
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^A, 川村静児^B, 三代木伸二,
大橋正健, 寺田聡一^C, 黒田和明, 新井宏二^B, 宮川治^D

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

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

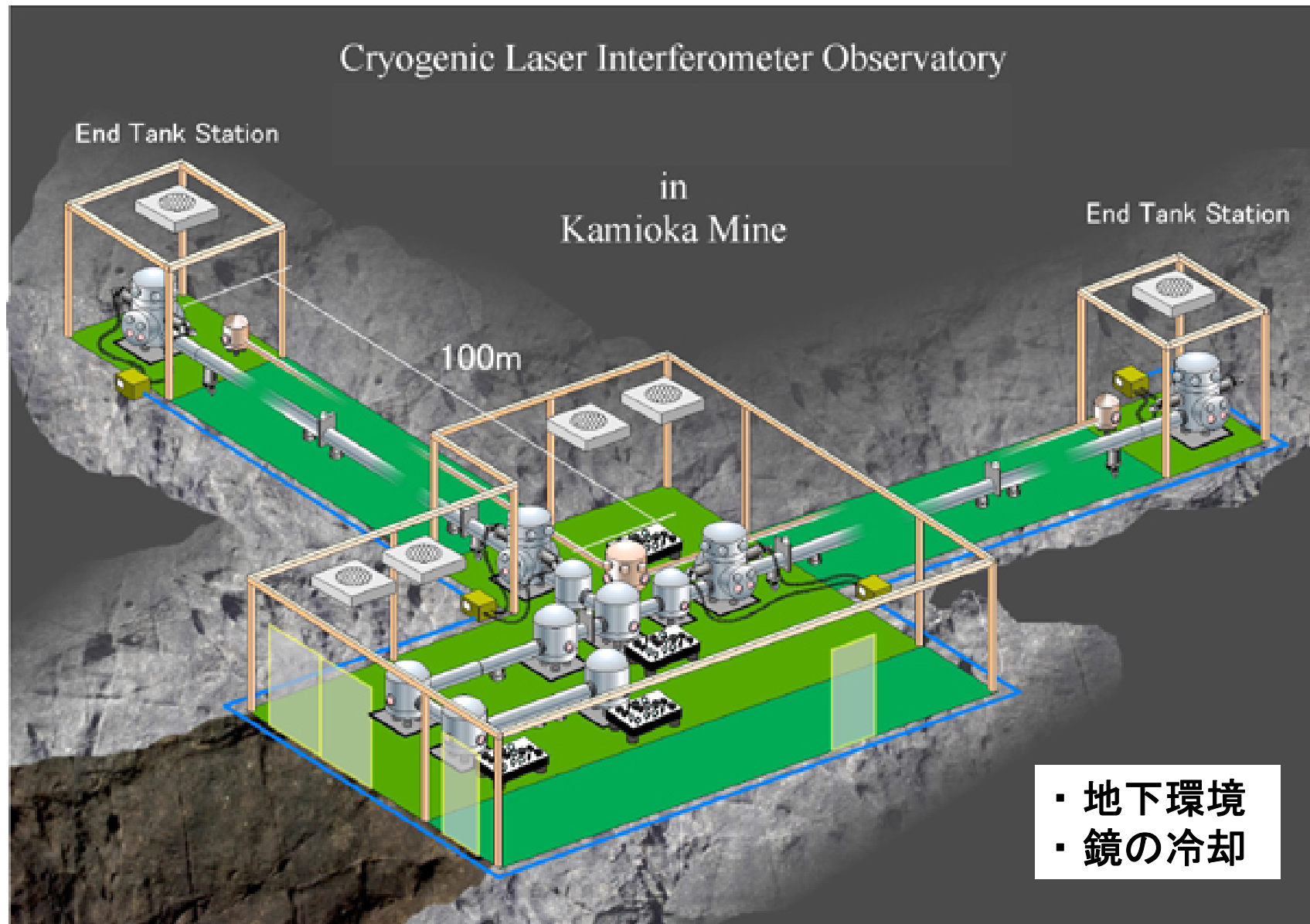
2.2 測定の戦略

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



