

プラズマの数値計算で何がわかるか

京大工 福山 淳

内容

- 数値計算の手法
- 数値計算で何がわかるか
- 今後の方向

数値計算および数値シミュレーション

- 自然科学およびは社会科学における確立された研究手法

- 理論的・解析的手法
- 実験的・観測的手法
- 数值的・シミュレーション的手法

- プラズマ・核融合分野

- 出発点：非線形波動・ソリトン
磁力線追跡・カオス
- 大規模シミュレーション，粒子シミュレーション



- スーパーコンピュータ

- **1984**：プラズマ研 VP-100：1 CPU, 250 MFLOPS, 128 MB
- **2002**：地球シミュレータ：8 CPU×640, 40 TFLOPS, 10 TB, 10 MW
- **2004**：ASCI Purple (LLNL)：64 CPU×197, 100 TFLOPS, 50 TB, 4.5 MW

(ASCI: Accelerated Strategic Computing Initiative → Advanced Simulation and Computing Program)

- **PC クラスタ**：例：2 CPU×16, 4 GFLOPS, 32 GB, 3.2 kW

数値計算の目的と手順

- 数値計算の目的

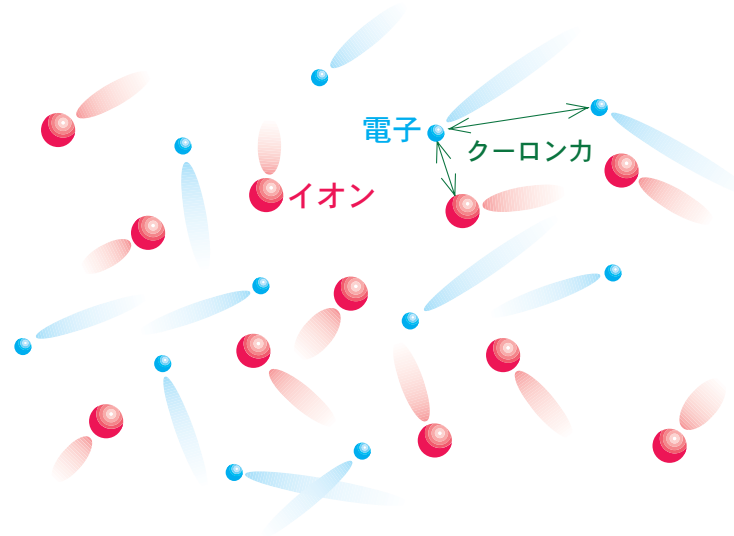
- 現象の物理機構の解明：analysis
- 未知のパラメータ領域における現象の予測：synthesis

- 数値計算の手順

1. 対象とする物理現象の把握
2. 現象を記述する物理モデルの選択・開発
3. 物理モデルを記述する数学モデルの選択・開発
4. 数学モデルを記述する計算コードの開発
5. 数学モデルの検証：安定性，収束性，精度，計算時間，記憶容量
6. 物理モデルの検証：極限における理論との比較，実験データとの比較
7. 新しいパラメータ領域への発展：適用範囲の確認，実験の予測・検証

プラズマを記述する物理モデル

- **プラズマ** : 主として電磁力により相互作用する多粒子系



- **物理モデル**
 - 多粒子系のモデル化
 - 粒子間相互作用のモデル化
 - 空間のモデル化

多粒子系のモデル化 (1)

粒子モデル		運動方程式 ジャイロ粒子運動方程式
流体モデル	位相空間	運動論方程式 ジャイロ運動論方程式
	実空間	多流体方程式 一流体方程式

- **粒子モデル** : 個々の粒子の位置 r_j および速度 v_j

- 運動方程式

$$\frac{dr_j}{dt} = v_j, \quad \frac{dv_j}{dt} = \frac{q}{m} \left[\mathbf{E}(r_j, t) + v_j \times \mathbf{B}(r_j, t) \right]$$

- **ジャイロ粒子モデル** : 粒子運動をサイクロトロン運動について平均

- 運動方程式 :

R = 旋回中心 , μ = 磁気モーメント

$$\frac{dR_j}{dt} = v_{j\parallel} \mathbf{e}_{\parallel} + \mathbf{v}_{\text{drift}}(R_j, \mu_j, t), \quad \frac{dv_{j\parallel}}{dt} = \frac{q}{m} E_{\parallel}(R_j, \mu_j, t)$$

多粒子系のモデル化 (2)

- 流体モデル

- 位相空間 (\mathbf{r}, \mathbf{v}) : 粒子分布関数 $f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$, $f(\mathbf{R}, \mu, v_{\parallel}, t)$
- 実空間 (\mathbf{r}) : 速度モーメント $n(\mathbf{r}, t)$, $\mathbf{u}(\mathbf{r}, t)$, $p(\mathbf{r}, t)$

- 発展方程式

- 運動論方程式

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} + \frac{q}{m} [\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + \mathbf{v} \times \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)] \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\text{coll}}$$

- ジャイロ運動論方程式

$$\frac{\partial f}{\partial t} + [v_{\parallel} \mathbf{e}_{\parallel} + \mathbf{v}_{\text{drift}}(\mathbf{R}, \mu, t)] \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} + \frac{q}{m} E_{\parallel}(\mathbf{R}, \mu, t) \frac{\partial f}{\partial v_{\parallel}} = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\text{coll}}$$

- 多流体方程式

$$\frac{\partial n_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \cdot (n_s \mathbf{u}_s) = 0, \quad n_s m_s \frac{d\mathbf{u}_s}{dt} = -\frac{\partial p_s}{\partial \mathbf{r}} + n_s q_s (\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}) + R_s, \quad \frac{d}{dt} (p n^{-\gamma}) = 0$$

- 一流体方程式 (電磁流体方程式)

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \cdot (\rho_m \mathbf{u}) = 0, \quad \rho_m \frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial \mathbf{r}} + \mathbf{j} \times \mathbf{B}, \quad \mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B} = \eta \mathbf{j}, \quad \frac{d}{dt} (p \rho_m^{-\gamma}) = 0$$

多粒子系のモデル化 (3)

- **粒子モデル**：有限粒子数による統計的ゆらぎ
 - **運動方程式**：サイクロトロン周期より短い時間ステップ
 - **ジャイロ運動方程式**：サイクロトロン周期より長い時間ステップ
- **流体モデル**：統計操作に伴う粒子間相互作用の取扱い
 - **位相空間**：マクスウェル速度分布からのずれ
 - **運動論的方程式**：サイクロトロン周期より短い時間ステップ
 - **ジャイロ運動論的方程式**：サイクロトロン周期より長い時間ステップ
 - **実空間**：マクスウェル速度分布からのずれが小さい場合
 - **多流体方程式**：速い現象
 - **一流体方程式**：変位電流や電荷密度が無視できるゆっくりした現象

現象に応じた適切なモデル

粒子間相互作用のモデル化

- 電磁力

- 粒子モデル

- クーロンの法則：遠隔相互作用（粒子数の2乗に比例する計算量）

- ガウスの法則：近接相互作用（粒子数 + 空間格子数 $^{2-1/d}$ に比例する計算量）

- ・ クーロン衝突の効果をモンテカルロ法等により取り入れる必要がある

- 流体モデル

- 位相空間：クーロン衝突項

- 実空間：摩擦項，エネルギー交換項

- 粒子の内部状態変化：電離，励起，再結合，核反応

- 乱流との相互作用

- 電磁界の計算法

- マクスウェル方程式： $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$, $\nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu_0 \mathbf{j}$

- 静電近似： $\nabla^2 \Phi = -\rho_{\text{ext}}/\epsilon_0$

- ねじれアルヴェン近似： $\nabla^2 A_{\parallel} = \mu_0 j_{\parallel}$, $\nabla^2 \Phi = -\rho_{\text{ext}}/\epsilon_0$

空間のモデル化

- **空間対称性**：必要計算資源を決定する
- **空間不均一性**
 - **1次元**：スラブ配位，球対称配位，磁気面平均されたプラズマ
— 解析は容易
 - **2次元**：軸対称配位，並進不変性
— 解析は可能
 - **3次元**：トロイダルヘリカル配位，非線形相互作用
— 解析が進みつつある
- **座標系**
 - **直角座標**：磁気面が存在する場合の精度
 - **円柱座標**：非円形断面の磁気面が存在する場合の精度．軸上の精度
 - **磁気面座標**：精度は向上，計算量増大

数値計算アルゴリズム

- 数値計算アルゴリズムの選定

1. 一貫性 (consistency) :

- 空間格子幅や時間ステップ幅を 0 とする極限において，計算式が基礎方程式と一致すること

2. 精度 (accuracy) :

- 高次項を無視することによって生じる打ち切り誤差や，計算機の内部表現の限界によって生じる丸め誤差が十分小さいこと

3. 安定性 (stability) :

