

BPM displacement measurement by gap-sensors at KEKB

Mitsuhiro Arinaga¹, Hitoshi Ishii, Masaki Tejima, Makoto Tobiya,
Hitoshi Fukuma, Shigenori Hiramatsu
High Energy Accelerator Research Organization, Accelerator Laboratory
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801, Japan

Abstract

The displacement of beam position monitors (BPMs) due to the thermal stress of vacuum chambers has been observed at KEKB rings. As the beam orbit is continuously corrected based on the beam position measured by the BPMs, the displacement of the BPMs changes the beam position relative to the magnets thus make it difficult to maintain a good orbit for the luminosity performance. For mass installation of gap-sensors in the rings to correct the BPM data, an inexpensive two-channel electrostatic gap-sensor was developed. It has the positional resolution less than $0.2\mu\text{m}$ and the temperature coefficient less than $0.2\mu\text{m}/^\circ\text{C}$. Eight gap-sensors were installed in the high-energy ring (HER) for the performance test.

KEKBにおけるBPM変位の測定

1. 概要

KEKB リングでは、大電流ビームによる発熱により真空チェンバーが変形し、その応力を受けて四極マグネットに取り付けたビーム位置モニター (BPM) も変位している。市販の変位計にて変位量を調べると、大きなところで、約1mmにも達するものがあることがわかった。大電流運転時の運転パラメータの再現性の悪さは主に BPM 変位によるものと考えられている。このような変位はビーム電流に依存しているため、運転パラメータの安定化のためには、運転中のBPMの変位を観測し、それに基づいてリアルタイムでBPMデータを補正する必要がある。そのために高精度な静電容量型変位計を開発した。今後、軌道補正に敏感な全てのBPMに設置する予定である。

2. BPM変位の観測

HER の放射光強度の強いセクションに設置されている BPM の測定値の異常調査のため、静電容量型変位計にて BPM 信号ピックアップの変位測定を行ったところ、図1に示すようにビーム電流とともに BPM が変位することが観測され、特にビームアポート時には 0.4mm もの変位が観測された。BPM は4極電磁石に強固に固定されているため、これだけの変位がおこる原因はビームチェンバーの熱変形によるものと考えられ、BPM に加わる外力は約1トン重程度と推定できる。最近行ったビームチェンバー変形測定においては、ビーム電流とともに mm オーダーの変形が観測され、BPM に強大な応力を及ぼしていると判断された。[1]

KEKB リングのビーム軌道は、常時 BPM によ

る軌道測定に基づいて補正されているため、このような BPM の変位はビームチューニングに甚大な影響を及ぼす。大電流時のチューニングパラメータの再現性の悪さは主に BPM 変位によるものと考えられている。

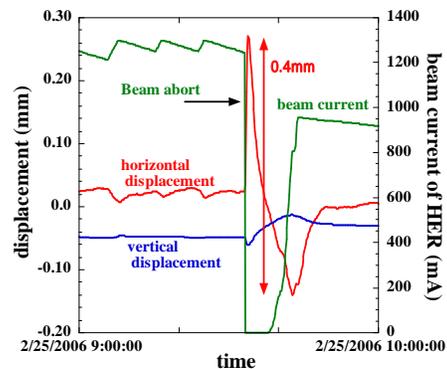


図1 ビームアポート時のBPMの変位量

このような強大な外力変化に対して、BPM 変位を $10\mu\text{m}$ 程度以下に押さえ込むことは不可能であるため、次善の策として、全ての BPM に変位計を設置して4極ないし6極電磁石に対する変位を $1\mu\text{m}$ 以下の精度で測定し、リアルタイムで BPM のオフセットデータを補正することが計画されている。

KEKB に設置されている約1000台の BPM の全てに設置するには、市販の変位計では膨大なコストが必要となるため不可能である。そこで安価で、かつ放射線環境下でも μm のオーダーで測定可能な高精度変位計を開発することとした。

3. ギャップセンサーの開発

¹ E-mail: arinaga@post.kek.jp

3.1 静電容量型変位計の原理

静電容量検出型の変位計は、被測定物と測定センサー間のギャップ x による静電容量 C_x が変化することで、 x の変化を測定するものである。以降ギャップセンサーと呼ぶ。原理を図2に示す。

