



# 高精度ペツパーポット型 エミッタンスモニターの開発

森田 泰之<sup>1</sup>, 長友 傑<sup>1</sup>, 中島悠太<sup>2</sup>

<sup>1</sup>理化学研究所仁科加速器科学研究センター

<sup>2</sup>大阪大学データビリティフロンティア機構

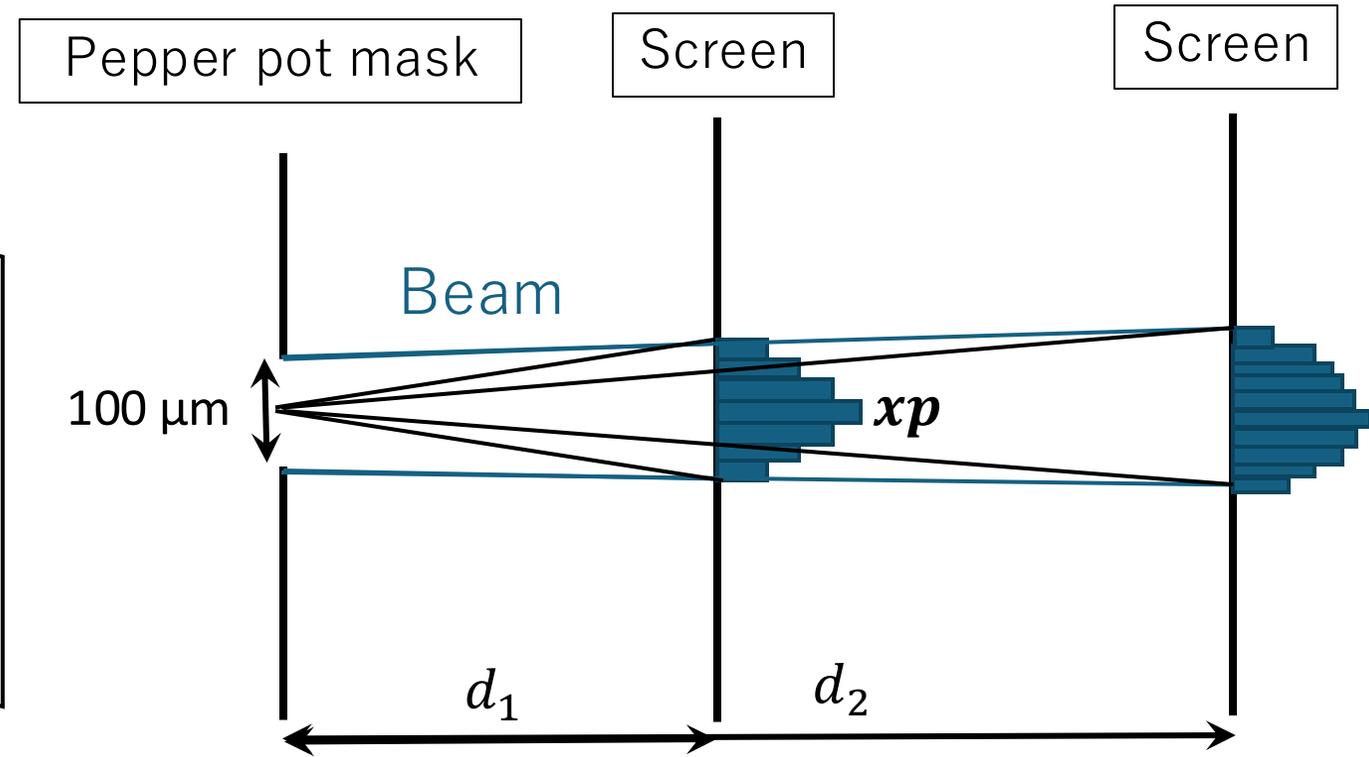
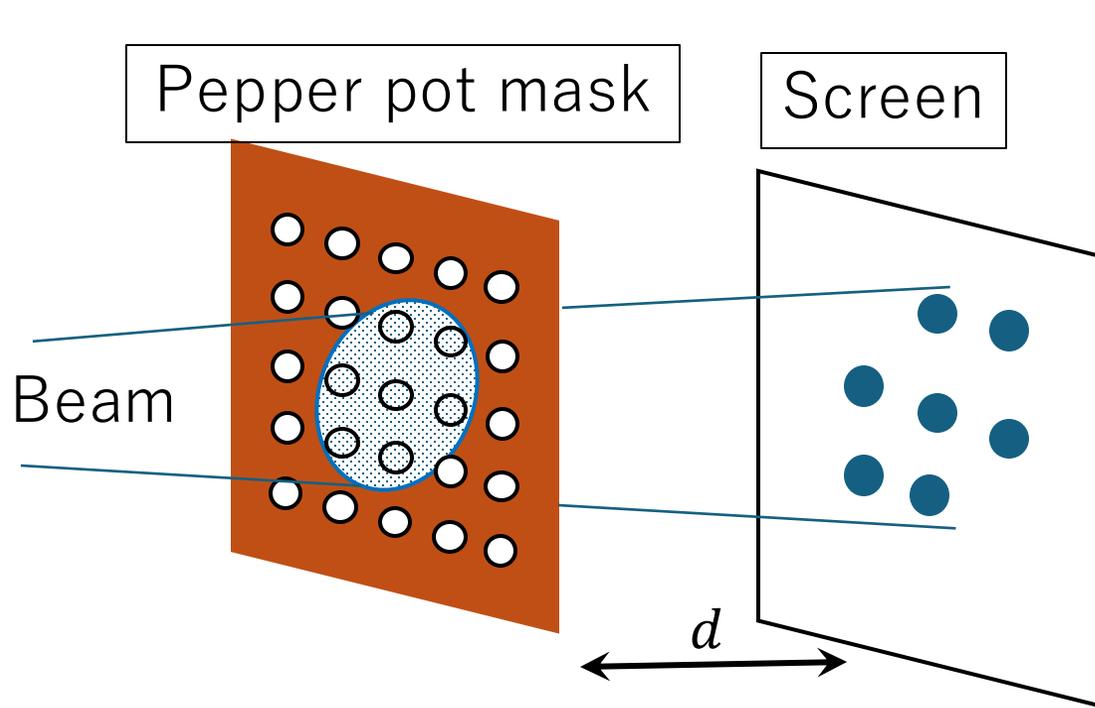
# Outline

- Introduction
  - ペPPERポット型エミッタンスモニターの概要
  - RILAC LEBTのペ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
  - 高精度解析手法のコンセプト
  - Optical Flowについて
  - 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

