

SPring-8 でのビーム位置モニタ長期安定化に向けた新たな取り組み

RECENT ACTIVITIES AT SPRING-8 TO IMPROVE THE LONG-TERM STABILITY OF THE BEAM POSITION MONITORS

藤田貴弘^{#,A)}, 高野史郎^{A)}, 正木満博^{A)}, 前坂比呂和^{B)}, 松原伸一^{A)}, 出羽英紀^{A)}, 佐々木茂樹^{A)}, 大竹雄次^{B)}
Takahiro Fujita^{#,A)}, Shiro Takano^{A)}, Mitsuhiro Masaki^{A)}, Hirokazu Maesaka^{B)}, Shinichi Matsubara^{B)}, Hideki Dewa^{A)},
Shigeki Sasaki^{A)}, Yuji Otake^{B)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Reserch Institute (JASRI/SPring-8)

^{B)} RIKEN SPring-8 Center XFEL Division

Abstract

Long-term stability of the Beam Position Monitor are quite important for the following reasons, (1) beam position at the BPM determine both position and angle at the synchrotron radiation source point, (2) in a very low-emittance ring, typically represented by SPring-8 upgrade plan, position stability for long-term must be improved to 10 μm which is less than 1/10 of present stability. In this paper, we report recent status of BPM stability and activity of survey for BPM stabilization.

1. はじめに

放射光源リングでは、アンジュレーターの光軸安定化が必須であり、そのために必然的に電子ビーム軌道に対しても長期間の安定性が求められる。SPring-8 蓄積リングには、1.4km の周長にわたって 288 ケ所にビーム位置モニタ(BPM)が設置されており、BPM のデータは周期的な軌道補正に使用されている。BPM 信号処理回路は 1997 年のコミッシュニング時から使用されていたものを 2006 年に更新することで、軌道補正の高分解能化、短周期化を実現し、短時間の軌道安定度を向上させてきた^[1]。一方で、放射光源として軌道の長期間安定性、または運転サイクル間で高い再現性を得ることについては、BPM がその大半の責任を担っており、BPM の安定性については現在においても課題があるため、改善の試みを継続しているところである。

SPring-8 では、1997 年のコミッシュニング後に、BPM ケーブル中の定在波の影響が除去できていなかったため、4 電極間の信号のゲインバランスが崩れ、その影響が BPM の電気中心をミリメートル程度ずらしていた。これを補正するため、3 電極法^[2]が考案され、バランスのずれによる電気中心のオフセットを $\sim 50\mu\text{m}$ 以下に補正した。この補正值は 1 度補正した後は、一定であることが期待されたものの、実際は長期間にわたってこのインバランス量が変動する(もっとも大きな BPM で $100\mu\text{m}$ 程度)ことが観測されている。そのため、運転サイクルごとの軌道の再現性などが大きな問題となっている。

BPM のドリフトの要因としては、

- BPM チェンバー、またはそのサポートの温度変動などによる機械的な変形
- BPM 処理回路、またはビーム信号自身の電

気的な変動

が考えられるが、3 電極法は、上記のうちの後者について評価できる手法である。3 電極法とは、4 電極の内、3 電極を選択して水平/垂直方向のビーム位置を計算する際、3 電極の選び方が 4 通りあることから、水平/垂直位置が 4 通り得られ、これら位置の矛盾が最小になるように各電極のゲイン補正係数を決めるものである。計算には、BPM 電極のマッピング計算から得られた電極の非線形性も考慮されている。この 3 電極法を用いると、ユーザー運転中の定常状態(一定のビーム軌道)の 4 電極データから、バランスのずれの最大値(インバランス)を見積もることができるため、ユーザー運転中の BPM インバランス変動を監視している。また、ビーム調整時には、ステアリング電磁石を用いて意図的に軌道振り、その応答からゲインバランスのずれを求め、年に数回の頻度でバランス補正を行っている。我々は、この BPM ゲインのインバランスの長期ドリフト量を、3 電極法で電気中心を補正している最大量 $100\mu\text{m}$ の 1/10 である $10\mu\text{m}$ 以下に抑えることを目標にしている。そのための調査状況と検証について報告する。

