

## Beam tests of a high-performance digital BPM system at KEK-LINAC and KEK-ATF Damping ring

Isao Ito<sup>A)</sup>, Norio Nakamura<sup>A)</sup>, Hiroshi Sakai<sup>A)</sup>, Masanori Satoh<sup>B)</sup>, Kazuro Furukawa<sup>B)</sup>, Tsuyoshi Suwada<sup>B)</sup>,  
Masao Kuriki<sup>B)</sup>, Hitoshi Hayano<sup>B)</sup>, Nobuhiro Terunuma<sup>B)</sup>, Toshiya Muto<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Institute for Solid State Physics, University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, 277-8581

<sup>B)</sup> Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801

<sup>C)</sup> Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University, 1-2-1 Mikamine, Taihaku, Sendai, 982-0826

### Abstract

To establish a technology for a submicron level beam stability needed in cutting-edge synchrotron radiation sources and accelerators, we are developing a high-performance beam position monitor (BPM) with a digital BPM system "Libera" manufactured by Instrumentation Technologies. We performed beam tests of Libera at KEK-LINAC to examine usage in single pass measurement, and at KEK-ATF Damping ring to verify performance in a circular accelerator. In this paper, we will report results of these beam tests about Libera performance.

## KEK-LINACおよびKEK-ATFダンピングリングにおける 高性能デジタルBPMシステムの性能評価試験

### 1. はじめに

Liberaは高速サンプリングアナログ-デジタル変換器(Analog to Digital Converter, ADC)によりBPMのRF信号をデジタル化し、FPGA(Field Programmable Gate Array)で信号処理を行うシステムである<sup>[1]</sup>。図1にLiberaのブロック図を示す。Liberaは波形処理のためのアナログボードとデジタルボード、制御のための組み込みコンピュータにより構成されている。

アナログボードのRF channelにはビームのスペクトルで決まる特定の周波数に最適化されたアナログフィルタとRFアンプ、減衰器が備えられている。このRF channelがBPM信号から特定の周波数成分を取り出す。今回のビーム試験のためにRF channelが357MHz(バンド幅10MHz)と500.1MHz(バンド幅9MHz)に最適化されたLiberaを各々2台ずつ用意した。

LiberaはBPM4電極のRF信号を4つの独立した回路によって同時に測定し、クロスバースイッチ(Quasi-crossbar switch)により4つのRF channelに切り替え、ADCでデジタル値に変換した後、クロスバースイッチ(Digital crossbar switch)で元のチャンネルに切り替えてデジタルボードに送る。このクロスバースイッチによりアナログボードの個体差が軽減される。

デジタルボードに送られたデータはFPGA上のDigital Down Converter(DDC)とDigital filterで処理される。信号処理モードには、ADCのサンプリング周波数でデータを出力するADC Rateモード、ADC RateモードのデータをDDCでビームの周回周波数まで逡倍するTurn-by-Turnモード、Turn-by-TurnモードのデータをDigital filterにより10Hz間隔で平均するSlow Acquisitionモード、などがある。

これまで正弦波の信号を使ったベンチ試験にてLibera単体の性能評価試験を行い、サブマイクロレ

ベルの位置分解能と広範囲のチャンネル出力の直線性を確認できた。さらにクロスバースイッチを使うことで4チャンネルの個体差による電流依存性、周波数依存性、温度依存性を大幅に抑えられることも確認できた<sup>[2]</sup>。今回はベンチ試験の結果を踏まえ、円形加速器におけるLiberaの性能を評価するため、先端加速器試験装置(KEK-ATF)のダンピングリングにてビーム試験を行った。さらにLiberaが高速サンプリングやトリガー同期などのSingle Pass計測においても利用できる要素を有していることを加味し、Liberaの線形加速器への利用を検証するため、電子陽電子入射器(KEK-LINAC)にてビーム試験を行った。本稿ではKEK-ATFダンピングリングおよびKEK-LINACにおけるビーム試験の結果を報告する。

