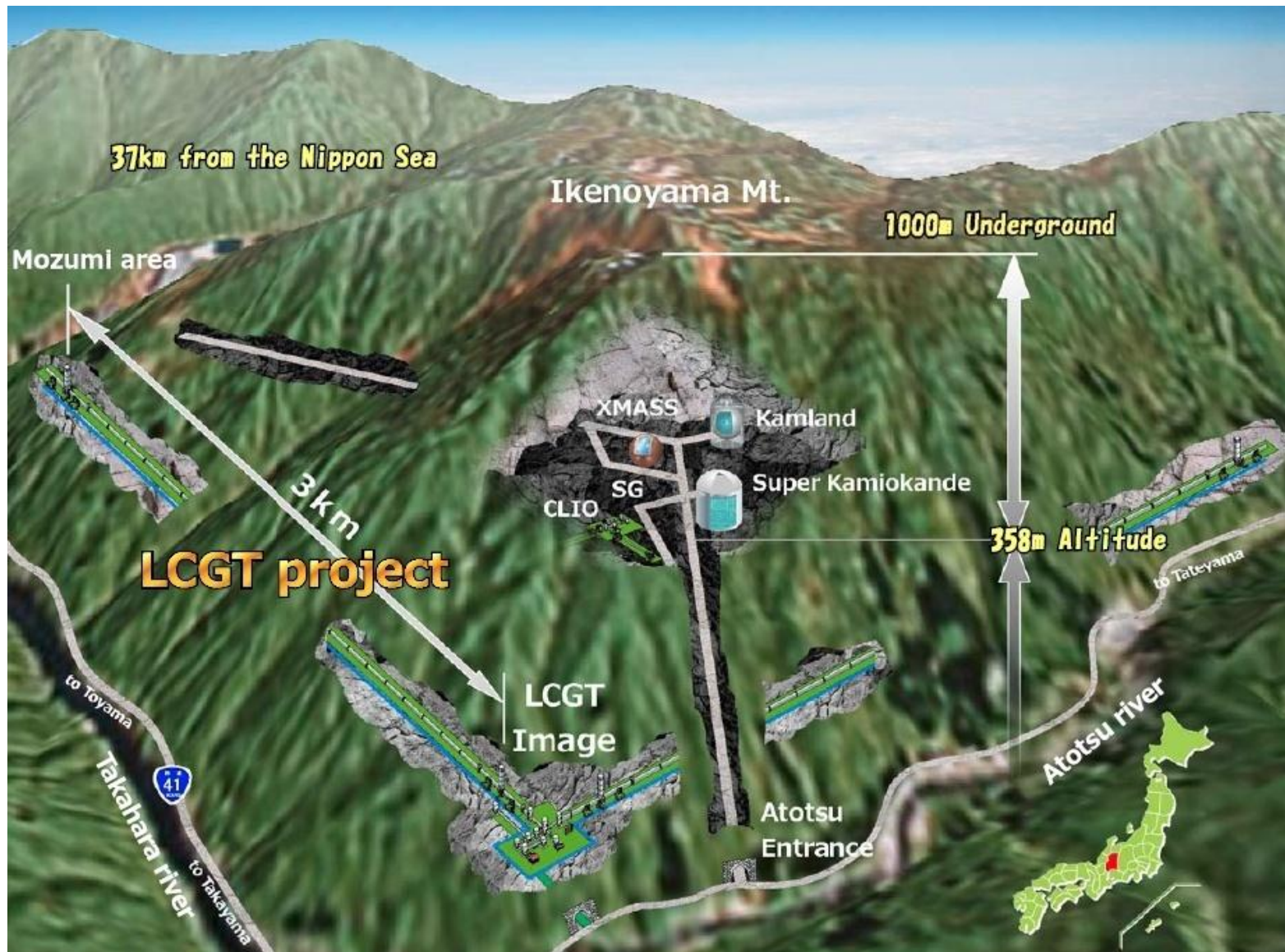
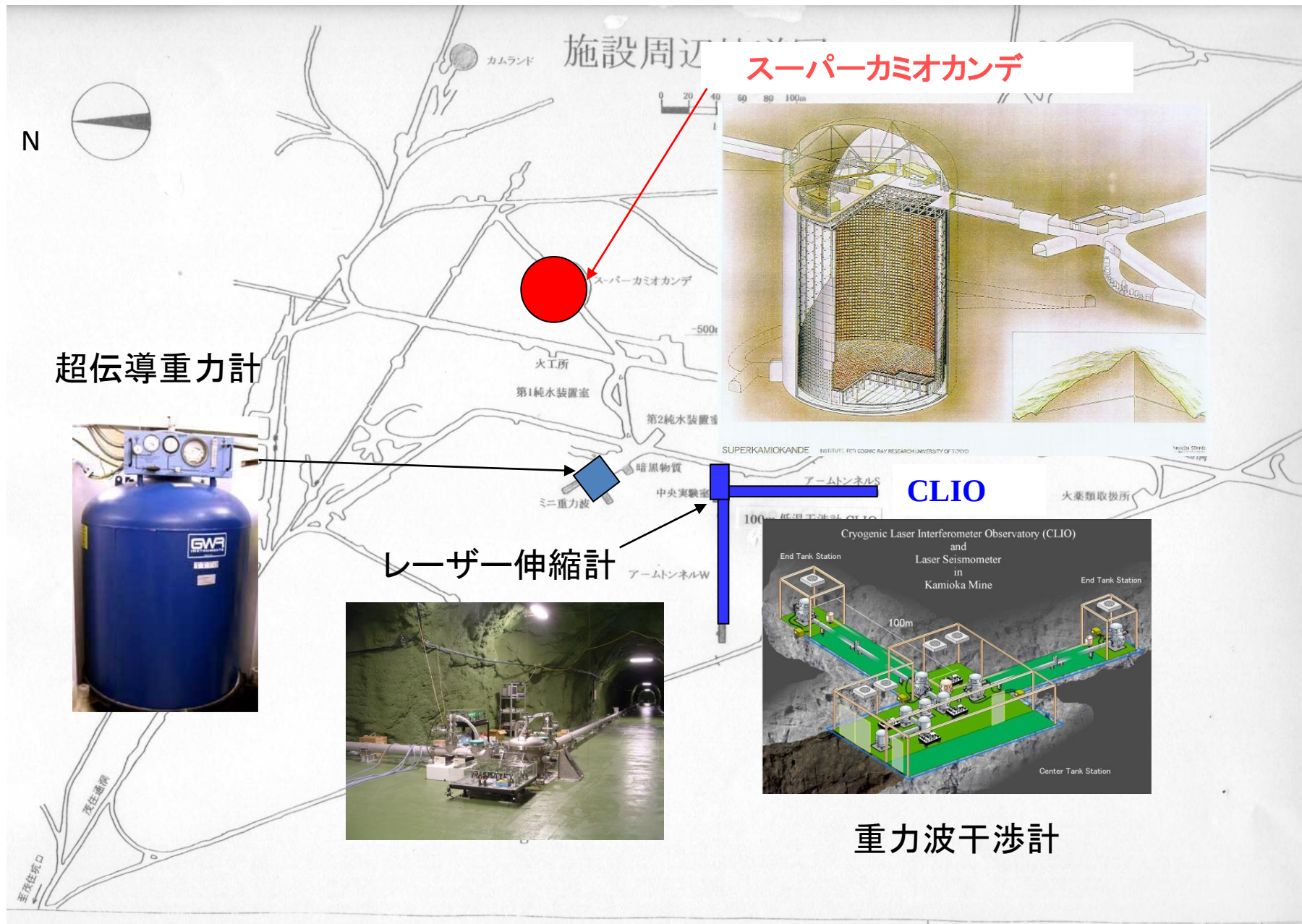


神岡での重力波観測(Ⅸ)

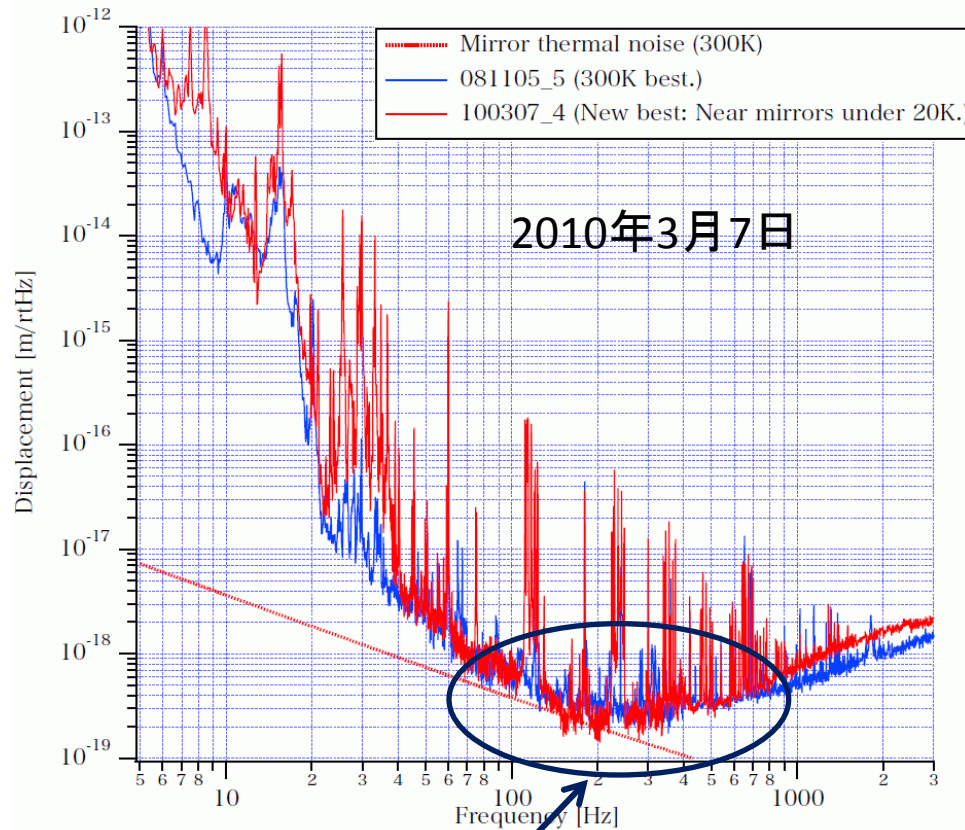
共同利用研究成果発表会



神岡地下での地球物理との連携



CLIOの最新の感度



常温での最高感度を超えた

低温装置の影響を調べる

2001	特定領域開始
2002. 4	トンネル掘削開始
2003. 6	地物干渉計完成
2003. 12	CLIO組立開始
2006	CLIO完成
2008. 11	CLIO常温熱雑音
2010. 3	極低温時代へ

