

あいち SR におけるパルス6極電磁石による蓄積ビームへの影響

PERTURBATION TO THE STORED BEAM BY PULSED SEXTUPOLE MAGNET IN AICHI SR

持箸晃^{#,A,B)}, 山村光平^{B)}, 保坂将人^{A)}, 高嶋圭史^{A,B)}, 真野篤志^{A)}, 石田孝司^{A)}
加藤政博^{C)}, 藤本将輝^{C)}, 大熊春夫^{D)}

Akira Mochihashi^{#,A,B)}, Kouhei Yamamura^{B)}, Masahito Hosaka^{A)}, Yoshifumi Takashima^{A,B)}, Atsushi Mano^{A)},
Takashi Ishida^{A)}, Masahiro Katoh^{C)}, Masaki Fujimoto^{C)} and Haruo Ohkuma^{D)}

^{A)} Nagoya University Synchrotron Radiation Research Center (NUSR)

^{B)} Graduate School of Engineering, Nagoya University

^{C)} UVSOR Facility, Institute for Molecular Science

^{D)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

Abstract

In Aichi Synchrotron Radiation Center (Aichi-SR), a pulsed sextupole magnet (PSM) system has been installed for beam injection magnet in 2015. Since then, we have been developing the injection scheme with PSM which can only kick the off-axis injection beam. However, it becomes clear that the stored beam is also perturbed by the PSM field. Turn-by-turn beam diagnostic experiments indicated that the perturbation is excited by residual dipole kicks in the PSM. Magnetic field measurements show the residual kick could be caused by an eddy current effect on a ceramic beam duct with thin titanium coating inside the duct.

1. はじめに

あいちシンクロトロン光センター[1]は愛知県瀬戸市に位置し、次世代モノづくりで不可欠なナノレベルの先端計測分析施設として、産・学・行政が連携した「地域共同利用施設」として設置され、2013年3月より供用運転が開始されている。あいちシンクロトロン光センター(あいちSR)の光源加速器である電子蓄積リング[2-4]は周長72m、ビームエネルギー1.2GeVと比較的小型ながら、磁場強度5Tの超伝導偏向電磁石を4台備えており、20keV付近までの硬X線を利用者に供給することができる。あいちSRでは供用開始当初からTop-up運転を行っており、加速器運転中(供用運転は毎週火曜日から金曜日の午前10時~午後6時30分)は蓄積ビーム電流300mAが維持されている。あいちSRのビーム入射は、現状では合計4台のキッカーマグネットによるバンブ軌道法が採られているが、キッカーバンブ軌道が蓄積リングの周長の約半分を占めており、Top-up入射の影響を受けるビームライン数は少なくない。この状況を打開するため、あいちSRではパルス多極磁石によるビーム入射法[5,6]の導入が検討されており[7]、2015年にパルス6極電磁石(PSM)システムを製作し蓄積リングに設置し[8]、ビーム入射が問題なく出来ることを確認している。通常のバンブ軌道法と比較して遜色ない入射効率を実現しているが、一方で、PSM励磁により蓄積ビームが振動することも明らかとなった。PSMによる蓄積ビームへの影響を調査するため、放射光によるビーム周回毎のビームプロファイル観測実験(あいちSRのビーム周回時間は約240ns)を行い、PSM励磁(正弦半波幅約1 μ s)終了後も徐々にビームサイズが増大する現象が確認された[9]。PSM製作時の磁場測定[10]によると、PSMに直流電流

を印加した場合には通常の6極磁場分布が確認されており、特にビーム軌道位置(PSM中心位置)での磁場強度はゼロである。しかしながらパルス電流印加時にはビーム軌道位置に磁場が発生しており、この磁場の影響により蓄積ビームが影響を受けるものと考えられる。この誤差磁場の原因は定かでないが、パルス磁場発生に伴いPSM構成要素内に発生する渦電流によるものと推測されてきた。

