

1. はじめに

赤道準2年振動(QBO)の影響は北極から南極、対流圏から中間圏へと、非常に広い範囲まで及んでおり、気候変動を考えるうえで重要な現象の1つである(Baldwin et al. 2001)。QBOは気候モデルで再現させるのが難しい現象の1つであり、IPCC AR4で使用されたCMIP3ではQBOを表現しているモデルはなかった。

Kawatani et al. (2011)は非定常重力波パラメタリゼーションを組み込まなくてもQBOがシミュレートされるAGCMを用いて温暖化時におけるQBOの変化を調べた。図1にMIROC-AGCMに現れた、赤道上における帯状平均東西風の時間-高度断面図を示す。現在気候実験(1979-1998年に相当)に比べ温暖化気候実験(2080-2099年に相当)ではQBOの周期は伸び、振幅は下部成層圏で顕著に弱くなり、位相が下部成層圏まで下り難くなっている。図2に現在気候と将来気候における東西風の時間-高度断面図及びQBOと赤道域上昇流の模式図を示す。温暖化に伴い、Brewer-Dobson(BD)循環が強まり、赤道域では上昇流の強化が起こる。上昇流の強化は上部対流圏-下部成層圏で著しく大きく、結果として下部成層圏最下層でのQBO振幅が弱まる。より詳細なメカニズムはKawatani et al. (2011)で議論されている。更にKawatani et al. (2012)は、海面水温と二酸化炭素濃度の上昇がQBO変化に及ぼす影響を個別に評価し、両者の役割の比は約3対1であることを示した。

BD循環が温暖化に伴って強化されることは、ほぼ全ての気候モデルで予測されている(Butchart et al. 2006)。しかし現実大気でBD循環が強まっているかどうかは不明で論争中である(Engel et al. 2009; Stiller et al. 2012; Young et al. 2012)。BD循環を精密に観測する精度は無く、上昇流のトレンドを直接的に観測する事は現時点で不可能である。

本研究では、1950年代から現在までの約60年分の観測データにQBO振幅のトレンドが見られるかどうかに着目した。また数種類

の客観解析データによるQBOの再現性も調べた。更にIPCC AR5で使用されるCMIP5では、QBOを表現しているモデルが数種類出てきた為、これらのモデルによるQBO変化も解析した。

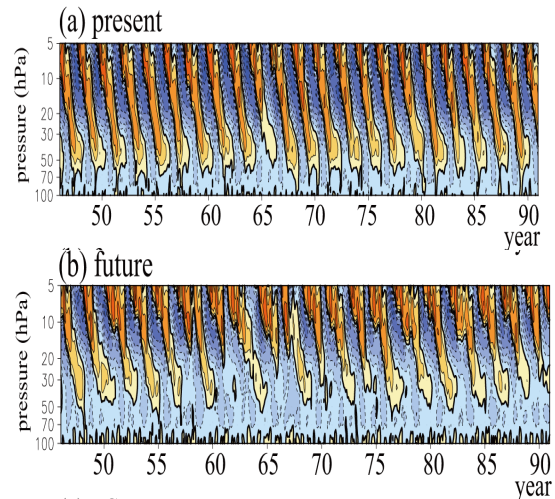


図1. MIROC-AGCMに現れた、赤道上における帯状平均東西風の時間-高度断面図。(a) 現在気候実験、(b)将来気候実験。

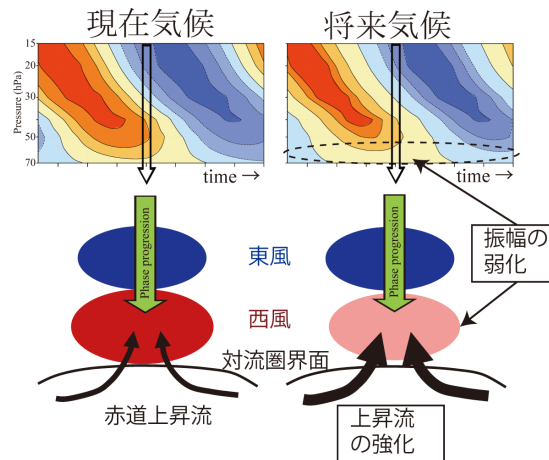


図2. 現在気候と将来気候における(上)東西風の時間-高度断面図と(下)QBOと赤道域上昇流の模式図。温暖化にともなって赤道域上昇流が強まり、下部成層圏最下層でのQBO振幅が弱まる事を示す。