共同利用研究費

- 超狭線幅光源のための光共振器の開発 160千円
- CLIO 用 Local Suspension Point Interferometer の開発 460千円
- 神岡での重力波観測 (IX) 846千円
- レーザー伸縮計と超伝導重力計の同時観測
による地球の固有振動の研究 240千円
- 神岡重力波検出器CLIOデータの解析 280千円
- CLIO用DC read out システムの開発 700千円

超狭線幅光源のための光共振 器の開発

情報通信研究機構
光・時空標準グループ
井戸哲也

宇宙線研究所
大橋正健・三代木伸二

NICT(情報通信研究機構)とは?



旧郵政省傘下の情報通信に関する研究開発型独立行政法人 (本部: 東京・小金井)
光・時空標準グループのmission: 日本標準時の生成・配信と周波数標準

Cs 原子泉方式

原子時計 (NICT-CsF1)

$$|\delta f / f| = 2 \times 10^{-15}$$

(2007年 BIPM 承認)

アジアで最も高精度な一次標準

Metrologia 45 139 (2008)

Sr光格子時計

今年度より動作開始. 安定度: 10^{-16} 台

東大との光ファイバリンクあり

10^{-16} 以上の精度で東大の光格子時計との
周波数の一致が確認可能

日本標準時

- 世界標準時に対して
+/-20ns以内の同期精度を維持
- GPS搭載時計を仲介して、日本標準時
に対して100ns以内の同期確認サービ
ス

^{40}Ca 単一イオン光原子時計

$$\nu_{\text{clock}} = 411\,042\,129\,776\,390\,(7)\,\text{Hz}$$

$$|\delta \nu_{\text{clock}} / \nu_{\text{clock}}| = 1.7 \times 10^{-14}$$

1mを実現する放射リストとしての
国際承認 (2009)

App. Phys. Express 1, 067011(2008)

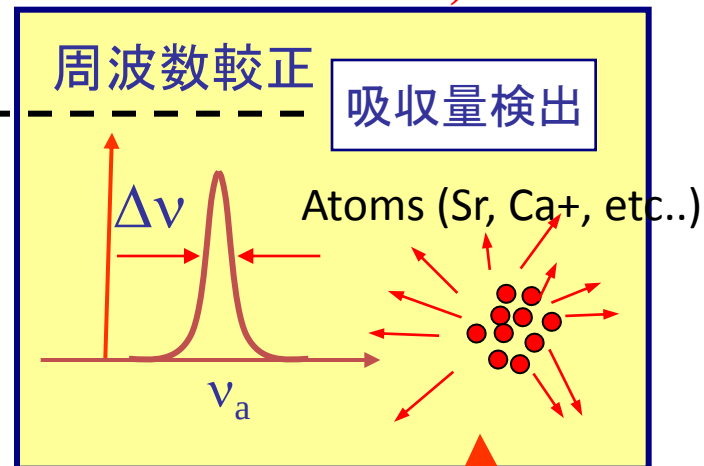
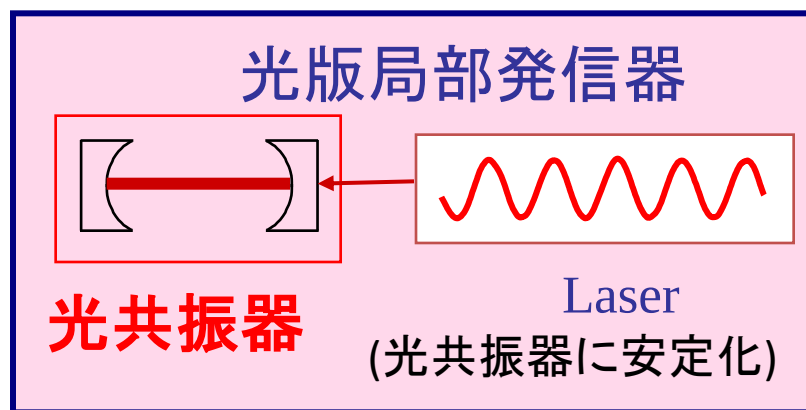
光格子時計の優れた周波数再現性を実証して
日本発の時計で秒の再定義を狙う

光原子時計の仕組み

2) 精密原子分光 (単一イオンor多数中性原子)

原子の吸収が最大になるように
レーザ波長にフィードバック

1) 狭線幅波長安定化レーザ



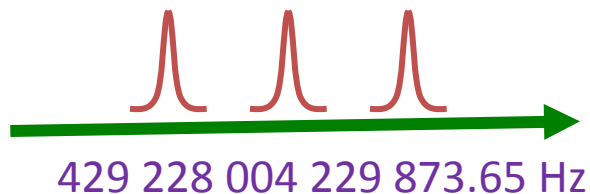
3) 光周波数カウンタ (光周波数コムパルス)

UTC (NICT)

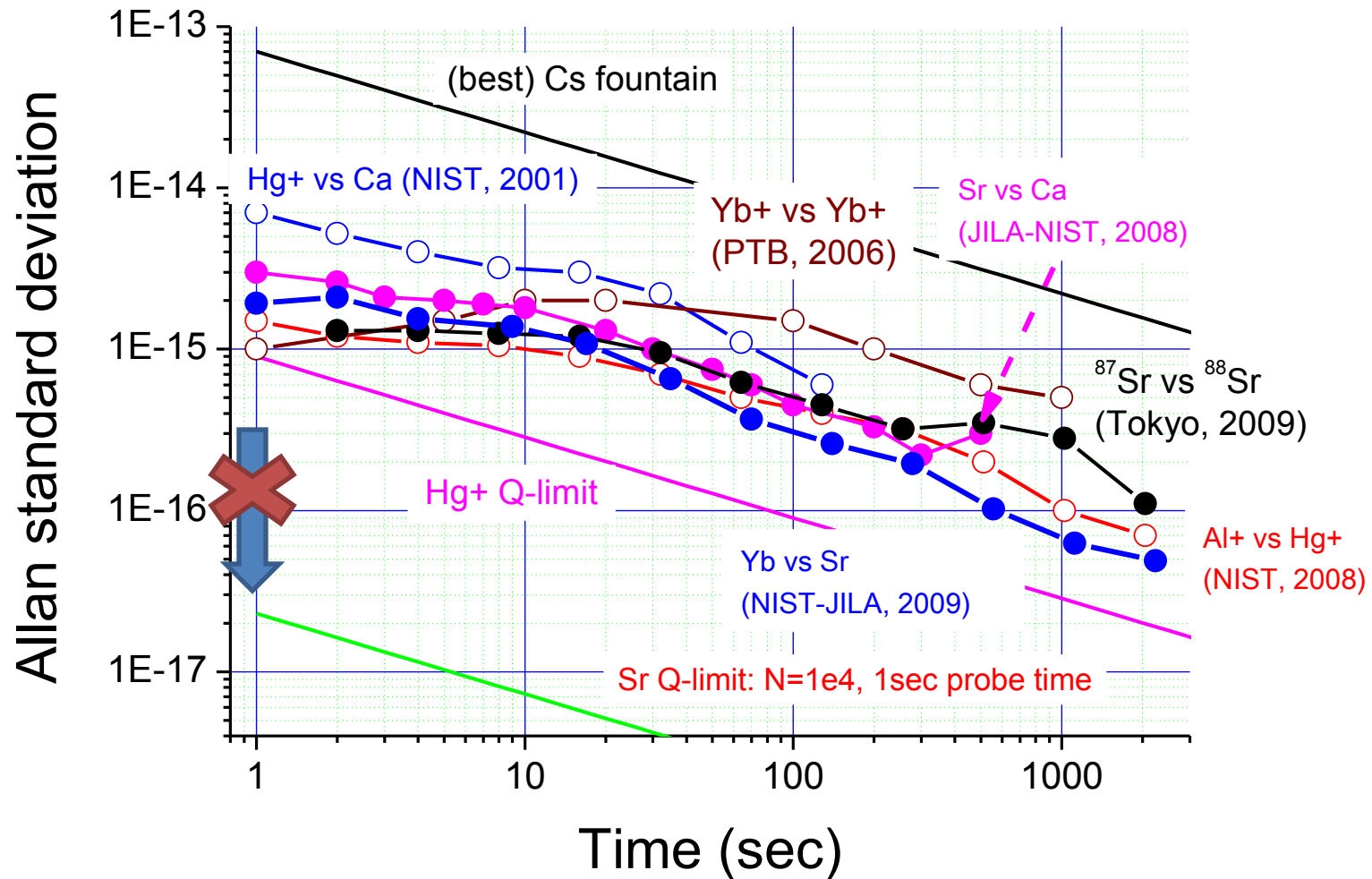
光周波数分周器

パルス光出力

(フォトディテクタで受光すれば出力はRF領域. 光→RFの分周器)



