

極短周期アンジュレータの開発 II

DEVELOPMENT OF VERY SHORT PERIOD UNDULATORS II

山本 樹^{#, A), B)}

Shigeru Yamamoto ^{#, A), B)}

^{A)} Photon Factory, Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} Department of Materials Structure Science, SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies)

Abstract

We are exploring a novel method to fabricate undulator magnets having a very short period. Two types of the magnet plates 100mm and 152mm long with 4-mm period length have been successfully fabricated. They produce an undulator field of approximately 4kG at a gap of 1.6mm. Magnetic field measurements and field characterization based on the measured field show that the quality of the undulator field of these magnet plates is satisfactory for a very short period undulator, and a spectrum calculation shows that the fundamental radiation emitted from this field is quite satisfactory in spectrum quality as compared to that for the ideal field.

1. はじめに

放射光光源の進歩においては、研究分野の拡大のために、より短い波長の光源開発が常に要求されてきた。高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・放射光研究施設 (KEK-PF) においてはこれまで、より短波長のまたはより高エネルギーの放射光を得るために真空封止アンジュレータの研究開発を行って来た。この方式を用いることによって、最新の永久磁石製作技術によってその時に得られる最新の磁石素材を用いることで最短のアンジュレータ周期長を実現することが可能になる。最初の成功は、6.5GeV PF-AR に設置された周期長 4cm の真空封止アンジュレータによって達成された^[1, 2]。このブレイクスルーに引き続いて 4 台の真空封止アンジュレータが PF-AR に設置された。このうち 2 台は周期長 4cm のギャップテーパ機構を備えたアンジュレータであり^[3]、他の 2 台は周期長 3.6cm および 2cm の通常型真空封止アンジュレータである^[4]。より短い周期をより狭いギャップで実現するために、PF2.5GeV リングにおいて Short Gap Undulator (SGU) の開発を行い設置した。これらの SGU は 1cm から 2cm 領域の周期長を持ち、3 次または 5 次高調波によって 12keV の硬 X 線を生成できるように設計されている^[5, 6]。

上記真空封止アンジュレータ開発の成功によって、我々は更に進めて“極短周期”アンジュレータの開発を行うことにした^[7, 8]。ここで、“極短周期”とは通常型アンジュレータの周期長 (数 cm) の約 1/10 の周期長とする。現在周期長 4mm を当面の目標として、この周期長を持ち Nd-Fe-B 系磁石素材でできた板状のアンジュレータ磁石の開発を行っている。4mm という周期長は、2.5GeV 蓄積リングにおいて基本波によって 12keV 放射を達成することを可能にする。これに対して、同じエネルギーの PF に設置した SGU では 3 次から 5 次高調波が必要にな

[#] shigeru.yamamoto@kek.jp

る。これまでに、周期長 4mm の場合、ギャップ 1.6mm において約 4kG のアンジュレータ磁場を生成できる板状磁石の開発に成功した。現状の到達点について以下に報告する。

2. 極短周期長アンジュレータ磁石の製作

通常のアンジュレータでは、剛性の強い一対の桁上に精密に成型された磁石ブロック (通常は非磁性の精密ホルダに収納される) を長手方向に精密に並べることで磁石列の形成を行う。したがって、磁場周期長を短縮しようとする場合、磁石ブロックの精度を保ちつつ磁石ブロックの大きさを縮小することが必要になる。しかし、周期長が非常に小さくなって、例えば 10mm を下回るようになると、精度を保ちつつ磁石ブロックを製作することはかなり難しくなり、この方式は成立しなくなる。更に磁石ブロックの組立・設置に用いるボルト等の部品が小さくなりすぎて使用に耐えなくなる。

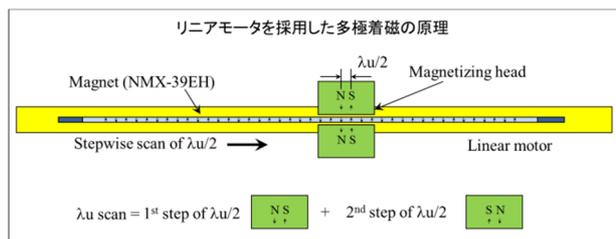


Figure 1: Multi-pole magnetization employing a linear motor. Perpendicular geometry is adopted in the present research.

