

SuperKEKB ビーム最終集束用超伝導 4 極電磁石の磁場時間変化測定 TIME DECAY MAGNETIC FIELD MEASUREMENT OF SuperKEKB BEAM FINAL FOCUS SUPERCONDUCTING QUADRUPOLE MAGNETS

有本靖 ^{*,A)}, 大木俊征 ^{A)}, 大内徳人 ^{A)}
Yasushi Arimoto ^{*,A)}, Toshiyuki Oki ^{A)}, Norihito Ohuchi ^{A)}
^{A)} KEK

Abstract

SuperKEKB, which is currently in operation at the KEK Tsukuba campus, is operated by squeezing the electron and positron beams at the interaction point (IP) to $\beta_y^* = 1$ mm and $\beta_x^* = 60$ mm. Eight superconducting (SC) quadrupole magnets squeeze the two beams at IP. When the SC quadrupole magnets were re-energized, we observed a change of vertical tune for the positron ring; we assumed that the strength of the quadrupole field varied over a long period. In order to verify this assumption, we performed the magnetic field measurements using an R&D magnet and a prototype magnet. They have almost the same magnet parameters as the SC quadrupole magnets installed into the interaction region. As a result, we found that the magnets exhibited long-term drift, and the variation is in the same order to explain the drift of vertical tune for LER.

1. はじめに

SuperKEKB [1] は 2018 年 3 月 19 日からビーム運転を開始し、2022 年 6 月 22 日までの運転において、衝突点での電子・陽電子の β_y^*/β_x^* を 0.8 mm/60 mm まで絞り込み、ピークルミノシティとして $4.7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を達成している。

SuperKEKB ではチューンはリング内の常伝導四極磁石を用いたフィードバックシステムによって一定値に制御されている。またリアルタイムで、ラティスマデルと電磁石の運転電流から求められるモデルチューンをモニターしている。このシステムにより、ビーム最終集束用超伝導 4 極電磁石 (QCS) [2] の再励磁後、数日にわたる鉛直方向のモデルチューンの変化が観測された。このためリング内に β ビートが発生していた。

これは QCS の超伝導四極磁石の時間的な磁場変動によるものと推察された。他の研究所の加速器、Tevatron [3] や、DESY [4]、RHIC [5] においても超伝導磁石磁場の時間変化が観測されている。この磁場の変化は超伝導体内の磁束のクリープによって引き起こされている。

我々はビームラインに設置されている 4 極電磁石 QC1P/QC1E とほぼ同じ磁石パラメータを持つ QC1P R&D 機と QC1E プロトタイプ機 [6] を用いてビーム運転電流で長時間の磁場測定を行った。また、この結果とこれまで他の加速器用超伝導電磁石で調べられてきた超伝導体内での励磁による磁化変化を参考にし、ビーム運転中に磁場変化が極めて小さくなる励磁の方法を提案し、その効果を磁場測定で確認した。本論文では、以上述べた SuperKEKB ビーム最終集束用超伝導 4 極電磁石 R&D 機、プロトタイプ機を用いた磁場測定結果について報告する。

2. 運転中の超伝導四極電磁石再励磁後のモデルチューンの変化

Figure 1 に、2021 年 11 月 SuperKEKB 運転時のビーム電流、鉛直方向のチューンを示す。Figure 1-(a) は蓄積電流値であり、青色、赤色はそれぞれ電子リング (HER)、陽電子リング (LER) の蓄積電流値を示している。Figure 1-(b) 及び-(c) はそれぞれ HER 及び LER の鉛直方向を示している。紺色のプロットは測定値、橙色はモデルチューンを表わしている。陽電子、電子ビームともに鉛直方向のモデルチューンが時間とともにゆっくり変化していることがわかる。この変化は、最終的には光学補正によって修正される。これらの現象は、2021 年 11 月 1 日午前 6 時 14 分に発生した地震による、超伝導電磁石電流遮断・再励磁 (午前 10 時 31 分) 後のビーム運転再開後から 11 月 8 日加速器メンテナンス間のビーム運転において顕著に観測された。11 月 1 日ビーム運転再開時、光学測定・補正が行われ LER/HER の鉛直チューンの設定値は 46.598/43.583 であるが、11 月 8 日の 46.560/43.569 は測定値に戻されている。

