

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：84502

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360045

研究課題名(和文)フェムト秒時間分解・電子ビーム3次元バンチ形状モニターの研究開発

研究課題名(英文)The development of 3D electron bunch monitor with femtosecond resolution

研究代表者

富澤 宏光(TOMIZAWA, Hiromitsu)

公益財団法人高輝度光科学研究センター・XFEL利用研究推進室・副主幹研究員

研究者番号：40344395

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,900,000円、(間接経費) 4,770,000円

研究成果の概要(和文)：E0サンプリング(EOS)の波長多重化により、単一のプローブ光で複数のE0信号を世界で初めて観測し、3次元バンチ計測の原理実証に成功した。また、第2世代XFEL光源と言われるシードXFELが発振し続けるには、互いにサブピコ秒の電子バンチとシード光パルスを6次元位相空間でオーバーラップさせて保持する必要がある。EOSでシード光に全同期した光タイミングシステムを実現し、オーバーラップを保持した高次高調波シードFELの発振に成功した。これにより諸外国の記録を2桁上回るヒット率を長期に保持できている。さらに、超高速応答の結晶開発を含むフェムト秒バンチ計測に必要なプローブ光源の要素技術開発にも成功した。

研究成果の概要(英文)：3D-BCD monitor enables non-destructive measurements of the longitudinal and transverse BCD at the same time. We verified this transverse detection with multiple E0 crystals at SPring-8 photoinjector test accelerator. In the high-order harmonics (HH) FEL seeding, it is required to maximize and keep 6D-phase-space overlapping between HH-laser pulse and electron bunch. We constructed a relative timing drift monitor based on E0-sampling, which measured the timing differences between the seeding HH-laser pulse and the electron bunch, using a common external laser source of both HH-driving and E0-probing pulses. Keeping the peak wavelength of E0 signals at the same wavelength with our feedback system, we provided seeded FEL pulses with a 20-30% hit rate during pilot user experiments. For achieving the upper limit of temporal resolution, we developed high-temporal-response E0-detector crystals and an octave broadband probe laser pulse with a linear chirp rate of 1 fs/nm (flattop spectrum).

研究分野：加速器科学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用物理学一般

キーワード：E0サンプリング 有機E0結晶 シードFEL 3次元バンチ形状モニター シングルショット・フェムト秒バンチ計測 E0サンプリングの空間多重化 E0サンプリングの波長多重化 電荷モーメント

## 1. 研究開始当初の背景

第4世代放射光光源の高輝度電子源(X線自由電子レーザー:XFEL)は、X線波長領域におけるサイエンス・フロンティアの開拓に必須となる基盤技術であるため、米国と日本に続いて世界各国で競うように建設され始めている。XFELは第3世代放射光リング光源とは異なり、物質構造解析に結晶化過程が不要になるので、飛躍的な実験解析速度の向上が期待される。また、極短電子バンチをX線光源とするため、フェムト秒レーザーと組み合わせたポンプ・プローブ実験による新たなフェムト秒サイエンスへの展開が期待されている。

しかし、この極短パルスX線源を有効利用するには、まだ以下の2点の課題があった。

- (1) その光源である電子バンチ(電荷分布)内の構造を非破壊・フェムト秒時間分解能で計測する方法の確立
- (2) 電子バンチにフェムト秒同期したタイミングシステム及び、ジッタートレンドのモニタリング(フィードバック制御)

上述の(1)と(2)を単一のモニターシステムを非破壊で実現できれば、すべての問題が解決する。市販のストリークカメラの最高時間分解能(200 fs (FWHM))を凌駕する極短バンチビーム計測法に、ビーム・ディフレクターがある。SPring-8サイトに2011年度に完成したSACLAのように比較的低エネルギーのXFEL加速器でも、8 GeVの電子ビームエネルギー領域に設置すると非現実的な長さになるため、1.3 GeVで実施されている。それでも全長10 mと長大になってしまう。一方、これらとは異なり非破壊で計測可能な方法に、EOサンプリング(EOS)がある。この方法では、現状の時間分解能は110 fs (FWHM)に制限されているが、長さが10 cm程度とコンパクトになる。また、EOSからの光信号を、フェムト秒タイミング信号や次世代のシード型FELのシード光源として利用する方法は、3次元バンチ形状計測法とともに本研究代表者が発明して特許を取得している。本システムは(1)と(2)を同時に非破壊で実現する唯一の方法と考えられている。本研究代表者と分担者は超高速応答結晶を含む必要な要素技術を既に有しており、本研究の進展によって世界最高速のフェムト秒バンチ長計測とタイミング同期を実現することが各方面から期待されている。

