

## SuperKEKB QCS クライオスタット位置の変動

### SuperKEKB QCS CRYOSTAT POSITION VARIATION

増澤美佳<sup>#</sup>, 植木竜一, 大澤康伸, 川本崇, 中村衆, 古澤将司, 山岡広

Mika Masuzawa <sup>#</sup>, Ryuichi Ueki, Yasunobu Ohsawa, Takashi Kawamoto, Shu Nakamura, Masashi Furusawa,  
Hiroschi Yamaoka

High Energy Accelerator Research Organization

#### Abstract

In SuperKEKB, a superconducting magnet system called QCS provides the strong magnetic field needed to focus the beams at the interaction point (IP). Cryostats containing these magnets are mounted on a moving platform in a cantilevered structure. The movable platform is firmly fixed to the beamline floor, but since it is cantilevered, the part near the IP is free. Capacitive gap sensors similar to those used in KEKB are attached to measure the distance between the Belle II CDC detector and the cryostat during beam operation. In addition, the HLS sensors are placed near the IP and constantly monitor the level change of the floor. There is a strong correlation among the floor motion obtained from the HLS sensors, QCS cryostat movement seen by the gap sensors, the strength of the QCS vertical steering magnet strengths and the vertical vertex position obtained from the Belle II data. It was also found that these were correlated with the outside air temperature. These correlations are reported below.

#### 1. はじめに

SuperKEKB は 2010 年に運転が終了した KEKB トンネルを再利用して建設された周長約 3 km の 4 GeV 陽電子リング(LER)と 7 GeV 電子リング(HER)からなるダブルリングコライダーである[1]。KEKB で達成したピークルミノシティ  $2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  を更に数十倍上げるために「ナノ・ビーム大角度交差衝突方式」と呼ばれるビーム衝突方式[2]が採用された。この衝突方式により、KEKB と同程度のパンチ長であっても大きな水平交差角で電子と陽電子を衝突させることにより衝突領域を短くし、ルミノシティを制限してしまう砂時計効果[3]を緩和することが期待できる。そして短くなった衝突領域に対して最終収束超伝導電磁石システム(QCS) [4]により垂直方向に強力な絞り込みを行うことでルミノシティを上げることを狙う。

これらの超伝導電磁石群が内蔵されている2台のクライオスタットはそれぞれ Belle II 検出器のフォワード側(R側)とバックワード側(L側)から挿入する形で最終ポジションに据え付けられる。クライオスタットは移動架台に片持ちで取り付けられていて、その移動架台はビームライン床にしっかりと固定されている。しかしながら片持ちなので衝突点寄りの部分は「フリー」の状態になっている。

クライオスタット据え付け後の動きをモニターするために KEKB の時と同様の静電容量型のギャップセンサーを取り付けて Belle II 内側の検出器とクライオスタットの距離をビーム運転中でも常時モニターするようにした。また、衝突点近傍と衝突点両側の直線部トンネルには HLS が置かれており床の高さの変動についても常時モニターしている[5]。HLS から得られた床変動データ、ギャップセンサーで見える QCS クライオスタットの動き、Belle II データから求められた衝突点の垂直方向の Vertex 位置に強い相関があることがわかった。またこれらは外気温とも相

関している。本発表ではこれらの相関について報告する。

#### 2. センサー

ギャップセンサーが取り付けられている場所を Fig. 1 に矢印で示す。衝突点の両側のクライオスタットに周方向に 45 度、135 度、225 度、315 度に 4 つのギャップセンサーが取り付けられておりこのセンサーでクライオスタットと Belle II CDC (Central Drift Chamber) の距離を常時モニターし、ロギングしている。通常はゆっくりとした動きに着目しているので数秒に一回程度のロギングであるが、地震時の早い動きを捉えたい場合には別途データロガーを用意して速いサンプリングでロギングする。

