

APPLE-II TYPE QUASI-PERIODIC VARIABLY POLARIZING UNDULATOR AT HISOR

Shigemi Sasaki^{#,1}, Atsushi Miyamoto¹, Kimimori Goto¹, Takafumi Mitsuyasu²

¹Hiroshima Synchrotron Radiation Center, Hiroshima University

²Department of Physical Science, Graduate School of Science, Hiroshima University

2-313 Kagamiyama, Higashi Hiroshima, 739-0046

Abstract

A 1.8-m-long 78-mm-period quasi-periodic APPLE-II undulator was installed in the 700-MeV HiSOR storage ring of Hiroshima Synchrotron Radiation Center. At the nominal minimum gap, achievable lowest photon energies are 3.1 eV, 6.5 eV, and 4.8 eV for horizontal linear, vertical linear, and circular polarization, respectively. Observed photon energies of fundamental and higher harmonic radiations are in good agreement with those of model calculations using measured magnetic field of undulator and the HiSOR beam parameters. Also, observed flux through a slit and a grating monochromator was more than twice larger than that from previously installed 100-mm-period helical undulator for the whole range of radiation spectra. The feedforward COD correction was done to avoid the intensity fluctuation of photon beam in other beamlines due to the gap and phase motion of undulator. No fatal effect on the stored electron beam by installing the undulator was observed though a slight beam size change was observed at the minimum gap.

HiSOR 準周期 APPLE-II 型可変偏光アンジュレーター

1. はじめに

広島大学放射光科学研究センターでは昨年の夏期シャットダウン中にそれまで挿入されていた磁場周期長 100 mm のマルチモードアンジュレーターに替えて、図 1 に示した APPLE-II 型準周期可変偏光アンジュレーターを挿入した[1]。

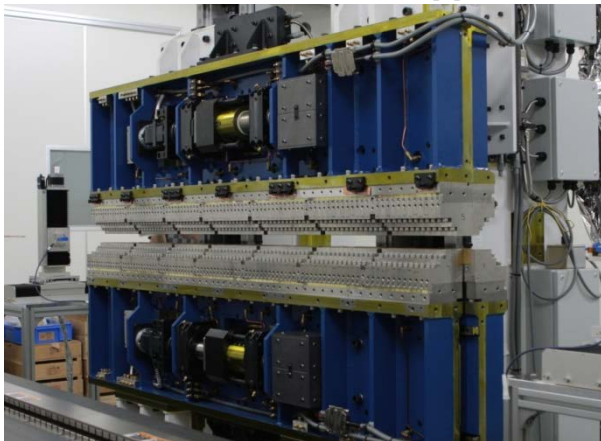


図 1. 磁場測定中の HiSOR 準周期 APPLE-II

APPLE 型準周期アンジュレーターは 1998 年に ELETTRA に挿入されたのを最初として、ALS と SOLEIL で放射光利用研究に供されており、本邦での導入は HiSOR が初めてである。このアンジュレーターは磁場周期長 78 mm、周期数 23、全長約 1.8 m であり、最小ギャップ (23 mm) 時に水平偏光モードで 3.1 eV、垂直偏光モードで 6.5 eV、円偏光モードで 4.8 eV の光子エネルギーの 1 次光を発生する。準周期化は、各磁石列で 6 個の水平方向に磁化した磁石の位置を変えることで実現した。

準周期化は次節に記した理論に従って、二つのパラメータの値として、 $r=1.5$ 、 $\tan\alpha=\sqrt{15}$ を採用した。この値は、ELETTRA のそれと同じであるが、ELETTRA では準周期位置にある水平磁化した磁石を抜くことにより準周期構造を作っており準周期位置での磁場強度が必要以上に小さくなっていたため、本アンジュレーターではビーム軸方向に磁化した磁石ブロックをビーム軸から 12 mm 遠ざけることにより理想に近い磁場分布を得た[2-6]。

2. 準周期磁石配列の作り方

1 次元準周期構造を作る簡便な方法は、図 2 に示すように、長方格子などの 2 次元の周期的構造 (2 次元格子) の内、一定の幅を持つバンド内にある格子点を格子の軸に対し無理数の傾き ($\tan\alpha$ が無理数) を持つ直線に投影することである。

