

jh170020-NAJ

前山 伸也 (名古屋大学)

Optimisation of Fusion Plasma Turbulence Code toward Post-Petascale Era II



Motivation

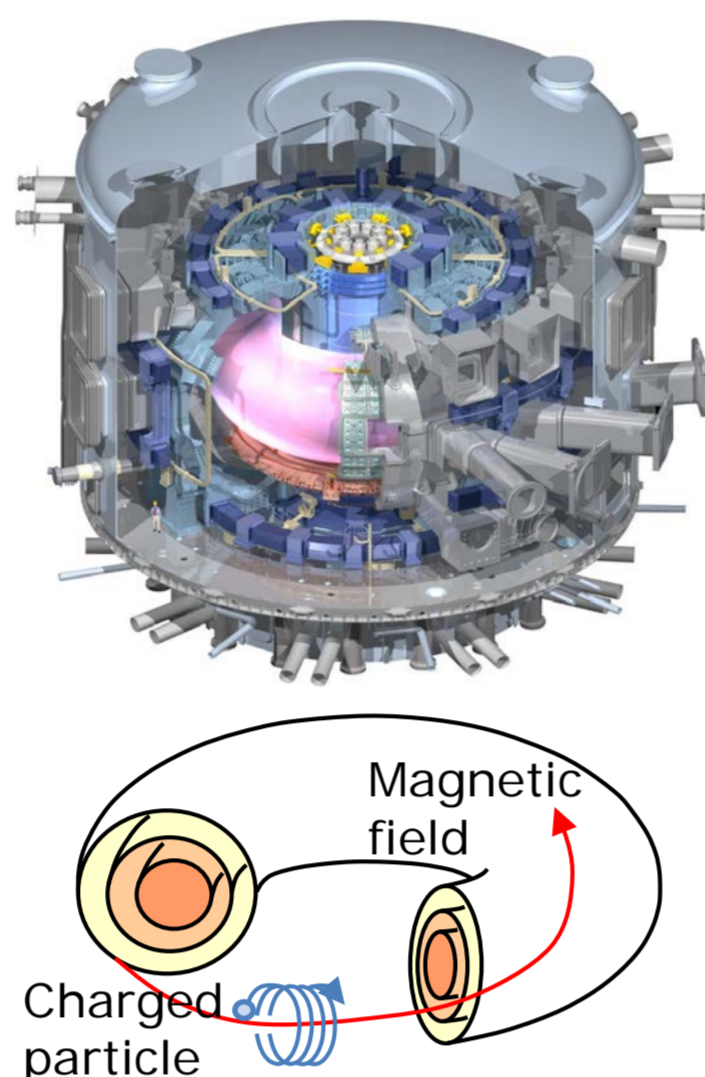
近年の核融合プラズマにおける乱流輸送シミュレーションは、大型装置実験で観測されるイオン熱輸送フラックスを定量的に評価しうる段階に来ている。しかし、プラズマの周辺領域ではシミュレーションが実験よりも低い輸送を予測するShortfall問題が世界各国のコードで報告されており、核融合炉開発に直結する重要な課題として原因究明が進められている。

Introduction

磁場閉じ込め核融合

- 基幹エネルギーとなり得る次世代のエネルギー源。
- 入力=出力となるブレークイーブン条件を達成。現在、エネルギー炉としての工学的実証に向けた研究が国際協力の下で進められている。
- 約1億度の燃料プラズマを強力な磁場で閉じ込めて核融合反応を起こす。
- プラズマ中で生じる電磁的な揺らぎが引き起こす乱流により、閉じ込め性能が左右される。

プラズマ乱流による熱輸送特性の解明と定量的評価が核融合研究の課題。



Simulation model

The GKV code (GyroKinetic Vlasov code)

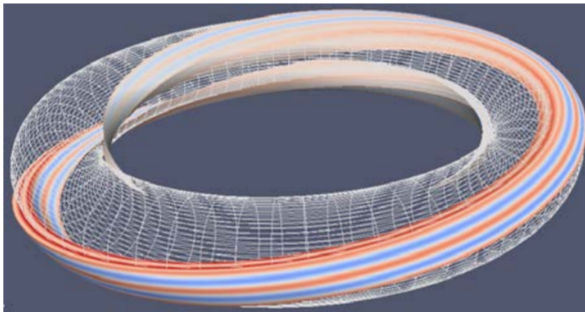
[Watanabe, Nucl. Fusion 46, 24 (2006), Maeyama, Parallel Comput. 49, 1 (2015).]

