

# SuperKEKB 衝突点建設: 測量とアライメント

## CONSTRUCTION OF SUPERKEKB INTERACTION REGION: SURVEY AND ALIGNMENT

阿部直宏<sup>#,B)</sup>, 増澤美佳<sup>A)</sup>, 植木竜一<sup>A)</sup>, 大澤康伸<sup>A)</sup>, 川本崇<sup>A)</sup>, 山岡広<sup>A)</sup>,  
三島研二<sup>B)</sup>, 有山至高<sup>B)</sup>, 田邊晃規<sup>B)</sup>

Naohiro Abe<sup>#,B)</sup>, Mika Masuzawa<sup>A)</sup>, Ryuichi Ueki<sup>A)</sup>, Yasunobu Ohsawa<sup>A)</sup>, Takashi Kawamoto<sup>A)</sup>, Hiroshi Yamaoka<sup>A)</sup>,  
Kenji Mishima<sup>B)</sup>, Takashi Ariyama<sup>B)</sup>, Akinori Tanabe<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization, KEK

<sup>B)</sup> PASCO Corporation

### Abstract

At SuperKEKB accelerator, construction work is now proceeding to start collision experiment from February next year. From August last year to February this year, Superconducting Magnet System (QCS) for beam final convergence was installed on the beam line and aligned using a Laser Tracker. The QCSL / R was installed on a moving platform that moves smoothly forward and backward on the beam line, and the reproducibility of the movement of the QCSL / R and the smoothness of the movement at the time of advancing and retreating the moving platform were measured.

In April, the BELLE II detector with a total weight of 1,400 tons moved about 13 m and rolled in to the accelerator beam line, but the floor change of the beam line during roll-in is measured. After roll-in, confirmation survey on consistency between the detector and the beam line is carried out and the BELLE II detector is fixed. In addition, after the roll-in QCS advancement, the cryostat is surveyed and the influence such as the subduction of the floor by the roll in is also evaluated.

### 1. はじめに

SuperKEKB[1-4]は2015年10月にレーザートラッカーによる主リング電磁石の位置調整(アライメント)を終えて、2016年2月から同6月までPhase I 運転と呼ばれる加速器調整運転を行った。入射調整開始後のLER/HER両リングでのビーム蓄積は速やかに進んだ。軌道補正のデータから主リングの周長が精密に分かるが、電磁石の位置測量データの解析結果から求めた周長予想値と2mm程度の誤差で一致しており、またLERとHERの周長の差は約0.2mmであった。これは両リング合わせて2000台以上ある電磁石の測量及びアライメント作業が非常に正確であったことを示している[4]。

現在2018年2月からのPhase IIと呼ばれる衝突実験開始へ向けて建設工事が進められている。2016年8月には衝突点最終収束系超伝導電磁石システム(QCS)のうちの片側のクライオスタット(QCSL)が、2017年2月にはもう片側のクライオスタット(QCSR)がビームラインへ据え付けられ、それぞれレーザートラッカーを用いてアライメントされた。QCSL/Rはビームライン上をなめらかに前進・後退する移動架台の上に据え付けられており、移動架台の前進・後退時のQCSL/Rの動きの再現性、動きのスムーズさについても測量した。

2017年4月には総重量1400トンのBELLE II 検出器がおおよそ13m移動し加速器ビームラインへロールインしたが、ロールイン中のビームラインの床変動について測量を行っている。ロールイン後には検出器とビームラインとの整合性について確認測量も行いBELLE II 検出器を固定している。また、ロールイン後のQCS前進後には

クライオスタットの測量を行い、ロールインによる床の沈み込み等の影響についての評価も行っている。

今回、衝突点回りの一連の測量作業について手法を簡単に説明し、測量結果及び床変動について報告する。

### 2. SuperKEKB 測量手法

SuperKEKB 電磁石のアライメントは、側壁基準点や電磁石について、レーザートラッカーを使って精密に測量していくことから始まる。



Figure 1: Measuring instrument.

