



統合輸送コードTASK3Dを用いた 熱輸送シミュレーション

A. Wakasa¹, A. Fukuyama¹, S. Murakami¹, N. Takeda¹, and, M. Yokoyama²

¹ Department of Nuclear Engineering, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan

² National Institute for Fusion Science, 322-6 Oroshi-cho, Toki 509-5292, Japan

第16回若手科学者によるプラズマ研究会

日時：平成25年3月4日（月）12:45 ～ 3月6日（水）10:55

場所：日本原子力研究開発機構 那珂核融合研究所

Acknowledgments: This work is supported by Grant-in-Aid for Scientific Research (S) (20226017) from JSPS.

1. はじめに (3-9p)
 - 統合輸送シミュレーションコード
 - 統合輸送コード TASK3D

2. 新古典輸送データベース (10-22p)
 - 非軸対称系プラズマの新古典輸送
 - 拡散係数算出コードDCOM
 - NNWを用いた新古典輸送データベース

3. TASK3DによるLHDプラズマ輸送解析 (23-42p)
 - 乱流輸送モデルとコンスタントファクタ
 - 熱輸送シミュレーション結果
 - 予測的シミュレーション
 - 温度勾配項を含んだgyro-Bohmモデル

4. まとめ

1. はじめに

- 統合輸送シミュレーションコード
- 統合輸送コード TASK3D

2. 新古典輸送データベース

- 非軸対称系プラズマの新古典輸送
- 拡散係数算出コードDCOM
- NNWを用いた新古典輸送データベース

3. TASK3DによるLHDプラズマ輸送解析

- 乱流輸送モデルとコンスタントファクタ
- 熱輸送シミュレーション結果
- 予測的シミュレーション
- 温度勾配項を含んだgyroBohmモデル

4. まとめ

磁気閉じ込め核燃焼プラズマの実現を目指し、
「**プラズマ全体の時間発展を全放電時間にわたって記述する統合シミュレーション**」の開発が重要な研究課題

磁気核融合プラズマにおける統合モデリングの目的

- 核燃焼プラズマの性能を予測
 - » **装置設計，研究計画の策定，運転シナリオの検討に寄与**
- プラズマの振る舞いを自己無撞着に記述し，実験結果と比較
 - » **物理モデルを検証し，物理機構を明らかにする**
- 計測データから輸送係数，加熱・損失パワー等直接には測定できない物理量の定量的な評価
 - » **プラズマ中の物理現象の理解の促進をはかる**

核融合プラズマの時空間スケール

5
/ 43

核融合プラズマの振る舞いは、時間空間スケールが大きく異なる様々な現象を含むとともに、空間領域や運転領域によって支配的な現象が変化

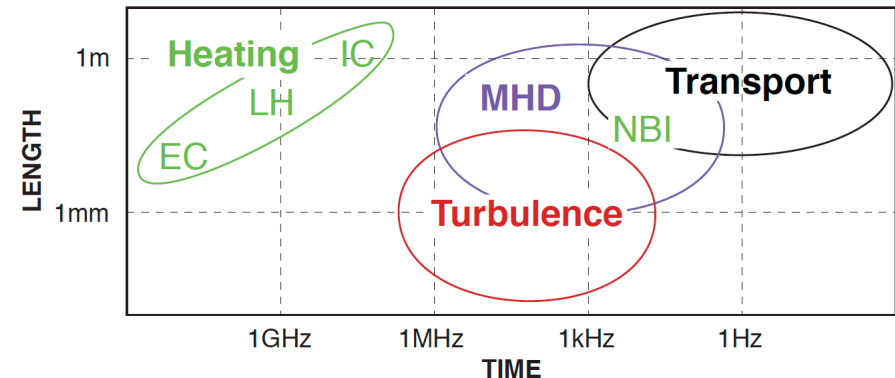
■核融合プラズマ中の物理現象

EX) ITER plasma

コアプラズマ領域 : 磁場強度 4 T, 温度 10keV, 密度 $10^{20}m^{-3}$

周辺プラズマ領域 : 磁場強度 4 T, 100eV (SOL), 10eV (ダイバータ), 密度 $10^{19}m^{-3}$

- **空間スケール** : 電子ジャイロ半径 \longleftrightarrow 磁力線方向の平均自由行程
コアプラズマ領域 ; 7桁程度, 周辺プラズマ領域 ; 10桁程度
- **時間スケール** : 電子ジャイロ周波数 \longleftrightarrow 放電時間
コアプラズマ領域 ; 11桁程度, 周辺プラズマ領域 ; 16桁程度



時空間スケールで非常に幅広い様々な物理現象が存在し、それらの現象が密度、温度、運動量などの空間分布や電磁場を通して密接に結合



限られた時間・空間スケールを記述する要素コードを組み合わせた**統合シミュレーションコード**が必要となる。

統合シミュレーションコードの開発

6
/ 43

多要素統合シミュレーション（巨視的な実験観測量の全時間変化の解析）

プラズマ形状を記述する平衡

密度温度の時間発展を記述する炉心プラズマ輸送

プラズマの巨視的な安定性

外部からの粒子・加熱・運動量ソース

炉心プラズマの境界条件を与える周辺プラズマ輸送

などの要素コードの組み合わせ

EX) プラズマ輸送：拡散型輸送モデル \Leftrightarrow 多流体方程式による動的輸送モデル
 \Leftrightarrow 運動量分布関数を用いる運動論的輸送モデル

統合シミュレーションコード：TASK（京大）**TASK3D**（京大+NIFS）TOPICS（JAEA）

モデリング

大規模シミュレーションの知見を理論モデル、数値データベース、モジュールなどとして統合シミュレーションへと取り込む

（境界条件）（過渡応答）（乱流輸送係数）

プラズマ・物質相互作用

非線形MHD

3D MHD 平衡

周辺プラズマ乱流



炉心プラズマ乱流

大規模シミュレーション

（モデリングに必要な基本物理過程の探求）

新古典拡散係数
算出コードDCOM

高エネルギー粒子
解析コードGNET-TD

粗視化

粗視化・領域分割されたモデル間の結合モデルの構築（**モデリング**）が重要

■ 統合シミュレーションコードTASK3Dの開発.

ヘリカル型核融合装置の実現を目指し、非軸対称系プラズマを対象とした統合シミュレーションコードTASK3Dの開発が、**京都大学**と**核融合科学研究所 (NIFS)**の共同研究で進行中.

▼ 近年の取り組み

- **新古典輸送データベースのTASK3Dへの組み込み**
→TASK3Dで正確な新古典輸送の評価が可能に.
 - **径方向電場算出モジュールの開発・追加**
→両極性条件や電場拡散方程式による径方向電場の自己無撞着な評価
 - **粒子加熱モジュールFIT3DとTASK3Dの連携, 整備**
→LHD実験プラズマに対する自己無撞着なNBI加熱パワー分布計算
及び熱輸送解析 (*Experimental analysis*)
→NBI加熱プラズマの予測的シミュレーション
(*Predictive analysis*)
- 以上のモジュールの追加・連携を行ったTASK3Dを用いて、LHDプラズマを対象とし、乱流輸送モデルを用いた熱輸送シミュレーションを行ってきた. ISHW(2009), IAEA(2010)

TASK3Dの性能向上への取り組み

8
/ 43

TASK3Dにおける乱流輸送モデルの精度向上, 及び, validation を目的としたLHD実験が一昨年から行われている.

(14th, Sep. 2011, EXP No. #773 等).

- 各乱流輸送モデルのコンスタントファクタの決定
 - LHD実験結果をもとに適切なコンスタントファクタを決定
- 各乱流輸送モデルの validation
 - TASK3Dを用いた熱輸送シミュレーション結果と実験結果の比較
- 新たな乱流輸送モデルの提案
 - gyroBohmモデルを基に温度勾配の効果を含ませたモデルを使用した熱輸送シミュレーション
ISHW(2012) , JIFT(2012), EPS(2012)
- 密度の時間発展を含んだ熱輸送シミュレーション
酒井 (京大) (ITC22)
- 時間発展プラズマにおける高エネルギー粒子解析コードGNET-TDと連携
 - LHD高イオン温度実験におけるNBI加熱プラズマの解析
山口 (京大) (ITC22)

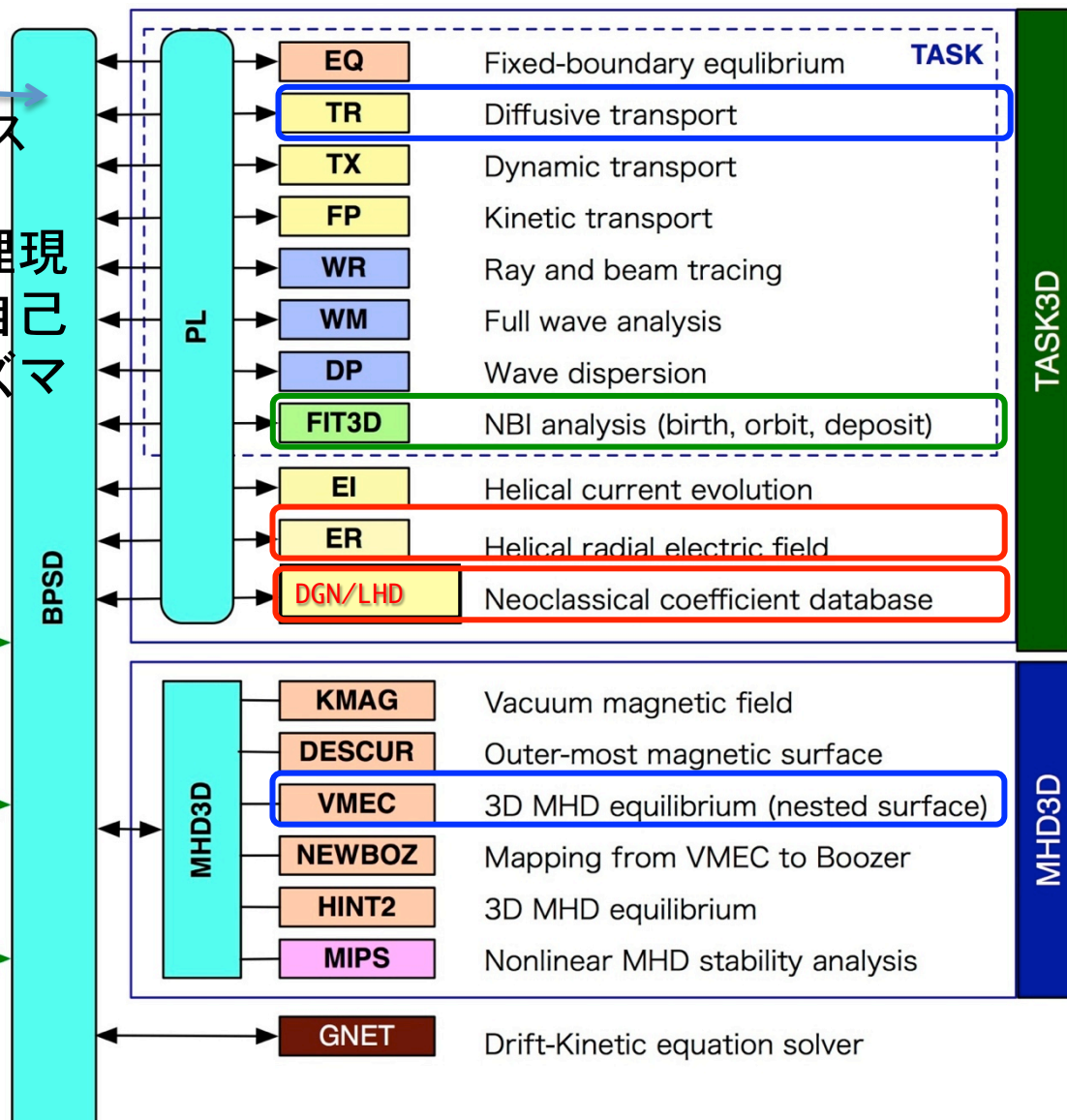
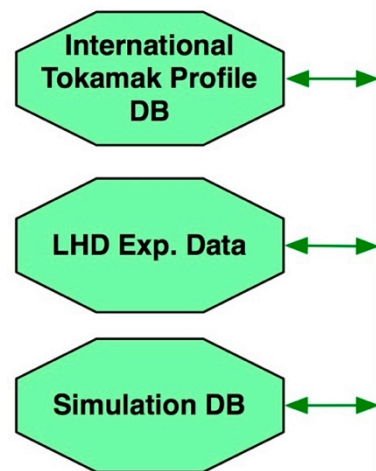
TASK3Dのモジュール構成

