

JAERI-Tech
2004-013



JP0550114



SPring-8原研軟X線ビームライン用挿入光源
ID23の位相駆動が誘起する軌道変動調査及び
駆動方向に依らない補正テーブルの作成

2004年12月

中谷 健・安居院 あかね・吉越 章隆・松下 智裕*
高雄 勝*・竹内 政雄*・青柳 秀樹*・田中 均*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2004

編集兼発行 日本原子力研究所

SPring-8 原研軟 X 線ビームライン用挿入光源 ID23 の位相駆動が
誘起する軌道変動調査及び駆動方向に依らない補正テーブルの作成

日本原子力研究所関西研究所放射光科学研究センター

中谷 健・安居院 あかね・吉越 章隆

松下 智裕*・高雄 勝*・竹内 政雄*・青柳 秀樹*・田中 均*

(2004 年 1 月 16 日受理)

SPring-8 原研軟 X 線ビームライン用挿入光源 ID23 は位相駆動時に二つの特徴的な軌道変動を引き起こす。一つは ID23 の磁石列が持つ誤差磁場が位相駆動によって変動するために引き起こされるもので、もう一つは位相駆動用サーボモーターのノイズによるものである。これらの軌道変動を蓄積リングアーク部に置かれている 3 台の電子ビーム位置モニターを用いて測定した。磁石列の誤差磁場による変動データと ID23 の位相位置の関係から、位相駆動時の方向に依らない変動成分を補正する励磁テーブルを作成した。

Measurement of Orbit Fluctuation Caused by APPLE-2 Undulator Phase Motion and the Correction Table Depending on Its Phase Position

Takeshi NAKATANI, Akane AGUI, Akitaka YOSHIGOE, Tomohiro MATSUSHITA*, Masaru TAKAO*, Masao TAKEUCHI*, Hideki AOYAGI* and Hitoshi TANAKA*

Synchrotron Radiation Research Center
Kansai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Mikazuki-cho, Sayou-gun, Hyogo-ken

(Received, January 16, 2004)

We observed two characteristic electron orbit fluctuations caused when the phase of ID23 (APPLE-2 type undulator) installed at SPring-8 was driven. One was caused by the variation of magnetic error field of ID23 when the phase was driven. The other was caused by the noise from the phase drive system which adopted AC servomotors. We measured these orbit fluctuations synchronized with the phase motion using the real-time electron beam position measurement system. The part of the orbit fluctuation was suppressed by the correction table which was made referring to the obtained data.

Keywords: BL23SU, SPring-8, APPLE-2 Undulator, Variably Polarized Light, Beam Orbit Fluctuation, Real-time Beam Position Measurement System

*Japan Synchrotron Radiation Research Institute

目次

1. はじめに.....	1
2. ID23 の位相駆動用サーボモータドライブアンプの軌道に与える影響.....	3
3. 実時間同期ビーム位置測定システム.....	6
4. 補正テーブルの作成.....	9
5. 結果.....	11
6. 結語.....	14
謝辞.....	14
参考文献.....	15

Contents

1. Introduction	1
2. The Influence from Servomotors for the Phase Drive of ID23	3
3. The Real-time Synchronous Beam Position Measurement System	6
4. Making of Correction Table Depending on Phase Position	9
5. Results	11
6. Summary	14
Acknowledgments	14
References	15

This is a blank page.

1. はじめに

大型放射光施設 SPring-8 の BL23SU 用挿入光源(Insertion Device 23: ID23)は、SPring-8 の蓄積リングの Cell23 の 4m 直線部の上流側 2m 部分に設置された可変偏光アンジュレーター (variably-polarizing undulator) APPLE-2 (advanced planar polarized light emitter type-2) である。図 1.1 に ID23 の設置図を示す。

ID23 の重要な特徴である左右円偏光の高速切り替えは、磁石列の位相駆動を繰り返すことによって得られる。磁石列間には強い吸引・反発力が作用しているため、高速かつ精密に位置を制御するために、位相駆動用モーターとして AC サーボモーター (図 1.1 の赤丸で囲まれた部分) が採用されている。

ID23 は磁石列を駆動して、アンジュレーター内を通過する電子ビームの軌道を変化させることにより、発生する放射光の位相変調を行う方式を採用している。単純に位相駆動のみを行うと、磁石列の持つ誤差磁場の変動によって引き起こされる電子ビームの軌道の変化は、アンジュレーター内だけに留まらず蓄積リング全体に及ぶ。放射光施設では多くのビームラインが同時に稼動しているため、位相変調が引き起こす電子ビーム軌道の変動は他のビームラインで行われている実験に支障を与えない程度に押さえられなければならない。SPring-8 ではアンジュレーターの上流及び下流に補正電磁石(Steering Magnet: STM)を設置し、リング全体の軌道変動を最小限に押さえる工夫がなされている。ID23 でも挿入光源の上流と下流に 2 台ずつ計 4 台の補正電磁石が設置されている。今回はこれらの内、ID 直近の 2 台(図 1.1 の青丸で囲まれた部分)を使用して補正を行った。

SPring-8 の運転スケジュールは「サイクル」によって分割されている。ここでは 2001 年第 8 サイクルから第 10 サイクルの間のマシンスタディ及びビームラインスタディの間に行われた位相駆動方向に依らない高精度補正励磁テーブルの作成について報告する。マシンスタディは第 8 サイクル 10 月 23 日 5:00~12:00、第 9 サイクル 11 月 20 日 20:00~24:00、11 月 21 日 21:00~24:00、第 10 サイクル 12 月 12 日 22:00~12 月 13 日 5:00 に行われた。また、ビームラインスタディは第 8 サイクル 10 月 17 日 13:30~18:00、第 9 サイクル 11 月 14 日 14:30~18:00、第 10 サイクル 12 月 5 日 18:00~12 月 6 日 1:00 に行われた。

ID23 の位相駆動が誘起する軌道変動は、蓄積リングのアーチ部に置かれている 3 台の電子ビーム位置モニター(radio frequency Beam Position Monitor:rfBPM)を用いて計測された。位相駆動と同期して軌道変動を測定できるシステムを構築し、取得したデータに Wavelet 変換を利用したフィルタリングを行って、補正励磁量を求めた。

また、この測定を行った際、位相駆動の「前後」で特徴的な軌道変動が観測された。オフライン測定で位相駆動用ドライブアンプの ON/OFF と補正電磁石電源のリファレンス出力に有意な相関が観測されたので、ドライブアンプから位相駆動用モーターへの動力線にノイズフィルターを取り付けて、ノイズ低減対策を行った。

