

# 超並列粒子コードを用いたジオ・ スペースプラズマ理工学シミュ レーション

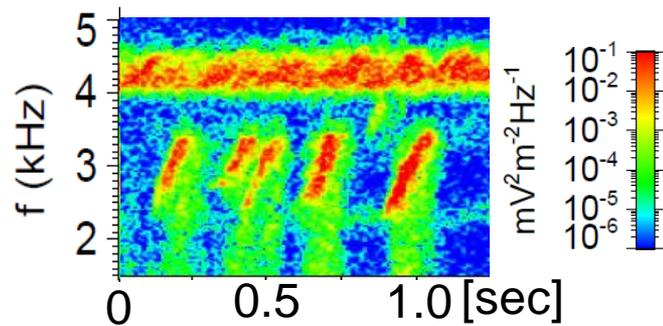
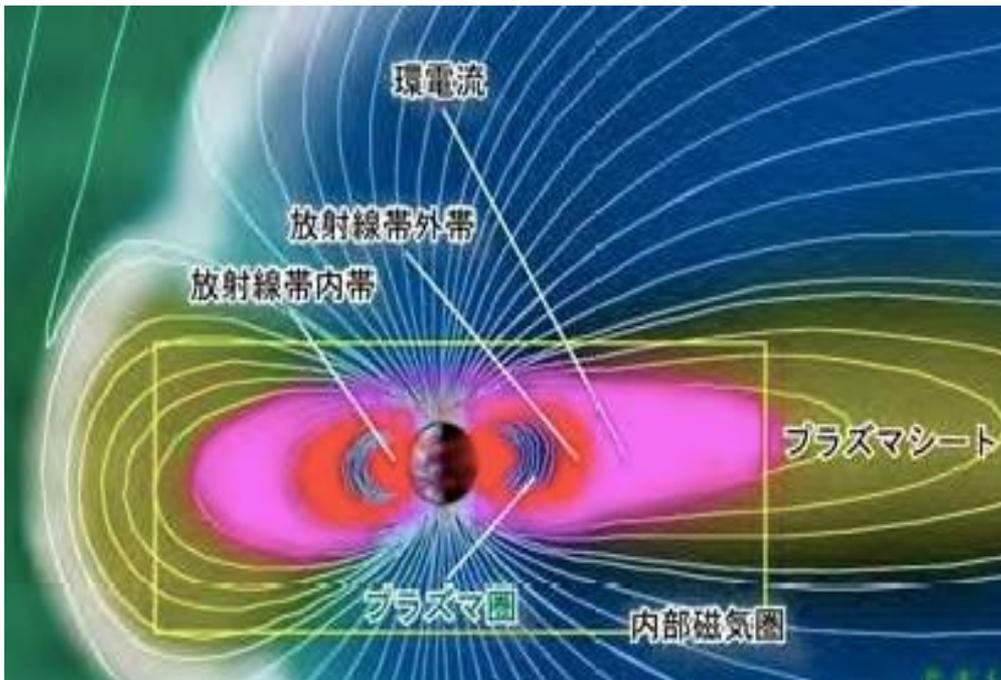
小路 真史<sup>1)</sup>, 三宅 洋平<sup>2)</sup>  
梅田 隆行<sup>3)</sup>, 石井 克哉<sup>4)</sup>

1) 宇宙科学研究所, 2) 神戸大学

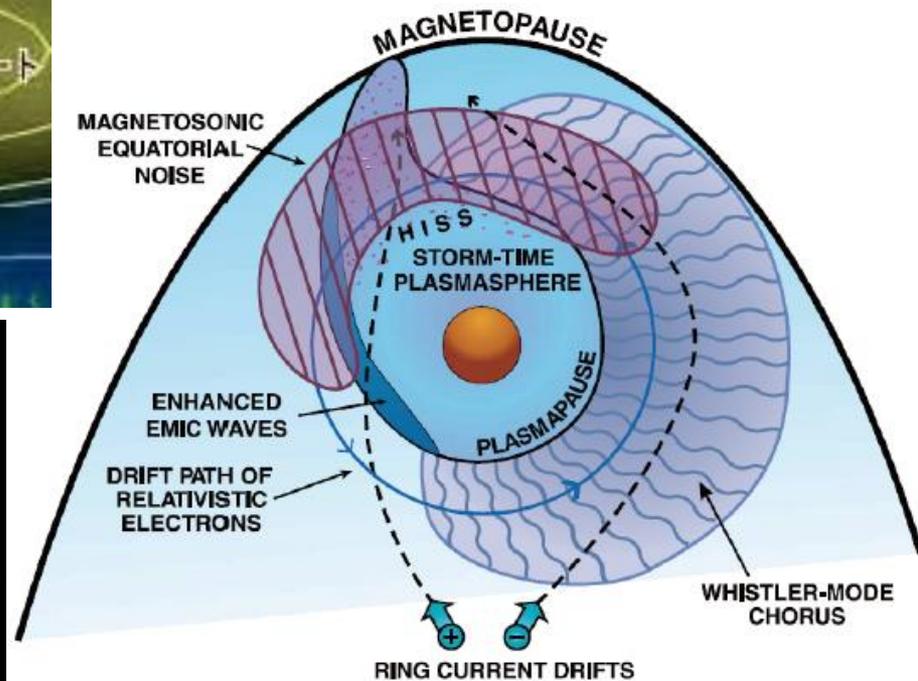
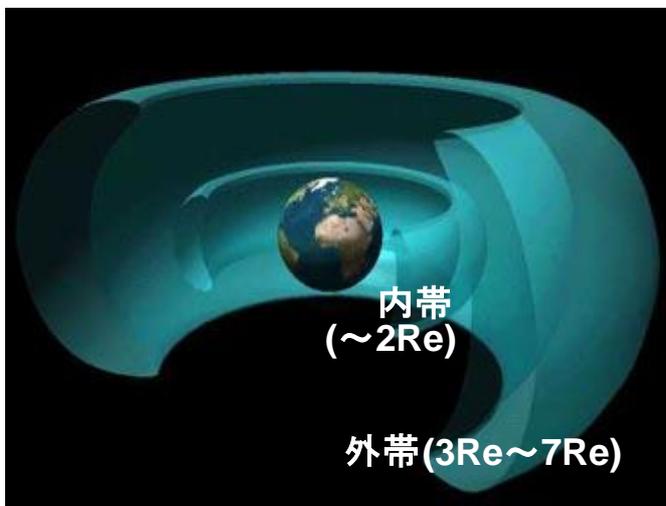
3) ジオスペース研究センター

4) 情報基盤センター

# 宇宙電磁プラズマ環境



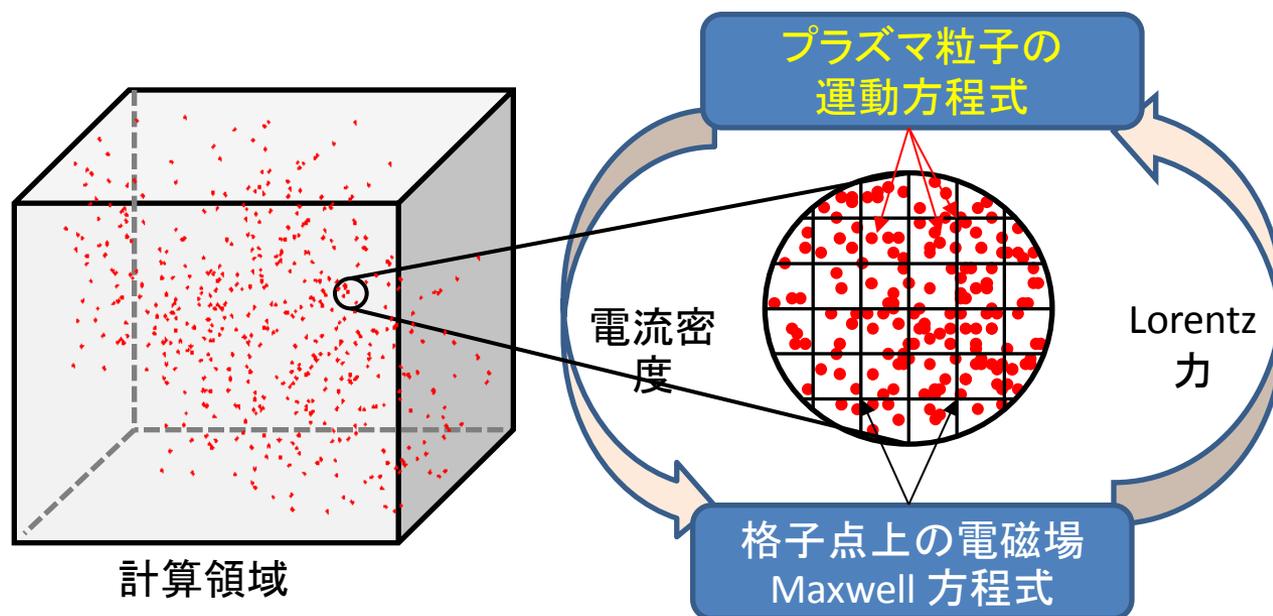
[Santolik et al., JGR, 2008]



[Thorne., GRL, 2010]

