

地球全球大気モデル GAIA による熱圏・電離圏ダイナミクスの主磁場依存性

埜 千尋¹, 陣 英克¹, 品川 裕之¹, 藤原 均², 三好 勉信³

[1] 情報通信研究機構(NICT), [2] 成蹊大学, [3] 九州大学

概要

地球全大気モデル GAIA を用いて、主磁場が中低緯度の電離圏・熱圏に及ぼす影響を評価し、以下の結果を得た。(1)中性大気速度・密度・温度の磁場依存性は小さいが、ダイナモ電場および電気伝導度は磁場に比例して増大し、電流は反比例して減少した。磁場が弱くなると、(2)潮汐波動の振幅は高高度で大きくなり、(3)磁気赤道域にある熱圏スーパーローテーションの速度は減少した。これは、磁場が弱いほどプラズマ運動の磁場による制約が弱くなるために、(2)の波動の振幅は大きくなり、スーパーローテーションの減速効果を持つイオンドラッグが大きくなることで(3)のスーパーローテーション速度が小さくなったためと考えられる。

1. はじめに

惑星固有磁場は、惑星宇宙環境を特徴づける重要な一要素である。地球の主磁場は、過去 80 万年の間に 10^{22} – 10^{23} Am² の範囲で変動し、1840 年頃から約 6%/100 年で減少している[Guyodo and Valet, 1999]。主磁場の大きさが変わると、磁場の影響を受けるプラズマから成る電離圏、そして電離圏と相互作用下にある大気圏も影響を受けることが示唆されてきた[e.g., Takeda, 1995; Cnossen et al., 2016]。長期変化として、近現代の二酸化炭素量の増大による超高層大気温度減少や電離圏ピーク高度・密度への影響が示唆されているが、生じる空間変化は小さい。他方、磁場の偏角・伏角の局所的な構造は、観測で見られるような電離圏ピーク高度および密度の空間変化[e.g., Takeda, 2013]を作り、その変化の大きさも二酸化炭素によるものと同程度になりうるものが、これまでのモデル研究で示されてきた[Cnossen and Richmond, 2008; Cnossen, 2014]。

超高層大気は、下層から伝搬してくる波動の影響を受け、また、磁気赤道域で大気の帯状平均流が自転角速度よりも早い、スーパーローテーションと呼ばれる局所構造が見られる。本研究は、これらの、赤道域～中緯度の超高層大気ダイナミクス及び現象が主磁場によってどのように影響するかに着目し、GAIA (Ground-to-Topside Model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy)モデルを用いて評価を行った。

2. モデル概要・計算設定

GAIA は、大気下層に気象再解析データを入力し、対流圏から熱圏までの大気圏と電離圏を、中性大気–電離大気間の相互作用を含め、大気物理および化学過程を解くモデルである[e.g., Jin et al., 2011]。本研究では、緯度・経度分解能 2.8 度 (T42)、鉛直分解能 0.2 スケールハイト(L150)の設定を用いる。主磁場強度を現在値の 10%、50%、および 75%に変えた計算を行った。それぞれの計算設定を B10%、B50%、B75%、現在値の場合を B100%と表す。中低緯度に着目するため、極冠電場ポテンシャルおよびオーロラ電子降り込みを含まない設定で計算を行った。太陽および磁気活動が静穏な 2008 年 2 月の一ヶ月平均の結果を示す。

3. 結果・考察

3.1 300 km 高度面の全球平均値

中性大気速度や電子密度の主磁場依存性は小さいのに対し、主磁場が減少すると、ダイナモ電場は磁場減少率程度に小さく、電離圏水平電流は大きくなった(図 1)。

定義より、ペダーソン電気伝導度は $\sigma_P \propto B^{2-\alpha}$ 、ホール電気伝導度は $\sigma_H \propto B^{3-\alpha}$ で高度に依存して変わる。300 km 高度では $\sigma_H < \sigma_P \propto B^2$ (図 1e, 1f) である。ここで、中性大気速度の磁場依存性を $V_n \propto B^\alpha$ とすると

