

DEVELOPMENT OF THE TURN-BY-TURN BEAM MONITOR USING AN UNDULATOR RADIATION

Masaki Mitsuhiro[#], Shiro Takano, Kazuhiro Tamura, Akira Mochihashi, Haruo Ohkuma
Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8)
1-1-1 Koto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

Abstract

At the diagnostic beamline II (BL05SS) of the SPring-8 storage ring, a turn-by-turn beam diagnostic system using undulator radiation has been developed to observe fast phenomena such as stored beam oscillations during the top-up injections, blowups of beam size and energy spread of a high current single bunch and so on. The principle and experimental setup of the turn-by-turn diagnostic system, and examples of beam observations are reported.

アンジュレーター放射を用いた Turn-by-turn ビームモニターの開発

1. はじめに

SPring-8 蓄積リング加速器診断ライン II (BL05SS)^[1]では、アンジュレーターからの放射光を用いてリング周回毎に電子ビームの挙動を観測するための診断システムを開発してきた。これにより、Top-Up 入射時の蓄積ビーム振動測定、および H24 年 10 月以降の運転から導入が予定されている大電流シングルバンチを含むハイブリッドフィルパターンのシングルバンチ部のみを切り出し、そのビーム診断などに活用することを計画している。この Turn-by-turn ビームモニターのシステム構成およびビーム計測例について述べる。

2. Turn-by-turn 放射光ビームモニター

BL05SS に設置されている挿入光源(ID05)^[2]は、周期長 76 mm、周期数 51、最大 K 値が 5.8 のアンジュレーターである。フロントエンド部には、光源点から約 25m 下流の地点に 4 象限スリットが設置されており、測定条件に応じて開口を変えて用いる。また光学ハッチ内には、光源から約 70m 下流の地点に Si(111)結晶を用いた二結晶分光器があり、アンジュレーター放射の特定のハーモニクスのみを選択することができる。Turn-by-turn 放射光ビームモニターは二結晶分光器下流の実験ハッチ内に設置しており、光源点からみて約 90m 下流に位置している (図 1)。

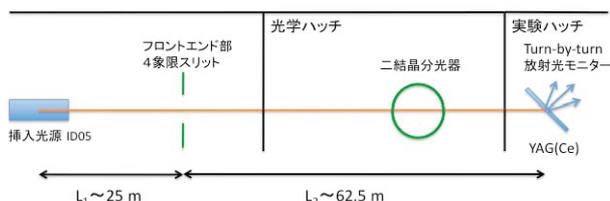


図 1 : Turn-by-turn 放射光ビームモニターに関する BL05SS の主要機器配置

この Turn-by-turn モニターは、アンジュレーター放射の空間プロファイルリング周回毎に観測することができるシステムであり、高速蛍光体、結像光学系、高速カメラなどから構成される (図 2)。光子エネルギー 10keV 程度のアンジュレーター放射の空間プロファイルを、真空中に設置した残光時間が数十ナノ秒の YAG(Ce) 蛍光体を用いて可視光イメージに変換する。YAG(Ce)結晶の厚さは 0.1mm であり、変換された可視光線の中心波長は 550nm、バンド幅は 100nm (FWHM)程度である。蛍光体上でのプロファイルイメージをカメラ受光面上に結像させるための可視光結像光学系の途中で、ハーフミラーを用いて光路を 2 つに分け、それぞれに円筒レンズを用いた 1 次元集光光学系を組み込んでいる。光路 1 では、垂直方向に光を絞り込むことで像を圧縮し、水平方向の射影プロファイル (ライン状) が得られる。一方、光路 2 では、水平方向に光を絞り込んで像を圧縮しているため、垂直方向の射影プロファイルが得られる。光路 1 と 2 で生成される水平、垂直方向の射影プロファイルは、イメージインテンシファイヤー II. (浜松ホトニクス製 C9548-02MP47) の光電面上に同時に結像される。II. の光電面材質は GaAsP、MCP は 2 段内蔵、蛍光面は残光時間が短い P47 を用いている。最小ゲート時間は 10 ns、最大繰り返しは 210 kHz である。2 つのライン状の像は、リレーレンズを介して高速 CCD カメラ (米国ローパー社製 ProEM:512B) で撮像される。受光面の画素数は 512(X)×512(Y)、ピクセルサイズは 16 μm である。リング周回毎 (周回時間: 4.79 μs) に放射光プロファイルを撮像するために、キネティクスモードと呼ばれる特殊な機能を用いる。これは、予め設定した受光エリア (サブフレーム) 内の CCD 素子に蓄積した電荷を外部トリガーに同期して縦方向 (Y 方向) にシフトさせることができる機能である。受光エリアはカメラ受光面全体が一番下の領域に位置し、光がそのエリアだけにあたるように光学系とカメラの位置を調整する。エリアサイズ (ピン幅) は Y 方向になるべく狭く設定する。最速のシフトレートは 0.45 μs/row である。

