

# CORRECTION SYSTEM OF CLOSED ORBIT DISTORTION INDUCED BY UNDULATORS AT THE SAGA LIGHT SOURCE

Yoshitaka Iwasaki<sup>1</sup>, Yuichi Takabayashi, Tatsuo Kaneyasu, Sigeru Koda  
 Kyushu Synchrotron Light Research Center  
 8-7 Yayoiogaoka, Tosu, SAGA, 841-0005

## Abstract

In order to suppress the closed orbit distortion (COD) induced by undulators and to permit the free control from the user's LAN at synchrotron radiation experimental mode, we have developed a feed-forward orbit correction system using SVD method. By adopting the correction scheme, the standard division of the COD variation to the reference orbit was reduced to less than 4 $\mu$ m in both directions at arbitrary gap height and phase position of the APPLE-II type undulator. By this system with the compensation system of the tune shift and the coupling, the free operation of undulators at planer mode has become possible at the SAGA Light Source storage.

## SAGA Light Sourceにおけるアンジュレータ誘起の閉軌道歪み補正システム

### 1. はじめに

放射光の利用を目的とした電子蓄積リングには各種挿入光源が設置されるが、ユーザ運転における任意の挿入光源の操作を可能とするためには、挿入光源に起因する蓄積ビームへの影響を、他の放射光利用実験に影響がないレベルまで抑制する必要がある。九州シンクロトロン光研究センター（SAGA-LS）電子蓄積リングにおいては現在、可変偏光型アンジュレータAPPLE-II<sup>[1]</sup>および佐賀大学によるプラナアンジュレータ（LS4U）がそれぞれ1台設置されており、アンジュレータのギャップに（APPLE-IIにおいては位相にも）依存して発生する閉軌道歪み（COD）に対する補正システムが必要であった。

SAGA-LSにおける閉軌道の歪み（COD）の補正システムとしては、実測に基づくレスポンス行列を用いたグローバルCOD補正システム<sup>[2]</sup>を運用しており、基準軌道に対し20 $\mu$ m以下の補正が可能である。しかし、グローバルCOD補正を行うのは、蓄積リングへの入射・加速後、ユーザに放射光を提供する前の一回であり、アンジュレータの駆動に伴い変化するCODに対して運用することはできない。また、BPM更新速度の遅さやBPMドリフトの問題があるため、Feed-backによる軌道補正システムの開発には課題が多かった。

アンジュレータが持つ不整磁場は、磁石列位置に対して一意であり誘起されるCODには再現性がある。そこで、Feed-forward方式によるギャップおよび位相に連動したCOD補正システムを構築した。

### 2. アンジュレータに起因するCOD

アンジュレータにより生成されるCODをFeed-forward方式により補正するためには、ギャップおよび位相に応じたステアリング電磁石の設定値テーブ

ル（補正值関数）を正確に作成する必要がある。始めに、アンジュレータが誘起するCODをギャップおよび位相毎に10回のBPMサンプリング平均で取得した。図1にAPPLE-IIによるギャップおよび位相毎のCODを示す。変位の標準偏差の最大値は、水平・垂直方向それぞれ91 $\mu$ mおよび114 $\mu$ mであり、変位の最大値ではそれぞれ154 $\mu$ mおよび162 $\mu$ mであった。

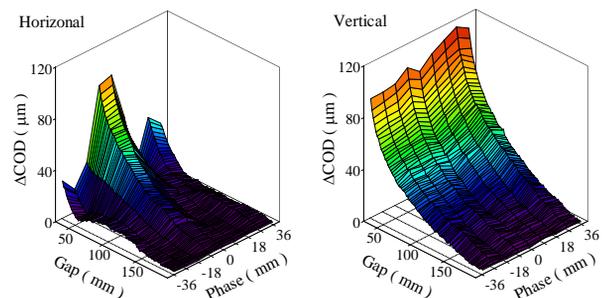


図1: APPLE-II に起因する COD 変位の RMS.

