

レーザーによる量子ビーム診断技術のフロンティア

富澤 宏光

The Forefront of Charged Particle Beam Diagnoses Utilizing Optical Laser Technologies

Hiromitsu TOMIZAWA

The leading-edge beam monitors for the current charged particle accelerators utilize optical laser technologies. In this paper, we take a general view of laser technologies in the forefront beam monitors developed for two state-of-the-art accelerator projects, particularly spin-polarimetry and microscopic transverse beam-size monitors for ILC (International Linear Collider) and ultrafast longitudinal bunch monitors for SACLA (Spring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser). The prospective laser utilization of beam diagnoses is generally discussed in relation to the points we must consider towards future ultimate accelerators.

Key words: electro-optic sampling, ultrafast bunch length monitor, beam diagnostics, terahertz technology, single-shot non-destructive beam monitor, International Linear Collider (ILC), X-ray Free Electron Laser (XFEL)

荷電粒子線加速器のビーム診断技術には電氣的な方法が一般的に用いられており、標準的なビーム電流やビーム重心位置（電荷中心）などのモニター機器については技術的な完成度が高い。特に、タイミング等の精密な計測技術においてはRF（radio frequency）技術が広く用いられている。本稿では、レーザーを用いた量子ビーム診断技術について具体例を挙げながら解説する。現状では、レーザー技術と完全に融合した量子ビーム診断技術が出現しているとはいいがたく、計測原理も従来からのものに基づいているため、まだ融合初期段階にある。

量子ビームモニターとは、加速器計画全体を通しての戦略目標を達成するために、体系的に設計され無駄なく配置されてこそ意味がある計測機器類である。加速器運転の観点からビームモニターを大きく2つに分類するならば、加速器要素のテストベンチ段階からビーム・コミッションング（「火入れ」の全系調整運転）時期に重要視するモニター類と、本格稼働後の定常運転時に入ってから時々刻々と変化する外乱によるビーム・パラメーターを追跡することで、量子ビーム性能の維持と向上を総合力として実現するモニター群とに分けられよう。本稿で取り扱うビー

ム診断系はどちらかというと前者に属し、高性能・多機能ではあるが発展途上のものが多いのでまだ確立されたものではない。私が読者に期待するのは、これからご紹介する個々のモニターの技術的な側面に捉われるのではなく、その特徴を捉えたレーザーの応用方針と計測原理の組み合わせの妙を各人が読み取っていただけることである。

ここでは、レーザーを用いた量子ビーム診断技術の開発が行われている先端加速器プロジェクトとして、まだ計画段階の国際リニアコライダー¹⁾（International Linear Collider, 略称 ILC）と、国家基幹技術のひとつとして建設・整備され、すでに供用開始している SACLA²⁾（Spring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser）を代表例として挙げながら、それぞれの加速器システムにおけるビーム診断系が開発された背景と、このような特殊なビーム診断技術が必要となった経緯がわかるように解説していく。最後に、これらのモニターの実例を参考にして、レーザー先端技術を用いた量子ビーム診断の今後について展望しながら議論することにする。

（公財）高輝度光科学研究センター（Spring8）XFEL 利用研究推進室（〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1） E-mail: hiro@spring8.or.jp

1. 国際リニアコライダー計画 (ILC) における量子ビームのレーザー診断技術

ILC は全長 31 km になる、計画段階にある巨大実験装置を作る国際共同プロジェクトである。全長 11.3 km の電子・陽電子主線形加速器で加速した 250 GeV の高エネルギーのスピンの偏極した電子と陽電子を高密度で衝突させ、宇宙の始まりであるビッグバンからピコ秒後という超高エネルギー状態を実現し、素粒子が質量を獲得する以前の初期宇宙の状態を再現するのが目的である。最終的には、重心エネルギーを 500 GeV から 1 TeV に倍増させるため、全長が 50 km になる予定で、実現すれば世界最大の衝突型加速器になる (エネルギー・フロンティア)。現在世界最大の衝突型円形加速器は、欧州原子核研究機構 (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, 略称 CERN) の円周 27 km (JR 山手線の一周に相当) の大型ハドロン衝突型加速器 (Large Hadron Collider, 略称 LHC) である。ILC ではこの LHC で 2012 年に発見されたヒッグス粒子の性質を詳細に調べることで質量生成のメカニズムを明らかにし、超対称性などの未知の素粒子を見つけるのが研究目的である。このとき、注目する素粒子反応の単位時間当たりのイベント数は、反応断面積に比例する。この比例定数をルミノシティーといい、衝突させる量子ビーム・パラメーターによって決定する量である。ILC のピークルミノシティー設計値は $\sim 2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ と、衝突点でビームサイズをナノメートルまで絞り込むことで、1 つの粒子を繰り返して衝突に関与させる周回方式の LHC と同等の値としている。さらに、ヒッグス粒子生成に関する計測のバックグラウンドとなる W^+W^- ウィークボソン散乱を抑えて、フェルミオン対生成などのルミノシティーを実効的に増大させるために、少なくとも電子ビームと陽電子ビームのうちひとつはスピンの偏極させることを計画している。

ILC を構成する 2 本の主線形加速器は電子と陽電子を対向させて加速する。スピンの偏極した電子バンチ (パルス化された個々の集団) と陽電子のバンチは、5 GeV まで加速された後、放射減衰を利用したビームエミッタンス減衰リング (damping ring, 略称 DR) で周回蓄積中に高品質化されてから、主線形加速器に入射される。加速前に約 2.6 km のビームバンチ圧縮部があり、バンチ長を時間にして 1 ps (RMS) まで縦に圧縮する。また、加速器から衝突点までには最終収束部が設置され、衝突点で水平方向 730 nm (RMS)、垂直方向 7.7 nm (RMS) までビームを絞り込む。電子・陽電子ビームのバンチ列は繰り返しが 5 Hz の約 1 ms の長さのマクロバンチ内に、3 MHz のマイクロバンチを構造としており、マクロバンチの平均ビーム電

