

あいち SR における LOCO

LINEAR OPTICS FROM CLOSED ORBITS FOR AICHI-SR STORAGE RING

高野琢^{#, A)}, 山本尚人^{A)}, 保坂将人^{A)}, 真野篤志^{A)}, 高嶋圭史^{A)}, 加藤政博^{B)}

Takumi Takano^{#, A)}, Naoto Yamamoto^{A)}, Masahito Hosaka^{A)}, Atsushi Mano^{A)}, Yoshihumi Takashima^{A)}, Masahiro Katoh^{B)}

^{A)} Nagoya University Synchrotron Radiation Research Center

^{B)} UVSOR Facility, Institute for Molecular Science

Abstract

The lattice parameters of Aichi-SR storage ring was determined experimentally by means of a LOCO (Linear Optics from Closed Orbits) program coded by LabVIEW. The orbital response matrix for 16 corrector magnets was measured and fitted by the LOCO model well within the BPM noise level. The validity of the analysis was confirmed by comparing the values of the tune and the beta function at BPM positions. The LOCO analysis resolved the twiss parameters and the statistical information concerning errors of such as the quadrupole gradient, the skew component, the momentum compaction factor, and the strength of steering magnets. As a result, it turned out that the gradient error and the skew component of the quadrupole magnets (QMs) are increased in inverse proportion to the distance from the superconducting 5T magnet (SCM), which indicates that the leak magnetic field from SCM contributes as a skew source.

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 と略す）は 2013 年 3 月よりユーザ供用が開始され^[1]、これまで致命的なトラブルを経験することなく 300mA トップアップ運転でのユーザ利用が現在行われている。ブースターシンクロトロンから輸送路を介して蓄積リングまで（Fig.1：加速器配置図を参照）のビーム入射効率は平均で 50%程度であり、今後改善の余地は有るものの設計時の想定に近いパフォーマンスを発揮している^[2]。一方、放射光モニターによるビーム形状の観測の結果、ビーム進行方向に垂直な面内で鉛直方向にビームサイズが膨らんでおり（水平 500 μ m, 鉛直 350 μ m）、さらに常伝導偏向電磁石位置（Fig.1）において 6 度程度ビームが傾いていることが判明しており、スキュー補正電磁石の導入が検討されている^[3]。

この様な状況から本研究では、現状の蓄積リングラティスパラメータエラーについての知見を得ること、またスキュー源の特定を行うことを目的として LOCO によるラティスパラメータ較正を行った。さらに、ベータ関数を測定し、蓄積リングの現状把握と LOCO 較正結果との比較検証を行った。

LOCO によるパラメータ解析の結果、4 極電磁石の磁場勾配 k の設計値からのずれおよび 4 極のスキュー成分がいずれも超伝導電磁石からの距離に反比例する形で相関しており、漏れ磁場の影響が無視できないことが明らかとなった。また本論文では、オリジナルに作製した LOCO プログラムの詳細についてもあわせて紹介したい。

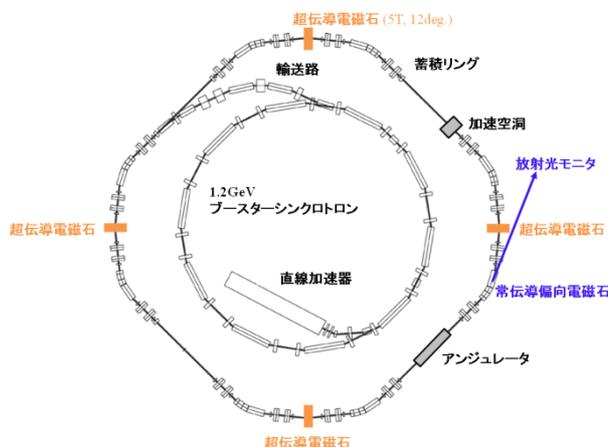


Figure 1: Layout of Aichi-SR accelerators.

