

一次元流体モデルを用いた非接触ダイバータプラズマ におけるELM現象の時間発展調査

小川研究室
M1 李躍
指導教員 小川雄一

目次

Part 1. 非接触ダイバータとELMとは

1.1 非接触ダイバータプラズマ

1.2 Edge Localized Mode

Part 2. 過去のELM研究

2.1 流体モデルと運動論モデル

2.2 モデル比較

2.3 Heat Flux Limiterの重要性

2.4 リサイクリング率の影響

Part 3. 本研究概要

3.1 非接触ダイバータにおけるELM研究

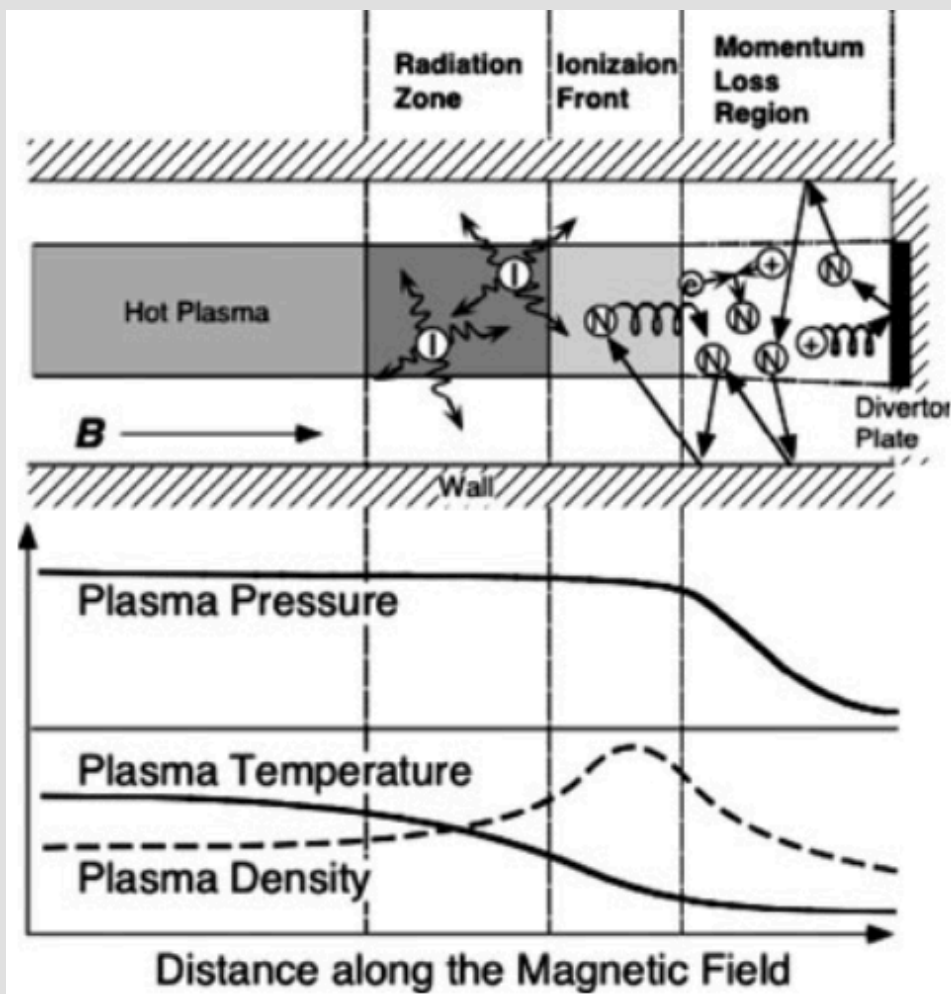
3.2 一次元流体モデルコード紹介

3.3 非接触プラズマダイバータ

3.4 中心差分検討

3.5 計算条件

3.6 結果比較



ダイバータの損耗を低減するため、非接触ダイバータの生成・維持は不可欠である。

- ・ 高リサイクリング状態になる
- ・ 放射損失が大きくなる
- ・ 中性ガスを大量に注入する
- ・ 温度はさらに低下する
- ・ 再結合過程が支配的になる
- ・ プラズマは消滅する

Fig. 1 非接触ダイバータの沿磁力線方向分布^[1]

1.2 Edge Localized Mode

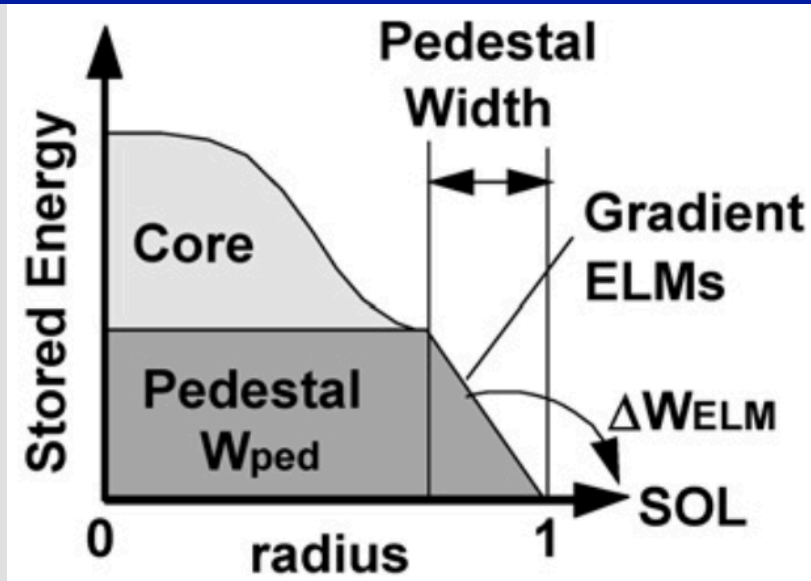


Fig.2 Hモードの周辺ペデスタル構造^[2]

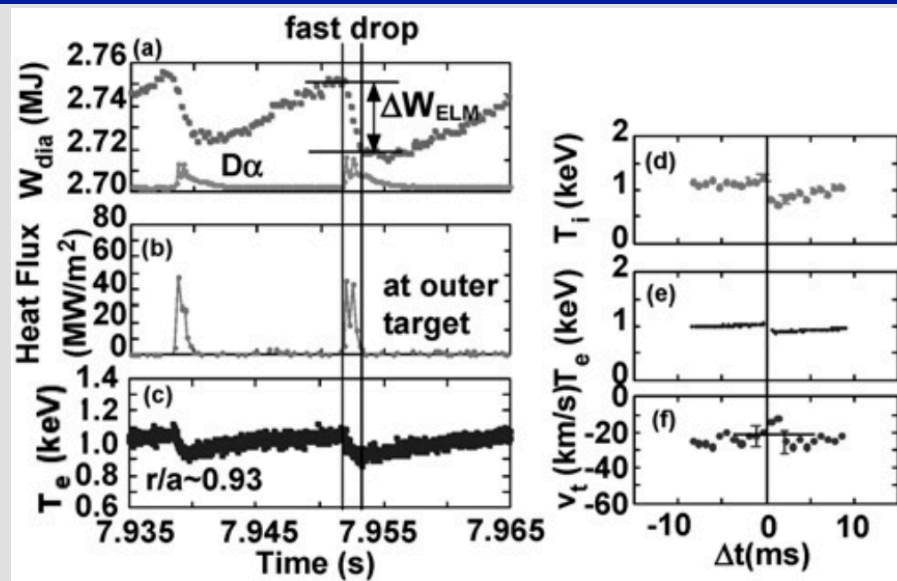


Fig.3 Type I ELMの崩壊と回復のサイクル^[2]

