

INFLUENCE ON THE FEL INTENSITY BY A CHANGE OF AN ENVIRONMENTAL MAGNETIC FIELD IN THE INJECTOR OF SACLA

Tatsuyuki Sakurai ^{#,A)}, Takahiro Inagaki ^{A)}, Sakuo Matsui ^{A)} and Yuji Otake ^{A)}

^{A)} RIKEN SPring-8 center XFEL Research and Development Division

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148

Abstract

During the commissioning of SACLA accelerator, unexpected perturbations of an electron-beam orbit and drop-off of FEL intensity were suddenly observed. This amount of the orbital perturbations is about 0.35mm in an injector section. In the case of SACLA, within 4 μ m perturbation along an undulator section allow us stable X-ray lasing. We suspected the correlation between the construction work of a shield room near by the injector section and these phenomena. Then the synchronizations between the beam-orbital motions, and motions of an overhead traveling crane and a trailer around the injector were founded. Due to accurate measurements, it is also found out that the environmental magnetic field was changed up to 0.002 Gauss by the crane motions. We could reproduce the same amount of beam-orbital motion by changing the same amount of the magnetic field change with an Earth magnetic-field correction-coil surrounding the injector section. This fact strongly suggests that over 4 μ m orbital perturbation of the electron beam along the undulator section is associated with this injector-part perturbation. In this paper, we report the FEL intensity instability caused by an unanticipated small change of the environmental magnetic field, and discuss the sources of the magnetic field change and the mechanisms of the perturbations.

SACLA 加速器における入射部環境磁場の変動による FEL 強度への影響

1. はじめに

SACLA (SPring-8 Angstrom Compact free electron LAser) は X 線自由電子レーザー (XFEL) を発生させ利用実験に提供する施設である。2011 年 6 月に最初の X 線レーザーの発振に成功し[1]、本年 3 月からは供用運転が開始された。現在 SACLA は実験ユーザーに 5~14 keV の X 線レーザーを 24 時間安定に供給し続けている。

その運転中において原因不明の電子ビームの軌道変動が発生し、レーザー強度出力が著しく低下する事象が起これ問題となった。この事象が発生した際、加速器最上流部の機器搬入室で遮蔽コンクリートブロックの積み下ろし作業を行っていたことから、これらの作業とビーム軌道変動の因果関係を調査した。作業を行っていた場所は入射部に近い場所であった。図 1 に SACLA 入射部の機器構成の模式図を示す。入射部は電子銃より 500kV で取り出された 1nsec(FWHM)幅の 1A ピークの電子ビームを、速度変調バンチングによって電子バンチ幅を約 20 倍まで圧縮し 20A のピーク電流を形成しつつ、約 30MeV まで加速する、電子ビームの質を左右する重要なセクションである。この入射部は電子ビームのエネルギーが低いため、環境磁場等の外的要因がビームの質に大きく影響する[2][3]。例えば入射部の軌道変動が伝搬して、アンジュレータ部の軌道が 4 μ m 以上変動するとレーザーの強度が半分になる[4]。本件も入射部において何らかの外的要因が寄与していると疑い、それらを調査した。

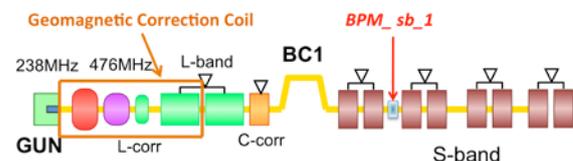


図 1: SACLA 入射部の機器構成の模式図

2. 軌道変動を起こした事象

2.1 搬入室に停止したトラックによる影響

この予期せぬ軌道変動が起きた際、SACLA 加速器の最上流部に近い搬入室では大型トラックによるコンクリートブロックの搬入作業を行っていた。図 2 はその搬入室周辺の配置図を示す。図 2 の上部の搬入口からトラックが出入りするタイミングでビーム軌道の変動が観測された。図 3 はトラックが出入りした際の電子ビーム軌道 (青) とレーザー強度 (赤) の変動を示す。ビーム軌道の測定は図 1 に示した BC1 後方の BPM_sb_1 で、レーザー強度の測定は実験棟光学ハッチ内に設置された 4 象限強度モニターを用いた。トラックが搬入室に入ったタイミングで約 0.35 mm、電子ビーム軌道が変化し、レーザー強度が約 60%まで低下した。トラックが停止している間、電子ビーム軌道やレーザー強度はこの状態を維持し、トラックが搬入室から出ると、軌道もレーザー強度も元に戻った。

