第１回核燃焼プラズマ統合コード研究会
京都大学
2003/08/01

TASK コードにおける並列処理

福山　淳　（京大工）

TASK コードの並列化

- **TASK コード**
  - TASK/WR: 光線追跡法：光線毎：予定
  - TASK/FP: フォッカープランク方程式：磁気面毎：並列化
  - TASK/MW: ３次元波動解析：行列方程式：並列化
  - TASK/TR: 輸送解析：行列方程式：予定
  - TASK/EQ: 平衡解析：行列方程式：予定
- **手法**
  - MPI

研究室の計算機クラスター

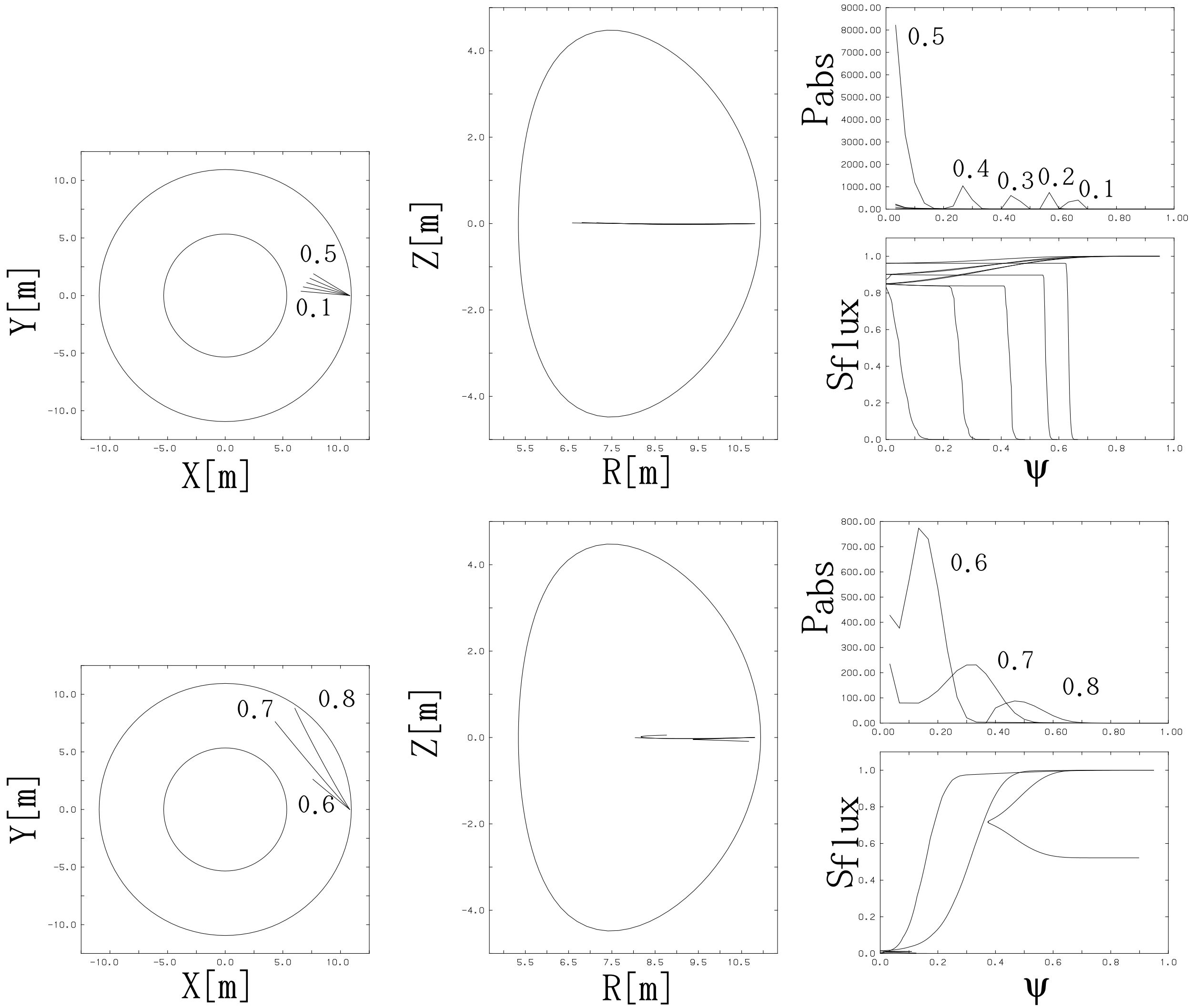
A	1997年8月	Intel Pentium II 266 MHz 256MB	8台	8 CPU
A’	1999年8月	Intel Pentium III 500MHz Dual 256MB	8台	16 CPU
B	2000年12月	Alpha 21264 600MHz 768MB	4台	4 CPU
C	2001年10月	Power Mac G4 867MHz 640MB	8台	10 CPU
D	2002年8月	Intel Xeon 2.2GHz 2GB Dual	16台	32 CPU

