

---

# 低温レーザー干渉計CLIOでの Coil-Magnet Actuator による 振り子の熱雑音

我妻一博, 内山隆, 山元一広<sup>A</sup>, 川村静児<sup>B</sup>, 三代木伸二,  
大橋正健, 寺田聡一<sup>C</sup>, 黒田和明, 新井宏二<sup>B</sup>, 宮川治<sup>D</sup>

東大宇宙線研, MaxPlanck研<sup>A</sup>, 国立天文台<sup>B</sup>,  
産総研<sup>C</sup>, California工科大<sup>D</sup>

# もくじ

---

Coil-Magnet Actuator のCoilで生じる渦電流 による  
振り子の熱雑音をCLIOで測定し、評価した

1. 背景
2. Coil起因の熱雑音
  - 2.1 原理計算と見積もり
  - 2.2 測定の戦略
  - 2.3 熱雑音の測定
  - 2.4 理論値との比較と再現性
3. まとめ

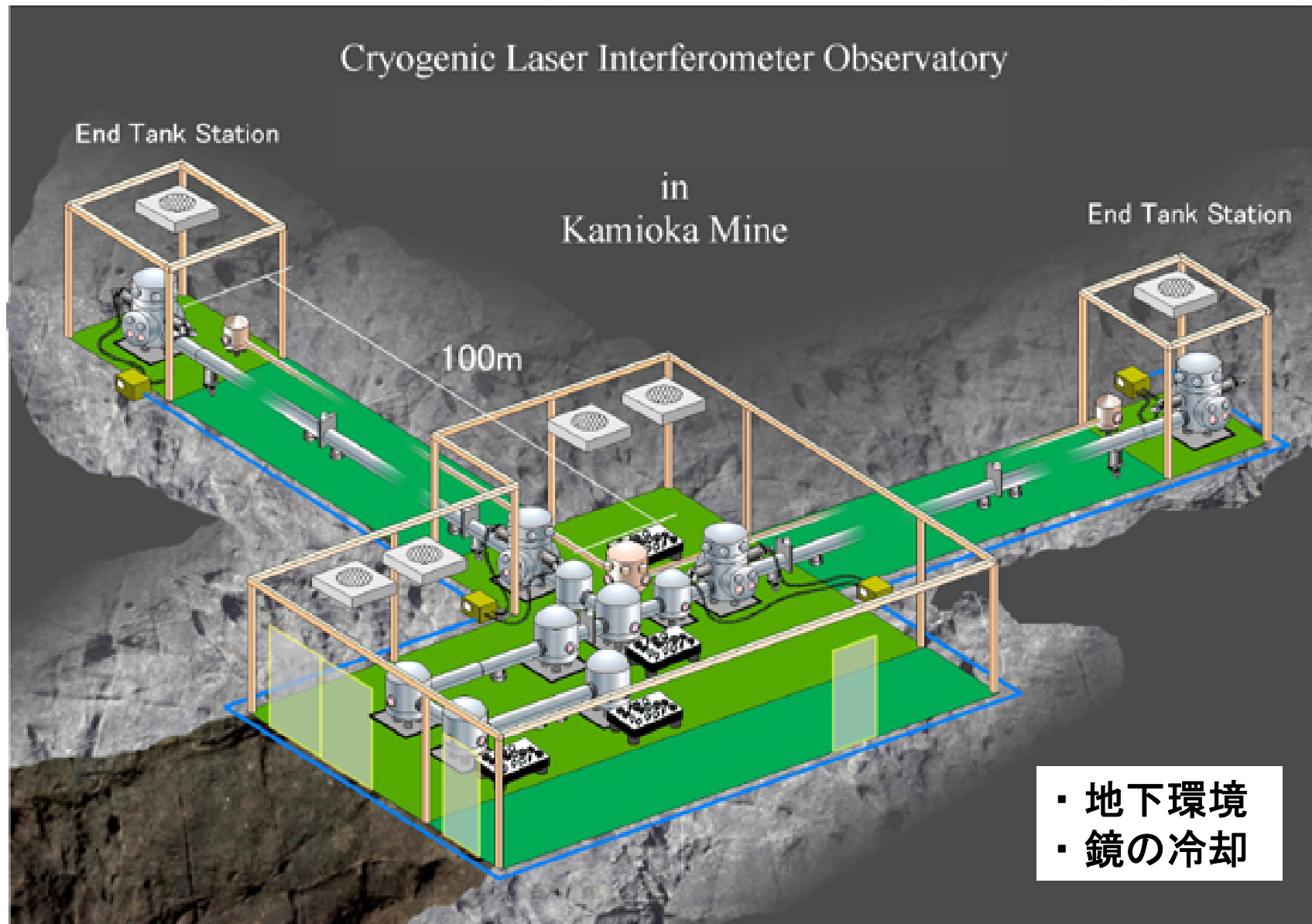
# もくじ

---

Coil-Magnet Actuator のCoilで生じる渦電流 による  
振り子の熱雑音をCLIOで測定し、評価した

1. 背景
2. Coil起因の熱雑音
  - 2.1 原理計算と見積もり
  - 2.2 測定の戦略
  - 2.3 熱雑音の測定
  - 2.4 理論値との比較と再現性
3. まとめ

