

SPring-8 蓄積リングにおけるビーム位置 モニタ信号処理回路の更新

佐々木 茂樹*1・藤田 貴弘*2

Renewal of Beam Position Monitor Electronics of the SPring-8 Storage Ring

Shigeki SASAKI*1 and Takahiro FUJITA*2

Abstract

Signal processing electronics for the beam position monitors (BPM) of the SPring-8 Storage Ring were renewed during the summer shutdown period of 2006. The configurations of the electronics of before and after the alteration are described. The evaluation of the performance of the electronics is shown with the data taken by using the actual beams.

1. はじめに

2006年夏のSPring-8の運転停止期間に蓄積リングのビーム位置モニタ（以下BPM）信号処理回路を更新し停止期間あけから新規信号処理回路の運用を始めている。本稿では新規回路の紹介を主眼とするが、比較のため更新前の旧回路についても述べ、新旧を比較しながらBPM信号処理回路システムの更新について報告する。

SPring-8は蓄積電子エネルギー8 GeVの第3世代放射光源の加速器で、1997年10月からユーザー実験にビームを供給している。SPring-8は入射器として1 GeVの線形加速器、線形加速器のビームを8 GeVまで加速するブースター・シンクロトロンをそなえ、8 GeVまで加速された電子を蓄積リングに入射するfull energy injectionの放射光源用マシンである。

放射光源として低エミッタンス、高安定なビームが求められ、利用運転開始以降も入射器、蓄積リングともに加速器の性能向上のための努力が続けられてきた¹⁾。今回のBPM信号処理回路の更新もその一環として行われ、冒頭でも紹介したように更新作業は2006年夏期停止期間中に行われ、停止期間あけの9月から新規信号処理回路を用いて運転をおこなってい

る。

SPring-8蓄積リングのBPMは電子ビームが真空チェンバ壁に誘起する電荷を信号として拾い上げるボタン型をしたピックアップ電極、電極信号の信号処理回路、および制御部から構成されている。今回更新したのは信号処理回路および制御部の一部に相当する部分である。

SPring-8蓄積リングは48セルのChasman Greenラティスを基本に設計、建設された。当初BPMのピックアップ電極は48セルのそれぞれに付き6カ所ずつ取り付けられ、総数288であった。この48セルを2セル分12カ所のBPMごとにまとめ1セットの信号処理回路で処理する構成とした。一カ所のBPMは4電極で構成されているので1セットの処理回路には48本の同軸ケーブルが集まってきている。全48セルを2セルずつ分担しているため、信号処理回路は全部で24セットあり、これでリング1周をカバーしている。なお、2000年にリングの4回対称の位置4カ所にマグネット・フリーの30 m長直線部を設置する改造を行った²⁾。これにより、蓄積リングの対称性は4回対称となった。また長直線部についてはBPMの数、取り付け位置等が変更されているが、保存されている位置データは288個のBPMがそのまま扱われて

*1 財高輝度光科学研究センター Japan Synchrotron Radiation Research Institute
(E-mail: sasaki@spring8.or.jp)

*2 財高輝度光科学研究センター Japan Synchrotron Radiation Research Institute
(E-mail: tfujita@spring8.or.jp)

いる；つまり一回の測定あたり 1~288 の通し番号とビーム位置データの組が 1 組のデータとして保存されている。

SPring-8 蓄積リングの RF 加速周波数は 508.58 MHz でハーモニック・ナンバー（以下 h ）は 2436，周回周波数は 208.78 kHz である．ユーザー運転中の蓄積電流値は 100 mA で，現在はトップ・アップ運転により蓄積電流値は 0.1% 以内に保たれている³⁾．フィリング・パターンはユーザー実験の要求により様々なパターンが実施されている．現状では孤立バンチのバンチあたり電流値を最大 1.5 mA 程度とし，蓄積電流値の合計を 100 mA とするという条件の下でフィリング・パターンを決めている．利用運転で採用されている各フィリング・パターンの詳細は SPring-8 の web ページを参照されたい⁴⁾．

ボタン電極上に誘起される信号の周波数スペクトルは周回周波数の高調波列で構成され，その包絡線は時間領域でのバンチ波形をフーリエ変換したものである．各高調波の強度はフィリング・パターンに大きく依存している．ただし，全高調波中で RF 加速周波数とその高調波（ $n \times h$ ， $n : 1$ 以上の整数）についてはフィリング・パターンには依存せず，蓄積電流値とバンチ波形のみで強度が決まる．また，スペクトル強度がバンチ長の変化等のバンチ波形に大きく依存するのはおもに上記包絡線の高周波成分であり，RF 加速周波数の領域ではバンチ波形の依存性は無視できる程度に小さい．このため，SPring-8 蓄積リングの BPM では RF 加速周波数（508.58 MHz）を検波周波数とし，フィリングによらず一定強度の信号を検波する構成になっている．ボタン電極の典型的な信号強度は 100 mA 蓄積時の 508.58 MHz の成分で -20 dBm である．

図 1 に BPM ボタン電極が取り付けられている部分の真空チェンバの断面図を示す．図中の A1~A4 をそれぞれ電極 1 番から 4 番の信号強度とすると，ビーム位置 (x, y) は

$$u = \frac{1}{2} \left(\frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2} + \frac{A_4 - A_3}{A_4 + A_3} \right)$$

$$v = \frac{1}{2} \left(\frac{A_1 - A_4}{A_1 + A_4} + \frac{A_2 - A_3}{A_2 + A_3} \right)$$

という量を導入し， $x = k_x u$ ， $y = k_y v$ あるいは $x = u/S_x$ ， $y = v/S_y$ 等で近似することができる．ここで (S_x, S_y) は位置感度係数でビームが 1 mm 動くと (u, v) がどのくらい変化するかという割合を示す． k_x, k_y はその逆数で，これらの値はチェンバの形状および電極の配置で決まる． k_x, k_y の大きさはチェンバの径程度の

