

アンジュレータ用補正データプログラムの更新

○江口 柊[#]、阿達正浩、齊藤寛峻、塩屋達郎、土屋公央
高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

概要

現在 PF リングで運用しているアンジュレータは磁石列を電子ビームに対して移動することで光子エネルギーと偏光状態を制御している。放射光実験中に放射光の光軸が動かないように、磁石列の移動に伴って発生する COD を、アンジュレータ前後に設置している補正電磁石を用いて補正している。軌道補正はフィードフォワードで実施している。本プログラムを用いて、COD 補正に必要な補正電流テーブルを自動で作成する。本発表では、開発中のプログラムを用いて更新した補正電流テーブルによる COD 補正の結果について報告する。

1. はじめに

KEK にはビームエネルギー 2.5 GeV の PF リングとビームエネルギー 6.5 GeV の PF-AR の 2 基の放射光源用電子シンクロトロンが稼働している。そして各リングの直線部にアンジュレータが設置されており、現在 PF リングに 12 台、PF-AR に 6 台の計 18 台のアンジュレータを運用している。アンジュレータを運用する上でギャップ変更及び位相変更した際の軌道変動を抑えることは放射光ユーザー実験を行うために重要である。そこで事前にアンジュレータのギャップ変更及び位相変更した際の軌道変動を測定し、図 1 にあるようなアンジュレータの上下流に設置している補正電磁石を用いて軌道変動をフィードフォワード補正している。

補正電磁石を用いてフィードフォワード制御するためには、各磁石列位置とまとめた補正電流値を補正電流テーブル（以降、補正データテーブル）が必要である。そして補正データテーブルを作成するためのプログラム（以降、補正データプログラム）を使用して補正データテーブルを作成及び更新を行っている。本稿では PF リングで運用しているアンジュレータ用補正データプログラムの更新作業の一環として、補正データプログラムの内容及び更新した補正データプログラムを使用した際の補正結果について報告する。



図 1. PF リング ID19 用補正電磁石

2. アンジュレータ

図 2 のように N 極と S 極の磁石を交互に並べて周期的な磁場を発生させ、入射した電子を蛇行させることによって放射光を取り出すための装置を挿入光源（Insertion Device : ID）と呼び、その中で光の干渉効果を利用して高い輝度の光を発生させる装置をアンジュレータと呼ぶ[2]。アンジュレータでは光の干渉を利用するため単色の光が生成される。そこで、磁石列配置を電子軌道から遠ざけたり近づけたりするなどして電子軌道上の磁場分布の振幅を変え、干渉条件を変えることで、ユーザー実験で要求される広範な光子エネルギーの光を得ている。このような、高輝度性、可変偏光性、単色性はアンジュレータの特徴である。

次にアンジュレータの磁石列の動きについて説明する。図 3 のような磁石列を電子軌道の進行方向に対して垂直方向に動かすことを Gap 軸動作（以下、ギャップ変更）といい、これによって光子エネルギーを変化させることができる。また電子軌道の進行方向に対して水平方向に動かすことを位相軸動作（以下、位相変更）といい、様々な偏光を生成することができる。

現在ギャップ変更のみを行うことができる 1 軸アンジュレータは PF リングでは 6 台運用しており、特に KEK にある 1 軸アンジュレータの多くは真空チャンバー内に磁石列を配置することにより磁石列をより狭く閉じることを可能とした真空封止型アンジュレータ[2]であり、今回プログラムテスト対象となった ID15 もこれに該当する。

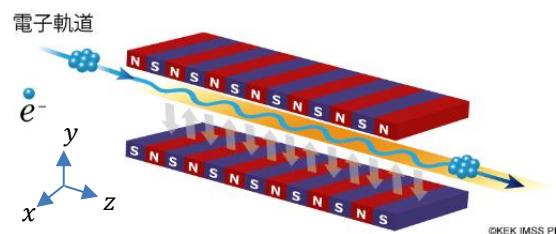


図 2. アンジュレータの概略図[1]

また様々な偏光特性を持つAPPLE-II型の可変偏光アンジュレータ (EPU) [3]のうち、ギャップ軸固定として位相変更のみを行う APU (adjustable phase undulator) [4]方式を採用している4列EPUが4台、ギャップ変更及び位相変更を行うことができる6列EPUが2台PFリングで運用されている。

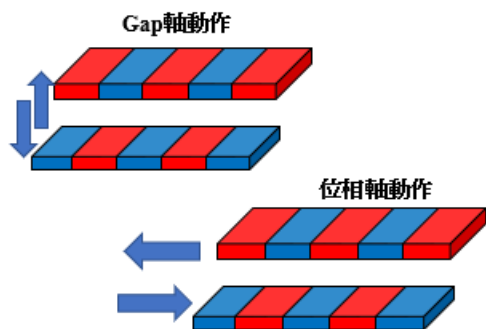


図3. アンジュレータの磁石列の動き

3. 補正データプログラム

補正データプログラムの流れを図4に示す。従来各偏光切り替え動作、各モード内電子エネルギー変更動作に対して、個別にテーブルを作成していたため、テーブルの更新に時間がかかっていた。そこで、複数の挿入光源の複数の動作に対する多数のテーブル作成を一つのPythonスクリプトに統合することでテーブル作成/更新時間の短縮を図ることを目的とした。また、ここでは1軸アンジュレータにおける補正データテーブルを作成するまでのプログラム流れ及びプログラムの動作時間について説明する。

