

マルチワイヤを用いた電磁石精密アライメントシステムの開発

DEVELOPMENT OF PRECISE MAGNET ALIGNMENT SYSTEM USING MULTI-VIBRATING WIRES

深見健司^{#, A)}, 安積則義^{B)}, 藤田貴弘^{A)}, 本井傳晃央^{A)}, 鍛冶本和幸^{C)}, 木村洋昭^{B)}, 松井佐久夫^{B)},
中西辰郎^{C)}, 岡安雄一^{A)}, 渡部貴宏^{A)}, 張超^{A)}
Kenji Fukami^{#, A)}, Noriyoshi Azumi^{B)}, Takahiro Fujita^{A)}, Teruo Honiden^{A)}, Kazuyuki Kajimoto^{C)}, Hiroaki Kimura^{B)},
Sakuo Matsui^{B)}, Tatsuro Nakanishi^{C)}, Yuichi Okayasu^{A)}, Takahiro Watanabe^{A)}, Chao Zhang^{A)}
^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute
^{B)} RIKEN, Harima Branch
^{C)} Spring-8 Service Co., Ltd.

Abstract

Magnet alignment is one of most critical issues for realizing next generation light source. A vibrating wire method has been regarded as the promising scheme, however, environment changes, especially temperature drift causes not only the drift of a magnetic center, but also the drift of a resonance frequency of the wire. These drifts are all mixed in a signal of wire vibration, and not separable for an ordinary method. We have developed a frequency feedback system for the vibrating wire method. A magnetic center can stably be measured using the system, and the resolution of the measurement was better than 1 [μm] for a typical quadrupole magnet. A possibility to apply it for future light source has been discussed.

1. はじめに

現在、世界中の放射光施設で極低エミッタンスリングの設計や建設が進められている^{[1]-[3]}。低エミッタンス化が進めば進むほど、電磁石に高い設置精度が要求される。エミッタンスが回折限界に達するような、いわゆる「究極のリング」ではミクロンオーダーの設置精度が要求されるため、実現可能なアライメント精度により設計の自由度が制限される。

このような高精度のアライメントを実現するためのツールとして、Vibrating Wire Method (以下、VWM) は用いられてきた^[4]。張力をかけたワイヤをビーム進行方向に張り、ワイヤに交流電流を流して強制振動させる。ワイヤの長さで決まる共鳴周波数付近でのワイヤ振幅の周波数応答からワイヤ上の磁場を求める。多極電磁石のボア中心付近でワイヤを走査し、ワイヤの振動が無くなる場所を磁場中心とする手法である。ワイヤは地磁気レベル以下の低磁場でも容易に振動するため、非常に高い位置分解能が得られる。共鳴周波数が一定であれば、共鳴点での振幅のみで磁場が得られるため、迅速に磁場中心を求めることができる。

しかしながら、共鳴周波数は周囲温度変化などにより容易に変動する。そこで、通電周波数を常時共鳴周波数に追従させるための周波数フィードバックシステムを開発した。磁場中心付近の極低磁場領域においてもフィードバックを行うため、フィードバック専用ワイヤの導入を提案した。このシステム用いた高速かつ高精度アライメント手法の確立と測定例について示す。

2. 方法

共鳴周波数付近でのワイヤの振幅と位相は、

$$A_n(\omega) = \frac{a_n}{\sqrt{(\omega^2 - b_n^2)^2 + c_n^2 \omega^2}} \quad (1)$$

$$\phi_n(\omega) = \tan^{-1} \frac{c_n \omega}{\omega^2 - b_n^2} \quad (2)$$

で表せる^[5]。ここで、 n は共鳴の次数、 b_n 、 c_n はそれぞれ共鳴周波数 [rad/s]、振動の減衰定数 [s^{-1}] である。ワイヤ上の磁場は係数 a_n [m/s^2] より求められる^[6]。共鳴点での位相は $\pi/2$ [rad] であるので、位相の測定値をもとに共鳴周波数の変化量を推定できる。式 (2) から、共鳴周波数の変化量 $\Delta\omega$ [rad/s] は、

