

Correction of dynamic multipoles for APPLE-II undulator with flat wires

Y.Kikuchi^{#,A)}, M.Hosaka^{A)}, Y.Takashima^{A)}, N.Yamamoto^{A)},
M.Adachi^{B)}, H.Zen^{B)}, M.Katoh^{B)},

^{A)} Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603 Japan

^{B)} UVSOR Facility, Institute for Molecular Science, Myodaiji-cho, Okazaki, 444-8585, Japan

Abstract

APPLE-II undulator can produce quasi-monochromatic light of different polarization though it is a relatively simple magnetic circuit. Therefore, it has been installed in many synchrotron radiation facilities and will be installed in Central Japan Synchrotron Radiation Research Facility under construction in Aichi prefecture. APPLE-II undulator also has been installed in UVSOR facility. When the undulator is operated in vertical polarization mode with narrower gap of 40 mm, the lifetime of electron beam through the storage ring significantly decreases. The reason is considered as dynamic multipole kicks in the undulator, which strongly depends on the undulator gap. Multi-wires, which are installed in the upper surface and the under surface of undulator beam duct, are candidate to compensate the multipole effects, because the multi-wires can generate arbitrary magnetic fields. This paper reports the result of numerical investigation on multipoles in the undulator by a three-dimensional magnetostatics computer code RADIA, the orbital calculation based on the numerical analysis and the preliminary experiment with flat wires.

マルチワイヤーによる APPLE-II 型アンジュレータの dynamic multipole 補正

1. はじめに

APPLE-II 型アンジュレータは比較的単純な磁気回路でありながら様々な偏光の準単色光を生成できることから多くの放射光施設で導入されている。現在愛知県下で建設が進みつつある中部シンクロトロン光施設（仮称）での導入が予定されている。

分子科学研究所 極端紫外光施設（UVSOR）の蓄積リングにも APPLE-II 型アンジュレータ（、U7）が導入されている。そのアンジュレータを縦偏光モードで運転した場合、図 1 のようにアンジュレータギャップが 40mm 以下になると蓄積リングの電子ビーム寿命が大幅に減少することが確認されている。これはアンジュレータ中を蛇行しながら進む電子が感じる多極磁場によって電子の運動が不安定になることが理由である可能性がある。そのため、アンジュレータ中の多極磁場を補正する必要がある。

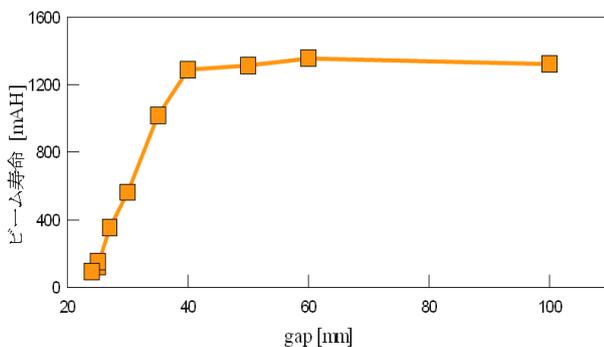


図 1 : ギャップ変化による電子ビーム寿命減少

2. RADIA による磁場解析

2.1 UVSOR U7 のモデル作成

アンジュレータ中の多極磁場を補正するためには、実際のアンジュレータ中に生じている磁場がどのように分布しているかを調べる必要がある。そのため、3次元計算コード RADIA^[2]を用いて、アンジュレータ中の磁場状態を計算した。表 1 に今回評価した UVSOR U7 のパラメータを示す。また、そのパラメータに基づき、RADIA 上に作成したモデルを図 2 に示す。

表 1 : UVSOR U7 の主な仕様

磁石素材	NdFeB
磁石寸法	幅 42 × 高さ 37 × 厚さ 19 mm
端部寸法	(横磁化) 幅 42 × 高さ 37 × 厚さ 12 mm (縦磁化) 幅 42 × 高さ 37 × 厚さ 9.5 mm
周期長	76 mm
周期数	38
全長	2945 mm

