

## あいち SR 電子蓄積リングの逐次的な閉軌道歪みの補正に関する研究

### STUDY ON SEQUENTIAL CORRECTION OF CLOSED ORBIT DISTORTION OF AICHI SR ELECTRON STORAGE RING

中尾海斗<sup>#,A)</sup>, 保坂将人<sup>B,C)</sup>, 高嶋圭史<sup>B,A,C)</sup>, 石田孝司<sup>B,C)</sup>,  
真野篤志<sup>B)</sup>, 郭磊<sup>B,A,C)</sup>, 加藤政博<sup>D,E,B)</sup>, 大熊春夫<sup>F,C)</sup>,

Kaito Nakao<sup>#,A)</sup>, Masahito Hosaka<sup>B,C)</sup>, Yoshifumi Takashima<sup>B,A,C)</sup>, Takashi Ishida<sup>B,C)</sup>,  
Atsushi Mano<sup>B)</sup>, Lei Guo<sup>B,A,C)</sup>, Haruo Ohkuma<sup>F,C)</sup>, Masahiro Katoh<sup>D,E,B)</sup>

<sup>A)</sup> Graduate School of Engineering, Nagoya University, <sup>B)</sup> Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University

<sup>C)</sup> Aichi Synchrotron Radiation Center, <sup>D)</sup> Hiroshima University

<sup>E)</sup> UVSOR Facility, Institute for Molecular Science, <sup>F)</sup> Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

#### Abstract

At Aichi Synchrotron Radiation Research Center (AichiSR), the accelerators are operated from 10 am to 6:30 pm on weekdays. The correction of the closed orbit distortion (COD) of the electron storage ring is performed only once in a day immediately after the transition to 300 mA top-up operation. The closed orbit changes gradually throughout the day due to the temperature change in the accelerator room. We are developing a method to suppress these closed-orbit changes by sequential correction of closed-orbit distortions. To improve the accuracy of the correction, we re-measure the response matrices, which has not been updated since the early stage of the commissioning. We also investigate the optimal number of eigenvalues used in the singular value decomposition. After these efforts, the residual of closed-orbit correction was reduced to about 60 %.

#### 1. はじめに

あいちシンクロトロン光センター(以下、あいち SR)の中核装置である 1.2 GeV 電子蓄積リングは 2013 年 3 月よりユーザー供用が開始され、開設以来 300 mA のトップアップモードで安定に運転されている[1]。あいち SR は、夜間は運転を停止する。毎朝の電子蓄積リング立ち上げ後、ユーザー利用開始直前に固有値分解法による軌道補正が行われており、基準軌道との差が最大で数  $\mu\text{m}$  以内まで補正してユーザー利用を開始する。しかし、リング室内の温度変化など様々な要因で軌道変動が発生し、一日の中で最大 60  $\mu\text{m}$  の閉軌道歪みが発生している。

そこで本研究では、一定時間おきに軌道補正を行い、軌道変動を抑制する逐次補正の導入に向けて、現在行われている軌道補正の精度向上のための応答行列の再取得や、固有値数の最適値の検討、補正限界の検討を行った。

#### 2. 応答行列更新

##### 2.1 取得条件

応答行列の取得にあたっては、BPM が線形な領域内で軌道が変化するように行った。あいち SR で使用している電極配置から、軌道が中心から 2 mm 以内であれば 0.8% の誤差で線形領域と見なすことができる。補正コイルの電流を 1 A 変えた際に軌道がこの範囲内に収まることを確認しながらすべての補正コイルの電流値を一つづ

つ変更した。先行研究[2]では 6 極電磁石・バンプキッカー・入射セプタム等をすべて OFF とし、応答行列を取得していたが、本研究では最終目標が逐次的補正であり実際の運転環境における応答行列が必要であると考え、通常通りこれらは ON の状態で測定を行った。蓄積リング周上に BPM が 32 個、ステアリング電磁石が水平、垂直それぞれ 16 個設置されているため、応答行列の要素は  $16 \times 32 \times 2 = 1024$  となるが、4 個の BPM が読み取り不良となっているため、実際には  $448 \times 2$  方向の要素数となっている。

