

極短周期アンジュレータの開発 III

DEVELOPMENT OF VERY SHORT PERIOD UNDULATORS III

山本 樹^{#, A), B)}

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

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

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

Abstract

A novel method to fabricate undulator magnets having a very short period has been explored and developed. Two types of the magnet plates 100mm and 152mm long with 4-mm period length have been successfully fabricated. A connection method of these magnet plates has also been successfully developed to fabricate longer undulator magnets. They produce an undulator field of approximately 4kG at a gap of 1.6mm. The magnetic field characterization based on the measured field show that the undulator field is satisfactory for very short period undulators.

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、より短い波長 (高いエネルギー) 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基づき、我々は 4 台の真空封止アンジュレータを PF-AR に設置した。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) の開発を行い実用化した。これらの SGU は 1cm から 2cm 領域の周期長を持ち、PF の 2.5GeV の電子エネルギーでは、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]。

上記の真空封止アンジュレータ開発の成功を踏まえて、近年我々は更に低いエネルギーの光源加速器において、より低次のアンジュレータ放射を用いつつ、より高いエネルギーの放射の実用化を目指して、“極短周期”アンジュレータのための研究開発を行っている [7-12]。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。本研究では周期長 4mm を目標に設定し、幅 20mm × 厚さ 2mm × 長さ 100mm (25 周期) (または 152mm (38 周期)) の板状の NdFeB 製磁性素材に、周期的交番磁気回路を高精度・高強度で書き込む方式の開発を行ってきた。着磁後に対向させた一対の磁石板の間の隙間 (磁石ギャップ) にアンジュレータ磁場を生成することができる。現在 1.6mm

の狭小ギャップに約 4kG の極短周期磁場 (周期長 4mm) を生成することが可能になった。実測磁場に基づく評価は、この磁場からの放射光が優れた輝度特性を持つことを示している。

周期長 4mm については磁石素材の改善によって、より長尺の 152mm の板状磁石の利用が可能になった。しかし、板状素材の製造工程上の制約のために、この長さを大幅に超える素材の製造は困難である。したがって、数 100mm を超える長尺のアンジュレータ磁場を生成するためには、複数の磁石板を長手方向に接続する方法の開発が重要な課題になる。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場生成の原理と磁石の製作

通常形式のアンジュレータにおいて、磁場周期長を短縮を試みる場合、アンジュレータ磁石列を構成する磁石ブロックの寸法をその (相対) 精度を保ちつつ縮小することが必要になる。しかし、周期長が、現在の通常値から非常に小さくなって、例えば 10mm を下回るようになると、上記の精度を保ちつつ磁石ブロックを製作することは難しくなり、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。

上述の通常アンジュレータの製作方式とは対照的に、我々は板状磁石素材を用いて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 [7-12]。多極着磁法を用いた新しい着磁方法を概念的に図 1 に示した。Nd-Fe-B 系材料でできた磁石素材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-極が交互に周期的間隔を置いて同時に形成され、磁石素材板への“転写”が行われる (図 1a)。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 (アンジュレータ磁場) が形成される (図 1b) [7-9]。図 1a には磁化方向が磁石板表面に垂直の場合を示した (直交着磁型)。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

[#] shigeru.yamamoto@kek.jp

同様である。もう一つ(水平着磁型)の幾何学も可能である[7-9]。この場合は水平磁気記録方式と同様、着磁は磁石素材板表面に平行に行われる。

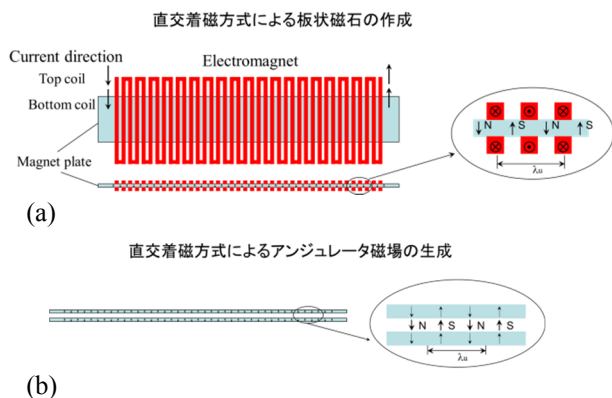


Figure 1: (a) Schematic illustration of perpendicular magnetization of the magnet plate, and (b) Formation of an undulator field in perpendicular magnetization.

