

## イオン源の AI 制御に向けたビーム診断器の開発

### DEVELOPMENT OF BEAM MONITOR FOR AI CONTROL OF ION SOURCE

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,  
武田佳次朗, 原隆文, 大本恭平

Yasuyuki Morita#, Mitsuhiro Fukuda, Tetsuhiko Yorita, Hiroki Kanda, Kichiji Hatanaka, Masao Nakao,  
Yusuke Yasuda, Keita Kamakura, Shuhei Hara, Koay Hui Wen, Keijiro Takeda, Takafumi Hara, Kyouhei Omoto  
Research Center for Nuclear Physics, Osaka University (RCNP)

#### Abstract

The tuning of the ion source has a part that relies on human experience and intuition, and because the unknown parameters such as plasma, the reproducibility is low. Therefore, we apply machine learning, search for correlation between parameters and beams, and aim to improve the degree of reproducibility. In order to apply machine learning, it is necessary to know the conditions of beam in detail, and development of an emittance monitor, a beam profile monitor, and an environmental sensor as a diagnostic device is indispensable. In particular, the Emission Monitor is very important for making adjustments, and it is required to make a wide range of emittance measurements quickly. RCNP has developed Pepper-Pot Emittance Monitor (PPEM), and has achieved measurement at 4 Hz. This device is mainly intended for emittance measurement of  $30\pi$  mm mrad or more, and needs to be improved to be able to measure low emittance beam in order to perform machine learning. Therefore, this time, we investigated the conditions of PPEM that can measure low emittance beam, and developed PPEM that can measure a wide range of measurement by replacing the pepper pot mask.

#### 1. はじめに

現在、加速器は医療用 RI 生成をはじめとした医療応用や廃棄核燃料の核変換技術などの産業利用が期待されている。加速器運転の際には実際のビームの状態を見ながら状況に応じてパラメーターを調整する必要がある、それには豊富な経験と熟練の技術が必要となる。一方で社会に普及させる際は熟練の技術を持ったオペレーターをすべての施設に配置することは不可能であるため、誰でも容易に行える新たな加速器運転システムを開発する必要がある。その中でも筆者はイオン源の調整に重点をおいて現在研究を行っている。イオン源の調整は加速器で加速されるビームの量に直結するため、非常に重要な要素である。そこで筆者は現在急速に発展している機械学習の技術を応用した、新たなイオン源運転・調整システムの開発を行っている。

イオン源調整の際には、ビームの状態を診断し、その結果をもとにパラメーターを調整し、再度診断を行いその結果をもとに再度調整を行う。この調整を繰り返すことでビームの量や質を向上させることができ、機械学習[1]を応用したイオン源調整の場合も同様のプロセスで調整を行う。そのため、ビームの診断に要する時間はイオン源の調整時間に直結するため、調整を効率的に行うためには迅速なビーム診断が求められる。

そこで今回、迅速なビーム診断を可能にするために大阪大学核物理研究センター(Research Center for Nuclear Physics, RCNP)では、高速エミッタンス測定を目的として Pepper-Pot Emittance Monitor (PPEM)の開発を行っている。本装置は RCNP で運転中の 5 台のイオン源全てのビームに対してリアルタイムでの連続的な位相空間分布の測定、エミッタンス値の算出を目的としている。本装置

が完成することで機械学習を用いたイオン源制御の際に現状のビームの是非を判断し、迅速に調整を行うことが可能となる。

#### 2. イオン源調整への機械学習の応用

一般的にはビームの電流値や実空間分布を測定し、調整を行っている。これは主に、手動で調整する以上、処理できる情報量に限りがあるためである。一方で機械学習は多くの情報を一度に処理することができる。そのため、機械学習を応用することで、ビームとパラメーターの相関を探ることができると期待される。

機械学習をイオン源制御へ応用する際には、何をもちょうビームの量や質が最高であると判断させるかが大きな問題となる。現状、この判断には加速器のアクセプタンスとビームのエミッタンスを比較することでビームの良し悪しを判断するシステムを検討している。具体的には、まず初めに加速器入射口でのアクセプタンスを測定する。そして機械学習の回帰によって大まかに値にあたりを付けた後[2]、次にビームのエミッタンスを測定し、測定器から加速器入射口までの輸送計算を行い、エミッタンスとアクセプタンスの比較を行うことで現状のビームの良し悪しを判断する。エミッタンスがアクセプタンスにマッチしていない場合、パラメーターの変更を行い、マッチするまで調整を行う。調整の概念図を Fig. 1 に示す。