TASK3Dは多数のモジュールを組み合わせた構成
各モジュールが、それぞれ異なった物理現象を記述

データ交換
インターフェイス

それぞれの物理現象が接続され自己無撞着にプラズマを記述する。

Profile Database



TR
拡散型輸送シミュレーション
モジュール

DGN/LHD

新古典輸送データベース
モジュール

ER
径方向電場算出
モジュール

FIT3D
NBI加熱パワー
算出モジュール

VMEC
3次元平衡解析
コード

1. はじめに

- 統合輸送シミュレーションコード
- 統合輸送コード TASK3D

2. 新古典輸送データベース

- 非軸対称系プラズマの新古典輸送
- 拡散係数算出コードDCOM
- NNWを用いた新古典輸送データベース

3. TASK3DによるLHDプラズマ輸送解析

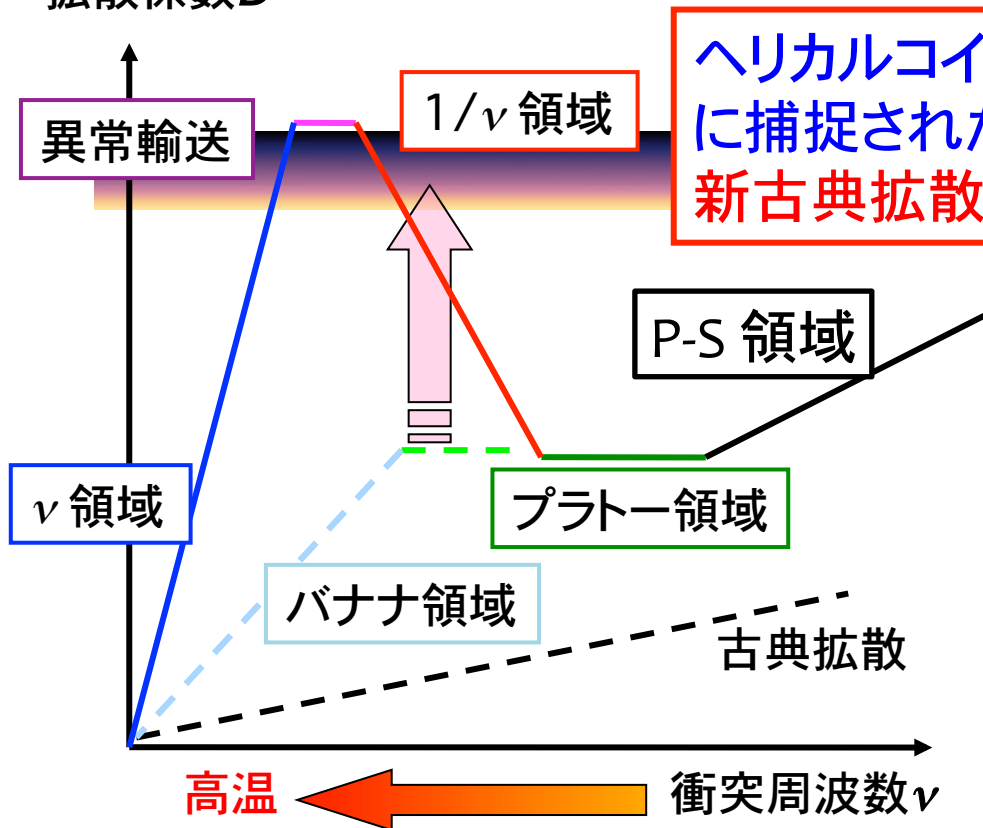
- 乱流輸送モデルとコンスタントファクタ
- 熱輸送シミュレーション結果
- 予測的シミュレーション
- 温度勾配項を含んだgyroBohmモデル

4. まとめ

非軸対称核融合装置における新古典拡散

ヘリカル型核融合装置(LHD)の拡散係数

拡散係数 D



ヘリカルコイルの作る磁場(ヘリカルリップル)に捕捉された粒子が、低衝突周波数領域で新古典拡散を増大させる

ヘリカル型核融合装置では、プラズマを高温にすると、新古典拡散係数が異常輸送程度まで増大してしまう可能性がある。

ヘリカル型核融合装置では新古典輸送の正確な検討が必要不可欠である。

モンテカルロ法を用いて単一エネルギー粒子の局所的な拡散係数を算出するコード,DCOM(Diffusion Coefficient Calculator by the Monte Carlo Method)を新たに開発。

DCOMコード: 新古典拡散係数の算出

DCOM : モンテカルロ法を利用し, 荷電粒子の軌道を直接追跡することで**単一エネルギー粒子の局所的な拡散係数**を算出するコード[*].

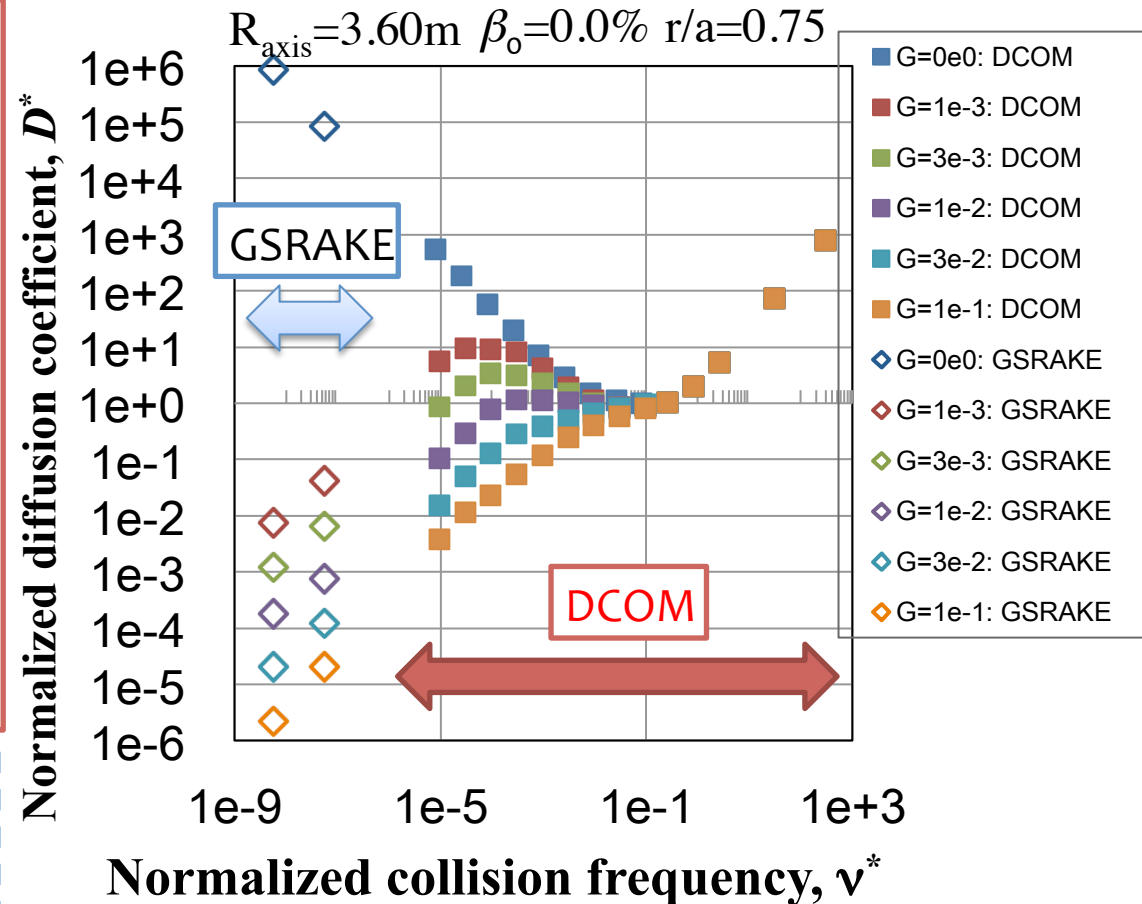
利点 : 多数の磁場フーリエモードを考慮することが可能で, 正確に拡散係数を算出することができる.

欠点 : 無衝突領域で長時間の計算が必要.

GSRAKE :

利点 : 高速に拡散係数の算出が可能.

+ **欠点** : 考慮可能な磁場のフーリエモード数に限りがあり, 磁場構造を正確に取り入れることが困難.



$$\nu^* = \frac{Rv}{\iota V}, \quad G = \frac{R_0}{\iota r} \frac{E_r}{vB}, \quad D^* = \frac{D}{D_{plateau}} = \frac{\omega\pi R_0}{0.64\rho^2 v} D$$

[*] A. Wakasa et al., J. Plasma Fusion Res. 4 (2001) 408.

ニューラルネットワーク(NNW)を利用した 新古典輸送データベース DGN/LHD

13
/ 43

DCOM, GSRAKEは、単一エネルギー粒子の局所的な拡散係数を算出する。
粒子拡散係数, 熱伝導度, 粒子・熱流束の算出 ← エネルギー積分
プラズマシミュレーションには, 広いパラメタ領域の拡散係数が必要。
強い非線形性 → 従来の方法では精度の良い内挿が困難。

⇒ ニューラルネットワークによる内挿 (データベース化)

ニューラルネットワーク(NNW)

動物の脳神経の動作を模倣した手法。

- 任意の関数を再現可能。
- 多数の入出力パラメータがある場合にも, 容易にフィッティング可能。
- 非線形性の強い事象を良く再現。

ニューラルネットワーク(NNW)を利用した 新古典輸送データベース DGN/LHD

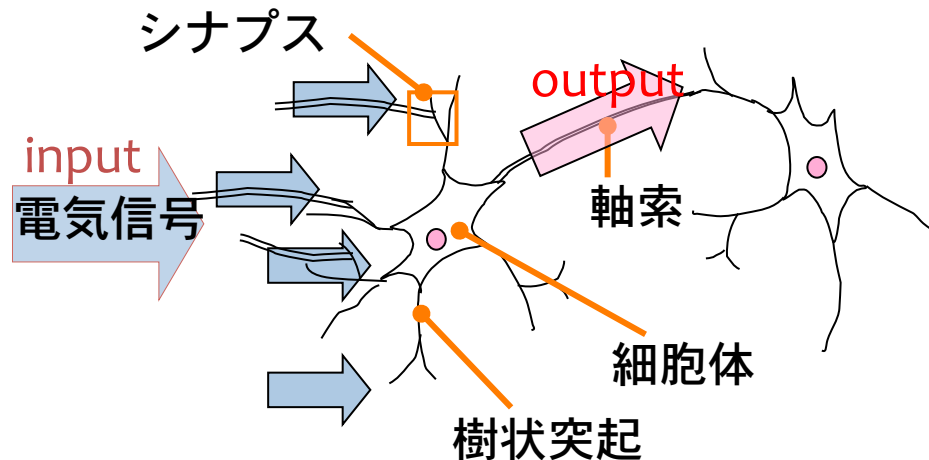
14
/ 43

DCOM, GSRAKEは、単一エネルギー粒子の局所的な拡散係数を算出する。
粒子拡散係数, 熱伝導度, 粒子・熱流束の算出 ← エネルギー積分
プラズマシミュレーションには, 広いパラメタ領域の拡散係数が必要。
強い非線形性 → 従来の方法では精度の良い内挿が困難。

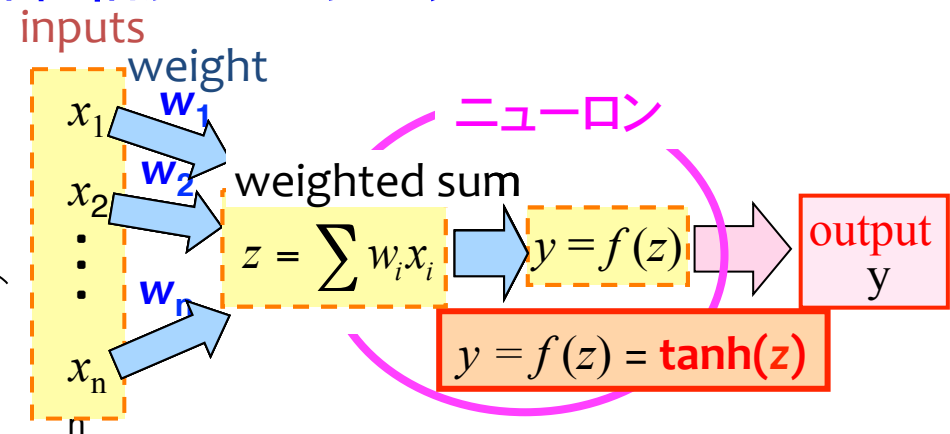
⇒ ニューラルネットワークによる内挿 (データベース化)

神経細胞の動作

ニューロン(神経細胞)



神経細胞の工学モデル



入力された電気信号がある閾値を超えた場合に, 次のニューロンへ出力される

重み付きの入力値総和をニューロンの内部関数へと入力し, その結果を出力値とする。

ニューラルネットワークの学習

NNWが正しい入出力関係を有するために、重みの値を適切な値に修正する必要。
学習データとしてDCOM及びGSRAKEの計算結果を使用する。

Training data

DCOM results and GKASE results

- $R_{\text{axis}} = 3.75\text{m}$: $(v^*, G, r/a, \beta_0, D^*)$ 1960 + 200 = 2160
- $R_{\text{axis}} = 3.60\text{m}$: $(v^*, G, r/a, \beta_0, D^*)$ 1960 + 200 = 2160

