



理研仁科センターにおける ペーパーポット型エミッタンスモニターの開発

森田 泰之¹, 長友 傑¹, Glynnis Mae Saquilayan¹, 中島悠太²

¹理化学研究所仁科加速器科学研究センター

²大阪大学データビリティフロンティア機構

Outline

- Introduction
 - エミッタンス測定
 - ペPPERポット型エミッタンスモニター
- 高精度解析手法の開発
 - Optical Flowの概要
 - Optical Flowを使用した解析手法
- 解析結果
 - 従来手法との比較
 - ビーム輸送シミュレーションによる妥当性の検証
- まとめ・展望

Radioactive Isotope Beam Factory (RIBF)

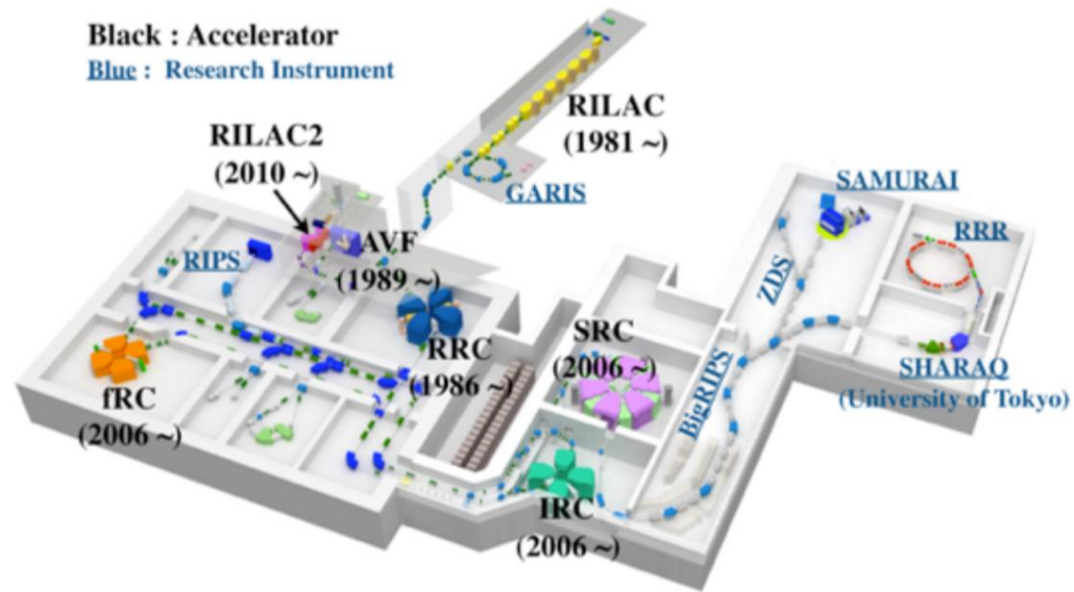
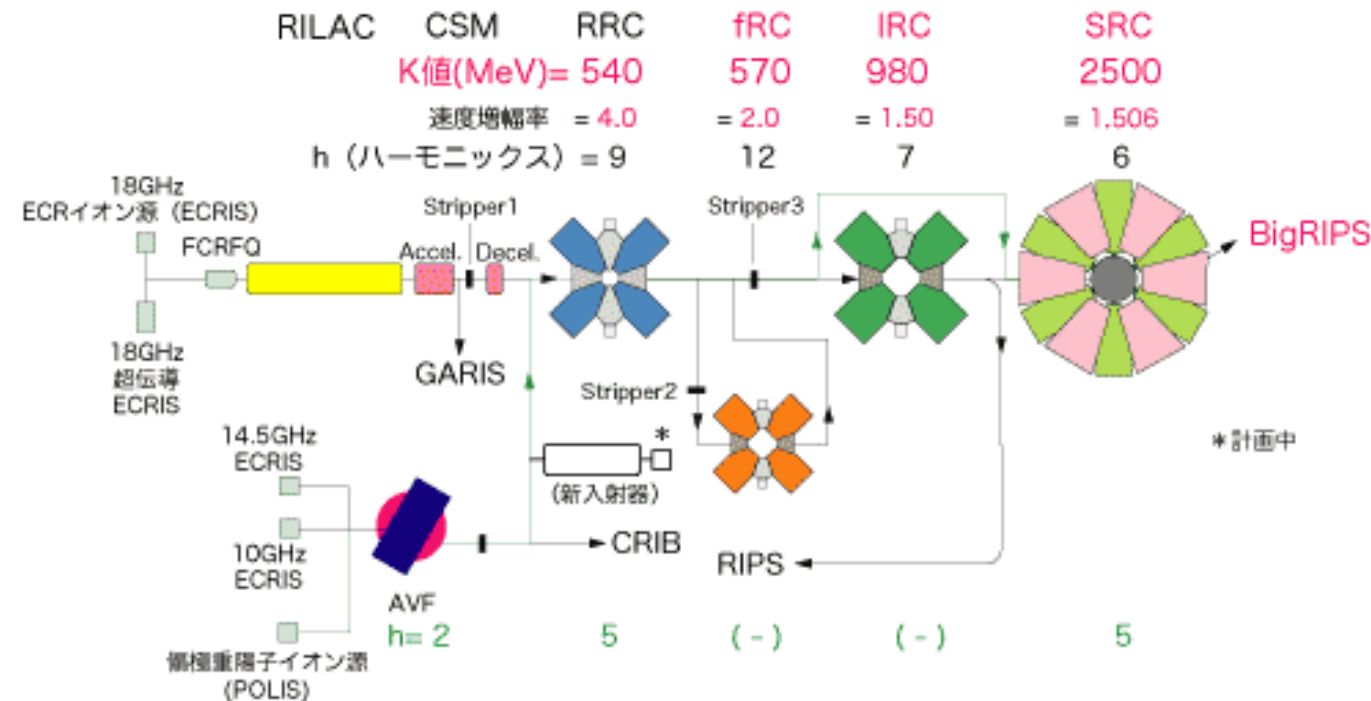


Figure 1: Layout of RI Beam Factory.

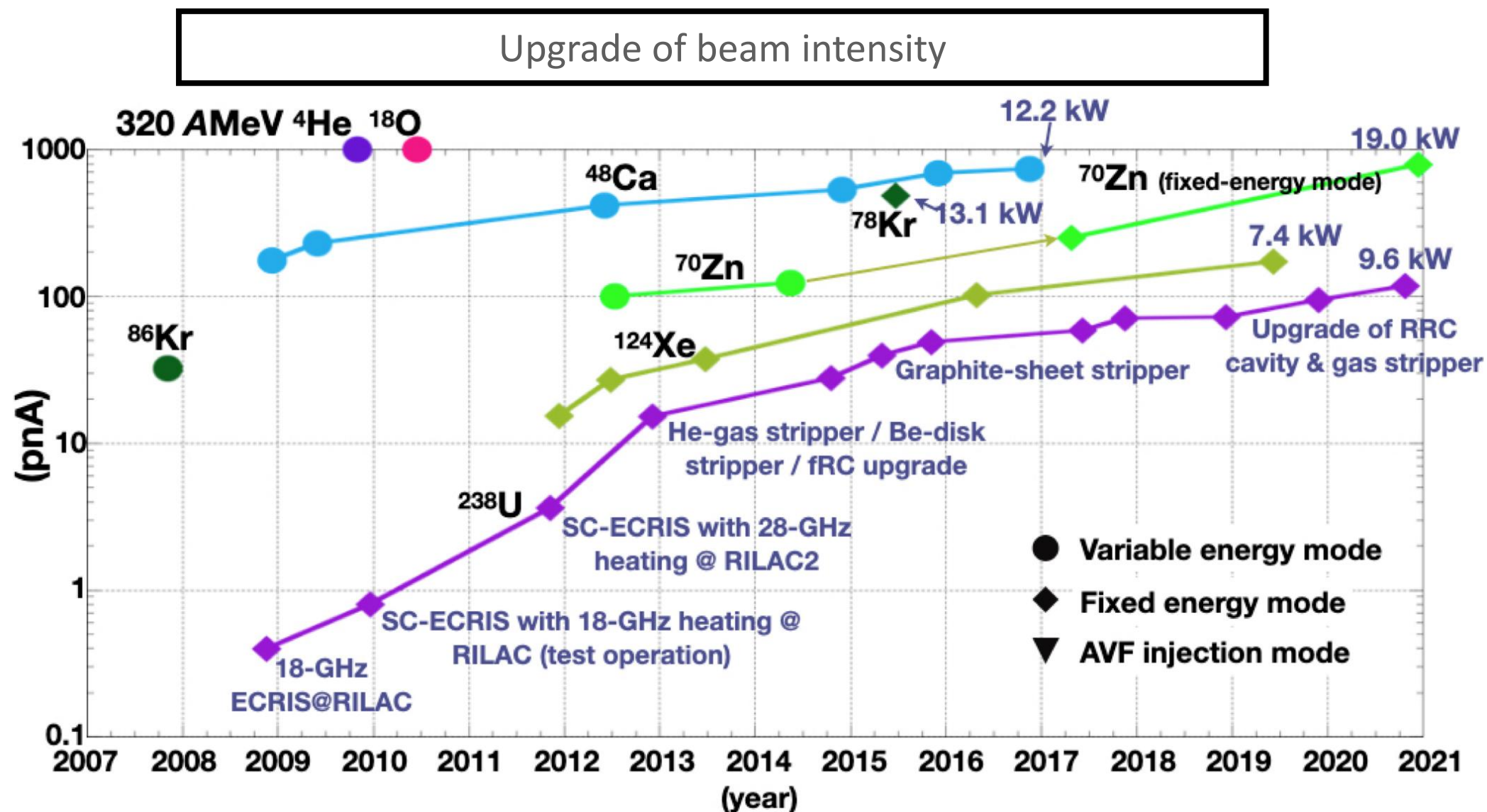
Fukunisi, Proc. PASJ 2020 PASJ2020 WEOOP02 より



