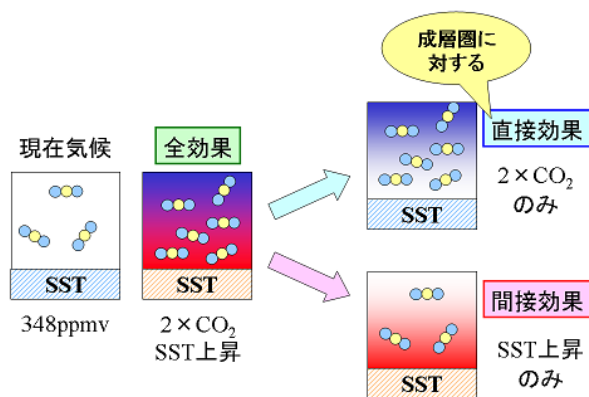


図 1. 理想実験の考え方

2 実験設定

2.1 モデル

本研究では気象研究所(MRI)で開発された大気大循環モデルを用いた(Yukimoto et al., 2001)。このモデルは大気海洋結合モデル MRI-CGCM2 から大気部分を取り出したモデルである。水平解像度は T42(約 2.8°)、鉛直 45 層で、最上端は 0.01hPa である。モデルに与える現在気候と CO₂ 増大気候の SST および海水は、予め結合モデルで計算されたデータを MRI から頂いて用いた。ここで CO₂ 増大気候とは、IPCC の A2 シナリオにおける 2071 年から 2080 年までの 1ヶ月平均気候値として定義し、これを CO₂ 倍増時の気候と見なす。CO₂ 濃度、SST、海水以外のパラメータは全て現在気候の値を用いる。従って、例えば成層圏における O₃ のフィードバックによる寒冷化は考慮されない。定性的な議論をする上では問題ないと思えるが、定量的な議論には注意が必要である。

モデルに与えた CO₂ 増加時の SST 上昇の分布を図 2 に示す。帯状平均した SST 上昇は 1.5±1K 程度である。SST 上昇は CO₂ 漸増実験の結果から作成したため、CO₂ 倍増の平衡実験に比べて SST 上昇は小さいと思われる。

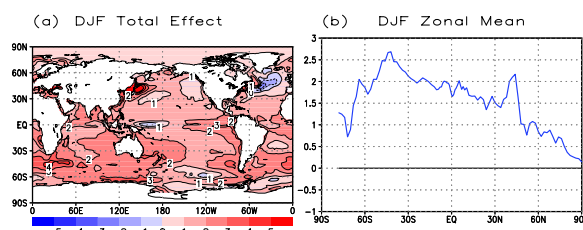


図 2. CO₂ 増加時の現在気候に対する SST の上昇(DJF)、(a)2次元分布、(b)帯状平均。

2.2 帯状平均の方法

帯状平均には Iwasaki(1989)による温位座標を变形した座標系(p_{\dagger} 系)を用いた。この座標系は TEM 系(变形オイラー平均)と同様に質量流線関数はラ

