

あいち SR における入射時ビーム変動の高速観測と評価

HIGH-SPEED OBSERVATION AND EVALUATION OF THE BEAM FLUCTUATION AT INJECTION TIMING IN AICHI SR

山村 光平^{#,A)}, 高嶋 圭史^{B)}, 保坂 将人^{B)}, 持箸 晃^{B)},
真野 篤志^{B)}, 山本 尚人^{C)}, 加藤 政博^{D)},
Kouhei Yamamura^{#,A)}, Yoshifumi Takashima^{B)}, Masahito Hosaka^{B)}, Akira Mochihashi^{B)},
Atsushi Mano^{B)}, Naoto Yamamoto^{C)}, Masahiro Katoh^{D)}
A) Graduate School of Engineering, Nagoya University
B) Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University
C) High Energy Accelerator Research Organization, KEK
D) UVSOR Facility, Institute for Molecular Science

Abstract

We tried to investigate effects on the stored beam by Pulsed-Sextupoles-Magnet(PSM) and to correct them, aiming to realize the PSM injection in Aichi SR. As its means, we have introduced ICCD-camera and optical system. We have performed turn-by-turn beam profile measurement under the perturbation of PSM and a dipole kicker magnet for comparison, and observed the motion of the beam position and the change in the beam size for each beam revolution. From the measurement and analysis, we have found that the center of stored beam position oscillates with betatron oscillation frequency and the beam size increases gradually with time. The oscillation of stored beam position tends to be small after the perturbation although the beam size has large values. The magnitude of the change in the beam size by the PSM and kicker is different; which implies that stored beam is affected not by simple dipole magnetic field.

1. はじめに

1.1 背景

あいちシンクロトロン光センター(あいち SR)[1]の加速器は、50 MeV 直線加速器、1.2 GeV ブースターシンクロトロン、1.2 GeV 電子蓄積リング(周長:72 m)から構成されており、ブースターシンクロトロンと直線加速器は電子蓄積リングの内側に配置されている。ここで、蓄積リングのパラメータを Table 1 に示す。

Table 1: Parameters of Storage Ring

Beam Energy	1.2 GeV
Circumference	72 m
Beam Current	>300 mA
Natural Emittance	53 nm·rad
Betatron Tune	(4.73, 3.18)
RF-Frequency	499.7 MHz
Harmonic Number	120
Damping Time	(6.69, 6.69, 3.34) ms
Revolution Time	240 ns

蓄積リングへの電子入射の繰り返しは 1 Hz であり、平成 25 年 3 月の稼動開始時よりビーム電流が 300mA でトップアップ運転を行っている[2]。現在入射の際に 4 台の Kicker 電磁石(パルス二極電磁石)によりバンブ軌道を作り、蓄積ビームを瞬間的に入射ビーム

側に寄せることで入射ビームの振幅を低減させている。しかし小型加速器であるあいち SR では、バンブ軌道が蓄積リング周長の半分を占めており、バンブ軌道内のビームラインではビーム入射の際に光が失われてしまう。これに加えてバンブ軌道内にある六極電磁石の非線形磁場の影響でバンブ軌道が完全には閉じないことから、バンブ軌道通過後のビームはベータトロン振動を始める。

1.2 パルス六極電磁石(PSM)

我々はこれらの問題点に対処するべく、蓄積ビームに影響を与えない新たな入射システムとしてパルス六極電磁石(PSM)[3,4]の開発を進めてきた[5]。PSM は Figure 1 に示す磁場分布を持っており、蓄積ビームが PSM 磁場の零点を通過するように設計すれば理論的には入射ビームのみが蹴られ、蓄積ビームに影響を与えない入射が可能である[3,4,6]。PSM は

