

1. はじめに

赤道域成層圏における準二年振動(QBO)は同領域において最大の変動であり、北半球の成層圏の年々変動に大きな影響を与えていることは良く知られている(Holton and Tan, 1980)。一方、温室効果気体等の増加によって引き起こされる地球温暖化で気候がどのように変動するかは幅広い関心を集めており、その一つとしてQBOの将来予測が挙げられる。これまで、2つの二酸化炭素倍増平衡実験でQBOの将来予測の研究が行われ、Giorgetta and Doege(2005)は現在気候で再現されている29カ月の周期が3カ月ほど短くなる、Kawatani et al.(2011)は24カ月から1-5ヶ月長くなると報告している。後者はさらに振幅が小さくなり、特に50hPaより下では非常に小さくなることを示している。これら相反する結果は温暖化によってBrewer-Dobson循環が前者では弱くなり、後者では強くなることに関連している。

本研究は上記の2研究と異なり、二酸化炭素漸増実験でシミュレートされたQBOの将来予測を解析するものである。結果は周期については変化が見られず、振幅は上部成層圏では増加するが、中下部で減少することがわかった。

2. モデル実験

化学-気候モデル検証活動(CCM Validation)のphase2(Eyring et al., 2008)で設定された過去再現将来予測参照実験REF-B2(以降B2と記す)シナリオの条件で気象研究所の化学-気候モデル(MRI-CCM, Shibata and Deushi, 2008)を積分した。積分期間は1960-2000年までの140年間、メンバー数は3つであり、初期値が少し異なっている。REF-B2シナリオのフォーシングは海面水温/海氷(SST/sea-ice)、温室効果気体、フロン類の月平均のSST、海氷分布を日に内挿し、CO₂, CH₄, N₂Oとハロゲン類の濃度を地表面において全球一様に時間(日にち)の関数で与えた。

火山エーロゾルや太陽11年周期変動は将来予測が非常に難しいので入れていない。

SST/sea-iceは気象研究所大気海洋結合モデル(Yukimoto et al, 2006、大気モデルはMRI-CCMとほとんど同じ)の二酸化炭素1%/年の漸増実験の結果を使った。過去値でもモデル結果を使ったのは、現在気候でのモデルと観測とのギャップを避けるためである。温室効果気体とフロン類は、過去は観測値を使い、将来は、前者はA1B、後者は修正A1ハロゲンシナリオを使った。

このREF-B2シナリオに加え、感度実験シナリオのハロゲンを1960年に固定するSCN-B2b(Sb)と温室効果気体(SST/sea-iceも)を1960年に固定するSCN-B2c(Sc)も行った。いずれも、固定するフォーシング以外はREF-B2と同じ条件である。

MRI-CCMは対流圏化学を含んでおらず、対流圏でも成層圏と同じ化学を使っている。水平解像度はT42(約2.8度~300km)、鉛直解像度は68層(地表~80km [0.01hPa])のT42L68を使った。QBOを再現するため、Hines(1997)の重力波抵抗スキームを使っている(Shibata and Deushi, 2008)。

化学種の輸送過程はハイブリッド・セミ・ラグランジアン法で、鉛直にはフラックス・フォームである。化学過程はファミリー法を使い、成層圏の主な化学種を含み、7種のファミリーを含む36の長寿命種、15の短寿命種、80の気相反応、35の光化学反応を扱っている。タイプI、IIの2種類の極成層圏雲と硫酸エーロゾルも含み、それぞれの表面で6種、3種の不均一反応を扱っている。

3. 気候変化

約100年後2070-2099年間の30年の帯状平均場の変化を温度(図1)と東西風(図2)に示す。この期間はハロゲンがほぼ1980年代以前の値に戻っているので(但し地表)、二酸化炭素等

の増加の影響が強く表れ、対流圏は熱帯上部に潜熱解放による大きい昇温、成層圏は上に行くほど降温が大きくなっている。これに対して、温室効果気体が一定の場合、ハロゲンによるオゾン層破壊が非常に小さくなり、オゾン層の回復により、上部成層圏と南極下部成層圏で昇温している。前者は均一反応、後者は不均一反応の変化によるものである。詳細に見ると、定性的には温室効果気体増加とハロゲン減少によるオゾン層回復の影響はそれぞれの効果を合わせたのと等しくなっている。

