EOS/MLS データに基づく成層圏・中間圏における半年周期振動の解析

*大羽田 剛史・飯田 千尋・廣岡 俊彦(九大院理)・江口 菜穂 (九大応力研)

1. はじめに

赤道域中層大気は、赤道域固有の波動や、準2年周期振動(QBO)、半年周期振動(SAO) などの特異な変動の存在から、多くの研究者の興味を引きつけてきた。一方で、成層圏界面より上の領域は、観測手段も限られることから、未だ断片的な知識しか得られていない。近年、高精度の衛星観測技術の進展に伴い、成層圏界面付近から下部熱圏にかけての領域についても全球的力学解析が可能となった。そこで本研究では、高度90km以上の高度まで観測可能なAura EOS/MLS データを用いて、熱帯域上部成層圏・中間圏におけるSAO を中心に赤道域循環について解析を行った。以下では、観測的特徴を報告する。

2. データと解析手法

2.1 EOS/MLS データ

本研究では、NASA 作成の Aura EOS/M LS Version 3.3 Level 2 の気温とジオポテン シャル高度のデータを使用する。鉛直分解能 は成層圏で約 4km、成層圏界面付近や下部 中間圏で約 8-9km であり、高度約 11km~97km の範囲にデータ面が 42 層ある。 水平方向の視野範囲は約 160km で、緯度は 南北それぞれ80度まで使用できる。本デー タは衛星軌道に沿って与えられているので、 前後3日分のデータを積分することで、経度 緯度5°×5°の格子点データを 1 日間隔で作 成し、解析に用いた。作成したデータは空間 スケールが経度緯度5°×5°で、時間スケール が 3 日以上の現象を力学的に詳しく解析す ることが可能である。解析期間は、2008年 1月から2013年6月である。

2.2 風の場の求め方

ジオポテンシャル高度から帯状平均東西 風を求めるために、CIRA1986 モデルで使用 されている傾度風平衡の式(Fleming et al. 1990)を用いた。

3. 解析結果

3.1 赤道域の概観

解析期間の赤道上の風の場の概観を知るために図 1 に月平均した赤道上の帯状平均東西風の時間変化を示す。上図は高度時間断面図、下図は 1hPa と 0.01hPa 面における時間変化を取り出したものである。上図から、下部成層圏では QBO が顕著であるが、成層圏界面付近(1hPa)では半年周期で西風と東風が移り変わる SAO が卓越しているのがわかる。一方、中部中間圏(0.01hPa 付近)でもSAO が見られる。以降成層圏界面付近のSAOをSSAO、中部中間圏のSAOをMSAOと呼び、これらを中心に解析を進める。

図1の下図からSSAOとMSAOは逆位相の関係にあることがわかる。これはHirota(1978)で報告されたロケットゾンデを用いた解析結果と一致するもので、これはMSAOが、SSAOによる上方伝播特性の影響を受けたケルビン波や重力波により形成されるためと考えられている(例えば、Dunkerton 1982)。

次に、図2に月平均した帯状平均東西風スペクトルの高度分布を示す。QBO成分は下部成層圏(10hPa付近)で卓越している。一年周期(AO)成分は上部成層圏と下部中間圏で比較的に大きくなっているが、あまり顕著ではない。中間圏では短周期成分も顕著なのに対し、成層圏では長周期成分の寄与が大きい。本研究で注目しているSAO成分は5hPa付近より上で最も卓越する成分で、0.1hPa付近と0.004hPaで極小となっていることがわかる。さらに、0.001hPa付近でも別のSAOピークが見られる。

また、SAO 成分の緯度高度分布を描くと、 成層圏上層では南半球側に振幅の極大があるのに対し、中部中間圏より上では赤道対称 と、高度により異なる空間構造が見られる (図 3)。成層圏上層の赤道非対称性は Belmont et al.(1974)で報告されており、 Hirota et al.(1983)により、南半球極夜ジェ ットおよび夏の東風が北半球に比べ強いため赤道対称からずれることが示されている。

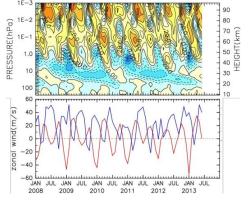


図 1 月平均した赤道上帯状平均東西風の時間変化。(上)高度時間断面図、等値線間隔は 10m s^{-1} 、暖色は西風、寒色は東風を表す。(下) 1 hPa 面(赤線)と 0.01 hPa 面(青線)の変動図。

