

## 極短周期アンジュレータの開発

### DEVELOPMENT OF VERY SHORT PERIOD UNDULATORS

山本 樹<sup>#, A), B)</sup>

Shigeru Yamamoto <sup>#, A), B)</sup>

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

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

#### Abstract

We have been exploring a method to fabricate very short period undulators. Here, “very short period” means periods one order-of-magnitude shorter than the ordinary period of several cm. We are developing a plate-type magnet some 100mm long with a period length of 4mm in the longitudinal direction. We selected 4-mm period since we can generate 12-keV radiation with the first harmonic of this undulator in the 2.5-GeV electron storage ring. The very short period undulators operate in a gap one order-of-magnitude shorter than that of ordinary undulators. Thus these undulators are very useful when they are combined with very low emittance storage rings and linacs.

A multi-pole magnetizing method was applied to magnetizing this plate: a periodic undulator field (of 4-mm period in this case) was generated by pulsed electro-magnets, and was transcribed into the plate. The magnetization procedure allows the undulator field to be obtained in a very short gap between the pair of opposing plates. Here we report the magnetization method to obtain a very short period and present the test results. The spectrum calculation of the radiation from the measured undulator field compares well with that from an ideal magnetic field in the region of the fundamental radiation, and the radiation from 10 to 15keV was found to be useful for synchrotron radiation experiments in case of 2.5-GeV energy of the electron beam.

#### 1. はじめに

アンジュレータ放射のエネルギーは、磁場周期長に比例して/電子ビームエネルギーの自乗に逆比例して増減する。これまでの放射光施設では数 cm のアンジュレータ周期長に対して、2GeV 程度の電子蓄積リングと組み合わせることで VUV-SX 光源を実現し、6-8GeV 程度のリングと組み合わせることで X 線光源を実現してきた[1, 2]。

近年は、真空封止型アンジュレータの技術を導入して、3-4GeV の高性能リングと周期長 2cm 程度のアンジュレータとを組み合わせることで X 線光源を建設することが計画され[3]、一部実現されつつある。上記に先駆けて我々も、2005 年より行った KEK-PF 直線部改造において、PF 電子蓄積リングに周期長 1-2cm の真空封止型短周期アンジュレータ (Short Gap Undulator: SGU) を 3 台導入し、これらの SGU が高輝度 X 線光源として有用であることを実証した。この成功は PF2.5GeV リングのような中規模エネルギーのリングにおいて X 線光源を建設するために、短周期真空封止アンジュレータを導入することの正しさを例証している[4, 5]。

本研究では、さらに進めてアンジュレータ磁場の周期長の“極短周期化”を図る。ここで、極短周期化とはこれまでの周期長を約 1/10 に圧縮することを意味する。このために、多極着磁法を応用して極短周期磁場を作成する。この方法では、極短周期のアンジュレータ磁場をパルス電磁石によって発生させ、これを磁石材料に“転写”する。当面周期長 4mm

の磁気回路作成を試みる。この場合幅 20mm x 厚さ 2mm x 長さ 100mm の板状の磁石素材を、一対の電磁石によって厚さ方向に挿みこみ電磁石 (着磁コイル) をパルスの励起することで、約 25 周期分のアンジュレータ磁石列を作成する。上記の方法で着磁した板状磁石を対向させ 1-2mm 程度の狭いギャップ中にアンジュレータ磁場を発生することができる[6]。周期長 4mm を選んだ理由は、この周期長を達成できれば、2.5GeV 電子蓄積リングにおいて基本波で 12keV (波長 1Å) 領域の放射を生成することができるからである。

今後も、この様な極短周期磁場の狭小ギャップ間での精密測定法の開発、磁場の高強度化・高精度化、アンジュレータ端部磁場の調整法開発、長尺化のための板状磁石の長手方向への接続法開発等解決しなければならない問題点は数多い。もとより、極短周期であるが故に本質的に狭小ギャップを必要とするアンジュレータを許容する加速器の検討が非常に重要である。現状の到達点に就いて以下に報告したい。

