

# R&D for a 3D bunch charge distribution monitor for the electron beam

Yuichi Okayasu<sup>\*A)</sup>, Tsutomu Taniuchi<sup>A)</sup>, Hideki Dewa<sup>A)</sup>, Akihiko Mizuno<sup>A)</sup>, Kenichi Yanagida<sup>A)</sup>, Shinsuke Suzuki<sup>A)</sup>, Shinichi Matsubara<sup>B)</sup>, Kanade Ogawa<sup>B)</sup>, Hiromitsu Tomizawa<sup>B)</sup> and Tesuya Ishikawa<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup>JASRI

1-1-1 Koto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198, Japan

<sup>B)</sup>RIKEN

1-1-1 Koto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198, Japan

## Abstract

我々は、電子バンチ電荷分布の3次元計測を非破壊・シングルショット・リアルタイムで、且つ30 fs (FWHM)の時間分解能で行うシステムを構築している。このシステムは電子バンチ電荷分布の縦方向成分計測に限らず、横方向成分の同時計測も実現可能とする。2012年初旬にシステムの原理実証試験をSPring-8内SCSS試験加速器にて行った。一般的にEOサンプリングで使用される無機ポッケルスEO結晶ZnTeに加え、これまで計測実績の報告がなされていない有機ポッケルスEO結晶DASTを用いたバンチ電荷分布計測に世界で初めて成功した。ZnTeに比べ、DASTによるEO信号は2倍程度強く、更に時間応答も優れていることが判った。一方で有機ポッケルスEO結晶の放射線損傷も無視できないため、損傷の定量評価にも取り組んでいる。

## 電子ビーム用三次元バンチ電荷分布モニター的设计開発(2)

### 1. 導入

一般にXFEL (X-ray Free Electron Laser) 加速器では、電子バンチを非破壊で、且つ数十フェムト秒 (FWHM)の精度で測定することが要求される<sup>[1,2]</sup>。更に、横方向 $\sim 100 \mu\text{m}$  (rms)、縦方向 $\sim 30$  fs (FWHM)といった、XFELでは一般的な超短パルスの電子バンチを精密に計測するためには、縦・横双方向、すなわち3次元のバンチ電荷分布 (3D-BCD : 3 Dimensional Electron Bunch Charge Distribution) の同時計測が必要である。例としてSACLA (SPring-8 Angstrom Compact Free Electron) では、従来電子バンチの時間分布計測にRFディフレクターを用いた手法が採用されてきた<sup>[3,4]</sup>。しかしながらこの手法は破壊的であるため、SASE (Self-Amplified Spontaneous Emission) 発振を利用するユーザー運転では同時計測が成立しないため、高精度な非破壊計測が求められてきた。更に応用としてHHGベースのシードFELを発振させる場合、HHG波と電子バンチは空間的に常に重複していなければならない。従ってHHG波生成ラインから分岐させたプローブレーザーで3D-BCD計測を行えば、HHGベースのシードFEL発振に対し、常にフィードバックをかけることが可能となる。

3D-BCD計測を可能にするモニター手法の一つに、EO (Electro-Optic) サンプリングによるBCD計測が挙げられる<sup>[5]</sup>。この方法では、電子バンチが誘起するクーロン場をEO媒質に作用させる。電子バンチと同じタイミングで併走するプローブレーザーがEO媒質を通過する際、プローブレーザーの偏光はEO効果によりリターデートされることから、この情報を電子バンチの電荷分布として復号する。マルチチャンネル分光器を用いた場合、シングルショット計測も実現可能となり、この手法はスペクトラルデコーディングと呼ばれるものである<sup>[6]</sup>。スペクトラルデコーディングでは、プローブ

レーザーの偏光リターデーションをポラライザーを通してレーザーの強度変調に変換し、最終的にバンチ電荷密度の時間分布を分光器で測定する。スペクトラルデコーディングの時間分解能は、主に以下に挙げる4つの要因により制限・決定される。

