

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26287117

研究課題名(和文) 気候変動に伴う赤道準2年振動の変化メカニズムの解明

研究課題名(英文) Mechanism of the Quasi-Biennial Oscillation modulation associated with climate change

研究代表者

河谷 芳雄 (KAWATANI, Yoshio)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・統合的気候変動予測研究分野・主任研究員

研究者番号：00392960

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：非定常重力波パラメタリゼーションを用いない気候モデルで赤道準2年振動(QBO)と半年振動(SAO)を再現した。成層圏水蒸気の年々変動メカニズムを、最新衛星観測と気候モデルを組み合わせ、論文として発表した。また気候変動に伴うQBO変化に関する実験を国際プロジェクトの枠組みの中で行い、QBO変化の特徴を調べた。

成層圏再解析比較プロジェクト(S-RIP)に参加し、赤道域成層圏東西風に関して再解析間の類似・相違点を明らかにした研究、成層圏の平均子午面循環と混合の強度を比較した研究、力学場の季節変動や年々変動を比較した研究等を、複数の論文として発表した。

研究成果の概要(英文)：The Quasi-biennial oscillation (QBO) and semi-annual oscillation (SAO) was successfully simulated by the climate model without non-stationary gravity wave parameterization. The mechanism of interannual variability of stratospheric water vapor was clarified by analyzing the climate model and satellite data. The experiments of the QBO modulation in a future climate were done following the international project, and modulations of the QBO were investigated. We participated in the stratosphere reanalyses intercomparison project (S-RIP). Several studies are published, such as representations of equatorial stratospheric zonal winds, comparison of mean meridional circulation and mixture processes, comparison of seasonal and interannual variations in dynamical fields etc.

研究分野：Middle atmosphere science

キーワード：赤道準2年振動 成層圈子午面循環

1. 研究開始当初の背景

大気循環や気候変動にとって、対流圏 - 成層圏相互作用を考えるのは必要不可欠であり、赤道準 2 年振動 (QBO) はそれに大きく関与している。QBO とは赤道域成層圏の東風と西風が 2 年強の周期で交代している現象で、主に重力波によって駆動されている。QBO は赤道成層圏の現象であるが、その影響は対流圏 - 成層圏 - 中間圏、北極 - 南極までの広範囲の力学・化学過程まで及んでいる。一方、成層圏ではブリュワー・ドブソン循環 (BD 循環) と呼ばれる、赤道域で上昇し、南北両半球に広がり、高緯度で下降する地球規模の循環が存在する。BD 循環は人体に有害な紫外線を防ぐオゾンや、気候変動と関係する水蒸気・メタンなどの大気微量成分を全球的に運ぶ極めて重要な循環で、世界中の主要な気候モデルのほぼ全てが、地球温暖化に伴って強まる事を予測している。

最新の研究から、地球温暖化に伴う QBO と赤道上昇流の長期変化傾向の定性的理解は得られた (Kawatani and Hamilton 2013)。一方で、長期変化に数年から数十年の変動が伴う事、QBO 弱体化傾向はモデルより観測が大きい事、赤道上昇流という BD 循環の一端の理解のみである事、など多くの課題が見つかった。更に気象学で頻繁に使用される再解析データ間で QBO 表現の相違点が大きい事、も課題である。気候モデル予測より現実では BD 循環がより強化されている可能性もある。しかしながら、大気内部変動に伴う QBO 変化のメカニズムは殆ど理解されていない。

2. 研究の目的

上記の背景を受けて本研究課題では、(1) 再解析データによる QBO 変動の再現性を地点観測データから検証、(2) 地球温暖化に伴う QBO・BD 循環の変動特性について、観測・再解析・広範なモデル実験を組み合わせることで中長期的な QBO の変化メカニズムを明らかにすることを目的とした。更に QBO 振幅の変化が他の気象現象に与える影響について調べる。また成層圏全般の研究における再解析データの有用性を合わせて調べることとした。

