

# イオン源のAI制御に向けた ビーム診断器の開発

大阪大学核物理研究センター(RCNP)

森田泰之, 福田光宏, 依田哲彦, 神田浩樹, 畑中吉治,  
中尾政夫, 安田裕介, 鎌倉恵太, 原周平, Koay Hui Wen,  
武田佳次郎, 原隆文, 大本恭平

2019年7月31日

日本加速器学会@京都大学

# 目次

- イオン源制御への機械学習の応用
- エミッタンスモニターの開発
  - Pepper-Pot Emittance Monitor
  - 低エミッタンスビームの測定
- まとめ、展望

# イオン源制御への機械学習の応用

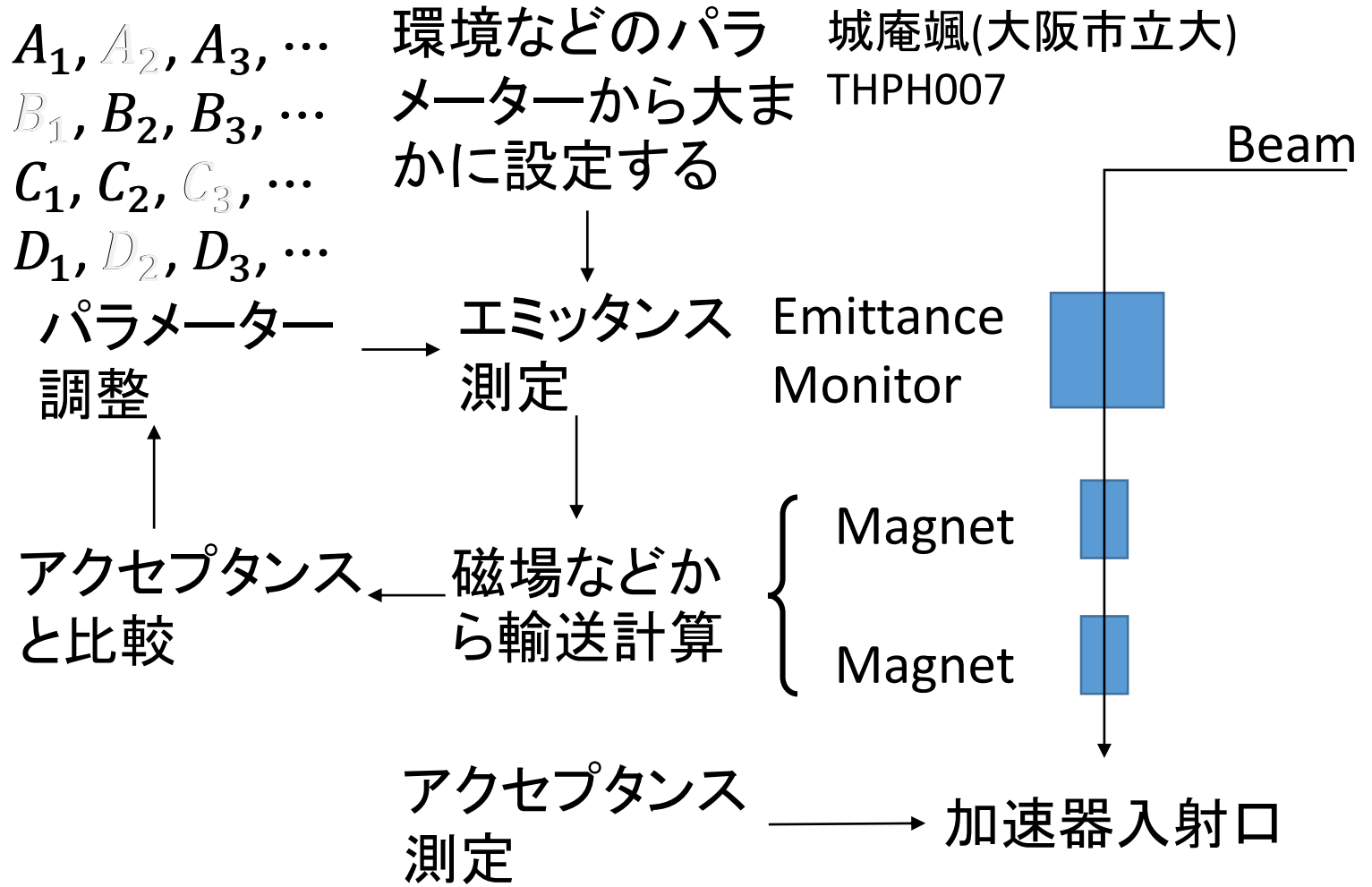
## 研究背景

- 経験と勘に頼った手動での調整
- 内部のプラズマなどの状態が不明
  - ビーム量、質の再現性が低い
- 調整中のデータ不足
  - パラメーター等の相関が探りにくい

