

## ステアリング電磁石の限界性能

### SMALLEST CORRECTION ANGLE AND FASTEST CORRECTION CYCLE OF STEERING MAGNETS AT THE SPRING-8 STORAGE RING

妻木孝治<sup>#A)</sup>, 張超<sup>A)</sup>, 武部英樹<sup>B)</sup>

Koji Tsumaki<sup>#A)</sup>, Chao Zhang<sup>A)</sup>, Hideki Takebe<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> JASRI/SPRING-8, <sup>B)</sup> OIST

#### Abstract

Orbit stability of less than 1  $\mu\text{m}$  is needed for storage ring for synchrotron radiation use. Iron core magnets are used for slow orbit correction ( $\sim$ less than 1 Hz) and air core magnets are used for fast orbit feedback correction (1 $\sim$ 200 Hz). We studied the controllable minimum magnet current and kick angle for iron core magnets for slow orbit correction, and the magnetic field reduction and the phase delay of applied magnetic fields for fast orbit correction. One-to-one correspondence between the magnet currents and magnetic fields was obtained when changing the magnet current from 0.2 A to 0.200145 A three times with 0.0145 mA step. Magnetic field stability for 1 minute was measured and stability less than  $\pm 5 \mu\text{A}$  and  $\pm 1 \text{mG}$  was obtained, which corresponds to  $\pm 0.5 \text{nrad}$  kick angle for 8 GeV SPRING-8 electron beam. These values are about 1/30 of initial steering magnet and power supply system performance. For fast orbit correction, the magnetic fields reduction was 42 % at 100 Hz and the phase delay exceeded 180 degree at 500 Hz for aluminum chamber. For SUS chamber, field reduction was very small and the phase delay remained within 180 degree even at 10 kHz. These results showed that the aluminum chamber cannot be used for fast orbit correction (less than 200 Hz) but the SUS chamber is applicable for fast orbit correction.

#### 1. はじめに

最近の放射光リングでは精密な実験を行うため、サブミクロンの軌道安定性が要求されている。軌道の安定性を確保するために、軌道変動の原因を取り除くとともに、変動する軌道をステアリング電磁石で精度よく補正することが必要となる。

SPRING-8 蓄積リングでは当初水平、垂直各 288 台の軌道補正用ステアリング電磁石が用意されており、そのうち各 12 台を使用してゆっくりした軌道の補正を行っていた。ステアリング電源の電流値は、 $\pm 5\text{A}$  を 16 ビット DAC で設定しているため最小電流分解能は 0.153 mA で、電子ビームの蹴り角に換算すると水平が 30 nrad で垂直が半分の 15 nrad である。このような微小な蹴り角にもかかわらず、ゆっくりした軌道補正のとき微小な軌道のジャンプが見られたため、さらに分解能の良いステアリング電磁石が必要になり、既存のステアリング電磁石の設定分解能を上げることが検討された。しかし電流値や磁場が小さくなりノイズやヒステリシスのため分解能が上がらないことが懸念されたため、電源の出力電流を下げてもどこまで有意な磁場変化が得られるかを検討した。また軌道補正はゆっくりしたものでばかりではなくチェンバーや磁石の振動に起因する早い軌道補正も必要である。振動による 200Hz 程度以下の早い軌道の変動をフィードバックで補正するためには、10kHz までの磁場の周波数が必要である<sup>[1]</sup>。そのため空芯のステアリング電磁石を用いてアルミチェンバーと SUS チェンバーの場合についてどの程度の周波数まで補正可能かについても検討した。

<sup>#</sup> tsumaki@spring8.or.jp

このようにステアリング電磁石を極限まで使用したときの限界について検討したのでその結果について述べる。

#### 2. 高精度軌道補正のための限界分解能

##### 2.1 測定

電磁石の鉄のヒステリシスのため微小磁場のコントロールができないのではないかと懸念されたため、ステアリング電磁石のヒステリシスを測定した。

図 1 に測定の配置図を示す。従来の  $\pm 5\text{A}$ 、16 ビット DAC の電源に対して、出力電流を DAC 設定値の 1/11 になるように電流制御回路を改造し、出力電流の変化を 1/11 としたときの磁場の追従性を測定した。