3. 研究の方法

ラジオゾンデデータ、衛星観測データ、高い時空間解像度を持つ雲データ、日本発再解析 JRA-55 を含む 8 種類の再解析データ、高解像度気候モデルに様々な条件を組み入れた広範な数値実験を駆使し、それぞれのデータの相補性を取る事に留意して研究目的の達成を試みた。研究組織には国内の研究者に加え、共通の問題意識を持つ 2 人の海外研究協力者も参画し、QBO 研究で最先端をいく研究実績を持つ研究者、再解析データ研究で世界をリードする研究者、国内屈指の気候モデル専門家、幅広い見識と国際的に顕著な実績を持つ研究者が一同に参画し、それぞれの得

意分野を融合させ研究を高いレベルで確実に進めた。得られた最新成果は適宜学会発表・論文文化し、幅広く普及させ社会に還元する予定である。

気候モデルについては、現在まで利用してきた MIROC-AGCM (東京大学、国立環境研究所、海洋研究開発機構で共同開発) を、本研究を遂行可能な仕様に構築した。水平解像度は 120km、鉛直は 500m に設定し、地表から高度約 90km までを 168 層でカバーした (T106L168) モデルと高度 50km までを 72 層でカバーした (T106L72) を構築した。これは非定常重力波パラメタリゼーションを組み込まずとも、QBO を自発的に再現可能且つ数十年に亘る長期積分が可能な仕様である。モデル計算は申請者が所属する研究機関の大規模並列スーパーコンピュータ (地球シミュレータ) を用いて効率的なモデル実験を行うことができた。

観測データについては、ラジオゾンデデータ (IGRA, FUB)、衛星観測データ (MLS) を使用する。再解析データは、予報モデルおよびデータ同化システムの種類によって、BD 循環の形状と強度が大きく異なっている。例えば予報モデルに内在する気温のバイアスは、データ同化を介して擬似的な循環を生じさせ BD 循環を非現実的に歪める。最新の再解析では、改良された予報モデル及び高度なデータ同化手法を利用することで、この問題は大きく改善している。本研究では複数の再解析データにおける QBO 再現性の評価及び BD 循環の検証を行う為に、2013 年に公開された日本発最新の再解析 JRA-55 (気象庁 55 年長期再解析) を含む、観測データの取扱いやデータ同化手法の違いから性能が大きく異なる新旧 8 種類の再解析データ (他に NCEP-1, NCEP2, ERA-40, ERA-Interim, JRA-25/JCDAS, MERRA, NCEP-CFSR) を使用した。

4. 研究成果

(1) 全球の放射強制力に寄与し、気候変動に重要な役割を果たす成層圏水蒸気の QBO に伴う変動を調べた。2004 年 6 月に打ち上げられた Aura MLS 衛星によって、これまでにない精度で成層圏水蒸気を測ることができるようになった。約 10 年分蓄積された MLS 観測データを用いて、赤道域の水蒸気の QBO に伴う年々変動を調べたところ、(i) 赤道域上部成層圏で時間と共に下方伝播する水蒸気偏差の存在が発見され、(ii) 赤道域上部対流圏から下部成層圏にかけては、上方伝播する成分が卓越することが確認された (図 1a)。

次に MIROC-AGCM を用いてそのメカニズムの解明を試みた。メタン酸化による成層圏水蒸気過程を取り込んだモデルは水蒸気の鉛直プロファイルの高度微分が正になり観測と整合的だが、取り込まないと符号が逆になる (図略)。(i) に関しては、メタン酸化プロセスを取り込んだモデルのみ再現された。メカニズムを調べたところ、上部成層圏の

QBO が引き起こす 2 次的な鉛直循環と、水蒸気の高度微分との掛け合わせによって説明できることが明らかになった。

一方 (ii) に関しては、対流圏界面まで下りてきた QBO が、対流圏界面の温度の変調を引き起こすことによるものであった。すなわち QBO 振幅に伴う対流圏界面の温度偏差が暖かく (冷たく) なる時に、より多くの (少ない) 水蒸気量が成層圏へと運ばれる。下部成層圏における水蒸気の年々変動と対流圏界面付近での QBO 振幅との間に高い相関がある。成果は論文として発表した (Kawatani et al. 2014)。この結果から、温暖化に伴う下部成層圏 QBO 振幅の弱体化に伴い、将来の下部成層圏水蒸気の年々変動は小さくなることが示唆される。

