

局所計測を併用した 新しい電子密度分布再構成法の開発

第16回 若手科学者によるプラズマ研究会
2013年3月4-6日

東京大学 小野・井研究室
門脇 和丈

レーザー干渉計の原理

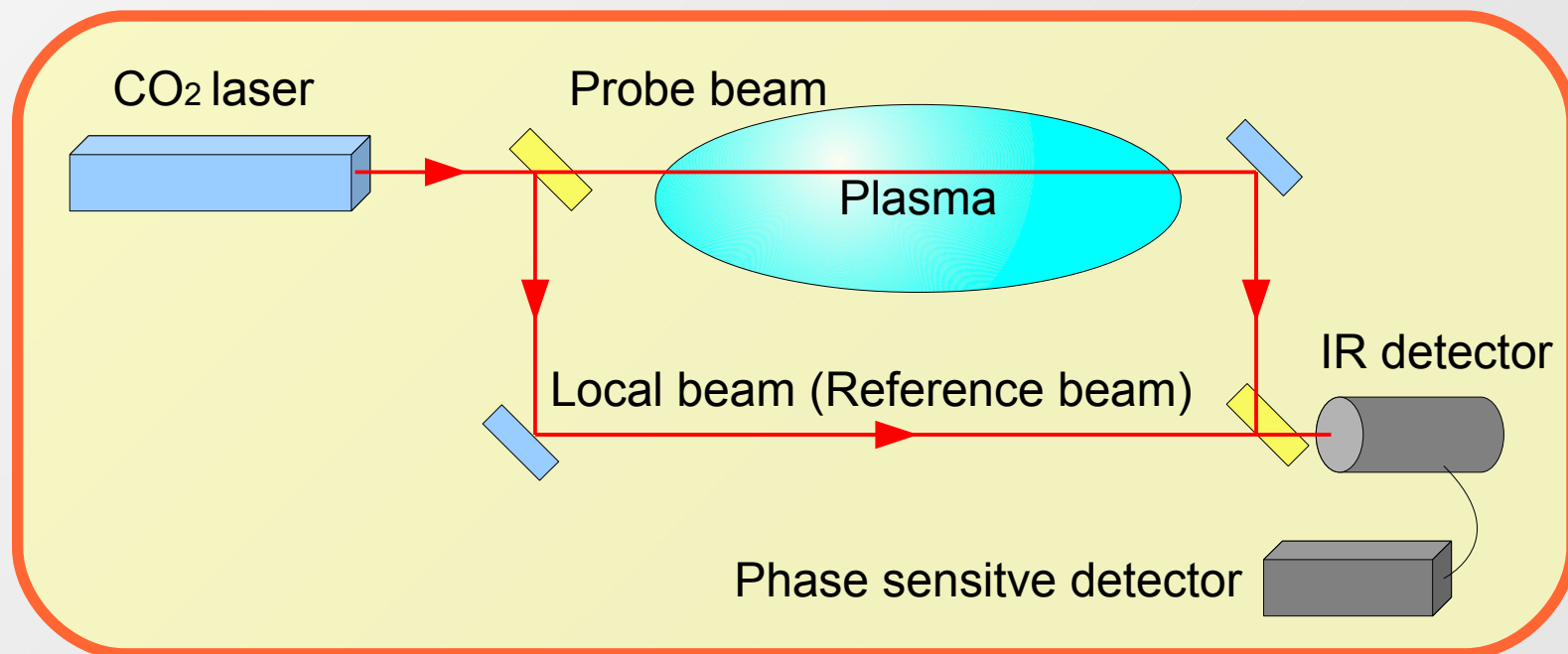
- プラズマ中を通すレーザー(プローブ光)とプラズマ外を通すレーザー(ローカル光)を干渉させ、位相差 $\Delta\phi$ を計測する。
- 関係式よりレーザーパス上の電子密度の線積分値 $n_e L$ が得られる。

$$n_e L = \frac{4\pi c^2 m_e \epsilon_0}{e^2 \lambda} \Delta\phi$$

$\Delta\phi$: 位相差 (取得パラメータ)

