

Characterization and Control Development for the New Suspended Benches for Advanced Virgo



Takanori Sekiguchi

This work is supported by:

Alessandro Bertolini, Eric Hennes, Jo van den Brand, Henk Jan Bulten, Mark Beker, Mathieu Blom, Joris van Heijningen, David Rabeling, Martin Doets, Riccardo Desalvo, Carlo Galli, Paolo Radaelli and Engineering Staffs in Nikhef



With Financial support from ALPS Oversea Dispatch Program

Contents

1. Brief Introduction of Nikhef
2. Suspended Benches for Advanced Virgo
3. Transfer Function Measurement [Multi-SAS]
4. Summary and Other Topics

Contents

1. **Brief Introduction of Nikhef**
2. Suspended Benches for Advanced Virgo
3. Transfer Function Measurement [Multi-SAS]
4. Summary and Other Topics



素粒子・宇宙線実験のための装置開発、デザイン、データ解析など

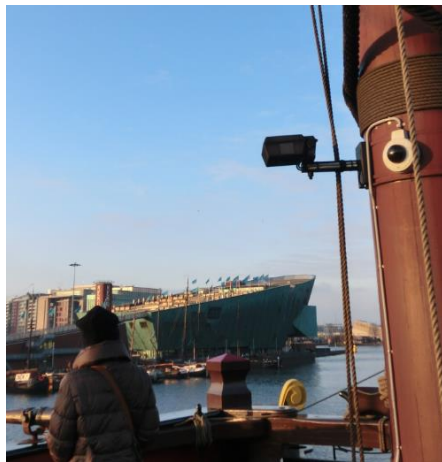
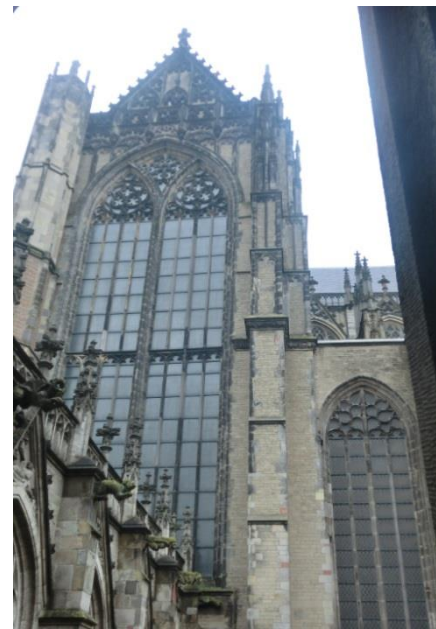
- 大型加速器 (LHC)
- ニュートリノ検出器 (ANTARES, KM3NeT)
- ダークマター検出器 (XENON)
- 重力波検出器 (Virgo, ET)

充実したエンジニアリングスタッフ (GW関係で十人以上のエンジニアが関与)

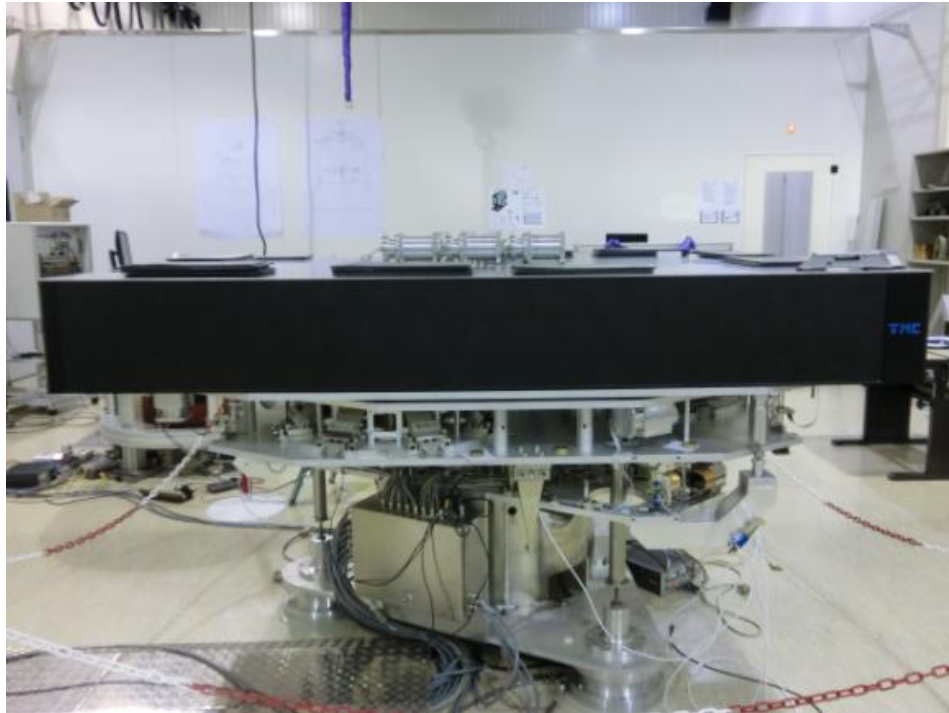
NIKHEF Location

中央駅から電車でロッテルダム、デンハーグ、ライデン、ユトレヒト、ブリュッセルなど...

アムステルダム中央駅まで自転車で20分



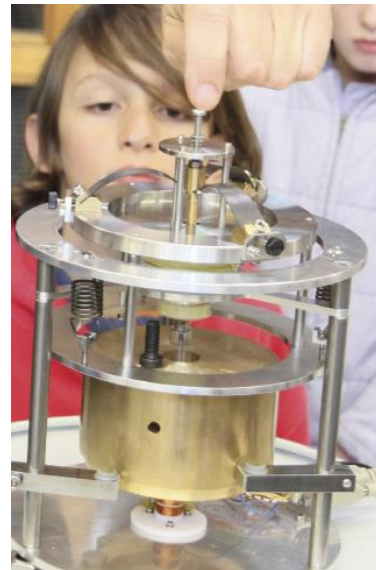
クリーンルーム (SAS, 光学実験室)



共用機械工作室、電子回路制作室

数十人のエンジニアリングスタッフによって整備、いつでも相談できる環境

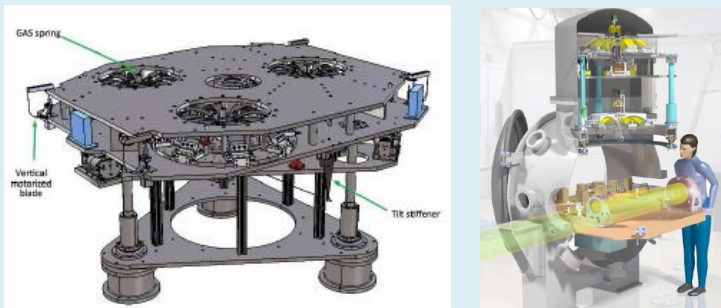
一般公開用 Toy Model



NIKHEF Activities for GW Detectors

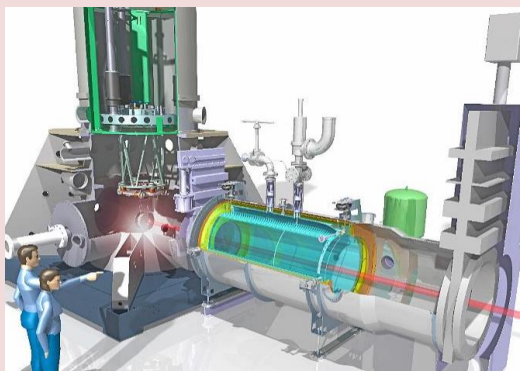
• EIB-SAS, Multi-SAS

Optical Bench用防振装置開発



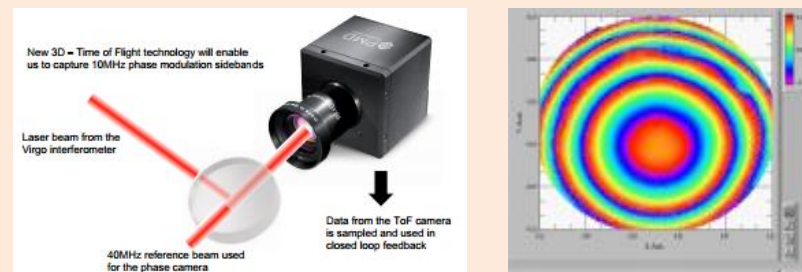
• Cryogenic Vacuum Link

真空度向上のためのCold Trap開発



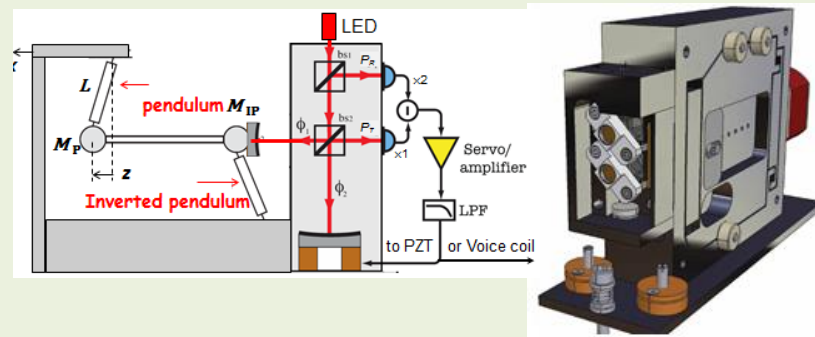
• Phase camera

Wave Frontセンサーの開発



• Accelerometers

高感度加速度計の開発

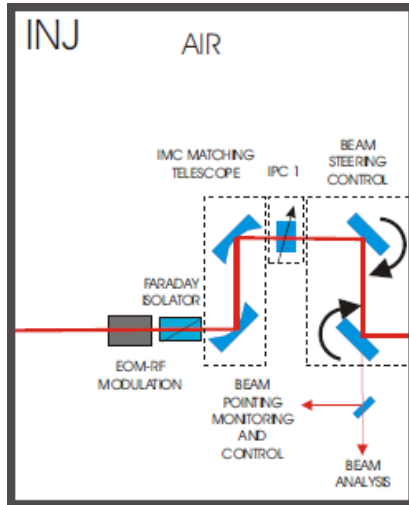


• ETサイト候補の地面振動測定、重力場雑音計算...

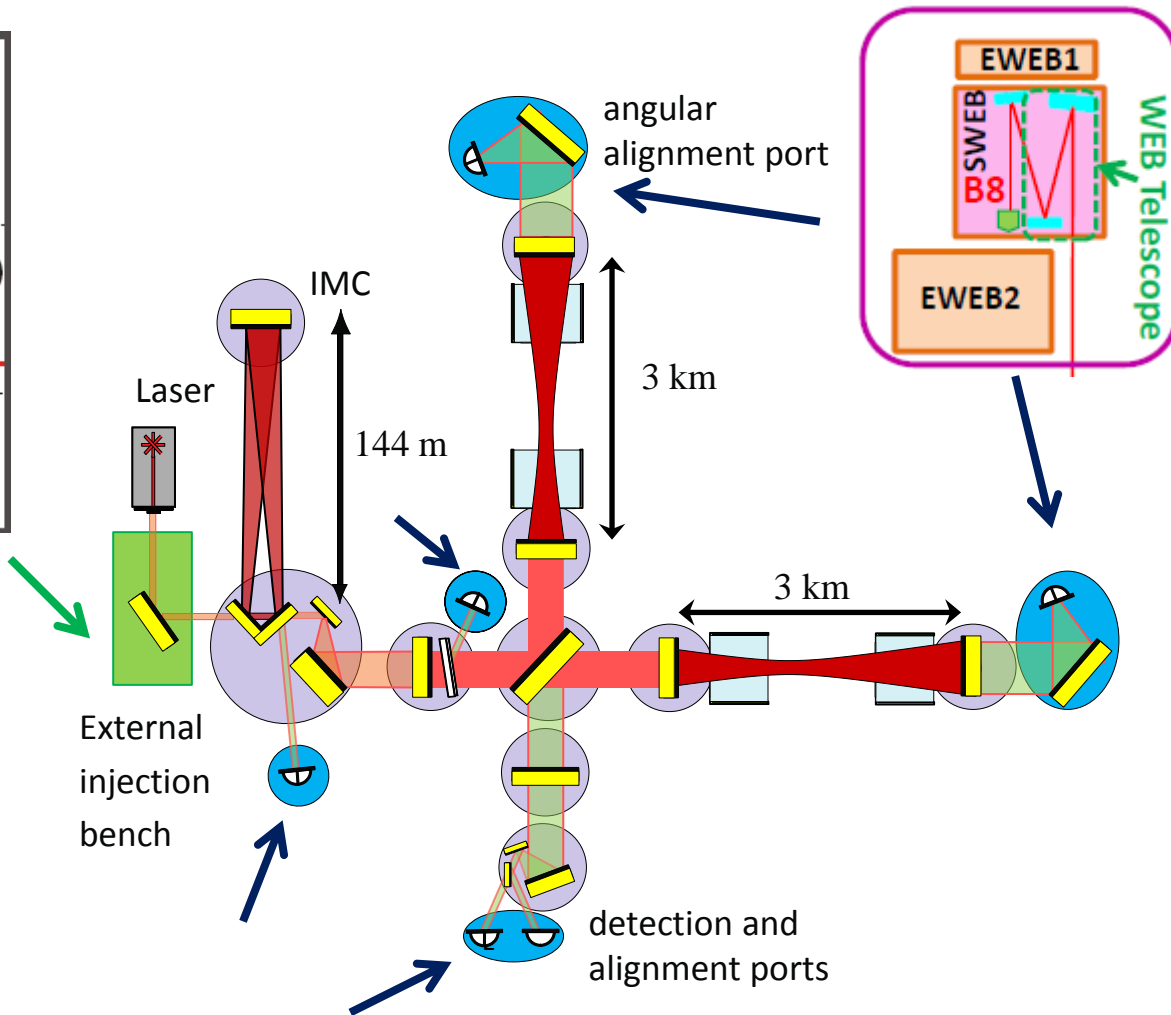
Contents

1. Brief Introduction of Nikhef
- 2. Suspended Benches for Advanced Virgo**
3. Transfer Function Measurement [Multi-SAS]
4. Summary and Other Topics

Suspended Optical Benches in Adv. Virgo

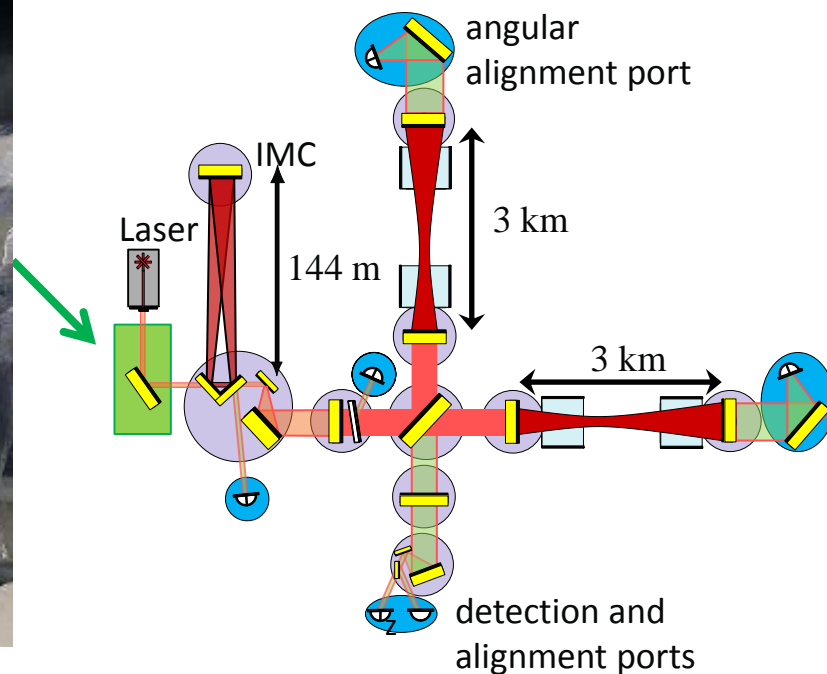


Faraday Isolator
 Beam Power Control
 PD for IMC lock, etc.



