

## Performance Tests of a Fast Electromagnetic Phase Shifter for a Polarization-Controlled Undulator

I. Ito<sup>1,A)</sup>, N. Nakamura<sup>A)</sup>, K. Shinoe<sup>A)</sup>, T. Shibuya<sup>A)</sup>, H. Kudo<sup>A)</sup>, H. Takaki<sup>A)</sup>,  
T. Tanaka<sup>B)</sup>, H. Kitamura<sup>B)</sup>, T. Bizen<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> ISSP, University of Tokyo, 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8581

<sup>B)</sup> SPring-8 Center, RIKEN <sup>C)</sup> JASRI 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo, Hyogo 679-5148

### Abstract

A 27-m polarization-controlled undulator that consists of four horizontal and four vertical undulator segments and seven phase shifters will be installed and used at SPring-8 as the most highly brilliant soft x-ray source for the material science beamline of the University of Tokyo. We designed and fabricated a phase shifter prototype to satisfy requirements for the phase shifter. The phase shifter prototype consists of three H-type dipole magnets and the yokes are made of 0.1-mm thick permalloy laminations united and insulated by varnish. The phase shifter prototype showed good performance in reproducibility and frequency response. Furthermore, the integrated AC magnetic field of the prototype was measured with a long coil system and could be easily suppressed to below  $1 \text{ G} \cdot \text{cm}$  by adjusting the coil currents. Now we are developing a flip coil system to measure the integrated DC magnetic field quickly and accurately.

## 偏光制御アンジュレータ用高速電磁石型移相器の性能評価

### 1. はじめに

東京大学では最先端の物質科学用高輝度軟X線ビームラインをSPring-8に建設し、今年度からユーザー運転を開始している。このビームラインの光源として27mの偏光制御アンジュレータが採用された<sup>[1,2]</sup>。偏光制御アンジュレータとは、4台の水平偏光8の字と4台の垂直偏光8の字のアンジュレータセグメントが交互に配置され、その間に偏光を制御する移相器が設置された光源である。

偏光制御アンジュレータで水平・垂直偏光軟X線だけでなく、高速極性切替可能な円偏光軟X線も供給できるように、電磁石タイプの移相器が検討されている。この電磁石タイプの移相器には、アンジュレータ光の品質劣化や電子軌道の変動を起こさないような高い再現性と安定性を有すること、さらに高速偏光切替(10~100Hz)で行えるように優れた周波数特性を有することなど、非常に厳しい条件が要求される。我々はこれまで電磁石タイプの移相器プロトタイプ(以下、移相器)の設計・製作を行い、上述の要求仕様を評価するための磁場測定試験を進めてきた。本発表では移相器の磁場測定試験とそれによる性能評価の現状について報告する。

### 2. 高速電磁石型移相器

図1に移相器の外観を示す。移相器はヨーク長が1:2:1の3台のH型の偏向電磁石(順にA,B,C)をビーム進行方向に並べた構造になっている。各電磁石は0.1mm厚積層パーマロイ(PC系Ni-Co,Cu-Fe)で製作された同一断面形状のヨークで構成されている<sup>[3]</sup>。

コイルは周波数特性を高めるために初期のものよ

りもインダクタンスLが小さいものを新たに製作した。直径2mmのエナメル銅線が168ターン巻かれており、電磁石A,B,Cのコイル抵抗は上下2個の合計で、 $R_A=R_C=0.18 \text{ } \Omega$ 、 $R_B=0.28 \text{ } \Omega$ 、インダクタンス $L_A=L_C=47\text{mH}$ 、 $L_B=85\text{mH}$ である。

移相器の電源はリップルの小さいリニアアンプ方式(5A30V)で、3台の電磁石それぞれに対して1台ずつ用意した。電流リップルとドリフトは、最大電流5Aに対して100ppm以下に抑えられるように設計されている。