この手法はビーム量だけでなく、エミッタンスやアクセプタンスをもとの調整するため、より多くの情報を元に調整を行うことができる。また、機械学習を応用することでこれまでは調整の際に測定していなかった外部磁場や温度などがビームに及ぼす影響を探ることができる。そのため、ビームとパラメーターの関係をより詳しく探ることができ、これまで人の経験と勘によって行われていた調整をデータに基づいて行うことができると期待される。

# morita16@rcnp.osaka-u.ac.jp

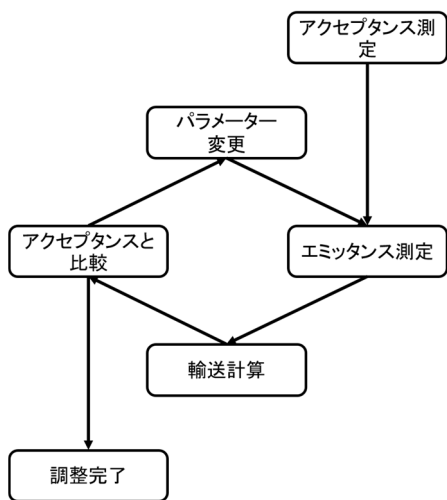


Figure 1: Concept of ion source tuning.

一方でこの手法で調整を行うためにはパラメーターの調整によって位相空間分布がどのように変動したかを把握する必要があるため、エミッタンスを何度も測定する必要があります。また、調整を迅速に行い、学習用のデータを短期間に蓄積させるためには高速でのエミッタンス測定が必須である。

### 3. Pepper-Pot Emittance Monitor (PPEM)

今回、高速でのエミッタンス測定を実現するため、Pepper-Pot Emittance Monitor(PPEM)[3]の開発を行った。

PPEM はペッパーポットマスクと呼ばれる格子状に穴の開いた金属板によってビームを切り出し、下流の蛍光面で可視光化し、その像をカメラで得ることで位相空間分布を求めるものである。像とペッパーポットマスクの穴の位置を対応させることで(x,y)の情報を得ることができ、蛍光面でのビームの広がりから(x',y')の情報を得ることができる(Figure 2)。RCNP で開発を行っている PPEM では、ペッパーポットマスクの穴の間隔は 3mm、ペッパーポットマスクから蛍光面までの距離は 50mm で設計されている[4]。

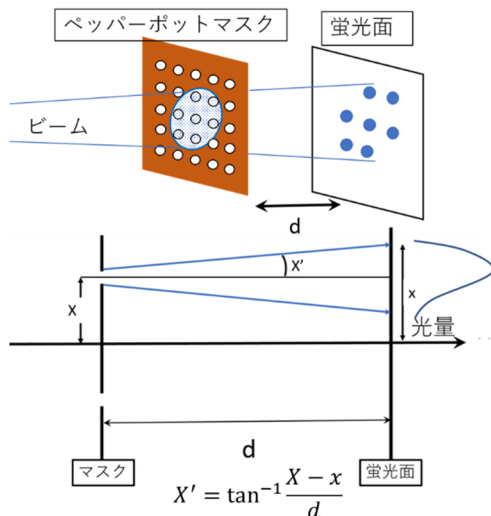


Figure 2: Concept of Pepper-Pot Emittance Monitor.

PPEM の特徴はペッパーポットマスクによってビームを切り出すことでスリット式 Emittance Monitor のようにスリットを動かす必要がなく、一度に 4 次元の位相空間情報を得ることができる。そのため、高速での測定が可能である。加えて Beam Profile Monitor(BPM)に蛍光版と CCD カメラを用いることでリアルタイムの測定を実現することができる。現在、RCNP では毎秒 4 回のエミッタンス測定を実現している[5-7]。

