

---

# Thermal-noise-limited underground interferometer CLIO



Kazuhiro Agatsuma  
and CLIO Collaborators

*Institute for Cosmic Ray Research, University of  
Tokyo*

*2009/06/05*

# もくじ

---



1. CLIO Overview
2. 地下の優位性
3. 常温での感度
4. 鏡の低温冷却実験
5. Observation
6. Summary

# CLIO Overview

---



-100m base-line **Locked-FP** style Proto-Type for LCGT.

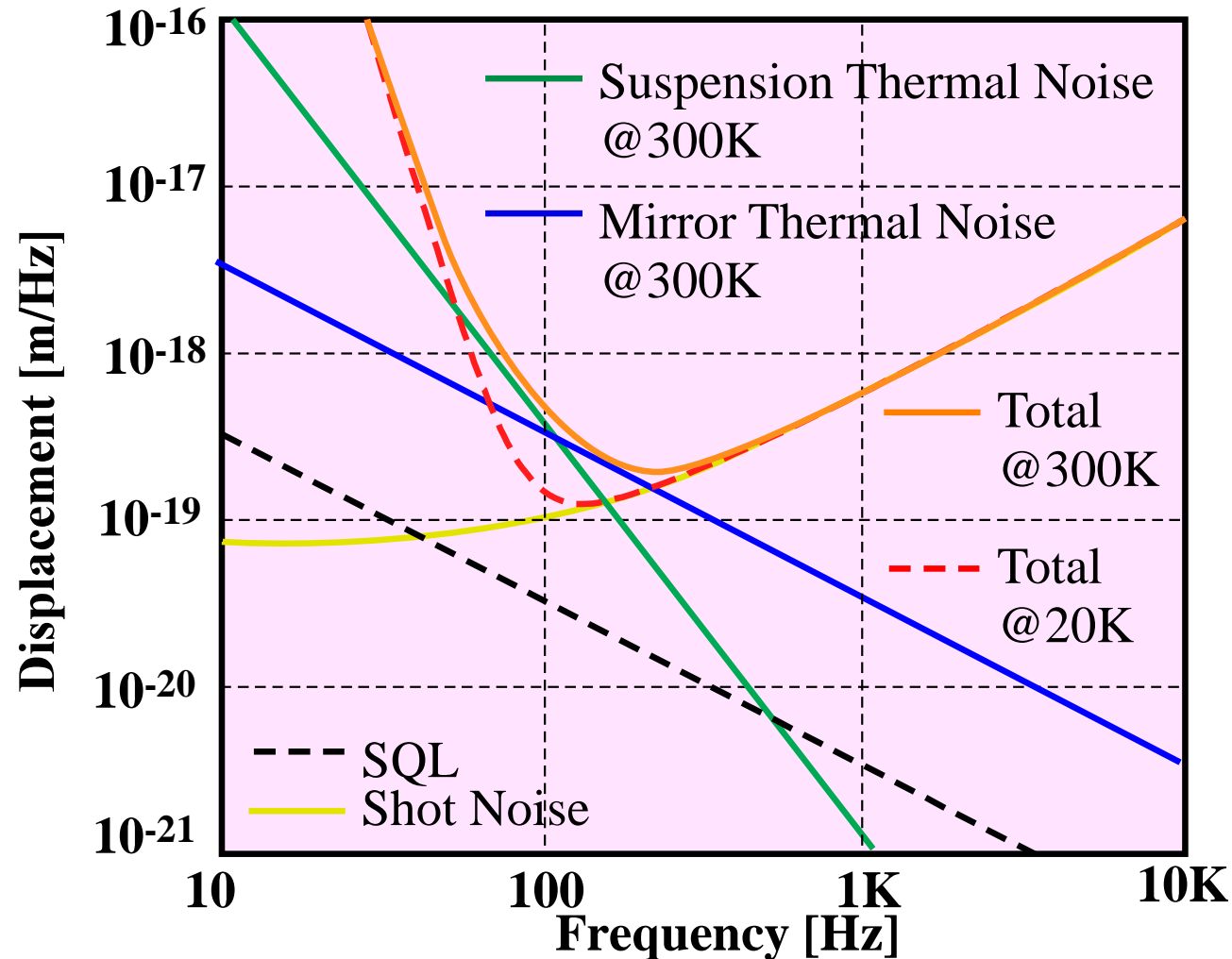
-**CLIK**(2000-02)におけるクライオスタット開発と低温干渉計基礎制御,  
**LISM**(1999-2002)における低周波感度の向上と安定動作・重力波観測実験,  
**KEK**低温センター(1996-2006)における、低振動冷凍機開発の集大成.

## ●目的

- レーザー干渉計重力波アンテナの感度を制限する**熱雑音を鏡の冷却により低減し、感度を向上させる**ことを目指す.

- **神岡の地下における、低振動・安定環境**を利用した、重力波観測を目指す.

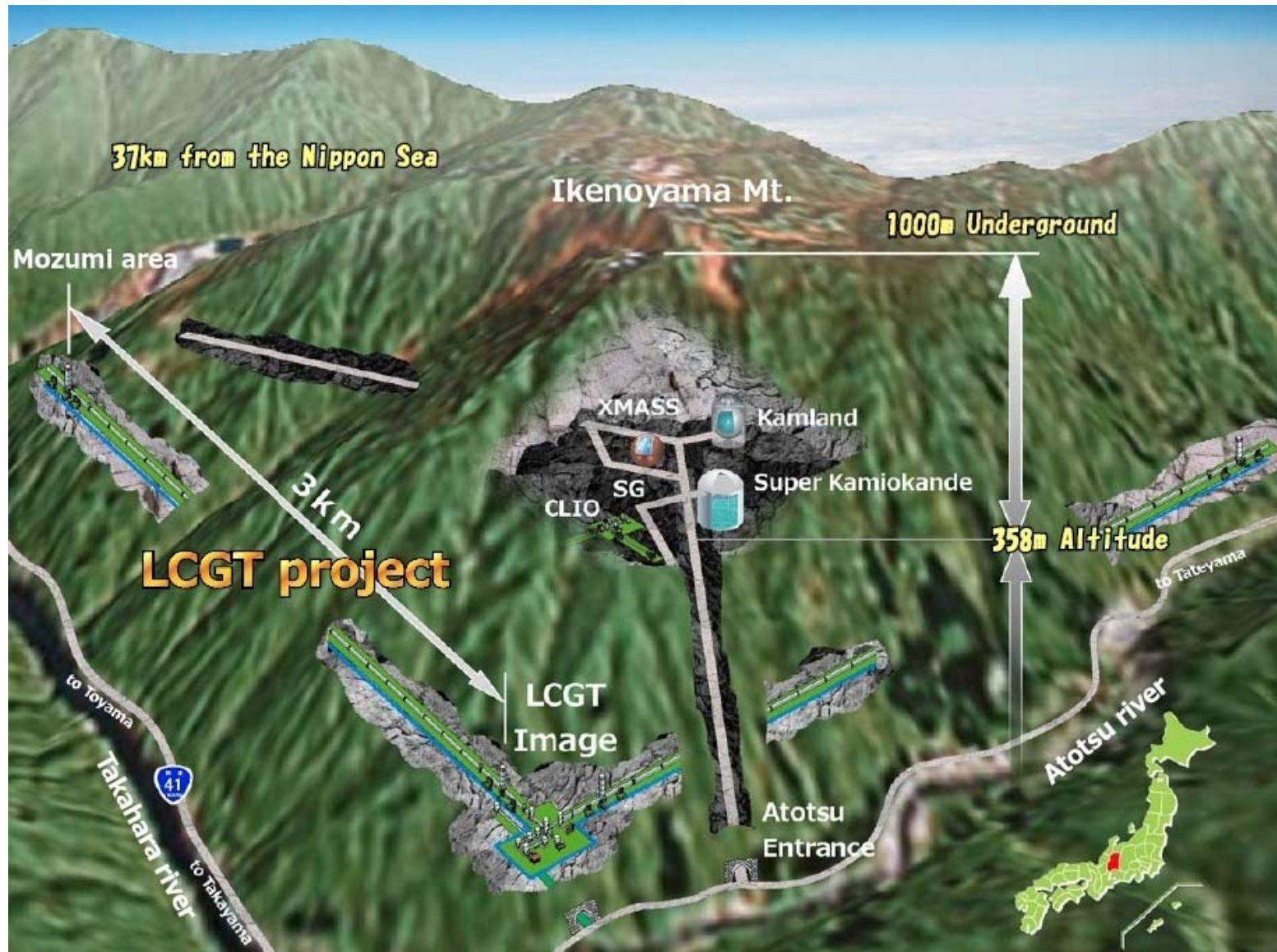
# 初期の熱雑音の観測と低減の戦略



**Laser power :**  
250mW for one arm  
**Mirror Mass :**  
1.8 kg

*Thermal Noises limit the sensitivity around 100Hz, and they will be reduced after cooling.*

# Site



Google Earth

# Picture



2009/6/5

重力波研究交流会@神岡研究棟

6

# Picture

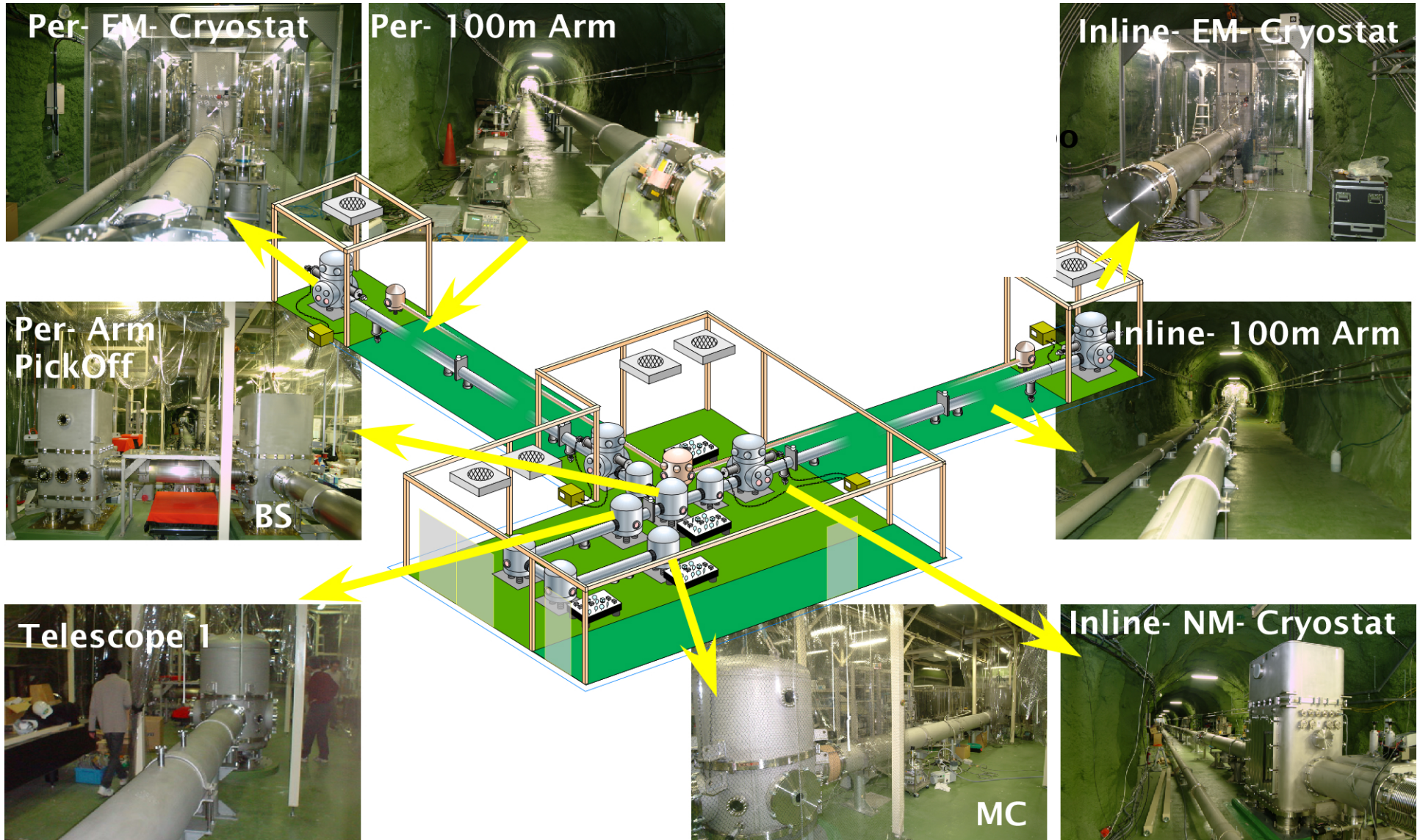


2009/6/5

重力波研究交流会@神岡研究棟

7

# CLIOの外観

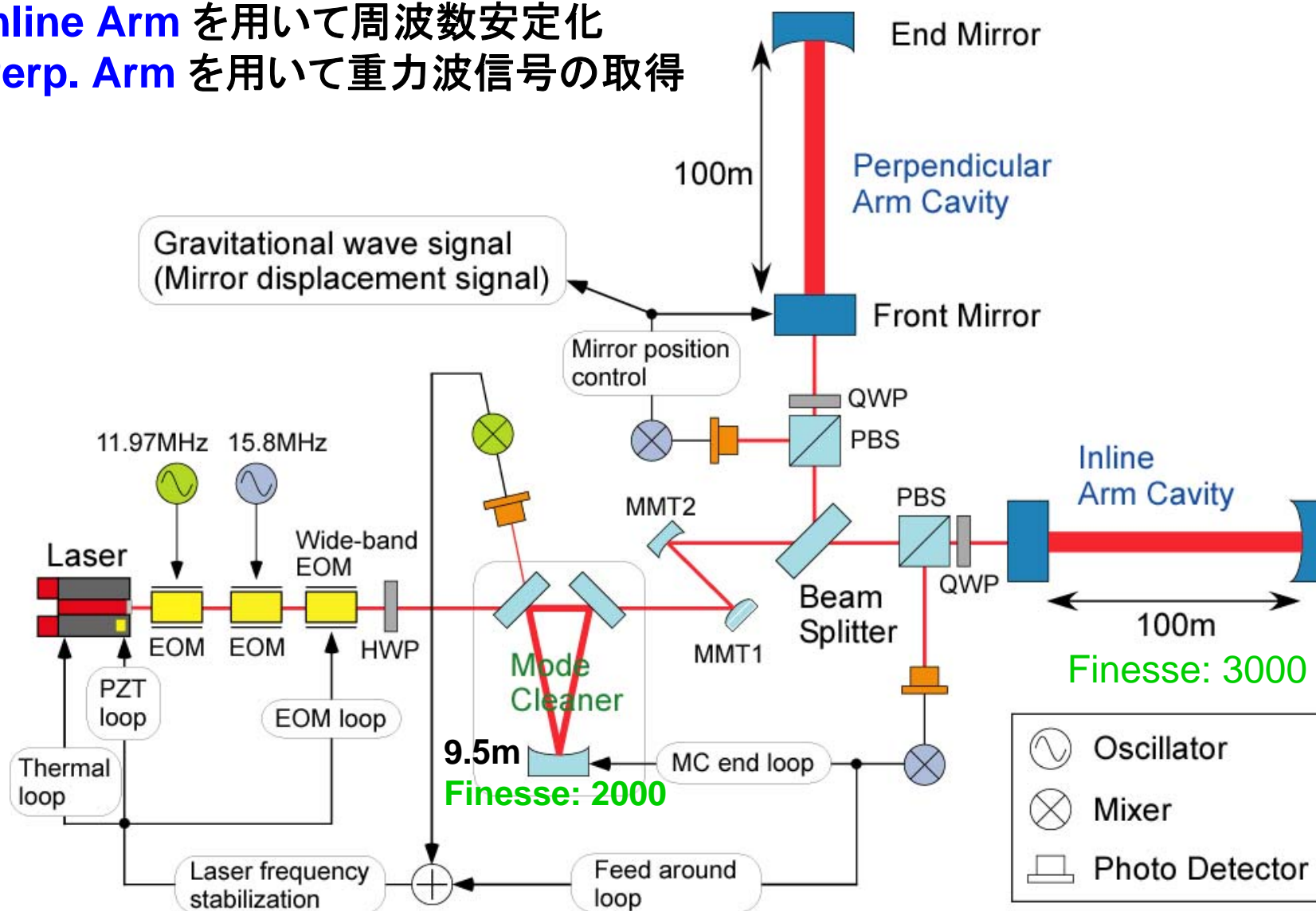




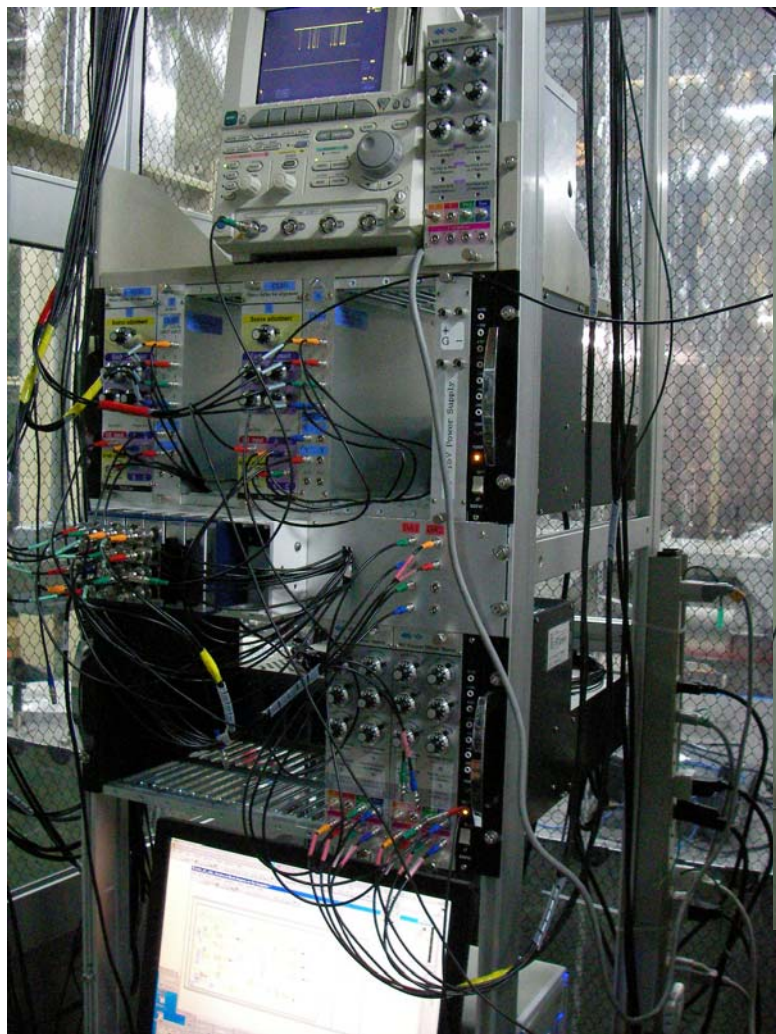
# Locked FP style IFO



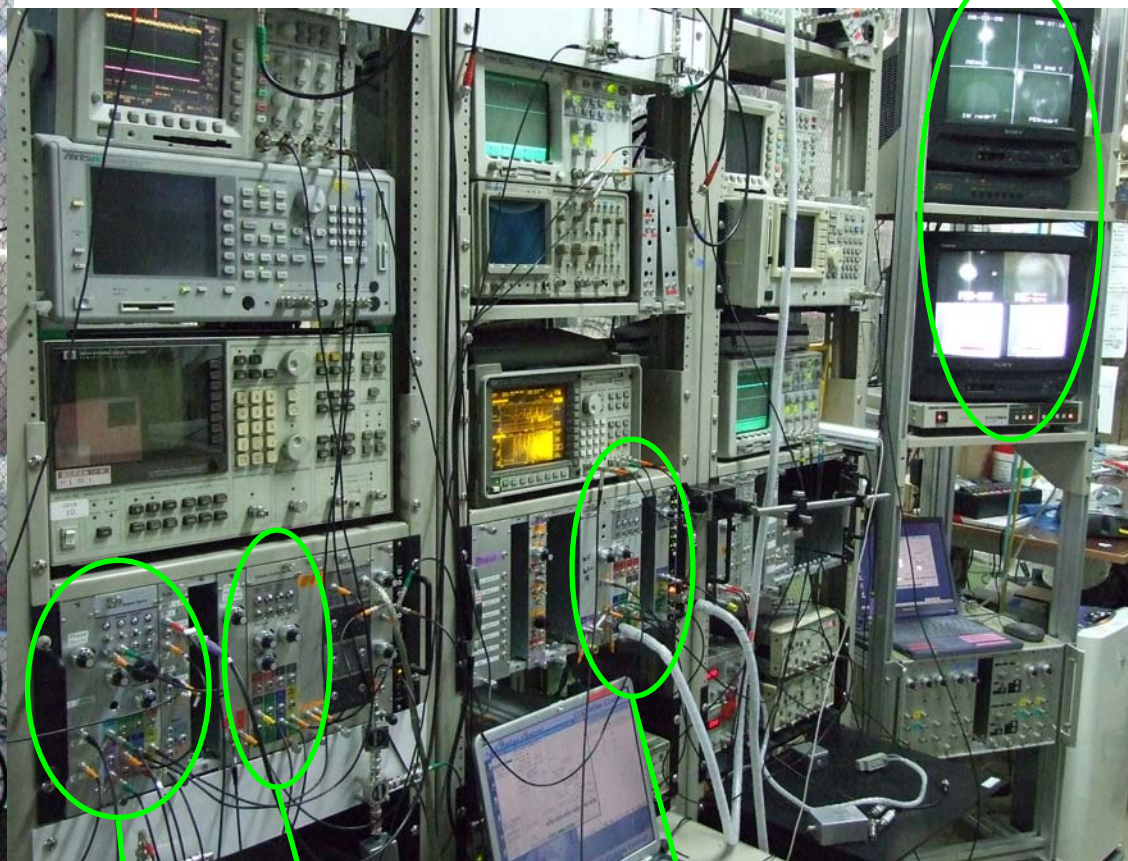
**Inline Arm** を用いて周波数安定化  
**Perp. Arm** を用いて重力波信号の取得



# Vertex



Digital Circuit and PC  
for LabVIEW



MC Servo

Primary  
(Inline) Servo

Secondary  
(Perpendicular)  
Servo

# 干渉計の一部自動化



MC Remote Lock System Stop Snap Shot 2009/05/24 11:06:51

State 2

Auto Lock

MC Locked  
Laser ON

Lock Safety Release

QPDc DC Total 5.4165

Servo Switch  
ON  
OFF  
Servo ON

Thermal Offset  
-0.25 0 0.25  
-0.5 0.5  
-0.75 1  
0.1

QPD1 DC Total 0.1551

## Inline PD 光量調整用波長板ピコモータ

Intelligent Picomotor Driver  
Example Labview 6.1 DLL Application

1) This program works with a Picomotor-Driver-only DCN network (i.e. no Joystick).  
2) Before running this program, the "Network In" port on the first Picomotor Driver in the DCN Network has to be connected to the COM1 serial port of the PC using a the Model 8761 Computer Interface Kit.  
3) You will also need to copy the Ldcnlib.dll file into the same directory as this VI.

