

## エッジフォーカスウィグラーの開発研究

三原彰仁<sup>A)</sup>、磯山悟朗<sup>A)</sup>、加藤龍好<sup>A)</sup>、柏木 茂<sup>A)</sup>、山本 樹<sup>B)</sup>、土屋公央<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup>大阪大学産業科学研究所

〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1

<sup>B)</sup>高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

### 概要

我々は SASE での使用を目的とし、集束型ウィグラーのひとつであるエッジフォーカスウィグラー (EF ウィグラー) の開発研究を行っている。今回我々は試験的に 5 周期分の EF ウィグラーを製作した。一般的にウィグラーを製作する際磁石ブロックの磁場エラーが問題となる。EF ウィグラーにおいては磁石ブロックが長方形型ではないため、この磁場エラーがさらに大きくなる可能性がある。ここで我々は新しい磁場エラーの最適化方法を考案し適用した。本稿では、今回用いた磁場エラーの最適化方法及び、それが上手く働いているかどうか確認のための測定を行ったので、その結果を示す。

### 1 はじめに

SASE (Self-Amplified Spontaneous Emission) は共振器を用いずに高い輝度のコヒーレントな放射光を発生出来るため、反射率の高いミラーが存在しない真空紫外や軟 X 線領域の高輝度光源として注目を集めている。しかしながら、短波長領域での SASE 発振には、100m を超える長尺のウィグラーが必要になる。さらにピーク電流の高い電子ビームのビームサイズを小さく保ったままウィグラー内を通過させる必要があるが、そのためには横方向の集束力が必要になる。ウィグラー内において電子ビームに集束力を与える方法としては、分離型集束方式と結合型集束方式の二つが存在する [1]-[4]。我々は結合型集束方式のひとつにあたる EF ウィグラーの研究をしている。それはウィグラーを構成する永久磁石にエッジ角を持たせることで電子ビームに集束力を与えるというものである [5]。

今回我々は、周期長 60mm、エッジ角  $2^\circ$  の EF ウィグラー 5 周期分の試作機を作成し特性測定を行った。一般的にウィグラー製作の際、それを構成する永久磁石のエラーが問題となる。そこで、我々は永久磁石に生じるエラーを製造段階において軽減させる新しい方法を考案し今回の製作に適用した。

### 2 EF ウィグラー

EF ウィグラーとは図 1 に示すように Halbach 型平面ウィグラーに用いられている長方形の永久磁石にエッジ角を持たせることによって、x, y の両方向に集束力を与えるものである。軌道面に垂直な磁場を発生させる偏向磁石 (縦磁化磁石) は台形をしており、軌道に並行な磁場を発生させる磁石は平行四辺形となっている。EF ウィグラーの集束力はエッジ角  $\phi$  を変えることで可変であり、x 方向の磁場勾配は  $dB_y/dx = 4(B_0/\lambda_w)\phi$  で与えられる。今回製作し

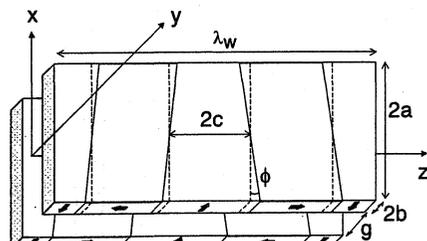


図 1 : EF ウィグラー模式図 (1 周期分)

た試作機は周期長  $\lambda_w = 60\text{mm}$ 、エッジ角  $\phi = 2^\circ$ 、ギャップ  $g = 30$  であり、これらのパラメータは現在阪大産研の SASE で使用している Halbach 型平面ウィグラーのパラメータを元に決定した。また磁石ブロックの大きさは  $2a \times 2b \times 2c = 100 \times 20 \times 15 \text{mm}^3$  である [6]。

### 3 磁石ブロックの切り出し方法

ウィグラーを構成する永久磁石は製造過程において磁化に誤差が生じる。それは一般的に磁化方向で  $1^\circ$ 、磁場強度で 1% 程度の大きさになると言われている。数千個以上の磁石を並べるウィグラーでは、その磁場エラーが積み重なるので大きな問題となる。この磁場エラーは、磁極に磁場補正用の小さなチップを取り付けたり、順番を並べ替えることで小さく出来るが、それには磁極ひとつひとつの磁場を測定する必要がある面倒な作業である。今回ウィグラーを構成する磁石を製造する段階でエラー (特に磁化方向のエラー) を軽減させる手法を考案し適用した。それは次のようなものである。あるエラーを持つ磁石ブロックを想定して、その磁石を磁化軸に沿って分断すると同じエラーを持つ磁石ブロックが二つ出来る。その一方を図 2 に示すように磁化軸の廻りに  $180^\circ$  回転させて再び付けることにより、主磁化方向以外のエラー成分が打ち消し合うので磁化方向のエラーが軽減される。

