

## BEAM PROFILE MEASUREMENT USING FLYING WIRE AT THE J-PARC MR

Susumu Igarashi<sup>1,A)</sup>, Kotoku Hanamura<sup>B)</sup>, Yoshinori Hashimoto<sup>A)</sup>,  
Masaki Tejima<sup>A)</sup>, Takeshi Toyama<sup>A)</sup>, Kenichirou Satou<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

<sup>B)</sup> Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.  
2-8-8 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-0045

Abstract (英語)

Beam profiles have been measured using flying wire monitor at the main ring (MR) of the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC). The flying wire is a beam profile monitor using a thin carbon fiber as a target. The beam is scanned with the wire target at the maximum speed of 5 m/s. The secondary particles from the beam-wire scattering are detected using a scintillation counter as a function of the wire position. The measured beam profiles indicated the effect of the injection mismatch, linear coupling resonance and adiabatic damping.

### J-PARC MRでのフライングワイヤーによるビームプロファイルの測定

#### 1. フライングワイヤーモニター

大強度陽子加速器施設(J-PARC)においては、ビームロスの低減が重要課題で、ビームロスのメカニズムの理解のためのビームプロファイルの測定が重要となる。現在、主リング(MR)では、プロファイル測定のために、ビームにより残留ガスがイオン化する現象を使ったイオンプロファイルモニター(IPM)<sup>[1]</sup>と、ワイヤーをターゲットとしビームとの散乱を測定するフライングワイヤーモニターがある。

フライングワイヤーは直径 7  $\mu\text{m}$ のカーボンファイバーをターゲットとして、ビームを横切るように最大 5 m/sの速度で移動させて、その際のビームの散乱粒子をシンチレータで計測することにより、ビームプロファイルを測るためのモニターである

(図1)。ビーム散乱によりビームを乱すと、正確なプロファイル測定とならないので、細いターゲットを素早く動かすことにより、ビームへの影響を最小として、正確なプロファイルを行うようにワイヤー材料、スキャン速度を決めている。フライングワイヤーはCERN、Fermilab等の陽子加速器でも使用されており、KEK-PSでも独自にワイヤー動作機構を開発し<sup>[2]</sup>、それをもとにJ-PARC MR用のモニターを製作した<sup>[3]</sup>。

水平方向プロファイル測定用として1台製作し、MRの入射部コリメータ下流に設置し、測定を行っている。コリメータ下流ではビームロスがあり、測定バックグラウンドとなるので、今年の夏に入射部コリメータの上流に設置位置を変更する。また、垂直方向プロファイル測定用としてもう1台製作し、水平方向用モニターに隣接して設置する。

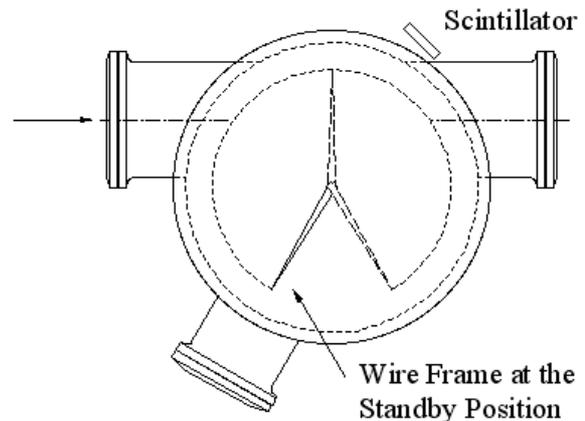


図1：フライングワイヤーの平面図。

#### 2. 入射ミスマッチの測定

調整初期には、入射路(3-50BT)とMRの光学パラメータのミスマッチにより、入射ミスマッチがあった。3-50BTでのマルチワイヤープロファイルモニター(MWPM)によるビームプロファイルはガウス分布を示し、 $2\sigma$ エミッタンスで  $4\pi$  mmmradであった。MRでのプロファイルは、 $4 \times 10^{11}$  protons per pulse、1バンチ入射で、入射から20 ms後のプロファイル測定で、図2で示すように、細いピークと幅の広い分布が重なった形状となっていた。3-50BTのQ電磁石の励磁曲線を検討しなおして、更にIPMでMRのターン毎のビームプロファイルを測定し、四極振動を小さくするように微調整を行った。調整後のフライングワイヤーによるビームプロファイルを図3に示す。

