

## バンチ内 6D 位相空間電荷密度分布の実時間計測可能な非破壊モニター開発

### DEVELOPMENT OF NON-INVASIVE MONITORING SYSTEM TO MEASURE BUNCH-BY-BUNCH CHARGE DENSITY DISTRIBUTION IN 6D PHASE SPACE

富澤宏光<sup>#, A)</sup>, 富樫格<sup>A)</sup>, 松原伸一<sup>A)</sup>, 伊達伸<sup>B)</sup>, 出羽英紀<sup>B)</sup>, 谷内努<sup>B)</sup>, 鈴木伸介<sup>B)</sup>, 岡安雄一<sup>B)</sup>, 下崎義人<sup>B)</sup>, 柳田謙一<sup>B)</sup>, 深見健司<sup>B)</sup>, 増田剛正<sup>C)</sup>, 清道明男<sup>C)</sup>, 黒田隆之助<sup>D)</sup>, 平義隆<sup>D)</sup>, 大和田成起<sup>E)</sup>, 小川奏<sup>E)</sup>, 南出泰丞<sup>F)</sup>, 野竹孝志<sup>F)</sup>

Hirotsu Tomizawa<sup>#, A)</sup>, Tadashi Togashi<sup>A)</sup>, Shinichi Matsubara<sup>A)</sup>, Shin Date<sup>B)</sup>, Hideki Dewa<sup>B)</sup>, Tsutomu Taniuchi<sup>B)</sup>, Shinsuke Suzuki<sup>B)</sup>, Yuich Okayasu<sup>B)</sup>, Yoshito Shimosaki<sup>B)</sup>, Kenichi Yanagida<sup>B)</sup>, Kenji Fukami<sup>B)</sup>, Takemasa Masuda<sup>C)</sup>, Akio Kiyomichi<sup>C)</sup>, Ryunosuke Kuroda<sup>D)</sup>, Yoshitaka Taira<sup>D)</sup>, Shigeki Owada<sup>E)</sup>, Kanade Ogawa<sup>E)</sup>, Hiroaki Minamide<sup>F)</sup>, Takashi Notake<sup>F)</sup>

<sup>A)</sup> XFEL Utilization Division, JASRI/SPring-8

<sup>B)</sup> Accelerator Division, JASRI/SPring-8

<sup>C)</sup> Controls and Computing Division, JASRI/SPring-8

<sup>D)</sup> National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

<sup>E)</sup> RIKEN SPring-8 Center (RSC), RIKEN

<sup>F)</sup> Tera-Photonics Laboratory, Advanced Science Institute, RIKEN

#### Abstract

We are developing the ultimate non-destructive monitor to measure 6D-phase space charge density distribution of electron bunches shot by shot. Our single-shot 6-D bunch monitor consists of four or six 3-D bunch charge distribution (3D-BCD) monitors based on triplet 3D-BCD elements installed in non-dispersive and dispersive sections of a beam drift transport line. We are planning to use these non-destructive triplet bunch monitor components, not only for a 3-D bunch (3D-BCD) monitor, but also as an electron energy chirping monitor in dispersive sections of the injection line for SPring-8 II from SACLA linac. In 2013, we upgraded the SPring-8 photoinjector test facility to be able to accelerate up to 85 MeV and installed a magnetic chicane to compress bunches down to 30 fs (FWHM). A 3D-BCD monitor evolved from simple encoding of EO sampling into a multiplexing technique with a single probe laser pulse for multiple EO crystal detectors in a manner of spectral decoding (demultiplexing). We realized demultiplexing as an imaging spectrograph with eight-track simultaneous detection in the area array CCD of a high-speed gated I.I. camera. Transverse detections of bunch slices are done by analyzing the higher order moments of the bunch slice charge density distributions. For achieving the upper limit of temporal resolution, we are preparing to combine high-temporal-response EO-detector organic crystals and an octave broadband probe laser pulse with a linear chirp rate of 1 fs/nm. We are developing an EO-probe laser pulse with  $\sim 10 \mu\text{J}$  pulse energy and bandwidth over 300 nm (FWHM; flat-top spectrum).