2. BPM ケーブル内の定在波の影響

一般に、ボタン電極に誘起されたビーム信号は長い同軸ケーブルを使って処理回路まで接続される。この時、ケーブルの湾曲部や、コネクタのかしめ部分でのインピーダンス不整合によって反射波がわずかに生じる。多くの場合、電圧反射率で 0.1 の数分の 1 程度である。こういった不整合によって生じた反射波はボタン電極まで戻るが、ボタン電極ではほぼ全反射されるため、元の信号とのベクトル和として、再度信号処理回路に入力される。こういった構成は、両端が 50Ω に近い通常同軸線路とは違って反射の影響を受けやすい。

[#] tfujita@spring8.or.jp

SPring-8 蓄積リングの BPM の場合、ボタン電極から信号処理回路まで、a-cable(2.5m)、b-cable(約20m~30m)、c-cable(5m)の3本の同軸ケーブルを用いている。これらのケーブルのコネクタの内、a、c-cable はケーブルメーカー工場で作成されたものだが、b-cable の処理回路側コネクタは現地でアセンブルされたためか、比較的この部分の不整合が大きい。また、b-cable は何度も湾曲しながらケーブルラダーに敷設されているため、複数個所に信号の反射源が存在する。ケーブル全体で見ると、電圧定在波比(VSWR)は 1.2 以内と常識的なケーブルの伝送特性に収まっているが、処理回路が実際に感じる電圧は BPM 電極ごとに 10%程度ばらつきがあることになる。この定在波による 10%のばらつきは両端を測定器に接続した測定では較正することができない。また、この 10%のばらつきは SPring-8 の BPM 部のチェンバー断面形状から、ビーム位置に焼き直した場合約 1mm の電気中心の誤差につながる。この量は 1997 年に最初に 3 電極法を用いてバランスを補正した量と矛盾しない。

定在波の場合、観測する周波数によって合成波の振幅が変わって見える。Figure 1 はシングルバンチを蓄積した際に 508MHz 周辺の各周回周波数の整数倍のピークを測定したものである。振幅の強弱の周波数間隔から 2 点の反射間の距離が~35 m であるので、電極と b-cable の回路側とで定在波が生じていると考えられる。

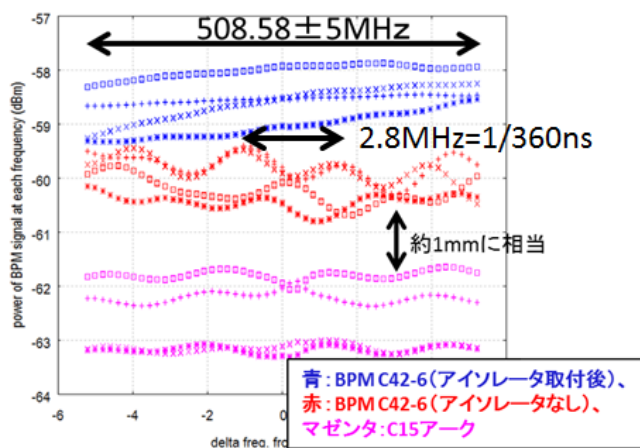


Figure 1: BPM spectrum when single bunch beam are stored in the ring. Blue points: Isolator was attached to button electrode side, red points: without isolator.

Table 1: Specification of the Isolator

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| 周波数範囲 | 488MHz-529MHz |
| 挿入損失 | < 0.5 dB (±0.1dB/20°C~30°C) |
| リターンロス(S11,S22) | < -25 dB |
| アイソレーション | > 25 dB |
| 部品表面での漏れ磁場 | < 50 Gauss |

