

X線SASEを目指したエッジフォーカスウィグラーの開発研究

三原 彰仁^{A)}、磯山 悟朗^{A)}、加藤 龍好^{A)}、柏木 茂^{A)}、山本 樹^{B)}、土屋 公央^{B)}

^{A)}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

^{B)}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

FEL実験において広く用いられているHalbach型ウィグラーは電子ビームの蛇行軌道面に対し、垂直方向には弱い集束力を持つが水平方向には集束力を持たない。X線SASE (Self-Amplified Spontaneous Emission) では使用するウィグラーが100mを超える長尺になるので水平方向への電子ビームの発散が問題となる。我々はこの問題を解決するべく、水平方向にも集束力を持ったエッジフォーカスウィグラー (EFウィグラー) を考案した。また、その作り出すであろう磁場分布を3次元磁場解析コードにより導出した。さらに $\theta = 2^\circ$ のエッジ角を持ったEFウィグラー6周期分の試作機を製作した。本稿では、EFウィグラーの特性及び試作機を製作する際に用いた磁場エラーの最適化の手法について報告する。

1. はじめに

阪大産研では遠赤外領域でのFEL及びSASEの原理実証実験を行っている。とくに、SASEは共振器を用いずに光の強度を指数関数的に増幅させることが可能なため、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。真空紫外や軟X線領域でのSASE発生には、長尺のウィグラー内をピーク電流値の高い電子ビームが、高輝度を保ったまま通過する必要がある。そのような長い距離において電子ビームの輝度を高く保つためには電子が発散しないように集束力を与えねばならない。しかし、Halbach型ウィグラーは蛇行軌道面に対し、垂直方向 (y方向) には弱い集束力を持つが、水平方向 (x方向) には集束力を持たないため、長尺のウィグラーを通過する際に、電子ビームが発散してしまい高輝度を保つのが困難である。これまでもウィグラー内の電子ビームに集束力を与えるいくつかの方法が議論され、開発されている^{[1]-[5]}。

我々が開発を進めている集束型ウィグラーは、従来のHalbach型ウィグラーに用いられている長方形のマグネットにエッジ角を持たせることで、x、yの両方向に集束力を与えるものである (図1に示す)。

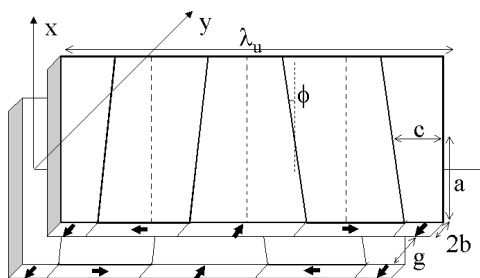


図1：EFウィグラー模式図(1周期分)

2. EFウィグラー

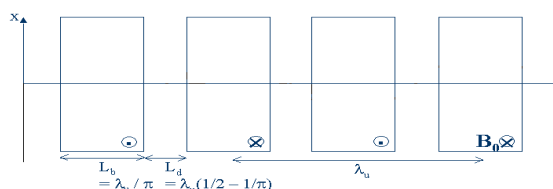


図2：ウィグラーの長方形型偏向磁石モデル

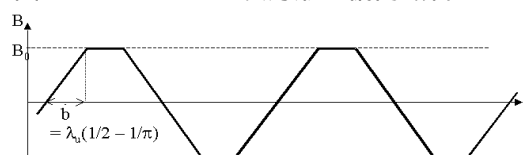


図3：長方形偏向磁石モデルの磁場

下の図はHalbach型ウィグラー及びそれが作り出す磁場を模式的に示したものである。

ウィグラーを図2に示すように長さが $L_b = \lambda_u / \pi$ である極性の異なる長方形型偏向磁石の列でモデル化する。設計軌道は偏向磁石の真中で x 方向の速度が 0 になるように仮定した。ここで λ_u はウィグラーの周期長、偏向磁場のピーク値を B_0 とし、図3では磁石の端で漏れる磁場を $b = \lambda_u (1/2 - 1/\pi)$ と線形に近似した。