## 2. 研究の目的

3次元バンチ形状(バンチ内電荷分布)計測モニターの各要素技術を開発し、SPring-8研究サイト内の先端加速器でその性能を確認する。まず、フォトカソードRF電子銃試験施設で3次元バンチ形状計測システムの要素技術開発と原理実証試験を行う。次に、EUV-FEL試験加速器で有機EO結晶等を用

いて、世界最速の時間分解能を達成するための結晶候補の評価を行う。同時に、電子バンチにフェムト秒同期した光タイミングシステムを実現し、FELユーザ利用に供せるジッタートレンドをリアルタイムで実現する。

ここで開発されるバンチ形状モニターの要素技術を、フェムト秒時間分解能が必要とされる先端加速器施設において広く応用することを目的とする。そのため、線形チャープ・超広帯域(白色)レーザープローブ光源は、高繰り返し運転可能でコンパクトなプローブ光源として完成させる。大型のレーザー光源インフラがない加速器施設でも利用可能な3次元バンチ計測システムとして完成することが、本研究の最終目的である。

## 3. 研究の方法

最初に、フェムト秒時間分解の3次元バンチ内電荷分布計測システム(図1)を実現するのに必要な以下に示す3つの要素技術を開発する(タイミング・シフターについては後述)。加速器要素技術である以上、その再現性(制御性)や放射線下でのロバスト性に優れたものを目指して開発される。

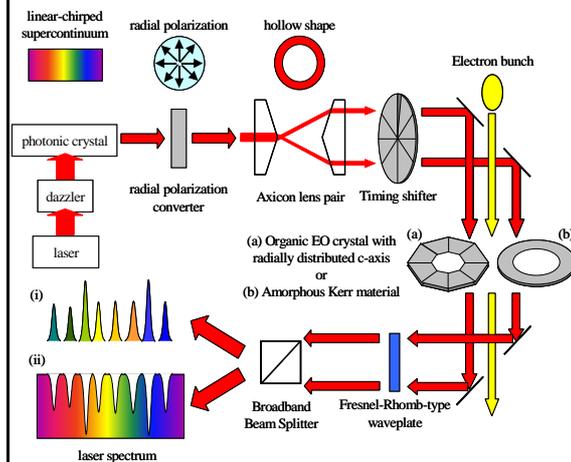


図1: フェムト秒時間分解能・3次元バンチ内電荷分布のシングルショット計測システム

### (1) 白色レーザー光生成:

世界最高速の30 fs (FWHM)の時間分解能でスペクトル復調するには、この時間分解能を損なわずに情報を搬送可能なEOプローブ光源と伝送系が必須である。350 nmを超えるスペクトル帯域の光源を、フォトリソニック結晶ファイバーを用いてコンパクトなシステム光源として開発する。この超広帯域プローブ光源は線形チャープである必要があるため、既存の音響光学変調器(DAZZLER)により高次分散まで補償する。

### (2) EO結晶開発:

世界最高速の30 fsの時間応答性を実現するEO素子を開発する。現状の最高分解能はEO無機結晶の応答性で制限され110 fs (FWHM)である。研究分担者の南出が成長させた有機DAST(4-dimethylamino-N-methyl-4-stilbazolium tosylate)結晶を

超高真空中に設置し、Pokels EO サンプリング(図1(a))を実現する。Kerr 効果は2次のEO効果で電界強度に比例する(Pokels効果は電場に比例)。アモルファスでは最低次のEO効果が2次になるので、3次元パンチ形状計測システムで精密な結晶軸配向を不要にするKerr EO サンプリング(図1(b))の実現も目指す(主に材料探索)。

### (3) 広帯域光学素子開発：

超広帯域 EO プロブレーザー光を用いるには、それを伝送し検出する光学機器の開発が必須である。伝送光学系全体として補償し、600-1100 nmの広波長帯域での吸収と分散の波長依存性を平坦化する。ラジアル偏光・円環ビーム生成に必要な光学素子も超広帯域に対応できる吸収・分散特性に優れたものを順次開発しなければならない。