上記の通常アンジュレータの製作方式とは対照的に、我々は極短周期アンジュレータ磁石を作成するための全く新しい方法を開発してきた^[7-10]。ここでは図 1 に概念的に示した多極着磁法を用いて、薄い磁石板の着磁を行った。図 1 に示した方式では着磁

方向は磁石板面に垂直となるように設定されている。ここではこの方式を垂直着磁方式と呼ぶが、こ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。磁石板には、日立金属(株)製の NMX-39EH (留磁束密度 $B_r=12\text{kG}$, および保磁力 $iH_c=25\text{kOe}$) 採用している。現状で 2 種類の形状の磁石板を製作することができる: 第 1 の形状は、長さ 100mm, 幅 20mm, 厚さ 2mm であり, 第 2 のものは、長さ 152mm で幅と厚さは同一である。この磁石板は一对の固定された電磁石着磁ヘッドに挟まれて、長手方向にリニアモータによってステップ状に送られながら磁場周期長が 4mm になるように着磁される (図 1 参照)。着磁ヘッドには 1 極 (半周期) 磁場を生成できる電磁石を製作して用いた。リニアモータによる磁石板のステップ送り幅は周期磁場の半周期分 (2mm) に設定されている。磁石板を送る際のステップ毎に着磁ヘッド電磁石に印加するパルス電流の方向を反転することで、周期長 4mm のアンジュレータ磁場を生成した。このようにパルス電流を着磁ヘッド電磁石に印加することで、その各ステップ毎に磁石板中に N 極と S 極を交互に周期的に連続して書き込むことができるようになった。

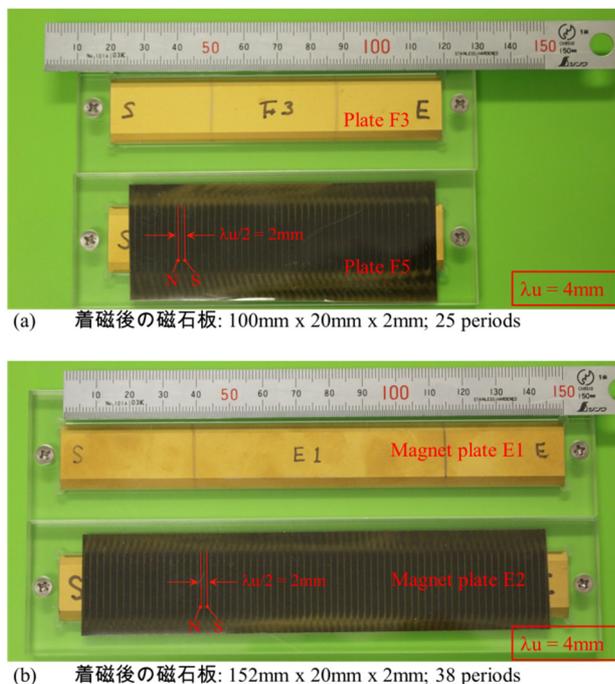


Figure 2: Magnetized plates with a period length of 4mm, which are coated with TiN. A pair of these plates is opposed to form the undulator field; (a) plates F3 and F5 100mm long, and (b) plates E1 and E2 152mm long.

