

次世代放射光リングのための Vibrating Wire によるマイクロメートルオーダーでの磁石アライメント法の確立と課題

DEVELOPMENT OF MICROMETER-ORDER MAGNET ALIGNMENT USING VIBRATING WIRE FOR NEXT GENERATION LIGHT SOURCES

深見健司^{*A)}、安積則義^{B)}、本井傳晃^{A)}、木村洋昭^{B)}、木内淳^{C)}、甲斐智也^{C)}、松井佐久夫^{B)}、渡部貴宏^{A)}
Kenji Fukami^{*A)}, Noriyoshi Azumi^{B)}, Teruo Honiden^{A)}, Hiroaki Kimura^{B)}, Jun Kiuchi^{C)}, Tomoya Kai^{C)},
Sakuo Matsui^{B)}, Takahiro Watanabe^{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 sources. A vibrating wire method has been regarded as the promising scheme. We have already showed that a position resolution of the magnetic center was better than 1 [μm] for a typical quadrupole magnet. To suppress background fields, e.g., geomagnetism, and to correct a sag of a wire are similarly important items to the resolution. We introduced counter magnets for compensation of the background fields both in horizontal and vertical directions. The sag was measured using HLS and WPS systems. Based on the result, a possibility to apply it for future light sources was 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、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」ではマイクロメートル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) が用いられてきた。張力をかけたワイヤをビーム軸方向に張り、ワイヤの長さで張力が決まる共鳴周波数の交流電流を流して磁場中で強制振動させる。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から磁場中心を探る方法である。磁場中心位置を一旦別の基準点に移す際の誤差が生じることなく、多極電磁石群の磁場中心を一直線上に並べることができる。

しかしながら、共鳴周波数は気温などの周囲環境の変化により容易に変動し、磁場中心測定の見誤差要因の一つとなる。我々はこれまで、変化する共鳴周波数に対し通電の周波数を常時追従させるためのフィードバックシステムを開発し、四極電磁石単体の磁場中心位置を再現性良くマイクロメートルオーダーで測定できることを示した [4]。検出可能な積分磁場は少なくとも 4×10^{-7} [Tm] 以下であることを示したが、同時に外部磁場によるワイヤの振動の抑制が必要不可欠であることがわかった [5]。多極電磁石群のアライメントに適用する場合には、この他にワイヤの撓みが誤差要因となる。ここでは、これらの誤差要因の補正方法について検討を行った。

2. 原理

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 [6]。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] から求めることができる。

ワイヤの垂直方向位置は懸垂曲線に従う。ワイヤの長手方向を s 軸、中央を $s=0$ とし、ワイヤ両端の高さを $y=0$ とした場合、 s 方向の高さ分布は、

$$y = \alpha \left[\cosh\left(\frac{s}{\alpha}\right) - \cosh\left(\frac{L/2}{\alpha}\right) \right] \quad (3)$$

で示される。ここで、 L はワイヤの長さ [m]、 $\alpha \equiv T/\rho g$ [m] であり、 T は張力 [N]、 ρ はワイヤの線密度 [kg/m] である。中央部での最大たわみ量 (サグ) $|\delta_y|$ [m] は、

$$|\delta_y| = \alpha \left[\cosh\left(\frac{L}{2\alpha}\right) - 1 \right] \cong \frac{\rho g L^2}{8T} \quad (4)$$

となる。サグは基本共鳴周波数との間には、

$$|\delta_y| = \frac{g}{32} \left(\frac{b_1}{2\pi}\right)^{-2} \quad (5)$$

の関係があるため、Eq. 4 右辺の各パラメータが既知でなくても、基本共鳴周波数の測定値から高さ分布を求めることができる。

次世代放射光リングでは、偏向磁石間の直線部に 3~7 台程度の多極電磁石群が並び、これらの電磁石の磁場中心位置を一直線上に並べる。個々の磁石の設置場所に

*fukami@spring8.or.jp

よりワイヤの高さが異なるため、各々の設置位置に応じた補正を行う。また、設置位置において感度の高い共鳴周波数を選択することが望ましいので、 $n=1\sim 7$ の次数で磁場中心の測定を行う。

