

多方向画像取得によるプラズマ発光 およびシース構造の三次元再構築

鈴木 陽香^{1,2}, 泉 涼太¹, 吉川 隼人¹, 豊田 浩孝^{1,2,3}

1名古屋大学 大学院工学研究科, 2名古屋大学低温プラズマ科学研究センター, 3核融合科学研究所
suzuki.haruka.c3@f.mail.nagoya-u.ac.jp

研究の背景

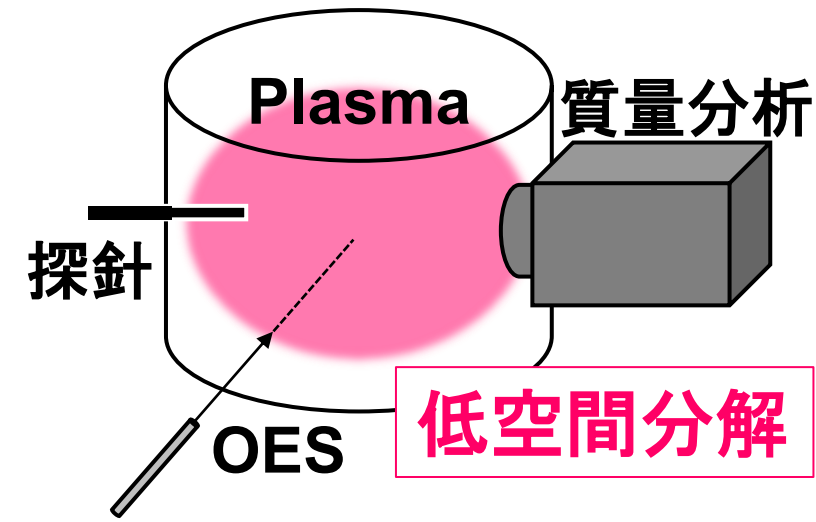
プロセス性能はプラズマ三次元空間構造に依存

✓ 加工形状・膜厚の制御 ✓ 面内均一性 ✓ 再現性

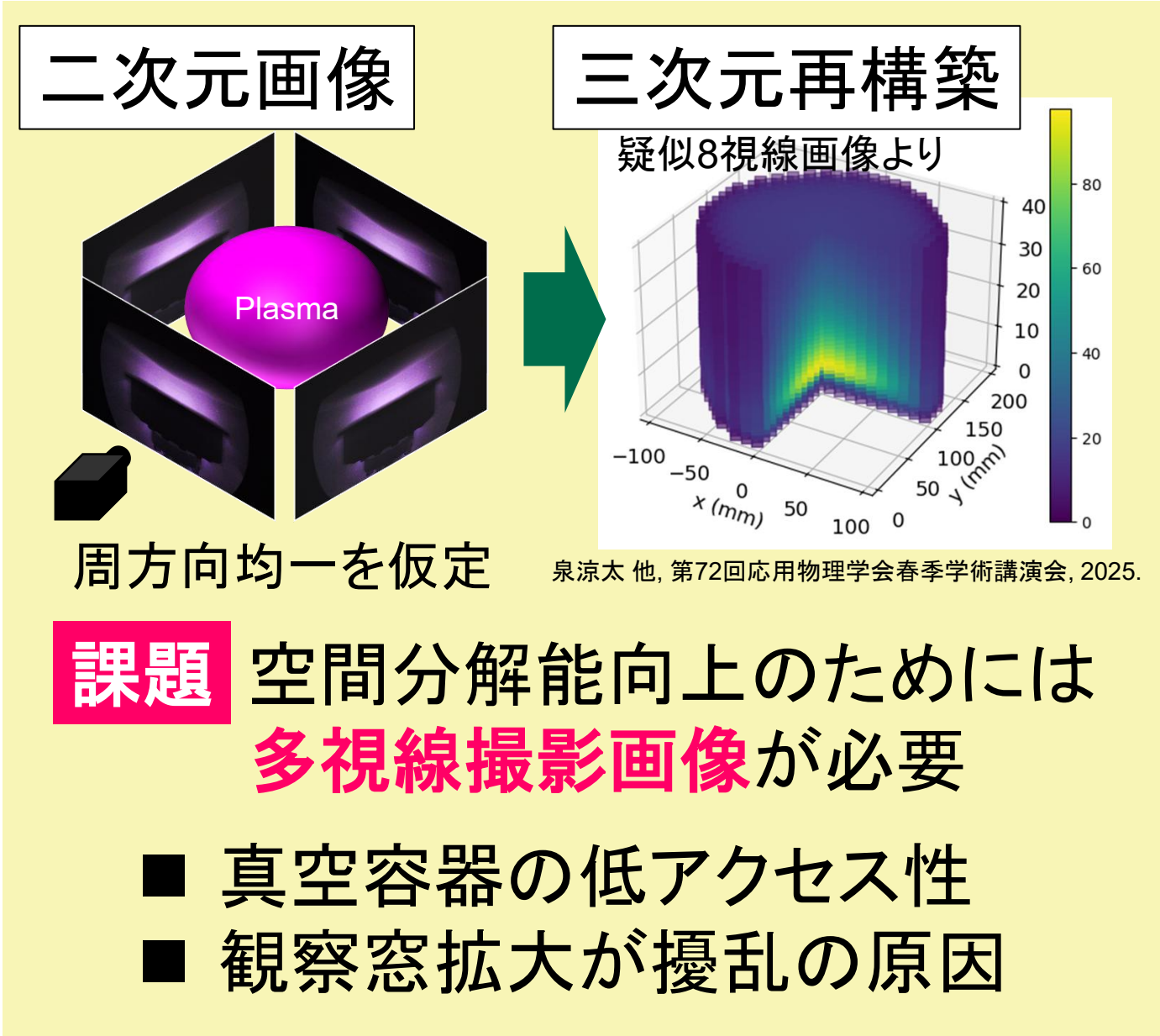
プラズマ内部構造の理解は、先進的プロセスの最適化に寄与

従来のプラズマ計測手法の問題点

- プローブ法 : 点計測、プラズマ擾乱
- 粒子計測 : 分布取得不可、擾乱
- 発光分光法 : 視線方向積分の計測



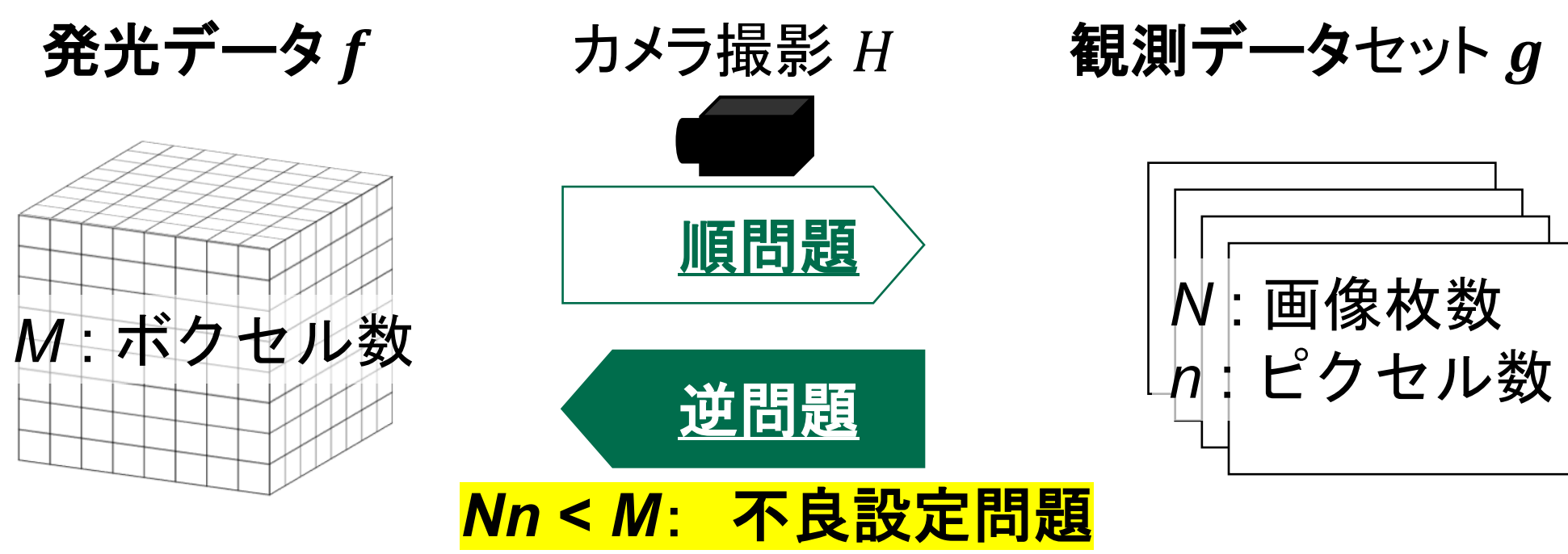
これまでに 複数視点カメラ画像から発光三次元空間分布を再構築



三次元再構築の手法

$$\begin{bmatrix} H_{1,1} & \cdots & H_{1,M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{N \cdot n, 1} & \cdots & H_{N \cdot n, M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1 \\ \vdots \\ g_{N \cdot n} \end{bmatrix}$$

