

BUNCH LENGTH MEASUREMENT WITH X-RAY STREAK CAMERA IN LOW ALPHA OPERATION IN SPRING-8 STORAGE RING

Akira Mochihashi ^{#,A)}, Shiro Takano ^{A)}, Kazuhiro Tamura ^{A)}, Mitsuhiro Masaki ^{A)}, Haruo Ohkuma ^{A)}, Kouichi Soutome ^{A)}, Masaru Takao ^{A)}, Yoshihito Shimosaki ^{A)}, Yoshihito Tanaka ^{B)},
^{A)} JASRI/SPRING-8
1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5198 Japan
^{B)} RIKEN/SPRING-8
1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5148 Japan

Abstract

In the third generation and the next generation synchrotron radiation light sources, the bunch length of ps ~ sub-ps is expected to be achieved. Such electron bunches, however, make the measurement and diagnostics of the bunch length very difficult. An X-ray streak camera (X-SC) can directly measure the temporal width of X-ray synchrotron radiation pulse. The temporal resolution of X-SC depends on the initial velocity distribution of the photoelectrons from a photocathode which converts the X-ray photons to the photoelectrons. At the SPRING-8, we are investigating characters of an X-SC by observing monochromatic X-ray photons at the diagnostics beamline II (BL05SS). The experimental setups and results of the experiments of the temporal response and detection efficiency at several photon energies are presented. At the SPRING-8, a challenge to generate shorter X-ray pulse by changing the momentum compaction factor (low-alpha operation) is in progress. The temporal width of X-ray pulse measured by the X-SC in the low-alpha operation is also presented.

SPRING-8 低アルファ運転時における X 線ストリークカメラによるバンチ長測定

1. はじめに

飛躍的に拡大する放射光科学において、現在、先進化した第3世代放射光源並びに XFEL に代表される次世代放射光源の開発が目覚ましい。そうした放射光光源では、従来にないピコ~サブピコ秒以下の短パルス光が期待される一方で、その短パルス性ゆえに光パルス長の評価には困難が伴う。パルス光の時間長の実時間測定装置としてストリークカメラが挙げられるが、特に X 線領域の短パルス光の場合、ストリークカメラ光電面で発生した二次電子によりストリーク像が形成されるため、二次電子の初速度分布が無視できず、それが時間分解能を決める一因となる。我々は、前回の本学会^[1]に於いて、X 線ストリークカメラ (以下 X-SC) に入射する光量を極端に減少させ、単一光子によるストリーク像の時間広がり測定し、X-SC の時間分解能を評価する方法を考案しその結果を報告した。今回は、前回の結果を踏まえ、X-SC の性能に関する数値 (時間分解能、CCD カメラの光子検出の相対感度) の X 線エネルギー依存性を前回よりさらに系統的に測定したので報告する。特に、X-SC 光電面の物性に着目し、光電面の材質である CsI の吸収端付近の X 線エネルギーに於ける単一光子イベントの時間広がり詳細に測定したので報告する。

SPRING-8 では、低アルファ運転による電子バンチ長は 5ps(r.m.s.)以下となり、X-SC による単一光子イベント広がり (~2ps (r.m.s.))と比較して無視できない。

このため、X-SC でバンチ長を観測する場合には、単一光子イベントによる時間広がり効果を考慮する必要がある。低アルファ運転時の X-SC による観測バンチ長を、単一光子イベントの時間広がり結果を用いて校正した結果、X-SC と独立かつ同時に電子バンチ長を測定した可視光ストリークカメラ (以下 V-SC) のバンチ長測定結果と一致することを確認した。今回は、X-SC の時間分解能の評価方法について議論し、X-SC で観測した単一光子イベントのエネルギー依存性について述べる。また、その結果得られた時間分解能を用い、SPRING-8 低アルファ運転時での X-SC による観測バンチ長の校正及び V-SC の測定結果との比較を述べる。

2. X-SC による単一光子の観測

2.1 実験のセットアップ

X-SC を用いて単一光子イベントの時間広がり観測するためのタイミング系のセットアップを図 1 に示す。実験では、ストリークカメラ (浜松ホトニクス社製 C5680-06) にシンクロスキャンユニット (M5675) 及び 2 時間軸拡張ユニット (M5679) を組み付けて一連の測定を行った。SPRING-8 の RF 信号 (508.58MHz) を RF ステーションからビームラインステーションまで光伝送ケーブルにて伝送し、ビームラインステーションにて電気信号に変換した信号をタイミングのマスター信号として用いた。ストリークカメラの縦方向スキャンのタイミング信号は、RF