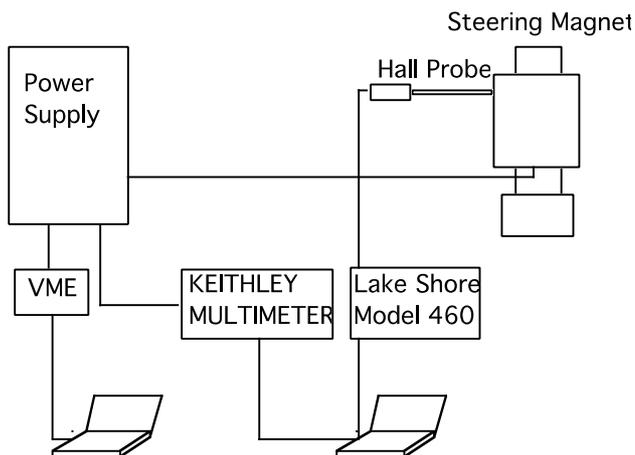


Figure 1: Measurement apparatus for magnetic fields of a steering magnet.

## 2.2 ヒステリシスと安定度の測定結果

図2に定格の $\pm 5A$ 変化させた時の磁場の変化を示す。 $\pm 5A$ 近辺ではわずかに飽和の影響が見られ、ヒステリシスもあるが、通常の軌道補正上問題となるような量ではない。図3に最小ビットに対応する $0.16\text{ mA}$ ステップで10回、合計 $1.6\text{ mA}$ を3回上下させた時の電流と磁場の関係を示す。ヒステリシスのため電流を下げた時は同じ電流値でも元の磁場より大きくなるが、その差は電流の上げ下げを繰り返すごとに小さくなり3回目ではほぼ閉じたループとなる。軌道補正に要する磁場の線形性は、この時点で十分保たれているということが出来る。図4に電源のDACの出力設定を $1/11$ にし、電流の最小ステップが $0.0145\text{ mA}$ となるようにし、電流値を $0.2\text{ A}$ から $0.200145\text{ A}$ まで10ステップで変化させた時の結果を示す。電流は3回上下させたが、2回目、3回目と磁場が小さくなっていくように見受けられるが、磁場の線形性は保たれている。図5に1分間、10分間、1時間の磁場の安定度を示す。これより少なくとも1時間程度の時間スケールでは電流と磁場の相関は見られない。また1時間での電流の安定度は $\pm 10\text{ }\mu\text{ A}$ 、磁場の安定度は $\pm 2\text{ mG}$ で、電子ビームの蹴り角に換算すると $\pm 1\text{ nrad}$ に相当する。1分間であればこれらの半分以下の安定度である。従って1分以下の周期の補正であれば現在の補正角の $1/30$ 程度でも有効であることを示している。

以上の結果を踏まえ、電源のRIOにサブのRIOを追加し、ステアリングの補正電流の最小ステップを $4.8\text{ }\mu\text{ A}$  (21ビットDAC相当)になるようにした<sup>[2]</sup>。これにより現在は補正の周期は $1\text{ Hz}$ で、補正時の電子ビームの最小蹴り角は、水平方向が $1\text{ nrad}$ 、垂直方向が $0.5\text{ nrad}$ となっている。

