

# 軟X線を用いた高エネルギー電子分布計測の開発

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

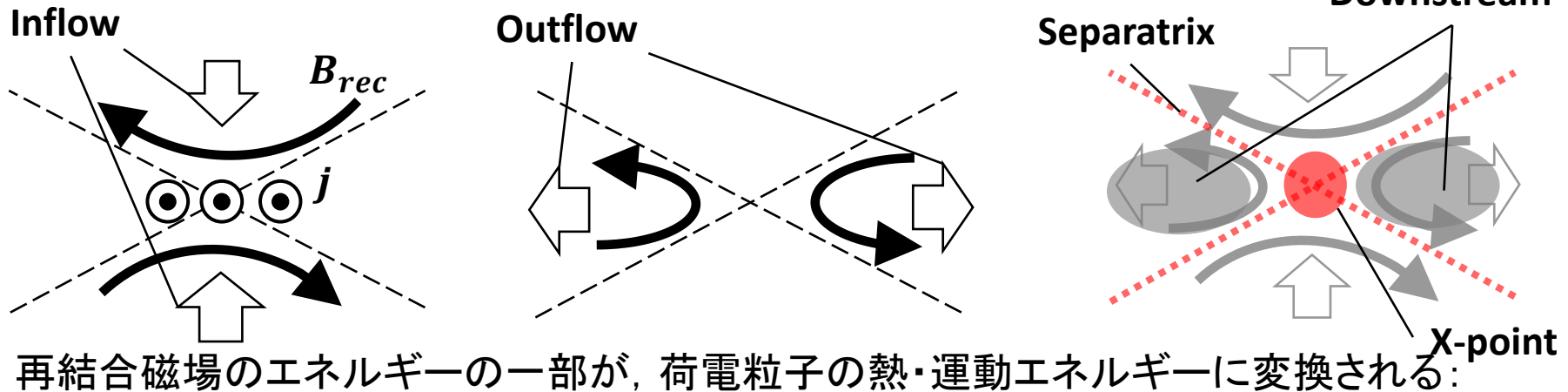
# 核融合と磁気リコネクション

究極の次世代エネルギー源



十分高いイオン温度が課題

磁力線のつなぎ替わり過程: Sweet-Parkerモデル



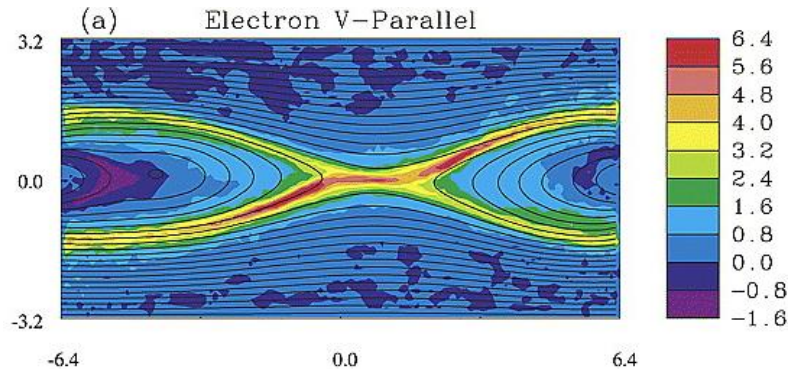
再結合磁場のエネルギーの一部が、荷電粒子の熱・運動エネルギーに変換される:

- 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)

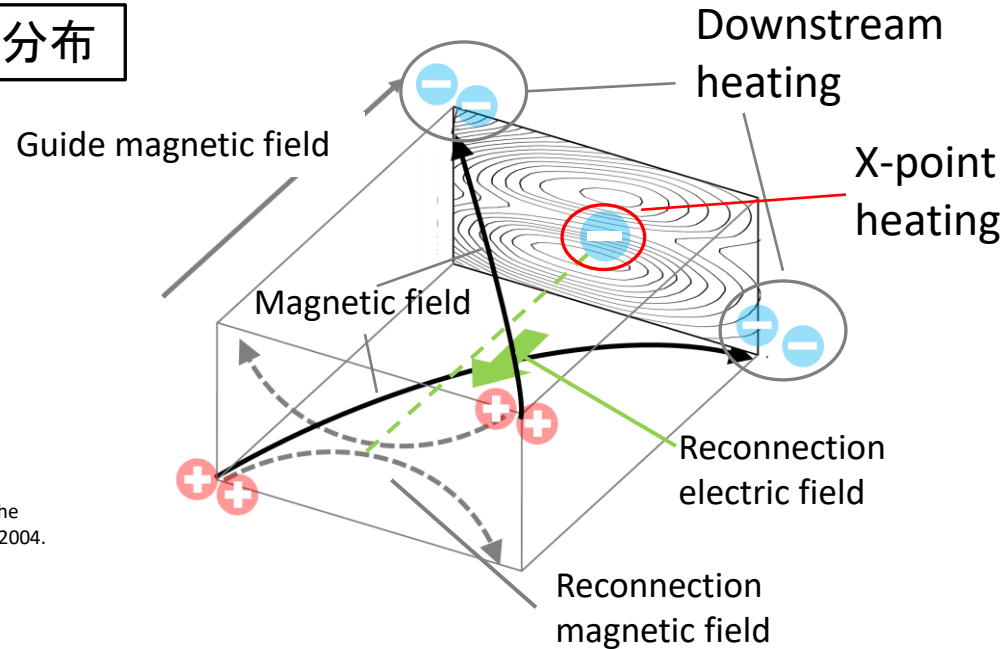
## 2.目的

# 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

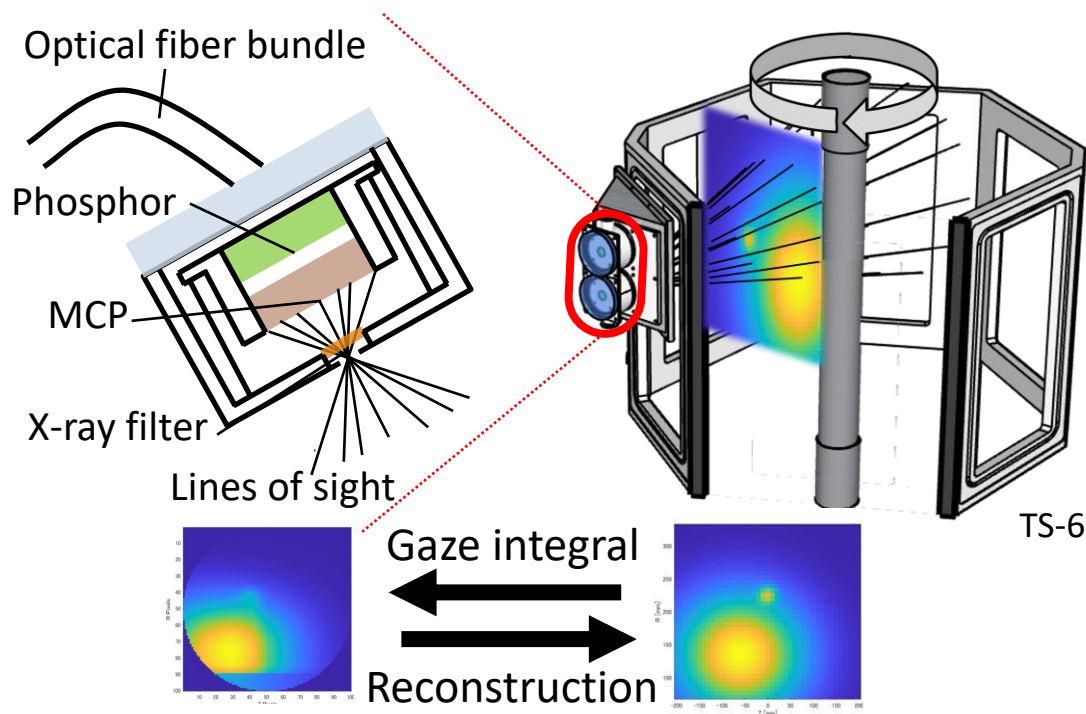
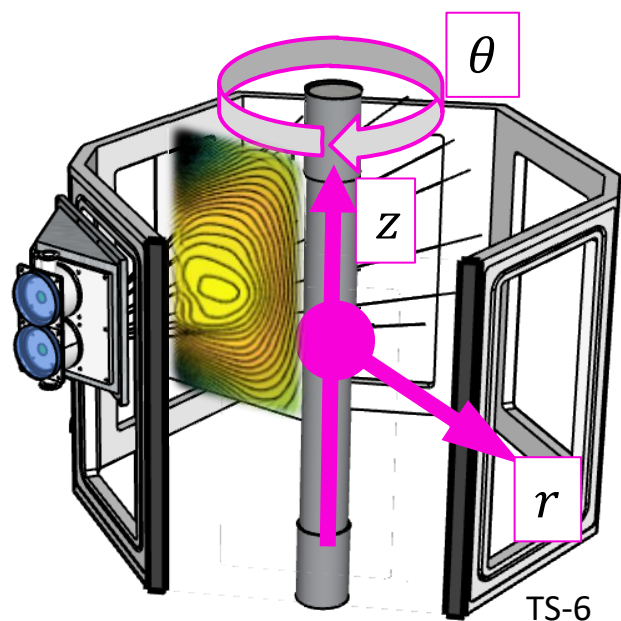
- 核融合に必要な高いイオン温度を電子が誘起する機構を解明したい。
- 電子ダウンストリーム加熱とX点加熱を観測し、これらがイオン温度を高める機構を解明し、理論を実証したい。(物理課題)

