

SACLA 電子源ビームの時間分解エミッタンス測定装置

TIME-RESOLVED EMITTANCE MEASUREMENT SYSTEM FOR THE SACLA ELECTRON SOURCE BEAM

竹村育浩^{#, A)}, 前平晃太郎^{A)}, 林田寿和^{A)}, Vitaliy Goryashko^{B)}, 渡川和晃^{B)}
Yasuhiro Takemura^{#, A)}, Koutarou Maehira^{A)}, Toshikazu Hayashida^{A)}, Vitaliy Goryashko^{B)}, Kazuaki Togawa^{B)}

^{A)} SPring-8 Service Co., Ltd

^{B)} RIKEN SPring-8 Center

Abstract

Measurement of real- and phase-space profiles along a longitudinal direction of an initial electron beam with high time resolution is one of the most important technologies for upgrading the low-emittance electron gun of the X-ray free electron laser facility SACLA. We developed an emittance measurement system using a fast wall current monitor and a movable slit system to measure slice transverse profiles and slice emittances of a one nanosecond beam with a few ten pico-seconds resolution. The slit control and data acquisition programs were developed using the LabVIEW software. We report the updated emittance measurement system of the SACLA gun test stand.

1. はじめに

X線自由電子レーザー施設 SACLA では、XFEL 光の性能を向上するために、電子源の高輝度化に取り組んでいる[1, 2]。電子ビームの初期状態が XFEL 光の生成に極めて敏感に影響するため、電子銃直下流の電子ビームを高い時間分解能で測定することは電子源開発にとって非常に重要なテーマである。今回、新たなスリット制御システムや高速電流モニタ等の周辺機器を整備することによって、電子銃における初期ビーム状態(プロファイル及びエミッタンス)を高い時間分解能で測定することに成功した[3]。本稿では、高時間分解能の測定のために行った電子銃テストスタンドのアップグレードについて報告する。

2. 電子銃テストスタンドの整備

2.1 電子銃テストスタンドの概要

Figure 1 に電子銃テストスタンドの各機器配置について示す[2-4]。

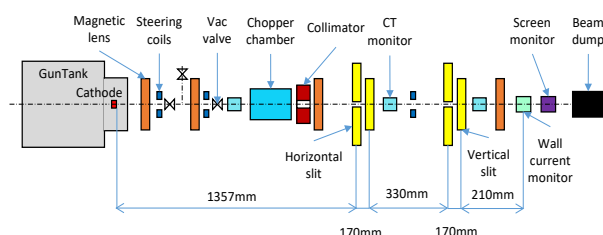


Figure 1: Layout of the gun test stand.

本システムは、単結晶 CeB₆ 熱カソードを備えた電子銃タンク、1 ナノ秒の短バンチ電子ビームを切り出すチョッパー、実空間分布及び位相空間分布を測定するための 2 組の水平、垂直スリット、数 10 ピコ秒の高時間分解能でビーム波形を測定する壁電流モニタで構成されている。また、ビームを精密に輸送するために 4 台の磁気

[#] ytakemura@ses-spring8.co.jp

レンズ電磁石と 3 組の水平、垂直ステアリング電磁石を備えている。

2.2 壁電流モニタの導入

電子銃から出射される時間幅 1 ナノ秒の電子ビームを数 10 ピコ秒の時間分解能で測定するためには、市販の CT モニタの応答時間では不十分であった。そのため、新たに壁電流モニタを製作し、高分解能でビーム波形を測定するための 8 GHz 帯域高速オシロスコープを導入した。波形測定の応答速度を早くするために、壁電流モニタの抵抗値は 10 Ω と小さい値とし、また、浮遊容量の原因となるノイズシールドケースを取付けて取り付けない構造とした[3]。Figure 2 に壁電流モニタの外観写真を示す。

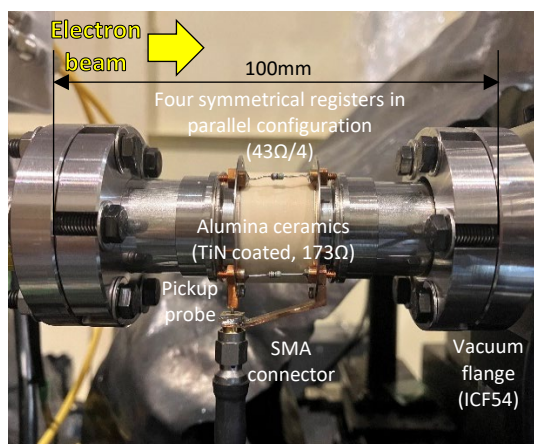


Figure 2: Wall current monitor.