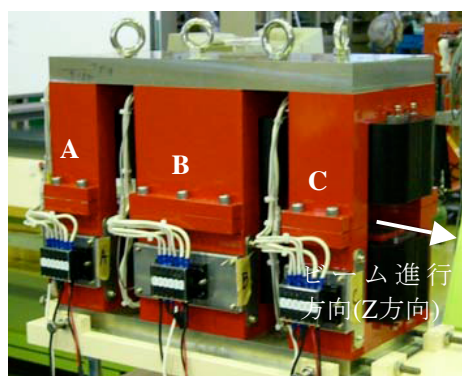


図1. 移相器の外観

移相器の磁場分布については、ホールプローブによる3次元磁場測定の結果、3次元磁場計算結果と良く一致していることが既に確認されている。また、水平方向の磁場の一様性も $\pm 8\text{mm}$ 範囲内で $\pm 0.05\%$ 内に保たれている<sup>[3]</sup>。

<sup>1</sup> E-mail: isao-maf@issp.u-tokyo.ac.jp

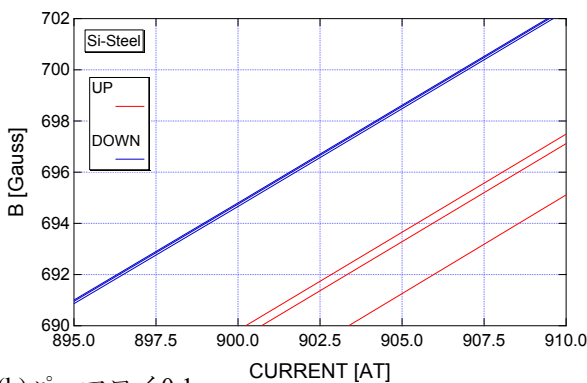
### 3. 励磁曲線と再現性

コアに使用している0.1mm厚積層パーマロイは超低ヒステリシスのため、移相器に0ATから1500ATのコイル電流を流した場合でも、高い再現性を有していることが確認されている<sup>[4]</sup>。また、励磁曲線はほとんど直線で、コアでの磁場の飽和もないことがわかっている<sup>[4]</sup>。今回は再現性の評価として、パーマロイ0.1mm、パーマロイ0.2mm、ケイ素鋼板0.1mmを積層して製作した3種類のコアを用意し、それぞれのコアに対する磁場の再現性を測定・比較した。

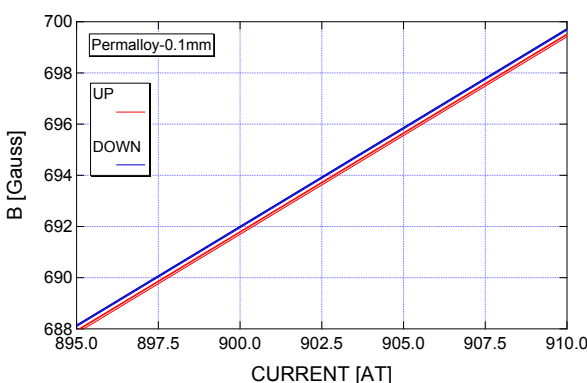
磁場の測定は電磁石A部中央にホールプローブを置いて励磁電流を変えながら行い、励磁電流と磁場の関係を求めた。励磁電流は0AT近辺から1500ATまで150ATごとに変化させた。0AT近辺から1500ATまで上昇をUP、1500ATから0AT近辺までを下降させることをDOWNとする。UPとDOWNを3回くり返して測定し、この3回のデータのばらつきを再現性とした。

図2に各コアの励磁電流と磁場の関係を示す。ケイ素鋼板はUPとDOWNの差が大きくなっているのに対して、パーマロイはどちらの厚みであってもUPとDOWNの差は小さい。これはパーマロイがケイ素鋼板に比べてヒステリシスが小さく、残留する磁場が小さいためと考えられる。パーマロイのコアがケイ素鋼板のコアと比較して高い再現性を有することがわかる。ただし、ケイ素鋼板でもDOWNだけに限れば、パーマロイほどではないが再現性は悪くないことがわかる。

