

スーパーコンピュータを 利用した大規模惑星磁気圏 シミュレーションと可視化

深沢圭一郎^{1, 2}

1. 九州大学情報基盤研究開発センター
2. CREST, JST

1. Introduction

- 太陽地球惑星系科学の紹介
- 磁気圏の構造
- MHD方程式とVlasov方程式

2. 木星磁気圏のシミュレーション

- 周期的現象の観測結果とシミュレーション結果

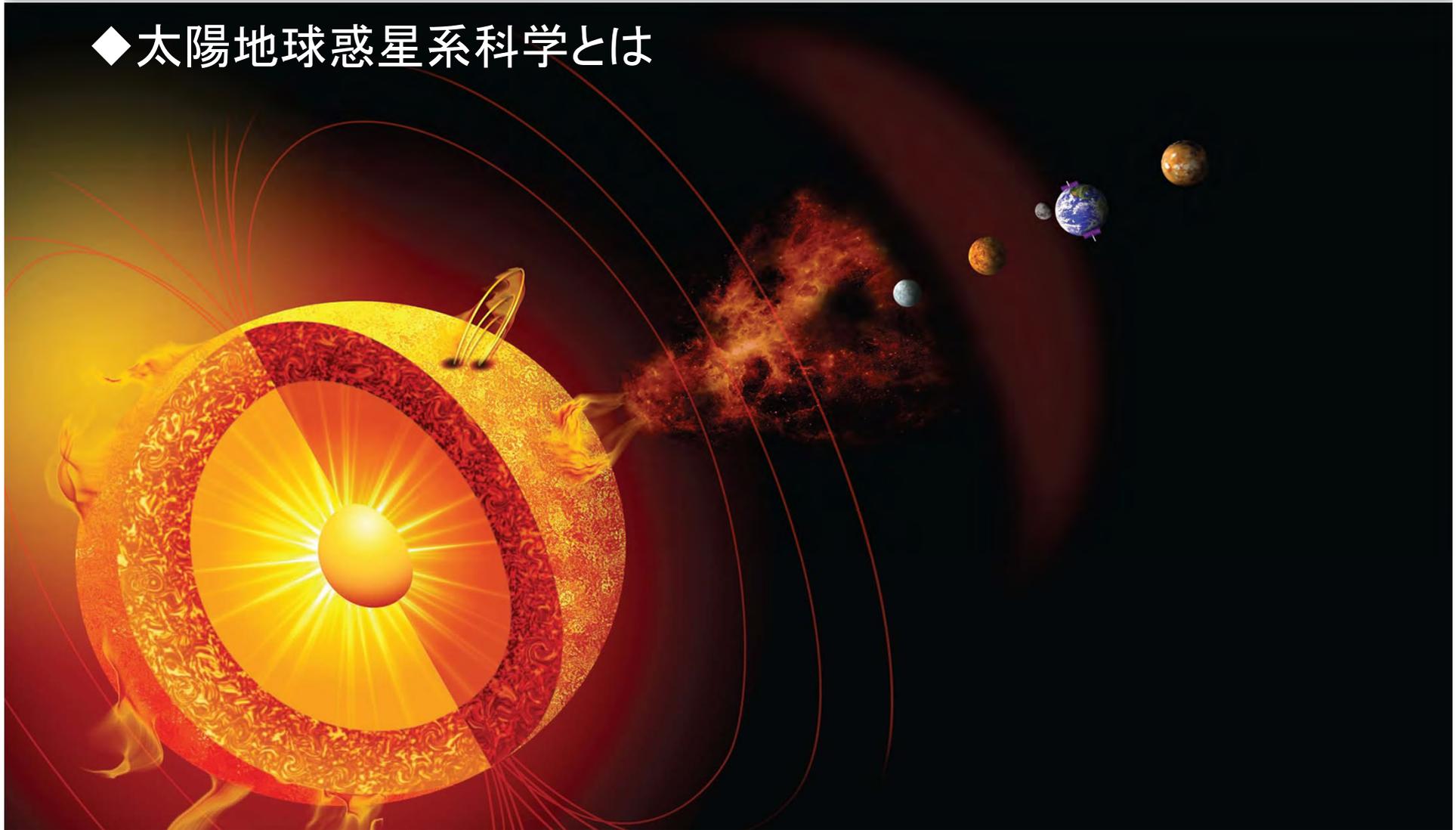
3. 土星磁気圏シミュレーション

- プラズマ渦構造とオーロラの関連

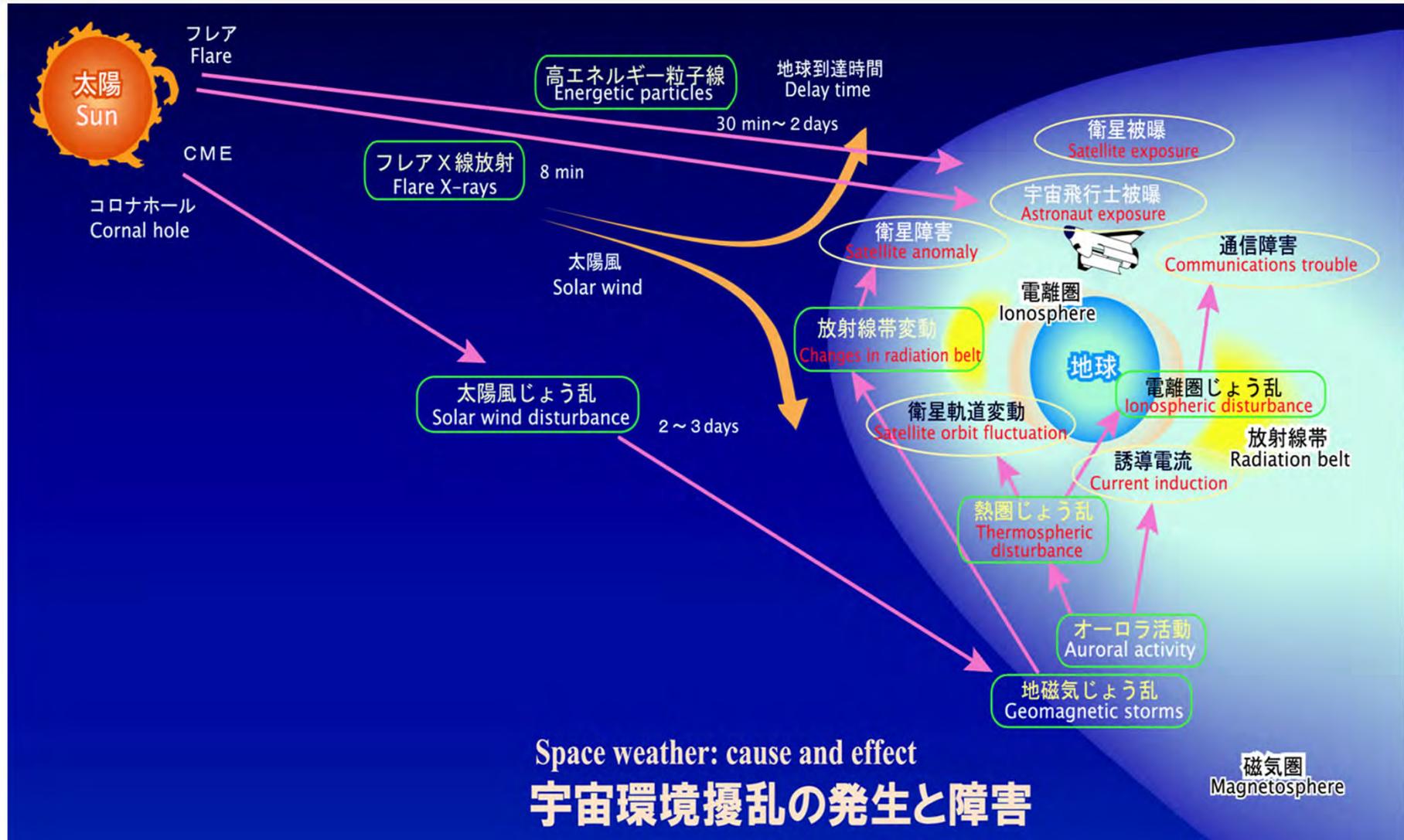
4. まとめ



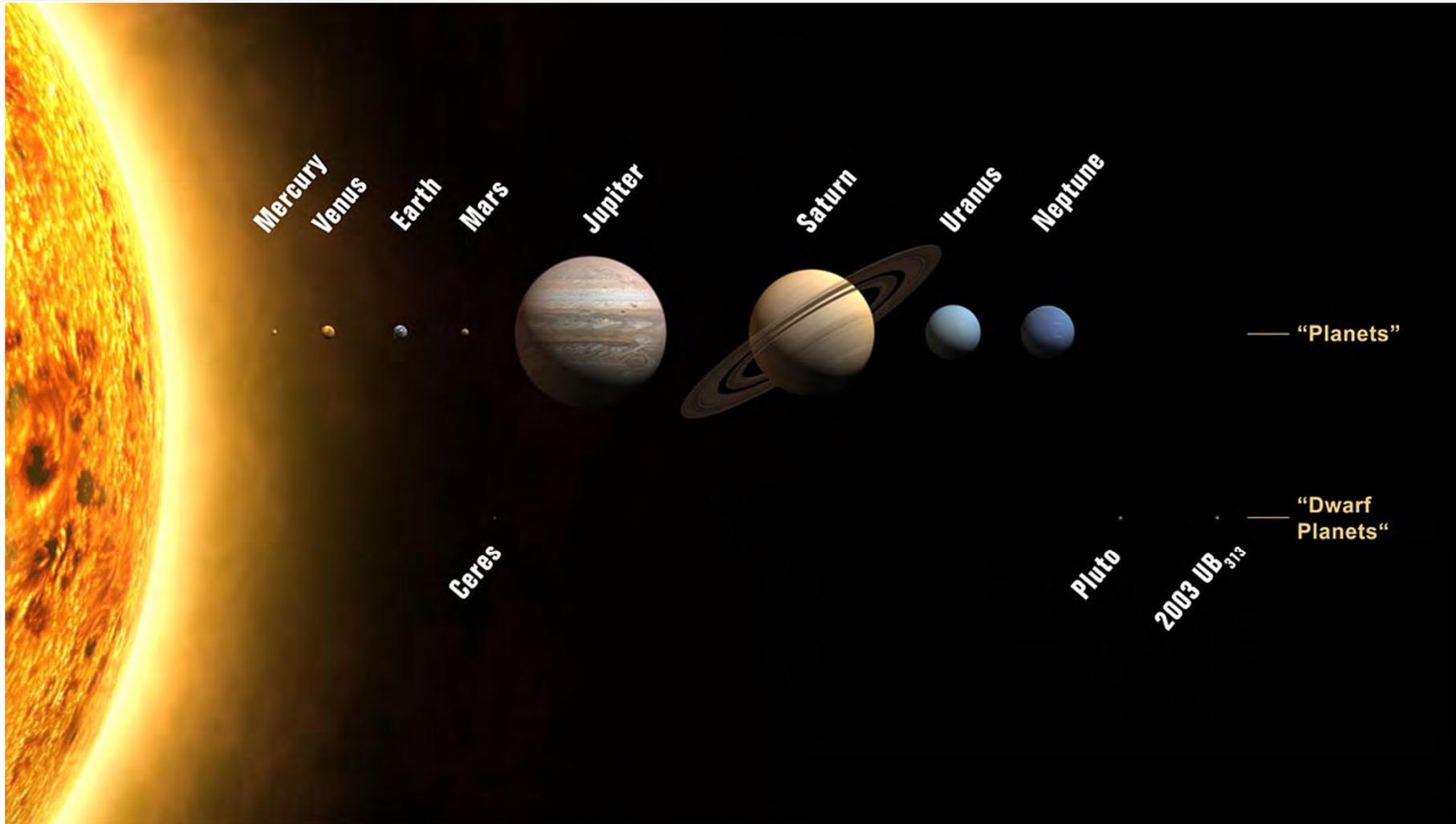
◆太陽地球惑星系科学とは



Introduction -2



Introduction -3



◆地球、木星、土星における電磁気的特徴

	Jupiter	Saturn	Earth
Magnetic field [nT]	420,000	21,000	31,000
Magnetic polarity	N pole is north	N pole is north	N pole is south
Rotation period [hr]	10	10.65	24
Main plasma source	Io, ionosphere	Enceladus, ionosphere	ionosphere
Equatorial Radius [km]	71,492	60,268	6378
From Sun [A.U.]	5.2	9.55	1

木星は巨大な磁場と豊富なプラズマを持って高速自転する。
土星は豊富なプラズマを持って高速自転する。



◆地球、土星磁気圏の形

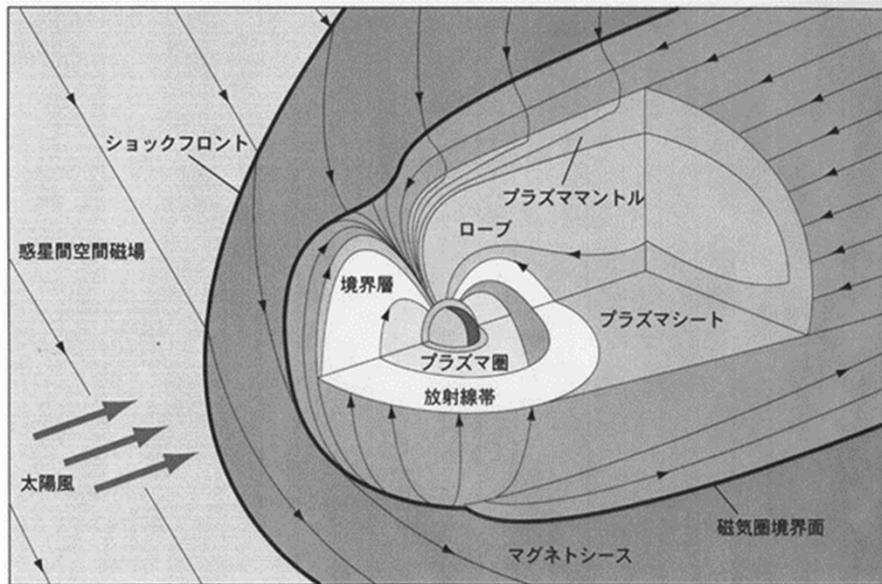


Fig. 1. A schematic of Terrestrial magnetosphere

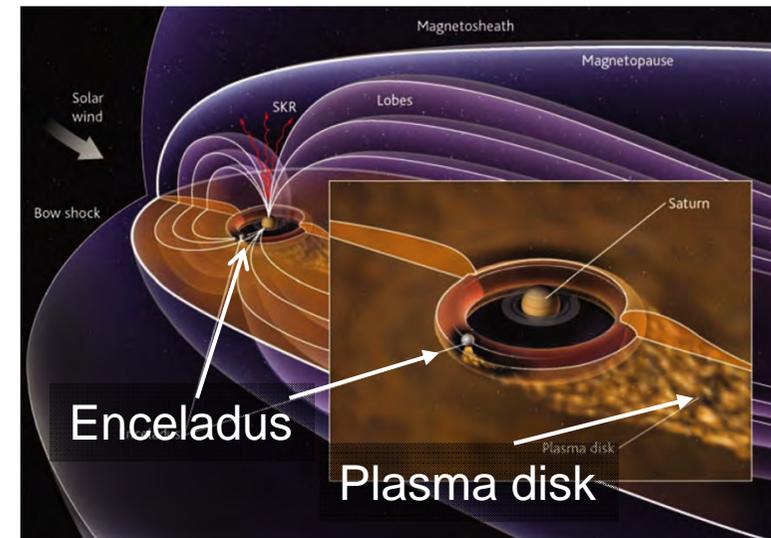


Fig. 2. Schematic of Saturn's magnetosphere [Kivelson, 2006]

土星は高速自転しているため、磁気圏内のプラズマ対流が複雑.

◆Spacecrafts

□8機の探査機が木星を観測