ComPort: COM2, NumModules: 1, Max dif: 0.01220  
Baudrate: 19200, Address: 1, ModType: 3, ModVer: 54, Lock dif: -0.00561

Speed Factor: 1X, 2X, 4X, 8X  
Min. Speed (0 to 249): 1, Acc (1 to 255): 100, Speed (-250 to 250): 1000 Case 1X 0 to 2000  
Motor Type: Standard, Motor Channel: A, Velocity Mode:   
Min. Speed (Hz): 2, Speed (Hz): 2000, Current Position: 1770

Start, Stop Voltage: 1, Auto, Manual, Manual 1, Manual 2  
Max, Lock, Lock Voltage: 0.035, Auto Max u/5mV, Auto Ready o/3V, PD Voltage: 0.027

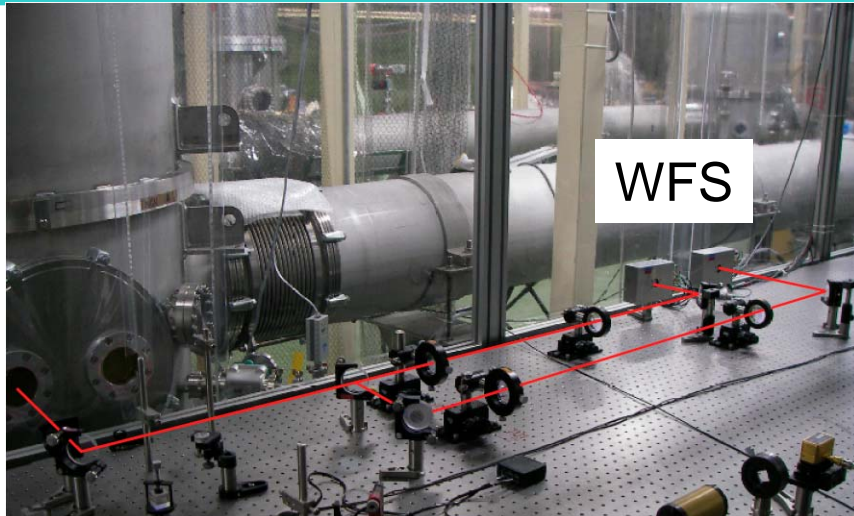
Error In (no error): status code 0, source  
Error Out: status code d0, source

MC Locked  
Lock Safety Release  
QUIT

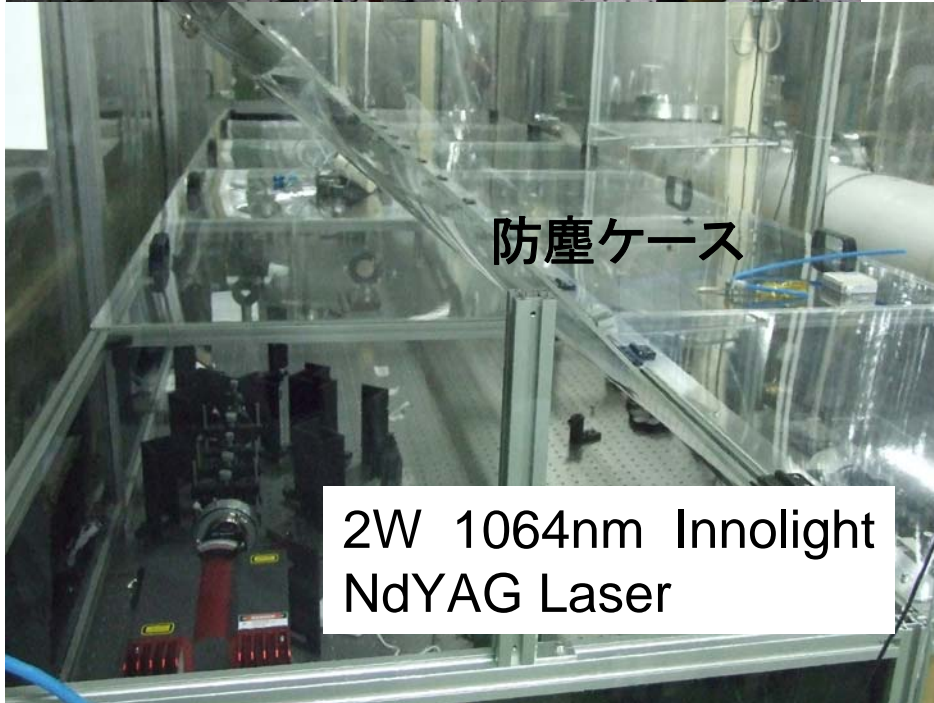
間に合わせ的なものをLabVIEWで作った。

今後、LIGO Digital System が宮川さんの主導のもと導入される予定

# 入射光学系



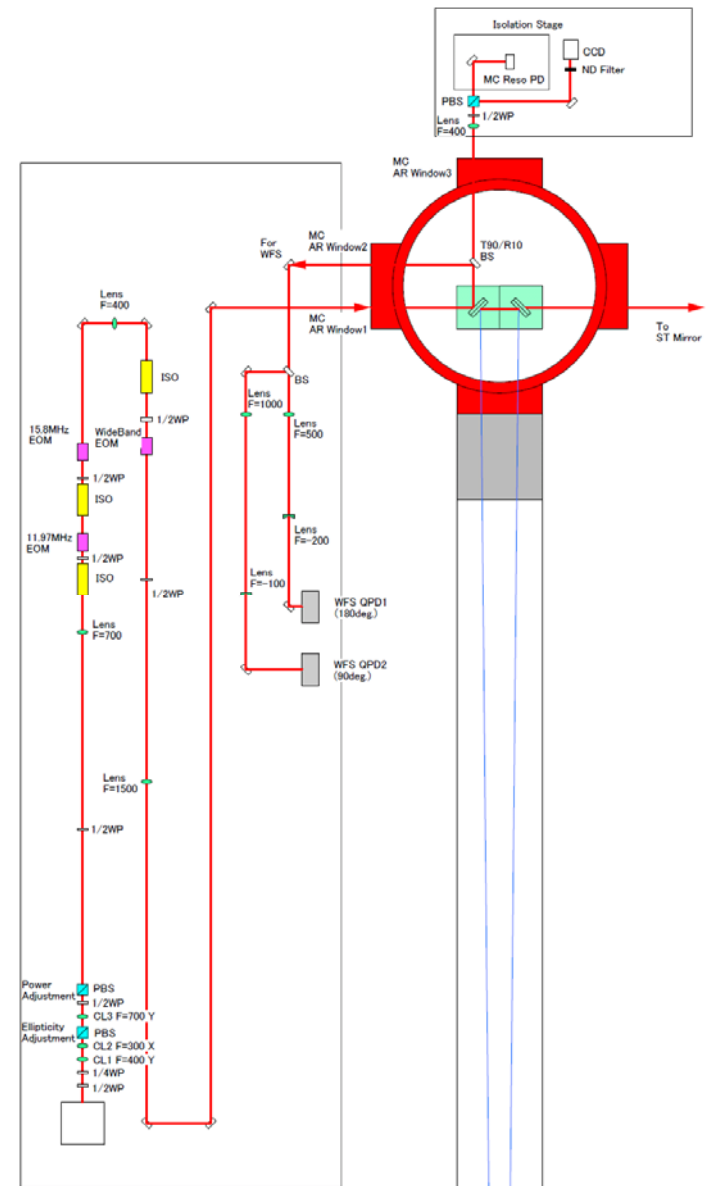
WFS



防塵ケース

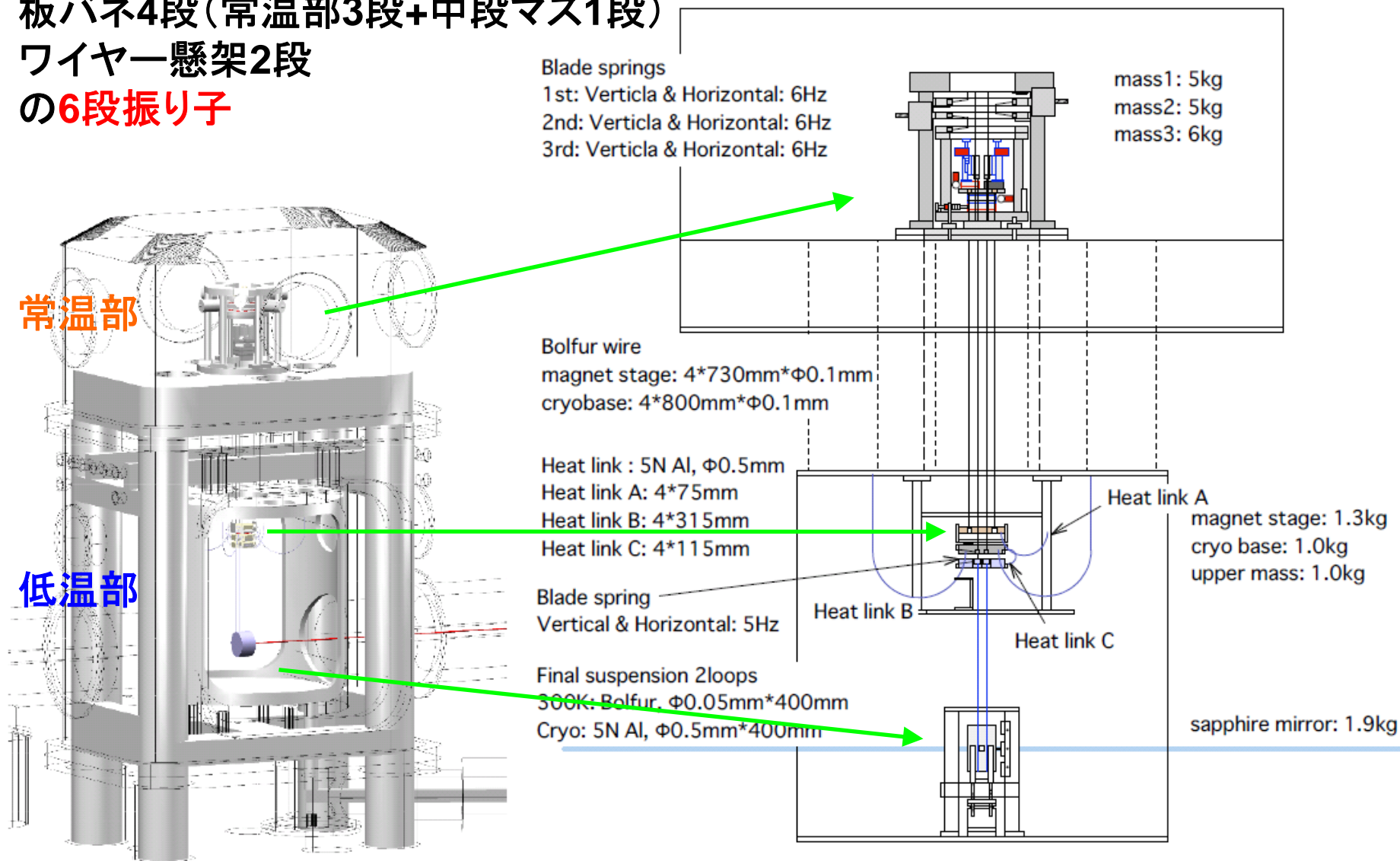
2W 1064nm Innolight  
NdYAG Laser

24°C

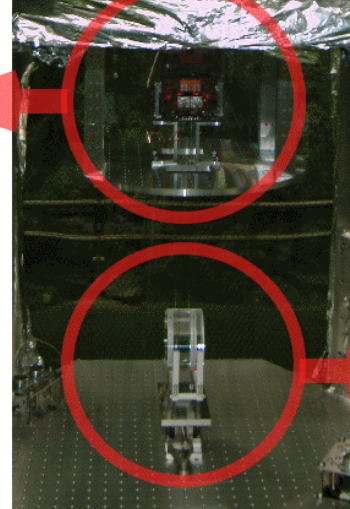
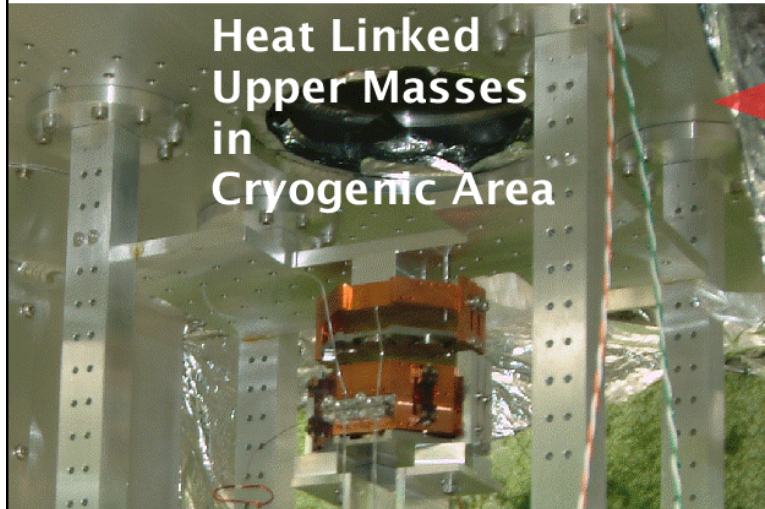
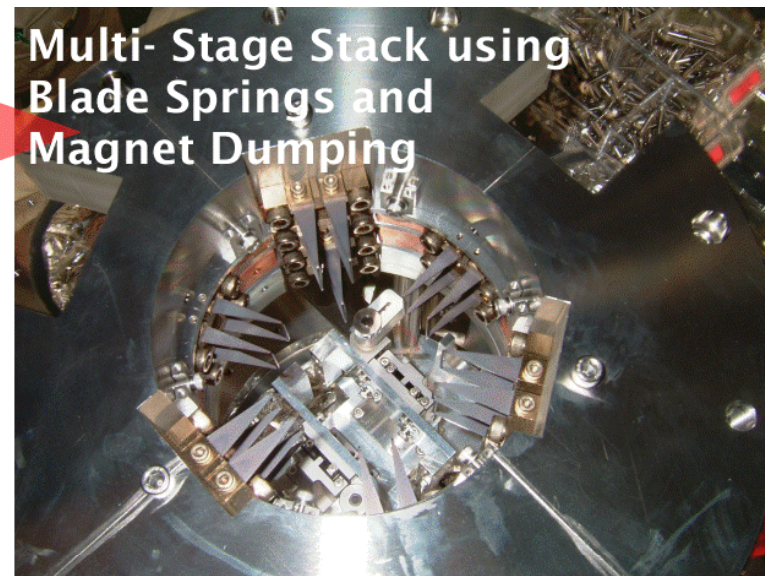
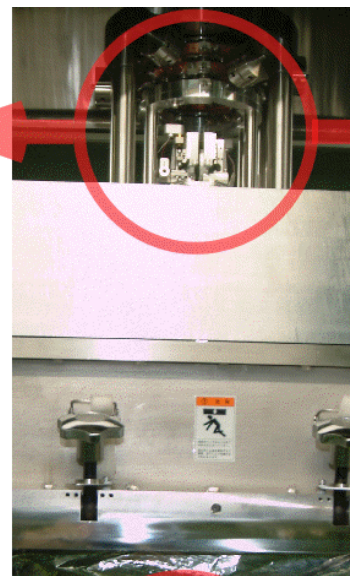


# CLIOの鏡防振振り子の全体像

板バネ4段(常温部3段+中段マス1段)  
ワイヤー懸架2段  
の6段振り子



# CLIOの鏡防振振り子の全体像



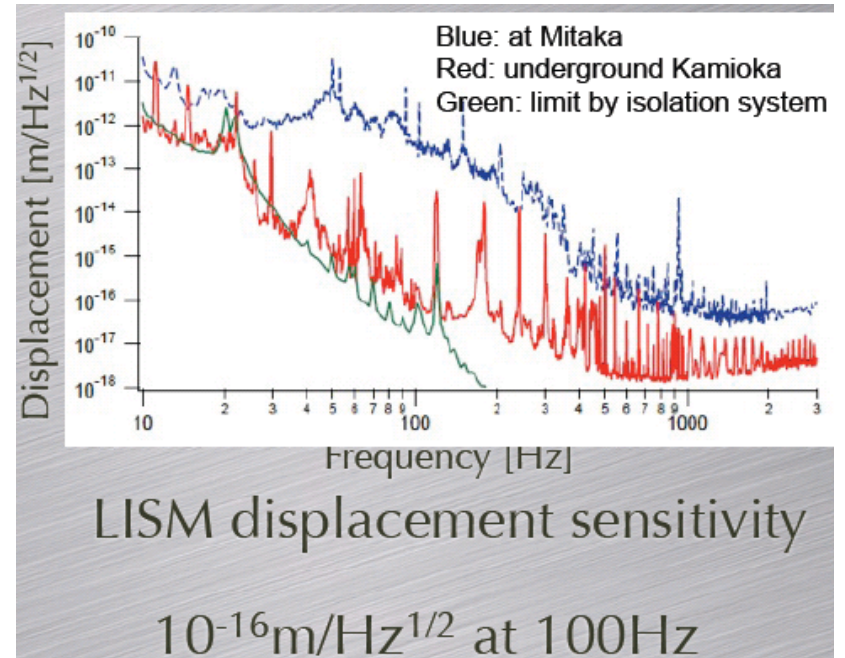
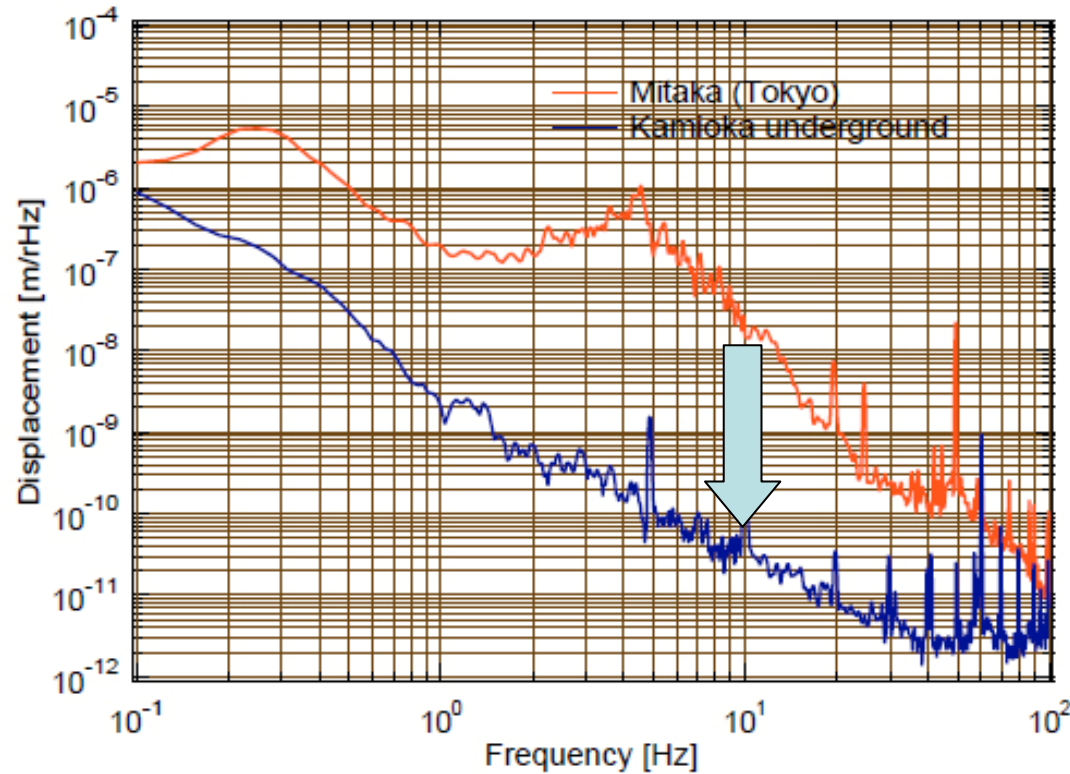


# 地下の優位性

# 地面振動 & LISM



## 地面振動の比較



- 三鷹よりも2桁も地面振動が静か
- LISMによる先行実験でも地下の優位性が示された

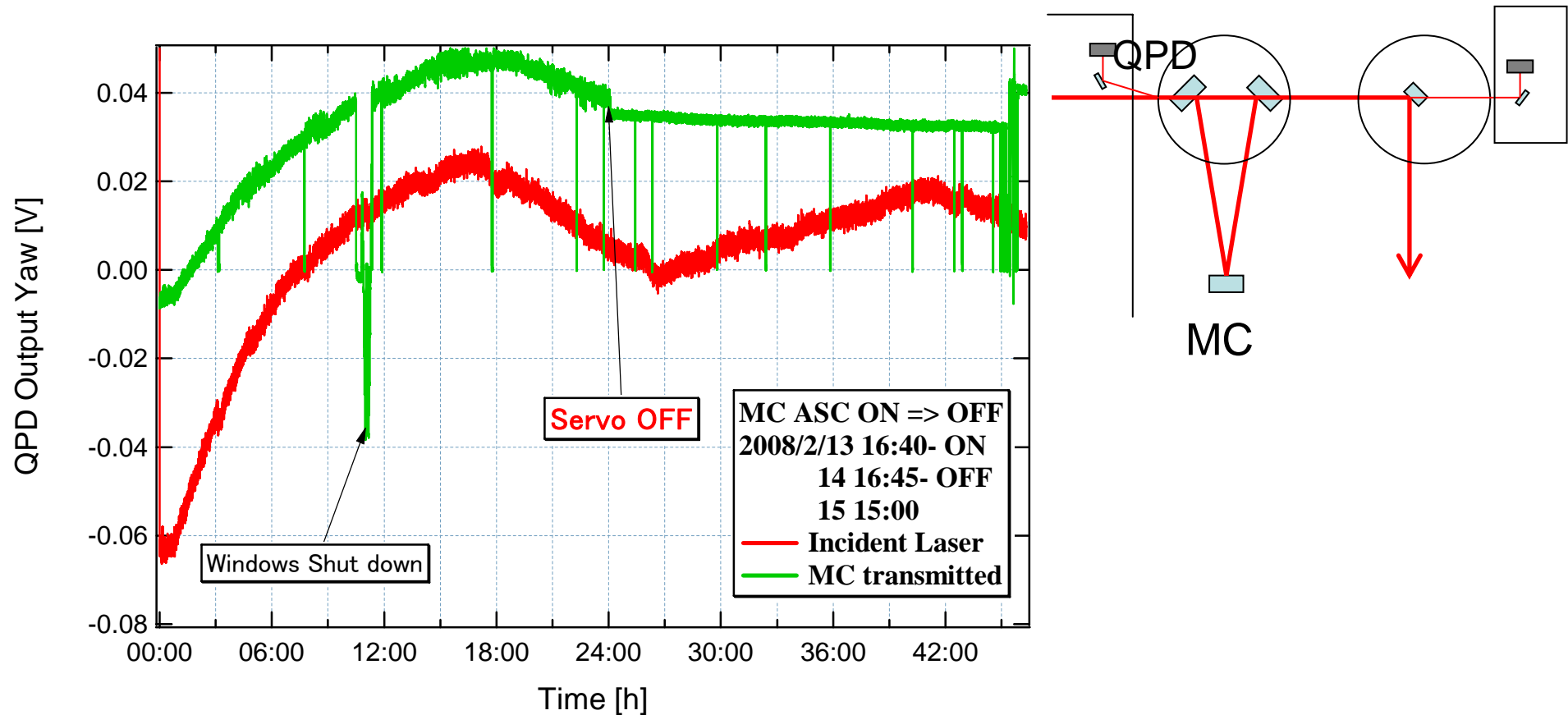


NAOJ 20m 干渉計を移設



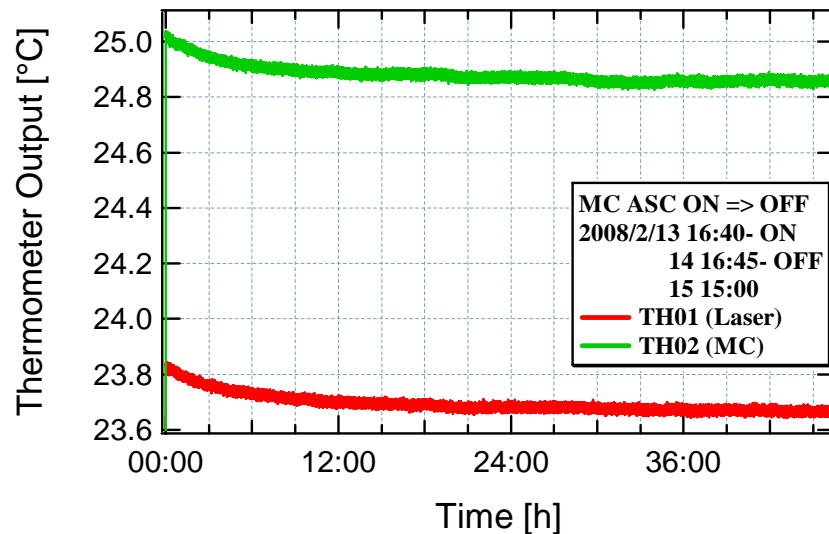
# 入射光ドリフトとMC透過光ドリフト

CLIOでは、MCの方が入射レーザーよりも安定



- MCの鏡をWFSを用いてアライメント制御し、入射光軸に追従させる試験
  - ⇒ TAMAを含め、通常の干渉計はレーザーに追従させた方が安定
  - ⇒ CLIOでは、振り子に吊ったMCの方が安定でビームジッターを改善している！

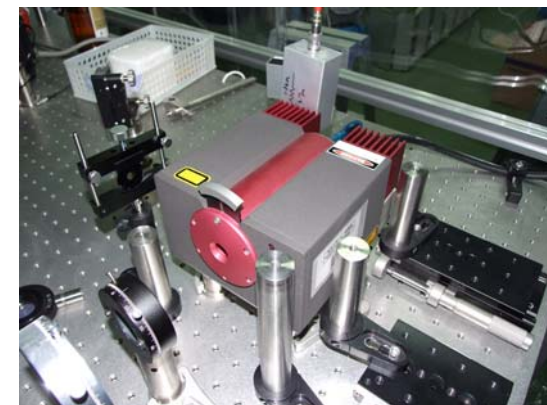
# Advantage of underground site



- Very stable temperature environment  
Its variance for 46 hours is about 0.1~0.2 degree [°C] without controlling temperature.