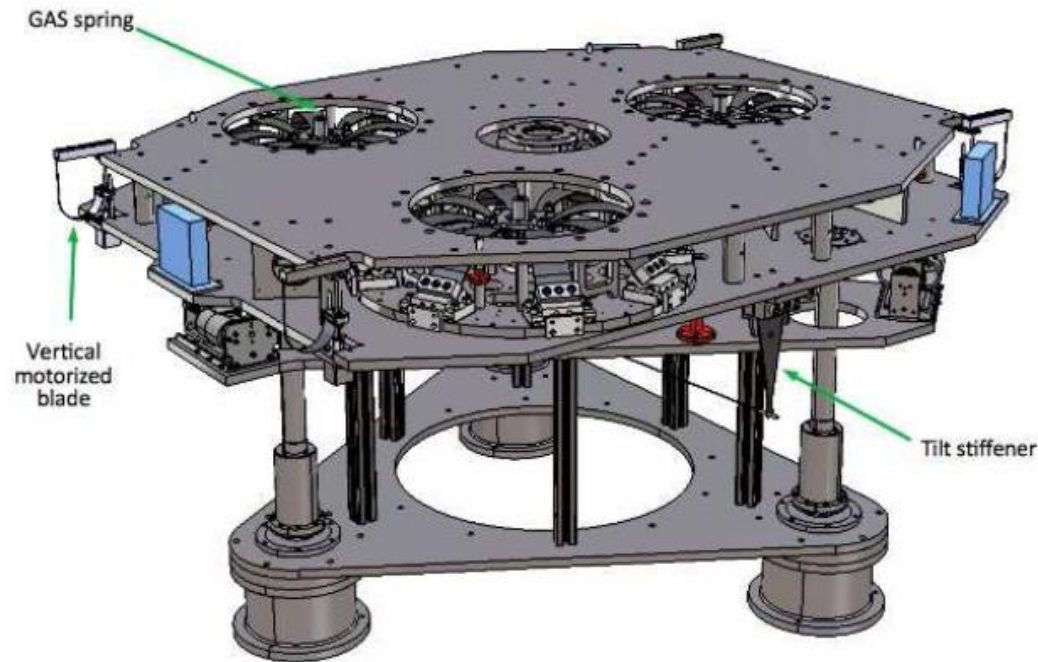
External Injection Bench (EIB) - SAS

- 空気中にある入射光学系用ベンチを防振
- Virgo+の主な雑音源の一つであったBeam jitter雑音の低減を目的
- 2011年にサイトに導入され性能試験



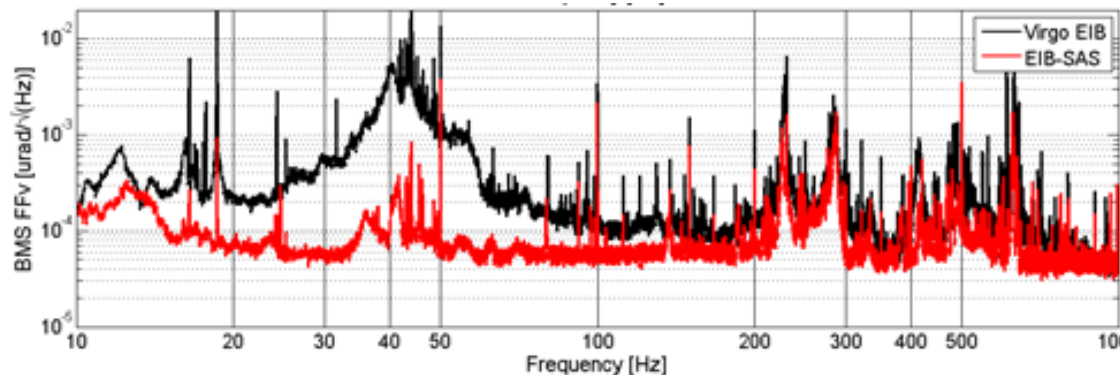
EIB-SAS Design

- 3本の倒立振り子および3個のGASフィルターにより6自由度を受動的に防振
- LVDTおよびGeophoneにより共振等による低周波の揺れを能動的に制御



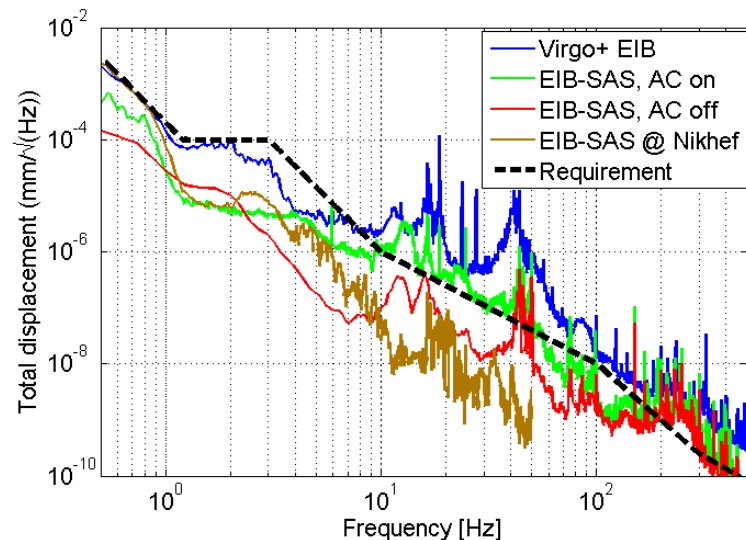
EIB-SAS Commissioning: Beam Jitter

- 100 Hz以下でBeam Jitterの低減を確認
- エアコンから来る音響による振動が問題 (> 2 Hz)
- 温度変化によるGASフィルターのドリフトが大きい



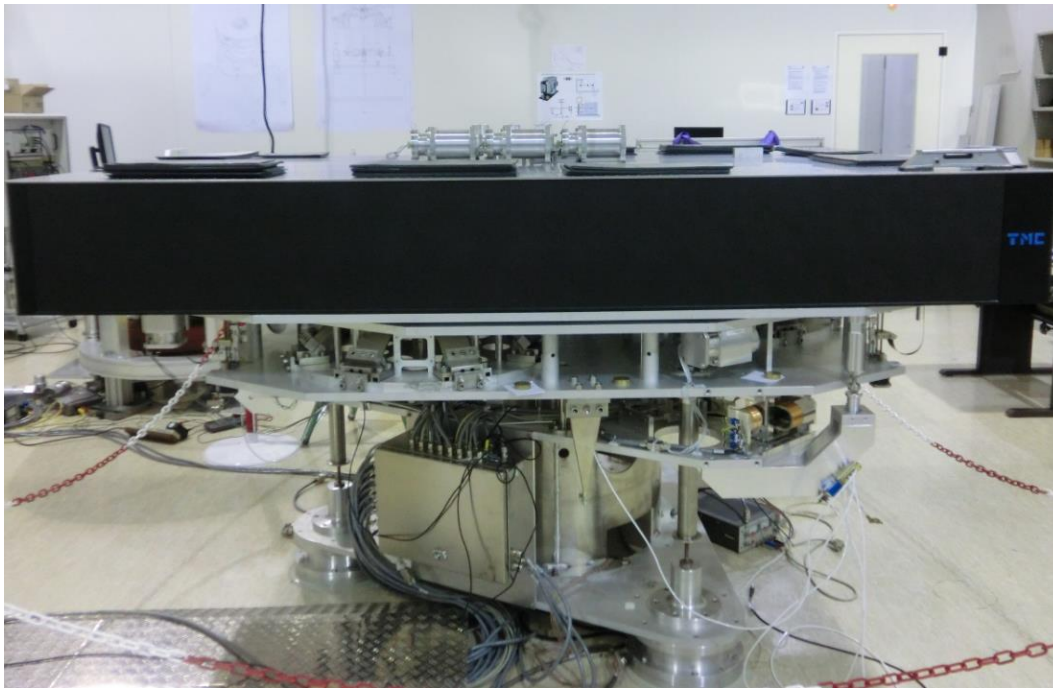
The good news:
Beam jitter significantly
reduced < 100 Hz

But:
Optics mounts keep
resonating (200-300)

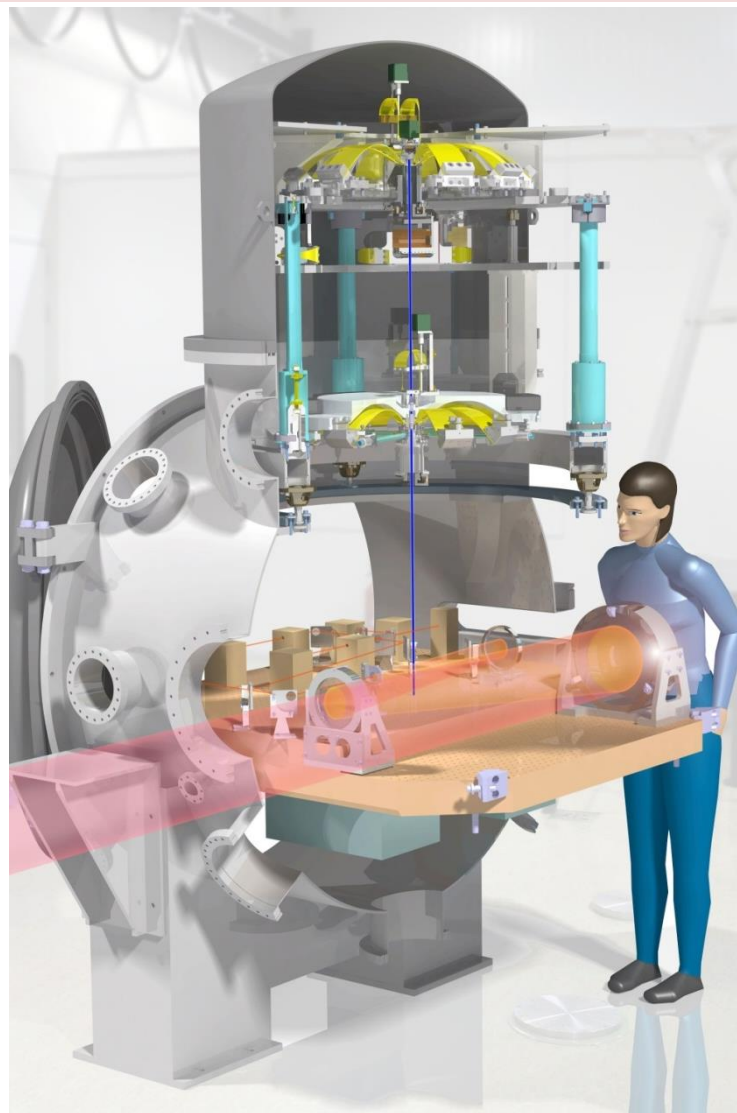


EIB-SAS Current Status at Nikhef

- GASフィルターの温度変化によるドリフトを制御するため鉛直アクチュエータを強化
- Tilt Stiffenerと呼ばれるワイヤーを導入、傾きのドリフト低減
- 制御の最適化、長期試験、伝達関数測定など



Multi-Stage Suspended Bench (Multi)-SAS



- 光軸制御用PDを含む光学ベンチを防振
- 角度揺れへの厳しい要請

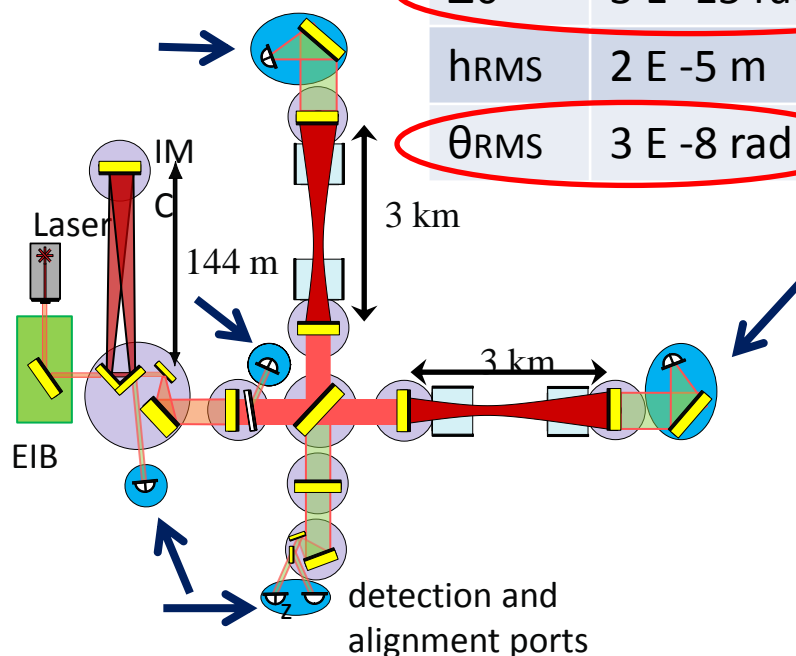
Requirements @ 10 Hz (VIR-0128A-12)