Cyclotron : 5, LINAC : 2, Ion source : 5

RIBF: 多様な原子核物理実験を目的とした、
入射加速器 (LINAC or AVF) と 4 つの後段サイクロトロンからなる複合加速器施設

Radioactive Isotope Beam Factory (RIBF)

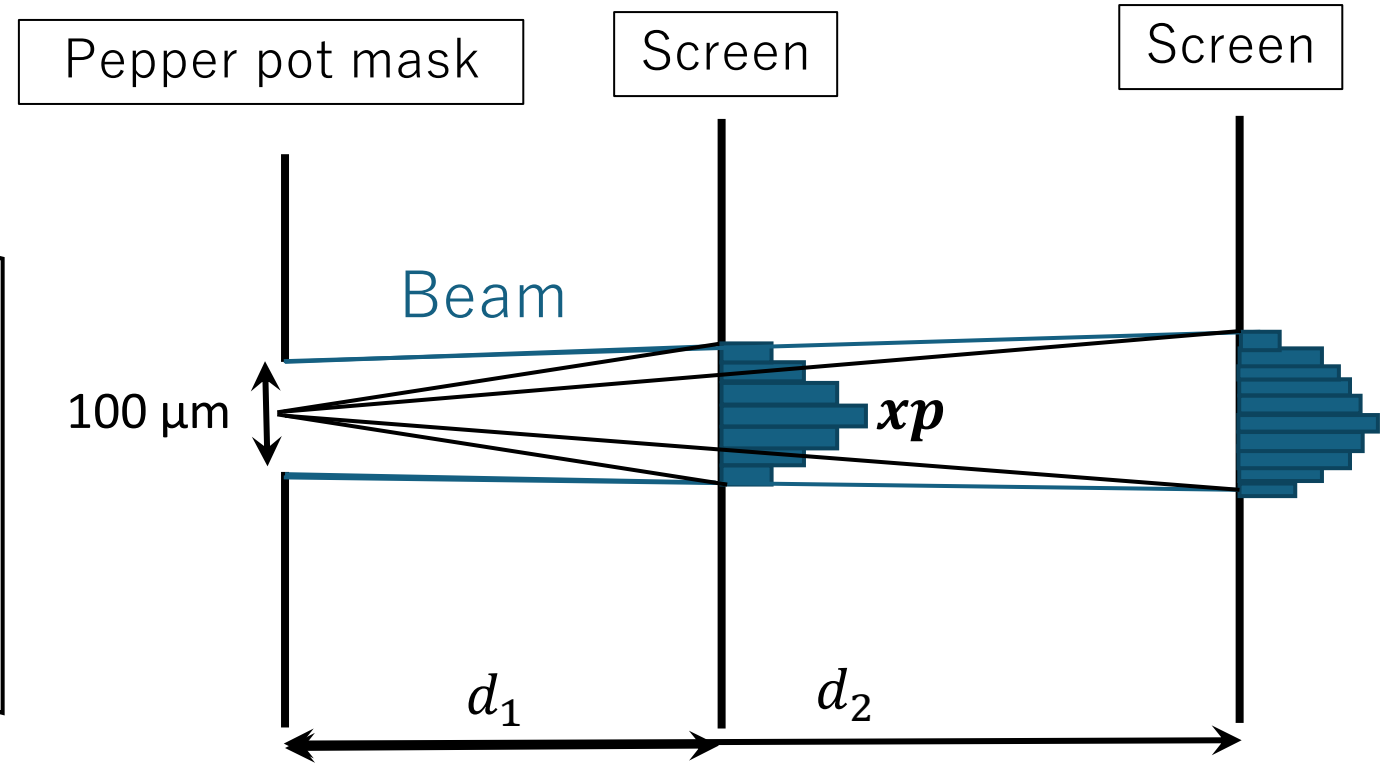
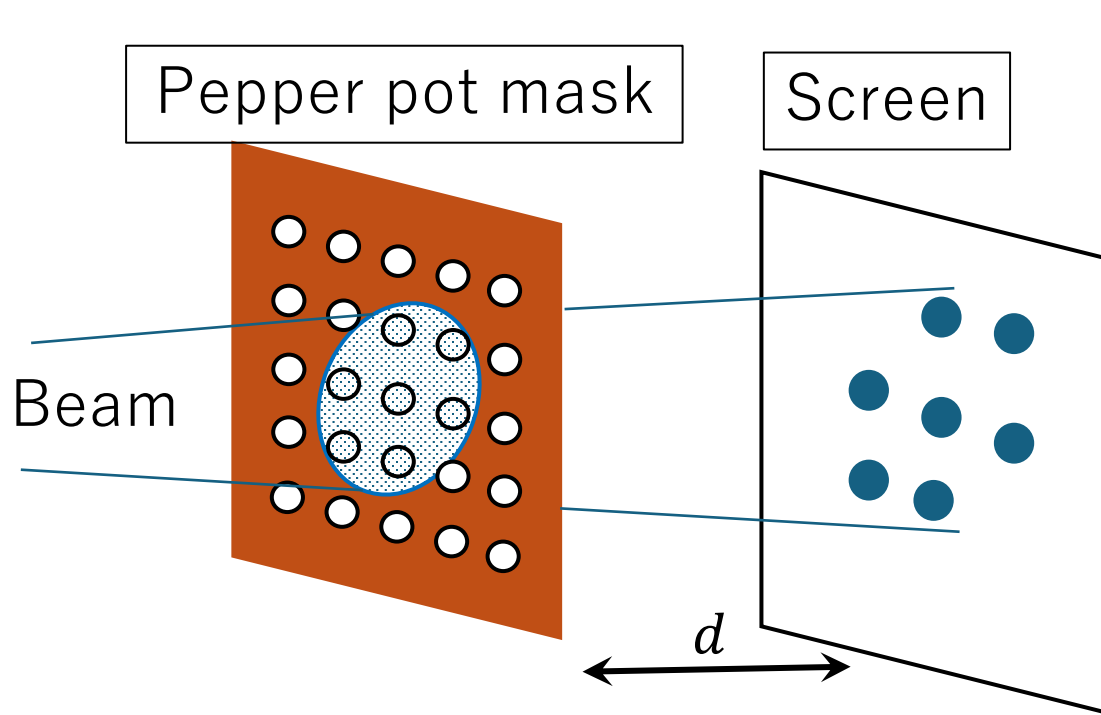


大強度化に向け、イオン源では**ビーム強度の増加とエミッタンスの良化**が必須

ペッパーポット型エミッタンスモニター(PPEM)