2.3 スリット制御

データ通信には EtherCAT を使用している。EtherCAT の特徴はマスターから出発し、順番に全てのスレーブを通過していき、折り返して再びマスターへ返るように設計され、1 サイクルで全入出力処理を終えることができる。これにより 4 枚のスリットの幅と位置を制御するモータドライバ 2 台と、各スリット幅を測定するエンコーダー 1 台を接

続し、各機器へのコマンド送信及び数値データの受信を1 サイクルで行う事が可能となった。Figure 3 に各機器との通信について示す。

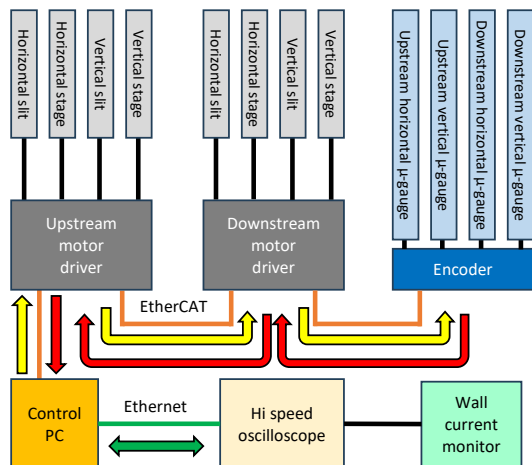


Figure 3: Connection and communication of each device.

3. 測定及び解析プログラム

3.1 スリットスキャンプログラム

スリット制御およびデータ解析には LabVIEW[5]を使用した。本プログラムは4つのスリット幅とステージ位置を手動で操作する機能に加え、任意の2対のスリットを制御しオシロスコープの波形を取得する4つのパターンの自動測定モードを備えている。

- ビームサイズ測定
 - 上流水平・垂直スリットを使用するモード
 - 下流水平・垂直スリットを使用するモード
- エミッタンス測定
 - 上下流水平スリットを使用するモード
 - 上下流垂直スリットを使用するモード

また、今回導入した壁電流モニタと高速オシロスコープの組み合わせと、既設のCTとオシロスコープの組み合わせを切り替えられる仕様としている。作成したスキャンプログラムをFig. 4に示す。

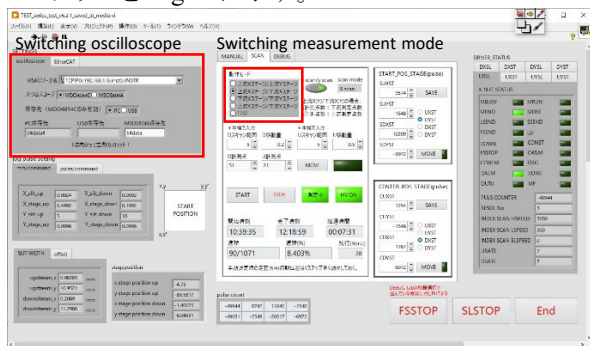


Figure 4: Program screen of the emittance measurement.