[#] masaki@spring8.or.jp

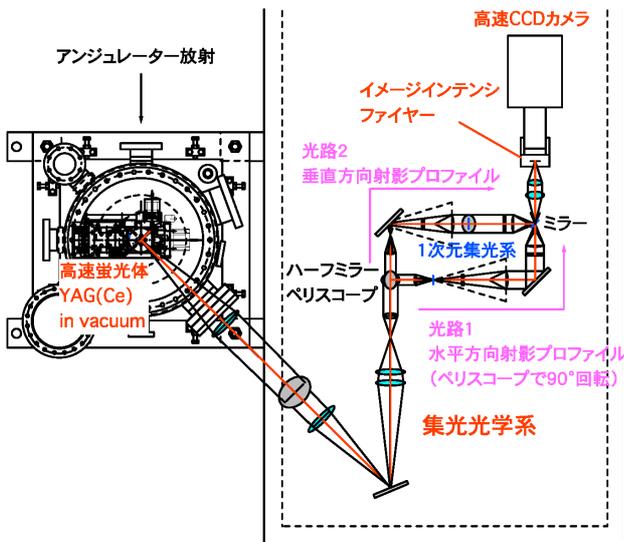


図2： Turn-by-turn 放射光モニターの全体概略図。光路1で作る水平方向のプロファイルは、ハーフミラーとともに構成されるペリスコープにより90°回転する。

3. ビーム計測

3.1 入射時の蓄積ビームの振動

SPring-8 では、ビーム入射時に4台のパルスバンパ電磁石によって蓄積ビームにバンパ軌道が作られる。4つの励磁波形の微妙な相違や励磁タイミングのズレなどによってバンパ軌道が完全に閉じないため、水平方向に関しては残留キックによりビーム振動が発生している。加速器立ち上げ時にバンパ励磁タイミングや水平補正キッカー^[3]の調整を行い、放射光利用実験に支障がない程度に振動を抑制しているが完全ではないため、Turn-by-turn 放射光モニターを用いてユーザー利用運転中に入射時のビーム振動を定期的に測定してきた。今回はその一例を示す。ID05のK値を0.45（磁極ギャップ80mm）にセットし、1次光7.2keVを用いた。放射光の角度振動を測定するため、フロントエンド部のスリット開口角を広げ、水平方向を123 μrad 、および垂直方向を45 μrad とした。Top-Up入射に同期した信号を撮像開始のトリガーとして取得したシングルショット画像を図3に示す。露光時間は、イメージインテンシファイヤー(I.I.)のゲート幅で決まり、200 nsにセットした。ゲート信号はリング周回信号(208.8 kHz)の分周信号で、この画像データでは、バンパ励磁(入射)の4ターン前(-4 turn)のタイミングから、5ターン毎に120ターン分のプロファイルを撮像している。入射同期信号と分周されたI.I.ゲート信号のタイミング関係を変えて、撮像開始ターンが-5, -4, -3, -2, -1ターンとなるデータのセットを揃え、ターン番号の順にソートして水平方向についてプロットすると図4(a)が得られる。図4(b)は、そのFFT解析であり、水平方向のベータatronチューンの小数部0.15付近にピークが現れている。このピー