2. LOCO プログラムの詳細

2.1 LOCO の概要

LOCO とは、蓄積リング周上のステアリング電磁石強度を微小変化させた時の BPM で観測されるビーム軌道レスポンスから加速器パラメータを推定する手段であり、これまで世界各地の放射光施設において研究開発が進められてきた^{[4][5]}。LOCO プログラムにおいては、ラティスパラメータのセットを少しずつ変化させながらその都度計算される軌道レスポンス R_{mod} と実測のレスポンス R_{meas} との残差が最小となるようにパラメータの最適化を行う。

2.2 計算式

モデルと実測のレスポンスの残差 χ^2 は(1)式の様に表される。

[#] t.takano@nusr.nagoya-u.ac.jp

$$\chi^2 = \sum_{i,j} \frac{(R_{mod,ij} - R_{meas,ij})^2}{\sigma_i^2} \quad (1)$$

式(1)中の i および j はそれぞれ BPM 番号およびステアリングの番号をそれぞれ表している。また、 σ は BPM のノイズレベルであり、フィッティングを行う際の重みづけの役割を担っている。

ビームの軌道変位量が十分小さく、レスポンスが線形で近似されると仮定できる場合、水平方向のレスポンス R_x は(2)式のようにベータ関数に比例する項と分散関数に比例する項の和として表される^[4]。

$$R_x = \frac{\Delta\theta_{x,j} \sqrt{\beta_{x,j} \beta_{x,i}} \cos(\phi_{x,ij} - \pi\nu_x)}{2 \sin \pi\nu_x} + \frac{\Delta\theta_{x,j} \eta_{x,j}}{\alpha_c L} \eta_{x,i} \quad (2)$$

式(2)中の $\Delta\theta_{x,j}$ は j 番目のステアリング強度の変化、 $\beta_{x,j}$ および $\beta_{x,i}$ は j 番目のステアリングおよび i 番目の BPM 位置におけるベータ関数、 $\eta_{x,j}$ および $\eta_{x,i}$ は j 番目のステアリングおよび i 番目の BPM 位置における分散関数、 $\phi_{x,ij}$ は j 番目のステアリングから i 番目の BPM 位置までの位相進み、 ν_x はチューン、 α_c はモーメントムコンパクトションファクター、 L はリング周長をそれぞれ表している。各種ツイスパラメータについては 3×3 の輸送行列を用いて導出を行い、水平方向と鉛直方向は独立に計算を行っている。

また本 LOCO 解析においては、4 極磁場に回転成分を導入することによってスキューパラメータとしている。

2.3 パラメータ最適化方法

LOCO で用いた全パラメータ (計 97 個) を Table 1 にまとめた。

Table 1: LOCO Parameter List

名称	略号	単位	個数
ステアリング強度 (電流値で規格化)	$\Delta\theta$	mrad/A	16×2
4 極磁場強度(QF1,QD1,QF2,QD2)	k	m^{-2}	8×4
コンパクトションファクター	α_c	-	1
4 極スキュー成分	ϕ	mrad	8×4

ここで、他の LOCO 研究^{[4] [5]}において取り入れられている BPM 感度係数は本研究では除外している。理由は、BPM 感度係数は式(2)全体にかかる係数として導入されることになるが、同じく式(2)全体にかかるステアリング強度 $\Delta\theta$ と競合し一意な解が定まらなくなるためである。

Table 1 で挙げたパラメータのうち、 $\Delta\theta$ およびコンパクトションファクター α_c はそれぞれ式(2)において独立変数として振舞う。一方、ベータ関数・分散関数・チューン・位相進みは 4 極磁場強度 k およびそのスキュー成分 ϕ の多変数関数となっており、これらは非独立変数として振舞う。

LOCO でパラメータ最適化を行うにあたっては、独立変数に対しては単純に式(1)の χ^2 に対する偏微分

値が 0 になるようにすればよい。即ち、パラメータセット p_1, p_2, \dots, p_n に対して、

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial p_1} = 0, \frac{\partial \chi^2}{\partial p_2} = 0, \dots, \frac{\partial \chi^2}{\partial p_n} = 0 \quad (3)$$