本研究では、これまであいちSRで行われてきたPSMによる蓄積ビームへの影響の観測実験データを踏まえ、パルス運転時におけるPSM磁場測定データを改めて解析し、この誤差磁場の特徴を明らかにすることを試みた。またその誤差磁場の解析結果から、その誤差磁場による蓄積ビームへの影響をシミュレーション計算し、先に行われてきたビーム観測実験結果との比較検討を行った。

2. PSM影響下の蓄積ビーム観測実験

PSM影響下での蓄積ビームの水平方向ビームサイズ並びにビーム位置のビーム周回毎観測実験は文献[9,11]により詳しく報告がなされているので、ここでは詳細に触れずに要点のみ述べるに留める。あいちSR蓄積リングに連続10バンチを蓄積し、追加のビーム入射を行わずにPSMのみをパルス励磁した場合のビームプロファイルを高速ゲートカメラでビーム周回毎観測した結果をFigure 1に示す。図中の数字はPSM励磁後のビーム周回数である。Figure 1から、PSM励磁によりビームプロファイルが変動することが見て取れる。PSM励磁後500ターンに渡る水平方向ビームサイズの変化をFigure 2に示す。PSM励磁後直ちにビームサイズ増大が見られ、およそ

[#] a.mochihashi@nusr.nagoya-u.ac.jp

300 ターン後にビームサイズの増大は飽和することが明らかになった。

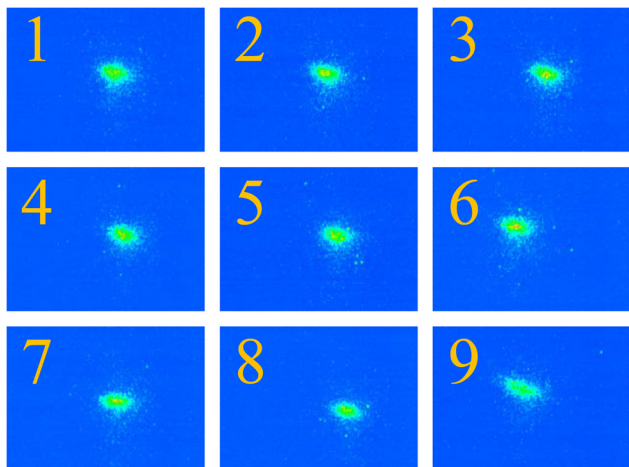


Figure 1: Beam profiles after the PSM is on. Numbers in the figures correspond to the turn number after the PSM is on.

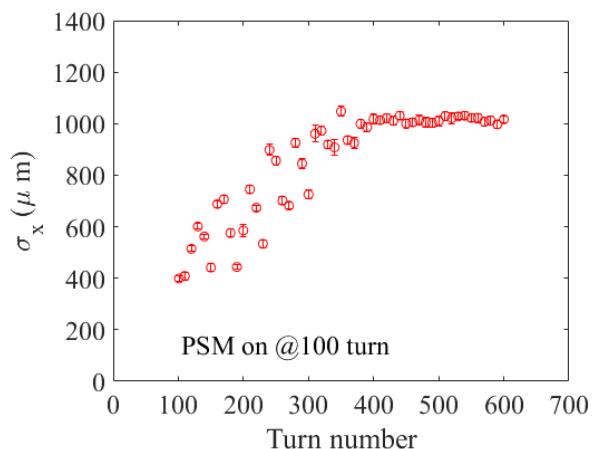


Figure 2: Increase in horizontal beam size after the PSM is on.