- Pioneer10 (1973), Pioneer11 (1974), Voyager1 (1979), Voyager 2 (1979), Ulysses (1992), Galileo (1995-2003), Cassini (2000), and New Horizon (2007)

□4機の探査機が土星を観測

- Pioneer11 (1979), Voyager1 (1980), Voyager 2 (1981), Cassini (2004 - now),

□Future missions

- JUNO (launch at 2011, arrive at Jupiter in 2016)
- EJSM (Jupiter mission: launch after 2020)
- TANDEM (Saturn mission: launch after 2020)



Motivation

◆巨大で複雑な惑星磁気圏を計算機シミュレーションで調べよう

□なぜシミュレーション？

- 惑星の100倍以上に広がる磁気圏全体を見るにはシミュレーションしか無い。
- 観測ではある時間の空間一点しかわからず、物理現象の理解が難しい。
- 磁気圏は10m～ 10^9 mスケールまでの現象を含むマルチスケール環境であり、シミュレーションに最適
- 最終的には人類が宇宙空間に出て行く際に安全な情報を提供したい。



電磁流体コード -1

◆宇宙プラズマを取り扱う方程式(1)

□Vlasov方程式

- 無衝突Boltzmann方程式とMaxwell方程式から成るプラズマの振る舞いを最も正確に表現できる方程式系

速度分布関数 $f(x, \mathbf{v}, t)$ を考えると、

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} + \frac{q}{m} (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} = 0$$

これとMaxwell方程式を連立して解く。

- しかし、位置 (x, y, z) 3次元、速度 (v_x, v_y, v_z) 3次元と時間から成る非線形方程式系で、解くことが困難
 $f(x, y, z, v_x, v_y, v_z, t)$ を計算するにはメモリ不足



電磁流体コード -2

◆宇宙プラズマを取り扱う方程式(2)

