

赤道域半年周期振動の年々変動と経度依存性について

大羽田 剛史¹・廣岡 俊彦¹・江口 菜穂²・岩尾 航希³

1:九州大学大学院理学府 2:九州大学大学院応用力学研究所 3:熊本高等専門学校

1. はじめに

熱帯域中層大気には、東西風が半年周期で移り変わる半年周期振動(SAO)が存在し、成層圏界面付近(SSAO)と中間圏(MSAO)に独立した振幅の極大が存在することが知られている(Hirota, 1978)。SAOは赤道域起源の波動や冬半球起源のプラネタリー波、また夏極から冬極へ向かう子午面流により駆動されると考えられている(Andrews et al, 1987)。以前からロケットゾンデやレーダー観測などの地点データを用いた解析が進められ、近年では高精度の衛星観測技術の発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。本研究では様々なデータの比較を行い熱帯域 SAO の特徴を解明することを目的とする。主データとして中間圏界面付近まで観測可能な Aura EOS/MLS データを用いるほか、新たに、太陽非同期衛星 TIMED に搭載された SABER データ、赤道近傍に設置された流星レーダー、MF レーダーのデータを解析に用いた。

本報告では SAO の観測的特徴と中間圏赤道域東西風の経度依存性についての解析結果を述べる。

2. 使用データと解析手法

本研究では衛星観測の Aura EOS/MLS データ、TIMED/SABER データ、流星レーダー、MF レーダー観測の4つのデータを使用する。

Aura EOS/MLS データは NASA の Aura 衛星搭載測器 MLS から得られる衛星観測データであり、気温とジオポテンシャル高度データを使用した。高度約 11km~97km の範囲に 42 層あり、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 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ の格子点データを 1 日間隔で作

成し、解析に用いた。解析期間は 2004 年 8 月から 2013 年 12 月の約 10 年間である。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)を用いる。

SABER データは、TIMED 衛星に搭載された赤外放射計から得られた衛星観測データであり、解析には気温とジオポテンシャル高度の2つを使用した。長期間のデータから日々の変動成分を求め潮汐成分を取り除き、格子点データを作成した。MLS と同様、傾度風平衡の式を用いて帯状平均東西風を求めた。

流星レーダーは、赤道近傍であるインドネシアの Kototabang(100.3E,0.2S)における高度 80-98km の観測地を使用した。MF レーダーは、インドネシアの Pameungpeuk(107.7E,7.7S)における観測値を使用した。鉛直範囲は約 70-98km である。鉛直分解能は両者ともに 2km である。

3. 解析結果

3.1 赤道域の概観 -SAO の観測的特徴-

まず MLS 観測に基づく赤道上の風の場に、SAO を含めどのような時間スケールの現象が存在するか知るために、日平均した帯状平均東西風と気温のパワースペクトルの高度分布を求めた(図1)。上図から下部成層圏(10hPa 付近)では QBO (準 2 年周期振動)成分が卓越していることがわかる。AO (1 年周期振動)成分は上部成層圏と中間圏界面付近で大きくなっているが、上部成層圏は中間圏界面付近に比べあまり顕著ではない。また中間圏では短周期成分が大きくなるのに対し、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 付近よりも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、中間圏界面

(0.001hPa) 付近にも SAO のピークが見られる。この SAO を以下 MpSAO と呼ぶ。MpSAO が存在する高度域の東西風については 3.2 節で議論する。下図の気温場の SAO 成分は東西風場の SAO 成分のピーク高度に対して数 km 程度低いことがわかる。これは赤道上の温度風平衡から理解できる。

図 2 に日平均した赤道上の帯状平均東西風とそれにバンドパスフィルターを施し SAO 成分を取り出したものの高度時間変化を示す。これらの図から SSAO と MSAO そして MpSAO が各領域で卓越しており、Hirota(1978)のロケットゾンデを用いた解析結果と同様に SSAO と MSAO は逆位相の関係であることがわかる。また MpSAO は SSAO と同位相で MSAO と逆位相の関係であった。

また SAO 成分振幅の高度緯度分布を描くと、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ほぼ赤道対称となっており、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、南半球の極夜ジェットと夏季の東風が北半球に比べ強いこと赤道対称からずれることが示されている。

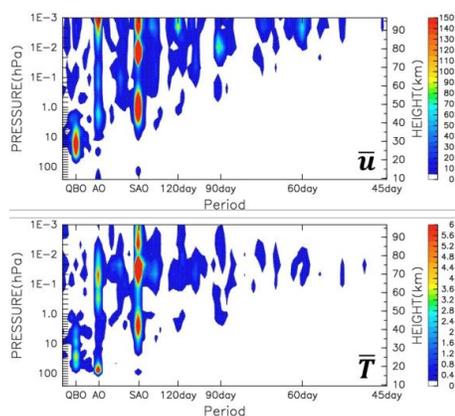


図 1 MLS 観測に基づく日平均した赤道上帯状平均東西風(上図)と気温(下図)の各周期成分のパワースペクトル。単位はそれぞれ m^2s^{-2} 、 K^2 。縦軸は高度、横軸は周期を表す。