Δh 2 E -12 m/rtHz

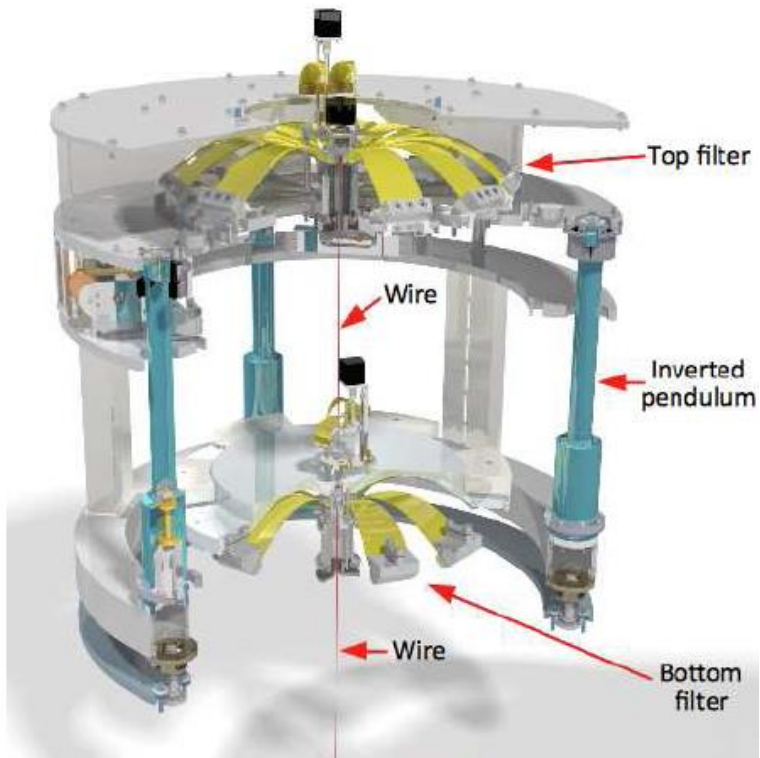
$\Delta\theta$ 3 E -15 rad/rtHz

hRMS 2 E -5 m

θ_{RMS} 3 E -8 rad



Multi-SAS Design

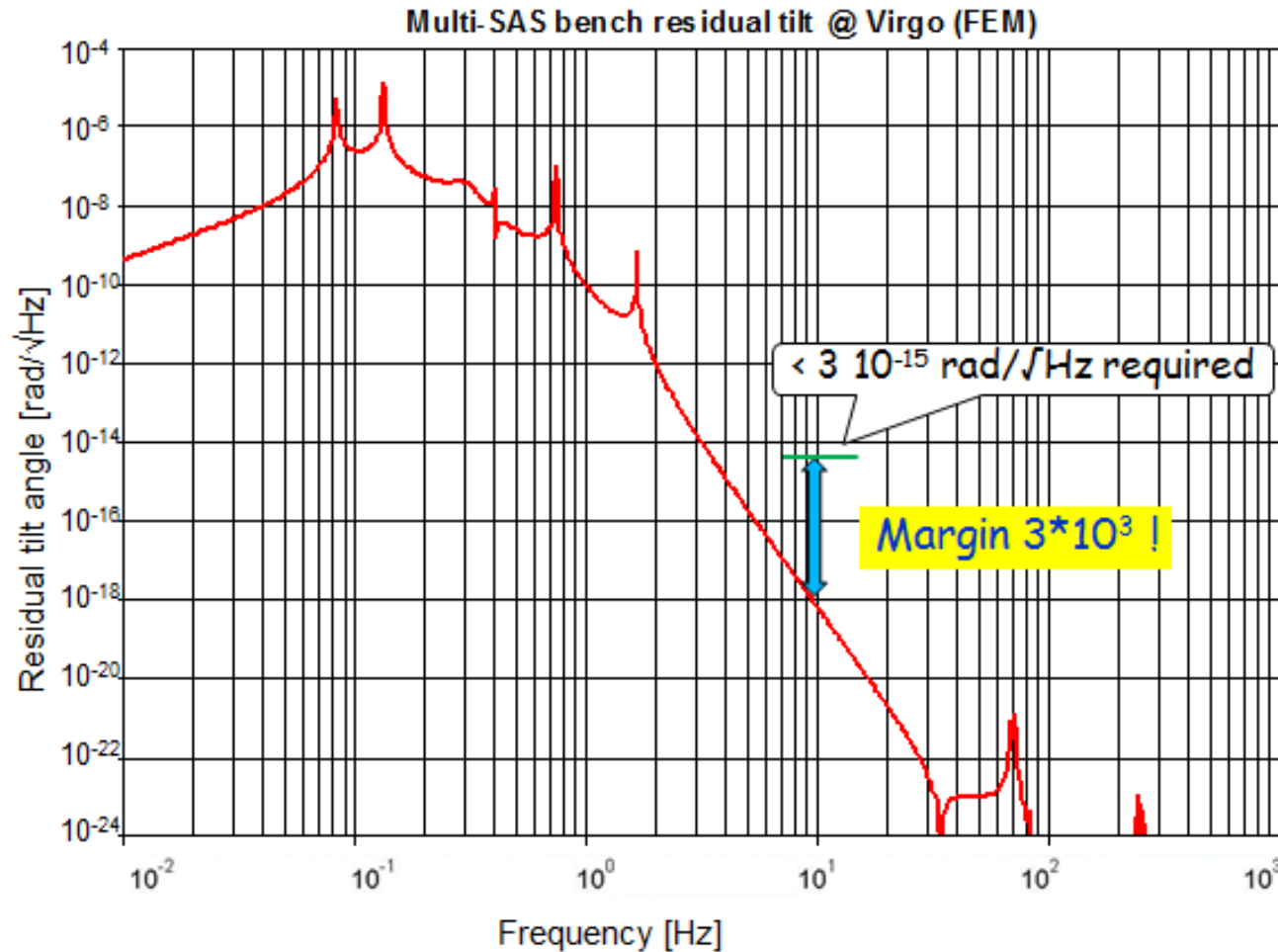


- 倒立振り子、GASフィルターによる多段防振
- 角度揺れ低減のためワイヤー1本懸架の構造

Frequency (Hz)	DOF	involved body	Notes
0.010	θ_y	common	
0.029	θ_y	+ Top stage-Bench, - Filter-1	
0.084	x/z	common	2 modes
0.134	θ_x/θ_z	Bench	2 modes
0.152	y	common	
0.239	θ_y	Top stage	
0.406	θ_x/θ_z	Filter-1	2 modes
0.518	y	+ Bench, - Filter-1	
0.743	z/x	+ Top stage, - Bench	2 modes
1.665	z/x	+ Top stage-Bench, - Filter-1	2 modes

Multi-SAS Simulation

E. Hennes (GWADW 2012 Presentation)



Multi-SAS Current Status at Nikhef

- 空気中における制御試験および**伝達関数測定**
- 日本帰国後、真空タンクに導入され現在は真空中での試験が行われている様子



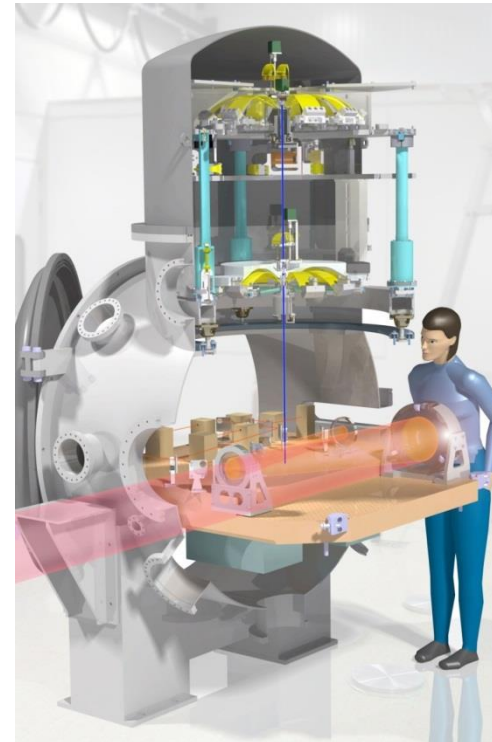
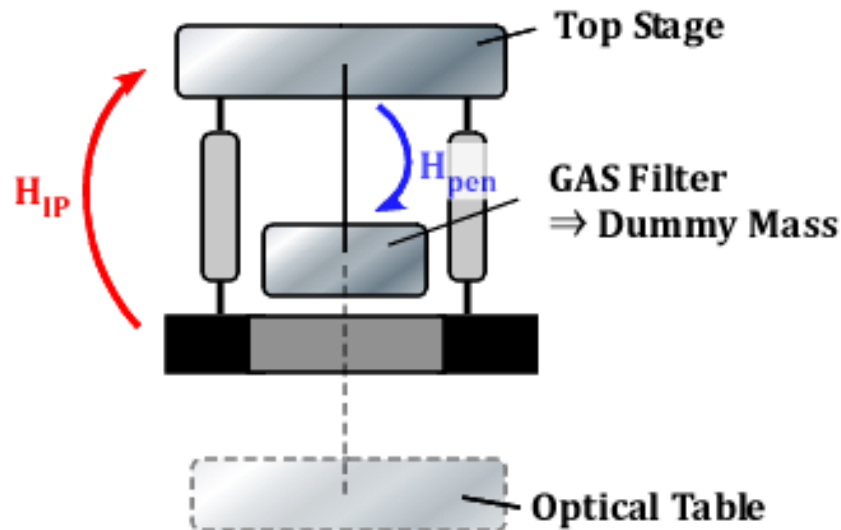
Contents

1. Brief Introduction of Nikhef
2. Suspended Benches for Advanced Virgo
- 3. Transfer Function Measurement [Multi-SAS]**
4. Summary and Other Topics

Purpose

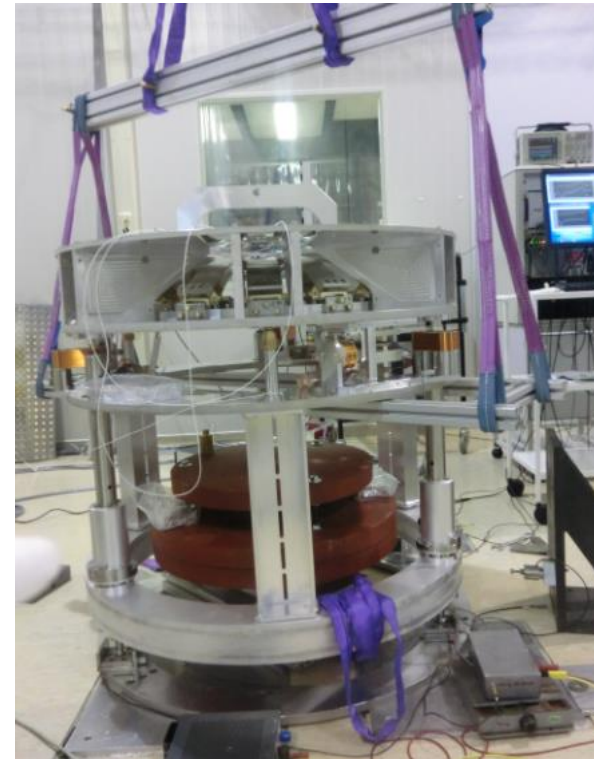
- Multi-SASの水平方向の防振性能を測定、モデルと比較
- 弾性モード(>50 Hz)の影響の調査

測定用のセットアップ: 倒立振り子+1段振り子

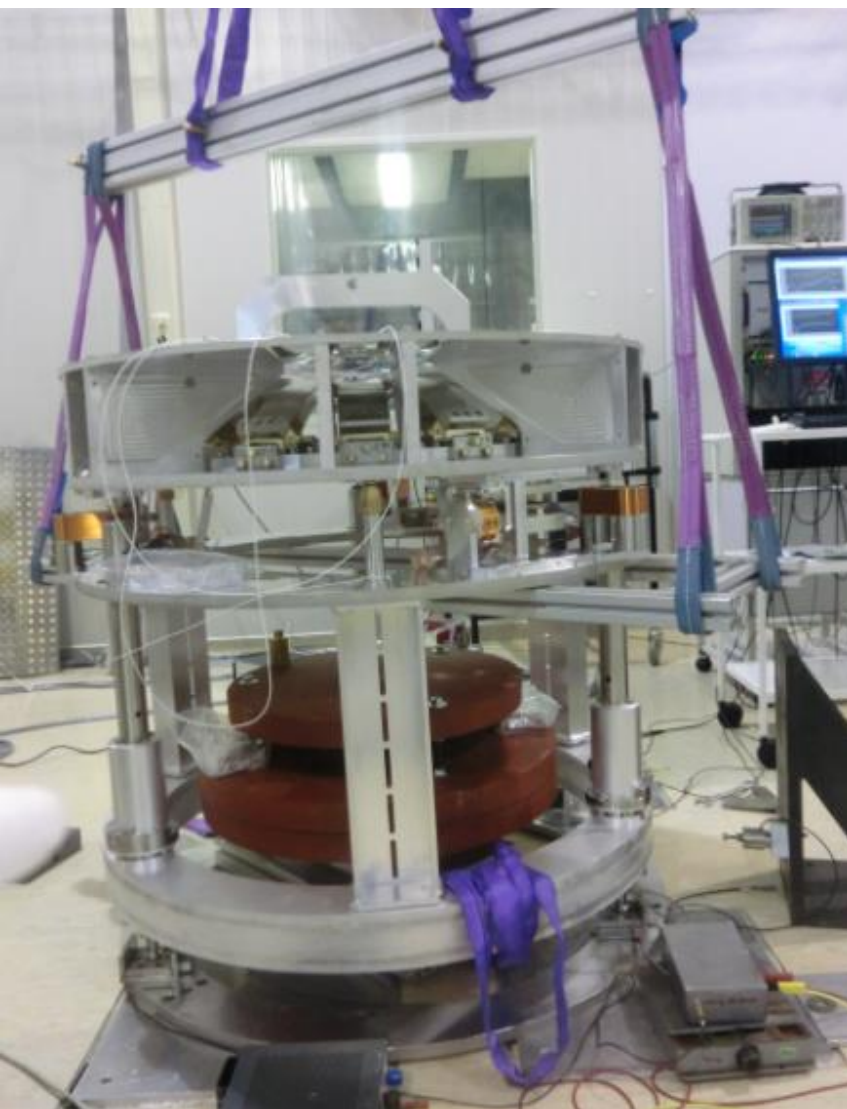


Previous Works

- 簡略化しない通常のセットアップで伝達関数の測定を試みた
⇒黄色いフレームの共振に邪魔されうまく測定できなかった
- システムを簡略化、土台を地面に近づけ安定化

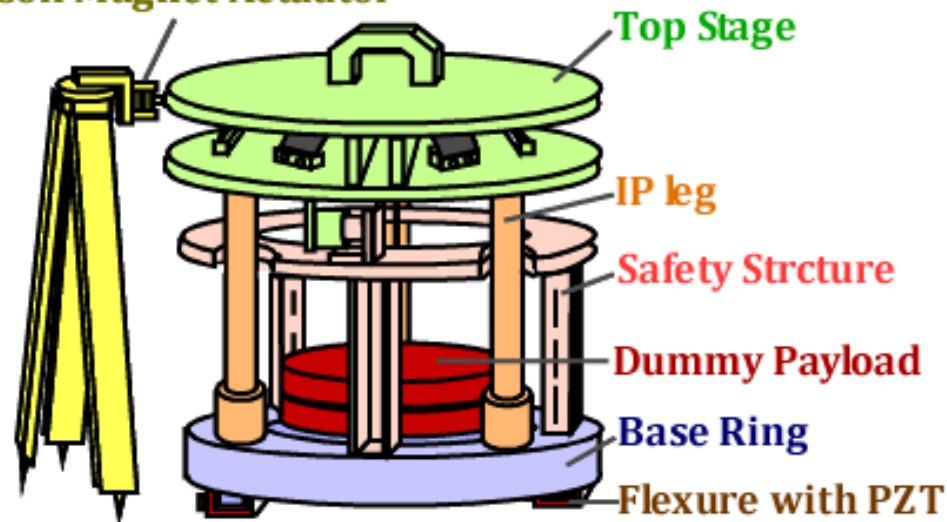


Experimental Setup

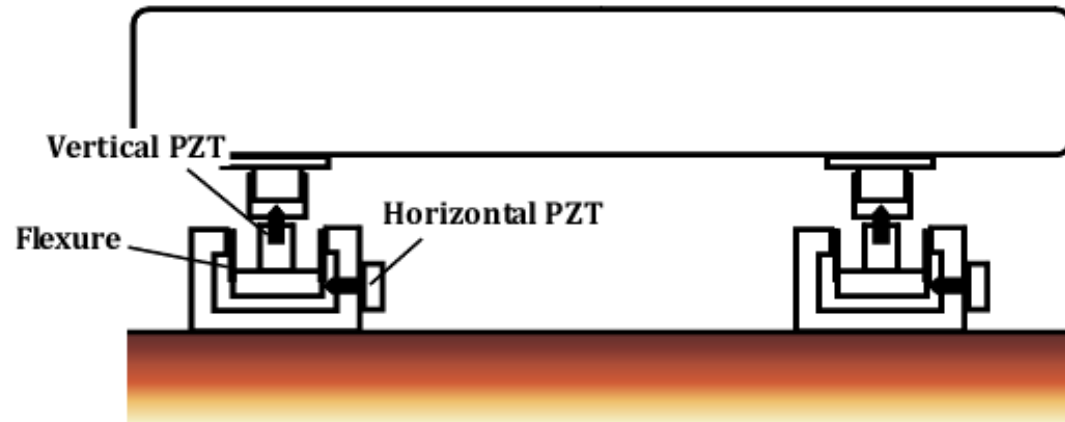
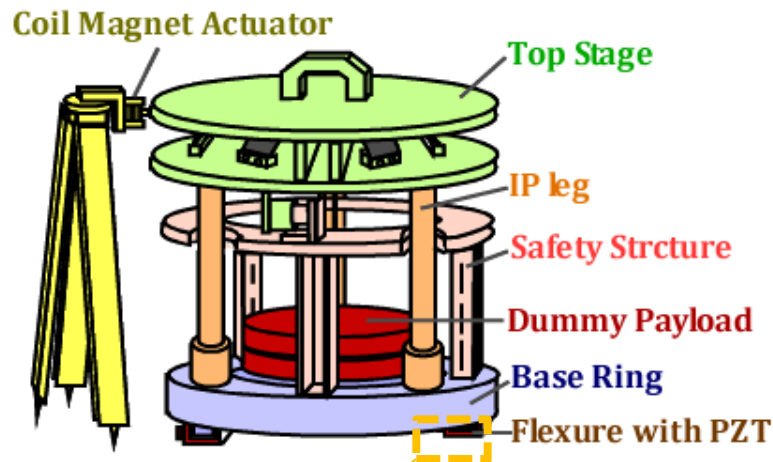


