

# BEAM-BASED CORRECTION OF A DCCT RESPONSE

Takeshi Toyama<sup>#</sup>, Yoshinori Hashimoto, Yoichi Sato, Masaki Tejima, Shuei Yamada

KEK/J-PARC

2-4 Shirane Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195

## Abstract

In high intensity accelerators of beam intensities above  $10^{13}$  particles per pulse, beam losses even in the order of 0.1 % are issues due to its residual activity. A beam DCCT may be very useful if it can detect such beam losses. The DCCT in the J-PARC MR has enough a resolution for such purpose. But so far three systematic relative errors are observed in the order of 0.1 %. Among these the deviation in the step response is corrected. At first modeling the DCCT system was performed using the response to the fast beam extraction. Then digital filter parameters were calculated with the model, and applied to the DCCT output signal. The relative deviation is corrected within 0.1%.

## ビーム DCCT 特性のビーム・ベースによる補正

### 1. はじめに

近年の大強度加速器では、1 加速あたり、または蓄積の粒子数が  $10^{13}$  個を超えるようになってきた。J-PARC では、定常運転時のビーム強度が RCS で 1 加速あたり約  $2 \times 10^{13}$  protons per pulse (ppp)、MR で約  $9 \times 10^{13}$  ppp に達している。そのため、ビームロス量が、ビーム強度に対して 0.1% 程度でも、絶対値は大きくなるため、残留放射能の観点から問題となる。ビーム電流モニターでこのビームロスを検出できれば非常に有効である<sup>[1]</sup>。一方、信号処理系はダイナミックレンジで制約を受けるので、いくら絶対値が大きくても相対値が小さいと正確な検出が困難になってくる。J-PARC MR に設置した DCCT<sup>[2]</sup> においては、相対精度 0.1% のオーダーでいくつかの系統的誤差を持つことが明らかになっている。(1) 信号処理回路のステップ応答の偏差 (= 周波数特性の歪み)、(2) シンクロトロン振動による誤信号、(3) 外部磁場による影響の 3 点である。特に(1) は、入射以降のビームロス評価において誤差の主要原因となり、問題となっていた(図 1、青線)<sup>[1]</sup>。

前述の強度のビームはリング周回電流に換算すると約 2.8 A になり、ベンチでビーム模擬試験をするには、大掛かりなセットアップが必要となる。一方、ビームの速い取出し(FX)では、ビームが 1 ターン (~5 $\mu$ s) 以内にリング内から無くなる。ビーム DCCT としては、このようなビーム電流はステップ入力と考えられる。FX 時の DCCT 出力をステップ応答とみなして、DCCT の回路系の特性をモデリングし、補正関数を導出、デジタルフィルタにより補正し良好な結果を得た。

### 2. DCCT 応答の線形性

システムが線形か非線形かで補正アルゴリズムが変わってくる。そのため、まず、上記の偏差が線形応答なのかをダミー電流信号 0.25, 0.5, 1.0A を使って確認した<sup>[3]</sup>。その結果、測定精度の範囲で線形であることが確認された(図 2)。