機械学習を用いることで莫大なデータの処理を実現

- 加速器を社会に応用する際の制御技術
- 機械学習を応用することで解決の糸口を探す

# イオン源制御への機械学習の応用



# モニター等の開発

ビーム制御ではビームの状態を診断し、その結果からビームの良し悪しを判断しなければならない

- ビーム量
- 実空間分布
- 位相空間分布(エミッタンス)
- 加速器のアクセプタンス

機械学習は膨大なデータを処理することに長けている  
→複数のモニターから傾向、相関を探り、絞り込む

- 外部磁場
- 真空度
- RF
- 温度
- ⋮

今回、エミッタンスモニターを開発

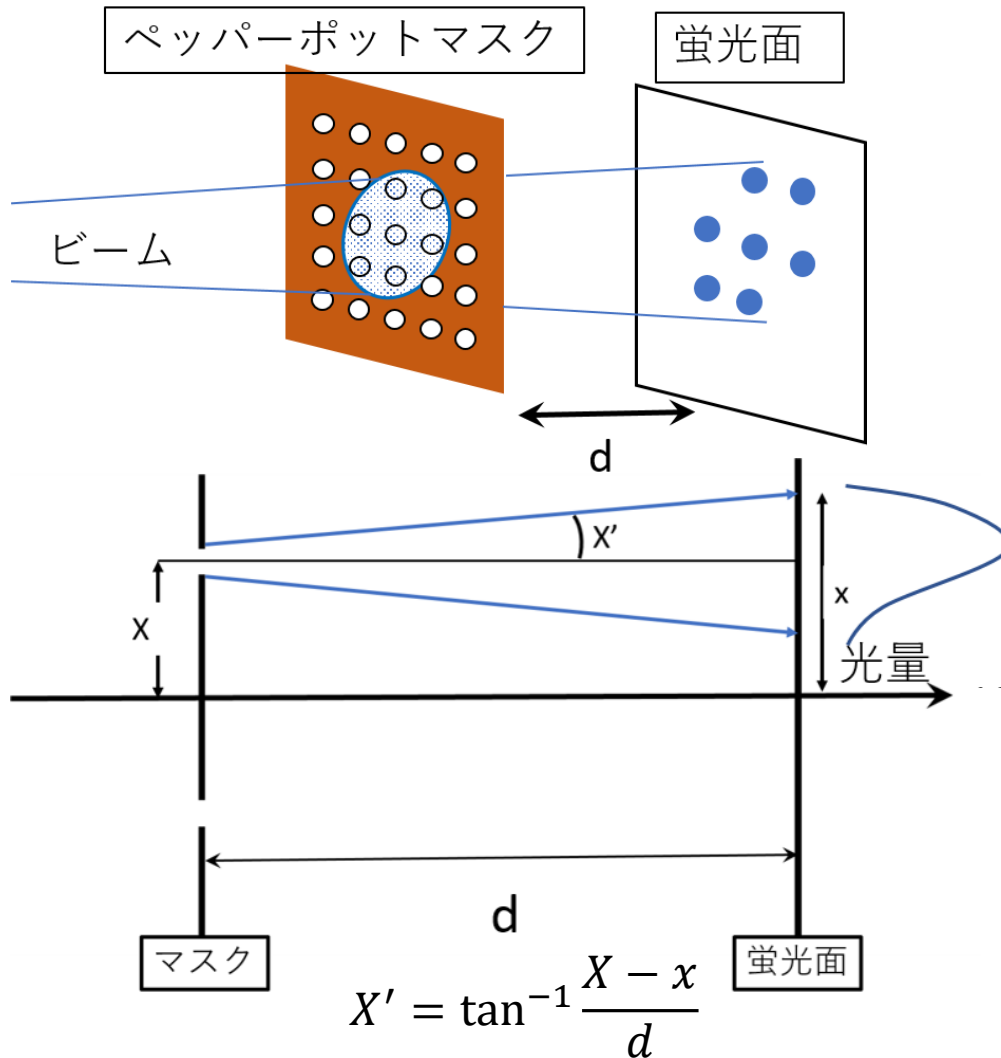
# 機械学習とエミッタンス測定

エミッタンスモニターに求められる性能

- リアルタイム測定  
調整結果の迅速な判断、データ量の増加
- 四次元分布測定  
加速器のアクセプタンスとの整合、情報量の増加
- 大まかなビーム量の増減の測定  
調整中のビーム量増減の確認

Pepper-Pot Emittance Monitor (PPEM) の開発を行った

# Pepper-Pot Emittance Monitor (PPEM)



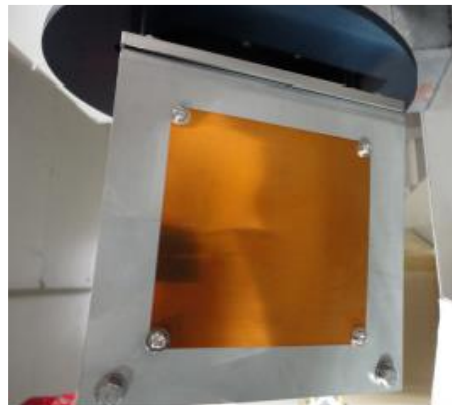
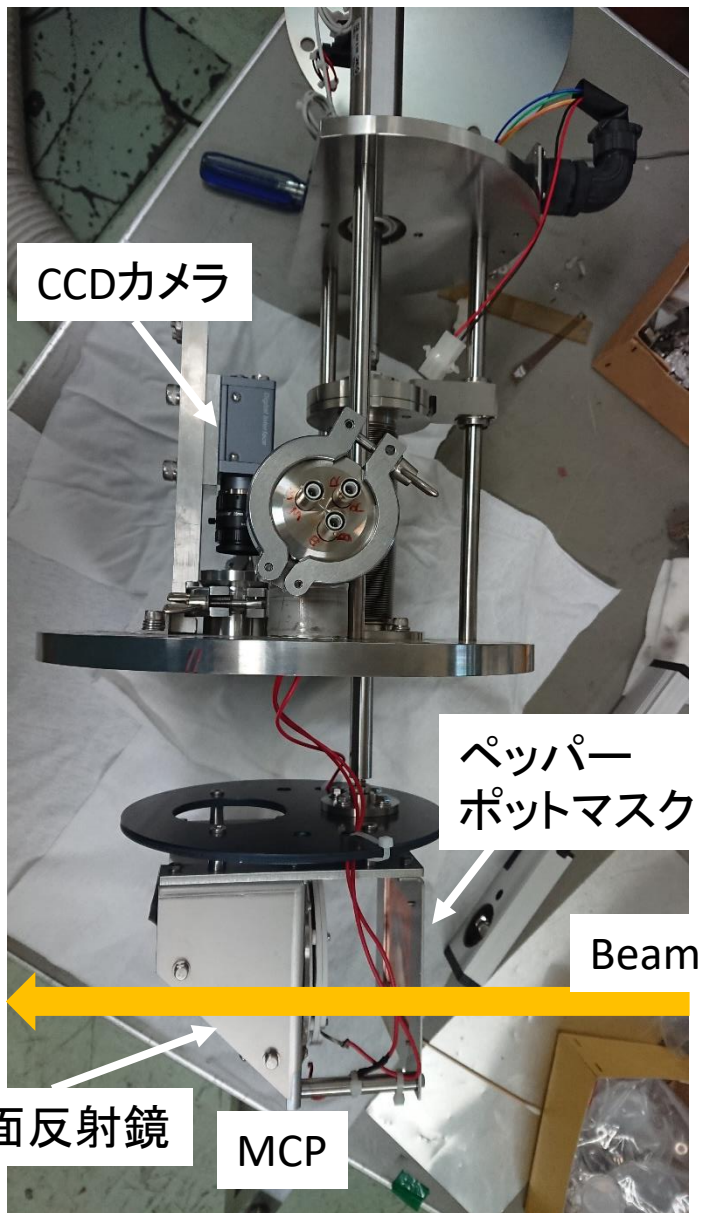
## 測定原理

