

軟X線を用いた高エネルギー電子分布計測と 二次元画像再構成手法の開発

小野靖研究室 奥西 衛門

東京大学工学部工学部電気電子工学科

目次

1. 背景
2. 目的
3. 実験装置
4. 再構成原理
5. シミュレーション
6. TS実験結果
7. 結論

1.背景

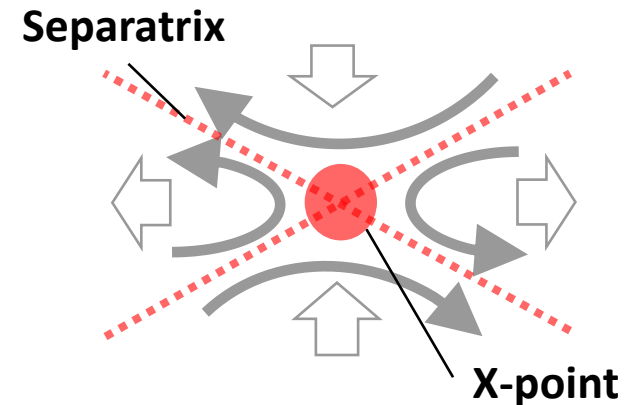
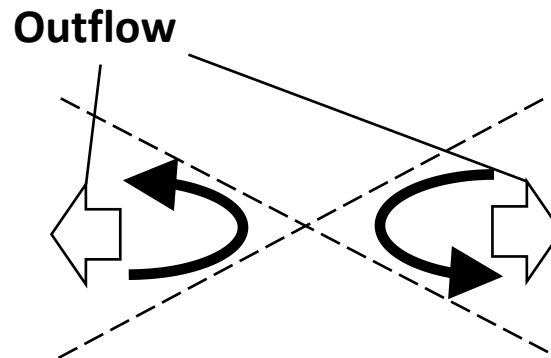
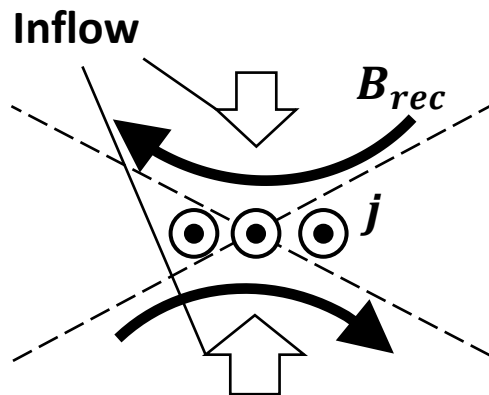
核融合と磁気リコネクション

究極の次世代エネルギー源



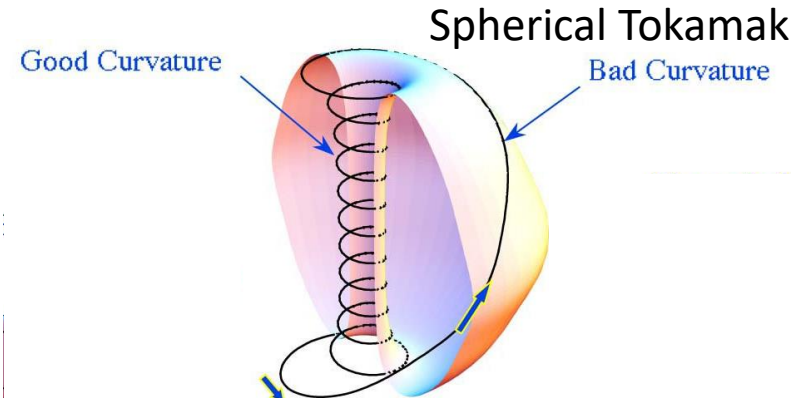
十分なプラズマ加熱が課題

磁力線のつながり替わり過程: Sweet-Parkerモデル



再結合磁場のエネルギーの一部が、荷電粒子の熱・運動エネルギーに変換される:

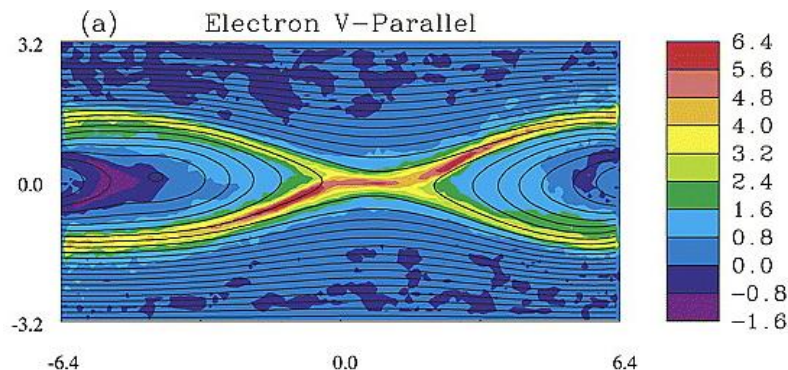
- アルヴェン速度に近いアウトフローによるプラズマ加速(イオン)
- 電流シート電界によるプラズマ加速とオーム加熱(電子)