- 1) 実際のスペクトラルデコーディングの時間分解能  $T_{res}$  は、プローブレーザーのフーリエ限界パルス幅  $\tau_0$  及びチャープパルス幅  $\tau_c$  により、図1及び(1)式に示すように決められる<sup>[6]</sup>。

$$T_{res} \approx \sqrt{\tau_0 \tau_c} \quad (1)$$

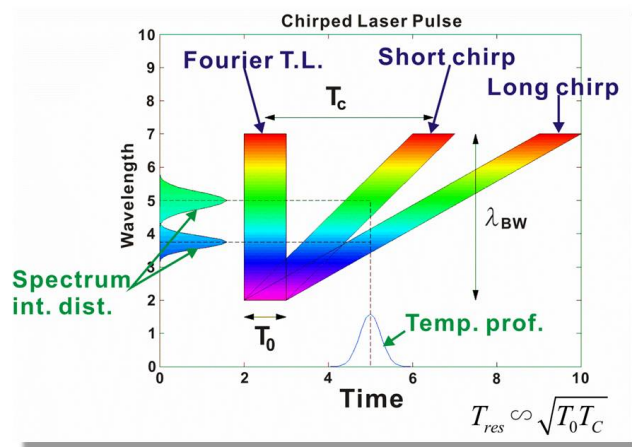


図1: 線形チャープパルスの波長と時間の関係。

- 2) ポッケルスEO結晶の分散は、結晶の厚さと周波数帯域 (可視帯域: プローブレーザー、THz帯域:

\* okayasu@spring8.or.jp

クーロン場)の双方に依存する。電子バンチのクーロン場が、数 mm 厚のポッケルス EO 結晶中を伝搬する際、クーロン場の位相は THz パルスの半周期に相当する<sup>[7]</sup>。特にポッケルス EO 結晶は、THz 帯域において顕著な吸収特性を持つことから、フェムト秒オーダーの時間分解能実現は難しい。

- 3) EO 媒質と電子ビーム軸の距離 ( $R$ ) が制限する時間分解能 ( $T_{geo}$ ) は、光速 ( $c$ ) と電子バンチのローレンツ因子 ( $\gamma$ ) とで

$$T_{geo} = \frac{2R}{\gamma c} \quad (2)$$

で表される。

- 4) 真空中を進む電子バンチと結晶中を透過するプローブレザーの速度不整合。ポッケルス EO 結晶の屈折率は、一般に  $\sim 2$  程度と高いため、用いる結晶の厚みが薄いほど高い時間応答が得られる。

以上は、BCD の縦方向計測の特性についてまとめたものであるが、精密な空間分布をおさえるためには、横方向計測も同時に行う必要がある。実際 SACLA の運転においては、電子バンチは挿入光源を  $\sim 10 \mu\text{m}$  以下の指向精度で直線的に通過させる必要があり、現在は精度  $1 \mu\text{m}$  (rms) 以下の RF ビームポジションモニターと精度  $2.5 \mu\text{m}$  (rms) 程度のスクリーンモニター (いずれも破壊的) によって、運転が担保されている<sup>[8]</sup>。これに対し、1) 電子バンチを取り囲むように、電子ビーム軸周りに EO 媒質を配置し、2) 線形チャープ且つ矩形強度分布のプローブレザーを採用し、3) マルチチャンネル分光器を用いた、3D-BCD モニターを導入することにより、BCD の縦方向 (時間分布) 及び横方向 (空間分布) を同時に、リアルタイム・シングルショット計測することが可能となり、BCD とバンチのエネルギーチャープの精密計測・調整が SACLA の運転と同時並行して行うことが可能となる。EO サンプリングによる BCD 計測手法は、スペクトラルデコーディングの他にも、テンポラルデコーディング、スペーシャルデコーディングなどが挙げられるが、本研究においてスペクトラルデコーディングを採用する長所は以下 2 点挙げられる。