- Fixed incident optics
- Using commercial Laser  
( **Innolight laser** )

**Incident beam jitter > Suspended MC mirror**



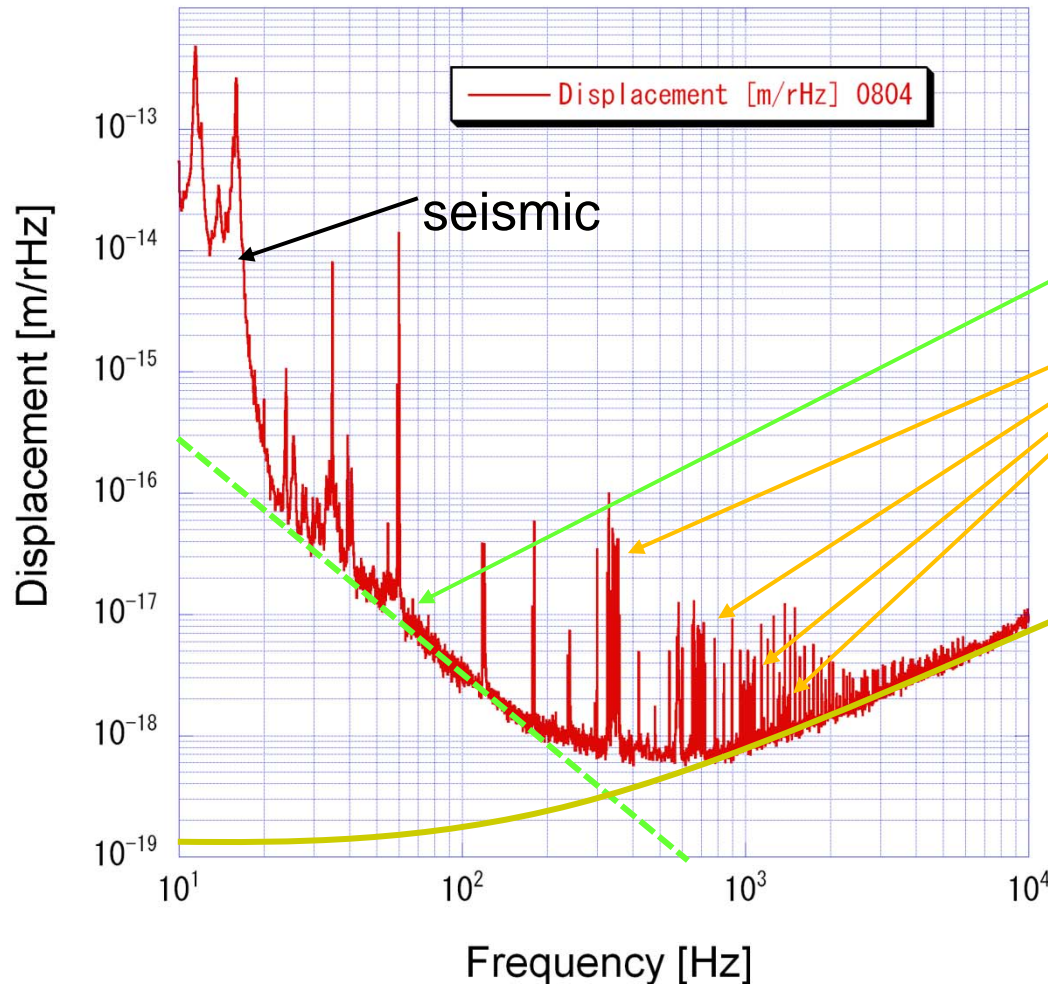
**Underground site gives MC high stable environment by its low seismic noise.**



# 常温での感度

# Factors limiting previous(Apr.08) sensitivity

## CLIO Displacement Noise in 2008 April

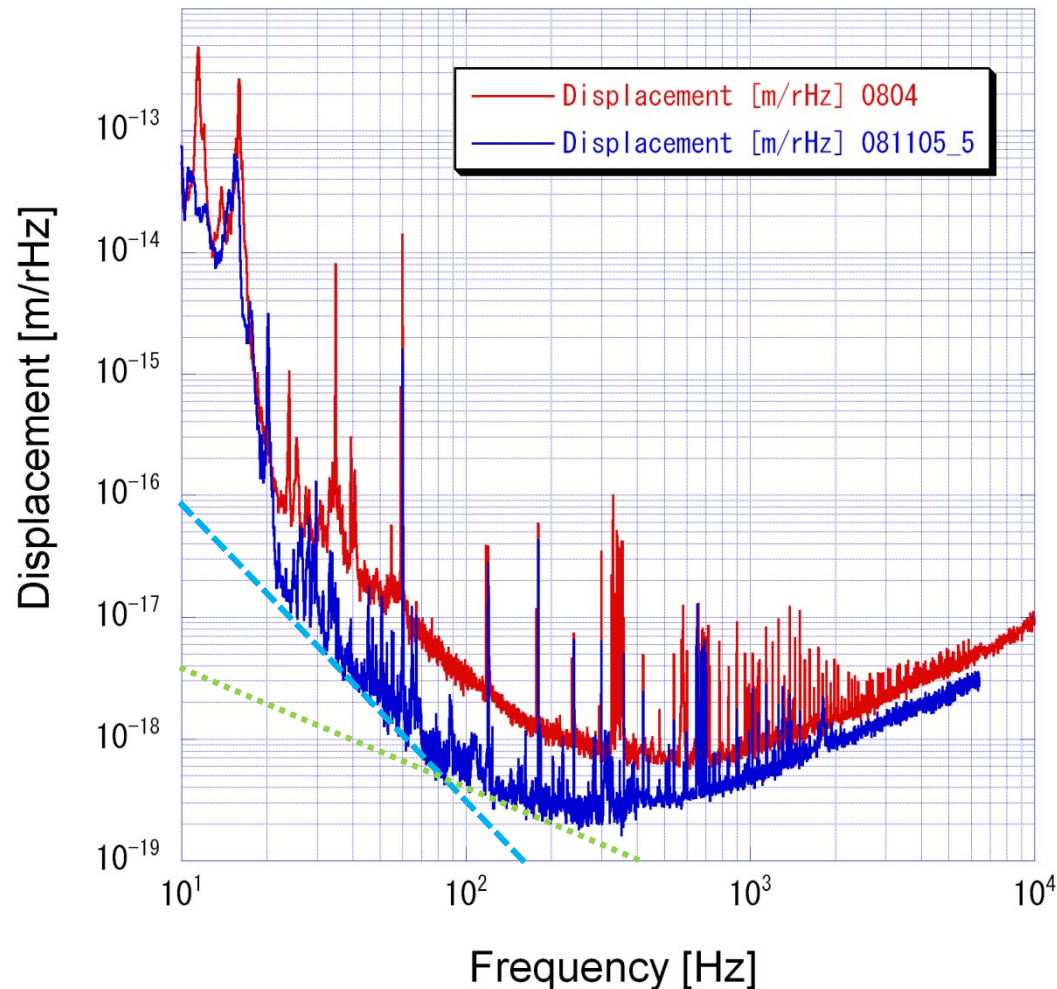


# Current best at room tempera



- 常温の熱雑音レベルに到達 -

## CLIO Displacement Noise Improvement from April/2008 to December/2008

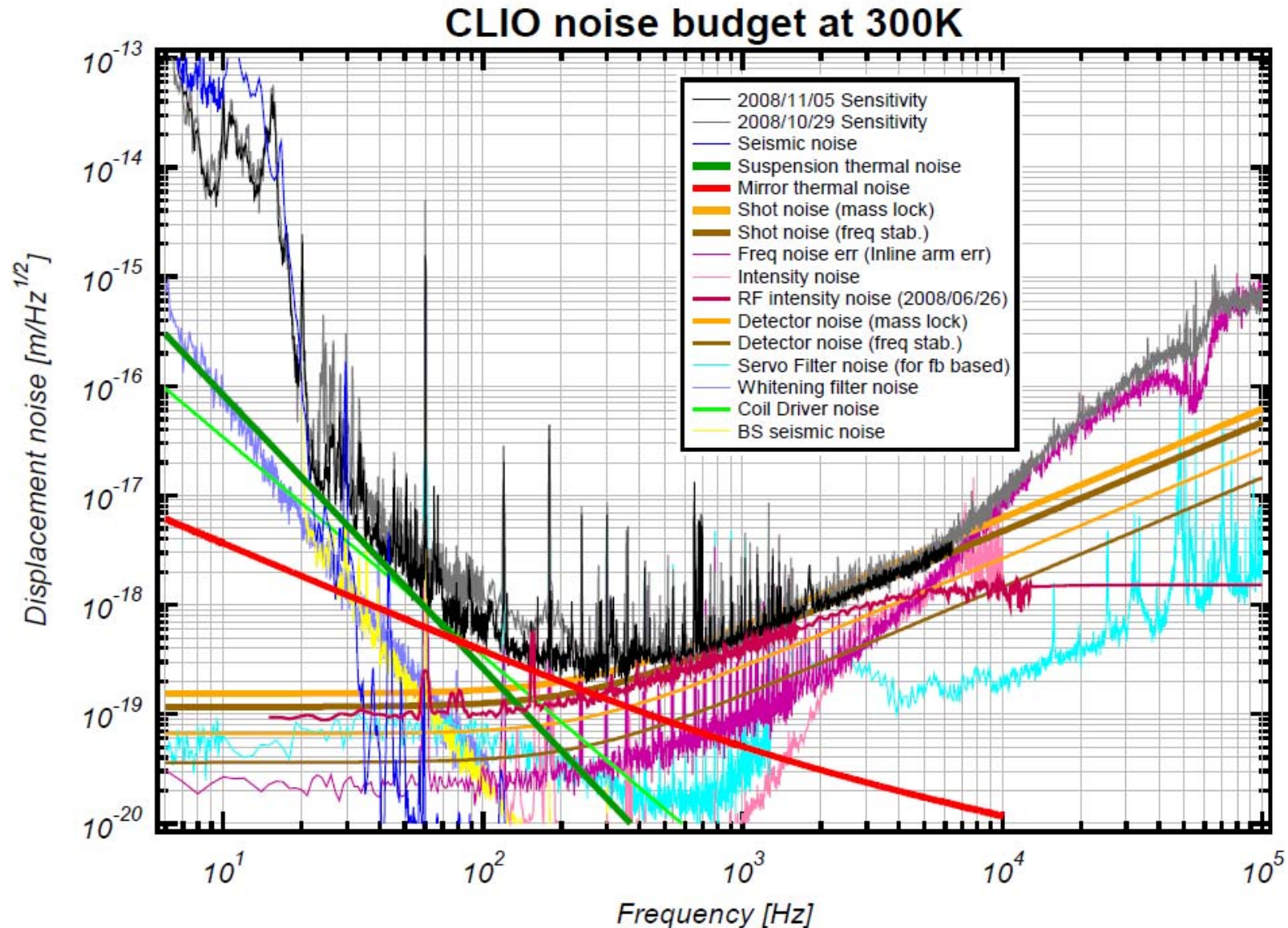


- By finer wires shift wire resonances from the best region change to finer
- Fix the malfunction of RF circuit over 400Hz, which assists to achieve shot noise level.
- Identified noise source appearing from 20Hz to 400Hz (Seiji's one day work)

Further more,

- Correct beam centering reduces noise arising from pitching of the mirror. (20Hz- 400Hz)
- Broken blue line shows pendulum thermal noise.
- Broken green line shows mirror thermal

# 室温でのNoise Budget



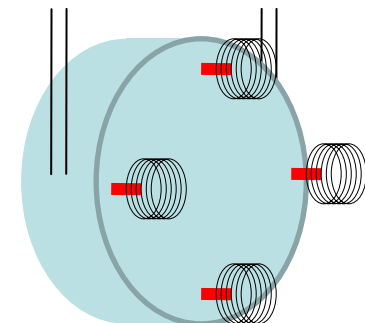
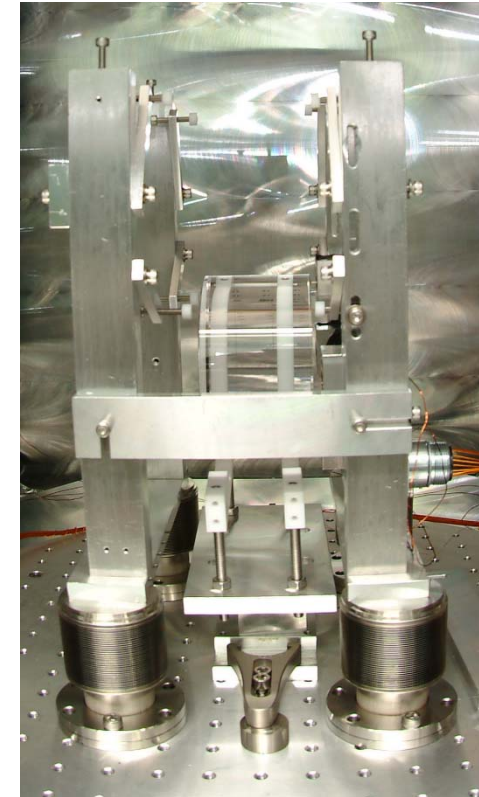
# 感度向上の最後の壁：熱雑音1



## - CLIOで見た鏡防振振り子の機械的Q値の悪化 -

### ● Eddy Current Dampingによる振り子の熱雑音

- 100mFP共振器 (Finesse 3140 ←  $R=0.999000 \pm 20$  ppm) の共振維持のために鏡の位置の精密制御が必要。
- 重力波業界では、磁石を鏡に接着し、かつコイルを対向させ、コイルに流す電流によって発生する磁場の制御で鏡の位置制御を非接触に行っている。磁石は、この時、直径2mm長さ10mmのネオジウム磁石。鏡の質量は1.8kg。
- CLIOでは、鏡周辺は低温(構造体:  $\sim 10$ K、鏡は20K)に冷却する必要があるため、コイルのホルダーにも純アルミを使用していた。
- ホルダーとしての純アルミが磁石に近すぎたため、その磁石の磁場により、アルミホルダー内にEddy Currentが流れ、結果的に、鏡の動きをDamping(つまり、損失を付加)し、振り子の機械的なQ値を低減させていた。
- ちなみに、この物理現象は、逆の立場から「アルミのホルダーに、そのアルミの抵抗に起因するジョンソン(電圧)雑音が発生し、それにより流れる円電流によって発生した磁場により鏡が揺らされた」と表現することも可能である。



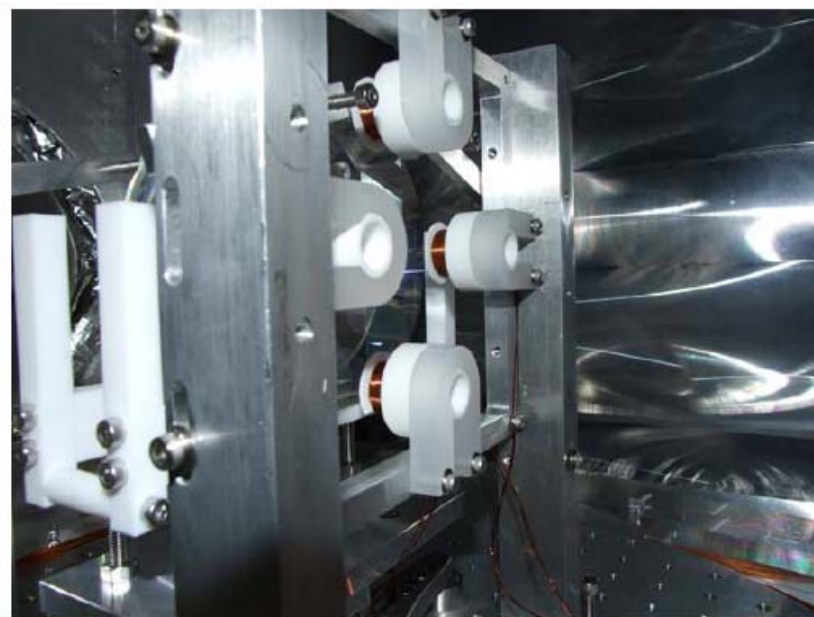
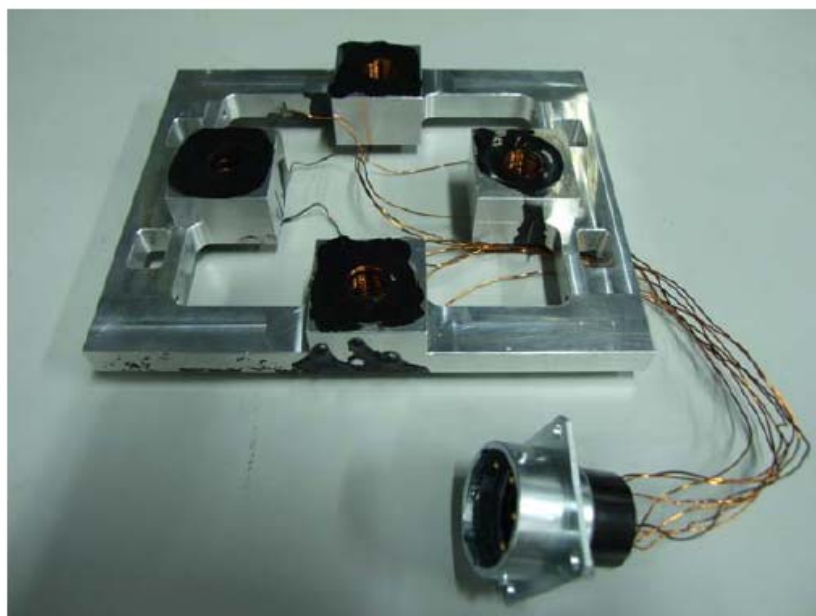
# 感度向上の最後の壁：熱雑音1



## - 検証実験 ①：コイルホルダーを非金属に変更 -

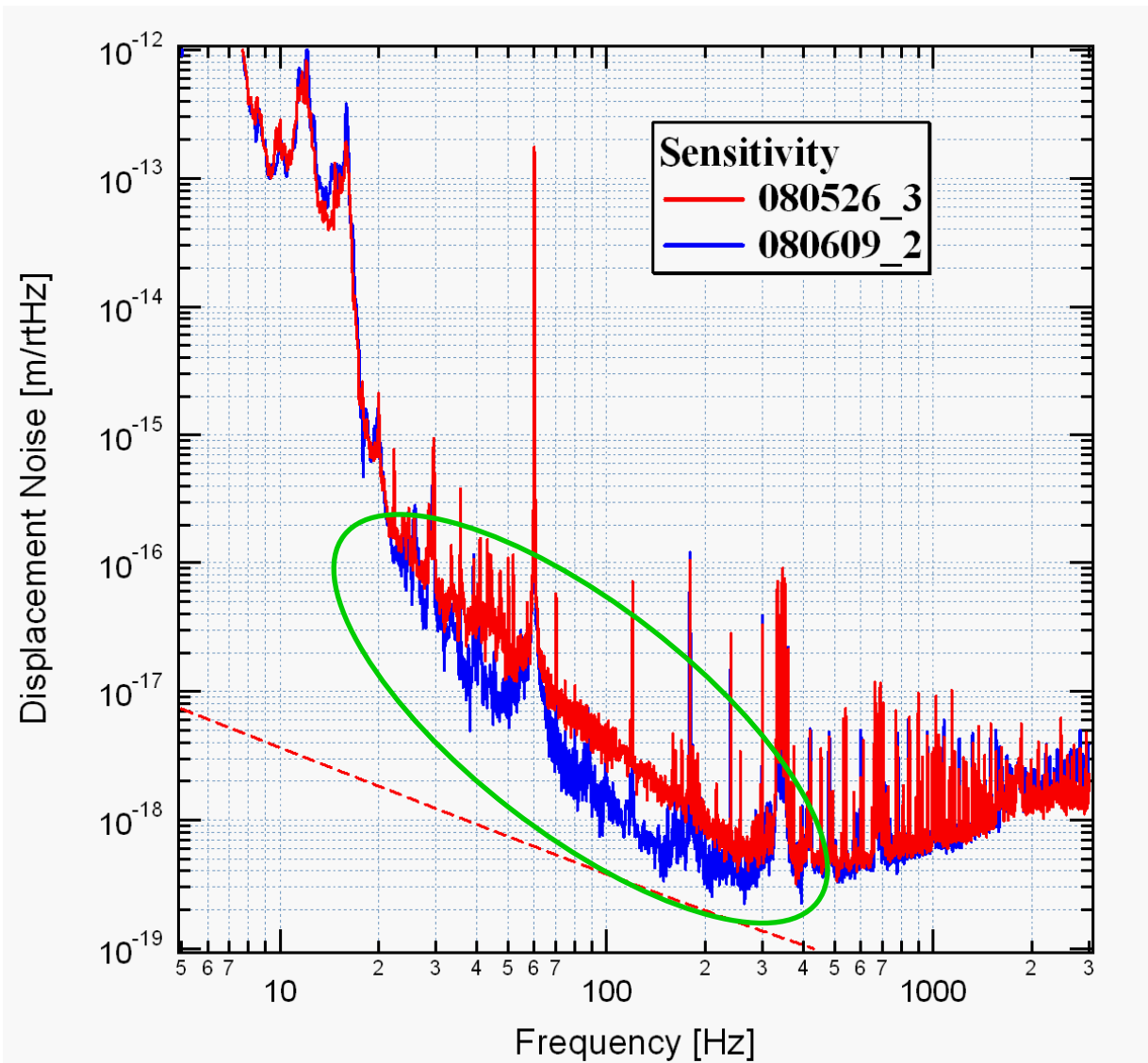
### 検証①

コイルホルダーを「アルミ」から「マコール(セラミック)」と「ダイフロン(樹脂)」に変更。  
(低温化のためには、そこそこ熱伝導性のあるものが必要があるが、今は検証ということで..)



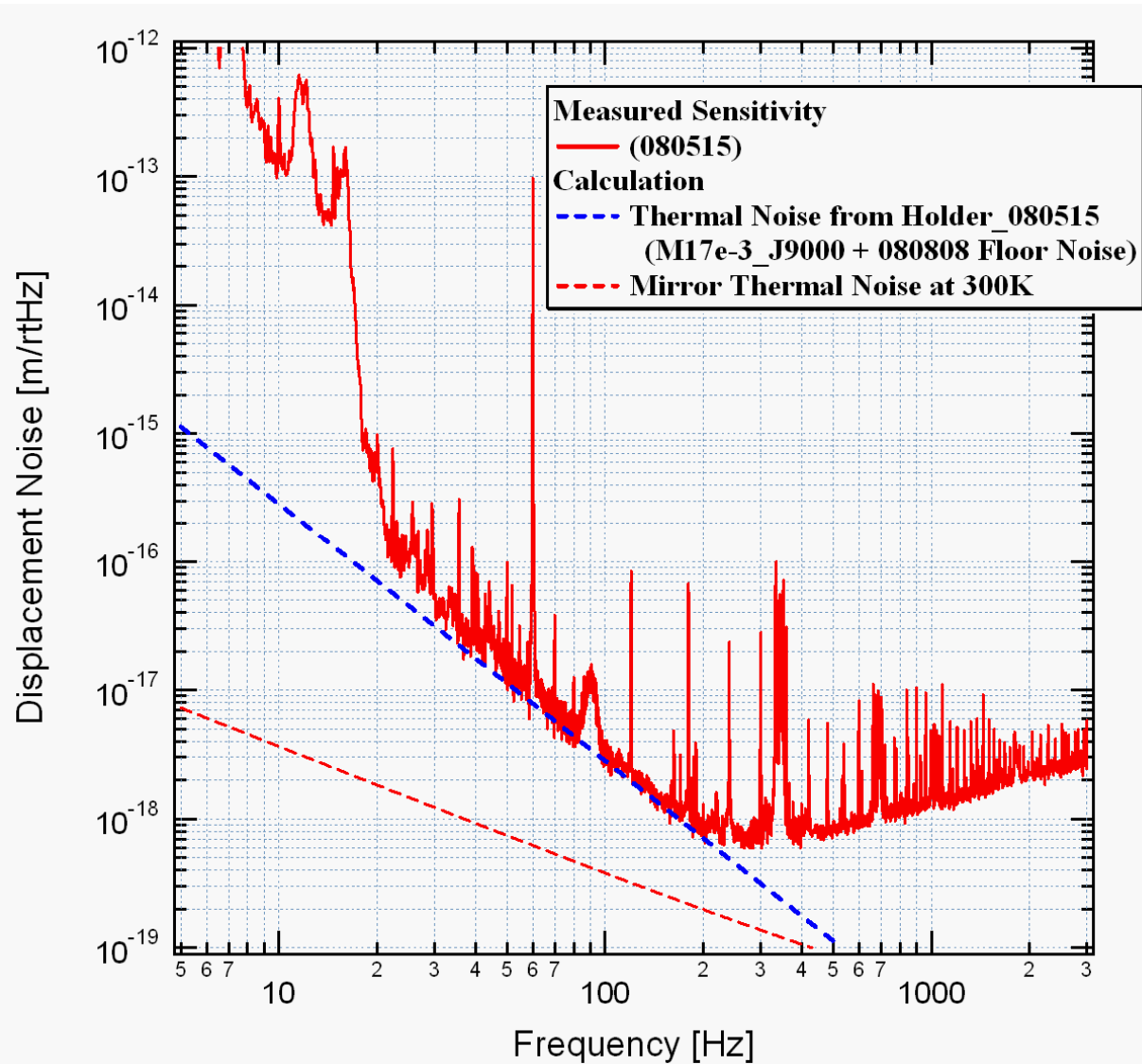


# Thermal noise (1) ---result



- Sensitivity improved
- limit of the sensitivity is the next problem

# Thermal noise (1) –theoretical check



● Theoretical guess explained the data.

$$G = \frac{4k_B T N}{m^2 \omega^4} 2\pi\sigma \left( \frac{3\mu_0 \mathcal{M}}{4\pi} \right)^2 \mathcal{J}$$

$$\mathcal{J} = \int_{z_1}^{z_2} \int_{r_1}^{r_2} \frac{r^3 z^2}{(r^2 + z^2)^5} dr dz$$

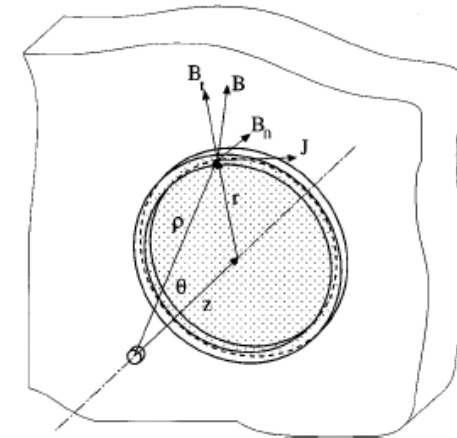


FIG. 1. Geometric configuration for eddy current calculation.