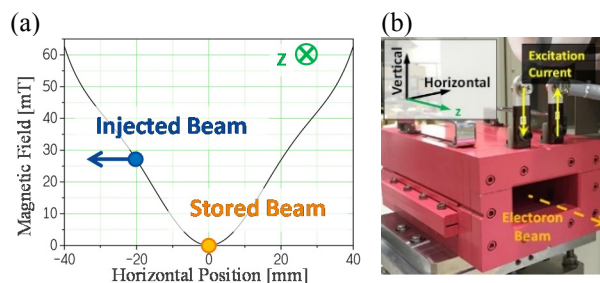


Figure 1: (a): Magnetic field distribution in the horizontal plane by PSM. (b): The PSM for Aichi SR.

yamamura.kouhei@d.mbox.nagoya-u.ac.jp

2015 年 10 月に蓄積リング内に設置され、現在は試験運転中である。

1.3 課題とアプローチ

導入された PSM を用いて入射を行ったところ従来の入射方法と同等である 30% 程度の入射効率で入射を達成し、その後電子ビームを 300 mA まで蓄積して、トップアップ運転に成功した。しかしビームポジションモニター(BPM)を用いたビーム位置振動測定により、PSM 励磁に伴い蓄積ビームの重心が水平・垂直それぞれの方向に振動し始めることが観測された[7]。この原因としては PSM の設置精度や、ヨーク・セラミックダクト内壁(Ti-コーティング)に発生する渦電流により、PSM 磁場分布が理想的になっていないことが考えられる。本研究では PSM 励磁開始から周回時間毎の蓄積ビームプロファイル計測・解析をする方法を確立し、PSM 磁場により蓄積ビームが受ける影響を調査、修正することを目的とした。周回毎にビームを撮影するために高速ゲート付 ICCD カメラと専用の光学系を導入し、ビームの重心変動および形状変化を観測した。

2. ビームプロファイル計測方法の確立

2.1 ICCD カメラ

導入した ICCD カメラの概観図を Figure 2 に示す。本実験で用いた ICCD カメラは CCD カメラ(浜松ホトニクス,C8484-05G02[8])とイメージ・インテンシファイア(I.I.)(浜松ホトニクス,M7971-01[9])より構成されている。I.I.に加わる高電圧短パルス信号(最短 5 ns)と光電子増倍により、短時間の現象を高感度で撮影できる。さらにデジタルディレイジェネレーター(DG535,Stanford Research Systems)を用いて、ビーム周回と同期した電子入射信号をトリガー信号とし、撮影タイミングを制御することで蓄積ビームを周回ごとに撮影することができる。

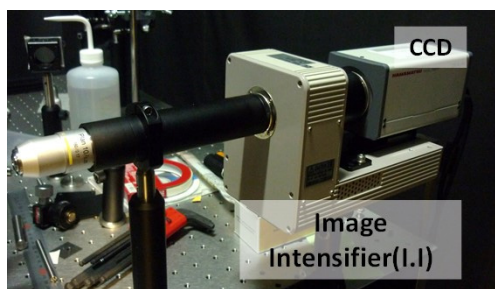


Figure 2: ICCD-camera set up in Aichi SR.

2.2 光学経路

撮影に用いるシンクロトロン光のビームラインとして、加速器ビーム診断用シンクロトロン光取出しポート BL9N1 を用いた[10]。導入した光学素子と経路長を Table 2,3 に、光学系の概略図を Figure 3 に、

BL9N1 の位置を Figure 4 に示した。

Table 2: Optical Devices in BL9N1

(1) Au-coated Cu mirror (Water-cooled)	Size :25 mm×25 mm Au-coat thickness :2000 Å Flatness :λ/10
(2) (3) (4) (6) Al mirror	Size :φ150 mm Thickness :20 mm Flatness :λ/10
(5) Spherical plano-convex lens	Outer diameter :φ100mm Focal length :1000mm
(7) (8) Al mirror	Size :φ25.4 mm Thickness :3.2 mm Flatness :λ/10
(9) Bandpass filter	λ=550±8 nm FWHM=40±8 nm
(10) Objective lens	Optical magnification :10× Focal length :16.6 mm
(11) ICCD-camera	Effective pixel :1344H×1024V