PPEMの長所：4次元測定, 高速測定

PPEMの主な課題：測定精度



並行ビームでの角度の過大評価

d (mm)	8.3	17.7	24.7
$\Delta\theta$ (mrad)	6.0	2.8	2.0

Small d : 角度分解能 ☹ エミッタンスを過大評価

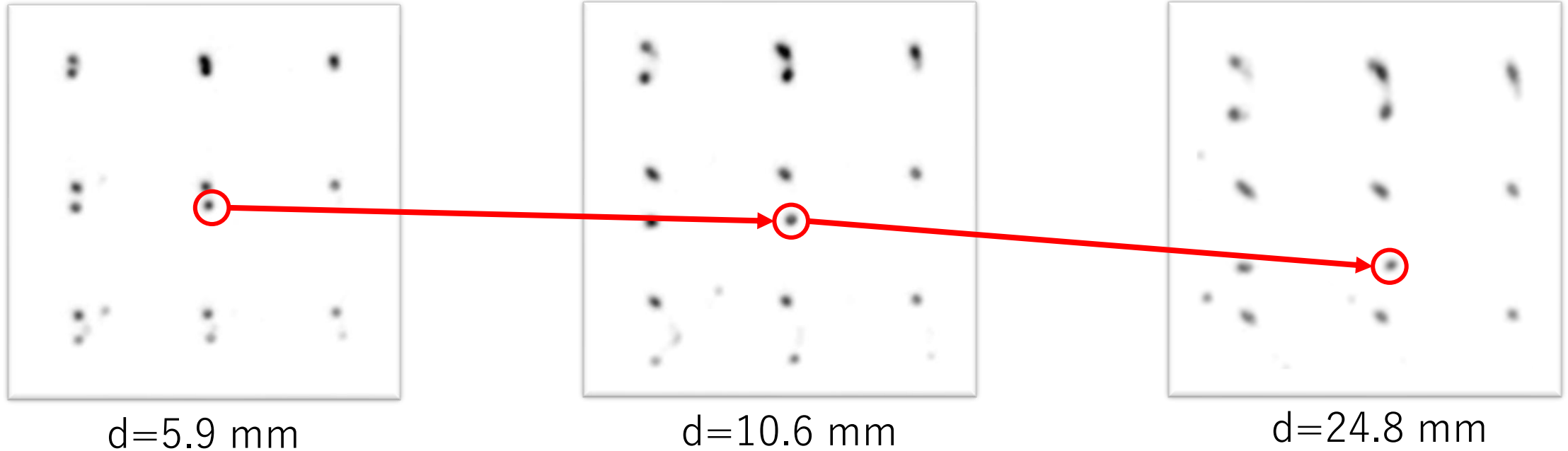
Large d : 角度分解能 ☺ エミッタンスを適正評価

マスクとスクリーンの距離 d は大きいほど測定が上がる

PPEMの課題 ‘マスクの穴と像の対応付け’