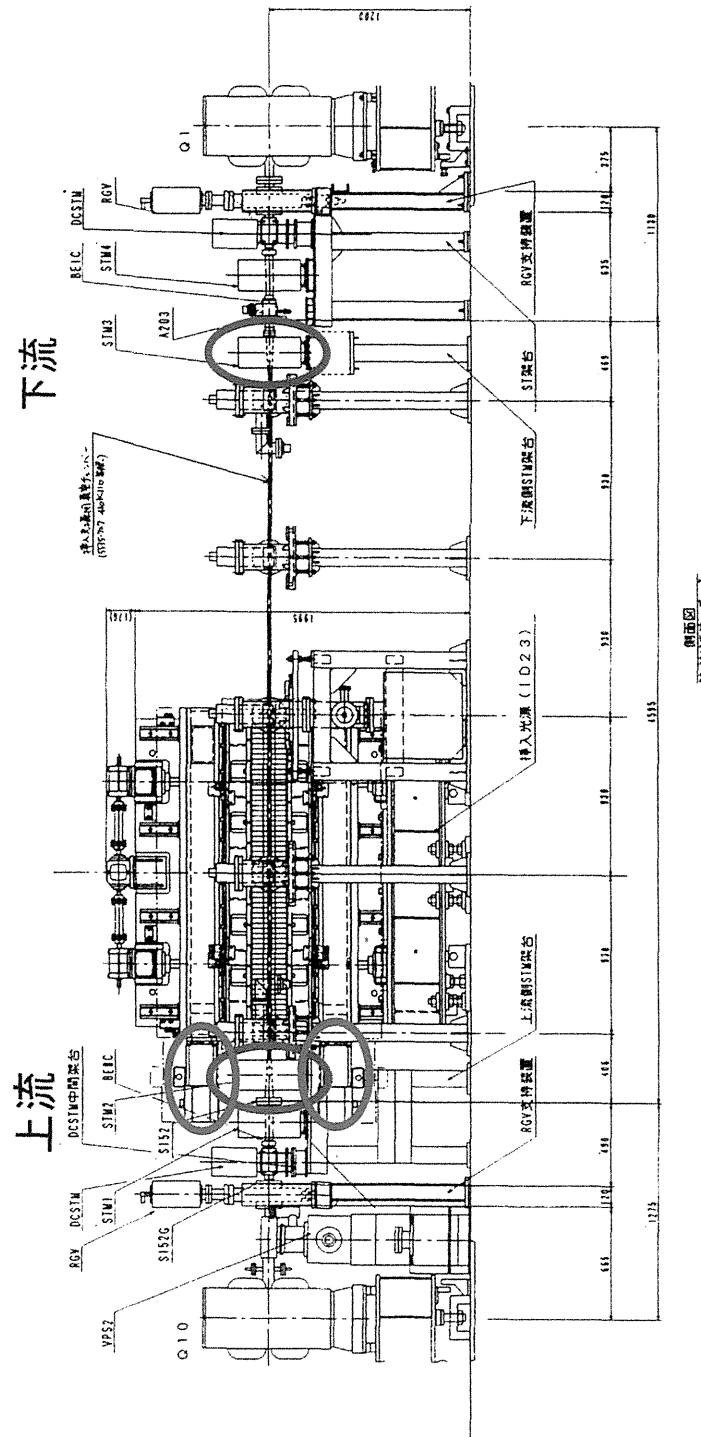


図 1.1: ID23 全体の設置図。赤丸部:サーボモーター、青丸部:補正に使用した電磁石。

2. ID23 の位相駆動用サーボモータードライブアンプの軌道に与える影響

蓄積リングの rfBPM15 で見た蓄積ビーム軌道が位相駆動用サーボモータードライブアンプの ON/OFF により水平方向に振動することが第 8 サイクルに観測された。(図 2.1) また、オフライン測定においても、ドライブアンプの ON/OFF に相関を持つ電氣的ノイズが観測された。このノイズを低減するために、第 8 サイクルと第 9 サイクルの間に位相駆動用サーボモーターのドライブアンプボックス (図 2.2 (a)) の改修作業を行った。作業内容は、上位位相駆動用及び下部位相駆動用ドライブアンプからサーボモーターへの各々の動力線にノイズフィルターを挿入する、というものであった。図 2.2 (b) の赤、白、青のケーブルが 3 回巻かれているパーツが取り付けられた零相リアクトルタイプのノイズフィルターである。

作業終了後、動作確認試験を行った。蓄積電子ビームが無い状態で位相駆動用モーター電源を ON して、ノイズ対策前及びノイズ対策後の補正電磁石電源装置のリファレンス信号をオシロスコープで測定した。その結果を図 2.3 に示す。(a)の零相リアクトルなしの時はノイズが観測されているが、(b)の取り付け後はノイズが軽減されたことが分かる。励磁電流に換算して $\pm 3\text{mA}$ 程あった変動を $\pm 0.5\text{mA}$ 程度 ($\pm 15\text{A}$ を 16bitDAC で出力した時の分解能とほぼ同等)まで押え込むことができ、零相リアクトルにより電氣的ノイズが低減されたことを確認した。

第 9 サイクルに第 8 サイクルとほぼ同じ測定を行った。第 8 サイクルの時と振動数は異なるものの、ほぼ同等の振幅のビーム振動が観測された。(図 2.4) ビーム変動に対する零相リアクトルの効果は、補正励磁電磁石電源のリファレンス信号に見られたほどのものではなかった。このことから、ドライブアンプの ON/OFF に同期した軌道変動を低減するには、別の要因を考える必要があることが解った。

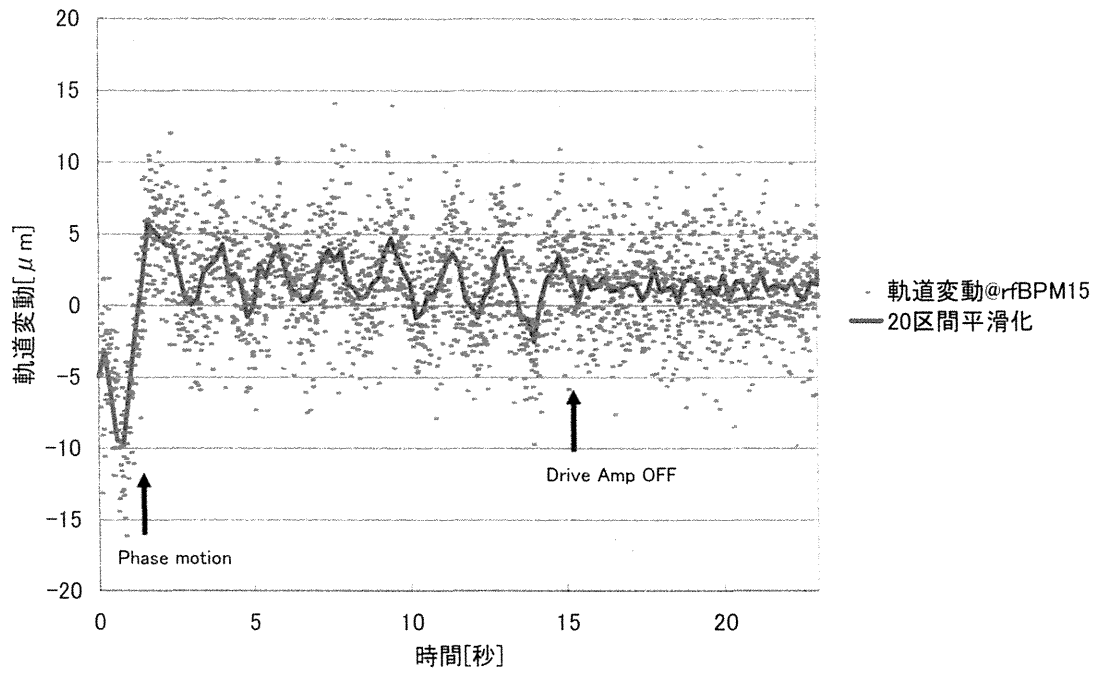


図 2.1: 改修作業前の rfBPM15 で観測した位相駆動後のサーボモーターON時の水平方向軌道変動(2001 Oct 17)