「Edge Localized Mode (ELM)」とはHモードの周辺輸送障壁で発生する間欠的・周期的な熱や粒子の放出現象である。

問題点:

このELMは非接触状態を崩壊させて、ダイバータ板へ過大な損耗を与える可能性がある。

最近の研究として

- ・ELMを緩和できるプラズマ条件を優先した炉設計研究
- ・ELM熱・粒子負荷を予測可能な動的モデルの開発 (私の研究目的)

[2] Y. Kamada *et al.*, J. Plasma Fusion Res. Vol.82, No.9 (2006)56-574

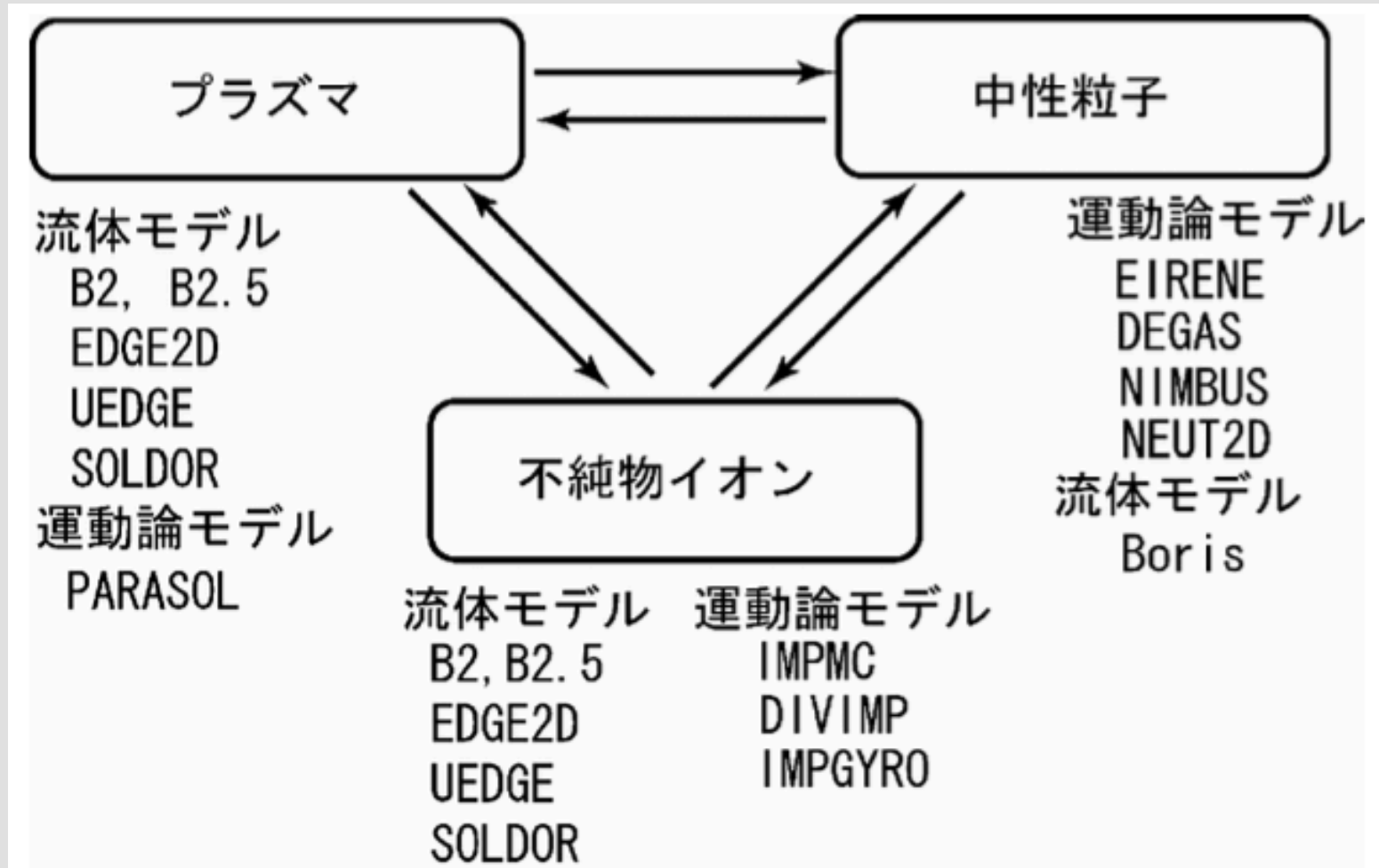


Fig. 4 境界層プラズマシミュレーションコード^[3]

[3] 畑山明聖, 滝塚知典, 「今, 核融合炉の壁が熱い!」, 日本原子力学会誌, Vol.50, No.7(2008)