一般に、リングのある場所にDipoleキック $\theta$ が存在した場合、軌道の変位 $\Delta x_i$ は、

$$\Delta x_i = \theta / 2 \times \sqrt{\beta_i \beta_j} \cos(|\phi| - \pi\nu) / \sin(\pi\nu)$$

で与えられる。ここで $\beta_i$ 、 $\beta_j$ はそれぞれ観測点およびキックが存在する場所でのベータ関数、 $\phi$ は観測点とキック点間の位相進度、 $\nu$ はベータatron振動数である。上式により観測されるCODの変位から、Dipoleキック $\theta$ を求めることができる。図2に上式から求めたAPPLE-IIのDipole不整磁場の大きさを示す。CODからDipole不整磁場への演算にあたって、Dipoleキックはアンジュレータ中央部に点状に存在するとした。また、ベータ関数および位相進度、

<sup>1</sup> E-mail: iwasaki@saga-ls.jp

ベータ関数にはリングの設計値を用いた。計算の結果得られたBL積の最大値は、水平・垂直各100Gauss\*cmおよび105Gauss\*cmであった。磁場測定により測定されたBL積は、水平・垂直方向各数十Gauss\*cm程度であり、磁場測定とビームを用いた方法により得られた値はほぼ傾向が一致していた<sup>[3]</sup>。

同様にしてLS4UによるCODより求めたBL積の最

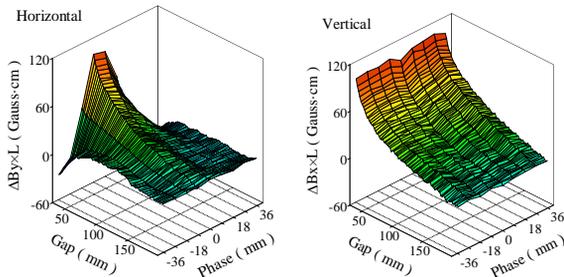


図 2: COD より算出した APPLE-II の Dipole 不整磁場の大きさ。

大値は、各方向15Gauss\*cmおよび20Gauss\*cmであった。

### 3. 制御システム

SAGA-LS 加速器制御システムでは、Microsoft Windows系OSを搭載したPCによるActiveXCA<sup>[4]</sup>を用いたクライアントサーバ方式の分散型制御システムを運用している<sup>[5]</sup>。ActiveXCAを用いることにより、Channel Accessを通じて各種制御変数に対して任意のPCから読み書きが可能である。通信に関するパフォーマンスは、制御点数および使用するPCのハードウェアにもよるが、Pentium4, 2.66GHz, 512MbyteRAMを搭載したWindows2000マシン間の通信で、10Hz程度の通信が可能である。図3にAPPLE-II、ステアリング電磁石電源、BPMシステム系統図を示す。

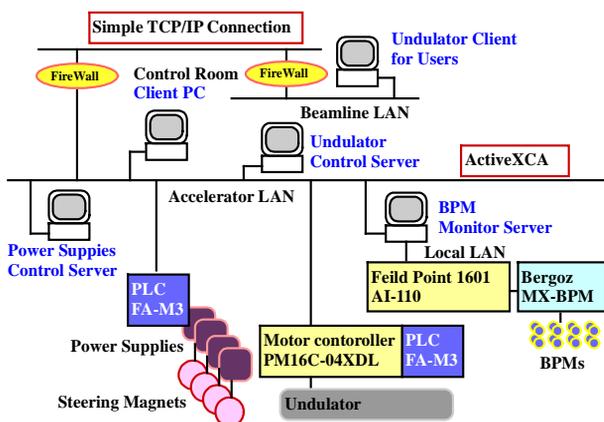


図 3: アンジュレータ (APPLE-II)、ステアリング電磁石電源および BPM モニタシステム系統図。

アンジュレータステッピングモータのコントロー

ルにツジ電子モータコントローラ、エンコーダおよびリニアスケールの読取りに横河FA-M3を用いている。ステアリング電磁石用電源は、工藤電機社製バイポーラ電源であり、FA-M3により遠隔制御を可能としている。BPMの処理回路にはBergoz MX-BPMを使用し、アナログ出力をNational Instruments Feildpoint1601の16bitADCにて読み込んでいる。サーバPC類は、電気的信号から物理量への変換を行う他、ActivexCAによる上位制御システムへのリンクを行っている。ステアリング電磁石サーバは、アンジュレータのギャップおよび位相を10Hzで読取り、軌道補正に必要な電源出力値を後述する補正テーブル(補正式)に従い演算し必要な設定値を自動的に出力させる。BPMの読取り速度はFieldpointのADCが上限を決めており、1Hz程度である。

