

赤道成層圏準 2 年周期振動とその気候への影響

山下陽介（国立環境研究所）・井上誠（秋田県立大学）

1. はじめに

赤道成層圏には、西風と東風の風系が交互に現れて下降し、その一巡する周期がおおよそ 2 年程度である準 2 年周期振動 (quasi-biennial oscillation: QBO) と呼ばれる卓越した現象が存在する。

QBO は赤道下部成層圏で卓越し、上空で現れた東風や西風の風系が徐々に下降する現象で、QBO の同一の位相が下降する速度は 1 ヶ月当たり約 1 km である (図 1)。東風と西風が一巡する周期は、50 hPa 付近の高度 (約 21 km) では 22~34 ヶ月で、平均すると 28 ヶ月である (Baldwin et al. 2001)。QBO に伴う東西風の振幅は赤道付近で最大で、その大きさは赤道 5~40 hPa 付近の高度 (約 22~37 km) では約 20 m/s である。振幅は赤道から両極向きに離れるほど小さくなり、南北約 12 度の緯度で半分程度になっているため、QBO は赤道域にしか見られない現象である。

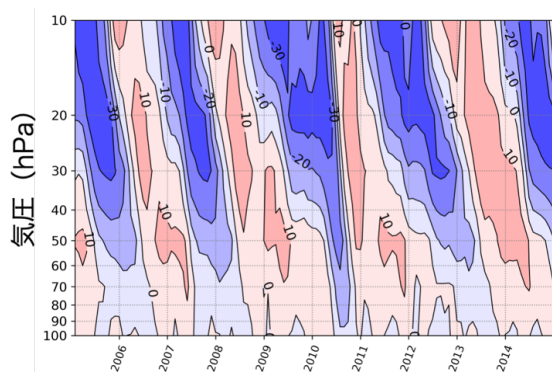


図 1 赤道下部成層圏東西風の時間-高度断面図 (単位は m/s)。青色：東風、赤色：西風 (JRA-55 の 2005~2014 年データに基づき解析)

しかし、QBO は赤道付近のみならず中高緯度の気候とも密接に関わることが知られている。本講演では、QBO の発見や発生メカニズムについて述べた後、QBO のグローバル気候への影響について見ていく。

2. QBO の発見

1883 年にインドネシアのクラカタウ火山噴火により成層圏に放出された火山灰が西に流されたことから、成層圏の東風 (クラカタウ東風と呼ばれる) が発見された。1908 年にはドイツの気象学者ベルソンが赤道アフリカでバルーン観測を行い、15 km 付近の高度で西風 (ベルソン西風と呼ばれる) を発見した。クラカタウ東風とベルソン西風は、QBO の別々の風系を観測していたものと考えられるが、長い間、これら東風と西風の関係は謎のままであった。1950 年代に赤道付近のカントン島 (キリバス) で継続的な成層圏のレーウィンゾンデ観測が始まり、鉛直方向の風の分布とその時間変化が分かるようになると、1960 年には約 2 年周期で風系が一巡する振動現象であることがアメリカのリードとイギリスのエブドンにより発見された (Ebdon et al. 1960; Ebdon and Veryard 1961; Reed et al. 1961)。この周期特徴から “quasi-biennial oscillation” と名付けられ (Angell et al. 1964)、QBO という略称で呼ばれるようになった。

3. ブリュワー・ドブソン循環と QBO

ブリュワー・ドブソン循環 (Brewer-Dobson circulation : BDC) は下部成層圏で見られる子午面循環で、赤道域で上昇し高緯度域で下降する (図2)。ブリュワーが水蒸気の観測、ドブソンがオゾンの観測からそれぞれ明らかにした (Brewer 1949 ; Dobson 1952)。成層圏の空気は、赤道域の対流圏から上昇する空気形成され、対流圏界面を通った空気は BDC により極域まで 4 ~ 5 年かけて到達する。また BDC は大気微量成分の輸送と関係し、赤道域の成層圏で生成されたオゾンを高緯度域に輸送する。また BDC が下降する極域では、断熱圧縮による加熱が起こり、太陽光が届かない極夜の気温低下を抑える。

対流圏界面付近は非常に低温であるため、対流圏の湿った空気が水蒸気を失い「脱水」される。北半球の冬季には圏界面付近が低温で脱水が効率的に働き、夏季には高温で脱水が比較的小さいため、BDC により上昇する熱帯域の成層圏水蒸気には季節変動の濃淡が縞模様のように記録され、「大気のテープレコーダー」と言われる。