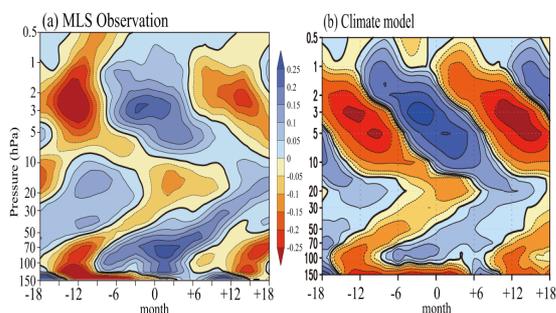


図 1. QBO に伴う赤道域 ($12^{\circ}\text{S}-12^{\circ}\text{N}$) 成層圏水蒸気の変動の時間 - 高度断面図。時間 "0" は QBO の位相が高度 30hPa で西風から東風になる月。(a) が MLS 衛星観測、(b) が気候モデル実験。コンター間隔は 0.05ppmv 。

(2) 地球温暖化に伴う QBO 変調の研究を遂行した。温暖化に伴う QBO 変化に関しては、我々のグループが世界に先駆けて行ってきたが (Kawatani et al. 2011, 2012; Kawatani and Hamilton 2013) QBO を再現しているモデルの数が少ない為、定量的な QBO の変調については不明確であった。また温暖化シナリオの依存性もある。

気候モデルにおける QBO の再現性及び将来変化を詳細に調べるため、2015 年に気候モデルによる QBO 比較国際プロジェクト (QBOi) が立ち上がった。我々のグループは、非定常重力波パラメタリゼーションを用いなくとも QBO を再現可能な唯一の気候モデル、MIROC-AGCM を用いてこのプロジェクトに参加している。QBOi の実験プロトコルに沿って、現在気候実験、二酸化炭素濃度 2 倍且つ海面水温を全球一様に 2K 上げた実験、同様に二酸化炭素濃度 4 倍且つ海面水温を 4K 上げた実験を行った。モデル積分期間はそれぞれ 30 年間で、アンサンブルメンバーは 3 である。

図 2 に带状平均した赤道域東西風の時間 - 高度断面図を示す。現在気候実験では、QBO をよく再現している。一方で二酸化炭素濃度 2 倍且つ海面水温 2K 上昇実験では、QBO の周期は長くなり、特に下部成層圏で振幅が弱くなる様子が見られ、我々のグループの先行研究 (Kawatani et al. 2011, 2012) と整合的

な結果である。一方で二酸化炭素濃度 4 倍且つ海面水温 4K 上昇実験では、QBO の構造が不安定になり、成層圏での QBO 振幅が弱くなりすぎて、QBO が消滅しかける期間もある。地球温暖化が極端に進むと、QBO が非常に変わり得ることを示唆している。更に世界中のモデルを用いた解析を同時に行い、各モデル間のばらつきとその原因を調べている。QBOi プロジェクトの最初の論文が出版された (Butchart et al. 2018)。

(3) 全球雲解像モデル NICAM データを用いた成層圏東西風の再現性の解析を行った。NICAM では鉛直解像度が粗い故に QBO は再現されないが、鉛直解像度を 500m 程度にすると再現される可能性がある (Kodama et al. 2015)。高解像度気候モデルで表現される大気波動に伴う運動量フラックスの鉛直解像度依存性を調べ、論文として出版した (Watanabe et al. 2015)。

