

# ビーム輸送系電磁石の漏洩磁場によるビーム軌道変動 BEAM ORBIT VARIATION AT SAGA-LS STORAGE RING CAUSED BY STRAY FIELDS OF TRANSPORT MAGNETS

金安達夫\*, 高林雄一, 岩崎能尊, 江田茂

Tatsuo Kaneyasu\*, Yuichi Takabayashi, Yoshitaka Iwasaki, Shigeru Koda  
SAGA Light Source

## Abstract

Beam orbit variation has been observed in the SAGA Light Source storage ring. Sudden shift of the beam orbit was frequently observed soon after the beam injection or just before the beam dump in the past two year. The maximum orbit variations were  $40 \mu\text{m}$  and  $20 \mu\text{m}$  for horizontal and vertical directions, respectively. To detect the origins of the orbit variation, we have checked operational data of the beam orbit, chamber movement and steering magnet current. We found that the orbit variation was caused by weak stray field of the transport magnet through the shutdown operation for the beam transport system. As a prevention we modified the operating procedure in the beam injection sequence. Currently the sudden orbit variation is not observed in the daily user operation.

## 1. はじめに

放射光施設 SAGA Light Source の 1.4 GeV 電子蓄積リング (以下 SAGA-LS リング) では, 近年, 加速器運転中にビーム軌道が突発的に変動する現象が観測されていた. 軌道の変位量は電子ビームサイズに比べて小さく放射光利用上の問題は生じていなかったが, 原因不明の軌道変動に対する対処は必要と判断し, 原因調査と対策に取り組んだ. 原因調査はデータベースを用いた過去の運転記録の検証から始まり, 蓄積リング真空槽の変位やステアリング電磁石の動作確認を経て, ビーム輸送系電磁石の漏洩磁場が軌道変動の要因と特定された. 本稿では軌道変動の原因解明へ向けた調査の結果と対処について報告する.

## 2. 軌道変動の傾向

SAGA-LS リングはビームエネルギー 1.4 GeV, 周長 75.6 m の比較的小規模なシンクロトロン光源である. ラティスは 8 回対称でダブルバンド型の電磁石配置であり [1], ビーム軌道計測用の BPM はリングの 1 セルにつき 3 箇所, リング全体では 24 箇所に設置されている. 2013 年現在, ユーザー利用日の加速器運転は基本的に 1 日 1 回の入射である<sup>1</sup>. 朝 9 時よりビーム入射を開始し, 概ね 10 時前には初期電流値 300 mA にてユーザー利用が開始される. 運転終了時刻は 21 時である. 通常ユーザー利用日における加速器運転手順では, 超伝導ウイグラーの励磁後にグローバル COD 補正を行い, その後, カップリング調整を経てユーザー利用を開始する. グローバル COD 補正には実測のレスポンス行列を用いており [2], 補正精度は基準軌道に対して  $20 \mu\text{m}$  (rms) 以下である. ユーザー利用の開始後は, 挿入光源のギャップ・位相操作に応じてフィードフォワード方式の COD 補正 [3] が行われている.