重みづけ行列 H 発光行列 f 投影行列 g

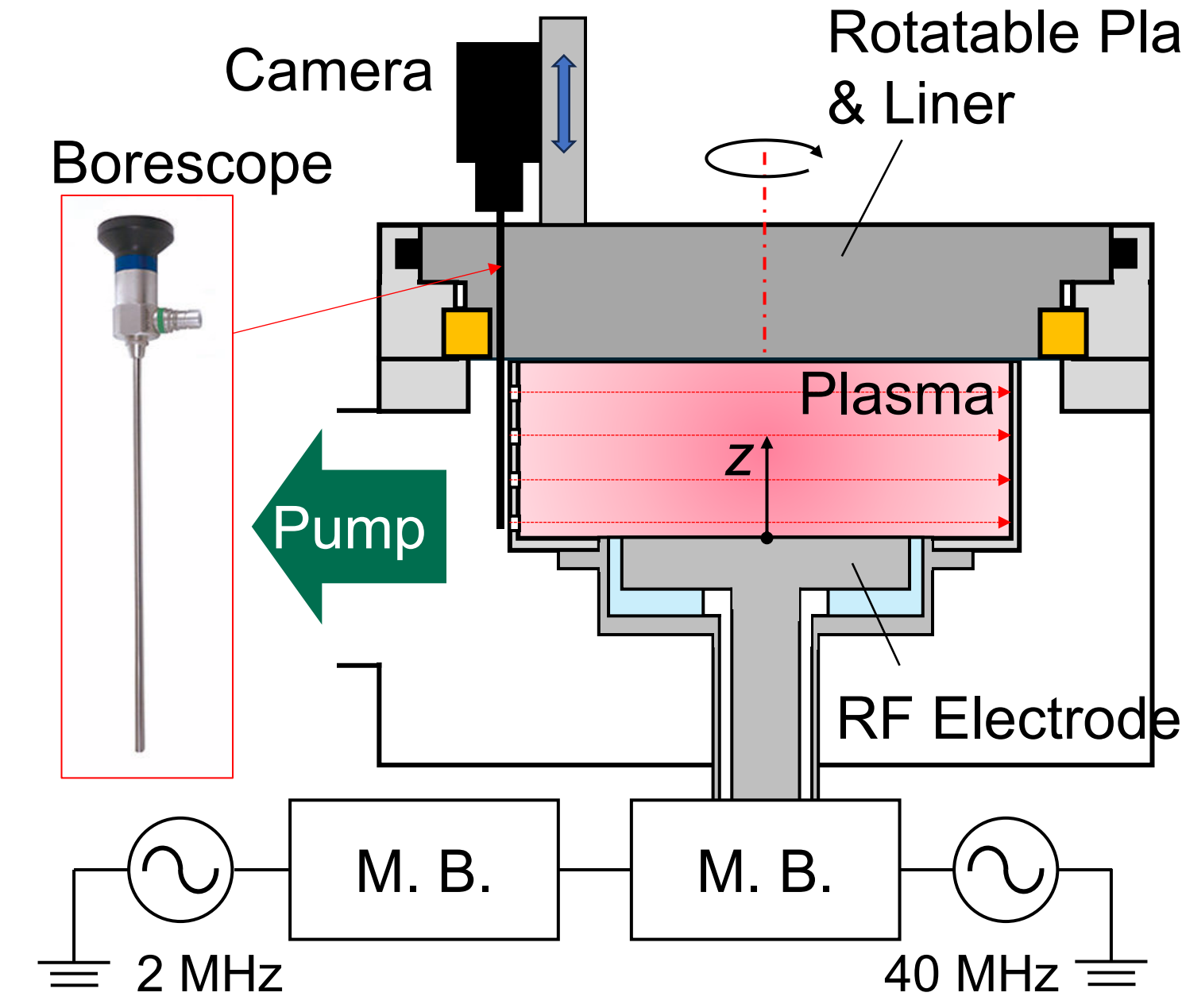


Tikhonov-Phillips正則化

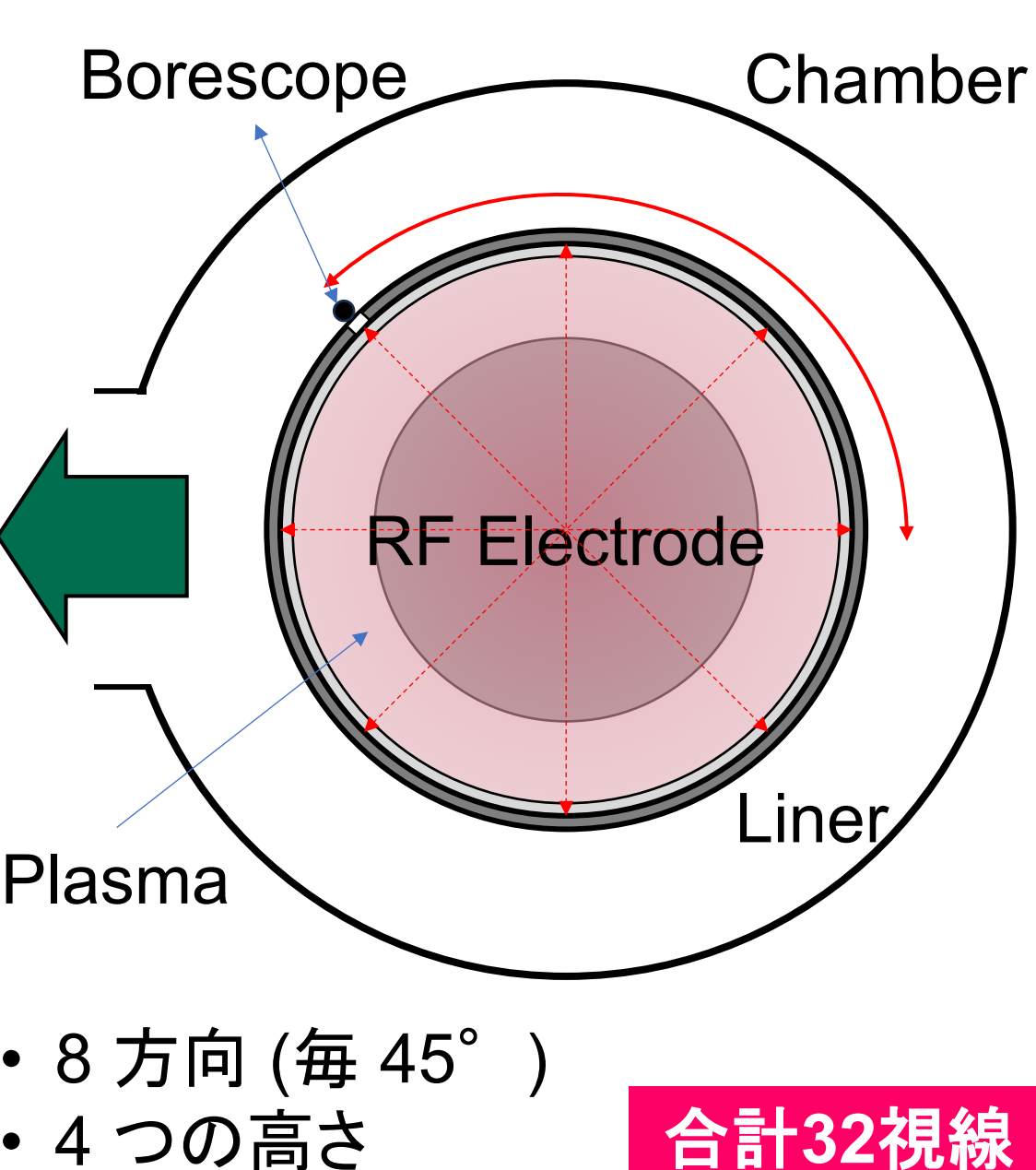
$$\min \left\{ \|\vec{g} - H\vec{f}\|^2 + \alpha \|\mathcal{C}\vec{f}\|^2 \right\} \quad \alpha: \text{正則化パラメータ} \\ \mathcal{C}: \text{ラプラシアン行列}$$
$$\vec{f} = (H^T H + \alpha \mathcal{C}^T \mathcal{C})^{-1} H^T \vec{g}$$

