

SuperKEKB ダンピングリング磁場測定装置の調整

TUNING OF THE MAGNETIC MEASUREMENT SYSTEM FOR THE SUPERKEKB DAMPING RING

植田猛^{#,A)}, 原田健太郎^{B)}, 菊池光男^{B)}, 多和田正文^{B)}, 江川一美^{B)}, 長橋進也^{B)}

Takeshi Ueda^{#,A)}, Kentaro Harada^{B)}, Mitsuo Kikuchi^{B)}, Masafumi Tawada^{B)}, Kazumi Egawa^{B)}, Shinya Nagahashi^{B)}

^{A)} Nihon Axis Co.,Ltd

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization(KEK)

Abstract

The magnetic measurement system for the positron damping ring of the SuperKEKB was designed and manufactured in 2010. From 2011, the magnetic measurements began. The rotating harmonic coil system for the quadrupole measurements has problem of the low accuracy. In 2012, the shorter harmonic coil of 60cm length was manufactured and the system was reconstructed to fit the shorter coil. Although the accuracy improved with the shorter coil, it did not reach the required value. With the reconstruction of the coil fixing mechanism of the girder, finally the accuracy satisfied the requirements. In this proceedings, we show the struggle to improve the measurement accuracy.

1. はじめに

ハーモニックコイルを用いた 4 極電磁石用磁場測定器は 2011 年に製作され、PF 電源棟に設置された。4 極電磁石の磁場測定の目的は、エンドシムによって 12 極成分を補正することと、4 極製造時の仕様上の製作精度 (80 台のばらつき) が 1.5×10^{-3} 以内であることが達成されているかをチェックすることであった。

当初は巻き数の少ない長さ 1.6m のハーモニックコイルを使って測定していたが、同じ電磁石を再測定した時の再現性や高次の磁場の電流に対する関係などが非常に悪く、実効 4 極磁場の再現性が約 0.1% 程度、高次磁場についてはほとんど測定不能な状態であった。その後、巻き数を増やしたコイルを製作して精度が向上したが、まだまだ不十分であった。そこで、長さを短くした 60cm のハーモニックコイルを製作し、2013 年末に測定器自体の幅を縮める改造を行い、再度測定を開始した。短いコイルで再現性はぎりぎり 4 乗台まで向上したものの、測定開始時の測定値のドリフトなど、原因不明の現象が数多く残ったままだった。その後、電気的なノイズ、測

定環境、電源、電磁石本体など様々な原因を仮定し、調査し、問題があれば改善していくことで、徐々に精度が向上し、最終的にはコイルの回転中心を決める構造を改良したことで目標である精度を達成することができた。ここでは、磁場測定器の約 5 年間にわたる精度向上のための調査、調整、改造作業について述べる。

2. 構造

磁場測定器の構造を Figure 1 に示す。測定器はコイルの左右にコイルを支える独立した架台が 2 台あり、それぞれがエアベアリングでハーモニックコイルを支持している。駆動側(Driving side)にはモータとエンコーダが、従動側 (Driven side) には機械ベアリング付きのテーパ状の軸があり、テーパ状の軸でコイルを駆動側に押す形でコイルを固定し、回す構造になっている^[2]。

