

## Fabrication and magnetic field measurement of a strong-focusing wiggler for the far-infrared FEL

Shigeru Kashiwagi<sup>1,A)</sup>, Takanori Noda<sup>A)</sup>, Ryukou Kato<sup>A)</sup>, Goro Isoyama<sup>A)</sup>,  
Shigeru Yamamoto<sup>B)</sup>, Kimichika Tsuchiya<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University  
8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

### Abstract

We have fabricated an edge-focusing wiggler for FEL and SASE in the far-infrared region at Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University. We have adopted the strong focusing scheme in order to keep the beam size small along the wiggler over the whole range of the electron energy, 10-30 MeV, and the peak magnetic field of the wiggler, up to 0.4 T. The period length of the wiggler is 60 mm, the number of periods is 32, and the total length is 1.938 m, including edge magnet blocks for correcting the electron orbit. The wiggler consists of 4 FODO cells for double focusing. Focusing elements and defocusing elements are incorporated with single wiggler periods with edge angles of +5 and -5 degrees, respectively, and they are separated by 3 normal wiggler periods. In this paper, we report fabrication of the strong focusing wiggler and result of the magnetic field measurement.

## 遠赤外FELのための強集束ウイグラーの製作と磁場測定

### 1. はじめに

我々は、大阪大学産業科学研究所のLバンドライナックで加速した大電荷量の電子ビームを用いて遠赤外領域のSASE実験および発振型FELの実験を行っている。我々は、SASEやFELで使用する高性能ウイグラーとして、通常の直方体の永久磁石にエッジ角を付けることで電子ビームに集束力を与える集束型ウイグラーを提案し、その開発研究を進めている<sup>[1-3]</sup>。これまでに、エッジ角度が2度の弱集束エッジフォーカス型ウイグラー試作機（5周期）を製作し、通常の平面型ウイグラーには無い水平方向ビーム集束のための磁場勾配（dBy/dx）がウイグラー内につくられる事を検証した。この試作機の製作および磁場測定の経験を踏まえ、我々はエッジ集束の効果を利用しウイグラー全体にわたりビームサイズを小さく保つ事によりSASEやFELのゲイン長を短くする事ができる強集束エッジ集束型ウイグラーの製作を行った。本論文では、このエッジフォーカスウイグラーの製作過程、磁場測定結果などについて報告する。

### 2. 阪大産研強集束ウイグラー

#### 2.1 基本パラメーター

この強集束ウイグラーの製作では、永久磁石とそのホルダーおよびベースプレートを新規に製作し、ギャップ可変のウイグラー架台は既存のものを利用した。ウイグラーの周期長や周期数は、これまで使用してきた通常型ウイグラーと同じとし、全長も

1.938 mで既存ウイグラーの1.92 mとほぼ同じである（端部の横磁化磁石分だけ片側9 mm長い）。製作したエッジフォーカスウイグラーの磁石配列には、通常型ウイグラーの磁石配列の途中に、ビームに集束力と発散力を交互に与えるためのエッジ付き永久磁石ユニットを配置した強集束型を採用した（図1）。このウイグラーの基本パラメーターと集束条件を表1に示す。試作機では、SASE実験に使用する電子ビームエネルギー12MeVとウイグラーのギャップ30 mmで鉛直方向に強く働くウイグラーの自然集束力を利用して、ウイグラー全体を同じエッジ角度付きの永久磁石で構成する弱集束型ウイグラーを採用した。しかし、産研で行っているFELやSASEの実験に使用するウイグラーとしてこの方式を使用した場合、ウイグラーのギャップを上げた（磁場が弱い）時やビームエネルギーが高い時にはウイグラーの自然集束力（ $k_0$ ）が弱まるために、ウイグラー全体にわたって垂直方向に発散力が働く。このエッジ集束ウイグラーの設計では、できる限り幅広いFELの波長領域をカバーでき、かつウイグラー内での平均ビームサイズを小さくなるように、強集束方式を

表1 ウイグラー基本パラメーター

ブロックサイズ	90×20×15 mm <sup>3</sup>
磁石材質・コーティング	Nd-Fe-B・TiN
周期長・周期数	60 mm・32 periods
全長	1.938 m
ピーク磁場	0.39 T (gap 30 mm)
FODOセル数・セル長	4 cells・0.48 m
磁場勾配・エッジ角度	3.2 T/m・5 deg.