- 誤差が時間と共に指数的に増大し，正しい解を覆い隠してしまわないこと

4. 効率 (efficiency) :

- 意味のある計算結果を得るために必要な計算量や記憶容量が妥当であること

数値解法 (1)

- 常微分方程式 :

- 初期値問題 : 独立変数のある 1 つの点に対して, 値が指定
 - 導関数が Lipschitz 条件を満たすならば解の一意性は保証
- 境界値問題 : 独立変数の複数の点に対して, 値が指定
 - 解が一意に決まる場合 : 通常境界値問題
 - 解が一意には決まらない場合 : 固有値問題
 - 解が存在しない場合

- 偏微分方程式の解の空間構造 :

- 空間差分法, 有限要素法, 境界要素法, スペクトル分解法等

- 偏微分方程式の解の時間発展 :

- 時間領域における初期値問題として時間差分法で解く場合
- 周波数領域における固有値問題として解く場合

数値解法 (2)

- 偏微分方程式の解の時間発展 :

- 時間領域における初期値問題として時間差分法で解く場合

- 陽解法 (Explicit 法) :

- ・ 新しい時刻での値が古い時刻での値の陽関数として定まる .

$$x^{(n+1)} = F(x^{(n)}, t)$$

- ・ 計算は容易で計算量も少ないが , 十分短い時間ステップ幅 Δt が必要
- ・ 1 つの時間ステップの間に物理現象が伝わる距離 L に比べて , 空間ステップ幅 Δx を長く , 現象の伝播速度 V に対して , $V < \Delta x / \Delta t$ が成立

- 陰解法 (Implicit 法) :

- ・ 新しい時刻での値を含む陰関数を解くことによって新しい値が定まる .

$$x^{(n+1)} = F(x^{(n)}, x^{(n+1)}, t)$$

- ・ 陰関数を解くために , 一般には反復計算が必要 .
- ・ 1 つの時間ステップの間に物理現象が伝わる距離が長くなり , 時間ステップ幅が大幅に緩和

数値解法 (3)

- 偏微分方程式の解の時間発展：
 - 周波数領域における固有値問題として解く場合
 - 定常振動の場合には実周波数を，一般には複素周波数を与えて，空間的な固有値問題を解くことになる．
 - 方程式が $(\omega \vec{I} - \vec{A}) \cdot x = 0$ の形になっている場合：
 - ・ 標準的な数値解法で固有値を求めることができる．
 - 方程式が $\vec{A}(\omega) \cdot x = 0$ の形になっている場合：
 - ・ 与えられた微小量 δ に対して $\vec{A}(\omega) \cdot x = \delta$ を解き， $|x|$ を十分大きくする ω を求めることで，固有値を得ることができる．

計算の高速化

- **演算装置**

- **スカラー演算装置** :

- 一つのデータの処理が終わってから、次のデータの処理を開始

- **ベクトル演算装置** :

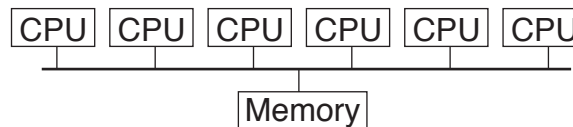
- データの処理を分割し、処理分割数と同じ数のデータを同時に実行

- 繰り返し計算が大幅に高速化

- 数値計算専用のため、設置台数が比較的少なく、それだけ高価格

- **並列処理**

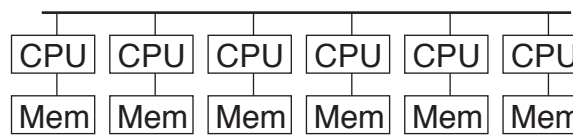
- **メモリ共有型並列計算** :



- 1台の計算機に複数のCPUを備え、共通のメモリにデータを記憶して処理

- 計算コードの自動並列化は比較的容易であるが、高速化に限界

- **メモリ共有型並列計算** :



- 複数台の計算機がそれぞれCPUを備え、各計算機のメモリにデータを記憶して処理

- 計算コードの並列化は複雑であるが、計算能力は計算機台数にほぼ比例

計算の大容量化

- 計算量の増大 \implies 必要記憶容量の増大
- **アドレス幅**
 - **32bit CPU** : 現在主流の汎用 CPU
 - データに利用できるメモリは, 1 ~ 2 GB
 - それ以上のメモリが必要な場合は, メモリ分散型並列処理
 - **64bit CPU** : スーパーコンピュータや最新の CPU
 - 2 GB を越えるメモリを利用することが可能

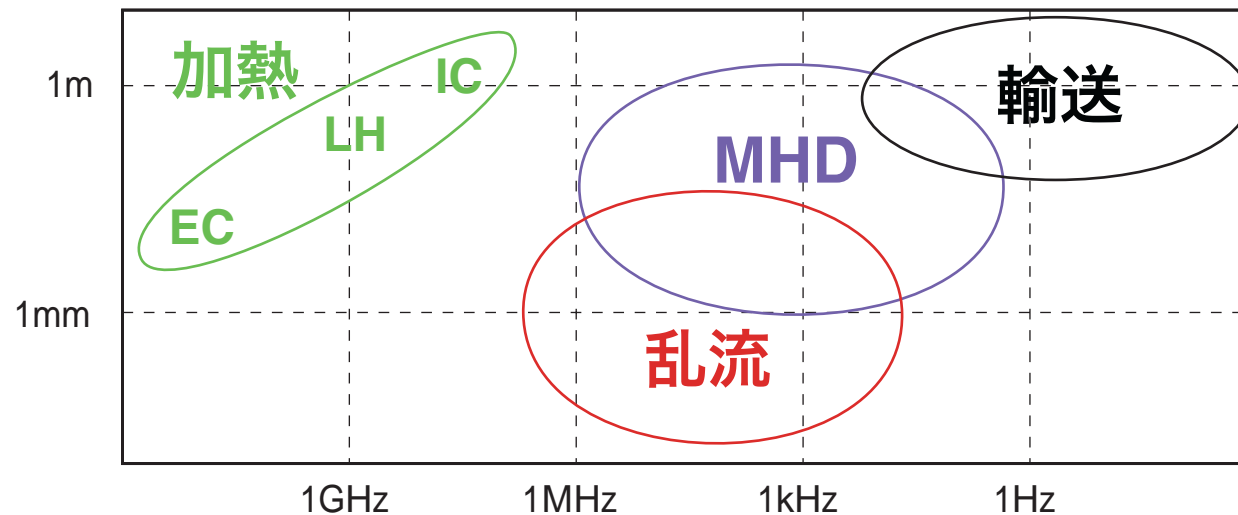
数値計算で何がわかるか

● トカマクプラズマの特性長と特性時間

デバイ長	~ 0.1 mm
電子サイクロトロン半径	~ 0.1 mm
イオンサイクロトロン半径	~ 3 mm
バナナ軌道幅	~ 30 mm
不均一特性長	~ 1 m
装置サイズ	~ 3 m

高域混成周波数	~ 140 GHz
電子サイクロトロン周波数	~ 100 GHz
プラズマ周波数	~ 100 GHz
低域混成周波数	~ 3 GHz
イオンサイクロトロン周波数	~ 50 MHz
アルヴェン周波数	~ 100 kHz
ドリフト周波数	~ 10 kHz
閉じ込め時間	~ 1 s
電流緩和時間	~ 1 s

● トカマクプラズマにおける物理現象



加熱・電流駆動の数値解析 (1)

- 中性粒子ビーム加熱・アルファ粒子加熱
 - 高速イオン生成：中性粒子軌道計算，荷電交換・電離，核反応
 - イオンの速度分布解析：バルク粒子への衝突緩和，軌道損失，加熱・電流駆動
 - 高速イオンの軌道追跡
 - 軌道平均されたジャイロ運動論方程式：フォッカープランク方程式
 - 実験と数値解析はよく一致
 - 解析例：JFT-2M におけるフェライト鋼によるリップル低減効果
 - 粒子軌道追跡コード OFMC による解析

加熱・電流駆動の数値解析 (2)

- 波動加熱

- 周波数帯：

- 電子サイクロトロン周波数帯
- 低域混成周波数帯
- イオンサイクロトロン周波数帯
- アルヴェン周波数帯

- 電磁波の励起・伝播・吸収：サイクロトロン共鳴あるいは混成共鳴における
吸収・モード変換，ランダウ減衰

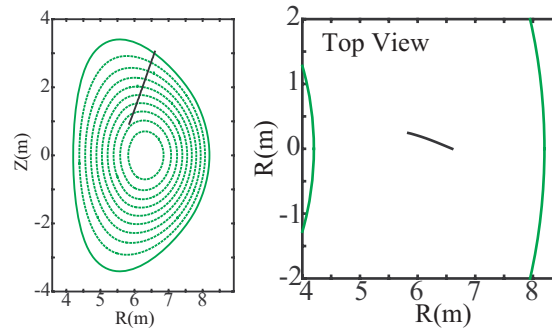
- 幾何光学的解析：光線追跡法，ビーム追跡法
- 波動光学的解析：マクスウェル方程式 + 運動論的誘電率テンソル

