

## 偏光可変準周期アンジュレータの新しい磁場設計モデル

### NEW MAGNETIC DESIGN MODEL FOR A QUASI-PERIODIC VARIABLY POLARIZING UNDULATOR

光安 孝史<sup>#,1)</sup>, 宮本 篤<sup>2)</sup>, 佐々木 茂美<sup>B)</sup>

Takafumi Mitsuyasu<sup>#,1)</sup>, Atsushi Miyamoto<sup>2)</sup>, Shigemi Sasaki<sup>2)</sup>

1) Graduate school of science, Hiroshima University

2) Hiroshima Synchrotron Radiation Center, Hiroshima University

#### Abstract

The radiation from a conventional linear undulator shows that its spectrum has harmonic peaks mainly at odd integer harmonic positions of fundamental radiation energy. It is difficult to eliminate these harmonics, if we use diffracting grating monochromator. But, we can eliminate higher harmonics by using Quasi-Periodic Undulator(QPU) alongside a diffraction grating monochromator. The QPU is an undulator to shift harmonic peaks from the integral energy positions to the irrational positions by introducing a recess at some magnet positions characteristic of a specific quasi-periodicity. On the other hand, APPLE-II undulator can selectively generate three different polarization states (horizontal, vertical, and elliptical polarization). The QPU under consideration is based on APPLE-II undulator. We attempt to shift spectral integer harmonic peaks to irrational positions in all polarization modes by combining characteristics of QPU and APPLE-II undulator. In this paper, we introduce a new QPU model that would spoil the main property of QPU in vertical polarization modes.

#### 1. 序論

上下各 2 列の磁石列で構成されている APPLE-II 型アンジュレータは、対角位置の磁石列をビーム軸の方向にシフトすることにより、水平直線偏光モード(以下水平偏光モード)、円偏光モード、垂直直線偏光モード(以下垂直偏光モード)と 3 種類の偏光モードを任意に切り換えることができるアンジュレータである。この APPLE-II 型アンジュレータを構成する磁石列のある特定位置の磁石をビーム軸から離すように磁石を配置し準周期化することで、高次光のピークを基本波の整数倍の位置から無理数倍の位置にシフトさせることができる<sup>[1-4]</sup>。

以下に垂直偏光モード時の磁石配列について、磁石位置を水平偏光を作る磁石配列に固定して準周期化した APPLE-II の磁石列(A)を Figure 1 に、磁石に

コイルを巻いて準周期位置の磁石を電磁石化して準周期化をした磁石列(B)を Figure 2 に、準周期化する位置の磁石を偏光モードと連動して、隣り合う水平磁化の磁石をビーム軸から遠ざけることのできる磁石列(C)を Figure 3 にそれぞれ示す。磁石を固定して準周期化されている APPLE-II の磁石列(A)の場合、垂直偏光モードのときに基本波の 3 倍のエネルギー位置に高次光のピークが出現した。そこで、コイルを巻いて準周期位置の磁石を電磁石に変更した磁石列のモデル(B)と、磁石の大きさを調節してコイルを使うことなく準周期化したモデル(C)を作成して、垂直偏光モードにおける磁場分布と偏光特性比較し、検証した。比較のために Figure 1, Figure 2, Figure 3 はすべて垂直偏光モード時の磁石配列を記載している。

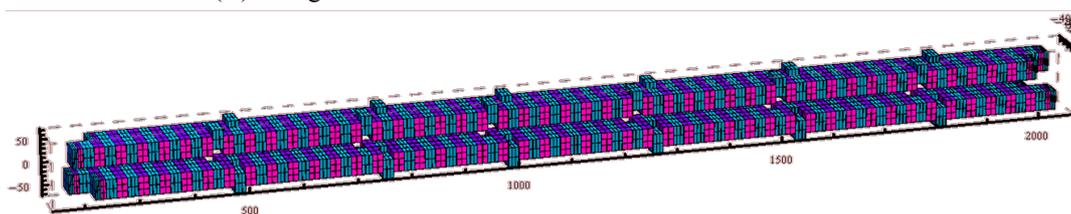


Figure 1: Magnetic array of quasi-periodic undulator: type-A.

