

極短周期アンジュレータの開発と光源性能評価試験

DEVELOPMENT OF A VERY SHORT PERIOD UNDULATOR AND CHARACTERIZATION OF THE UNDULATOR RADIATION

山本 樹^{#, A)}, 益田伸一^{A)}, 浜 広幸^{B)}, 柏木 茂^{B)}, 日出富士雄^{B)}, 武藤俊哉^{B)}, 南部健一^{B)},
Shigeru Yamamoto^{#, A)}, Shinichi Masuda^{A)}, Hiroyuki Hama^{B)}, Shigeru Kashiwagi^{B)}, Fujio Hinode^{B)}, Toshiya Muto^{B)},
Kenichi Nanbu^{B)}

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

^{B)} Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University

Abstract

We are exploring a novel method to fabricate undulator magnets having a very short period length. Plate-type magnets 100mm long with 4-mm period length have been successfully fabricated. Undulator field of approximately 3kG is obtained at a gap of 1.6mm. A prototype undulator based on this technology has been constructed. Field measurements and characterization show that the quality of the undulator field of these plate magnets is sufficient for an undulator light source. Test experiments for light generation using a real electron beam have been carried out at a test accelerator at the Research Center for Electron Photon Science (ELPH), Tohoku University. Observation and characterization of the undulator radiation were accomplished successfully.

1. はじめに

放射光光源の進歩においては、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、真空封止アンジュレータの発明・研究開発を行い、より短い波長(高いエネルギー)の放射光を生成できる光源の開発を行っている。真空封止ア

て、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からである。最初の成功は、6.5 GeV PF-AR に設置された周期長 4 cm 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]。上記アンジュレータの開発の後、エネルギーのより低いPF2.5 GeV リングにおいて10 keV以上の放射光を生成するために、より短い周期をより狭いギャップで実現する短周期真空封止アンジュレータ(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2.5 GeVの電子エネルギーでは、3次または5次高調波によって12 keVの硬X線を生成できるように設計されている[5, 6]。

図1には上記の状況をまとめて、PFに於けるアンジュレータ周期長の短縮の歴史を示した。PFの運転開始から、通常型アンジュレータ(Out-of-vacuum)の場合100mm程度から50mmまで、真空封止型(In-vac)の場合40mmから10mm程度までの周期長短縮化が図られてきた。

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によって、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(=数mm)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)の板状のNdFeB製磁石素材に、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對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

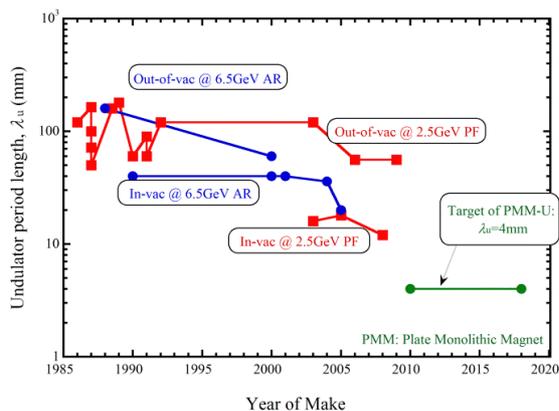


Figure 1: Development of reduction of undulator period length of over the years at the Photon Factory (PF), KEK. Red lines indicate the history at the 2.5-GeV PF, and blue lines indicate the history at the 6.5-GeV PF-Accumulation Ring (PF-AR): Green line indicates the target of the present research.

ンジュレータの方式を用いることによって、その時点での永久磁石製作技術によって得られる最新の磁石素材性能を活用して最小の磁石ギャップを実現することによ

[#] shigeru.yamamoto@kek.jp

約 3 kG の極短周期磁場(周期長 4 mm)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、このアンジュレータ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。

更に、上記の 1.6 mm という狭小ギャップを許容して“極短周期”アンジュレータを導入・設置することの出来る、東北大学・電子光物理学センターS-band Linac において実施した、最初の放射の観測について報告する。

