

## 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<sup>#,A)</sup>、安積則義<sup>B)</sup>、藤田貴弘<sup>A)</sup>、本井傳晃央<sup>A)</sup>、鍛治本和幸<sup>C)</sup>、木村洋昭<sup>B)</sup>、松井佐久夫<sup>B)</sup>、  
中西辰郎<sup>C)</sup>、岡安雄一<sup>A)</sup>、渡部貴宏<sup>A)</sup>、張超<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> JASRI/SPring-8、<sup>B)</sup> RIKEN, Harima Branch、<sup>C)</sup> SPring-8 Service Co., Ltd.

1. はじめに
2. 方法 (周波数フィードバック、マルチワイヤについて)
3. 測定
4. 結果 (フィードバック性能)
5. 考察 (磁場中心分解能、ドリフト)
6. まとめと克服すべき問題点

## 1. はじめに

「**電磁石の精密アライメント技術**」: 次世代リングのカギを握る  
ミクロンオーダーに迫る高いアライメント精度  
→ **設計自由度の増大** + ビーム調整の期間の短縮。

Vibrating Wire Method (VWM):

ビーム中心軸に張ったワイヤに、AC 電流を通電して磁場中で強制振動させる。  
→ 共鳴点でのワイヤの振幅は誤差磁場に比例。振動が無くなる場所が磁場中心。  
(利点)

**分解能が高く、他の基準点に移設する必要が無い。**

(欠点)

外気温等の変動で**共鳴周波数が容易に変化**し、振幅変動。**磁場の変化と区別できない。**

**本研究の特長**

**AC 電流の周波数を共鳴周波数に追従させる。(周波数フィードバック)**

## 2. 方法

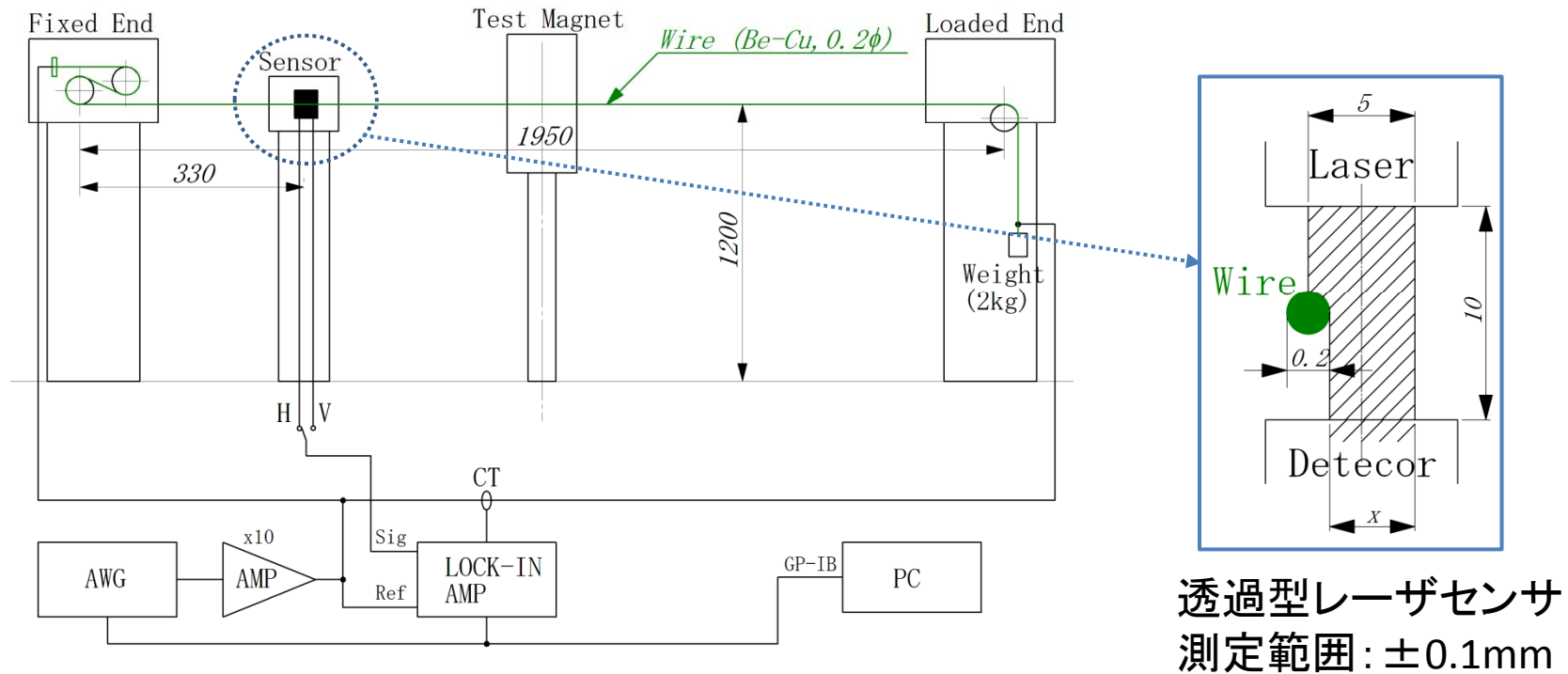


図 2-1. VWM の試験用セットアップ。

- ・ワイヤ材質：Be-Cu (0.2φ)、ワイヤ長：1.95 [m]、張力：2 [kgw]
- 基本共鳴周波数：70 [Hz]、サジッタ：62.5 [μm]
- (試験電磁石：中央に設置)

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho}}, \quad S = \frac{\rho g}{8T} L^2 = \frac{g}{32 f_1^2}$$

## 2. 方法(周波数フィードバック)

共鳴周波数付近での振幅  $A(\omega)$ 、位相  $\phi(\omega)$

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

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

$b_n$ : 共鳴周波数  $2\pi f_n$  [rad/s]、 $c_n$ : 減衰定数 [ $s^{-1}$ ]  
 $a_n$  [m/s<sup>2</sup>] → 磁場

共鳴点での振幅だけで磁場は求められる。  
 但し、共鳴周波数は容易に変化する。

→ 通電周波数を共鳴周波数に追従させる。  
 (周波数フィードバック)