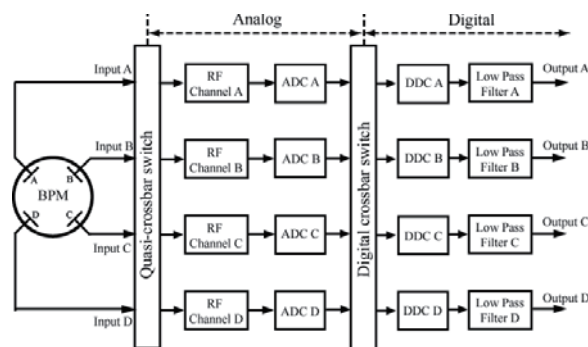


図1. Liberaのブロック図

### 2. KEK-ATFにおけるビーム試験

KEK-ATFダンピングリングはリニアコライダー用に超低エミッタンスを生成するための円形加速器である。ダンピングリングのRF周波数は714MHzである。ビーム位置計測にはボタン電極型BPMが使わ

れており、電極の径は $\Phi 12\text{mm}$ 、感度係数は約 $6388\ \mu\text{m}$ である<sup>[3]</sup>。信号強度は1GHz近辺で最大になる。KEK-ATFダンピングリングで使用されているBPM信号処理回路はBPM信号から1GHzまでの広帯域をピックアップし、ダイオードでマイナスの信号のみを取り出して、Charged ADC(14bit 500pC)により総電荷をデジタル化して位置データを算出する<sup>[4]</sup>。

今回のビーム試験では周回周波数2.16MHzのシングルバンチのビーム位置を計測した。LiberaはTurn-by-TurnモードとSlow Acquisitionモードの2通りでサンプリングを行い、さらにSlow Acquisitionモードではクロスバースイッチを併用した。ダンピングリングでは714MHz間隔のRFバケットに対して1つおきにバンチが分布しているので、使用するLiberaのRF ChannelはRF周波数714MHzの1/2である357MHz(バンド幅10MHz)に最適化されている。ダンピングリングを想定したベンチ試験の結果を表1に示す。

	Turn-by-Turn mode	Slow Acquisition mode
分解能 (-40dBm)	2.4 $\mu\text{m}$ 5 $\mu\text{m}$	0.05 $\mu\text{m}$ 0.15 $\mu\text{m}$
電流依存性 (-60~-40dBm)	10 $\mu\text{m}$ 50 $\mu\text{m}$	3 $\mu\text{m}$ 10 $\mu\text{m}$

表1.ベンチ試験の結果。上段(赤字)がクロスバースイッチを使った場合、下段(青字)が使わない場合

図2はビーム電流が2mAの時の垂直方向のTurn-by-TurnデータとSlow Acquisitionデータである。Slow AcquisitionデータはTurn-by-Turnデータのうちの100msec分をDigital filterで平均したデータであるため位置データのふらつきが小さくなり、さらにクロスバースイッチを使いアナログ回路特性を抑制することで位置データのふらつきがより小さくなる。

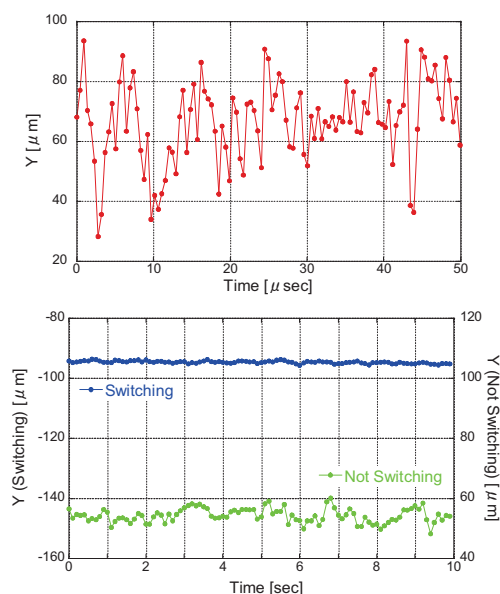


図2.KEK-ATFダンピングリングにおけるTurn-by-Turnデータ(上)とSlow Acquisitionデータ(下)。

図3はビーム電流に対する垂直方向の位置分解能である。100点のビーム位置データの標準偏差を位置分解能とした。位置分解能はビーム電流の増加に伴い向上し、ビーム電流2mAに対してTurn-by-Turnモードでは10  $\mu\text{m}$ 以下、Slow Acquisitionモードではクロスバースイッチを使わない場合は2  $\mu\text{m}$ 以下、使った場合は0.5  $\mu\text{m}$ 以下まで到達した。ビーム試験の結果がベンチ試験の結果より大きい原因の1つとして、実際のビームの位置変動や信号強度の変動による影響が考えられる。