電子サイクロトロン波電流駆動における駆動電流分布

- **トカマクにおける電子サイクロトロン波による電流駆動**
  - 光線追跡法により波動伝播を解析し，波動電界の空間分布を求める
  - 波動電界の空間分布から各磁気面上での速度分布関数の時間発展を解析
  - 速度分布関数の変形から駆動電流密度を評価
- **各磁気面上で２次元フォッカープランク方程式を解く．**
  - 大型トカマクでは高速電子の空間拡散の影響は小さいので，
    各磁気面上の速度分布関数の時間発展は独立

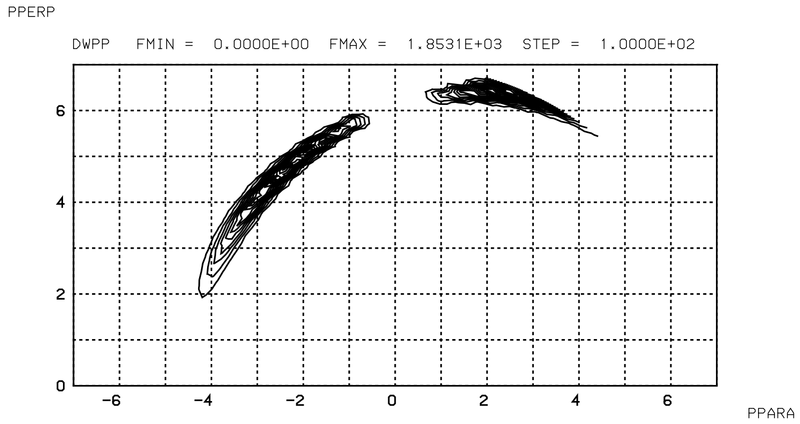
電子サイクロトロン波電流駆動の波動伝播解析

- $f = 200\,\mathrm{GHz}$ の場合の伝播軌跡，吸収パワー分布のトロイダル方向屈折率依存性

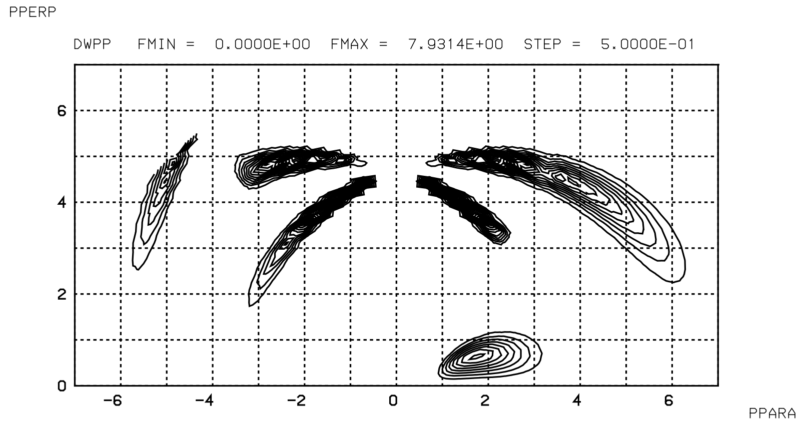


電子サイクロトロン波電流駆動の速度分布

- $f = 200\,\mathrm{GHz},\ N_\phi = 0.2,\ r = 0.05\,\mathrm{m}$ と $r = 1.5\,\mathrm{m}$ における速度拡散係数