を満足するようにパラメータを調整する。一方、非独立変数に対しては、本 LOCO では最もシンプルな最急降下法を採用している。即ち、 χ^2 曲面における各パラメータに対する勾配が最も大きくなる方向に向かって χ^2 の極小値を探索する手法である。具体的には、 χ^2 に対する各パラメータの偏微分値を成分として持つ下記ベクトル

$$\vec{u} = \left(-\frac{\partial \chi^2}{\partial p_1}, -\frac{\partial \chi^2}{\partial p_2}, \dots, -\frac{\partial \chi^2}{\partial p_n} \right) \quad (4)$$

の方向に向かってパラメータを振って行く。ベクトルの大きさ $|\vec{u}|$ の決定方法については、実際に χ^2 曲面をこのベクトル \vec{u} に沿ってスキャンしていき、最も χ^2 が小さくなる量として定めている。そのため、計算の iteration 毎に $|\vec{u}|$ は変化することになる。

2.4 プログラミング

本 LOCO プログラムは全て LabVIEW を用いて記述している。次節で述べる軌道レスポンスの自動取得から行列計算およびパラメータフィッティング、さらにベータ関数の測定と LOCO によるベータ関数との比較などの評価解析まで一貫して行えるようになっている。ラティスの設定ファイルはシミュレーションソフト WinAgile の設定ファイル (*.lat) と互換性を持ち、そのまま読み込むことができるようになっている。

3. 軌道レスポンスマトリクスの取得

3.1 取得条件

レスポンス取得にあたっては、なるべく非線形な効果を排除するためにステアリングの強度を最小限に抑えて測定を行った。具体的には、リング全周の COD が $100 \mu\text{m}$ 以内程度に収まるように調整し、ステアリングの蹴り角は $3 \mu\text{rad}$ (50mA の励起) 程度とした。6 極電磁石・バンパキッカー・入射セプタムは全て OFF するとともに、これまでのスタディで漏れ磁場の存在が明らかとなっているブースターシンクロトロン・輸送路についても完全に電磁石の励磁を止めた状態でレスポンス測定を行った。BPM からの読み取りは 10 回の平均値を用いている。蓄積リング周上に BPM が 32 個、ステアリング電磁石が 16 個設置されているため、マトリクスの要素は $16 \times 32 \times 2 = 1024$ となるが、3 個の BPM が読み取り不良となっているため、実際には 928 の要素数となっている。