- ✓ プラズマ粒子分布関数 f_s と電磁ポテンシャル揺動 ϕ, A の時間発展を5次元位相空間 $(x, y, z, v, \mu; t)$ 上で解く。

$$\begin{cases} \frac{\partial f_s}{\partial t} + \mathbf{v}_{gy} \cdot \nabla f_s - \frac{\mu \nabla_{\parallel} B}{m_s} \frac{\partial f_s}{\partial v_{\parallel}} = S_s + C_s \\ \nabla_{\perp}^2 \phi = -\frac{1}{\epsilon_0} \sum_{s=i,e} \rho_s \\ \nabla_{\perp}^2 A_{\parallel} = -\mu_0 \sum_{s=i,e} j_{\parallel s} \end{cases}$$

- ✓ 多次元領域分割 $[x(\text{または}y), z, v, \mu]$ + 粒子種 (s) 並列
- ✓ MPI/OpenMPハイブリッド並列

磁力線に沿った局所モデル



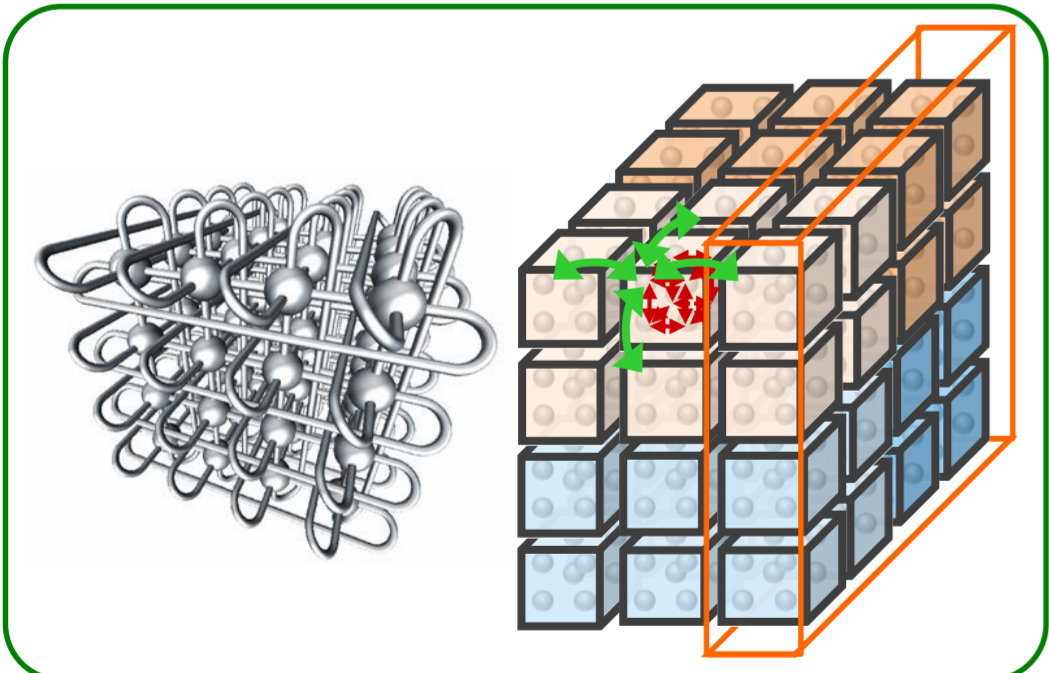
計算科学的には、多次元CFD計算

- フーリエスペクトル法 (x, y)
→ x, y に関する転置通信
- 差分法 (z, v, μ)
→ z, v, μ に関する1対1通信
- 電磁場ソルバー
→ v, μ, s に関する総和通信