2.2 モデル比較

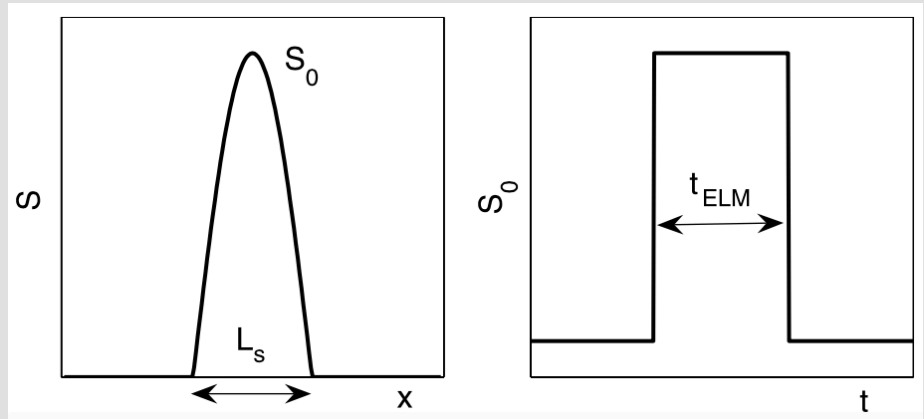
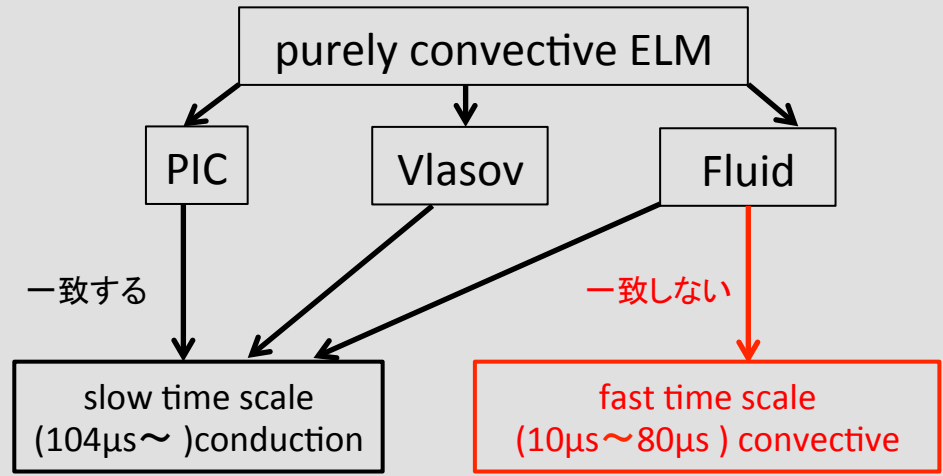


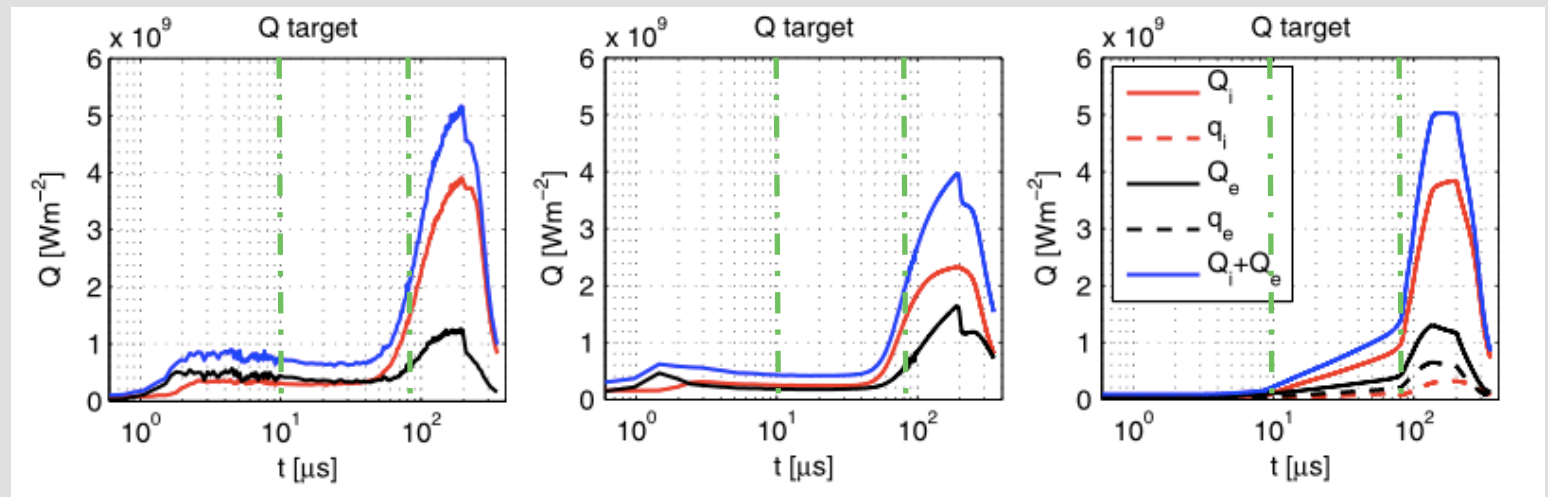
Fig.5 ELMソースの空間と時間分布^[4]



PIC code

Vlasov code

Fluid code



*low-collisionality case, no plasma-neutral interaction, preferentially by convection

Fig.6 各コードでアタッチメントにおけるELM現象を模擬するシミュレーション結果^[4]

[4] W. Fundamenski *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **54** (2012) 045002

2.3 Heat Flux Limiterの重要性

heat flux limiter
なし

heat flux limiter
あり

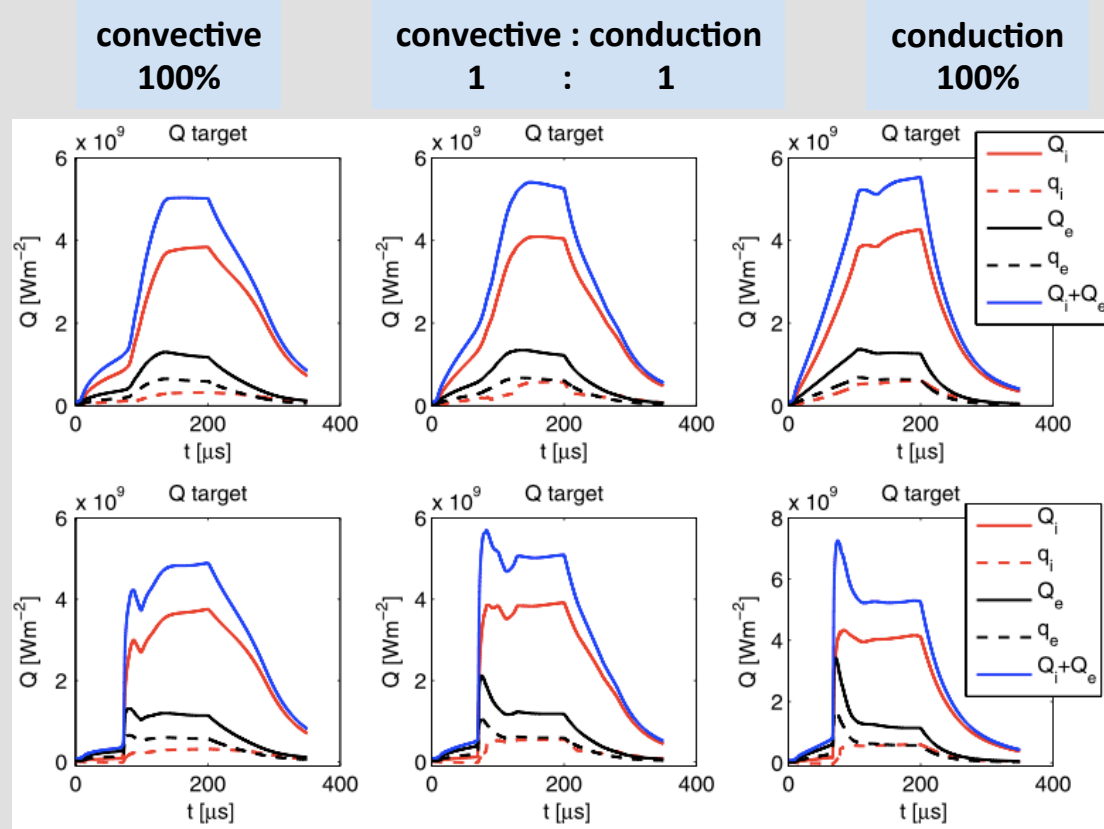
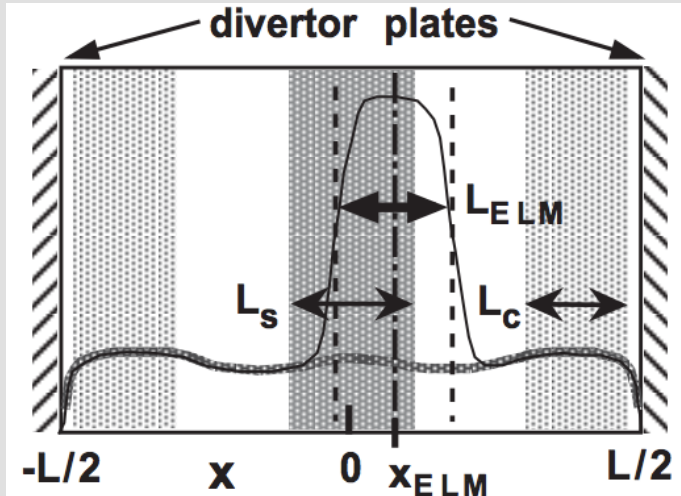