- ピエゾおよび電磁アクチュエータを用いて加振し、加速度計で各段の振動を測定
- LabViewのSwept-sineのプログラムを用いて周波数応答を計測

Coil Magnet Actuator

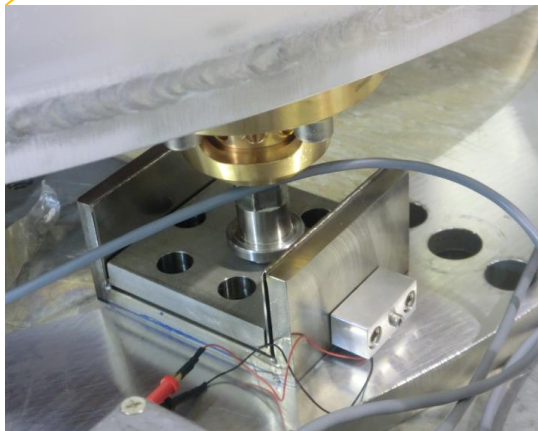


Experimental Setup --- PZT Actuator



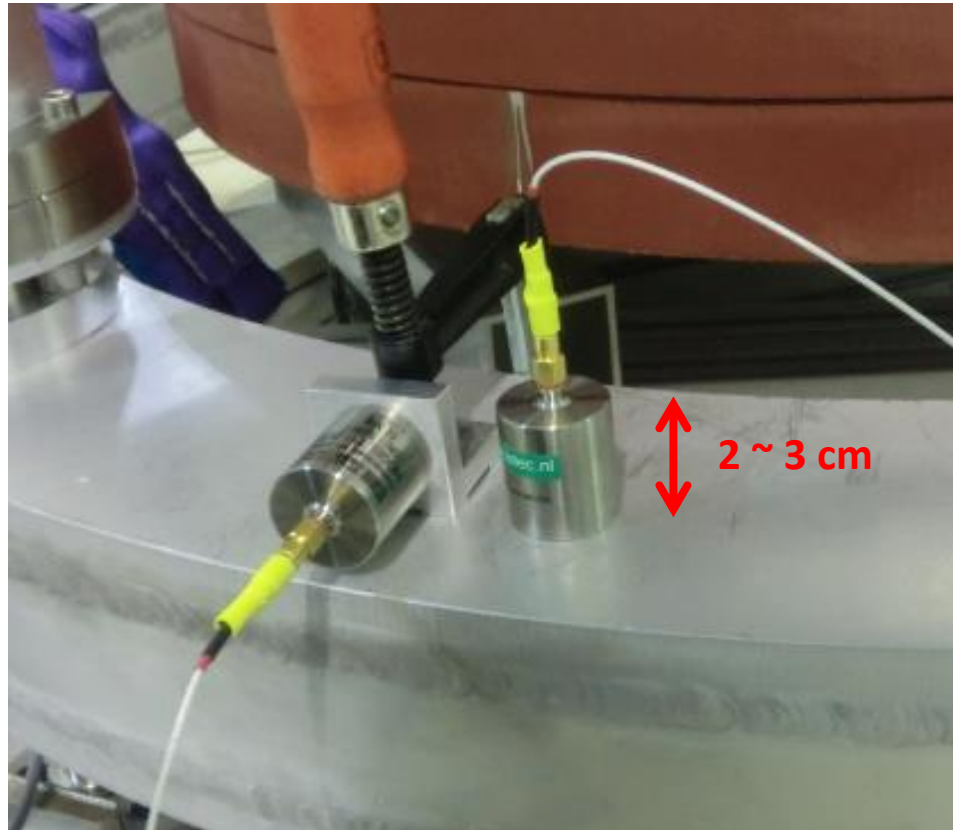
High-Load Piezo Actuator: P-225.10 (PI)
Operating at ~500V with E-472.20 Amplifier

- 水平、鉛直両方の加振に対応



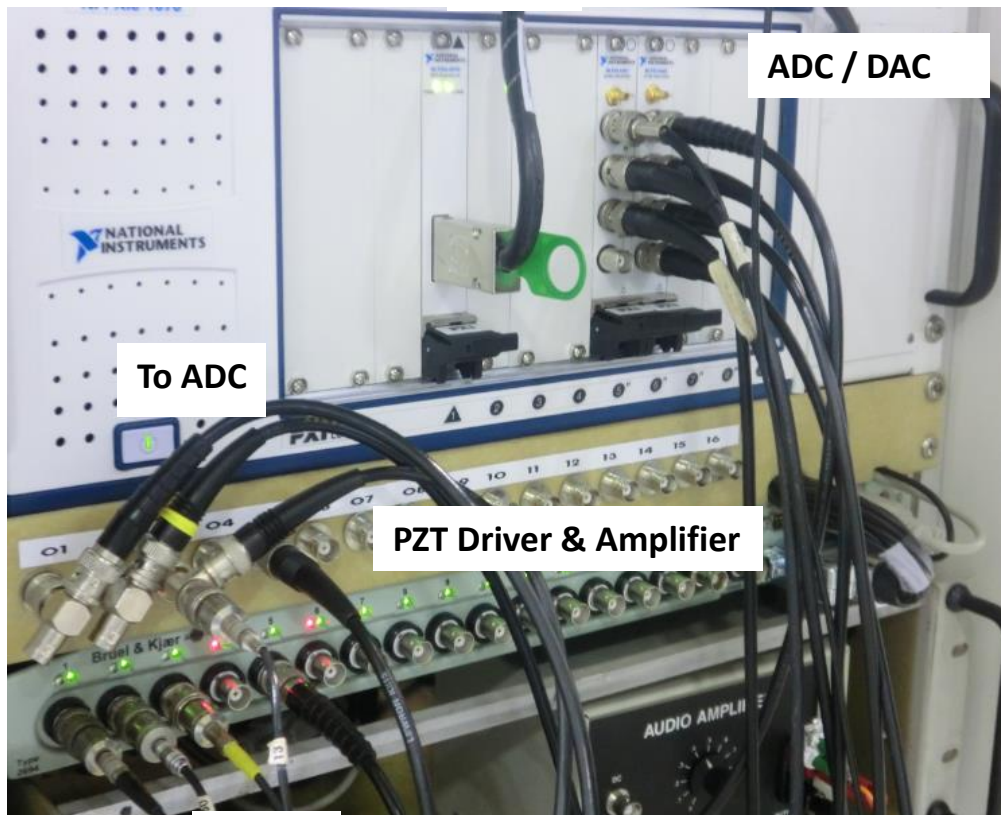
Experimental Setup --- PZT Accelerometer

Wilcoxon, Model 731-207, Sensitivity: ~ 10 V/g,
Noise : ~ 0.1 μ g/rtHz, 2.5 Hz – 25 kHz



Measurement System

To PC



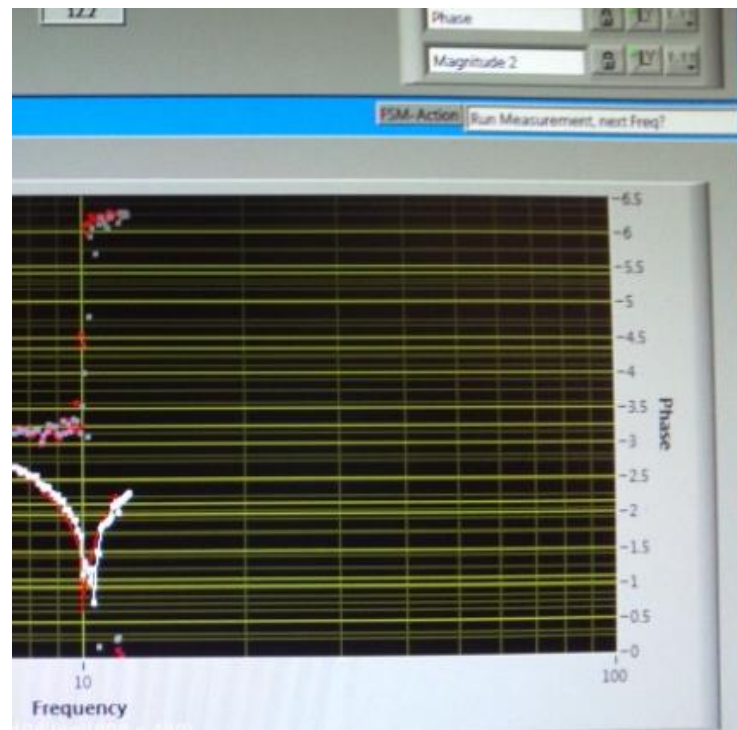
ADC / DAC

To ADC

PZT Driver & Amplifier

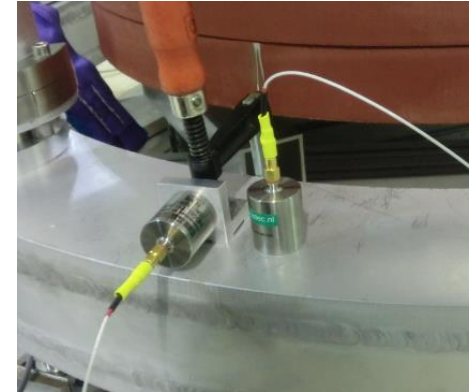
To PZT

Audio Amp (Coil Driver)



Beeswax

- 加速度計の固定は基本的にクランプを使用
- クランプが難しい場所は**Beeswax (蜜蝋)**で接着



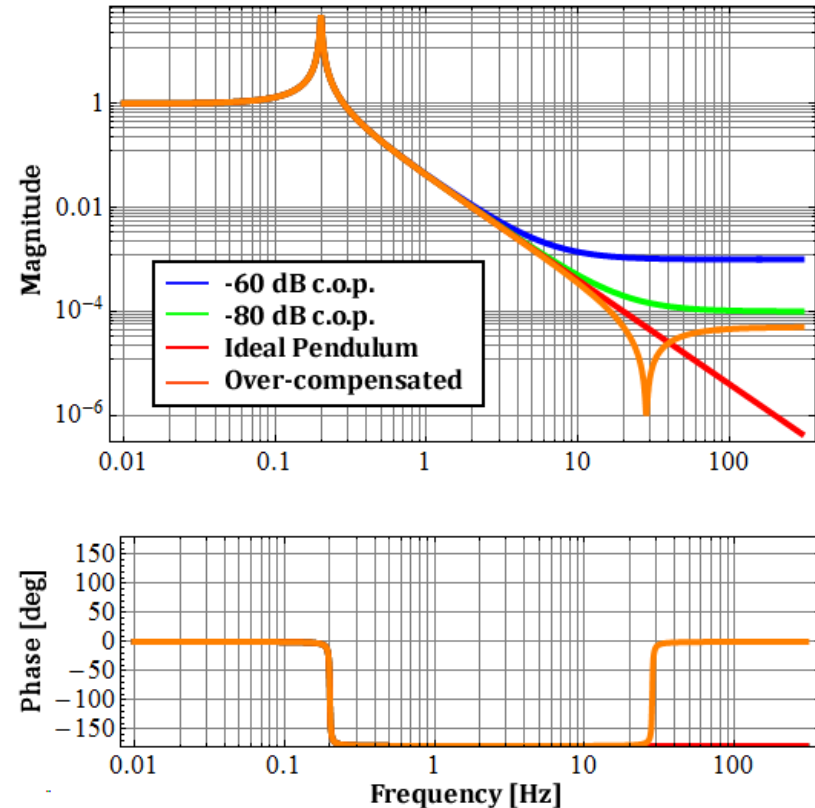
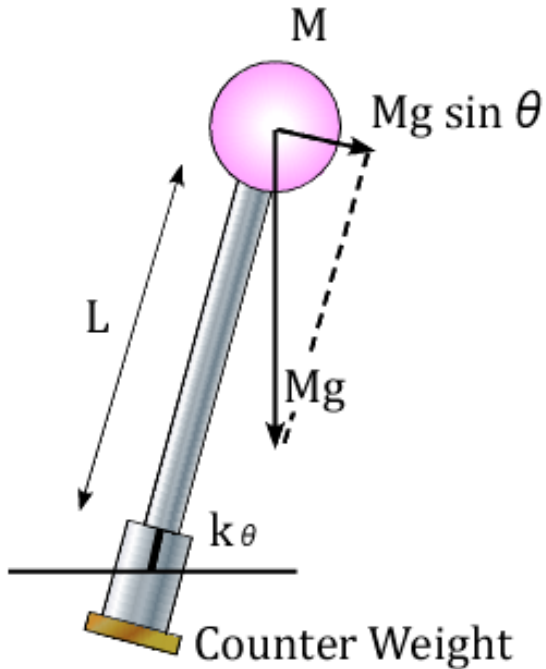
化粧品 [\[編集\]](#)

最大の用途はクリームや口紅など化粧品の原料で、ろうそく、ワックス、クレヨン、接着剤、ガム、リトグラフ、エッチング、ろうけつ染めなどにも用いられる^[3]。ろうそく作りにおいては、パラフィンワックス製のものに融点を高める目的で混ぜられる場合も多い^[3]。(Wikipedia – 蜜蝋)