3. 考えられる原因

測定誤差の原因を特定するために、誤差を 3 種類に分類し、順に対策を行った。

- ノイズ・測定精度

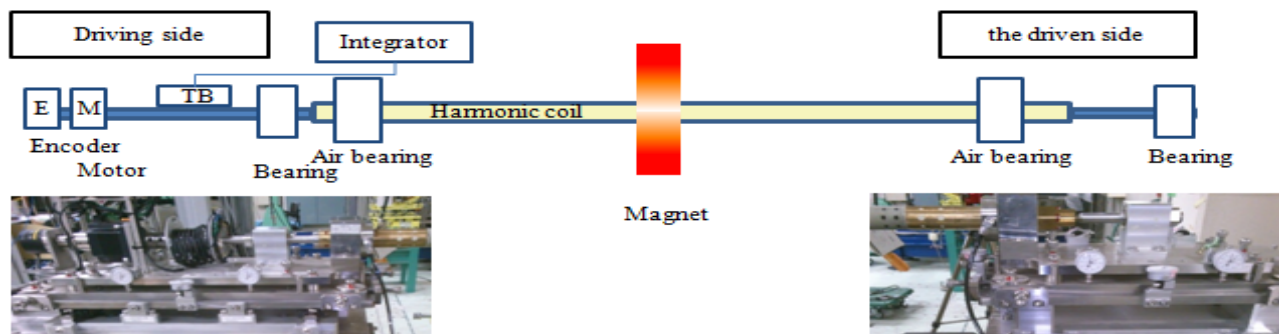


Figure 1: Structure of the magnetic field measuring instrument.

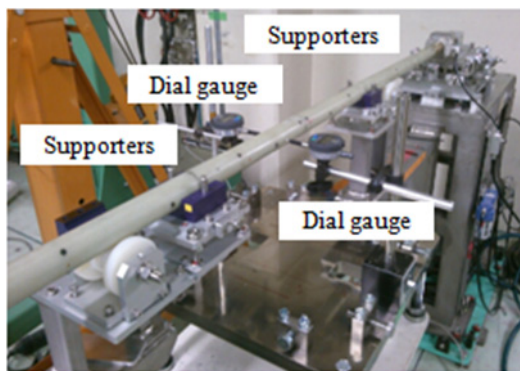


Figure 2: Rotation axis measurement.

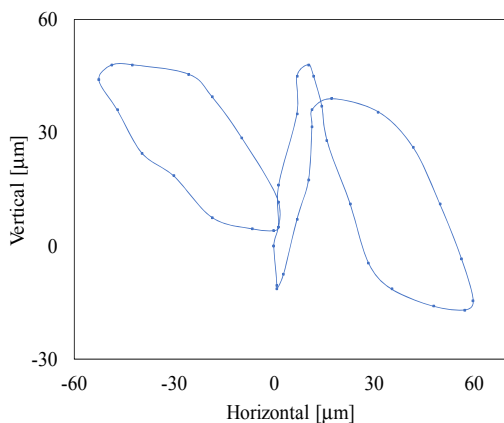


Figure 3: movement of HC1600.

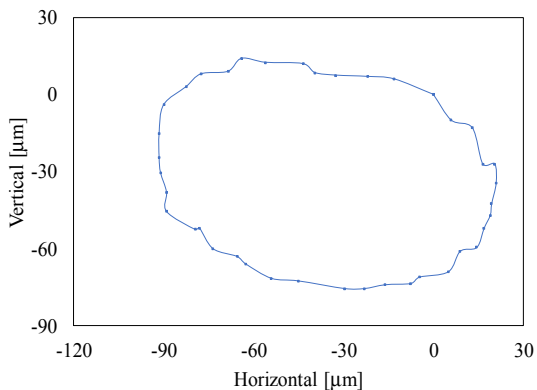


Figure 4: movement of HC600.

- 連続測定でのドリフト
- ハーモニックコイル抜き差しによる再現である。

3.1 ノイズ対策

ノイズの原因として機器の接触不良やアースの不良が考えられる。またハーモニックコイルが毎回転一様に動いていないと精度が落ちる。そこでまず、機器の接触・アース不良確認の為、回転部のケーブルを揺らしながらの測定、測定器架台、電磁石架台にアースを取付けての測定等を行ったが、大きな影響は無かった。また、ハーモニックコイル内のケー

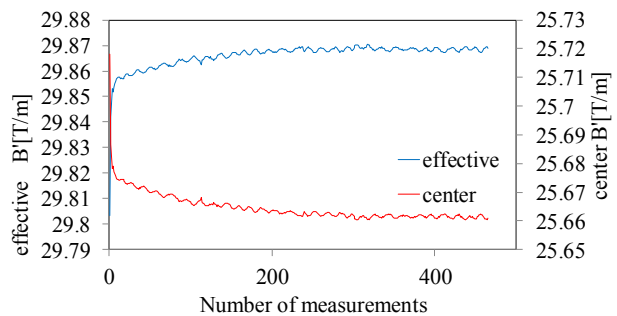


Figure 5: Continuous measurement of one quadrupole magnet.

