

## DRIFT-CONTROL OF ELECTRON BEAM ORBIT FOR STABILIZATION OF SASE LASER POWER IN THE SCSS PROTOTYPE ACCELERATOR

Shinichiro Tanaka<sup>1,A)</sup>, Kazuaki Togawa<sup>B)</sup>, Makina Yabashi<sup>B)</sup>, Teruaki Hasegawa<sup>A)</sup>, Masaya Oka<sup>A)</sup>,  
Taichi Hasegawa<sup>A)</sup>, Yuji Otake<sup>B)</sup>, Hitoshi Tanaka<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> JASRI/SPring-8, 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5198, Japan

<sup>B)</sup> RIKEN/SPring-8, 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo, 671-5148, Japan

### Abstract

In order to stabilize a position and an intensity of SASE (Self Amplified Spontaneous Emission) laser at the SCSS prototype accelerator, we have constructed an automatic correction system of an electron beam orbit. The orbit drift along the accelerator causes laser position and intensity variations. Our system corrects with only the orbit deviation from the pre-set reference in two undulators because this is very sensitive to lasing power. In this paper, we report on the outline of the orbit correction system and the achieved stability performances.

### SCSS試験加速器におけるレーザー安定化のための軌道ドリフト制御

#### 1. はじめに

SPring-8では、X線自由電子レーザー(XFEL/SPring-8)施設の建設が進められている。2005年にSCSS試験加速器を建設し、翌年EUV領域でレーザー増幅に成功した。その後ユーザー利用に向けて実験棟の建設、加速器の調整・安定化が行われ<sup>[1-2]</sup>、2007年9月にSASE-FELの飽和を達成、2007年10月から試験的ユーザー利用運転が、2008年5月からは課題募集による本格的ユーザー運転が開始されている<sup>[3]</sup>。ユーザー運転を円滑に進めるには、長時間に渡りレーザー位置とレーザー増幅状態を安定化させる必要がある。そこで、電子ビームの基準軌道からの偏差を補正する自動軌道ドリフト補正システムを構築し、レーザー増幅状態、並びに実験ハッチ内でのレーザー位置の安定化を試みた。

#### 2. 軌道ドリフト補正の基本方針

軌道ドリフト補正システムは、実験試料上でのレーザー位置と強度を長時間一定に保つ目的で導入される。このため、加速器に沿った全軌道ではなく、レーザー位置と強度に直接影響を与える2台のアンジュレータ内部の軌道のみが対象となる。アンジュ

レータ内部の軌道は、アンジュレータ入口、アンジュレータ中間、アンジュレータ出口の3ヶ所のBPMによる位置として規定される。まず、アンジュレータ部は静的であり短期間(1日程度)での地盤の変化も少なく軌道変動要因は、上流のRFシステムによりもたらされると仮定した。このように考えることで、軌道ドリフト補正は、アンジュレータ入口部での水平・垂直軌道の位置と角度を基準軌道に固定する問題に帰着できる。電子ビームの基準軌道と現軌道との差をモニタリングし、C-band 進行波加速管(TWA)上流の補正電磁石を用いてアンジュレータ入口での位置を補正し、そのBPM直下流の補正電磁石を用いてアンジュレータ入口角度を補正する。この2段階補正を周期的に行うことで、ここで前提とした条件が妥当であれば基準軌道と現軌道の偏差を十分小さく維持することが出来る(図1)。