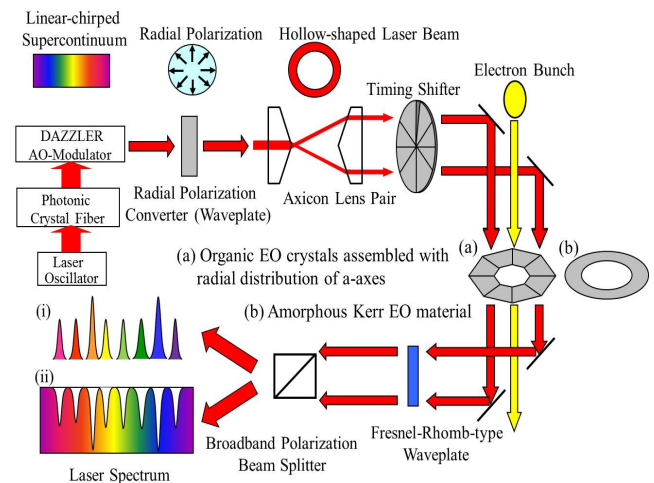
- 1) 電子バンチ断面の横方向電荷分布が計測できる。従来精力的に行われてきた、BCD の射影成分評価に比べて直接的であることから、高精度な X 線レーズング制御には必須である。
- 2) SACLA では、電子バンチの横方向の大きさ ( $40 \mu\text{m}$  [rms]) は、縦方向の大きさ ( $30 \text{fs}$  [FWHM],  $10 \mu\text{m}$  相当) に比べて大きいことから、電子バンチ長計測において、軌道上のバンチの僅かな傾きを計測評価することは困難を極めてきた。しかし、3D-BCD 計測を導入することにより、バンチの傾きを補正しながら精密なバンチ長計測をリアルタイムで且つ、非破壊で行うことが可能となる。

上記 2 点の長所により、挿入光源の手前で電子ビームの精密調整が実現される。

## 2. 3D-BCD 計測の原理

本研究で提唱する 3D-BCD モニターの特徴は、以下の通り。

- 1) 非破壊計測。
- 2) シングルショット計測。
- 3) リアルタイム計測。
- 4)  $30 \text{fs}$  (FWHM) の時間分解能で、BCD の 3 次元同時計測が可能。



Details of the EO detectors in 3D-BCD monitor

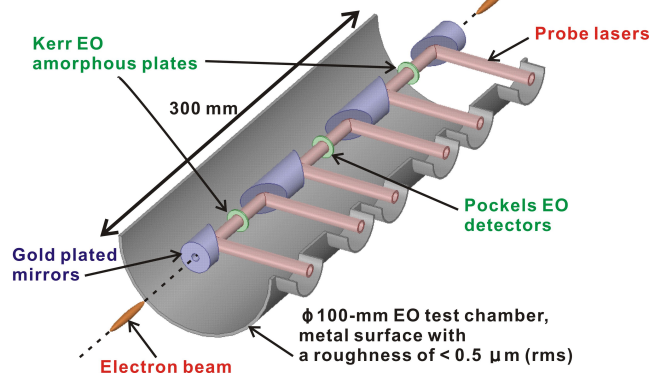


図 2: 3D-BCD 計測の概念図 (上) と 3D-BCD モニターの全構成 (下)。

スペクトラルデコーディングによる 3D-BCD 計測の概念を図 2 (上) に示す。広帯域 ( $\sim 350 \text{nm}$  [FWHM] @  $800 \text{nm}$ )・線形チャープ・矩形強度分布のレーザーを、プローブレザーとして生成する。プローブレザーの偏光方向を、ラジアル偏光変換素子を用いて放射状に揃えた後、アキシコンレンズ (若しくはミラー) 対を用いて、レーザーのプロファイルを円環に変換する。一方、図 2 (上) に示すように、8 個のポッケルス EO 結晶 (a) と円環型のカー EO アモルファス媒質 (b) を電子ビームの軸周りに配置する。プローブレザーを個々のポッケルス