Fig.7 heat flux limiter調査に関して、各輸送方式における流体モデルシミュレーションの結果。heat flux limiters $\alpha_e=0.5, \alpha_i=1.0$ [4]

heat flux limiter	fast time scale	slow time scale
なし	非物理	影響無し
あり	物理	影響少ない

[4] W. Fundamenski *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **54** (2012) 045002

2.4 リサイクル率の影響



滝塚先生らはELMの空間分布をずらしてPARASOLコードを使い、ELMに対してリサイクル率の影響を調べた。

R_Γ	Γ	Q
増加	ピーク値の時間ずれ	最大値減少

Fig.8 ELMソースの空間分布^[5]

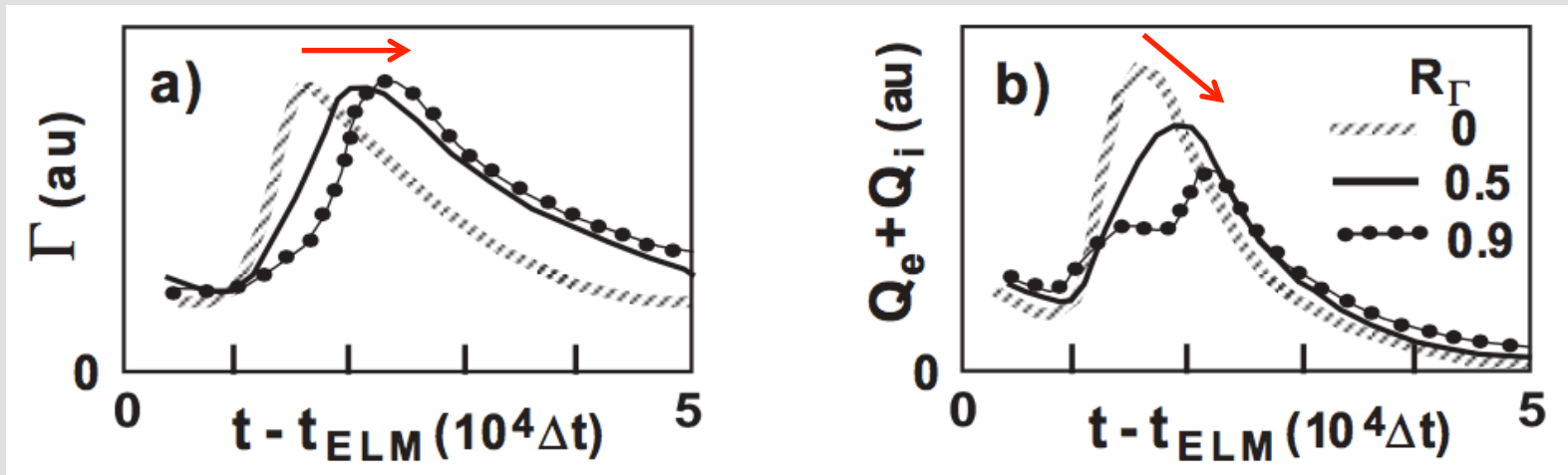


Fig.9 各リサイクル率に応じる粒子束と熱流束の振る舞い^[5]

[5] T. Takizuka *et al.*, Contrib. Plasma Phys. **46**, No. 7-9, 698 – 703 (2006)

