

ニュースバル入射ビームラインの時間分解 Q スキャン

TIME RESOLVING Q-SCANNING AT THE BEAM TRANSPORT LINE

庄司善彦^{#,A)}, 皆川康幸^{B)}, 竹村育浩^{B)}

Yoshihiko Shoji^{#,A)}, Yasuyuki Minagawa^{B)}, Yasuhiro Takemura^{B)}

^{A)} University of Hyogo, NewSUBARU/Spring-8

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

Abstract

We report the results of the time-resolving Q-scan at the beam transport line to NewSUBARU. We used the conventional Charge Transformer (CT) to monitor the linac bunch structure and the screen monitor for the measurement of beam profile. We succeeded to obtain a transverse beam parameter of one single bunch in a macro pulse, which had two or three bunches.

1. はじめに

電子蓄積リング NewSUBARU では、安定なトップアップ運転を継続するために高い入射効率の維持が重要である。これまで様々なマシンスタディーを通じてポイントが明らかになってきた。近年の問題点の一つは、ショット毎の入射ビームのばらつきである。これは線形加速器を入射器としていることに起因し、入射調整の鍵はこの線形加速器ビームの理解にあることが明らかになっている。

ニュースバルへの入射はシングル・バケット入射で、入射ビームの時間幅はサイクルによって一定ではないが 1ns 程度である。蓄積リングの rf 周波数は 500MHz であり、1 発のビーム (マクロ・パルス) は蓄積リングの 1 つの rf バケットに入射される。一方で線形加速器の rf 周波数は 2856MHz なので、この 1 発のマクロ・パルスは内部バンチ構造を持ち 1 パルスは 2~3 バンチを含む。これまでの観測に依れば、このバンチ構造 (=時間構造) のばらつきに連動して横方向のビームパラメーターも変動している。問題点はそれが入射効率のばらつきに直結していることにある。

これまで我々は、電子蓄積リングに設置したストリークカメラを用いて線形加速器ビームをモニターしてきた[1]。この測定手順は解析が面倒だが、現有機器のみで、線形加速器ビームの時間構造 (バンチ構造) と、それぞれのバンチの 2次元 (y - y' あるいは x - x') 分布をシングル・ショットで測定できる手法である。これまでの y - y' 空間の測定によって明確になってきた点は以下である。

(1) 電子銃の時間ゲートにタイミングジッターがあり、これがパルス内のバンチ構造を変える。

(2) 同一パルス内でも先頭バンチと最後のバンチでは、transverse parameters が大きく違う。

(3) 同一パルス内の同じ先頭バンチでも、時間構造に起因するバンチ電荷によって、transverse parameters が変わる。

といったものである。一方で別のマシンスタディー

から rf bucket に対するビーム軸方向のパルスサイズは十分小さく、また vertical transverse emittance は入射効率に対する決定的要素ではないことが解ってきた。従って次のステップは上記(1),(2)と(3)が (x - x') 空間でも正しいと示すことである。

ここで我々はより簡単な測定方法が必要と考えて、旧来の方法による測定可能性を検討した。それはビームトランスポートラインに従来から設置されていたスクリーンモニターを使った Q-スキャンである。これを、内部バンチ構造に感度を持つ CT と組み合わせることで、単一バンチだけを分離してビームパラメーターを得る事に成功した。

2. 測定方法

2.1 モニター装置

2014 年にデマルケストスクリーンの厚さを 1mm から 0.1mm に変更し、分解能を大幅に向上させた。Figure 1 にスクリーンの構造を示す。従来からあるスクリーンのマーカー (小穴) は、スケール較正用に、中央から端に移した。

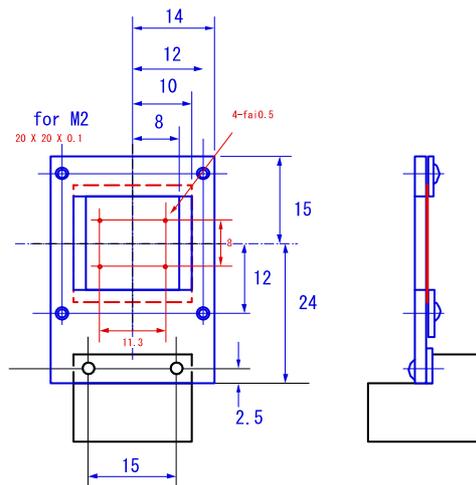


Figure 1: New monitor screen at the transport line.