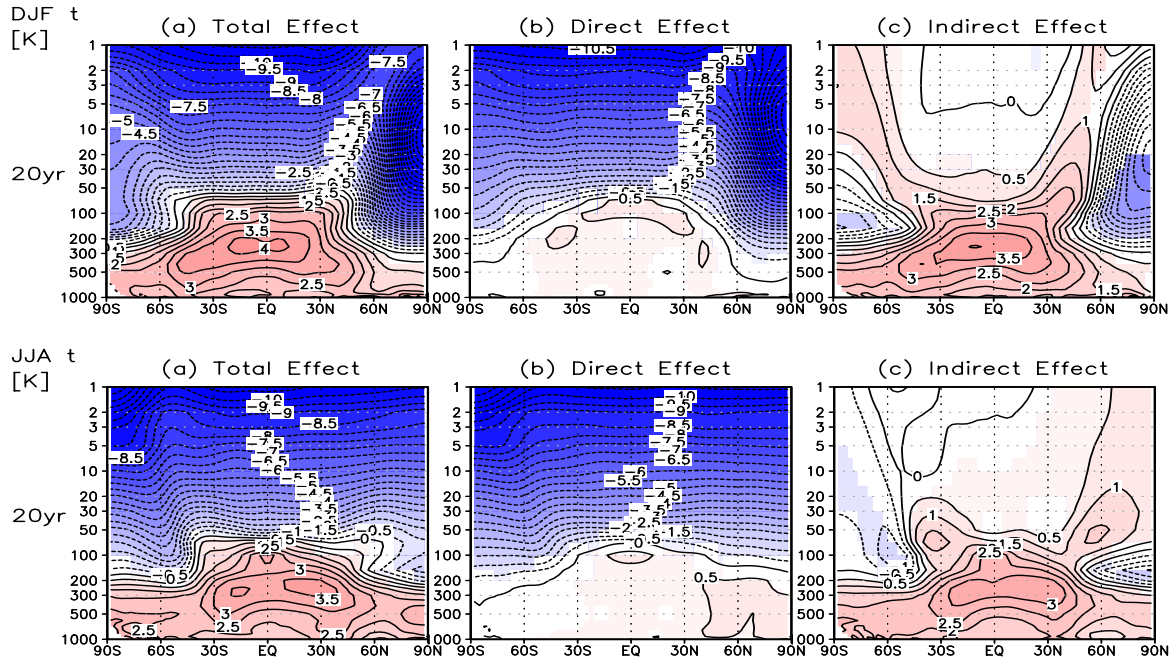


図 3: 帯状平均気温の変化 (上段 : DJF、下段 : JJA)。(a) 全効果、(b) 直接効果、(c) 間接効果による変化を示す。シェード領域は、cntl ランと各ランの気温に有意な差がある領域を示す (信頼係数 95%)。

グランジュ的な物質輸送を表現する。 p_{\dagger} 系は、(1) 下部境界、(2) 有限振幅波動、を正確に表現できる利点がある。成層圏中高緯度における平均子午面循環は波動によって駆動されるため、波動活動をより正確に捉えることができる p_{\dagger} 系を使用して解析を行った。

3 結果

3.1 基本場

図 3 は CO_2 増加の全効果、直接効果、間接効果による帯状平均気温の変化である。全効果による気温変化はよく知られているように、対流圏で気温上昇、成層圏で気温低下をもたらす。大ざっぱに見ると直接効果は成層圏の気温低下に寄与し、間接効果は対流圏の気温上昇に寄与する。対流圏での気温上

昇は熱帯上部で大きい。海氷の効果により、DJF 北半球高緯度の地表面気温 (図 4) も上昇が大きい。直接効果も地表面に対して影響するが、地表面も含めて対流圏の気温はほぼ間接効果によって説明できる。一方成層圏での気温変化は直接効果が大部分であるが、中高緯度で間接効果による気温上昇の峰が存在する。

これらの気温変化を反映して、直接効果・間接効果双方において中高緯度で西風が強まる (図 5)。もし寄与の分離がうまくいっていれば、直接効果と間接効果の和は全効果に一致するはずである。例えば気温についてはこの関係が大体成り立っており、寄与の分離は概ねうまくいっていると考えられる。しかし DJF の北半球成層圏高緯度に限っては特に東西風で線形性が良くない。この原因は、(1) 年々変動が大きいため 20 年では積分年数が足りない、(2) 元々非線形である、という可能性を考えている。