現在は、より高精度の磁場周期長を得るために、上一対の着磁用電磁石(ヘッド)で挟まれた磁石素材板を長手方向に高精度リニアモータによってステップ状に送りながら着磁する方式を採用している。着磁用ヘッドには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)とした。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。

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。

磁石素材板には、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。

着磁終了後の磁石板を図2に示した:100mm長磁石; AおよびB[9], 152mm長磁石; E1およびE2[10-12]。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、BとE2の磁石について観察できる。図2の着磁例は、周期長4mmのアンジュレータ磁場として25から38周期が放射光実験の実用上の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立つ。

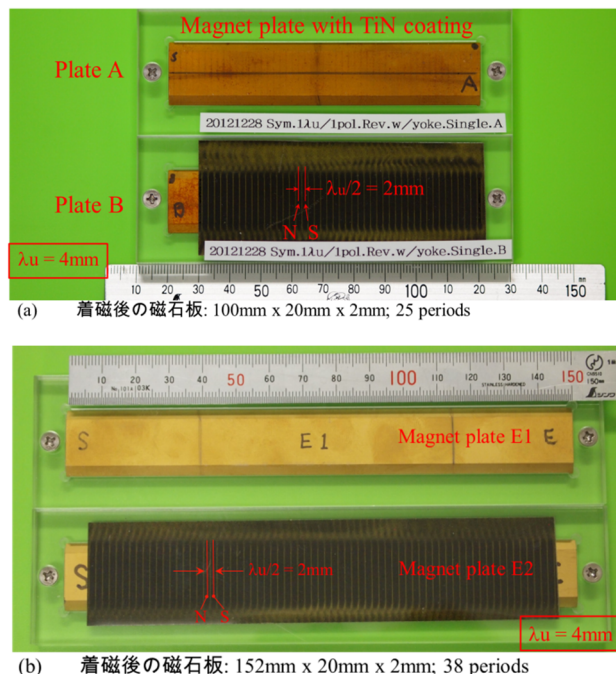


Figure 2: Magnetized plates with a period length of 4mm, which are coated with TiN. A pair of these plates is opposed to form the undulator field; (a) plates A and B 100mm long, and (b) plates E1 and E2 152mm long.

3. 極短周期長アンジュレータ磁場の生成とアンジュレータ磁場の評価

上述のようにして作成した板状磁石一対を互いに平行に対向して配置すると、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(図1b)。この磁石板の性能評価を行うためにアンジュレータ磁場の精密測定を行った。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。

磁場測定の結果を図3と4に示した。図3は100mm長磁石板のペア(AとB:図2a参照)に対するものであり、図3aはギャップ1.6mmにおけるアンジュレータ磁場を、図3b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対称となっている。端部の磁極についても、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の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。

精密磁場測定の結果; 100mm長磁石

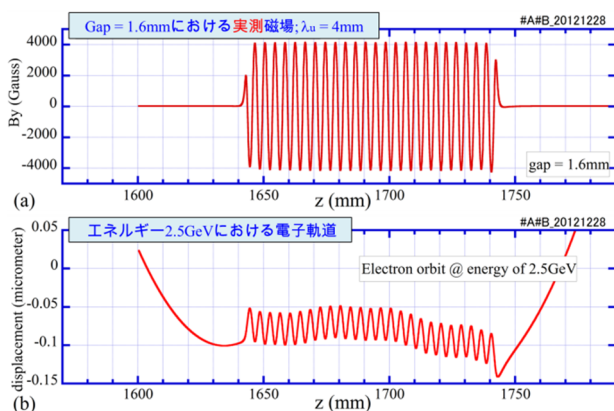


Figure 3: Result of the magnetic measurement for the plate magnets 100mm long; (a) undulator field with a period length of 4mm measured at a gap of 1.6mm, and (b) electron orbit with an energy of 2.5GeV.

精密磁場測定の結果; 152mm長磁石

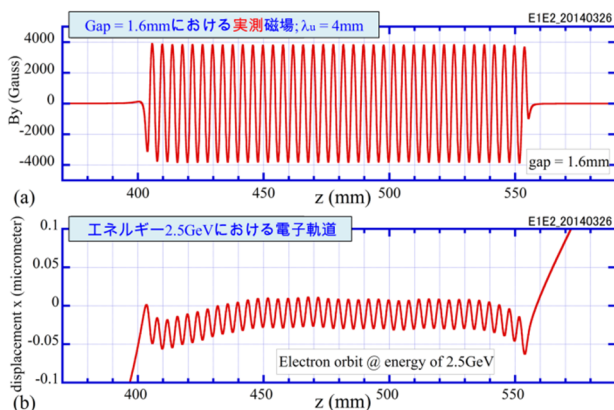


Figure 4: Result of the magnetic measurement for the plate magnets 152mm long; (a) undulator field with a period length of 4mm measured at a gap of 1.6mm, and (b) electron orbit with an energy of 2.5GeV.