# 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

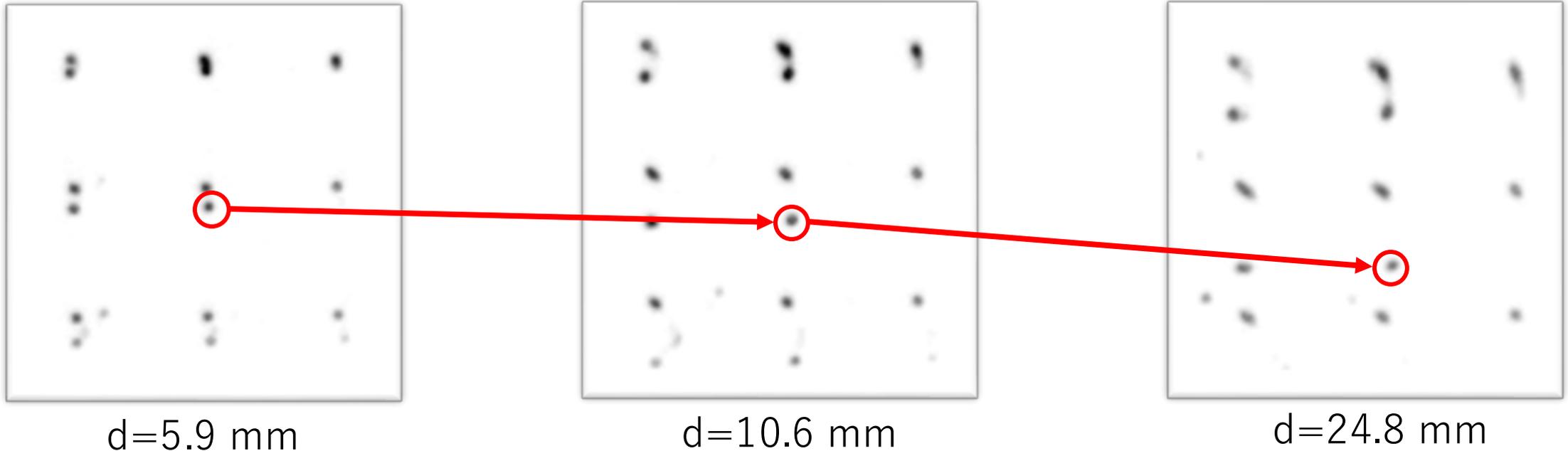
Large  $d$  : 角度分解能 ☺ エミッタンスを適正評価

**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 😊

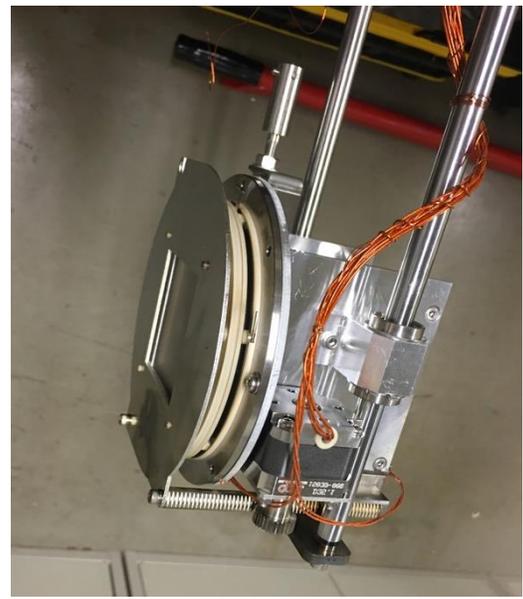
Large  $d$ : マスクの穴と像の対応付け ☹️

◆ 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

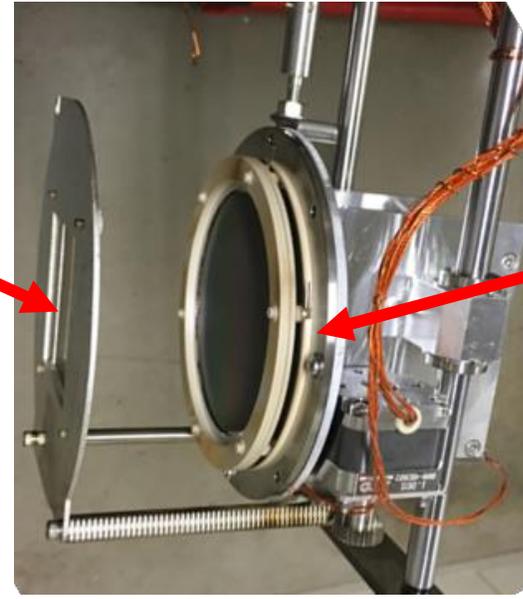
➤ RILAC LEBTでは装置に工夫をして活用してきた

# マスク・スクリーン距離可変式PPEM

d 最小

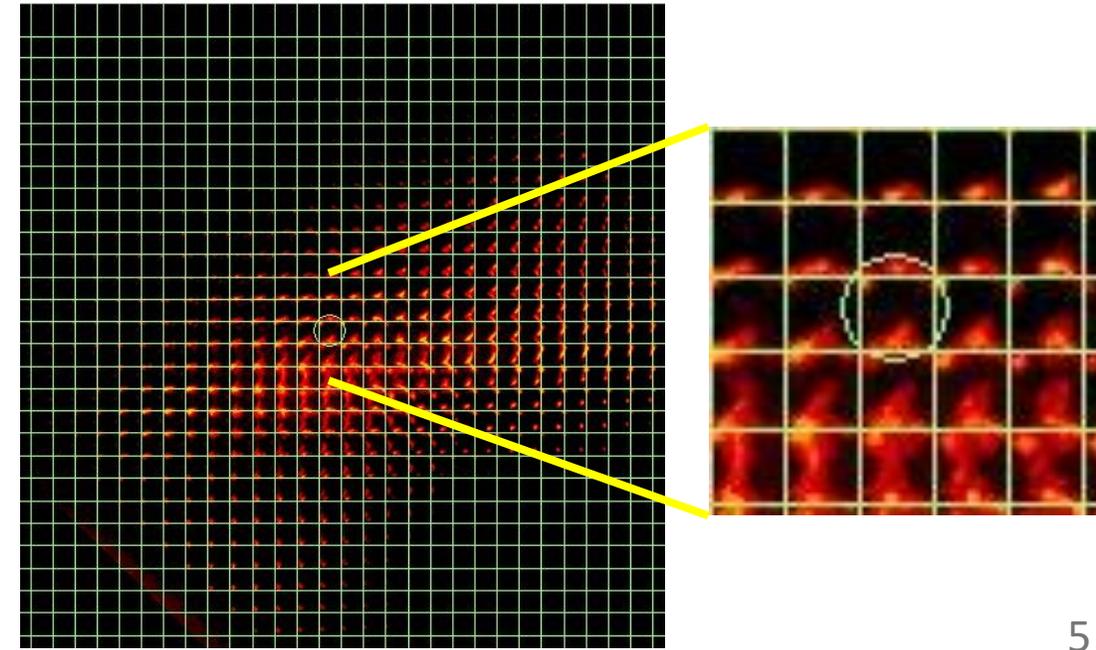
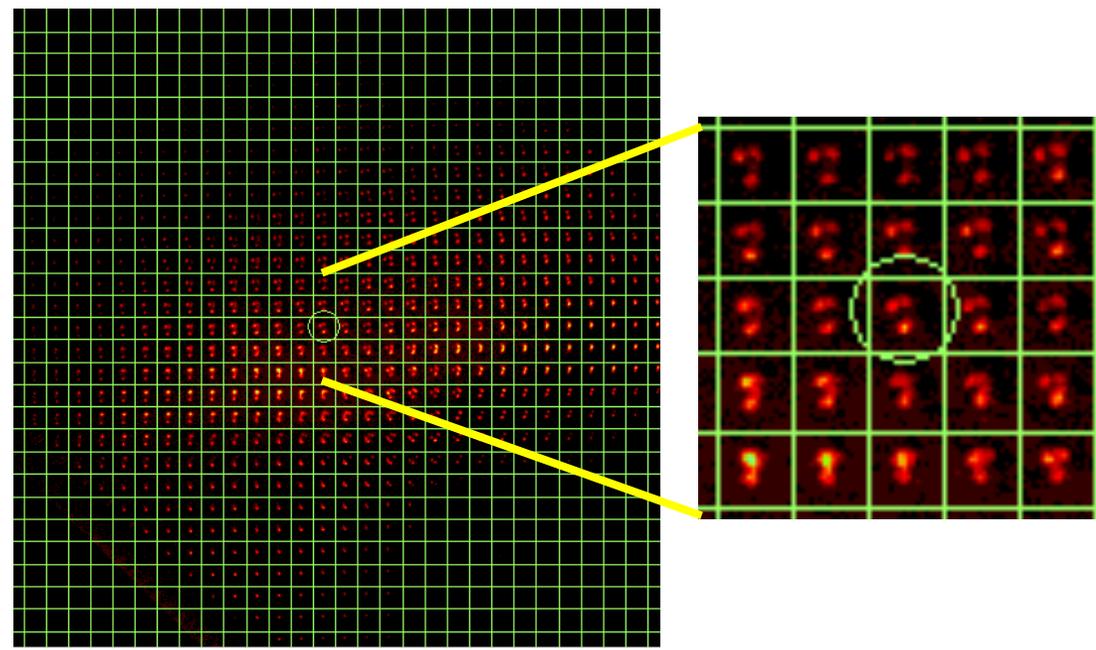


d 最大



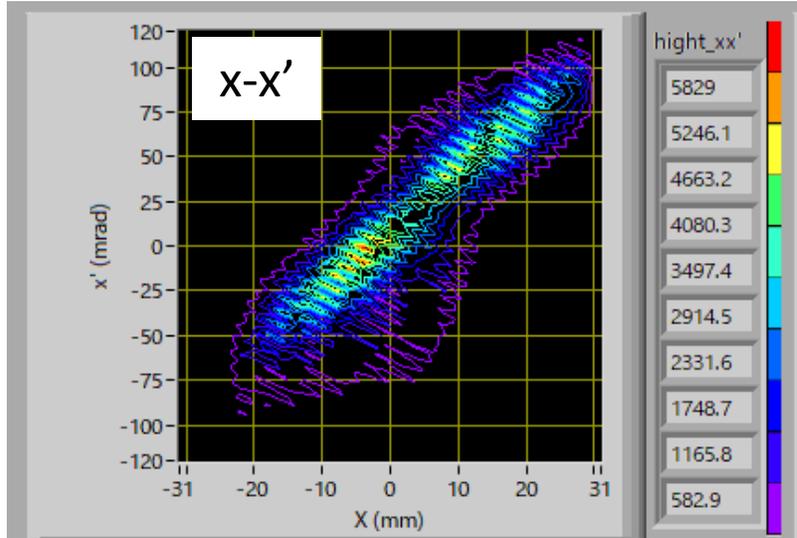
ペッパーポットマスク

マイクロ  
チャンネルプレート  
(スクリーン)