□MHD (Magnetohydrodynamics)方程式

- Vlasov方程式のn次モーメント取ることで、求められる。

0次(速度空間で積分)、1次(\mathbf{v} かけて積分)、2次(\mathbf{v}^2 かけて積分)より、

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\mathbf{v} \rho)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

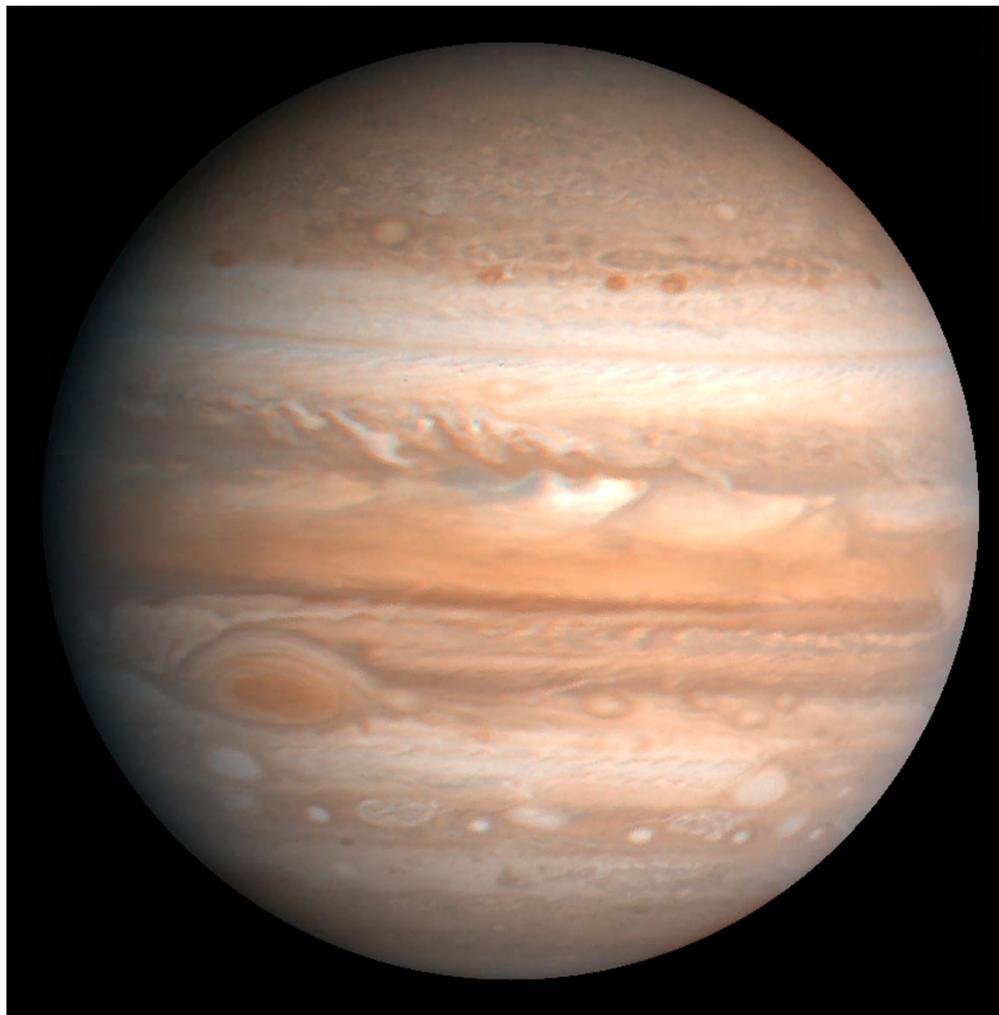
$$\frac{\partial p}{\partial t} = -(\mathbf{v} \cdot \nabla) p - \gamma p \nabla \cdot \mathbf{v}$$

を得る。これらと磁場の誘導方程式

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad \text{をまとめてMHD方程式という。}$$



木星磁気圏シミュレーション



木星磁気圏シミュレーション1

12

- ◆ 周期的な現象がGalileoによって観測
 - 木星磁気圏尾部で2~3日周期のプラズマ放出現象

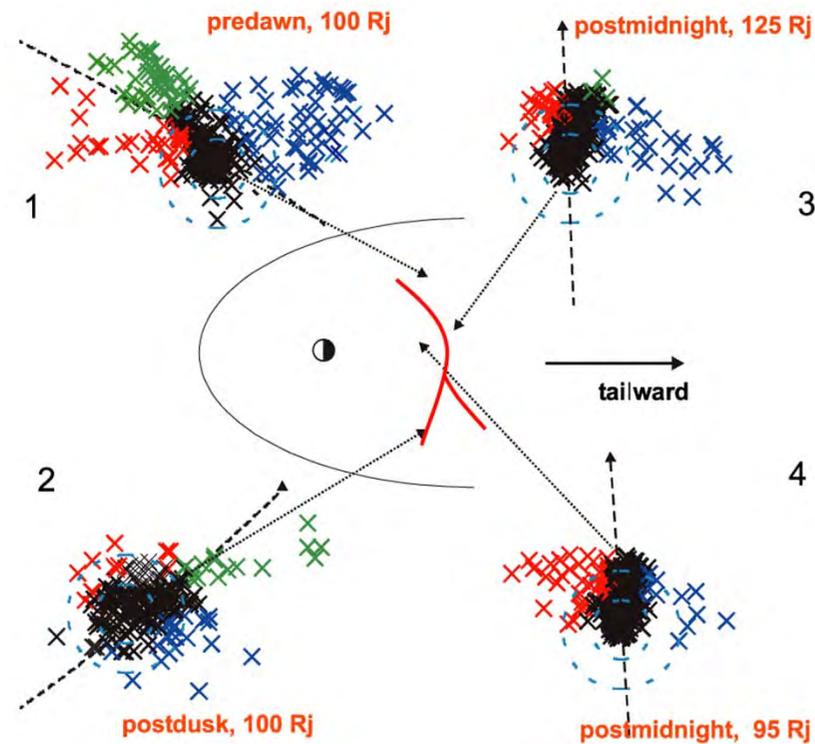


Fig. 3. Distribution of flow directions [Woch et al., 2002]

- ◆ シミュレーションにより観測に似た現象を再現
 - 周期的なプラズマ放出現象をシミュレーションにより再現

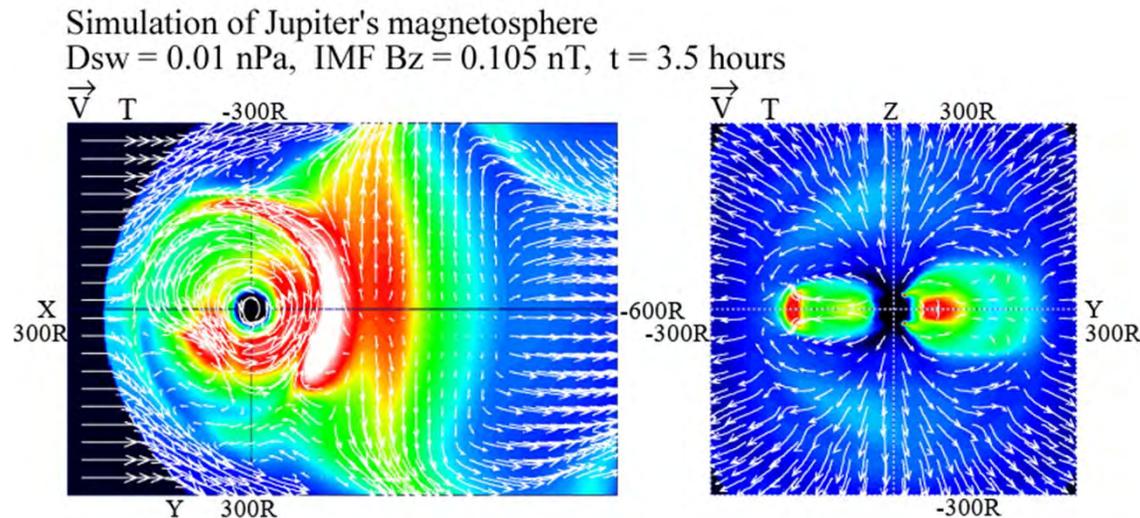


Fig. 4 プラズマの周期的放出現象 [Fukazawa et al., GRL, 2005]

