

ニュースバルにおける時間同期系開発とフェムト秒パルスレーザーシーディング DEVELOPMENT OF TIMING SYNCHRONIZATION SYSTEM AND FEMTOSECOND LASER SEEDING IN NewSUBARU

後長葵^{#, A, B)}, 金島圭佑^{A, B)}, 田中義人^{A, B)}, 貴田祐一郎^{C)}, 橋本智^{D)}, 田中隆次^{B)}
Aoi Gocho^{#, A, B)}, Keisuke Kaneshima^{A, B)}, Yoshihito Tanaka^{A, B)}, Yuichiro Kida^{C)}, Satoshi Hashimoto^{D)},
Takashi Tanaka^{B)}

^{A)} Graduate School of Science, University of Hyogo

^{B)} RIKEN SPring-8 Center

^{C)} Japan Synchrotron Radiation Research Center

^{D)} Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, University of Hyogo

Abstract

We are developing a coherent light source combining an accelerator-based light source and a femtosecond pulsed laser at a synchrotron radiation facility of NewSUBARU. The aim is to demonstrate the principle that enables single-cycle free electron laser oscillation using the laser-seeding method. In the method, a femtosecond pulsed laser and electron bunch should interact in an undulator in a coaxial direction. Timing synchronization of the electron bunches and the femtosecond pulsed laser is then essential to realize the laser seeding. A Ti:sapphire laser system with a pulse duration of about 13 fs was installed at the experimental hall, and the laser pulses have been synchronized to the specific electron bunch in the storage ring. The synchronization precision was evaluated using a streak camera, and is sufficiently higher than the bunch width of the storage ring. The result has led to the successful observation of coherent pulsed light by laser seeding. The characteristics of the obtained coherent pulsed light is also reported.

1. はじめに

レーザー光と放射光を組み合わせることで、様々な光計測や光源開発への応用が広がる。我々は、放射光施設ニュースバルにおいて加速器ベース光源とフェムト秒パルスレーザーを組み合わせたコヒーレント光源開発を進めている。目的は、レーザーシーディング法を用いた単一サイクル自由電子レーザー発振を可能とする基本原理[1]の実証である。レーザーシーディング法とは、放射光の発生源である電子バンチにアンジュレータ内でレーザーと相互作用させることにより、レーザーの持つコヒーレンスを電子バンチに与え、放射光の位相を制御する方法である。この実証実験では、磁場強度分布可変型アンジュレータ[2]を2台設置し、上流側のアンジュレータ内でフェムト秒パルスレーザーと電子バンチを同軸方向に伝播させて相互作用させた後、シケインを通過させることで不等間隔のマイクロバンチを形成させる。これを下流側のアンジュレータに導入して、コヒーレント光の時間構造制御を達成する。

このようにレーザーシーディングを実現させるには、電子バンチとフェムト秒パルスレーザーの時間同期が欠かせない。そこで、パルス時間幅約 13 fs のチタンサファイアレーザーを実験ホールに導入し[3]、その出力光を蓄積リング内の特定の電子バンチに同期できるシステムを開発した。また、その同期特性を、ストリークカメラで評価し、電子バンチ長より十分高い精度で制御が達成されていることを確認した。また、同時に空間オーバーラップを達成することにより、レーザーシーディングによるコヒーレ

ントパルス光の観測に成功した。

本稿では、このようなパルスレーザー光と放射光の組み合わせ実験に不可欠な時間同期技術とその性能について報告する。第 2 章で電子バンチ-チタンサファイアレーザー間の時間同期方法を説明し、第 3 章でストリークカメラを用いた同期精度の評価方法とその結果を示す。また、第 4 章で、得られたコヒーレントパルス光の特性について報告する。

2. レーザー・放射光時間同期法

本章では、パルスエネルギー mJ 級のフェムト秒パルス光を発生する再生増幅器付きモードロックチタンサファイアレーザーと蓄積リング内の電子バンチとの時間同期を達成する方法[4]を示す。

