

原型炉級プラズマにおけるマルチスケール乱流輸送シミュレーション

前山伸也

名大理

第40回プラズマ・核融合学会年会, 岩手, 2023.11.27-30

シンポジウム”核融合原型炉における燃焼プラズマの理論・シミュレーション研究の進展”



研究背景

原型炉・核燃焼プラズマ

- 電子(e), 燃料種イオン(D,T), 燃焼灰(He)などの多成分混合プラズマ
- 核融合生成アルファ粒子は主に電子を加熱

問題意識 1. イオンのみならず、電子の閉じ込め理解も重要

- イオン・電子スケールに渡るマルチスケール乱流解析

問題意識 2. 第一原理シミュレーションだけで将来の原型炉級プラズマ想定パラメータをカバーするのは困難。運転シナリオ検討との乖離を解消したい

- マルチフィデリティ乱流輸送モデリング

Background

様々な微視的不安定性
イオンスケール:

ITG, TEM, MTM, KBM

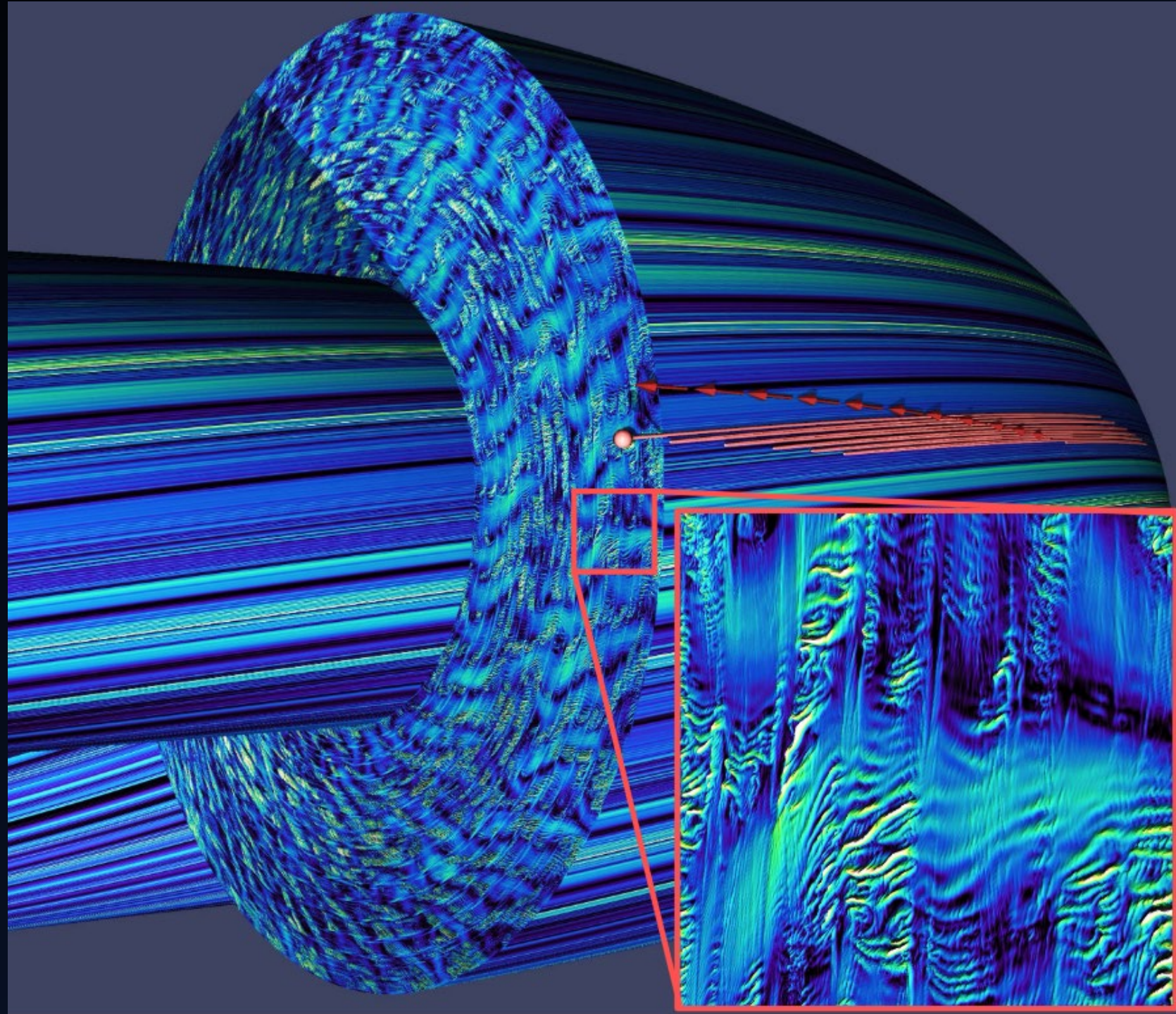
電子スケール: ETG

マルチスケール乱流相
互作用により乱流輸送
が影響されうる。

[Maeyama, PRL (2015)]

日・欧・米のシミュ
レーション研究や実験
との比較研究が進展。

[IAEA-FEC2023 Overview]



Impacts of multi-scale interactions in burning plasma?

□ High electron temperature ($T_e > T_i$) (because of electron heating by alpha particles)

As T_e/T_i increases,

Ion-scale

- Ion temperature gradient (ITG) modes tend to be destabilized. [Romanelli'89]
- Temperature-gradient-driven trapped electron modes (TEMs) tend to be destabilized. [Casati'08]

Electron-scale

- Electron temperature gradient (ETG) modes tend to be stabilized. [Jenko'01]
- **Is electron-scale effect ignorable at high $T_e/T_i > 1$?**

□ Electron, Fuel (D,T), Ash (He) mixture

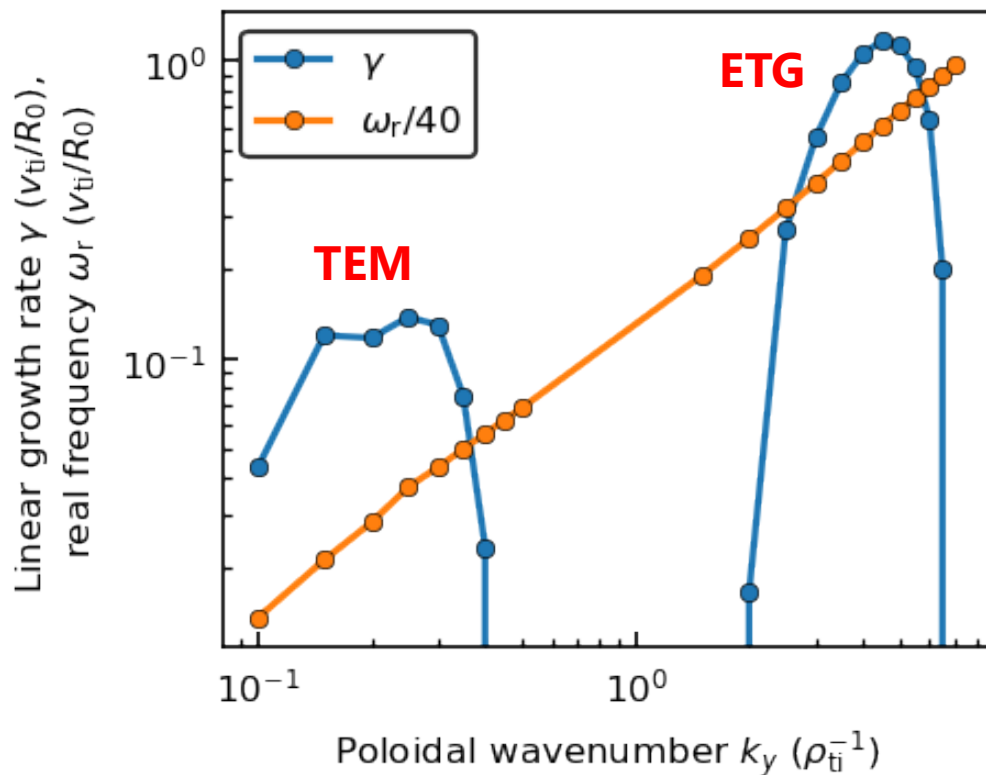
- **Do electron-scale modes affect transport of fuels and ash?**

□ Kinetic resonance of energetic particles

- ITG can be stabilized. [Siena'20]
- TEM, propagates in different direction, has no resonance. [Hussain'21]