2. 極短周期長アンジュレータの開発

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に、多極着磁法を応用した新しい着磁方法の開発を行ってきた[7-14]。この着磁方法を概念的に図 2 に示した[13]。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 2a)。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 2b)[7-9]。図 2a 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同様である。

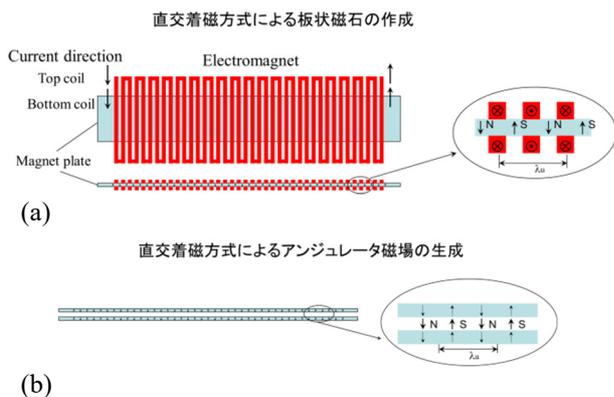


Figure 2: (a) Schematic illustration of perpendicular magnetization of the magnet plate, and (b) Formation of an undulator field in perpendicular magnetization[13].

現在は、より高精度の磁場周期長を得るために、左右一対の着磁用電磁石(ヘッド)の間を、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(図 3)。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(2 mm)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 4 mm 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。

磁石素材板には、日立金属(株)製の NMX-37SH (残留磁束密度 $B_r=12\text{kG}$, および保磁力 $iH_c=21\text{kOe}$)を採用している。本研究では、長さ 100 mm, 幅 20 mm, 厚さ 2 mm の磁石板を製作して用いた。

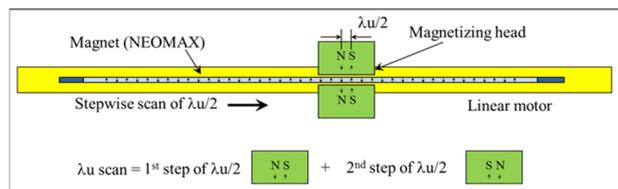


Figure 3: Multi-pole magnetization employing a linear motor. Perpendicular geometry is adopted.

着磁終了後の磁石板を図 4 に示した:長さ 100 mm, 幅 20 mm, 厚さ 2 mm。磁石表面は、真空封止アンジュレータ磁石として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 4 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。図中下段の磁石については、着磁後の磁場のパターンを磁気ビューワシートを通して観察できる。この着磁例は、周期長 4 mm のアンジュレータ磁場として 25 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。

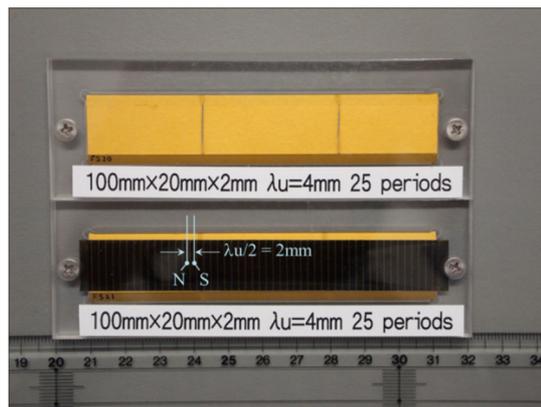


Figure 4: Magnetized plate magnets 100 mm long, 20 mm wide and 2 mm thick with a period length of 4mm, which are coated with TiN. A pair of these plates is opposed to form the undulator field.