3.2 測定結果

実測のレスポンス、設計上のレスポンス、およびそれらのマトリクスの差分を Fig.2 に示した。

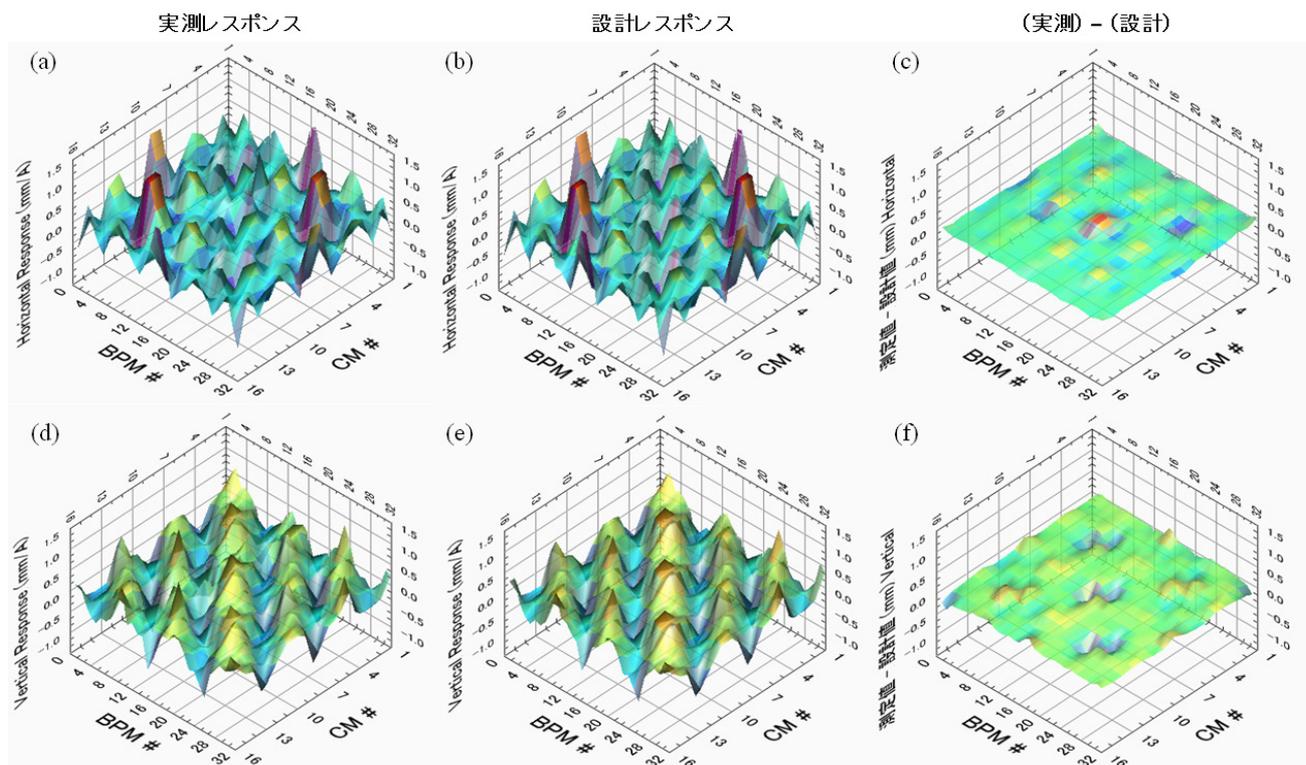


Figure 2: The response matrices for all horizontal (a-c) and vertical (d-f) corrector magnets are displayed. The matrices of the measured by BPMs, the calculated from the designed lattice parameters, and the differences of them are plotted in the figure (a, d), (b, e), and (c, f), respectively. The orbital responses are normalized by the steering excitation current.

あいち SR では蓄積リングのラティスとして 4 回対称セルの構造 (Fig. 1) を採用しており、これを反映して測定された軌道レスポンス (Fig. 2 (a)(d)) も対称的な構造を有している。設計ラティスを基に算出したマトリクス (Fig. 2 (b)(e)) と比較したとき、両者の構造に見た目の顕著な差異が認められないことから、あいち SR 蓄積リングの現状の運転動作点は設計パラメータから大きくは離れていない事がこの時点で推察される。また、実測および設計レスポンスの差分を Fig. 2 (c)および(f)にプロットしたが、この差分構造にも対称性が現れた。これは、現状ラティスパラメータと設計上のそれとの差分がリング周上において対称的に分布していることを示唆する。

約 3000 回程度の iteration を経て、実測レスポンスおよびモデル計算によるレスポンスの誤差の標準偏差は水平方向および鉛直方向とも BPM ノイズレベル以下の $7.6\mu\text{m}$ までフィッティングが収束した。この時のフィッティングの例として、あるステアリングに対する水平方向のレスポンスにおける収束の様子を Fig. 4 に示した。

4. LOCO 実行結果

4.1 パラメータ収束過程

Table 1 に挙げたパラメータについて、2 節で述べた計算式と最急降下法に従って最適化を行った。当然ながら、最初から全てのパラメータを振るとフィッティングが発散してしまうので、Fig. 3 に示す順序に従ってパラメータを段階的に増やしながらか解析を進め、徐々にフィッティングを収束させた。