3.1 非接触ダイバータにおけるELM研究

目的: 一次元流体モデルを用いた非接触ダイバータプラズマにおけるELM現象の時間発展調査を行う。

方法: 非接触ダイバータにおいて、ELM熱・粒子負荷を予測可能な動的モデルの開発

調査範囲: SOL-ダイバータ領域

モデル: 調査領域が広いことで、粒子モデルはやや厳しい。一方、モデルの比較から流体モデルを工夫すれば、ある程度でELMの時間発展を評価することができる。

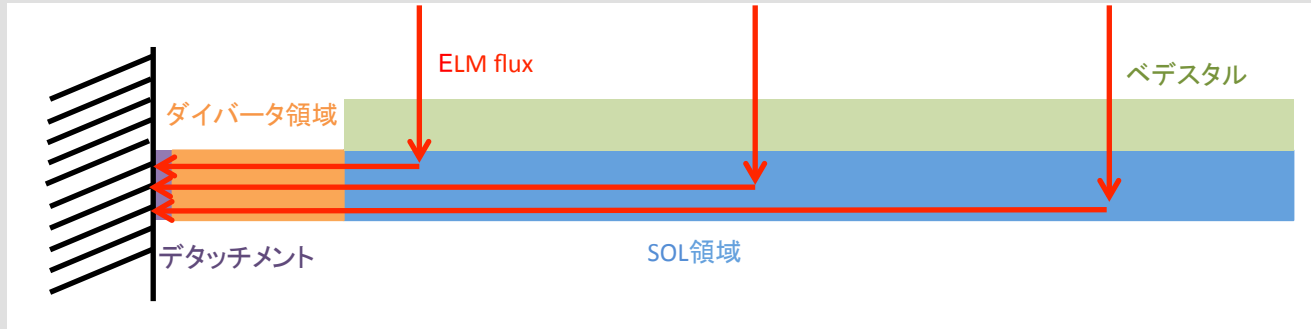
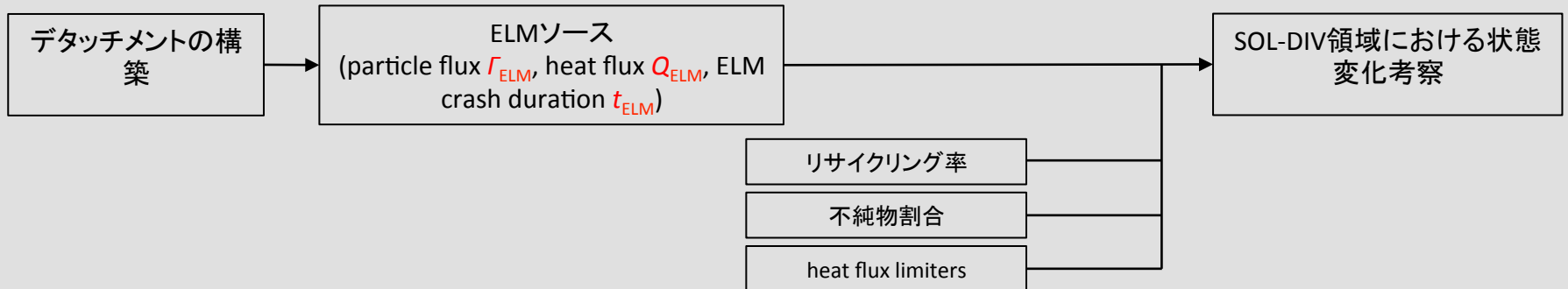


Fig.10 ELM現象導入モデルの概念図



仮定

- ・内側外側が対称(プラズマ電流なし)
- ・磁場一様
- ・イオン温度が等方的

境界条件

$$M \equiv \frac{V}{C_s} = 1 \quad (\text{シース領域の入り口})$$

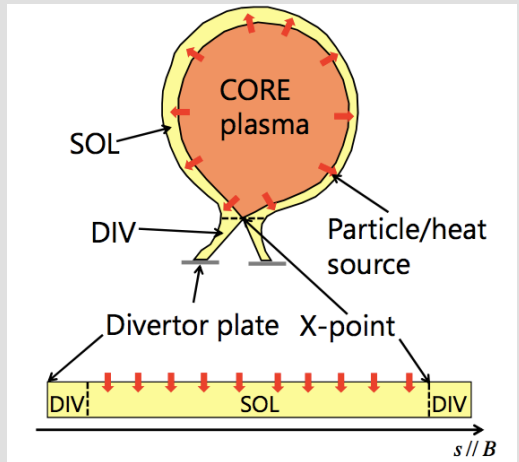


Fig.11 プラズマのポロイダル断面と磁力線方向一次元SOL-ダイバータプラズマモデルの概念図

磁力線方向一次元SOL-ダイバータプラズマの輸送方程式

連続の式

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s}(nV) = S$$

イオンエネルギー輸送方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} m_i n V^2 + \frac{3}{2} n T_i \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{1}{2} m_i n V^3 + \frac{5}{2} n T_i V + q_i^{eff} \right) = Q_i + \frac{3m_e n (T_e - T_i)}{m_i \tau_e} - \frac{\partial}{\partial s} (\pi_i^{eff} V) - V \frac{\partial}{\partial s} (n T_e)$$

電子エネルギー輸送方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} n T_e \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{5}{2} n T_e V + q_e^{eff} \right) = Q_e - \frac{3m_e n (T_e - T_i)}{m_i \tau_e} + V \frac{\partial}{\partial s} (n T_e)$$

運動量輸送方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} (m_i n V) + \frac{\partial}{\partial s} (m_i n V^2 + n T_i + n T_e - \eta^{eff} \frac{\partial V}{\partial s}) = M_m$$

ポロイダル方向一次元の輸送方程式

中性粒子の連続の式

$$\frac{\partial n_{n,recy}^{out}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (n_{n,recy}^{out} V_{n,recy}^{out}) = S_{n,recy}^{out} - n_{n,recy}^{out} v_{L,recy}$$

$$\frac{\partial n_{n,recy}^{inn}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (n_{n,recy}^{inn} V_{n,recy}^{inn}) = S_{n,recy}^{inn} - n_{n,recy}^{inn} v_{L,recy}$$

$$\frac{\partial n_{n,diff}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (-D_n \frac{\partial n_{n,diff}}{\partial x}) = S_{n,diff} - n_{n,diff} v_{L,diff}$$

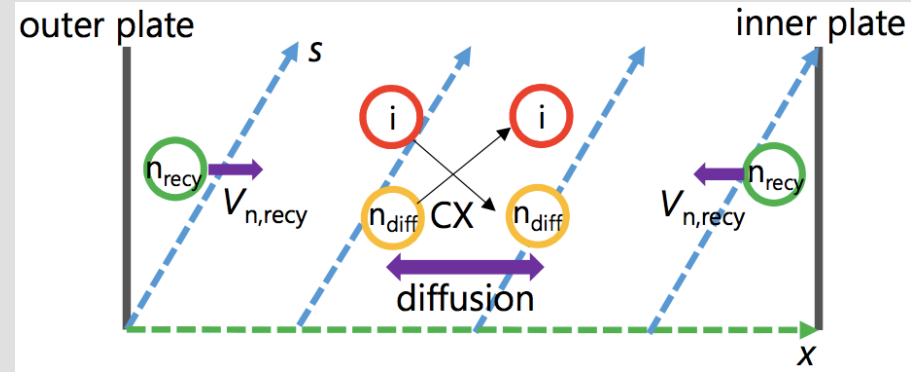
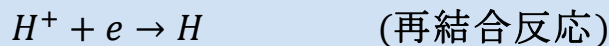
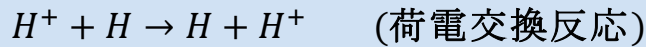
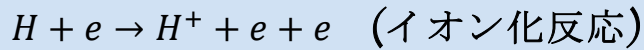


