

SuperKEKB ビーム最終集束用超伝導電磁石システム - ハーモニックコイルによる4極電磁石の磁場測定 -

SUPERCONDUCTING MAGNET SYSTEM FOR THE INTERACTION REGION OF SUPERKEKB - MAGNETIC MEASUREMENT OF QUADRUPOLE MAGNETS WITH HARMONIC COILS -

有本 靖^{*A)}, 植木 竜一^{A)}, 大内 徳人^{A)}, 川井 正徳^{A)}, 宗 占国^{A)}, 土屋 清澄^{A)}, 山岡 弘^{A)}, 王 旭東^{A)},
Yasushi Arimoto^{*A)}, Ryuichi Ueki^{A)}, Norihito Ohuchi^{A)}, Masanori Kawai^{A)}, Zhanguo Zong^{A)},
Kiyosumi Tsuchiya^{A)}, Hiroshi Yamaoka^{A)}, Xudong Wang^{A)},
^{A)} KEK / SOKENDAI

Abstract

After a phase 1 operation (Feb.~Jun. 2016) of SuperKEKB, a superconducting-final-focus-quadrupole system (QCS) has been installed into an interaction region (IR) of SuperKEKB for the following operation period, phase 2. The QCS has eight-superconducting-quadrupole magnets and squeezes electron and positron beam at an interaction point to about 50 nm in vertical direction. To confirm magnetic qualities of the quadrupole magnets at operation conditions where solenoid fields of Belle II detector and compensation solenoids of QCS are energized, we performed magnetic measurements at IR. Higher order harmonics of the quadrupole magnets were measured by harmonic coils. The amplitudes for vertical-focus-quadrupole magnets were below level of 1 unit. One of the horizontal-focusing-quadrupole magnets for an electron beam exhibits a large amplitude of 20 units in sextupole components. The large sextupole components are diminished when the all solenoids are turned off. It was found that the error fields are generated at ends of an iron-support-block surrounding the quadrupole magnet.

1. はじめに

SuperKEKB では最終集束超伝導四極電磁石システム (QCS) 及び Belle II 検出器の無い Phase1 運転を 2016 年 2 月から 6 月まで行った。2017 年 2 月に QCS の製作が完成し、QCS は衝突点領域 (IR) にインストールされた [1]。2017 年 4 月には (バーテックス検出器のない) Belle II 検出器がビームラインにインストール (ロールイン) された。2018 年 3 月より Phase2 運転が開始されクライダーとして Luminosity 向上のためのビーム光学調整、ビームバックグラウンドスタディ等を 2018 年 7 月まで実施した [2]。

QCS は衝突点における電子 (陽電子) ビームの鉛直/水平方向のサイズを 59(48) nm/11(10) μ m に集束する超伝導電磁石システムである [1]。ここで Fig. 1 に IR における QCS 電磁石の配置を平面図で示す。リング中心は図の下側である。QCS は電子/陽電子リング (HER/LER) それぞれに独立した 2 組のダブルレット超伝導四極電磁石、即ち計 8 台の四極電磁石から構成されている (Fig. 1 中の "QC" で始まる磁石が四極電磁石を表わしている)。各四極電磁石には誤差磁場を補正する補正電磁石が 4 台 (QC1RP は 5 台) ずつ組み込まれている。また QC1P 隣の HER には QC1P の漏洩磁場が生成する多極磁場成分を消去するキャンセル超伝導電磁石が組み込まれている [3]。

QCS は 1.5 T の磁場を発生する Belle II 検出器ソレノイド内に設置される。ビームの $x-y$ 結合を出来るだけ小さくするために、QCS にはソレノイド磁場成分を軸方向の積分値でキャンセルする超伝導補償ソ

レノイド (Fig. 1 中の ESL, ESR1, ESR2,3) が組み込まれている [4, 5]。

QCS の IR へのインストールから Phase2 運転開始までの間に IR で実施された磁場測定は目的、方法によって以下の 3 項目に分けられる。

- Single stretched wire 法による 4 極磁場中心の測定
- ハーモニックコイルによる多極磁場成分の測定
- ホールプローブによるビーム軸方向磁場の測定

