

会議報告

First International Beam Instrumentation Conference, IBIC2012 会議報告

岡安 雄一^{*1}・高野 史郎^{*1}・前坂 比呂和^{*2}・正木 満博^{*1}・松原 伸一^{*1}・田中 均^{*2}

Report on First International Beam Instrumentation Conference, IBIC2012

Yuichi OKAYASU^{*1}, Shiro TAKANO^{*1}, Hirokazu MAESAKA^{*2}, Mitsuhiro MASAKI^{*1}
Shinichi MATSUBARA^{*1} and Hitoshi TANAKA^{*2}

1. はじめに

2012年10月1日から5日間（最終日は日光への遠足に当てられた）の日程で、つくばの国際会議場において第一回のビーム診断国際会議IBIC2012が開催された。招待講演（10件）、口頭発表（18件）、チュートリアル（3件）、特別講演（1件）、ポスター発表（173件）が行われ、企業展示による参加も含め23カ国から約250人の関係者が集まった。各会場では活発な質疑応答が行われ、第1回目のIBICとしては上々のスタートを切ったと言えよう。会議のプログラムや発表内容は <http://ibic12.kek.jp/index.php/Main/HomePage> でプリプレスプロシーディングスも含め閲覧が可能である。興味のある方は是非そちらを御覧頂きたい。会議の集合写真を図1に示す。

IBICは、Biannualで開催されてきたBeam Instrumentation Workshop, BIW（北米）とEuropean Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators, DIPAC（欧州）を統合し、アジアも加えた3極で開催されることとなった国際会議¹⁾である。2009年のBIWのプログラムコミッティーメンバーに回った1通のメールに端を発した米欧亜3極化の流れは¹⁾、三橋利行氏の卓越したリーダーシップと幅広い人脈、それを強力にバックアップした生田施設長とKEKビーム診断関係者等の努力で一気に進展し、3年の短期間で今回の



図1 会議2日目に撮影された参加者の集合写真

IBIC2012の開催に漕ぎ着けた。結果的にこの流れの引き金を引いた筆者（H.T.）にとっても、この成功は感慨無量であった。以下に会議の内容を4つに分類し、口頭発表を中心に紹介する。ポスターセッションでも興味深い数々の発表が行われたが、誌面の都合上、ここでは全ての発表内容を網羅できなかったことをご容赦願いたい。

^{*1}（公益財団法人）高輝度光科学研究センター

^{*2}（独立行政法人）理化学研究所 播磨研究所

2. ビーム位置モニタ (BPM), 到達時間モニタ関係

ビーム位置モニタ (BPM) については, 3つのチュートリアル講演のうちの2つがBPM関係であり, また, 他の口頭発表・ポスター発表においても, 線形加速器・円形加速器, 電子加速器・陽子 (イオン) 加速器, それぞれにさまざまな報告があった。チュートリアルでは, KEKの飛山氏が「BPM Electrode and High Power Feedthrough - Special Topics in Wideband Feedthrough」と題し, SuperKEKBのボタンBPMに用いられる大電力フィードスルーに関する解説を行った。広帯域・低反射・低損失, かつ, 大電力・大気圧・ベークング・放射線に耐えうるフィードスルーの開発について, 3次元電磁界シミュレーションによる設計から機械性能に関することまで一連の流れが示された。また, KEKの平松氏が「Beam Position Monitors for Circular Accelerators」と題し, ボタン型・ストリップライン型BPMに関する解説を行った。単純な円筒ダクトの電極に誘起される電圧とビーム位置の関係を解析的に求める手法, レーストラック型ダクトや矩形ダクトの電極については境界要素法を用いて数値的に求める手法という基礎的なところから, 読み出し回路やBeam-based Alignmentに関することまで幅広く丁寧な説明を聞くことができた。

