

# DEVELOPMENT OF A BEAM POSITION DETECTOR FOR AN ORBIT FEEDBACK SYSTEM IN SuperKEKB

Hitoshi Ishii<sup>#A)</sup>, Hitoshi Fukuma<sup>A)</sup>, Kenji Mori<sup>A)</sup>, Makoto Tobiyama<sup>A)</sup>, Mitsuhiro Arinaga<sup>A)</sup>,  
Masatsugu Ryoshi<sup>B)</sup>, Akira Terada<sup>B)</sup>, Kazutaka Hayashi<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba Ibaraki, 305-0801

<sup>B)</sup> Mitsubishi Electric TOKKI Systems Corp.

8-1-1 Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki, Hyogo, 661-0001

## Abstract

SuperKEKB, which is under construction at KEK, is an electron-positron collider aiming at 40 times larger luminosity of KEKB. Since a vertical design beam size at a collision point is as small as 50nm in SuperKEKB, an orbit feedback system is essential for maintaining stable collision. A fast beam position detector is being developed for the orbit feedback system. Tentative target performance is a signal to noise ratio of 120dB at the input power of -3dBm and a signal bandwidth of 1kHz. The detector consists of an analogue part to convert 509MHz-beam-signal to 17 MHz-IF-signal and a digital part which has a ADC, two CIC decimation filters and a FIR filter. The paper describes results of laboratory measurement obtained so far and items to be improved for a final version.

## SuperKEKB 軌道フィードバック用ビーム位置検出器の開発

### 1. はじめに

SuperKEKB 加速器は、現在 KEK で建設中の 2 つのリングからなる非対称エネルギーの電子・陽電子衝突型加速器である<sup>[1]</sup>。SuperKEKB で要求される低エミッタンスビーム開発では、衝突点での鉛直方向ビームサイズが 50nm と非常に小さく設定されている。この為、衝突点近傍に高分解能のビーム位置モニタを置き、高速でビーム軌道を測定しビームが安定に衝突する様ビーム軌道を補正するフィードバックシステムが必須である。そこで、特に重要な要素となる位置検出器に付いて回路技術の評価と問題点の洗い出しを目的に試作機の製作を行なった。

軌道フィードバックシステムは、衝突点で電子ビームと陽電子ビームの相対位置にオフセットがあった時、ビーム-ビーム力によって生じるビーム軌道の変化を衝突点近傍に置いたビーム位置モニタ (BPM) で検出し、オフセットがゼロになる様にステアリング磁石でビーム軌道を制御するというシステムである。軌道フィードバックシステムに必要な BPM の性能仕様については検討が続けられている。これまでに得られた検討結果をもとに暫定的に位置分解能 1 $\mu$ m 以下、信号検出バンド幅 1kHz、データ更新周波数 5kHz を目標性能とした。

検出器は、509MHz のビーム信号を 16.9MHz の中間周波数 (IF) に変換するアナログ部と ADC, CIC フィルタ及び FIR フィルタから成るデジタル部で構成される。現在、性能評価用の試作機が完成し、各種測定を行なっている。

この論文では、試作機の性能評価及び、実用化に向けた今後の課題について報告する。

### 2. ビーム位置モニタ (BPM)

#### 2.1 衝突点付近の BPM と構造

軌道フィードバックに用いる BPM は、各リングにつき衝突点 (IP) を挟んで 1 台ずつ設置され、両リング合わせて 4 台ある (図 1)。BPM は静電型でポタン電極径 1.8mm、チェンバ径 20mm である (図 2)。

