

4 列可変偏光アンジュレータ用補正データプログラムの更新

○江口 柊^{A)}、阿達正浩^{A)}、齊藤寛峻^{A)}、塩屋達郎^{A)}、土屋公央^{A)}

^{A)} 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

1. はじめに

KEK には PF リングと呼ばれるビームエネルギー 2.5 GeV の光源用電子シンクロトロンが稼働している。PF リングの直線部には 12 台のアンジュレータが設置されており、すべてのアンジュレータについて磁石列が移動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欠かせない。その軌道変動を抑えるために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フィードフォワードで補正している。これまでフィードフォワードで補正するために各磁石列位置と補正電流値をまとめた補正電流テーブルを作成するためのプログラム（以下、プログラム）は MATLAB を使用していたが、Python スクリプトを使用したプログラムへの更新を行っている。そして実際に Python スクリプトを使用して更新したプログラムによる 1 軸アンジュレータの COD 補正の結果について報告した^[1]。本稿では 1 軸アンジュレータ用プログラムを応用した 4 列可変偏光アンジュレータ用のプログラムの更新と更新したプログラムを使用して作成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。

2. 4 列可変偏光アンジュレータ

図 1 のように入射した電子ビームが周期的な磁場によって蛇行することで放射光を取り出すための装置を挿入光源と呼び、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^[3]。以下電子ビームの進行方向を Z 軸とし、X 方向の磁場を水平磁場、Y 方向を垂直磁場と定義してする。

PF リングでは、光子エネルギーの変更を磁石列上下方向移動（以下、Gap 動作）のみで行う 1 軸アンジュレータの他に、偏光モードの変更を行うために複数の磁石列が独立して動作可能な APPLE-II 型の可変偏光アンジュレータ(EPU)^[4]も運用している。1 軸アンジュレータで実現できる偏光は直線偏光のみであることに對し、例えば磁石列を $\pm 1/4$ 周期分電 Z 軸方向に対して水平にスライドさせること（以下、位相動作）で図 2 に示すような円偏光を実現することができる。

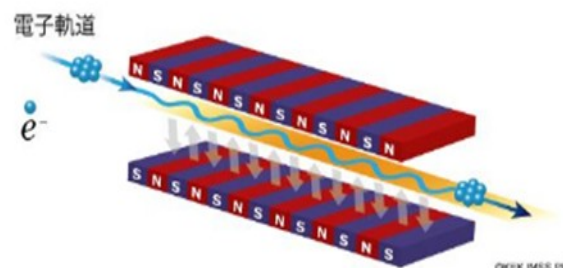


図 1 アンジュレータの概略図^[2]

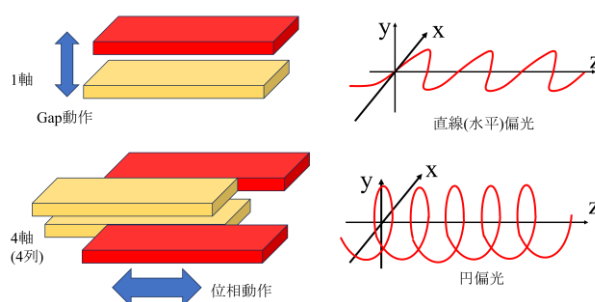


図 2 各アンジュレータの動きと実現可能な偏光例

PF リングの APPLE-II 型 EPU の特徴は、4 列の磁石列を全て独立に動く構造である。Gap を固定したまま上下または左右の磁石列を位相動作させて光子エネルギーを調整する adjustable phase undulators (APU)^[5]として利用できる特徴を持っている。通常の EPU 方式より制御方式は簡素化されており、プログラム実行時間の短縮にもつながっている。APU 方式では EPU 方式として使う際の磁石列の位相差 EPU phase(以下、 $\phi(\text{mm})$)に追加して、上下の磁石列ペアの間に位相 $\rho(\text{mm})$, $\sigma(\text{mm})$ を与えて制御しており、それぞれ APU- ρ モード、APU- σ モードと呼んでいる。図 3 に Symmetric mode における APU- ρ モード、APU- σ モードの磁石列の動きを示す。斜めに対向する磁石列を対として位相 $\pm\phi/2(\text{mm})$ 動かし、追加的に $\rho/2(\text{mm})$, $\sigma/2(\text{mm})$ を動かしていく。APU- ρ モードでは、上部磁石列を電子ビーム進行方向に $\rho/2(\text{mm})$ 動かしており、下部磁石列を逆方向に動かしている。APU- σ モードでは、それぞれ左右磁石列をペアにして電子ビーム進行方向に $\pm\sigma/2(\text{mm})$ 動かしている。