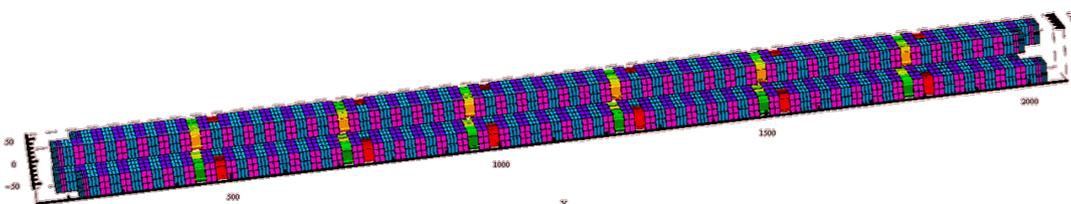


Figure 2: Magnetic array of quasi-periodic undulator: type-B.

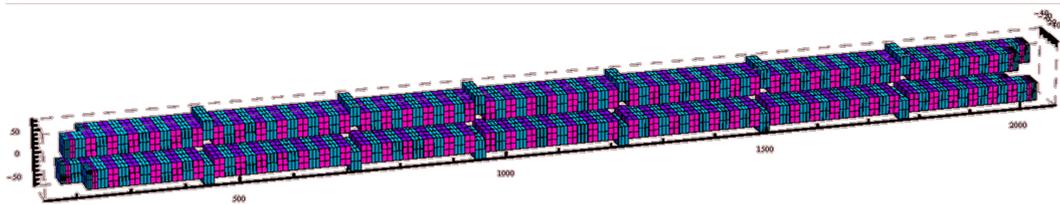


Figure 3: Magnetic array of quasi-periodic undulator: type-C.

## 2. 各モデルのアンジュレータの磁場分布

周期的な磁場を準周期化するためには、準周期位置で周期的な位置のそれとは異なる光と電子との位相差を作る必要がある。そこで、APPLE-II アンジュレータでは、水平方向に磁化したフルサイズの磁石の端から数えて 9, 16, 22, 29, 36, 43 番目に対応する磁石を電子の軌道軸から遠ざけることで準周期化を実現した。

一方、コイルを使うモデルでは、対応位置にコイルを巻いて電磁石化することで磁場を弱めることで準周期化している。

磁場の計算は RADIA<sup>[5]</sup>を用いて行った。以下 Table 1 にアンジュレータのパラメータを示す。

Table 1: Parameters of Undulator

名称	値
全長[mm]	1780
ギャップ[mm]	30
周期数	23
周期長	78
水平偏光モードの磁石のシフト量[mm]	0
楕円偏光モードの磁石のシフト量[mm]	26
垂直偏光モードの磁石のシフト量[mm]	39
中心磁石の間隔[mm]	1.0
磁石の種類	NdFeB
残留磁束密度[T]	1.3
準周期位置の磁石のシフト量[mm]	14
コイルに流す電流(水平)[A/mm <sup>2</sup> ]	12000
コイルに流す電流(垂直)[A/mm <sup>2</sup> ]	10000

### 2-1 各偏光モード時の各モデルの磁場分布

Figure 4, Figure 5, Figure 6 に Figure 1, Figure 2, Figure 3 の磁石配列を採用した場合の水平偏光モード、楕円偏光モード、垂直偏光モードの磁場分布をそれぞれ上から順に示す。以下のグラフにおいて水平成分の磁場  $B_x$  を青色で、垂直成分の磁場  $B_z$  を赤色で表す。

#### i. 水平偏光モード

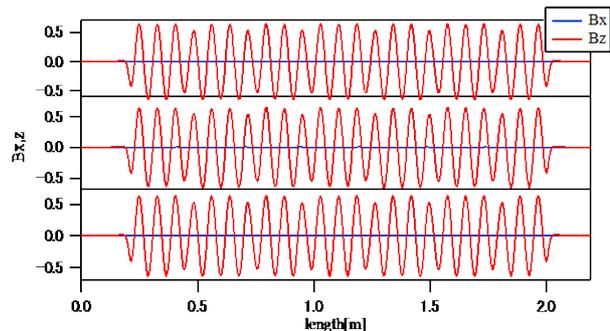


Figure 4: Magnetic distribution of horizontal polarization mode.