図4は152mm長磁石板のペア(E1とE2:図2b参照)に対するものであり、図3と同様に図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。この磁石板E1とE2に対しては、磁石板の中心に対して反対称の磁場分布が得られるように着磁ヘッドと磁石板の長手方向の位置関係を調整した。図4bに示したアンジュレータ磁場中の電子軌道からもわかるように、非常に良好な磁場を得ることができた。

精密磁場測定の結果; 100 + 100mm長磁石

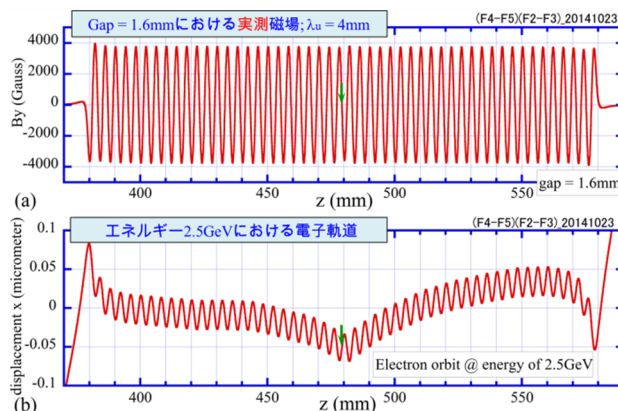


Figure 5: Result of the magnetic measurement for the connected plate magnets 200 (=100+100) mm long; (a) undulator field with a period length of 4mm measured at a gap of 1.6mm, and (b) electron orbit with an energy of 2.5GeV. After independent magnetization of the plates, a couple of them (F2 and F3) is opposed to the other couple (F4 and F5).

精密磁場測定の結果; 100 + 100mm長磁石

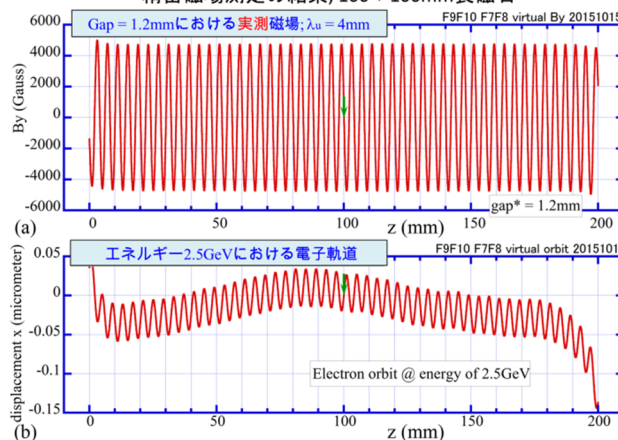


Figure 6: Result of the magnetic measurement for the connected plate magnets 200 (=100+100) mm long; (a) undulator field with a period length of 4mm measured at a gap of 1.6mm, and (b) electron orbit with an energy of 2.5GeV. A couple of the plates (F7 and F8) is connected longitudinally and magnetized, then it is opposed to the other couple (F9 and F10).

100mm長磁石に加えて152mm長磁石の製作ができるようになったことは、“モノリシック”アンジュレータ磁石によって、より長いアンジュレータ磁場を生成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存在する。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。

ある。図5に示したのは、100mm長の磁石板の連結を試みた最初の例である。この試みでは、独立に(磁石板 A と B とは対照的に) 反対称磁場分布を持つように着磁した100mm長の磁石板 F4 および F5 を単純に長手方向に連結した上で、同様に着磁し連結した磁石板 F2 および F3 と上下に対向させた。磁場測定は同じギャップ1.6mmにおいて行った(図5a)。図中の緑色矢印は連結点を示す。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のアングレータとして適切なものであり、アング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。

各々の組が反対称磁場分布を持つように着磁を行った。磁場測定はギャップ1.2mmにおいて行った。図6中の緑色矢印は連結点を示す。図6bに示した電子軌道(電子エネルギー2.5GeVの場合)には、連結点における磁場不正は全く見ることができない。長さ200(=100+100)mmのアングレータとして、図5の場合よりも更に良好な磁場および電子軌道が得られたことが判る。

4. 実測磁場に基づく放射の評価

上述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が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7および8に示した。