<sup>1</sup> E-mail: shigeruk@sanken.osaka-u.ac.jp

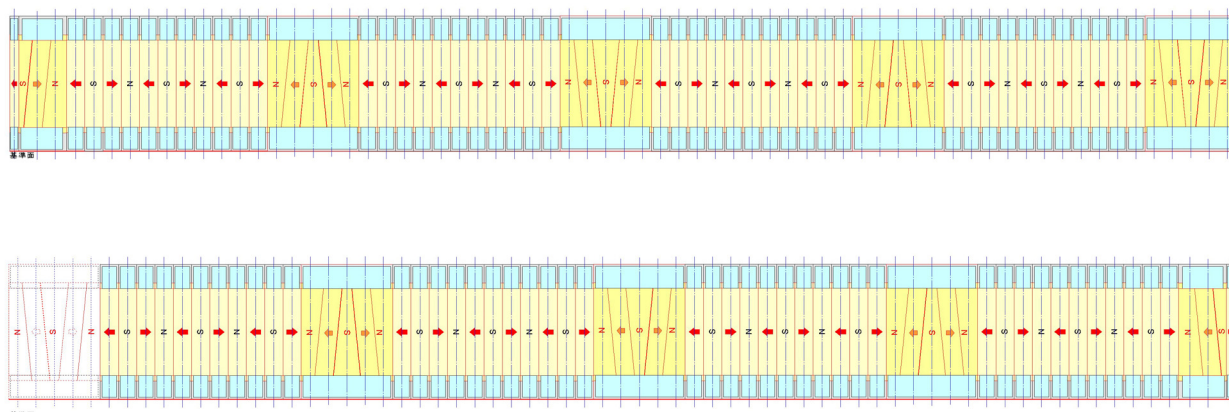


図1 強集束エッジフォーカスウイグラー磁石配列

採用し、集束・発散 (FODO) のセル数や集束力 (エッジ角度) の最適化を図った<sup>[4]</sup>。

## 2.2 永久磁石ブロック製作

磁石製作では、まず永久磁石の素材ブロック内で強度のかたよりなどが無いかを調べるために、素材ブロックの表面磁場をホール素子で測定した。その結果、磁石の機械的中心と磁場強度分布の中心がプレス方向に約2 mmずれている事が分った。この原因として、磁石を磁場中プレス形成する際にプレス方向の磁石固定位置と磁場印加用の電磁石コイルの磁場軸とが2 mm程度ずれていた事が考えられる (プレス軸と磁場方向は直交)。今回の磁石加工ではプレス面の表裏の区別をし、素材ブロックの機械的中心から2 mmずらした位置から磁石の切り出しを行った。磁石ブロックは約1割の予備を含め、全部で8タイプ製作した。加工後に1つのブロックに対して、N極とS極の両面と、各極で中心軸のまわりに永久磁石を180度回転させた位置の計4回の測定を行った。タイプにより若干の違いはあるが通常部に使用する縦磁化磁石88個については、磁場強度のばらつきは標準偏差で約0.2 %、N極とS極間で磁場強度の平均値の差は約0.5 Gauss (約0.03 %) であった。予備の磁石を含めた全磁石ブロックから、N極とS極の強度差が小さく、かつ強度のばらつきが全体で小さくなるように磁石を選択し、使用する位置と組み合わせを決めた。

## 2.3 磁石の初期配列

磁石の初期配列は通常部分とエッジ部分で別々に決めた。エッジ部は、台形の縦磁化磁石を中心にエッジ付き横磁化および縦磁化磁石が両側に付き、計5個の磁石で1つのユニットを形成する。この5個の磁石の組み合わせは、表面磁場測定の結果をもとにユニット間で磁場強度のばらつきが最も小さくなるように決めた。そして、5個の磁石を接着して組み立て、全体を1つのホルダーに取付けた後にフリップコイルで積分磁場 ( $B_s$ ) を測定した。これらのエッジ付き磁石ユニットのウイグラー内での配置