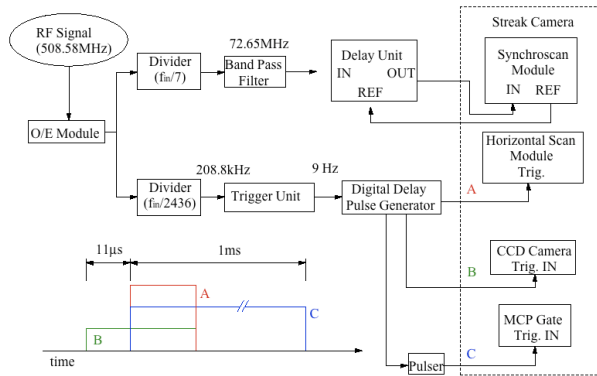


図1 X-SCのタイミングシステムのブロック図

信号を分周信号発生器で7分周(72.65MHz)し、バンドパスフィルターでサイン波に成形した後、ディレイユニット(C6878)を介してシンクロスキャンユニットに入力した。ディレイユニットにより、シンクロスキャンのタイミング調整ができ、かつシンクロスキャンユニットからの参照信号を用いた位相フィードバックが有効になりタイミングが安定化する。一方、水平方向掃引のトリガー信号は、RF信号を分周信号発生器にて2436分周(リング周回周波数)し、更にストリークトリガユニットで9Hzまで分周する。分周信号をデジタルディレイパルス発生器(Stanford Research Systems, DG535)のトリガー信号として用い、DG535は(1)CCD露光開始トリガー(2)水平方向掃引トリガー(3)Image Intensifier(以下I.I.)内のMCPゲート信号の合計3つのトリガー信号を発生させる。CCDカメラは、トリガー信号を受信後11 μ s後に露光を開始するため、CCDトリガー信号は、MCPゲートと水平方向スキャンよりも11 μ s先行させるようにする。使用したX-SCのストリーク管末端部の蛍光材はP43(100% \rightarrow 10%減衰時間1ms)なので、単一光子イベントを分別し観測するためには、ストリーク管を通過して蛍光材に当たる光電子に対して1ms以下の時間ゲートを設ける必要がある。そこで、X-SCの水平掃引ユニット(M5679)を用いて水平掃引時間を100 μ sとすることで、ストリーク管末端部の蛍光材に当たる光電子に対して100 μ sの時間ゲートを設けた。単一光子イベントをできるだけ明確に観測するため、ストリーク管下流のI.I.内のMCPをゲート動作させることにより、MCP暗電流によるバックグラウンドイベントを出来るだけ減少させるようにした。MCPゲートは水平方向掃引スタートと同時に開とし、P43の全発光量の90%を収集することを目安に、ゲート幅は1msとした。また、I.I.出力側の蛍光材もP43なので、I.I.下流のCCDカメラの露光時間は約2msとした。