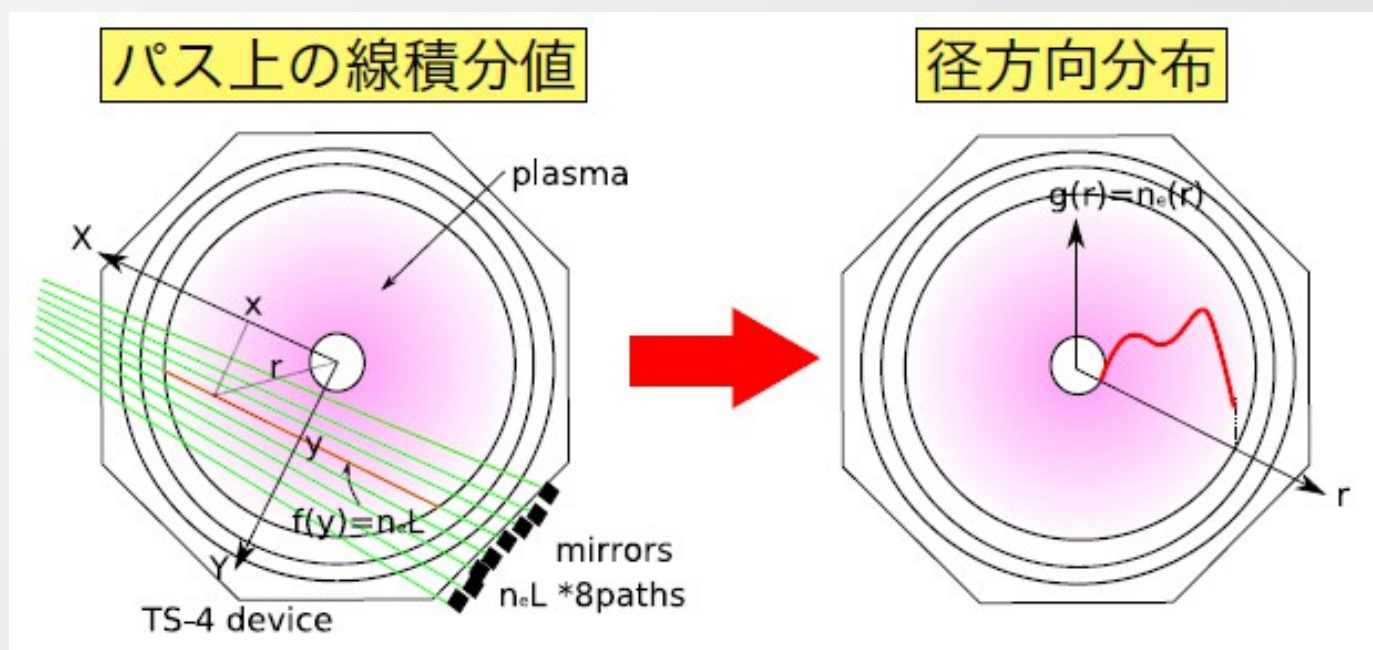
λ : 波長

L : パス長



序論 レーザ干渉計 電子密度分布再構成

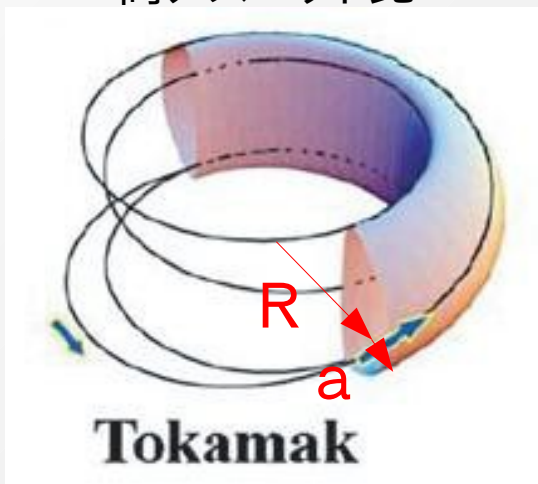
- 計測した線積分値から、径方向分布を計算する必要がある。
- 代表的な手法
 - アーベル変換 ← 従来手法
 - 級数展開法 ← 本研究で開発した手法
 - エントロピー最大化法 etc.



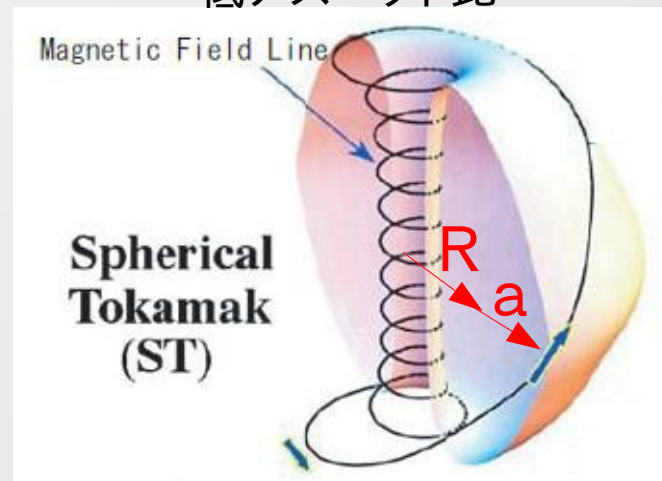
TS-4装置 低アスペクト比の球状トカマク配位

アスペクト比 = 大半径 / 小半径 = R / a

高アスペクト比

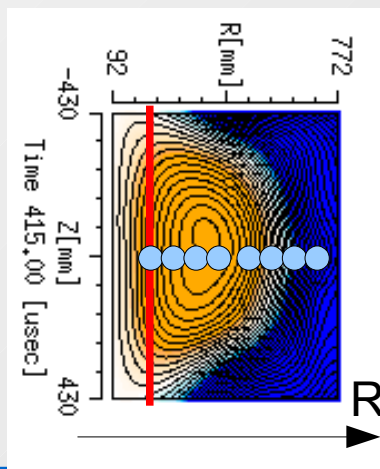


低アスペクト比

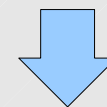


● TS-4装置は低アスペクト比

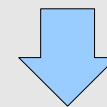
半径位置 [mm]
184
262
346
409
482
575
612
687



レーザ位置より内側にも大きな磁場勾配



内壁の傍の密度分布が重要だが無情報

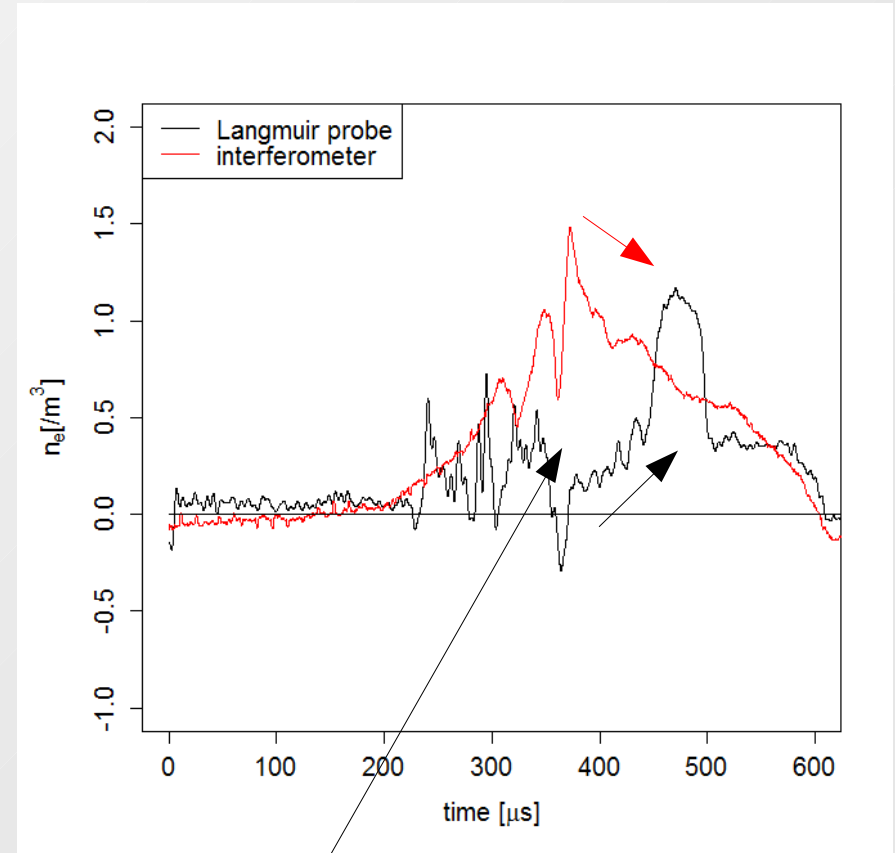
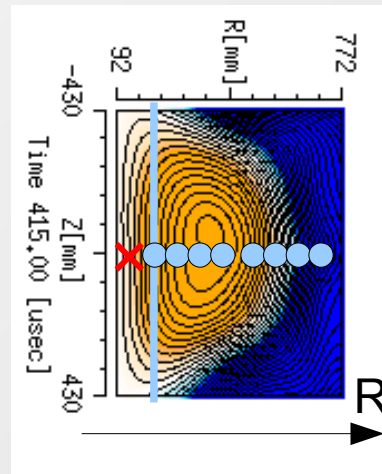