共鳴点での位相は  $90^\circ$ 、周波数の変化量は、  
 位相の測定値から推定できる。

$$\Delta\omega \cong \frac{c_n}{2 \tan \phi_n}$$

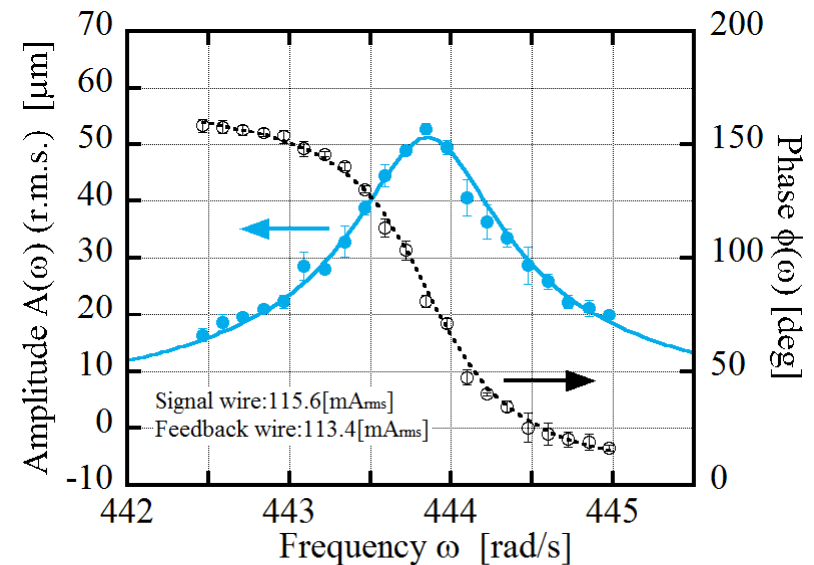


図 2-2. 振幅、位相の周波数依存性。

## 2. 方法(マルチワイヤ)

磁場信号用ワイヤ (Signal Wire) は磁場中心付近にある。

→ 磁場が十分強い位置にフィードバック専用ワイヤ (Feedback Wire) を設置。

Signal Wire 自身の位相でのフィードバック: Basic Feedback

Feedback Wire の位相でのフィードバック: Advanced Feedback

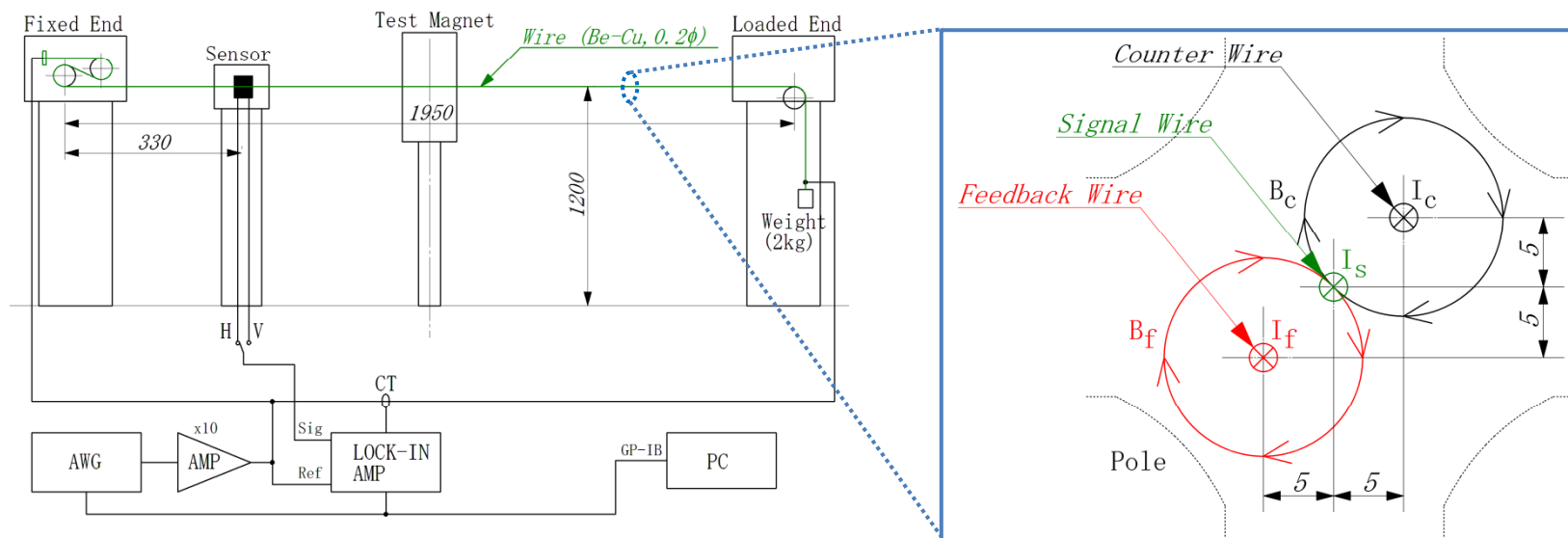


図 2-3. VWM の試験用セットアップ(左)とワイヤ断面図(右)。AWG, Lock-in AMP 等の測定回路系は、ワイヤ個別に用意されている。

- Feedback Wire の通電による磁場の重畳:  $< 1 [\mu\text{Tm}]$
- 磁場を打ち消すための Counter Wire の必要性について検討。

### 3. 測定(フィードバック性能)

試験電磁石：水平、垂直コンバインド二極電磁石  $2 \times 10^{-3}$  [T]  $\times$  0.15 [m]、一定磁場

#### 3-1. 振幅、位相の周波数応答の測定

- ・位相による周波数フィードバックに必要な振動の減衰定数  $c$  の決定。
- ・Feedback Wire の影響について評価するため、ON/OFF による Signal Wire の  $a, c$  係数の変化を観測。

#### 3-2. フィードバック試験

以下の3条件で振幅、位相の変動を6時間連続測定した。  
サンプリングレート: 1 [S/sec]、100 [sec] 分の移動平均を記録。

##### (1) フィードバック無し

- ・振幅、位相の変動量の観測。

##### (2) Basic Feedback 有り

- ・振幅、位相の安定度の観測。
- ・Signal Wire, Feedback Wire 共鳴周波数の相関の観測。

##### (3) Advanced Feedback 有り

- ・振幅、位相の安定度の観測。

基本共鳴周波数だけでなく、3-rd, 5-th, 7-th 高調波について行った。  
(ワイヤの最大振幅を  $\pm 50 \mu\text{m}$  (r.m.s.) として通電電流値を決めた。)

### 3. 測定(磁場中心測定分解能)

試験電磁石 : 四極電磁石 40[T/m] × 0.1[m]

#### 3-3. 磁場中心位置の測定

電磁石の水平方向、垂直方向位置を遠隔制御ステージを用いて 1 [μm] ステップで移動、ワイヤ振幅の変化を測定。(1-st、Basic Feedback)

#### 3-4. 磁場中心位置のドリフトの監視

電磁石の磁場中心位置とワイヤ位置とを一致させ、その後ワイヤの振幅を 48 時間連続測定。サンプリングレート: 1 [S/sec]。(1-st、Advanced Feedback)