- 位置精度：マスクの穴の間隔に依存
- 角度精度：スクリーンとの距離に依存

3 × 3個分の穴に対応するscreen上での像



Small d : マスクの穴と像の対応付け 😊

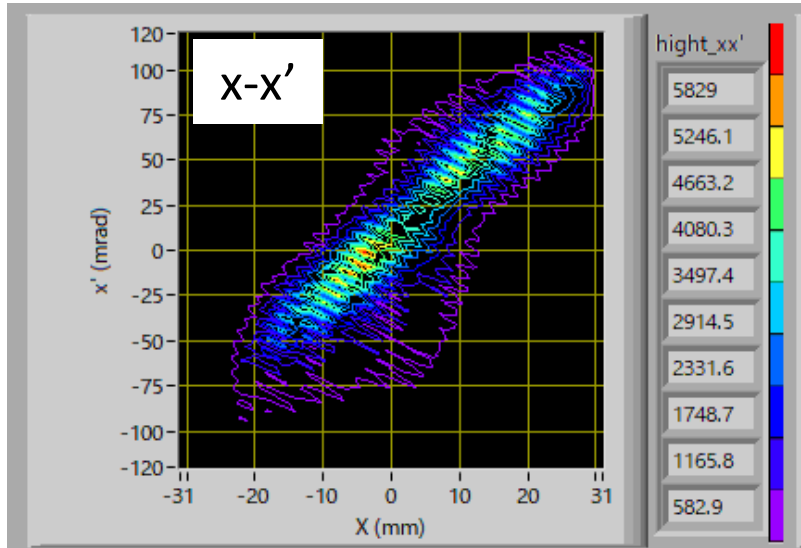
Large d : マスクの穴と像の対応付け ☹️

◆ 対応付けを誤る距離はビームの位相空間分布に依存する

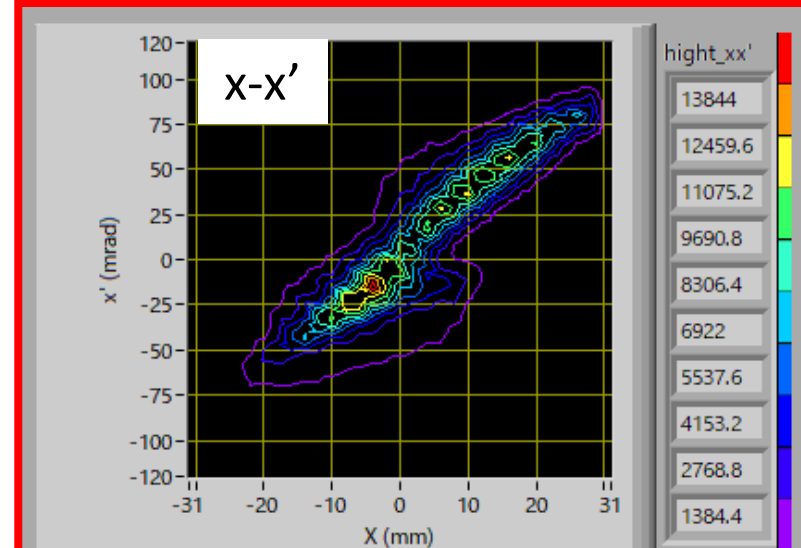
➤ RILAC LEBTでは装置に工夫をして活用してきた

従来の手法での解析結果 イオン種: $^{14}\text{N}^{4+}$, 引き出し電圧: 10 kV, 432 μA @第一診断箱

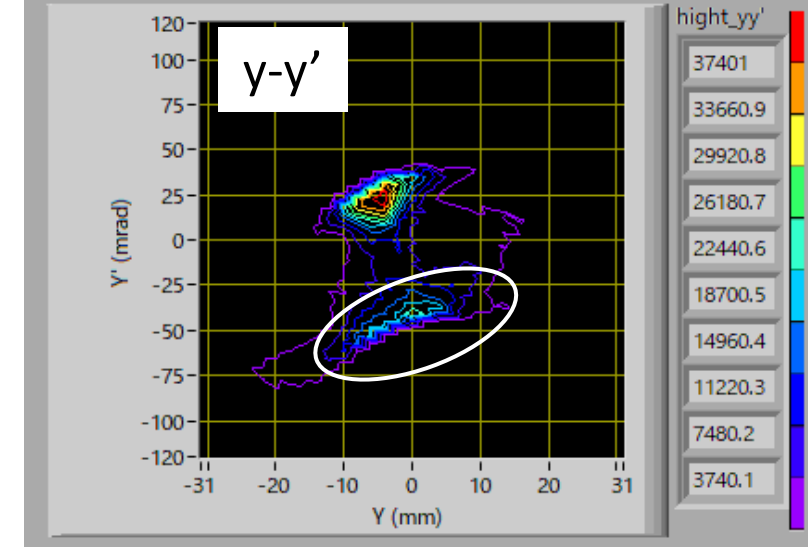
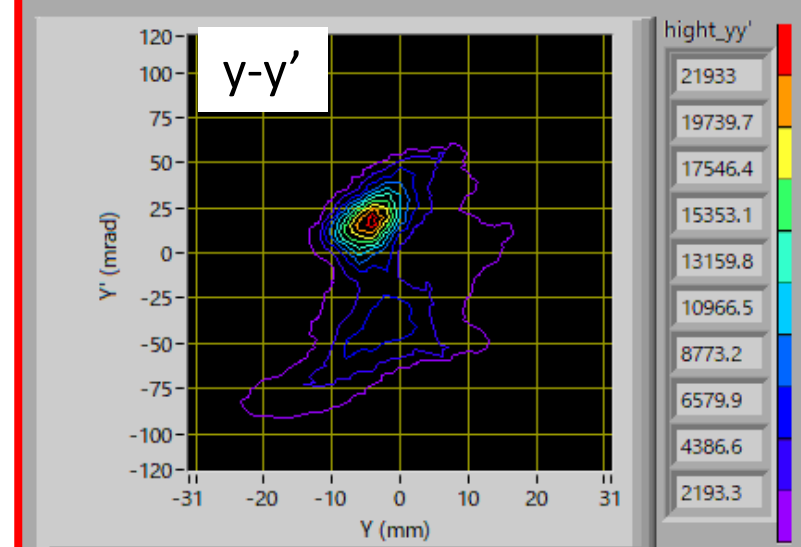
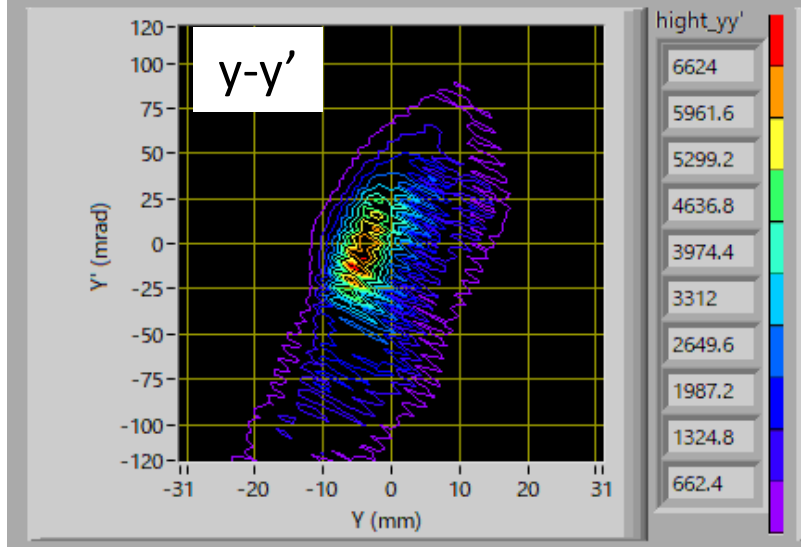
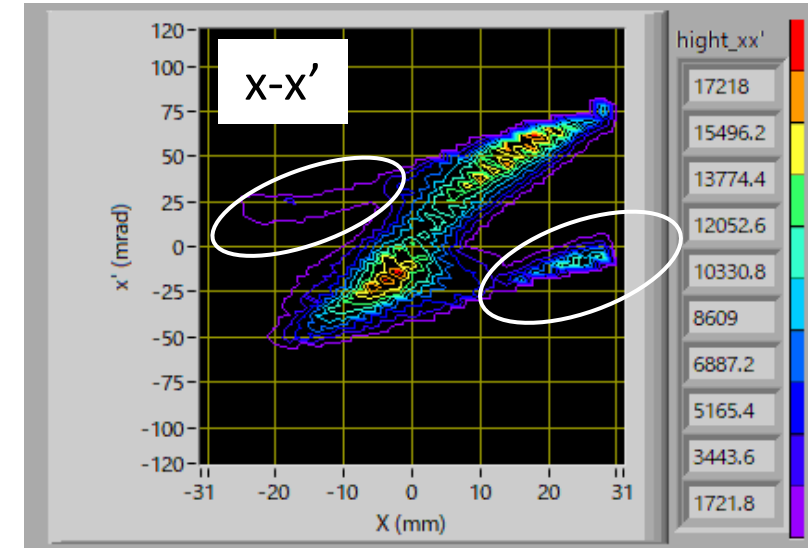
$d : 8.3 \text{ mm}$



$d : 17.7 \text{ mm}$



$d : 24.7 \text{ mm}$



Outline

- Introduction
 - エミッタンス測定
 - ペPPERポット型エミッタンスモニター
- 高精度解析手法の開発
 - Optical Flowの概要
 - Optical Flowを使用した解析手法
- 解析結果
 - 従来手法との比較
 - ビーム輸送シミュレーションによる妥当性の検証
- まとめ・展望

Optical Flowとは？

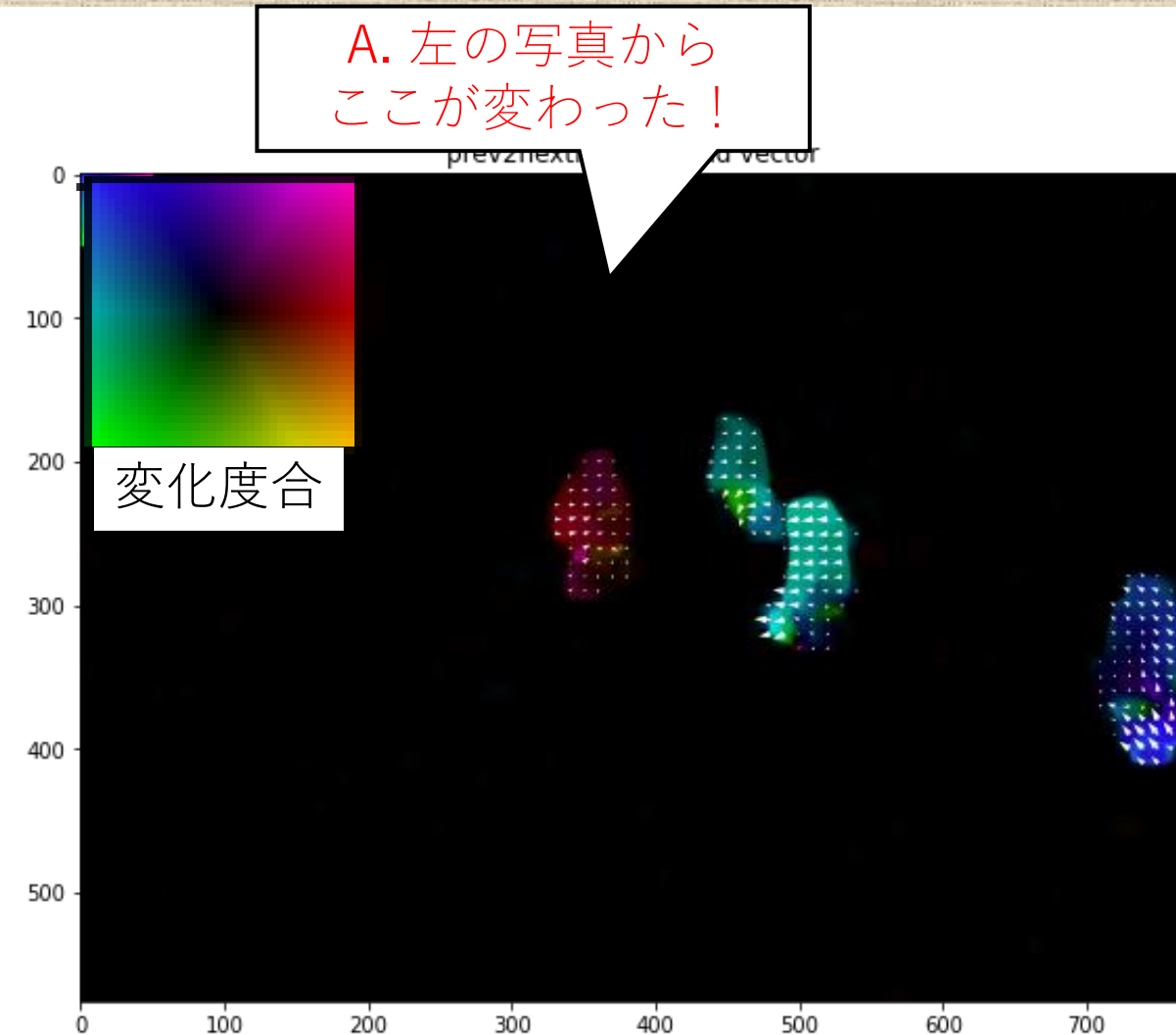
Q. 左の写真から、
何がどう変わった？



https://qiita.com/yusuke_s_yusuke/items/03243490b1fd765fe61f

連続した2枚の写真の変化を計算するのがOptical Flow
(ただし微小な変化のみ計算可能)