[#] t-sakura@spring8.or.jp

2.2 搬入室の天井クレーンによる影響

図 2 の搬入室には 10 トンの天井クレーンが備えられている。このクレーンの走行によっても電子ビームの軌道が変動することが分かった。図 4 にクレーン動作時のビーム軌道とレーザー強度の変動を示す。クレーンが図 2 の矢印の方向に動くとビーム軌道に影響した。特に搬入口周辺で動かすと、より大きく変動することが分かった。変動幅は最大 0.15mm で、レーザー強度は約 8%減少した。

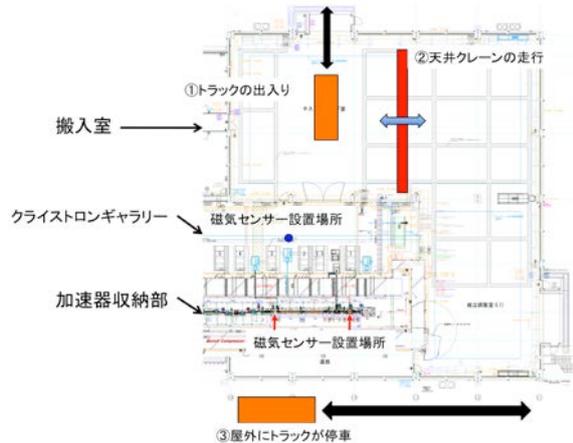


図 2： XFEL 加速器最上流部の模式図

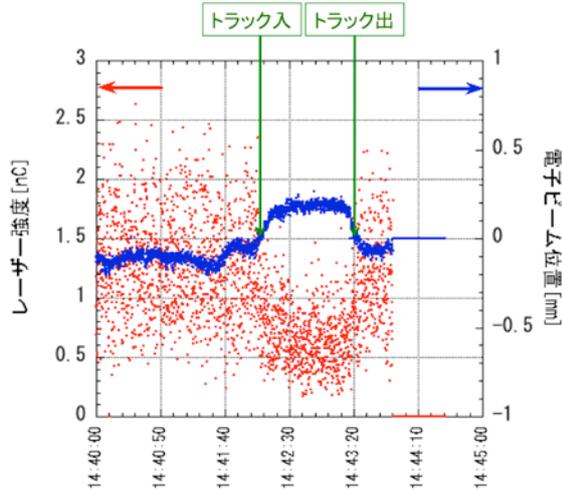


図 3： 搬入室に停止したトラックが起こした電子ビーム軌道の変動（青）とレーザー強度の変動（赤）

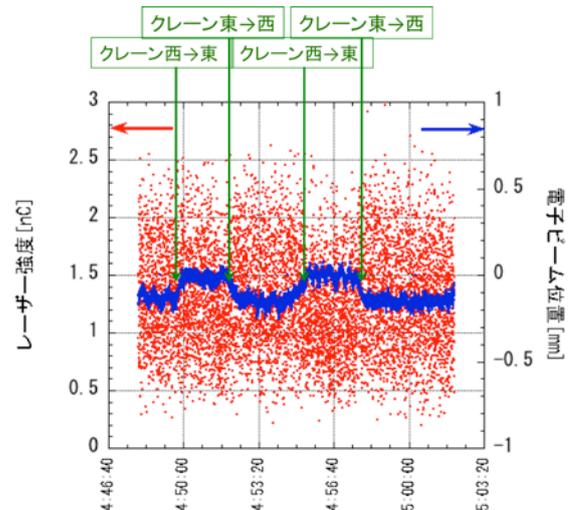


図 4： クレーン走行による電子ビーム軌道の変動（青）とレーザー強度の変動（赤）

2.3 屋外の入射部近傍にトラックが停止した影響

建屋南側の入射部に隣接した位置にトラックが停止した時に最も大きな変動が生じた。図 5 にビーム軌道とレーザー強度の時間変化を示す。トラックが図 2 の③の位置付近に停車するとビーム軌道が 0.7mm 程変動し、FEL 発振が完全に止まってしまった。