着磁ヘッドには、直径 1.1mm のワイヤをエポキシ樹脂によって強固に固定して用いた (1 極の精度 $\pm 0.05\text{mm}$)。この着磁ヘッドに約 10kA のパルス電流を送り 0.1 ミリ秒間励磁した。リニアモータによる磁石板のステップ送り機構は閉回路方式によって制御され、その送り精度は $\pm 0.003\text{mm}$ 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) と各ステップ毎に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。

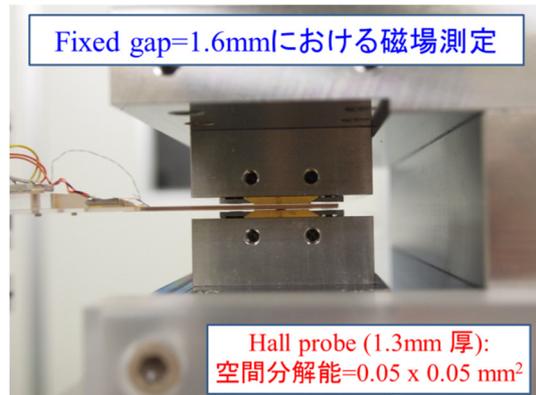


Figure 3: Field measurement was made at a fixed gap of 1.6mm by using a Hall probe with a special resolution of $0.05\text{mm} \times 0.05\text{mm}$.

着磁終了後の磁石板を図 2 に示した: 100mm 長磁石; F3 および F5, 152mm 長磁石; E1 および E2。磁石表面は、加速器真空中にこの磁石を持ち込む際の真空封止のために TiN コートされている。図 2 では各磁石の吸着事故防止のために、アクリル樹脂製のケースに収納して示した。着磁後の磁場のパターンが磁性流体シートを通して、F5 と E2 の磁石について観察できる。ここに示した着磁の成功は、100mm 長については 25 周期 (152mm 長については 38 周期) が放射光実験の実用上使用に耐える周期数であるならば、“モノリシック”アンジュレータ磁石も利用できるようになったことを示している。さらに、これらの板状磁石の製作はアンジュレータの小型化・重量削減にも有用であり、最終的には Nd-Fe-B 磁石の主要成分である希土類元素を含む重要な資源の保全にも役に立つ。

3. 極短周期長アンジュレータ磁場の生成と磁場測定に基づく磁場の評価

一对の板状磁石が互いに平行に対向して配置されると、磁石板間の狭いギャップにアンジュレータ磁場が生成される。この磁石板の性能評価を行うために磁場測定を行った。磁石ギャップ 1.6mm において鉛直方向磁場を図 3 に示した方向で測定した。今のところ磁石ギャップは固定方式であり、ホール素子は厚さ 1.3mm の銅製ホルダに装着して使用した。ホール素子の空間分解能 (感受領域) は $0.05\text{mm} \times 0.05\text{mm}$ である。

精密磁場測定の結果; 152mm長磁石

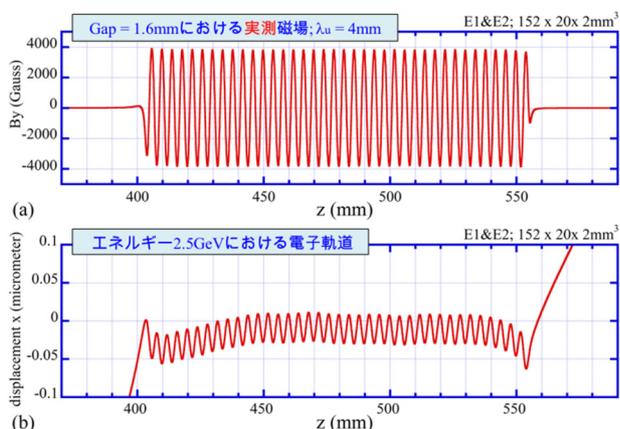


Figure 4: Result of the magnetic measurement for the plate magnets 152mm long; (a) undulator field with a period length of 4mm measured at a gap of 1.6mm, and (b) electron orbit with an energy of 2.5GeV.