3. 測定

3.1 磁場中心位置の測定

磁場中心位置の測定セットアップを Figure 1 に示す。天然石を材料とした定盤上に試験用機器を設置した。座標の定義を図中に示す。方位は、 $+x$ が「南」、 $+s$ が「東」である。直径0.2[mm]のBe-Cuワイヤを用い、次世代リングの典型的偏向磁石間距離を模擬し、長さを3.75[m]とした。ワイヤの張力を21.0[N]とし、基本共鳴周波数を $2\pi\times 38$ [rad/s]とした。任意波形発生器からの正弦波をワイヤに通電し、 x,y 方向のワイヤの振動を光学式寸法測定器(KEYENCE、LS-9006D、繰り返し精度0.03[μm])により測定した。測定器からの信号をロックインアンプ(NF、LI5640)に入力し、通電周波数成分の振幅、位相をピックアップした。通電電流値は103[mA_{rms}]とした。

アライメント試験用四極電磁石(定格磁場勾配15[T/m]、有効磁場長0.2[m])を s 方向中央部に設置した(Figure 1、QM)。ワイヤ両端に用意した遠隔ステージにより、ワイヤ側を x,y 方向に平行移動させた。走査範囲は ± 10 [μm]、最小ステップは1[μm]とした。張力をかけたワイヤを移動させるため、移動毎に振動が安定するまで10[sec]待機して測定を開始した。測定頻度2[S/sec]で10回測定し、平均値、標準偏差を記録した。

ワイヤは四極電磁石の磁場だけでなく地磁気を含むバックグラウンド磁場を受ける。このため、ワイヤに共鳴周波数で通電すると、四極電磁石OFFでも有意に振動する(以下、残留振動)。そこで、残留振動をキャンセルするためのカウンタ電磁石(定格積分磁場 1.5×10^{-3} [Tm])を x,y 方向用別々に用意した(Figure 1、Ch,Cv)。残留振動の振幅が無視できるレベルになるよう、これらの電磁石の磁場を調整したうえ磁場中心位置を測定し、カウンタ電磁石OFFの場合と比較した。以上の測定を基本共鳴周波数と、奇数次数 $n=3, 5, 7$ の高調波で行った。基本共鳴周波数の測定では、測定の再現性を評価するため、同じ条件での走査を3回繰り返し行った。定盤上にフラックスゲート式磁気センサ(MEDA、FVM400、分解能1[nT])を設置し、測定中のバックグラウンド磁場をモニタした。

磁場中心位置のドリフトを観測するため、磁場中心位置にワイヤを固定し、ワイヤ振幅の時間的変化を測定した。振幅の変化から磁場中心位置の変動を推定した。基本共鳴周波数を用いて、カウンタ電磁石をONとした。測定頻度を0.5[S/sec]とし、試験四極電磁石ONから12時間連続測定した。測定時間は通電電流の周波数を共鳴周波数に追従させるための位相フィードバック^[5]をONとした。フィードバック周期は100[sec⁻¹]とした。

3.2 ワイヤの垂直方向位置分布の測定

磁場中心測定と同じワイヤを使用し、ワイヤ長を4.43[m]とした。張力を17.15[N]、19.60[N]とした。サグはそれぞれ0.36[mm]、0.32[mm]である。ワイヤ両端の高さは、オートレベルを用いて ± 0.1 [mm]程度で一致するよう調整した。

ワイヤの s 方向の高さ分布をHydrostatic Levelling System(FOGALE、HLS、繰り返し精度 <0.5 [μm])とWire Positioning System(FOGALE、WPS、繰り返し精度 <1 [μm])の組み合わせで測定した。Figure 1の定盤上に一对のHLSを設置し、一方を基準とした固定した。他方のHLSはワイヤ下部に置き、基準面上にWPSを設置して基準面からワイヤまでの高さを測定した。このHLSを s 方向に静かに移動させて、HLSとWPSの測定値の和から、ワイヤの s 方向の相対的な高さ分布を求めた。

比較のため、同じ測定をレーザトラッカ(Leica、AT402、測定精度 ± 15 [μm]+6[$\mu\text{m}/\text{m}$])により行った。トラッカのターゲット球をワイヤに近づけてゆき、ワイヤとターゲット球間の電気抵抗を測定しながら、接触した瞬間の座標を測定した。ワイヤ円形断面に対し6方向から同じ測定を行い、最小二乗フィッティングによりワイヤ円形断面の中心の座標を求めた。

