

複合周期アンジュレータ磁気回路の試作と評価

EVALUATION OF TEST MAGNETS FOR COMPOSITE PERIOD UNDULATOR

黒田聡浩^{#,A)}, 鏡畑 暁裕^{B)}, 清家 隆光^{B)}, 北村 英男^{C)}, 田中 隆次^{C)}
Akihiro Kuroda^{#,A)}, Akihiro Kagamihata^{B)}, Takamitsu Seike^{B)}, Hideo Kitamura^{C)}, Takashi Tanaka^{C)}

^{A)} University of Hyogo

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute

^{C)} RIKEN SPring-8 Center

Abstract

Since the wavelength of undulator radiation (UR) is dependent on the amplitude and periodic length of the undulator magnetic field, a desired wavelength is available by choosing them appropriately. While the field amplitude can be adjusted by changing the magnet gap, the periodic length is usually fixed to a certain value, which limits the range of the wavelength tunability of UR. The composite-period undulator (CPU) is an insertion device proposed to extend the wavelength tunability, which makes it possible to switch the magnetic period by a simple mechanical motion. Then the concept has been applied to a novel undulator concept called the “helical-8 undulator”, which can generate arbitrary polarization states with the on-axis heat load being kept low even if high K values are applied. In order to demonstrate the principle of the helical-8 undulator, a test magnetic array has been constructed and the field measurements at two different operation modes have been carried out, the results of which are presented in this paper.

1. はじめに

放射光において、偏光特性は大変重要な特徴の一つであり、様々な偏光状態を入手するために数多くのアンジュレータが提案されている。その中でも、APPLE 型磁気回路は水平、垂直、右円、左円偏光といった多くの偏光状態を作り出すことが出来るため、偏光切替を必要とする放射光実験用ビームラインにおける挿入光源として標準的に利用されている。しかしながら、SPring-8 のように高エネルギー電子ビームを用いる放射光施設において軟 X 線ビームラインの光源として利用する場合、APPLE 型磁気回路は次に述べるような深刻な熱負荷問題を引き起こす。

直線偏光モード即ち、電子がある平面上を正弦波軌道に沿って移動するとき、軸上における高調波放射光の強度は K 値の増加に伴って増大し、この結果、熱負荷に相当する軸上パワー密度は急激に増加する。したがって、モノクロメータやミラーのような光学機器が損傷もしくは変形し、その結果単色性や集光特性などの機器性能が著しく劣化する。

「8 の字型アンジュレータ」は上記のような困難を克服するために提案された挿入光源である。周期的な垂直磁場に加え、その 2 倍の周期をもつ水平磁場を発生するように磁気回路を構成することによって、8 の字状の軌道に沿って電子が移動し、基本波長において水平偏光を作り出す。この場合ヘリカルアンジュレータと同様に、軸上での基本波長にお

けるフラックスを大きく失うことなく、大半の放射光パワーを軸外に分散させることができる。8 の字型アンジュレータの大きな欠点の一つは、二つの異なった磁場周期を含むために、APPLE 型磁気回路のようにヘリカルアンジュレータに切り替えることが出来ないことである。これまで 8 の字型アンジュレータを円偏光モードで運転するための様々な提案がなされてきたが、利用可能なフラックスとスペクトルの純粋性の点から、どれも純粋なヘリカルアンジュレータほど有用ではなかった。

そこで、低い軸上パワー密度で柔軟な偏光利用を可能にするために、ヘリカルアンジュレータから 8 の字型アンジュレータ、そしてその逆も同様に切り替えることができる新しいアンジュレータ（ヘリカル 8 アンジュレータ）が提案された^[1]。この発想は、自由電子レーザーや放射光の波長範囲を改良する目的のために提案された、複合周期アンジュレータ（CPU）を拡張する形で提案されたものであり、二つの異なった周期からなる磁場を発生する特殊な磁気回路に基づいている^[2]。

本研究では、提案された CPU 磁気回路を試作し、基本周期と倍周期の各モードに設定した状態で磁場分布を測定することにより、CPU の原理について検証した。さらに、これをヘリカル 8 アンジュレータに適用した場合に期待される光源性能について、実測した磁場データを光源計算ソフト SPECTRA で解析することによって評価した。