あいち SR に設置されている LIBERA システム[12]を用いて、PSM 励磁後の水平方向ビーム位置のビーム周回毎観測実験も行った。結果を Figure 3 に示す。なお Figure 3 は複数回の PSM 励磁に対して平均を取ったものである。PSM 励磁後直ちに重心振動振幅が増大し、およそ 600 周後に重心振動が収束することが分かる。

3. PSM 磁場測定データ解析

PSM のパルス電流印加時におけるパルス磁場測定結果から、パルス磁場の空間分布並びに時間変化を解析した。磁場測定はロングコイル、ショートコイルの2種類のサーチコイルで行われている。PSM のビーム軸方向全長は 200mm であり、水平方向の開口全幅は 88mm(セラミックスダクトの内寸)である。使用したコイル寸法は、ロングコイルは長さ 400mm,幅 2mm であり、ショートコイルは 5mm 四方の大きさである。各コイルの自己インダクタンスによる検出遅延時間はロングコイルは約 8ns, ショートコイルは約 3ns である。PSM にセラミックスダクトを組み込

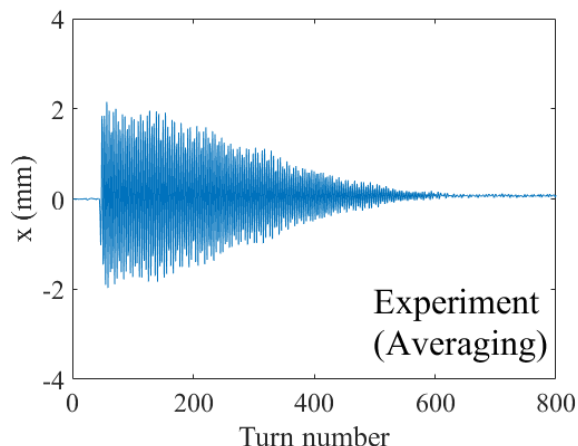


Figure 3: Horizontal position of the beam after PSM is on.

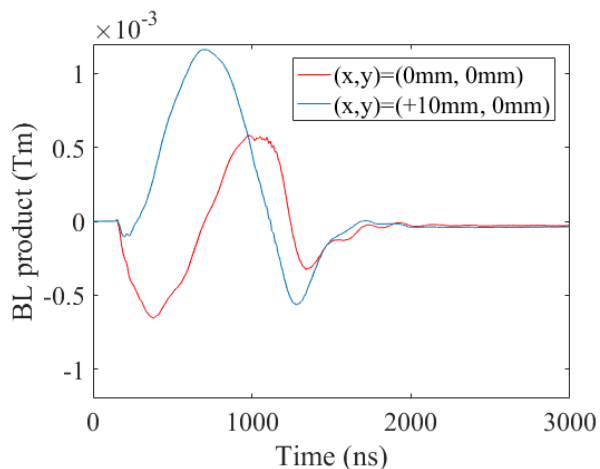


Figure 4: Change in BL product on time in different positions of PSM.

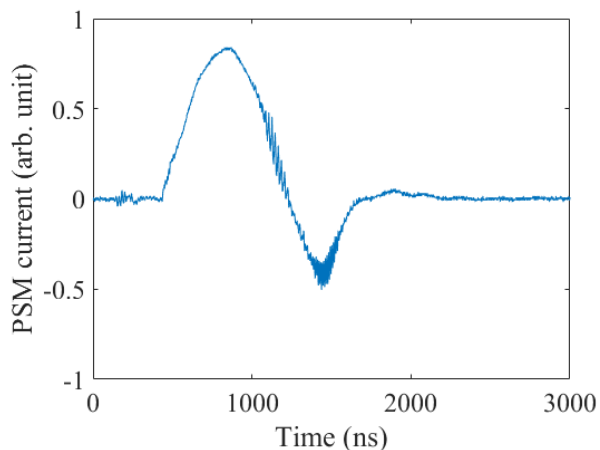


Figure 5: Pulse shape of PSM current. Notice that Figure 5 has time delay for Figure 4.