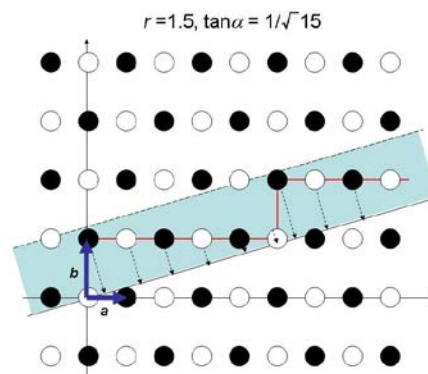


図 2. 2次元長方格子から1次元準周期を作る方法：○が正のキックを与える格子点、●が負のキックを与える格子点で、それぞれが磁石のN極とS極に相当する。

このような1次元の格子点の座標は、簡単な幾何学的考察により以下の式で与えられることが分かる：

$$\hat{z}_m = m + (r \tan \alpha - 1) \left\lfloor \frac{\tan \alpha}{r + \tan \alpha} m + 1 \right\rfloor$$

ここで、 m は整数、 r は長方形格子の縦横の格子定数の比である。また、括弧 $\lfloor x \rfloor$ は x より小さい最大の整数を表す括弧（ガウス括弧）である。

上記格子点の座標は、準周期アンジュレーターの開始点（原点）から半周期ステップで数えた電子の進みに対する光の位相の進み ϕ_m に比例し、

$$\phi_m = \pi \left\lfloor m + (r \tan \alpha - 1) \frac{\tan \alpha}{r + \tan \alpha} m + 1 \right\rfloor$$

という関係があり、半周期毎の位相の進みは次の式で与えられる：

$$\Delta\phi = \phi_{m+1} - \phi_m$$

つまり、整数 m の値によって、周期的アンジュレーターの半周期での位相進みは $\Delta\phi_p = \pi$ 、準周期的な半周期では、 $\Delta\phi_q = \pi r \tan \alpha$ となる。

一般に、位相の進みは磁場分布から計算できる値を用いて以下のように表される[7]：

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{photon}}} \left(\frac{z}{2\gamma^2} + \int \frac{x^2 dz}{2} \right)$$

ここで、 λ_{photon} は放射される光の波長であり x' はアンジュレーター中での電子軌道のビーム軸に対する角度である。

準周期アンジュレーター中でも1周期毎の磁場形状が正弦波的であり、準周期位置では磁場の振幅のみが異なっていると仮定すると、簡単な計算により準周期位置と周期的位置での位相差の比は次の式で表される：

$$\Delta\phi_q / \Delta\phi_p = r \tan \alpha \cong \left(\frac{2B_{0q}^2 - B_{0p}^2}{B_{0p}^2} \right)$$

この式から分かるように、1次元準周期構造を決めるパラメータ r と $\tan\alpha$ を代入することにより一意的に準周期の場所のピーク磁場と周期的場所のピーク磁場の比 (B_{0q}/B_{0p}) が決まる。

準周期アンジュレーターの実機製作に当たっては、1次元準周期格子点の間隔が狭い場所について、その両サイドの格子点位置でのピーク磁場が、広い格子点間隔の場所のピーク磁場より小さくなるように磁石位置を電子ビーム軸から遠ざけて配置する。