3.2 測定手順

測定の条件出しは下記の手順で行っている。

- 1) 上流側スリットで切り出したビーム波形の強度を見な

から上流側スリットの開口幅を決定する。

- 2) ステージを手動でスキャンしてビームの存在範囲を探索し、測定範囲、中心座標、1step当たりの移動量を決定する。
- 3) 上流側のスリットを中心に固定し、下流側スリットの開口幅を適当な値に設定した状態で下流側ステージを手動スキャンし、下流側スリットにおけるビームの存在範囲を求める。
- 4) 2)、3)をもとに下流側スリットの開口幅、測定範囲、中心座標、1step当たりの移動量を決定する。

測定に使用する各ステージを中心座標に移動しプログラムの測定モードを選択する。Figure 5に示す通り、測定モードによりスリットの走査順序及び測定開始点が異

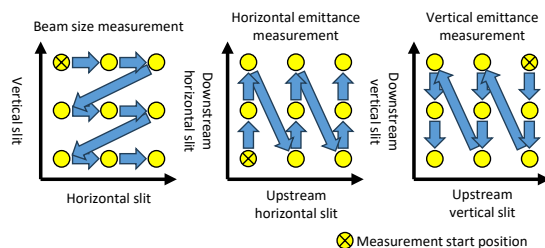


Figure 5: Operation of each mode.

なる。プログラムの各入力欄に測定範囲(半幅)、1stepの移動量を入力し、測定点数を自動計算して各測定スタート位置へスリットを移動させる。繰り返し走査する側のスリットはバックラッシュによる測定誤差を無くするため、1step分多く移動させている。水平エミッタンス測定を例に各測定機器の動作を説明する(Fig. 6を参照)。自動測定を開始すると、下流水平スリットを1stepずつ移動しながら各座標でオシロスコープの計測波形が保存される。下流の走査が終了すると上流水平スリットを1step移動し、再度下流スリットの走査と波形の保存が行われる。これを上流の走査が完了するまで繰り返す。

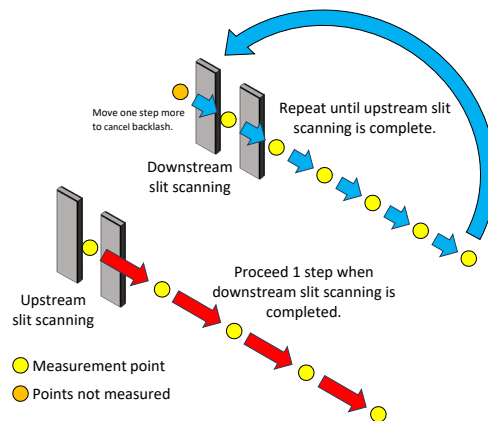


Figure 6: Slit movement during measurement.

3.3 測定データ補正プログラム

自動測定を開始する前にオシロスコープでビームの無い状態でのバックグラウンドをリファレンス波形として保

存する。自動測定中は測定波形よりリファレンス波形を差し引いた値を測定データとして保存している。第 2 章で述べたように、本壁電流モニタはノイズシールドを使用していないため、高電圧機器のノイズにより測定中にバックグラウンドが変動し、測定波形に傾きと offset が発生してしまう。測定中の時間経過によるバックグラウンドの変動を Fig. 7 に示す。

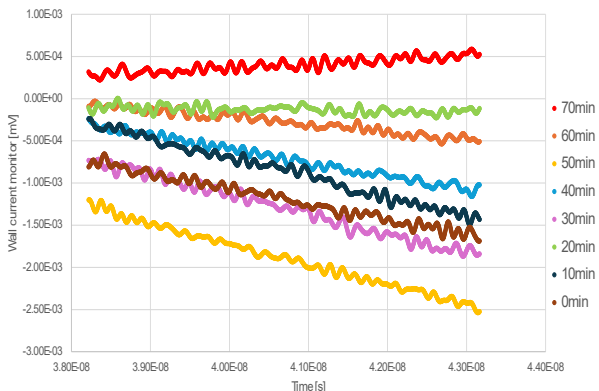


Figure 7: Background fluctuations during measurement.