[#] kikuchi.yoshitaka@e.mbox.nagoya-u.ac.jp

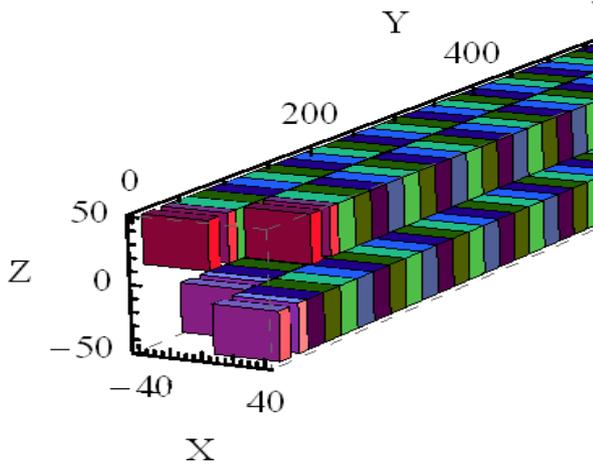


図2 : UVSOR U7 のモデル図

2.2 磁場解析結果

2.1 で作成したモデルを用いて RADIA で磁場計算を行った。その結果の例が図3 (a)、(b) であり、X 軸が水平方向、Y 軸がビーム進行方向、Z 軸が垂直方向となっている。これらの計算結果を見ると、(a) では Y 軸方向へは縦偏光モードの特徴である周期的な水平方向磁場 B_x が発生していることが確認できる。また (b) では、磁場 B_x が X 軸方向の位置によっても変化していることや $x = \pm$ 約 20 mm の位置では Y 方向へ移動しても磁場がほぼ 0 のまま言一定であること等がわかる。

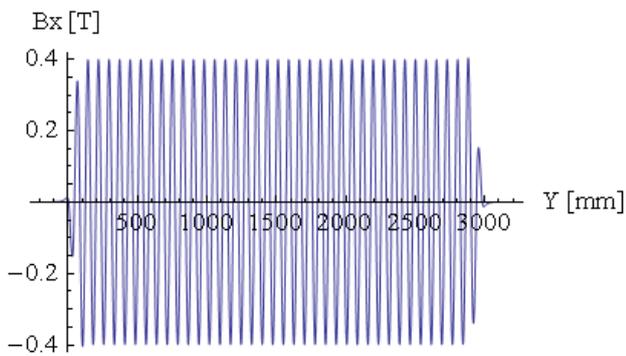


図3 (a) : 水平磁場 B_x の Y 軸方向への周期的変化 (縦偏光モード、gap = 24mm、 $x = z = 0$)

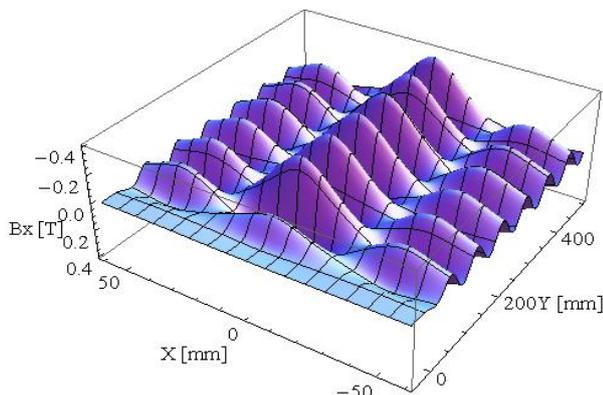


図3 (b) : 水平磁場 B_x の X-Y 平面での磁場分布 (縦偏光モード、gap = 24mm、 $z = 0$)

3. RADIA による電子ビーム軌道計算

3.1 計算方法

RADIA による磁場計算により得た磁場を用いて U7 中を運動する電子ビームの軌道を計算した。計算に用いた式を以下に示す。

$$\begin{aligned} d\vec{\beta} &= \frac{\vec{\beta} \times \vec{B}}{[B\rho]} ds \\ d\vec{r} &= \vec{\beta} \cdot ds \\ \vec{\beta} &= \vec{\beta} + d\vec{\beta} \\ \vec{r} &= \vec{r} + d\vec{r} \end{aligned}$$