水平偏光モード時は、(A), (B), (C)のどの磁石配列でも水平磁場  $B_x$  が発生することなく、準周期性を示すことができた。

#### ii. 楕円偏光モード

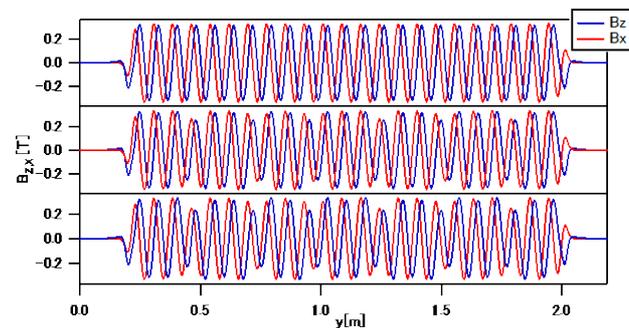


Figure 5: Magnetic distribution of circular polarization mode.

楕円偏光モード時も、どの磁石配列についても同じような磁場分布を示した。

iii. 垂直偏光モード

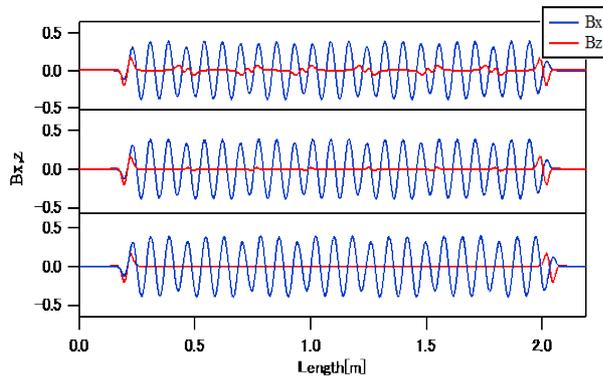


Figure 6: Magnetic distribution of vertical polarization mode.

(A)と比較すると、(B), (C)の磁場分布は垂直磁場  $B_z$  の成分が弱くなった。アンジュレータで準周期性を構成するには、光と電子の位相差(移動距離)を調節する必要がある。この準周期性を実現するために、特定位置で磁場を弱めて位相差を作ることに加えて、その位置で電子軌道に余計なずれが生じないように水平成分の磁場が生じないようにする必要がある。

### 3. 放射光スペクトルと偏光特性

2 節で記載した磁場分布からそれぞれの偏光モードの放射光スペクトルと偏光特性を記載する。また、算出のための計算コードは SPECTRA9.0<sup>[6]</sup>を用いた。

Figure 7, Figure 8, Figure 9 の上部に各偏光モードの放射光スペクトルを記す。横軸に基本波で規格化したエネルギーを、縦軸に放射される光のフラックス密度を示す。

偏光特性は強度関数である Stokes Parameter<sup>[7]</sup>を用いて表現できる。

全体の強度関数  $S_0$  は

$$S_0 = I_H + I_V = I_{cw} + I_{ccw}$$

と定義される。

各偏光状態での強度関数  $S_1, S_2$  は以下の式で定義される。

$$S_1 = I_H - I_V$$

$$S_2 = I_{cw} - I_{ccw}$$

偏光特性  $P_L, P_C$  は、強度の割合を比較することで求めることができる。

$$P_L = \frac{S_1}{S_0} \quad P_C = \frac{S_2}{S_0}$$

放射光スペクトルと同様に横軸に規格化したエネルギーを、縦軸に偏光特性を示す。

この計算に用いたビームのパラメータを Table 2 に示す。

Table 2: Parameters of Beam at HiSOR

名称	値
蓄積電子のエネルギー[MeV]	700
電流[mA]	300
周長[m]	21.95
直線部の $\beta_x$ [m]	2.0
直線部の $\beta_y$ [m]	1.2
エネルギー幅	0.00096
ハーモニック数	14
エミッタンス[mm mrad]	0.4

#### 3-1 各偏光モードの放射光スペクトルと偏光特性

Figure 7, Figure 8, Figure 9 に Figure 1, Figure 2, Figure 3 の磁石配列を採用した場合の水平偏光モード、楕円偏光モード、垂直偏光モードの放射光スペクトルと偏光特性をそれぞれ上から順に示す。各偏光モードのスペクトルにおいて(A)が青、(B)が赤、(C)が緑とする。

##### i. 水平偏光モード

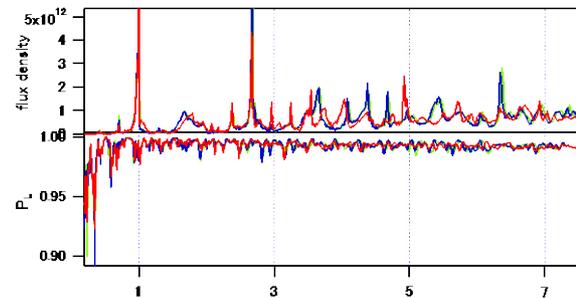


Figure 7: Radiation spectra and characteristics of horizontal polarization mode.