# 背景



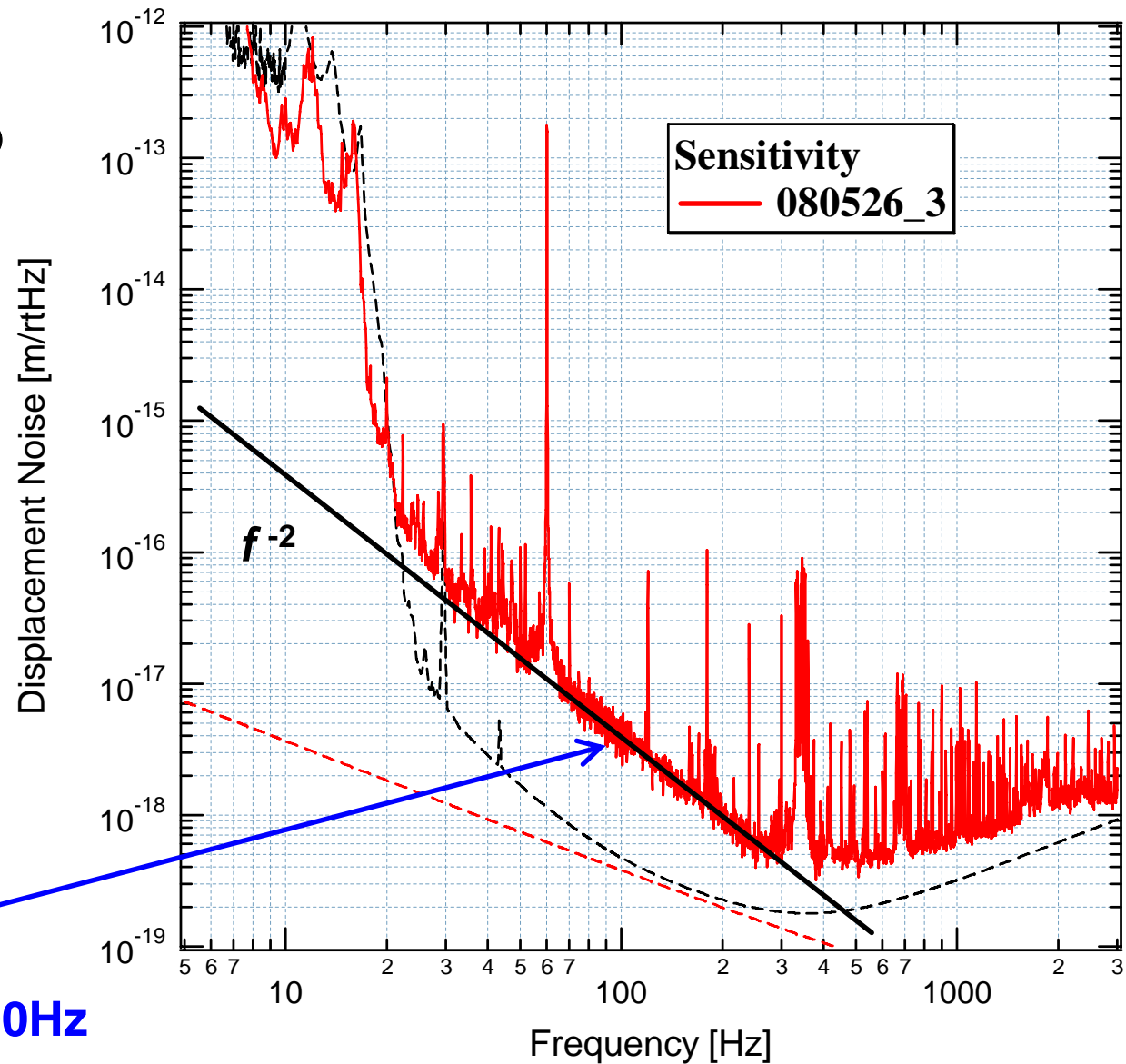
# 背景

CLIOの感度は  
30Hz ~ 200Hz を  $f^{-2}$  の  
Unknownなノイズで制  
限されていた



6月に劇的な改善

$3 \times 10^{-18}$  [m/rtHz] @ 100Hz

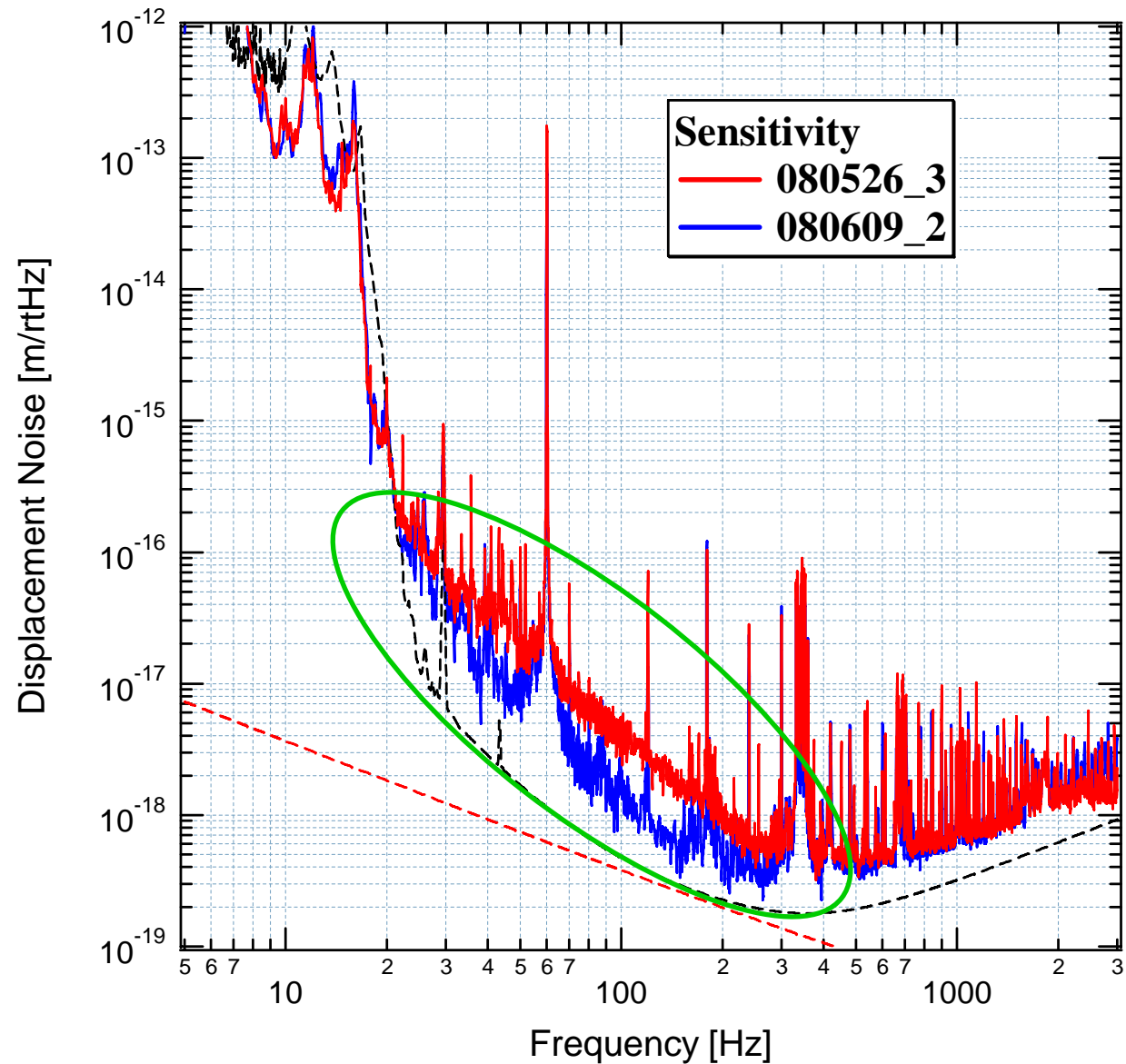


# 背景

天文台とCLIOのコラボ  
企画の一環

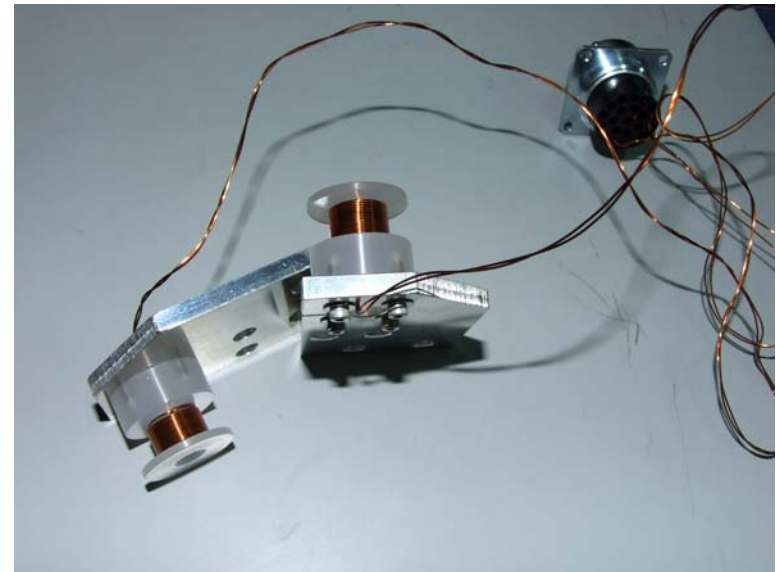
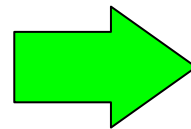
2008年6月5～6日  
川村静児氏による  
ノイズハンティング

原因：  
Coil-Holderに生じる  
渦電流起因の振り子  
の熱雑音であった。



# 背景

- Coilを取り付けるHolderを渦電流の効果が低いHolderに交換



- Holder同様、Coilにも渦電流によってノイズが生じる
- Coilに生じる渦電流は、Holderと違って避けられないノイズ源

⇒ Coilに生じる渦電流による振り子の熱雑音を詳細に調べてみた

# もくじ

---