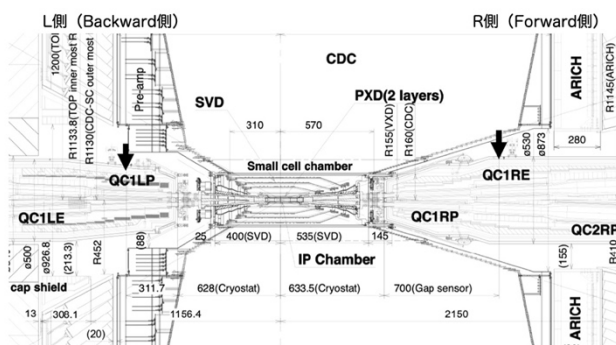


Figure 1: Gap sensor locations are shown by arrows.

今回のトンネル変動の解析には衝突点の L 側と R 側にそれぞれ2台ずつ設置した Fogale nanotech 社製の HLS センサーを用いた。片側2つのセンサーのレベルを比較することで衝突点直近の床の傾きを評価した。センサーのおおよその位置を Fig. 2 に矢印で示す。

<sup>#</sup> mika.masuzawa@kek.jp

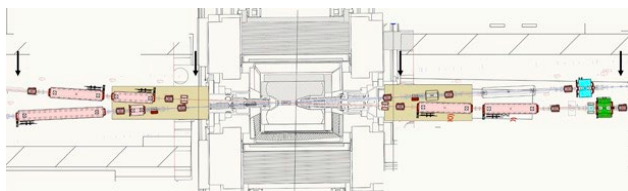


Figure 2: HLS sensor locations are shown by arrows.

### 3. 床、クライオスタット及び Vertex 間の相関

#### 3.1 2022 年 3 月から 6 月までの動き

Figure 3 に 2022 年 3 月 1 日から 2022 年 6 月 22 日までの L 側と R 側のギャップセンサーの値の平均をとってクライオスタットの平均位置としたものと、Belle II から提供された Vertex 位置のトレンドを示す。両者とも垂直方向の動きに対応する成分のみプロットしており、マイナス側は位置が下がる方向に対応する。両者とも概ね同様の動きをしており 4 ヶ月のビーム運転でギャップセンサーが取り付けられている位置でのクライオスタットは  $\sim 50 \mu\text{m}$ 、Vertex は  $\sim 70 \mu\text{m}$  下方に動いたことがわかる。Figure 1 で示されているギャップセンサーの位置での変位が衝突点で拡大されることはクライオスタットが方持ちで支持されていることを考慮すると妥当である。5 月 11 日あたりから数日間の Vertex の動きがその前後の傾向と異なる。これはおそらくビーム調整の一環として LER 側で衝突点角度バンプをつけた軌道を採用していたことと関係していると考えられる。

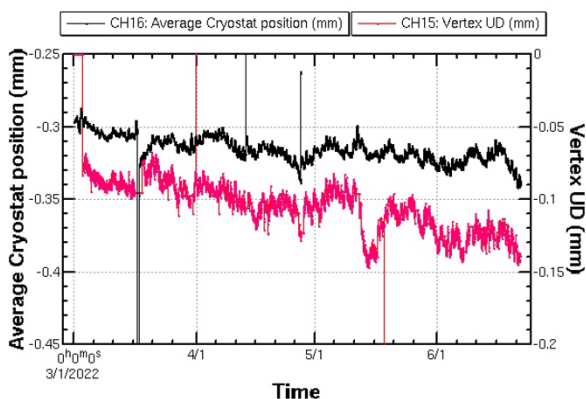


Figure 3: Average of the L-side and R-side of the cryostat positions with respect to CDC (black) and Belle II vertex position (red) are plotted against time. Both correspond to the vertical motion.