Reference of calculation:  
*G. Cagnoli et al., Rev. Sci. Instrum. 69, 2777 (1998)*

# 振り子の熱雑音の検証実験



Coil自身に生じる渦電流を用いて振り子の熱雑音を操作する

振り子の熱雑音 ⇒ 揺動散逸定理

渦電流 ⇒ Viscous damping

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

運動方程式

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

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

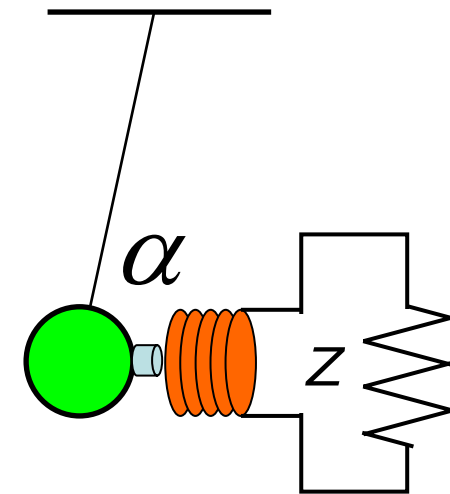
F: 鏡に加わる外力[N/A]  
 Z: コイルと外付け抵抗のインピーダンスの和  
 N: 磁石コイルペアの個数  
 m: 鏡の質量[kg]  
 Q: 振り子の機械的Q値  
 G: パワースペクトル[m<sup>2</sup>/Hz]

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

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

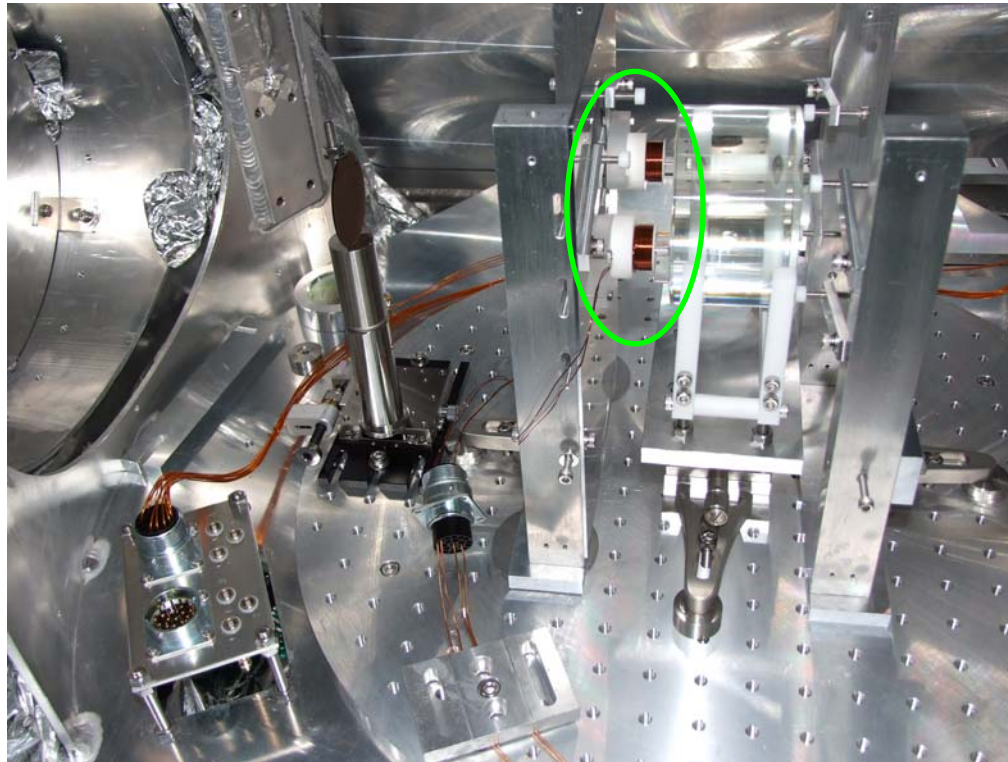
$$Q = \frac{m\omega_0 R}{N\alpha^2}$$

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

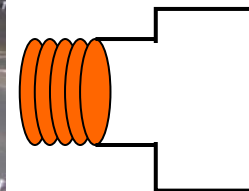
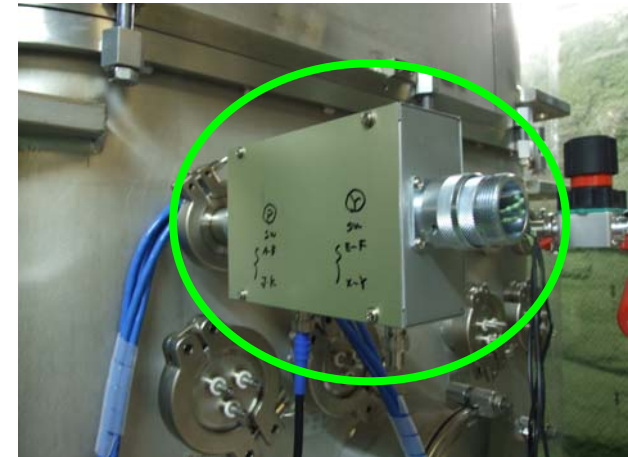


コイルの抵抗を変えるだけで、熱雑音を任意に操作できる！

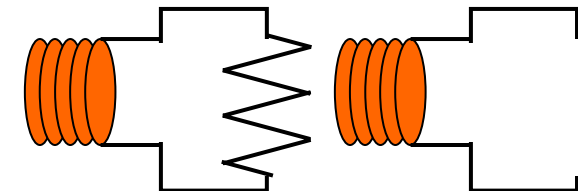
# 振り子の熱雑音の検証実験



Per. End



Short



2Ω

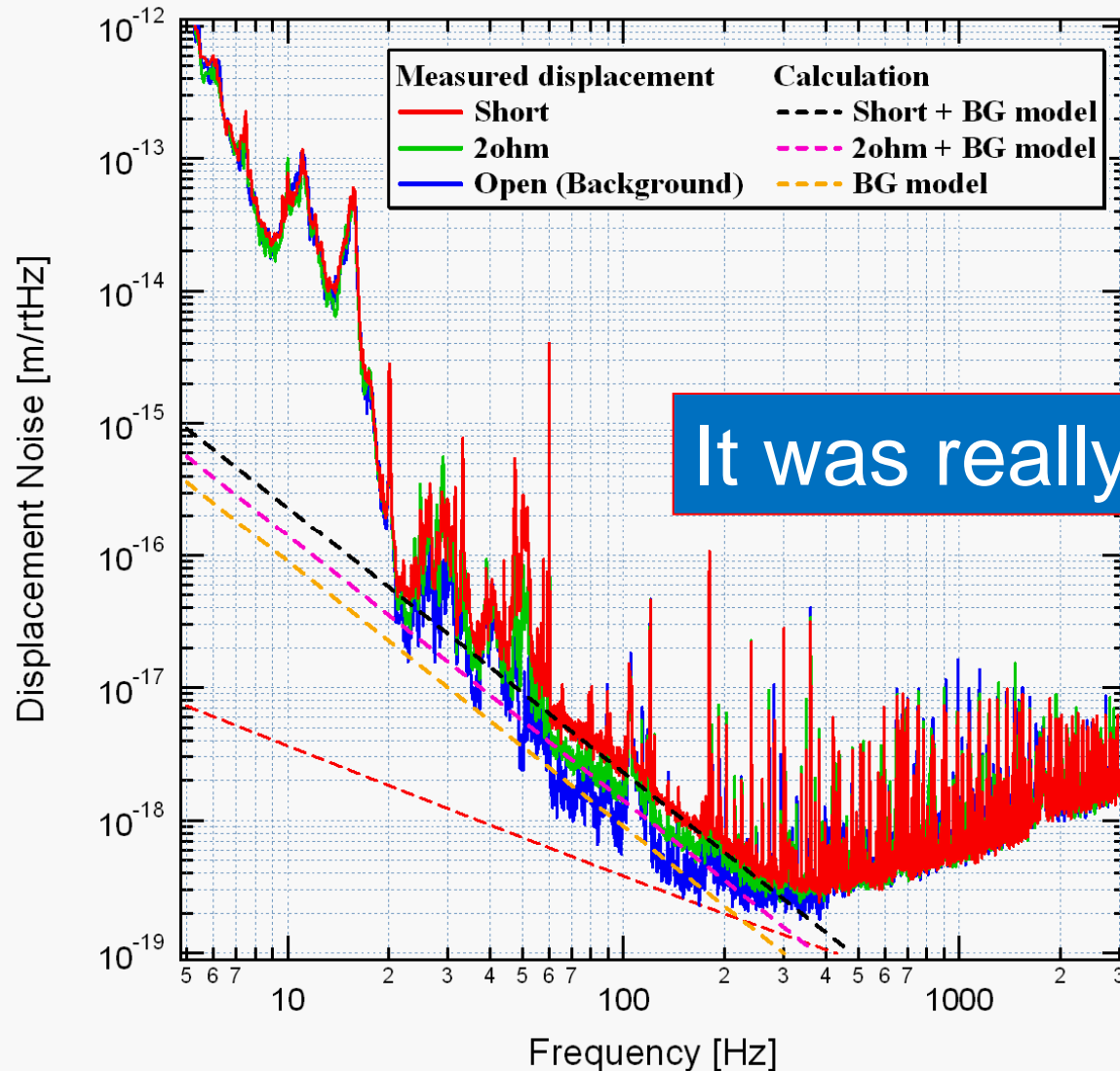
Open

Prediction	Q of pendulum	Noise + Floor (Open) @100Hz [m/rtHz]
Short	$4 \times 10^4$	$2.3 \times 10^{-18}$
2Ω	$1.6 \times 10^5$	$1.5 \times 10^{-18}$
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

# Thermal noise (1) --Experimental check ②

## pendulum thermal



**It was really pendulum thermal!**

### Expected noise@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]

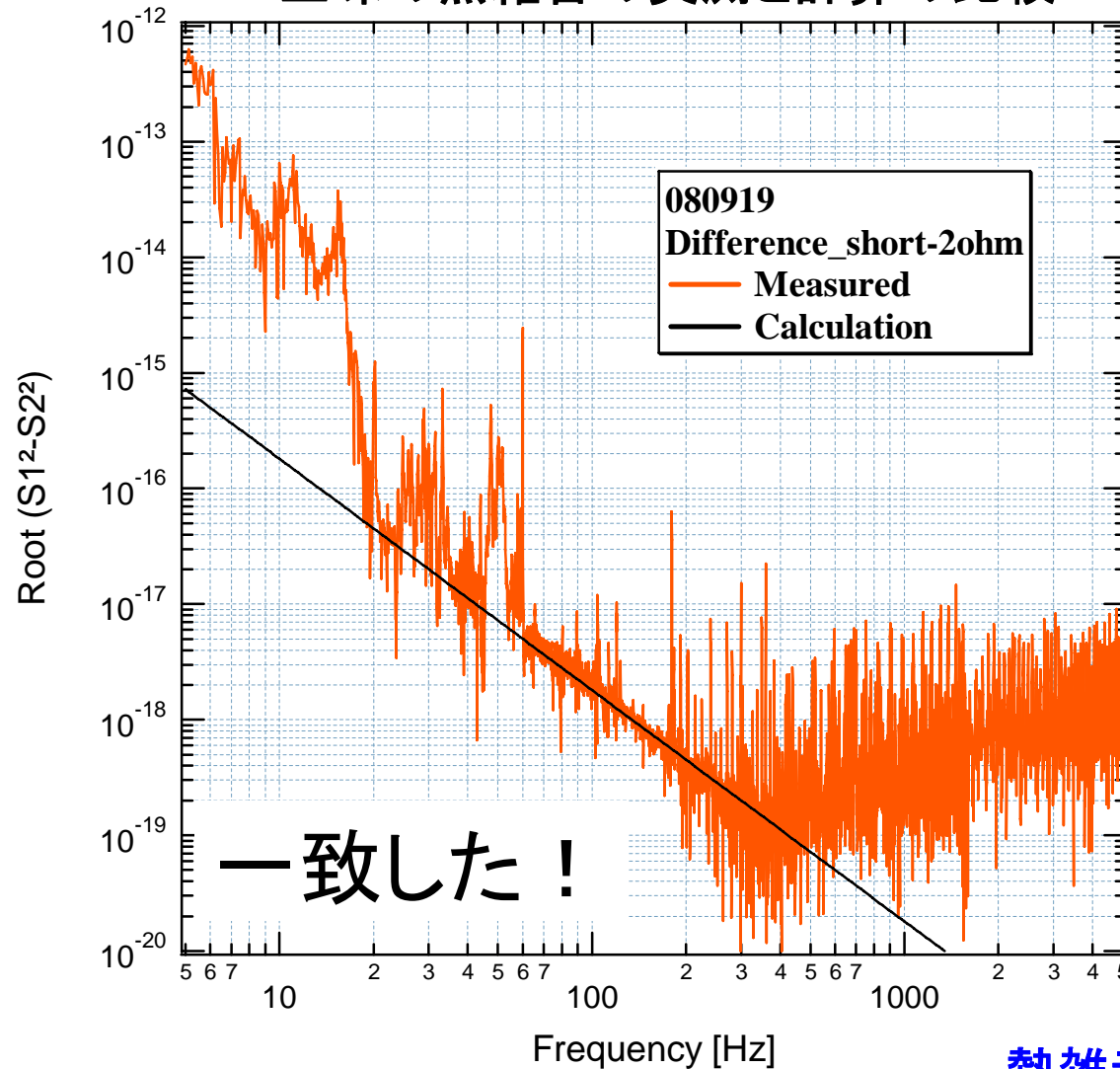
### Comparison in wide frequency band

**Noise spectrum considering noise floor**  
 $\Rightarrow$  observation agrees with theory

# 振り子の熱雑音の検証実験



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:

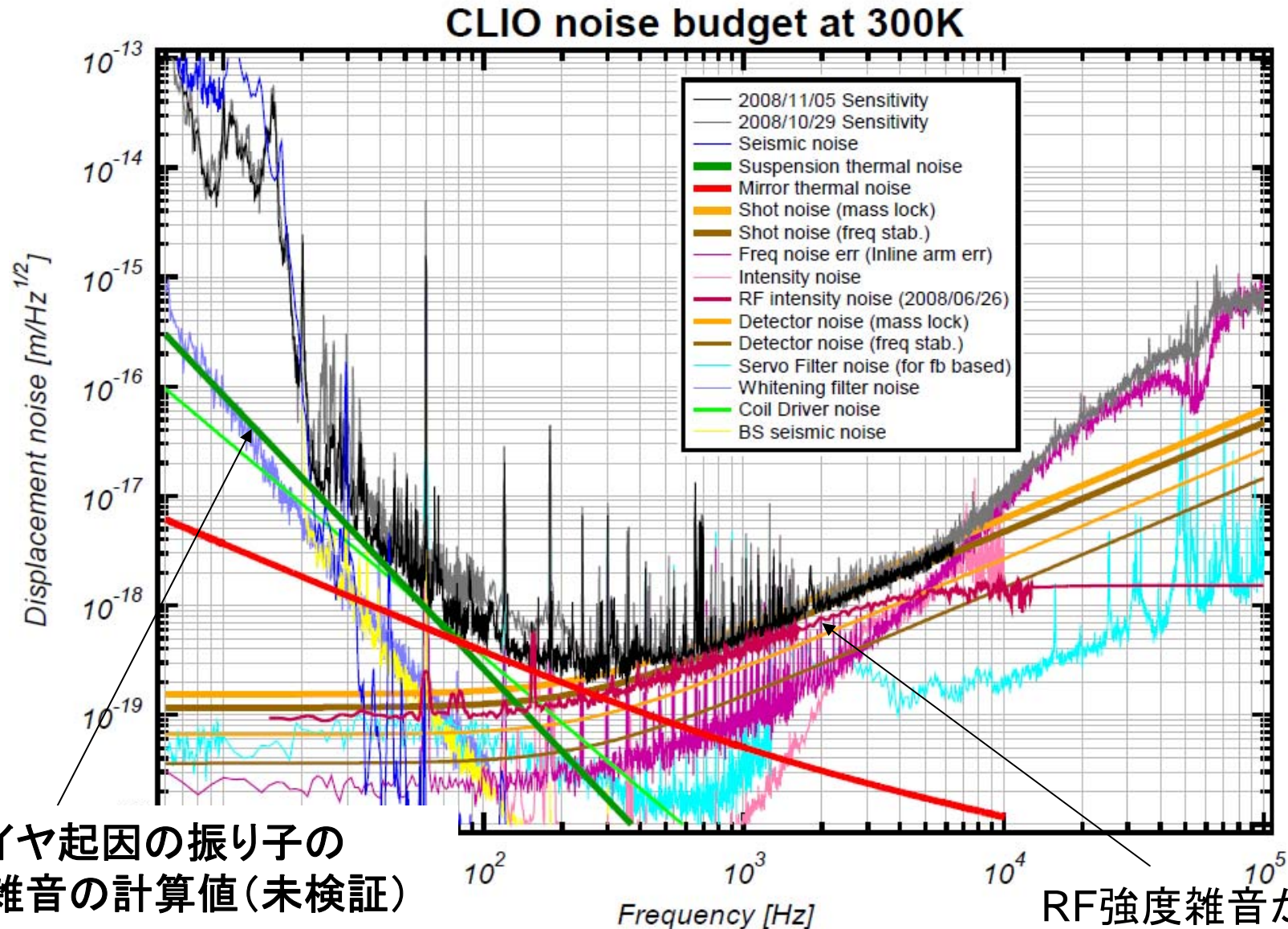
20Hz ~ 300Hz

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

⇒ off-resonant かつ、  
GW-band での  
振り子の熱雑音の初検証

熱雑音が普通に見える時代の到来

# 室温でのNoise Budget

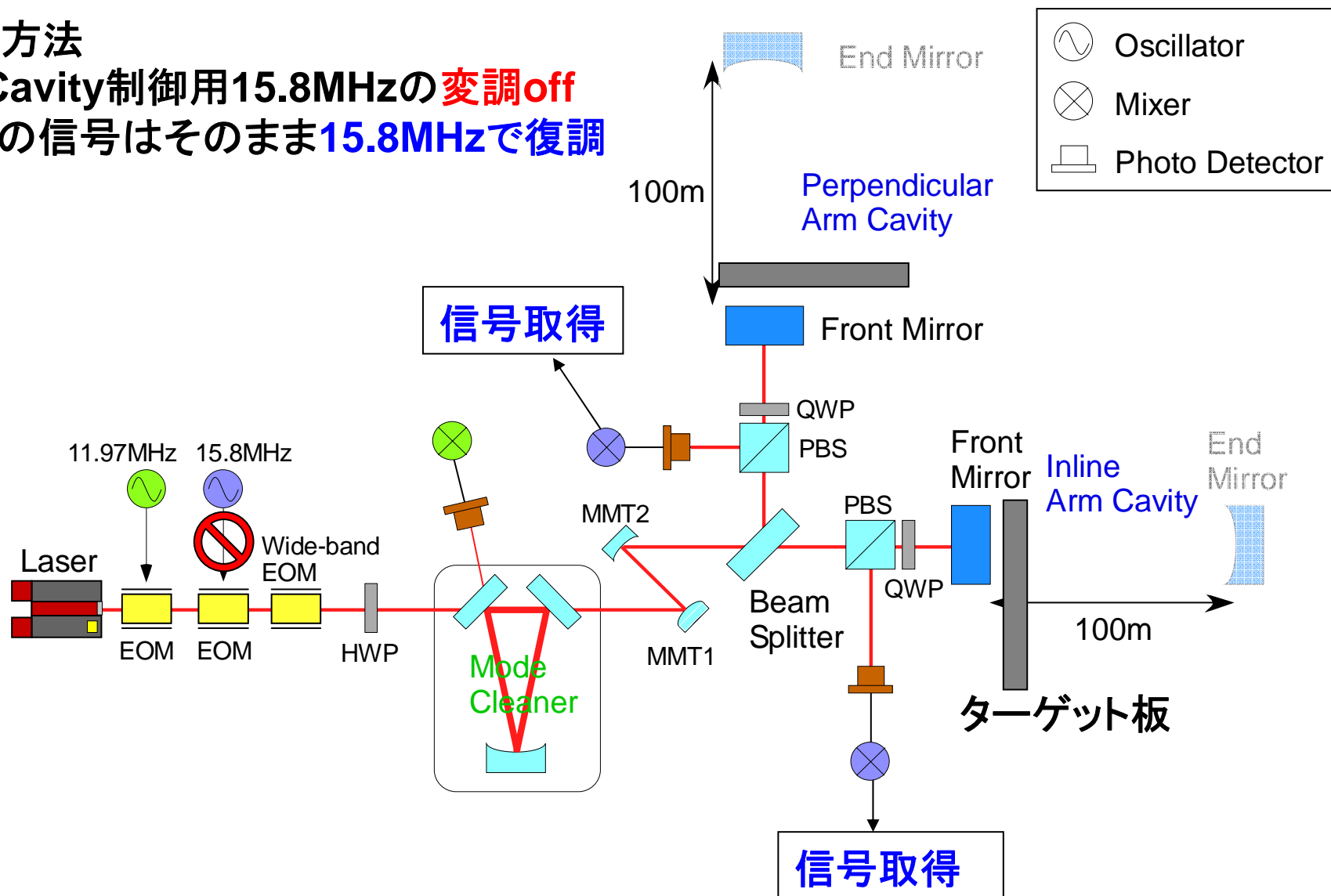


# 高周波帯域の懸念：RF強度雑音



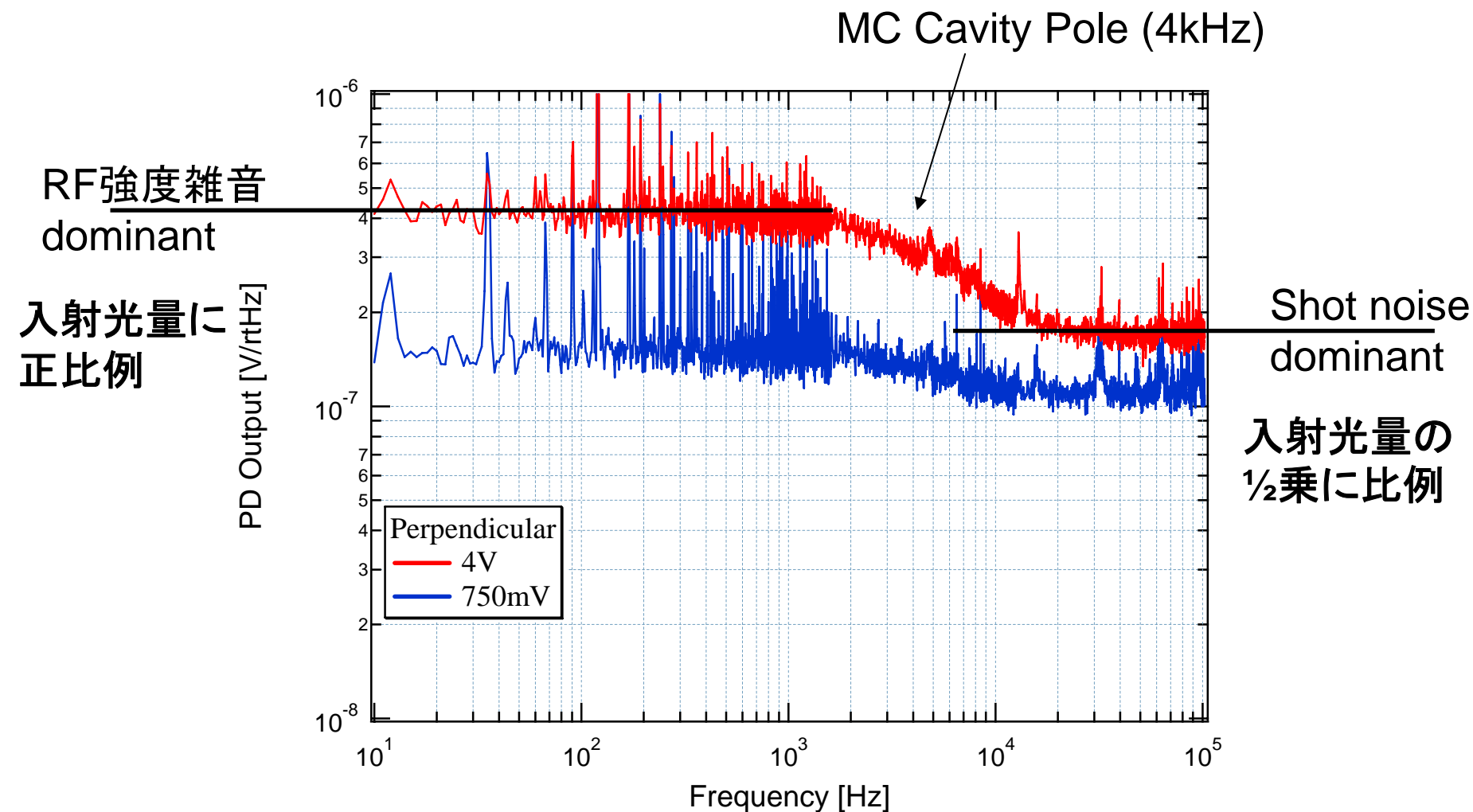
## 測定方法

- ・腕Cavity制御用15.8MHzの変調off
- ・PDの信号はそのまま15.8MHzで復調

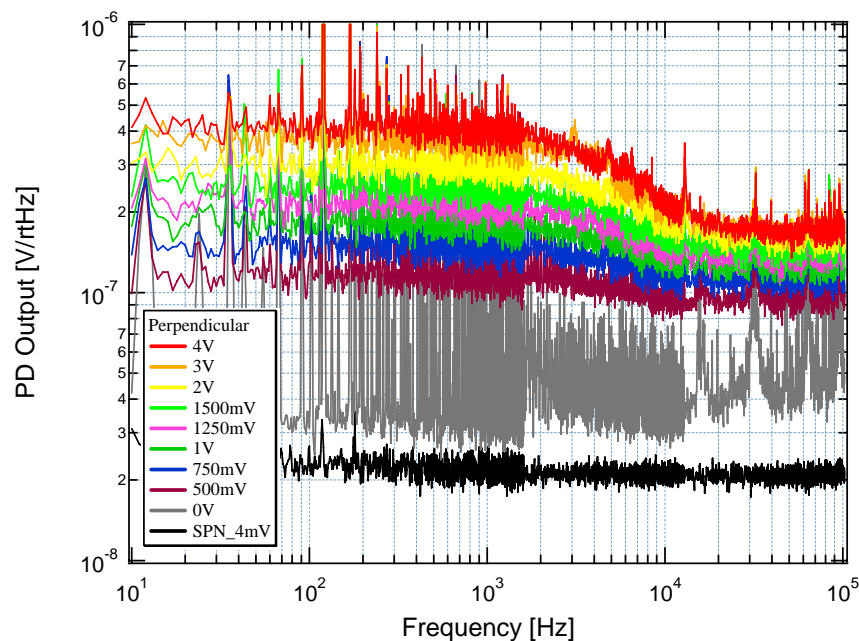




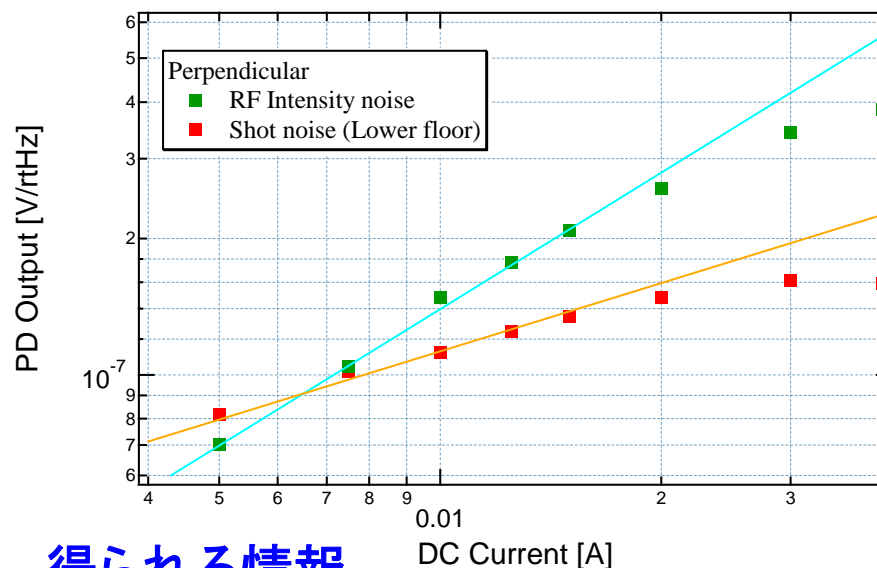
# 高周波帯域の懸念：RF強度雑音



# 高周波帯域の懸念：RF強度雑音



## RF強度雑音とShot noise の比



### 得られる情報

- (1). 光量依存性
- (2). PDの応答
- (3). RF強度雑音とShot noiseの比

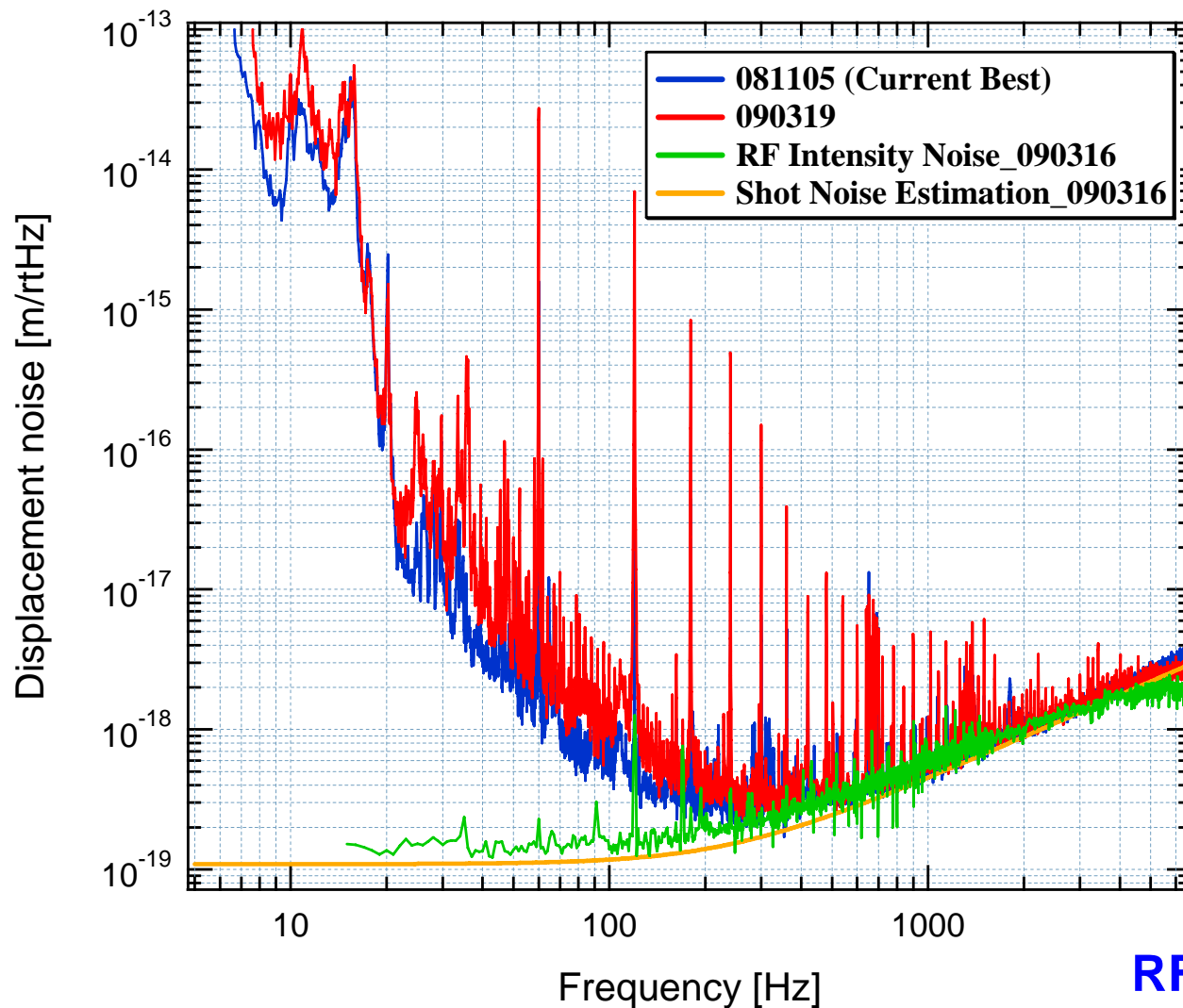
$$\sqrt{\left(\frac{RFI}{\sqrt{1+(f/P_{MC})}}\right)^2 + Shot^2}$$

$P_{MC}$  はMCのCavity Pole(4kHz)

⇒ Background noise を  
差し引いた後、フィッティング  
**RFI** と **Shot** を求めた

6 ~ 7 mA の電流相当の光量がPD  
に入射するとき、**RF強度雑音**と**Shot  
noise**が等しくなる

# 高周波帯域の懸念：RF強度雑音



高周波で一致

⇒ 現在の感度の

400Hz ~ 4kHz

を制限している

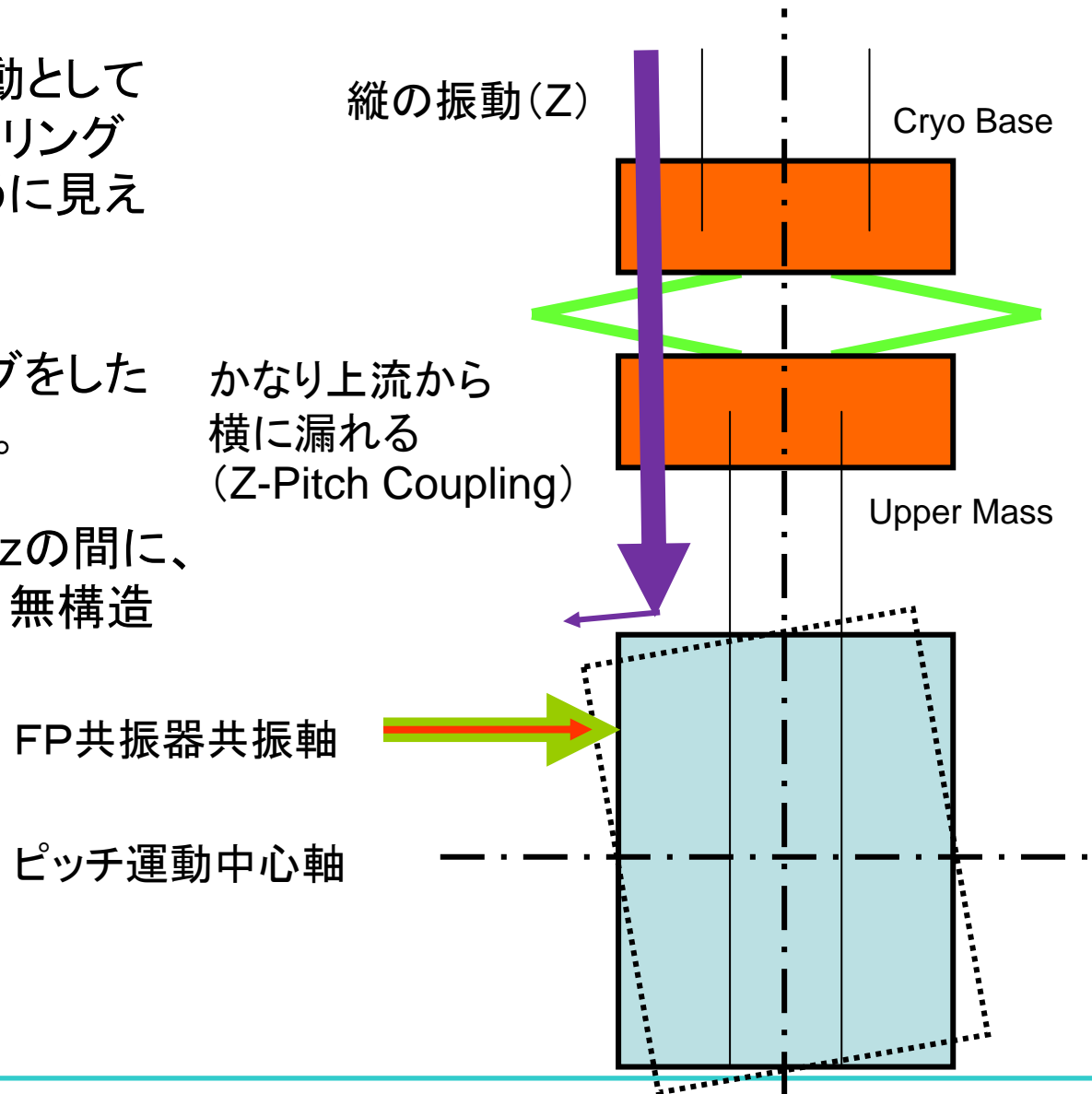
可能性が高い

CLIOの目的は低周波  
なので、Priority はそ  
れ程高くない

RF強度雑音の量を操作する  
検証実験が必要

# 現在20Hz~70Hzを支配している雑音源は何？

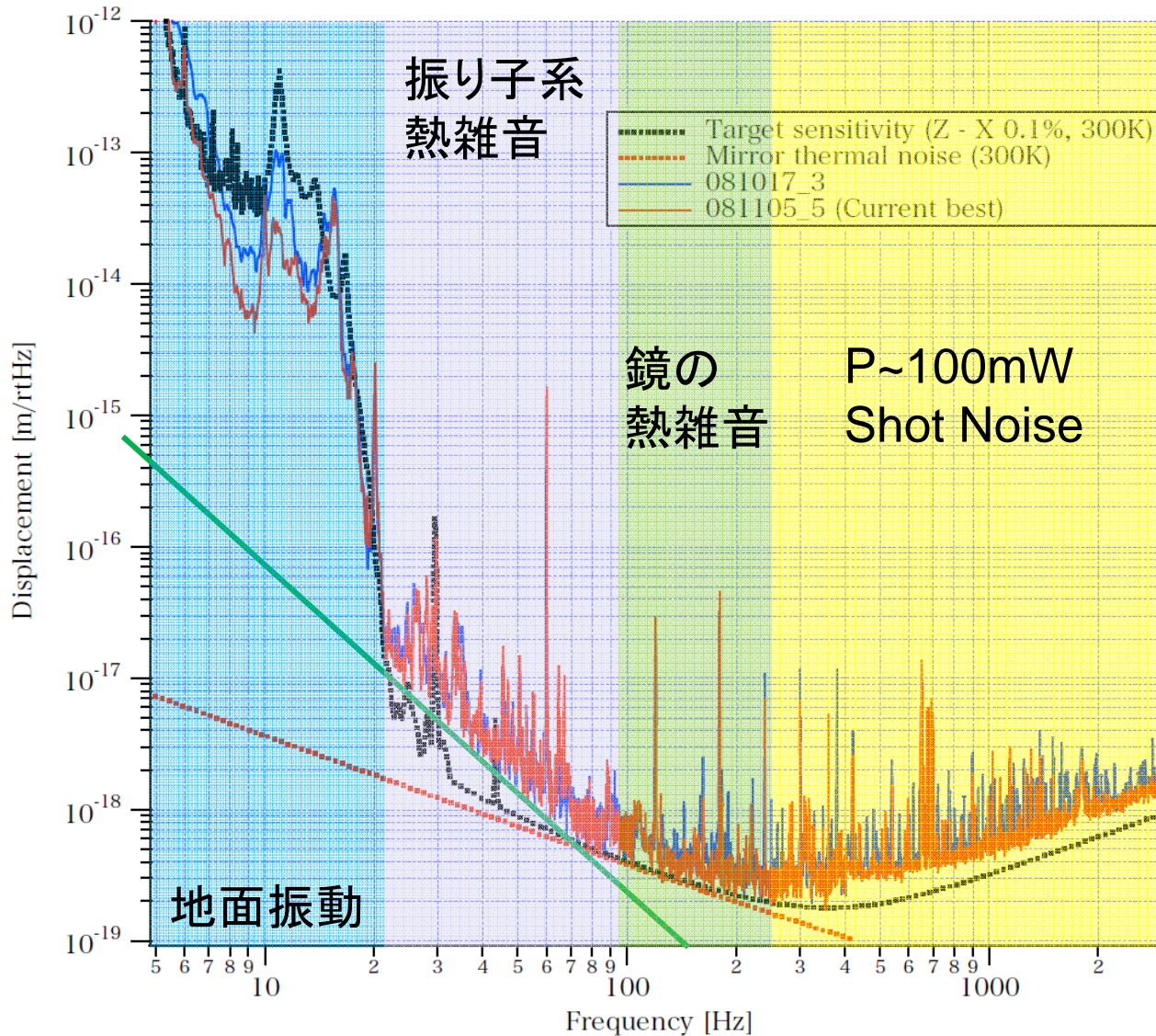
- 縦の地面振動は、ピッチ振動として漏れてくる。ビームセンターリング不十分だと、Xが動いたように見える。
- そこで、ビームセンターリングをしたら、汚い構造は低減された。
- しかし、今度は、20Hz~70Hzの間に、落とすきれない？ 傾き-5/2、無構造な雑音が残った。



# 感度向上の最後の壁：熱雑音2



## -70Hz~20Hzを支配している雑音源は何？-



●残ったのは、ワイヤーのピッチの振動の熱雑音が横方向に漏れたものがまだ見えているかもしれない。

(緑線)

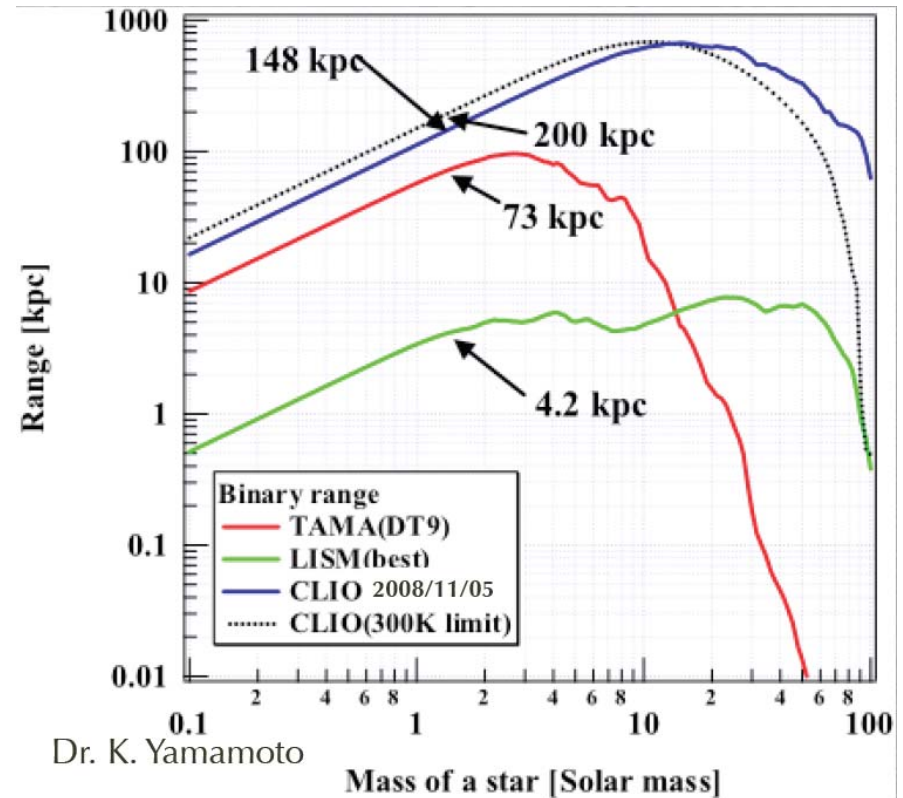
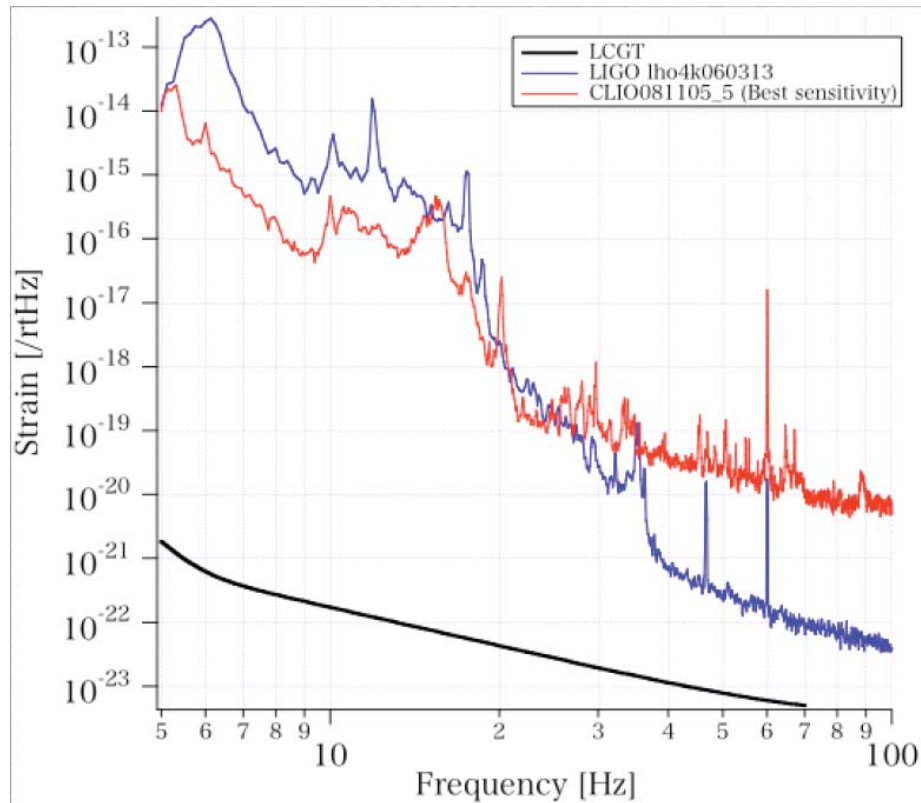
(ピッチのQは計測済み)

