

# 地球全球大気モデルGAlAによる 熱圏・電離圏ダイナミクスの 主磁場依存性

埜 千尋<sup>1</sup>, 陣 英克<sup>1</sup>, 品川 裕之<sup>1</sup>,  
藤原 均<sup>2</sup>, 三好 勉信<sup>3</sup>

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

# 地球超高層

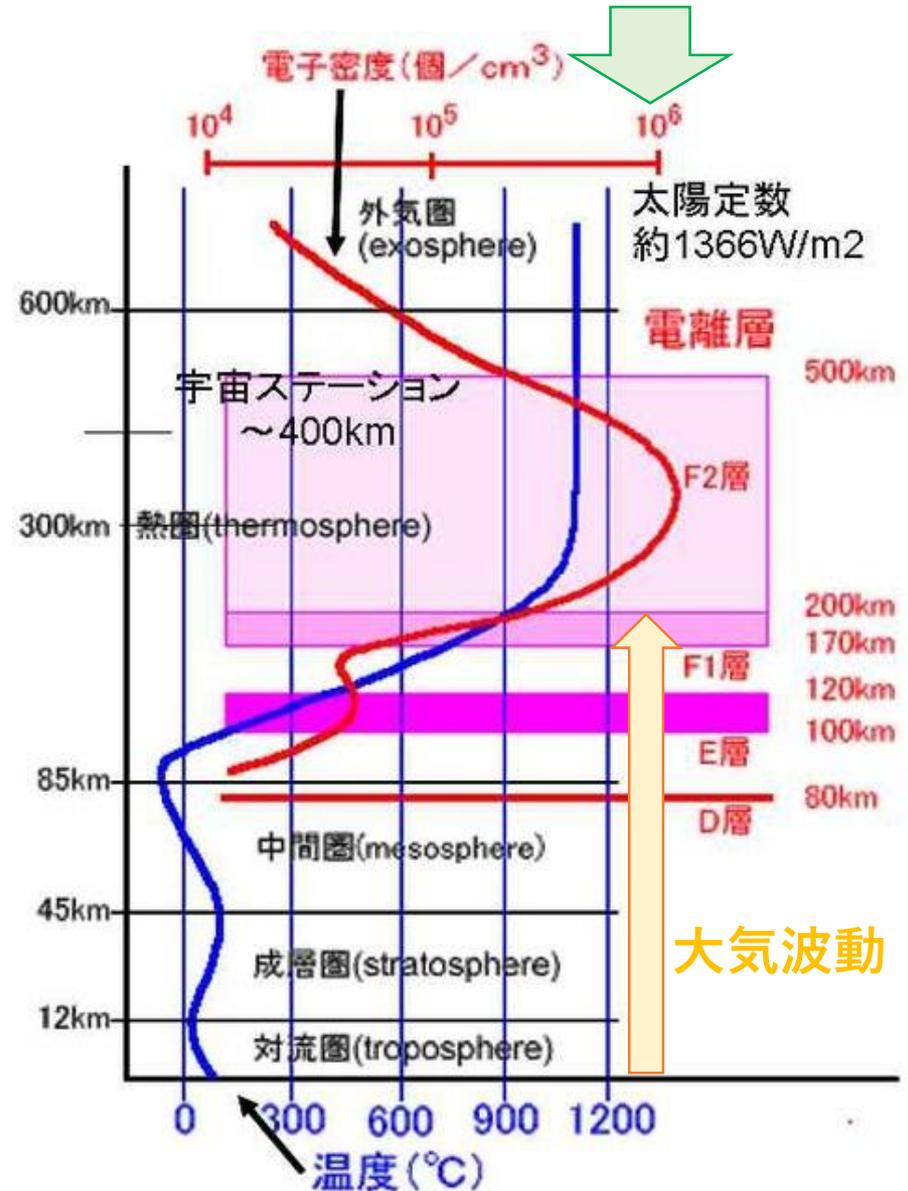
- \* 中性大気  
(対流圏～成層圏～中間圏～熱圏)
- \* 電離大気(電離圏)

両大気間で、

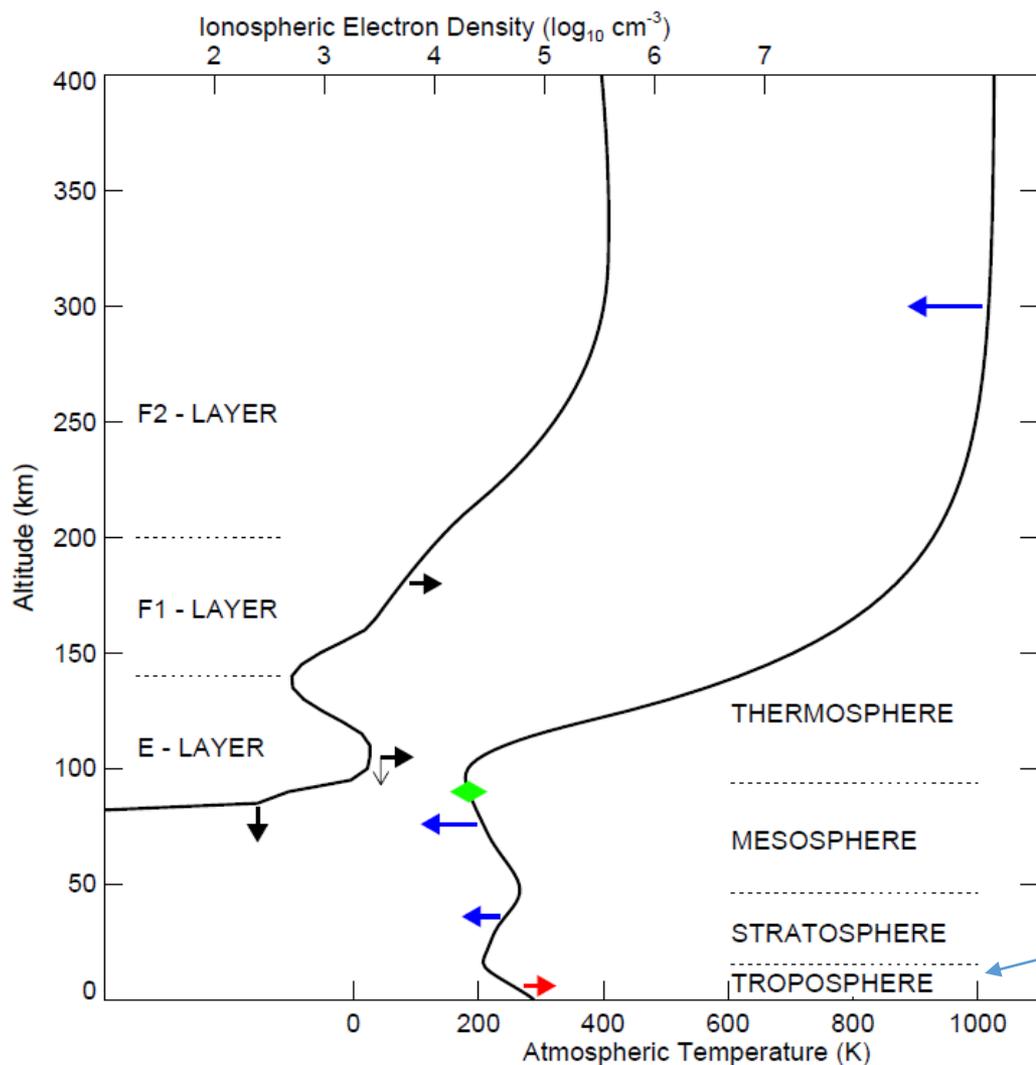
- \* イオン-中性粒子衝突
- \* 光化学反応過程

- \* 下層からの大気波動
- \* 上層からの太陽放射、  
オーロラ降込、対流電場の印加

太陽放射・オーロラ降込・電場印加



# 長期変化傾向



[Laštovička et al., 2008]

## 長期変化の要因

- 温室効果ガス(主にCO<sub>2</sub>)増大
- 放射活性ガス(O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>)  
[e.g., Qian et al., 2011]
- 地球主磁場の変化
- 磁気圏活動度