精密磁場測定の結果; 200 (=100+100)mm長磁石

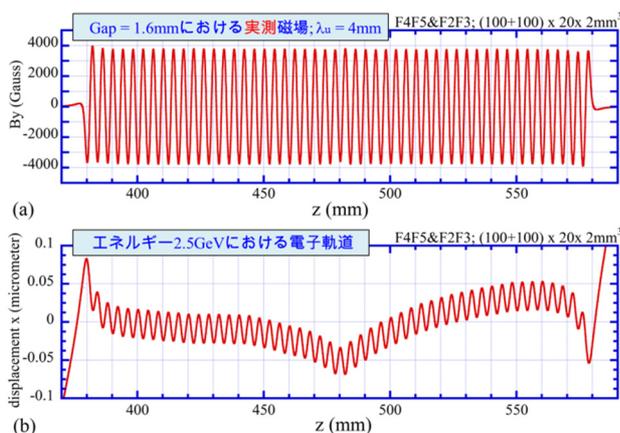


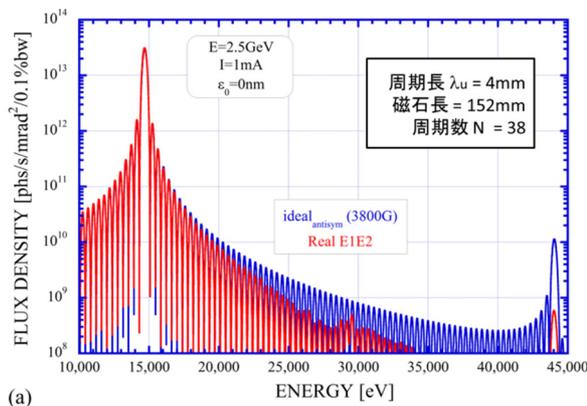
Figure 5: Result of the magnetic measurement for the connected plates 200 (=100+100)mm long; (a) undulator field with a period length of 4mm measured at a gap of 1.6mm, and (b) electron orbit with an energy of 2.5GeV.

この固定ギャップ式アンジュレータの磁場測定結果を図4と5に示した。図4は152mm長磁石のペア(E1とE2:図2参照)に対するものであり、図4aはギャップ1.6mmにおけるアンジュレータ磁場を、図4bはその磁場中を通過するエネルギー2.5GeVの電子の軌道を示している。約4kGのアンジュレータ磁場をギャップ1.6mmにおいて得ることができた。着磁ヘッドと磁石板の長手方向の位置関係を調整することにより、長手方向の磁場分布は磁石板の中心に対してほぼ反対称となっている。端部の磁極についても、より中心部の磁極と同じ方法で着磁を行い、板状アンジュレータ磁石開発のこの段階では端部磁極の着磁について特別な注意を払って

いない。このために現状では両端部における軌道補正は十分ではないが、中心部分におけるアンジュレータ軌道は満足できるものである。このアンジュレータ磁場を評価するために、図4aの実測磁場に基づいて放射光の光束密度スペクトルの計算を行った。電子ビームのエネルギーが2.5GeV、エミッタンスおよびエネルギー広がりともにゼロの場合に求めたスペクトルを、同じ強度の理想磁場の時のスペクトルと比較して図6aに示した。

図4aに示した磁場を通過する電子からの放射スペクトル(図6aの赤線)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(青線)からの放射スペクトルと比べて同等の性能を持つことが判る。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。

実測磁場と理想磁場との比較; 152mm長磁石



実測磁場と理想磁場との比較; 200 (=100+100)mm長磁石

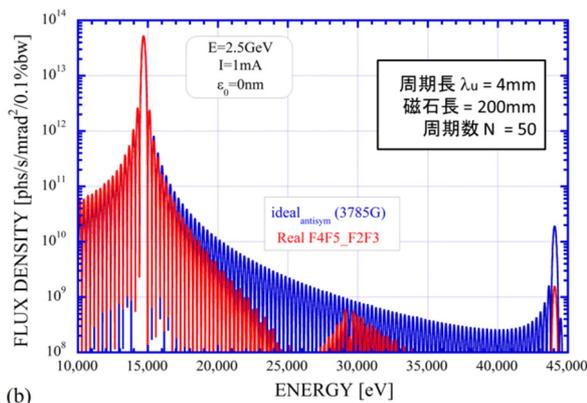


Figure 6: Comparison of the flux density spectrum calculated on the basis of the measured field, to that of the ideal field for 2.5-GeV energy of the electron beam with zero emittance and zero energy spread; (a) spectrum for the plates 152mm long, and (b) for the connected plates 200 (=100+100)mm long.