実験装置図

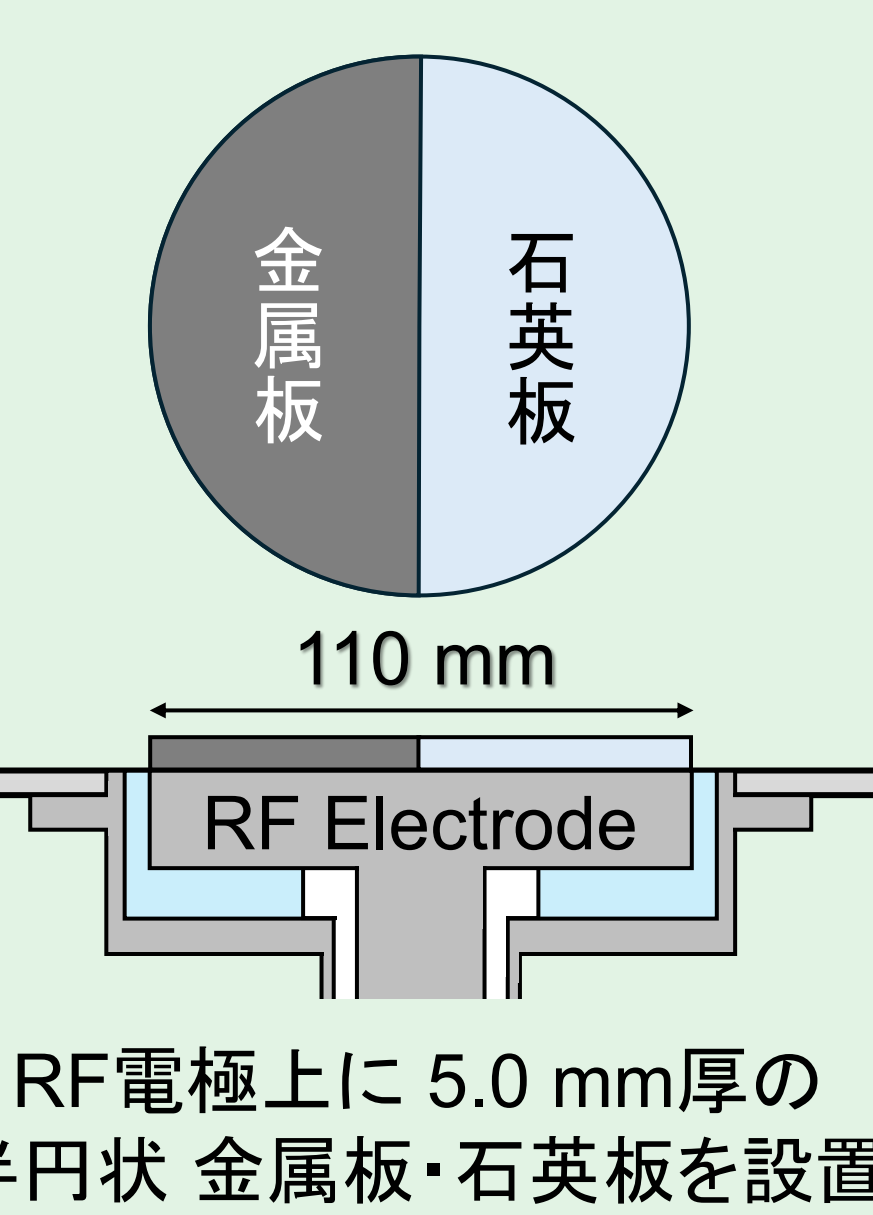
実験装置 側面図



上面図

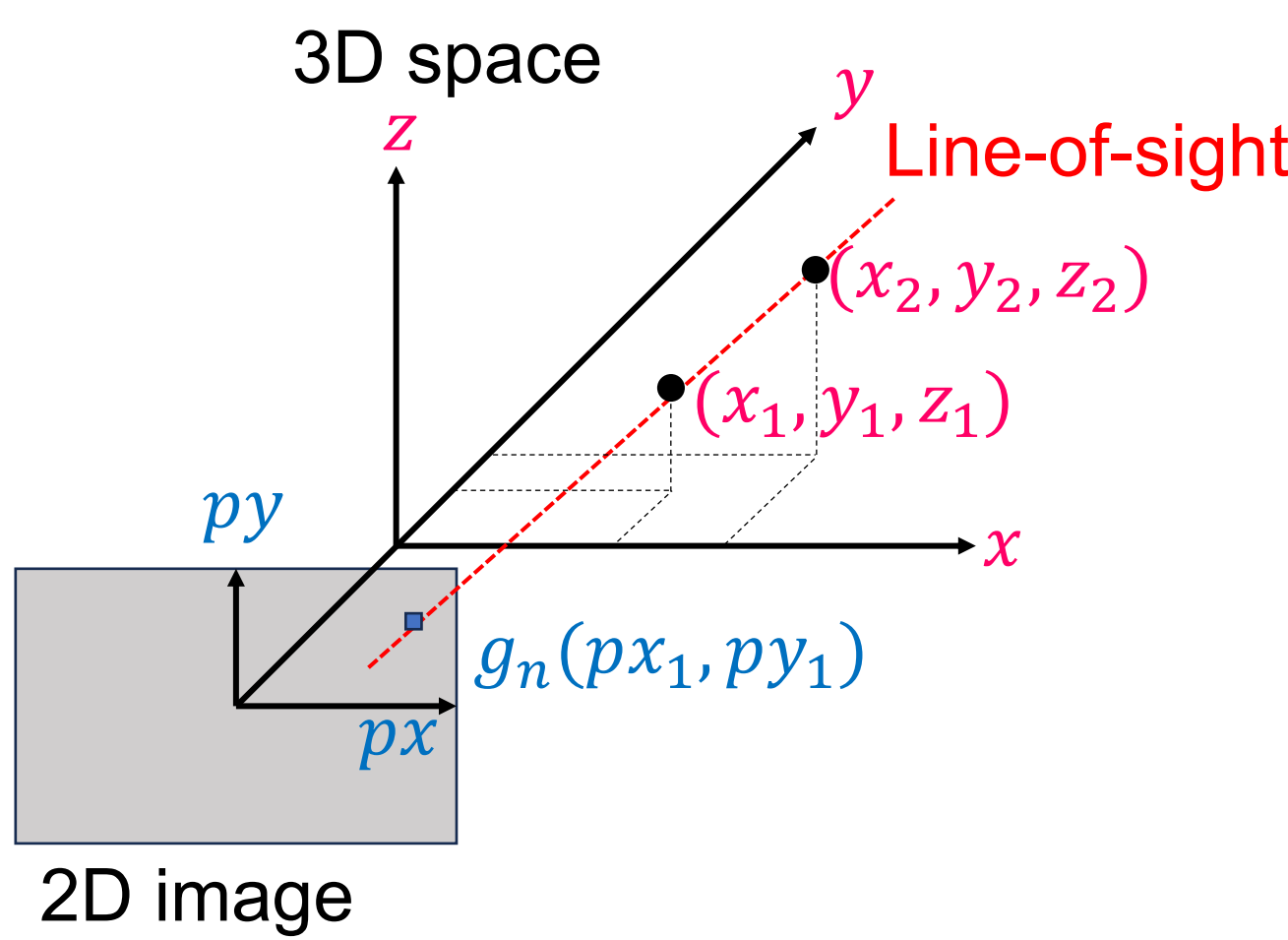


不均一プラズマの生成

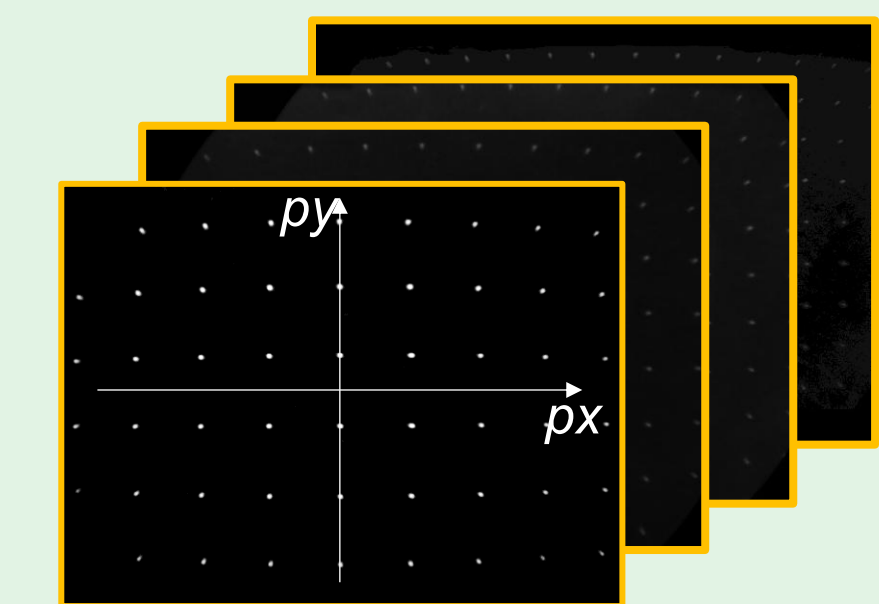


重みづけ行列 H の作成

