

令和 2 年 7 月 2 日現在

機関番号：82706

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18816

研究課題名(和文) 観測史上初2016年赤道成層圏循環の崩壊を予測できるか

研究課題名(英文) Can we predict an unprecedented disruption of the equatorial stratospheric circulation in 2016?

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・地球環境部門(環境変動予測研究センター)・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) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：中間圏・下部熱圏を含む中解像度及び高解像度の大気大循環モデルを用いて、2016年に観測された赤道準2年振動(QBO)崩壊現象の再現実験に初めて成功し、北半球亜熱帯成層圏から伝わったロスビー波が、赤道成層圏の厚さ数km程度の狭い高度範囲に集中して作用することが要因と示した。気候モデルを用いたアンサンブル実験から、エルニーニョと海氷減少がQBO崩壊を引き起こすロスビー波の生成と赤道方向への伝播が重要であることも分かった。QBO崩壊現象に先んじて生じた中部成層圏のQBO東風シア領域の上昇については、成層圏子午面循環に伴う赤道上昇流が本質的な役割を果たしたことも分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

QBO位相の変化は、成層圏極渦の変調を引き起こし、中高緯度の地表面気圧配置やストームトラックの分布を変化させる為、QBOは季節予報にとっても重要な現象と認識されている。2016年に起きたQBO崩壊は、気象現象の正確な予測を迫る世界中の予報機関に大きな衝撃を与えた。2016年QBO崩壊現象は、その予測に世界各国の機関が失敗していた。本研究で明らかになったQBO崩壊メカニズムの解明及び数値モデルでの再現成功は今後の季節予報精度向上に貢献することで、科学的にも社会的にも大きな意義を有する。

研究成果の概要(英文)：The mechanism of the QBO disruption in 2016 was investigated by high-resolution atmospheric general circulation model with high vertical resolution. Extratropical Rossby waves propagating from mid-latitude stratosphere to low latitudes play crucial roles in forming the disruption. Ensemble experiments also implied the importance of El Nino and decreasing of sea ice on the disruption through making preferable condition for Rossby wave propagations. Tropical upwelling in the stratosphere is essential for upward propagation of QBO easterly in the middle stratosphere.

研究分野：大気科学

キーワード：赤道準2年振動

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

赤道準 2 年振動(Quasi-Biennial Oscillation: QBO)は主に小規模な大気重力波によって駆動されており、気候モデルで再現させるのが最も難しい気象現象の 1 つである。世界の殆どの研究機関で、様々な仮定を含む重力波パラメタリゼーションをモデルに組み込むことで QBO を再現しており、大きな不確実性を引き起こす主要因となっている。研究代表者は同パラメタリゼーションを組み込まない高解像度気候モデル(MIROC-AGCM)を用いて QBO の再現に成功し、QBO 駆動の詳細なメカニズムや(Kawatani et al. 2010a,b)、地球温暖化に伴う QBO 変化の成果を世界に先駆けて報告した(Kawatani et al. 2011)。さらに 60 年に渡る観測データを用いて高度 19km の QBO 振幅がこの 60 年間で 30%以上減少している事を発見し、温暖化に伴う QBO 変化が既に現れていることを立証した(Kawatani and Hamilton 2013)。2016 年に起きた QBO 崩壊現象は、地球温暖化に伴う QBO の変調が関連し、今後類似のケースが増える可能性があることが指摘されている。

2016 年 9 月に英国で開かれた QBO 国際ワークショップでは、2016 年の QBO 崩壊現象も議論されたが、メカニズム解明や気候モデルでの再現可能性に関する具体的解決策は継続課題とされた。QBO 崩壊の再現に失敗している世界各国のモデルでは、重力波パラメタリゼーションが QBO の主たる駆動源になっており、例えば海面水温変化に伴う小規模重力波の変動が QBO へ与えるプロセス等は反映されていない。パラメタリゼーションを用いない研究代表者による唯一の高解像度気候モデル実験は海洋変動の影響も反映され、QBO 崩壊現象の謎を紐解く独創的・先駆的な研究になる可能性が高いと考えた。

