

# 極短周期アンジュレータ開発のための精密磁場測定

## PRECISE MAGNETIC FIELD MEASUREMENT FOR DEVELOPMENT OF VERY SHORT PERIOD UNDULATORS

益田 伸一<sup>#, A)</sup>, 山本 樹<sup>A, B)</sup>  
Shinichi Masuda<sup>#, A)</sup>, Shigeru Yamamoto<sup>A, B)</sup>

<sup>A)</sup>Photon Factory, Institute of Material Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization

<sup>B)</sup>Department of Materials Structure Science, SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies)

### Abstract

Precise magnetic field measurement system has been developed to evaluate the field quality of the very short period undulators, the period length of which is ten times shorter than that of the ordinary undulators. The resolution of the positioning system is  $0.1\mu\text{m}$  in longitudinal direction and  $0.5\mu\text{m} \times 0.5\mu\text{m}$  in transverse directions. We are testing and adjustments whole measurement system.

### 1. はじめに

比較的低エネルギーの電子ビームで比較的高エネルギーの放射光を生成することを目的にして、極短周期アンジュレータの開発が進められている[1-9]。

周期長はミリメートルオーダーであり、従来のアンジュレータの周期長の約 1/10 を達成目標としている。周期長が極端に短くなると、従来のアンジュレータの様に磁石ブロックを並べてアンジュレータ磁場を生成する方法では、精度を保ったまま短周期化することが難しくなる。そのため、パルス電磁石によって薄い板状磁石に N 極と S 極を交互に着磁する新しい方法を考案した[1]。また、長尺のアンジュレータ磁場を生成するために長尺の板状磁石を制作することは難しいので、複数の板状磁石を連結して滑らかなアンジュレータ磁場を生成するための着磁法の開発を行った[8-10]。

前述の新方法によって製作した極短周期アンジュレータ磁石の評価、さらに今後の着磁法の改良のために、精密な磁場測定が必要である。このために、電子ビーム軸方向に  $0.1\mu\text{m}$ 、電子ビーム垂直方向に  $0.5\mu\text{m} \times 0.5\mu\text{m}$  の精度で位置決めし、磁場測定を行うことができる装置を開発し、現在試験運転・調整を行っている。

### 2. 精密磁場測定装置

精密磁場測定装置は、リニアモーターで駆動されるエアスライド式のステージによって、アンジュレータのギャップに挿入したホール素子をビーム軸方向にスキャンし、アンジュレータ磁場の空間分布を測定する。Figure 1 に精密磁場測定装置を示す。図の手前から奥行方向に設置されているのがエアスライドのレールで、ストロークは 1000 mm である。エアスライド上にはビーム軸方向に垂直な横方向に 2 軸の自動ステージが設置されており、3 次元空間

内の精密位置決めが可能である。エアスライドのエンコーダーはリニアモーターの駆動パルスに同期して位置情報パルスを出力し、レール中央を通過時に原点パルスを出力することにより、 $0.1\mu\text{m}$  の精度で絶対位置を得ることができる。ビーム軸垂直方向の自動ステージの位置決め精度は、 $0.5\mu\text{m} \times 0.5\mu\text{m}$  である。



Figure 1: Precise magnetic field measurement system.

ホール素子は、厚さ  $0.8\text{mm} \sim 1.0\text{mm}$  の銅製ホルダに装着され細いワイヤーで配線されている。ノイズ対策（後述）のため Fig. 2 に示す様に配線のワイヤーがむき出しにならないようにシールドボックス内に収められ、ホール素子ホルダが固定されている。シールドボックスは、3 軸のスイベル機構によって傾きの微調整ができる。ホール素子の出力信号はリ

<sup>#</sup>shinichi.masuda@kek.jp

ニアモーター駆動パルスと同期して 10MHz でサンプリングされる。制御システムの性能に依存するが、典型的には 1 駆動パルス当たり 50~150 回のサンプリングを行う。長さ 1000mm のストロークに対して 500~1000 秒で磁場測定することができる。

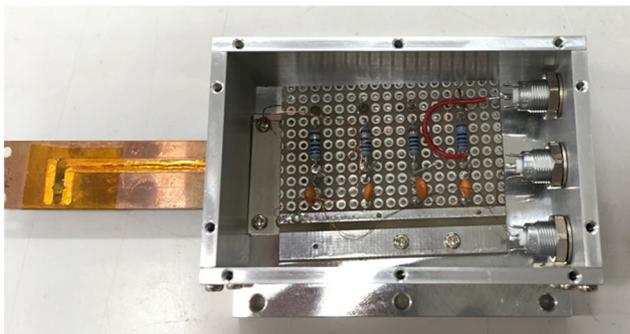


Figure 2: Hall probe sensor and shield box.