Optical Flowとは？



https://qiita.com/yusuke_s_yusuke/items/03243490b1fd765fe61f

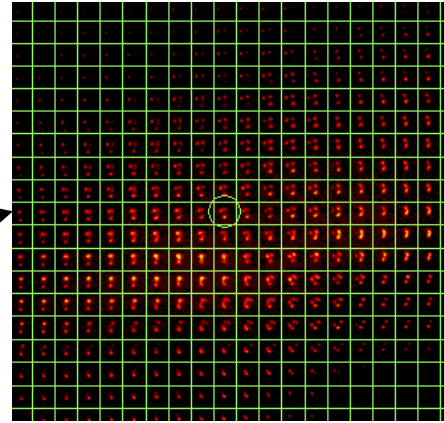
Optical Flowで写真の変化を計算すると…

人：顔の向きに移動

オブジェクト：変化なし

Optical Flowを使った解析手順

Optical Flowで一括で計算するのは困難



1. d_0 においてマスクの穴と像の対応付けを行う。

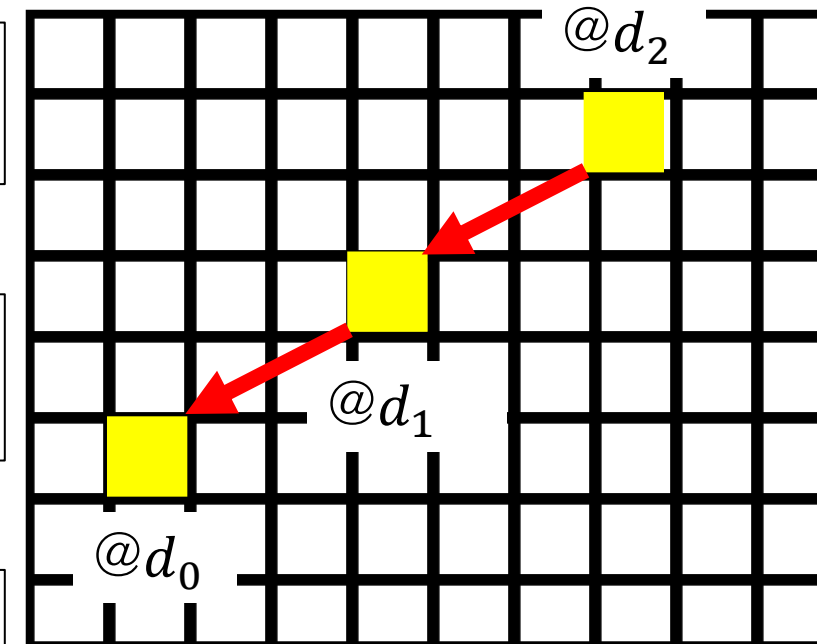
2. Optical Flowで d_{i+1} から d_i の光点の移動を計算する。

3. d_{i+1} のxy情報を、移動前の d_i のxy情報に書き換える。

5. 次の写真を撮影する。
(i に1を加算する)。

4. d_{i+1} のxy情報を書き出し、参照可能にする。

6. 補正したxy情報でエミッタンスを算出する。

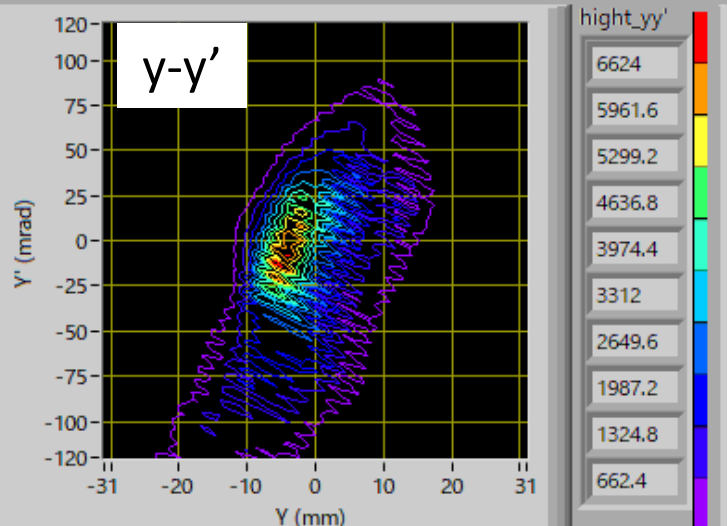
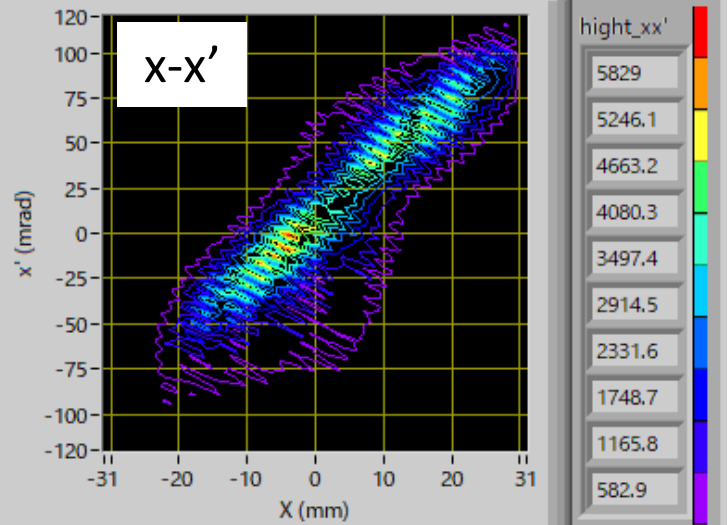


Outline

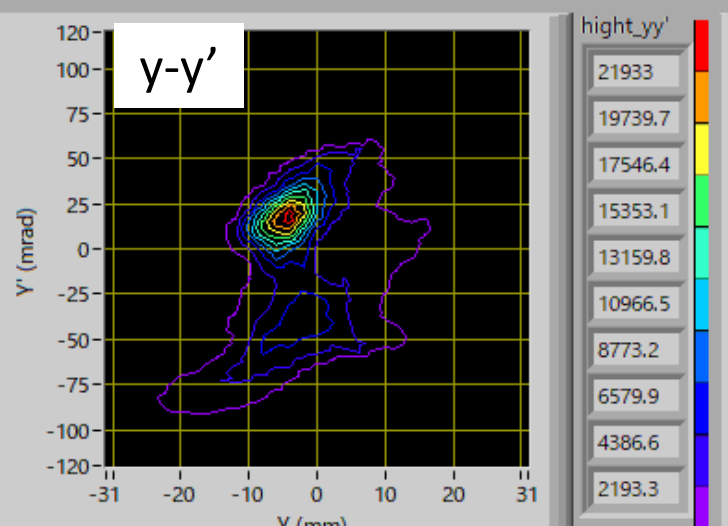
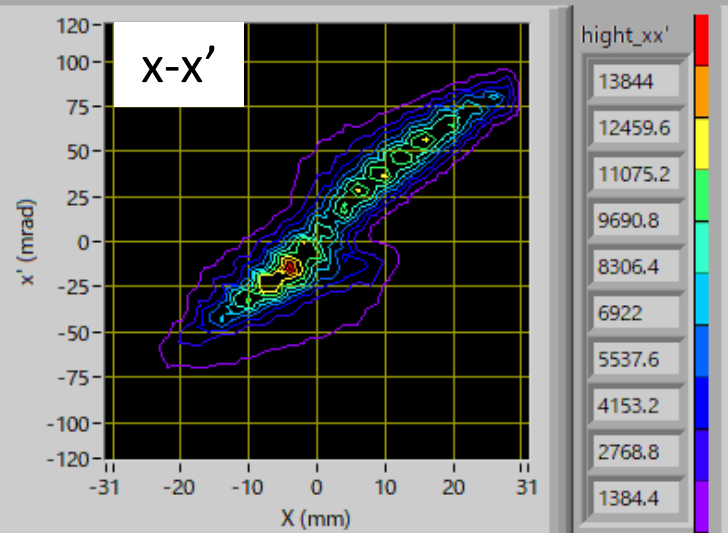
- Introduction
 - エミッタンス測定
 - ペPPERポット型エミッタンスモニター
- 高精度解析手法の開発
 - Optical Flowの概要
 - Optical Flowを使用した解析手法
- 解析結果
 - 従来手法との比較
 - ビーム輸送シミュレーションによる妥当性の検証
- まとめ・展望