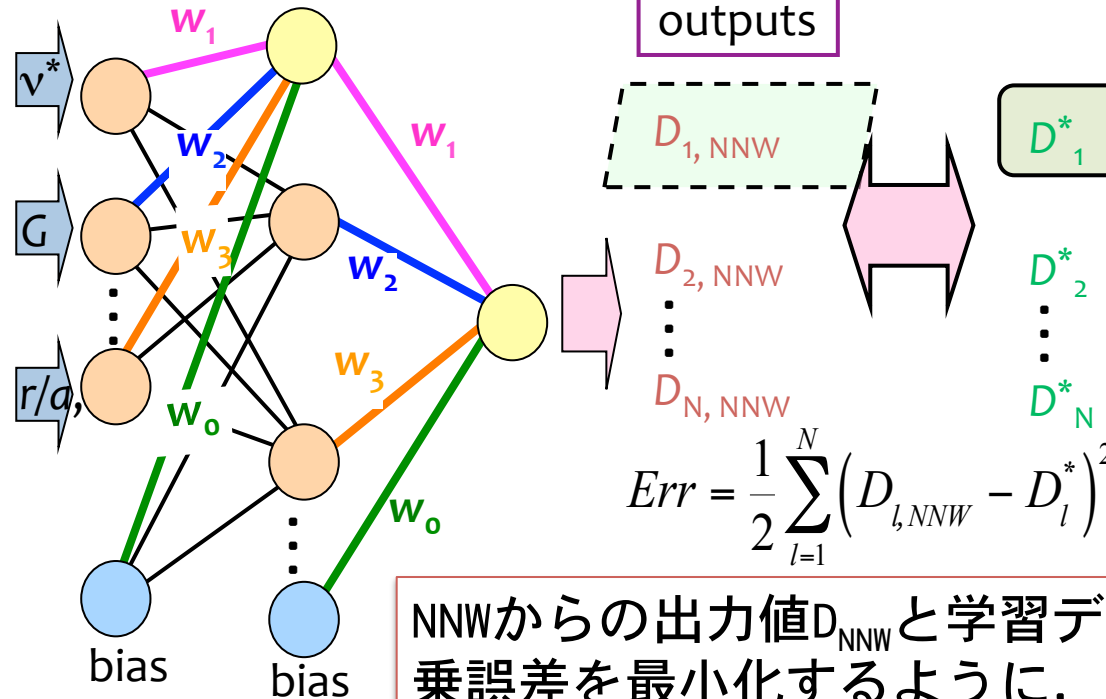
NNWが出力すべき出力値
(学習データ)

inputs

階層型ニューラルネットワーク

outputs

- $v^*_1, G_1, r/a_1, \beta_{0,1}$
- $v^*_2, G_2, r/a_2, \beta_{0,2}$
- ⋮
- $v^*_N, G_N, r/a_N, \beta_{0,N}$



NNWからの出力値 D_{NNW} と学習データ D^* の平均自乗誤差を最小化するように、ニューラルネットワークの各結線重みの値を修正する。

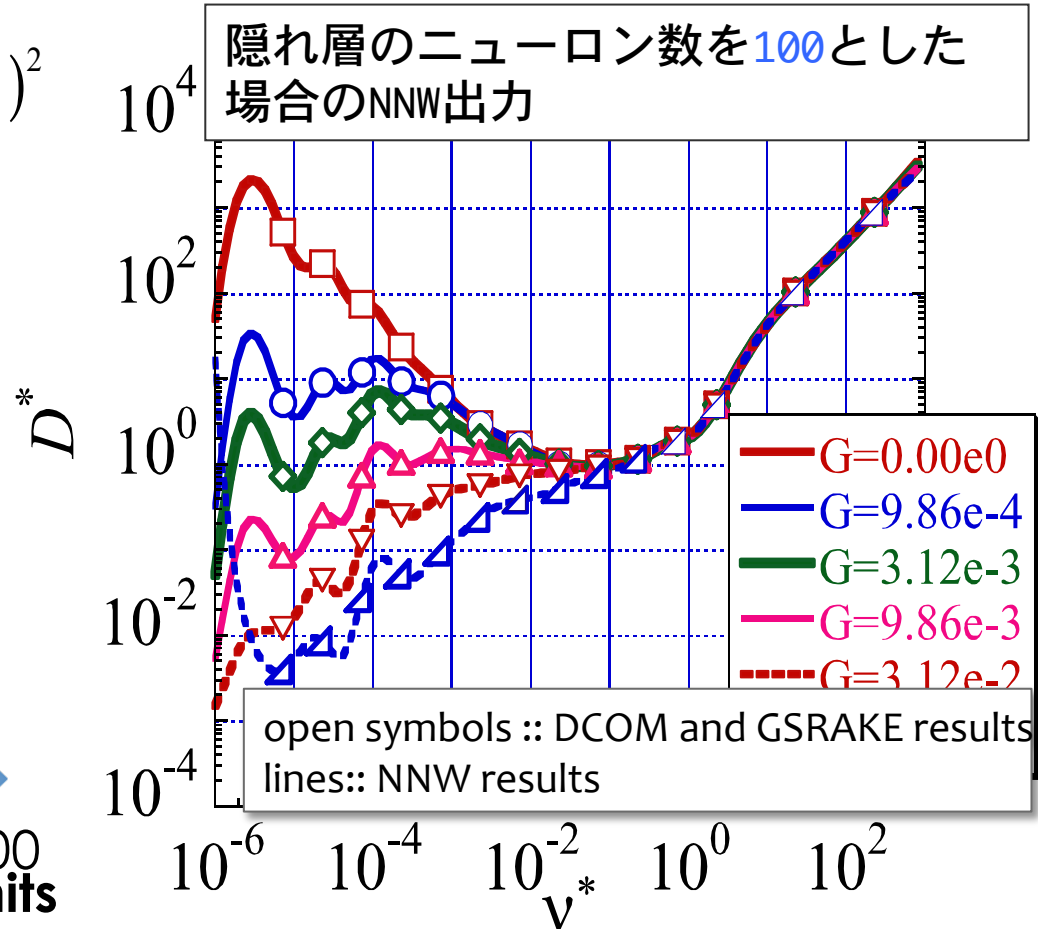
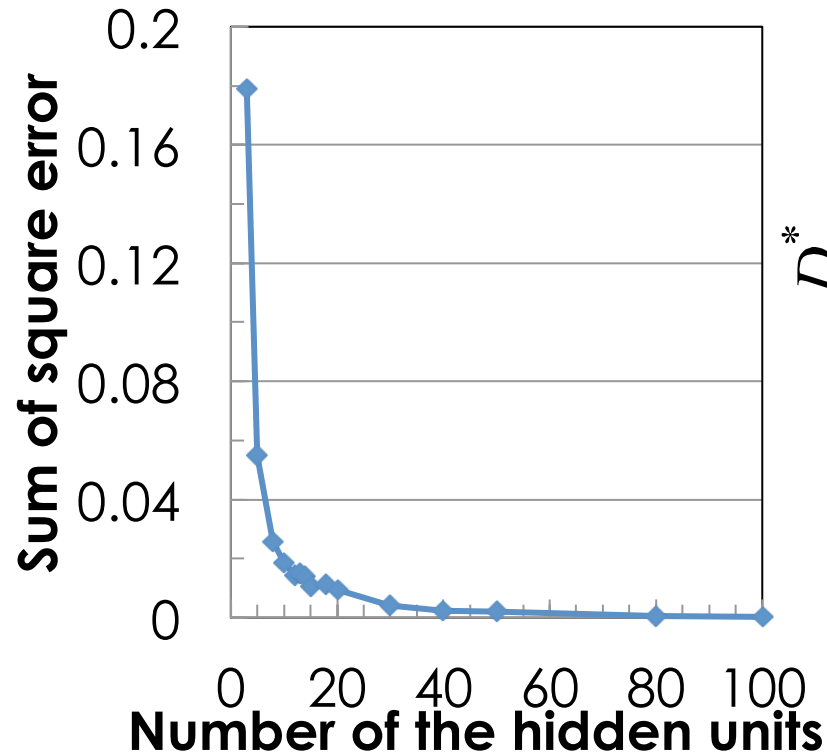
隠れ層のニューロン数の決定

- 最小化と汎化 -

階層型NNWにおいて隠れ層（中間層）のニューロンの数を適切に決定することが重要

Sum of square error

$$E = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^N (y_l - t_l)^2$$



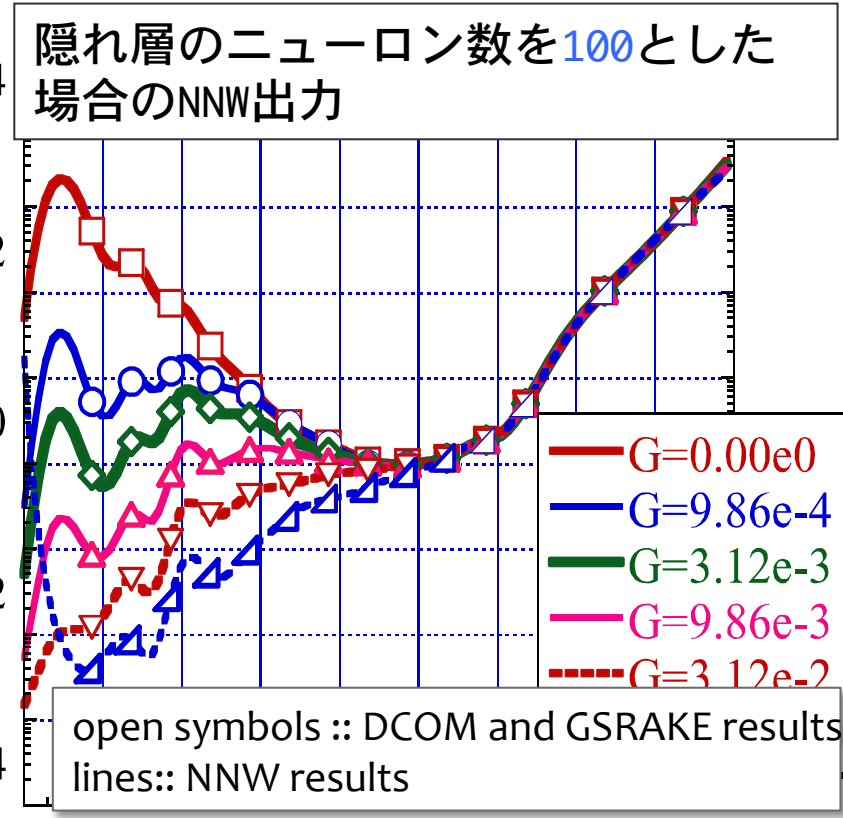
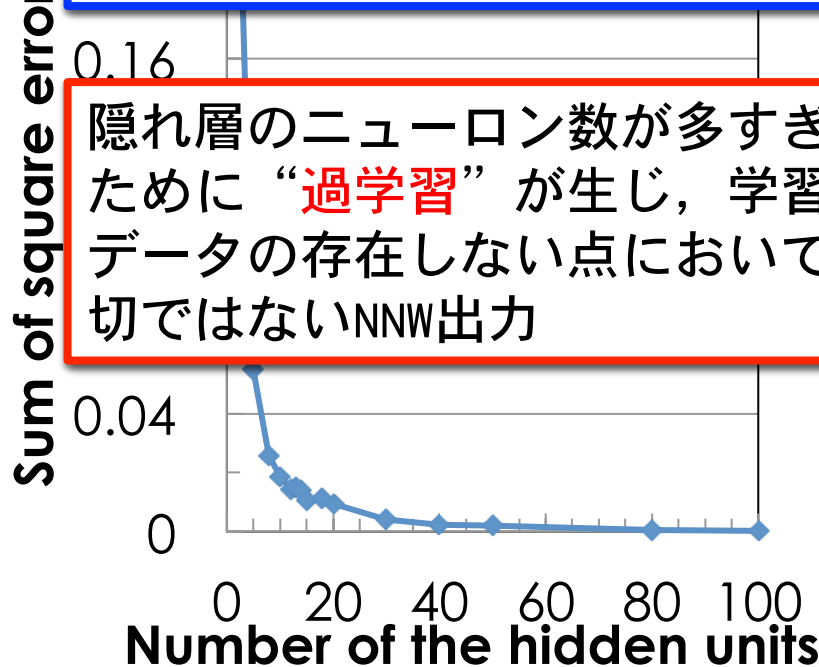
隠れ層のニューロン数の決定