Halbach型ウィグラーは蛇行平面に対し垂直方向には集束力を持つことが知られている。その集束力はウィグラー内1周期において均一な大きさ $k [1/m^2]$ (復元力とも呼ばれる) で働くと仮定すると式(1)で表される。これより集束力 k は電子エネルギーの二乗に反比例し磁場強度の二乗に比例することがわかる。つまり長波長領域でのFELやSASEにおいては電子ビームのエネルギーがそれほど高くないので十分強い集束力を得ることが出来る。しかし、数100MeVからGeV

$$k = \frac{8 - \pi}{3\pi} \left(\frac{e}{m_0 c} \right)^2 \left(\frac{B_0}{\gamma} \right)^2 \quad (1)$$

オーダーの高エネルギー電子ビームに対してはほとんど集束力が働かなくなる。

平面型ウィグラーは長方形型偏向磁石で構成されているが、偏向磁石にエッジ角を持たせることで、x方向に対しても集束力を発生させる事が期待される。

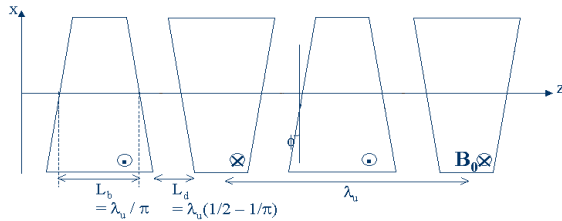


図4：エッジ角度付き偏向磁石モデル

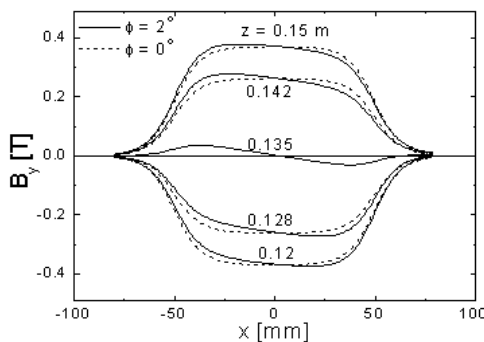


図5： $\phi = 2^\circ$ EFウィグラー及び、 $\phi = 0^\circ$ Halbach型ウィグラーが与える磁場（x、z依存）

エッジ角 ϕ を付加した偏向磁石モデルを図4に、また、EFウィグラーと従来のHalbach型ウィグラーにより作り出されるy方向の磁場を数値計算により導き出した結果を図5に示す。表1は、図5の計算で使用した、Halbach型ウィグラー及び、EFウィグラーの持つパラメータを示している。また、我が産研のライナックで使用しているエネルギー12MeVの電子ビームに与えるx、y方向の集束力が等しくなるように $\phi = 2^\circ$ に設定した。

表1:ウィグラーのパラメータ

Type		Halbach(No Focus)
Magnetic Period	λ_u	60 mm
Gap	g	30 mm
K-value	K	1.469
Residual Field	B_r	1.13 T
Block Dimensions		
Horizontal	2a	100 mm
Vertical	2b	20 mm
Longitudinal	2c	15 mm

図5よりEFウィグラーの磁場は $x = 0$ [mm] 付近で、Halbach型ウィグラーのそれと等しい。また、1[T/m]程度の磁場勾配(dB_y/dx)を持つ事が分かる。この磁場勾配によりx方向にも集束力が生じる。Halbach型ウィグラーの時と同様にEFウィグラーのx、y方向のそれぞれ

の集束力 k_x と k_y がウィグラー内で均一に作用するものと仮定すると、それらは次のように求まる。

x方向の集束力は、エッジ角の値に比例するのでエッジ角を正に大きくすれば高エネルギーに電子ビームに対しても大きな集束力を与えることが出来る。また(1)と(3)よりx、y方向の集束力には以下の関係式が成り立つ

(4)からEFウィグラーの集束力は、ウィグラー偏向磁場が本来持つ弱い集束力kに制限されることがわかる。

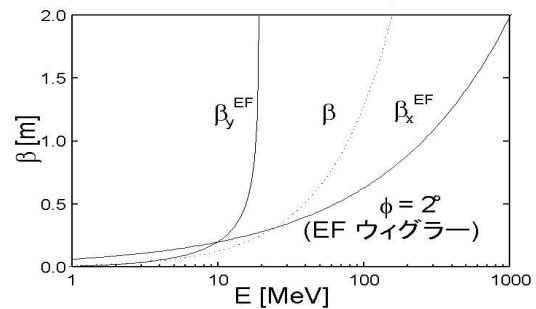


図6：EFウィグラー内の適合ベータトロン関数

$\phi > 0$ 、 $k_x < k$ であれば、x方向とy方向の両方に集束力が生じるが、 $k_x > k$ の場合、 $k_y < 0$ となりy方向は発散を示す。図6はウィグラー内での適合ベータトロン関数 β_0 を示す。ここでの適合条件は、ビームサイズが一定となる $\beta_0 = 0$ 、 $\beta_0 = k^{-1/2}$ とした^[6]。実線は $\phi = 2^\circ$ であるEFウィグラー、破線は一般のHalbach型ウィグラーのそれを示す。