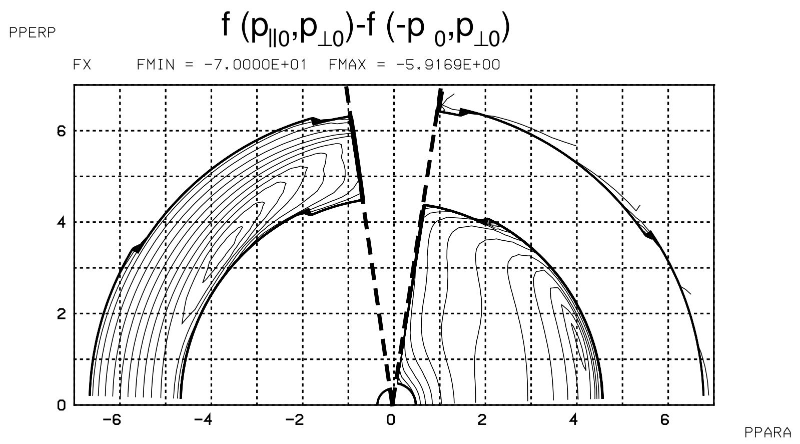


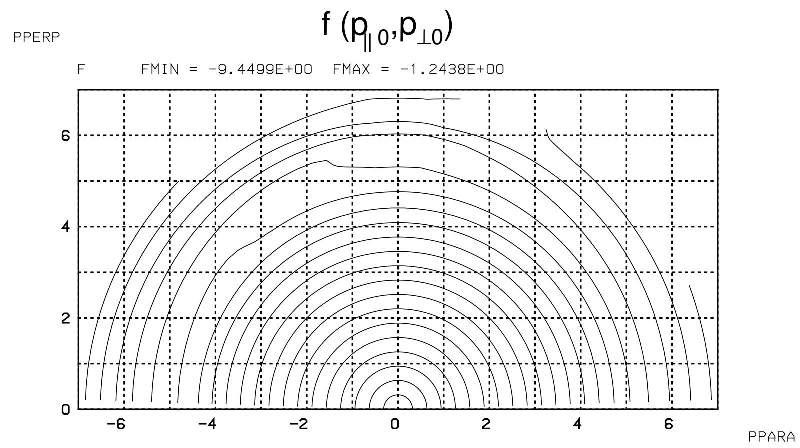
r=0.05 m



r=1.5 m

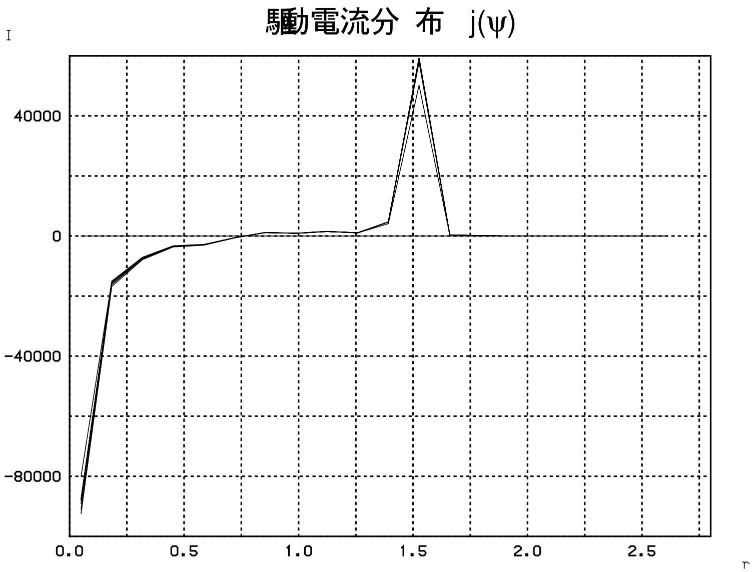
- $f = 200\,\mathrm{GHz},\ N_\phi = 0.2,\ r = 0.05\,\mathrm{m}$ における速度分布（非対称成分，対称成分）