流値は 10 mA にもなる。このマクロパルス的な大電流ビームによってモニター自身が破壊されない、「大電流ビーム耐性」という意味での非破壊性能が求められる。そのため、レーザーを用いた量子ビーム診断が特殊な用途のために開発されている。特に ILC では、後に述べる X 線自由電子レーザー (X-ray free electron laser, 略称 XFEL) の SACLA と比べ、ビーム進行方向 (縦方向) に長く、横方向 (空間的) に細く絞られたビームを計測することが求められる。したがって、空間分解能を特に重視したビームモニターの開発が行われている。

ILC 加速器で使用されるレーザーを用いた量子ビーム診断用のモニターとしては、レーザーワイヤモニター (マイクロビームのサイズ計測)、ポラリメーター (スピンの偏極度計測) やレーザー干渉縞モニター (ナノビームのサイズ計測) がある。これらの高精度モニターはすべて、レーザーとの逆コンプトン散乱で量子ビームと相互作用させる計測原理に基づいた準非破壊モニターである。しかし散乱断面積が小さいので、非破壊モニターといってよい。その反面、散乱 γ 線強度計測の統計性を上げるためのデータ積算が必要になるため、シングルショット計測への発展性は考慮されていない (スキミング計測や比較計測の手法を採用している)。

1.1 マイクロ・ビームサイズ計測のためのレーザーワイヤモニター

ILC でのレーザーワイヤモニターは、減衰リング (DR) での平衡ビームサイズ (水平 100 μm (RMS)、垂直 10 μm (RMS)) の計測に、さらに下流の主線形加速器や最終収束部にも複数台設置して電子・陽電子ビームの状態変化の監視にも使われる予定である。従来のワイヤ (針金) スキャナーという計測方法 (計測限界は数 μm) で使われているカーボンやタングステンの細線が熔けてしまうので、それをレーザー光線に置き換えたレーザーワイヤ方式が考案された³⁾。レーザーワイヤの採用により、ILC 加速器でのビームサイズの計測は大電流ビーム耐性と量子ビームに影響を与えない「非破壊」計測を同時に満たすことが可能になった。レーザーワイヤモニターでは、細く絞ったレーザー (レイリー長範囲) で散乱された γ 線をシンチレーターで計測する。散乱 γ 線計数量を積算しながらレーザーを電子ビームの横方向にスキャンし、その位置を横軸にとってプロットすることでビームプロファイルの一次元射影像が得られ、水平または垂直のビームサイズ評価ができる。そのため、10 分程度の計測時間を要する方法である。準 CW 電子ビームを蓄積する DR では平均ビーム電流があるため、比較的弱い CW レーザーでも図 1 のように光共振

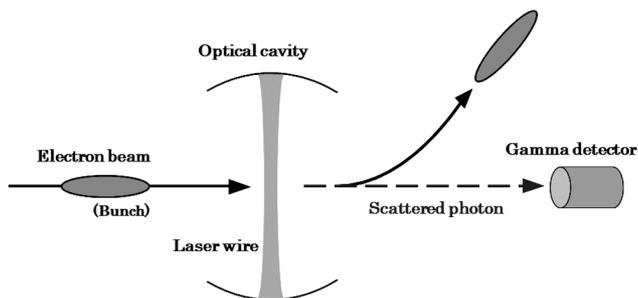


図1 光共振器内 (Intracavity 型) レーザーワイヤモニター
の概念図。

器内で蓄積しながら逆コンプトン散乱させれば測定できる。しかし、バンチ圧縮後の主線形加速器以降での計測では、ピーク強度の高いパルスレーザーを使用して集光する必要がある。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の先端加速器試験装置 (ATF) での DR における計測実施例では、凹面鏡光共振器に蓄積された波長 532 nm の CW レーザーを用いた場合、その約 $7 \mu\text{m}$ (RMS) のビームウェストを用いて $1 \mu\text{m}$ のステップでスキャン計測すると $5 \mu\text{m}$ (RMS) 程度までのビームサイズが計測可能であることが確認されている⁴⁾。レーザーを絞る大きさには限界があり、現実的な光学系を考えたときに波長の 10 倍程度が限界になる。現状のレーザー技術で考えると、このモニターの計測限界は $1 \mu\text{m}$ (RMS) 程度である。なお、通常はガウスビームである最低次横モード TEM_{00} のレーザーを使用しているが、空間分解をさらに 2~3 倍向上させるために、その高次モードである TEM_{01} を用いた計測も試験されている⁵⁾。実際の DR においては、広く普及している放射光干渉モニターで垂直サイズの計測は分解能的に十分なので、レーザーワイヤモニターに置き換える必要性は特にない。このモニターの放射光干渉計に対する優位性は、放射光が出ない直線部でも測定可能 (分散ゼロに近い条件でも測定可能) な点と、加速器ラインの任意の場所に設置可能という点である。

1.2 ナノ・ビームサイズ計測のためのレーザー干渉縞モニター

上述したレーザーワイヤ方式の計測限界を 2 桁向上させるために考案されたのが、レーザー干渉縞モニター (通称: 新竹モニター) である⁶⁾。これは ILC の衝突点 (interaction point, 略称 IP) でのナノビームを計測するために採用されている方法で、ILC の最終目標値とする空間分解能 $\sim 5 \text{ nm}$ を目指したものである。現時点で最終目標値に到達していないものの、現状で最も高い空間分解能を実現しており、 100 nm (RMS) 以下のビームサイズが計測できる唯一の高精度モニターである。高エネルギー実験の測

