

Measurement for stray field of the pulse septum using the stored beam at NewSUBARU

Takayuki Mitsui¹, Takahiro Matsubara*, Yoshinori Hisaoka, and Yoshihiko Shoji
LASTI, University of Hyogo
1-1-2 Koto, Kamigoori, Ako-gun, Hyogo, 678-1205

Abstract

In this research, the distribution and the time structure of the stray field of the pulse septum were investigated by measuring the change of the stored beam orbit. Its time structure and spatial distribution gave essential information for the design of the correction magnet of the stray field.

周回ビームを用いたNewSUBARUにおけるパルスセプタム電磁石の漏洩磁場の測定

1. はじめに

NewSUBARU^[1]は兵庫県立大学（旧姫路工業大学）高度産業科学技術研究所（LASTI）の附属施設であり、2000年から放射光利用運転を開始し、2003年6月からは定電流top-up運転を実施している^[2]。表1にNewSUBARUの主要パラメータを示す。Top-up運転とは利用運転中にビーム入射を随時行い、蓄積電流値の減少を補う運転方式である。得られる放射光の強度が一定になる等の利点があるので、多くの施設でtop-up運転実施の為に取り組みがなされている。Top-up運転の技術的ポイントは、ビーム入射時のビームロスとパルスの軌道変動の改善である。パルスセプタムの漏洩磁場はこの両方に関与しているが、NewSUBARUで特に問題となっているのは入射効率である。強い非線形性を持つ漏洩磁場の存在が入射プロセスの理解を複雑にし、入射調整を難しくしている。我々は別に設定したパルス電磁石で漏洩磁場を打ち消す方法を検討しており、その為に周回ビームを用いて漏洩磁場分布を測定する事にした。

表1：NewSUBARUの主要パラメータ。

電子エネルギー	0.5~1.5GeV
入射エネルギー	1.0GeV
周長	118.73m
RF周波数	499.955MHz
ハーモニックナンバー	198
ベータトロン振動数	6.30（水平方向） 2.23（垂直方向）
自然エミッタンス（1GeV）	38nm

2. パルスセプタム電磁石の概要

図1にパルスセプタム電磁石と入射部真空チャンバーの断面を示す。エディカレント型のセプタムではなく、電源から直接セプタムに電流を流すタイプである。表2にNewSUBARUのパルスセプタムのパラメータを示す。

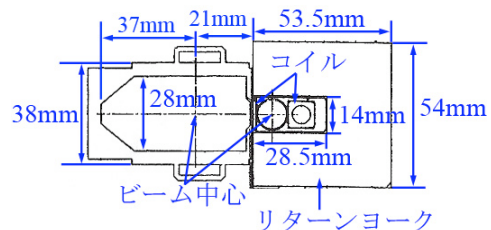


図1：リング上流から見た入射部の断面図。

表2：NewSUBARUのパルスセプタム電磁石の主要パラメータ。

材質	コイル：C1100 真空チャンバー：SUS316L リターンヨーク：35A300
電磁石全長	1m
セプタムコイル寸法	幅12mm、厚さ3mm
リターンコイル寸法	10mm×10mm
入射ビーム用チャンバー寸法	外径12mm 厚さ0.5mm
抵抗（20℃）	0.76mΩ
インダクタンス	2.3μH
電流波形	0.92msec幅ハーフサイン
最大電流	4949A
最大磁場	0.44T
利用運転時磁場	0.35T

¹ E-mail: mit-k@lasti.u-hyogo.ac.jp

* Present affiliation: Sumitomo heavy industry, Ltd.

3. 測定原理

蓄積リング上でベータトロン振動よりも十分緩やかな磁場のエラーが発生すると、リングの全周において閉軌道のズレ (COD) が発生する^[3]。本研究では予想される磁場エラー発生点 (入射点) からリングを半周した対称点での、パルスセプタム漏洩磁場によるCOD変化を測定した。この測定位置でのCOD (xとする) は(1)式で与えられる。

$$x = -\frac{\beta\Delta B\Delta L}{2B\rho\sin\pi\nu} \quad (1)$$

ここで、 β は測定点と入射点共通のベータトロン関数、 ν はベータトロン振動数、 ΔB と ΔL は磁場エラーの強さと長さ、 $B\rho$ は電子の運動量である。

4. 漏洩磁場波形の測定

4.1 測定結果

パルスセプタム電磁場による周回ビームのパルスのCOD変化から、漏洩磁場の時間波形を求めた。磁場の空間分布を求める為に、入射部での周回ビーム軌道を変えて各軌道でのパルスセプタムによる軌道変動を測定した。