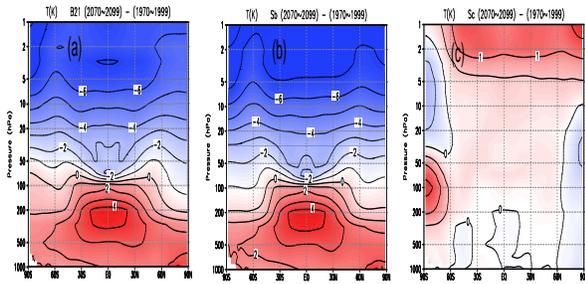


図 1. 帯状平均温度の 2070-2099 年の 30 年平均の 100 年前からの変化。(a)REF-B2、(b)Sb、(c)Sc。等値線間隔は 1°C。

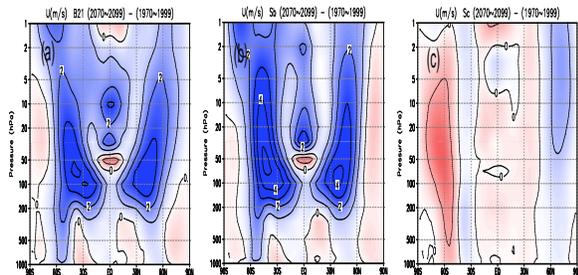


図 2. 図 1 と同じ、但し、帯状平均東西風。等値線間隔は 1m/s。シェーディングは正の値が青、負の値が赤で、図 1 と逆になっていることに注意。

東西風で見ると(図2)、温暖化のランでは下部成層圏から極夜ジェットの軸の赤道側の風が強くなっており、温室効果気体を固定したランではオゾンホール消滅の影響で、極夜ジェットが弱くなっているのが見られる。

4. QBO

1990-2009 年間の観測とモデルの QBO を図 3 に示す。観測は ERA40 と ERA-Interim の合

成である

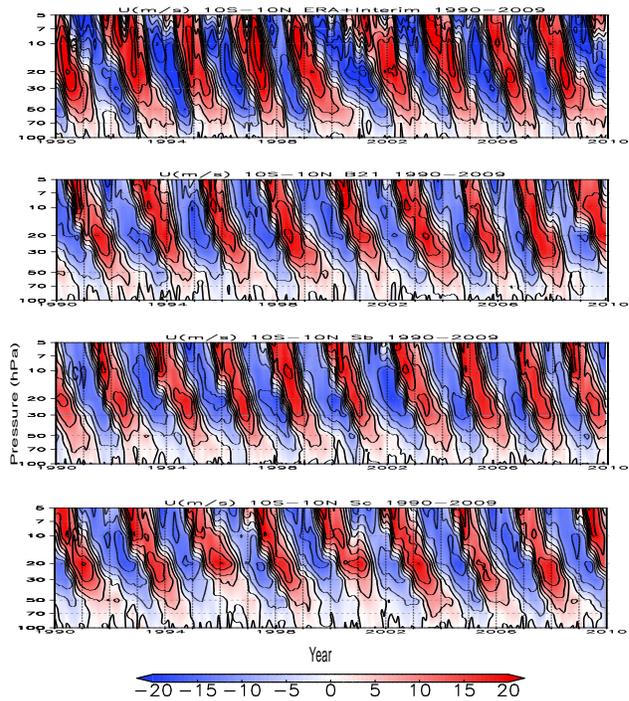


図 3. 熱帯 (10S-10N) の帯状平均東西風の 1990-2009 年の 20 年の推移。(a)ERA、(b)REF-B2、(c)Sb、(d)Sc。季節変化は除いている

いずれのランも大まかには周期が 28 カ月前後で観測値の 27 カ月に近い QBO を再現しており、その他の種々の特徴も観測値に良く似ている。

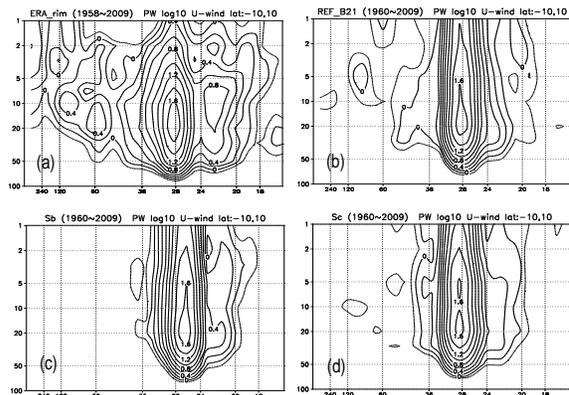


図 4. 熱帯 (10S-10N) の帯状平均東西風のパワースペクトルの 16 カ月より長い成分。ERA は 1958-2009、モデルは 1990-2009。(a)ERA、(b)REF-B2、(c)Sb、(d)Sc。