### 3. ノイズ対策

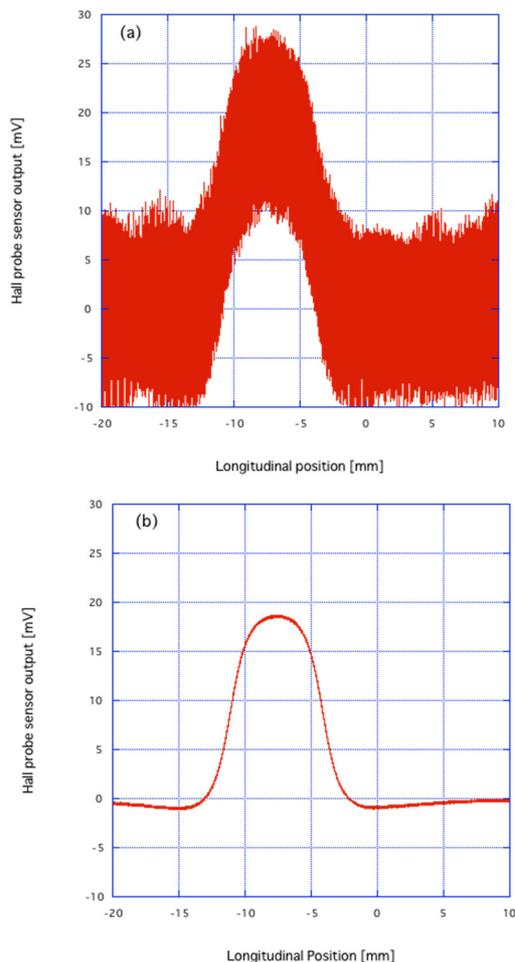


Figure 3: Hall probe sensor outputs for a square permanent magnet of 7mm × 7mm size when noise reduction was (a) not applied and (b) applied.

試験的に 7mm 角サイズの永久磁石に対してスキューを行った結果を Fig. 3 に示す。磁石周辺の磁場の空間分布が測定できていることがわかる。ノイズ対策を何もしない場合は、Fig. 3 (a) に示す様にホール素子出力に大きなノイズが載っている。主なノイズはエアスライダを駆動するためのサーボパックのスイッチングによって発生するものである。このノイズは電磁波として空中を伝搬してくる成分と導線を伝わってくる成分がある。ホール素子への電流供給のためのケーブルおよび信号用のケーブルはシールドし、ホール素子の配線ワイヤーはシールドボックスに収めて電磁波ノイズを拾わないようにした。信号から高周波ノイズを除去するため Fig. 2 に示すようにローパスフィルタをシールドボックス内に収めている。電源ラインから伝わるノイズを低減するため、ステージ駆動系と磁場測定系の電源ラインを別系統にした。駆動系には、三相 200V をスコットトランスを用いて单相 100V に降圧し、電源として用いている。また、測定系にはノイズカットトランスを介して電源供給を行っている。ノイズ源から出るノイズを遮断するため、零相リアクトルを設置してサーボパックにつながるケーブルを巻き付けている。これらのノイズ対策を施したときの測定結果を Fig. 3 (b) に示す。ノイズの振幅が 20mV ほどあったものが、0.1mV 程度まで減少した。さらにデジタルフィルタによる後処理を行うことにより、ノイズの除去を行う。

### 4. 精密磁場測定試験

精密磁場測定装置の制御ソフトウェアを開発し、極短周期アンジュレータ磁石の磁場測定試験を行った。磁石は周期長 4mm で着磁されており、長さ 100mm、幅 20mm である。Figure 4 に測定結果を示す。ホール素子は磁石表面からおよそ 1mm の位置に高さ方向を固定し、中心軸に沿って長手方向にスキューを行った。4mm 周期のアンジュレータ磁場が 100mm の長さで正しく測定できている。

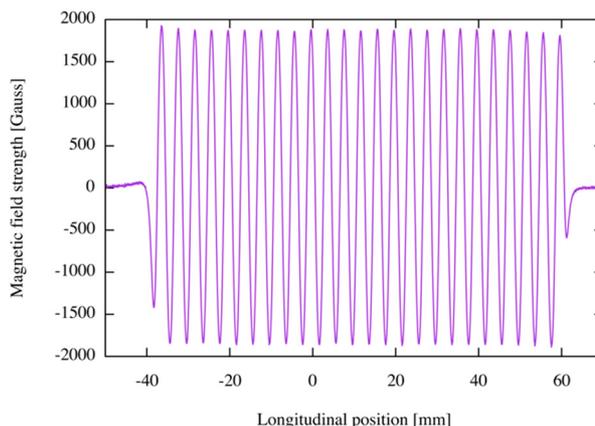


Figure 4: Magnetic field measured along a center axis of a very short period undulator.