定器が衝突点を囲むように配置されるので、これと共存して干渉縞モニターは設置することができない。したがって、ビーム・コミッショニング時に使用するだけで高エネルギー実験時には取り外す予定である (極小ビームサイズを確認したのちは、基本的に測定器でルミノシティーを間接的に計測する)。2 つに分岐・対向させたレーザーの交差点に形成される干渉縞を光路差で横方向に位相スキャンし、そこに電子ビームが当たったときに散乱される γ 線の強度変調のコントラストからビームサイズを測定する。したがって、このモニターにおいては、 γ 線強度変調のコントラストを上げることがビームサイズ計測における最重要事項である。この変調コントラストの悪化要因としては、計測するビームサイズがレーザー干渉縞のピッチに対してマッチしていない (ビームサイズ計測に対するダイナミックレンジが狭いため) ことや、交差させる 2 本のレーザー強度の不均一性や偏光状態などが挙げられる。レーザーの交差角によって生じる干渉縞の周期長 (最小時にレーザー波長の半分程度) に計測最適なビームサイズがあるため、交差角を可変にしてダイナミックレンジを確保する。さらにダイナミックレンジを拡げるために、片方みのレーザー光線の角度を振る方式 (角度スキャン) でレーザーワイヤ・モードを併用することも行われている⁷⁾。空間分解能は波長の 10 分の 1 程度で、計測時間に数分程度を要する。図 2 に示す KEK ATF での実施例では、532 nm のレーザーを用いて仮想衝突点 (virtual IP) に干渉縞を形成し、交差角を 2 度から 174 度まで変化させて $6 \mu\text{m}$ から 20 nm までビームサイズが計測できることが確認されている⁸⁾。衝突点での垂直ビームサイズである 7.7 nm の測定に関しては、最短波長で発振する汎用の高出力レーザーである分子フッ素 (F_2) レーザー (157 nm , 100 mJ/pulse) を用いても 10% の相対誤差を保ったままだと 10 nm が測定下限値になるが、相違誤差の増加を許容すれば 5 nm まで計測可能になるとしている。今後、最終目標の極細ビーム計測を行うようになると、電子ビームの干渉縞に対する位置、レーザーのポインティングや位相のゆらぎ、波面のひずみなどの各種要因が支配的になってくると思われる。

1.3 スピン偏極度計測のためポラリメーター

レーザーを用いたポラリメーターは、高エネルギーの電子・陽電子ビームのスピンの偏極度を計測するためのモニターで、ILC の高エネルギー物理実験には必須である。計画段階でのスピンの偏極度は、電子ビームでは輸送中の減偏極などを考慮して 80% 以上 (スピン偏極電子源では 90%)、陽電子も偏極させる場合は初期で 30% 程度、 γ 線のコリメーターの調整で 60% まで上げる予定となってい

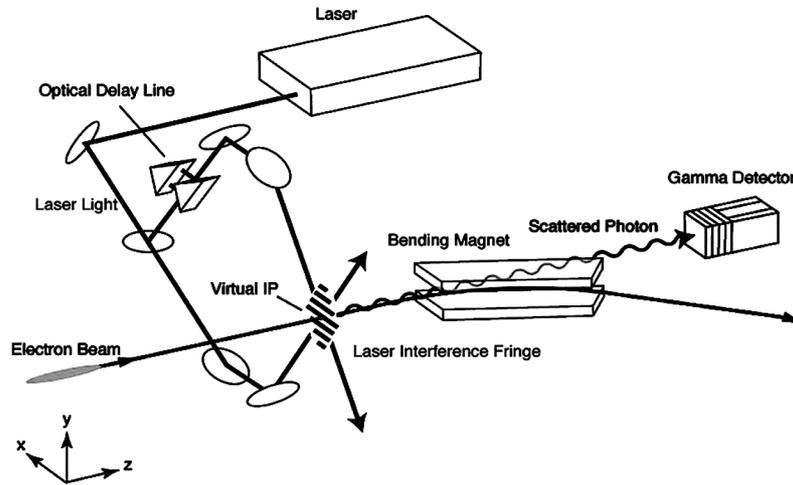


図2 KEK ATFで試験されたレーザー干渉縞モニターの装置構成図⁷⁾.

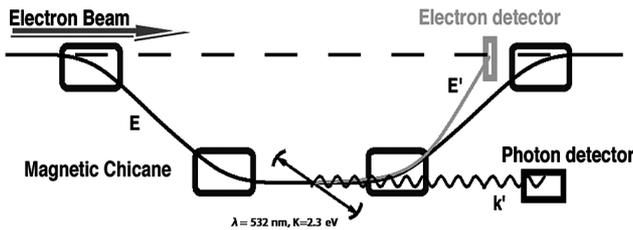


図3 Jefferson Labで開発しているコンプトン・ポラリメーターの概略図¹²⁾.

る。従来から使われている電子ビームのスピンの偏極を分析する方法には、金などのターゲットでのスピン依存性モット散乱⁹⁾や、磁場を印加した強磁性体ターゲットへのメラー散乱¹⁰⁾などさまざまな方法が知られているが、これらの方法はビームエネルギーの制限や大電流ビームに耐えられないため、スピン偏極電子源等のオフライン試験用にしか用いられない。ILCのスピンの偏極度を計測する方法には、レーザー光を右円偏光と左円偏光に切り替えて、スピン偏極した電子または陽電子ビームとの逆コンプトン散乱により生じた γ 線の散乱断面積の非対称度、または散乱された電子・陽電子のエネルギー分布の非対称度(電子・陽電子と光子のスピンの平行と反平行の場合での(微分)断面積の差)を比較することで、平均的なスピン偏極度を非破壊で計測する方法がある。

このポラリメーターの概念図を図3に示す。まず、4台の偏向電磁石で構成されるシケイン部(magnetic chicane)の中央2台の偏向電磁石間で、スピン偏極した電子ビームと円偏光レーザーを相互作用させる。そこで散乱された電子等はシケイン下流2台の偏向電磁石のエネルギー分散を利用することで、一次元アレイの検出器(チェレンコフ検出器)を用いてエネルギー分布が計測される。ILCのレーザープローブ方式のポラリメーターとしては、散乱電子に

ついて微分断面積の非対称度を比較計測する方法がドイツのDESY(Deutsches Elektronen Synchrotron)等により開発されている¹¹⁾。ILC加速器において減偏極が一番問題となるのはDRなので主線形加速器の前で計測する必要があるが、当然ながら衝突点でのスピン偏極度の確認も高エネルギー実験のために必須である。そのため、超高エネルギーのスピン偏極した電子・陽電子ビームの計測に対応できる方法として考えられている。

