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) 1hPa 面(赤 線)と 0.01hPa 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 2 m s⁻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 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)。

$\frac{d\bar{u}}{dz} = -\frac{R}{H\beta}\frac{d^2\bar{T}}{dy^2}$

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 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 $\Delta \overline{T}$ を±10K、 Δy を3.0×10⁶mとして東西風 の鉛直シアーを求めると $\Delta \overline{u}/\Delta z = \pm 3.9 \text{ m s}^{-1}$ /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

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 equatorial beta-plane. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 108, 335-352.