

## §5. 光から見た加速器・光源

5-2. アンジュレータ中の不整磁場が電子軌道  
および光ビームに及ぼす影響

鎌田 進

高エネルギー物理学研究所放射光実験施設  
MR 超高輝度放射光計画推進室\***Effects of Undulator Imperfection on Electron  
Orbit and Light Characteristics**

Susumu KAMADA

National Laboratory for High Energy Physics (KEK)

A change of the electron orbit depending on the gap height of the undulator was observed in the MR light source experiment together with the widening of angular divergence of light. The angle widening of light was partly reduced by superimposing a uniform field to the undulator horizontally.

A computer simulation was conducted assuming random rotation of the undulator poles and it gave qualitative agreement with the observations.

For light sources of new generation, proposed was an undulator of divided structure, which allows independent movement of gaps and therefore makes Beam-Based-Correction of undulator field possible.

1. アンジュレータギャップ開閉に伴う電  
子ビーム平衡軌道の変動

MR 放射光ビーム試験において、電子ビームの垂直平衡軌道がアンジュレータギャップの開閉にともなって変動することが観測された。このとき水平方向の変動は見られなかった<sup>1)</sup>。この電子ビームの垂直軌道変動を図1に示す。図中×印は、ギャップ高100 mm 時の平衡軌道を基準とし、観測された軌道変動を再現するアンジュレータ位置の誤差キック量をシュミレーションによって求めたものである。

この観測された誤差キック量  $\theta_{\text{kick}}$  はギャップ間隔  $H_{\text{gap}}$  に比例する成分とアンジュレータパラメーター  $K$  に比例する成分 (ギャップ間隔の指数関数に比例) の和として(1)式によって再現することができ図中○印で示されている。

$$\theta_{\text{kick}}[\mu\text{rad}] = 0.1585 H_{\text{gap}}[\text{mm}] - 10.02 K - 15.71 \quad (1)$$

(1)式の右辺第2項は永久磁石列が生成するアンジュレータ磁場自身の不整が原因と考えられる

\* 高エネルギー物理学研究所放射光実験施設 MR 超高輝度放射光計画推進室 〒305 つくば市大穂 1-1  
TEL 0298-64-5682 FAX 0298-64-7529 e-mail Susumu.Kamada@KEK.jp

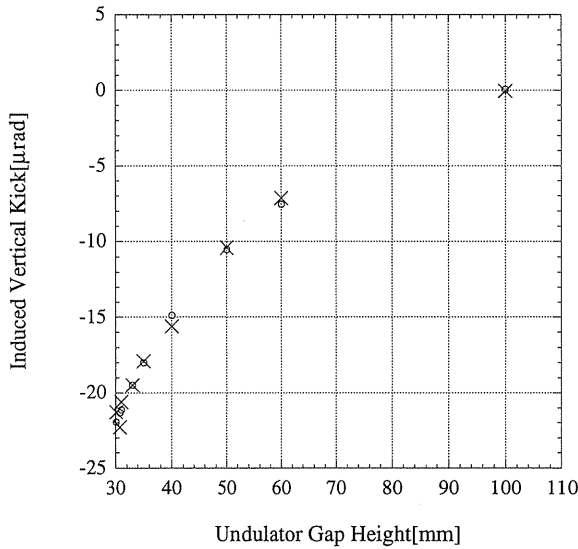


Figure 1. Vertical kick of electron orbit induced by the undulator.

が、第1項はよりゆるやかな周期構造を持つ誤差磁場が原因と推定される。もちろんこの他にも地磁気、電力線からの漏洩磁場などアンジュレータ設置環境に不整磁場が存在している可能性もあるが、そのうちアンジュレータギャップ開閉に伴い変動する成分は観測された誤差磁場の一部となっている。一方ギャップ開閉に依る変動をしない不整磁場成分についてこの測定からは何も言うことができない。

正規のアンジュレータ磁場でも、アンジュレータ中で垂直電子軌道の変位があると収束作用による垂直キックが生じる、しかしその効果を見積もるとここで観測された誤差キック量に比べほぼ1桁小さい<sup>2)</sup>。

## 2. 光発散角のギャップ開閉に伴う変動および水平磁場による補正効果

観測された誤差キックのために光発散角の増大やスペクトルの劣化など光ビームパラメータに悪影響が生じていると考えられる。これを評価するためアンジュレータギャップ間隔を変えて垂直方向光発散角の測定を行った。各ギャップ間隔毎に、アンジュレータ放射の基本波長  $\lambda_1 = \lambda_u(1 +$