Measurement, Discussion

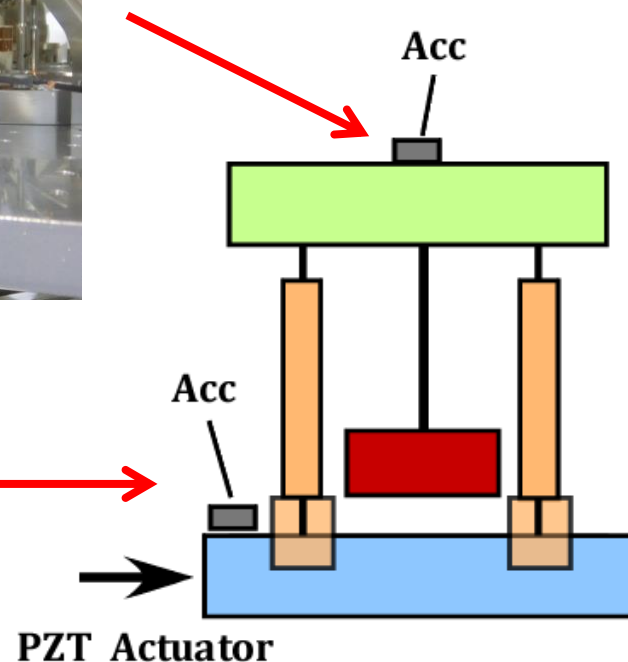
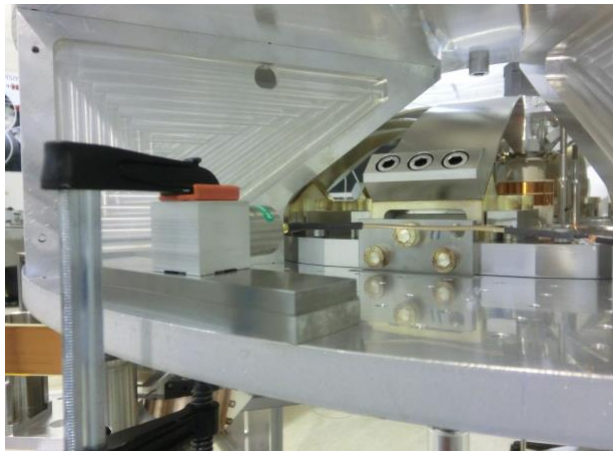
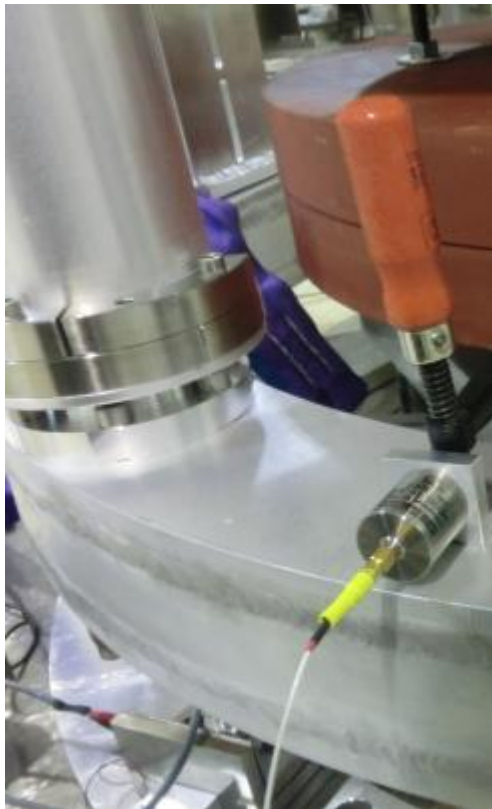
Transfer Function of Inverted Pendulum

- 倒立振り子の防振性能は高周波でサチる: **Center of Percussion 効果**
- 対策しない場合、Multi-SAS IPの防振比は -50 dB程度でサチる
- サチュレーションレベルは脚の質量分布に依存、Counter Weightで調整可



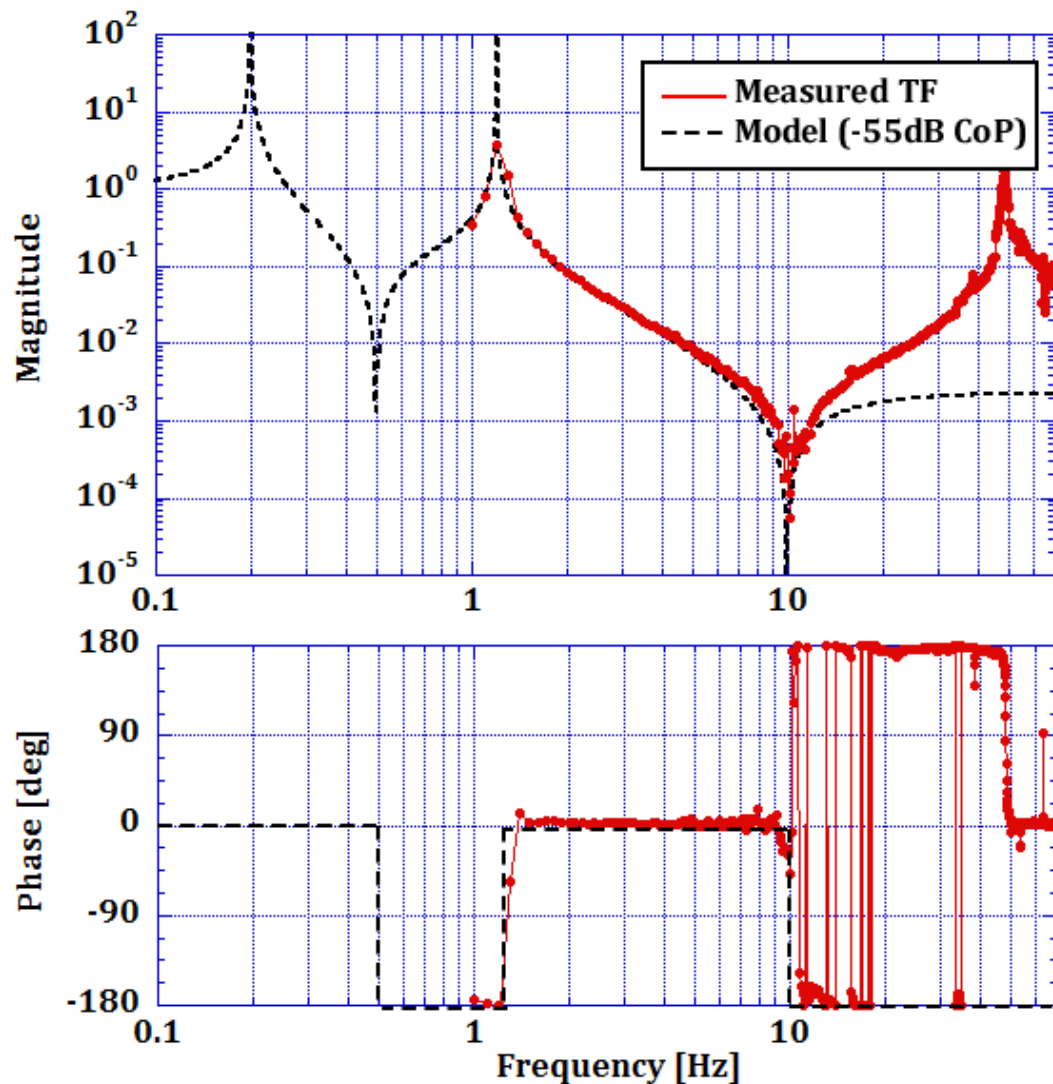
IP Transfer Function Measurement

- BaseとTopにそれぞれ水平方向に加速度計を配置
- IPのCounter Weightは適当に調整



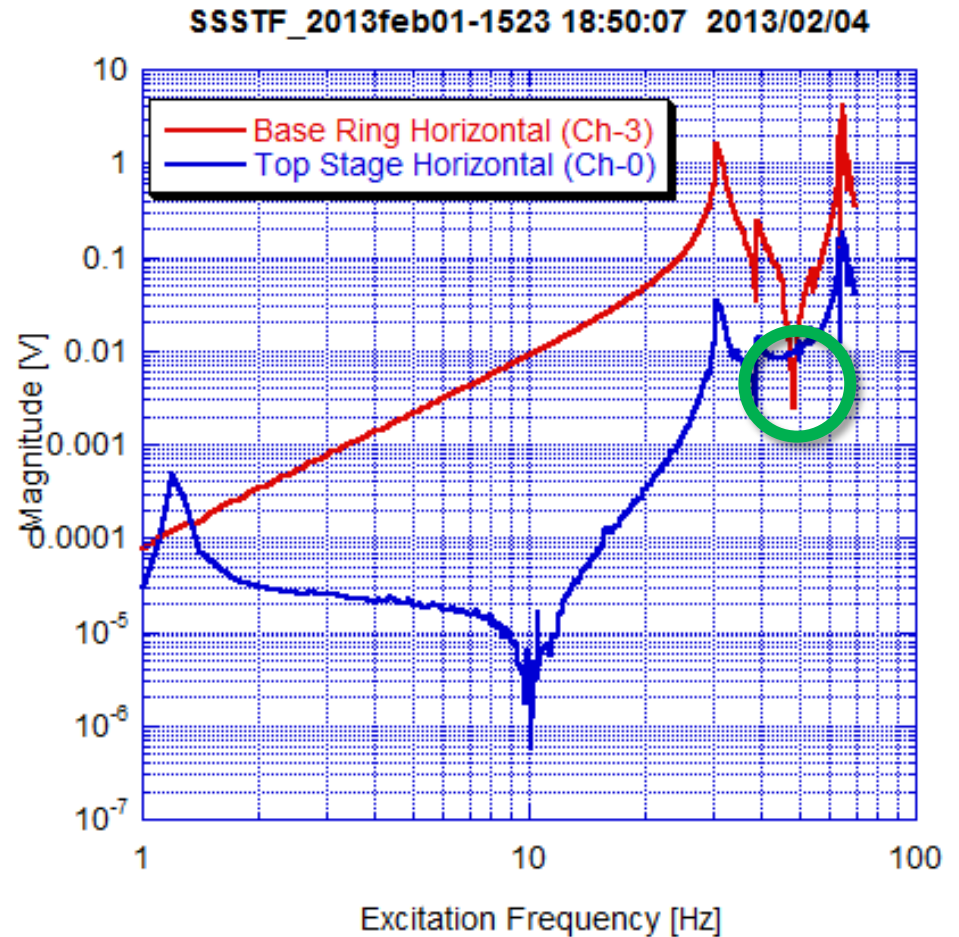
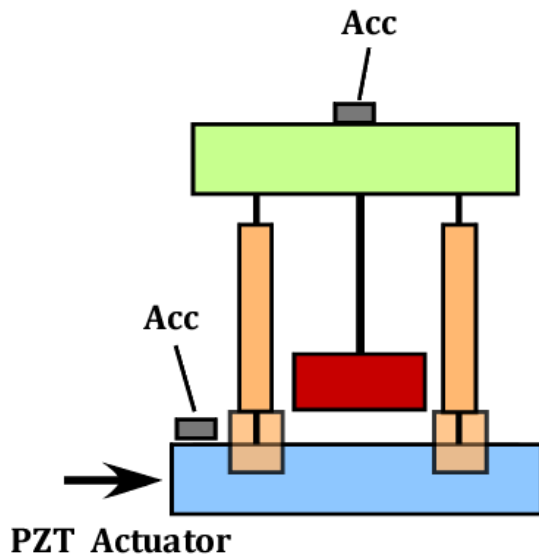
Measured IP Transfer Function (First Trial)

- 0.2 Hzが倒立振り子の共振、
1.2 Hzが振り子の寄生共振
- 10 Hz以下はモデルと一致したが、高周波で伝達関数の絶対値が上昇
- 50 Hz付近にピーク、防振比は
ほぼ1に



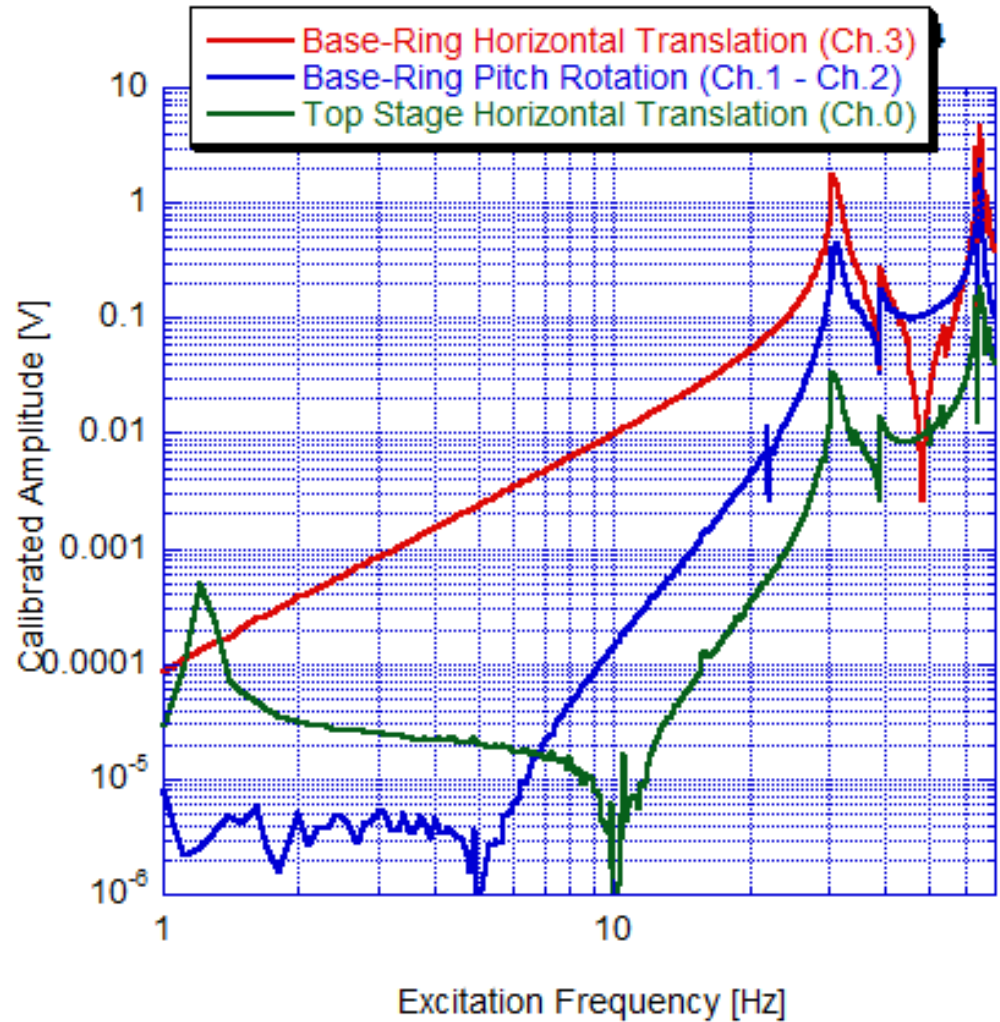
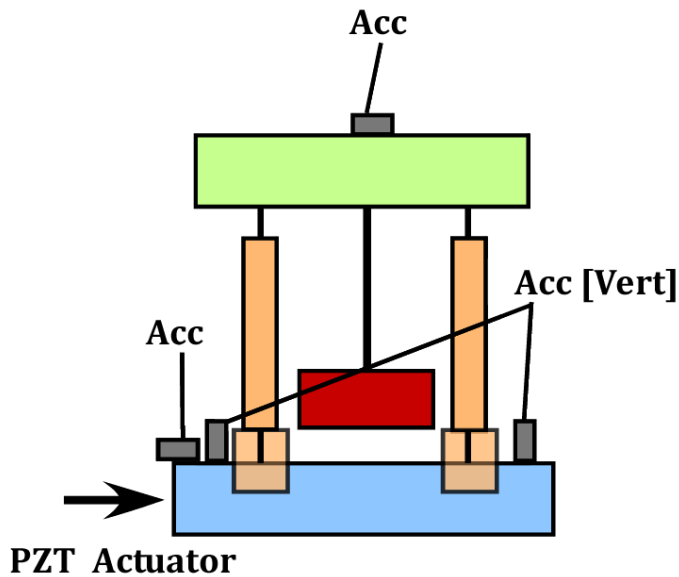
Amplitude of Accelerometer Signal

- 30 Hz: 土台のFlexureの共振
50 Hz: 土台の反共振
- 土台の反共振の影響がTop Stageのシグナルに現れていない
⇒ 他自由度カップリングの疑い