パルスセプタムのパルス磁場が誘導電流を発生させる事を完全に避ける事は出来ない。磁石コイルの電流波形がハーフサインであるのに対して、誘導電流による磁場はその微分形であるハーフコサインとなる。そこで、測定した波形をサイン成分 (漏洩磁場成分) とコサイン成分 (誘導電流磁場成分) に分けるデータ解析を行った。その解析例を図2に示す。Vertical CODの原因である水平方向磁場成分と、horizontal CODの原因である垂直方向磁場成分は異なった波形を示した。

データ解析では、高周波成分のカットによってハーフコサインがある時定数 τ でなまった形を仮定し、ハーフコサインの強度と時定数をパラメータとして求めた。サイン成分は磁場の測定結果からコサイン成分を引く事で得られる。

4.2 コサイン成分の時定数

水平磁場の τ の空間分布は垂直方向にはほぼ一樣で、水平方向にはセプタムから遠ざかる程大きくなる傾向があった。垂直磁場の τ の空間分布には明確な傾向は見られず、ほぼ一樣であった。但し垂直磁場のコサイン成分は小さかったので精度は悪い。

4.3 データ解析結果の妥当性

測定磁場はパルスのだが、測定領域が波長と比べて十分狭いので、サイン成分、コサイン成分共に空間

分布は以下の静磁場の方程式 ((2)式、(3)式) を満たすはずである。

$$\frac{\partial B_x}{\partial x} = -\frac{\partial B_y}{\partial y} \quad (2)$$

$$\frac{\partial B_x}{\partial y} = \frac{\partial B_y}{\partial x} \quad (3)$$

ビーム中心における一次の微分係数を表3に示す。値の不一致は推定誤差範囲に収まってはいないがおおよそ合っており、解析は妥当であると考えている。

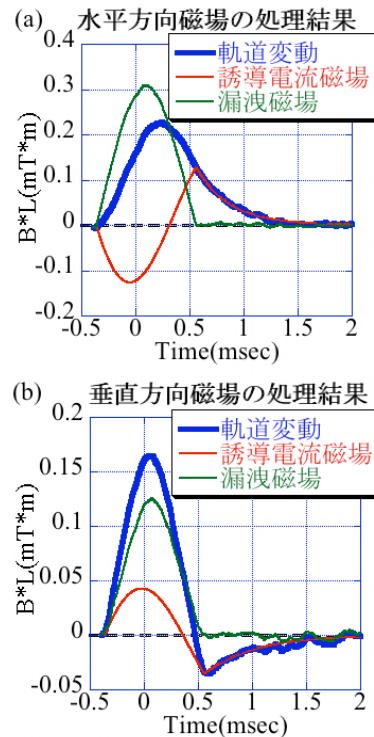


図2：測定した波形例と、それらをデータ解析で分解したサイン成分、コサイン成分。(a)水平方向磁場、(b)垂直方向磁場。

表3：ビーム中心での一次の微分係数。

磁場成分 (mT)	$\frac{\partial B_x}{\partial x}$	$-\frac{\partial B_y}{\partial y}$	$\frac{\partial B_x}{\partial y}$	$\frac{\partial B_y}{\partial x}$
サイン	8.8 ± 1.2	13.4 ± 3.8	14.5 ± 1.9	23.8 ± 2.4
コサイン	2.6 ± 1.0	-3.2 ± 1.0	1.9 ± 1.5	-0.2 ± 0.2

5. 磁場の分布

5.1 各磁場成分の空間分布

データ解析の結果として得られた磁場分布を図3に示す。漏洩磁場の分布は予想に反して、 $y=0(\text{mm})$ の線に対して非対称であった。垂直磁場はほぼ予想されていたが水平磁場は予想外であり、その時間構造は垂直磁場と明らかに異なる。