[#] ri121013@stkt.u-hyogo.ac.jp

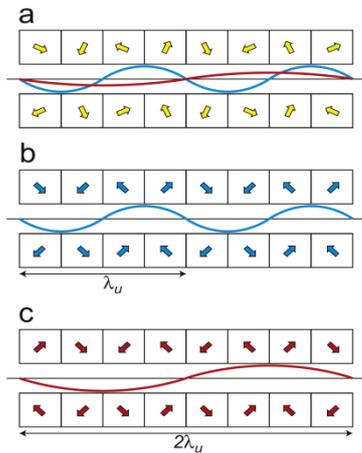


Figure 1: (a) Halbach-type undulator magnet circuit with inclined easy axes to generate a composite-period field. The magnetization vectors can be decomposed into those for (b) the fundamental period and for (c) the double period. The magnetic field profiles with the two different periods are shown for reference.

2. 原理

まず Fig. 1(a)に示す CPU 磁気回路の概要について解説する。この磁気回路は、それぞれの磁石の磁化ベクトルをある規則に従って傾けていることを除いては、普通の Halbach 型磁気回路と同じものである。このアンジュレータから得られる磁場はおよそ次式のように表される。

$$B_y(z) = -B_{1y} \sin(k_u z) + B_{2y} \sin\left(\frac{k_u z}{2}\right) \quad (1)$$

ただし、

$$k_u = \frac{2\pi}{\lambda_u}$$

であり、 λ_u は周期長である。上式より、磁場は 2 つの異なる磁場周期 λ_u 、 $2\lambda_u$ を含むことがわかる。これは Fig.1(a)に示した磁化ベクトルが、Fig.1(b)及び(c)で示した 2 つの直行する成分に分解できることから明らかである。2 つの磁場振幅 B_{1y} 、 B_{2y} は永久磁石の磁場と磁石ブロックの大きさ、さらに傾斜角度 θ に依存する。

上下磁石列をアンジュレータ軸に沿って逆方向に相対的距離 Δz だけ動かす（位相駆動）ことで、磁場は次式のように変化する。

$$B_y(z) = -B_{1y} \sin(k_u z) \cos \phi + B_{2y} \sin\left(\frac{k_u z}{2}\right) \cos\left(\frac{\phi}{2}\right)$$

ただし、

$$\phi = \frac{k_u \Delta z}{2}$$

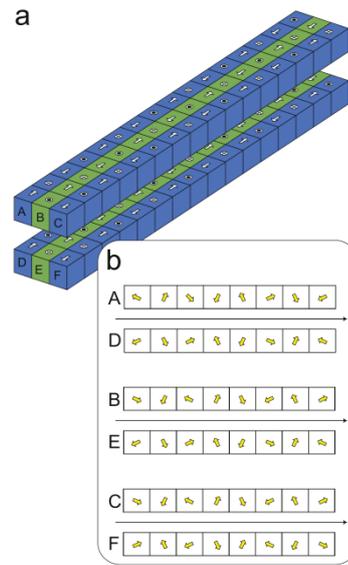


Figure 2: (a) Helical undulator composed of six magnet arrays and (b) its modification to the Helical-8 undulator based on the CPU scheme. The magnet arrays B and E generate the vertical field, while A, C, D and F generate the horizontal field.

である。 $\Delta z = \lambda_u$ または $\Delta z = \lambda_u / 2$ を代入したとき、 $B_y(z)$ は周期 λ_u もしくは $\lambda_u / 2$ を持つ正弦波磁場になることは明白である。言い換えれば、磁場周期は相対的距離 Δz を変えることにより、選択可能となる。これが CPU 配列の基本原理である。

Fig.2(a)のような 6 つの磁石列を持つヘリカルアンジュレータに CPU 磁気回路を応用したものがヘリカル 8 アンジュレータである。中央の磁石列 (B,E) が垂直磁場 B_y を発生し、外側の 4 つの磁石列

