

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 8 月 16 日現在

機関番号：84502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390123

研究課題名(和文)三線式ワイヤ法、及びパルス法による極低磁場領域での高速アライメント技術の開発

研究課題名(英文) Development of an alignment method in a ultra-low field using a triple-wire excited CW current and using a wire excited pulsed current..

研究代表者

深見 健司 (Fukami, Kenji)

公益財団法人高輝度光科学研究センター・加速器部門・副主幹研究員

研究者番号：60463311

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：多極電磁石5台を用いて Vibrating Wire Method をベースにしたアライメント試験を行った。バックグラウンドとなる地磁気や残留磁場は、カウンタ電磁石を導入し補正できることを示した。直線性の規定されたワイヤを選択することで、システム全体の総合的統計誤差を $\pm 5\mu\text{m}$ 以内に抑制できた。時間的に変化する共鳴周波数に対しワイヤ通電周波数を追従させるフィードバックを構築した。このシステムで磁場中心のドリフトを $1\mu\text{m}$ 以内の精度で測定できることを示した。極低エミッタンスリングの精密アライメントに対応できるシステムが完成した。

研究成果の概要(英文)：Using a test bench consisted of five multi-pole magnets with typical field gradients, we demonstrated an alignment of these magnets by introducing a vibrating wire method (VWM). The background fields, geomagnetism, remanent of another magnets, were canceled by counter dipole and quadrupole magnets. An overall statistical error of the system was estimated to be  $\pm 5\mu\text{m}$  using a linearity controlled wire. In order to observe a drift of the magnetic center caused by temperature rise of a water-cooling magnet, and caused by a deformation after installation, etc., we developed a resonance-frequency tracked vibrating wire for a sustainable measurement. A precise alignment system with an accuracy of micro-meter order was completed for a ultra-low emittance ring.

研究分野：ビーム物理

キーワード：Vibrating Wire Method Ultimate Storage Ring Alignment

## 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初の段階で、すでに世界中の放射光施設で極低エミッタンスリングの検討が行われていた。これらの施設では、電子ビームのエミッタンスを回折限界に近づけることで、リングから取り出される放射光のスポットサイズが実質上最小となる究極のリングを目指している。このようなリングでは、ビーム収束系の多極電磁石に例外なく高精度の精密設置(アライメント)が要求される。設置誤差はマイクロオーダーしか許されないため、設計の自由度を奪っている。

Vibrating Wire Method (VWM) は本来、磁場測定用ツールとして開発されたものである。磁場中を通したワイヤに交流電流を通電し振動させ、微弱磁場を検知する。ワイヤをビーム中心軸上に張ることによりアライメントツールとして利用できる。多極電磁石の中心軸上の磁場がゼロであることを利用して、ワイヤが振動しなくなるよう電磁石の中心軸をビーム中心軸に一致させる。

筆者も試作機によりワイヤ上の 1 箇所のみ磁場を発生させて実験を行った。共鳴周波数付近でのワイヤ振幅の周波数応答から磁場を評価した結果、少なくとも  $5[\mu\text{m}]$  以内の精度で磁場中心位置を検知できることが分かった。但し、測定と電磁石位置の調整を繰り返し行う *in situ* アライメントでは、設置誤差を即座に知ることができなければ実質上使用できない。

加えて、極低エミッタンスリングでは多極電磁石の台数が飛躍的に増大するため、直線区間に並ぶ多極電磁石の数は場合によっては十数台以上にもなる。磁石の設置位置に対して感度の高い共鳴の次数を選択することになれば、基本共鳴周波数から十数次高調波までの周波数応答を測定する必要がある。同じく高速化という観点から、測定手法を抜本的に見直す必要がある。