ここでは上記の第 2 番目のハーモニックコイルによる磁場測定結果について報告する。実験室で縦型クライオスタットを用いて実施された単体磁場測定についての報告がこれまでになされている [6]。ここで報告する磁場測定がこれまでの報告と異なる主要な点は 1) QCS 四極電磁石は実機横型クライオスタットに格納され、2) Belle II 検出器ソレノイドおよび QCS 補償ソレノイドを励磁して実施された点である。

2. QCS 四極電磁石設計

QCS の四極電磁石のコイルは NbTi 製ラザフォードケーブルを直線部において $\cos 2\theta$ 分布となるように 2 層で巻線した構造である。導体直線部の断面は、各層ともコイル 1/2 極分を 3 つのコイルブロックに分割することで高次磁極成分を抑制している。

巻線のリード端部は Skew 成分が発生しない様、磁場中間平面に対し鏡対称に設計された。従ってリターン端部では 4 極 (次数 $n = 2$) の許容多極磁場成分 ($n = 6, 10, \dots$) が発生し、リード端部は $n = 4, 6, 8, \dots$ の多極成分が発生するが、QC1 については $n < 10$ の多極磁場成分は積分値で 0.6 units 以下、QC2 につい

* yasushi.arimoto@kek.jp

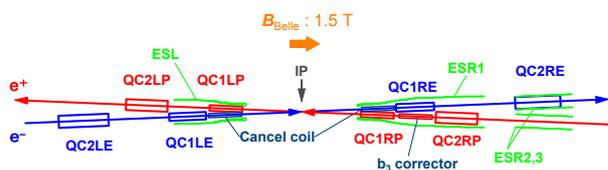


Figure 1: Schematic layout of the QCS magnets at IR of SuperKEKB. A center of the main ring is located at lower side of this figure. IP is an interaction point. QC2LE(P), QC1LE(P), QC1RE(P), QC2RE(P) are the quadrupole magnets for HER (LER). ESL, ESR1, ESR2,3 are compensation solenoids. B -field of 1.5 T by Belle II solenoid is applied in direction as shown with the bold arrow. The compensation solenoids produce fields opposite to the Belle II solenoid.

では $n < 8$ は 0.3 units, $n = 10$ は 2 units 以下で設計されている [7, 8].

ここで述べた多極磁場成分の大きさ (単位は "units") は以下のように $n = 2$ の成分を 10^4 で規格化した n 次のスキュー成分 (a_n), ノーマル成分 (b_n) である [9].

$$B_y + iB_x = 10^{-4} B_2 \sum_{n=1}^{\infty} (b_n - ia_n) \left(\frac{x + iy}{r_0} \right)^{n-1} \quad (1)$$

四極電磁石の主パラメーターを Table 1 に示す. またヘリウム容器を含む各電磁石の断面図を Fig. 2 に示す. 各断面図の最外郭がヘリウム容器である (ヘリウム容器はチタン合金 (Ti-6Al-4V) ロッドで QCS の真空容器から支持されている). QC1LE, QC2LP には磁石本体のヨーク以外に対向ビームラインの磁気シールド, 電磁石全体を覆うサポートブロック等に磁性体が使用されている.

Table 1: Main parameters of the quadrupole magnets [10]. I.D.(O.D.): Inner (outer) diameters of the magnet conductors. G : Gradient of magnetic field. GL : Axial integral of the field gradient. I : Design current. R_{ref} : Reference radius.

	QC1P	QC1E	QC2P	QC2LE/RE
I.D. [mm]	25.0	33.0	53.8	59.3
O.D. [mm]	35.5	70.0	93.0	115.0
G [T/m]	76.4	91.6	32.0	36.4/40.9
GL [T]	25.5	34.2	13.1	19.5/16.5
I_{des} [A]	1800	2000	1000	1250/1350
R_{ref} [mm]	10	15	30	35
Yoke	-	Perm.	Perm.	Iron

3. QCS 四極電磁石磁場測定

磁場測定は IR において Belle II ソレノイド及び QCS 補償ソレノイド励磁下で実施された. 各ソレノイドの励磁電流を Table 2 に示す. セットアップの概

略図, 写真をそれぞれ Fig. 3, 4 に示す. この図では加速器リング中心から見て右側にある QCS クライオスタット, QCS-R (左側に設置されたクライオスタットは QCS-L と呼ぶ.) に格納されている磁石を測定した時のセットアップである. 測定時間効率化のため 2 台の磁場測定器を HER, LER にセットし, 電磁石 2 台同時に磁場測定を行なった.