2. X線自由電子レーザーにおける量子ビームのレーザー診断技術

理化学研究所のSACLAは、2011年3月に完成した、長さ400mの加速器棟、240mの光源棟と60mの実験研究棟からなるXFEL利用研究施設である。この加速器施設はILCのような素粒子研究ではなく、物性研究や生命科学のために建設されたものであるが、真空の基礎研究¹³⁾などブライトネス・フロンティアでの新展開も期待されている。なお、SASE XFELの原理と利用研究については、本特集の石川先生の解説記事をお読みいただきたい。SACLAのCバンド加速管128本からなる主線形加速器で、SPRING-8放射光用蓄積リングと同じ8GeVまで極短電子バンチを加速することができる。SACLAは2012年3月7日より供用運転を開始しており、現状で世界最短波長の0.063nmのXFELパルスを10fs以下の超短パルスで発振可能な性能に達している。同様のXFEL施設は米国や欧州で建設または計画されているが、SACLAは最もコンパクトな施設にもかかわらず、光源性能で世界最高性能を実現している。このことは、超高品位の電子ビーム技術や高精密電子制御技術で世界最高水準であることを意味している。それらの技術に関しては、2004年から建設されたSACLAのプロトタイプ

イブ試験機である SCSS (SPRing-8 Compact SASE Source) にて先行して試験が行われ、2006 年の EUV (extrem ultraviolet)-FEL の発振により実証された¹⁴⁾。

SACLA では現在までのところ、量子ビームに対するレーザーを用いた診断技術は一切使用されていない。しかし、電気光学 (EO) 結晶を用いた EO サンプリング (EOS) による超高速計測に関しては、SCSS で継続的に試験されてきた。それは、XFEL ではバンチ長計測に長時間分解能が求められるからである。SACLA の光源部でのバンチサイズは横が約 100 μm (RMS) に対して、縦のバンチ長が 30 fs (FWHM) まで圧縮されている。このように、SACLA においてフェムト秒の時間分解能のバンチ長モニターがコミッション時に必須だったため、RF ディフレクターを用いてバンチ内電荷分布構造の破壊計測を行った¹⁵⁾。しかし、この計測システムは下流のスクリーンまで距離が 10 m と長大になるため、計測系全体のコンパクト化と非破壊でシングルショット計測を可能にする EOS の各種開発を行なっている¹⁶⁾。さらに XFEL においては、電子バンチの内部構造のうちレーザー発振に寄与しているバンチスライスに関する情報が必要である。レーザー発振のスライスは、横で約 30 μm (RMS) に対して、縦が 10 fs (FWHM) 以下であると推定されている。これは、電子バンチ全体のうちの一部の高品位な領域がレーザー発振に寄与することを示唆している。したがって、1 fs 程度の時間分解能をもった電荷分布構造計測が求められている。

また、現在の XFEL は SASE (self-amplified spontaneous emission) というショットノイズから発振させる方式のため、FEL 光はスパイク時間構造 (インコヒーレント構造) をもつ。この時間コヒーレンスの問題は、フルコヒーレント光を外部から供給するシード型 FEL (第 2 世代 XFEL) で解消できる。そこでも、EOS は SCSS 試験加速器においてレーザーと電子バンチのタイミング合わせに用いられている¹⁷⁾。

2.1 電子バンチ長の非破壊計測のための EO サンプリング (EOS)

以前からテラヘルツ分野では、ZnTe 結晶などのポッケルス効果 (一次の EO 効果) を利用して、サブピコ秒の時間分解能でのパルス長計測が行われてきた。この方法を EOS (electro optical sampling) という。1 ps 程度の電子バンチのクーロン電場の変化は、周波数領域でいうとテラヘルツに対応する。高エネルギー加速器においては、相対論効果により電子バンチの進行方向に対して電場がほぼ垂直に立つため、図 4 に示すように極短バンチ計測に利用でき

る。電子バンチが EO 結晶をプローブ光 (直線偏光) と同時に通過する際に、電場で誘起された複屈折により楕円偏光化する。偏光変調として書き込まれたバンチ情報を偏光子で強度変調に変換して復調 (decode) することで、縦方向のバンチ形状が計測できる。近年、欧米の加速器研究施設では非破壊でシングルショット計測可能な方法として盛んに研究開発されている。EOS が優れている点は、レーザー分野ですでに確立したフェムト秒分解能でのシングルショット計測方法が EO 信号の復調に使えることと、電子バンチ到来のタイミング・ジッターを EO プローブ光のパルス幅の範囲内でカバーすることも可能なことである。

ところで、EOS の復調方式には、線形チャープしたプローブ光を用い、その波長スペクトル上に書き込まれた電子バンチの時間構造をマルチチャンネル分光器で復調する方法があり、スペクトル復調方式 (spectral decoding) とよばれている (図 4 参照)。これに対して、フェムト秒レーザーの超短パルス計測で復調する方式を時間復調方式 (temporal decoding) とよんでいる。Spectral decoding では高繰り返しでもシングルショット計測可能、微弱 EO プローブ光でも簡便に分光器で復調できる点で優れているが、時間分解能については必ずしも優れた復調方式ではない。このため、時間分解能に優れた temporal decoding が精密計測に用いられる。一方で、時間分解能よりもリアルタイム性を重視するジッター・トレンド計測においては、spectral decoding が使われている¹⁸⁾。Spectral decoding の時間分解能は、フーリエ限界パルス幅とチャープパルス幅 (EO プローブ光のパルス幅) の幾何平均で与えられる¹⁹⁾。そのため SACLA では、屈折率分散を設計・制御可能なフォトニック結晶ファイバー²⁰⁾ を用いて、オクターブ帯域をもつレーザー光 (supercontinuum, 略称 SC)²¹⁾ を精密に分散制御可能な EO プローブ光源として開発している²²⁾。

また、従来の EOS では無機結晶の ZnTe がおもに使用されており、現実的な厚さ 300 μm の場合で時間分解能が 110 fs (FWHM)²³⁾ と、結晶自身の時間応答性により制限されている (temporal decoding による計測結果)。当然ながら、これでは XFEL が要求する時間分解能には遠く及ばない。そこで SACLA では、理化学研究所仙台支所のテラヘルツ光源研究チーム (南出泰重チームリーダー) と超高速応答の DAST をはじめとする有機 EO 素子の研究開発が共同で行われている²⁴⁾。