電子線形加速器のBPMについては, 高分解能RF空胴BPMとして, X線自由電子レーザー (XFEL) のSACLA (日本)・European XFEL (E-XFEL, ドイツ)・SwissFEL (スイス) や, リニアコライダー関係のATF II (日本)・CLIC (欧州) から報告が行われた。SACLAとE-XFELからは, 100 pC程度の電荷量のビームに対し, サブマイクロン (rms) の位置分解能が得られたとの報告があった。従来のボタン型・ストリップライン型BPMについても多くの施設から報告があった。検出器本体にはとくに新奇性はなかったものの, E-XFEL向けに開発が進められているバンチトレイン内フィードバック用高速処理回路や μ TCAによる高速読み出し回路が報告されるなど新しい試みがいくつか見られた。

XFEL施設からはビームの到達時間計測に関する

報告も行われた。XFEL特有の短バンチ (100 fs以下) を実現するための加速器の安定化や, フェムト秒精度の時間分解能を必要とするポンププローブ実験へのタイミング情報の提供には, ビーム到達時間計測が必須である。到達時間測定法は各施設で異なり, SACLAではRF空胴BPMの基準空胴 (TM010モード) の位相を, LCLSではアンジュレータ下流に設置されたタイミング検出用のRF空胴の位相を, FLASHではボタン型電極からの電気信号を使ってEO変調器 (Electro-Optic Modulator) によりモードロックレーザーからの短パルス光信号に変調をかけて相互相関を計測する方法が使用されている。いずれの方法においても100 fs (rms) 以下の時間分解能が得られている。

電子円形加速器のBPMについては, 放射光源としての加速器が大半を占めているためか, 従来型のボタンBPMに関する報告が多かった。この種のBPMは電極にしても検出回路にしても技術的にはもう確立しているように思われる。ただ, チュートリアルでもあったようにSuperKEKBのような大電流マシンでは, ウェークや熱負荷に対する設計上の配慮が必要であると感じられた。一方で放射光源では, 電子ビームだけでなく光軸の安定化に向けた放射光光軸の直接計測の試みも進められている。

3. 放射光モニタ関係

放射光モニタ関係では, ビームエミッタンスやビームサイズ測定に関する講演が5件行われた。University of MelbourneのWootton氏が「Vertical Emittance Measurements using a Vertical Undulator」と題する講演を行った。アンジュレータ放射の偶数次光がビームエミッタンスの増大により強度を増すことは広く知られているが, 通常アンジュレータでは電子ビームを水平面内で蛇行させるため偶数次光強度が水平エミッタンスに対して敏感になり微小な垂直エミッタンスに対する感度があまりない。Wootton氏らの方法は, 水平磁場により垂直面内でビームを蛇行させる垂直アンジュレータを用いることで, 偶数次光強度の垂直エミッタンスに対する感度を高めて微小な垂直エミッタンス診断に利用しようというものである。Australian Synchrotronの軟

X線ビームラインを用いた実験結果も示され、興味深かった。

PSI の Schlott 氏 が「Design and Expected Performance of the New SLS Beam Size Monitor」と題する講演を行った。Swiss Light Source (SLS) では、 π 偏光法と呼ぶ偏向電磁石からの可視・紫外域放射光の垂直偏光成分のみを用いてビーム像を結像させる独特の方法で、垂直ビームサイズを測定している。これまでに、垂直エミッタンスを低減させるための様々な取り組みにより、1 pm・rad の垂直エミッタンスが達成され、4 μ m (rms) という微小な垂直ビームサイズが測定された。今後更に垂直エミッタンスを限界エミッタンスの 0.2 pm・rad にまで低減する計画があり、これに向けた新しい π 偏光法ビームサイズモニタ開発が進められている。分解能を向上させるため、結像素子として従来の屈折レンズに変えトロイダルミラーを用い、測定波長をより短波長の紫外域とする等、新しい計測法の詳細が報告された。