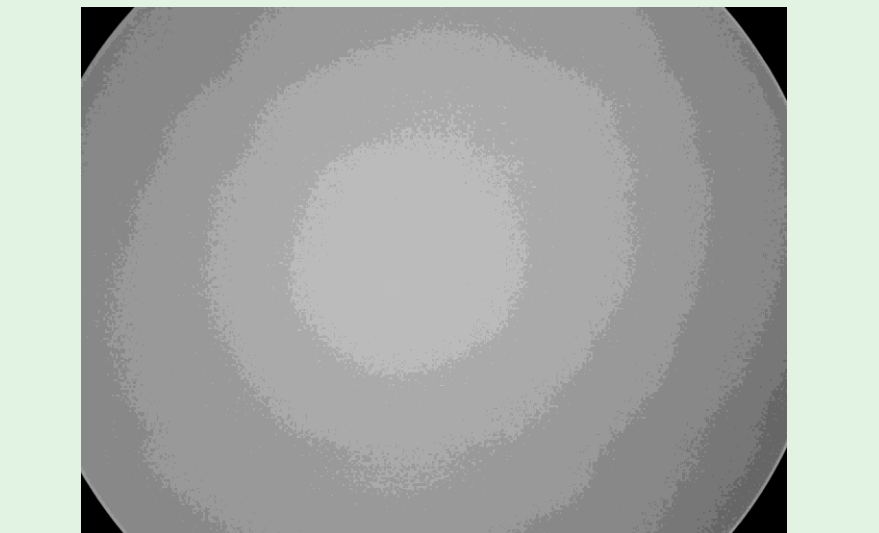
三次元空間／二次元画像の関係



① 各距離でパターンを撮影



② 均一光源を撮影



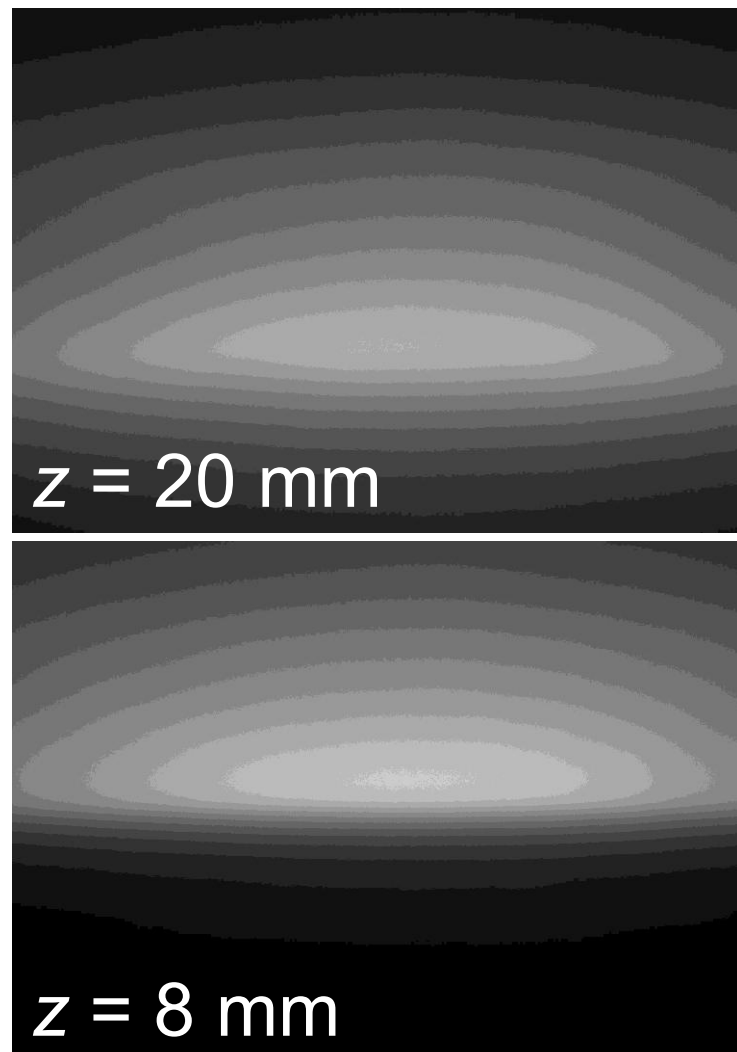
- ① ある画素に投影される光線追跡
- ② 素子光学特性に(周辺光量落ち)