#### 2. 極短周期アンジュレータ磁場の生成

薄板状の磁石を多極着磁法によって着磁する方法を概念的に図 1 および 2 に示した。Nd-Fe-B 系磁石材料でできた磁石板をジグザグ型のワイヤでできた一対の電磁石によって挟み込む。これらの電磁石にパルス電流を印加することによって、N-極と S-極が交互に板状磁石中に周期的間隔を置いて同時に形成され、板状磁石への“転写”が行われる。着磁後の一対の磁石板を互いに対向させることによって、磁石間の狭い隙間 (ギャップ) に周期的磁場 (アン

<sup>#</sup> shigeru.yamamoto@kek.jp

ジュレータ磁場)が形成される。図 1a には磁化方向が磁石板表面に垂直の場合を示した(垂直着磁型)。この場合の幾何学は磁気記録媒体の垂直磁気記録方式と同様である。もう一つ(水平着磁型)の幾何学も図 2 に示したように可能である。この場合は水平磁気記録方式と同様、着磁は磁石板表面に平

行に行われる。水平型の場合の着磁強度は垂直型よりも弱くなることが予想されるが、この方式は着磁を完全に磁石板表面に沿って行うことができるならば磁極毎の着磁強度に誤差があっても磁場の 1 次積分値をゼロにできるという利点を持つ。

### 直交着磁方式による板状磁石の作成

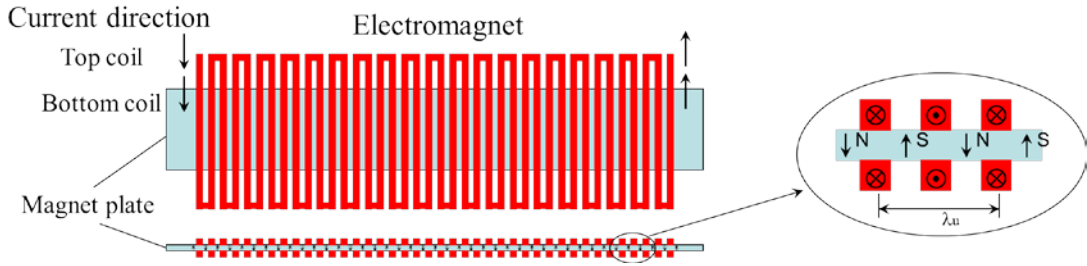


Figure 1a. Schematic illustration of perpendicular magnetization of the magnet plate.

### 直交着磁方式によるアンジュレータ磁場の生成

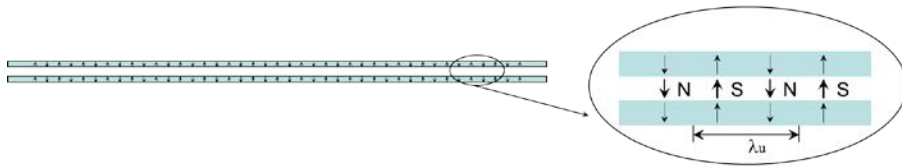


Figure 1b. Formation of an undulator field in perpendicular magnetization.

### 水平着磁方式による板状磁石の作成

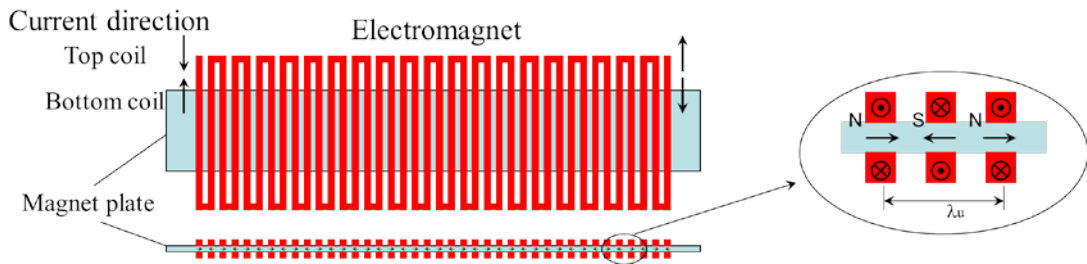


Figure 2a. Schematic illustration of longitudinal magnetization of the magnet plate.