2. 使用データ

QBO を解析する為の長期観測データとして、独ベルリン自由大学が提供しているラジオゾンデデータがある。このデータは 1953 年 1 月から 1967 年 3 月まではカントン島 (3°S, 172°W)、1967 年 9 月から 1975 年 12 月まではガン島 (1°S, 73°E)、1976 年 1 月から現在まではシンガポール (1°S, 104°E) で観測されたものである。

本研究で用いた再解析データを表 1 に示す。客観解析データは物理量によってそれぞれの再現性が異なる。特に全球的な観測データの少ない成層圏ではデータ間の違いが大きく、昨今の検討課題となっている(Fujiwara et al. 2012)。再解析データで表現される QBO は観測データの有無を反映した経度依存性がある事が指摘されている (Hamilton 2004)。

本研究では、最初にラジオゾンデ及び客観解析データを用いて、過去から現在までの QBO 変化を調べた。1953 年から 2012 年までの間に海面水温や二酸化炭素濃度が上昇しており、それに伴う QBO 変化が見られると予想した。次に客観解析データでの QBO の再現性を調べた。

データの種類	期間
ラジオゾンデ	1953—2012
NCEP-1	1948—2011
NCEP-2	1979—2011
ERA-40	1957—2002
ERA-Interim	1979—2011
JRA-25/JCDAS	1979—2011
MERRA	1979—2011
NCEP-CFSR	1979—2010

表 1：観測及び客観解析データと期間

モデルの名前	シナリオ
HadGEM2-CC	historical, rcp45
MIROC-ESM-CHEM	historical, rcp45
MIROC-ESM	historical, rcp45
MPI-RSM-MR	historical, rcp45

表 2：解析した CMIP5 モデルとシナリオ

CMIP5 について、現在データを取得済みの 39 種類のモデルの中では、QBO を表現しているモデルが 4 種類あった (表 2 参照)。それらのモデルの historical 実験及び rcp45 実験の出力データを解析し、QBO の変化をそれぞれのモデルについて調べた。ただしこれらのモデルの QBO は非定常重力波パラメタリゼーションによって駆動されている事に注意する。

3. 結果

図 3 にラジオゾンデ東西風データの時間—高度断面図を示す。このデータには QBO 以外の成分も含まれている。そこでこれらのデータから季節変化を除外し、5 か月移動平均を掛けて、QBO 成分を取り出した (Dunkerton and Delish, 1985; Taguchi 2010)。

1953 年 1 月から 2012 年 4 月までのラジオゾンデ観測期間では 26 サイクルの QBO が存在している。各サイクルで QBO の振幅を計算し、そのトレンドを調べたところ、中部～上部成層圏に掛けては統計的に有意な変化は見られなかったものの、下部成層圏最下層 (70hPa) では統計的に有意な負のトレンドが検出された。つまり下部成層圏で QBO 振幅が弱くなっている傾向が見られており、Kawatani et al. (2011, 2012) のモデル研究と類似していた。

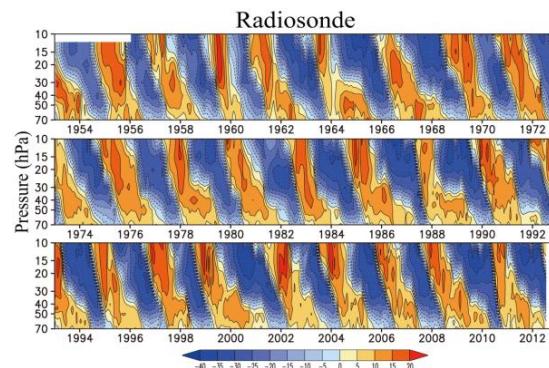


図 3. 赤道域ラジオゾンデ東西風データの時間—高度断面図。1953 年—現在まで。

温暖化にともなって下部成層圏最下層の QBO 振幅が弱まる事が、MIROC-AGCM 以外のモデルで見られるかどうか、に着目した。CMIP3 では QBO を再現しているモデルが無かったが、CMIP5 を調べたところ、39 種類

のモデル中、QBO を表現しているモデルは5つあった (図 4)。ただし、CESM1-WACCM は観測データによるナッジングを施している為、解析対象外とした。QBO を再現している4つのモデルについて、1900年から2100年までのデータを用いて QBO 振幅の変化を調べたところ、MIROC-AGCM と同様に全てのモデルで、QBO 振幅が温暖化に伴い弱くなる様子が見られた。また赤道域上昇流の変化も合わせて調べたところ、同様に全てのモデルで上昇流が強まっていた。CMIP5 データサーバーには、運動量収支解析を可能とするデータが整備されていないので、詳細な解析は出来ないが、Kawatani et al. (2011)から、これら4つのモデルでも、BD 循環の強化が下部成層圏 QBO の振幅を弱めている事を示唆している。