## 2. 研究の目的

極低エミッタンスリングで要求される精度を満たし、実用的な時間内でアライメントを行うためのシステムを構築する。以下に手順を示す。

### (1) 磁場中心測定の誤差評価

磁場中心位置の測定分解能はマイクロオーダーに達するものの、多極電磁石群のアライメントでは、以下に示す克服すべき課題がある。

① 地磁気、残留磁場などバックグラウンド磁場の重畳

② ワイヤの撓み

以上に関して適切な補正を行い、システム全体としての総合的誤差を評価する。

### (2) 高速アライメントの検討

ワイヤ振幅の周波数依存性を測定することなく、共鳴点 1 点のみで瞬時に誤差磁場を評価する手法について提案する。ワイヤの共鳴周波数は環境温度の影響を受けて容易

に変動するため、ワイヤの通電電流周波数を変化する共鳴周波数に追従させるためのフィードバックシステムを構築する。

### (3) 複数電磁石同時アライメントの検討

更なる高速化のため、高周波パルス通電により誤差磁場発生場所の特定を行い、多数電磁石の同時アライメントの可能性を示す。

上記のうち (1)、(2) を実施した段階で、既に十分短時間にアライメント可能であることが分かった。また、システム全体の総合的誤差の抑制や、電磁石の温度による変形などアライメントシナリオに起因する誤差評価の方が重要であると判断し、(3) は行わなかった。

## 3. 研究の方法

### (1) 磁場中心位置の測定

試験用電磁石として 3 台の四極電磁石 ( $Q1, Q3, Q5$ ) と 2 台の六極電磁石 ( $S2, S4$ ) を用意した。リング加速器の直線区間を模擬し、1 台の共通架台の上にこれらの電磁石を並べた。試験セットアップを図 3-1 に示す。直径  $0.2[\text{mm}]$  のベリリウム銅製ワイヤをビーム軸に沿って設置した。ワイヤの全長は  $4.87[\text{m}]$  とした。ワイヤ両端を x-y ステージに乗せたうえプーリーを介して  $2[\text{kgw}]$  の張力を掛けた。基本共鳴周波数は  $28.3[\text{Hz}]$  である。ワイヤの通電電流の周波数を基本共鳴周波数にセットして、ワイヤの振動をレーザセンサにより測定した。振動のうち、通電周波数成分のみロックインアンプでピックアップし、振幅、位相を記録した。

ワイヤの方を走査し、各電磁石の磁場中心位置を求めた。バックグラウンド磁場として存在する地磁気など外部磁場は、別途用意したカウンタ二極電磁石  $Sth, Stv$  で打ち消した。両端の四極電磁石  $Q1, Q5$  の磁場中心を結ぶ直線を「基準線」と定義し、中間電磁石  $Q3, S2, S4$  の磁場中心の基準線との差を「変位」と定義した。

四極電磁石の磁場中心を  $(x_0, y_0)[\text{m}]$ 、磁場勾配を  $G_q[\text{T/m}]$ 、有効長を  $l_e[\text{m}]$  とすると、ワイヤが受ける水平、垂直方向の積分磁束密度分布  $B_y(x)l_e, B_x(y)l_e[\text{Tm}]$  は、

$$B_y(x)l_e = G_q(x - x_0)l_e \quad (1)$$

$$B_x(y)l_e = G_q(y - y_0)l_e \quad (2)$$

で示される。ワイヤの水平、垂直方向振幅は、それぞれ垂直、水平方向の積分磁束密度に比例する。ワイヤを水平、垂直方向に走査し、振幅について線形関数で最小二乗フィッティングを行い、磁場中心位置を求めた。

一方、六極電磁石の磁場中心を  $(x_0, y_0)[\text{m}]$ 、磁場勾配を  $G_s[\text{T/m}^2]$ 、有効長を  $l_e[\text{m}]$  とすると、ワイヤが受ける水平、垂直方向の積分磁束密度分布  $B_y(x)l_e, B_x(y)l_e[\text{Tm}]$  は、

$$B_x(x, y)l_e = G_s(x - x_0)(y - y_0)l_e + \delta B_{x,0}l_e \quad (3)$$

$$B_y(x, y)l_e = \frac{G_s}{2}[(x - x_0)^2 - (y - y_0)^2]l_e + \delta B_{y,0}l_e \quad (4)$$