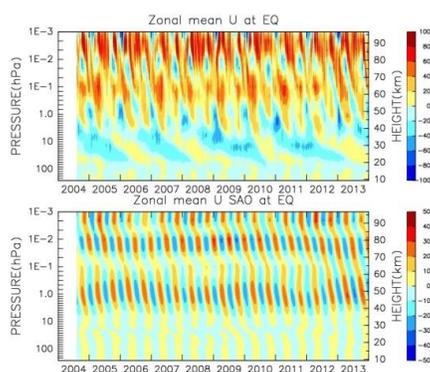


図 2 日平均した赤道上帯状平均東西風(上図)と SAO 成分(下図)の高度時間変化図。

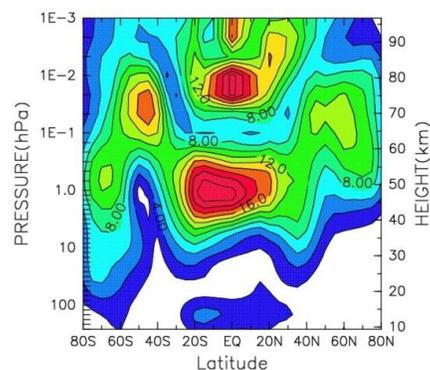


図 3 SAO 成分振幅の高度緯度分布。等値線間隔は $2m s^{-1}$ 。縦軸は高度、横軸は緯度を表す。

次に SAO の季節進行について調べた。日々の帯状平均東西風に 31 日移動平均をかけ、解析期間で平均した SSAO が卓越する 1hPa と MSAO が卓越する 0.01hPa における帯状平均東西風の気候値的な季節進行を図 4 に示す。またエラーバーは、上下に標準偏差分を取っており、年々変動の大きさの目安である。SSAO 高度は夏至冬至の時期に東風の極大、春分秋分の時期に西風の極大を迎え、図 2 下と同様に MSAO 高度とは逆位相の関係になっていることがわかる。また SSAO 高度は、北半球冬季の東風が南半球冬季の東風に比べ弱いもの一年を通じて正弦波的に変化しているのに対し、MSAO 高度では西風期間が東風期間に比べ長く非正弦波的な振る舞いである。MSAO は SSAO による上方伝播特性のフィルター効果を受けたケルビン波や重力波により生成される

と考えられている(Dunkerton,1982 など)が、本解析から SSAO のフィルター効果だけでは MSAO の季節進行の特徴を説明できないことがわかる。

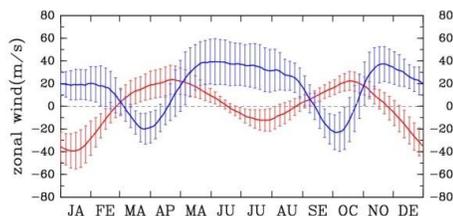


図4 赤道上における解析期間で平均した SSAO 高度 (1hPa) と MSAO 高度 (0.01hPa) における帯状平均東西風の季節進行 (赤線が SSAO 高度、青線が MSAO 高度、エラーバーは標準偏差で 5 日おきに示している)。

3.2 中間圏赤道域東西風の経度依存性

この節では MpSAO が存在する上部中間圏赤道域の東西風について MLS、SABER、流星レーダー、MF レーダーの解析結果を報告する。

図5に MLS と SABER のデータから求めた赤道上の月平均帯状平均東西風の高度時間断面図を示す。高度約 80km 以下では SSAO と MSAO を含めほぼ同様な振る舞いで東西風が移り変わっている。また SABER から中間圏界面付近、高度約 100km に SAO 成分が存在しており、その高度は MLS の MpSAO 高度に比べ約 5km 高い。これは中部中間圏以上の高度における観測機器間の差異を反映していると考えられる。

次に MpSAO が存在する高度について MLS、流星レーダー、MF レーダーの比較を行った。各データの赤道域東西風の季節進行を図6に示す。MLS は赤道上の帯状平均東西風、流星レーダー、MF レーダーは 1 地点の東西風であることに注意し 3 者を比較すると、MLS は高度 85-95km で西風が強く、流星レーダー、MF レーダーではその高度では東風が支配的であり、逆向きの主風となっていることがわかる。この東西風の差異の原因について傾度風平衡からのずれの寄与と、帯状平均場と 1 地点データから考えられる経度依存性の存在に焦点をあて解析を行った結果を以下に記す。