(a)ケイ素鋼板 0.1mm



(b)パーマロイ0.1mm



(c)パーマロイ0.2mm

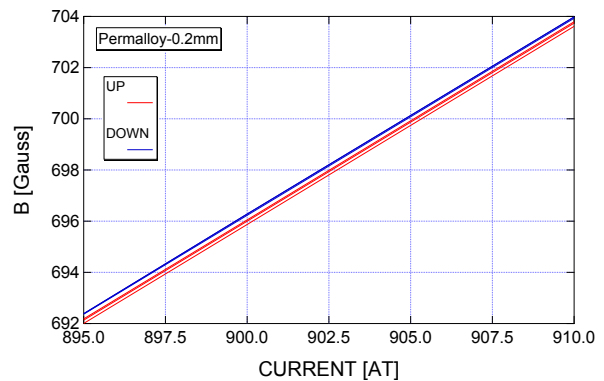


図2. 励磁曲線

### 4. 真空チャンバーの周波数特性

電磁石自身の周波数応答特性は既に測定され<sup>[3]</sup>、コイルのインダクタンスを下げることでさらに特性が改善されている。他方、電磁石で交流磁場を励磁した場合、磁場中に置かれた導体に電気伝導度に応じた渦電流が発生して磁場が乱される。移相器中にチャンバーを設置した場合に、チャンバーに発生する渦電流が交流磁場与える影響を調べた。

図3に測定のプロック図を示す。測定はFFTアナライザ(HP35670A)の周波数応答測定モードで行った。励磁電流は6ATとし、チャンバーの効果のみを出すために、チャンバーがない場合の周波数特性を、チャンバーを入れた場合の周波数特性から差し引いた。移相器に挿入したチャンバーの材質はステンレスであり、その断面は挿入光源間に用いられているチャンバーの断面形状と同じで、幅90mm、高さ18mmの矩形でおよそ近似でき、厚みは5mmである。さらに、比較のために直径27mm、肉厚1.5mmのステンレス製円形パイプについても移相器に挿入し交流磁場に与える影響を測定した。

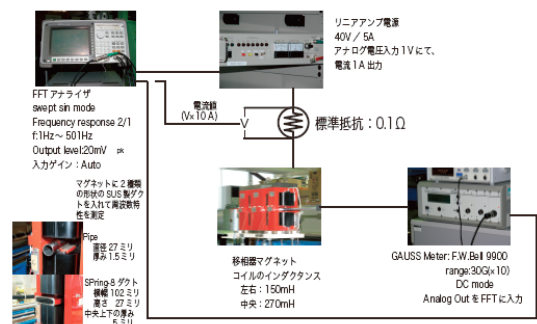
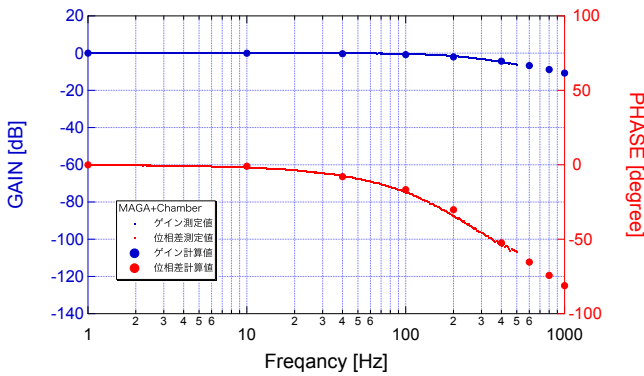