3. 試験用超伝導 4 極電磁石 QC1 と磁場測定装置

3.1 試験用超伝導 4 極電磁石 QC1

ビームライン上に設置された超伝導 4 極電磁石の磁場特性を評価するために、陽電子ビームライン用 QC1P の R&D 機と電子ビームライン用 QC1E プロトタイプ機を用いた。また、実機のビーム運転では QC1P は Belle ソレノイド磁場と補正超伝導ソレノイド磁場の合成磁場中で励磁されることから、QC1P R&D 機を長さ 634.5 mm、コイル内径 190 mm の超伝導ソレノイド磁石が発生する 2.5 T の磁場の中で励磁・磁場測定を行った。QC1P R&D 機と QC1E プロトタイプ機の磁石パラメータを Table 1 にまとめた。QC1P R&D 機と QC1E プロトタイプ機は、現在ビーム運転に使用している実機電磁石とほぼ同じ磁石パラメータをもち、今回の主磁場成分 (4 極磁場) の励磁後の時間とともに変化する磁場を評価するには適してい

* yasushi.arimoto@kek.jp

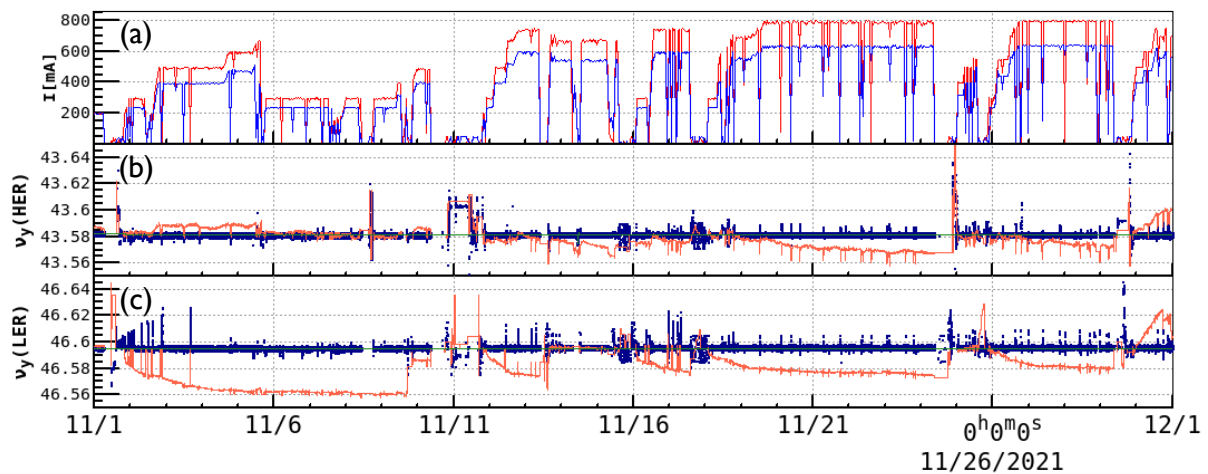


Figure 1: SuperKEKB operation status on Nov. 2021. (a) Stored current for HER (blue) and LER (red). (b) Vertical tune for HER. (c) Vertical tune for LER. In the trend graphs of the tunes, the points in dark blue are the measured tunes, and the orange lines are the model tunes.

る。使用した QC1P R&D 機と QC1E プロトタイプの写真を見せ、Fig. 2 と Fig. 3 に示した。QC1P R&D 機は、磁性体ヨークを超伝導コイル外周部に持たない 4 極電磁石であるのに対し、QC1E プロトタイプにはヨーク (鉄) が組付けられている。

Table 1: Main Parameters of QC1P R&D and QC1E Prototype Magnet

		QC1P R&D	QC1E Prot.
Design field gradient	T/m	76.37	91.53
Design current	A	1800	2000
Maximum field in coil	T	4.6	3.5
Load line ratio at 4.2 K	%	72	73
Double layer coils:			
Number of turns		25	34
Inner/outer radius	mm	25.0/30.4	33.0/38.4
Inner/outer length	mm	344/362	401/397
Magnetic yoke:			
Inner/outer radius	mm	None	47/70
Magnet length:			
Mechanical length	mm	409.3	455.4
Effective length	mm	333.6	373.1