実験結果

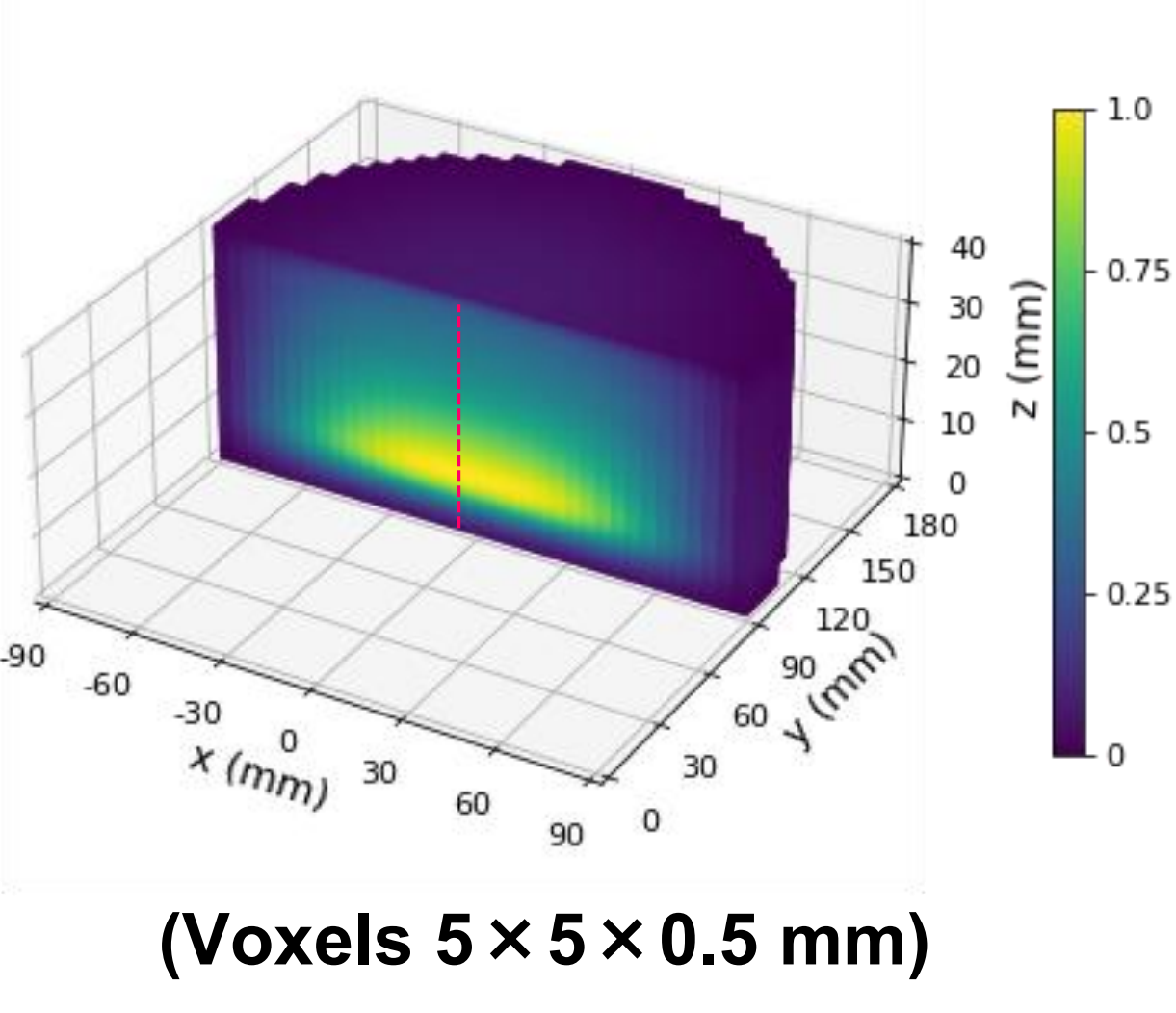
単周波・準均一プラズマ発光再構築

VHF電力: 50 W, 放電ガス: N₂ (20 sccm), 圧力: 6.6 Pa, 32方向視線