もし、ひとつの磁石ブロックから図 2 のような磁石の組を二つ切り出すことが出来れば、それらは同じエラーを持

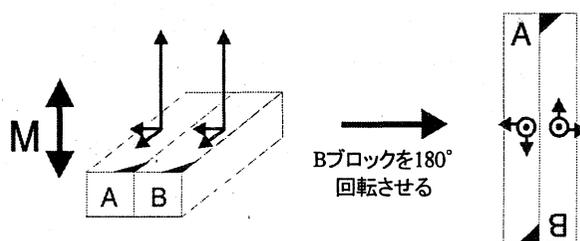


図 2 : 磁化方向のキャンセレーション

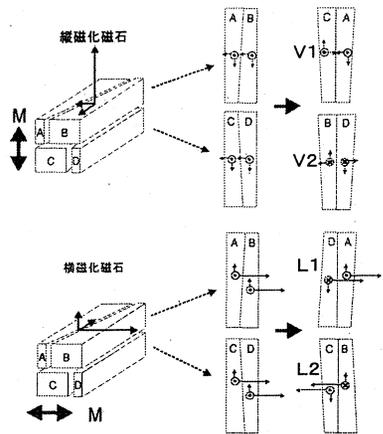


図3：磁石ブロックの切り出し方法 (Mは磁化方向を示す)

つ磁石となるはずである。ウィグラーを組む際に同じエラーを持つ磁石が予め分かるのであれば、磁石を組む段階でそれらはペアとして適当な位置に配置することでウィグラー内に生じる磁場エラーを容易に軽減させることができる。この磁化方向エラーにおけるキャンセレーションの考えを用いたEFウィグラー用の永久磁石の切り出し方法を図3に示す。

EFウィグラーの磁石は長方形型とは異なり、縦磁化磁石が台形、横磁化磁石が平行四辺形である。このため磁石の切り出し方法が少し複雑になる。まず、ひとつの素材ブロックからA,B,C,Dのように四つ切り出す。縦磁化磁石の場合はBとCを磁化軸に対し $180^\circ$ 回転させてAC(V1磁石)とBD(V2磁石)の組み合わせにする。一方、横磁化磁石の場合はDとCを磁化軸に対し $180^\circ$ 回転させてAD(L1磁石)とBC(L2磁石)の組み合わせにする(図中のV2磁石、L2磁石は裏返してある)。以上のように磁石を切り出して、実際にEFウィグラーを組む際には、V1磁石、L1磁石のN極を、V2磁石、L2磁石のS極を用いることにした。これにより磁化方向エラーが小さく、かつ同じエラー特性の磁石ブロックが二つずつ出来る。それらの磁石をペアとして扱うことにより、磁場エラーの最適化を容易に行うことができる。我々はEFウィグラー5周期分の試作機製作にあたりこの磁石ブロックを縦、横磁化磁石それぞれ30個ずつ計60個製作し、うちエラーの小さいもの40個を使用することにした。

#### 4 磁石ブロック特性測定

出来上がった永久磁石のエラーが上手くキャンセルしているかどうか確認するために、磁化軸と磁場強度の二つについて磁場測定を行った。磁化軸の測定に使用した装置の概略図を図5に示す。この装置はx,y,z方向にそれぞれ対のコイルを持つ。それらのコイルの中心に設計磁化軸がz方向を向くように磁石を置く。次に磁石を振動させることでそれぞれのコイルに発生する誘導電流からx,y,z方向それぞれの磁場強度を換算して磁化方向を導出した。横磁化磁石の磁極面はエッジ角 $\phi = 2^\circ$ を持っていたので横磁化磁石の測定は多少困難であった。磁場強度の測定にはホール素子を用いて、磁極面の機械的中心から磁化軸に沿って10mm離れた点での磁場強度を測定した。