●振り子のQの推定値(これもワイヤーバイオリンモードのQを測定しそこから計算)から計算される振り子自身の熱雑音のレベルともほぼ一致する。

●250Hz~70Hzは鏡の常温熱雑音に接近(赤線)。

どれにしろ、熱雑音。  
冷却実験の舞台は整った。

# 重力波の感度



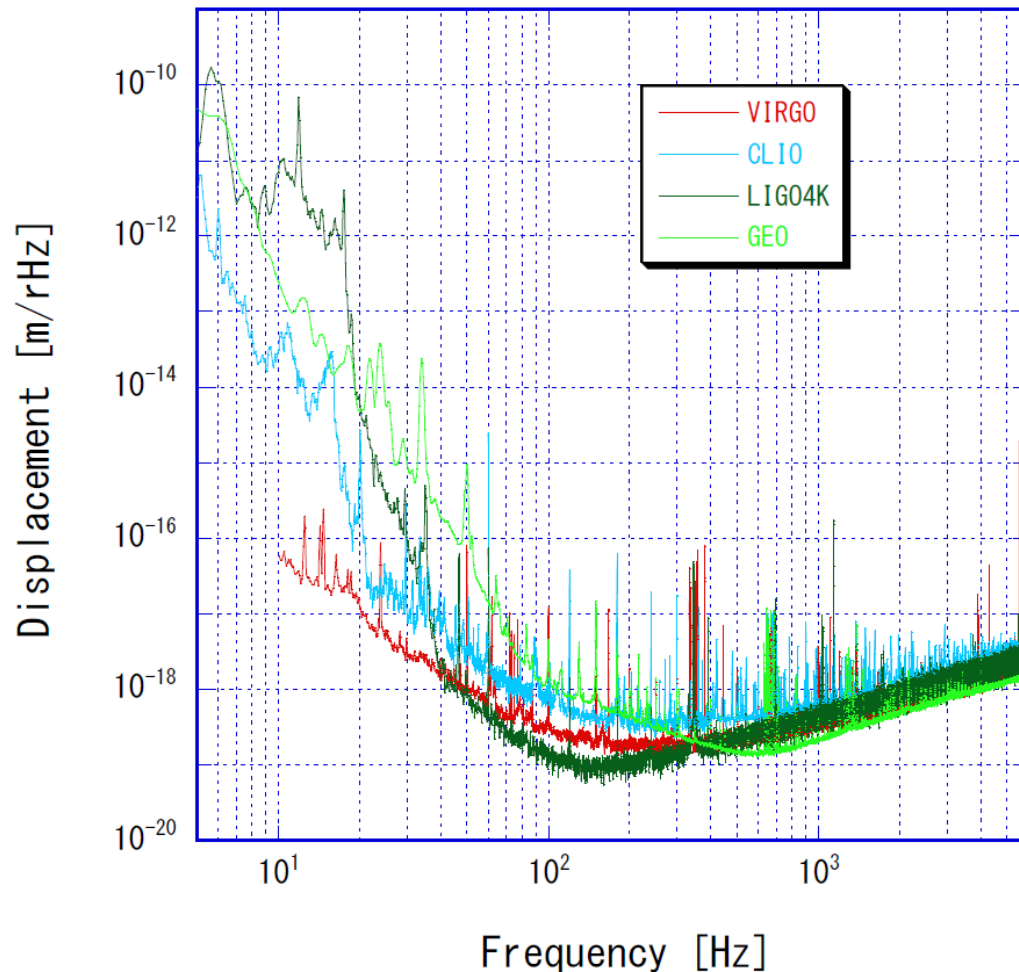
腕の長さが40分の1であるにも関わらず、  
**20Hz以下でLIGOを上回る**

Binary Range も目標としてきた  
TAMAのDT9を超えた

# 世界の重力波観測装置との比較



VIRGO/CLIO/LIGO/GEO  
Displacements



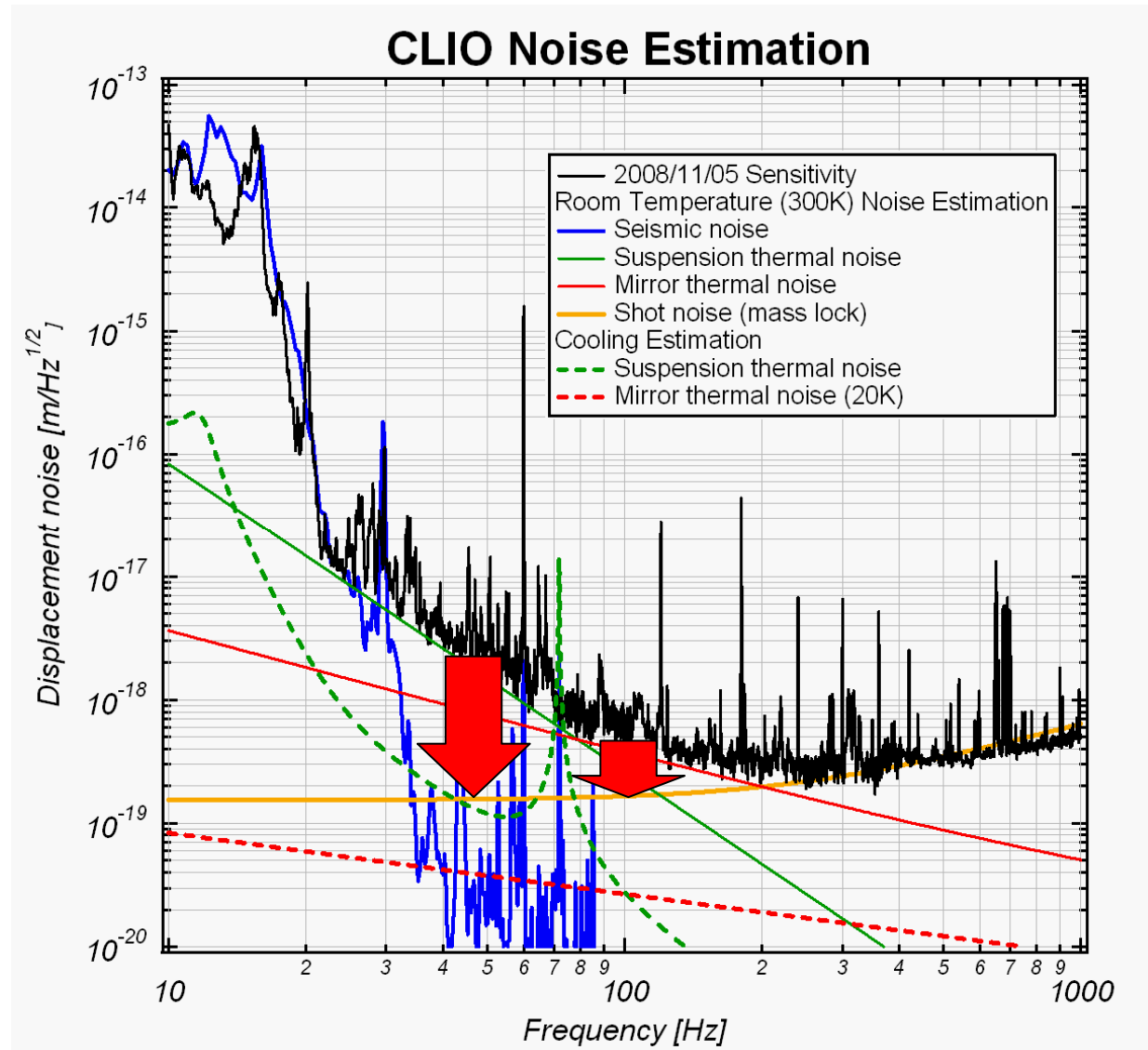
- 世界のkmスケールの干渉計と比較しても、変位感度は互角
- Virgoは、Super Attenuatorのおかげで、低周波で断トツ。
- LIGOはスペクトルのきれいさと、3台がほぼ同じ感度という点で優れる。
- GEOは先進的Detection技術でShot雑音を低減。
- 当然Strainではkmクラスが圧倒的に有利。
- 世界はすでにAdvancedな重力波望遠鏡開発(感度10倍)を開始。



# 鏡の低温冷却実験



# Goal



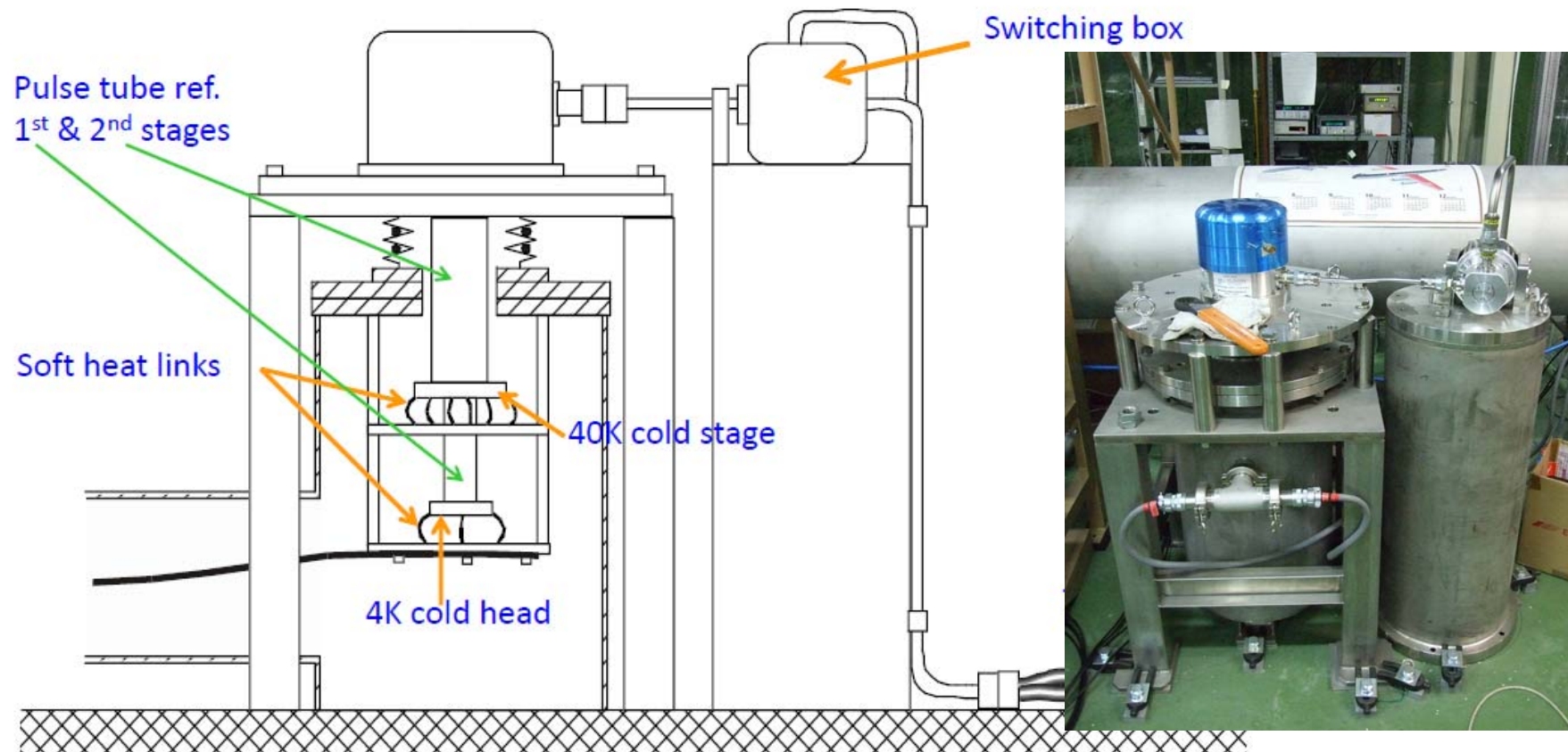
鏡の低温冷却実験によって、熱雑音低減の初観測を目指す

# 低振動冷凍機

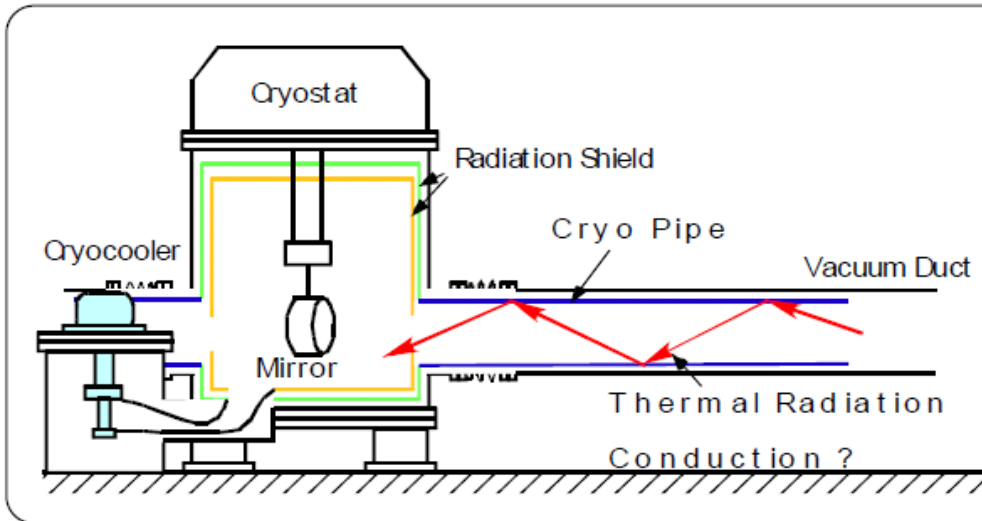


## Quiet refrigerator was developed ( design in 2003)

F-6: Class. Quantum Grav. (Accepted), Pr-1: Proc. 28th ICRC (2003),  
patent: Pa-3 Tomaru et al., 2003; Suzuki et al., 2003.

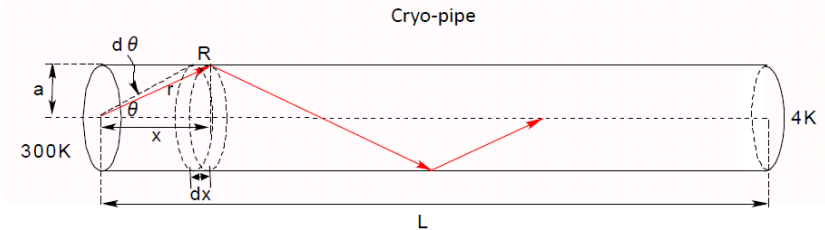


# 輻射伝搬による鏡の温度上昇



Radiation shield inside a radiation shield(3)

Simulation: Ray trace model

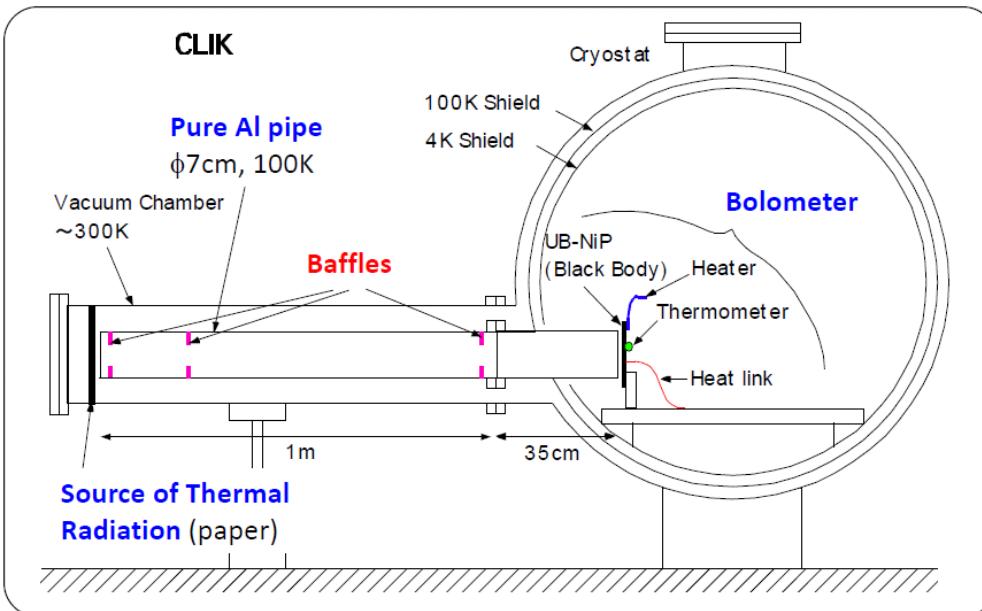


Calculation result including reflection effect (CLIO case)

Reflectivity of Al	$R=0.90$	$R=0.95$	$R=0.97$
$(P_{ref} + P_{dir})/P_{dir}$	307	622	898

Thermal radiation source → Vacuum duct consist of stainless steel  
 Absorbed power in cryostat → 100% (black body)

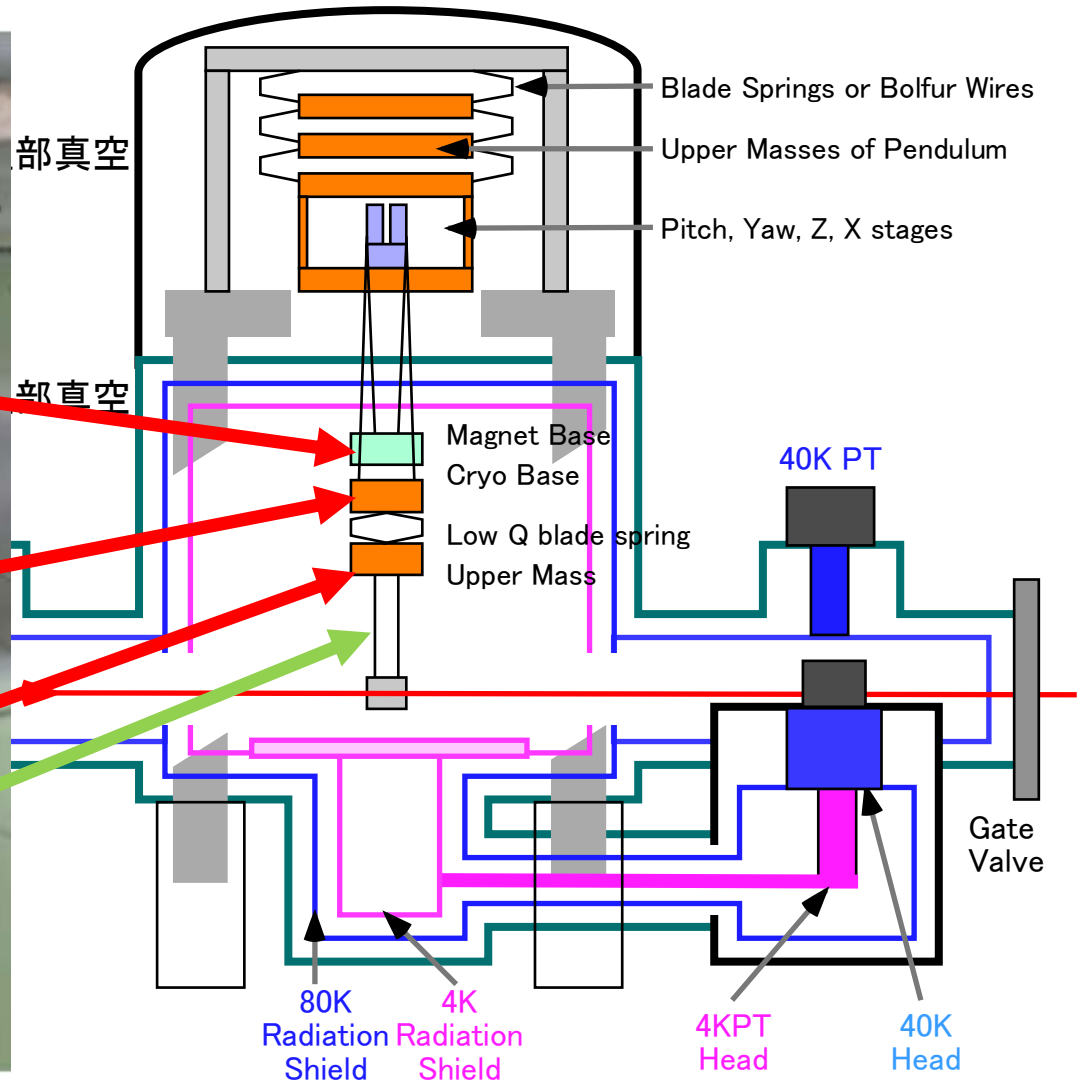
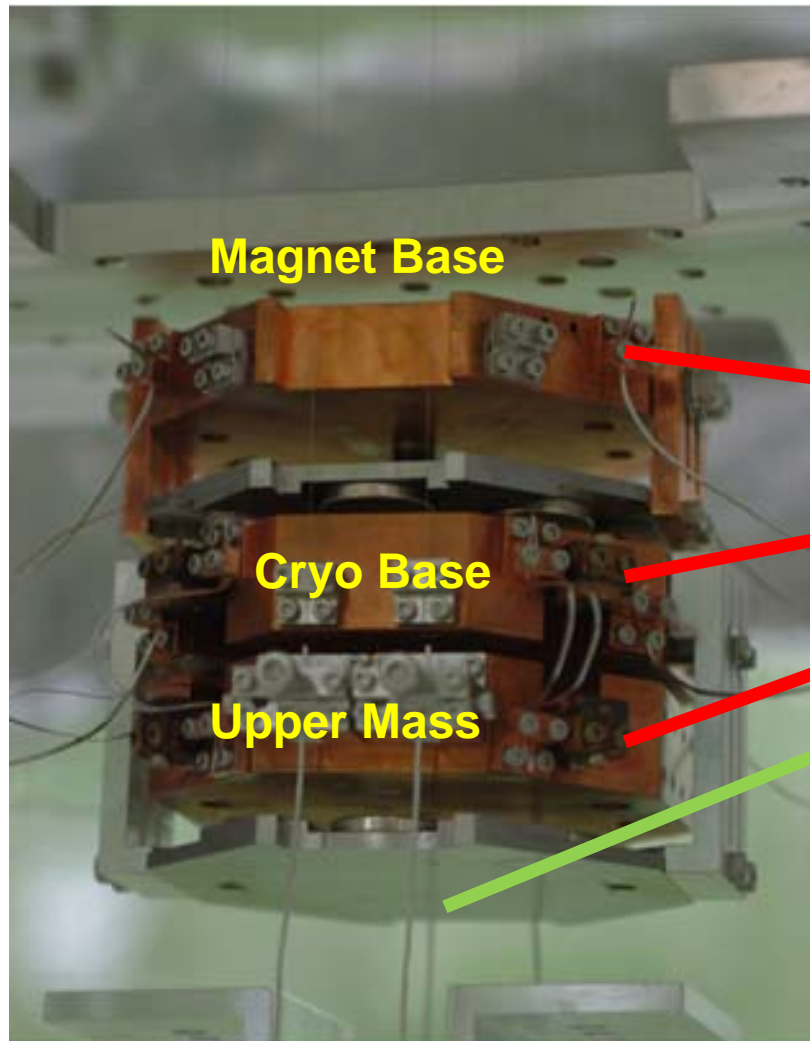
$\epsilon=0.1@300K$