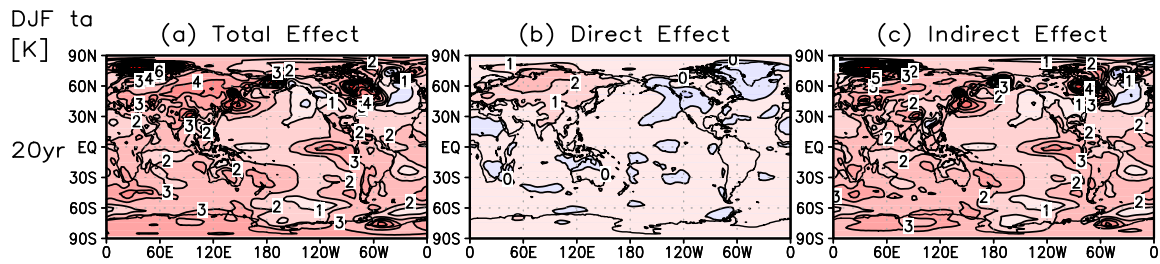


図 4: DJF における地表面気温の変化。(a) 全効果、(b) 直接効果、(c) 間接効果。

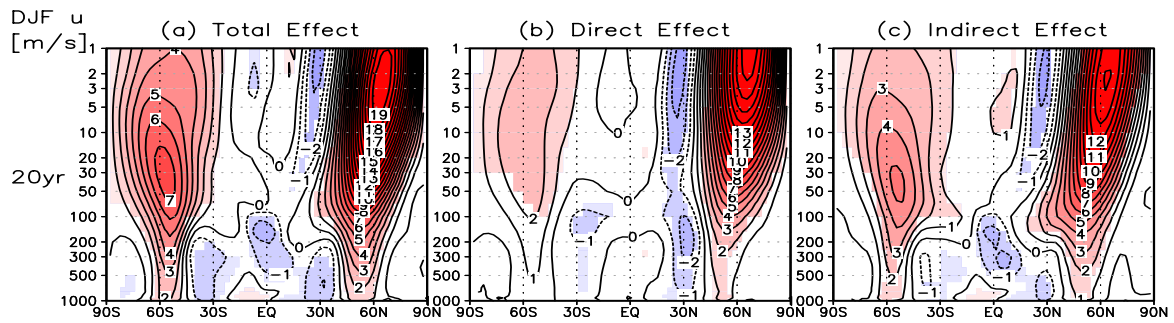


図 5: DJF における帯状平均帯状風の変化。(a) 全効果、(b) 直接効果、(c) 間接効果。

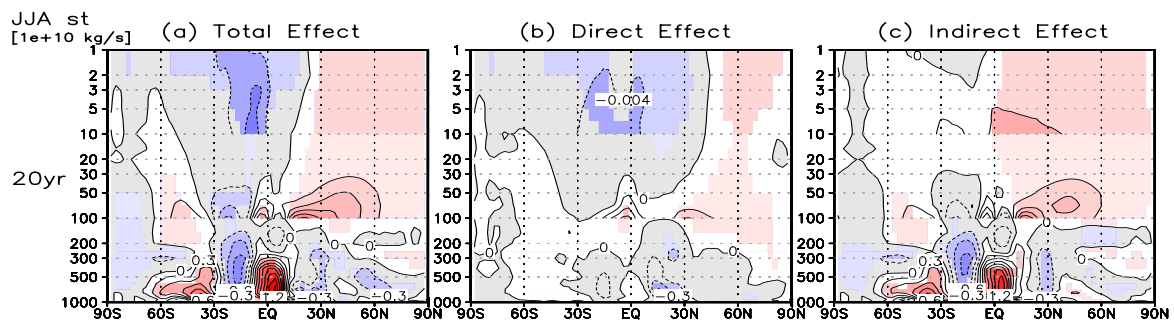
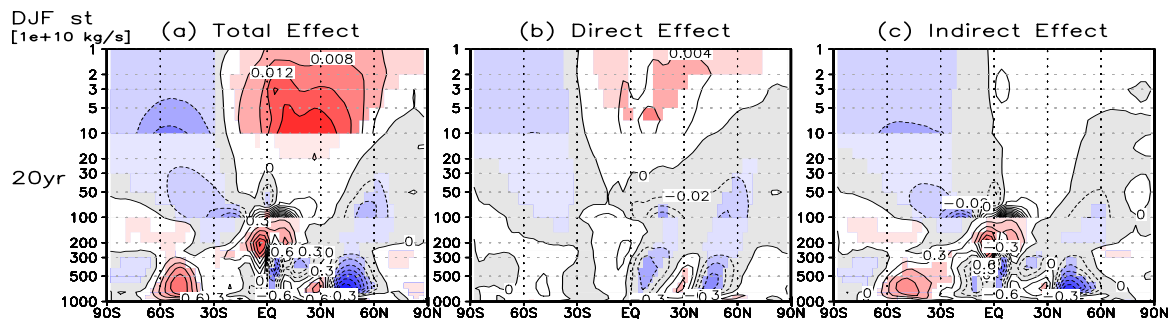


図 6: 質量流線関数の変化(上段 : DJF、下段 : JJA)。(a) 全効果、(b) 直接効果、(c) 間接効果。正 (赤色) が時計回りの変化を表す。

3.2 平均子午面循環と EP フラックス

図6は各効果による平均子午面循環の変化である。成層圏の Brewer-Dobson 循環は DJF 北半球、および夏半球で有意に強まる。DJF 北半球の Brewer-Dobson 循環は直接効果・間接効果双方の寄与によって強まり、特に直接効果は成層圏上部の循環、間接効果は成層圏下部の循環に寄与しているようである。一方夏半球 (DJF 南半球・JJA 北半球) でも両方の効果が関係するが、特に間接効果による寄与が大きい。