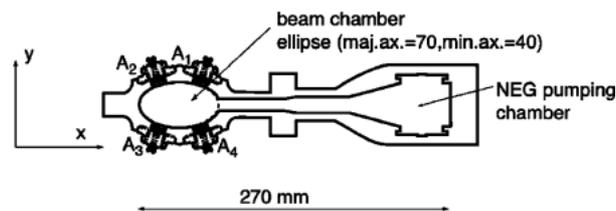


図 1 BPM 電極部分の真空チェンバ断面

オーダーとなる．SPring-8 蓄積リングではチェンバの電子ビームが通過する部分は短径 40 mm，長径 70 mm の楕円断面である．この断面形状と図 1 に示すような電極の配置に対し $k_x \approx 14$ mm， $k_y \approx 21$ mm である．信号強度誤差の位置計測誤差に対する影響を見積もるため，信号強度誤差を $\delta A_1 = \delta A_2 = \delta A_3 = \delta A_4 = \delta A$ として中心部分（ $A_1 = A_2 = A_3 = A_4 = A$ ）で位置計測誤差を誤差伝搬により評価すると， $|\delta x| = (k_x/2) |\delta A/A|$ ， $|\delta y| = (k_y/2) |\delta A/A|$ である． k_x, k_y の上記の値を考慮すると，例えば位置計測誤差を 1 μm 以下とするためには $|\delta A/A| \leq 10^{-4}$ とする必要がある．これは S/N (Signal to Noise ratio) を 80 dB 以上確保する必要があることを意味する．

今回の新規信号処理回路の開発においては，サブ μm の位置測定分解能を目標性能とした．対応する S/N の目標値は 100 dB である．先述のように 100 mA 蓄積時の信号強度は -20 dBm であるので，入力に換算した雑音は回路で発生する雑音を含め -120 dBm となるようにすることが目安となる．回路の雑音指数 (NF, Noise Figure) が 25 dB 程度加わることを考慮すると，熱雑音レベルが -145 dBm となるような帯域幅にする必要がある．熱雑音の雑音密度は -174 dBm/Hz であるので，熱雑音が -145 dBm となるのは 800 Hz である．このため帯域幅 1 kHz 程度を設計上のガイドラインとした．

2. 新旧信号処理回路の構成

信号処理回路は全部で 24 セットで蓄積リングの全周をカバーしているが，これらをさらに 6 セットずつのグループにしてそれぞれ 1 台，全部で 4 台の VME から制御している．これらの VME はネットワーク経由で加速器運転用のワークステーションとコミュニケーションをとり，BPM 信号処理回路と制御システムとのインターフェースとして機能している．新・旧回路ともに 24 セットの回路を 6 セットずつ 4 グループにし，それぞれを 1 台の VME で制御するという構成は共通である．

図2~5に1セット分の概略のブロックダイアグラムを示す。図2が旧信号処理回路の全体、図3はFEおよびSP部、図4がCOD部である。ここでFEというのはFront Endの略でバンドパスフィルター(BPF: Band Pass Filter) およびRFスイッチを内蔵する部分である。SPはSingle Passを表し、周回ごとのビーム位置を測定可能な回路部分である。CODはClosed Orbit Distortionの略で閉軌道(のゆがみ)を測定する目的を持った回路部分である。図5は新規回路である。新規信号処理回路はCOD部を置き換えるためのもので、SPの機能は持たせていない。加速器運転上はSPの機能も必要になる場合があるので、当面の運用として2セル12BPMごとに1カ所ずつ旧SPにケーブルを接続したままとし、新規回路は12BPM中の固定した11BPMを使用するのを基本パターンとすることとした。

2.1 旧信号処理回路の構成

図2に示すように1セットの回路は12台のFE、4台のSPバックエンド、1台のCODバックエンドからなるアナログ信号処理部とADC(Analog Digital Converter), DIO(Digital Input Output) モジュールからなるデジタル部からなっている。制御系とのインターフェースはRIO(Remote Input Output)と呼ばれるシステムを用いた。RIOはVMEモジュールとして開発されたマスター・カードと実際の機器と信号

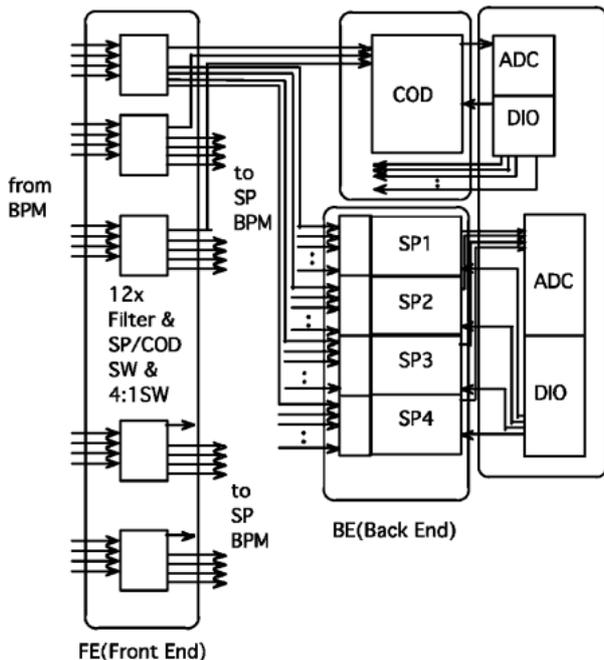


図2 旧信号処理回路の1セット分全体の概略ブロックダイアグラム

をやり取りするスレーブ・カードから構成される。旧信号処理回路で使用しているADCおよびDIOモジュールはRIOスレーブ・カードで、RIOマスターとは光ケーブルで接続されている。

1台のFEには1BPMの4電極の信号が接続され、BPFを通過後、まずSP/CODの選択を行い、CODが選択された場合はさらに4電極の選択を行う。

2.1.1 SPモード

SPモードは4電極の信号を並行して処理するため4台のバックエンドモジュールを1セットとしている。各モジュールの先端部に13:1のスイッチが装備されていて、これにより12BPM中の1BPMを選択する。13番目の入力にはテスト信号入力用である。

FEからの信号は13:1スイッチのあとステップ減衰器(1dBステップ、設定範囲0~31dB)を経由してRFアンプに入力される。その後、0/20dBの減衰器、BPF(Band Pass Filter)を経由してミキサーで55MHzの中間周波数(IF: Intermediate Frequency)に変換され、再びステップ減衰器(1dBステップ、設定範囲0~63dB)を経てIFアンプに入り、同期検波によりDC化され、アナログ処理部の出力となる。

