

Lバンド RF デフレクタによる SACLA 入射部での電子ビーム時間構造測定 TEMPORAL STRUCTURE MEASUREMENT OF AN ELECTRON BEAM AT THE SACLA INJECTOR USING AN L-BAND DEFLECTOR

前坂 比呂和^{#,A)}, 大島 隆^{A),B)}, 松原 伸一^{B)}, 原 徹, 田中 均^{A)}, 大竹 雄次^{A)}

Hirokazu Maesaka^{#,A)}, Takashi Ohshima^{A),B)}, Shinichi Matsubara^{B)}, Toru Hara^{A)}, Hitoshi Tanaka^{A)}, Yuji Otake^{A)}

^{A)} RIKEN SPring-8 Center

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

Abstract

In order to measure the temporal structure of an electron beam at the injector part of the x-ray free electron laser (XFEL) facility, SACLA, we designed and produced a L-band transverse deflector system. Since the injector part is equipped with many acceleration cavities, the phase and amplitude of each cavity should be precisely adjusted to produce an electron beam with a designed temporal structure. In SACLA, the electron beam generated by a thermionic gun is firstly compressed by the velocity bunching process. Therefore, the goal of the L-band deflector is to measure the temporal profile after the velocity bunching with a bunch length from 10 ps to 1 ns and to adjust the phase and amplitude of the acceleration cavities in the injector. In order to cover the wide measurement range and to correct a rotating kick by the longitudinal magnetic field of a solenoid lens, we designed a L-band deflecting cavity that can generate an arbitrary polarization including both linear and circular ones. The produced cavity was installed into the SACLA injector and the temporal profile of the electron beam was measured. A 100 ps-long bunch was appropriately streaked by the deflector for both vertical and horizontal direction, and the temporal resolution was estimated to be approximately 10 ps. An energy vs. time phase space structure was also measured at the dispersive part of a bunch compressor chicane. Thus, the L-band deflector system provides helpful information for machine tuning.

1. はじめに

X線自由電子レーザー (XFEL) 施設 SACLA [1] は供用開始以来さまざまなユーザ実験に安定に XFEL を供給し続けている。しかしながら、一週間以上の長期停止期間後に SACLA を立ち上げた際に、XFEL 性能を最大化するのに時間と労力を要することが問題となっている。そのひとつの理由として、SACLA 加速器入射部における時間方向ビーム形状を測定することができないため、入射部の加速空洞の位相・振幅が適切に再現できていないことが挙げられる。そこで、SACLA 入射部での時間方向ビーム形状を測定することができれば加速器の調整に役に立つものと考えられる。

SACLA 入射部での時間方向ビーム形状測定が有効であることを示すため、SACLA 加速器の構成を復習しておくこととする。SACLA 加速器のレイアウトを Figure 1 に示す。電子ビームは 500 kV, 1 A の熱電子銃により生成され、高圧パルスビームチョッパで 1 ns のバンチが切り出される。その後、238 MHz バンチャ空洞により速度変調が与えられてバンチングし、476 MHz ブースタ空洞により 1 MeV まで加速される。それに続く Lバンド (1428 MHz) 補正空洞にて減速することにより、正弦波の曲率に起因する縦方向位相空間分布の曲がりを補正して線形化する。そして、Lバンド APS 空洞 (L-APS) にてオフcrest 加速し、C バンド補正空洞で再び縦方向位相空間分布を線形化した上で1つ目のバンチ圧縮器 (BC1) を通すことでバンチ圧縮する。その後も同様に、S バンド加速器 4 ユニットでのオフcrest 加速後に BC2 にて、C バンド

加速器 12 ユニットでのオフcrest 加速後に BC3 にてそれぞれバンチ圧縮することにより、XFEL に必要な短バンチ (< 30 fs)、かつ、高ピーク電流 (> 3 kA) の電子ビームを生成する。その最終的なバンチ長は、既設の C バンドデフレクタ (C-TDS) [2] にて測定することができる。