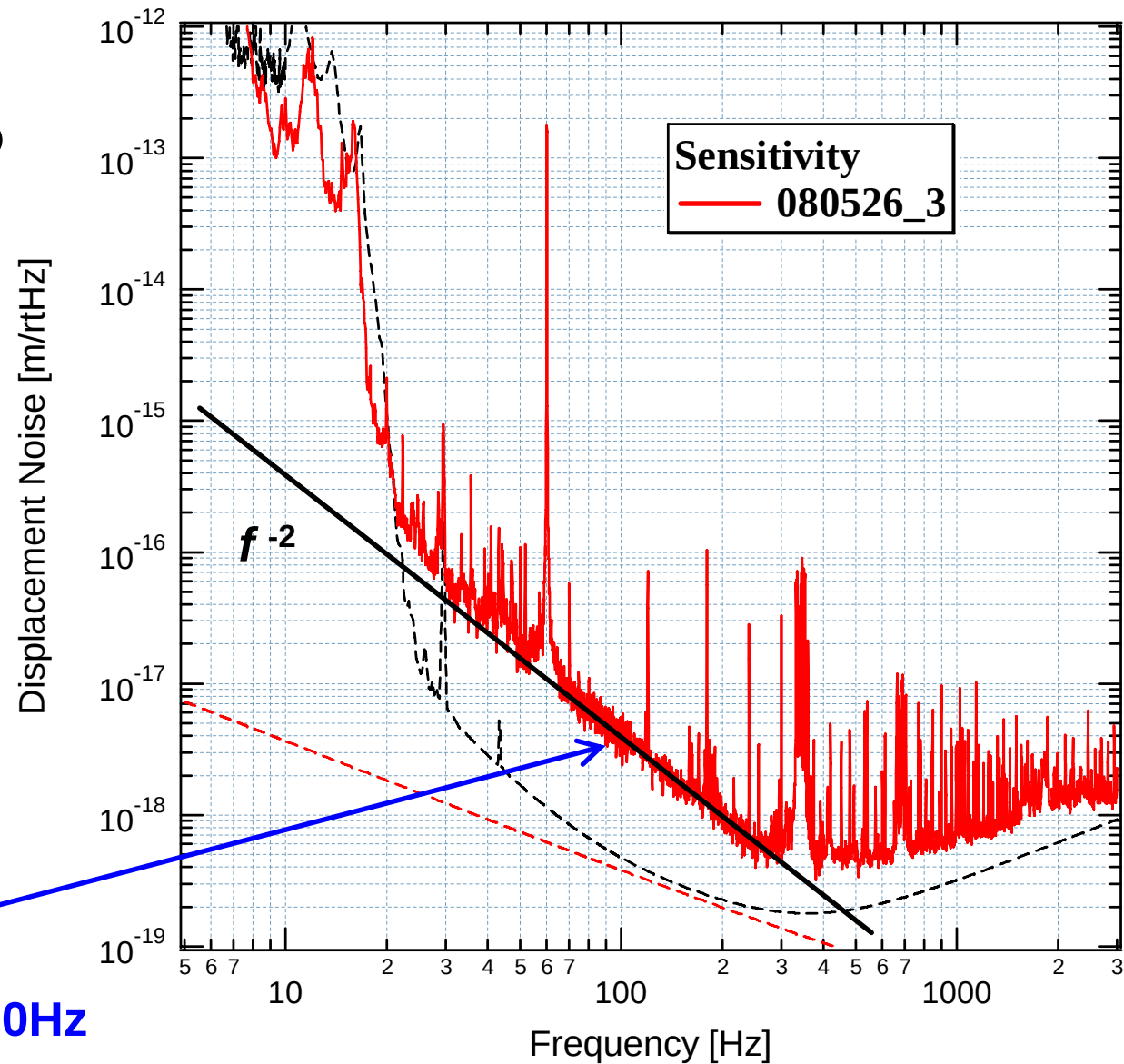
背景

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

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

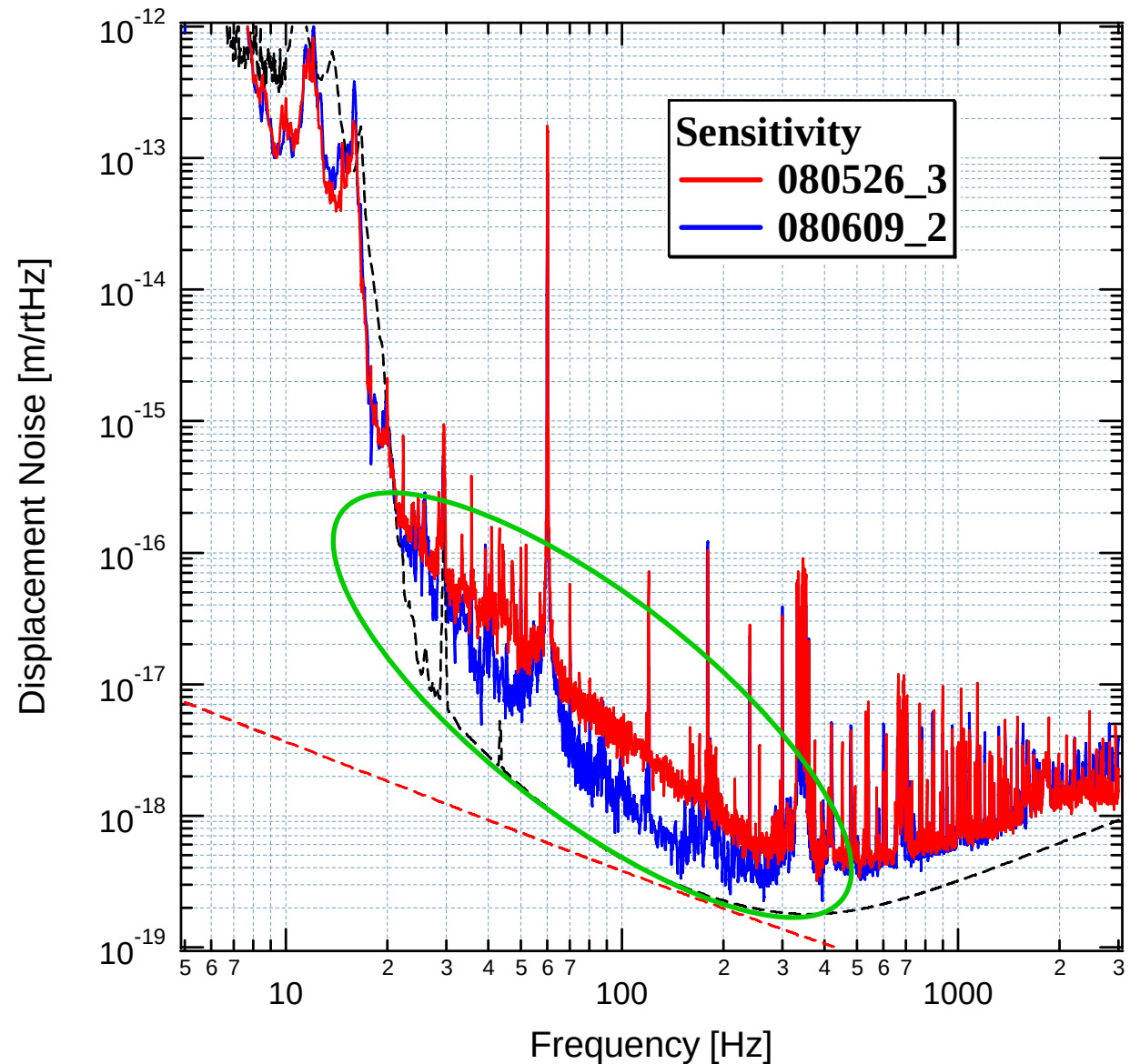


背景

天文台とCLIOのコラボ
企画の一環

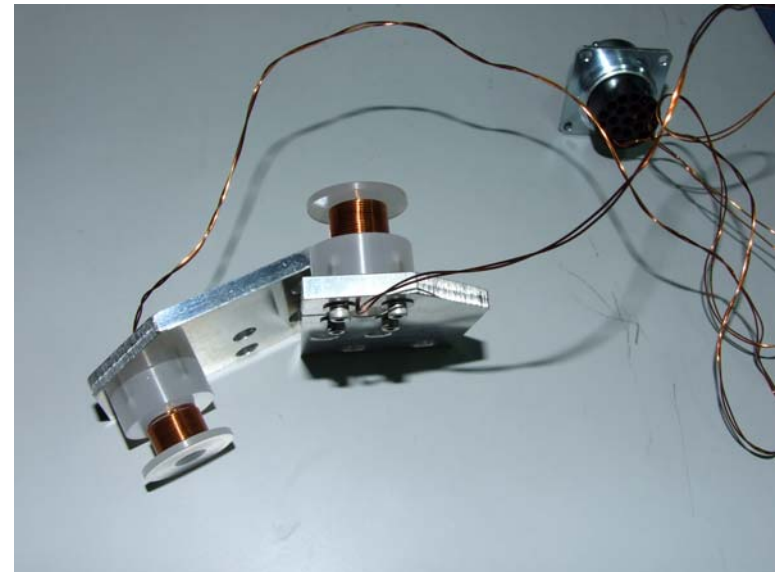
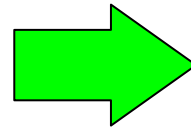
2008年6月5～6日
川村静児氏による
ノイズハンティング

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を渦電流の効果が高い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: $m(-\omega^2 + \omega_0^2)\tilde{x} = N\alpha\tilde{I}$

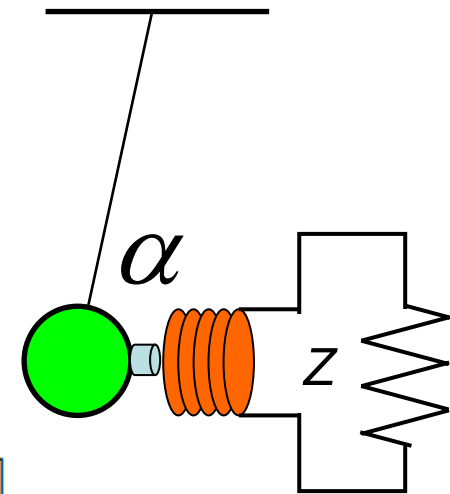
回路: $Z\tilde{I} + i\omega\alpha\tilde{x} = 0$

