

HA8000 を用いた土星磁気圏の高解像度電磁流体シミュレーション

深沢 圭一郎[†] 梅田 隆行[‡] Raymond J. Walker[§] 荻野 瀧樹[‡] 湯元 清文^{**}

土星の固有磁場の勢力範囲である磁気圏は太陽から吹いてくるプラズマ（太陽風）との相互作用で形作られている。この土星磁気圏は巨大であり、3次元電磁流体力学（MHD）コードを用いてシミュレーションが行われているが、現実的な構造を再現するには計算資源の問題もあり解像度不足が指摘されていた。そこで本研究では東京大学 HA8000 に最適化されたコード（実行効率14%）を利用し、従来の3倍の空間解像度で計算を行い、土星磁気圏構造を調べた。その結果、土星磁気圏界面におけるプラズマの渦構造がきれいに再現された。低解像度の計算結果と比べ、渦の生成が早い、生成場所が異なるなどいくつかの新しい構造を得ることができた。土星磁気圏では渦構造が探査機の観測でも報告されているが、1次元の情報しか無く、その構造の理解が難しいため、本研究の結果により、詳細な理解が期待される。

High resolution magnetohydrodynamics simulation of Saturn's magnetosphere with HA8000

KEIICHIRO FUKAZAWA[†], TAKAYUKI UMEDA[‡], RAYMOND J. WALKER[§],
TATSUKI OGINO[‡] and KIYOHUMI YUMOTO^{**}

Saturn's magnetosphere is formed by the interaction between the intrinsic magnetic field and solar wind which is the plasma from the Sun. The magnetosphere is very huge and simulated with the three-dimensional magnetohydrodynamics simulation. However it is lack of the spatial resolution to simulate the realistic configuration of the Saturn's magnetosphere. In this study we have simulated the Saturn's magnetosphere with the high resolution grid using the optimized simulation code to the HA8000 at the University of Tokyo (performance efficiency 14%). As the results we have obtained the clear formation of vortex along the magnetopause. To compare with the low resolution results, we found the some new characters which are the fast formation of vortex and different location of vortex formation. In Saturn the spacecraft observed the configuration of vortex, however it is hard to understand the configuration and dynamics in detail due to the only information of one-dimension. Thus our simulation results are expected to contribute to the new knowledge of Saturn's magnetosphere.

[†] 九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門
Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kyushu University

[‡] 名古屋大学太陽地球環境研究所
Solar Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University.

[§] カリフォルニア大学ロサンゼルス校
University of California, Los Angeles.

^{**} 九州大学宇宙環境研究センター
Space Environment Research Center, Kyushu University.

1. はじめに

真空空間だと思われている宇宙空間だが、その99%はプラズマで満たされている。プラズマとはイオン化した気体を指す。太陽や恒星からは太陽風や恒星風と呼ばれているプラズマの風が磁場を伴って吹き出している。これらのプラズマと惑星の固有磁場が相互作用することにより、磁気圏と呼ばれる領域が形成され、宇宙嵐や地磁気嵐が引き起こされている。そのため、惑星磁気圏の研究は我々が生きる宇宙を理解するために非常に重要である。

土星や地球の特徴を Table 1 に載せるが、土星には地球や木星と同様に固有磁場が存在し、その周辺に磁気圏を形成している。また自転周期が約 10.65 時間と短く、高速に回転している。さらにエンセラダスという月を持っており、そこから大量のプラズマが磁気圏に供給されている。このような特徴により、地球や木星とは異なった磁気圏を構成していると考えられており、精力的な研究が行われている。土星は今までに 4 機の探査機が観測を行っており、現在も Cassini 探査機が土星を周回観測している。その結果、様々な現象が報告されているが、探査機では“その場”観測しか行えないために時間方向に点のデータしか無く、そこで起きる現象の理解が難しい。このような状況において計算機シミュレーションは時間発展する 3 次元空間情報が分かるために非常に期待されている。