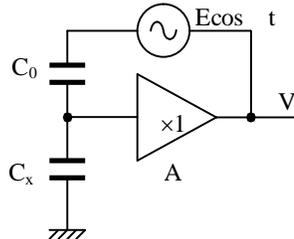


図2 静電容量型変位計の測定原理

ゲイン1のアンプの出力に $E \cos t$ なる電圧を重畳し、 C_0 を通してギャップ容量 C_x に印加すると出力は $V = (C_0 / C_x) E$ となる。センサー電極面積を S とすると、次式のように出力はギャップ x に比例する。

$$V = (C_0 E / \epsilon_0 S) x \quad (1)$$

BPM に実装するための寸法制限から、センサー電極径は 8mm で設計されており、ギャップ 0.5-2.5 mm では静電容量は 0.89-0.18pF と云う極めて小さな値となる。ギャップの測定誤差を小さくするためには、1) センサー容量に並列に加わるセンサー内部容量、2) センサーとアンプを接続するケーブル容量、及び 3) アンプの入力容量 C_{amp} を、十分に低減する必要がある。またこれらの影響は温度で変化するため、高い安定性を実現するためには、1)-3) の容量を何らかの方法でキャンセルしなければならない。

3.2 センサー及びセンサーケーブル

上記 1) 及び 2) については、センサーにガードシールドを設け、更にセンサーとアンプを接続するケーブルに3重同軸ケーブルを用いて、内側シールドをガード電極として、アンプ出力からガードに同じ電位をかけることにより実効的に対グランド容量を打ち消す。

センサーはステンレス製の外形20mmの円柱型であり、中心導体部の回りを円筒パイプによるガードシールドで囲むことで、内部の浮遊容量を打ち消している。また、製造の容易さ及びコスト低減のために、センサー電極はプリントパターンで作られている。

センサーケーブルには、内側シールドを強化した3m長の3重同軸線を用いた。このケーブルは放射線環境下での長期間使用に耐えるよう新規に開発されたもので、絶縁体にポリエチレンを用い、最外被覆にPEEK材を用いたものである。

3.3 回路構成

一方 3) については、図3に示すブートストラップ回路にて入力容量をキャンセルし、かつ入力抵抗を実効的に大きくすることで、3) の影響を極限ま

で低減することにする。

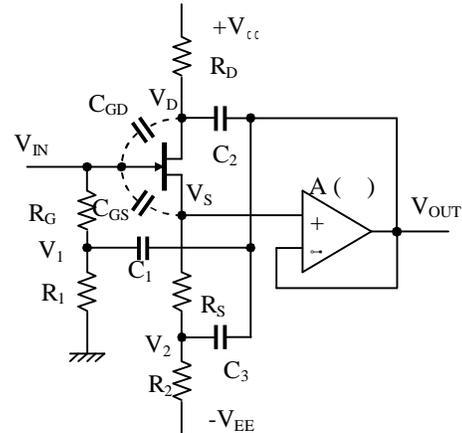


図3 ブートストラップ回路

使用周波数 $\omega / 2\pi = 10\text{kHz}$ では、 C_1 、 C_2 、 C_3 のインピーダンスは無視できるものとし、選択したFET及びオペアンプのパラメーターを用いると、入力抵抗及び入力容量は

$$R = -5.4 \times 10^5 \Omega, \quad C_{amp} = 6.5 \times 10^{-5} \text{ pF}$$

となり、実効的に非常に大きな入力抵抗と小さな入力容量を実現できる。オペアンプの位相遅れにより R は負性抵抗となるが、回路解析より図3の回路は安定であることが保証されるので問題はない。センサー内部容量及びセンサーケーブル容量を十分に低減することにより、 $\sim 10^{-3}$ の精度でのギャップ容量測定が期待できる。

実際の回路構成は図4に示すように、図3のアンプ A の出力に発振器出力を重畳し、入力に接続されるセンサー電極に C_0 を通して 10kHz サイン波を印加する。アンプの出力は絶対値検波された後、カットオフ周波数 100Hz のローパスフィルターにてリプルを除去し、更にセンサーグランドと加速器が繋がることで出来てしまうグランドループをカットするため、絶縁アンプを通して出力される。グランドループのカットは、グランド電流によるノイズの影響を除去するだけでなく、加速器自身のグランド条件を乱さないためにも必要なことである。

3.4 試作回路の性能

以上の基本設計に基づいて試作したギャップディテクター回路を恒温槽内に設置し、10 から40 の範囲でギャップ測定値の温度再現性を測定したところ、通常の3重同軸ケーブルをセンサー接続ケーブルに使用した場合には、温度依存性は約 $0.33 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ 、温度再現性は約 $2 \mu\text{m}$ が得られた。しかしながら、加速器の長期シャットダウン中は空調停止等による大きな周囲温度の変化があり得るため、これではシャットダウン後の再現性に不安が残る。このような温度依存性はケーブル容量が十分にキャンセルされていないため、ケーブル容量の変化が現れているものと考えられる。