0.6 K increase during 20<sup>th</sup> century  
[Intergovernmental Panel on  
Climate Change (IPCC), 2007]

# 主磁場の長期変化

地球の主磁場強度

- ・ 過去80万年の間に  $10^{22}$ - $10^{23}$  Am<sup>2</sup> で変動
- ・ 現在 100年あたり 6%減少

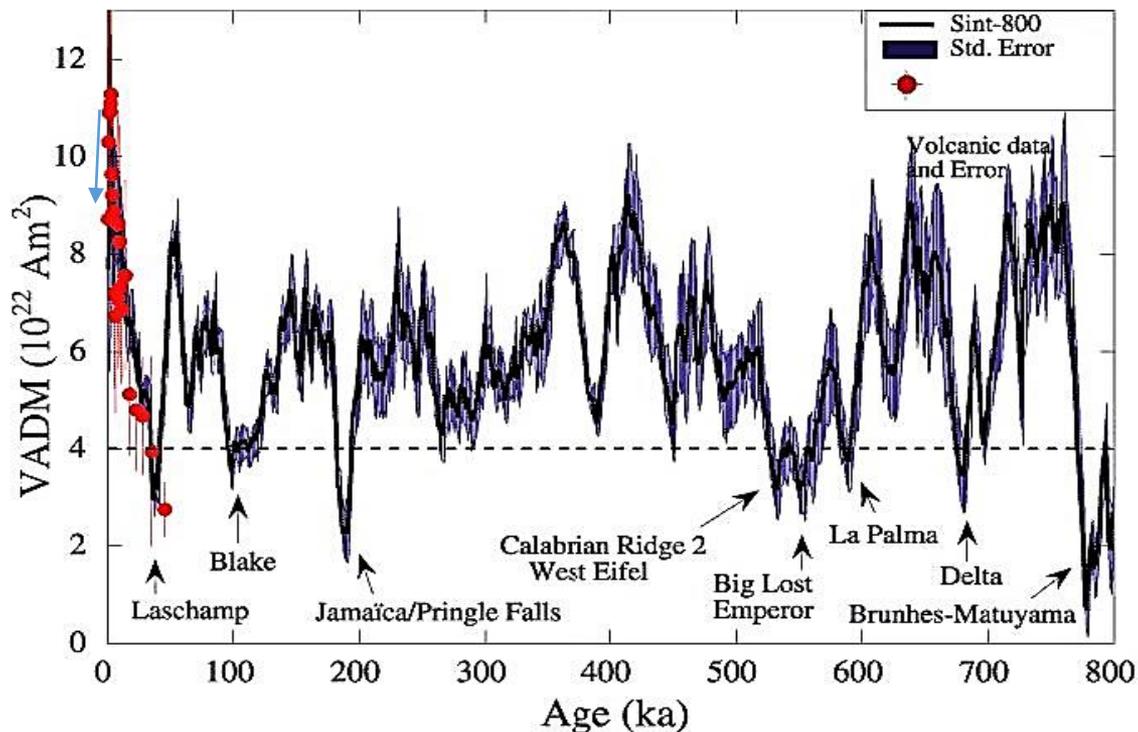


Fig. Long-term magnetic field variation [Guyodo and Valet, 1999]

太陽放射・オーロラ降込・電場印加

# 主磁場変化依存

磁場小ほど

-磁気圏小、FAC大、CPP小 [Cnossen et al., 2012]

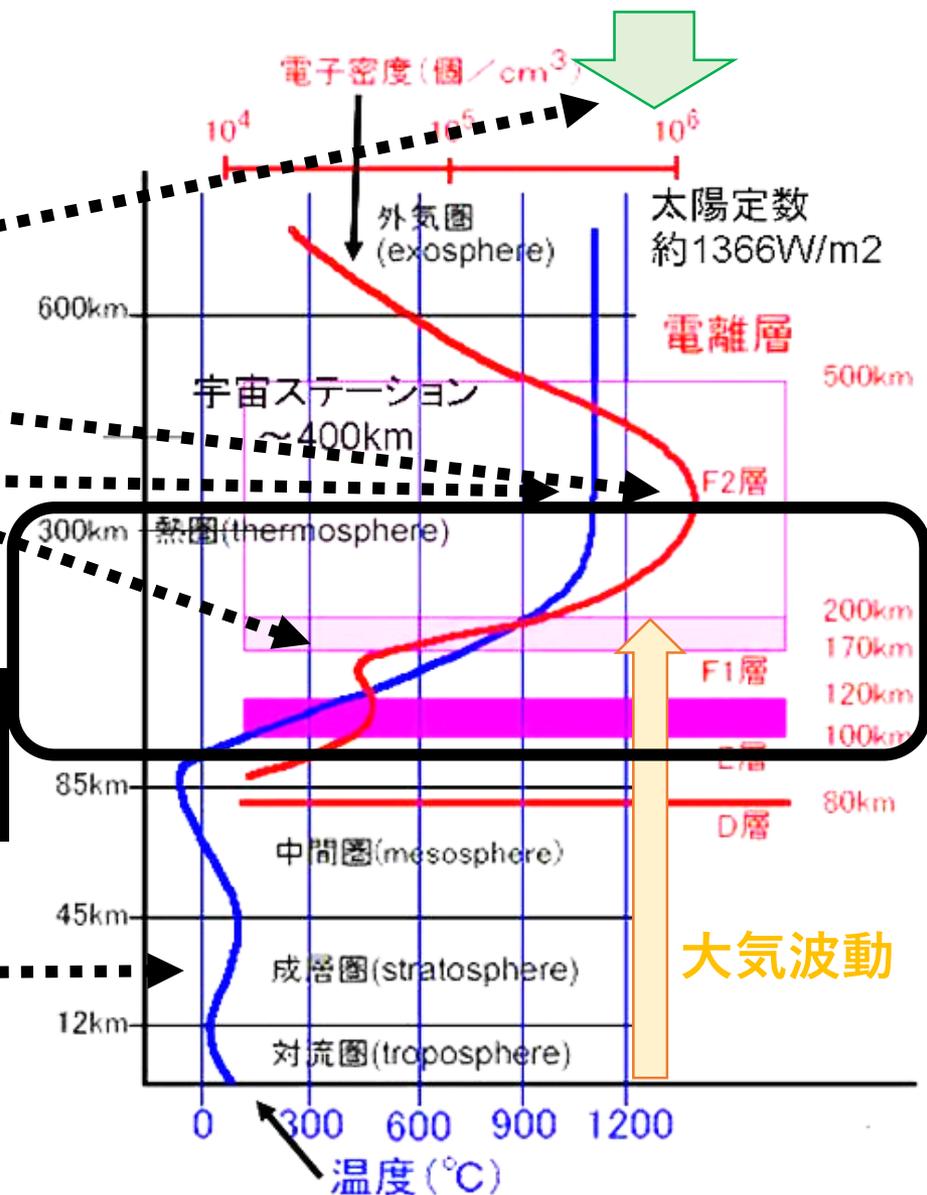
-電離圏高度上昇、 $\Sigma$ 大 [Takeda, 1996]

-hmF2, foF2, Sq場は場所により  
増大・減少 [Takeda 2013; Cnossen, 2014]

## 本研究

- \*熱圏・電離圏平均場
- \*潮汐波
- \*熱圏スーパーローテーション

-重力波フィルタ効果の変化による中間圏以下の温度・速度増減 [Cnossen et al., 2016]



# 研究目的

地球主磁場は熱圏・電離圏ダイナミクスへどう影響するか。  
電離圏は磁場に直接影響を受け、熱圏・電離圏相互作用がどのようにはたいているか。

→全大気圏・電離圏領域をself-consistentに解く GAIA (Ground-to-Topside Model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy) モデルを用いて調査する