Coil-Magnet Actuator のCoilで生じる渦電流 による  
振り子の熱雑音をCLIOで測定し、評価した

1. 背景
2. Coil起因の熱雑音
  - 2.1 原理計算と見積もり
  - 2.2 測定の戦略
  - 2.3 熱雑音の測定
  - 2.4 理論値との比較と再現性
3. まとめ



## 2.1 原理計算と見積もり

渦電流によって、Coil自身にも電流が流れて熱雑音となる  
振り子の熱雑音 (Viscous damping)  $\Rightarrow$  揺動散逸定理

$$G = \frac{4k_B T \omega_0}{m \omega^4 Q} \quad \sqrt{G} \text{ [m}/\sqrt{\text{Hz}}]$$

運動方程式

振り子:  $m(-\omega^2 + \omega_0^2)\tilde{x} = N\alpha\tilde{I}$

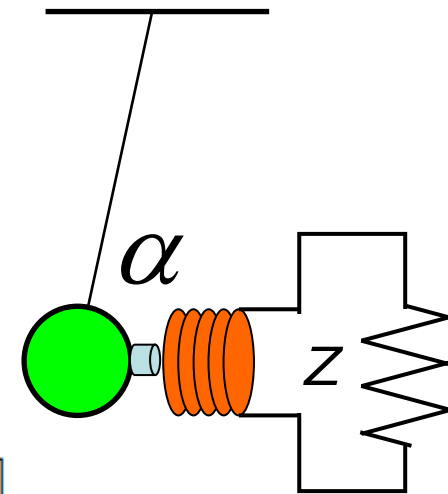
回路:  $Z\tilde{I} + i\omega\alpha\tilde{x} = 0$

$\alpha$  は Coil-magnet actuator の Coupling 率 [N/A]