図3. 周波数特性測定のプロック図

図4に交流磁場の周波数特性を示す。(a)がチャンバーを挿入した場合、(b)がパイプを挿入した場合である。チャンバーの場合、肉厚が5mmと比較的厚いことと幅が広いこと、渦電流の影響をより大きく受けていることがわかる。一方で、パイプの場合は渦電流の影響が相対的に小さくなっている。チャンバーの肉厚を移相器マグネット磁極にかかる部分の

みでも薄くできれば、影響を小さくできることが期待できる。ただし、実際には安全をみてステンレスチャンバーをセラミックチャンバーに変える予定である。

(a)チャンバー



(b)円形パイプ

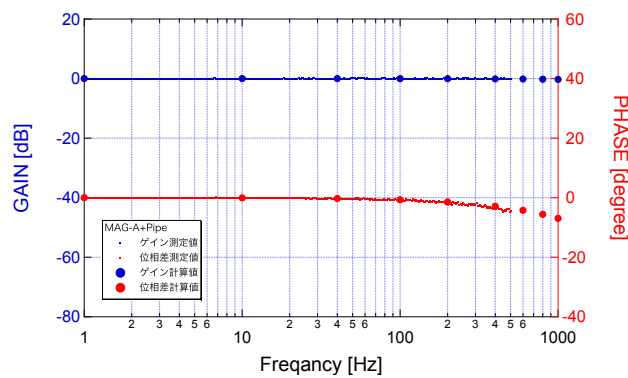


図4. 周波数特性

## 5. 交流積分磁場測定

偏光制御アンジュレータで高速偏光切り替えを行いながら高品質の放射光を発生させるためには、移相器の積分磁場を可能な限りゼロ(目安としては $1\text{G}\cdot\text{cm}$ 以下)にして、電子ビームの変動をサブミクロン以下に抑えることが要求される。この要件を評価するために、 $1\text{G}\cdot\text{cm}$ 以下の積分磁場を測定可能な分解能( $0.01\text{G}\cdot\text{cm}$ )と、 $10\sim 100\text{Hz}$ の交流磁場を発生・測定するのに十分な同期性( $20\text{MHz}$ )・確定性( $1\mu$ 秒)を持った測定システムを開発し、移相器の交流積分磁場測定を行った。

図5に交流積分磁場測定システムのブロック図を示す<sup>[4]</sup>。ロングコイルを通過する磁束の変化で誘導される電圧から交流積分磁場を測定する。制御システムはNational InstrumentsのPXIシステムで構成されていて、それらをリアルタイムOS用のLabVIEWで作ったプログラムで制御する<sup>[4]</sup>。

まず、電源からのリップルノイズを確認するため、直流電流で移相器を励磁した場合にロングコイルに誘導される電圧信号を計測した。図6はリップルノイズのパワースペクトル密度である。50Hz毎にリッ

プルノイズの周波数成分が確認できる。

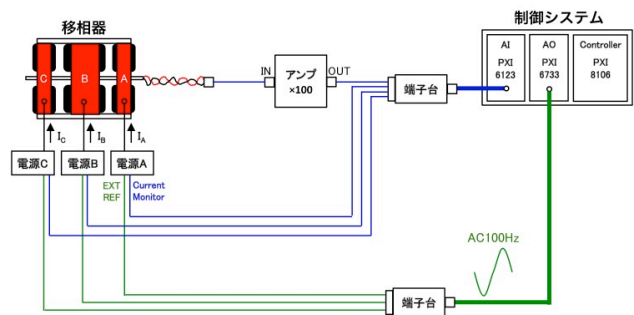


図5. 測定システムのブロック図

続いて、 $100\text{Hz}$ の交流電流で移相器を励磁し、交流積分磁場を測定した。移相器に流す交流電流は電磁石A,B,Cそれぞれで振幅、位相を調整し、発生した $100\text{Hz}$ の交流磁場成分が最も小さくなる状態で測定を行った。図7に交流積分磁場のパワースペクトル密度を示す。交流電流の大きさはpeak to peakで $I_A = I_C = 362\text{AT}$ 、 $I_B = 430\text{AT}$ である。リップルノイズと $100\text{Hz}$ の交流磁場が足し合わされた状態になって、全てのスペクトルピークは $1(\text{G}\cdot\text{cm})^2/\text{Hz}$ 以下に収まっている。