# 4. 結果(周波数応答)

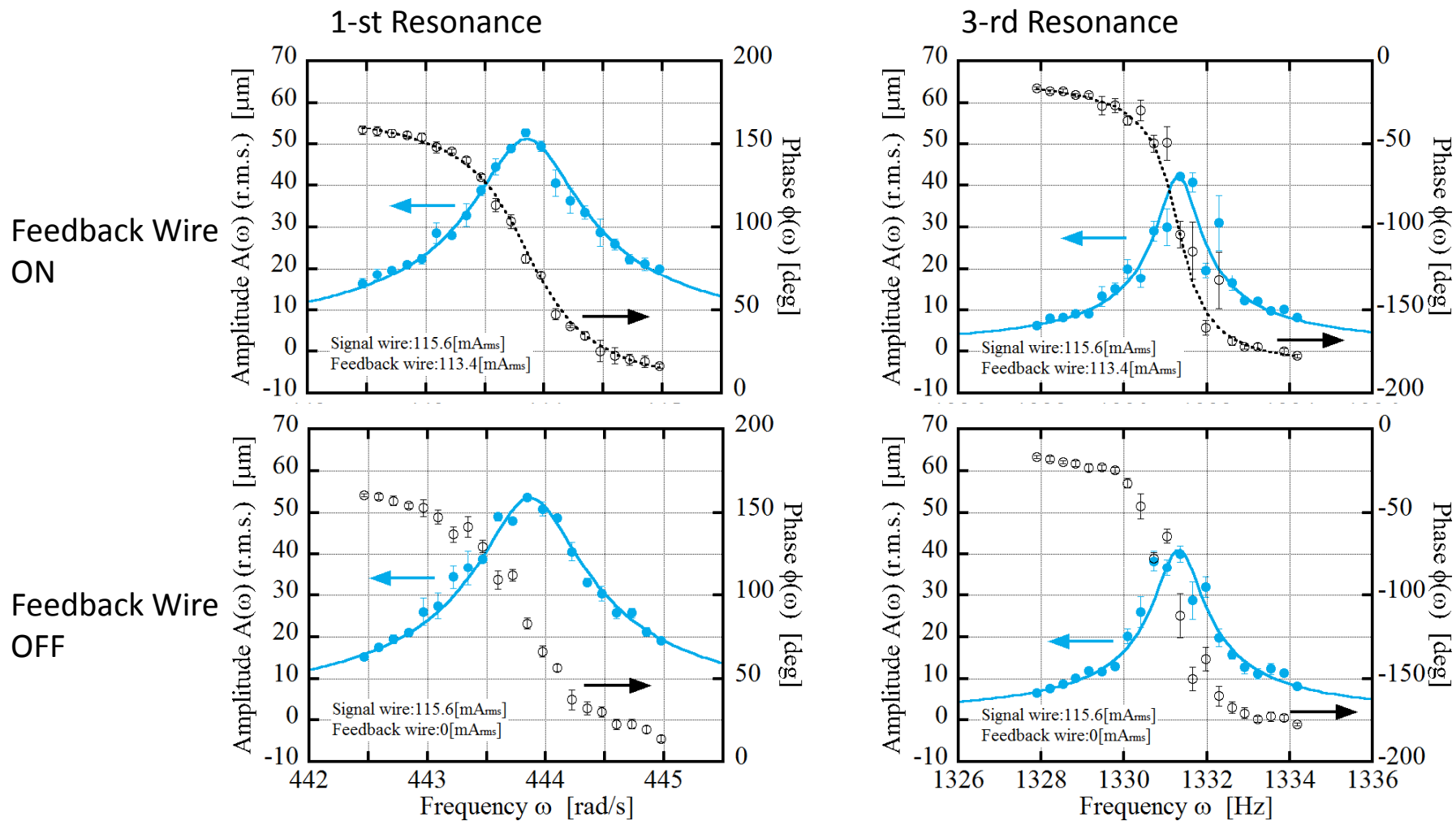


図 4-1. Signal Wire の振幅、位相の周波数応答。



## 4. 結果(周波数応答)

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

Table 3-1. 次数別フィッティング結果まとめ

n	Feedback Wire : ON			Feedback Wire : OFF		
	$a_n$ [ms <sup>-2</sup> ] x10 <sup>-2</sup>	$b_n/2\pi$ [Hz]	$c_n$ [s <sup>-1</sup> ]	$a_n$ [ms <sup>-2</sup> ] x10 <sup>-2</sup>	$b_n/2\pi$ [Hz]	$c_n$ [s <sup>-1</sup> ]
1	2.02±0.03	70.641±0.002	0.89±0.02	2.07±0.03	70.643±0.001	0.87±0.02
3	5.96±0.09	211.880±0.004	1.06±0.03	6.42±0.10	211.880±0.005	1.17±0.05
5	8.55±0.13	353.080±0.008	2.89±0.05	8.47±0.09	353.080±0.006	2.81±0.04
7	5.56±0.10	494.560±0.009	1.93±0.10	5.68±0.09	494.540±0.008	1.90±0.11

Feedback Wire の磁場の重畳は無視できる。→ Counter Wire は設置しなかった。

Table 3-2. 次数別フィードバック係数

n	Signal Wire $c_n$ [s <sup>-1</sup> ]	Feedback Wire $c_n$ [s <sup>-1</sup> ]
1	0.80	0.76
3	1.04	1.13
5	3.02	1.73
7	2.06	1.75