放射光干渉計に関する講演も 2 件行われた。KEK の三橋氏による招待講演「Recent Progress in SR interferometer」では、天文の分野で恒星の視直径を測定するために用いられた干渉計の歴史に簡単に触れた後、光の空間コヒーレンスと光源サイズを関係付ける理論の解説から始まり、5 μ m 以下の微小ビームサイズを測定するための様々な工夫などが実際の測定例を交えて報告された。また、光子数と位相との不確定性関係に基づく放射光干渉計の分解能に関する理論的考察が紹介された。Australian Synchrotron の Boland 氏の講演「Intensity Imbalance Optical Interferometer Beam Size Monitor」では、微小ビームサイズ測定において干渉縞のビジビリティが 1 に近くなることから、縞の谷の光強度が検出器のノイズレベルとなり、十分な測定精度が得られないという問題を、減光フィルターを用いてダブルスリットを通過する 2 つの光強度バランスを人為的に崩して回避する方法が紹介された。これにより、見かけのビジビリティが低下し、谷の強度が十分に得られるため、測定精度の改善が期待できるとの報告がなされた。生出氏の「何故改善できるのか」という素朴な質問を皮切りとして、測定精度改善効果に関する議論が講演後も活発に

行われていたのが印象的である。

Cornell University の Rider 氏が「Operation of a Single Pass, Bunch-by-bunch x-ray Beam Size Monitor for the CESR Test Accelerator Research Program」と題する講演を行った。Coded Aperture を用いたイメージングは、X線領域での天体観測で用いられてきた手法である。ランダムに穴の開いたマスクを通して観測された X線分布から数学的な操作により X線源のイメージが得られる。Coded Aperture を用いた X線ビームサイズモニタは、X線ピンホールカメラと比較して検出する光子数が多いため高感度であり、シングルショット、バンチ毎のサイズ測定に適している。ATF2 では ILC を目指した開発が進められており、Super KEKB でもビームサイズモニタとして導入が計画されている。Rider 氏の講演では、Cornell Electron Storage Ring (CESR) で既に稼働している Coded Aperture による X線ビームサイズモニタについて詳細な報告がなされた。

4. バンチ長・バンチ時間構造関連

バンチ長・バンチ時間構造評価に関する口頭発表は 4 件、ポスター発表は 9 件行われた。以下口頭発表の 4 件に関しアウトラインをまとめる。理研播磨研の前坂氏が「Electron Beam Diagnostic System for the Japanese XFEL, SACLA」と題して、SACLA における各電子ビーム診断機器とそれらの性能について紹介した。CT、ストリークカメラ、CTR / CSR モニタによる各加速器構成機器の特徴に応じたバンチ長計測法に加え、ビーム破壊方式としては FLASH、FERMI などの XFEL 加速器施設でも採用されている RF ディフレクターによる電子バンチの水平方向時間構造計測 (Transverse Deflecting Structures: TDS) を用いて 10 fs (FWHM) 程度の分解能でバンチ長計測が実現されていることを報告した。TDS 計測の質を劣化させるコヒーレント OTR の浸入に対する対策については、JASRI の松原氏による講演「Improvement of Screen Monitor with Suppression of Coherent-OTR for SACLA」の中で、Ce:YAG 蛍光体と空間マスクの導入により超前方に分布する COTR を効率よく遮断する手法の開発が紹介された。これに対し、ビーム非破壊方式で代表的な EO サンプリング

によるアプローチとして、JASRI 岡安氏が「The First Electron Bunch Measurement by means of DAST Organic EO Crystals」と題し、無機ポッケルス EO 結晶に比べ高速時間応答が期待される有機ポッケルス EO 結晶によるバンチ長計測の測定データが示された。これまで EO サンプリングへの有機結晶導入は、主に真空悪化と放射線損傷による懸念からタブー視されてきた。報告では無機 (ZnTe) と有機 (DAST) ポッケルス EO 結晶による EO 信号強度スペクトル、すなわちバンチ時間構造が比較され、有機ポッケルス EO 結晶の威力が高消光比計測の結果をもって示された。また実験過程で明らかになった計測寿命について、さらにその原因を究明するため、放射線損傷・レーザー照射による内部損傷についての研究が進行中であることが報告された。