3. HiSOR 準周期 APPLE-II の磁場

図3に、ギャップ 25 mm のときの、水平直線偏光モード、円偏光モード、垂直直線偏光モードでの実測磁場分布を示す。

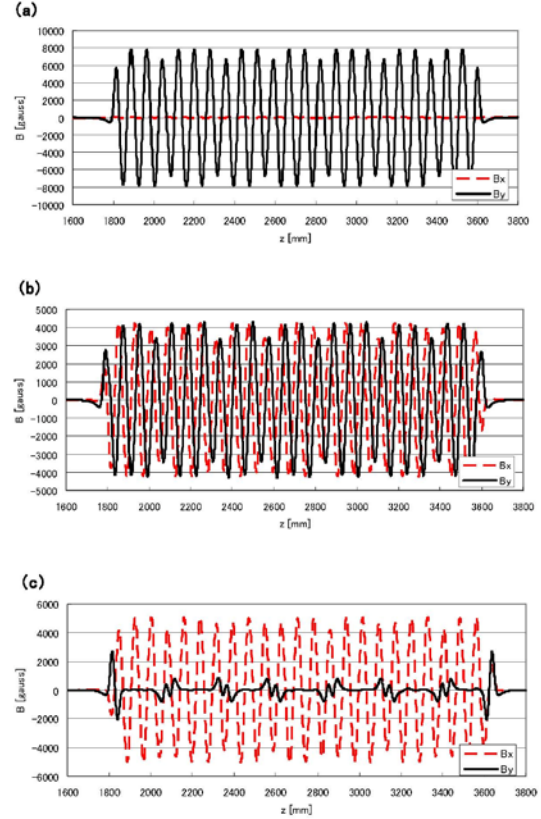


図3：ギャップ 25 mm 時の磁場分布実測値；(a) 水平偏光モード、(b) 円偏光モード、(c) 垂直偏光モード。

上図に示した実測データは、3次元磁場計算コード RADIA[8]を用いたモデル計算と非常に良い一致を示している。

理想的には、準周期アンジュレーターの磁場は周期的アンジュレーター中の準周期化理論によって決まるある特定の数個所の各1周期についてのみ異なったピーク磁場を導入することにより得られる。この、理想に近い磁場分布は、図3(a)に示した水平偏光モードで得られている。しかしながら、図3(c)に見られるように、垂直偏光モードでは準周期位置近傍のほぼ1周期半に渡って、水平磁場、垂直磁場ともに磁場が乱れている。この不必要な磁場変調が次節に示す放射光スペクトルに影響を与えている。

4. HiSOR 準周期 APPLE-II からのスペクトル

図4に実測磁場データと HiSOR リングのパラメータを用いて SPECTRA[9]で計算した各偏光モードでのスペクトルを載せる。この図から、円直線偏光モード(a)と水平偏光モード(b)では基本波の整数倍の光子エネルギー位置の高次光強度がよく抑制されていることが分かるが、垂直直線偏光モード(c)では、3倍の高調波が残っている。これは垂直直線偏光モードでは隣り合う磁石列の磁石位相が半周期ずれるため、準周期位置でビーム軸

から遠ざけた磁石ブロックが本来必要な位置からずれて準周期性に乱れが生じるためである。

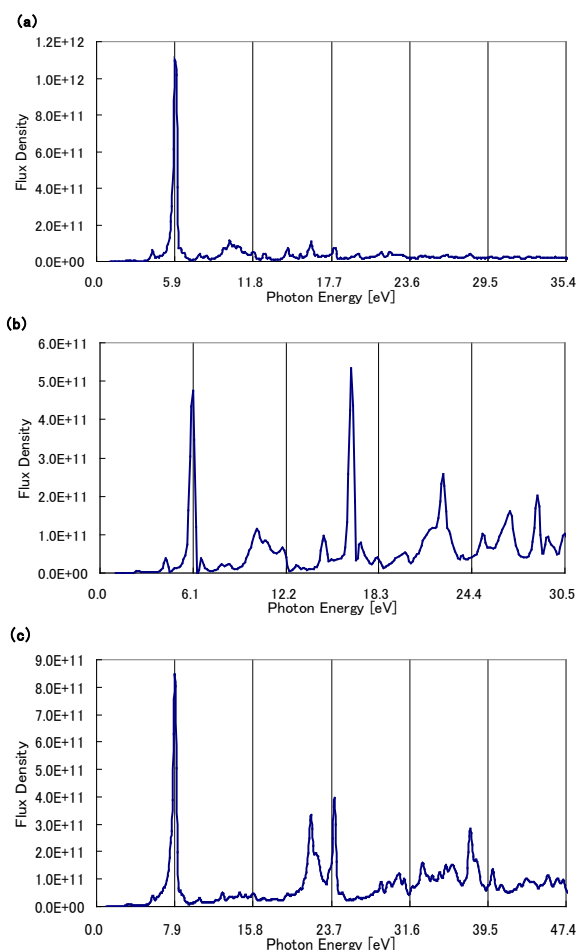


図4：SPECTRAで計算したフラックス密度スペクトル、(a)ギャップ 25 mm, 円偏光モード, (b)ギャップ 32 mm, 水平偏光モード, (c)ギャップ 25 mm, 垂直偏光モード。