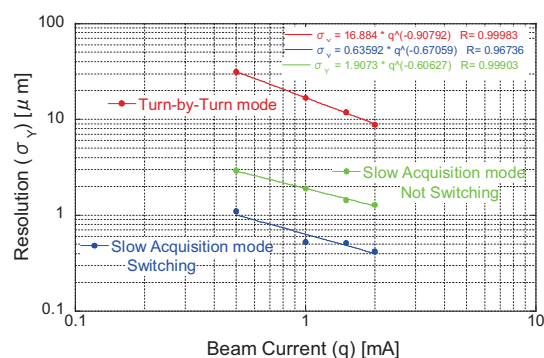


図3.位置分解能(垂直方向)

図4はLiberaの垂直方向の電流依存性である。Slow Acquisitionモードでサンプリングを行った。ビーム電流が2mAから0.3mAまで減少する間のLiberaの計測値の変動は10  $\mu\text{m}$ 程度であり、ベンチ試験の結果と合う。

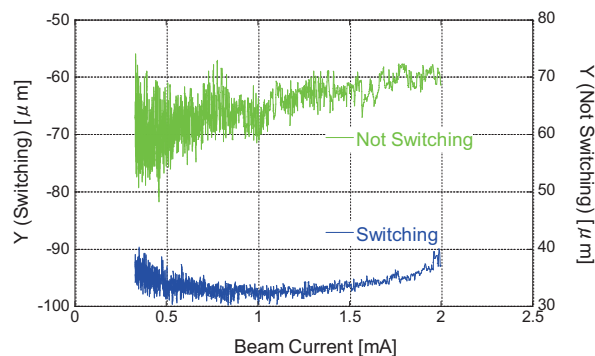


図4.電流依存性(垂直方向)

### 3. KEK-LINACにおけるビーム試験

KEK-LINACはKEKB、PF、PF-ARに電子・陽電子ビームを入射する線形加速器である。ビーム入射の繰り返しは最大50Hzで、KEKBへの安定した連続入射時は10Hzである。ビーム位置計測にはストリップライン型BPMが使われており、電極は長さ132.5mm、内径 $\phi 27.1\text{mm}$ 、開口角 $60^\circ$ 、感度係数は約 $8\text{mm}$ である<sup>[5]</sup>。信号強度は250MHz近辺で最大になる。KEK-LINACの既存BPMシステムでは、BPMセンサからピックアップされた複数のRF信号を信号合成器で一本のケーブルに合成し、デジタルオシロスコープ(DPO7104, Tectronix)でデジタル波形処理してビーム位置を導出する<sup>[6]</sup>。

今回のビーム試験では連続して配置されている2つのBPMセンサ各々にLibera2台(以下Libera1, Libera2)を設置して、10Hz間隔のビームと同期を取りながらTurn-by-Turnモードでビーム位置を計測した。また比較のためLiberaより下流に設置されたKEK-LINACの既存BPMシステムでビーム位置を計測した。なお、使用するLiberaは本来RF周波数が500.1MHzの円形加速器に合わせて作られたものであり、RF Channelは500.1MHz(バンド幅9MHz)に最適化されている。

図5はビーム電荷が0.2nCの時にTurn-by-Turnモードで計測した100パス分の水平方向のビーム位置である。

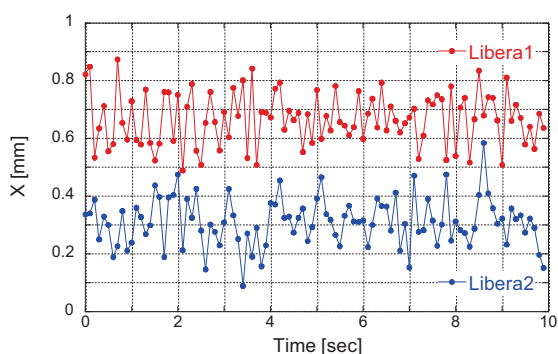


図5. Turn-by-Turnモードで計測した100パス分のビーム位置(水平方向)

図6はビーム電荷に対する水平方向の位置分解能である。100パス分のビーム位置データの標準偏差を位置分解能とした。比較のためKEK-LINACの既存BPMシステムの位置分解能もプロットしている。Liberaの位置分解能はビーム電荷の増加に伴い向上し、0.2nCで0.1mm以下に到達した。