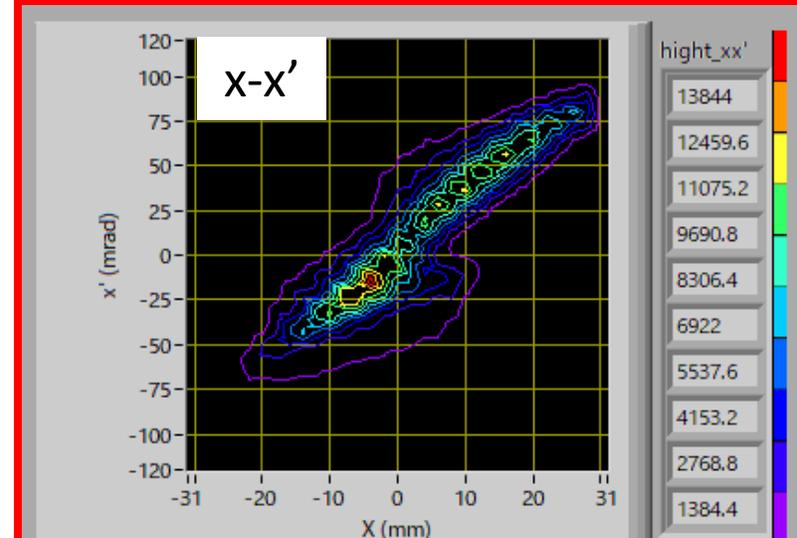


従来の手法での解析結果 イオン種:  $^{14}\text{N}^{4+}$ , 引き出し電圧: 10 kV, 432 e $\mu$ A@第一診断箱

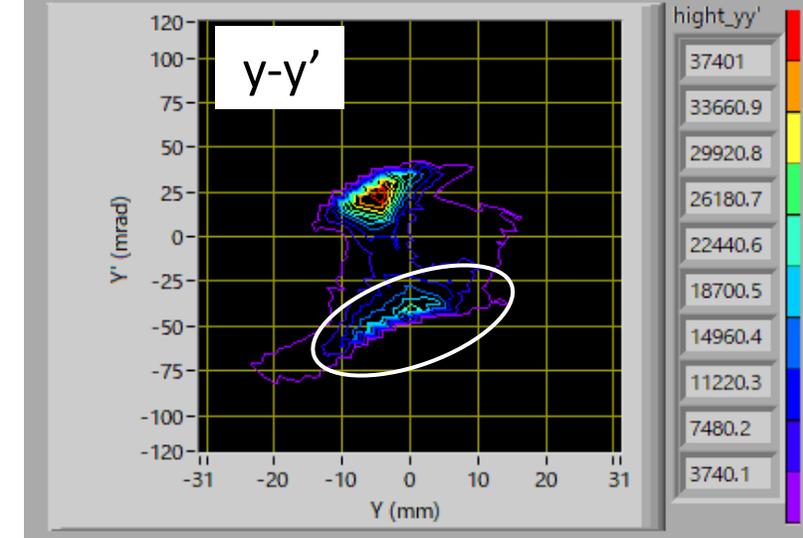
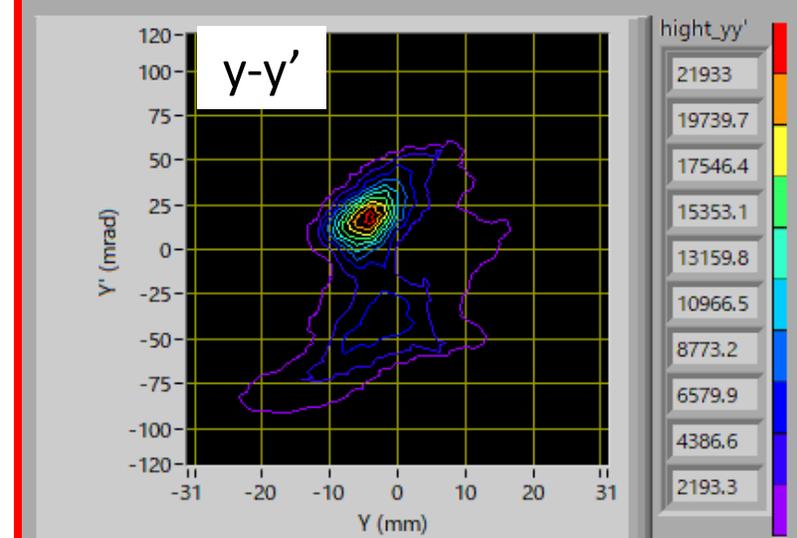
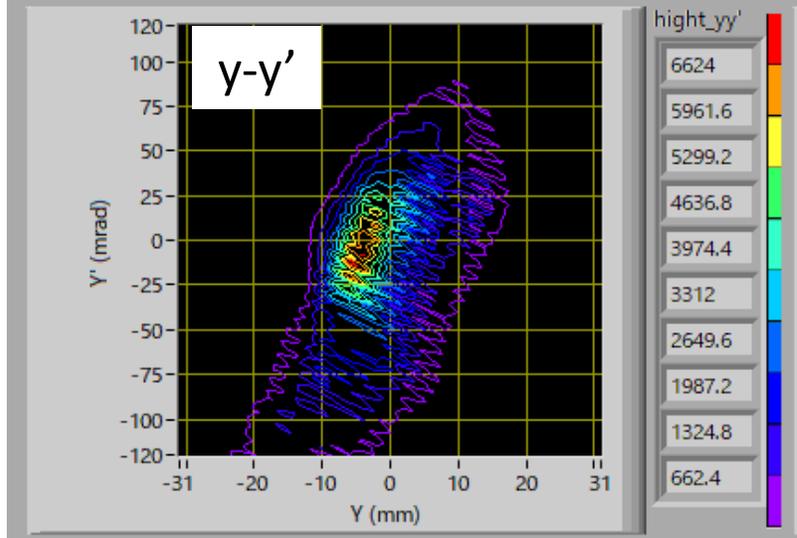
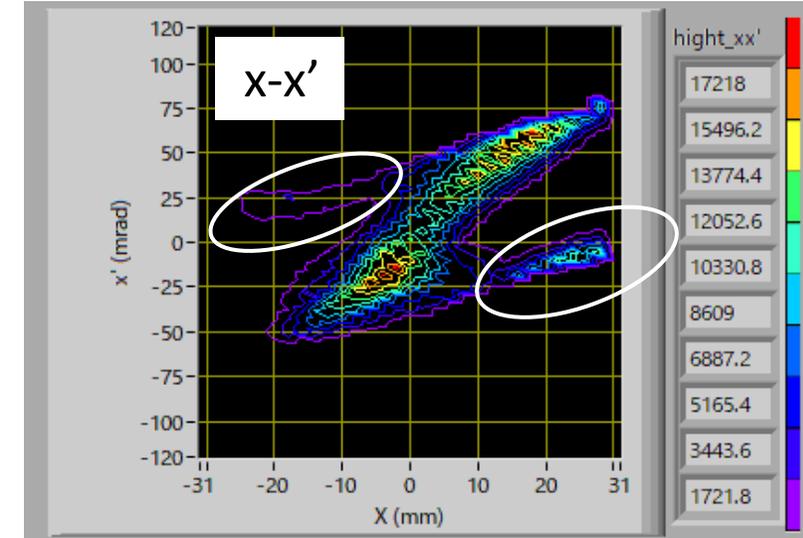
$d : 8.3 \text{ mm}$



$d : 17.7 \text{ mm}$



$d : 24.7 \text{ mm}$



# Outline

- Introduction
  - ペPPERポット型エミッタンスモニターの概要
  - RIKEN RIBF LEBTのペ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
  - 高精度解析手法のコンセプト
  - Optical Flowについて
  - 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

