

# On the formation of a fast thermospheric zonal wind at the magnetic dip equator

近藤奨<sup>1</sup>, A. D. Richmond<sup>2</sup>, Huixin Liu<sup>3</sup>, 渡部重十<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学 理学院 宇宙理学専攻

<sup>2</sup> National Center for Atmospheric Research / High Altitude Observatory

<sup>3</sup> 京都大学 生存圏研究所

## 要旨

磁気赤道で強く吹く熱圏大気東西風のダイナミクスの理解のために NCAR Thermosphere - Ionosphere - Electrodynamics General Circulation Model (TIE-GCM) モデルを用いた解析を行った。その結果、東西風はイオンドラッグの EIA 構造により地理赤道ではなく磁気赤道で強く吹くことが明らかになった。磁気赤道で速い東西風は 280 km - 600 km の高度で見られ、高度約 400 km 以上では主に粘性を介して磁気赤道上で強い。粘性を無視した場合のシミュレーションでは、高度 400 km 以上においてイオンドラッグは磁気赤道上で極大を形成するにもが、粘性を介して下層域と結合しているため、東西風は磁気赤道で速度極大を形成するという結果を示している。シミュレーション結果は DE-2 衛星や CHAMP 衛星の観測と一致している。それゆえ、低緯度熱圏大気東西風はイオンドラッグと粘性に支配されていることが示唆される。

## 1 はじめに

低中緯度における上部熱圏の力学は主に太陽 EUV 放射により支配されている。昼間は温度上昇により密度が上がり、夜間は温度降下により密度が下がる。この密度差が圧力勾配となり昼の面から夜の面に向けて風を駆動する。圧力勾配のほか、イオンドラッグや粘性、コリオリ力などが熱圏の風に重要な影響を与える。Rishbeth [1972] はイオンドラッグが風の速度を制限する主要な要素であることを示唆している。

先行研究により熱圏大気東西風は地理赤道ではなく磁気赤道で強く吹くことが明らかにされている [Raghavarao et al. 1991, Liu et al. 2009, Watanabe and Kondo, 2010]。これらの研究は DE-2 衛星や CHAMP 衛星を用いて明らかにされており、両衛星とも、磁気赤道で強

い東西風を示している。この磁気赤道で強い風は 08-05 Local Time (LT) で観測されており、これは赤道電子密度異常帯 (EIA) が発達する時間と一致している [Liu et al., 2009]。そのため、彼らはイオンドラッグが東西風を磁気赤道で強く吹かせる主要な要素であることを示唆している。一方で DE-2 衛星の観測により、イオンドラッグが磁気赤道上で強い上部電離圏 (高度約 500 km 以上) でも東西風は磁気赤道上で強いという結果を示している [Watanabe and Kondo, 2011 の図 3 参照]。これは Liu et al [2009] などが指摘するイオンドラッグでは説明ができない特徴である。このメカニズムの解明のため、NCAR Thermosphere - Ionosphere - Electrodynamics General Circulation Model (TIE-GCM) シミュレーションを用いて東西風ダイナミクスの解明を行う。得られた結果は DE-2 衛星や CHAMP 衛星の結果と比較する。

## 2 TIE-GCM シミュレーションと条件設定

NCAR TIE-GCM は熱圏電離圏に関する三次元、時間依存のモデルである。[Dickinson et al., 1984, Roble et al., 1988, Richmond et al., 1992]。水平分解能は地理緯度地理経度で  $5^\circ \times 5^\circ$ 、鉛直分解能は 1 / 2 スケールハイトである。下部境界は約 97 km、上部境界は約 700 km である。計算においては March equinox (Day of Year = 80)、太陽活動極大 (F10.7 = 174.1)、磁気擾乱度が小さい状態 ( $K_p = 2$ ) を仮定する。これは CHAMP 衛星が観測した条件を考慮したためである。熱圏大気の運動方程式では、圧力勾配、イオンドラッグ、粘性、コリオリ力、移流などが考慮されている。なおこのモデルにおいて水平方向の粘性は無視されている。計算においては以下の 3 つの状況を仮定する。(1) Default, (2) イオンドラッグ無視, (3) 粘性無視。(2) の仮定については

