

# スリット-ハーブ装置による 4 次元エミッタンス評価の試験

## PRELIMINARY RESULTS OF FOUR-DIMENSIONAL EMITTANCE ESTIMATION USING SLIT-HARP DEVICE

柏木啓次<sup>#</sup>, 宮脇信正, 倉島俊

Hirotsugu Kashiwagi<sup>#</sup>, Nobumasa Miyawaki, Satoshi Kurashima

Takasaki Advanced Radiation Research Institute, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

### Abstract

We are developing a beam injection tuning method for matching the emittance of the beam with the acceptance of the cyclotron. Four-dimensional emittance data is necessary to accurately perform the beam transport calculation for controlling the emittance shape in the low energy beam transport line including solenoid magnets. We have developed a method to obtain 4-dimensional emittance data by combining horizontal and vertical measuring devices of the slit-harp device which is used for the 2-dimensional emittance evaluation. The results of a test experiment and data analysis showed that 4-dimensional emittance data can be obtained by the method.

### 1. はじめに

量研高崎 AVF サイクロトロン (K=110) [1] は材料・バイオ研究等のために 10 MeV H<sup>+</sup> から 490 MeV Os<sup>30+</sup> の多様なイオンビームを実験ごとに切り替えて提供している。このビームの切り替え時には、サイクロトロン・イオン源のパラメータの変更を行った後、ビーム入射調整が行われる。イオン源から射出するビームの軌道はイオン種が同じであっても都度異なるため、切り替えごとにビーム入射ラインの電磁石電流を手動で調整している。この入射調整を効率的に行うため、測定したエミッタンスを基に軌道計算を行い、電磁石電流を決定する方法を開発している [2]。

イオン源からサイクロトロンまでの低エネルギービーム輸送ラインは主にソレノイド電磁石と偏向電磁石で構成されているため、軌道計算を行ってエミッタンス形状を制御するためには 4 次元エミッタンスのデータが必要である。そこで、2 次元エミッタンス評価用に用いられているスリット-ハーブ装置の水平・鉛直方向測定装置を組み合わせることで 4 次元エミッタンスデータを得る方法を開発した。

### 2. スリット-ハーブエミッタンス測定装置

Figure 1 に主に重イオン生成用の ECR イオン源の低エネルギービーム輸送ライン及びスリット-ハーブエミッタンス測定装置 [3] を示す。イオン源はこの他に 3 台あり、偏向電磁石 IIM で各ビームラインが合流する。スリット-ハーブエミッタンス測定装置は全てのイオン源からのビームの測定を行うことができる偏向電磁石 IIM の下流のビームラインに設置されている。本装置は水平(x)、鉛直(y) 方向測定用の独立した 4 つの機器(上流から、x スリット、y スリット、x ハーブ、y ハーブの順)で構成されており、それぞれステップモータにより駆動する。x ハーブ、y ハーブはともに 48 本の  $\phi 0.1$  mm の金メッキタングステンワイヤーを 0.3mm 間隔で設置したものである。製作上の制約よりワイヤーは 4 本ずつビーム軸方向に 1

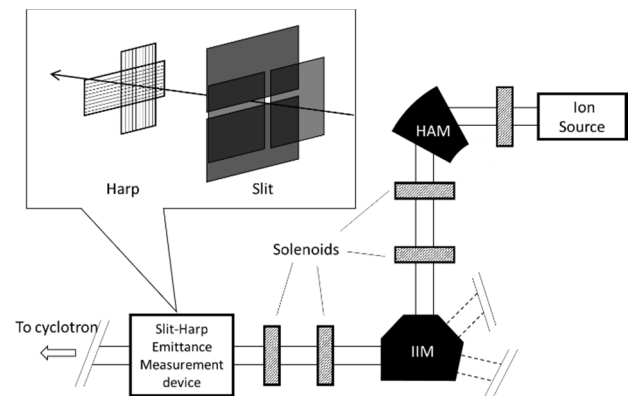


Figure 1: Schematic layout of low energy beam transport line and slit-harp device.

mm 位置をずらして設置されている。測定角度範囲は  $\pm 20$  mrad、ワイヤー間隔で決定される角度分解能は約 0.9 mrad である。スリット幅は x スリット、y スリットともに 0.1mm から約 4mm まで任意に設定可能である。各ワイヤーで検出したビーム強度信号は水平・鉛直各 48 チャンネルの電流-電圧変換アンプで増幅され、DAQ デバイスによって PC に取り込まれる。

2 次元エミッタンス測定においては、x スリットと x ハーブもしくは y スリットと y ハーブを測定位置範囲の一方の端からもう一方の端まで同期して動かすとともに、スリット位置に対する各ワイヤーのビーム強度を取得することで x-x' 平面もしくは y-y' 平面におけるビームの強度分布を求める。

### 3. 4 次元エミッタンスデータ取得のための測定及びデータ解析

ビームの横方向の 4 次元エミッタンスデータ  $(x, x', y, y')$  を得るためには、位置  $(x, y)$  における発散角  $(x', y')$  を測定する必要がある。スリット-ハーブエミッタンス装置は通常 2 次元エミッタンスの測定に使用されているが、本装