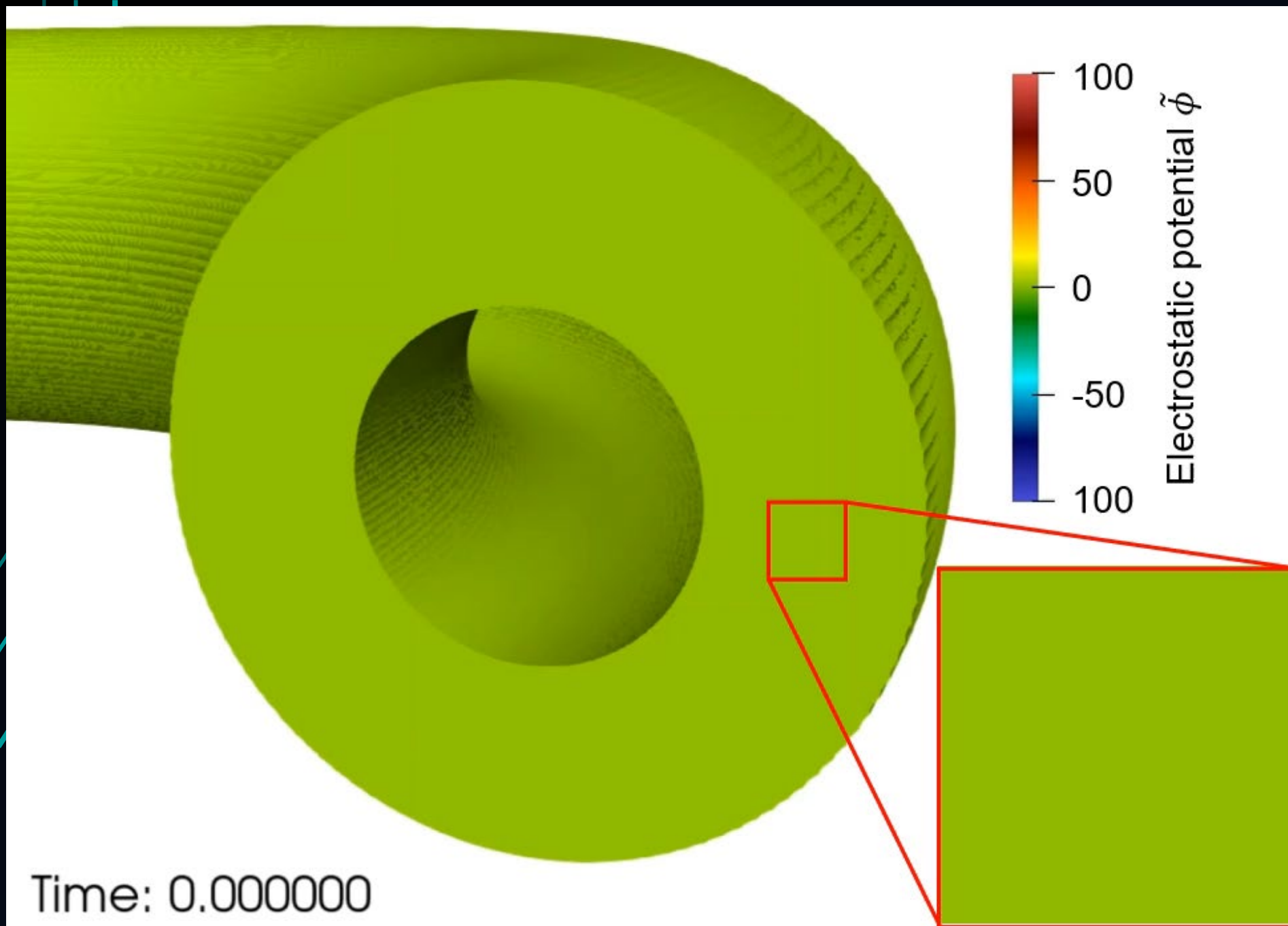
Extrapolation of multi-scale interactions toward burning plasma is examined by GKV (Free download from <https://github.com/GKV-developers/>)

Linear dispersion relation



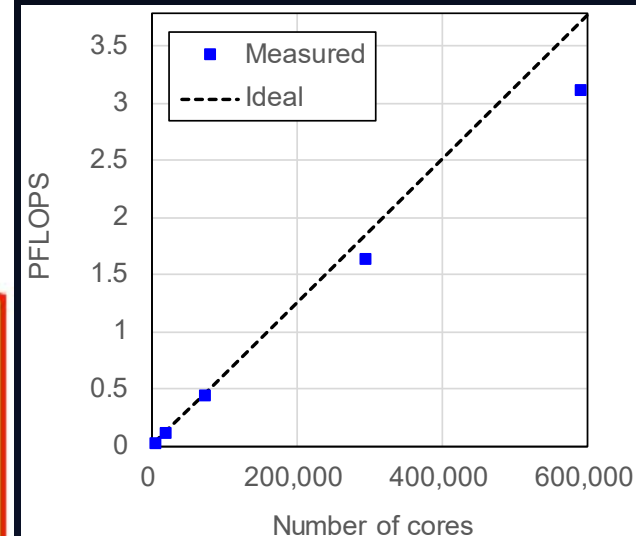
- ✓ **High electron temperature ($T_e > T_i$)**
- ✓ **Electron, Fuel (D,T), Ash (He) mixture**

	Employed plasma parameters	Cf.) DIII-D High-Te discharge #173147 t=3705ms, r/a=0.5 [Grierson'19PoP]
Species	e, D, T, He	e, D, C
Density grad. R/L_n	3	2
Temperature grad. R/L_{T_e}	9.342	6.5
Temperature grad. R/L_{T_D}	1	3
Temperature ratio T_e/T_D	3	2.2
Inverse aspect $\epsilon = r/R$	0.18	0.2
Safety factor q	1.42	1.2
Magnetic shear $\hat{s}$	0.8	0.9
Normalized collision ν_{ee}^*	0.050	0.014

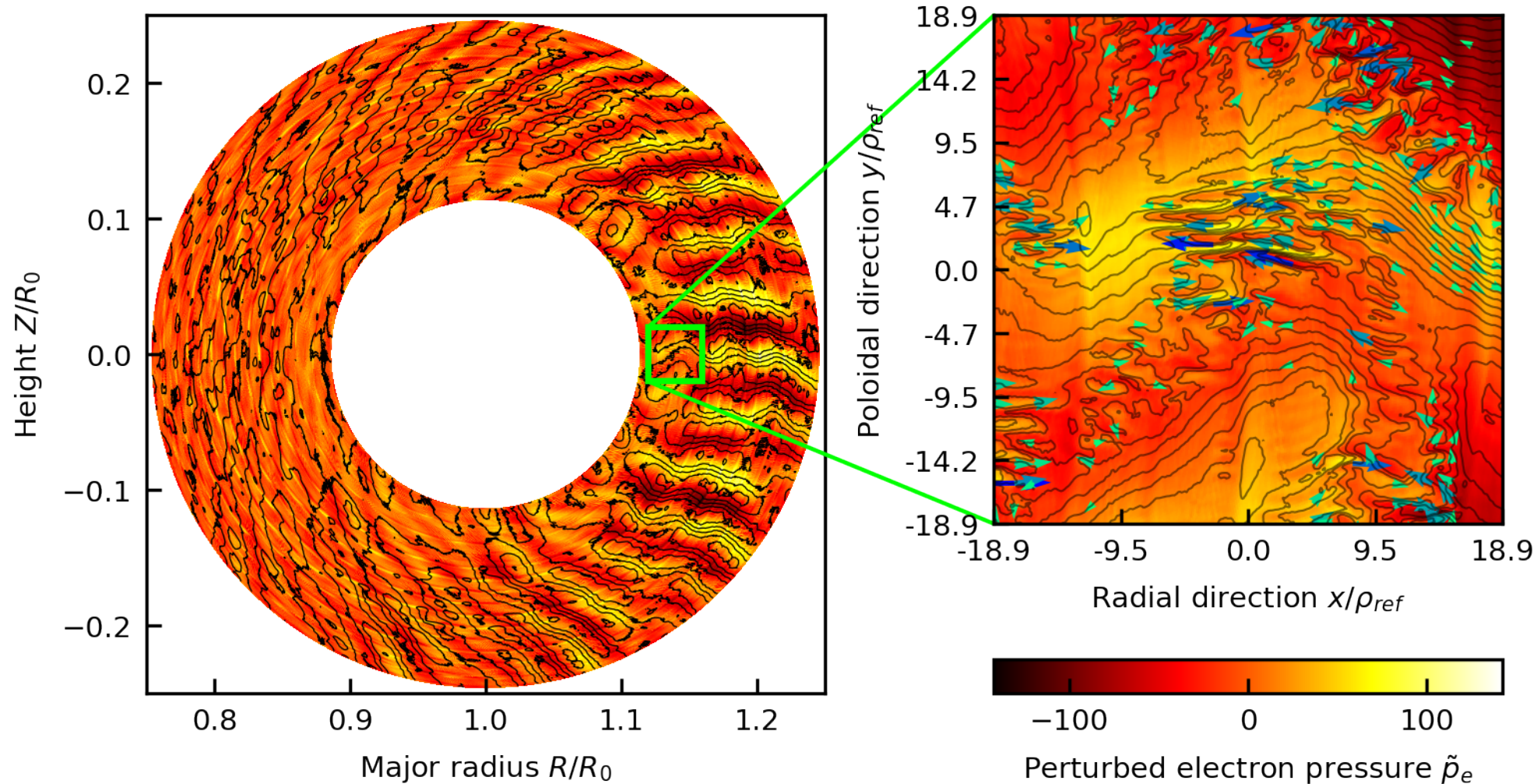


Weak scaling of GKV on Fugaku supercomputer

- 3.1 PFLOPS (12,288 nodes)
- 7.5% to CPU peak.
- Parallel efficiency 83.7%



Color map of perturbed electron pressure and streamlines of turbulent ExB flows



ETGs coexist with TEMs.