しかしながら、今までの土星磁気圏シミュレーションでは計算機の性能限界もあり、十分な精度でシミュレーションを行えていなかった。今まで我々は東京大学 HA8000 に対して、惑星磁気圏シミュレーションコードである電磁流体 (MHD) コードを最適化し、1024 コアにおいて 14% の実行効率を達成しており¹⁾、解像度を上げた計算が可能となった。そこで本論文では、従来の 3 倍の解像度を利用した土星磁気圏計算機シミュレーションを行い、その構造を調べることを目的とする。第 2 章では、プラズマの挙動を記述する電磁流体方程式、第 3 章ではシ

ミュレーション手法について簡単に説明し、第 4 章で土星磁気圏シミュレーション結果を示す。最後にまとめを行う。

2. MHD 方程式

宇宙プラズマの振る舞いを記述する方程式として Vlasov-Maxwell 方程式がある。これは、無衝突 Boltzmann 方程式と Maxwell 方程式から成る方程式系で、宇宙プラズマの振る舞いを正確に記述できる。しかしながら Vlasov 方程式は多くの成分からなる非線形方程式であり、解くことが非常に難しい。そこで、Vlasov 方程式のモーメントをとることで求められる電磁流体力学 (MHD) 方程式が、磁気圏のようなグローバルなプラズマ構造を調べる際には使用されている。MHD 方程式は Vlasov 方程式の運動論的効果を見捨てることで得られ、以下のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} &= -\nabla \cdot (\bar{v}\rho) + D\nabla^2 \rho \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} &= -(\bar{v} \cdot \nabla)\bar{v} - \frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{1}{\rho} \bar{J} \times \bar{B} + g + \frac{\Phi}{\rho} \\ \frac{\partial P}{\partial t} &= -(\bar{v} \cdot \nabla)P - \gamma P \nabla \bar{v} + D_p \nabla^2 P \\ \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} &= \nabla \times (\bar{v} \times \bar{B}) + \eta \nabla^2 \bar{B} \\ * \bar{J} &= \nabla \times (\bar{B} - \bar{B}_d) \end{aligned} \quad (1)$$

上から、連続の式、運動方程式、圧力変化の式 (エネルギーの式)、最後が磁場の誘導方程式となる¹⁾。ここで ρ はプラズマの密度、 \bar{v} は速度、 P はプラズマ圧力、 \bar{B} は磁場、 \bar{J} は電流密度、 $D = D_p$ は拡散係数、 g は重力加速度、 $\Phi \equiv \mu \nabla^2 \bar{v}$ は粘性、 $\gamma = 5/3$ は 3 次元の比熱定数、 η は電気抵抗である。 \bar{B}_d は惑星の固有磁場を示す。簡単に言えば、電磁場を考慮した流体力学方程式と呼べる。詳しい導出方法は参考文献を参照されたい²⁾。

Table 1 地球、木星、土星の特徴

	固有磁場 [nT]	磁極	自転周期 [hr]	プラズマ源	赤道半径 [km]	太陽からの距離 [A.U.]
地球	31,000	N 極が南	24	電離圏	6,378	1
木星	420,000	N 極が北	10	イオ、電離圏	71,492	5.2
土星	21,000	N 極が北	10.65	エンセラダス、電離圏	60,268	9.55

3. シミュレーションモデル

MHD 方程式を解く数値計算法としては、Ogino ら³⁾によって開発された Modified Leap Frog 法を使用する。これは最初の 1 回を two step Lax-Wendroff 法で解き、続く $(l - 1)$ 回を Leap Frog 法で解き、その一連の手続きを繰り返す。 l の値は数値的に安定の範囲で大きい方が望ましいので、2 次精度の中心空間差分を採用するとき、数値精度の線形計算と予備的シミュレーションから $l = 8$ に選んでいる。この手法を用いた計算で、今まで様々なシミュレーションを行ってきたこともあり、同様の手法をもちいることで、過去の結果と比較できる利点がある。