Table 2: Excitation Currents of the Solenoids During the Magnetic Measurement

Solenoid	Belle II	ESL	ESR1	ESR2,3
Current [A]	4096	404	450	151

磁場測定にはハーモニックコイルを用いた. コイルの巻線半径は電磁石の内径に合わせて 3 種類のを製作した. QC1P/E の電磁石に対しては $\phi 12$ mm, QC2P の電磁石に対しては $\phi 25$ mm, QC2E の電磁石に対しては $\phi 33$ mm のハーモニックコイルを使用した. 積分磁場を測定するロングコイルの軸方向の長さも測定磁石に合わせて設計されており, QC1P/E 用が 600 mm, QC2P 用が 700 mm, QC2E 用が 800 mm である. 一方, 磁場プロファイルを測定するショートコイルの長さはすべて 20 mm である.

各ハーモニックコイルには Tangential(T) 巻線, バッキング用の Quadrupole (Q) と Dipole (D) 巻線が備えられている. 四極電磁石を測定する際には T 巻線に対して Q 巻線と D 巻線でアナログバッキングの配線を行なった. これによって主成分の 4 極磁場を消去して多極成分に対する感度を高めるとともに, 芯ずれおよび回転ムラによる誤差多極磁場成分を小さくしている [11].

ハーモニックコイルはロータリーモーターのシャフトに固定されており, モーターは軸方向に移動するステージに固定されている. ハーモニックコイルを回転して得られる波形は積分器 (Metrolab:PDI5025) で計測される. 回転軸に取り付けられたエンコーダー出力は積分器のトリガーチャンネルに入力される. これらの装置の制御, データ収集システムは EPICS/CSS [12], オンライン多極磁場成分の解析ソフトは ROOT/CERN をベースに構築された.

4. 測定結果

4.1 DC 電流ループ

四極電磁石のヒステリシス, ヨークの磁氣的飽和の 4 極及び多極磁場に対する影響を見るために DC 電流ループ測定を行った. 使用する電源はユニポーラ電源 [13] であるため $0 \text{ A} \rightarrow \text{定格電流} \rightarrow 0 \text{ A}$ というサイクル (2 サイクル) で測定した. 測定点ごとに電流値を固定してハーモニックコイル (ロングコイル) の波形を測定した. Belle II ソレノイド及び QCS の補償ソレノイドは Table 2 の電流値に設定した. Figure 5 に 2 サイクル分の Transfer function の測定値を励磁電流の関数としてプロットした. 上段, 下段のプロットはそれぞれ QC1P, QC1E の測定結果である. プロット内の矢印は電流変化の方向である. ここで Transfer

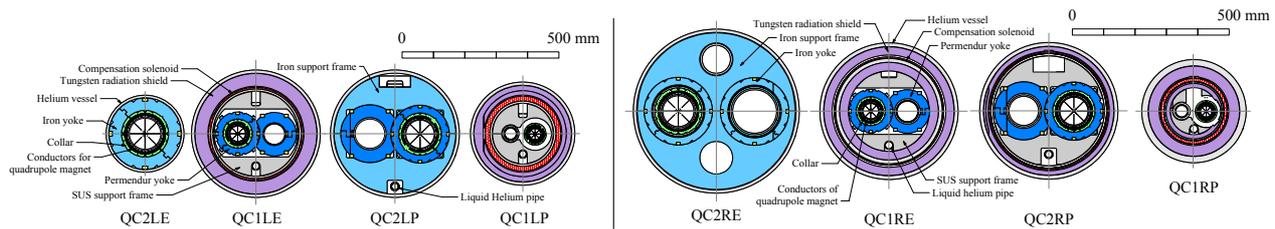


Figure 2: Cross sections of the helium vessels at the longitudinal center of the quadrupole magnets in the QCS-L (left in this figure) and QCS-R (right in this figure) cryostats.