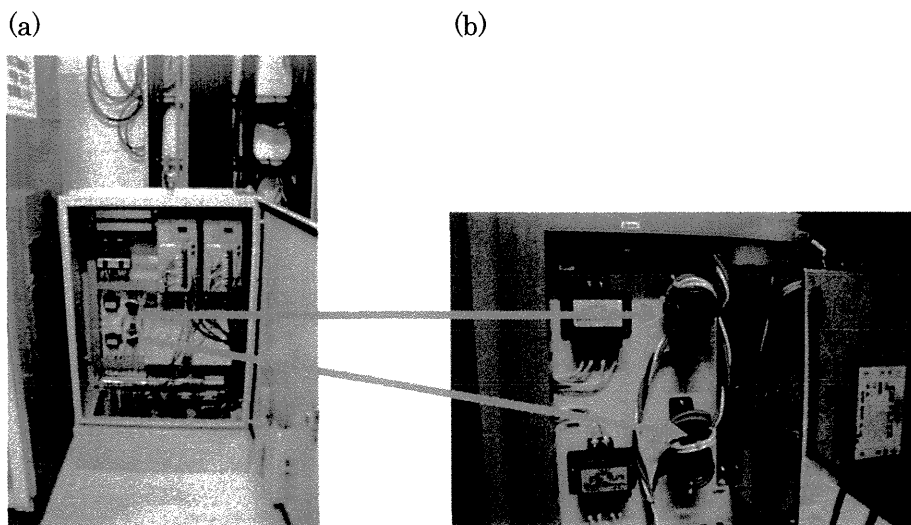


図 2.2: 零相リアクトル取り付け後のドライブアンプボックス
(a) 盤内全体 (b) 零相リアクトル本体 (2001 Nov. 6)

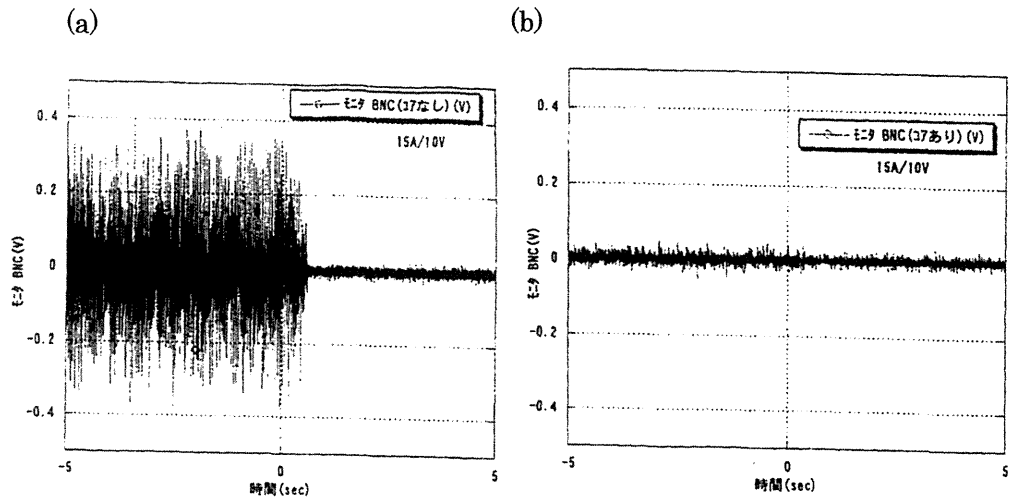


図 2.3: 補正電磁石電源のリファレンス出力電圧
 (a) 零相リアクトル取り付け前、(b) 取り付け後(2001 Nov. 6)

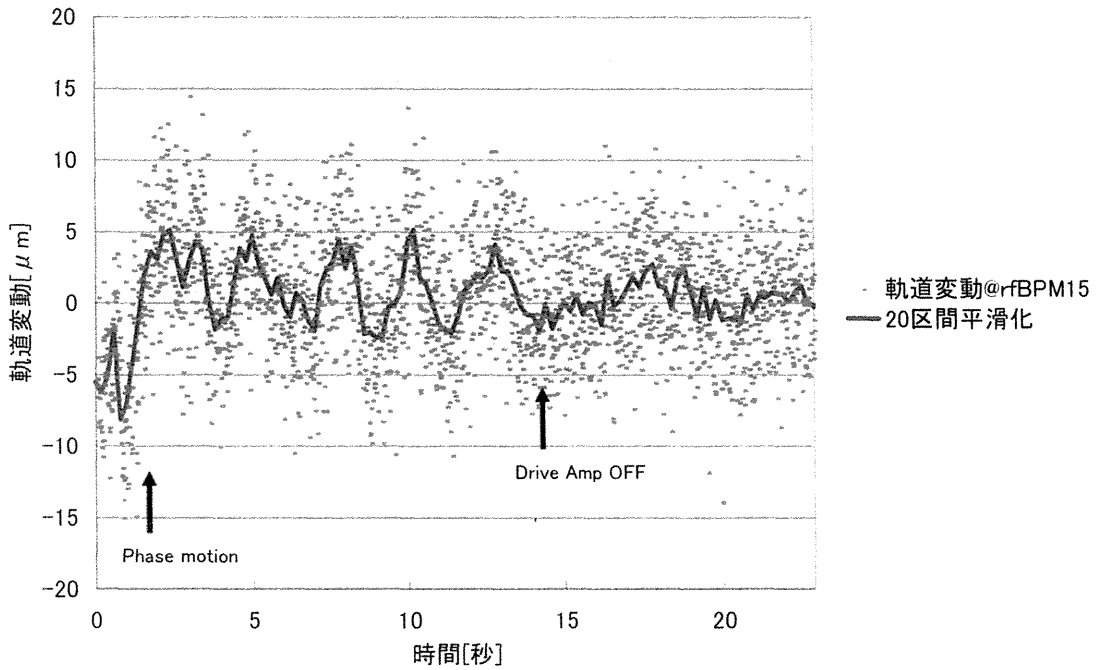


図 2.4: 零相リアクトル取り付け後に rfBPM15 で観測したサーボモーターON時の位相駆動後の水平方向軌道変動 (2001 Nov. 14)