ク強度や振動の位相情報に基づいて、入射バンパや補正キッカーの励磁タイミングのフィードバック制御に応用することを考えている。

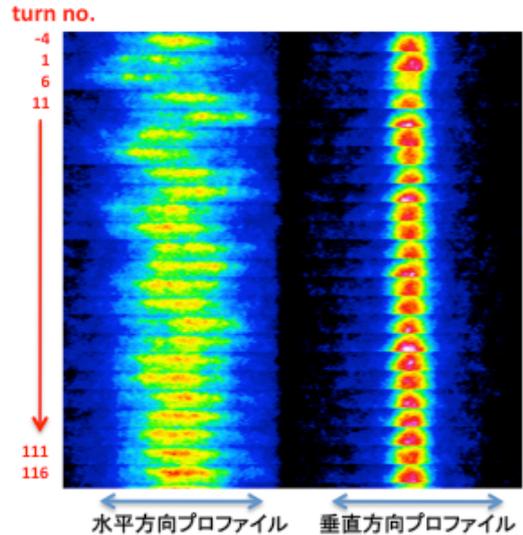


図3：入射に同期してキネティクスモードでシングルショット撮像した画像。左側の数字はバンパ電磁石励磁時点から数えたターン数であり、一番上のプロファイルは励磁前である。I.I.のゲートタイミングは、バンパ励磁波形の立ち上がり部分で残留キックを受けたバンチに合わせている。

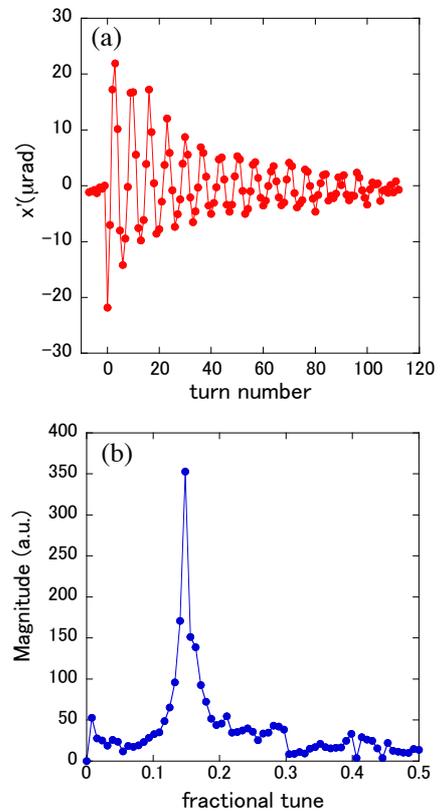


図4：(a)ターン毎に測定した水平プロファイルから求めた放射光の角度振動。(b)振動のFFT解析。ベータatronチューン(小数部0.15)が主成分。

3.2 電子ビームのエネルギー拡がり

ID05 の磁極ギャップを狭くし K 値を大きくするとマルチポールウィグラーとなり、高次光が放射されるようになる。一般に、高次光は電子ビームのエネルギー拡がりに敏感であるため、これを用いて逆にエネルギー拡がりを診断することができる。高次光の空間プロファイルの幅は、水平方向に関しては水平エミッタンスの影響が支配的であるが、垂直方向に関してはエミッタンスが小さいため、エネルギー拡がりアンジュレーター放射本来の持つ角度発散によって決まる。つまり、エネルギー拡がりの空間プロファイルへの影響は、垂直方向の幅の変化として現れる^[2]。これらの性質から、高次光の空間プロファイルを使って水平エミッタンスとエネルギー拡がりを同時に高速計測することが可能となる。