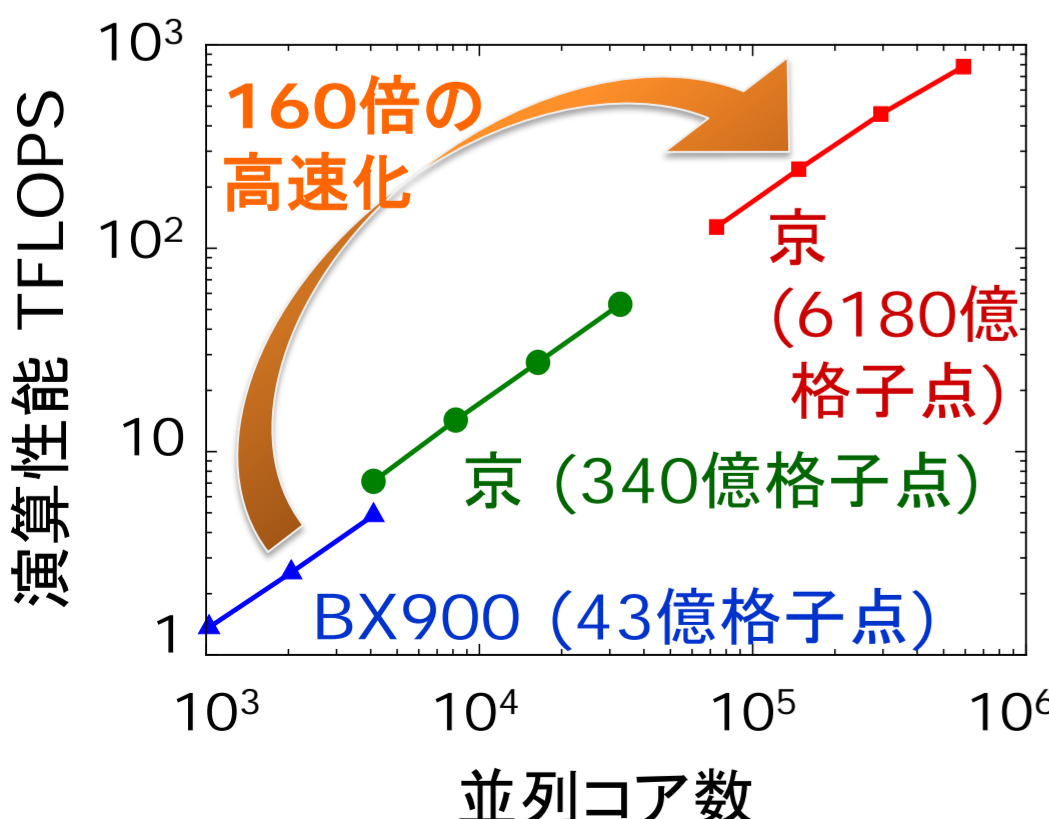
ノード間通信がボトルネックに。

「京」における通信最適化の取り組み

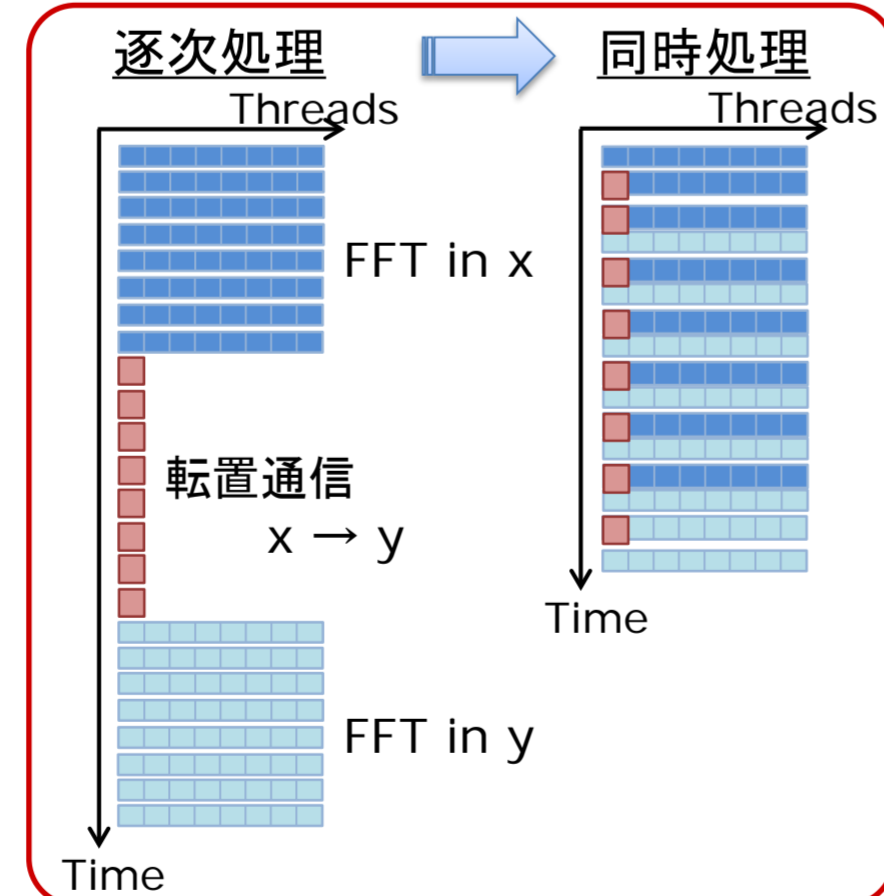
Tofuネットワークでのセグメント化プロセス配置



BX900(原子力機構)および京(理研)における演算性能のスケールアップ



OpenMPを利用した通信オーバーラップ



- プロセス配置の最適化により通信コストを半分以下に削減。
- 通信オーバーラップにより、通信コストを実質的に隠す。