で示される。ここで、各式の右辺第二項は磁場中心での二極成分である。ここでは、 $B_x$  成分を使って以下のように磁場中心を求めた。

垂直方向の 2 つのオフセット位置、 $y=y_0+y_f, y=y_0-y_f$ [m] の間の積分磁束密度差分の水平方向分布を  $\Delta B_{x,yf}(x)l_e$ [Tm] とすると、

$$\Delta B_{x,yf}(x)l_e = 2G_s y_f (x - x_0)l_e \quad (5)$$

である。同様に、水平方向の 2 つのオフセット位置、 $x=x_0+x_f, x=x_0-x_f$ [m] の間の積分磁束密度差分の垂直方向分布を  $\Delta B_{x,xf}(y)l_e$ [Tm] とすると、

$$\Delta B_{x,xf}(y)l_e = 2G_s x_f (y - y_0)l_e \quad (6)$$

である。上記の式 (5)、(6) は、任意の位置からのオフセット位置でも成り立つ。ワイヤを水平方向、垂直方向のオフセット位置で走査し、ワイヤの垂直方向振幅差分について線形関数で最小二乗フィッティングを行い、磁場中心位置を求めた。オフセットの値としては、 $x_f=y_f=1$ [mm] とした。

六極電磁石の磁場中心測定では、四極電磁石  $Q1, Q3, Q5$  の残留磁場による誤差磁場勾配が無視できない。このため、 $Q1$  をカウンタ四極電磁石として使用し、逆方向に励磁することで誤差磁場勾配を打ち消した。

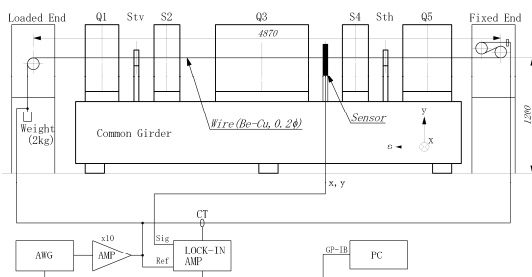


図 3-1. VWM 試験セットアップ。地磁気など外部磁場を打ち消すため、水平、垂直方向のカウンタ二極電磁石 ( $Sth, Stv$ ) を設置した。

## (2) ワイヤ通電周波数のフィードバック

ワイヤの通電電流周波数を変化する共鳴周波数に追従させるためのフィードバックを行った。共鳴状態では通電電流と振動の位相差が  $90$ [deg] であることを利用し、位相を常にモニターして通電電流の周波数を自

動調整した。磁場信号用ワイヤ自身の位相で行うフィードバックを以降では“Basic feedback”と呼ぶ。

ワイヤが磁場中心付近にある状態でも正常にフィードバックができるよう、フィードバック専用ワイヤを別に用意し、磁場信号用ワイヤと  $5$ [mm] 間隔で平行に設置した。フィードバック専用ワイヤの位相で行うフィードバックを以降では“Advanced Feedback”と呼ぶ。フィードバック専用ワイヤに通電することにより誤差磁場が発生する。この誤差磁場を打ち消すため、フィードバック専用ワイヤと対称の位置に第三のワイヤを設置する検討を行っていた。しかしながら、誤差磁場による影響は無視できることが分かったため、使用しなかった。

フィードバックの効果を確認するため、一定磁場中でフィードバックなし、Basic Feedback あり、Advanced Feedback ありの 3 通りで振幅、位相の連続測定を行った。測定間隔は  $3$ [sec] 周期で  $24$ [hour] 連続測定した。Basic Feedback、Advanced Feedback は双方とも  $150$ [sec] 間隔で行った。ワイヤの振幅が水平、垂直方向とも  $100$ [ $\mu$ m] となるよう、 $Sth, Stv$  で一定磁場を発生させた。

## (3) 磁場中心位置のドリフトの測定

測定開始時に対象電磁石の磁場中心位置にワイヤをセットし、振幅の時間的変化から磁場中心位置の変化に換算した。測定間隔は  $3$ [sec] 周期で  $48$ [hour] 連続測定した。Advanced Feedback を  $150$ [sec] 間隔で行った。