- 速度分布解析：バルク粒子への衝突緩和，軌道損失，加熱・電流駆動

- 高速電子・イオンの軌道追跡
- 軌道平均されたジャイロ運動論方程式

電子サイクロトロン波電流駆動の解析

Poloidal angle 70°
 Toroidal angle 20°
 Initial beam radius 0.05 m
 Initial beam curvature 2 m



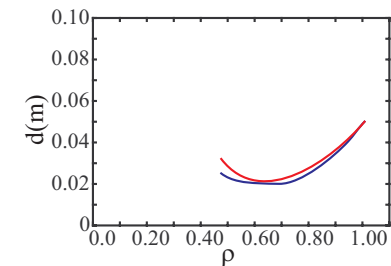
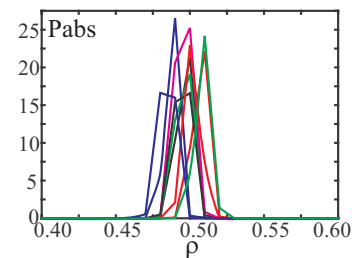
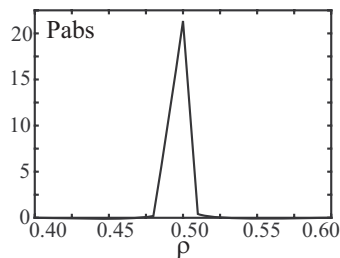
TASK/WR

Ray/Beam Profile

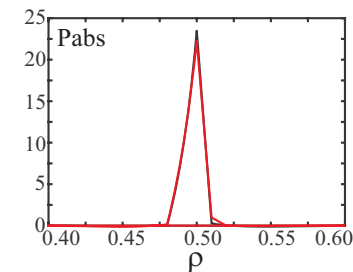
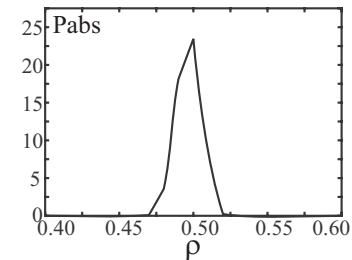
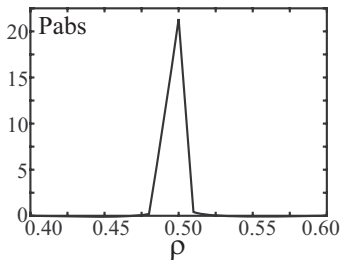
単一光線

複数光線

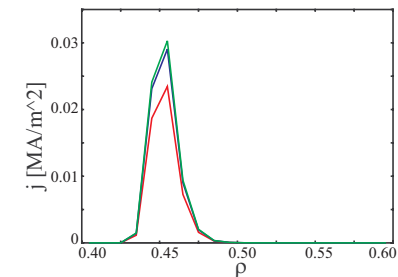
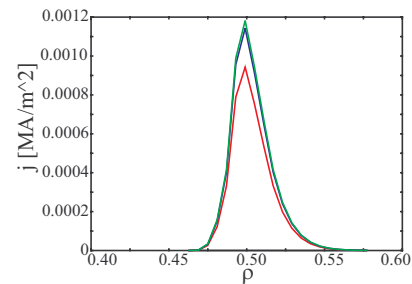
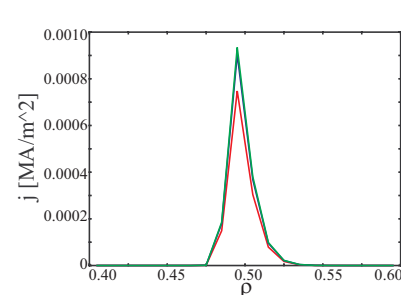
ビーム追跡



P_{abs} Profile

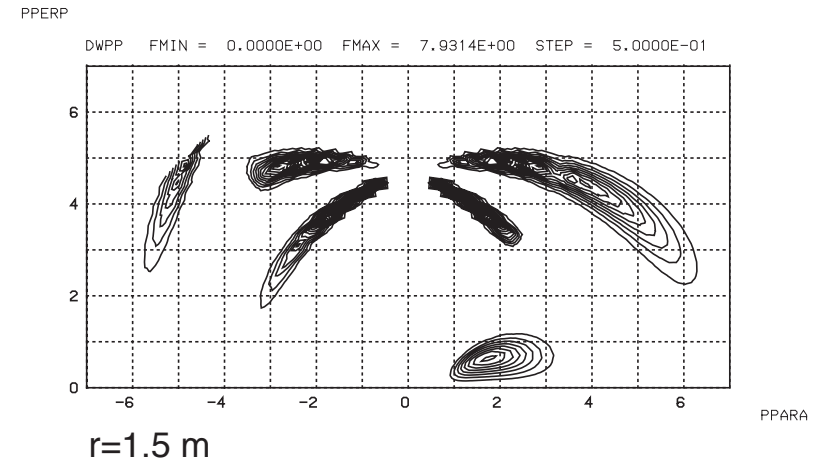
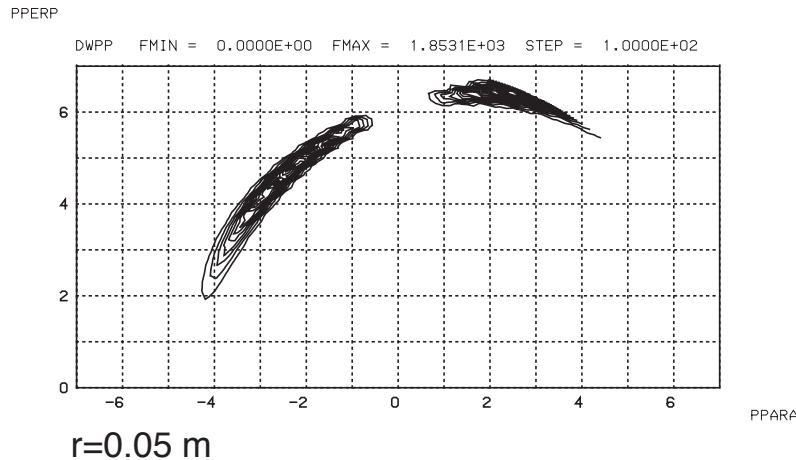


j_{CD} Profile

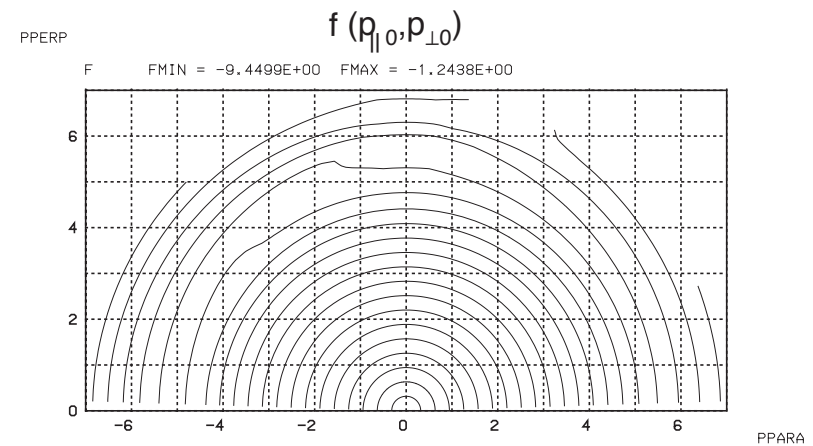
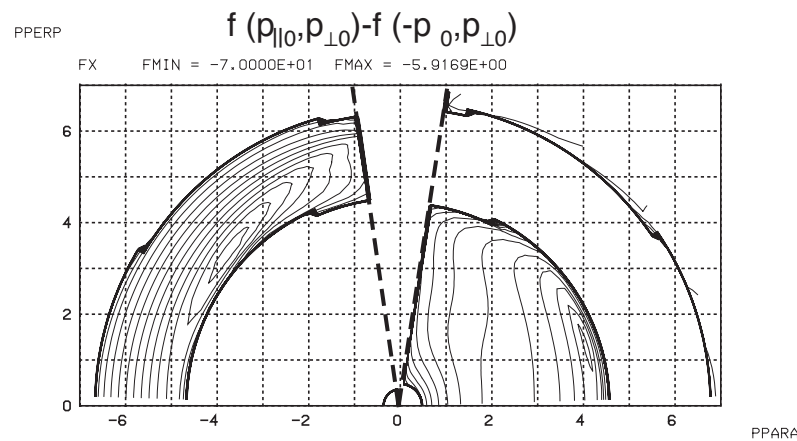


電子サイクロトロン波電流駆動の速度分布

- $f = 200 \text{ GHz}$, $N_\phi = 0.2$, $r = 0.05 \text{ m}$ と $r = 1.5 \text{ m}$ における速度拡散係数