上記のように、SACLA では BC1 までの入射部に 5 台もの加速ユニットがあり、それらの位相・振幅を精密に合わせることで所望の縦方向ビーム形状を作り出している。そのためには縦方向位相空間分布を知る必要があるが、もともとの設計では、バンチ内のエネルギー分布が BC1 のエネルギー分散部のビーム形状から測定可能となっているだけで、時間分布が測定できなかった。そのため、縦方向位相空間分布を再現することができず、XFEL 性能の再現にも苦勞するのではないかと考えられる。とくに、入射部は電子ビームの初期条件を決める部分であるため、そこが再現できていなければ、それ以降の S バンド、C バンド加速ユニットを C-TDS を頼りに調整しても再現することは困難である。逆に、BC1 までの縦方向位相空間分布が再現できれば、その初期条件と相対論領域の幾何学的なビーム力学により、それ以降のバンチ圧縮は C-TDS を使って調整可能となるものと考えられる。

そこで、SACLA 入射部の速度変調バンチングの性質を測定するための高周波デフレクタシステムを設計・製作することとした。この部分では、バンチ長は調整により 10 ps から 1 ns まで可変であるので、広い測定レンジがあることが望ましい。また、バンチ長は最短で 10 ps 程度まで縮められるので、最高で数 ps の時間分解能が必要となる。さらに、入射部ではビームの収束にソレノイドレンズが使用されているため、その進行方向磁場により、デフレクタで掃引したビーム形状が回転してしまう。そのた

[#] maesaka@spring8.or.jp

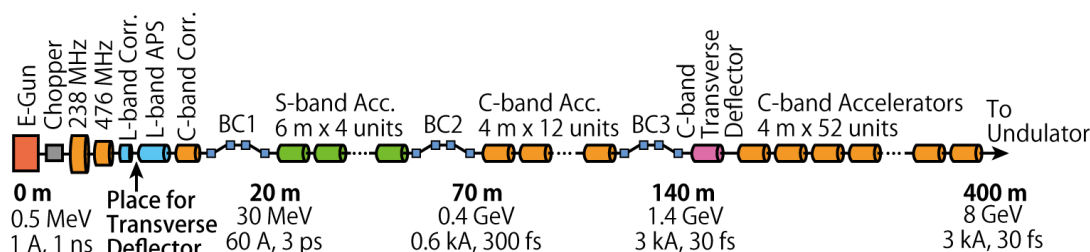


Figure 1: Schematic layout of the SACLA accelerator.

め、デフレクタの偏波を回転できるようにしておくことも重要である。このような条件で入射部用のデフレクタシステムを考えることとした。本稿では、このようなデフレクタシステムの設置場所や周波数の選択、および、デフレクタ空洞 (TCAV) の設計・製作・試験をおこなった結果について報告する。

2. デフレクタシステムの設計

2.1 デフレクタシステムの設置場所

このデフレクタシステムは、速度変調バンチングの測定を目的としているため、TCAV は速度変調バンチング部の末端に設置することが望ましい。選択肢としては、L-APS の上流、または、下流のどちらかが考えられる。上流側でのビームエネルギーは約 1 MeV であるので、たとえば、数 10 mrad のキックを与えるためには数 10 kV の横方向電圧があればよい。一方、下流側に設置する場合、ビームエネルギーが約 30 MeV となるので、さきほどの 30 倍のキック電圧が必要となる。高いキック電圧を得るには、より大電力の高周波源や、より長い多セル空洞が必要となるため、スペースや費用がかさむこととなる。そこで、Figure 1 に示すように L-APS の上流に TCAV を設置することとした。こうすることで、238 MHz バンチャ空洞、476 MHz ブースタ空洞、L バンド補正空洞の 3 つの空洞の応答を測定することが可能となる。そこでのビームパラメータと TCAV の要求性能を Table 1 にまとめた。