# 宇宙プラズマ粒子シミュレーション

- ダイナミックに変動する宇宙プラズマ環境の真理解明
- 人類の宇宙利用に向けた衛星工学シミュレーション



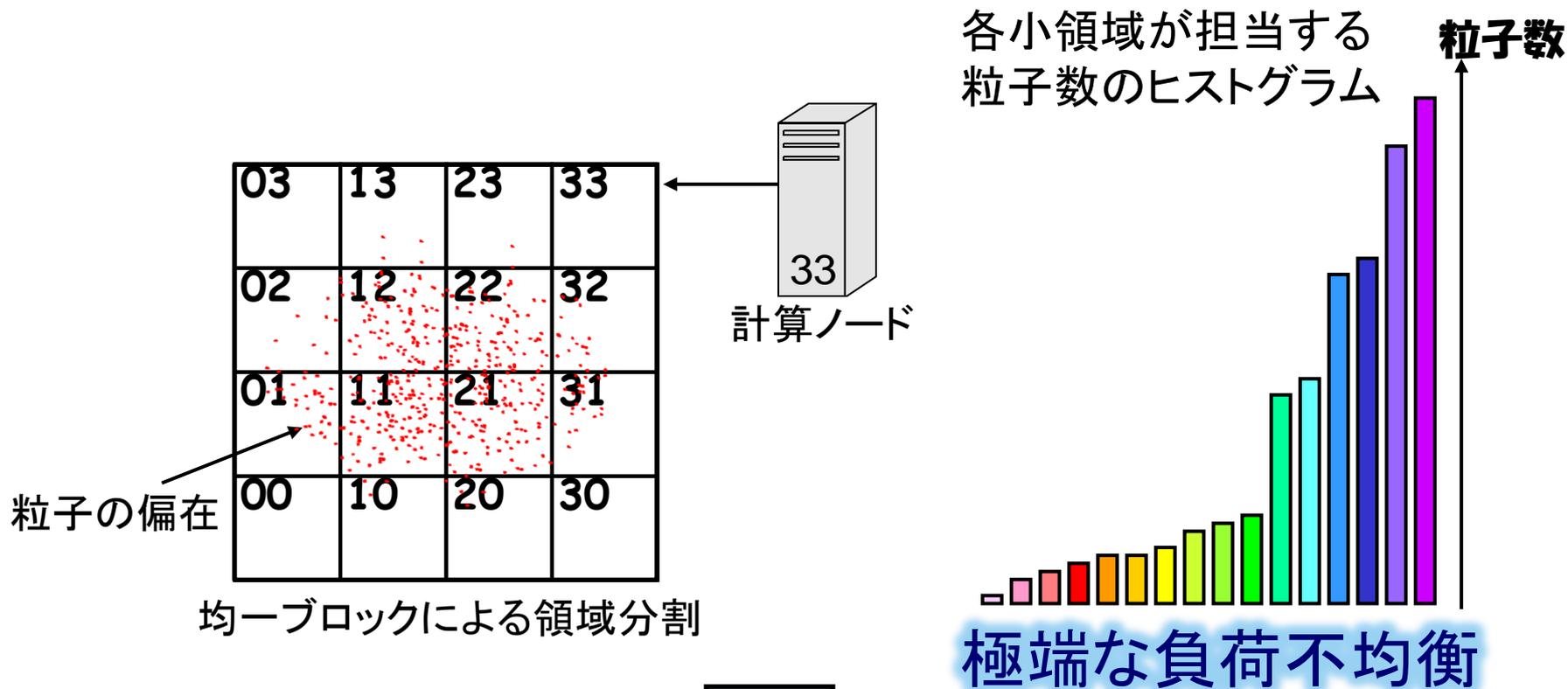
“Particle-in-Cell 宇宙プラズマシミュレーション”

一辺数100 gridの3次元空間 +  $10^{10}$  個の荷電粒子



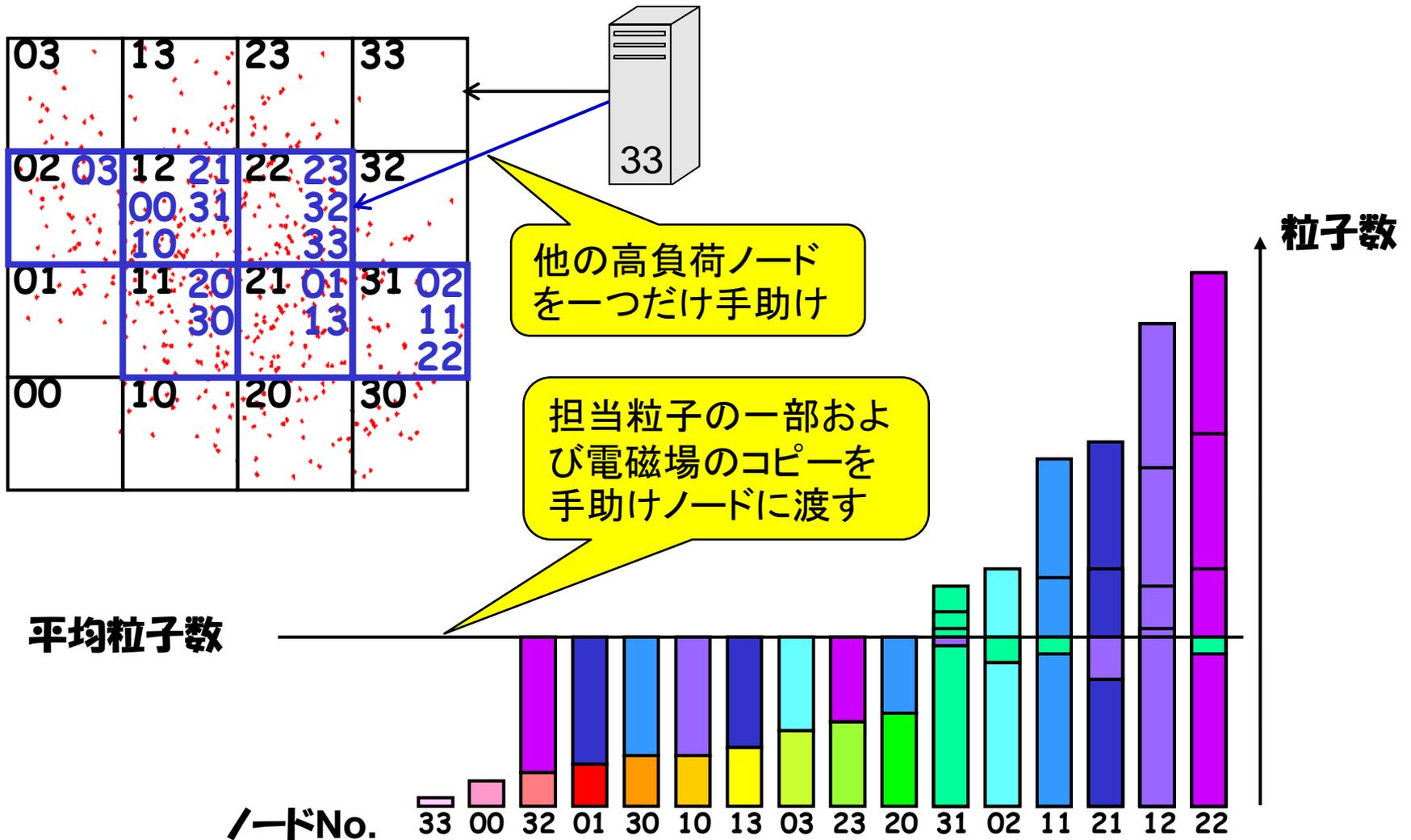
超並列 (分散メモリ型並列計算) 環境への対応が不可欠

# 領域分割方式に基づく粒子シミュレーションの並列化における負荷バランス問題



動的負荷分散の必要性

# OhHelp動的負荷分散機構

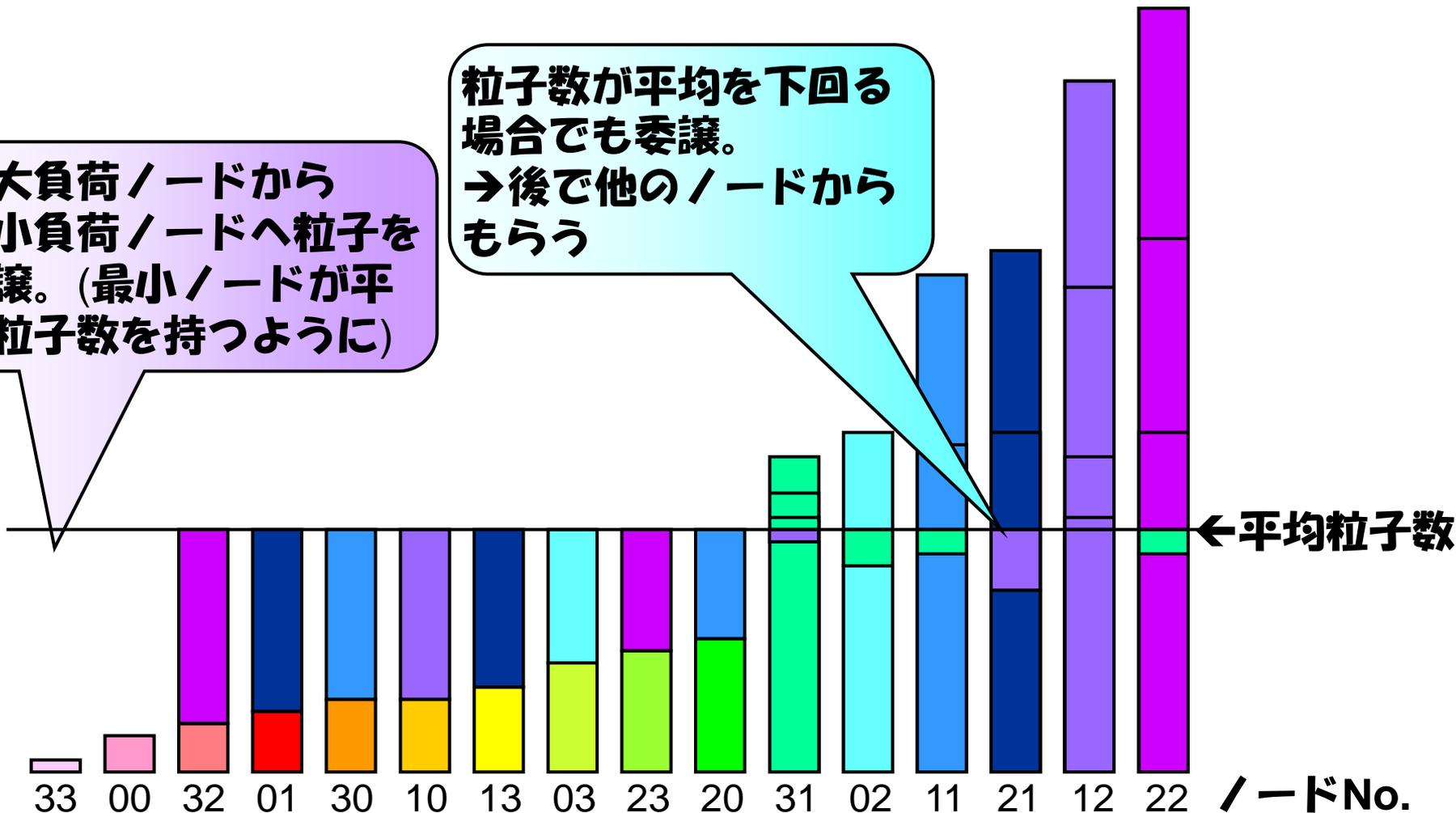


**担当粒子数と担当格子点数の双方の観点で負荷バランスを達成**

# 手助けノード割当アルゴリズム

最大負荷ノードから  
最小負荷ノードへ粒子を  
委譲。(最小ノードが平  
均粒子数を持つように)

