# 宇宙電磁環境シミュレーション: 小型天体・人工衛星近傍プラズマじょう乱の 大規模計算機実験

#### 三宅洋平

神戸大学計算科学教育センター y-miyake@eagle.kobe-u.ac.jp

概要

宇宙空間中の小型天体・人工衛星は電離気体であるプラズマとの 接触により帯電する、またそれらの固体表面が宇宙プラズマの境 界となり、その周辺ではプラズマ環境そのものが大きく乱される、 将来衛星ミッションに向け、このような衛星プラズマ相互作用を事 前に定量評価する必要がある.本講演では.スーパーコンピュータ 向けに最適化された電磁粒子プラズマ粒子シミュレーションを用い た小型天体・プラズマ相互作用解析の最新の取り組みを紹介する.



- 1. 宇宙プラズマ環境と小型天体・人工衛星の相互作用
   2. 宇宙プラズマ現象の数値的アプローチ
   3. 宇宙プラズマ粒子計算の並列化技法
   4. 解析事例
- 5. 今後の展望とまとめ

### 対象とする宇宙空間

### 我々が対象としている「宇宙」 一 地球近傍の人類生存基盤領域

一 太陽から地球に至る領域
 一 太陽系惑星領域



### 太陽活動による宇宙電磁環境への影響







•フレアなどの太陽活動に伴うダイナミックな変動→宇宙天気

6



・宇宙の99.9%以上はプラズマ状態
・プラズマ:物質の第4の状態。荷 電粒子(電子、イオン)の集合体
・宇宙環境利用には宇宙プラズマ の理解が必要



### 宇宙プラズマ中での人工衛星帯電



◇ 衛星は宇宙空間では接地できない⇒浮遊電位
 ◇ 周辺のプラズマ電子・イオンの衛星への流入
 ◇ 衛星からの光電子・二次電子流出



2003年10月 みどり2号 全損事故













<u>ハーネ</u>ス オーロラ帯での LI内面の帯電

MLI内面と ハーネス間 の放電 ハーネス間 の持続放電 持続放電の波及

104本全ての 焼損

### 衛星帯電・放電による衛星故障



(Space Architect Study: Koons他、1999)

#### 1973年~1997年の衛星障害326件の統計 米国Aero-space社と米空軍、アメリカ海洋大気局による調査結果

#### 半分以上が衛星帯電および放電による障害

数値シミュレーションの必要性

## 宇宙プラズマ環境をどうやって評価するか

#### 個々のパーツを地上プラズマチャンバー内でテストする。

・プラズマ環境の実現が容易ではない
・チャンバー壁の影響がある
・プラズマ現象が複雑(異方性、分散性、非線形性)
・大型システムの評価が困難



### 宇宙プラズマ現象の数値的アプローチ

### プラズマダイナミクスの記述法



13



宇宙プラズマの動き(Dynamics)とそれによって生じる電磁場変動(いわゆる電波)。互いに影響しあう。

電波(電界、磁界からなる)を解く方程式 (Maxwell方程式) プラズマダイナミクスを解く方程式 (運動方程式)

 $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$  $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_{o} \mathbf{J} + \frac{1}{c^{2}} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$  $\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_{o}}$  $\nabla \cdot \mathbf{B} = \mathbf{0}$ 

 $\frac{dv_i}{dt} = \frac{q_s}{m_s} (\mathbf{E} + v_i \times \mathbf{B})$  $\frac{dx_i}{dt} = v_i$ 

2つの方程式を組み合わせて、電磁場(電波)とプラズマの動きを解き進める。

### プラズマ粒子シミュレーション



### プラズマ粒子計算モデルの妥当性評価

- 1. 基本物理量の確認 エネルギー保存、プラズマ波動分散関係...
- 2. 基礎現象の再現(理論との比較) ラングミュアプローブ、OML理論、シース理論...

#### 3. 科学衛星観測との比較 例)プラズマ航跡電場計測との比較



φ<sub>SC</sub> = + 40 V magnetotail lobes 10 10 Electric field (mV/m) 0 -5 φ<sub>SC</sub> = + 20 √ just outside magnetopause -10 -10 -180 -180-90 180 -90 90 90  $\theta$  (degree)  $\theta$  (degree)

シミュレ・

ーション

16

180

衛星観測

### 計算例:衛星搭載イオンエンジンプラズマ挙動

ムービー再生

### スーパーコンピュータの利用



http://jp.fujitsu.com/about/tech/k/

- ▶3次元かつ数値ノイズの少ないシミュレーション解析
  - - 膨大な数の粒子(~10<sup>10</sup>個=必要主記憶~TB)を解き進める
     ・必要
  - スーパーコンピュータの利用を前提