α は Coil-magnet actuator の Coupling 率 [N/A]

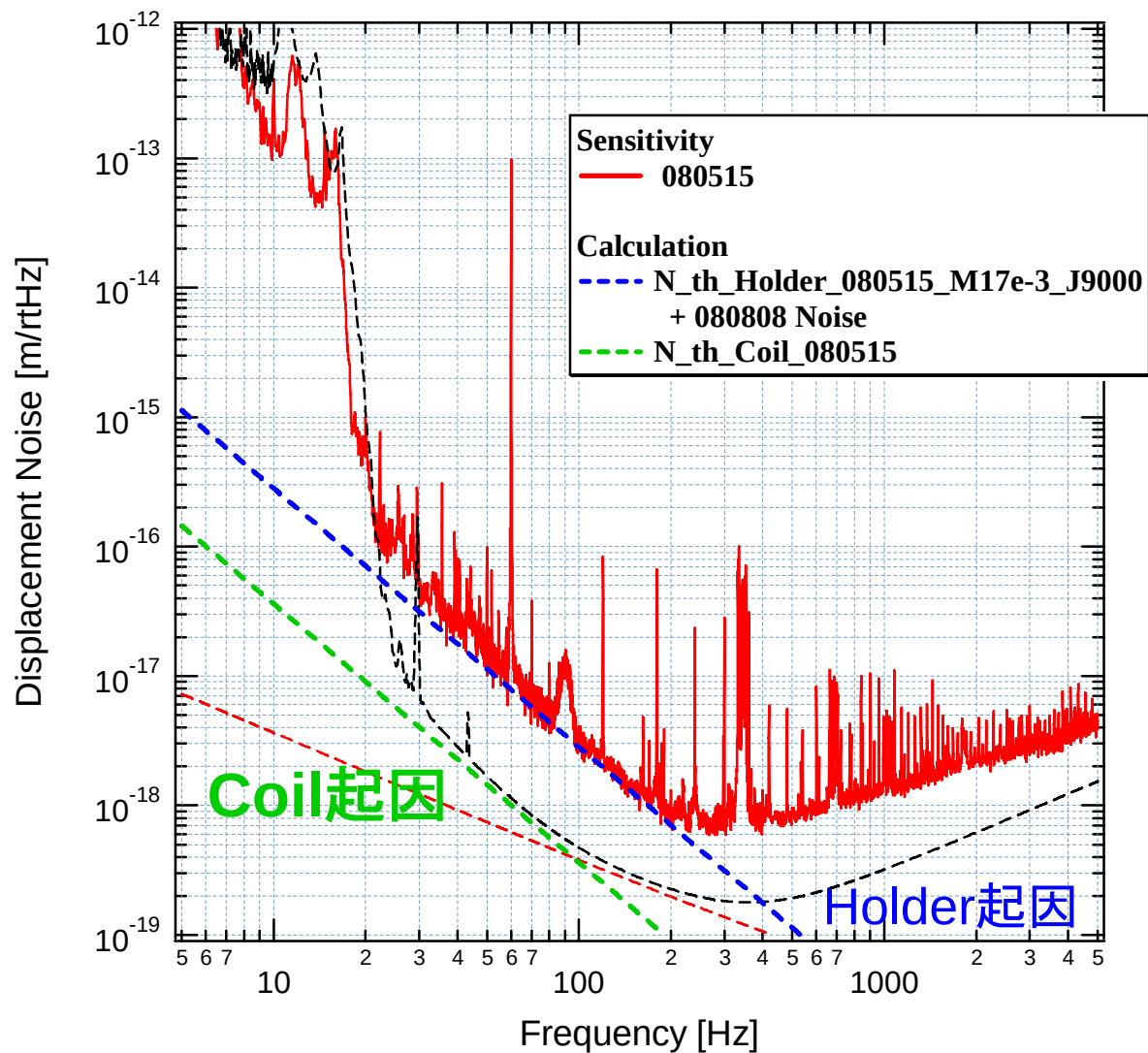
$$m(-\omega^2 + \omega_0^2)\tilde{x} + i\frac{N\alpha^2\omega}{Z}\tilde{x} = 0$$