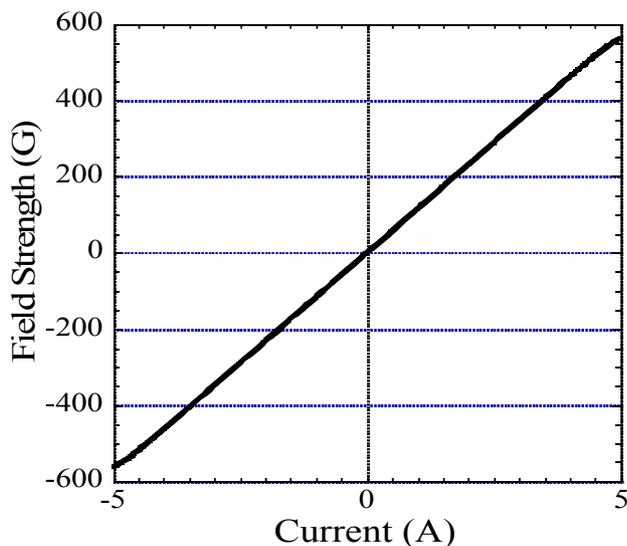


Figure 2: Relation between magnetic fields and magnet current of a steering magnet. The magnet current is changed in full range.

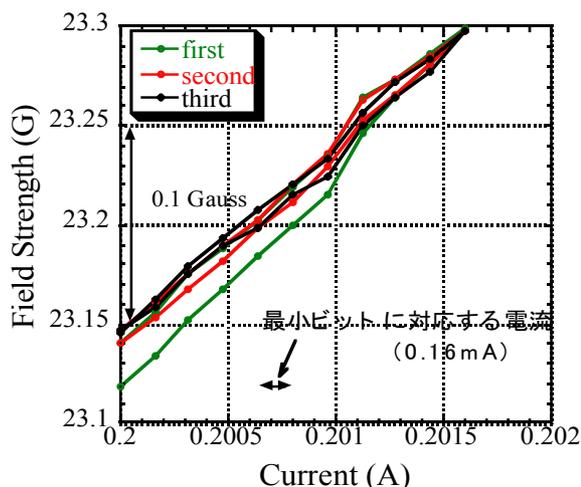


Figure 3: Magnetic field variation for the small current variation. The current is increased and reduced three times between  $0.2\text{ A}$  to  $0.2016\text{ A}$  with a  $0.16\text{ mA}$  step.

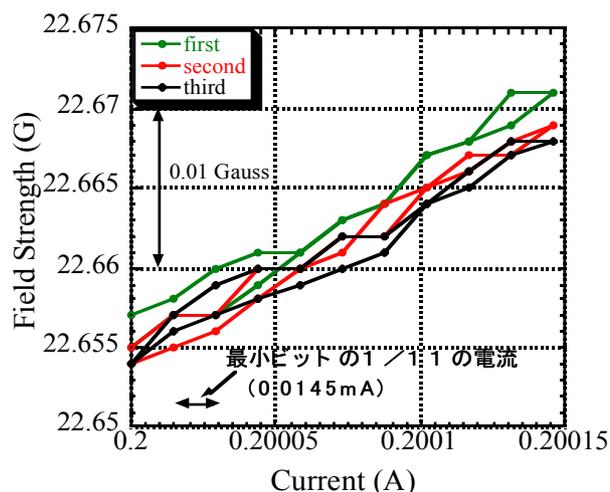


Figure 4: Magnetic field variation for the smallest current variation. The current is changed from  $0.2\text{ A}$  to  $0.200145\text{ A}$  with a  $0.0145\text{ mA}$  step.

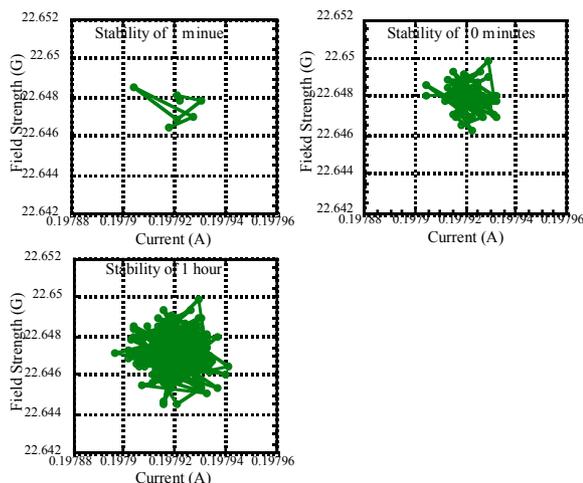


Figure 5: Stability of magnetic fields for 1 minute, 10 minutes and 1 hour.