- 「京」フルノード規模までの良好なストロングスケールングを達成し、世界最先端のプラズマ乱流解析コードを開発。

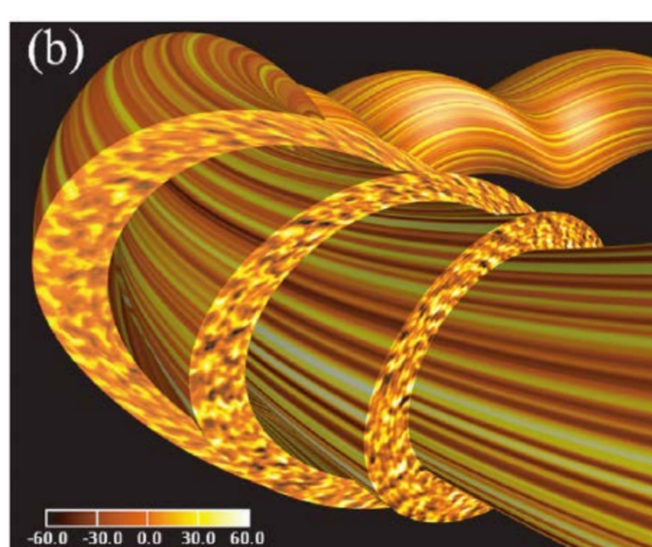
Summary

- Shortfall問題に対して、複数のアプローチから原因究明に取り組む。
- 大域モデルと局所モデルの比較による非局所的輸送現象の寄与の解明。
- 改良局所モデルによる乱流の磁力線方向自己相関の寄与の解明。
- 同時に、スペクトル法コードGKV(日)とセミラグランジアン法コードGYSELA(仏)の計算性能の比較により、各手法のメニーコアへの適合性を議論する。

