

## SuperKEKB におけるスキュー六極磁場の試験導入 SuperKEKB TEST OPERATION WITH SKEW SEXTUPOLE MAGNETS

中村衆<sup>#,A)</sup>, 増澤美佳<sup>A)</sup>, 菅原龍平<sup>B)</sup>, 植木竜一<sup>A)</sup>, 川本崇<sup>A)</sup>, 大見和史<sup>A)</sup>, Zhou Demin<sup>A)</sup>, 森田昭夫<sup>A)</sup>,  
大西幸喜<sup>A)</sup>, 杉本寛<sup>A)</sup>, 小磯晴代<sup>A)</sup>

Shu Nakamura<sup>#,A)</sup>, Mika Masuzawa<sup>A)</sup>, Ryuhei Sugahara<sup>B)</sup>, Ryuichi Ueki<sup>A)</sup>, Takashi Kawamoto<sup>A)</sup>, Kazuhito Ohmi<sup>A)</sup>,  
Demin Zhou<sup>A)</sup>, Akio Morita<sup>A)</sup>, Yukiyoishi Ohnishi<sup>A)</sup>, Hiroshi Sugimoto<sup>A)</sup>, Haruyo Koiso<sup>A)</sup>

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

<sup>B)</sup> Professor Emeritus, KEK, High Energy Accelerator Research Organization

### Abstract

SuperKEKB is an asymmetric-energy electron-positron collider aiming at the integrated luminosity of 50 ab<sup>-1</sup> as the successor to KEKB. To achieve this goal, SuperKEKB adopted the “nano-beam scheme,” in which two low emittance beams collide at the interaction point (IP) with a large crossing angle. To realize such low emittance beams at IP, Chromatic x-y coupling at IP has to be corrected frequently. In SuperKEKB positron ring (LER), twenty-four rotating sextupole magnets were installed to generate skew sextupole magnetic fields for the chromatic x-y coupling correction. In December 2021, a few setups of tilting angles of the 24 rotating sextupole magnets varied the chromatic x-y coupling parameters. It was found that the vertical emittance growth at the primary and secondary synchro-beta resonance lines can be controlled by rolling the sextupole magnets. The tilting system of the rotating sextupole magnet is described, and the results of the beam study are summarized in this report.

### 1. はじめに

SuperKEKB は KEKB で達成した積分ミノシティの約 50 倍、50ab<sup>-1</sup> を目標とし、弱い相互作用を精密に観測することで標準理論を超えた物理を見つけることを目的として提案された[1]。SuperKEKB では、KEKB のピークミノシティの数十倍を目指しているため、衝突点のビームサイズをより小さく、周回するビーム強度をより強くしなければならぬ。そのためには、加速器のビーム光学パラメータを精密に調整する必要があることは言うまでもない。ここでは、ビーム光学パラメータを精密に操作するための方法の一つとして、SuperKEKB の陽電子リング (LER) に導入した回転六極電磁石によるスキュー六極磁場の生成と、それによるビーム試験の結果、および電子リング (HER) に設置している既設スキュー六極電磁石によるビーム試験の結果を報告する。

### 2. LER の回転六極電磁石

#### 2.1 六極電磁石を回転させた理由

KEKB において、LER にはスキュー六極電磁石が 4 ペア (8 台) 設置されていた[2]。SuperKEKB では、六極電磁石を ±30° の範囲で回転させることによって、六極磁場とスキュー六極磁場の成分比を変えることで、衝突点 (IP) での水平垂直カップリングの運動量依存性 (Chromatic x-y coupling) の補正を行う方式を採用した。このため、IP を挟んで 12 台ずつ、計 24 台の六極電磁石の架台を回転機構のついた新しい架台に変更している。

SuperKEKB では LER において、IP での Chromatic x-y coupling が大きいと想定されていたため、KEKB のときよりも多くのスキュー六極電磁石が必要となった。また、

<sup>#</sup> shu.nakamura@kek.jp

おなじく LER において、ダイナミックアパーチャーによるビームライフタイムの制限の問題が HER よりも厳しいと考えられて貯め、補正に用いるスキュー六極電磁石のペアは入れ子にならない配置[3]を取る必要があった。超伝導電磁石であれば、六極磁場とスキュー六極磁場とを同じ場所で発生させることが容易であるが、製造コストやランニングコストが高価である。一方、常伝導の六極電磁石とスキュー六極電磁石を個別に用意した場合、必要な磁場強度を満たす電磁石を IP 近傍に新たに設置するにはスペースが無過ぎた。