▶ 近年のスーパーコンピュータは超並列システム - シミュレータの階層的並列化は必須

## プラズマ粒子計算の階層的並列化

#### 「プロセス並列化×スレッド並列化×SIMDベクトル化」



## プラズマ粒子計算の分散メモリ並列技法

#### 粒子分割法(例えば、[Martino et al., Parallel Comput., 27(3), 2001]

- ・ 全プロセスが全空間の電磁場情報を保有/計算
- ・粒子数を均等分割
- ・プロセス毎に求められた電流を総和(all-reduce)



○ 実装とても簡単
× 領域大→メモリ不足
× 領域大&並列度大
→電流計算コスト大
◆大規模 all-reduce



- ・1セルあたりの粒子数大(=領域小)
- •低並列数(~10<sup>2</sup>並列) •低空間次元数(<sup>4</sup>次元) …ならば、これでもオッケー。

### 粒子分割PICコードの並列性能



#### (静的)領域分割法

- ・空間を小領域に分割(1~3次元)
- 小領域を各プロセスに割り当て
- 割り当てられた小領域内で粒子一格子の相互作用計算





○ 実装まずまず簡単
 × 粒子集中→メモリ不足
 × 粒子数のばらつき
 →負荷不均衡
 →並列効率低下

・粒子の粗密が少ない
 (一様粒子分布、非一様性が1or2次元的)
 …ならば、これでもオッケー。

### (静的)領域分割法のMPI通信

- - ⇒ 移送すべき粒子のラベリング、パッキング、個数の通知、通信
  - ⇒通信回避アルゴリズム(テンポラルブロッキング等)が有効
- ◆ 電磁場の境界通信(boundary\_comm\_for\_eb)
   ⇒ ステンシル計算でおなじみ
- ◇ 小領域境界電流足し込みのための通信(boundary\_comm\_for\_J)
   ⇒ 電磁場境界値と同じ要領でSendrecv通信。ただし受信したデータで境界値を 上書きしない → 後で自分の領域の境界電流と合算。



## より技巧的な分散メモリ並列技法

### 動的領域分割法(例えば、[Thackera et al., Proc. HPCSA, 2003]

- 空間を小領域に分割
- •小領域を各プロセスに割り当て
- •小領域内粒子数が均衡するように境界を動的に変更



Orthogonal Recursive Bisection (ORB)

#### (いろいろ登場したので)手法間比較

#### N: ノード数, P: 全空間中の総粒子数, D: 全空間の格子点数

For efficiency, particle & field solving costs should scale as O(P/N) and O(D/N).

Approach	粒子負荷 (Ideal : Worst)	場の負荷 (Ideal : Worst)
1. 粒子分割	P/N : P/N	D : D
2. 静的領域分割	P/N:P	D/N : D/N
3. 動的領域分割	P/N : P/N(?)	D/N : ~D
4.他に方法は?	?	<b>?</b> 27

### 領域分割方式PICにおける粒子負荷不均衡の問題

⇒粒子・格子連成計算に共通に現れる課題



動的負荷分散アルゴリズムの必要性

#### OhHelp: 負荷分散戦略([Nakashima et al., Proc. ICS, 2009]など)



#### OhHelp: 手助けノード(2次)割当のアルゴリズム



helped by "23", "32", and "33".

### (OhHelpも含めてあらためて)手法間比較

#### N: ノード数, P: 全空間中の総粒子数, D: 全空間の格子点数

For efficiency, particle & field solving costs should scale as O(P/N) and O(D/N).

Approach	粒子負荷 (Ideal : Worst)	場の負荷 (Ideal : Worst)
1. 粒子分割	P/N : P/N	D : D
2. 静的領域分割	P/N : <b>P</b>	D/N : D/N
3. 動的領域分割	P/N : P/N(?)	D/N : ~D
4. OhHelp	$P/N : (1+\alpha) (P/N)$	D/N: 2D/N <sup>31</sup>

#### OhHelp実装PICコードの並列性能

並列手法間の比較(3次元PIC)

#### 粒子分布の影響(OhHelp法)

32



プラズマ粒子計算の超並列化の最大の障壁である 負荷不均衡を(許容可能な追加コストで)解決

## 共有メモリ並列・SIMDベクトル化

### シミュレーションモデル

#### <u> 共有メモリ(スレッド)並列</u>

- ・ 粒子分割 or 領域分割? ⇒ 領域分割
   (プロセス毎の小領域を内部でさらに分割)
- 色付けによるアクセス衝突回避アルゴリズム

#### <u>SIMDベクトル化</u>

- 基本的にはコンパイラの最適化機能に依拠
- PICカーネル計算(プラズマ電流)に含まれる

## $J(\delta(x_p)) += j_p$



J:電流配列、δ:粒子隣接格子点を求める関数、j<sub>p</sub>:プラズマ粒子が作る電流の計算が自動ベクトル化を阻害

• 粒子所属セルに基づく粒子並び替えによる解決

### 共有メモリ並列・SIMD最適化の効果



メニーコアプロセッサ(Intel Xeon Phi)など新世代の プロセッサでは、このレベルの最適化が(も)特に重要

### 計算科学・計算機科学の連携

JHPCN(学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点) collaboration research 「超並列宇宙プラズマ粒子シミュレーションの研究」

神大:三宅、臼井 東北大:加藤 名大:小路 etc.