ここで10MeV程度の低エネルギー電子ビームに対してEFウィグラーにおけるx、y両方向のベータトロン関数はHalbach型ウィグラーのそれと同じ程度に小さい。これは両方向共に弱い集束力kと同程度の集束作用が生じていることを示す。またその集束力はビームサイズを小さくし電子ビームの輝度を高く保つのに十分な大きさである。20MeVより高いエネルギーを持つ電子ビームに対しては、EFウィグラーはy方向に発散作用を持つため適合ベータトロン関数は与えられないが、x方向のそれはHalbach型ウィグラーのそれよりも小さく出来る。(2)式よりエッジ角を正に大きくする事でx方向の集束力をさらに強く出来、さらに(3)式よりエッジ角を負の方向に大きくする事で、y方向に強い集束力を持たせることが出来ること分かる。このような集束力を持つウィグラーは高エネルギー電子ビームに対してもx、yの両方向に強い集束力を持つようFODO集束原理を応用してウィグラー列を構成できる。

3 . EFウィグラーの設計及び磁場エラーの最適化

$$k = k_x + k_y$$

(4)

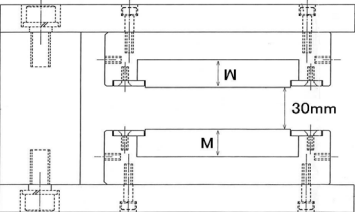
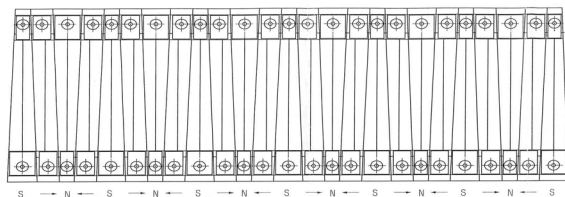


図7：EFウィグラー試作機図面

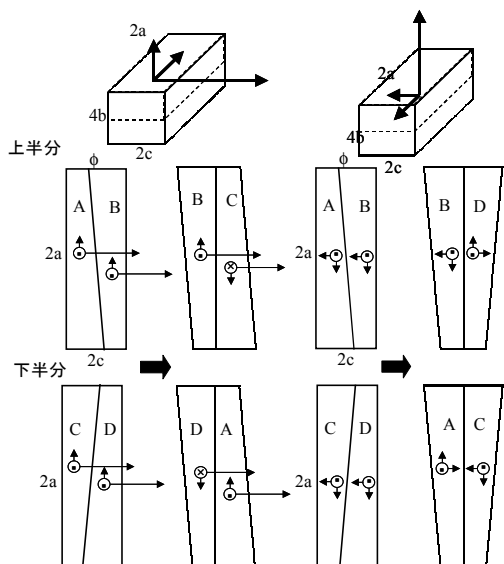


図8：磁石ブロックの作り方(台形型と平行四辺形型)

ウィグラーを製作する際、磁石ブロックの持つ磁場エラーが問題となる。永久磁石はどんなに精度良く製造されても、磁場強度と磁化方向に0.1%程度のばらつきが生じる。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、磁石の並べ方によっては電子の軌跡が設計軌道から大きくそれる事もある。この磁場エラーの影響は、磁極に磁場補正用の小さな磁石チップを取り付けたり、順番を並べ替えたりして小さく出来るが、それには磁極1つ1つの磁場を

$$k_x = \frac{4e}{m_0 c} \frac{B_0}{\gamma} \times \frac{\phi}{\lambda_u} \quad (2)$$

$$k_y = \frac{8 - \pi}{3\pi} \left(\frac{e}{m_0 c} \right)^2 \left(\frac{B_0}{\gamma} \right)^2 - k_x \quad (3)$$

測定する必要があり面倒な作業である。

今回、EFウィグラー試作機の製作にあたり、磁極の磁場を測定せず磁場エラーの最適化を行う方法を用いた。その方法を以下に紹介する。まず前提としてひとつの永久磁石内では磁化の方向、大きさが均