EO 結晶及びカー EO 媒質に対し、電子バンチと同じタイミングで透過させる。ここで、個々のポッケルス EO 結晶を透過するレーザーを時間的に区別するため、互いに独立した屈折率を持つ 8 つの合成石英を個々の結晶と空間的に対応するように組み合わせたタイミングシフターを、アキシコンレンズの直後に導入する。ポッケルス EO 結晶及びカー EO 媒質で偏光がリターデートされたプローブレーザーを、フレネルロム波長板、広帯域偏光ビームスプリッターの順に透過させ、最終的にマルチチャンネル分光器でプローブレーザーの強度分布を計測する。より具体的な 3D-BCD モニターの構成を図 2 (下) に示す。モニターチェンバー内部には、2 つのカー EO 媒質とポッケルス EO 結晶を配置し、それぞれに対して放射状に偏向した円環プローブレーザーを透過させる。中央に配置したポッケルス EO 結晶で、電子バンチの縦方向分布計測を行い、両端に配置したカー EO 媒質で電子バンチの位置・及び入射角、すなわち横方向分布を計測する。

### 2.1 縦方向電荷分布計測

電子バンチの縦方向電荷分布を計測するためには、 $\sim 30$  fs (FWHM) 以下の時間分解能が要求される。この分解能を得るためには 1) 広帯域で線形にチャープしたプローブレーザーの生成と 2) ポッケルス EO 結晶の透過特性が重要な鍵を握る。上記で述べたように、本研究では、帯域 350 nm (FWHM) @ 800 nm で矩形強度分布のプローブレーザーを使用する。この場合、プローブレーザーのフーリエ限界パルス幅は  $\tau_0 \approx 3$  fs (FWHM) 程度である。BCD を一つのポッケルス EO 結晶を用いて行う場合、チャープ幅  $\tau_c \approx 300 - 400$  fs (FWHM) 程度に線形チャープさせたプローブレーザーを用いれば、(1) 式より時間分解能は  $T_{res} \approx 30$  fs (FWHM) と見積もられる。実際に 3D-BCD 計測では、8 つのポッケルス EO 結晶をプローブすることになり、この場合電子バンチとプローブレーザー間のタイミングジッターを 50 fs (FWHM) に抑えた上で、プローブレーザーの線形チャープ幅を  $\tau_c \approx 600$  fs とすれば、 $T_{res} \approx 40$  fs (FWHM) の時間分解能が見込まれる。次に、ポッケルス EO 結晶の透過特性が系の時間分解能に与える制限に対し、以下 3 点について注意を払う必要がある。

- 1) THz 帯域における吸収特性
- 2) 結晶中を伝搬するバンチ起因のクーロン場とプローブレーザーの速度不整合
- 3) THz 帯域に加え、可視光領域の結晶中での分散

従来 EO サンプリングによる BCD 計測には、無機ポッケルス EO 結晶である ZnTe や GaP が一般的に用いられてきた。しかし、いずれもそれぞれ順に 5 THz と 11 THz 近傍に吸収特性が存在することから、結晶中を伝搬するクーロン場は歪み、時間分解能は  $\sim 130$  fs (FWHM) 程度に制限されてきた。従って、目標とする時間分解能を得るためには、幅広い帯域で透過するポッケルス EO 結晶を導入する必要がある。そこで我々は、その候補の一つとして、有機ポッケルス EO 結晶である DAST (4-*N*, *N*-dimethylamino-4'-*N*'-methyl stilbazolium tosylate) 結晶<sup>[9]</sup>を採用することにした。