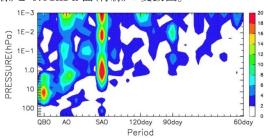


図 2 月平均した赤道上帯状平均東西風の各周期数成分の振幅分布。単位はm s⁻¹。縦軸は高度、 横軸は周期を表す。

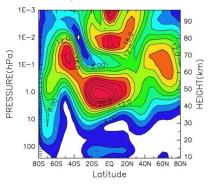


図3 SAO 成分の高度緯度分布。等値線間隔は2ms⁻¹。縦軸は高度、横軸は緯度を表す。

3.2 成層圏突然昇温への SSAO・MMAO の応答

SSAO と MSAO の年々変動を調べるにあたり北半球の冬季に注目して図 1 の下図を見ると、2009 年・2010 年・2013 年の冬季の SSAO と MSAO の振幅が他の年より強い

ことがわかる。これらの年は、大規模成層圏 突然昇温(Stratospheric Sudden Warming: SSW)が起こった年である(2009 年 1 月・2010 年 1・2 月・2013 年 1 月に発現)。大昇温とは、「帯状平均場に関して、10hPa かそれ以下の高度で緯度 60 度より極側が高温となり、西風が東風に変わる」条件を満たす大規模な昇温であり、極域のみならず赤道域にも大きな影響を与えるものと考えられる。実際に、冬季成層圏極域で見られる成層圏突然昇温と赤道域の SAO の関係を知るために、SSW 生起時の SAO の変動を調べた。

ここでは、一例として 2013 年 1 月に起こった SSW を取り上げる。図 4 の上図は北緯70-80 度における帯状平均気温、下図は帯状平均東西風の高度時間断面図である。突然昇温発現後に、急激な気温変化や東西風の西風から東風への反転が見られる。 SSW は対流圏で励起される大振幅のプラネタリー波が成層圏へ非定常的に伝播する過程で発現する。 SSW 時は図 5 の極域で上下に分かれ低緯度側では上下から集まるような大循環が駆動され、上昇流に伴い断熱加熱、下降流に伴い断熱冷却が起こると考えられている。このような SSW 時の子午面循環を踏まえ赤道域の気温場について見ていく。

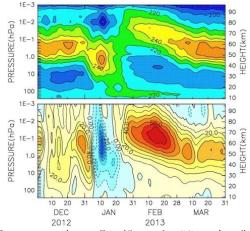


図 4 2013 年 1 月に起こった SSW 時の北緯 70-80 度における帯状平均気温(上図、等値線間隔 10K)と帯状平均東西風(下図、等値線間隔 $10 \, \mathrm{m \, s^{-1}}$ 、暖色は西風、寒色は東風)の高度時間変化。

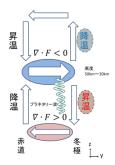


図 5 成層圏突然昇温の発現機構、 Matsuno and Nakamura (1979)の図を改変。 F:Eliassen-Palm Flux。

赤道域は 1 年を通じて気温変化が小さいため、大昇温が起こっていない年の平均的な季節進行を求め、それからの偏差を取ったものを図 6 に示す。この図から大昇温時に成層圏界面付近で気温が負偏差、中部中間圏では正偏差となり、成層圏界面付近で降温、中部中間圏では昇温していることがわかる。図 7 に、SSW の最盛期に当たる 2013 年 1 月 11 日の気温偏差の緯度高度分布を表す。図 7で示した SSW 時の昇温と降温の特徴がよく表れている。また、大規模 SSW が生じた他の年に関しても、これらとほぼ同様の特徴が見られた(図省略)。

次に、上記の気温変化と、SAO の振幅変化の関係を考える。ここで赤道上の β 平面における気温風の式は以下のようになる (例えば、Andrews et al. 1987)。

$$\frac{d\bar{u}}{dz} = -\frac{R}{HR} \frac{d^2\bar{T}}{dv^2}$$

この関係式をもとに SSW 時の大循環を考えると、降温する領域では高度と共に東風が強くなり、昇温する領域では高度と共に西風が強くなる。この関係から、 SSW 時に極域と赤道を繋ぐ子午面循環が形成されるときは、 SSAO 域の東風加速、 MSAO 域の西風加速が生じると考えられる(図 8)。

図 9 に赤道上の大昇温が起こっていない 年からの東西風偏差を示す。図 7 と同様に SSW 時に成層圏界面付近で負偏差、中部中 間圏では正偏差となっていることから、成層 圏界面付近では西風が、中部中間圏では東風 が強化され、SSW に伴う気温偏差が SSAO と MSAO の振幅を強める可能性があること が示唆される。一方で、MSAO の西風加速 は SSAO の東風加速に対して遅れて生じて いることがわかる。この特徴は他の大昇温の 時にも見られた。