図 4 に示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 2b)。この磁石のアンジュレータ性能評価のために、幾つかのギャップにおいて行った精密磁場測定の結果を図 5 に示した:図 5a; 磁場, 図 5b; 電子軌道(エネルギー 2.5 GeV の場合)。非常に良好なアンジュレータ磁場を得ることができたことが判る。

アンジュレータ磁場の評価を行うために、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 2.5 GeV, 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

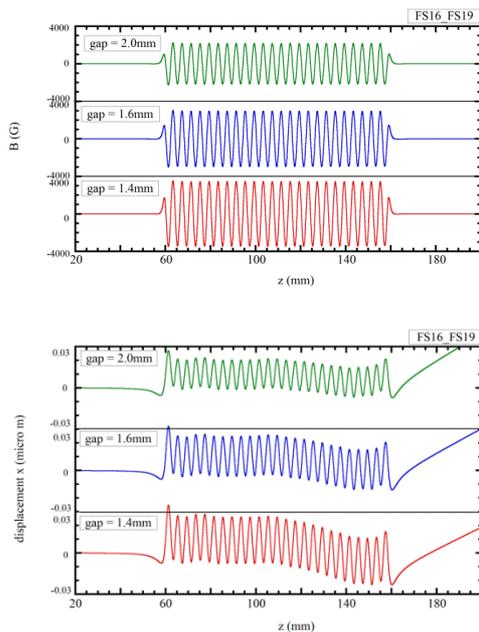


Figure 5: Result of the magnetic measurement for the plate magnet 100 mm long; (a) undulator field with a period length of 4 mm measured at a gap of 1.4, 1.6 and 2.0 mm, and (b) orbit of an electron with energy of 2.5 GeV at the same gaps.

スペクトルを、同じ強度の理想磁場の時に得られるスペクトルと比較して図 6 に示した (gap = 1.6 mm 時)。

図 5 に示した“モリシック”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 6 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。10-15 keV 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。

上述の様に極短周期アンジュレータ磁場 (ここでは周期長 4 mm) を生成できる磁石の開発については、概ね成功した。次の目標として、この磁石を対向させて装着し、磁石間のギャップを精密に制御することのできる駆動機構の開発・製作を行った。この装置は、比較的小型のもので、今回示した全長 100 mm の磁石を含む全長 200 mm までの磁石板を装着することができる。さらに、真空封止型アンジュレータとしての機能を持つように開発した。アンジュレータ磁石のコンパクト化・軽量化に伴い、駆動機構本体もこれまでの通常型アンジュレータのそれに比べて大幅に小型化することができた。図 7a に、この駆動機構の外観写真を示した。

この装置のギャップ分解能については、1 micron を目標とした。これは、通常型アンジュレータの分解能が現時点でおおむね 10 micron であり、極短周期アンジュレータとして実現する周期長が通常型の 1/10 であることから、選定した数値である。現状で、概ね 1 micron の目標を達成することができた。図 7b は、この装置への 100 mm 長磁石の装着状況を示している。運転中の電子ビームによる磁石劣化保護のための Cu マスクの後ろに 100 mm 長磁石を装着した。

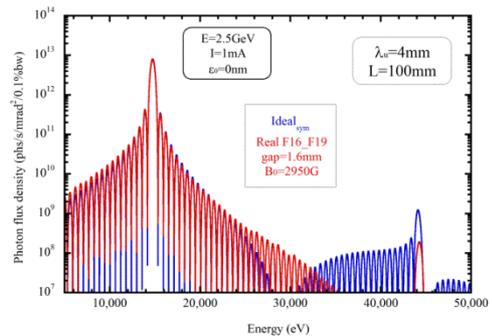


Figure 6: Comparison of the flux density spectrum calculated on the basis of the measured field, to that of the ideal field for 2.5-GeV energy of the electron beam with zero emittance and zero energy spread.

3. 極短周期アンジュレータからの放射観測

3.1 電子ビーム源と放射光観測システム

極短周期アンジュレータからの放射光の観測実験を東北大学・電子光物理学研究センターの光源加速器、test Accelerator as a Coherent Terahertz Source (t-ACTS) にお

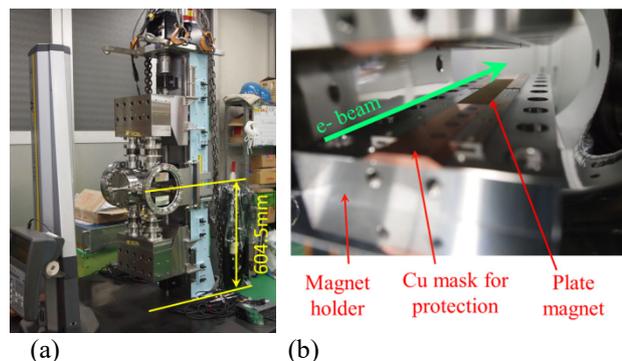


Figure 7: Photograph of a mechanical frame of the very short period undulator which can be equipped with the plate magnets 200 mm long.