Impacts on turbulent transport

- ✓ **Large-to-small interactions: ETG peak is suppressed after TEM growth.**
- ✓ **Small-to-large interactions: TEM amplitude is also reduced in the presence of ETG.**

Comparison of heat flux [gyro-Bohm unit]

Electron : $Q_e = 524$ (low-k) $\rightarrow$ 88 (Full-k)

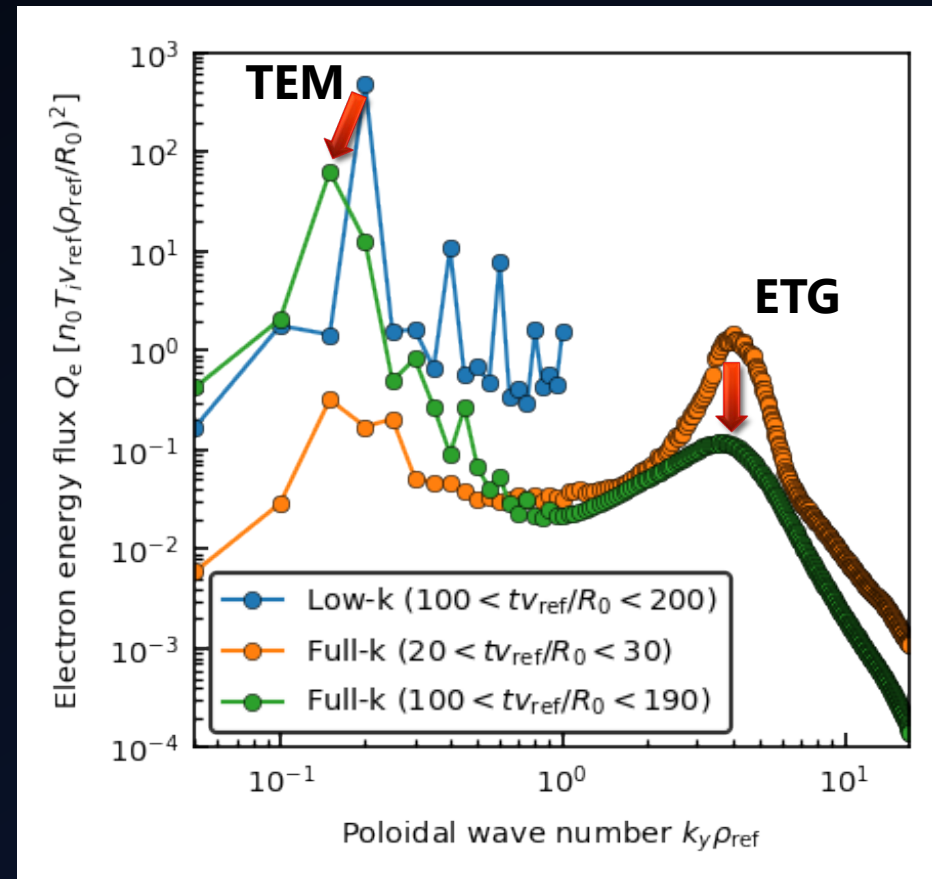
Fuel : $Q_D + Q_T = 17$ (Low-k) $\rightarrow$ 3.7 (Full-k)

Ash : $Q_{He} = 1.4$ (low-k) $\rightarrow$ 0.3 (Full-k)

$\rightarrow$ ETGs affects not only electrons but also fuel ions and helium ash.

Wavenumber spectra of electron energy flux

Multi-scale simulation (Full-k) and ion-scale simulation (Low-k) are compared.



Nonlinear triad transfer analysis [Maeyama'21NJP]

- ✓ Entropy balance equation is

$$\frac{dS_k}{dt} = (\text{Linear drive}) + (\text{Dissipation}) + T_k.$$

From the nonlinear entropy transfer term,

$$T_k = \sum_q \sum_p J_k^{p,q} = J_k^{\Omega_i, \Omega_i} + 2J_k^{\Omega_i, \Omega_e} + J_k^{\Omega_e, \Omega_e},$$

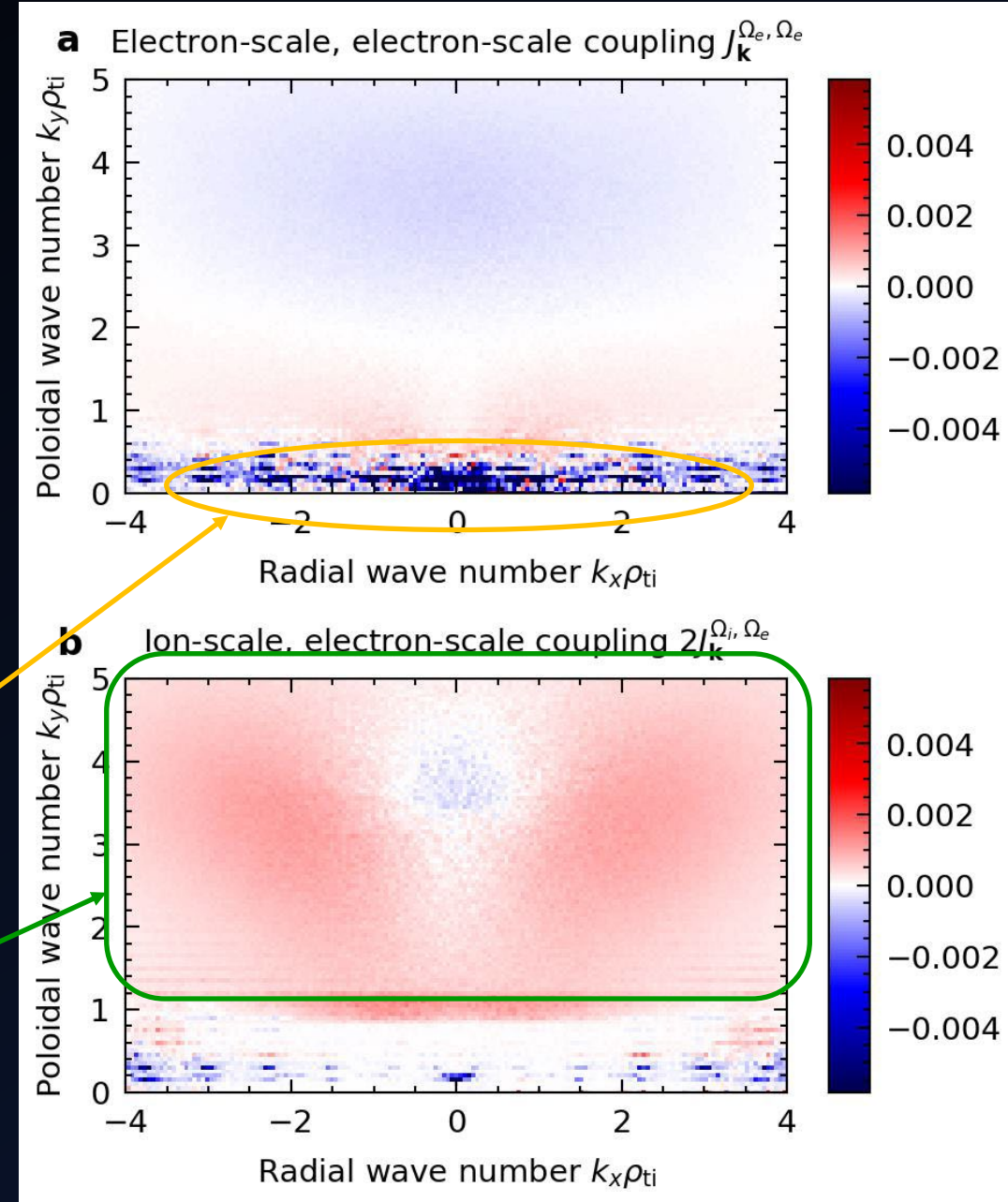
electron-scale contribution is extracted

$$J_k^{\Omega_e, \Omega_e} = \sum_{p \in \Omega_e} \sum_{q \in \Omega_e} J_k^{p,q}.$$

- ✓ **Direct observation of damping of TEM by small-scale ETG turbulence.**

Detailed balance $\sum_{k \in \Omega_i} J_k^{\Omega_e, \Omega_e} + \sum_{k \in \Omega_e} 2J_k^{\Omega_i, \Omega_e} = 0$ shows energy transfer from TEM to high k_y and high k_x , not a typical peak of ETG ($k_x \sim 0$).