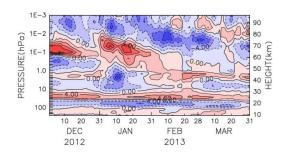


図 6 赤道上における、大昇温が発現していない 年からの気温偏差についての図 6 上と同様の図。 等値線間隔は 2K、赤色は正偏差、青色は負偏差。

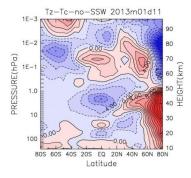


図7 2013年1月11日における大昇温が発現していない年からの気温偏差の高度緯度分布。等値線間隔は2K、赤色は正偏差、青色は負偏差。

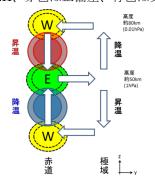


図8 SSW 時の赤道上の気温偏差に伴う SAO 強化の模式図。W は西風加速、E は東風加速を表す。

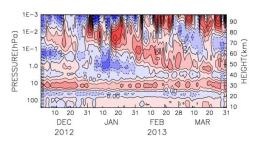


図 9 赤道上における、大昇温が発現していない年からの東西風偏差についての図 6 下と同様の図。等値線間隔は $10 \, \mathrm{m \, s^{-1}}$ 、赤色は正偏差、青色は負偏差。

最後に SAO 強化の定量的解析を行った。 SSW に伴う赤道域の気温偏差によって、降 温する成層圏界面付近では東風、昇温する中 部中間圏では西風が強まる風の場がつくら れると考え、先に示した赤道上のβ平面にお ける気温風の式に基づき、SSW 時の成層圏 界面付近の降温と中部中間圏の昇温の $\Delta \bar{T}$ を±10K、 Δy を3.0×10⁶mとして東西風 の鉛直シアーを求めると $\Delta \bar{u}/\Delta z = \pm 3.9 \,\mathrm{m \, s^{-1}}$ /kmとなる。実際に、2013 年 1 月に起こっ た SSW 時は、成層圏界面付近で-4.8 m s⁻¹/ km、中部中間圏で+3.9 m s⁻¹/kmの東西風の 鉛直シアーがつくられていた。このことから、 SSW 時に生じる気温偏差によって、観測さ れるような SAO の強化が起こることが定量 的に示された。

4. まとめと今後の方針

今回の研究で得られた SAO の特徴をまとめる。まず、SSAO と MSAO は逆位相の関係で、それぞれの空間分布は SSAO が赤道非対称で MSAO は赤道対称であった。SSW 形成に伴う赤道域の気温偏差が SSAO の東風・MSAO の西風の振幅を強めることが示された。また中部中間圏の西風加速は成層圏界面付近の東風加速に比べ遅れて起こることがわかった。

今後は、図4および図5で見られる、中間 圏界面付近(0.001hPa付近)の半年周期成 分についても同様の解析を行う予定である。

参考文献

- [1] Andrews, D. G., and M. E. McIntyre, 1976: Planetary waves in horizontal and vertical shear: The generalize Eliassen-Palm relation and the mean zonal acceleration. *J. Atmos. Sci.*, **33**, 2031-2048.
- [2] Andrews, D.G., J.R. Holton and C. B. Leovy, 1987: *Middle Atmosphere Dynamics*. Academic Press, 489pp.
- [3] Belmont, A. D., D. G. Dartt, and G, D, Nastrom (1974). Periodic variations in stratospheric zonal wind from 20 to 65 km, at 80°N to 70°S. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **100**, 203-211.
- [4] Dunkerton. T. J., 1982: Theory of the mesopause semiannual oscillation, *J*, *Atmos.*, *Sci.*, **39**.2681-2690.
- [5] Fleming, E. L., S. Chandra, J. J. Barnett, and M. Corney (1990), Zonal mean temperature, pressure, zonal wind, and geopotential height as functions of latitude. COSPAR International Reference Atmosphere: 1986, Part II: Middle atmosphere models, Adv. Space Res., 10, 12, 11-59.
- [6] Hirota, I., T. Hirooka and M. Shiotonai, 1983: Upper stratospheric circulations in the two hemispheres observed by satellites, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **109**, 443-454.
- [7] Hirota, I., 1978: Equatorial waves in the upper stratosphere and mesosphere in relation to the semiannual oscillation of the zonal wind, *J. Atmos. Sci.*, 35 714-722.
- [8] Matsuno, T., and K. Nakamura, 1979: The Eulerian- and Lagrangian- mean meridional circulation in the stratosphere at the time of sudden warming, *J. Atmos. Sci.*, **36**, 640-654.
 [9] Plumb, R. A. and R. C. Bell (1982). A model of the quasi-biennial oscillation on an
- of the quasi-biennial oscillation on an equatorial beta-plane. Q. J. R. Meteorol. Soc. 108, 335-352.