### 水平着磁方式によるアンジュレータ磁場の生成

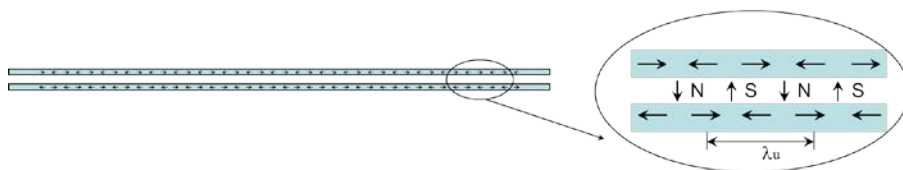


Figure 2b. Formation of an undulator field in longitudinal magnetization.

### 板状磁石ステップ送りによる鉛直着磁

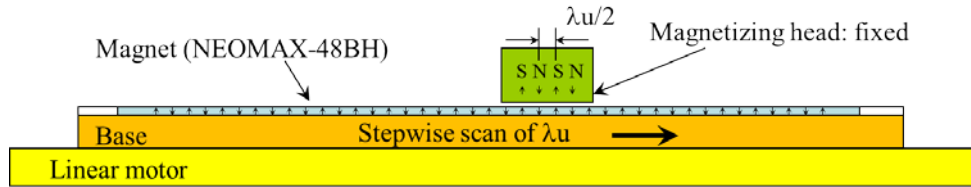


Figure 3. Perpendicular magnetization employing a linear motor.

予備的な着磁試験を垂直着磁方式において行った。この試験では長さ 100mm x 幅 20mm x 厚さ 2mm の板状の磁石素材に周期長 4mm のアンジュレータ磁場の“転写”を試みた。磁石板は NEOMAX-48BH 製で、この素材は  $B_r=13.9\text{kG}$  の残留磁束密度と  $iH_c=14\text{kOe}$  の保磁力を持つ（日立金属 NEOMAX エンジニアリング(株)）。しかしながら、アンジュレータ磁場として得られた結果は非常に不満足なものであった。磁場強度と周期長の偏差はそれぞれ  $\pm 50\%$  と  $\pm 30\%$  にも達した。我々はこの結果は着磁ヘッドとして用いた電磁石およびその製法にあると判断した。しかし、このジグザグワイヤ式着磁ヘッドの改良に拘泥せず、着磁ヘッド製作を単純化し少ない場合の数で良好な結果を得るために、垂直着磁型の別の手法を採用することにした。この方法では、図 3 に示したようにリニアモーターでステップ駆動された磁石板（同寸法）が固定着磁ヘッドで着磁される。

て制御され、その送り精度は 0.003mm である。板状磁石の磁場周期長の精度は主に、着磁ヘッド中のワイヤ間隔の精度とリニアモーターの駆動ステップ幅の精度によって決定される。従って、得られる磁場強度の精度は磁場周期長の精度（を決めるワイヤ間隔精度とステップ送り精度）と各ステップで着磁ヘッドに供給される電気量の精度によって、基本的に決定される。

### 3. 磁場測定と評価

上記のように着磁した板状磁石のアンジュレータとしての品質を評価するために磁場測定を行った。ここでは図 4 に示した方法によって鉛直方向磁場の測定を行った。磁場測定子にはホール素子を使用した。この測定の時点では 1mm 程度の狭いギャップに、そのホルダ厚さが適合するホール素子を準備できなかった。ホルダ低部に素子を埋め込んだ測定子（日本電磁測器：A8083-A6211）を使用した。測定距離は磁石表面より  $g_1 + g_2$ ：ここで、 $g_1$  は磁石表面からホール素子ホルダ底面までの隙間であり、 $g_2$  はホルダ底面とホール素子感受エリア中心までの距離である。