仮定を追加する or 更なる情報取得

内側での局所計測と干渉計測の比較

- プラズマ生成時の
局所計測(静電プローブ)
線積分計測(干渉計)
から得られた内壁付近の
電子密度の時間発展

- × プローブ位置
- レーザ計測位置



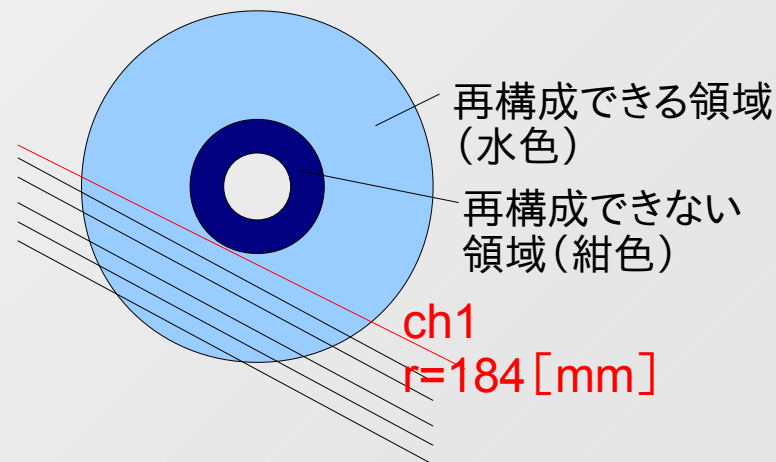
傾向に大きな違いがある

従来手法1＝アーベル変換は径方向内側の再構成ができない

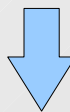
- アーベル変換で再構成が可能な範囲は、最も内側のレーザ位置で決まる。

$$g(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{df(y)}{dy} \frac{dy}{\sqrt{y^2 - r^2}}$$

f(y): 計測した線積分値
g(r): 再構成された径方向分布
f(y)に、十分に細かく補間をした線積分値
を代入する。



線積分値を内側方向に適切に延長することができない



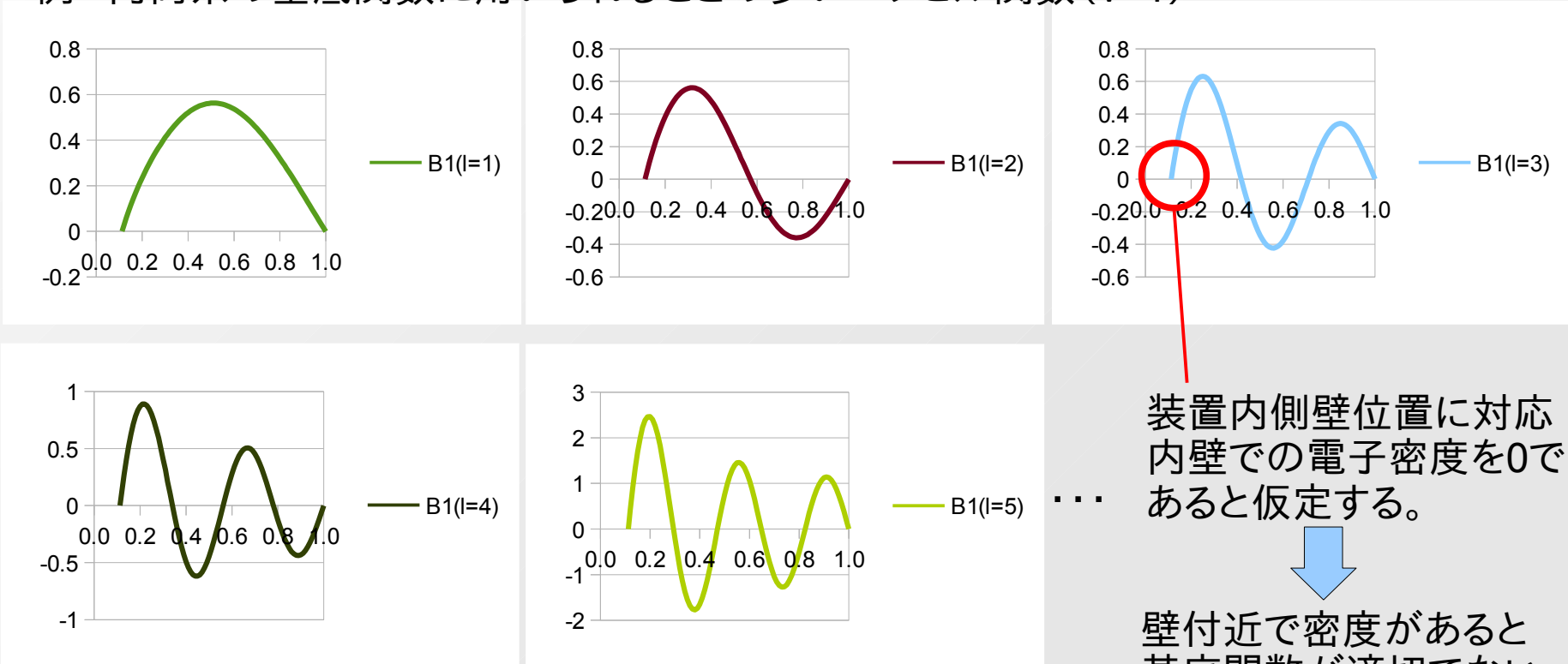
内側の再構成も不可能

従来手法2＝級数展開法は内側の仮定が合わない

- 級数展開法

- 基底関数系の線形和で表現できると仮定
- 基底関数の例 (三角関数、ベッセル級数、ゼルニケ多項式など・・・)

例: 円筒系の基底関数に用いられることの多いベッセル関数 ($\nu=1$)