$$\text{ダイナモ電場 } E = V_n \times B \propto B^{\alpha+1}$$

$$\text{電離圏電流 } J = \sigma_P E \propto B^{\alpha+1}$$

$$\text{イオンドラッグ } J \times B \propto B^{\alpha+2}$$

$$\text{ジュール加熱 } \sigma_P E^2 \propto B^{2\alpha+2}$$

の関係が求まる。中性大気はイオンドラッグの影響を主に受けるとすると、その B^α の依存性をもつことになり、関係式が閉じる。ここで、計算からは $\alpha \sim 0$ であるので、 $E \propto B^1$ 、 $J \propto B^1$ と求まり、計算結果を反映する。

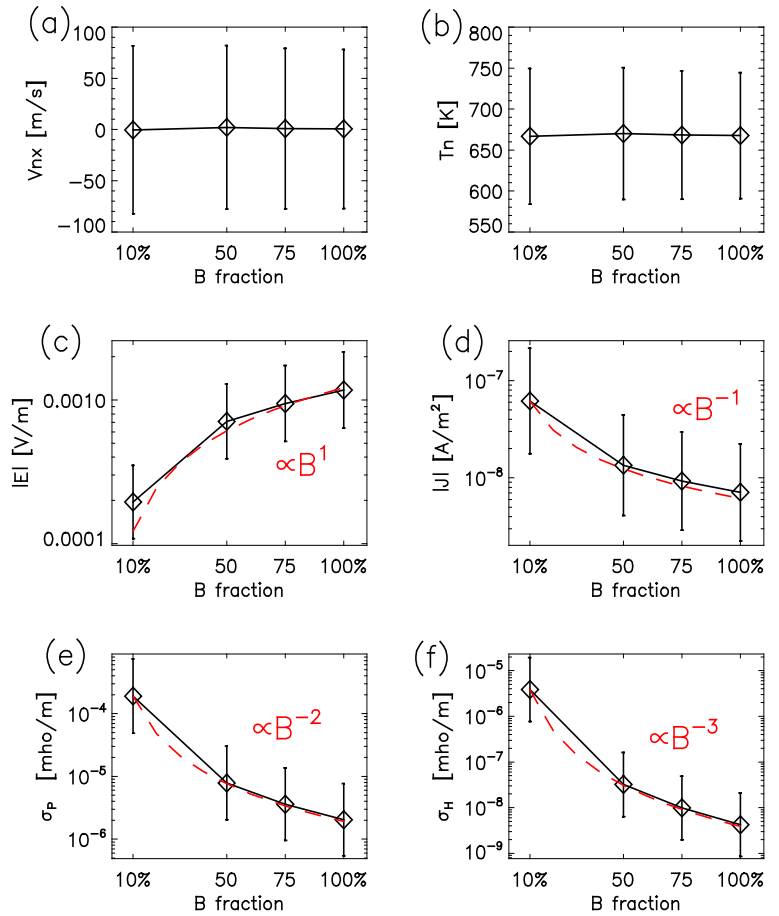


図 1. 300 km 高度の(a)中性大気速度、(b)中性温度、(c)電場、(d)水平電流、(e) σ_P 、(f) σ_H の平均値の主磁場依存性。近似曲線を赤色破線、それぞれの標準偏差(1 σ)をエラーバーで示す。

3.2 中性・電離大気の大気潮汐波動

図 2 に 1 日周期・西進波数 2 の潮汐波 DW2 の振幅緯度分布を示す。磁場強度が弱いほど振幅が大きくなった。

プラズマ運動は、磁場が弱いほど、磁場による制約が小さくなる。生成/伝播された中性大気の波動成分が、中性粒子-イオン衝突によってイオンを揺らし、磁場の制約が小さい場合ほどイオンの振幅が大きくなる。イオンが応答しやすいほうが中性大気の振幅の減衰が軽減し、大きな振幅となる。イオンと中性粒子の衝突が効率的である ~ 100 km 高度で特にイオン速度の振幅の磁場による違いが顕著になり、それ以上の高度の中性大気波動の振幅にも磁場依存性が反映された。

