変動惑星圏シミュレーション

寺田直樹、加藤雄人、寺田香織(東北大)、 藤原均(成蹊大)、荻野竜樹、梅田隆行(名大STEL)、 石井克哉、永井亨(名大情報基盤センター)

> 名古屋大学HPC計算科学連携研究プロジェクト 成果報告シンポジウム 2011年5月10日

変動惑星圏シミュレーション

 惑星大気・プラズマ環境におけるマイクロ秒~数十億年スケールの時間 変動、及びその蓄積によって生じる惑星圏システムの多様性を明らかにす べく、本研究グループが現有する以下の数値シミュレーションコードを適用
 ・拡充発展させ、惑星大気・プラズマの変動と進化に係る統合的知見を得ることを目的とする。

> (a) 太陽系初期シミュレーション [松本(D3)、齋(D2)]

	→→ (b) 長期変動(数千万年~数十億年)シミュレーション
(大気・プラ	──✓ [寺田直、古橋(M1)]
ズマに係る	1
(特徴的な)	(c) 中期変動(数分~数十年)シミュレーション
不可逆過	[*] [藤原、寺田直、寺田香(PD)、星野(D3)、市川(M2)]
し程の蓄積	\bigwedge
	√─√(d) 短期変動(マイクロ秒~秒)シミュレーション
	[加藤、北原(M2)]

惑星からの大気・プラズマ流出

宇宙空間へ流出



典型的な時	間スケール
• 分~時:	流出過程
• 分~年:	境界条件(太陽や下
	層大気)の周期的変動、
	突発的変動
・µ秒~秒∶	加熱·温度構造決定

火星·金星(非磁化惑星)

- 大気・プラズマに係る(特徴的な)不可逆過程の蓄積
- 惑星大気・プラズマの流出、そしてそれによって引きおこされる惑星環境の進化が主研究課題

太陽風と太陽放射の影響によって、 大量の大気が宇宙空間に流出



大気流出の理解は、惑星環境の進化と多様性を
 生む要因の理解に不可欠



GCOE program "Global Education and Research Center for Earth and Planetary Dynamics" - Planetary Evolution Research Group -

Early solar system

原始太陽系星雲からナノサイズ始原物質 ~様々な時空間スケールにおける現象を繋ぐ~



分~時: プラズマ流出過程



現状では、磁気流体力学(MHD+ハイ ブリッド)方程式系で、流出経路と流出 率(および46億年間の総流出量:火星で <数気圧、金星で<数十気圧)を導出

今後の理題
・多流体方程式系に拡張
(JpGUで発表予定)
・多流体K-H不安定におけ
ス混合届の時空間登屋
勿此口 眉 切时王间无成
 計算規模
2D 2000x2000
$\sim 4000 \times 4000$ arids (H23)
3D 800x500x500
3D 800x500x500 ~6000x4000x4000 grids
3D 800x500x500 ~6000x4000x4000 grids (H24以降, 直交格子)

磁気流体力学(MHD)シミュレーショ ンの説明: 支配方程式系

• Continuity equation for the total plasma density

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{M} = \sum_{i} (m_{i}q_{i} - m_{i}L_{i})$$

• Momentum equation

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\frac{\vec{M}\vec{M}}{\rho} - \frac{\vec{B}\vec{B}}{\mu_0} + \Pi\right) + \nabla \left(P + \frac{B^2}{2\mu_0}\right) = -v_{it}\vec{M} - \rho\vec{g} - \sum_i (m_iL_i)\frac{\vec{M}}{\rho}$$
Faraday's law
$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \nabla \times \vec{E} = 0$$
2 kinds of simplified viscous terms

• Energy equation

•

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\left(e + P - \frac{B^2}{2\mu_0} \right) \frac{\vec{M}}{\rho} + \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{\mu_0} \right] = -\frac{\vec{M}}{\rho} \cdot \left(v_{it} \vec{M} + \rho \vec{g} + \frac{\vec{M}}{\rho} \sum_i (m_i L_i) \right) + \frac{kT_q}{\gamma - 1} \sum_i (q_i - q_{EII,i}) - \frac{kT_{EII}}{\gamma - 1} \sum_i q_{EII,i} - \frac{kT_L}{\gamma - 1} \sum_i L_i + \frac{1}{3(\gamma - 1)} \frac{M^2}{\rho^2} \sum_i (m_i q_i) + \nabla \cdot \left(K \nabla T_L \right) \right]$$

• Additional continuity equations for ionospheric ion densities

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho_i \frac{\vec{M}}{\rho} \right) = m_i q_i - m_i L_i$$