Fig.12 中性粒子モデルの概念図

原子分子過程



不純物モデル

$$Q_{e,rad} = -L_z r_{imp} n^2$$

L_z : 放射効率

r_{imp} : 不純物割合

3.3 非接触ダイバータプラズマ ①

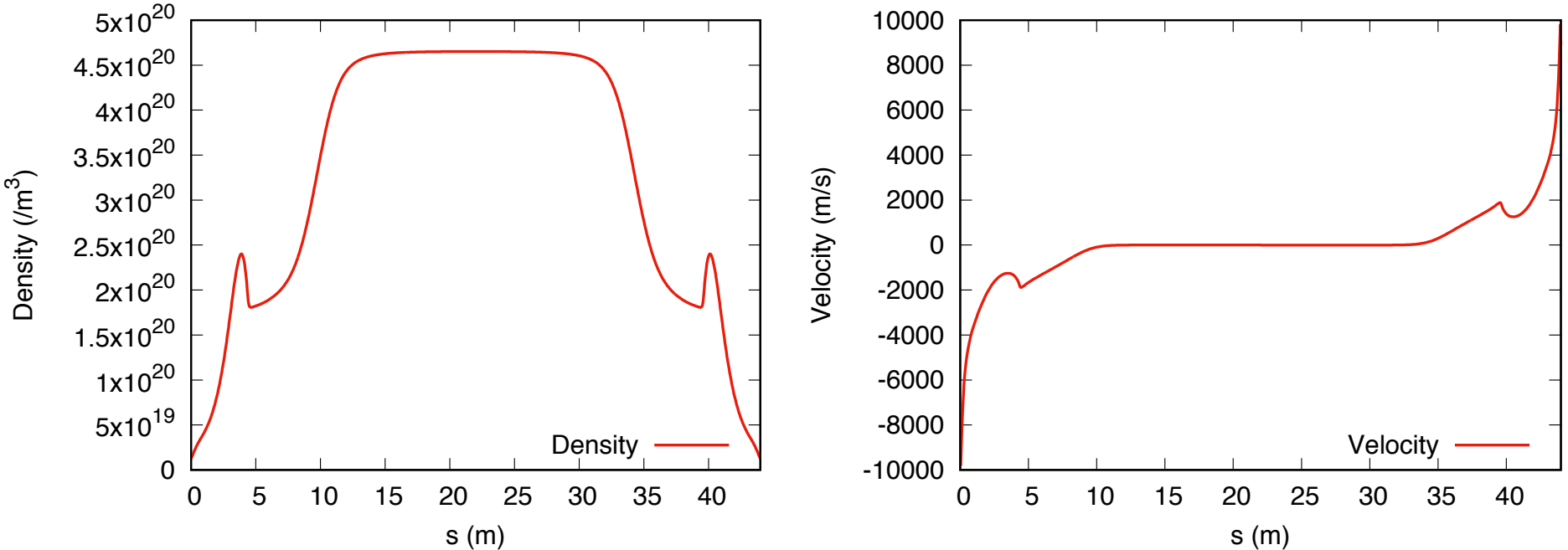


Fig.13 非接触ダイバータプラズマの密度と速度の空間分布

計算条件: SOL-DIV領域: 22.0 m; X点: シースから4.4 m;
粒子flux: $4.0 \cdot 10^{22}$ [/s]; heat flux: $1.0 \cdot 10^6$ [W];