(A,C,D,F) が水平磁場 B_x を発生する。言い換えれば、水平、垂直磁場は APPLE 型挿入光源と違って、独立に生成される。円偏光の極性は中央の磁石列を半周期シフトさせることで切り替えることができる。全ての磁石列を Fig.2(b)のような CPU 磁気回路に修正し、各々の磁石列の位置を z_A, z_B, \dots, z_F と定義する。磁石列の組 (A,D) と (C,F) を一緒に動かすと、すなわち、

$$z_A = z_D = z_L, z_C = z_F = z_R$$

とすると、磁場は次のように変形できる。

$$B_{x,y}(z) = -B_{1x,1y} \sin(k_u z - \phi_{1x,1y}) \cos \phi_{2x,2y} + B_{2x,2y} \sin\left(\frac{k_u z}{2} - \frac{\phi_{1x,1y}}{2}\right) \cos\left(\frac{\phi_{2x,2y}}{2}\right) \quad (2)$$

ただし、

$$\phi_{1x} = \frac{k_u(z_L + z_R)}{2}, \phi_{2x} = \frac{k_u(z_L - z_R)}{2}$$

$$\phi_{1y} = \frac{k_u(z_B + z_E)}{2}, \phi_{2y} = \frac{k_u(z_B - z_E)}{2}$$

であり、これらの位相パラメータを調整することによって、様々な運転モードを実現することができる。例えば、楕円偏光モードは位相パラメータ (ϕ_{1x} , ϕ_{2x} , ϕ_{1y} , ϕ_{2y}) を $(0, \pi, \pm\pi/2, \pi)$ に設定することにより可能である。この場合、磁場は次のように与えられ、

$$B_x(z) = B_{1x} \sin(k_u z), B_y(z) = \mp B_{1y} \cos(k_u z) \quad (3)$$

明らかに楕円型アンジュレータの式と一致する。

$B_{1x} = B_{1y}$ という条件を満足するように各々の磁石を設計すると、この式はヘリカルアンジュレータの磁場に変形できる。また、偏光極性は位相パラメータ ϕ_{1y} の符号を反転することで切り替えることができる。

水平 8 の字偏光と垂直 8 の字偏光モードは位相パラメータ (ϕ_{1x} , ϕ_{2x} , ϕ_{1y} , ϕ_{2y}) を各々 $(0, 3\pi/2, 0, \pi)$ と $(0, \pi, 0, \pi/2)$ に設定することで可能になる。水平 8 の字偏光モードの磁場は、

$$B_x(z) = -\frac{B_{2x}}{\sqrt{2}} \sin\left(\frac{k_u z}{2}\right), \quad (4)$$

$$B_y(z) = B_{1y} \sin(k_u z)$$

で与えられ、一方垂直 8 の字偏光モードの磁場は、

$$B_x(z) = B_{1x} \sin(k_u z),$$

$$B_y(z) = \frac{B_{2y}}{\sqrt{2}} \sin\left(\frac{k_u z}{2}\right) \quad (5)$$

で与えられる。(4)式、または(5)式で与えられる磁場の中で運動する電子から放射される放射光は、基本電子エネルギーで水平もしくは垂直に偏光される。強調すべきことは、軸上パワー密度が、従来の直線偏光アンジュレータのものよりずっと低いということである。

以上をまとめると、ヘリカル 8 アンジュレータでは、適切に位相パラメータを設定することで、単純なヘリカルアンジュレータとしてだけでなく、水平 8 の字と垂直 8 の字アンジュレータとして動作する。

3. 方法及び結果

前節で解説したヘリカル 8 アンジュレータの原理を検証するために磁石列を試作し、これが発生する磁場分布の計測を行った。ただし試作した磁石列は Fig.2 と全く等価ではなく、(B,E)列は従来の Halbach 型磁気回路で代用している。従って、

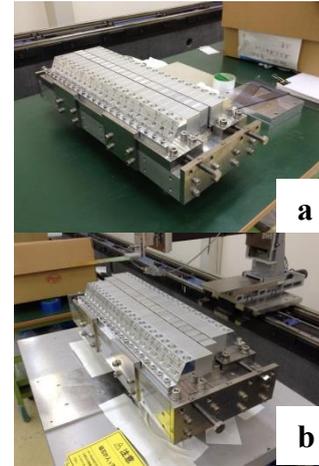


Figure 3: Test magnet arrays: (a) fundamental mode (b) double-period mode.