成層圏中高緯度の子午面循環は波動によって駆動される。図7上段は DJF における EP フラックス収束の変化である。DJF 北半球に注目すると、直接効果による変化は成層圏中緯度で発散し成層圏上部亜熱帯で収束する。間接効果も変化パターンは類似しているが、対流圏界面における波の赤道向き屈折変化によって亜熱帯で収束変化が見られる。一方夏半球では、成層圏における波動収束の強まりは間接効果の方が直接効果よりもやや大きい (図には示していないが JJA 北半球についても確認した)。

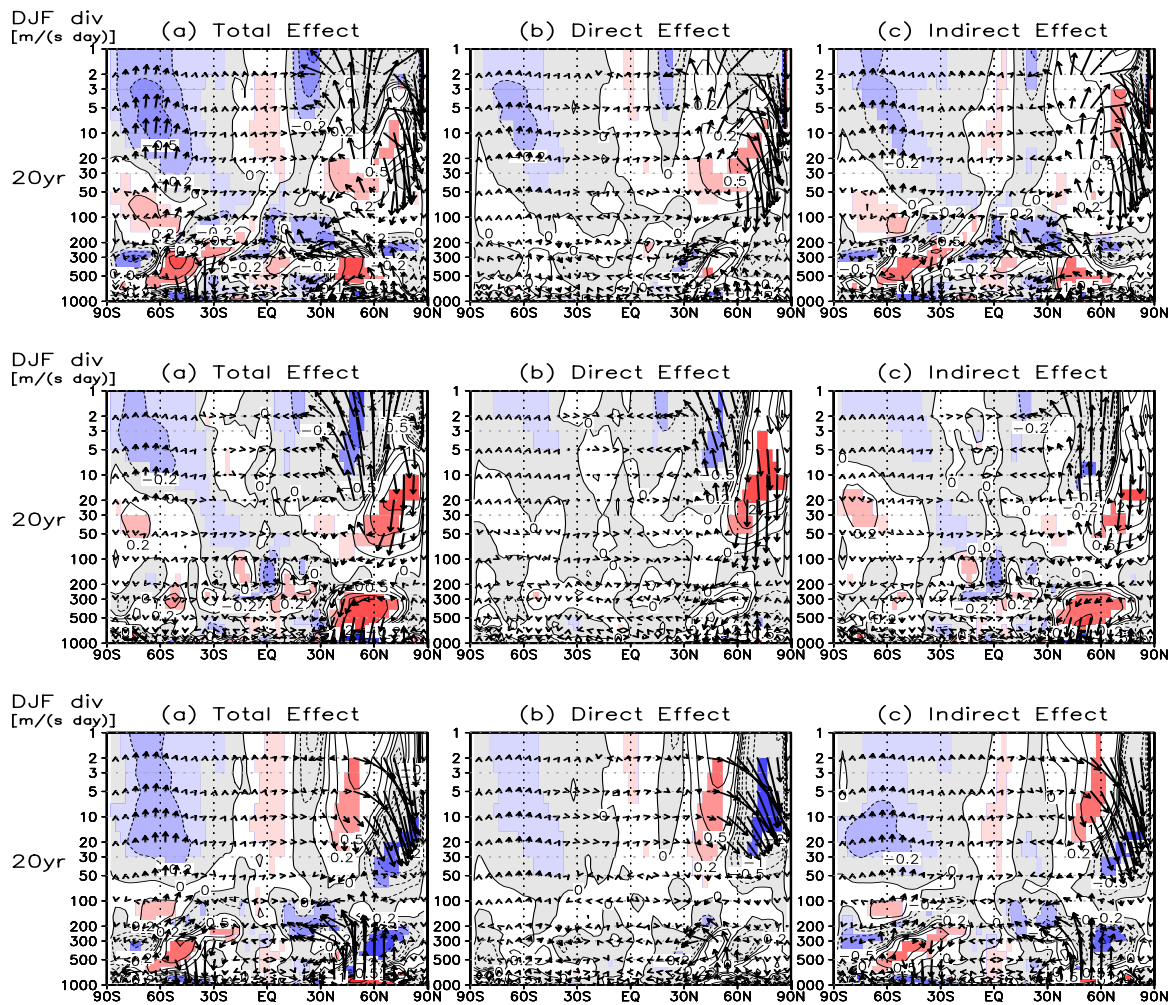


図7: DJF における EP フラックス (矢印) とその発散の変化 (上段: 定常性 + 非定常性、中段: 定常性、下段: 非定常性)。(a) 全効果、(b) 直接効果、(c) 間接効果。赤が発散変化、青が収束変化を示す。