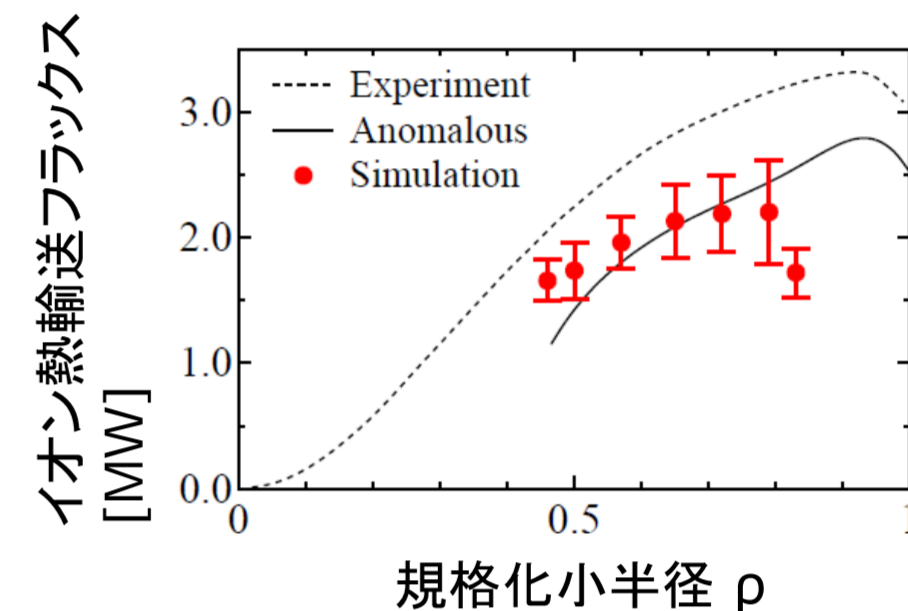
Validation study of turbulent transport

- GKVによるシミュレーション結果と実験的に観測される熱輸送フラックスを直接比較。
- プラズマの中心領域では、両者は定量的に一致。 [Nunami, Phys. Plasmas 19, 042504 (2012).]

シミュレーションにより得られた静電ポテンシャル揺動のスナップショット



イオン熱輸送フラックスの半径方向分布 For LHD (w/ ae-ITG)