Table 3: Optical Path Length

Source point~(1)	2 m
(1)~(2)	1.3 m
(2)~(3)	5.7 m
(3)~(4)	1.5 m
(4)~(5)	0.5 m
(5)~(10)	1.1 m + 18.26 mm
(10)~(11)	182.6 mm

Figure 3 に示したように BL9N1 から ICCD カメラへの光の導入には単一レンズと 7 枚のミラーを用いている。発光点から光学架台に設置したレンズまでは 11 m 離れており、単一レンズで ICCD カメラに等倍の像を結像させることは困難であった。そこで焦点距離 1000 mm の球面平凸レンズで 0.1 倍像を作り、倍率 10 倍の対物レンズで拡大する光学系を採用した。発光点から 1 枚目のミラーは蓄積リングと真空接続された真空チャンバー内に設置された金コート水冷銅ミラーであり、シンクロトロン光中の紫外域以上の波長を持つ光を、合成石英窓を通して真空外へ取り出している。合成石英窓の真上に設置されたアルミ平面ミラーにより遮蔽壁外部の暗室に光を導入し、5 枚のアルミ平面ミラー・レンズ・バンドパスフィルターにより ICCD カメラに等倍かつ単色光の像を結像した。

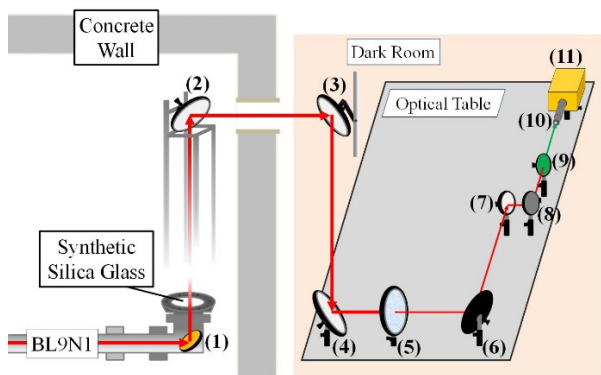


Figure 3: Setup of the optical system from BL9N1 to ICCD-camera.

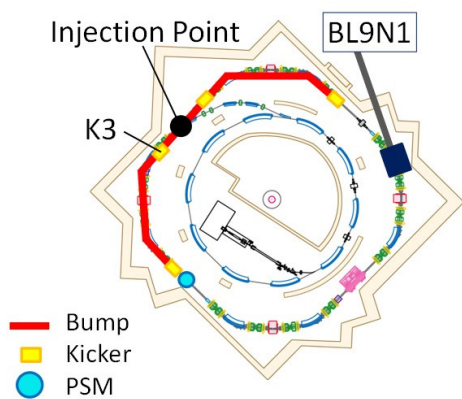


Figure 4: The position of the injection point, PSM, K3 and BL9N1 in Aichi SR.

2.3 測定条件

本実験ではビーム電流値 30 mA、連続 10 バンチの電子ビームを蓄積ビームとして用いた。蓄積ビームに摂動を加える入射用電磁石として、PSM と、比較として現在入射に用いられている Kicker 電磁石(パルス二極電磁石)4 台のうち 1 台(K3)の 2 種類を用いた。実際にブースターシンクロトロンからの電子ビーム入射は行わずに、それぞれの入射用電磁石を 1 Hz の入射信号に同期して繰り返し運転させた。ICCD カメラの撮影タイミングを制御するため、I.I. の動作を入射信号と同期させた。ICCD カメラについては、I.I. のゲート幅を 50 ns(連続 25 バンチの時間幅に相当)に設定して、蓄積ビーム 10 バンチ全てを撮影できるような撮影タイミングを調整し決定した。その撮影タイミングについて、入射信号を受信する度に 1 ショット撮影することを 100 回繰り返し、計 100 ショット撮影した。その後、蓄積ビームの周回時間だけ撮影タイミングをずらして 100 ショット撮影することを繰り返した。