[#] shoji@lasti.u-hyogo.ac.jp

スクリーンを薄くした効果で電子ビームの多くがスクリーンを透過するようになり、スクリーンより下流に設置されている CT で時間構造の同時測定が可能となった。今回使用した fast CT も従来からビームトランスポートに設置されている装置である。時間分解能は 0.5 ns 程度で線形加速器のバンチを分離できないが、ビームがバンチから構成されていることを仮定すれば凡その推測が可能あって、それで十分である。

2.2 プロファイル計測

測定は通常の Q-スキャンと同じだが、同一条件で 20~30 回測定する。同時に CT 波形を取り、CT 波形別に解析する。

測定結果の一例を Figure 2 に示す。従来は CT との相関は考えずに Q スキャンを行なってきたために気付かなかったが、図のように比較すれば、相関は明白である。

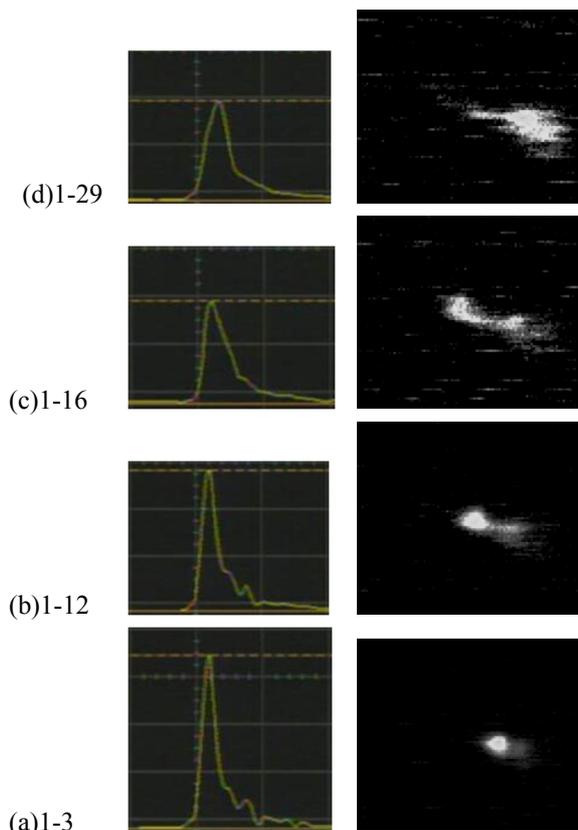


Figure 2: Example of the measurement at $K=-1.44$. The left is the CT signal form and the right is the beam profile on the screen for the same shot. Four sets of profiles are the images of four different shots with exactly the same machine parameters.

Single bunch に近いビームに対しては（最下段のプロファイル）、スクリーン上のビームプロファイルは小さなスポットである。CT 波形に後方バンチが現れてきたと考えられるショットでは、先頭バンチのスポットはやや左に移動し、右に新しいスポットが出現する。この、右のスポットが後方バンチのプ

ロファイルであることは容易に推測できる。これを利用してバンチ毎のプロファイルを得ることが可能である。

推測部分があるが、ストリークカメラを使った測定からの知見が不足部分を補っている。つまり、transverse parameter の原因は電子銃の timing jitter であり、同じ時間構造に対しては同じ transverse parameters になるという前提で解析を勧めることが出来るということである。