は、対向するユニットで測定した  $B_s$  の差が小さくなるように組み合わせ、上流からその差が小さい順に配置した。

通常部分の配列については、7箇所のエッジユニット部に平均的な磁場強度の直方体磁石があると仮定し、磁石単体でフリップコイルを用いて測定した磁場データから磁石配列の最適化を行った。

## 3. 磁場測定

### 3.1 測定装置

ウイグラーの磁場測定と磁場調整は高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で行った。強集束ウイグラー磁石は、既存のウイグラー磁石と交換できるように、上側と下側磁石はそれぞれ4枚のステンレス製基盤に取り付けられている。KEKで製作中の真空封止型アンジュレーターの機械架台に、鋼鉄製の取り付け治具を使用して、強集束ウイグラー磁石を取り付けて磁場測定した。ウイグラー磁石と平行に置いた長尺リニアステージに、垂直方向 (y 方向) と水平方向 (x 方向) の磁場を測定するための2つのホール素子を取り付け、ビーム軸方向 (z 方向) に沿って1 mmステップで移動させる。また、小型リニアステージにより水平・垂直方向にもホール素子の移動が可能である。これらのリニアステージはステッピングモーターで駆動し、マグネスケールでその位置を読む (読込みの位置分解: 5 $\mu$ m)。ホール素子を取り付けたホルダーの温度をモニター・制御する事により、約0.1 Gaussの精度で磁場測定を行った。水平垂直方向のホール素子とウイグラー磁石との初期の位置出しは、基準ブロックとセオドライトを用いて行い、最終的な縦方向の基準位置 (y=0) はウイグラー内の異なる z 位置の何点かで縦方向の磁場分布を測定し決定した。z 軸方向の基準位置に関しても、通常部分の縦磁化磁石上の磁場が最大となる位置から導き出した。z 方向の基準位置 (z=0) は、ウイグラー中央部のエッジ付き縦磁化磁石の中心とした。

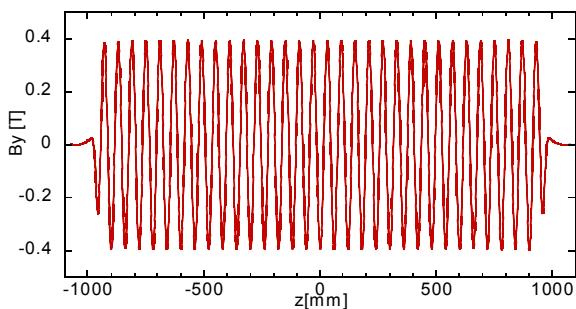


図2 垂直方向磁場( $B_y$ ) (ギャップ : 30mm)

### 3.2 測定調整および磁場測定結果

今回の磁場調整では、磁石交換とチップ磁石を使用する方法を採用した。ギャップ30 mmでz軸に沿って垂直磁場を測定し、それから求まる電子軌道と半周期ごとの磁場積分値を指標に磁場を最適化した。図2にギャップが30 mmの時に測定した垂直磁場分布を示す。エッジ磁石部においてもプラナー部と同じウイグラー磁場が作り出されている事がわかる。エッジ付き磁石部もプラナー磁石配列部同様に、垂直磁場半周期毎の磁場積分値のばらつきがウイグラー全体で小さくなるように調整した。エッジユニット部は5個の磁石を接着したので磁石1つずつの交換ができないため、ユニット単位で水平方向に僅かにずらす事で積分磁場を調整した。また、今回製作した強集束型ウイグラーでは、上流・下流端部にz方向の厚さが9mmの横磁化磁石を配置することで、ビームのウイグラーへの入射軸とウイグラー内でのビーム蛇行軸が同じになるようにした。端部における磁場誤差はチップ磁石を用いることで補正した。

磁場調整後のギャップ30 mmと40 mmの水平・垂直方向のウイグラー内での軌道を図3に示す。実線が水平方向の軌道で点線が垂直方向の電子軌道である。計算に用いた電エネルギーは我々がSASEビーム実験でよく用いる11 MeVとした。調整はギャップ30 mmに対して行ったが、ギャップを40 mmに広