3.2 磁場測定装置と測定システム

磁場測定は QC1 超伝導 4 極電磁石の実機に使用されたハーモニックコイル (Fig. 4) [7] を用いた。ハーモニックコイルは、複数のコイルから構成されており、 $2n$ 極 (n は整数) 磁場測定用タンジェンシャルコイル 1 台 (T)、2 極磁場測定用コイル 3 台 (D0, D1, D2)、4 極磁場測定用コイル 3 台 (Q0, Q1, Q2) から構成されている。多極磁場を高精度に測定するため、T コイルには D0 コイル、Q0 コイルによるアナログバックリングを施した。

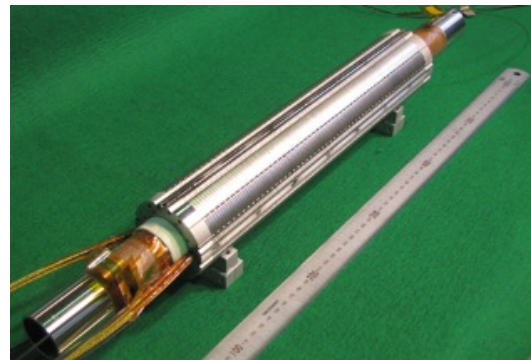


Figure 2: The photograph of the QC1P R&D magnet.

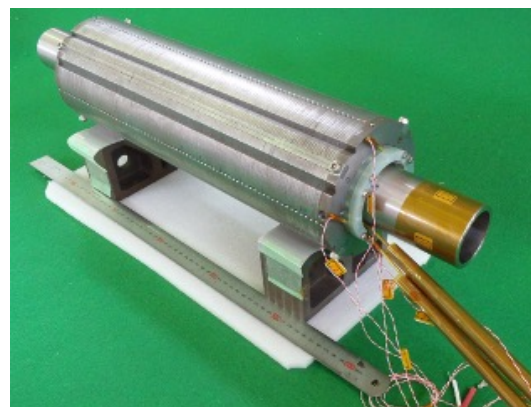


Figure 3: The photograph of the QC1E prototype magnet.

4 極磁場強度の時間変化は Q2 コイルを使って測定した。Q2 コイルは、シリンダー上でのコイル開き角度 90 度、ターン数 10、半径 12.0 mm のコイルをボビンの円周方向に 4 個配置したもので、4 極磁場に最も高い感度を持っている。ハーモニックコイル長は 600 mm である。またこれらのコイルは G10 製のボビンに巻線されている。

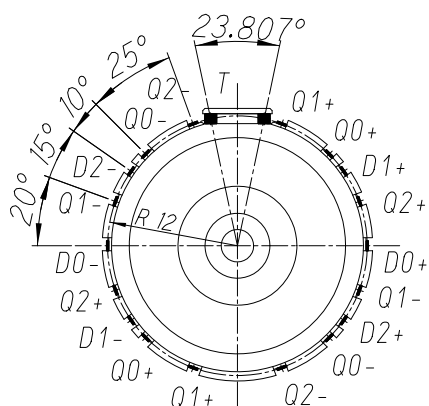


Figure 4: The cross section of the harmonic coil.