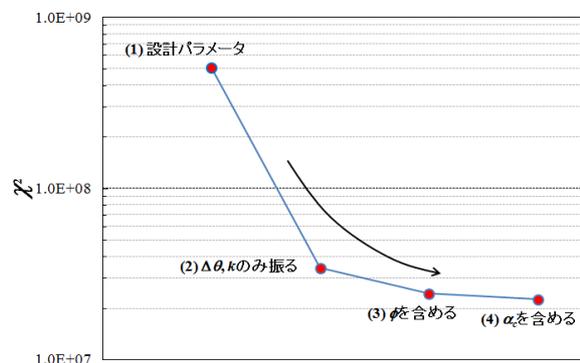


Figure 3: The decreasing process of χ^2 . The numbers (1) – (4) shown in the figure mean which parameter is to be included into the LOCO analysis; (1) before fitting started, (2) $\Delta\theta$ and k are firstly optimized, (3) ϕ is included with them, and (4) α_c is finally included with all other parameters.

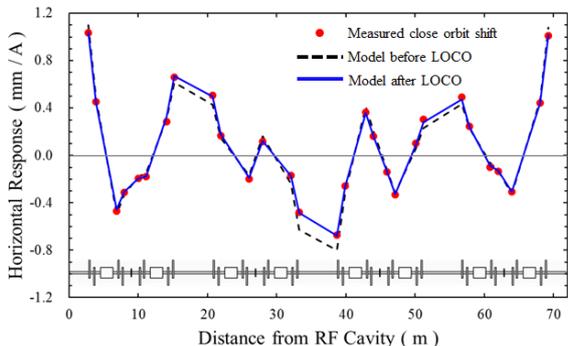


Figure 4: Orbit shift at horizontal BPMs for one horizontal steering magnet. The orbital response is normalized by the steering excitation current.

収束後の LOCO モデルによるチューン値は水平方向に対して 4.695 (実測値: 4.699), 鉛直方向に対して 3.192 (実測値: 3.193) となり, ほぼ実測の値を再現した。

4.2 パラメータ詳細

Table 2 に, LOCO 解析により得られたパラメータの詳細を示す。

Table 2: The Results of the LOCO Analysis

	Family	設計K (m ⁻²)	<K> (m ⁻²)	RMS deviation (%)
Quadrupole	QF1	2.5638	2.5635	0.2874
	QD1	2.9068	2.9294	0.2423
	QF2	4.1870	4.1105	0.3308
	QD2	2.3795	2.1770	0.5674
Quad. Skew	Family	<Skew> (mrad)	RMS deviation (%)	
	QF1	0.08	112.46	
	QD1	0.00	124.67	
	QF2	3.02	16.62	
	QD2	5.03	17.63	
Corrector	Type	< $\Delta\theta$ > (mrad/A)	RMS deviation (%)	
	SF1	0.0626	2.8340	
	SD1	0.0636	2.2989	
	SF2	0.0629	2.7588	
	SD2	0.0624	1.9210	
Compaction factor	設計	LOCO		
	0.019	0.022		

まず 4 極磁場においては, QD2 の系列において 0.5%以上の比較的大きなばらつきと設計値からの差異が認められる。さらに, スキュー成分においても同じ QD2 の系列において比較的大きな値 (5mrad) が見られる。これら結果についての考察として, あいち SR 蓄積リングでは Fig. 5(a)に示すように磁場強度 5T の超伝導電磁石を中心に対称的に配置した Triple Bend のセル構造を採用しており, 4 極電磁石のうち QD2 ファミリーは位置的に最も超伝導電磁石に近接していることがわかり, その距離はおよそ 1.3m 程度である。ここで 4 極電磁石の各系列において, 設計値からのずれ量 Δk およびスキュー成分の大きさ ϕ を超伝導電磁石からの距離に対してプロットした (Fig. 5(b)および(c))。これらの図から明らかなように, 超伝導電磁石からの距離に反比例する形で Δk および ϕ が相関していることが分かった。これ