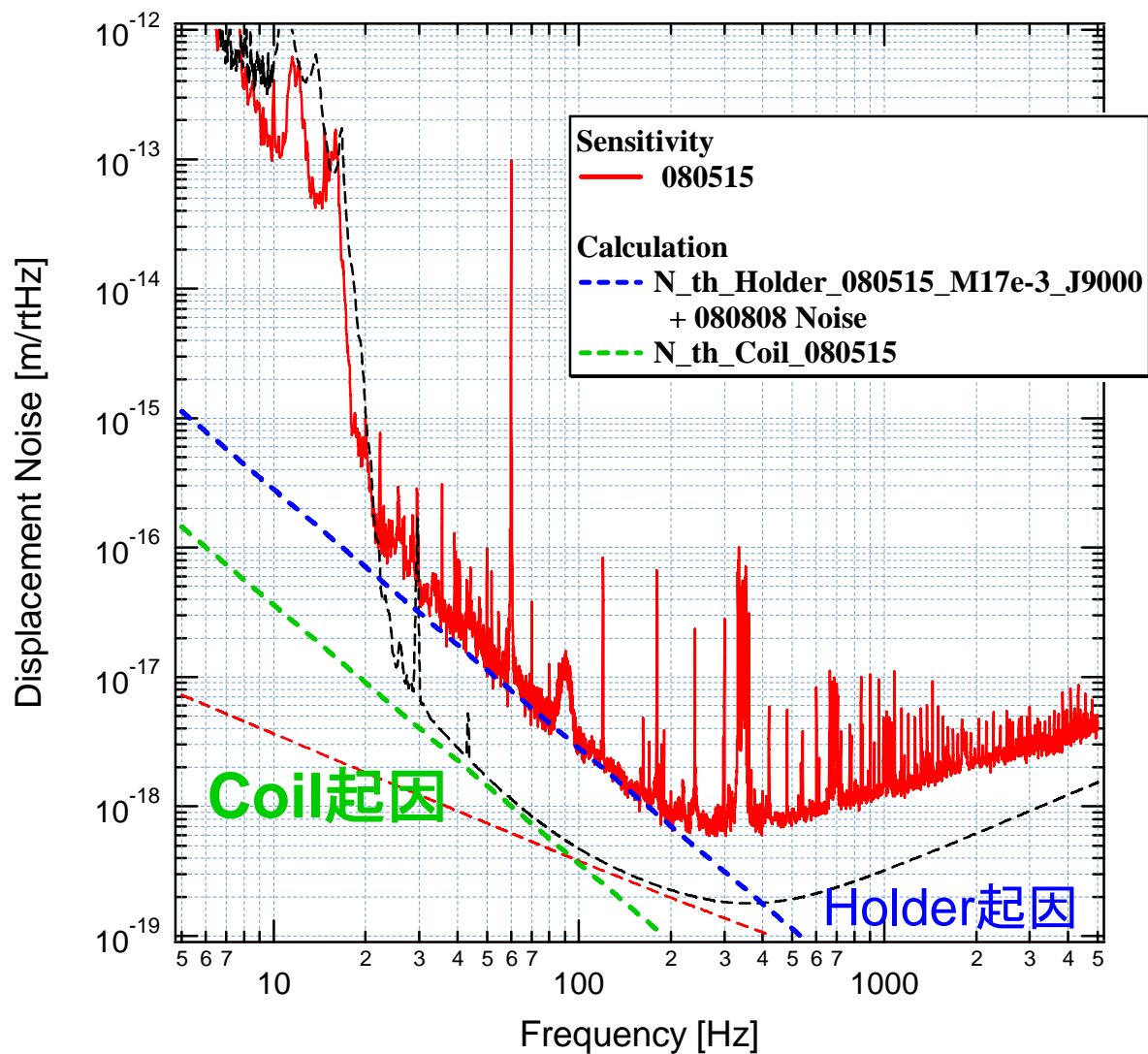
$$m(-\omega^2 + \omega_0^2)\tilde{x} + i\frac{N\alpha^2\omega}{Z}\tilde{x} = 0$$

$$Q = \frac{m\omega_0 R}{N\alpha^2}$$

$$G = \frac{4k_B T N \alpha^2}{m^2 \omega^4 R}$$



## 2.1 原理計算と見積もり



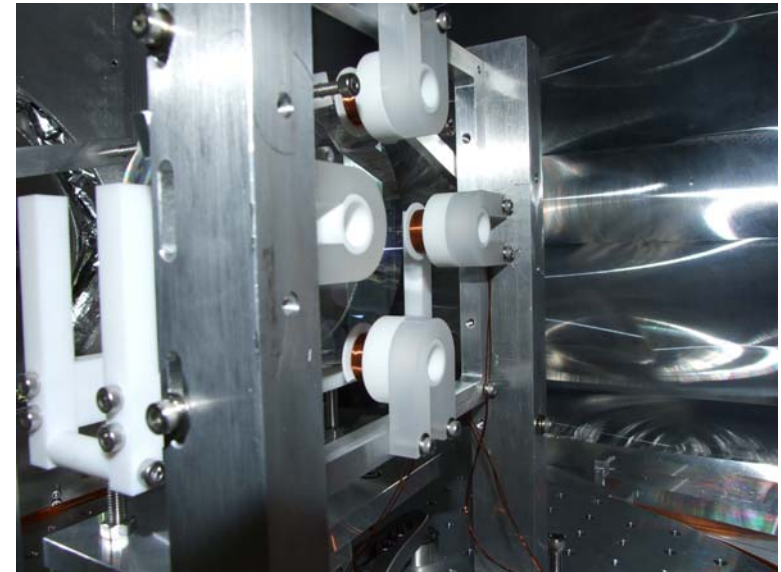
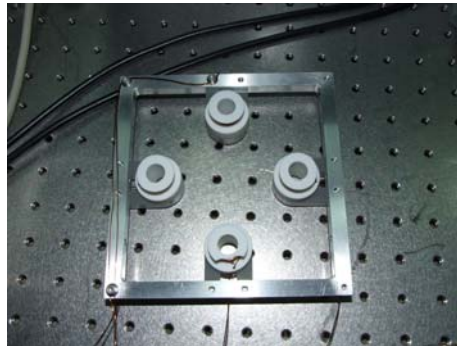
うまくすれば、Coil起因の振り子の熱雑音が見えるかもしれない！