#### 3. 軌道ドリフト補正システム

##### 3.1 使用するBPMと補正電磁石

軌道ドリフト補正システムでは、R&D用に設置されている3台の空洞型BPMが用いられる(配置は図1

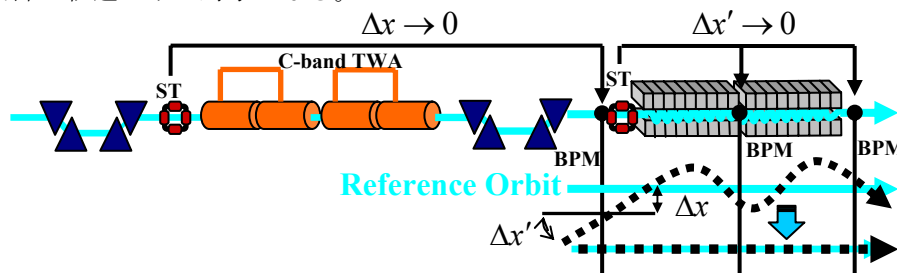


図1. 2段階軌道ドリフト補正スキーム。Δxは位置の基準軌道からの偏差を表わし、Δx'は角度の基準軌道からの偏差を表わす。

<sup>1</sup> E-mail: tanakas@spring8.or.jp

参照)。このBPMシステムは60Hzまでショット毎のビーム位置を高分解能で検出する能力を有する。現BPMシステムでは、0.2nCの加速電荷の場合で5 $\mu$ m以下の位置精度が得られている<sup>[4]</sup>。BPMから出た信号は加速器に同期したRFで検波され、電荷、位置検出用の振幅と符号判定用の位相がADCで別個に読み出される。これらのデータは0.5Hz周期でデータベースにも保存される。一方で補正に使用する電磁石は2台の水平垂直一体型の磁石（配置は図1参照）で、コアは低ヒステリシス材で作られているが、渦電流対策は施されていない。時間応答特性よりは再現性を重視した設計になっているため、1Hzより高速の補正は現状では困難である。

### 3.2 軌道ドリフトの周波数成分とその抽出

図2に、BPMで検出された2秒毎の水平位置を移動平均のデータ数（時間幅）をパラメータとして示す。ショット毎のBPMの値は、主に入射部RF系の変動による位置変動、ビームエネルギー変動、電子ビームの実空間分布や軌道の傾き成分の変化等の影響を受け、大きく変化している事が分かる。スパイク上の高周波成分は5点（10秒）の移動平均でおおよそ取れる事が分かる。

5点の移動平均データを用いて水平軌道変動の主要周波数成分がどのあたりに位置するのかを調べた。図3にFFTのデータを示す。図2の軌道の大きなうねりに対応するピークが0.01 Hz近辺に位置するツインピークである。振幅は周波数と共になだらかに減衰していくが、0.05と0.15 Hz 付近にブロードなピークも存在する事が分かる。ここでは示していないが、垂直軌道の周波数特性は、水平とほぼ同じであった。これらのデータをもとに補正周期も考慮して、先ず、10点のデータのアンサンブル平均を軌道ドリフトと見なして補正を行う事とした。

