

Magnetic Field Measurement of Fast Electromagnetic Phase Shifter Prototype for a Polarization-Controlled Undulator

I. Ito^{1,A)}, N. Nakamura^{A)}, K. Shinoo^{A)}, T. Shibuya^{A)}, H. Kudo^{A)}, H. Takaki^{A)},
T. Tanaka^{B)}, H. Kitamura^{B)}, T. Bizen^{C)}

^{A)} ISSP, University of Tokyo, 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8581

^{B)} SPring-8 Center, RIKEN ^{C)} 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.

偏光制御アンジュレータ用高速電磁石移相器プロトタイプの磁場測定試験

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2010年までに建設する予定で、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を採用した^{[1][2]}。この偏光制御アンジュレータは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、その間に高速で偏光制御できる電磁石タイプの移相器が設置される。この移相器によって、水平・垂直偏光の軟X線だけでなく高速極性切替できる円偏光軟X線も供給できる。

移相器には、全ての偏光状態に対応できる位相シフト（最大波長で最大 2π 以上）が実現できること、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、高速偏光切替(10Hz以上)で行えるように優れた周波数特性を有することなどが要求される。我々は既に移相器プロトタイプ的设计・製作を行い、性能評価のための磁場測定試験を進めてきた^[3]。本発表では移相器プロトタイプの磁場測定試験の現状について報告する。

2. 移相器プロトタイプとDC磁場測定

移相器のプロトタイプは、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と呼ぶ）をビーム進行方向に並べた構造になっている^[3]。図2にその写真を示す。各電磁石で同一断面形状のヨークが上下1つずつあり、0.1mm厚積層パーマロイ(PC系Ni-Co,Cu-Fe)で製作されている。コイルは直径2mmのエナメル銅線が300ターン巻かれていて、測定され

た電磁石A,B,Cのコイル抵抗は上下2個の合計で、 $R_A=R_C=1.15\ \Omega$ 、 $R_B=1.62\ \Omega$ 、インダクタンスは $L_A=145.6\text{mH}$ 、 $L_B=247.2\text{mH}$ 、 $L_C=146.9\text{mH}$ である。移相器プロトタイプ用電源はリップルの小さいリニアアンプ方式(5A30V)で、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^[3]。さらに、電源自身の周波数応答は、1kHzまでの振幅減衰は-3dB、位相遅れは90度以下になるように設計・調整されている。移相器1台で3台の電源が使われる（電源1台で電磁石1台を励磁する）。

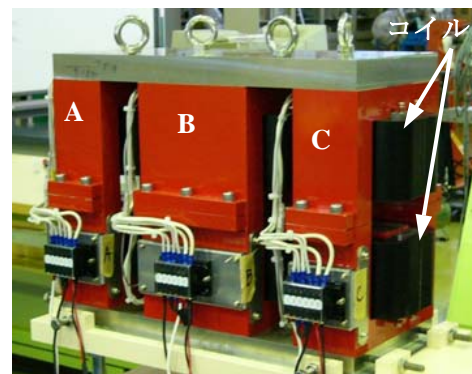


図2. 移相器の外観

移相器のDC磁場についてはすでに測定を済ませている^[3]。測定はホールプローブと3次元ムーバで構成された3次元磁場測定システムで行った。コイル電流が $I_B=1400\text{AT}$ 、 $I_A=I_C=-1170\text{AT}$ の時のz方向磁場分布を図3に示す。z方向磁場分布の最大磁場はプロ

¹ E-mail: isao-maf@issp.u-tokyo.ac.jp

トタイプの中央で約1075Gであり、3次元磁場解析コードELF/MAGIC^[4]による計算結果とよく一致した。さらにz方向磁場分布による位相シフトは最小光子エネルギー250eVに対応する放射波長 $\lambda=4.959\text{nm}$ に対して最大 4π となり、これは偏光制御アンジュレータにとって十分な値である。加えて、z方向磁場分布によるバンプ軌道と角度については、計算では $I_B=1400\text{AT}, I_A=I_C=-1170\text{AT}$ でバンプ軌道が閉じるように設定されているのに対して、測定値で得られたバンプ軌道のズレは $0.75\mu\text{m}(58.7\text{G}\cdot\text{cm})$ とゼロに近い値となった。x方向磁場分布はコイル電流が $I_B=1400\text{AT}, I_A=I_C=-1170\text{AT}$ の時に-8mmから8mmまでの水平方向の範囲内で磁場の一様性は $\pm 0.05\%$ 内に保たれた。