DESY Schmidt 氏により、「Femtosecond Resolution Bunch Profile Diagnostics」と題して、XFEL 加速器におけるフェムト秒オーダーの時間分解能を有するバンチ長・時間構造、プロファイルモニタの体系的なレビューがなされた。FLASH で実証試験が行われた Optical Replica Synthesizer の紹介は大変興味深かった。この手法では、電子バンチとプローブレーザーを同期させ 2 台のアンジュレータと局所シケインで相互作用させ、エネルギー・密度変調を形成する。この密度変調により発生したコヒーレント放射の時間幅を FROG 法で位相計測することにより、電子バンチの時間構造を非破壊で計測する。このシンプル且つ斬新なアイデアは 2004 年に DESY の Saldin 氏らによって提案され、電子バンチのサイズやプローブレーザーとの空間重複、プローブレーザーのジッター・パルスエネルギーなどの制約を克服しながら、現在も精力的に開発が進められている。

5. プロファイルモニタ関連

プロファイルの観測にはスクリーンモニター (SCM) が一般的に使われる。SCM は、蛍光スクリーンや OTR (遷移放射光) スクリーンにビームが当たったときに出る光をカメラで撮像するプロファイルモニタで、数 10 μm 以下の測定精度で 2 次元のビームのプロファイルをシングルショットで測定することが可能である。ワイヤー

スキャナーは、細いワイヤーをモータで駆動させてビームをスキャンし、散乱されるガンマ線などを検出することにより測定を行う。マルチショット計測であるため、正確な強度分布測定にはビーム軌道や強度の安定化が不可欠であるが、ほぼ非破壊的に測定できるという利点もあるのでよく使用されている。本節では、これらのプロファイルモニタの発表についてまとめる。

SCM は、ビーム重心位置、横方向プロファイルの観測だけでなく、ビームエミッタンスの測定、RF-deflector と組み合わせての時間方向プロファイル測定等、様々な計測に利用されている。このため会議でも、機械設計、光学設計、検出器、ソフトを含めたシステム設計や GUI に至るまで、報告も多岐に渡っていた。撮像用の機器としては、CCD カメラが多く使用されているが、Gated ICCD カメラ、CMOS カメラを用いたシステムも見られた。CMOS カメラは、近年 CCD カメラと同等な性能が安価に手に入るので普及しつつあるようだ。SCM のスクリーンとしては、蛍光スクリーンと OTR スクリーンが主に使用されている。既に、LCLS, FLASH, SACLA 等の FEL 施設からプロファイル計測における COTR 問題が報告されており、高輝度電子ビームを扱う施設では、COTR 対策の一環として蛍光スクリーンの導入が進んでいる。会議では COTR を除去するために COTR が放射されるビーム軸に対し、斜めから蛍光像を計測する方法 (図 2) が多く採用されていた。しかし、この方法では、蛍光スクリーンを薄くしても、電子ビームが蛍光スクリーン内を通過した際の蛍光を虚像として観測するため高い精度でビームプロファイルを得ることが難しい。この効果を抑制する対策として、ビームに対する蛍光体の設置角度と観測角度の最適値を、蛍光体の屈折率によるスネルの法則から決定できるという発表があった。その他にも、電子ビーム軸方向へ射影した蛍光像をモニタする方法として、COTR 光を空間マスクにより消光する方法も報告されていた。

ワイヤースキャナーについては、スキャン時の駆動機構やワイヤーの振動により測定精度が悪化する問題があるため、駆動機構の安定化や実際の動作を正確に把握するためのモニタ機構に関する報告が行われた。また、ワイヤースキャナーは通