### 2.2 横方向電荷分布計測

横方向の BCD 計測の実現可能性を検証するため、実際に 8 つの EO 媒質を仮定した場合の信号強度変調について計算による評価を行った。また計算では、SACLA の運転パラメータをもとに、電子ビームのエネルギーを 8 GeV、バンチ電荷を 100 pC、縦方向の BCD を 30 fs (FWHM) のガウス分布と仮定した。(2) 式より、EO 媒質は可能な限り電子ビームの軸に近づけることが望まれることから、実験ではポッケルス EO 結晶の端と電子ビーム軸の距離を  $r = 2$  mm とした。図 3 に EO 信号強度変調評価で仮定した、BCD の縦方向にスライスしたプロファイルと、配置した 8 つの EO 媒質の相対的な位置関係を示す。ここでプロファイルの縦横比は  $r_{ver} : r_{hol} = 1 : 2$  であり、 $\sqrt{r_{ver} \cdot r_{hol}} = \sqrt{2} \times 40 \mu\text{m} \approx 60 \mu\text{m}$  である。

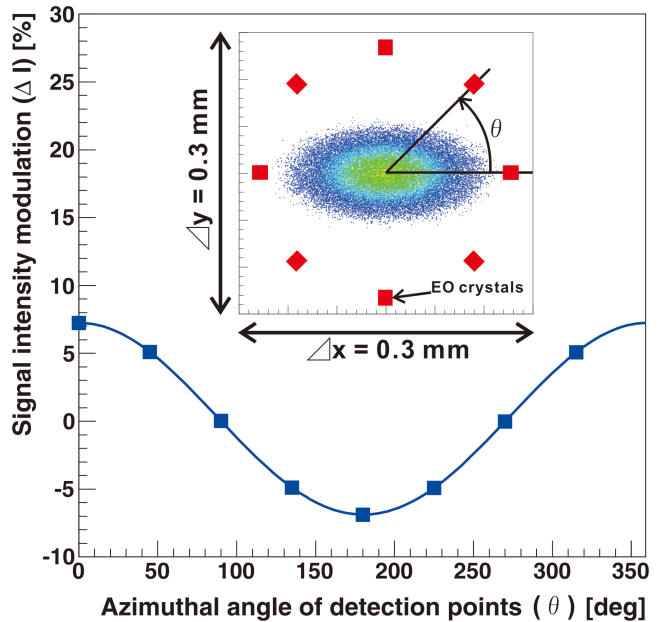


図 3: EO 信号強度変調評価で仮定した BCD の縦方向にスライスしたプロファイルと 8 つの EO 媒質での EO 信号強度の計算結果。

まず、BCD の縦方向スライスプロファイルが図 3 に示すような楕円ではなく真円である場合、それぞれの EO 媒質 ( $r = 2$  mm) での電場は

$$E(r) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \epsilon_0 c r \sigma_b} \quad (3)$$

より、 $\sim 100$  MV/m と見積もられる。ここで  $Q$  はバンチ電荷量、 $\epsilon_0$ 、 $\sigma_b$  はそれぞれ真空における誘電率と BCD の縦方向スライスプロファイルのサイズ (FWHM) である。次に、電子バンチ起因のクーロン場が EO 媒質に作用した際に生じる、EO 効果による媒質の屈折率の変化量 ( $\Delta n$ ) は

$$|\Delta n| = \frac{n_0^3}{2} \{ \xi_p E(r) + \xi_k E^2(r) \} \quad (4)$$

で表される。ここで  $n_0$  は真空中における EO 媒質の屈折率、 $\xi_p$  と  $\xi_k$  はそれぞれ順にポッケルス EO 効果とカー

EO 効果を示す項である。一般に電場が弱い場合は、カー EO 効果はポッケルス EO 効果に比べて無視できるくらいに小さいことが知られているが、100 MV/m 程度の電場が作用する場合は、カー EO 効果は無視できない。従って、このような条件下では、原理的にはポッケルス EO 効果が生じない、カー EO アモルファス媒質を EO サンプリングに採用し、BCD の精密評価を行うべきである。従ってここでは、EO 媒質にカー EO アモルファス媒質を仮定し、その非線形屈折率を  $n_2 \approx 1.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{V}^2$  とした<sup>[10, 11]</sup>。実際にカー EO 媒質の厚さを  $L = 1 \text{ mm}$  とした場合、バンチ電荷分布の縦方向スライスプロファイルが図 3 に示す楕円である場合 ( $I_{sig}$ ) と、前述した真円の場合 ( $I_{org}$ ) との EO 信号強度の変調  $\Delta I$  を