いて行った。図 8 に示すように、加速器は S バンド RF 電子銃、アルファ・マグネット、3 m 長の S バンド加速構造体、および電子輸送ラインで構成されている。t-ACTS の入射システムは、進行波加速構造中における速度集群法を用いた圧縮により、低エミッタンス・短バンチの電子ビームを供給できるが、今回の実験では電子ビームを圧縮せずにクレスト位相に乗せて加速した。繰り返しは、2 Hz で行われた。1 個の電子ビームのパルス長は 2.0×10^{-6} s であり、インターバル 350 ps の 5700 個のマイクロパルスにより構成されている。各マイクロパルスの電荷量は 3.5 pC であり、ピーク電流はおよそ 10 mA である。

図 8 に示す t-ACTS のビームラインに設置した極短周期アンジュレータ装置に、4 mm 周期・100 mm 長磁石を装着した。加速構造体下流に設置したビーム診断システムを用いた Q スキャンを行い、ビームエミッタンスおよび

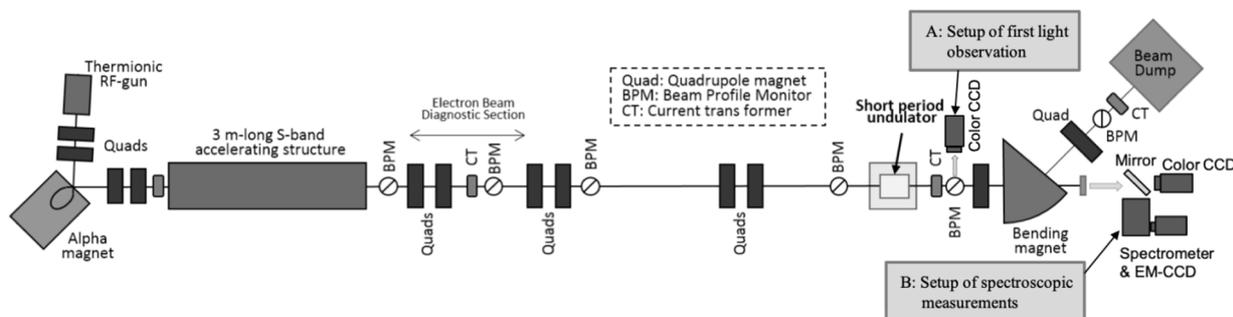


Figure 8: t-ACTS beam line and optical system for measurement of undulator radiation.

Twiss パラメータを測定した。ビームウェストが極短周期アンジュレータの軸方向中心に位置するように Twiss パラメータを調整した。

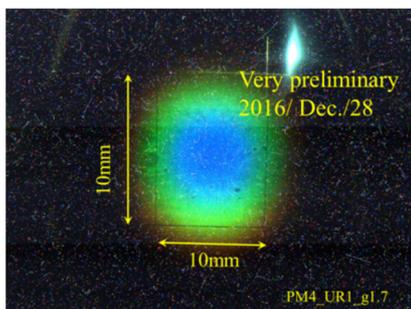


Figure 9: Observation of the first light from the very short period undulator.