→**大気ダイナミクスと現象への、電磁場の影響を評価**する

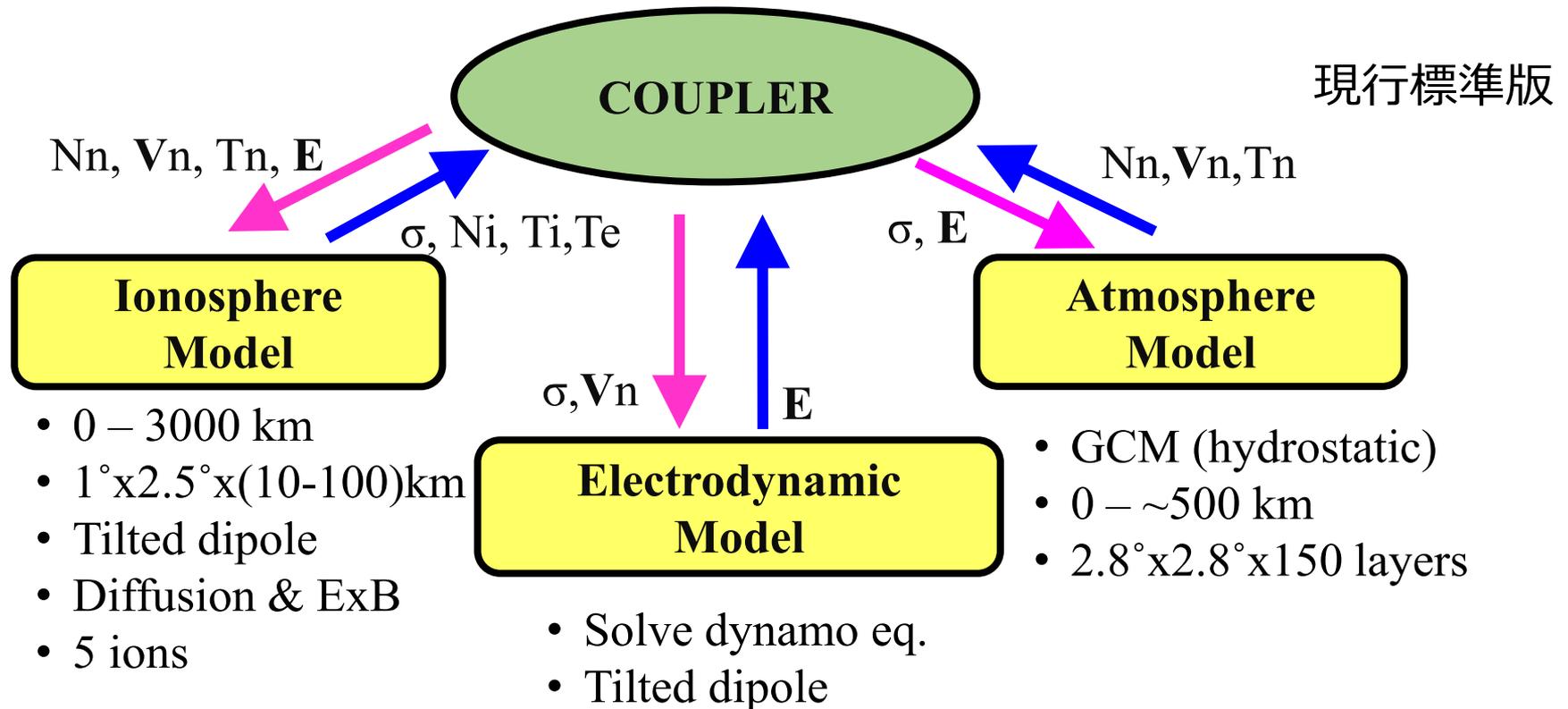
## Topics

- 1) 平均場
- 2) 潮汐波動伝播
- 3) 熱圏スーパーローテーション

# GAIAモデル1

## Whole atmosphere-ionosphere model (GAIA)

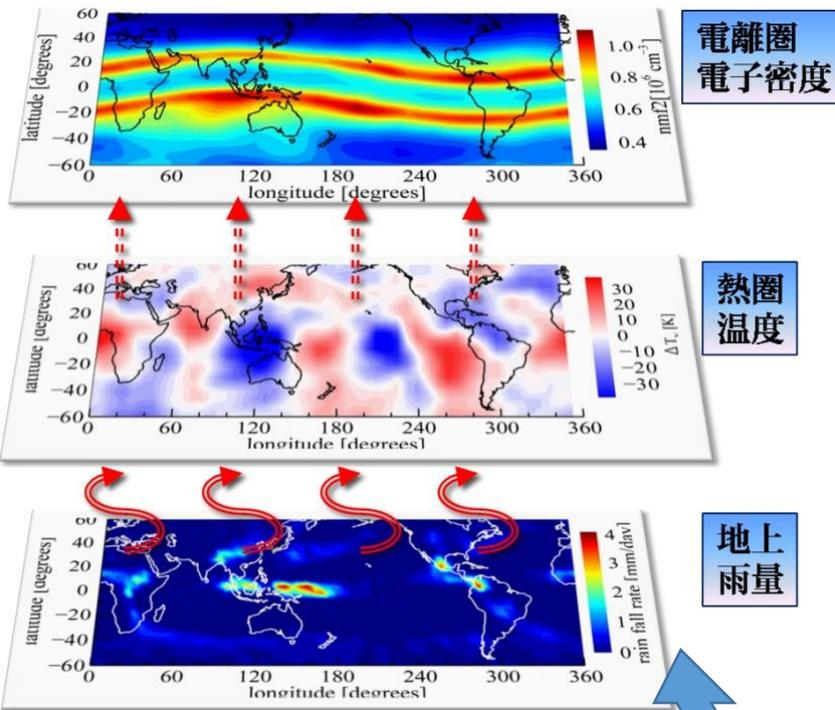
シームレスな全大気圏モデルと電離圏モデルを  
self-consistentに結合する世界唯一のモデル



# GAIAモデル2

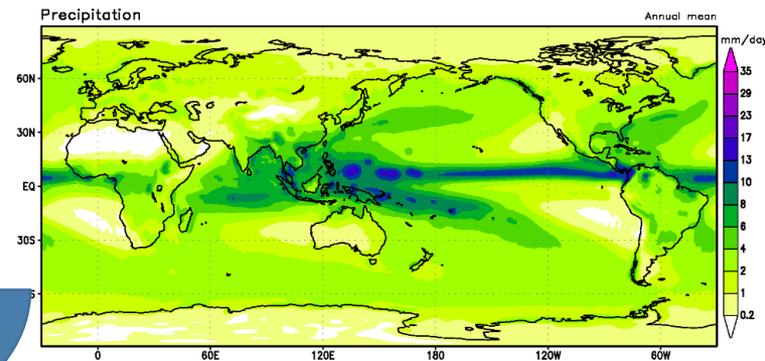
Whole atmosphere-ionosphere model (GAIA)

Realistic input parameters



F10.7 at Penticton

Meteorological Reanalysis data  
(produced by JMA)



- \* 大気圏・電離圏上下結合 [Jin et al. 2011]
- \* 熱圏中性大気密度の赤道異常 [Miyoshi et al., 2012]
- \* 熱圏大気のスーパローテーション [Miyoshi+12]
- \* 成層圏突然昇温 [Jin et al., 2012]
- \* プラズマバブルの発生予測 [Shinagawa et al.]
- \* 太陽フレア応答 [Matsumura et al.]

nudging at 0-30 km altitudes

surface temperature and pressure,  
temperature, zonal and meridional  
winds, water vapor

# GAIAモデルの計算設定

- 分解能 $2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$ (T42)、0.2スケールハイト(L150)
- 駆動源(大気下層のインプット・太陽紫外線)は同じ条件を用いる
- 中低緯度に着目し、極のオーロラ・電場入力はなしとする
- 2008年2月の1ヶ月間の平均を示す
- 傾いたダイポールの主磁場を現状100%とし、10, 50, 75%に減少させた計算を実施。それぞれB100%, B10%, B50%, B75%と以下呼ぶ。

# 確認：電気伝導度の変化1

Pedersen電気伝導度

$$\sigma_p = \frac{nq^2}{m_i} \frac{v_{in}}{v_{in}^2 + \omega_i^2} + \frac{nq^2}{m_e} \frac{v_{en}}{v_{en}^2 + \omega_e^2} \propto \begin{cases} B^{-2} & v_{in} \ll \omega_i, v_{en} \ll \omega_e \rightarrow \text{高高度} \\ B^0 & v_{in} \gg \omega_i, v_{en} \gg \omega_e \rightarrow \text{低高度} \end{cases}$$

n: 密度、q: 電荷素量、m\*: 質量、v: 衝突周波数、 $\omega$ : サイクロトロン周波数  $\omega_* = qB/m_*$   
下添字 e 電子、i イオン、n 中性大気

※それ以外の領域では、プラズマ高度変化やイオン・電子の違いの影響

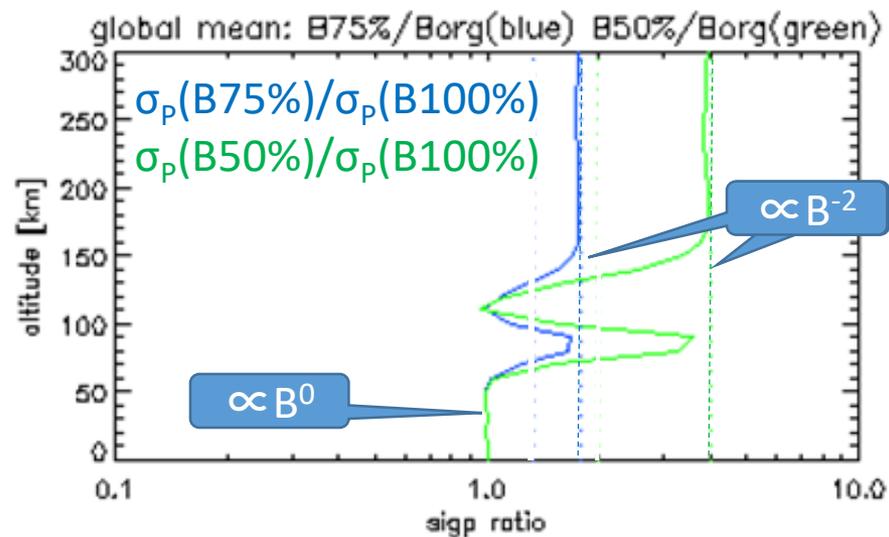
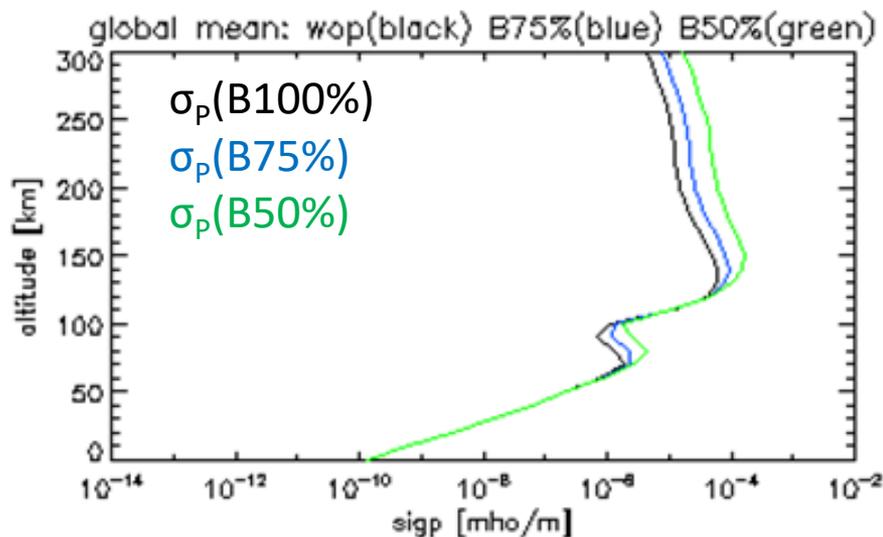