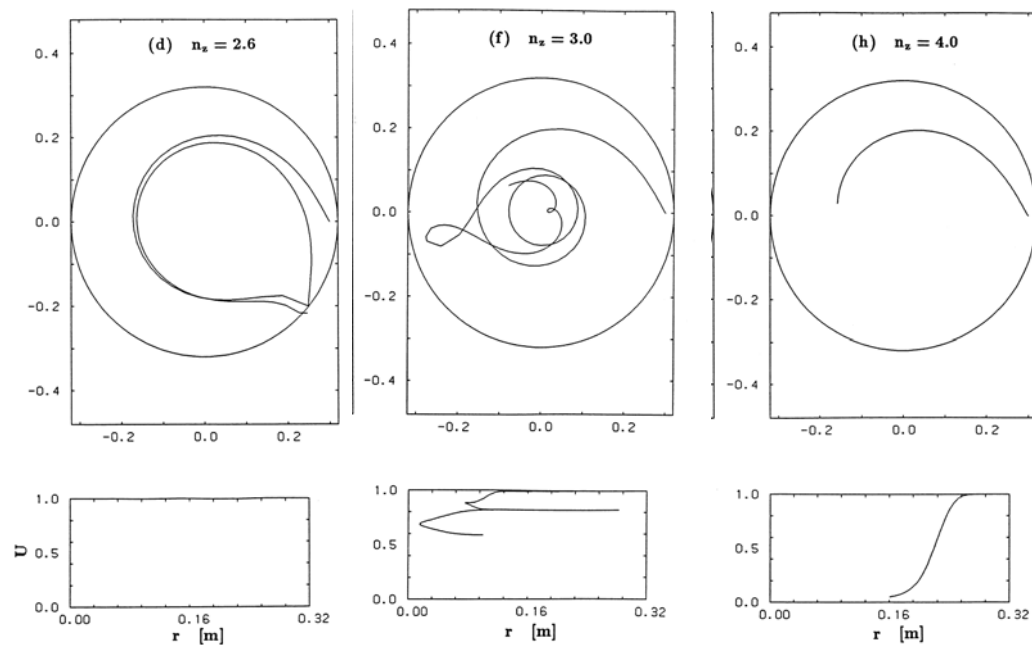
- $f = 200 \text{ GHz}$, $N_\phi = 0.2$, $r = 0.05 \text{ m}$ における速度分布（非対称成分，対称成分）



- TASK/FP**

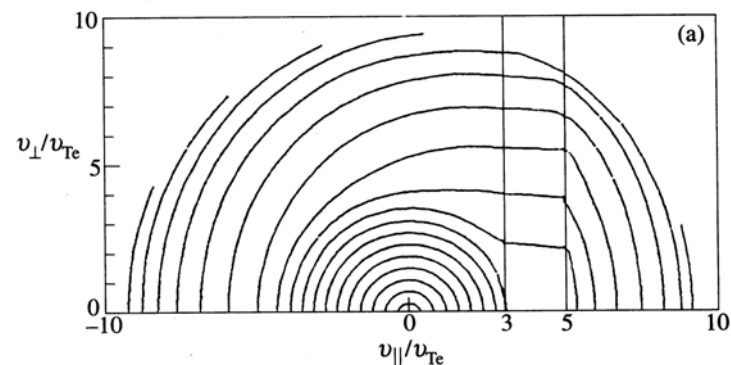
低域混成波電流駆動の解析

- ポロイダル面内の伝播：幾何光学近似



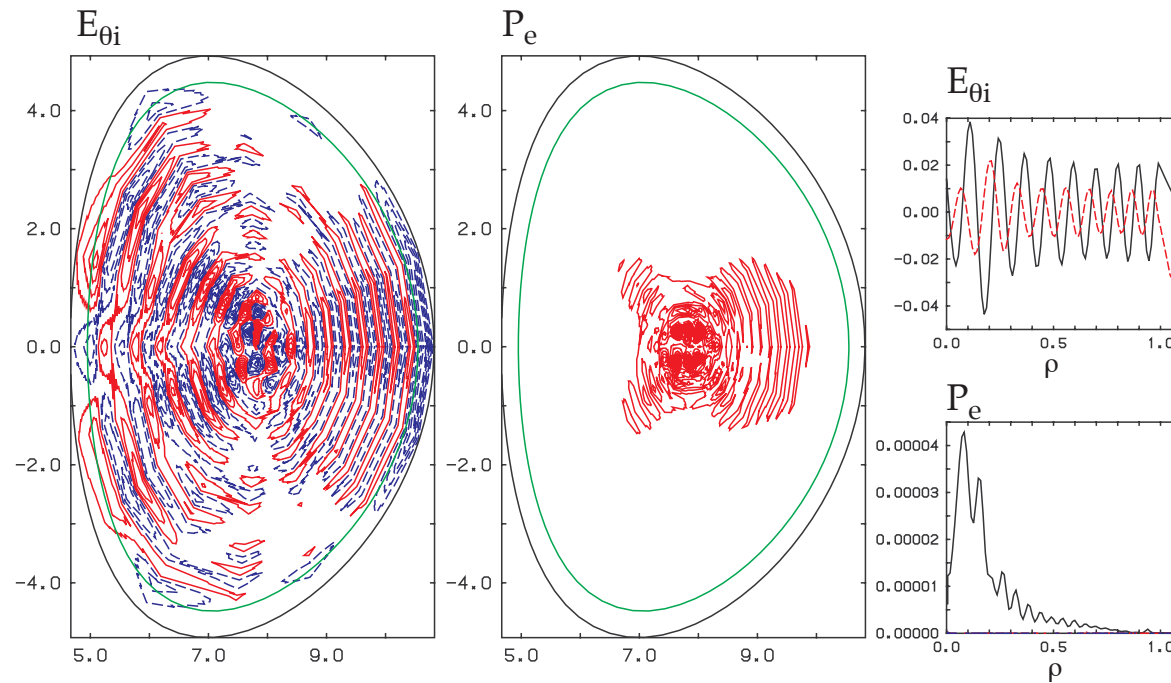
- 速度分布関数の変形

- 位相速度付近の速度分布関数が平坦化
- クーロン衝突による等方化
- 速度分布関数の非対称性 \implies 電流駆動



イオンサイクロトロン波電流駆動の解析

- ITER プラズマにおける速波電流駆動：



- TASK/WM

加熱・電流駆動の数値解析 (3)

- 波動加熱・電流駆動解析の現状

- 電子サイクロトロン波加熱・電流駆動

- 実験と解析結果はかなりよく一致：DIII-D, JT-60

- ITER について，コード・ベンチマーク進行中

- 課題：電子バーンシュタイン波等へのモード変換

- 低域混成波電流駆動

- 吸収がよい場合には実験と解析結果はかなりよく一致：JT-60

- ITER について，コード・ベンチマーク進行中

- 課題：吸収が弱く多重反射を伴う場合の伝播・吸収解析

- イオンサイクロトロン波加熱・電流駆動

- 速波による加熱・電流駆動は実験と解析結果はかなりよく一致：JET, DIII-D

- 課題：イオンバーンシュタイン波へのモード変換

輸送現象の解析 (1)

- **解析対象：**

- 粒子輸送，熱輸送，電流拡散
- 粒子源，加熱源，電流源：原子分子過程，粒子 / 波動加熱解析，
- 新古典輸送：拡散係数，電気抵抗率，ブートストラップ電流，Ware ピンチ
- 乱流輸送：輸送モデルが確立されていない．
- プラズマ形状：2次元電磁流体平衡方程式との結合

- **解析レベル**

- 拡散型輸送方程式：定常状態における流束と勾配の関係を利用
- 流体型輸送方程式：磁気面平均された流体方程式，プラズマ回転，径方向電界
- 運動論的輸送方程式：軌道平均されたジャイロ運動論的方程式

- **主な課題：**

- 乱流輸送モデルに依存した解析結果：内部輸送障壁形成
- プラズマ表面における境界条件に強く依存：周辺部輸送障壁（Hモード）

輸送現象の解析 (2)

- **拡散型輸送方程式** : V :体積 , ρ : 規格化半径 , $V' = dV/d\rho$

- **粒子輸送**

$$\frac{1}{V'} \frac{\partial}{\partial t} (n_s V') = - \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\langle |\nabla \rho| \rangle n_s V_s - \langle |\nabla \rho|^2 \rangle D_s \frac{\partial n_s}{\partial \rho} \right) + S_s$$

- **熱輸送**

$$\frac{1}{V'^{5/3}} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} n_s T_s V'^{5/3} \right) = - \frac{1}{V'} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(V' \langle |\nabla \rho| \rangle \frac{3}{2} n_s T_s V_{Es} - V' \langle |\nabla \rho|^2 \rangle n_s \chi_s \frac{\partial T_s}{\partial \rho} \right) + P_s$$