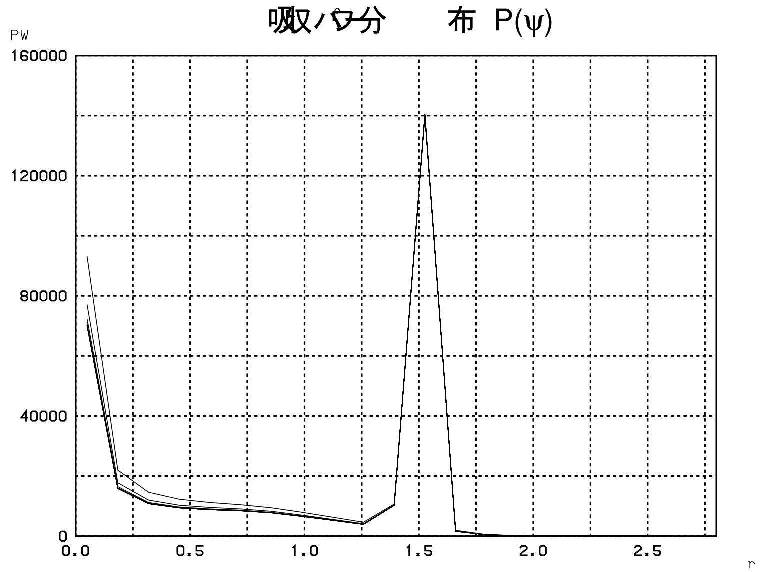




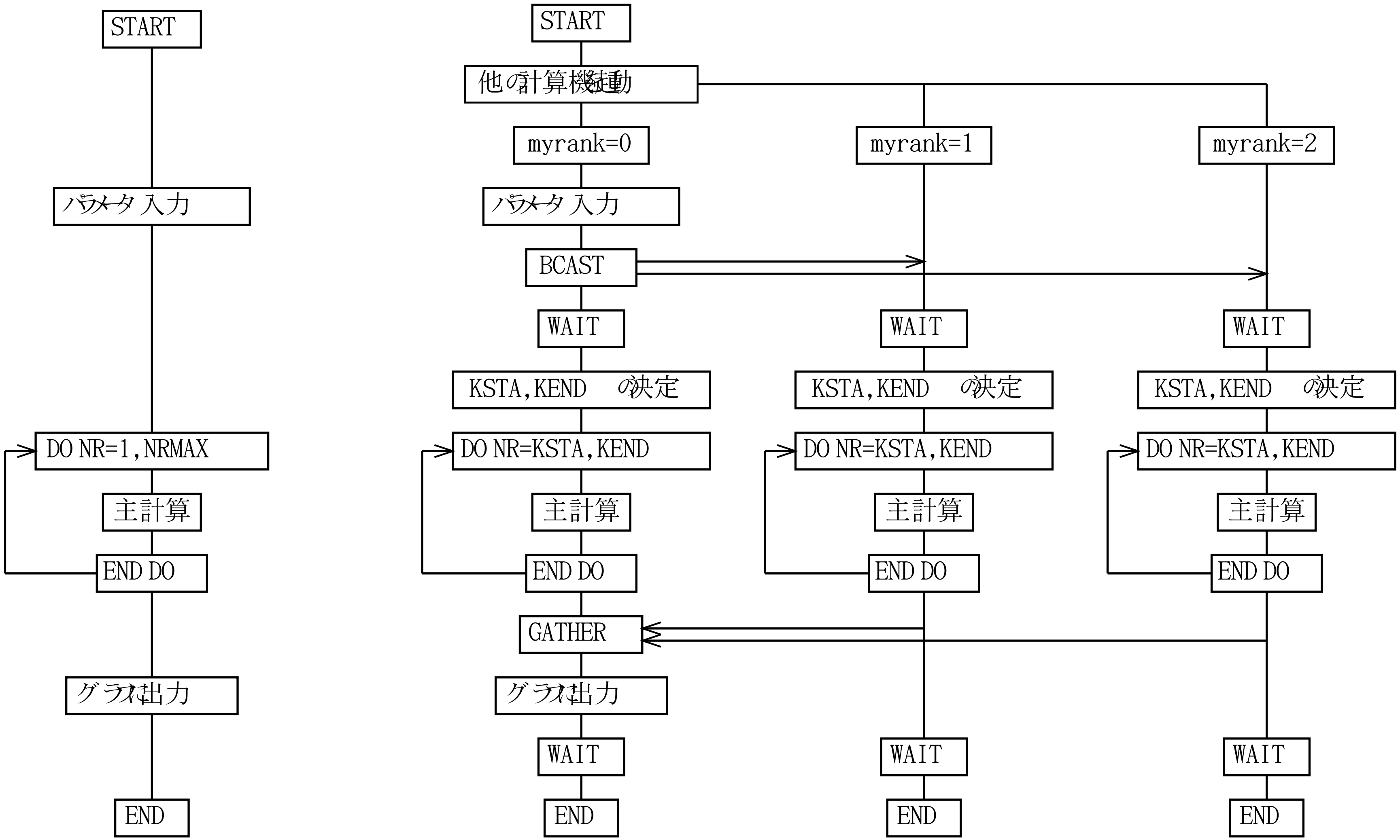
電子サイクロトロン波電流駆動の駆動電流分布

- $f = 200\,\mathrm{GHz},\ N_\phi = 