$$\Delta\omega \cong \frac{c_n}{2 \tan \phi_n} \quad (3)$$

となる。ワイヤへの通電周波数をそのワイヤ自身の位相により制御するフィードバックのことを、以下では「Basic Feedback」と呼ぶことにする。

試験セットアップを Figure 1 に示す^[7]。ワイヤには直径 0.2 [mm] のベリリウム銅を用いて、床から 1.2 [m] の高さにワイヤを張った。長さは 1.95 [m] とした。ワイヤの片方を固定し、張力をかけるため一方に 2 [kg] の錘を吊り下げた。このとき、基本共鳴周波数は $2\pi \times 70$ [rad/s]、ワイヤ中央部での撓み (サジッタ) は 62.5 [μm] である。任意波形発生器により発生させた正弦波電圧をワイヤに印可した。

[#] fukami@spring8.or.jp

フィードバック時の周波数の変更は、任意波形発生器により行った。透過型レーザセンサ (KEYENCE 製、IB-05) を固定端から 0.33 [m] の位置に設置し、ワイヤの振動を測定した。ワイヤ振動の振幅、位相のうち通電周波数の成分のみをロックインアンプにより抽出した。ワイヤの振動源として試験用電磁石をワイヤの長手方向の中央に設置した。

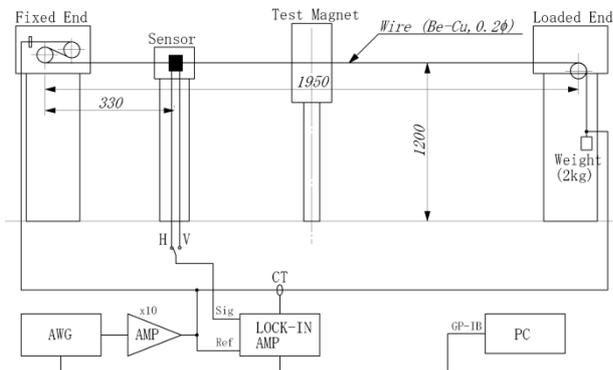


Figure 1: Test girder for a vibrating wire method. Length of the wire is 1.95 [m]. Nominal fundamental resonance frequency is $2\pi \times 70$ [rad/s]. Sagitta is 62.5 [μm].

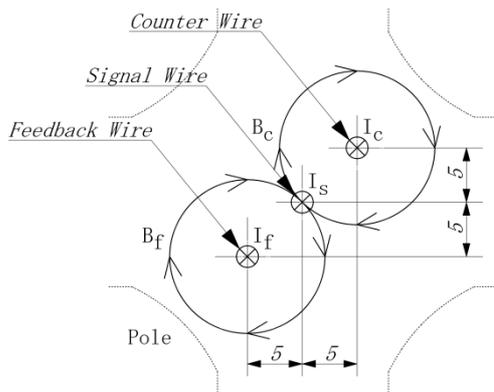


Figure 2: Cross sectional view of multi wires. I_s , I_f , and I_c indicate supplied current for the Signal Wire, for the Feedback Wire, and for the Counter Wire, respectively. B_f and B_c indicate magnetic fields induced by I_f and I_c , respectively.

ワイヤが磁場中心に近づくと Basic Feedback を行うために十分な信号強度が得られなくなる。加えて、位相の極性も頻繁に変わる。この場合にでもフィードバックが行えるよう、上記の磁場信号用ワイヤとは別にフィードバック専用のワイヤを用意し、磁場信号用ワイヤに平行に設置した。ワイヤ配置の断面図を Figure 2 に示す。以下、明確に区別するため、磁場信号用ワイヤを「Signal Wire」、フィードバック専用ワイヤを「Feedback Wire」と呼ぶことにする。Signal Wire と Feedback Wire の距離は水平、垂直方向とも 5 [mm] とした。Signal Wire の通電周波数を Feedback Wire の位相により制御するフィードバックのことを、以下では「Advanced Feedback」と呼ぶことにする。Feedback Wire に通電することに

より発生する磁場は、測定対象磁場に重畳する。重畳磁場は最大で 1×10^{-6} [Tm] のオーダーであることが想定されるが、第三のワイヤ「Counter Wire」を設置することで打ち消すことができる。以降の章で Counter Wire の必要性について検討した。