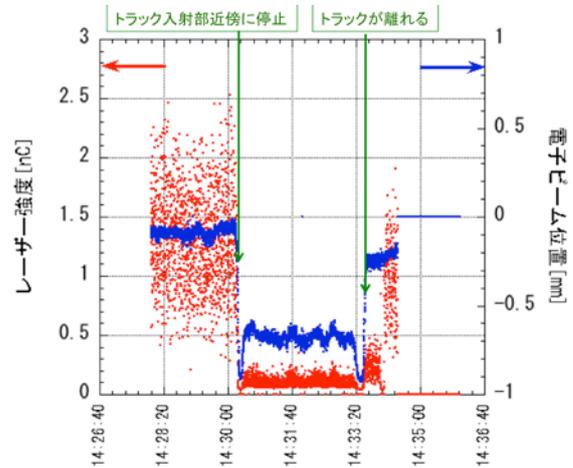


図 5： 屋外の入射部近傍にトラックが停止した際の電子ビーム軌道の変動（青）とレーザー強度の変動（赤）

3. 変動の原因

3.1 トラックによる変動

レーザー強度が上述の作業によって影響を受けることが確認された。ではこの作業によって何が変化して影響を及ぼしているのか調査した。

この調査のために、搬入室と加速器収納部の間にあるクライストロンギャラリーにフラックスゲート

磁気センサーを設置し、クレーン走行時や、トラックの出入りによって環境磁場が変化しているか測定した。

まず図 6 にトラックが屋外に停止した際の環境磁場を、図 7 にその際の BPM_sb_1 でのビーム軌道の測定結果を示す。図 2 の③の場所において、トラックが出入りする時に環境磁場が変動することが確認された。変動量は 0.05 G と地磁気の約 1/4 であった。さらに停車時のトラックの前後の向きを入れ替えて測定を行った。その結果図 6 の①と②で環境磁場の変化の向きが逆方向に変動した。そしてそれに合わせて図 7 のビーム軌道も逆向きに振れた。これらの結果から、トラック自体が磁化している可能性を疑い、トラックの残留磁場をガウスメータで測定した。その結果最大 10 G の残留磁場が確認された。このトラックはマグネットリフトで吊り上げた鋼材を積み込んだ経験があり、磁場が残留した可能性が疑われる。

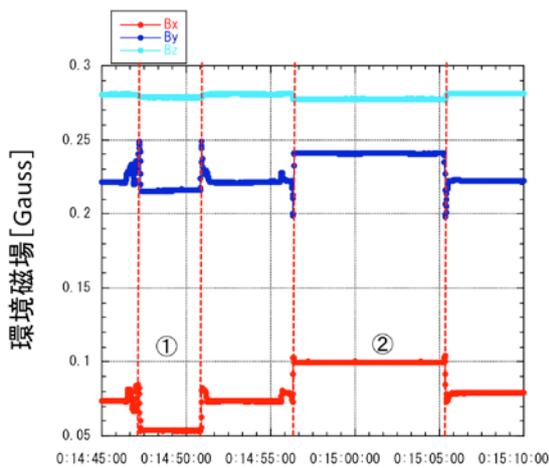


図 6：屋外にトラックが停止した際のクライストロンギャラリーでの環境磁場変動

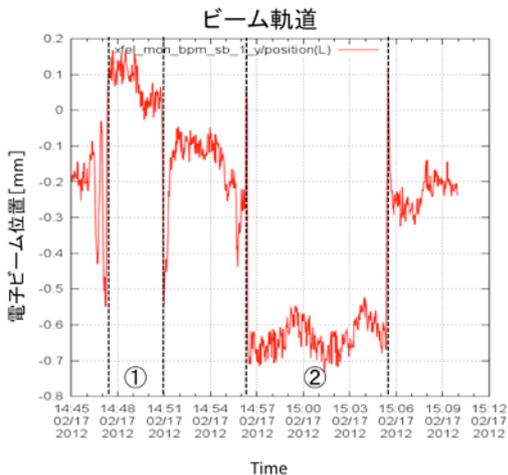


図 7：屋外にトラックが停止した際のビーム位置の変動

3.2 クレーンによる変動

クレーンによる影響調査はクライストロンギャラリーに加えて、収納部内の入射部近傍の 2 箇所にフラックスゲート磁気センサーを設置して環境磁場の測定を行った。測定時はクレーンを一定間隔で動かし、その時の環境磁場とビーム軌道を測定した。図 8,9 は入射部近傍とクライストロンギャラリーでの環境磁場の変動を示す。クレーンを走行させると、クライストロンギャラリーでは最大で 0.02 G の変動が観測された。これは地磁気の大きさの 1/10 に相当する。