$$\Delta I = \frac{I_{sig} - I_{org}}{I_{org}} \quad (5)$$

と定義した場合の、8 つの EO 媒質での EO 信号強度変調を計算・比較した結果を図 3 に示す。ここで、信号強度  $I$  の定義は

$$I = I_0 \sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda} \Delta n L\right) = I_0 \sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda} \frac{n_2 E^2}{2} L\right) \quad (6)$$

である。図 3 の計算結果から、EO 信号の強度変調は高々 10 % 程度と見積られる。一方、実際の SACLA のビームサイズは  $\sqrt{r_{ver} \cdot r_{hol}} \approx 40 \mu\text{m}$  程度であることから、BCD の横方向の非対称性を検出することは厳しいことが予想される。従って実験においては、広帯域偏光レーザーを導入し、EO 媒質を透過したプローブレーザーの  $s$  波を高い消光比で計測する必要がある。

### 3. 実証実験

2012 年 2 月に大型放射光施設 SPring-8 の SCSS 試験加速器において、スペクトラルデコーディング EO サンプリングによる、BCD 計測の実証実験を行った。実験のセットアップ及びパラメーターを表 1 と図 4 に示す。

表 1: SCSS 試験加速器における実験条件

電子ビーム	
ビームエネルギー	250 MeV
バンチ電荷	~0.25 nC
バンチ長	300 fs (FWHM)
繰り返し周波数	30 Hz
ピーク電流	> 300 A
プローブレーザー	
パルス幅	~ 5 ps (FWHM)
バンド幅	8 nm @ 795 nm (FWHM)
レーザーパワー	~ 5 $\mu\text{J}$
繰り返し周波数	30 Hz

パルス幅 ~ 5 ps (FWHM) / バンド幅 8 nm @ 795 nm (FWHM) に整形したプローブレーザーをレーザーハッチから加速器収納部内に送り、バンチ長 300 fs (FWHM)

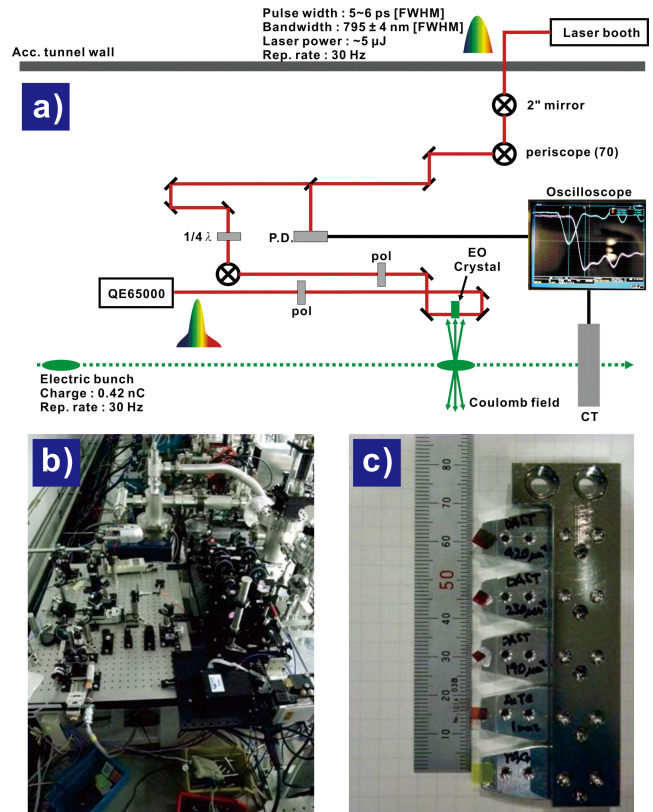


図 4: SCSS 試験加速器における、EO サンプリングによる BCD 計測実証実験のセットアップ a)、b) と実験で使用したポッケルス EO 結晶 (上から順に 420、230、190 mm 厚の DAST、1 mm 厚の ZnTe) 及び、結晶位置合わせ用 0.5 mm 厚 Ce:YAG 蛍光体 c)。

