

jh160028-NAJ

前山伸也 (名古屋大学)

Multi-Platform Development of Fusion Plasma Turbulence Code toward Post-Petascale Era



Motivation

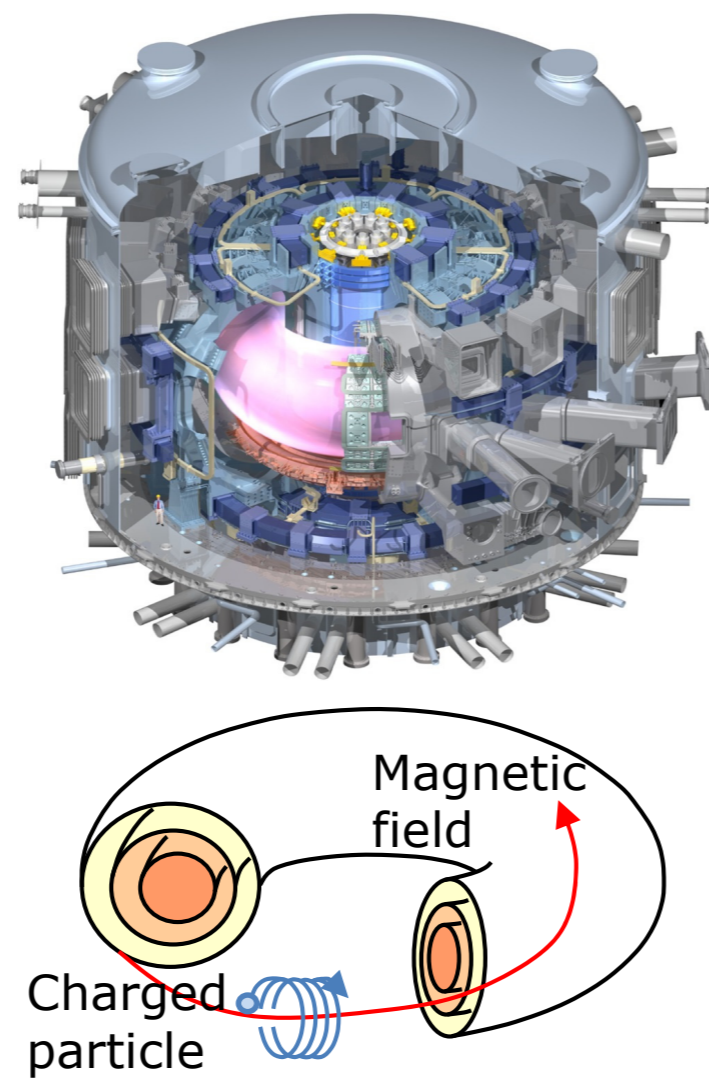
核融合炉開発上の研究課題であるプラズマ乱流に関して、「京」で最適化した大規模シミュレーションによって、従来のスケール分離の仮定を覆すマルチスケール相互作用が発見された。[Maeyama, Phys. Rev. Lett 114, 255002 (2015).] 本課題では、ポスト「京」世代を見据えたプラズマ乱流コード開発と、それを利用してマルチスケールプラズマ乱流物理を切り拓くための応用研究を行う。