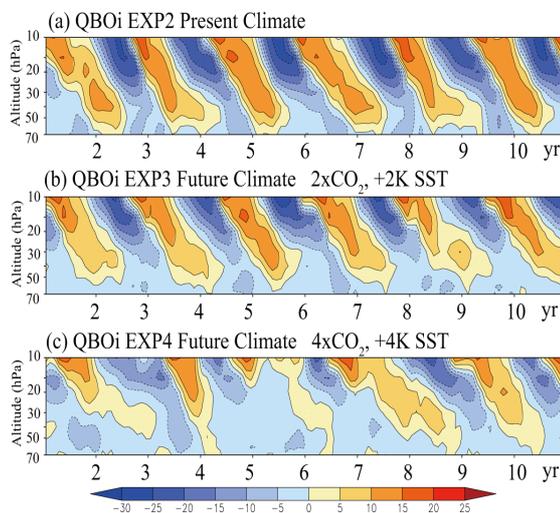


図 2. 带状平均した赤道域東西風の時間 - 高度断面図。(a) 現在気候実験、(b) 二酸化炭素濃度 2 倍且つ海面水温 2K 上げた実験、(c) 二酸化炭素濃度 4 倍且つ海面水温を 4K 上げた実験。赤が西風、青が東風を示し、コンター間隔は 5ms^{-1} 。

(4) QBO が対流圏の東西平均循環場および対流活動にあたる影響について徹底的に調べるための手法を提案し、観測データ、再解析データセットを用いて統計的有意な変動を調べた。その結果、北半球夏季・冬季の夏極における循環と降水活動の変化や、南半球冬の亜熱帯ジェットの南北移動など、いまままでに知られていない有意なシグナルを発見した。成果は論文として発表した (Gray et al. 2017)。

(5) SPARC Reanalysis Intercomparison Project (S-RIP) に関わる研究を遂行した。S-RIP は成層圏現象を対象とした、国際的な再解析比較プロジェクトである。

図 3 に 1979 年 - 2001 年の高度 70hPa にお

ける地点観測の東西風データ取得率と再解析間の東西風の相違（再解析間でのバラツきの度合い）を示す。赤道域ではそもそも観測点が少なく、特に中部～東部太平洋の赤道近傍では観測点が皆無に等しい状況である。高度が上がれば各地点のデータ取得率は顕著に低下する（図略）。

再解析間の相違は、地点観測データ密度と見事に対応した東西非一様な分布になっている。衛星輝度温度データには地域的な疎密はほぼ無いので、再解析の東西風に対しては、衛星輝度温度データに比べて地点観測データの束縛はるかに大きいことを明確に示している。地点観測データ数は時間の関数になっているので、Kawatani and Hamilton (2013) で示したような QBO 振幅のトレンドを再解析データから計算した場合、人工的なトレンドも含まれることになり注意が必要であることも指摘した。再解析間の東西風の相違は、他にも高度や QBO 位相にも依存していた。成果は論文として発表した (Kawatani et al. 2016)。

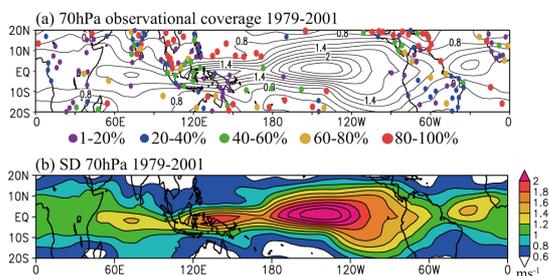


図 3 .1979 年 - 2001 年の高度 70hPa における (a) 地点東西風観測の観測データ取得率と (b) 再解析間の東西風の相違。値が大きい場所ほど、再解析間のばらつきが大きいことを示す。

(6) 再解析データの気温、東西風について、特に太陽活動に伴う変動の解析と比較を行った論文を出版した。また再解析データの気温について、特に大規模火山噴火に伴う変動の解析と比較を行った論文を出版した (Fujiwara et al. 2015)。これらの論文では、QBO に伴う変動の評価も同時に行った (Mitchell et al. 2015)。

続いて気象再解析データについて、成層圏の平均子午面循環と混合の 10 年規模の変動を調査し、各種観測から指摘される Age of Air (AoA) の詳細な字空間変動と結び付け、論文として発表した (Miyazaki et al. 2016)。