モードロックレーザー発振器は、その発振の周期が、レーザーの共振器長で決まっている。その出力光は再生増幅器によって増幅されるが、その出力パルスの時間間隔は、モードロック発振器の周期の整数倍になる。発振器および再生増幅器の典型的な繰り返し周波数は、それぞれ、約 80 MHz, 約 1 kHz である。

一方、蓄積リング内の電子バンチの繰り返し周波数は、最大で数百 MHz (RF 加速周波数)であり、最小の場合は、シングルバンチモードに対応し、リングの周長で決まり、数百 kHz から数 MHz である。ニュースバルでの本実験の場合、シングルバンチモードで行ったので、電子バンチの繰り返し周波数は 2.5 MHz である。

このように異なる光源のタイミングを合わせるために、蓄積リングの RF 基準信号をトリガー信号として、レーザーのタイミングを制御する。すなわち、繰り返し約 1 kHz のレーザー光のタイミングを、繰り返し周波数約 2.5

ri22e011@guh.u-hyogo.ac.jp

MHzの電子バンチのタイミングに合わせるための時間同期システムを開発した。

また、同期精度については、電子バンチ長に相当する時間幅より十分に高いことが必要である。

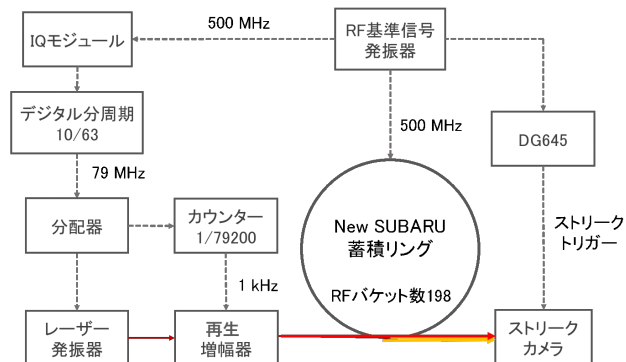


Figure 1: Timing synchronization scheme between mode-locked laser and electron bunches in NewSUBARU storage ring.

開発したタイミング制御方法を Fig. 1 に示す。RF バケット数 198 であるニュースバル蓄積リング内のシングルバンチにレーザーパルスを同期させるため、RF 基準信号を $1/(198 \times N)$ の周波数に分周し、再生増幅器のトリガーとして送る。ここで、 N は整数であり、 N 周に一度の周期信号に対応する。また、本研究では既存のモード同期レーザーを用いるために、その共振器長に制限があり、レーザー発振器には約 79 MHz の信号を送る必要があった。具体的には、RF 基準信号(499.95 MHz)をデジタル分周器によって 10/63 の周波数にした 79.36 MHz の信号を分配器で二方に分け、一方はレーザー発振器に、一方はカウンタで $N=2520$ の場合に相当する 1/79200 の周波数、つまり、1.0020 kHz にして再生増幅器に送り、それぞれのトリガー信号とした。電子バンチレーザーパルス間の遅延時間は、初めにカウンタの遅延を用いて大まかに調整する。その後、2 ns(RF 基準信号の周期)以下の調整については、IQ モジュールを用いて RF 基準信号の位相を遠隔で変化させることにより行った。

3. 時間同期の評価

時間同期システムによって同期されたチタンサファイアレーザーパルスと電子バンチのタイミングをモニターするために、実験ハッチにストリークカメラを設置(Fig. 1)し、電子バンチからの放射光(黄色の矢印)とチタンサファイアレーザー光(赤色の矢印)を同時に導入して、タイミングをモニターし、同期精度の評価を行った。ストリークカメラの構成と基本的な原理を Fig. 2 に示す。図の左から入射した光パルスは、前置分光器を経由した後、光電面で電子に変換され、右方向に加速される。その後、掃引電極間を通過する際に変化する掃引電圧が垂直方向に付加される。Figure 2 の下図は、掃引電圧の時間変化を模式的に表したものである。電子は、掃引電極への入射タイミングによって、少しずつ異なる方向に偏向され、MCP で増倍された後、蛍光面で再び光へと変換される。蛍光面での分布の様子を CMOS カメラで撮影し、ストリーク像を