蓄積リングの運転状態を監視するうちに, 緩やかなビーム軌道のドリフトに加え, 突発的な軌道変動も生じていることが判明した. ビーム軌道の測定値は 1 分

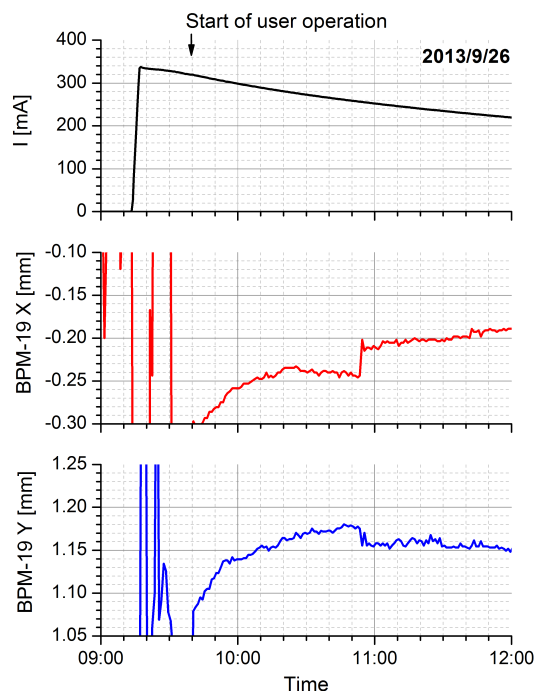


Figure 1: Beam orbit variation during an user operation of the SAGA-LS storage ring. Sudden orbit shift within one minute was observed at 10:54. The beam position data obtained by BPM No. 19 are plotted as representative for the 24 BPMs.

間隔でデータベース [4] に取り込まれている. 軌道変動のおおよその傾向を把握するため, データベースに保存されている運転記録を用いて調査を行った. Figure 1 に典型的な軌道変動イベントが発生した際の BPM 測定値を示す. ユーザー利用開始直後から数十分間のビーム軌道の緩やかな変動は, 放射光の熱負荷による BPM 真空槽の位置変動が大きな要因と考えられている [5]. 熱負荷によるドリフトに加え, 11 時頃にステップ状の軌道変動が発生している. Figure 1 では BPM-19 による測定値を例として示したが, その他の BPM においても同

\* kaneyasu@saga-ls.jp

<sup>1</sup>本稿で扱うデータは 2012 年度と 2013 年度の運転記録である. 当時は 1 日 1 回入射の運転形態であったが, 2014 年度より 1 日 2 回入射の運転も行っている

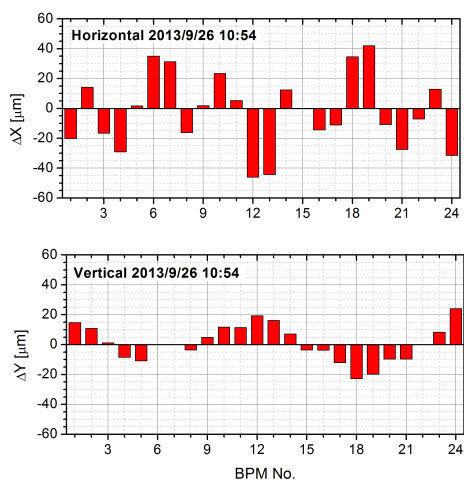


Figure 2: Beam orbit variations for the horizontal and vertical directions. The orbit variations are changes of the beam orbit measured by the BPMs during one minute.

時に変動が発生していた。蓄積リング全体の軌道変動を Figure 2 に示す。軌道変動は蓄積リングの全周に分布しており、最大変位量は水平方向では  $40 \mu\text{m}$  程度、垂直方向は  $20 \mu\text{m}$  程度であった。なお BPM-6, 7 による垂直方向ビーム軌道の測定値はノイズの影響が大きく、今回の調査ではデータから取り除いた。

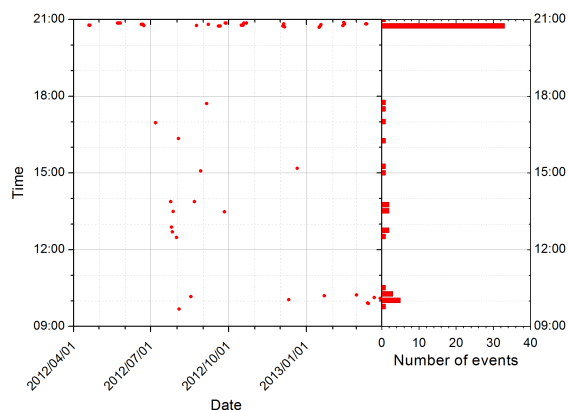
過去 2 年分の運転について BPM 測定値を調査したところ、軌道変動のおおよその傾向として、i) 発生頻度は数日に一回、ii) 軌道変位の分布は再現性が高い、iii) 発生時刻はユーザー利用開始直後または利用運転の終了直前に集中する、iv) 挿入光源の操作とは相関が無い、ことがわかった。また BPM 測定値を 1 秒間隔でモニターしたところ、軌道変動に要する時間は 40 秒程度であることが判明した。過去 2 年間の軌道変動の発生日と時刻を Figure 3 にまとめる。ユーザー利用開始直後と終了直前に集中して軌道変動が発生している状況がわかる。2012 年度の運転を詳しく見ると、運転終了直前の軌道変動は月に一週だけ集中して発生しており、夏期には朝から夕刻まで発生時間帯は広がっている様子がわかった。一方、2013 年度になると、夏期以降はユーザー利用開始直後の時間帯に軌道変動が頻発している。軌道変動の発生時刻には明確な片寄りが見られることから、何らかの機器を人為的に操作することが要因と推定した。さらに施設の開所当時 (2006 年) の運転記録も調べたところ、蓄積リングにおけるビーム軌道の変動は当時から発生していたこともわかった。