ここでは、図 4 の方法で得られた測定値の 2 倍の数値を“仮想的”アンジュレータによって生成された磁場の尺度として使用した。この 2 倍した磁場の値は、磁場測定値とこの磁場の鏡映磁場の重ね合わせとして得られる“仮想的”アンジュレータ磁場（“仮想的”ギャップ  $g = 2(g_1 + g_2)$  における：鏡映面はギャップ中心、つまり磁石表面より  $g_1 + g_2$  に置かれる）としての意味を持つ。このホール素子の空間分解能は 0.05mm であり、“仮想的”ギャップ  $g=1.2\text{mm}$  である ( $g_1=0.2\text{mm}$  および  $g_2=0.4\text{mm}$ )。また、ホール素子ホルダの厚さは 3mm である。

図 5 に“仮想的”アンジュレータ磁場としての上記測定結果を示した。図 5a は実測磁場の 2 倍の値を、5b は電子ビームエネルギーが 2.5GeV の時のこの磁場中の電子軌道を、各々示している。“仮想的”ギャップ  $g=1.2\text{mm}$  において約 7kG の“仮想的”磁場を得ることができた。極短周期アンジュレータ着磁技術開発のこの時点では、磁石板両端の着磁も中心に近い他の磁極と同様に行ったため、両端部のアンジュレータ軌道としての補正は不十分である。しかし、この“仮想的”磁場中の軌道はアンジュレータ軌道として十分満足のできるものに見える。

### 板状磁石の磁場測定と評価

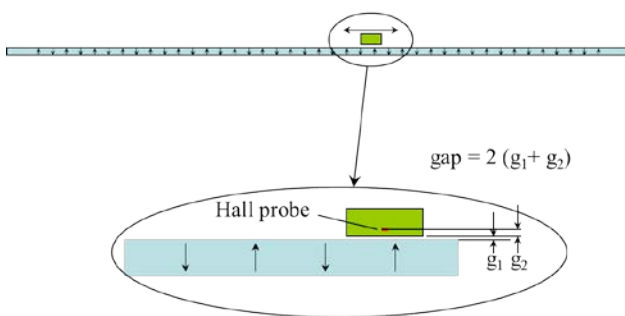


Figure 4. Magnetic measurement of the magnet plate, where a “virtual gap” is given by  $g = 2(g_1 + g_2)$ .

ここで我々は、1 周期 (2 極) 分の着磁ヘッドを製作した。直径 1.1mm のワイヤを 1 極あたり 2mm の間隔でエポキシ樹脂によって強固に固定した (1 極の精度 0.05mm)。この着磁ヘッドに 9.6kA のパルス電流を送り 0.1 秒間励磁した。リニアモーターによる磁石板のステップ送り幅は磁場周期長と同一の 4mm に調整した。この送り機構は閉回路方式によ

“仮想”アンジュレータ磁場の測定結果

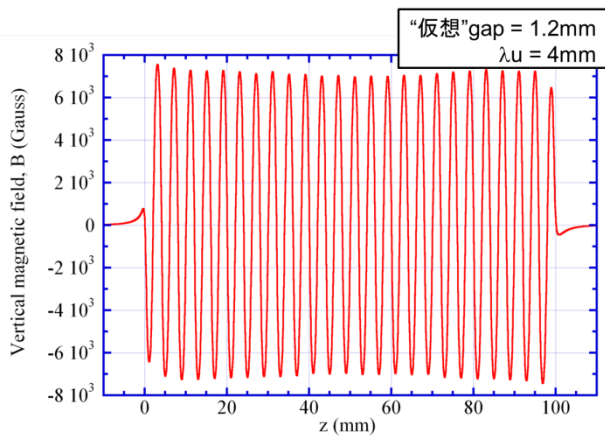


Figure 5a. Measurement of the “virtual undulator field” with a period length of 4mm.