Figure 1はレーザートラッカーによる測量である。側壁に1.5inchのリフレクターで測定できる治具がトンネル内側と外側に約13mごとに設置されている。これらの測点をレーザートラッカーで測定する。測定したデータは、Figure 2のように測量網を組み、厳密網平均計算を実施する。網平均計算は、自由網平均計算という、観測値を信頼した固定点を持たない計算手法で最確値(座標値)を求める。

<sup>#</sup> neaboa3009@pasco.co.jp

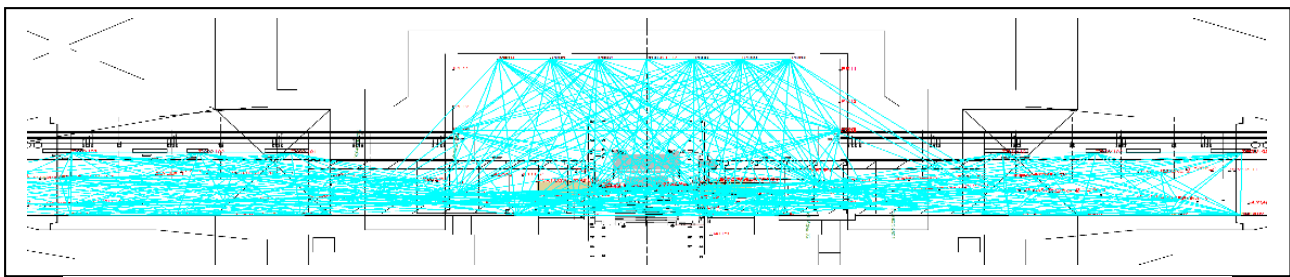


Figure 2: Survey networks.

Figure 2 は筑波直線部で実施した測量網である。レーザートラッカーで測定したデータを用いて Figure 2 の網平均計算を行い、その精度を測点の標準偏差で示すと、最大で  $30\mu\text{m}$  程度であり、アライメントするための基準として活用できる基準点成果が求められたことになる。

### 3. QCSL/R のアライメント

QCS のアライメントは、FARO のレーザートラッカー ION および Vantage の 2 台を使用して実施した。2 台のレーザートラッカーについては事前に機能チェックを行い、相違がないことを確認した上で、作業前にキャリブレーションを行い、測量及びアライメントを実施した。L 側と R 側で実施時期が変わっているため、特に後から実施した QCSR については、QCSL の点検を行い経年変化が問題ないことを確認して、アライメントを行った。

最終的には BELLE II 内に QCSL/R を前進させて最終位置にセットする必要がある。この前進の際に、QCSL/R の先端が大きくぶれて、例えば測定器の内側に接触しない事を確認しなければならない。これについては、QCSL/R の先端にリフレクターをセットして、移動架台を実際に稼働させ、レーザートラッカーでその動きをモニタリングした。座標軸は、X 方向を BELLE II ソレノイド磁場軸に設定し、天頂方向を +Z 方向、SuperKEKB リング外側を +Y 方向にした右手系の座標系で管理した。その結果を Figure 3 および Figure 4 に示す。

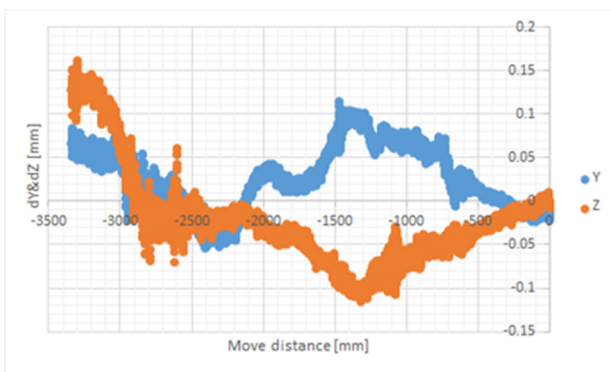


Figure 3: QCSL moving Test 1st.