2. 研究の目的

QBO 崩壊現象は確立された理論では解釈ができず、且つ世界各国の気象機関が予報に失敗した。本研究の目的は、そのメカニズムの解明・気候モデルによる再現に挑むものである。以下に起きた現象を述べる。

赤道域の成層圏(高度 18 - 50km の大気層)では、東風と西風が 2 年強の周期で交代している QBO と呼ばれる大規模な大気循環が存在する。QBO は 1961 年に発見されて以来、理論・観測・数値実験により、その駆動メカニズムは以下のように理解されてきた。赤道域の活発な積雲対流によって大気波動(主に重力波)が励起される。東進・西進する重力波が上方伝播し成層圏で砕波すると、それぞれ東向きの風(西風)と西向きの風(東風)を形成する。重力波の位相速度 C_x と東西風 U の絶対値 $|C_x - U|$ が大きいほど、重力波は上空まで伝播する性質を持つ為、最初に上層に西風(東風)が現れ、時間とともに下降する。下降した西風(東風)の上層には新たな東風(西風)が形成される。この特徴はゾンデ観測が始まった 1953 年以降一貫しており、QBO 駆動メカニズムは確立されたと考えられてきた。

しかし 2016 年 1 月、西風位相が下降している最中の高度 22km 付近に突如東風が形成され、西風が上方伝播し始めたのである(図 1)。この観測史上類を見ない QBO 崩壊現象は上述した理論では説明不可能で、世界中の研究者を驚かせた。この現象を速報した 2 本の論文(Osprey et al. 2016, Science; Newman et al. 2016, GRL)は、中緯度から赤道域に侵入した惑星規模の大気波動(プラネタリー波)が要因になっている可能性を示したが、詳細なメカニズムは未解明であった。(1)観測史の中で、何故 2016 年のみ中緯度プラネタリー波が高度 22km 付近で東風を形成できたのか、(2)プラネタリー波は規模が 1 万 km と大きく、1~3 か月先の天候を予報する通常の季節予報モデルでも十分に解像できる現象にも関わらず、世界各国の気象予報機関、例えばヨーロッパ気象局(ECMWF)、英国気象庁(Met Office)、日本の気象庁(JMA)等が、この QBO の変調を予測できなかった理由は何故か、は解明されていない。

QBO は赤道成層圏の現象であるが、赤道~極域、対流圏—成層圏—中間圏に及ぶ広範囲の力学・化学過程に影響を及ぼしている。QBO 位相の変化は、成層圏極渦(極域に形成される大規模な西風の渦)の変調を引き起こし、中高緯度の対流圏ジェット、地表面気圧配置やストームトラック(低気圧の通り道)の分布を変化させる。例えば QBO は北大西洋振動と呼ばれる大規模な気圧パターンに影響を及ぼし、英国では QBO 西風位相時に、低気圧活動が活発で洪水が起きやすいことが報告されている。

QBO は季節予報にとっても重要な気象現象と認識され、全く予期していなかった 2016 年 QBO 崩壊は、気象現象の正確な予報が任務の世界中の予報機関に大きな衝撃を与えた。温暖化に伴う QBO の変調が、QBO 崩壊に関連している可能性も指摘され、今後類似の現象が起こる頻度が増すと、季節予報精度が大きく下がる可能性がある。本研究の主目的は、2016 年の変則的 QBO を引き起こしたメカニズムを解明・気候モデルで再予測し、詳細なメカニズム解明と予測可能性を調査することである。

3. 研究の方法

QBO 崩壊現象は、少なくとも 2015 年 12 月には高度 22km の QBO 西風が弱くなり始めるなど、その予兆が現れている。最初に各種観測データ及び全球再解析データを用いて、赤道域大気波動の定量的変化、中緯度プラネタリー波の発生活動とその 3 次元的伝播特性について精査し、現象の理解を深める。次に QBO 研究に実績のある気候モデルを用いた数値実験を行う。QBO の駆動源である重力波を陽に表現可能な高解像度気候モデル MIROC-AGCM をベースとし、中間圏・下部熱圏まで拡張した JAGUR を用いて、以下に示す 3 種類の実験を行う。(1)ハインドキャスト実験(過去の事例をモデルで予測し、系統誤差の補正等を通じて予報精度向上を上げる試み。