- ダイバータ板前の温度が1eV程度まで低下すると、体積再結合は支配的になることで、ダイバータ板へのイオン粒子は著しく減少する。

3.3 非接触ダイバータプラズマ ②

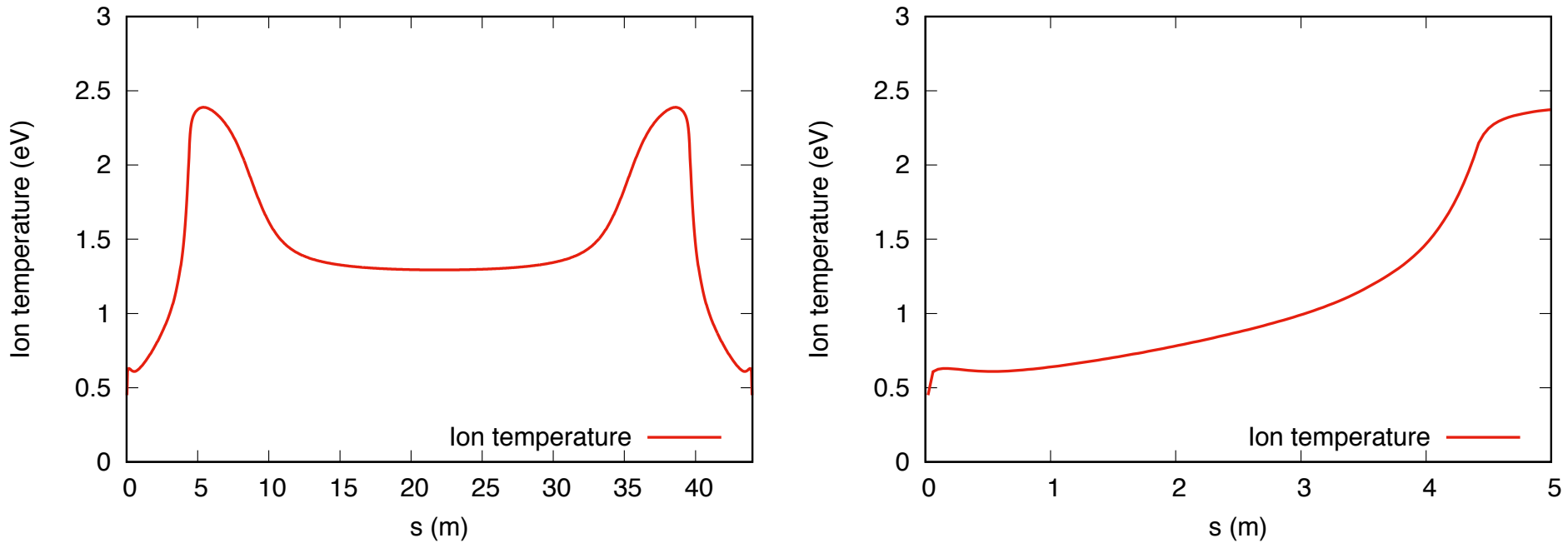


Fig.14 非接触ダイバータプラズマのイオン温度の空間分布とその拡大図

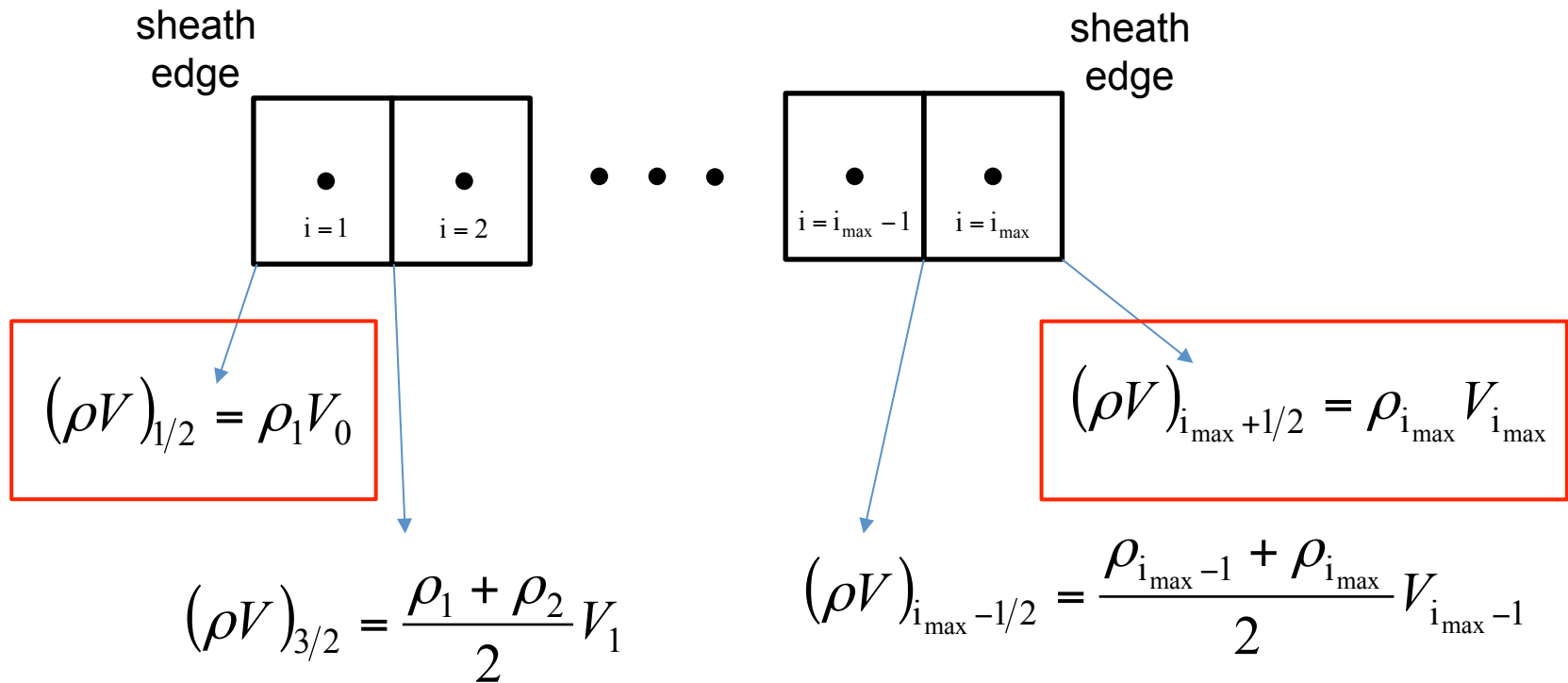
・炉心密度を増大させ、リサイクリング率が活発になることで中性粒子、不純物などとの相互作用による放射冷却が増大になる。その結果としてダイバータ領域のプラズマ温度が減少する。

プラズマが低温高密度化する過程でイオン化反応率が上昇してリサイクリング中性粒子の減衰長 λ が短くなり、メッシュサイズは十分小さくならないと、収束できない。

3.4 中心差分検討 (境界での風上差分)

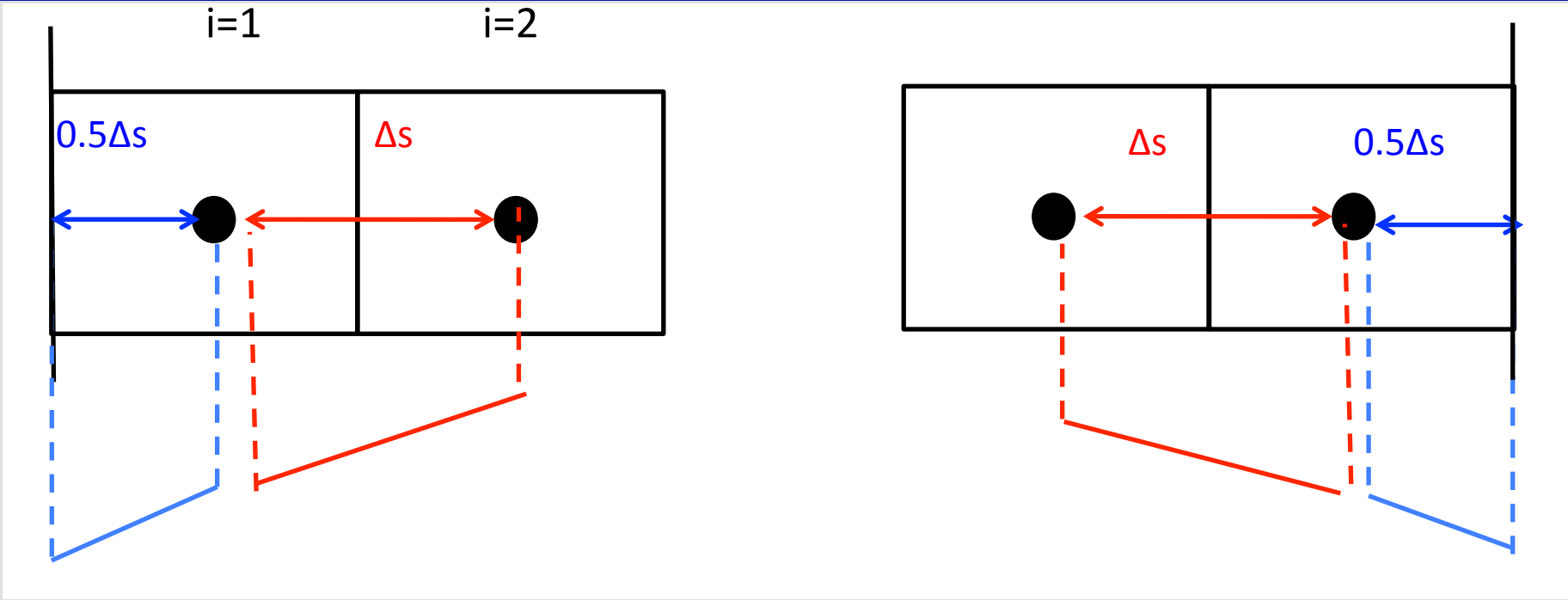
連続の式

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} (\rho_i - \rho_i^N) + (\rho V)_{i+\frac{1}{2}} - (\rho V)_{i-\frac{1}{2}} = m S_i \Delta s$$



シース入り口では ρ に関して風上差分を使っている

3.4 中心差分検討 (境界での線形外挿)



0.5Δsの勾配は前面の勾配と一緒に

$$\begin{aligned} \rho_{1/2} &= \rho_1 - (\rho_2 - \rho_1) / \Delta s * 0.5\Delta s \\ &= 1.5\rho_1 - 0.5\rho_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_{imax+1/2} &= \rho_{imax} - (\rho_{imax-1} - \rho_{imax}) / \Delta s * 0.5\Delta s \\ &= 1.5\rho_{imax} - 0.5\rho_{imax-1} \end{aligned}$$