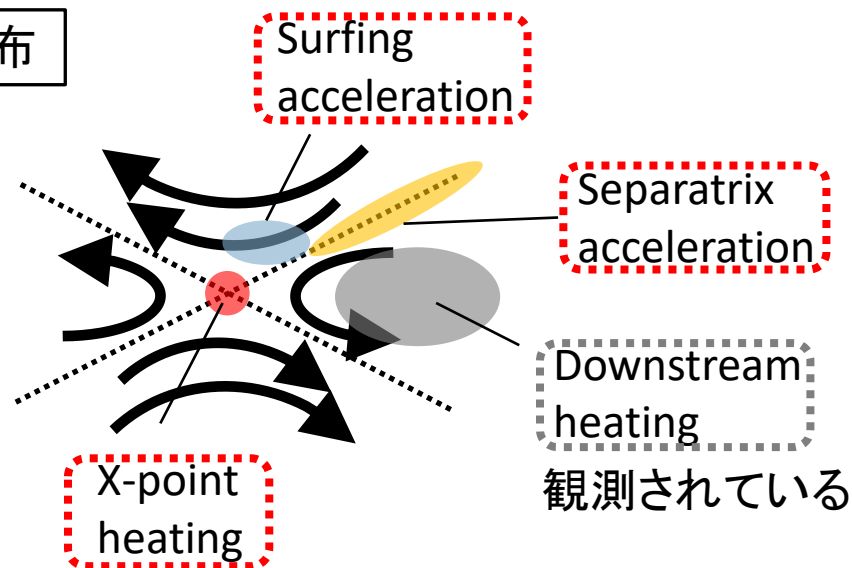
2.目的

リコネクションによる電子の局所加熱

PICシミュレーションで予想される局所加熱分布



P. L. Pritchett and F. V. Coroniti, "Three-dimensional collisionless magnetic reconnection in the presence of a guide field", Journal of Geophysical Research: Space Physics, Vol. 109, No. A1, 2004.