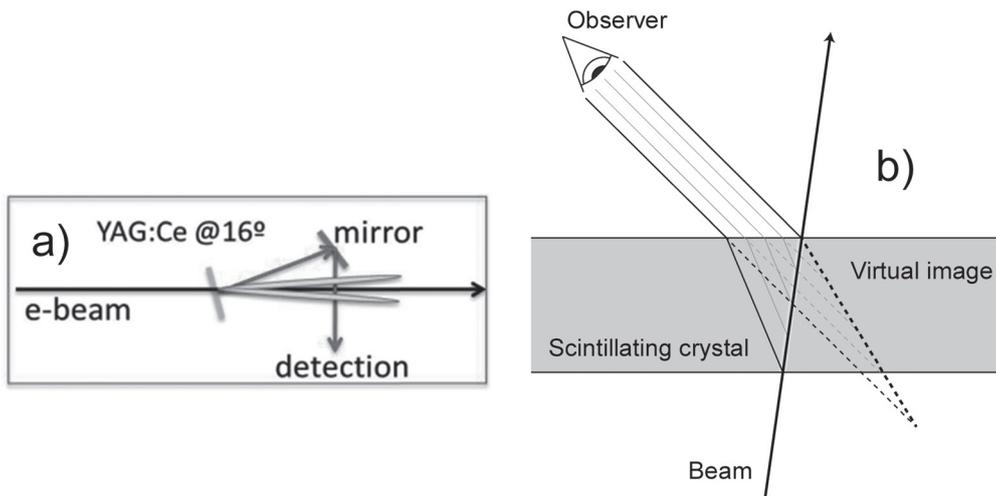


図2 COTR 光を避けた SCM の構成²⁾ (a) と斜めから蛍光像を観察する場合の虚像³⁾ (b)

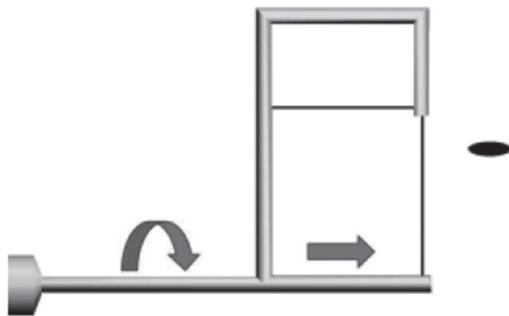


図3 Twisting wire scanner の構成⁴⁾

常1軸のアクチュエータに縦と横のワイヤーを取り付けて2次元のプロファイルを測定するが、新しい機構として直進と回転の2つの駆動機構を持ったアクチュエータに2次元のワイヤーを備えた1つの装置(図3)を用いたユニークなワイヤースキャナーが報告された。ワイヤースキャナーによるビームプロファイル測定は、1回の測定に数分と時間を要するため、調整に使用するにはビームの安定化を行う等条件を整える必要があるが、ほぼ非破壊に測定でき、COTRの影響も受けない。常設のモニタとして、また、SCMとのクロスチェック等に有用と考えられる。

6. 最後 に

IBIC は粒子加速器国際会議 IPAC と同様に毎年開催され、アジア、北米、ヨーロッパを順次巡り、3年後の2015年にはまたアジア地域へ戻ってくる。来年は Diamond Light Source の主催でイギリスのオックスフォードで、2014年には SLAC の主催でアメリカ西海岸での開催が既に決まっていた。会議の最終日には、2015年の開催地がメルボルンに決まったことがアナウンスされた。新しくスタートを切った IBIC の今後の発展に向けて、加速器学会会員の皆様の積極的な参加とサポートをお願いし、この報告書を終えることにする。

参考文献

- 1) 三橋利行, 「国際ビーム計測診断会議の設立および第1回開催について」, 加速器 Vol.8, No.3, 2011 (137-140) .
- 2) M. Veronese, et al., “Intra Undulator Screen Diagnostics for the FERMI@Elettra FEL”, in these proceedings.
- 3) Rasmus Ischebeck, et al., “A Transverse Profile Imager for Ionizing Radiation”, in these proceedings.
- 4) V. Gharibyan, et al., “Twisting Wire Scanner”, in these proceedings.