2.2 レーザー高調波シード型 FEL のタイミングモニター & EO 光信号同期

XFEL における SASE 光とシード FEL 光の関係は、

MOPA (master oscillator power amplifier) 方式の Ti:Sa レーザーでいうと、増幅自然放出 ASE (amplified spontaneous emission) と増幅シードパルスとの関係に相当する。FEL 光源部 (アンジュレーター内) の高輝度電子バンチは高利得媒質であるため、コントラストが高いシード FEL 光源の実現のためにはシード効率を高めなければならない。そのためには、電子バンチ (高品位な領域) とシード光パルスが互いに 6 次元位相空間 (x, x', y, y', t, E) でオーバーラップし、さらに十分な利得の必要性から両方のパルス (バンチ) を可能な限り圧縮した条件下でこれを維持しなければならない。空間・時間・周波数のマッチング条件のうち、タイミング (時間 t) だけが FEL 運転パラメーターやシードレーザーの最適調整により緩和することがほかと比べて困難である。そこで、SCSS での EUV-FEL のシード・システムでは、前節で述べたスペクトル復調方式でのジッター・トレンド計測手法を拡張し、図 5 に示すような電子バンチとシードパルスの全光学式同期技術^{25, 26)}を実現している。

フェムト秒レーザーの高次高調波パルス (HHG) は理想的なフルコヒーレント VUV ~ XUV 光源であることから、SCSS において HHG でシーディングすることで EUV-FEL 光源のフルコヒーレント化を行った。図 5 に示すように、HHG 駆動レーザー源から一部分岐した光パルスを精密に分散補償しながら伸長することで 4~5 ps の線形チャープに変換し、これを EO プロブ光として用いた。電子バンチとシード HHG パルスのタイミング差を EO 信号の波長位置変動から実時間計測する。EO 信号が波長軸上の定位置にくるように、レーザー光源装置からのパルス到来タイミングにフィードバックを掛けることで相対的なドリフトを制御した。ドリフトを制御するために与えるタイミング遅延は ±3 ps の範囲ならば、AO (acousto optic) 変調器で一次分散を制御して光学的距離をフェムト秒単位で微調する。このダイナミックレンジ内に収まるように、デジタル遅延発生器での粗調により支援するシステム構成である。このシステムにより、電子バンチと HHG パルスの 6 次元位相空間のオーバーラップを長時間持続的に保持することを実現している¹⁷⁾。なお、SCSS のシーディングでは 6 次元マッチング条件の緩和のために、HHG パルスが 50 fs であるのに対して電子バンチを 500 fs 程度にし、HHG パルスの空間サイズを逆に大きめの 500 μm 程度にすることで約 200 μm の電子バンチを包み込むようにしている。これは同時に SASE の強度を低くしてシード FEL のコントラストを上げることに寄与している。

2.3 シングルショット 3 次元バンチ形状計測のための多重化 EO サンプリング

SACLA では建設時期に、スペクトル復調方式の EOS が特徴とする簡便さとリアルタイム性に着目し、同時に電子バンチの横方向の電荷分布もシングルショット計測可能なものできないかを検討した。それはリアルタイム性を実現して、SACLA が繰り返し 60 Hz で営業運転中でも 3 次元バンチ形状の挙動をライブビューしようと計画したからである。そこで著者らが考えたのは、スペクトル復調の波長多重化 (図 6) である^{25, 26)}。

EOS は、電子バンチが横方向に電場を放射状に放つことを利用して、バンチの縦方向の電荷密度分布を非破壊計測することはすでに述べた。これを多重化するには、電子ビームの横に EO 結晶を複数配置し、それらを同時にプロブする必要がある。これにより、バンチスライス of 電荷密度分布が作るモーメントを計測することが原理的に可能である。この 3 次元バンチ内電荷密度分布を実時間計測 (演算処理による補正不要) するために、各種レーザー制御技術により、線形チャープでスペクトル強度分布を矩形化するとともに、円環・ラジアル偏光 (vector Bessel-Gauss beam) に変換する光学システムを開発している。すでに電子バンチ計測試験を実施しており、多重化復調方式の原理実証まで成功している^{16, 24)}。この光学系は複雑なので、詳細は文中で紹介した文献でご確認いただきたい。

原理実証機で採用した波長多重化の方式は、後に実用機として開発した空間多重化方式²¹⁾ (ファイバーバンドル伝送・F マッチング分光撮像法) と比べて測定原理がわかりやすいので、図 6 を用いて説明する。この多重化方式では円環レーザーによって、複数の EO 結晶をシングルショットで多点同時計測する (図では 8 点)。そして、タイミング制御板 (各点をプロブするタイミングを個別に遅延) を用い、各 EO 信号を異なる波長領域に書き込む (encode)。それぞれの対応する波長域が変調されたレーザー光を一緒にまとめて 1 つの分光器に入射する。各波長域に書き込まれた 8 つの信号は分光器でバンチごとに 1 つの波長スペクトルとして復調される。横方向で方位角に展開された電場分布と校正データから 3 次元バンチ内電荷密度分布を直接復元する。なお、このビーム診断システムを加速器ビームラインの水平・垂直偏向部を利用して複数台設置すると、バンチごとに変化する 6 次元位相空間でのバンチ内電荷密度分布の観測が可能になる。

3. レーザーの量子ビーム診断技術への応用に関して

前章までに、レーザーを用いた量子ビーム診断技術の具

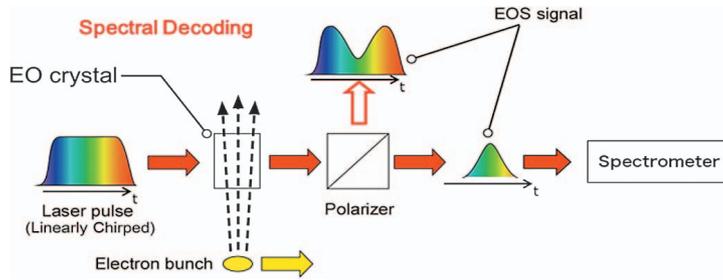


図4 スペクトル復調方式 (spectral decoding) のEO サンプリングの概念図.