# スクリーン間の距離が大きい際の対応付け手法

過剰な距離でマスクの穴と像の対応付けを誤るのは解析で修正可能

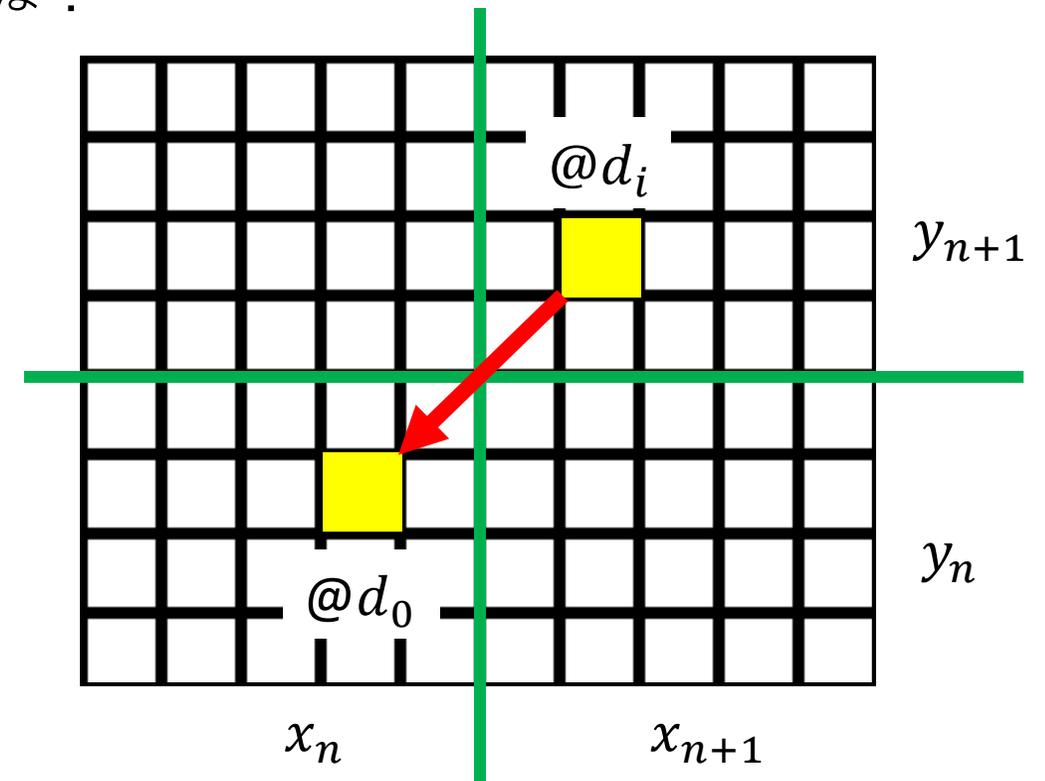
## ◆ 新たな解析手法の開発

### 解析手法の案

- ◆ 距離を変えた際のスクリーン上の変化を追跡  
↑ 追跡する手法は？

画像の変化を追跡する **Optical Flow** を用いて補正を行う

- 像の変化を逆算することで、 $d_0$ での穴の位置との対応付け  $(x_n, y_n)$  を引き継いだ解析が可能
- 複数の  $d$  での測定が必要 (測定時間が長くなる) が、測定精度は向上させられる



# Optical Flowとは？

Q. 左の写真から、  
何がどう変わった？



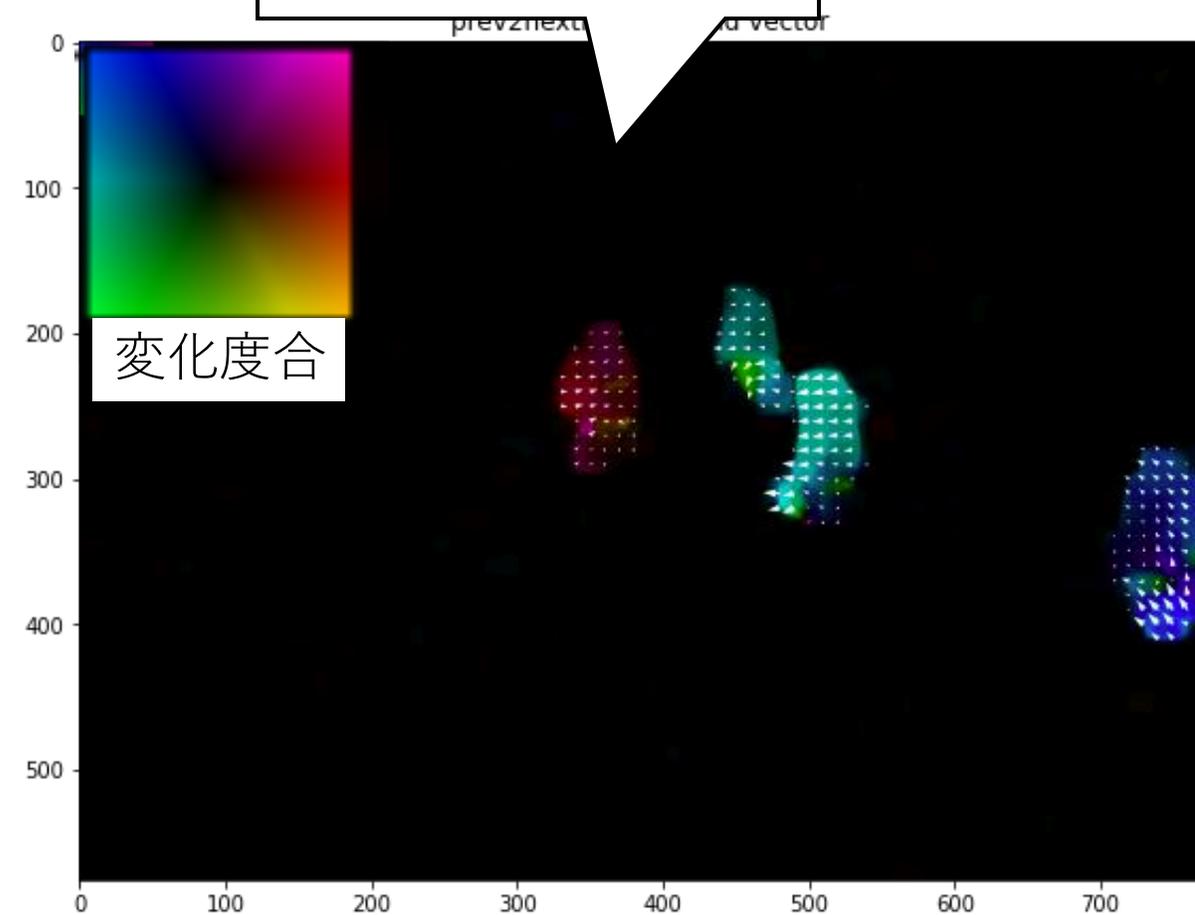
[https://qiita.com/yusuke\\_s\\_yusuke/items/03243490b1fd765fe61f](https://qiita.com/yusuke_s_yusuke/items/03243490b1fd765fe61f)

**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？



A. 左の写真から  
ここが変わった！



[https://qiita.com/yusuke\\_s\\_yusuke/items/03243490b1fd765fe61f](https://qiita.com/yusuke_s_yusuke/items/03243490b1fd765fe61f)

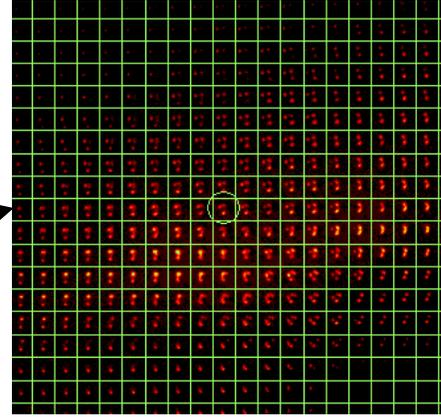
Optical Flowで写真の変化を計算すると…

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。

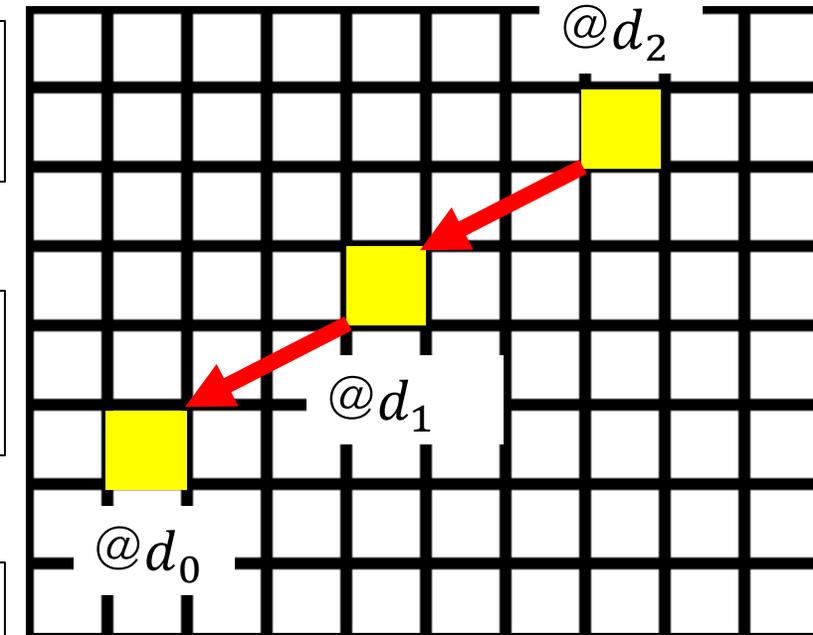
2. Optical Flowで $d_{i+1}$ から $d_i$ の光点の移動を計算する。

