

SPring-8 蓄積リング水平方向変位の解析 ANALYSIS FOR HORIZONTAL DISPLACEMENTS OF SPRING-8 STORAGE RING

岡安雄一^{*A)}、木村洋昭^{A)}、張超^{A)}、松井佐久夫^{B)}
Yuichi Okayasu^{*A)}, Hiroaki Kimura^{A)}, Chao Zhang^{A)}, Sakuo Matsui^{B)}

^{A)}Japan Synchrotron Radiation Research Institute

^{B)}RIKEN Harima branch

Abstract

Survey techniques for SPring-8 accelerator components have been modified and improved through three phases since 1996 in terms of measurement methods, instruments and analysis. Standard deviations of both radial and azimuth coordinates for entire quadrupole magnets in the storage ring are compared and found to be improved by 40% for radial and 60% for azimuth coordinates comparing to initial stage.

1. はじめに



Figure 1: Bird's eye view of SPring-8/SACLA accelerator facilities (upper) and schematic side view of accelerator components for a normal one cell in the storage ring tunnel (lower).

周長約 1.5 km の SPring-8 蓄積リングは、48 セル (44 標準セル + 4 長直線セル) からなる Chasman-Green ラティスで構成され、標準 1 セルは 2 台の偏向電磁石と 3 台の共通架台 (A, B, C) に設置された多極電磁石及び補正電磁石によりなる (Figure 1)。このうち四極電磁石の座標は、1997 年の供用開始以来、20 年にわたって継続的に測量されてきた。この測量の意義は、1) 蓄積リング加速器構成機器の水平・垂直成分について、短期・長期的変動の動向を継続的に評価すること、2) 地震等の突発的な事象により、加速器構成機器の変位が生じた場合に精度良く配置を再現するため、の 2 点である。測量評価の鉛直成分 (水準) については、2016 年に千葉市で開催された第 13 回日本加速器学会で報告したので、詳細は割愛する [2]。

蓄積リングに全ての電磁石が据付完了した 1996 年から、2017 年までに実施された蓄積リングの測量・解析方法は、大きく分けて 3 つのフェーズに大別される。す

なわち

- 1) 据付開始から主に長直線部の機器配置が定常化した 1996 - 2003 年 (Phase I)、
- 2) 測量方法が確立した 2005 - 2013 年 (Phase II)、
- 3) 測量方法の改良がなされた 2014 - 2017 年 (Phase III)

である。1996 年以前の整地から建屋建設、加速器収納部トンネル内外を結ぶネットワーク測量、実際の機器据付の詳細については、[1] を参照されたい。

本稿では、各フェーズにおける測量方法、解析結果を比較することにより、蓄積リング加速器機器の測量の質が向上していった変遷について報告する。

2. ネットワーク解析概要

ネットワーク解析の概要について、本稿の内容を理解するために必要な範囲に限定し、簡単に述べておく。一般に、ネットワーク測量で得られる四極電磁石の座標 (x_n, y_n, z_n) は、レーザートラッカーの回転機構中心を原点とする極座標 (r_n, θ_n, ϕ_n) で

$$\begin{cases} x_n = r_n \cos \theta_n \cos \phi_n \\ y_n = r_n \cos \theta_n \sin \phi_n \\ z_n = r_n \sin \theta_n \end{cases} \quad (1)$$

で表せる。ここで n は測量点数に相当する。実際の測量では、1 器械点でリング全周の測量を実施するのは不可能であり、複数の器械点でネットワーク測量した結果を重み付き最小二乗法でフィッティングすることにより、座標の最適解を求めることになる。各座標の測量値と仮定した初期値との差分、すなわち修正値を v_n とし、各々の出現確率 $f(v_n)$ が標準偏差 σ_n の正規分布で表されるとすれば、

$$f(v_i) = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_i} \exp\left(-\frac{v_i^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

で表せる。従って、 n 点の測定が互いに独立である場合、1 組の修正値セットの出現確率は

$$f(v) = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_1 \dots \sigma_n} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{v_1^2}{\sigma_1^2} + \dots + \frac{v_n^2}{\sigma_n^2}\right)\right\} \quad (3)$$

* okayasu@spring8.or.jp

である。ここで各測定の違い係数は $p_n = 1/\sigma_n^2$ で与えられることから、 n 点の重み係数を対角行列:

$$P = \begin{pmatrix} p_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & p_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & p_n \end{pmatrix} \quad (4)$$

で表せば、ネットワーク解析の最適解が得られる条件式は

$$\sum_n p_i v_i^2 = \mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} \equiv S = \text{Min.} \quad (5)$$

$$\Rightarrow \frac{\partial S}{\partial x} = \frac{\partial S}{\partial y} = \frac{\partial S}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

となる。この最適解に対し、水平移動と回転のパラメータを設計座標に対して最適化することにより、最終的な四極電磁石の座標を算出するのが一連のネットワーク解析の手順である。

3. PHASE I/II における水平座標測量

標準 1 セルにおける、ネットワーク測量の器械点及び測量点を Figure 2 に示す。標準 1 セルでは、加速器収納部内壁に約 20 m 間隔で測量参照点のモニュメント (MO) を設置している。Phase I/II では両端の 2 台の挿入光源 (ID) と共通架台 B の前、計 3 箇所レーザータッカーを設置し (SP)、各共通架台両端の四極電磁石及び 2 点の内壁モニュメントの座標を計測する。1 器械点あたりの測定点は 8 点である。

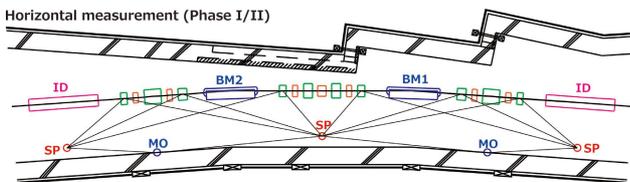


Figure 2: Schematics of network survey in SPring-8 storage ring during Phase I/II. “SP”, “MO”, “ID” and “BM” represent station points, reference monuments mounted on the accelerator tunnel wall, insertion devices and bending magnets, respectively.

測量に使用した機材は、Phase I においては測距範囲が 25 m 程度の Leica 製レーザータッカー SMART310 のみを使用した (Figure 3)。Phase II では SMART310 の測量に加え、Leica 製セオドライト Wild T3000 を四極電磁石の上に設置し、2 セル間隔の四極電磁石の角度データの測量が加わり、測量精度の向上が図られた。Phase III との比較のため、SMART310 の主要性能を Table 1 に示す。

ネットワーク測量で得られた四極電磁石の座標 (x, y) を蓄積リングの中心を原点とする動径座標、方位角座標 (r, s) に変換し、設計値からの差分 (dr, ds) を測定年毎に周回電子軌道に沿った (セル座標) 分布で比較した。結果を Figure 4 ($dr : a, b$)、Figure 4 ($ds : c, d$) に示す。いずれのグラフも Phase I が上図、Phase II が下図であ



Figure 3: Leica SMART310 laser tracker.

Table 1: Specifications for Leica SMART310

Angle resolution	0.7" (3.4 μ rad)
Distance resolution	1.26 μ m
Repeatability of coordinate	± 5 ppm
Accuracy of a coordinate	
static / moving	$\pm 10 / \pm 20 - 50$ ppm
Max. radial distance	~ 25 m

り、それぞれ平均値をオフセットとして差し引いてある。また参考までに、それぞれのグラフに蓄積リング収納部の地下構造物 (RF 導波管路、地下雨水配管、シンクロトロン - 蓄積リングビーム輸送トンネル; SSBT 等) の配置、蓄積リング建設前の地盤標高 (org. altitude) と埋め戻し領域 (banked) も記述している。

まず四極電磁石の dr についてであるが、Phase I では各測定年毎のふらつきが大きく相関が見られない一方で、Phase II に移行してからは分布の特徴に再現性が見られ、測定手法が確立した効果が確認できる。 ds については、Phase I/II で測定年毎のふらつきに大差は無いが、6 セル、43 セル近傍のピークが Phase II では顕著に確認できる。また、 ds については、蓄積リング建設前の地盤標高とも相関が否定できない。これは電磁石のローリングが寄与する dr に比べ、 ds は電磁石のピッチングが寄与することから、床面水準の影響を受けやすいためである。いずれにせよ、Phase I に比べ、Phase II では四極電磁石間の角度データが加わったことから、四極電磁石の座標分布傾向の把握と再現性が向上した。また SMART310 の鉛直方向角度精度は、水平方向のそれ ($\sim 0.5''$) に比べ 2 倍程度劣ることから、自作のコードによるネットワーク解析では、重み付き最小二乗法のフィッティングは水平座標のみで実施した。すなわち (6) 式のうち

$$\frac{\partial S}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

の拘束条件は課していない。

4. PHASE III における水平座標測量

Phase III においては、Leica 製レーザータッカー AT402 の導入により測距離が飛躍的に伸び (Figure 6)、蓄積リング収納部内で測量する限りにおいては測距離の制限が取り払われたため、1 器械点における測定範

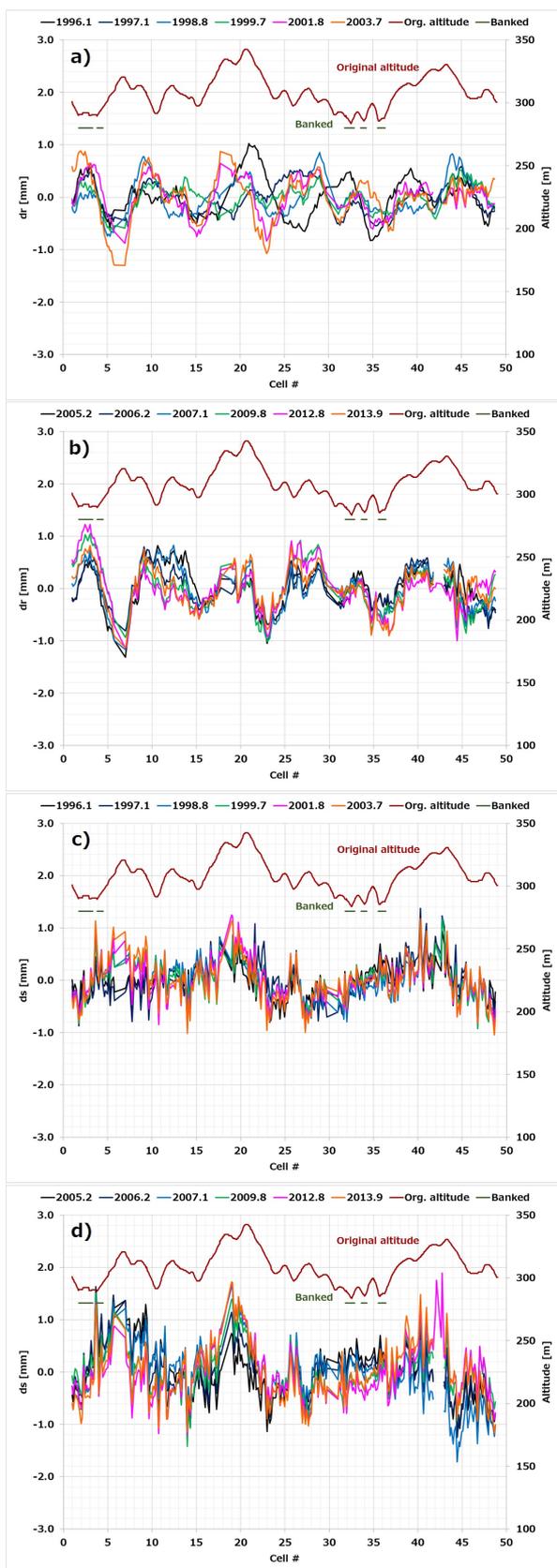


Figure 4: Quadrupole magnets coordinates; radial (*a* : Phase I, *b* : Phase II) and azimuth (*c* : Phase I, *d* : Phase II) direction components distributions along electron beam orbit. Original ground level is also overlaid.

囲はレーザートラッカーで視認できる範囲、すなわち 8 点から 14 点に増加した (Figure 5)。AT402 の主要な性能を Table 2 に示す。

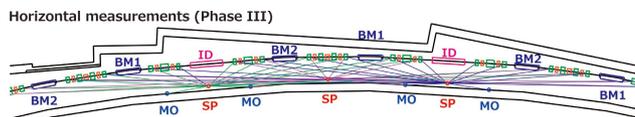


Figure 5: Schematics of network survey in SPring-8 storage ring in Phase III. “SP” and “MO” represent station points and reference monuments mounted on the accelerator tunnel wall.



Figure 6: Horizontal coordinate measurements with Leica AT402 laser tracker.

Table 2: Specifications for Leica AT402

Angle measurements	
Resolution	0.07" (0.3 μ rad)
Accuracy	$\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$
Repeatability	$\pm 7.5 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m/m}$
Distance measurements	
Resolution	0.1 μm
Accuracy	$\pm 10 \mu\text{m}$
Repeatability	$\pm 5 \mu\text{m}$
Max. radial distance	$\sim 80 \text{ m}$

また、レーザートラッカーのネットワーク測量に加え、Trimble 製デジタルレベル DiNi03 により、各セル共通架台 B の最上流に設置された四極電磁石の水準測量も並行して実施し、New River Kinematics 製 Spatial Analyzer を用いたネットワーク解析では、水準データに重みを付けた最小二乗法を導入した。Phase III で得られた四極電磁石の *dr* 及び *ds* のセル座標分布を Figure 7 に示す。Phase I/II と同様、いずれのグラフも平均値をオフセットとして差し引いたものである。*dr*、*ds* のいずれについても、測定年毎のばらつきは収束し、分布の再現性も飛躍的に改善していることが確認できる。Phase

I/II と異なり、ネットワーク解析における重み付き最小二乗法のフィッティングにおいて、水準 z の拘束を増やすことの有意性が定性的に示された。2014 年に測定した 7 セル近傍の dr が他の年よりも 200 μm 程度差異があるのは、当該長直線部に挿入光源を据え付けた直後で、測定点が異なるためである。また、2016 年における 10, 19 セル近傍の dr が、他の年に比べて 200 μm 程度異なる原因については、現在調査中である。

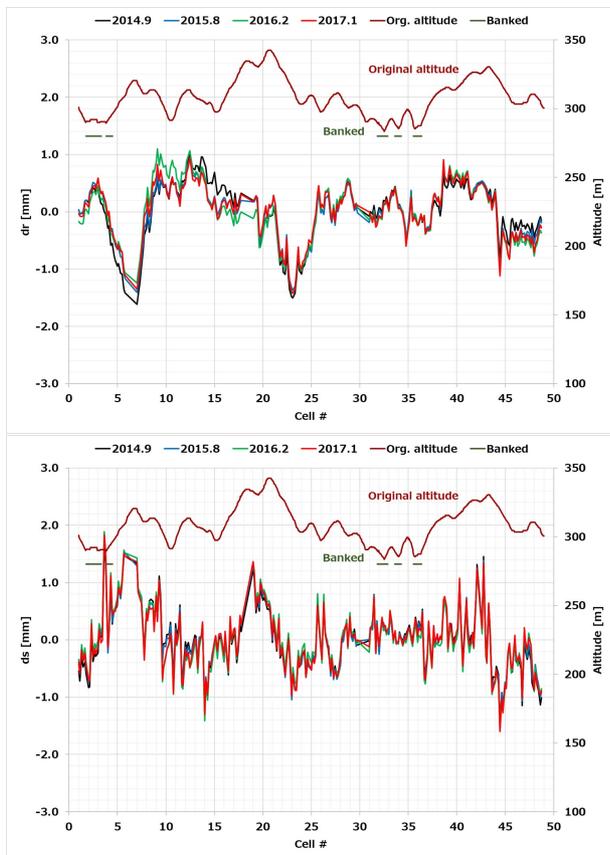


Figure 7: Quadrupole magnets coordinates; radial (*upper*) and azimuth (*lower*) direction components distributions along electron beam orbit for Phase III.

各フェーズの dr , ds について、標準偏差の分布を比較した結果を Figure 9 に示す。また、全周における dr と ds の標準偏差をフェーズ毎に比較した結果を Table 3 に示す。Phase III の標準偏差が大幅に改善され、重み付き最小二乗法の拘束条件に水準 z が加わった効果が定量的に確認できる。 dr に関しては、フェーズが進むに連れてリング全周の標準偏差が一意的に小さくなる一方で、 ds に関しては、Phase II においてリング全周の標準偏差は大きくなる。また全周にわたる分布は、8, 19, 32, 43 セル近傍に変曲点を持つ、ほぼ等間隔のピーク構造であり、32 セル近傍を除き地盤標高分布との相関も推測される。考えられる要因は二つあり、一つはセオドライト自体を床面変動に伴うピッチングが寄与する電磁石の天面に設置していることであり、もう一つは 6, 18, 30, 42 セルの長直線部では、角度測定は除外されていることである。先の加速器学会でも報告したとお

り、SPring-8 蓄積リング四極電磁石の水準は、造成前の地盤標高と強い相関があることが確認されている [2]。地盤標高が高く切土処理を施した領域において、床面水準の上昇が確認されている (Figure 8)。床面水準の変位が電磁石のピッチングを通じ、結果として角度測定の誤差に伝播している、と考えられる。

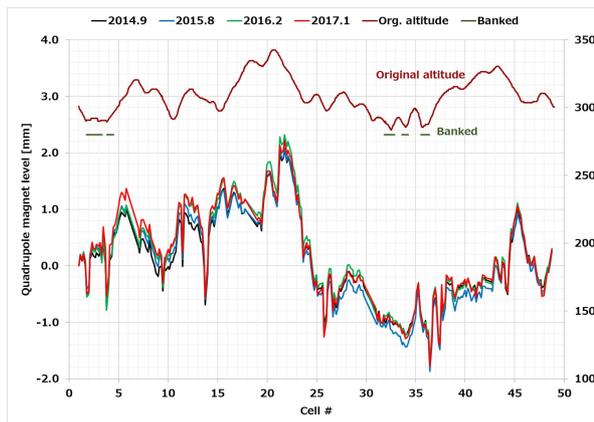


Figure 8: Quadrupole magnet level and original ground level.

最後に測量から得られた蓄積リングの周長 C_s と、加速周波数から算出された周長 C_f の差分 ($C_s - C_f$) を、測定年毎に比較した結果を Figure 10 に示す。簡単のため蓄積リングを真円と仮定した場合、測量から得られた dr の平均値から、蓄積リングの周長は、設計周長 1435.9488 m を用いて

$$C_s = 2\pi\bar{dr} + 1435.9488 \quad (8)$$

で与えられる。他方、蓄積リングの加速周波数 f とハーモニック数 2436 とから、周長は

$$C_f = 2436 \times \frac{c}{f} \quad (9)$$

で与えられる。ここで c は光速である。加速周波数 f に関しては、測量時期直前 1 ヶ月の平均値を用いた。Phase I のうち、1996 年と 1997 年に関しては、加速周波数の記録が存在しなかったため記載していない。

Figure 10 (*upper*) を見ても明らかな様に、Phase II では測量ベースと加速周波数ベースの周長差分が 0.5 mm 以下で収束し、Phase I では 2 mm 程度、Phase III では 1 ~ 1.5 mm で収束している。また参考までに、2017 年の測量座標と設計座標の差分を Fig. 10 (*lower*) に示す。Phase III の周長差分が Phase II に比べて大きい原因は、ネットワーク解析において、各セル共通架台 B の最上流四極電磁石の水準にのみ重みがかかっており、水平方向成分に対し、解析的に歪が生じていることが疑われる。トラッカー測量と同様、各共通架台両端の四極電磁石の水準を測量するなど、対策を検討している。

5. まとめ

1996 年から 2017 年までの約 10 年間で三つのフェーズに区分し、蓄積リングの水平座標測量について、

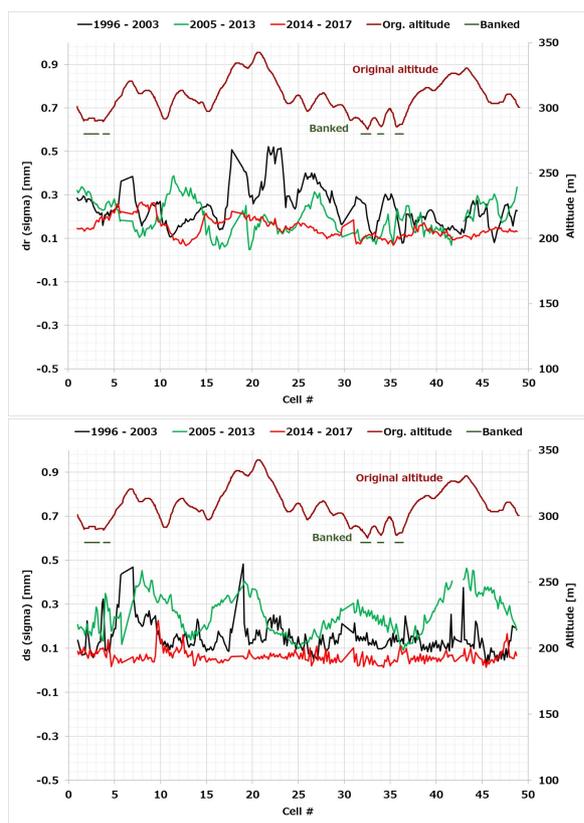


Figure 9: Standard deviation of quadrupole magnets coordinates; radial (*upper*) and azimuth (*lower*) direction components distributions along electron beam orbit.

Table 3: Standard deviation of evaluated quadrupole magnet coordinates (*r*, *s*) for three measurement phases.

Phase	σ_{dr} [μm]	σ_{ds} [μm]
I	243	145
II	194	252
III	147	62

測量方法と解析結果の変遷をまとめた。Phase I/II では Leica SMART310 による測量をベースに、Phase II では Leica Wild T3000 による 2 セルおきの四極電磁石の角度測量が加えられ、二次元解析により測量方法を確立させた。Phase III では Leica AT402 による三次元測量に加え、Trimble DiNi03 による水準測量も加わり、三次元解析により測量の精度は大幅に向上した。

各フェーズの測量から得られた、四極電磁石の動径座標 (*dr*) 及び方位角座標 (*ds*) を比較した。*ds* については、いずれのフェーズにおいても蓄積リングの床面水準と相関が見られた。これは床面水準の変動が電磁石のピッチングを通じて寄与したものと考えられる。

また *dr* と *ds* の標準偏差を比較した結果、*dr* についてはフェーズが進むに従いリング全周の標準偏差は小さくなり、Phase I に比べて Phase III では 40% 程度、*ds* については 60% 程度改善した。他方、*ds* については、リング全周の標準偏差は Phase II で大きくなった。

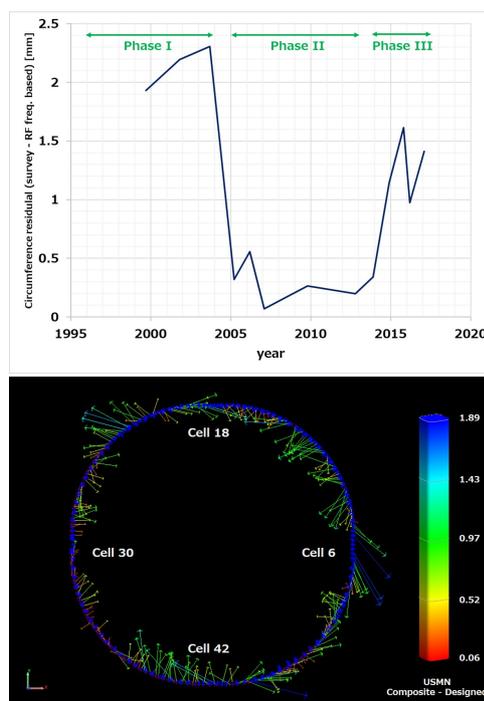


Figure 10: Evaluated circumference comparison. Circumference derived via survey is subtracted by one calculated with RF acceleration frequency (*upper*). *Lower* represents displacements of measured (2017) and designed coordinates.

四ヶ所の長直線部近傍に変曲点を持つピーク構造が見られ、原因として Phase II で実施されたセオドライトによる四極電磁石の角度測量が、長直線部で除外されていたこと、四極電磁石の天面に設置したセオドライトに、床面水準の変位が電磁石のピッチングを通じて誤差として伝播したこと、が考えられる。

測量と加速周波数から算出した蓄積リングの周長を測定年毎に比較した。両者の差分は Phase I では 2 mm 程度、Phase II では 0.5 mm 以下、Phase III では 1 ~ 1.5 mm に収束した。

参考文献

- [1] C. Zhang *et al.*, “Long-term variation of the magnet alignment in SPring8 storage ring”, in Proceedings of the 11th International Workshop on Accelerator Alignment (IWAA2010), September 13 - 17, 2010, Hamburg, Germany.
- [2] Y. Okayasu *et al.*, “A level survey improvement for SPring-8 storage ring”, in Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, PP. 1305 - 1308.