一方で PPEM はマスクの隣り合う穴から出たビームが被らないようにする必要があり、測定できるエミッタンスは設計によって制限される。そのため、1 台の PPEM では広い範囲のエミッタンス測定を行うことができない。RCNP で開発を行っている PPEM では、エミッタンスの大きなビームの測定を想定しているため  $30 \pi \text{ mm mrad}$  以下の測定を行う際に分解能が足りず、正確な測定を行うことができない。Figure 3 に横軸にシミュレーションで仮定したエミッタンス値を、縦軸に RCNP の設計で測定を行った際の測定値をプロットし  $30 \pi \text{ mm mrad}$  以上の領域に直線フィッティングをしたものを、Fig. 4 に同様の結果を  $30 \pi \text{ mm mrad}$  以下のみをプロットし、直線フィッティングしたものを示す。フィッティングパラメーター  $p_0$  は y 切片を、 $p_1$  は直線の傾きのフィッティング結果を表している。また、エミッタンスは  $2\sigma$  で 15mm のビーム径を持つ楕円を仮定し、角度方向の値を大きくすることでエミッタンスを変えている。この結果から RCNP の設計では、 $30 \pi \text{ mm mrad}$  以下の測定ができないと言え。

そこで今回、 $30 \pi \text{ mm mrad}$  以下の低エミッタンスビームの測定を目指した開発を行った。

PPEM の分解能を決める要素は主に

1. ペッパーポットマスクの穴の間隔(dx)
2. ペッパーポットマスクから蛍光面までの距離(d)
3. CCD カメラの分解能

である。

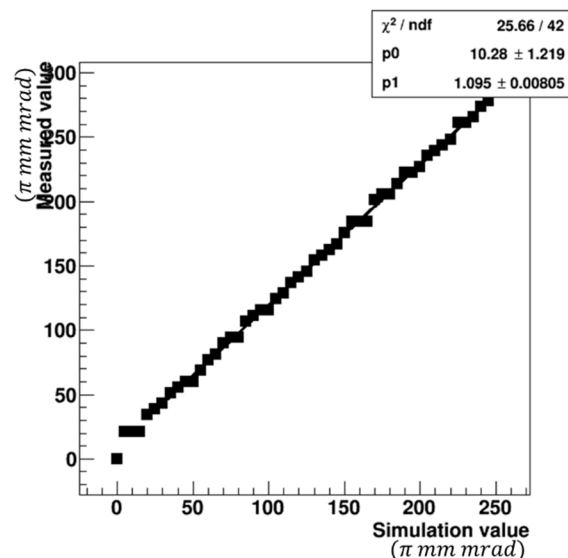


Figure 3: Simulation results of emittance measurements in the design of RCNP.

(Fitting from  $30 \pi \text{ mm mrad}$  to  $250 \pi \text{ mm mrad}$ )

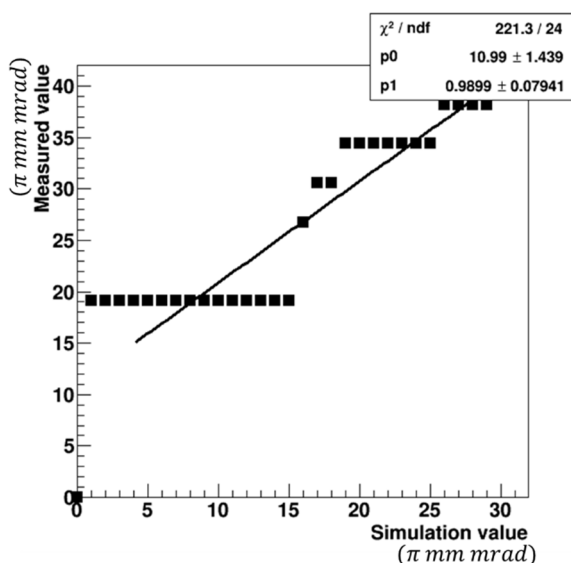


Figure 4: Simulation results of emittance measurements in the design of RCNP.

(Fitting from 5  $\pi$  mm mrad to 30  $\pi$  mm mrad).

PPEM ではペッパーポットマスクの穴の位置でしかビームを切り出すことができないため、穴の間隔が  $(x,y)$  の分解能を決める。一方で穴の間隔が狭まると、隣り合う穴から出たビームが重なり合い、正確な測定ができなくなる。また、ペッパーポットマスクから蛍光面までの距離は得られた像 1pixel 当たりの角度を決め、角度分解能に影響を与える。ペッパーポットマスクから蛍光面までの距離が長いほど  $(x',y')$  の角度分解能は上がるが、測定可能な最大角度は小さくなるため、ペッパーポットマスクの穴の間隔の時と同様にビームが重なり合い、測定が正確に行えなくなる危険性が上がる。CCD カメラの解像度は高ければ高いほど、 $(x',y')$  の角度分解能が上がる。また、CCD カメラの解像度を上げても測定可能な最大角度には影響しないが、一方で得られる像のデータが大きくなり、読み込みや解析にかかる時間が増加し、リアルタイム性を損なう可能性がある。そのため、これらを総合的に精査し、低エミッタンスビームのリアルタイム測定に耐える分解能を実現することが重要である。Table 1, 2 にペッパーポットマスクから蛍光面までの距離  $(d)$  ごとの角度分解能  $(\Delta x')$ , 測定可能な最大角度  $(x'_{max})$  をまとめた。ただし、ペッパーポットマスクの穴の間隔を  $dx(mm)$  とし、カメラの解像度は Table 1 では  $50\mu m/1pixel$ 、Table 2 では  $20\mu m/1pixel$  である。