#### 1. はじめに

SPring-8 では、フェムト秒時間分解で計測可能で、3次元 (縦・横方向) バンチ形状 (電荷密度分布) をシングルショット・非破壊計測可能なモニター要素 (3D-BCD) を開発している。EO (電気光学) 結晶を電子ビーム軌道の周りに複数個均等配置し、これらを同時に単一のオクターブ帯域プローブ光で EO サンプリング計測 (Spectral Decoding) することで多重化 (Multiplexing) を実現している。2012 年度までは波長多重化方式で 3D-BCD の計測原理の実証試験<sup>[1,2]</sup>を行ってきたが、プローブ光の時間分解能 (スペクトル帯域) を最大限に活かすため、空間多重化方式を新たに開発した<sup>[3]</sup>。この新方式の採用により、複数台の 3D-BCD 計測が単一の復調用イメー

ジング分光器で同時に行えるようになった。これはエリアセンサ上にファイバー伝送した各結晶に対応した変調領域のプローブ光を分割結像させることで多重化密度を高めることが可能になったため、これに対応したリアルタイム再構築専用の演算処理系も開発している<sup>[4]</sup>。複数台の 3 次元バンチ形状計測系 (3 台の 3D-BCD 計測要素でトリプレットを構成) をビーム・トランスポート系の水平・垂直偏向部にも設置して組み合わせ、6 次元位相空間のバンチ内電荷密度分布の挙動をバンチ毎に実時間計測する電子バンチ・モニタリング (ライブビュー構想) を実現することを計画している。

ところで、SPring-8 では蓄積リングのエミッタンスを大幅に小さくするための改造を計画中である。改造後の蓄積リングでは SACLA を入射器とすることで、さらなる高輝度・短パルス放射光の発生を目

<sup>#</sup>hiro@spring8.or.jp

指している. SACLA からのビームは, 最初に 300 m のビーム輸送ライン XSBT (from the XFEL Facility to the Booster Synchrotron Beam Transport Line) を通してブースタシンクロトロンの出射点付近まで輸送される. シンクロトロンのビームラインは, SACLA の直線下流部に比べて 9 m 低く位置しているため, XSBT は水平方向だけでなく垂直方向にも偏向部を有する<sup>[5]</sup>. バンチ長の伸びを極力抑制するため, 水平・垂直偏向部は Chasman-Green 型ラティスで構成している. Fig. 1 に示すように, SACLA からの入射バンチの 6 次元位相空間での挙動を非破壊診断するビームラインとして XSBT の活用を検討している.

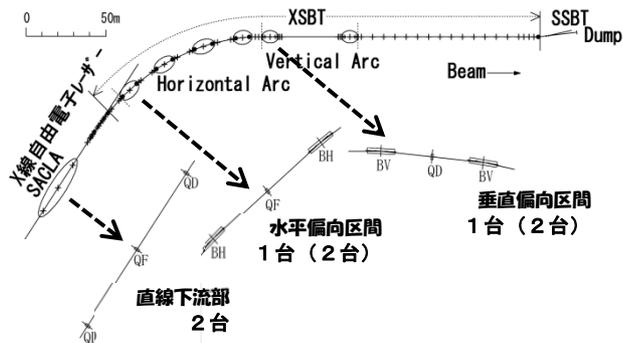


Figure 1: Outline of the XSBT as a beam diagnostic line. The installation points and numbers of 3D-BCD monitors are indicated.

一方で, SACLA 直線下流部での数十フェムト秒のバンチを模擬するため, フォトカソード試験加速器を前年度までに 85 MeV までアップグレードし<sup>[6]</sup>, ユーザ運転に制限されないでモニター開発が出来るようにした. 本稿では, 複数個の 3D-BCD 計測要素を必要とする 3 次元バンチ形状計測系用の空間多重化技術の開発経緯と現状について説明する. そして, 有機 EO 結晶の超高速応答を活かすオクターブ帯域のプロープ光源の開発状況についても報告する.