Figure 4: Test magnets for CPU. The magnet array pairs (Bt,Bb), (At,Ab), and (Ct,Cb) corresponding to (B,E), (A,D), (C,F) in Fig.2(b).

(B,E)列の位相は固定し、(A,D)と(C,F)列を位相駆動してモードの切替を行うため、期待される磁場は(3)式または(4)式で与えられる。すなわち、楕円型アンジュレータと水平 8 の字アンジュレータの切り換えを可能とする磁石列である。

試作した磁石列の写真を Fig.3 に、またその磁気回路を模式的に Fig.4 に示す。左側磁石列 (At,Ab)、中央磁石列 (Bt,Bb)、右側磁石列 (Ct,Cb) から構成される周期長 10cm、周期数 5 のアンジュレータ磁石列である。個々の磁石はネオジウム系の希土類永久磁石 (残留磁場密度 1.22T 以上、保持力 25kOe 以上) であって、At,Ab,Ct,Cb の各磁石列の幅を 40mm、高さを 40mm とし、Bt,Bb 各磁石列の幅は 30mm、高さは 40mm とした。前述したように Bt,Bb 列については通常の Halbach 型磁気回路と等価なものを、At,Ab,Ct,Cb 列については垂直磁化磁石に挟まれた磁石の着磁方向が 30° だけ傾斜させたものを使用した。

このアンジュレータをアンジュレータ駆動架台に取り付け、ガウスメータにより磁場を測定した。A,B,C 列の端面を一致させた状態を基本周期モード、B 列を動かさず、A 列を -z 方向に、C 列を z 方向に

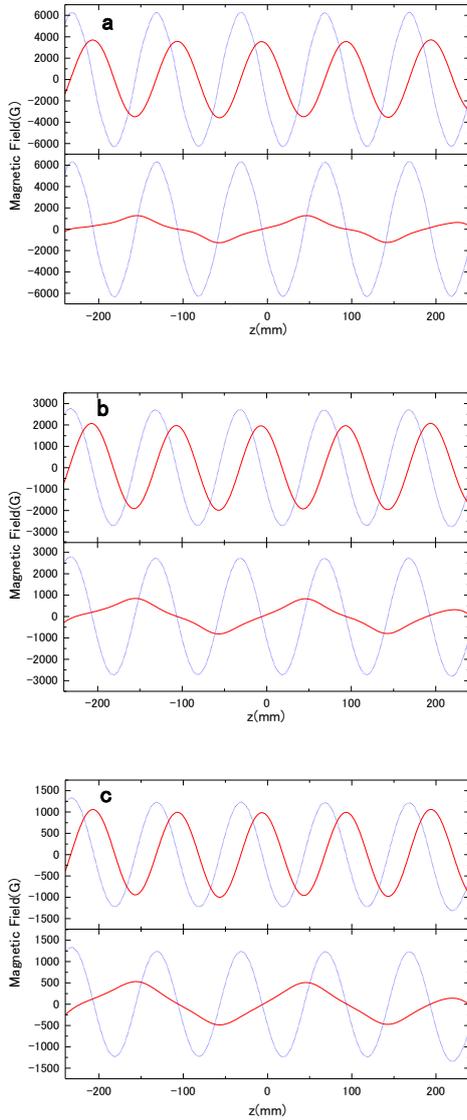


Figure 5: Magnetic Field in test magnets: (a) gap=20mm, (b) gap=40mm, (c) gap=60mm. Blue line: vertical field, red line: horizontal field.

