

[13A-03]

STUDY ON BEAM DYNAMICS IN AN UNDULATOR

M. Fujimoto*, R. Kato, M. Kuwahara, T. Igo, T. Konishi, Ravi A. V. Kumar, S. Mitani,
S. Suemine**, and G. Isoyama

Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan

**Unicon System Corp.

Abstract

We are studying electron beam dynamics in the planar undulator of the horizontal oscillation type used for infrared Free Electron Laser (FEL) and Self-Amplified Spontaneous Emission (SASE) at ISIR, Osaka University. Electron beam sizes were measured at three locations in the undulator as a function of the K-value. The vertical beam size oscillated a few times as the K-value increases, which indicates that the focusing force in the undulator is strong in the vertical direction. The beam size in the undulator has been calculated using the simple model using transfer matrices as well as numerical integration of the equation of motion under the realistic magnetic field in the undulator. Beam sizes obtained with the two methods agree each other as long as the amplitude of the oscillation is less than 5 mm. Variations of the beam sizes with the K-value and absolute values measured at the three locations were well reproduced with the simple calculation using transfer matrices. It is suggested that this strong focusing force can be used to reduce the beam size in the undulator to enhance gain of the FEL and SASE.

アンジュレーター内でのビームダイナミックスの研究

1. はじめに

我々は阪大産研附属放射線実験所の L バンド電子ライナックを用いて赤外領域における FEL および SASE の研究をおこなっている。FEL や SASE はアンジュレーター内での電子ビームと光の相互作用によって発生・増幅される。赤外領域の光を得るには、十数 MeV のエネルギーをもつ電子ビームを用いる。この大きさは他の研究所で用いられるものと比べて低い値である。アンジュレーターには永久磁石を用いた Halbach 型アンジュレーターを用いている。一般に水平振動型アンジュレーターは鉛直方向には収束作用をもつことが知られている。したがって、より大きな FEL 強度および SASE 強度を得るためには、電子ビームに対するアンジュレーターの収束作用を含むビームダイナミックスを理解することが重要である。

本稿では、アンジュレーター内でのビームサイズを測定した実験とその解析結果を報告する。

2. ビームサイズ測定実験

我々の用いる Halbach 型アンジュレーターは上下磁極間隔を調整し、K 値を変化させる。K 値は

$$K = \frac{eB_0\lambda_u}{2\sqrt{2}\pi mc} \quad (1)$$

で定義されており、ビーム軌道の最大振れ角を表すパラメーターである。このアンジュレーターのパラメーターを表 1 に示す。

アンジュレーターの入口と出口からそれぞれ 85 mm の位置と、中央の合計 3 箇所スクリーンモニターが設置されており、ここでビームサイズを測定することができる。スクリーンモニターには厚さ 1 mm のアルミナ蛍光板 (Desmarquest 社製 AF995R) を用いている。ビーム通過時の発光を CCD カメラ

表 1 アンジュレーターのパラメーター

period length (λ_u)	60 mm
number of period	32
K-value	0.013 ~ 1.472

*M.Fujimoto,06-6873-8486,fri25@sanken.osaka-u.ac.jp

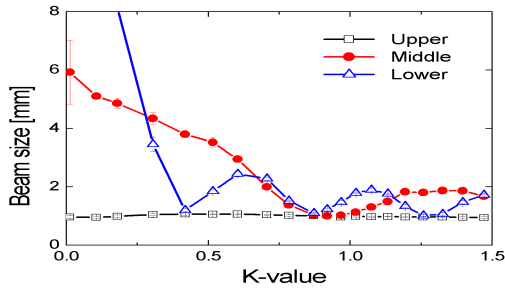


図1 測定した鉛直方向ビームサイズ

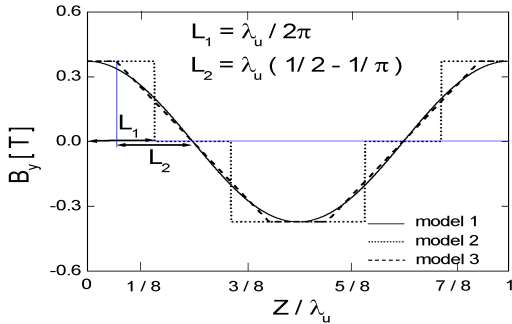


図2 アンジュレーターの磁場

で撮影し、画像処理プログラム(Sensor Physics 社製 Laser Test)を用いて解析する。画像の光の強度を数値化してガウス分布を仮定し、その標準偏差をビームサイズとした。