$$\Delta\omega \cong \frac{c_n}{2 \tan \phi_n}$$

# 4. 結果(周波数フィードバック: Basic Feedback)

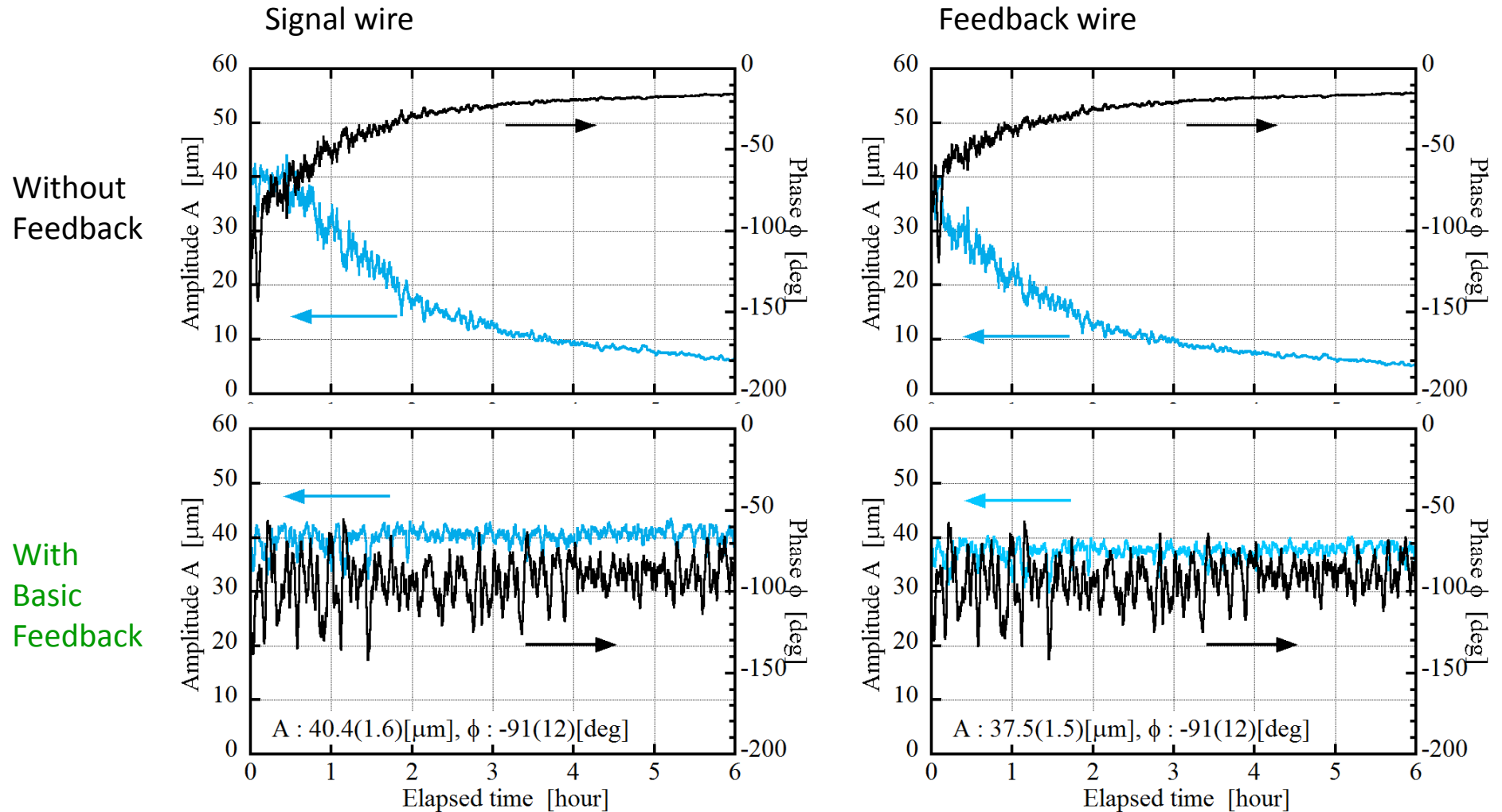


図 4-2. フィードバック有無での振幅、位相の時間的变化(3-rd)。

Basic Feedback により振幅の変動は 4 [%] 以内に抑制 !