3. 実時間同期ビーム位置測定システム

ID23 の位相駆動中に発生する電子軌道の変動を押さえ込むには、数十ミリ秒間隔で ID23 前後に設置された補正電磁石の励磁量を位相位置に対応して変化させる必要がある。ギャップ距離及び位相位置と励磁量の対応表を我々は補正励磁テーブルと呼んでいる。この ID23 用補正励磁テーブルは、位相の依存性だけでなくギャップにも依存性があるので二次元テーブルとなる。補正励磁テーブルは Feed-forward 方式で作成される。すなわち、あらかじめ補正を行うギャップ及び位相における軌道変動を測定し、その変動量をキャンセルする補正励磁量を求めてテーブルにする。今回、この Feed-forward 方式のテーブル作成を事前のものを参考にしながら繰り返す (iteration) ことによって、より精度の高い補正励磁テーブルを作成した。iteration では、同じ手順の操作を数回行うので作成に時間がかかる。我々は、図 3.1 の実時間同期ビーム位置測定システムを構築し、データの取得から解析までを手早く行えるようにした。

軌道変動の測定は、蓄積リングのアーケ部に置かれている 3 台の rfBPM (Cell15, Cell27, Cell39) を用いて行った。これらの rfBPM は、蓄積電子ビームの COD (Closed Orbit Distortion) 測定用 BPM を改造して、より高い周波数帯の変動を測定できるようにされたものである。これらからの変動データはマルチチャンネルの ADC (Analog Digital Converter) でリアルタイムにデジタル化される。本システムでは、ADC として横河電機製モジュール型計測器 WE7000 を採用した。ID23 のギャップ及び位相の駆動と WE7000 での変動データ取得は、SPRING-8 制御システム (Message And Database Oriented Control Architecture: MADOCA) 上で、図 3.1 の WorkStation からのコマンドメッセージによって制御されている。このコマンドメッセージにタイムスタンプを付けて保存することによって、駆動と測定の同期を取っている。

軌道変動要因には、ID23 によって引き起こされるものだけでなく、他の変動要因 (冷却水の脈動、電磁石電源の出力変動、気温の変化による建物の伸縮の変動、等々) による成分が含まれている。これらの要因を取り除き ID23 による変動のみを抽出するために、駆動を周期的な繰り返しパターンで行い、Wavelet 変換を用いたフィルタリングを行った。

変動と駆動のデータはそれぞれ時系列で得られるが、本システムではデータ間の時刻の同期をとり、時間を媒介変数として変動と駆動の相関をとることが可能である。

測定データの流れを以下に示す。

1. rfBPM×3(Cell15, Cell27, Cell39): 水平垂直方向の蓄積ビーム軌道の位置を電圧で出力する。
2. WE7000: マルチチャンネル ADC として、変動電圧を±1V→16 bit の分解能でリアルタイム (サンプリング周波数: 100Hz) に Analog/Digital 変換する。また、パターン駆動が行われている間のデータを蓄積する。
3. WorkStation (WS): ID23 をパターンで駆動する。パターン終了後、WE7000 からデータを吸い上げる。
4. PC×6: 3 台の rfBPM から取得した水平と垂直 (計 6 つ) のデータを WS から受け取り、Wavelet 変換アルゴリズムを用いてフィルタリングを行う。
5. WS: フィルタリング後のデータとパターン駆動のコマンドメッセージのログから駆動と変動の相関関係を導く。

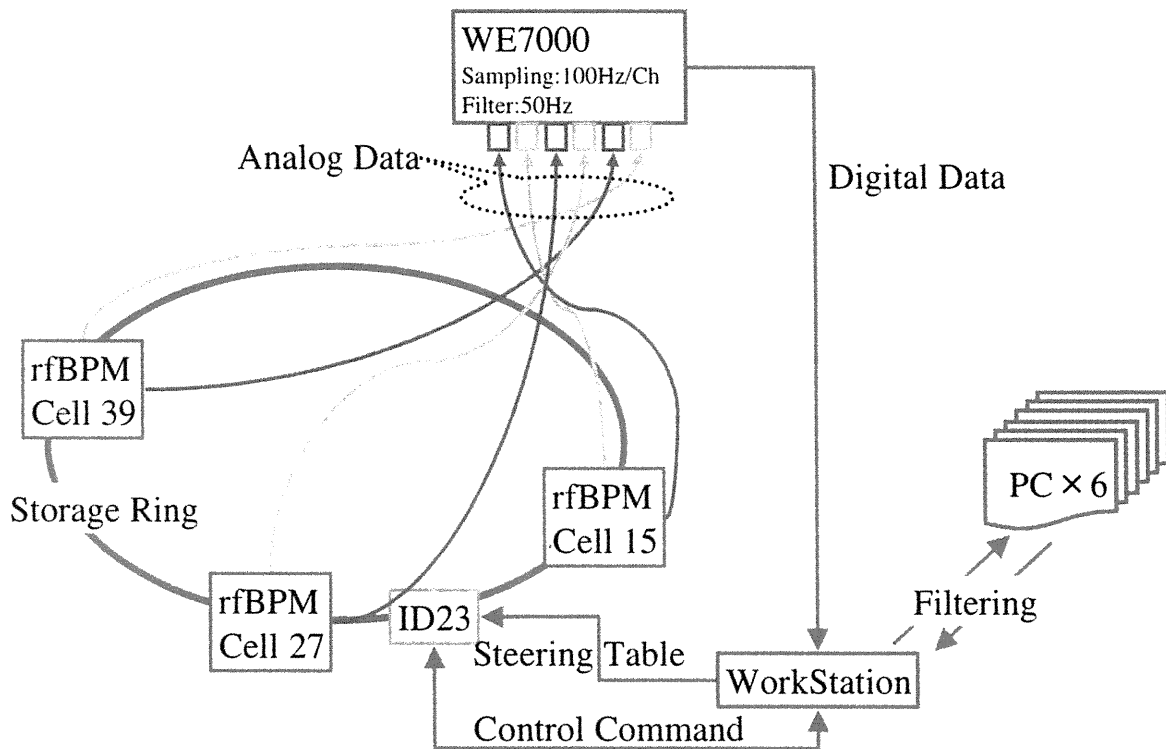


図 3.1: 実時間同期ビーム位置測定システム

図 3.2 (a) に SPring-8 の軌道変動を測定する機器からのデータを収集するため、WE7000 を繋ぎ込んでいる様子を示す。図中右から二人目の人物がケーブルの繋ぎ込みをしている。(b) は ADC の前段に使用された 50Hz の固体フィルターである。WE7000 内部には 5kHz、500Hz のフィルターしかなかったため、100Hz で測定を行うためにナイキスト周波数である 50Hz のフィルターを用意した。

この測定では、一度に大量の変動データが得られるので、迅速に Wavelet 変換フィルタリングを行うために PC によるクラスタを用いた。6 箇所の軌道変動データに Pentium III 1GHz クラスのコンピューターを一つずつ割り当て合計 6 台の PC に各々の計算をさせた。1 つのデータ処理にかかった時間は 5 分から 10 分程度であった。クラスタマシンのセットアップの様子を図 3.3 に示す。