## 2. 3次元バンチ計測モニター要素と空間多重化復調方式の開発状況

電子バンチ内の 3 次元電荷分布を非破壊でシングルショット計測するモニターを提案し開発しているところは我々のグループ以外には皆無で, 世界でも例がない. そのため, ほぼすべての要素技術を研究開発しなければならない. 今までに, 一対の対向する EO 結晶を単一のプロープ光で同時計測するという原理実証試験に, 2 つの加速器 (フォトカソード試験加速器と SCSS 試験加速器) にて成功している.

フォトカソード試験加速器では, 螺旋状に各 EO 結晶をプロープする時間をシフトさせるタイミングシフターを開発した. これにより EO 信号を刻印する波長領域を EO 結晶 (8 個) ごとに分けることで原理実証に成功した<sup>[1,2]</sup>. しかし, この方式だと EO プロープ光の帯域が 1/8 になってしまうので, 後述する高時間分解能を同時に達成するには適した方法

とは言えない. SCSS 試験加速器の実験では, 同期した 2 つのファイバー分光器を用い, 対向する 2 つの EO 結晶からのプロープ光を独立に分光復調することで計測原理を実証した. この方法では EO 結晶の数だけ分光器が必要になってしまうため, 6 次元位相空間計測では大変なことになる. モニター系としてのシステム完成度という点だけでなく, ライブビューを実現する制御システムも問題となる.

そのため, Fig. 2 に示すような空間多重化方式 (ファイバーバンドル伝送・F マッチング分光撮像法) を実用機として開発した<sup>[3]</sup>. この多重化方式では円環レーザによって, 複数の EO 結晶をシングルショットで多点同時計測 (図では 8 点) したプロープ光を EO 結晶ごとに对应させたファイバーでイメージング分光器に転送する. 分光器 (復調器) の入射スリットに沿って, 縦にこのファイバーをダミーのファイバーを間に挟んで一直線に並べてバン

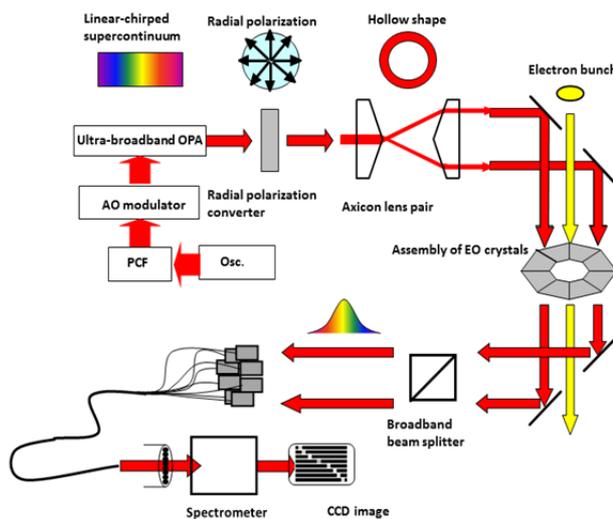


Figure 2: Schematic drawing of 3D-BCD monitor based on EO-multiplexing technique, utilizing simultaneous detection in imaging spectrographs with multi-track (eight tracks) of area array CCD of an image intensified (I.I.) camera.

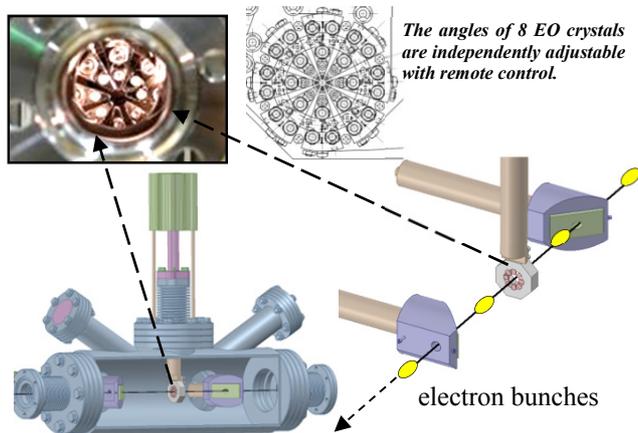


Figure 3: 3D-BCD monitor element with 8 EO crystals in vacuum chamber.