$\lambda_{xx}(U_i - U_n) + \lambda_{xy}(V_i - V_n) = 0$  と設定する。ここで、 $\lambda_{xx}$  と  $\lambda_{xy}$  はイオンドラッグテンソルの成分、 $U_i$  と  $V_i$  は東西方向と南北方向のイオンドリフト、 $U_n$  と  $V_n$  は東西方向と南北方向の風速である。また (3) の仮定については、 $\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 U_n}{\partial z^2} = 0$  と設定する。ここで、 $\mu$  は粘性係数であり、 $\rho$  は大気密度、 $z$  は高度である。

### 3 結果

TIE-GCM シミュレーションによって計算された高度約 400 km における熱圏大気東西風と電子密度の日変化を図 1 に示す。地理座標で表されており、すべての経度で平均されている。大まかに言うと東西風は昼間は西向き、夜間は東向きである。約 20 LT で東向き速度の極大を形成する。電子密度は 10 - 01 LT で EIA を形成し約 20 LT では Prereversal Enhancement [Farley et al., 1986] により EIA 構造が特に発達している。

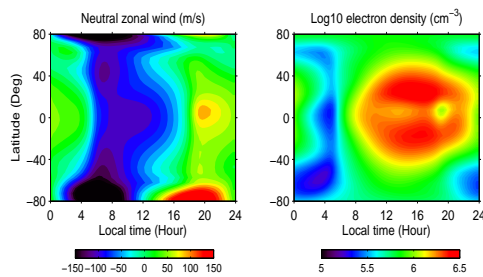


図 1 高度約 400 km における熱圏大気東西風 (左) と電子密度 (右) の日変化

図 2 は地理座標で表された高度約 400 km における東西風分布である。左パネルは 14 LT、右パネルは 20 LT であり、これらの時間は EIA がよく発達している時間である。上パネルは Default の場合 (1)、下パネルはイオンドラッグ無視 (2) の場合である。それぞれの図中の白線は磁気赤道を表す。正の値は東向きを表す。上のパネルから、東西風は磁気赤道で強く吹いており、14 LT では約 -50 m/s (西向き) であり、20 LT では約 100 m/s (東向き) である。20 LT における磁気赤道で強い風は磁気緯度約  $\pm 10^\circ$  以内で見られる。この領域は電子密度の極小領域と一致している (図 1 参照)。下のパネルでは、東西風は磁気赤道で強くは吹かず、地理赤道で極大もしくは極小を形成している。これより、東西風はイオンドラッグの EIA 構造により磁気赤道で強く吹いていることが明らかとなった。

図 3 は 20 LT における東西風 (左) と電子密度 (右) の緯度高度分布である。上パネルと下パネルは Default (1) と粘性無視 (3) の場合を表している。磁気赤道は約

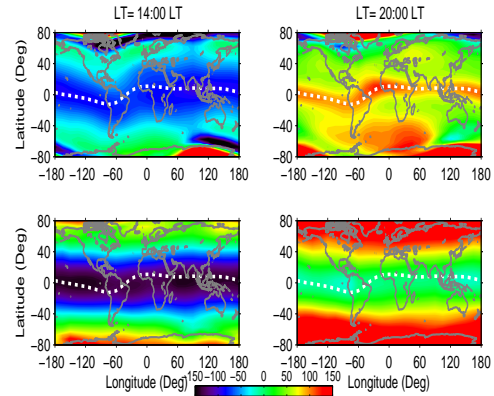


図 2 高度約 400 km, 14 LT と 20 LT における熱圏大気東西風。上パネルは Default の場合、下パネルはイオンドラッグ無視の場合である。