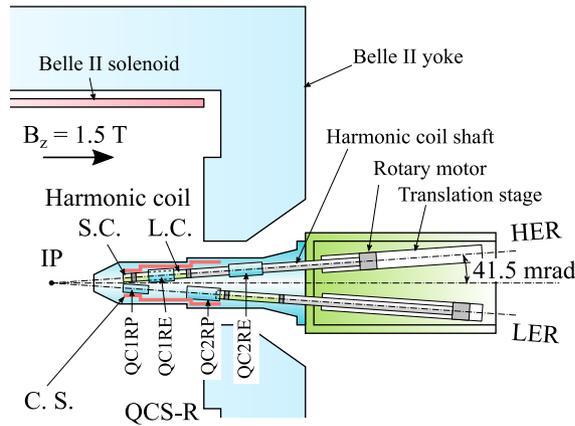


Figure 3: Schematic view of the magnetic measurement system (plan view). S.C. and L.C. indicate the short coil and the long coil of the harmonic coil, and C.S. indicates the superconducting compensation solenoid. The harmonic coils are fixed to the shaft of the rotary motor and the motors are translated in axial direction by the translation stages. The lower side on this figure is the center of SuperKEKB main ring.

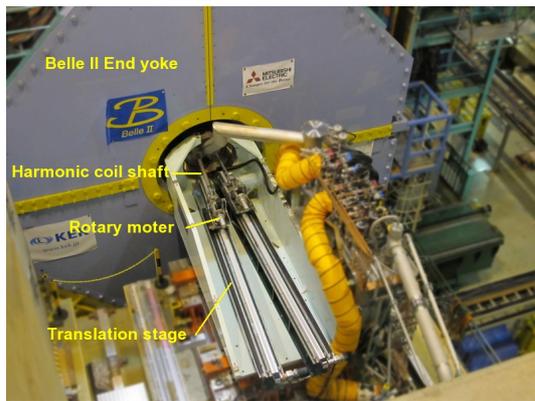


Figure 4: A photograph of the magnetic measurement system taken from the downstream of the electron beam.

function は以下の式で定義される.

$$T = \int_{z_1}^{z_2} G(z) dz / I \quad (2)$$

z_1, z_2 はハーモニックコイルのビーム軸方向の IP 側と反 IP 側端部の位置である. G, I はそれぞれ 4 極磁

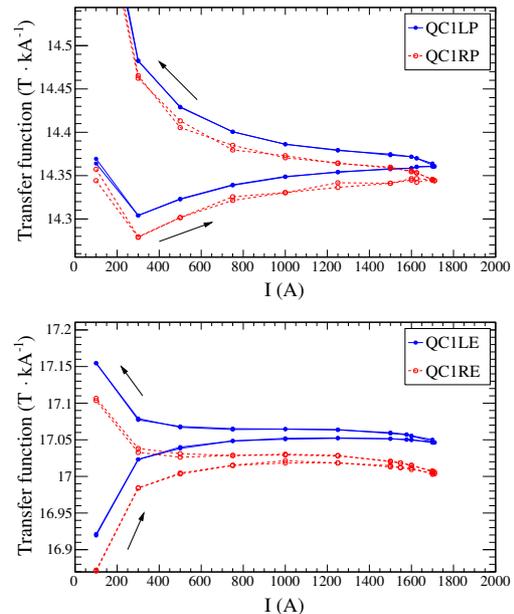


Figure 5: Integrated transfer function of quadrupole term at different current level in steady-state. Top: QC1LP (solid curve) and QC1RP (dashed curve). Bottom: QC1LE (solid curve) and QC1RE (dashed curve).

場勾配, 励磁電流である.

QC1P は運転電流 (1625 A) 付近において 0.2%, QC1E は (運転電流: 1577 A) 0.04% 程度の up ramp と down ramp に違いが見られた. QC1E は外側にヨークが取り付けられているので電流値が 1600 A を越えるとヨークの磁気飽和の影響が見られるが, 問題のない大きさである.

SuperKEKB のメインリングではビームエネルギーは一定で, 励磁電流を AC 的に変化させないので, ヒステリシス損失について考慮する必要はないが, ビーム調整の時に四極電磁石の電流を変化させる場合は同じ電流変化の向きで調整する等の注意が必要である.