Figure 3 は IP から離れていく方向へ動かしているとき、距離にして  $0.2\text{mm}$  移動したときに取得した 3D データをプロットしたものである。ビーム直角方向 ( $dY$ ) は  $\pm 0.1\text{mm}$  程度、高さ方向 ( $dZ$ ) は  $\pm 0.15\text{mm}$  で推移していることがわかる。 Figure 4 は IP へ向かうときの動きを

モニタリングしたものである。ほぼ同じ距離で同じように変位していることがわかる。したがって、再現性としては  $\pm 50\mu\text{m}$  以内で非常によい。

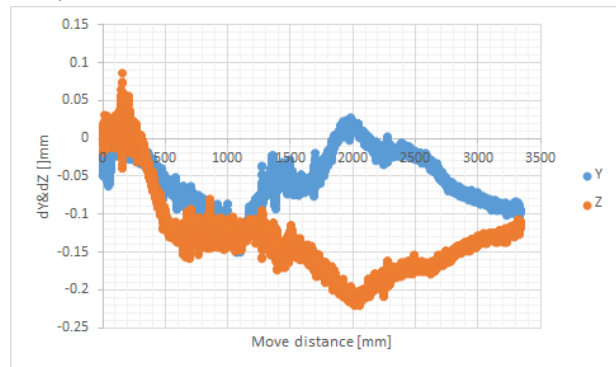


Figure 4: QCSL moving test 2nd.

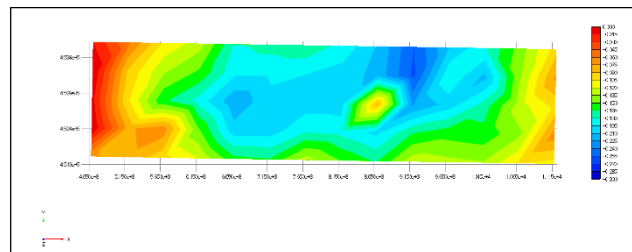


Figure 5: QCSR floor level undulation.

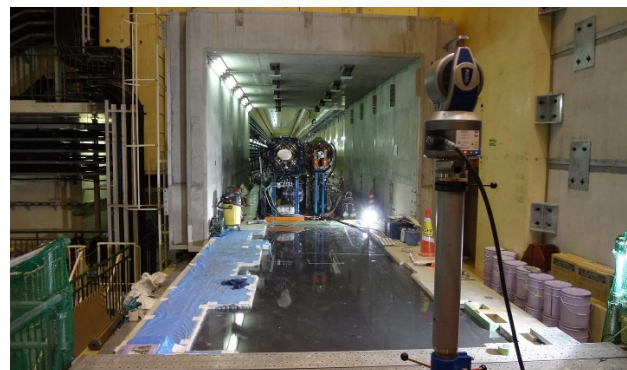


Figure 6: Floor height measurement for QCSR.

Figure 5 は QCSR の床をレーザートラッカーでメッシュ上に測定したときの高さの差分データを図示したものである。赤色が一番高く  $0\text{mm}$  としたとき、青が濃い箇所は、 $-0.3\text{mm}$  で一番低いことを示す。QCS はこの床に 2 本のレールをセットし、その上にセットされている。グラフは、右側が IP に近いほうで、左側が大穂実験ホール側である。大穂側が高い結果である。Figure 6 は QCSR の床測定時の状況を示すものである[2]。