開発した各要素技術を組み合わせて、RF電子銃試験施設(10 Hz 運転・ピコ秒電子ビーム源)でシングルショット3次元パンチ計測に必要なタイミング制御版の開発を行なう。図2に示す波長多重化に基づく、電子パンチの横方向のシングルショット計測の原理実証を行なう。また、EUV-FEL 試験加速器(30 Hz 運転・フェムト秒電子ビーム源)で有機EO結晶等を用いて世界最速の時間分解能を達成することを目指したEO素子の開発を行なう。同時に、電子パンチにフェムト秒同期した光タイミングシステムを構築することで、高次高調波(HHG)レーザーによるシード FEL のヒット率向上を実現する。このことにより、フェムト秒パンチ計測に必須である、精密な時間ドリフト制御を実現する。

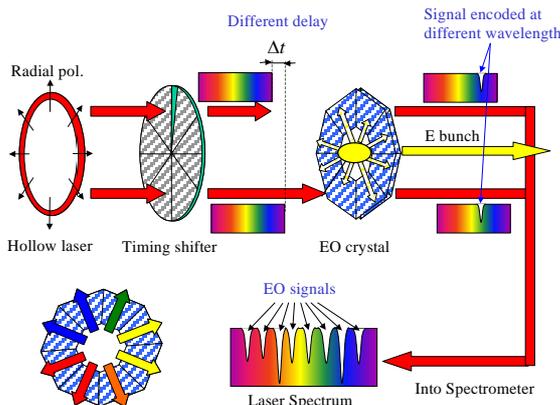


図2：3次元パンチ計測のためのEOSの波長多重化方式で用いたタイミング・シフトの原理

## 4. 研究成果

各研究成果を実験項目ごとに整理し以下に記す。それぞれの実験項目にそれぞれ目的があるため、その意味が分かるように必要に応じて概説する。各実験セットアップの説明と実験結果に対する考察も行うことにする。

### (1) 多重化EOSの原理実証試験：

フォトカソードRF電子銃からの10 psの電子パンチを用いて、世界初の多重化EOSの

原理実証試験に成功した。その実験システムについて説明する。図3の右側から、線形チャープに補償したTi:Saレーザの基本波(792 nm; 200 ps)を直線偏光にして入射する。これは、カソード励起光源から分岐(コンプレッサー回折格子からの0次光を利用)したEOプローブ光源である。波長板( $\lambda/2$ ,  $\lambda/4$ )は、各EO素子通過後に控える検光子(ポラライザ)とセットで調整し、電子ビームがない時に分光器で検出される光量が最小になるように設定する(クロスニコル配置)。図3のRisley Prism 対は、自動アライメント・システムにおいて、分光器での光量を検光子なしの状態(平行ニコル配置)で最大化するためのアクチュエータとして機能する。

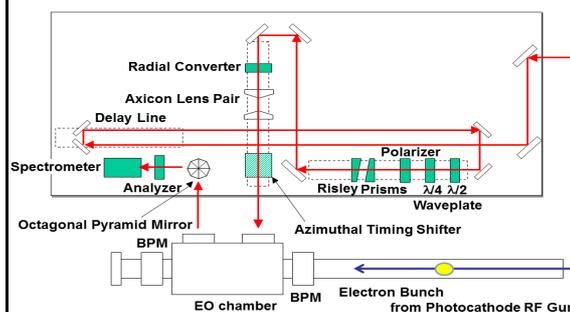


図3：フォトカソードRF電子銃試験施設で原理実証した3次元パンチ内電荷分布計測システム

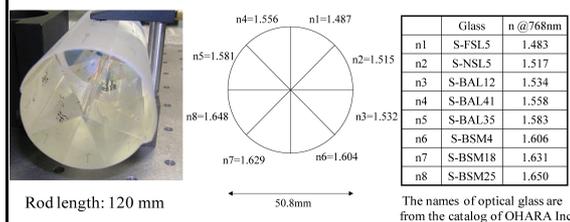


図4：ピコ秒電子パンチ計測用に設計したタイミング制御板(タイミング・シフター)