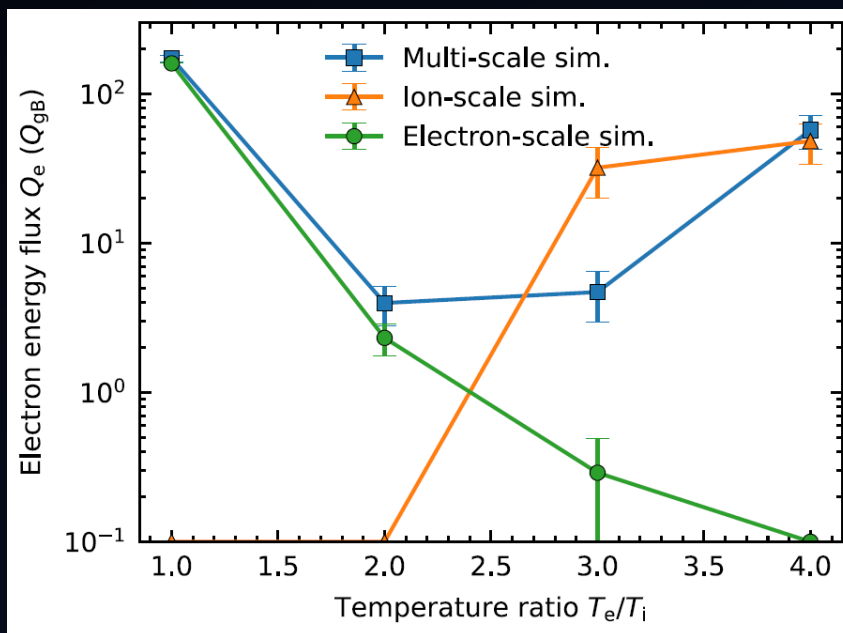
つまり、大きいスケールのTEMが崩れることで短波長の揺動にエントロピーが流れるが、それは必ずしもETGを励起するわけではない。



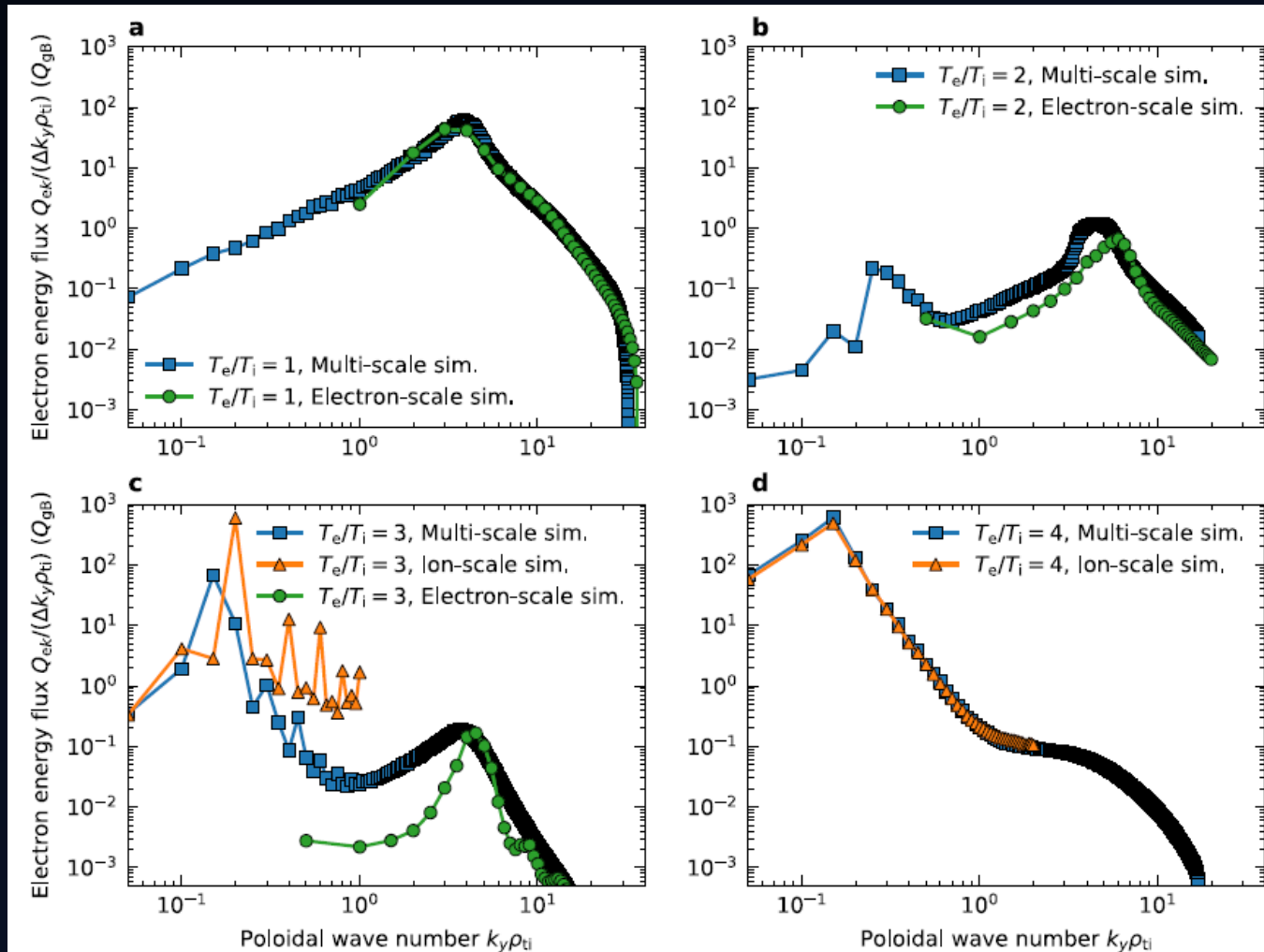
電子・イオン温度比依存性

- ✓ $T_e/T_i > 1$ の高電子温度領域でもマルチスケール相互作用が存在
- ✓ マルチスケール相互作用を介した乱流輸送低減の可能性を世界で初めて指摘

Temperature dependence of Q_e



Wavenumber spectra of electron energy flux



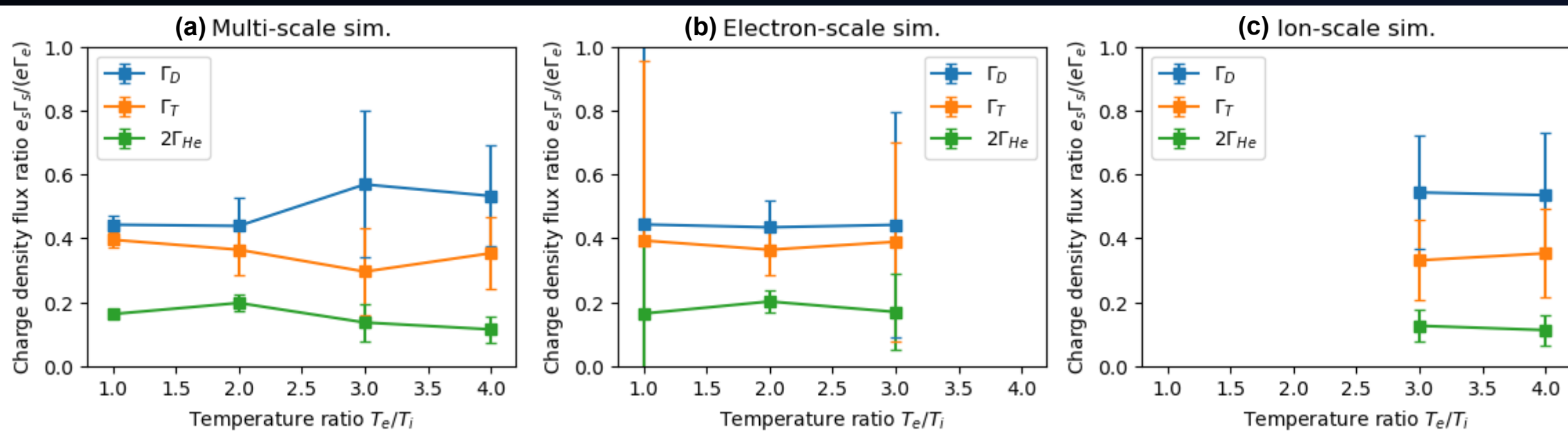
TEM/ETGマルチスケール乱流における粒子輸送解析

摂動ジャイロ運動論における粒子輸送・・・両極性拡散

$$\Gamma_e = \sum_{s=D,T,He} Z_s \Gamma_s \quad (Z_s: \text{価数}, \Gamma_s: \text{粒子種} s \text{ の粒子束})$$