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。



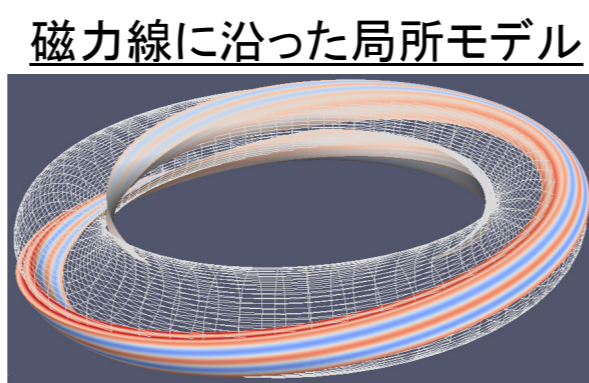
Simulation model

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



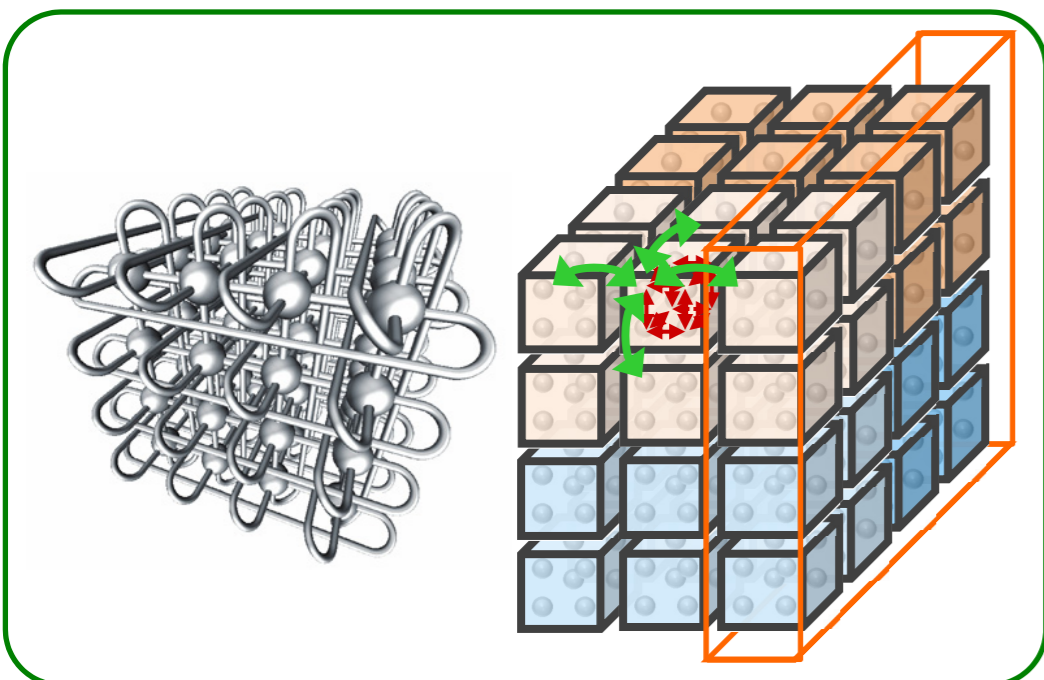
計算科学的には、**多次元CFD計算**

- 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

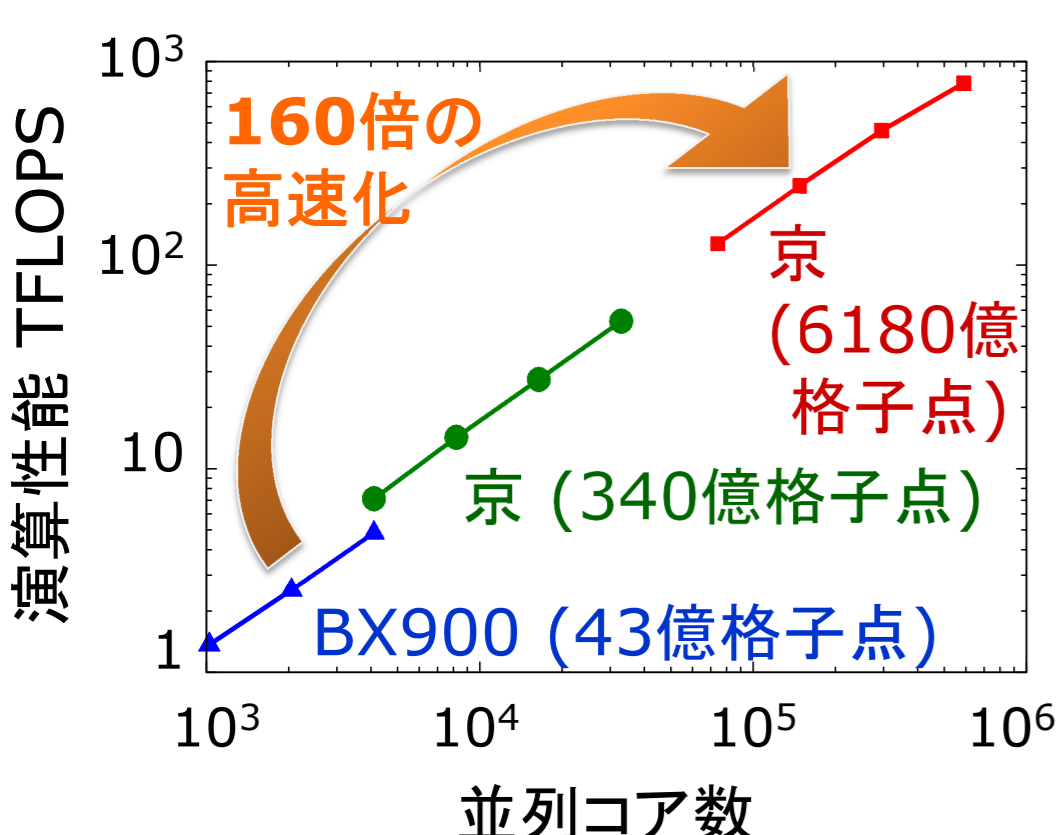
ノード間通信がボトルネックに。

「京」における通信最適化の取り組み