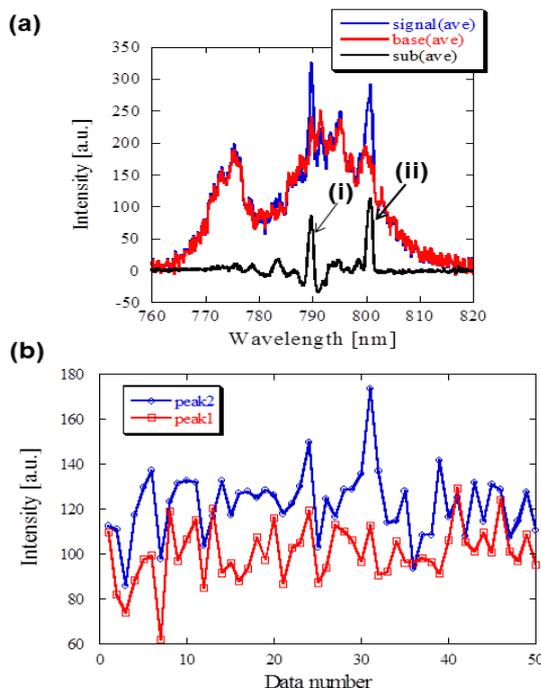


図5：波長多重化EOS(3次元計測)の原理実証試験で捕捉したダブルEO信号とその変動トレンド

図1 (a)の Pokels EO 結晶を使用する波長多重化 EOS (3次元バンチ計測)の場合、複数の EO 素子が電子バンチの横方向にラジアル状に配置されるため、実際のプローブ光はラジアル偏光板とアキシコンレンズ対で円環状のラジアル偏光ビームに変換して入射される。図2に示したように、各 EO 結晶において信号がエンコードされる波長域が異なるように、円環ビームはその円周に亘ってラジアル状にタイミングをシフトさせる制御板(光路長(光学的距離)の調整)を必要とする。

原理実証試験では、10 ps の電子バンチを計測するため、フェムト秒バンチ計測の場合とは異なり、最低 10 ps の遅延時間を各結晶に対応したエンコーディング領域間に与える必要がある。そのため、本試験用のタイミング制御板(12 cm のロッド形状)を図4に示すように8種類の光学ガラスを組み合わせることで製作した。光学ガラスはプローブ光の波長帯域に亘って波長分散特性が平坦なもので、屈折率の差が 0.02 以上(各領域間の時間差が 10 ps 以上)になるように選択した。

このプローブ光源装置の構成で、対向する EO 結晶(ZnTe)をペアにし、多重化 EOS の実証試験を行った。対向ペアの ZnTe 結晶に対応する位置において、円環プローブ光を個々に遅延させる光学ガラスとして n2 と n8 (図4参照)を使用した場合の計測結果を図5(a)に示す。本実験に用いたバンチ電荷量は 1.3 nC であった。また、信号パルス(i)と(ii)のピーク間の時間差は約 110 ps (11 nm)であった。単一のプローブ光で複数の EO 結晶からの信号を同時計測した世界初の実験である。図5の信号パルス(i)と(ii)それぞれのピーク強度(それぞれ Peak1 と Peak2 として(b)に変動トレンドを示す)の短期変動(rms)は 12% と 13% であった。この時の信号パルスのピーク強度比(ii)/(i)の変動は 13%、和(i)+(ii)の変動が 10%となる。比(ii)/(i)はバンチ電荷量の変動を取り除いた他の変動要因が 13%あることを示している。その変動要因の一つは、和(i)+(ii)が示唆するレーザ強度分布の変動と考えられる。レーザ強度分布の変動には、円環ビームの強度ムラやスペクトル強度分布の変化が光源変動要因として考えられ、他にもファイバー分光器(復調器)へのカップリング時の振動による検出強度の変動が測定器側の要因として挙げられる。これらをまとめて、レーザ強度変動と呼び、和(i)+(ii)の変動そのものであるとシンプルに考えて 10%だとする。他に残る唯一の変動要因は、EO プローブレザと電子ビームの相対的位置変動(ただし、2つの EO 結晶を結ぶ線上に射影した相対的位置変動である)と考えられるので、この変動は 8%と計算される。この計算が成立するには、レーザ強度変動と相関がない変動要因である必要があるため、この変動要因を電子ビームの位置変動に求めるのが妥当である。この電子ビーム位置変動が励起レーザのフォトカソード上での位置変動のみに依ると仮定す