ドル化し、EO 信号群を空間的に分離して入射する。F マッチングをスリット上でとることで、エリアセンサ上に個々のファイバーから来た EO 信号を空間的に分離して結像することが可能になる。多重化密度を高めることが可能になったため、これに対応したリアルタイム再構築専用の演算処理系も開発できるようになった。電子バンチ内の 3 次元電荷分布をシングルショット計測するのに、この 3 つの計測要素が必要になるが、それぞれの計測要素からの信号 (8×3) をまとめて一つのイメージング分光復調器に送ることで、リアルタイム処理することが可能になった。6 次元位相空間計測では、Fig.1 に示すように最大でこれが 6 台必要になるが、この多重化復調方式 (demultiplexing) の発明により、初めて現実的なシステム設計が可能な計画となった。

### 3. フェムト秒時間分解・6次元位相空間計測系の要素技術開発テストベンチ

我々は SPring-8 のフォトカソード試験施設を、本バンチモニターの開発テストベンチとして利用可能な施設とするために、2年間かけてアップグレードしてきた。RF 電子銃空洞を独立 2 空洞に変更し、ビームエネルギーを改造前 (ピルボックス型単空洞) の 3.8 MeV から 6 MeV (次のステップである 10 MeV に向けての準備完了) に上げた。同時に、新規に導入した高電界加速管により 85 MeV (改造前 30 MeV) まで加速エネルギーを増強し、バンチ圧縮系の下流にあるバンチモニター直前で数十フェムト秒の極短バンチ長を達成できるようにした。今年度のモニター試験のために設置された主な機器は、RF パルス圧縮器 (SLED)、独立 2 空洞式 RF 電子銃、高電界加速管、シケイン電磁石 (偏向角 15 度の偏向電磁石 4 台) である。RF 電子銃のビームエネルギーを 10 MeV 程度まで上げるとバンチ伸張をさらに抑えられるため、2.7 セル RF 電子銃空洞に交換してのモニター試験を来年初頭に計画している。

本テストベンチに設置された高電界加速管 (1.4 m 加速管と 1.2 m エネルギー変調管) は、SPring-8 線型加速器における暗電流低減を目的として開発された低暗電流加速管<sup>[7]</sup>の設計をベースに、ビーム形状およびエミッタンスの対称化のためカプラー部がダ

ブルフィード化されている。また、これらの高電界加速管を駆動するのに必要な RF パワーを得るため、80 MW クライストロン (Toshiba E3712) 出力 (パルス幅 4  $\mu$ s) を SLED ( $\beta=8.3$ ) によりパルス圧縮 (パルス幅 1  $\mu$ s) し、各 RF 空洞に分配する大電力立体回路を構築している。

この試験加速器のシケインと水平偏向電磁石の前後に、6 次元位相空間計測システムに必要とされる 3D-BCD 計測要素の開発テストベンチを Fig. 2 に示すように配置している。この 3 種類の EO 試験チャンバーについて以下に列記しておく。

#### 3.1 3次元バンチ内電荷分布 (3D-BCD) 計測要素実証機 (Fig. 4 : 3D BCD monitor)

Fig. 2 に示したシステム構成で運用し、実証試験機はシケイン直前に現状では設置している。500 pC 程度のピコ秒電子バンチを用いて、3次元バンチ内電荷分布計測の実証試験と電子バンチ内の構造とその挙動の計測を目的とする。EO プローブ光には、時間的に線形チャープの矩形波で空間的に円環ビームの電子バンチに同期したレーザーパルスを用いる。8 個の EO 結晶を同時にプローブし、8 (+1) 分岐ファイバーバンドルで伝送して分光復調する。EO 結晶には ZnTe を用いるが、超高速計測も同時に必要な場合は結晶を DAST 結晶などに交換し、次に述べる 1D-BCD の試験チャンバーと位置を交換してシケイン直後に設置できる構造になっている。この結晶ホルダーは 8 個の結晶を実装可能であるが、結晶軸の方向をバンチ電界に最適化するために数度の角度微調機構を持たせている。