なお入射用電磁石・入射点の位置をそれぞれ Figure

4 に示した。

3. 解析方法の確立

3.1 解析方法

上記の条件で蓄積ビームをターンバイターンで撮影した画像データのうち、異なる撮影タイミングにおける典型的な 2 枚の画像を Figure 5 に示す。

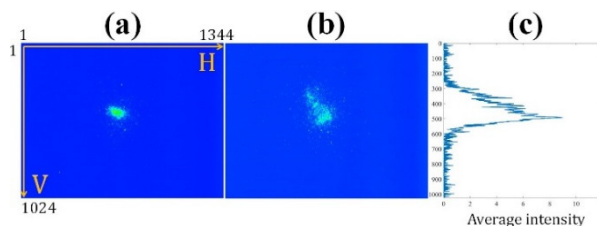


Figure 5: (a): A beam image without perturbation. (b): A beam image with perturbation. (c): Vertical projection of (b).

Figure 5 は入射用電磁石の磁場が加わる前後(前(a),後(b))のビーム像である。このような 2 次元画像データからビームサイズを導出するためには、水平(H)・垂直(V)各方向の画像強度の射影をガウシアンでフィッティングする方法が一般的であるが、Figure 5(b)の様にビーム像が拡散している場合、射影をとると Figure 5(c)のようになり、ガウシアンでフィッティングすることは難しい。そこで、H・V 各方向の画像強度射影をとり強度分布の一次モーメント(式(1))・二次モーメント(式(2))をそれぞれビーム重心・サイズと定義した。

$$\mu = \frac{\int x f(x) dx}{\int f(x) dx} \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \frac{\int (x - \mu)^2 f(x) dx}{\int f(x) dx} \quad (2)$$

なお式(1)(2)において x は pixel 番号、f(x)はその pixel 番号での画像強度である。この方法は、フィッティングするモデル関数によらずビーム位置・サイズが評価できるが、画像に残るバックグラウンドの影響を受けやすく、バックグラウンドを完全に差し引かないとビームサイズ σ が大きく算出されてしまう。このため、解析ではビーム像が写っている部分のみ選択し、バックグラウンドによる解析結果への影響を最小限に抑えるようにした。ビーム像状態の集束・拡散に関わらず、どの画像データでもビーム像の部分のみを選択する方法として下記の方法で統一してデータ解析を行うことにした。

まず Figure 5 に示す H 方向・V 方向に関して、ビーム像を十分含む領域を選択して画像データから切り取る。次に切り取ったものを H・V 各方向に画像強度

の射影をとり、式(1)(2)に従って (μ, σ) を導出し、これを (μ_0, σ_0) とする。さらに $\mu_0 \pm 3\sigma_0$ の領域を選択し直して再び式(1)(2)に従って (μ, σ) を求める。この (μ, σ) を画像解析から得られるビームの重心・サイズと定義した。

3.2 較正

上記の解析によって求められたビーム重心 (μ) 、ビームサイズ (σ) は CCD カメラ上の pixel 数で表されるため、これを実空間上の長さに変換するため較正を行った。方針として、まずステアリング電磁石の励磁により蓄積ビーム軌道を移動させると、その前後で撮影した画像では蓄積ビームが移動する。この時の BPM 上での移動量(mm)と、撮影したビーム画像の重心解析による画像上での重心移動 pixel 数を比較することで、1pixel あたりに相当する実空間上の長さを求めた。実際の実験では蓄積ビーム位置を約 0.5 mm 間隔で 5 点、合計で約 2 mm 動かしてそれぞれの点で BPM 測定と ICCD カメラによる撮影を行った。この 5 点において、BPM 測定によるビーム位置を縦軸に、画像解析からのビーム重心 pixel 位置を横軸に取ったものを Figure 6 に示す。Figure 6 に記した 5 点の線形最小二乗フィッティングにより、この傾きは $12 \pm 0.2 \mu\text{m}/\text{pixel}$ と求められた。以降では、この値を 1 pixel あたりの長さとして変換に用いている。

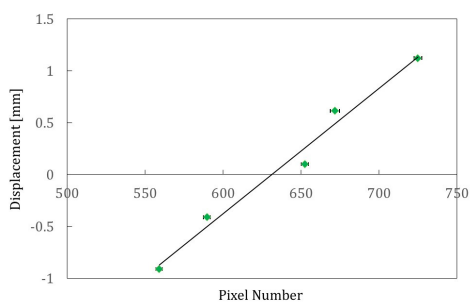


Figure 6: Calibration measurement between BPM position and the pixel number on the CCD camera.