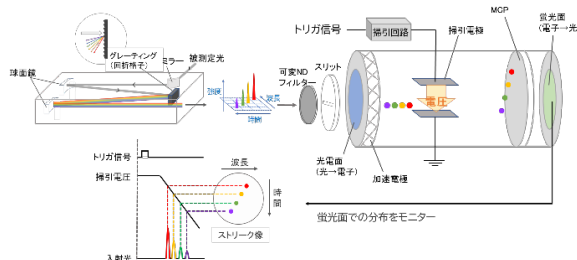


Figure 2: Schematic configuration and the principle of streak camera.

得る。CMOS カメラ像上では、前置分光器によって横軸が波長に、掃引電圧の向きである縦軸が時間に対応する。

電圧掃引トリガーにレーザー再生増幅器へのトリガー信号を分岐して用いることにより、レーザーが照射された周辺のみを切り出して観測することができる。このとき、掃引電圧へのトリガー信号(ストリークトリガー)にジッターがあると、到達時刻がずれるため、積算した際にそのプロファイルがぼやけてしまうという問題が起こる。このストリークトリガージッターは、ストリークカメラの時間分解能に対して無視できない大きさである。これを考慮し、シングルショットでのモニターを行った。また、ストリークカメラでは被測定光をストリーク管内で電子に変換するため、入射光強度に依存して、電子同士のクーロン力による反発が原因でストリーク像の広がりが生じる。これを防ぐため、ストリークカメラの上流に設置した可変 ND フィルターで入射光強度を調整した状態で光電面に導入した。

波長 800 nm の放射光パルスとレーザーパルスを、掃引レンジ 500 ps でモニターした結果を Fig. 3 に示す。左図は、ある 3 ショットでのストリーク像で、横軸が時間に対応する。左側に現れているのが自発光で、右側がレーザー光である。また、各ショットの時間プロファイルを右図に示す。ショットごとにパルス到達時間のばらつきが確認でき、これがストリークトリガーのジッターに相当する。

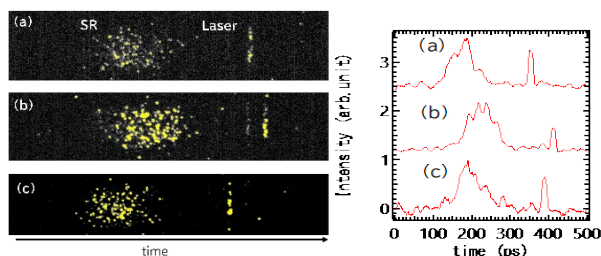


Figure 3: Single-shot-streak profiles of SR and laser pulses.

このジッターが影響しないように、シングルショットで得たストリーク像ごとに電子バンチレーザーパルス間の遅延時間 Δt を算出し、Table 1 に放射光(SR)とレーザーのパルス幅、SR パルスの到達時間のばらつき(トリガージッターに相当)、および遅延時間 Δt の値をまとめた。遅延時間 Δt のばらつきがレーザー光と電子バンチのタイミングジッター、つまり同期精度を表す。この結果より、同期精度は 14 ps(FWHM)と定量的に評価できた。なお、ここ

で示されたレーザーパルス幅は、用いたストリークカメラの時間分解能が数ピコ秒であることが影響して、実際のパルス幅より大きい値となっている。

Table 1: Pulse Widths and the Timing Jitters

| | 値(ps) (FWHM) |
|------------------|--------------|
| 放射光パルス幅 | 80±7 |
| レーザーパルス幅 | 10±2 |
| ストリークトリガーのジッター | 50 |
| Δt のばらつき | 14 |

