

CHARACTERIZATION OF THE EFFECT OF THE VARIABLY POLARIZED UNDULATOR ON ELECTRON BEAM AT THE SAGA-LS STORAGE RING

Tatsuo Kaneyasu¹, Yuichi Takabayashi, Yoshitaka Iwasaki, Shigeru Koda
SAGA Light Source
8-7 Yayoigaoka, Tosu, Saga 841-0085

Abstract

An APPLE-II type variably polarized undulator has been installed in the SAGA-LS storage ring during the winter shutdown of 2008. We have investigated influence of the undulator on the electron beam, resulting from the changes in the pole gap and phase. The influence of the undulator is analyzed in terms of residual field strength and a focussing effect. Based on the beam measurements, we have developed correction methods to compensate closed orbit distortion, betatron tune shift and betatron coupling depending on the gap and phase.

電子ビームを用いた可変偏光アンジュレータの不整磁場評価

1. はじめに

SAGA-LS加速器グループでは、ユーザーサイドからのVUV-SX領域における高輝度可変偏光光源に対する要望に答えるべくAPPLE-II型アンジュレータ^[1]の開発を進めてきた。2008年にはアンジュレータ製作と磁場調整を終え、冬季のマシン停止期間中にSAGA-LS電子蓄積リング長直線部への設置を完了した^[2,3]。本年度中のアンジュレータ光利用実験に向けて、現在ビームラインの立上げ調整が進行中である。

APPLE-II型アンジュレータでは、四列の磁石列のうち斜めに対向する二列を長手方向に変位(位相差 ΔZ)させることで任意の偏光(水平・垂直直線偏光, 左右円偏光等)を得る。したがって、ビームライン側からユーザーが随時光子エネルギーや偏光状態を変更するためには、磁極ギャップ駆動に加えて位相変化が電子ビームへ及ぼす影響を調査し、それらを補償するシステムの構築が必須である。そこでアンジュレータの設置に引き続き、不整磁場評価を目的としたビーム試験を行った。ビーム試験ではギャップ・位相変化に対するビームの応答を観測し、ビーム軌道の変位、チューンシフト及びカップリング変化からアンジュレータの不整磁場(ダイポール, 四極, スキュー四極)を評価した。現在測定結果をベースとして、フィードフォワード制御による補償システムの構築を進めている。本稿ではビームへの影響調査の結果と磁場測定データの比較、補償システムの概要を報告する。

2. APPLE-II型アンジュレータ

SAGA-LSリングに設置したAPPLE-II型アンジュレータのパラメータを表1にまとめる。磁気回路の周期長は72 mm, 周期数は28となっており、偏光切

り替えのために斜め対向の磁石列は長手方向 ± 36 mmの範囲で独立に変位可能である。なおアンジュレータのリングへの設置・立上げ状況については施設報告^[3]を参照されたい。またアンジュレータ設置前の磁場測定では、フリップコイル法による水平面内の積分磁場とホール素子を用いた軸上磁場の評価を行っている。

表1: APPLE-II型アンジュレータの主要パラメータ

磁石材質	Nd-Fe-B
周期数	28
周期長 [mm]	72
磁極ギャップ [mm]	30 - 200
位相可動範囲 [mm]	-36 - +36
光子エネルギー (1-7次) [eV]	35 - 1000 eV

3. ビーム試験

APPLE-II型アンジュレータが電子ビームへ及ぼす影響を調査した。試験の手順としては、まずアンジュレータ設置前に不整磁場の入射に対する影響を調べ、アンジュレータ設置後には不整磁場(ダイポール, 四極, スキュー四極)評価を目的としたビーム試験を実施した。ビーム試験の結果に基づき任意のギャップ・位相に対して、軌道の歪み、ベータatronチューンのシフト、カップリング変動を補償するシステムを構築中である。

3.1 入射への影響

SAGA-LSは低エネルギー入射(255 MeV)であるため、入射時の不整磁場の影響は蓄積状態(1.4 GeV)に比べ相対的に大きくなる。そこでAPPLE-II型アン

¹ E-mail: kaneyasu@saga-ls.jp

ジュレータの設置前に、長直線部中央におけるキック角と入射効率の関係を調べた。図1に測定結果を示す。測定では長直線部の前後に設置されているステアリング電磁石を用いて、近似的に直線部中央へキックを与えた。図1ではキック角を積分磁場(BL 積)へ換算している。ガウス関数を用いたフィットにより許容キック角 (HWHM)として、水平方向の場合は480 G-cm、垂直方向には320 G-cmを得た。これに対し最大ギャップにおける磁場測定では、不整磁場は水平方向キックが22 G-cm、垂直方向のキックで30 G-cmと評価された。よって不整磁場の入射への影響は無視できると考えられる。設置後の試験においても入射効率の低下はみられず、不整磁場は入射へ影響していないことが確認された。

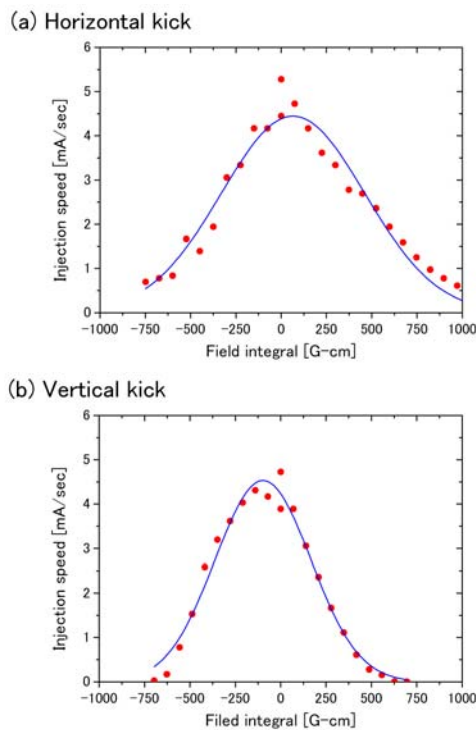


図1：ダイポールキックと入射効率の関係。(a)水平方向のキック。(b)垂直方向のキック。

3.2 蓄積状態への影響

3.2.1 ダイポール磁場

アンジュレータの不整ダイポール磁場の評価を目的として、ギャップと位相の変更に起因する電子ビームの軌道変位を測定した。図2にビーム試験と磁場測定データの比較を示す。ビーム試験で求めた不整磁場(BL 積)は、24箇所のBPMで測定した軌道変位の平均値から算出しており、最大ギャップ200 mmの不整磁場を原点としてプロットした。なお、位相方向については代表的な偏光モード(水平直線： $\Delta Z = 0$ mm, 垂直直線： $\Delta Z = \pm 36$ mm, 左右円偏光： $\Delta Z = \pm 27$ mm)のみを示している。いずれの偏光

状態であっても、ビーム試験と磁場測定でおおよその傾向は一致している。不整磁場の強さとしては数十G-cmであり、アンジュレータ前後のステアリング電磁石で十分に補償可能な強度である。ビーム試験の測定値を用いて任意のギャップ・位相に対応する二次元補償テーブルを作成し、フィードフォワード方式の軌道補償システム^[4]を構築した。

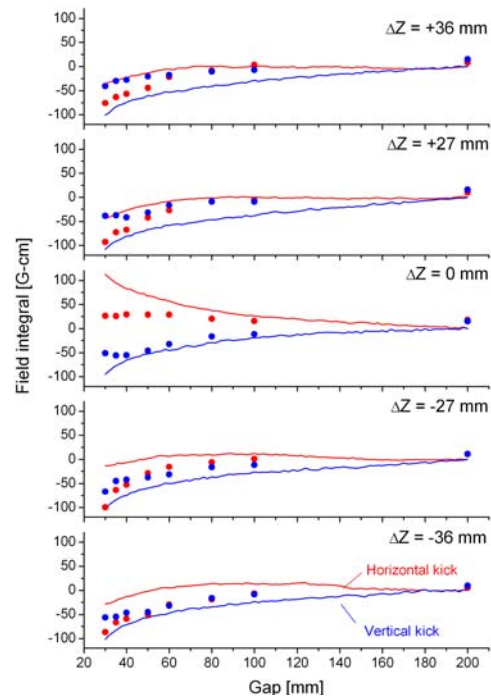


図2：不整ダイポール BL 積のギャップ・位相依存。丸印は磁場測定の結果。実線はビーム試験の結果。

3.2.2 四極磁場

ベータatronチューンのギャップ・位相依存を測定した。ここでは最も単純な水平偏光モードにおけるチューンシフトと不整四極磁場を報告する。図3にチューンのギャップ依存を示す。垂直チューンはギャップを閉じると増大するが、水平方向のチューンシフトは無視できる程度である。この傾向は理想的な平面型アンジュレータにおけるチューンシフトと一致している。一般に平面型アンジュレータでは垂直方向には収束力が存在する。収束力に関する一般式^[5]より、垂直方向のチューンシフトはアンジュレータ区間の垂直ベータ関数の平均値 $\bar{\beta}_y$ と軸上のピーク磁場 B_{0y} を用いて

$$\Delta \nu \approx \frac{10^{-18} c^2 \bar{\beta}_y B_{0y}^2 N \lambda_u}{8\pi E^2}$$

と書ける。ここで N は周期数、 λ_u は周期長、 E は電子エネルギーである。一方、水平方向に関しては収束力が存在しないためチューンは変化しない。図3には理想的な平面型アンジュレータにおけるチューンシフトの計算値もプロットした。チューンシフトは

モデルと良く一致している。

垂直方向に関しては収束力によるチューンシフトが主要であるため、測定値から不整四極磁場を評価することは困難である。そこで水平方向のチューンシフトが不整磁場を反映すると考えて、チューンシフト Δv_x を磁場測定データと比較した。図3(b)に結果を示す。不整四極磁場に起因するチューンシフトは、チューン測定精度以下であり無視できることがわかる。また水平偏光モードに関しては、アンジュレータ前後の四極電磁石の補正コイルを用いたチューン補償システムを整備した。ギャップ変更に伴うチューンシフトに対して、フィードフォワード制御が有効であることが確認されている。

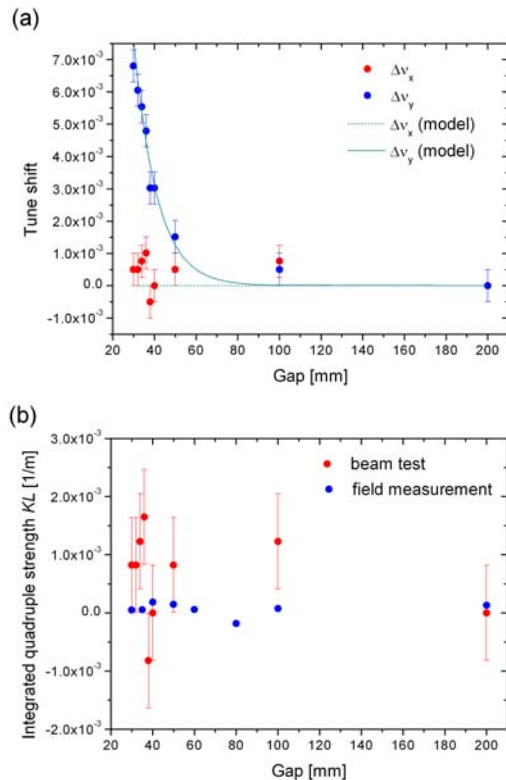


図3 : (a) 水平偏光モード(磁石列位相 $\Delta Z = 0$ mm)におけるチューンシフト。実線と点線は理想的な平面型アンジュレータのチューンシフトのモデル値。(b) 水平方向のチューンシフトから換算した不整四極磁場と磁場測定データの比較。

3.2.3 スキュー四極磁場

SAGA-LS蓄積リングでは差共鳴を利用したベータatronカップリングの測定が可能である^[6]。APPLE-II設置後のカップリング測定により、ギャップ・位相変更に応じて蓄積リングのカップリング(ユーザー運転時1.4%)は数%オーダーで変化することがわかった。そこでAPPLE-IIのスキュー四極成分の補償を目的として、シート型スキュー四極電磁石をアンジュレータダクトへ設置した^[3]。本システムを用いて最大30%のカップリング制御が可能である。

水平偏光モードにおけるスキュー四極磁場の測定結果と、カップリング補償に用いているスキュー四極磁場の比較を図4に示す。ここで磁場 ∇ 測定データは最大ギャップにおける強度からの変位をプロットしている。ビーム試験で求めた補正用のスキュー四極磁場は、設置前の磁場測定で得られた結果と整合している。

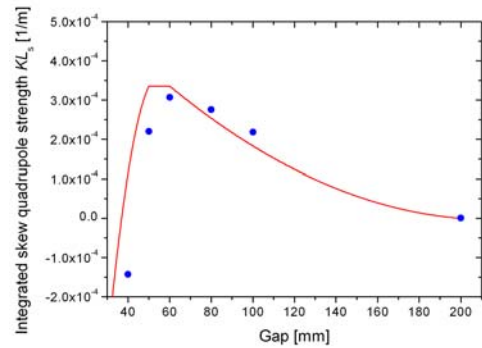


図4 : 水平偏光モード(磁石列位相 $\Delta Z=0$ mm)におけるスキュー四極磁場。四極強度の積分値で示した。実線は補正電磁石によるスキュー四極磁場の強度

4. まとめ

SAGA-LSではAPPLE-II型アンジュレータの設置を完了した。アンジュレータの設置後、ビーム試験による不整磁場の評価を行った。ビーム試験で評価されたダイポール磁場、四極、スキュー四極磁場は設置前の磁場測定結果と同程度であり、またギャップ依存についてもおおよその傾向は一致した。現在ビーム試験の結果に基づき、磁極ギャップ・位相変化による軌道の歪み、チューンシフト、カップリング変動を補償するシステムを構築している。現状では水平偏光モードに限って補償システムが運用されているが、今後は他の偏光モードについても不整磁場の解析を進めながら、補償システムを整備する予定である。

参考文献

- [1] S. Sasaki et al., "Analyses for a planar variably-polarizing undulator", Nucl. Instrum. Meth. A 347 (1994) 83.
- [2] 江田他, "SAGA-LSにおけるAPPLE2アンジュレータの製作", 第22回日本放射光学会年会 (2009) 12P001.
- [3] S. Koda et al., "Status of Synchrotron Radiation Facility SAGA-LS", in these proceedings.
- [4] Y. Iwasaki et al., "Correction System of Closed Orbit Distortion Induced by Undulators at the SAGA Light Source", in these proceeding.
- [5] P. Eillaume., "A New Approach to the Electron Beam Dynamics in Undulators and Wigglers", proc. of EPAC92, p. 661.
- [6] S. Koda et al., "Measurement of Betatron Coupling in SAGA-LS Storage Ring", Proc. of 5th Annual Meeting Particle Acc. Soc. Japan (2008) pp. 701.