##### 2.2 現在使用している応答行列との比較

実測した応答行列、現在使用している応答行列、およびその差分を Fig. 1 に示す。あいち SR では蓄積リングのラティスとして 4 回対称のセル構造を採用しており、これを反映して測定された応答行列も対称的な構造となっている。

水平方向において実測と現在使用しているものとの差分を取ると、最大でも  $\pm 0.1 \text{ mm/A}$  以内であり、現在使用している応答行列から大きく乖離していないことが分かった。

一方で垂直方向の応答行列は実測と現在使用しているもので少し差異が見られている。 $\pm 0.3 \text{ mm/A}$  程度の差になった値が数点あり、特に補正電磁石の 8 番、12 番での差異は顕著である。今回は時間的成約から LOCO 計算を断念したが、特に垂直方向の誤差に関して LOCO 計算による誤差磁場の解析を進めたい。

<sup>#</sup> nakao.kaito@g.mbox.nagoya-u.ac.jp

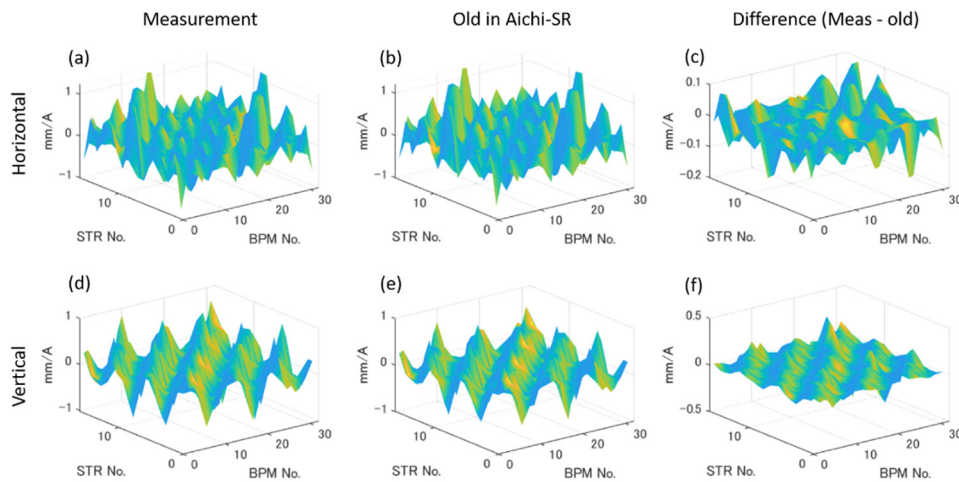


Figure 1: The response matrices for all horizontal (a-c) and vertical (d-f) corrector magnets are displayed. The matrices of the measured by BPMs, the old matrices in Aichi-SR, and the differences of them are plotted in the figure (a, d), (b, e), and (c, f), respectively. The orbital responses are normalized by the steering excitation current.

### 2.3 応答行列入れ替えによる補正の違い

応答行列の入れ替え前後での補正した COD を Fig. 2 に示す。使用固有値数は 10 個である。Fig. 2 を見ると、特に変更前の COD が大きい部分で補正が行えている様子が伺える。また、逆に COD が悪化している部分もほとんど見られない。このことから定期的に応答行列を更新することで、よりよく補正残を少なくできることが分かった。

## 3. COD 補正シミュレーション

### 3.1 シミュレーション概要

あいち SR では条件付き固有値分解法[3]を用いたグローバル軌道補正が行われている。その補正限界については COD 補正シミュレーションを用いて検討を行うこととした。このシミュレーションでは、2 章で測定した応答行列を用いて条件付き固有値分解法による補正の計算を行った。補正前の COD は、四極電磁石の据付誤差や偏向電磁石の回転誤差等を正規分布に従う乱数で与え、実際のラティス要素から磁場誤差を計算することで求めた[4]。与えた乱数の条件を Table 1 に示す。これらの条件は各電磁石の設置精度目標から、発生する COD が RMS 値 $\pm 150 \mu\text{m}$ になるようにファクターを掛けて調整を行い導出した。