L-APS 上流に TCAV を設置した場合、スペースの関係で、キック後のビーム形状は L-APS の下流のスクリーンモニターで見なければならぬ。残念ながら、1 MeV 程度の低エネルギービームは L-APS で加速しないかぎり下流まで到達できない。そこで、TCAV でキックしたあと、L-APS で加速されたビームの形状を見なければならぬ。そのため、与えたキック量が L-APS の加速でどう振る舞うかなどの考慮が必要となる。また、この部分にはソレノイ

Table 1: Beam Parameters and Requirements for the TCAV

Beam energy	~ 1 MeV
Bunch length	10 ps – 1 ns (typically 30 ps)
Normalized emittance	1 mm mrad
Time resolution	< 3 ps for a 10 ps bunch
RF Field polarization	Linear and Circular (Selectable)
Beam size	~ 1 mm FWHM at the screen
Screen size	10 mm in diameter

ドレンズが使われているため、進行方向磁場成分により、横方向運動量が回転力を受ける。そのため、TCAV のキック方向が制御できるようにしておかないと、スクリーン上での時間軸が傾いて時間分布が見づらくなってしまふことに注意が必要である。

2.2 測定レンジと偏波制御

速度変調バンチング後のバンチ長は、上流の加速空洞の位相・振幅によって、10 ps ~ 1 ns と可変で、通常の XFEL 運転では 30 ps ほどである。本デフレクタシステムはこのような広い測定レンジをカバーしつつ、十分な時間分解能を持つことが求められる。

まず、測定レンジを広げるため、われわれは直線偏波と円偏波を使い分けることを考えた。前節にて、ソレノイドレンズによる回転の効果を補正するために偏波方向を制御することの必要性に触れたが、それを実現するには、Figure 2 に示すように TCAV に入力ポートを 2 つ用意し、それを直角に交わるように設置すればよい。このとき、各入力高周波の位相・振幅を制御することにより、直線偏波の角度が任意に設定できるだけでなく、円偏波に設定することも可能である [3]。なお、Figure 2 では、上部にそれぞれ斜め 45 度に付けられたポートから同位相・同振幅で高周波信号を入れることで、磁場を水平方向に制御した様子をシミュレーションしている。

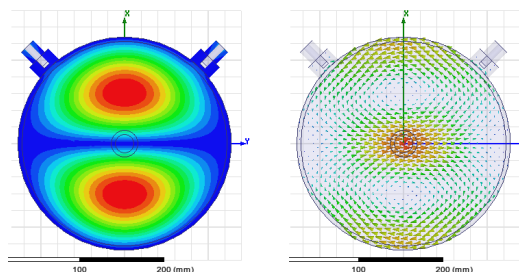


Figure 2: Electric field contour plot (left) and magnetic field vector plot (right) of the TM110-mode in the TDS.

直線偏波を利用する場合、デフレクタシステムのセットアップは Figure 3 のようになる。ゼロクロスからの位相が ϕ ずれたタイミングで通過した電子は、TCAV でキックを受けて、スクリーン上で下式 (1) に示す位置 y に到達する [3]。

$$y = \frac{m_{12} e B_0 l T \phi}{p_0} = \frac{\sqrt{\beta_0 \beta_1} \sin \psi}{p_0} e B_0 l T \phi \quad (1)$$

ここに、 $m_{12} = \sqrt{\beta_0 \beta_1} \sin \psi$ は TCAV からスクリーンまでの転送行列の (1,2) 要素、 β_0, β_1 はそれぞれ TCAV とスクリーンの位置でのベータ関数、 ψ は TCAV-スクリーン間のベータatron位相差、 e は電荷素量、 B_0 はピーク

磁場、 l は TCAV の有効長さ、 p_0 は電子ビームの進行方向運動量である。また、 T は飛行時間係数

$$T \equiv \frac{\sin \frac{\omega l}{2\beta c}}{\frac{\omega l}{2\beta c}} \quad (2)$$