ブルジョイント箇所ではノイズを拾っていないか確認するため、永久磁石をおいて測定したが影響なく、積分器回路内にある low-pass filter を有効にしたが効果的ではなかった。これにより外部から何か影響を受けてノイズが入っている可能性はほぼ否定された。

次に、ハーモニックコイルの軸ぶれについて測定を行った。架台改造前に測定に使用していた長さ 1.6m の多数巻ハーモニックコイル(HC1600)はコイル全長 2095mm、直径 40mm で、測定で使用するコイルは 2 種類、積分磁場を測定するための長コイルが軸方向の長さ1.6m で 40 巻、中心磁場測定用の短コイルが長さ 2cm で 200 巻である。たわみ対策のため、エアベアリングから約 60cm 中心寄りに、コイル支持用の治具を取りつけてある。治具なしではコイルが撓み、エアベアリングに傷がつくため、支え治具は必須であった。軸ぶれの測定は、Figure 2 のように、ハーモニックコイル中心付近をダイヤルゲージ 2 個で挟んだ状態でコイルを回転させて求めた。上下方向についても同様に測定し、1 回転でのコイル中心の動きをグラフ化した(Figure 3)。軸ぶれはないのが理想だが、上下左右に一様でないぶれがあることが分かった。コイル支持治具をずらして調整を行ったが、調整は困難で、軸ぶれを減少させることはできなかった。

そこで、コイルのたわみ防止用の支持治具を廃止する目的で、コイルの長さをほぼ半分にした、全長 1095mm、直径 40mm、長コイル 40 巻で長さ 600mm、短コイル 200 巻で 20mm とした、短いハーモニックコイル (HC600) を製作し、架台の幅も縮めて再度測定を行った。軸ぶれはゼロではないものの、偽の高次成分を導き出すような動きはなくなり、安定した回転となった (Figure 4)。

3.2 ドリフト対策

1 台の 4 極電磁石を約 4 時間連続測定した結果を Figure 5 に示す。実効磁場も中心磁場も初期ドリフトが大きいが、200 回くらいからは値が安定する。実効磁場と中心磁場が逆の特性を見せているが、これは長コイルと短コイルが回転軸を挟んで対称に配置されているためである。ドリフトを含めた全体の値の揺らぎを計算すると、実効磁場が 2.25×10^{-3} 、中心磁場が 2.24×10^{-3} となり、目標としている 4 乗台には到達していない。

ただし 200 回以降の安定した領域だけでばらつき

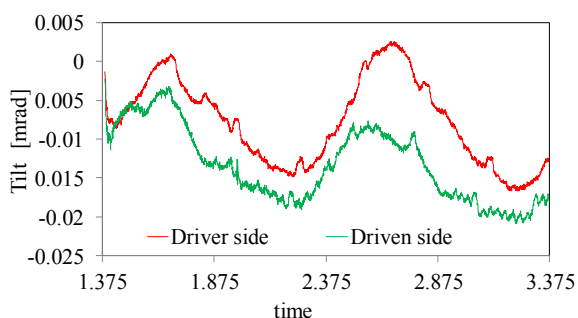


Figure 6: Tilt of the girders.

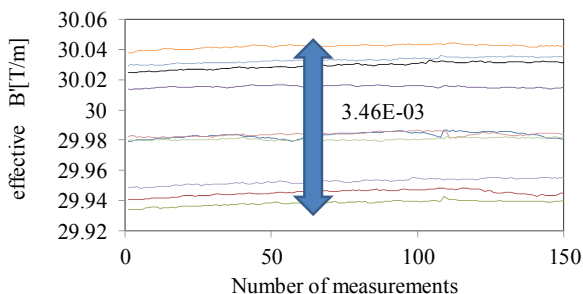


Figure 7: Fluctuation of the measurement.