2.1 実験結果と解析

実験はSPring-8加速器診断IIビームライン(BL05SS)²⁾にて行った。光源である多極ウイグラー

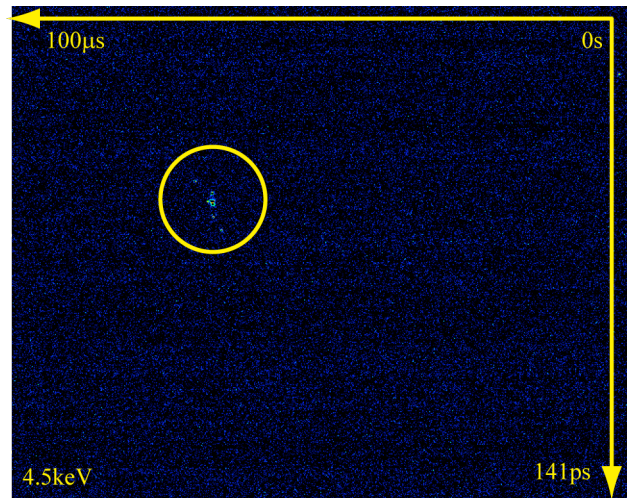


図2 単一光子イベントの観測例。縦、横軸はそれぞれ垂直掃引(全幅141ps)、水平掃引(全幅100 μ s)に相当する。

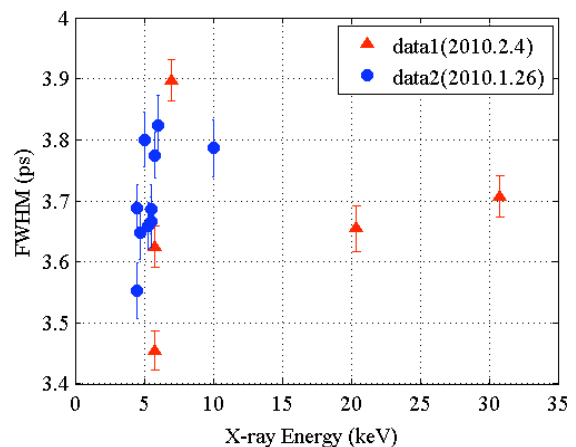


図3 単一光子イベントの時間広がり(X線エネルギー依存性)

³⁾のギャップ値と液体窒素冷却型二結晶分光器のブラッグ角を調整して単色X線をX-SCに入射した。単一光子イベントを分別可能とするように各種ビームライン機器を調整してX線光量を適度に減少させ、X-SCを二軸スキャン・シングルショットで動作させた典型的な結果を図2に示す。図中の○内の中央部のドットの塊として見える像が、単一光子によるストリーク像である。なお、図2の状態から光学系を調整して徐々に光量を増加させると、図2のドット塊が現れる頻度が増加し、最終的には二軸掃引による電子ビームの時間プロファイルが観測される。実際は、図2のシングルショット像を1000~2000回測定し(その大部分は単一光子イベントが観測されていない)、その後の解析で単一光子によると思われる像をピックアップして統計処理を施し、単一光子イベントの時間広がり(統計平均)を求めた。ストリーク像には、単一光子イベントに起因する像の他、ストリークカメラに内蔵されたI.I.中のMCPの暗

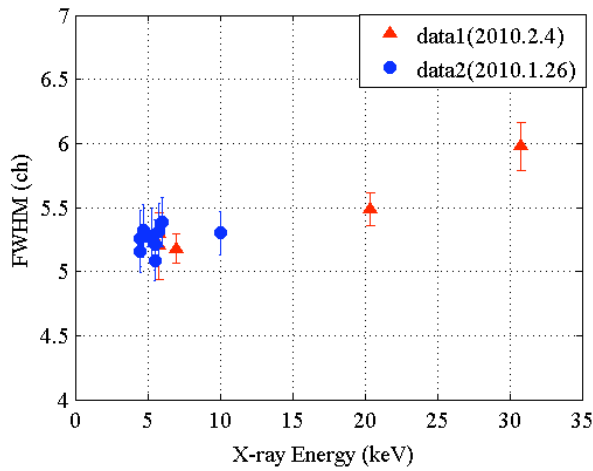


図4 単一光子イベントの水平方向広がり X 線エネルギー依存性 (縦軸は CCD チャンネル数)

電流像が観測される。真のイベントと暗電流イベントは、像の強度をヒストグラム解析して分別することができる^[1]。X-SC は光電面が着脱可能であり、必要に応じて光電面を変更することができる。本実験では CsI 光電面を用いた。Cs, I はそれぞれ 5keV 付近に L 吸収端を持つことに着目し、吸収端付近、並びに吸収端から離れた 10~30keV で測定を行い、単一光子広がりエネルギー依存性を調べた。結果を図 3 に示す。図 3 には異なる日の測定結果 (一旦 X-SC を立ち上げ直している) を区別してデータをプロットし、X-SC の測定の再現性を確認できるようにした。装置の再現性は概ね 0.2ps 程度であることが分かる。5keV 付近のデータは、Cs, I の L 吸収端より低いエネルギー(4.5keV)から吸収端を越えたエネルギー(6keV)までの結果である。吸収端付近の時間広がり概ね 3.5~4ps(FWHM)で、吸収端を越える付近(7keV 付近)まで時間広がり比較的急激に増加し、その後 10,20keV と緩やかに減少し、30keV では再び緩やかに増加していることが見て取れる。

以上は単一光子イベントのストリーク像の縦方向の時間広がりについての考察であるが、次に水平方向の広がりについても同様の解析を行った。結果を図 4 に示す。図 4 は、水平方向の広がりを CCD カメラのチャンネル単位で記述した。図 4 を見ると、高エネルギー側の広がりが大きくなる傾向があることが分かる。これは発生する光電子の角度広がりが入射光子エネルギーに依存することを示唆しており、この結果は、図 3 の 20,30keV の結果と矛盾しないが、吸収端近傍の振る舞いは、縦方向の広がりとは異なる結果を示した。