また、補正限界の他に計算上の最適な固有値数の導出も行った。

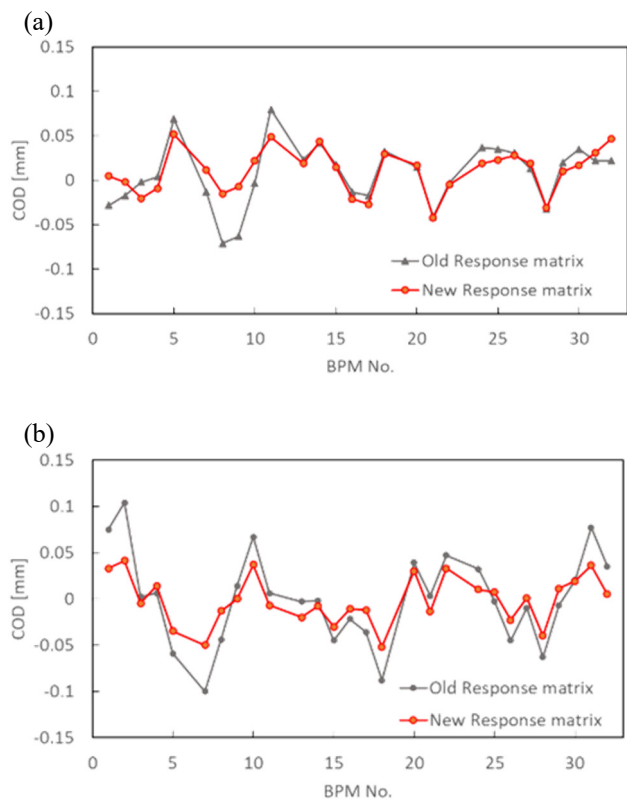


Figure 2: COD correction using old and new response functions. Horizontal and Vertical are plotted in the figure (a) and (b).

Table 1: Conditions of COD Simulation

Position of errors	Source of errors	Amplitude ( $\sigma$ )	Influenced Direction
Bending Magnet	Field error	0.002 %	Horizontal
	Roll error		Vertical
Quadruple Magnet	Alignment error	0.04 mrad	Horizontal
			Vertical
Super bend Magnet	Field error	1.0 $\mu\text{m}$	Horizontal
	Roll error		Vertical

### 3.2 補正限界

逐次補正を行っていく上で、発生する COD に対する補正の限界値を求めることは重要である。そこで、最大 RMS 値 $\pm 150 \mu\text{m}$ の COD を 200 パターン用意し、補正限界値を計算した。使用する固有値は実際の使用数と同じ水平・垂直ともに 10 個とした。200 パターンの COD の RMS 値の平均と補正後の COD の RMS 値の平均を Table 2 に示す。

Table 2: The Average of COD RMS in 200 Times Simulation

	Horizontal	Vertical
Before correction [ $\mu\text{m}$ ]	63.06	36.20
After correction [ $\mu\text{m}$ ]	4.41	0.41

この結果から、計算上では元の COD の水平:1/14、垂直:1/88 まで減少することができるということがわかった。実際補正する場合、BPM 自体のドリフトや補正電磁石のスキュー成分などで補正残は悪化すると考えられる。

### 3.3 固有値数と補正量

Figure 3 に、作成した COD を固有値分解法で補正した際の、固有値使用数ごとの COD-RMS 値の一例を示す。水平方向は使用する固有値数を増やすことで補正精度を向上できている様子が確認できる。垂直方向に関しても固有値数 12 まで増やすことでより補正精度を高めることができています。一方で、固有値数 13 以上では特に垂直方向で補正が限界に達してしまっている。

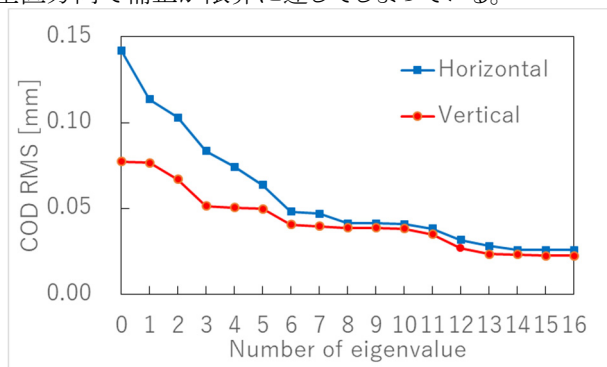


Figure 3: COD-RMS when changing the number of eigenvalues in simulation.