→ ○制動放射による軟X線を観測し、可視光に変換するカメラの開発  
○複数のカメラから伝送された画像を一枚の写真に収めるシステムの開発  
(開発課題) ○撮影画像から高速電子分布を再構成するソフトウェアの開発

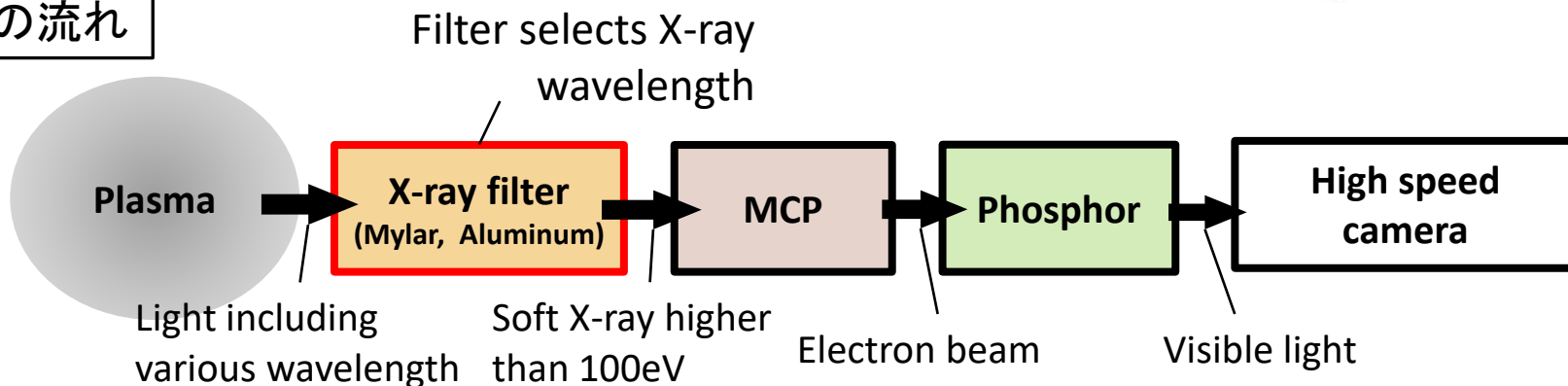
# 3.実験装置

# プラズマ合体装置TS-6と軟X線ステレオカメラ

## 計測系の視野と構造



## 信号の流れ



## 4.再構成原理



# 正則化によるアーチファクトの抑制

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:

$$g = Hf + e$$

観測信号  $g$  重み行列  $H$  再構成対象  $f$  雑音  $e$

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

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

線形再構成: Tikhonov-Phillips正則化法 従来手法

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

非線形再構成: 最小Fishier情報量法 新手法 1/2

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

$$\hat{f}^{(n+1)} = (H^T H + M\gamma C^T W^{(n)} C)^{-1} H^T g$$

$$W_{i,j}^{(n)} = \frac{\delta_{i,j}}{f_i^{(n)}} \text{ for } f > 0; = W_{max} \text{ for } f \leq 0;$$

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

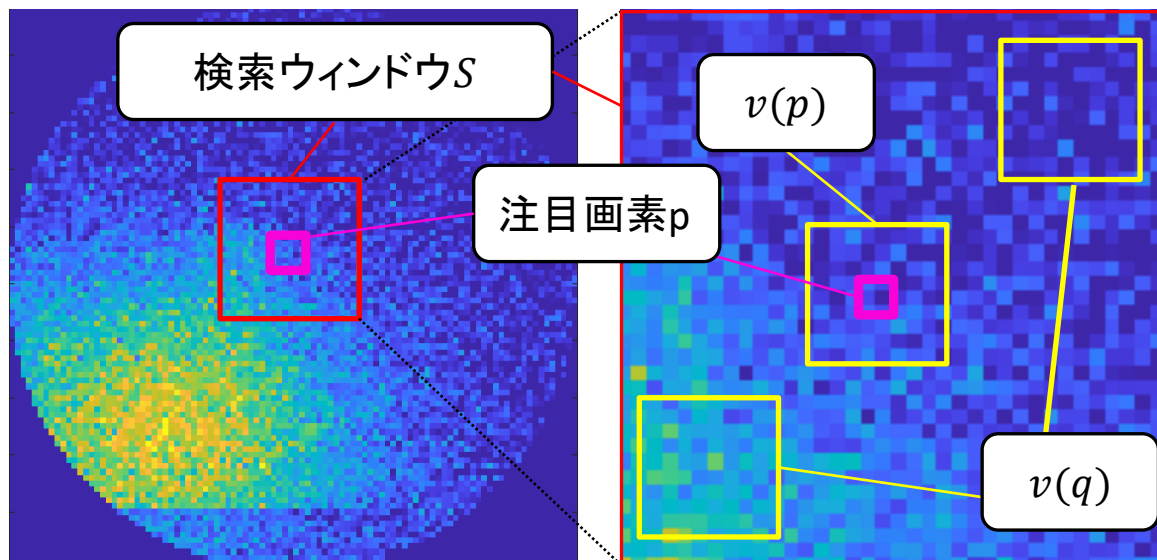
# フィルタリングによるガウシアンノイズの低減

非線形平均(NLM)フィルタ 新手法2/2

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:

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

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

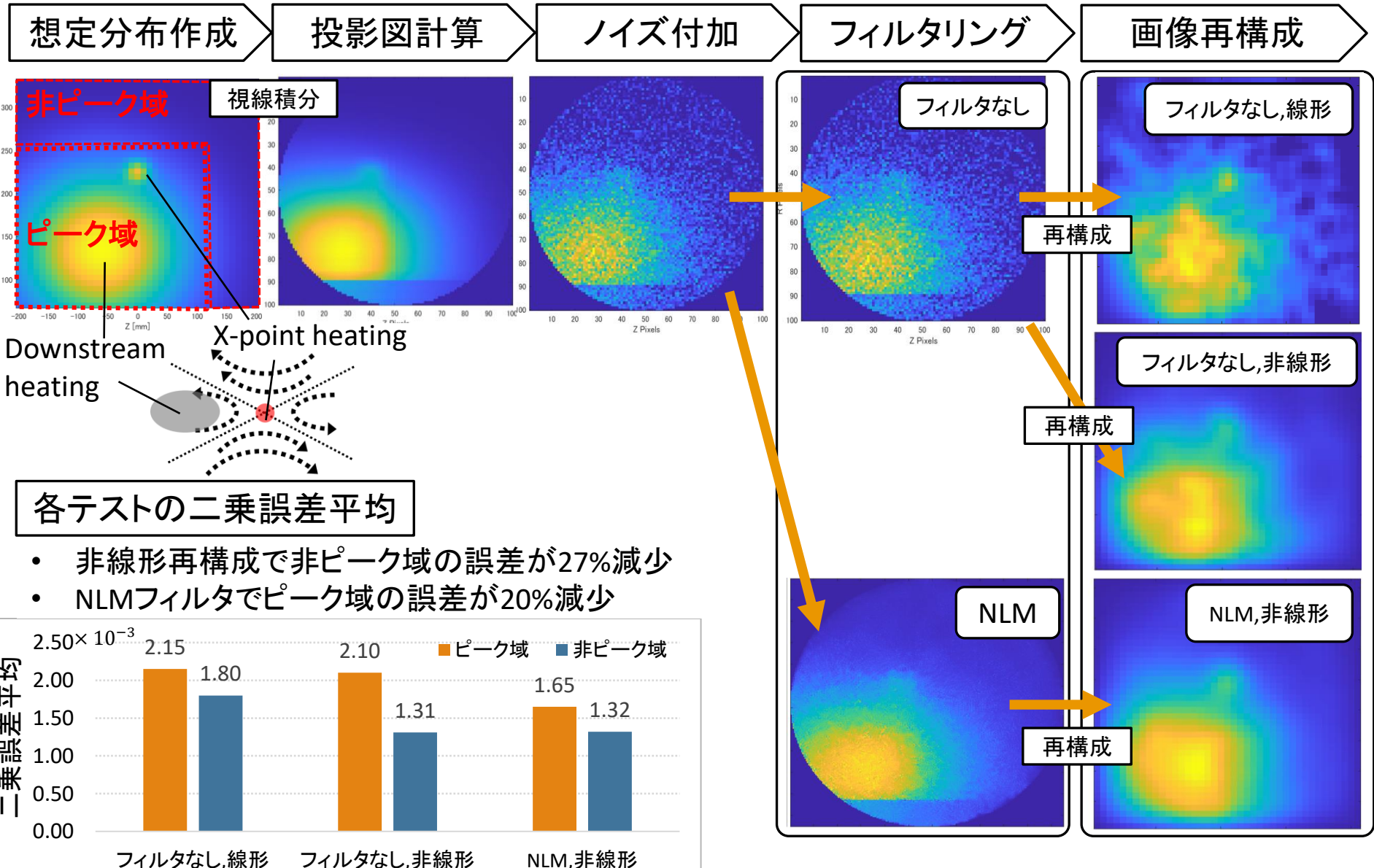


小さな加熱のスムージングを抑え、ノイズを低減することが期待できる

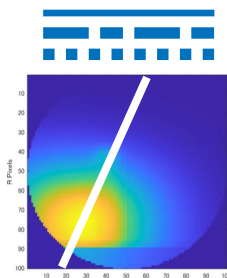
- 類似度の高い画素に大きな重み
- ノイズの分散 $\sigma^2$ の推定が必要
- エッジ保存型フィルタ