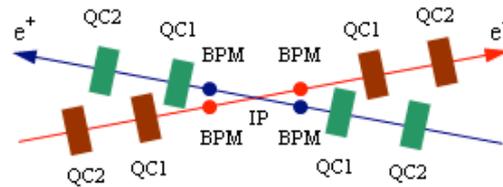


図 1 : 衝突点付近の BPM 概略配置

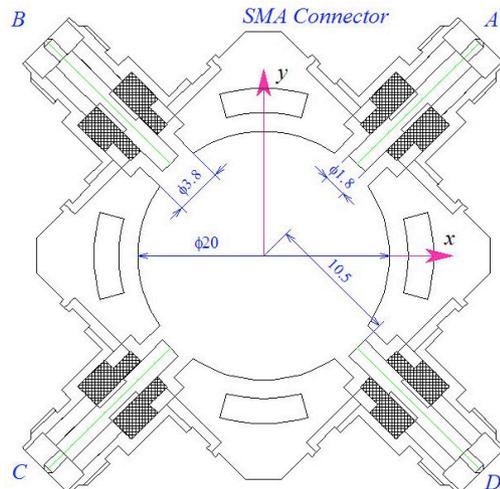


図 2 : BPM 断面

<sup>#</sup> hishii@post.kek.jp

### 3. 信号パワーと信号対雑音比

#### 3.1 期待される信号強度

SuperKEKB のマシンパラメータ<sup>\*1</sup> の内、BPM に関連する主な項目を表 1 に示す。ビーム電流は KEKB に比べ HER、LER 共に約 2 倍大電流化されている。

表 1 : SuperKEKB のパラメータ

	HER	LER
粒子	electron	positron
エネルギー (GeV)	7.007	4.000
ビーム電流 (A)	2.6	3.6
バンチ数	2500	2500
バンチ電流 (mA)	1.04	1.44
バンチ間隔 (ns)	3.93	3.93
バンチ長 (mm)	5	6
エミッタンス (nm)	4.6	3.2
カップリング(%)	0.28	0.27
垂直ビームサイズ (IP) (nm)	57	48
放射減衰時間 (横方向) (ms)	58	43
加速周波数 (MHz)	508.887	508.887
ハーモニック数	5120	5120
周回周波数 (kHz)	99.392	99.392

BPM の電極容量を 0.4pF と仮定し、電極端に発生する信号を求めると図 3 の様になる。又、バンチ間隔 4ns で 2500 個のマルチバンチの場合のパワースペクトルを図 4 に示す。検出周波数 509MHz でのパワーは -6.31dBm である。この時、電極部を通過する全電力は、0.89W であり、電極径を小さくした事に依り低く抑えられている。

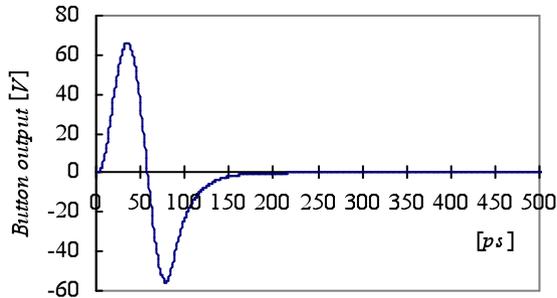


図 3 : BPM 電極端の信号波形

\*1 : 電流、バンチ数、バンチ長に付いては、マシンパラメータが変更され、試作機設計時とは異なっている。

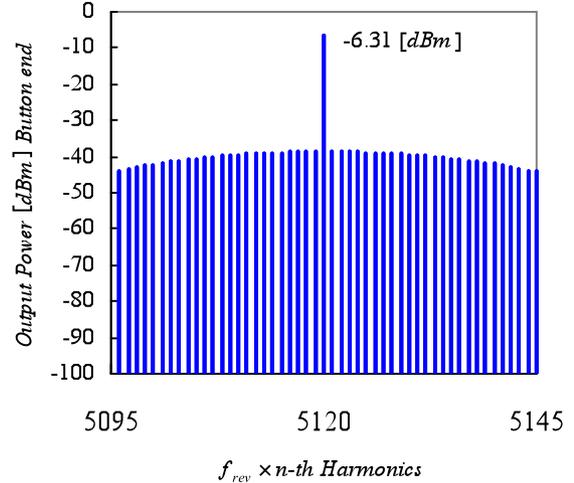


図 4 : 信号のスペクトラム

#### 3.2 SNR と位置分解能

信号処理回路 (後述) として、ビーム信号の 509MHz 成分を 16.9MHz の中間周波数(IF)にアナログダウンコンバートした後 AD 変換し、AD 変換されたデジタル信号を DDC(Digital Down Converter) でベースバンドに変換後デジタルフィルタで帯域制限する回路を考える。このとき、信号パワーから期待される SNR は以下のように評価される。