磁気流体力学(MHD)シミュレーショ ンの説明

- 3-D TVD MHD model
 - Up to 14 ion species are considered (O⁺, O₂⁺, CO₂⁺, NO⁺, CO⁺, N₂⁺, N
 ⁺, C⁺, He⁺, H₂⁺, H⁺, Ar⁺, Ne⁺, and Na⁺)
 - 94 chemical reactions
 - Entire ionosphere-solar wind interaction region simultaneously solved
 - Inner boundary locates at the bottom of the ionosphere (120 km altitude for Venus, 100 km for Mars, 0 km for Mercury)
 - Outer boundary locates at 9.2 $R_{\rm p}$ altitude
 - Hyperbolic ∇ B cleaning method similar to Dedner et al. [2002] implemented
- Grid structure
 - Vertical:
 - 3-10 km grid size in the lower ionosphere
 - 300-1400 km grid size near the outer boundary
 - Horizontal:
 - Unstructured



Grid structure on a horizontal sphere

分~時: プラズマ流出過程



現状では、磁気流体力学(MHD+ハイ ブリッド)方程式系で、流出経路と流出 率(および46億年間の総流出量:火星で <数気圧、金星で<数十気圧)を導出

今後の理題
・多流体方程式系に拡張
(JpGUで発表予定)
・多流体K-H不安定におけ
ス混合届の時空間登屋
勿此口 眉 切时王间无成
 計算規模
2D 2000x2000
$\sim 4000 \times 4000$ arids (H23)
3D 800x500x500
3D 800x500x500 ~6000x4000x4000 grids
3D 800x500x500 ~6000x4000x4000 grids (H24以降, 直交格子)

分~時: 中性大気流出過程



現状では、電磁圏MHDコードと外圏 two-stream+粒子軌道追跡コードを 結合。酸素原子の流出率の太陽風 動圧変動に対する応答を調査 [Kaneda et al., 2007, 2009] 今後の課題

外圏-熱圏 DSMC (Direct simulation Monte-Carlo) モデルへの拡張



- Collision frequency is not high enough to maintain equilibrium.
- Momentum exchange in a collision between atmospheric molecules is still important.

分~時: 中性大気流出過程



1D 熱圏-外圏DSMCモデル計算結果

太陽フレア・太陽風変動に対する応答

First coupling model for Venus <Hoshino et al.; Ichikawa et al.>

We have developed

a new general circulation model (GCM) with the Venusian mesosphere (70 – 110 km) and thermosphere (>110 km).

Our simulation results first show the momentum transfer toward the thermosphere, that

the Kelvin wave originated in the cloud deck propagates up to about 110 km with a vertical wavelength of 40 – 50 km.





下層大気との結合(地表から外圏まで)

First whole region GCM for Earth <H. Fujiwara et al.>

GCM: all the atmospheric regions,

from the ground to exobase first in the world (in collaboration with Kyushu Univ and NICT). Our GCM simulations reproduce day-to-day variations of the thermosphere which have never shown in previous simulations.

Upper panel: temperature and horizontal wind at about 12 km altitude.

Bottom panel: temperature and horizontal wind at about 300 km altitude in the condition of solar minimum and geomagnetically quiet.





[Next work] Comparison with observation: IPY long-run data obtained from the European Incoherent Scatter Svalbard radar (ESR) observations in 2007 and 2008, for seasonal variation of the ion temperature extremely larger than the IRI model.

µ秒~秒: 粒子加速

Radiation belt at Jupiter and the Earth <Y. Katoh et al.>

Simulation result confirmed the existence of highly effective electron acceleration in the process of chorus generation [Katoh et al., 2008].

Our simulation studies serve important clues in understanding the radiation belt physics and enhance collaborative studies through the satellite mission ERG, SCOPE and beyond.



[Santolik et al., 2004]





Reproduced chorus emissions [Katoh and Omura, 2007; Omura et al., 2008, 2009]



・ 並列化(1000並列以上。
 OhHelp@京大学術情報
 メディアセンター)



Molecular cloud formation <M. Matsumoto et al.>

 Knowledge on the formation of molecular clouds from interstellar atomic gas is indispensable to understand star formation since denser regions of the molecular clouds within the cold neutral

medium are protostar nurseries. **M. Matsumoto** (D3 in 2011FY) et al. have studied the effects of magnetic field and partial ionization (ambipolar diffusion) on molecular cloud formation through thermal instability, using one-dimensional two-fluid (neutral and ionized gases) simulations.







Major Results

M. Matsumoto (D3 in 2011FY) et al. found that possibility of ambipolar diffusion is excluded by the guiding effect of the moderate-strength magnetic field, and in weak-field cases the ambipolar diffusion becomes effective but is dominated by a more significant amplification of magnetic field due to the thermal instability. Their parameter studies have clarified how strong an influence magnetic field has on the condensation of neutral gas.