## 5.シミュレーションによる評価

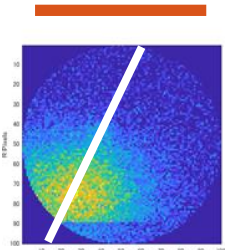
# 空間領域での検証:フィルタリングと非線形再構成の有効性



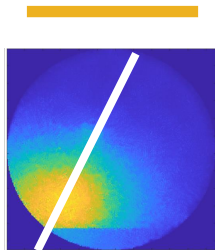
# 一次元周波数領域による検証：NLMとノイズの分離



ピーク距離を  
3種類に変化させた  
理論投影画像

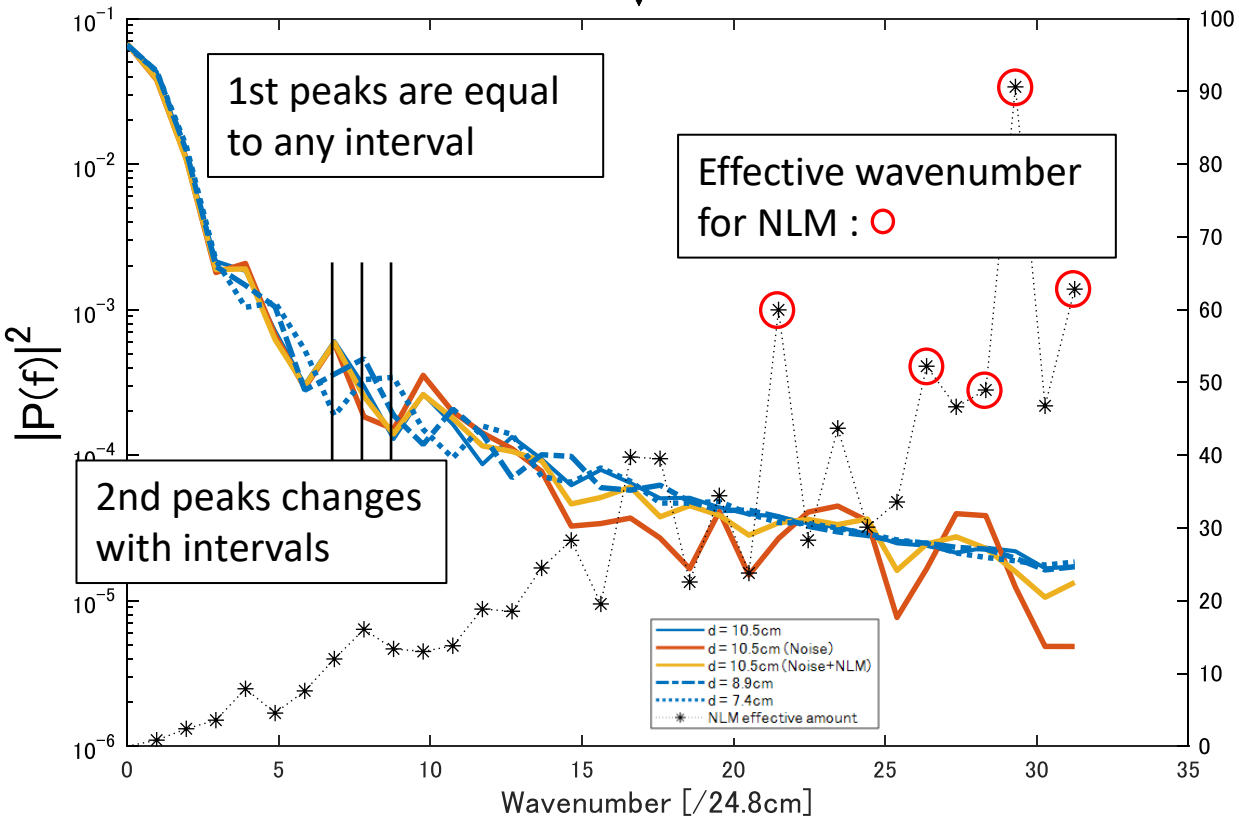


理論的投影画像に  
ノイズを付加



ノイズ画像に  
NLMを適用

白線の一次元値をFourier変換



.....\*..... NLM効果量

$$= \frac{(\text{ノイズ画像}) - (\text{NLM適用画像})}{(\text{理論画像})}$$

- ピーク距離が代表する波数帯と、NLMが大きく働く波数帯が分離されている
- NLMによって局所加熱等が大きくスムージングされない

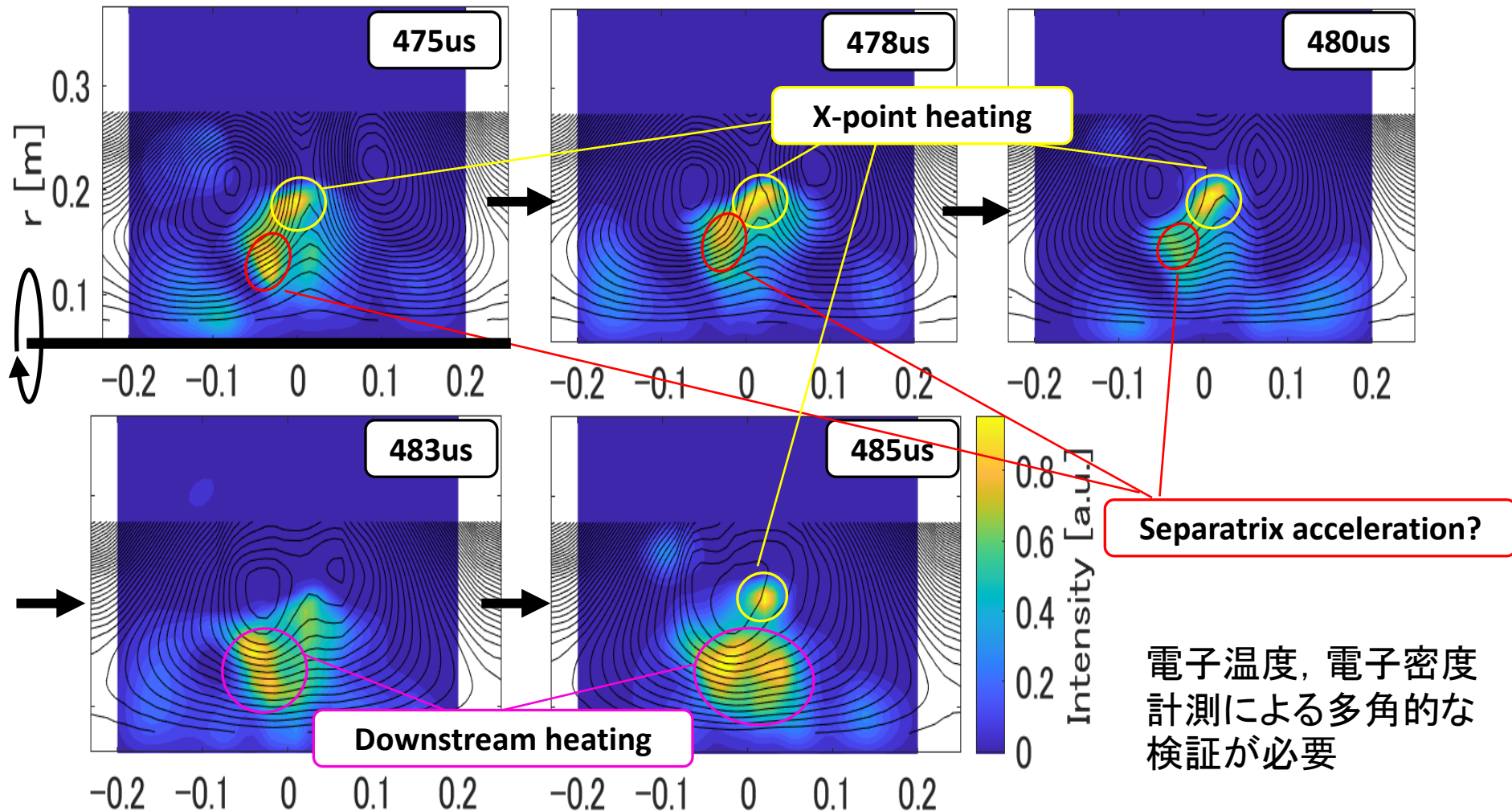
分解能:  $24.8\text{cm}/10 = 2.5\text{cm}$

## 6.実験における再構成結果

# X点とセパトリクス上の加熱を検出

新手法による時間発展: Mylar  $1\mu\text{m}$

2回の放電を時系列に整列, 100eV以上の電子が透過  
トロイダルコイル充電電圧  $V_{TF} = 4\text{kV}$ , ポロイダルコイル充電電圧  $V_{PF} = 39\text{kV}$ , Arガス