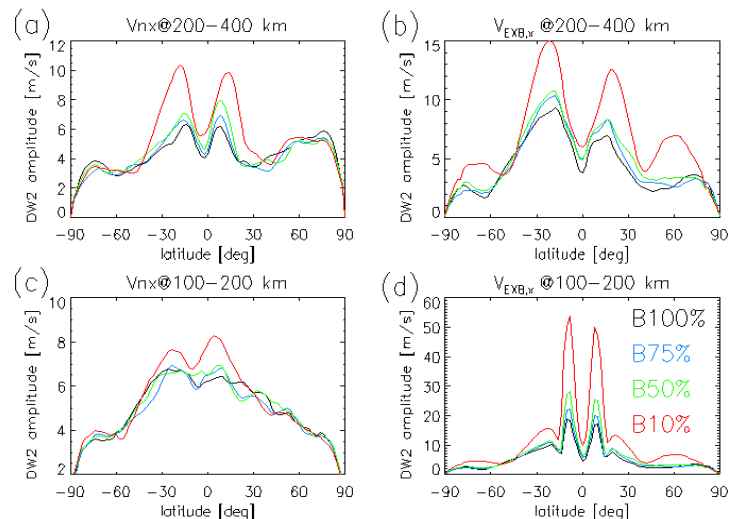


図 2. 200-400 km 高度における(a)中性速度および(b)プラズマドリフト速度の DW2 の振幅緯度分布。100-200 km 高度における分布を(c)(d)に示す。線の色は、磁場の設定の違いを表す。

3.3 熱圏スーパーローテーション

熱圏スーパーローテーションは、帯状平均した東西風が、磁気赤道の高度300 km 付近に東向き速度ピークを持つものである(図 3a, 3b)。B100%のとき(図 3 左)のスーパーローテーション最大速度が 45.7 m/s であるのに対し、B10%のとき(図 3 右)は 25.0 m/s と、45%ほど減少した。磁気赤道域における中性大気速度(図 3c, 3d)およびイオン速度(図 3e, 3f)について、高度分布の地方時(LT)ごとの変化を見ると、磁場が弱まると西向きの風速が増大している。磁場強度が弱いほどプラズマの磁場による制約が弱まってプラズマ速度が大きくなり、スーパーローテーションに対して減速効果として影響するイオンドラッグ[Miyoshi et al., 2012]の効果が大きくなり、スーパーローテーションがより効果的に減速されたためと考えられる。

なお、この解析結果として、2002 年 2 月の月平均を示している。2008 年も速度に類似の磁場依存性は見られたが値が小さかった。これは、観測[Liu et al., 2006]およびモデル[Miyoshi et al., 2012]で示されているように、F10.7 が大きいほどスーパーローテーションが発達するためである。