Tilt Motion of Base Ring

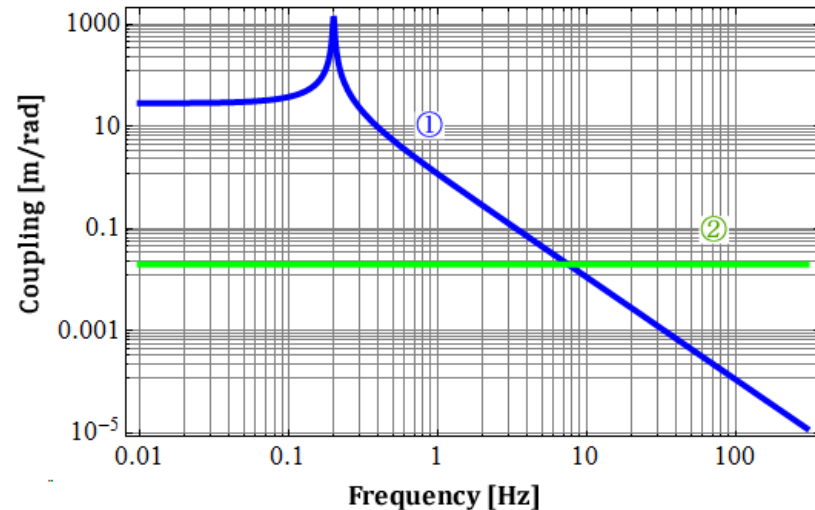
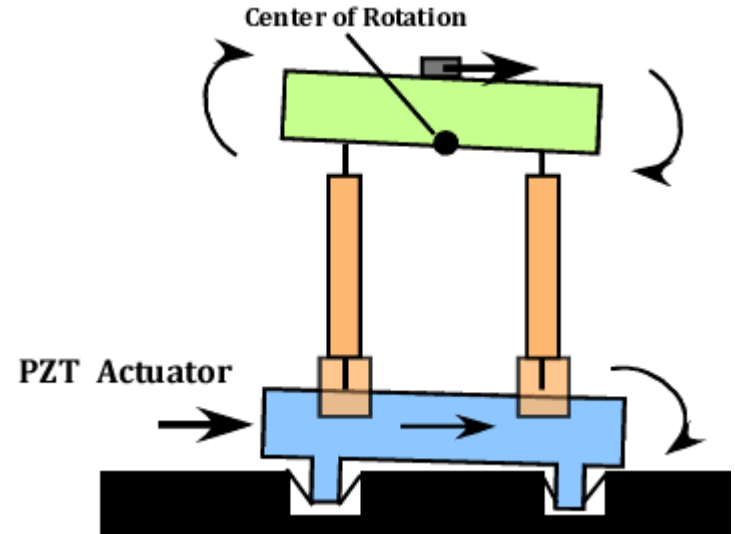
- 垂直加速度計を新たに設置し差分を取ってTiltを計測
- 高周波ではPitchとTop Stageの水平加速度計シグナルが比例



Tilt Coupling

- 土台を支えるFlexureやピエゾの加振の方向に非対称性が存在 \Rightarrow Tiltにエネルギーが分散
- IPはVerticalに非常に硬いため、土台のTiltはTop StageのTiltにそのまま伝わる
- 2種類のTilt Coupling

- ① 土台の傾きによりTop Stageが水平に揺れる効果
- ② 回転中心が加速度計の設置位置と異なるため Tiltがそのまま出力



Tilt Coupling

正しい伝達関数を測るための解決策

- ① Tiltをなるべく抑えるような揺らし方
- ② Topの加速度計の位置を回転中心に近づける

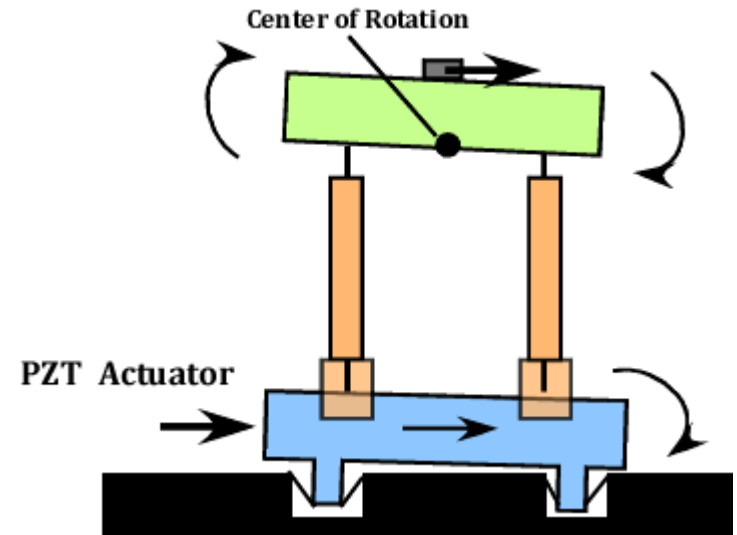
①にまつわる試行錯誤

- ・アクチュエーション点を変える
- ・Bottom Ringの質量分布を変える
- ・グリースの上を滑らせる

⇒色々試したが全部ダメだった

※ Caltechで測定された時にはオイルを循環させその上を滑らせていたが、クリーン環境では使えない

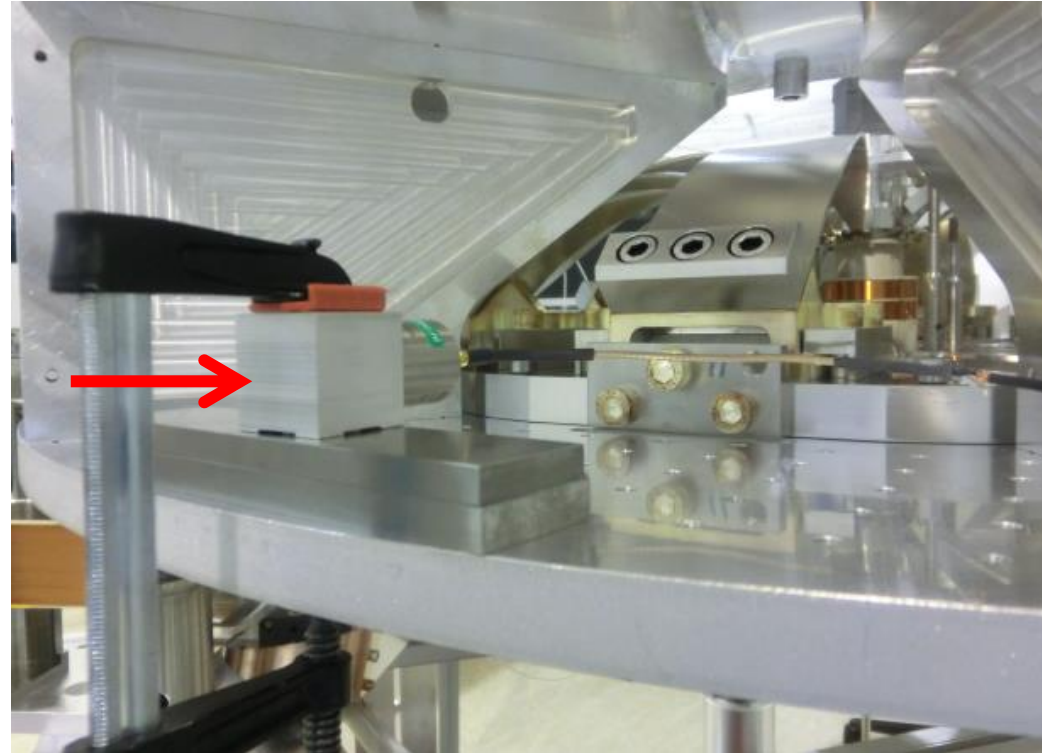
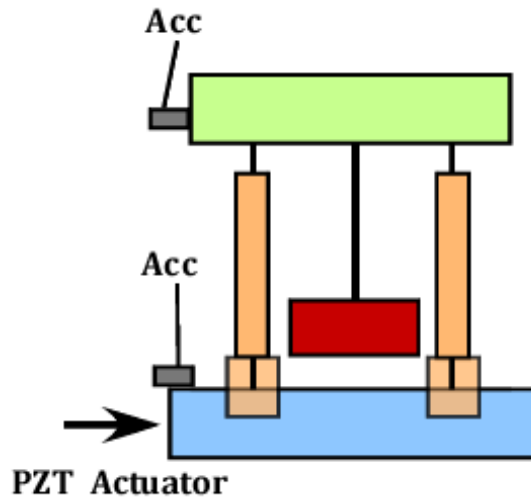
では②はどうか・・・？



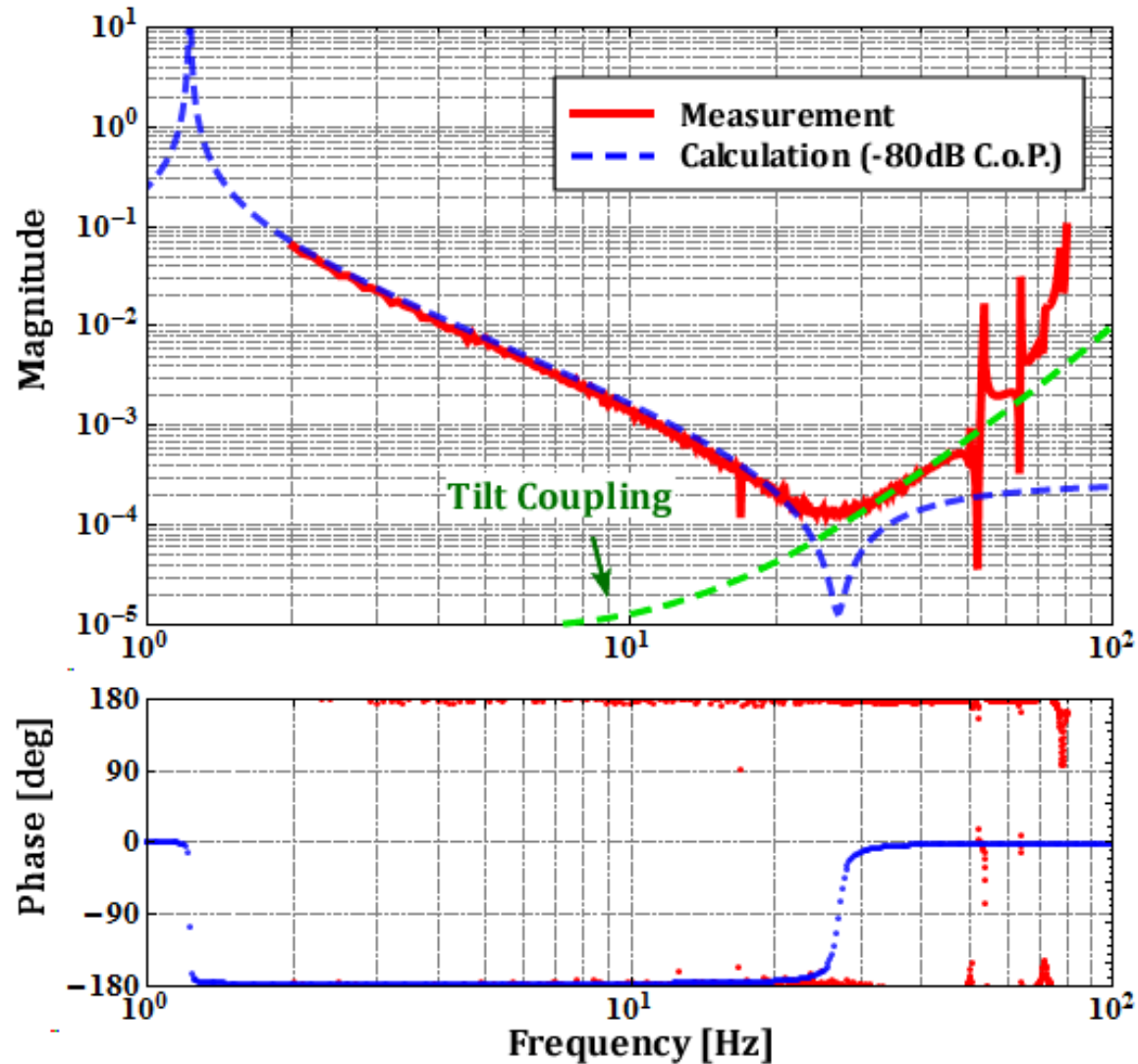
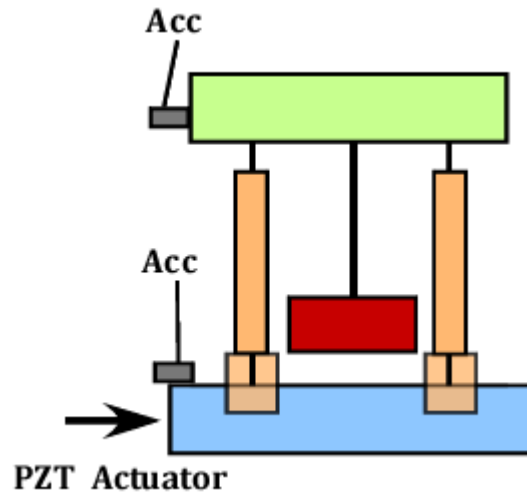
Finding Sweet Spot

水平加速度計の高さをmm単位で調整

Sweet Spot (回転中心)を発見！
カップリングが1/100以下に減少！

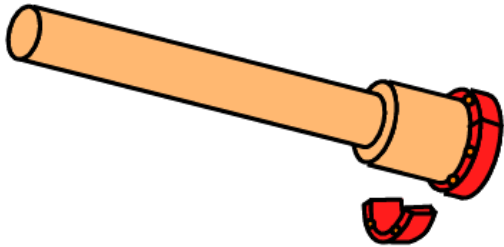


IP Transfer Function (w/ Sweet Spot Acc.)