4. 結果・考察

以上の光学系・測定条件から撮影された蓄積ビームを周回毎に並べたものを Figure 7 に示した。Figure 7 の左上に記した数字は周回ターン数である。入射電磁石の磁場が加わると軌道が大きく変動するので、撮影された画像上でビーム像が大きく動いたターン付近が磁場発生付近のタイミングである。入射電磁石のパルス幅は PSM が約 $0.8 \mu\text{s}$ 、K3 が約 $1.2 \mu\text{s}$ であるので、画像上でビーム像が大きく移動したターンから 5 ターン前の撮影タイミングから撮影し始めれば、磁場発生直前のターンを含めて撮影できると考えられるので、このターンを 1 ターン目とした。

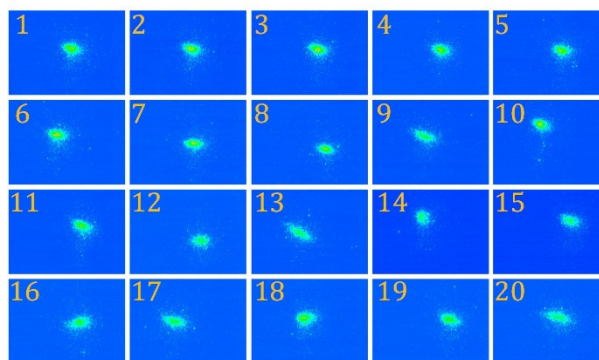


Figure 7: Turn-by-turn stored beam profiles kicked by PSM.

次に、上記の解析方法で、蓄積ビームサイズ (σ) 、重心 (μ) を H・V それぞれの方向に解析し、ターン毎に 100 ショットの平均をプロットしたグラフを Figure 8 に示す。PSM・K3 に関して、それぞれ 1~40・1~20 ターンをターンバイターンで測定し、その後 100・200・300・400・500・1000 ターン、次に 3000 ターンから 3000 ターンおきにダンピングタイム付近である 30000 ターンまで測定し、横軸 (ターン数) を対数表示にしてプロットした。

Figure 8 の σ 解析から分かるように、入射用磁場が加わると、H・V どちらの方向にもビームが拡散し、蓄積ビームサイズが大きくなり、400~500 ターン付近で最大となる。このターンの周辺は現在のところターンごとの測定ができていないが、1~40 ターンの様子を見ると、蓄積ビームサイズは振動しながら徐々に大きくなっていくのではないかと推測される。また重心振動の振幅が PSM と K3 で大きく変わらないが、蓄積ビームサイズは明らかに PSM の方が大きいことから、PSM が蓄積ビームに及ぼす影響は単純な二極磁場ではないことが予想される。そして PSM・K3 どちらも 400~500 ターン付近で重心振動が収束しかけていることに対して、蓄積ビームサイズは最大になっている。このことから蓄積ビームは位相空間内を拡散しながら移動して、400~500 ターン付近で最も拡散し、重心の振動が収束するのではないかと考えられる。また、蓄積ビーム重心位置・サイズの振動をそれぞれターンバイターンで測定できている点のみ FFT 解析したところ重心は PSM では 0.738、K3 では 0.728 の振動数を持っており、これは水平方向チューン小数部分のデザイン値である 0.73 とほぼ等しい。またビームサイズについて、今回解析したデータ点においては PSM・K3 とともに特有の振動数を持つことは確認できなかった。