### 3. 原因調査と対策

#### 3.1 真空槽の変位

まず BPM 計測値を通じて観測される軌道変動が確かにビーム由来であることを確認するため、BPM が設置されている真空槽の変位を確認した。SAGA-LS リングではビーム軌道の安定性に関する調査の一環として、一部の BPM 真空槽に接触式の変位計が取り付けられている<sup>[5]</sup>。変位計による BPM 真空槽の位置測定と BPM に

(a) FY2012



(b) FY2013

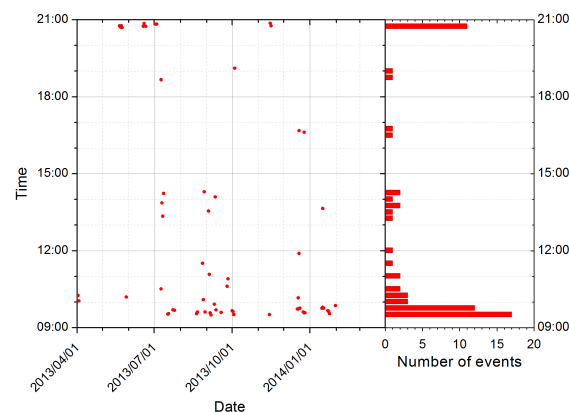


Figure 3: Two-dimensional plots for the orbit variation events observed in (a) FY 2012 and (b) FY 2013, respectively. The right side panel represents the time histogram of the events. The time bin size is 15 minutes.

よるビーム軌道変動を比較すれば、軌道変動が真空槽の変形由来かどうか検証することができる。ビーム軌道と真空槽の位置測定の結果を Figure 4 に比較する。比較対象の箇所は水平方向は BPM-2、垂直方向については BPM-11 である。ビーム軌道と真空槽位置の相関がわかりやすくなるよう、変位計が設置済みでかつ軌道変位量も大きい BPM を選んだ。Figure 4 に示したとおり、BPM 真空槽の位置は熱負荷によって緩やかにドリフトするものの急激な変化は無く、真空槽の変形が突発的な軌道変動の要因ではないと判断した。

#### 3.2 ステアリング電磁石

ビーム軌道の変位量と分布の再現性が高いことから、特定のステアリング電磁石による不整磁場の生成を疑った。SAGA-LS リングには 40 箇所ステアリング電磁石が設置されている。単一のダイポールキックによる COD を計算し、軌道変位の観測結果を再現するステアリング電磁石を探した。Figure 5 に軌道変位の観測結果と最も良く一致した計算結果を示す。ここで軌道変位量には 2013 年度に発生した軌道変動イベントの平均値を用いている。不整ダイポールの発生箇所として六極電磁石内蔵のステアリング (SDX-16, SFY-16) を仮定す