1. ペッパーポットマスクでビームを切り出す
2. 蛍光面で可視化
3. CCDカメラで像を取得
4. マスクの穴と像を対応させ、 $(x,y)$ の情報を得る
5. ビームの広がりから $(x',y')$ の情報を得る

## エミッタンスの計算

1. 光量からビーム量の分布を算出する
2. 位相空間分布の面積を算出する

# RCNPで開発中のPPEM



厚さ 50 $\mu$ m  
穴の直径 70 $\mu$ m  
穴の間隔 3mm  
材質 銅

## ペッパーポットマスク



マスク-MCP 50mm  
MCP-CCDカメラ 370mm  
画像 1200 × 1600pixel

マイクロチャンネルプレート(MCP)

毎秒4回の連続的な測定を実現

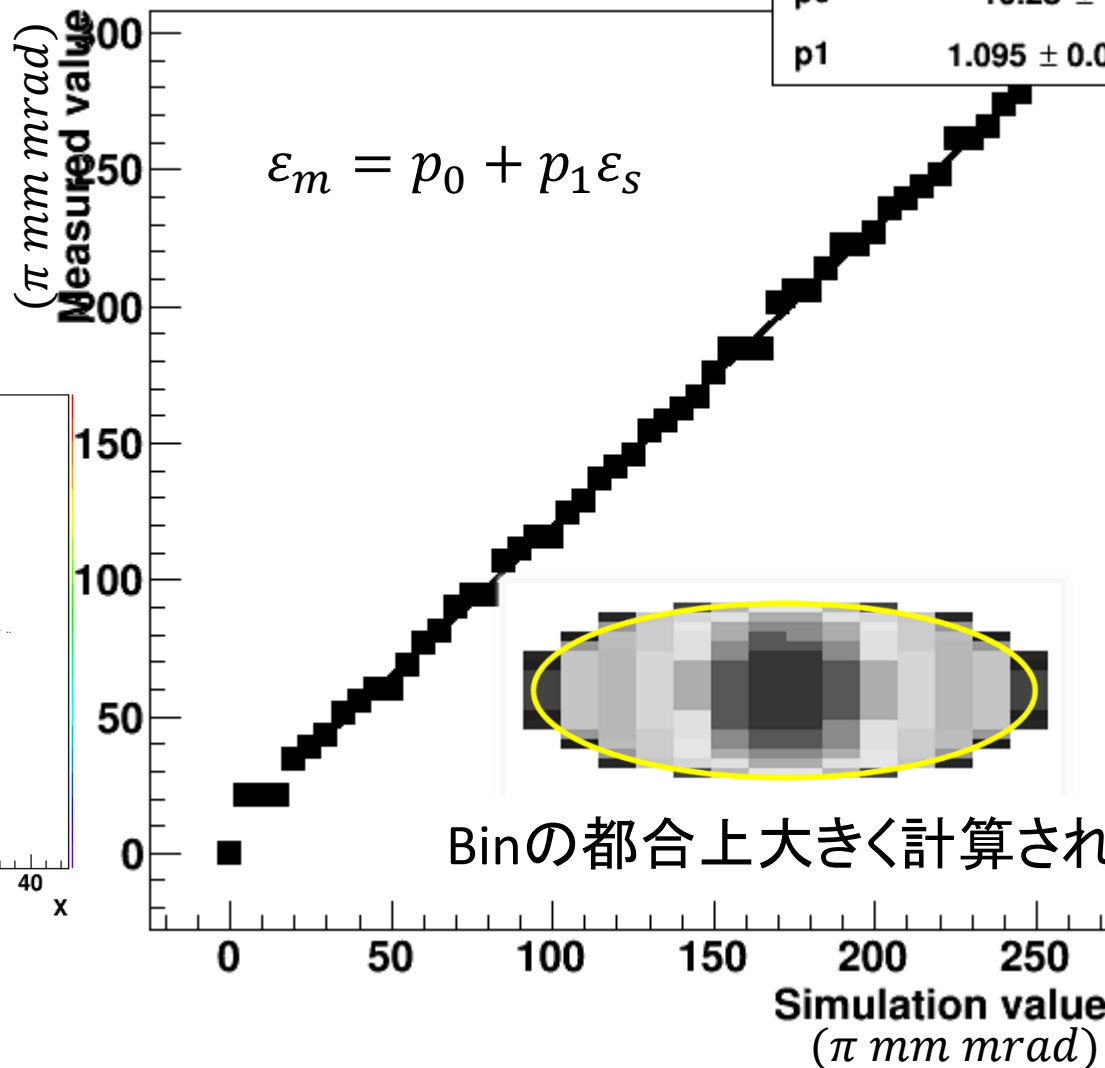
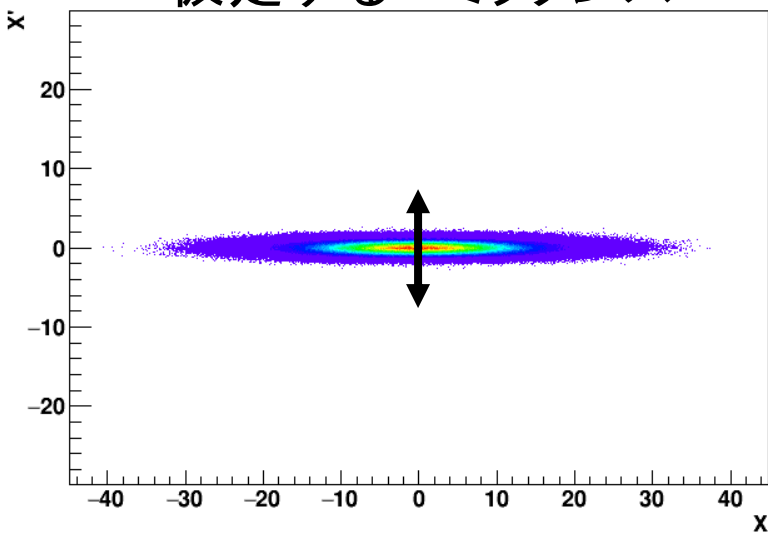