で、 ω は共振各周波数、 βc は電子ビームの速度である。このとき、スクリーン上でのビーム半径 σ_y のビームを掃引した場合、時間分解能 σ_t は

$$\sigma_t = \frac{p_0 \sigma_y}{|m_{12}| e B_0 l T \omega} = \frac{p_0 \sqrt{\epsilon}}{\sqrt{|\beta_0|} |\sin \psi| e B_0 l T \omega} \quad (3)$$

となる [3]。ここに、 ϵ はビームのエミッタンスである。なお、入射部ではビーム径がスクリーンモニタの分解能に比べて十分大きいので、スクリーンモニタの分解能の効果は無視した。直線偏波の場合、キック力にあたる BL 積 $B_0 l T$ を上げれば時間分解能が良くなるが、測定レンジを考えると、正弦波の線形部分のみしか使えないので、高周波信号周期の 1/4 ほどまでのバンチ長しか一度に測定できない。

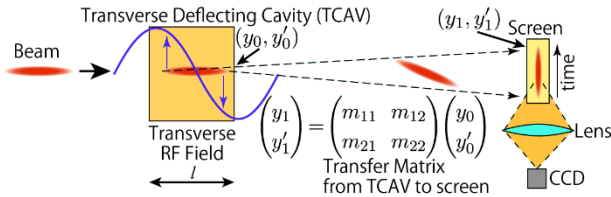


Figure 3: Schematic setup of a transverse deflector system with a linear polarization.

そこで、より広い測定レンジをカバーするため、円偏波でキックすることを考える。このときのセットアップは Figure 4 のようになる。TCAV のキック力の絶対値が一定で、キック方向だけが回転するので、スクリーン上ではビームが円弧を描くような像が得られる。この場合、高周波信号周期がほぼ 100% 使えるので、直線偏波の場合に比べて長い測定レンジでの測定が可能となる。スクリーン上の円弧の半径 r は、

$$r = \frac{|m_{12}| e B_0 l T}{p_0} = \frac{\sqrt{|\beta_0 \beta_1|} |\sin \psi| e B_0 l T}{p_0} \quad (4)$$

となる [3]。この半径はスクリーン内に像が十分に収まるようにキック力で調整する必要がある。時間分解能の表式は (3) と一致するが、スクリーンからはみ出さないようにするとキック力が上げられないので、直線偏波に比べると時間分解能は劣ることになる。このように、直線偏波と円偏波を使い分けることで測定レンジや時間分解能を切り替えて測定することができる。

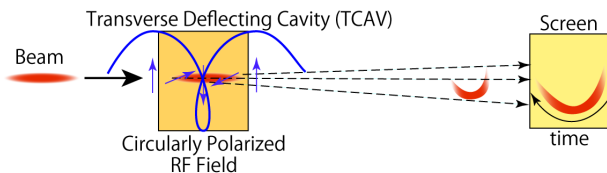


Figure 4: Schematic setup of a transverse deflector system with a circular polarization.

2.3 共振周波数、時間分解能と必要な BL 積

前節のことを踏まえた上で、まず TCAV の周波数を選択したい。時間分解能を高めるためには周波数は高いほうが有利である。また、TCAV でのバンチ長は最長で約 1 ns であるので、周波数は 1 GHz 程度にするのが望ましい。ただし、TCAV を L-APS の上流に設置するため、L-APS の位相アクセプタンスに捕捉されたものしかそもそも測定できない。そこで、TCAV の共振周波数は 1 GHz より少し高めめの L バンド (1428 MHz) とすることとした。実際、L-APS での位相アクセプタンスを見積もると、約 240 度となった [3,4]。これは約 0.47 ns に相当する。これだけのバンチ長が測定できれば大抵の情報はえられるので、この設計で進めることとした。