3. 時間分解 Q スキャン

3.1 Q 設定

序論に述べた(1)~(3)の知見が垂直方向だけでなく水平方向でも正しいことは、定性的には Figure 2 が証明している。しかし、この章では定量的な Q-scan による解析について述べる。今回の測定は Quadrupole magnet : Q10 とその中央から $L=9.39\text{m}$ 下流のデマルケストスクリーン M5 を使った。Q10 の設定は $K=-0.8, -1.44, -1.9$ (rad/m) の 3 種類でそれぞれ 20 shots 程度測定した。Q10 の実行長は $L_Q=0.264\text{m}$ である。以下、thin lens 近似を使い、集束力=焦点距離の逆数= KL_Q を k として解析を進める。

3.2 プロファイル解析

得られた典型的な horizontal profile を、CT time profile 順に並べて示したものが Figure 3 である。バンチ構造によってプロファイルが変わるので、近いバンチ構造のプロファイルを使って k 依存を見なければならぬ。

これらのプロファイルに対して Lorentz 分布と Gauss 分布を組み合わせた以下の関数を使って fitting した。

$$\text{Exp}(-x^2/8w^2) \left[1 + 1/(1+x^2/w^2) \right] \quad (1-1)$$

$$\text{Exp}(-x^2/w^2) \left[1 + 1/(1+x^2/w^2) \right] \quad (1-2)$$

式に物理的意味は無く、単に fitting が良いというだけである。左右対称で幅のパラメーターは w のみ、この他に高さや位置がパラメーターとなる。幅 w と分散の関係は、(1-1)に対しては $\text{rms}^2=3.17w^2$ 、(1-2)に対しては $\text{rms}^2=0.422w^2$ である。式の使い分けは、 $K=-1.44$ に対しては式(1-1)、 $K=-0.8, -1.9$ に対しては式(1-2)とした。

先頭バンチの強度が最も高い最下段のプロファイルに対して行なった fitting 結果を Figure 4 に示す。

3.3 k 依存

Figure 4 の左右のピークはそれぞれ先頭バンチと 2 番目のバンチに相当する。ここでは左右のピークの面積比はほぼ 3:1 の shot で比較する。先頭ピークに対して rms^2 を使った Q scan の結果を Figure 5 に示す。データ点が 3 つなので、パラメーターは決まってしまう。スクリーン分解能を $\text{rms}^2 = 0.01\text{mm}^2$ とし

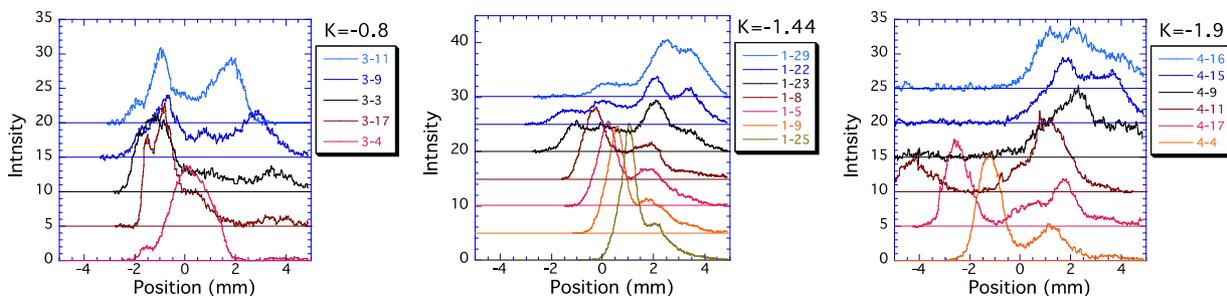


Figure 3: Typical horizontal beam profiles for three Q magnet settings.