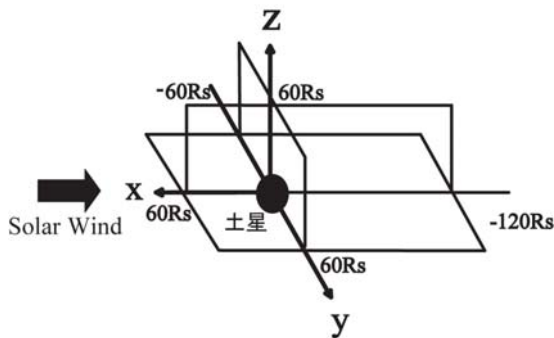


Fig. 1 土星磁気圏シミュレーション座標系

並列化には MPI のみを使用する。並列化手法としては、HA8000 に最適な並列化手法を調べるため、Fig. 2 に示してある 3 種類の格子分割法の性能を測定した結果、3 次元格子中の 2 次元分を分割する 2 次元領域分割が最も性能が出た(実行効率 14%)¹⁾。そのため、本研究でも 2 次元領域分割を適用している。一般にスカラ計算機にはキャッシュヒットを考慮した 3 次元領域分割が最適と言われているが、x86 系アーキテクチャでは、ベクトル向け分割であ

るキャッシュチューニングを行わない 2 次元領域分割が最適である⁴⁾。並列化時の通信において、通信時間を最小限にするために、すべての境界値を入れるためのバッファ配列を用いた。また、実際の MPI で通信する際には“MPI_sendrecv”を用いた。これは送受信を一括で行う関数になり、送受信に伴うプロセスが一つで済む。また、HA8000 では 3 種類のコンパイラ (Hitachi, PGI, Intel) が利用可能だが、最も性能が出た Intel コンパイラを利用した¹⁾。コンパイラオプションは、

```
-ipo -O3 -msse3 -xSSE3 -no-prec-div
```

を使用した。各オプションの働きは以下の通りである。ipo: インライン化およびその他のプロシージャー間の最適化が複数のソースファイル間で行われる、O3: 浮動小数点演算を多用するループや大きなデータセットを処理するループを含むコード向け最適化を行う、-msse3 -xSSE3: SSE3 命令を作成、-no-prec-div: 除算を積算に変更する(逆数を利用)。

本シミュレーションでは、GSM (geocentric solar magnetospheric coordinates) と呼ばれる直交座標系を用いており、太陽方向を x 軸の正、夕方向を y 軸の正、北向きを z 軸の正にとっている。この座標系を Fig. 1 に表す。そして、x 軸の正の方向から太陽風を流し続ける。また今回の計算では xy 平面に対して対称であるので $z < 0$ の領域は解かなくて良いこととなり、計算領域は $-60R_S \leq x \leq 120R_S$ 、 $-60R_S \leq y \leq 60R_S$ 、 $0 \leq z \leq 60R_S$ の直方体となる。ここで R_S は土星半径であり、60400 km である。格子間隔を $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.1R_S$ の均一格子としたので、シミュレーションボックスの格子数は $(nx, ny, nz) = (1800, 1200, 600)$ となる。この領域で MHD 方程式を解いていく。初期条件など詳細なシミュレーションモデルは参考文献⁵⁾を参照されたい。