んだ場合の、ロングコイルによる BL 積の時間変化を Figure 4 に示す。Figure 4 は、ロングコイルの垂直方向位置はビーム軸に等しく(y=0mm)異なる水平方向位置での測定結果を比較したものである。また、参考までに

PSM の励磁パルス電流波形を Figure 5 に示す。励磁パルス波形は全幅約 $1\mu\text{s}$ の正弦半波でありアンダーシュートが見られる。Figure 4 の($x=+10\text{mm}$)の BL 積波形はこの励磁電流波形を反映している見える。一方、ビーム軸上の BL 積波形は、本来はあってはならないのであるが、無視できない程大きく、またその波形はちょうどビーム軸外の BL 磁場波形を微分したものと似通っていることが分かる。なお、Figure 4,5 の間には固定した時間遅延があるため、相互のデータは波形形状の比較のみ可能であることを付け加えておく。

ロングコイルによる BL 積波形から、BL 積の水平位置依存性を解析した結果を Figure 6 に示す。Figure 6 を見ると、磁場分布はほぼ放物線上すなわち 6 極磁場を呈しているが、($x=0\text{mm}$)位置において磁場にオフセットが存在し、このオフセットの極性はパルス磁場立ち上がり時間経過に依存して反転することが分かる。

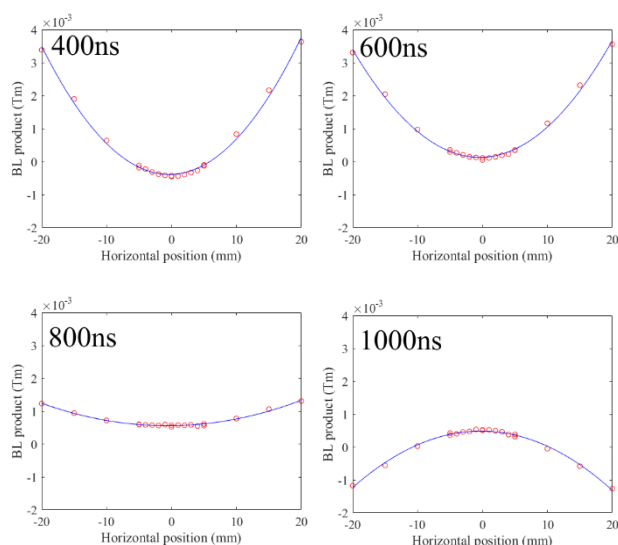


Figure 6: Magnetic field distribution on ($y=0\text{mm}$) plane. Times in the figures correspond to the time after PSM is on.

磁場の空間分布をフィッティングすることにより、(6 極, 4 極, 2 極)の各磁場成分の時間経過依存性を解析した。結果を Figure 7 に示す。6 極, 4 極成分は概ね励磁パルス電流波形の形状を反映しているが、2 極成分はそれらの微分波形の様相を呈する。また、ビーム軌道位置がほぼ PSM 中心を通過する場合には、ビームが受ける 6 極, 4 極磁場成分による水平方向キックは微小であると考えられる一方、2 極磁場成分によるキックは比較的大きいことが分かる。これらのことから、蓄積ビームの PSM による摂動は主に 2 極磁場による影響によるものと推察される。

ビーム軸上で発生する磁場の原因を探るべく、PSM 用セラミックスダクトの有無での磁場測定結果を比較した。($y=0\text{mm}$)平面上にロングコイルを設置し、 $x=+5, 0, -5\text{mm}$ での BL 積波形の比較を Figure 8 に示す。Figure 8 を見ると、セラミックスダクトの有無でビーム軸近傍の BL 積波形が異なっていることが分かる。セラミックスダクトの内壁にはインピーダンス対策として公称厚み $1\mu\text{m}$ の Ti コーティングが施されている。セラミックスダクトの有無による BL 積波形の違いから、ビーム軸付近で見られる磁場は、

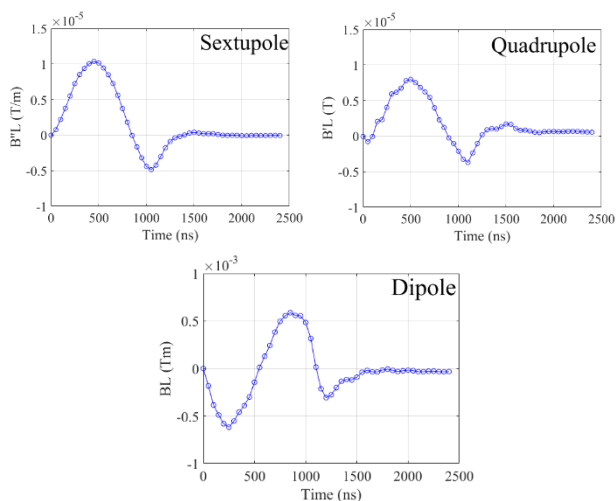


Figure 7: Temporal dependence of the sextupole, quadrupole and dipole magnetic component in PSM.