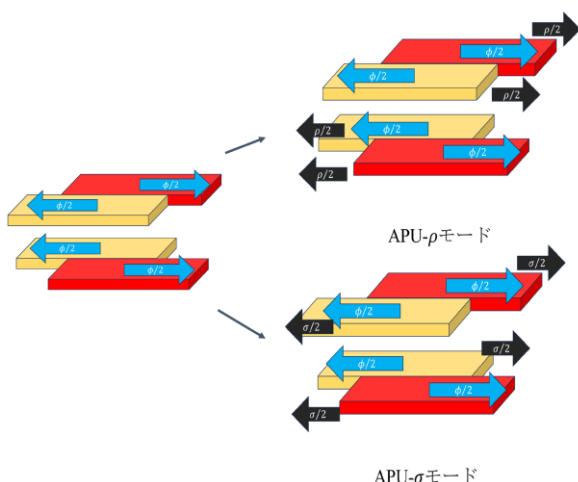


図 3 APU- ρ モード、APU- σ モードの磁石列の動き

3. 補正電流テーブル作成の流れ

現在補正データプログラムは「補正電流値算出プログラム」と「補正電流テーブル作成プログラム」の 2 つのプログラムによって構成されている。図 4 に測定対象モードにおけるプログラムの流れを示す。測定する偏光モードの光子エネルギー可変範囲へと磁石列を移動し、生じた軌道変動を補正するために必要な各補正電流値を、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（トレランス： $5(\mu\text{m})$ 、もしくは標準偏差： $2(\mu\text{m})$ ）を満たすか判定する。測定終了条件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。この内容を、測定終了条件を満たすまで複数回繰り返す。これをイタレーションと呼んでいる。そして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光子エネルギーへ移動し、満たせなければプログラムは停止し、基準軌道の再測定を実施する。

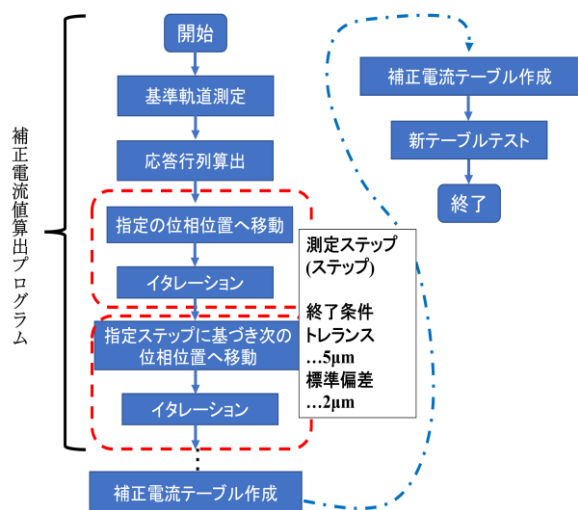


図 4 測定対象モードにおけるプログラムの流れ

測定ステップで指定したステップ幅で区分した、光子エネルギー可変範囲内のすべての測定点に対して測定終了条件を満たす補正電流値が得られれば、「補正電流テーブル作成プログラム」を使用して補正電流値と位相位置を対応させた補正電流テーブルを作成する。測定点の間の区間については前後の測定データを用いて線形補完して電流値を与える。補正電流テーブルは水平上流、水平下流、垂直上流、垂直下流それぞれ作成する。

その後の補正用電磁石電源に対して作成した補正電流テーブルを用いて軌道補正の確認を行う。確認には、PF 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する。その後われていることが確認できれば、作成した補正電流テーブルを更新してユーザー運転に用いる。プログラムの構成は 1 軸アンジュレータ用のプログラムと変わらないが、1 つのアンジュレータに対して 1 つの補正データプログラムのみ存在していた 1 軸アンジュレータに対して、APU では、複数ある偏光モードおよびそれらのモード遷移動作に対してそれぞれプログラムを作成している。

ID19 の運転モードと各モードのデータ取得の順序について、表 1 と図 5 に示す。表 1 から運転モードは直線偏光(LHR,LVS)モード、円偏光(C $\pm$ S)モード、楕円偏光(E $\pm$ S)モードの 6 モードであるが、各モード間を移動するために必要な遷移(TRS)モードが存在し、合計 7 モードが測定対象となる。各偏光モードの測定をするためには、TRS モードを測定し TRS モード用の補正電流テーブルを作成した後、補正電流テーブルのデータを使用して各偏光モードの基準軌道測定位置における補正電流値を求める必要がある。そのため TRS モードは最初に測定を実施しなければならない。これは PF リングで運用されている他の APU についても同様である。

表 1 ID19 の運転モード一覧

水平直線偏光 LHR	APU- ρ モード
垂直直線偏光 LVS	APU- σ モード
左右円偏光 (Bx/By=1) C $\pm$ S	APU- σ モード
左右楕円偏光 (Bx/By=1/2) E $\pm$ S	APU- σ モード