まず、熱雑音のパワー  $P_n$  は、 $P_n = kTB = -113.83[\text{dBm}]$  となる。ここで、 $k, T, B$  はそれぞれボルツマン定数、絶対温度(=300K)、バンド幅(=1MHz)である。509MHz の信号パワーは図 4 より電流 3.6A のとき -6.31dBm なので、アナログ回路の雑音指数(NF)を 15dB とすると、1)熱雑音の SNR は 92.53dB となる。次に、2)ADC のダイナミック精度による SNR はデータシートより 76.10dB である。さらに、3)ADC のクロックジッターによる SNR は  $\text{SNR} = -20 \log(2\pi f \Delta t) = 75.08\text{dB}$  となる。ここで、 $f$  は信号周波数(=16.9MHz)、 $\Delta t$  は ADC のクロックジッター(=1.66ps)である。1)~ 3)全ての SNR を考慮すると AD 変換後の SNR は、72.97dB となる。

AD 変換された信号はデジタルフィルタで帯域制限されるので、最終的に得られる SNR は

$$\text{SNR} = 72.97 + 10 \log(f_s / (2f_c)) = 119.88\text{dB}$$

となる。ここで、 $f_s$  はサンプリング周波数(=98.4MHz)、 $f_c$  はフィルタの遮断周波数(=1kHz)である。よって、チェンバ半径を  $r$  とするとこの SNR による位置分解能  $\sigma_{pos}$  は、

$$\sigma_{pos} = (r / \sqrt{2}) (1/2 / \text{SNR}) = 3.58 \text{ (nm)}$$

となり目標性能を十分に満たす位置分解能が得られる事が分かる。

#### 4. 信号処理回路

信号処理回路は、図5に示す様にアナログ処理部とデジタル処理部の2つの部分で構成されている。

アナログ処理部では、ビーム信号はダウンコンバータによって16.9MHzのIF信号に変換されADCに送られる。又、RF信号を基準入力としてPLLによってサンプリングクロックとLocal信号が生成される。アナログ部の諸元の一部を表2に示す。

デジタル処理部では、ADCに依るデータ取得及びDDCによるIF-ベースバンド変換、CICおよびFIRフィルタによるディシメーションと帯域制限、ならびに絶対値計算と位置計算が行なわれる。これら全ての処理は、 $\mu$ TCA規格のメイン基板上のFPGAで実行され、データ通信やデータの読み出しは、SuperKEKBのコントロールシステムであるEPICS<sup>[2]</sup>のIOC経由で行なわれる。EPICSの制御コードはFPGAに内蔵されたハードコアのPowerPC上のLinuxで動作する。なお、以上のデジタル処理はKEKで開発中の低レベルRFシステム用に製作された制御基板を使用している<sup>[3]</sup>。

各パートの動作周波数とデジタル部の諸元をそれぞれ表3,4に示す。またデジタルフィルタ特性の計算結果を図6,7に示す。

表2：アナログ部主要諸元の仕様

入力インピーダンス	50 $\Omega$
入力インピーダンス整合度	$ \Gamma  \leq 0.3 (i=1,2,3,4)$
最大入力レベル	23dBm (total power)
入力周波数範囲	508.887MHz $\pm$ 10MHz
総合雑音指数	20dB 以下
基準RF入力レベル	-10dBm ~ -3dBm
ローカル位相雑音	$\leq -160$ dBc/Hz 17MHz offset
クロックジッタ (目標)	1ps 以下
IFアンプ帯域幅	1MHz
IFアンプ利得可変範囲	$\pm 2$ dB
IFアンプ出力 (RF=-3dBm)	1.6Vp-p