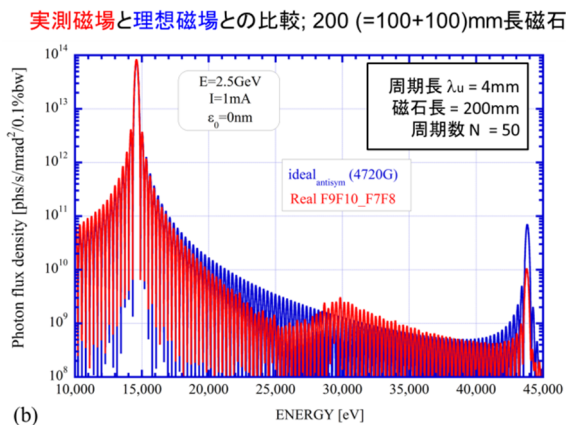
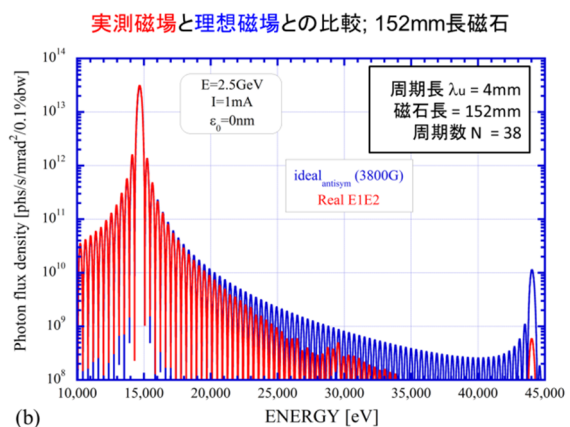
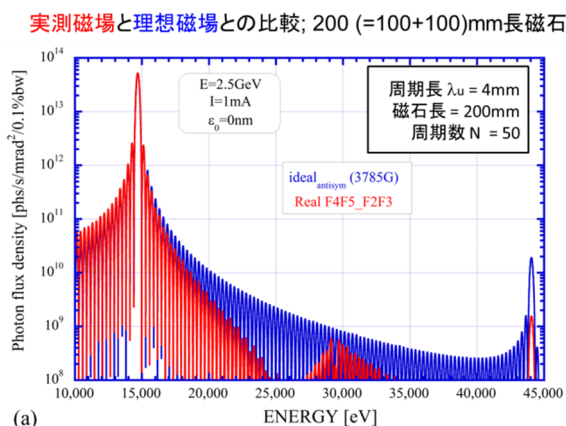
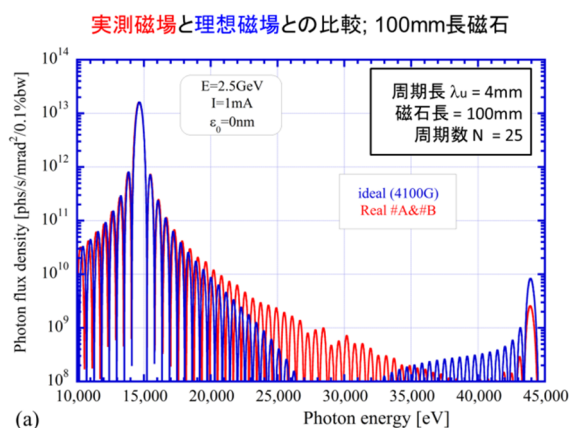


Figure 7: Comparison of the flux density spectrum calculated on the basis of the measured field, to that of the ideal field for 2.5-GeV energy of the electron beam with zero emittance and zero energy spread; (a) spectrum for the plates 100mm long (Fig.3), and (b) for the plates 152mm long (Fig.4).

磁石板の連結を適切に行い、より良好なアングレータ磁場を得るために、連結すべき磁石板を一体にして連結したまま着磁を行う方法を開発した。図6には、2組の100mm長の磁石板、F9およびF10とF7およびF8を各々一体として着磁を行い、その後対向させて行った磁場測定の結果を示した(図6a)。F9およびF10(またはF7およびF8)に一体着磁を行う際には、図5の例と同じく

Figure 8: 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 a case of the connected plates 200 (=100+100) mm long (Fig.5), and (b) for another case of the connected plates 200 (=100+100)mm long (Fig.6).

図7には100mm長および152mm長の“モノリシック”アングレータからの放射特性を、図8には100mm長の磁石板2枚を連結した連結型200mm長アングレータからの放射特性を示した。

図 3a および 4a に示した“モノリシック”アンジュレータ磁場を通過する電子からの放射スペクトル(図 7a および 7b 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。図 5a および 6a に示した連結型 200mm 長アンジュレータ磁場を通過する電子からの放射スペクトル(図 8a および 8b の赤線)も同様に、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。図 5b に見られる連結部の磁場不正による小さなキックは、磁石の連結数がこの例の様に少ない場合は影響が小さいことが判る。しかし、連結数を増やしてより長尺のアンジュレータ磁石を製作しなければならない場合には、連結部の磁場不正効果が累積することを避けるために、図 6b に示したなめらかで良好な軌道を与える連結着磁法の採用が重要になる。

[12] S. Yamamoto, Proc. International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation 2015, New York City, USA, 2015, in printing.

5. まとめ

今回の成果によって、当面の目標を周期長 4mm に設定した極短周期アンジュレータ開発のための主要な問題は解決することができたと考えられる。アンジュレータ磁石を連結して長尺化するための連結着磁法の開発にも、明確な成果を得ることができた。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。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。近い将来にこれらを達成して、精密ギャップ駆動機構と組み合わせることで、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実現したいと考えている。

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 *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, SAOT11, 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.
- [11] 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.