◆ Periodic plasmoid ejection from simulation

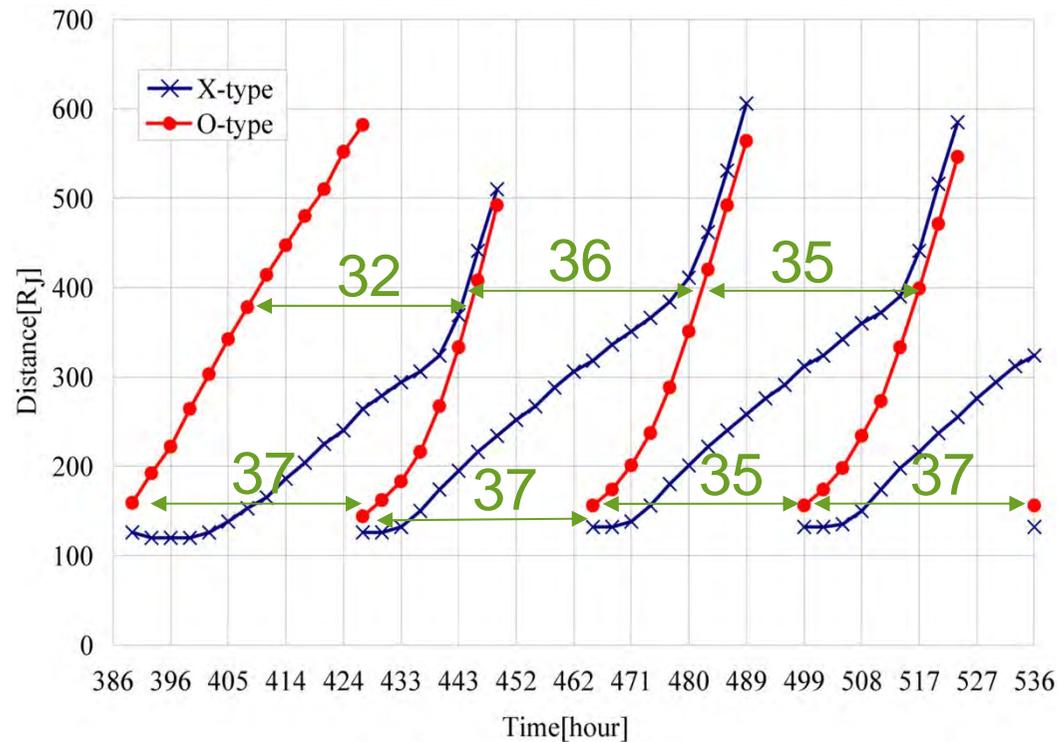
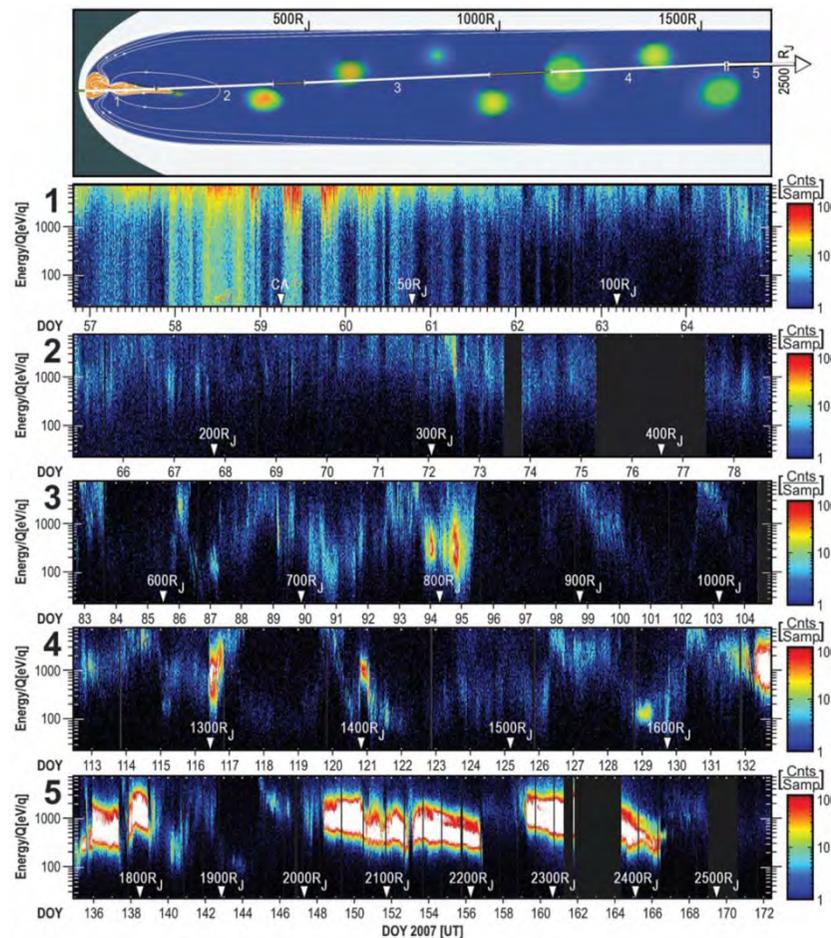


Fig. 5. Locus of the X-type and O-type neutral lines versus time [Fukazawa *et al.*, 2005]

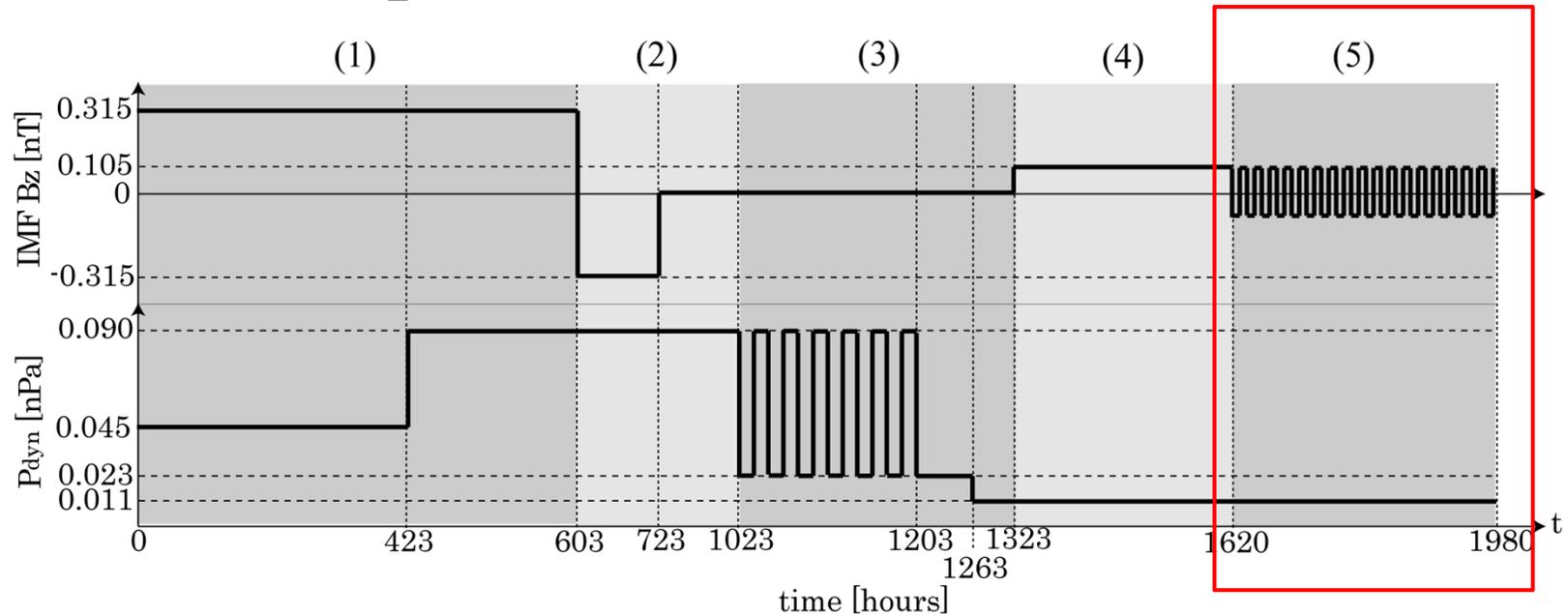
◆New Horizonの観測結果 [*McComas et al., 2007*]



In late February 2007, the New Horizon spacecraft flew past the Jupiter and observed plasmoid like structures repeatedly in Jupiter's distant tail.