また再解析データを用いて、QBO や他の変動に伴う力学場の変動を解析し、S-RIP の活動を包括的に示す論文を発表した (Fujiwara et al. 2017)。更に力学場の季節変動や年々変動を比較した結果を、Long et al. (2017) として出版した。この中で、QBO を念頭に東西風データの比較をおこなった。オゾンと水蒸気場の季節変動や年々変動を比較した結果を、Davis et al. (2017) として出版した。この中で、QBO に伴うオゾン変動の様子も比

較した。

気象再解析および大気組成を中心的に対象とした複数の再解析について、過去 10 年分程度についてオゾンの 3 次元分布を比較した。オゾンは放射過程を介して気象および風の場に影響するため、その品質は気象再解析を向上する上で重要である。気温および風への影響が大きい上部対流圏・下部成層圏で、オゾン濃度場の再解析データ間の差異が大きいことが分かった。データ同化手法や利用した観測データのの違いに帰着する考察を行った。成果は論文として発表した (Miyazaki et al. 2017)。

< 引用文献 >

Kawatani, Y., K. Hamilton and S. Watanabe, 2011: The Quasi-biennial oscillation in a double CO₂ climate, *J. Atmos. Sci.*, 68, 265-283., doi:10.1175/2010JAS3623.1

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., doi:10.1175/JAS-D-11-0265.1

Kawatani, Y. and K. Hamilton, 2013: Weakened stratospheric Quasi-biennial Oscillation driven by increased tropical mean upwelling, *Nature*, 497, 478-481, doi:10.1038/nature12140

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 15 件)

Hirota, N., H. Shiogama, H. Akiyoshi, T. Ogura, M. Takahashi, Y. Kawatani, M. Kimoto and M. Mori, 2018: The influences of El Nino and Arctic sea-ice on the QBO disruption in February 2016, *npj Climate and Atmospheric Science*, in press, 査読有

Butchart N., Anstey J. A., Hamilton K., Osprey S., McLandress C., Bushell, A. C., Kawatani Y., , S. Watanabe et al. 2018: Overview of experiment design and comparison of models participating in phase 1 of the SPARC Quasi-Biennial Oscillation initiative (QBOi), *Geoscientific Model Development*, 11, 1009-1032, doi:10.5194/gmd-11-1009-2018, 査読有

Watanabe S., Hamilton K., Osprey S., Kawatani Y., Nishimoto E. 2018: First Successful Hindcasts of the 2016 Disruption of the Stratospheric Quasi-biennial Oscillation, *Geophysical*

Research Letters, 45, 1602-1610, doi:10.1002/2017GL076406, 査読有

Gray L. J., Anstey J. A., Kawatani Y., Lu H., Osprey S., Schenzinger V., 2017: Surface impacts of the Quasi-Biennial Oscillation, Atmospheric Chemistry and Physics Discussion, 2017, doi:10.5194/acp-2017-1065, 査読有

Davis S, M., Hegglin M. I., Fujiwara M. et al. 2017: Assessment of upper tropospheric and stratospheric water vapor and ozone in reanalyses as part of S-RIP, Atmospheric Chemistry and Physics, 17, 12743-12778, doi:/acp-17-12743-2017, 査読有

Fujiwara, M., J. S. Wright, G. L. Manney et al. 2017: Introduction to the SPARC Reanalysis Intercomparison Project (S-RIP) and overview of the reanalysis systems, Atmospheric Chemistry and Physics, 17, 1417-1452, doi: 10.5194/acp-17-1417-2017, 査読有

Miyazaki, K. and K. Bowman, 2017: Evaluation of ACCMIP ozone simulations and ozonesonde sampling biases using a satellite-based multi-constituent chemical reanalysis, Atmospheric Chemistry and Physics, 17, 8285-8312, doi:10.5194/acp-17-8285-2017, 査読有

Long, C. S., M. Fujiwara, S. Davis, D. M. Mitchell, and C. J. Wright, 2017: Climatology and interannual variability of dynamic variables in multiple reanalyses evaluated by the SPARC Reanalysis Intercomparison Project (S-RIP), Atmospheric Chemistry and Physics, 17, 14593-14629, doi: 10.5194/acp-17-14593-2017, 査読有