ここで、 $\beta = v/c$ 、 B が磁場 [T]、 s が Y 軸方向への移動量、 $[B\rho]$ が Magnetic Rigidity [T m]、 r が位置をあらわしている。

3.2 軌道計算結果

上式を用いて電子ビーム軌道を計算した結果の一例を図4に示す。この結果は縦偏光モードにおいて電子ビームが Y 軸方向へ進行する際、電子ビームの Z 軸 (垂直) 方向への運動をグラフに表したものである。この結果を見ると、電子ビームは Z 軸方向に蛇行運動すること、アンジュレータから出るところには電子ビームが Z 軸方向で負方向に若干移動していること、アンジュレータギャップが狭くなるほどビームの振幅が大きくなることが表されている。

また、図5はビームがアンジュレータに入射されるとき X 軸 (水平) 方向の位置 x [mm] とアンジュレータ通過後のビームのキック角 x' [mrad] をグラフに表したものである。これを見ると、 $x = 0$ 付近での磁場成分は 4 極磁場のものだが、 $x = 6$ mm 付近になると多極磁場成分が表れていることがわかる。

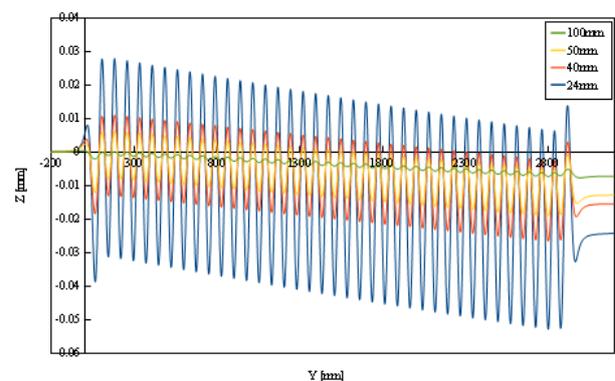


図4 : 縦偏光モードでの電子ビーム軌道計算結果

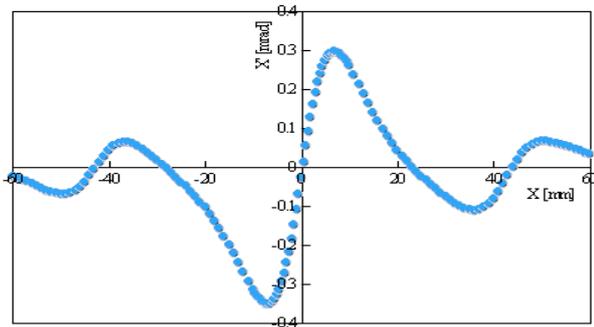


図5：縦偏光モードでの入射位置 x [mm]とアンジュレータ通過後のキック角 x [mrad]の関係 (gap = 24mm)

3.3 実験結果との比較

図5の曲線の傾きを Δk として、以下の式に代入するとチューンシフト Δv を求めることができる。

$$\Delta v = \frac{\langle \beta \rangle}{4\pi} \Delta k$$

ここで、 $\langle \beta \rangle$ はアンジュレータ中の β 関数の平均値で、アンジュレータ中心の β 関数 $\beta^*_{\text{hori}} = 10.03$ 、 $\beta^*_{\text{ver}} = 1.51$ から算出した。この式を使って縦偏光モードにおける各ギャップでの $x = 0$ での水平方向チューンシフト Δv_{hori} と垂直方向チューンシフト Δv_{ver} を算出し、実際に測定した U7 のチューンシフトと比較した。その結果を図6 (a)、(b) に示す。この結果を見ると Δv_{hori} 、 Δv_{ver} どちらも計算値が測定値とよく一致していることがわかる。

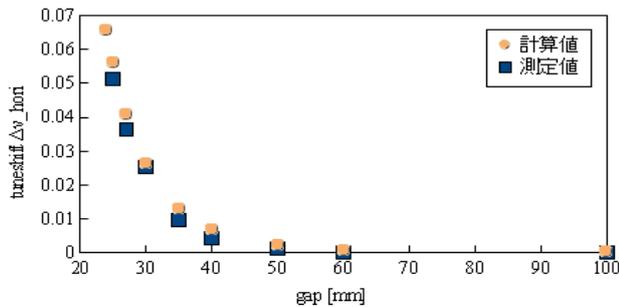


図6 (a)：各ギャップでの Δv_{hori} の計算値と測定値の比較 (縦偏光モード)