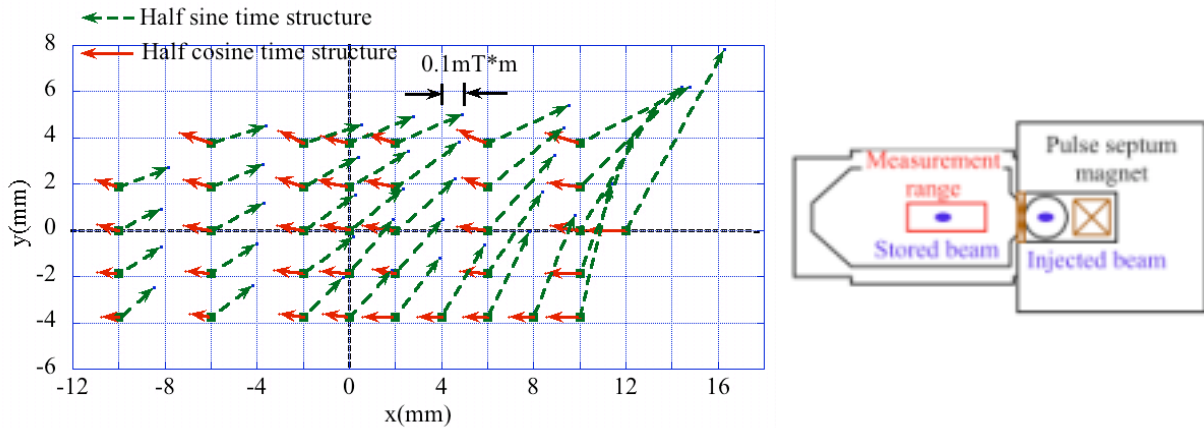


図3：パルスセプタム電磁石の漏洩磁場と誘導電流磁場の分布をリング上流から見た図。x,y=0の点が周回ビームの中心軌道である。破線の矢はサイン成分、実践の矢はコサイン成分を示す。磁場強度はピーク値を取った。

5.2 y=0(mm)での磁場強度

y=0(mm)での各磁場成分の強度を対数表示したグラフを図4に示す。この図と4.に示した結果から以下の事が明らかとなった。

- (1) 磁場の空間分布から、水平磁場は電磁石の傾きでは説明出来ない。
- (2) 垂直磁場のサイン成分はx依存性が強く、純粋な漏洩磁場である可能性が高い。よりxの大きい点での測定を行って分布を確認し、その後補正コイルを設計する事を考えている。
- (3) 水平磁場と垂直磁場で磁場波形（コサイン成分のサイン成分に対する比）及び空間分布が全く異なる事から、磁場の発生原因が違うと考えられる。よってそれぞれ別のコイルを用いての補正が適切であろう。
- (4) 水平方向磁場のコサイン成分は磁場をなまらせる作用をしており、通常の渦電流である。x依存性は緩やかであり、時定数τがセプタム面に近付く程小さくなる事と考え合わせると、垂直方向にある程度の大きさを持った磁場発生源がセプタム側にあると考えられる。但し、それが何かは不明である。
- (5) 垂直磁場のコサイン成分は小さく、磁場波形がアンダースhootを起こす様に発生している。NewSUBARUで以前に存在していた誘導電流^[4]に類する経路で発生していると言える。しかしその強度は他成分より一桁程度は弱く、問題になる程度ではない。

6. まとめ

本研究では、漏洩磁場をコイルを用いて補正する為に必要なデータ測定を行った。周回ビームの軌道

中心付近に限定された測定であったが、多くの情報が得られた。現在はシングルパスのビームを使ったセプタムに近い点での磁場分布測定の解析を行っている。これらの測定とシミュレーションによる理論計算を比較し、漏洩磁場と誘導電流の発生原因を明らかにした後、補正コイルの設計を行う予定である。

参考文献

[1] A. Ando et al., J. Synch. Rad. 5(1998), pp.342-344.
 [2] Y. Shoji et al., "NewSUBARU storage ring: Operational progress in these three years", Proc. APAC 2004, pp. 550-552.
 [3] 神谷幸秀, 「OHO'84 高エネルギー加速器入門」 II 加速器の原理 シンクロトロン及びストレージリング
 [4] Y. Shoji et al., "Stray field of a pulse septum induced by eddy currents", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.14, No.2, pp. 441-444, June 2004.

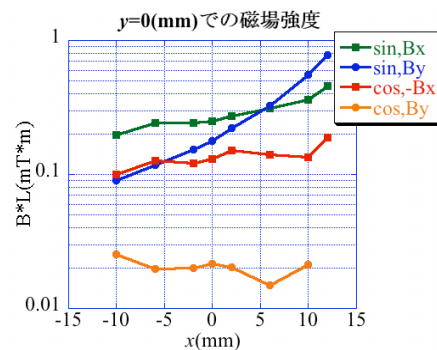


図4：y=0(mm)での各磁場成分の強度。