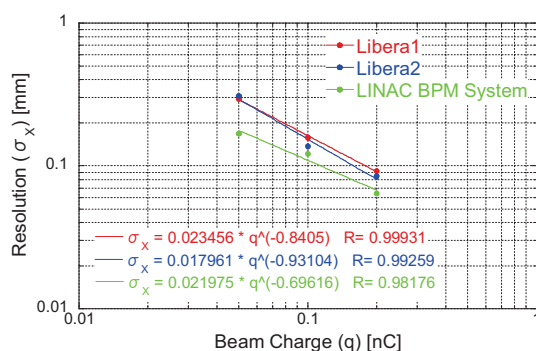


図6.位置分解能(水平方向)

図7はLiberaのビーム電荷-ビーム位置依存性を考えるためのステアリング電磁石の電流値に対する水平方向の測定値である。上流のステアリング電磁石によって蹴られたビームの位置を計測した。Liberaの電流依存性には誤差の範囲で有意な差が見られず無視できる程度に小さかった。さらにビーム位置の変位はステアリング電磁石の許容電流の範囲内(-5A~5A)で直線性が保たれた。

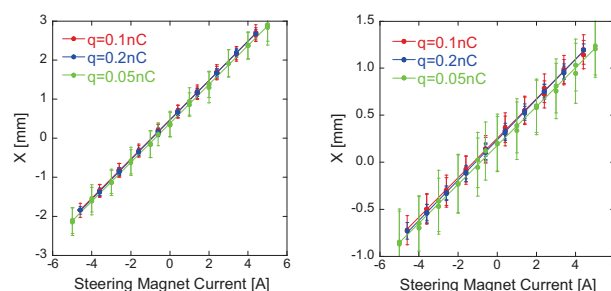


図7.Libera1(左)とLibera2(右)の電流依存性

## 4. まとめ

KEK-ATFダンピングリングにてLiberaによるビーム位置計測を行い、Liberaの円形加速器における性能を評価した結果、実際のビーム位置計測においてもサブミクロンレベルの分解能で電流依存性の小さい計測ができることを確認できた。KEK-ATFのビーム試験で使用したLiberaは357MHzのマルチバンチ運転に最適化されているので、マルチバンチのビーム位置計測ではさらに良い精度のビーム位置計測が期待できる。

さらにKEK-LINACにてLiberaによるビーム位置計測を行い、Liberaの線形加速器への利用を検証した結果、LiberaがKEK-LINACの既存BPMシステムとほぼ同程度の性能を有することを確認できた。一方、KEK-LINACのビーム試験で使用したLiberaは500.1MHzに最適化されていて、250MHz近辺で最大になるストリップライン型BPMの信号に対しては感度が良くなかった。また今回のビーム試験ではKEK-LINACのビーム電荷が0.1nC程度(PFモード)に留まり、BPMの信号強度が弱かった。Liberaの帯域を250MHz近辺に合わせ、KEK-LINACのビーム電荷が1nC(KEKBモード)の状態ではビーム位置計測を行えば、より精度の良い計測が期待できる。

以上より、Liberaは円形加速器でのTurn-by-Turn計測や線形加速器でのSingle Pass計測などの高速な計測も可能であるとともに、低エミッタンスビームに必要なサブミクロンレベルの高精度のビーム位置計測も可能である。

最後に本研究開発において、エムティティ(株)の梅田昌治氏、KEK-PFの帯名崇氏、Cheng Weixing氏(現SLAC-LCLS)から有益な助言をいただきました。ここに感謝いたします。

## 参考文献

- [1] <http://www.i-tech.si/>
- [2] I.Ito, et al., in Proceedings of the 3<sup>rd</sup> annual meeting of particle accelerator society of Japan and the 31<sup>th</sup> Linear accelerator meeting in Japan, Sendai, 2006, p.916.
- [3] F.Hinode, et al, KEK Internal 95-4, June 1995.
- [4] H.Hayano, et al., in Proceedings of APAC 2004, Gyeongju, Korea, p.533.
- [5] T.Suwada et al., Proceedings of Beam Instrumentation Workshop '98
- [6] M.Satoh, et al., in Proceedings of LINAC 2006, Knoxville, Tennessee USA, p.280.