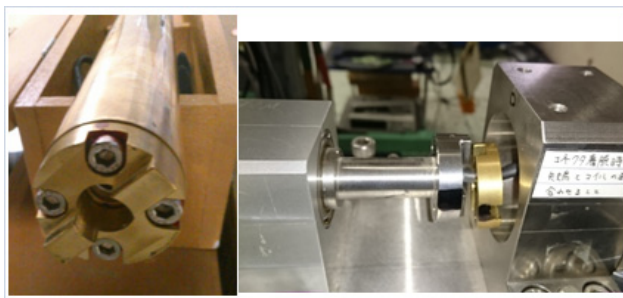


Figure 8: Coupling structure of the Driver side.

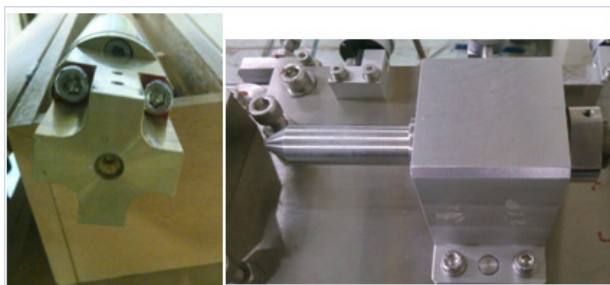


Figure 9: Driven side coupling.

を計算すると、実効磁場で 1.07×10^{-4} 、中心磁場で 1.38×10^{-4} となり十分良い精度となっている。初期ドリフトの原因を探し、それを解決すれば、精度が満たされそうだとおられた。

ドリフトの原因としてまず考えたのが温度変化による影響で、室温を低く (23°C) したり高く (30°C) したり、電磁石に風を当てたりして測定してみたが、状況は変わらなかった。次に積分器の電気回路の温度変化を疑い、前日から積分器の電源を入れた状態で測定したり、冷却して測定したりしたが、これも

影響は小さかった。そこで、実験室のある建物自体が動いているのではないかと考え、駆動側と従動側架台それぞれに電子水準器を設置し、2日間傾きを測定した(Figure 6)。駆動側・従動側の架台は別々に設置されているが、同じ傾向の動きをし、電磁石架台との関係も確認したが連動していて、床面全体として日較差で変動するものの、コイルだけを動かすような動きは観測されなかった。

架台などの外部の機構が動いていないようなので、最後に、ハーモニックコイル内部でコイルを巻いている部分移動している可能性を検討した。ハーモニックコイルは樹脂流し込み接着で製作されており、中を容易に見ることができず、分解も不可能である。構造的には、長短コイルがそれぞれボビンに巻き付けられた後、ボビンを円筒状の外套に差し込み、軸方向の4か所をビスで固定し、両端とビス部分を樹脂流し込みで接着してある。そこで、接着箇所を4か所増やし、内部の空気が逃げられるように通気用の穴をあけるといった改造を行った。しかしながら、結局、測定初期のドリフトは改善しなかった為、ドリフトが終わるまで約200回回転させてから測定を開始することにした。

3.3 ハーモニックコイル抜き差しによる再現性

測定前に空回転(200回)することで、1台の連続測定ならば目標誤差を達成できるようになったが、ハーモニックコイルを抜き差しすると再現しないという問題が残った。同一の4極電磁石を、途中でコイルを抜き差ししながら10回、各150回転分測定した結果をFigure 7に示す。それぞれ抜き差ししない範囲での平均値を求め、10回分としてばらつきを計算すると、 3.46×10^{-3} となった。