実験では、二結晶分光器から出射された単色 X 線を Ta 製の四象限スリットで成形し、X-SC 光電面 (縦 0.2mm, 横 6mm) の開口に X 線が妨げられることのないようにしている。Ta スリットと X-SC の間にはカプトン膜の入射/出射窓を持ったガスイオンチェンバー (使用ガスは N₂) を設置し、イオン電流を観測することで、X-SC に入射される X 線フ

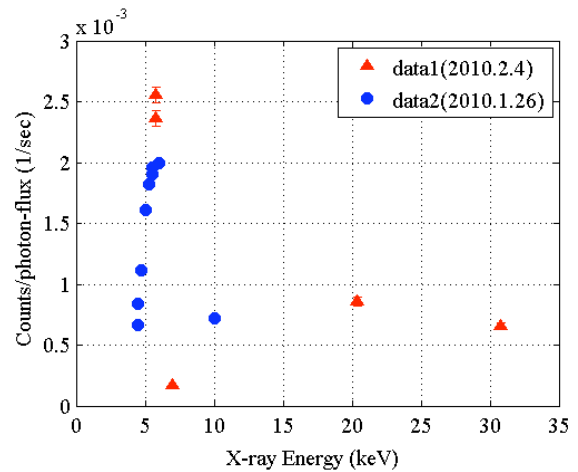


図5 CCD 計数率の X 線エネルギー依存性

ラックスを測定した。X-SC への X 線フラックスに対する X-SC の CCD 計数効率の X 線エネルギー依存性を図 5 に示す。図 5 を見ると、6keV 前後で検出効率が大きく変化していることが分かる。これは、前述したように Cs, I の L 殻の吸収端エネルギーによるものと考えられる。

3. 低アルファ運転時のバンチ長測定

3.1 実験のセットアップ・実験結果

SPring-8 では momentum compaction factor (以下 α) を制御してバンチ長を短縮し、短パルス X 線の発生実験を行っている^[4]。X-SC を用いて、短パルス X 線のパルス長の評価を 4.5keV~10keV 間のエネルギーの X 線を用いて行った。実験では α を通常運転時の約 1/10 とし、また potential well distortion によるバンチ伸長を抑制するため、バンチ電流を 9 μ A 以下として実験を行った。X-SC は縦掃引のみとし、アナログ積算して S/N の向上を図った。蓄積リングの RF 電圧を変えてバンチ長を制御し、観測パルス長

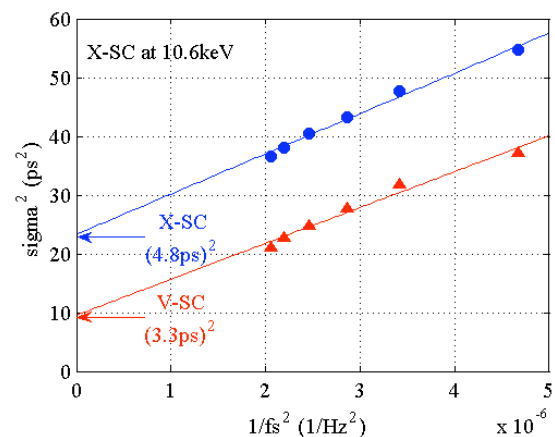


図6 観測パルス長のシンクロトロン振動周期依存性

のシンクロトロン振動周波数依存性を 10.6keV の X 線で測定した結果を図 6 に示す。図には X-SC と独立かつ同時に偏向電磁石を光源とする BL38B2 にてバンチ長を測定した可視光ストリークカメラ (以下 V-SC) の結果も示した。観測パルス長は、本来のパルス長に加えて(1)ストリークカメラの時間ジッターの影響、(2)開口の影響、(3)単一光子イベントの時間広がりを受け、観測パルス長はそれらの自乗和で表されると仮定すると、シンクロトロン周期の自乗に対して観測パルス長の自乗を直線プロットした切片の値から、時間ジッターと開口の影響の値を知ることができる。図 6 は X 線エネルギー 10.6keV のときの結果であり、同エネルギーの単一光子イベントの時間広がり 1.6ps(図 3 の FWHM 値を r.m.s.値に換算した値)を図 6 の切片の値から差し引くと $(4.8\text{ps})^2 - (1.6\text{ps})^2 = (4.5\text{ps})^2$ (いずれも r.m.s.値)となり、これが 10.6keV パルス長測定時の X-SC の時間ジッターと開口の効果によるパルス長伸長成分である。