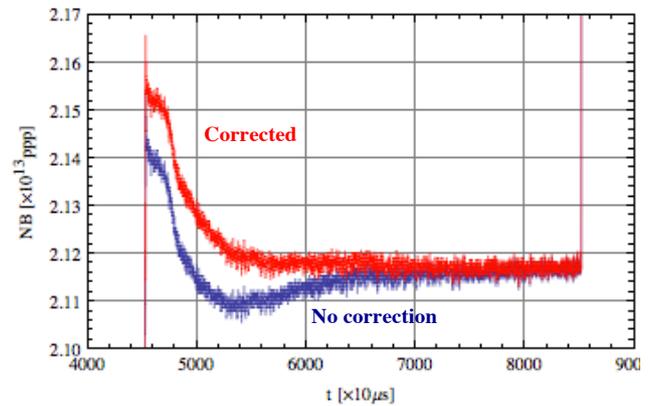


図 1: MR 入射時 (3 GeV) の DCCT 信号波形。青線: 補正前、赤線: 補正後。

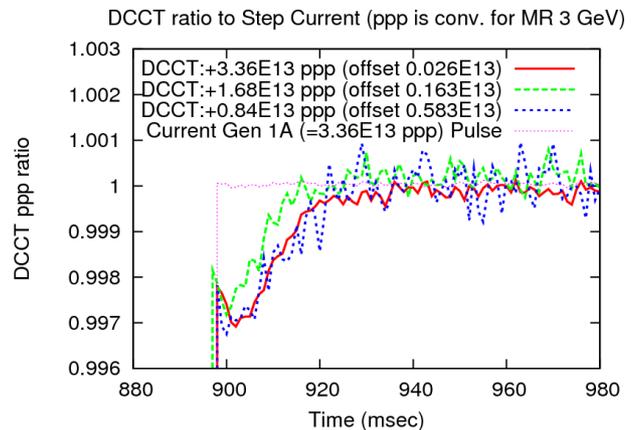


図 2: ダミー信号を使用した DCCT 線形性の確認。

細赤線がダミー入力信号 (1 A の場合) である。ダミー入力が、粒子数換算で、 $0.84 \times 10^{13}$  ppp,  $1.68 \times 10^{13}$  ppp,  $3.36 \times 10^{13}$  ppp の時に、対応する DCCT 出力信号を、それぞれ青破線、緑破線、赤線で示した。

<sup>#</sup> takeshi.toyama@kek.jp

それぞれの出力電圧は、最終値が1になるように規格化してある。

### 3. DCCT のモデリング

FX 時の DCCT 出力は、リング 1 周  $5 \mu s$  以内の時間でとり出される。さらに FX に伴うビームロスが無視出来る量であると、 $t \gg 5 \mu s$  では、ビーム電流のステップ入力と考えられる。J-PARC MR の場合、ビーム強度約  $9 \times 10^{13}$  ppp で電流約 2.8 A となる。DCCT システムの応答 (図 3) を、ここでは、物理法則に基づく「第 1 原理モデリング」ではなく、便宜的なモデリングを行う。すなわち、出来るだけ簡単な (低次の) 系で、システムを記述する方法を求めることにする。

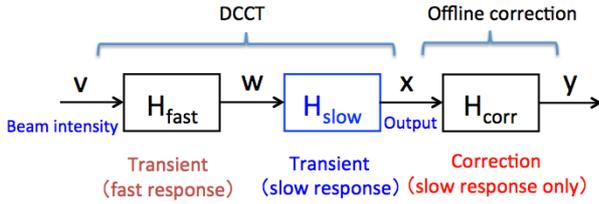


図 3: DCCT システムにおける信号の流れ。

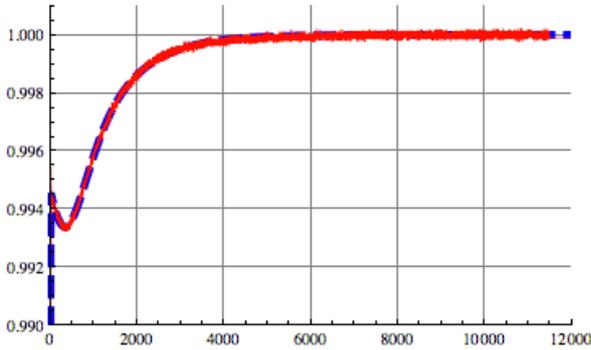


図 4: 速い取出しビームに対する規格化したステップレスポンス。赤線：実験値、青破線：フィット。

式(1)のような形を仮定し、実験データにフィッティングすると未知の係数が以下のように求まる。

$$y_{slow} = 1 + a e^{-\alpha t} \cos[\omega t - \phi] - b e^{-\beta t} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} a &= 0.006047561987019263 \\ \alpha &= 0.003179792842039866 \\ \omega &= 0.002692908951941402 \\ \phi &= -0.05924399694271084 \\ b &= 0.011357630102646362 \\ \beta &= 0.001050936434891587 \end{aligned}$$

フィットの結果を図 4 に青破線で記入した。後に使うので、Laplace 変換を求めておく：

$$H_{slow}[s] = 1 + \frac{b s}{s + \beta} + \frac{a s \{ (s + \alpha) \cos \phi - \omega \sin \phi \}}{(s + \alpha)^2 + \omega^2} \quad (2)$$