図5 MLS(下図)と SABER(右図)観測に基づく赤道上の月平均帯状平均東西風の高度時間断面図。

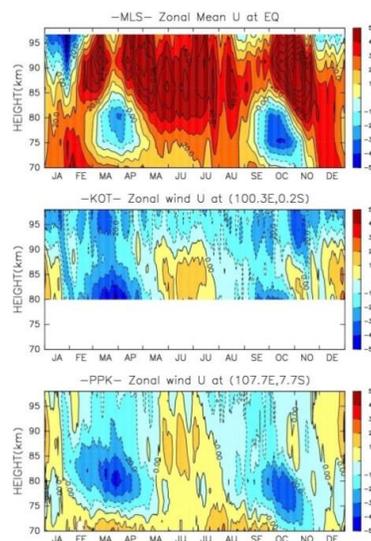
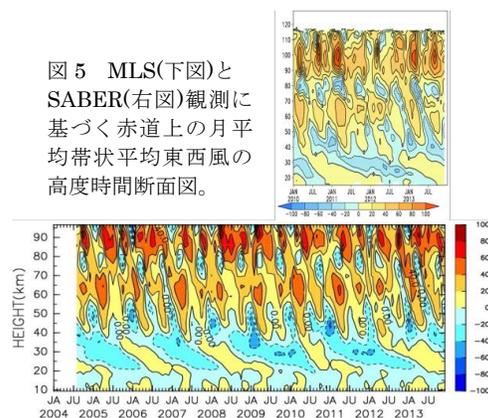


図6 赤道上の MLS の帯状平均東西風、流星レーダー、MF レーダーの東西風の季節進行。縦軸は高度、横軸は時間を表す。等値線間隔は 10m s^{-1} である。

まず傾度風平衡からのずれの寄与が食い違いを生じさせていると考え、オイラー平均プリミティブ方程式系における東西風と南北風の運動方程式を連立させ傾度風平衡からのずれの寄与を含む東西風を求めた (図省略)。傾度風平衡で求めた東西風と比較すると中間圏の西風は弱まっていたが、レーダーが示すような東風とはならず、傾度風平衡からのずれの寄与だけでは説明できないと考えられる。

次に赤道域中間圏の東西風の経度依存性について考察する。本研究で帯状平均東西風を求める際に使用した傾度風平衡の式は、赤道上が

温度極大時は西風、逆に温度極小時は東風となる。このことを踏まえ、レーダーが東風位相時の上部中間圏赤道域の MLS 温度場 (図 7) をみると、多少経度方向に変動がみられるがどの経度帯も赤道が温度極大となっている。静力学平衡が成り立つと考えると赤道上どの経度帯でも西風が主風と考えられ、インドネシア上空でも同様に西風と考えられる。従って衛星観測からは、レーダー観測にみられる中間圏赤道域の東風は説明できないと考えられる。

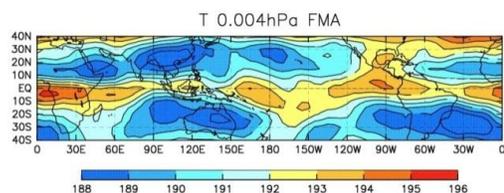


図 7 レーダーが東風位相時 (FMA) の MLS による上部中間圏赤道域の温度場。等値線間隔は 1K。

4. まとめ

今回の研究でわかった 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、MSAO は赤道対称であった。MLS 観測から、中間圏界面付近にも SAO 成分が存在し、SSAO と同位相、MSAO とは逆位相で、空間構造は赤道対称であった。季節進行に関しては、SSAO は正弦波的に東西風が移り変わるのに対し、MSAO は非正弦波的で、SSAO のフィルター効果を受けた波動以外のメカニズムが季節進行に寄与している可能性がある。

上部中間圏赤道域において MpSAO の存在が衛星観測データから確認され、その高度域では MLS の帯状平均東西風は西風が、レーダーは東風が卓越している結果が得られた。逆向きの主風が生じる原因について、傾度風平衡からのずれの寄与と経度依存性の存在を考慮して解析を行ったが、両者の食い違いを説明できなかった。

今後は、この食い違いが生じた原因について上部中間圏以上で卓越する潮汐の影響や衛星観測のデータ取得時間を踏まえて、より詳細に解析を進めていく予定である。

参考文献

- [1] Andrews, D. G., and M. E. McIntyre, 1976: Planetary waves in horizontal and vertical shear: The generalized 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] 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.
- [9] Venkateswara Rao, N., T. Tsuda, S. Gurubaran, Y. Miyoshi, and H. Fujiwara (2011), On the occurrence and variability of the terdiurnal tide in the equatorial mesosphere and lower thermosphere and a comparison with the Kyushu-GCM, *J. Geophys. Res.*, 116 D02117, doi:10.1029/2010JD014529.