

# COMPENSATION OF NONLINEAR EFFECT IN APPLE-II UNDULATOR BY MULTI-WIRE METHOD IN UVSOR-II

Heishun Zen <sup>\*,\*\*A,B)</sup>, Yoshitaka Kikuchi<sup>C)</sup>, Masahito Hosaka<sup>D)</sup>, Naoto Yamamoto<sup>D)</sup>, Kenji Hayashi<sup>A)</sup>, Takuhiko Kondo<sup>E)</sup>, Junichiro Yamazaki<sup>A)</sup>, Masahiro Adachi<sup>A,B)</sup>, Yoshifumi Takashima<sup>C,D)</sup>, Masahiro Katoh<sup>A,B,D,E)</sup>,

<sup>A)</sup> UVSOR facility, Institute for Molecular Science, Myodaiji-cho, Okazaki, Aichi, 444-8585

<sup>B)</sup> The Graduate School of Advanced Studies (Sokendai), Myodaiji-cho, Okazaki, Aichi, 444-8585

<sup>C)</sup> Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603

<sup>D)</sup> Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603

<sup>E)</sup> Equipment Development Center, Institute for Molecular Science, Myodaiji-cho, Okazaki, Aichi, 444-8585

## Abstract

A compensation method of nonlinear effect in an apple-II undulator, which leads to decrement of electron beam lifetime, has been introduced in UVSOR-II. The method uses several flat wires for generating arbitrary magnetic field to cancel out the nonlinear effect. For determining the excitation current of the flat wires, 3D magnetostatic computation code RADIA and singular value decomposition method were used. By using flat wires, the beam lifetime was drastically increased. However, injection efficiency from injector to storage ring got smaller.

## UVSOR-IIにおけるマルチワイヤ法による Apple-II アンジュレータの非線形効果補償

### 1. はじめに

Apple-II Undulator [1]は様々な偏光状態の準単色光を発生させることが可能な挿入光源として世界中の放射光源加速器において利用されている。Apple-II Undulator が電子ビームに与える影響はこれまでに BESSY などにおいて調査されており[2, 3]、Apple-II Undulator が電子ビームに非線形な角度変化を与える事により、ビーム寿命や入射効率の大幅な低下が引き起こされるが知られている。この様な Apple-II Undulator の与える非線形な効果を補償するために、様々な補正方法が考案されている[4, 5, 6]。

低エネルギー(750 MeV)・低エミッタンス(27 nm-rad)放射光源加速器 UVSOR においては、角度分解光電子分光を主な用途として長さ約 3 m の Apple-II Undulator (U7 と呼ぶ。仕様は表 1 に示す)が既に導入されており、数々の応用研究成果が挙げられている。一方、この Undulator がビームに与える非線形な効果により、垂直偏光モード且つ狭ギャップ時に電子ビーム寿命が顕著に低下する事、水平偏光モード且つ狭ギャップ時に入射器から蓄積リングへの入射効率が大きく低下する事が分かっている。これらの悪影響のため、ユーザ側はより低エネルギーの光を利用したいにも関わらず、垂直偏光モード時に発生可能な光エネルギーが 19.7 eV 以上に制限されている。

上記の非線形効果を補償し、ビーム寿命・入射効率を改善する為、BESSY で使用されている多数のフラットワイヤ(マルチワイヤ)を用いた非線形効果

補正方法[6]の検討・導入を昨年度より開始した[7]。昨年度の年会では、静磁場計算ソフト RADIA を用いた計算結果と U7 で実際に生じるチューンシフトを比較し、計算の妥当性を確認すると共に、非線形磁場を補償するために必要なマルチワイヤ励磁電流の概算結果について報告した。また、マルチワイヤ励磁時の温度上昇についても報告した。本論文では、実機の製作と実証試験結果について報告する。

表 1 : UVSOR Apple-II Undulator (U7)の主な仕様

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

### 2. マルチワイヤ法

図 1 にマルチワイヤと Undulator 真空ダクト、Undulator との関係を示す。図の様に、マルチワイヤは Undulator 真空ダクトに設置され、それぞれのワイヤに異なる電流を流す事により、真空ダクト内に多様な磁場分布を発生させる事が可能である。Apple-II Undulator 中で電子ビームが受ける非線形な角度変化を打ち消す様にマルチワイヤにより非線形磁場を発生させることにより、Apple-II Undulator が

\* zen@ims.ac.jp

\*\* Present address : Institute of Advanced Energy, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011