同期間の Vertex 位置とクライオスタットの平均位置の相関を Fig. 4 に示す。両者には正の相関がある。クライオスタットが下がればその中の四極マグネットの中心も下がるのでビーム軌道もそれを追いかけて下がり Vertex 位置も下がるのでこの正の相関関係は理屈に合う。ただし、QCS のステアリングを使って軌道補正した場合は Vertex 位置とクライオスタットの相関は崩れてしまう。次に Vertex

位置と L 側と R 側の衝突点近傍の床の高さとの相関を Fig. 5 に示す。なお、本レポートでは L 側、R 側それぞれにおいて衝突点から遠い方にある HLS を基準とした時の衝突点側の HLS の高さを「衝突点近傍の床の高さ」と定義している。

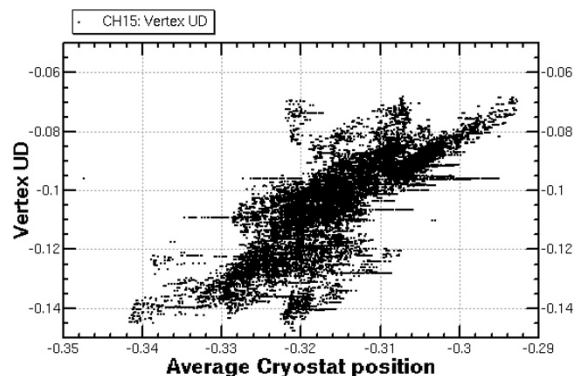


Figure 4: Vertex position (mm) is plotted against the average cryostat position (mm).

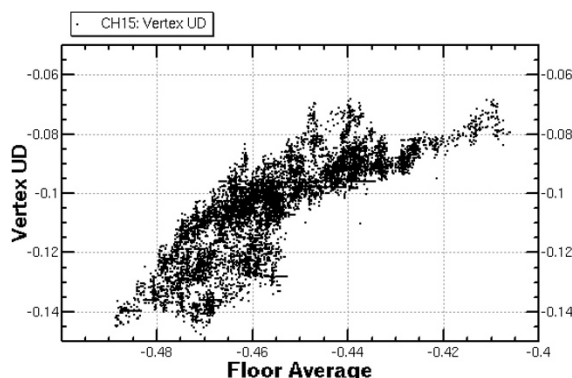


Figure 5: Vertex position (mm) is plotted against the average floor position (mm).

Vertex 位置と衝突点の床の高さにも正の相関が確認できる。Figure 6 はこの三者 (Vertex、クライオスタット、床) の関係を模式的に表したものである。

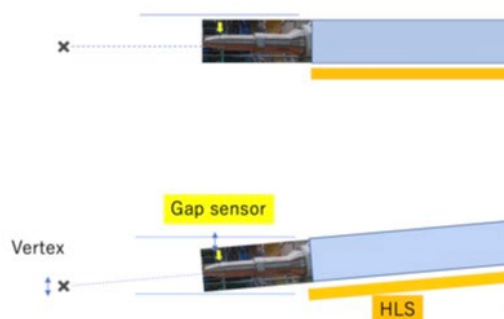


Figure 6: Schematic drawing to show the vertex, cryostat and floor motion.

衝突点側の床が下がる(傾く)ことでクライオスタットも傾きその中の四極マグネットの中心を通るビーム軌道も Belle II 測定器に対して下がり、その結果 Vertex 位置も下がる。