- 最小化と汎化 -

階層型NNWにおいて隠れ層（中間層）のニューロンの数を適切に決定することが重要

DCOM及びGSRAKEの結果（学習データ）が存在する点ではNNW出力との結果はよく一致。

隠れ層のニューロン数が多すぎるために“**過学習**”が生じ、学習データの存在しない点において適切ではないNNW出力



隠れ層のニューロン数を増やすに従い平均自乗誤差は単調に減少するが、ニューロン数が必要以上に多い場合には**汎化能力の悪化**を引き起こす。

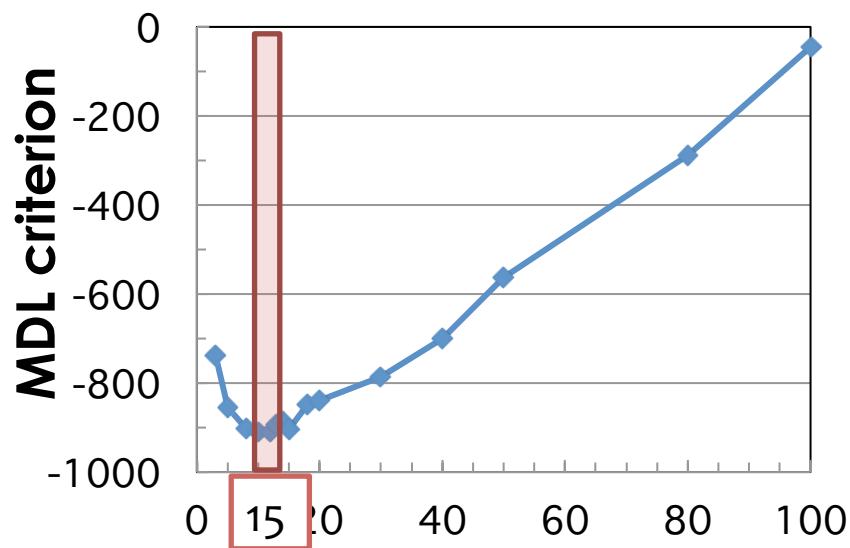
隠れ層のニューロン数の決定 - MDL基準 - 18 / 43

情報量基準のひとつであるMDL基準を用いて隠れ層のニューロン数を決定

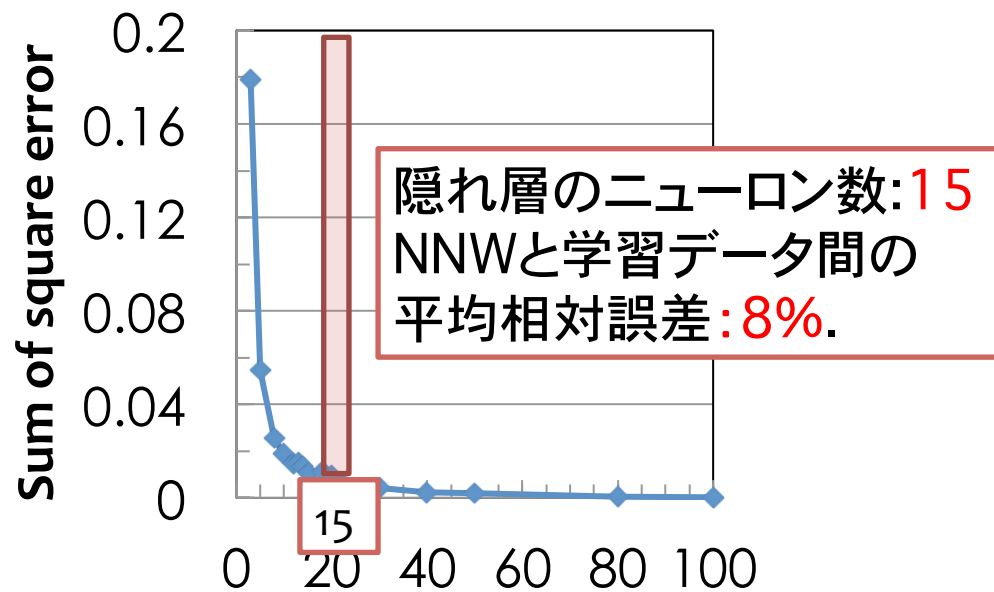
Minimum Description Length criterion (MDL criterion) : モデル選択のための基準の一つで、データに対するあてはまりの良さとモデルの自由度とのバランスを取ることにより最良のモデルを選択

$$\text{MDL} = -\text{最大対数尤度} + 0.5 \times (\text{隠れ層のニューロン数}) \times \ln(\text{学習データ総数})$$

学習データとの間に大きな誤差が存在する場合には第1項に大きな差があらわれ、十分あてはまりの良いモデルが選ばれる。第1項に大きな差が無い場合には、第2項が働いて自由度の小さいモデルが選ばれる



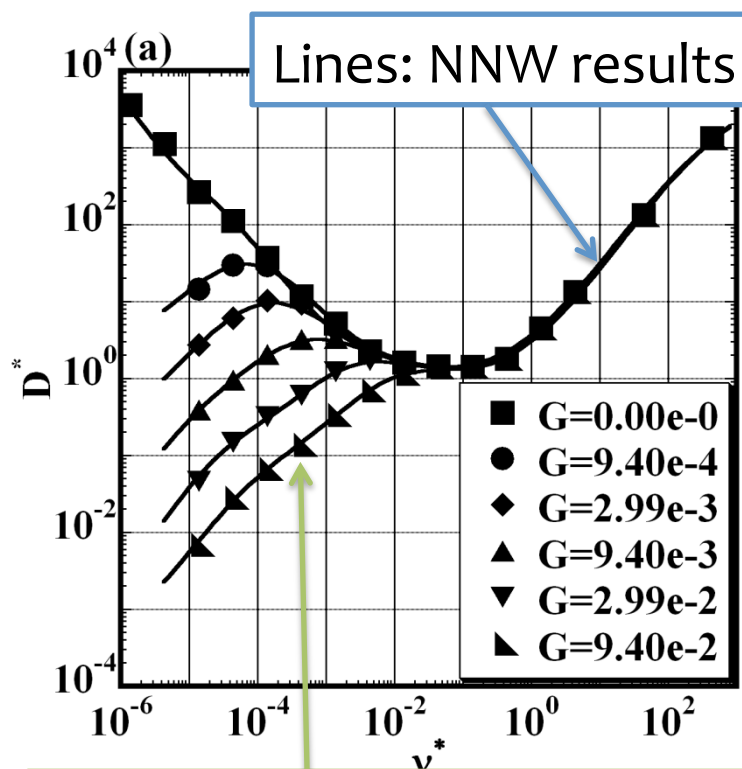
Number of the hidden units



Number of the hidden units

新古典輸送データベースの出力結果

新古典輸送データベース: DCOM+GSRAKE/NNW for LHD (DGN/LHD)-



• DGN/LHD の出力結果 (Lines) は、DCOM, GSRAKE の計算結果 (symbols) と非常に良く一致。
(平均相対誤差 6-8%)

• $1/v$, $v^{1/2}$, plateau, P-S 領域, 及び, 径方向電場の効果を良く再現.

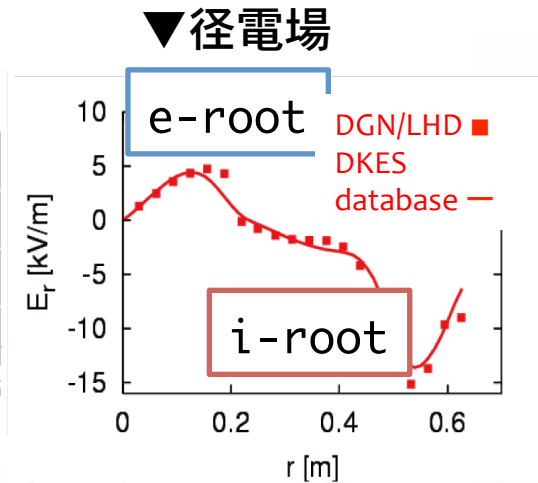
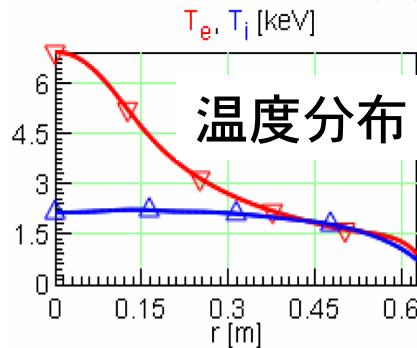
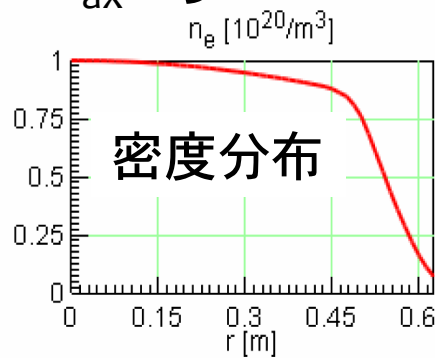
symbols: DCOM and GSRAKE results

輸送係数ベンチマークテスト [*]

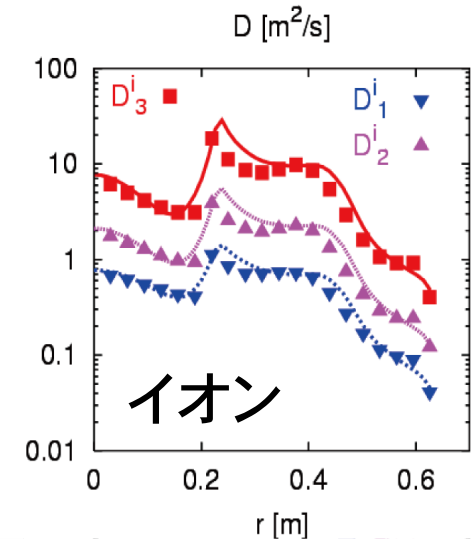
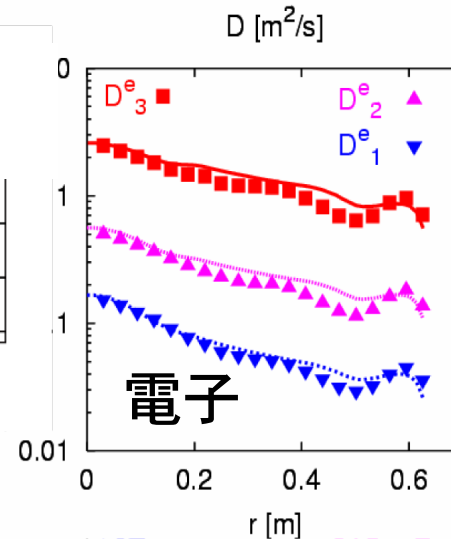
DGN/LHD
DKES database [3]

のベンチマークテスト.

LHD
 $R_{ax} = 3.6 \text{ m}$



▼D1: 粒子拡散係数(D) symbols : DGN/LHD
D3: 熱伝導度(χ) lines : DKES database
D2: 非対角項



異なる手法により算出された,
両極性電場, 電子及びイオンの各輸送係数が, 良く一致.



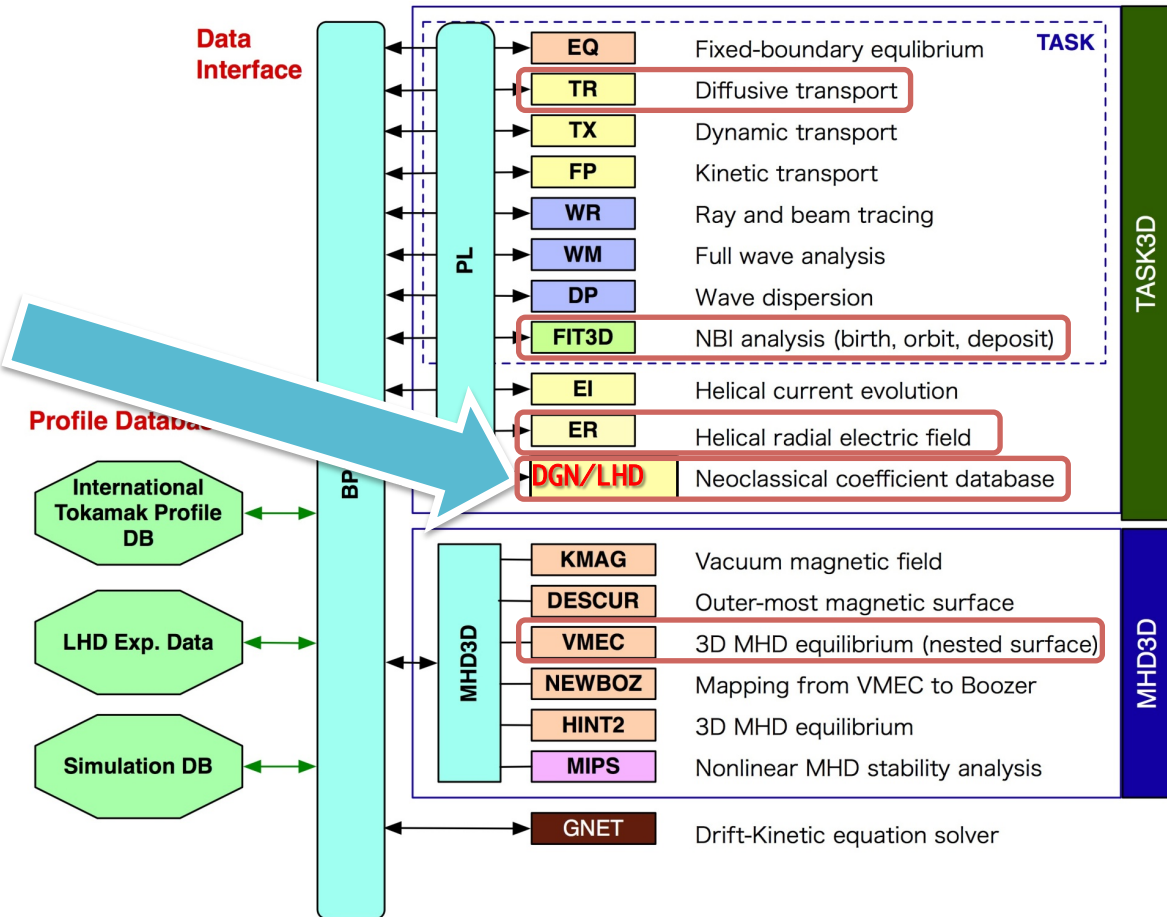
データベースDGN/LHDの信頼性が確認された.

[*] Y. Turkin et al., in Proc. 17th International Stellarator/Heliotron Workshop 2009, PPPL, CD-ROM (2009) P02-14

新古典輸送データベースDGN/LHDのモジュール化

21
43

新古典輸送データベース
DGN/LHD を TASK3D へ組み
込むことでLHDプラズマを対
象とした熱輸送シミュレー
ションにおいて、正確な新
古典輸送系数，及び，径方
向電場の評価を可能とした。



正確な新古典輸送系数の評価の元

- LHDプラズマに対する（予測的なものを含めた）熱輸送シミュレーション
- LHDプラズマの実験解析（径方向電場の評価・乱流輸送の評価）

Summary I

1. はじめに
 - 統合輸送シミュレーションコード
 - 統合輸送コード TASK3D

 2. 新古典輸送データベース
 - 非軸対称系プラズマの新古典輸送
 - 拡散係数算出コードDCOM
 - NNWを用いた新古典輸送データベース
-
- 核燃焼プラズマの実現には，統合シミュレーションコードの開発が必要不可欠.
 - » 現在，京大とNIFSの共同研究で統合輸送コードTASK3Dが開発中.