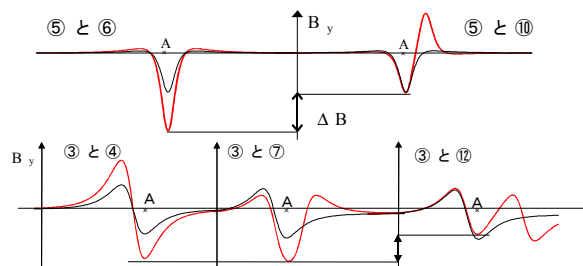
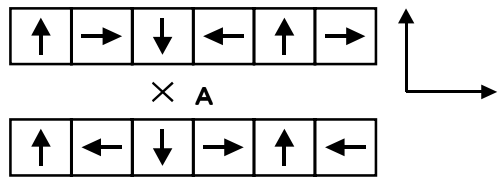


図9：磁石ブロックの配列とその配置の違いによるエラーの差（実線で、自身のエラーを、点線でそれぞれの足し合わせを示す）

一であるとする（エラー分布が均一である）。そして、その磁石をいくつか分割した時、それぞれも元の磁石と同じエラーを持つとする。分割されたそれぞれのブロックを図8のように適当な軸に対し180°回転させて組み合わせることで、回転軸以外の成分が打ち消され、磁化方向のエラーを小さく出来ると考えた。この方法で磁石ブロックを製造することで同じエラーのものが2つ出来る。

次に磁場強度のエラーを考える。ウィグラーを構成している磁石ブロックの磁化方向はy及びz軸方向のどちらかである。磁場強度のエラーを小さくするためには同じエラーを持つ磁石が互いにエラーを強めあわない様に工夫して配置する必要がある。ここでAに生じるy方向のエラーを考える。図9より磁化方向がy方向であるの磁石に注目すると同じエラーをもつ磁石をに配置した時はエラーが同じ向きを向くために2倍に強め合っているがに配置するとさっきのそれと比べ半分程になる。次に磁化方向がz方向であるの磁石に注目すると同じく図9より、同じエラーを持つ磁石をに配置した時が最もエラーが小さくなる。

以上のような関係で磁石を配置することで磁場強度のエラーを小さく出来ると考えた。このようにして磁場方向、磁場強度のエラーを最適化しEFウィグラーを設計した。実際製作した試作機(6周期分)の図面を図7に示した。

4．今後の展開

これまでに、出来上がった試作機を構成する個々の永久磁石ブロック(計96個)の磁場測定は終了しており、現在はそれらのデータより予想される試作機全体の磁場を計算している。本研究会では、その結果について報告する。

今後は、これらの永久磁石を使い試作機を組み上げた後、試作機全体の磁場測定を行い計算より求め

る磁場分布との比較を行う。また、その際に我々の考案した磁場エラーの最適化がうまく成立しているかなどについても確認・議論する予定である。一方、今回試作した6周期のウィグラーをビームラインに挿入した場合、エッジフォーカスの効果が確認できるかどうかの検討も行っていく予定である。

参考文献

- [1] A. AVarfolomeev, V.V.Gubankov, A. H. Hairetdinov, S. N. Ivanchenkov, A. S. Klebnikov, N. S. Osmanov, S. V. Tolmachev, Nucl. Instr. and Meth. A 358 (1995) 70
- [2] R. D. Schlueter, Nucl. Instr. and Meth. A 358 (1995) 44
- [3] J. Pflueger, Y. M. Nikitina, Nucl. Instr. and Meth. A 381 (1996) 554
- [4] J. Pflueger, H. Lu, D. Koester, T. Teichmann, Nucl. Instr. and Meth. A 407 (1998) 386.
- [5] J. Pflueger, Nucl. Instr. and Meth. A 445 (2000) 366
- [6] M. Fujimoto, R. Kato, G. Isoyama, Symposium on Accelerator Science and Technology (2001) 461
- [7] M. Fujimoto, R. Kato, M. Kuwahara, T. Igo, T. Okita, T. Konishi, R. A. V. Kumar, S. Mitani, S. Okuda, S. Suemine, G. Isoyama, in: V.N. Litvinenko, Y. Wu (Eds.), Free Electron Laser 2000, Elsevier, Amsterdam, 2001, p. II-13