はおそらく, 超伝導電磁石からの漏れ磁場が 4 極磁場分布もしくは 4 極電磁石に隣接して設置されている 6 極電磁石の磁場分布に影響している可能性が考えられる。詳細な検討のためには実際の磁場分布をシミュレーションして考察する必要があるが, 磁場解析ソフトによる概算では, 例えば QD2 の位置において約 5 ガウス程度の磁場がビーム進行方向に対して垂直な面内の鉛直方向に漏れていることが示されている。また, これまで超伝導偏向電磁石のスタディ結果からそれ自身が 6 極磁場成分を有する事が明らかとなっており^[6], 複雑な磁場分布形状を与えるビーム光学系への影響は単純ではないと考えられる。

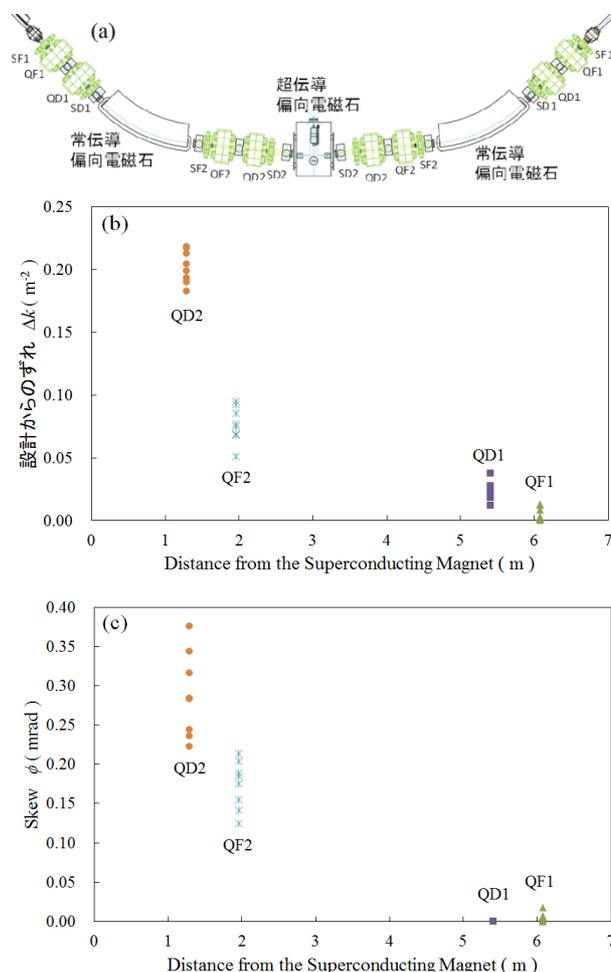


Figure 5: (a) The triple bend cell structure. The magnets in the cell are symmetrically arranged about the SCM. The shift of the quadrupole gradients Δk from the designed value and the skew angles ϕ of the QMs are plotted in the figure (b) and (c), respectively, as a function of distance from the SCM to each QM families.

5. ベータ関数の測定と LOCO との比較

あいち SR においてこれまで観測されていなかった

たベータ関数の測定を行い、さらに LOCO モデルとの比較検証を行った。

あいち SR においては、ステアリング用 2 極磁場は 6 極電磁石に内蔵された補助コイルにより制御され、また 6 極電磁石からかなり近接した位置 (6cm) に BPM が設置されている。したがって、ステアリングから BPM までの位相進みをチューン値によってほとんど近似できることを利用して、下記式からベータ関数を導くことができる^[7]。

$$\beta_{BPM/cor} \approx 2 \tan \pi Q \frac{\Delta x_{c.o.}}{\Delta \theta} \quad (5)$$

式(5)中の $\Delta x_{c.o.}$ は Fig. 2 で示したレスポンスマトリクスに含まれているので、改めて測定を行う必要はない。 $\Delta \theta$ については全てのステアリングについて同じ値をとるものと仮定して測定を行った結果を Fig. 6 に示す。