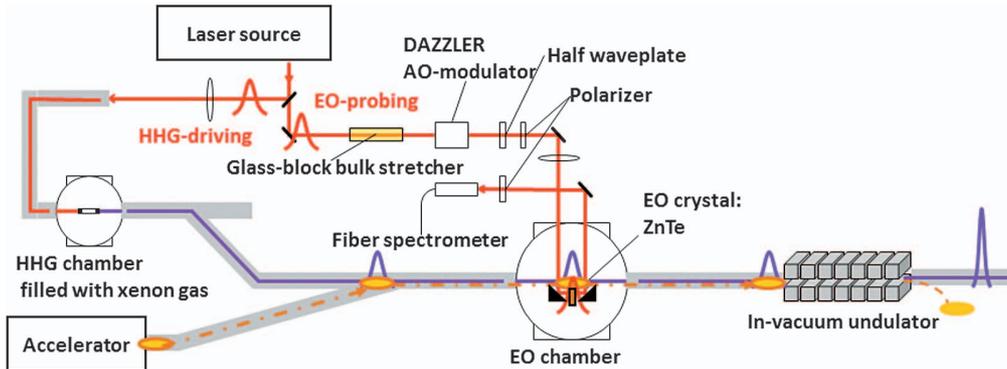


図5 SCSS プロトタイプ機で試験したEOS同期方式EUVシード型FEL¹⁷⁾.

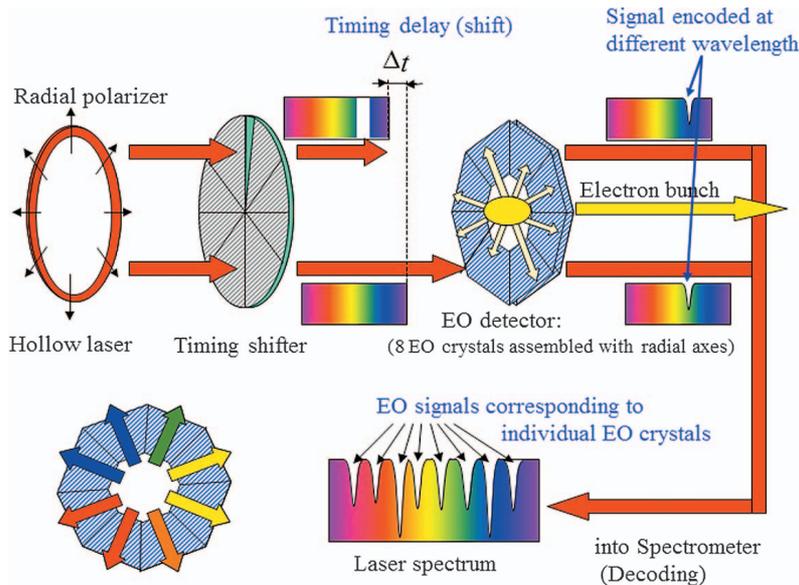


図6 3次元バンチ内電荷分布のシングルショット計測のための波長多重化^{25,26)}.

体例について概観してきた。このようなモニターは、レーザー光源装置やその伝送系など従来の加速器施設では考慮されていない新たなインフラと環境整備が必要になるため、本格的に導入するにはそれなりの理由が問われる。本章では、ご紹介した実例を使ってビーム診断系にレーザーを用いる意味を議論し、その将来を展望したい。

3.1 量子ビーム診断技術では何をレーザーで測るのか

最初に議論したいのは、一般にビームモニターにどのよ

うなものが求められるのかという点である。荷電粒子ビームのマクロ的な量で代表的なビーム電流 (バンチ電荷)、ビーム重心 (バンチの縦と横方向) は、従来の電気的な方法でも十分に精密計測ができる (ただし、バンチ列の構造や繰り返しによっては検出器の応答性等の問題があるので注意を要する)。一方で、バンチの縦横の計測に関しては、前章までにみてきたように極小サイズや極短バンチが求められるようになってから、レーザーを用いた高分解能モニ

ターが開発された。量子ビーム診断にレーザーを用いると、ほかにも非破壊計測が可能になることや、電気ノイズの影響を受けにくいなどの利点がある。

また、バンチ内の構造に興味がある場合も、XFELの例でわかるように存在する。観測したい荷電粒子ビームのミクロ的な構造は、究極的には6次元位相空間の荷電粒子のバンチ内分布である（必ずしも現在の加速器がそこまで要求しているわけではないので、必要に応じて次元を落とす）。平均的な計測でもよい前述のマクロ量の場合は、加速器運転に支障がないのであれば、あえて非破壊計測を採用する必要はない（ただし、ILCのように大電流ビーム等が原因でモニター自身が壊れる場合は除く）。しかし、ミクロ量の計測の場合はバンチごとの6次元位相空間での挙動も考慮しなければならず、必然的にシングルショット計測と動的観察のために非破壊計測まで求められることになる。

いずれのモニターにしても、取得した生の信号を処理して、最終的に必要とする量子ビーム・パラメーターの情報に変換しなければならない。加速器に信号をフィードバックして安定化制御する場合と、人間が運転状態を把握するために監視情報を出力する場合とでは求められる処理が異なるが、いずれも最善なのはリアルタイム性（フィードバック制御や実時間計測）であることは論を俟たない。加速器のマシン形態により事情が異なるので一般論を展開するのは難しいが、リアルタイム性を実現する前提条件に、シングルショット計測と非破壊計測を可能とするビームモニター開発が戦術的に含まれることは確かである。量子ビームに対する要求性能が年々高まっており、より精密なバンチごとの安定化が必要になってきていることから、レーザー技術がミクロ的な量のビーム診断系にシングルショット計測と非破壊計測を生かして応用され始めている。

ここまではバンチそのものの計測にだけ注目して記述してきたが、機器保護も含めた加速器運転で重要なもう一方の計測対象であるビームのノイズ的なものの計測システムについても少し述べておきたい。この対象に含まれるものには、ビームハローモニターやバンチ純度計測、ビームロスモニターなどがある。これらのモニターには、量子ビームに影響を与えないのであれば非破壊計測が求められることはない。したがって、現状ではここにレーザーが応用される気配はないが、もし将来的に次節で整理する観点から、利用価値があると判断されるならば検討すべきであろう（その判断は読者にお任せする）。

3.2 レーザーの特徴と量子ビーム診断に用いるときの指針
次に、レーザー光源にはどのような特徴があるのかを把

握した上で、量子ビーム診断をするための応用の指針を得るために概観したい。レーザーの特徴として本質的なのは、空間的にも時間的にも非常にコヒーレンスの高い光源（シングルモードで発振するCWレーザーはコヒーレント光に近い状態の光）ということである。もうひとつ重要な実用技術面での特徴は、高強度の極短パルス光（列）を容易に得ることが可能な点である。以下に、レーザーを量子ビーム診断へ応用する上での着眼点について整理して考察する。