## (4) ワイヤの撓みの補正

ワイヤの垂直方向の撓みは、理想的な場合懸垂曲線に従う。図 3-1 のセットアップでは、ワイヤ中央でのたわみ (サグ) は  $0.38$ [mm] になる。撓みが理論曲線に完全に従う場合、サグ  $S$ [m] は基本共鳴周波数の測定値  $f_1$ [Hz] から、以下の式により計算できる。

$$S = \frac{g}{32} f_1^{-2} \quad (7)$$

ここで、 $g$ [m/sec<sup>2</sup>] は重力加速度である。

撓みを実測するため、石定盤を用意し定盤上に  $4$ [m] のワイヤを  $2$ [kgw] の張力で設置した。静電型水レベルシステム (HLS) とワイヤポジショニングシステム (WPS) の組み合わせでワイヤの撓みの長手方向分布を測定し、理論曲線との差分を評価した。

## 4. 研究成果

### (1) 磁場中心測定の統計的誤差の評価

四極電磁石のうち  $Q3$  の磁場中心測定を図 4-1 に示す。図の横軸は基準線からの変位を示す。線形関数でフィッティング行っ

た結果、ゼロクロス点から水平、垂直方向変位を求めると、それぞれ  $-28.47 \pm 0.07 [\mu\text{m}]$ 、 $+53.23 \pm 0.07 [\mu\text{m}]$  となった。ワイヤの振幅を見ながら、水平方向の変位を小さくするよう磁石位置を調整した。調整後、変位はそれぞれ  $-2.59 \pm 0.07 [\mu\text{m}]$ 、 $+60.12 \pm 0.04 [\mu\text{m}]$  となった (図 4-1、黒丸参照)。以上のようにミクロンオーダーでの測定と調整が可能であることが分かった。

六極電磁石のうち  $S2$  の磁場中心測定例を図 4-2 に示す。図の横軸は基準線からの変位を示す。線形関数でフィッティングを行った結果、ゼロクロス点から水平、垂直方向変位を求めると、それぞれ  $+28.8 \pm 0.8 [\mu\text{m}]$ 、 $+11.8 \pm 0.7 [\mu\text{m}]$  となった。 $S4$  でも同等の誤差で変位を求めることができた。

全ての電磁石において、フィッティング誤差は  $1 [\mu\text{m}]$  以内であった。積分磁場の検出限界は  $0.1 [\mu\text{Tm}]$  以下であることが分かった。基本共鳴周波数のみを使い、且つ共鳴点だけの振幅を使って、高速かつ十分な高精度で磁場中心を測定できることが分かった。

ワイヤの走査の所要時間は、1 方向につき  $3 [\text{min}]$  程度であった。この間の共鳴周波数の変化は無視できると判断し (以下の項目 (3) 参照)、通電電流周波数のフィードバックは行わなかった。また、走査することなく 1 点の測定でも変位を推定できる。このシステムを使えば in-situ アライメントを十分高速に行うことができる。

システム全体のオーバーオール統計的誤差を見積もるため、一旦ワイヤを取り外して再度ワイヤを設置し、取り外し前後の変位の測定値を比較した。ワイヤ取り外し前の  $Q3$ 、 $S2$ 、 $S4$  の変位を 0 とし、再設置後の変位を記録した。ワイヤの再設置は 4 回繰り返した。結果を図 4-3 に示す。前後の差分の大きさはワイヤの直線性に大きく依存した。ワイヤの直線性が規定されたワイヤを選択すれば、システム全体の総合的統計的誤差を  $\pm 5 [\mu\text{m}]$  以内に抑制できることが分かった。

## (2) 磁場中心測定の系統的誤差の評価

ワイヤの長手方向の撓み分布の測定結果を図 4-4 に示す。図中に共鳴周波数から計算した懸垂曲線を実線で示した。実測値と計算値の差分は、ワイヤ中央で  $1.0 [\mu\text{m}]$ 、最大で  $8.5 [\mu\text{m}]$  であった。差分はシステムの系統的誤差となる。ワイヤには Nilaco 製を用いた。ワイヤの局所的折れ曲がり (キンク) を含めた系統的誤差を評価するため、今後、NGK 製ワイヤを用いて、ビーム軸方向にさらに細かく再度測定する予定である。