4.2 誤差多極磁場成分

ロングコイルで測定された各電磁石の多極磁場成分を Fig. 6 に示す. 各プロットの横軸は多極磁場成分の次数, 縦軸は多極磁場の大きさである. 対応する電磁石, 測定電流値, 参照半径は各プロット内に表示

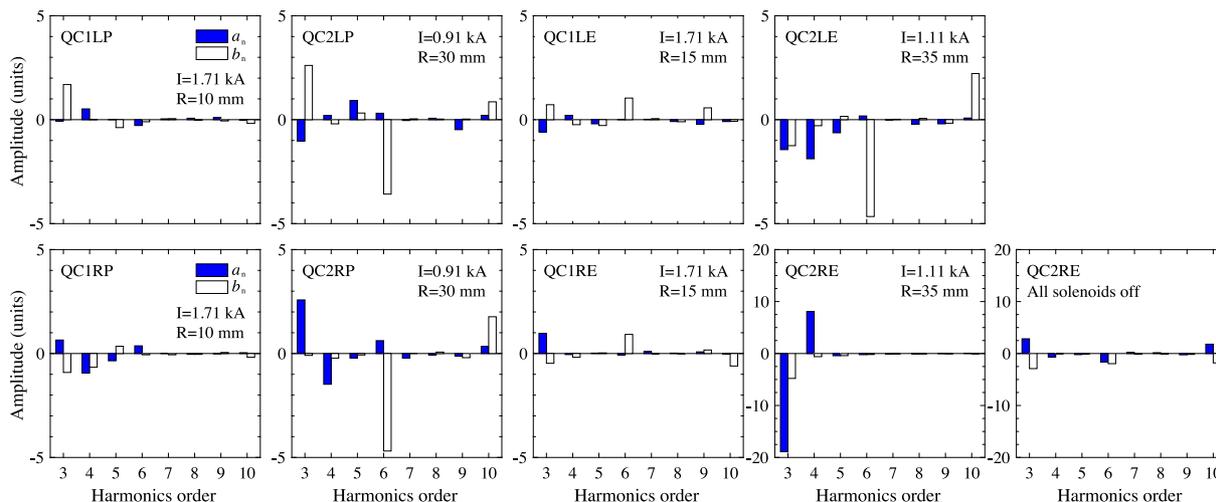


Figure 6: Measured integrated harmonics in the body of the quadrupole magnets. The Belle II and the all compensation solenoid are energized except for the plot at the lower right plot for QC2RE; this data is obtained when no solenoid is not energized. Filled bars are skew components and white bars are normal components.

されている。上段のプロットがQCS-L, 下段がQCS-Rクライオスタットに格納されている四極電磁石である。

QC1 電磁石について $n \leq 10$ の多極磁場成分は (QC1LP を除き) 1 unit 以下となっている。QC1LP については $n = 3$ のみが 1 unit を少し越える程度でその他の成分は 1 unit 以下となっている。この $n = 3$ の誤差磁場は補正電磁石によって十分補正可能な大きさである。ビーム光学から要請される誤差磁場の大きさは QC1 については 1 unit 以下であり、この要請は満たされている。

QC2 については QC2RE を除いて多極磁場成分は 5 units 以下となっている。QC2RE については $n = 3, 4$ において大きな誤差磁場が発生している。ソレノイド電流をすべて切った時の QC2RE の多極磁場成分を下段右端に示した。ソレノイドを切るとこの誤差磁場が 2 units のレベルまで減少していることがわかる。

4.3 軸方向プロファイル

ビーム軸方向に沿ってショートコイルで測定した磁場プロファイルを Fig. 7 に示す。Figure 7-a), b), c), d) はそれぞれ、次数 $n = 2, 3, 4, 6$ 各成分のビーム軸 (HER) に沿ったプロファイルである。十字、丸及び一点鎖線はそれぞれ、測定値のスキュー成分、ノーマル成分、そして計算値のノーマル成分である。計算はソレノイド磁場なし、QC1LE ヨーク有りの 3D モデルの計算値 (OPERA3D/TOSCA) である。ここでハーモニクコイル長は 20 mm なので、計算値は 20 mm の移動平均値をプロットした。

