

SPring-8 次期計画における加速器機器の据え付け誤差評価 AN ALIGNMENT ERROR ESTIMATION FOR THE SPRING-8 UPGRADE PLAN

岡安 雄一^{*A)}、木村 洋昭^{A)}、松井 佐久夫^{B)}
Yuichi Okayasu^{*A)}, Hiroaki Kimura^{A)}, Sakuo Matsui^{B)}
^{A)}Japan Synchrotron Radiation Research Institute
^{B)}RIKEN Harima branch

Abstract

Trends of accelerator components coordinates designed as the SPring-8 II configuration are calculated with ground deformation growth rates. The rates are evaluated from measurements demonstrated for the existing SPring-8 configuration since 1996. Alignment errors for all neighboring two magnet girders are estimated by a surveying network analysis assuming to adopt a current measurement scheme and confirmed to be settled within a tolerance. A necessity of the realignment is also discussed.

1. 目的

1996年から現在に至るまでの約20年にわたって行ってきた、SPring-8蓄積リング加速器収納部の測量データを基に、地盤変動予測を行った。またこの予測から、従来の測量方法(デジタルレベルによる水準測量・レーザートラッカーによる水平座標測量)を踏襲し、次期計画(以下、SPring-8 II)で想定される機器の座標を、地盤変動・測量誤差を勘案した数値計算により求めた。

この検討の目的は、1) 従来の据え付け・測量方法で許容据え付け誤差を満たすか、2) ネットワーク測量を実施する際、例えば収納部内壁に測量点を追加する必要があるか、若しくは減らせないか。結果として据え付け・測量誤差と測量時間はどのくらいになるか、3) 設置から何年後にアライメントをし直す必要があるのか、またはないのか、の問いに答えることである。

表題の評価を行うための数値計算環境が整ったことから、簡単な例として地盤変動を線形補間で予測し、機器の座標の測量誤差を評価したので、その進捗を報告する。

2. 加速器構成機器の据え付け誤差評価

加速器を構成する主な機器は、RF加速空洞、挿入光源、電磁石、真空チェンバーなどが挙げられる。これらの機器の据え付けは、現場で一斉に行うのではなく、例えば電磁石は予め環境が良く管理された場所で架台ごとに精度良く据え付けられた後に、蓄積リング加速器収納部へ輸送され、架台ごとに据え付けられるシナリオとなっている。Figure 1に現在検討が進められている蓄積リング標準セルの設計機器配置案上面図(上)と、そのハーフセル分の三次元モデル(下)を示す。標準セルには、挿入光源1台、収束・補正電磁石を搭載した架台6台、また各架台間に永久偏向磁石が計5台設置されることが検討されている。軌道解析による水平・垂直方向に対する許容据え付け誤差(peak to peak)は、前者の架台上の電磁石の据え付けが $\pm 15 \mu\text{m}$ (目標値)、後者の架台同士が $\pm 90 \mu\text{m}$ とされている。前者は振動ワイヤー法[1]やワイヤーアライメント法[2]により、精度の良い据え付けの実現が見込まれる。また試作機の輸送に伴う加速

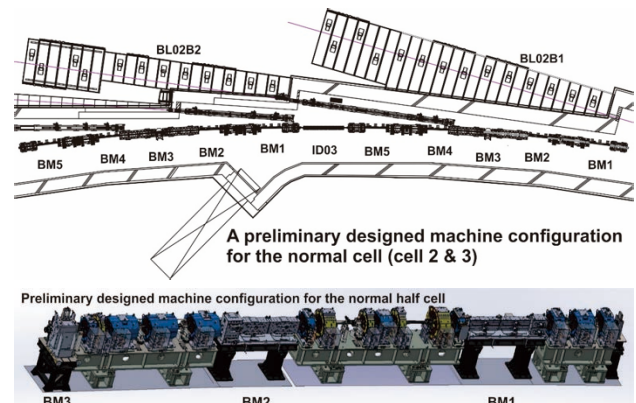


Figure 1: Top view of a preliminary designed machine configuration for the normal cell (upper) and its 3D model for the normal half cell (lower). Any correction magnets expected in these above figures.

度も、架台中央の電磁石天面に設置した三軸加速度計による測定の結果、ビーム進行方向と水平面でそれに直行する方向、鉛直方向いずれも加速度の絶対値は0.4 Gを下回り、例としてESRFの次期計画で設定されている閾値の1.5 Gを下回ることが確認されている。

架台同士の据え付け誤差については、現行のSPring-8蓄積リングの20年分の測量データを基に据え付け年を仮定し、地盤変動を経過年と機器ごとに線形補間で予測することにより、測量網計算により評価した。尚、計算では下記の5つの条件を仮定した。

- 1) 地盤の年変動は系統的であり、線形近似に従う。
- 2) 測量方法は現行を踏襲し、基本的にはレーザートラッカーで測量を行い、全周48点のデジタルレベルによる水準測量データを併用する。
- 3) 据え付け年の機器の座標は理想的であり、水平・水準共に設計座標とする。器械点(測量機器を設置する座標)は、水平座標については常時固定とし、水準については地盤の経年変化の影響を勘案した。
- 4) 架台は両端の四極電磁石天面に測量点を1点設置。挿入光源は中心に支柱があるものと仮定し、支柱の側面に測量点を1点設置。加速器収納部内壁の測量

* okayasu@spring8.or.jp

点は、現行を踏襲して1セルあたり2点を内周側の壁に設置。長直線部については、標準型挿入光源を4台設置することと仮定した。

- 5) 測量精度 (σ) については現行の実績に基づき、距離： $\pm 7.3 \mu\text{m} + 2.5 \mu\text{m/m}$ 、角度： 0.57 秒 ($2.7 \times 10^{-6} \text{ rad}$) とし、地盤の変動を勘案した水平・水準座標に正規分布で加えた。

また座標系は断りが無い限り、リングの中心を原点とし、東を $+x$ 、北を $+y$ 、鉛直上向きを $+z$ と定義している。SPRING-8 と SPRING-8 II における、加速器収納部内の測量点数と通常測量作業にかかる日数の比較を Table 1 に示す。

Table 1: Number of network measurement points and working days. Numbers within brackets are actual measurement points.

SPRING-8	
# of network meas. points	1918 (271)
Working days	4 days / person
SPRING-8 II	
# of network meas. points	3704 (691)
Working days	8 days / person

次に SPRING-8 II における計 691 点の機器座標の変位勾配を、以下の順で求めた。まずはじめに、1996 年 1 月から 2018 年 2 月の期間に測量された SPRING-8 の計 271 点の座標 ($A_i(s_j)$) について、

$$\Delta A_i^2(s_j) = \sum_i (A_i(s_j) - f_i(s_j))^2 \quad (1)$$

$$f_i(s_j) = a(s_j)i + b(s_j) \quad (2)$$

$\Delta A_i^2(s_j)$ を最小にする $a(s_j)$ 及び $b(s_j)$ を算出した。ここで A は x, y, z 、 i は 1996 年 1 月を基準とした測量実施年、 j は 1 ~ 271 の測量点番号、 s_j は 1 セル最上流の測量点を原点とした設計軌道上の j 番目の s 座標である。

次に (1), (2) 式で得られた変位勾配 $a(s_j)$ から、SPRING-8 II の各機器における変位勾配 ($a(s_k)$, $k = 1 \sim 691$) を

$$a(s_k) = \frac{a(s_j) - a(s_{j-1})}{s_j - s_{j-1}}(s_k - s_{j-1}) + a(s_{j-1}) \quad (3)$$

として線形補間により求めた。最終的に据え付けを仮定した年の SPRING-8 II 機器座標を設計座標とし、向こう 17 年分の計 691 点の機器座標を算出した。変位勾配 [mm/year] のセル依存性を Fig. 2 に示す。

SPRING-8 II 機器座標のうち、据え付けを仮定した初年度のデータを用いて、隣り合う 2 架台同士の据え付け誤差を評価する。数値計算は、理化学研究所の松井佐久夫氏が開発したコード [3] を使用した。このコードは予め前出の測量機の精度と器械点及び測量点の座標を入力し、器械点が測量する測量点を紐づけることにより、二次元の測量網計算を行う。具体的には測量点の観測値と最適解をそれぞれ L 、 X 、比例係数を A 、残差を V とすれば、観測方程式：

$$V = AX - L \quad (4)$$

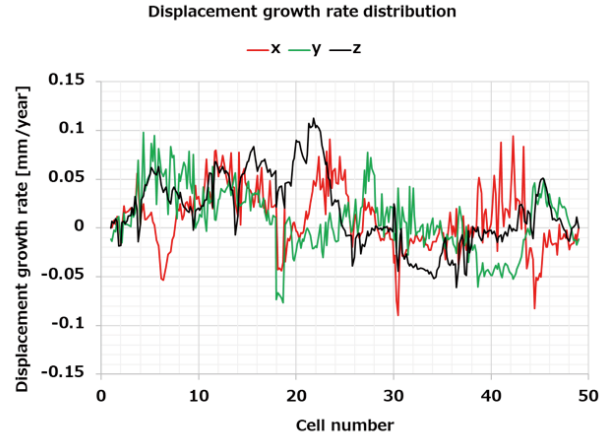


Figure 2: Evaluated displacement growth rates for x , y and z .

が成り立つ。測量精度の異なる 2 台以上の測量機で測量を行う場合は、重み P を勘案して (4) 式は

$$PV = PAX - PL \quad (5)$$

と表せる。 V 、 X 、 L は測量回数に応じた列ベクトルである。本コードに限らず、一般的な測量網計算はこの (重み付き) 残差が最小 ($\partial V^T PV / \partial X = 0$) になるように、最小二乗法により観測方程式を解く。最終的に正規方程式：

$$\begin{aligned} \frac{\partial V^T PV}{\partial X} &= 2A^T PAX + A^T PL + (L^T PA)^T = 0 \\ &\Leftrightarrow A^T PAX - A^T PL = 0 \\ &\Leftrightarrow X = (A^T PA)^{-1} A^T PL \end{aligned} \quad (6)$$

により、最適解が得られる。また、行列 $V^T PV$ は正方対称行列であり、行列要素 C_{ij} の対角成分は分散、それ以外が共分散からなる、分散共分散行列である。個々の最適解に対する標準偏差を σ_{X_i} とすれば、行列要素 C_{ij} は

$$C_{ij} \propto \sigma_{X_i X_j} \quad (7)$$

で与えられる [4]。

以上の手続きで、断続的な測量データから蓄積リング全周にわたる測量点の座標が得られる。得られた座標に対する誤差は、(7) 式で得られる分散共分散行列要素を用いて、1) 分散行列要素だけに依存する、個々の測量点に対する誤差と 2) 共分散行列要素で併せて記述される、2 つの測量点に対する相対的な誤差の 2 通りの評価方法を必要に応じて区別しなければならない [5]。一般に測量の業界では、これらの精度を二次元の誤差楕円で視覚化・評価する。前者は絶対誤差楕円、後者は相対誤差楕円と呼ばれる。いずれも短軸・長軸をそれぞれ s 、 l (σ)

とし、長軸と x 軸の成す角を θ とすれば、

$$s = \sqrt{\frac{t_1}{2} + \sqrt{\frac{t_2^2}{4} + t_3^2}} \quad (8)$$

$$l = \sqrt{\frac{t_1}{2} - \sqrt{\frac{t_2^2}{4} + t_3^2}} \quad (9)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(-\frac{2t_3}{t_2} \right) \quad (10)$$

で与えられる。 $t_1 \sim t_3$ の内訳は絶対誤差楕円の場合：

$$\begin{cases} t_1 = \sigma_{xi}^2 + \sigma_{yi}^2 \\ t_2 = \sigma_{xi}^2 - \sigma_{yi}^2 \\ t_3 = \sigma_{xiiy} \end{cases} \quad (11)$$

相対誤差楕円の場合：

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta x}^2 &= \sigma_{xi}^2 - 2\sigma_{xixj} + \sigma_{xj}^2 \\ \sigma_{\Delta y}^2 &= \sigma_{yi}^2 - 2\sigma_{yiyj} + \sigma_{yj}^2 \\ \sigma_{\Delta x \Delta y} &= \sigma_{xiiy} - \sigma_{xijy} - \sigma_{xjyi} + \sigma_{xyjy} \end{aligned}$$

$$\begin{cases} t_1 = \sigma_{\Delta x}^2 + \sigma_{\Delta y}^2 \\ t_2 = \sigma_{\Delta x}^2 - \sigma_{\Delta y}^2 \\ t_3 = \sigma_{\Delta x \Delta y} \end{cases} \quad (12)$$

である。従って隣り合う架台同士の据え付け誤差は、架台端の四極電磁石座標の相対誤差楕円を評価する。

Figure 3 に架台同士の据え付け誤差について、相対誤差楕円の長軸 (赤) と短軸 (青) の蓄積リング全周にわたる計算結果を示す。相対誤差楕円は測量網が疎である四箇所の長直線部において比較的大きい。2、14、26、38セルの RF 加速空洞を設置した箇所も、同様に測量網が粗いため、長軸・短軸の極小値が大きいの、仮定した収納部内壁に設けた測量点の位置が他の箇所に比べて周期性が異なるためである。長軸及び短軸の平均はそれぞれ順に $17, 16 \mu\text{m}$ と見積もられ、結果として水平方向に対する据え付け誤差は $\sqrt{17^2 + 16^2} \approx 23 \mu\text{m}$ である。垂直方向の誤差は測量網計算では見積もれないことから、比高差の測量精度実績 $7 \mu\text{m} (\sigma)$ を採用する。結果として水平・垂直方向に対する許容誤差が peak to peak で $\pm 90 \mu\text{m}$ であることから、rms に直せば $90/2\sqrt{2} \approx 32 \mu\text{m}$ であり、いずれも許容内に収まることが判る。収納部内壁の測量点位置の最適化、外周側の壁にも測量点を増設するなど更なる改良を検討している。また参考までに標準セル (13 セル) における機器配置と測量点及び器械点、相対誤差楕円の関係を図 4 に示す。

3. 再アライメントの必要性

再アライメントの必要性を議論する前に、Fig. 5 に示す 1996 年 1 月から 2018 年 2 月までに測量した水準測量の経年分布から、約 20 年にわたる地盤変動のオーダーを把握しておく。Figure 5 の見方は、1996 年に測量した蓄積リングの水準を基準とし、経年変位を円環の動径

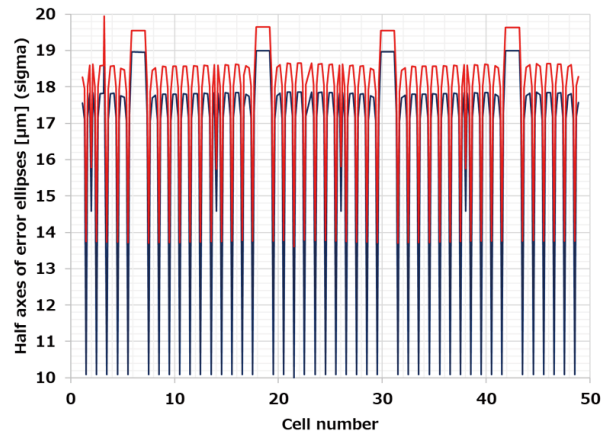


Figure 3: Calculated half major (red) and minor (blue) axes of relative error ellipses for the first accelerator components alignment.

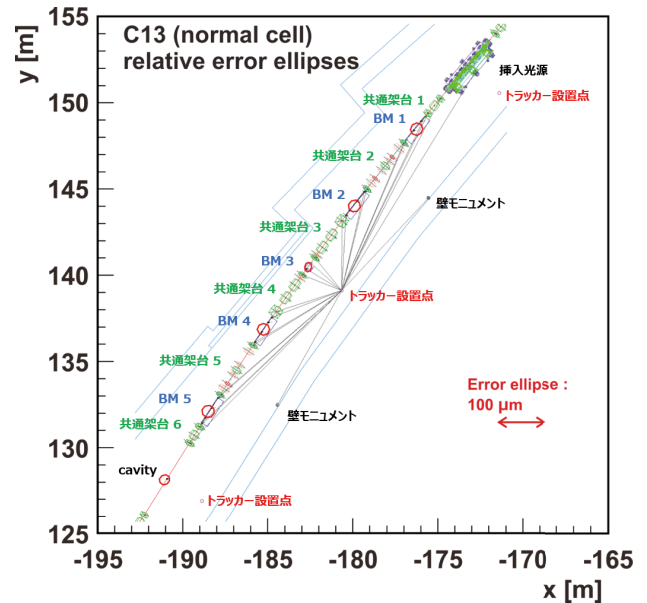


Figure 4: Calculated relative error ellipses overlaid on accelerator configuration at a normal cell (cell 13). Both measurement and instrument points are also described.

方向に沿ってプロットしたものである。測量で得られた水準の分布は、地下構造物及び造成前の地形を顕著に反映していることが Fig. 5 から読み取れる。Figure 5 のカンタープロットに付している注釈は、当該箇所の地下構造物若しくは地盤の造成と、該当するセル番号、箇所によっては共通架台の識別を示す。切土が施された 14 ~ 22 セルでは、約 20 年かけて最大 2.5 mm 程度隆起し、反対に盛土の 31 ~ 36 セルでは最大 1.5 mm 程度沈下している。さらに蓄積リングの内周から外周をまたぐ 5 箇所の地下雨水配管、4 箇所の RF 導波管部、3 セルの中央管理棟から蓄積リング内周へアクセスする地下通路部でも最大 1 mm 程度の沈下が見られる。9 セル近傍の車道アンダーパス部では、0.5 mm 程度沈下したが、最近では沈下が回復し収束している。Figure 6 は線形補間で得ら

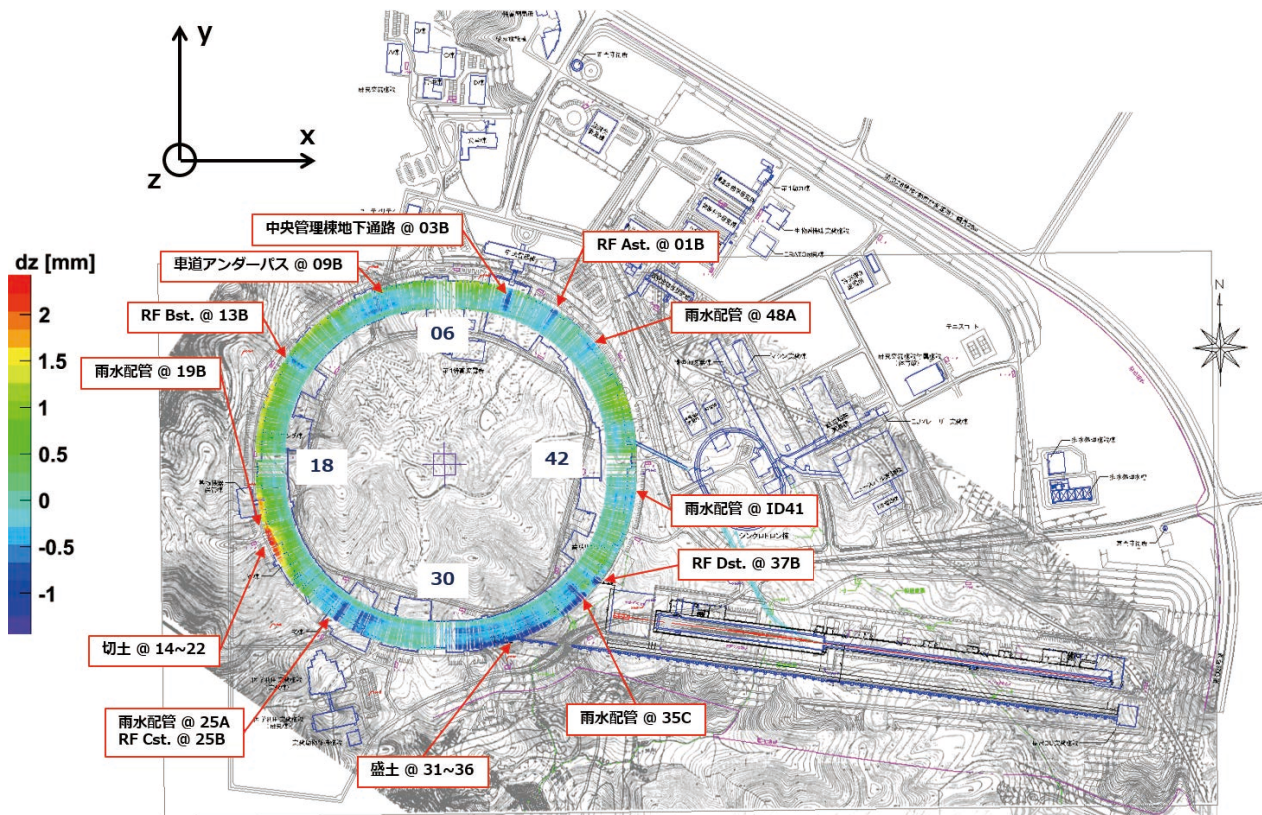


Figure 5: Measured SPring-8 accelerator component levels since 1996 overlaid on ground contour-line map and infrastructures. Radial direction of the contour ring represents passed year, i.e., inner of the ring starts from 1996 and outer ends by 2018.

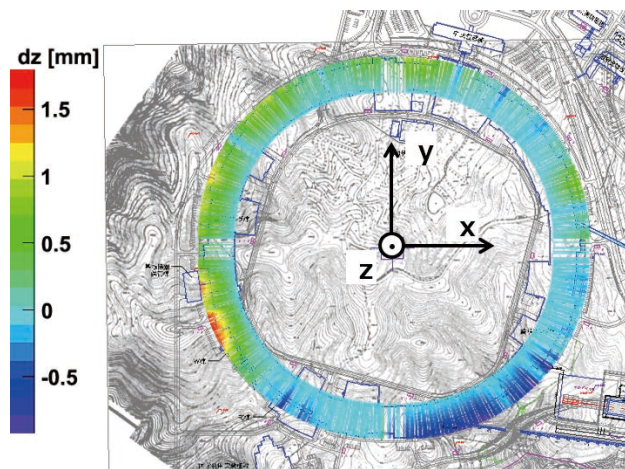


Figure 6: Evaluated SPring-8 II accelerator component levels for 17 years overlaid on ground contour-line map and infrastructures. Radial direction of the contour ring represents passed year.

れた SPring-8 II における機器の水準の経年変化を示す。車道アンダーパス及び RF B ステーションの沈下は収束しているが、その他の箇所については実測の傾向を反映している。

据え付け年の機器の座標を設計座標とし、(3) 式で与

えられる地盤の経年変動に起因する変位勾配から、(1) 式に倣い、向こう 17 年分の機器の座標 ($A_i^2(s_j)$) が得られる。但し $i = 0, \dots, 15$ であり、据え付け年を 0 とした経過年数である。 i 年経過後の隣り合う 2 架台の地盤変動に伴う設計座標からの差分を ΔR_{GEO} とすれば

$$\begin{aligned} \Delta R_{GEO} = & \left[\{dx_i(s_j) - dx_i(s_{j-1})\}^2 \right. \\ & + \{dy_i(s_j) - dy_i(s_{j-1})\}^2 \\ & \left. + \{dz_i(s_j) - dz_i(s_{j-1})\}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13) \end{aligned}$$

で表せる。ここで $dA_i(s_j) = A_i(s_j) - A_0(s_j)$ である。Figure 7 に ΔR_{GEO} の経過年数について、蓄積リング全周の分布 (上) と ΔR_{GEO} の蓄積リング全周にわたる等高線の分布 (下) を示す。より現実的には 2 章で見積もった据え付け誤差が勘案されるが、地盤変動に伴う隣り合う 2 架台の設計座標からの差分は、中心値 (ΔR_{GEO}) だけで議論すれば、早いところで 1 年 9 ヶ月で許容値の 90 μm を超えることが Fig. 7 (下) から判る。従って各架台の再アライメントは、1 年半から 2 年毎に必要と見込まれる。最後に、再アライメントが必要 ($|\Delta R_{GEO}| \geq 90 \mu\text{m}$) な架台の全体に占める割合の推移を Fig. 8 に示す。また参考までに、 $|\Delta R_{GEO}|$ が 200, 300, 400, 500 μm 以上の場合についても併せて示した。据え付け後 10 年を目途に、全体の半数で $|\Delta R_{GEO}| \geq 90 \mu\text{m}$ となることが判る。

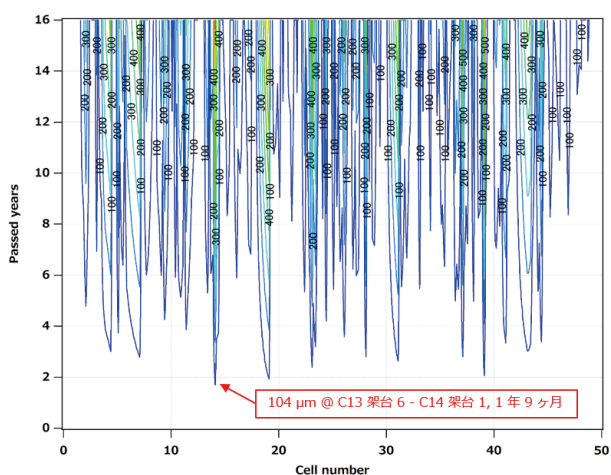
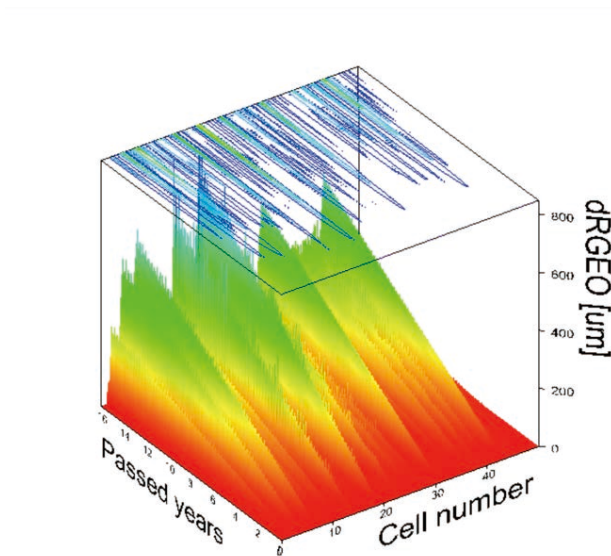


Figure 7: Calculated coordinate residuals ΔR_{GEO} of neighboring two girders for designed ones. Upper is ΔR_{GEO} trends distribution for the entire storage ring and lower is contour plots of the ΔR_{GEO} projection.

4. まとめ

1996年から2018年までに実施した SPring-8 蓄積リングの測定データを基に、蓄積リング全周の地盤変動勾配を求め、SPring-8 II で想定される機器配置の座標の経年変化を線形補間で評価した。蓄積リングの水準は、地下に埋設される通路、RF 導波管、地下配管といった構造物と造成に伴う切土・盛土の分布に顕著に依存し、約 20 年で $-1.5 \sim 2.5$ mm の範囲で変動する。

SPring-8 II においても、現行のレーザートラッカー及びデジタルレベルによる据え付け・測定の踏襲を仮定した場合、測量点と通常の測量作業に必要な日数は倍になる。また全周にわたり、隣り合う 2 架台同士の据え付け誤差は水平方向で $23 \mu\text{m}$ (σ)、垂直方向で $7 \mu\text{m}$ (σ) と見積もられ、現時点で設定されている許容範囲内に収まる。加速器収納部内壁の測量点位置の最適化、外周側の内壁

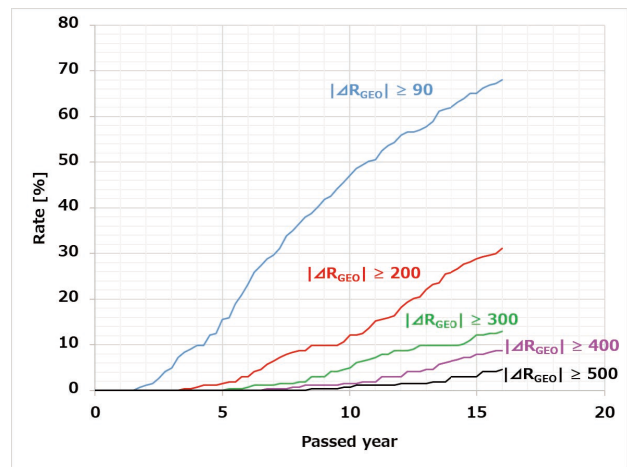


Figure 8: Trends of number of girders above $|\Delta R_{GEO}|$ thresholds.

への測量点の増設など、更なる改良を比較・検討している。また加速器機器据え付け後の再アライメントは、1年半から2年毎に必要な箇所が現れ、10年を目途に全体の半分で必要となる見込みである。

参考文献

- [1] K. Fukami *et al.*, “Estimation of Magnet Alignment Accuracy for SPring-8 Upgrade using Resonance-Frequency Tracked Vibrating Wire”, Proc. International Workshop on Accelerator Alignment (IWAA), Grenoble, October 3-7 (2016).
- [2] C. Zhang *et al.*, “An Eigenfrequency Wire Alignment System under Development for Magnet Fiducialization”, Proc. International Workshop on Accelerator Alignment (IWAA), Grenoble, October 3-7 (2016).
- [3] S. Matsui *et al.*, “相対的な誤差楕円も表示する平面の測量網計算プログラムの開発”, Proc. 12th Annual Meeting of PASJ, Tsuruga, Aug. 5-7 (2015), pp. 140-145.
- [4] R. C. Smith and P. Cheeseman, “On the representation and estimation of spatial uncertainty”, International Journal of Robotics Research, Vol. 5, No. 4 (1986), pp. 56-68.
- [5] T. J. M. Kenne and G. Petrie, *Engineering Surveying Technology* (CRC Press, London, 1993).