粒子数が平均を下回る  
場合でも委譲。  
→後で他のノードから  
もらう

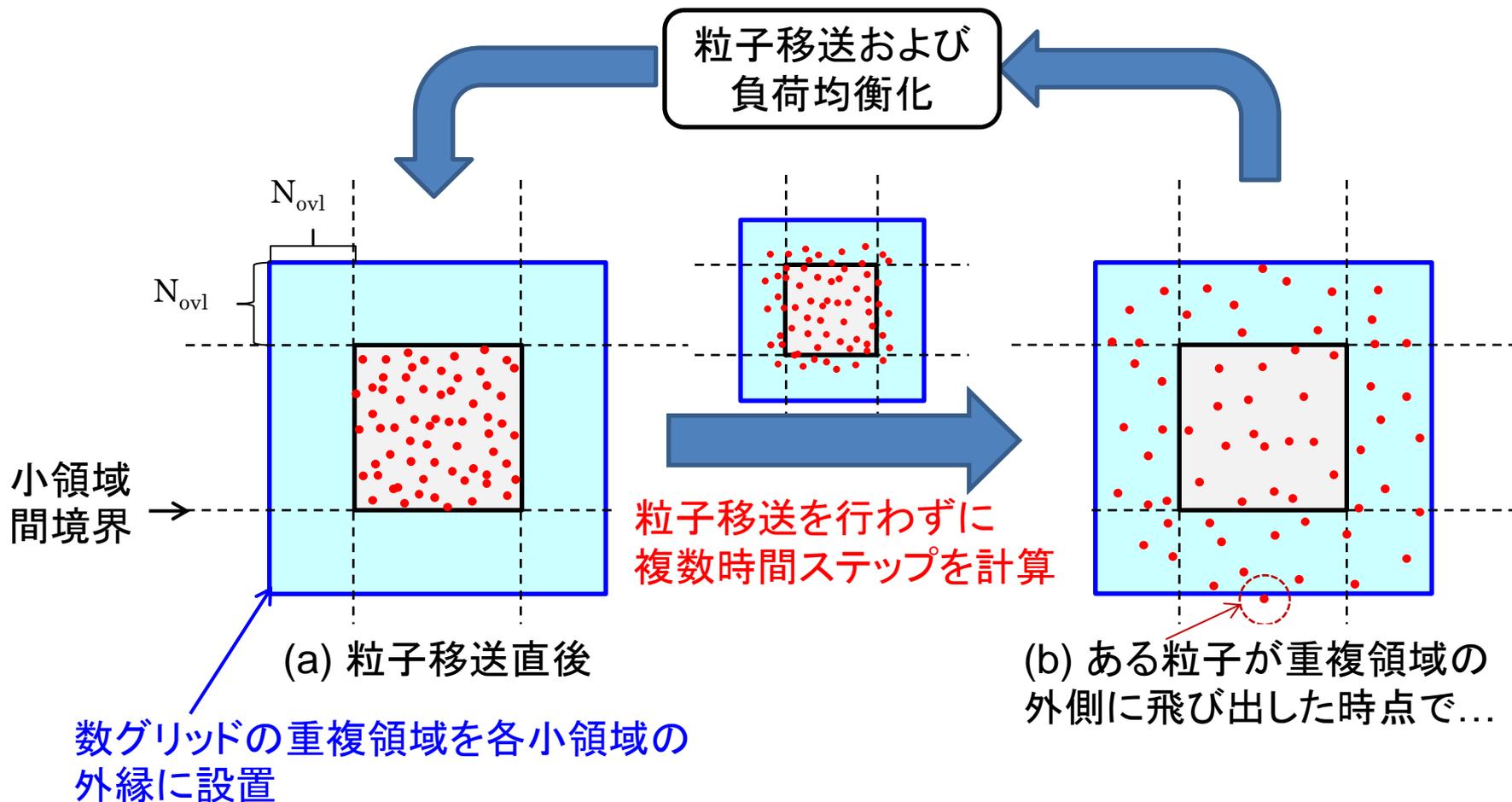


各ノードは高々1つだけ他のノードを手助けする。

→粒子数のみならず領域サイズ(格子点数)に関しても負荷均衡

# OhHelpオーバーヘッド削減のための最適化

## ➤隣接ノードとの重複領域の設定

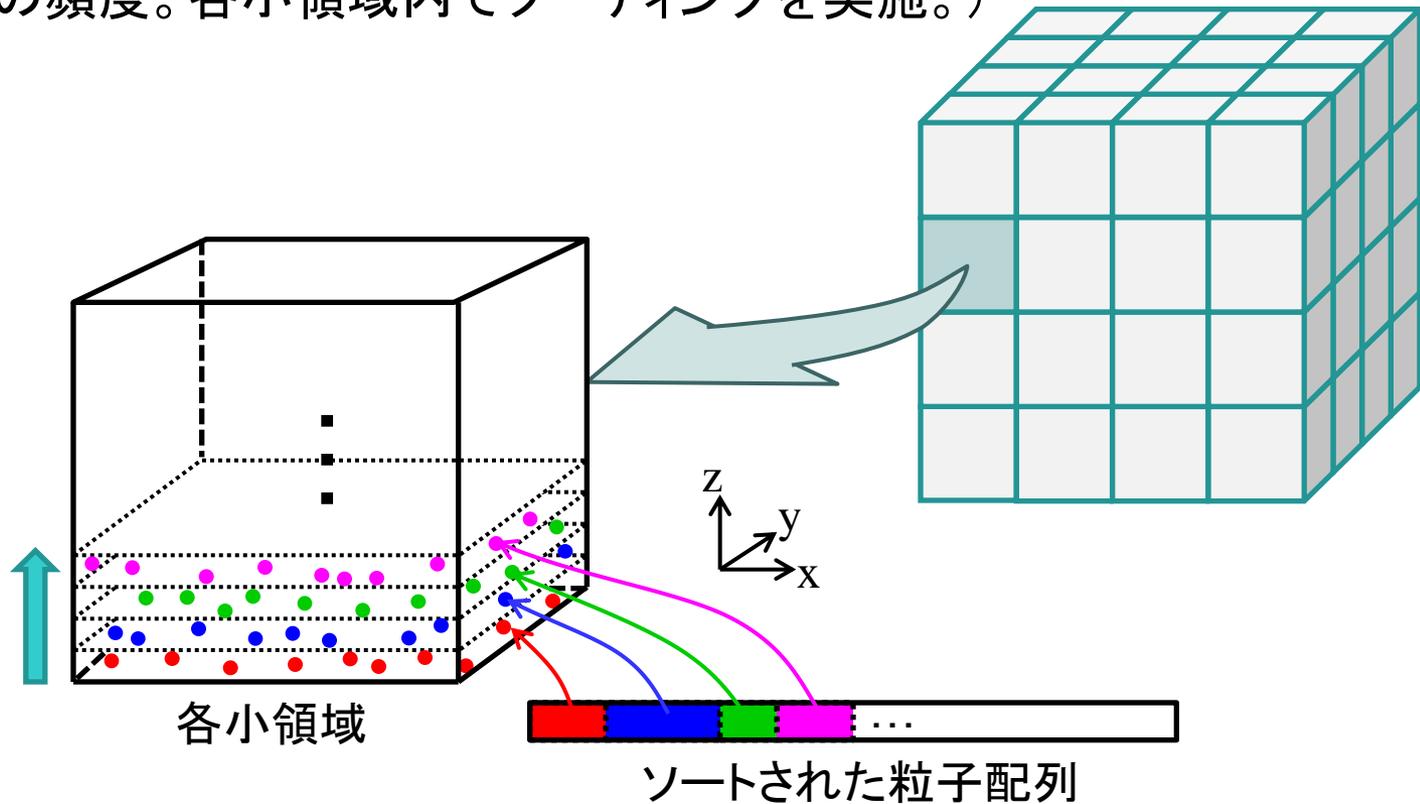


- 粒子移送・負荷均衡化の実施回数に比例するコストを削減
- プロセス間で移送される延べ粒子個数も削減可能

# その他の最適化

## ➤ 粒子配列のソーティング

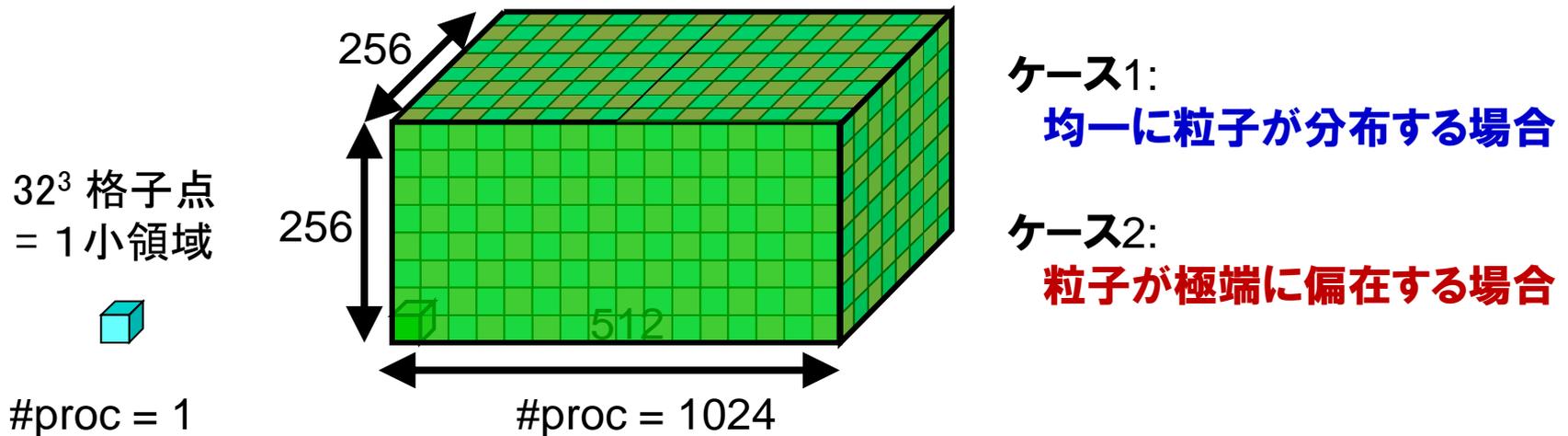
粒子のz座標を基準にして粒子配列をソーティング(数百時間ステップに1回程度の頻度。各小領域内でソーティングを実施。)