図. 全球平均したPedersen伝導度(左)と比(右)の高度分布

# 確認：電気伝導度2

磁場10%の場合、

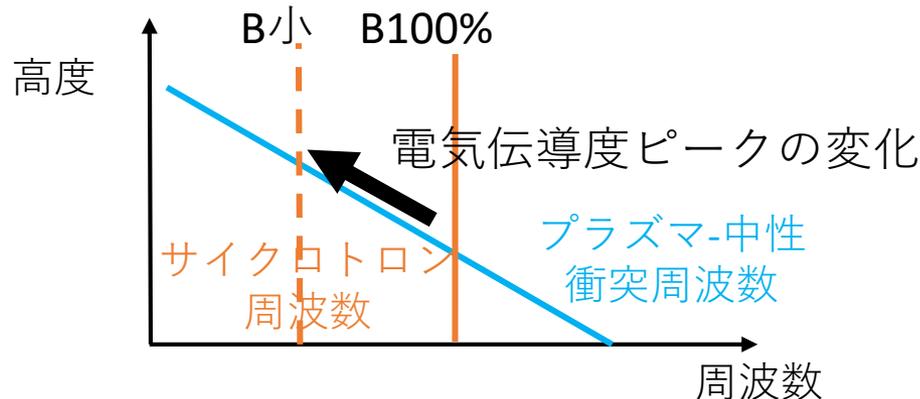
- (1) イオン密度は微増(昼-夕) 微減(夜-朝)
- (2) 電気伝導度の値増大、高度増大

[e.g., Takeda, 1996]

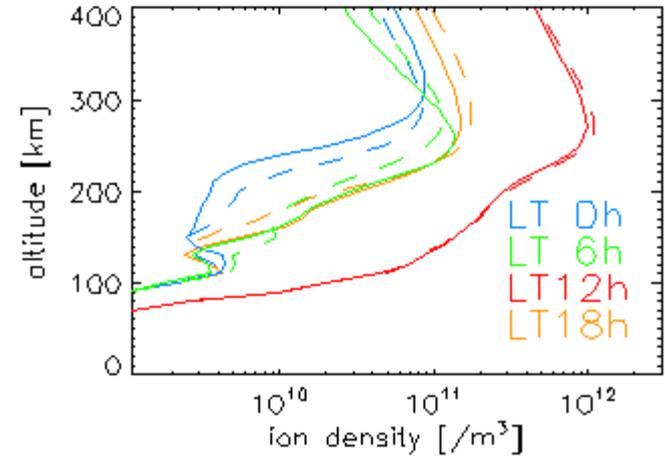
∵ B小だとサイクロトロン周波数小

プラズマ-中性衝突周波数は高高度ほど小  
磁場に依らない。

→ 両周波数が同程度の高度で電気伝導度がピークになるので、サイクロトロン周波数が下がれば高度が上がる



イオン密度 @135°E 36°N



Pedersen電気伝導度 @135°E 36°N

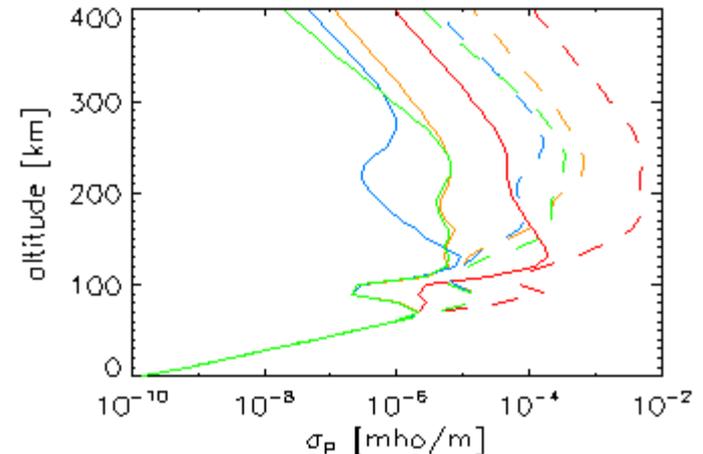


Fig. Altitude profiles at 4 local times (LT) for B100% (solid line) and B10% (dashed).

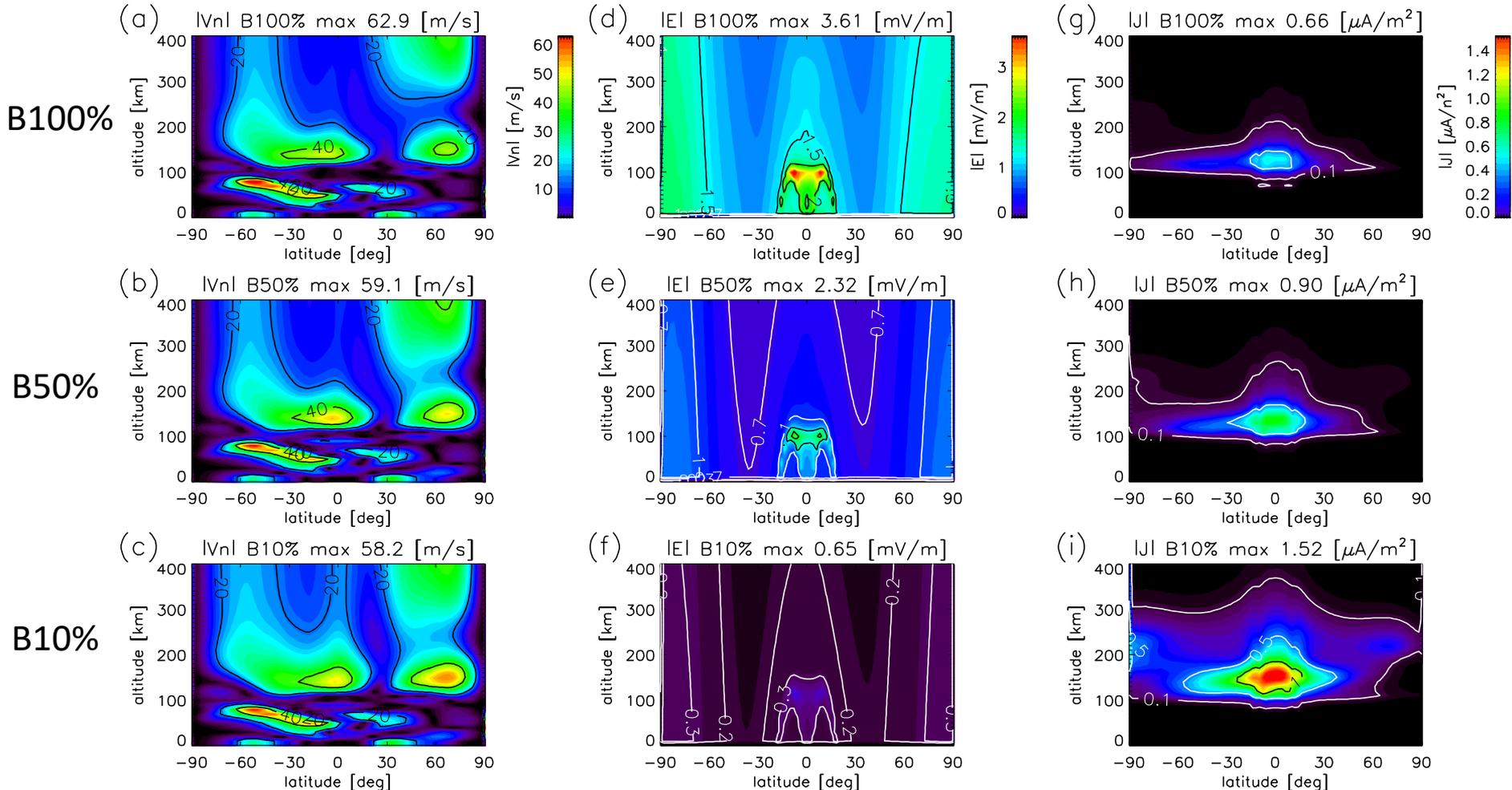
# Topic1: 平均場のB依存性

2008年2月の帯状平均の緯度・高度分布

中性大気速度

水平電場絶対値

水平電流絶対値



# 結果：B依存性

- 熱圏パラメータの依存性小
- 電場は $B^1$ に比例
- 電流は反比例
- Pedersen伝導度 $B^{-2}$
- Hall伝導度 $B^{-3}$