双方ともワイヤ中央を原点として、 ± 1.8 [m]の範囲で測定した。先に示したEq. 3は、ワイヤ両端の高さが一致している場合について示している。しかしながら、一致していない場合においても、両端の高さを一致させるよう座標変換すれば十分近似可能である。例えば両端の高さの差が5[mm]の場合でも、座標変換によりEq. 3との差分は -2.3×10^{-7} [mm]となり無視できる。このため、両測定とも両端の測定値が一致するよう座標変換したうえ理論値と比較した。

4. 結果と考察

4.1 カウンタ電磁石によるバックグラウンド磁場の補正

カウンタ電磁石によりワイヤの残留振動を補正した場合の、基本共鳴周波数、及び次数 $n=3, 5, 7$ の高調波での磁場中心測定結果をFigure 2に示す。 x,y 両方向とも、基本共鳴周波数での磁場中心位置を0とした。高調波で求めた磁場中心位置と基本共鳴周波数で求めた磁場中心位置との差をTable 1にまとめた。バックグラウンド磁場の各方向の磁束密度は、 $(B_x, B_y, B_s)=(-28, -31, +11)$ [μT]であった。

基本共鳴周波数において同じ条件で3回測定した結果、 x 方向の2、3回目の磁場中心は1回目に対しそれぞれ -0.1 [μm]、 -0.2 [μm]であった。一方、 y 方向の2、3回目の磁場中心はそれぞれ $+1.1$ [μm]、 $+2.3$ [μm]であった。使用する周波数による測定値の相違、同じ条件による測定値のばらつきとも、 x 方向に比べて y 方向の方が大きかった。

y 方向の相違の原因として、磁場中心位置の時間的ドリフトが考えられる。磁場中心位置の時間的変化をFigure 3に示す。磁場中心位置とヨーク温度との相関をFigure 4に示す。 y 方向の磁場中心位置は試験用四極電磁石のヨークの温度と強い相関があり、温度係数は 2.7 [$\mu\text{m}/\text{K}$]であった。一方、 x 方向の温度係数は 0.15 [$\mu\text{m}/\text{K}$]であり、 y 方向の1/10以下であった。当該測定中の四極電磁石上面の基準面の高さをダイヤルゲージを用いてモニタした結果、同期間中の高さの変化量は 50 [μm]であり、磁場中心の測定結果と矛盾しなかった。電磁石の熱膨張により磁場中心位置が y 方向に顕著に変化したものと考えられる。

試験用四極電磁石ON直後の y 方向磁場中心位置の

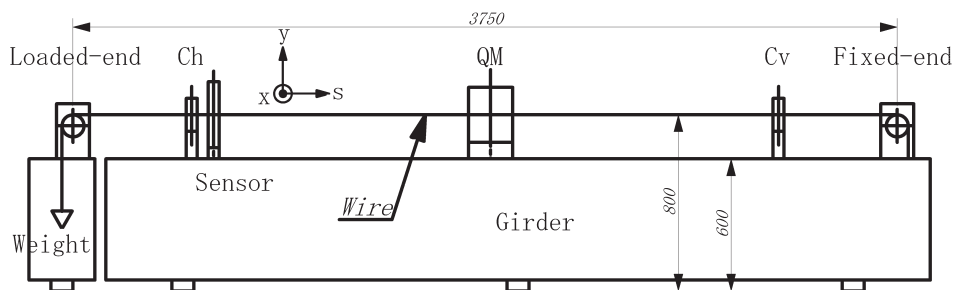


Figure 1: Outline of the test girder. Wire length is 3.75[m]. Tension is 21.0[N]. Nominal fundamental resonance frequency is 38[Hz]. Sag is 0.217[mm]. QM indicates a test quadrupole magnet. Ch and Cv indicate counter magnets. Fixed end of the wire, QM, Ch, Cv, and wire vibration sensor were fixed on a surface table made of natural stone. Loaded end of the wire was fixed on a girder made of Cordierite.

時間的変化率は $5[\mu\text{m}/\text{hour}]$ であった。Figure 2 の各測定間の時間間隔は $15[\text{min}]$ 以上あったので、 y 方向磁場中心位置の測定値の相違は、磁場中心位置のドリフトによるものが支配的であると考えられる。

カウンタ電磁石を使用しない場合、ワイヤの残留振動の振幅は基本共鳴周波数で最も大きく、 x 方向 $-35.1[\mu\text{m}]$ 、 y 方向 $-167.7[\mu\text{m}]$ であった。残留振動を補正しない場合、高調波で求めた磁場中心位置と基本共鳴周波数で求めた磁場中心位置との差は先のドリフトに比べて有意に大きかった (Table 1 参照)。残留振動は、使用する共鳴周波数の次数により異なる。例えばワイヤ上のバックグラウンド磁場が一樣であれば、奇数次数での振動への寄与分は次数に反比例する。このため、磁場中心測定値は次数により有意な相違が生じ、互いに一致しなかったものと考えられる。