4分の1周期だけ動かした状態を倍周期モードと称する。

初めに、水平方向、垂直方向における磁場のピーク位置を測定から求め、そのピーク位置にホールプローブをセットしたのちに、アンジュレータ軸方向への磁場分布を、測定距離 480mm、ステップサイズ 1mm で測定した。そして、アンジュレータのギャップを調節し、20、40、60mm において、同様に基本周期、倍周期それぞれのモードでの磁場分布を測定した。その結果、各ギャップにおいて Fig.5 のような磁場データが得られた。グラフの上部が基本周期モード、下部が倍周期モードでの測定結果を示す。いずれのモードにおいても、グラフ中央付近 (-100 ~ 100mm) で予想された磁場分布が確認された。

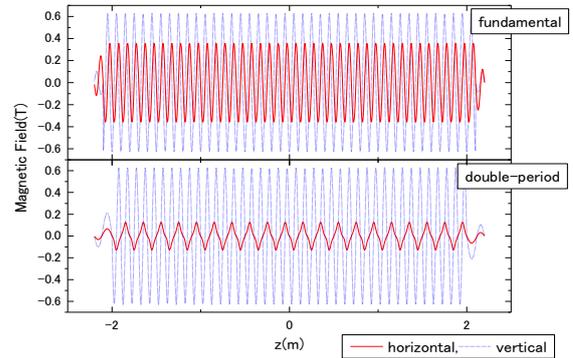


Figure 6: Magnetic field extended in gap=20mm.

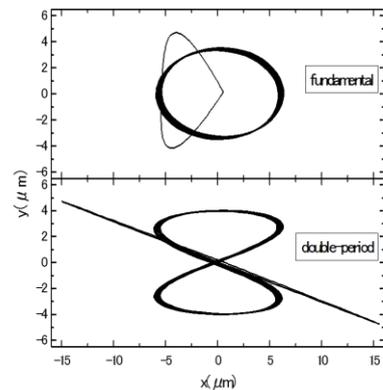


Figure 7: Electron beam orbit in gap=20mm.

4. 解析及び解析結果

前節で述べた磁場測定結果から、周期磁場に相当する中央部分の磁場データを抽出し、これを全長 4.4 m のアンジュレータに相当する磁場分布へ拡張したのち、SPECTRA を用いて、軌道、輝度及びストークスパラメータ、そしてパワー密度を求めた。以下に、その解析結果を示す。

Fig.7 には投影電子軌道（アンジュレータ軸に垂直な平面への投影）を示す。基本周期モードでは楕円軌道を、倍周期モードでは 8 の字軌道を描くことが確認できる。Fig.8 には輝度のスペクトルとストークスパラメータ s_1 及び s_3 の光子エネルギー依存を示す。この結果から、基本エネルギーにおいて円偏光度 95%以上、水平直線偏光度 100%が得られることが分かる。Fig.9 にはパワー密度の空間分布を示す。基本周期モードでは中空のドーナツ、倍周期モードでは蹄のような分布が確認できる。これはそれぞれ、ヘリカル（または楕円型）アンジュレータ、及び 8 の字アンジュレータに特有なパワー分布であり、試作した磁気回路に基づくアンジュレータが、2つの異なる偏光特性を有するアンジュレータの機能を位相駆動のみで切り替え可能であることを示している。

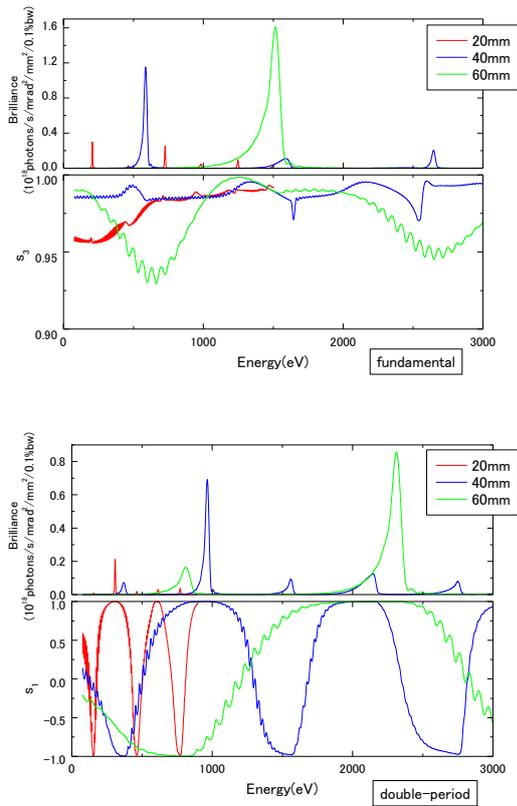


Figure 8: Brilliance, Storks parameter in fundamental or double-period mode of Helical-8 undulator.