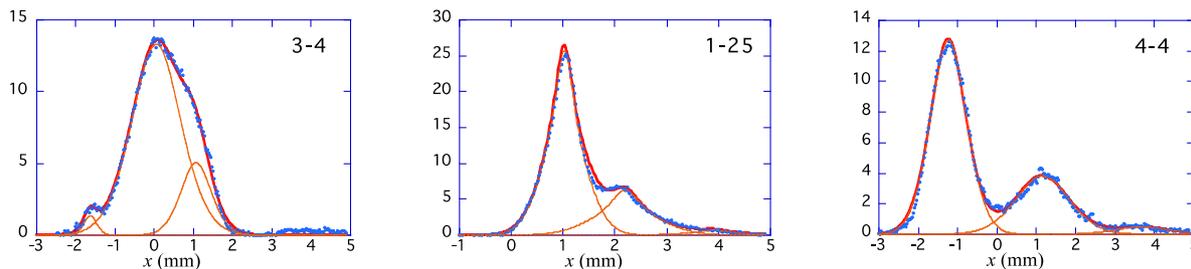


Figure 4: Parameter fitting to the beam profiles at the bottom of Figure 3.

て求めた Q10 位置のビームパラメーターは、先頭と 2 番目のバンチに対してそれぞれ以下であった。

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= 0.016 \text{ mm mrad}, & \beta_x &= 11.5 \text{ m}, & \alpha_x &= -2.8 \\ \epsilon_x &= 0.010 \text{ mm mrad}, & \beta_x &= 12.3 \text{ m}, & \alpha_x &= -2.4 \end{aligned}$$

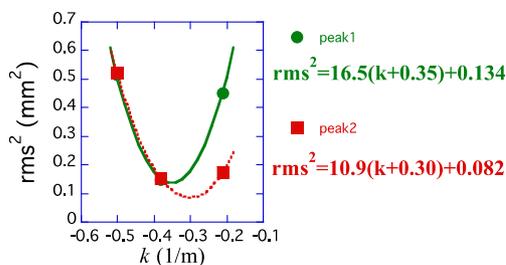


Figure 5: Parabola shape of Q-scanning of the initial bunch.

更に 2 つのピーク位置の差から、Q10 位置における中心の差を計算できる。スクリーン上の位置差を Δx 、Q10 における位置と角度差をそれぞれ Δx_0 $\Delta x'_0$ とすると下式が成り立つ。

$$\Delta x = (\Delta x_0 + L \Delta x'_0) + (L \Delta x_0) k \quad (2)$$

Figure 6 に示すプロットから $\Delta x_0 = 0.36$ mm, $\Delta x'_0 = 0.02$ mrad を得る。

以上の結果を Q10 位置の x - x' 空間に表示したものが Figure 7 である。先頭と 2 番目のバンチは分離されており、バンチ単独に対する Twiss parameters とマクロ・パルス全体に対する Twiss parameters は全く違う。また、タイミングジッターによってこの絵は大きく変る。

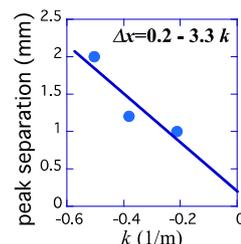


Figure 6: Position difference of the initial bunch and the second bunch.

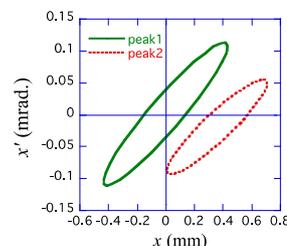


Figure 7: Beam ellipses of the initial bunch (peak1) and the second bunch (peak2) at Q10.

4. まとめ

ニュースバルへのビームトランスポートにおいて、線形加速器ビームの特定のバンチに対する Q-scan を行なった。これは、従来型スクリーンモニターと、バンチ構造に感度を持つ CT の組み合わせで可能になった。これにより既に明らかにした垂直方向に加え、水平方向のビームパラメーターのバンチ依存も確認できた。同じマクロ・パルス内であっても、バ

ンチによってパラメーターが異なり、同じバンチであってマクロ・パルス内のバンチ構造変化によってパラメーターが変化する。そして、バンチ構造がほぼ同じであれば横方向のパラメーターもほぼ同じになる。

参考文献

- [1] Y. Shoji, K. Takeda, Y. Minagawa, Y. Takemura, S. Suzuki, and T. Asaka, "Electron Storage Ring as a Single Shot Linac Beam Monitor", Proc. of IBIC'12.