

PLAN OF A FAST SYNCHROTRON RADIATION BEAM MONITOR AT THE SPRING-8 DIAGNOSTICS BEAMLINE II

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

Abstract

We have been designing and developing a fast synchrotron radiation beam monitor as a tool for turn-by-turn diagnostics of the horizontal emittance and energy spread, observing the spatial profile of higher-harmonic radiation from the insertion device (ID05) of the SPring-8 diagnostics beamline II. This fast monitor system is outlined. In addition, we have a plan of sub-ps bunch length measurement by the fluctuation method using visible light from edges of bending magnets. Results of the simulation study are shown.

SPring-8 加速器診断ライン II における高速光モニターの計画

1. はじめに

SPring-8 蓄積リングを周回する電子ビームの様々な物理的状態を診断するために、マルチポールウィグラー型の挿入光源(ID05)^[1]を持つ加速器診断ライン II (BL05SS)^[2]の整備を進めてきた。2010年4月に、ID05からの分光 X 線を実験ハッチまで導き、本格的にビーム診断装置を構築できる環境が整った。実験ハッチ内に整備を計画している診断系の一つに高速光モニターがある。これは、マルチポールウィグラーとなる ID05 の高次光の空間分布から、エネルギー広がりや水平エミッタンスをリアルタイムに同時計測することができるモニターであり、ナノ秒オーダーの短い残光時間を持つ高速蛍光体、精密集光系、イメージンテンシファイヤー、高速 CCD カメラなどから構成される。このシステムを用いて、入射ビームや大電流シングルバンチビームの振舞いをターン毎に診断し、ビーム性能の向上および運転・調整の効率化などを行なう。一方、ID05の上下流に位置する偏向電磁石からの可視エッジ放射光も、光学ハッチ内にある二結晶分光器のシリコン結晶の表面で鏡面反射し、実験ハッチまで到達し得る。このエッジ光を用いて、フラクチュエーション法によりサブピコ秒オーダーのバンチ長をターン毎に計測することを検討しており、蓄積リングでの短パルス利用のために計画されている XFEL C-band Linac からの入射^[3]などで期待できる高品質短バンチビームの診断に適用することを考えている。

2. エネルギー広がりや水平エミッタンスの同時診断システム

単一電子によるアンジュレーター放射やウィグラー放射のスペクトル幅 $\Delta\omega/\omega$ は、次数の大きな高次光になるにしたがい狭くなる特性を持つ。その特性により、電子ビームのエネルギー広がりやエミッタンスの診断には高次光が敏感なプローブとなる。

最大 K 値が 5.8 の ID05 の放射スペクトルには、高次光のピークが多数現れるので^[1]、これらのビーム診断用光源として非常に有用である。電子ビームの水平エミッタンスは、観測される高次光空間分布の水平方向の幅を増大させる。一方、垂直エミッタンスは、十分よく補正された XY エミッタンス結合のおかげで非常に小さいため、空間分布への影響はほとんど無視できる。また、電子ビームのエネルギー広がりや、空間分布の幅を等方的に増大させる効果をもたらすが(図1)、主にエミッタンスの影響が少ない垂直方向の幅の増大として観測される。

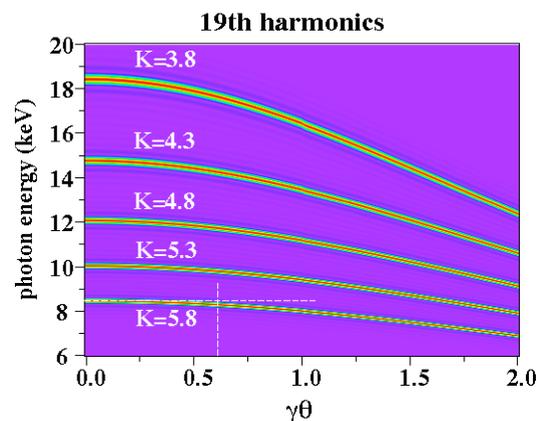


図1：19次光に対する放射角度($\gamma\theta$)と光子エネルギーの関係の K 依存性。二結晶分光器を用いて狭いバンド幅で切り出した(横の点線)際に観測される放射角度の広がり(縦の点線)は、エネルギー広がりによってスペクトル幅が太くなると更に広がる。