装置内側壁位置に対応
内壁での電子密度を0で
あると仮定する。

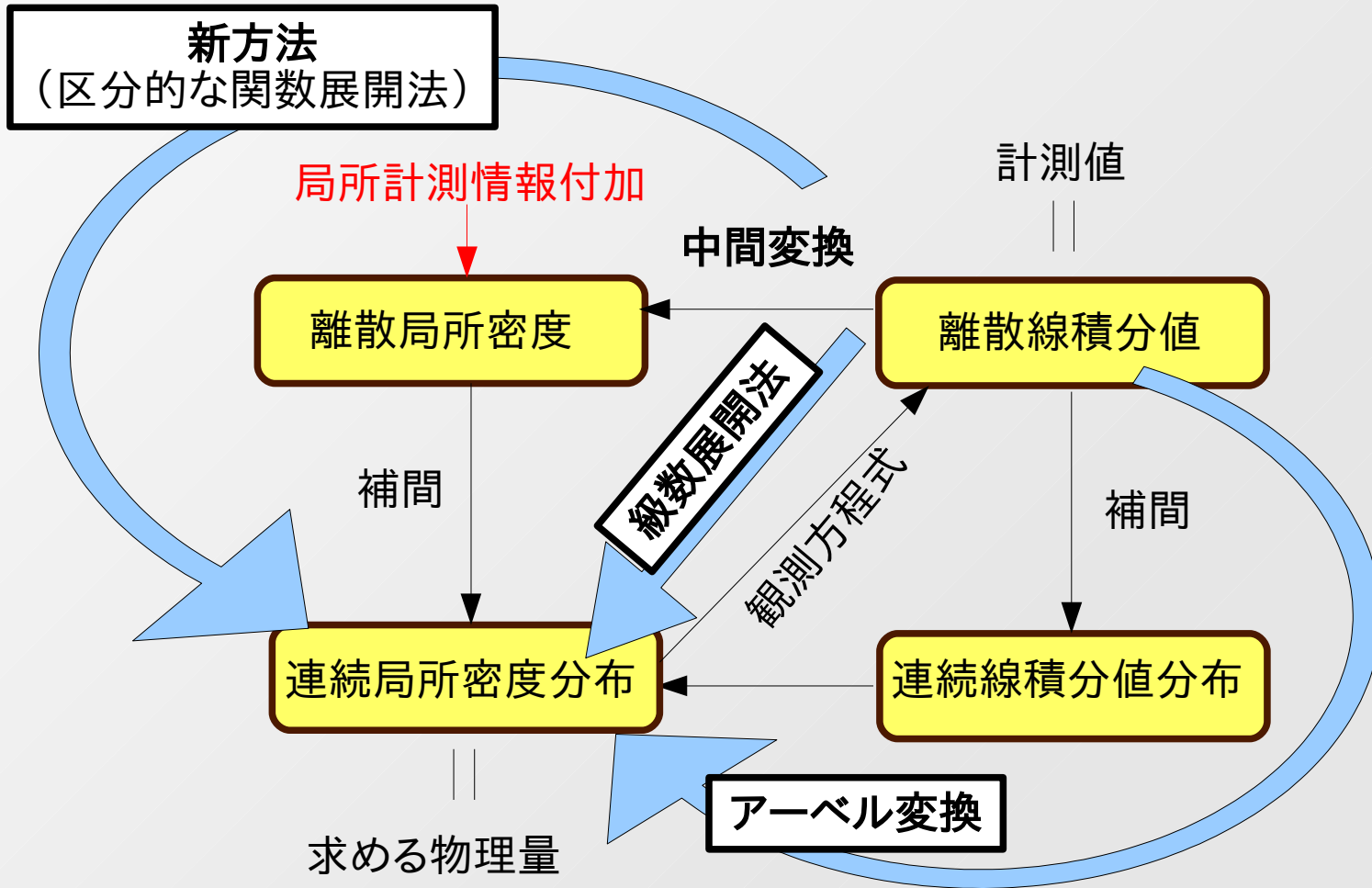


壁付近で密度があると
基底関数が適切でない。

局所計測を追加し、情報を増やしての再構成を目指す

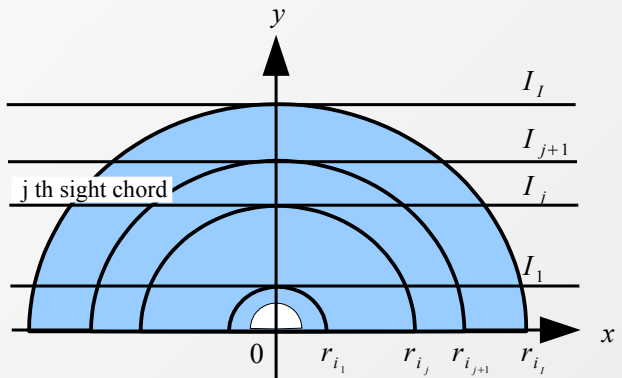
- 局所計測と、既存の積分計測を併用
 - 次元の異なる2つの量を用いた再構成法を開発
 - アーベル変換に仮定でなく実測値を追加
 - 級数展開法の基底関数仮定のような強い仮定を置かずに済む

再構成法の比較

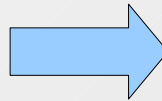


新手法の概要(アーベル変換との類推)