0.2$ における吸収パワー密度と駆動電流密度の半径方向分布



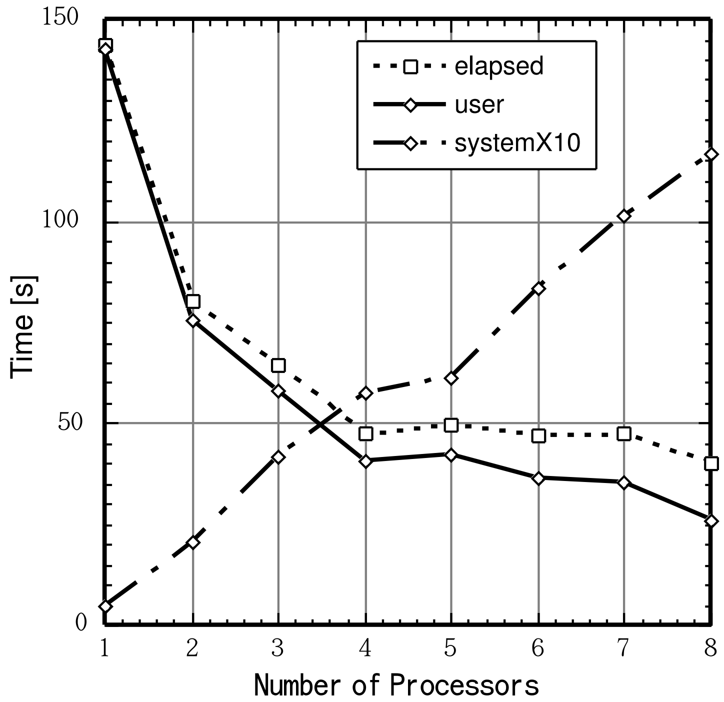


電子サイクロトロン波電流駆動における駆動電流分布：流れ図



電子サイクロトロン波電流駆動解析における並列化