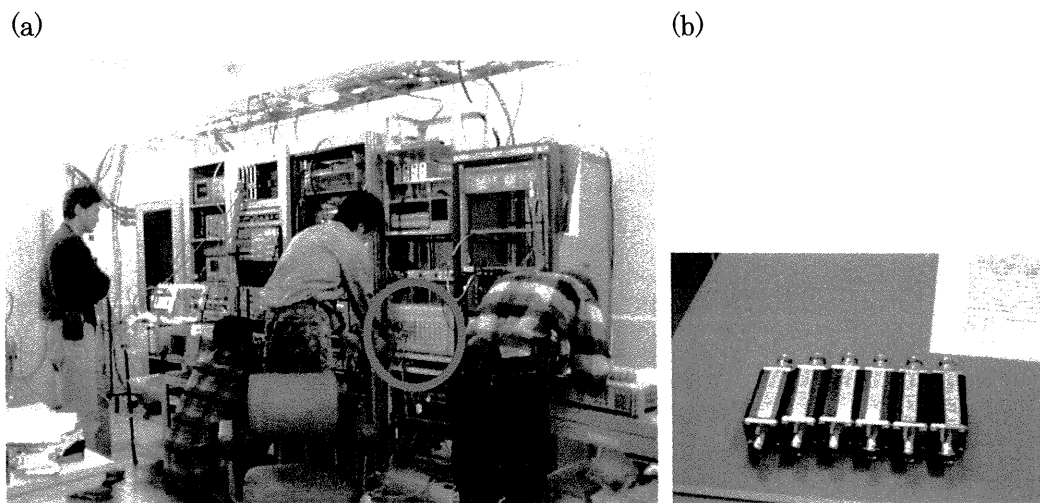


図 3.2: (a) WE7000 (赤丸) のセットアップ (b) 前段に使用した 50Hz の固体フィルター (2001 Oct. 23)

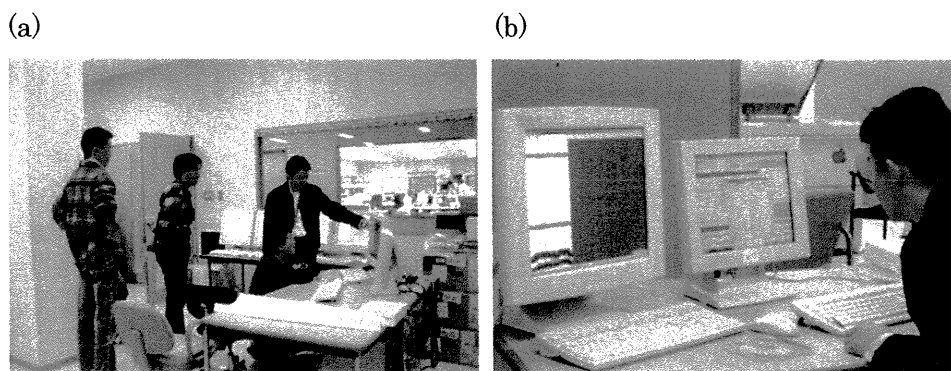


図 3.3: Wavelet 変換用 PC クラスタ (2001 Oct 23)

4. 補正テーブルの作成

ID23 を図 4.1 (a) のような繰り返しパターンを用いて位相駆動を行い、蓄積リングアーケ部に設置された rfBPM3 台 (Cell15, Cell27, Cell39) を使用して水平方向の軌道変動を測定した。繰り返しパターンで ID23 を動かして、複数回同じ現象を観測し、それを足し合わせ ID23 が誘起した成分のみを精度良く定量的に抽出するように工夫した。パターン駆動により、Cell15 の水平方向に現れた軌道変動を図 4.2(a) に示す。

測定時のビーム条件は以下のとおりであった。

- ・ 蓄積電流: 100mA
- ・ Filling Pattern: 160bunch train * (12·1)
- ・ Optics: HHLV+4LSS
- ・ ID23 を除く全 ID 固定
- ・ 自動軌道補正なし

ID23 の位相駆動のパターンを図 4.1 (a) のようにしているのは理由がある。簡単に考えると、図 4.1(b) のような駆動パターンで良さそうに思われるが、これでは以下のような問題があった。ID23 は位相 0mm の位置でギャップ駆動を行うので、位相駆動時の軌道変動の基準点は位相 0mm の位置にいる時の軌道であることが望ましい。図 4.1(b) の場合、位相が 0mm になるとき、すなわち軌道が「原点」になる時は初めと終わり以外は瞬間でしかない。しかも高速で駆動している最中である。ID23 の駆動と関係の無い遅い周期の軌道のドリフトをバックグラウンドとして取り除く際、基準点が静的な条件でないと正確に取り除くことができない。よって、駆動パターンを毎回位相 0mm の位置で静止するようにして、基準点の変動を明確に観測できるようにした。

パターン駆動時の軌道変動データを Wavelet 変換を用いてフィルタリングすると、ID23 のパターン駆動に同期した成分が抽出される。(図 4.2) Wavelet 変換後のデータをパターンの周期で重ね合わせ、(図 4.3 (a)) 挿入光源中心に誤差磁場が局在しているモデルに基づいて挿入光源上下流の STM の励磁量をそれぞれ算出する。時間を横軸として得られる補正励磁量を、パターン駆動のログから横軸を位相位置に変換して、(図 4.3 (b)) データ取得時の補正励磁量と足し合わせてより精度の高い励磁テーブルとなる。

データ取得から励磁量算出までの一連の処理を繰り返して (3 回程度の iteration)、最終的に軌道変動が $5\mu\text{m}$ 以下になるまで、補正励磁テーブルの精度を上げた。