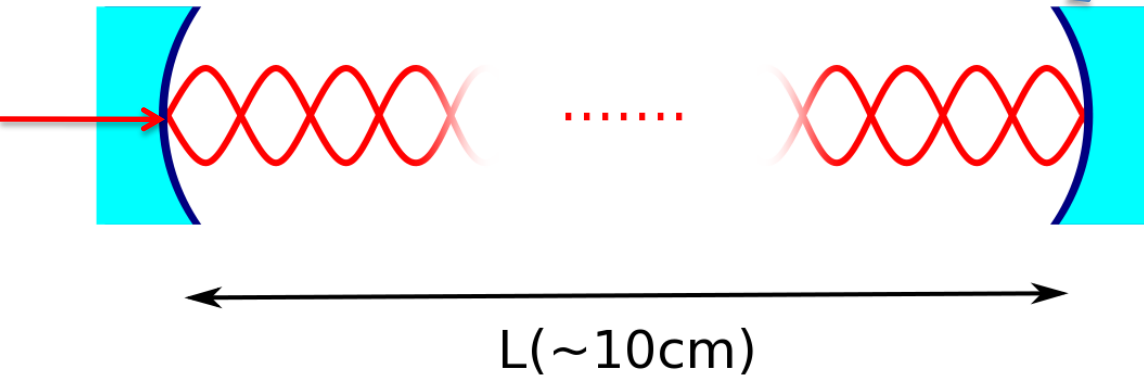
光原子時計の現況



- 同等以上の時計との比較で初めて時計の性能は判明する
- 短期($\sim 1\text{s}$)はレーザ線幅 i.e. 光共振器でlimit

光共振器とは?

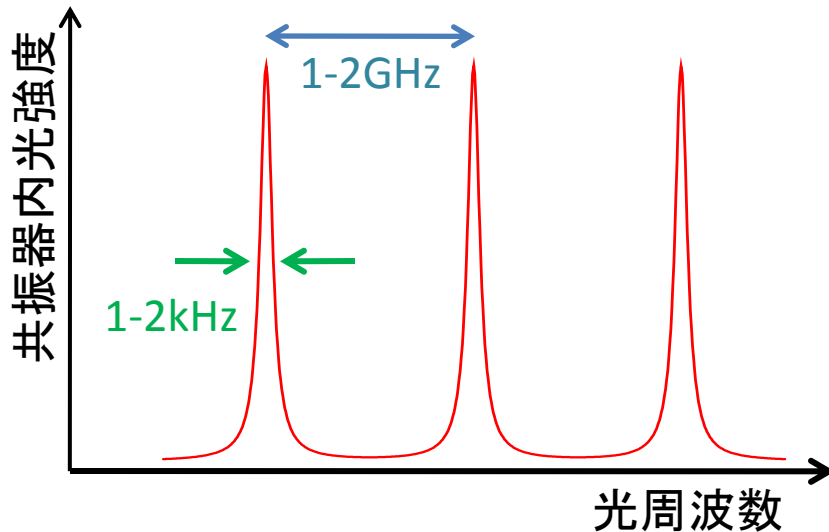
低損失誘電体多層膜鏡コート



二鏡間の距離(共振器長)を安定に保つ必要性

- (1) 低熱膨張素材
- (2) 防振・防音性能の追及

$$\text{共鳴条件: } L = N \times \left(\frac{\lambda}{2} \right) \rightarrow f = N \times \frac{c}{2L}$$



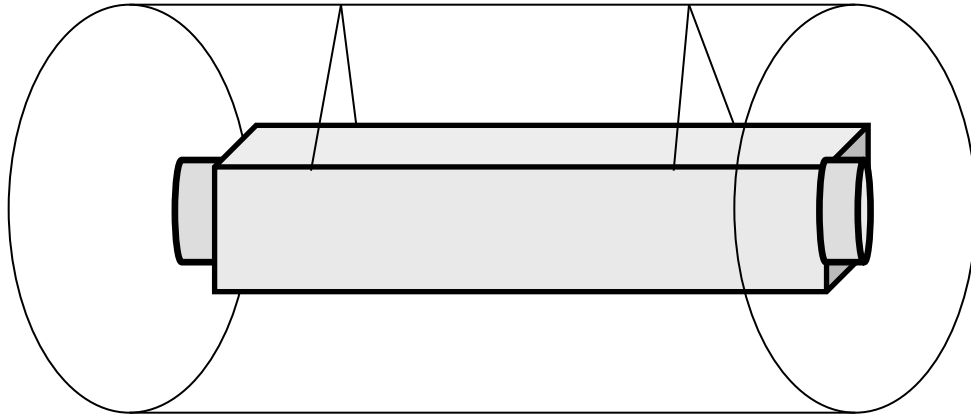
周波数弁別性(Q値)を上げるには
(3) 共振器鏡の低損失化が必要

なぜ神岡?

もちろん低振動環境ゆえ.

How to isolate a cavity from ambient vibrations?

- 1998

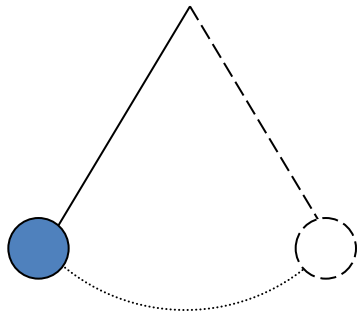


Cavity Material:
Ultralow thermal expansion
→ ULE, Zerodure, etc..

Must be inside a vacuum can

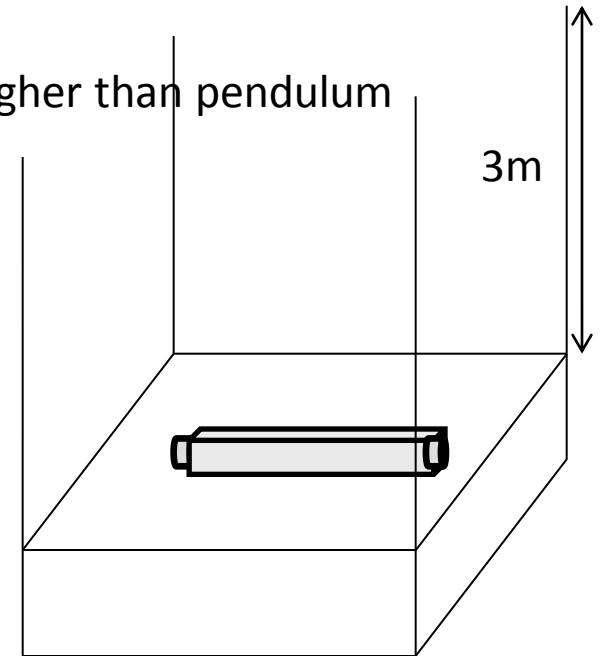
- Avoid change of index-of-refraction
- Thermal isolation from ambient temperature change
- Isolation of acoustic vibration

To suspend a cavity → dump vibrations with frequency higher than pendulum frequency



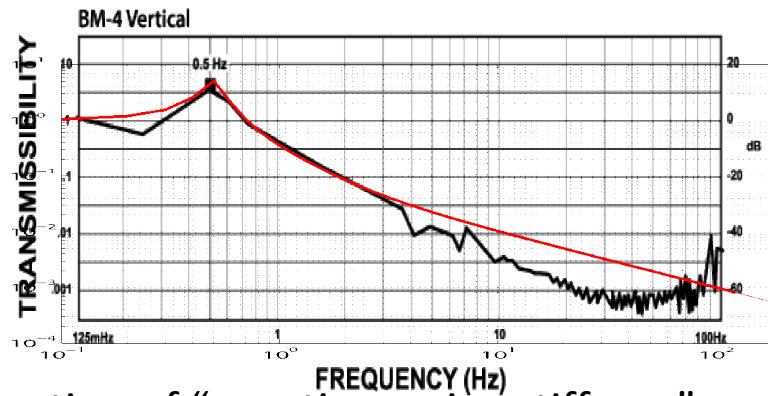
$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

Big l lowers resonant frequency
→ Optical table suspended
to be a big pendulum with $l=3\text{m}$
→ $\omega=0.3\text{Hz}$



Recent technical progress

$\frac{1}{2}$ Hz resonance frequency on desktop table



Combination of “negative spring stiffness” enabled a tiny spring constant k , reducing resonant frequency < 1 Hz on a small desk.