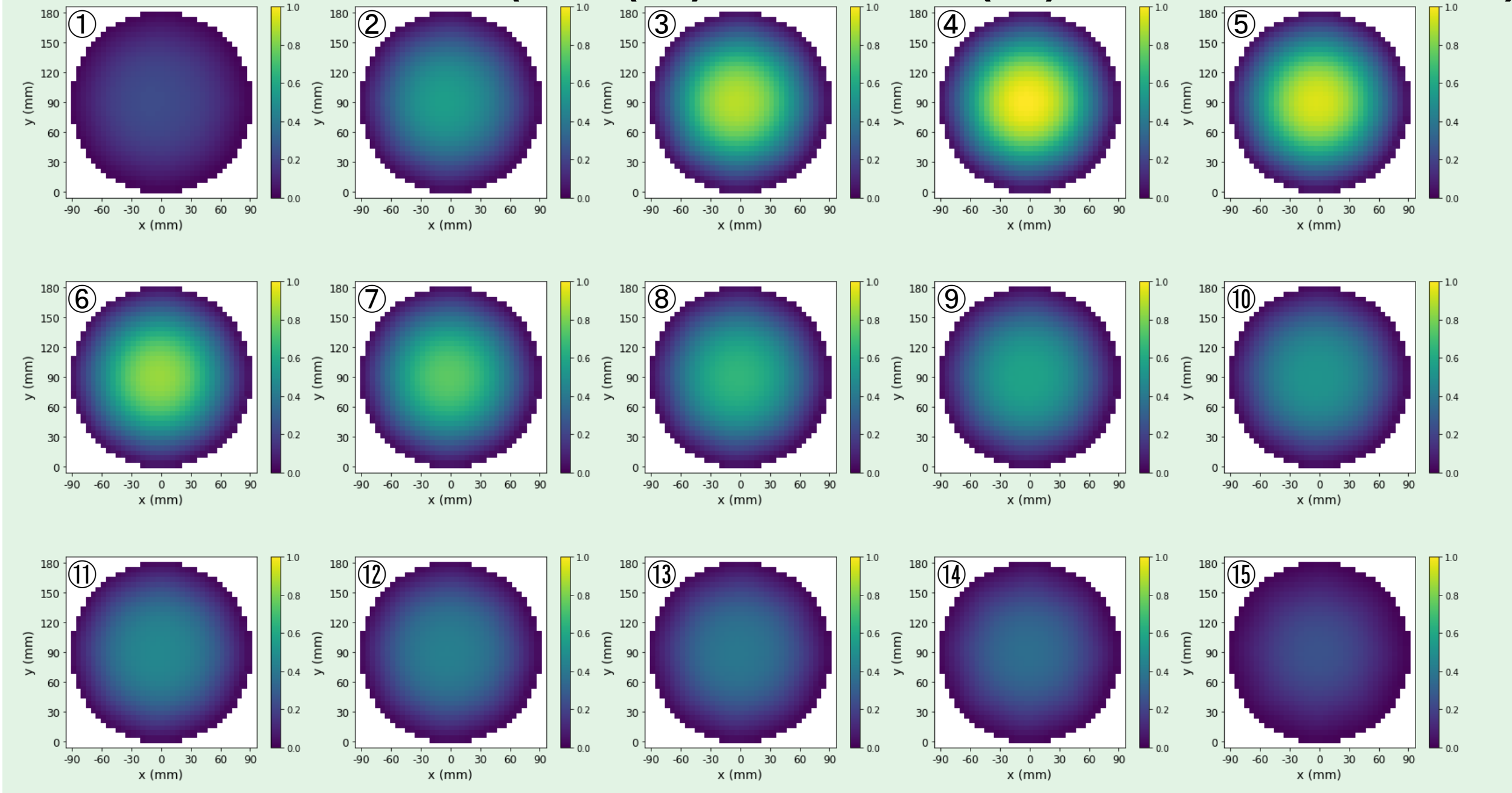
撮影画像例



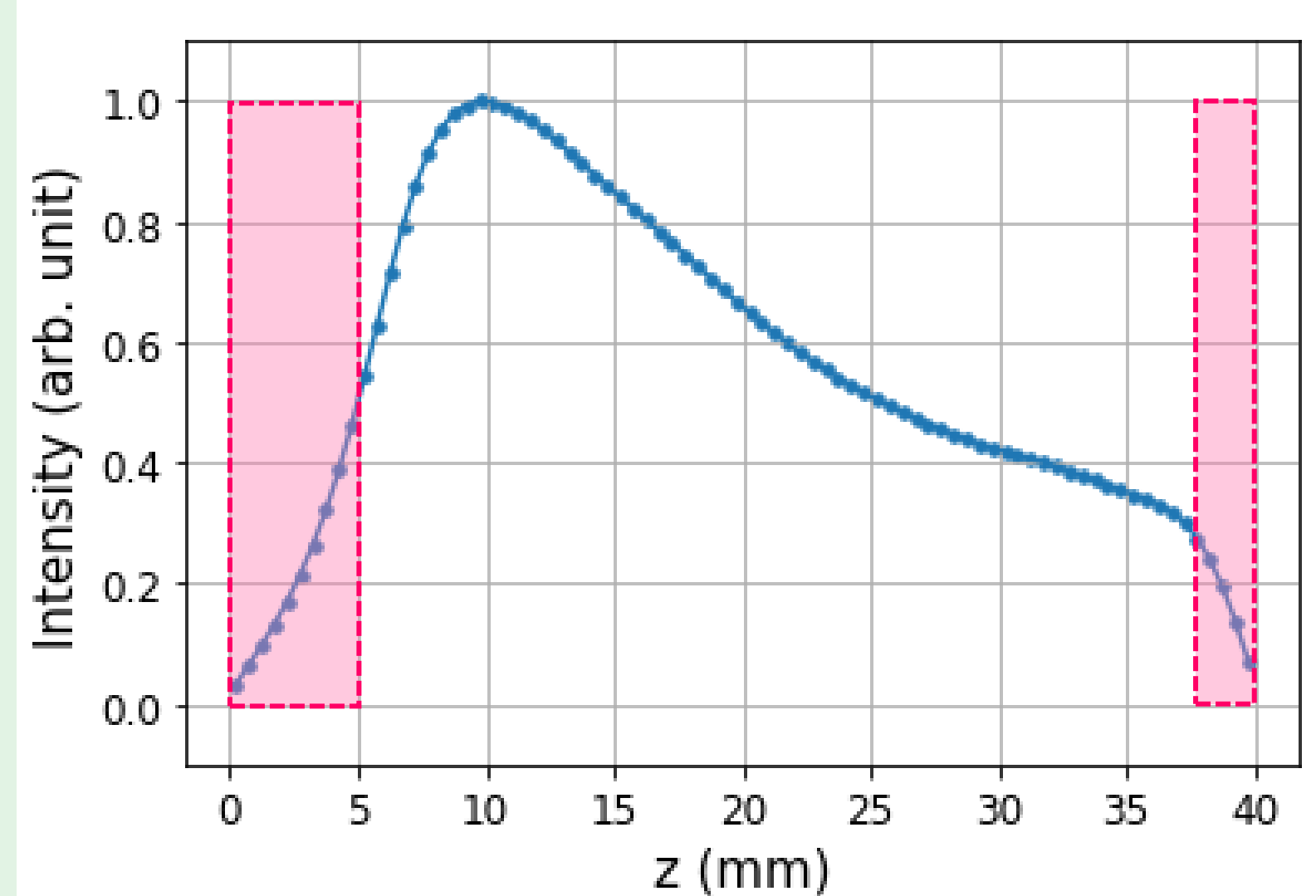
三次元再構築結果



再構築スライス画像 (2.75(①) ≤ z ≤ 37.75(⑮) mm, Δz = 2.5 mm)