3.1 プログラム開始前の準備

プログラムを開始するにあたって、軌道に関する他の制御が影響しないようにリング軌道安定化のために使用している各フィードバックシステムをOFFにする必要がある。本作業については手動で行っている。またイタレーション回数等のプログラムの測定条件の修正が必要な場合はプログラム開始前に確認し修正する。

3.2 応答行列算出

プログラム開始後、はじめに基準軌道の測定を行う。磁石列が基準軌道位置まで移動する際は軌道が変動しないようフィードフォワード制御が働いているが、基準軌道測定時にはOFFにする必要がある。

基準軌道測定後、基準軌道位置にいる状態でアンジュレータ上下流それぞれについて、水平方向垂直方向に電流値を振り軌道変動を測定する。その際の電流値は任意の値であり、各アンジュレータによって違う場合もある。この軌道変動をもとに軌道補正用の電流値を求めるための応答行列を算出する。

3.3 補正電流値算出

磁石列の移動動作を細かなステップに分ける。磁石列を1ステップ移動し、生じた軌道変動を補正するために必要な各補正電流値は応答行列を用いて算

出する。算出した補正電流値を設定した後に軌道を再測定し、測定終了条件を満たすか判定する。測定終了権を満たさない場合には、応答行列を用いた補正電流値の算出へと戻る。測定終了条件を満たすまで複数回繰り返す(イタレーション)。設定したイタレーションの上限回数内に終了条件を満たせば次のステップへと進み、満たせなければプログラムを停止する。標準的な終了条件は以下の通りである。

- トレランス: 5 μm
- 標準偏差: 2 μm

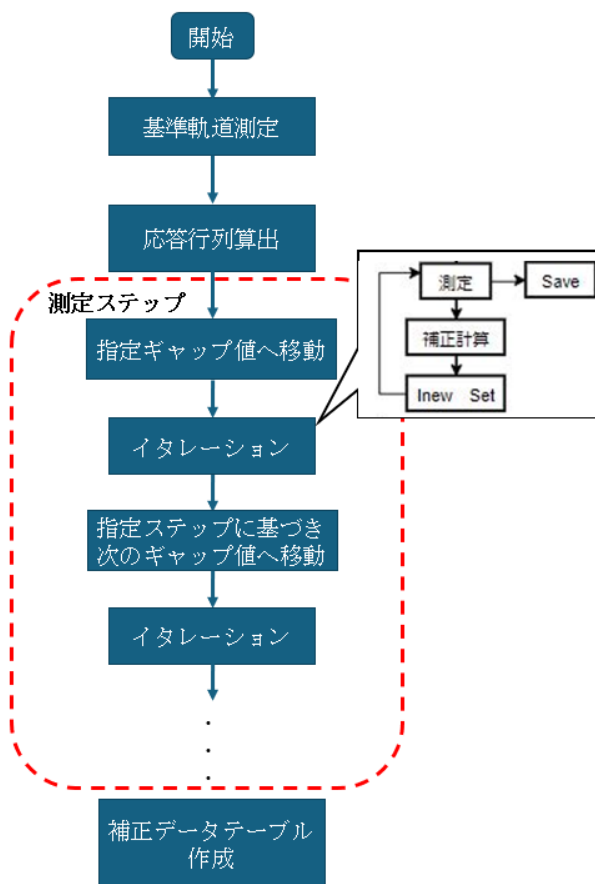


図4. 補正データプログラムの流れ

3.4 補正データテーブルの作成

すべての測定ステップが終了後、求めた補正電流値をもとに補正データテーブルを作成する。補正データプログラムは電流値算出プログラムと補正データテーブル作成プログラムの2つのプログラムで構成されている。

補正データテーブルは測定データを線形補間して作成する。補正データテーブルは水平上流、水平下流、垂直上流、垂直下流それぞれについて作成する。その後実際に作成した補正テーブルを用いて軌道変動の確認を行う。軌道変動を確認する方法として、リング立ち上げ時に実施しているアンジュレータ軌道チェック用プログラムを使用して確認する。その後問題がなければ作成した補正データテーブルを採

用し運用する。

3.5 プログラムの動作時間

ユーザー運転時間を確保するという観点から、本プログラムを使うことで作業時間の短縮を図ることが本プロジェクトの目的である。なお、表1に各タイプのアンジュレータに対して現時点での標準的な作業時間は以下の様に想定している。ここでは基準軌道位置への移動時間等の時間は磁石列の現在位置によって変わることがあるため含まれていない。可動する軸数や磁石列移動幅が多ければ多いほど測定に時間がかかることが分かる。またイタレーション回数が多くなればさらに測定時間がかかる場合もある。今後、パラメータの最適化などを行い、作業時間の短縮を図る。