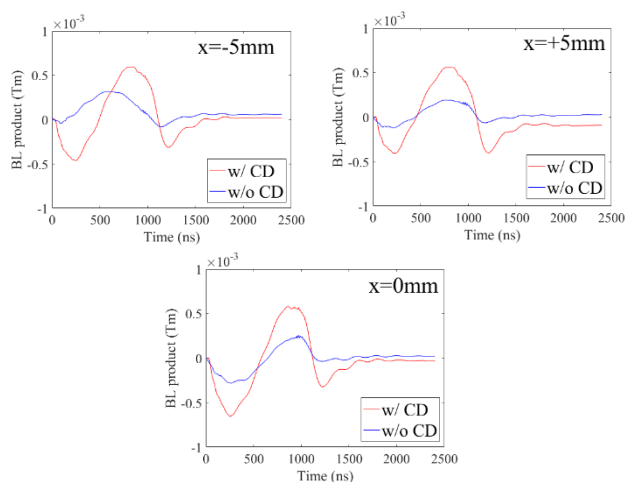


Figure 8: BL product at ($x=-5,0,+5$)mm with and without ceramic duct.

この Ti コーティングを流れる渦電流による影響と考えられる。また、セラミックスダクトがない場合でも($x=0\text{mm}$)位置で磁場波形が確認されている。PSM は厚み 0.2mm 鋼鉄を積層して製作されており、鋼鉄中に発生する渦電流の影響を抑制するよう対策が施されているが、Figure 8 の (CD なし, $x=0\text{mm}$)に見られる磁場は、積層鋼鉄製コア内に僅かに誘導される渦電流によるものと推測される。

次にショートコイルによる磁場測定結果であるが、例として、セラミックスダクト有りの場合の PSM パルス立ち上がり後 400ns における($y=0$)平面上の磁場分布を Figure 9 に、また同条件での(セラミックスダクト有)結果から(セラミックスダクトなし)の結果を差し引いたものを Figure 10 に示す。Figure 9 を見ると、ビーム軸方向磁極端位置では磁場はゼロになっており、また PSM 内部ではビーム軸位置に依らず概ね放物状の 6 極磁場が発生していることが分かる。このため、先に議論したビーム軸上の残留磁場は、磁極端部などにおける磁場の振舞いによるものではないことが確認できる。また、セラミックスダクトの有無の差である Figure 10 を見ると、その差分には大きな水平方向位置依存性は見られず、水平方向にはほぼ一様

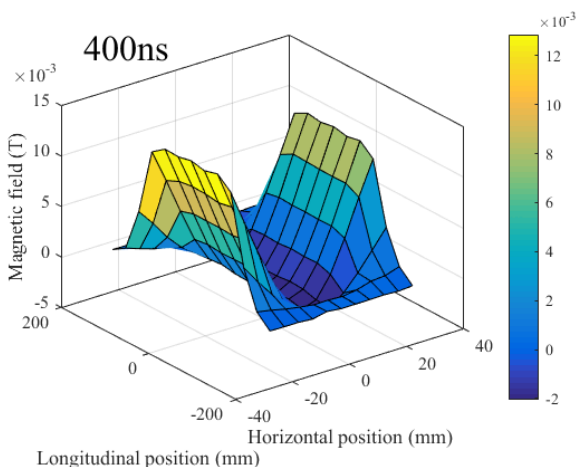


Figure 9: Magnetic field distribution on ($y=0$) plane with ceramic duct in PSM.