測定実験では、アンジュレーターの上流側と中央、下流側の3箇所でビームサイズをK値の関数として測定した。1つのK値において5枚の画像データをとった。それらのビームサイズの平均をそのK値でのビームサイズとした。また5つのビームサイズの標準偏差を誤差とした。K値に対してプロットした鉛直方向ビームサイズを図1に示す。

3. 測定結果の解析

図1より鉛直方向の収束力が大きいことがわかる。鉛直方向のビームサイズ変化を解析するために、まずはアンジュレーターを転送行列で表現する。

3.1 アンジュレーターのモデル化

アンジュレーターの磁場を次のように仮定する。

$$\begin{aligned} B_x &= 0 \\ B_y &= B_0 \cos(k_u z) \\ B_z &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで k_u はアンジュレーター周期長 λ_u を用いて $2\pi/\lambda_u$ で表される。この式(2)をモデル1として図2

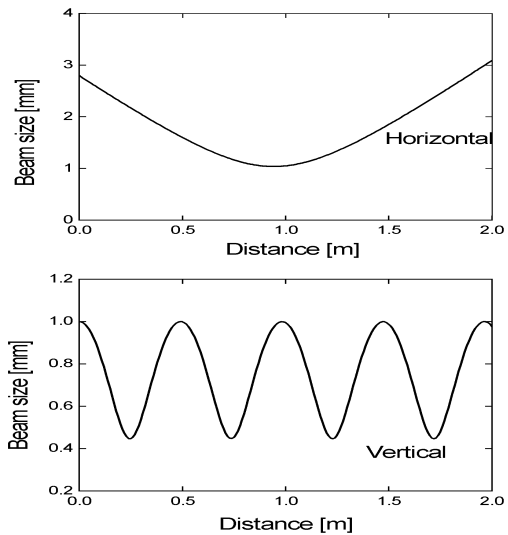


図3 解析によって求めたビームサイズ
水平方向(上) 鉛直方向(下)

に実線で示す。転送行列でこの問題を扱うためにモデル2のような方形磁場で近似した。偏向磁石の半分の長さ L_1 は、モデル1とモデル2における磁場の積分値が等しくなるように選択した。モデル1との差を小さくするため、モデル3のようにエッジ部分を長さ L_2 で線形に変化する磁場で置き換えた。

以上の近似によりアンジュレーターは、自由空間の転送行列と線形漏れ磁場領域でのエッジ効果を考慮した偏向磁石の転送行列^[1]との積で記述できる。

3.2 ビームダイナミクス

前節のモデルを用いると、水平方向のビームサイズ x と垂直方向のビームサイズ y は、ビーム軸上の位置 z の関数として次のように与えられる。

$$x(z)^2 = a + bz + cz^2 \quad (3)$$

$$y(z)^2 = A + B \cos 2\sqrt{f}z + C \sin 2\sqrt{f}z \quad (4)$$

ここで a, b, c は入口でのツイスパラメーター(β_0, α_0)とエミッタンス(ε)で決まる定数である。また $f((K/\gamma)^2)$ は収束作用を表す関数であり、 A, B, C は $\beta_0, \alpha_0, \varepsilon$ および f で決まる定数である。ビームエネルギー $E=12.5$ MeV、磁極間隔 $g=30$ mmで計算したビームサイズを図3に示す。これより鉛直方向の収束作用が大きいことがわかる。水平方向に関してはエッジ効果による発散と偏向磁石内での収束が打ち消し合っている。また鉛直方向に関してはエッジ効果による収束作用の影響が現れている。