$10^\circ\text{N}$  である。Default における東西風は高度約 250 km 以上において磁気赤道上で強く吹いている。東西風は磁気赤道上において、高度約 300 km - 400 km で最も強く、100 m/s を超える。一方で電子密度は高度約 300 km - 400 km で密度の極大と極小の比がもっとも大きくなり、それは最大で約 10 倍である。EIA の密度極小は東西風速度の極大と一致している。高度 450 km 以上では EIA の密度極小は見られなくなるにも関わらず、東西風は磁気赤道上で強く吹いている。明らかに高度約 450 km 以上の東西風の振る舞いはイオンドラッグの緯度構造では説明ができない。

粘性無視の場合における東西風は高度約 300 km 付近において磁気赤道で強い。そしてその速度極大は電子密度の密度極小と一致している。注目すべき特徴としては、高度 400 km 以上の東西風は Default の場合と比べ速度が弱くなっているという点である。そして、高度約 300 km 付近の速度極大と比べても速度は約 100 m/s も弱くなっている。これらの特徴は粘性が風に与える影響を示している。

図 4 は熱圏における主要な 3 つの項とそれらの和 (破線と点線) の大きさの日変化であり、高度約 400 km, 磁気赤道上の分布である。3 つの項とは圧力勾配 (線)、イオンドラッグ (破線)、粘性 (点線) である。正の値は東向きの加速を表す。基本的に圧力勾配とイオンドラッグがほぼすべての時間でバランスしており、それゆえ、圧力勾配が負のときは東西風は西向きであり、正のときは東向きである。粘性項は他の 2 つに比べ値が小さく、ほぼゼロに近い値であるが、5-7 LT と 18-20 LT においては正の値をとる。3 項の和はゼロの値に近い。しかし、4-7 LT の間は負の値であり、17-20 LT では正の値をとる。

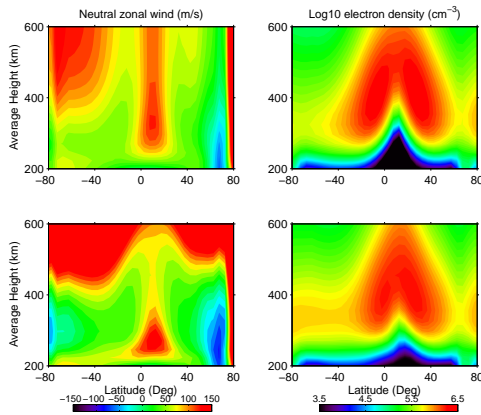


図 3 Default の場合 (上パネル) と粘性無視の場合 (下パネル) における東西風 (左) と電子密度 (右) の緯度高度分布. 20 LT, 磁気赤道は約  $10^{\circ}\text{N}$  である.

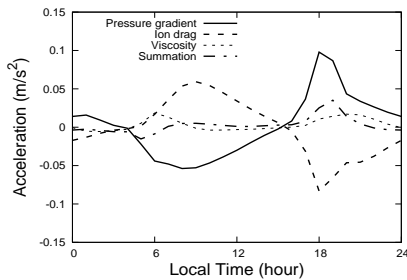


図 4 Default の場合における, 磁気赤道上の圧力勾配, イオンドラッグ, 粘性, これら 3 つの和の日変化.

## 4 議論とまとめ

Default の場合の熱圏大気東西風は磁気赤道で強く吹いている一方で, イオンドラッグを無視した場合の東西風は地理赤道で強く吹くという結果が得られた (図 2 参照). これは, 明らかに東西風の磁気赤道上の速度極大は, イオンドラッグの EIA 構造によって形成されることを示している. 人工衛星により観測された東西風もまた EIA が十分に発達している時間帯において磁気赤道で強いということを示している [Liu et al., 2009]. われわれの結果は観測と一致しており, 東西風がイオンドラッグを介したプラズマに強く支配されていることを示すものである.