ワイヤの振幅は磁場の強さだけでなく、磁場の長手方向位置にも依存する。また、この場所依存性は共鳴の次数により変わる。十分な信号強度を得るためには、磁石の設置位置に応じた適した次数を選択する必要がある。低エミッタンスリングでは、偏向電磁石間の直線部に 5 台以上の四極、六極電磁石が並ぶ^[1]。これらの電磁石の磁場中心を 1 セットのワイヤで測定することを想定すると、次数は 1~7 までの間で用意しておきたい。ここでは、基本共鳴周波数と第 3、5、7 高調波について、各種フィードバックの試験を行った。

3. 測定

3.1 フィードバック試験

試験用電磁石として水平、垂直方向コンバインド型二極電磁石を設置した。最大積分磁場は 2×10^{-3} [T] \times 0.15 [m] である。

式 (1)~(3) の各パラメータを求めるため、一定磁場中において、共鳴周波数付近でのワイヤの振幅と位相の周波数応答を測定した。Signal Wire と Feedback Wire 両方について、それぞれ別々に行った。Feedback Wire の磁場の影響を評価するため、共鳴周波数で Feedback Wire に通電した場合と通電しない場合両方について、Signal Wire の周波数応答を測定した。

フィードバックが無い場合の振幅と位相の時間的変動を観測するため、Signal Wire と Feedback Wire 両方について当初の共鳴周波数のまま保持し、振幅と位相を 1 [s] 毎に測定した。測定値から 100 [s] 分の移動平均値を求めて 6 [hr] 記録した。次に、200 [s] に 1 回の割合で Basic Feedback を行いながら同じ測定を行った。測定結果をもとに、Signal Wire と Feedback Wire の共鳴周波数の相関係数を求めた。最後に、相関係数を用いて 200 [s] に 1 回の割合で Advanced Feedback を行いながら同じ測定を行った。

3.2 磁場中心測定試験

試験用電磁石として四極電磁石を設置した。積分磁場勾配は 40 [T/m] \times 0.1 [m] であり、低エミッタンスリング用としては典型的な値である^{[1],[2]}。

遠隔制御ステージを用いて、電磁石の位置を水平、垂直方向別々に 1- μm ステップで移動させて、ワイヤ振幅の電磁石位置依存性を求めた。測定中、Basic Feedback を行った。通電電流は 115.9 [mA_{rms}] とし、基本共鳴周波数を選択した。再現性を評価するため、20 [min] 毎に同じ測定を 3 回繰り返した。

磁場中心位置の変動を観測するため、Signal Wire 位置と磁場中心を一致させ、Advanced Feedback を行いながらワイヤの振幅を 48 [hr] 監視した。水平方向、垂直方向の測定はそれぞれ別々に行った。

4. 結果

4.1 Feedback Wire の影響

基本共鳴周波数での Signal Wire の水平方向振幅と位相の周波数応答を Figure 3 に示す。上側の図は、同じ次数の共鳴周波数で Feedback Wire にも通電した場合の周波数応答である。最小二乗法でフィッティングを行った結果、式 (1) の係数 a_1 、 b_1 、 c_1 はそれぞれ $(2.02 \pm 0.03) \times 10^{-3}$ [m/s²]、 $2\pi \times (70.641 \pm 0.002)$ [rad/s]、 0.89 ± 0.02 [s⁻¹] であった。式 (3) の係数 c_1 は 0.80 ± 0.01 [s⁻¹] であった。

下側の図は、Feedback Wire の通電を OFF とした場合の周波数応答である。式 (1) の係数 a_1 、 c_1 はそれぞれ $(2.07 \pm 0.03) \times 10^{-3}$ [m/s²]、 0.87 ± 0.02 [s⁻¹] であった。これらの値は全て誤差の範囲で一致した。第 3、5、7 高調波においても、これらの係数の値について Feedback Wire の ON、OFF による相違は見られなかった。Feedback Wire により発生する磁場の影響は無視できると考えられるので、Counter Wire は設置しなかった。

4.2 フィードバック性能

第 3 高調波での Signal Wire の水平方向振幅と位相の時間的変動の測定例を Figure 4 に示す。上側の図はフィードバック無しで測定したものである。一定磁場中であっても、振幅は 1.8 [hr] で 1/2 に減少した。下側の図は Basic Feedback を行いながら測定したものである。振幅の変動は 6 [hr] で 4 [%] 以内、位相は -91 ± 12 [deg] であった。