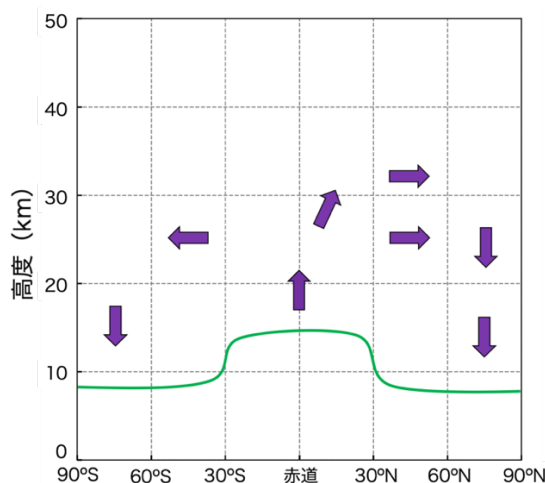


図2 模式図：北半球冬季における下部成層圏の BDC (紫矢印)。緑線：対流圏界面

赤道域の大気波動による対流圏から成層圏への西風と東風の運動量輸送により、成層圏では QBO の西風と東風の風系が生じて下降している。QBO の位相が下降する赤道域下部成層圏には BDC の上昇流があるため、QBO の位相の下降速度は BDC の影響を受けて変化する。BDC が強い北半球冬季には QBO の位相の下降が抑制され、BDC が弱い夏季には下降が促進される。

4. QBO のグローバル気候への影響

QBO は赤道付近の子午面循環を変化させ、赤道周辺の循環を駆動する (Plumb and Bell 1982)。この循環は「QBO の二次循環」(図3)と呼ばれる。QBO の二次循環に伴い、下部成層圏オゾンなどの物質濃度に約 2 年周期の変動が生じる。

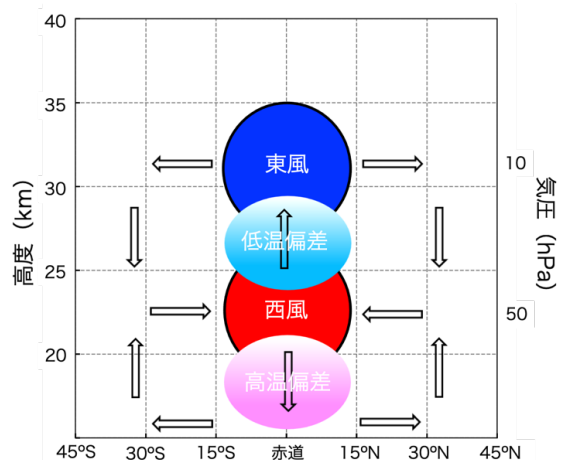


図3 模式図：成層圏における QBO の二次循環 (矢印)。赤：西風、青：東風、水色：低温偏差、ピンク：高温偏差 (Plumb and Bell 1982 を元に作成)

冬季の成層圏では、極域を周回する大規模な流れである極渦 (polar vortex) が卓越している。北半球の冬季には、QBO に伴う 50 hPa 付近の高度の風系が西風の場合に東風の場合と比較して、

北極渦が強くなりやすいことが知られており、ホルトン・タン効果 (Holton and Tan effect : HTE) と言われる (図4、Holton and Tan 1980 ; 1982)。HTE による 50 hPa 付近の高度の位相と北極渦強度との相関は、真冬の 1 月に最大となる。また HTE と同じく、50 hPa 付近の高度の風系が西風の場合に成層圏突然昇温 (Stratospheric Sudden Warmings : SSWs) の頻度は少ない傾向にある。対流圏の北極振動 (Arctic Oscillation : AO) や北大西洋振動 (North Atlantic Oscillation : NAO) は正位相になりやすい (Anstey and Shepherd 2014)。

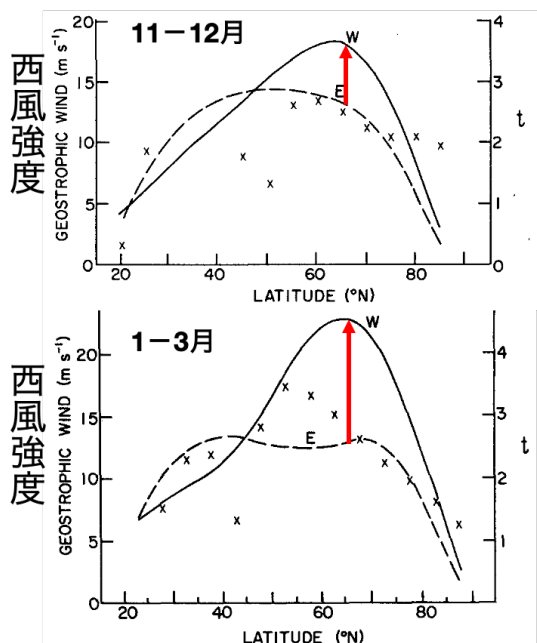


図4 ホルトン・タン効果:QBOに伴う50hPa付近の高度の風系と北極渦の西風強度との関係 (Holton and Tan 1980 改)。W: 西風、E: 東風