目的

加熱領域が最大であるダウンストリーム加熱に加えて、未知の小さな加熱であるX点加熱、セパトリクス加熱、波乗り加速を観測し、加熱機構を解明したい。



従来より解像度の高い再構成手法の開発

X線によるエネルギー別の電子密度測定

静電プローブによる電子温度、電子密度計測

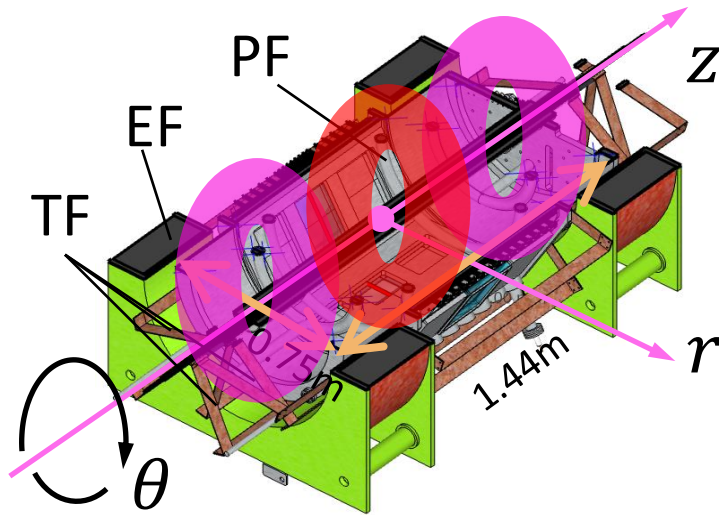
本日の発表

今後に予定

3.実験装置

プラズマ合体装置TS-6

TS-6断面



大円周方向(トロイダル方向)と
小円周方向(ポロイダル方向)に磁場を印加

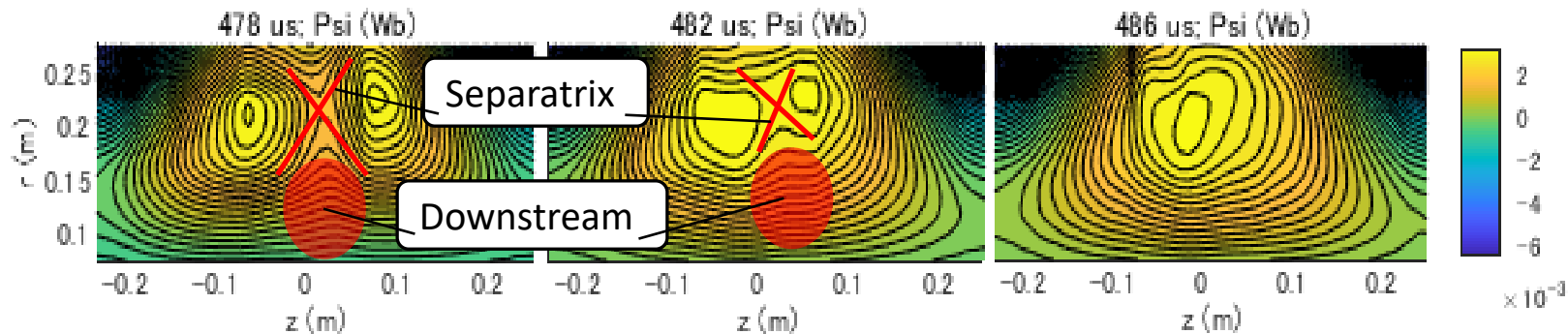


$z+$, $z-$ それぞれの領域に
トーラスプラズマを生成



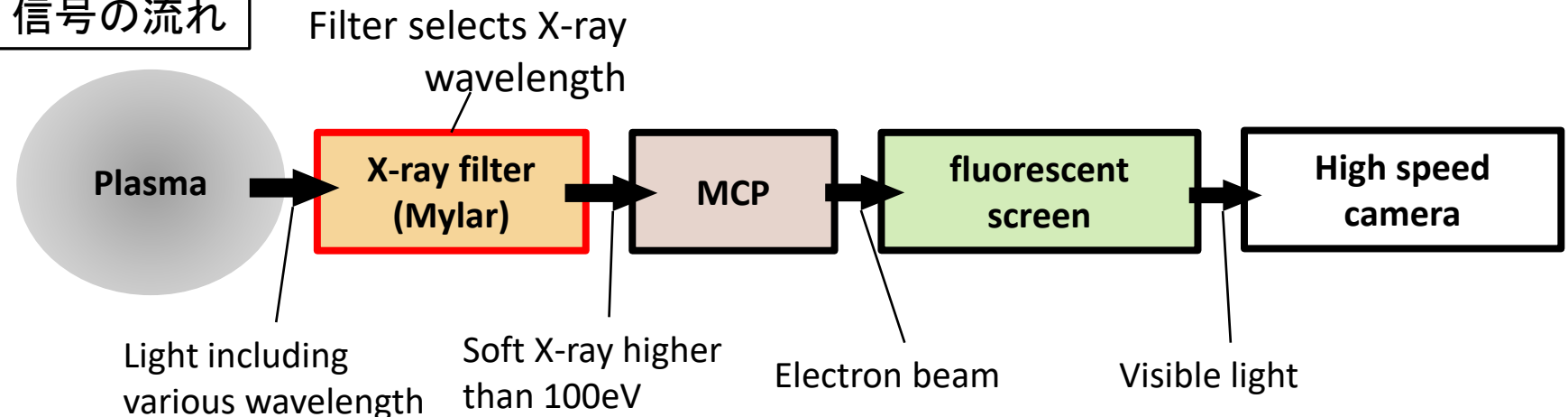
中間部 $z = 0$ において合体

ポロイダル断面の磁場分布 黒線は磁力線

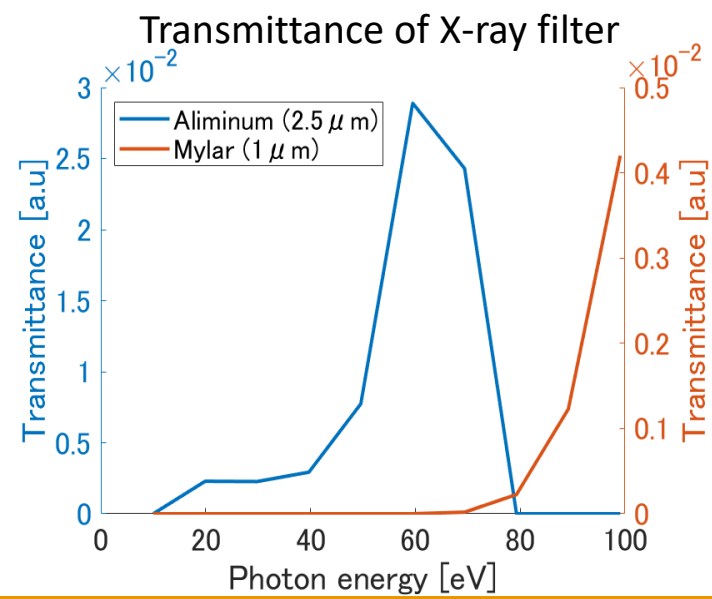
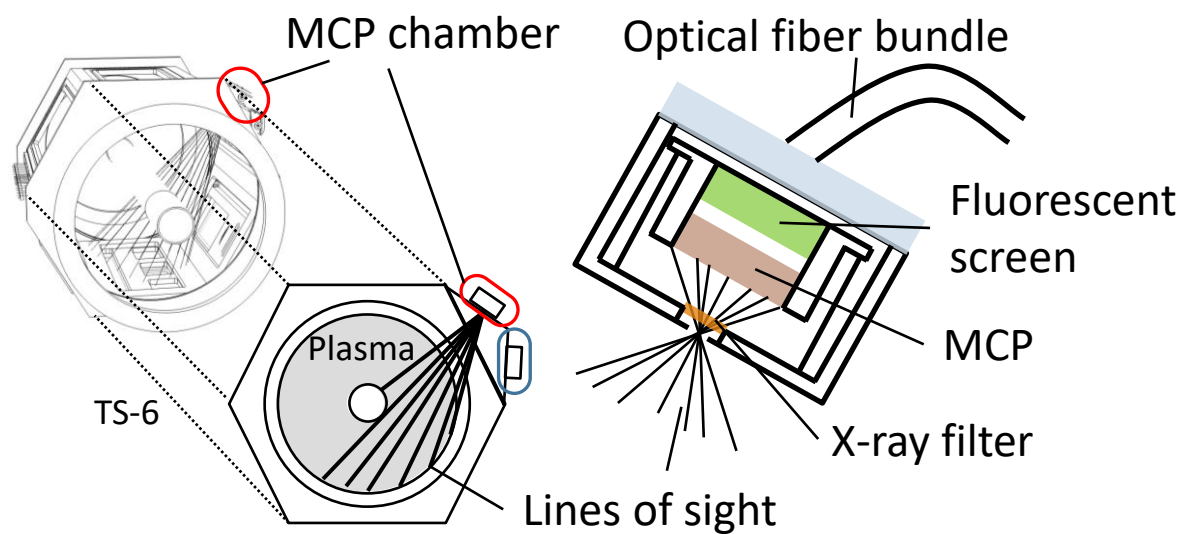