カウンタ電磁石で残留振動を補正すればこのような相違は生じず、共鳴の次数を変えても正しく磁場中心を測定できることがわかった。

Table 1: Difference between magnetic center using fundamental resonance and that using higher harmonics.

n	Counter Magnet ON ($\Delta x, \Delta y$)[μm]	Counter Magnet OFF ($\Delta x, \Delta y$)[μm]
3	(0.8, 1.6)	(33.5, 39.0)
5	(0.2, 1.2)	(20.8, 26.0)
7	(0.6, 2.7)	(32.2, 30.0)

4.2 ワイヤの撓みと補正

ワイヤの高さ分布の測定結果を Figure 5 に示す。WPS と HLS の組み合わせによる $s = \pm 1.8[\text{m}]$ での測定値を $y=0$ とした。ワイヤの線密度、張力、長さの実測値をもとに Eq. 4 で計算した高さ分布を点線で示した。基本共鳴周波数の実測値をもとに Eq. 5 で計算した高さ分布を実線で示した。双方のサグの差分は、張力 $17.15[\text{N}]$ で $0.27[\mu\text{m}]$ 、張力 $19.60[\text{N}]$ で $0.52[\mu\text{m}]$ であり無視できる。以下、測定値と Eq. 5 の計算値を比較した。

レーザートラックを用いた測定において、電気抵抗で観測した場合のターゲット球とワイヤの接触点は、先に示したワイヤ振動センサで観測した接触点と $5[\mu\text{m}]$ の

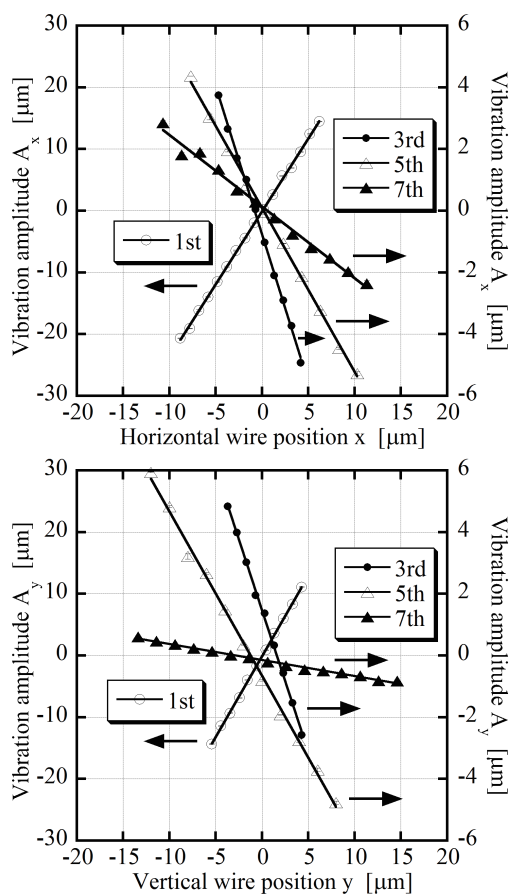


Figure 2: Vibration amplitude versus wire position using fundamental resonance and using higher harmonics. Error bars indicate one standard deviations for ten measurements. Solid lines indicate results of least-squares fit by a linear function.

相違があった。このような有意な系統的誤差があったため、この手法による実測値と先の計算値とは直接比較できないことがわかった。一方、WPS と HLS でのサグの測定値は計算値に比べて小さく、張力 $17.15[\text{N}]$ 、

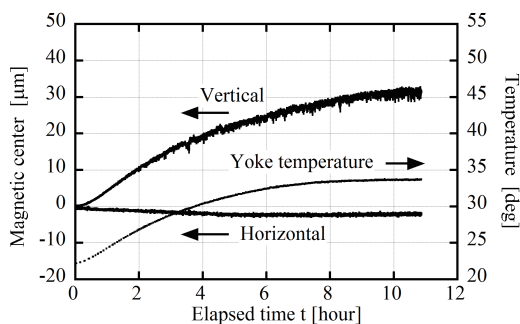


Figure 3: Time dependence on magnetic center position and on yoke temperature.