Progress of dielectric coating technology

Cavity mirror reflectivity

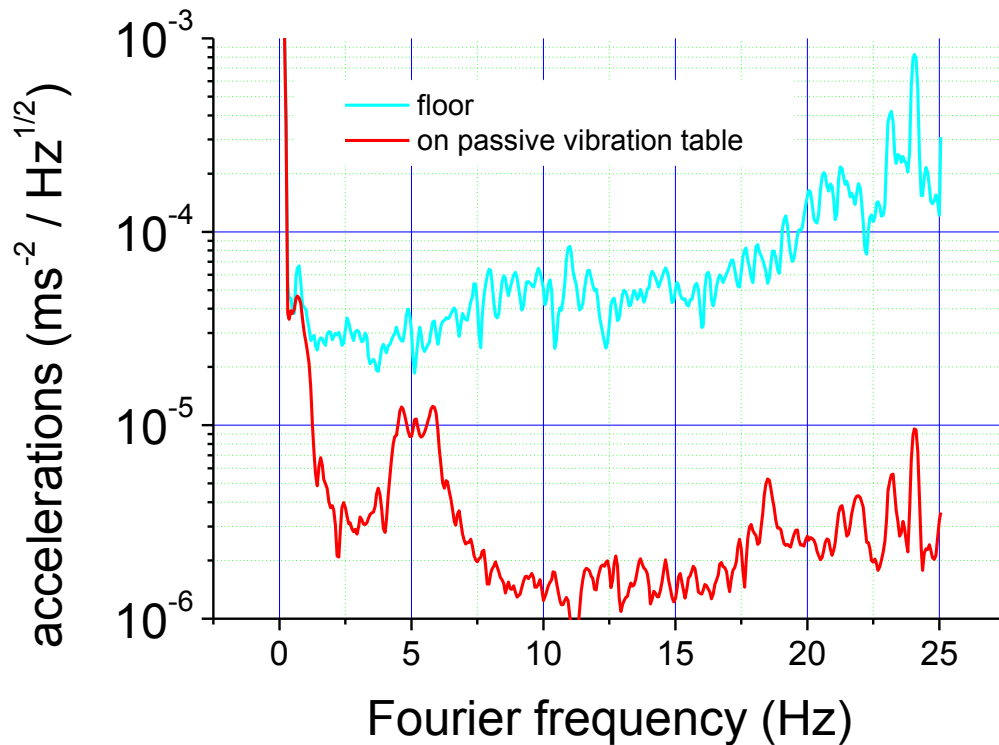
$R > 99.998\%$ (Finesse $> 1e5$)

→ Possible to reduce cavity lengths

Length: 4cm, Finesse: $1e5$

→ resonance FWHM: 37kHz

Acceleration on a passive AV table in NICT



- Resonance @ sub-Hz
- No vibration isolation below the resonance
- unexpected resonance @5Hz

除振台上加速度
 $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$

完全に振動の影響をなくすためには
もう1桁小さい振動環境が欲しい

熱雑音のestimation

$$G(\omega) = \frac{4k_B T}{\omega} \frac{1 - \sigma^2}{\sqrt{\pi} E w_0} \left(\phi_{sub} + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{1 - 2\sigma}{1 - \sigma} \frac{d}{w_0} \phi_{coat} \right)$$

σ : Possion 比
 E : ヤング率
 w_0 : ビーム半径
 d : coating 厚さ

Φ_{sub} : 鏡基板の機械的Q値
 Φ_{coat} : coatingの機械的Q値

K. Numata et al., Phys. Rev. Lett. **93**, 250602 (2004).

鏡基板材質	共振器長 (cm)	Allan 分散
ULE	10	6e-16
ULE	30	2e-16
Fused Silica	30	5e-17

神岡に来たとしても
熱雑音対策の必要あり

極低温環境
Or 長尺共振器+石英基板鏡

ULE: Ultra Low Expansion Glass (Corning), チタニアシリカガラス
 チタンのドーピングの均一性が機械的Qに影響??

NICTでの共振器開発プロジェクト

	現状 (JILA, Tokyo,...)	NICTのアプローチ
低 CTE 素材	ULE glass(Corning社, $1e-8$ @ 0-100°C)	均質化ULE同等品 (信越石英+東北大)
鏡	ATF (or REO)社 イオンビームスパッタリング(IBS)	IBS成膜及び基板研磨最適化(航空電子工業)
防振	Minus-k 社受動除振(米国) or 能動制振装置(欧州)	受動+能動ハイブリッド除振 (自主開発)
購入方法	ATF or REO社	1-stop channelの確立

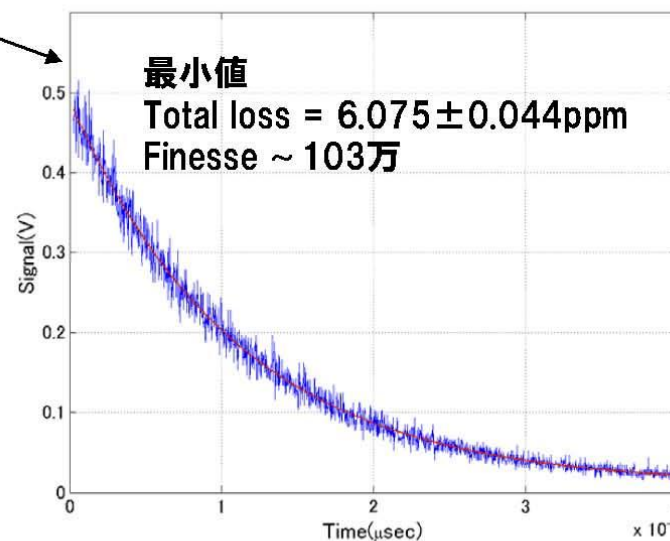
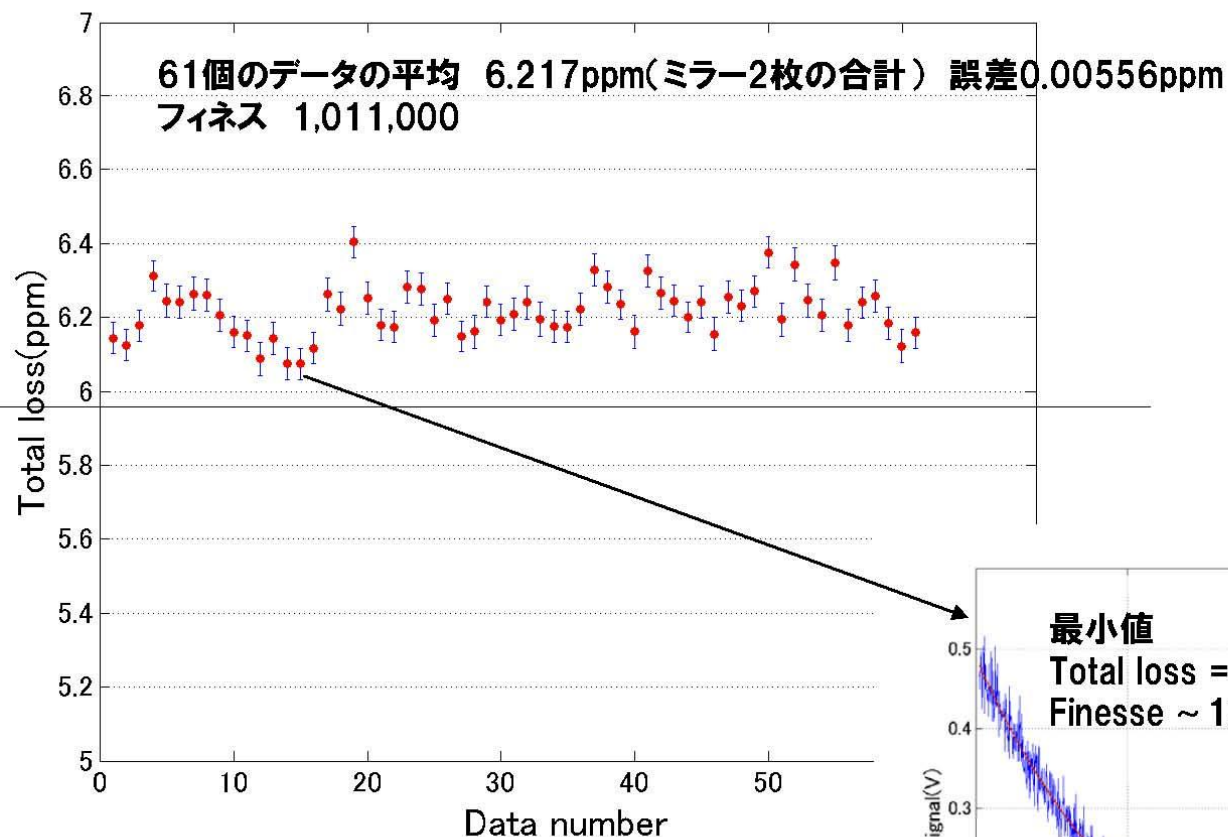
現行品(米国ATF社)を超える日の丸共振器を目指す