### 3. 早い軌道補正のための限界周波数

正確な補正のためにはあらかじめ交流磁場の減衰量と位相の遅れを押さえておくことが重要である。そこでアルミチェンバーおよび厚さの異なる2種類のSUSチェンバーについて磁場の減衰と位相の遅れを測定した。

#### 3.1 測定

測定系を図6に示す。測定はパルス発生器 (Wave Tex model 91) で正弦波を作り、電力増幅器 (エヌエフ回路設計ブロック HSA4014) で増幅し、ステアリング電磁石に電流を流した。そしてステアリングへの印加電圧  $V_1$ 、ステアリングに流れる電流  $I (=V_2/R)$ 、ステアリングの作る磁場  $V_3$  を測定した。磁場は、直径 20 mm のボビンに直径 0.1 mm のエナメル線を 100 ターンまいたものをセンサーとして誘起される電圧  $V_3$  を測定した。ステアリング電磁石は空心の高分解能磁石を用いた<sup>[3]</sup>。ステアリング電磁石の主なパラメータを表1に示す。

測定は 0 から 10 kHz まで周波数を変えながら、チェンバーを流れる渦電流による磁場の減衰と位相の遅れの周波数依存を測定した。測定は次の4ケースについて行った。①チェンバーなし、②楕円アルミニウムチェンバー (肉厚 3.3 mm、長径 98 mm、短径 48 mm)、③楕円 SUS チェンバー (肉厚 1.6 mm、長径 94 mm、短径 43 mm)、④レーストラック SUS チェンバー (肉厚 1.0 mm、長径 91 mm、短径 42 mm)。

#### 3.2 チェンバーによる磁場の減衰と位相の遅れ

図7に渦電流に磁場の減衰の影響を示す。図ではチェンバー中央の磁場の値を、チェンバーがない場合の磁場の値で規格化して示してある。3.3 mm 厚のアルミチェンバーでは 100 Hz で磁場は 58%まで減衰し、1 kHz で7%になってしまふ。これに対しSUS チェンバーでは1 kHz でもほとんど減衰は見られず、10 kHz でやっと半分程度になる

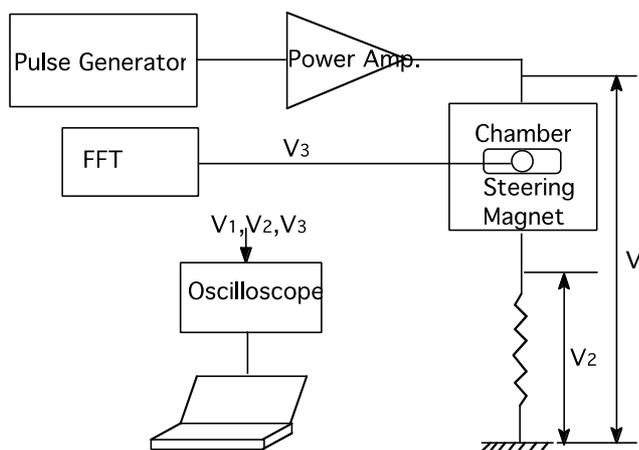


Figure 6: Apparatus for the measurement of reduction and phase delay of magnetic field due to eddy current.