<sup>#</sup> kashiwagi.hirotsugu@qst.go.jp

置のように水平・鉛直方向が独立した装置であれば、これらを組み合わせることによって3次元以上の位相空間におけるビームの強度分布を得ることが可能である。本方法では3次元のエミッタンス測定結果からデータ解析によってビームの4次元情報を構築する。ただし、本方法で得られる4次元情報はビームの全4次元情報でなく、位置 $(x, y)$ におけるビームの発散角 $(x', y')$ の代表値である。

### 3.1 3次元エミッタンス測定

スリット・ハープによる $x$ - $x'$ エミッタンス測定では、 $x$ スリットで切り出された鉛直方向に細長いビームの拡がりの発散角分布を全ての $y$ 座標についてまとめて測定する。 $y$ スリットを用いて $y$ 位置ごとにこの $x$ - $x'$ エミッタンス測定を行うことでビームの $x$ - $y$ - $x'$ 位相空間分布を測定することができる。同様に、 $x$ スリットを用いて $y$ - $y'$ エミッタンス測定を $x$ 位置を変えて複数回行うことで $x$ - $y$ - $y'$ 位相空間分布が測定できる。

2次元測定時は $x$ スリット、 $y$ スリットともにスリット幅は角度分解能を低下させないよう、ワイヤー径と同じ0.1 mmに設定している。しかし、3次元測定を $x, y$ スリットの幅をとともに0.1 mmで行った場合、ハープでの検出ビーム強度が非常に微弱となるため、ビーム発散角を計測しない方向のスリット( $x$ - $y$ - $x'$ 測定では $y$ スリット、 $x$ - $y$ - $y'$ 測定では $x$ スリット)の幅は検出ビーム強度に応じて1 mmから2 mm程度に拡げて測定を行うこととなる。

### 3.2 4次元データの作成

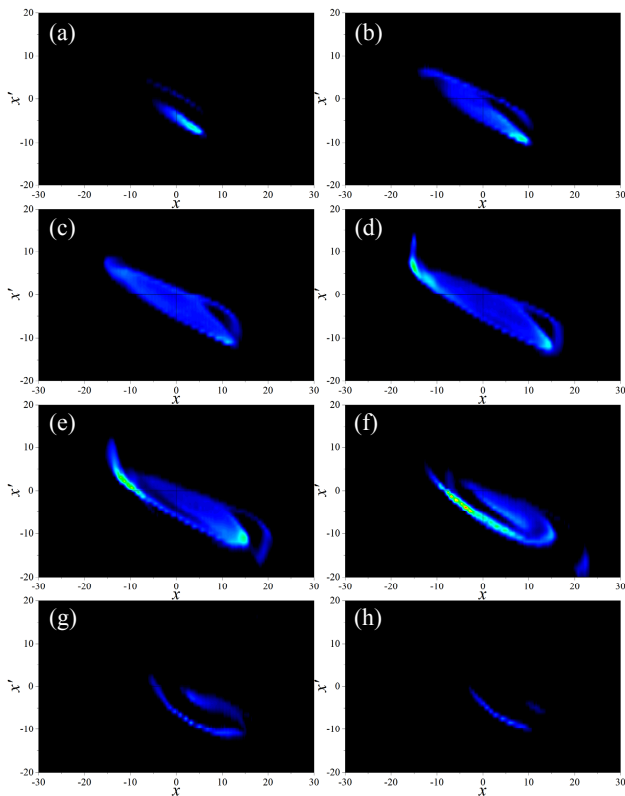


Figure 2: Results of the  $x$ - $y$ - $x'$  measurement. (a)  $y = -9$  mm (b)  $y = -6$  mm (c)  $y = -3$  mm (d)  $y = 0$  mm (e)  $y = 3$  mm (f)  $y = 6$  mm (g)  $y = 9$  mm.

3次元測定( $x$ - $y$ - $x'$ ,  $x$ - $y$ - $y'$ )により、位置 $(x, y)$ における $x', y'$ およびその座標におけるビームの強度が得られる。このデータを用いて位置 $(x, y)$ におけるビームの発散角 $(x', y')$ を決定し、4次元データ $(x, y, x', y')$ を作成する。この方法について以下に示す

- 共通  $xy$  座標のデータを抽出:  $x$ - $y$ - $x'$ 測定では $y$ スリットの位置ごとに $x$ スリット及び $x$ ハープをスキャンして $x$ - $x'$ 平面での測定を行い、 $x$ - $y$ - $y'$ 測定では $x$ スリット位置ごとに $y$ - $y'$ 測定を行う。通常、 $x$ - $y$ - $x'$ 測定では $y$ の測定間隔は $x$ に比べ大きく、 $x$ - $y$ - $y'$ 測定では $x$ の測定間隔が $y$ に比べ大きい。そのため、 $x$ - $y$ - $x'$ 測定と $x$ - $y$ - $y'$ 測定で測定される $xy$ 座標が同一ではない。そこで、これらの2つの測定結果から共通する $xy$ 座標の測定データ $(x, y, x', y', \text{ビーム強度})$ を抽出する
- $x', y'$ の決定: 位置 $(x, y)$ における $x', y'$ の代表値を最大強度となる座標、もしくは重心座標により決定する