プラズマ電流計算や速度更新時におけるメモリ参照局所性を改善  
(キャッシュミス率の低減)

# OhHelp適用粒子コードの性能評価(1)

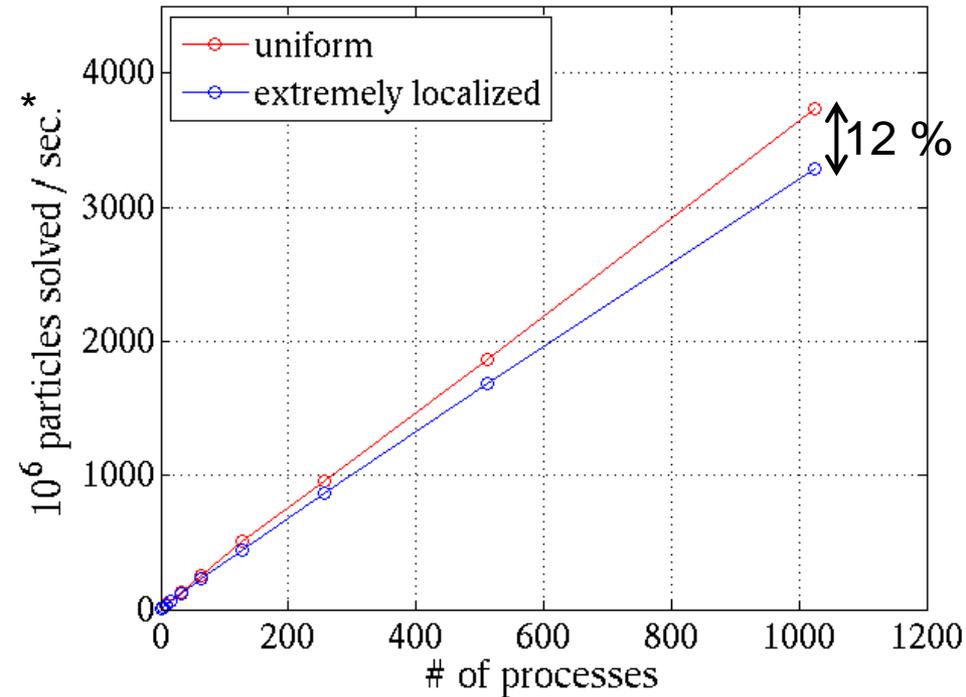
- weak scaling: 1 ~ 1024プロセス



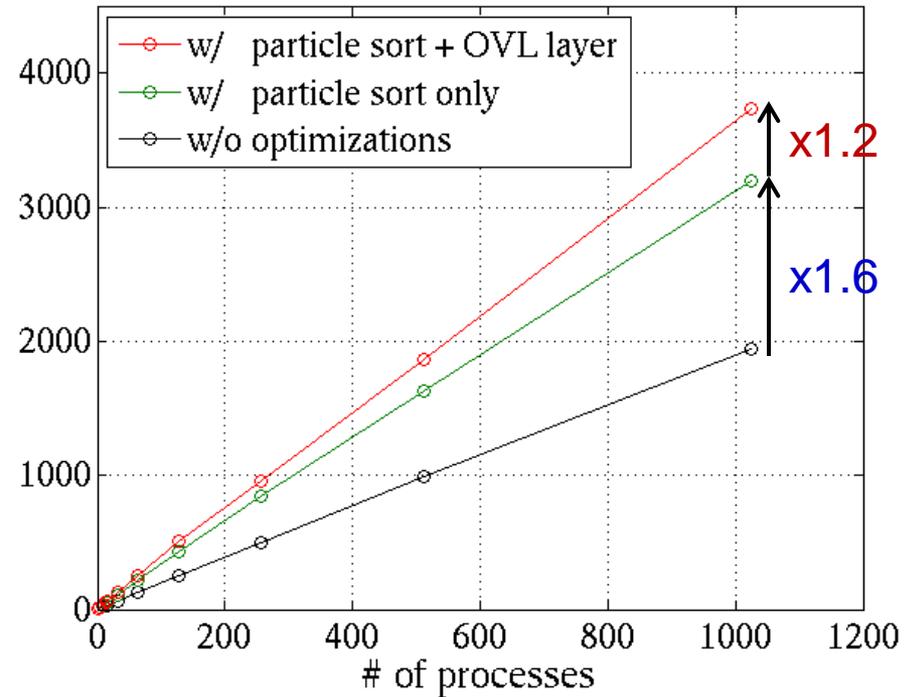
- Fujitsu HX600 supercomputer@名古屋大学を利用  
プロセッサ: Quad Core AMD Opteron  
1ノードあたりのプロセッサ(cores)数: 4 (16)  
1ノードあたりの主記憶サイズ: 64 GB

# OhHelp適用粒子コードの性能評価(2)

## シミュレータ性能



## 最適化の効果

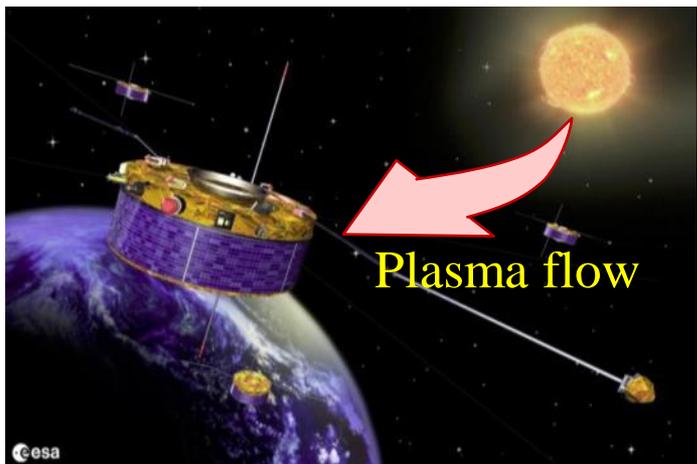


\*性能指標: 単位時間あたりの処理粒子数

- 1024並列においても良好なスケーラビリティ
- 均一粒子分布時と粒子偏在時の性能差はおよそ12 %  
(OhHelpが10%までの負荷不均衡を許容する設定になっているため)
- 重複領域および粒子ソーティング最適化により1.9倍の性能向上
- 実行効率は1024並列時でおよそ10 %