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

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



2.1 原理計算と見積もり



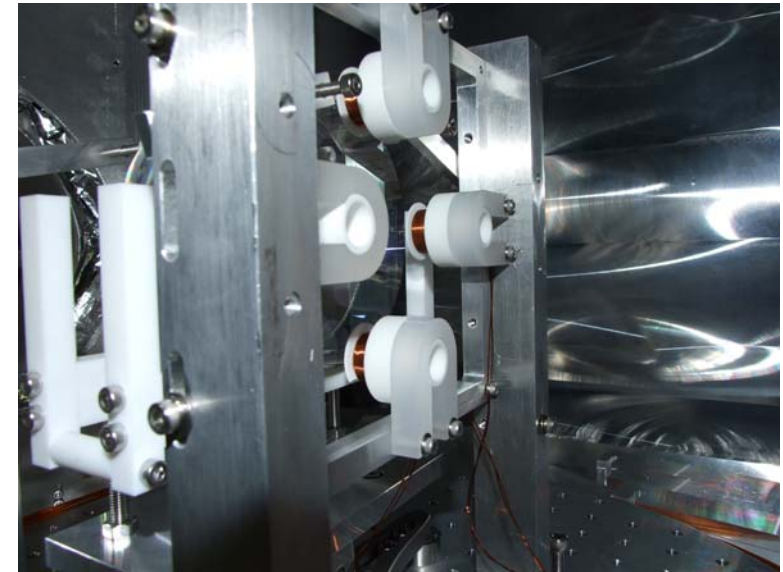
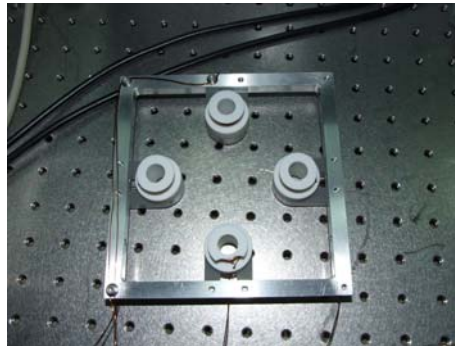
うまくすれば、Coil起因の振り子の熱雑音が見えるかもしれない！

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

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

R を下げて、 α を上げる

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

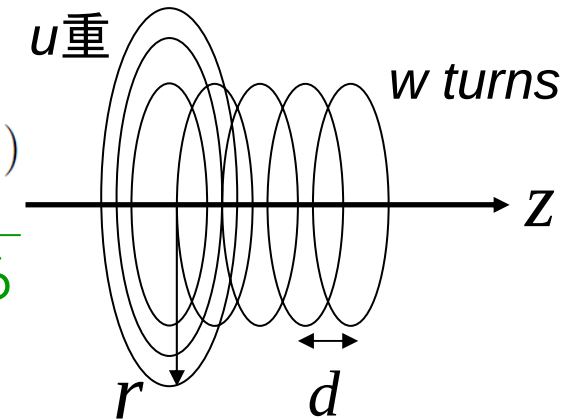
Per. Near :サマリウムコバルト磁石 ϕ 1mm $M = 2.9 \times 10^{-3} [\text{A} \cdot \text{m}^2] \times$
 Per. End :ネオジウム磁石 ϕ 2mm $M = 1.7 \times 10^{-2} [\text{A} \cdot \text{m}^2] \odot$