次に、必要な時間分解能から必要な BL 積を見積もる。TCAV でのバンチ長は最短で 10 ps 程度となるため、時間分解能は 3 ps 程度かそれ以下であることが求められる。この 3 ps の時間分解能を得るのに必要な TCAV の BL 積 $B_0 l T$ は、(3) より、

$$B_0 l T = \frac{p_0 \sigma_y}{|m_{12}| e \sigma_t \omega} \approx 2.8 \times 10^{-4} \text{ [Tm]} \quad (5)$$

となる [3]。ここで、ビーム半径 σ_y は Table 1 の FWHM ビームサイズの半分の 0.5 mm とし、 $|m_{12}|$ は L-APS のパラメータなどから 0.3 と見積もった。このとき、クレスト位相でのキック角 y'_{\max} は、

$$y'_{\max} = \frac{e B_0 l T}{p_0} \approx 60 \text{ [mrad]} \quad (6)$$

となる。

最後に、円偏波での測定の時間分解能を求めておく。この場合、キック力はスクリーンのサイズで制限される。直径 10 mm のスクリーンの場合、ビームの像の半径は 3 mm 程度までしか広げられない。このとき、時間分解能は (1), (3) より約 20 ps となる。円偏波での測定ではバンチ長 100 ps 以上のビームが対象となるので、この程度の時間分解能が得られれば問題ないと考えられる。

3. L バンドデフレクタ空洞の設計と製作

第 2 節でのシステム設計をもとに、L バンド TCAV を設計・製作した。本節では TCAV の空洞について詳しく述べる。

3.1 空洞設計

設計した TCAV の概略図を Figure 5 左に示す。なるべくコンパクトなものとするため、単セル空洞とした。入力ポートは斜め 45 度に 2 つ設置して、直交する 2 つの TM110 モードをそれぞれ励振できるようにした。チューナは 3 つ設け、2 つは各モードの周波数調整が、残り 1 つはモード間の直交性の調整ができるようにした。水平偏波、垂直偏波のそれぞれの高周波信号を確認できるよう、ピックアップアンテナも 2 つ設けた。

この形状の TCAV にて 3 次元高周波電磁界シミュレータ HFSS [5] によるシミュレーションをおこない、各種パラメータを決定し、Table 2 にまとめた。TCAV の長さは高周波の波長の約 1/4 にあたる 60 mm とした。このときの飛行時間係数は $T \approx 0.85$ となり、損失はわずかである。

シミュレーションによると無負荷 Q 値は 2.3×10^4 となり、それに合わせて入力ポートの外部 Q 値を 1.6×10^4 にすると、負荷 Q 値は 9.5×10^3 となった。このとき、結合度 β は 1.44 となり、若干の強結合で高周波の充填時間が少し短めになるようにした。横方向シャントインピーダンスは $2.1 \text{ M}\Omega$ と見積もられ、SACLA で L バンド補正空洞に使用されている 2.5 kW 半導体アンプで励振した場合に 1 MeV の電子ビームが最大 63 mrad でキックできる計算となった。これは、要求値の 60 mrad を満たしている。

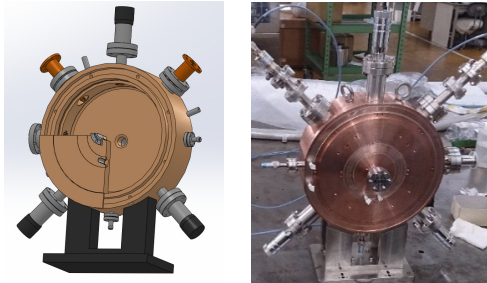


Figure 5: Schematic drawing (left) and photograph (right) of the L-band TCAV.