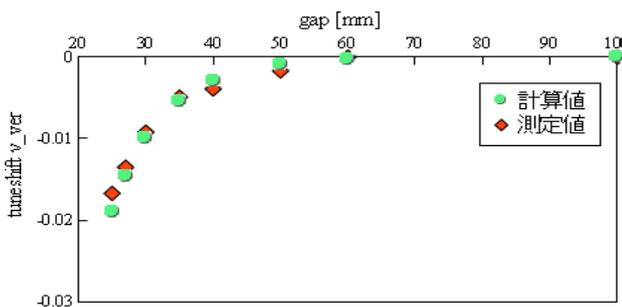


図6 (b)：各ギャップでの Δv_{ver} の計算値と測定値の比較 (縦偏光モード)

4. フラットワイヤーを用いた予備実験

UVSOR 7U の多極磁場の補正には、アンジュレータ内ビームダクトの上面と下面に複数本の銅のフラットワイヤーを設置し、それに電流を印可し任意の位置分布を持つ磁場を発生させるという方法^[3]の導入を予定している。その方法では電流を印可したフラットワイヤーには熱が生じ、アンジュレータの永久磁石が温められる。そのため、通電時のフラットワイヤーの温度上昇を調査した。今回は図7に示す様に $3 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$ のフラットワイヤー14本を用いてマルチワイヤーを試作し、ワイヤーを直列になぎ 10A の電流を流した際の温度上昇を確認した。その結果を図8に示す。図8より、マルチワイヤーの中央部が最も温度上昇が大きく、約 20°C 上昇していることがわかる。ワイヤーと永久磁石が最も接近するアンジュレータギャップが 24mm の時、磁石も同程度温められるとすると、UVSOR U7 に使用されている永久磁石「NEOMAX - 44H」の磁石特性は $-0.11\%/K$ 低下するので、約 2% 残留磁束密度が低下する^[4]。この磁石の温度上昇による残留磁束密度の低下によってアンジュレータの性能が変化してしまうならば、それを防ぐための対策を今後検討する。



図7：マルチワイヤー設置図

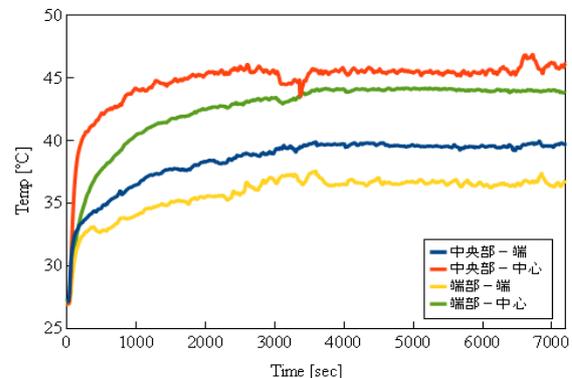


図8：電流を 10A 直流で流した時のマルチワイヤーの温度上昇

5. 補正に必要な電流値の検討

数値計算により予測される U7 中の多極磁場の補正に必要な励磁電流を 2 次元計算コード POISSON^[5] を用いて検討した。

まず、U7 縦偏光モードの多極磁場成分を補正する際に必要な磁束密度を計算する。長さ l 、磁束密度 ΔB の磁束領域を Magnetic Rigidity [Bp] の電子ビームが走行する際に与えられる偏向角は次式で与えられる。

$$x' = \frac{\Delta B l}{[B\rho]}$$

図 5 において多極磁場成分が表れている部分で、最大の x' は約 0.3 mrad であり、 l はアンジュレータ U7 の全長で 2.945 m、また UVSOR では [Bp] = 2.5 T m である。これらの値を代入し、 ΔB を求めると約 2.5 Gauss となった。よって U7 の多極磁場を補正するためにはフラットワイヤーによって 2.5 Gauss 以上の磁束密度をもった磁場を発生させる必要があることがわかる。