# 4. 結果(周波数フィードバック: Advanced Feedback)

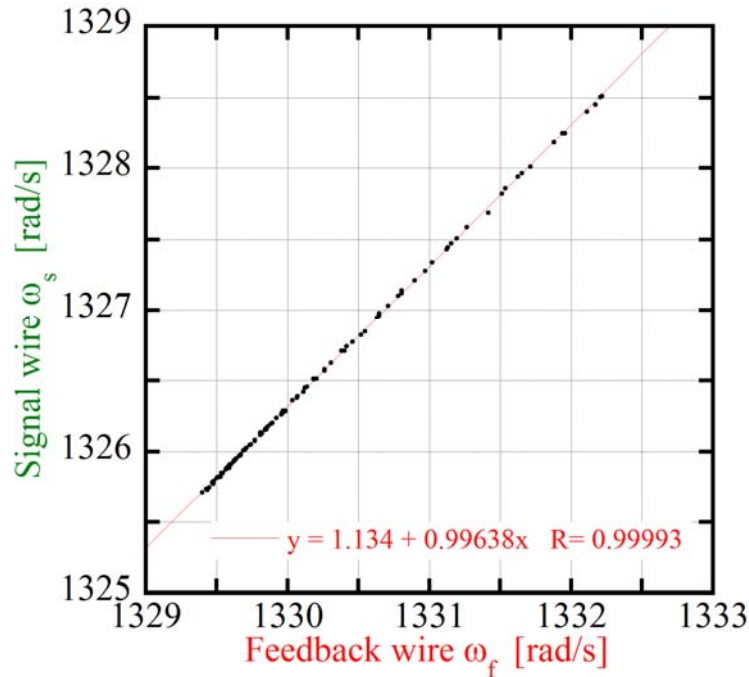


図 4-3. 共鳴周波数の相関(3-rd)。

周波数変化量: 0.2 [%] / 0.7 [K]  
 ほぼ完全な相関が見られる。  
 →Advanced Feedback 可能。

実際に Basic Feedback と同等  
 の安定度が得られた(右図)。

With  
 Basic  
 Feedback

With  
 Advanced  
 Feedback

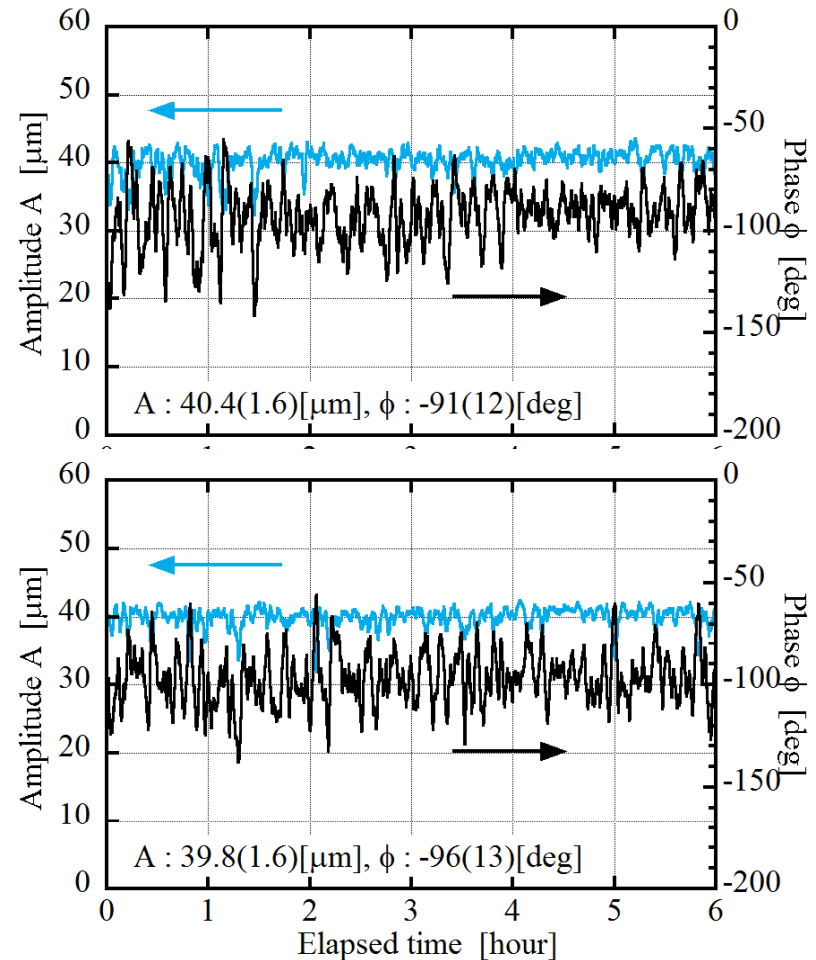


図 4-4. 両フィードバックによる安定度の比較(3-rd)。

# 4. 結果(周波数フィードバック、その他の次数)

Without Feedback

With Basic Feedback

With Advanced Feedback

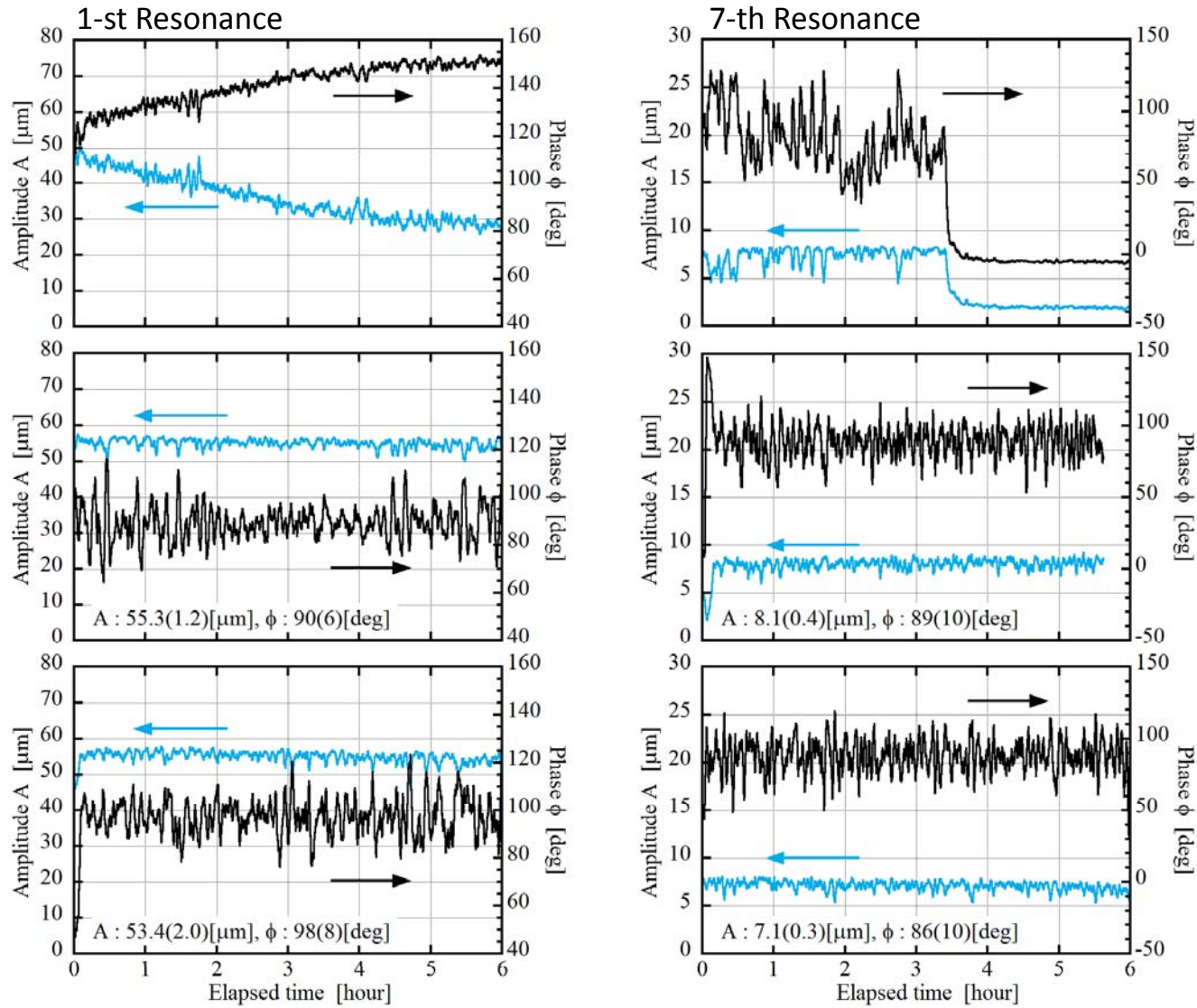


図 4-5. フィードバック有無での振幅、位相の時間的变化。

## 5. 考察(磁場中心測定分解能)

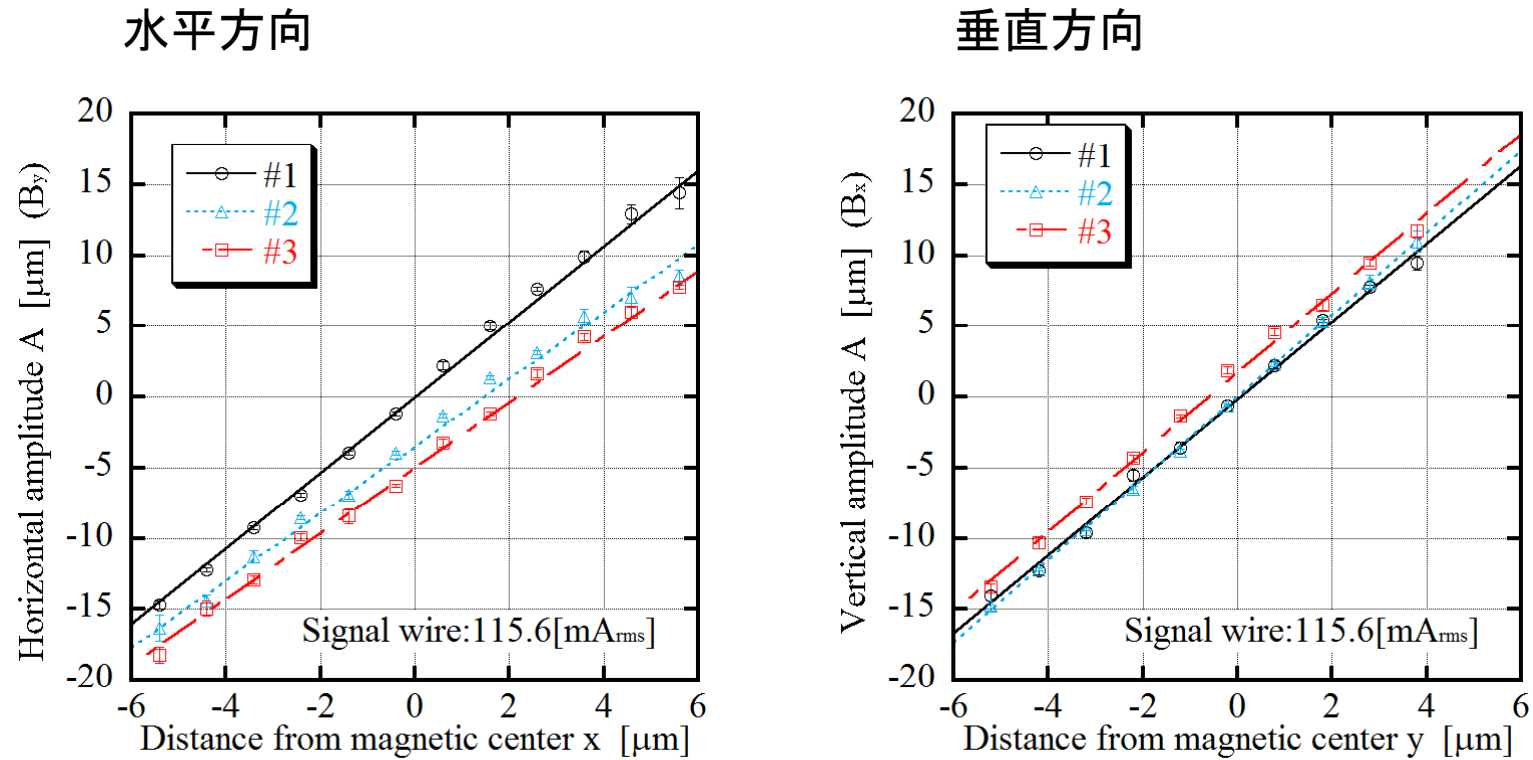


図 5-1. 電磁石の位置に対するワイヤの振幅(1-st)。

電磁石設置位置 1  $\mu\text{m}$  に対するワイヤ振幅の変化量は 2.8  $\mu\text{m}$ 。  