### 3.2 長期間(〜4年間)の床及びクライオスタットの動き

Figure 7 に 2019/10/15 から 2022/6/22 までの L/R 側のクライオスタットと床の動きを時系列で示す。この期間には冬期・夏期シャットダウンが合計5回含まれている。シャットダウン中は Belle II 検出器ソレノイド磁場および QCS 磁場を下げていたので電磁力がかからず、クライオスタットと床の動きも運転中のものとは異なっている。運転期間中のみに着目すると L 側については床の動きとクライオスタットの動きが定性的にも定量的にも良く合っている。R 側については最初の運転期間は合っているが、2019 年のシャットダウン以降はオフセットがついた動きになっている。これについてははっきりとした原因はわかっていないが、2019 年の運転で Belle II CDC 検出器のケーブルとクライオスタットが触れてしまっていてその後の冬期のシャットダウン前後での磁場の上げ下げでケーブルの接触が解除された可能性が挙げられている。またその後にオフセットが大きくなった件に関しては 2020 年の 4 月に軌道補正のソフトウェアにバグ(4 月末には修正されている)が入ってしまった影響が指摘されている。いずれにしても定性的には R 側のクライオスタットも床の動きに連動した変動を示していることが言える。この期間、クライオスタットは Belle II 測定器から抜き出されていない。この状態でクライオスタットは L 側で $\sim 0.1\text{mm}$ 、R 側ではその数倍に当たる $\sim 0.4\text{mm}$ 下がっている。床は L 側で $\sim 0.1\text{mm}$ 、R 側で $\sim 0.2\text{mm}$ 下がっている。衝突点の両側の床が衝突点に向かって沈み込んで行く理由、R 側の床の沈み込みが L 側に比べて大きい原因についてはまだわかっていない。R 側のクライオスタットの方が長いことも一因であると考えられる。運転中に床には常に衝突点に引き込まれる方向の電磁力がかかり続けていることが沈みこみの原因の可能性として挙げられる。2022 年 6 月末にビーム運転が停止し現在は第一回目の長期シャットダウン(LS1)に入っている。LS1 では L/R 両側のクライオスタットを Belle II 測定器から一旦引き抜いて衝突点周りの各種作業を行っている。クライオスタットを所定の位置に戻した後、速やかに位置変動のモニタを再開する予定である。

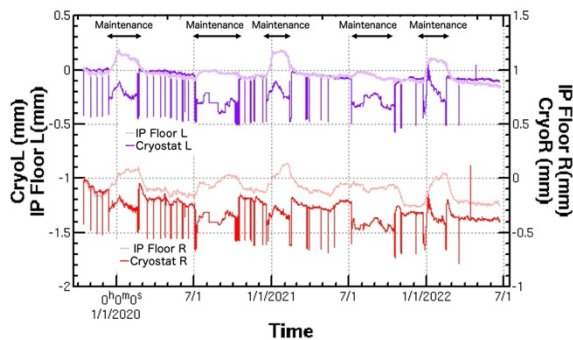


Figure 7: Cryostat and IP floor motion from Oct.15, 2019 to Jun. 22, 2022.

### 3.3 QCS クエンチ前後のクライオスタットと Vertex 位置とその再現性

Figure 8 は 2022 年 3 月 16 日 23:36 に福島県沖を震源に発生した地震(つくば市震度4)で QCS がクエンチした際のクライオスタットと床の動きを示したものである。この時のクエンチでは両側クライオスタット共、 $\sim 0.4\text{mm}$ 下がっている。クエンチから復旧後 L 側のクライオスタットは元の位置に戻っているが、R 側については戻り方が緩やかで数時間では元の位置には戻っていない事がわかる。

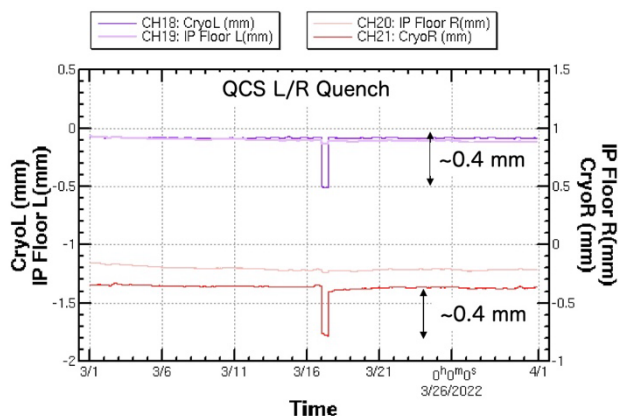


Figure 8: Cryostat and floor position at a QCS quench caused by an earthquake.