3.2 最初の放射の観測実験

最初の放射光観測実験[15]では、放射の観測波長域を可視領域に設定するために、加速器のビームエネルギーを 35 MeV に設定した(規格化エミッタンスは水平 1×10^{-6} m, 鉛直 3×10^{-6} m)。放射光の観測は図 8 中 A に示した光学系により行った。アンジュレータからの放射を下流に置かれた水平振り分けミラーにより真空槽の外に取り出し、カラー CCD カメラで撮影した。この時 CCD カメラの焦点を上記ミラー上に設定した。撮影のタイミングは 2 Hz で行われる加速器運転のタイミングに同期させた。

加速器ビーム調整の後、図 9 に示した最初の放射の観測に成功した。軸上の青色の放射を中心とする典型的なアンジュレータ放射を観測した。撮影時のアンジュレータパラメータ (gap = 1.7 mm, $K = 0.102$, $B_0 = 2740$ G) と軸上放射 (青色) の波長 ($\lambda = 433$ nm) から得られるビームエネルギーは $E = 34.9$ MeV となり、加速器の設定パラメータと調和的である[15]。

3.3 放射光スペクトル観測

放射光の分光計測を行い、放射光評価実験を実施するため、t-ACTS の加速器調整を進めて、極短周期アンジュレータに対する最適パラメータを追求するとともに、アンジュレータ下流のビームラインのアクセプタンス拡張等の改善を行った。今回の精密分光計測実験では、水平・垂直方向の規格化エミッタンスは、それぞれ

5.0×10^{-6} m, 4.4×10^{-6} m である。アンジュレータ中心でのビームサイズは、水平方向 0.29 mm, 垂直方向 0.11 mm である。偏向電磁石下流のビームプロファイルモニターで解析した電子ビームのエネルギーとその拡がりは、33 MeV および 0.44%(rms)である。

図 10 に、偏向電磁石直後に設置した分光計測システムを示した(図 8 中 B の拡大図)。観測窓から取り出したアンジュレータ放射は、アイリス通過後、切り替えミラーによってカラー CCD またはイメージング分光器に導かれる。分光器には高感度 EM(Electron Multiplying)-CCD カメラがマウントされ 2 次元分光イメージを記録する。EM-CCD 素子のピクセルサイズは 0.013×0.013 mm² であり、画素数は 1024×1024 である。入射部には水平方向に開閉するスリットが設置されており、スリットに入射したイメージは EM-CCD 素子面に 1:1 で結像される。

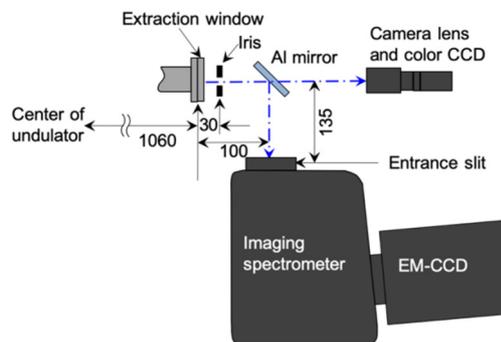


Figure 10: Optical system to observe the undulator radiation. A color CCD and an imaging spectrometer with an EM-CCD were placed downstream of the iris. A movable mirror was put to switch the undulator radiation into the color CCD or the imaging spectrometer.

図 11a は、gap = 1.5 mm 時にカラー CCD カメラで観測した極短周期アンジュレータ放射のプロファイル(直径 9 mm のアイリスによって周辺領域をマスク)である。イメージング分光器の入射スリットの水平方向幅を 0.1 mm にした時のシングルショット分光計測結果を図 11b に示す。この 2 次元イメージは前述の EM-CCD カメラによって記録された。CCD イメージの水平方向のピクセル位置は波長に対応し、垂直位置は垂直方向の放射光観測角度 (θ)、即ち垂直方向発散角に対応する。明るい弧状の部分が分光されたアンジュレータ放射であり、アンジュレータ放射の観測角度依存性を示している。図 11b の 2 次元

イメージデータから抽出した軸上光束密度分布を図12に示した。この時、光軸($\theta=0$)周辺の ± 0.50 mrad内の放射光強度の平均値から光束密度を求めた。横軸方向に対する入射スリット幅 0.1 mm は角度誤差 ± 0.04 mradに相当し、垂直・水平共に観測波長($\lambda = 468$ nm)に対して十分な精度を与える(垂直: $\Delta\lambda = 0.51$ nm, 水平: $\Delta\lambda = 0.003$ nm)。2次元イメージデータにメディアンフィルタによる数値処理を行いX線ノイズを除去した。分光計測系の波長の校正はHg標準ランプを用いて行った。光束密度の絶対値校正は、ハロゲン標準ランプとHe-Neレーザーを用いて行った。上記のデータ処理の際に波長を光子エネルギーに変換し、放射光強度(CCD pixel value)を通常の光束密度に変換した。