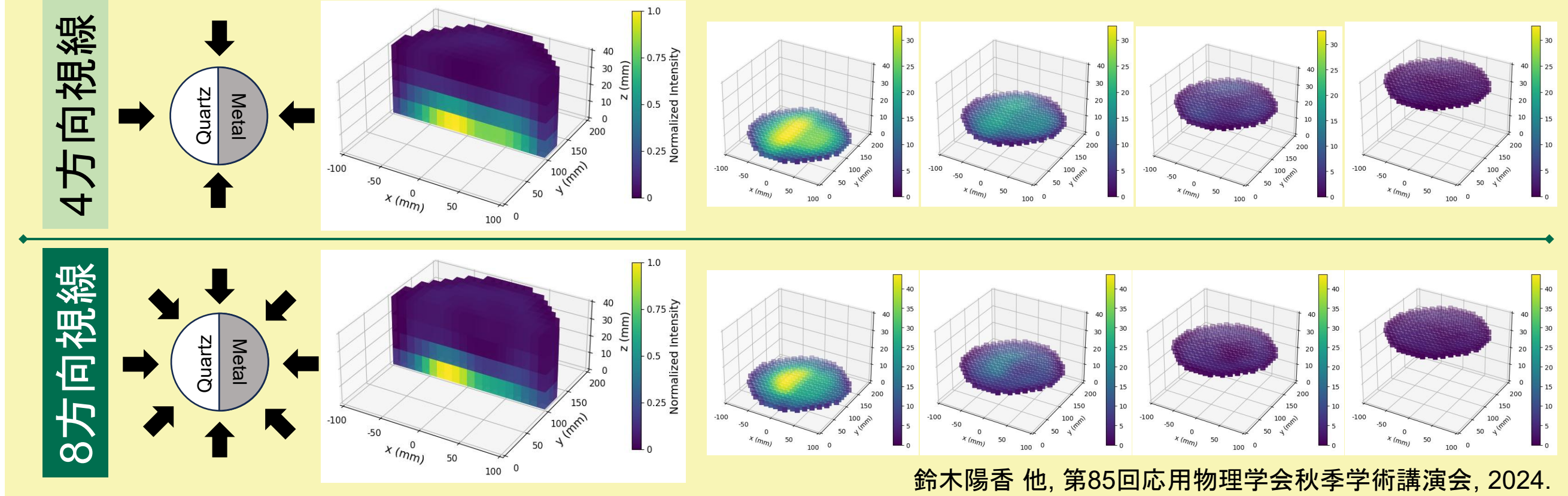
中心における1次元発光分布



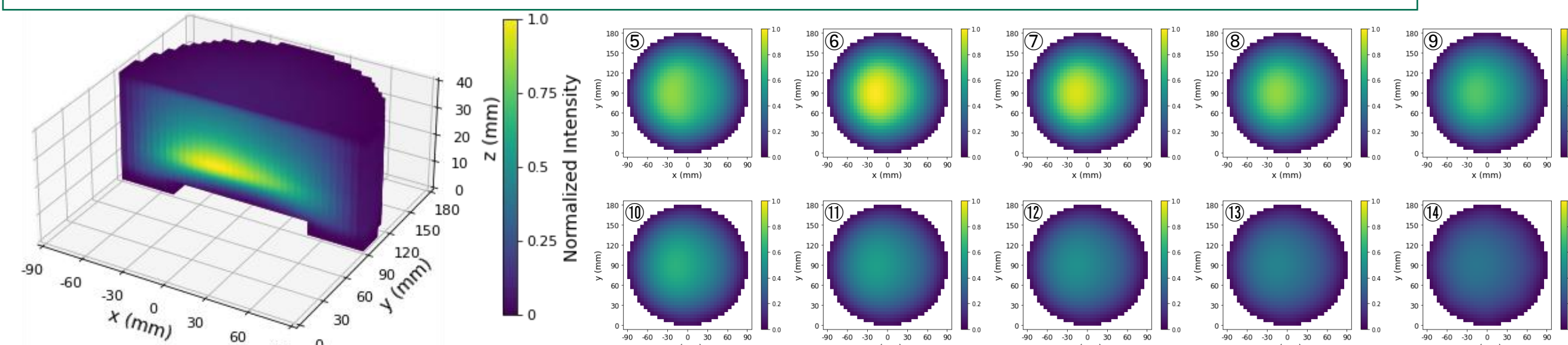
➢ 時間平均のRFシースの観測
⇒ 数 mm ~ 5 mm

不均一プラズマ発光再構築

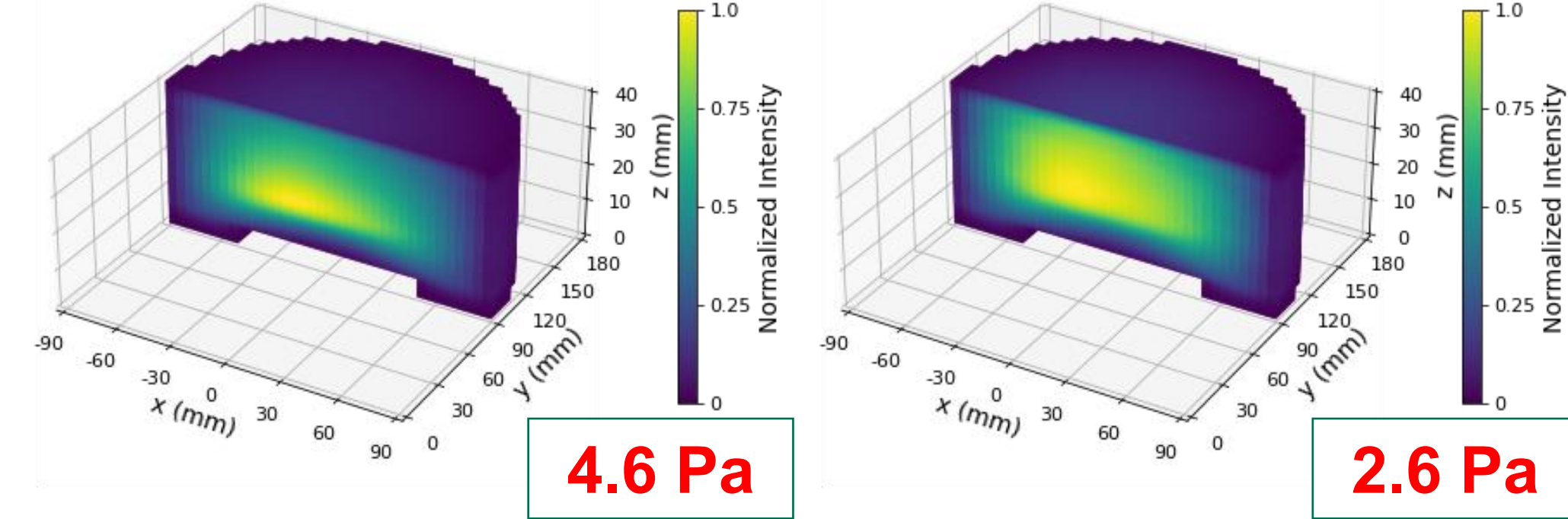
過去の報告: 不均一プラズマ再構築 (Voxels 10 × 10 × 10 mm)



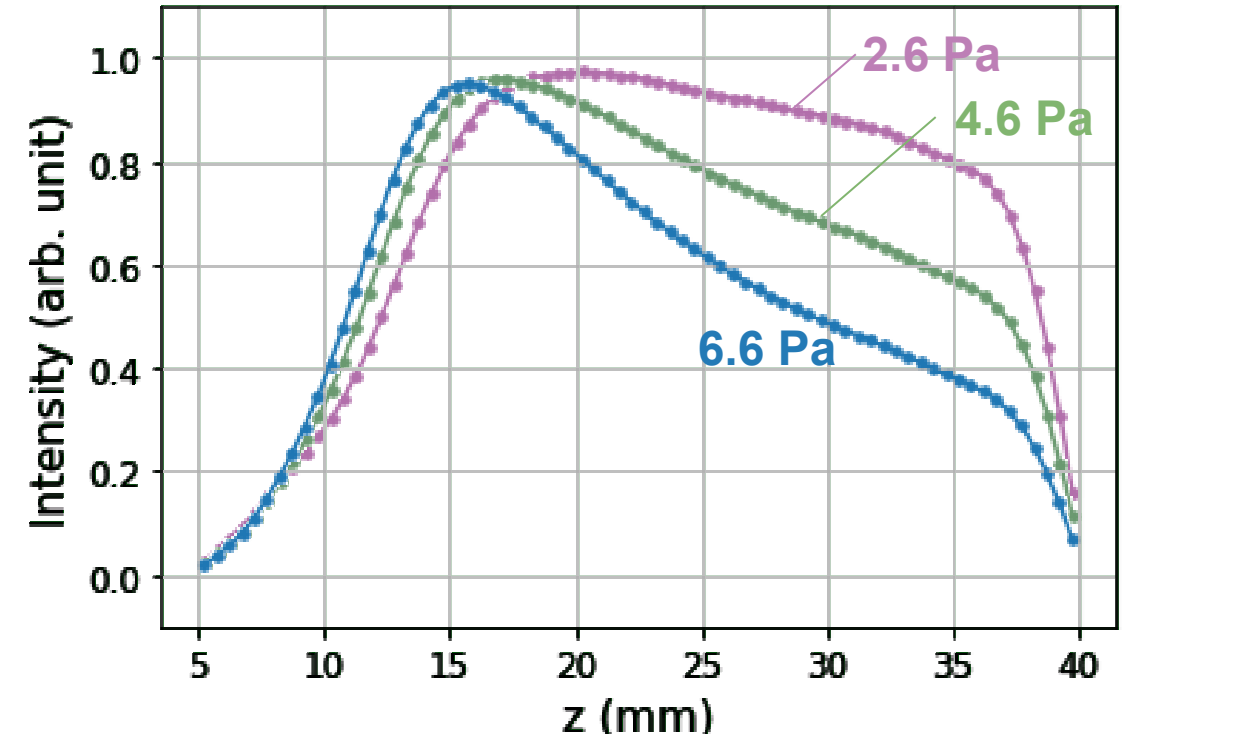
VHF電力: 50 W, LF電圧: 0 V, 放電ガス: N₂ (20 sccm), 圧力: 6.6 Pa, 24方向視線