アーベル変換

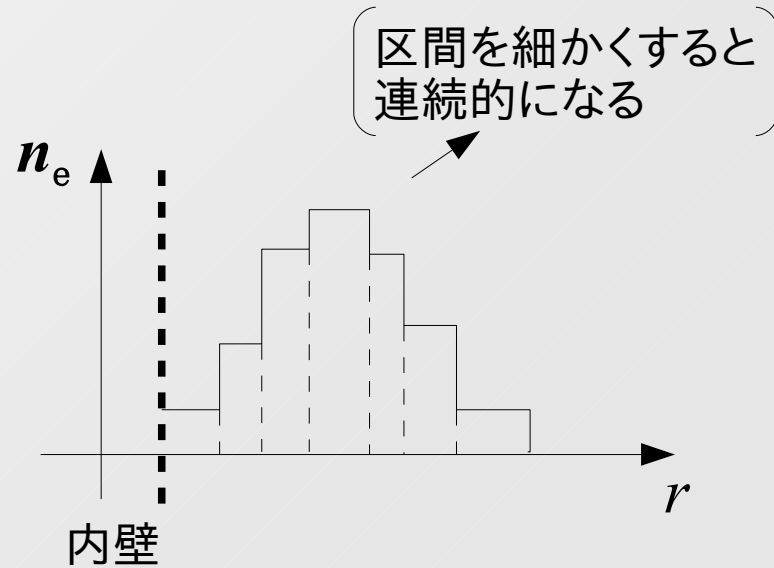


各区間での密度一定

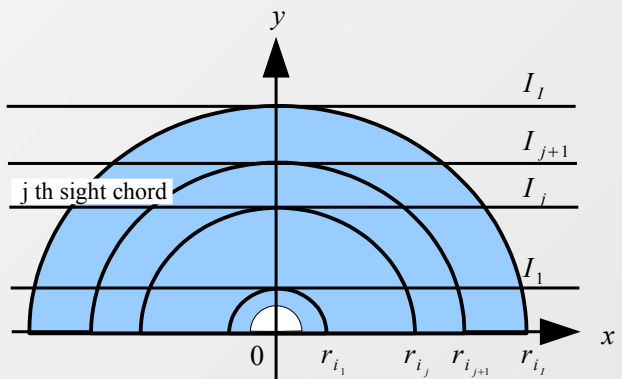


線積分値

局所値



新手法

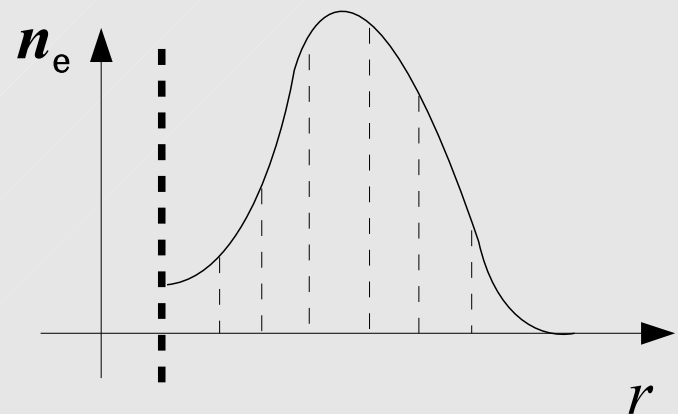


各区間が補間関数でなめらかに接続



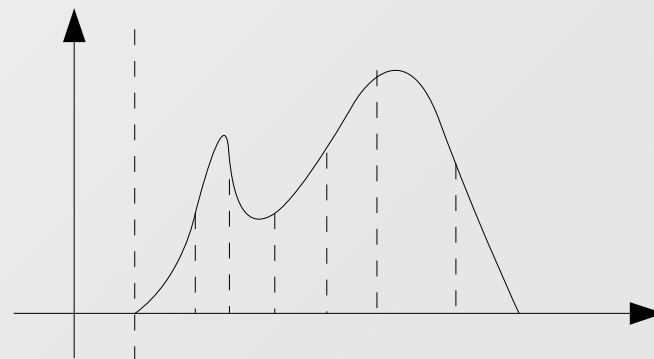
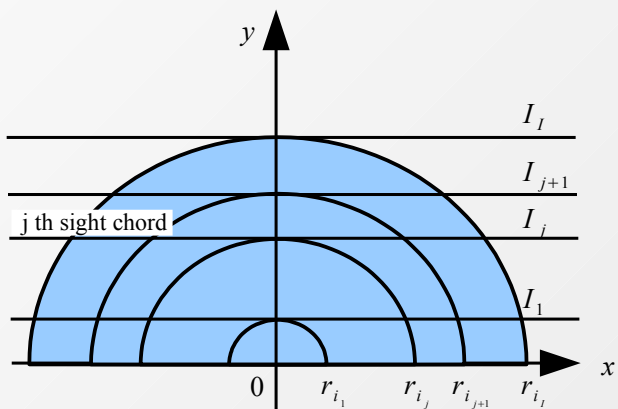
線積分値

局所値

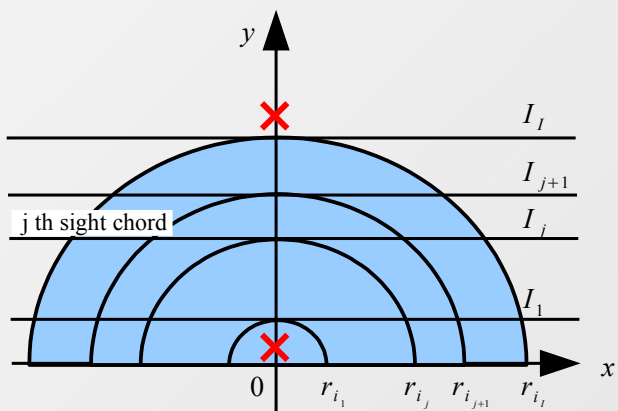


新手法の概要(局所計測との接続)

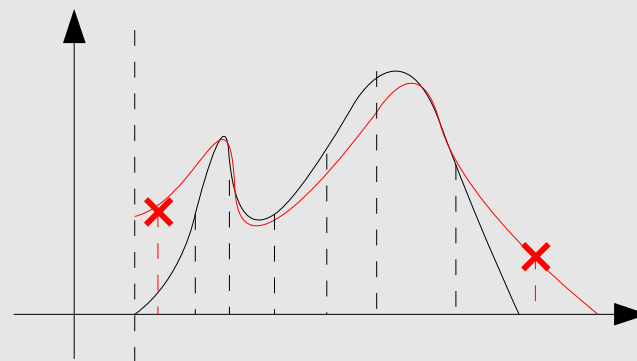
新手法(無情報)



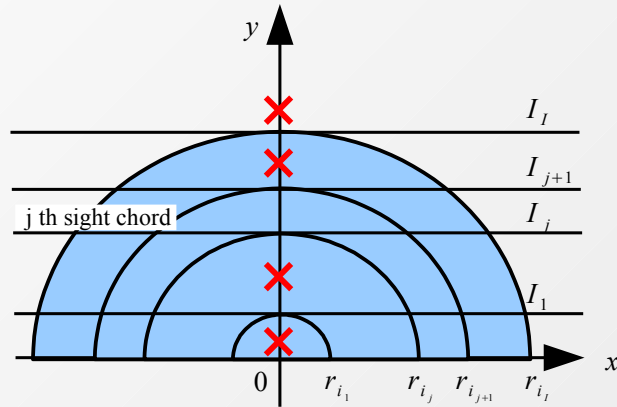
新手法(局所計測あり)



区間の分割を増やし
局所情報を用いて
補正をかける

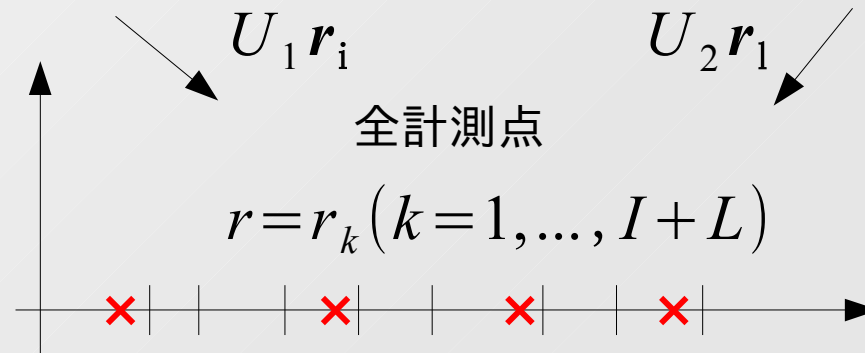
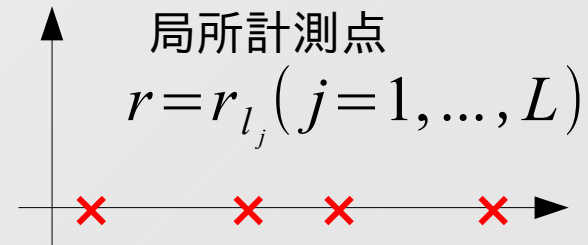
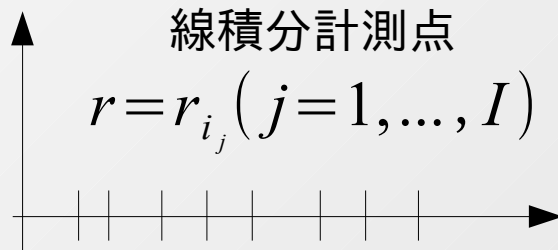


区間の分割



$$\left\{ \begin{aligned} \mathbf{r} &= U_1 \mathbf{r}_i + U_2 \mathbf{r}_l \\ \mathbf{n}_e &= U_1 \mathbf{n}_{e(\text{integral})} + U_2 \mathbf{n}_{e(\text{local})} \end{aligned} \right.$$