4 極成分のプロファイルは測定値と計算値は良く合っている。磁石端部において 6 極, 8 極, 12 極成分の誤差磁場 (いずれも 10 units 程度) が発生しているがビームに影響を与える大きさではない。

Figure 8 に測定で得られた QC2RE の軸方向プロファイルを示す。十字、丸のマークはそれぞれソレ

ノイド励磁時の Skew, Normal 成分であり、X 及び三角のマークはそれぞれすべてのソレノイドを励磁しない時の Skew, Normal 成分のプロファイルを示す。また、プロットの下に同じ z 方向の位置に QC2RE が組込まれている鉄製支持ブロックを示す。

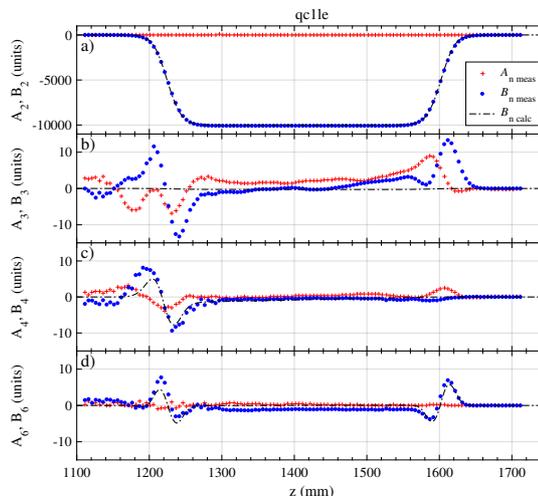


Figure 7: The axial profiles of the QC1LE quadrupole magnet. Cross and circle markers indicate measured skew and normal components, respectively, and dot-dashed curve is calculated normal components. a): Quadrupole components as a function of the axial distance from IP. b): Sextupole components. c): Octupole components. d): Dodecapole components.

ソレノイド励磁時のプロファイルには $z = 3370$ mm, $z = 2620$ mm に大きなピークが見られる。一方ソレノイドを励磁していない時はこのピークが見られない。またこれらのピーク的位置はブロックの端部に相当しており、このことからこの大きな誤

差磁場は鉄ブロックに流れ込んだソレノイド磁場が端部にて発生させたものであると推定される。

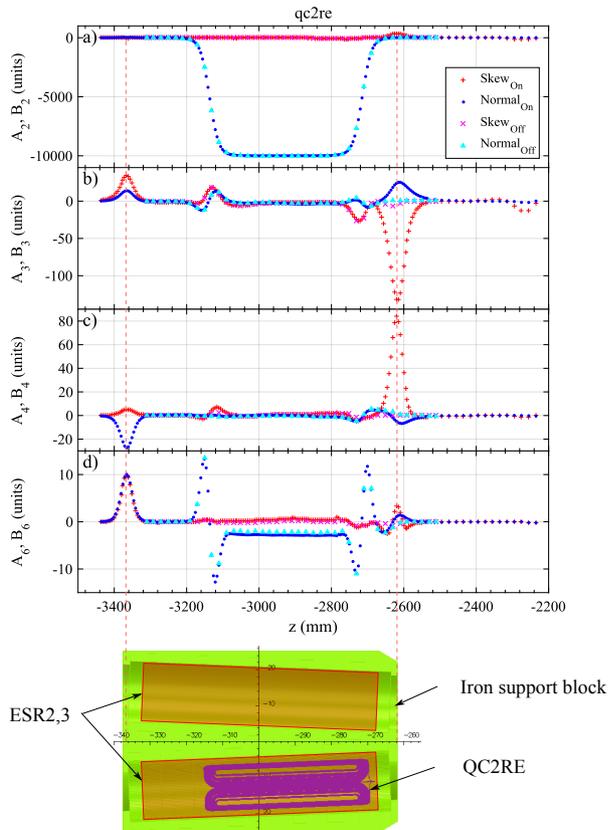


Figure 8: The axial profiles of QC2RE quadrupole magnet. The iron support block is indicated at a same scale and position in the axial direction.