<sup>1</sup> E-mail: susumu.igarashi@kek.jp

2 $\sigma$ エミッタンスは3.4 $\pi$  mmmradであり、概ね3-50BTでの測定と一致している。

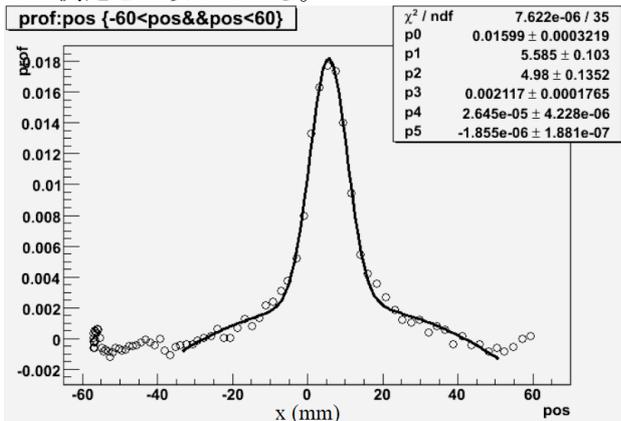


図2：入射ミスマッチがある状態でのビームプロファイル。

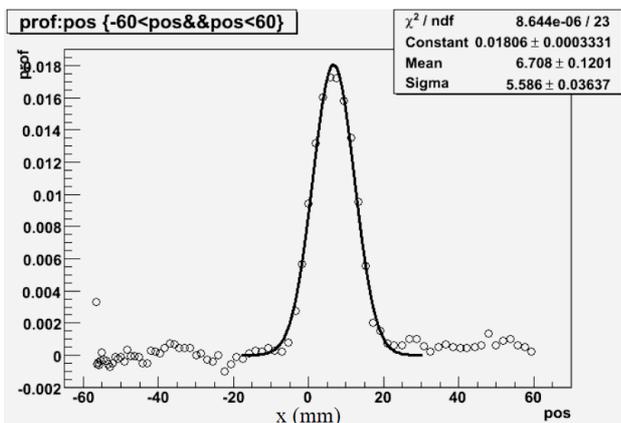


図3：入射マッチング調整後のビームプロファイル。

### 3. 線形結合共鳴のプロファイルへの影響

線形結合共鳴  $v_x+v_y=43$  のビームプロファイルへの影響を、ビーム強度を  $2 \times 10^{11}$ ,  $4 \times 10^{11}$ ,  $8 \times 10^{11}$  pppとして観測した。チューンの設定を  $(v_x, v_y) = (22.14, 20.72), (22.17, 20.75), (22.23, 20.81), (22.24, 20.82), (22.26, 20.84), (22.29, 20.87), (22.32, 20.90)$  として、加速開始から 0.5 s 後にプロファイルを測定した。入射ミスマッチがある状態であったが、細い分布の部分をガウス関数でフィットし、2 $\sigma$ エミッタンスを図4に示す。 $v_x+v_y$ が43より小さいときは、ビーム強度に依らず、ビームは細いままであった。 $v_x+v_y$ が43より大きいときは、ビームエミッタンスは $v_x+v_y$ に依り、43に近いときに大きくなっている。この効果は、ビーム強度にも依り、ビーム強度が強いほど、ビームエミッタンスが大きくなっている。

空間電荷効果に依りチューンが小さい方に広がり、そのチューン分布が線形結合共鳴にかかると、その共鳴効果でビームエミッタンスが大きくなるものと考えられる。空間電荷のチューンスプレッドは、ビーム強度が  $8 \times 10^{11}$  ppp のとき、0.04 程度と評価され、測定結果を概ね説明できる。この評価で、ビームエミッタンスは測定値の3.4 $\pi$  mmmradを使い、