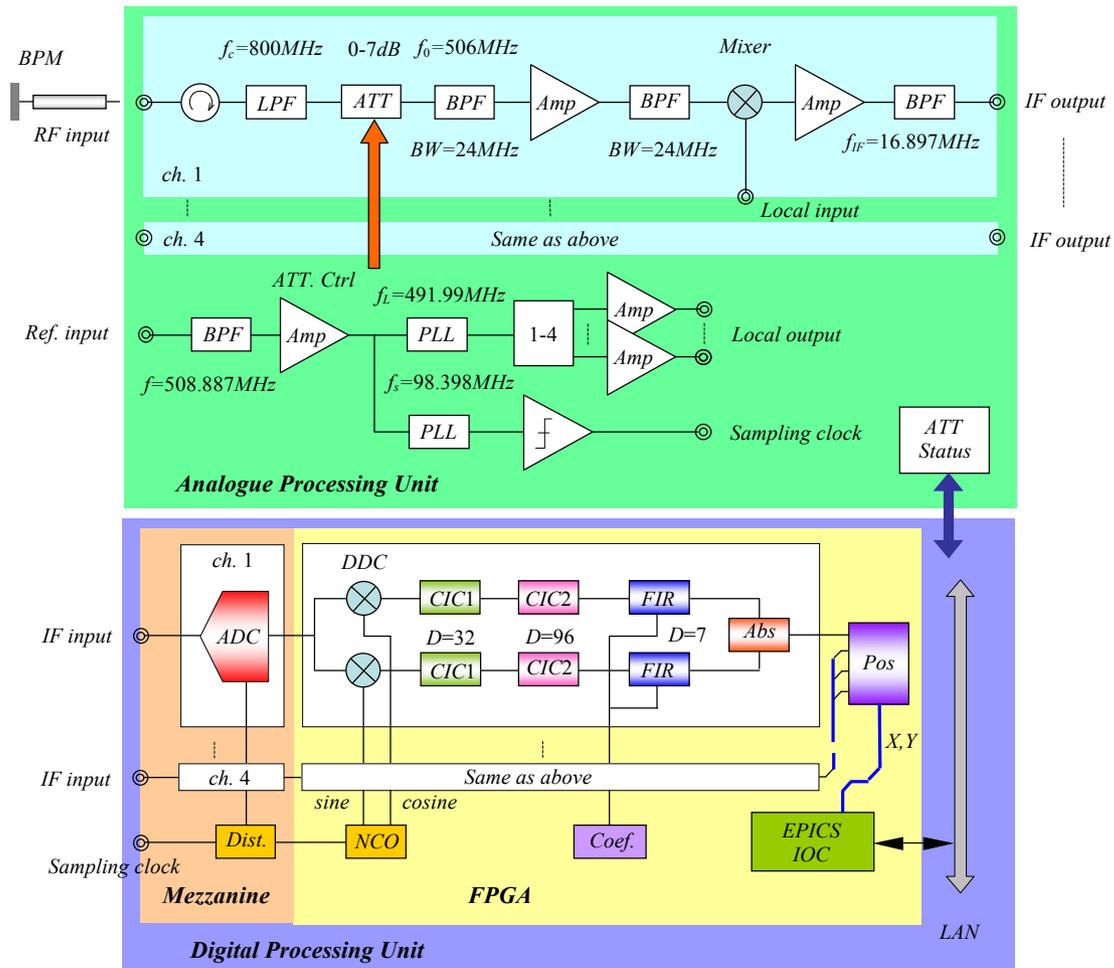


図5：処理回路ブロック図

表 3 : 検出器各部の周波数

項目	RF との比	周波数
検出周波数	1	508.887 MHz
Local 周波数	4950/5120	491.990 MHz
中間周波数	170/5120	16.897 MHz
Image 周波数	4780/5120	475.094 MHz
Sampling 周波数	990/5120	98.398 MHz
NCO 周波数	170/5120	16.897 MHz
NCO レート	990/5120	98.398 MHz
Baseband	0	DC
CIC1 処理レート	990/5120	98.398 MHz
CIC1 出力レート	990/5120/32	3.106 MHz
CIC2 処理レート	990/5120/32	3.106 MHz
CIC2 出力レート	990/5120/32/96	32.354 kHz
FIR 処理レート	990/5120/32/96	32.354 kHz
FIR 出力レート	990/5120/32/96/7	4.622 kHz