3. アイソレータによる定在波の低減

こういった反射波が時間を経ることによる劣化や温度などで変化したものが BPM のドリフトとして観測されているのではないかと考え、b-cable からの反射が処理回路に戻って入力されないように a-cable と b-cable の接続部にアイソレータを順次追加している。アイソレータは加速器収納部内に設置するため、厚さ 3 mm の鉛シートで遮蔽を行い、また、アイソレータ内の磁石から磁場が漏れていると、設置場所の環境 (比透磁率) によってアイソレータ内部の磁場に影響を及ぼしたり、アイソレータのドリフトの原因となったりすることを懸念して、鉄性の筐体で磁気遮蔽を施した。アイソレータの典型的な高周波特性を表 1 に示す。この長期変動の解消のため、まず、BPM ケーブル中の定在波を低減するために収納部内にアイソレータを設置して定在波の抑制を進めてきた。Figure 1 の青線はアイソレータを設置した場合の 508MHz 近辺の周回周波数のピークを測定したものであり、定在波の影響が改善できていることが分かる。このアイソレータの設置により、バランスのドリフトが改善した BPM もあり、また、明確な効果はないものもあった。定在波の低減では対策は十分ではないことが分かった。

4. バランス変動と BPM 処理回路の関係

SPring-8 蓄積リングには 30m の長直線部がリングの 4 か所に対称にあり、この長直線部の BPM については、バランス変動が比較的大きな BPM と比較的小さい BPM が近接しているものがある。そこで、これらの特徴的な BPM のバランス変動と関係があるものを調査したところ、信号処理回路のダウンコンバートに使用しているローカルオシレータのレベルと強く関連していることが分かった。ローカルオシレータ信号は蓄積リングのマスターオシレータから分岐した信号を E/O、O/E の光アナログリンクを用いて 24 台の信号処理回路に配信しているものであり、ボタン電極からの 508.58MHz の周波数コンポーネントを 250kHz の IF 信号にダウンコンバートするために使用している。Figure 2 に BPM 信号処理回路のブロック図を示す。回路は加速周波数である 508.58 MHz を 250 kHz の IF にダウンコンバートして 8 倍のオーバーサンプルでデジタル化し、Discrete Fourier Transformation (DFT)によって加速周波数成分を検波する構成である。また、FET スイッチによる multiplex 方式であり、1 台のラックに全く同じ構成の回路が 4 系統設置されており、1 系統あたり 3BPM 分(=12 電極分)処理している。つまり、3BPM は全く同じ処理回路で処理されている。

長直線部のバランス変動が特徴的な BPM(C05-5 と C05-6)についての例をそれぞれ Figure 3, Figure 4 に示す。この 2 つの BPM は全く同じ RF アンプ、ミキサ、IF アンプ、ADC で処理されている。図には DSP が検波した IF 電圧と 3 電極法で求めたインバランス (バランスの最大のずれ) をプロットしている。まず、C05-5 は IF 電圧の変動が小さく、インバランスの変動も小さい(おおよそ $\approx 5 \mu\text{m}$)。それ

に対し、C05-6 は IF 電圧の変動が大きく、IF 電圧の変動とインバランスの変動が同時に起きていることが分かった ($\sim 50 \mu\text{m}$)。さらに、C05-6 については、インバランスの変動とローカルレベルの変動に強い相関が確認された。

前述の通り C05-5 と C05-6 は全く同じ回路で処理されている上に、ローカルレベルは IF 電圧に影響

しない設計になっている。また、改めてオフラインでビーム信号を模擬して行った測定でもローカルレベル変動に対する IF 電圧の変動はユーザー運転中に観測されている量の 1/20 以下であった。よって、現状では、ローカルレベルの変動とバランスの変動は因果関係の無い現象だと考えている。