100mm長磁石に続けて152mm長磁石の製作ができるようになったことは、より長い磁石を製作する試みの一つの成功例である。しかし、現在開発している薄型磁石板の製作においては長さの限界がある

はずである。磁石板の厚さが 2mm またはそれ以下の場合、200mm を超える長さの磁石を製作することは容易ではない。したがって、板状磁石を長手方向に連結する方法を開発する必要がある。適切な連結は磁石端部磁極の着磁強度の調節と、長手方向の磁石板の間隔の最適化によって達成されるはずである。図 5 に示したのは、100mm 長の磁石板の連結を試験的に行った結果である。この試験では、対向させた 100mm 長磁石板のペア (F5 と F3 : 図 2 参照) を同一磁石板の他のペア (F4 と F2) と長手方向に単純に連結した。これらの磁石板は 152mm 長の磁石板 (E1 と E2) と同一の方法で各々が反対称磁場分布を持つように着磁された。磁場測定は同じくギャップ 1.6mm において行った。この連結試験においては連結部分の調整・最適化は全く行っていないにも拘わらず、図 5b に示した電子軌道 (電子エネルギー 2.5GeV の場合) は、長さ 200 (=100+100)mm のアンジュレータとして適切なものである。同様の方法で求めた計算スペクトルは、基本波の領域では今回の試験的連結を行ったアンジュレータ磁場から得られる放射が同じ長さで同一強度の理想磁場からの放射と遜色の無い性能を持つことを示している (図 6b)。図 5b のアンジュレータ軌道に見られる連結部分の小さなキックは重要でないことがわかる。

4. まとめ

極短周期アンジュレータの開発に関して今回得られた成果は、当面の目標とした周期長 4mm の磁石製作のための主要な問題点を解決することができたことを示している。アンジュレータ磁石を長尺化するための磁石連結法の開発に関しても、最終的な解決に向けて明確な見通しを持つことができた。実用機の開発にはさらに、着磁強度と精度の向上を達成し、アンジュレータ両端部の適切な磁場強度を達成するための着磁法の改良が必要になるであろう。上記を完遂するには更に、精密かつ系統的な磁場測定とそれに基づくアンジュレータ磁場の評価が重要になる。しかし、我々は高性能の実在電子ビームを用いた極短周期アンジュレータからの放射の観測と評価の実験を近い将来に実現できるものと信じている。

5. 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、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) から科学技術振興機構を通してなされた激励に深く感謝します。

参考文献

- [1] S. Yamamoto, et al., Rev. Sci. Instrum. **63**, 400-403, 1992.
- [2] S. Yamamoto, et al., J. Appl. Phys. **74**, 500-503, 1993.
- [3] S. Yamamoto, et al., AIP Conf. Proc. **705**, 235-238, 2004.
- [4] K. Tsuchiya, T. Shioya, and S. Yamamoto, AIP Conf. Proc. **879**, 380-383, 2007.
- [5] S. Yamamoto, et al., AIP Conf. Proc. **879**, 384-387, 2007.
- [6] S. Yamamoto, et al., AIP Conf. Proc. **1234**, 599-602, 2010.

- [7] S. Yamamoto, Journal of Phys.: Conf. Ser. **425** 032014, 2013.
- [8] 山本 樹, 第 10 回日本加速器学会年会プロシーディングス, 86-89, 2013.
- [9] S. Yamamoto, WEOAA02, Proc. IPAC2014, 1845-1857, Dresden, Germany, 2014.
- [10] S. Yamamoto, Synchrotron Radiation News **28** No.3, 19-22, 2015.