開発中の多視点軟X線ステレオカメラ

信号の流れ



計測系の視野と構造



4.再構成原理

正則化による偽ピークの抑制

プラズマの軸対称性を仮定し、二次元ラドン変換によって再構成を行う:

$$\begin{array}{ccccc} \boxed{\text{観測信号}} & \nearrow & g = Hf + e & \nwarrow & \boxed{\text{雑音}} \\ & \searrow & & \nearrow & \\ & \boxed{\text{重み行列}} & & \boxed{\text{再構成対象}} & \end{array}$$

ペナルティ関数正則化法は、以下の量 Q を最小化する f を再構成像として選択する:

$$Q(f) = (\text{粗さ}) + (\text{二乗誤差}) = \gamma P(f) + \frac{1}{M} \|Hf - g\|^2$$

Tikhonov-Phillips正則化法(線形再構成)

$$P(f) \rightarrow \int_D |\nabla^2 f(r)|^2 dr \sim |Cf|^2 \quad \text{未定乗数法より,} \quad \hat{f} = (H^T H + M\gamma C^T C)^{-1} H^T g$$

最小Fishier情報量法(非線形再構成)

$$P(f) \rightarrow \int_D \frac{|\nabla^n f(r)|^2}{\boxed{f(r)}} dr$$

$f \sim 0$ において強い正則化 \rightarrow 誤差による偽ピークの抑制

$$\begin{aligned} f^{(n+1)} &= (H^T H + M\gamma C^T W^{(n)} C)^{-1} H^T g \\ W_{i,j}^{(n)} &= \frac{\delta_{i,j}}{f_i^{(n)}} \text{ for } f > 0; \\ &= W_{\max} \text{ for } f \leq 0; \end{aligned}$$

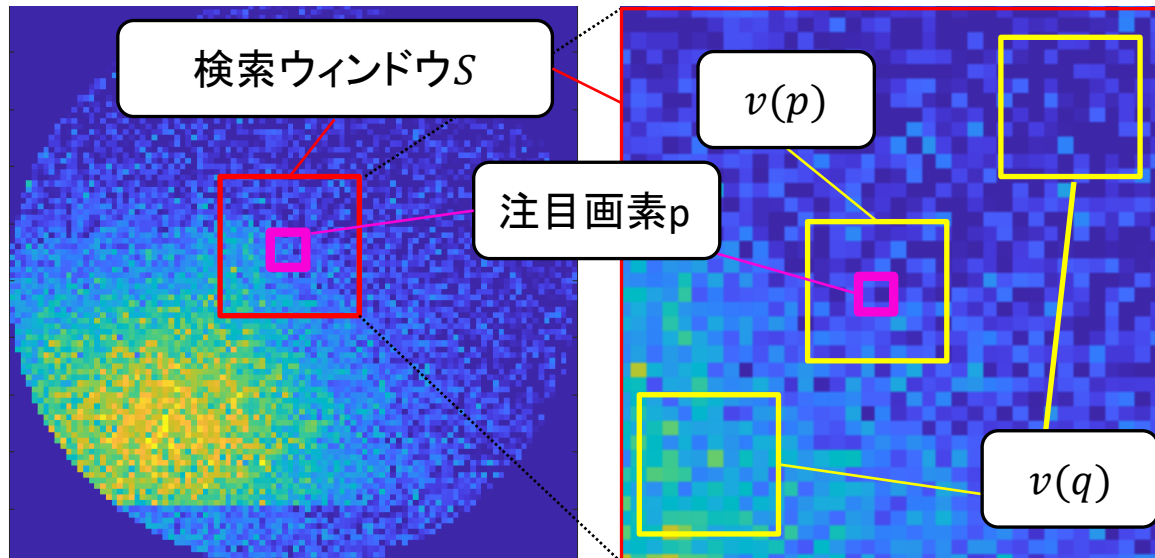
フィルタリングによるノイズの低減

非線形平均(NLM)フィルタ

注目画素 p に対して検索ウィンドウ S を定め、 S 中の画素 q の重み付けを行う:

$$p \rightarrow \sum_{q \in S} w(p, q) * q$$

$$w(p, q) = \frac{1}{Z(p)} \exp \left(- \frac{\max \left(\|v(p) - v(q)\|^2 - 2\sigma^2, 0 \right)}{\sigma^2} \right), (Z \text{ は規格化定数})$$