式からは

$\sigma_p \propto B^{-2 \sim 0}$   $\sigma_H \propto B^{-3 \sim 1}$  高度依存

$V_n \propto B^\alpha$  とすると

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

$J = \sigma_p E \rightarrow J \propto B^{\alpha-1}$  ( $\because \sigma_p > \sigma_H, \sigma_p \propto B^{-2}$  300km)

Ion drag:  $J \times B \propto B^\alpha$

Joule heating  $\sigma E^2 \propto B^{2\alpha}$

※計算からは  $\alpha \sim 0$

$\rightarrow V_n \propto B^0, E \propto B^1, J \propto B^{-1}$

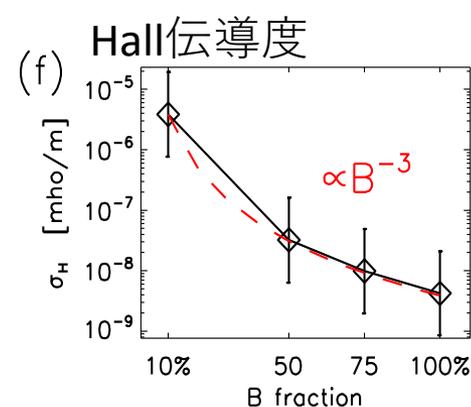
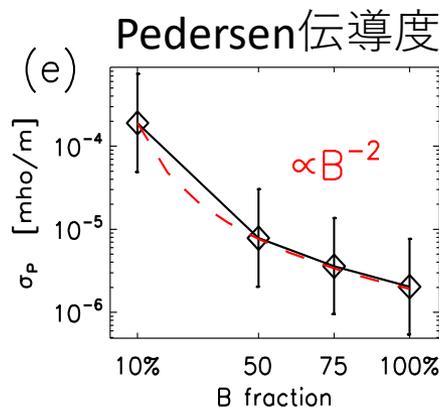
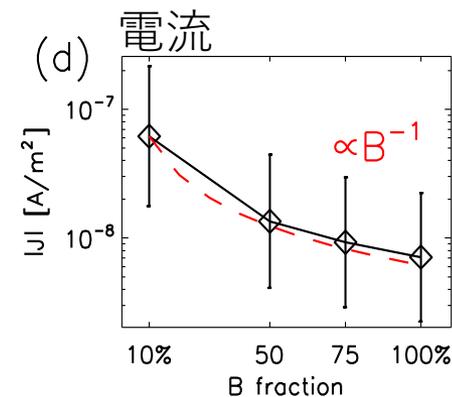
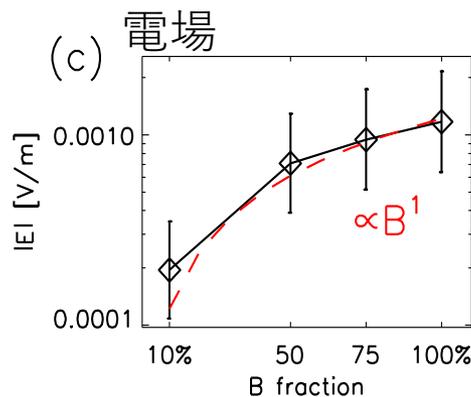
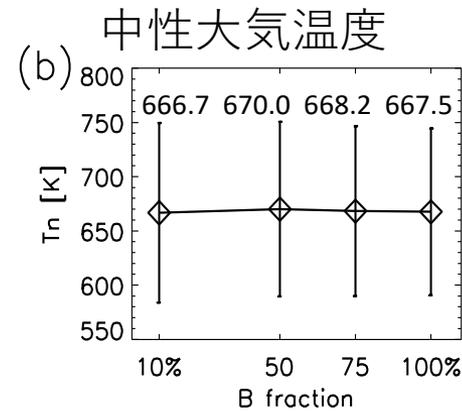
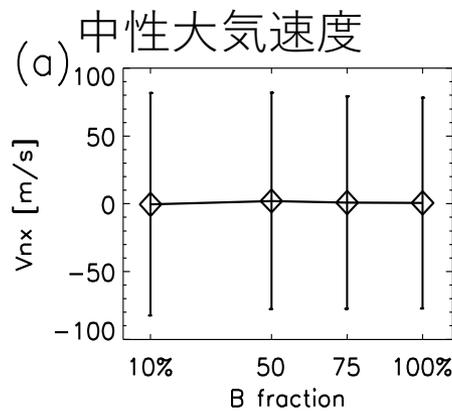


図. 高度300 km全球平均値の主磁場依存性

# Topic2: 波動の解析

解析：潮汐波

- 1) 経度・時間の2次元 fast Fourier transform (FFT) を高度・緯度の各点で一日ごとに求める
- 2) 各点ごと、振幅を2008年2月の一か月間平均

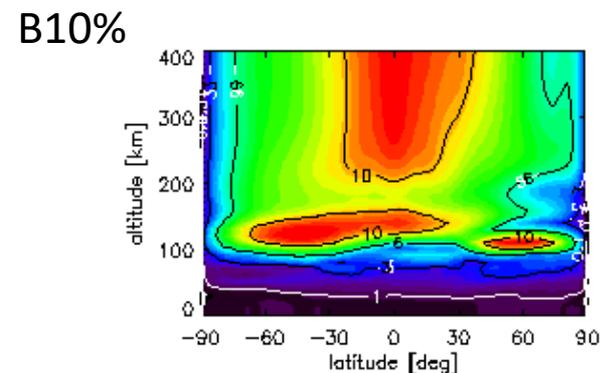
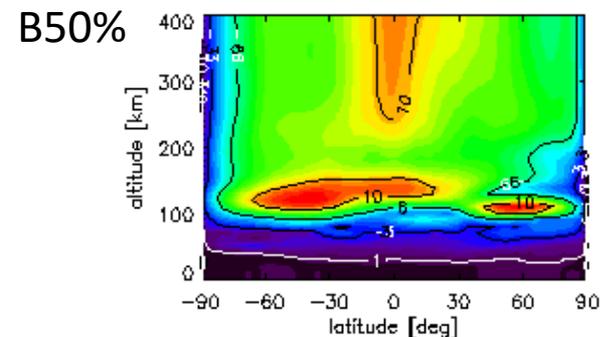
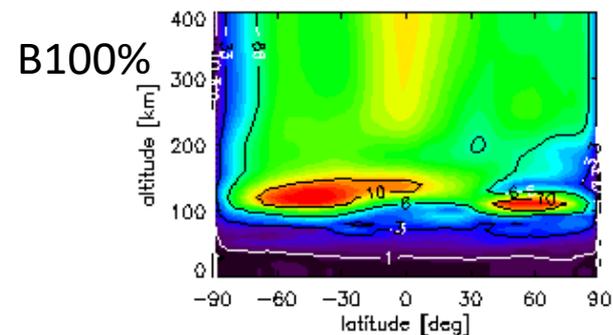
解析：プラネタリー波