## 2.2 測定の戦略

### Coil起因の熱雑音を見るための戦略

- Holder起因の熱雑音をCoil起因より下げる  
⇒ マコール製のコイルボビンを使用

Holderの熱雑音回避用に内山さんがすでに作っていたものを利用



- Coil起因の熱雑音を大きくする

$$G = \frac{4k_B T N \alpha^2}{m^2 \omega^4 R} \propto \frac{\alpha^2}{R} \quad R \text{を下げ、}\alpha \text{を上げる}$$

$$\alpha = \frac{\mu_0 \mathcal{M}}{4\pi} \sum_{s=0}^{u-1} \sum_{n=0}^{w-1} \frac{3(z_1 + dn)(r_1 + ds)}{((r_1 + ds)^2 + (z_1 + dn)^2)^{5/2}} 2\pi(r_1 + ds) \quad \mathcal{M} \text{を上げる}$$

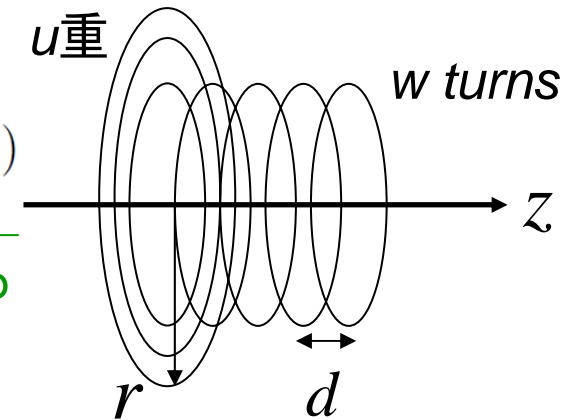
Per. Near :サマリウムコバルト磁石  $\phi$  1mm  $M = 2.9 \times 10^{-3} [\text{A}\cdot\text{m}^2] \times$   
 Per. End :ネオジウム磁石  $\phi$  2mm  $M = 1.7 \times 10^{-2} [\text{A}\cdot\text{m}^2] \odot$

# 2.2 測定の戦略

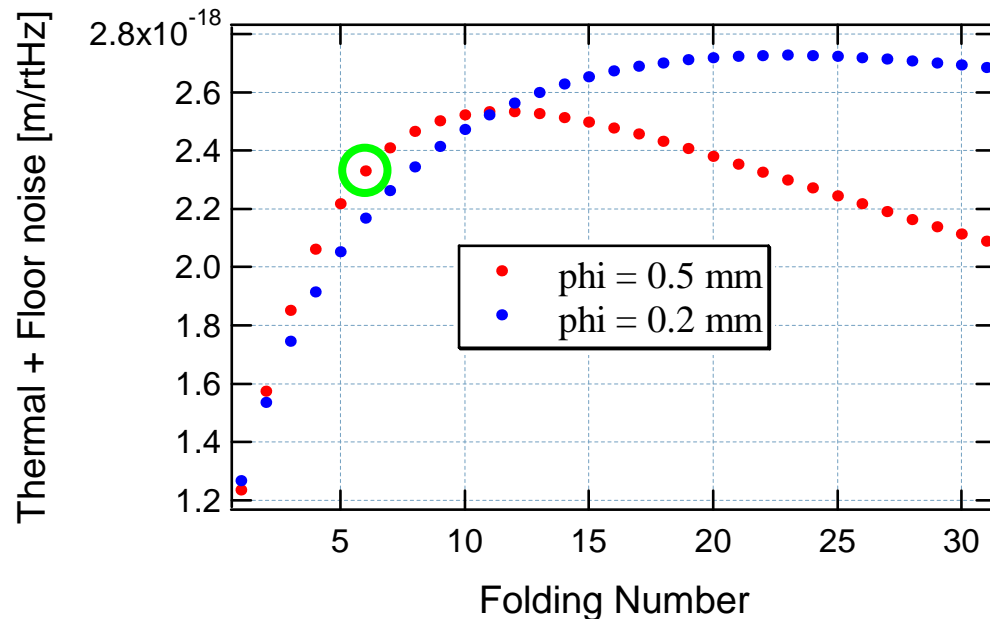
## Coil の検討

$$\alpha = \frac{\mu_0 \mathcal{M}}{4\pi} \sum_{s=0}^{u-1} \sum_{n=0}^{w-1} \frac{3(z_1 + dn)(r_1 + ds)}{((r_1 + ds)^2 + (z_1 + dn)^2)^{5/2}} 2\pi(r_1 + ds)$$