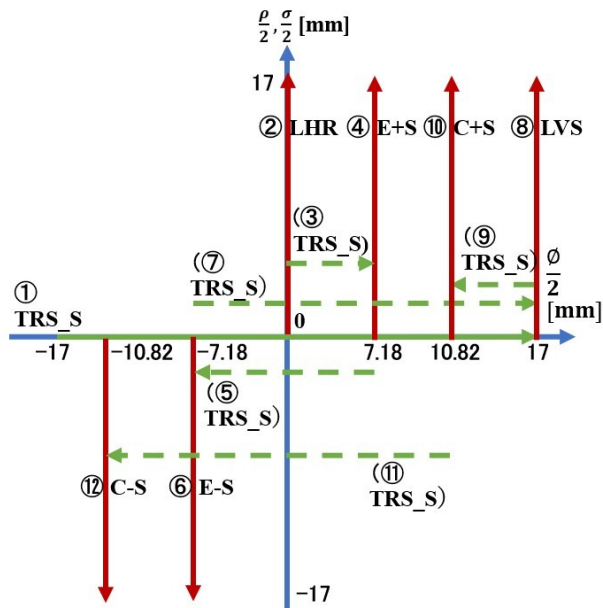


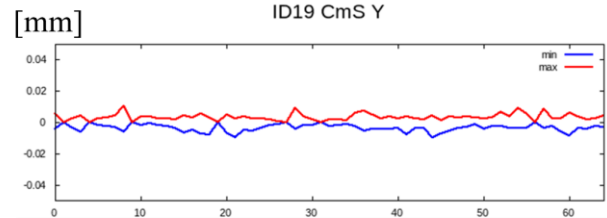
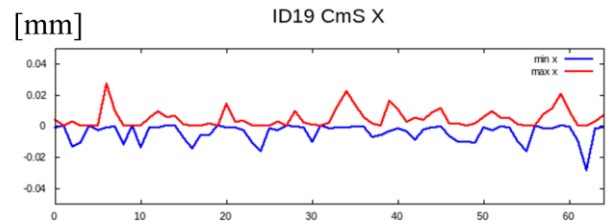
図 5 遷移・偏光モードのデータ取得の順序

4. 補正電流テーブル更新後の COD 補正の結果

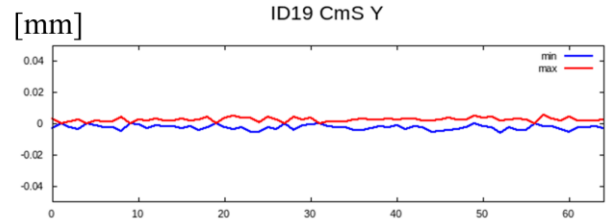
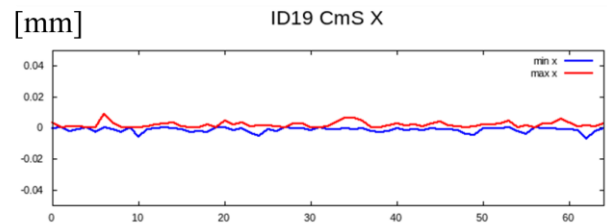
開発したプログラムを使用して作成した補正電流テーブルに対して、アンジュレータ軌道チェック用プログラムを使用して COD を確認した結果を図 6 に示す。いずれのグラフも縦軸は各 BPM における基準軌道との差分で横軸が BPM 番号である。「min」と表記しているものが各 BPM における X/Y 軸マイナス方向の差分の最大値で、「max」と表記しているものが各 BPM における X/Y 軸プラス方向の差分の最大値である。図 6 (a)はC-Sモードにおける補正電流テーブル更新前の状態で図 6 (b)が補正電流テーブル更新後の状態である。おおよそ X が $\pm 20(\mu\text{m})$, Y : $\pm 10(\mu\text{m})$ 以内であれば運転に用いることができる。補正電流テーブルを更新したことで特に水平方向が大きく改善していることがわかる。他の偏光モードについても同様の結果が得られた。

3 章で述べたように、APU の各偏光モードの測定を実施するためには、TRS モード用の補正電流テーブルを作成する必要がある。そして補正電流テーブルを作成するためには、TRS モード用の「補正電流値算出プログラム」が完遂しなければならないが、測定終了条件を満たさず、プログラムが終了してしまうことが多かった。そこでイタレーション回数を増やしたりしたもの、プログラムの実行時間が延びるだけで、測定終了条件を満たさなかった。そこでイタレーション回数を少なくして、測定終了条件を満たさなかった場合は測定終了条件を満たした位置まで戻って基準軌道を再度取得する「基準軌道の

複数回取得」を実施するようなプログラムを、6 列 EPU 用プログラムを用いて開発中である。位置を戻ることによって作業時間がかかる可能性は高いが、基準軌道を再度取得することで測定終了条件を満たしやすくなる可能性がある。結果的に作業時間の時間短縮につながると考えられる。さらに、各モードおよびモード遷移の接続点における電流値の反映など、省力化および時間短縮を目指したプログラムの改良を行う予定である。



(a)補正電流テーブル更新前



(b)補正電流テーブル更新後

図 6 C-Sモードにおける COD 補正結果

参考文献

- [1] 江口 柊、他、アンジュレータ用補正データプログラムの更新、令和 5 年度高エネルギー加速器研究機構技術研究会報告集、p.277-280、(2024).
- [2] <https://www2.kek.jp/imss/pf/about/sr/pf1.html>.
- [3] 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、p.1-13、(2013).
- [4] S. Sasaki et al., Nucl. Instr. and Meth. A331, 763-767 (1993).
- [5] R. Carr, Nucl. Instr. and Meth. A306, p. 391,(1991)