そのため、KEKB で使用した既存の六極電磁石を高精度に回転させ、補正に必要なスキュー六極成分を発生させる方法を選択した。この方法であれば、狭いスペースに対応した新しいスキュー六極電磁石と、そのスキュー六極電磁石用の新しい電源を製作する必要がなく、また運転コストも従来と変わらない。

#### 2.2 回転機構と回転軸の調整

回転させる六極電磁石の重量は約 700 kg であるため、回転させるために十分にパワーのあるパルスモーターとそれに耐えるギアを選定した。モーターはベース架台に固定して直線型ウォームギアを回転させ、そのウォームギアを回転架台のヘリカルギアにかみ合わせることで、回転架台に固定した電磁石を回転させている。このほか、ベース架台の四隅に垂直方向を支持する回転ローラーを、またそれ以外に回転方向と直角の水平方向を保持するための回転ローラーを組み込んでいる[4]。

回転架台に固定する六極電磁石は既存の六極電磁石を用いた。そのままでは回転架台に固定して回転させる際に干渉する箇所があったため、電力ケーブルの接続ブスバーや冷却水配管の取り回しに手を加えた。

電磁石のブスバーに接続する電力ケーブル (最大使用電流 425 A) は、電磁石直近の中継端子盤で、太くてかたい電力ケーブルから柔らかく可とう性のある電線に

変換して接続した。電磁石の冷却水は、冷却水配管マニホールドを電磁石と一体に回転するようにし、そこへの接続は柔軟性のある金属網目被覆のもので行った。このような改造を行って回転架台と共に LER に据え付けた写真を Fig. 1 に示す。電磁石の左側に可とう性のある白い半透明の被覆の電線と、金属網目の冷却水配管を見ることができる。

六極電磁石の中心軸を回転軸に合わせる調整作業はビームラインへの設置前に行った。まず、電磁石の両端面で、対抗する磁極間隙に直径 0.1 mm のベリリウム・

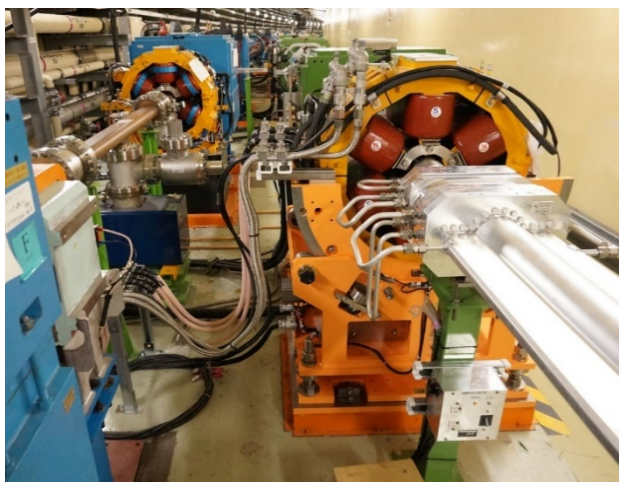


Figure 1: A rotating sextupole magnet installed in LER.

銅合金のワイヤーを張り、その交点を磁極中心とした。次に、架台上面が水平となるように調整した回転架台に六極電磁石をのせ、六極電磁石自身も水平となるように支持部のボルトを調整する。そして、セオドライト(ライカ社製 E2)を、その光軸が電磁石の両端面のワイヤーの交点を通るように設置する。その後、回転架台を $+30^\circ$ 、 $-30^\circ$  に回転させ、それぞれでワイヤー交点の座標を計測する。最後に回転架台の調整ボルトを使って、ワイヤー交点の座標が回転軸に合うように調整する、という一連の調整を数回繰り返すことによって、約 0.1 mm 以下の精度で各端面の磁極中心を回転軸に合わせることができた。Figure 2 は調整後の磁極中心と回転軸のズレをプロットしたものである。横軸は 24 台の回転六極電磁石に個別に振った番号で、縦軸は各電磁石の調整後のズレ量である。F および B は電磁石端面の前後を表し、X と Y はそれぞれ水平方向と垂直方向を示す。