By 都丸さん

モデリングと検証実験が行われ、  
**CLIOにバッフル**が導入された。

# 冷却



2009/6/5

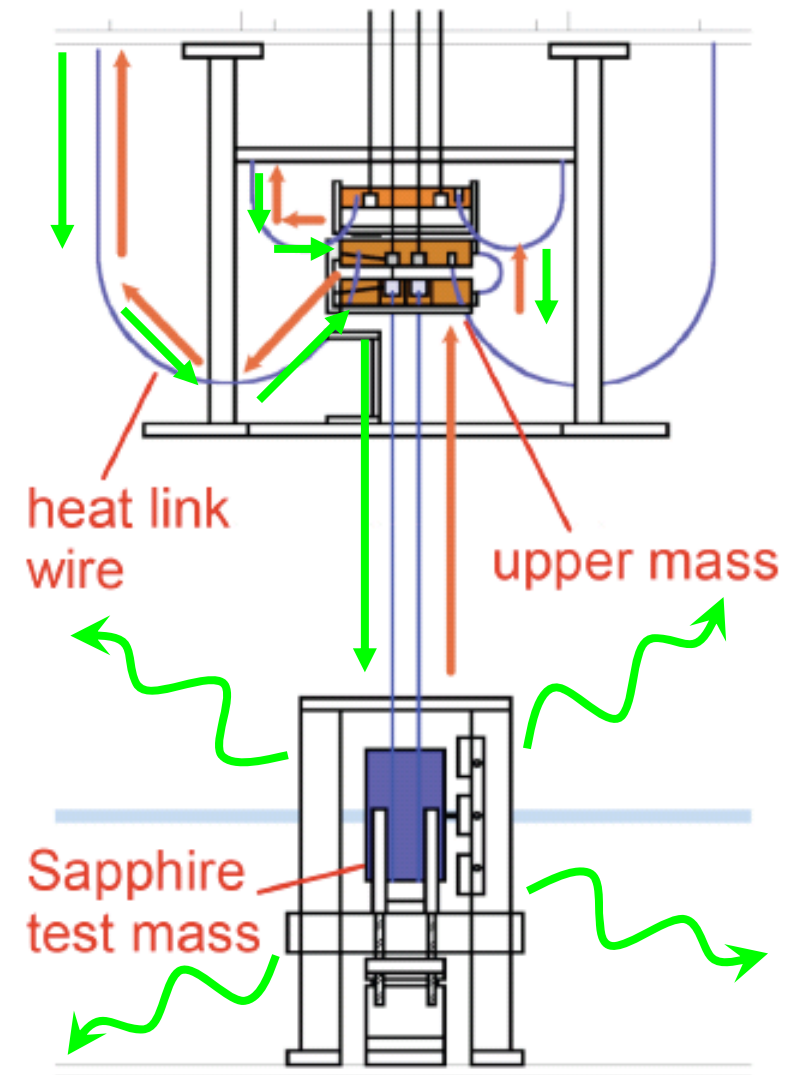
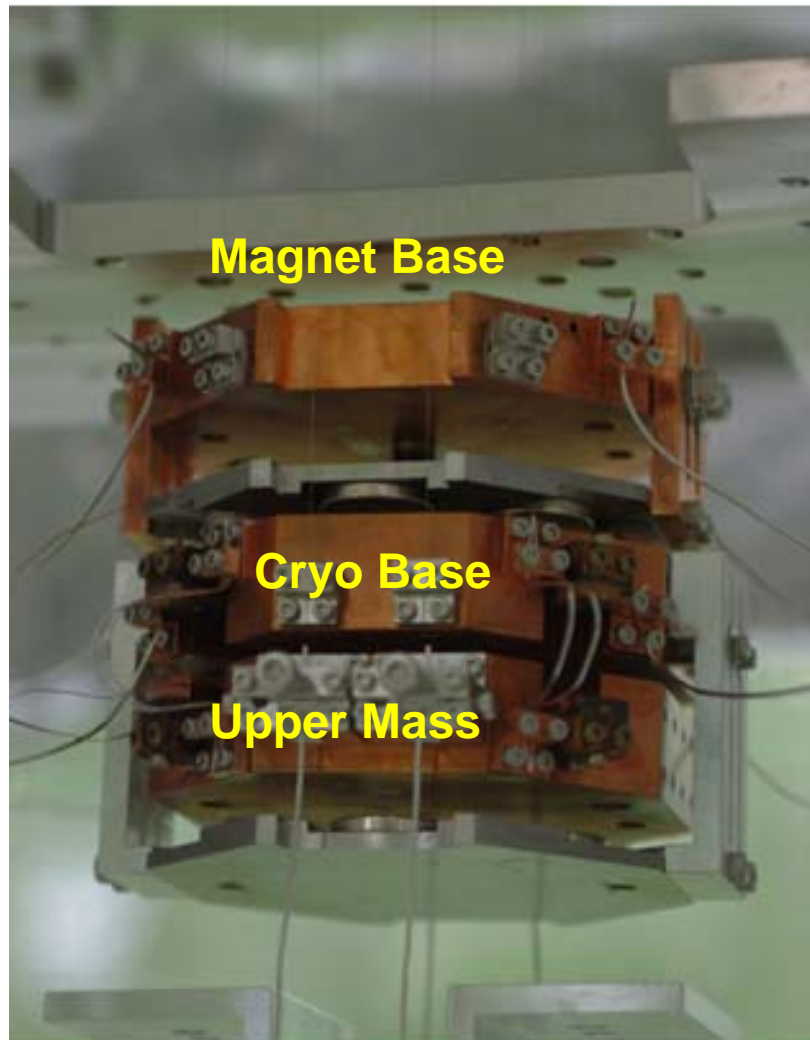
重力波研究交流会@神岡研究棟

44

# 冷却



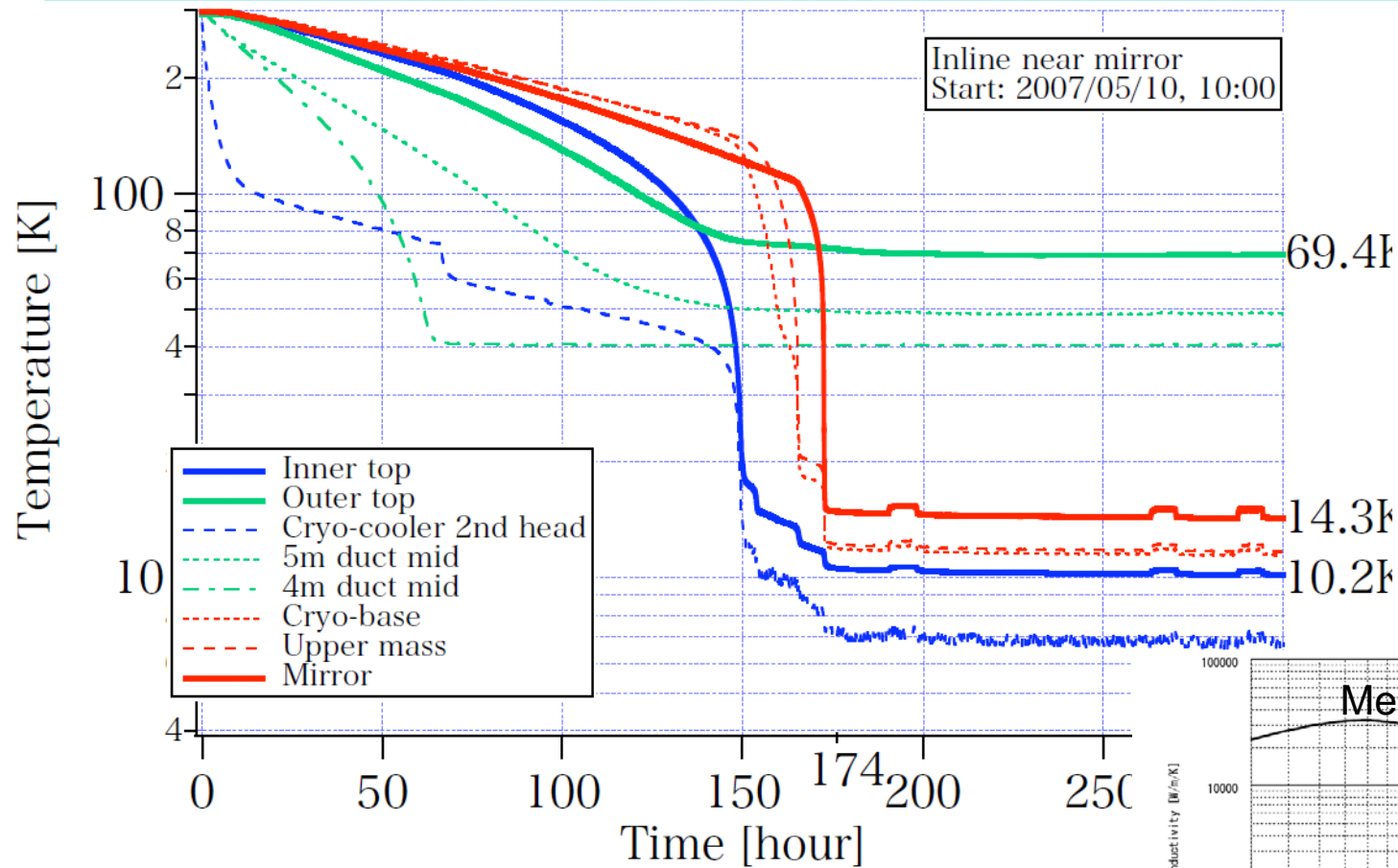
輻射と熱伝導によって冷却される



Radiation

Thermal Conduction

# Time Table of Cooling 2007



輻射優勢

熱伝導優勢

一週間

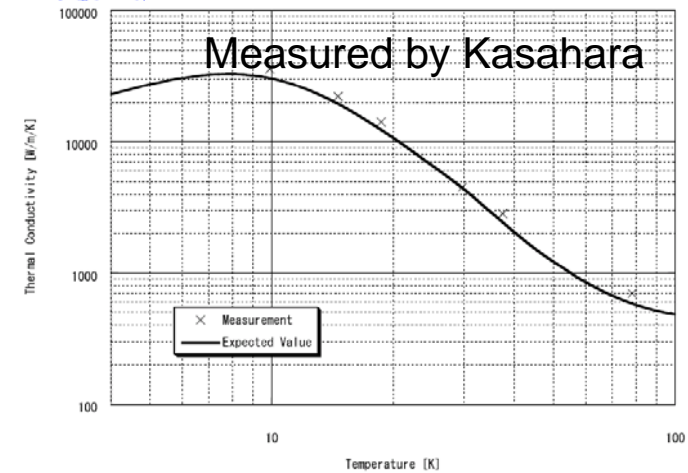
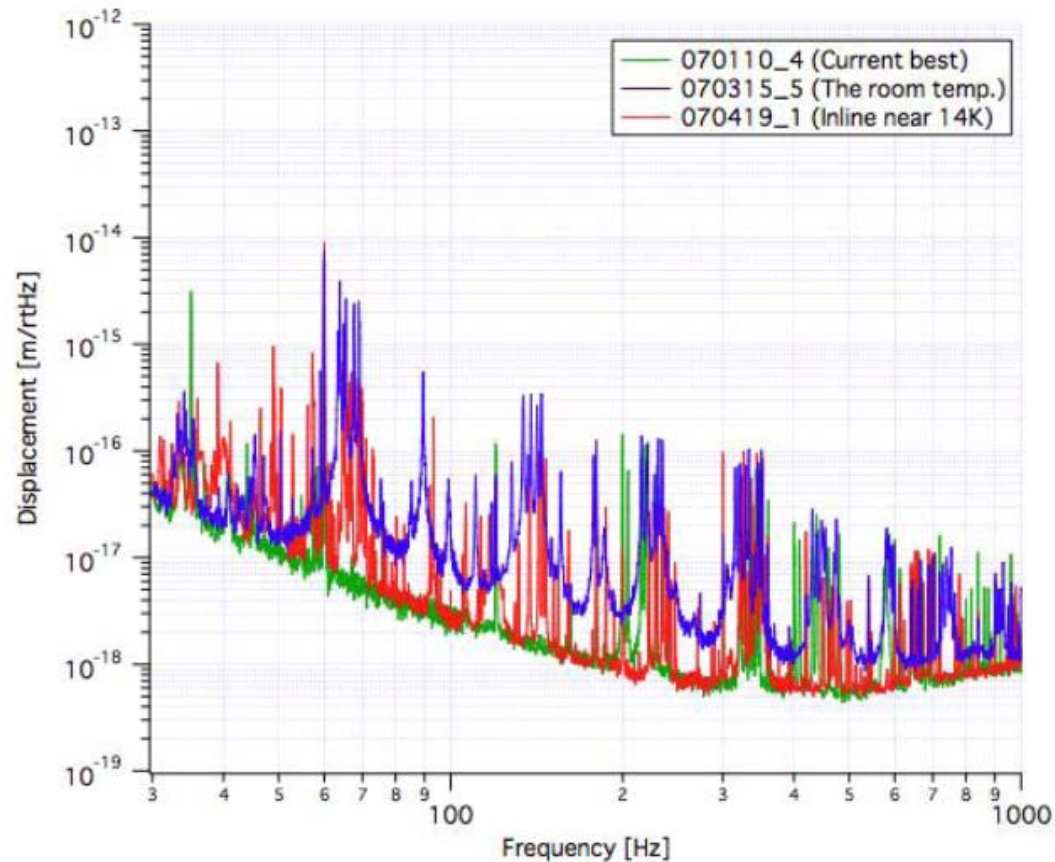


図 4.7: Cuφ1.00 fiber の熱伝導率の測定値と予測値 (RRR の測定値は 4100)

# 2007冷却実験



## Reduction of thermal noise of bad Q suspension



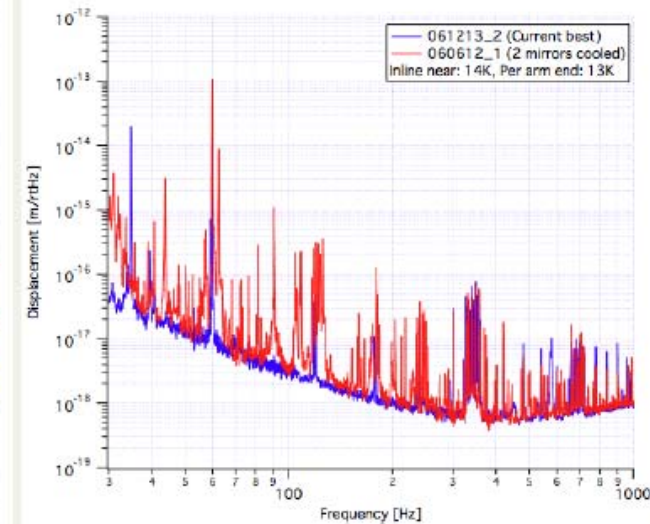
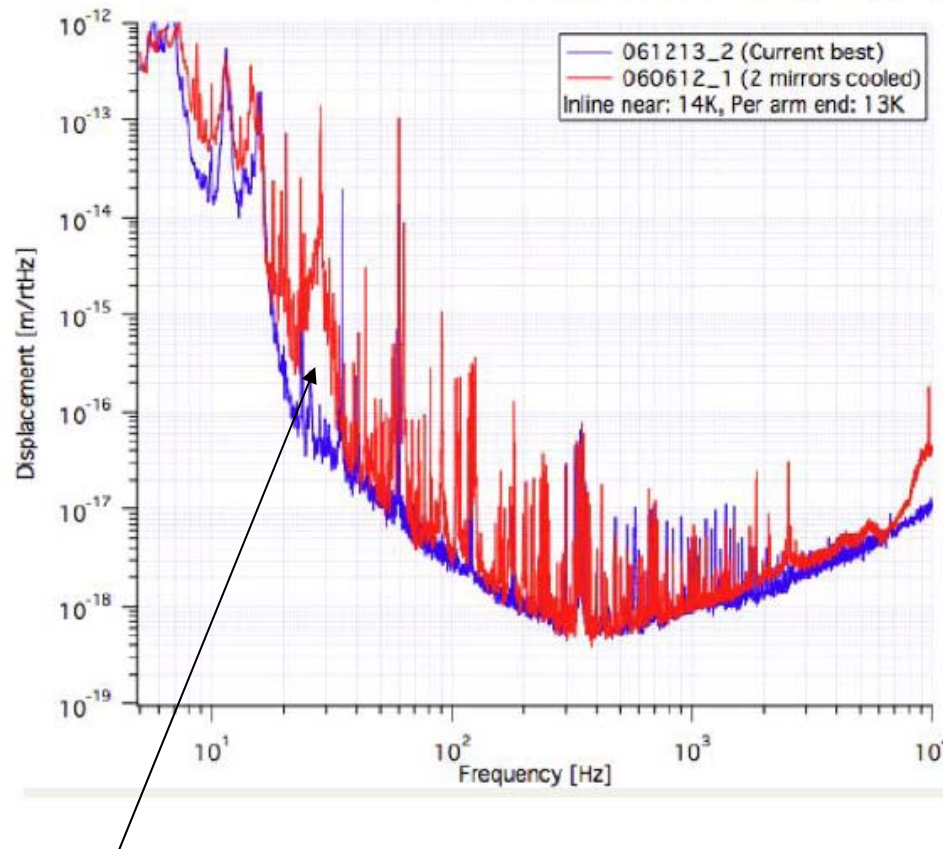
Inline near mirror was suspended by  $\Phi 1.0$  Al wire.

This is the first observation of sensitivity improvement by cooling.

# 2007冷却実験



## Long run of refrigerator system - 2 mirrors are cooled -



Φ0.5mm Al wire

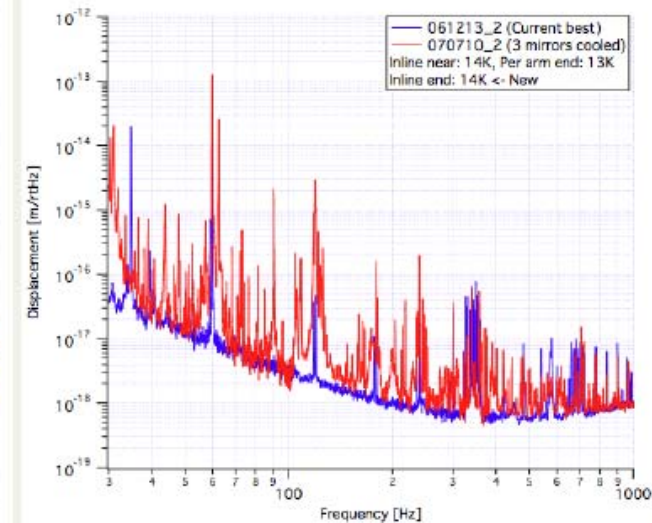
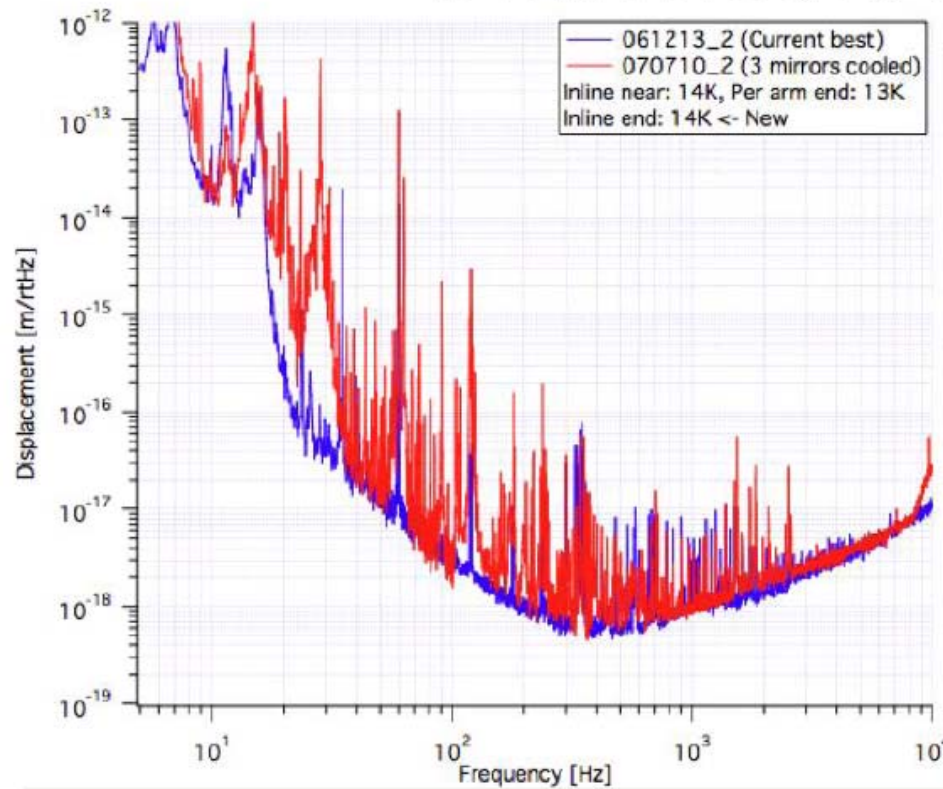
ダクト側に付けたアルミ箔による散乱光



# 2007冷却実験



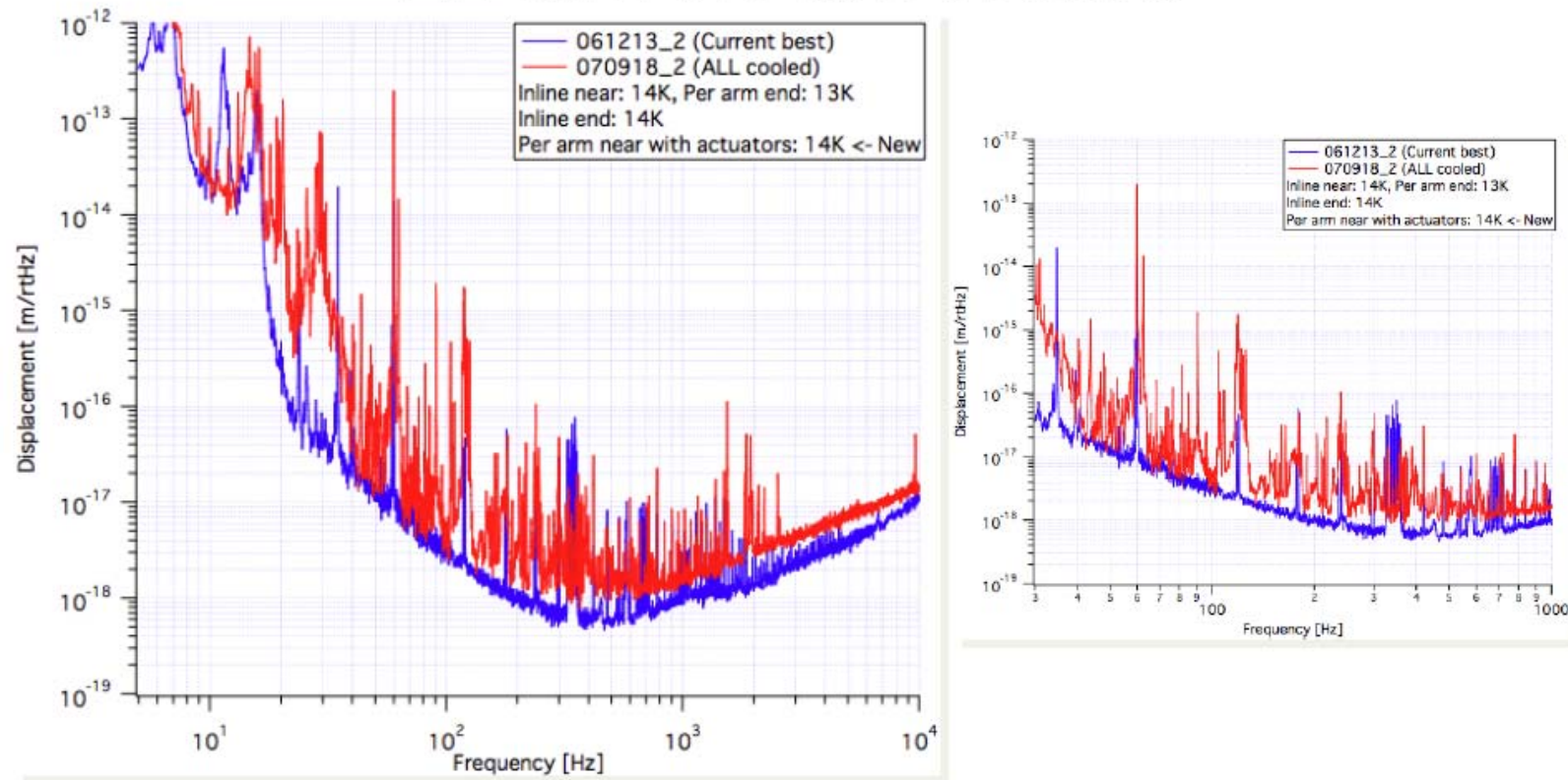
## Long run of refrigerator system - 3 mirrors are cooled -



# 2007冷却実験



## Long run of refrigerator system - All mirrors are cooled -



Tuning has not finished yet.

# 2007冷却実験



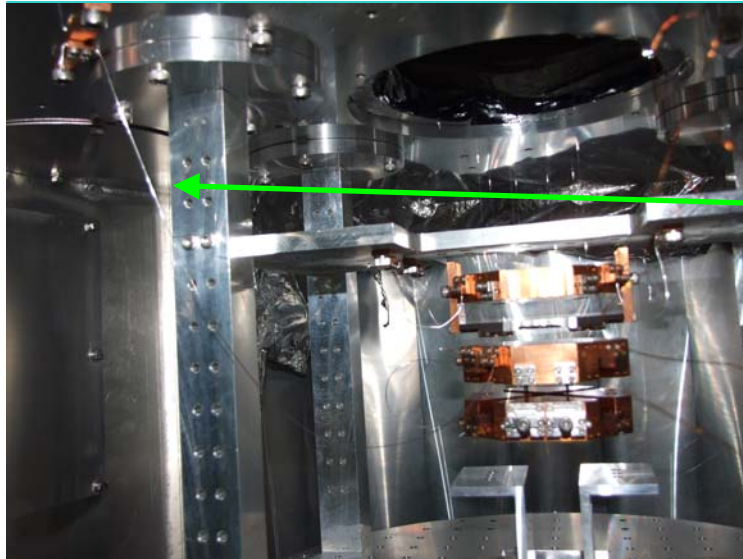
## Cooling summary

	Cooling time	Mirror temp	Heat in the suspension	Heat at the 1st cooling 2006/02
Inline end	176hour start 07/06/22,10:00	13.5K	40mW	N/A
Inline near	174hour start 07/06/22,10:00	13.4K	36mW	N/A
Per arm end	164hour start 07/04/27,11:05	12.5K	62mW <sup>#1</sup>	116mW
Per arm near	193hour start 07/08/16,12:30	13.8K	29mW	109mW

#1: No shield for radiation from the outer shield at 63K.