SPモードでは周回ごとのデータを分離することができるようにするため、帯域幅を周回周波数の20倍以上の5MHzとしている。この5MHzというのはRF加速周波数に対して100分の1程度の帯域幅であるので、バンチ間隔が100バケット以上開いていれば当該バンチのビーム位置に、また、バンチ間隔が100バケット程度以下の場合は100バケット分の各バンチ電流の重みつき平均のビームの位置に応じた信号を出力することになる。

4台のSPバックエンドの検波出力は、4ch入力で

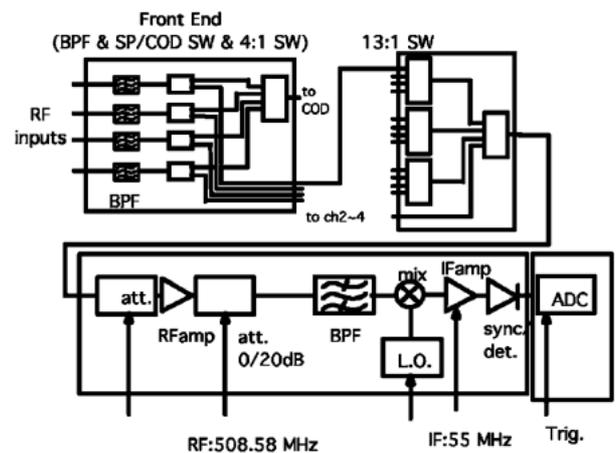


図3 旧信号処理回路フロントエンド部およびSP部の概略ブロックダイアグラム

4 個の 12-bit ADC を備えた RIO スレーブ・カードに入力されてデジタル値に変換される。周回周期に同期したトリガ信号で周回ごとにサンプリング、デジタル化を行う。デジタル・データは RIO スレーブ・カード上のバッファに蓄積され、一連の測定後まとめて VME に転送される。スレーブ・カード上のバッファには最大 4096 周回分のデータを蓄積することができるが、一連のデータ取得は 12 BPM 中の固定した 1 BPM に対して行われ、BPM の切替はバッファのデータを転送した後に行う。なお、24 セットの回路のデータ取得は並行して行うことができるので、全周の BPM のうち 2 セルごとに 1 カ所については同一周回のビーム位置をサンプルすることができる。

VME からは信号振幅のデジタル値がネットワーク経由でワークステーションに転送され、ワークステーション上でビーム位置情報に変換する。

また、スイッチの切替、減衰器の減衰率設定等はワークステーションから VME を経由して RIO を通じて SP バックエンドおよび FE という経路で行う。

2.1.2 COD モード

COD モードでは各 BPM の 4 電極を順に切替えながら信号処理を行う構成となっている。COD モードバックエンドも先端部には 13 : 1 のスイッチが装備され FE を選択するようになっている。選択された当該 FE では COD モードを選択した上で 4 電極中の 1 電極を選択するようになっている。

COD バックエンド内に入った信号は 13 : 1 スwitch の後、中心周波数 508.58 MHz 帯域幅 1 MHz の BPF を通過後アイソレータを経てステップ減衰器 (1 dB ステップ、設定範囲 0~63 dB)、RF アンプにはいる。その出力はミキサーで 10.7 MHz の中間周波数に変換後再度ステップ減衰器 (1 dB ステップ、設定範囲 0~63 dB) を経て IF アンプに入る。IF アンプ出力は rms-DC 変換方式で検波されて DC 信号になり COD バックエンドから出力される。COD バックエンド出力は 1 ch の 16-bit ADC を装備した RIO モジュールでデジタル値に変換される。

COD モードの場合はスイッチの切替とデジタル変換後のデータ転送を逐一おこない、48 回 (12 BPM \times 4 電極) のループで 1 連のデータ取得とする。24 セットの信号処理回路は並行して動作させることが可能なので、48 回の切替・データ取得で蓄積リング 1 周分の COD データを取得することができる。1 周分のデータ取得に要する時間は 20~25 秒である。

COD 用の RIO モジュールに搭載されている ADC は Δ - Σ タイプで AD 変換データは常時更新されてい

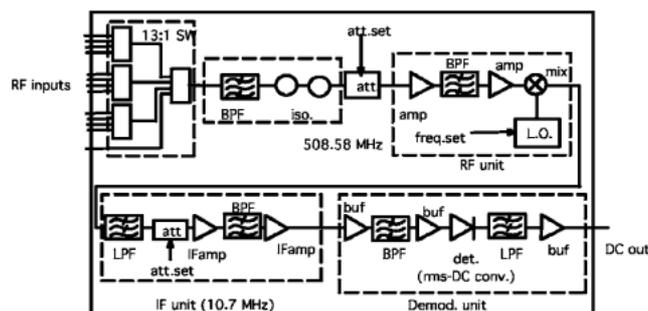


図 4 旧信号処理回路 COD バックエンド部の概略のブロックダイアグラム

るが、ADC に内蔵されているデジタル・フィルタのフル・ステップ応答時間が約 40 ms であるので電極切替後 40 ms 後にデータが有効であるというフラグを立て、このフラグの状態を監視してデータを取り込むという動作をさせている。

当初、データが有効になった後 1 回だけデータを取り込み次の電極に切替えるという動作をさせていたが、取得したデータの位置測定再現性は $10 \mu\text{m}$ を超えており、再現性の改善が強く望まれていた。これに対する対策として、実効的な帯域幅を下げて S/N を向上させるため、電極の切替後に複数回のデータを取得しそれを平均化して取り扱う方法に変更した。この複数回のデータの取得は RIO のマスター・スレーブ間通信のサイクルタイムの関係で 10 ms おきに行うこととした。また、マシン・スタディで最適な平均回数を調べ 25 回の平均 (250 ms 間の積分に相当) を行うこととし、実効的な帯域幅は 1/4 Hz 程度となった。

2.2 新規信号処理回路の構成⁵⁾

図 5 に新規信号処理回路の概略ブロック図を示す。新規回路には SP の機能は持たせていない。測定の高速度をはかるため、1 セットの信号処理回路には 4 系統の処理回路が収納されている。従って、1 系統の回路がカバーするのは 3 BPM である。