- 1) 高度・緯度ごとに、日平均をとる
- 2) 経度方向の変化をFFT
- 3) 求まる振幅を一か月平均する

結果：

磁場が小さい方が、いくつかの波の高高度の振幅は大きい

半日潮西進波数2の波(SW2)の振幅



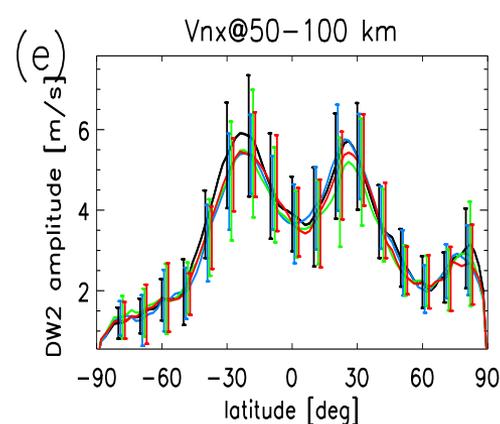
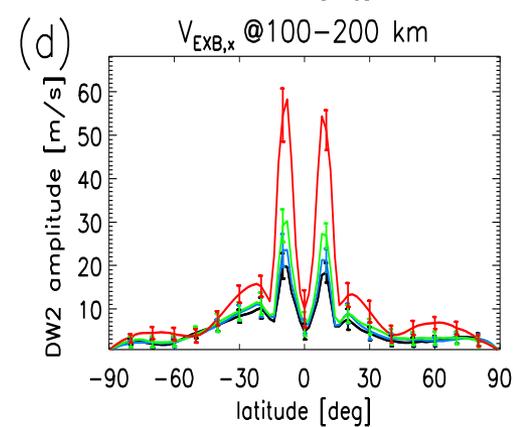
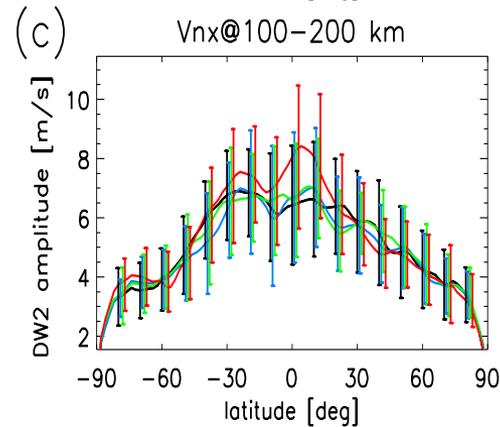
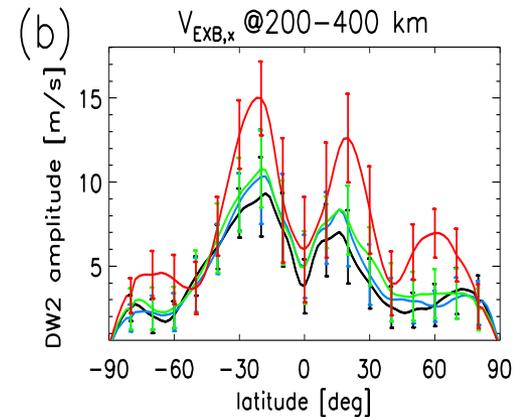
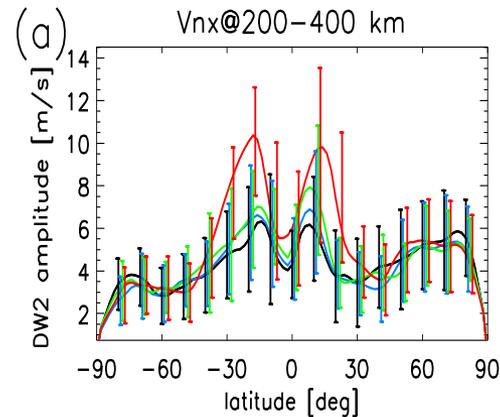
# 結果：潮汐波

## B小ほど

- 中性風の波動振幅 @ >100 km 大
- プラズマドリフト速度の振幅 @100km 大

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、イオン-中性相互作用による制約の違いで、~100 km 高度以上で磁場小ほど振幅大となる

注：大気下層条件は同じものを用いているので、伝播による違いを見たもの



B100%, B75%, B50%, B10%

Fig. Latitude profiles showing DW2 wave amplitudes of zonal neutral wind and plasma drift velocities.

# 結果：潮汐波

200-400 km高度の中性東西風の波の振幅

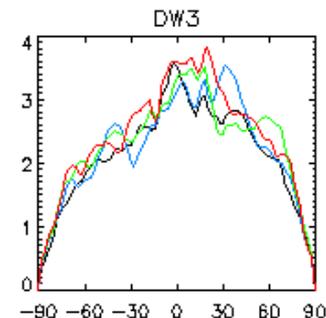
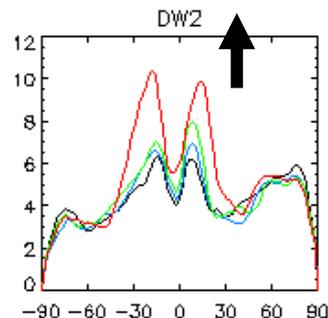
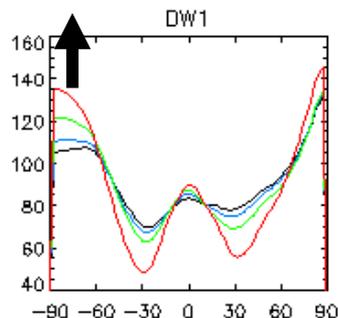
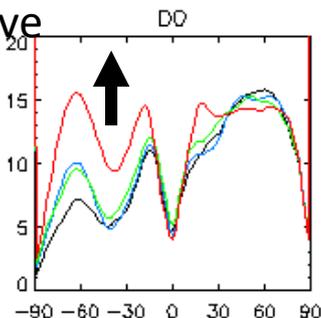
diurnal wave

B100%

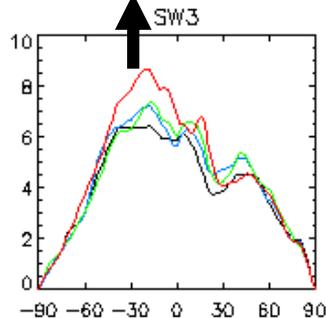
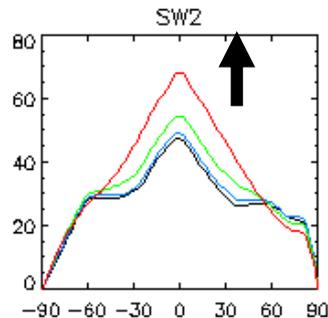
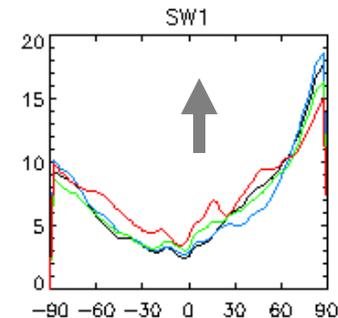
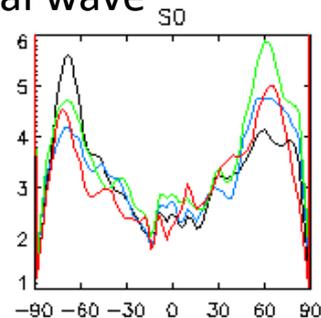
B75%

B50%

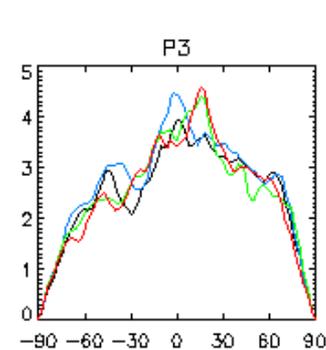
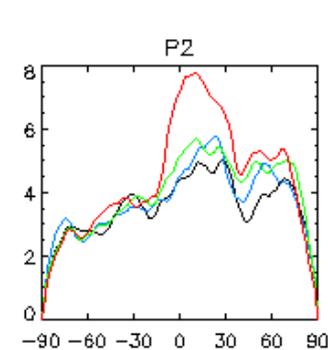
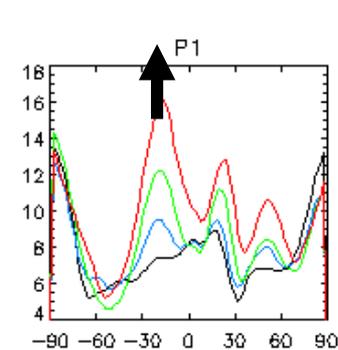
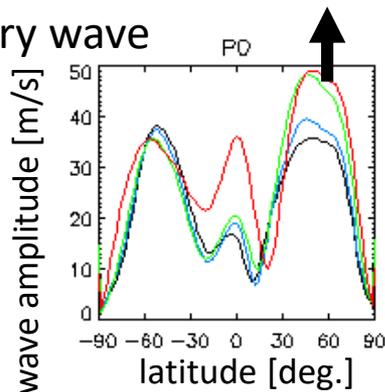
B10%



semi-diurnal wave



Planetary wave



\*波ごとに異なる特徴

# 波動の長期変化

□ Planetary Wave: ~2-30日周期  
 \* 80-100 km高度領域で断続的に増大の傾向 [Laštovička, 2002]

□ 潮汐波: 1日~その高調波  
 \* 減少傾向。1970年はじめ以降は減少率が小さくなっている [Portnyagin et al., 2006]

□ 重力波: 数10分~数時間  
 \* 増加傾向の間接的示唆はあるが、直接的な風の観測からは傾向が見られない。80-100 kmの重力波に関する観測からの傾向は限定的 [Laštovička et al., 2008]

LF-HF帯電波吸収→下部電離圏変動  
 冬大夏小：成層圏風による波動伝播の違い  
 1970年代後半から増大傾向  
 太陽周期性やENSO, QBOの依存性は見られず