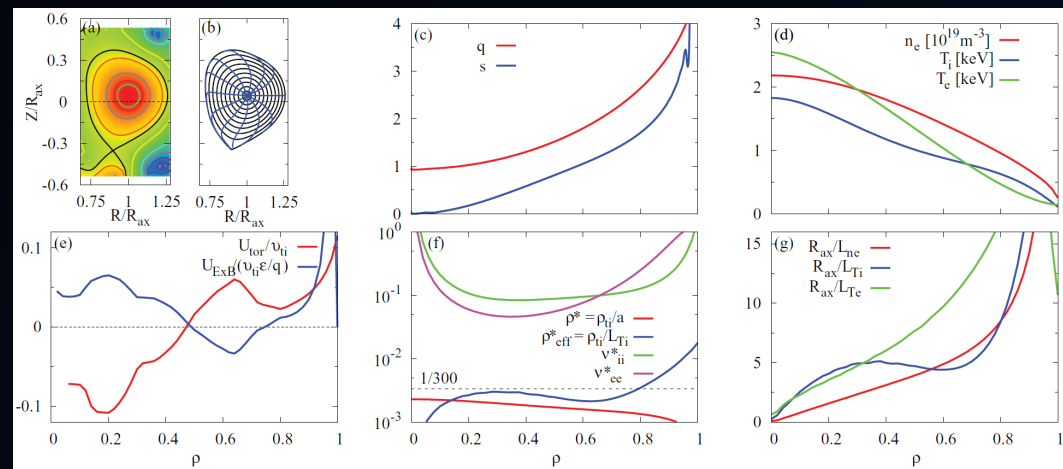
- ✓ マルチスケール相互作用の主な効果は乱流揺動振幅の変化（輸送モデル構築に影響する）。それに伴い電子・イオン粒子輸送フラックスが変化するが、イオン種間内訳には大きな影響を与えない。

両極性拡散条件の各イオン種間内訳 ($1 = \sum_{s=D,T,He} Z_s \Gamma_s / \Gamma_e$)

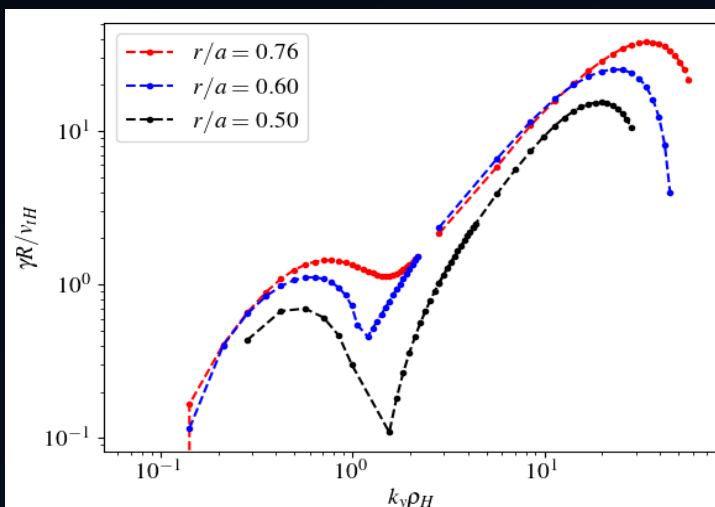


JT-60U配位におけるマルチスケール乱流解析

JT-60U #E45072
L-mode discharge
[Nakata, NF(2016)]

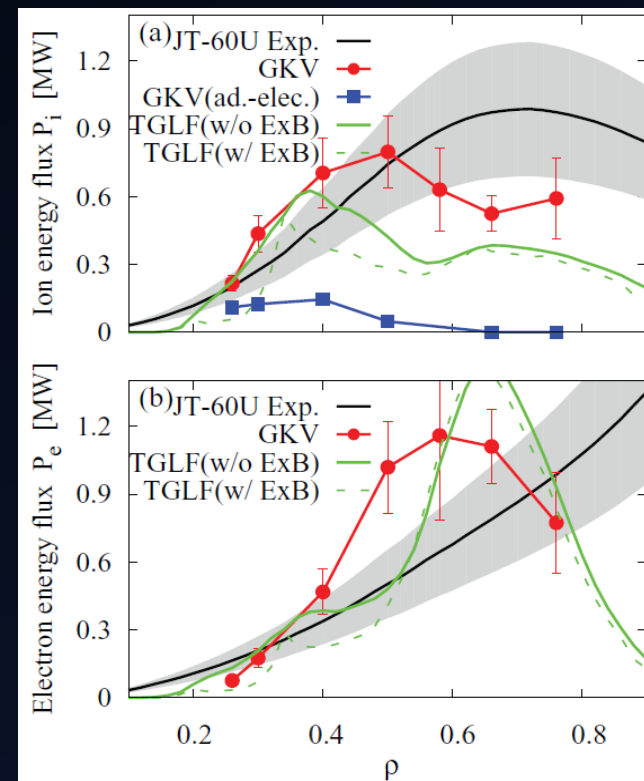


- ✓ 先行研究の線形分散関係、イオンスケール計算の再現性を確認後、マルチスケール乱流解析を実施。



線形成長率のポロイダル波数依存性

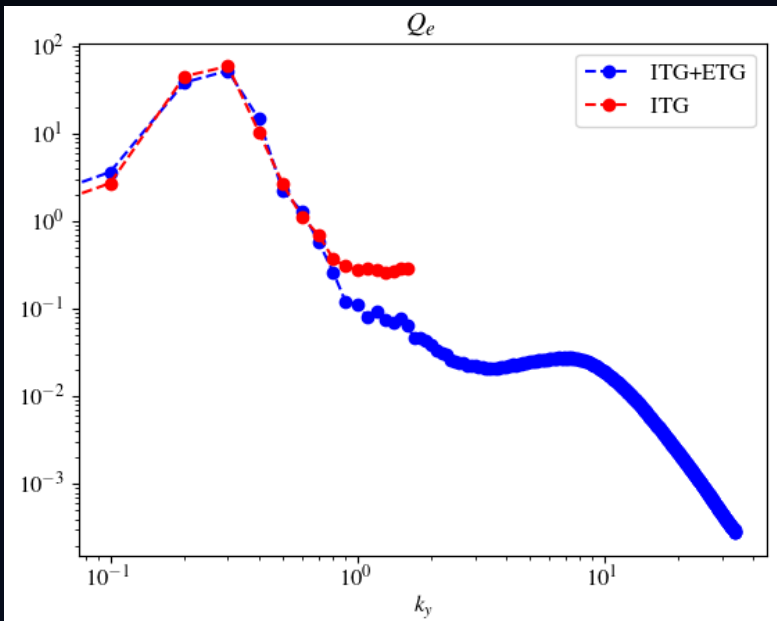
(e,D,C混合プラズマの解析だが、規格化には軽水素質量を用いた。)



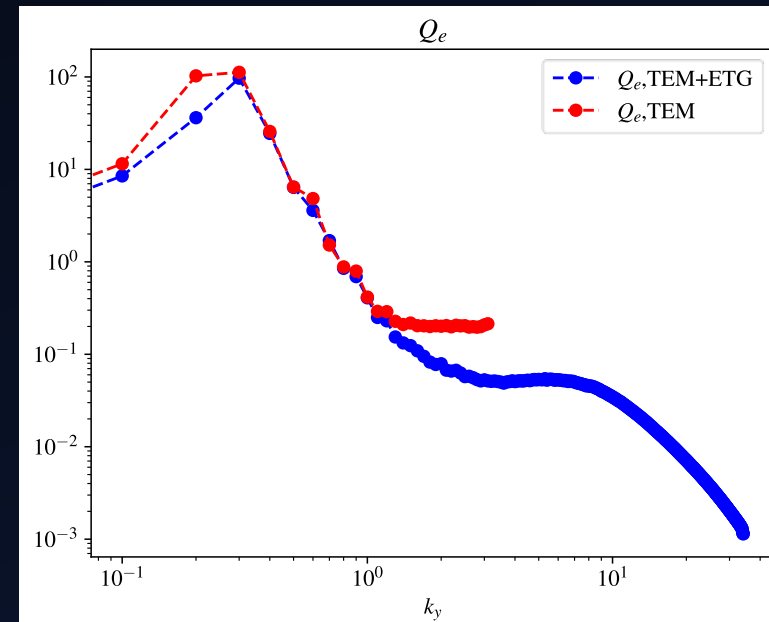
JT-60U配位におけるマルチスケール乱流解析

- ✓ コア部(半径位置 $\rho=0.5$)では、ITG乱流によりETGが強く抑制され、マルチスケール乱流計算とイオンスケール乱流計算で同程度の熱輸送 [Cf. Maeyama, PRL(2015)]
- ✓ 周辺部に近づく(と $\rho=0.6$)、イオンスケールはTEM, 電子スケールはETGが強く不安定。
- ✓ イオンスケール乱流計算に比べてマルチスケール乱流計算では輸送低減(~40%)
- ✓ **TEM/ETGマルチスケール相互作用によるTEM乱流輸送の低減が実配位でも起こることを示す結果。**

電子熱輸送スペクトル(@ $\rho=0.5$)



電子熱輸送スペクトル(@ $\rho=0.6$)



次のステップ：大規模数値シミュレーション研究と運転シナリオ探索の断絶解消に向けて

原型炉開発のための運転シナリオ探索には、流体近似や経験則に大きく依存する簡易的乱流輸送モデルが用いられる。

一方、大規模シミュレーションは複雑な乱流の物理がわかるがパラメータ探索には不向き。

着想：マルチフィデリティデータ融合手法の乱流輸送モデリングへの適用

問題を以下の様に捉えなおす。

- Low-fidelity data: 低精度計算・多数のデータ（例：準線形輸送モデル）
- High-fidelity data: 高精度計算・少数の限られたデータ（例：マルチスケール乱流シミュレーションや実験データ）