1 セットの回路の構成は、4 台のフィルター・スイッチ・モジュール、以下それぞれ 1 台の RF アンプ・モジュール、ミキサー・モジュール、IF アンプ・モジュール、およびローカル・オシレータ・モジュールでアナログ部を形成している。デジタル部は ADC ボードが 4 台と VME モジュールとして作成された DSP ボードが 1 台である。DSP ボードと ADC ボードの間は光ケーブルで接続されている。RF アンプ、ミキサー、IF アンプの各モジュールはそれぞれ 4 ch の入出力を備えている。

アナログ部のモジュールはすべて個別の NIM モジ

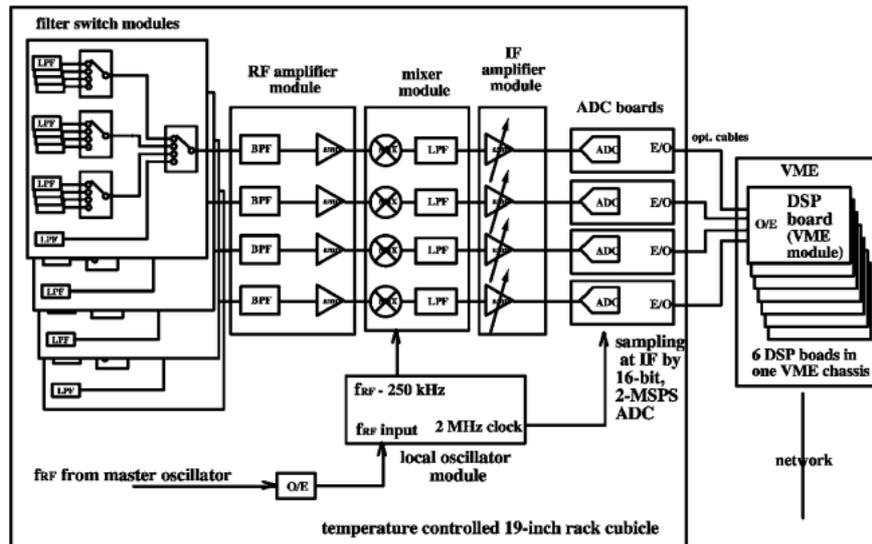


図5 新規信号処理回路1セット分の概略ブロックダイアグラム

ジュールとして作成し、故障時などに特定のモジュールのみを交換すればよいようにした。

フィルター・スイッチ・モジュールからADCボードまでは1台の19インチラックに収納されている。この19インチラック全体に対し温度調節装置を用いて0.1度以内で一定温度に保つ温度安定化を行っている。なお、NIM用電源とADCボード用電源は温度安定化範囲外に設置されている。

フィルター・スイッチ・モジュールは13ch入力で3BPM、12電極分の信号が接続されている。13番目の入力はテスト信号用である。

RFアンプ・モジュールの入力段には中心周波数508.58MHz帯域幅300kHzのSAW(Surface Acoustic Wave)BPFを組み込んで、RFアンプへの入力信号中のRF加速周波数以外の周回周波数の高調波成分を極力排除し、100mAまでの蓄積電流ではRFアンプの上流に減衰器が必要ない構成とした。

ミキサーで250kHzのIFに変換した後、可変ゲインのIFアンプを経て、IF信号のままAD変換を行う。IFアンプのゲインを調整して、ADCの電圧レンジ(差動電圧フルスケール2.048V)に適合させる。ADCのサンプリングレートは2MSPS(Mega Samples Per Second)で250kHzの正弦波にたいし1周期あたり8点のサンプリング点となっている。サンプリング長は2048点(約1ms)とし、このデータから250kHzの周波数成分だけを取り出しその振幅を得る、いわゆるデジタル検波方式とした。2048点のサンプルが終了するごとにスイッチを切替、次の電極からの信号の処理を行う。ADCボードには1chの

アナログ入力の他に、1chの16-bitデジタル出力が装備されていて電極切替、ゲイン設定などの信号のやり取りを行っている。

サンプルされたデータのデジタル検波および検波後の振幅データからのビーム位置の算出、電極の切替制御はすべてDSP上で行い、DSPからはビーム位置データのセットがVMEおよびネットワーク経由でワークステーションに送られる。従ってワークステーション上ではビーム位置の算出は行わず、4カ所のVMEからのデータの整列、データベースへの格納、ディスプレイへのデータの表示等を行っている。

IF周波数とサンプリング・クロックの関係が正確に8倍でないと、サンプルされたデータは周波数の差で変調されて、振幅が必ずしも正しく算出されない。このためローカル・オシレータ・モジュール内には2MHzの発振器を内蔵してサンプリング・クロックを生成すると同時にこの2MHzを8分周して250kHzの正弦波を生成する。また、RF加速用のマスターオシレータの信号を分岐して、この基準正弦波を各BPM信号処理回路のおかれているところまで配信し、ローカル・オシレータ・モジュールに供給している。ローカル・オシレータ・モジュール内で250kHzの正弦波とRF基準信号から508.38MHz(508.58MHz-250kHz)を生成してミキサー・モジュールに供給する。これにより、地球朝夕その他の理由で蓄積リングの周長が変化し、それを補正するためにRF基準周波数が変わった場合でも、IF周波数とサンプリング・クロックは正確に同期を続けることができる⁶⁾。

各電極2048点サンプルで蓄積リング全周分のデー

データ取得に要する時間は、1セット中の4系統を並行に処理し、また、24セットの回路も並行処理することができるので、3 BPM (12電極) 分のスキャンの時間である。DSP上で12電極分のデータ取得が終了するまでに要する時間は約15 msである。ワークステーション上ではDSP上のデータがネットワークを経由する時間、データベースへのデータ格納、ディスプレイへの表示処理のための時間等が加算され1秒程度を要する。

実際のビーム位置計測では現在のところ、全電極をスキャンするデータ取得をDSP上で100サイクル分繰り返して、位置データに直したものを100回分平均化した上でワークステーションにデータを転送している。この場合DSP上の15 ms × 100回の1.5秒とDSP上のオーバーヘッド、およびネットワーク、データベース関連の処理時間が加算され、リング全周のデータ取得に要する時間は約3秒となっている。