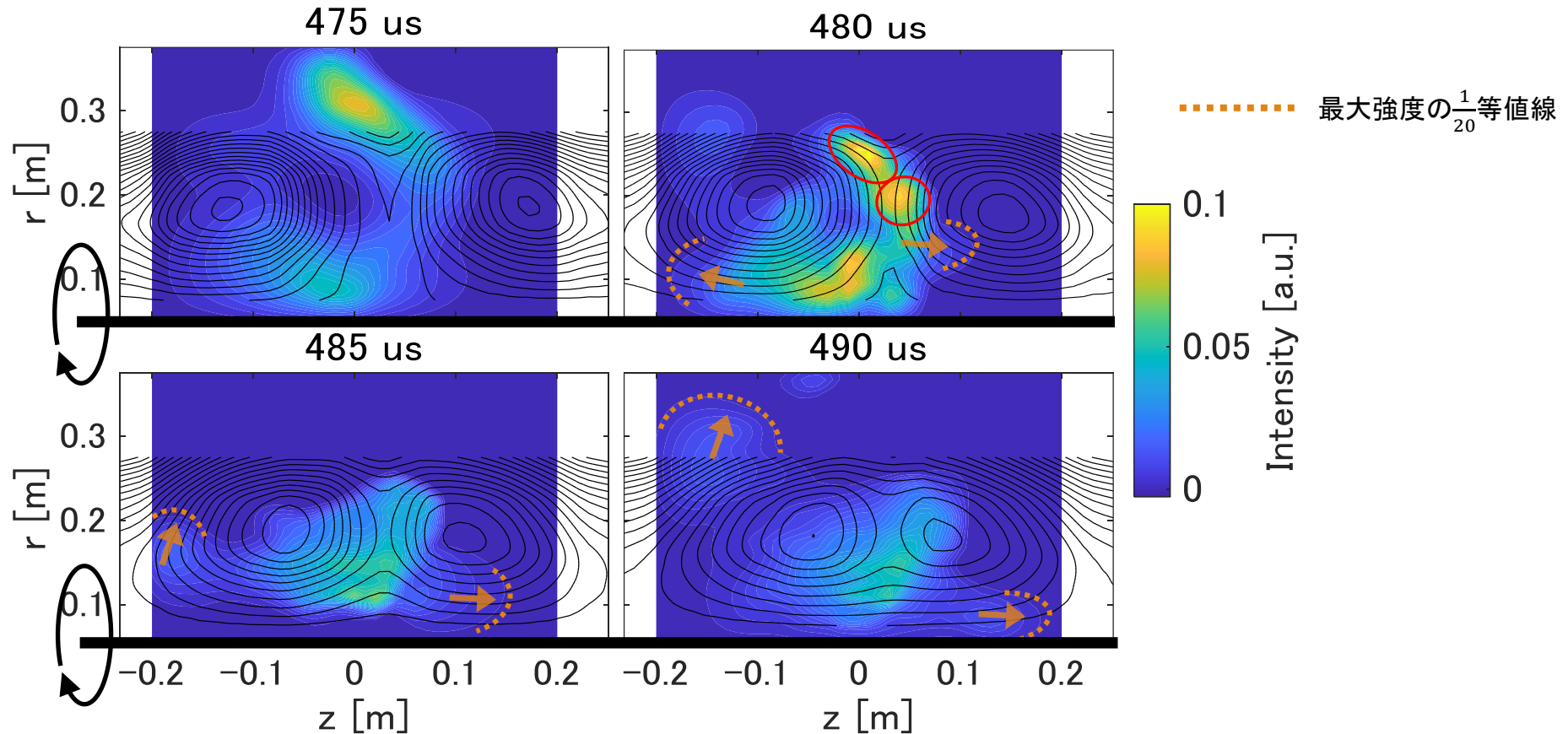
電子温度, 電子密度  
計測による多角的な  
検証が必要



# ダウンストリーム加熱の発展を検出

フィルタと非線形再構成による時間発展:Mylar  $1\mu\text{m}$

$V_{TF} = 4\text{kV}$ ,  $V_{PF} = 39\text{kV}$

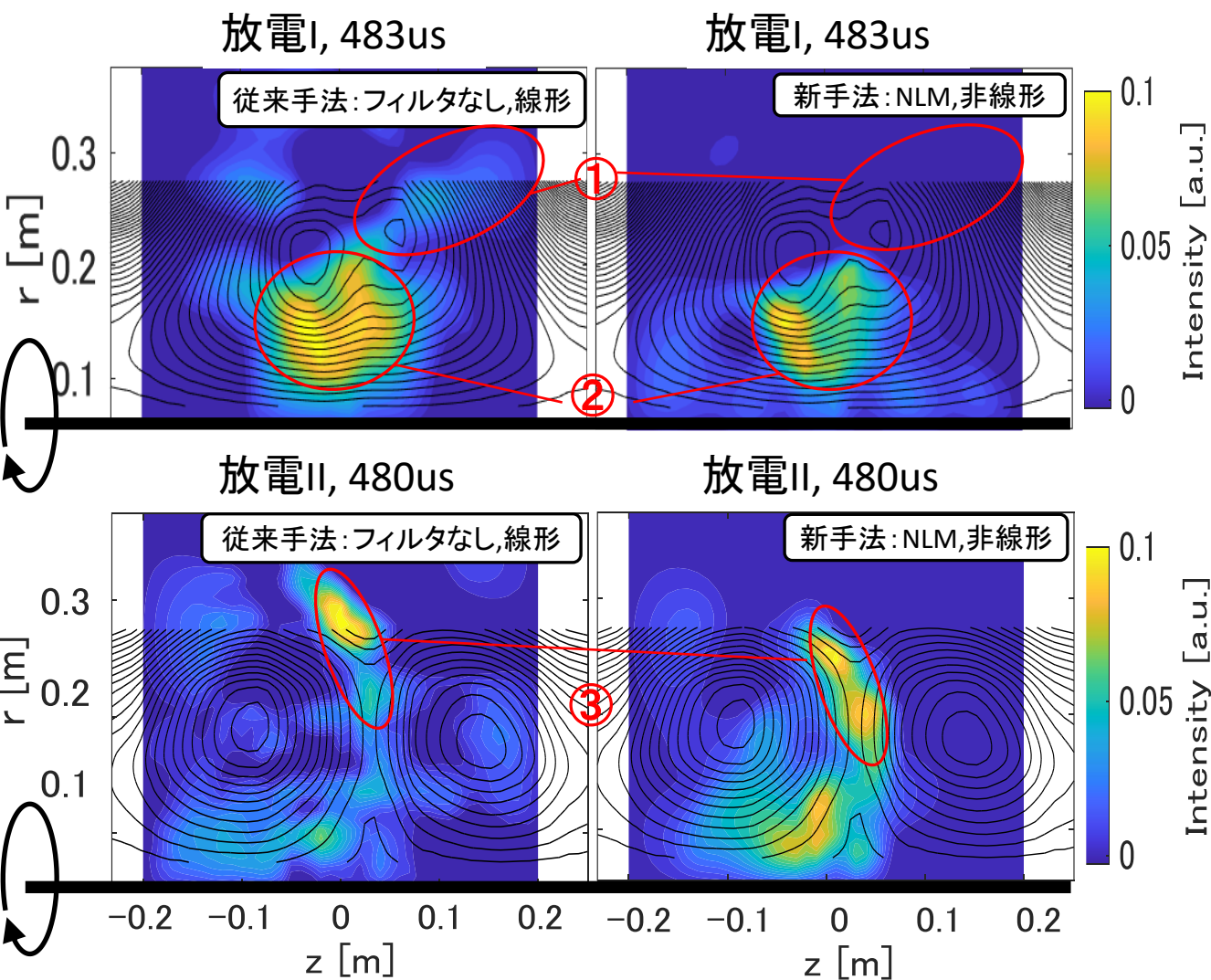


x点内側のダウンストリームに噴出した高エネルギー電子は、磁力線を通じてx点外側へと移送される



# 新手法の優位性: アーチファクトの低減と局所加熱の検出

従来手法との比較 黒線は磁力線, 色は発光分布を表す:  $V_{TF} = 4\text{kV}$ ,  $V_{PF} = 39\text{kV}$ ; Mylar  $1\mu\text{m}$



- ① x点付近まで広がっていた発光が抑えられる
- ② ダウンストリーム加熱中, z軸負の領域がより高温であることが分かる

③ より多くの局所加熱を検出することができる

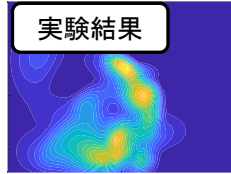
真の局所加熱か?  
偽ピークの可能性は?

# ファントムテストによる実験結果の裏付け

ファントムテスト

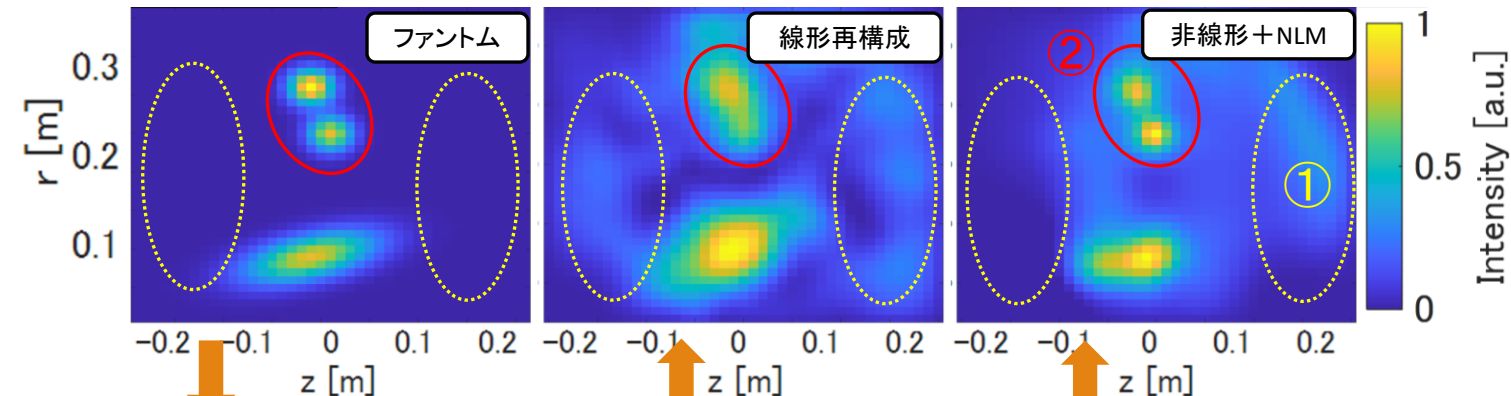
実験結果を反映したファントムを作成,  $S/N = 0.2$  のホワイトガウスノイズ