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。

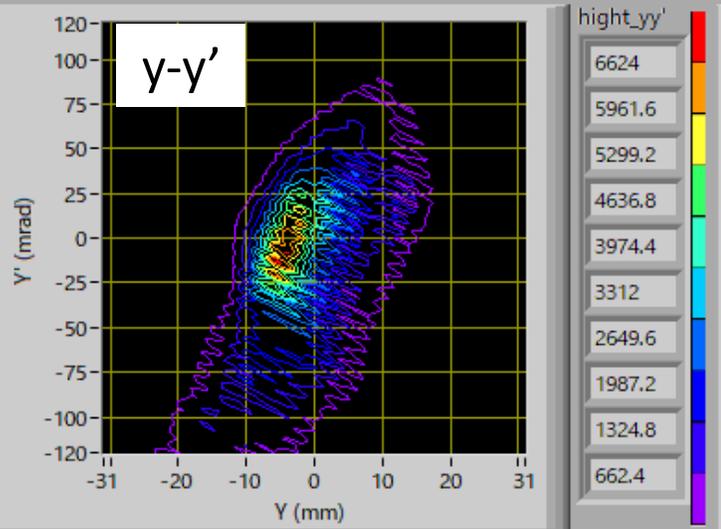
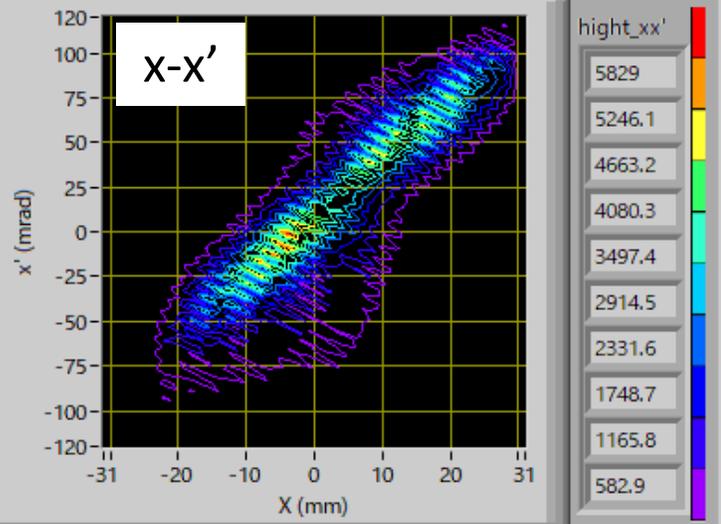


# Outline

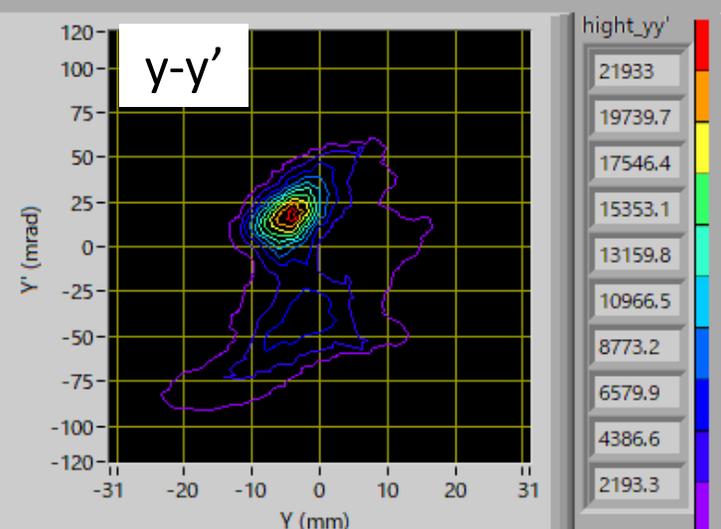
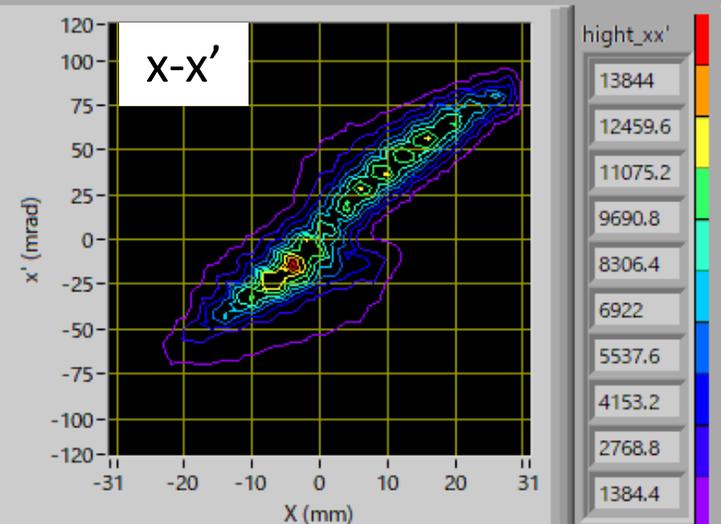
- Introduction
  - ペPPERポット型エミッタンスモニターの概要
  - RIKEN RIBF LEBTのペPPERポット型エミッタンスモニター
- 高精度解析手法の開発
  - 高精度解析手法のコンセプト
  - Optical Flowについて
  - Optical Flowを使用した解析手法
- 解析結果
  - 従来手法との比較
  - ビーム輸送シミュレーションによる妥当性の検証
- まとめ・展望

# 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 $\mu\text{A}$ @第一診断箱

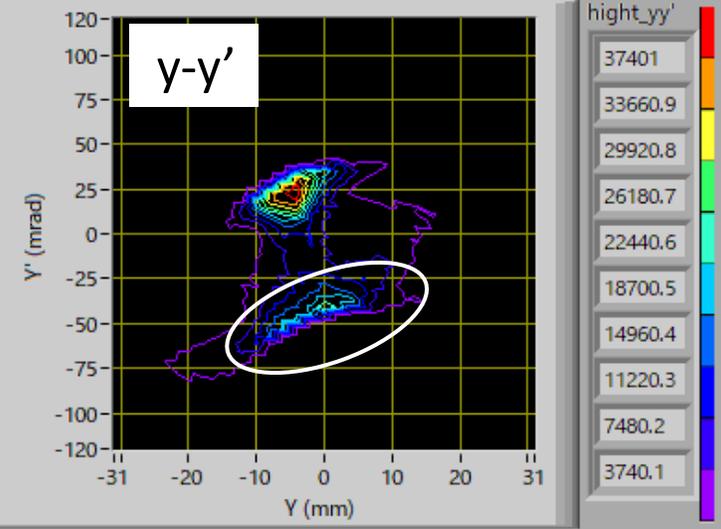
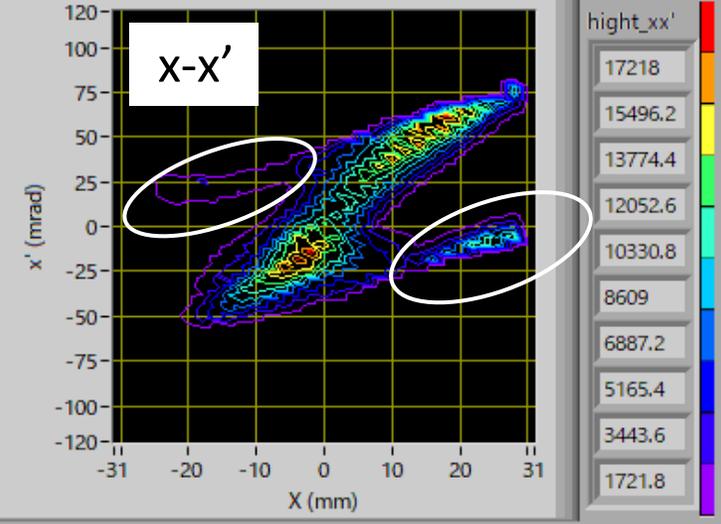
$d : 8.3 \text{ mm}$