バックグラウンド変動の要因であるノイズを低減させるため、アースの設置位置やケーブルの取り回しを変更するなどの対策を実施したが大幅な改善は見られなかった。そのため、プログラムによる波形補正を行い解析する事とした。

傾きの補正について、波形の最初と最後の電圧値より傾きを計算し各点に補正値を加え、最初と最後の電圧値の差が 0 V となるようにした。offset の補正については最初の電圧値と 0 V との差分を計算し、各測定点に差分を加え offset を補正する。また、この傾きと offset の補正を、取得した全波形に適用させるプログラムとした。補正前後の波形を Fig. 8 に示す。

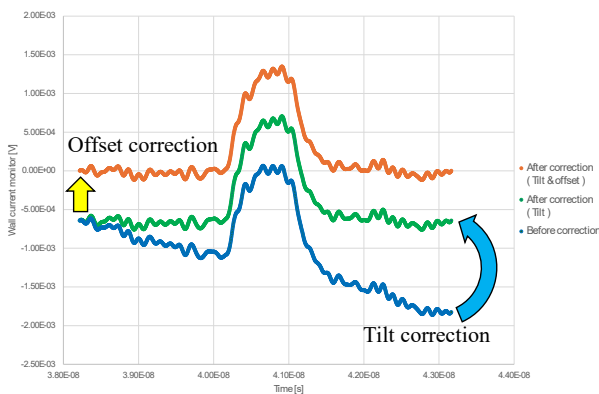


Figure 8: Tilt and offset correction.

3.4 データ解析プログラム

3.3 補正プログラムで補正した波形を各座標順にソートし直し、約 5 ナノ秒の波形を 3 ピコ秒毎に分割し 3D グラフで表示するプログラムを作成 (Fig. 9 を参照)。またソートした空間プロフィールを任意のフレームレートで動画のように再生させる事も可能とした。作成したフレームの

一部を Fig. 10 及び Fig. 11 に示す。Figure 10 にはビームサイズを (横軸を水平スリットの位置:幅 4 mm、縦軸を垂直スリット:幅 4 mm)、Fig. 11 にはエミッタンスを示す (横軸を上流の水平スリット位置:4 mm、縦軸を下流の水平スリット位置:3 mm)。両図とも波形の中心を 0 ps としている。

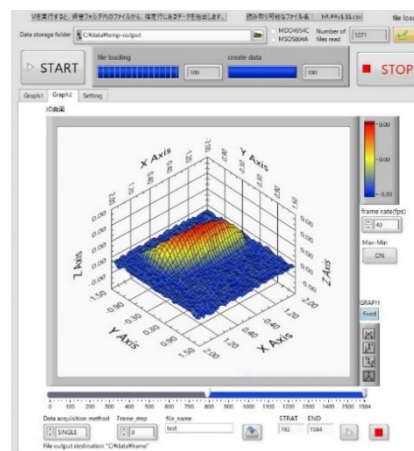


Figure 9: View of 3D plot on the program.

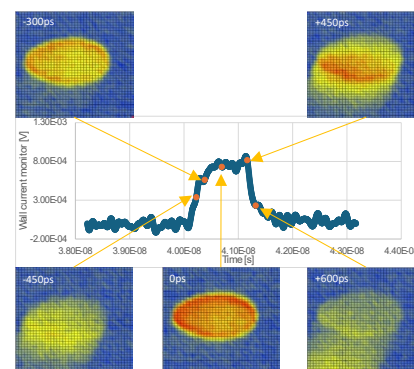


Figure 10: Time-resolved spatial beam profile.

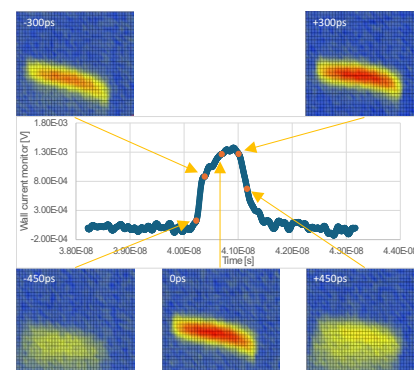


Figure 11: Time-resolved phase space profile.

4. 現状の問題点と今後の対策案

4.1 スリットスキャンプログラム

Figure 11 のエミッタンス測定の場合、約 1300 点の座標を測定する必要があり 1 時間 20 分程度の時間を要している。今後更なる高精度な測定を実施すると測定点数も増加し、効率化の面からも測定時間の短縮化が必要である。

- 測定したいビームの範囲 (Fig. 12 の赤枠内) のみ測定を行うようにプログラムを改修する。

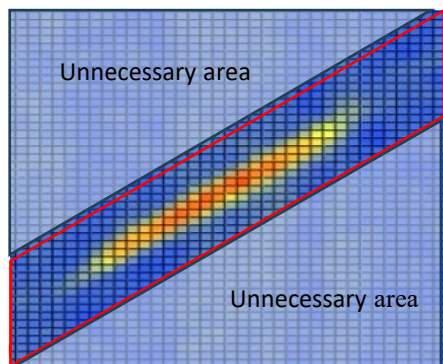


Figure 12: Range of beams to be measured.