- **16 枚の磁気面上で速度分布の時間発展を計算**



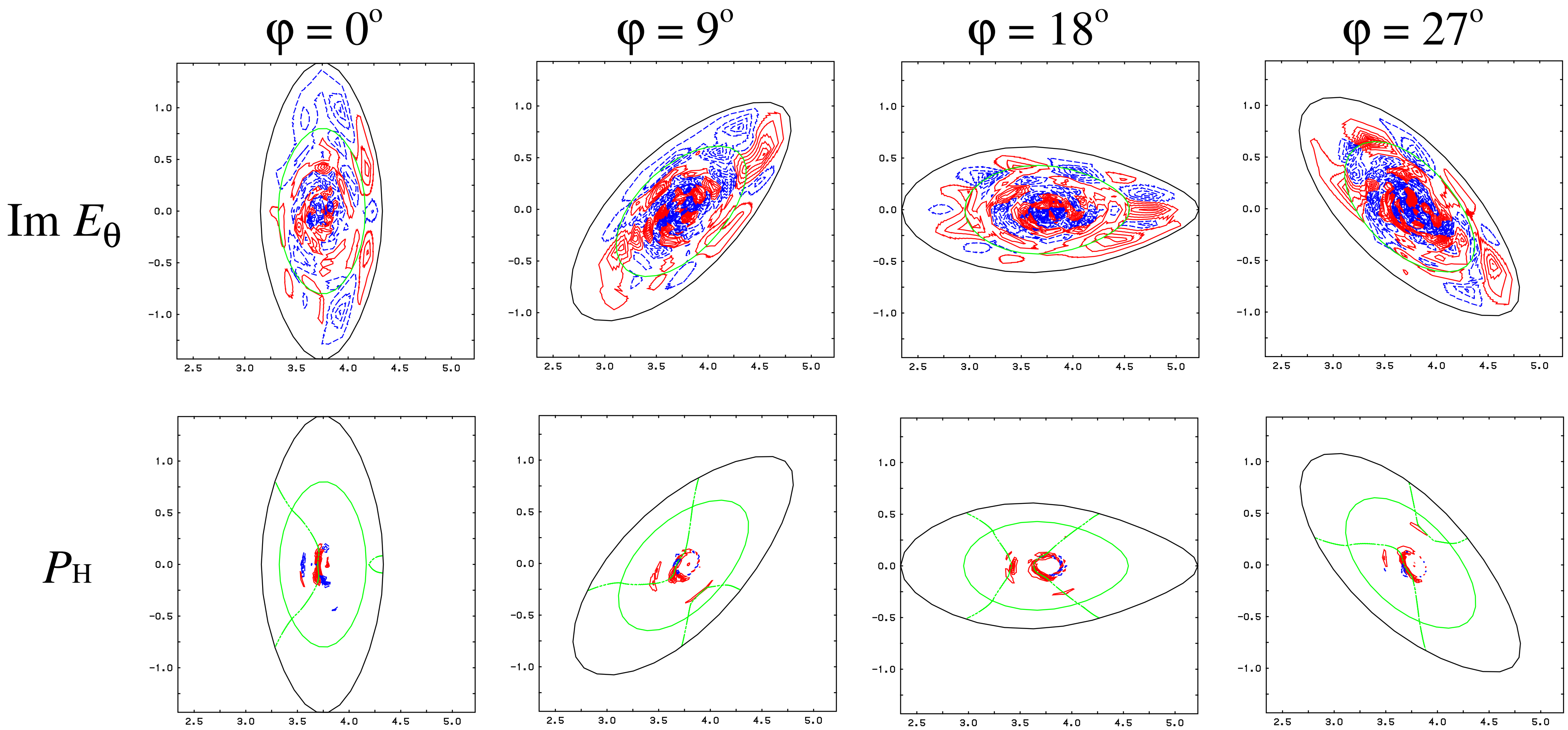
- **8 台の計算機：経過時間で約 3.6 倍の高速化**
  - 並列化されていない部分の割合がやや高い
  - データ転送量は 1 磁気面あたり 80kB