現在計画している高速光モニターシステムの概略を図2に示す。二結晶分光器によって 2×10^{-4} 程度のエネルギーバンド幅で分光された高次光の空間プロファイルや、ナノ秒オーダーの非常に短い残光時間を持つ高速蛍光体^[4](浜松ホトニクス製: J9758)を用いて観測する。発光波長は 400nm、バンド幅は 10nm (FWHM)程度である。ミラー、アクロマティックレンズ、スペーシャルフィルターなど

[#] masaki@spring8.or.jp

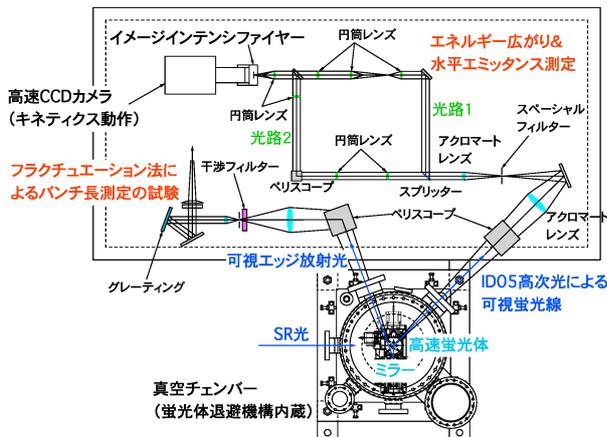


図 2 : 実験ハッチ内に整備する高速光モニターシステムの概略図

の集光光学系の途中にあるスプリッターにより光を 2 経路に分割する。円筒レンズの組み合わせにより、光路 1 の光については横（水平）方向にのみ集光し、垂直プロファイルのイメージを 1 次元的に結像させて、エネルギー広がり測定に用いる。光路 2 の光については縦（垂直）方向にのみ集光し、水平プロファイルのイメージを同様に結像させることにより、水平エミッタンスも同時に測定する。撮像には、最小ゲート幅 10ns、最大ゲート繰り返し蓄積リングの周回周波数に相当する 208kHz のイメージインテンシファイヤー I.I. (浜松ホトニクス製: C9548) と高速 CCD カメラ (米国ローパーサイエンティフィック社製: ProEM-512BK) の組み合わせを用いる。この高速カメラは、マイクロ秒オーダーの時間分割測定に有用な、受光面縦方向に CCD 素子の電荷を高速でシフト (最速 0.45 μ s/row) させることができるキネティクスモードと呼ばれる機能を有している。光を 2 経路に分割し、水平と垂直のそれぞれの方向に 1 次元的に集光する理由は、受光面上の細長い領域 (数ピクセル程度の幅のウィンドウ) のみに光をあて、キネティクスモードを利用して、リング周回時間 (4.8 μ s) 毎にバンチの状態を観測するためである。ウィンドウの幅は、ライン状に絞られた像の幅に応じて、ソフトウェア上で設定することができる。

カメラと I.I. の動作テストのために、キネティクスモードを使って、25 次光 (10.92keV) を観測した例を図 3 に示す。このテストのときには、図 2 に示したような 1 次元的に集光する光学系ではなく、C マウント取り合いの汎用レンズを I.I. の入力面に取付けた。そのため、像をライン状に細く絞れないのでウィンドウ幅を 32 ピクセル (512 μ m) とした。この場合、CCD 電荷シフト時間は、露光時間 1 μ s の分も含めて $32 \times 0.45 + 1 = 15.4\mu$ s となる。毎回の電荷シフトは、外部から入力するトリガー信号に同期して開始される。外部トリガーには、蓄積リングの周回信号を 5 分周した信号を用い、5 ターン毎 (24 μ s 周期; 41.6kHz) に、3mA のシングルバンチに同期して測定した。I.I. に入力したゲート信号も 5 ターン毎にビー