観測された海面水温、二酸化炭素やオゾン等のデータを気候モデルに与える)。2015年11月1日、12月1日、2016年1月1日など様々な初期値を用いて、どの段階からモデルがQBO崩壊を捉えられるのか、を精査する。さらに2016年1月に見られた背景場を作りうる要因についても考察する。これには中解像度MIROC5モデルを用いる。QBOを再現することはできないが、低コストであり、複数のアンサンブル実験が行えるという利点がある。

4. 研究成果

中間圏・下部熱圏を含む水平解像度60km、鉛直解像度300mという高解像度の大気大循環モデルJAGUARを用いて、2016年に観測された成層圏QBO崩壊現象の再現実験を行った。その結果、高解像度モデルではQBO崩壊の再現に世界で初めて成功した。2016年1月4日から2月1日まで1週間おきに計5回、1実験あたり連続40日間分の再現実験を実施し、QBO崩壊イベントの生じる過程を調べた。図2にその結果を示す。1月下旬から高度40hPaに東風が形成されており、これがQBO崩壊イベントである。QBO崩壊イベントが生じた30-60hPaの範囲では、それらどれもが観測値とよく一致した。本結果は、世界中の気象機関等がイベントを予見できなかったことと対照的で、より精緻なモデルを用いていけば、少なくとも1か月以上遡って予見できた可能性があることを示唆できた。

再現実験結果を統計的に分析した結果、崩壊の直接の原因の特定に成功した。図3にQBO崩壊現象時の帯状平均東西風、波動伝播を表すEP-fluxおよびその収束を示す。すべての波動成分、主にロスビー波成分、主に重力波成分による寄与に分けて書いている。左側が1月4-24日、右側が2月1-21日の平均値を示す。北半球からの中緯度ロスビー波が赤道上高度40hPaの狭い高度範囲に侵入して東風加速を引き起こすことで、高度40hPa付近の東風を形成していることがわかる。このように北半球亜熱帯成層圏の東西風の構造によって屈折しながら伝わったロスビー波が、赤道成層圏の厚さ数km程度の狭い高度範囲に集中して作用するため、従来の低鉛直解像度では再現が難しい現象であることが分かった。以上の成果は論文として発表した(Watanabe et al. 2018)。

QBO崩壊現象には2015年のエルニーニョが関係しているという報告もあるが、今年度は、エルニーニョの海面水温を与えた従来の実験に加えて、気候値の海面水温を与えた実験を行った。気候値実験では中緯度ロスビー波が赤道域へ伝播するのに好都合な背景場にならず、QBO崩壊現象を起こす条件になりにくいことが分かった。このことから、エルニーニョ海面水温分布が要因の1つであることが示唆された。

一方で上部成層圏でのQBO西風位相が時間とともに上昇する特徴の再現はできないという問題点もあった。そこで初期値を11月までさかのぼった追加実験を行った。25アンサンブル実験のうち、17ケースでQBO崩壊現象の再現に成功した。またモデルのチューニング次第で、20hPa付近の西風位相の上昇が再現できるケースがあることも判明した。

さらにQBO崩壊現象の延長再予報実験に取り組み、季節予報可能性について調査した。その結果、QBO崩壊現象に先んじて生じた中部成層圏のQBO東風シア領域の上昇については、成層圏ブリューワー・ドブソン循環に伴う赤道上昇流が本質的な役割を果たしたことが分かった。またQBO崩壊現象は12月1日を初期値として開始した延長再予報実験では再現できないのに対して、1月1日を初期値とした場合には再現できたことから、季節スケールの予測可能性を持たない現象であったことが示唆された。