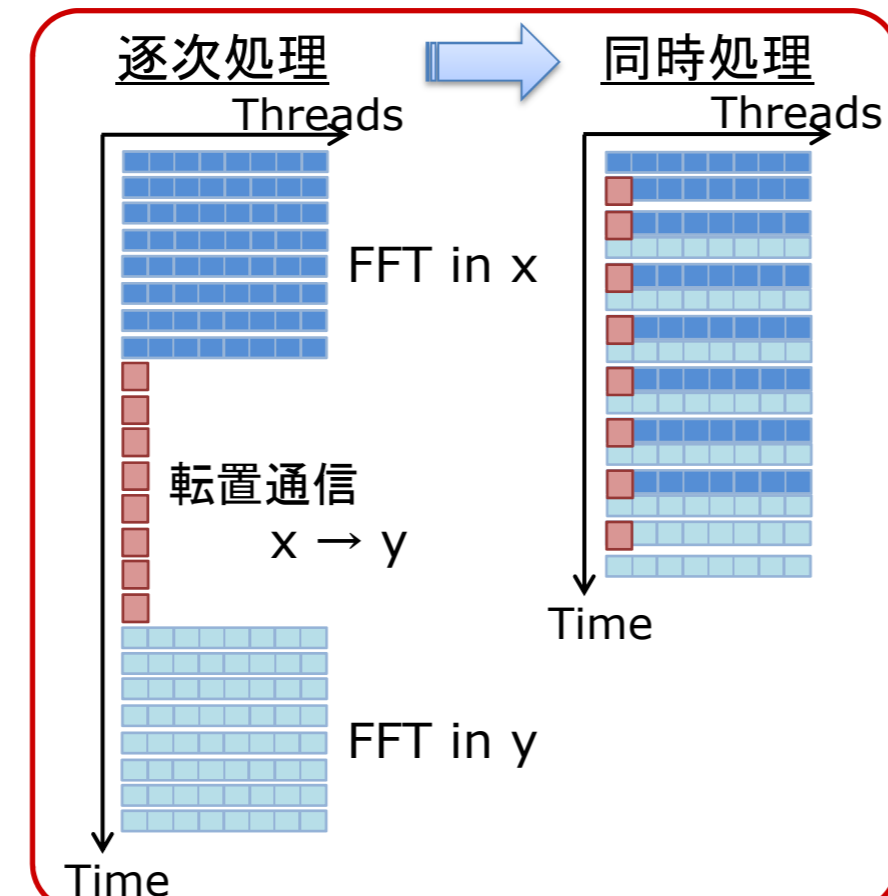
Tofuネットワークでのセグメント化プロセス配置



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



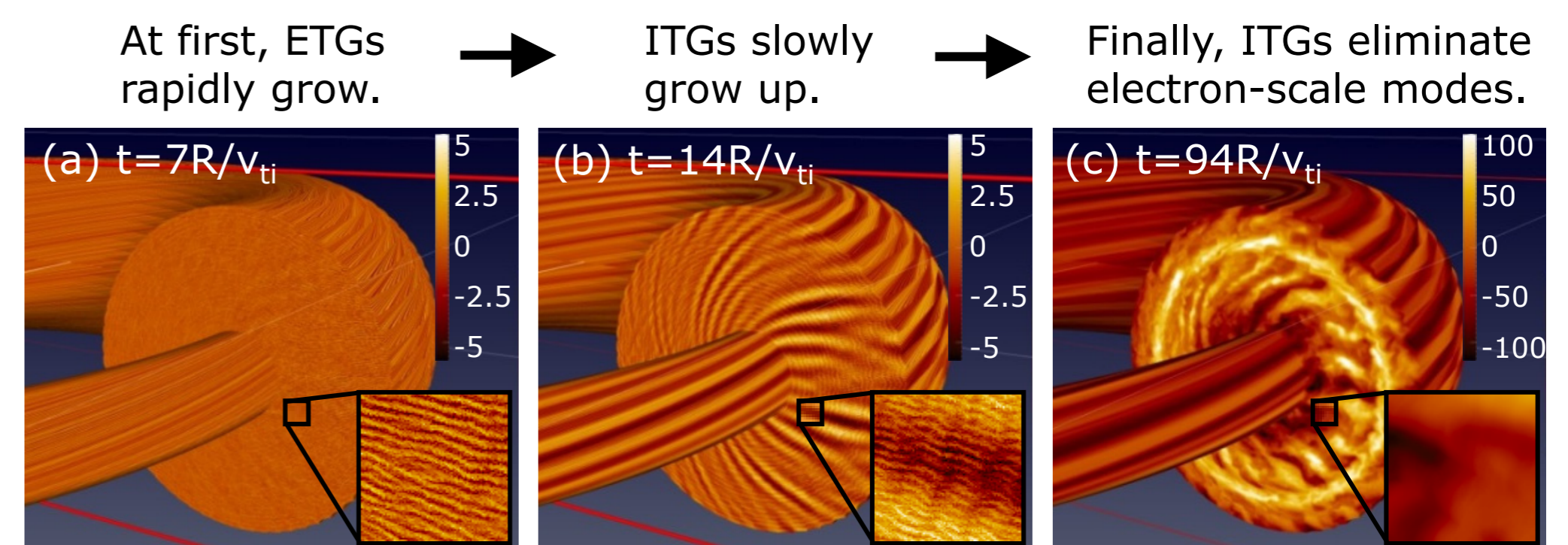
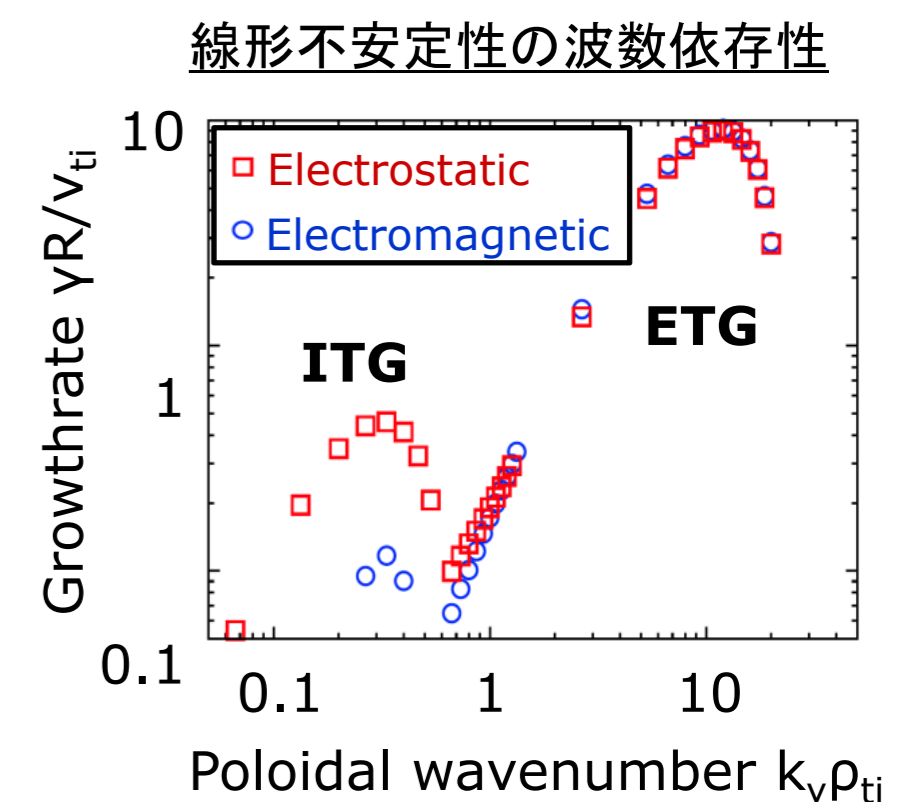
- プロセス配置の最適化により通信コストを半分に削減。
- 通信オーバーラップにより、通信コストを実質的に隠ぺい。
- 「京」フルノード規模までの良好なストロングスケールングを達成し、世界最先端のプラズマ乱流解析コードを開発。

Summary

計算科学研究と物理応用研究を両輪として課題を推進している。
計算科学: マルチコアの「京」から、メニーコアのポスト「京」へ。
アクセラレータ(GPU)の「TSUBAME2.5」やメニーコアCPUの「FX100」におけるコード開発と、通信オーバーラップの拡張。
物理応用: 次期高性能プラズマを対象としたマルチスケール乱流研究を展開。

Application: Multi-scale plasma turbulence

- 乱流はプラズマの不安定性により駆動される。
- 従来の乱流研究では、長波長のイオンスケールの不安定性(ITG)と短波長の電子スケールの不安定性(ETG)による乱流をスケール分離を仮定して個別に解析。
↓
- **電子/イオンスケールを同時に扱う大規模シミュレーションで検証。従来の仮定を覆し、両者の相互作用が存在することが明らかに。**