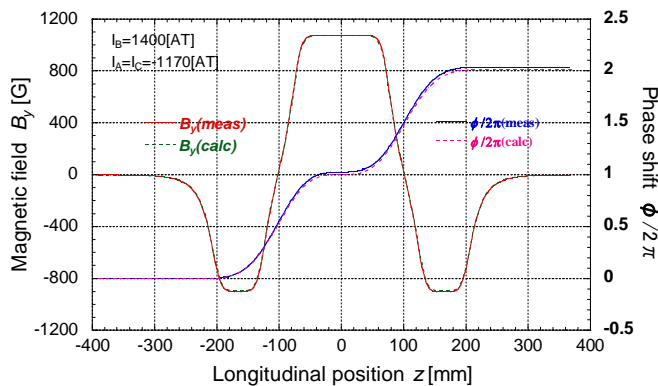
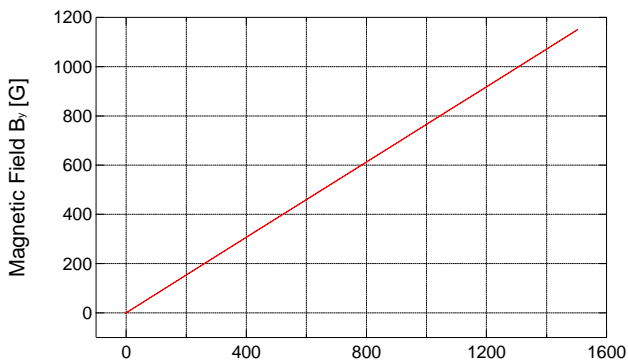


図3. 縦方向(z方向)の磁場分布と位相シフト

3. 励磁曲線と再現性

図4は移相器の偏向電磁石Bの励磁曲線である。(a)から、励磁曲線はほとんど直線であり、さらに最大コイル電流1500ATまで飽和していないことがわかる。励磁曲線の測定では0ATから1500ATまでスキャンし、さらに1500ATから0ATまでスキャンした。(b)は705ATから710ATまでの励磁曲線を拡大したものである。(b)にヒステリシス効果がわずかに観測できるが、同じコイル電流の磁場の差は最大でわずか0.25G程度である。これは積層パーマロイヨークが超低ヒステリシスのため、移相器プロトタイプが高い再現性を有していることを示すものである。

(a) Span 1600AT (0AT~1600AT)



(a) Span 5AT (705AT~710AT)

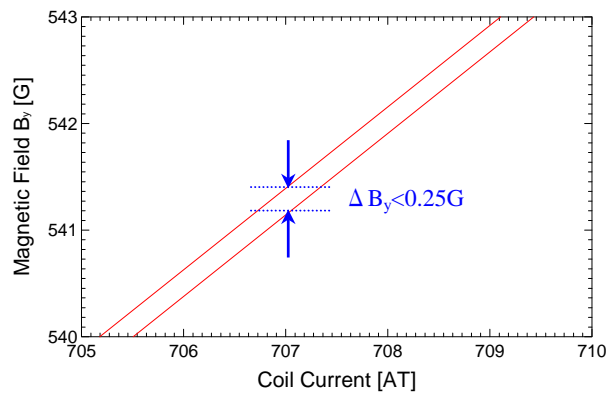


図4.励磁曲線

4. 周波数特性

図5は、ホールプローブによって測定された偏向電磁石A中心の周波数特性を示している。ゲインは500Hzまで1dBの範囲内で一定であり、位相遅れは10Hzで1度以下、100Hzで10度以下に収まっている。コイルの巻き数、すなわちインダクタンスを減らせば、移相器と電源の共振周波数上がるので周波数特性はさらによく期待できる。現在、インダクタンスの低いコイルに変えて測定を行う準備をしているところである。

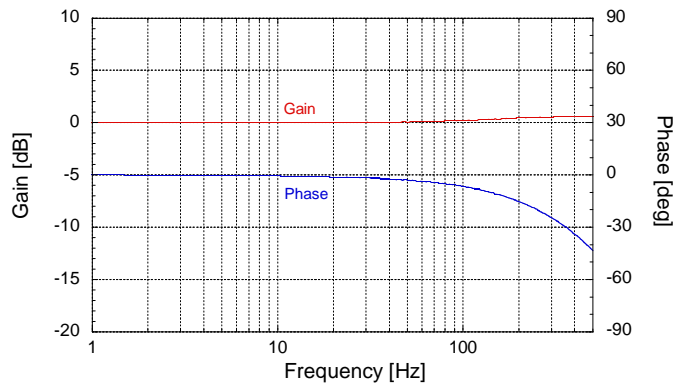


図5.偏向電磁石Aの周波数特性

5. AC積分磁場測定

高速円偏光切替では移相器はACで励磁させるが、AC積分磁場を可能な限りゼロにすることが求められる。このAC積分磁場の測定はロングコイルシステムを用いて行われた。これは長いサーチコイルを用いてコイルを通過する磁束の変化で誘導される電圧を計測する方法である。図6にロングコイルシステムのブロック図を示す。ロングコイルは長さ600mm、幅5.3mm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。移相器の磁場 B と、ロングコイルの出力 V の関係は以下の(1)(2)(3)式で表される。ロングコイルの出力 V を計測すればこれら(1)(2)(3)式で移相器の積分磁場を算出できる。