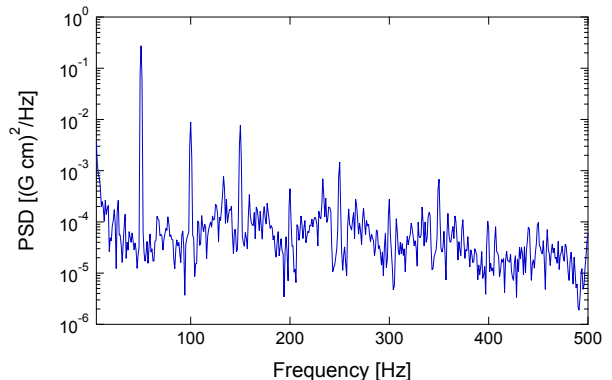


図6. リップルノイズのパワースペクトル密度

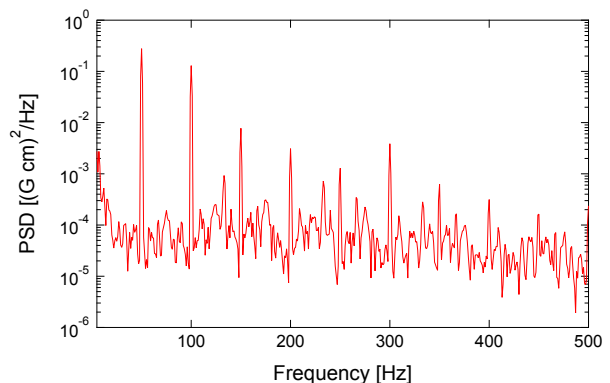


図7.  $100\text{Hz}$ 交流積分磁場のパワースペクトル密度

図8はパワースペクトル密度から計算した累積変位である。 $0\text{Hz}$ から $1000\text{Hz}$ の範囲のパワースペクトル密度の二乗和の平方根を算出した。赤線は $100\text{Hz}$

の交流電流で励磁した場合の累積変位であるこの累積変位には100Hzの残留磁場成分と電源のリップルノイズの両方が含まれて、その値は0.86G・cmであった。よって100Hzで偏光切り替えを行った場合でも移相器が与える電子ビームの変動はサブミクロン以下であることが期待できる。青線は直流電流で励磁した場合の累積変位で、電源のリップルノイズによる寄与を測定したもので、その値は0.43G・cmであった。緑線は交流および直流電流で励磁した場合の累積変位の二乗差の平方根を計算したもので、0.74G・cmであった。この累積変位は100Hzの残留磁場成分の寄与を主に示していると考えられる。

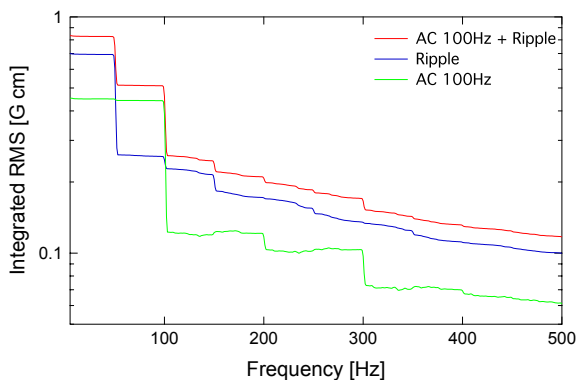


図8. パワースペクトル密度の累積変位

## 6. フリップコイルによる積分磁場測定

我々はこれまで移相器の直流磁場分布を測定する場合、ホールプローブと3次元ムーバで構成された3次元磁場測定システムで測定を行ってきた<sup>[3]</sup>。そのため測定に時間がかかり、磁場の温度変動などの影響が無視できなかった。また、今回報告した磁場の再現性についても、電磁石中央の一点のみの値で評価を行っているので、移相器を横断する電子ビームへの影響を評価するには不十分であった。そこで現在、短時間で精度よく直流積分磁場が測定するために、フリップコイルによる積分磁場測定システムを開発している。