 位置分解能は 0.1  $\mu\text{m}$  に達する。→ 積分磁場 0.4  $\mu\text{Tm}$  に相当。

## 5. 考察(バックグラウンド磁場の影響)

### (1) 地磁気

励磁を OFF としてもワイヤの残留振動あり。

#### ・従来方式

残留振動を差し引く。

サブミリオーダーの広い走査から内挿する。

#### ・目標

電磁シールドで目標  $< 0.1 [\mu\text{Tm}]$ 。

### (2) 残留磁場

複数の四極、六極電磁石を共通架台実機上でアライメントする際に対策が必要。

#### ・従来方式

水平走査時:  $B_x$ 、垂直走査時:  $B_y$  を用いる。

サブミリオーダーの広い走査から内挿する。

#### ・目標

対象以外の電磁石の電磁シールド。

表 5-1. バックグラウンド磁場の大きさ

項目	積分磁場 [ $\mu\text{Tm}$ ]	
	$B_y L$	$B_x L$
検出分解能*	0.4	0.4
地磁気		
(@ 1-st resonance)	50	40
(@ 3-rd resonance)	3	9
残留磁場		
(@ $x=50\mu\text{m}$ )	1	0
(@ $y=50\mu\text{m}$ )	0	1

\* 通電電流を 15 倍まで増大可能 ( $\Delta T < 20 \text{ K}$ )。  
最小分解能は  $0.027 [\mu\text{Tm}]$