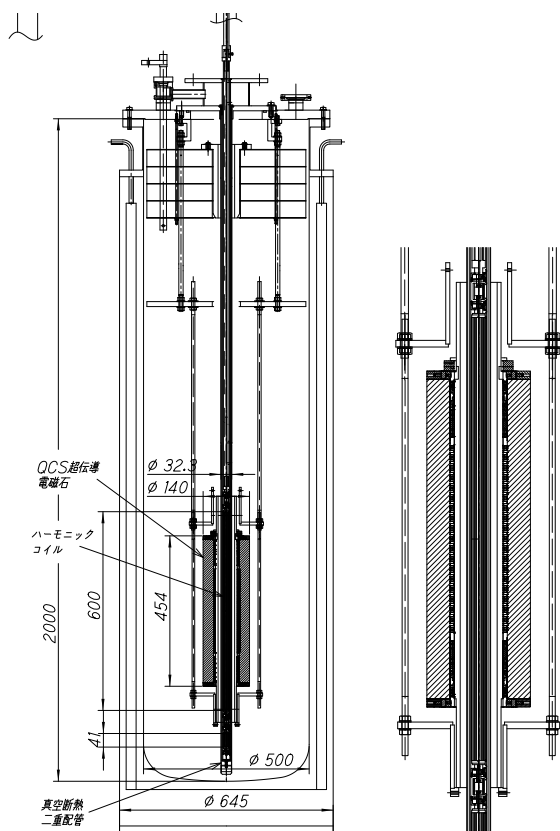


Figure 5: The cross section of measurement system with the cryostat (left). The enlarged cross-sectional view of the superconducting-quadrupole magnet (right).

Figure 5 に磁場測定システムと 4 極電磁石を組込んだ縦型クライオスタットを示す。超伝導 4 極電磁石は液体ヘリウムで冷却される。4 極磁石ボア内径側には 2 重管が挿入されている。2 重管の内径側は大气であり、ハーモニクコイルが挿入される。2 重管の外径側は液体ヘリウムと接しており、真空層とスーパーインシュレーションによって大气(室温)から断熱されている。また、本磁場測定では 4 極磁場強度の変化を励磁直後の値に対して 100 ppm 以下の精度で測定する必要があるため、ハーモニクコイルの温度による変化を極力小さくするために、ハーモニクコイル下端部から温度

制御された窒素ガスを流している。液体ヘリウムはトランスファーチューブを使ってデュワー(容量:1000 L)よりクライオスタットに輸送する。クライオスタットへの充填は 2-3 時間ごとに磁石への通電を保持した状態で行った。

4. 磁場測定結果

4.1 QC1P R&D 機

先に述べたように実機では、QC1P は Belle-II ソレノイドと QCS の補償ソレノイドの合成磁場(約 2.6 T)の中で励磁されている。この状態を今回の測定で再現するために、我々は超伝導ソレノイド電磁石の内筒に QC1P R&D 機を組み込んで磁場測定を行った。このソレノイドの主なパラメーターはコイル内径 190 mm、長さ 635.5 mm、発生磁場 2.5 T @ 261 A である。QC1P R&D 機には、ビームラインに設置された実機の運転電流に近い 1600 A を通電した。励磁速度は 10 A/s である。この試験に使用した四極磁石電源の安定性は 20 ppm 以下である (Fig. 6)。

Figure 7 の左図はソレノイドを励磁した場合(黒丸)とソレノイドを励磁しなかった場合(赤い四角)の四極磁場成分の時間依存である。縦軸の値 y は四極磁場成分の強度を $C_2(t)$ 、電流値を $I(t)$ 、プロットの最後の時間を t_f とすると、

$$C'_2(t) = C_2(t)/I(t), \quad (1)$$

$$C'_2(t_f) = C_2(t_f)/I(t_f), \quad (2)$$

$$\Delta C'(t) = C'_2(t) - C'_2(t_f) \quad (3)$$

$$y = \Delta R(t) \equiv \frac{\Delta C'(t)}{C'_2(t_f)}, \quad (4)$$

である。ここで t は励磁を開始した時刻を起点とした経過時間である。どちらの場合も時間とともに変化しているのが分かる。Solenoid on の場合、2 時間で 2 ppm 増えているのが分かる。また、このプロットにより磁場変化は $\ln t$ に対して線形関数で表わされる。これは Flux creep に表わされる特徴的な関数である。測定で得られた C_2 にはハーモニクコイルの温度による膨張の補正もかけている。温度はハーモニクコイルの抵抗値から見積り、20°C の値に換算している。各プロットに示されている帯の幅はボビンの熱膨張係数の不確か性による幅である。