### 2.3 回転架台の制御

回転架台のパルスモーターの制御は、駆動用のパルス信号が鈍らないように、IP に近い 3 か所のローカル制御室に設置した Programmable Logic Controller (PLC) を介して行った。各回転六極電磁石とローカル制御室との距離は最大で約 200 m である。

回転六極電磁石の設計当初は、ビームが無い状態で非同期制御によって各回転架台の回転制御を行うこととしていた。そのため、各 PLC のラダープログラムはそれぞれ 1 台ずつパルスモーターを駆動する設計となっており、電力線もそれなりの太さのものとなっていた。しかし、

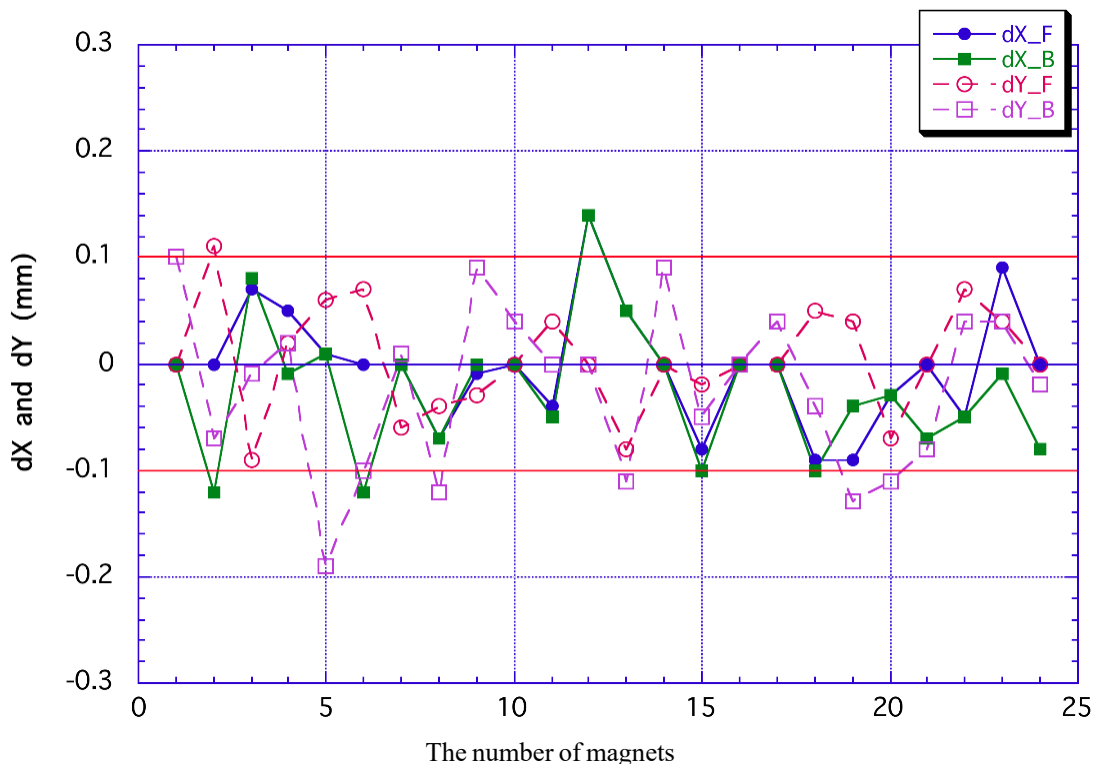


Figure 2: Misalignment between the center axis of the magnets and the center axis of rotation after adjustment.  $dX$  and  $dY$  are the deviations in the X and Y directions when rotated  $\pm 30^\circ$ , respectively. F and B are the front and rear of the magnets, respectively.

ビームコミッションングの進捗によって、ビームを保持した状態ですべての回転六極電磁石を同期して回転させる必要性が高まったため、2020 年秋に制御系の改造を行った。

元々は回転角の精度を重視し、回転時のバックラッシュを除く目的で、回転架台は必ずマイナスの角度に回転する方向でセットすることにした。そのため、ビームを保持した状態では回転角の変更はできない仕様となっていた。この制限を外し、セットする方向のまま回転を止めた場合の角度設定精度を測定したところ、パルスモーターの回転速度を 1/50 (50→1 kpulse/sec) に落とせば、ビーム光学からの要請である 0.1 mrad 以下の確度で設定できることを確認した。実際には、時間短縮のために 10 kpulse/sec で設定したが、蓄積ビーム電流が大きく減少するなどの問題は見られなかった。このほか、回転架台を全台同時に動作させるために、パルスモータードライバへの供給電力を大幅に増加させる必要があり、それに伴った配線の変更を行った。以上の改修を行った結果、24 台の回転六極電磁石を同時に制御することが可能となったが、PLC の仕様から完全な同期制御を保証するには至っていない。