# PPEMによるエミッタンス測定シミュレーション

横軸: Emittance(仮定値)

縦軸: Emittance(測定値)

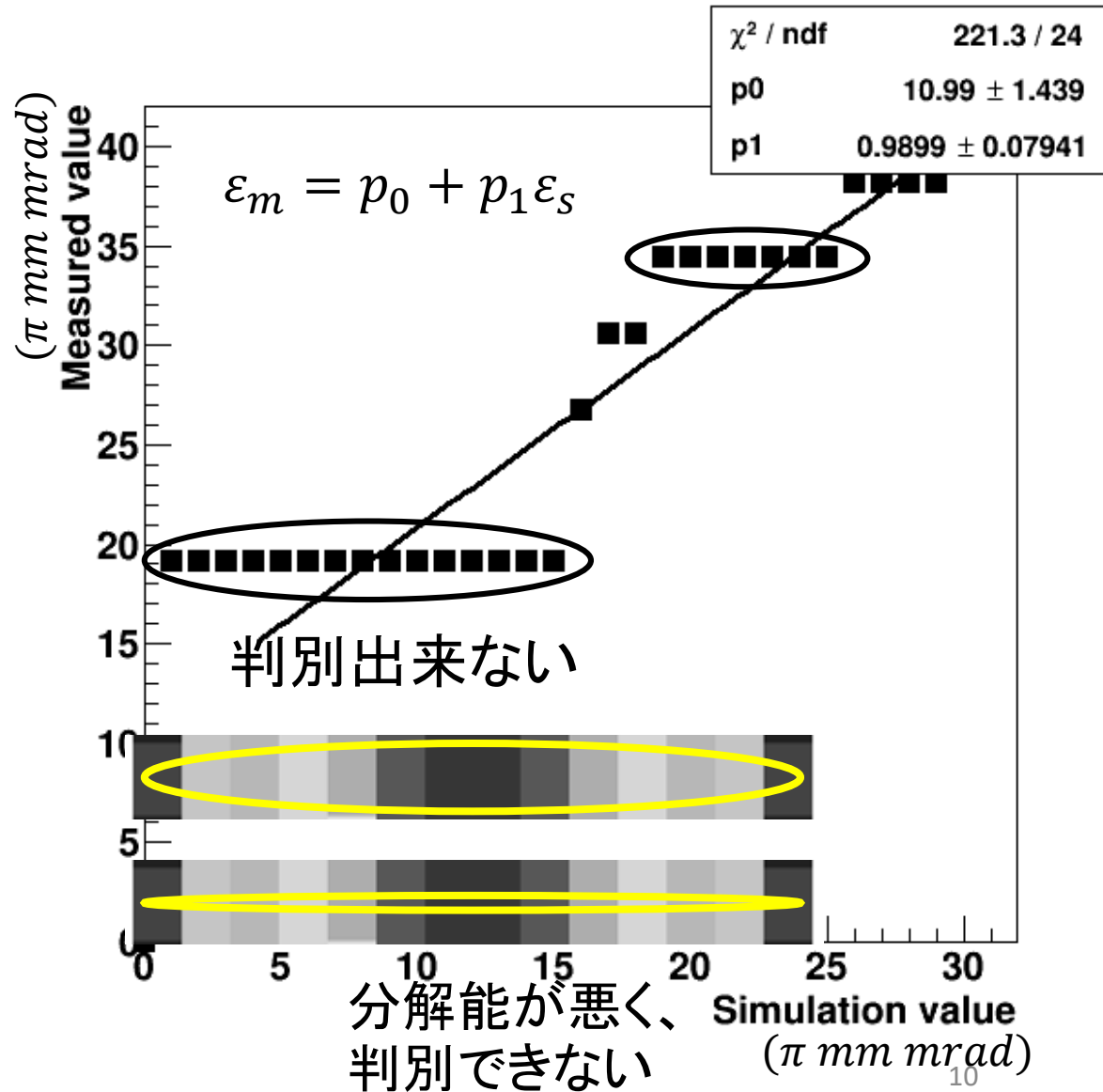
仮定するエミッタンス



$\chi^2 / \text{ndf}$	25.66 / 42
p0	10.28 ± 1.219
p1	1.095 ± 0.00805

# 低エミッタンスビームの測定シミュレーション

- 既存のものはエミッタンスの大きなビームを想定している  
→低エミッタンスビームの測定が不可能
- 機械学習で運用するためには、幅広い範囲での測定が必須  
→低エミッタンスビーム用の設計が必要



# 低エミッタンスビームの測定に向けて

分解能に影響を及ぼすパラメーター

- ペPPERポットマスクの穴の間隔 ( $dx$ )

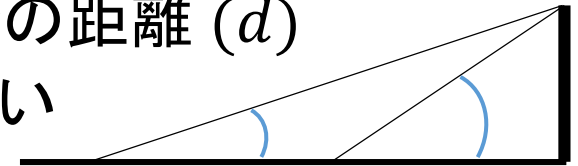
穴の間隔が広い

→  $(x, y)$  の分解能が悪くなる

- ペPPERポットマスクから蛍光面までの距離 ( $d$ )