Table 1: Main Parameters for the High Resolution Steering Magnet

Parameter	Value
Integrated magnetic field $Bl$	300 G.cm (14 G)
Current $I$	5 A
Resistance $r$	0.36 $\Omega$
Inductance $L$	1.3 mH

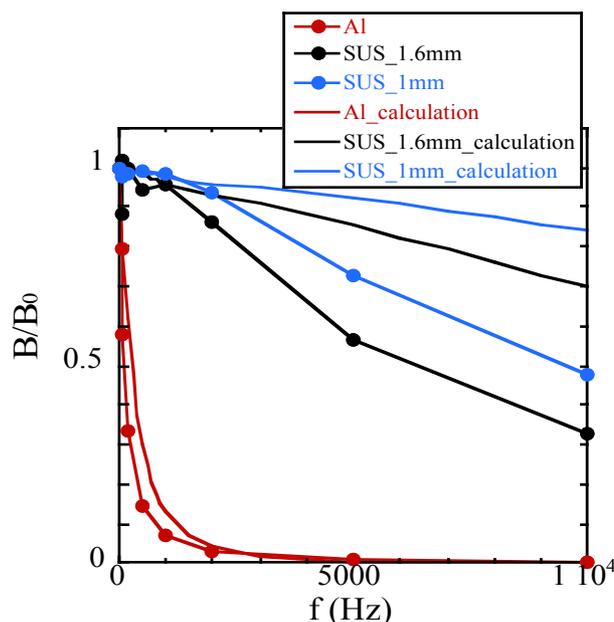


Figure 7: Frequency dependence of magnetic field with 3.3 mm thick aluminum chamber, 1.6 mm thick SUS chamber, and 1 mm thick SUS chamber.

鉄心を持った電磁石の磁極間に、四角形のチェンバーが置かれた場合の中心から  $x$  の位置での磁場の減衰は次のように表される<sup>[4]</sup>。

$$\frac{B(x)}{B_0} = \frac{\cosh\left[(1+i)\frac{b-t}{\delta_v}\right] \cosh\left[(1+i)\frac{x}{\delta_h}\right]}{\cosh\left[(1+i)\frac{b}{\delta_v}\right] \cosh\left[(1+i)\frac{b-t}{\delta_h}\right]} \quad (1)$$

$$\delta_h = \sqrt{\frac{2\rho h}{\omega\mu_0 t}} \quad (2)$$

$$\delta_v = \sqrt{\frac{2\rho h}{\omega\mu_0 H}} \quad (3)$$

ここで  $\rho$  は電気抵抗率、 $h$  は電磁石の磁極間の半分、 $t$  はチェンバーの厚さ、 $H$  はチェンバーの高さの半分、 $b$  はチェンバーの半幅である。上式を導く際鉄中の

磁場  $H$  は小さいものとして無視している。しかし空芯のステアリング電磁石では上式の仮定は使えないため厳密には式 (1) は適用できない。しかし傾向をみるため  $h$  を  $x = b/4$  のところを通る磁力線の長さで代表させて、磁場の減衰や位相の遅れを求めた。厚さ 1.6 mm の楕円形の SUS チェンバーに対する磁場の減衰の計算結果を図 8 に示す。チェンバーの端から中央に行くに従って磁場の減衰は大きくなり中央付近ではほぼ一定の 2 極磁場になっていることがわかる。アルミチェンバー、SUS の 1.6 mm 厚の楕円チェンバー、SUS の 1 mm 厚のレーストラックチェンバーに対する、 $x = 0$  での計算値の周波数依存性を図 7 の赤の実線、黒の実線、青の実線で示す。おおまかな傾向は再現しているが、値は一致していない。これはもともと式 (1) を適用したことに無理があると思われる。