### 3. ビームコミッションングとその結果

2021 年 12 月と 2022 年 3 月にビーム運転で初めて系統的な Chromatic x-y coupling 補正試験を行った。この時は LER のみにビームを蓄積し、IP での垂直方向ベータ関数は 1 mm であった。各回転六極電磁石の回転角は、モデル計算から IP での Chromatic x-y coupling がほぼゼロとなるように設定している。

局所的な x-y coupling を表す量として、XY 結合行列  $R$  を以下のように定義[5,6]する。

$$R = \begin{pmatrix} \mu & 0 & -r_4 & r_2 \\ 0 & \mu & r_3 & -r_1 \\ r_1 & r_2 & \mu & 0 \\ r_3 & r_4 & 0 & \mu \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} u \\ p_u \\ v \\ p_v \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} x \\ p_x \\ y \\ p_y \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\mu^2 + (r_1 r_4 - r_2 r_3) = 1 \quad (3)$$

ここで、 $(x, p_x, y, p_y)$  は通常の物理座標で、 $(u, p_u, v, p_v)$  は XY 結合の無い基準座標である。今回のパラメータサーチは垂直方向への影響が大きい  $r_1$  と  $r_2$  で行った。最初に変更した Chromatic x-y coupling パラメータは  $\partial r_1 / \partial \delta = r_1'$  で、 $\delta = \Delta p / p$  である。モデル計算で求めた補正量を基準として、そこからの差を  $\Delta r_1'$  として、各補正量でチューンスキャンを行い、それぞれの補正量での垂直エミッタンス  $\varepsilon_y$  の変化を観測した。補正量の設定は回転六極電磁石の回転角で行ったが、補正量の変化によって入射効率の低下やビームオプティクスの変化は見られなかった。Figure 3 は LER のチューンダイアグラムで、通常の運転チューンは  $(\nu_x, \nu_y) = (44.525, 46.590)$  付近である。チューンスキャンの図中の矢印の範囲で行っ

た。途中で一次と二次の Synchro-beta coupling 共鳴を横切る。

Figure 4 に  $\Delta r_1' = +1, 0, -1, -2$  のときのチューンスキャンにおける  $\varepsilon_y$  の変化を示す。一次の Synchro-beta coupling 共鳴 ( $\nu_x - \nu_y - \nu_s = n$ ) によるエミッタンス増大を弱めていることがわかる。また、運転チューンに近い、二次の Synchro-beta coupling 共鳴 ( $\nu_x - \nu_y - 2\nu_s = n$ ) によるエミッタンス増大は  $\Delta r_1' = -1$  の時にほぼなくなっている。また、Fig. 5 に  $\Delta r_2' = +0.2, +0.1, 0, -0.05, -0.1$  のときのチューンスキャンの結果を示す。  $\Delta r_1'$  のときと同様に、一次と二次の Synchro-beta coupling 共鳴によるエミッタンス増大を制御できていることがわかる。

また、2022 年 3 月のビーム運転では、HER の Chromatic x-y coupling 補正のビーム試験を行った。この時も HER のみにビームを蓄積し、IP での垂直ベータ関

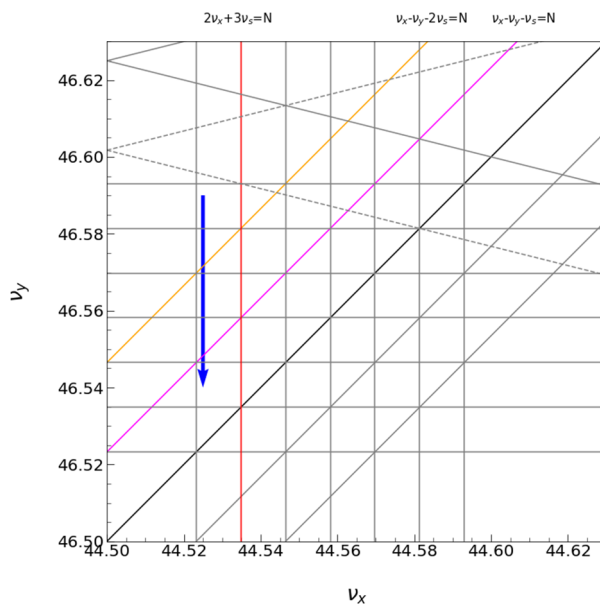


Figure 3: Tune diagram of LER. The tune scan was performed in this range in the direction indicated by the blue arrow. On the way, it crosses the primary and secondary synchro-beta coupling resonances.