$d : 17.7 \text{ mm}$

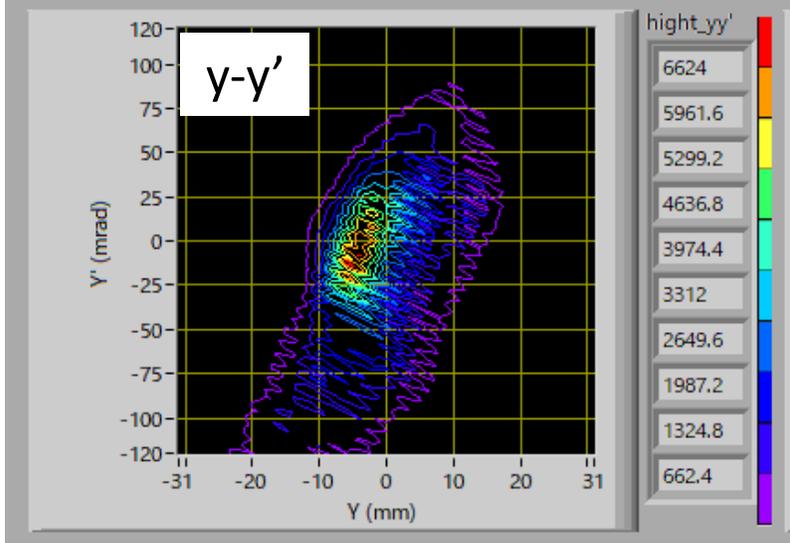
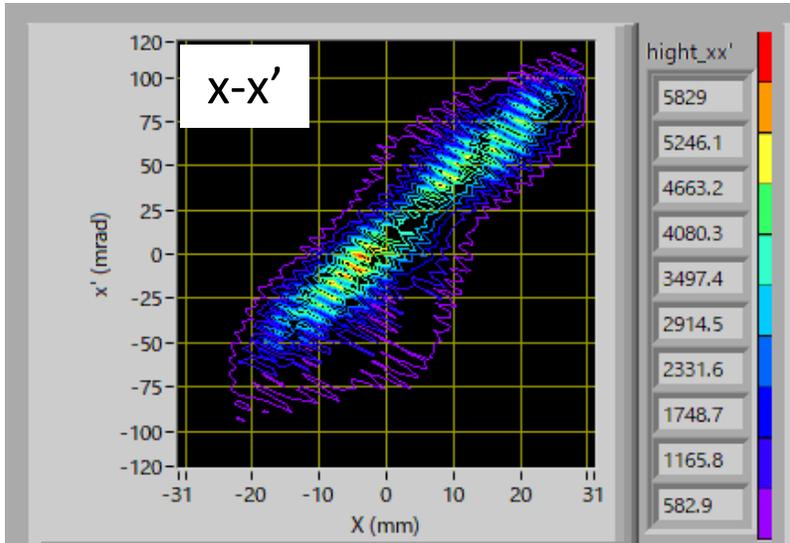


$d : 24.7 \text{ mm}$

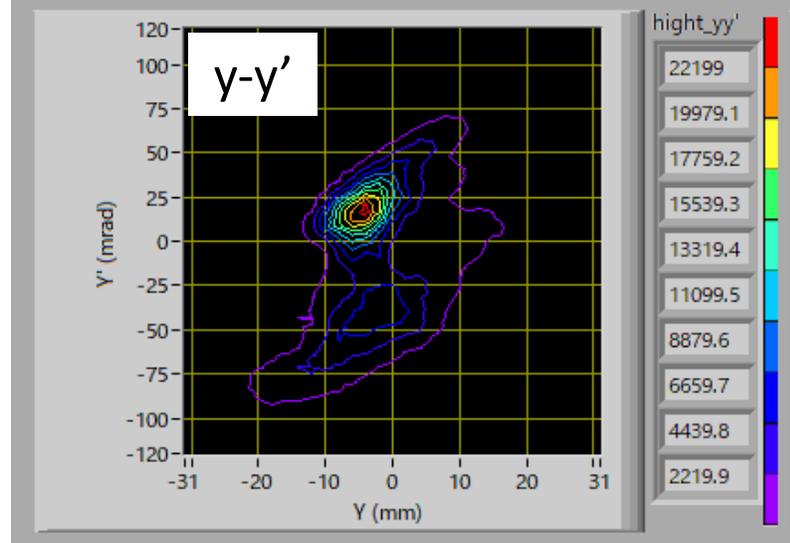
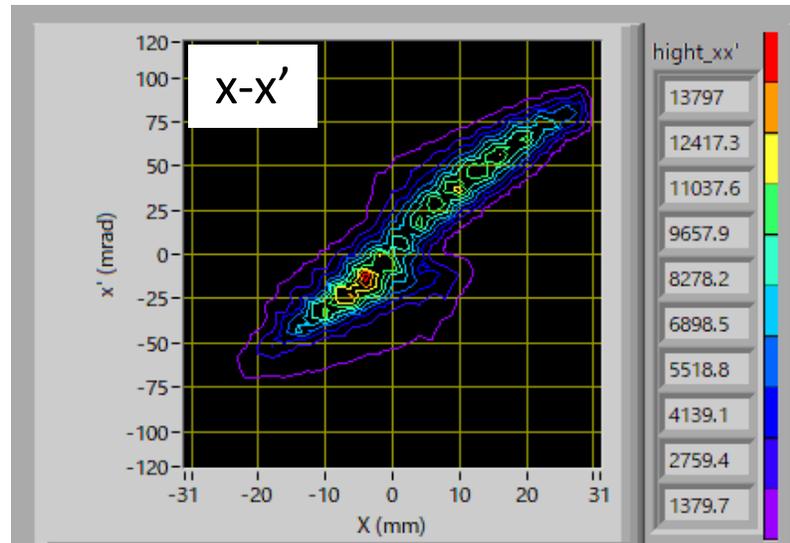


# Optical Flowを使った解析結果

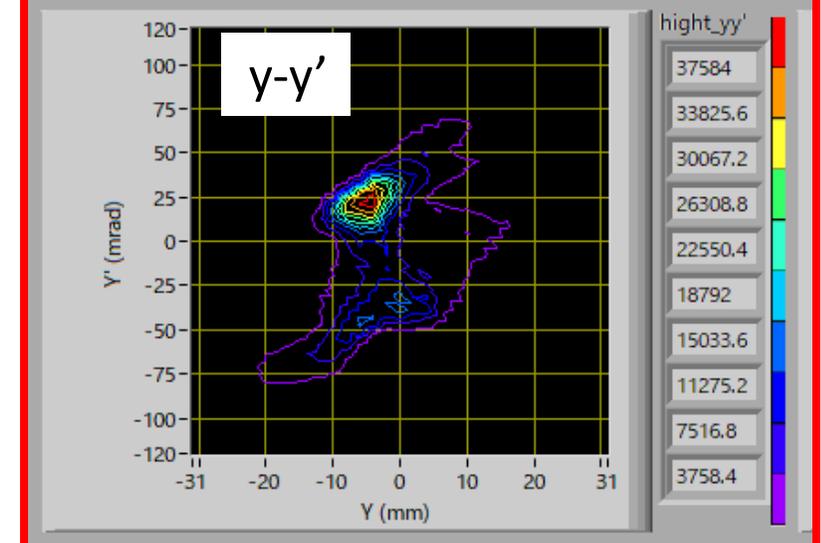
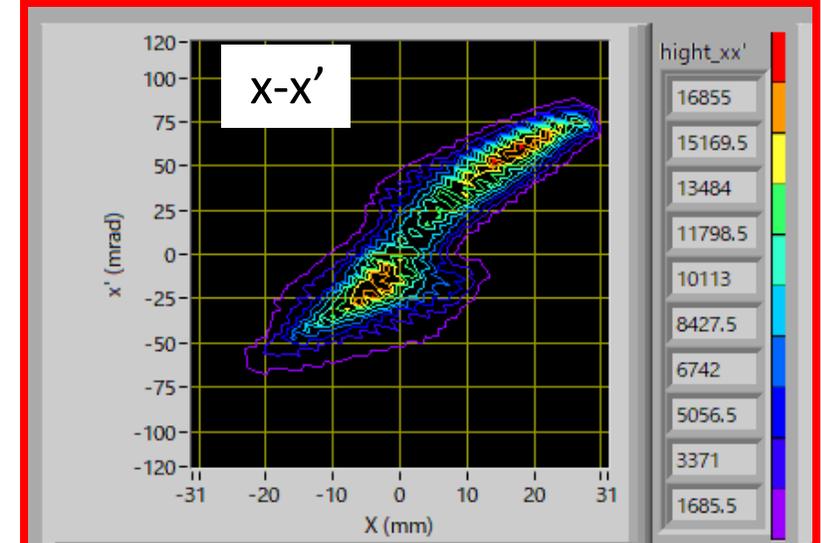
$d : 8.3 \text{ mm}$



$d : 17.7 \text{ mm}$



$d : 24.7 \text{ mm}$



# LabVIEWを使った解析システムの開発

特許出願済み  
出願番号: 2023-143339

**START** **STOP**

Obtained PICT Save Folder:

Sub Folder:  Run Number:

For Debug: EM Dev, SMD Control, OFF Line Ana.