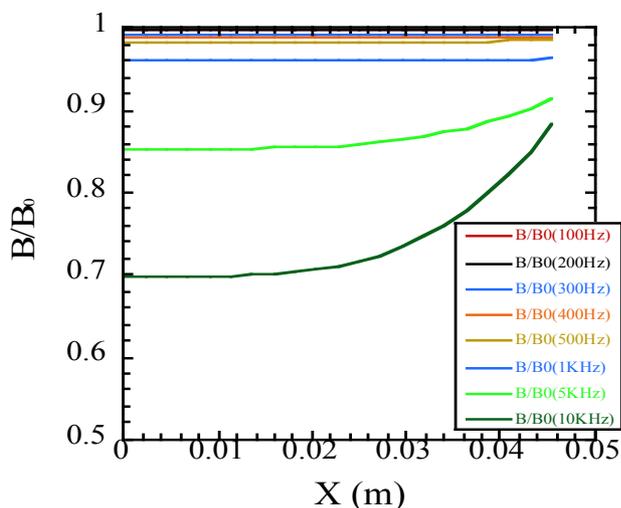


Figure 8: Magnetic field distribution for the 1.8 mm thick SUS chamber.

図 9 に電圧の位相を基準にした磁場の位相の遅れを示す。チェンバーのない場合が純粋に電磁石のインダクタンスによる位相の遅れで、チェンバーがある場合は電磁石のインダクタンスにチェンバーを流れる渦電流の影響が加わったものである。電磁石のインダクタンスによる位相の遅れは、式 (4) のようになり、図 9 の赤の実線になる。

$$\Phi = \arctan\left(\frac{2\pi fL}{R}\right) = \arctan(2.25 \times 10^{-2} f) \quad (4)$$

図 9 よりチェンバーのない場合の測定結果と式 (4) による計算結果は一致しているのがわかる。またアルミチェンバーの場合は 500 Hz で位相が 180 度ずれ磁場の向きが逆転してしまう。これに対し SUS チェンバーの場合は 10 kHz でもまだ同位相にとどまり磁場は逆転しない。図 10 にチェンバーのある場合からチェンバーのない場合の位相の遅れをひいて、渦電流による位相のおくれだけを求めたものを示す。実線は次式から求めたものである。

$$\Phi = \arctan\left(\frac{\text{Im}B(x)}{\text{Re}B(x)}\right) \quad (5)$$

測定結果と計算値の違いは大きい。特にアルミチェンバーで周波数が大きくなると違いが著しい。

以上よりアルミチェンバーの場合は磁場の減衰が大きく、位相も低い周波数で 180 度ずれ磁場が逆転してしまうため早いフィードバックには使えないことがわかる。これに比べ SUS チェンバーの場合は 10kHz でも磁場の減衰は 1 mm 厚のチェンバーで約 50%にとどまり、渦電流による位相の遅れも 0.3 $\pi$  程度であり、電磁石のインダクタンスによる遅れ 0.5 $\pi$  を加えても磁場が逆転することはない。またコイルのインダクタンスは巻き数の 2 乗に比例するため、コイルの巻き数を減らせばさらに位相の遅れは小さくなり、問題ないことがわかる。

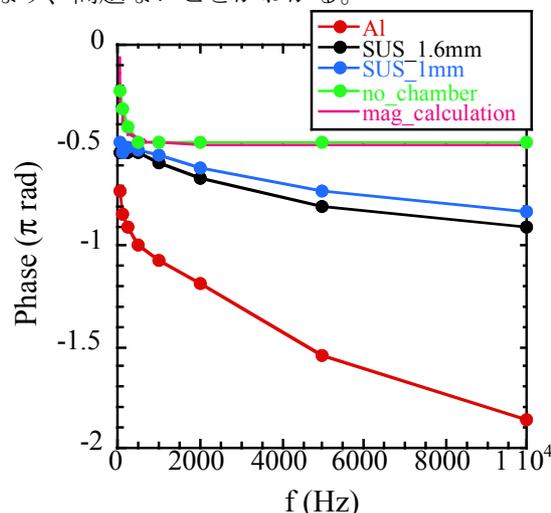


Figure 9: Phase difference between applied voltage and the magnetic field without chamber and with aluminum chamber, 1.6 mm thick SUS chamber, and 1 mm thick SUS chamber.