与える非線形な効果を補償する事ができる。デメリットはマルチワイヤを Undulator と真空ダクト間に設置する事により、機械的制約の為、Undulator ギャップの最小値が大きくなる事である。UVSOR においては、真空ダクト高さ 22 mm、フラットワイヤの高さは 0.3 mm、幅は 3 mm であり、ワイヤとワイヤの間には 1 mm の隙間が設けてある。また、フラットワイヤは絶縁の為、厚さ 0.1 mm のカプトンシートに挟まれている。これにより、機械的な制約により決定される最小ギャップが 23 mm となる。また、フラットワイヤは上下とも 14 本、合計 28 本設置され、これにより、水平方向 ± 30 mm 幅の領域に渡り、非線形効果を補正する事が可能となる。本研究では、マルチワイヤ励磁用電源の台数を減らす為、Skew 成分は無視し、Dipole 成分は Undulator 上・下流に配置したステアリングマグネットを用いて補正する事として、図 2 に示すような結線を行う事とした。図 2 において、赤線で繋がれた同じ番号のワイヤには同じ大きさ、方向の電流が流される。

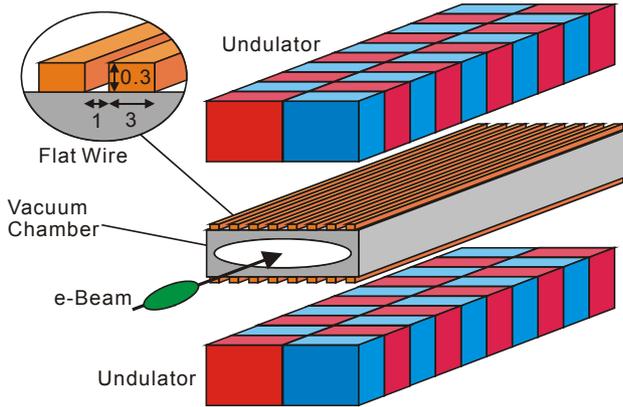


図 1: マルチワイヤ設置概略図

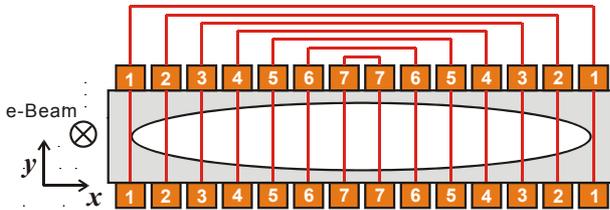


図 2: マルチワイヤ結線概略図。赤線で繋いだ同じ番号のワイヤには同じ大きさ・方向の電流を流す。

### 3. 固有値分解による励磁電流決定

昨年度、報告した様に、RADIA を用いて U7 の磁場分布を計算すると共に、U7 全体で与えられる電子ビームの角度変化を粒子軌道計算により計算した [7]。最も非線形性が大きい垂直偏光モード、Undulator ギャップ 24 mm 時の結果を図 3 に示す。この偏向角  $x'$  を打ち消す為に必要な磁場は

$$B_y(x) = -x'(x) \frac{[B\rho]}{l}$$

で与えられる。ここで、 $[B\rho]$  は Magnetic Rigidity、 $l$  は磁場の存在する長さであり、UVSOR U7 の場合はそれぞれ 2.5 T·m、3 m である。図 3 から求められる補正に必要なある点 ( $i$ ) の磁場強度を  $B_y [i]$  とすると、 $j$  番目のフラットワイヤに流す電流を  $I [j]$ 、 $j$  番目のフラットワイヤ四本に 1 A 流した際に位置  $i$  に誘起される磁場強度  $b_y[i, j]$  より、

$$B_y[i] = \sum_{j=1}^7 b_y[i, j] I [j]$$

$$\mathbf{B}_y = \mathbf{b}_y \cdot \mathbf{I}$$

と行列計算により与えられる。この式において、 $\mathbf{B}_y$  は Undulator の状態を与えると一意に与えられ、また、 $\mathbf{b}_y$  はマルチワイヤの設置位置を決めると一意に与えられる。本研究では、上式の  $\mathbf{I}$  を固有値分解法により解く事で、補正に必要なマルチワイヤ電流を求めた。なお、実際には -30 ~ 30 mm の間を 60 等分して  $\mathbf{B}_y$  および  $\mathbf{b}_y$  を計算した。ここで、 $\mathbf{b}_y$  は静磁場計算コード RADIA を用いて求めた。