2.3 新旧回路の構成上の比較と特徴

旧回路のCODモード、新規回路とも電極信号を切替えて順次処理するいわゆるマルチプレクス方式を採用した。4電極をそれぞれ別の回路で処理した場合4回路の特性がそろっていないと誤差を発生する要因となる。

新規回路ではサブ μm の精度を目標としたので同一BPMの4電極は1回路で処理をしてこの誤差要因を極力排除するため、旧回路と同様にマルチプレクス方式を採用した。さらに温度安定化により周囲温度の変化による回路特性の変動を極力小さくして測定安定度を確保するようにした。

新旧の回路の構成で大きく異なる点の一つがRFアンプの上流の減衰器の有無である。旧回路では蓄積電流値1 mA相当以上の信号入力の場合に減衰器を設定してRFアンプに入る信号レベルを一定としていた。このためRFアンプに入る信号を回路入力端で換算した信号強度の最大値は100 mA蓄積時の -20 dBm に対し振幅で2桁小さい -60 dBm となってしまう、蓄積電流が100 mAとなっても信号強度が上がった効果をS/Nの向上に反映することができない構成となっていた。これは、旧回路は蓄積リングのコミッシュニング時の低電流での運用時に支障を来さないよう設計されていたためである。

これに対し、新規回路では、100 mAでの利用運転での性能向上に重点を置くため、この点を改善し100 mA蓄積時に良好なS/Nを得られるようにするため、RFアンプ上流には減衰器を置かない構成とした。この場合、フィリング・パターンによっては周回周波数の

高調波の影響で大きな振幅の信号が入力される可能性がある。100 mA蓄積時のいかなるフィリング・パターンにおいてもRFアンプ以降の回路の非線形性の影響が極力小さくなるようにRFアンプの上流に帯域幅の狭いBPFを置いて508.58 MHzの周りの周回周波数の高調波の影響を可能な限り排除する構成とした。

もう一つの大きな差異はIF信号を直接ADCでサンプリングしてデジタル検波を行う構成としたことである。旧信号処理回路CODモードバックエンドではrms-DCコンバージョンによる検波段が非線形性の主要因であった。このため、IFのままデジタル化することで非線形性を軽減できると判断した。また、IFでサンプリングして、DSPで処理をすることにより信号処理の柔軟性を高めることができる利点がある。

3. 性能の評価

3.1 新規回路試作器の試験

新規回路に関しては試作器を作成し、それを用いて高周波信号源(SG: Signal Generator)による特性測定等を行った。その一環として分解能の評価を以下のように行った。SGの出力をパワー・ディバイダで13に分割し12個はスイッチ・フィルター・モジュールに、残りの一個はローカル・オシレータ・モジュールに接続した。この信号を入力とし、2048点サンプルごとに順次12個の入力チャンネルを切替え、4chごとに1 BPMをあつかうのと同じ方法でビーム位置に相当するデータを算出した。また、この手続きを繰り返し行いビーム位置に相当するデータをDSP上で平均化し、平均回数の依存性を調べた。さらに平均化されたデータの取得を100回ずつ繰り返し、100回の繰り返しの標準偏差を求めて分解能の指標とした。入力は12チャンネルなので4個ずつ組にすると、3組のビーム位置に相当するデータが取得できる。

結果を図6に示す。平均回数が2000回程度までは分解能は平均回数の平方根に反比例して小さくなっていて統計が主要因、つまりランダム・ノイズが分解能の支配要因であると考えられる。XとYで分解能が異なるのは位置感度係数の違いによるものである。平均化をしなくても標準偏差で $0.3\ \mu\text{m}$ 程度、100回平均をすればその1/10の分解能を達成していることがわかる。

平均化回数2000回以上で分解能が悪化しているように見えるが原因は定かではない。2000回の平均をした場合DSP上で1サイクルのデータ取得に要する時間は30秒程度でありこれを100回繰り返して標準偏差を求めている。この数十分間の信号源、または回

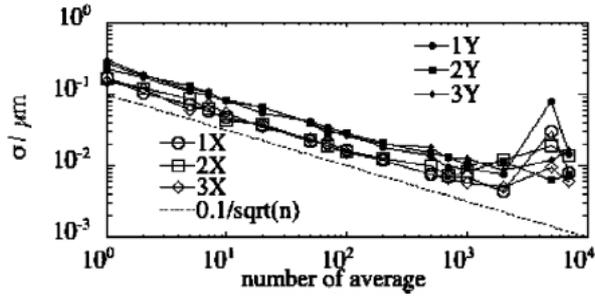


図6 高周波信号源を用いた分解能の評価．横軸：DSP 内での平均化回数．縦軸：100 回の繰り返し標準偏差/ μm ．点線は平均回数の平方根に反比例する傾きの線

路系の安定度の影響が出ているのかもしれない．

3.2 新旧の再現性比較

実際の蓄積電子ビームを使った回路の測定再現性の評価として以下のようなデータを取得している．全周の COD 測定を 100 回程度繰り返し行い、各 BPM について連続する 2 回の位置測定データの差分の rms を測定再現性の評価としている．なおこの評価値には直近の繰り返し測定の間でのビームの変動が含まれている．

旧回路では測定周期は 22~23 秒であった．新規回路では 4 秒周期の測定で取得したデータで再現性評価を行った．

図7に新規回路での結果を示す．横軸は BPM の通し番号で、縦軸は上記のようにして測定した rms である．

新規回路のデータを見ると周期構造が認められる．ビームが変動していて、ビーム変動の源がシングルキック様のもので、源がランダムに位置、キック量等を変化させているとすると、変動量の統計的期待値はリングの各点でのベータatron関数の平方根に比例する．新規回路で取得したデータにおける周期構造はその様子が現れているものと考えられる．蓄積リングのラティスは 4 回対称であるので、1/4 周分ずつずらして重ねると図8のようになる．1/4 周ごとのデータはよく重なっていて、ベータatron関数と同様なパターンを示しているの以上記のような状況が成立しているものと考えられる．