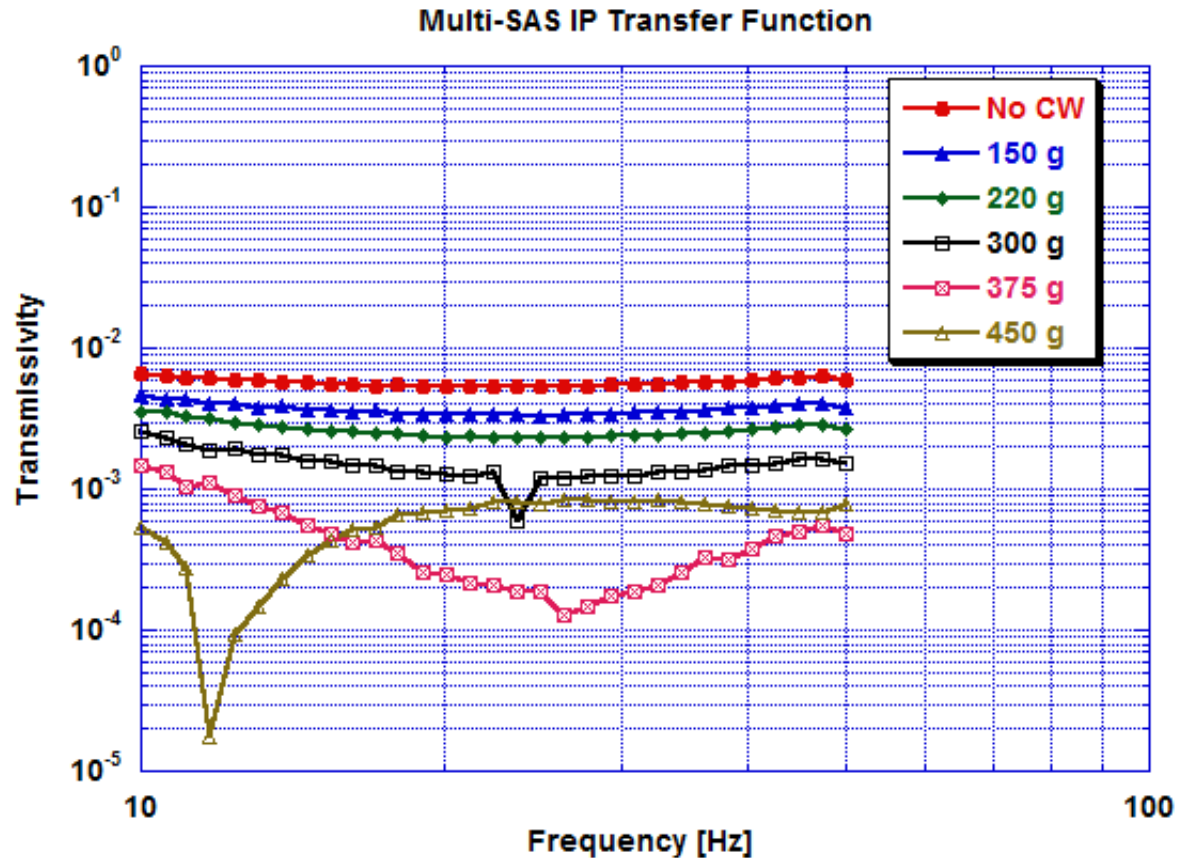


- 25 Hzで-80 dBの防振比を確認
- 30 Hz以上は未だTilt Couplingに埋もれる

IP Counterweight Tuning

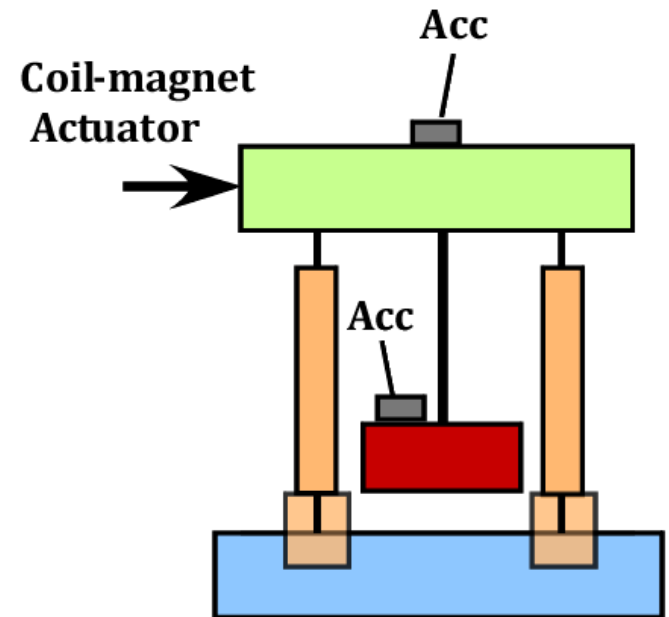


- カウンターウェイトの重さを変化させて伝達関数測定
- CW無しでは-45 dBで防振比がサチるが、-80 dB程度まで下がるよう調整できた

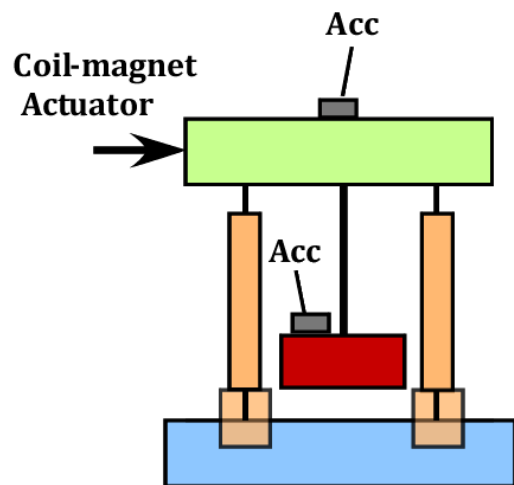


Transfer Function of Payload

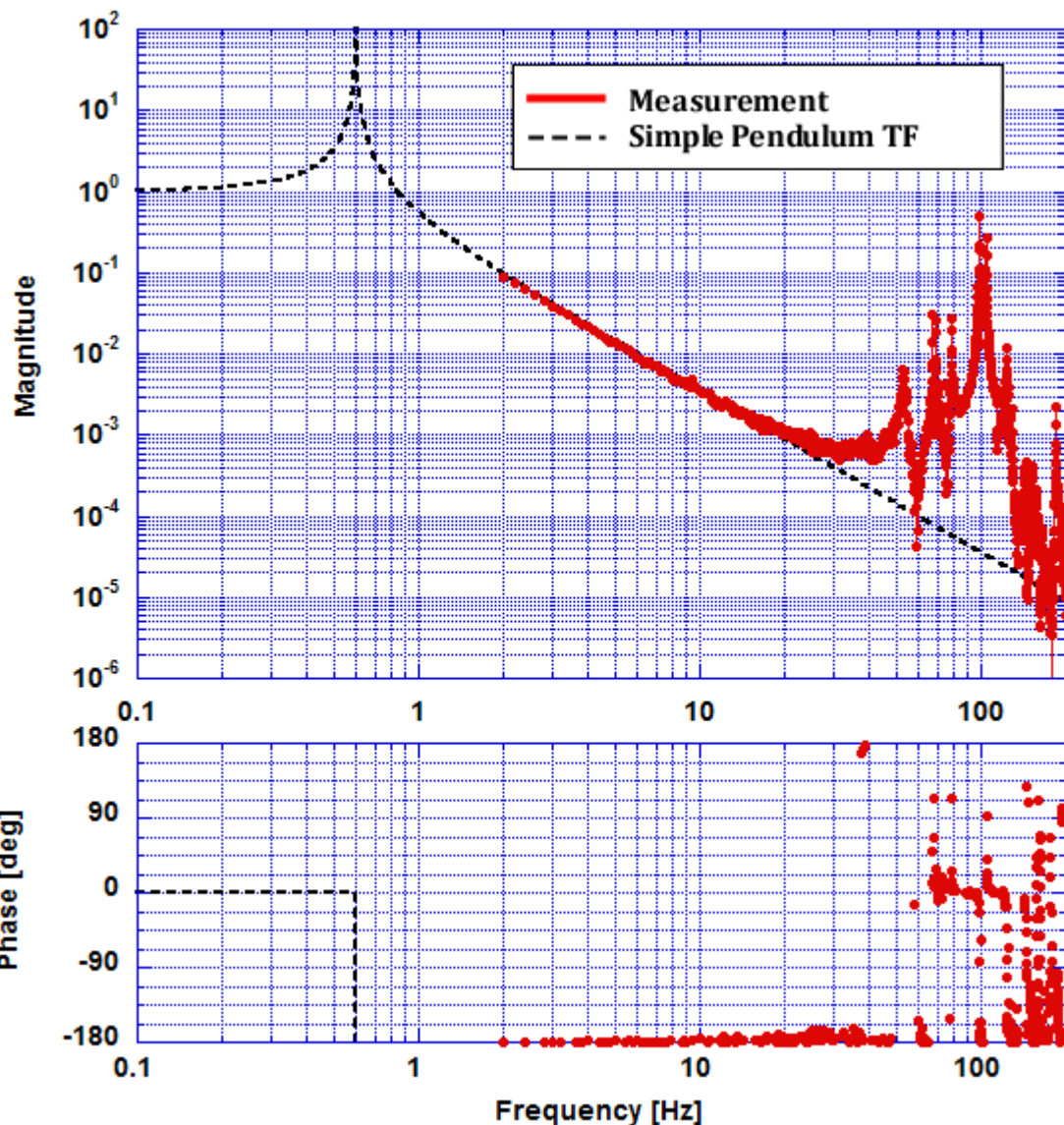
- 単振り子の伝達関数測定
- 高周波における弾性モードの影響を調査



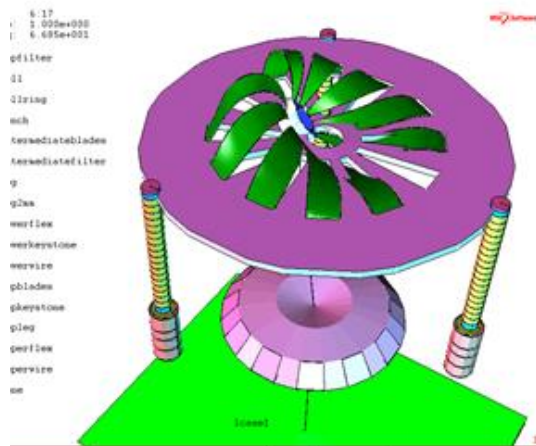
Payload Transfer Function



- 50 Hz以上は弾性体モードにより防振性能が大幅に悪化
- 特に100 Hz付近のピークが大きく、伝達関数はほぼ1



Identification of Resonances



Keystone coupled mode
(70 Hz)