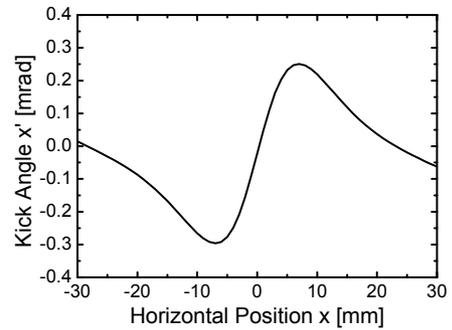


図 3: 垂直偏光モード、ギャップ 24 mm の際に 750 MeV の電子ビームが U7 中で受ける角度変化

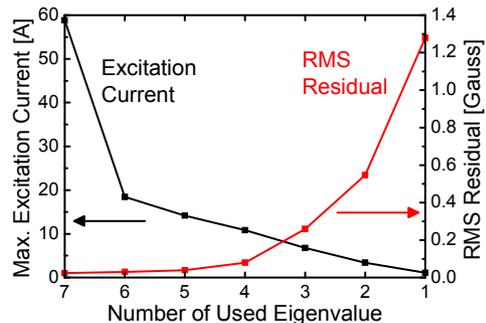


図 4: 固有値分解時に計算に含める固有値の数とマルチワイヤ最大励磁電流および理想的補正磁場との残差の関係性

図 4 に電流算出時に計算に含める固有値の数と補正に必要なマルチワイヤの最大励磁電流および理想的補正磁場との残差との関係性を示す。固有値を 4 個以上使用すれば補正残差は十分小さくなるのに対し、最大の励磁電流は固有値が 6 個まではほぼ線形

に増加していく事が分かる。この事から本研究では使用する固有値を4個とすることに決めた。図5に理想的補正磁場分布と固有値を4個として固有値分解により求めた最適励磁電流を与えて得られる補正磁場分布および補正残差を示す。図より、4個の固有値を用いる事で理想的な補正磁場と良く一致した磁場を発生可能な励磁パターンが得られていることが分かる。この時のワイヤ1~7番までの励磁電流を表2に示す。

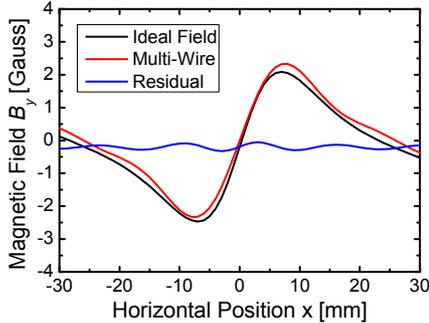


図5：理想的補正磁場分布(黒線)、4個の固有値を用いて求められた励磁電流パターンで得られる補正磁場分布(赤線)とそれらの残差

表2：ギャップ24 mm、垂直偏光時の最適励磁電流パターン

番号	1	2	3	4	5	6	7
電流	4.4	-0.7	-2.2	3.7	7.8	0.3	-10.8

#### 4. マルチワイヤの製作と設置

マルチワイヤは分子科学研究所装置開発室の支援の下に製作された。製作精度を高めるため、図6に示すアクリル製の治具を作成し、フラットワイヤを治具の溝に当てはめながらカプトンシートに接着した。また、カプトンシートには位置決め用のアルミブロックが図6の様に予め接着されており、アクリル製治具をこのブロックに押し当てる事で位置精度を向上させた。また、図7に示すアルミ製治具および位置決め用アルミブロックを用いて、Undulator磁石列に対し、マルチワイヤを設置する事で、設置精度を向上させた。

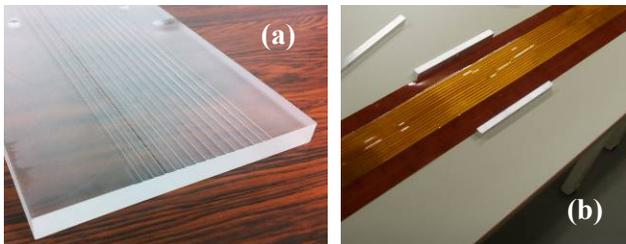


図6：(a)フラットワイヤをカプトンシートへ接着する際に用いた治具。(b)位置決め用アルミブロック

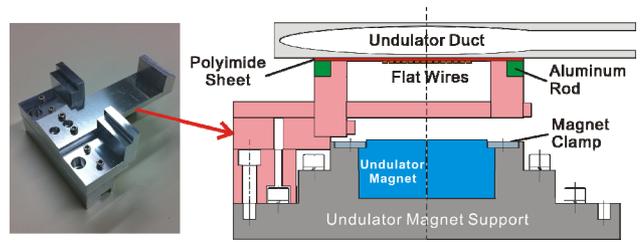


図7：マルチワイヤ設置用治具(写真)と使用方法

マルチワイヤの Undulator に対する設置誤差を確認するため、U7 Undulator の発生させる非線形性とマルチワイヤが発生させる非線形性とを蓄積リングの水平ベータatronチューンの位置依存性を計測する事で確認した。結果を図8に示す。図8より、0.5 mm 以下の設置精度でマルチワイヤを設置できている事が分かる。