測定された rms は回路起源のもので BPM によらず一定なものと各 BPM の場所でのベータatron関数の平方根に比例するものと考えられていると仮定すると、各点において

$$\sigma_{\text{meas}}^2(n) = \sigma_{\text{circ}}^2 + \sigma_{\text{osc}}^2(n) = \sigma_{\text{circ}}^2 + \varepsilon_{\text{osc}}\beta(n) \quad (1)$$

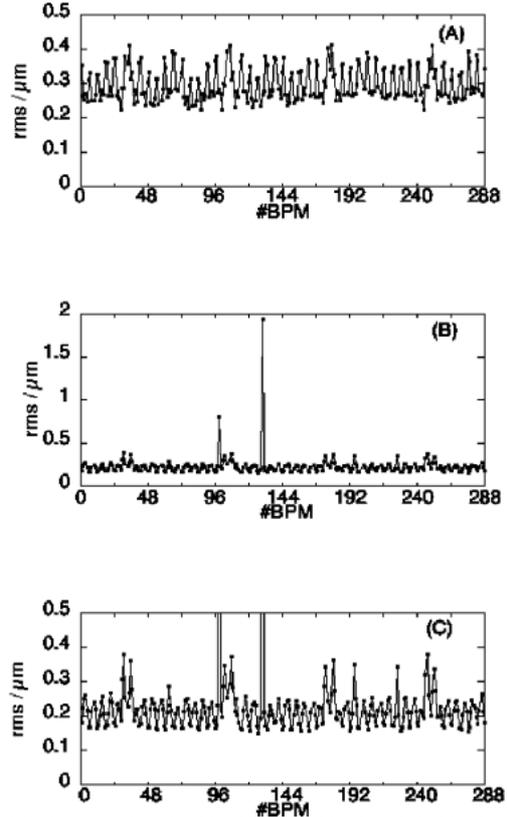


図7 新規信号処理回路での連続する 2 回の測定の差の rms．横軸：BPM 通し番号、縦軸：rms/ μm ．(A)：水平方向、(B)：鉛直方向、(C)：鉛直方向拡大（縦軸を(A)と同じ範囲にとった）

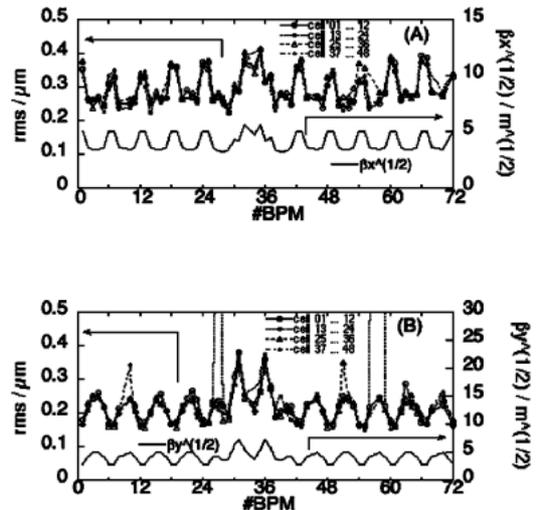


図8 図7のデータを 12 セル分ずつずらして重ねたもの．比較のためベータatron関数を示した、右縦軸目盛．(A)水平方向、(B)鉛直方向．ベータatron関数のパターンが明らかに認められる．(B)において再現性の特に悪い BPM はスケールアウトしている．(B)ではその他にも再現性の悪い BPM が散見される．

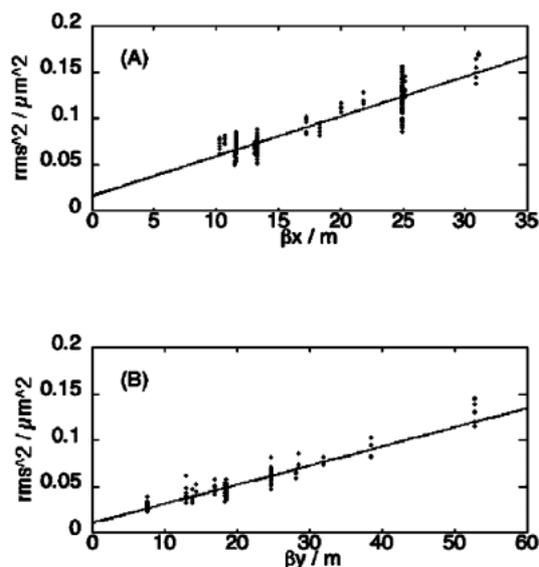


図9 rms の 2 乗をベータatron関数に対してプロットした。(A)水平方向, (B)鉛直方向. 縦軸 $\text{rms}^2 / \mu\text{m}^2$, 横軸 β / m . 直線は一次関数によるフィット. 図8で明らかに再現性の悪い点は省いてフィットをした. 各直線の式は以下の通り.
 (A) $\text{rms}^2 = 0.017(0.002) + 0.0043(0.0001) \beta_x$,
 (B) $\text{rms}^2 = 0.010(0.001) + 0.0021(0.00004) \beta_y$.
 カッコ内はフィットしたパラメータの誤差.

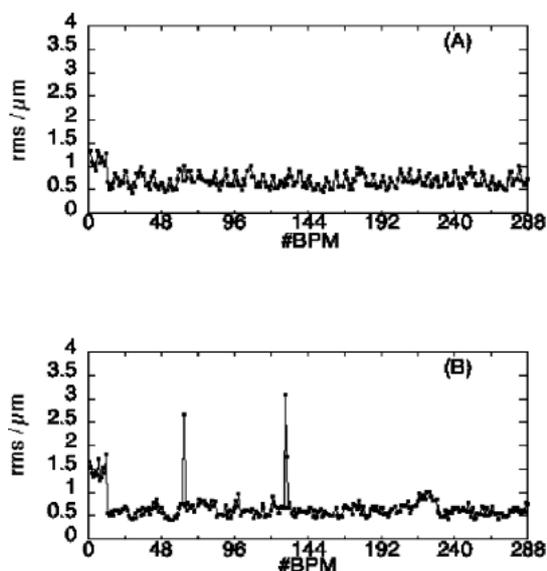


図10 旧信号処理回路での連続する2回の測定の違いのrms. 横軸: BPM 通し番号, 縦軸: $\text{rms} / \mu\text{m}$. (A): 水平方向, (B): 鉛直方向. 鉛直方向での再現性の悪いBPMがある. 一カ所に関しては新規信号処理回路と同一のBPM(通し番号130番). 1~12番が系統的に再現性が悪くなっている. メカニズムは不明であるが, RFキャビティの設置箇所の上・下流でこのような現象が認められる. 鉛直方向では217~228番にも同様な傾向が認められるがここもキャビティの設置箇所の上・下流にあっている.