(1) 単色性の利用

CWレーザーはスペクトル幅が非常に狭いが高いため、干渉計やホログラフィーの光源として優れている。エキシマーレーザーなども10 ns程度のパルスレーザーであるので（準）単色光源として使用可能である（超短パルスレーザーとは区別が必要）。半導体リソグラフィー用のF₂レーザーの場合は0.2 pmの狭帯域化が実現しているため、レーザー干渉縞モニターで光源候補として挙げておいた。単色性にはレンズ系で色収差の問題がないため、光伝送系の設計が容易になる利点がある。

(2) 可干渉性の利用

レーザーは干渉性が高いため、その干渉縞の有効利用により波長以下の分解能でナノ・ビームサイズを計測可能である。干渉縞モニターがレーザーワイヤよりも空間分解能を2桁高くできるのはこのためである。また、光波の振幅や波長の情報だけでなく、位相も加えて記録するホログラムにも干渉性は利用されている。さらに白色光干渉を用いると、測定対象の3次元形状を非接触かつ高速・高精度に測定することができる。なお、干渉性が非常に高いので、それが計測の邪魔になることもある。特に、分光器で計測する際は拡散板などでそれを緩和してやる必要が生じることがある。

(3) エネルギー集中性（集光性）の利用

パルスレーザーは平均的にパワーが高いわけではないが、時間的・空間的・周波数的に狭い領域に集中しているので、きわめて高いエネルギー密度が実現できる。この特性をポラリメーターやレーザーワイヤでは、量子ビームとの相互作用が小さい散乱断面積を補うために利用している。CWレーザーにおいても、その単色性を生かしてQ値の高い光共振器に蓄積してビームウエスト（集光性）を利用することで、比較的弱いレーザー光源でもレーザーワイヤでビームサイズ計測が可能になっている。

(4) 超短パルス性の利用

ナノ秒～サブ・フェムト秒程度の短パルス光を得る技術が確立している。超短パルスレーザー（モード同期レ

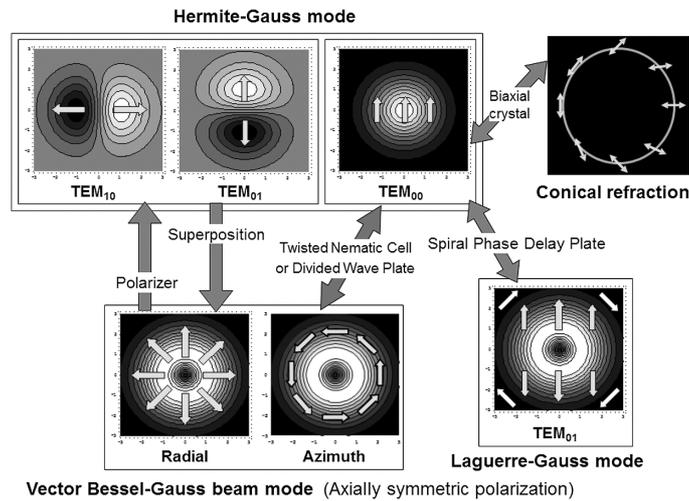


図7 ポアンカレ球で表現される偏光状態から特殊な偏光への変換関係図。

ザー)は、時間とエネルギーの不確定性関係のため広いスペクトル幅をもつ。フォトニック結晶ファイバーを用いれば、オクターブを超えるスペクトル帯域をもつコヒーレント白色光(SC光)の発生も可能となる。EOSのスペクトル復調方式では、前章で述べたように高時間分解能化を実現するために利用している^{22, 25, 26)}。この超短パルスレーザーの波長スペクトルには、等間隔に並ぶ多数の光周波数モード列(光周波数コム²⁷⁾)が現れる。これを時間・空間・周波数の広範囲にわたる精密な基準として用いることで、超高精度計測や現在の時間標準であるセシウム原子時計を置き換える「光時計」を実現できる。ただし、光伝送系は波長分散や色収差に関して十分に注意して設計・構築しなければならない。

(5) 指向性の利用

レーザーでは、共振器の軸方向に往復する光だけが増幅され発振する(光軸方向に共振器の閉じ込め効果が高い)ので、長距離伝搬しても拡散しない指向性光源である。その場観察(*in-situ*測定)用のプローブ光源として優れている。プローブする作動距離が長く取れるので、量子ビームが走っている超高真空中の奥まったところでも計測が可能である。EOSではレーザーを搬送波として用いて長距離伝送している。外からプローブ光を真空中のEO結晶に送り、そこから変調情報を載せたまま真空窓の外にある復調用の光学システムに導くため、伝送光路は長くなるが指向性があるために実現している。

(6) 制御性の利用

制御性を利用して、従来の電波技術と同様にレーザーでも振幅変調や位相変調、周波数変調などが容易に行える。EOSにおいては、ポッケルス効果によってEOプローブ光に偏光変調を与えてから復調に適した変調変換をしてい

る。これに限らず、ほかにも磁気光学(MO)効果や音響光学(AO)効果などを変調素子として利用できる。レーザー整形も精密に制御する技術は確立しており、多重化EOSではAO変調器を用いてプローブ光スペクトルの矩形強度分布化と線形チャープ化を同時に行い、3/6次元量子ビーム診断系のリアルタイム性を可能にしている。また、よく使われる偏光制御に関しては、単にポアンカレ球上での変換(ポラリメーターで利用)のみならず、図7に示すような並進対称性のない偏光ビームに変換する光学素子が開発されている。対称性の高い偏光分布の順に並べると、軸対称偏光(EOSの多重化に利用)、ラゲール・ガウス、円錐屈折になるが、電場または磁場の対称性に着目した応用があるだろう。