イオンサイクロトロン波の３次元伝播解析

- **トロイダルプラズマにおけるイオンサイクロトロン波の伝播解析**
- マクスウェル方程式を３次元境界値問題として解く
- **複素非対称行列方程式の並列化**
  - **直接法**（ガウスの消去法，LU 分解）
    - — データの依存関係：１行ずつ処理（前進消去・後退代入）
    - — 列毎の並列化：共有メモリ型
  - **反復法**（SOR 法，共役勾配法）
    - — データの依存関係弱い：分散メモリ型
    - — 収束遅い
  - **前処理つき反復法**（ILUCG 法，ILUBCG 法）
    - — 前処理（不完全 LU 分解）にデータの依存関係
    - — 収束速い

イオンサイクロトロン波の３次元伝播解析

- **LHD** $(R_0 = 3.9\,\mathrm{m},\ B_0 = 3.75\,\mathrm{T},\ f = 50\,\mathrm{MHz})$



前処理付き双共役勾配法 (ILUBCG) の並列化

- **不完全 LU 分解による前処理に現れるデータの依存関係を一部省略**
- ILUBCG 法

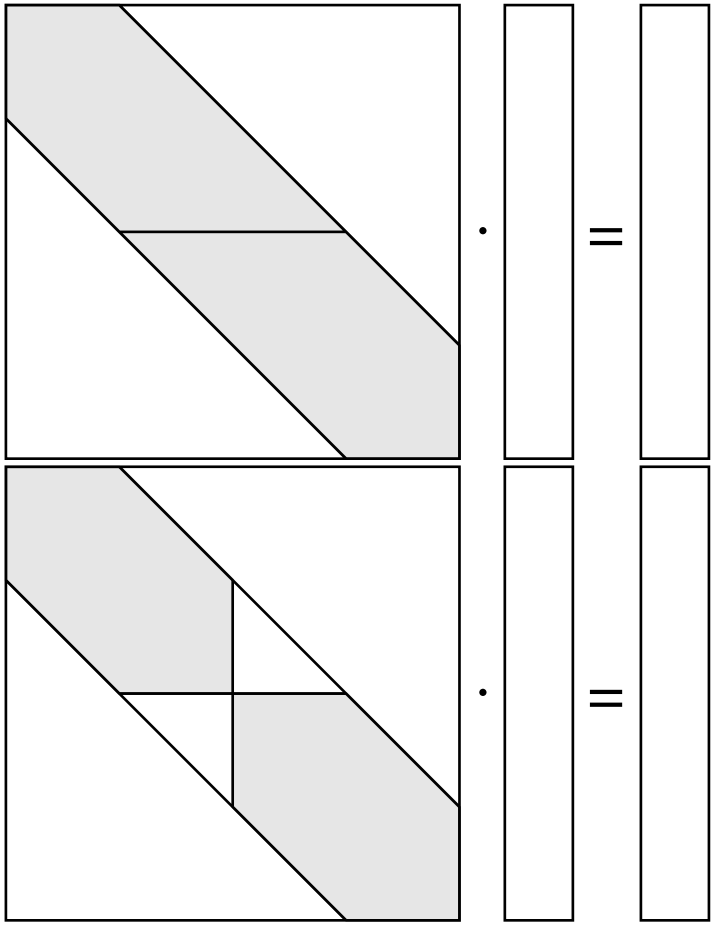
$$A \cdot \boldsymbol{x} = \boldsymbol{b}, \qquad A^T \cdot \boldsymbol{x}^* = \boldsymbol{b}^*$$