ると、EO 結晶位置で 80 $\mu$ m (rms)相当となる。これは、フォトカソード位置でのレーザのポインティング変動が 30 $\mu$ m (rms)以下である事実と矛盾する。これは、EO プローブ光のレーザ強度および相対的位置変動に相関があるためと考えられる。

## (2) HHG シーディングの精密ドリフト制御:

共振器ミラーがない短波長域で発振する FEL は SASE (Self-Amplified Spontaneous Emission) 方式と言われる。SASE 型 FEL では、アンジュレータ入口付近で発生した自発放射光がシード光となって増幅されるために時間コヒーレンスが低く、ショットごとに揺らいだスパイク状の時間・スペクトル波形になる。これを改善するため、外部からシード光となるコヒーレント光を入射することで、フルコヒーレントな FEL パルス光を発生させるのがシード型 FEL である。

HHG パルスは理想的なコヒーレント VUV~XUV 光源である。このシード光源の高利得増幅器として FEL 装置を用いれば、HHG が有するフルコヒーレント特性を保持しながら、光強度を数桁以上増幅できる。この方法に依れば、光共振器ミラーの存在しない波長領域でも、縦モードをシングルモード化することが原理的に可能となる。

FEL において SASE 光とシード光の関係というのは、一般的な MOPA 方式のレーザ装置でいうところの ASE (増幅自然放射光) と増幅シードパルスとの関係に相当する。シード型 FEL では、シード光パルスのピーク電場と電子バンチの相互作用により、増幅の初期段階においてアンジュレータ内で蛇行する電子バンチに密度変調がかかることで、フルコヒーレントな光を発生する。しかし、この変調した電子バンチは高利得媒質であるため、シード FEL にとってバックグラウンドとなる SASE 光が成長しやすい。コントラストを上げるには、SASE 光を抑制してシード増幅利得を高める必要がある。これはシーディング効率の向上で解決し、電子バンチとシード光パルスが互いに 6 次元位相空間でマッチング(オーバーラップ)していることがとても重要となる。しかし、これを安定に維持するには技術的な多くの困難を伴う。

EUV-FEL 試験加速器のシーディング装置開発において、コントラスト改善と時間方向のオーバーラップを考え、50 fs 程度の HHG パルスに対して電子バンチを 500 fs 程度にする運転条件で行った。ここではジッター程度の変動のみを電子バンチ長でカバーし、タイミングドリフトを制御するシステムを構築した。図6のように HHG 駆動レーザ光源を加速管室で僅かに分岐し、それを EO サンプリングのプローブ光として用いた(光タイミング信号)。これにより、HHG パルスと電子バンチの相対的なタイミングドリフトをリアルタイムで EO 信号のピーク波長として把握し、制御可能にすることに成功した。

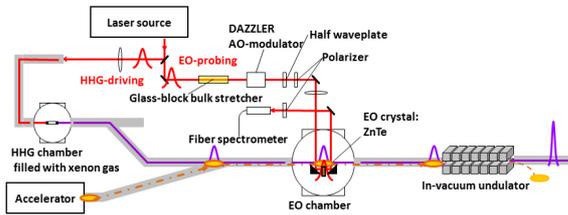


図 6 : EOS ロック方式・HHG シーディングの装置構成 (SACLA のプロトタイプ機である EUV-FEL 試験加速器で実現し、シード型 FEL のユーザ利用運転もこのシステムで実施した)

この高度にシーディング状態を保持された状態を定量的に記述するために、SASE 光のピーク強度の分散を  $\sigma_{SASE}$ 、平均値をこの実際のシーディング状態を記述するために、SASE 光のピーク強度の分散を  $\sigma_{SASE}$ 、平均値を  $\overline{I_{SASE}}$  とし、FEL ピーク強度  $I_P$  を以下の式で変換し、 $I_N$  という正規化された指標 (正規化ピーク強度) を導入した。

$$I_N = (I_P - \overline{I_{SASE}}) / \sigma_{SASE}$$

$I_N > 6\sigma$  の正規化ピーク強度の FEL パルスを実効シードパルスと定義し、全ショットにおける有効シードパルスの比率を有効ヒット率という指標で表現することにする。第 13 次高潮波 (61.2 nm) でシードした FEL パルス強度と中心波長の相関分布 (1 万ショット) の一例を図 7 に示す。青い点は SASE 光、赤が有効シードパルス、紫が中間領域である。この時の有効ヒット率は 20~30% であった。これは諸外国で実施された HHG シーディングのヒット成功率を優に 2 桁上回り、安定なシーディングを実現した。研究代表者と研究分担者は第 7 回大阪大学近藤賞を受賞した。

