

# UNDULATOR FOR HIGH INTENSITY COHERENT TERAHERTZ RADIATION

Yuu Tanaka <sup>#,A)</sup>, Fusashi Miyahara <sup>A)</sup>, Toshiya Muto <sup>A)</sup>, Fujio Hinode <sup>A)</sup>, Kenichi Nanbu <sup>A)</sup>,  
Shigeru Kashiwagi <sup>A)</sup>, Masayuki Kawai <sup>A)</sup>, Hiroyuki Hama <sup>A)</sup>, Kimichika Tsuchiya <sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University,  
1-2-1 Mikamine, Taihaku, Sendai, Miyagi, 982-0826

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

## Abstract

A test accelerator for the terahertz source project has been under development at the Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University, in which a generation of intense coherent terahertz radiation from the very short electron bunch less than 100 fs will be demonstrated. We will supply broad-band coherent radiation from bending magnets in a ring where isochronous optics is going to be applied to preserve the short bunch length. In addition, narrow-band coherent terahertz radiation from an undulator has been considered. We constructed the undulator that is a basically a Halbach planer type composed of permanent magnet blocks. The period length of the wiggler is 100 mm, the number of periods is 25, and thus the total length is 2.532 m, including end magnet blocks for the orbit compensation. We measured the magnetic field by Hall probes, and the magnetic field was optimized by sorting of magnet blocks and inserting of small chip magnets into magnet holders. In this paper, we report on manufacturing of the undulator and the result of the magnetic field measurement.

## 高輝度コヒーレント THz 光発生のためのアンジュレータ

### 1. はじめに

東北大学電子光理学研究センターでは、加速器を用いた高輝度コヒーレントテラヘルツ光源の開発研究を進めている。本テラヘルツ光源開発研究では、100 フェムト秒以下の超短電子バンチビームを使い、アイソクロナスリングによる広帯域コヒーレント光発生およびアンジュレータを用いた狭帯域コヒーレント放射やプリバンチド FEL 実験<sup>[1]</sup>などを計画している。今回、高輝度テラヘルツ光発生に用いる永久磁石で構成されるアンジュレータを製作した。

アンジュレータの周期長や磁場強度などのパラメータは、電子ビームエネルギーが 17 MeV の時に、1 次共鳴波長がテラヘルツ帯の約 300  $\mu\text{m}$  になるように設計された。アンジュレータ内の磁場分布の測定は、長尺のリニアステージに取り付けたホール素子を使い行った。アンジュレータの磁場調整（磁石交換、チップ磁石の挿入）および磁場特性評価は、ホール素子での磁場測定結果をもとに行った。

本発表では、今年 6 月に完成した高輝度テラヘルツ光発生に用いるプラナーアンジュレータ製作について、磁場測定結果を中心に報告する。

### 2. アンジュレータ

高輝度テラヘルツ光発生のためのアンジュレータ基本パラメータを表 1 に示す。今回製作したアンジュレータはギャップが水平方向に開閉し、電子ビームは鉛直方向面内で蛇行運動する。ビーム軸の床面からの高さは、750 mm である。周期長と

周期数はそれぞれ 100 mm と 25 周期である。アンジュレータの端部に横磁化磁石を配置することにより電子ビームの入射軸とアンジュレータ内での蛇行運動の軸が同じになるようにした。ギャップ可動範囲は 44~110 mm であるが、自由空間モードでの THz FEL 開発を目的とするため、ビーム実験はギャップ 54~68 mm の範囲で行う予定である。ピーク磁場強度は、ギャップが 54mm の時に約 0.41 T であり、この磁場を発生させるために、アンジュレータを構成する磁石サイズは 110×65×25 mm<sup>3</sup> と比較的大きなものとした。また、アンジュレータギャップはステッピングモータを用いて制御され、ギャップ間隔はロータリーエンコーダを用いて計測される。制御システムは LabVIEW で開発した。ステッピングモータやロータリーエンコーダは PLC を介して制御している。

本アンジュレータでは、電子ビームエネルギーを 17MeV としたとき、波長 360~170  $\mu\text{m}$  (0.8~1.7 THz) のテラヘルツ光の発生が可能である。また、