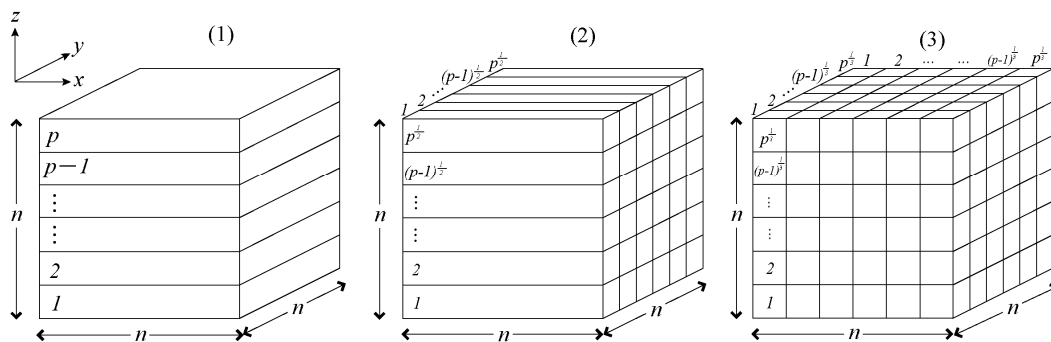


Fig. 2 3種類の領域分割法¹⁾

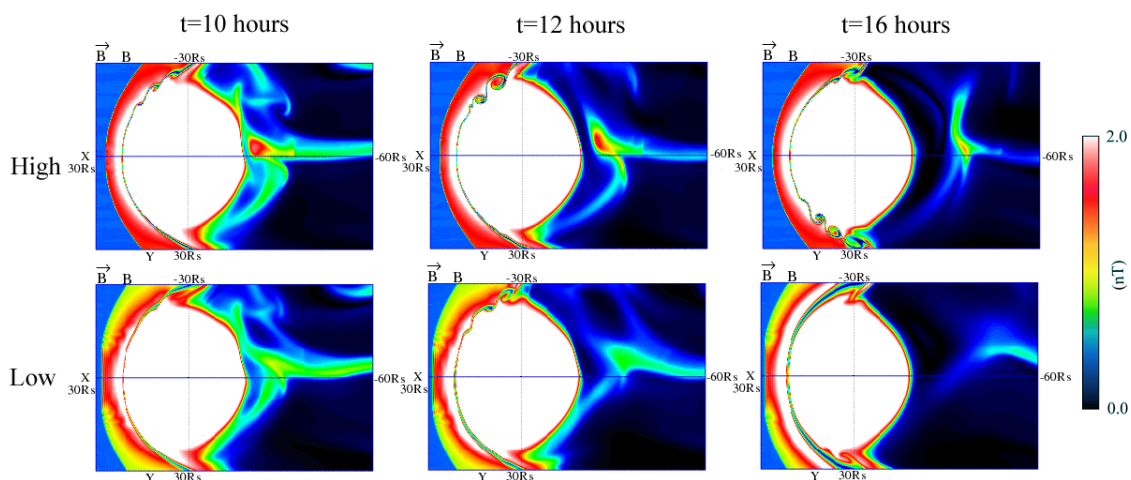


Fig. 3 土星磁気圏の赤道面 (xy 平面) における磁場強度. 上図が今回のシミュレーション結果、下図が従来の解像度での結果.

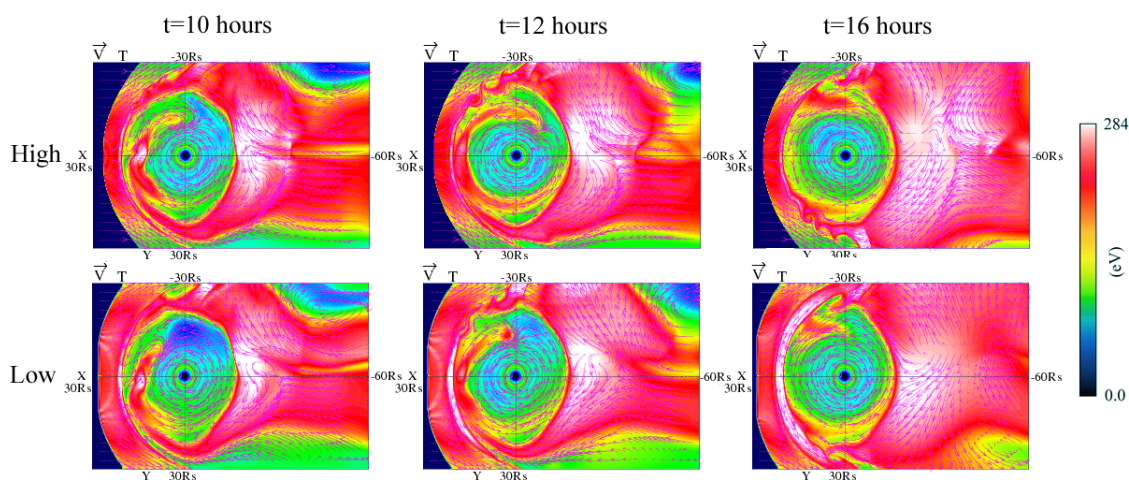


Fig. 4 土星磁気圏の赤道面 (xy 平面) におけるプラズマ温度、流れ. 上図が今回のシミュレーション結果、下図が従来の解像度での結果.