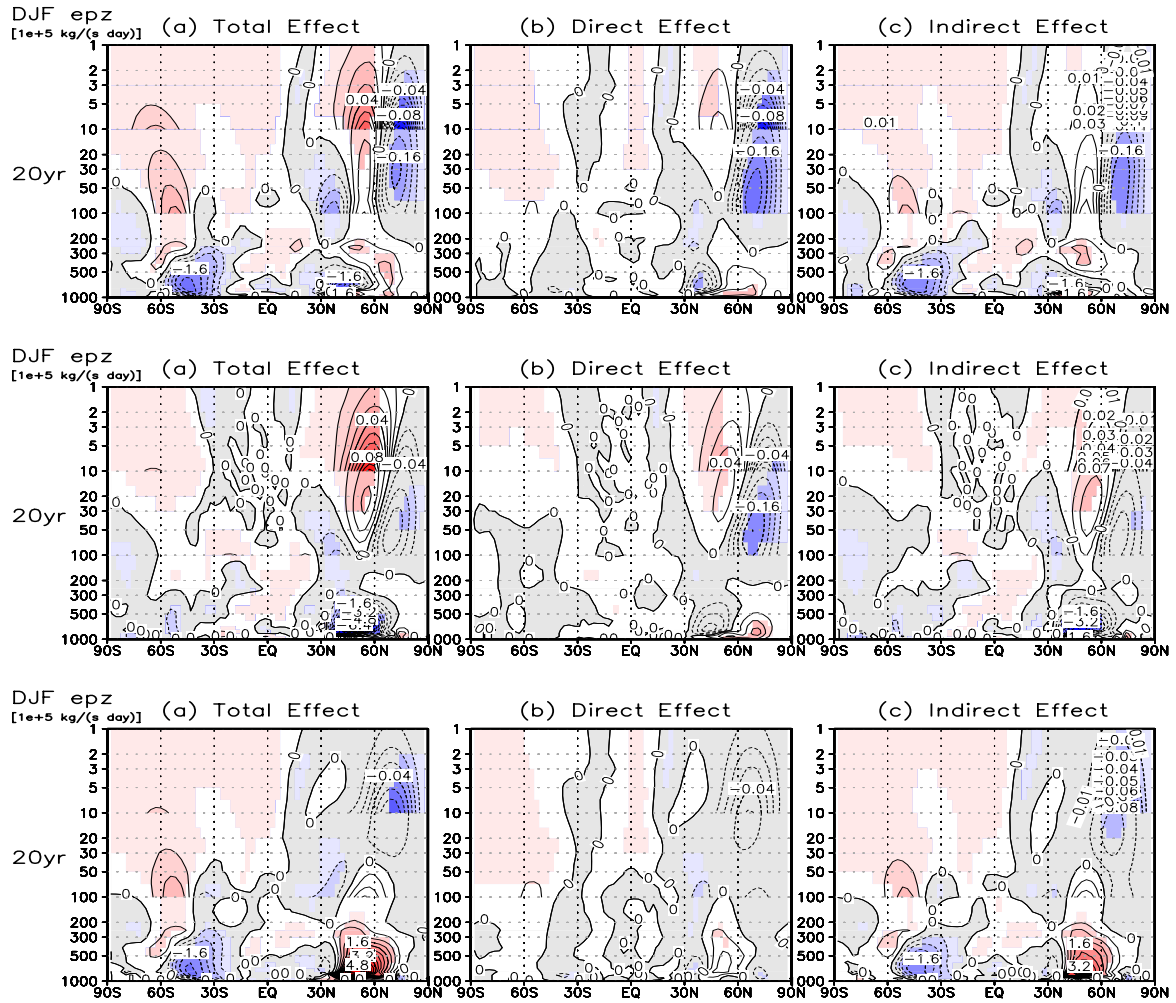


図 8: 上向き EP フラックスの変化 (上段：定常性 + 非定常性、中段：定常性、下段：非定常性)。(a) 全効果、(b) 直接効果、(c) 間接効果。

3.3 定常性波動と非定常性波動

子午面循環の変化をもたらす波動の種類を調べるため、DJF について EP フラックス収束を定常性波動と非定常性波動に分離した (図 7)。定常性波動は主に波数 1~3 の超長波、非定常性波動は主に波数 4~10 の長波であることが分かっている。波動がどのように鉛直伝搬しているかを調べるために、EP フラックスの鉛直成分も同様に示す (図 8)。