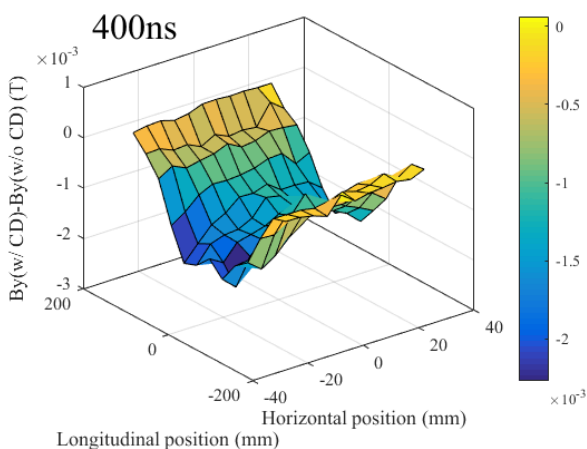


Figure 10: Difference between the magnetic field distribution with and without ceramic duct in PSM.

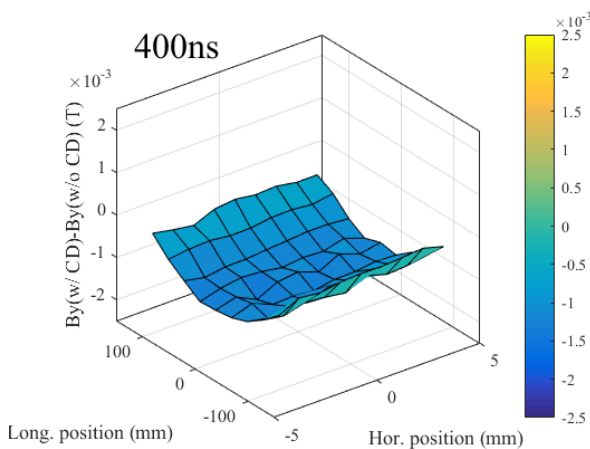


Figure 11: Difference between the magnetic field distribution with and without ceramic duct in PSM (around beam orbit position).

な分布をしていることが分かる。蓄積ビーム位置付近 ($x=-5\text{mm}\sim+5\text{mm}$)におけるセラミックスダクト有無の磁場の差分を Figure 11 に示す。蓄積ビーム位置近傍では磁場の差にほとんど水平方向位置依存性は見られない。このことから、セラミックスダクト内壁に誘導される渦電流の分布は水平方向についてはほぼ一様と考えられる。

4. シミュレーション計算

以上の議論を踏まえ、PSM による蓄積ビームへの影響のシミュレーション計算を行った。ロングコイルによる磁場測定結果より、蓄積ビーム位置(x,y)=($0\text{mm},0\text{mm}$)における誤差磁場の大きさ及び時間変化は既知なので、この磁場測定データを元に、計算機上で蓄積ビームに摂動を加え、水平方向ビームサイズ及び重心振動の時間発展を計算した。あいち SR のリング周回時間は約 240ns であるため、Figure 7 を見ると分かるように、PSM の影響は複数ターンに及ぶ。シミュレーションでは、PSM による(6 極, 4 極, 2 極)成分の誤差磁場の影響を複数ターンに互り取り入れて計算を行った。またあいち SR には集束 6 極, 発散 6 極電磁石がそれぞれ 2 ファミリー運用されており、これら 6 極電磁石の効果をシミュレーションに取り入れている。なお、ビームの transverse 方向の運動とは独立に、longitudinal 方向のシンクロトロン振動も考慮しており、ビーム周回 1000 ターン程度のシミュレーションのため、放射減衰(減衰時間は約 28000 周)の効果は無視している。PSM による摂動前、及び摂動後の水平方向位相平面上における粒子分布を Figure 12 に示す。PSM による摂動により粒子分布は次第に位相平面上を拡散しビームサイズ増大を引き起こすと同時に重心振動振幅は抑制される。