小さな加熱のスムージングを抑えながらノイズを低減することが期待できる

- 類似度の高い画素に大きな重み
- ノイズの分散 σ^2 の推定が必要
- エッジ保存型フィルタ

5.シミュレーションによる評価

フィルタリングと非線形再構成の有効性

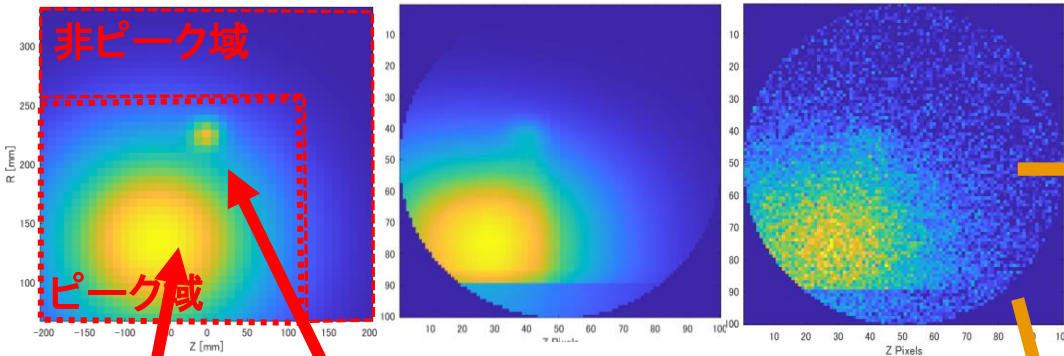
想定分布作成

投影図計算

ノイズ付加

フィルタリング

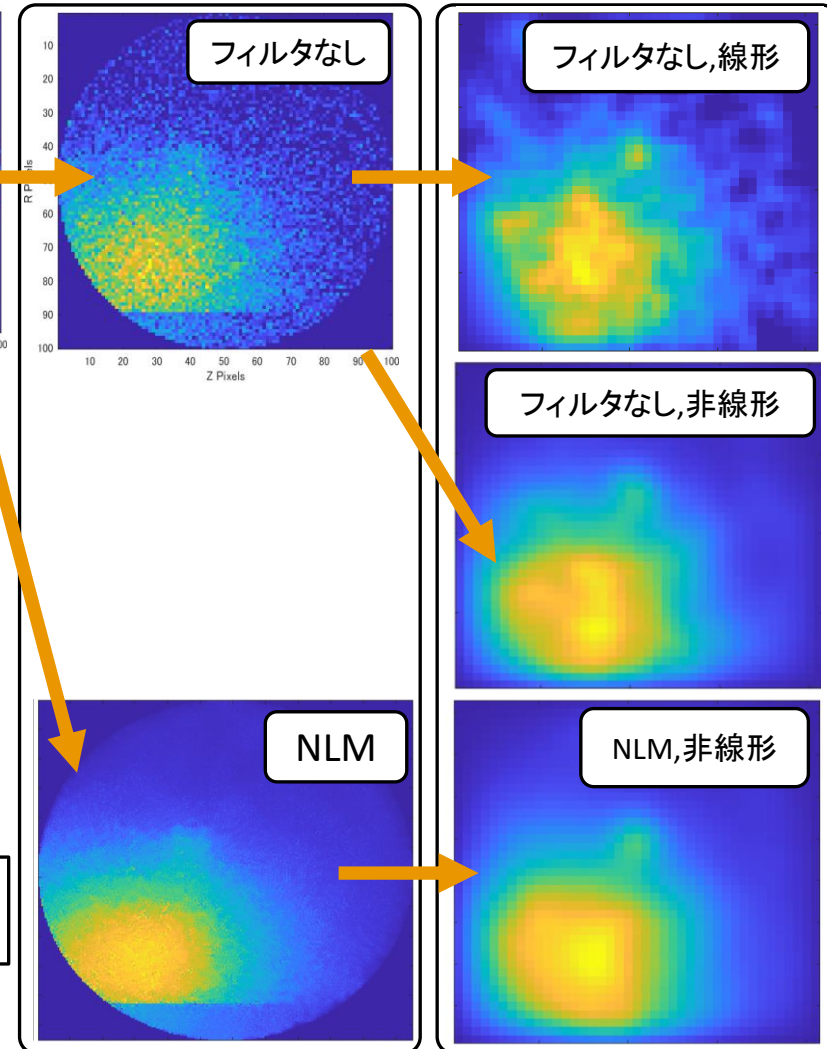
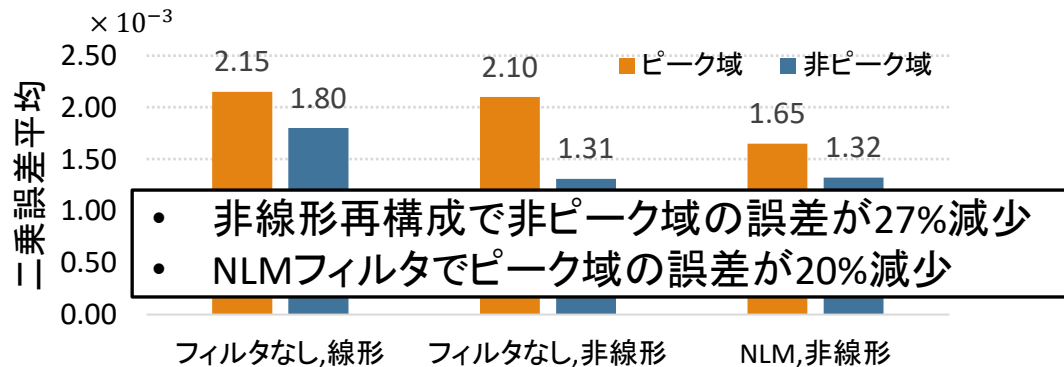
画像再構成