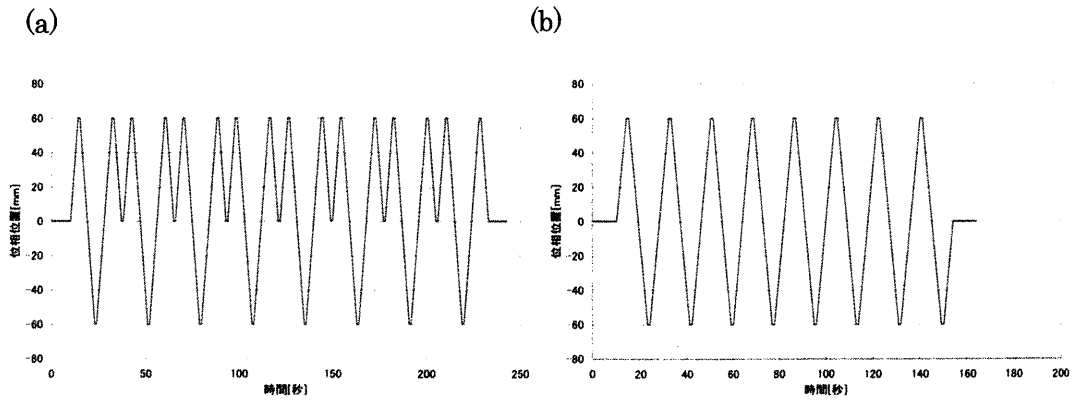


図 4.1: (a) 使用した位相駆動パターン (b) 単純な駆動パターン

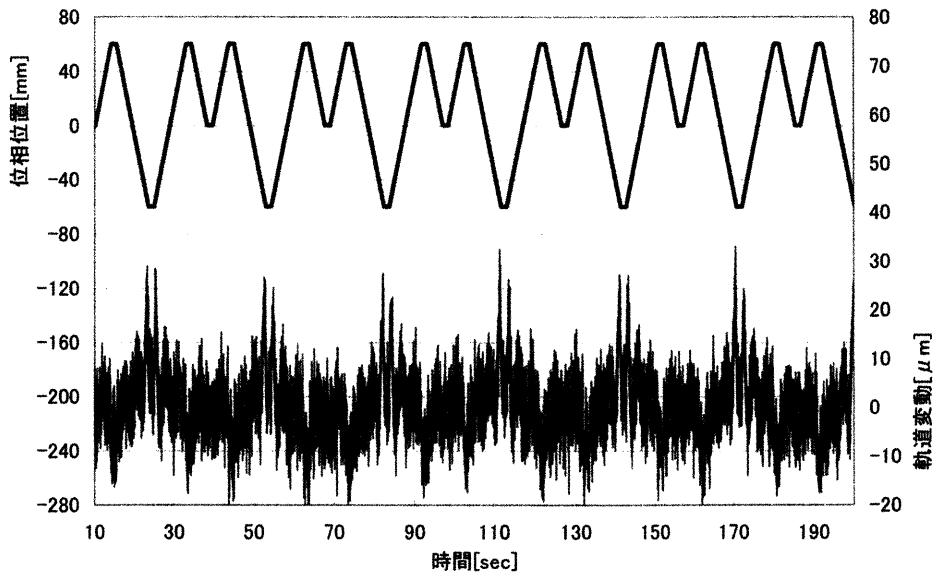


図 4.2: 位相駆動パターン (紺色)、rfBPM15 で観測された水平方向軌道変動 (緑色)、Wavelet 変換でフィルタリングされた軌道変動 (赤色)

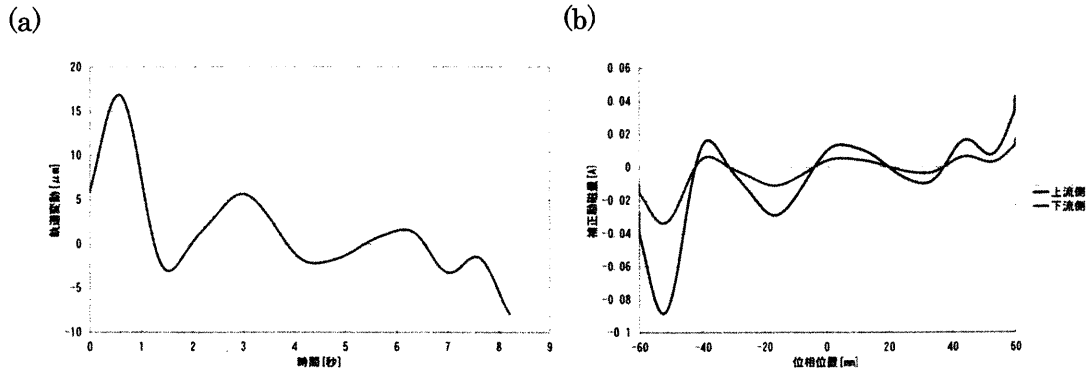


図 4.3: (a) 駆動パターンの周期で折り畳んで平均化した軌道変動、(b) 横軸を位相位置に変換して、変動を補正するよう求めた上下流の STM の補正励磁電流

5. 結果

ユーザー運転時に使用している速度の半分（15mm/秒）で位相のパターン駆動を15の異なるギャップ距離(36mm, 37mm, 38mm, 39mm, 40mm, 45mm, 46mm, 47mm, 48mm, 49mm, 50mm, 55mm, 60mm, 65mm, 70mm)において行い、補正励磁テーブルの改善を行った。Cell15のrfBPMで測定した、ギャップ36mm, 40mm, 45mm, 50mm, 55mm, 60mm, 65mm, 70mmの補正テーブル改善前(×: Before)と改善後(○: After)の水平方向の軌道変動をそれぞれ図5.1(a), (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h)に示す。15mm/秒の速度で駆動した時の軌道変動はすべてのギャップ距離で $5\mu\text{m}$ 以下に収まっている。

図5.2は、図5.1(a)の改善後(○: After)の縦軸を拡大して、駆動方向ごと(-60mm→+60mm: 赤、+60mm→-60mm: 青)に分離したものである。はっきりと駆動方向によって軌道変動が異なることがわかる。両者の平均はほぼ平坦になっているので、駆動方向に依らない軌道変動を補正する励磁テーブルが得られていることがわかる。

Gap36mmの改善後の位相駆動の軌道変動を→方向と←方向それぞれで抽出して、→方向駆動時の軌道変動のみを積極的に補正する励磁テーブルを作成して駆動したところ、図5.3のようになった。←方向駆動時の軌道変動は大きくなってしまったが、→方向駆動時の軌道変動は観測できない領域まで補正することができた。駆動方向に応じた補正を行えば、現在のrfBPM測定系では観測できないところまで抑え込めることを確認した。