MHD 方程式では未知数が 8 (プラズマ密度、速度 3 成分、圧力、磁場 3 成分) があるために、シミュレーション結果として約 80 GB のデータがサンプリング時間毎に書き出される。サンプリング時間は 0.069 時間であり、磁気圏構造、ダイナミクスを調べるためには 20 時間以上の結果が必要となり、約 300 個のデータを利用した (合計 24 TB)。計算結果の書き出し自体は 1024 コア毎に行い、情報通信研究機構 (NICT) が運用している分散ストレージシステムに保存し、解析を行った。東京大学情報基盤センターと NICT 間は JGN2plus で接続されており

実効速度で最大 240 Mbps の転送 (SFTP) が可能である。また今回の計算ではおよそ 700 計算時間を利用した。

4. シミュレーション結果、考察

磁気圏のシミュレーションでは太陽風との相互作用を計算するために、太陽風を入力として与える。太陽風はプラズマの風であり、太陽から磁場 (IMF : Interplanetary Magnetic Field) を伴っている。磁場の向きは磁気圏の構造に大きな影響を与えるが、今回の計算では磁気圏内に太陽風のエネルギー

が流入しやすい北向きの IMF を用いた。北向き IMF 時には、磁気圏の反太陽側（尾部）において、磁力線のつなぎ替え（磁気リコネクション）が起こり、プラズマ対流の大規模な変動など起こる。

Fig. 3, 4 に土星磁気圏シミュレーション結果を載せる。それぞれの図は計算結果を切り出して、拡大し、可視化している。Fig. 3 は磁場の強度、Fig. 4 はプラズマの温度を色で、プラズマの動きを矢印で示している。それぞれ $t = 10, 12, 16$ 時間における赤道面 (xy 面) 上の結果を示しており、上図が高解像度 ($0.1 R_S$) の計算結果、下図が従来の解像度 ($0.3 R_S$) での結果⁶⁾である。座標系は Fig. 1 に示したものであり、図の中心から少し左側にある黒い点が土星である。図の左側から超音速の太陽風が吹いてきており、土星の磁場に衝突することで、衝撃波面が形成され、その波面と土星の間に磁気圏の境目である磁気圏界面が形成される。我々の土星磁気圏シミュレーションコードは、今までの研究において、磁気圏の形、衝撃波面の位置、磁気圏内のプラズマ分布などにおいて、観測結果を非常によく再現できている⁷⁾。

高精度の結果では、Fig. 3 の $t = 10$ 時間において $-y$ 方向の磁気圏界面（左上部）に波が立ってきているのがわかる。さらに 2 時間後にはきれいな渦構造が形成されている。一方で従来の解像度では、 $t = 10$ 時間において少し磁気圏界面にゆがみが見える程度である。さらに、 $t = 12$ 時間において渦が形成されてはいるが、高精度の結果と比べて、波の成長に違いが見られる。 $t = 16$ 時間では高精度の結果では $\pm y$ 方向の磁気圏界面上に渦構造が見えているが、従来の結果では見えていない。低解像度の結果では、 $+y$ 方向の磁気圏界面に渦構造が見られることは一度もなかった。

Fig. 4 では、プラズマの動きを示しているが、土星の高速自転に引きずられて、プラズマが土星周辺で共回転していることがすべての図からわかる。この共回転プラズマが $-y$ 方向では、太陽風と逆向きのため、速度シアが大きく、波が立ち、渦構造が生成されやすい。一般にこの渦構造は Kelvin-Helmholtz (KH) 不安定性による渦といわれるが、その不安定条件をこの領域では良く満たしている⁶⁾。また土星磁気圏の観測により、シミュレーション結果と同じ場所 ($-y$ 方向) で渦構造が見つかっており⁸⁾、スペクトル解析により観測とシミュレーション結果が非常に似た構造であることが分