- **電流拡散**

$$\frac{\partial B_\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \rho} \left[\frac{\eta}{FR_0 \langle R^{-2} \rangle} \frac{R_0 F^2}{\mu_0} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{V' B_\theta}{F} \left\langle \frac{|\nabla \rho|^2}{R^2} \right\rangle \right) - \frac{\eta}{FR_0 \langle R^{-2} \rangle} \langle \mathbf{J} \cdot \mathbf{B} \rangle_{\text{ext}} \right]$$

電流拡散性バルーニングモード乱流輸送モデル

- **CDBM 自己維持乱流輸送モデルから求められた熱拡散係数**

$$\chi_{\text{TB}} = F(s, \alpha, \kappa, \omega_{E1}) \alpha^{3/2} \frac{c^2}{\omega_{pe}^2} \frac{v_A}{qR}$$

磁気シア $s \equiv \frac{r}{q} \frac{dq}{dr}$

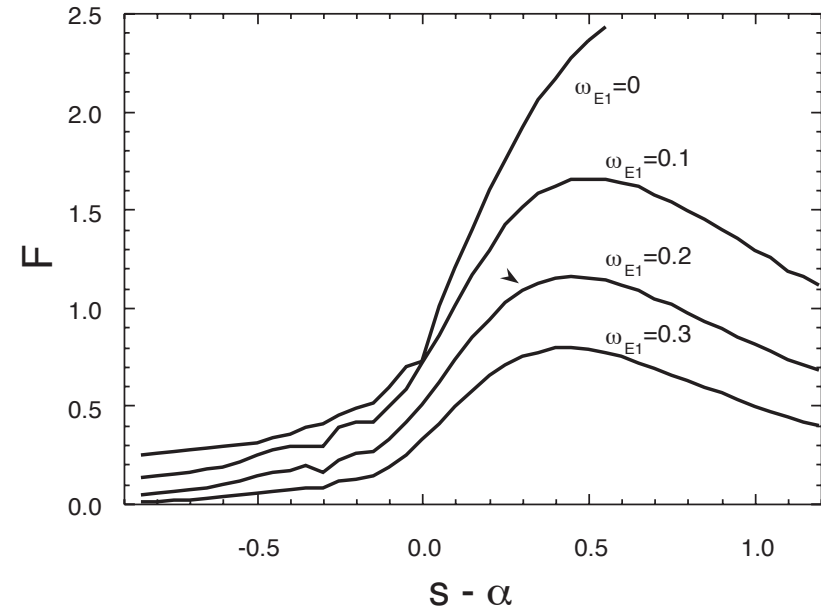
圧力勾配 $\alpha \equiv -q^2 R \frac{d\beta}{dr}$

磁気曲率 $\kappa \equiv -\frac{r}{R} \left(1 - \frac{1}{q^2}\right)$

$E \times B$ 回転シア $\omega_{E1} \equiv \frac{qR}{sv_A B_\theta} \frac{dE}{dr}$

- **負磁気シア**は輸送を減少させる。
- **磁気軸シフト**は輸送を減少させる
- **$E \times B$ 回転シア**は輸送を減少させる。

- $F(s, \alpha, \kappa, \omega_{E1})$ の $s - \alpha$ 依存性



- 近似式

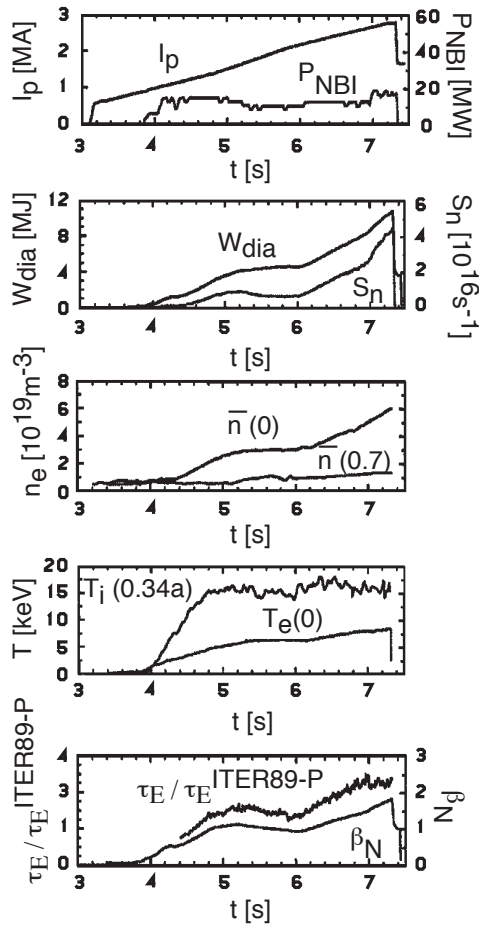
$$F_{\text{BM}} = \begin{cases} \frac{1}{1 + G_1 \omega_{E1}^2} \frac{1}{\sqrt{2(1 - 2s')(1 - 2s' + 3s'^2)}} & \text{for } s' = s - \alpha < 0 \\ \frac{1}{1 + G_1 \omega_{E1}^2} \frac{1}{\sqrt{2(1 - 2s' + 3s'^2 + 2s'^3)}} & \text{for } s' = s - \alpha > 0 \end{cases}$$

内部輸送障壁形成の輸送シミュレーション

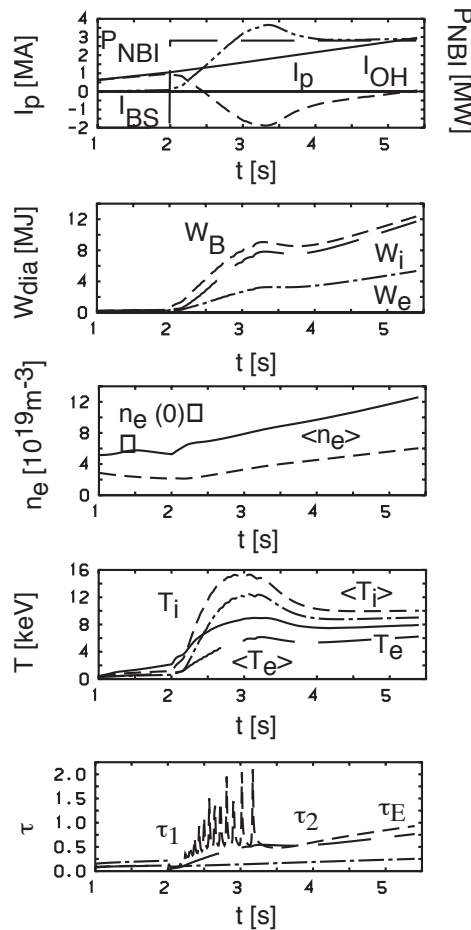
- JT-60U 実験データとの比較: 進行中
- TASK/TR

時間発展

JT-60U 実験

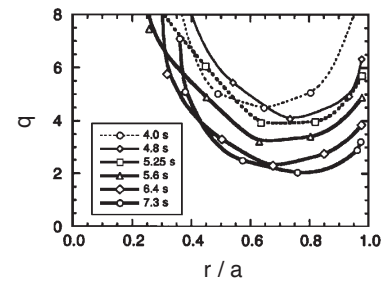


シミュレーション

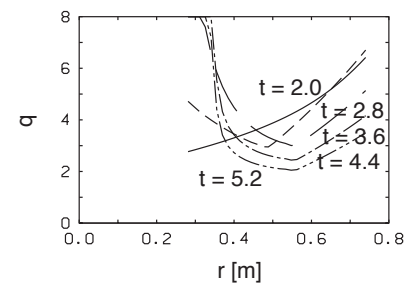


安全係数

JT-60U 実験

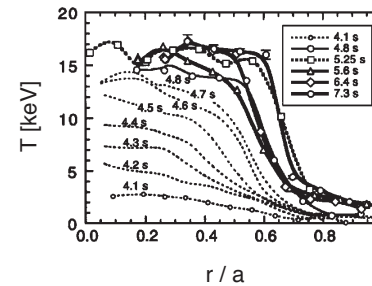


シミュレーション

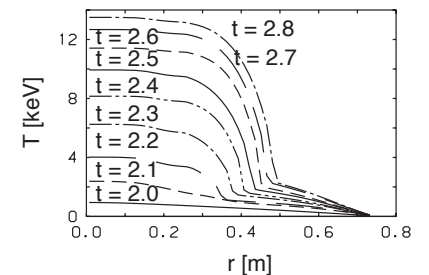


イオン温度

JT-60U 実験



シミュレーション



流体型輸送方程式

- 磁気面平均された流体方程式 (電子, イオン)

$$\frac{\partial n_s}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r n_s u_{sr}) + S_s$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (m_s n_s u_{sr}) = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r m_s n_s u_{sr}^2) + \frac{1}{r} m_s n_s u_{s\theta}^2 + e_s n_s (E_r + u_{s\theta} B_\phi - u_{s\phi} B_\theta) - \frac{\partial}{\partial r} n_s T_s$$