2.2 測定の戦略

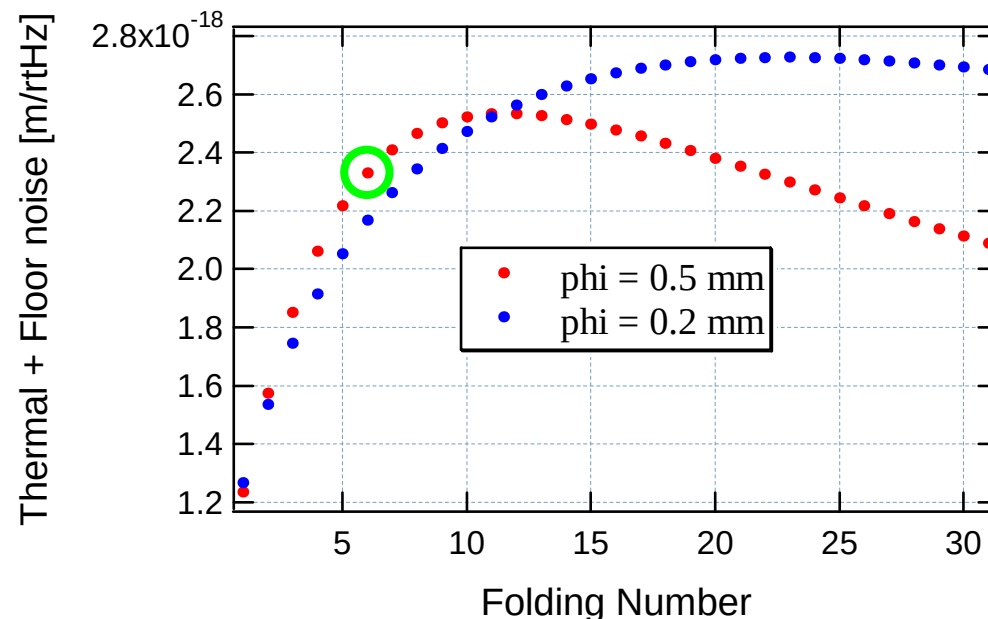
Coil の検討

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

Coilの巻き数と形状に拠る



Coil の重ね巻きと熱雑音の関係



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

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

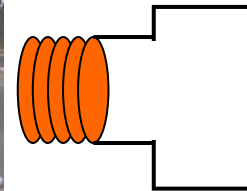
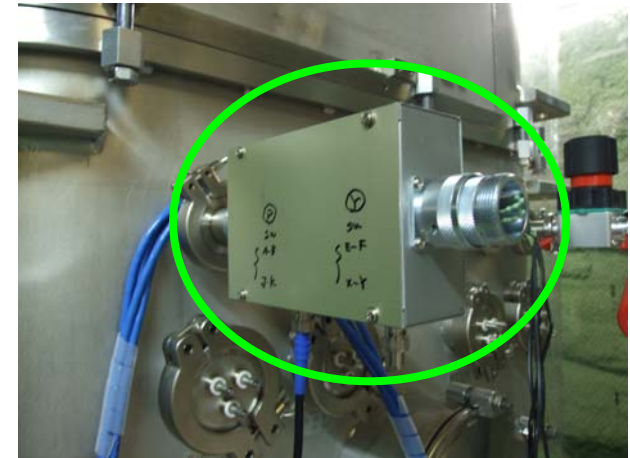
φ 0.5mm銅線 15 turns で 3往復(6重巻き)のCoil