このクエンチ前後の Vertex 位置とクライオスタットの位置の相関関係を Fig. 9 に示す。地震によって発生した QCS クエンチの前後で Vertex 位置とクライオスタットの位置(Figure 9 では L/R 側のクライオスタットの平均位置で代表させている)との相関にオフセットが乗ったことがわかる。これは主に R 側のクライオスタットの位置が完全に戻っていないことが原因である。クエンチ後の運転ではクライオスタットの位置の戻り具合にも注意してルミノシティ調整を行う必要があると考える。

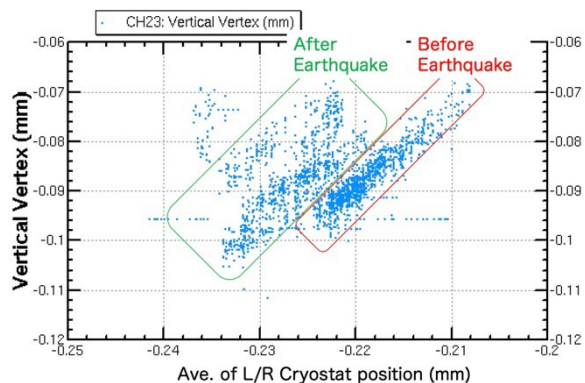


Figure 9: Vertical vertex position is plotted against the average position of the L- and R-side cryostats. There seems like an offset introduced by the quench.

### 3.4 日較差

今までは長期的な床変動とそれに起因するクライオスタットと Vertex 位置の相関関係に着目して議論をしてきた。本節ではもう少し短周期の動きについて考察する。Figure 10(Upper)は2022年5月1日から一週間のL側クライオスタットと衝突点L側床の動きを外気温と共にプロットしたものの、Fig. 10(Lower)はその時の Vertex 位置を外気温と共にプロットしたものである。これらの動きには全て日較差が見えており、外気温が日較差変動の原因の一つであることが推測される。KEKB 時代から筑波実験棟の床の傾きが外気温や日照と相関があることがわかっている[6]。実験棟の屋根が日照で炙られることで建物に変形し床が傾くことは2003年に行った清水建設株式会社によるシミュレーションでも示されていることから、今回も同様のことが起きていると考える。Figure 11に2003年に清水建設株式会社が行った「日射による加速器施設の変形評価」の結果の一部を示す。建物と地盤をモデル化し、実際の外気温データを用いて模擬計算をしたところ、日射により屋根が炙られて伸びることで建物各階の床が傾く様子が可視化された。日射により床が傾き16時ごろにその傾きは最大となる。これは Fig. 10のクライオスタットと衝突点床の高さがこの時間帯に最大値になることと矛盾しない。

また、外気温の日較差で Belle II 実験の Vertex 位置が  $10 \mu\text{m}$  程度変動することが今回のデータ解析で新たにわかった。

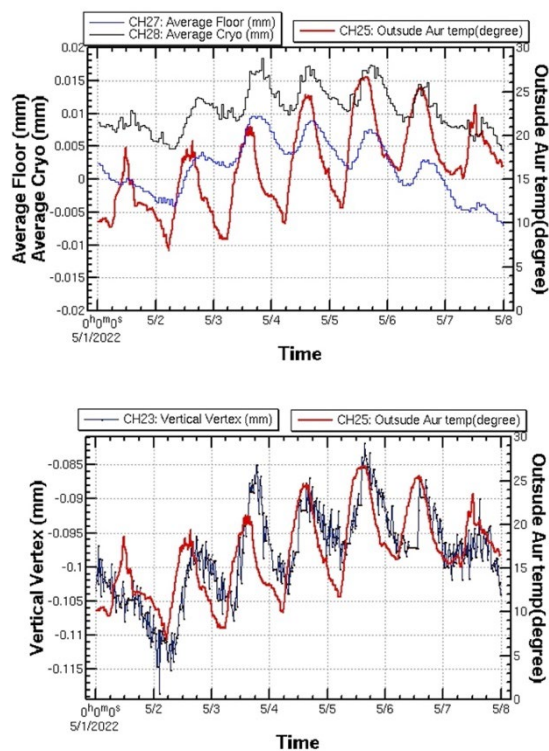


Figure 10: Cryostat motion and floor motion during a week of May, 2022 are shown along with the outside air temperature (Upper). Vertex position is plotted along with the outside air temperature (Lower).