#### 4. BELLE II 移動に伴う床変動

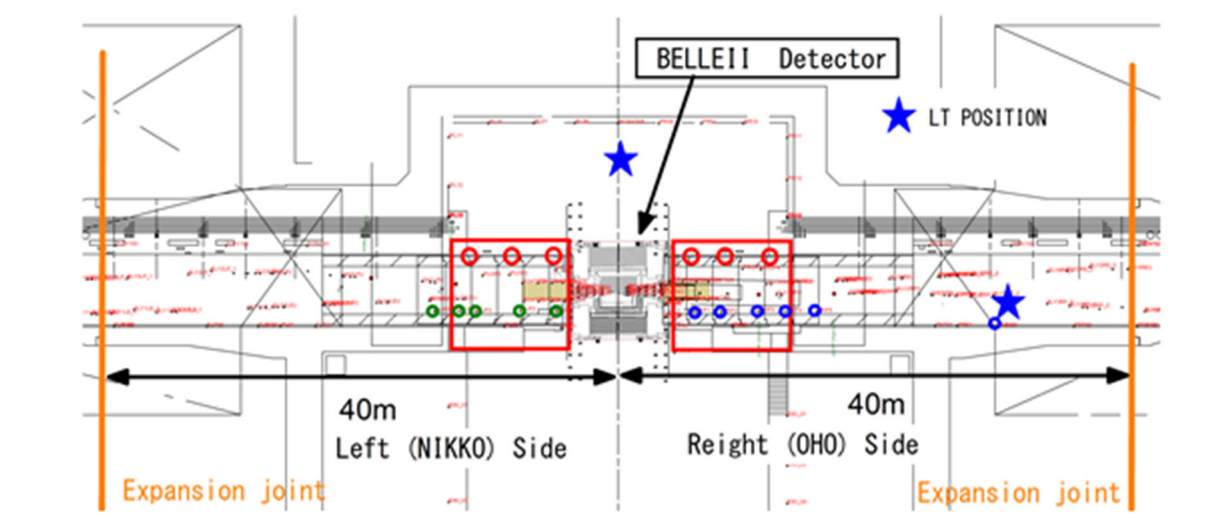


Figure 7: Measurement points.

##### 4.1 BELLE II ロールイン前の状況

BELLE II 検出器がビームラインにロールインされる際、どの位沈下するのか測定した。衝突点付近の構造は、BELLE II 検出器を移動するための床は B4F であるが、ビームラインは、B3F にあるため高さの差がある。ビームラインは、衝突点を挟んでほぼ左右対称に B4F から立ち上げたコンクリートでつくられた床面の上に設定され、その上に片持ち梁のような状態で、QCS が設置されている。BELLE II ロールイン前には、仮設ステージが設置され、その上で QCSL/R のアライメントを実施した。アライメントは BELLE ロールアウト時の測定で得られていた 0.3mm 程度の沈下量を考慮して、QCS 自体はビームライン高から上げて設置した。

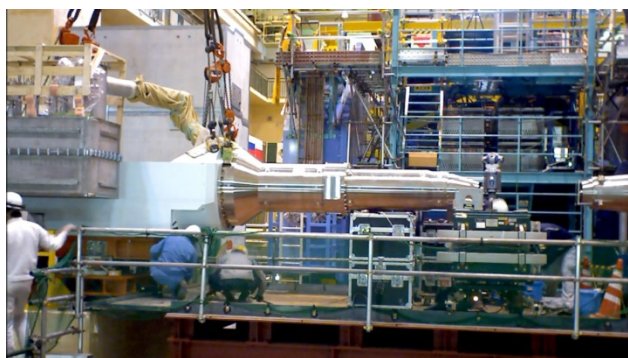


Figure 8: Setting bridge.

##### 4.2 BELLE II ロールイン

QCSL/R の設置&アライメント終了後 2017 年 4 月 11 日に BELLE II をビームラインへロールインした。床変動をモニタリングするためレーザートラッカー 3 台を配置し、BELLE II の移動に伴って精密測定を実施した。BELLE II は、主リングビームラインから内側へ約 13m 移動した (ロールアウト) 位置で組み立てられており、重さは約 1400 トンといわれている。

る。

ロールインは、まず 5m 主リングに近づいた地点で一旦停止し、1 回目の測定を実施した。Figure 7 の星印が、レーザートラッカーを配置した場所になるが、3 台目は、NIKKO 側に配備したが、途中でデータに不具合が生じ、評価不可能となったため記載していない。