Fig. 6. Plasma observations from just after NH's inbound crossing of Jupiter's magnetopause late on DOY 56, through closest approach at $\sim 32 R_J$, and back down the magnetotail to $>2500 R_J$. [*McComas et al., 2007*]

◆ Solar wind parameter



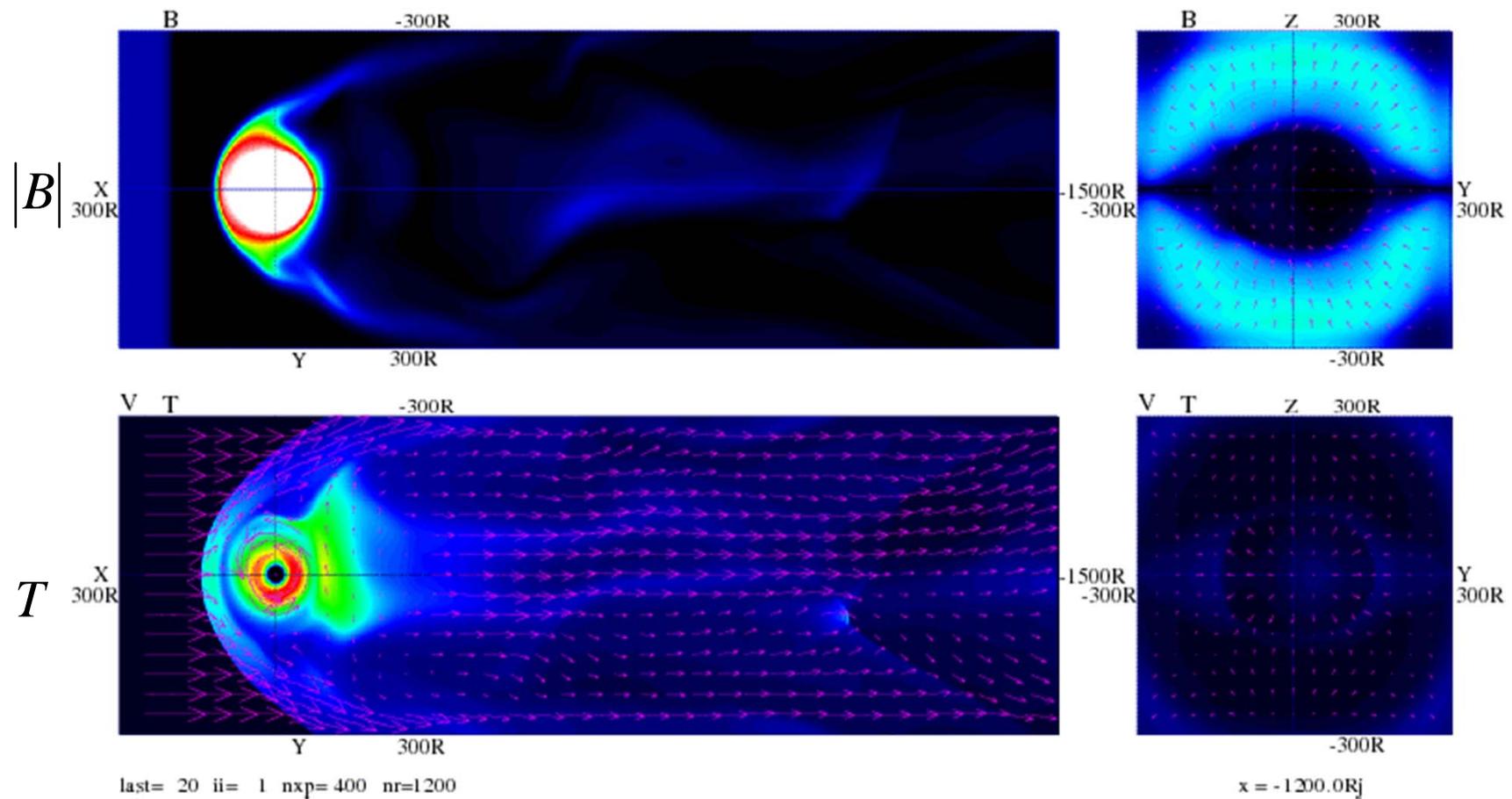
- (1) Northward IMF and medium dynamic pressure [Fukazawa et al., JGR, 2010]
- (2) Southward IMF and medium dynamic pressure
- (3) No IMF and medium dynamic pressure with oscillation
- (4) Low northward IMF and dynamic pressure
- (5) Oscillated IMF B_z and low dynamic pressure



木星磁気圏シミュレーション6

Distant tail of Jovian Magnetosphere

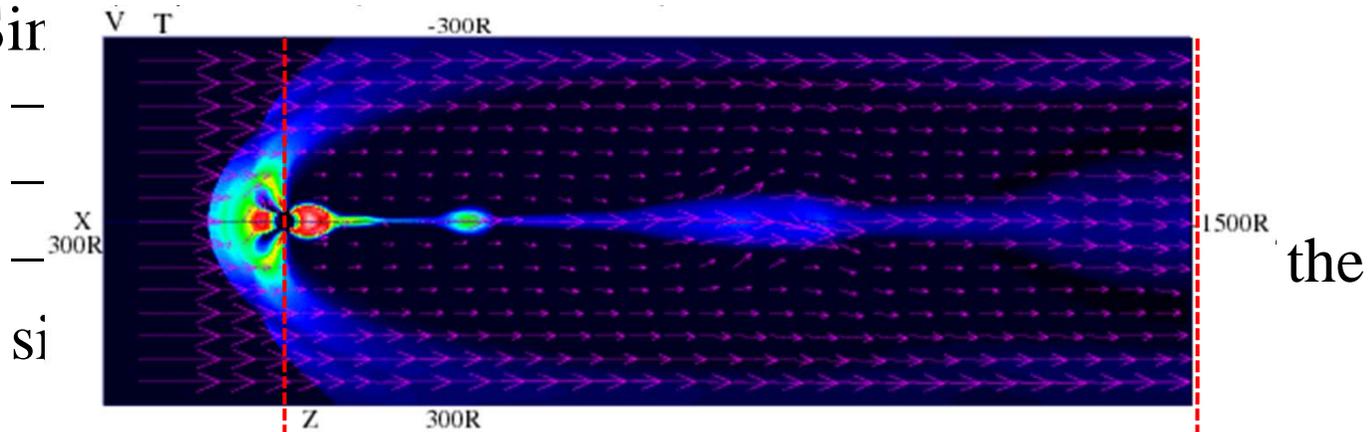
$B_z = 0.105 \text{ nT}$ $D_{sw} = 0.01125 \text{ nPa}$ $t = 1323 \text{ hours}$



[Fukazawa et al., JGR, 2010]

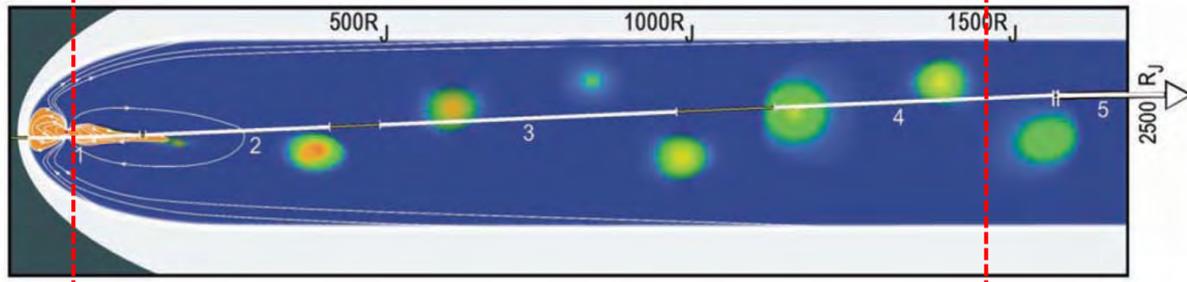
◆ Periodic plasmoid ejection in the tail

□ Sir



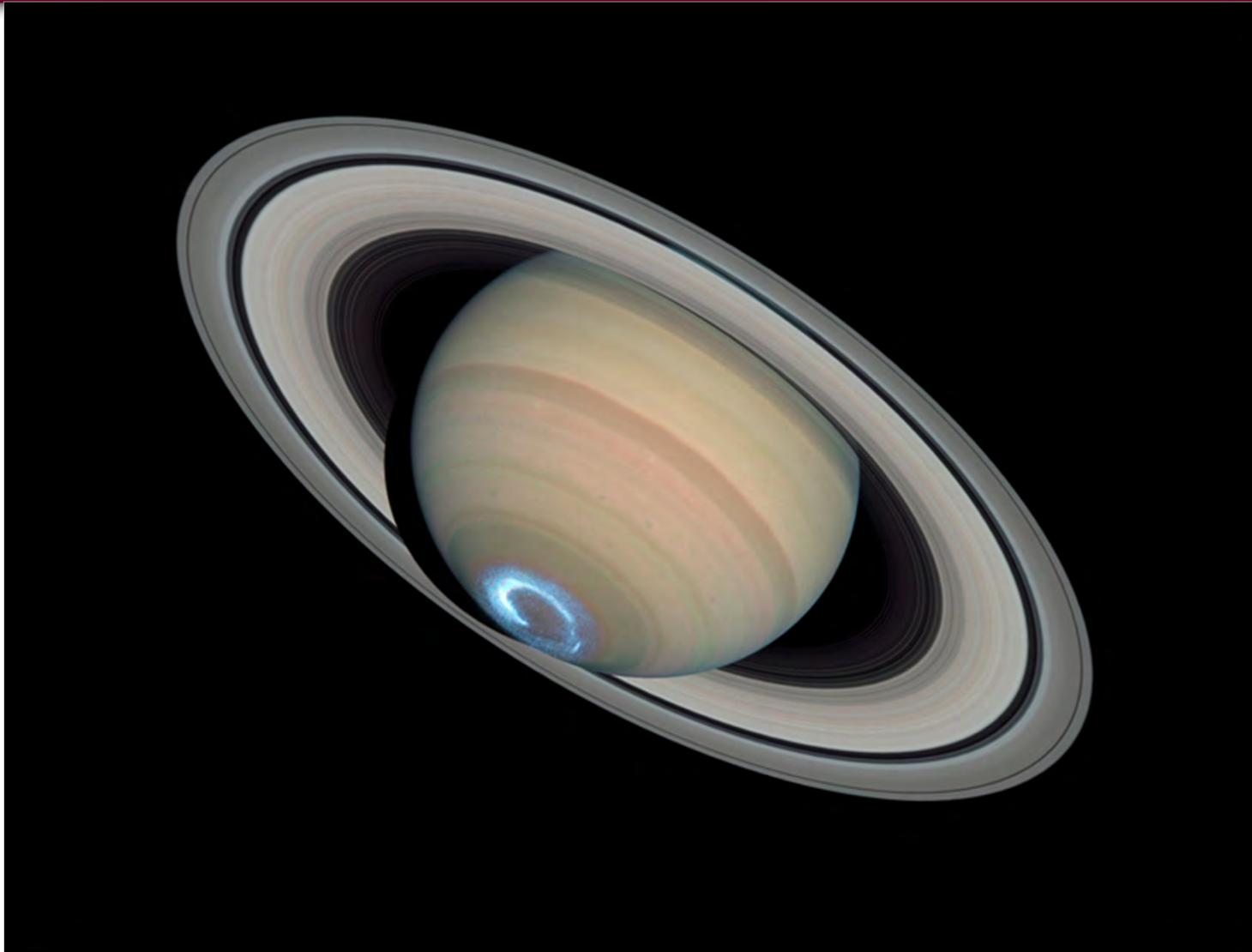
□ NewHorizon [*McComas et al., 2007*]