収納部内では、入射部の 238MHzSHB 空洞と C バンド補正空洞近傍の 2 カ所にフラックスゲート磁気センサーを設置し、搬入室のクレーンを一定間隔で動かしながら、環境磁場の変動を測定した。測定の際は電子銃カソードヒーター以外の電源類は OFF して行った。その結果、天井クレーンの走行に合わせて、入射部近傍の環境磁場もわずかに変動してい

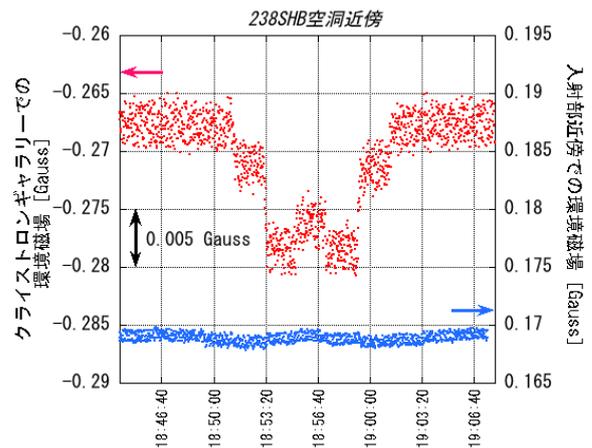


図 8：天井クレーンの動作によるクライストロンギャラリー（赤）と 238MHzSHB 空洞近傍（青）での環境磁場変動

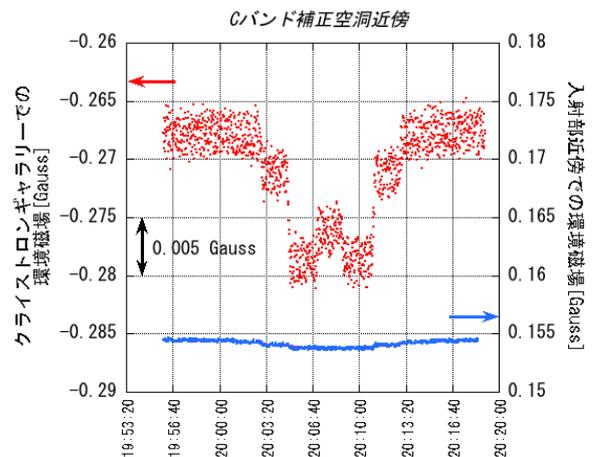


図 9：天井クレーンの動作によるクライストロンギャラリー（赤）と C バンド補正空洞近傍（青）の環境磁場変動

ることが確認された。その大きさは 0.002 G 程度で、地磁気の 1/100 であった。またクレーンがそれぞれの測定点に最近接した時に変動が最大になることが分かった。

3.3 地磁気補正用コイルによる環境磁場変動の再現

上述の作業によって加速器収納部内の環境磁場がわずかに変動することが確認された。またこの環境磁場の変動がビームに影響するのか調べるために、地磁気の 1/100 の変動量を再現して現象が再現するかを調査した。SACLA 加速器の L バンド空洞前までは電子ビームエネルギーが 1 MeV 以下と低いため、地磁気の影響が無視できない。そのため入射部にはそれを打ち消すための補正コイルが設置されている。この補正コイルを用いて人為的に入射部の環境磁場をクレーンによる影響分だけ変化させ、同様の電子ビームの変動やレーザー強度の変動が見られるか調べた。

図 10 は補正コイルの電流値を 1% ずつ変えた時の、BPM_sb_1 での電子ビーム軌道とレーザー強度の変動を示す。補正コイルの電流値を定常運転時から 0.5% 変更すると、クレーンによる軌道変動と同程度の変動が現れた。0.5% の電流値の変化を補正コイルの発生磁場に換算すると 0.0015 G に相当する。これは収納部内で測定した環境磁場の変動量 0.002 G とほぼ一致する。そしてレーザー強度もまた約 8% 減少した。これらの結果からクレーン走行により入射部の磁場は地磁気の 1/100 程度の変化をし、これが電子ビームの質に影響を与えていたことがわかった。