また Fig. 7 右図はソレノイドを励磁し、励磁パターンを up ramp と down ramp にした場合の四極磁場の時間変化を表わしている。縦軸の y の値は以下で定義した。

$$C'_{2DR}(t_f) = C_{2DR}(t_f)/I_{DR}(t_f), \quad (5)$$

$$\Delta C'(t) = C'_2(t) - C'_{2DR}(t_f) \quad (6)$$

$$y = \Delta R(t) \equiv \frac{\Delta C'(t)}{C'_{2DR}(t_f)}, \quad (7)$$

ここで、 $C_{2DR}(t_f)$ 、 $I_{DR}(t_f)$ はそれぞれ、down ramp 時の測定終了時での四極磁場成分の強さ、電磁石電流である。Down ramp の場合、1638.3 A \rightarrow 0 A \rightarrow 1638.3 A \rightarrow 1600 A というパターンで励磁した (Fig. 8)。各電流値で 3 分間保持している。

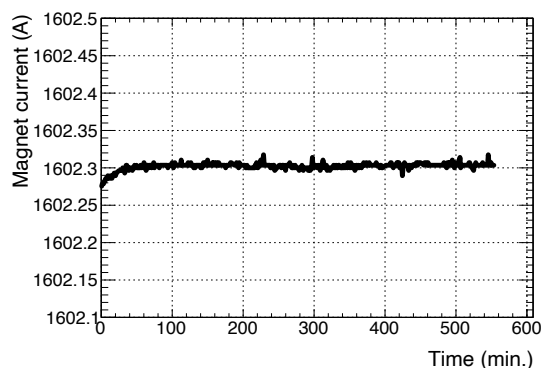


Figure 6: The trend plot of the current of QC1P R&D magnet during the measurement.

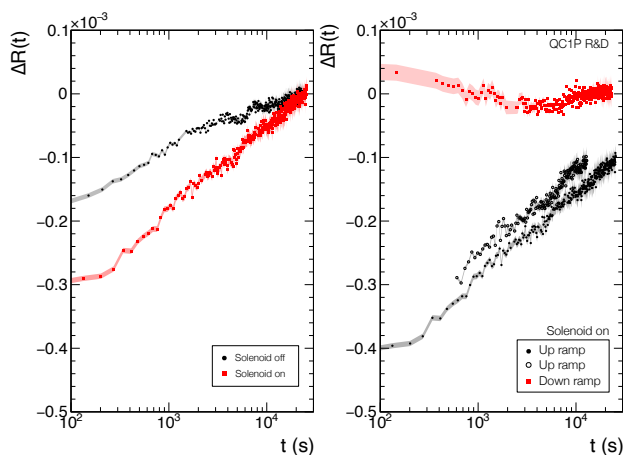


Figure 7: Time dependence of quadrupole field for QC1P R&D magnet. The left plot is comparing with data obtained by solenoid-off and -on. The shaded areas are the uncertainties from the uncertainty of a thermal expansion of the harmonic-coil bobbin. Refer to the text for meaning of the y-axis. The data for the up-ramp (closed circle) is well represented by $y = 0.55 \times 10^{-4} \ln t - 6.64 \times 10^{-4}$, for the down-ramp (closed square) is represented by $y = 0.0076 \times 10^{-4} \ln t - 0.188 \times 10^{-4}$.

Up ramp では 2 日に分けて、2 回測定を行った。結果は 2 回とも同じ傾きを示しており、時間変化については再現性があることがわかる。ここで、このグラフの関数を以下で定義する。

$$y = a \ln t + b \quad (8)$$

経過時間 t の単位は秒 (s) である。Up ramp 時は $a = 5.5 \times 10^{-5}$ 、down ramp 時は $a = 7.6 \times 10^{-7}$ であり、down ramp によって励磁後の時間変化は大幅に小さくなった、これは超伝導体に発生する磁化のヒステリシスループの位置が down ramp によって、磁化の小さい位置に設定されたためと考えられる。Flux creep は磁化の時間的減衰によるものなので、初期磁化が小さくなった分、磁場の時間変化幅が小さくなったものと推測される。

Figure 8 に示すように、Down ramp するために直前の電流を設定値より少し大きくしているが、この設定値にも最適値がある。我々は Down-ramp 前の通電電流値を

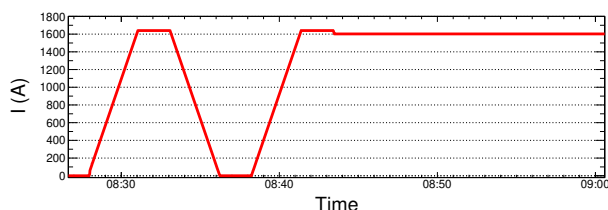


Figure 8: The magnetic cycle of QC1P (down-ramp).