- Periodic
- Velocity
- Observation

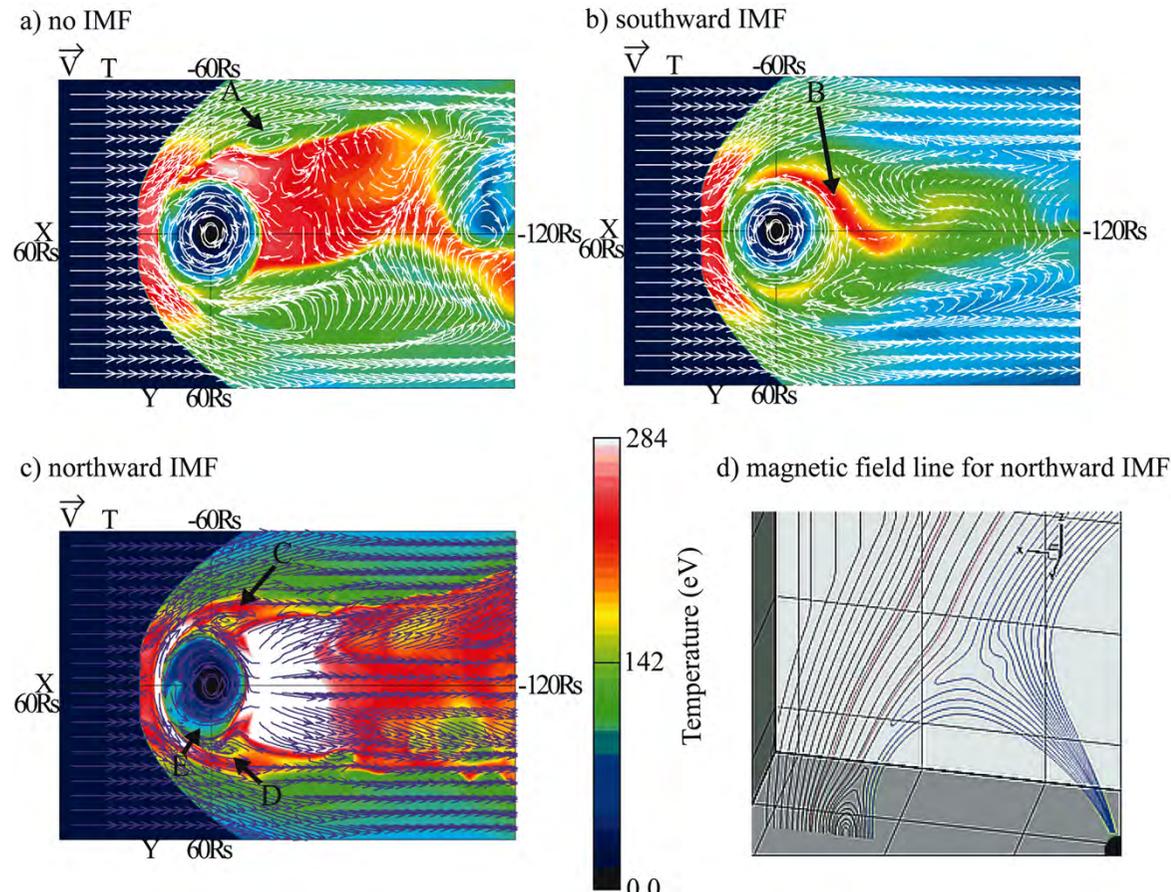


土星磁気圏シミュレーション

19



◆ IMFの変化に伴う土星磁気圏対流構造



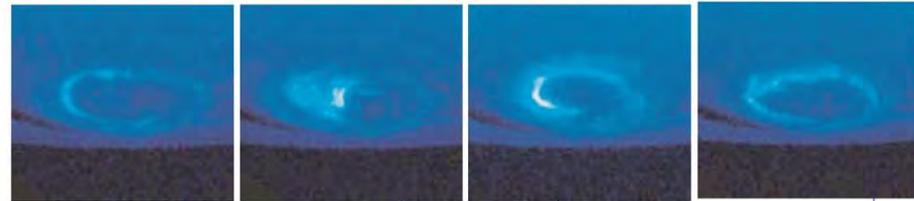
どの条件においても土星磁気圏では渦構造が発達している。

no IMF、southward IMFではスケールの大きな渦、northward IMFでは小さいが、強い渦が見える。

Fig. 7. The temperature and flow vectors in the equatorial plane for the simulations with no IMF (a), southward (b) and northward IMF (c) [Fukazawa et al., 2007a]

◆HSTとCassiniの同時観測(2004年)

- Cassiniが太陽風を観測して($500R_S$ 程度上流)、HSTが土星のオーロラを撮像



- 土星磁気圏の乱れた対流構造、渦構造に関係するのでは？

因は不明。

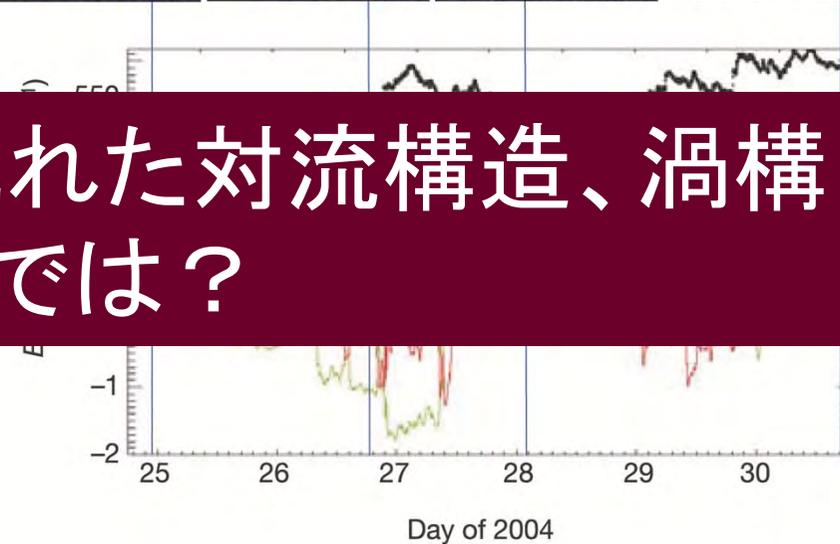
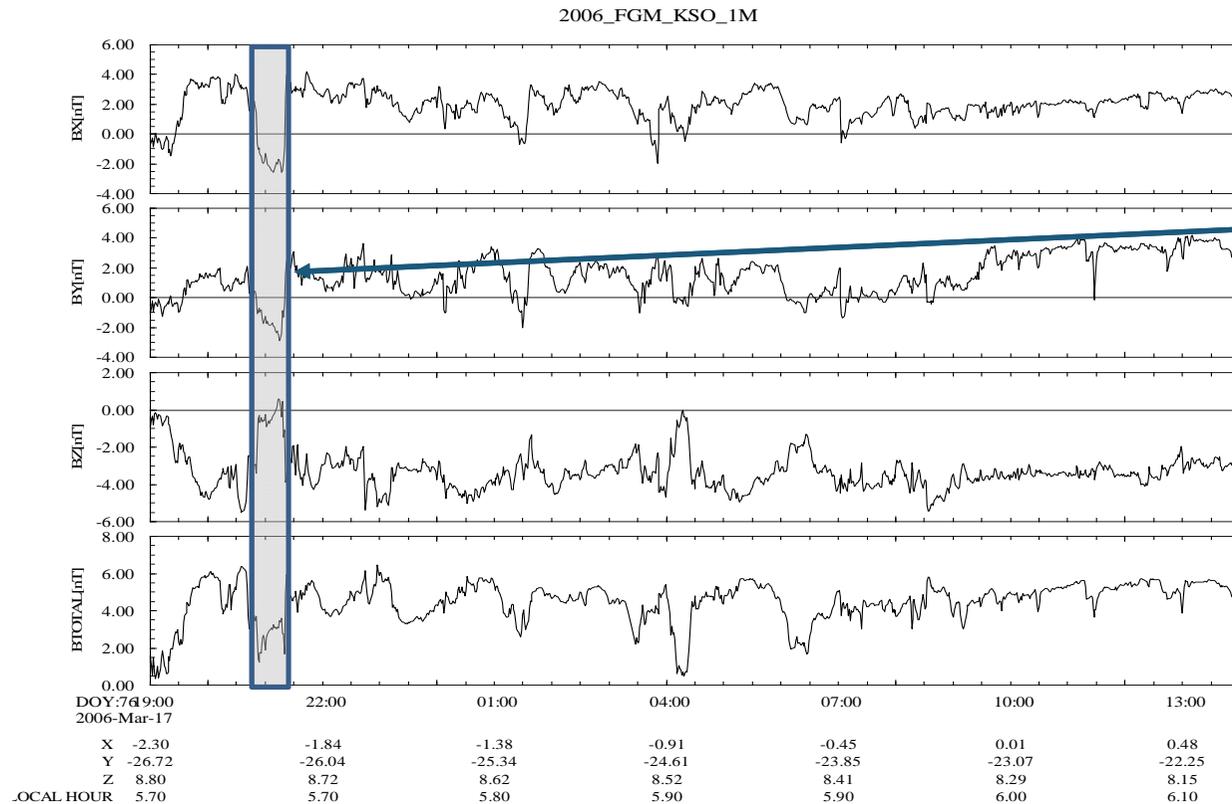