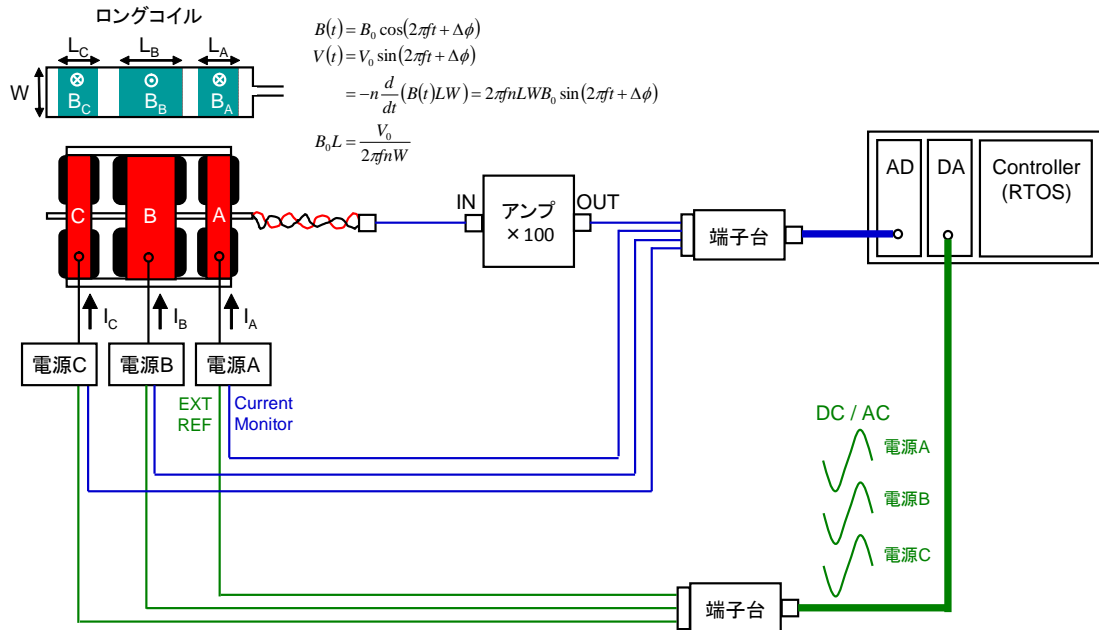


図6.AC磁場測定システム

$$B(t) = B_0 \cos(2\pi ft + \Delta\phi) \quad (1)$$

$$V(t) = V_0 \sin(2\pi ft + \Delta\phi)$$

$$= -n \frac{d}{dt}(B(t)LW)$$

$$= 2\pi fnLWB_0 \sin(2\pi ft + \Delta\phi) \quad (2)$$

$$B_0 L = \frac{V_0}{2\pi fnW} \quad (3)$$

システムの制御部はNational InstrumentsのADボード(PXI16133)とDAボード(PXI6733)、コントローラ(PXI8106)で構成されていて、これらは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DAボードからDC信号またはAC信号を3台の電源の外部参照信号端子に対してそれぞれ独立に入力する。電源は送られてきた参照信号に応じた電流を移相器のコイルに流す。DAボードは0~1MHzまでの電圧信号を出力可能である。外部参照信号によって制御された電流がコイルに流れると移相器は磁場を発生し、それをロングコイルで計測する。ロングコイルの出力は微弱であることから、低ノイズプリアンプで増幅する。このプリアンプはゲインが100になるように設計されている。プリアンプで増幅したロングコイルの出力はADボードでサンプリングする。ADボードは16bitで、最小±1.25Vのダイナミックレンジで計測が可能であり、よって分解能は $2.5V/2^{16} = 40 \mu V$ である。このADボードと低ノイズプリアンプを併用することで $40\mu V/100 = 0.4 \mu V$ の分解能を実現できる。DAボードとADボードのクロックは同一なので、移相器の電源に同期して励磁された積分磁場を計測できる。さらにコントローラのOSはリアルタイムOSであり、割り込みによって制御プログラムが中断することはなく、さらに μ 秒の時間精