# 衛星プラズマ相互作用への応用

➤ 磁気圏対流プラズマにおける衛星ウェイク形成



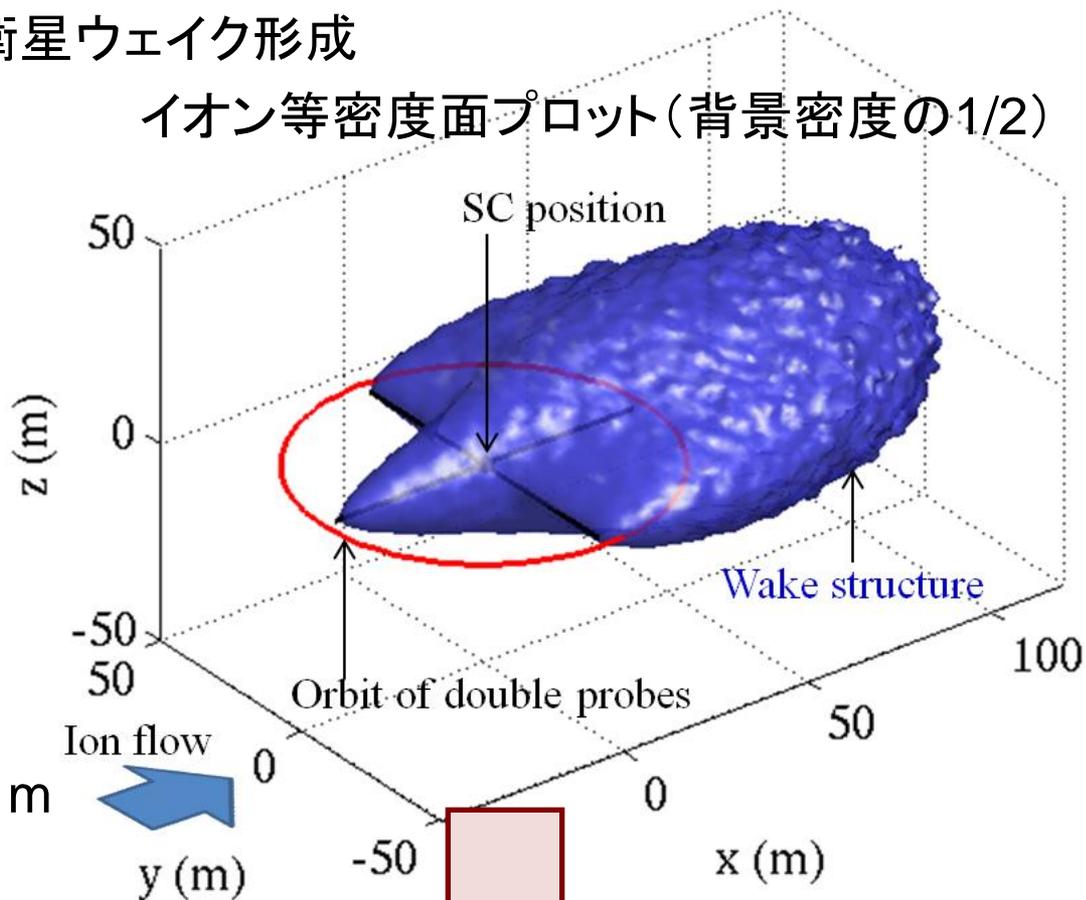
CLUSTER衛星

ウェイク空間スケール > 100 m  
衛星や光電子空間スケール ~ 1 m

問題サイズ

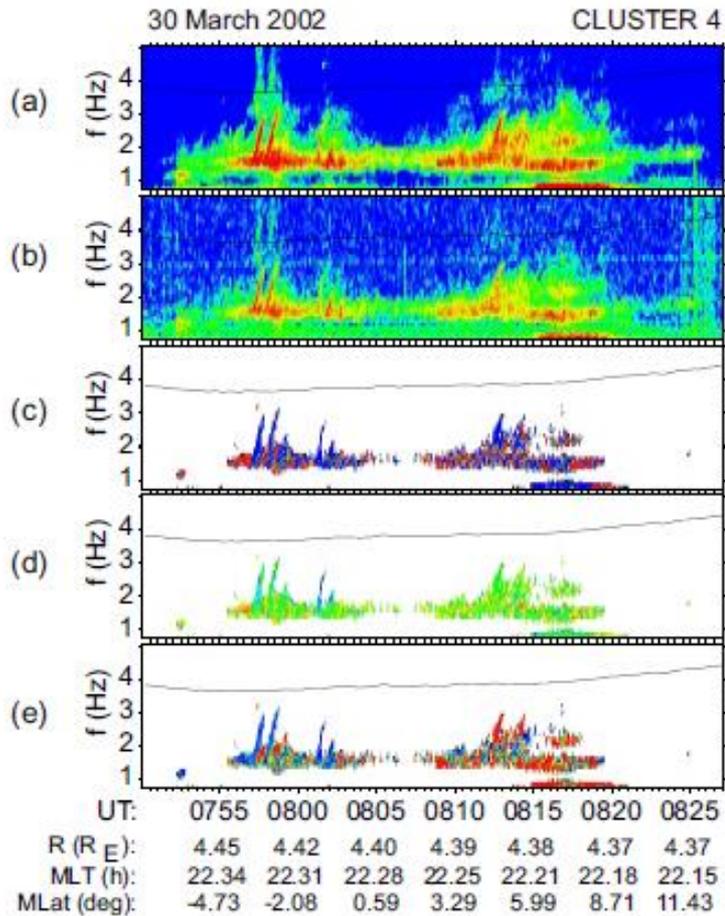
• 512x512x128 格子点  
• 3 億粒子  
→ ~ 1 TB

イオン等密度面プロット (背景密度の1/2)

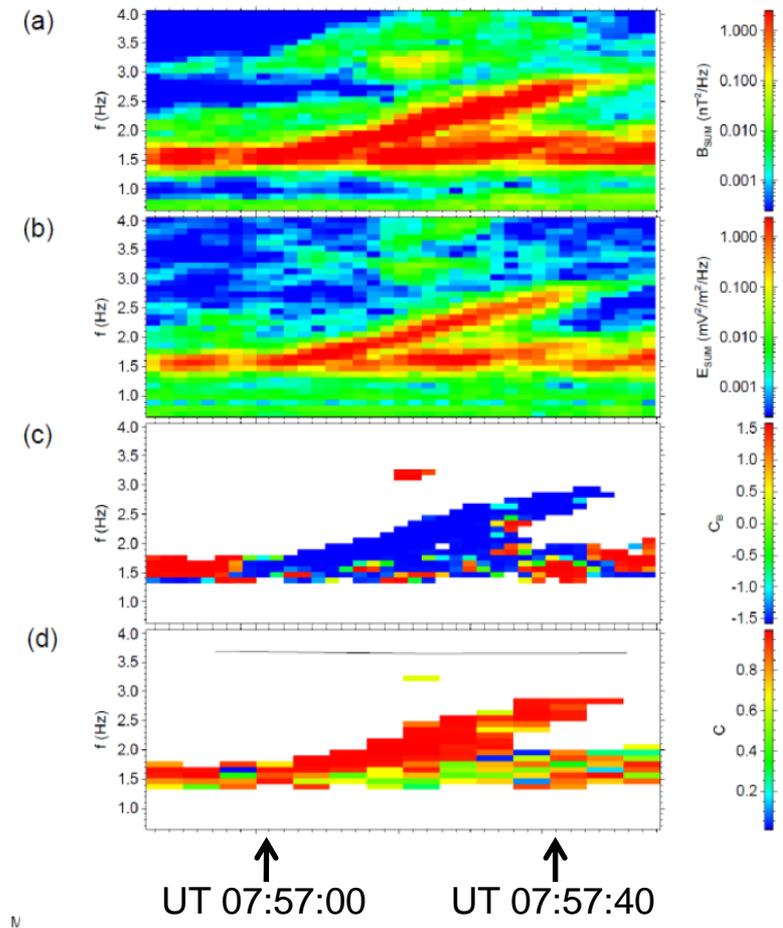


- 衛星帯電への影響
- ウェイク形成に起因するスプリアス電場形成メカニズムの解明

# 内部磁気圏におけるプラズマ波動の衛星観測



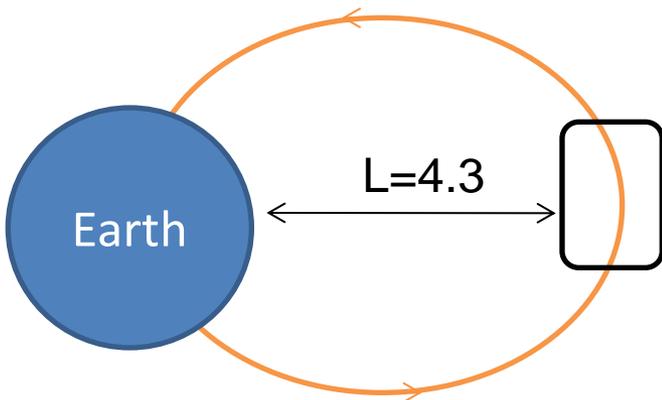
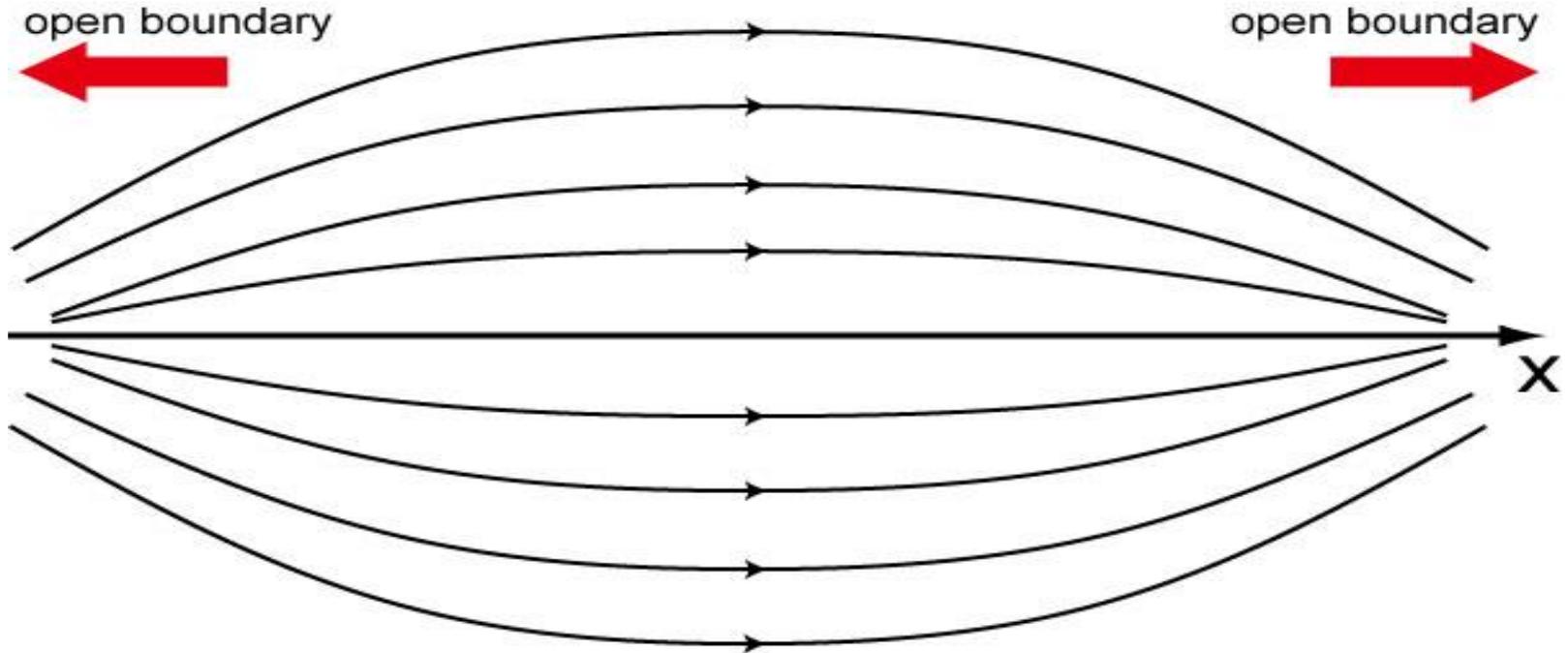
[Pickett et al., GRL, 2010]



[Omura et al., JGR, 2010]

# 内部磁気圏の波動粒子相互作用解析のためのシミュレーションモデル

$$\begin{cases} B_{0x} = B_{0eq}(1 + ax^2) \\ B_{0\perp} = -r_L/2 \, dB_{0x}/dx \end{cases}$$



We do NOT calculate

- the parallel motion of cold ions.
- $E_x$ ,  $J_x$  (longitudinal components).