表 4 : デジタル部の諸元

ADC 分解能	16bits
NCO ビット幅	54bits
CIC1 ステージ	5
CIC1 ディレー	1
CIC1 ディシメーション	32
CIC1 直流利得	33554432 (25bits)
CIC2 ステージ	5
CIC2 ディレー	1
CIC2 ディシメーション	96
CIC2 直流利得	8589934592 (33bits)
FIR 次数	201
FIR 窓関数	Kaiser ( $\alpha=4$ )
FIR 遮断周波数	1kHz
FIR ディシメーション	7
FIR 直流利得	134346701 (28bits)

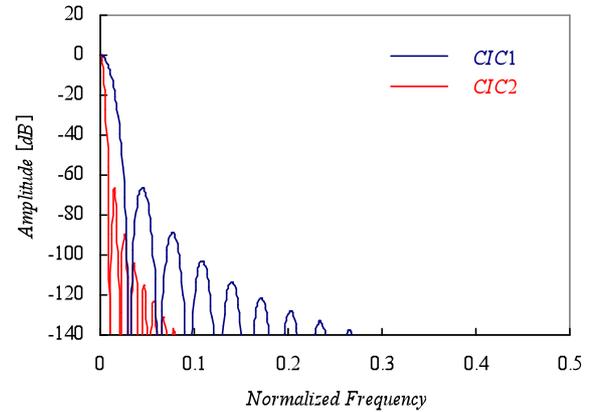


図 6 : CIC1,CIC2 の周波数特性

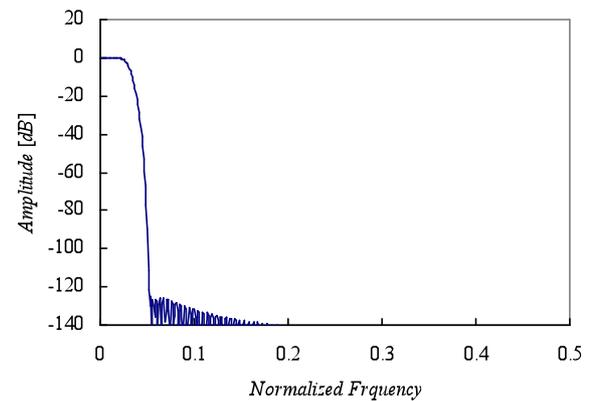


図 7 : FIR の周波数特性

## 5. 性能評価試験

### 5.1 アナログ処理部の性能

仕様書に規定されている諸元は多数である為、測定値やグラフ等は、紙面の都合で割愛する。全般的には完成度が高く、試験成績書通り十分仕様が満たされている。唯一、サンプリングクロックのジッタ項目は、目標の 1ps に対して 1.5ps と仕様を僅かに超えた。ただし、この数値の SNR への寄与は、1.42dB に留まり問題となるレベルではない。又、約 3ヶ月間パワーオンの状態にあるが局所的な温度上昇や誤作動は皆無である。

### 5.2 総合特性

図 8 に ADC で取得した IF 信号の FFT 解析の結果を示す。

同図から、入力信号の全雑音は -73.17dB なので、フルスケール入力に対して SNR=73.17dB となりセクション 3.2 で求めた SNR=72.97dB と良く一致している。

