

DEVELOPMENT OF THE EDGE FOCUSING WIGGLER

T.Noda^{*A)}, G.Isoyama^{A)}, R.Kato^{A)}, S.Kashiwagi^{A)}, S.Yamamoto^{B)}, K.Tsutiya^{B)}

^{A)} Institute of Science and Industrial Reserch, Osaka University
8-1 Mihogaoka Ibaraki, Osaka, 567-0047

^{B)} Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Reserch Organization
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

We are developing a high-performance undulator for SASE in the short wavelength region and have proposed the edge-focusing wiggler. It is a Halbach type wiggler with an edge angle to produce a focusing force in a transverse plane. Prototype model was developed and we confirmed that its field gradient is about 1[T/m]. And to install edge-focusing wiggler in the L-band linac at ISIR, the magnetic field in the wiggler is numerically examined the properties of the focusing force.

エッジフォーカスウィグラーの開発研究

1. 序

1.1 はじめに

阪大産研では短波長領域の SASE に必要とされる高性能ウィグラーの開発研究を進めている。

一般に短波長領域の SASE 発生のためには長尺のアンジュレータが必要であるが、電子ビームの輝度を保つためにアンジュレータ内で電子を集束させなければならない。しかし電子ビームのエネルギーが低くウィグラー磁場が強い場合、水平振動の Halbach 型ウィグラーは鉛直方向に弱い集束力を持つが、水平方向には集束力を持たない。そこで水平と鉛直両方向の発散を抑えるために、アンジュレーター列の間または磁極間に四極磁石を設置する方式などが考案されており、開発研究が行われている^{[1]-[5]}。

我々が開発研究を進めている手法は、従来の Halbach 型ウィグラーに用いられる長方形のマグネットにエッジ角をもたせることで横方向の磁場勾配を発生させ、強集束方式により鉛直、水平両方向に集束力を与えるというものである。

1.2 エッジフォーカスウィグラー

我々が考案したエッジフォーカス (EF) ウィグラーの模式図を図 1 に示す。軌道面に垂直な磁化軸を持

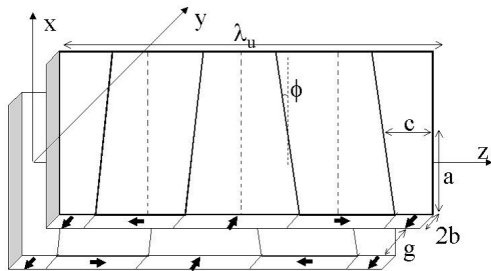


図 1: EF ウィグラーの模式図 (1 周期分)

つ磁石 (縦磁化磁石) は台形の形をしており、平行な磁化軸を持つ磁石 (横磁化磁石) は平行四辺形の形をしている。ハードエッジモデルを適用すると、EF ウィグラーの集束力は以下のように求まる^[6]。

$$k_0 = \frac{8 - \pi}{3\pi} \left(\frac{e}{m_0 c} \right)^2 \left(\frac{B_0}{\gamma} \right)^2 \quad (1)$$

$$k_x = \frac{1}{B\rho} \frac{dB_y}{dx} = \frac{4e}{m_0 c} \frac{B_0}{\gamma} \frac{\phi}{\lambda_u} \quad (2)$$

$$k_y = k_0 - k_x \quad (3)$$

ここで、 e は電子の電荷、 m_0 は電子の静止質量、 B_0 は縦磁化磁石のピーク磁場、 ϕ はエッジ角、 γ は電子のエネルギーである。図 1 において、エッジ角を正の方向に大きくすることで水平方向の集束力が強まり、逆に負の方向に大きくすると鉛直方向の集束力が上昇する。

高エネルギーをもつ電子ビームに対して強い集束力を与えるためには、エッジ角を大きく取らなければならない。一般に鉛直、水平両方向に同時集束させることはできないが、エッジ角を逆につけたアンジュレーターを交互に並べることで強集束原理を用いた集束が可能である。

現在、阪大産研 L-Band ライナックへ EF ウィグラーを導入する計画が進められており、ウィグラーのパラメーター決定のために水平、鉛直両方向の集束力の評価を行った。また、この評価を基に試作機を完成させ、磁場を測定しその勾配を確認した。本稿ではこれらの詳細を報告する。