表1. 補正データプログラムの動作時間

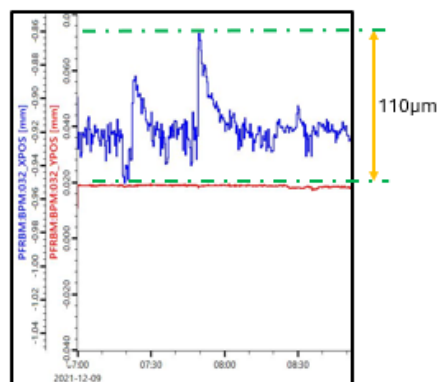
	測定時間	動作軸（動作軸数）
ID15	約20分	ギャップ（1軸）
ID16-1	約4時間	位相（4軸）
ID28	約14時間	ギャップ及び位相（7軸）

4. 補正データプログラム動作テスト

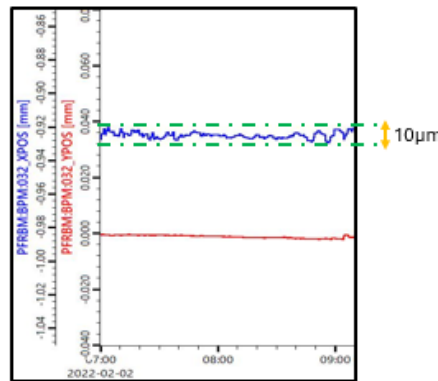
3.5から分かるように1軸アンジュレータ以外は測定時間がかかってしまうことから、今回は補正データプログラム更新の第一段階として1軸アンジュレータID15で補正データプログラムを使用した際の補正結果について説明する。

補正データプログラムのテストを実施する中で、プログラムが測定終了条件を満たさない場合と満たす場合があった。図5にBPM032におけるスタディ直前の電子ビームの状態を示す。図5(a)、図5(b)ともに縦軸はBPM032における電子ビームの位置で横軸は日時を示している。また青線はBPM032における電子ビームの水平方向位置であり、赤線はBPM032における電子ビームの垂直方向位置である。同じ補正データプログラムを使用しているにもかかわらず電子ビームの水平方向位置が図5(a)では大きく振動しており、測定に大きな影響が出ることが分かった。

図5(b)の時に作成した補正データテーブルを使用してID15の軌道チェックを行った。図6に前回(2021年)の加速器立ち上げ時に軌道チェックした際の測定結果と比較を示す。縦軸は各BPMにおける基準軌道との差分で横軸がBPM番号である。「min」と表記しているものが各BPMにおける最小の差分値、「max」と表記しているものが各BPMにおける最大の差分値である。補正データテーブルを更新したことで前回の加速器立ち上げ時と比較して特に水平方向が大きく改善していることがわかる。今後は1軸アンジュレータ用補正データプログラムを基礎として4列EPU用の補正データプログラムを更新していく予定である。



(a) 終了条件を満たさなかった時



(b) 終了条件を満たした時

図5. BPM032におけるスタディ直前の電子ビームの状態

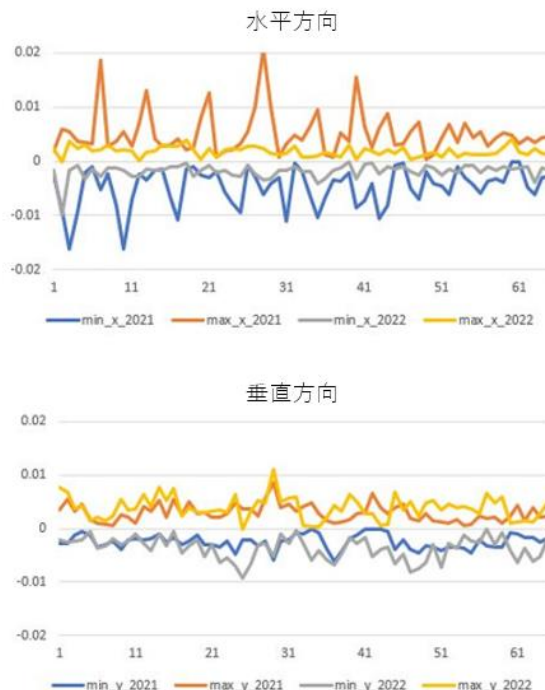


図6. ID15における各BPMにおける差分値の比較

参考文献

- [1] <https://www2.kek.jp/imss/pf/about/sr/pf1.html>
- [2] T. Tanaka, “3. アンジュレータ”, OHO' 13 高エネルギー加速器セミナー, July 23-26, 2013, p.1-13.
- [3] S. Sasaki et al., Nucl. Instr. and Meth. A331,1993, p.763-767.
- [4] R. Carr, Nucl. Instr. and Meth. A306, 1991, p. 391.