図12は、ギャップ値 1.5, 1.7, および 2.0 mm に於いて上記の手順で得たアンジュレータ放射の光束密度スペクトルである。電子ビームエネルギーのショット毎のバラツキを避けるため同じ実験条件で計測した数十の分光データのうち、最も高いエネルギーを持つ分光データ5個を選定して示した。測定したスペクトル特性は、ギャップ 1.5, 1.7, および 2.0 mm のとき電子エネルギーをそれぞれ 33.49, 33.53, および 33.57 MeV と仮定すると、t-ACTSの電子ビーム診断で得られたパラメータセットに基づくスペクトルの計算値(図12: 丸印)とおおよそ一致する。電子エネルギーの違いは、ショット毎の電子ビームのバラツキによるものと考えられる。光束密度の測定値はショット毎のバラツキの範囲内で計算値と(絶対光子数のスケールで)一致している。

放射光スペクトルの低エネルギー部分で、計算値と実測値には不一致が見られる。垂直ビームサイズ $\sigma_y = 0.11$ mmの電子ビームが 1.5-2.0 mmの狭小ギャップを通過

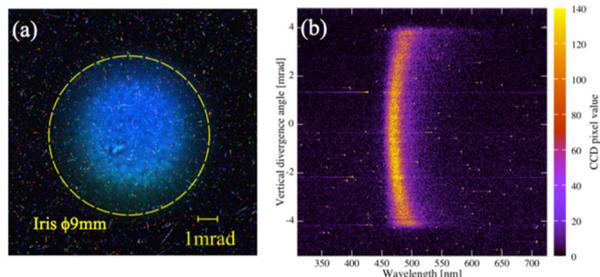


Figure 11: (a) A transverse profile of the undulator radiation observed by color CCD. (b) A single-shot 2-dimensional spectroscopic image.

するので、電子ビーム中の垂直方向の位置によって電子に作用する磁場強度が異なる。この効果を考慮した検討を行ったが、周期長が 4 mm と短いため K 値(自体もその変化)も小さいので、この効果は無視できるほど小さいことが判明した。スペクトルの不一致は、実際の加速器モニターシステムでは観測できない電子ビーム低エネルギー成分に起因する可能性もある。この不一致は、加速器の側からだけでなく、極短周期アンジュレータ側からの解明も進める必要がある。また、このことは極短周期アンジュレータの光源としてのみならず、加速器の運転状況のモニタとしての可能性も示唆している。

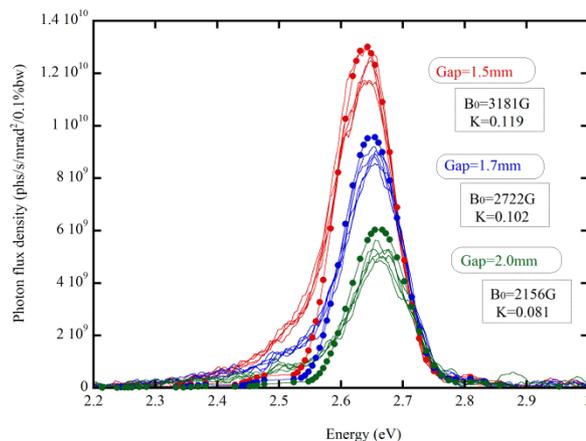


Figure 12: Measured and calculated undulator spectra of the first harmonic of undulator radiations from the 4-mm period undulator with 100 mm length at several gaps of 1.5 (red), 1.7 (blue), and 2.0 (green) mm. The calculated spectra are denoted by circles.

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 Vol. 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.
- [12] S. Yamamoto, AIP Conf. Proc. 1741, 020029, 2015.
- [13] 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.
- [14] 山本 樹, レーザー研究, Vol. 45 No.2, 82-86, 2016.
- [15] 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.