従来の手法での解析結果 イオン種: $^{14}\text{N}^{4+}$, 引き出し電圧: 10 kV, 432 μA @第一診断箱

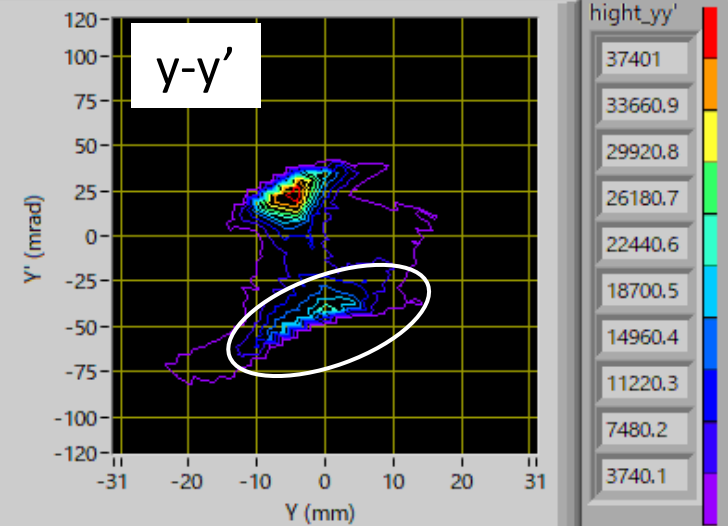
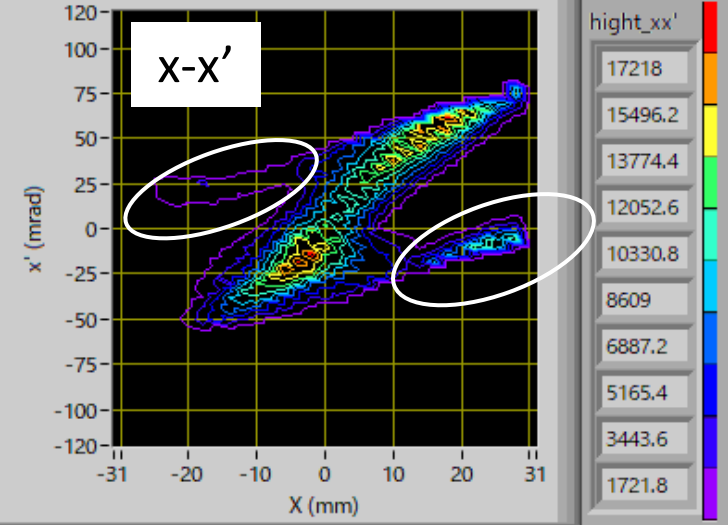
$d : 8.3 \text{ mm}$



$d : 17.7 \text{ mm}$



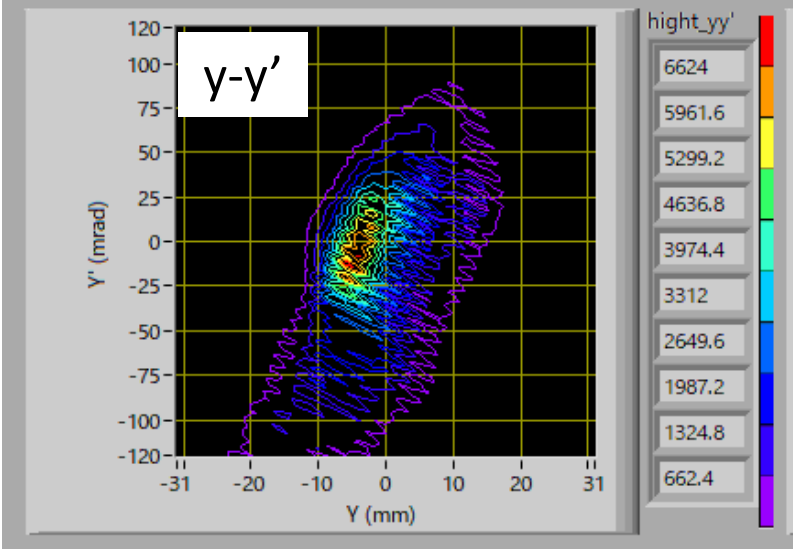
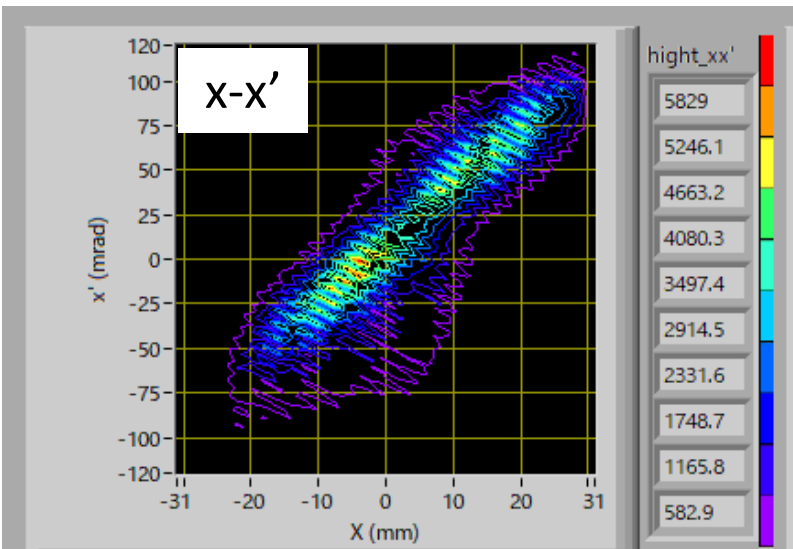
$d : 24.7 \text{ mm}$



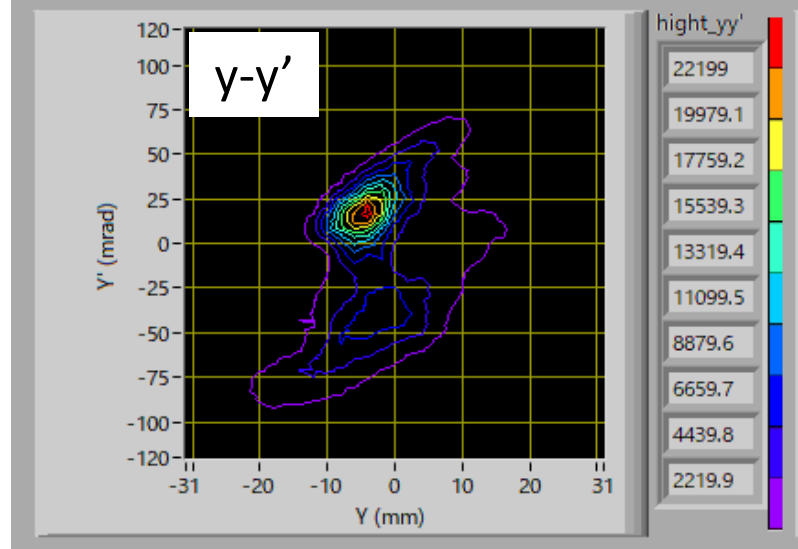
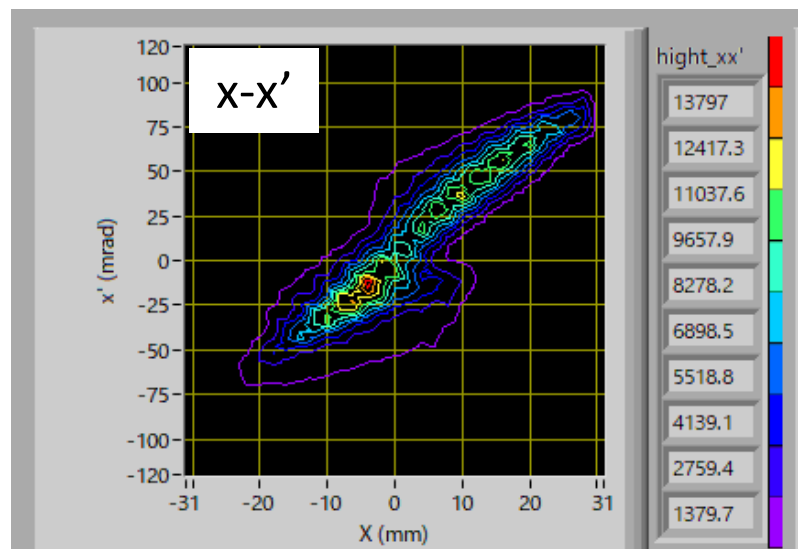
Optical Flowを使った解析結果