## 4. 3次元エミッタンス測定及び4次元データ構築試験

本方法で4次元データが得られることを確かめるため、測定及びデータ解析プログラムを作成し、3次元エミッタンス測定を行い、その結果から4次元データを構築する試験を行った。本測定にはHECRイオン源で生成した50.22 keVの $O^{6+}$ を用いた。

3次元エミッタンス測定の際の $x, y$ 範囲は $-18 \text{ mm} \leq x \leq 24 \text{ mm}$ 、 $-11 \text{ mm} \leq y \leq 14 \text{ mm}$ 、また、 $x$ - $y$ - $x'$ 測定での $y$ 測定間隔は1 mm、 $x$ - $y$ - $y'$ 測定での $x$ 測定間隔は2 mmである。Figure 2に $x$ - $y$ - $x'$ 測定結果を示す。 $y$ 位置を変えると、

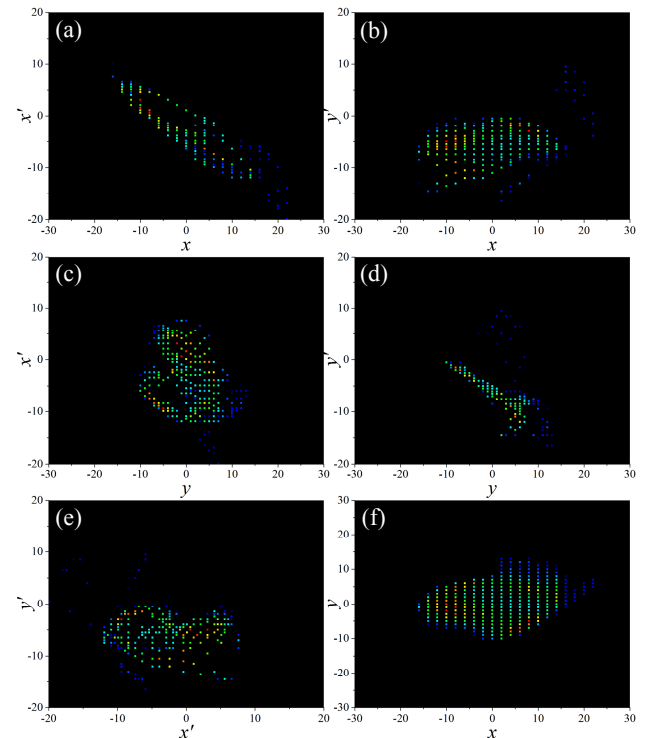


Figure 3: Beam intensity distributions in 2-D planes from 4-D data.

$x$ - $x'$ 平面のビーム分布が徐々に変化しているのがわかる。同様に、 $x$ - $y$ - $y'$ 測定を行い  $x$  位置ごとの  $y$ - $y'$ 分布が測定されることを確認した。

これらの測定データから共通した  $xy$  座標を持つデータを抽出し、その位置( $x, y$ )での最大強度となる  $x'$ および  $y'$ を代表値とすることで4次元データ( $x, y, x', y'$ )を作成した。Figure 3に得られた4次元データから作成した $x$ - $x'$ ,  $x$ - $y'$ ,  $y$ - $x'$ ,  $x$ - $y$ ,  $x'$ - $y'$ 各平面上でビームの分布を示す。このように、本方法により二つの3次元データから4次元データを構築できることを確認した。

## 5. まとめと今後の予定

スリット-ハープエミッタンスの測定装置を用いて4次元エミッタンスデータを得る方法の開発を行った。 $x$  スリットと $x$  ハープによる $x$ - $x'$ 分布測定に $y$  スリットを加えた $x$ - $y$ - $x'$ 測定と、 $y$ - $y'$ 分布測定に $x$  スリットを加えた $xy$ - $y'$ 分布測定を行い、その結果から位置( $x, y$ )のビーム発散角( $x', y'$ )を求めることで4次元エミッタンスデータが得られることを確

認した。

今後は、3次元データから4次元データへのデータ変換方法の改良を進めるとともに、得られた4次元データを用いて軌道計算を行って、アクセプタンスと整合させるためのエミッタンス形状制御を行う。

## 参考文献

- [1] K. Arakawa *et al.*, “Construction and first year’s operation of the JAERI AVF Cyclotron”, Proc. 13th. Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Vancouver, Canada, 1992, pp. 119-122.
- [2] H. Kashiwagi *et al.*, “Test of beam transport based on beam emittance measurement in the injection line of the TIARA AVF cyclotron.” Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2017, pp. 1123-1125.
- [3] Kashiwagi *et al.*, “Development of a fast emittance measurement system with the slit-harp method.” Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2016, pp. 619-62.