最終目標

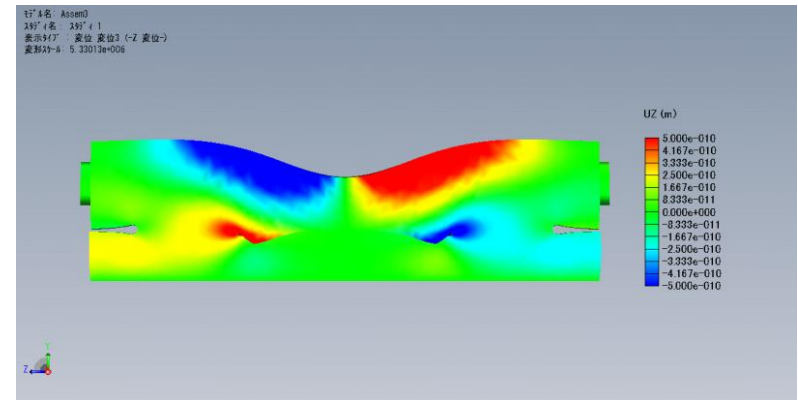
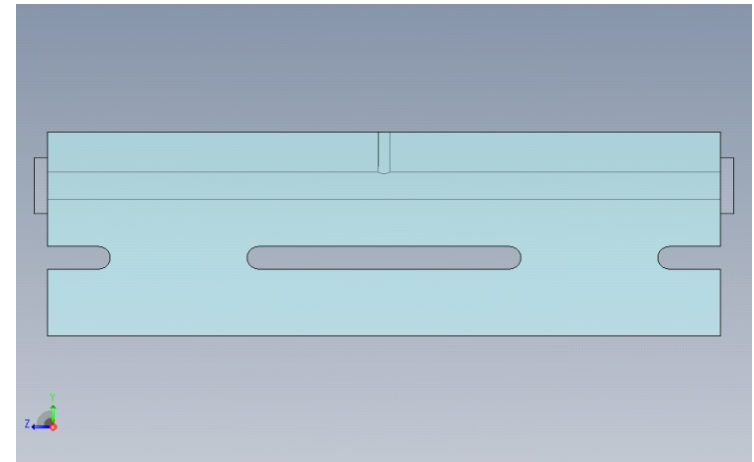
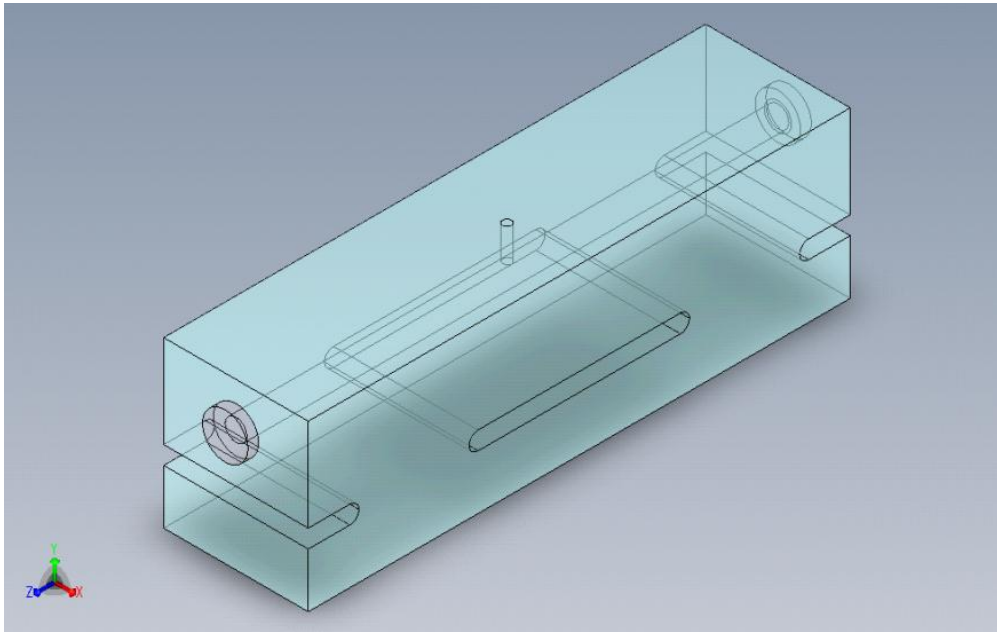
長尺 (30cm) 共振器