Signal Wire の共鳴周波数と Feedback Wire の共鳴周波数との相関を Figure 5 に示す。相関係数は 0.996 であり、ほぼ完全な相関関係があるため、Feedback Wire の位相だけで Signal Wire の共鳴周波数を精度よく推定できる。実際、Advanced Feedback のケースでも、振幅の変動は 6 [hr] で 4 [%] 以内、位相は -96 ± 13 [deg] であった。

4.3 磁場中心測定の分解能

電磁石の水平、垂直方向位置に対するワイヤの振幅を Figure 6 に示す。電磁石の位置 1 [μm] に対する振幅の変化は 2.8 [μm] であった。振幅測定 10 回の標準偏差は 0.2 [μm] であったので、位置分解能は 0.1 [μm] に達することが分かった。測定 3 回間の磁場中心位置のばらつきは、水平方向、垂直方向でそれぞれ 2.2、0.7 [μm] であった。

磁場中心位置の水平方向、垂直方向の時間的変化を Figure 7 に示す。ワイヤの振幅を、ワイヤと磁場中心位置との差分に換算した。縦軸はワイヤから見た磁場中心位置の水平、垂直方向変位を示しており、符号は水平方向に対し Figure 1 の紙面奥を正、垂直方向に対し上方を正とした。垂直方向の磁場中心位置の変化はワイヤを固定している架台表面の温度と負の相関が有り、温度変化 1 [K] に対する変位量は -7.3 [μm] であった。これに対し、水平方向は温度との明確な相関は見られなかった。

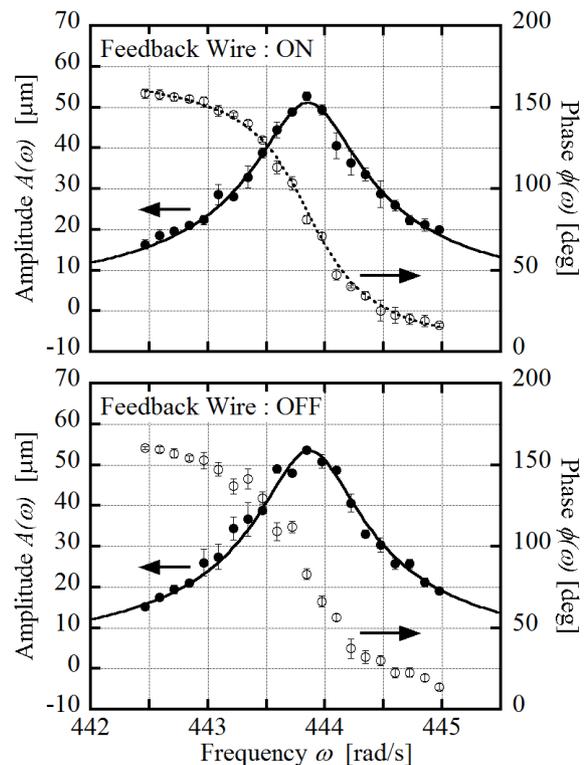


Figure 3: Frequency responses of r.m.s. amplitude and a phase in horizontal direction for the Signal Wire near the 1-st resonance frequency. Error bars indicate one standard deviation of ten measurements. Solid and broken lines indicate results of the least squares fitting with Eq.1, and Eq.3, respectively.