Coilの巻き数と形状に拠る



## Coil の重ね巻きと熱雑音の関係



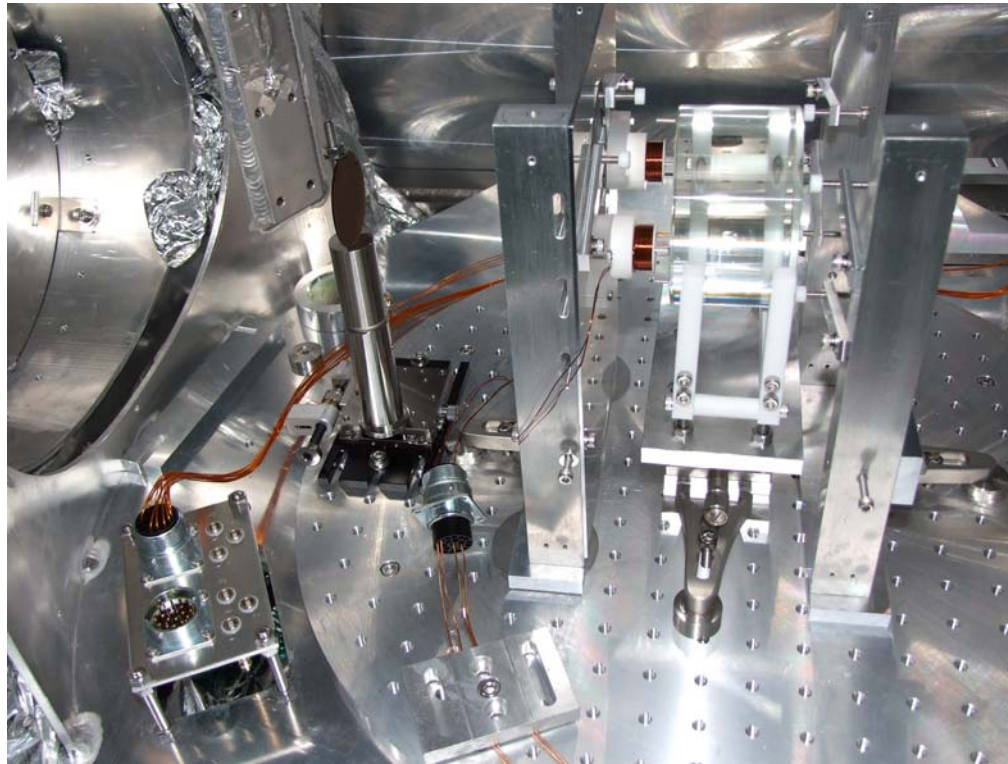
$$G = \frac{4k_B T N \alpha^2}{m^2 \omega^4 R}$$

$$\propto \frac{\alpha^2}{R}$$

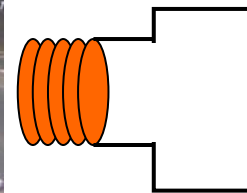
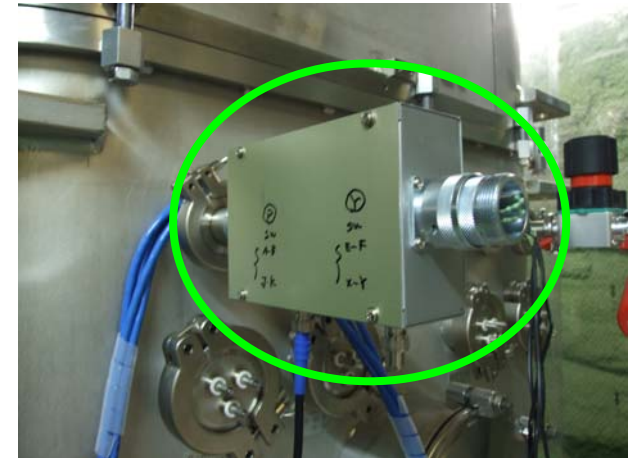
**\$\phi\$ 0.5mm銅線 15 turns で 3往復 (6重巻き) のCoil**