極低温環境共振器は現在の人的資源を考えると5年プロジェクト

1064nm用キャビティー損失計測結果

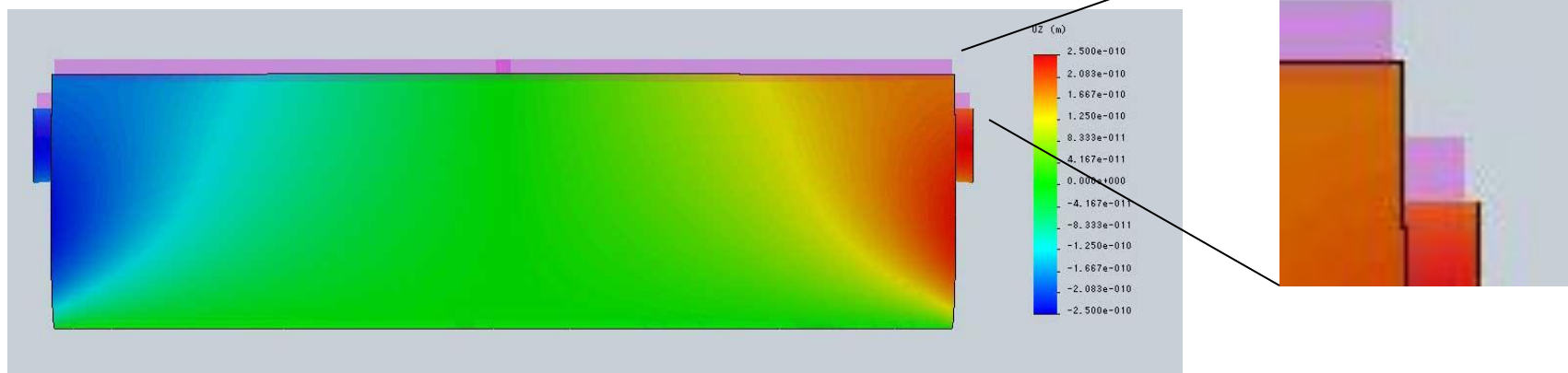


箱形30cm光共振器の設計

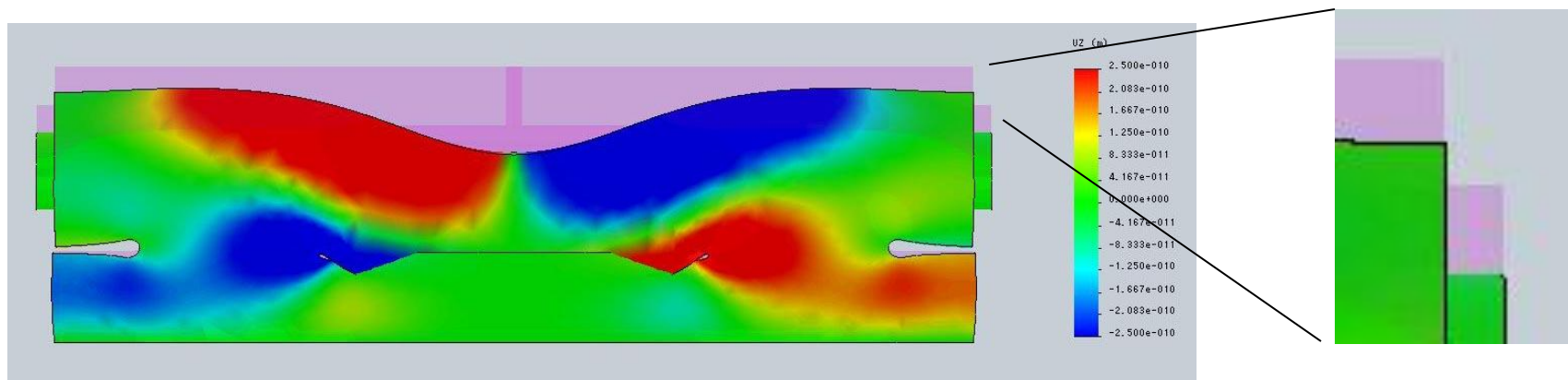


土台と一体として耐振性能向上
均等な重力を支える圧力配分
鉛直方向の振動に対して共振器長変化が
打ち消されるよう各部の長さを設計

下駄構造無しの単なるブロック

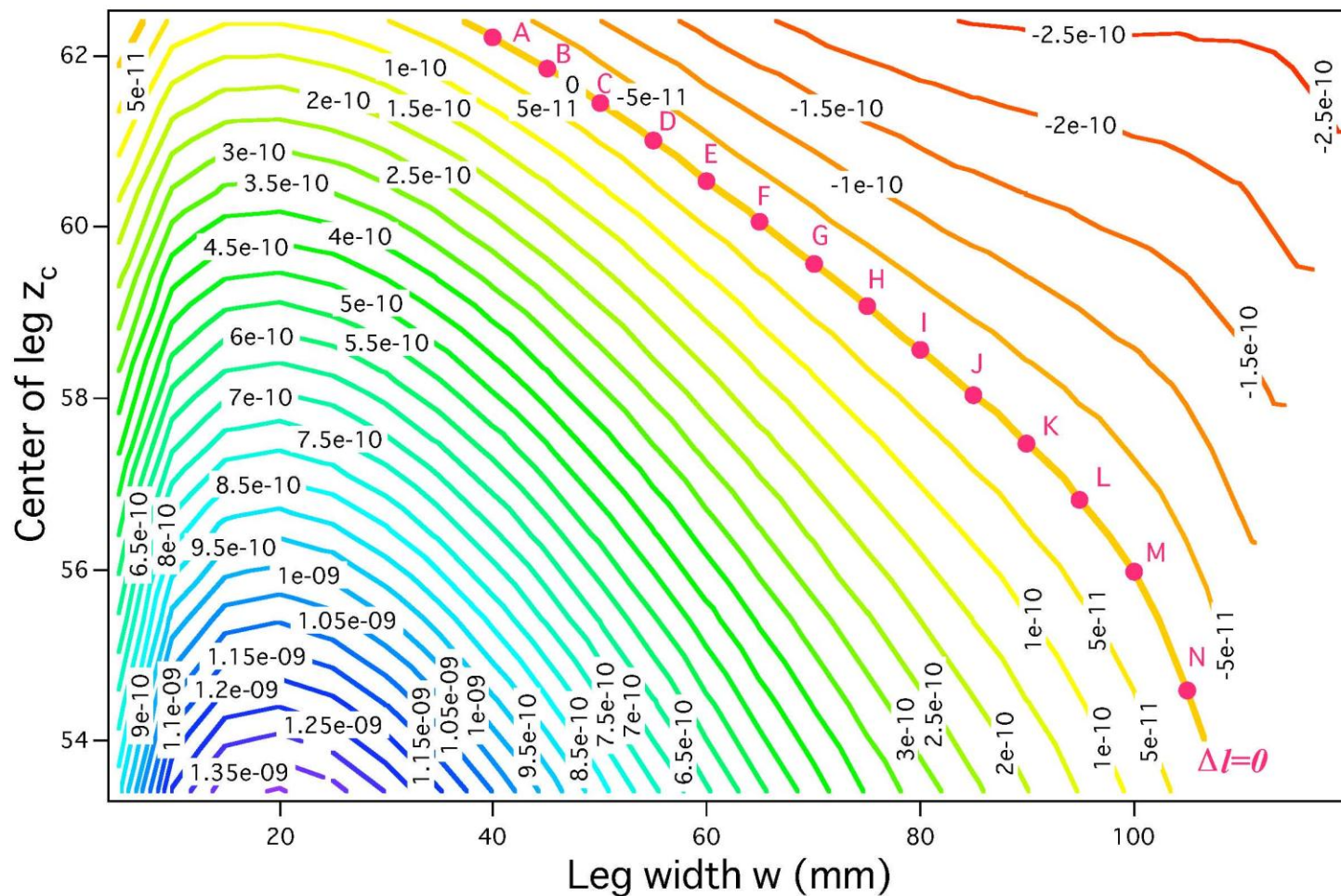


下駄構造



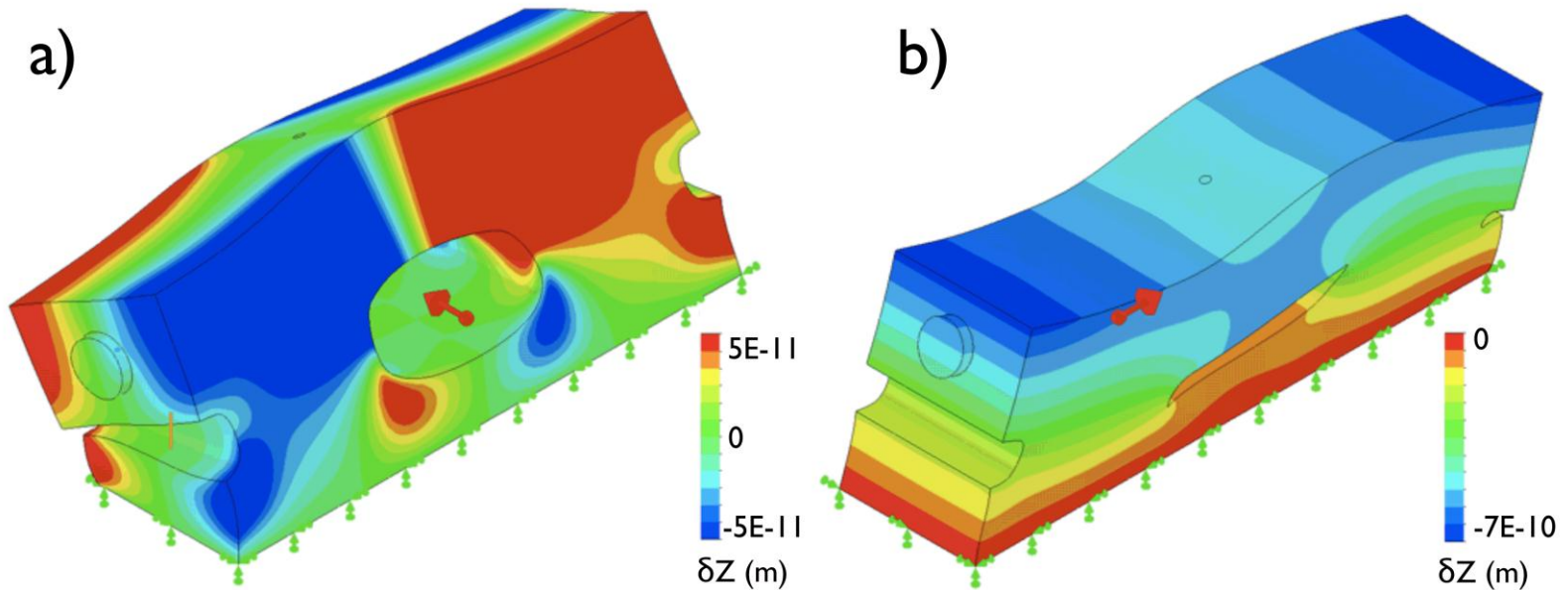
鏡位置の変化量の違いは100倍程度

垂直振動感度の足の位置・幅依存性



対称性に依存する水平方向 振動感度

水平方向の振動感度は対称性により基本的に鈍感



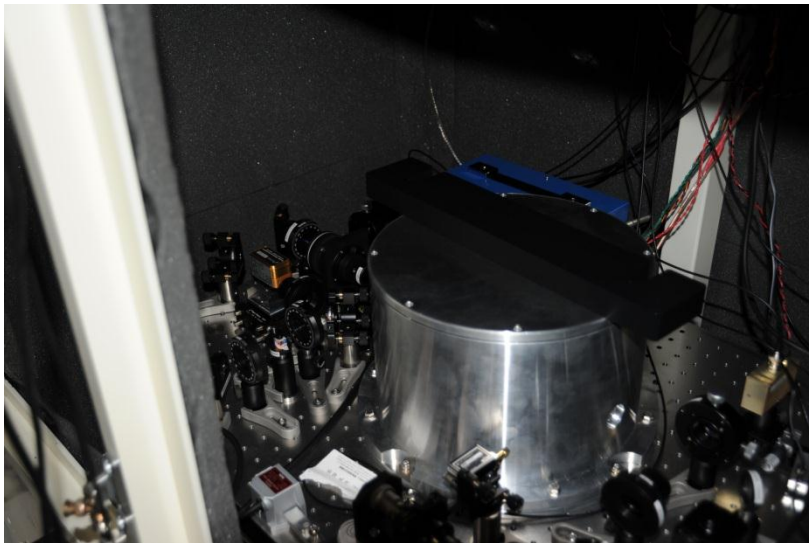
設計振動(加速度)感度: $3 \text{ kHz} / \text{ms}^{-2}$

東京: $3 (\text{kHz}/\text{ms}^{-2}) \cdot 5 \times 10^{-5} (\text{ms}^{-2}) = 0.15 \text{ Hz}$

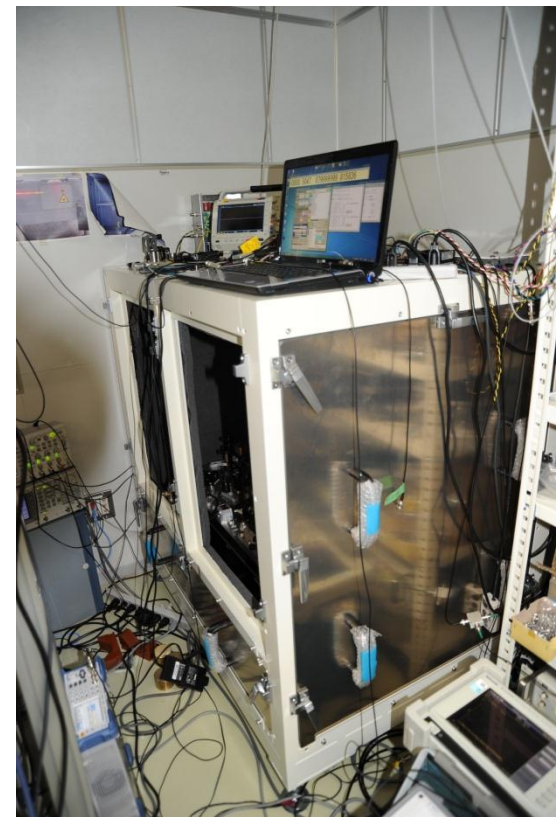
神岡: 東京の1-2桁落ち → 振動での制限から解放

実験装置

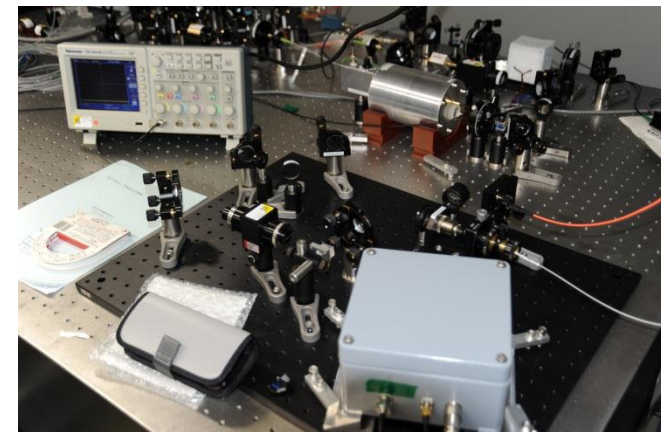
防音Boxは最初1台. 追ってもう1台 (比較のため)
神岡の環境では除振台が不要の可能性もあり