図9はフリップコイルの外観と制御システムのブロック図である。コイルは長さ600mm、幅5mmのガラスエポキシ製のボビンに径0.2mmの銅線を10回巻きにしたものである。コイルの回転にはステッピングモータ(オリエンタル製RK566BE)を使用する。回転速度は180度/0.5~1秒である。コイルの回転角度はインクリメンタルエンコーダ(オムロン製E6B2-CWZ6C)で計測する。

図10のように磁場 $B_z$ 中でコイル(巻き数 $N$ 、長さ $L$ 、幅 $D$ )を回転させると、下記の(1)式で表される誘導電圧 $V$ がコイルに生じる。

$$V(t) = -N \frac{d}{dt} (B_z L D \cos \theta) = N B_z L D \sin \theta \frac{d\theta}{dt} \quad (1)$$

フリップコイルを時計回りまたは反時計回りに180回転させて、その誘導電圧 $V$ を計測すれば、(1)式で移相器の直流積分磁場を算出できる。

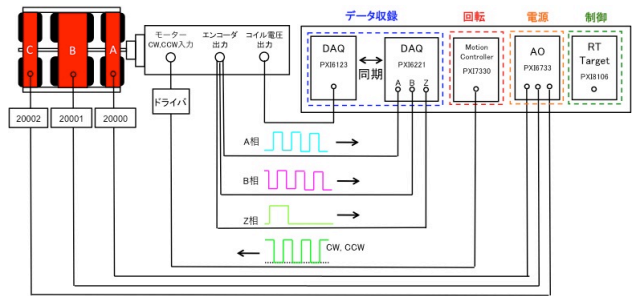
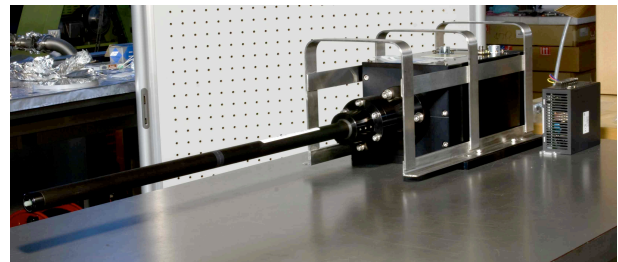