測定は、BELLE II を Table 1 のとおり、移動を停止してもらい、その都度数か所の測定を実施した。

Table 1: Measurement Time

1 <sup>st</sup> Time	The distance from which BELLE has moved 0m
2 <sup>nd</sup> Time	The distance from which BELLE has moved 5m
3 <sup>rd</sup> Time	The distance from which BELLE has moved 7m
4 <sup>th</sup> Time	The distance from which BELLE has moved 9m
5 <sup>th</sup> Time	2 The distance from which BELLE has moved 11m

BELLE II 付近にセットしたレーザートラッカーは、B4F に配置し、床の変動およびビームラインのステージの上を観測した。BELLE II は移動してビームラインに近づくにつれて、ビーム直角方向にも床の変動を示す結果となったが、ビームラインの床を直角方向に傾けるほどの回転量ではない。もう一方のレーザートラッカーは、IP から約 30m 離れた地点にセットし、主にビームラインの床の変動を監視するためのデータを取得した。

### 4.3 BELLE II 移動測定結果

BELLE II が Table 1 のとおり移動途中で停止しているときに測定したデータを Figure 9 に示す。基準とした測定点は、大穂側、日光側共に IP から離れた点を不動として、プロットしている。わずか距離 8m の間で最大 0.13mm 沈下した。また、基準とした測点近くには、KEK で設置した HLS がある[1,3]。



Figure 9: Beamline floor movement.



Figure 10: Survey points.

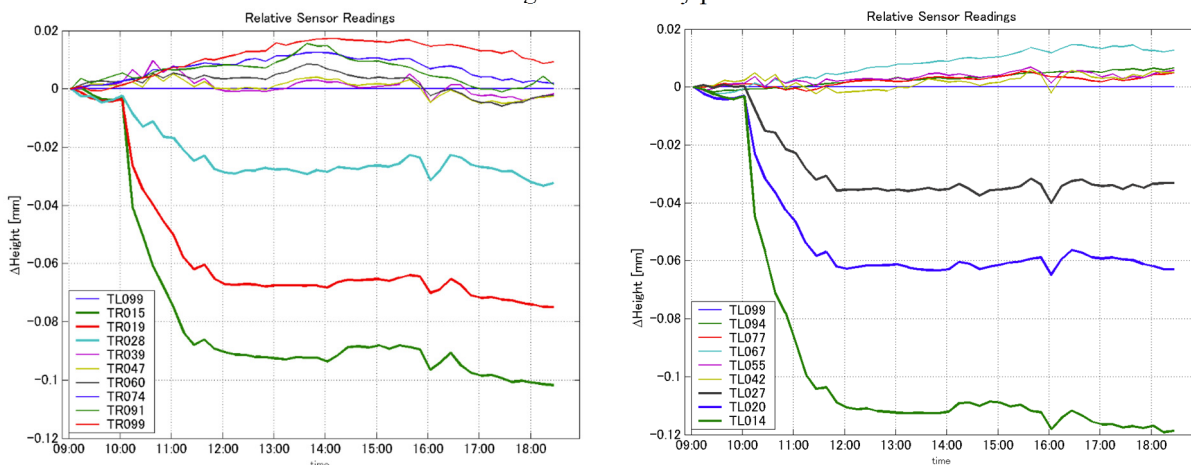


Figure 11: HLS (Relative sensor readings) Left graph : OHO side , Right graph : NIKKO side.