PICT Folder (Offline):

Sub Folder (Offline):  Wait For Offline (ms):

Flow Path:

Python Path:

Data Saved Folder:

Decr/Incr:

Pause:  Select PICT:  Num of PICTs:

**Calculate Flow** **O.F. Processing**

Off. Processing Time (min):

Thrr. for Emit:  Frac Over Thr (%):

Save Offline Ana?:  TimeStamp:

OffLine Ana. folder name:

**Device Control** **Main Display**

**Captured Image** **Grid** **Threshold And ROI** **2D Emittance** **Drifted** **Calib. Data** **For Debug**

bin\_xy: max\_h:  min\_h:  binW\_h:  bin\_x'y': max\_v:  min\_v:  binW\_v:

Averages: Mean\_X:  Mean\_Y:  Mean\_Y':  Mean\_X':  Check Unity:  Sum\_I:

**RMS Emittances**

epsilon\_4D (mm<sup>2</sup>mrad<sup>2</sup>mrad):

Eigen Emittances (mm<sup>2</sup>mrad):

epsilon\_X (mm<sup>2</sup>mrad):  epsilon\_XY (mm<sup>2</sup>mrad):  epsilon\_X' (mm<sup>2</sup>mrad):

epsilon\_Y (mm<sup>2</sup>mrad):  epsilon\_YX (mm<sup>2</sup>mrad):  epsilon\_Y' (mm<sup>2</sup>mrad):

**beam matrix**

59.5833	56.0824	-10.8813	-3.82982
56.0824	92.3438	-7.76198	-5.99717
-10.8813	-7.76198	61.5419	-32.1875
-3.82982	-5.99717	-32.1875	198.904

XX'\_Matrix:  XY'\_Matrix:  X'Y'\_Matrix:

YY'\_Matrix:  XY''\_Matrix:  X'Y''\_Matrix:

**計算時間 約1分/15枚**

# LabVIEWを使った解析システムの開発

特許出願済み  
出願番号: 2023-143339

**Device Control**

START STOP

Obtained PICT Save Folder

Sub Folder: 1 Run Number: 150

For Debug: EM Dev, SMD Control, OFF Line Ana.

PICT Folder (Offline): 20240403\_L3

Sub Folder (Offline): 1 Wait For Offline (ms): 200

Flow Path: C:\Users\PPEM\Desktop\PPEM\_vis\cal\_csv

Python Path: C:\User...anaconda3\python.exe

Data Saved Folder: D:\PPEM

Decr/Incr

Pause Select PICT Num of PICTs: 19 19

Selected File Name: 20240403\_0918\_10\_180stp\_34.BMP Load PICT

Fix Grid? Calc. Drift?

Calculate Flow Use Flow Res

O.F. Processing O.F. Elapsed Time (min): 2.142439

Thresh. (%) Frac Over Thr (%): 0 100

Save Offline Ana? TimeStamp

OffLine Ana. folder name

**Main Display**

Captured Image Grid Threshold And ROI 2D Emittance Drifted Calib. Data For Debug

bin\_xy: max\_h: 31 min\_h: -31 binW\_h: 2

bin\_x'y: max\_v: 150 min\_v: -150 binW\_v: 4

Averages: Mean\_X: 0.671941 Mean\_Y: 0.822143 Mean\_Y': 0.417126 Mean\_X': -0.638068 Check Unity: 1 Sum\_I: 2.36591E+6

**RMS Emittances**

epsilon\_4D (mm\*mm\*mrad\*mrad): 1769.22

Eigen Emittances (mm\*mrad): 35.4673 49.8832

epsilon\_X (mm\*mrad): 36.983

epsilon\_XY (mm\*mm): 55.1323

epsilon\_XY' (mm\*mrad): 70.1068

epsilon\_Y (mm\*mrad): 49.5198

epsilon\_XY' (mrad\*mrad): 92.3112

epsilon\_YX' (mm\*mrad): 72.8532

**beam matrix**

58.4905	66.7333	-10.5918	-10.0294
66.7333	99.5217	-7.42501	-3.5519
-10.5918	-7.42501	53.885	46.5662
-10.0294	-3.5519	46.5662	85.7498

XX'\_Matrix XY\_Matrix X'Y\_Matrix

58.490	66.733	58.490	-10.59	99.521	-7.425
66.733	99.521	-10.59	53.885	-7.425	53.885

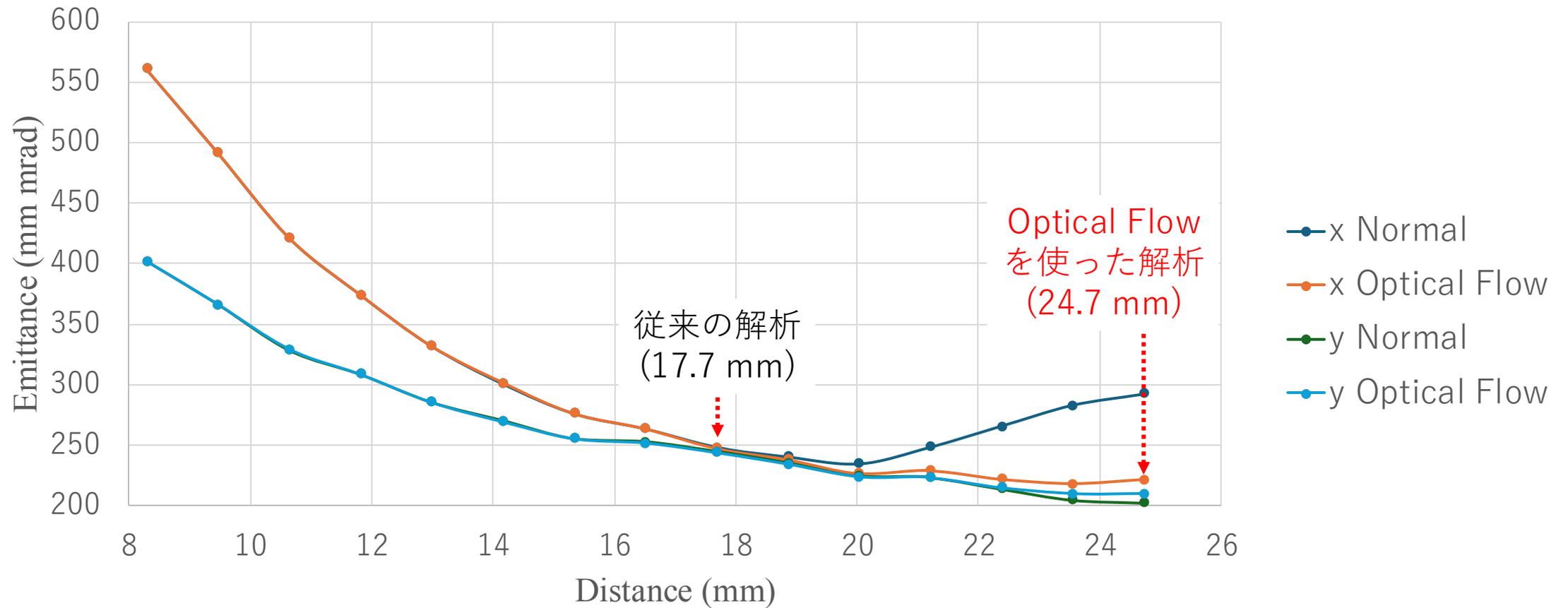
YY'\_Matrix XY'\_Matrix X'Y'\_Matrix

53.885	46.566	58.490	-10.02	99.521	-3.551
46.566	85.749	-10.02	85.749	-3.551	85.749