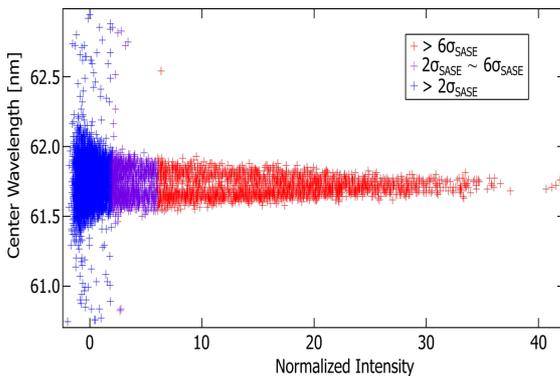


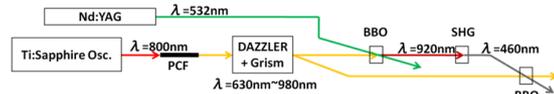
図 7 : HHG シード FEL パルスの中心波長と SASE 光で正規化したピーク強度の相関

### (3) 超高速 EOS 開発 :

世界最高速の 30 fs の時間応答性を実現する EO 素子を開発するため、有機 DAST 結晶の試験と超広帯域 EO プロブレーザー光の開発を行なった。DAST 結晶はそのテラヘルツ発生帯域から 20 fs (FWHM) の超高速応答性があると見積もられた。さらに、EUV-FEL 試験加速器にて有機 DAST 結晶を用いて世

界で初めて電子バンチの EO 信号捕捉に成功した。しかし、EO チェンバー近傍の積算空間線量が 100 Gy を超えると、EO 信号強度 (ピーク) が低下することが確認された。EO 信号減衰の機構は解明されていない。EO 素子の品質向上に関する、アニーリングと結晶研磨・整形の技術はほぼ確立した。

超広帯域の EO プロブ光源の開発は、空間多重化方式を開発したことにより、当初の目標帯域幅に達しなくても 30 fs (FWHM) の時間分解能が実現できるようになった。図 8 にこの光源レーザシステムとスペクトル帯域が 250 nm の矩形スペクトル強度分布を実現した結果を示す。これ以上の広帯域にするとフォトニック結晶ファイバーが壊れ易くなるのが明らかになり、実用的な帯域幅をこの値に決定した。また、高次の分散補償をして精密な線形チャープを実現するために、図 9 に示すような DAZZLER を用いたチャープ・スキャン法による高次分散の計測を行い、それを分散補償用の DAZZLER へのフィードバック制御することで、超広帯域の矩形スペクトルを精密に線形チャープ化することに成功した。現状で、30 fs (FWHM) のバンチ長の計測は実現していないが、必要な要素技術は、本研究により完成している。



### Supercontinuum shaped by DAZZLER

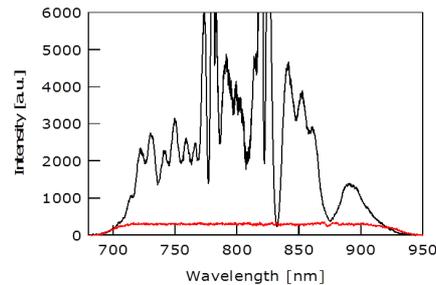


図 8 : 広帯域スペクトル光源系 (上図) で実現した線形チャープ・矩形スペクトル (下図の赤線)

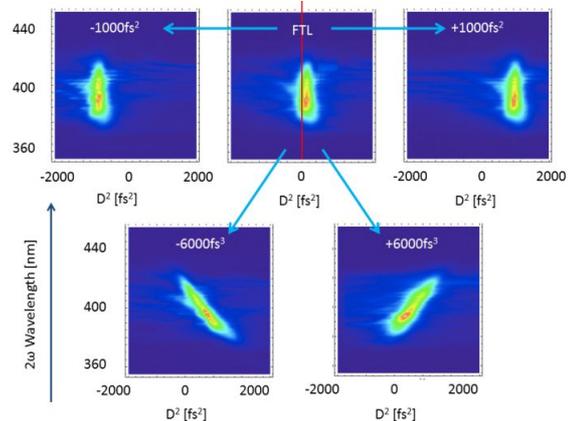


図 9 : DAZZLER を用いたチャープ・スキャン法による高次分散補償の制御 (線形チャープ化)

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計14件)

岡安雄一, 富澤宏光, 松原伸一, 熊谷教孝, 前川陽, 上坂充, 石川哲也, Feasibility study of a single-shot 3D electron bunch shape monitor with an Electro-Optic sampling technique, Phys. Rev. ST Accel. Beams, 査読有, Vol.16, 2013, pp. 052801-12.