実験結果



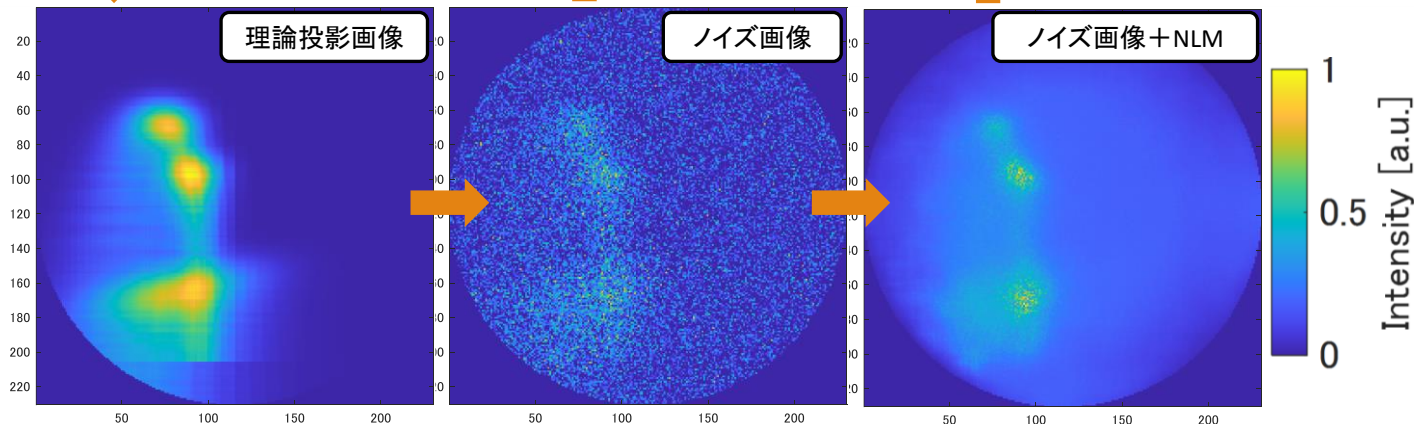
従来手法

新手法



①アーチファクト:  
残存するものの  
新手法によって低減

②二つのピーク:  
従来手法では重畳,  
新手法では分離成功



新手法が検出した  
小ピークは真の分  
布であることを強く  
示唆する

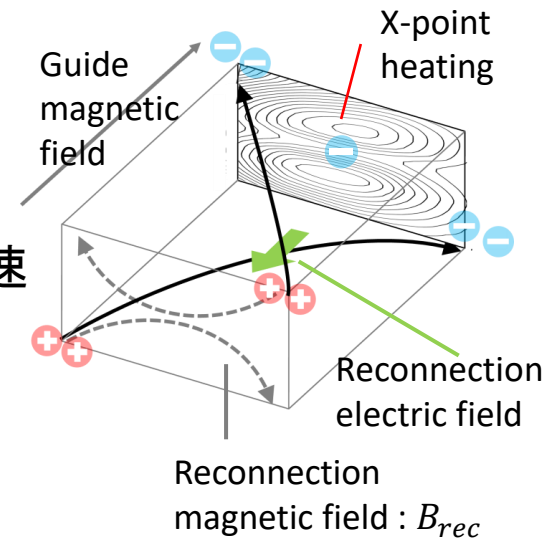
## 7. 結論

# 結論

(物理成果)

- X点加熱を初観測, ダウンストリーム加熱の発展を観測
- 電子加熱がイオン温度に影響を及ぼす機構を実証

X点からガイド磁場に沿って噴出する電子のベータトロンの加速  
→イオンとの衝突  
ダウンストリームに排出された電子がポテンシャル形成  
→イオン加速



(開発成果)

- 電子分布計測のための2画面軟X線カメラシステムを開発
- X点加熱を検出可能な再構成手法を開発

再構成分解能 2.5cm まで確保  
最小Fisher情報量で非ピーク域誤差が27%低下  
NLMフィルタリングでピーク域誤差が20%低下  
NLMとX点との周波数分離を発見

## 今後の研究

大まかな加熱機構が判明したので、  
より詳細な分布に移りたい

- ✓ X線によるエネルギー別の電子密度測定
- ✓ MCPの増設による12視点X線計測
- ✓ 軸対称を仮定しない三次元再構成

有難う御座いました

## 8.補足

# 再構成原理(1): 正則化パラメータと視線行列

## 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。

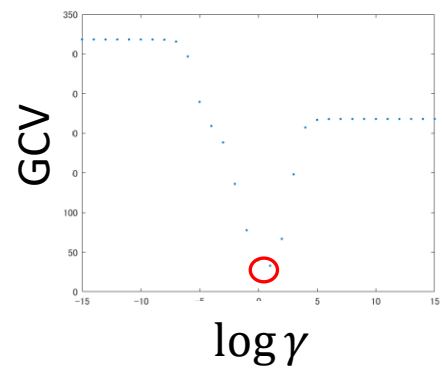
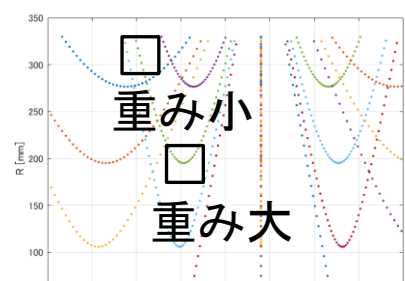
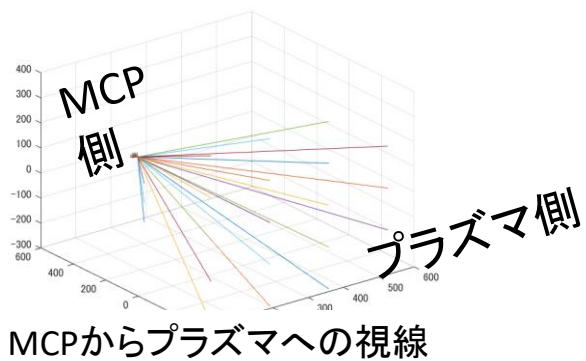
## 正則化パラメータ $\gamma$ の決定: 最小GCV基準

$\gamma$ は次の量が最小になる値に定める:

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

$\gamma$ が大きすぎると二乗誤差 $\epsilon$ が増加,  
GCVが増大

$\gamma$ が小さすぎると分母が0に近づき,  
GCVが増大





# 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

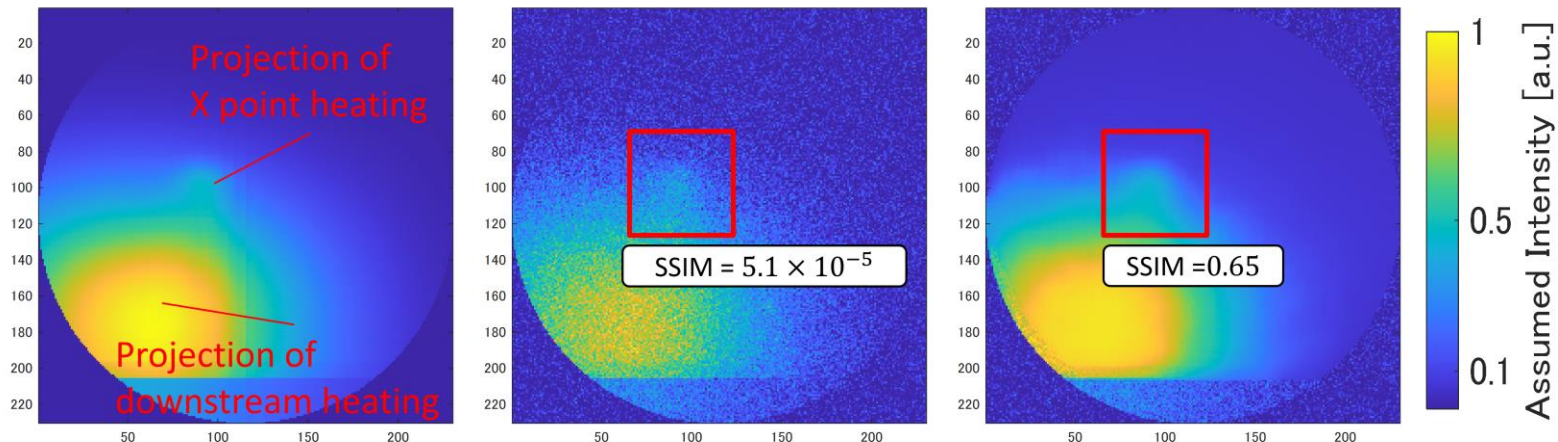
画像のエッジに対して不感となるノイズ推定作用素 $N$ を考える

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

各ピクセルのノイズがもつ標準偏差 $\sigma_n$ を推定する

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

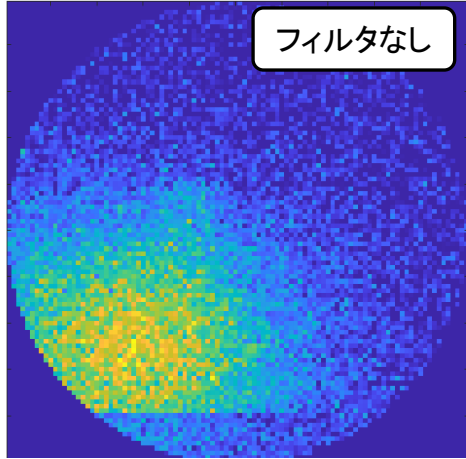
NLMによる構造類似度(SSIM)の改善



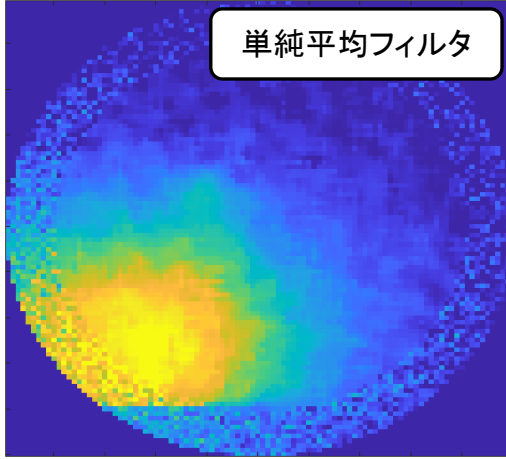
# 単純平均フィルタによるファントムテスト

## フィルタリング

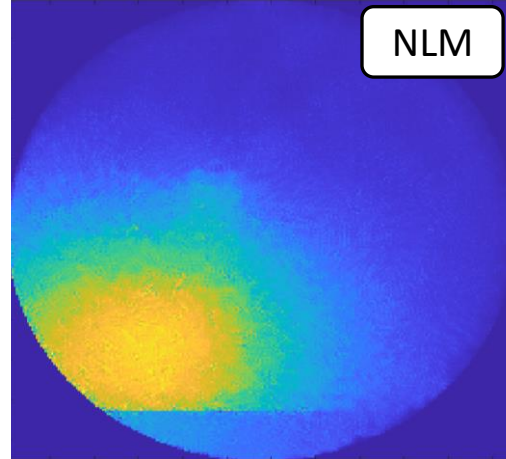
フィルタなし



単純平均フィルタ

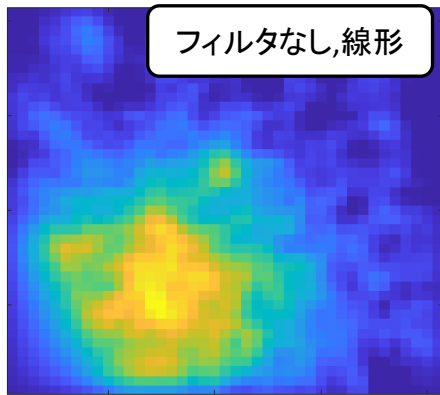


NLM

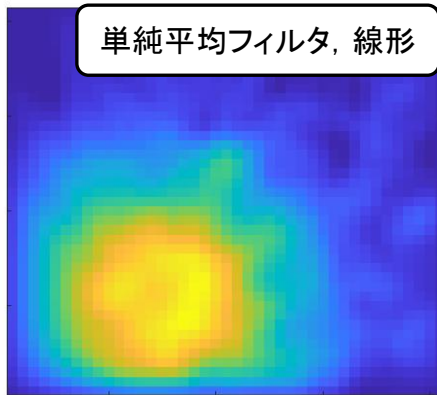


## 画像再構成

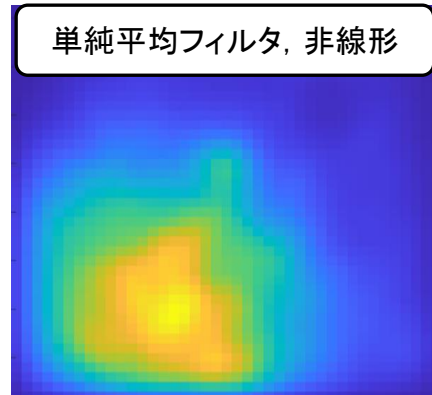
フィルタなし, 線形



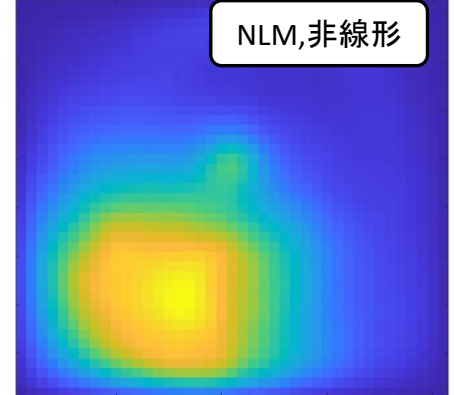
単純平均フィルタ, 線形



単純平均フィルタ, 非線形

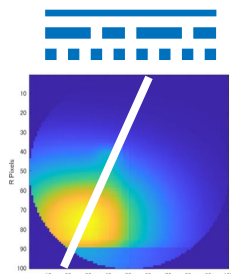


NLM, 非線形

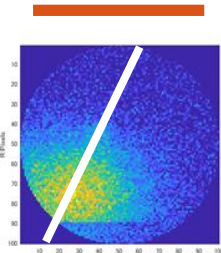




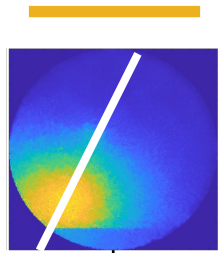
# 一次元周波数領域による検証②: NLMとノイズの分離



ピークサイズを  
3種類に変化させた  
理論投影画像

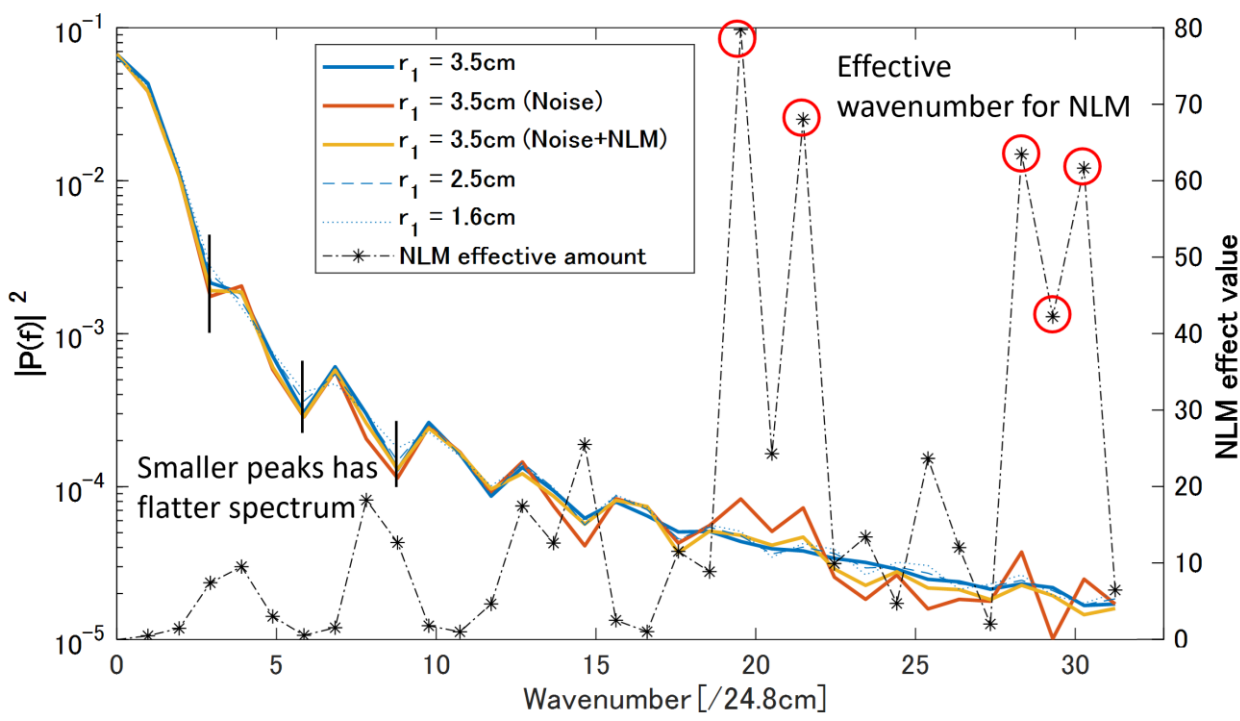


理論的投影画像に  
ノイズを付加



ノイズ画像に  
NLMを適用

白線の一次元値をFourier変換



.....\*..... NLM効果量

$$= \frac{(\text{ノイズ画像}) - (\text{NLM適用画像})}{(\text{理論画像})}$$

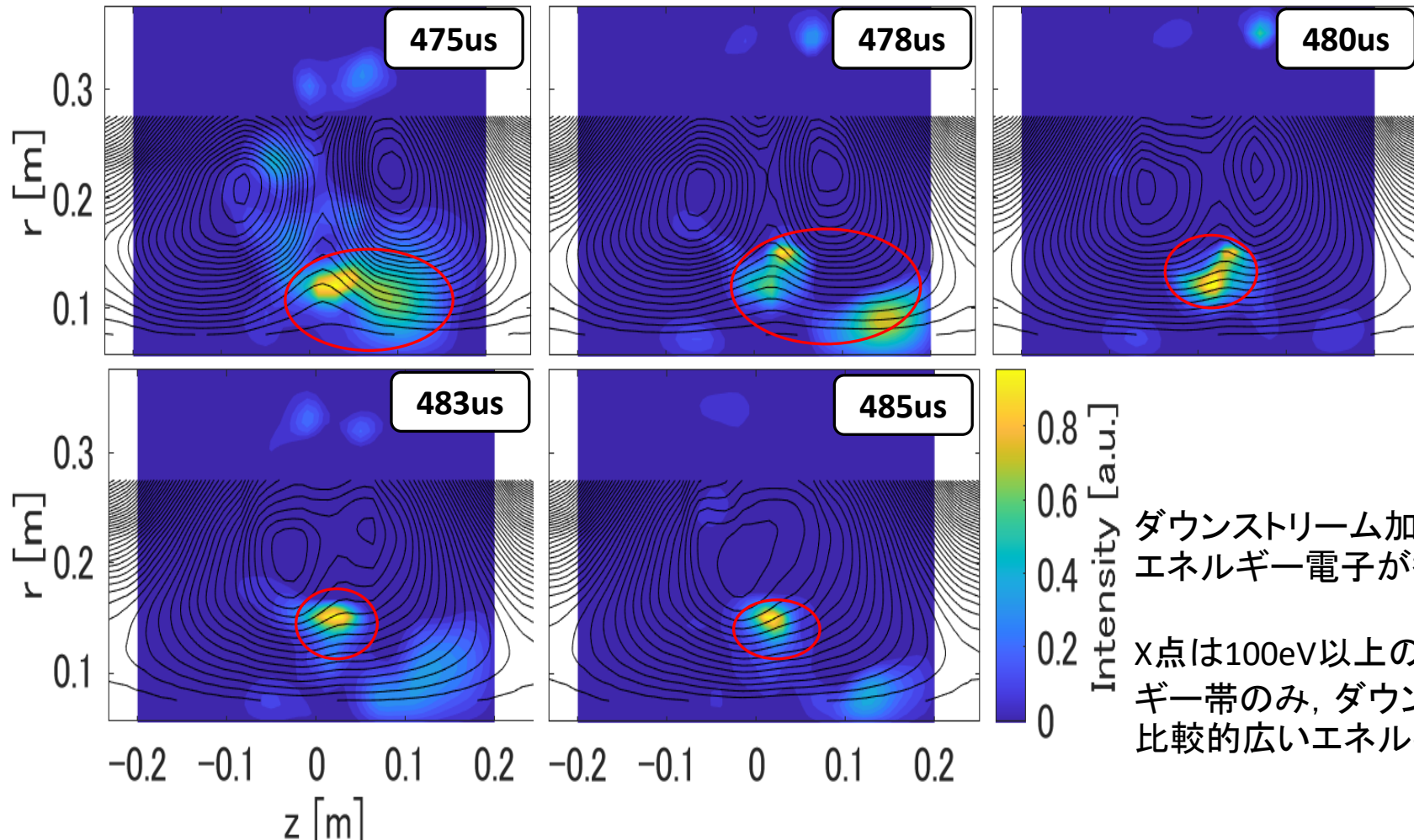
- ピークサイズが代表する波数帯と, NLMが大きく働く波数帯が分離されている
- NLMによって局所加熱等が大きくスムージングされることはない

# Aluminum 2.5um の結果

アルミニウムフィルタ

二放電を時系列に整列; 50~70eVまでの電子が透過される

$$V_{TF} = 4\text{kV}, V_{PF} = 39\text{kV}$$