太陽系初期: 原始惑星系円盤

MRI in accretion disks <K. Sai et al.>

• The Magneto-Rotational Instability (MRI) is one of the important mechanisms to explain the angular momentum transport and generation of turbulence in accretion disks. In

order to reconstruct the MRI turbulence and evaluate the box size dependence of the non-linear saturation state of MRI, **K. Sai** (D2 in 2011FY) et al. have develope a simulation code based on the CIP-MOCCT scheme.





Time variation of magnetic energy during the linear stage of MRI (Sai et al.)

Major results

K. Sai (D2 in 2011FY) et al. have developed a CIP-MOCCT code whose accuracy and reliability have verified against known analytical and numerical solutions of Alfvenic wave and MHD shock tube tests. Shearingperiodic boundary condition has implemented in the three-dimensional code to check the linear growth of MRI.The code is ready to investigate its non-linear turbulent stage.



ユニバーサルスキームの開発



現状では、semi-discrete central schemeを拡張したものを、電子移流 項を含む方程式系に適用済み [Matsuda et al., submitted]



名古屋大学HPC計算科学連携研究 プロジェクト課題(まとめ)

• 「変動惑星圏シミュレーション」

寺田直、加藤、寺田香(東北大)、藤原(成蹊大)、荻野、梅田(名大STEL)、石井、永井(名大情報基盤センター)

- 惑星大気・プラズマ環境におけるマイクロ秒~数十億年スケールの時間変動、及びその蓄積によって生じる惑 星圏システムの多様性を明らかにすべく、本研究グループが現有する以下の数値シミュレーションコードを適用
 ・拡充発展させ、惑星大気・プラズマの変動と進化に係る統合的知見を得ることを目的とする。
- (a) 太陽系初期シミュレーション [松本(D3)、齋(D2)]
 - 星・惑星形成環境における重力収縮ガスとプラズマの相互作用、及び磁場が果たす役割を理解することを目標とする。特に、磁場の効果が重要となると考えられる超 新星爆発が誘発する分子雲形成過程や、降着円盤における磁気乱流場での多様な不安定モードの発展とその競合を明らかにすることを目指す。
- (b) 長期変動(数千万年~数十億年)シミュレーション [寺田直、古橋(M1)]
 - 惑星圏の長期変動(数千万年~数十億年スケールの時間変動)の中でも、不可逆過程の長期的蓄積によって生じる、惑星圏システムの進化・多様性に関わる過程を 明らかにする。特に、火星、金星、水星、地球、系外惑星等の大気・プラズマの宇宙空間への流出過程を、本研究グループが現有する先鋭的なコードを用いて究明し 、その数千万年~数十億年間に及ぶ蓄積によって生じる惑星大気の進化や、生命居住可能条件(ハビタブル条件)に及ぼす影響の定量評価を目標とする。
- (c) 中期変動(数分~数十年)シミュレーション [藤原、寺田直、寺田香(PD)、星野(D3)、市川(M2)]
 - 惑星圏の中期変動(数分~数十年スケールの時間変動)の中でも、特に惑星大気の日々変動、季節変化、太陽11年周期変動などに起因した惑星圏中期変動を明らかにする。地球、金星、火星、木星など各惑星に特徴的な大気現象を理解すると共に、比較惑星学的見地から惑星圏中期変動の一般理論の構築を目指す。また、惑星電磁圏、大気圏などの領域間の結合過程が惑星圏中期変動に果たす役割の理解も目指す。
- (d) 短期変動(マイクロ秒~秒)シミュレーション [加藤、北原(M2)]
 - 惑星圏の短期変動(マイクロ秒~秒スケールの時間変動)は、惑星圏システムにおける最高エネルギーのプラズマ粒子ダイナミクスに直接的に関わる現象を含むと 共に、背景媒質であるプラズマの温度や組成に影響を及ぼし、長期・中期変動現象と共に惑星圏システムの進化・多様性を決定する本質的要素の一つである。短期 変動現象をその物理素過程から究明し、長期・中期変動に関する理論モデルとの連携により、短期変動現象の不可逆過程への寄与と惑星圏システムの進化に及ぼ す影響の定量評価を目指す。
- 本研究では、まずは(a)(b)(c)(d)の各課題を遂行し、それぞれの時間スケールにおける特徴的な惑星圏変動現象の理解を深める。そして将来的にそれらを統合的な視点で繋ぎ合わせ、惑星圏環境の変動現象とその蓄積によって生じる多様性をモデルとして統合するための足がかりを創ることを目標とする。