Table 2: Design Values of the L-band TCAV

Resonant Frequency	1428 MHz
Resonant Mode	TM110 (linear and circular)
Shunt Impedance	$2.1 \text{ M}\Omega$
Input Power	2.5 kW max. for each port
Maximum Kick Angle	60 mrad for 1 MeV electrons
Cavity Inner Radius	256 mm
Cavity Inner length	60 mm
Unloaded Q (Q_0)	2.3×10^4
Loaded Q (Q_L)	9.5×10^3
External Q (Q_{ext})	1.6×10^4
Filling Time	$6.6 \mu\text{s}$

3.2 空洞の製作と低電力測定結果

上記のように設計した TCAV を実際に製作し、その低電力高周波測定をおこなった。出来上がった TCAV の写真を Figure 5 右に示す。入力ポートやピックアップアンテナの結合度は、大気中で測定をしながら調整し、真空中での測定で最終確認した。チューナなどの調整もおこない、最終的に真空中で得られた低電力測定結果を Table 3 に示す。無負荷 Q 値はシミュレーションの約 8 割となり、負荷 Q 値も同様の傾向となったが、最低限の性能はクリアしている。実際、シャントインピーダンスが 2 割ほど減る計算となるため、キック力が 1 割ほど減ることになるが、この程度であれば問題にならない。ポート間のアイソレーションも測定し、約 34 dB であった。この程度のアイソレーションがあれば偏波の制御などで大きな問題にはならないと考えられる。

Table 3: Low-Level RF Measurement Results

Parameter	Port 1	Port 2
Resonant Frequency	1428.0 MHz	1428.0 MHz
Unloaded Q (Q_0)	1.78×10^4	1.80×10^4
Loaded Q (Q_L)	8.19×10^3	8.35×10^3
External Q (Q_{ext})	1.51×10^4	1.56×10^4

4. 電子ビームの測定

実際の電子ビームを測定するため、TCAV を第 2 節で示した場所にインストールし、2 つの入力ポートに 2.5 kW 半導体アンプ 2 台から $10 \mu\text{s}$ 幅のパルス高周波電力を印加する準備をおこなった。高周波電力の位相・振幅制御は、VME-DA 変換ボードと L バンド IQ 変調器を組み合わせておこなった [6]。まず、TCAV のコンディショニングをおこなうため、真空度を見ながら小さい入力パワーから入れていき、数時間後にはほぼ最大の高周波電力が印加できるようになった。その後、空洞内高周波電力の偏波を制御するため、水平・垂直のピックアップ信号を見ながら各ポートの位相・振幅の調整をおこなった。

準備が整ったところで実際の電子ビームを掃引して測定をおこなった。ここでは、XFEL の通常の運転条件での直線偏波による時間方向ビーム形状測定の結果を示すことにする。まず、掃引する前の L-APS 下流のビーム形状を Figure 6 に示す。ビームサイズは約 1 mm FWHM で、画面の縦方向の長さは約 10 mm である。これを、スクリーン上で垂直・水平掃引されるように TCAV の直線偏波方向を調整した上でとった時間構造を Figure 7 に示す。垂直・水平とも適切に掃引されていることがわかる。このときの TCAV への入力高周波電力は 2 つのポート合わせて約 1.1 kW で、バンチの全体像が見えるよう低めの電力とした。このとき、位相を振ったときのビーム位置の変化から時間と位置の関係を求めると 0.07 mm/ps となった。このことから、テイルも含めたバンチ長は 100 ps 程度で、その状態で 10 ps 程度の時間分解能が得られていることがわかる。また、バンチ内の縦方向位置によりビームサイズが変わっていることも見て取れる。これは、空洞内の高周波位相によって収束力が変わる効果や、エネルギーチャープにより色収差が出ていることによるものと考えられる。

次に、エネルギー対時間の縦方向位相空間分布をとるため、BC1 のエネルギー分散部のスクリーンモニターでのビーム形状を測定した。その結果を Figure 8 に示す。左側の画像は TCAV で掃引していないもので、ビームのエネルギー分布のみが見られている。このとき、高エネルギー部分は画面左側である。それを垂直方向に掃引したものが右側の画像である。画面上側がバンチの先頭に相当し、エネルギー対時間の分布が適切に得られていることがわかる。