バンチングファクターも壁電流モニターの測定からの0.04を使用した。

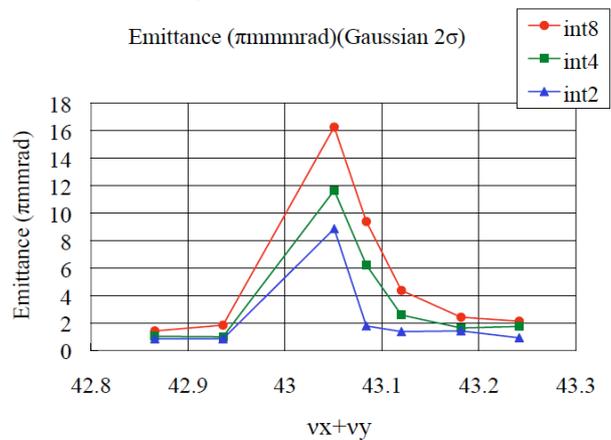


図4：線形結合共鳴付近でのチューン $v_x+v_y$ についてのビームエミッタンスの依存性。ビーム強度 $2 \times 10^{11}$  pppのとき青三角、 $4 \times 10^{11}$  pppのとき緑四角、 $8 \times 10^{11}$  pppのとき赤丸で示す。

### 4. ビームエミッタンスのビーム強度依存性

ビーム強度を  $2 \times 10^{12}$  ppp から  $1 \times 10^{13}$  ppp まで変えたときのビームエミッタンスを測定した。入射バンチ数は 2バンチで入射後 120 ms は入射エネルギーの 3 GeV で周回し、その後、30GeV まで加速するパターンのうち、加速開始後 100 ms でプロファイルの測定を行った。測定結果は加速中のアディアバティックダンピングを仮定し、3 GeV でのエミッタンスにスケールさせた。MRのチューンは  $(22.41, 20.75)$  とした。コリメータの設定は、3-50BTで54  $\pi$  mmmrad、MRで60  $\pi$  mmmradとした。

LINACからRCSへの横方向の入射条件は、セクター入射、あるいは、100  $\pi$  mmmrad のペイント入射とした。また、縦方向の入射条件も、ペイントを行わない条件と行う条件を作った。縦方向ペイント条件として、RCSの2nd harmonic RFを基本波電圧の80%でかけ、入射中に2nd harmonic RFの位相を、基本波を基準として、0から-80%へ、または、0から-100%へ変化させた場合を設定した。また、RCSの運動量オフセットを 0%, -0.1%, -0.2%とし、縦方向ペイント条件を設定した。

ビーム強度が大きくなるにつれてMRでのビームサイズが大きくなっていることが分かった(図5)。 $2 \times 10^{12}$  ppp のときの100%ビームエミッタンスは 17  $\pi$  mmmradで、 $1 \times 10^{13}$  pppのときの100%エミッタンスは 52  $\pi$  mmmradであった。ビームロスも、ビーム強度が大きくなるにつれて、大きくなった。 $2 \times 10^{12}$  ppp のときのMR入射後120 msまでのビームロスは 0.1%以下で、 $1 \times 10^{13}$  pppのときのビームロスは 6.6 %であった。RCS入射時の横方向ペイント入射の場合は、1 $\sigma$ のビームサイズは 15.6 mmと横方向ペイントなしの場合の15.0 mmに比べ大きくなっていたが、100%エミッタンスとしては 45  $\pi$

mmradと小さくなった。また、縦方向ペイント入射の場合は、どのペイント条件でも $1\sigma$ のビームサイズが $13\text{ mm} \sim 14\text{ mm}$ となり、縦方向ペイントなしの場合より、小さくなった。 $1 \times 10^{13}$  pppのときのビームロスが最小となった設定は、RCSでの入射時に $100\pi$  mmradの横方向ペイントで、縦方向ペイント条件として、RCSの2nd harmonic RFを基本波電圧の80%でかけ、その位相を、入射中に、 $0$  から $-80\%$ へ変化させた場合で、RCSの運動量オフセットを $0\%$ とした場合であった。そのときのMR入射後 $120\text{ ms}$ のビームロスは $6.0\%$ であった。