5. まとめ

IRにおいて、Belle II ソレノイド及び QCS 補償ソレノイド励磁下での QCS 超伝導四極電磁石の磁場測定をハーモニックコイルで実施した。

DC 電流ループ測定では QC1LP/RP) は 0.2%, QC1LE(RE) は 0.04% のヒステリシスが見られた。また QC1LE ではヨークの磁気的な飽和により、Transfer function が若干減少していたが問題のないレベルである。

積分多極磁場成分はビーム運転に影響の大きい QC1 についてはすべて目標とした 1 unit レベル以下であった。

QC2 電磁石については許容多極成分 ($n = 6$) 以外は 1~2 units のレベルにあり、 $n = 6$ の成分も 5 units 以下であった。一方 QC2RE では $n = 3, 4$ の多極成分が 10~20 units の高いレベルにあることがわかった。軸方向プロファイルの測定結果より、QC2RE が組込まれている鉄製の支持ブロックの端部で発生していることが分かった。この誤差磁場のビームに対する影響はまだ不明だが、影響が大きければ QC1E(誤差

磁場が小さいので補正電流量に余裕がある) 用の補正電磁石で補正を試みる事が考えられている。

謝辞

本測定の遂行にあたり三菱システムサービスの田中氏、白石氏、日立プラントメカニクスの遠藤氏には高度な技術的支援を頂いた。三立機械設計の青木氏には測定装置の CAD 図面を作成して頂いた。磁場測定用 EPICS/CSS システムは関東情報サービスの浅野氏が作成した。また KEK の増澤氏、川本氏、大澤氏にはレーザートラッカーを用いて測定器の測定を実施して頂いた。KEK の大木氏、中村氏には励磁電源の操作、トラブルへの対応について感謝致します。

参考文献

- [1] N. Ohuchi *et al.*, "Final-focus superconducting magnets for SuperKEKB," in *Procs. of IPAC'18*, Vancouver, BC, Canada, May. 2018, p. TUZGBE2.
- [2] Y. Ohnishi, "Report on SuperKEKB phase 2 commissioning," in *Procs. of IPAC'18*, Vancouver, BC, Canada, May. 2018, p. MOXGB1.
- [3] B. Parker *et al.*, "The SuperKEKB Interaction Region Corrector Magnets," in *Procs. of IPAC'16*, Busan, Korea, 2016, p. TUPMB041.
- [4] Y. Ohnishi *et al.*, *Progr. Theor. Exp. Phys.*, vol. 2013, no. 3, p. 03A011, Mar. 2013.
- [5] X. Wang *et al.*, "Superconducting magnet system for the interaction region of SuperKEKB - Quench protection and solenoid field of superconducting solenoid -", 第 15 回日本加速器学会年会, 長岡, 2018 年 8 月, p. THP071.
- [6] Y. Arimoto *et al.*, "Magnetic Measurement for Superconducting-Quadrupole-Magnets of Final-Focus System for SuperKEKB," in *Procs. of IPAC'16*, Busan, Korea, 2016, p. THPOR004.
- [7] N. Ohuchi *et al.*, "Design and Construction of the SuperKEKB QC1 Final Focus Superconducting Magnets," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 25, no. 3, p. 4001204, 2015.
- [8] N. Ohuchi *et al.*, "Design and construction of the QC2 superconducting magnets in the SuperKEKB IR," in *Procs. of IPAC'16*, Busan, Korea, 2016, p. TUPMB033.
- [9] R. Meinke, P. Schmueser, and Y. Zhao, "Methods of harmonics measurements in the superconducting HERA magnets and analysis of systematic errors," DESY, Tech. Rep., 1991.
- [10] N. Ohuchi *et al.*, "Design of the superconducting magnet system for the SuperKEKB interaction region," in *Procs. of NA-PAC*, Pasadena, California, Sep. 2013, p. 759.
- [11] A. K. Jain, *CERN-98-05*. CERN, 1988, ch. "Harmonic coils", pp. 175-217.
- [12] K. Asano *et al.*, "Development of magnetic field measurement control software system of superconducting final focus quadrupole magnets for SuperKEKB using EPICS," 第 13 回日本加速器学会年会, 千葉, 2016 年 8 月, p. TUP089.
- [13] 大木俊征, 中村衆, "SuperKEKB 電磁石電源 -高安定度電源の開発-, " *低温工学*, vol. 53, no. 3, pp. 146-153, 2018.