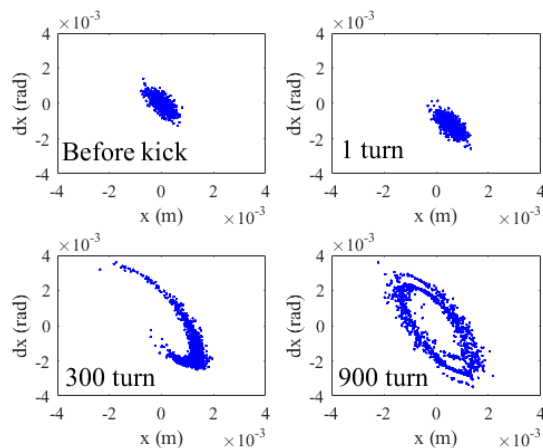


Figure 12: Phase space distribution due to the PSM perturbation.

PSM からの摂動による水平方向のビームサイズ増大のシミュレーション計算結果と実験結果との比較を Figure 13 に示す。双方とも PSM による摂動が与えられると速やかにビームサイズが増大し、PSM 励磁後およそ 300 ターンでビームサイズがおよそ 1mm(rms)まで増大しその後飽和する。また、重心振動の時間発展の結果を Figure 14 に示す。シミュレーションと実験結果双方ともおよそ 600 ターンで重心振動が抑制されている。なお実験結果は Figure 3 と同様、複数回の PSM 励磁に対する平均を

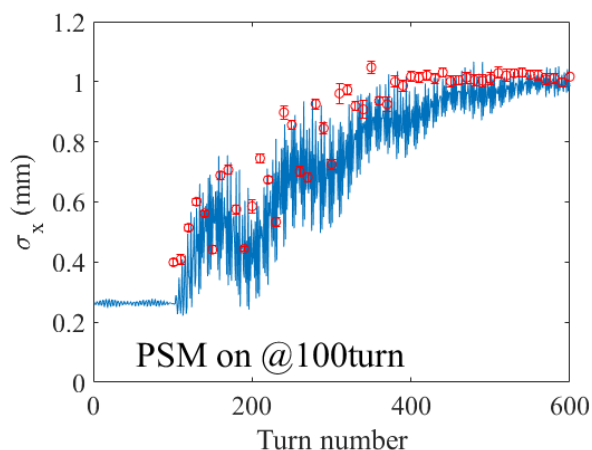


Figure 13: Change in horizontal beam size after PSM is on. Red circles and blue lines correspond to the experimental data and the simulation result.

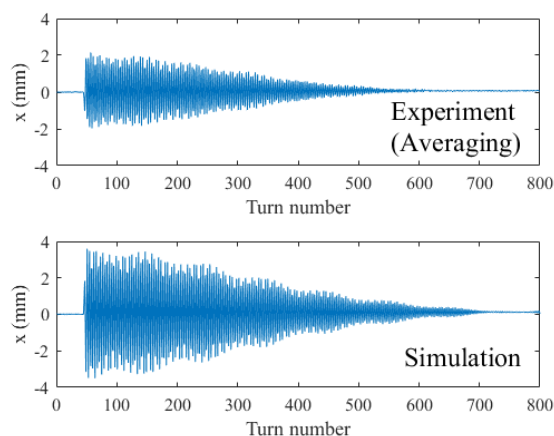


Figure 14: Change in horizontal beam oscillation after PSM is on.