 - 非軸対称系プラズマ（特に高温プラズマ）において新古典輸送は重要な研究課題.
 - » 新古典拡散算出コード及び新古典輸送データベースの開発
 - » 新古典輸送データベースのTASK3Dへの組み込み
- LHDプラズマを対象とした様々な熱輸送解析を可能に.

1. はじめに

- 統合輸送シミュレーションコード
- 統合輸送コード TASK3D

2. 新古典輸送データベース

- 非軸対称系プラズマの新古典輸送
- 拡散係数算出コードDCOM
- NNWを用いた新古典輸送データベース

3. TASK3DによるLHDプラズマ輸送解析

- 乱流輸送モデルとコンスタントファクタ
- 熱輸送シミュレーション結果
- 予測的シミュレーション
- 温度勾配項を含んだgyroBohmモデル

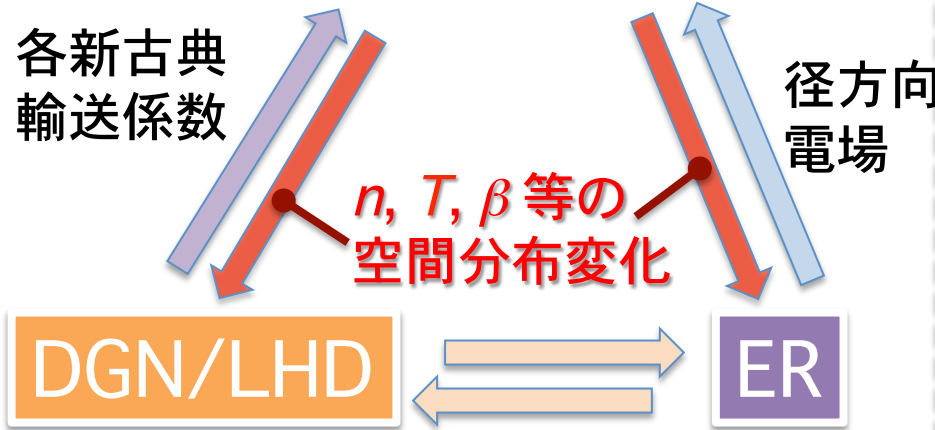
4. まとめ

TASK3Dを用いた1D熱輸送シミュレーションの流れ 24 43

TR

電子・各イオンの
径方向拡散を扱う。

1次元拡散型輸送方程式
 ・粒子輸送方程式
 ・熱輸送方程式
 ・磁場拡散方程式



両極性条件
$$e\Gamma_e^{NC} = \sum Z_i e\Gamma_i^{NC}$$

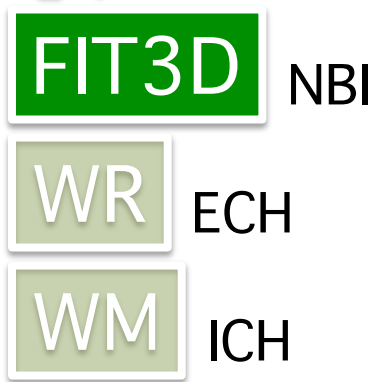
新古典輸送データベースDGN/LHDの開発により、正確かつ高速な新古典輸送係数の算出、及び、径方向電場の算出を可能に。

平衡磁場

VMEC

n, T, β 等の空間分布変化

加熱ソース



温度分布・密度分布の時間変化に応じた加熱吸収分布の計算

自己無撞着なNBI加熱プラズマの熱輸送シミュレーション

熱輸送方程式と乱流輸送モデル: TASK/TR

■ 熱輸送方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} n_s T_s \right) = - \frac{1}{V'} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(V' \langle |\nabla \rho| \rangle n_s T_s \left(V_{K_s} + \frac{3}{2} V_s \right) - V' \langle |\nabla \rho|^2 \rangle \frac{3}{2} D_s T_s \frac{\partial n_s}{\partial \rho} - V' \langle |\nabla \rho|^2 \rangle n_s \chi_s \frac{\partial T_s}{\partial \rho} \right) + P_s$$

D_s : the particle diffusion coefficient χ_s : the thermal diffusion coefficient
 V_s : the particle pinch velocity V_{K_s} : the heat pinch velocity

熱輸送係数を新古典輸送によるもの χ^{NC} と乱流輸送によるもの χ^{TB} の和と仮定.

$$D_s = \boxed{D_s^{\text{NC}}} + \boxed{D_s^{\text{TB}}}, \quad \chi_s = \boxed{\chi_s^{\text{NC}}} + \boxed{\chi_s^{\text{TB}}}, \quad V_s = \boxed{V_s^{\text{NC}}} + \boxed{V_s^{\text{TB}}}, \quad V_{K_s} = \boxed{V_{K_s}^{\text{NC}}} + \boxed{V_{K_s}^{\text{TB}}}$$

乱流輸送係数は χ^{TB} [m²/sec]のみ考慮 ($D_s^{\text{TB}}=V_s^{\text{TB}}=V_{K_s}^{\text{TB}}=0$).

電子及びイオンの乱流輸送係数は χ^{TB} は等しいと仮定. ($\chi_{\text{ele}}^{\text{TB}} = \chi_{\text{ion}}^{\text{TB}}$)

■ 新古典輸送係数: DGN/LHDより両極性条件下で算出

$$\Gamma_s^{\text{NC}} = -n_s D_1^s \left\{ \frac{1}{n_s} \frac{\partial n_s}{\partial r} - \frac{q_s E_r}{T_s} + \left(\frac{D_2^s}{D_1^s} - \frac{3}{2} \right) \frac{1}{T_s} \frac{\partial T_s}{\partial r} \right\}; \quad V_s = \left[\Gamma_s^{\text{NC}} + \frac{\partial n_s}{\partial r} \right] / n_s ;$$

$$Q_s^{\text{NC}} = -n_s T_s D_2^s \left\{ \frac{1}{n_s} \frac{\partial n_s}{\partial r} - \frac{q_s E_r}{T_s} + \left(\frac{D_3^s}{D_2^s} - \frac{3}{2} \right) \frac{1}{T_s} \frac{\partial T_s}{\partial r} \right\}. \quad V_{K_s} = \left[Q_s^{\text{NC}} + n_s \frac{\partial T_s}{\partial r} \left(\frac{D_3}{D_2} - \frac{3}{2} \right) \right] / n_s T_s ;$$

乱流輸送係数: 乱流モデル

TASK3Dは,様々な乱流輸送モデルを実装済み.
また新たな乱流モデルも容易に組み込み可能(ファンクション, モジュール)

実装されてるモデルの例)

	Bohm model emphasized on the edge region	gyro-Bohm model	Alcator Scaling model	advanced gyro-Bohm model (Including the effect of grad T)
χ^{TB}	$C_{\text{edgeBohm}} \frac{T}{eB} \left(\frac{r}{a} \right)^2$	$C_{\text{gyroBohm}} \frac{T}{eB} \left(\frac{\rho_L}{a} \right)$	$C_{1/n} \frac{1}{n}$	$C_e^{(0)} \frac{1}{16} \frac{T_e}{eB} \frac{\rho_i}{a} + C_e^{(1.5)} \frac{1}{16} \frac{T_i}{eB} \frac{\rho_i}{a} \left(\frac{\nabla T_i}{T_i} a \right)^{\frac{3}{2}}$ $C_i^{(1.5)} \frac{1}{16} \frac{T_i}{eB} \frac{\rho_i}{a} \left(\frac{\nabla T_i}{T_i} a \right)^{\frac{3}{2}}$

(C_{model} は 各乱流輸送モデル毎に決定される定数.)

電子・イオン温度が共に計測されているショット (the reference plasmas: #109081, #109082, #109125, #109129, #109131, #109133, #109134, #109135) を対象に熱輸送シミュレーションを行い, 各乱流輸送モデルの比例定数 C_{model} を決定. (14th, Sep. 2011, EXP No. #773)

→ シミュレーションで得られた電子・イオン温度と実験計測値の間の相対誤差の二乗平均平方根 (RMS) を最小化するように, C_{model} を決定.

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{\text{NRMAX}} \sum_{\text{NRMAX}} \left(\frac{T^{\text{TASK3D}}(\rho) - T^{\text{EXP}}(\rho)}{T^{\text{EXP}}(\rho)} \right)^2}$$

→ 得られた比例定数 C_{model} を用いて, 他ショットの解析を行った.

- ▼ LHD実験データを各初期条件に使用.
- ▼ 密度分布は実験測定値で固定.
- ▼ 温度分布が定常となるまで計算.
- ▼ 実験計測値 (温度密度分布) を元に算出した加熱パワー分布を使用.
- ▼ 径方向電場は両極性条件から決定.

Reference Plasmas

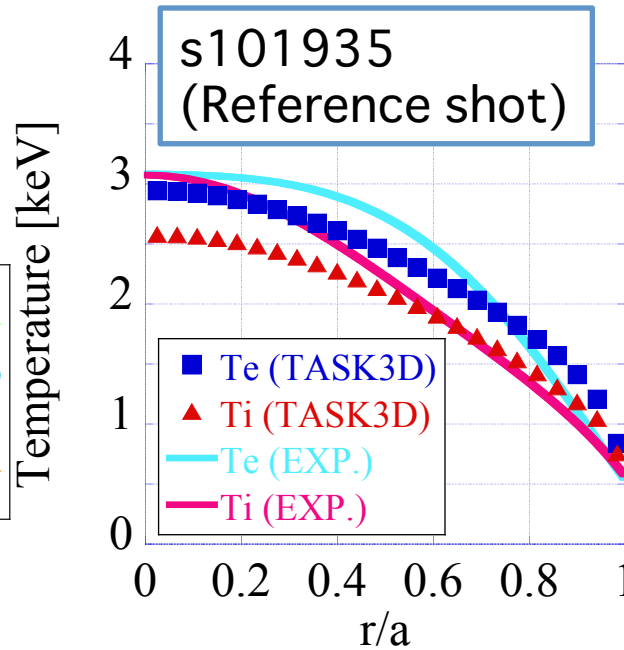
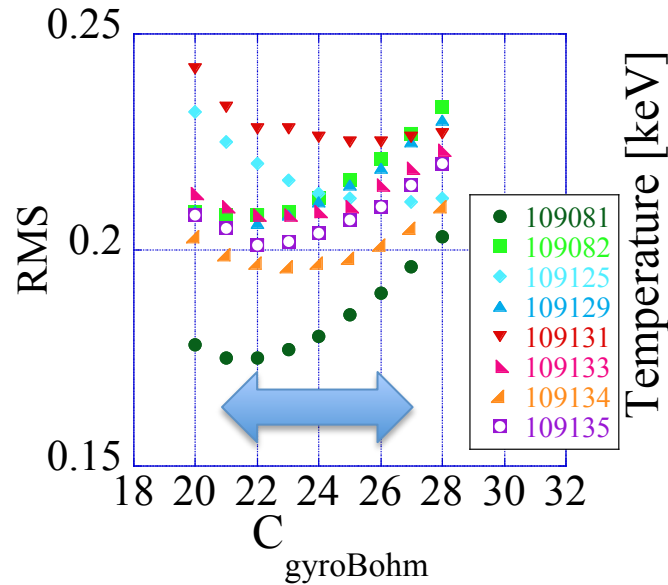
Shot num.	time[se c]	Rax[m]	B _o [T]	T _{eo} [keV]	T _{io} [keV]	n _o [10 ¹⁹ m ⁻³]
-----------	---------------	------------	--------------------	-----------------------	-----------------------	--

the 15 cycle exp. (EXP No. #773, 14 SEP 2011)

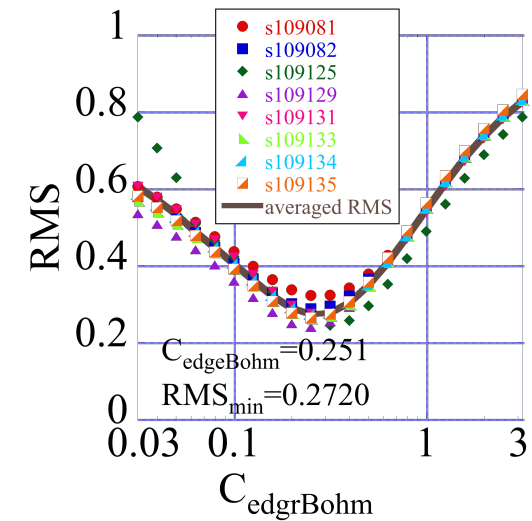
109081	4.24	3.60	2.75	3.0	3.0	3.07
109082	4.24	3.60	2.75	3.2	3.5	2.78
109125	4.24	3.60	2.85	3.4	4.1	1.81
109129	4.24	3.60	2.85	3.4	3.8	2.63
109131	4.24	3.60	2.85	3.4	4.0	2.27
109133	4.24	3.60	2.85	3.4	3.8	2.61
109134	4.24	3.60	2.85	3.3	3.5	2.87
109135	4.24	3.60	2.85	3.3	3.4	2.99

Constant Factor, C_{model} の決定

gyro-Bohm model



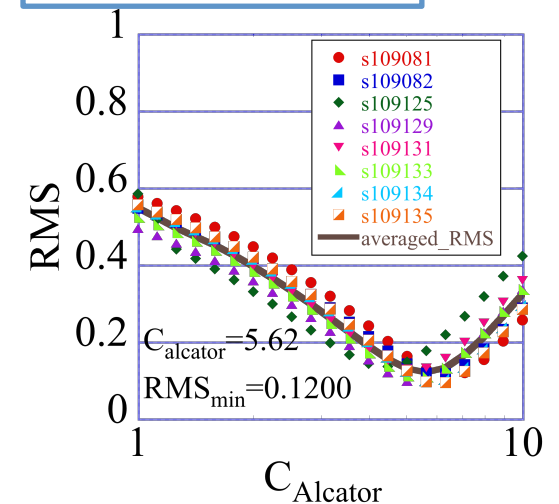
edge-Bohm model



C_{gyroBohm} の値を22 - 27 とした場合にRMSの値が最小に。
全ショットのRMSの和を最小とする $C_{\text{gyroBohm}} = 25$ と決定。