特許出願済み
出願番号: 2023-143339

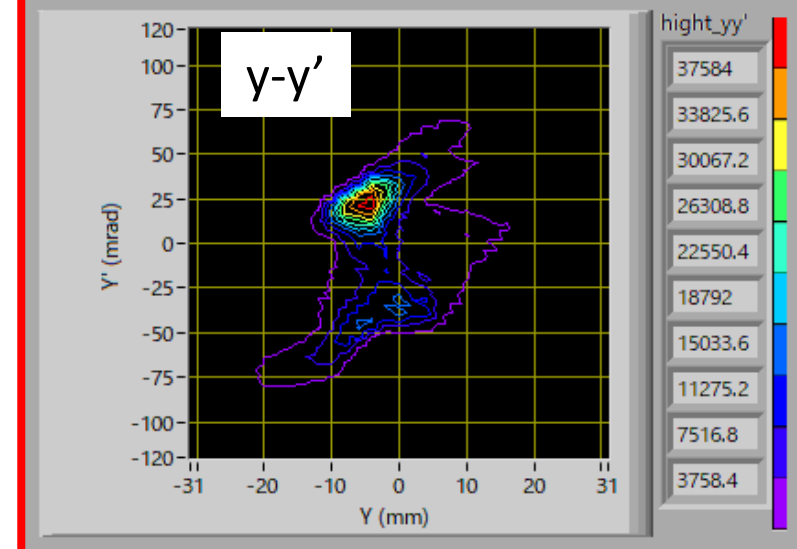
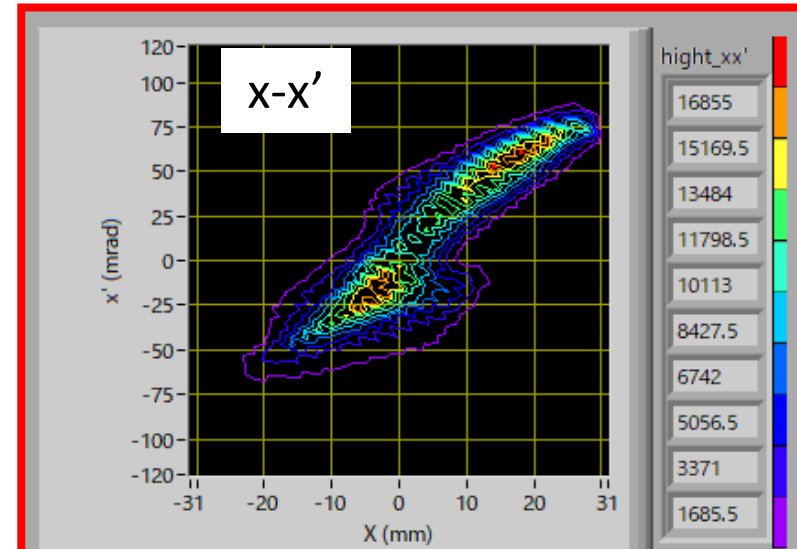
$d : 8.3 \text{ mm}$