並べ替え用の行列

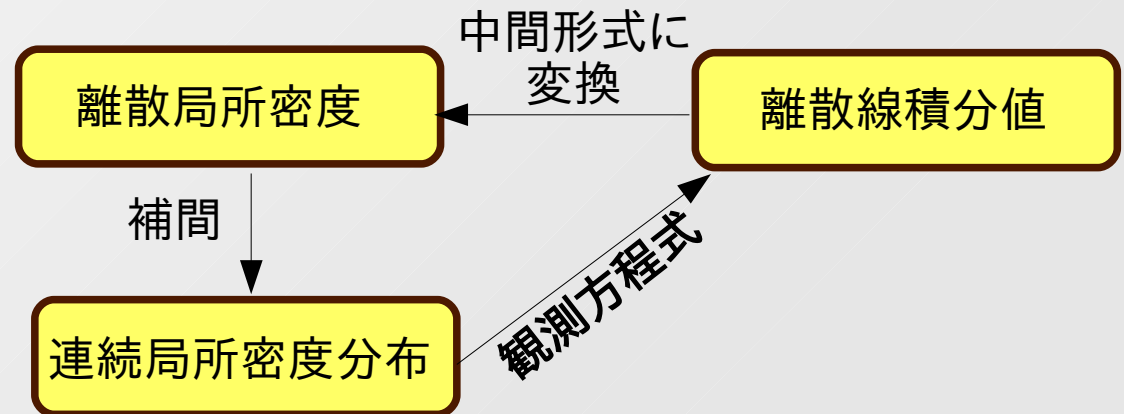


線形変換を利用したアルゴリズムの作成

- 補間法として自然スプライン補間を選択
- 補間法が決まれば、観測方程式を作成できる。

観測方程式が可積分で線形化可能

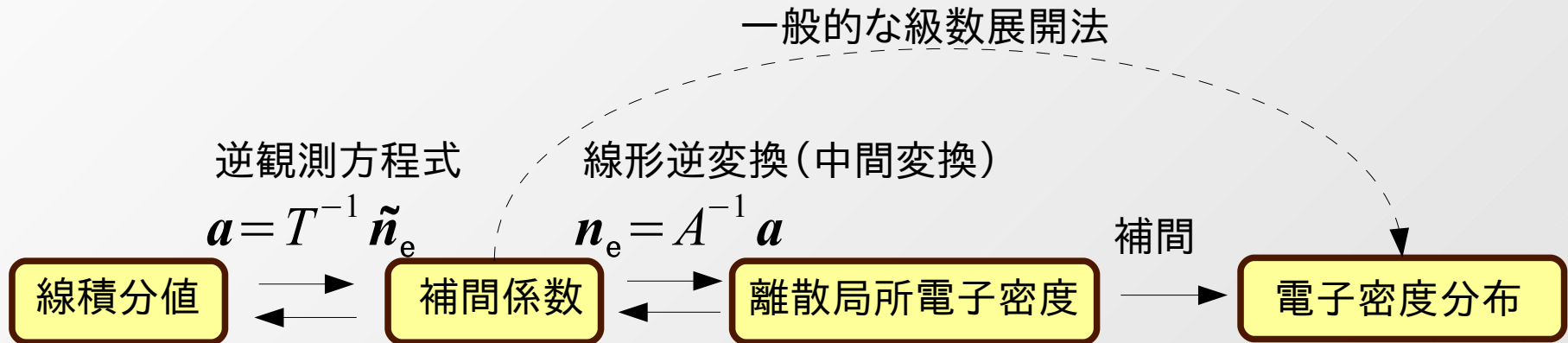
$$I_j = \int_{r_{i_j}}^R \frac{g(r)r dr}{\sqrt{r^2 - r_{i_j}^2}}$$



スプライン補間 $g_{k+1}(r) = a_{0k} + a_{1k}(r - r_k) + a_{2k}(r - r_k)^2 + a_{3k}(r - r_k)^3$
 $(r_k \leq r < r_{k+1})$

再構成が係数を決定する問題になった。
各係数と局所密度値ベクトルの関係を求めると、中間変換が作れる

線形変換のみを用いて定式化



一度離散局所電子密度に変換するため、局所計測データを追加できる

$$\mathbf{n}_e = U_1 \mathbf{n}_{e(\text{integral})} + U_2 \mathbf{n}_{e(\text{local})}$$

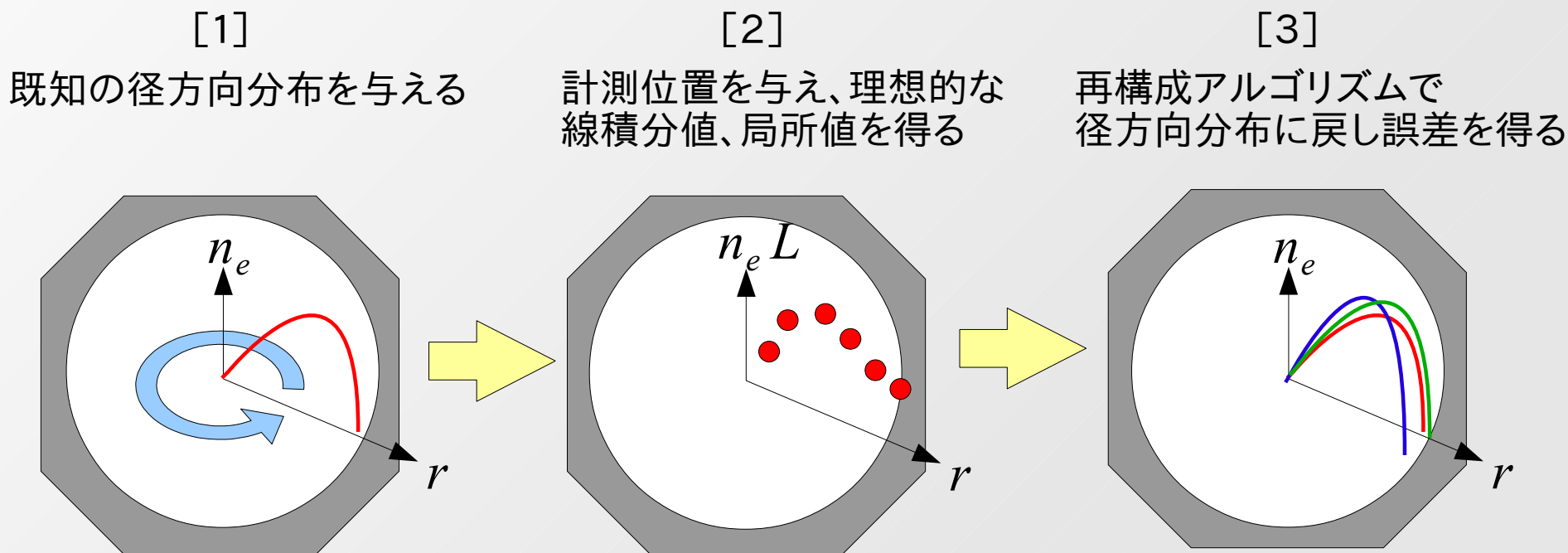
最終形

$$\mathbf{n}_{e(\text{integral})} = (TAU_1)^{-1} \left\{ \underset{\substack{\uparrow \\ \text{線積分計測値}}}{\tilde{\mathbf{n}}_e} - TAU_2 \mathbf{n}_{e(\text{local})} \right\}$$