- スリット幅及びステージ移動用のステップングモータ速度を最適化する。
- 測定を単一方向測定から往復測定 (Fig. 13) へ変更する。

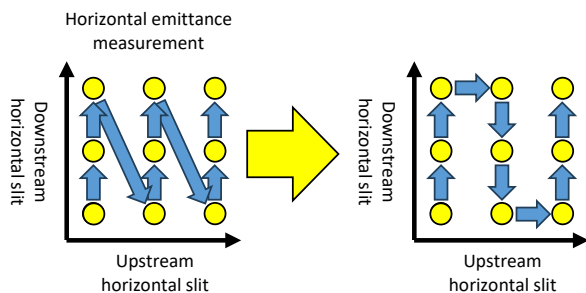


Figure 13: Round-trip measurement.

4.2 測定データ補正プログラム

S/N 比の高い波形では本プログラムの補正でも問題無いが、S/N 比が低い、コリメータ径を下げた場合や、スリット幅を極端に閉めるといった、ビームが極端に絞られた状態の場合では効果が弱い。

- アベレーシング回数を増やす。
- 傾きの計算を最初と最後の値各 1 点での計算から、最初と最後の複数点での平均値で計算する。
- 各座標での測定毎に、プログラムよりチョッパーを制

御しビーム ON/OFF の波形を取得しバックグラウンドを差し引く (Fig. 14)。

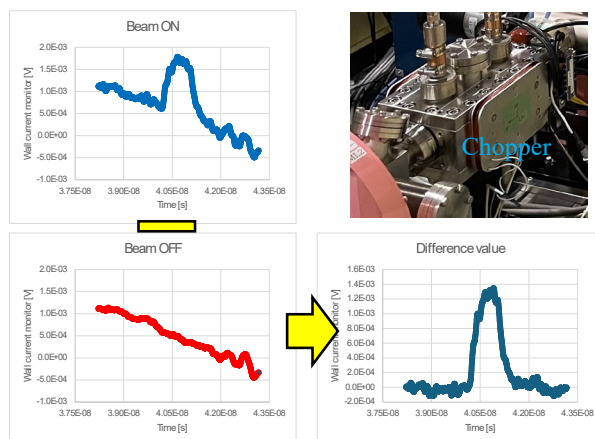


Figure 14: Background signal subtraction.

5. まとめ

新しく開発した壁電流モニタ及び LabVIEW で構築したスリットスキャンシステム、データ解析システムにより、1 ナノ秒の電子ビームを数 10 ピコ秒の時間分解能で測定する事が可能となった。しかしながら、4 章で記載した通り多くの問題点も出てきている。今後、これらの問題点を改善することで実験の効率化を図り、更なる電子源の高度化を進めていく。

謝辞

スリットスキャン測定システムの開発に多大なる貢献をしたスプリングエイトサービス株式会社の大原啓氏 (現所属: 三菱電機株式会社) に感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] 渡川和晃, “SACLA 電子源ビームの高輝度化に向けて”, 第 20 回日本加速器学会年会(2023).
- [2] K. Togawa *et al.*, “CeB₆ electron gun for low-emittance injector”, Phys. Rev. Spec. Top. -Accel. Beams 10, 020703 (2007).
- [3] K. Togawa, “Slice emittance measurements using a slit-gridsystem and a fast wall-current monitor”, Rev. Sci. Instrum. 95, 043304 (2024).
- [4] 前平晃太郎 他, “SACLA 電子銃システムの交換作業効率化のための機器整備”, 第 20 回日本加速器学会年会 (2023).
- [5] National Instruments, <https://www.ni.com/ja/shop/labview.html>