Research plan & progress

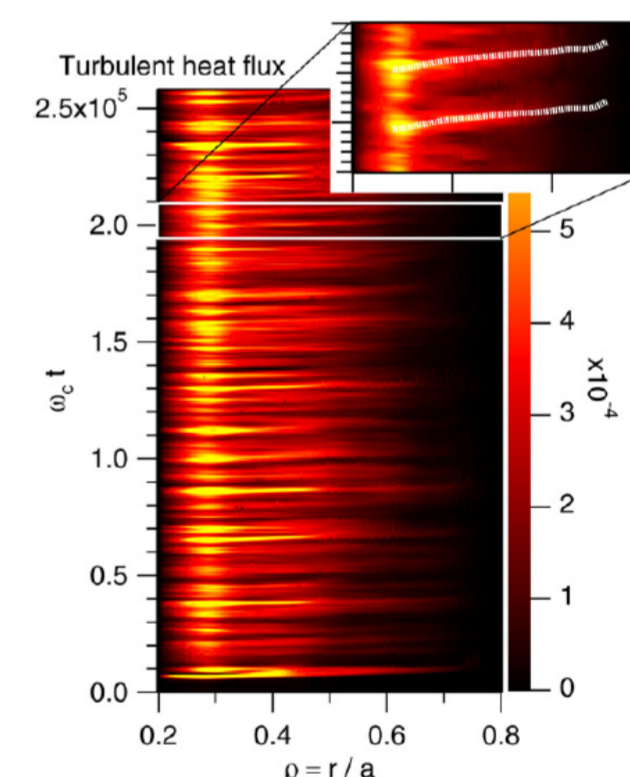
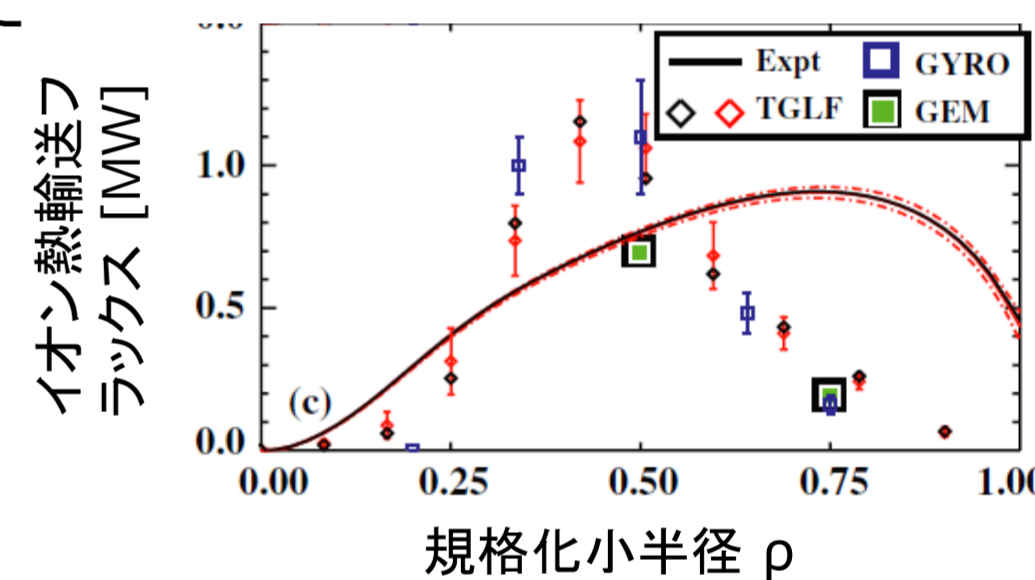
プラズマの周辺領域では、局所モデルに基づく熱輸送フラックスが実験値より小さくなってしまふShortfall問題が世界各国のコードで報告されている。 [Rhodes, Nucl. Fusion 51, 063022 (2011).]

シミュレーションによる核融合装置の予測性能を左右する重要なShortfall問題を、複数のアプローチから検討する。

大域モデルと局所モデルの比較

局所モデルでは加熱分布と熱輸送フラックスの整合性が保証されないことが、Shortfall問題の原因の可能性として考えられる。

加熱による分布形成と輸送フラックスを自己無撞着に扱える大域モデルに基づくシミュレーションコードGYSELA(仏)との比較を行うことで、非局所的輸送現象がShortfall問題に与える影響を明らかにする。



大域モデルに基づくコード GYSELAではプラズマ分布の変化を伴う非局所的輸送現象が生じ得る [Sarazin, Nucl. Fusion 50, 054004 (2010).]

改良局所モデルの適用

Shortfall問題における別の要因の可能性として、局所モデルにおける乱流自己相関の取り扱いの数値的困難性が考えられる。プラズマ周辺領域では、プラズマ中心領域とは異なる微視的不安定性が存在し、そこで生じる乱流は磁力線方向に長い自己相関を持つ。

我々は従来モデルよりも磁力線方向に対称性の良い改良局所モデルを提案しており、この改良モデルをプラズマ周辺領域に適用することで、局所モデルにおける自己相関の取り扱いやその計算精度がShortfall問題に与える影響を明らかにする。

並列計算手法の高度化

昨年度課題において、GKVコードのGPU化やFX100のアシスタントコアを利用した通信と演算のオーバーラップといった並列計算手法開発を進めた。今年度はさらに、GPU上での通信・演算オーバーラップの開発、スペクトル法コードGKVとセミラグランジアン法コードGYSELAの比較によるメニーコアへの適合性調査、磁力線方向への並列度の増大が見込まれる改良局所モデルのスケールビリティ調査などを進める。

(上)従来モデルと(下)改良モデルによる静電ポテンシャル揺動スペクトルの磁力線方向分布