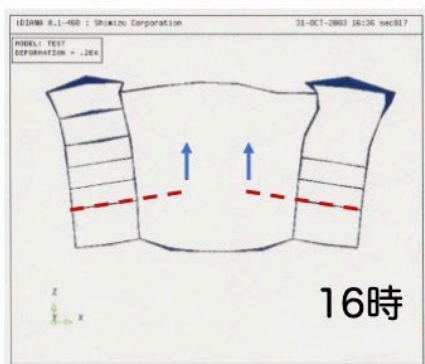
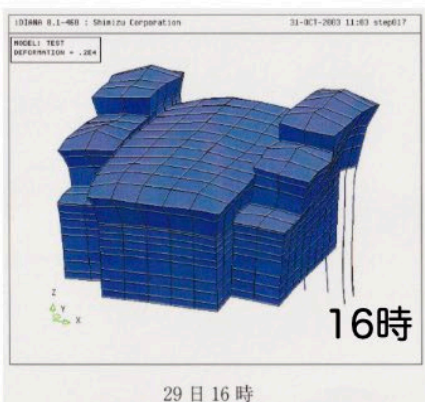
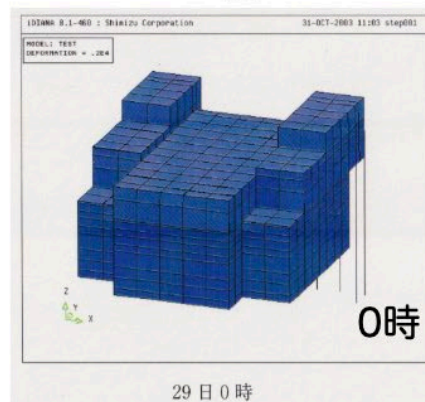
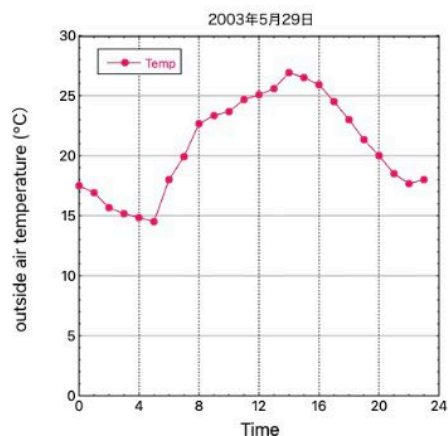


Figure 11: Simulation results of deformation due to solar radiation carried out on Tsukuba experimental hall by SHIMIZU CORPORATION in 2003.

### 3.5 地震時のクライオスタットの揺れ

最後にギャップセンサーのサンプリングレートを 256 Hz に上げて地震時のクライオスタットの揺れについて取得したデータを Fig. 12 に紹介する。これは 2022 年 5 月 5 日の 18:42 に起きた地震の時のデータでつくば市では震度 3 を観測した。この時のクライオスタットの振幅は L 側も R 側も、また垂直方向も水平方向も  $\sim 0.1\text{mm}$  であった。この時はビーム運転をしていたが、地震によりビームロスが発生し両リング共アポートされている。L/R 両側とも水平方向が振動持続時間は長い。今まで取得した地震時のデータによるとクライオスタットの振幅で Fig. 12 を大幅に超える地震は SuperKEKB 運転開始後幸いにもまだ発生していない。