Figure 5 に極短周期アンジュレータ磁石の表面付近を 2 次元スキャンした結果を示す。長手方向は Fig. 4 と同様に、横方向は中心軸をゼロ点として磁石の縁付近までスキャンした。磁石の中央付近の磁場のピークの位置で横方向に 100 $\mu\text{m}$  ステップでスキャンした磁場分布を Fig. 6 に示す。横方向に極めて均一なアンジュレータ磁場が生成されていることがわかる。さらに、3 次元スキャンして磁場の 3 次元空間分布を測定することも可能であり、アンジュレータ磁場の精密な評価ができる。

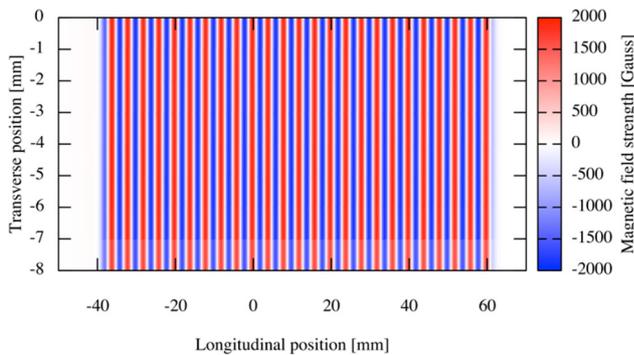


Figure 5: 2D spatial distribution of magnetic field of a very short period undulator.

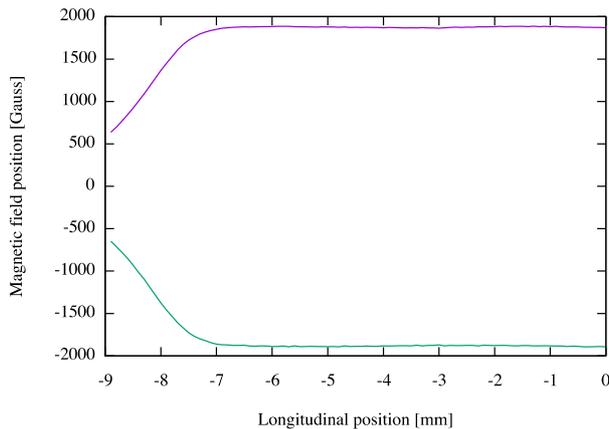


Figure 6: Peak magnetic field measured along transverse direction around center of a very short period undulator.

## 5. まとめ

極短周期アンジュレータ開発において新しく考案した着磁法の評価および改良のため、精密磁場測定装置を制作し極短周期アンジュレータの測定試験を実施した。高精度な空間解像度でスキャンを行えることを確認した。今後、ホール素子の精密な較正を行い、極短周期アンジュレータの精密磁場測定を進める。

## 謝辞

本研究は、その遂行の一部において、JSPS 科研費 24651107 および 26246044 の助成を受けています。また、本研究は同じく一部において、総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) により、科学技術振興機構を通じた委託を受けています。

## 参考文献

- [1] S. Yamamoto, Journal of Phys.: Conf. Ser. 425 032014, 2013;  
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/425/3/032014/pdf>
- [2] 山本 樹, 第 10 回日本加速器学会年会プロシーディングス, SAOT11, 86-89, 2013;  
[https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj10/proceedings/PDF/SAOT/SAOT11.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj10/proceedings/PDF/SAOT/SAOT11.pdf)
- [3] S. Yamamoto, WEOAA02, Proc. IPAC2014, 1845-1857, Dresden, Germany, 2014;  
<http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/IPAC2014/papers/weoaa02.pdf>
- [4] S. Yamamoto, Synchrotron Radiation News Vol. 28 No. 3, 19-22, 2015;  
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/08940886.2015.1037677?scroll=top&needAccess=true>
- [5] 山本 樹, 第 12 回日本加速器学会年会プロシーディングス, FROM04, 187-190, 2015;  
[https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2015/proceedings/PDF/FROM/FROM04.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/FROM/FROM04.pdf)
- [6] S. Yamamoto, AIP Conf. Proc. 1741, 020029, 2015;  
<https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4952808>
- [7] 山本 樹, 第 13 回日本加速器学会年会プロシーディングス, TUP066, 1035-1039, 2016;  
[https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2016/proceedings/PDF/TUP0/TUP066.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/TUP0/TUP066.pdf)
- [8] 山本 樹, レーザー研究, Vol. 45 No. 2, 82-86, 2016.
- [9] 山本 樹, 第 14 回日本加速器学会年会プロシーディングス, THOL11, 216-220, 2017;  
[https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2017/proceedings/PDF/THOL/THOL11.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/THOL/THOL11.pdf)
- [10] S. Yamamoto, WEXGBD1, Proc. IPAC2018, Vancouver, BC, Canada, 2018;  
<http://ipac2018.wrws.de/papers/wexgbd1.pdf>