→ Low-high fidelityデータ間の相関を取り入れることで予測精度を改善する。

⇒ 大規模数値シミュレーションを直接的に乱流輸送モデルに反映し、経験則を超えた輸送モデルを創出。

非線形自己回帰Gauss過程回帰(NARGP)

[Perdikaris, Proc. R. Soc. A 473, 20160751 (2017)]

Gauss過程回帰・・・入出力データセットがガウス過程に基づいて生成されたと仮定する。
入出力データセットを用いてベイズ推定することで、平均や分散を事後分布として推定する。

非線形自己回帰Gauss過程回帰(NARGP)・・・多段のGauss過程回帰を組み合わせ、t段の回帰を行う際に、t-1段の事後分布を含めて回帰を行う。**マルチフィデリティ回帰ではこの多段のGauss過程回帰をフィデリティの次数に合わせて適用**する。

$$f_t(x) = g_t(x, f_{*t-1}(x)), \quad (2.11)$$

$$g_t \sim \mathcal{GP}(f_t | 0, k_t((x, f_{*t-1}(x)), (x', f_{*t-1}(x'))); \theta_t)).$$

カーネル関数の関数形は以下で与える。

$$k_{t_g} = k_{t_p}(x, x'; \theta_{t_p}) \cdot k_{t_f}(f_{*t-1}(x), f_{*t-1}(x'); \theta_{t_f}) + k_{t_b}(x, x'; \theta_{t_b}), \quad (2.12)$$

$$k_t(x, x'; \theta_t) = \sigma_t^2 \exp \left(-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^d w_{i,t} (x_i - x'_i)^2 \right), \quad (2.13)$$

1次元関数のテストケース

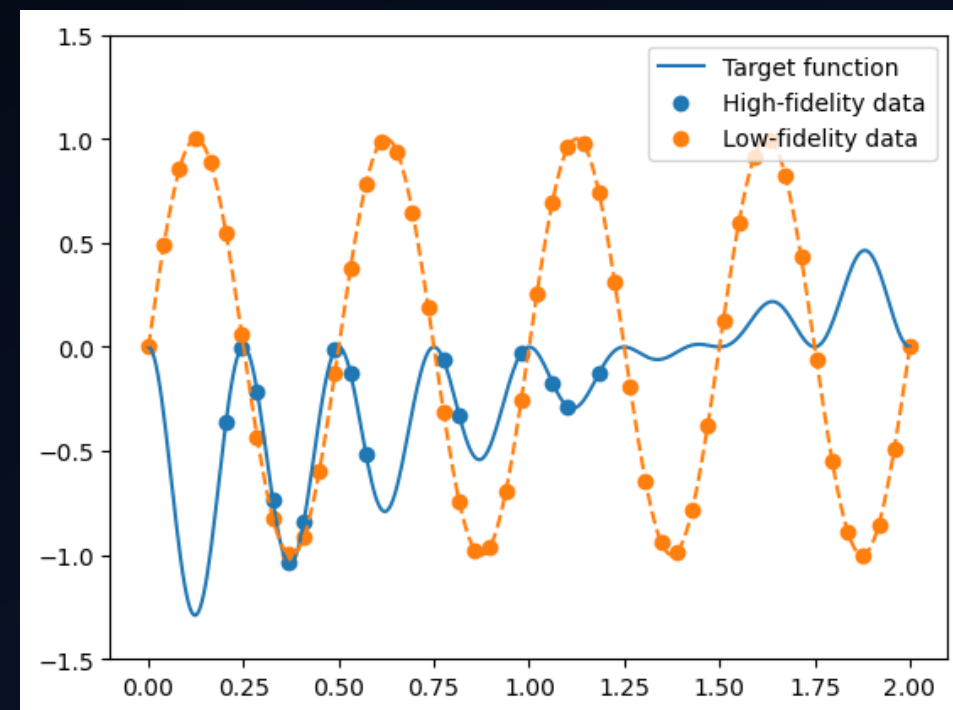
- Low-fidelity データ
正弦波, データ点数50点

$$f_l(x) = \sin(8\pi x) \quad (3.1)$$

- High-fidelity データ
Low-fidelity関数 f_l を非一様(x依存)かつ非線形(2乗)に変換。データ点数15点 (low-fidelityの50か所の評価位置xの内から15か所)

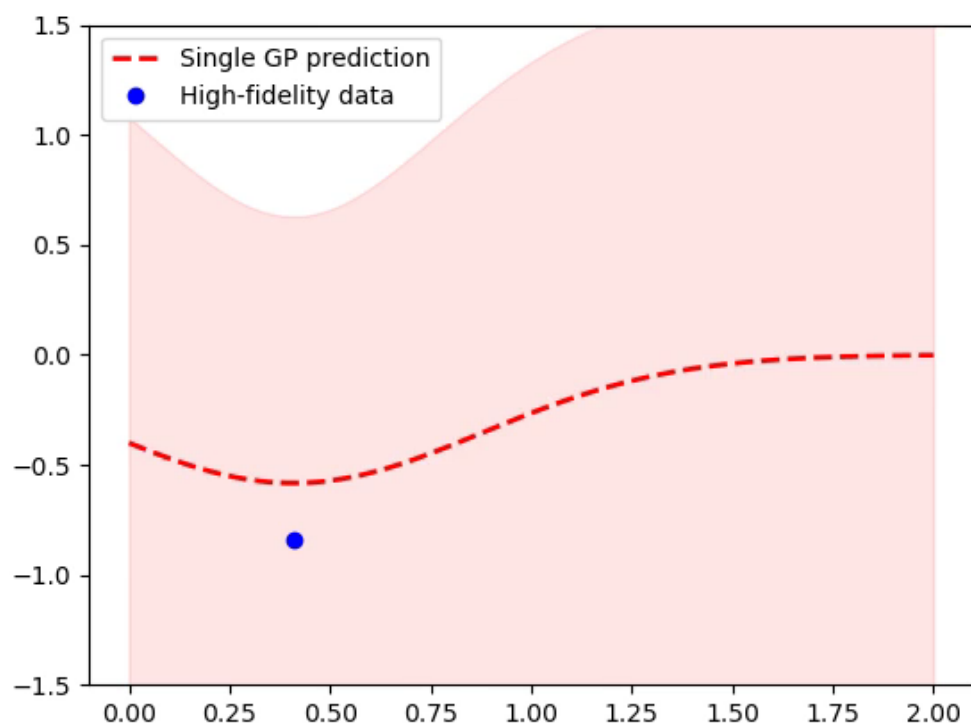
$$f_h(x) = (x - \sqrt{2}) f_l^2(x). \quad (3.2)$$