表1 THzアンジュレータ基本パラメータ

アンジュレータタイプ	Halbach型プラナー
磁石ブロックサイズ	110×65×25 mm <sup>3</sup>
磁石材質・コーティング	Nd-Fe-B・TiN
周期長・周期数	100 mm・25 periods
全長	2.532 m
ギャップ	54 - 68 mm
ピーク磁場	0.41 T (@ gap = 54 mm)
K値	3.82 (max)

# tanaka@lms.tohoku.ac.jp

式(1)より求められる、磁場の 2 乗に比例し、電子ビームエネルギーの 2 乗に反比例する水平方向に生じる自然集束力は非常に強く、アンジュレータ内でビームサイズを一定にする適合条件を満足するためには、入射位置でのβ関数を極めて小さくする必要があり、実際にその条件で電子ビームを入射することは困難である。そのため、アンジュレータ内でのビーム水平方向のビームエンベロップは大きく変化(振動)する。

$$k_0 l = -\frac{1}{8} \left( \frac{eB_0}{p} \right)^2 \lambda_u \quad (1)$$

ここで、 $B_0$  はピーク磁場、 $e, p$  はそれぞれ素電荷、運動量である。

### 3. アンジュレータ製作と磁場調整

#### 3.1 磁石単体測定

アンジュレータを構成する永久磁石全数に対して、ホール素子を用いて、磁石表面から 27mm の距離の表面磁場分布測定を行い、その結果(磁場分布)をもとに、アンジュレータの磁石初期配列の最適化を行った<sup>[2]</sup>。今回、製作された縦磁化磁石 107 個のピーク磁場強度のばらつきは約 0.46%であった。初回のロッドで製作した磁石の歩留まりが悪く、後から追加で磁石を製作したため、全体でのばらつきが若干大きくなった。

#### 3.2 磁場測定システムおよび磁場調整方法

磁場測定システムの写真を図 1 に示す。長尺のリニアモータステージ(z 軸)の上に、水平・垂直方向(x 軸、y 軸)に移動可能なステッピングモータ駆動のリニアステージが設置されている。その 3 軸方向に移動可能なステージシステムからアルミフレームをのぼし、その先に小型の回転ステージとホール素子を取り付けられている。1 つのホルダーに水平・垂直磁場( $B_x, B_y$ )を測定するためのホール素子 2 個が設置されている。ホール素子の出力電圧は素子の温度に依存するため(1°Cで磁場が約  $10^{-3}$  変化)、チップ抵抗をヒーターとして使いセンサー



図 1: テラヘルツ光発生用アンジュレータの磁場測定の様子

ヘッドを一定温度(30 度)に保っている。チップ抵抗を 2 個使用し、片方を固定、もう一方をサーミスタでセンサーヘッドの温度を測定し、通電のオン・オフで温調をする。

実際の測定では、アンジュレータ軸に沿ってホール素子を秒速 10mm で移動させ、5180mm にわたり磁場を測定した。計算機からのデータの取得は 1kHz で行い、約 10  $\mu\text{m}$  間隔の磁場測定データを保存した。(測定の最初と最後の 20mm はステージの加速・減速区間としてデータは保存しなかった。)測定後に、測定生データから 50Hz 周期のノイズ除去と 200  $\mu\text{m}$  間隔のデータへの変換を行った。また今回の測定では、磁場の読み値が約 2Gauss オフセットをはいてしまう問題があった。原因ははっきりしていないがホール素子の電圧を読む ADC の温度依存性が考えられる。このオフセット磁場の問題は、生データからバックグラウンド磁場の値を引くことで対処した。

#### 3.3 磁場調整

アンジュレータの磁場調整は、2010/5/31~6/11 の期間に NEOMAX エンジニアリング高崎で行った。今回の磁場調整では、横磁化磁石の交換とチップ磁石を使用する方法(縦磁化磁石下に挿入)を採用した。ギャップ 54 mm でアンジュレータ軸に沿って水平磁場( $B_x$ )を測定し、それから求まる半周期ごとの磁場 1 次積分の絶対値の平均からのばらつきと、磁場の 2 重積分から求まる電子軌道(式(2))を指標に磁場を最適化した。

$$y(z) = -\left( \frac{e}{mc\gamma} \right) \cdot \int^z \int^{z'} B_x(z'') dz'' dz' \quad (2)$$

