

# あいち SR における並列化線形光学補正計算にもとづく

## Vertical Dispersion の補正

### CORRECTION OF VERTICAL DISPERSION BASED ON PARALLEL COMPUTING LOCO FOR AICHI-SR STORAGE RING

高野琢<sup>#,A)</sup>, 山本尚人<sup>A)</sup>, 保坂将人<sup>A)</sup>, 真野篤志<sup>A)</sup>, 高嶋圭史<sup>A)</sup>, 加藤政博<sup>B)</sup>  
Takumi Takano<sup>#,A)</sup>, Naoto Yamamoto<sup>A)</sup>, Masahito Hosaka<sup>A)</sup>, Atsushi Mano<sup>A)</sup>, Yoshihumi Takashima<sup>A)</sup>, Masahiro Katoh<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Nagoya University Synchrotron Radiation Research Center

<sup>B)</sup> UVSOR Facility, Institute for Molecular Science

#### Abstract

Recently, the vertical dispersion function of Aichi-SR storage ring has been measured. The value of the function was unexpectedly large ( $> 0.1\text{m}$  max.). In order to identify the coupling source for the electron beam, the lattice parameters were determined experimentally by means of an originally developed linear optics fitting program coded by LabVIEW. To increase the processing speed of the program, the calculation algorithm was parallelized. The orbital response matrix for 16 corrector magnets was measured and fitted by a model lattice well within the BPM noise level. The analysis resolved the Twiss parameters and the statistical information concerning lattice errors of such as the quadrupole gradient, the skew component, the momentum compaction factor, and the strength of steering magnets. As a result of the analysis, the possible coupling sources are identified at six points on the storage ring. To suppress the coupling effect, three skew magnets are installed at the identified “coupling points”, and as the result, the vertical dispersion is drastically decreased.

#### 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<sup>[1]</sup>、これまで深刻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<sup>[2]</sup>。一方、蓄積リングの分散関数を測定した結果（Fig.2）、縦方向の分散関数が想定よりも大きい（最大で 0.1m を超える）ことが判明した。このことを反映して、ダブルスリットを用いた放射光モニターによるビーム形状の観測では、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 $\mu\text{m}$ 、鉛直 150 $\mu\text{m}$ ）、さらに常伝導偏向電磁石位置（Fig.1 の青矢印部分）においてビーム断面形状の主軸が水平面に対して 15 から 20(degree)程度傾いていることが観察されている。

この様な背景から、放射光の品質向上のため、蓄積リング上に存在すると考えられるカップリング源を特定し、これを補正することが望まれており、これまでスキュー補正電磁石の導入<sup>[3]</sup>などが検討されてきた。

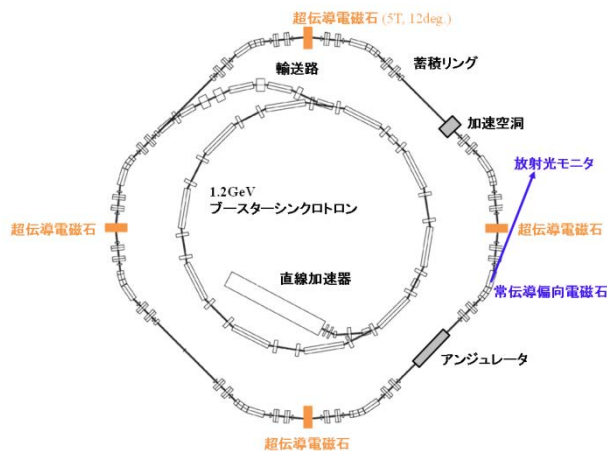


Figure 1: Layout of Aichi-SR accelerators.

本研究では、カップリング源を推定し縦方向分散関数を補正するという目的のため、線形光学補正計算を行い、現状の蓄積リングラティスパラメータの校正を行った。

線形光学補正によるパラメータ解析の結果、カップリング源の候補として蓄積リング上の 6 つの領域に絞り込むことができた。今回の研究では、この 6 つの領域の内、まずは解析の結果特に寄与が大きいと考えられる 3 か所に既設の 6 極電磁石を利用したスキュー電磁石を導入して縦分散の補正を試みた。その結果、大幅に分散を抑え込むことに成功した。

<sup>#</sup> t.takano@nusr.nagoya-u.ac.jp

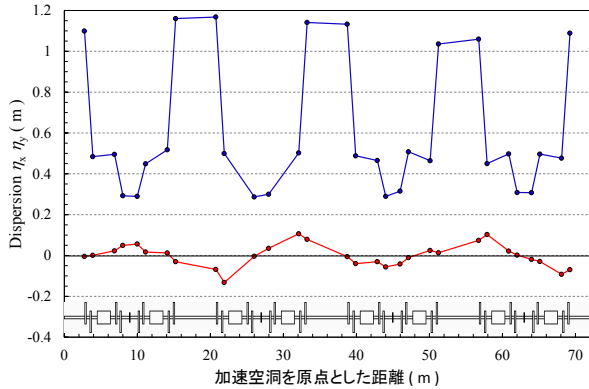


Figure 2: Horizontal (blue) and vertical (red) dispersion functions.

## 2. 線形光学補正プログラムの概要

### 2.1 線形光学補正の概要

線形光学補正とは、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<sup>[4] [5]</sup>。線形光学補正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 計算式について

ここでは、4 極スキュー成分の計算方法について述べる（その他のパラメータについての具体的な計算式、および最適化手法については、昨年のプロシーディングスに記載している<sup>[6]</sup>ので詳細は省略する）。

蓄積リング上のある地点にカップリング源が存在するとしたときのリング上の地点  $s$  における縦方向の分散関数は下記の式で与えられる<sup>[7]</sup>。

$$\Delta D_y(s) = \frac{k D_x \sqrt{\beta_k \beta_y(s)}}{2 \sin \pi \nu} \cos(|\Delta \psi(s)| - \pi \nu) \quad (1)$$

ここで、カップリング地点における水平分散関数および垂直ベータ関数をそれぞれ  $D_x$ 、 $\beta_k$  としている。さらに、係数  $k$  はカップリング源が 4 極電磁石である場合には焦点距離  $F (= 1/KL)$  および 4 極磁場の roll 成分  $\phi$  を用いて  $k = 2\phi/F$  で表される。本研究では、想定されるカップリング源として 4 極電磁石および超伝導電磁石を考慮した。また、垂直分散のより厳密な取り扱いのためには、水平キックによる垂直 COD への回り込みの成分を輸送行列に取り入れる必要があるが、本研究では取り入れていない。

### 2.2 パラメータ

線形光学補正計算で用いた全パラメータ（計 155 個）を Table 1 にまとめた。

Table 1: List of the Parameters for the Linear Optics Correction Program

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	$16 \times 2$
4 極磁場強度(QF1,QD1,QF2,QD2)	$k$	$m^{-2}$	$8 \times 4$
コンパクションファクター	$\alpha_c$	-	1
BPM 感度係数	$b$	-	$29 \times 2$
4 極スキュー成分	$\phi$	mrad	$8 \times 4$

Table 1 で挙げたパラメータのうち、 $\Delta\theta$ 、 $b$  およびコンパクションファクター  $\alpha_c$  はそれぞれ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  $\phi$  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。

### 2.3 プログラミング

本研究で開発した線形光学補正プログラムは全て LabVIEW<sup>[8]</sup> を用いて作成したオリジナルなものである。加速器制御プログラムと連動した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線形光学補正結果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。さらに、縦方向の分散関数を解析対象に含めることにより、式 (1) にもどづき 4 極スキュー成分を算出する。ラティスの設定ファイルはシミュレーションソフト WinAgile<sup>[9]</sup> 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。

実際の計算では、蓄積リングを 10(cm) 間隔で細かく刻んで輸送行列を計算し、155 個に及ぶパラメータを個々に細かく振ってその都度リング全周の再計算を行うため、従来は一度の解析に多大な時間の消費を覚悟しなければならなかったが、計算を並列化し、マルチコア CPU (Intel Core i7-5960X : 8 コア 16 スレッド) の性能を最大限まで引き出すことにより、スーパーコンピュータに頼らず市販の PC で実用上問題ない速度で解析を行える処理能力を達成した。

### 2.4 軌道レスポンスマトリクスの取得

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  $100 \mu m$  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  $3 \mu rad$  (50mA の励起) 程度とした。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. 線形光学補正実行結果

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（約  $10 \mu\text{m}$ ）以下の  $7.6 \mu\text{m}$  までフィッティングが収束した。収束後の線形光学補正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。以下には，縦方向の分散に関する 4 極スキュー成分の解析結果について述べる（その他のパラメータについては，前

回報告を参照<sup>[6]</sup>）。

実測の縦分散関数に対して，線形光学補正によりパラメータを最適化した結果を Fig. 3(a)に示す。また，この時の蓄積リング上での“カップリング地点”となる領域を Fig. 3(b)に赤丸および青丸で図示した。カップリング地点には 4 極電磁石だけでなく超伝導電磁石も含まれており，超伝導電磁石の作り出す多極成分がカップリングに寄与している可能性が示唆される。

Table 2 には，想定されるカップリング源の内，4 極電磁石について式（1）を用いて計算される roll 成分をまとめた。

Table 2: Skew Roll Component

名称	$\phi$ (mrad)	名称	$\phi$ (mrad)
QF1	52.75	QD1	54.68
QF4	70.85	QD4	<b>91.63</b>
QF9	<b>108.84</b>	QD6	10.39
QF12	38.26	QD9	44.52
		QD12	50.37
		QD14	<b>125.08</b>

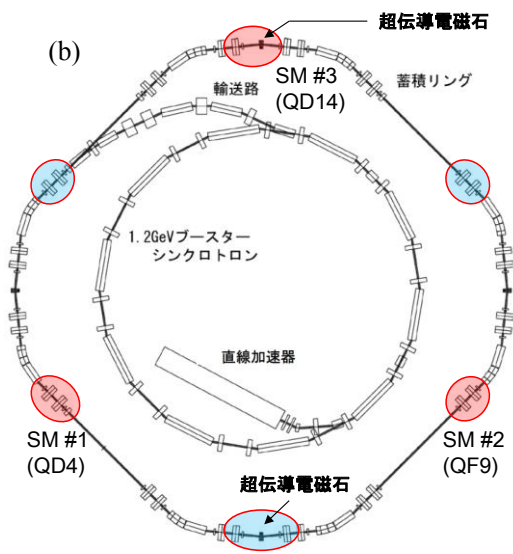
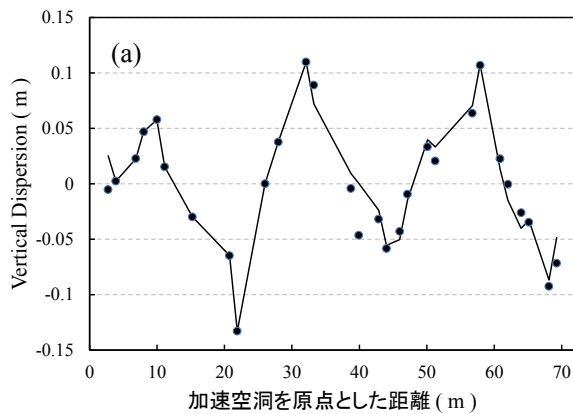


Figure 3: (a) Measured vertical dispersion function is plotted as filled circles, comparing with the optimized calculation (solid line). (b) Identified “coupling points” are displayed as red and blue circles. Three skew magnets are installed at red circles.

## 4. Skew 電磁石の導入

### 4.1 Skew 電磁石の概要

本研究で導入した Skew 電磁石の外観 (Fig.4(a)) と Poisson<sup>[10]</sup>を用いて描画した磁場分布形状 (Fig.4(b)) を示す。

Fig.4 に示すとおり，既設の 6 極電磁石を利用し Skew 磁場を作り出している。N 極および S 極の巻き数は 2 : 1 とし， $2.0 (\text{mm}^2)$  のケーブルを用いて最大 20 アンペアの電流を印加することができる。また，最大電流印加時のコイル温度は 50 度程度に抑えられていることを確認している。

### 4.2 Vertical Dispersion 補正結果

3 つの skew 電磁石により縦方向の分散関数を補正した結果を Fig. 5 に示す。ここでは，QD4, QF9, QD14 に導入した skew 電磁石をそれぞれ SM#1, SM#2, SM#3 と呼んでいる。Fig.5(a)では，SM#1, SM#2, および SM#3 を順次導入した時の分散関数の変化を示している。これより，3 つの skew 電磁石はいずれも分散関数を下げる方向に有効に寄与していることが分かる。

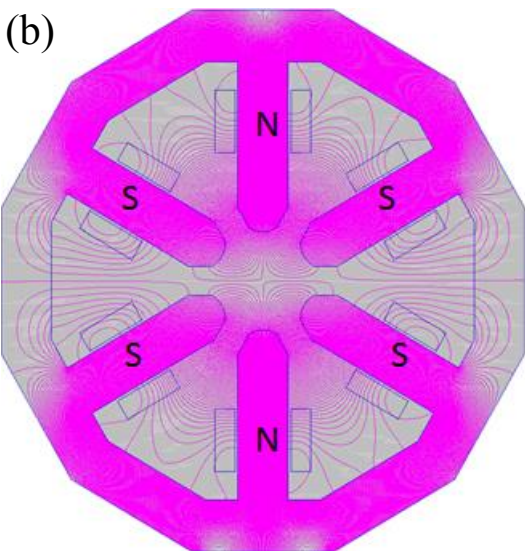
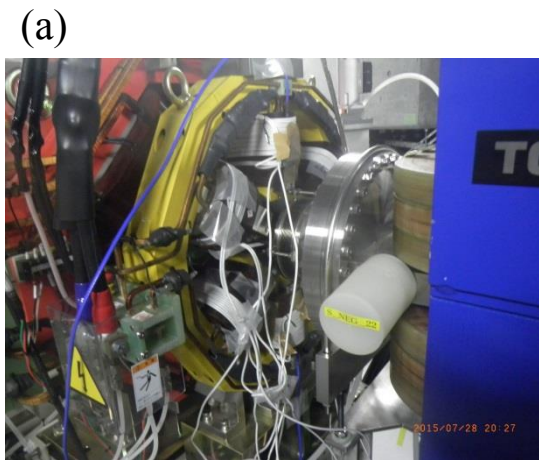


Figure 4: (a) Picture of the skew magnet. (b) Skew magnetic field drawn by Poisson.

Fig.5(b)には、3つの skew 電磁石を全て使用した時の水平および垂直方向の分散関数を補正前後で比較してプロットした。この図から、垂直方向の分散関数が大きく低減できており、水平方向には顕著な影響を及ぼしていないことが分かる。

## 6. まとめ

あいち SR の蓄積リングにおける縦方向の分散関数を補正して低減化し、放射光の品質を向上させることを目的として、独自に開発した並列化 LOCO プログラムを用いて、あいち SR 蓄積リングの光学系パラメータ最適化を行い、カップリング発生源の候補地点を絞り込んだ。

特定した候補地点のうち、比較的効果が大きいと期待された3地点に、既設の6極電磁石を利用したスキュー電磁石を導入し、縦方向の分散関数を補正することを試みた。

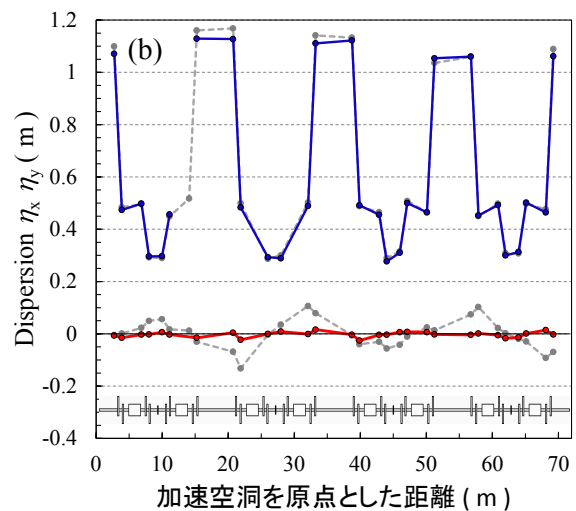
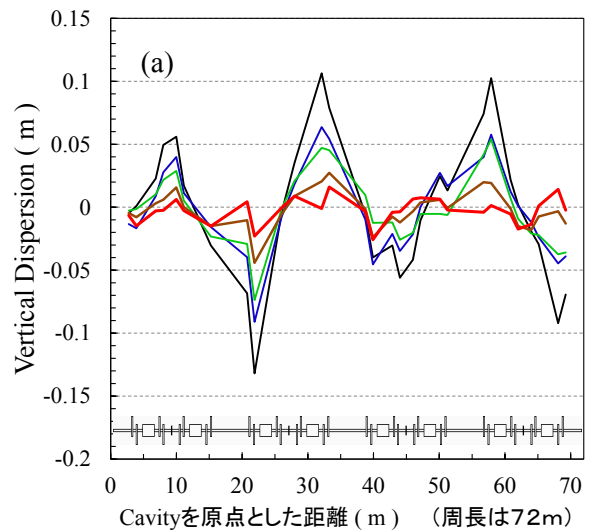


Figure 5: (a) Vertical dispersion functions of pre-corrected(black), corrected by SM#1(blue), SM#2(green), SM#1+#2(brown), and SM#1+#2+#3(red). (b) Horizontal(blue) and vertical(red) dispersion functions are plotted, comparing with pre-corrected functions(dotted gray lines).

その結果、3つのスキュー電磁石はいずれも分散関数を下げる方向に有効に寄与した。3つのスキュー電磁石により縦方向の分散関数は大幅に低減化することに成功した。

以上の分散関数低減化の結果を元に、今後はビームサイズおよび寿命の詳細な解析を進めるとともに、ビームラインで光の強度がどのように変化するかについて確認を行っていきたいと考えている。

また、本研究ではカップリングを引き起こしている地点の絞り込みはできたが、カップリング地点には4極電磁石のみならず多極成分を有することが判明している超伝導電磁石も含まれており、より根本的にスキュー成分を作り出している原因までは特定するに至っておらず、その解明が今後の課題となっ

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] T. Takano, N. Yamamoto, M. Hosaka, A. Mano, Y. Takashima, M. Katoh, “Linear Optics from Closed Orbits for Aichi-SR Storage Ring”, Proceedings of the 11th Annual Meetings of Particle Accelerator Society of Japan, pp. 487-491, 2014.
- [7] M. J. Syphers, “Skew Quadrupole Tuning and Vertical Dispersion in the Tevatron”, Fermilab Internal Report Beams-doc-611 (2003).
- [8] <http://www.ni.com/labview/ja/>
- [9] P. J. Bryant, “Agile, a Tool for Interactive Lattice Design”, Proceedings of EPAC (2000).
- [10] J. H. Billen and L. M. young, “POISSON/SUPERFISH on PC Compatibles”, Proceedings of the 1993 Particle Accelerator Conference, Vol2, p. 790 (1993).