Downstream heating

X-point heating

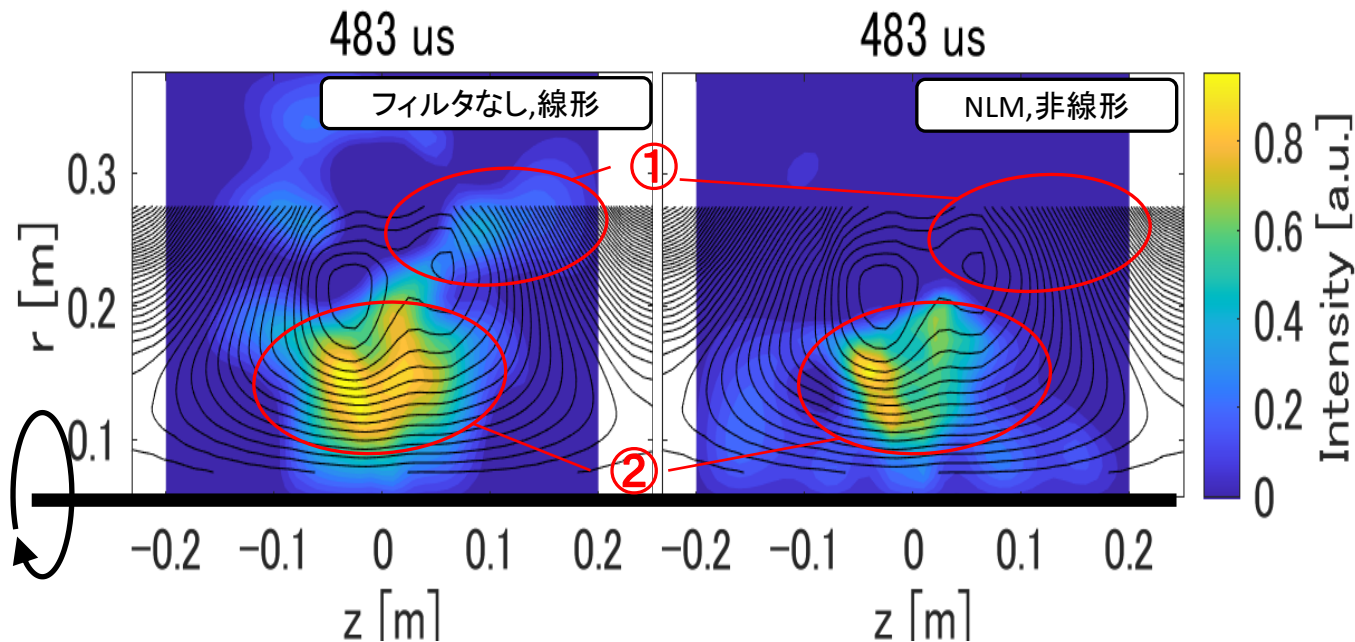
各テストの二乗誤差平均



6.実験における再構成結果

新手法による改善(1): 局所判別性の向上

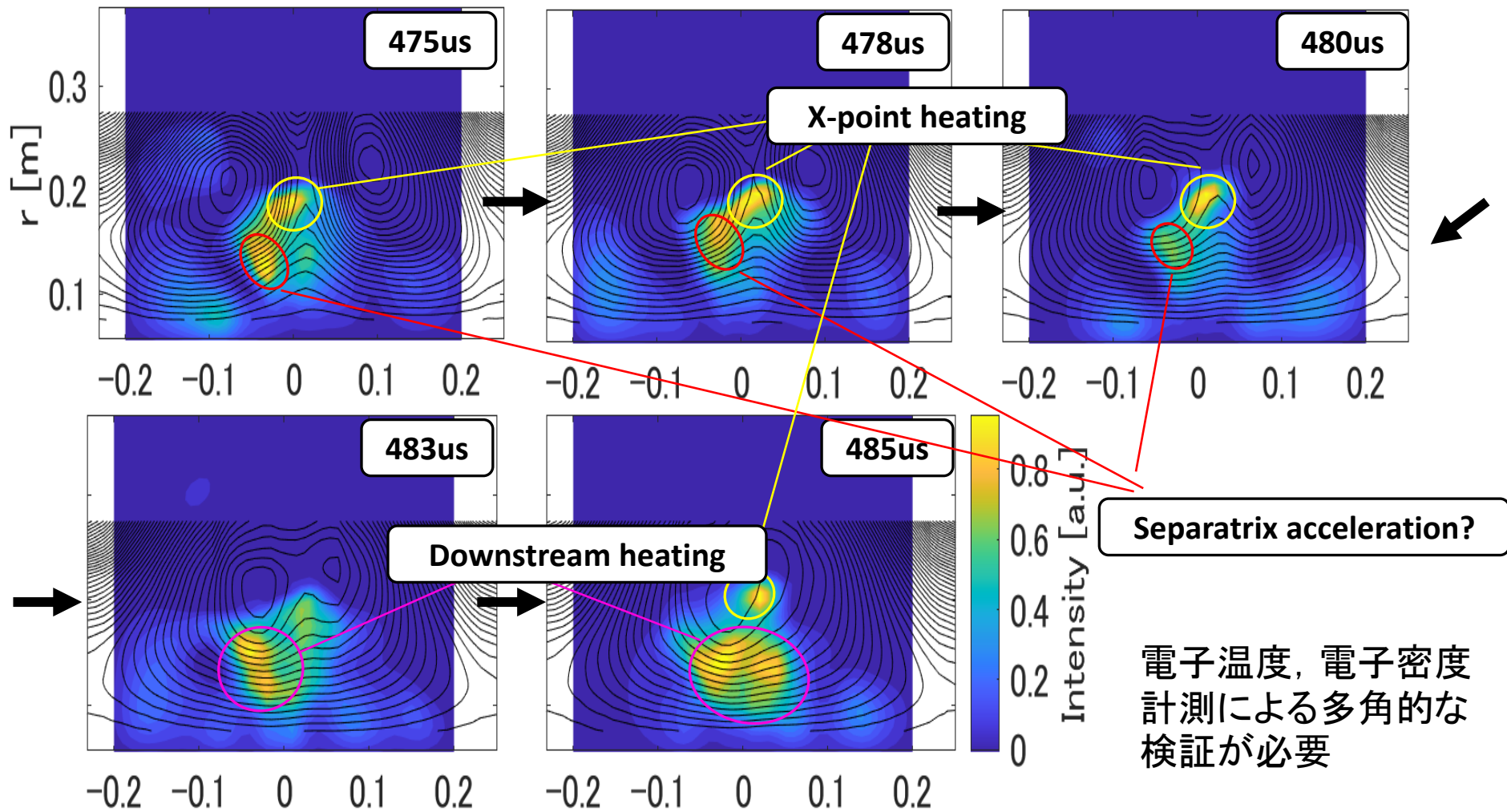
従来手法との比較 黒線は磁力線, 色は発光分布を表す; TF4kV, PF38kV : Mylar $1\mu\text{m}$