程度の電子バンチとのタイミングをポッケルス EO 結晶の位置で揃えよう、ストリークカメラで粗調整を行った。電子バンチは EO 計測チェンバー下流に設置された CT の信号を、プローブレーザーは収納部内光学テーブルに配置したフォトダイオードの信号を参照し、CANDOX によるプローブレーザーの遅延で両者のタイミングの微調整を行った。次に Ce:YAG 蛍光体を電子ビームと同じ高さに設置し、蛍光体を徐々にビーム軸に近づけながら、CCD カメラで遠隔監視を行い、蛍光体が電子ビームのハローで発光しない位置を決定した。蛍光体端から電子ビーム軸までの距離 ( $r$ ) は 1.4 mm であった。図 4 c) に Ce:YAG 蛍光体及び、4 種類のポッケルス EO 結晶をマウントした治具を示す。図 4 c) において、電子ビームの進行方向は紙面の表から裏へ垂直に向かう方向である。また、電子ビーム軸に対して、Ce:YAG 蛍光体と各ポッケルス EO 結晶の端は一律に揃えて取り付けられている。

加速器の電子ビームスリットを調整しながら、ZnTe による EO 信号強度のバンチ電荷量依存を計測・比較した結果を図 5 に示す。また、ZnTe のポッケルス EO 効果のみを考慮した、EO 信号強度の計算結果も上書きで示す。EO 信号強度の測定値は、冷却 CCD 搭載の分光器 (オーシャンオプティクス社製 QE65000) で計測した EO 信号強度を、シングルガウシアンでフィットした結

果 (10 ショット分の平均値) を採用している。バンチ電荷量が 0.28 nC を超えてから、EO 信号の強度は飽和した。他方、バンチ電荷量が少なくなるほど、分光器で計測したスペクトルの S/N が悪化するため、EO 信号強度の評価が困難となる。次に、バンチ電荷量を 0.28 nC (平均) に固定し、無機ポッケルス EO 結晶 (1 mmt ZnTe) と有機ポッケルス EO 結晶 (230  $\mu$ mt DAST) の EO 信号強度比較を図 6 に示す。

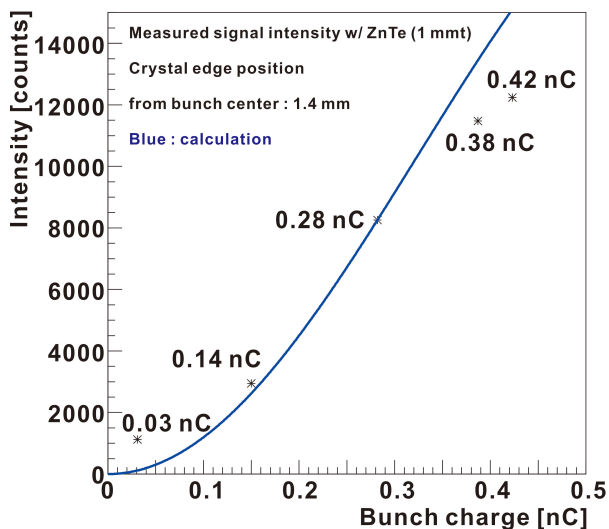


図 5: EO 信号強度のバンチ電荷量依存性。

図 6 において、いずれも分光器で測定した EO 信号強度スペクトル (1 ショット) を黒で、電子ビームを出していない際に測定したバックグラウンドスペクトル (40 ショット分の平均) を赤で、信号スペクトルとバックグラウンドスペクトルの差分を青で示した。ZnTe による EO 信号強度に比べ、DAST のそれは約 2 倍であることに加え、信号の立ち上がりが極めてシャープ、すなわち時間応答が優れていることが判る。また、DAST を用いた EO 信号強度スペクトルにおいては、780 ~ 790 nm 近傍の強度成分については、現在検証を進めているところではあるが、可能性の高い要因の一つとしてウェーク場が挙げられる。一方、DAST による EO 信号計測は、信号の捕捉開始から 40 分程度で信号が得られなくなった。主として放射線損傷を疑い、現在、実際の測定環境を再現した放射線損傷の定量評価に取り組んでいる。