DJF 北半球の成層圏上部亜熱帯における EP フラックス収束は、定常性成分で有意に強まる。中緯度で定常性波動の上向き鉛直伝搬が強まることによって、成層圏上部で赤道向きに屈折し収束することで子午面循環が強化されたと考える。しかし対流

圏では定常性波動の上向き鉛直伝搬が弱まり、逆に非定常性波動が強まる。つまり対流圏下部における定常性波動の生成は増えていない。定常性波動の鉛直伝搬が対流圏で弱まるにも関わらず成層圏で強まることから、少なくとも対流圏下部における定常性波動の生成変化は、成層圏の波動収束強化の原因ではない。

夏半球成層圏では、中高緯度で非定常性波動の上向き鉛直伝搬が強まることによって Brewer-Dobson 循環が強まる。これは DJF 冬半球で定常性波動が強まることとは対照的である。夏半球成層圏の変化は冬半球成層圏に比べて統計的な有意性が高く、北半球・南半球双方で共通した変化が見られる。夏半

球では東風が弱まっているため、伝搬可能な波動の位相速度の範囲が広がったことが一つの原因であると推測する。

4 まとめ

DJF の北半球における Brewer-Dobson 循環は、直接効果、間接効果双方の寄与によって強まる。特に直接効果は成層圏上部の循環を強め、間接効果は成層圏下部の循環を強める。成層圏における停滞性超長波の鉛直伝搬の強まりが、成層圏上部亜熱帯における EP フラックス収束を強化すると考える。しかし対流圏における EP フラックスの鉛直伝搬は、成層圏とは逆に弱まる。一方で、JJA 南半球における Brewer-Dobson 循環の変化は小さい。

夏半球成層圏の子午面循環は主に間接効果によって強まる。これは対流圏から成層圏への非定常性波動の鉛直伝搬が強まったことが主要な原因であると考えている。

今後は、(1) 他のモデルの結果との比較、(2) 波動の位相速度を計算、に取り組む予定である。

謝辞

研究会当日に示した計算結果に間違いが見つかったため、再計算を行った結果を報告いたします。研究会の際、計算の間違いを指摘して頂いたことを深く感謝いたします。また、多くの方々から非常に有益なコメントを頂きました。このような場を提供くださった東大 CCSR の木本教授、京大防災研の向川助教授、および京大理の余田教授にお礼申し上げます。計算には東北大学情報シナジーセンター大規模科学計算システムを利用しました。

参考文献

[1] Butchart, N., and A. A. Scaife, 2001: Removal of chlorofluorocarbons by increased

mass exchange between the stratosphere and troposphere in a changing climate. *Nature.*, **410**, 799-802.

- [2] Iwasaki, T., 1989: A diagnostic formulation for wave-mean flow interaction and Lagrangian-mean circulation with a hybrid vertical coordinate of pressure and isentropes. *J. Meteor. Soc. Japan*, **67**, 293-312.
- [3] Rind, D., R. Suozzo, N. K. Balachandran, and M. J. Prather, 1990: Climate change and the middle atmosphere. Part I: The doubled CO₂ climate. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 475-494.
- [4] Rind, D., P. Lonergan, N. K. Balachandran, and D. Shindell, 2002: 2×CO₂ and solar variability influence on the troposphere through wave-mean flow interaction. *J. Meteor. Soc. Japan.*, **80**, 863-876.
- [5] Sigmond, M., P. C. Siegmund, E. Manzini, and H. Kelder, 2004: A simulation of the separate climate effects of middle-atmospheric and tropospheric CO₂ doubling. *J. Climate.*, **17**, 2352-2367.
- [6] Sudo, K., M. Takahashi, and A. Hajime, 2003: Future changes in stratosphere-troposphere exchange and their impacts on future tropospheric ozone simulations. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, doi:10.1029/2003GL018526.
- [7] Yukimoto, S., A. Noda, A. Kitoh, Y. Kitamura, M. Hosaka, K. Shibata, S. Maeda, and T. Uchiyama, 2001: The New Meteorological Research Institute Coupled GCM (MRI-CGCM2) -Model Climate and Variability-. *Papers in Meteorology and Geophysics.*, **51**,(2), 47-88.