QCSL/R は、このように変動する前に精密にレベル出しを行った床面に設置されている。BELLE II の移動で、片持ち梁のような構造である QCS は、現時点で QCSL 側において、QCSL の付け根にあたる P10 と P12 という

Figure 11 のデータを見ると TR039 や TL042 が変動していないが、Expansion Joint から IP よりの測点については、IP からの距離に応じて沈下しており、固定として処理した基準点においても、0.1mm 程度沈下していることが分かった。したがって、この変動で IP 点の沈下を予測すると、0.4~0.5mm 程度の沈下が起きていても不思議ではない。

測点を 2017 年 6 月に測定すると、BELLE II がロールインされる前の 2017 年 3 月データよりも、それぞれ 0.45mm 程度沈下している事がわかった。

大穂側にレーザートラッカーをセットし測定したデータを Figure 12 に示す。測定した箇所は、ビームラインの内側の床面である (Figure 7 参照)。当然のことではあるが、外側の測点とはほぼ同じ挙動である。不動点を IP から 26m 離れた地点に置くことで、全体的に沈下量が大きい。測点の位置関係を考慮すると、IP から 3 点目と 4 点目の間に主リング外側の固定点があることから、約 1.5mm の沈下が見られる。したがって、BELLE II の移動に伴う QCS のねじれはないと考えられる。

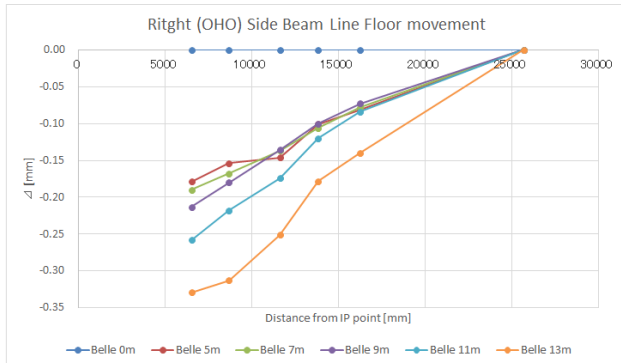


Figure 12: Right side beam line floor movement.

## 5. まとめ

SuperKEKB の測量は、当初 KEKB の改造であり不動のマグネットを設定することで、大掛かりな測量は必要ないのではと考えられていた。しかし、建設中に東日本大震災があり、また新設建屋工事や PF-AR 入射路の工事による地下水の変化などが原因で、加速器トンネルは大きな変位を余儀なくされ、精密測量に掛かる重みが増していった。そんな環境下で測量網を使って精密測量と精密アライメントを実施され、Phase I ではリングの周長差 0.2mm を達成できた[4]ことは地道な努力の積み重ねが実った瞬間だと感じる。

本報告の主題である衝突点付近の測量とアライメントについては、BELLE II の移動に伴う、局所的な変動を正確に捉えて大きな検出器の性能を引き出すために、大きな成果を上げていると考える。1400 トンもの重量物が 13m 移動することは、現実的になかなかないことではあるが、どんなに強固に作られた建屋においてもひずみ変動することが分かった。おそらく現代の計器で測定するから詳しく詳細な動きを捉えられるようになったと思う。

レーザートラッカー測定が当たり前になった現在、様々な使用方法を考えると同時に、精密水準測量の技術や、高精度トータルステーションでの距離測定、角度測定技術を用いて先端研究の一翼を担いたいものである。

今後、移動架台可動域における常伝導電磁石の精密アライメント作業が予定されている。これまでに培われた技術を投じて、高性能な加速器運転および実験成果が得られるように、引き続き測量&アライメントで貢献していきたい。

## 参考文献

- [1] M. Masuzawa *et al.*, “SuperKEKB Main Ring Tunnel Motion”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 9-11, 2014, Aomori, Japan.
- [2] H. Yamaoka *et al.*, “Design and Construction of the QCS Moving Stage”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 5-7, 2015, Tsuruga, Japan.
- [3] T. Kawamoto *et al.*, “Tunnel Level Variation in The SuperKEKB Interaction Region Monitored by HLS”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 8-10, 2016, Chiba, Japan.
- [4] Y. Funakoshi *et al.*, “SuperKEKB Phase 1 Beam Commissioning”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 8-10, 2016, Chiba, Japan.