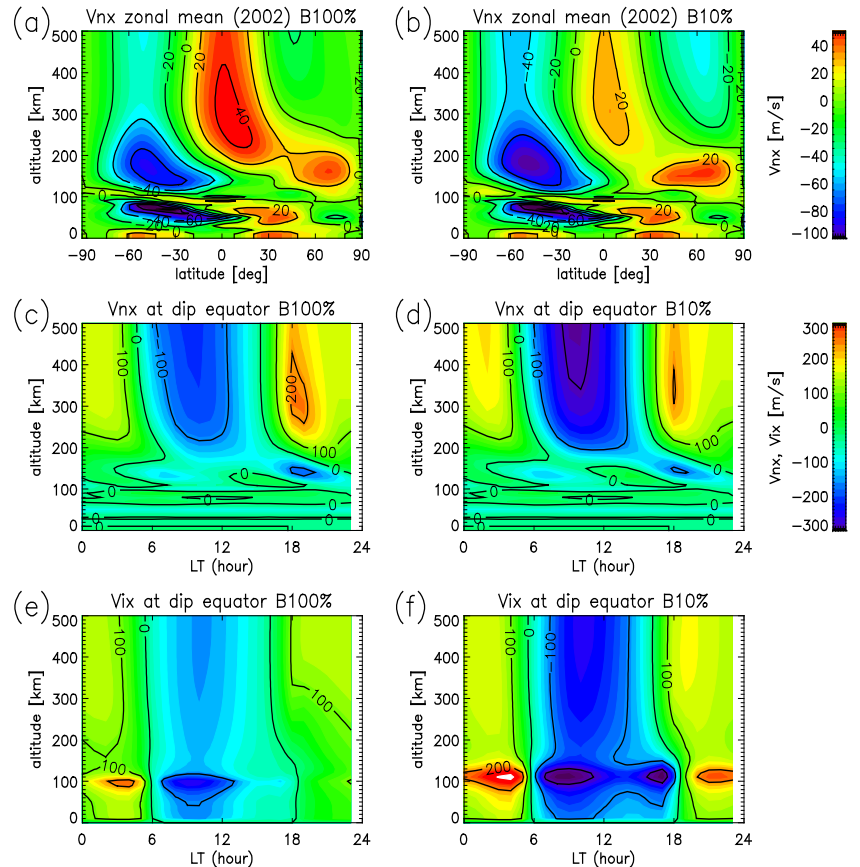


図 3. 上から、中性大気速度の帯状平均の緯度・高度分布、磁気赤道における中性大気速度およびプラズマドリフト速度の地方時-高度分布について、東向き正とし、B100%(左)および B10%(右)の場合を示す。

4. 参照論文

- Cnossen, I., and A. D. Richmond (2008), Modelling the effects of changes in the Earth's magnetic field from 1957 to 1997 on the ionospheric hmF2 and foF2 parameters, *J. Atmos. Solar-Terr. Physics*, 70, 1512–1524.
- Cnossen, I. (2014), The importance of geomagnetic field changes versus rising CO₂ levels for long-term change in the upper atmosphere, *J. Space Weather Space Clim.*, 4, A18, doi:10.1051/swsc/2014016.
- Cnossen, I., H. Liu, and H. Lu (2016), The whole atmosphere response to changes in the Earth's magnetic field from 1900 to 2000: An example of “top-down” vertical coupling, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, doi:10.1002/2016JD024890.
- Guyodo, Y., and J.-P. Valet (1999), Global changes in intensity of the Earth's magnetic field during the past 800 kyr, *Nature*, 399(6733), 249–252, doi:10.1038/20420.
- Jin, H., Y. Miyoshi, H. Fujiwara, H. Shinagawa, K. Terada, N. Terada, M. Ishii, Y. Otsuka, and A. Saito (2011), Vertical connection from the tropospheric activities to the ionospheric longitudinal structure simulated by a new Earth's whole atmosphere-ionosphere coupled model, *J. Geophys. Res.*, 116, A01316, doi:10.1029/2010JA015925.
- Liu, H., H. Lühr, S. Watanabe, W. Köhler, V. Henize, and P. Visser (2006), Zonal winds in the equatorial upper thermosphere: Decomposing the solar flux, geomagnetic activity, and seasonal dependencies, *J. Geophys. Res.*, 111, A07307, doi:10.1029/2005JA011415.
- Miyoshi, Y., H. Fujiwara, H. Jin, H. Shinagawa, and H. Liu (2012), Numerical simulation of the equatorial wind jet in the thermosphere, *J. Geophys. Res.*, 117, A03309, doi:10.1029/2011JA017373.
- Takeda, M. (1996), Effects of the strength of the geomagnetic main field strength on the dynamo action in the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 101(A4), 7875–7880, doi:10.1029/95JA03807.
- Takeda, M. (2013), Contribution of wind, conductivity, and geomagnetic main field to the variation in the geomagnetic Sq field, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 118, 4516–4522, doi:10.1002/jgra.50386.