$K^2/2)/(2\gamma^2)$  の光について測定をした。ここで  $K$  はアンジュレータパラメータ、 $\lambda_u$  はアンジュレータ周期長、 $\gamma$  は電子ビームの相対論的ローレンツ係数である。(−++) に配置されたモノクロメータ第1, 第2結晶およびアナライザ結晶を用いて、アナライザ結晶のロッキングカーブの分散  $\sigma_r'^2$  から光発散角が求められた<sup>3)</sup>。測定結果を図2に示す。ここで横軸にはギャップ間隔の代わりに、(1)式による誤差キック量を使った。また縦軸に示す光垂直発散角の標準偏差  $\sigma'_{\text{LightBeam}}$  は、ロッキングカーブの分散  $\sigma_r'^2$  から、結晶回折角度幅の分散  $\sigma_m'^2$  および理想的放射発生過程で決まる全長  $L$  のアンジュレータの光発散角分散  $\sigma_p'^2 = \lambda_1/(2L)$  を(2)式に従って差し引いたものである。

$$\sigma'_{\text{LightBeam}} = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_r'^2 - \sigma_m'^2 - 4\sigma_p'^2} \quad (2)$$

図2の縦軸に示される垂直光発散角の内訳は電子ビーム垂直発散角の標準偏差  $\sigma'_{\text{electron}}$ 、ギャップ間隔に依存する不整磁場由来の光発散角標準偏差  $\sigma'_{\text{gap}}$  およびギャップ間隔に依存しない不整磁

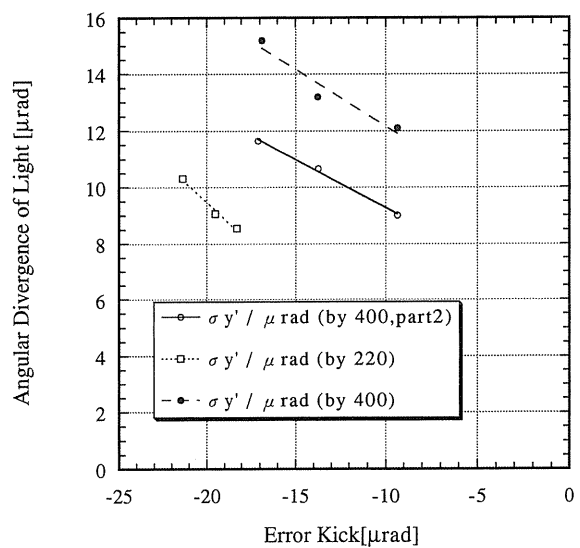


Figure 2. Vertical angular divergence of light vs. Error kick by the undulator.

場由来の光発散角標準偏差  $\sigma'_{\text{environment}}$  を使い(3)式に表すことができる。

$$\sigma'_{\text{LightBeam}} = \sqrt{\sigma_{\text{electron}}'^2 + \sigma_{\text{gap}}'^2 + \sigma_{\text{environment}}'^2} \quad (3)$$

アンジュレータ磁場が完全なら、 $\sigma'_{\text{LightBeam}}$  は電子ビーム垂直発散角を示しギャップ間隔に依存しないはずである。図2には結晶交換作業を間に挟んで採られた3群のデータが示されている。何れの群でも誤差キック量に比例して光発散角が増大している。またその比例係数も似た値でギャップ間隔に依存した不整磁場の影響を明示している。一方各群間で測定値はかなり大きくばらついているがこの原因は理解できていない。

垂直誤差キックを打ち消す水平磁場をアンジュレータ磁場に重畳することで、光発散角も改善できると期待される。そこでアンジュレータ全体に渡りほぼ一様に水平磁場を発生する補正コイルを急遽設置しその効果を調べた<sup>4)</sup>。図3に示すように補正コイル電流が誤差キックを殆ど打ち消す時、光ビーム発散角は極小になることが確認された。

### 3. アンジュレータ不整磁場モデルに基づく光ビームパラメータのシュミレーション

将来の放射光源アンジュレータの設計製作や補正方式を開発する為には不整磁場の発生原因を特定しなければならない。そのために実験観測結果を合理的に説明する誤差モデルの確立が必要である。

その第一歩として不整磁場の光ビームへの影響を定量的に評価できる必要がある。この目的のために加速器設計、解析そして運転用総合化計算コードSADに、任意磁場の電子の運動から発生するシンクロトロン放射電磁場及びそのスペクトルを計算する新機能が付加された<sup>5)</sup>。

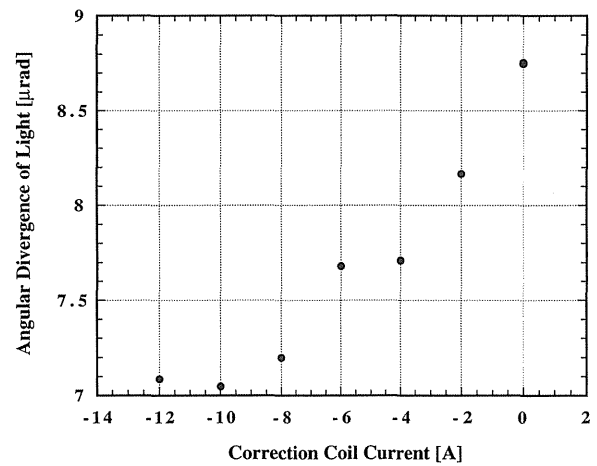


Figure 3. Correction of angular divergence of light by superimposing magnetic field horizontally.

#### (A) アンジュレータ磁場のモデル化

誤差を含んだアンジュレータ磁場を表現するために、SADコードに加速器要素として登録されているシャープエッジ偏向磁石を用いる。このため従来のアンジュレータ磁場の取り扱いと図4に示す差異が生じる。ここでは従来のサイン関数型磁場とスペクトルが一致するように偏向磁石強度を決める。即ちサイン軌道と円弧軌道の電子軌道長が互いに等しくなるようにする。ここで行ったモデル化は最も単純なもので、より近似を上げるには多数の偏向磁石を使ってアンジュレータ磁場を表現する。

#### (B) 不整磁場の誤差モデル

従来のアンジュレータ製作における水平磁場の測定精度はホールプレナー効果のため磁化方向の精度に換算して0.5度程度とされてきた<sup>6)</sup>。これは、(1)式の誤差キックのうち右辺第2項の原因がアンジュレータ磁極の磁化方向ランダム誤差である事を強く示唆する。ここで行なおうとするシュミレーションは基本的にこの仮説の妥当性を確認する為のものである。

磁化方向のランダム誤差を表すため、標準偏差0.5度のガウス分布に従い乱数発生によりアンジュレータを構成する偏向磁石に磁極回転誤差を与える。さらに(1)式右辺第1項の存在に鑑み、誤

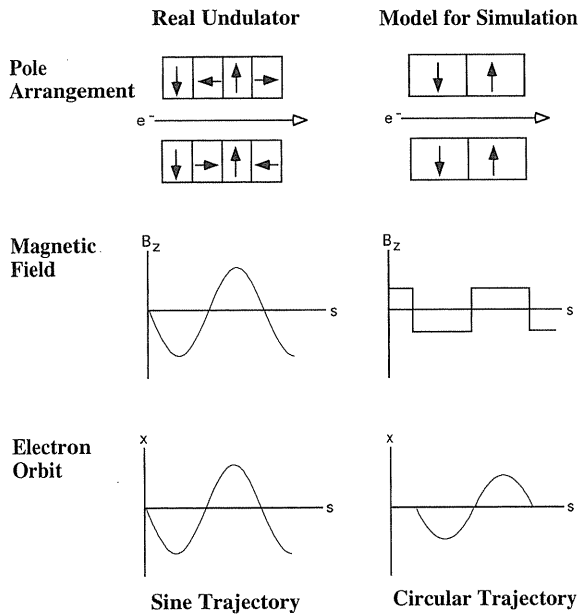


Figure 4. Modeling of undulator.

差キック総量が(1)式と一致するように一様水平磁場を K 値に応じて重ね合わせる。

(C) 誤差シュミレーションの方法と結果

上述のモデルに基づいて、磁極回転誤差を5種類の種数から発生させた乱数列で与え、K=1の場合にそれぞれの誤差の影響を評価した。電子軌道のアンジュレータ内垂直変位、ゼロエミッタンスのシンクロトロン放射スペクトルピーク位置と幅、そしてスペクトルピークにおける光束角密度および水平垂直光発散角を表1にまとめた。有限エミッタンスの電子ビームから発生する放射光

のパラメータはこれらのコンボリューションにより得られる。

シュミレーションに見る垂直光発散角の増大は、不整磁場を作る乱数発生種数によりかなり大きく異なっており、観測結果をその範囲内に収めている。

(D) ギャップ間隔依存性シュミレーションの方法と結果

アンジュレータに磁場誤差が存在すると、ギャップ間隔を変えた時、光ビームパラメータがどう変化するかを知るシュミレーションも行った。ここでは、乱数発生種数が11の場合についてのみ計算をした。無誤差および有誤差の場合の光発散角を、K 値を変化させながら誤差シュミレーションと同じ方法で求め図5に示す。

K 値が0.2程度では殆ど誤差の影響がないが、ギャップを閉めるに連れ光発散角が特に垂直方向で増大してゆく様子は観測結果と定性的に一致している。

(E) 補正シュミレーションの方法と結果

磁場補正の効果を見るために、誤差シュミレーションと同じ誤差例について補正のシュミレーションを行った。まずアンジュレータ全体として垂直誤差キックが発生しないよう一様水平磁場を重ね合わせる補正をした。次にアンジュレータを2分割して、各々で誤差キックが発生しないよう2種類の一様水平磁場を重ね合わせる補正をし

Table 1. Simulation of light characteristics emitted from undulators with pole rotation error

seed number for random number generation	kick angle by uniform field error [ $\mu\text{rad}$ ]	vertical orbit displacement [ $\mu\text{m}$ ]	photon energy at spectrum peak [eV]	angular flux density at spectrum peak [photons/e <sup>-</sup> /mrad <sup>2</sup> /0.1%BD]	width of spectrum peak [eV]	angular divergence of light at spectrum peak hori./vert. [ $\mu\text{rad}$ ]
No Error	0	0	9004.65	9.61	52.73	3.39/ 3.16
11	1.66	20.17	8906.98	4.11	105.86	4.76/10.41
13	2.95	8.30	8960.47	9.21	62.00	3.60/ 6.04
15	0.90	19.75	8902.33	3.19	128.23	6.65/10.28
17	16.83	13.42	8937.21	8.56	64.13	3.70/ 7.41
19	-11.35	41.41	8669.77	2.03	146.03	8.49/21.76

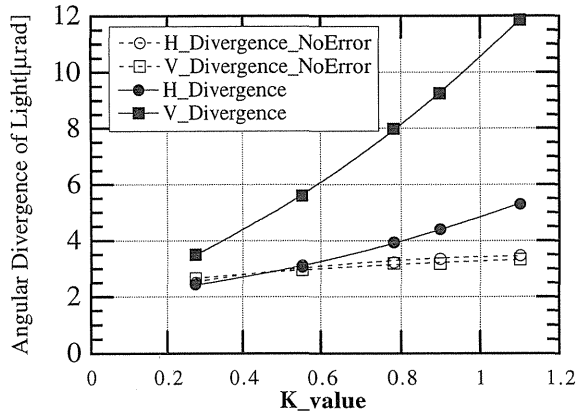


Figure 5. Simulation for K-value dependence of angular divergence of light.

た。さらに、アンジュレータを3, 4そして5分割した場合についても同様に補正のシミュレーションを行った。

この補正シミュレーションに現れる補正効果も、乱数発生の種数によりかなり幅がある。大局的に見れば分割数を増すと補正効果は向上したが、分割数を増すことにより悪化する場合もある。しかし実施したシミュレーションの範囲では、3分割補正まで可能なアンジュレータなら、ここで仮定した量の磁場誤差が存在しても光束角密度を無誤差時の90%以上にまで回復できる事が示された<sup>7)</sup>。

MR放射光ビーム実験で使用したアンジュレータは3分割構造ではあったが、独立なギャップ開閉を念頭に置いた仕様ではなかったため補正シミュレーションで行った多分割補正の実験はでき

なかった。

#### 4. まとめ

アンジュレータギャップ開閉に伴う、電子ビームの軌道変動そして光発散角の増大が観測された。この光発散角増大現象は、アンジュレータにほぼ一様な水平磁場を重畳することで部分的に補正された。

磁極磁化の回転誤差モデルに基づき、観測条件に則したパラメータで磁場不整と補正の効果についてシミュレーションが行われ、観測結果との整合性が確認された。さらに追及を進めるには、特に水平方向の誤差磁場測定データおよびそれを取り込むための不整磁場モデルの改善が必要である。

また独立にギャップ開閉が可能な多分割型アンジュレータを使用すれば、ギャップ開閉に伴う電子軌道の変動測定から不整磁場を有効に補正できる事が示された。この方法は将来の放射光源で有用であろう。

#### 文献

- 1) 福間 均：私信。
- 2) 神谷幸秀：KEK Report 89-24.
- 3) 杉山 弘：KEK Proceedings 96-8.
- 4) 山本 樹：KEK Proceedings 96-8.
- 5) K. Oide: "SAD home page", <http://www-acc-theory.kek.jp/sad.html>.
- 6) 北村英男：私信。
- 7) 鎌田 進：KEK Proceedings 96-8.