ダウンストリーム加熱の一部低エネルギー電子が観測されたか

x点は100eV以上の高エネルギー帯のみ, ダウンストリームは比較的広いエネルギー帯で発光

# 参考文献

- [1] 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.
- [2] P. L. Pritchett. Relativistic electron production during guide field magnetic reconnection. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol. 111, No. 10, 2006.
- [3] M. Hoshino. Electron surfing acceleration in magnetic reconnection. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol. 110, No. A10, 2005.
- [4] M. Inomoto, T. Ushiki, X. Guo, T. Sugawara, K. Kondo, T. Mihara, Y. Minami, Y. Inai, H. Kaneko, R. Yanai, Y. Takahata, H. Tanabe, Y. Ono, A. Sanpei, and S. Kamio. Effects of reconnection downstream conditions on electron parallel acceleration during the merging start-up of a spherical tokamak. *Nuclear Fusion*, Vol. 59, No. 8, 2019.
- [5] N. Iwama, H. Yoshida, H. Takimoto, Y. Shen, S. Takamura, and T. Tsukishima. Phillips – tikhonov regularization of plasma image reconstruction with the generalized cross validation. *Applied Physics Letters*, Vol. 54, No. 6, 1989.
- [6] Junguang Xiang, Shinjiro Takeda, Yunhan Cai, and et al. Double-filter high-resolution soft x-ray tomographic diagnostic for investigating electron acceleration in ts-6 reconnection merging experiments. *Review of Scientific Instruments*, Vol. 92, , 2021.
- [7] M. Anton et al. X-ray tomography on the tcv tokamak. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, Vol. 38, , 1996.