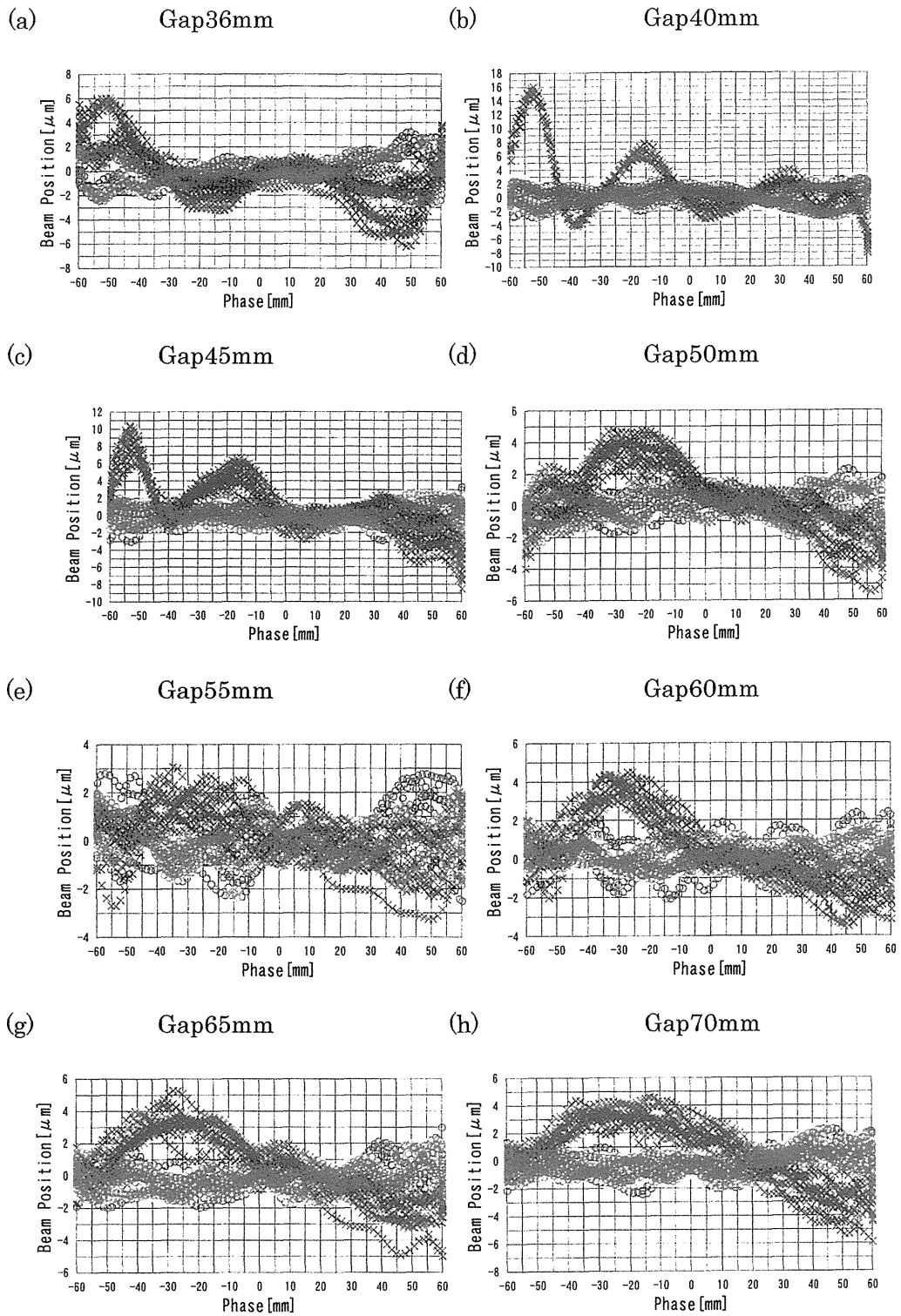


図 5. 1: 各ギャップ距離における位相駆動時の水平方向軌道変動 (a) 36 mm, (b) 40 mm, (c) 45mm, (d) 50 mm, (e) 55 mm, (f) 60mm, (g) 65mm, (h) 70mm、改善前(\times : Before)、改善後(\circ : After)

駆動方向に依る差

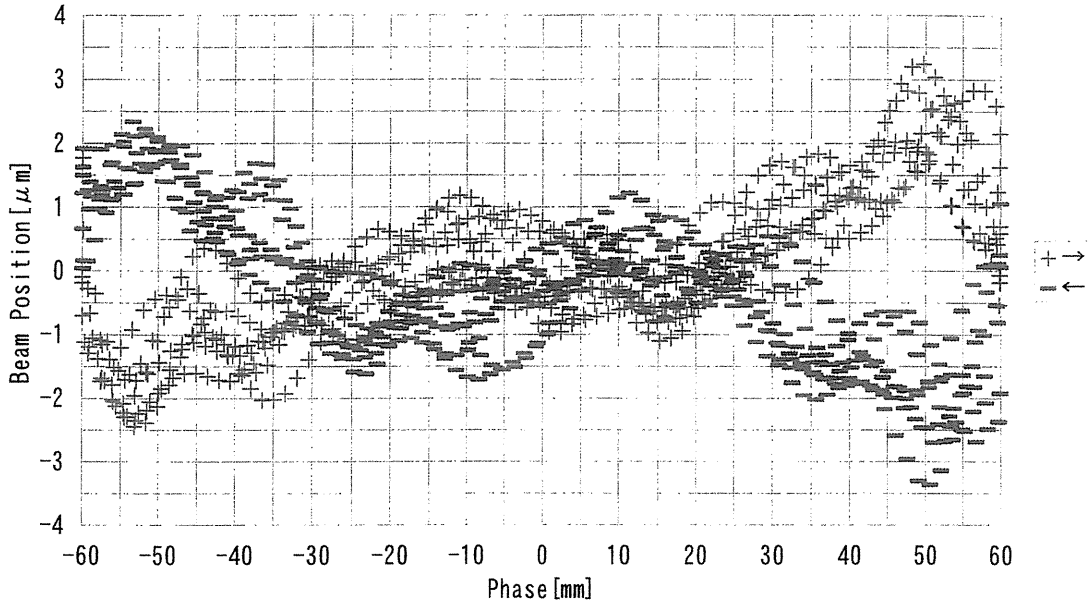


図 5.2: 図 5.1 (a) After の縦軸を拡大して、駆動方向ごと (-60mm→+60mm : 赤、+60mm→-60mm : 青) に分離したもの

→方向のみ補正

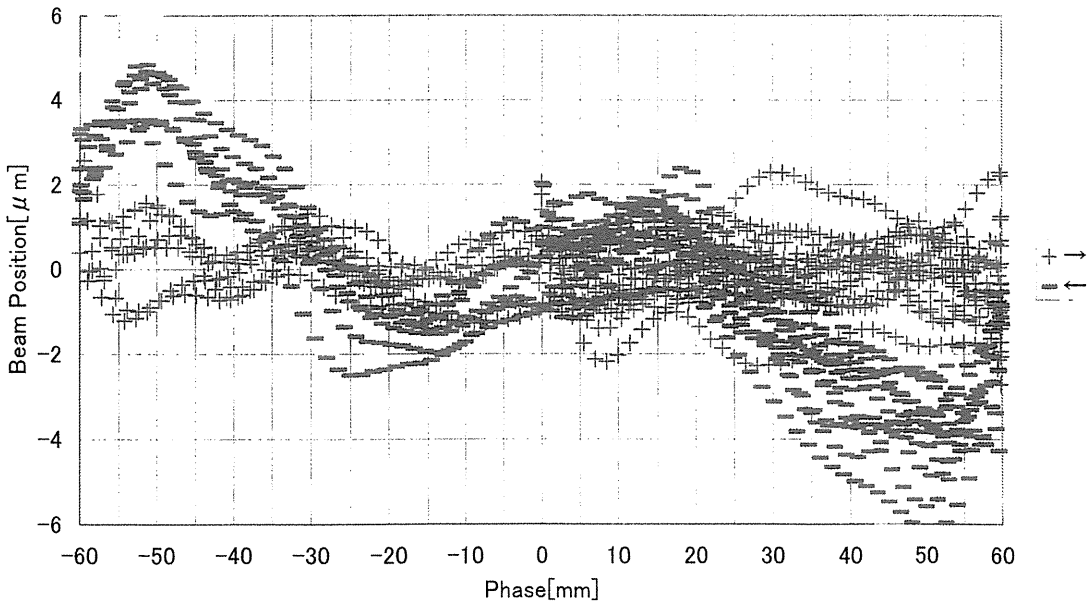


図 5.3: →方向 (-60mm→+60mm) 駆動時の変動成分のみ補正するテーブルを作成して、パターン駆動を行った時の軌道変動

6. 結語

2001年第8サイクルから第10サイクルにID23の引き起こす軌道変動の調査と補正励磁テーブルの作成を行った。

位相駆動用サーボモーターのドライブアンプからの動力線を零相リアクトルに巻きつけて、ドライブアンプからのノイズ低減をする改修作業を行った。保守通路周辺環境のノイズ低減には成功したが、ビーム変動に対する効果は補正励磁電磁石電源に見られたほどのもではなかった。ドライブアンプのON/OFFに同期した軌道変動を低減するには、別の要因を考える必要があることが解った。