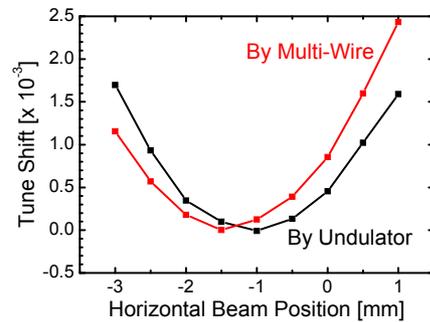


図8：Undulator ギャップを32 mmにした際のアンジュレータおよびマルチワイヤの発生させるチューンシフト。マルチワイヤの結果は符合を反転させ、y軸のゼロ点をシフトさせている。

#### 5. マルチワイヤによる寿命回復試験

図9に何も補正しなかった時(黒線)、四極成分のみ上流下流の四極電磁石で補正した時(赤線)、マルチワイヤに各ギャップで適切な電流を流した時(青線)の Undulator ギャップと電子ビーム寿命の関係性を示す。マルチワイヤを使用することで、寿命を大きく改善する事に成功した。また、四極補正を行わない方が行った場合に比べて、最もギャップが狭い条件でビーム寿命が長かった。

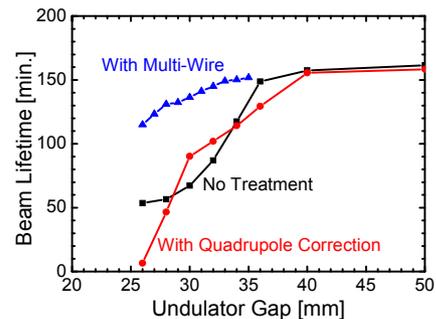


図9：Undulator ギャップとビーム寿命の関係。黒線：補正無し。赤線：四極補正のみ。青線：マルチワイヤ使用。ビーム電流は全ての計測で約300 mA。

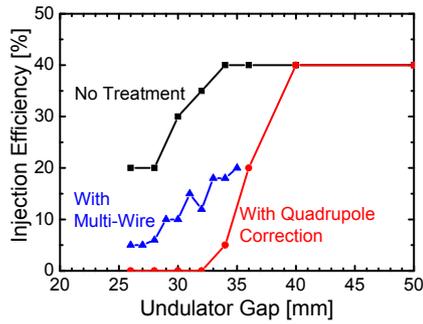


図 10: Undulator ギャップと入射効率の関係。条件は図 9 と同一。

また、図 10 に入射器から蓄積リングへの入射効率と Undulator ギャップとの関係を示す。入射効率は何も補正しない場合が最も高く、それに比べてマルチワイヤを励磁することで低下した。この原因はまだ分かっていない。今後、Turn-by-Turn BPM 等を用いて入射ビームの挙動を計測すると共に、フラットワイヤの本数を増やすなど、対策を講じる予定である。

## 6. まとめ

UVSOR に設置された Apple-II Undulator の非線形効果を補償するため、マルチワイヤ法を導入した。励磁電流パターンを決定する為、3次元磁場計算コード RADIA と固有値分解法を用いた。計算に使用する固有値の数と最大励磁電流、補正後の残差との関係より、固有値を 4 個として計算することとした。また、マルチワイヤを設計・製作し、Undulator ダクトに設置した。ビームを用いて設置精度を確認したところ、0.5 mm 以下の精度で設置できている事を確認した。実際に励磁し、寿命を回復する事に成功したが、入射効率が低下した。今後は入射効率低下の原因を Turn-by-Turn BPM などを用いて調査する予定である。

## 7. 謝辞

本研究で使用したマルチワイヤおよびその設置用治具の設計・製作は分子科学研究所装置開発室の皆様にご多大なご支援を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] S. Sasaki, Nucl. Instr. And Meth. A 347 (1994) 83.
- [2] P. Kuske, et al., Proc. of the 2001 Particle Accelerator Conference (2001) 1656.
- [3] J. Bahrtdt and G. Wüstefeld, Phys. Rev. ST-AB 14, (2011) 040703.
- [4] J. Bahrtdt et al., Proceedings of the 9th Int. Conference on Synchr. Rad. Instr., Daegu, Korea, 2006.
- [5] J. Chavanne et al., Proceedings of the EPAC 2000, Vienna, Austria, pp 2346-2348.
- [6] J. Bahrtdt et al., Proc. of EPAC08 (2008) 2222.
- [7] Y. Kikuchi et al., Proc of 7th Annual Meeting of PASJ (2010).