並行して、数十年に亘る再解析データを用いてQBO、エルニーニョ南方振動、海水の関連性を調べたところ、2016年はQBO西風位相、エルニーニョ、海水減少が同時に起こっている特徴的な年であることが分かった。これを確かめるためにMIROC5気候モデルを用いたアンサンブル実験を行った。その結果、エルニーニョと海水減少がQBO崩壊を引き起こすロスビー波の生成と赤道方向への伝播に50%程度の寄与をしていることが明らかになった。成果は論文として発表した(Hirota et al. 2018)。

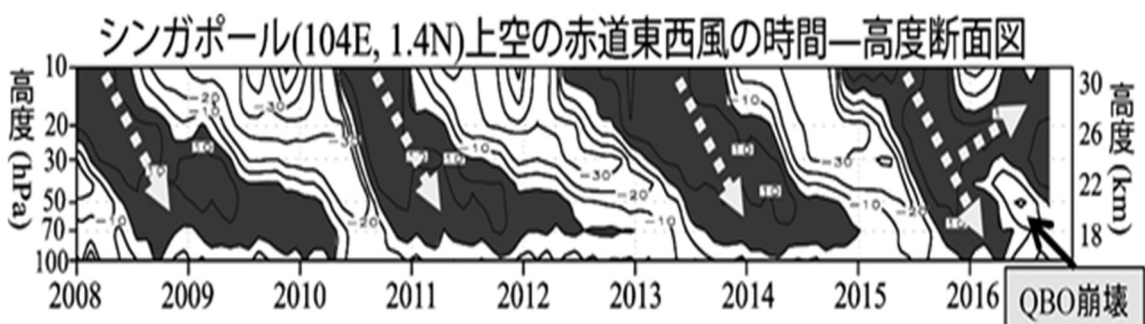


図1. 赤道東西風の時間-高度断面図。黒(白)は西風(東風)。西風と東風が約2年で交代する赤道準2年振動(QBO)は、最初に大気上層に現れた後、時間と共に下方伝播する(矢印)。2016年1月に高度22kmの西風領域に突然東風が現れ、西風は上方伝播を始め、30km付近の東風は消滅した。これが観測史上初のQBO崩壊現象であり、世界各国の気象機関で予報・再現できて

いない。

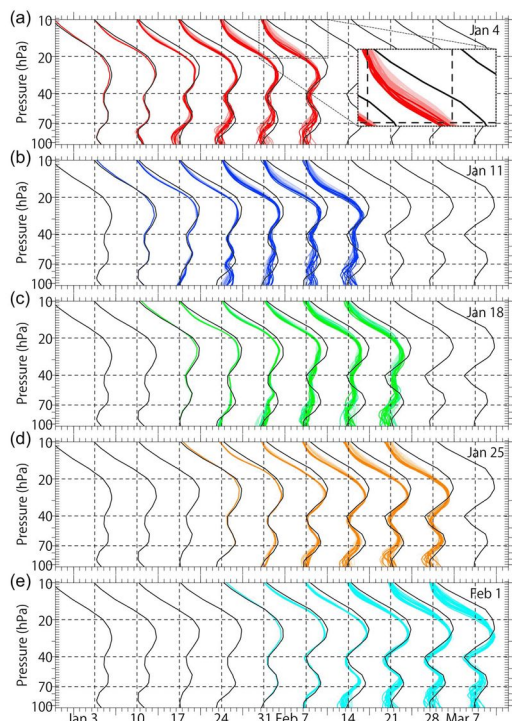


図2(左図).赤道上東西風の鉛直プロファイル。2016年1月3日から3月7日まで一週間間隔で並んでいる。黒線はMERRA2再解析データ。カラーはモデル実験で、それぞれ27アンサンブルからなる。上から1月4日、11日、18日、2月1日を初期値に取った実験結果。1月下旬から高度40hPaに東風が形成される様子が見られる。