ペPPERポットマスクと蛍光面が近い

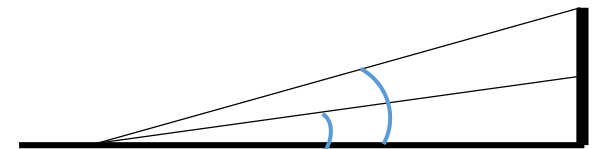
→  $(x', y')$  の分解能が悪くなる



- CCDカメラの解像度

解像度が低い

→  $(x', y')$  の分解能が悪くなる



- 画像の読み込み、解析に時間がかかる可能性

- これまで無視していたMCPのチャンネル径やペPPERポットマスクの穴のサイズが無視できなくなる

# 低エミッタンスビームの測定

$d$ (mm)	$\Delta x'$ (mrad)	$x'_{max}$ (mrad)
50	1	$10 \times dx$
100	0.5	$5 \times dx$
150	0.33	$3.3 \times dx$
200	0.25	$2.5 \times dx$

50 ( $\mu\text{m}/\text{pixel}$ )

$d$ (mm)	$\Delta x'$ (mrad)	$x'_{max}$ (mrad)
50	0.4	$10 \times dx$
100	0.2	$5 \times dx$
150	0.133	$3.3 \times dx$
200	0.1	$2.5 \times dx$

20 ( $\mu\text{m}/\text{pixel}$ )

想定するビーム

ビーム径 15mm

エミッタンス  $10\pi$  mm mrad

要求性能

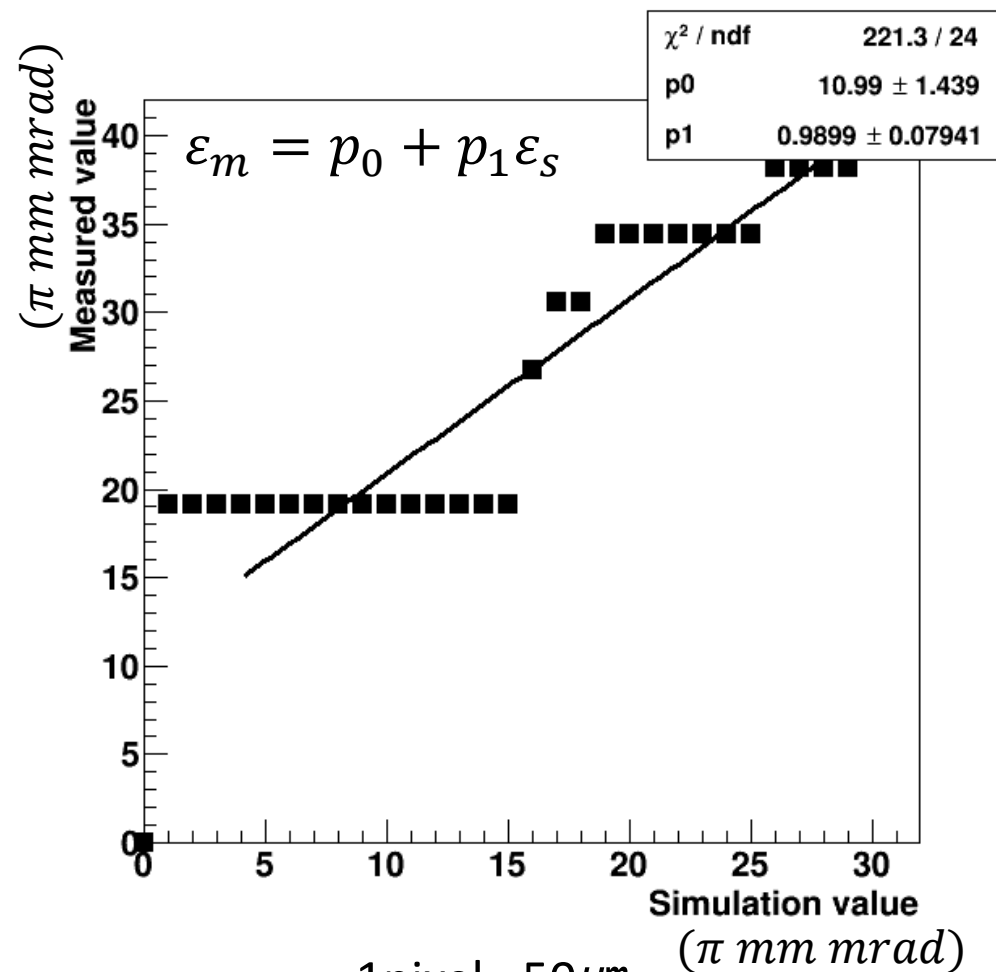
- $5\pi$  mm mrad以上を判別可能
- 測定可能な最大角度  
7.5 mrad