度を保障できる。

図7は測定された移相器プロトタイプ of 積分磁場のパワースペクトル密度である。青線はDC電流 $I_A = I_C = 438AT$ 、 $I_B = 521.544AT$ で励磁した場合であり、50Hzとその高調波にリップルを確認できる。赤線は10HzのAC電流で励磁した場合である。AC電流で励磁する場合は、コイル電流0ATで磁場が0Gになり、さらに0ATの時のコイル電流の時間微分が極力小さくして電源への負担を軽減するように、振幅と同じオフセットと位相 $\pi/2$ を与えている。

$$I(t) = I_0 \sin(2\pi ft + \pi/2) + I_0 \quad (4)$$

赤線ではリップルの他に10Hz成分とその高調波の磁場成分が確認できる。AC電流で励磁した測定では、 I_A 、 I_B 、 I_C の値は10Hz成分がもっとも小さくなるように振幅とオフセット両方を調整された。全てのスペクトルピークは $1(G \cdot cm)^2/Hz$ 以下に収まっていることがわかる。

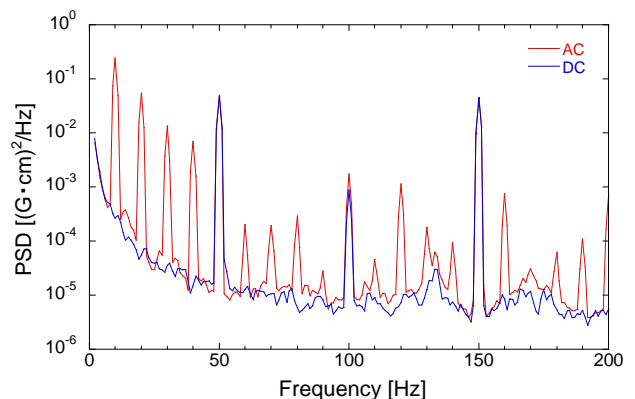


図7. 積分磁場のパワースペクトル密度

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から1000Hzの範囲のパワースペクトル密度の二乗和の平方根を計算した。赤線は10HzのAC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10Hzとその高調波、電源のリップルノイズが含まれていて、その値は0.86G・cmである。青線はDC電流で励磁した場合の累積変位である。この累積変位には赤線の累積変位に含まれていた成分のうち、10Hzとその高調波以外の成分が含まれていて、その値は0.43G・cmである。さらに50Hz間隔の段差はリップルノイズを表していて、これらの段差の二乗差の平方根をとることでリップルノイズの値を見積もることができ、その値は0.40G・cmである。緑線はACおよびDC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ある。この累積変位は高調波成分のみを表していて、その値は0.74G・cmとなる。

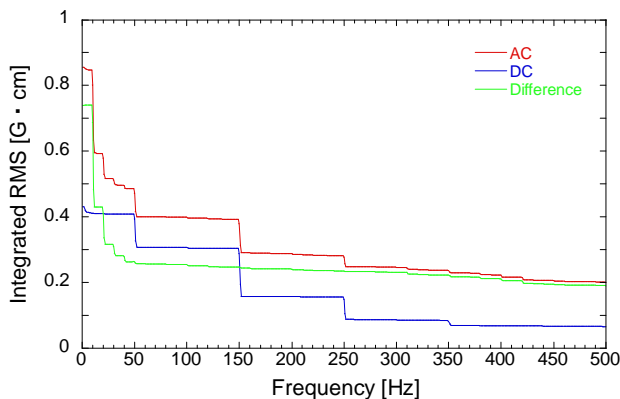


図8.積分磁場の累積変位

以上の累積変位により算出した全成分の総和、および10Hzとその高調波、リップルノイズ、それ以外の各成分の量をまとめた。二乗和の平方根で計算した累積変位は各々の成分が独立で位相がランダムな場合の総計であり、0.86G・cmとなる。一方、パワースペクトル密度の各成分を単純に足し合わせた値の平方根を計算した(以下、単純和と呼ぶ)。単純和は位相が揃ってリップル・高調波成分が最も大きく現れた場合を想定していて、その値は8.5G・cmである。AC磁場の高調波成分やリップルノイズがバンブ軌道を閉じさせない原因となりうるが、二乗和で1G・cm程度、大きく見積もった単純和でも10G・cm以下であり、大きな影響はないと期待できる。

	二乗和	単純和
総和	0.86G・cm	8.5G・cm
高調波	0.74G・cm	4.7G・cm
リップル	0.40G・cm	1.5G・cm
それ以外の成分	0.19G・cm	2.3G・cm

表1.ノイズ成分の総和

レータ用移相器のプロトタイプDC磁場測定、励磁曲線、周波数特性の測定を行い、移相器プロトタイプは優れた磁場の再現性と周波数特性を有していることを確認できた。さらにAC積分磁場測定を行い、10Hzで励磁した場合の積分磁場はおよそ1G・cm以下まで抑えることができた。今後はAC積分磁場測定をさらに進めるとともに、磁場の安定性の評価や他の積層ヨークとの比較等も行い、実機設計の参考としたい。

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] <http://www.elf.co.jp/product/elfmagic.html>

7. まとめ

要件に基づいて設計・製作した偏光制御アンジュ