局所計測値

テスト分布の再構成実験

- 再構成アルゴリズムの性能比較



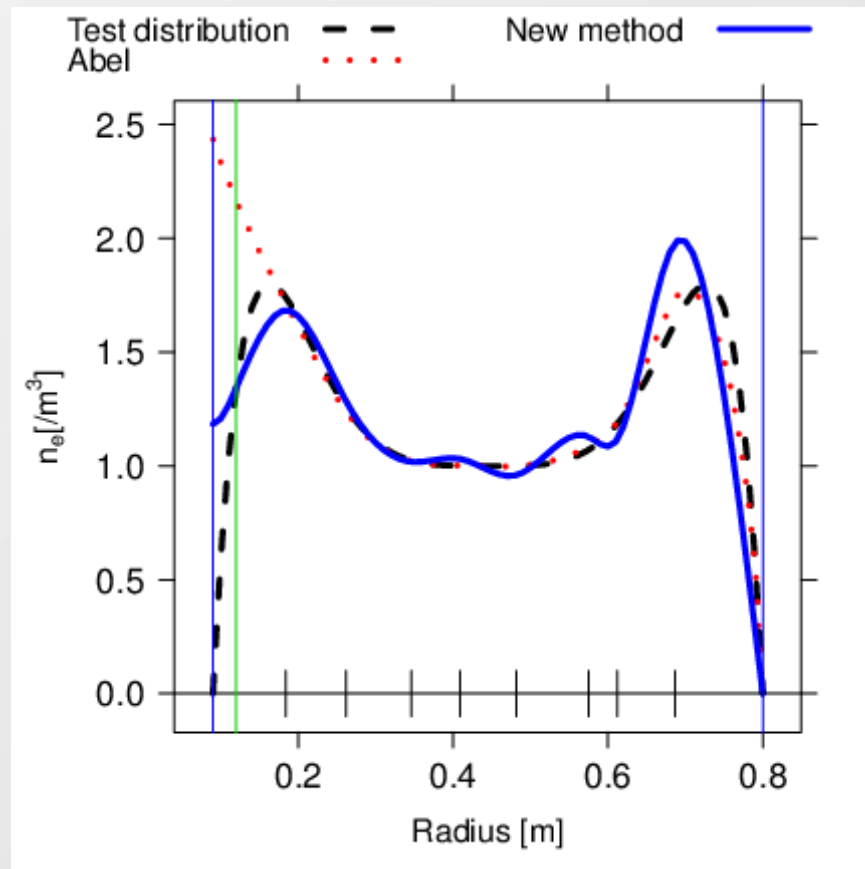
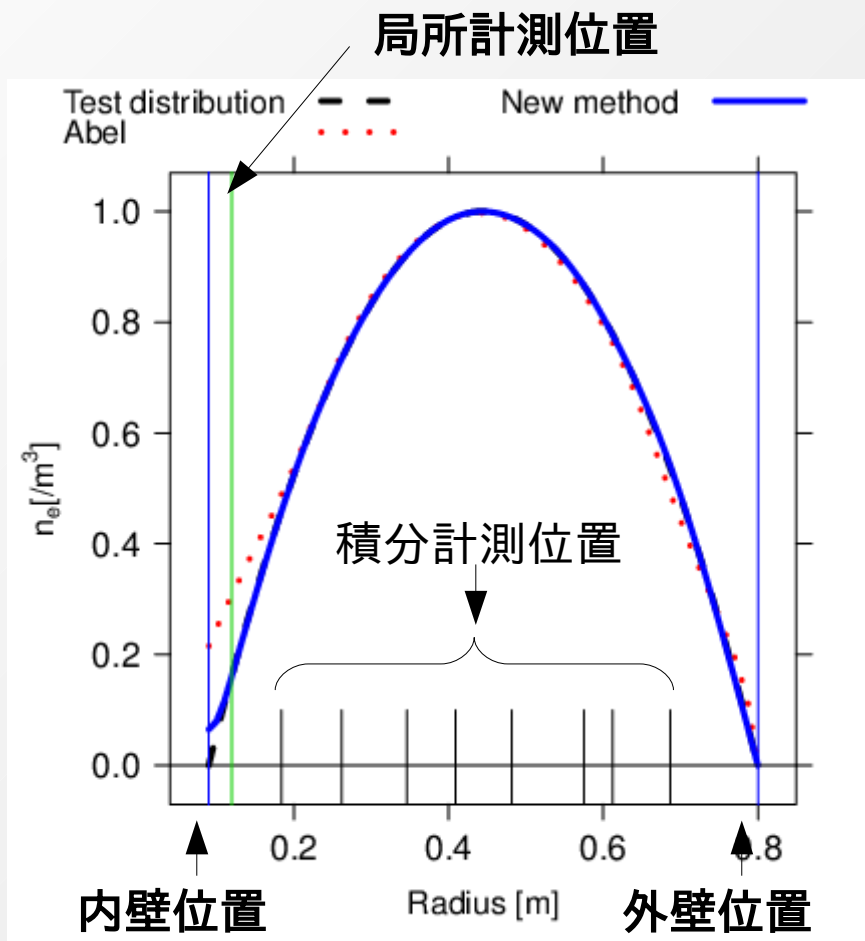
軸対称を仮定

装置パラメータはTS-4装置のものを使用

赤:元のテスト分布
青:アルゴリズム1での再構成分布
緑:アルゴリズム2での再構成分布

誤差の小さいアルゴリズムが良いアルゴリズム

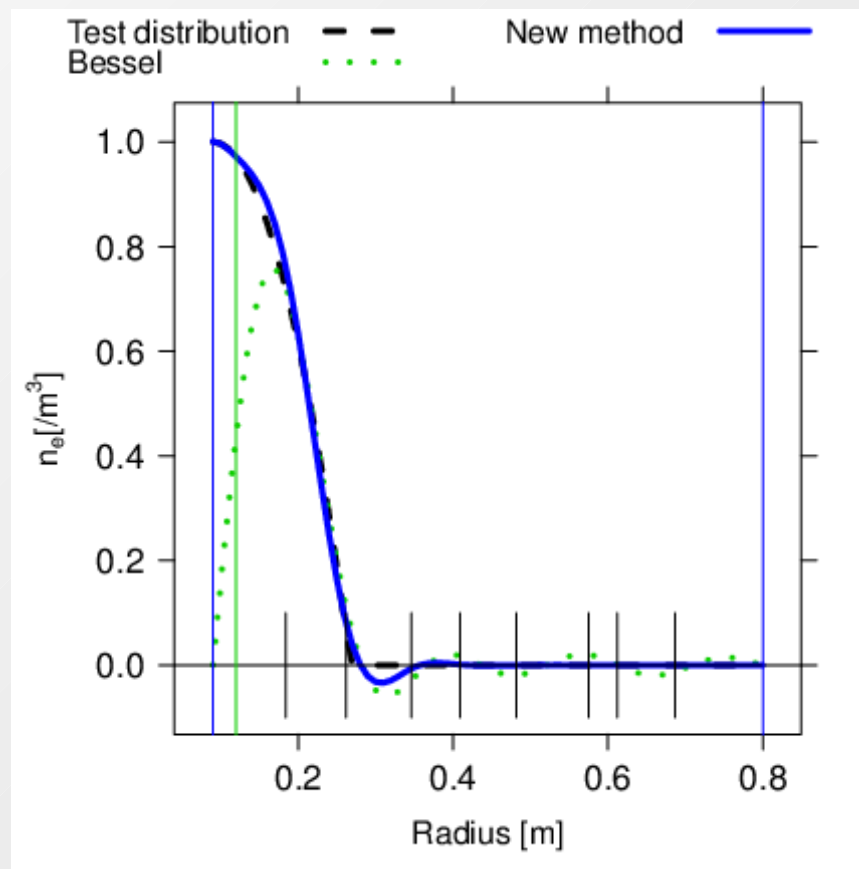
テスト分布再構成結果1(古典的なテスト分布)