Research plan & progress

マルチスケールプラズマ乱流の物理をさらに開拓していくため、ポスト「京」を見据えたコード開発・物理研究を進めていく。

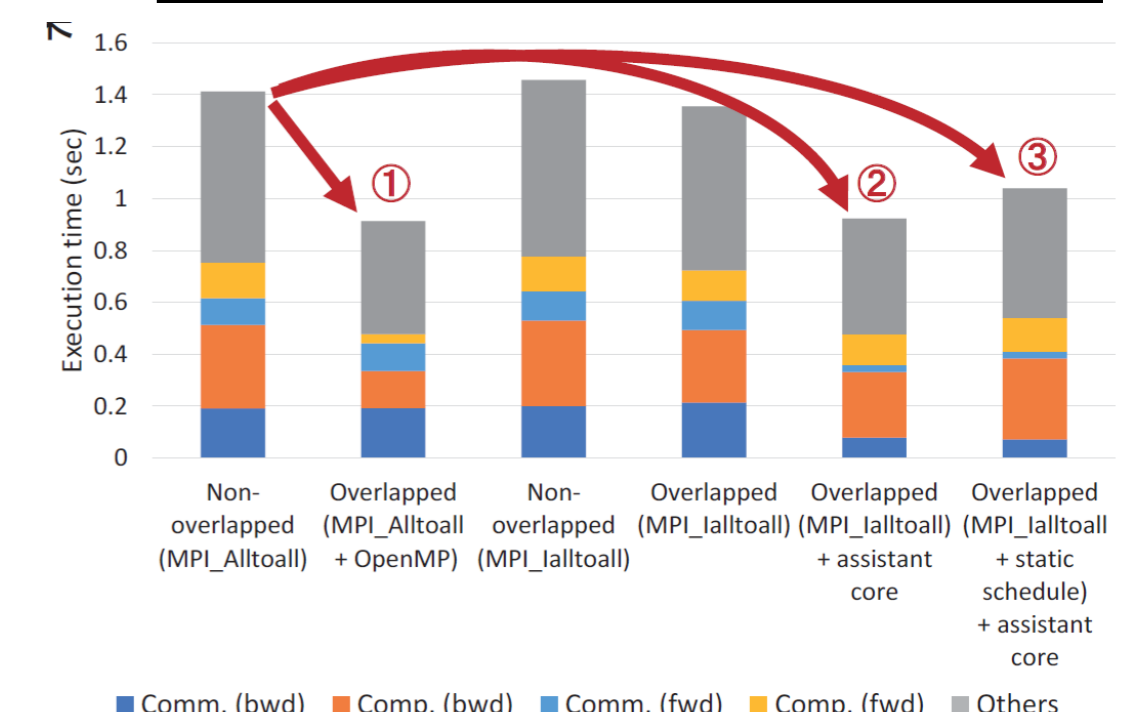
メニーコア化への対応

- 「京」では8コア/ノードであったが、ポスト「京」ではメニーコア化。
 - アクセラレータ(GPU)系の「TSUBAME2.5」におけるコード開発
...メモリの小ささに加えメモリアクセスがボトルネックとなるため、これらを抑えることを念頭に、CUDA FortranによるGPU化。現状7割程度。
 - メニーコアCPUの「FX100」におけるコード開発
...「京」で最適化したコードをベースに性能評価中。
- ポスト「京」がどちらのタイプになっても対応できるように、両者の特性を比較・研究する。

通信オーバーラップの拡張

- FX100で導入されたアシスタントコアの利用を検討。
- アシスタントコアを利用した通信オーバーラップに成功。
 - 本例では、Dynamicスケジューリングによるロードバランスの均一化が必要。
 - アシスタントコアの起動オーバーヘッドへの対処や、スケラビリティテストが今後の課題。

FX100におけるGKVカーネルの性能評価



物理課題への適応

- 次期核融合装置はプラズマの高ベータ化(ベータ値=プラズマ圧力と磁気圧の比)をキーワードに開発が進められている。
- 高ベータ化に伴いITG以外の不安定性による乱流の駆動が想定される。
 - マイクロティアリングモード(MTM)はイオンスケールの波長とともに微細電流シート構造をもつので、電子スケールの影響を受ける?
- MTMとETGの相互作用解析により、マルチスケール乱流の理解を広げる。

プラズマパラメータによるイオンスケール不安定性の変化