かっている⁶⁾。一方で、 $+y$ 方向では共回転の向きと太陽風の向きが同じため、渦が起きないと言われているが、Fig. 4 の $t = 16$ 時間において土星の右側（白い領域）から土星に向かってプラズマが動いている様子が高解像度、低解像度の結果からもわかる。これは磁気リコネクションに伴うプラズマの流れであり、この流れが $+y$ 方向に侵入すると太陽風の向きと反対方向となり、速度シアが生まれる。この速度シアは $-y$ 方向と比べて小さく、更に KH 不安定性は解像度に大きく依存するため、低解像度では再現できていなかった。

現在観測では、 $-y$ 方向における磁気圏界面でのみ渦構造が見つかった⁸⁾。前述のように磁気圏構造は IMF の向きにより大きく形を変え、IMF は時間とともにその向きと強度を変える。そのため観測では、ある太陽風入力での全体的な磁気圏の様子はわからず、探査機がいる“その場”の情報だけである。一方、計算機シミュレーションではある太陽風条件下での 3 次元磁気圏構造がわかるため、今回再現された新しい $+y$ 方向における渦構造も観測に先立った結果である可能性がある。

5. まとめ

本研究では、東京大学 HA8000 を用いて土星磁気圏高精度グローバルシミュレーションを行った。シミュレーションには HA8000 に最適化された電磁流体力学コードを利用することで、長時間の時間発展を計算しなければならない磁気圏シミュレーションが可能となった。それに伴いシミュレーションデータも膨大な量になったが、分散書き出し、高速ネットワークで繋がれた分散ストレージを利用することで対応できた。

シミュレーション結果では、従来の低解像度の結果とは異なり、渦の生成が早い、今まで現れなかった場所に生成されるなど大きな違いが現れた。今回の結果は、土星磁気圏の観測結果ではまだ観測されていない渦構造を示すもので、これから観測されることが期待される。この渦構造は地球磁気圏にも見られるが、磁気圏内への未解明のエネルギー流入過程と考えられている。また、そのエネルギー、プラズマの流れが衛星など宇宙空間での活動へ悪影響を与えることも考えられ、その物理的理解は重要である。

参 考 文 献

- [1] 深沢圭一郎、梅田隆之、荻野瀧樹、高効率並列電磁流体コードによる HA8000 クラスシステムのパフォーマンス評価、2010 年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム論文集、133-140、2010.
- [2] R. O. Dendy, 『Plasma Dynamics』, Oxford University Press, 1990.
- [3] T. Ogino, R. J. Walker, M. Ashour-Abdalla, A global magnetohydrodynamic simulation of the magnetopause when the interplanetary magnetic field is northward, IEEE Trans. Plasma Sci.20, 817.828, 1992.
- [4] Fukazawa, K., T. Umeda, T. Miyoshi, N. Terada, Y. Matsumoto, and T. Ogino, Performance measurement of magneto-hydro-dynamic code for space plasma on the various scalar type supercomputer systems, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 38, No. 9, pp2254, 2010.
- [5] Fukazawa, K., T. Ogino, and R.J. Walker, "Vortex-associated reconnection for northward IMF in the Kronian magnetosphere", Geophys. Res. Lett., 34, L23201, doi:10.1029/2007GL031784, 2007.
- [6] Walker, R.J., K. Fukazawa, T. Ogino, and D. Morozoff, "A Simulation Study of Kelvin-Helmholtz Waves at Saturn's Magnetopause", J. Geophys. Res., accepted, 2010.
- [7] Fukazawa, K., S. Ogi, T. Ogino, and R.J. Walker, "Magnetospheric Convection at Saturn as a Function of IMF Bz", Geophys. Res. Lett., 34, L01105, doi:10.1029/2006GL028373, 2007.
- [8] Masters, A., N. Achilleos, C. Bertucci, M. K. Dougherty, S. J. Kanani, C. S. Arridge, H. J. McAndrews and A. J. Coates (2009), Surface waves on Saturn's dawn flank magnetopause driven by the Kelvin-Helmholtz instability, Planet. Space Sci., 57, doi:10.1016/j.pss.2009.02.010.