## 5. 考察(バックグラウンド磁場の影響、サブミリ走査)

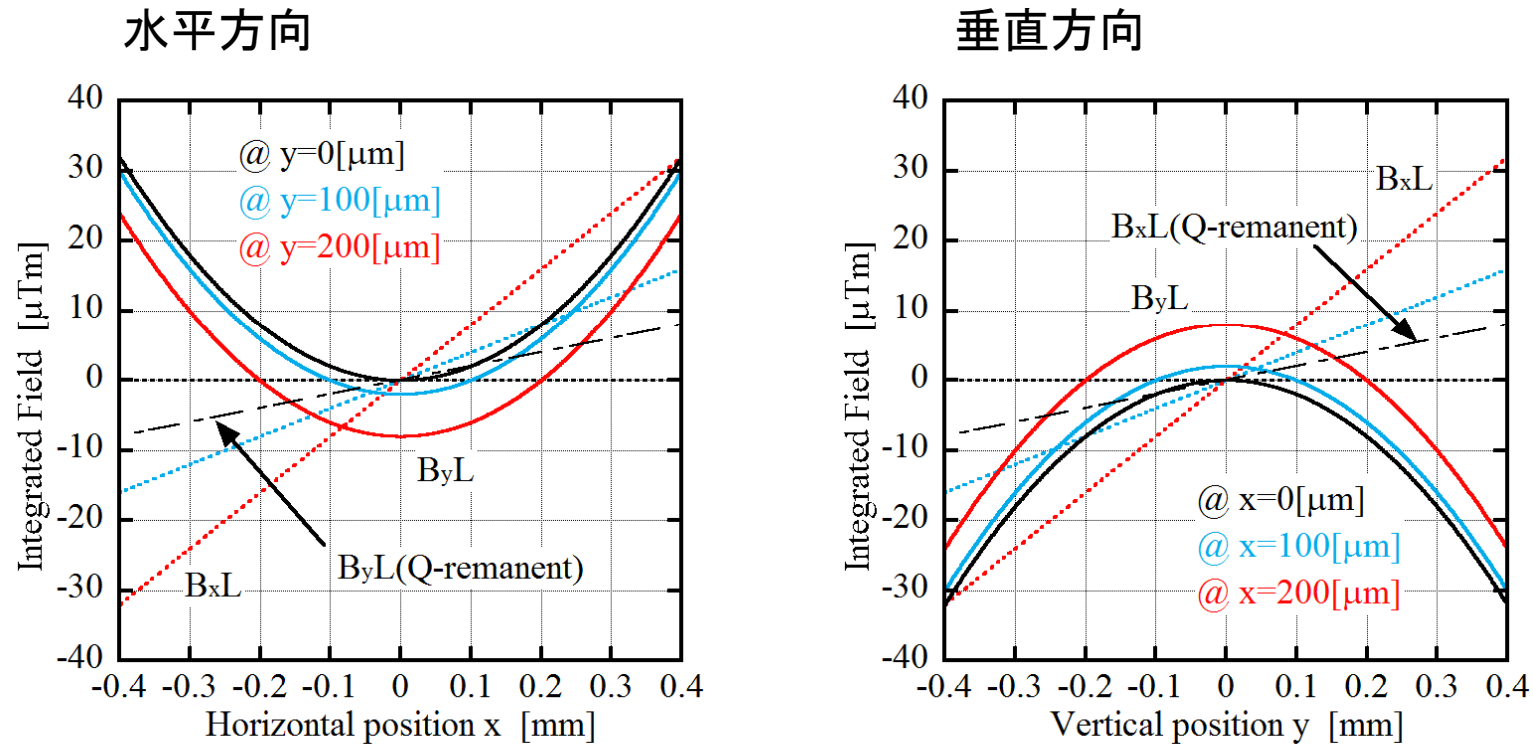


図 5-2. 電磁石位置に対する  $B_x$ ,  $B_y$  の積分磁場。左: 水平方向、右: 垂直方向。  
 $B_y''L = 2000 [\text{T/m}^2] \times 0.2 [\text{m}]$  を仮定した。

- ・地磁気、残留磁場とも無視できる。

## 5. 考察(バックグラウンド磁場の影響、ミクロン走査)

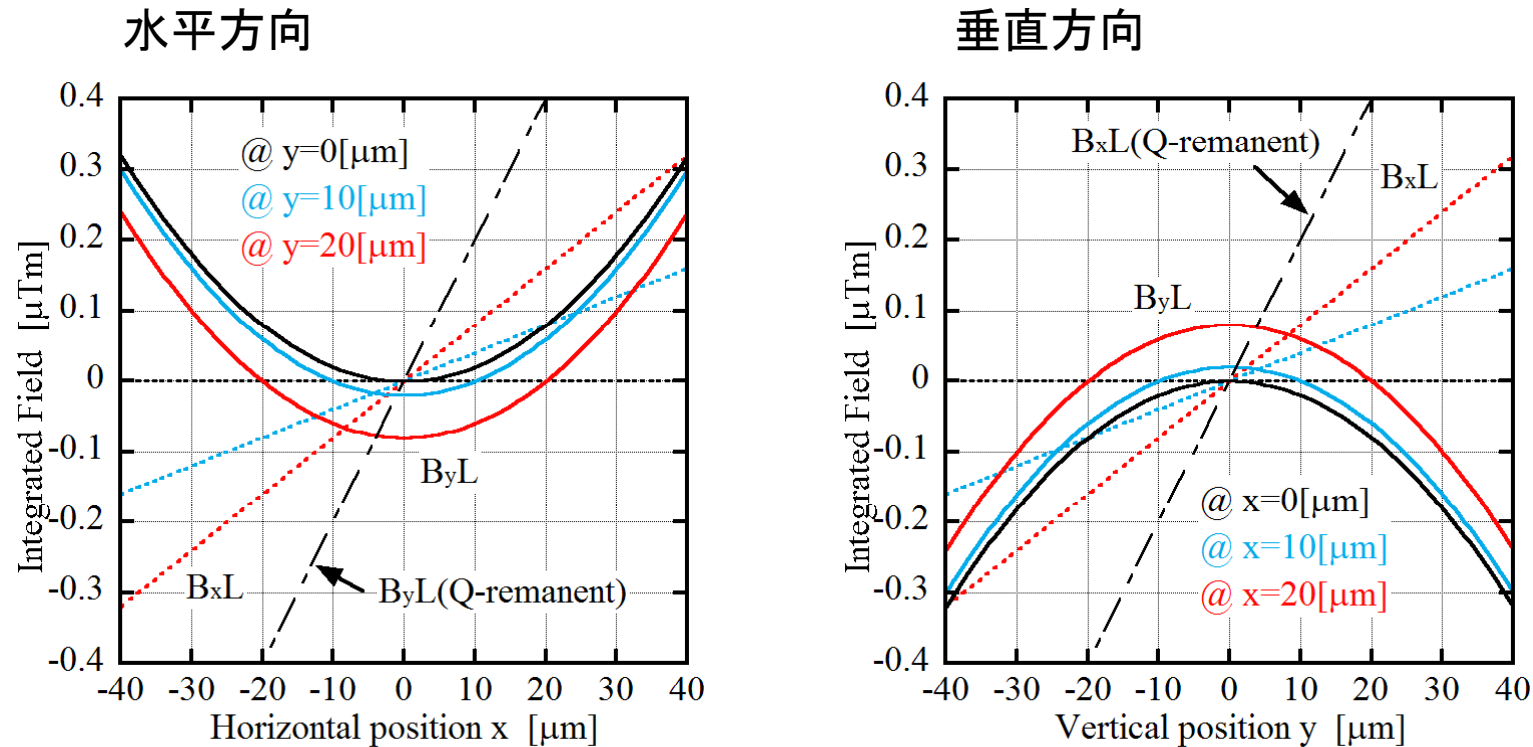


図 5-3. 電磁石位置に対する  $B_x, B_y$  の積分磁場。左: 水平方向、右: 垂直方向。  
 $B_y''L = 2000 \text{ [T/m}^2] \times 0.2 \text{ [m]}$  を仮定した。

- ・地磁気、残留磁場とも無視できない。
- 水平走査時:  $B_x$ 、垂直走査時:  $B_y$  を用いる。
- バックグラウンド磁場の電磁シールドを検討。