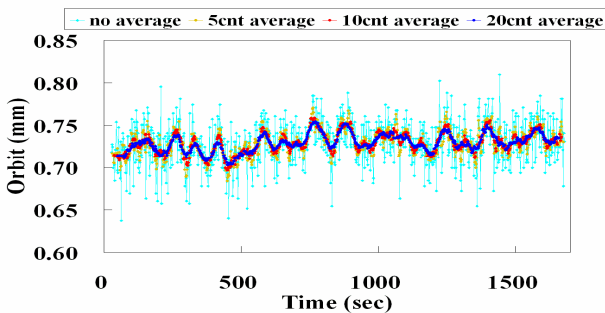


図2. BPMで検出した2秒毎の水平位置

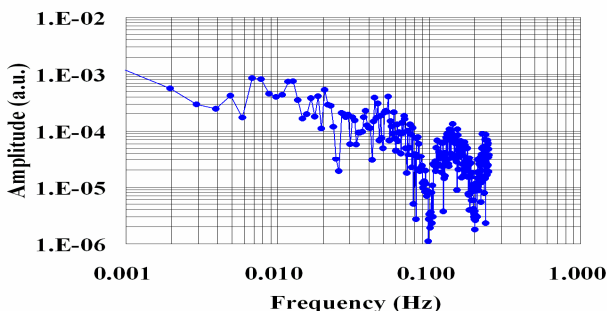


図3. 軌道変動の周波数成分

### 3.3 補正で用いる電磁石の感度係数

使用する補正電磁石とBPMの数が少ないので、各補正電磁石毎に対応するBPMの線形応答は、線形オプティックスによるモデル計算ではなく、ビーム応答測定により得られる測定値を使用する。補正電磁石の電流値を  $x$ 、その時の  $n$  番目のBPMの変位を  $\delta_n$  と表せば、線形感度係数  $S_n$  を用いて  $\delta_n = S_n x + b$  と記述でき、 $N$  個の電流値の異なるデータを最小二乗法でフィットする事により感度係数  $S_n$  は (1) 式のように求められる。感度係数は、アンジュレータギャップや加速器のパラメータに依存するため、効率化を図るためにGUIによる自動測定が可能のように配慮した。

$$S_n = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \delta_{ni} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N \delta_{ni}}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N x_i} \quad (1)$$

### 3.4 軌道補正

データベース経由でビームの位置情報を取得し、10点のデータの平均値として与えられる軌道と基準軌道との偏差から、最小二乗法により補正電磁石の値を決定する。ここでは、図1にしめすようにアンジュレータ入口での軌道の変位補正 (Step-1) と角度補正 (Step-2) を分離し、順番に独立して、1台ずつの電磁石で補正を行うため、各電磁石の補正量  $x$  は (2) 式で簡単に計算できる。

$$x = \frac{-\sum_{n=1}^N \delta_n S_n}{\sum_{n=1}^N S_n^2} \quad (2)$$

現状10点のデータ取得に20秒を要することから、30秒ごとにこの2段階補正を繰り返し行っている。

## 4. 軌道ドリフト補正の有効性と長期安定性

現状の軌道ドリフト補正の性能を表1にまとめる。この補正を行うことによって1日（約10時間）のユーザー運転中、レーザー増幅状態を安定に保つことが可能となった。また、入射器RF系のパラメータ調整が、アンジュレータ部の軌道ドリフトに煩わされることなく効率的に行えるようになった。図4に、2台のアンジュレータの中間に位置するBPMの約5時間に渡る水平(a)及び垂直(b)軌道変動の補正ONとOFFの場合を比較して示す。

表1. 軌道ドリフト補正の性能

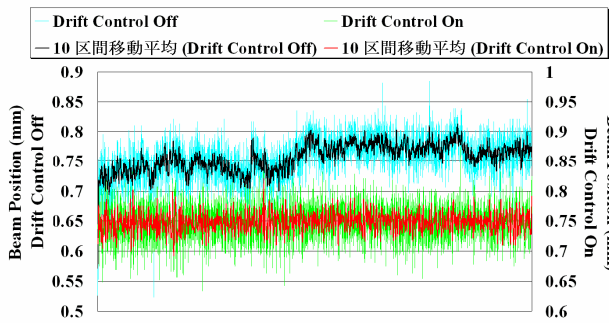
	電子ビームの 水平変位 ( $\sigma$ )	電子ビームの 垂直変位 ( $\sigma$ )	レーザー強度	レーザー変位
軌道ドリフト補正OFF	31 $\mu$ m	10 $\mu$ m	$\geq 50\%$ *2	*3
軌道ドリフト補正ON	11 $\mu$ m	6 $\mu$ m	$\sim 11\%$	ビームサイズの5% *4