尚、有機ポッケルス EO 結晶 (DAST) を用いた EO サンプルングでの BCD 測定に、我々は世界で初めて成功したことを付け加えておく。

#### 4. まとめ

我々は、3D-BCD 計測を非破壊・シングルショット・リアルタイムで、且つ 30 fs (FWHM) の時間分解能で行うシステムを構築している。この 3D-BCD 計測は、スペクトラルデコーディングによる EO サンプルングがベースとなっており、1) 電子ビーム軸周りに配置した 8 つのポッケルス結晶、2) 線形チャープで広帯域にわ

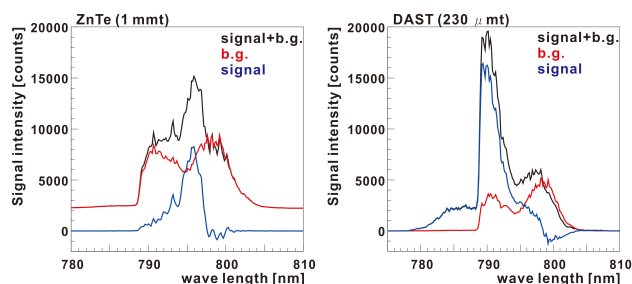


図 6: 無機ポッケルス EO 結晶 (1 mmt ZnTe) と有機ポッケルス EO 結晶 (230  $\mu$ m DAST) による EO 信号強度の比較。平均バンチ電荷量はいずれも 0.28 nC。

たり矩形に強度分布を持ち、且つ偏光方向が放射線状に配向した円環のプローブレーザー、3) 1 オクターブ帯域幅で、消光比の極めて高い光学部品から構成される。これらの構成により、BCD の縦方向成分計測に限らず、横方向成分の同時計測も実現可能とする。2012 年 2 月に我々は 3D-BCD モニターシステムの原理実証試験を SPring-8 内 SCSS 試験加速器にて行い、一般的に EO サンプルングで使用される無機ポッケルス EO 結晶 ZnTe に加え、これまで例のない有機ポッケルス EO 結晶 DAST を用いた BCD に世界で初めて成功した。ZnTe に比べ、DAST による EO 信号は 2 倍程度強く、更に時間応答も優れていることが判った。一方で有機ポッケルス EO 結晶の放射線損傷も無視できないため、損傷の定量評価にも取り組んでいる。

#### 参考文献

- [1] G. Materlik et al., TESLA Technical Design Report, PART V (2001).
- [2] J. Rivers, SCSS X-FEL Conceptual Design Report, RIKEN (2005).
- [3] O. H. Altemueller, et al., Rev. Sci. Instr., **35**, 438 (1964).
- [4] H. Ego, et al., in Proceedings of EPAC08, Genova, Italy, 1098 (2008).
- [5] X. Yan, et al., Phys. Rev. Lett., **85**, 3404 (2000).
- [6] I. Wilke, et al., Phys. Rev. Lett., **88**, 124801 (2002).
- [7] S. Casalbuoni, et al., Phys., Rev., ST-AB, **11**, 072802 (2008).
- [8] Y. Otake, et al., in Proceedings of EPAC08, Genova, Italy, 1224 (2008).
- [9] X.-C. Zhang, et al., Appl. Phys. Lett., **61**, 3080 (1992).
- [10] M. Sheik-Bahae, et al., Opt. Comm. **142**, 294 (1997).
- [11] R. L. Sutherland, Handbook of nonlinear optics, Marcel Dekker, New York, 1996.