Fig. 8. Comparison between HST images and solar wind conditions propagated to Saturn for the period 25–30 January 2004 [Crary *et al.*, 2005]

土星磁気圏シミュレーション3

◆ Vortex at dawn in the observations from Cassini



この磁場変化は磁気圏内における渦構造を示していると言われている

Fig. 9. One minute averages of Cassini magnetic field observations in KSO coordinates (X – Saturn to Sun, Z – upward normal to Saturn’s orbital plane, Y – completes a right handed system) on March 17 and 18, 2006 [Walker et al., 2011].



土星磁気圏シミュレーション4

◆ Comparison between observation and simulation

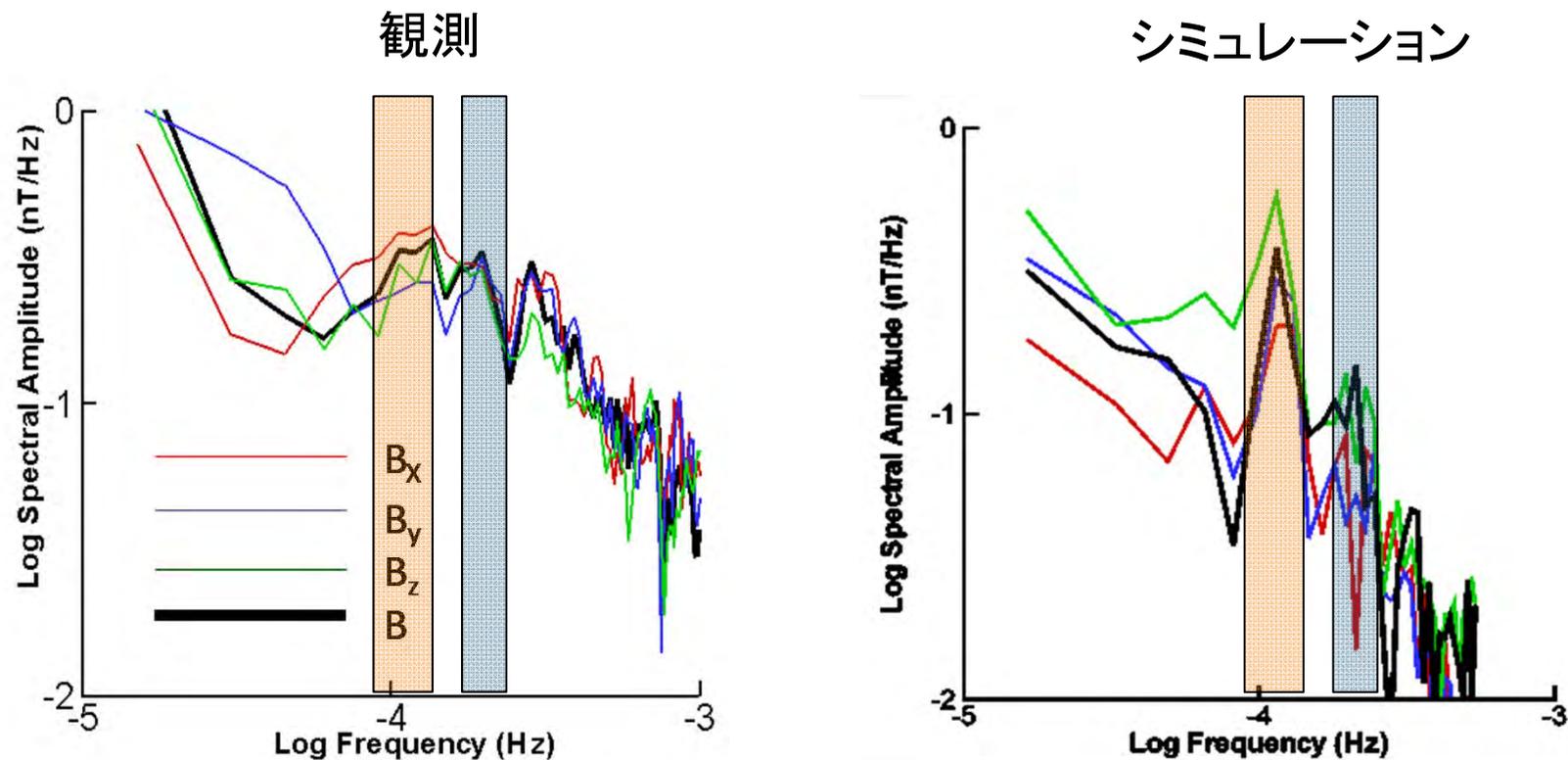


Fig. 10. Amplitude spectra of the oscillations observed by the Cassini magnetometer after the last magnetopause crossing on March 18, 2006 (left) and from the simulation (right) [Walker et al., 2011]



土星磁気圏シミュレーション5

◆シミュレーション上の空間精度の問題

□今までは十分な空間精度ではなかった

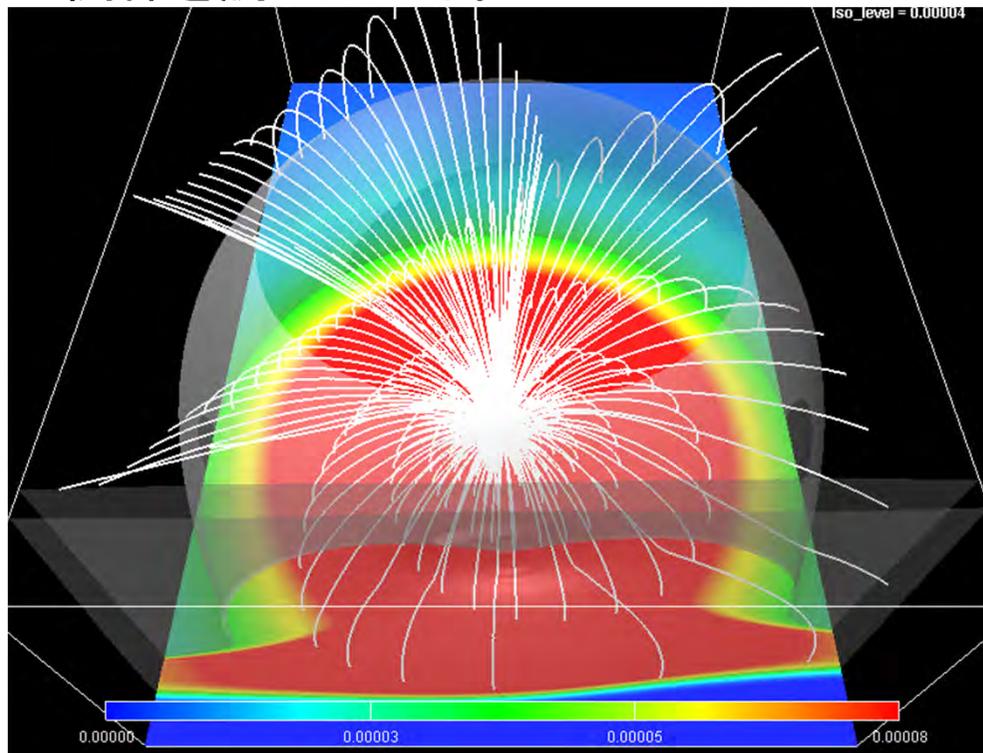
- 今までの計算では $0.3R_S$ の格子幅を利用。
- 実距離で言うと、 $0.3 \times \text{約}60,000\text{km} = 18,000\text{km}$
- 近年地球磁気圏では $0.1R_E$ (640km) 以下で印象的な波、渦構造が生成
- 太陽風中のラーマ半径を100km以上程度としても、土星磁気圏シミュレーションにおいて、まだまだMHD範囲内
- より精度の高い計算をし、構造の変化があり得るか確認し、知見を得ておくべき！
→高解像度土星磁気圏MHDシミュレーション