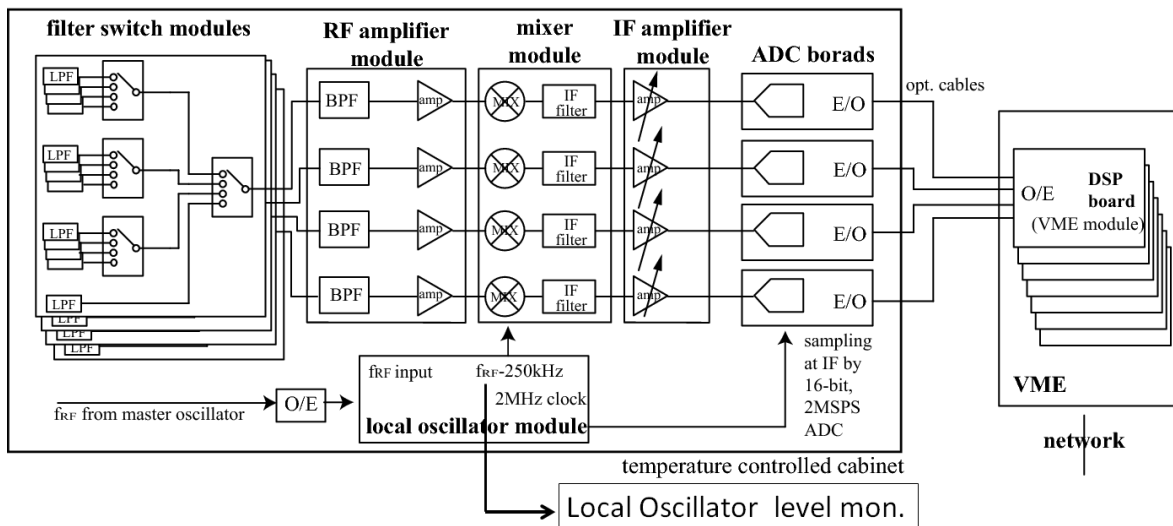


Figure 2: Block diagram of the BPM electronics. BPM electronics employs multiplex-method. A frequency component of 508.58MHz from button electrodes is down-converted to 250 kHz IF signal. IF signal is digitized by 2 Msample/s ADC. Signal voltage is detected on DSP applying DFT.

5. BPM バランスドリフト源の加速器収納部内探索

バランス変動の原因が処理回路よりも上流にあると考え、収納部内で原因の探索を行っている。

5.1. 放射線の影響

収納部内の BPM ケーブルの調査を行ったところ、ドリフトの大きな C05-6 の BPM ケーブルには激しい放射線損傷と思われるインピーダンスの変化、ケーブル被覆の劣化が認められた。Figure 5, 6 に TDR で測定した BPM ケーブルの電圧反射係数を示す。そして、放射線照射量を確認するために、ケーブルにラドカラーを貼付したところ、C-5-6 に貼付したラドカラーは著しく赤色に変色した。C05-6 の直近には上流の偏向電磁石からの放射光を受けるアブソーバーが設置されており、その受光体からの散乱 X 線が C05-6 の BPM ケーブルに照射していることが分かった。また、Figure 7, 8 に BPM とアブソーバーの位置関係、ラドカラーの着色状況を示す。Figure 6 の電圧反射率の波形に 1 部インピーダンスの劣化が低減されている部分があるが、ケーブルの敷設状況から、アブソーバーとケーブルの間にあるサポートが影を作っている部分に対応する。

これらから次の 2 項が考えられる。(1) BPM ケーブルに X 線が照射されることでノイズが生じている。または、(2) X 線の照射によりケーブル内誘電体の誘電率が変化、それに伴う局所的な特性インピーダンスの変動が BPM バランスのドリフトを引

き起こしていることである。まず、前者について調べるため、BPM C05-5 と C05-6 の直近にボタン電極には接続しないダミーの同軸ケーブルを敷設し、保守通路側で放射線によるノイズを測定した。またそれとは別に、ボタン電極に接続する 4 本のケーブルに対して、厚さ 3mm の鉛管による遮蔽を施した。結果、ダミーケーブルに関しては、508MHz に同期するノイズはほとんど観測されなかったし、バランスのドリフトと相関は認められなかった。508MHz の 3 倍にあたる周波数に比較的強いピークが確認されたが、3 倍高調波は回路の入力段のフィルタで十分除去されているので、影響することは考えにくい。

次に、後者のケーブルのダメージがバランスのドリフトと関係しているかどうかを調べるために、ケーブルの交換を行った。Figure 9 にケーブル前後のバランスドリフトとローカルレベル変動について示す。ケーブル交換前に顕著であった、バランスのドリフト、ローカルレベルの変動、IF 電圧の変動が、交換後には大きく改善されている。