### 4. 補正関数とデジタルフィルタ

補正関数  $H_{corr}[s]$  は、下記の式を満たすようにとる：

$$H_{slow}[s] H_{corr}[s] = 1.$$

すなわち、

$$\begin{aligned} H_{corr}[s] &= \frac{1}{H_{slow}[s]} \\ &= \frac{n(s)}{d(s)}, \end{aligned}$$

$$n(s) = (s + \beta) \{ (s + \alpha)^2 - \omega^2 \}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} d(s) &= \{ (b - 1)s - \beta \} \{ (s + \alpha)^2 + \omega^2 \} \\ &\quad - a s (s + \beta) \{ (s + \alpha) \cos \phi - \omega \sin \phi \} \end{aligned}$$

となる。測定データは、100kSPS, 16bit ADC (帯域周波数 40kHz) によりデジタル・データとして得られるので、補正計算は、デジタル処理で行うことを考える。デジタル処理に都合が良いように、式(3)に  $z$  変換を施し、さらに対応する差分方程式を求める。まず、双 1 次  $z$  変換<sup>14)</sup>

$$s = \frac{2}{T} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad (4)$$

により、下記の式を得る (以下では  $T=1$  とおいた)：

$$\begin{aligned} H_{corr}[z] &= \frac{y[z]}{x[z]} = H_1[z] + H_2[z] + H_3[z] \\ H_1[z] &= \frac{y_1[z]}{x[z]} = b_{10} \\ H_2[z] &= \frac{y_2[z]}{x[z]} = \frac{b_{21} z^{-1}}{1 + a_{21} z^{-1}} \end{aligned} \quad (5)$$

$$H_3[z] = \frac{y_3[z]}{x[z]} = \frac{b_{31} z^{-1} + b_{32} z^{-2}}{1 + a_{31} z^{-1} + a_{32} z^{-2}}$$

$$\begin{aligned} b_{10} &= 1.005352321 \\ b_{21} &= -0.000012230 \\ a_{21} &= -0.998937540 \\ b_{31} &= 0.000018595 \\ b_{32} &= -0.000018489 \\ a_{31} &= -1.993661699 \\ a_{32} &= 0.993678901 \end{aligned}$$

ここでは、図 5 のような並列処理を採用した。式 (5) を、差分方程式に直すと

$$y[n] = y_1[n] + y_2[n] + y_3[n]$$

$$\begin{cases} y_1[n] = b_{10}x[n] \\ y_2[n] = b_{21}x[n-1] - a_{21}y_2[n-1] \\ y_3[n] = b_{31}x[n-1] + b_{32}x[n-2] \\ \quad - a_{31}y_3[n-1] - a_{32}y_3[n-2] \end{cases} \quad (6)$$

となる。ここで  $n$  番目のサンプル値を、それぞれ  $x[n]$ ,  $y_1[n]$ ,  $y_2[n]$ ,  $y_3[n]$ ,  $y[n]$ とした。この補正関数(6)を図6の測定値に作用させると、図7(a), (b), (c)の補正前の青線が、赤線で示すように補正される。立上り時のスパイクは DCCT の速い応答（リングング）で、今回の補正関数では補正していない。また、300Hz 程度の正弦波的な振動は、何らかの理由でシンクロトロン振動が混入していると考えられる。この例では、補正によりビームロスの評価値が1入射あたり約  $10^{11}$  protons、約 20W 増加することになる。