#### 3.2 フェムト秒時間分解バンチ計測 (超高速応答 EO 結晶) 試験機 (Fig. 4 : 1D BCD monitor)

EO サンプリングを基本技術とする 3/6 次元バンチ内電荷分布計測系は、空間よりも時間分解能において特に優れている。この時間分解能は現在のところ、EO 結晶の応答性によって制限されているが、我々はプローブ光源の限界まで追求する方針である。このための試験チャンバーを最短バンチ (<150 pC, 30-50 fs (FWHM)) が利用できる予定のシケイン直後に設置している。この試験機で有機 DAST 結晶をはじめとした各種 EO 結晶材料の試験を行うことが必要である。結晶ホルダーは垂直にスライドする構造とし、複数個の結晶試験片を一度の Test Run で試験できるようにしている。また、次章でのべる EO プローブ光源も限界まで広帯域化し、1 オクターブの超広帯域が可能なレーザ伝送系を用意している。

#### 3.3 エネルギーチャープ計測実証機 (Fig. 4 : Bunch energy chirp monitor w/EOS)

偏向電磁石後の 30 度ラインに設置した 3D-BCD 計測要素である。基本的に Fig. 3 に示した 3 次元バンチ計測と同じ装置であるが、結晶配置を分散部でのビーム計測に最適化 (楕円状など) する研究が必要のため、結晶ホルダーごと交換可能な構造になっている。ファイバーレーザー光源で EO プローブを行う。

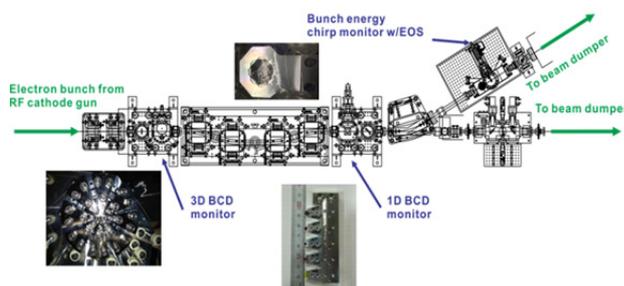


Figure 4: Three different types of EOS test chambers at the magnetic chicane bunch compressor of SPring-8 photoinjector test facility.

#### 4. 超高速バンチ長計測のための EO プローブ光源開発

3次元バンチ形状計測(3D-BCD)で可視光領域のEOプローブ光で限界まで時間分解能を上げるには、超広帯域のEOプローブ光源の開発する必要がある。空間多重化方式の開発に成功したことにより、当初の目標だった1オクターブの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。この光源レーザシステムとスペクトル帯域が230 nm (FWHM)の矩形スペクトル強度分布を実現した結果を Fig. 5 に示す<sup>[3]</sup>。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ことが明らかになり、実用的な帯域幅をこの値に決定しているが、最終的に300 nm (FWHM)を安定供給できるシステムとする予定である。また、高次の波長分散補償をして精密な線形チャープを実現するため

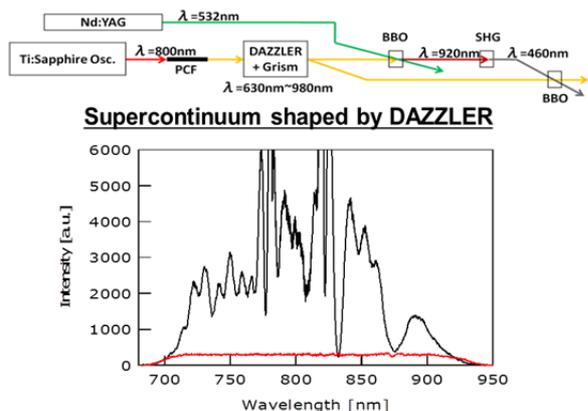


Figure 5: Schematic drawing of generation of broadband linear-chirped laser probe pulse with square-shaped spectrum (red line: 230 nm (FWHM), 660 fs (GDD introduced by DAZZLER: +1000 fs<sup>2</sup>)). The 460-nm pump laser pulse is generated from Nd: YAG laser (SHG: 532 nm) pump pulse and the super-continuum signal pulse with additional NOPA stage.