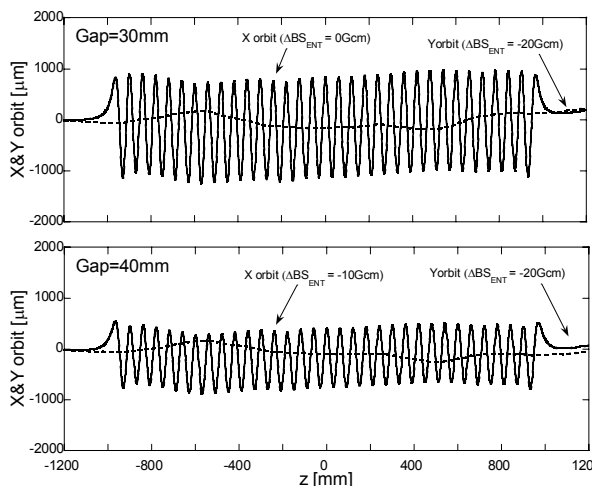


図3 ウイグラー内の水平・垂直方向の電子軌道上 : ギャップ30mm、下 : ギャップ40mmの場合

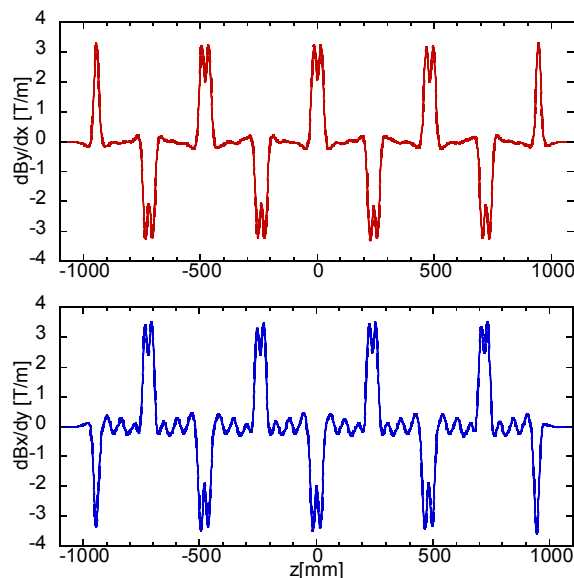


図4 測定された垂直磁場から算出された、水平方向磁場勾配 :  $dB_y/dx$  (上) と垂直方向磁場勾配 :  $dB_x/dy$  (下)

げた場合にもウイグラー中の周期磁場が良好に保たれている事が分る。ギャップ30 mmと40 mmでのピーク磁場は0.392 Tと0.2315 Tである。

次に、水平方向の磁場勾配はx軸上の垂直磁場 $B_y$ から、垂直方向磁場勾配はy軸上の水平磁場 $B_x$ からそれぞれ線形フィットする事により算出した。図4に求めた磁場勾配を示す。水平・垂直の両方向ともピークで約3.2 T/mの磁場勾配がエッジ部で作られていることを確認した。また、エッジ部におけるビーム集束力のばらつきを7箇所のエッジユニット部について1周期分の磁場勾配を積分することによって調べた。その結果、水平・垂直方向の集束力のばらつきは標準偏差でそれぞれ1.0%と1.1%である。垂直方向の磁場勾配の平均値は、水平方向のそれよりも約5.5%大きい。また、図4の下図に示す垂直方向磁場勾配に、本来なら存在するはずの無い領域で、周期的に変化する磁場勾配が見える。この磁場勾配の周期と $y=0$ での $B_x$ の分布が良く似た傾向を示している。今後、磁場測定結果の解析を進め水平・垂直方向集束力の差や垂直方向の周期的なバックグラウンドの原因を明らかにすると共に、実際に電子ビームを用いたSASE実験を行っていく予定である。

### 参考文献

- [1] G. Isoyama et al., Nucl. Instr. and Meth. A 507 (2003) 234.
- [2] S. Kashiwagi et al., Proceedings of the 26th International FEL Conference, Trieste, Italy, Aug. 29-Sep. 3, p458, 2004
- [3] 野田孝典 他, “エッジフォーカスウイグラーの開発研究”, Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan (Aug.4-6, 2004, Funabashi Japan)
- [4] 野田孝典 他, “阪大産研遠赤外FELのためのエッジフォーカスウイグラー設計”, 本研究会