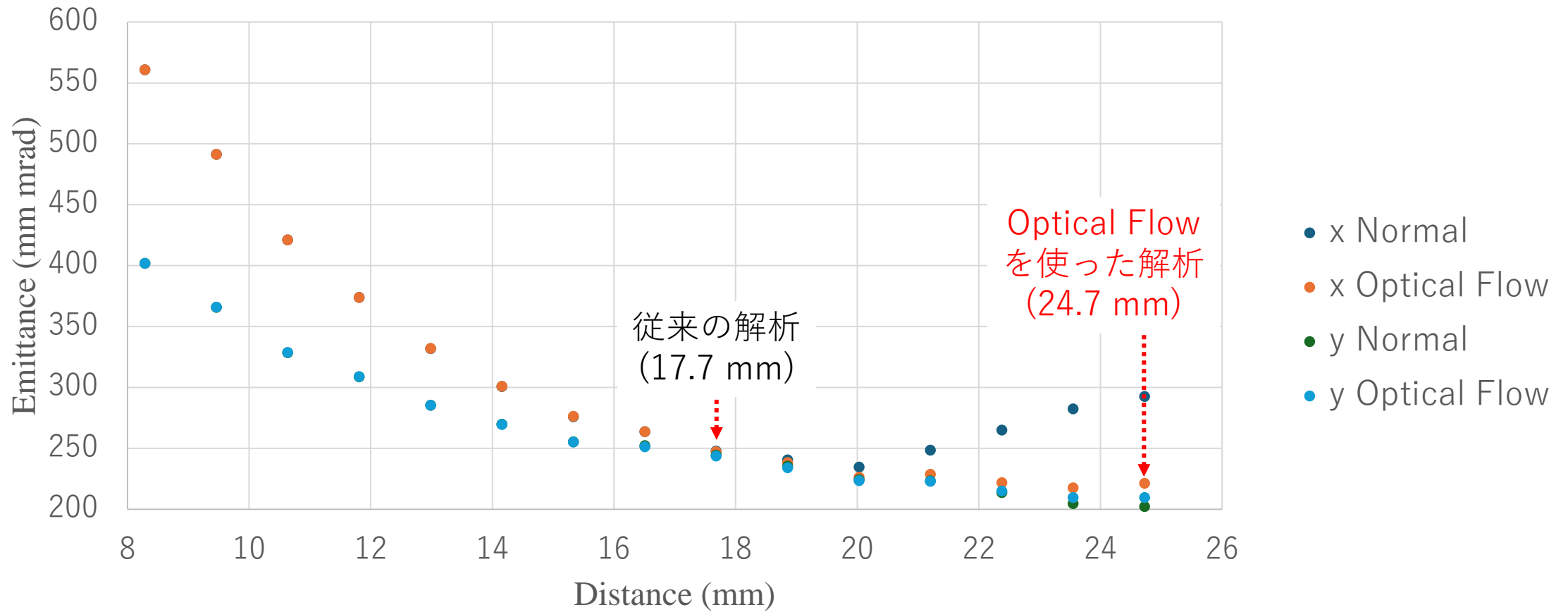
$d : 17.7 \text{ mm}$



$d : 24.7 \text{ mm}$



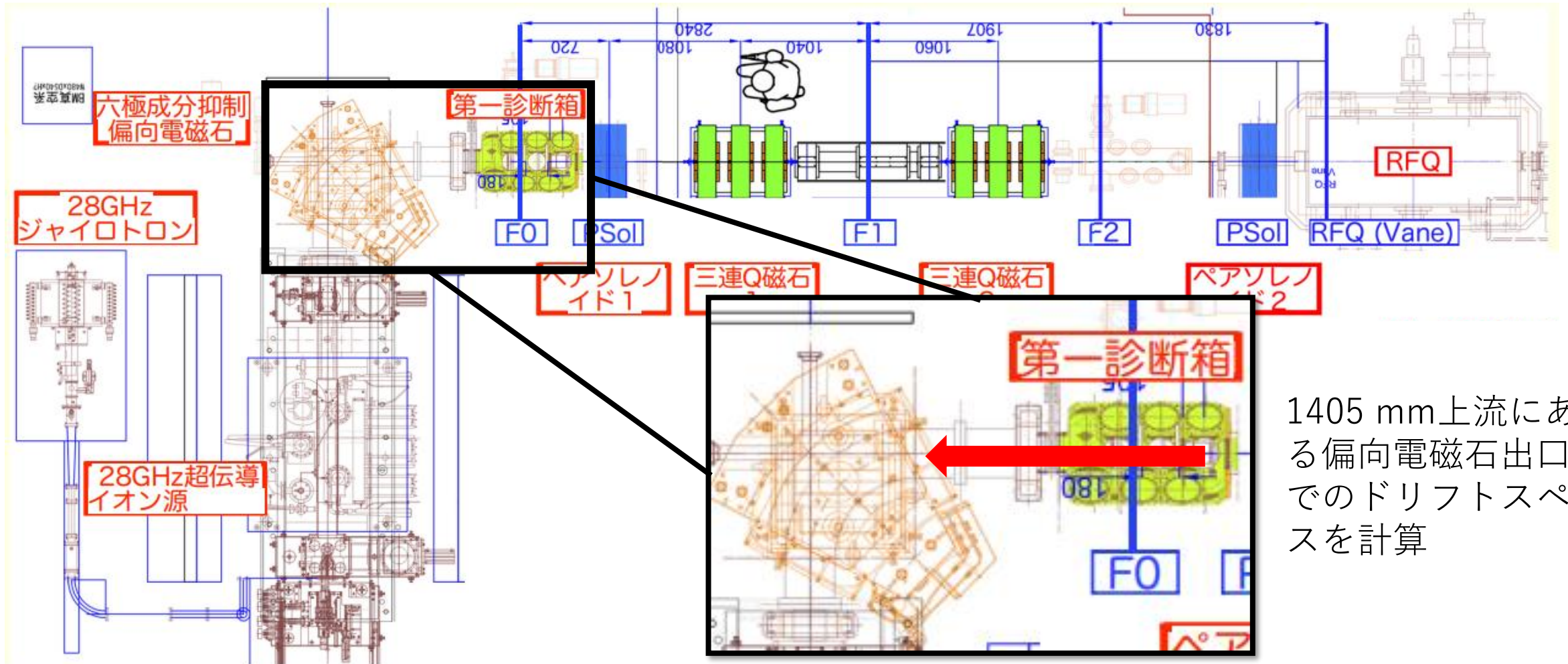
エミッタンス測定値の過大評価への効果



	17.7 mm	24.7 mm
x-x'	248 mm mrad	221 mm mrad
y-y'	244 mm mrad	210 mm mrad

エミッタンス値の過大評価を
10%以上改善

測定精度の確認



1405 mm上流にある偏向電磁石出口までのドリフトスペースを計算

同位置に比較できるエミッタンスモニターはない

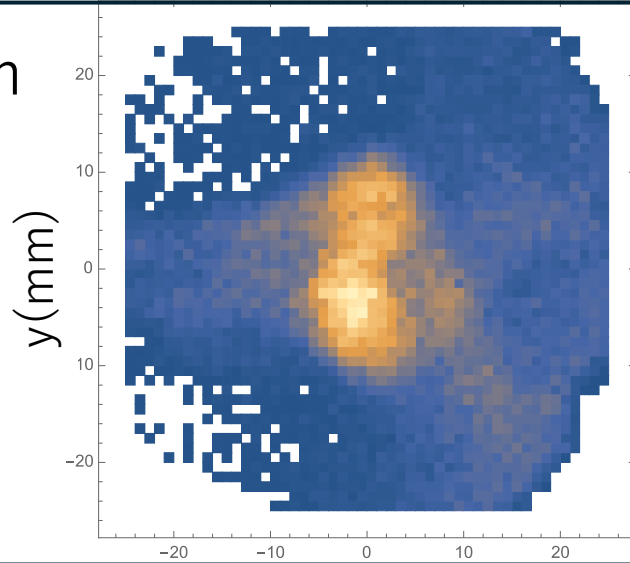
➤ 上流側への輸送計算の透過効率で'**過大評価の抑制**'について検証

'測定したビーム'の計算なので、上流への透過効率は100%になるはず

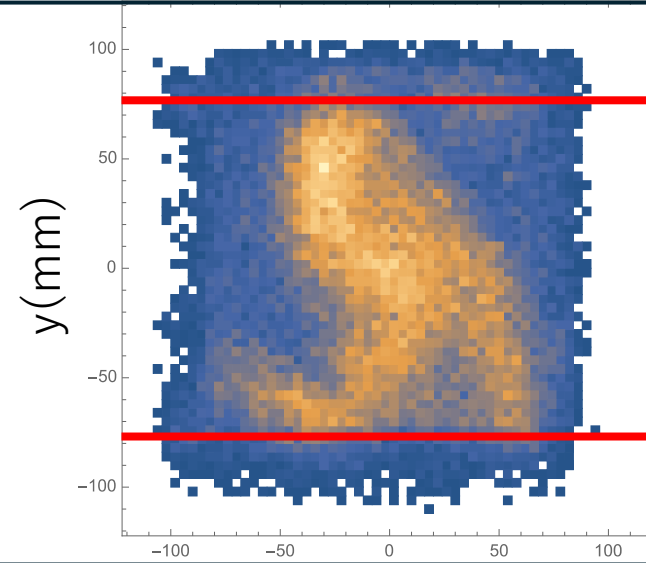
測定精度の確認

イオン種: $^{51}\text{V}^{13+}$, 引き出し電圧: 13.066 kV, 134 μA

d = 16.6 mm
(従来手法)



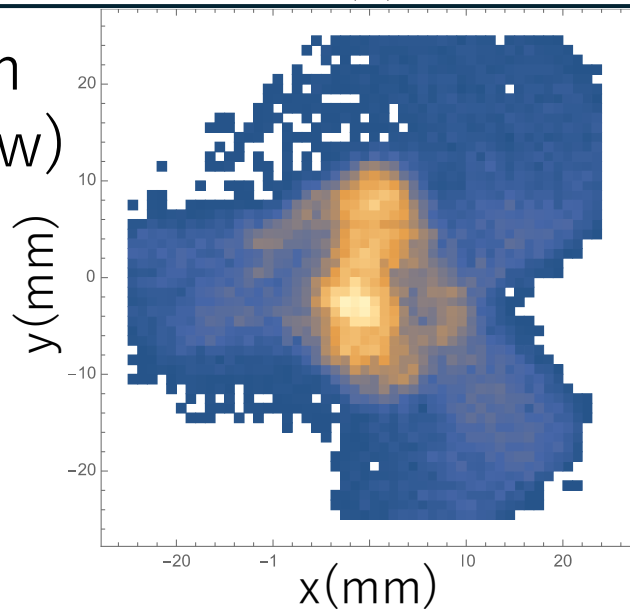
1405 mm
上流



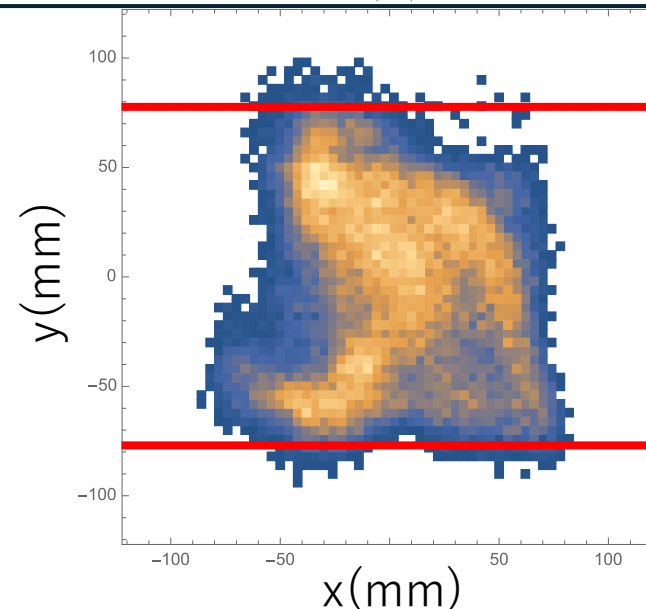
偏向電磁石の開口

通過効率
92.5 %

d = 24.7 mm
(Optical Flow)



1405 mm
上流



通過効率
99.3 %

➤ **測定精度向上**

まとめ

- マスクとスクリーン間の距離がPPEMの測定精度を決定
- 従来の解析手法では、過剰に距離を大きくすると穴と像の対応付けを誤る
 - 位相空間上で本来存在しない領域に分布が出現
 - 距離を小さくせざるを得ず、エミッタンスを過大評価
- 測定精度向上のため、Optical Flowを用いた新たな解析手法を開発
- Optical Flowを用いることで従来の解析手法上にマスクとスクリーン間の距離をとれるようになり、測定精度向上を実現
 - エミッタンス測定値の**過大評価を10%以上改善**
 - 輸送計算によってエミッタンス測定精度のを確認
 - **ボタン一つで測定・解析が可能**
- **理研仁科センター全てのイオン源へのインストールの準備中**
 - RILAC LEBTには2台設置済み
 - 18GHzECRイオン源にはインストール済み

今後の発展

- 特にECRイオン源ではビームの形状はきれいなガウシアン分布ではない。
 - ビームはプラズマの状態を反映していると考えられる。
- ➔ プラズマ診断等と組み合わせ、イオン源とビームの関係について探索を行う