4. フェムト秒パルスレーザーシーディングへの応用

本章では、開発した時間遅延制御システムを用いてレーザーシーディングを行った結果を示す。Figure 4 にレーザーシード型の自由電子レーザー(FEL)の構成を示す。2台のアンジュレータ[2]が、ニュースパルの蓄積リング BL1 のセクションに設置されており、上流よりモジュレータ、ラディエータである。ビームライン上流にはフェムト秒パルスレーザー(800 nm)が設置されている。レーザーパルスと電子バンチをモジュレータ真空チャンバー内で相互作用させることで、電子バンチにエネルギー変調を起こす。その後、シケインを通過する際に密度変調される。これにより、等間隔(800 nm)のマイクロバンチが形成される。マイクロバンチ中の電子それぞれがラディエータ通過時に発生させる放射光は、干渉により強め合い、コヒーレント光として出力される。出力波長は 400 nm である。モジュレータ内で、電子バンチとフェムト秒パルスレーザー間の時間オーバーラップを達成するために上述の前置分光器つきストリークカメラを用いてモニターを行った。分光器を波長 800 nm に調整することにより、モジュレータによる放射光とレーザー光の時間オーバーラップを確認した。フェムト秒レーザーシーディングでは、電子バンチ長である約 80 ps よりも高い精度でオーバーラップを制御する必要があり、本システムの精度は十分である。

フェムト秒レーザーシーディングを行った際のラディエータからの放射光の時間プロファイルを図 5 に示す。

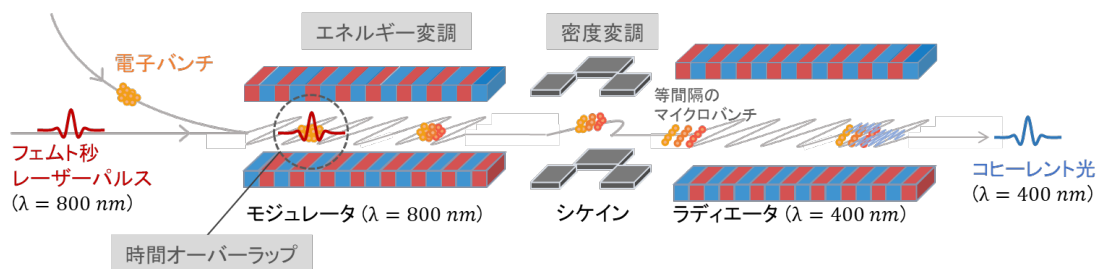


Figure 4: A schematic of femtosecond laser seeding for coherent SR pulse generation.

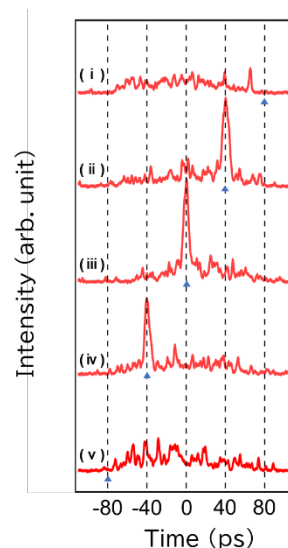


Figure 5: Streak profiles of laser-seeded SR dependent on the laser-electron bunch interval.

前置分光器およびカラーフィルターにより、フェムト秒パルスレーザー、およびモジュレータからの波長 800 nm の光を遮断し、波長 400 nm の成分のみストリークカメラの光電面に導入されている。時間幅約 80 ps の光はラディエータ内で電子バンチが発生させた自発光であり、電子バンチの時間分布に対応する。Fig. 5(i)-(v)はフェムト秒パルスレーザーを 40 ps 間隔で掃引した際の時間プロファイルで、図中の▲はフェムト秒レーザーパルスのタイミングを表す。なお、Fig. 5 では、ストリークトリガージッターが現れないように、自発光の分布で時刻の基準を決め、補正した。レーザーのタイミングに伴って鋭いピークがシフトしていることと、電子バンチとの時間オーバーラップがない時にはピークが発生していないことから、ピーク部分の発生光はレーザーシーディングに起因するものであることが確認できた。Figure 5 のプロファイルでは発生光のパルス幅が 10 ps 程度であるが、これは、本課題で用いたストリークカメラの時間分解能が数ピコ秒であることによる。正確なパルス幅を評価するためには、超短パルスレーザー等のパルス幅計測に用いられている技術が必要である。今回はそのひとつである相互相関法を実施するための光学系を実験ステーションに別途整