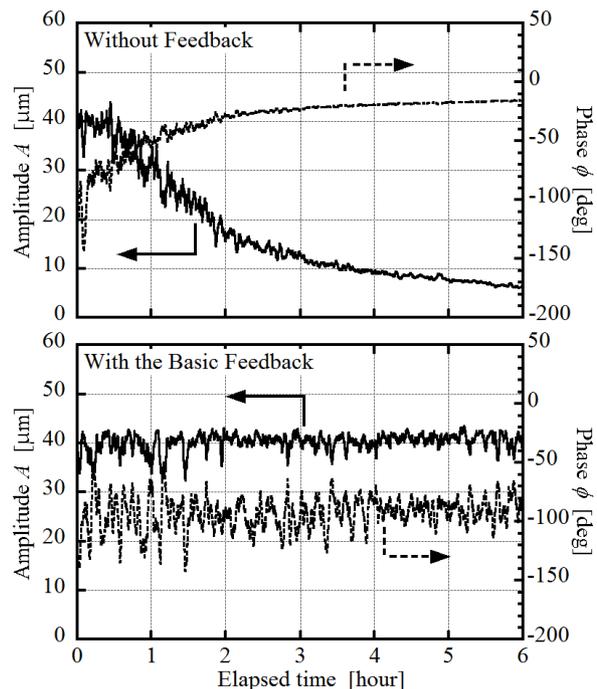


Figure 4: Example of time fluctuations in r.m.s amplitude and a phase in horizontal direction for the Signal Wire at the 3-rd resonance frequency.

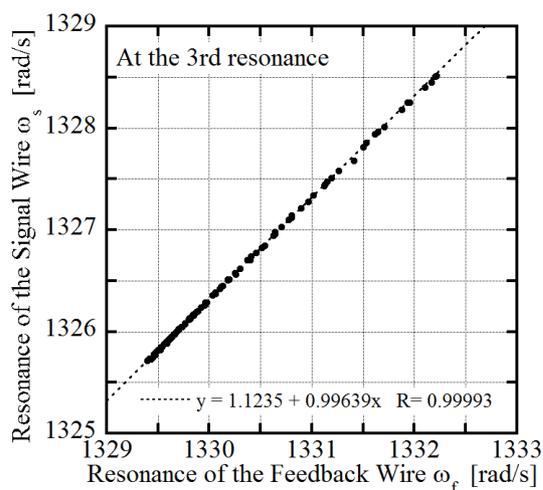


Figure 5: Correlation between the resonance frequency of the Signal Wire and that of the Feedback Wire. Broken line indicates result of least squares fitting with a linear function.

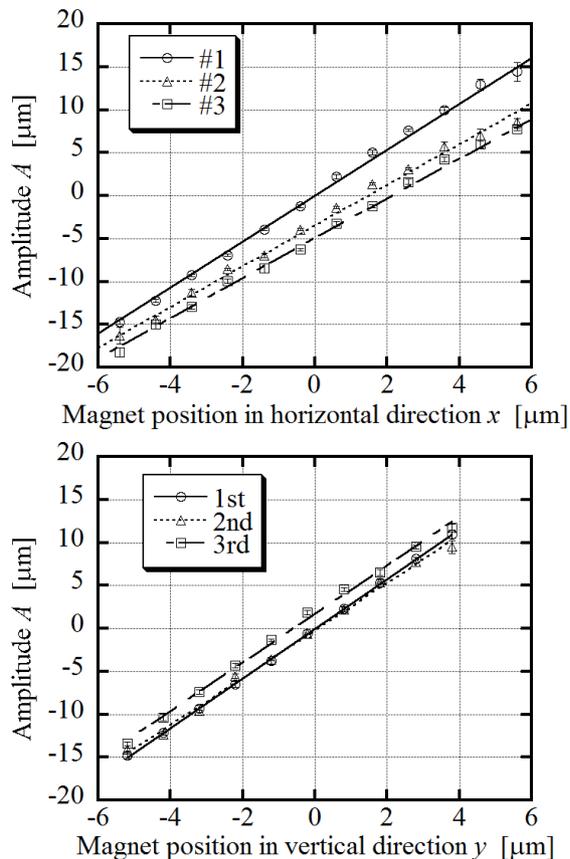


Figure 6: R.m.s. amplitudes for the Signal Wire versus magnet positions both in horizontal and vertical directions. Measured magnetic center of the 1-st turn is defined as the origin in horizontal axis. Error bars indicate one standard deviation of ten measurements, but invisibly small. Lines indicate results of least squares fitting with a linear function.