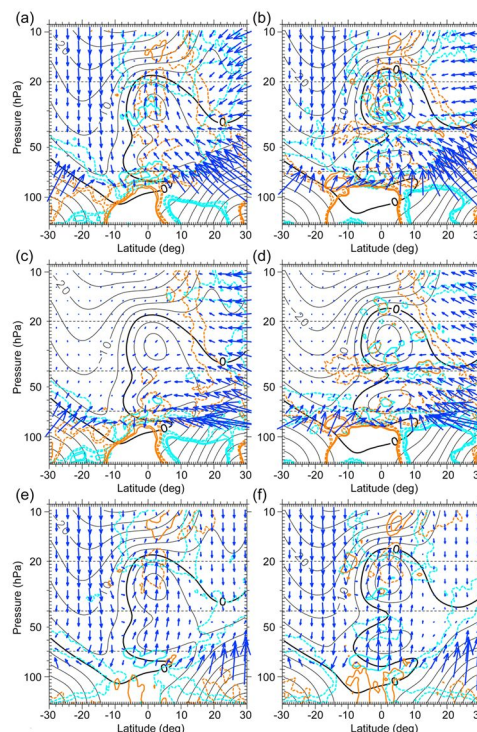


図3(右図).気候モデル実験で再現されたQBO崩壊現象時の帯状平均東西風(黒線コンター)、波動伝播を表すEP-flux(ベクトル)およびその収束(水色コンター:正が実線、負が破線で、負が東風加速を示す)。(a,b)すべての波動成分、(c,d)主にロスビー波成分、(e,f)主に重力波成分によるもの。(a,c,e)が1月4-24日、(b,d,f)が2月1-21日の平均値を示す。北半球からの中緯度ロスビー波が赤道上高度40hPaの狭い高度範囲に侵入して東風加速を引き起こしていることがわかる。

<引用文献>

Hirota, N., H. Shioyama, 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*, 1, 10(2018).

Kawatani, Y., K. Sato, T. J. Dunkerton, S. Watanabe, S. Miyahara, and M. Takahashi, 2010a: The roles of equatorial trapped waves and internal inertia-gravity waves in driving the quasi-biennial oscillation. Part I: Zonal mean wave forcing, *J. Atmos. Sci.*, 67, 963-980.

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

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

Newman, P. A., Coy, L., Pawson, S., & Lait, L. R. (2016). The anomalous change in the QBO in 2015–2016. *Geophysical Research Letters*, 43, 8791–8797.

Osprey, S., Butchart, N., Knight, J. R., Scaife, A. A., Hamilton, K., Anstey, J. A., Zhang, C. (2016). An unexpected disruption of the atmospheric quasi-biennial oscillation. *Science*, 353(6306), 1424–1427.