“仮想”アンジュレータ磁場中の電子軌道

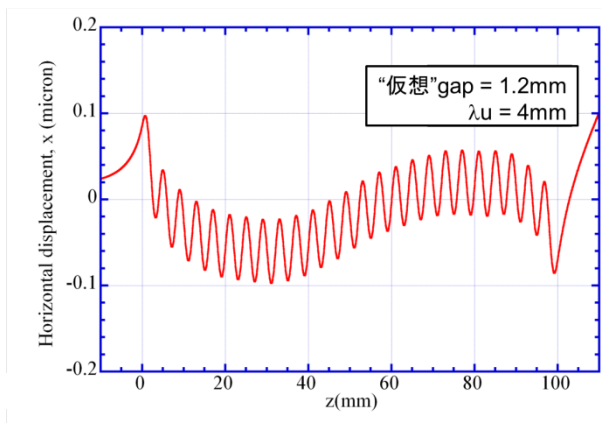


Figure 5b. Electron orbit displacement when the electron energy was 2.5GeV.

この磁場のンジュレータとしての性能を評価するために、この磁場を通過する電子からの放射のスペクトル（放射角密度）を求めた。電子エネルギーが2.5GeVの時、この“仮想的”磁場からの放射スペクトル（1電子の場合）は、アンジュレータ基本波の領域では誤差のない理想磁場（同じ磁場強度の場合）からの放射スペクトルと比べて遜色ない性能を持つことが判る（図6）。10-15keVの光子エネルギーの領域では放射光実験の光源として有用である。

4. まとめ

今回得られた結果は、極短周期アンジュレータを開発する上で我々が正しい方向に進んでいることを示していると考えられる。勿論、実用機の開発にはさらに、着磁強度と精度の向上、アンジュレータ両端部

の適切な着磁法の開発、狭小ギャップでの磁場測定法の開発等、多くの事柄を解決しなければならない。さらに非常に狭いギャップを必然的に必要とするこの形式のアンジュレータを設置することのできる高性能光源加速器の検討が非常に重要である。しかし、極短周期アンジュレータはそれが要求する直線部の長さを非常に短くできる点で、このような高性能加速器の追及に大きな自由度を与えるものと考えられる。

実測磁場と理想磁場との比較

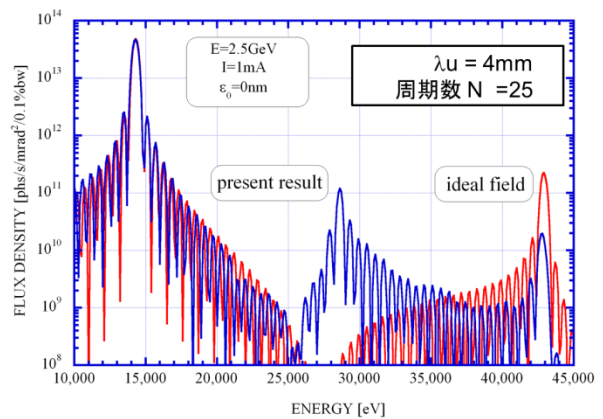


Figure 6. (a) Flux density spectrum calculated on the basis of the measured field, compared to that of the ideal field in case of 2.5-GeV energy of the electron beam with zero emittance and zero energy spread.

謝辞

本研究は一部において、JSPS 科研費 24651107 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] S.Yamamoto, X.Zhang, H.Kitamura, T.Shioya, T.Mochizuki, H.Sugiyama and M.Ando, J. Appl. Phys. **74**, 500 (1993).
- [2] e.g. <http://www.esrf.eu/>, <http://www.aps.anl.gov/> and <http://www.spring8.or.jp/>
- [3] e.g. <http://www.psi.ch/sls/>, <http://www.bnl.gov/ps/nsls2/about-NLSL-II.asp>, and <http://www.lunduniversity.lu.se/research-and-innovation/max-iv-and-ess>
- [4] S.Yamamoto, K.Tsuchiya and T.Shioya, AIP Conf. Proc. **879**, 384 (2007).
- [5] S.Yamamoto, K.Tsuchiya, H.Sasaki, T.Aoto and T.Shioya, AIP Conf. Proc. **1234**, 599 (2010).
- [6] S.Yamamoto, J. Phys.: Conf. Ser. **425** 032014 (2013).