図5には、HiSOR 準周期アンジュレーターからの光を利用するビームライン BL-9A エンドステーションで測定されたスペクトルを示す。

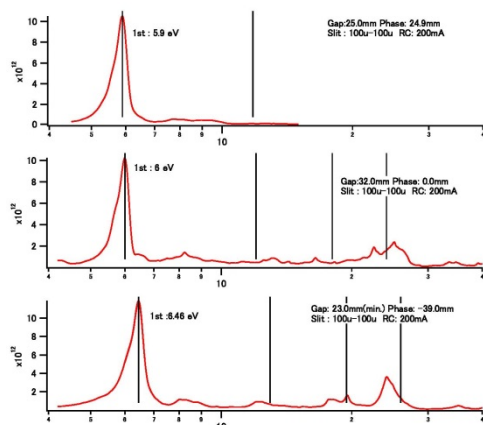


図5：QP-APPLE-IIからの実測放射スペクトル、(上) 円偏光, (中) 水平偏光, (下) 垂直偏光 (有田将司氏提供)。

この図中、上から順にギャップ 25 mm 時の円偏光モードでのスペクトル、ギャップ 32 mm 時の水平偏光モードでのスペクトル、ギャップ 23 mm 時の垂直偏光モードでのスペクトルのグラフとなっている。図中の縦線は、基本波ピークの2倍、3倍、4倍の光子エネルギーの位置を示し、周期的アンジュレーターからのスペクトルでは整数次の高次光が出る場所であることから、準周期化が有効に機能していることが分かる。

5. まとめ

広島大学放射光科学研究センターでは、2011年夏に準周期可変偏光アンジュレーターを導入した。このアンジュレーターでは、架台が乗っているベースプレートにレールが敷いてあり、真空チャンバーを取り外すことなく蓄積リングの外側に引き抜くことが出来る。このような構造を採用することにより、ユーザー運転を行わない週末などの短期シャットダウン中にアンジュレーターを引き抜き、準周期化した部分の磁石をホルダーごと取り外し通常の磁石に差し替え、従来型の周期的APPLE-II アンジュレーターにすることが可能である。このような構造にした理由は、3次や5次の高次光を利用するユーザーがいる可能性を想定したためである。さらに、異なった準周期の導入も比較的簡単に行えるという利点もある。

参考文献

- [1] S. Sasaki, A. Miyamoto, K. Goto, M. Arita, T. Okuda, The 3rd Int'l Particle Accelerator Conference IPAC12, May, 2012, New Orleans.
- [2] 米沢富美子, "準結晶," 物理学最前線 19, pp135-197 (大槻義彦編、共立出版 1988)
- [3] Shinya Hashimoto and Shigemi Sasaki, "Concept of a new undulator that will suppress the rational harmonics," Nucl. Instrum. and Methods A **361**, 611-622, (1995).
- [4] S. Sasaki, B. Diviacco, R. P. Walker, Proc. of EPAC98, p.2237.
- [5] S. Sasaki, "Exotic insertion devices," in "Undulators, wigglers and their applications," eds. H. Onuki and P. Elleaume, Taylor & Francis, 2003, pp. 237.
- [6] S. Sasaki, A. Miyamoto, K. Goto, Review article in J. of PASJ, **9**, No.2 pp.3-9, (2012).
- [7] R. P. Walker, Nucl. Instr. Methods, A **335**, 328 (1993).
- [8] O. Chubar, P. Elleaume, J. Chavanne, J. Synchrotron Radiat. **5**, 481 (1998).
- [9] T. Tanaka and H. Kitamura, J. Synchrotron Radiat. **8**, 1221 (2001).