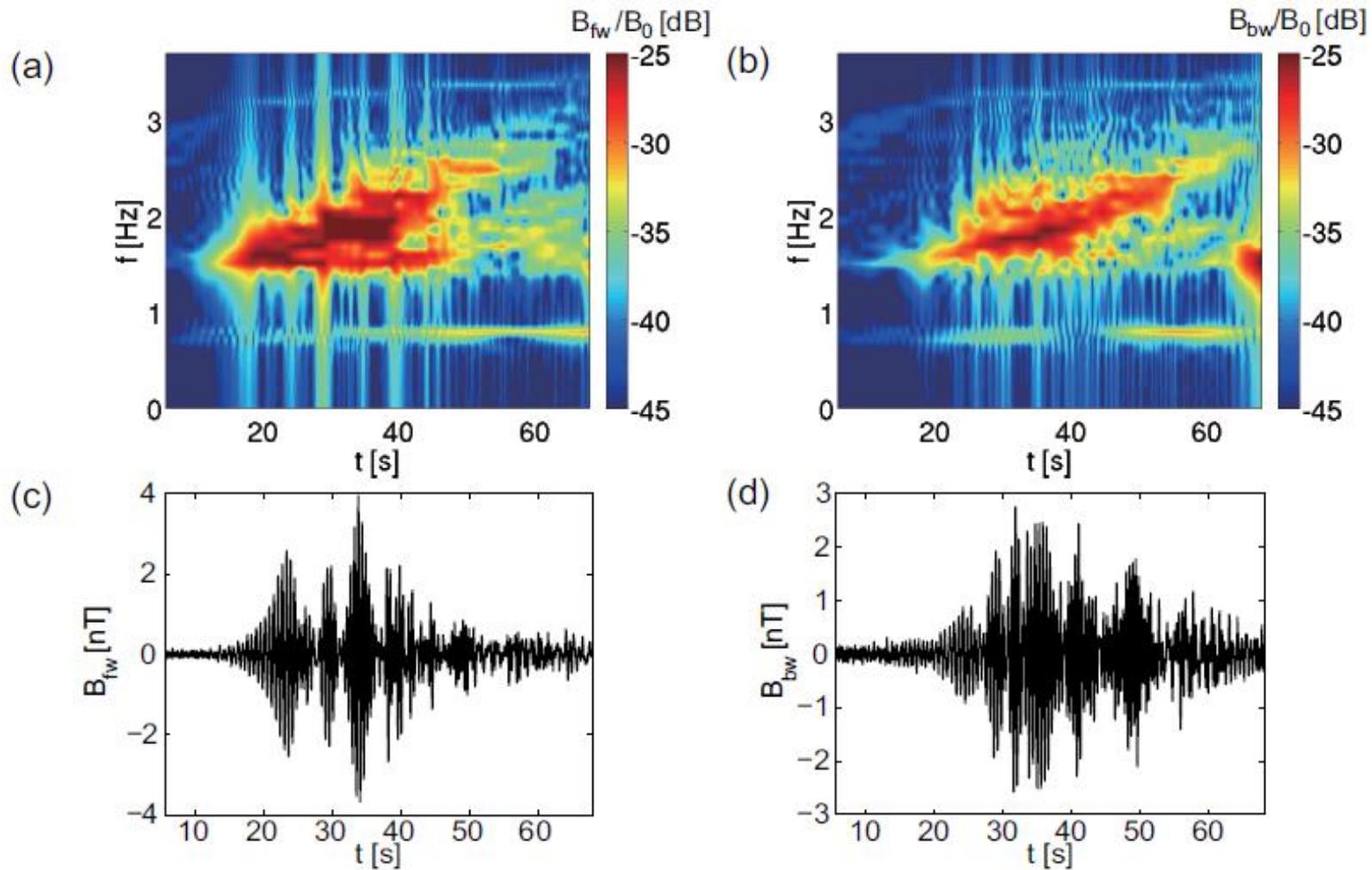
# シミュレーションパラメータ

ion species	$V_{th\parallel}/c$	$V_{th\perp}/c$	$n_i/n_e$	$q/m/(e/m_H)$	$N_p/\text{cell}$
H <sup>+</sup>	0	0	0.8019	1.0	256
He <sup>+</sup>	0	0	0.0950	1/4	256
O <sup>+</sup>	0	0	0.0950	1/16	256
energetic H <sup>+</sup>	0.002	0.00283	0.0405	1.0	16,384

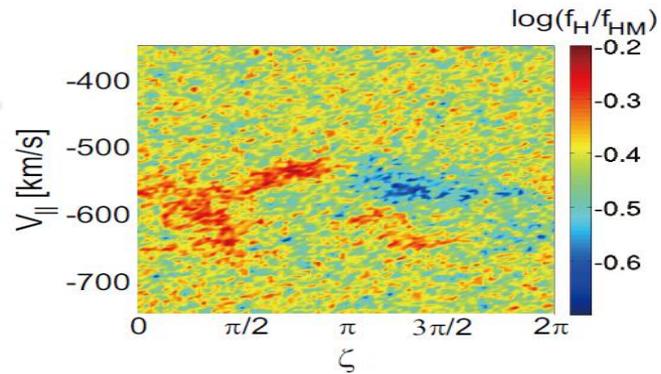
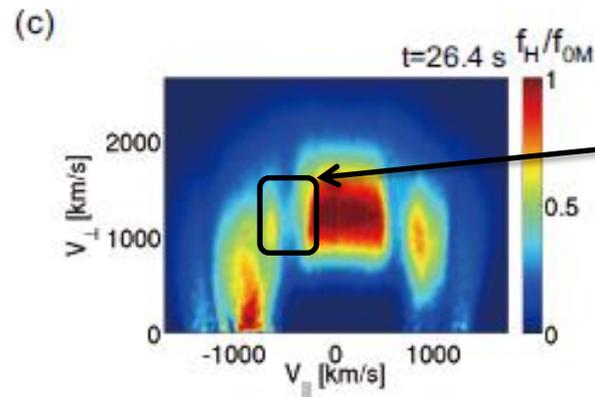
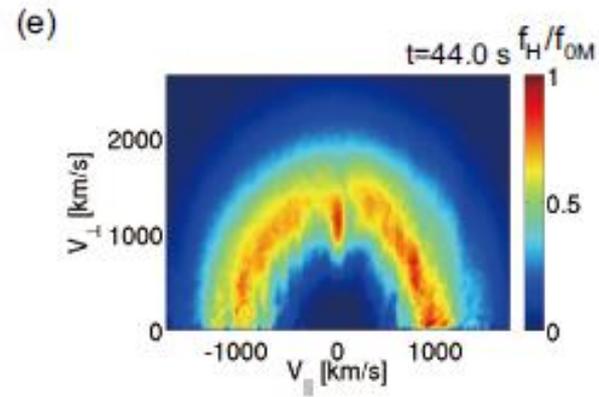
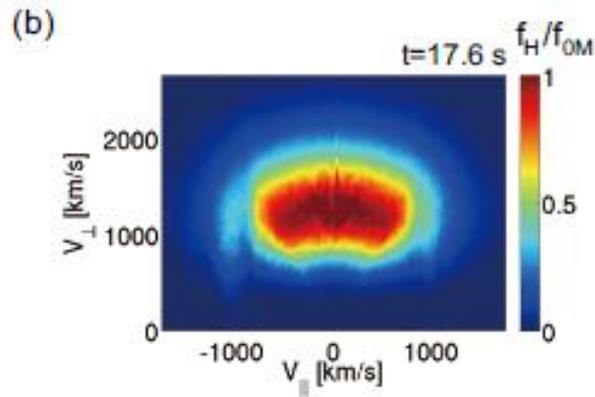
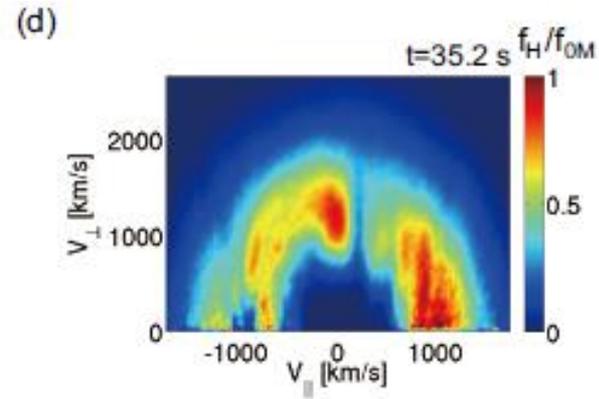
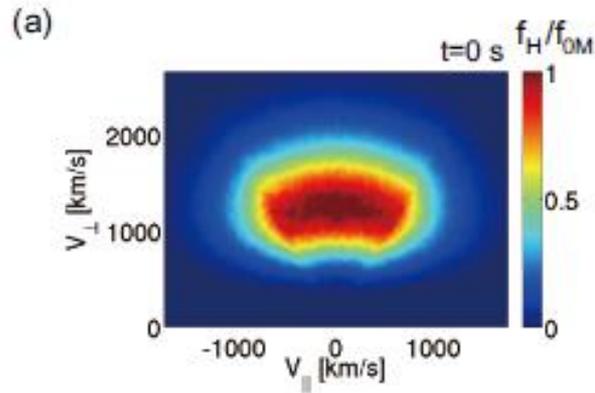
- The loss cone distribution is assumed for Hot H<sup>+</sup>
- The loss cone parameter beta=0.1
- The electron fluid is also assumed as cold fluid