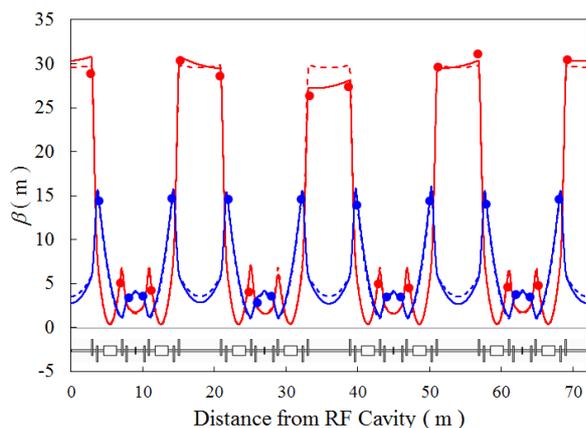


Figure 6: Measured horizontal (red) and vertical (blue) beta functions were plotted as filled circles, comparing with LOCO predictions (solid lines) and with the designed functions (dotted lines).

6. まとめ

ステアリングに対する軌道レスポンスマトリクスを測定し、作成した LOCO プログラムによってあいち SR 蓄積リングのパラメータ最適化を行った。その結果、フィッティング残差の標準偏差は BPM ノイズレベル以下程度まで減少し、LOCO モデルによるチューン値は実測の値をほぼ再現した。また、各パラメータのばらつきを評価したところ、4 極電磁石磁場強度の設計値からのずれ及びスキュー成分の大きさがいずれも超伝導電磁石からの距離に反比例する形で相関していることが明らかとなった。これは、超伝導電磁石からの漏れ磁場に起因するものと考えられる。

LOCO モデルに基づくベータ関数とステアリングレスポンスから求めたベータ関数を比較した結果、両者の傾向はほぼ一致しているものの、水平方向で

最大 9%、鉛直方向で最大 5%程度の誤差があった。これは、あいち SR 蓄積リングでは BPM 感度係数を LOCO のパラメータとすることが原理的に不可能であることが要因のひとつとして考えられる。

以上の LOCO による結果を元に、今後は超伝導電磁石付近の 4 極電磁石系列に補正コイルを導入することによりスキュー成分の相殺を試み、エミッタンス減少などビーム性能向上につなげたいと考えている。

参考文献

- [1] N. Yamamoto, M. Hosaka, K. Takami, T. Takano, A. Mano, H. Morimoto, Y. Takashima, and M. Katoh, "Beam Commissioning of Central Japan Synchrotron Radiation Facility", 加速器, 9(4), pp. 223-228 (2012).
- [2] N. Yamamoto, M. Hosaka, T. Takano, A. Mano, Y. Takashima, and M. Katoh, "Present Status of Top-up Operation at Aichi-SR Storage Ring", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp. 465-467 (2013).
- [3] R. Kawakami, A. Mano, M. Hosaka, N. Yamamoto, M. Katoh, Y. Takashima, and T. Takano, "Measurement of Emittance in Aichi synchrotron Radiation Center", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp. 693-696 (2013).
- [4] J. Safranek, "Experimental Determination of Storage Ring Optics Using Orbit Response Measurements", Nuclear Inst. and Methods in Phys. Res. A, 388, pp. 27-36 (1997).
- [5] Y. Iwasaki, Y. Takabayashi, S. Koda, K. Yoshida, T. Tomimasu, and H. Ohgaki, "Model Calibration of the SAGA Light Source Electron Storage Ring Using Orbit Response Matrix", Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp. 652-654 (2007).
- [6] M. Hosaka, N. Yamamoto, T. Takano, A. Mano, Y. Takashima, and M. Katoh, "Present Status of Super-Conductive Bending Magnets at Aichi SR", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp. 461-464 (2013).
- [7] F. Zimmermann, "Measurement and Correction of Accelerator Optics", Beam Measurement, pp. 21-107 (1998).