$C_{\text{gyroBohm}} = 25$ とした場合, 実験測定値と
TASK3Dシミュレーション結果との平均RMSは約20%。

Alcator model



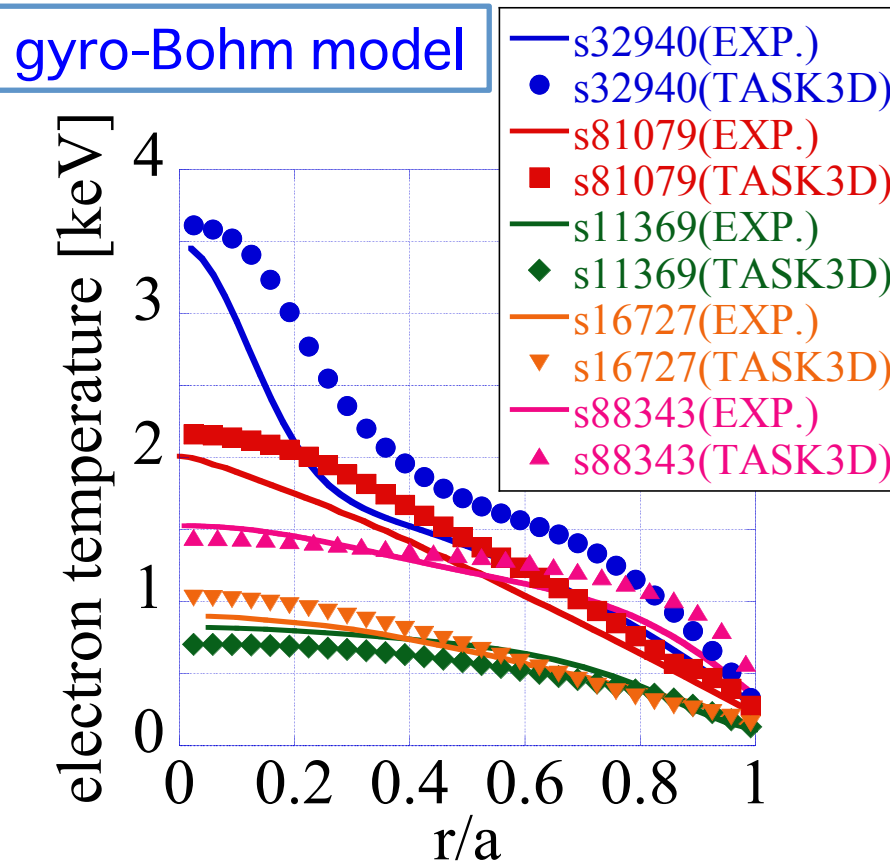
Characteristic Properties of the Chosen Shots 30 43

* Next, we applied TASK3D to additional LHD shots using the **gyro-Bohm models** with the same fitting factor ($C_{\text{gyroBohm}}=25$).

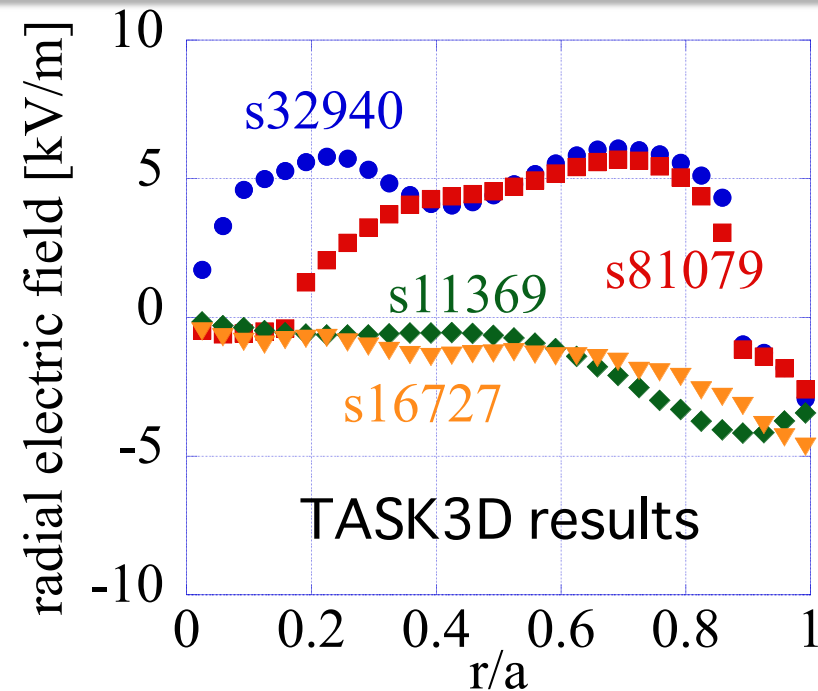
Shot num.	time[sec]	feature	Rax[m]	B ₀ [T]	T _{eo} [keV]	n _o [10 ¹⁹ m ⁻³]	Heating
88343	1.84	Te and Ti measured	3.60	2.75	1.5	1.41	NBI
11369	2.2	NBI plasmas (similar <i>n</i> and <i>T</i> profiles.)	3.60	1.52	0.83	2.2	NBI
16727	1.02		3.75	1.5	0.91	1.84	NBI
32940	2.003	Electron Root plasma	3.75	1.52	3.48	0.299	NBI+ECH
81079	0.866	low density	3.75	1.5	2.01	0.189	NBI

Simulation Results for the Chosen Shots

31 / 43



$R_{ax} 3.60m$ (s11369 and s88343)の両
ケースでシミュレーション結果と実
験測定値が良い一致.



In Experimental results,

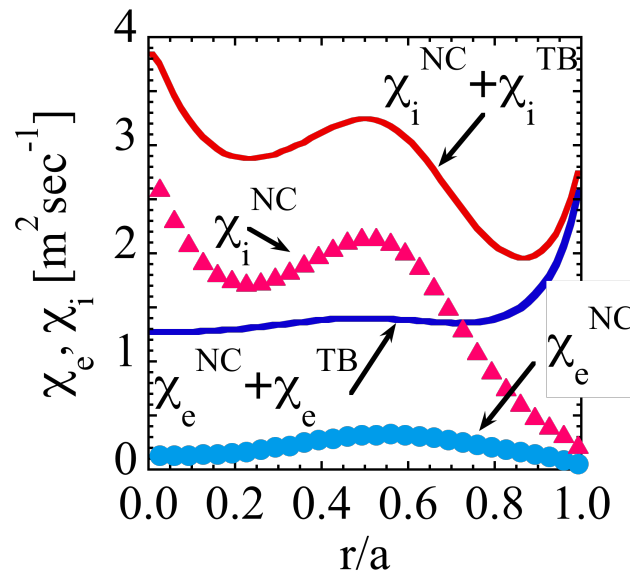
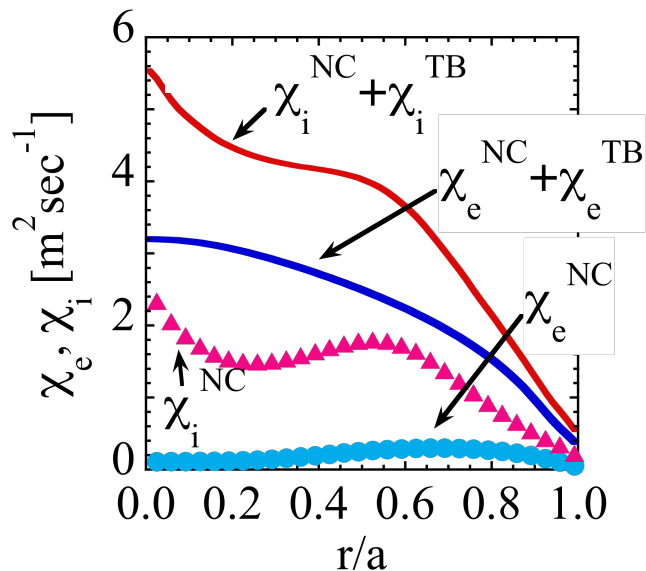
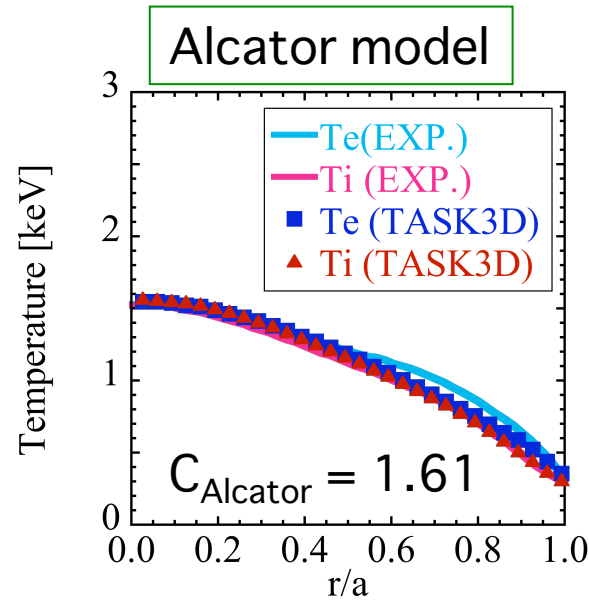
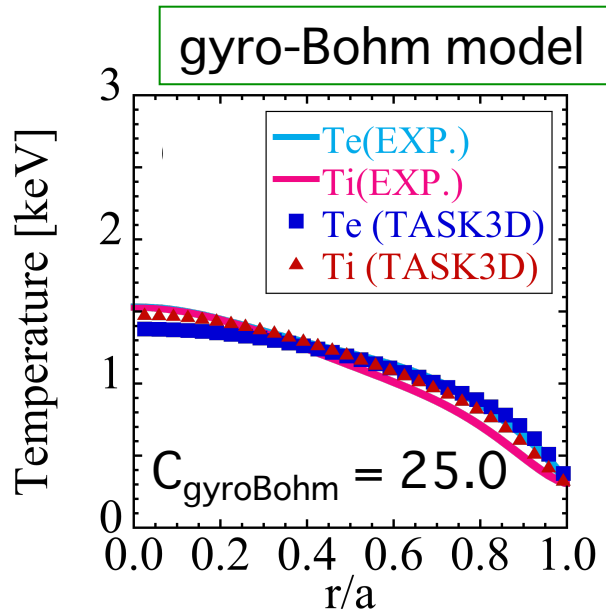
in s32940: The positive electric field are observed in all regions and has its peak around $r/a = 0.2$.

in s81079: In $r/a < 0.6$, the positive electric field are observed.

The TASK3D simulation reproduces the positive electric field (electron root) at s32940 and s81079.

熱輸送シミュレーション結果 - 熱輸送係数 -

s88343: 1.833sec, $R_{ax} = 3.6m$, $B_0 = 2.75T$, $\beta_0 = 0.11\%$



本ショットに対する解析においては、新古典輸送係数と乱流輸送係数の間に次の関係。

electron : factor ≈ 10

ion: factor $\approx 0.5 - 1$

・電子熱輸送現象においては乱流輸送が支配的であるが、

・イオン熱輸送現象においては、新古典輸送が乱流輸送と同程度の大きさを示す

という結果が得られた。

NBI加熱プラズマに対する TASK3Dを用いた予測的シミュレーション

▼ Raxis=3.60 [m]
▼ B₀=-2.85T

TR

1次元拡散型輸送方程式
・熱輸送方程式

VMEC

boz10.r360q100b004a8020.dat

FIT3D

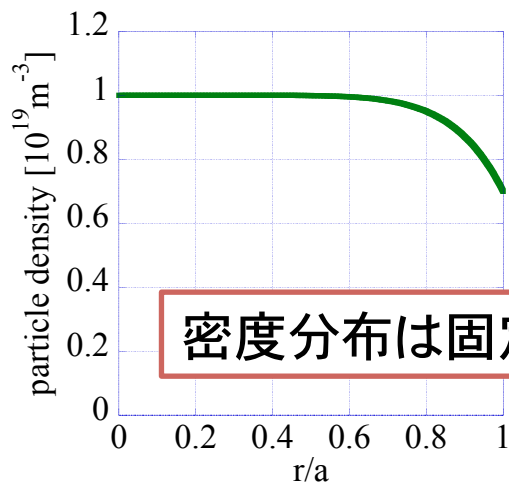
DGN/LHD

ER

▼ NBI 加熱プラズマ

#1 (5.8MW), #2 (4.5MW), #3 (4.5MW),
#4 (4.5MW), #5 (6MW)

温度分布の変化に伴い, NBI吸収パワー分布を
繰り返し計算.