$\rightarrow dx = 1.5$  or  $2$  mm

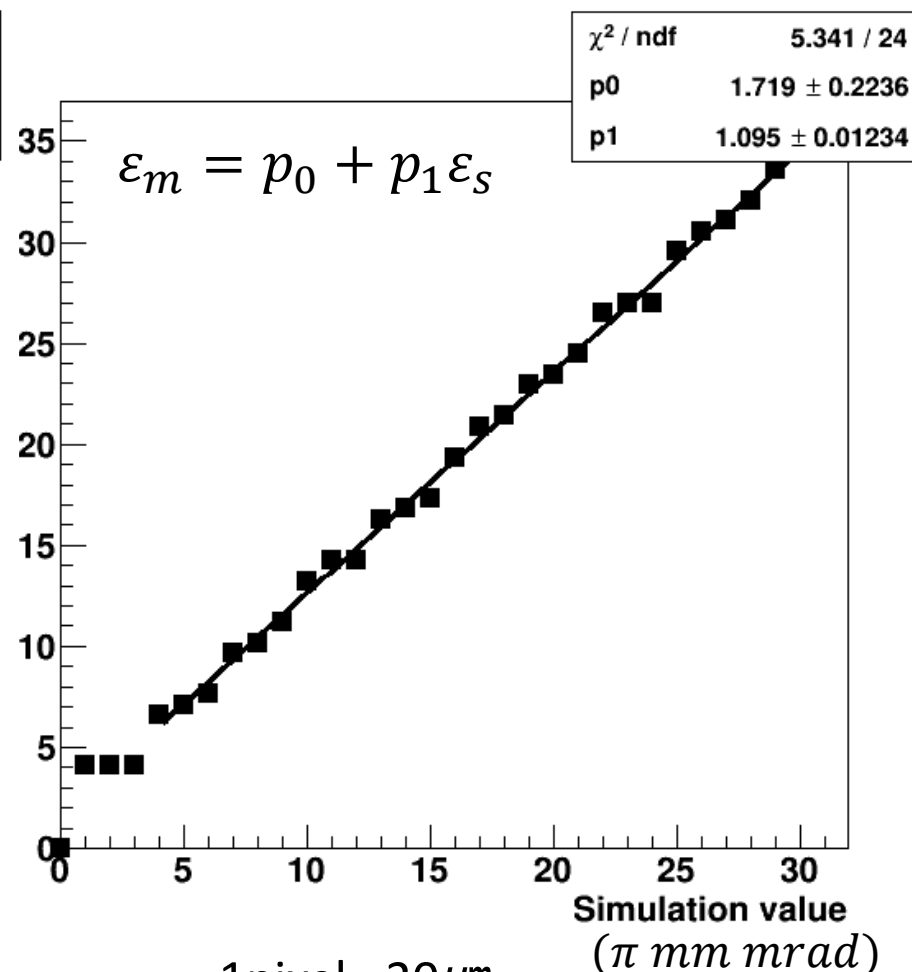
$d = 100$  mm

$1\text{pixel} = 20 \mu\text{m}$

# 低エミッタンスビームの測定シミュレーション



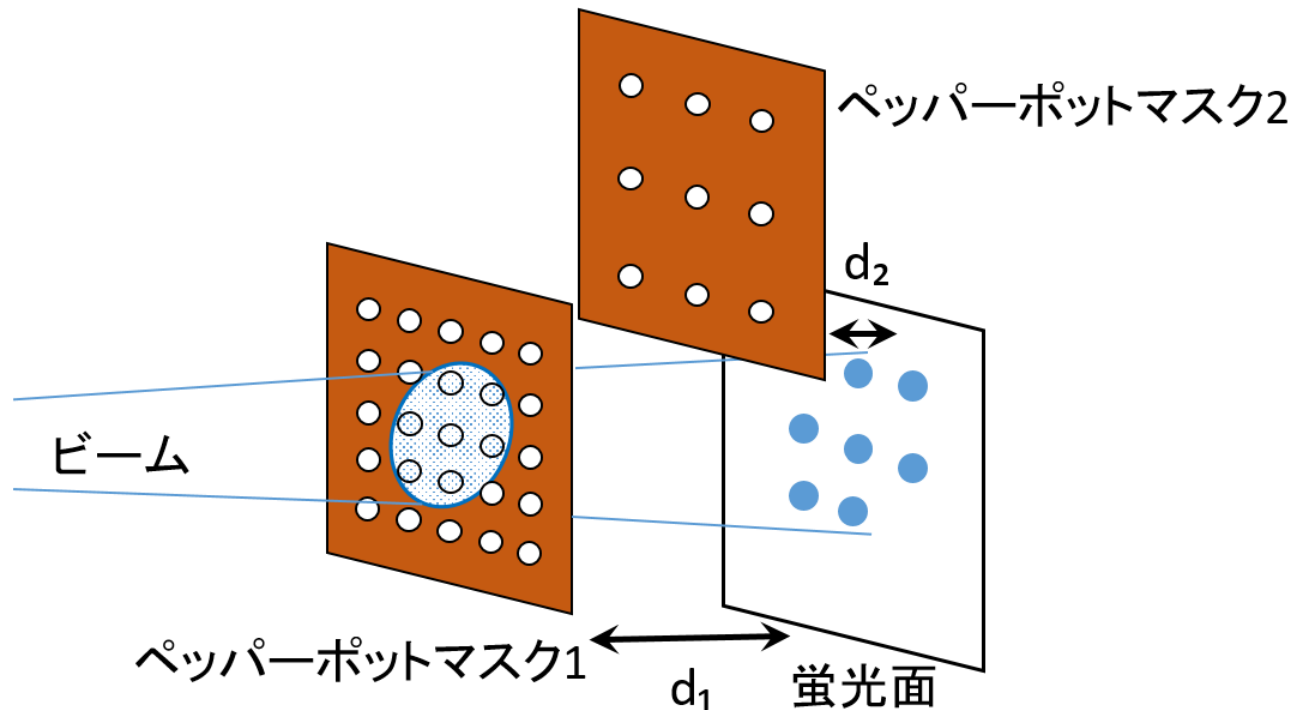
1pixel :  $50\mu\text{m}$   
 dx : 3mm  
 d : 50mm



1pixel :  $20\mu\text{m}$   
 dx : 2mm  
 d : 100mm

# 新たなPPEMの設計

- 複数のイオン源を使用する場合、広い範囲のエミッタンス測定が望まれる
  - マスクの穴の間隔、マスク-スクリーン間の距離を可変にすることで対応できる
- 複数のマスクを用意し、ビームによって差し替える



# まとめ、展望

## まとめ

- 現在イオン源制御への機械学習の応用を計画中
- 機械学習の応用に向け、リアルタイム測定を目指してPPEMを開発中
- 幅広い範囲のエミッタンスに対応するため、 $30\pi\text{mm mrad}$ 以下の低エミッタンスビームの測定を目的とした開発を行った
- ペPPERポットマスクを差し替え、数 $\pi \sim 200\pi\text{mm mrad}$ と幅広い範囲のエミッタンスに対応する