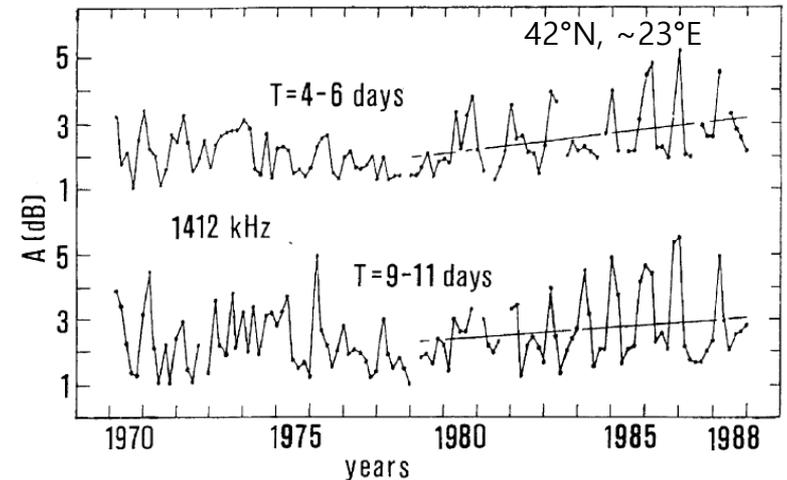


Fig. Long-term trends in planetary wave activity from the 1412 kHz absorption in Bulgaria. [Laštovička, 2002]

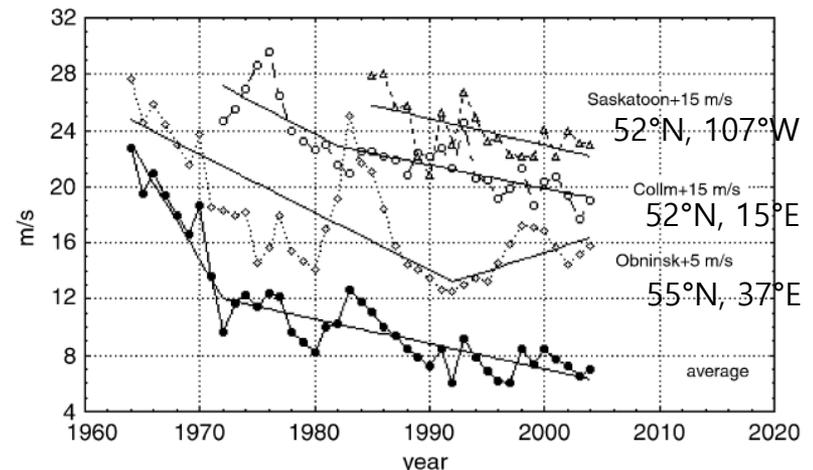


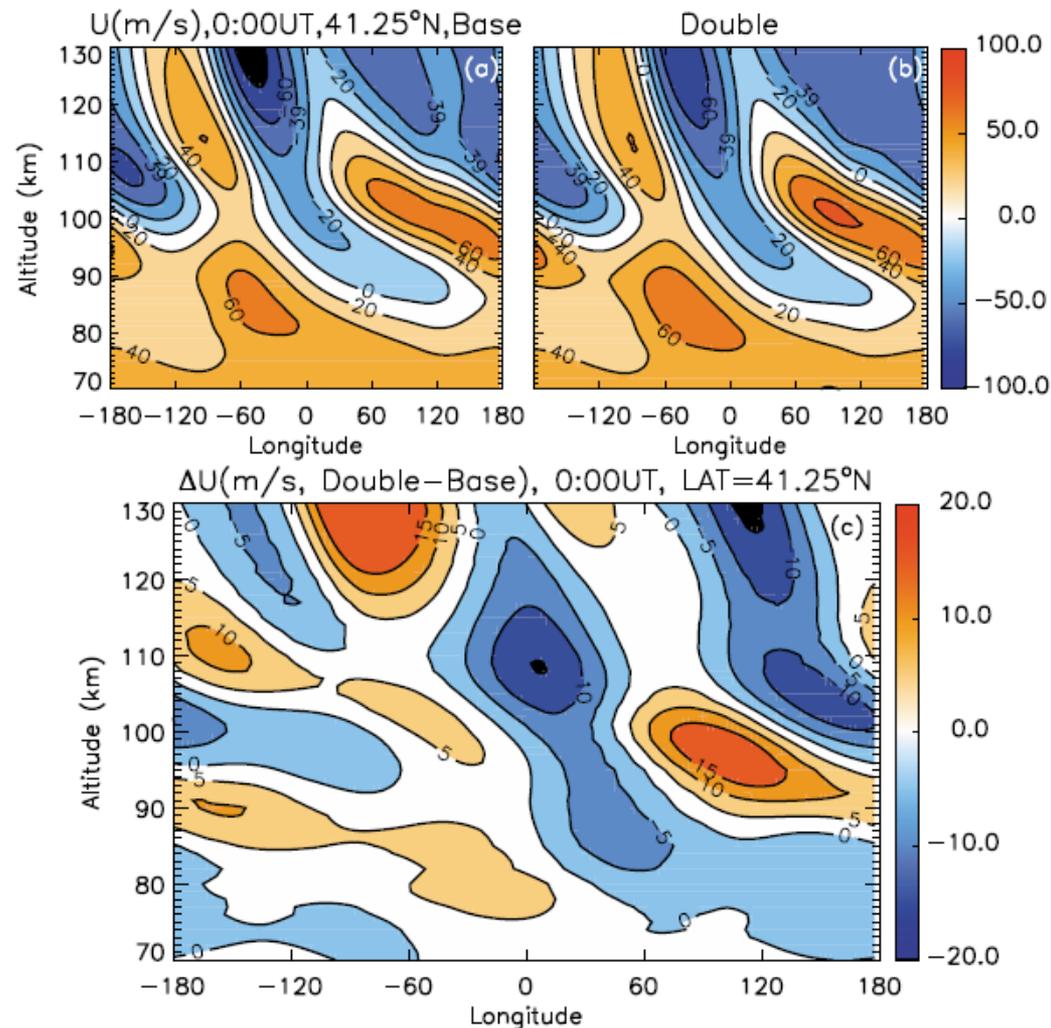
Fig. Time series of amplitudes of annual mean semidiurnal tides for a zonal component [Portnyagin et al., 2006]

# TIME-GCM計算

TIME-GCMモデルを用いた  
半日潮汐波動の $\text{CO}_2$ 依存性  
初期結果 [Qian et al., 2011]

太陽極小期、地磁気静穏時  
41.25度N, 0000 UT

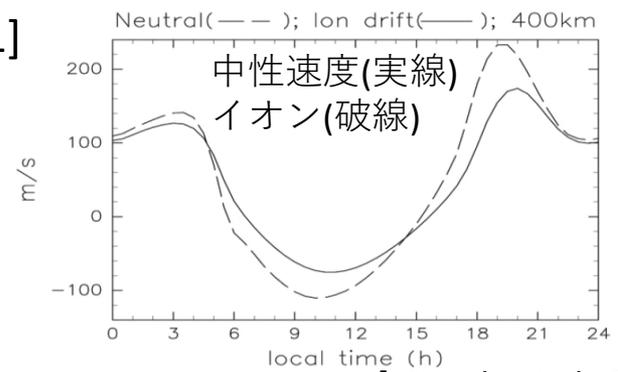
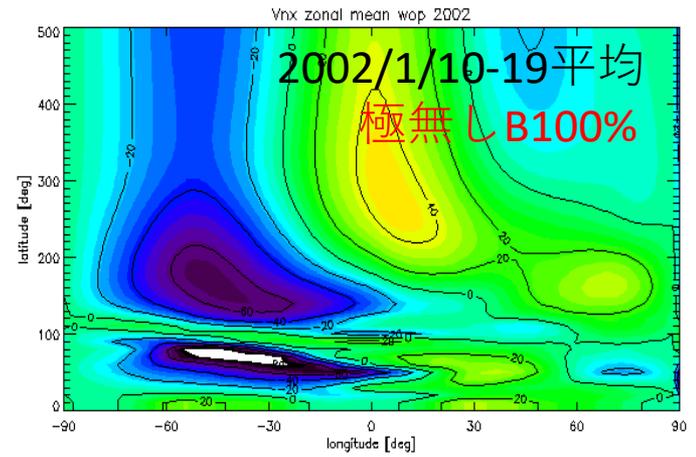
$\text{CO}_2$ 通常と倍増時の東西速度  
→ $\text{CO}_2$ 大だと10m/s増大  
振幅は減る  
→過去に振幅大きいと示唆