パワースペクトルを示すと図 4 のようになり、モデルの QBO は観測より狭い周期帯から成り立っていることがわかる。これは、今回のランのフォーシングに火山エアロゾルや太陽 11 年周期を含まないことに関連していると思われる。この図から QBO を取り出すのに 20-40 カ月のバンドパスフィルターを用いることにした。

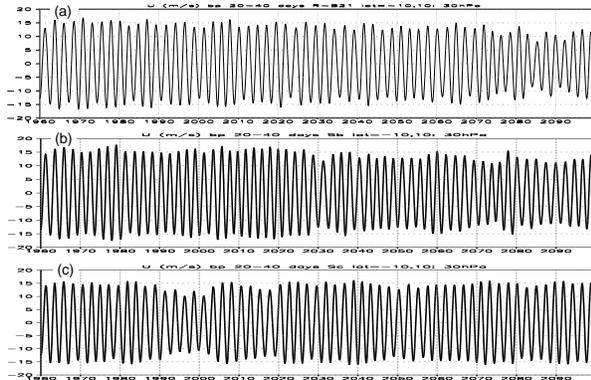


図 5. 30hPa でのバンドパスフィルターで取り出した QBO の 1960-2100 の推移。(a)REF-B2、(b)Sb、(c)Sc。

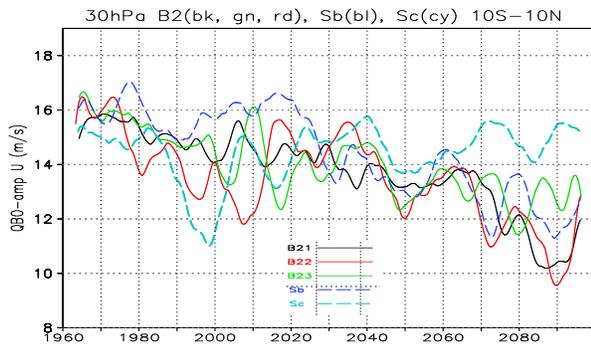


図 6. 30hPa でのバンドパスフィルターで取り出した QBO の振幅の 1960-2100 の推移。

30hPa での QBO の推移を見ると(図 5)、明らかに温暖化のランでは振幅が減少している。振幅を求めるのに単色波の場合に準じて分散 σ を使って $\sqrt{2\sigma}$ とした。それぞれの 3 サイクルの期間で分散を求め、その振幅の 3 サイクルの中心の年月に割り当てた。Wavelet (Morlet mother wavelet) を使った解析も行い、周期と振幅を求めた。周期は年代によってほとんど変化していないことがわかった (図略)。

これらに線形フィッティングを行って、トレンドを求めたのが図 7 である。

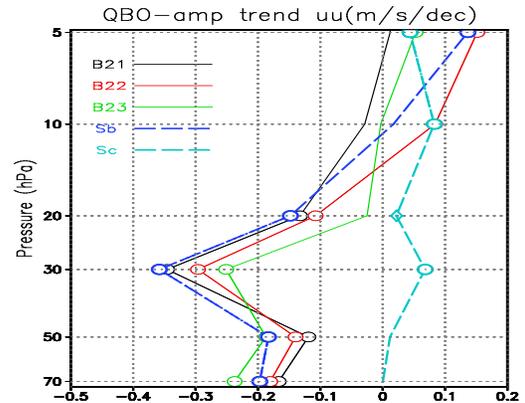


図 7. バンドパスフィルターで取り出した QBO のトレンドの鉛直分布。白丸は 99%、ダイヤモンドは 95% 有意を表す。

温暖化のランでは 20hPa より下層で振幅が減少し、10hPa より上層では増大する傾向があるが、後者の有意性は低い。温室効果気体を固定したランでは 30hPa より上層で弱く増大する。