**全ての鏡の長時間安定冷却に成功**

# 2009冷却実験



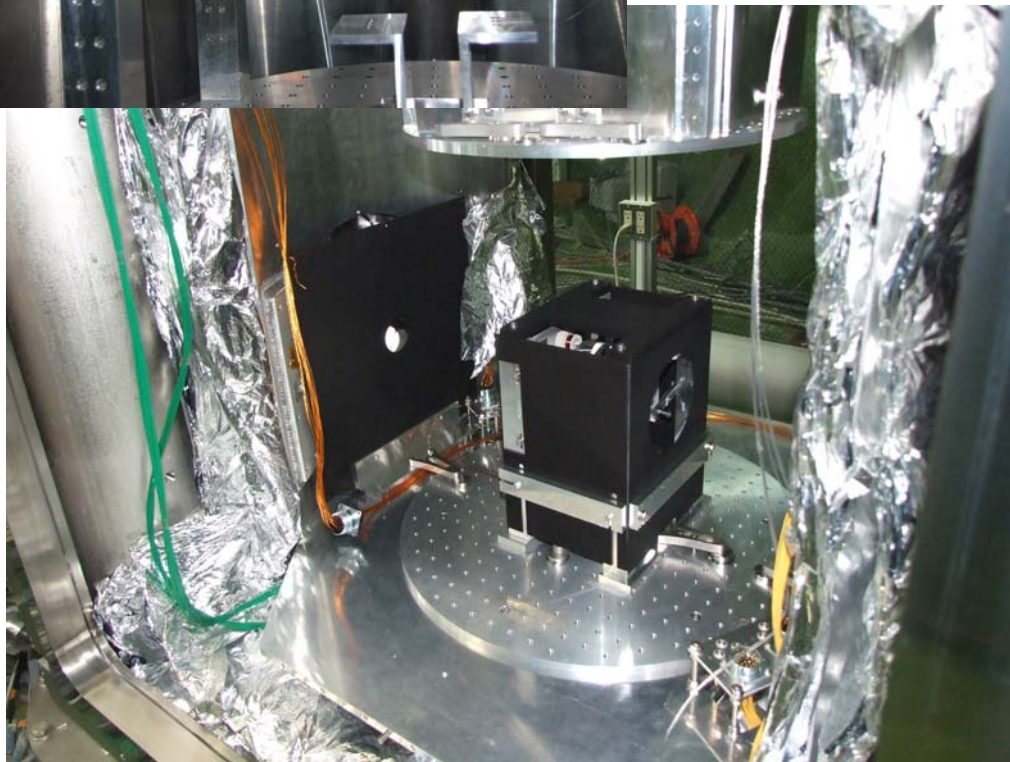
Inline Near の冷却から取り掛かっている

## 2007冷却実験との違い

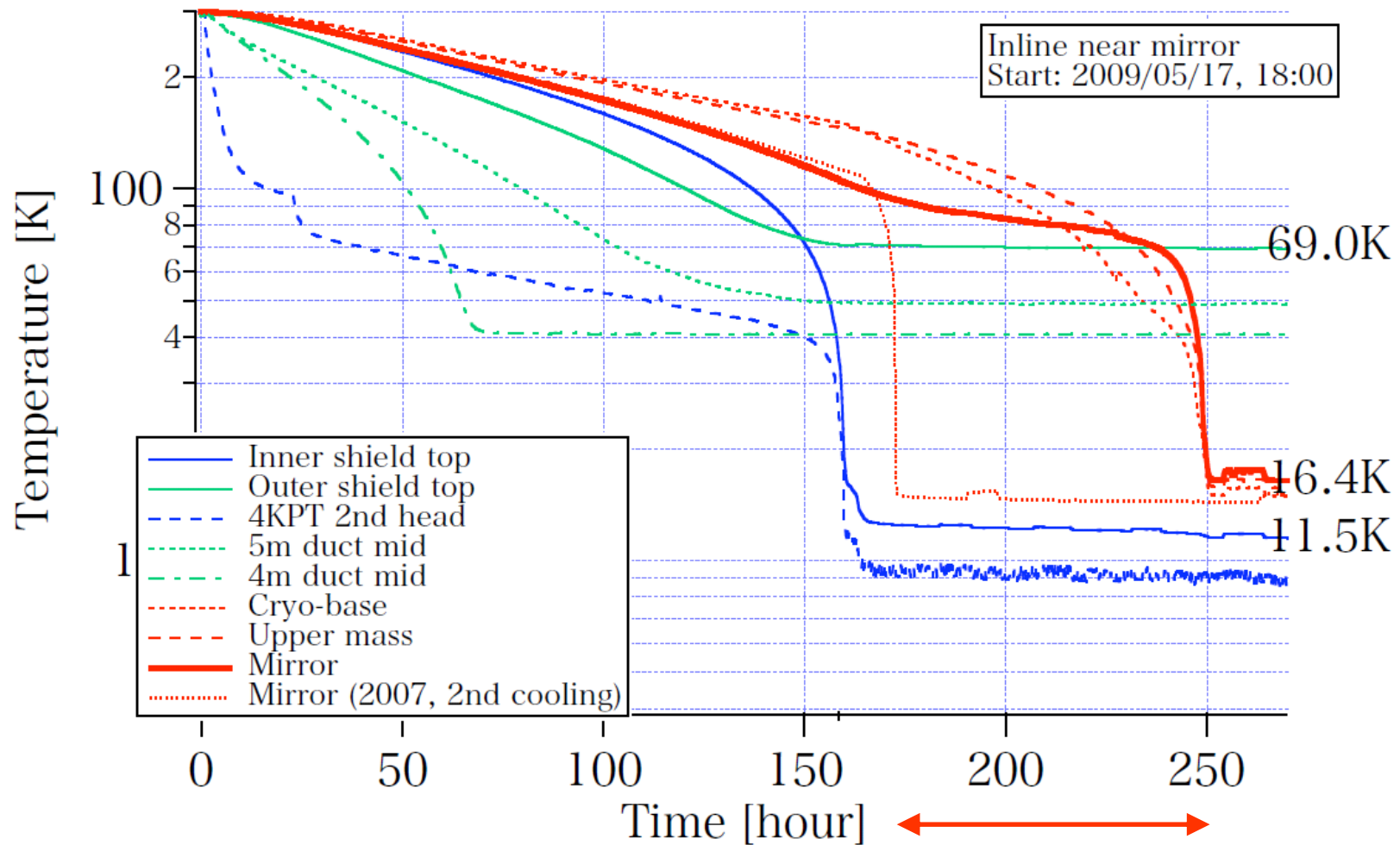
- Heat link の数  
8本 ⇒ 1本
- ダクトアパーチャー  
アルミ箔 ⇒ 黒くコーティング  
105mm ⇒ 45mm
- ミラーシールド  
黒くコーティング
- コイルマグネット  
アクチュエータの装備

## 常温からの変化

- コイルボビン  
マコール ⇒ 窒化アルミ
- 最終段のワイヤ  
 $\phi 0.05\text{mm}$  ボルファー  
⇒  $\phi 0.5\text{mm}$  アルミ



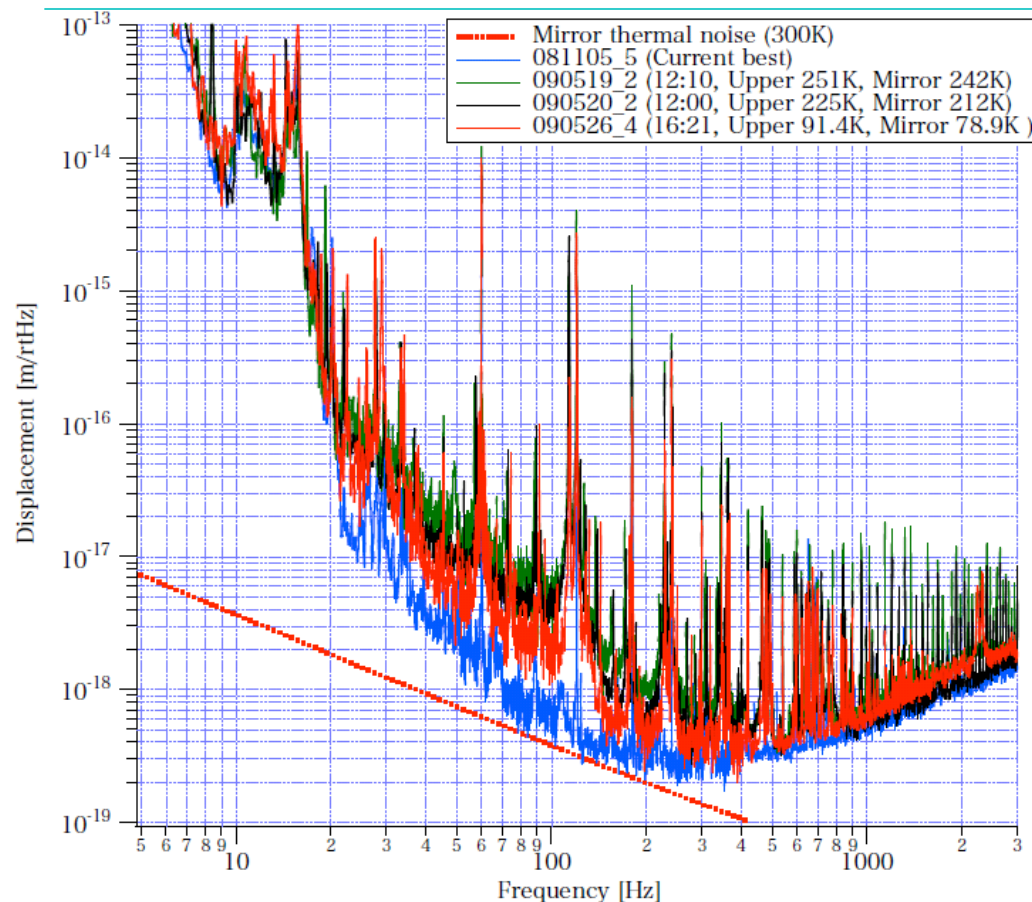
# Time Table of Cooling 2009



Heat link の数を減らした影響

Heat link を減らしても20K以下まで鏡の冷却に成功した

# 2009冷却実験



20-50Hzのフロアーを1台分の振り子  
( $f_0=0.7\text{Hz}$ で固定)の熱雑音で合わせよう

とすると、 $Q_{\text{pend}}$ は以下

090519\_2:  $f_0 = 0.7\text{Hz}$ ,  $T = 251\text{K}$ ,  
 $Q_{\text{pend}} = 200$ .

090520\_2:  $f_0 = 0.7\text{Hz}$ ,  $T = 225\text{K}$ ,  
 $Q_{\text{pend}} = 500$ .

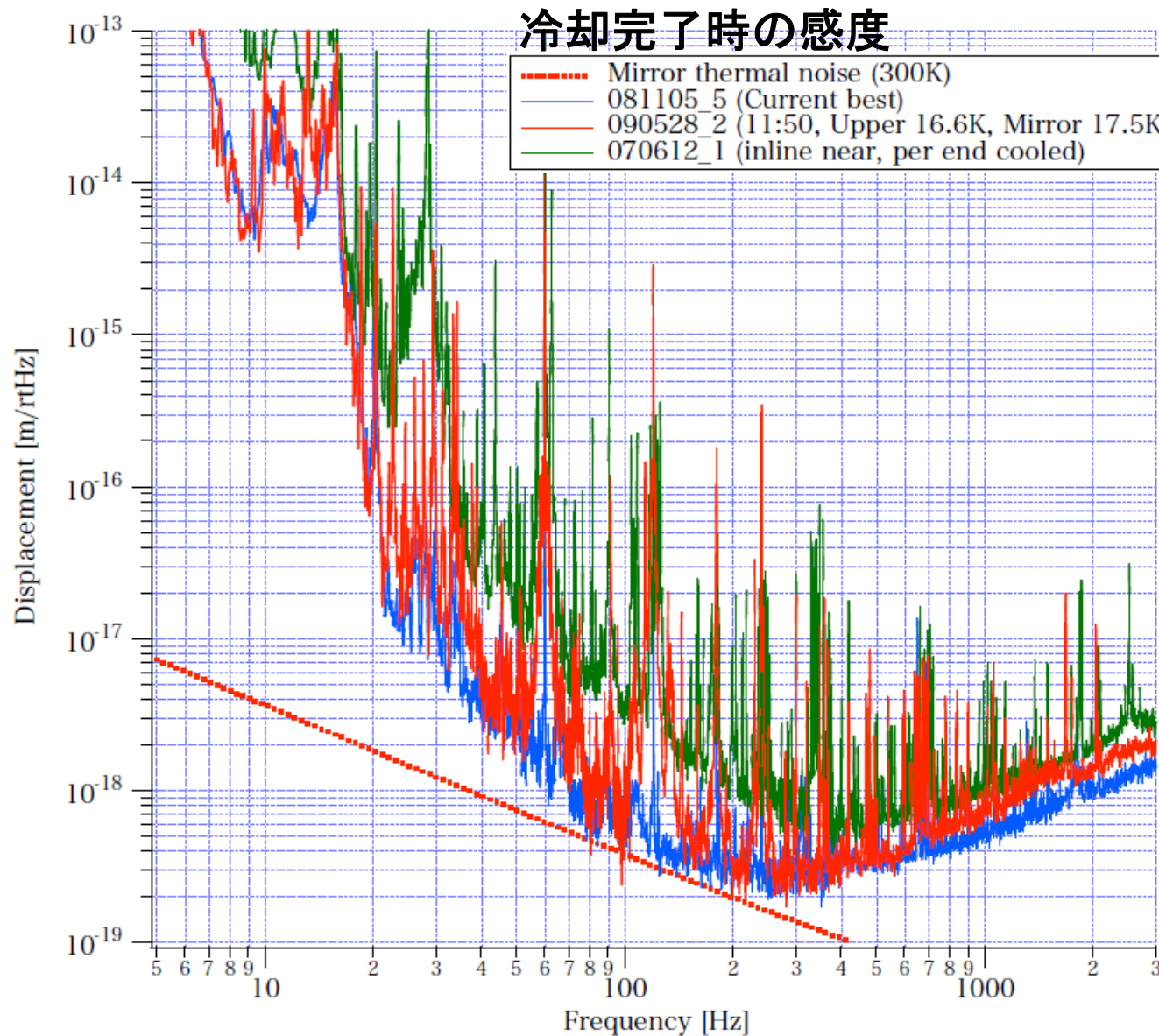
鈴木さん、笠原さんの過去の測定から  
今使っている純アルミ線の単独のQ値は  
室温で400程度、懸架系のパラメータから  
導かれるdilution factorは0.00855、  
この二つの値から振り子のQ値を求めると  
 $Q_{\text{pend}}=4.6 \times 10^4$ 程度

今回の冷却でいえること

- (1)一つの振り子の懸架ワイヤーをアルミに変えた。
- (2)低周波に約一桁大きいフロアーノイズが発生した。
- (3)冷却につれて下がった。By 内山さんのメール

まだ振り子の熱雑音  
が下がったとは言えない

# 2009冷却実験



2007年の冷却実験のときの感度と比べれば(当然ながら)熱雑音領域に近い

⇒ 2台目を冷やせば熱雑音低減が見える見込みが多分にある

## 問題点

- ハムのすそのが広い
- Heat link を少なくした割にはline noiseが多い
- コンタミの発生



---

# Observation



# 常温での観測(1st. Observation)



2007 Feb.12 (Mon.) – Feb.18 (Sun.)

8:00 - 22:00 Operator on Site

22:00 - 8:00 No-Operator

Total 86 hour

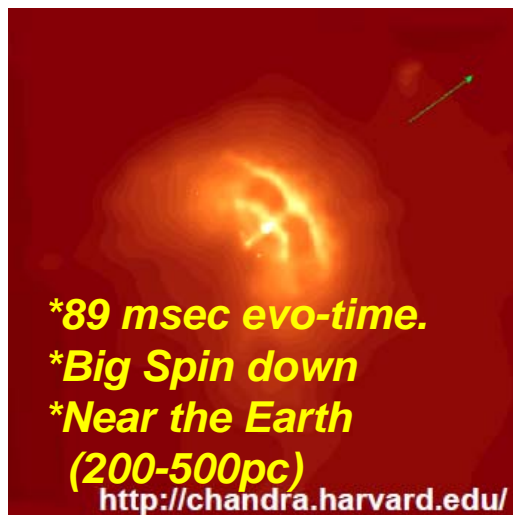
Date	2007/Feb./12-18	<i>Duty Cycle</i>
12 Mon.		65%
13 Tue.		55%
14 Wed.		51%
15 Thu.		20%
16 Fri.		54%
17 Sat.		58%
18 Sun.		55%

# PSR J0835-4510 (Vela Pulsar)からの重力波



- T.Akutsu et. al., Class. Quantum Grav. 25 (2008) 184013. -

- In Feb.2006, we have done one week data taking for targeting GWs from Vela pulsar (PSR J0835-4510) because the CLIO “strain” sensitivity around 22Hz was comparable with VIRGO and LIGO 4K at that time.
- Vela has the largest spin-down upper limit  $\sim 5 \times 10^{-24}$  among the known pulsars.
- We analyzed the data using the Matched Filtering Method. Parameters are listed below. To keep the S/N loss less than 2%, we used 102 parameters templates (6 for  $A$ , 17 for  $\psi$ ).
- We obtained  $\sim 5.3 \times 10^{-20}$  assuming 10% calibration error. (99.4% conf)



$\alpha$ : 08h 35m 20.61149s	Right ascension of the source
$\delta$ : -45d 10m 34.8751s	Declination of the source
$\lambda$ : 36.25° N	Polarization angle
$\phi_r$ : 9h 26m 40.4s (MJD : 54144)	Deterministic phase
$\Omega_r$ : $2\pi(0.9973 \times 24 \times 3600)$	Rotation angular velocity of the Earth
$\gamma$ : 135°	Measured counterwise from East to the bisector of interferometer arms
$\xi$ : 90°	Angle between interferometer arms

unknown parameters

$A = [0, \pi]$	: Inclination angle
$\psi = [-\pi/4, \pi/4]$	: Polarization angle

# Short Observation 090430



歪度と尖度を、横軸を歪度  $b_1$ 、縦軸を尖度  $b_2$  とした図 Analyzed by 田越さん

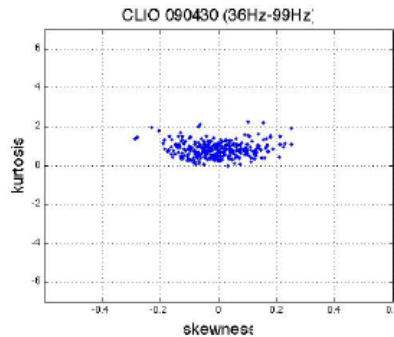


図 4: CLIO 090430, 36-99Hz

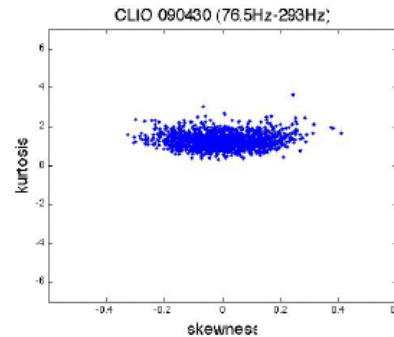


図 5: CLIO 090430, 76.5-293Hz

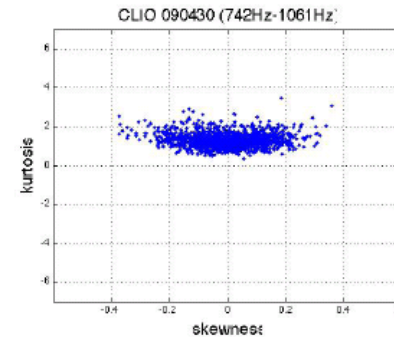


図 6: CLIO 090430, 742-1061Hz

$$m_r = \sum_i (X_i - \mu)^r / N$$

$$b_1 = m_3 / (m_2)^{3/2},$$

$$b_2 = m_4 / (m_2)^2 - 3.$$

$X_i$ : データ

$N$ : データ数

$\mu$ : 平均値

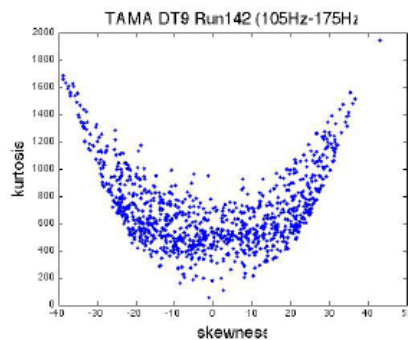


図 7: TAMA DT9, 105-175Hz

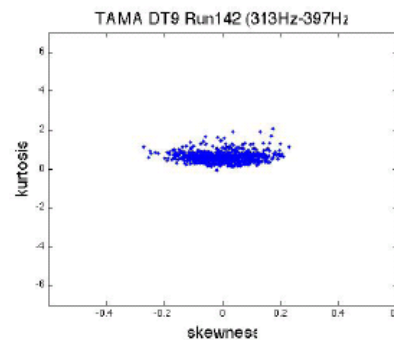


図 8: TAMA DT9, 320-399Hz

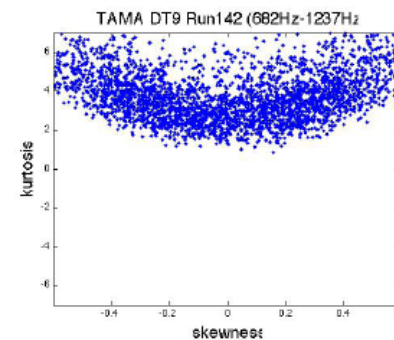


図 9: TAMA DT9, 683-1237Hz

CLIOは全ての帯域において、ガウス分布に近い。  
100Hz以下は比べ物にならないほど良い。

# Short Observation 090427,30



	CLIO 090427	CLIO 090439	TAMA DT9 Run 142
Data length [hours]	4.81	4.32	9.70

表 2:

Analyzed by 田越さん

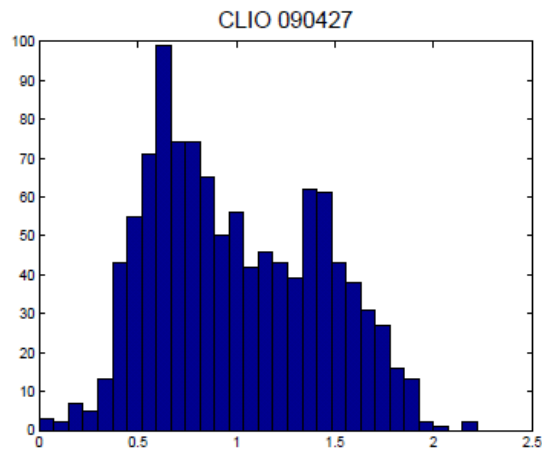


図 10: CLIO 090427

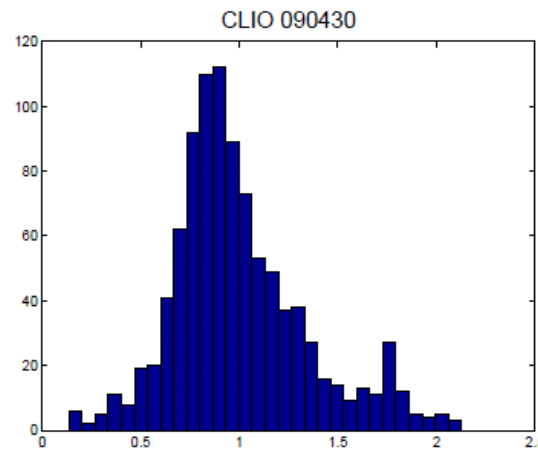


図 11: CLIO 090430

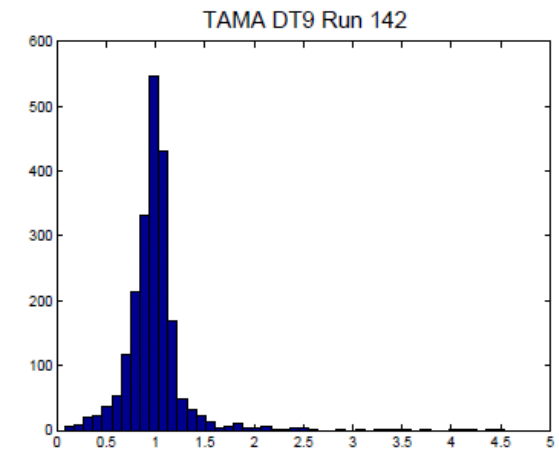


図 12: TAMA DT9 Run 142

$$N = \left( 4 \int \frac{f^{-7/3}}{S_n(f)} df \right)^{-1/2} \quad N / \langle N \rangle$$

**TAMAに比べてバーストノイズも無い**  
**⇒ 地下の優位性を示している**

# Summary



- 常温での目標感度に達した  
⇒ 振り子と鏡の熱雑音に近づいた
- 振り子の熱雑音の発生メカニズムの一つを定量的に検証することが出来た
- 現在、鏡の低温冷却実験が進められている

⇒ CLIOは今まさに佳境に入ってきたところ



To be continued..