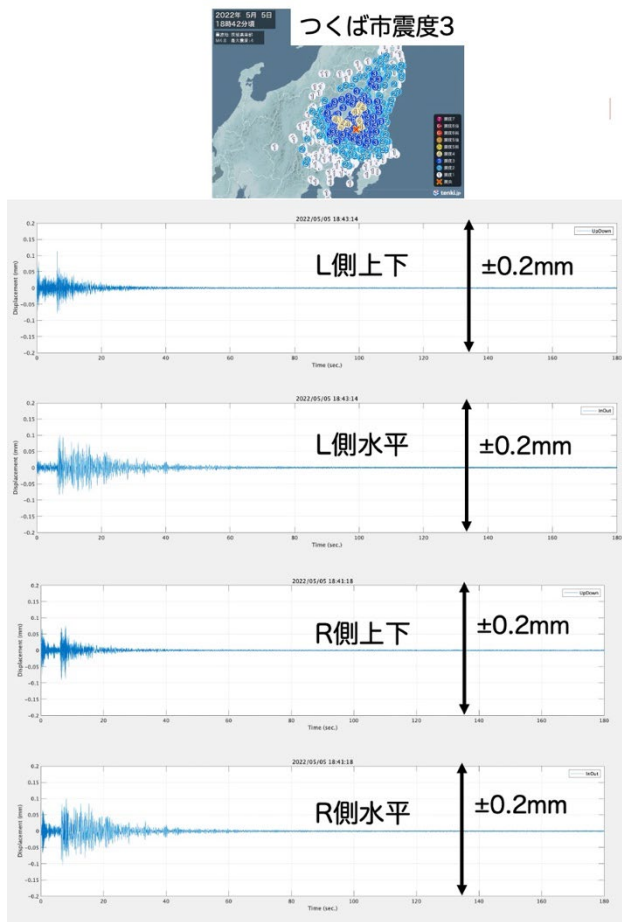


Figure 12: Cryostat motion during an earthquake on May 5, 2022.

## 4. まとめ

2019 年から昨年の 6 月までの衝突点近傍の床の動きと最終収束超伝導電磁石システム(QCS)を内蔵するクライオスタットの動き、及び Belle II データ解析から求められた Vertex 位置の動きについて長期モニターを行った。通常の運転では QCS のステアリング電磁石を使って常時軌道補正は行っていないので、クライオスタットと Vertex の位置にははっきりとした相関関係を見ることが

できる。これらの相関は日単位でも見えていて、その大元は外気温であると考えられる。外気温と筑波実験棟 B4 の床の傾きには相関があることが KEKB 時代からわかっている。今回 SuperKEKB のクライオスタットの動きにも日較差が現れたことは驚きではない。一方で Vertex にも  $10\ \mu\text{m}$  のオーダーではあるが日較差が見えていることが今回初めて確認された。

長期的に衝突点床が沈み込んで行く現象が続いている。沈み込み量は R 側でより大きい。運転状態で電磁力が常に衝突点側に引き込まれる方向でかかり続けていること、およびクライオスタットの自重が片持ちでかかり続けていること、が原因である可能性がある。今回のシャットダウンで両側のクライオスタットを一旦 Belle II 検出器から引き抜いて再度所定の位置で固定すること作業を行うが、この傾向に歯止めがかかるのかどうか、注視していく。

## 参考文献

- [1] SuperKEKB, <https://www-superkekb.kek.jp>
- [2] 「SuperKEKB 加速器」赤井 和憲、小磯 晴代「加速器」Vol. 15, No. 4, 2018(213–220).
- [3] [http://accwww2.kek.jp/oho/oho11/oho11\\_txt/1\\_Funakoshi\\_20110823.pdf](http://accwww2.kek.jp/oho/oho11/oho11_txt/1_Funakoshi_20110823.pdf)
- [4] N. Ohuchi *et al.*, “SuperKEKB beam final focus superconducting magnet system”, Nucl. Instrum.Meth.A 1021 (2022) 165930.
- [5] M. Masuzawa *et al.*, “Tunnel Level Variation in the SuperKEKB Interaction Region”, Proceedings, 7th International Particle Accelerator Conference (IPAC 2016): Busan, Korea, May 8-13, 2016.
- [6] M. Masuzawa and R. Sugahara, “FLOOR LEVEL MOTION OBSERVED IN THE KEKB TUNNEL”, Proc. 14th Symposium on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Japan, November 2003.