**\$\Rightarrow 2.3 \times 10^{-18}\$ [m/rtHz] @100Hz のノイズフロアの測定を目指す**

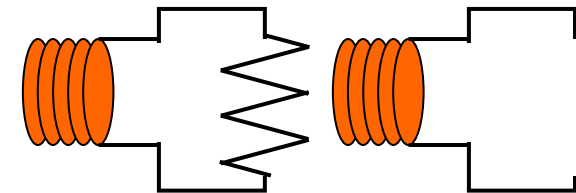
## 2.3 熱雑音の測定



Per. End



Short



2Ω

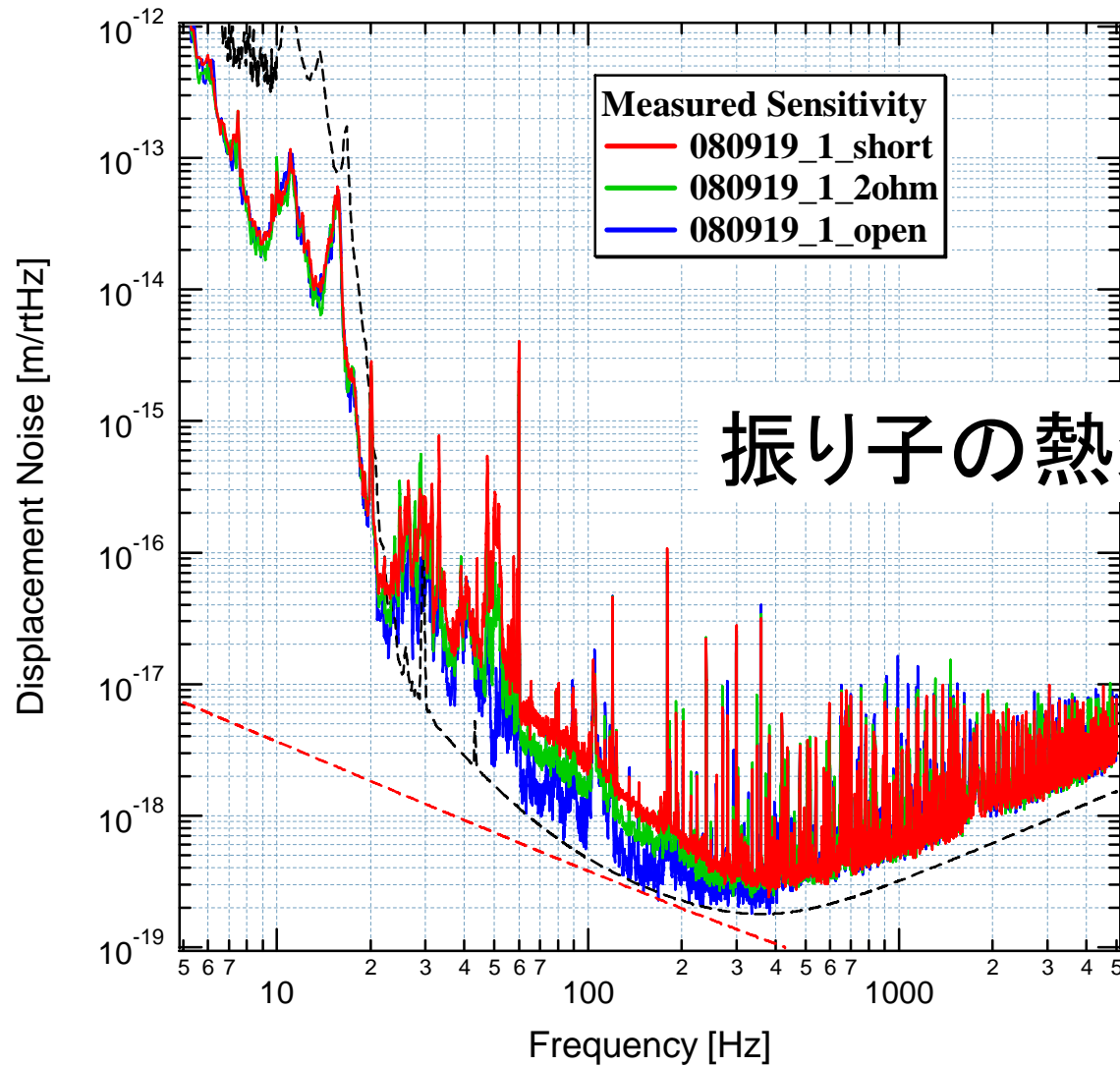
Open

Prediction	Q of pendulum	Noise + Floor (Open) @100Hz [m/rtHz]
Short	40837	$2.3 \times 10^{-18}$
2Ω	156880	$1.5 \times 10^{-18}$
Open (Floor)	-	$1 \times 10^{-18}$

リレー回路と抵抗を  
取り付け、  
3段階の測定が可能



## 2.3 熱雑音の測定



振り子の熱雑音が見えた！

予想ノイズレベル@100Hz

Short :  $2.3 \times 10^{-18}$  [m/rtHz]

2  $\Omega$  :  $1.5 \times 10^{-18}$  [m/rtHz]

Open :  $1 \times 10^{-18}$  [m/rtHz]

Wide bandでの比較が必要

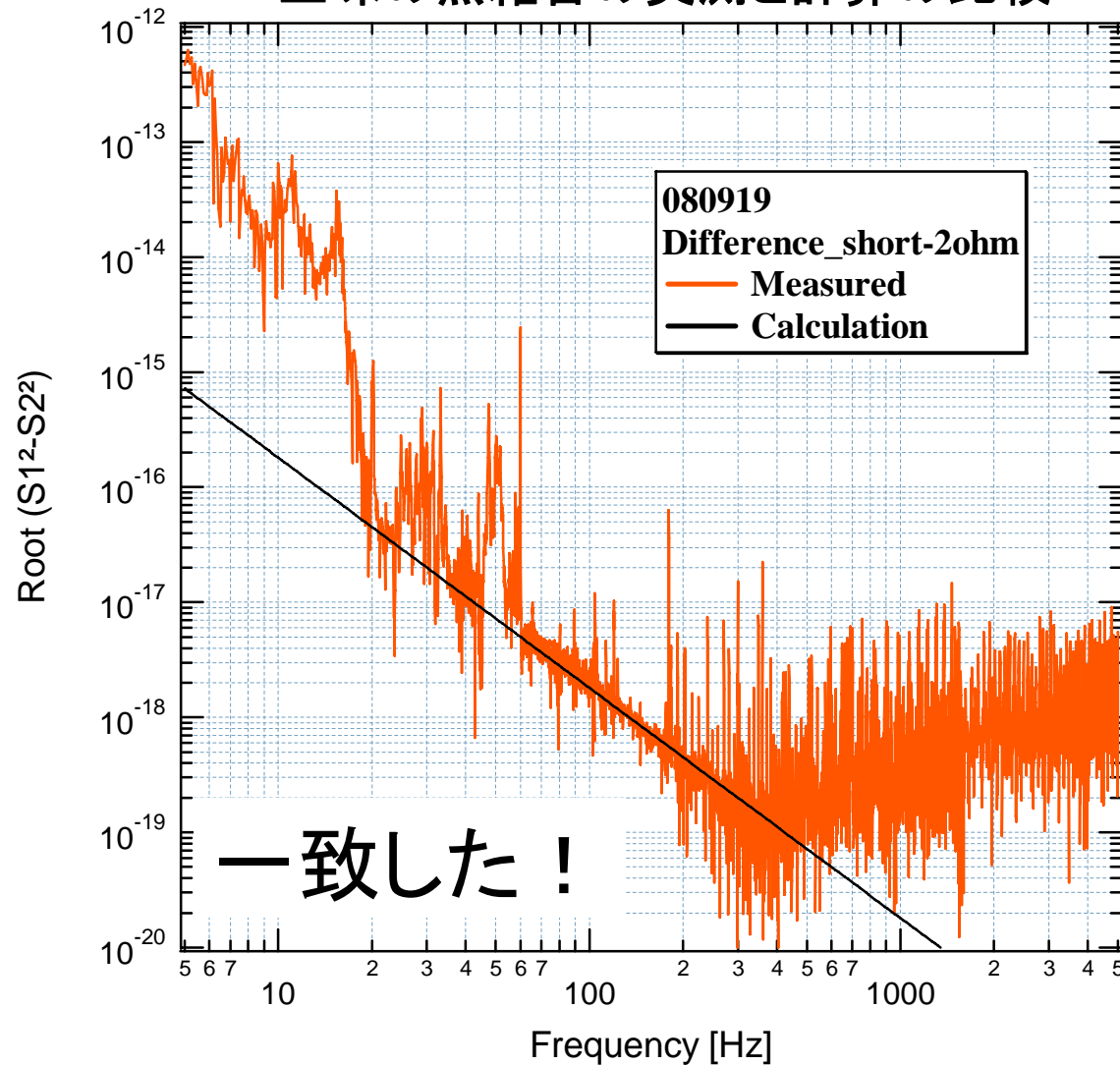
Short と 2 $\Omega$  の測定の差  
⇒ フロアを除去した正味の  
熱雑音の差