中高緯度から赤道付近に伝播してくる惑星規模のロスビー波 (Rossby wave) は、東風域を伝播できない特性がある。そのため、QBOに伴う50hPa付近の高度の風系が西風であると、ロスビー波が極域へ向かいやすくなり北極渦が減

速されると推測されている (図5)。他方で、赤道中上部成層圏の風系やQBOの二次循環により生じた中緯度域の風が極域へのロスビー波伝播を変えることも指摘されており (Gray et al. 2001 ; Naoe and Shibata 2010 ; Yamashita et al. 2011 ; Garfinkel et al. 2012 ; White et al. 2015 ; 2016)、HTEのメカニズムには未だに不明な点も多い。

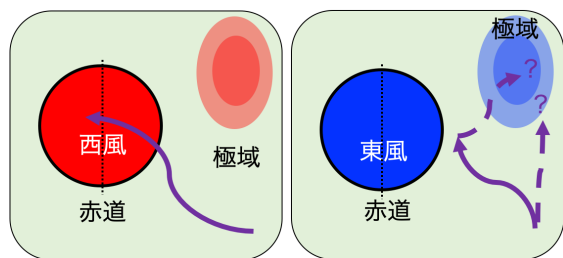


図5 模式図: QBOに伴う50hPa付近の高度の風系と惑星規模のロスビー波伝播との関係

QBOは南極渦の強度にも影響を与えるとされており、南半球の春季から夏季には20~30hPaの高度(約24~27km)の位相の変化に伴い南極渦強度も変化し、両者の相関は11月に最大となる (Anstey and Shepherd 2014)。風系が西風の場合に、南極振動 (Antarctic oscillation : AAO) は正位相になりやすい。11月頃の南極渦は夏極の東風に移行する段階で、西風風速最大となる場所が下降しており、QBOに伴う南極渦強度の変化は、南極渦の下降する時期の違いとしても現れる。すなわち、赤道付近の風系が西風であると、東風の場合よりも南極渦の下降する時期が遅くなりやすい。また南極渦の変化には、QBOの二次循環や対流圏から成層圏に伝播する惑星規模のロスビー波が関係する可能性がある (Yamashita et al. 2018)。

2016年にはQBOの周期的な変化の特徴とは異なり、下降する西風の中の40 hPa付近に東風が現れ、一時的に西風が上下に分裂する異常な時間発展を示し(図6)、「QBO異常」と呼ばれた。QBO異常には、40 hPa付近に東風を作るような中緯度域からの波が関係しているとされており(Osprey et al. 2016; Watanabe et al. 2018)、同時期のエルニーニョと温暖化に伴う北極海水の減少の影響が指摘されている(Hirota et al. 2018)。また2020年初頭には、40 hPa付近に東風が現れ西風域が上下に分裂するQBO異常が発生しており、現在の気候では特段に珍しい現象ではなくなっている可能性がある。

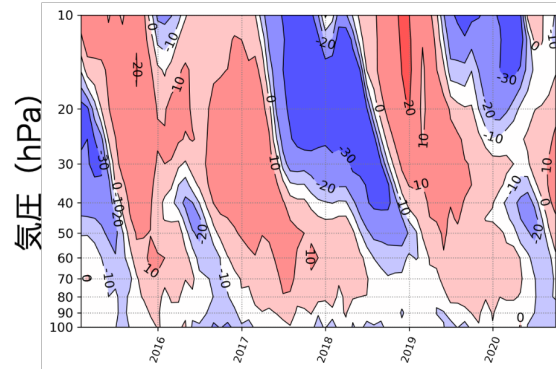


図6 シンガポールのゾンデ観測による赤道東西風の時間-高度断面図(ベルリン自由大学提供のデータ)。

5. まとめ

QBOは赤道下部成層圏で卓越し、上空で現れた東風や西風の風系が徐々に下降する現象である。QBOは、赤道周辺の風や気温、物質分布に影響を与えており、また高緯度域の極渦強度や成層圏突然昇温の発生頻度にも影響する。