連続の式

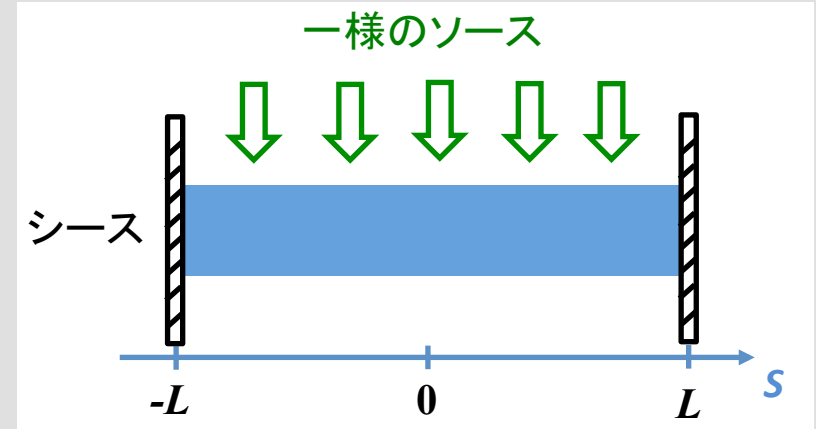
$$\frac{d}{ds}(nV) = S = \text{const.}$$

運動量輸送の式

$$\frac{d}{ds}(m_i n V^2 + 2nT) = 0$$

$$(T = \text{const.})$$

境界条件: $V(L) = -V(-L) = C_s = \sqrt{\frac{2T}{m_i}}$



数値計算

- 連続の式 {
- ・風上差分
 - ・中心差分(境界風上差分)
 - ・中心差分(境界線形外挿)

運動量輸送の式: 風上差分

メッシュサイズ: $\Delta s = 2 \text{ cm}, 5 \text{ mm}$

解析解

$$n = \frac{L + \sqrt{L^2 - s^2}}{L} n_t \quad \left(n_t = \frac{SL}{C_s} \right)$$

$$V = \frac{s}{L + \sqrt{L^2 - s^2}} C_s$$

3.6 結果比較

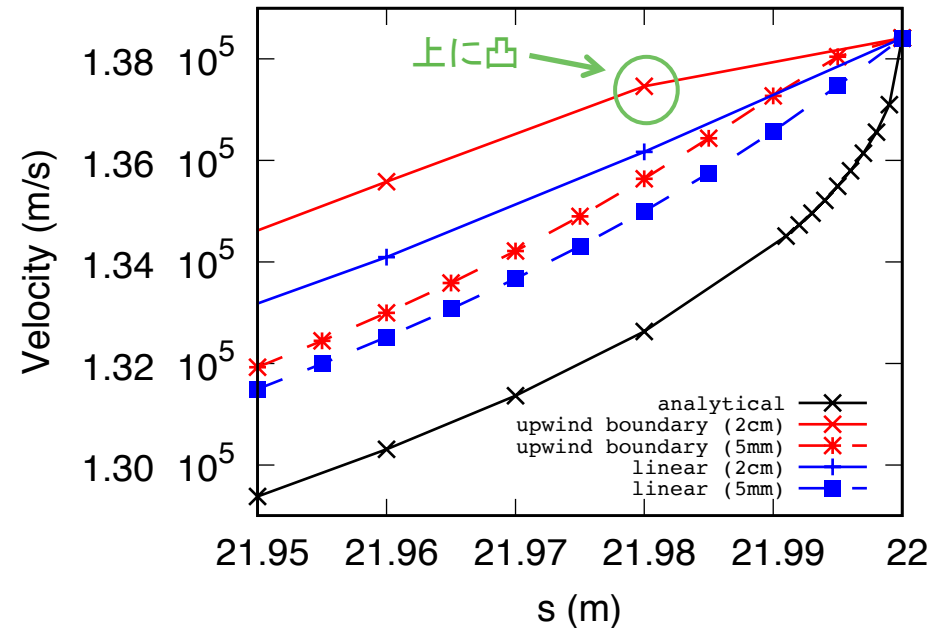
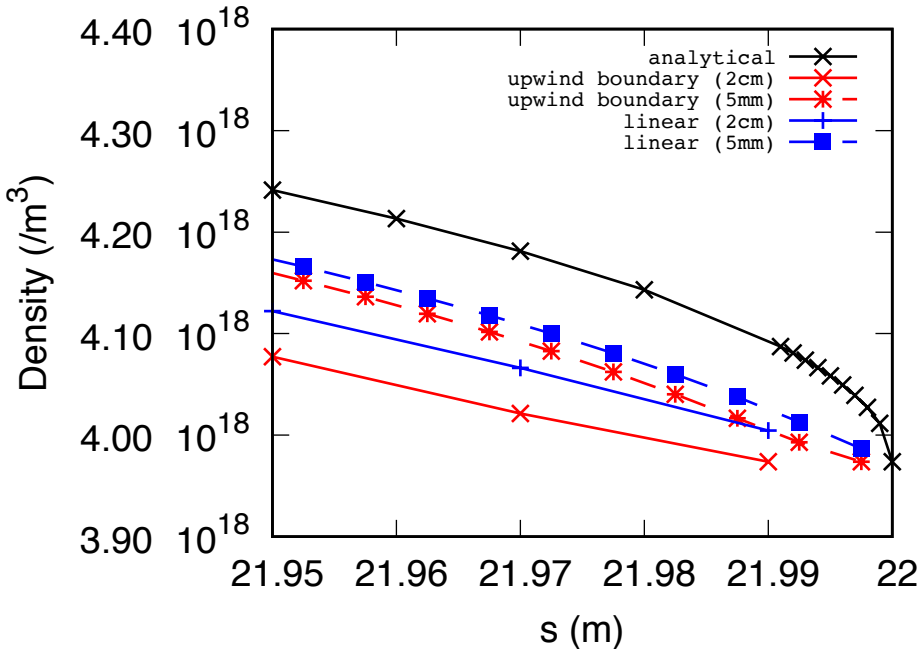


Fig.15 プラズマ密度と流速について数値計算と解析解の比較

密度	境界線形(青)	境界風上(赤)
精度	2 cm	2cm
精度	5 mm	5mm

流速	境界線形(青)	境界風上(赤)
精度	2 cm	2 cm (上に凸)
精度	5 mm	5 mm (やや上に凸)

1. ELMの放出現象によって、非接触状態が破壊される可能性があるため、ダイバータにおけるELM熱・粒子負荷を予測可能な動的モデルの開発は重要である。
2. 一次元流体モデルコードを使用して、ELMソースパラメータやリサイクリング率などを調整しながらSOL-DIV領域で非接触状態におけるELMの時間発展を考察する予定。
3. 現コードを使い、物理量の空間分布シミュレーション結果から非接触状態の構築が確認できた。
4. アタッチより特性長が短くなるデタッチの場合、コードの精度はより重要になると思う。現コードの一次精度風上差分を二次精度中心差分への改善を行なっている。結果として連続の式に関して境界での検討から、線形外挿は風上差分より良い結果に至ったが、厳密解との残差が大きい問題を検討する必要がある。