最後に客観解析データによる QBO の再現性及び QBO 振幅のトレンドが見られるかどうかを調べた。図 5 に客観解析データに現れた赤道上における帯状平均東西風の時間-高度断面図を示す。客観解析間で QBO の表現が大きく異なっている事が一目瞭然である。QBO 振幅の時間変化を調べたところ、NCEP-1, NCEP-2, NCEP-CFSR では正のトレンドとなっており、ラジオゾンデ観測データと真逆の結果を示していた。

ERA-Interim, ERA40, JRA, MERRA の QBO 振幅の変化を、ラジオゾンデ観測があるシンガポール上空で比較したところ ERA-Interim が観測と一番近い値を示していた。またシンガポール上空では上記客観解析間の違いは比較的小さいが、地点観測点の無い場所では、客観解析間の違いが大きくなっており、同化手法の違いやモデル依存性が表れているものと推測される。

4. まとめ

1953年から現在までの約60年分のラジオゾンデデータを使用して、QBO 振幅の変化を調べた。下部成層圏最下層で QBO 振幅が弱くなる有意なトレンドを発見した。温暖化に伴って QBO 振幅が弱くなることは、MIROC-AGCM では指摘されていた (Kawatani et al. 2011, 2012)。CMIP5 モデルを調べたところ、39 種類中4種類が QBO をモデルの中で陽に表現する事に成功していた。

これら4つのモデルでも、温暖化にもとない QBO の振幅が弱まる様子が見られた。客観解析では QBO 表現にばらつきがあり、QBO 振幅の再現性が一番良かったのは ERA-Interim であった。

本研究は温暖化シグナルが QBO に現れている事を示すとともに、近年の BD 循環の強化を間接的に示すものである。

参考文献

- Baldwin M. P. et al. The quasi-biennial oscillation. *Rev. Geophys.*, 39, 179–229, (2001).
- Butchart, N. et al. Simulations of anthropogenic change in the strength of the Brewer–Dobson circulation. *Clim. Dyn.*, 27, 727–741, (2006).
- Dunkerton, T. J. & Delisi, D. P. Climatology of the equatorial lower stratosphere. *J. Atmos. Sci.*, 42, 376–396, (1985).
- Engel, A. et al. Age of stratospheric air unchanged within uncertainties over the past 30 years, *Nature Geoscience*, doi:10.1038/NCEO388, (2009).
- Fujiwara, M. et al. A proposal of the SPARC Reanalysis/Analysis Intercomparison Project, *SPARC Newsletter*, No. 38, 14–17, 2012.
- Hamilton, K. On the quasi-decadal modulation of the stratospheric QBO period. *J. Clim.*, 15, 2562–2565, (2002).
- Kawatani, Y. Hamilton, K. & Watanabe, S. The quasi-biennial oscillation in a double CO₂ climate. *J. Atmos. Sci.*, 68, 265–283, (2011).
- Kawatani, Y., K. Hamilton and A. Noda, 2012: The effects of changes in sea surface temperature and CO₂ concentration on the quasi-biennial oscillation, *J. Atmos. Sci.*, 69, 1734–1749.
- Stiller, G. P. et al. Observed temporal evolution of global mean age of stratospheric air for the 2002 to 2010 period, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 3311–3331, (2012).
- Taguchi, M. Observed connection of the stratospheric quasi-biennial oscillation with El Niño–Southern Oscillation in radiosonde data. *J. Geophys. Res.*, 115, D18120, doi:10.1029/2010JD014325, (2010).
- Young, P. J. et al. Changes in stratospheric temperatures and their implications for changes in the Brewer–Dobson circulation, 1979–2005, *J. Climate*, 25, 1759–1772, (2012).