⇒ 2.3 x 10⁻¹⁸ [m/rtHz]@100Hz のノイズフロアの測定を目指す

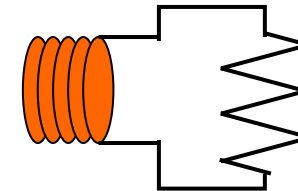
2.3 熱雑音の測定



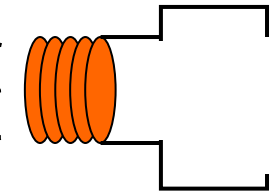
Per. End



Short



2Ω

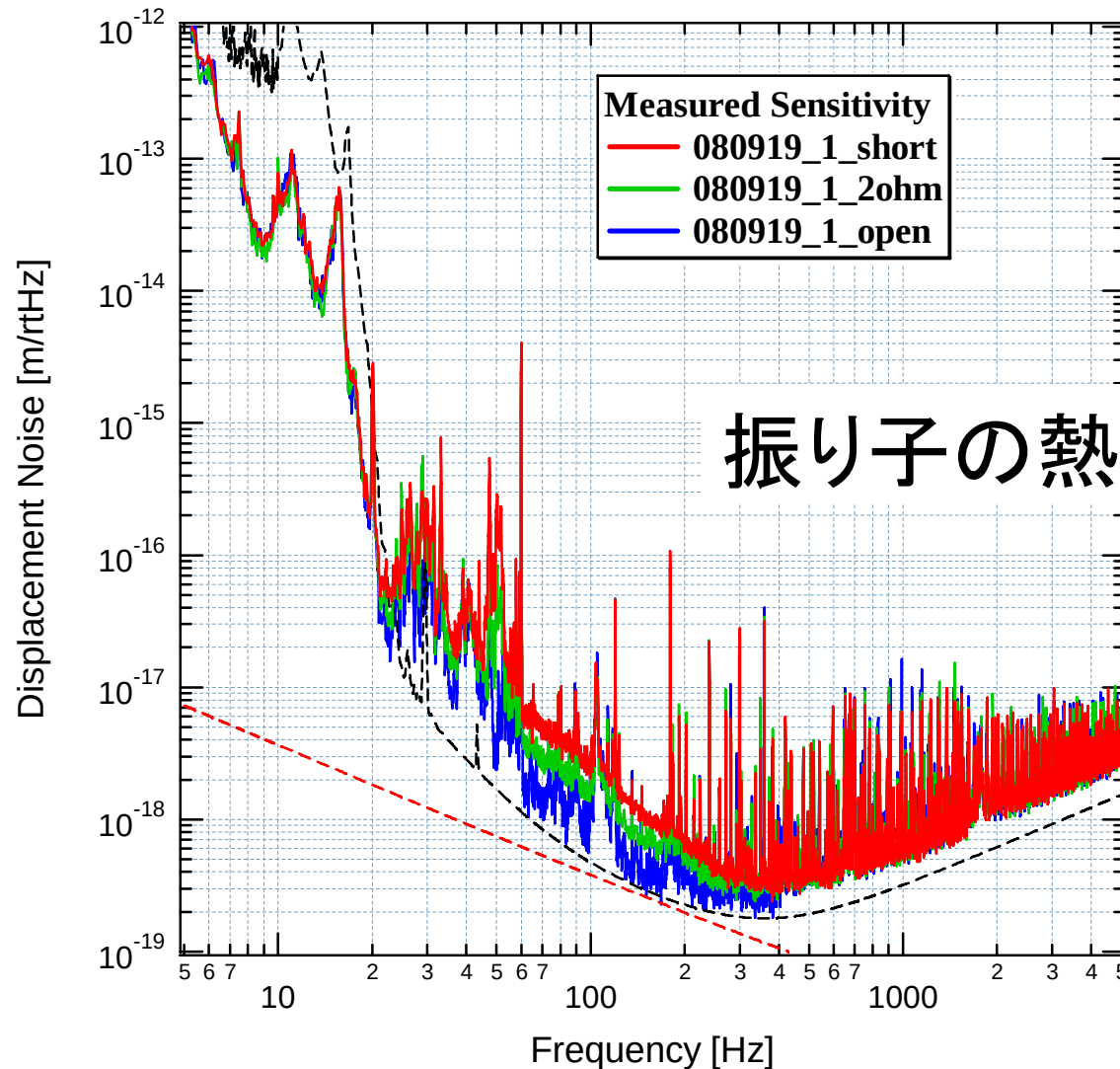


Open

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



振りの熱雑音が見えた！

予想ノイズレベル@100Hz

Short : 2.3×10^{-18} [m/rtHz]

2 Ω : 1.5×10^{-18} [m/rtHz]

Open : 1×10^{-18} [m/rtHz]