- ① 偽ピークの低減: x点付近まで広がっていた発光が抑えられている
- ② 判別性の改善: ダウンストリーム加熱の大きなピークの中でも, z軸負の領域が高温であることが見て取れる

新手法による改善(2): 局所加熱の検出

フィルタと非線形再構成による時間発展: Mylar 1 μ m

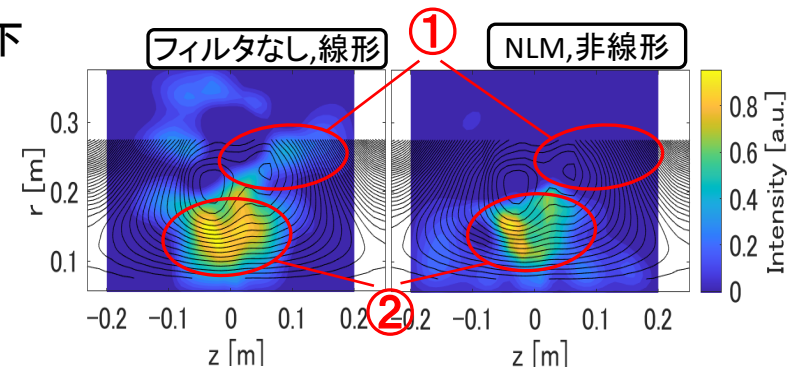


7.結論

結論

従来より解像度の高い再構成手法を開発

- 最小Fisher情報量を用いた非線形再構成がオフピーク領域の再構成誤差を27%低下させる
- NLMフィルタがピーク領域の再構成誤差を20%低下させる



今後の研究

再構成ソフトウェアの空間分解能試験

- ピーク幅とノイズS/Nの影響

静電プローブによる電子温度, 電子密度計測

- トリプルプローブの作成

X線によるエネルギー別の電子密度測定

- X線フィルタの厚さをパラメータとしたスキャン

MCPの増設による6視点X線計測

お聞きいただきありがとうございました。

8.補足

再構成原理(1): 非線形再構成

重み行列Hの決定

i番目の投影画像画素に対するj番目の分布画素の重みを H_{ij} にもつ行列Hは、視線を点列とみなしたときの、画素中に含まれる点の数によって決定する。

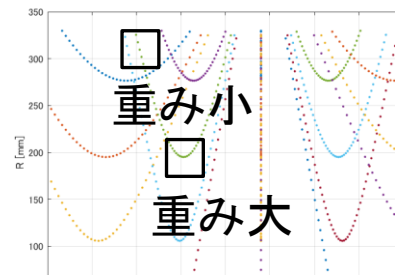
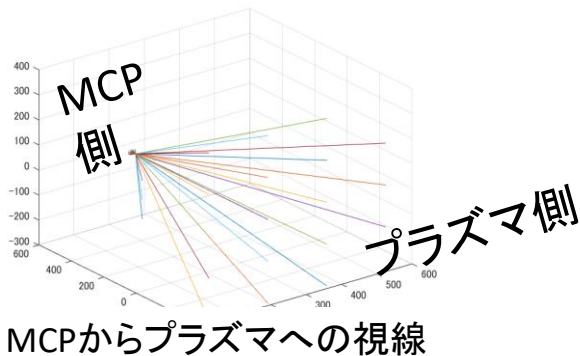
正則化パラメータ γ の決定: 最小GCV基準

γ は次の量が最小になる値に定める:

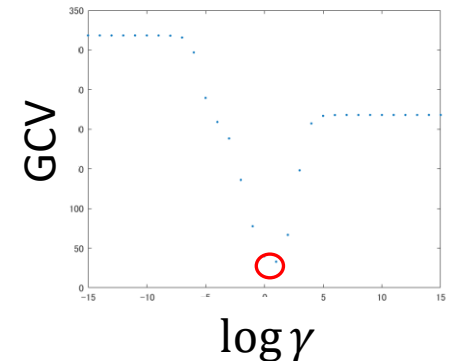
$$GCV(\gamma) = \frac{\epsilon^2}{1 - \frac{1}{M} \sum \frac{\sigma_i^2}{\sigma_i^2 + \gamma M}}$$