Miyazaki, K., Iwasaki, T., Kawatani, Y., Kobayashi, C., Sugawara, S., and Hegglin, M. I.: Inter-comparison of stratospheric mean-meridional circulation and eddy mixing among six reanalysis data sets, Atmos. Chem. Phys., 16, 6131-6152, doi:10.5194/acp-16-6131-2016, 2016, 査読有

Kawatani, Y., K. Hamilton, K. Miyazaki, M. Fujiwara and J. Anstey, 2016: Representation of the tropical stratospheric zonal wind in global atmospheric reanalyses, Atmospheric Chemistry and Physics, 16, 6681-6699, doi: 10.5194/acp-16-6681-2016, 査読有

S. Watanabe, K. Sato, Y. Kawatani, and M. Takahashi. Vertical resolution dependence of gravity wave momentum flux simulated by an atmospheric general circulation model. Geosci. Model Dev., 2015, 8, 1637-1644, doi: 10.5194/gmd-8-1637-2015, 査読有

C. Kodama, Y. Yamada, A. T. Noda, K. Kikuchi, Y. Kajikawa, T. Nasuno, T. Tomita, T. Yamaura, H. G. Takahashi, M. Hara, Y. Kawatani, M. Satoh, and M. Sugi. A 20-year climatology of a NICAM AMIP-type simulation. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2015, 93, 4, 393-424, doi: 10.2151/jmsj.2015-024, 査読有

Mitchell, D. M., L. J. Gray, M. Fujiwara, T. Hibino, J. A. Anstey, W. Ebisuzaki, Y. Harada, C. Long, S. Misios, P. A. Stott, and D. Tan, 2015: Signatures of naturally induced variability in the atmosphere using multiple reanalysis datasets, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 141, 2011-2031, doi:10.1002/qj.2492, 査読有

Fujiwara, M., T. Hibino, S. K. Mehta, L. Gray, D. Mitchell, and J. Anstey, 2015: Global temperature response to the major volcanic eruptions in multiple reanalysis data sets, Atmospheric Chemistry and Physics, 15, 13507-13518, doi: 10.5194/acp-15-13507-2015, 査読有

Kawatani, Y., J. N. Lee and K. Hamilton, 2014: Interannual variations of stratospheric water vapor in MLS observations and climate model simulations, J. Atmos. Sci., 71, 4072-4085., doi:10.1175/JAS-D-14-0164.1, 査読有

[学会発表](計 34件)

Fujiwara, M. et al.: Results from the SPARC Reanalysis Intercomparison Project (S-RIP) during 2013-2017, 5th ICR5, 2017, invited.

Miyazaki, K., Iwasaki, T. Kawatani, Y. et al: Inter-comparison of stratospheric mean meridional circulation and eddy mixing among six reanalyses, IUGG 2015, 2015.

Kawatani, Y., J. N. Lee and K. Hamilton: Interannual variations of stratospheric water vapor in MLS observations and climate model simulations, AOGS2014, 2014, invited.

〔その他〕

河谷芳雄のホームページ

<https://sites.google.com/site/yoshiokawatani>

藤原正智のホームページ

<http://wwwoa.ees.hokudai.ac.jp/~fuji/>

宮崎和幸のホームページ

<https://sites.google.com/site/kazuyukimiyazaki/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河谷 芳雄 (KAWATANI, Yoshio)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・統合的気候変動予測研究分野・主任研究員
研究者番号：00392960

(2) 研究分担者

藤原 正智 (FUJIWARA, Masatomo)

北海道大学・地球環境科学研究所・准教授
研究者番号：00360941

宮崎 和幸 (MIYAZAKI, Kazuyuki)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境観測研究開発センター・主任研究員
研究者番号：30435838

(3) 連携研究者

渡辺 真吾 (WATANABE, Shingo)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・シームレス環境予測研究分野・分野長
研究者番号：50371745

佐藤 薫 (SATO, Kaoru)

東京大学・理学系研究所・教授
研究者番号：90251496