2. 数値解析による集束力の評価

まず数値解析によって集束力を評価する。ウィグラーの磁場は、永久磁石より生じる磁場を足し合わせることで求め^[7]、この結果を用いて式 (1)、(2) へ磁場勾配を代入することで集束力を導出した。また、ウィグラーのパラメーターは表 1 のように設定した。

* E-mail: noda25@sanken.osaka-u.ac.jp

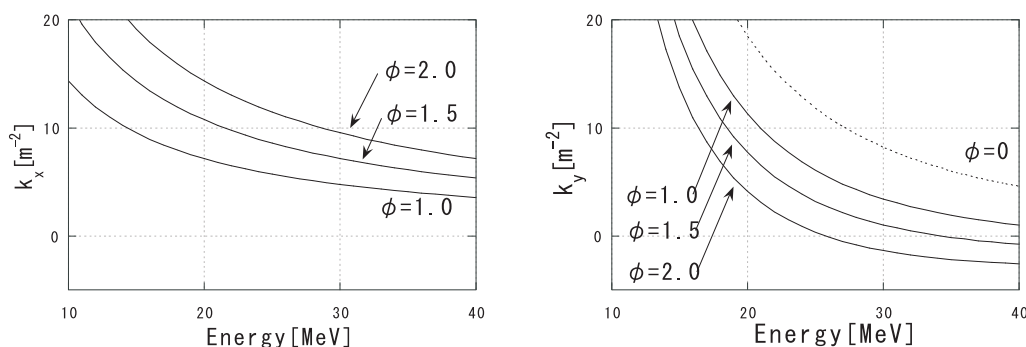


図 2: ピーク磁場 4000Gauss における集束力 k_x (右) および k_y (左)

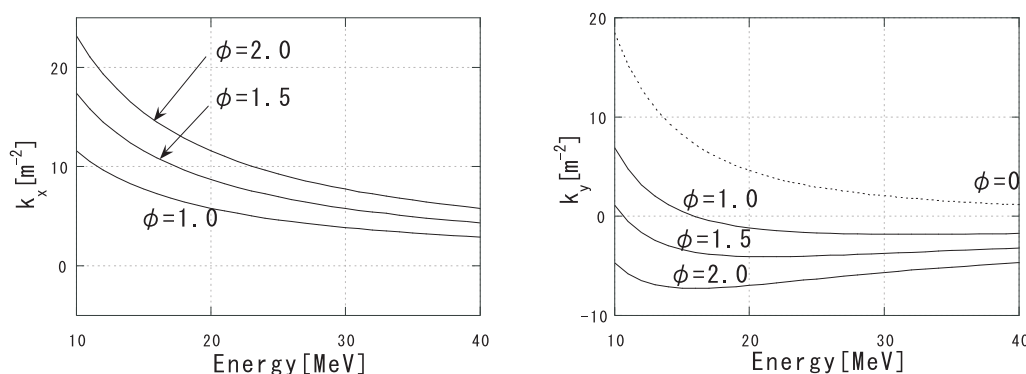


図 3: ピーク磁場 2000Gauss における集束力 k_x (右) および k_y (左)

Wiggler Type	Halbach
Block size($2a \times 2b \times 2c$)	$100 \times 20 \times 7.5mm^3$
Gap	30mm(min)
Periodic number	32 periods
Residual induction of permanent magnet	1.28T
Peak magnetic field	0.42T(max)

表 1: 数値解析で用いたパラメーター

ピーク磁場、ビームエネルギー、およびエッジ角と、各方向の集束力との関係を表したグラフを図 2、図 3 に示す。数 10MeV 程度の電子エネルギーにおいては一般的に、ウィグラーのピーク磁場が高いと水平、鉛直両方向の二重集束が実現できる。また、大きいエッジ角及び低いピーク磁場により、鉛直方向には発散することがわかる。

試作機の設計段階において、阪大産研は電子ビームのエネルギーが 12MeV 近傍の SASE 実験を想定していた。よって、この電子エネルギーにおいて二重集束が可能であることを検証するために試作機のエッジ角を 2 度に設定した。

ただしウィグラーのエッジ角を 2 度にする、阪大産研 LBand ライナックの最大電子エネルギーである 30MeV 近傍では、ピーク磁場が高くても鉛直方向に容易に発散してしまうことがわかり、導入するウィグラーのエッジ角を現在再検討中である。