Table 1: Design and Angular Resolution ( $50\mu m / 1 pixel$ )

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

Table 2: Design and Angular Resolution ( $20\mu m / 1 pixel$ )

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

今回、半径 15mm の位相空間上で楕円となるビームを仮定し、 $5\pi$  mm mrad 以上のエミッタンス測定を実現し、測定可能な最大角度が 7.5 mrad 以上となるように設計を行う。今回、ビーム径が大きいほど角度分解能が必要となること、位相空間上でビームが回転することを考慮し、RCNP の加速器を基準に要求性能を決定した。この条件を満たすものは以下の三つである。

1.  $d = 100mm, dx = 1.5mm, 20\mu m/1pixel$
2.  $d = 100mm, dx = 2.0mm, 20\mu m/1pixel$
3.  $d = 200mm, dx = 3.0mm, 50\mu m/1pixel$

このうち、3 は位置分解能が低く、調整中にビームが絞られる可能性があることを考慮し、今回は候補から外し、1, 2 について Fig. 3, Fig. 4 の場合と同様に  $2\sigma$  で 15 mm のビーム径を持つ楕円をエミッタンスとして仮定し、角度方向の値を大きくすることでエミッタンス値を変えてシミュレーションを行い、横軸に仮定したエミッタンス値、縦軸にそのビームを測定した際の値をプロットし直線フィッティングをおこなった。その結果をそれぞれ Fig. 5, Fig. 6 に示す。フィッティングパラメーター  $p0$  は  $y$  切片を、 $p1$  は直線の傾きのフィッティング結果を表している。

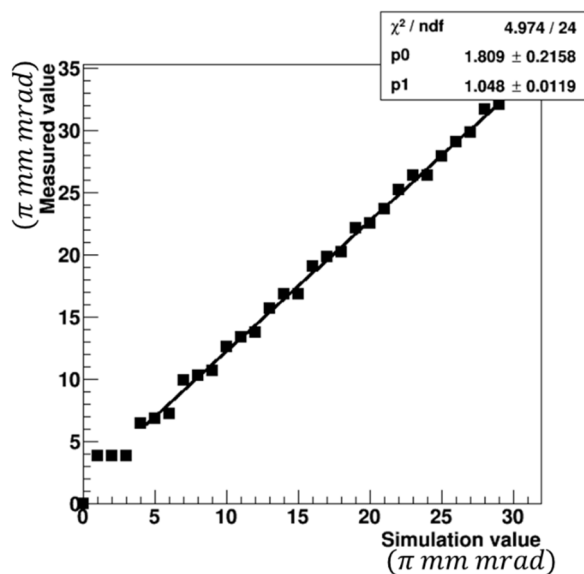


Figure 5: Simulation results of emittance measurements in the design 1.

(Fitting from 5  $\pi$  mm mrad to 30  $\pi$  mm mrad)

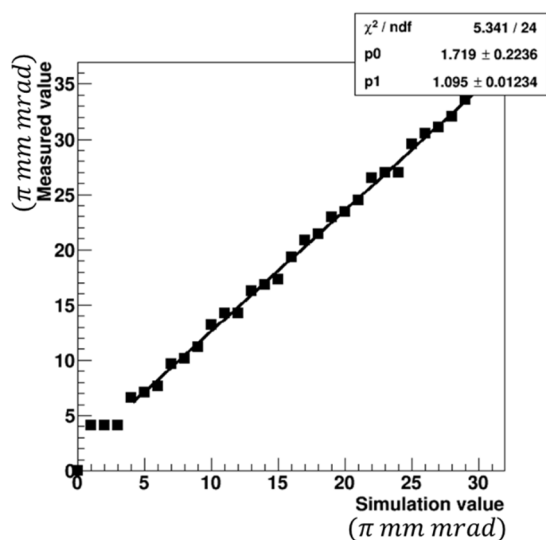


Figure 6: Simulation results of emittance measurements in the design 2.