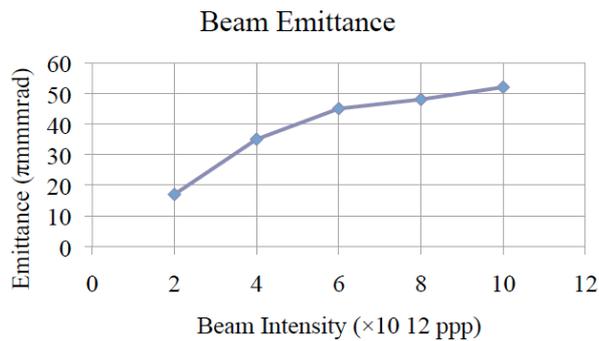


図5：ビームエミッタンスのビーム強度依存性。

## 5. 加速中のプロファイル

現在の最高ビーム強度  $1.2 \times 10^{13}$  ppp での加速中のビームプロファイルを測定した。2バンチ入射で、 $3\text{ GeV}$ から $30\text{ GeV}$ までを $1.9\text{ s}$ で加速している間、加速開始後 $0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.3, 1.7, 1.9\text{ s}$ でのプロファイルを別々のショットで測定した。当初、プロファイルの測定分布に不自然な飽和が見られたが、シンチレーションカウンターの飽和と考え、シンチレータの位置をワイヤーから約2倍遠ざけることにより問題を解決した。プロファイルより100%エミッタンスを算出し、加速中の運動量の値との散布図をつくると図6のようになる。加速開始から $0.1\text{ s}$ 後のエミッタンスが $67\pi$  mmradでほぼコリメータのサイズであり、入射から加速初期でビームがコリメータサイズまで大きくなっていると考えられる。ただ、その後は、概ねアディアバティックにダンピングしていることがわかる。

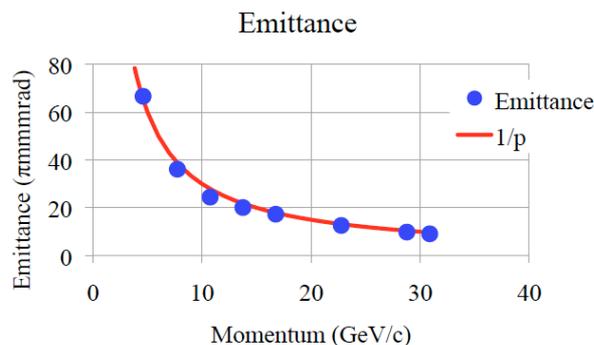


図6：加速中のビームエミッタンス(100%)。

## 6. 課題

フライングワイヤーがシンチレータを使い、ビームバックグラウンドに弱いので、現在のコリメータの下流の場所は、あまり良くなく、特にビーム強度が強いときの入射エネルギーでの測定に問題がある。2010年の夏にコリメータおよび入射機器の上流の場所に移設する。これにより、特に入射直後のプロファイルの測定が可能となると思われる。また、垂直方向プロファイル測定用のフライングワイヤーを2010年夏に新しく設置する。

## 7. まとめ

水平方向プロファイル用のフライングワイヤーを2008年の春に設置してからワイヤーが切れることなく、ビーム強度  $1.2 \times 10^{13}$  ppp、2バンチの測定が可能であることが分かった。6バンチの測定については機会を逸したが、少なくともワイヤーが待機位置にいる状態で、 $1.2 \times 10^{13}$  ppp、6バンチ運転でワイヤーが切れることはなかった。

ビーム強度が $4 \times 10^{11}$  ppp程度の状態ならば、入射時のプロファイルは可能であったが、ビーム強度が強い場合にはビームロスのつくバックグラウンドにより、入射時のプロファイル測定には問題がある。ただし加速開始後 $0.1\text{ s}$ からは、 $1.2 \times 10^{13}$  pppのビーム強度でも測定可能であった。

2010年夏にフライングワイヤーを、ビームロスの少ないコリメータおよび入射機器の上流に移設し、ビーム強度の大きい場合の入射直後のプロファイルを測定できるようにする。また垂直方向フライングワイヤーを設置する。

## 参考文献

- [1] K. Satou et al., "Development of IPM for J-PARC MR", Proceedings of the 6<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 5~7, 2009, Ibaraki, Japan.
- [2] S. Igarashi et al., "Flying Wire Beam Profile Monitors at the KEK PS Main Ring", Nucl. Instrum. Meth. A482:32-41, 2002
- [3] S. Igarashi et al., "Flying Wire Beam Profile Monitor at the J-PARC MR", Proceedings of the 5<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 6~8, 2008, Higashihiroshima, Japan.