### 4. アンジュレータの磁場測定結果

#### 4.1 磁場分布と電子軌道

調整後に測定した水平磁場を図 2 に示す。図 3 にギャップが 54mm の場合のアンジュレータ磁場調整前と調整後の電子軌道を示す。アンジュレータ内での電子ビームの軌道は、電子ビームのエネルギーを 17 MeV と仮定し、式(2)より算出した。また、図 4

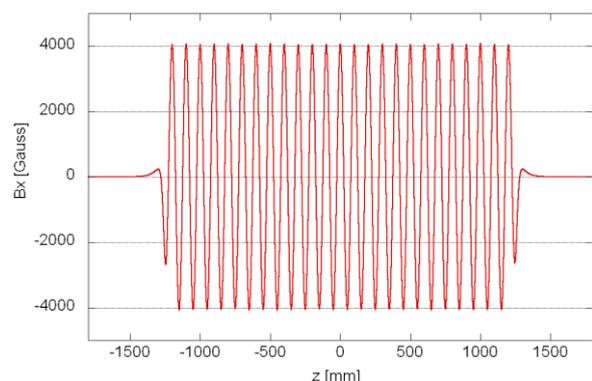


図 2: アンジュレータ軸上の  $B_x$  分布 ( $g=54\text{mm}$ )

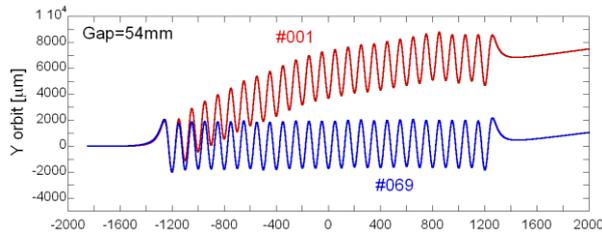


図 3 : Gap = 54mm, Eb = 17MeV のビーム軌道  
赤 : 調整前、青 : 調整後

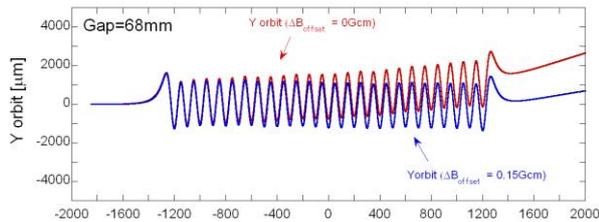


図 4 : Gap=68mm, Eb=17MeV のビーム軌道  
赤 : Offset 磁場なし、青 : Offset 磁場=0.15Gauss

にギャップが 68mm の場合の電子軌道を示す。今回の磁場調整はギャップを 54 mm に固定して行ったため、図 5 にある様にギャップを 68 mm にした場合に僅かではあるが軌道がそれてしまう。しかし、地磁気と同程度の 0.15 Gauss の磁場をオフセット磁場として加える事により、軌道修正が可能である。これらの結果から、磁場調整後はギャップを 10mm 以上変化させた場合でも、アンジュレータ内の磁場により、ビーム軌道に影響が出ないことが分かる。

次に、異なる水平・垂直位置にホール素子を移動させ、アンジュレータに沿った磁場分布を測定することで、アンジュレータ内の 3 次元磁場分布を測定した。アンジュレータ内のビーム軸付近の磁場は、式(2)の様に表すことができる<sup>[3]</sup>。

$$\begin{aligned} B_x &= B_0 \cosh(kx) \cos(kz) \\ B_y &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$B_z = -B_0 \sinh(kx) \sin(kz)$$

ここで、 $B_0$  はピーク磁場、 $k = 2\pi/\lambda_U$ 、 $\lambda_U$  はアンジュレータ周期長である。メイン磁場である  $B_x$  は  $x$  方向に  $\cosh$  関数で変化するので、 $x=0$  で最小となる。