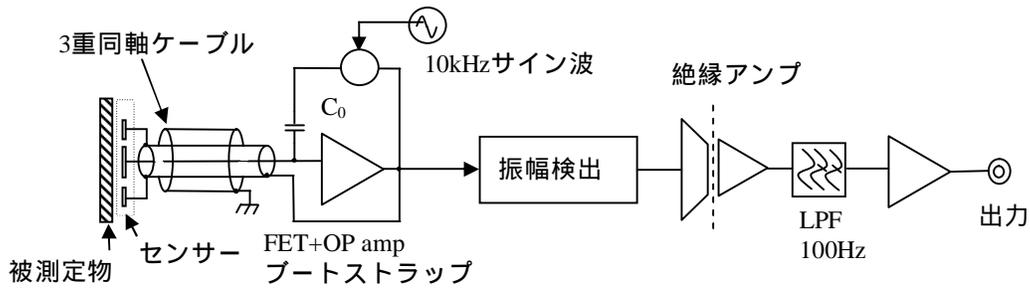


図4 変位計ブロック図

そこで、内側シールドを強化した3重同軸ケーブルを開発し、当該ケーブルに変更することにより図5に示すように、温度依存性約 $0.1\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ 、温度再現性 $1\mu\text{m}$ 以下となり、KEKB BPM の変位測定に十分な性能を実現することができた。

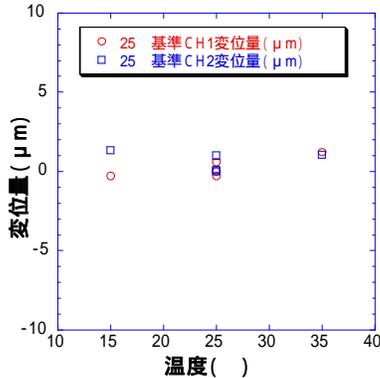


図5 試作回路の温度特性

開発した変位計の仕様及び性能を以下に示す。

- 測定範囲 0.5 ~ 2.5mm (1.5mmセンター)
- 2チャンネル (x, y 同時測定可)
- 応答帯域 DC-100Hz (-3dB)
- 分解能 0.2 μm 以下
- 温度特性 0.2 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ 以下
- 変位誤差 0.2%以下

3.5 トンネル内での試験

以上述べた試作機を8台製作し、ビーム軌道に対する影響の大きい6極マグネットにギャップセンサーを取り付け、ビーム運転時における性能試験を兼ねて、6極マグネットに対する BPM 変位量を測定した。(図6、図7)。

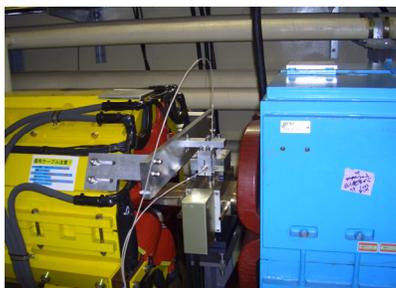


図6 6極マグネット近傍のBPMに取付けた変位計

ビームアポート時には、8ヶ所全ての BPM が、0.5mm ~ 1 mm程度大きく変位することが確認されるとともに、ギャップセンサーの再現性及び分解能とも十分な性能を有していることが確認された。

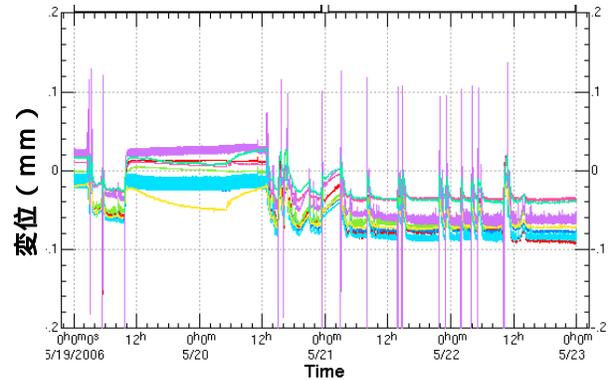


図7 開発した変位計で測定した4か所のBPM変位(x,y同時観測)

4. 将来展望

詳細な回路解析とガードシールドによる浮遊容量の打ち消しにより、高精度な静電容量型ギャップディテクターを開発した。将来大量に使用が予定されるため、安価に製造するための工夫が成されている。今後、更に製造を容易とするための改良を検討中である。開発した変位計は、KEKB ビーム運転パラメーターの再現性改善のため、ほぼすべてのBPMに設置される予定である。

謝辞

本機の開発に当たっては(株)デジテックス研究所のご協力を頂いた。ここに感謝いたします。

参考文献

- [1] 末次祐介, 私信