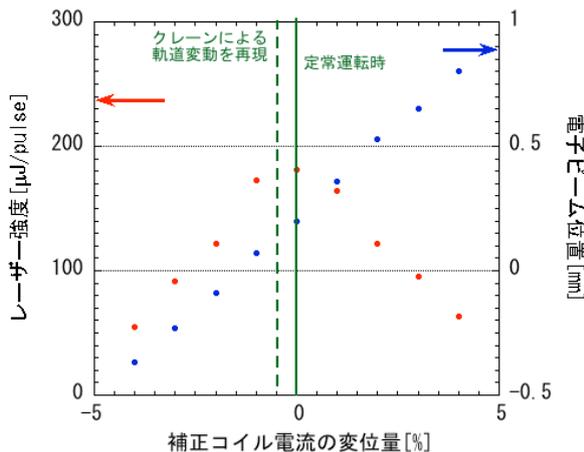


図 10：補正コイルの電流値を変えた時の電子ビーム位置（青）とレーザー強度（赤）の関係。緑実線は定常運転時、緑点線は電流値を 0.5% 変化させ、クレーンによる軌道変動を再現させた時

4. アンジュレータ部での電子ビーム位置の変動

これまで述べたように、トラックやクレーンによって環境磁場の変動が起こり、入射部の軌道が変動していることが分かった。ではこの軌道変動がアンジュレータ部の軌道にまで伝搬しているのかを調査した。

図 11 に上述の 2.3 節での電子ビーム変動を示す。赤は図 1 に示した BPM_sb_1 での電子ビームの軌道変動で、青はアンジュレータ直前に設置された BPM での軌道を示す。トラックによって電子ビームが 0.7 mm 変動した時、それがアンジュレータ直前においても、約 50 μm 軌道が変動していることが確認された。前述した許容幅 4 μm と比較してひと桁以上大きいため、レーザー発振が止まったものと考えられる。

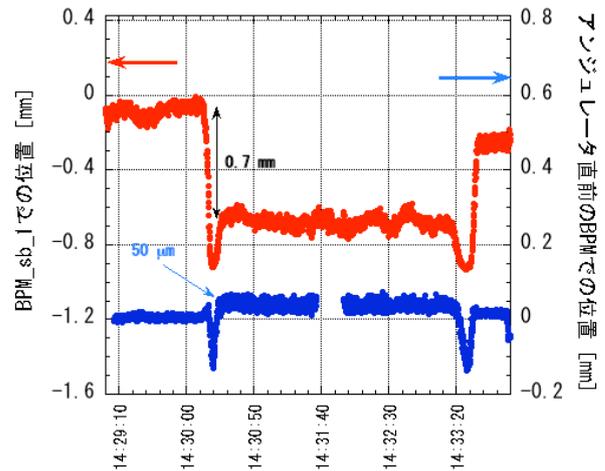


図 11：屋外にトラックが停止した際の電子ビーム位置の変動。赤：BC1 後方の BPM_sb_1 でのビーム位置、青：アンジュレータ直前の BPM でのビーム位置

5 まとめ

SACLA 加速器に於いて観測された原因不明のビーム軌道の原因は①遮蔽コンクリートブロックの搬入に使用していた磁化されたトラックと②天井クレーンの走行であった。そこで天井クレーンを動かしながら入射部近傍での環境磁場の変動を観測した所、環境磁場が地磁気の 1/100 だけ変動していることが判明した。その僅かな変動量が加速器に影響するか調べるために地磁気補正コイルを用いて再現実験を行った。その結果、環境磁場変動と同程度の磁場を与えることで軌道・レーザー強度変動が再現した。そして入射部の軌道変動が 400m 離れたアンジュレータ部まで影響を及ぼすことが判明した。したがって、我々は今回の一連の事象は環境磁場の変動によって引き起こされものであると断定した。機

器搬入室のある場所は加速器の最上流部にあたり、電子ビームのエネルギーが低い入射部に非常に近かったため、僅かな環境磁場の変動に敏感に反応してしまったものと思われる。

参考文献

- [1] H.Tanaka et al., “A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-angstrom region”, Nature Photonics,
- [2] T.Hasegawa et.al., ”SACLA 入射部における環境磁場の一様化対策”Proceeding of the 8thAnnual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan
- [3] S.Matsui et.al., “XFEL 加速器トンネル内の地球磁場と鉄筋の消磁”, Proceeding of the 7thAnnual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan
- [4] T.Tanaka.et.al., “Consideration on the BPM alignment tolerance in X-ray FELs”, Nuclear Instrumental Method, A.528, 172, 2004