### 3.4 固有値数

Figure 4 に固有値数を変化させた際の COD の RMS 値を示す。測定の結果、水平方向においては固有値 11 個が最も補正できており、12 個以上増やすと逆に補正精度が悪化する様子が確認された。垂直方向は固有値数 8 個でおおよそ補正精度は限界に達した。3.3 項にて固有値数と補正量の関係をシミュレーションしたがその結果と異なるものとなった。その要因として BPM のドリフトが考えられる。BPM 自体が水平で  $0.5 \mu\text{m}$ 、垂直で  $0.1 \mu\text{m}$  程度のゆらぎを持っており、これが補正の際に悪影響を及ぼしている可能性も考えられる。シミュレーションでは BPM の変動を考慮していなかったため、これらを考慮して再度計算を行いたいと考えている。

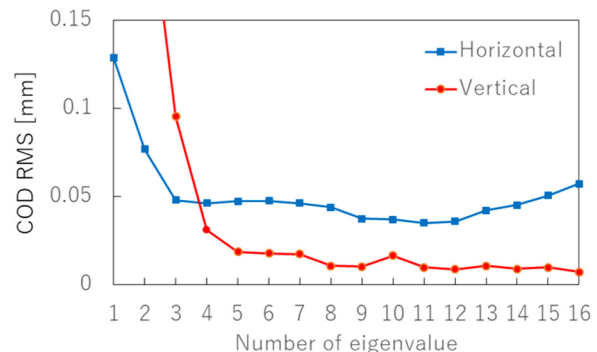


Figure 4: COD-RMS when changing the number of eigenvalues in Aichi-SR.

## 4. 逐次補正

### 4.1 実験条件

実験条件は以下のように設定した。水平・垂直ともに同じ条件である。

- 補正間隔=1 分
- 基準軌道は実験開始時のものとした
- 応答行列は更新後のものを使用した
- 使用固有値数=10 個
- 実験時間が限られていたため、軌道変動を大きくする目的で加速器室内の一部の空調を切り、軌道が安定した後に再度空調を入れ、同時に基準軌道の取得と補正を開始した

### 4.2 実験結果と考察

Figure 5 にそれぞれ水平方向の補正ありの COD の変化、補正なしの COD 変化、補正の有無による COD の RMS 値の変化を示す。ここで補正なしの COD 変化は、補正ありのデータに対して、補正をかけた際の収束方向の変化を差し引いた推測値であることを述べておく。

補正なしと補正ありを比較すると、最大で  $0.015 \text{ mm}$  変化していたものが  $0.01 \text{ mm}$  以下に抑えられていることがわかる。また、Fig. 5-(b) において時間的に大きく振動している軌道も補正をかけることで振動が収まっている様子が確認できた。

Figure 5-(c) より RMS 値で比較すると 60 分間の逐次補正終了時で約 2  $\mu\text{m}$  抑制することができていることが確認できた。