備した。実際に測定を行い、発生したコヒーレント光のパルス幅は 150 fs 以下であることが分かっている。

また、Fig. 5 で示したプロファイルは、シングルショットで得られたものであり、S/N 比が良くない。解決方法として、ストリークジッターを計測しながら積算する方法や機械学習を取り入れたフィッティングなどで改善を試みる予定である。S/N 比が改善されれば、レーザーシーディングに起因するパルス光と自発光の強度との比を正確に求めることにより、パルス光強度の電子バンチ密度依存性を評価でき、これがコヒーレント光であることを実験的に確かめられることが期待できる。

さらに、アンジュレータのギャップを変化させ、ストリークカメラ前置分光器にてスペクトル変化を測定したり、パルス幅の変化を相互相関器で計測を行ったりすることによって、レーザーシーディングにより発生したパルス光の特性を調べた。詳細は[5]を参照されたい。

5. まとめ

ニュースバル蓄積リング中のシングルバンチとモードロックチタンサファイアレーザーを時間同期させるシステムを開発、整備した。時間同期をモニターする方法としてストリークカメラを導入した。ストリークカメラの特性を考慮し、入射光の強度を調整することにより、シングルショットでのモニターを行った。その結果、電子バンチとレーザーパルスの同期精度は 14 ps であると評価できた。

この時間同期システムを用いて、フェムト秒パルスレーザーシーディングを行った。電子バンチとフェムト秒レーザーパルスが、モジュレータ中で時間オーバーラップしている様子が確認できた。その結果、電子バンチ中に形成されたマイクロバンチが発生させたコヒーレント光が確認できた。レーザーシーディングの再現性は高く、コヒーレント光は安定に出力されている。

謝辞

本研究の遂行にあたり、ニュースバルのスタッフの皆様、JASRI 富樫格氏、富澤宏光氏に多大なる御協力を頂きました。また、岡部純幸氏には、ジッターの計測および解析でご教示いただきました。ここに謝意を表します。本研究は JSPS 科研費 JP18H03691 および兵庫県立大学特色化特別プロジェクトの助成を受けています。

参考文献

- [1] T. Tanaka, “Proposal to generate an isolated monocyclus x-ray pulse by counteracting the slippage effect in free electron lasers,” *Phys. Rev. Lett.*, 114, 044801 (2015)
- [2] T. Tanaka, Y. Kida, R. Kinjo, T. Togashi, H. Tomizawa, S. Hashimoto, S. Miyamoto, S. Okabe, Y. Tanaka, “Development of an undulator with a variable magnetic field profile”, *J. Synchrotron Rad.*, 28, 404-409 (2021)
- [3] Y. Kida *et al.*, “Ultrashort laser light source for demonstrating the monocyclus FEL scheme”, *Proc. 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2022) Kyushu Univ (Online meeting)*, Japan, Oct. 2022, pp. 75-78.

[4] Y. Tanaka, T. Hara, H. Kitamura, T. Ishikawa, “Timing control of an intense picosecond pulse laser to the SPring-8 synchrotron radiation pulses”, *Rev. Sci. Instrum.*, 71, 1268-1274 (2000)

[5] T. Tanaka *et al.*, “Experimental demonstration of a fundamental mechanism to realize a single-cycle FEL”, PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug. 2023, WEOA2, this meeting.