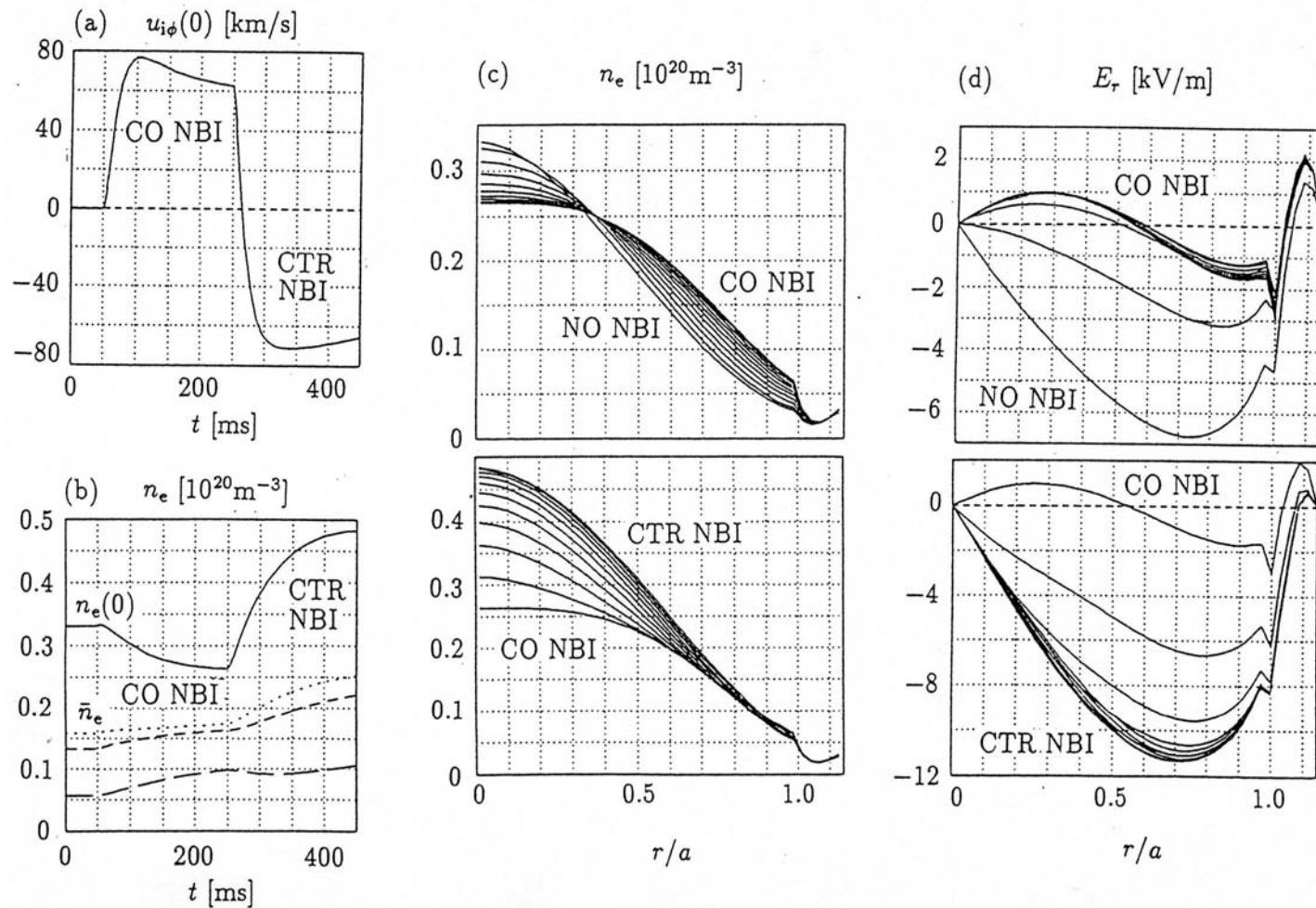
$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (m_s n_s u_{s\theta}) &= -\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 m_s n_s u_{sr} u_{s\theta}) + e_s n_s (E_\theta - u_{sr} B_\phi) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^3 n_s m_s \mu_s \frac{\partial}{\partial r} \frac{u_{s\theta}}{r} \right) \\ &\quad + F_{s\theta}^{\text{NC}} + F_{s\theta}^{\text{C}} + F_{s\theta}^{\text{W}} + F_{s\theta}^{\text{X}} + F_{s\theta}^{\text{L}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (m_s n_s u_{s\phi}) &= -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r m_s n_s u_{sr} u_{s\phi}) + e_s n_s (E_\phi + u_{sr} B_\theta) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r n_s m_s \mu_s \frac{\partial}{\partial r} u_{s\phi} \right) \\ &\quad + F_{s\phi}^{\text{C}} + F_{s\phi}^{\text{W}} + F_{s\phi}^{\text{X}} + F_{s\phi}^{\text{L}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \frac{3}{2} n_s T_s &= -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \left(\frac{5}{2} u_{sr} n_s T_s - n_s \chi_s \frac{\partial}{\partial r} T_e \right) + e_s n_s (E_\theta u_{s\theta} + E_\phi u_{s\phi}) \\ &\quad + P_s^{\text{C}} + P_s^{\text{L}} + P_s^{\text{H}} \end{aligned}$$

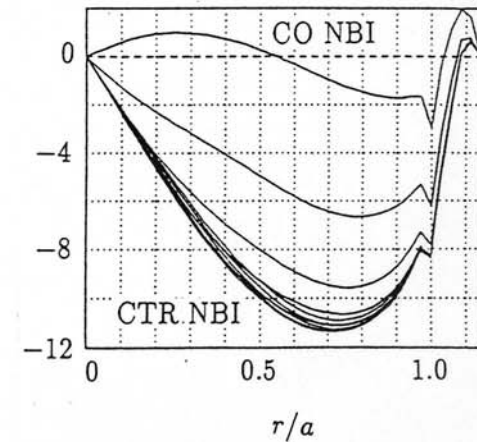
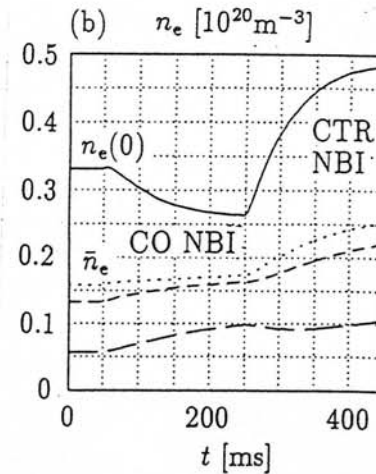
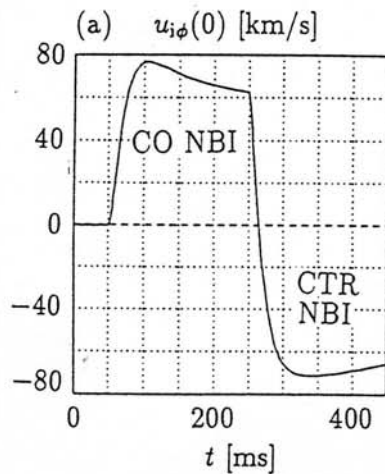
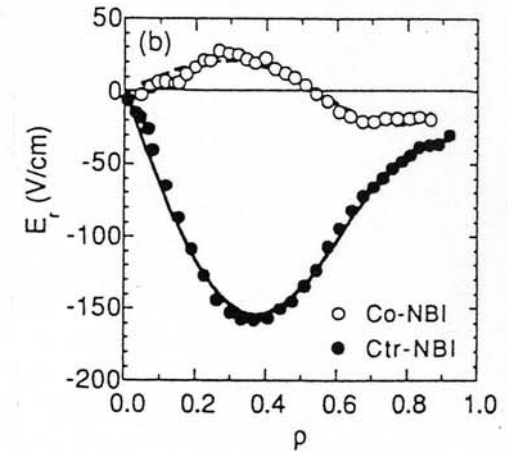
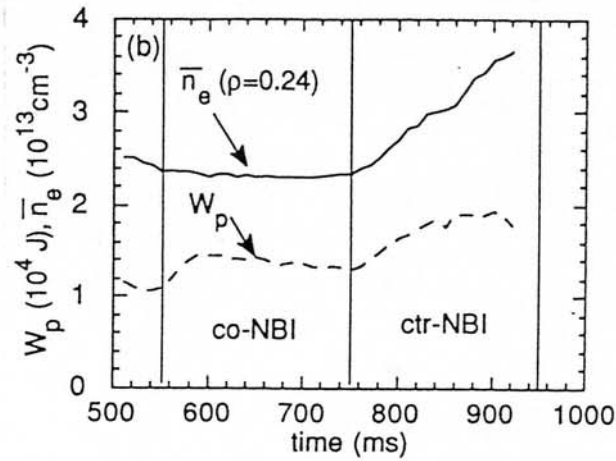
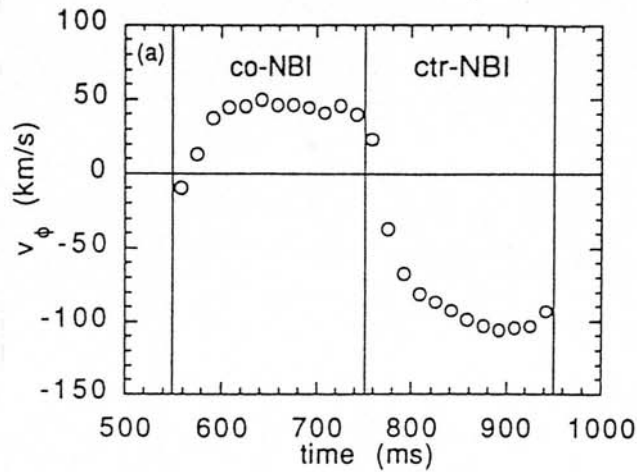
プラズマ回転と径方向電界形成の輸送シミュレーション