目標としては、これらのデータからなるべく正確にHigh-fidelity関数（右図青線）を推定したい。

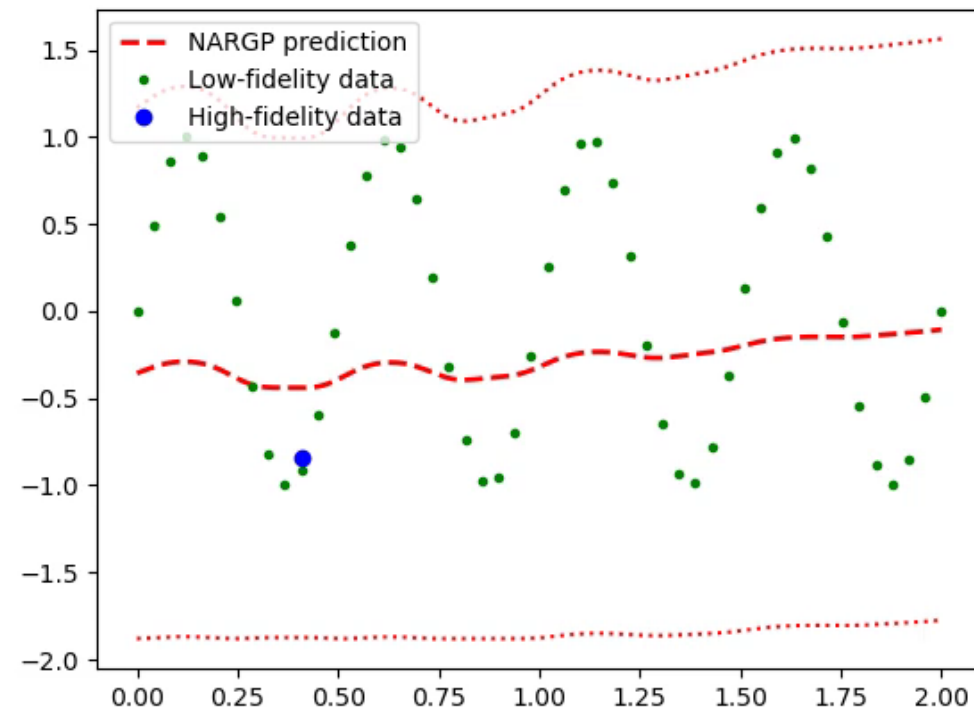


1次元関数のテストケース

通常のGauss過程回帰

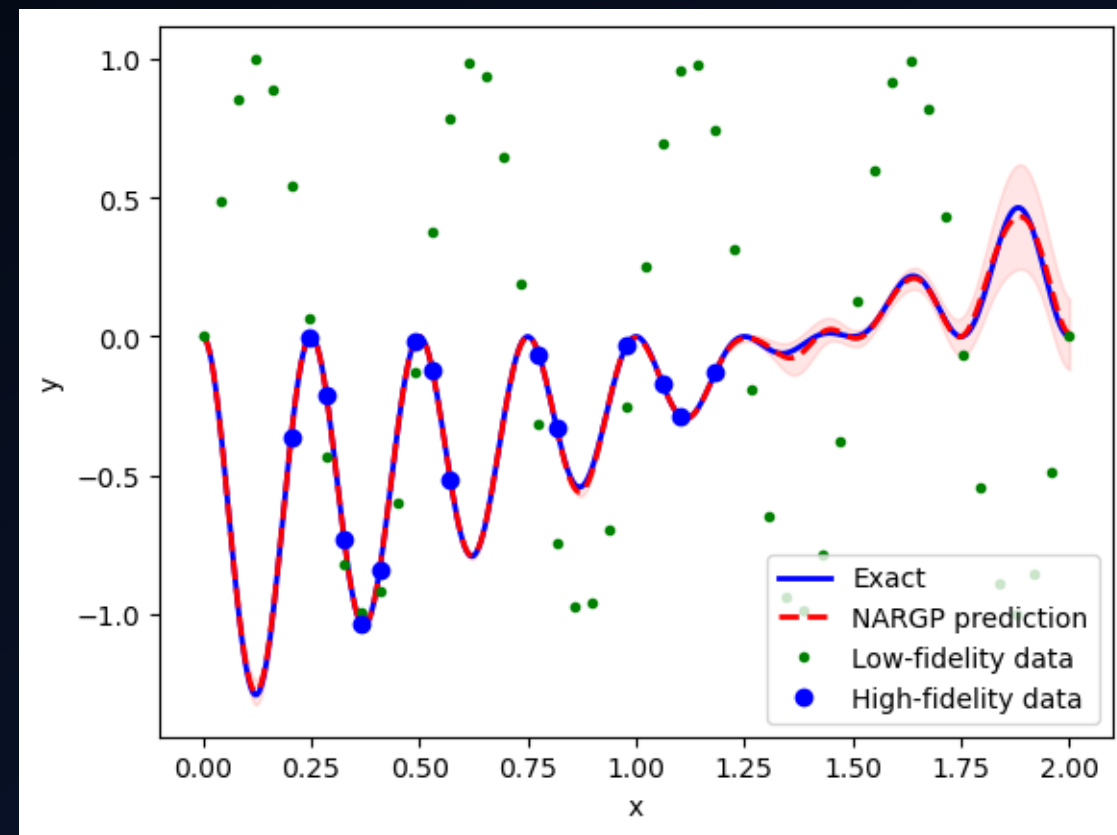
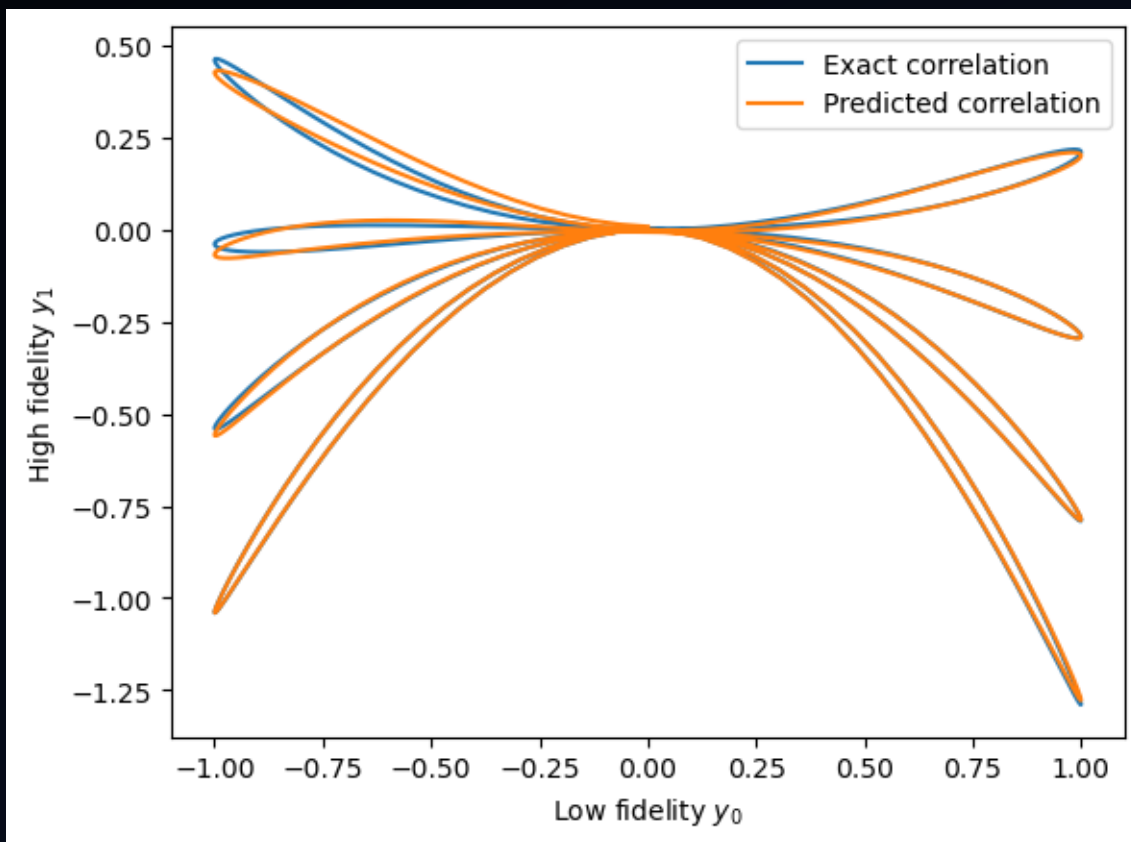


NARGP



1次元関数のテストケース

- ✓ NARGPでは低フィデリティデータと高フィデリティデータ間の相関を抽出（左図）
- ✓ それにより、通常のGauss過程回帰に比べて少ないデータ点数でも良い予測を構築できると期待される。分散により予測精度の指標を与える。



プラズマ乱流輸送データセットへの適用

E. Narita, et al., Contrib. Plasma Phys., e202200152 (2023)のデータ

入力とする局所プラズマパラメータ(12個):

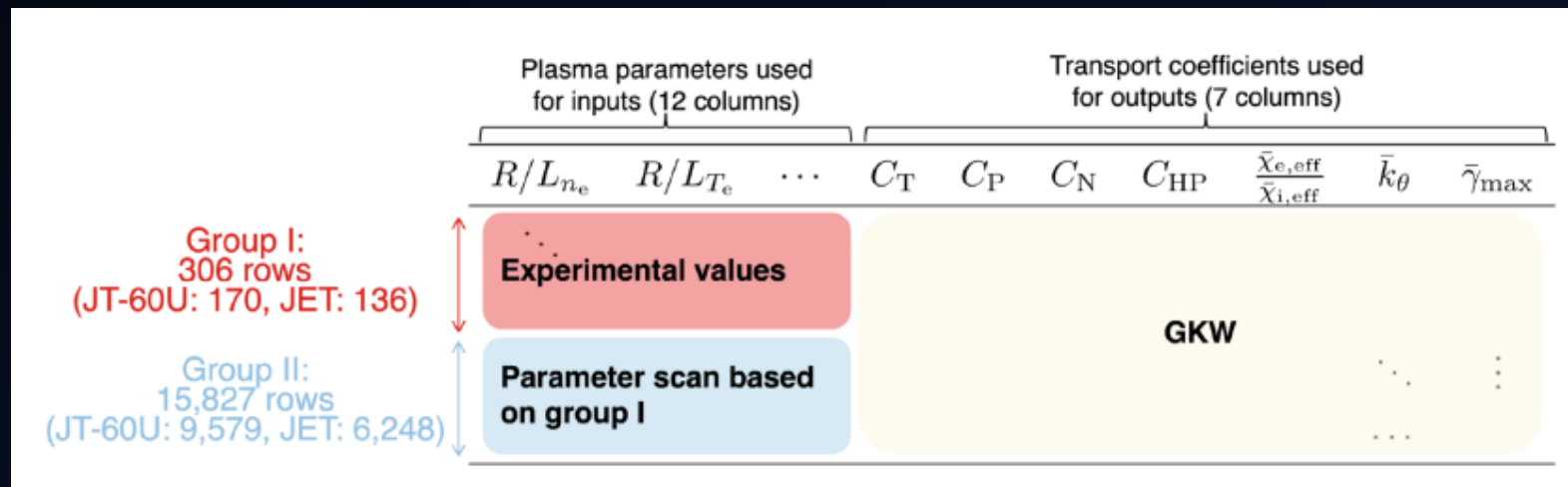
'R/Ln', 'R/LTe', 'R/LTi', 'ni/ne', 'Te/Ti', 'beta', 'nu_ee', 'q', 's', 'epsilon', 'kappa', 'delta'