ムと同期しており、幅は最小の 10ns、繰り返しは 41.6kHz である。

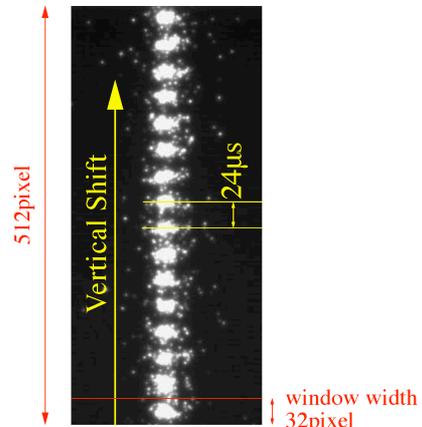


図 3 : 高速 CCD カメラのキネティクス動作テスト。シングルバンチ 3mA からの放射 (25 次光) を 5 ターン毎に撮像したデータを 10 回積算した。

3. フラクチュエーション法によるバンチ長診断の検討

バンチ長と同程度の波長長となるようにエネルギーバンド幅を制限してインコヒーレント放射を観測すると、その強度揺らぎがバンチ長と相関を持つことが知られている^[5]。このフラクチュエーション法の利点は、フーリエ変換の性質から、バンチ長が短くなるほど、強度揺らぎの観測に必要なバンド幅に対する要求が緩和されるという点である。また、適当な波長範囲で、1 パルス毎に放射スペクトルを測定した際に現れるランダムなスパイク構造の幅の逆数から、バンチ長を評価する実験も行なわれている^[6]。この方法は、十分な光量があれば、原理的にシングルショットで測定することができるため、将来の XFEL C-band Linac からの入射ビームなどで期待できるサブピコ秒のバンチ長診断の候補の一つとして位置づけることができる。

BL05SS では、図 4 に示すように、ID05 の上流側と下流側に位置する 04B2 と 05B1 という 2 つの偏向電磁石エッジ部からの放射光も利用できる。このエッジ放射の可視光成分を図 2 のように取り出し、フラクチュエーション法の試験をすることを検討している。

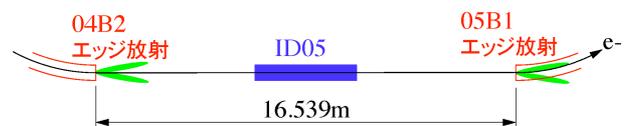


図 4 : 04B2 と 05B1 の 2 カ所のエッジ部光源。ID05 中心から約 87.5m 下流の地点で可視光成分を取り出す。

04B2 と 05B1 から 2 つのエッジ放射パルスが、実験ハッチに到着するときの時間差は、0.1fs 程度である。この時間間隔は、適当なバンド幅で観測する可視光領域の波長に相当する時間よりも 1 桁以上短く、その波束長も 0.1fs より遥かに長い。よって、この 2 つのエッジ光は、可視光領域では時間的に分離していない。また、空間的にもオーバーラップしているので、1 電子からの放射を計算すると、図 5 のようなリング状の干渉パターンとなる。

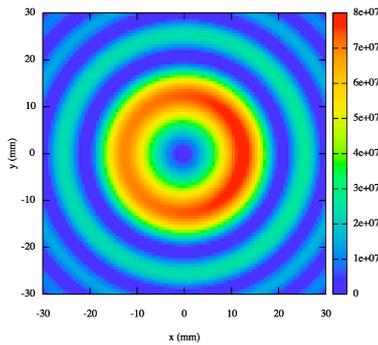


図 5 : σ 偏光と π 偏光の区別をしないときのエッジ放射の干渉パターン。波長は 514nm である。

これを有限の径のレンズで集光したときの電場を $e(\omega)$ とすると、バンチ全体からの放射が寄与する電場 $E(\omega)$ は、

$$E(\omega) = e(\omega) \sum_j e^{i\omega t_j} \quad (1)$$

で表される。ここで t_j は、バンチの中の j 番目の電子の光源点への到着時間である。バンチ形状がガウス分布であると仮定し、正規乱数と(1)式を用いて、波長 514nm、バンド幅 20nm(FWHM)での波長スペクトルを、異なるバンチ長に対して計算した結果を図 6 に示す。バンチ長が長くなるほどスパイク構造の幅が狭くなるので、グレーティングなどで構成される分光器の波長分解能に対する要求が厳しくなる。