コイルの抜き差しで値が変わるということは、ハーモニックコイルの固定箇所に問題あると考えられた。駆動側の固定方法は、モータ軸端部にI字の突起を作り、ハーモニックコイル端部にもI字の突起を作り、その間にI字の溝が裏表に直交方向に彫られた真鍮製のカップリングを挟んで固定する構造になっている。溝にはめ込む方向はマーカーで印をつけ、毎回同じ方向で測定を行った(Figure 8)。一方、従動側はハーモニックコイル端部に直径約6mmの穴があり、架台側についているテーパ状の軸をそこにさして受けるという形になっている。軸中心は架台設置時にアライメントされているが、テーパ状の軸には機械ベアリングがついており、自由に回転してしまうため、毎回同じ場所にさしているわけではなかった(Figure 9)。そこで、テーパ状の軸に対してもピンで回転位置を決められるように工夫し、従動側も毎回同じ位置で測定を行ったところ、5回の抜き差しでの測定でばらつきが 3.69×10^{-4} まで改善した。

従動側のコイルの受け部分、すなわち、テーパ状の軸とその機械ベアリングが回転中心のブレにつながっていることが分かったので、コイルを改造し、従動側も駆動側と同じ、I字2本で歪みを逃がす機構にしてみた。3回抜き差しして測定して比較した結果、各回でも 1.44×10^{-3} の揺らぎとなり、悪化して

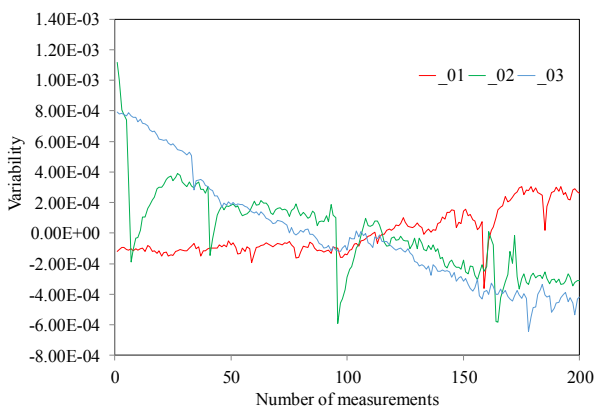


Figure 10: Fluctuation after the change of the driven side coupling.



Figure 11: The improvement of the driven side coupling.

しまった(Figure 10)。ハーモニックコイルと軸受けとの接続部が精度に大きく影響しているのは明白なので、いっそ従動側を接触させないで測定してみたところ、 2.00×10^{-4} の揺らぎに改善した。しかし、従動側で軸方向にコイルを押さえないと、測定している間にコイルがずれていくことが分かった。テーパ状の軸できっちり押さえると回転が安定しない(精度が悪くなる)ということは、ハーモニックコイルの回転がエアベアリングで決まっているのではなく、テーパ状の軸とその機械ベアリングで決まってしまっていることを示唆する。ならば軸方向に押すのをやめ、ただし、適度に固定はされた状態を作り出し、エアベアリングでハーモニックコイルの回転が決まる状態にできれば、精度が向上するだろうと推定された。結局、従動側接続部に2mmの隙間をつくり、ハーモニックコイルと軸受の間に通常時5mm、押せば1mm程度に圧縮されるスポンジを挟んだ。これにより、コイルの回転軸がエアベアリングで決まるようになった(Figure 11)。ばらつきを測定すると、 1.57×10^{-4} で、ハーモニックコイルが軸方向にずれることもなかった。また初期ドリフトも100回転近くずれ続けていたものが、50回程度で安定するようになった。

そこで、もっと精度が上がらないかと駆動側にもスポンジを挟み測定したが精度は変わらず、また、従動側の隙間を無くし、接続部にグリスを塗布して

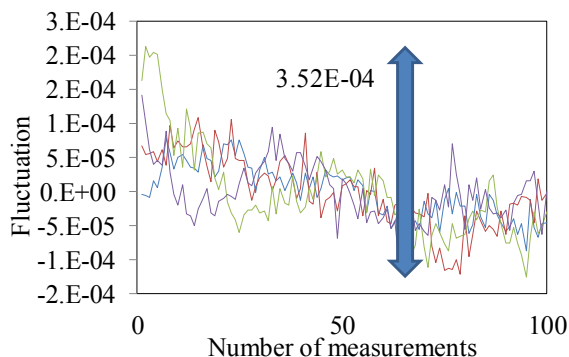


Figure 12: Reproducibility of the measurement.