◆ 土星磁気圏大規模シミュレーション

□ 今までより3倍の解像度で計算

- 世界最大規模の計算 ($1800 \times 1200 \times 1200 \times 8$) により、渦構造とオーロラ
の関係を調べている。



計算データが大きくなり、可視化(ポスト処理)に問題が出てきている。

東大に導入されたAVS PCEを利用することで対応している。

Fig. 11. 土星磁気圏赤道面における磁場強度[Fukazawa et al., JGR, 2011, revised]

◆ 極域沿磁力線電流の構造

□ 沿磁力線電流はオーロラの輝きと関連がある

– 細かな沿磁力線電流の強い分布が見える。

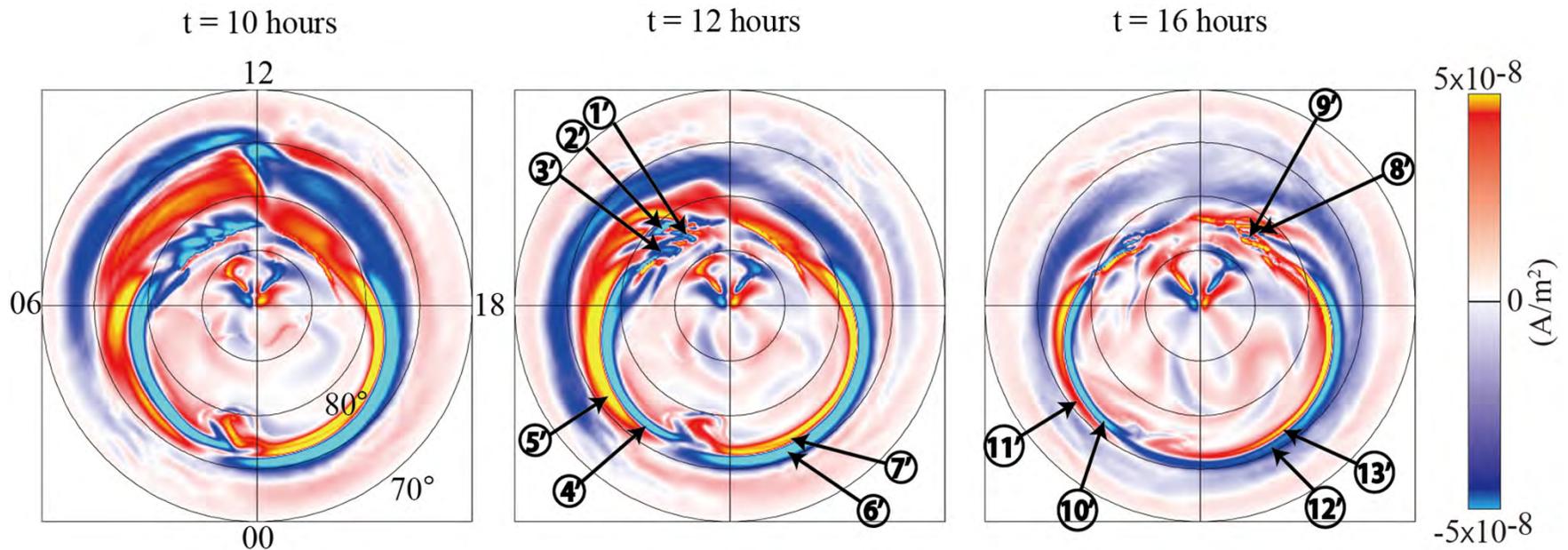
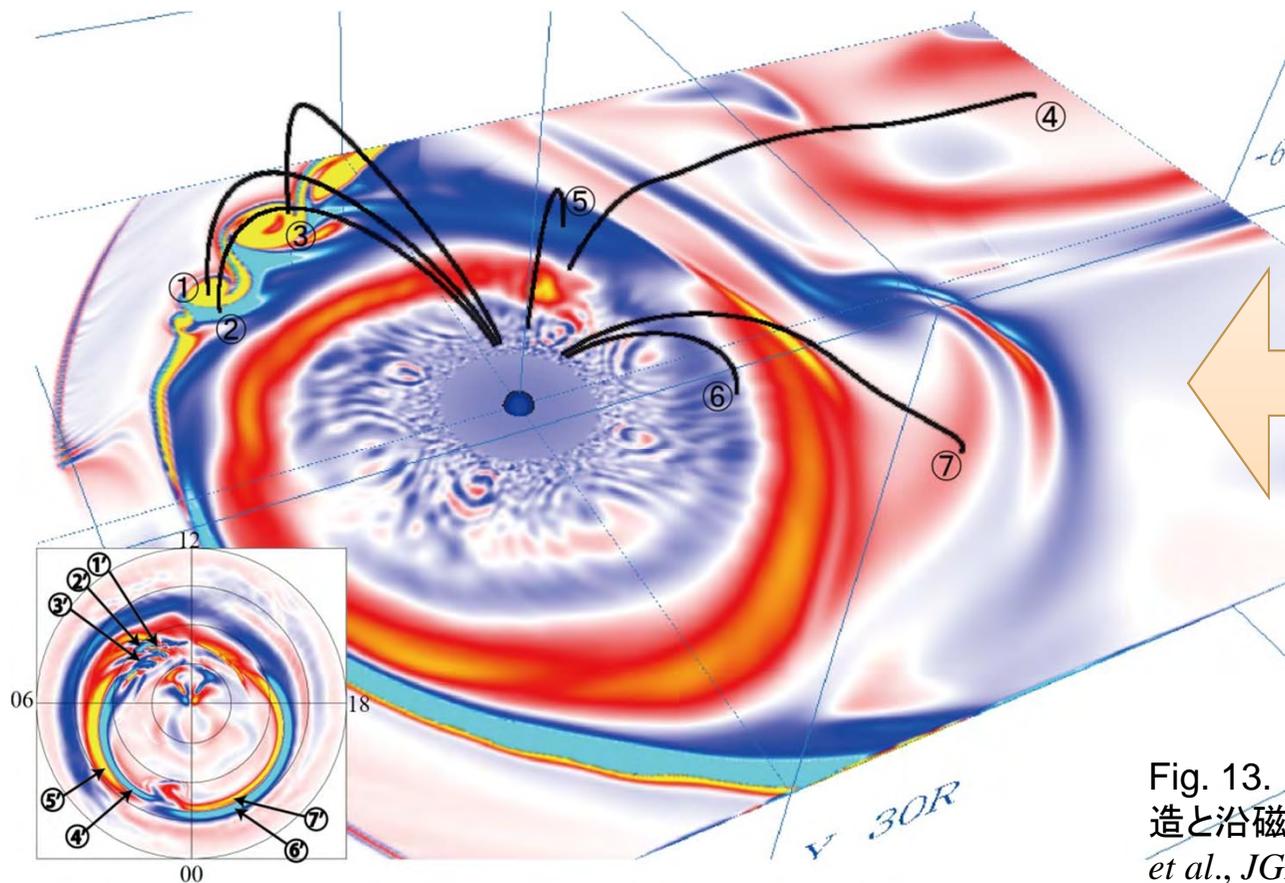


Fig. 12. 土星磁気圏における沿磁力線電流の構造[Fukazawa et al., JGR, 2011, revised]



◆ 沿磁力線電流と渦構造の関係

□ 沿磁力線電流の強い箇所から磁力線を伸ばすと...



大規模計算による高精度なシミュレーションにより、土星渦構造とオーロラの構造の関連性を示唆。

Fig. 13. 土星磁気圏における渦構造と沿磁力線電流の関係[Fukazawa et al., JGR, 2011, revised]



◆ 惑星磁気圏のMHDシミュレーション

- 観測では情報が足りないため、数値シミュレーションが力を発揮できる分野
- 木星磁気圏では周期的な現象が観測されているが、シミュレーションでもその現象を再現できている。
- 土星磁気圏では渦構造とオーロラの関係が観測から示唆されているが、シミュレーションでも確認出来ている。
- 現在の計算では、スパコン上で計算は出来るが、計算結果のデータが大きすぎて、ポスト処理が困難になってきている。