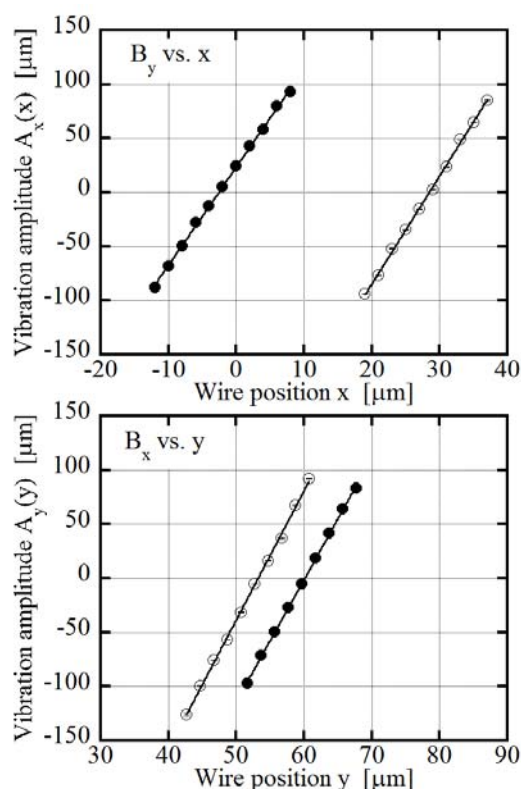


図 4-1. 四極電磁石  $Q3$  の磁場中心測定例。白抜き点は電磁石位置調整前の測定結果、黒点は電磁石位置調整後の測定結果を示す。

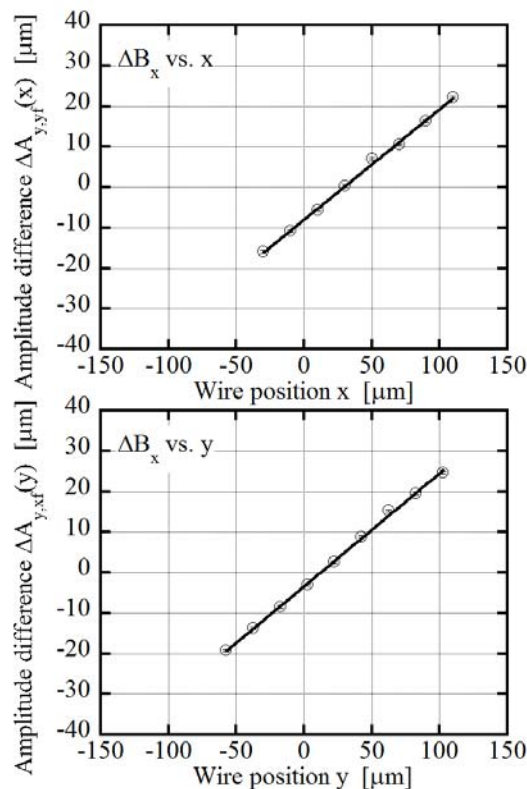


図 4-2. 六極電磁石  $S2$  の磁場中心測定例。縦軸は 2 つのオフセット位置の間の垂直方向振幅差分を示す。

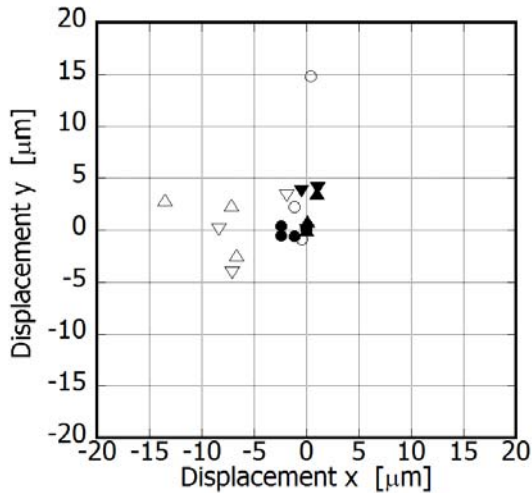


図 4-3. ワイヤを一旦撤去し、再設置したときの、撤去前後の変位測定値の差分分布。上向三角は S2、下向三角は S4、丸は Q3 の変位を示す。黒点は直線性が規定されたワイヤ (NGK 製、C1720W-EHM) を使用した場合、白抜き点は直線性が規定されていないワイヤ (Nilaco 製、541267) を使用した場合について示す。