**Device Control**

**Main Display**

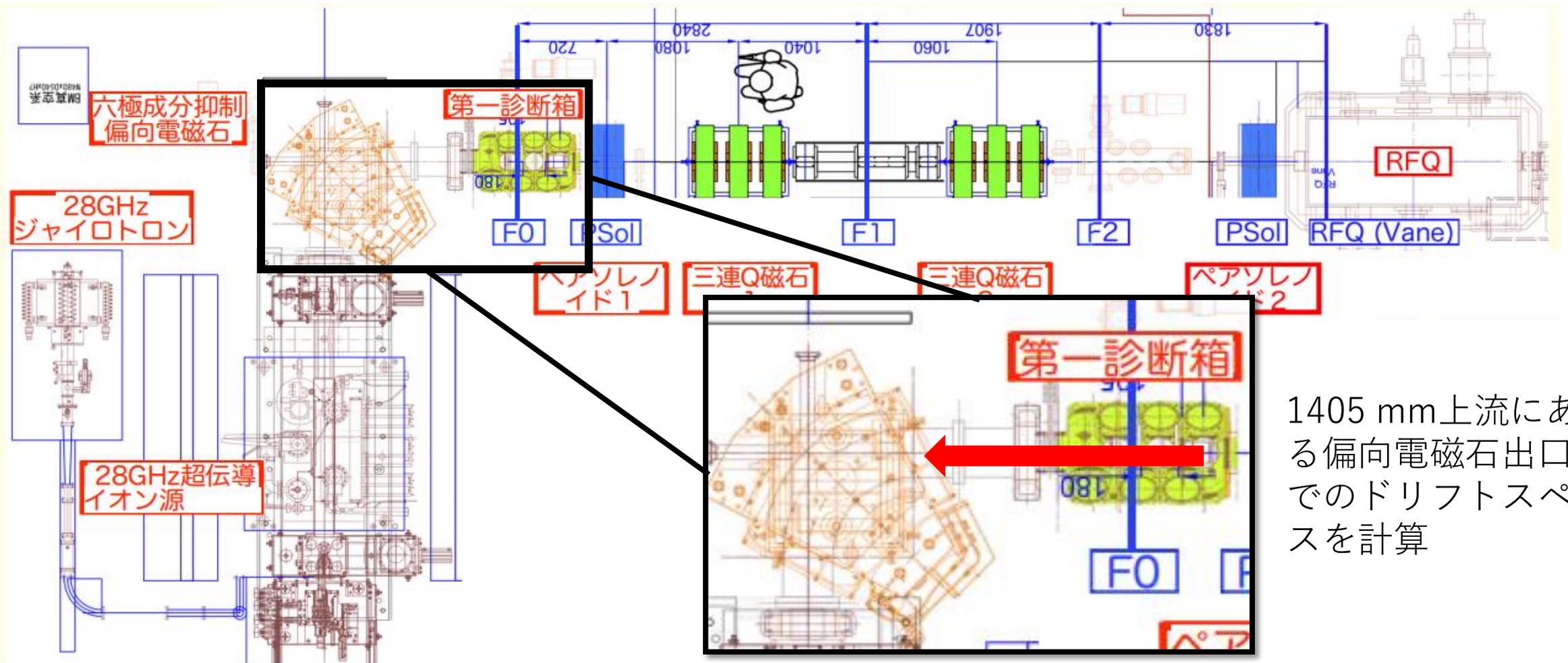
# エミッタンス測定値の過大評価への効果



	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%以上抑制  
 ➤ ビーム輸送シミュレーション  
を用いて妥当性を検証

# 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

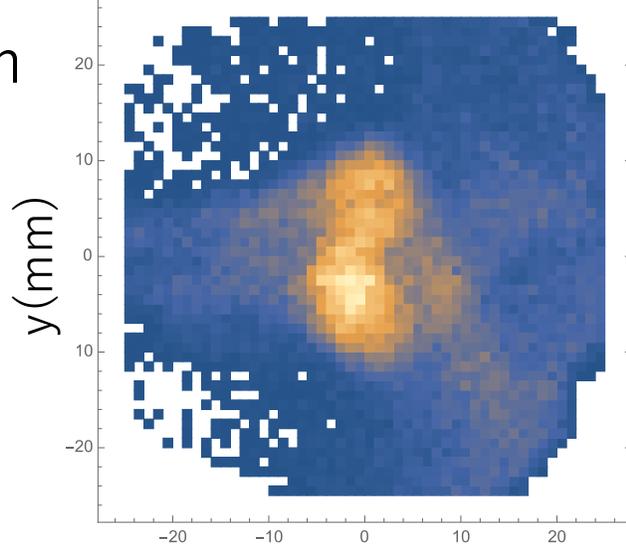
➤ 上流側への輸送計算の透過効率で'**過大評価の抑制**'について検証

'届いたビーム'の計算なので、上流への透過効率は100%になるはず

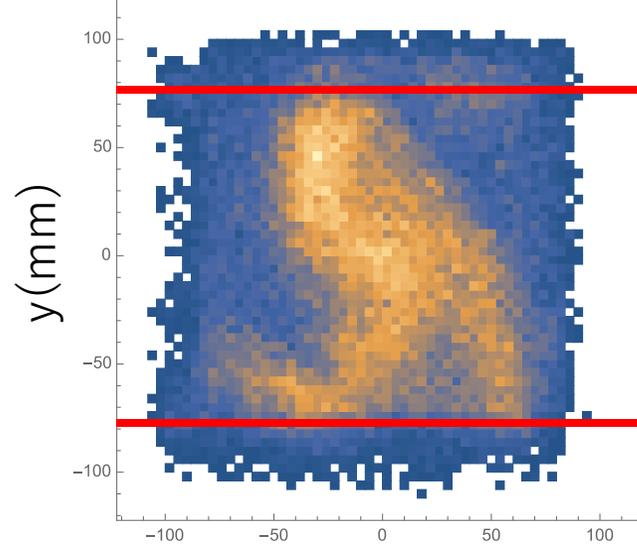
# 測定精度の確認

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

d = 16.6 mm  
(従来手法)



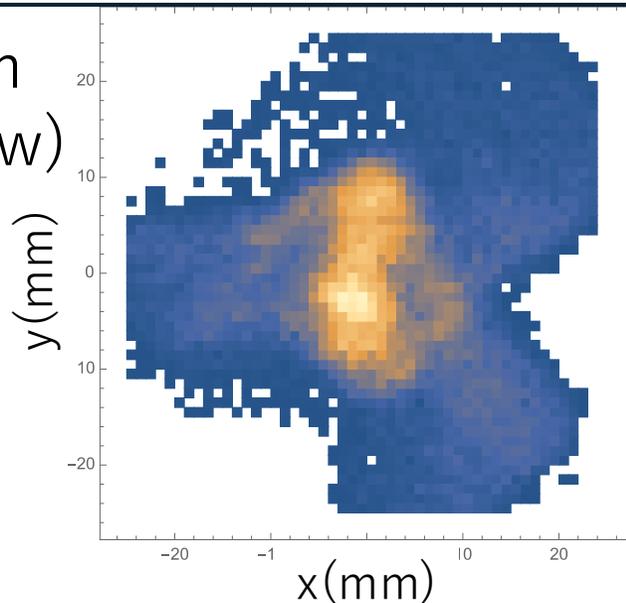
1405 mm  
上流



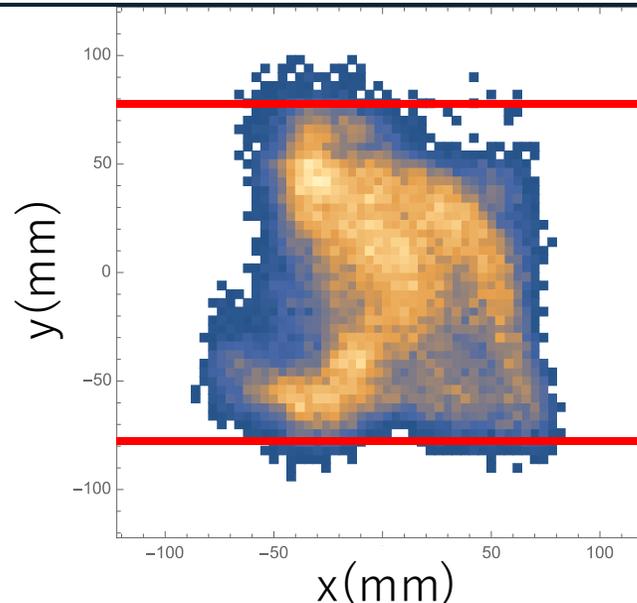
偏向電磁石の開口

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を予定
  - 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