参考文献

- Angell, J. K., and J. Korshover (1964): Quasi-biennial variations in temperature, total ozone, and tropopause height. *J. Atmos. Sci.*, **21**, 479–492.
- Anstey, J. A., and T. G. Shepherd (2014): High-latitude influence of the quasi-biennial oscillation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **140**, 1–21, doi:10.1002/qj.2132.
- Baldwin, M. P., L. J. Gray, T. J. Dunkerton, K. Hamilton, P. H. Haynes, W. J. Randel, J. R. Holton, M. J. Alexander, I. Hirota, T. Horinouchi, D. B. A. Jones, J. S. Kinnnersley, C. Marquardt, K. Sato, and M. Takahashi (2001): The quasi-biennial oscillation. *Rev. Geophys.*, **39**, 179–229, doi:10.1029/1999RG000073.
- Brewer, A. W. (1949): Evidence for a world circulation provided by the measurements of helium and water vapour distribution in the stratosphere, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **75**, 351–363.
- Dobson, G. M. B. (1952): Ozone in the Earth's atmosphere, *Endeavour*, **11**, 215–219.
- Ebdon, R. A. (1960): Notes on the wind flow at 50mb in tropical and subtropical regions in January 1957 and in 1958. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **86**, 540–542.
- Garfinkel, C. I., T. A. Shaw, D. L. Hartmann, and D. W. Waugh (2012): Does the Holton–Tan mechanism

- explain how the quasi-biennial oscillation modulates the Arctic polar vortex? *J. Atmos. Sci.*, **69**, 1713–1733.
- Gray, L. J., E. F. Drysdale, B. N. Lawrence, and T. J. Dunkerton (2001): Model studies of the interannual variability of the Northern-Hemisphere stratospheric winter circulation: The role of the quasi-biennial oscillation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **127**, 1413–1432, doi:10.1002/qj.49712757416.
- Hirota, N., H. Shiogama, H. Akiyoshi, T. Ogura, M. Takahashi, Y. Kawatani, M. Kimoto, and M. Mori (2018): The influences of El Niño and Arctic sea-ice on the QBO disruption in February 2016. *npj Climate and Atmospheric Science*, **1**, 10, doi:10.1038/s41612-018-0020-1.
- Holton, J. R., and H.-C. Tan (1980): The influence of the equatorial quasi-biennial oscillation on the global circulation at 50 mb. *J. Atmos. Sci.*, **37**, 2200–2208.
- Holton, J. R., and H.-C. Tan (1982): The quasi-biennial oscillation in the Northern Hemisphere lower stratosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, **60**, 140–148.
- Ebdon, R. A., and R. G. Veryard (1961): Fluctuations in equatorial stratospheric winds. *Nature*, **189**, 791–793.
- Naoe, H., and K. Shibata (2010): Equatorial quasi-biennial oscillation influence on northern winter extratropical circulation. *J. Geophys. Res.*, **115**, D19102, doi:10.1029/2009JD012952.
- Reed, R. J., W. J. Campbell, L. A. Rasmussen, and R. G. Rogers (1961): Evidence of a downward propagating annual wind reversal in the equatorial stratosphere. *J. Geophys. Res.*, **66**, 813–818.
- Osprey, S., N. Butchart, J. R. Knight, A. A. Scaife, K. Hamilton, J. A. Anstey, V. Schenzinger, and C. Zhang (2016): An unexpected disruption of the atmospheric quasi-biennial oscillation. *Science*, **353**(6306), 1424–1427, doi:10.1126/science.aah4156.
- Plumb, R. A., and R. C. Bell (1982): A model of the quasi-biennial oscillation on an equatorial beta-plane. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **108**, 335–352.
- Yamashita, Y., H. Akiyoshi, and M. Takahashi (2011): Dynamical response in the Northern Hemisphere midlatitude and high-latitude winter to the QBO simulated by CCSR/NIES CCM. *J. Geophys. Res.*, **116**, D06118, doi:10.1029/2010JD015016.
- Yamashita, Y., H. Naoe, M. Inoue, and M. Takahashi (2018): Response of the Southern Hemisphere atmosphere during winter and spring to the stratospheric equatorial quasi-biennial oscillation (QBO). *J. Meteor. Soc. Japan*, **96**(12), 587–600, doi:10.2151/jmsj.2018-057.
- 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. doi:10.1002/2017GL076406.
- White, I. P., H. Lu, N. J. Mitchell, and T. Phillips (2015): Dynamical response to the QBO in the northern winter stratosphere: Signatures in wave forcing and eddy fluxes of potential vorticity. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 4487–4507.
- White, I. P., H. Lu, and N. J. Mitchell (2016): Seasonal evolution of the QBO-induced wave forcing and circulation anomalies in the northern winter stratosphere. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **121**, 10411–10431, doi:10.1002/2015JD024507.

著者連絡先：山下陽介，〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2.
Tel: 029-850-2314; E-mail: yamashita.yosuke@nies.go.jp