内側の情報がないアーベル変換(赤)はズレが生じる

緑の位置での局所密度情報を利用する新手法(青)はアーベルに比べ誤差を抑えられている。

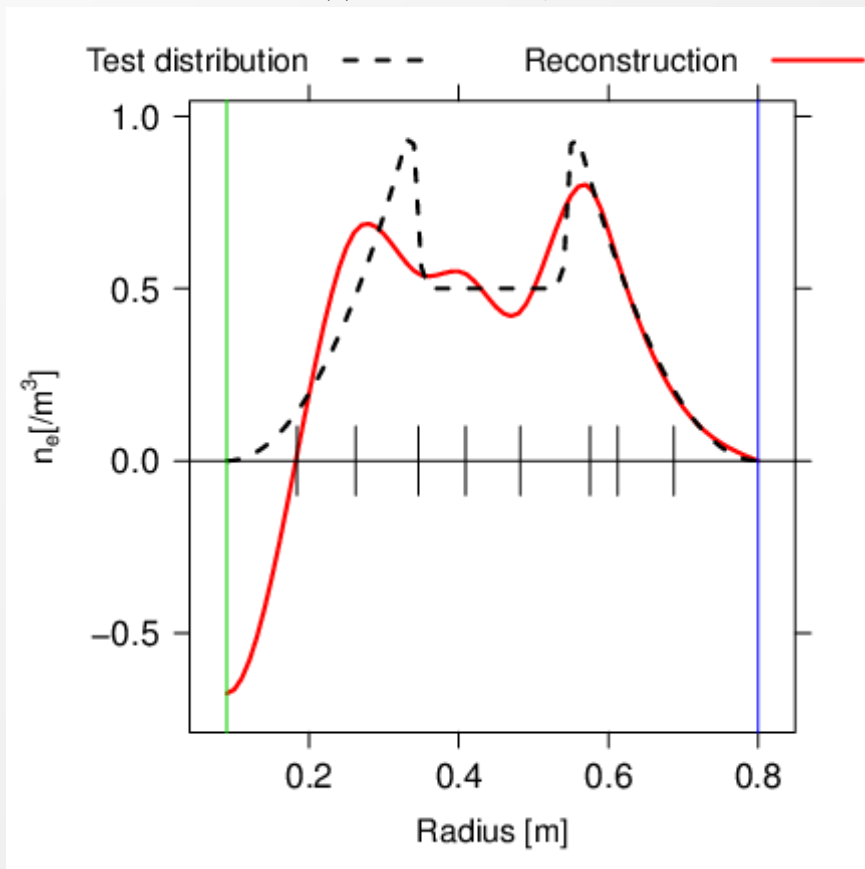
テスト分布再構成結果2(端で非ゼロ値)



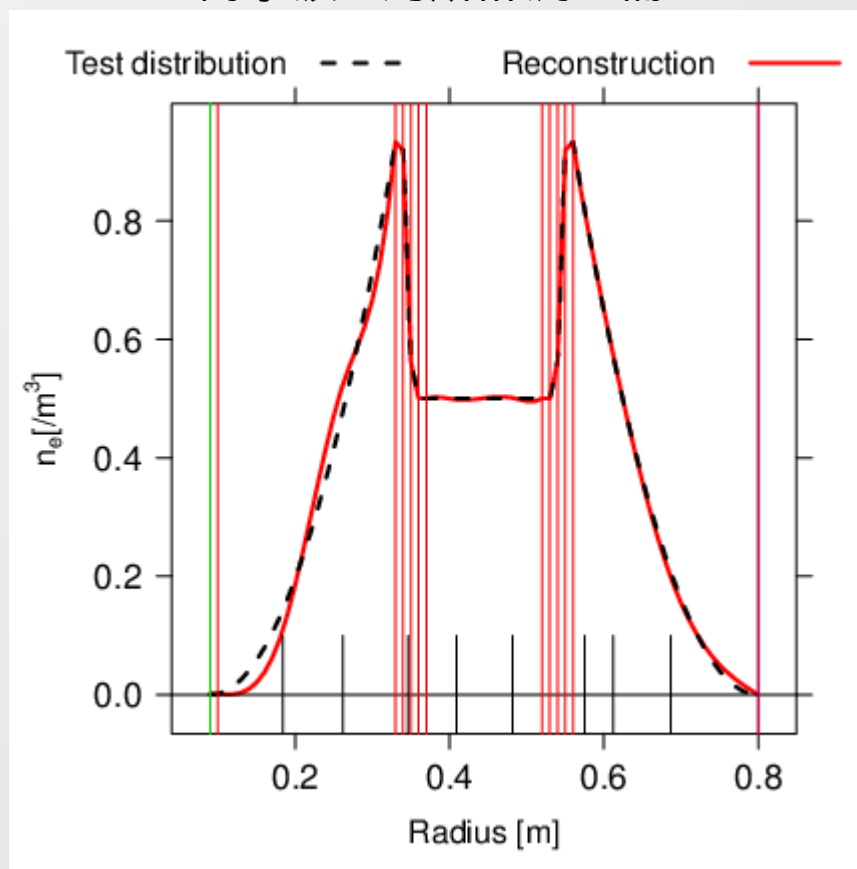
級数展開(緑)では仮定が成り立たない状況でも、
新手法(青)は内側で誤差を抑えられている。

テスト分布再構成結果3(衝撃波構造のある分布)

局所値の情報なし



衝撃波を局所計測で補正



衝撃波(密度の不連続面)が存在する分布
→衝撃波前後に局所計測(高分解能のトムソン散乱計測など)を
上手く配置してやることで、分布再構成が可能になる。

結論

- 局所計測と線積分計測を組み合わせた新再構成法を開発
 - 既存の手法では再構成不可能な領域の再構成が可能になった
 - 分布に対する仮定が弱いため、既存手法では仮定が合わない状況でも再構成が可能になった
 - その例として、
 - 両端で局所密度が0にならないケース
 - 分布中に積分計測の分解能以下の構造(衝撃波)があるケースでも再構成が上手くできることを確認した
- 今後、実データへの適用を行う。

ご清聴ありがとうございました。