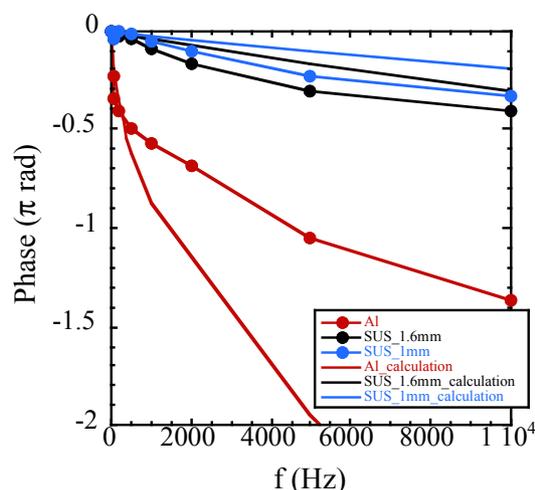


Figure 10: Phase delay of magnetic fields due to eddy current. Contribution of magnet inductance is subtracted. Measurement results are shown by circles and the calculated phase delays are shown by solid lines.

#### 4. まとめ

超精密で安定な軌道補正を目指して、ステアリング電磁石のコントロール可能な電流値と蹴り角（磁場）および早い軌道補正のための限界周波数を検討した。

具体的には現在のステアリング電磁石（電流±5、最小分解能 0.153 mA、最小ビーム蹴り角水平 30 nrad、垂直 15 nrad）に対して 0.16 mA ステップで 0.2 A から 0.2016 A まで 3 回上下させヒステリシスの影響をみた。1 回目はヒステリシスのため閉じたループとはならなかったが 2 回目以降はほぼ閉じたループとなり、磁場の線形性はほぼ保たれた。さらに最小出力電流を 1/11 にして 0.2 A から 0.20145 A まで 0.0145 mA ステップで同様の測定をした。この時もほぼ電流と磁場の関係を 1 : 1 に対応付けられることができた。さらに 1 分間、10 分間、1 時間の磁場の安定性を測定した。その結果 1 時間での電流の安定度は約 ±10 μA、磁場の安定度は ±2 mG、ビームの蹴り角に換算すると ±1 nrad であった。1 分間ではさらにこれらの値の半分以下であった。これより 1 分以下の周期の補正であれば、SPRING-8 補正電磁石の初期の設定の最小補正角の 1/30 程度でも有効であることがわかった。

また肉厚 3.3 mm のアルミニウムチェンバーおよび肉厚 1.6 mm の楕円形 SUS チェンバー、肉厚 1 mm のレーストラック形状の SUS チェンバーに対し空芯のステアリング電磁石の磁場の減衰と位相の遅れの周波数依存性を 10 kHz まで測定した。その結果アルミニウムチェンバーでは磁場は 100 Hz で 58% まで減衰し、1 kHz で 7% まで減衰した。これに対し 2 種類の SUS チェンバーでは、1 kHz ではほとんど磁場の減衰はみられず、10 kHz でやっと半分程度になった。位相の遅れに対しては、ステアリング電磁石のコイルのインダクタンスを含んだ場合、アルミニウムチェンバーでは 500 Hz で位相が 180 度遅れ磁場が逆転してしまうのに対し、SUS チェンバーでは 10 kHz でも位相が反転することはない。これよりアルミニウムチェンバーは 200 Hz 程度の早い軌道補正には使用できないが、SUS チェンバーでは十分対応可能であることがわかった。

#### 参考文献

- [1] S. Sasaki, The 2<sup>nd</sup> Workshop on Beam Orbit Stabilization, December 2002, Spring-8.
- [2] H. Takebe, K. Tsumaki, C. Chang, S. Matsui, H. Tanaka, 10<sup>th</sup> ICALEPS Int. Conf. on Accelerator & Large Expt. Physics Control Systems, Geneva, 10-14 Oct 2005, PO2.084-4 (2005).
- [3] C. Chang, K. Tsumaki, K. Kajimoto, Spring-8 Acc02-memo 10, (2002).
- [4] J. Tanabe, SLAC-R-754, June 2005.