次に、POISSON を用いてどの程度フラットワイヤーに電流を流せば 2.5 Gauss の磁場が発生するか確認した。その結果が下の図 9 (a)、(b) である。この結果では、フラットワイヤーによって発生している磁場が、補正すべき多極磁場成分と似た磁場分布であり最大約 2.5 Gauss の磁束密度を持っていることが確認できる。しかし、このような磁場を発生させるにはフラットワイヤーに 30 A もの電流を流さなければならず、発生熱等の問題により今回報告している補正法をそのまま U7 に導入するのは難しい。そこで、フラットワイヤーの断面積を大きくすることで発生熱を抑えることや、他の補正方法などと組み合わせることで電流値を小さくする等の対策を今後検討する必要がある。

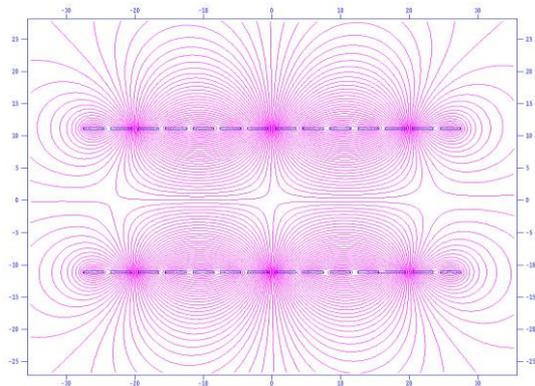


図 9 (a) : POISSON による磁場シミュレーション

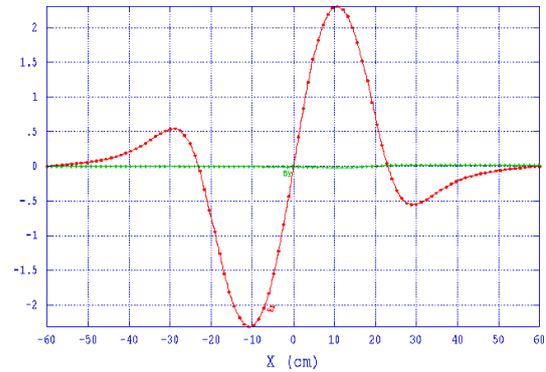


図 9 (b) : (a) で発生する磁束密度 (赤線 : 水平磁場、緑線 : 垂直磁場)

6. まとめ

UVSOR U7 の縦偏光モードにおける多極磁場成分の補正のため、磁場解析、電子ビーム軌道計算、フラットワイヤーの温度上昇測定、必要電流値の検討を行った。磁場解析では、U7 中の磁場がどのように分布しているか計算することが出来、電子ビーム軌道計算においては、U7 中の補正すべき多極磁場成分を確認することが出来た。また軌道計算の結果よりチューンシフトの値を算出し、UVSOR U7 での測定値と比較したところ、よく一致した。また必要電流値を検討する際に、フラットワイヤーによる複雑な補正磁場の発生が確認でき、マルチワイヤー方式による多極磁場成分の補正の見通しを得た。

ただし、複雑な磁場を発生させるためには大きな電流値を必要とし、ワイヤーの発生熱等の問題が生じる。そのため、今後は発生熱を抑える対策と電流値を抑える対策等を検討する予定である。その後 U7 にこの補正法を導入し、実際に多極磁場を補正することを試みる予定である。

参考文献

- [1] S.Sasaki, et al., "A New Undulator for Generating Variably Polarized Radiation", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.31 (1992) L1794-L1796
- [2] P.Elleaume, et al., "COMPUTING 3D MAGNETIC FIELDS FROM INSERTION DEVICES", Proceedings of PAC97, Vancouver, May, (1997) 3509-3511
- [3] J. Bahrtdt, et al., "ACTIVE SHIMMING OF THE DYNAMIC MULTIPOLES OF THE BESSY UE112 APPLE UNDULATOR", Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy, (2008) 2222-2224
- [4] http://www.hitachi-metals.co.jp/prod/prod03/p03_01.html
- [5] http://laacg1.lanl.gov/laacg/services/download_sf.phtml