図 3 において EIA 構造は高度約 250 km - 450 km で見られる. しかしながら, Default の場合の東西風は電子密度が極大を形成している高高度においても磁気赤道で強いという特徴を示している. この東西風の速度極大は DE-2 衛星のデータを用いた Watanabe and Kondo [2011] でも見られる. 彼らは 18-24 LT の上部電離圏において東西風は磁気赤道で強く吹いていることを示している. その時間の EIA 領域では, 東西風の速度極大と電子の密度極小は一致している. 図 2 から, 熱圏の東西風はイオンドラッグの EIA 構造により磁気赤道に沿って強く吹くことを示した. それゆえ, 上部電離圏ではイオンドラッグとは別の要素によって東西風は磁気赤道で強く吹くことを示している. その要素は粘性であり, 低高度の磁気赤道で強い東西風が粘性を介して高高度の東西風を引っ張るという過程が示唆される. 図 3 の下パネルは粘性を無視した場合の東西風の分布を示している. Default の場合は EIA 領域の上部も磁気赤道で強い東西風は見られるが, 粘性無視の場合は見られない. さらに, EIA 領域 (高度約 450 km 以下) に比べ EIA 領域の上部における東西風は弱くなっている. もちろん, 運動方程式において粘性を変化させることは, 圧力勾配やイオンドラッグなどの他の項にも影響を与える. そのため, 図 3 は単純に粘性のみの影響を示したものではない. しかしながら電子密度の変化は図 3 の上パネルと比べて大きくないため, 粘性を無視することによって生じるイオンドラッグのような他の項への影響は小さく, 粘性項の影響が強く表れていると考えられる. それゆえ, 上部電離圏における東西風は粘性の影響を強く受けていることが示唆される. 粘性は圧力勾配やイオンドラッグの項と比べてその値は小さい. 全ての時間で圧力勾配とイオンドラッグはほぼバランスしているが, 18-24 LT では

粘性も含めたバランスとなり、粘性項が重要となる。圧力勾配とイオンドラッグのバランスは Maruyama et al. [2003] にも見られる。そこでは、異なる熱圏電離圏に関する数値モデルを用いてこのバランスが示されている。今回の研究から、熱圏大気東西風に関して以下の二つの点を明らかにした。ひとつは東西風はイオンドラッグの EIA 構造により磁気赤道で強く吹くということ、二つ目は、上部電離圏では東西風は粘性によって磁気赤道で強く吹くということである。

thermosphere coupling in the low latitude region, in *Aeronomy of the Earth 's atmosphere and ionosphere*, Springer

## 参考文献

Dickinson, R. E., E.C. Ridley, and R. G. Roble (1981), A three-dimensional general circulation model of the thermosphere, *J. Geophys. Res.*, 86, 1499-1512

Farley, D. T., E. Bonelli, B. G. Fejer and M. F. Larsen (1986), The prereversal enhancement of the zonal electric field in the equatorial ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 91(A12), 13723-13728

Liu, H., S. Watanabe and T. Kondo (2009), Fast thermospheric wind jet at the Earth's dip equator, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L08103, doi:10.1029/2009GL037377

Raghavarao, R., L. E. Wharton, N. W. Spencer, H. G. Mayr and L. H. Brace (1991), An Equatorial Temperature and Wind Anomaly (EWTA), *Geophys. Res. Lett.*, 18, 1193-1196

Richmond, A. D., E.C. Ridley, R. G. Roble (1992), A thermosphere / ionosphere general circulation model with coupled electrodynamics, *Geophys. Res. Lett.*, 19, 601-604

Roble, R.G., E.C. Ridley, A.D. Richmond, and R.E. Dickinson (1988), A coupled thermosphere/ionosphere general circulation model, *Geophys. Res. Lett.*, 15, 1325-1328

Rishbeth, H. (1972), Thermospheric winds and the F-region: A review, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 183, 34, 1-47

Watanabe, S and T. Kondo (2011), Ionosphere-