5.2. 湿度の影響

Figure 3.4 で見られた BPM バランス変動には、加速器収納部および保守通路の湿度に強く相関していることが最近分かってきた。Figure 9 に BPM バランスの変動に加えて、蓄積リング収納部内に設置された空調機の排気湿度の履歴を示す。図では線の重なりを避けるため、湿度のデータに 20 ポイントのオフセットを加えている。また、加速器収納部の温度変動は 0.1°C 程度で非常に安定であり、湿度については加速器収納部と保守通路とでほぼ同様の変動

になっている。Figure 9 から湿度でローカルオシレータのレベル変動と非常に強い相関が見えている。また、湿度の変動が短い停止期間(6/6~6/7)を境に小さくなるのと同期して、ローカルレベルが一定になり、C05-6 のバランス変動が $10\mu\text{m}$ 以下に安定した。

これらから、BPM C05-6 のバランス変動は、ケーブルへの放射線照射、環境湿度の変動などがケーブル

の特性インピーダンスの変動に何らかの形で関わることで発生しているものと推定される。偶然にも、BPM ケーブルの遮蔽作業と同時に湿度が安定になったため、どれが原因なのか、現時点でははっきり切り分けられていない。原因とそのメカニズムについては、今後も継続する調査の中で明らかにしていくつもりである。

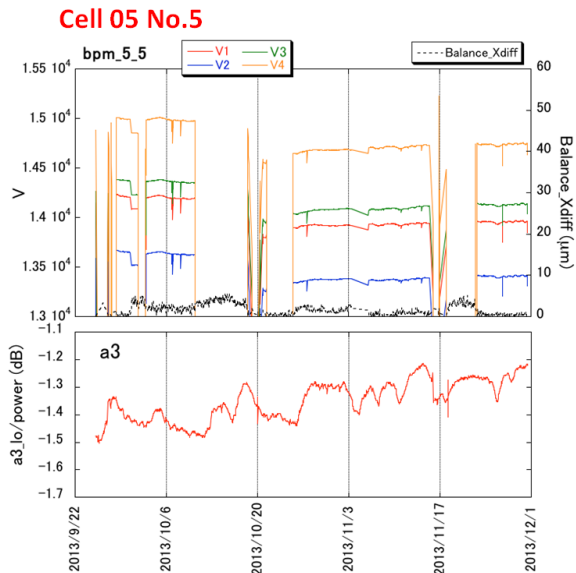


Figure 3: (top) IF voltage of BPM C05-5 detected by DSP. (middle) Trend of Local Oscillator power.

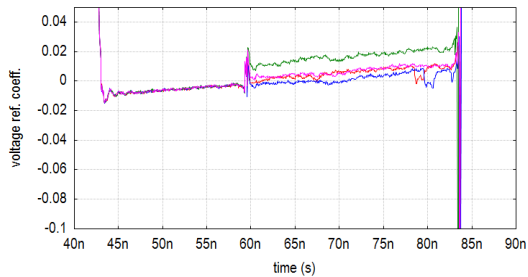


Figure 5: TDR waveform of the BPM cable (C05-5).

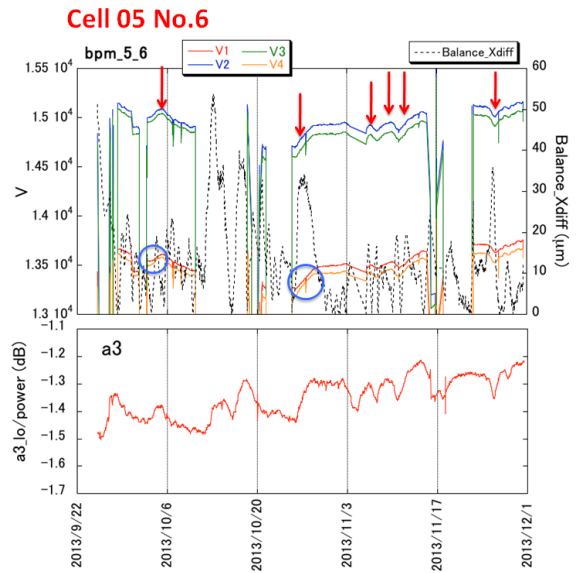


Figure 4: (top) IF voltage of BPM C05-6 detected by DSP. (bottom) Trend of Local Oscillator power.