Parameters	normalized value	real value
Number of grids $N_x$	4096	
Number of grids of damping region $N_{rx}$	1536	
Grid spacing $\Delta x$	$0.1V_A/\Omega_H$	1.9 km
Time step $\Delta t$	$0.004/\Omega_H$	$1.72 \times 10^{-4}$ s
Proton cyclotron frequency at the equator $f_H = \Omega_H/(2\pi)$	$1/(2\pi)$	3.7 Hz
Electron cyclotron frequency at the equator $f_e = \Omega_e/(2\pi)$	$1836 f_H$	6.8 kHz
Proton plasma frequency at the equator $f_{pH} = \Omega_{pH}/(2\pi)$	$95.5 f_H$	353.4 Hz
Electron plasma frequency at the equator $f_{pe}$	$339.8 f_e$	120.1 kHz
Ambient magnetic field at the equator $B_{0eq}$	1	243 nT
Alfven velocity at the equator $V_A$	1.0	443 km/s

# シミュレーションによる自発的なトリガード放射の再現



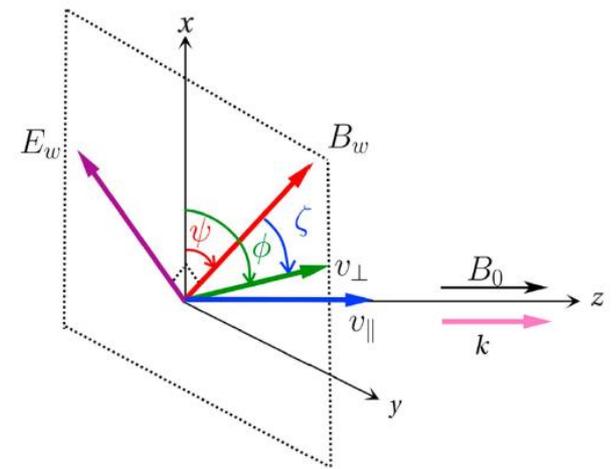
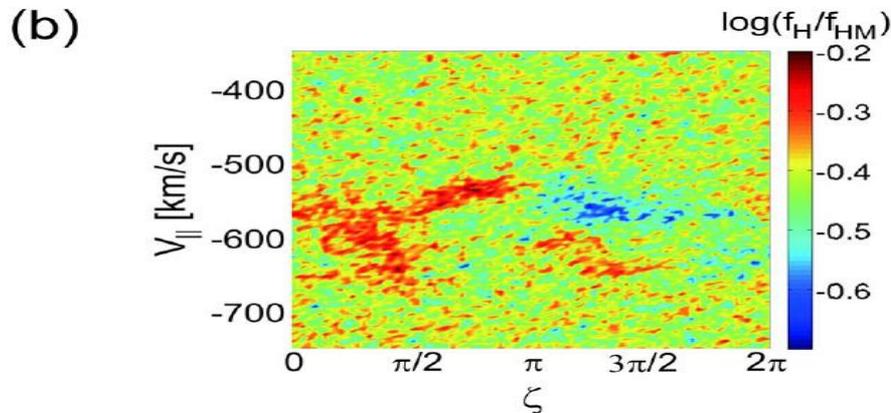
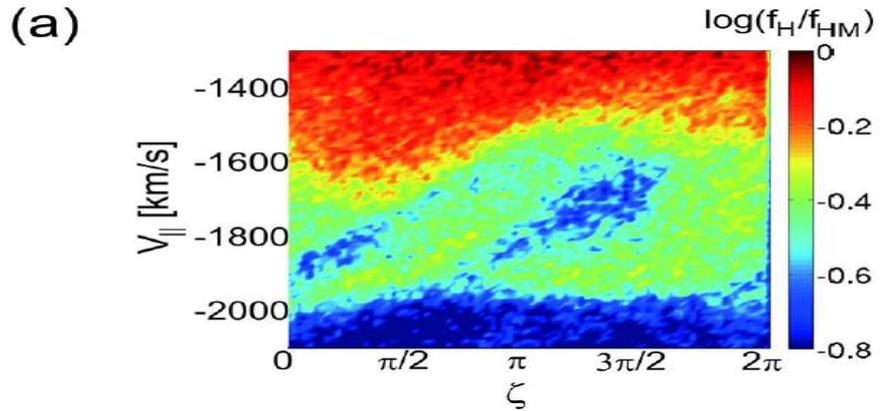
# イオンの速度分布関数の時間発展



# 波動と共鳴したイオンがつくる電流

$$\frac{d^2\zeta}{dt^2} = \omega_{ir}^2 (\sin \zeta + S), \quad \left( \frac{d\zeta}{dt} = -k(v_{\parallel} - V_R) \right)$$

$$S = \frac{1}{s_0 \omega \Omega_w} \left( s_1 \frac{\partial \omega}{\partial t} + V_p s_2 \frac{\partial \Omega_H}{\partial h} \right)$$



$S \sim 0 \rightarrow J_B$

$$c^2 k^2 - \omega \Pi_c = -\mu_0 c^2 k \frac{J_B}{B_w}$$

$$\omega = \omega_0 + \omega_1$$

$$\omega_1 = \frac{1}{2} \mu_0 V_g \frac{J_B}{B_w}$$

$0 < S < 1$  ( $S = 0.4$ )

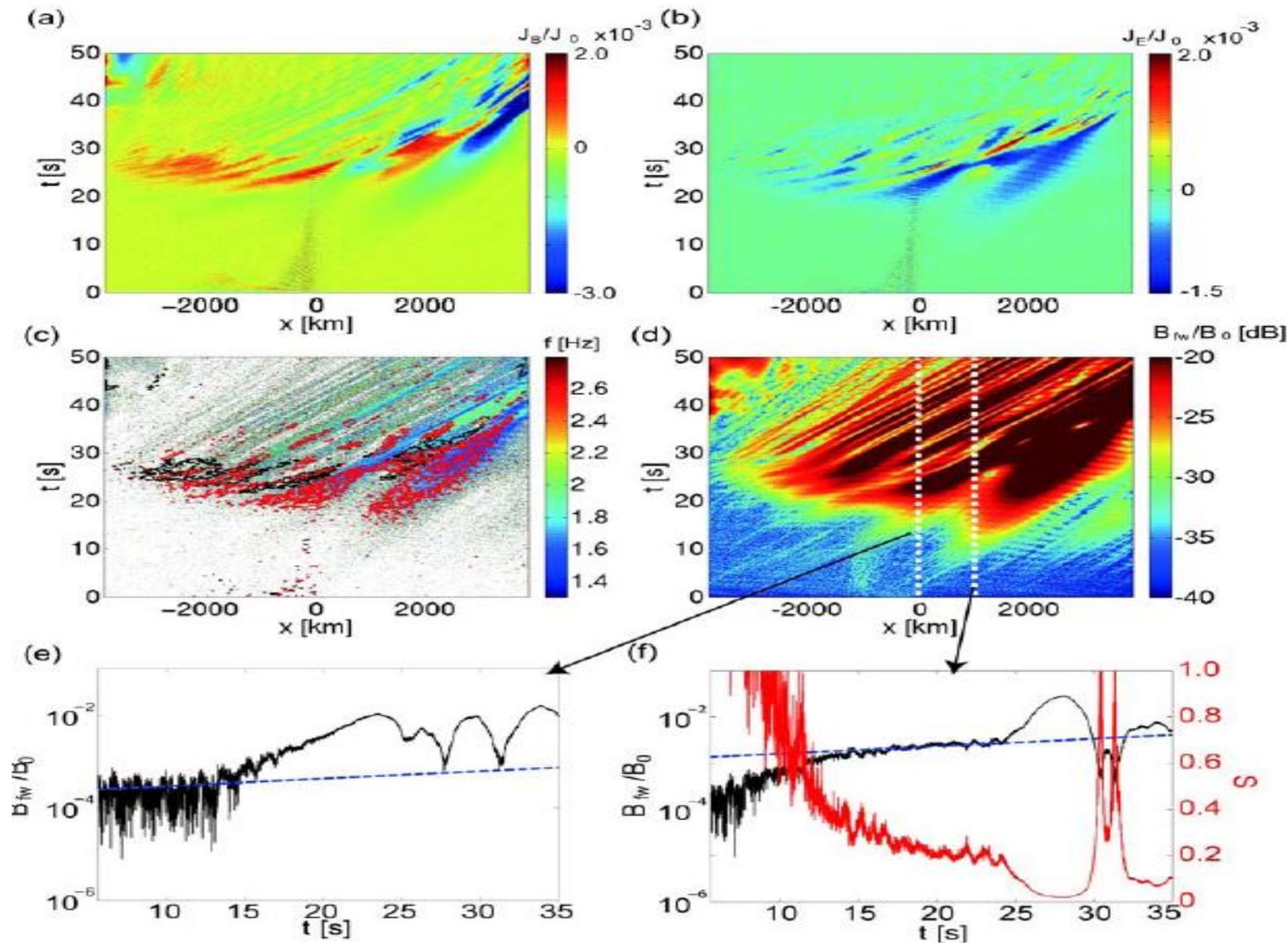
$\rightarrow J_E$

$$\frac{\partial B_w}{\partial t} + V_g \frac{\partial B_w}{\partial h} = -\frac{\mu_0 V_g}{2} J_E$$

# 共鳴電流による非線形な波動成長

$$c^2 k^2 - \omega \Pi_c = -\mu_0 c^2 k \frac{J_B}{B_w}$$

$$\frac{\partial B_w}{\partial t} + V_g \frac{\partial B_w}{\partial h} = -\frac{\mu_0 V_g}{2} J_E$$



## まとめ

- **衛星ウェイク環境におけるスプリアス電場特性の研究**
  - ✓ OhHelpによるPICコードの超並列化と性能評価
  - ✓ 3次元衛星プラズマ環境シミュレーションにより、衛星ウェイク形成を再現
- **電磁イオンサイクロトロン(EMIC)波による非線形波動粒子相互作用の研究**
  - ✓ リアルスケールシミュレーションによって、EMICトリガード放射を再現
  - ✓ 2種類の非線形共鳴電流による、周波数上昇を伴う励起過程を明らかにした。