(Fitting from 5  $\pi$  mm mrad to 30  $\pi$  mm mrad)

この結果から 1,2 の条件による大きな違いはなく、どちらも測定に耐えうる分解能を有しているといえる。

今回の設計で、低エミッタンスビームの測定が可能な設計で測定を行った際に、エミッタンスの大きなビームが来ていると、隣り合う穴から出たビームが重なり合い、正確な測定ができなくなってしまう。そのため、広い範囲で測定を行うためにはエミッタンスの小さいエミッタンス測定用と大きなエミッタンス測定用をうまく使い分ける必要がある。最も簡単な方法は 2 台用意し、使い分けることだが、その場合、それぞれで別の位置に設置することになり、測定位置が大きく変わってしまう。また、MCP や蛍光面、CCD カメラをそれぞれ個別に用意する必要はなく、同一のものを使うことができれば測定値が大きく安価に済ますことができる。そこで、ペッパーポットマスクをビームのエミッタンスによって差し替えることで下流の MCP や蛍光面、CCD カメラを共通で使用し、幅広い範囲のエミッタンス測定を行う PPEM を考案した。この装置では、測定位置はおおきくかわらず、安価に幅広い範囲のエミッタンスが測定できる。その概略図を Fig. 7 に示す。

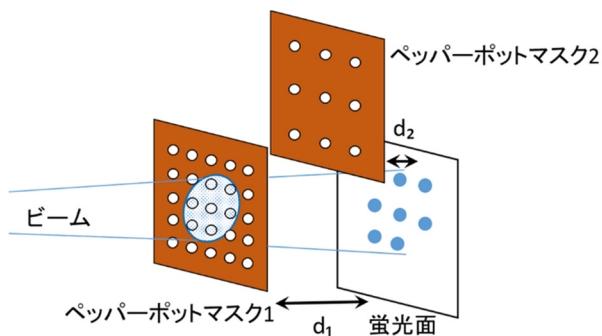


Figure 7: Measurement of wide range emittance by replacing the pepper pot mask.

## 4. まとめ

現在、イオン源調整への機械学習の応用を行っている。機械学習の大きなメリットとして多くの情報を処理できるという点があげられ、そのメリットを生かしてパラメータとの相関を探り、これまで経験と勘に頼っていた調整を数値的に処理することが期待される。機械学習の実装のためにはビームの状態を迅速に測定することが求められる。そこで今回、PPEM で低エミッタンスビームの測定を行うために必要な条件を精査し、低エミッタンスビーム測定用の PPEM の設計を行った。また、ペッパーポットマスクを差し替えることで低エミッタンスビーム用と高エミッタンス用を切り替え、一台で幅広い範囲のエミッタンスに対応できる PPEM を設計した。

## 謝辞

本研究は、大阪大学核物理研究センター(RCNP)研究プロジェクト、大阪大学データビリティフロンティア機構学際プロジェクトから、多大なご協力を頂きました。

また、本研究の一部は、文部科学省「ダイバーシティ研究環境実現イニシアティブ(牽引型)」連携型共同研究助成、および、大阪市立大学戦略的研究(基盤研究)の助成を受けて実施されました。

## 参考文献

- [1] 斎藤康毅, “ゼロから作る Deep Learning –Python で学ぶディープラーニングの理論と実装”, 株式会社オライリー・ジャパン(2016).
- [2] 城庵颯, “機械学習を使用した KEK Linac 加速器運転調整システムの開発”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan THPH007.
- [3] M. Dolinska, M. Domke *et al.*, “EMITTANCE MEASUREMENTS AT THE NEWUNILAC PRE-STRIPPER USING A PEPPER-POT WITH A PC-CONTROLLED CCDCAMERA”, Proceedings of the 4th European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators (1999).
- [4] 山根浩義, “ペッパーポット型リアルタイムエミッタンス測定装置の開発”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan SAP079.
- [5] Tetsuhiko Yorita *et al.*, “Developments of fast emittance monitors for ion sources at RCNP”, Rev. Sci. Instrum., vol. 87, pp. 02B928, 2016.
- [6] 森田泰之, “RCNP におけるペッパーポット型エミッタンス測定装置のリアルタイム化”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan TUP079.
- [7] 森田泰之, “重イオン入射ビームの大強度・高輝度化”大阪大学理学研究科物理学専攻 修士論文(2018).