ActiveXCAクライアントは、サーバと通信を行う際にブロードキャストを行う他、複数の通信ポートを使用する。このため、外部LANからのアクセスを可能とする場合にはファイアウォールのセキュリティポリシーを緩くせざるを得ない。また、ビームラインユーザもActiveXCAを導入しなければいけない不便さがあることから、ビームラインユーザ系からのアンジュレータ制御系へのアクセスには、単一ポートのみを使用するシンプルなTCP/IPクライアントプログラムを提供した。

### 4. 補正の方法

COD補正に必要なステアリング電磁石キック角は、アンジュレータ内部の磁場分布やステアリング電磁石の磁場測定値、ベータ関数および位相進度の計算値を用いて算出可能である。しかし、計算によるベータ関数および位相進度の値は現実の加速器内で形成される値と厳密に一致しているとは限らず、また磁場測定の誤差や電源設定値の精度などから、補正に必要な値を厳密に得ることは難しい。そこで、アンジュレータ上下流のステアリング電磁石単位電流あたりのCODを実測し、水平・垂直各24台のBPMで観測するCOD変位が最小となるように、最小二乗法を用いて軌道補正に必要な電源設定値をオフラインにて算出した。つまり、 $\Delta X_j, \Delta x_{1j}, \Delta x_{2j}$ をそれぞれj番目のBPMで観測される、アンジュレータ、ステアリング電磁石1、ステアリング電磁石2によるCODとしたとき、

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^{24} \left( \Delta X_j - a\Delta x_{1j} - b\Delta x_{2j} \right)^2$$

を最小にする係数a,bをオフラインにて計算した。

ギャップに関しては6次の多項式によるフィッティング、位相に関しては線形補間を行い、任意のギャップおよび位相に対して補正に必要なステアリング電磁石電源の出力値が得られるようにした。

## 5. 補正結果

図4にAPPLE-IIのギャップおよび位相に連動したステアリング電磁石電源制御システム稼動時のCOD変位のRMSを示す。補正の結果、任意のギャップ、位相において基準軌道に対する変位は水平・垂直方向共に最大で30 $\mu\text{m}$ 以下まで抑制された。

同様の方法でLS4UによるCOD変位は、10 $\mu\text{m}$ 以下まで抑制された。現在、この方法により取得した補正テーブルに従い、必要なステアリング電磁石電源設定値をギャップおよび位相に連動して10Hzで出力させている。

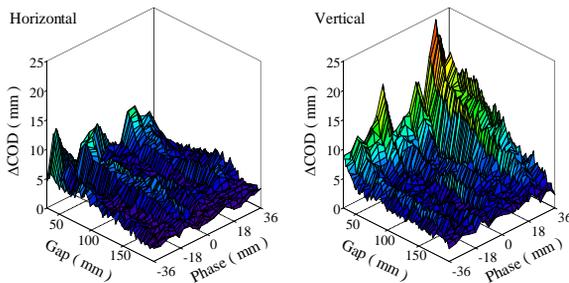


図 4:軌道補正後の COD 変位.

## 6. 補正の高精度化

SAGA-LS電子蓄積リングは現在カップリング1.4%にてユーザ運転を行っている。長直線部での垂直方向ビームサイズは約50 $\mu\text{m}$ と想定されるため、CODの補正精度が30 $\mu\text{m}$ の場合、アンジュレータ操作に伴いビームラインによってはビーム位置変動の影響を受ける可能性があった。そこで、COD変位を更に減少させるため、全24台のBPMで観測されるCOD変位を観測しながらオンラインにてアンジュレータ上下流ステアリング電磁石電源ペアの設定値決定を行うこととした。