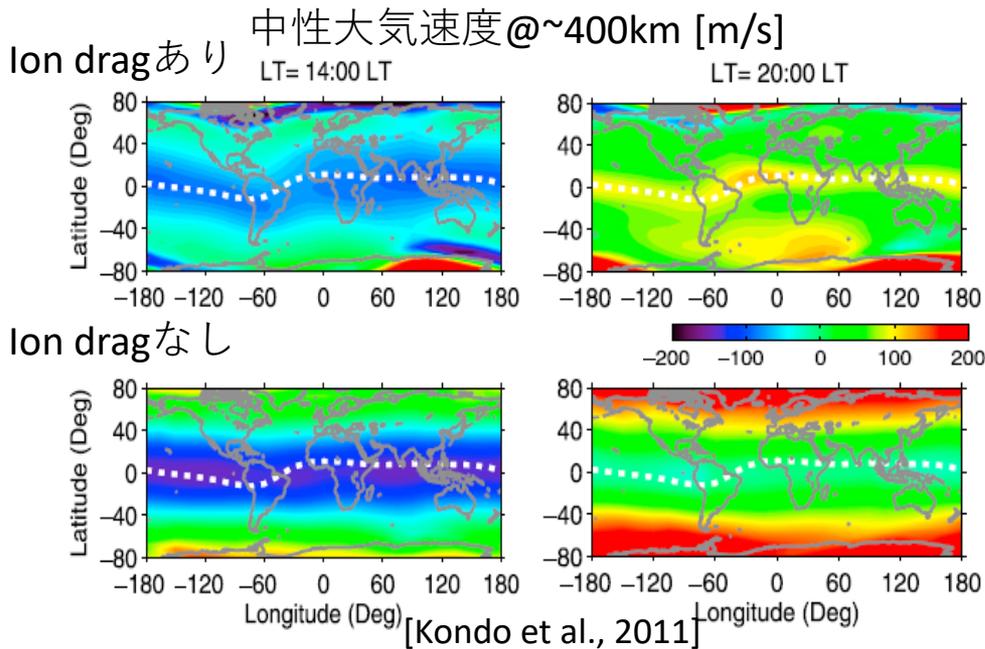


# 熱圏super rotation

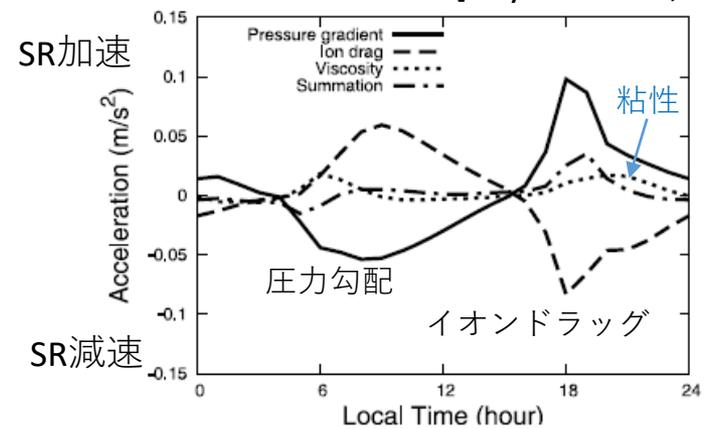
- モデルでも再現  
TIEGCM [Kondo et al., 2011] -K11  
GAIA [Miyoshi et al., 2012] (右図) -M12
- ①圧力勾配②粘性が加速、③イオンドラッグが減速。①~③で②が高高度(>400km)の加速に寄与 [K11]
- ③が最小 [M12]の磁気赤道で速度大 [K11]
- 加えて潮汐波動がLT~4hの加速に寄与 [M12]



[Miyoshi et al., 2012]



[Kondo et al., 2011]



[Kondo et al., 2011]

# 結果：熱圏 super rotation

B小ほど

- Super rotation速度小(a,b)
- 中性速度が西向きに大きくなる(c,d)
- プラズマ速度大(e,f)

\* プラズマ速度の磁場による制約が小さいために、プラズマ速度大、イオンドラッグ効果大。

→ イオンドラッグはsuper rotation構造の減速に作用する

\* 波動振幅増大により~4hで速度大

• 示している結果は2002年2月  
( $F_{10.7} = 170-230 [10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}]$ )。  
2008年2月 ( $F_{10.7} \sim 70$ )の構造は速度小。

→  $F_{10.7}$ 依存性 [e.g., Miyoshi et al. 2012]

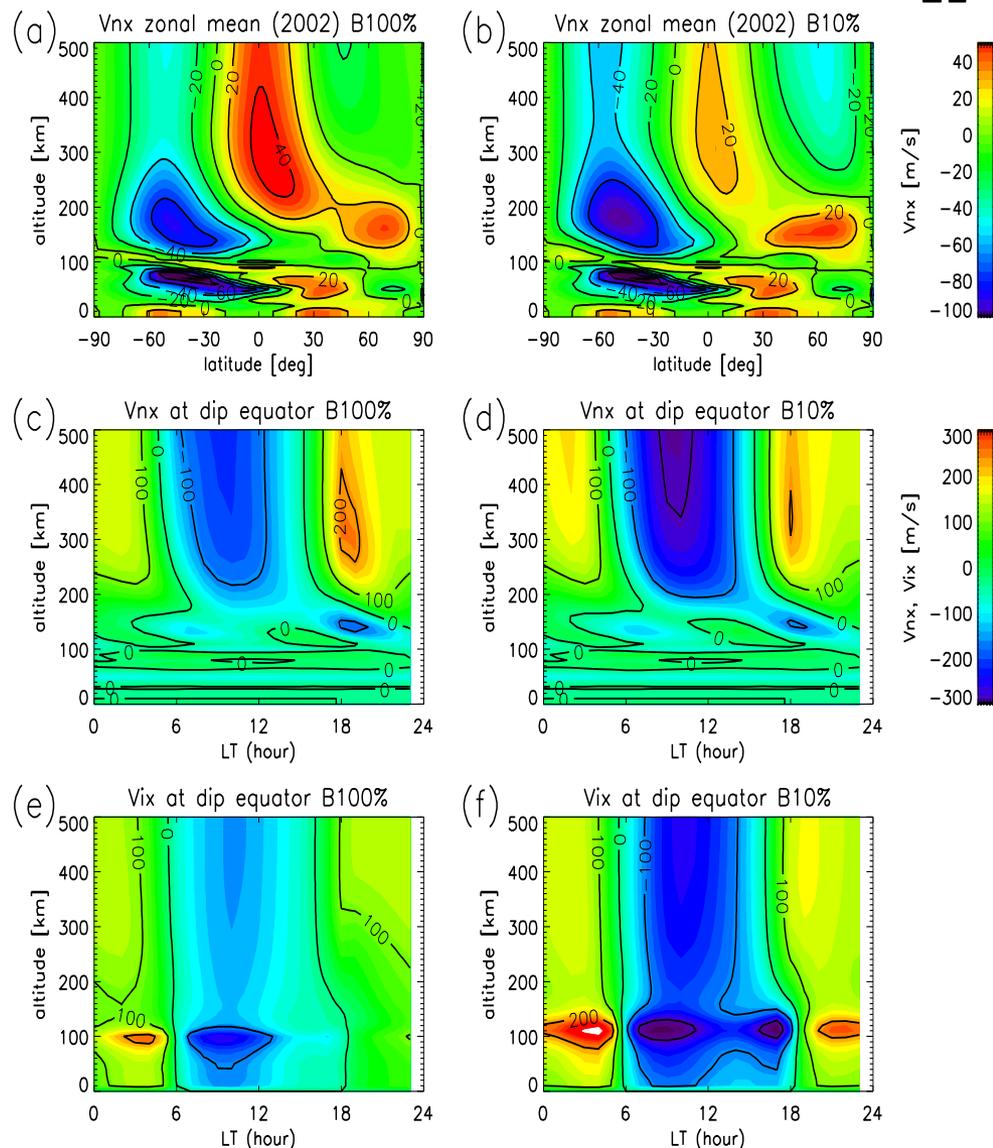


Fig. (a-b) Latitude-altitude plots of zonal-averaged zonal neutral wind, and LT-altitude profiles of (c-d) zonal neutral and (e-f) plasma wind near the dip equator for B100% (left) and B10% (right) cases.

# まとめ

地球全大気モデルGAIAを用いて、主磁場が電離圏・熱圏に及ぼす影響を評価した。

- 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する。
- 2) 磁場が弱くなると、潮汐波動の振幅は高高度で大きくなる。これは、プラズマ運動の磁場による制約が弱くなったためである。
- 3) Super rotation速度は減少した。磁場が弱いほどプラズマ運動の制約が小さく、イオンドラッグおよび減速効果が大きくなったためである。

Tao, C., H. Jin, H. Shinagawa, H. Fujiwara, and Y. Miyoshi (2017), Effect of intrinsic magnetic field decrease on the low- to middle-latitude upper atmosphere dynamics simulated by GAIA, J. Geophys. Res. Space Physics, doi:10.1002/2017JA024278, accepted.