取ったものである。これは観測したビーム振動に、キック毎にある程度のばらつきが存在していたためである。このばらつきの原因は PSM 励磁トリガーなどのタイミング信号に起因するものと考えられ、Figure 14 の実験データとシミュレーション結果との間のビーム振動振幅の差は、この実験データの平均化によるものと考えられる。今後、タイミング信号を改善した上での再実験が望まれる。

5. まとめと今後の展望

これまでの議論で、PSM による蓄積ビームに対する影響のビーム診断実験結果、またサーチコイルによる PSM 内のパルス磁場の空間分布と時間変化を考察した。それらの結果から、蓄積ビームが PSM によって受けると思われる摂動を考慮したシミュレーション計算を行い、シミュレーション計算結果とビーム診断実験の結果は概ね一致を確認することができた。磁場測定の結果から、蓄積ビームに対する PSM による摂動は、セラミックスタクト内壁に施された Ti コーティングに誘導される渦電流による磁場の影響と強く推測される。

渦電流の影響を抑制するための方法として、Ti コー

ティングに何らかの幾何学的パターンを施し、ビームに対するインピーダンス源となることを避けつつ渦電流の抑制を図る方法が考えられる。また、厚み等のコーティング条件の最適化を図り渦電流の効果を抑制することも考えられる。バンプ軌道発生用キッカー電磁石のセラミックスタクトの内壁にも、一般にはこの PSM と同様に導電性材料によるコーティングが施されている。このコーティングにも渦電流が誘導されているが、パルス 6 極電磁石の場合、ビーム軌道上の磁場がゼロでなければならないため、この渦電流の抑制が極めて重要である。このため、各種コーティング材料の最適条件の探索、またコーティングパターンの探索が今後の課題と言える。

あいち SR の PSM の場合、誤差磁場はほぼ 2 極磁場であることが明らかになった。この PSM の 2 極誤差磁場に対して適切なベータatron位相の関係を満たす位置においてカウンターキックを与えてビームに対する影響を相殺する方法が考えられる。現在、シミュレーション計算と同時にカウンターキックを与えるキッカー設置場所の検討などを進めている。PSM による摂動に対する方策を早急に検討し、できるだけ早い段階で PSM の実運用を目指して今後の研究開発を進めてゆく。

本研究で解析を行った磁場測定データは、伊藤氏 [10]によるものである。また、本研究を遂行するに当たりあいち SR 光源課関係諸氏に多大なるご協力を頂いた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 「知の拠点あいち」あいちシンクロtron光センター；
<http://www.astf-kha.jp/synchrotron/>
- [2] N. Yamamoto *et al.*, “Accelerators of the Central Japan Synchrotron Radiation Facility Project”, Proceedings of IPAC’10 (Kyoto, Japan) 2567 (2010).
- [3] N. Yamamoto *et al.*, “Central Japan Synchrotron Radiation Research Facility Project(ii)”, AIP Conference Proceedings **1234** 591 (2010).
- [4] N. Yamamoto *et al.*, “Accelerators of the Central Japan Synchrotron Radiation Facility Project (II)”, Proceedings of IPAC’11 (San Sebastián, Spain) 2987 (2011).
- [5] K. Harada *et al.*, “New Injection Scheme using a Pulsed Quadrupole Magnet in Electron Storage Rings”, Phys. Rev. ST Accel. Beams **10** (12) (2007) 123501.
- [6] H. Takaki *et al.*, “Beam Injection with a Pulsed Sextupole Magnet in an Electron Storage Ring”, Phys. Rev. ST Accel. Beams **13** 020705 (2010).
- [7] N. Yamamoto *et al.*, “Design Study of Pulsed Multipole Injection for Aichi SR”, Proceedings of IPAC’14 (Dresden, Germany) 1962 (2014).
- [8] K. Ito *et al.*, “Development of Pulsed Multipole Magnet for Aichi SR Storage Ring”, Proceedings of IPAC’15 (Richmond, USA) 1616 (2015).
- [9] 山村光平他, “あいち SR における入射時ビーム変動の高速観測と評価”, 第 13 回日本加速器学会プロシーディングス(千葉) 1122 (2016).
- [10] 伊藤圭哉, “あいち SR における電子ビーム入射用パルス多極電磁石の研究”, 名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程修士論文(2016).
- [11] 山村光平, “あいち SR 電子蓄積リングにおける入射時ビーム変動の超高速観測とビーム力学的考察”, 名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程修士論文(2017).
- [12] Instrumentation Technology; <http://www.i-tech.si/>