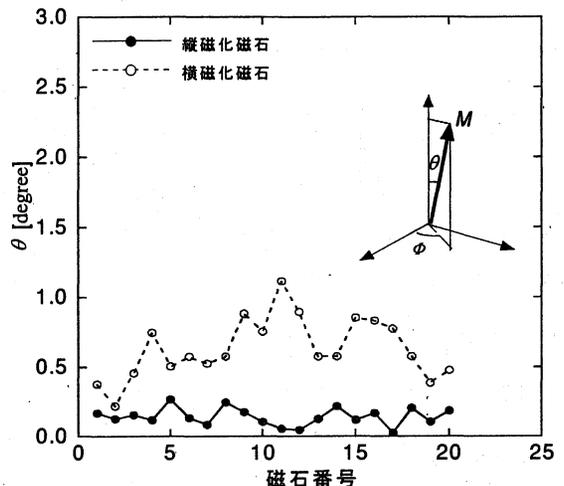


図4：磁化軸測定結果

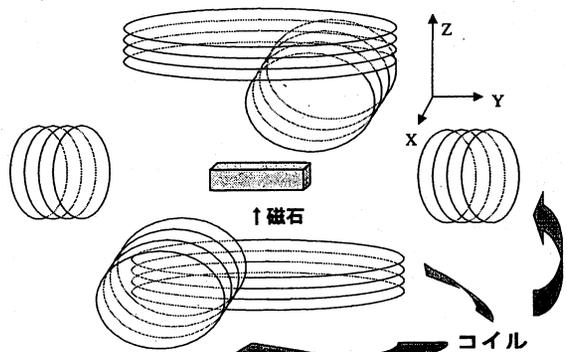


図5：磁化軸測定装置概略図

図4は磁化軸の測定結果をグラフにしたものである。磁化軸のエラーの平均は縦磁化磁石が $\theta = 0.15^\circ$  横磁化磁石が $\theta = 0.64^\circ$ となった。横磁化磁石の方が縦磁化磁石に比べてややエラーが大きいが、どちらもおよそ $\theta = 1^\circ$ 以下に留まっている。この結果から、磁化方向のエラーは上手くキャンセルされていると言える。横磁化磁石のエラーが大きくなった理由としては、横磁化磁石の磁極面が磁化軸に対してエッジ角 $\phi = 2^\circ$ を持っているため、計測の際に誤差が増えた可能性が考えられる。次に磁場強度の測定結果を図6に示す。

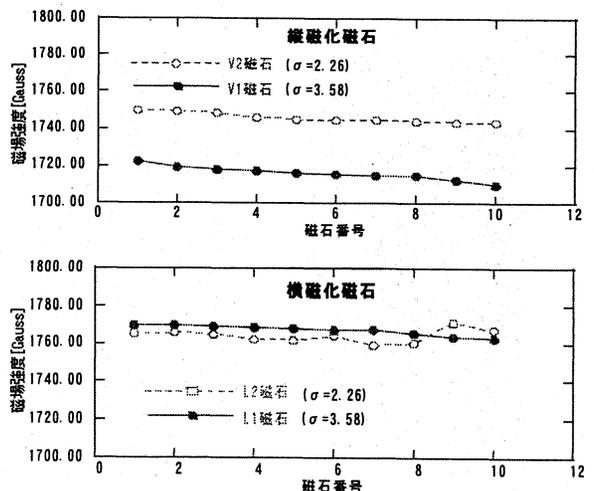


図6：磁場強度測定結果

それぞれの種類の磁石について標準偏差を計算した結果、全ての磁石において平均値の0.2%以下と、1%よりも小さい値になった。これより種類別にみると磁場強度はかなり均一であるといえる。しかしながら、縦磁化磁石に着目するとV1磁石とV2磁石では磁場強度の絶対値に2%弱の違いがある。V1磁石とV2磁石に生じた磁場強度のズレの原因を知るには、それらを切り出す前の素材ブロックの磁場強度分布にむらがある、または素材ブロックの磁化方向がずれている等の可能性が考えられるので、素材ブロックの磁場特性を知る必要がある。

## 5 素材ブロック特性測定

図7に示すように素材ブロックは、余裕を持って切り出しが行えるよう、ひとまわり大きい長方形をしている。その磁場特性は製造過程の中の強磁場中形成・焼結の際にはば決定される。この強磁場を形成するコイルは素材ブロックに対して十分に大きく均一な磁場を発生させるが、形成圧縮の際に磁場中心と素材ブロックの機械的中心がずれると出来上がった磁石の磁場中心が機械的中心と異なる可能性がある。そこで、素材ブロックの磁場特性を知るべく素材ブロックの両磁極面で磁場強度のマッピングを行った。方法は磁場強度測定の時と同じくホール素子を用いて磁極面から10mm離れた点での磁場強度を測定した。磁極面の機械的中心を原点とし、図7に示すx,y方向に沿ってそれぞれ、マッピング間隔5mm, 10mmで50×80 mm<sup>2</sup>の範囲で行った。図8は素材ブロックの磁極面における磁場強度分布を分かり易く相対的に示したものである。図8よりわずかではあるが磁場中心がxの正の方向にずれていることが分かる。それぞれのy座標においてx=-10~10