- **JFT-2M パラメータ** : NBI入射 : 順方向入射 \rightarrow 逆方向入射
- トロイダル回転 \Rightarrow 負の径方向電界 \Rightarrow 密度分布中心集中
- **TASK/TX** : 粒子拡散係数 : $0.3 \text{ m}^2/\text{s}$, イオン粘性 : $10 \text{ m}^2/\text{s}$



JFT-2M 実験との比較

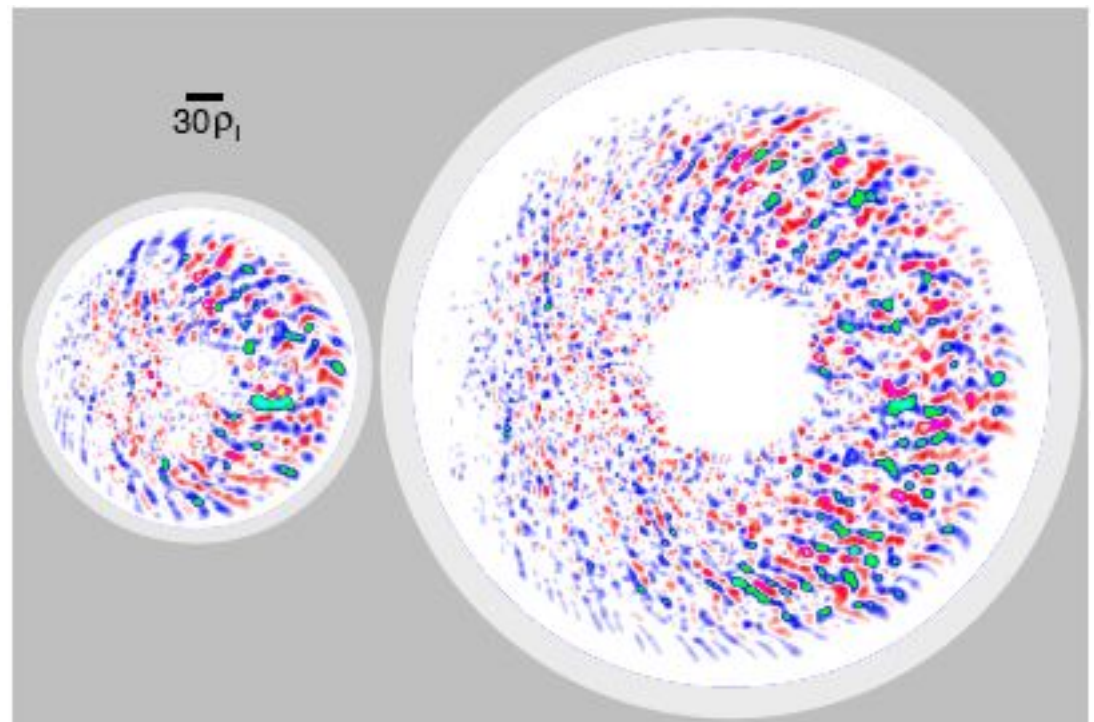
- **JFT-2M 実験** : **Ida et al.: Phys. Rev. Lett. 68 (1992) 182**
- 実験結果とかなりよく一致



乱流輸送の解析

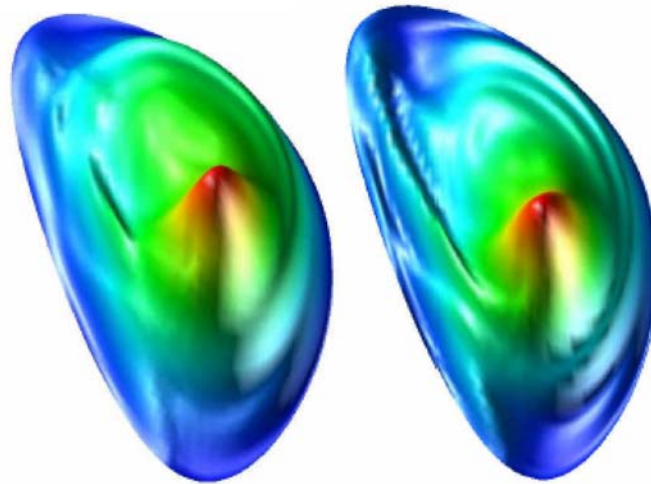
- 多くのモデルが提案され，数値計算による検証が進められている．
- **イオン温度勾配モード**
 - ジャイロ粒子モデルあるいはジャイロ流体モデルを用いた大規模非線形シミュレーション
 - トカマクプラズマ全体にわたるシミュレーション
 - 電子の応答をどのように取り入れるか **ref: Z. Lin et al.: IAEA-2000 TH2-3**

- **非線形飽和機構**
 - 帯状流による安定化
 - 準線形効果による安定化
- **未解明**
 - 輸送の非局所性
 - 輸送の高速遷移
 - 輸送モデルへの取り入れ方



巨視的不安定性の解析

- 圧力勾配や電流勾配によって駆動される巨視的不安定性の解析
 - 理想電磁流体方程式による解析は，プラズマ形状も含めて確立されている。

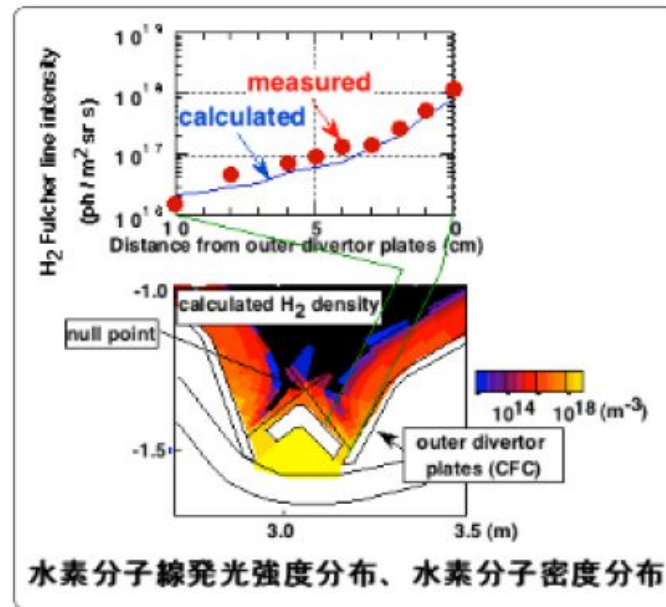


ref: W. Park et al.: IAEA-2002 TH5-1

- 電気抵抗，電子質量，流れ，運動論的效果等を含めた解析：進行中
- 新古典ティアリングモード (NTM)： 限界に大きな影響
- 抵抗性壁モード (RWM)： 壁の有限抵抗のために完全には安定化できない
- アルヴェン固有モード (AE)： 高速イオンによって励起

周辺プラズマの解析

- セパトリクスより外側の SOL プラズマおよびダイバータプラズマ
 - 磁力線が壁に達するため，2次元解析が必要
 - 原子分子過程や壁との相互作用を取り入れた2次元流体コードによる解析が進行中