#### **Applications**

Spacecraft-plasma interactions
Plasma wave generation & particle acceleration processes in Earth's magnetosphere

#### HPC

Parallel & distributed algorithms
High-performance computational & programming models

京大:中島、深沢

北大:岩下

etc.

最新のコンピュータアーキテクチャに適合した実用コードをコデザイン 互いの分野の研究内容・文化をよく理解する必要



## 太陽探査衛星と太陽コロナプラズマの相互作用

Solar Probe Plus (Credit: NASA & JHU/APL) •高温高密度の太陽コロナプラズマ •衛星から超高密度の光電子・二次電子放出

衛星帯電特性は地球周回衛星と同じか?
 科学衛星観測への影響は?

### シミュレーションモデル



太陽コロナプラズマ(電子、イオン)、光電子、二次電子を考慮

シミュレーションによる衛星帯電予測

상황 형태는 것 않았는 것을 받았다. 전신 그 말 신지 않았다. 중영에 매매	김 교육은 경험을 가격했다. 것은 것이 많은 것이 없는 것이 없는 것이 없는 것이 없는 것이 없는 것이 없다. 것이 없는 것이 없 않이	
Case	PIC simulation	Theory*
<u>太陽近傍(0.04 AU)</u>	-20.5 V	+2.9 V
水星周辺	+9.9 V	+7.4 V
地球周辺	+12.8 V	+9.5 V

\*OML理論[Mott-Smith and Langmuir, 1926]による値



太陽最近傍では、理論と大きく異なり<u>衛星が負に帯電</u> (地球周辺では理論値と大体一致)

### 衛星周辺の空間電位分布



(背景電子流入による負電荷蓄積)>(光電子放出による正電荷蓄積) →衛星は負に帯電

#### <u>太陽近傍環境特有の現象</u>

### 自然の小型天体(月、小惑星)への応用

#### 太陽風プラズマー月固体表面間の電磁気的相互作用 (局所的には月の磁気異常と太陽風プラズマの相互作用)



### 月縦孔地形の電気環境のシミュレーション解析



マリウスの丘の縦孔

かぐや衛星により、 クレーターとは「異なる」縦孔地形の発見 <u>→月・火星の縦孔・地下空洞探査計画UZUME</u>



将来の直接探査・月面基地利用を見据えて...<sup>43</sup> 月縦孔の電気環境および帯電ダスト環境の数値予測

計算モデル・条件



月面: 1. 絶縁性 2. 荷電粒子吸着 背景プラズマ: 太陽方向から到来 光電子放出: 太陽光到来角を考慮 格子点幅:50 cm 解析空間:  $200 \times 200 \times 1000 \text{ m}^3$ 使用計算資源: 2048**コア、**3.5 TB

### 計算結果:月縦孔表面の帯電分布



## 計算結果:月縦孔周辺の帯電ダスト挙動

#### 縦孔周辺の電気環境(月面電位)



今後帯電ダストの月面着陸探査機に付着した場合の 影響を評価し、月縦孔探査ミッション設計に役立てる



### ポスト「京」に向けた宇宙環境シミュレータの高度化

ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題(萌芽的課題) **し**太陽系外惑星の誕生と太陽系内惑星環境変動の解明 <u>し太陽活動</u>による地球環境変動の解明





各時空間スケールシミュレーションコードの次世代アーキテクチャ向け最適化、 およびスケール間の連成研究に向けた技術的検討

まとめ

- 宇宙空間を満たすプラズマと小型天体や人工衛星の
   相互作用は宇宙探査ミッションに多大な影響を与えうる。
- 人類未踏領域における人工衛星プラズマ相互作用や
   月や小惑星などの小型天体周辺のプラズマ電気環境
   に関して、研究の余地が十分に残されている。
- 仮想的に宇宙環境を再現可能なシミュレーションは、上記の問題を解決する上で非常に有用なツールである。
- 本質的に3次元、非均一な系を対象とする本問題では スパコンの利用は必須である。計算機科学分野との緊 密な連携により大きな成果を上げることができる。

### ご清聴ありがとうございました