Watanabe, S., K. Hamilton, S. Osprey, Y. Kawatani and E. Nishimoto, 2018: First Successful Hindcasts of the 2016 Disruption of the Stratospheric Quasi-biennial Oscillation, *Geophys. Res. Lett.*, 45, 1602-1610.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 8件/うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Kawatani Yoshio, Hamilton Kevin, Gray Lesley J., Osprey Scott M., Watanabe Shingo, Yamashita Yousuke	4. 巻 76
2. 論文標題 The Effects of a Well-Resolved Stratosphere on the Simulated Boreal Winter Circulation in a Climate Model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Atmospheric Sciences	6. 最初と最後の頁 1203 ~ 1226
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JAS-D-18-0206.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Watanabe S., Hamilton K., Osprey S., Kawatani Y., Nishimoto E.	4. 巻 45
2. 論文標題 First Successful Hindcasts of the 2016 Disruption of the Stratospheric Quasi-biennial Oscillation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 1602 ~ 1610
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1002/2017GL076406	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Hirota, N., H. Shiogama, H. Akiyoshi, T. Ogura, M. Takahashi, Y. Kawatani, M. Kimoto and M. Mori	4. 巻 -
2. 論文標題 The influences of El Nino and Arctic sea-ice on the QBO disruption in February 2016	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 npj Climate and Atmospheric Science	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:.10.1038/s41612-018-0020-1, 2018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kawatani Yoshio, Hamilton Kevin, Sato Kaoru, Dunkerton Timothy J., Watanabe Shingo, Kikuchi Kazuyoshi	4. 巻 76
2. 論文標題 ENSO Modulation of the QBO: Results from MIROC Models with and without Nonorographic Gravity Wave Parameterization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Atmospheric Sciences	6. 最初と最後の頁 3893-3917
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1175/JAS-D-19-0163.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Richter Jadwiga H., Butchart Neal, Kawatani Yoshio, Bushell Andrew C., Holt Laura, Serva Federico, Anstey James, Simpson Isla R., Osprey Scott, Hamilton Kevin, Braesicke Peter, Cagnazzo Chiara, Chen Chih Chieh, Garcia Rolando R., Gray Lesley J., Watanabe Shingo, Yoshida Kohei, Yukimoto Seiji et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 Response of the Quasi Biennial Oscillation to a warming climate in global climate models	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Butchart Neal, Anstey James A., Kawatani Yoshio, Osprey Scott M., Richter Jadwiga H., Wu Tongwen	4. 巻 47
2. 論文標題 QBO Changes in CMIP6 Climate Projections	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019GL086903	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Richter Jadwiga H., Anstey James A., Butchart Neal, Kawatani Yoshio, Meehl Gerald A., Osprey Scott, Simpson Isla R.	4. 巻 125
2. 論文標題 Progress in Simulating the Quasi Biennial Oscillation in CMIP Models	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JD032362	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Bushell A. C., Anstey J. A., Butchart N., Kawatani Y., Osprey S. M., Richter J. H., Serva F., Braesicke P., Cagnazzo C., Watanabe S. et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 Evaluation of the Quasi Biennial Oscillation in global climate models for the SPARC QBO initiative	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1002/qj.3765	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Smith A. K., Holt L. A., Garcia R. R., Anstey J. A., Serva F., Butchart N., Osprey S., Bushell A. C., Kawatani Y., Kim Y. H., Lott F., Braesicke P., Cagnazzo C., Chen C. C., Chun H. Y., Gray L., Kerzenmacher T., Naoe H., Richter J., Versick S., Schenzinger V., Watanabe S., Yoshida K.	4. 巻 -
2. 論文標題 The equatorial stratospheric semiannual oscillation and time mean winds in QBOi models	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/qj.3690	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Shingo Watanabe, Kevin Hamilton, Scott Osprey, Yoshio Kawatani, Eriko Nishimoto
2. 発表標題 Hindcasts of the 2016 Disruption of the Stratospheric QBO
3. 学会等名 SPARC General Assembly 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shingo Watanabe, Kevin Hamilton, Scott Osprey, Yoshio Kawatani, Eriko Nishimoto
2. 発表標題 Hindcasts of the 2016 Disruption of the Stratospheric QBO
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shingo Watanabe, Kevin Hamilton, Scott Osprey, Yoshio Kawatani, Eriko Nishimoto
2. 発表標題 Hindcasts of the 2016 Disruption of the Stratospheric QBO
3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society 15th Annual Meeting
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡邊真吾
2. 発表標題 2015-2016年QB0崩壊イベントの再現実験
3. 学会等名 対流圏・中層大気流体力学研究集会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shingo Watanabe, Kevin Hamilton, Scott Osprey, Yoshio Kawatani, Eriko Nishimoto
2. 発表標題 Hindcasts of the 2016 Disruption of the Stratospheric QBO
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shingo Watanabe, Kevin Hamilton, Scott Osprey, Yoshio Kawatani
2. 発表標題 Hindcasts of the 2016 Disruption of the Stratospheric Quasi-biennial Oscillation
3. 学会等名 DynVarMIP workshop on Atmospheric circulation in a changing climate (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡邊真吾, 河谷芳雄, Kevin Hamilton, Scott Osprey
2. 発表標題 2015/2016年に生じた赤道成層圏準二年周期振動 (QBO) 崩壊イベント発生時の大気波動の振る舞いについて
3. 学会等名 日本気象学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Yoshio Kawatani https://sites.google.com/site/yoshiokawatani/ https://sites.google.com/site/yoshiokawatani/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	渡辺 真吾 (Watanabe Shingo) (50371745)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(環境変動予測研究センター)・センター長代理 (82706)	