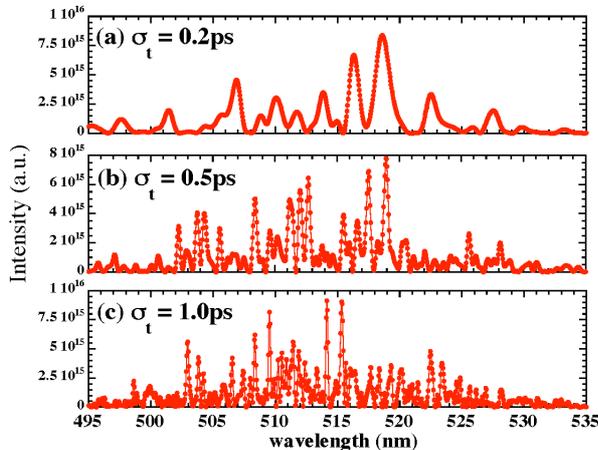


図 6 : 3 つの異なるバンチ長(r.m.s.)に対して計算したシングルショット波長スペクトル。

例えばバンチ長が 1ps (r.m.s.)の場合、少なくとも 0.1nm 程度の波長分解能が必要である。スパイク構造の幅を定量的に評価するためには、強度相関の手法を用いる。すなわち、スペクトル強度の自己相関関数、

$$C(n) = \frac{\langle I(\omega_i)I(\omega_{i+n}) \rangle}{\langle I(\omega_i)^2 \rangle} \quad (2)$$

の周波数シフト n が小さい領域に、バンチ形状因子が現れることを利用する^[6]。(2)式を用いて、図 6 のスペクトルの自己相関関数を計算すると図 7 のようになる。周波数シフトが小さい領域では、ガウシアン形状となっている。これは、図 6 のスペクトルを計算した際に、バンチの時間構造としてガウス分布を仮定したことに起因している。ガウシアンフィットにより評価したバンチ形状因子の幅の逆数から、バンチ長(r.m.s.)を計算すると、元々仮定したバンチ長と矛盾しない結果が得られた。この方法は、バンチ形状がガウス分布でない非平衡ビームに対しても、原理的に適用することができる。

また一般に、電子ビームのエミッタンスの効果は無視できないが、蓄積リングのビームのように、エミッタンスが数 nm · rad 以下である場合には、可視光のエミッタンス $\lambda/4\pi$ に比べて十分小さいので、その影響を無視することができるだろう。

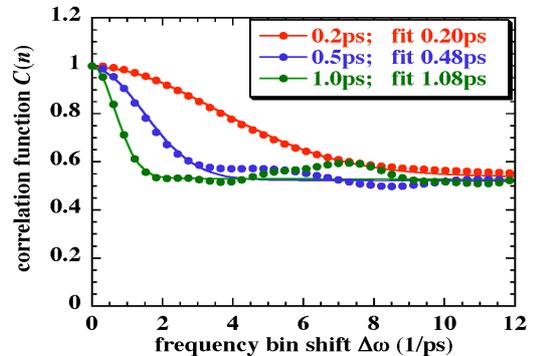


図 7 : シングルショットスペクトルの自己相関関数の 10 ショット平均。実線はガウス関数によるフィッティング曲線。

参考文献

- [1] M. Masaki, et al., Proceedings of SRI 2009, 10TH International Conference on Radiation Instrumentation, Melbourne, Australia, 27 Sep.- 2 Oct. 2009, pp.560-563.
- [2] S. Takano, et al., Proceedings of SRI 2009, 10TH International Conference on Radiation Instrumentation, Melbourne, Australia, 27 Sep.- 2 Oct. 2009, pp.399-402.
- [3] K. Fukami, et al., "Spring-8 における XFEL-Linac から蓄積リングへのビーム輸送", in these proceedings.
- [4] T. Ohmura and H. Yamaguchi, J. Vac. Soc. Jpn. (真空), Vol.50, No.4 (2007), pp.258-263.
- [5] M. S. Zolotarev and G. V. Stupakov, SLAC-PUB-7132, March 1996.
- [6] P. Catravas, et al., Phys. Rev. Lett., Vol.82, Number 26 (1999), pp.5261-5264.