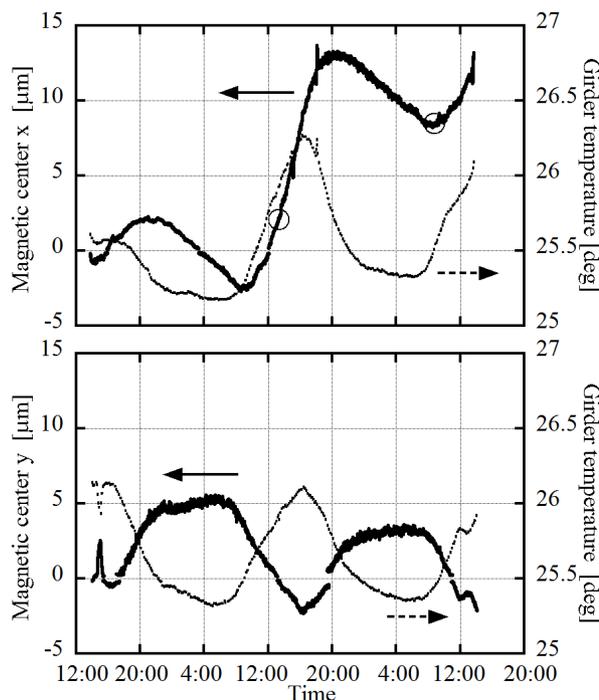


Figure 7: Time fluctuations in the magnetic centers both in horizontal and vertical directions. Right side vertical axes indicate temperatures of the wire-fixed girder surface. Circles in upper figure indicate measuring times of rolling angle of the wire-fixed girders.

5. 考察

5.1 バックグラウンド磁場の影響

磁場中心位置の測定結果から得られた位置分解能を積分磁場に換算すると 4×10^{-7} [Tm] となる。加えて、ワイヤの温度上昇を 20 [K] で制限しても通電電流を 1.7 [A_{rms}] (分解能試験時電流の 14.7 倍) まで増大可能であるので、更に分解能を向上させることは可能である。

しかしながら、このオーダーになると地磁気の影響が無視できない。現状のシステムでは地磁気のシールドを行っていないため、試験電磁石 OFF でもワイヤの残留振動が観測される。例えば、第 3 高調波での残留振動は、水平で 3×10^{-6} [Tm]、垂直で 9×10^{-6} [Tm] の磁場に相当する。上記の分解能と同等の測定精度を得るためには、地磁気を 1×10^{-7} [Tm] 程度に抑制することが望ましい。ワイヤ全体を円筒形のミューメタルに通すなどの電磁シールドを施せば到達可能な値である。

六極電磁石もアライメントの対象となるが、磁場中心付近の磁場は一般に六極電磁石の方が四極電磁石に比べて弱い。低エミッタリング用六極電磁石の典型的な値として 2000 [T/m²] $\times 0.2$ [m] を仮定すると^{[1],[2]}、磁場中心付近の積分磁場は Figure 8 のようになる。地磁気を上記レベルに抑制できれば十分にマイクロオーダーで磁場中心位置を求めることが可能である。

上記のセクション 2 で述べたように実使用架台

上の四極、六極電磁石複数台の磁場中心を 1 セットのワイヤで測定することを想定すると、ワイヤ側を遠隔ステージで走査の方が現実的である。この場合には、測定対象電磁石以外の残留磁場の影響も考慮する必要がある。

今回使用した試験用四極電磁石の場合、電源を OFF しても定格の 0.5 [%] の磁場が残った。磁場中心位置から水平方向、垂直方向に 50 [μm] 離れた位置での B_x 、 B_y 成分の積分磁場はそれぞれ 1×10^{-6} [Tm] に相当するため、地磁気比べて無視できなくなる。六極電磁石の磁場中心を求めるとき、水平方向走査には B_x 、垂直方向走査には B_y を用いるよう限定すれば上記の残留磁場は回避できるが、必要に応じ、測定対象電磁石以外のボア内に円筒形の電磁シールドを行うなどの対策が必要である。