(B)のコイルを用いた準周期アンジュレータモデルの放射光スペクトルは整数倍の位置からシフトした。コイルを用いたモデル(B)では、5 次に相当する整数倍のエネルギー位置付近にピークが出現した。また、基本波のエネルギー位置の偏光特性は、すべてのモデルで、 $P_L=0.99$  以上を出したので水平偏光しているといえる。

ii. 楕円偏光モード

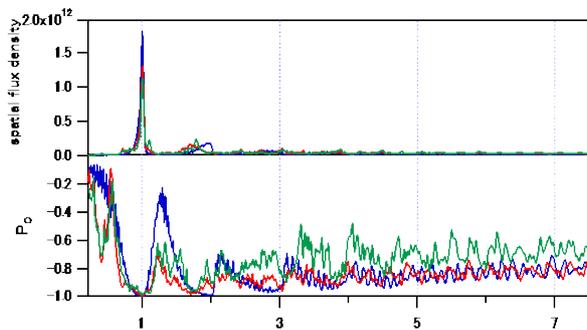


Figure 8: Radiation spectra and characteristics of circular polarization mode.

楕円偏光モードでは、ほとんど高次光のピークが現れないので、準周期化の効果を顕著には確認することはできなかったが、高次光フラックス強度は十分に下がっているため、準周期化しても問題はないといえる。偏光特性も基本波のエネルギー位置で  $P_c = -0.99$  を出しているため、どのモデルのアンジュレータも左回りの円偏光をしている。

iii. 垂直偏光モード

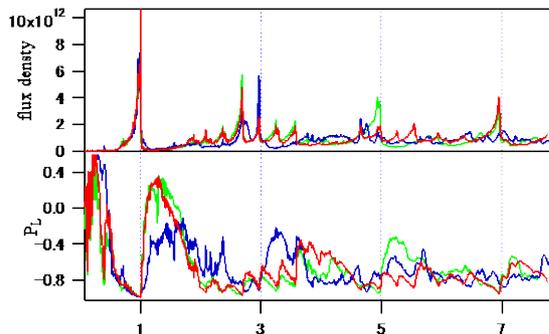


Figure 9: Magnetic spectra and characteristic of vertical polarization mode.

各磁石列のモデルにおいて、基本波のエネルギー位置での偏光特性は、 $P_v = -0.99$  以上となったため垂直偏光をしているといえる。また、スペクトルにおいても高調波が、基本波の整数倍のエネルギー位置から、低いほうに出現した。(A)の磁石配列での3次光のフラックス強度を基準にして、3次に相当するエネルギー位置での(B)、(C)の flux はともに30%程度まで減少した。

4. まとめ

本論文では、3種類の準周期 APPLE-II アンジュレータについて各偏光モードでの放射スペクトルと偏光特性を比較した。また、3種類のアンジュレータともに、基本波での偏光特性が著しく落ちることはなかったため、純粋に放射スペクトルのみを比較することができた。磁石にコイルを巻いて電磁石化する(B)のモデルは、コイルに流れる電流値が非現実的に高いため、コイルの熱によって磁場強度が変わ

らないように空冷や水冷を工夫する必要がある。一方、コイルを使うことなく準周期化したモデル(C)では、基本波のエネルギー位置で偏光特性が落ちることもなく、高調波も整数倍のエネルギー位置から低い位置になったものが観測された。

参考文献

- [1] S. Hashimoto and S. Sasaki, Nucl. Instrum. Methods **A 361** 611 (1995).
- [2] S. Sasaki, Proceedings of IPAC09, Vancouver, BC, Canada.
- [3] S. Sasaki, Proceedings of the 7th Annual Meeting of PASJ (August, 2010, Himeji).
- [4] S. Sasaki, Proceedings of the 6th Annual Meeting of PASJ (August, 2009, Ibaraki).
- [5] O. Chubar, P.Elleaume, J. Chavanne, J. Synch. Radiat. **5**, 481(1998).
- [6] T. Tanaka and H. Kitamura, J. Synch. Radiat. **9** 1221(2001).
- [7] R. P. Walker, Proceeding of the 1997 CERN Accelerator School, CERN Report No. 98-04, p.129.