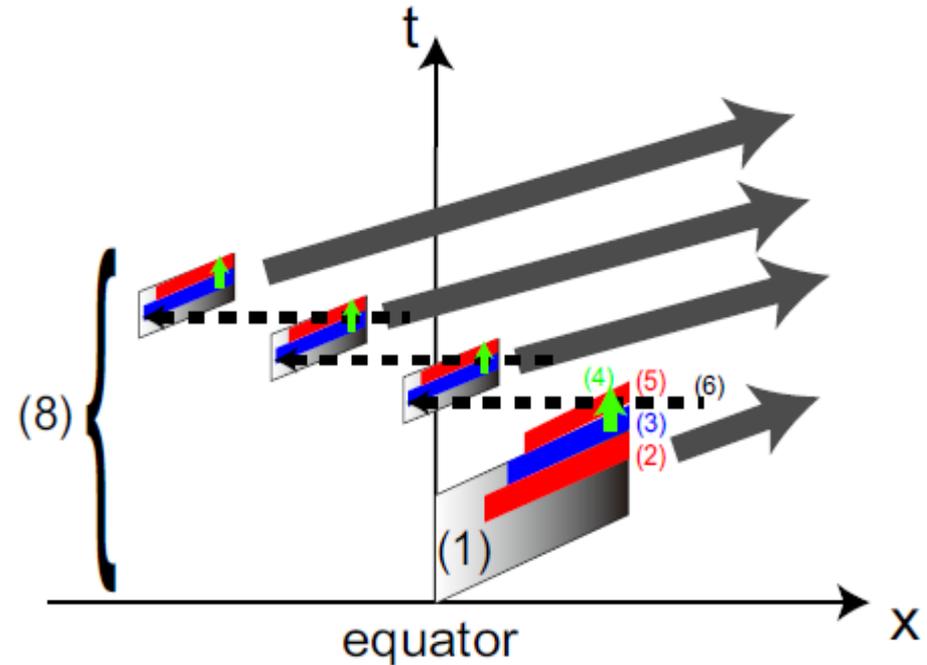
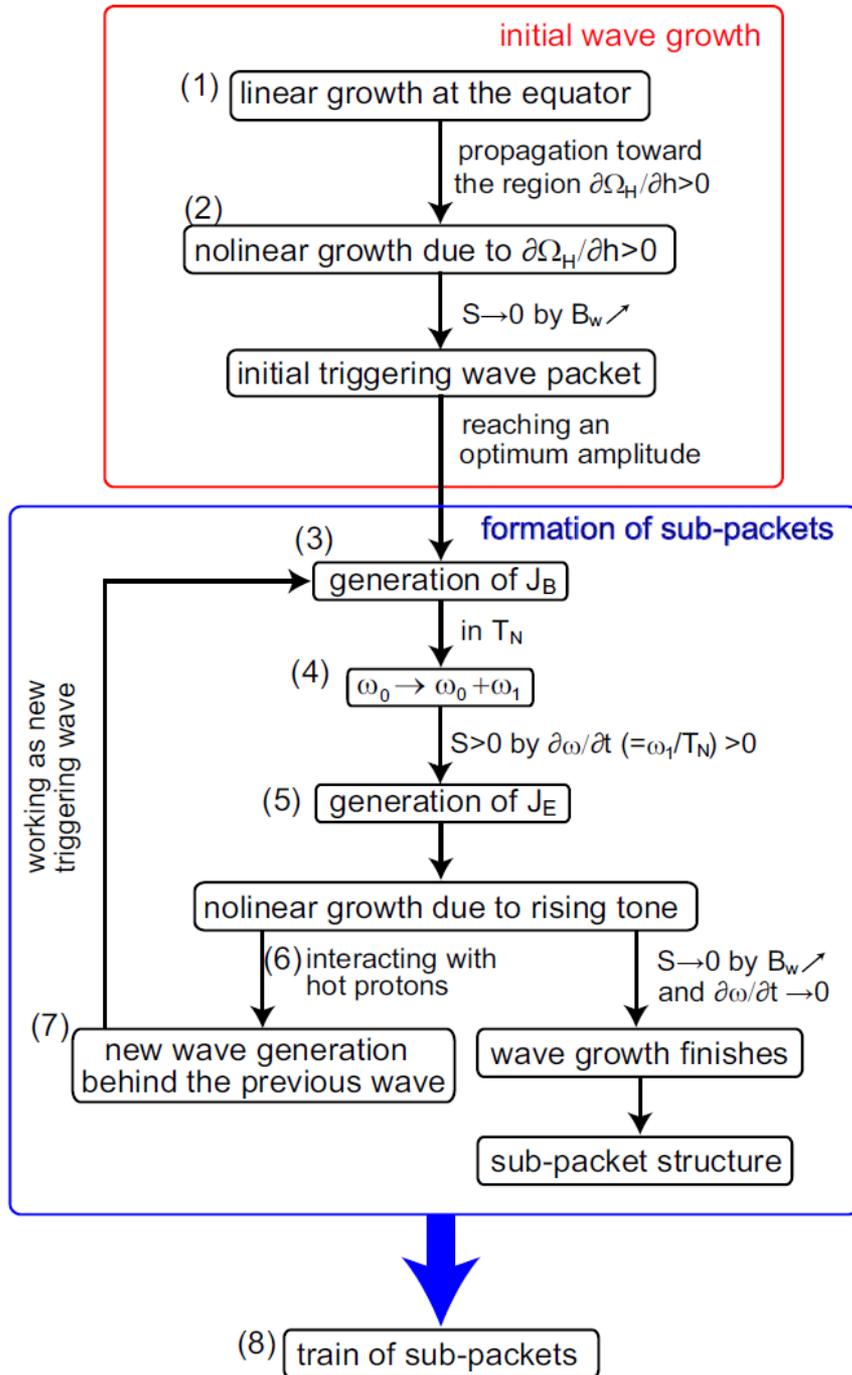


# Summary

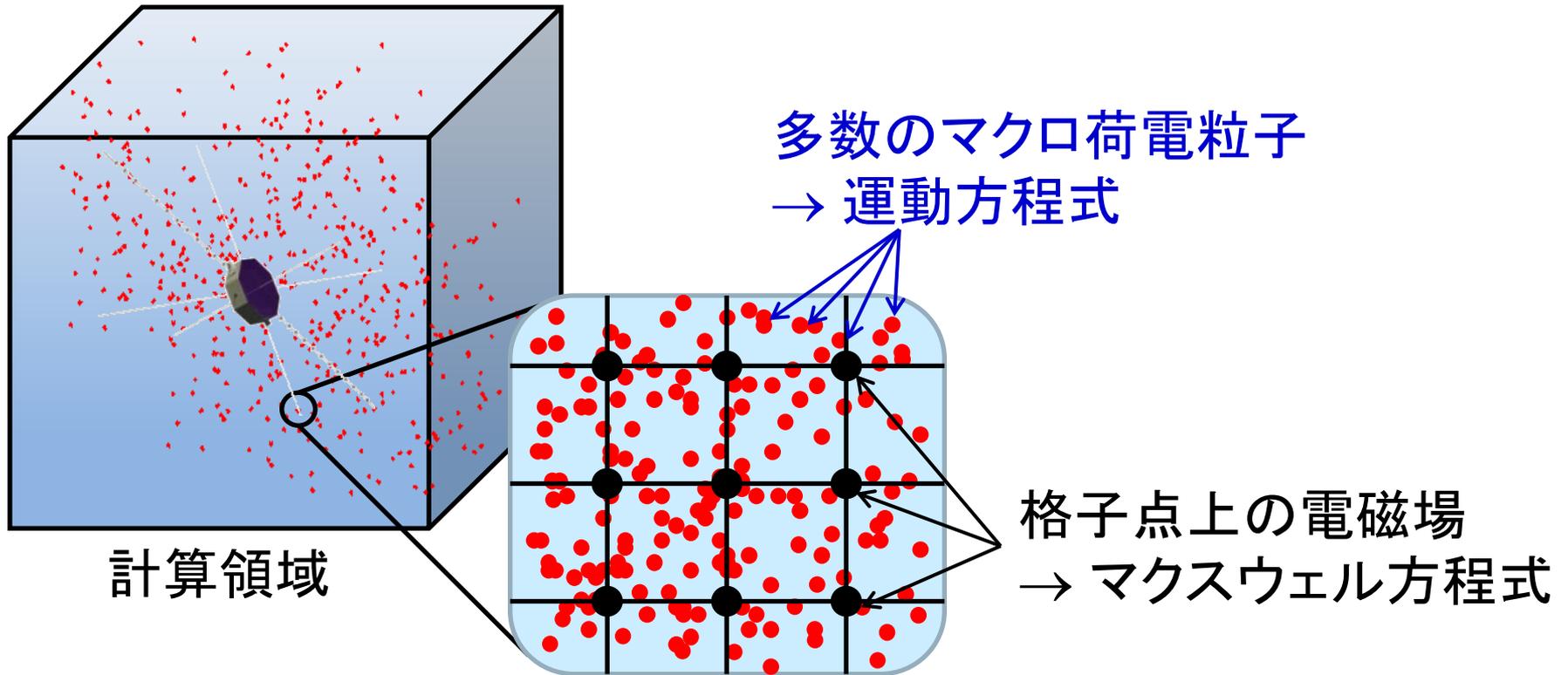
$$S = \frac{1}{s_0 \omega} \left( s_1 \frac{\partial \omega}{\partial t} + V_p s_2 \frac{\partial \Omega_H}{\partial h} \right)$$

$S \sim 0 \rightarrow J_B \rightarrow$  rising tone

$S \sim 0.4 \rightarrow J_E \rightarrow$  wave growth



# プラズマ粒子(Particle-in-cell)シミュレーション手法



A sort of P-M (particle-mesh) method  
Computational cost roughly scales as  $O(N_p)$ ,  $N_p$ : # of particle