が成り立つ. ここで $\sigma_{\text{meas}}(n)$ は n 番目の BPM で測定された rms 値, σ_{circ} は回路の分解能の寄与分, $\sigma_{\text{osc}}(n)$ は n 番目の BPM の場所でのビーム変動による寄与分, ε_{osc} は規格化されたビーム振動のエネルギーに比例する量, $\beta(n)$ は n 番目の BPM の場所でのベータatron関数の値である. なお, 回路の分解能はいずれの回路も同一であると仮定している.

ここで各 BPM のベータatron関数に対して rms の 2 乗をプロットすると図9のようになる. これを一次関数でフィットした. 結果は水平方向が, $\text{rms}^2 = 0.017(\pm 0.002) + 0.0043(\pm 0.0001)\beta_x$, 鉛直方向が $\text{rms}^2 = 0.010(\pm 0.001) + 0.0021(\pm 0.00004)\beta_y$ であった.

これらのフィットの結果得られた定数項の平方根から σ_{circ} を求めると $0.1 \mu\text{m}$ で実ビームの計測でもサブ μm の分解能が得られていることがわかる.

この $0.1 \mu\text{m}$ という値は試作器における SG での測定に比べると3倍程度の値となっている. また, フィットの定数項の値は水平と鉛直でパラメータの誤差範囲を若干超えて異なっている. 定数項が回路の分解能で決まるとすると, 水平方向と鉛直方向での違いは SG での測定と同様に位置感度係数の分だけのはずであるが, 大小関係は逆になっている.

旧回路についても同様に各 BPM について連続する2回の位置測定データの差分の rms をプロットしてみると図10のようになる. これを12セル分ずつずらして重ねると図11のようになる. 図10, 11では水平方向についてはベータatron関数のパターンが認められるが, 鉛直方向については明確なパターンが認められない. このため rms の 2 乗をベータatron関数に対してプロットすると図12に示すように, 水平方向は rms のベータatron関数に対する依存性が見取れるが, 鉛直方向については依存性が明らかではない.

旧回路については水平方向についてのみフィットを行った. 結果は $\text{rms}^2 = 0.079(\pm 0.022) + 0.024(\pm 0.001)\beta_x$ であった. フィットで得られた定数項の平方根から分解能を評価したところ $0.3 \mu\text{m}$ であった. この値から評価すると, 旧回路でも既にサブ μm の分解能が得られているが, これは先述した RIO 上での25回の平均化(各電極250ms間の積分に相当する)に負うところが大きい.

新規回路における水平と鉛直での分解能に相当する量が位置感度係数と整合していないこと, 旧回路での

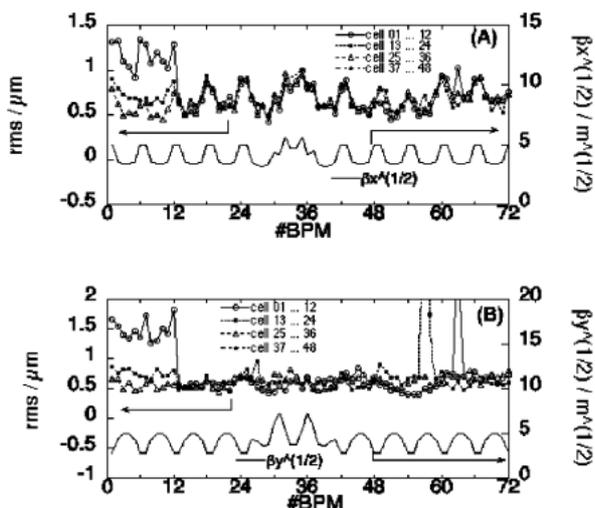


図11 図10のデータを12セル分ずつずらして重ねたもの。比較のためベータトロン関数を示した、右縦軸目盛。(A)水平方向、(B)鉛直方向。水平方向ではベータトロン関数のパターンが認められるが鉛直方向では明らかではない。(B)において再現性の特に悪いBPMはスケールアウトしている。左端12カ所のBPMはRFキャビティの設置箇所の上・下流にあたっている(全周4カ所、4対称の位置)。

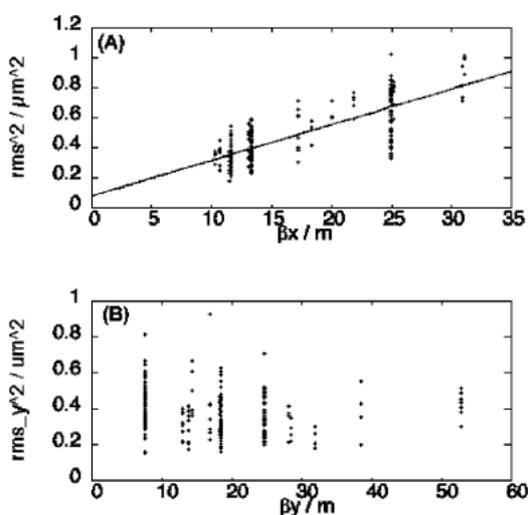


図12 rmsの2乗をベータトロン関数に対してプロットした。(A)水平方向、(B)鉛直方向。縦軸 $rms^2 / \mu m^2$ 、横軸 β / m 。直線は一次関数によるフィット。図11で12セルずらした場合の重なる悪い点は省いてフィットした。 $rms^2 = 0.079(0.022) + 0.024(0.001)\beta_x$ 。カッコ内はフィットしたパラメータの誤差。鉛直方向ではベータトロン関数に対する依存性は明らかではないので、フィットは行わなかった。