γ が大きすぎると二乗誤差 ϵ が増加,
GCVが増大

γ が小さすぎると分母が0に近づき,
GCVが増大



軸対称面における視線の射影経路



再構成原理(2): 非線形平均フィルタ

ノイズの標準偏差の推定: John Immerkærの方法

画像のエッジに対して不感となるノイズ推定作用素 N を考える

$$L_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad L_2 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 4 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad N = \frac{1}{2} (L_2 - L_1) = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 4 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}$$

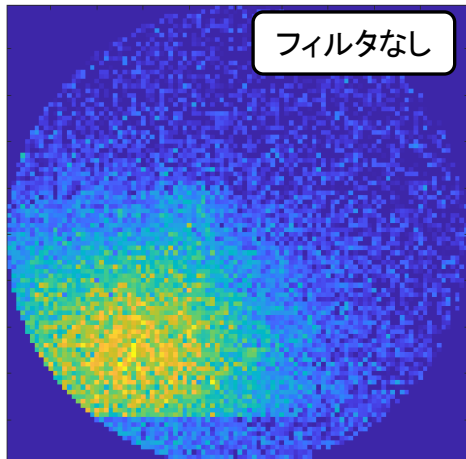
各ピクセルのノイズがもつ標準偏差 σ_n を推定する

$$I_{xy} * N \equiv \sum_{\substack{j=-1,0,1 \\ i=-1,0,1}} I(x+i, y+j) * N_{ij}$$
$$\sigma_n^2 = \frac{\Sigma (I_{xy} * N)^2}{36(W-2)(H-2)}$$

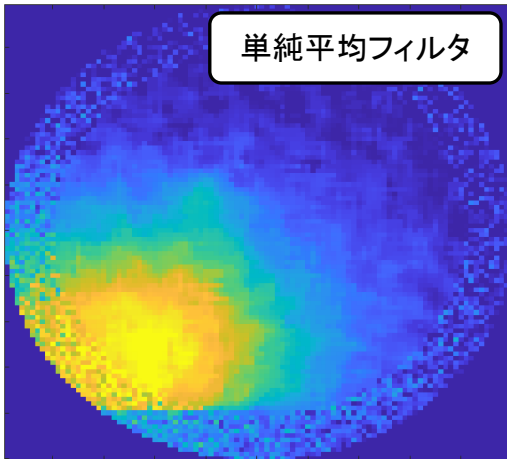
ファントムテスト: 単純平均フィルタ

フィルタリング

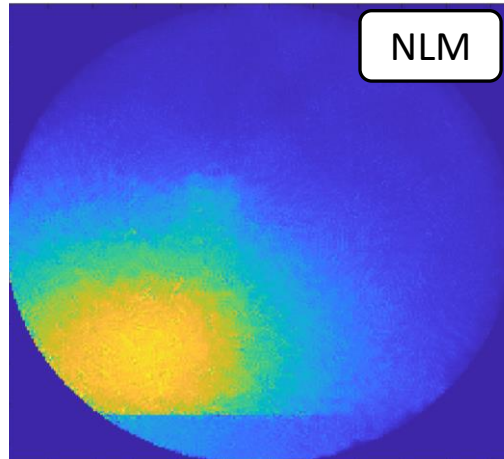
フィルタなし



単純平均フィルタ

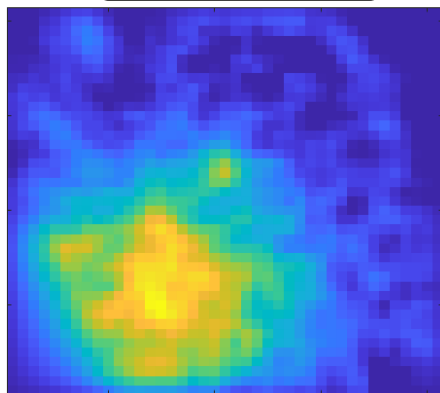


NLM

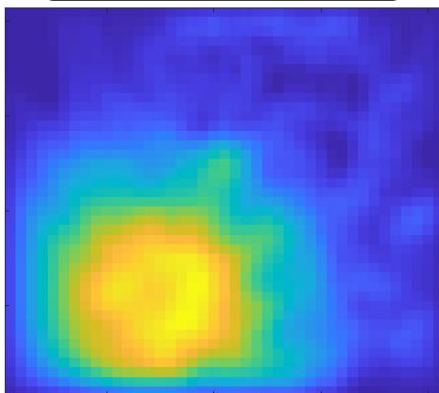


画像再構成

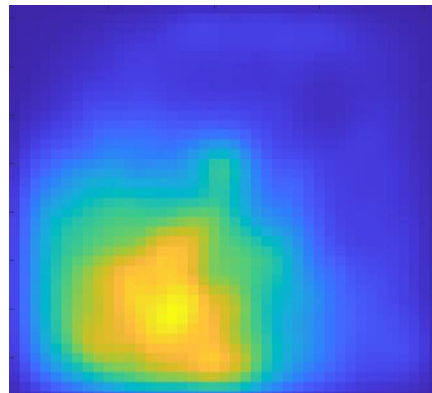
フィルタなし, 線形



単純平均フィルタ, 線形



単純平均フィルタ, 非線形



NLM, 非線形