図9. フリップコイルと制御システム

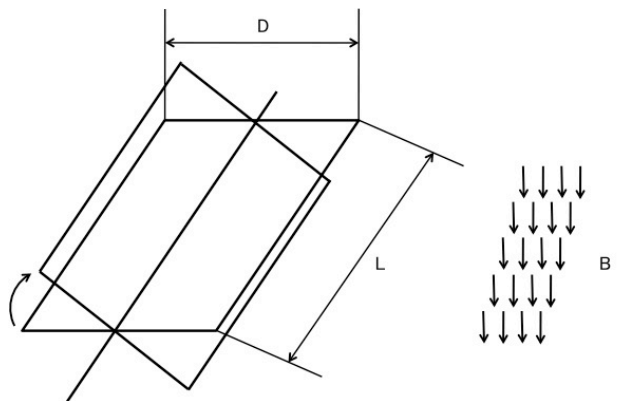


図10. コイルの誘導電圧と移相器の磁場の関係

制御システムはNational InstrumentsのADボード(PXI6123, PXI6221)とAOボード(PXI6733)、モーションコントローラ(PXI7330)、コントローラ(PXI8106)で構成されていて、これらはリアルタイムOS用のLabVIEWで作ったプログラムで制御する。制御の手順としては、まずAOボードから制御電圧信号を電源に送り、コイル電流ランプ制御(0.1A/sec)でセットする。直流電流によって移相器が励磁されたら、モーションコントローラでフリップコイルを回転させ、フリップコイルの回転角度と移相器の直流磁場を各々2つのDAQボードで同期(20MHz)を取りながら計測する。フリップコイルの誘導電圧は微弱なので、低ノイズプリアンプで増幅して計測する。以上の制御の手順はリアルタイムOSで実行される。そのため1μ秒の時間確実性で測定を実行でき、さらに電源設定やデータ解析、その他OS管理のタスクの割り込みなどで測定が中断する心配がない。

図11は移相器の電磁石Bのみでおよそ11000Gcmの直流積分磁場を発生させたときのフリップコイルの誘導電圧である。フリップコイルは180度/0.8秒の速

度で、時計回り(CW)と反時計回り(CCW)の両方向に回転させた。誘導電圧の振幅は時計回り-0.238V、反時計回り0.243Vであり、時計回りと反時計回りどちらの方向にフリップコイルを回した場合でも同程度の値になる。N=10、D=5.2mm、 $d\theta/dt=180\text{度}/0.8\text{秒}$ (=3.9ラジアン/秒)であるから、(1)式より直流積分磁場 $B_zL$ は時計回り10746Gcm、反時計回りで11018Gcmとなる。

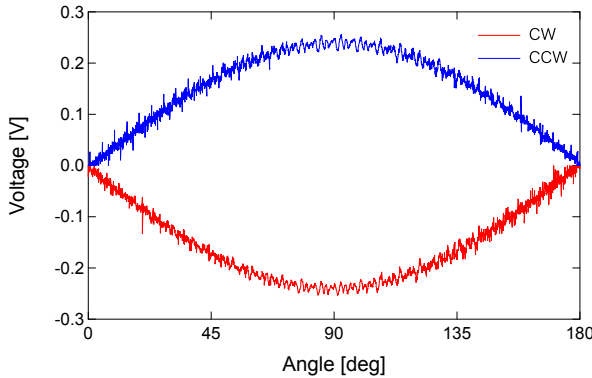


図11. フリップコイルの誘導電圧

## 7. まとめ

偏光制御アンジュレータ用移相器プロトタイプの磁場測定による性能評価を行ってきた。

パーマロイ0.1mm、パーマロイ0.2mm、ケイ素鋼板0.1mmを積層して製作したコアを用意し、それぞれのコアに対する磁場の再現性を測定し、比較した。ケイ素鋼板に比べてパーマロイのコアが優れた再現性があることを確認できた。

移相器中にチャンバーとパイプを設置し、渦電流が交流磁場に与える影響を調べた。現状のチャンバーの場合、薄肉の円形パイプより厚みと幅があるために渦電流の影響をより強く受けることがわかった。肉厚を薄くすることで渦電流を小さくすることも案として考えられるが、安全のためにセラミックチャンバーを導入することを予定している。

偏光制御アンジュレータの高速偏光切替時に電子ビームの変動をサブミクロン以下に抑えられるように、移相器の残留積分磁場をどこまで小さくできるかを試験した。移相器を100Hzで励磁した場合の残留積分磁場を目標とする1G・cm以下まで抑えることができた。

移相器の直流積分磁場を短時間で精確に測定するためにフリップコイルによる積分磁場測定システムを開発した。今後、この直流積分磁場測定システムを使って、直流積分磁場の再現性や長期安定性などを調べる予定である。

## 参考文献

- [1] 尾嶋正治, 柿崎明人, “東京大学アウトステーション計画”、放射光20巻6号, p.383 (2007).
- [2] T. Tanaka and H. Kitamura, AIP Conference Proceedings705 (2004) 231.
- [3] N. Nakamura, et al., Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33rd Linear Accelerator Meeting in Japan, p719-721.
- [4] I.Ito, et al., Proceedings of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p664-667.