\*1 電子ビームの変位は、アンジュレータ部入口、中間、出口の変位の平均を示す

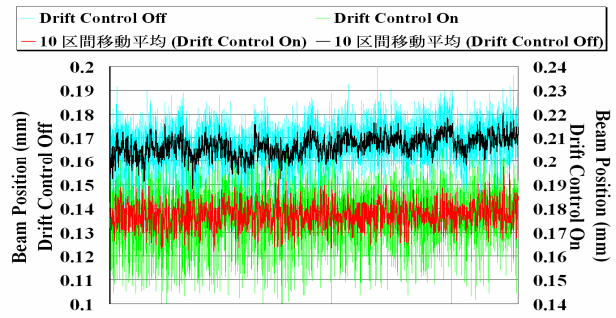
\*2 定常的SASE飽和は維持できない

\*3 測定データなし

\*4 光源から10m下流で測定



(a). アンジュレータ中間部水平軌道



(b). アンジュレータ中間部垂直軌道

図4. ビーム軌道の長時間変化 (約5時間)

次に、アンジュレータ部の軌道を基準軌道にどの程度精密に合わせることがレーザー増幅状態を維持する上で必要かを調べた。図5に軌道を基準軌道から50 $\mu$ m程度ずらした状態で、軌道ドリフト補正を働かせた場合のレーザー増幅状態の回復の様子を示す。軌道ドリフト補正による軌道平均値の回復で、レーザー出力が顕著に回復していることが分かる。実験ハッチで軌道ドリフト補正ONの状態でレーザースポットを観察しても、何処で補正が行われたかは判別できず、補正のON/OFFで、短期の位置安定性に顕著な違いは見られず、実験者からみて補正は十分に透明になっている。その一方で、図4でも分かるように、補正ONの状態でも軌道変動は10 $\mu$ m程度残っており、それに相関したレーザー出力変動も明らかである。このことから、現状の補正精度は未だ十分とは言えず、今後補正精度の向上が望まれる。

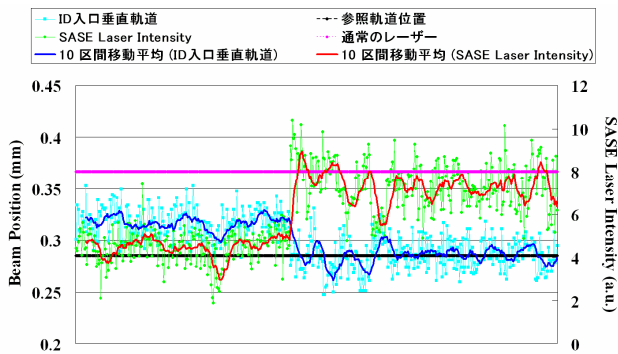


図5. アンジュレータ部の軌道とレーシングの相関 (約15分間)

## 5. まとめ

レーザー増幅状態、並びに実験ハッチ内でのレーザー位置の安定化を行うために軌道ドリフト補正システムを構築した。アンジュレータ部の軌道ドリフトを抑制し、レーザー増幅状態とレーザー位置再現性を確保した。この軌道ドリフト補正システムはユーザー利用運転で運用を開始しており効果を発揮している。ただし、ユーザー運転中、軌道のドリフトは抑えられているものの、短期的にみると軌道変動幅が小さくなっておらずレーザー出力が変動することが明らかとなった。現状の補正周期では、軌道変動の比較的高い周波数成分の抑制に対応できていないことが解り、今後これに対応するため、データサンプリング数を上げる改造を行い補正ルーティン的高速化を行って軌道変動の抑制を行う予定である。

## 参考文献

- [1] 前坂比呂和、他. “SCSS試験加速器のRFシステムの高精度化”, 本研究会ポスター発表
- [2] 細田直康、他. “SCSS試験加速器におけるEUVレーザー安定化のための静電ビームディフレクタのタイミング制御”, 本研究会ポスター発表
- [3] 田中均、他. “SCSS試験加速器の運転状況 - 50~60nmのレーザー波長領域での連続SASE飽和の達成 -”, 本研究会口頭発表
- [4] 前坂比呂和、他. “SCSS試験加速器のビーム位置検出器および電荷検出器の性能”, 本研究会2006年発表