低フィデリティデータ（最大16133点）：半経験的準線形拡散係数 D_{QL}

$$\bar{D} \propto \left(\bar{\gamma}_{\max} / \bar{k}_{\theta}^2 \right)^{\alpha} \left[\mathcal{K}_{RH} \left(\bar{\gamma}_{\max} / \bar{k}_{\theta}^2 \right)^{0.5} \right]^{-\beta}$$

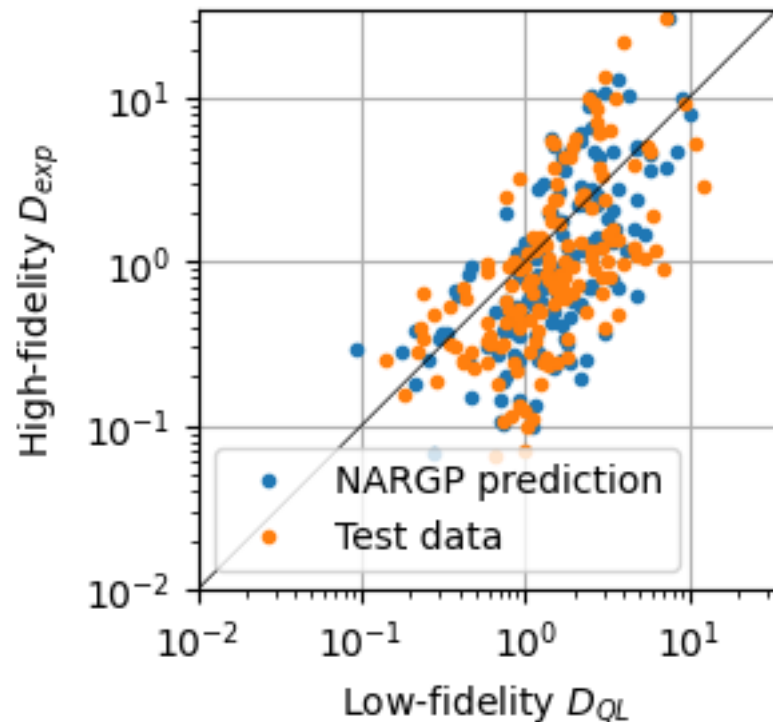
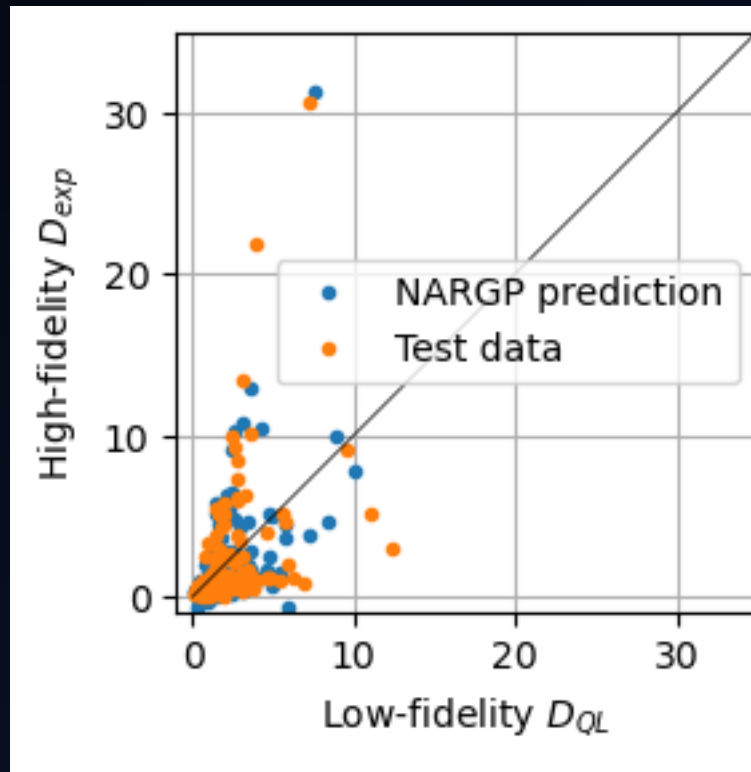
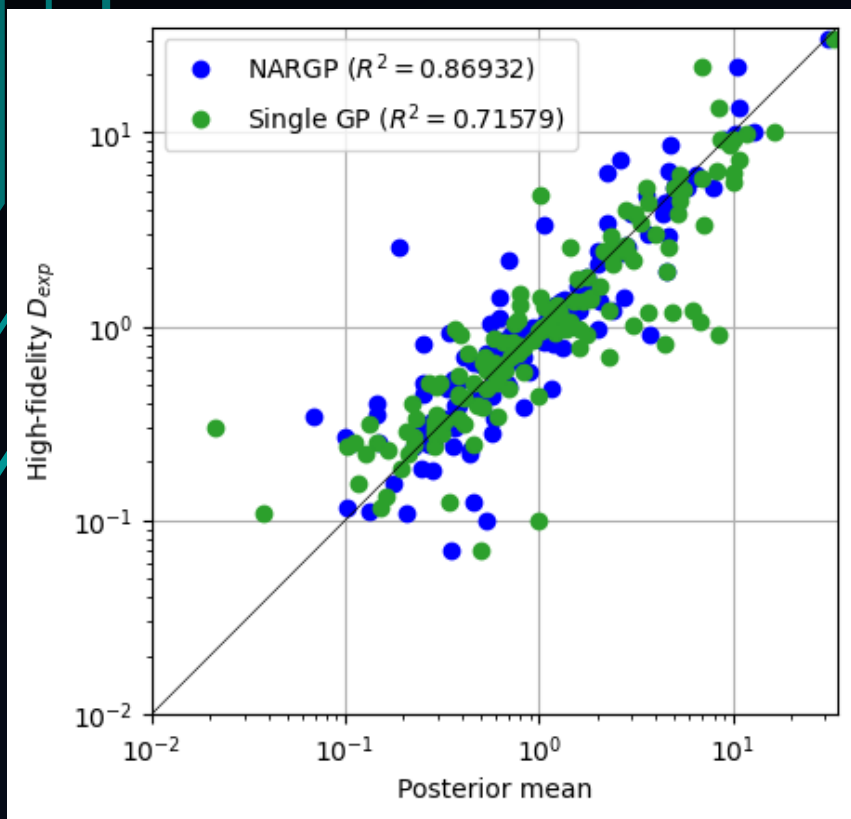
高フィデリティデータ（最大306点）：実験値に基づく拡散係数 D_{exp}

→ 半分は学習用データとして利用し、残り半分は検証用データとして未参照で残す



プラズマ乱流輸送データセットへの適用

通常のGauss過程回帰よりNARGPの方が決定係数は高そうだが、そうでないケースも散見。
低・高フィデリティデータ間の関係が十分抽出できているか不明
→もう少し、データの特性に踏み込んで結果の解釈・分析が必要。



まとめ

- 将来の核燃焼プラズマを想定した研究の進展 [Maeyama, et al., *Nature Commun.* **13**, 3166 (2022)]
(高電子温度 $T_e > T_i$ かつ e,D,T,He 混合プラズマ (e.g. 原型炉やITER PFPO-1))
 - Q. 高電子温度領域でも電子スケール効果は効くか？
 - A. $T_e/T_i=3$ の高電子温度でも電子スケール効果が影響しうる。
マルチスケール相互作用により電子熱輸送が低減されうる電子温度領域の存在を世界で初めて指摘。
 - Q. 電子スケール乱流は 燃料D,T や He燃焼灰 の輸送に効くか？
 - A. マルチスケール相互作用で乱流スペクトルが変化し、電子だけでなくD,T, Heの輸送にも影響する。
主な影響は乱流飽和振幅の変化であり、粒子輸送の両極性拡散内訳はあまり変化しない。
- JT-60U実平衡配位シミュレーションにおいてもETGによるTEMの輸送低減機構が存在。
- 大規模数値シミュレーション研究を設計・モデリングに反映させるための方法論の研究
 - **マルチフィデリティ乱流輸送モデリング**の検討
 - 非線形自己回帰Gauss過程回帰(NARGP)・・・低精度だが多数のLow-fidelityデータと高精度だが少数のHigh-fidelityデータを融合して、高精度の予測を試みるマルチフィデリティモデリング手法の一つ。
 - 1次元や2次元のテストケースでは、外挿性の向上といったNARGPの優位性が顕著に確認された。
 - 核融合プラズマ乱流輸送データセットに対してもNARGPの適用を検討中。