DOI:10.1103/PhysRevSTAB.16.052801  
富澤宏光, 高輝度光陰極を実現する先端レーザ技術, Journal of the Vacuum Society of Japan, 査読有, Vol.55 No.2, 2012, pp. 50-58.

DOI:10.3131/jvsj2.55.50

柳田謙一, 鈴木伸介, 花木博文, Design study of beam position monitors for measuring second-order moments of charged particle beams, Phys. Rev. ST Accel. Beams, 査読有, Vol.15, 2012, pp. 012801-9.

DOI:10.1103/PhysRevSTAB.15.012801

〔学会発表〕(計16件)

岡安雄一, 松原伸一, 富澤宏光, 小川 奏, 南出泰亜, 松川健, 表面プラズモン共鳴を介した電子バンチのEO計測技術の展望, 第68回日本物理学会年次大会, 広島大学, 27-30 March 2013.

富澤宏光, 富樫格, 小川奏, 田中均, 矢橋牧名, 松原伸一, 岡安雄一, 石川哲也, The First Demonstration of EOS 3D-BCD Monitor to Maximize 3D-Overlapping for HHG-Seeded FEL, IBIC2013, Oxford UK, 16-19 Sep. 2013.

〔産業財産権〕

取得状況(計6件)

名称: ビーム測定装置, ビーム測定方法, 及びそれを用いたポンプ・プローブ測定方法

発明者: 富澤宏光

権利者: (公財)高輝度光科学研究センター

種類: 特許

番号: 特許第5165278号

取得年月日: 平成24年12月28日

国内外の別: 国内

〔その他〕

受賞等(計2件)

名称: 第7回大阪大学近藤賞 技術貢献賞

受賞者: 富澤宏光, 青山誠, 岩崎純史, 高橋栄治, 富樫格

受賞年月日: 平成25年5月8日

6. 研究組織

(1)研究代表者

富澤 宏光 (TOMIZAWA, Hiromitsu)  
(公財)高輝度光科学研究センター・  
XFEL利用研究推進室・副主幹研究員  
研究者番号: 40344395

(2)研究分担者

出羽 英紀 (DEWA, Hideki)  
(公財)高輝度光科学研究センター・  
加速器部門・副主幹研究員  
研究者番号: 20360836

(3)研究分担者

鈴木 伸介 (SUZUKI, Shinsuke)  
(公財)高輝度光科学研究センター・  
加速器部門・主幹研究員  
研究者番号: 00416380

(4)研究分担者

富樫 格 (TOGASHI, Tadashi)  
(公財)高輝度光科学研究センター・  
XFEL利用研究推進室・研究員  
研究者番号: 60415239

(5)研究分担者

松原 伸一 (MATSUBARA, Shinichi)  
(公財)高輝度光科学研究センター・  
XFEL利用研究推進室・研究員  
研究者番号: 90532135

(6)研究分担者

岡安 雄一 (OKAYASU, Yuichi)  
(公財)高輝度光科学研究センター・  
加速器部門・研究員  
研究者番号: 90509910

(7)研究分担者

南出 泰亜 (MINAMIDE, Hiroaki)  
(独)理化学研究所・  
テラヘルツ光源研究チーム・チームリーダー  
研究者番号: 10322687

(8)研究分担者

谷内 努 (TANIUCHI, Tsutomu)  
(公財)高輝度光科学研究センター・  
加速器部門・副主幹研究員  
研究者番号: 60360822

(9)連携研究者

水野 明彦 (MIZUNO, Akihiko)  
(公財)高輝度光科学研究センター・  
加速器部門・副主幹研究員  
研究者番号: 30360829

(10)連携研究者

柳田 謙一 (YANAGIDA, Kenichi)  
(公財)高輝度光科学研究センター・  
加速器部門・主幹研究員  
研究者番号: 10529564