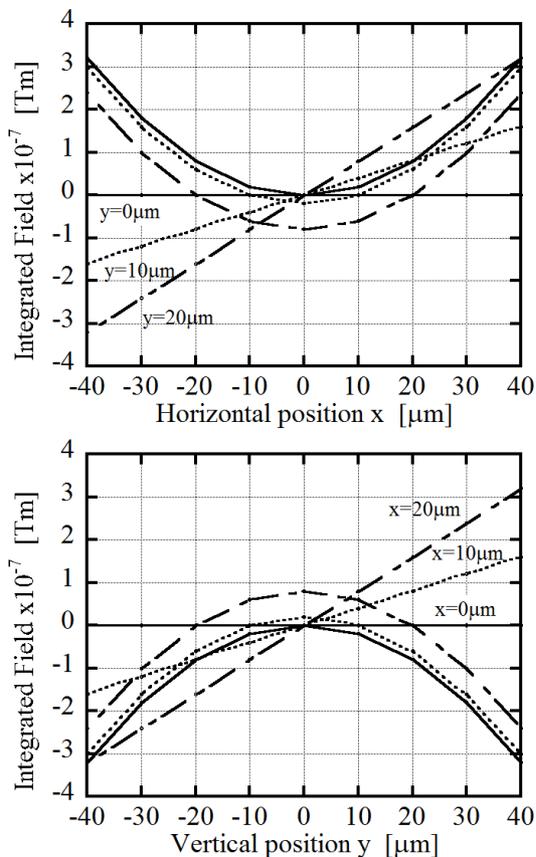


Figure 8: Calculated field distributions in a typical sextupole magnet, $2000 \text{ [T/m}^2] \times 0.2 \text{ [m]}$, both in horizontal and vertical directions. Linear and quadratic functions indicate field components of B_x , and B_y , respectively.

5.2 磁場中心位置のドリフト原因

垂直方向ドリフトとワイヤ固定架台の表面温度との相関は明確であった。架台の材質は鉄であり、一方、電磁石は遠隔制御ステージごと石定盤の上に乗せられている。石定盤の材質は主に斑れい岩、コーズライトであり、線膨張係数は鉄の 1/2 程度である。また、体積は $0.26 \text{ [m}^3]$ であり、ワイヤ固定架台よりずっと大きく、周囲温度の影響を受けにくい。石

定盤の熱膨張を無視し、鉄の膨張によりワイヤの設置位置が垂直方向に変化したと考えると、垂直方向のドリフトは定性的にも定量的にも説明できる。

水平方向ドリフトの原因の一つとして、ワイヤ固定架台のワイヤ軸周りの傾きの変化が考えられる。上下流架台上に水準器を設置し、Figure 7 の黒円で示す 2 回の時刻に傾きを測定した結果、上下流とも同じ方向に $10 \sim 20 \text{ [}\mu\text{rad]}$ 変化し、ドリフトの方向と矛盾していなかった。しかしながら、傾きと温度との相関は明確ではなかった。現在、再現性を含めた詳細な調査を行っている。

今回の測定結果は必ずしも磁場中心位置の変化を直接示してはいないが、Advanced Feedback を用いない限りこのような監視を自動で行うことはできない。この手法を用いれば、ミクロンオーダーのアライメントが可能であるだけでなく、アライメント作業中のドリフトの監視や、ドリフトを防止するための事前の材料試験などにも有効である。

6. まとめ

ワイヤの共鳴周波数は容易に変化するため、ワイヤの振幅は一定磁場中でも変動する。ワイヤの通電電流の周波数を共鳴周波数に追従させることにより、一定磁場中での振幅変動を効果的に抑制できることを示した。周波数フィードバックを行うための専用ワイヤを磁場信号用ワイヤとは別に用意し、磁場信号用ワイヤと平行に設置すれば、磁場信号用ワイヤが磁場中心付近の極低磁場領域に設置された場合にも問題なくフィードバックが可能であることがわかった。この手法により、次期計画リングが要求するミクロンオーダーのアライメント精度を十分満たすだけでなく、アライメント作業中の精度を確保するための指標になりえることを示した。

7. 謝辞

本研究は JSPS 科研費 26390123 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] NSLS-II preliminary design report, <http://www.bnl.gov/nsls2/project/PDR/>
- [2] The MAX IV Detailed Design Report, http://www.maxlab.lu.se/maxlab/max4/DDR_public/
- [3] L. Liu et al., Proc. of IPAC2013, (2013) 1874-1876, Shanghai, China.
- [4] A. Jain et al., Proc. of IWAA2008, (2008) 1-6, Tsukuba, Japan.
- [5] A. Temnykh et al., Nucl. Inst. and Meth. A399 (1997) 185-194.
- [6] S. Kashiwagi et al., Proc. of IPAC2012, (2012) 732-734, New Orleans, U.S.A.
- [7] K. Fukami et al., Proc. of IPAC2014, (2014) 277-279, Dresden, Germany.