軌道変動測定から補正励磁テーブル作成までを迅速に行えるシステムを構築し、ユーザー運転時に使用する領域の駆動方向に依らない軌道変動を抑える補正励磁テーブルが完成した。駆動方向に応じた補正を行えば、現在のrfBPM測定系では観測できないところまで抑え込めることを確認した。

謝辞

JASRIの加速器部門、ビームライン・技術部門、安全管理室など本当に多くのスタッフの方々にご助力いただきました。特に、熊谷教孝加速器部門長、大熊春夫運転軌道解析グループリーダーには多大なご意見ご指導をいただきました。ここに改めて感謝致します。

最後になりましたが、ID23にご理解いただき支援下さった下村理放射光科学研究センター長に感謝いたします。

参考文献

<挿入光源>

A New Undulator for Generating Variably Polarized Radiation: S. Sasaki, K. Miyata, T. Takada, Jpn. J. Appl. Phys. 31, L1794 (1992).

Design of a new type of planar undulator for generating variably polarized radiation: S. Sasaki, K. Kakuno, T. Takada, T. Shimada, K. Yanagida, Y. Miyahara, Nucl. Instrum. Methods A331, 763 (1993).

原研軟 X 線ビームライン(BL23SU)用挿入光源の制御系の開発: 平松洋一、島田太平、宮原義一, JAERI-Tech 1999-082.

SPring-8 原研軟 X 線ビームライン BL23SU の H13 年運転・整備記録: 安居院あかね、吉越章隆、中谷健、藤井健太郎、横谷明德、JAERI-Tech 2002-064.

<位相駆動>

First Operation of Circular Dichroism Measurements with Periodic Photon-Helicity Switching by a Variably-polarizing Undulator at BL23SU at SPring-8, A. Agui, A. Yoshigoe, A. Yokoya, Y. Saitoh, Y. Hiramatsu, T. Shimada, T. Nakatani, T. Matsushita, Y. Miyahara, H. Tanaka, M. Takeuchi, T. Bizen, S. Sasaki, M. Takao, H. Aoyagi, T. P. Kudo, K. Satoh, S. Wu, H. Ohkuma, Rev. Sci. Inst. 72, 3191 (2001).

APPLE-2 型アンジュレーターの高速度位相変調を用いた高分解能円二色性実験: 安居院あかね、吉越章隆、中谷健、松下智裕、斎藤祐児、水牧仁一郎、横谷明德、田中均、宮原義一、島田太平、竹内政雄、高雄勝、佐々木茂樹、青柳秀樹、工藤統吾、佐藤一道、呉樹奎、大熊春夫, 放射光 vol.14, 17 (2001).

<Wavelet 変換>

Wavelet 変換を利用した SPring-8 ID23 の軌道変動解析: 松下智裕、安居院あかね、吉越章隆、中谷健、田中均、高雄勝、青柳秀樹、竹内政雄、大熊春夫, 放射光 vol.15, 303 (2002).

Analysis of the orbit distortion by the use of the wavelet transform, T. Matsushita, A. Agui, A. Yoshigoe, M. Takao, H. Aoyagi, M. Takeuchi, T. Nakatani, H. Tanaka, Eighth International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (2003 August 25-29) San Francisco, USA, AIP conference proceedings vol.705, p290-295 (2004).

<補正テーブル作成>

SPring-8 原研軟 X 線ビームライン挿入光源 ID23 の位相駆動が誘起する閉軌道変動調査及び補正テーブルの作成: 中谷健、田中均、高雄勝、安居院あかね、吉越章隆、竹内政雄、青柳秀樹、大熊春夫、JAERI-Tech 2003-048

Measurement of the orbit fluctuation caused by an insertion device with amplitude modulation method, T. Nakatani, A. Agui, A. Yoshigoe, T. Matsushita, M. Takao, H. Aoyagi, M. Takeuchi, H. Tanaka, Eighth International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (2003 August 25-29) San Francisco, USA, AIP conference proceedings vol.705, p21-24 (2004).

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV=1.60218×10⁻¹⁹J

1 u=1.66054×10⁻²⁷kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å=0.1nm=10⁻¹⁰m

1 b=100fm²=10⁻²⁸m²

1 bar=0.1MPa=10⁵Pa

1 Gal=1cm/s²=10⁻²m/s²

1 Ci=3.7×10¹⁰Bq

1 R=2.58×10⁻⁴C/kg

1 rad=1cGy=10⁻²Gy

1 rem=1cSv=10⁻²Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- E C閣僚理事会指令では bar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s(N·s/m²)=10 P (ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s=10⁴St(ストークス)(cm²/s)

圧	MPa(=10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062×10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10 ⁻⁴	1.35951×10 ⁻³	1.31579×10 ⁻³	1	1.93368×10 ⁻²
	6.89476×10 ⁻³	7.03070×10 ⁻²	6.80460×10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778×10 ⁻⁷	0.238889	9.47813×10 ⁻⁴	0.737562	6.24150×10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407×10 ⁻⁶	2.34270	9.29487×10 ⁻³	7.23301	6.12082×10 ¹⁹
	3.6×10 ⁶	3.67098×10 ⁵	1	8.59999×10 ⁵	3412.13	2.65522×10 ⁶	2.24694×10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279×10 ⁻⁶	1	3.96759×10 ⁻³	3.08747	2.61272×10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072×10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515×10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616×10 ⁻⁷	0.323890	1.28506×10 ⁻³	1	8.46233×10 ¹⁸
	1.60218×10 ⁻¹⁹	1.63377×10 ⁻²⁰	4.45050×10 ⁻²⁶	3.82743×10 ⁻²⁰	1.51857×10 ⁻²²	1.18171×10 ⁻¹⁹	1

1 cal= 4.18605J (計量法)
 = 4.184J (熱化学)
 = 4.1855J (15℃)
 = 4.1868J (国際蒸気表)
 仕事率 1 PS(仏馬力)
 = 75 kgf·m/s
 = 735.499W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10 ⁻¹¹
	3.7×10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

Spring-8 原研軟X線ビームライン用挿入光源 I D 23 の位相駆動が誘起する軌道変動調査及び駆動方向に依らない補正テーブルの作成



古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています