

SPring-8 蓄積リングの水準測量の改良 A LEVEL SURVEY IMPROVEMENT FOR 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

Level measurements for SPring-8 storage ring accelerator components have been performed with digital levels every year since its starting operation in 1996. Since 2014, we improved our level measurement scheme because accumulated error was estimated to be 4 ~ 6 mm with the prior scheme. Eventually, the accumulated error of the level measurement was decreased by less than 0.3 mm and moreover, work efficiency was also improved.

1. はじめに

SPring-8 蓄積リングでは運転を開始した 1996 年よりほぼ毎年加速器構成機器の水準測量を実施している。周長 1436 m の蓄積リングは 48 セルで構成されている。水準測量では、各セル 3 つの共通架台両端に設置された四極電磁石天面の計測点を合計 6 点、一周で約 280 点の水準を測量してきた。しかしこれまでのデータを解析してみると、環閉合差 (起点から水準測量の差) が 4 - 6 mm であった。これを最小二乗法で処理して結果とするため、起点から一番離れた計測点での水準は、経年で連続的に変化している様には見えなかった。

国土交通省国土地理院が規定する水準測量の準則 [1] では、一級水準計測点の環閉合差許容範囲は $2.5 \text{ mm} \sqrt{S[\text{km}]}$ であり、周長 1436 m の蓄積リングでは環閉合差許容範囲は 3.0 mm となる。この規定は屋外での測定を前提としており、我々の屋内での測定ではさらに条件が良いことから、測定を改善を試みた。その結果、環閉合差は 0.3 mm 以下と一桁以上改善され、且つ作業効率も向上した。本稿では、水準測量の改良の詳細について議論する。

2. SPRING-8 蓄積リングの水準測量

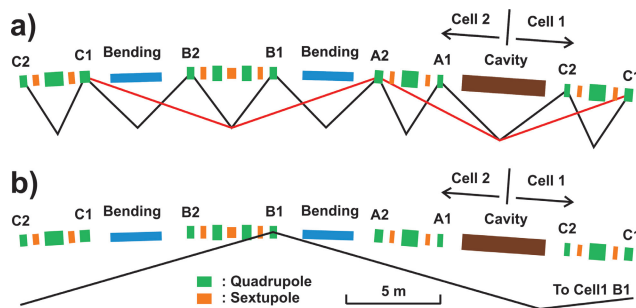


Figure 1: Level measurement procedure comparison before (a, ~2013) and after (b, 2014~) improvement.

SPring-8 蓄積リングの標準セル (約 30 m) の基本構成は、概ね 1) 挿入光源 (若しくは RF キャビティ) 1 台、

* okayasu@spring8.or.jp

2) 偏向電磁石 2 台、3) 共通架台 3 台 (A, B, C) にマウントされた多極電磁石群、4) 真空チェンバーである。各共通架台両端の四極電磁石 (A1, A2, B1, B2, C1, C2) 6 点が計測点である。蓄積リング水準測量の測定方法及び計測点の数は、Figure 1 に示す様に、2014 年を境に異なる。

2.1 2013 年までの水準測量

Figure 1 (a) に示すように、6 点 / セルの計測点のレベルを 6 点 / セルの器械点で連続的に短距離 (3 m - 5 m) で計測した。さらに 2 器械点で上流セルの C1 と当該セルの A2、C1 の四極電磁石の天面レベルを長距離 (~15 m) で計測した。いずれの測定も 2 回ずつ行い、測定値の差が 60 μm 以上の場合は再測定を行った。すべての測定結果を最小二乗法でフィッティングし、全周の測定の最確値を最終結果としている。各測定の測量器は、1997 ~ 1999 年までは目視気泡管レベル : Leica 社製 WILD N3 を、2000 年からは電子オートレベル : Carl Zeiss 社 (現 Trimble 社) 製 DiNi 12 を使用した。Figure 2 (a) に、1996 年から 2010 年までの 2 年毎に実施された、蓄積リング四極電磁石天面の水準測量結果を示す。横軸はセル番号、縦軸は水準で一目盛りが 0.5 mm である。14 年の間に、最大 $\pm 1.5 \text{ mm}$ 程度の変位が発生していることが判る。一方で 17 セルから 25 セルの拡大した領域でも認められるように、例えば近接する 2004 年と 2006 年の同一計測点での水準差が約 0.5 mm と非常に大きい。また水準測量の生データの環閉合差も 4 - 6 mm と大きかった。

2.2 2014 年からの水準測量

これまでの測量方法で環閉合差が大きい理由は、測定距離が短いことであると考えた。それは例えば 100 m 離れた 2 点の比高差を計算する場合、5 m 間隔で 20 回の水準測定で繋いで計測するより、25 m 間隔で 4 回の測定でそれを行う方が精度良く計測でき、環閉合差が小さくなるということである。そこで水準測量は 30 m 間隔の各セル 1 点とし、残りの各セル 5 点については、水準測量と同時に進められるレーザートラッカー測量のデータを使用することとした。また水準測量の細かい手順も見直し、2 回の測定は独立な測定となるよう改善を図った。概要は

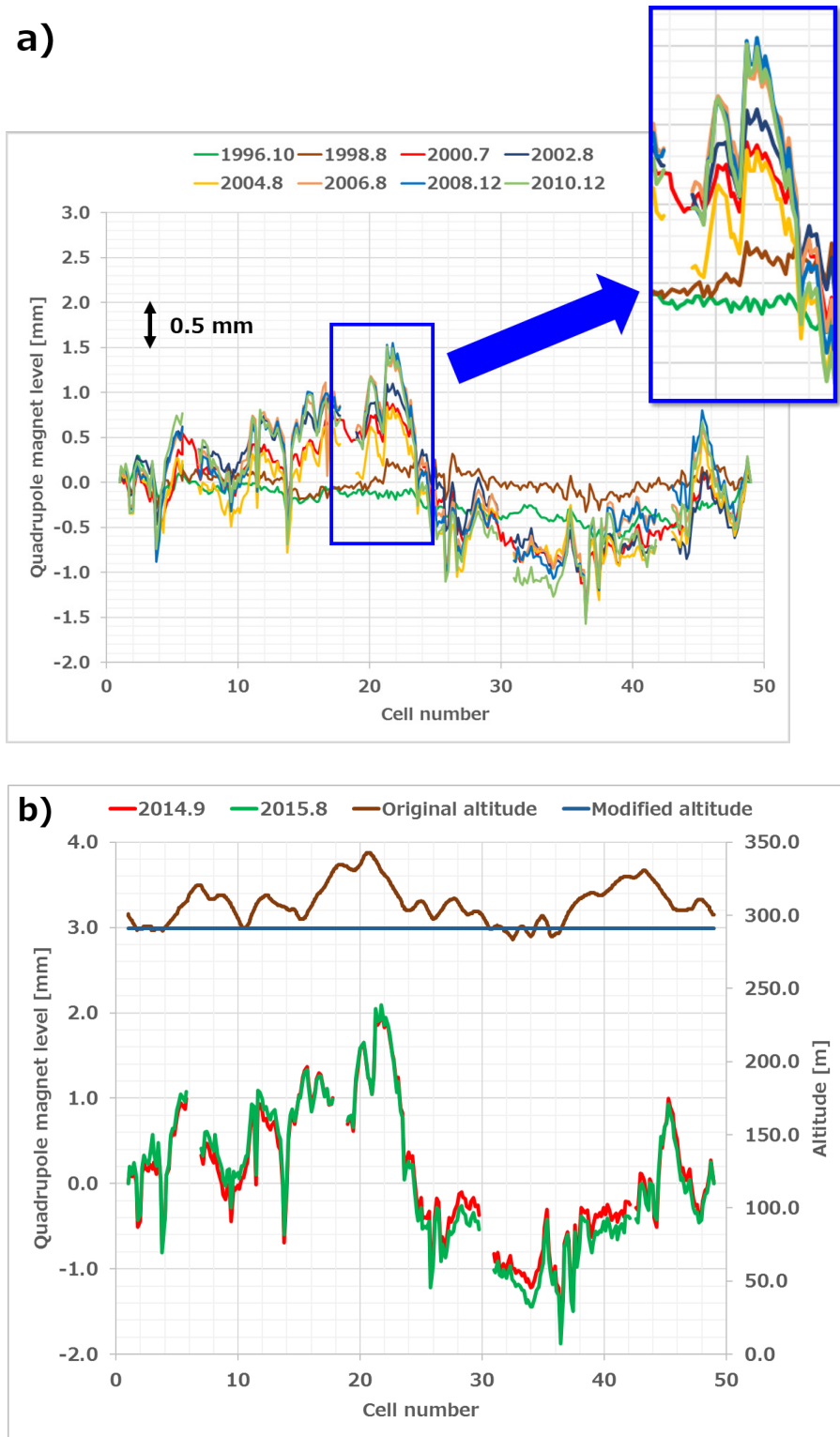


Figure 2: Measured quadrupole magnet levels before (a), ~ 2013) and after (b), 2014 \sim) the measurement improvement. Magnified region represents an example of point which gives ~ 0.5 mm of relatively larger measurement fluctuation (*cf.* 2004 and 2006). Original and modified altitudes along SPring-8 storage ring are also superimposed.

- 水準測量は各セル 1 点 (約 30 m 間隔) とし全周を計測する。
- 残りの各セル 5 点については、レーザートラッカー測量のデータを使用する。
- 予め校正された標尺を使用して、2 回計測する。
- 計測は、前視 → 後視 → 標尺入れ替え・オートレベル脚を反転し再整準 → 後視 → 前視の順で行う。
- 2 回の計測が 0.1 mm 以上であれば再測定する。
- 水準測量結果に重みをつけて、三次元ネットワーク解析で全計測点の水準を評価する、

というものである。順を追って、詳細を述べる。

Figure 1 (b) に示すように、当該セル及び隣接する上流セルの B 架台最上流に設置されている四極電磁石 (B1) の測量点を計測した。電子オートレベルは 2014 年より Trimble 社製 DiNi 0.3 に変わっている。DiNi 0.3 は DiNi 12 と計測精度は同等であるが、Bluetooth を経由した計算機へのデータ送受信機能があり、遠隔での測定制御と測定値の記録が可能である。そのためデータ入力に伴う人的過誤を極力排除し、効率よく測量作業を遂行することが可能である。計測時間が短いこともあり、三脚は軽量の Leica 社 AT28 (重量: 12 kg) アルミパイプ三脚を使用している。また収納部トンネル天井部に設置されている空調用ファンコイルは停止せずに計測している。

一回目の測定は前視 → 後視の順に行い、次に標尺を入れ替え、且つ電子オートレベルを三脚ごと反転させ再度整準する。二回目の計測は後視 → 前視の順で行う。2 回の測定値の差が 0.1 mm 以上の場合は、再測定している。

各計測点の比高差を計測した後、蓄積リング一周の環閉合差を計算し、その差が距離に応じた直線的な計測エラーと仮定した補正 (環閉合補正) を行い、最終的に起点と終点の水準を一致させて水準データ結果とする。

水準測量と並行して、レーザートラッカー (Leica 社製 AT-402) による水平方向の変位の三次元計測を実施している。計測点は、水準測量と同様に各セル 6 点の基準座に加え、収納部内周側壁に設けた各セル 2 点のモニュメントである。水準測量とは逆にレーザートラッカー測量では、短距離計測で精度の良い水準のデータが得られる。

レーザートラッカーによる計測データを三次元ネットワーク解析する際に、水準測量の解析結果で得られる、各セル B1 の水準で拘束をかけ、蓄積リング全周の計測点のデータを解析的に評価している。三次元計測のデータ収集・解析ソフトウェアは、New River Kinematics 社の Spatial Analyzer を使用している。

Figure 2 (b) に、2014 年及び 2015 年に新しい方法で実施された、蓄積リング四極電磁石天面の水準測量結果を示す。いずれも計測点セル 1 A1 を基準点 (0 mm) としている。二回の計測とも、環閉合差は 0.3 mm 以下で、それまでの計測の 1/10 以下になった。

長距離の水準データの質を議論する際に、環閉合差はひとつの指標である。様々な偶然要素が重なり、環

閉合差が小さくなる場合もあり得る。しかしながら、Figure 2 (b) の二回の測定データの差が最大でも 0.2 mm 程度であることは、別の解析 [2] で蓄積リング収納部の年間の変位が約 0.1 mm 程度であることを勘案しても妥当であると解釈している。

また参考までに、SPRING-8 建設前後に測量された標高のうち、蓄積リングに沿った値を重ねた。

建設当初の四極電磁石水準の高低差はおよそ 0.6 mm であったのに対し、19 年経た現在ではその高低差は約 4 mm と 3 倍強となった。SPRING-8 蓄積リングに沿った標高差は、建設前には約 50 m 程度あり、切土・盛土を施して標高 291 m に揃えられた。Figure 2 (b) を見ても直感的に判る通り、四極電磁石の水準変位は、建設前の標高分布と強い相関が認められる。水準の絶対基準点が存在せず、その年ごとの相対的な水準データしかないため、具体的な隆起 / 沈下点は特定できない。しかしながら、切土が施された領域で、四極電磁石の水準が経年で相対的に上昇する原因については、切土により地盤に対する負荷が減り、継続して隆起しているためと考えられる。尚、SPRING-8 及びその周辺の地盤状況についての詳細は 1. で述べる。環閉合差に関しては 0.3 mm 以内であり、水準測量改善前に比べ一桁以上改善し、且つ冒頭で述べた国土地理院が規定する一級水準測量の環閉合差許容範囲内に収まっている。

3. まとめ

2014 年より蓄積リング水準測量の手法に改善を施した。各セルにつき 1 台の四極電磁石の天面の水準を電子オートレベルで測定している。他の四極電磁石の水準については、並行して行うレーザートラッカーによる三次元座標測量の結果について、水準測量の測定値で拘束をかけたネットワーク解析を行うことにより、解析的に評価している。

水準測量を改善した結果、蓄積リング一周の環閉合差は 4 - 6 mm から 0.3 mm 以下に収まり、一級水準測量の許容範囲を満たすまで測定精度が向上した。また電子オートレベルの性能向上から、データ入力に伴う人的過誤を極力排除し、効率的な測量作業が可能となった。

建設当初に比べ、19 年経た現在の蓄積リングの高低差は 3 倍強の 4 mm 程度に広がっていることが、測定結果から判明した。またこの高低差分布は、SPRING-8 建設前に測量された、蓄積リングに沿った標高分布と強い相関があることも判明した。主として切土を施した領域において、蓄積リングの水準が年をおいて増加している原因は、切土により地盤に対する負荷が減少したため、隆起したものと考えられている。

A SPRING-8 及びその周辺の地盤状況

SPRING-8 が建設されている敷地の地質構造区分は、古生代二畳紀から石炭紀 (約 2.5 - 3 億年前) に形成された上月 - 龍野帯という地層帯である (Figure 3)[3]。

またこの地層帯の主たる岩質は、海底で生成された夜久野コンプレックス (夜久野型複合岩類) に属する変斑れい岩類 (マグマが冷えて固まったもの) であり、部分的に花崗岩質岩類 (トータル岩・石英閃緑岩など)、斑



- [3] 上郡町史編纂専門委員会 編 (1999) 『上郡町史 第三巻 史料編 I』 上郡町.
- [4] 田中眞吾、後藤博彌 著 (1999) 『上郡町地形・地質図』 上郡町.

Figure 3: A schematic of stratum classifications for Hyogo prefecture, Japan[3].

長岩類 (石英斑岩及び流紋岩など)、ひん岩・安山岩などの岩質で構成されている [4].

SPring-8 キャンパスは、これら堅固な岩質の上に造成・建設されているが、Figure 4 のキャンパス造成図に示す通り、敷地全体が平坦な訳ではなく、盛土と切土の領域が混在していることが判る。

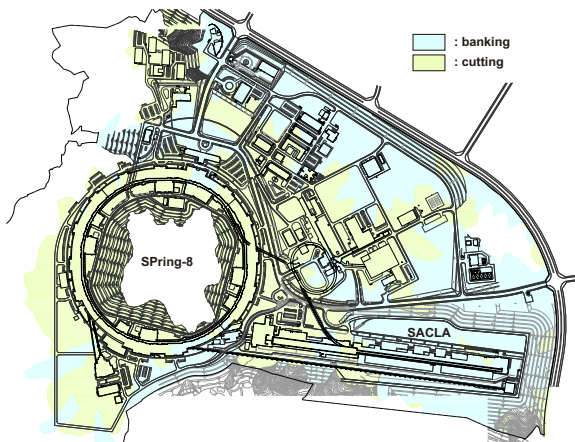


Figure 4: A cutting and banking map of SPring-8 site.

参考文献

- [1] 国土交通省告示第 413 号 『作業規定の準則』.
- [2] H. Kimura *et al.*, "SPring-8 蓄積リング収納部床レベルの長期変位解析" in Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 7-9, 2016, Chiba, Japan.