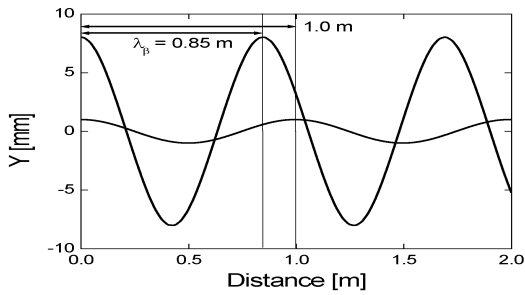


図4 鉛直方向の軌道数値計算

3.3 解析方法の評価

3.1 で仮定した式(2)はマクスウェルの方程式を満たしていない。より現実的な磁場は以下の式で与えられる。^[2]

$$\begin{aligned} B_x &= 0 \\ B_y &= B_0 \cosh(k_u y) \cos(k_u z) \\ B_z &= -B_0 \sinh(k_u y) \sin(k_u z) \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)では y の変化により双曲線関数的に磁場が変化する。しかし、転送行列を用いた解析ではそれを考慮していない。したがって、 y の違いによる収束力の変化を評価する必要がある。

式(5)で与えられる磁場中における粒子の軌道の数値計算を行なった。E=12.5 MeV、g=30 mm で様々な y の値を与えた。そのうち $y=1$ mm および 8 mm の計算結果を図4に示す。 y の違いによる磁場の変化の影響は収束力の違いとして、ベータatron振動の周期長 λ_β の差に現れている。

一方、転送行列を用いた解析によりビームサイズ変化の周期長を求めることができ、上記の条件では 0.493 m となる。したがって、粒子のベータatron振動の周期長は 0.986 m である。この値と数値計算結果より読み取れる値とを比較した結果、ビームサイズが 5 mm 以下では収束力の差は 5% 以内であり、3 mm 以下では 2% 以内であることがわかった。よって、3~5 mm 以下のビームサイズをもつ電子ビームに対して、この転送行列を用いてモデル化した解析が適用できると考えられる。

3.4 測定結果と計算結果の比較

測定結果と式(4)とをビームサイズ 5 mm 以下の範囲で比較した。その結果を図5に示す。これよりビームサイズ変化の極大極小の位置を含め、ビームサイズの変化は実験と理論が良く一致しているこ

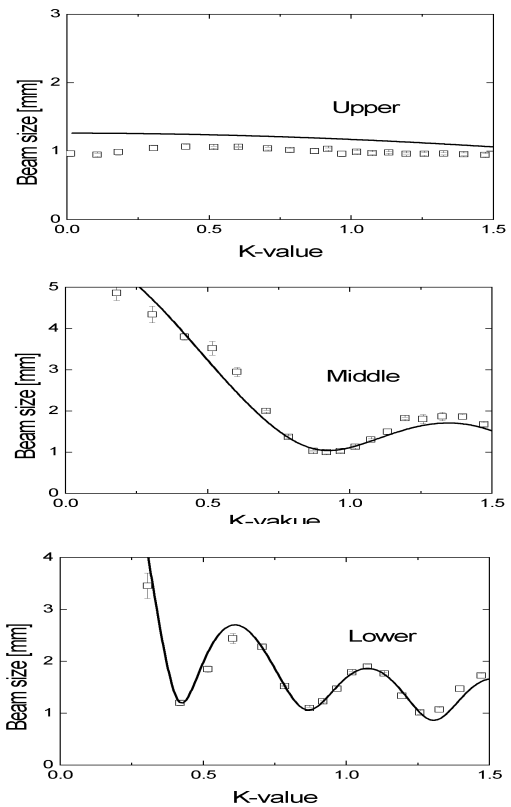


図5 測定結果と計算結果との比較

とがわかる。また、ビームサイズの絶対値も式(4)で、ほぼ再現できている。よって、ビームサイズ 5 mm 以下の範囲では転送行列を用いた解析を適用できると結論付けた。

4. まとめ

我々は FEL や SASE の研究においてビームサイズが 3 mm 以下の範囲で主に実験を行なう。したがって、今回の研究結果は FEL や SASE の実験を行なうに当たり非常に有益である。アンジュレーターの 12.5 MeV の電子を 2 m で 2 回振動させる収束力の大きさにより、アンジュレーター内のビームサイズを小さく保つことができるであろう。今後は、ビームダイナミクスと FEL 強度および SASE 強度との関係を測定・検討し、より高い出力をもつレーザーの開発を目指す。

参考文献

- [1] 野田 章、「OHO'89 陽子シンクロトロン of イオン光学系」
- [2] 「入門 自由電子レーザー」 日本原子力学会