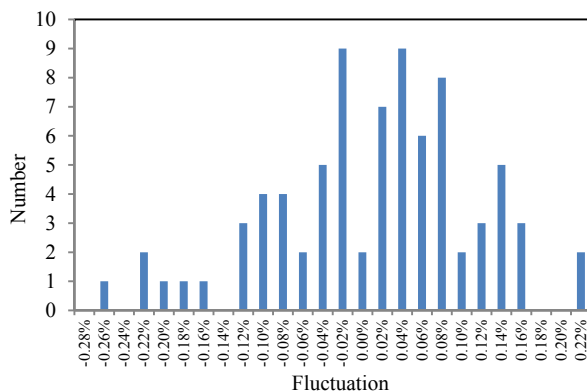


Figure 13: Statistics of 80 quadrupoles.

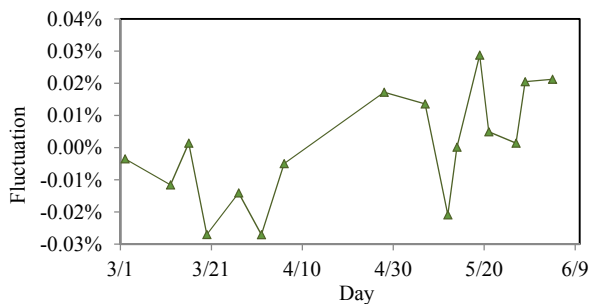


Figure 14: Standard magnet measurement.

みたが、それも精度が良くなることはなかった。従動側接続部に隙間をつくり、ハーモニックコイルと軸受の間にスポンジを挟む方法が最適なので、この状態で測定前に50回転空転させ、ハーモニックコイル抜きしたときの再現性を確認した。すると 3.52×10^{-4} のばらつきとなった(Figure 12)。抜き差しの再現性を含めて、 1.5×10^{-3} の電磁石製作誤差によるばらつき仕様がおおよそ検証可能な精度となり、目標が達成された。

3.4 4極電磁石の測定結果

この状態で、ダンピングリングの80台の4極電磁石を全て再測定した。80台の最大電流での実効磁場の、全台数の平均値に対する揺らぎをFigure 13に示す。最も小さいものと大きいものの差は約0.5%、標準偏差は0.01%であった。仕様上の製作精度は標準偏差としては満たされていることが分かった。約

3ヶ月にわたる測定中、80台のうちの1台を基準電磁石とし、装置の誤差をチェックするため、1週間に約2回の割合で測定を行った。結果を Figure 14 に示す。途中のドリフトは小さく、測定精度の目標 0.05%内におさまっていた。

4. まとめ

磁場測定では、ハーモニックコイルを回転させるが、その位置は軸方向にも回転方向にも一定に保つ必要がある。途中の支えや端部にあった機械ベアリングの影響を排除し、コイルの回転がエアベアリングだけできちんとは決まるように改善し、軸方向に強く押さないようにカップリングを工夫することで、測定精度が改善された。分かってみれば、わざわざエアベアリングを採用したにも関わらず、エアベアリングで回転が決まっていなかったということであったが、原因を解明するまでに様々な試験を繰り返して行った。最終的には、測定前に約 50 回回転させてから測定を開始することで、コイル抜き差しや長期ドリフトも含めた測定精度 0.05%以下を達成することができた。

参考文献

- [1] K. Harada, et al., "PF 直線部増強用の 4 極電磁石磁場測定", 第 14 回加速器科学研究発表会、つくば、2003, 1P031.
- [2] K. Harada et. Al., "SuperKEKB/PF-AR 用陽電子ダンピングリングの電磁石磁場測定", 第 9 回加速器学会年会、大阪、2012, p466.