理論値と比較

## 2.4 理論値との比較と再現性

正味の熱雑音の実測と計算の比較

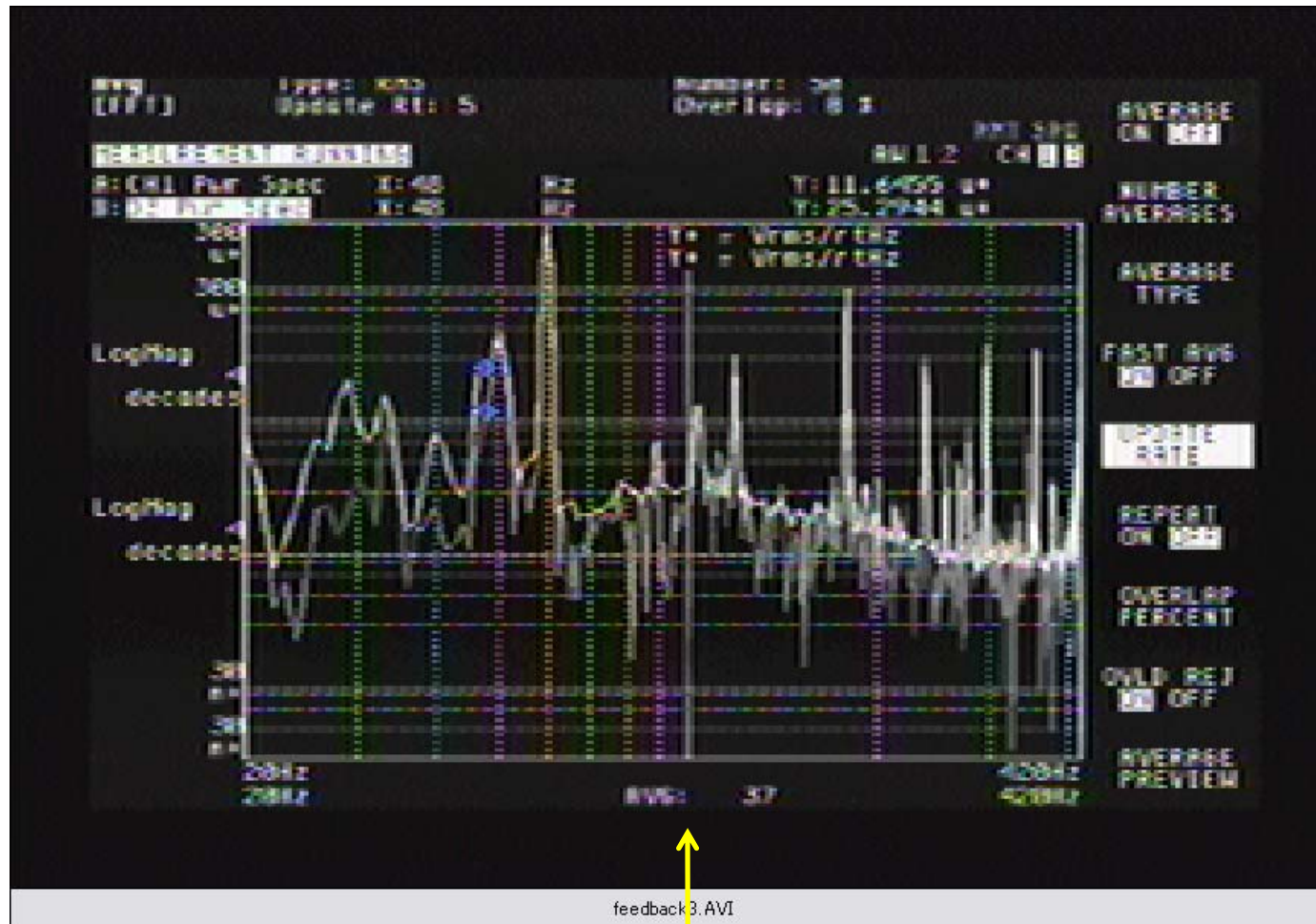


CLIOで今回の熱雑音  
が見える範囲:  
20Hz ~ 300Hz

20Hz ~ 300Hzにかけて、  
特に 60Hz ~ 300Hz で  
計算と実測が良い一致を  
示した

## 2.4 理論値との比較と再現性

再現性の確認 : Short ⇒ Open ⇒ Short



feedback3.AVI

100Hz



# まとめ

---

Coilに生じる渦電流による振り子の熱雑音を、干渉計のノイズとして直接見ることができた (世界初?)

- パラメータを操作し、測定値と計算値が一致
- 再現性が確認できた

⇒ノイズレベルを正確に見積もることができるようになった

## 展望

- LCGTなど、今後の干渉計のNoise EstimationやCoil-Magnet Actuatorの設計に貢献できる

# Magnetic Moment と Coupling率

---

$$\alpha = \frac{A_{100} R_c}{H_{100}}$$
$$= A_{100} R_c \cdot m(2\pi \cdot 100)^2 \quad \longleftarrow \text{測定で求まる}$$

$$\alpha = \frac{\mu_0 \mathcal{M}}{4\pi} \sum_{s=0}^{u-1} \sum_{n=0}^{w-1} \frac{3(z_1 + dn)(r_1 + ds)}{((r_1 + ds)^2 + (z_1 + dn)^2)^{5/2}} 2\pi(r_1 + ds)$$

---

コイルの形状

一度、測定から  $\alpha$  を求めて  $M$  の値が決まれば、  
任意のコイルの巻き数に対して  $\alpha$  が計算できる。