鉛直方向のデータがベータトロン関数との相関がないこと等から、(1)式のモデルに組み込まれていない効果があるものと考えられる。式(1)によるモデルでは個々のBPMは独立で、回路の分解能とベータトロン関数の平方根に比例するビーム変動の寄与が独立という仮定をしている。ところが、マルチプレクスの周期や複数のBPMをスキャンするための時間と蓄積ビームの閉軌道の変動の時間との関係で、相関項に相当する効果や隣のBPMとの相関を考慮する必要があり、上記の独立性の仮定が妥当でないのかもしれない。

旧回路では1電極ごとに平均化を行い、48電極のスキャンで1組のデータとしていた。1BPMの4電極のマルチプレクスの周期は1秒以上で全BPMのスキャン時間は20秒以上であった。これに対し、新規回路の場合は15msでの全電極のスキャンのループを多数回繰り返すという平均操作となっており、1BPMに対する1回のマルチプレクスは4msの周期になっている。平均操作としては、15msおきに100点をサンプルし、実効的に1.5秒の積分となっていると考えられる。これらデータ収集に要する時間的な要素を考慮すると閉軌道の変動に対する応答は新・旧の回路でかなり異なったものになっていると考えられる。これらを考慮したデータの解釈は今後進めていく必要がある。

今回の回路更新の評価としては、実ビームを用いたBPMの分解能に式(1)のモデルによるフィットの結果を用いることとする。この条件下では新規回路は旧回路に対し、分解能はrms値で3倍の向上、測定速度は7倍の向上がみられた、というのが信号処理回路の更新の効果である。

4. まとめと今後の展望

SPring-8蓄積リングのBPM信号処理回路を更新しビーム位置測定分解能で3倍の改善、測定速度で7倍の改善をみた。

SPring-8蓄積リングの利用運転中はBPMによるCOD測定をもとに、周期的に軌道補正をかけている。この補正の周期はBPM信号処理回路の更新前は約30秒であった。このうちBPMの測定に20秒以上を要していた。新規回路に更新後はこの補正の周期は15秒に短縮した。15秒中の3秒がBPMの位置測定に要する時間で残りは軌道補正用ステアリング電磁石の制御のためのデータベースへのアクセス、補正磁場の設定のための時間等である。

これら分解能の改善、測定時間の短縮化による蓄積リングの運転状態に対する効果の評価は今後とも進め

ていく必要があるが、今回の更新で得られるようになった高分解能測定および補正周期時間の更なる短縮により蓄積リング COD の更なる安定化が期待できる。

短縮化の第1段階はハードウェアの変更を行わずに補正磁場設定のプログラムを変更して時間の短縮をはかる。第2段階以降はハードウェアの変更・追加などを視野に入れる。例えばデータ転送を通常のネットワーク経由ではなく、シェアド・メモリ・ネットワークなどの専用線で転送することでBPMの位置測定データをDSP上の処理時間程度で取り扱えるようにする。さらに、ステアリング電磁石の電源を応答の速いものに変更する。また、ステアリング電磁石の磁場の速い変化に追従できるよう真空チェンバを改造して渦電流による遅延等の影響を軽減する。ビーム位置測定から軌道補正までのループを専用のハードウェアで行う、などである。

これらの対策により、秒オーダー以上の変動要因に追従できるシステムとなることが期待できる。例えば、挿入光源の機械的なギャップ変更などにも追従できる速度を実現したいと考えている。

謝辞

今回のBPM信号処理回路の更新にあたりSPring-8加速器部門のスタッフ各位の協力に感謝する。特に、加速器部門リング加速器グループの高嶋武雄、小路正純の両氏には回路仕様の確定の各段階で全面的に協力いただいた。また、ADCボード、DSPボードの開発は加速器部門制御グループの福井達、増田剛正の両氏に負っている。また、この両氏には新規回路の制御ソフトウェアの開発においても適切な助言をいただいた。また、加速器部門運転・軌道解析グループの早乙女光一、高雄勝の両氏には夏期停止期間終了後の加速器運転再開時における回路更新に必要な手順等について助言をいただき、これにより非常に順調に回路の

移行を行うことができた。また、移行後の種々のデータの取得において加速器部門スタッフ各位の協力が欠かせないものであった。ここに改めて感謝の意を表する。

参考文献

- 1) H. Tanaka, "Stabilization of Stored Beam in the SPring-8 Storage Ring", Proc. of the NANOBEAM 2005, the 36th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop, Uji Campus, Kyoto University, 2005, p-12.
- 2) H. Tanaka, K. Soutome, M. Takao, M. Masaki, H. Ohkuma, N. Kumagai and J. Shimizu, "Beam Commissioning and Achieved Performance of SPring-8 Storage Ring Phase-2 Lattice with Four Magnet-free Long Straight Sections", Nucl. Instrum. and Meth. A486, 521 (2002).
- 3) H. Tanaka, T. Aoki, T. Asaka, S. Date, K. Fukami, Y. Furukawa, H. Hanaki, N. Hosoda, T. Kobayashi, N. Kumagai, M. Masaki, T. Masuda, S. Matsui, A. Mizuno, T. Nakamura, T. Nakatani, T. Noda, T. Ohata, H. Ohkuma, T. Ohshima, M. Oishi, S. Sasaki, J. Shimizu, M. Shoji, K. Soutome, M. Suzuki, S. Suzuki, S. Takano, M. Takao, T. Takashima, H. Takebe, K. Tamura, R. Tanaka, T. Taniuchi, Y. Taniuchi, K. Tsumaki, A. Yamashita, K. Yanagida, H. Yonehara and T. Yorita, "Top-up Operation at SPring-8—Towards Maximizing the Potential of a 3rd Generation Light Source", Proc. of the 9th European Particle Accel. Conf., Lucerne, 2004, p. 222.
- 4) http://www.spring8.or.jp/ja/users/status/schedule/bunch_mode
- 5) S. Sasaki, T. Fujita, M. Shoji and T. Takashima, "Upgrade of BPM Electronics for the SPring-8 Storage Ring", Proc. of the 12th Beam Instrumentation Workshop, Fermilab, 2006.
- 6) S. Date and N. Kumagai, "A Long-term Observation of the DC Component of the Horizontal COD in the Storage Ring of SPring-8", Nucl. Instrum. and Meth. A421, 417 (1999).