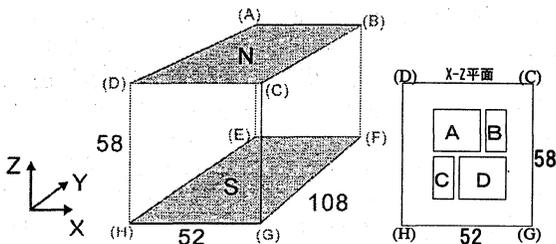


図7：素材ブロック

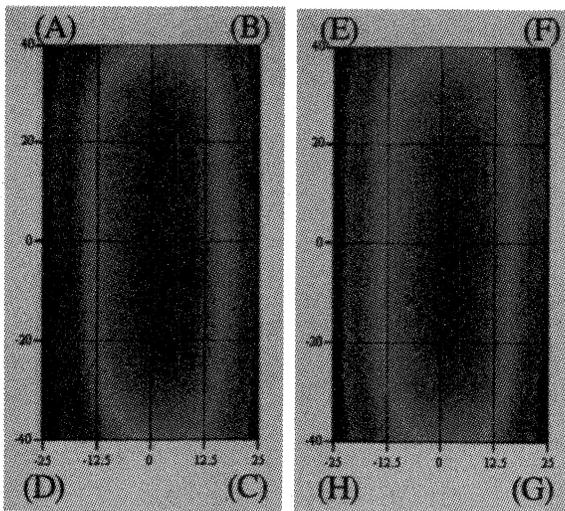


図8：マッピングの結果

の範囲で磁場強度に約2~3%の差があることが分かった。図7と見くらべると、A磁石とC磁石よりもB磁石とD磁石の方が、磁場強度が大きいと考えられる。つまり縦磁化磁石のV1磁石はどちらも磁場強度の弱い磁石AとCから出来ており、逆にV2磁石はどちらも強い磁石BとDから出来ている。縦磁化磁石の磁場強度に差が生じた原因のひとつとして以上のことが考えられる。横磁化磁石を構成している磁石ブロックの組み合わせを見ると、ADとBCのペアなのでL1磁石、L2磁石ともに強い磁石と弱い磁石の組み合わせになる。よって、横磁化磁石の磁場強度の間に大きな差は生じなかったと考えられる。

## 6 結論と今後展開

今回我々はウィグラー内における磁場エラーを軽減させるためEFウィグラー用磁石ブロックを新しい手法を用いて加工・製作した。出来上がった磁石ブロックの磁場エラーを測定した結果、磁化方向に関しては思惑通り上手くエラーがキャンセルされており、磁場強度に関しては縦磁化磁石のV1磁石とV2磁石に2%弱の差が生じた。しかし磁場強度も磁石ブロックの種類別にデータを見るとそれぞれ個々のエラーは小さい値をしめしている。このことより今後、縦磁化磁石に関してはV1磁石とV2磁石の適当な組を考えてEFウィグラーを組めば、ウィグラー内に発生する磁場は均一性を保ち、磁場エラーを最適化出来ると考えられる。今回我々の提案した磁場エラー軽減を目的とした磁石ブロック製作の新たな手法は良い結果を示したと言える。今後は上記のように縦磁化磁石の組み合わせを考えた上、ウィグラーを組んで磁場測定を行い全体としてのエラーの様子がどうなっているか確認し、また測定された磁場分布と数値計算により求まる値との比較を行う予定である。

## 参考文献

- [1] LCLS DESIGN STUDY GROUP, SLAC-R-0521, (1998)
- [2] J. PFLUGER, YU. M. NIKITINA, NUCL. INSTR. AND METH. A 381 (1996) 554
- [3] A. A. VARFOLOMEEV, ET AL., NUCL. INSTR. AND METH. A 381 (1995) 70
- [4] ROSS D. SCHLUETER, NUCL. INSTR. AND METH. A 381 (1995) 44
- [5] G. ISOYAMA, ET AL., NUCL. INSTR. AND METH. A 507 (2003) 234
- [6] R. KATO, ET AL., NUCL. INSTR. AND METH. A 445 (2003) 164