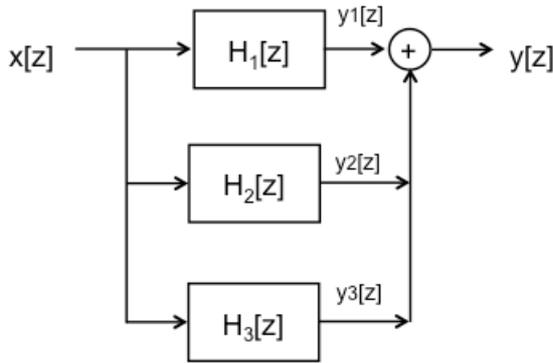


図5：z変数で記述した補正関数 ( $H_{\text{corr}}$ ) 内の信号の流れ。

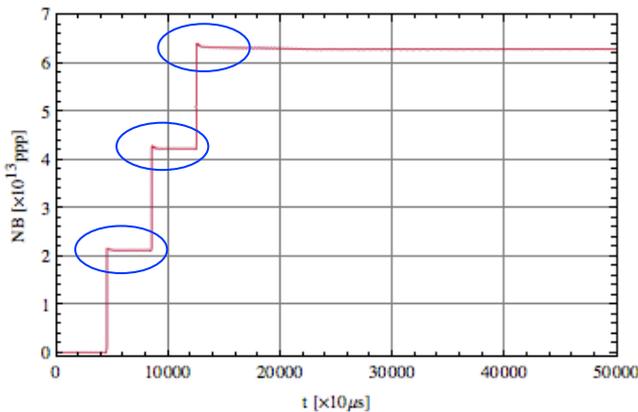


図6：DCCTによるビーム強度の測定例 (Run34, shot 119)。3段階に立ち上がっているのは、3回の入射のため。それぞれの入射時刻を K1, K2, K3, K4 と読んでいる。この例では、K1での入射は無い。青丸で囲った部分は、図7で拡大図として表示。

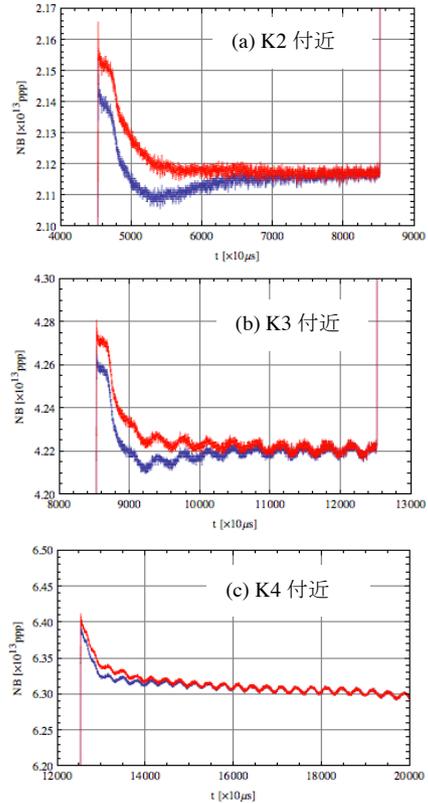


図7：DCCTによるビーム強度測定：各入射時刻 (K2, K3, K4) 付近の拡大図。青線：補正前、赤線：補正後。

## 5. 議論

速いビーム取出し時のステップ応答をモデリングして得た補正関数（デジタルフィルター）を、J-PARCの制御計算機のDCCT波形処理・表示プログラム（CERN ROOT<sup>[5]</sup>）を使用）に実装し、2011年2月8日から運用している<sup>[6]</sup>。これまでに、時間の経過と共に適正な補正関数がずれることが判明している。今後、時間変化の原因を追求するとともに、実用的にはショット毎（または数ショット程度の短期間）に補正関数を再導出して、補正に使用するアルゴリズムの確立を行っていく予定である。

## 参考文献

- [1] Y. Sato et al., “Beam dynamics simulations of J-PARC Main Ring for fast extraction operation: benchmarks to reproduce beam losses of current operation, and keys for upgrade plan by higher repetition”, in these proceedings (in Japanese).
- [2] Y. Hashimoto et al., “Characteristics of a DCCT for the J-PARC Main Ring” in these proceedings. Y. Ohmori et al., “A Calibration Method for Beam DCCT of J-PARC Main Ring”, *ibid.* (in Japanese).
- [3] 佐藤洋一、手島昌己、橋本義徳：メモ、“DCCT 補正用測定（測定日：2010/08/23-25）”。
- [4] 川又政征、“MATLAB で学ぶデジタル信号処理の基礎”、信号処理 5(5), 333-344, 2001, など。
- [5] <http://root.cern.ch/drupal/>
- [6] S. Yamada, private communication.