Wide bandでの比較が必要

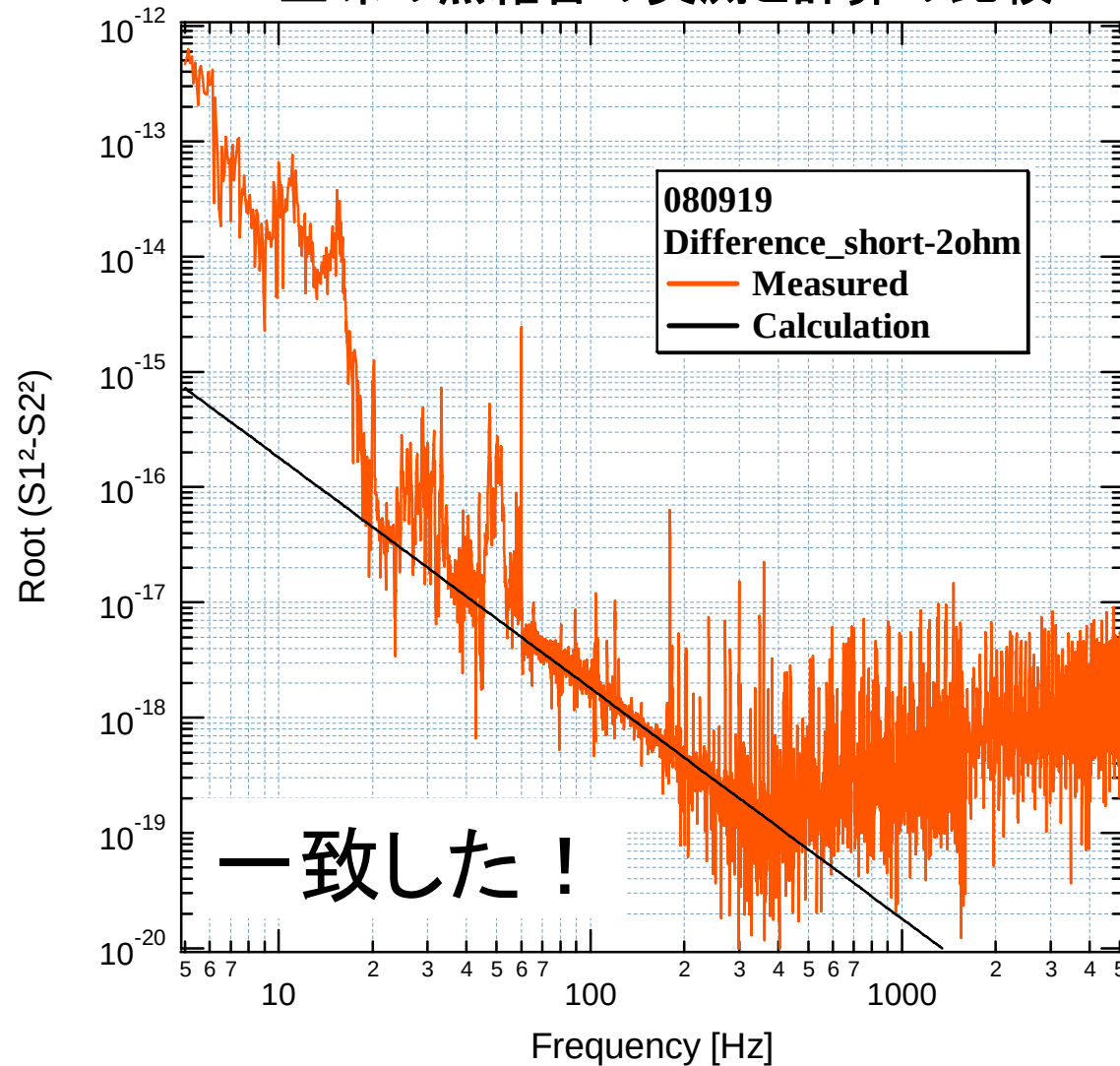
Short と 2 Ω の測定の差
⇒ フロアを除去した正味の
熱雑音の差



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

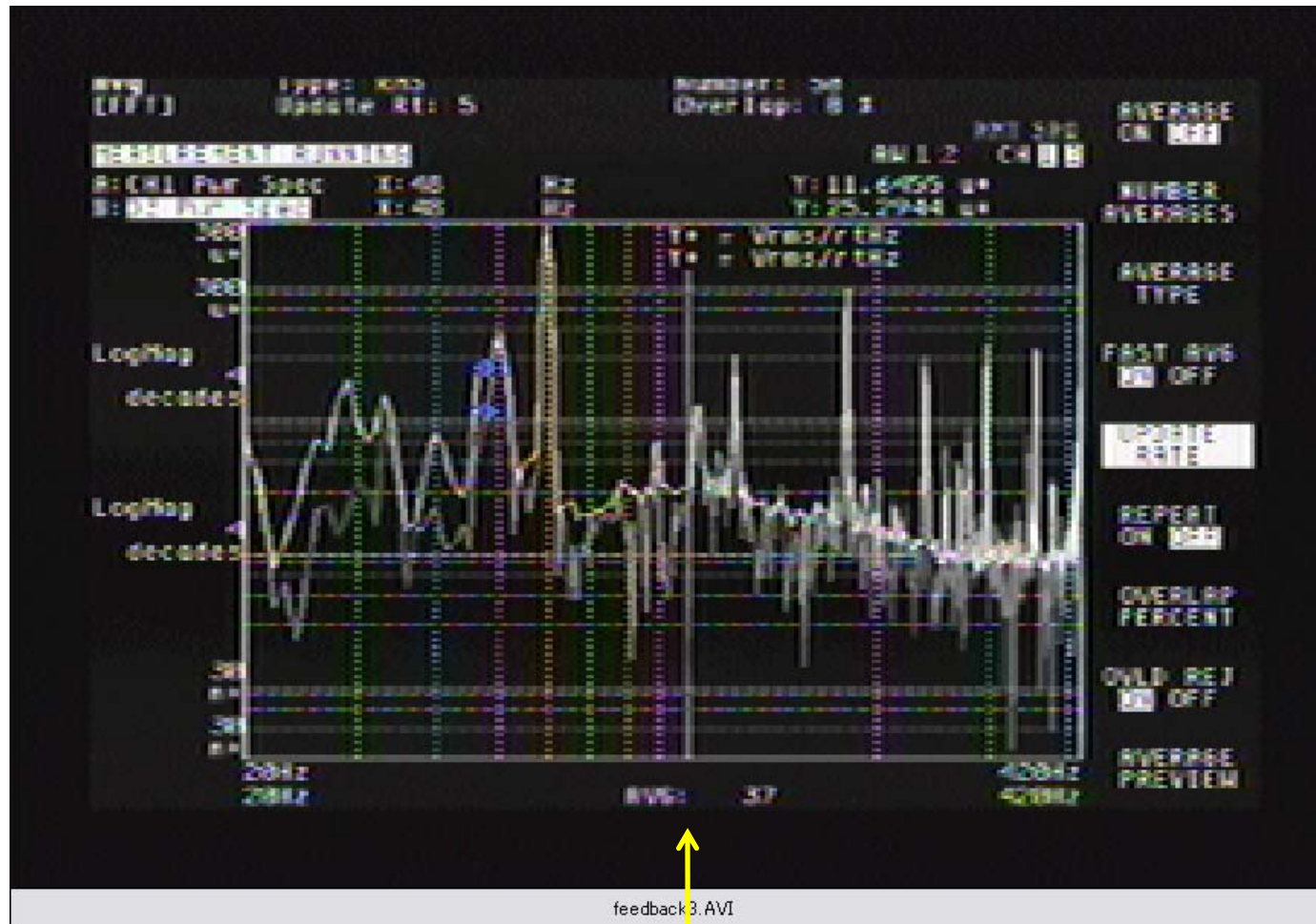


CLIOで今回の熱雑音
が見える範囲：
20Hz ~ 300Hz

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 $\Rightarrow$ Open $\Rightarrow$ Short



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

- 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

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

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

コイルの形状

一度、測定から α 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 α が計算できる。