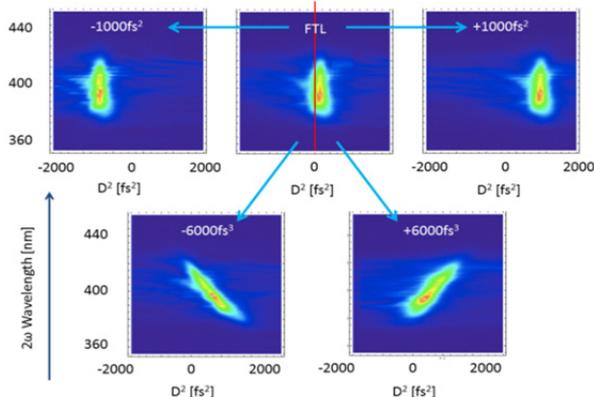


Figure 6: Chirp scan measurements of probe laser pulse. Adding GDD of +1000 fs<sup>2</sup> by DAZZLER, a linear chirped laser pulse was generated with a flat-top spectrum (a wide spectral plateau region as shown in Fig. 5).

に、Fig. 6 に示すような音響光学素子 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援用し、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。電子バンチ計測に供するには、復調分光器で1000 countsを得るのに光源で必要とされるパルスエネルギーは約10 μJである。そのための超広帯域増幅器(OPA)を開発した(調整準備の段階である)。

#### 5. まとめと今後の展望

電子バンチ内の3次元電荷分布を非破壊かつシングル・ショット計測する方法は、我々が世界で初めて提唱<sup>[8,9]</sup>したものである。一連の実証試験を通じて、複数のEO結晶を電子ビーム軌道の周りに配置して、単一のレーザ光(EOプローブ光)で同時にプローブする技術を確認した。実用に耐える空間多重化方式を開発したことで、6次元位相空間計測系を具体的に検討できる段階に達している。まだ、システムのロバスト性など実用化に向けて解決すべき点は多々あるが、数年以内に実用化システムを完成させることを戦略目標として掲げている。

このように大規模計測システムになると、制御系の開発も重要になるため、FPGA およびプロセッサ処理の最適化を行い、システム全体を構築して目標とするリアルタイム性能(ライブビュー構想の実現)を実装することを検討している。

また、独立行政法人産業技術総合研究所では、Sバンド小型リニアック施設において、ODRで発生するラジアル偏光のテラヘルツを用いたビーム重心位置検出を行うモニター系を共同して開発している<sup>[10]</sup>。これは3次元バンチ形状モニターの計測要素を簡素化するための戦術オプションとして、本モニターの開発戦略の中に位置づけているものの一つである。この他にも、モニターシステムをコンパクト化する戦略オプションを3つ用意している。

極短バンチ計測を行う最有力結晶の候補は有機DAST結晶である。我々は、EUV-FEL試験加速器にてDAST結晶を用いて世界で初めて電子バンチのEO信号捕捉に成功している<sup>[2]</sup>。しかし、いろいろと調査した結果、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。実際の試験加速器での計測実験では、直前のOTRスクリーンを入れる時には必ずEO結晶を退避させるなど運用で解決する方法を採っているが、本質的解決には結晶の放射線耐性の向上が必要である。したがって、EO信号減衰の機構を解明するための研究も理研(仙台)テラヘルツ光源研究チームと共同して行っている。また、EO素子の品質向上に関して、アニーリングと結晶研磨・整形の技術もほぼ確立しており、EO素子としては完成段階に近づいている。

現時点で、30 fs (FWHM)のバンチ長の計測はまだ実現していない。しかし、必要な要素技術と試験加速器はほぼ完成の域に達しており、他のEO結晶候補の基礎試験だけでなく、他のバンチ長計測方法も