3. 試作機の磁場測定

3.1 製作

次の段階として表 2 のパラメーターを持つ試作機を製作した。数値解析で用いたパラメーターにはほぼ準じているが、残留磁場は 1.32T である。

Wiggler Type	Halbach
Block size($2a \times 2b \times 2c$)	$100 \times 20 \times 7.5mm^3$
Gap	30mm
Periodic number	5 periods
Residual induction of permanent magnet	1.32T
Peak magnetic field(measurement)	0.42T
Edge angle	2.0deg

表 2: 試作機のパラメーター

完成した試作機の磁場を、ホール素子を用いて KEK で磁場測定を行った。今回の測定では、ホール素子がウィグラー本体またはその支柱に衝突しないよう計測したために、水平方向の測定範囲が制限されることになった。

3.2 測定結果

B_y の z 依存性、x 依存性をそれぞれ図 4 図 5 に示す。座標原点はウィグラーの中心にとった。ただ

し x 依存性に関しては前述の測定範囲の制限により $-5\text{mm} \leq x \leq +30\text{mm}$ の範囲内のみプロットである。

図5より磁場勾配 $\frac{dB_y}{dx}$ が生じていることがわかる。その大きさは、 $x = \pm 5\text{mm}$ の範囲でリニアフィッティングした結果、平均 1.09T/m となった。数値解析による評価と比較すると、ピーク磁場の絶対値は2%弱小さく、磁場勾配に関しては10%以上の増加が見られた(計算値では 0.93T/m)。

次に、得られた磁場勾配の値を基に集束力を評価したグラフが図6である。これより、電子ビームエネルギーが 13MeV 付近において二重集束が実現可能であることがわかる。

4. まとめ

数値解析によりピーク磁場と集束力との関係性を評価した。また、EFウィグラー試作機が完成し、その磁場勾配が約 1T/m であること、二重集束が実現される可能性があることがわかった。

今後の予定としては、まず試作機の磁場測定追試を行い、ギャップを変化させた場合の磁場を調べる。次に阪大産研 L-Band ライナックに EF ウィグラーを導入し、ビームの振る舞いを調査する予定である。そのエッジ角の設定は検討中である。

参考文献

- [1] A. AVarfolomeev, V.V.Gubankov, A. H. Hairtdinov, 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] G.Isoyama, Rev. Sci. Instr. 60 (1989) 1826

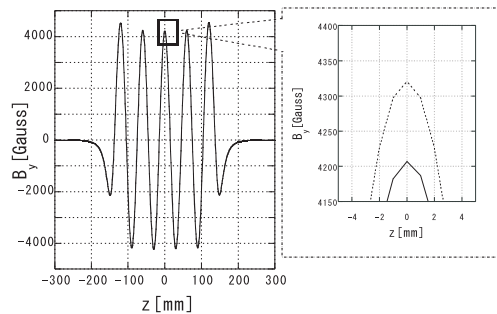


図4: $x=0, y=0$ における B_y の z 依存性 (実線は測定値、破線は計算値)

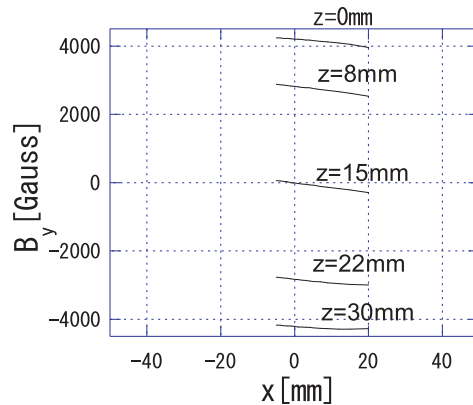


図5: $x=0$ における B_y の x 依存性 ($z=0\text{mm}, 30\text{mm}$ が縦磁化磁石の中心)

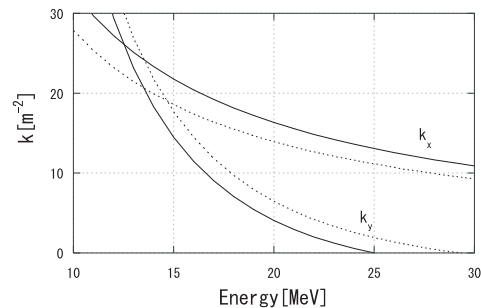


図6: ビームエネルギーと集束力 (実線は測定値、破線は計算値より導出)