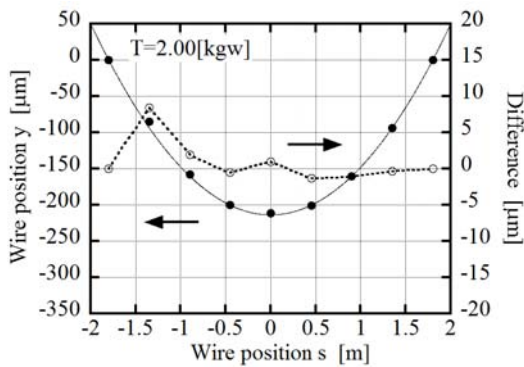


図 4-4. ワイヤの長手方向の撓み分布。黒点は実測値、黒実線は共鳴周波数から計算した懸垂曲線を示す。白抜き点と破線は実測値と計算値の差分を示す。

### (3) 磁場中心測定中の振幅、位相の変動

ワイヤ振幅と位相の時間的変化の測定結果を図 4-5 に示す。初期状態では通電周波数は共鳴周波数に一致していたが、通電電流の周波数を一定とした場合、振幅は 10[hour] で 16[%] 減少した (図 4-5、上図参照)。周囲温度と振動の位相は、相関係数 0.89 の強い相関があり、温度係数は 29[deg/K] であった。

温度係数はワイヤ張力を支える構造に強く依存する。プーリー部の抵抗が大きくなると温度によるワイヤの伸縮を吸収しにくくなるため温度係数が大きくなる。例えば、プーリーを回転させないよう固定したケース

では温度係数は 3 倍以上の値を示した。本研究の試験セットアップ (図 3-1) では、上記項目 (1) のような短時間のワイヤ走査ではフィードバックは不要であった。

一方、Basic Feedback を行うことにより、24[hour] の振幅変動と位相変動の標準偏差は、それぞれ 1.6[%]、1.7[deg] に抑制された。周囲温度と共鳴周波数は、相関係数 0.69 の相関があり、温度係数は 0.02[Hz/K] であった。磁場信号用ワイヤとフィードバック専用ワイヤの共鳴周波数の相関係数は 0.99 であった。Advanced Feedback でも同等の安定度が得られ、24[hour] の振幅変動、位相変動の標準偏差は、それぞれ 1.5[%]、1.8[deg] であった。

### (4) 磁場中心位置の長期ドリフト

Advanced Feedback を用いた磁場中心位置の長期ドリフトの測定例を図 4-6 に示す。図は Q3 についての結果を示す。図中に周囲温度とヨーク温度の変化も示した。垂直方向の磁場中心位置とヨーク温度には明確な相関がみられた。しかしながら、ヨーク温度は 2 日間では一定値に達することはなかった。ヨーク温度は周囲温度にも影響を受けて変化しているように見えた。磁場中心のドリフトについての時定数を正確に見積もるためには、周囲温度の安定化が必要であることが分かった。

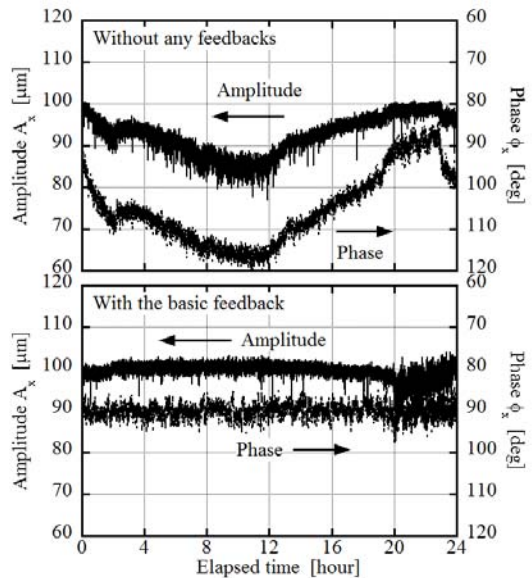


図 4-5. ワイヤの水平方向振幅、位相の時間的変化の測定結果。上図はフィードバックなしで測定した結果、下図は Basic Feedback を行って測定した結果を示す。