なお、今回は通常の XFEL 運転条件での結果のみ示したが、円偏波による長いバンチの測定などは今後の課題である。TCAV の円偏波の調整自体はできていることはビームでも確認しているので、収束系の調整などをおこなって適切な時間構造を測定できるようにしていく予定

である。

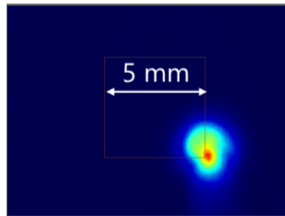


Figure 6: Beam profile after L-APS.

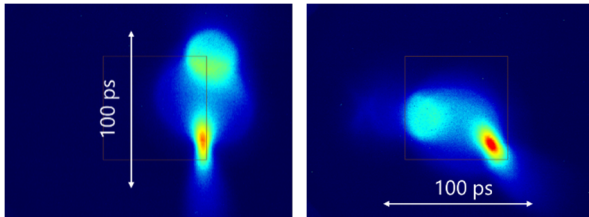


Figure 7: Beam profile after L-APS with vertical streaking (left) and horizontal one (right). The bunch head is top (left) for vertical (horizontal) streaking.

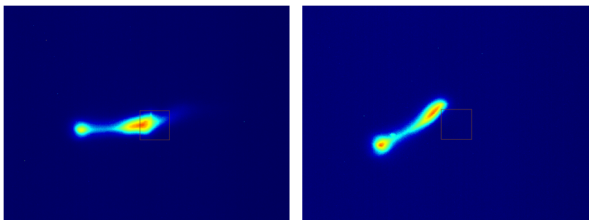


Figure 8: Beam profile at the dispersive part of BC1 without streaking (left) and vertical streaking (right). The high energy part is left for both images and the bunch head is top for the right image.

5. まとめ

SACLA 入射部のビームの時間構造を測定するため、L バンドデフレクタシステムを設計・製作した。入射部の速度変調バンチング部分では、バンチ長が 10 ps ~ 1 ns の間で可変であるので、広い測定レンジに対応できるよう、直線偏波と円偏波を使い分けられる TCAV を設計した。それに加え、直線偏波の方向も制御できるため、ソレノイドレンズによるキック方向の回転も補正できるという特長も持つ。直線偏波は短いバンチ長の測定に有効で、キック力をより大きくすることで時間分解能を高めることができる。一方、円偏波は高周波の周期の大部分を伝えるため、長いバンチの測定に有効である。この TCAV を速度変調バンチングの終端部に設置することで、1 MeV の電子ビームを掃引し、最高で 3 ps の時間分解能が得られるシステムとした。これを実現するための L バンド単セルの TCAV を設計・製作し、低電力測定の結果、ほぼ設計どおりのものができていることを確認した。実際にこの TCAV でビームを掃引した結果、偏波方向の制御が適切におこなえ、垂直・水平それぞれのビーム掃引ができることを確認した。また、エネルギー分散部での縦方向位相空間分布の測定ができることも確かめた。今後、円偏波などの測定も進めていき、SACLA 入射部の理解

を深めていきたいと考えている。

参考文献

- [1] T. Ishikawa *et al.*, Nature Photonics **6**, 540 (2012).
- [2] H. ego *et al.*, Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res., Sect. A **795**, 381 (2015).
- [3] H. Maesaka *et al.*, “Design of a Compact L-Band Transverse Deflecting Cavity with Arbitrary Polarizations for the SACLA Injector”, Proceedings of IBIC2015, Melbourne, Australia, pp. 22–26 (2015).
- [4] R. Helm, R. Miller, Particle Dynamics, in: P. M. Lapostolle, A. L. Steptier (Eds.), Linear Accelerators, North-Holland Publ. Co., Amsterdam (1970).
- [5] <http://www.ansys.com>
- [6] Y. Otake *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **19**, 022001 (2016).