

研究代表者氏名(所属) 佐藤雅彦(核融合科学研究所)

研究課題名 大規模並列計算における陰的時間積分法を使用したMHD非線形コードの高速化



目的

核融合炉の実現のためには、高温高密度プラズマを安定に閉じ込めることが必要であり、巨視的不安定性である磁気流体力学(MHD)不安定性の非線形現象の解明が重要である。

これまでに多くのMHD非線形シミュレーションが行われてきたが、今後は、
 ・現実的なパラメータでの高精度MHD非線形シミュレーション
 ・自由境界を取り扱ったMHD非線形シミュレーション
 ・二流体モデル等の拡張MHD非線形シミュレーション
 等を行っていくことが求められる。
 このようなシミュレーションを陽解法で行うことは、クーラン条件の制約から非常に計算コストが大きくなる。

- ・クーラン条件を緩和するため、完全陰解法を採用したMHDコードの開発する。
- ・大規模連立一次方程式を高速に処理することが鍵。
 → Xabclibの使用、MHDモデルに対する適切な前処理の研究により、高速なMHDコードの開発を目指す。

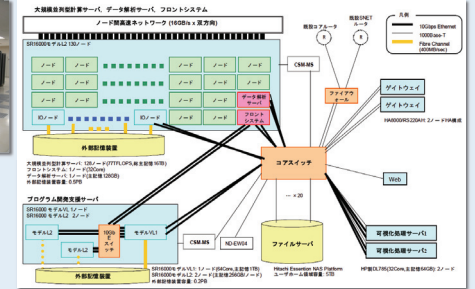
研究体制

佐藤雅彦(NIFS): MIPSコードの陰解法化
 片桐孝洋(東大): Xabclibの開発
 藤堂泰(NIFS): 陽的MIPSコードの開発、モデル拡張
 中島徳嘉(NIFS): MHD平衡コードの整備

プラズマシミュレータ



システム全体構成図

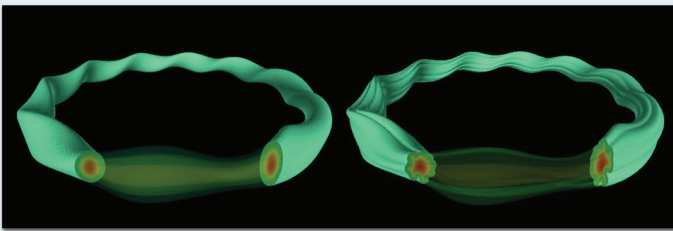


MIPS code (MHD Infrastructure for Plasma Simulation)

核融合科学研究所開発のMHD共通基盤コード

- ・一流体MHDモデル
- ・4次精度の有限差分による離散化
- ・4次精度ルンゲクッタ法による時間積分
- ・MPIによる並列化

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} &= -\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) \\ \rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} &= -\rho \omega \times \mathbf{v} - \rho \nabla \left(\frac{v^2}{2} \right) - \nabla p + \mathbf{j} \times \mathbf{v} + \frac{4}{3} \nabla [\nu \rho (\nabla \cdot \mathbf{v})] - \nabla \times [\nu \rho \omega] \\ \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= -\nabla \times \mathbf{E} \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= -\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) - (\gamma - 1) p \nabla \cdot \mathbf{v} + (\gamma - 1) [\nu \rho \omega^2 + \frac{4}{3} \nu \rho (\nabla \cdot \mathbf{v})^2 + \eta \mathbf{j} \cdot (\mathbf{j} - \mathbf{j}_{eq})] \\ \mathbf{E} &= -\mathbf{v} \times \mathbf{B} + \eta (\mathbf{j} - \mathbf{j}_{eq}) \\ \mathbf{j} &= \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{B} \\ \omega &= \nabla \times \mathbf{v} \\ \rho &: \text{密度}, \mathbf{v}: \text{速度}, \mathbf{B}: \text{磁場}, p: \text{圧力} \\ \eta &: \text{抵抗}, \nu: \text{粘性}, \gamma: \text{比熱比}\end{aligned}$$



陰解法の必要性

アルフヴェン波 $\sim 10^{-6}$ 秒 << 抵抗性MHD不安定性 $\sim 10^{-3}$ 秒

陽的な時間積分法では、時間刻み幅がアルフヴェン波の伝播時間に制限される。MHDモデルから二流体モデルへ拡張した場合、さらに速い時間スケールの現象が現れ、クーラン条件による制約はより厳しくなる。

完全陰解法より、大きな時間刻み幅が可能に

完全陰解法

$$\begin{aligned}\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} &= \mathbf{f}(\mathbf{u}) \\ \frac{\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^n}{\Delta t} &= \mathbf{f}(\mathbf{u}^{n+1}) \\ \mathbf{F}(\mathbf{u}^{n+1}) &= \mathbf{f}(\mathbf{u}^n) - \frac{\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^n}{\Delta t} = 0\end{aligned}$$

Newton法

$$\begin{aligned}\mathbf{F}(\mathbf{u}) &= 0 \\ \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{u}} \cdot d\mathbf{u} &= -\mathbf{F}(\mathbf{u}) \\ \mathbf{u} &= \mathbf{u} + d\mathbf{u}\end{aligned}$$

 $\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{u}}$: ヤコビアン行列次元 $\sim 10^8$
1行あたり非零要素数 $\sim 13 \sim 45$

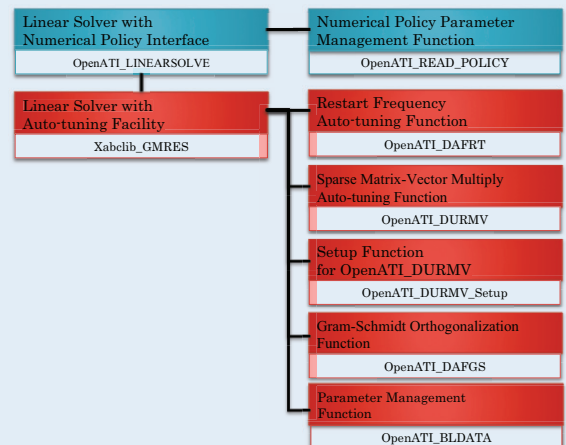
高速な線形ソルバーが必要

Xabclib

自動チューニング機能付き数値計算ライブラリパッケージ

- ・汎用的自動チューニングAPIの提供
- ・自動チューニング機能の再利用性を考慮した、汎用的APIのOpenATLibを提供
- ・世界に先駆けた先進的AT機能の提供
 1. 自動チューニングポリシー設定機能
実行速度、メモリ量、演算精度の方向設計機能
 2. マルチコア向けの負荷バランスの改善が可能な疎行列演算方式
非零要素均等化方式
Branchless Segmented Scan (BSS) 方式
 3. 直交化アルゴリズム動的選択機能

線形ソルバー構成図



HITACHI SR16000/VL1 (1ノード、128SMT実行) で非零要素均等化による負荷バランス改良法による疎行列・ベクトル積の性能評価試験では、1ノードで最高約68GFLOPSを達成

(片桐他、並列/分散/協調処理に関するサマリー・ワークショップ (2010/8))

研究計画

1. OpenMP版Xabclibを陰解法版MIPSコードへ導入、性能評価
2. MPI版Xabclibの開発
3. MPI版Xabclibを陰解法版MIPSコードへ導入、性能評価
4. 拡張MHDモデルを用いた拡張版MIPSコードの開発、性能評価