共振器内包真空チャンバー



防音box

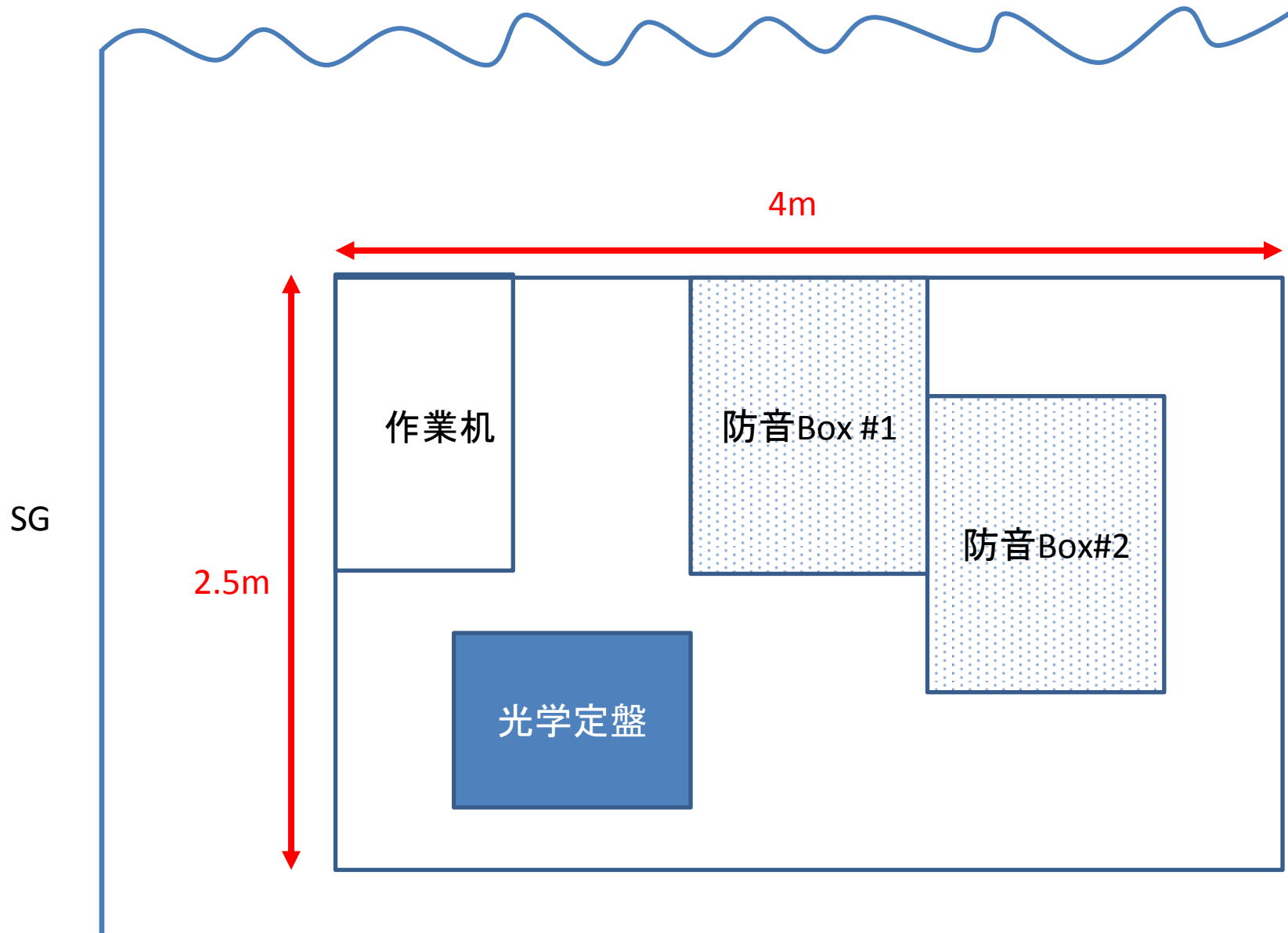


半導体レーザ光源

予定実験スペース

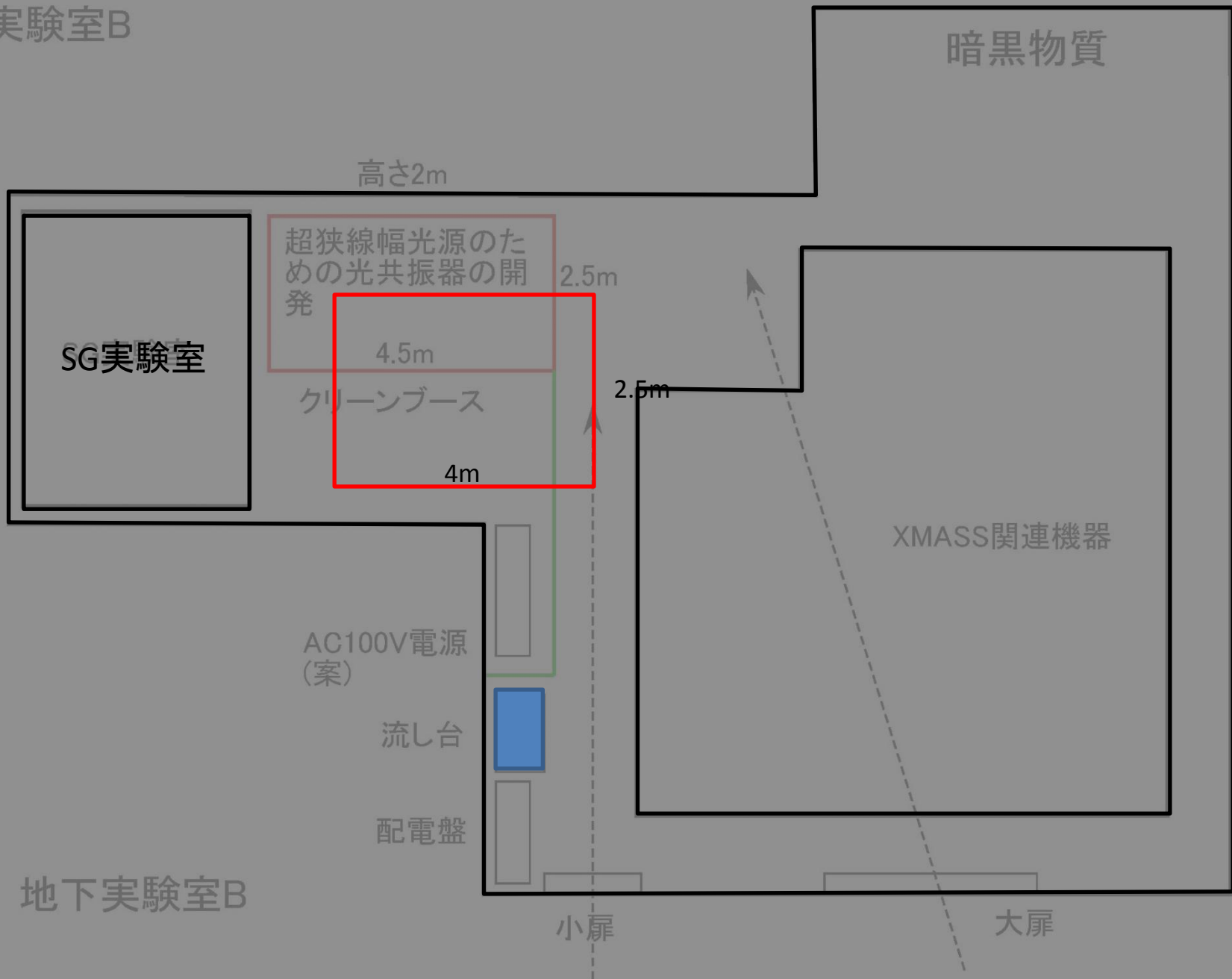
神岡地下実験室B

SG実験室の前, 4mX2.5m



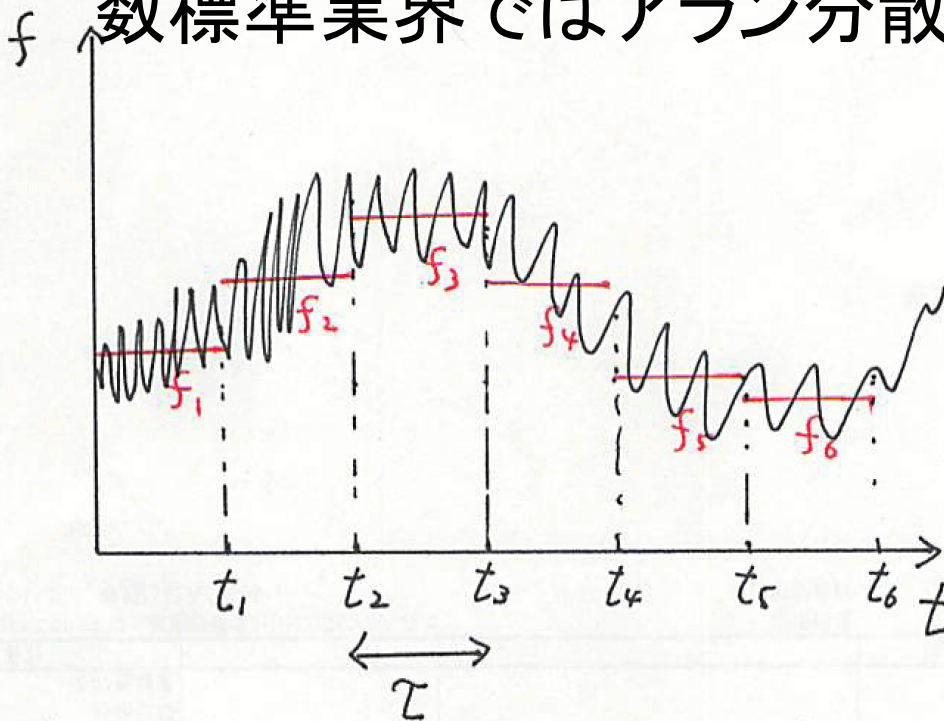
ご静聴ありがとうございました

地下実験室B



アラン分散

Osillatorの位相の性能を表すのに位相雑音密度
(Phase Noise Density)が一般に広く使われるが周波
数標準業界ではアラン分散が使われる



$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2} \frac{\langle (\bar{f}_{i+1} - \bar{f}_i)^2 \rangle}{\bar{f}^2}$$

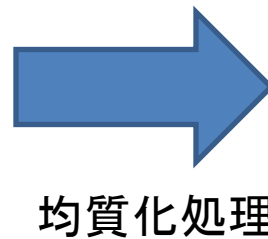
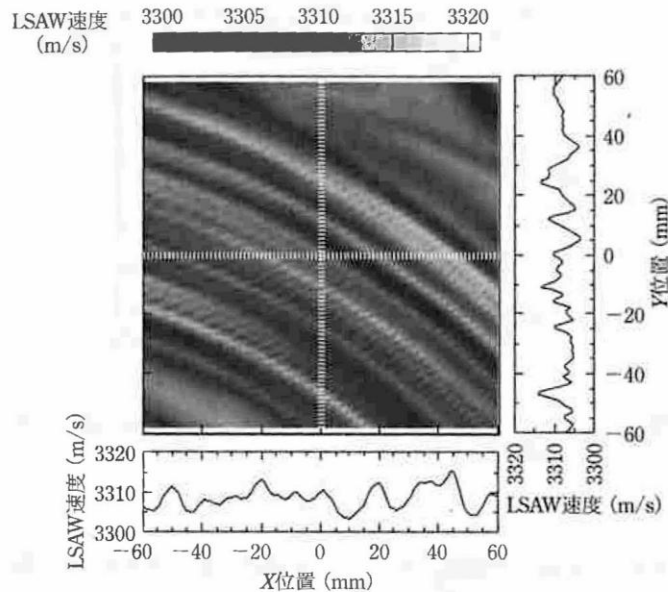
隣り合う時間 τ の平均値がどの
程度ふらつくか?