変えた測定も行い最適値を求めた。ここでは最適な通電パターンでの測定結果だけを示している。

4.2 QC1E プロトタイプ機

QC1E プロトタイプ機について同様のことを行った。Figure 9 に結果を示す。Down ramp では 1591 A に上げて、1581 A に設定して測定した。QC1P と同様に up ramp は 2 回測定しており、 2×10^3 s 以降の傾きは 2 回ともほぼ同じ大きさであった。Down ramp では短時間 (2 時間) 測定ではあるが、変化は非常に小さい。Up ramp、down ramp における勾配はそれぞれ $a = 3.2 \times 10^{-5}$ 、 $a = -5.0 \times 10^{-7}$ である。Up ramp での変化率は QC1E は QC1P の半分弱になっている。

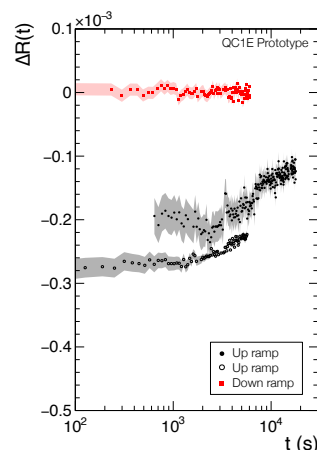


Figure 9: Time dependence of quadrupole field for QC1E prototype magnet. The data for the up-ramp (closed circle) is well represented by $y = 0.32 \times 10^{-4} \ln t - 4.34 \times 10^{-4}$, for the down-ramp (closed square) is represented by $y = -0.0050 \times 10^{-4} \ln t - 0.044 \times 10^{-4}$.

5. チューンへの換算

ここで、磁場変化率をチューンの変化に換算する。リング加速器では Quadrupole 磁場に変化が生じた場合のチューンシフトは以下で表わされる。

$$\Delta v = \frac{\beta_Q}{4\pi} \int \Delta K_1(s) ds \quad (9)$$

ここで、 β_Q 、 K_1 、 s はそれぞれ、4 極磁石での β 関数、 K_1 は四極磁場の強さ、 s はビーム軸に沿った位置である。ここで、 β_Q の s に沿った変化量は、4 極磁石の磁場領域の範囲では十分小さいとして定数とおいた。

SuperKEKB でのモデルチューンの変化は LER に顕著に見られたので、LER に設置されている QCIP についての値を考える。Figure 7, 9 に示した値は

$$\Delta R(t) = \frac{\Delta C'(t)}{C'_{2DR}(t_f)} = \frac{\int \Delta K_1(s) ds}{\int K_1(s) ds} \quad (10)$$

なので、

$$\Delta v = \frac{\beta_Q}{4\pi} \Delta R(t) \int K_1(s) ds \quad (11)$$

と表わされる。ここで 1 台の QCIP¹ は

$$\int K_1(s) ds = 1.72 \text{ m}^{-1} \quad (12)$$

である。QCIP の位置では $\beta_{QCIP} = 780 \text{ m}$ なので、

$$\Delta v = \frac{780 \times 1.72}{4 \times 3.14} \Delta R(t) \quad (13)$$

$$\sim 100 \Delta R(t) \quad (14)$$

となる。ここでモデルチューンと磁場の変化率を 100 倍してチューンの変化に換算してプロットしたものを Fig. 10 に示す。十字のプロットは QCS を up ramp で設定した時の LER の model tune の値、クロス (×) のプロットは down ramp で設定した時の LER の model tune の値である。いずれもビームのチューンは一定値にフィードバックされている。磁場測定では、8 時間以上の測定はできていないが、磁場測定データを外挿すると、up ramp の時については磁場の変動とモデルチューンの変動率はオーダーでは一致している。また、モデルチューンにはスパイクが見られるが、これはビーム遮断によるものである。