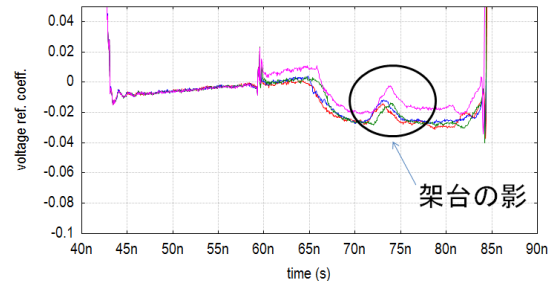


Figure 6: TDR waveform of the BPM cable (C05-6).

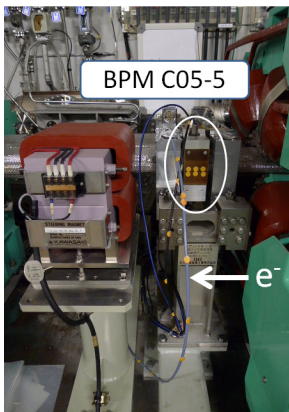


Figure 7: Layout of BPM C05-5. Color of the RADCOLOR was still yellow.

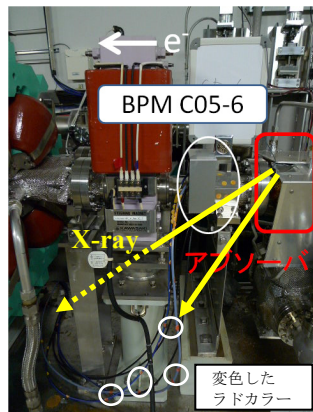


Figure 8: Layout of BPM C05-6. RADCOLOR attached to the BPM cables are colored to red due to the scattered X-ray from the absorber.

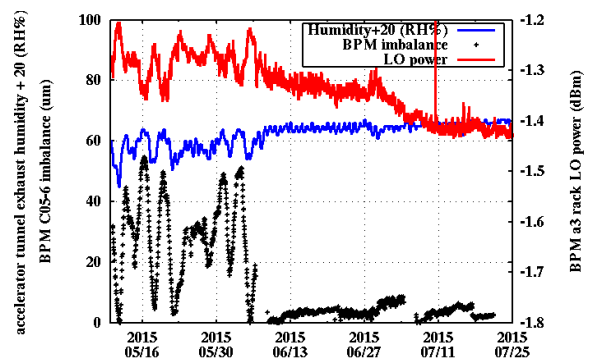


Figure 9: BPM imbalance, LO power and humidity in SPring-8 accelerator tunnel. For Humidity, 20 point are added to the data for elimination overlap with other lines.

まとめ

現状の SPring-8 の光軸安定化のため、また、SPring-8 アップグレード計画に十分見合う BPM システムを実現するため、BPM のバランス変動対策を進めている。3 電極法で得られる BPM ゲインのインバランスを指標として、BPM ケーブル内の定在波の低減を進めている。また、最近の取り組みとして、バランス変動が大きな BPM に着目し、ドリフトの原因が収納部内のケーブルへの放射線照射、周囲の湿度変動、ローカルオシレータのレベルと強い相関があることが分かってきた。今後、調査を継続し、原因究明を進め、ドリフトが $10\mu\text{m}$ 以下の BPM システムを実現したい。

参考文献

- [1] S. Sasaki, T. Fujita et al., Proc. of the DIAPC 2007, Venice, Italy, (2007) p. 114.
- [2] M. Masaki et al., Proc. of the 11th Symp. on Accel. Sci. and Technol., (1997), p.83.