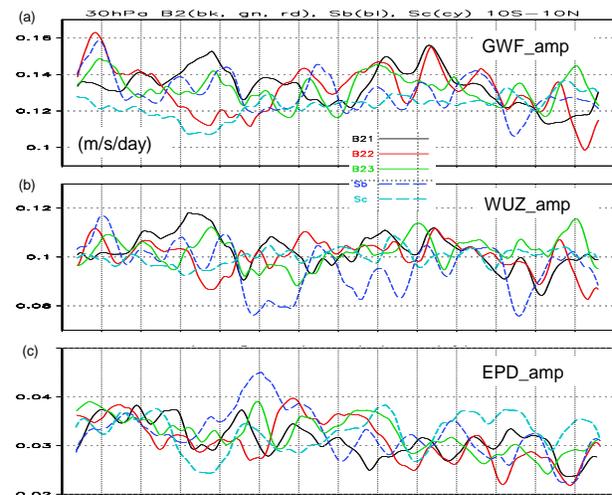


図 8. 重力波、運動量鉛直輸送、EP-Flux のフォーシングの QBO 成分の推移。

個々のフォーシングを調べると、図 8 のようになり、重力波、運動量鉛直輸送、モデル

で表現された波 (EP-Flux) の (大きさの) 順で減少トレンドが見られるが、これらは同位相で働いている訳ではないので、それぞれの役割を同定するのは難しい。

鉛直輸送による時間変化は上昇流と鉛直シアアの掛け算であり、QBO の周期帯を作るのはパワースペクトル (図 4) で見られるように QBP 自身と長期成分しかない (図 4 では省略したが、16 か月より短い周期は年と半年にシャープなピークがあるのみである)。鉛直輸送の項を分けると鉛直流と鉛直シアアの一方が QBO、他方が長期成分になり、下記のように鉛直流に関して関連付けると、第一項の Brewer-Dobson に関連したものと、第二項の QBO の二次循環に関連したものの和になる。

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_{wuz}^Q = -\left(\bar{w}^* \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)\right)^Q \sim -(\bar{w}^*)^L \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^Q - (\bar{w}^*)^Q \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^L$$

但し、上付きの L は長周期成分 (>10 年) で Q は QBO 成分である。

これらを評価すると、成層圏下層では鉛直シアアが小さくトレンドも非常に小さいので、ほとんど Brewer-Dobson の項のみが効いている。一方、中層より上では二次循環も効いていることがわかった (図略)。これらを含めて詳細な解析は Shibata and Deushi (2012) に記載されている。

5. 参考文献

- Eyring, V., Chipperfield, M. P., Giorgetta, M. A., Kinnison, D. E., Manzini, E., Matthes, K., Newman, P. A., Pawson, S., Shepherd, T. G. & Waugh, D. W. : Overview of the New CCMVal reference and sensitivity simulations in support of upcoming ozone and climate assessments and the planned SPARC CCMVal. SPARC Newsletter, No. 30, p.20–26, 2008.
- Giorgetta, M. A. & Doege, M. C.: Sensitivity of the quasi-biennial oscillation to CO₂ doubling. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L08701, doi:10.1029/2004GL021971, 2005.
- Hines, C. O., Doppler-spread parameterization of gravity-wave momentum deposition in the middle atmosphere. 2. Broad and quasi monochromatic spectra, and implementation. *J. Atmos. Solar-Terres. Phys.*, 59, 387-400, 1997.
- Kawatani, Y., Hamilton, K. & Watanabe, S. : The quasi-biennial oscillation in a double CO₂ climate. *J. Atmos. Sci.*, 68, 265–283, doi: 10.1175/2010JAS3623.1, 2011.
- Holton, J. R. & Tan, H. -C.: The influence of the equatorial quasi-biennial oscillation on the global circulation at 50 mb. *J. Atmos. Sci.*, 37, 2200–2208, 1980.
- Shibata, K. & Deushi, M.: Partitioning between resolved wave forcing and unresolved gravity wave forcing to the quasi-biennial oscillation as revealed with a coupled chemistry-climate model. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L12820, doi:10.1029/2005GL022885, 2005.
- Shibata, K. and M. Deushi: Simulation of the stratospheric circulation and ozone during the recent past (1980-2004) with the MRI chemistry-climate model, CGER's Supercomputer Monograph Report Vol.13, National Institute for Environmental Studies, Japan, 154 pp, 2008.
- Shibata, K., and M. Deushi: Future changes in the quasi-biennial oscillation under a greenhouse gas increase and ozone recovery in transient simulations by a chemistry-climate model, *Greenhouse Gases - Emission, Measurement and Management*, Dr. Guoxiang Liu (Ed.), 355-386, ISBN: 978-953-51-0323-3, InTech, 2012.
- Yukimoto, S., Noda, A., Kitoh, A., Hosaka, M., Yoshimura, H., Uchiyama, T., Shibata, K., Arakawa, O. & Kusunoki, S.: Present-day climate and climate sensitivity in the Meteorological Research Institute coupled GCM version 2.3 (MRI-CGCM2.3). *J. Meteorol. Soc. Japan*, 84, 333-363, 2006.