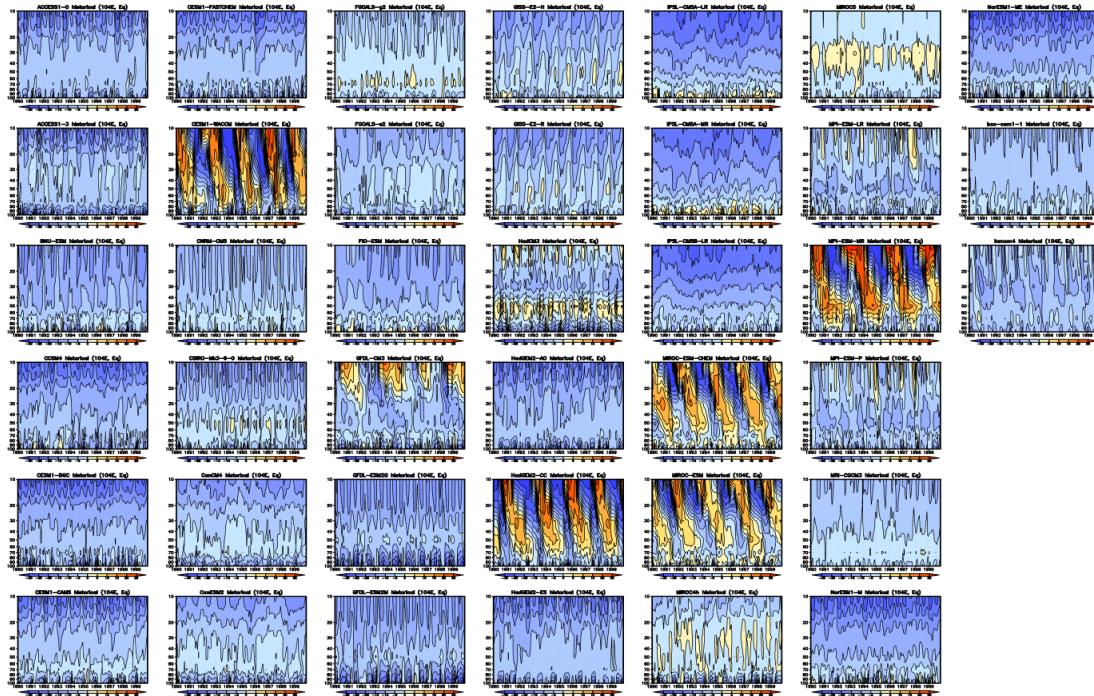


図 4. CMIP5 モデルにおける赤道上の帯状平均東西風の時間一高度断面図。Historical run の 1990 年から 1999 年までの 10 年分。39 種類のモデル中、QBO を表現しているモデルは 5 つあるが、CESM1-WACCM は観測データによるナッジングを施している為、解析対象外とした。

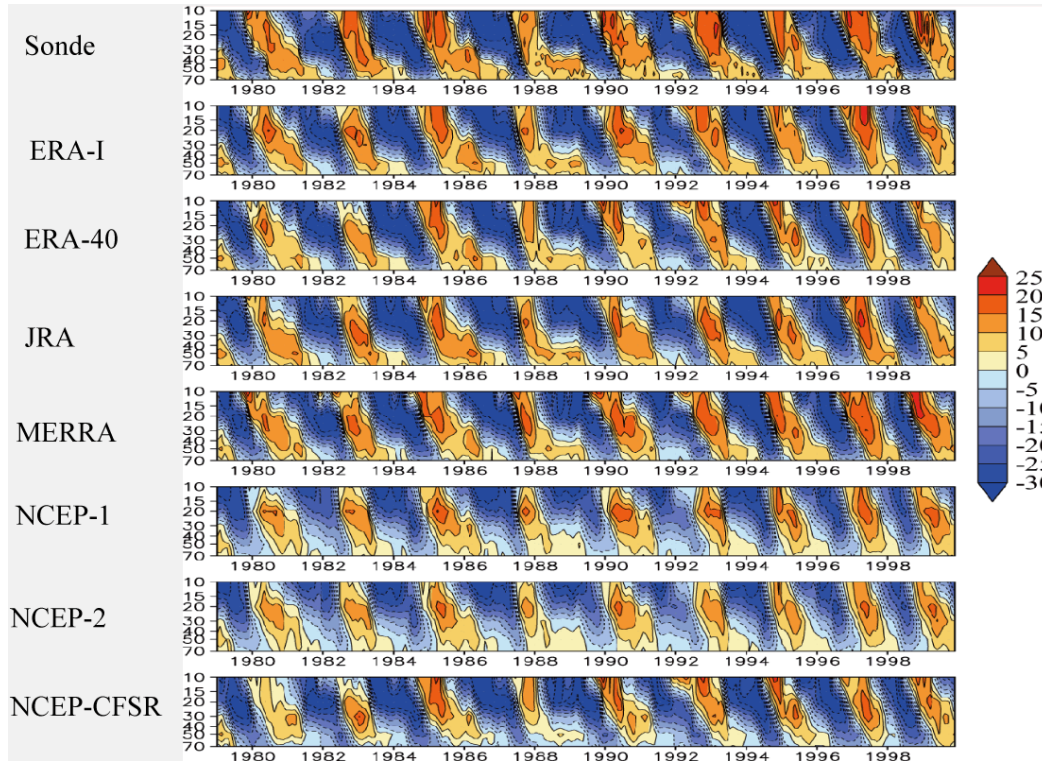


図 5. ラジオゾンデ観測データと客観解析データに現れた赤道上における東西風の時間一高度断面図。客観解析は帯状平均している。