## 展望

- エミッタンスモニターの実機の作成、テスト
- 機械学習に向けて学習用のデータの取得

Back Up



# 機械学習のメリット・デメリット

## • メリット

- 膨大な量のデータ処理が可能  
→データの分類による相関の発見
- Try & Errorによって多くのパターンを試せる  
→試行錯誤によって現状の最適値を判断可能
- 学習を繰り返すことでより迅速に調整が可能

## • デメリット

- AIが物理背景などを考えて判断するのは困難
- 学習に多くのデータ、時間が必要
- 学習はモデル次第で良くも悪くもなる

# 機械学習に用いるPC

- 機械学習では行列計算が必須  
→計算量も多いためGPUを搭載
- RCNPの実験系を参考に...
  - NVIDIA製のGPU推奨
  - GPUのメモリは8GB～
  - CPUはi5で十分
  - CPUのメモリは16GB～
  - 電源は600W～
  - OSはLinux(Windowsでも可?)
  - HDDは1TB～
  - SSDにする必要はない
- 注意点
  - NVIDIA製のGPU以外では機械学習のライブラリが正常に作動しない
  - GPUのCC(Compute Capability)によっては機械学習のライブラリが正常に作動しない
  - ゲーム用PCを購入するのが一番簡単

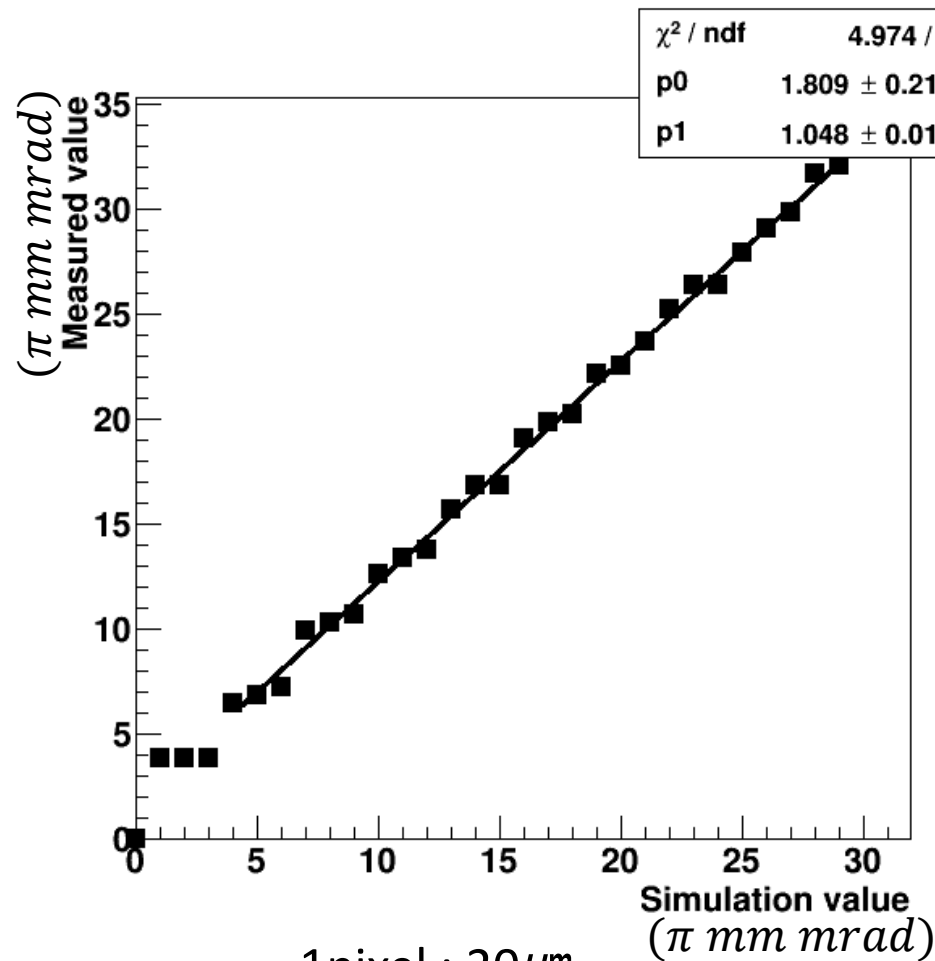
# 機械学習に必要な環境

- 基本的にプログラムはPython  
→ Anaconda3でPython環境を構築

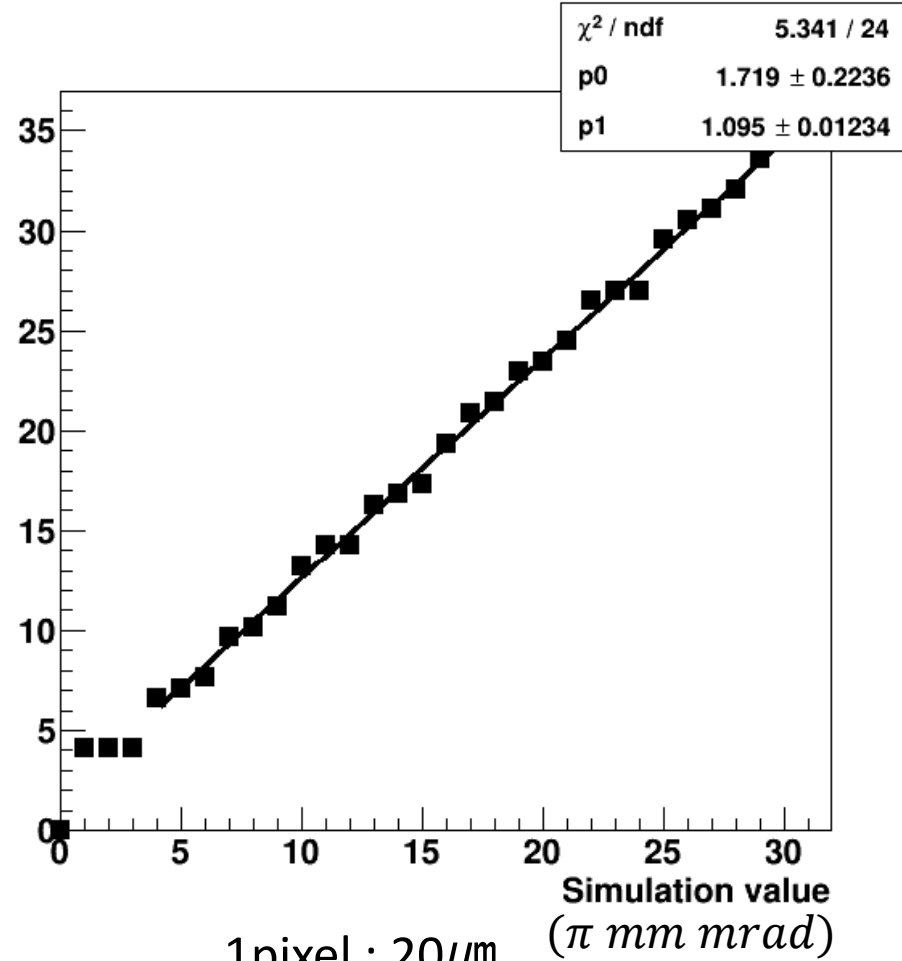
## Anaconda3とは

- Python用のディストリビューション
  - 機械学習に必要なNumpyやPandasがデフォルトで使える
  - NvidiaのGPUを利用する場合に必要なCUDAなどの環境も簡単にインストールできる
  - 機械学習に必要なライブラリ
    - Tensorflow + Keras
    - Chainer
    - Gym
- } どちらか片方で可
- 強化学習用

# 低エミッタンスビームの測定シミュレーション

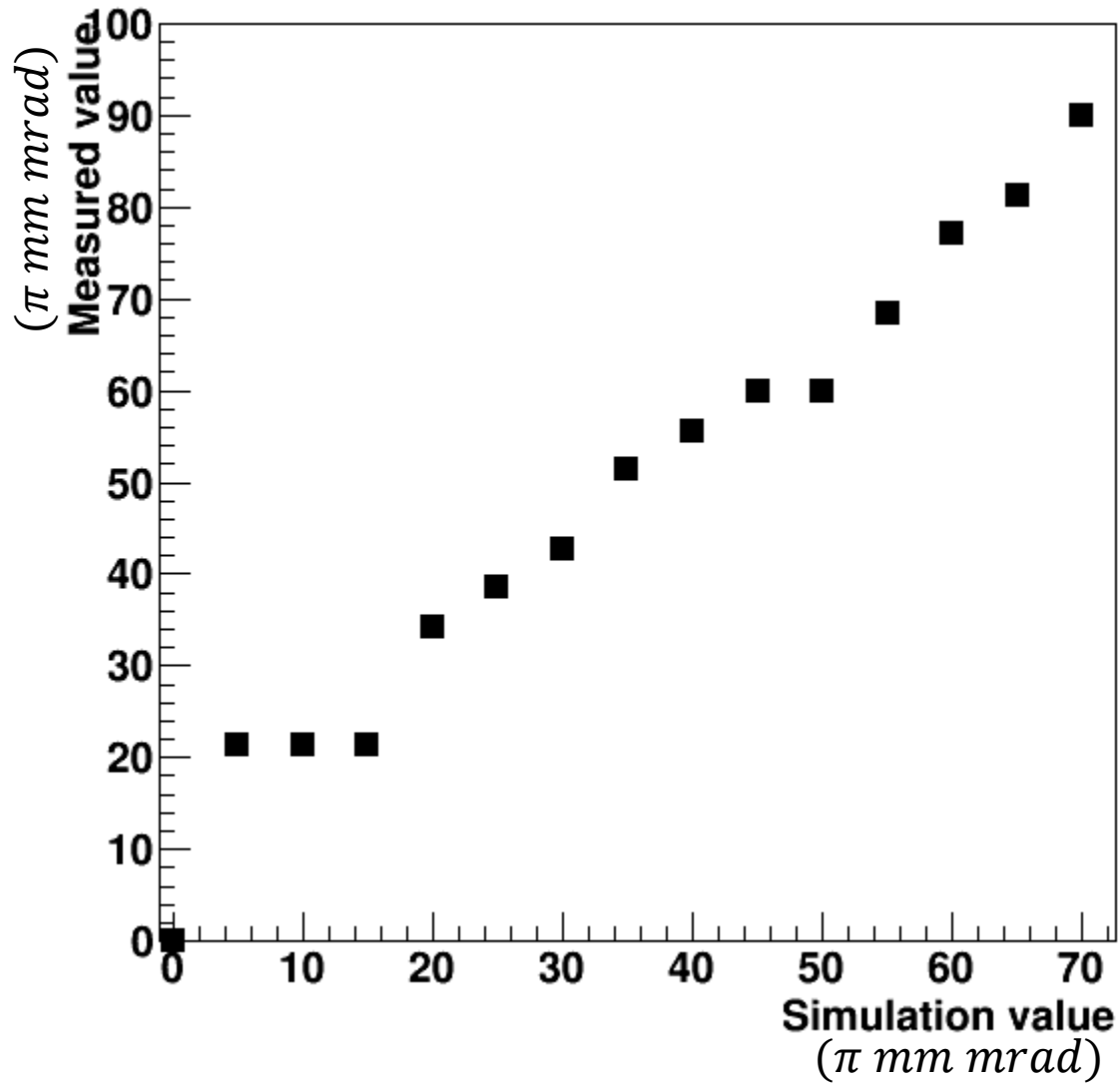


1pixel :  $20\mu\text{m}$   
dx : 1.5mm  
d : 100mm



1pixel :  $20\mu\text{m}$   
dx : 2mm  
d : 100mm

# 低エミッタンス領域(RCNP仕様)



$dx = 3mm$   
 $d = 50mm$   
 $50\mu m/pixel$