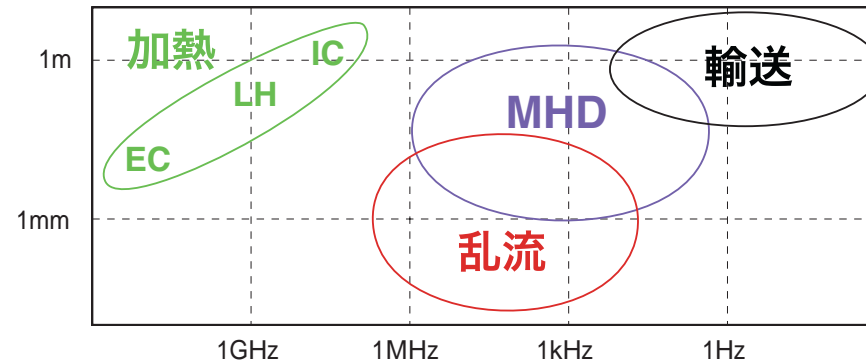


JT-60U における解析

- **周辺部輸送障壁形成**：モデルの検証が進行中

今後の方向

- 物理モデルの階層性



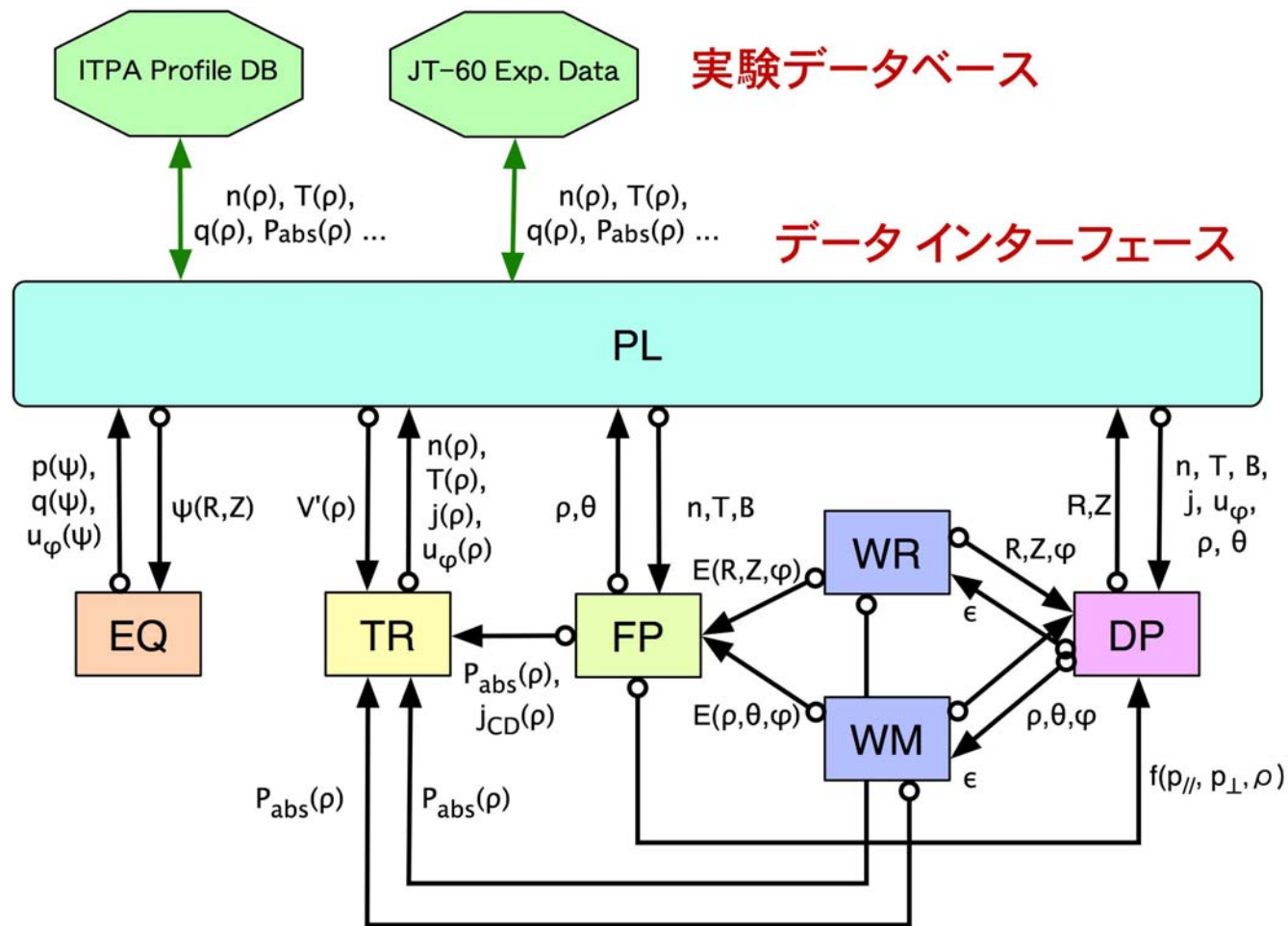
- 単一の物理モデルで記述することは将来的にも困難
- 空間尺度や時間尺度の異なる現象を階層化し，階層間の相互作用を考慮した数値シミュレーションが必要
- 例：輸送とMHDの相互作用：矢木他
 - 長波長成分：MHDによる記述
 - 短波長成分：粘性係数等による記述

- シミュレーションの統合化

シミュレーションの統合化

- 国際熱核融合実験炉 ITER に向けて、自律性の高い核燃焼プラズマの振る舞いを予測することが必要
 - プラズマ加熱の大部分が 粒子加熱：密度と温度に依存
 - プラズマ電流の多くが自発電流：圧力勾配とポロイダル磁界に依存
 - プラズマ中心部で 粒子生成：燃料イオン密度と温度に依存
- トカマクプラズマ中のさまざまな現象を記述し、現在のトカマクにおける実験で検証された解析コードを組み合わせ、核燃焼プラズマ全体の時間発展を解析する統合コードの開発
- 核燃焼プラズマ統合コード構想
 - 核燃焼プラズマの時間発展を解析するために統合コードのフレームワークを構築すること
 - 核燃焼プラズマの記述に不可欠でありながら、これまで検討されていなかった物理課題を研究すること
 - 統合コードを手軽に利用できるように分散型ネットワークを構築すること

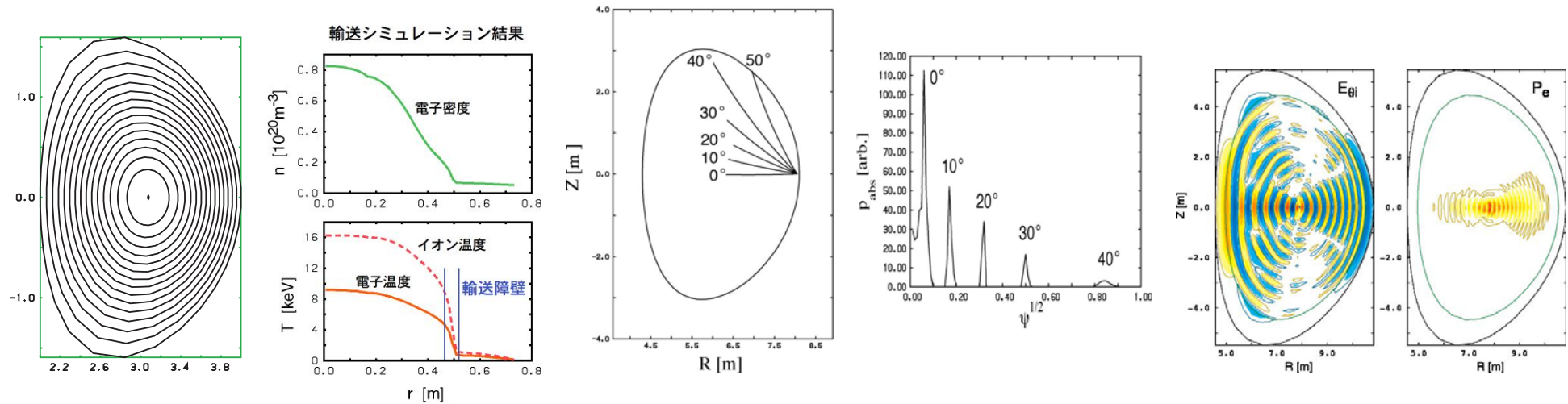
TASK コードの構成



平衡 輸送 速度分布 波動伝播 波動分散

EQ	固定境界 2次元平衡解析	WR	幾何光学的波動解析
TR	1次元トカマク輸送解析	WM	波動光学的波動解析
FP	3次元速度分布解析	DP	波動分散解析

TASK コードのモジュール EQ, TR, WR, WM による解析例



- 平衡モジュール EQ によって得られた等磁束面
- CDBM モデルを用いた輸送モジュール TR による内部輸送障壁形成の解析例
- 波動伝搬モジュール WR による電子サイクロトロン波電流駆動の解析例
- 波動伝播モジュール WM による速波電流駆動の解析例

おわりに

- プラズマを研究する手法として、数値計算・数値シミュレーションは、理論・実験とならぶ重要な役割を果たしている。
- 特に、乱流輸送解析、MHD解析の拡張、周辺プラズマ解析等是非線形効果が重要であり、数値シミュレーションによる解析が不可欠である。
- しかしながら、プラズマ全体の時間発展を解析し、予測するためには、多くの解析コードを組み合わせた総合的解析が必要である。
- そして、非線形シミュレーションによる解析結果から法則性を見だし、モデルとして表現する試みも重要である。