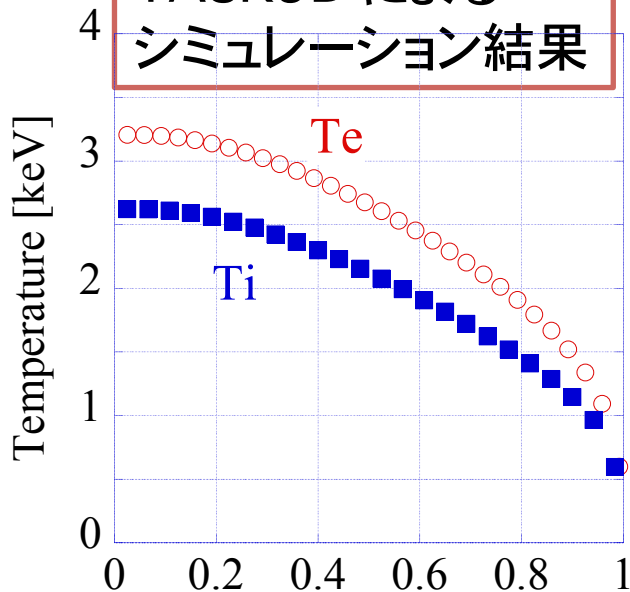
密度分布は固定

乱流輸送モデル: gyro-Bohm model
 $C_{gyroBohm} = 25$

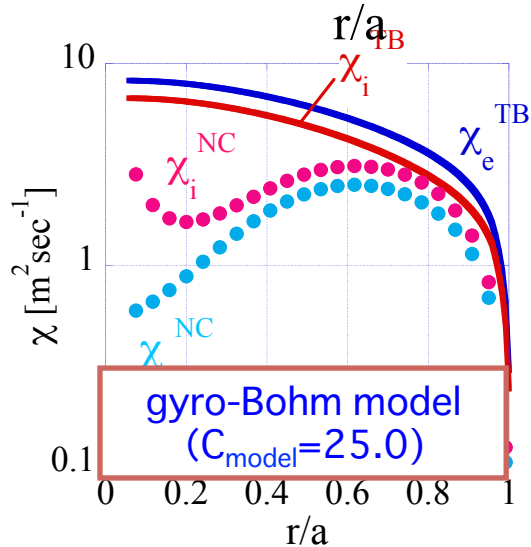
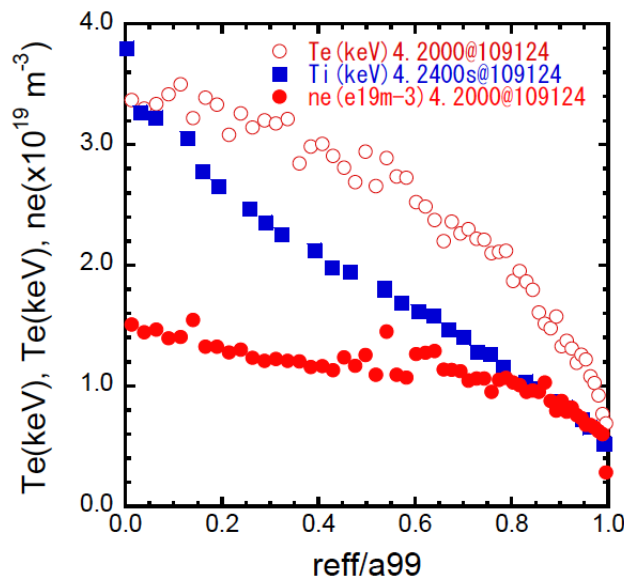
電子イオン温度が定常となるまで計算.

TASK3Dを用いた予測的シミュレーションと LHD実験結果との電子イオン温度分布の比較

TASK3Dによる
シミュレーション結果



ほぼ同等の密度分布,加熱などの条件下で,
LHDで実験を行った結果得られた温度分布



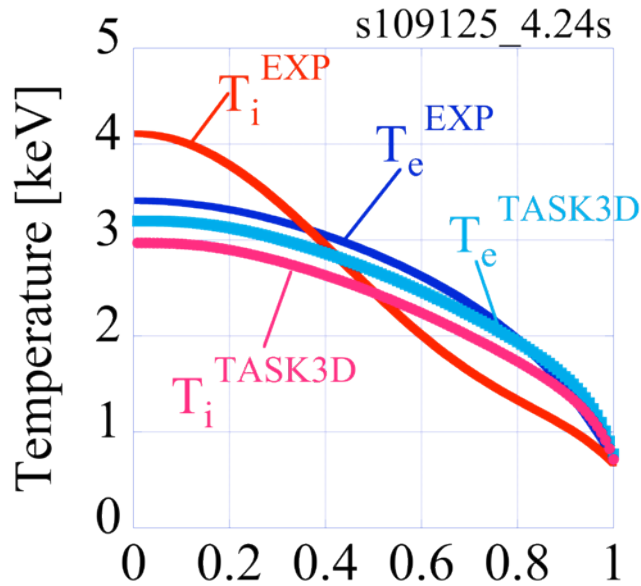
電子温度: TASK3Dにより得られた温度分布と実験結果はよく一致 (中心温度: 3.2 keV, parabolic形状).

イオン温度: 中心イオン温度は, TASK3Dの結果に比べて約25%高い値が実験では得られた. 分布形状も実験で得られたイオン温度は急峻なpeak形状となっており, TASK3Dの結果と大きく異なる.

熱輸送係数 χ の比較 TASK3D vs EXP.

gyro-Bohm model

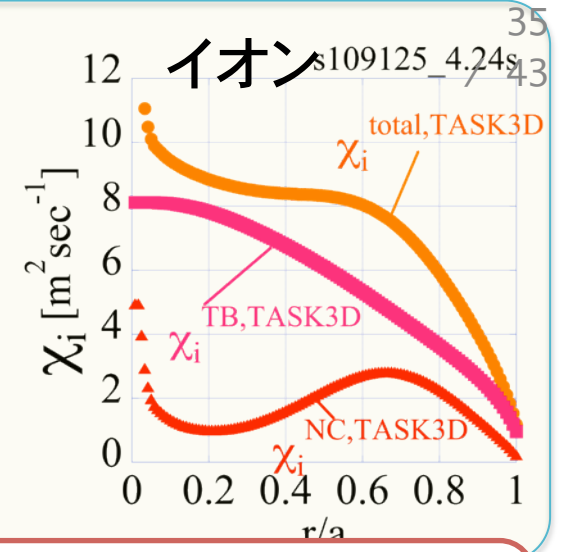
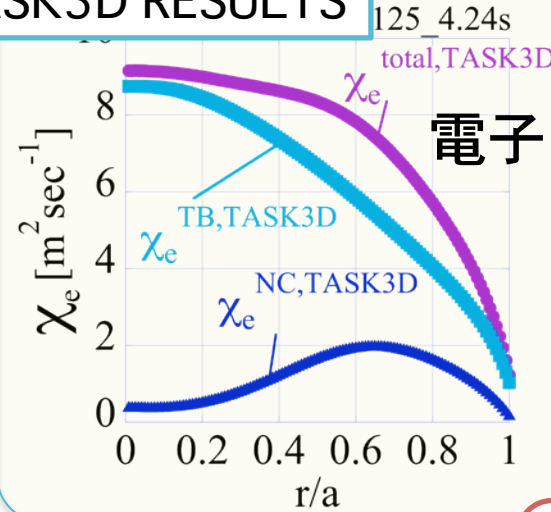
$\chi_e^{TB} = \chi_i^{TB}$ を仮定



電子イオン温度はよく一致。
イオン温度分布は大きく異なる。

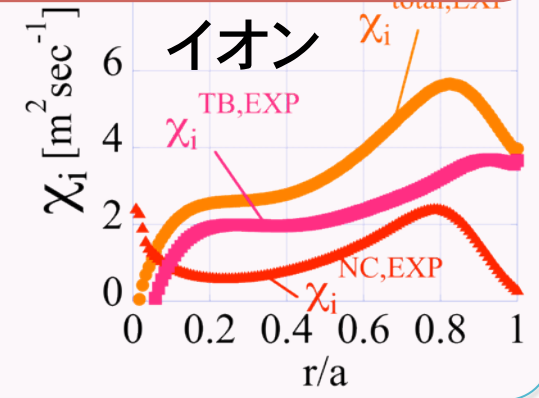
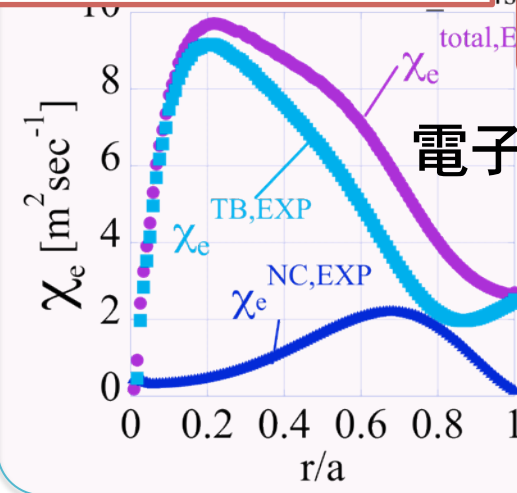
中心部: $T_i^{TASK3D} < T_i^{EXP}$
周辺部: $T_i^{TASK3D} > T_i^{EXP}$

TASK3D RESULTS



実験結果 (パワーバランス)

$$\chi_s^{TB, EXP} = -\frac{q_s^{PB}}{nT_s'} - \chi_s^{NC}$$



電子の熱輸送係数はTASK3Dと実験でよく一致
イオンの熱輸送係数は両者で大きく異なる。
実験から得られた、電子とイオンの熱輸送係数は等しくない

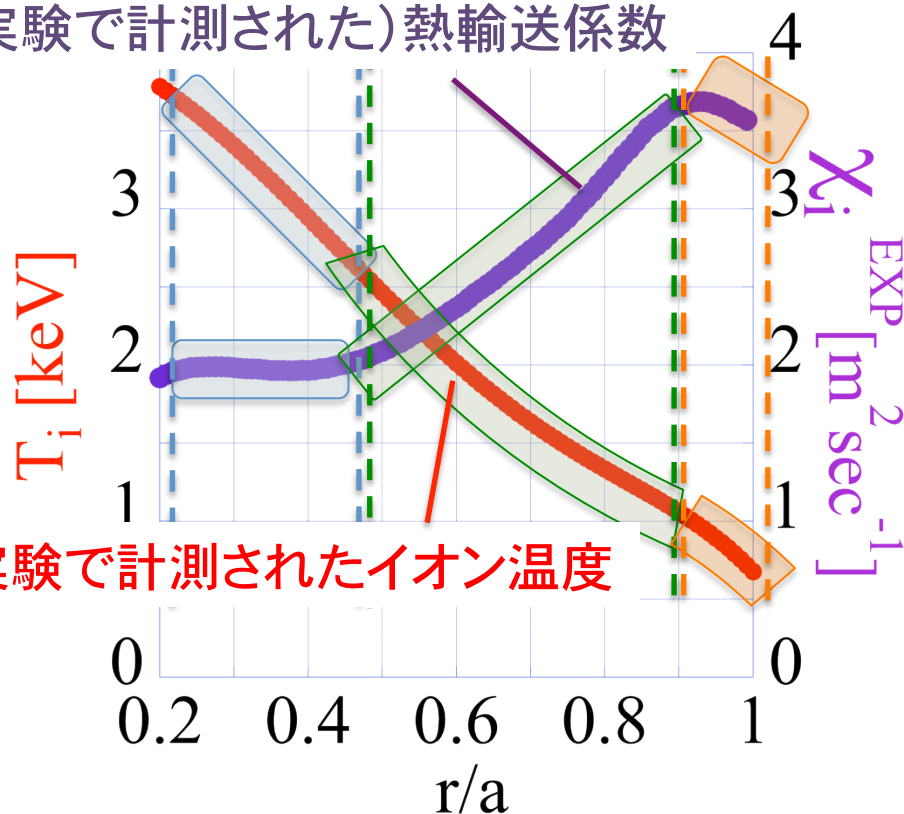
イオン温度勾配とイオン熱輸送係数の関係

$\frac{\partial^2 T_i}{\partial \rho^2} = 0$	$\frac{\partial^2 T_i}{\partial \rho^2} > 0$	$\frac{\partial^2 T_i}{\partial \rho^2} < 0$
$\frac{\partial \chi_i}{\partial \rho} = 0$	$\frac{\partial \chi_i}{\partial \rho} > 0$	$\frac{\partial \chi_i}{\partial \rho} < 0$

イオンの熱輸送係数 χ_i の勾配は、
イオン温度 T_i の二階微分に比例。

$$\frac{\partial \chi_i}{\partial \rho} \propto \frac{\partial^2 T_i}{\partial \rho^2}$$

パワーバランスより算出した
(実験で計測された)熱輸送係数



実験で計測されたイオン温度

イオンの熱輸送係数 χ_i は、
イオン温度 T_i の勾配に比例。

$$\chi_i \propto \frac{\partial T_i}{\partial \rho}$$

イオン温度勾配項 aT' / T を
gyro-Bohmモデルへ追加。

$$\chi_i^{\text{TB}} = C_{\text{gyroBohm} \times \text{gradT}} gB \times \left(\frac{\partial T}{\partial \rho} \frac{a}{T} \right)$$