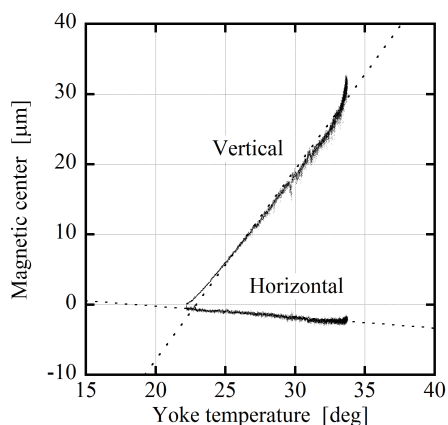


Figure 4: Correlation between magnetic center position and yoke temperature. Broken lines indicate results of least-squares fit by a linear function.

19.60[N]での差分は、それぞれ3.4[μm]、2.2[μm]であった (Figure 5、一点鎖線参照)。分布全体での相違の最大値は、それぞれ10.2[μm]、9.0[μm]あった。

アライメントを迅速に行うためには、基本共鳴周波数の測定だけで高さ分布を推定し、補正を行うことが望ましい。十分な精度で懸垂曲線に従うことがわかれば、ワイヤ全域にわたって補正が可能となる。上記の誤差要因として、ワイヤ線密度の不均一性、折れ曲がりなどの不連続性があげられる。試験に使用したワイヤについて、1[m]を0.1[m]毎に10本に分けて精密上皿天秤で測定した結果、線密度は 264.12 ± 0.15 [mg/m]であった。線密度の不均一性による分布の誤差は0.12[μm]であり上記の差分は説明できない。今後、ワイヤのキンク等局所的な不連続性を丹念に調べる予定である。

今回の測定結果から、アライメント精度のターゲットが10[μm]以上であれば、基本共鳴周波数の測定値だけで直ちに補正可能である。さらに精度を追及する場合には、差分の要因、傾向を詳細に調査する必要がある。

5. まとめ

カウンタ電磁石でバックグラウンド磁場起因の残留振動を打ち消すことにより、磁場中心を正確に測定できることを示した。多極電磁石群の磁石中心の真直度の目

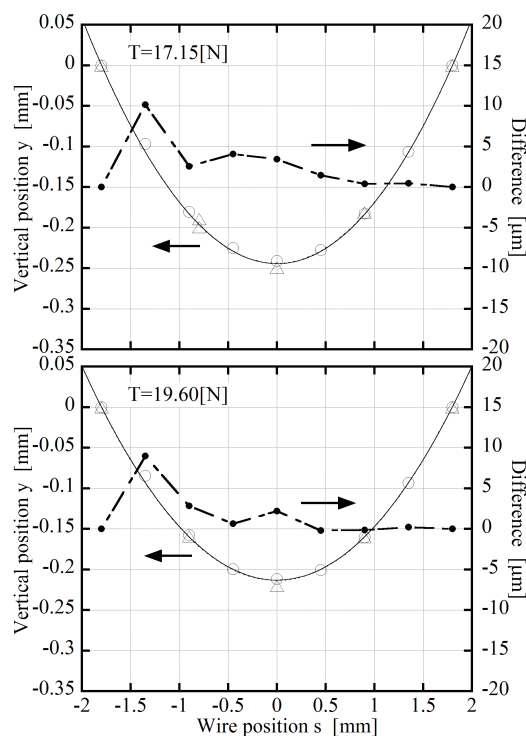


Figure 5: Wire height distribution in longitudinal direction. Broken and solid lines indicate calculated heights by Eq. 4 and by Eq. 5, respectively. Open circles and triangles indicate measured heights by WPS, HLS and by Laser Tracker. Closed circles and long dashed lines indicate differences between the open circles and the solid lines.

標を10[μm]とするならば、ワイヤの撓みは基本共鳴周波数の測定だけで迅速に補正できるが、更に高精度を狙うならば、ワイヤの局所的な不連続性等まで考慮する必要がある。

6. 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/index.html
- [3] L. Liu et. al., Proc. of IPAC2013, (2013) 1874-1876, Shanghai, China.
- [4] K. Fukami et. al., Proc. of IPAC2014, (2014) 277-279, Dresden, Germany.
- [5] K. Fukami et. al., Proc. of PASJ2014, (2014) 105-109, Aomori, Japan.
- [6] A. Temnykh et. al., Nucl. Inst. and Meth. A399 (1997) 185-194.