圧力依存性 (LF電圧: 0 V)

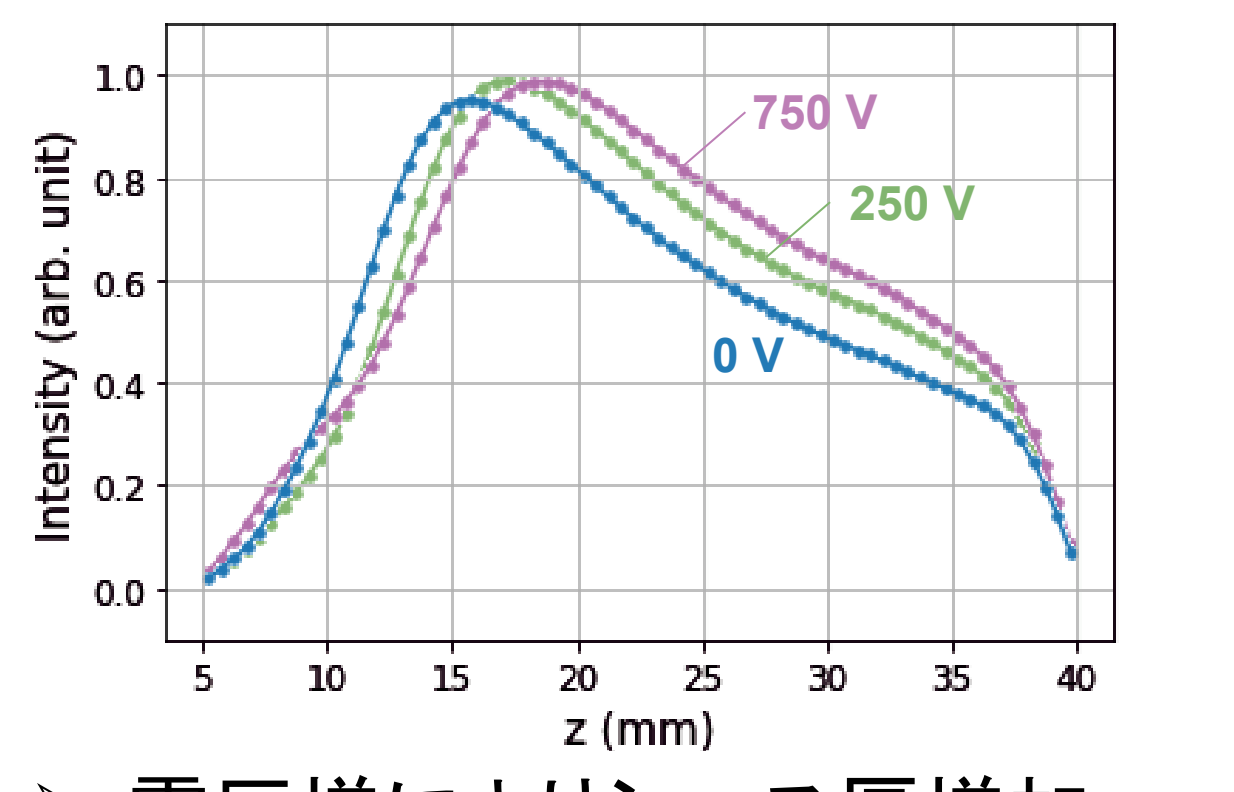
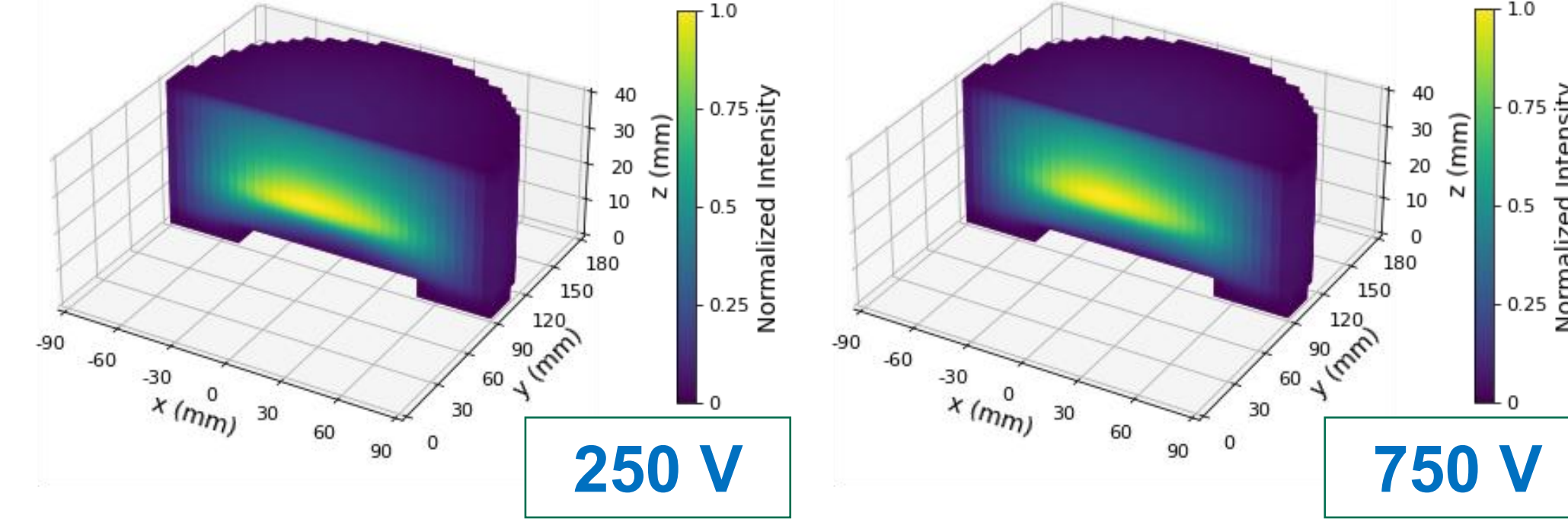


中心における1次元発光分布



➢ 圧力増によりプラズマ縮小

LF電圧依存性 (圧力: 6.6 Pa)



➢ 電圧増によりシース厚増加

まとめ

- 真空を維持したまま任意視線から撮影可能な計測装置の開発
- 32視線画像を用いたプラズマ発光三次元再構築 = 空間分解能向上・シース観測
- 不均一プラズマの発光再構築: 圧力・電圧に対する依存性 = CCPの基礎特性を再現

今後の計画

- 他の計測方法・シミュレーションによる交差検証
- 横方向空間分解能の向上