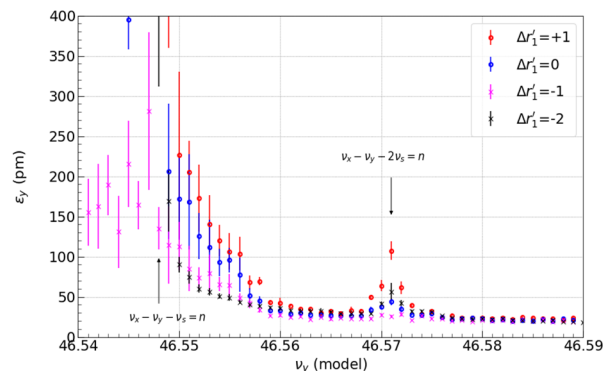


Figure 4: The result of the tune scan with each  $\Delta r_1'$ .

数は 1 mm であった。補正には KEKB で使用したスキュー六極電磁石のうち 8 ペア (16 台) の電磁石が使用可能であったため、それらを用いた。 $\Delta r_2' = 0$  と  $-0.05$  での比較を行った結果、 $\Delta r_2' = -0.05$  で  $\epsilon_y$  の改善が見られた。しかし、スキュー六極電磁石の最大磁場に制限され、それ以上の補正量を設定することはできなかった。

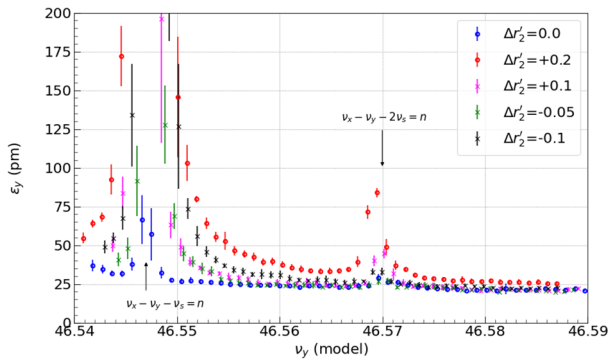


Figure 5: The result of the tune scan with each  $\Delta r_2'$ .

#### 4. まとめと今後の課題

SuperKEKB で LER に導入した回転六極電磁石は、コライダーとして初めて、六極電磁石を回転させてスキュー六極磁場を生成し、Chromatic x-y coupling 補正を行った事例である。既存の六極電磁石を精度よく回転架台に据え付けることによって、磁石の回転によってビーム入射やビーム光学を乱すことなく、任意の補正量を設定することができた。これによって一次と二次の Synchro-beta coupling 共鳴によるエミッタンス増大を制御できることが確認できた。

HER においては、既設のスキュー六極電磁石によって Chromatic x-y coupling 補正試験を行った。既設の電磁石では最大磁場の制限によって十分な補正をすることはできなかったが、LER のように六極電磁石を回転させる必要は無く、既設のスキュー電磁石を適切な磁場の新電磁石に置き換えることで対応できる見込みである。

#### 参考文献

- [1] 赤井和憲, 小磯晴代, “SuperKEKB 加速器”, 加速器 Vol.15 No.4, 2018, pp. 213-220.
- [2] M. Masuzawa *et al.*, “Installation of skew sextupole magnets at kekb”, Proceedings of IPAC10 (2010) 1533-1535.
- [3] H. Koiso *et al.*, “Lattice of the KEKB colliding rings” Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 03A009.
- [4] 中村衆 他, “SuperKEKB における衝突点光学補正用回転六極電磁石の開発とその性能”, 加速器 Vol.19 No.3, 2022, pp. 131-139.
- [5] 船越義裕, “KEKB のルミノシティの最近の進展について”, 加速器 Vol.6 No.3, 2009, pp. 222-230.
- [6] 大西幸喜, “SuperKEKB ナノビーム衝突運転” 加速器 Vol.15 No.4, 2018, pp. 245-252.