観測パルス長を本来のパルス長よりも伸長させる 3 つの効果：(1)時間ジッター、(2)有限開口の影響、(3)単一光子イベント広がりを受け、上記で述べた 10.6keV での校正値を用いて各 X 線エネルギーでの観測パルス長を校正し、同時に測定した V-SC でのパルス長の測定結果との差を図 7 にまとめた。図 7 は 10.6keV による測定結果を元に校正したため、10.6keV では V-SC と X-SC の結果は一致しているが、他のエネルギーでは一致が見られない。これは、単一光子広がりや開口の効果にエネルギー依存があるためと考えられる。正確にバンチ長を測定するためには、測定に使用する X 線エネルギーについて図 6 の校正用データを個別に取得する必要がある。

4. まとめと今後の課題

X 線ストリークカメラの時間分解能の評価方法と

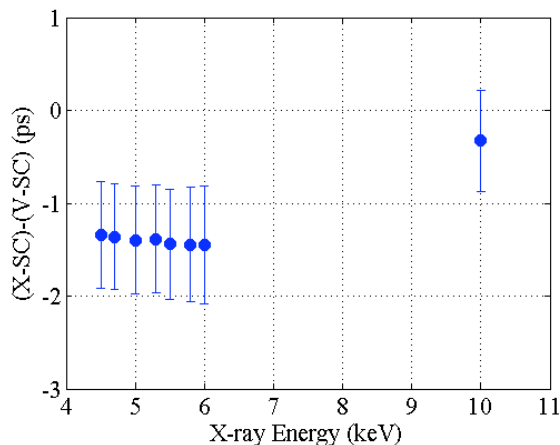


図 7 X-SC と V-SC の観測パルス長の比較。X-SC のパルス長は本文中の効果を校正したものの。

して、単一光子イベントのストリーク像の時間広がり解析して求める方法を提案し、測定を行った。単一光子イベントの時間広がりには、今回測定した 4.5keV~30keV の領域では有意な光子エネルギー依存性が見られる。光電面として CsI を用いた今回の測定では、Cs, I の吸収端 (5keV 付近) 付近を測定したところ、X 線エネルギーが吸収端を越えるまではエネルギーと共に比較的急激に時間広がりを変化することを確認した。

水平方向掃引の広がりエネルギー依存性は、光電面から発生する光電子の角度広がりエネルギー依存性を示唆するものであり、その結果は高エネルギー領域では垂直掃引の時間広がりエネルギー依存性と矛盾のないものとなっている。吸収端付近の振る舞いは垂直掃引の時間広がりとは異なっていた。CCD 計数効率はエネルギー依存性が顕著であり、特に吸収端エネルギーの前後で計数効率は大きく変化することが確認できた。

SPring-8 低 α 運転時のバンチ長は、単一光子イベントの時間広がりと比較して無視できないため、バンチ長の測定には、単一光子イベントによる時間広がり効果の校正が必要がある。単一光子イベントの時間広がり測定結果を元に、X-SC の時間ジッター成分を求め、また開口の効果を含めて観測バンチ長を校正したところ、校正に用いた X 線エネルギーでは、独立かつ同時にバンチ長を測定した可視光ストリークカメラと誤差の範囲で結果が一致した。

今後は光電面の材質、厚みを変えた場合の時間分解能測定を系統的に行う予定である。現在、複数種類の膜厚の CsI 並びに Au 光電面をマウントしたマルチアレイ型光電面を開発中であり、計数効率、時間分解能の膜厚依存性を精査し、より高い時間分解能と検出効率を実現する光電面薄膜の条件を模索し、ストリークカメラの高性能化を目指す。

本研究は科研費 (若手研究 B 課題番号 21740215) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] A.Mochihashi, et al., "SPring-8 加速器診断ビームラインにおける X 線ストリークカメラの特性評価", Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting 2009, Tokai, Ibaraki, Japan, Aug. 5-7, 2009, p.329.
- [2] S. Takano, et al., "SPring-8 蓄積リング加速器診断ビームラインの現状", Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting 2009, Tokai, Ibaraki, Japan, Aug. 5-7, 2009, p.91.
- [3] M. Masaki, et al., "SPring-8 加速器診断ビームライン II 挿入光源の特性とその応用", Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting 2009, Tokai, Ibaraki, Japan, Aug. 5-7, 2009, p.177.
- [4] SPring-8 Research Frontiers 2008, p.176.