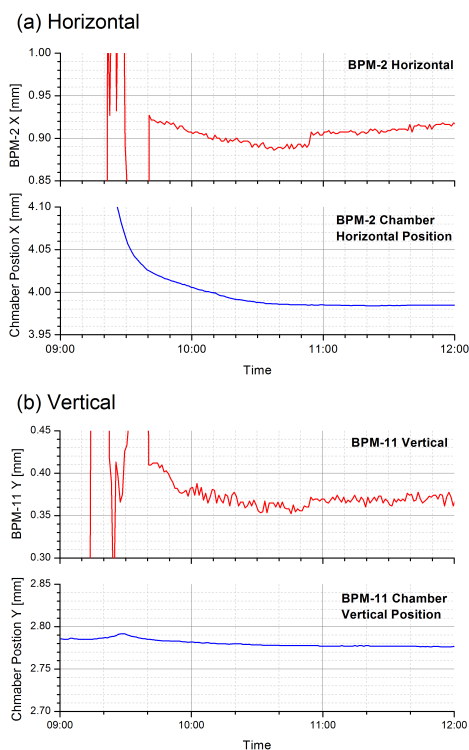


Figure 4: Comparison of the beam position data measured by the BPM and the BPM chamber deformation observed by the position sensor.

ると、軌道変動の測定値が良く再現されることがわかった。ダイポールキックの強さは水平方向で 40 G-cm、垂直方向に 10 G-cm 程度である。これをステアリング電磁石の励磁電流の変化量に換算すると、水平方向はおよそ 0.05 A、垂直方向については 0.03 A となる。ステアリング電磁石の励磁電流の変化が軌道変動を引き起こしているのか検証するため、不整ダイポールの発生源と思われるステアリング電磁石の励磁電流値を継続的にモニターしたが、計算で推定された程度の電流変化は発生していないことがわかった。

### 3.3 ビーム輸送系電磁石

不整ダイポールキックの発生源として可能性があげられたステアリング電磁石はいずれも入射点近傍である。SAGA-LS リングの入射点近傍の配置を Figure 6 に示す。蓄積リングの至近距離にビーム輸送系の電磁石が配置されており、これらを蓄積リング運転中に操作することで微小な漏洩磁場の強度が変化し、その結果、蓄積リングのビーム軌道変動が生じることが判明した。

ビーム輸送系電磁石による漏洩磁場の影響を確認するため、蓄積リングの四極電磁石 QD1-16 と QF1-16 間のビームダクト天井部にホール素子を取りつけて、輸送系電磁石の漏洩磁場の変化とビーム軌道の関係を調べた。Figure 7 にビーム輸送系電磁石の励磁電流、ビームダクト近傍の磁場測定値、ビーム軌道の関係を示す。ビーム輸送系の偏向電磁石 BM280-2 の操作に応じて、ダクト近傍の磁場とビーム軌道が変化することが明確にわかる。ビームダクト天井部で測定した漏洩磁場の変化量は

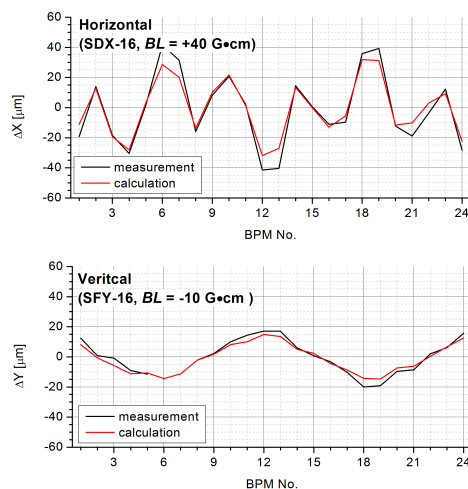


Figure 5: Comparison of the measured beam orbit variation and calculation result assuming single dipole kick at steering magnet. The dipole kicks assumed in the calculation are 40 and 20 G-cm for horizontal steering magnet SDX-16 and vertical one SFY-16, respectively.

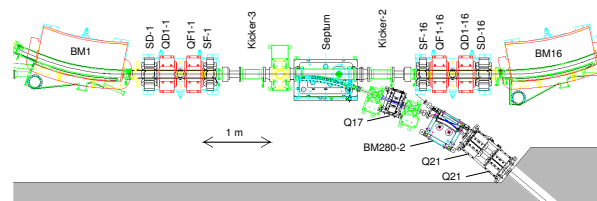


Figure 6: Layout of the injection section of the SAGA-LS storage ring.