## 5. 考察(磁場中心ドリフト)

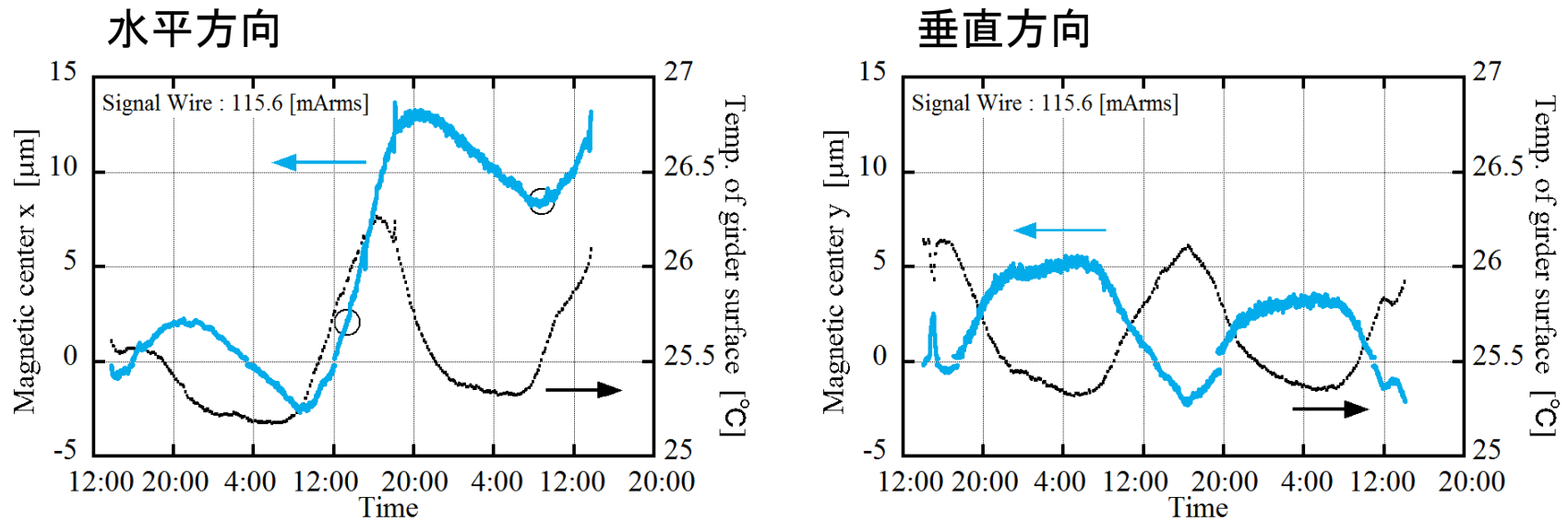


図 5-4. 磁場中心位置の時間的变化とワイヤ架台表面の温度変化。

垂直方向: 架台表面温度と相関が明確。 $\Delta y = -7.3 [\mu\text{m}/\text{K}]$ 。

水平方向: 架台傾きに起因?

→ Advanced Feedback を用いることにより、ドリフトの自動監視が可能。

## 5. 考察(磁場中心ドリフト)

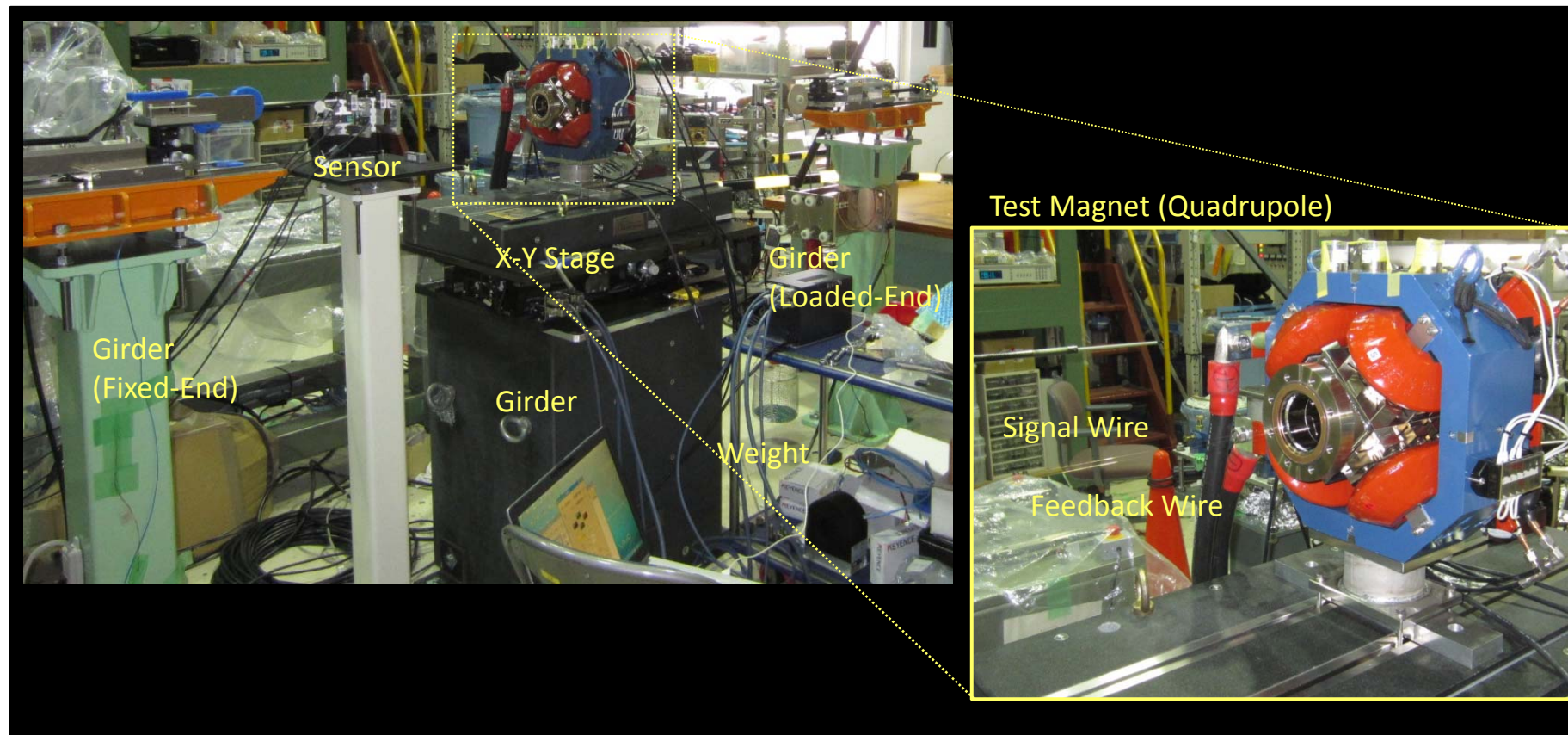


図 5-5. 四極電磁石の磁場中心位置測定時の写真(左)。右は電磁石部拡大図。

## 6. まとめと克服すべき問題点

### まとめ

- ・一定磁場中でのワイヤの振幅を安定させる手法として、周波数フィードバックは有効であることを示した。振幅の周波数応答を取得する必要が無いので、迅速に測定可能。
- ・Signal Wire が磁場中心付近にあってもフィードバックできる Advanced Feedback についても同等の性能を確認した。アライメント中の磁場中心のドリフト、事前の材料試験などに有効である。

### 克服すべき課題

- ・バックグラウンド磁場のシールドが肝要である。地磁気、残留磁場とも測定手法により避けることは可能であるが、シールドできれば測定精度、測定の自由度とも改善できる。