5. まとめ

試作した磁石列の磁場測定結果から、ヘリカル8アンジュレータにおいて、ヘリカルアンジュレータ（厳密には楕円型アンジュレータ）と水平8の字アンジュレータの切り換えが、可能であることが確認された。

今回の試験では、CPU磁気回路に変更したA,C列を位相駆動することによって、ヘリカルモードと水平8の字モードの切り換えを行った。一方で、B列はHalbach型磁気回路のまま変更していないため、垂直8の字モードは確認されていない。しかしながら、試作した磁石列で基本周期と倍周期の切替が可能であるというCPUの原理が実証されたことから、B列をCPU磁気回路に変更することで垂直8の字モードも問題なく実現可能であると思われる。

参考文献

- [1] T.Tanaka, H.Kitamura, Nucl. Instr. And Meth. A659 (2011) 537-542
- [2] T.Tanaka, H.Kitamura, Phys. Rev. ST AB 14 (2011) 050701

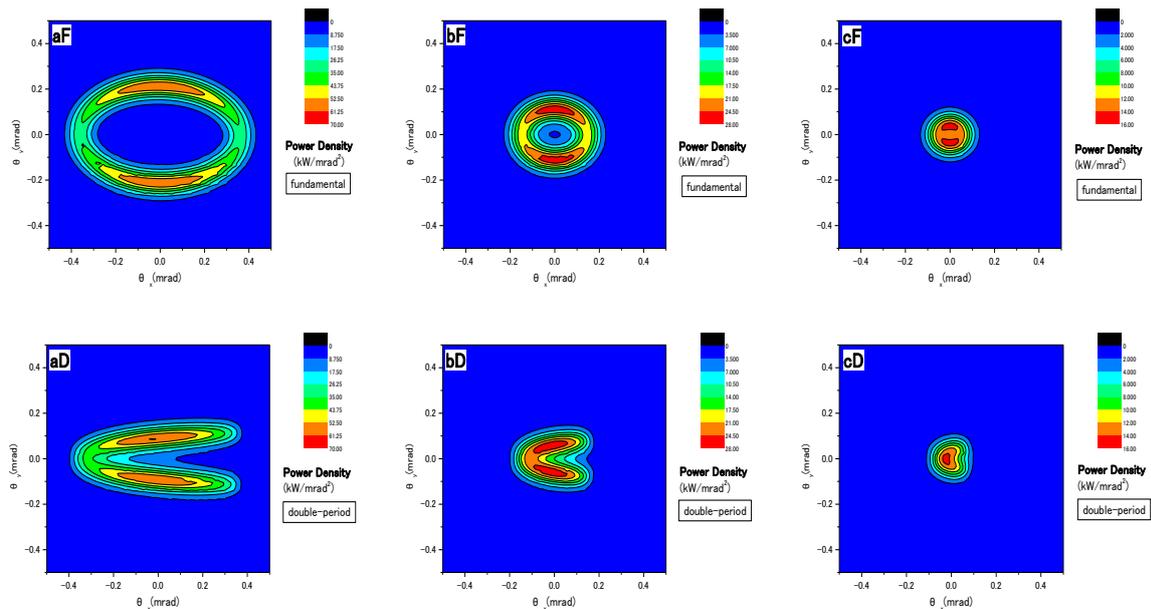


Figure 9: Power densities in fundamental or double-period mode of Helical-8 undulator :
 (aF) fundamental, gap=20mm (aD) double-period, gap=20mm (bF) fundamental, gap=40mm
 (bD) double-period, gap=40mm (cF) fundamental, gap=60mm (cD) double-period, gap=60mm