ここで示す測定例は、試験的に行なった 7GeV 運転の際のエネルギー拡がりのバンチ電流依存性である。ID05 の K 値を 3.74 (磁極ギャップ 30.44 mm) にセットし、15 次光 11.36 keV を用いた。フロントエンド部のスリット開口は、二結晶分光器への熱負荷を考慮し、水平方向 ΔX を 0.2 mm と狭くした。またこうすることで、YAG(Ce)蛍光板に投影される水平方向のプロファイルが、光源点におけるビームの水平方向分布のピンホールイメージとなる。スリットの垂直方向の開口 ΔY については、15 次光が切られない程度の 1.2 mm とした。垂直方向の放射の幅とエネルギー拡がりの関係を較正するために、バンチ電流が小さいマルチバンチビームを用いて、RF 周波数を変えることによりビームエネルギーの中心値を変化させながら 15 次光の垂直プロファイルを測定した。このとき、ビームエネルギーを最大で 0.18% 程度変えた計算となる。このデータに基づき算出した較正曲線が図 5 である。ここで、RF 周波数が中心値 (ビームエネルギー 7.000 GeV) のときに測定した垂直プロファイルの幅が、7GeV における自然エネルギー拡がりの計算値 0.0957% に対応するものとした。図 6 は、実際に測定したエネルギー拡がりのシングルバンチ電流依存性である。シングルバンチ部に I.I.ゲート (幅 200 ns) をかけ、キネティクスモードでバンチ電流ごとに 100 フレームの画像をシングルショットで取得した。このときの設定では、1 フレーム当たりプロファイルが 24 個含まれているので合計 2400 個の幅のデータが得られ、その幅の平均値を図 5 の較正曲線を用いてエネルギー拡がりに変換した。今回の測定結果では、バンチ電流が 2 mA 程度からすでにエネルギー拡がりの増大がみられ、13 mA では約 0.18% となり、元のエネルギー拡がりの 2 倍近くに達している。

SPRING-8 蓄積リングでは、高度化の一環としてバンチ電流の増強が計画されている。一般にバンチ電流を増やすとウェイクの影響などによりエネルギー拡がりが増大する傾向があるため、アンジュレー

ターからの分光フラックス密度がバンチ電流に比例して単純に増えていかないことになる。これは光源性能に直結する問題であり、今後、大電流バンチ運転における光源性能を評価する上で、エネルギー拡がり測定の重要性が増してくるものと思われる。

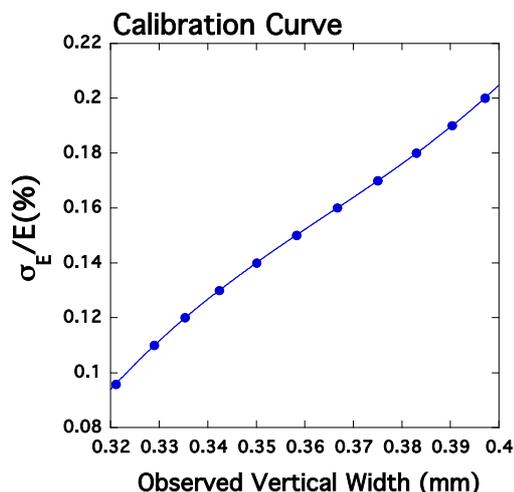


図 5 : RF 周波数を振り、ビームの中心エネルギーを変えて測定した垂直方向プロファイルの幅に基づき構築したエネルギー拡がり較正曲線。実線は 3 次関数によるフィッティングカーブ。

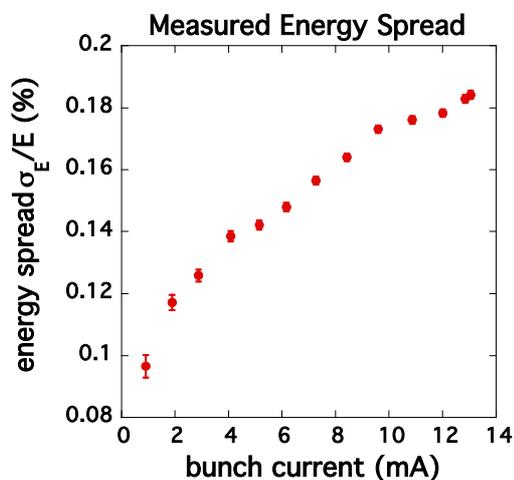


図 6 : 7 GeV 試験運転時に測定したエネルギー拡がりのシングルバンチ電流依存性。

参考文献

- [1] S. Takano, et al., Proceedings of SRI 2009, 10th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, Melbourne, Australia, 27 Sep.- 2 Oct. 2009, pp.399-402.
- [2] M. Masaki, et al., Proceedings of SRI 2009, 10th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, Melbourne, Australia, 27 Sep.- 2 Oct. 2009, pp.560-563.
- [3] C. Mitsuda, et al., Proceedings of IPAC 2010, Kyoto, Japan, 23-28 May. 2010, pp.2552-2554.