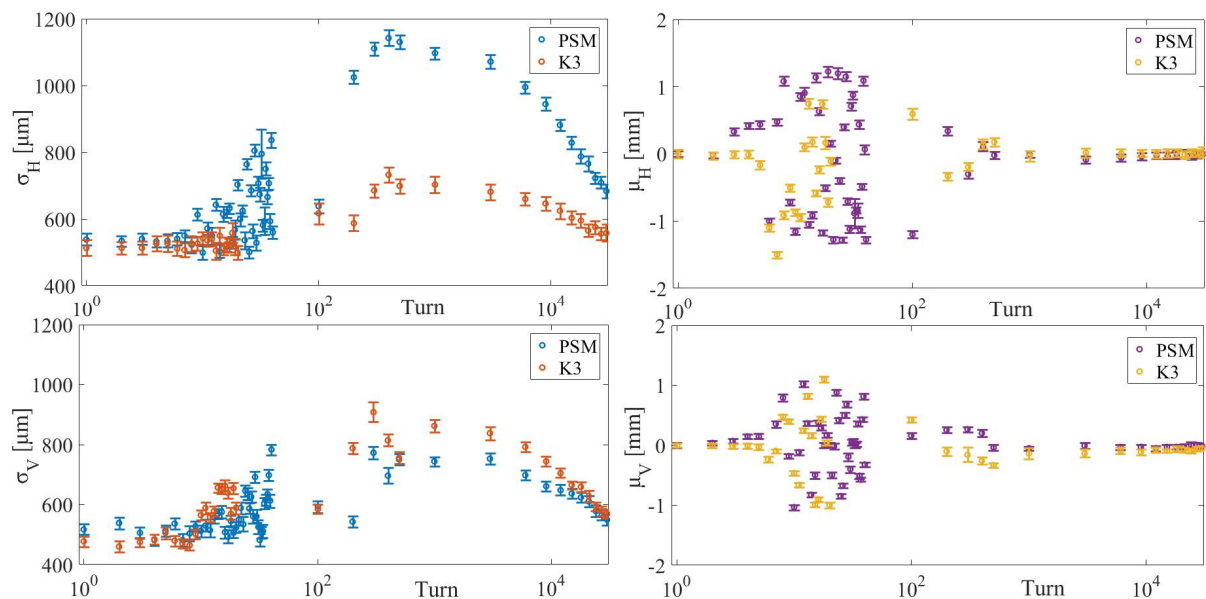


Figure 8: Change in horizontal/vertical beam size and beam position on turn numbers.

5. 今後

今後は更に測定ターン数を追加し、ビームの周回ごとの振る舞いをより詳細に測定する。現時点では、一連のPSMによるビームサイズの変化の原因について、そのメカニズムは明らかになっていない。このためトラッキング計算などの理論計算を進め、測定データと定量的な比較検討を行い、観測されている現象を理解するべく研究を進めていく。

謝辞

本研究を進める上で、あいちSRの技術職員の方々をはじめ、多くの加速器関係者の方々による多くのご支援やご指示を頂きました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- [1] <http://www.astf-kha.jp/synchrotron/>
- [2] N. Yamamoto *et al.*, AIP, **1234**, pp. 591-594 (2010).
- [3] K. Harada *et al.*, Phys. Rev. STAB **10** (12) (2007) 123501.
- [4] H. Takaki *et al.*, Phys. Rev. STAB **13** (2010) 020705.
- [5] K. Ito *et al.*, Proc. of IPAC 2015, TUPJE005 (2015).
- [6] N. Yamamoto *et al.*, NIM. A, **767** (2014) 26-33.
- [7] K. Ito master's thesis, Nagoya University (2015).
- [8] http://www.biovis.com/images/cameras/SCAS0077E03_C8484-03G-05G.pdf
- [9] https://www.hamamtsu.com/resources/pdf/sys/SHSS0018J_C11370.pdf
- [10] R. Kawakami, master's thesis, Nagoya University (2013).