併用しながら、EO サンプリングの時間分解能の限界を慎重に見極めたいと考えている。ここで、CTR のマイケルソン干渉計を用いた電子ビーム幅測定に関して若干の補足をさせて頂きたい。超短パルス光では、パルスの中に1波長以上存在するべきであり、10 THz は波長 30  $\mu\text{m}$  なので、100 fs より短いパルスは存在しないはずである。20 fs のパルスでは、波長 6  $\mu\text{m}$  より短い中赤外～可視・紫外域の光が関与していると考えるのが妥当である。阪大産研（吉田陽一教授、楊金峰准教授の研究室）では、フェムト秒ストリークカメラの時間分解能を遥かに超え、近年目覚ましくフェムト秒電子バンチの記録を次々と塗り替えている。しかしながら、彼らが 20 fs のパルスを測定<sup>[11]</sup>しているのが本当であるとする、CTR スペクトルとして論文に載せている図はパルス形状の決定に関与していない部分のスペクトルを見てことになり、解析手法や測定方法そのものが間違っているとしか言いようがない。特に 1 fs の電子バンチの発生成功の確認ともなれば、紫外域での直接計測をしなければならないはずであり、彼らが行っている赤外域では無理である。何をか言わんやである。

## 謝辞

本研究の3次元バンチ内電荷分布計測要素の研究開発費の一部は、科研費基盤研究（B）課題番号 23360045（代表者：富澤宏光）、基盤研究（C）課題番号 24560535（代表者：南出泰臣）に支援された成果である。このうち、ラジアル偏光素子に関しては、基盤研究（C）課題番号 20612024（代表者：富澤宏光）で開発されたものである。また、現在進行中の6次元位相空間計測系の研究開発に関しては、基盤研究（A）課題番号 26246046（代表者：富澤宏光）により支援されている。

## 参考文献

- [1] H. Tomizawa, et al., “Feasibility Study of Single Shot Realtime Non Distractive Three Dimensional Bunch Charge Distribution Monitor,” *Proc. of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Himeji, Japan, 4-6 August 2010, pp.307-311.
- [2] Y. Oyamasu, et al., “Feasibility study of a single-shot 3D electron bunch shape monitor with an electro-opticsampling technique,” *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **16**, 052801, 2013.
- [3] H. Tomizawa, et al., “The First Demonstration of EOS 3D-BCD Monitor to Maximize 3D-Overlapping for HHG-Seeded FEL,” *invited talk, Proc. of the 2nd International Beam Instrumentation Conference (IBIC2013)*, Oxford, UK, 16-19 September 2013, pp.1-3.
- [4] A. Kiyomichi, et al., “MicroTCA-Based Image Processing System at SPring-8,” *Proc. of the 19th Real Time Conference*, Nara, Japan, 26-30 May 2014, in press.
- [5] K. Fukami, et al., “Transport of ultrashort bunch to the storage ring in SPring-8,” *Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Nagoya, Japan, 3-5 August 2013, pp.406-409.
- [6] T. Taniuchi, et al., “Test bench for ultra-short bunch monitor at SPring-8,” *Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Nagoya, Japan, 3-5 August

- 2013, pp.392-395.
- [7] T. Taniuchi, et al., “High Power Test of Low Dark Current Accelerating Structure,” *Proc. of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Tsukuba, Japan, 1-3 August 2011, pp.1286-1288.
- [8] H. Tomizawa, Japan Patent Application No: 2007-133046 (Japanese Patent No.5165278).
- [9] H. Tomizawa, H. Hanaki, T. Ishikawa, “Non-destructive single-shot 3-D electron bunch monitor with femtosecond timing all-optical system for pump & probe experiments,” *Proc. of the 29th International Free Electron Laser Conference (FEL2007)*, Novosibirsk, Russia, 26-31 August 2007, pp. 382-385.
- [10] Y. Taira, et al., “Observation of radially polarized terahertz radiation generated by a sub-picosecond electron beam,” *Vibrational Spectroscopy*, 2014, in press.
- [11] I. Nozato, et al., “Measurement of < 20 fs bunch length using coherent transition radiation,” *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **17**, 072803, 2014.