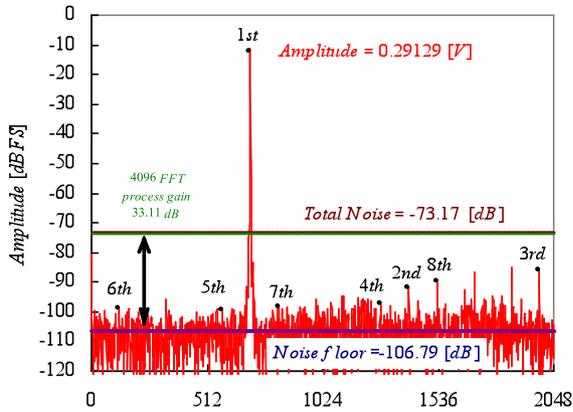


図 8 : IF 信号 4096 点の FFT 解析

デジタルフィルタの遮断周波数の測定も設計通りの結果が得られている。

図 9 は、509MHz の RF 信号を 4 つに分配した信号を各チャンネルに繋いだ時、FIR 出力から得られる X 方向、Y 方向の位置情報を示している。各点は平均値からの差を表していて総点数は 4096 である。平均値から大きくはずれたデータを除いた X、Y の標準偏差は、 $\sigma_x=44\text{nm}$  と  $\sigma_y=55\text{nm}$  であり目標分解能  $1\mu\text{m}$  以下を十分満たしていることがわかる。ただし、チャンネル 1 ~ 4 の IF 出力は  $0.32\text{Vp} \sim 0.36\text{Vp}$  の範囲なので、これを考慮すると予想性能より 14.3dB 程 SNR が悪いことになる。平均値から大きくはずれたデータが出現する原因と SNR 悪化の原因については調査中である。

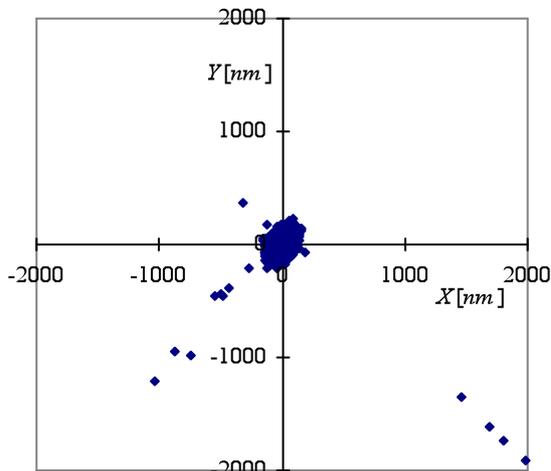


図 9 : 4096 点の位置情報の分布

## 6. 今後の作業

### 6.1 デジタル制御部機能の追加

今回の試作機では、基本性能の実証を主な目的としたため外部との信号インターフェイスは簡略化している。例えば、フィードバックコントローラとの速い信号のやり取りや複数台の処理回路間でデータの同期をとる機能は持っていない。実用機に向けて制御インターフェイス部の機能追加を行う予定である。

### 6.2 レイテンシの短縮

試作機のレイテンシは 3ms 程度であり設計通りの性能が得られている。しかし、最近の制御系を含めたシミュレーション結果によると、十分なフィードバックゲインを得るには、1ms 以下のレイテンシが必要なことが明らかになってきた。処理系のレイテンシの殆どは FIR フィルタの次数で決まっているのでフィルタの帯域幅と次数の最適化によりレイテンシを減らすことが必要である。

## 7. まとめ

SuperKEKB でのビーム衝突維持の為、軌道フィードバックシステムの中核であるビーム位置モニタ用検出回路を開発中である。ダウンコンバータとタイミング生成回路から成るアナログ処理部は目標性能を満たすに十分な性能が得られている。又、デジタル部と合わせた総合性能では、目標性能を満たす位置分解能を実現できる見通しを得た。平均値からの偏差が大きい位置データが発生する原因とデジタルフィルタでのプロセスゲインが予想より低い事に付いては調査中である。今後、試作機の性能評価や性能改善を続けると共に、制御部を充実させ、実用機の完成を目指したい。

## 参考文献

- [1] 赤井和憲、小磯晴代、” SuperKEKB 設計の進展と建設状況”、本プロシーディングス。
- [2] 古川和朗他、” SuperKEKB に向けた運転制御システムの開発”、本プロシーディングス。
- [3] 小林鉄也他、” SuperKEKB 用デジタル LLRF 制御システム試作機の性能評価”、本プロシーディングス。