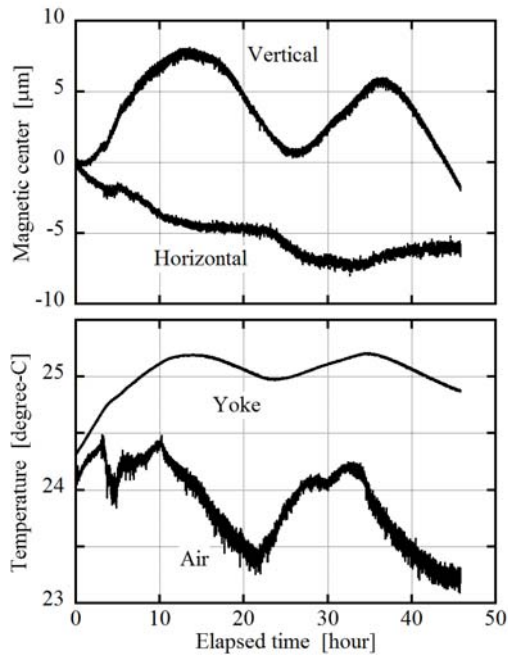


図 4-6. 四極電磁石 Q3 の励磁開始直後からの磁場中心位置の時間的変化（上図）。Advanced Feedback で測定した。下図は測定時の周囲温度、及びヨーク温度の変化を示す。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 5 件)

① K. Fukami, N. Azumi, T. Fujita, T. Honiden, K. Kajimoto, H. Kimura, S. Matsui, T. Nakanishi, Y. Okayasu, T. Watanabe, and C. Zhang, “Resonance Frequency Feedback System for a Precise Magnet Alignment using Multi-Vibrating Wires”, 5 th International Particle Accelerator Conference, June 15-20, 2014, Dresden, Germany.

② K. Fukami, N. Azumi, T. Fujita, T. Honiden, K. Kajimoto, H. Kimura, S. Matsui, T. Nakanishi, Y. Okayasu, T. Watanabe, and C. Zhang, “Development of Precise Magnet Alignment System using Multi-Vibrating Wires”, 11 th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9-11, 2014, Aomori, Japan.

③ K. Fukami, N. Azumi, T. Honiden, H. Kimura, J. Kiuchi, T. Kai, S. Matsui, and T. Watanabe, “Development of Micrometer-Order Magnet Alignment using Vibrating Wire for Next Generation Light Source”, 12 th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 5-7, 2015, Tsuruga, Japan.

④ K. Fukami, N. Azumi, T. Kai, H. Kimura, J. Kiuchi, S. Matsui, T. Watanabe, and

C. Zhang, “Estimation of Magnet Alignment Accuracy for SPring-8 Upgrade using Resonance-Frequency Tracked Vibrating Wire”, 14 th International Workshop on Accelerator Alignment, October 3-7, 2016, Grenoble, France.

⑤ K. Fukami, N. Azumi, T. Kai, H. Kimura, J. Kiuchi, S. Matsui, S. Takano, T. Watanabe, and C. Zhang, “Precise Magnet Alignment for the SPring-8 Upgrade”, International Magnetic Measurement Workshop, June 4-9, 2017, Didcot, U.K.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

なし

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

深見 健司 (FUKAMI, Kenji)

公益財団法人高輝度光科学研究センター  
加速器部門・副主幹研究員

研究者番号: 60463311

(2) 研究分担者

藤田 貴弘 (FUJITA, Takahiro)

公益財団法人高輝度光科学研究センター  
加速器部門・研究員

研究者番号: 40416384

(3) 研究分担者

渡部 貴宏 (WATANABE, Takahiro)

公益財団法人高輝度光科学研究センター  
加速器部門・副主席研究員

研究者番号: 90282582