本稿では、レーザーを用いた量子ビーム診断技術について、その開発が行われている先端加速器プロジェクトの中でILCとSACLAを例に、それぞれの加速器システムにおけるビーム診断系の中で、このような特殊なビーム診断技術が必要になった理由がわかるように説明した。レーザーによる量子ビーム診断の現状は、ここまでみてきたように、まだ開発段階で簡便性や量産性などの点で洗礼を受けていない。今後、各方面での利用を通じて洗練されるに従って、それぞれの加速器診断システム全体の中で最適な機能分離が進み、将来の先端加速器において標準的なモニター群を構成していく頃には、本稿で取り上げた量子ビームモニターは全く別のものになっているかもしれない。したがって、これらの計測原理を概観して、レーザー技術を用いたビームモニターの導入を検討する際に研究開発の指針となるように整理しておいた。ここでは大型加速器施設を例に挙げたので、ビームモニターのコンパクト化やコス

ト面などには触れなかった。しかし、今回取り上げた巨大加速器プロジェクトでも、SACLAのようにコンパクト化をはじめから戦略的に織り込んでいる計画では、必然的にビーム診断系の選定にはシビアである。同様に、リニアコライダーもCERNのCLIC (Compact Linear Collider) 計画ではコンパクト化と高エネルギー化 (multi-TeV) を戦略目標として明確にしておき、加速器システム全体の設計に甘さが許されない。今後いっそうのダウン・サイジングがコスト面でも求められる量子ビーム施設において、レーザーによる高度なビーム診断系の設計・導入に際しては、これらの面にも十分に配慮して選定する必要があることを最後に指摘しておきたい。

文 献

- 1) ILC Technical Design Report (Executive summary): <https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- 2) T. Ishikawa *et al.*: "A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-ångstrom region," *Nat. Photonics*, **6** (2012) 540-544.
- 3) H. Sakai *et al.*: "Measurement of a small vertical emittance with a laser wire beam profile monitor," *Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams*, **5** (2002) 122801.
- 4) L. Corner *et al.*: "Laserwire: A high resolution non-invasive beam profiling diagnostic," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, **740** (2014) 226-228.
- 5) Y. Honda: "Experimental studies of a low emittance electron beam in the KEK-ATF damping ring with a laserwire beam profile monitor," Kyoto University doctor thesis (2004).
- 6) T. Shintake: "Proposal of a nanometer beam size monitor for e^+e^- linear colliders," *Nucl. Instrum. Methods A*, **311** (1992) 453-464.
- 7) 山口洋平: "レーザー干渉型電子ビームサイズモニターの開発研究", 東京大学理学研究科修士論文 (2011).
- 8) J. Yan *et al.*: "Measurement of nanometer electron beam sizes with laser interference using Shintake Monitor," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, **740** (2014) 131-137.
- 9) C. G. Shull, C. T. Chas and F. E. Myers: "Electron polarization," *Phys. Rev.*, **63** (1943) 29-37.
- 10) H. R. Band, G. Mitchell, R. Prepost and T. Wright: "A Moeller polarimeter for high energy electron beams," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, **400** (1997) 24-33.
- 11) M. Baylac *et al.*: "First electron beam polarization measurements with a Compton polarimeter at Jefferson Laboratory," *Phys. Lett. B*, **539** (2002) 8-12.
- 12) M. Beckmann, J. List, A. Vauth and B. Vormwald: "Precision polarimetry for the International Linear Collider," *European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP)* (Stockholm, 2013).
- 13) T. Inada *et al.*: "Search for photon-photon elastic scattering in the X-ray region," *Phys. Lett. B*, **732** (2014) 356-359.
- 14) T. Shintake *et al.*: "A compact free-electron laser for generating coherent radiation in the extreme ultraviolet region," *Nat. Photonics*, **2** (2012) 555-559.
- 15) H. Ego *et al.*: "Design of the transverse C-band deflecting structure for measurement of bunch length in X-FEL," *Proc. of European Particle Accelerator Conference (EPAC)* (Genova, 2008) pp. 1098-1101.
- 16) H. Tomizawa *et al.*: "Feasibility study of radial EO-sampling monitor to Measure 3D bunch charge distributions," *Proc. of International Particle Accelerator Conference (IPAC)* (Kyoto, 2010) pp. 269-272.
- 17) H. Tomizawa *et al.*: "Stable operation of HHG-Seeded EUV-FEL at the SCSS test accelerator," *Proc. of International Free-Electron Laser Conference (FEL)* (Manhattan, 2013) pp. 728-733.
- 18) B. Steffen: "Electro-optical measurements of the longitudinal electron bunch profile at FLASH," FLS workshop (Hamburg, 2006).
- 19) I. Wilke *et al.*: "Single-shot electron-beam bunch length measurements," *Phys. Rev. Lett.*, **88** (2002) 124801.
- 20) J. C. Knight, T. Birks, P. Russell and D. Atkin: "All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding," *Opt. Lett.*, **21** (1996) 1547-1549.
- 21) R. R. Alfano and S. L. Shapiro: "Observation of self-phase modulation and small-scale filaments in crystals and glasses," *Phys. Rev. Lett.*, **24** (1970) 592-594.
- 22) H. Tomizawa *et al.*: "The First Demonstration of EOS 3D-BCD Monitor to Maximize 3D-Overlapping for HHG-Seeded FEL," *Proc. of International Beam and Instrumentation Conference (IBIC 2013)* (Oxford, 2014) pp. 1-3.
- 23) G. Berden *et al.*: "Benchmarking of electro-optic monitors for femtosecond electron bunches," *Phys. Rev. Lett.*, **99** (2007) 164801.
- 24) Y. Okayasu *et al.*: "Feasibility study of a single-shot 3D electron bunch shape monitor with an electro-optic sampling technique," *Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams*, **16** (2013) 052801.
- 25) H. Tomizawa, H. Hanaki and T. Ishikawa: "Non-destructive single-shot 3-D electron bunch monitor with femtosecond-timing all-optical system for pump & probe experiments," *Proc. of International Free Electron Laser Conference (FEL)* (Novosibirsk, 2007) pp. 472-475.
- 26) H. Tomizawa: Japan Patent Application No: 2007-133046; Publication No: 2008-288087.
- 27) J. N. Eckstein, A. I. Ferguson and T. W. Hänsch: "High-resolution two-photon spectroscopy with picosecond light pulses," *Phys. Rev. Lett.*, **13** (1978) 847-850.

(2014年5月15日受理)