Figure 6 に垂直方向の RMS 値変化を示す。こちらも水平と同様に軌道変動を抑えることができている様子を確認できる。

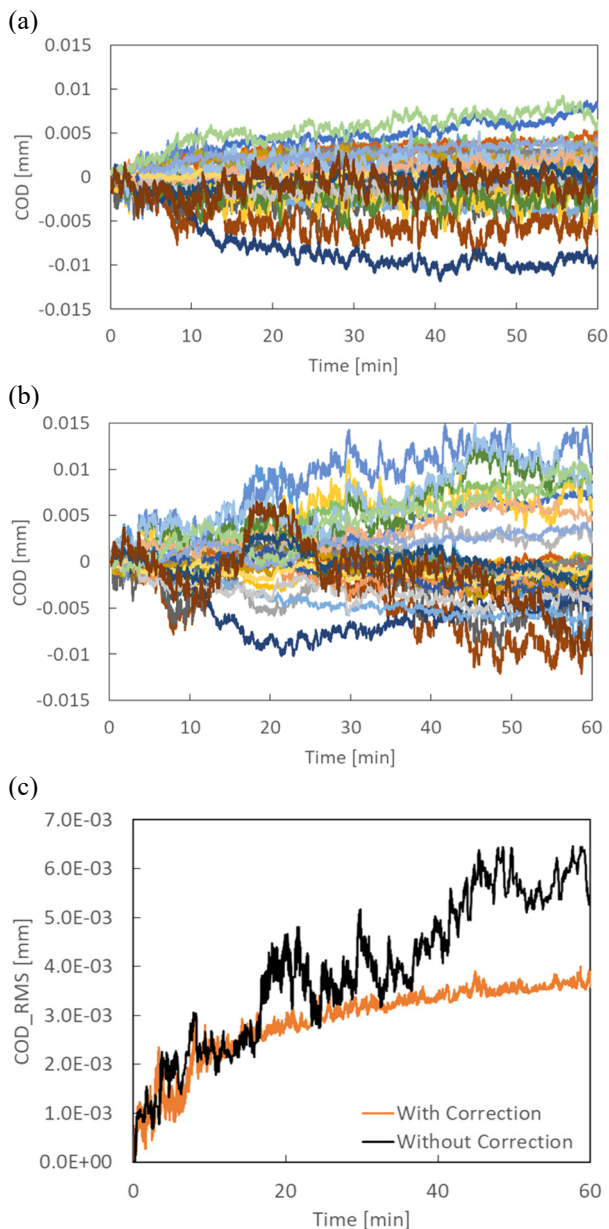


Figure 5: Horizontal COD change with correction, COD change without correction are plotted in figure (a) and (b). RMS of each COD are plotted in figure (c).

補正の限界について考察を行うと、まずシミュレーションで求めた COD 補正の限界に達していないことが明らかである。

補正の限界値に悪影響を与える因子として BPM のエラーが考えられる。エラーの要因の一点目として BPM の据付誤差によるドリフトが考えられる。あいち SR では四極電磁石に締結される形で固定されているが、温度変

化等で変動している可能性がある。実際、加速器立ち上げ直後に BPM のゆらぎが確認されている。二点目として BPM コネクタの緩みが挙げられる。一部のコネクタにおいて再度トルク管理を行ったが、別の箇所でも同様の事例が起こっている可能性がある。

また、応答行列を取得した際にスキュー成分が観測された。そのため、例えば水平方向の補正を行った際は垂直方向に無条件で悪影響を与えてしまう。この影響についてはシミュレーションを用いて検証を行いたい。

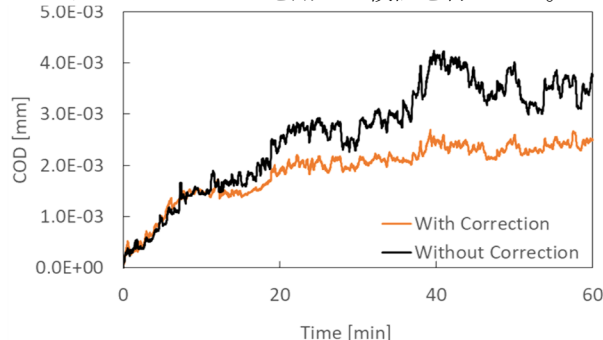


Figure 6: RMS of vertical COD change with correction and without correction.

## 5. まとめ

あいち SR における閉軌道歪みの逐次補正に関する検討を行った。応答行列の更新により補正は向上し、逐次補正に関しても十分な効果が得られることが確認できた。今後は BPM の異常を検出し、処理の中断を行うフェールセーフ機構の実装、得られた応答行列から LOCO 計算を実施し、磁場誤差の推定等を行いたいと考えている。

## 謝辞

あいち SR の施設関係者の方々には、本研究において多大なるご支援をいただきました。ここに深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Y. Takashima *et al.*, “あいち SR 光源加速器の現状”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2019 pp. 1260-1262.
- [2] T. Takano *et al.*, “あいち SR における LOCO”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2014, pp. 487-491.
- [3] Y. Kamiya *et al.*, “ERROR ANALYSIS OF A NEW COD CORRECTION METHOD UNITING GLOBAL AND LOCAL ORBIT FEEDBACKS”, Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference, pp.1174-1176
- [4] M. Katoh, Introduction to electronic storage rings OHO '93.