軌道補正に必要なステアリング電磁石電源出力値  $\mathbf{I}$  は、COD変位  $\Delta\mathbf{x}$  と単位電流あたりのCODレスポンス  $\mathbf{R}$  の逆行列  $\mathbf{R}^{-1}$  を用いて、 $\mathbf{I} = \mathbf{R}^{-1} \cdot \Delta\mathbf{x}$  として算出した。CODレスポンス  $\mathbf{R}$  の逆行列  $\mathbf{R}^{-1}$  はSVD (Singular Value Decomposition) により解いた (最小二乗法のSVDによる解法の適用<sup>[6]</sup>)。数回のiterationの後、COD変位の標準偏差は各方向4 $\mu\text{m}$ 以下まで抑制した。LS4Uについても同様の補正を行い、SAGA-LSにおけるBPMシステムのノイズレベ

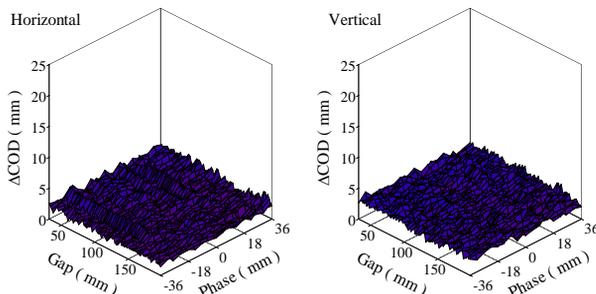


図 5:補正パターン更新後の COD 変位.

ルまでCOD変位が低減された。図5に補正パターン高精度化後のCOD変位を示す。基準軌道に対する個別のBPM変位の最大値も10 $\mu\text{m}$ 以下に抑制された。

## 7. まとめ

ActiveXCAを用いたクライアント-サーバ方式の分散型システムにより、アンジュレータに起因するCOD変位に対するFeed-forward方式の補正システムを構築した。補正を行う前にはAPPLE-IIの稼動に伴い各方向それぞれ最大で91 $\mu\text{m}$ および114 $\mu\text{m}$ あったCOD変位のRMSは、一回目の補正の後、任意のギャップおよび位相に関して約30 $\mu\text{m}$ 以下となった。

補正精度を向上させるため、SVDを用いたオンラインによる補正テーブル作成を行った結果、各方向BPMノイズレベルである4 $\mu\text{m}$ 以下まで変位は抑制された。最新の補正式による軌道補正システムの運用を近日中に開始する予定である。

Dipoleキック補正のためのFeed-forward制御システムの構成は、チューンおよびカップリング補正に対しても容易に応用可能である。現在、LS4UおよびAPPLE-IIは、CODの補正と共に、チューンおよびカップリングの連動補正も行っている。上記システムにより、プラナモードにおいてはユーザサイドによる自由なアンジュレータ操作が可能となった。

Feed-forwardシステムに用いる補正テーブル (補正式) は、挿入光源が静止した状態でのCOD計測値から演算した。そのため、ユーザにアンジュレータ操作の許可信号を出す際には、アンジュレータ駆動スピードを通常駆動スピードの1/10まで低下させ、ユーザ実験に影響が生じないようにしている。また、今後、蓄積リングの低エミッタンス化を行い、ビームサイズを低減化した場合には、更なる補正精度の向上が必要である。その場合にはBPMシステムの低ノイズ化と、ステアリング電磁石電源設定値精度の向上が必要となる。

## 参考文献

- [1] S. Sasaki et al., "Analyses for a planar variably-polarizing undulator", Nucl. Instrum. Meth. A 347 (1994) 83.
- [2] H.Ohgaki, et al., "GLOBAL COD CORRECTION OF SAGA-LS STORAGE RING", Proceedings of the PAC07, Albuquerque (2007) 3327.
- [3] T.Kaneyasu, et al., "Characterization of the Effect of the Variably Polarized Undulator on Electron Beam at the SAGA-LS Storage Ring", Proceedings of this meeting.
- [4] Kay-Uwe Kasemir  
<http://icsweb1.sns.ornl.gov/~kasemir/axca/index.htm>
- [5] H.Ohgaki, et al., "DESIGN OF CONTROL SYSTEM FOR SAGA SHYNSCHROTRON LIGHT SOURCE", Proc. of PAC03, Portland(2003) pp.2387~2389.
- [6] William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, Brian P. Flannery, "Numerical Recipes in C", The Art of Scientific Computing Second Edition.