0.1 Gauss 程度であったが、磁場測定位置とビーム軌道が 20 mm 以上離れていることや、漏洩磁場がビーム進行方向に広がっている事を考慮すると、COD の計算で予想されていた数十 Gcm 程度のキック力は発生すると考えられる。

### 3.4 対処

ビーム輸送系電磁石の漏洩磁場が軌道変動の要因と判明したことにより、Figure 3 に示した軌道変動の発生時刻や日時の片寄りも説明がつく。ビーム輸送系電磁石の操作は入射器電磁石と連動しているため、ビーム蓄積中に入射器電磁石系を立ち下げれば軌道変動が発生する。まず加速器の運転終了直前に軌道変動が頻発したことは、特定の運転当番による操作手順が原因と判明した。SAGA-LS 加速器の運転当番は 4 名の加速器グループスタッフが週毎に努めている。そのため、ほぼ月に一週のペースで運転終了直前に軌道変動が発生していたと理解できる。さらに 2012 年夏期の昼間の軌道変動は、施設の使用電力の上昇に伴う節電要請に対応するため入射器電磁石系を立ち下げたことによる。2013 年の夏期

[4] H. Ohgaki et al., Proc. of PCaPAC05, WEP36.

[5] 岩崎能尊他, 第9回日本加速器学会年会プロシーディングス, p. 933.

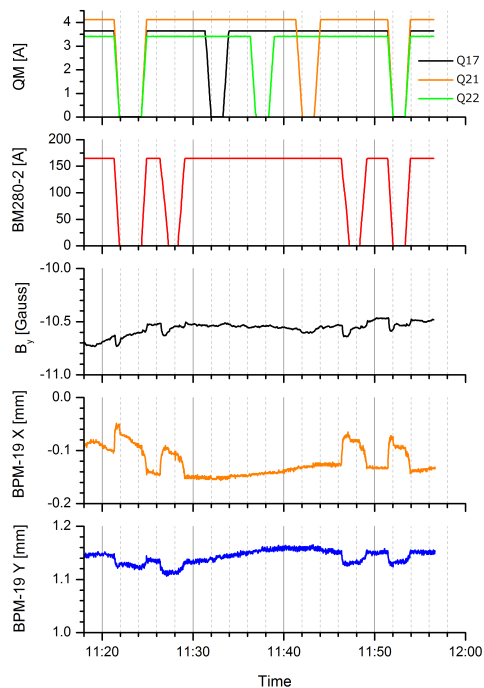


Figure 7: Stray magnetic field measured at the top plane of the beam duct and beam position data during the operation of the transport magnets.

以降、朝の入射直後に軌道変動が頻発したのは節電運転が常態化したためである。

対策としては微弱な漏洩磁場の抑制ではなく、加速器運転手順の単純な改善で対応することとした。2014年2月以降は蓄積リングへのビーム入射後、軌道補正を行う前に輸送系電磁石をシャットダウンしており、漏洩磁場による軌道変動の発生は抑止されている。

#### 4. まとめ

SAGA-LS リングでは運転開始以来、突発的なビーム軌道の変動が発生していた。変位量は電子ビームサイズに比べて小さく放射光利用上の問題は生じていなかったが、軌道変動の対処は必要と判断し、原因調査と対策に取り組んだ。蓄積リング真空槽の変形やステアリング電磁石の動作不良などを順次調査した結果、リニアックから蓄積リングへのビーム輸送系電磁石の漏洩磁場がビーム軌道変動の要因と判明した。対策としては漏洩磁場の抑制ではなく加速器運転手順の改善で対処しており、2014年2月以降のユーザー利用運転では、ビーム輸送系電磁石の漏洩磁場に起因する軌道変動は発生していない。

#### 参考文献

- [1] Y. Iwasaki et al., Proc. of PAC03, p. 3270.
- [2] H. Ohgaki et al., Proc. of PAC07, p. 3327.
- [3] 岩崎能尊他, 第6回日本加速器学会年会プロシーディングス, p. 481.