イオン温度勾配の効果を含んだgyro-Bohmモデル -温度勾配項の次数決定-

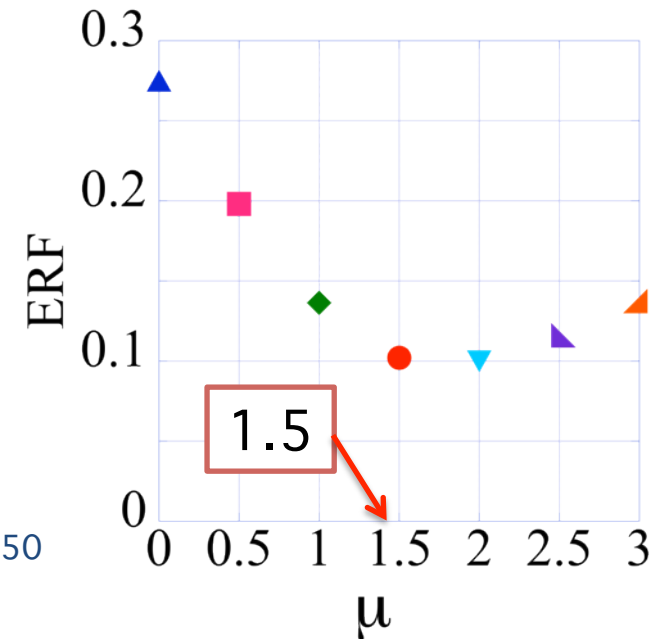
温度勾配項 aT'/T を含んだ gyro-Bohm モデルを考える。

$$\chi_i^{\text{TB}} = C_i \times gB \times \left(\frac{T'}{T} a \right)^\mu$$

ここで温度勾配項の効果の大きさを示す指標である μ を導入。最も良く実験結果を再現できる μ の値を決定した。
 $\mu=1.5$ とした場合に、RMS値が最小に。

(using grad T to the 1.5th power is similar to the CDIM model [*])

[*] K. Itoh, S. -I. Itoh and A. Fukuyama, Phys. Rev. Lett. Vol. 69 (1992) 1050



イオン温度勾配の効果を含まない項

$$\chi_e = C_e^{(0)} \frac{1}{16} \frac{T_e}{eB} \frac{\rho_i}{a}$$

simple gB

イオン温度勾配の効果を含んだ項

$$+ C_e^{(1.5)} \frac{1}{16} \frac{T_i}{eB} \frac{\rho_i}{a} \left(\frac{\nabla T_i}{T_i} a \right)^{\frac{3}{2}}$$

gB x grad T_i

$$\chi_i = C_i^{(1.5)} \frac{1}{16} \frac{T_i}{eB} \frac{\rho_i}{a} \left(\frac{\nabla T_i}{T_i} a \right)^{\frac{3}{2}}$$

gB x grad T_i

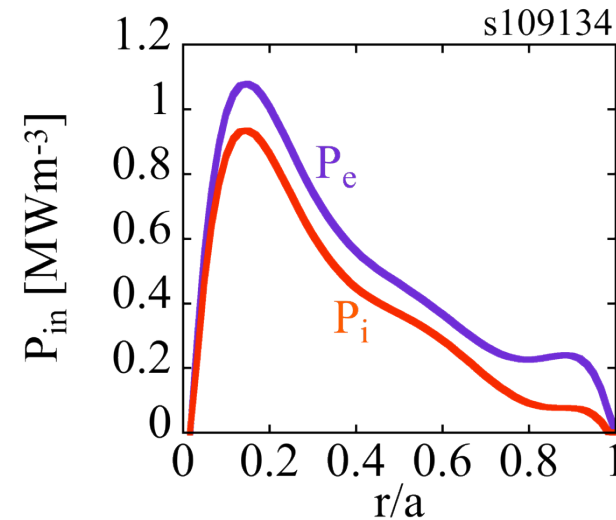
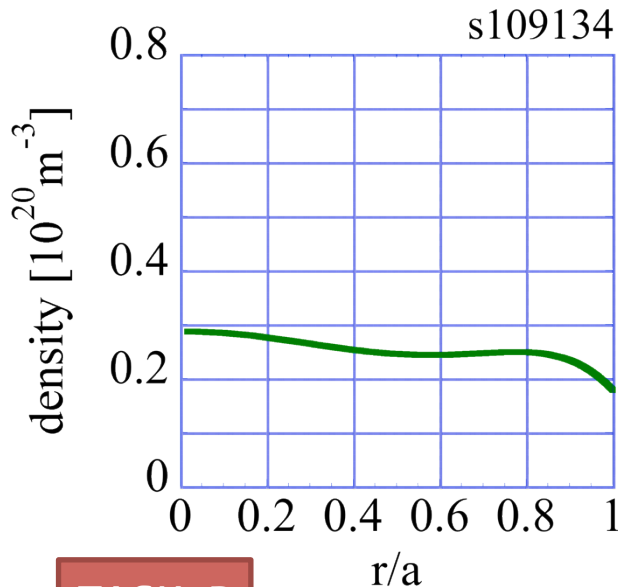
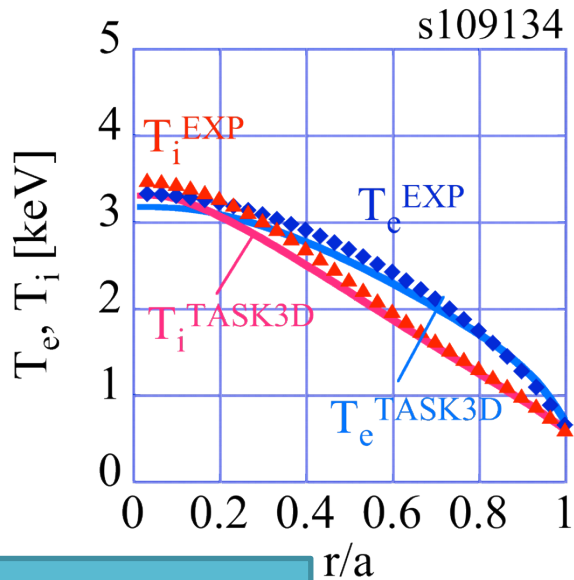
Summary of Extended gB Model

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{\text{NRMAX}} \sum_{\text{NRMAX}} \left(\frac{T^{\text{TASK3D}}(\rho) - T^{\text{EXP}}(\rho)}{T^{\text{EXP}}(\rho)} \right)^2}$$

Turbulence model		RMS			
		s109125 4.24s	s109134 4.24s	s109695 3.74s	AVR.
$\chi^{\text{TB,ele}}$	gB	0.233	0.200	0.309	0.248
$\chi^{\text{TB,ion}}$	gB				
$\chi^{\text{TB,ele}}$	gB	0.130	0.132	0.271	0.178
$\chi^{\text{TB,ion}}$	gB <i>xgradT</i>				
$\chi^{\text{TB,ele}}$	gB <i>+gBxgradT</i>	0.095	0.081	0.096	0.091
$\chi^{\text{TB,ion}}$	gB <i>xgradT</i>				
$\chi^{\text{TB,ele}}$	gB <i>+gBxgradT</i>	0.052	0.098	0.126	0.092
$\chi^{\text{TB,ion}}$	gB <i>xgradT</i> ^{1.5}				

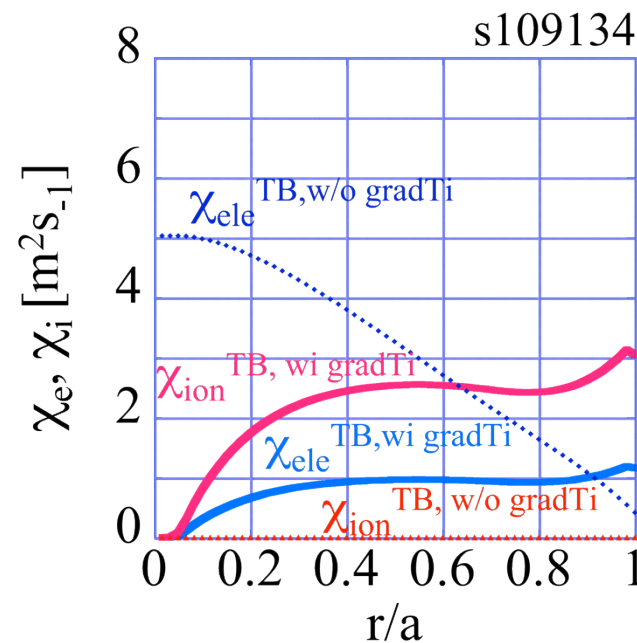
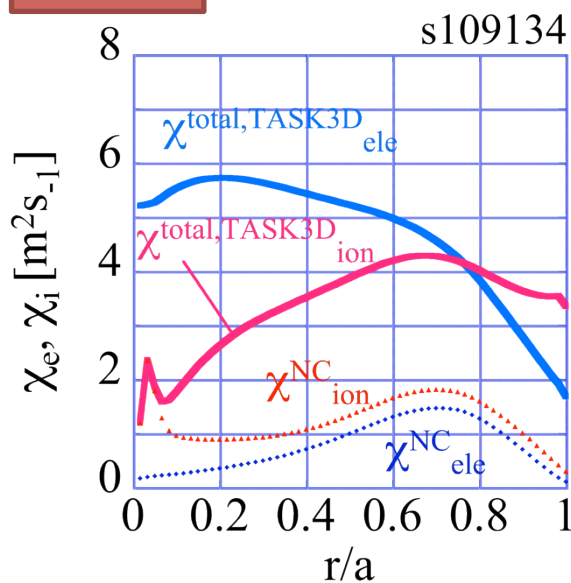
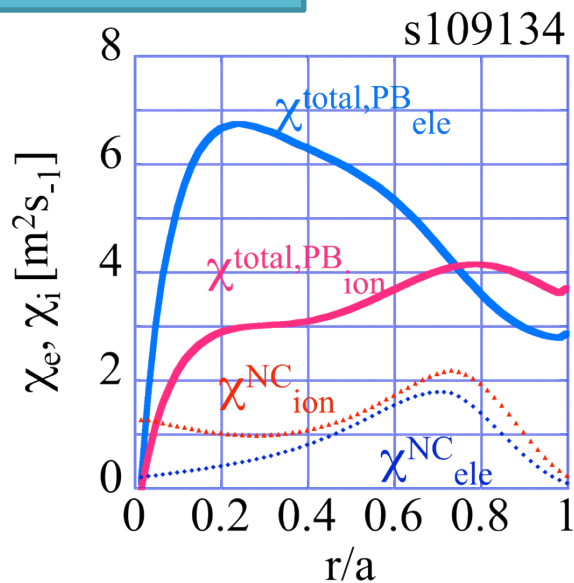
109134_4.20sec: B=+2.750T,NBI#1#2#3#4#5

C1e=13.80, C2e=2.680, C1i=0.000, C2i=7.070



EXPERIMENTAL

TASK3D



Integrated transport code, TASK3D, has been developed based on a range of collaborations

輸送現象に関する系統的な知見の
獲得や精密な議論を目指す

Given conditions
輸送モデル, プラズマ入力(ソース)
...

モデル妥当性検証
Model Validation
→予測の高精度化



TASK3D-a

LHD実験データ解析型

(Analysis of LHD experiment)



TASK3D-p

到達パラメータ予測型解析

型(Predictive analysis)

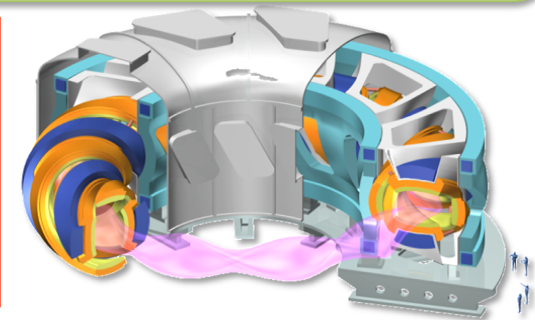
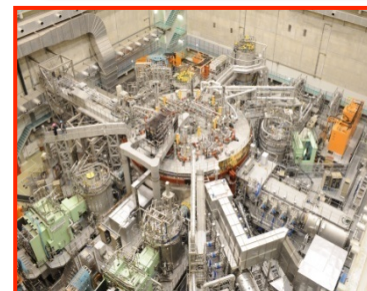
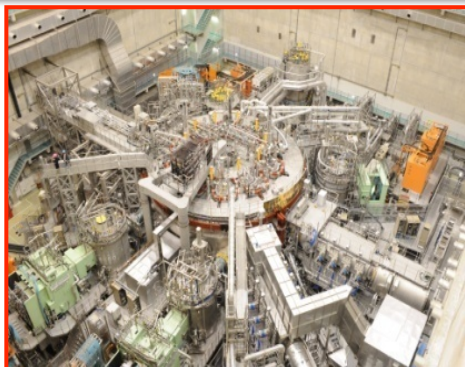
with **Kyoto Univ.**



基本的な解析モ
ジュールは同一

実験条件・プロフィールデータ
各種粒子熱ソース...

LHDプラズマの高性能化
炉心プラズマ設計 (FFHR-d1 design)
....



Summary II

41
/ 43

3. TASK3DによるLHDプラズマ輸送解析

- 乱流輸送モデルとコンスタントファクタ
- 熱輸送シミュレーション結果
- 予測的シミュレーション
- 温度勾配項を含んだgyro-Bohmモデル

-
- 乱流輸送係数中のコンスタントファクタ決定のために、LHD実験プラズマを対象に熱輸送シミュレーションを行った。(#109081, #109082, #109125, #109129, #109131, #109133, #109134, and #109135, LHD EXP, 14th, Sep. 2011, EXP No. #773).
 - LHDプラズマを対象にシンプルなgyro-Bohmモデルを想定し、TASK3Dを用いた予測的シミュレーションを行った.:
 - » TASK3Dシミュレーションで得られた電子温度分布は実験結果と良く一致.
 - » シンプルなgyro-Bohmモデルを用いたシミュレーションでは、イオン温度分布について実験結果の再現できなかった.
 - gyro-Bohmモデルに対してイオン温度勾配の効果を加えたモデル.
 - TASK3Dシミュレーションで得られた温度分布は電子・イオン両実験温度分布を再現した。(但し限られたショットのみの検証.)