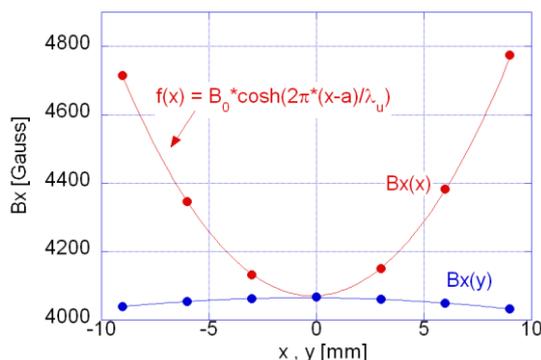


図 5 :  $z=0$  での  $x, y$  軸上磁場強度分布

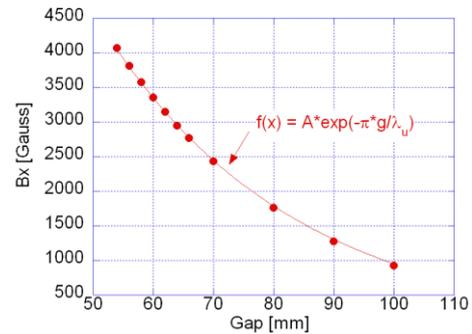


図 6 : ギャップとピーク磁場の関係

$z=0$  (アンジュレータの中心の縦磁化磁石上)での、 $x$  方向および  $y$  方向の磁場分布を図 5 に示した。ここでは、 $B_x$  の  $x$  方向分布に対して  $\cosh$  関数でフィッティングを行った。精度の良いフィッティングできているが、 $B_x$  が最小になる点が、僅かではあるが  $x=0$  からずれていた ( $\Delta x = -190 \mu\text{m}$ )。全ての縦磁化磁石上での  $\Delta x$  を求めたところ、アンジュレータ全体では、 $\Delta x$  はおよそ  $150 \sim 200 \mu\text{m}$  であった。 $x$  方向のホール素子の初期設置誤差が  $\Delta x$  程度あったと考えられる。一方、垂直方向( $y$  方向)の水平磁場強度分布は、磁石外側にいくに従い僅かに減少しているのが図 5 より分かる。 $\pm 3\text{mm}$  の位置で約 0.2% 磁場強度が減少している。

#### 4.2 磁場強度のギャップ依存性

ギャップを 54~110mm と大きく変化させ、アンジュレータ軸に沿って磁場測定を行い、ギャップとピーク磁場の関係を求めた。図 6 にその関係を示す。このグラフより、ピーク磁場強度はギャップに対して指数関数的 ( $B \propto \exp(-\pi g/\lambda_U)$ ) に変化する事が分かる<sup>[4]</sup>。

### 5. まとめと今後の予定

テラヘルツ光発生用のアンジュレータ製作を行った。磁石交換とチップ磁石を使った磁場調整により、ギャップ幅を変えても電子ビームの軌道に影響の出ない、良好な磁場をアンジュレータ内に作り出すことができた。また、異なる横方向位置 ( $x, y$  方向位置) の磁場を測定し、空間的な磁場分布を確認する事ができた。ピーク磁場強度のギャップ依存性も測定した。今後、東北大学電子光理学研究センターにおいて、Vibrating Wire 法<sup>[5]</sup>を用いた磁場測定により、アンジュレータ内の磁場分布を精密に調べる予定である。

### 参考文献

- [1] Mafuyu Yasuda et al., Proc. Of the 5<sup>th</sup> Particle Accelerator Society of Japan (2008) 75.
- [2] A. D. Cox and B. P. Youngman, SPIE 582, 91 (1985).
- [3] H. Wiedemann, Particle Accelerator Physics II, Chap. 2, 1995.
- [4] G. Brown et al., Nucl. Instr. and Meth. **208** (1983) 65.
- [5] A. B. Temnykh et al, Nucl. Instr. and Meth. **515** (2003) 387.