- アルゴリズム

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{r}_0 &= \boldsymbol{r}_0^* = C^{-1} \cdot (\boldsymbol{b} - A \cdot \boldsymbol{x}_0) \\
\boldsymbol{p}_0 &= \boldsymbol{p}_0^* = \boldsymbol{r}_0 \\
k &= 0 \\
\text{while } |\boldsymbol{r}_k| &\geq \epsilon |\boldsymbol{b}| \\
\alpha_k &= (\boldsymbol{r}_k^* \cdot \boldsymbol{r}_k)/(\boldsymbol{p}_k^* \cdot C^{-1} \cdot A \cdot \boldsymbol{p}_k) \\
\boldsymbol{x}_{k+1} &= \boldsymbol{x}_k + \alpha_k \boldsymbol{p}_k \\
\boldsymbol{r}_{k+1} &= \boldsymbol{r}_k - \alpha_k (C^{-1} \cdot A) \cdot \boldsymbol{p}_k \\
\boldsymbol{r}_{k+1}^* &= \boldsymbol{r}_k^* - \alpha_k (C^{-1} \cdot A)^T \cdot \boldsymbol{p}_k^* \\
\beta_k &= (\boldsymbol{r}_{k+1}^* \cdot \boldsymbol{r}_{k+1})/(\boldsymbol{p}_k^* \cdot \boldsymbol{p}_k) \\
\boldsymbol{p}_{k+1} &= \boldsymbol{r}_{k+1} + \beta_k \boldsymbol{p}_k \\
\boldsymbol{p}_{k+1}^* &= \boldsymbol{r}_{k+1}^* + \beta_k \boldsymbol{p}_k^* \\
k &= k + 1
\end{aligned}
$$

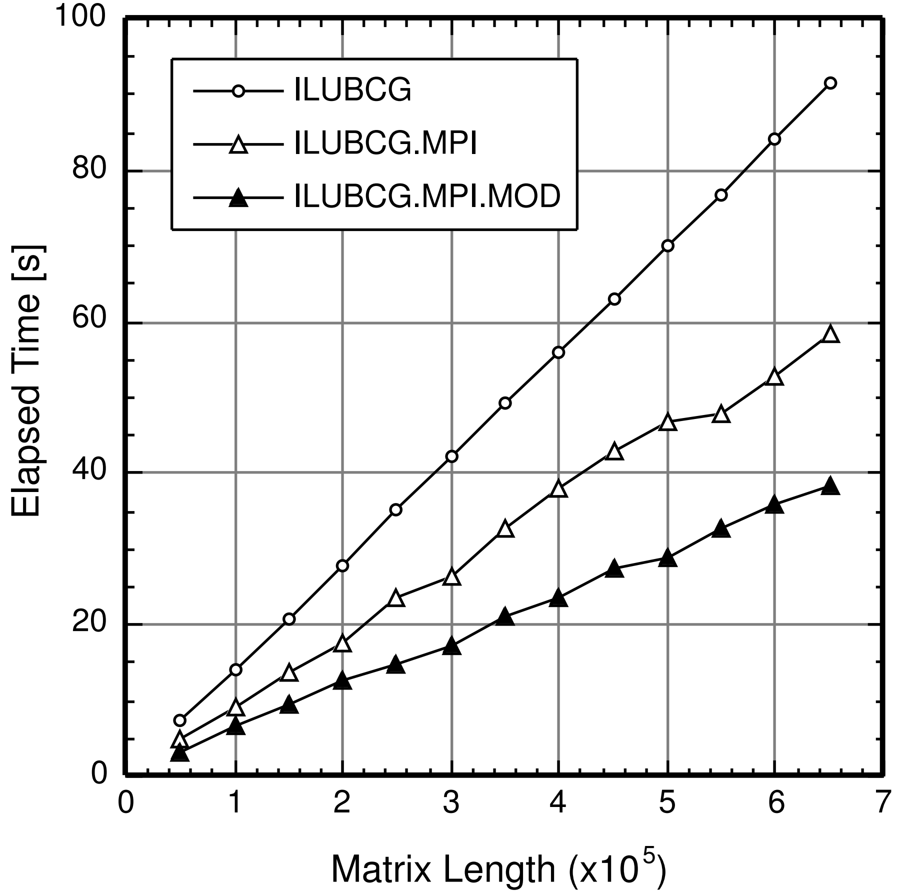
- 前処理行列

$$C = LU \sim A$$



ILUBCG 法の並列化

経過時間の行列長依存性



経過時間の計算機台数依存性