カウンタだけで計測可能
(PNDはFFTアナライザ等測定が複雑)

非測定より明らかに優秀なベースクロックで周波数を測定する場合：
非測定クロックとベースクロックが同程度の性能の場合：

Aの安定度
A vs Bの安定度

チタニアシリカガラス材料の均質化



均質化処理

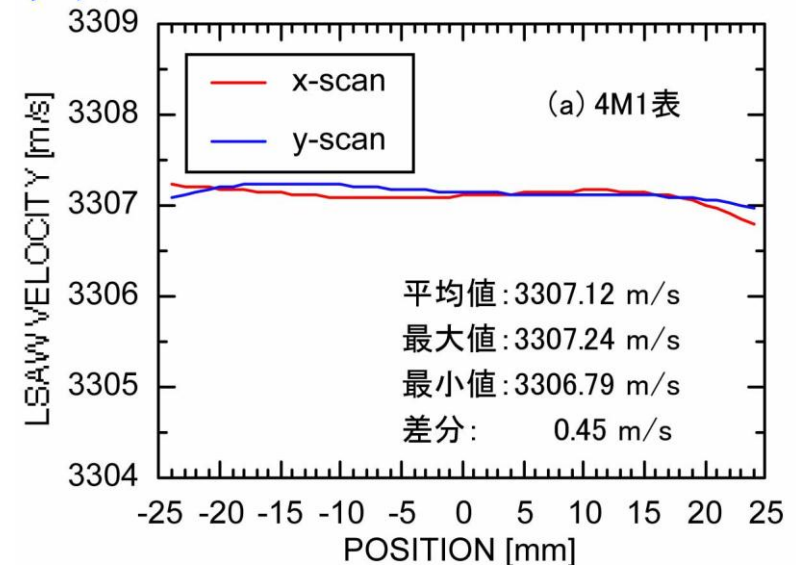


図6 C-7972 試料A に対する LSAW 速度の二次元スキャンとラインスキャンの測定結果。

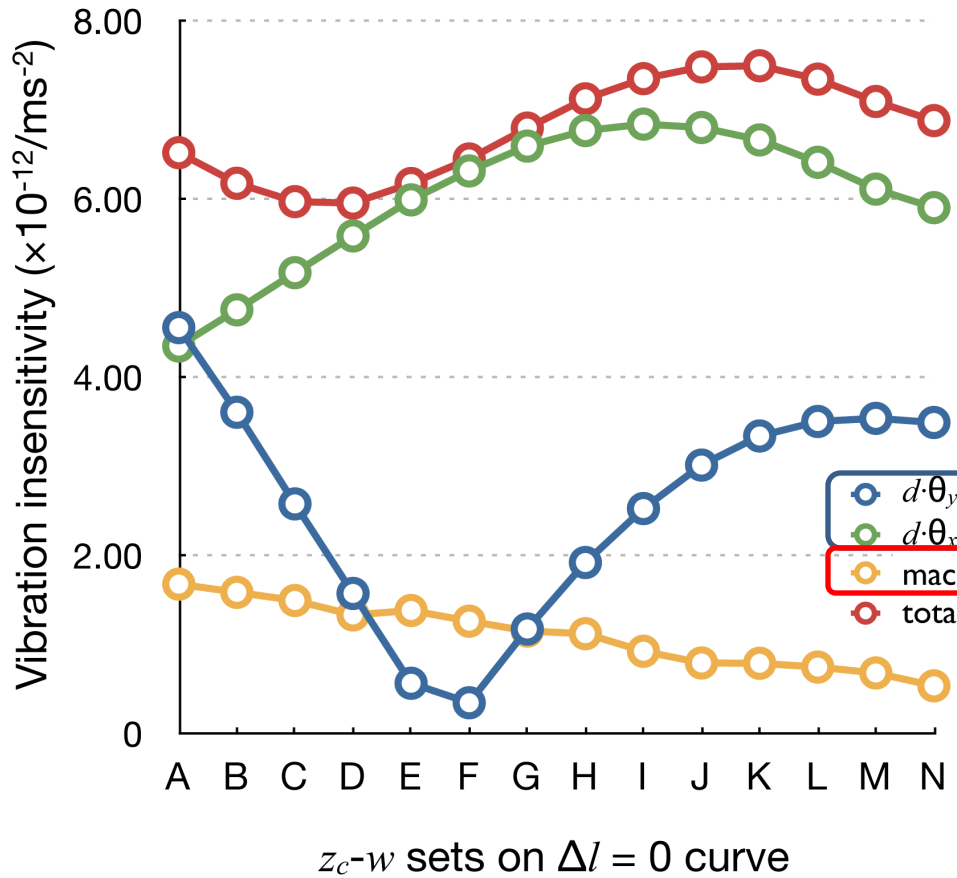
LSAW (Leaky Surface Acoustic Wave, 漏洩表面弾性波)速度の測定 (東北大学櫛引研究室)

信越石英株式会社でチタニアシリカガラスの熱処理・均質化し
東北大で評価。

鏡基板として使用するさいに機械的Q値が上がるかも。

→神岡では違いが顕在化する可能性(東京では振動感度を十分小さくする必要性)

何がlimit?



• オプコンの位置のずれ
0.5mmを仮定

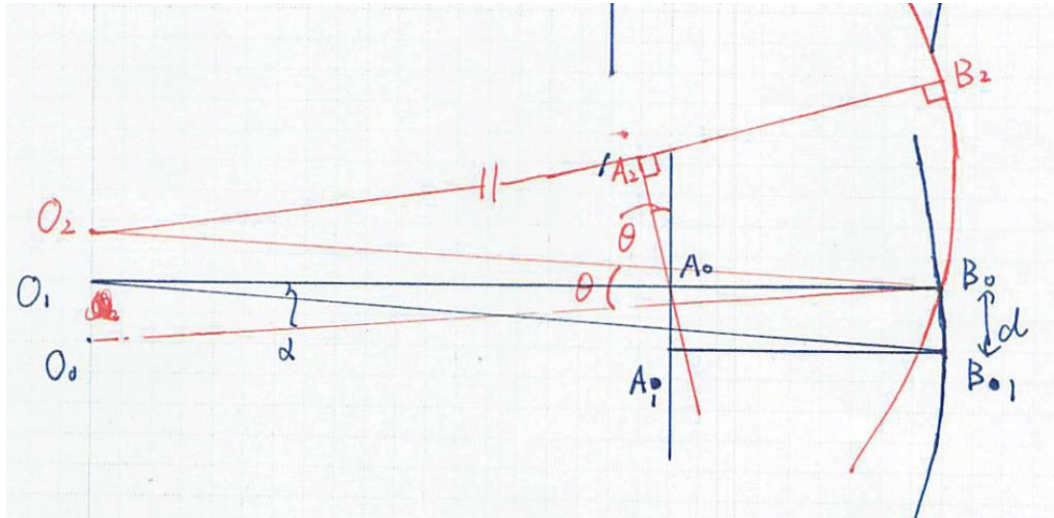
• 切削精度0.1mm

698nm=400THz

$400\text{THz} \times 7\text{e-}12 \text{ (/ms}^{-2}\text{)}$
 $= 3\text{kHz / ms}^{-2}$

Sub-Hzレーザとするには
 $1\text{e-}4\text{m/s}^2$ 程度の振動環境が必要

Critical parameter: positioning accuracy of optical contact



A0B0: 筐体(回転)中心軸

A1B1: ずれた光軸

A2B2: 回転後の光軸

L : 共振器長

R : 曲面鏡曲率半径

θ : 鏡の回転角度

d : 光軸と筐体軸のずれ

$$A_2B_2 = L \left(1 - 2 \frac{R}{L} \alpha \theta + \left(\frac{2R}{L} - \frac{1}{2} \right) \theta^2 + O(\theta^3) \right)$$

$$= L \left(1 - 2 \frac{d}{L} \theta + \left(\frac{4R}{L} - 1 \right) \frac{\theta^2}{2} + O(\theta^3) \right)$$

1st order term of θ

$\theta \sim 1e-9$

→ 光軸を中心とした回転なら

2次の効果のみで問題なし.

しかし実際には筐体軸と光軸の

ずれ d がオプコン精度によって生じる

$d/L \sim 5e-4/1e-1 = 5e-3 \gg \theta$

搬入後の開発の工程

1. 環境整備(光学系セットアップ, 神岡)
具体的には汎用10cm共振器を防音box内に入れて, 安定化.
2. 30cm共振器の振動感度及び安定度測定 (小金井)
3. 30cm共振器を神岡に移設. 小金井での振動感度測定結果に応じて防音ボックスを持ち込むかどうか決定.
4. 汎用10cm共振器 v.s. 30cm共振器 -> 汎用10cm共振器の熱雑音寄与の測定
5. 均質化10cm共振器 v.s. 30cm共振器 -> 均質化の効果検証
6. 汎用4点指示30cm共振器 v.s. 30cm共振器 -> 史上最狭線幅レーザー??