Down ramp により、磁場変動を抑えることで、モデルチューンのドリフトは低減されていることが分かる。これまで QCS は up ramp (0 A から設定値にダイレクトに設定) で立ち上げていたが、今後、立ち上げ時は (設定電流より少し高めに通電した後に) down ramp で運転電流値に設定することにした。

6. まとめ

SuperKEKB では QCS の立ち上げ時にモデルチューンのドリフトが発生していた。この原因として、QCS の超伝導四極磁石の時間変動が疑われた。我々はほぼ実機と同じ QCIP R&D 磁石と、QCIE プロトタイプ磁石を用いて最大 8 時間にわたり、磁場の時間変動を測定した。その結果、up-ramp の励磁方法では、QCIP は 8 時間で 3×10^{-4} の四極磁場成分が変動することが分かった。この変化は $\Delta R(t) \propto \ln(t)$ の振舞いをしており、flux creep に起因することが推察された。この磁場変動から予測される鉛直方向のチューンの変化量はこれはモデルチューンの変化量とオーダー的に同じであった。また設定電流

¹ LER (陽電子リング) には IP の上流側と下流側に 2 台の QCIP (QC1RP, QC1LP) が設置されている。

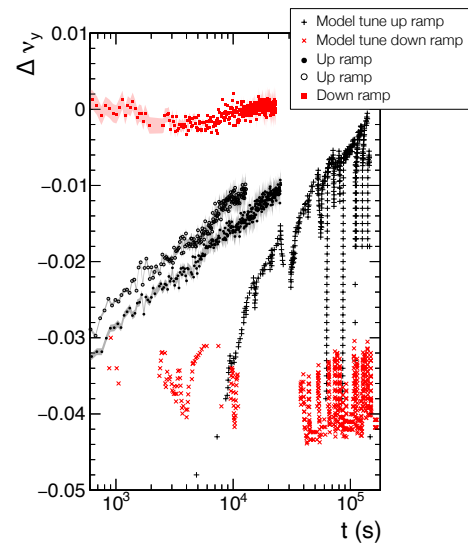


Figure 10: Time dependence of the model tunes of LER (+, ×) and the tune variations estimated from the measured quadrupole fields of QCIP-R&D magnet (○, ●, and ■).

値より少し高めに通電した後に、down ramp で設定すると四極磁場の長期変動は抑えられることが分かった。実際の運転において、QCS の四極磁石は down ramp で設定することで QCS の磁場変動によるモデルチューンの変化を抑えることができた。

謝辞

この実験にあたり、技術支援を頂いた三菱電機システムサービスの白石氏に感謝します。

参考文献

- [1] H. Koiso, "Colliders for B-factories," *Conf. Proc. C*, vol. 110904, pp. 1931–1935, 2011.
- [2] N. Ohuchi *et al.*, "SuperKEKB beam final focus superconducting magnet system," *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. Sect. A*, vol. 1021, p. 165930, 2022.
- [3] D. Herrup *et al.*, "Time variations of fields in superconducting magnets and their effects on accelerators," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 25, no. 2, pp. 1643–1646, 1989.
- [4] H. Brück *et al.*, "Time dependence of persistent current effects in the superconducting HERA magnets," in *11th International Conference on Magnet Technology (MT-11)*, vol. 1, Dordrecht, 1990, pp. 141–146.
- [5] C. Liu *et al.*, "Mitigation of persistent current effects in the RHIC superconducting magnets," *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 22, p. 111003, Nov 2019.
- [6] N. Ohuchi *et al.*, "Design and construction of the proto-type quadrupole magnets for the SuperKEKB interaction region," in *Procs. of NA-PAC*, Pasadena, CA USA, 2013, p. 1232.
- [7] Y. Arimoto *et al.*, "Superconducting magnet system for the interaction region of SuperKEKB - magnetic measurement of quadrupole magnets with harmonic coils -," in *Procs. of the 15th Ann. Meet. of Part. Acc. Soc. of Japan*, Nagaoka, Japan, Aug. 2018, THP065.