Keystone
tilt mode

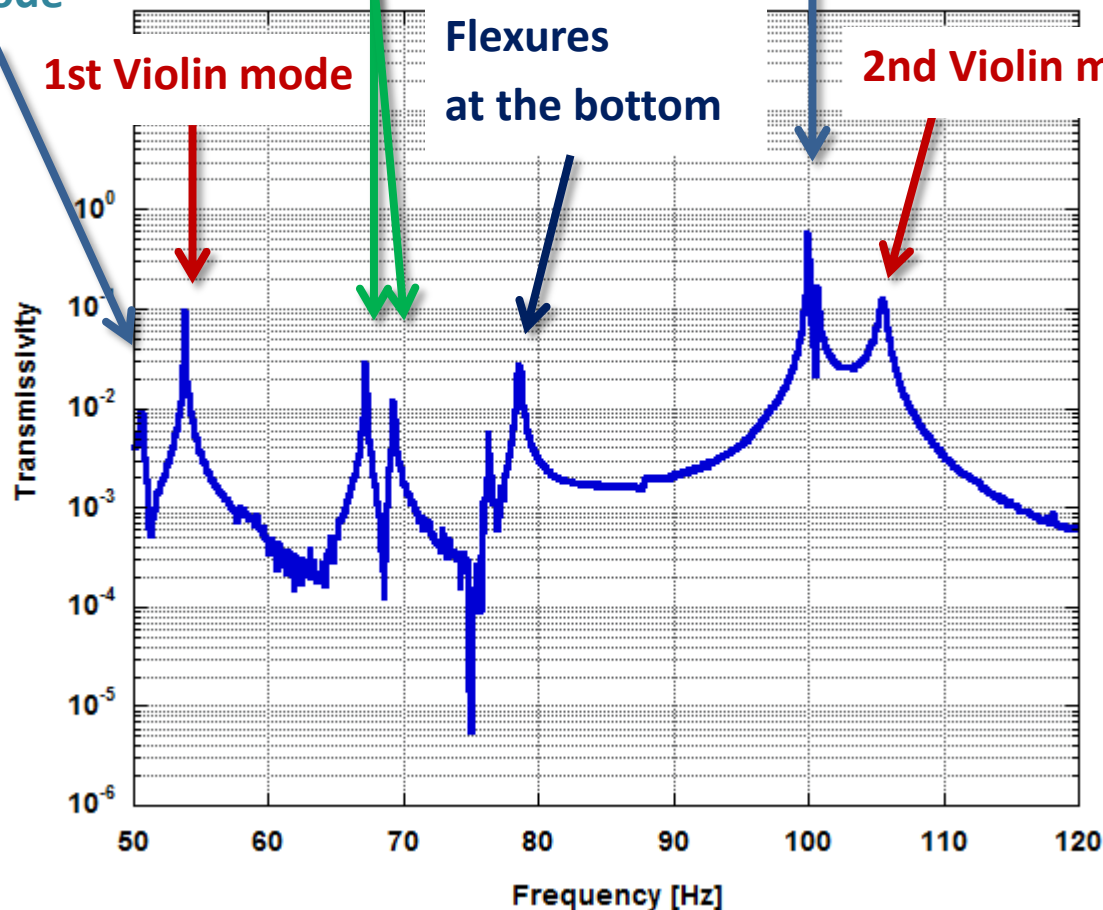
Payload Resonances

Keystone mode

1st Violin mode

Flexures
at the bottom

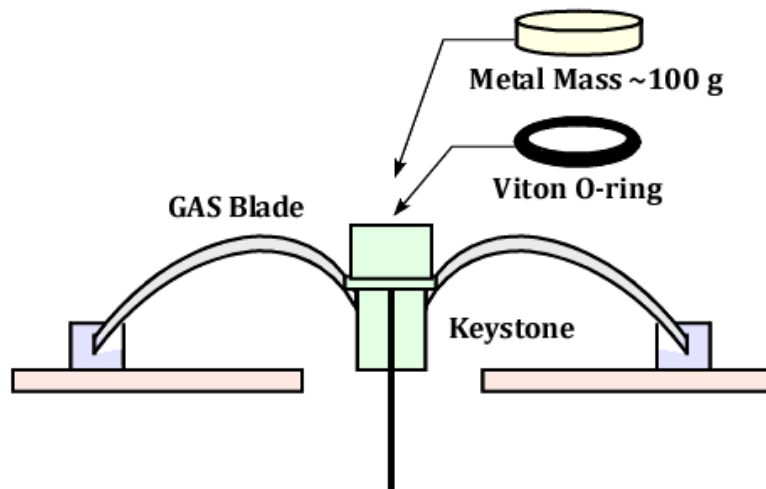
2nd Violin mode



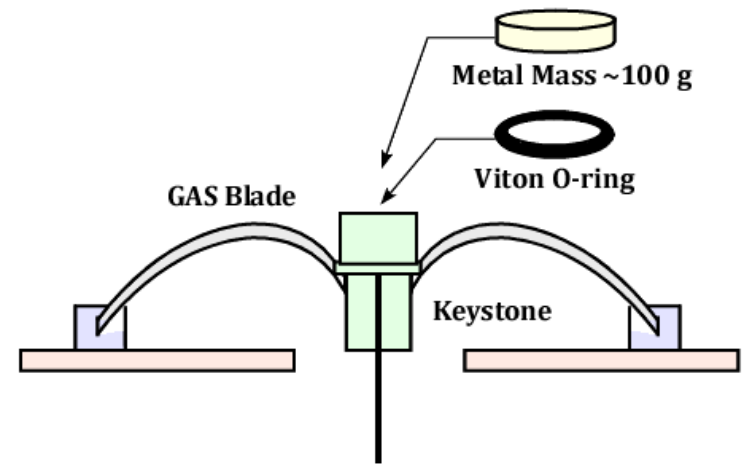
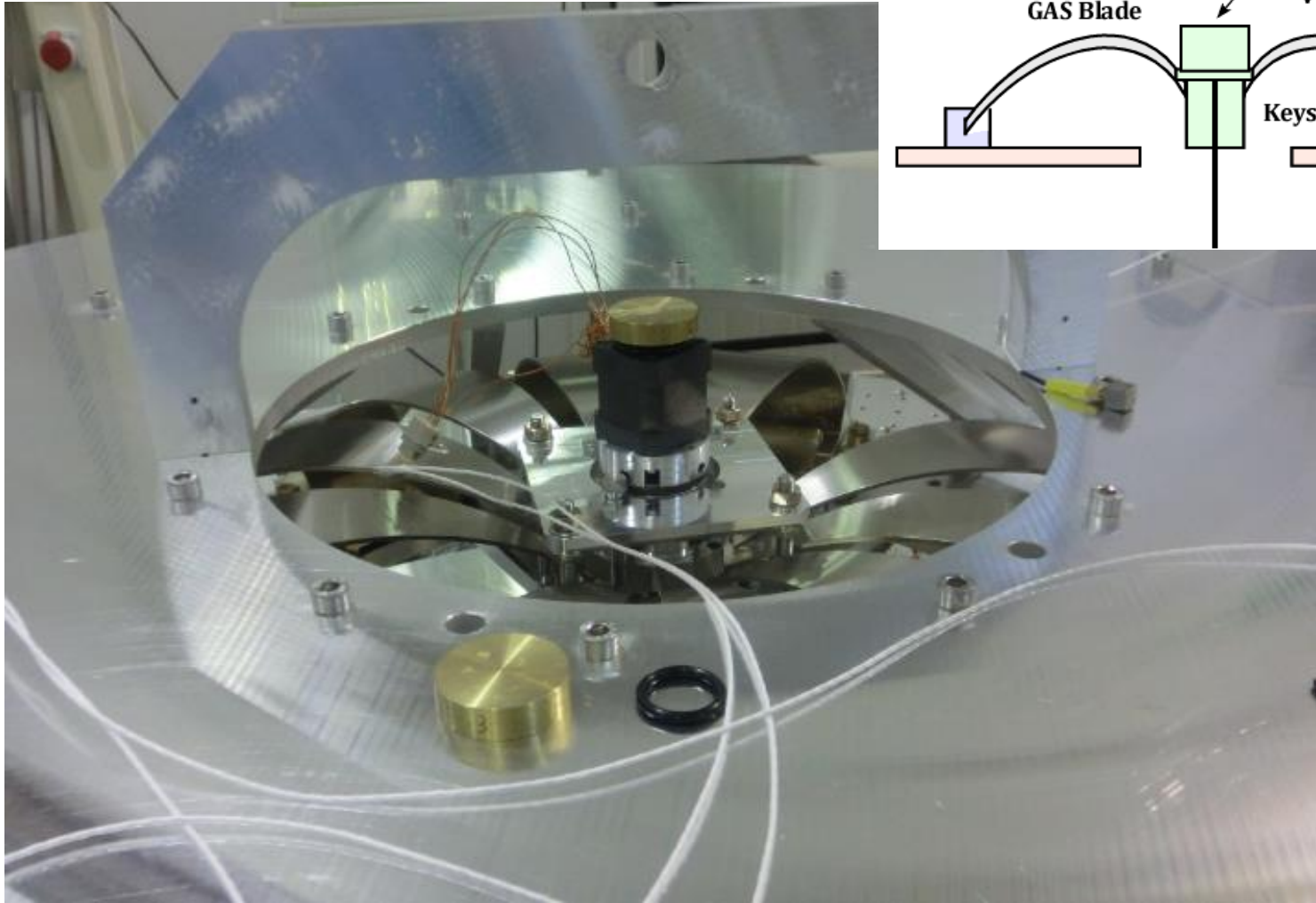
- ワイヤー (Φ6.2 mm)およびGAS フィルターの共振が主に見えている

Mechanical Damper on the Keystone

- 100 Hz付近の共振をダンプしたい
- 問題となるのはGASフィルターの中央部 (Keystone)まわりの共振
- Keystoneに振動を吸収するダンパーを設置することで効率的にダンプできる

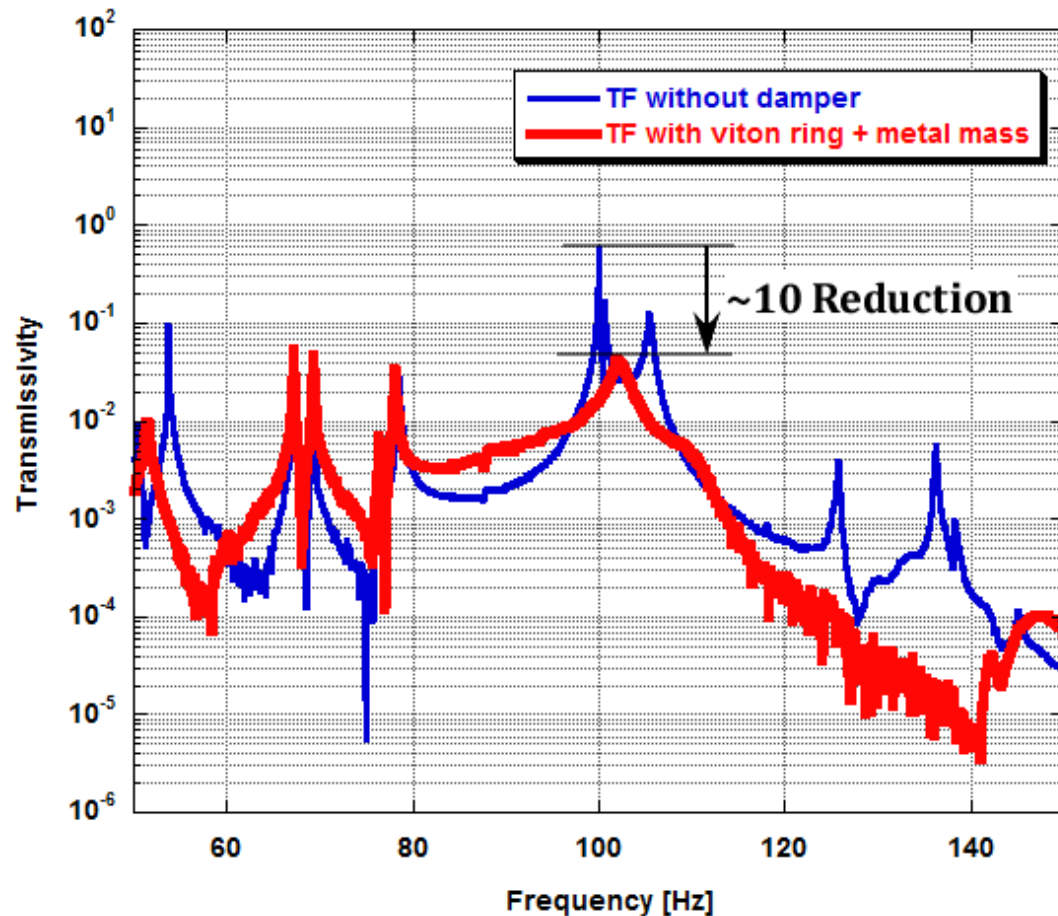
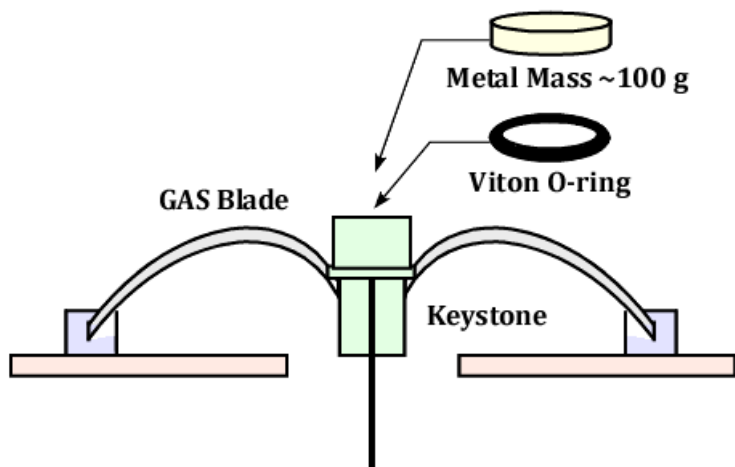


Temporary Damper

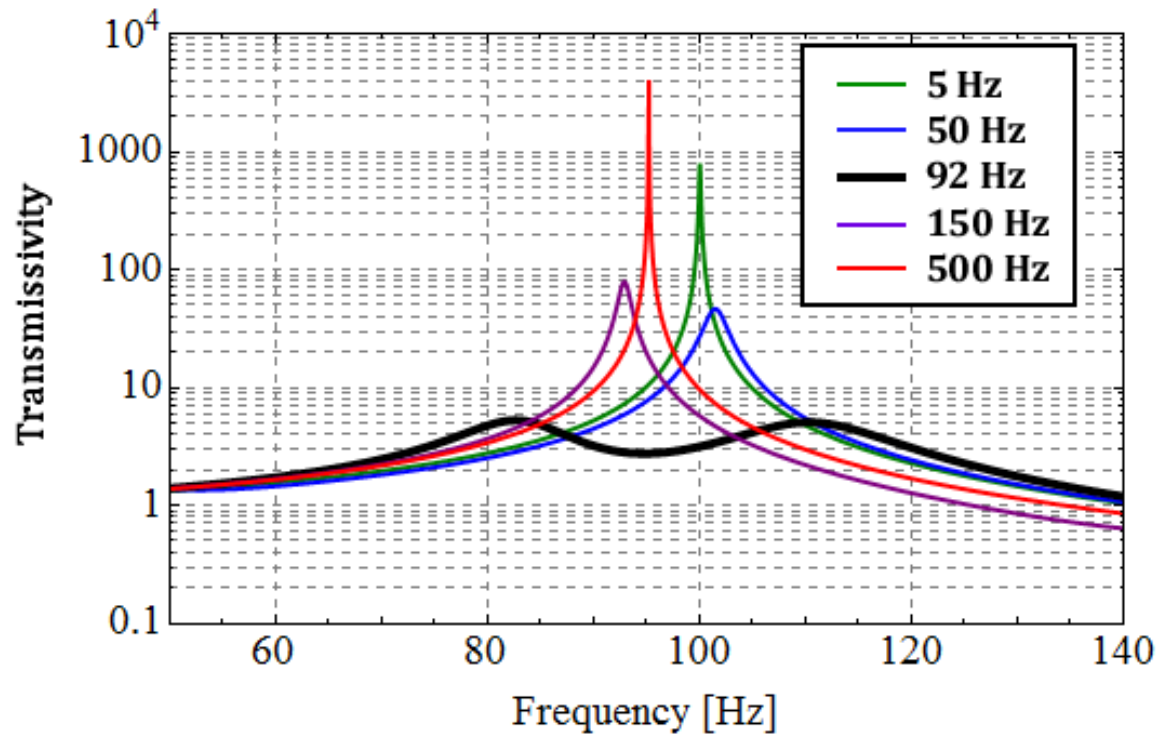
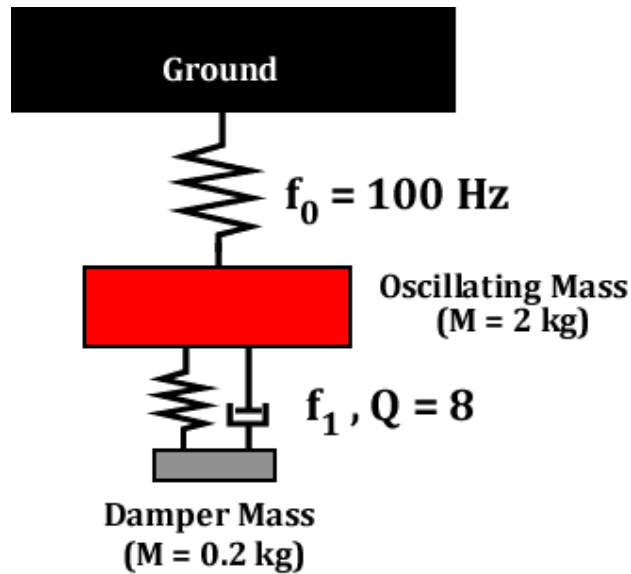


Mechanical Damper on the Keystone

- 100 Hz付近の共振がダンプされ、さらに高周波のピークも改善



Mechanical Damper Theory



- Damperの共振周波数がダンプしたい周波数に近いと効率的にダンプされる
- 今回はたまたまDamperの共振周波数が $\sim 130 \text{ Hz}$ とKeystoneの共振と近かった

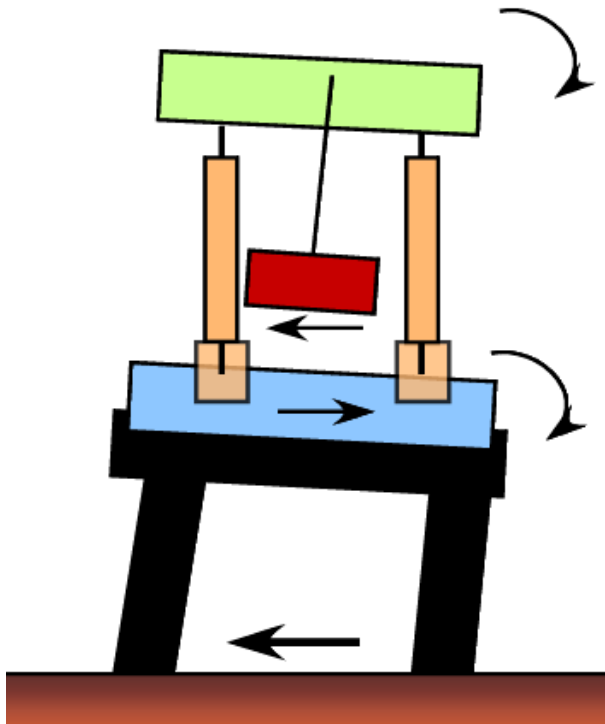
Contents

1. Brief Introduction of Nikhef
2. Suspended Benches for Advanced Virgo
3. Transfer Function Measurement [Multi-SAS]
4. **Summary and Other Topics**

Study from Multi-SAS TF Measurement

- IPの伝達関数測定はTiltカップリングとの戦い

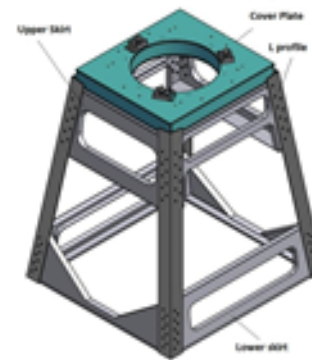
高周波のTilt雑音は直接Top Stageに伝わり防振比を悪化させる
⇒ 倒立振り子を支える土台がロバストでない場合問題



KAGRAの場合:

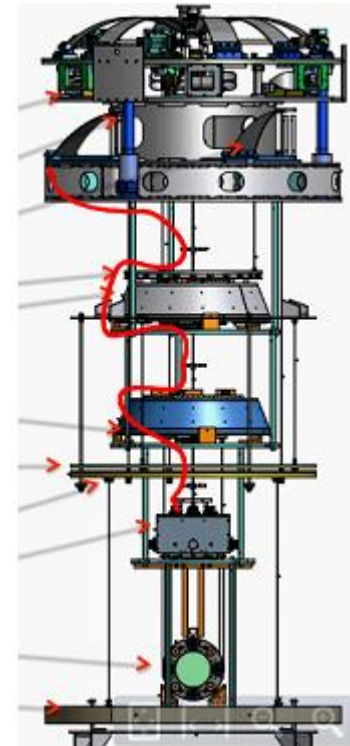
Type-A は地面に直接固定のため問題ない

Type-B においてOuter Frameの剛性が重要



Study from Multi-SAS TF Measurement

- 振り子の高周波の防振性能が、ワイヤーのバイオリンモード、GASフィルターの共振によって大きく低下する
- 対策：
 - Keystoneにメカニカルダンパーを設置
 - ワイヤーにダンパーを設置
(電気ケーブルがその役割を果たすか?)



Summary

- Advanced Virgoで光学ベンチを懸架するのに用いられるMulti-SASの防振性能を評価した
- 50 Hz以上で質点モデルや剛体モデルからのずれが観測され、それらの単純なモデルよりも防振比が悪くなるという結果を得た
- 倒立振り子は傾きに対して感度を持ち、高周波での防振性能に大きな影響を及ぼすことがわかった
- 高周波の機械共振は適切な箇所にダンパーを配置することで受動的にダンピングできることがわかった

Other Topics

Geophone Noise Measurement on EIB-SAS

Noise Measurement of Geophone

- KAGRA-SAS, EIB-SAS, Multi-SAS, LIGO active isolation system など様々な防振系で利用されるGeophone の雑音レベル測定を、EIB-SASを用いて試みた



geophone

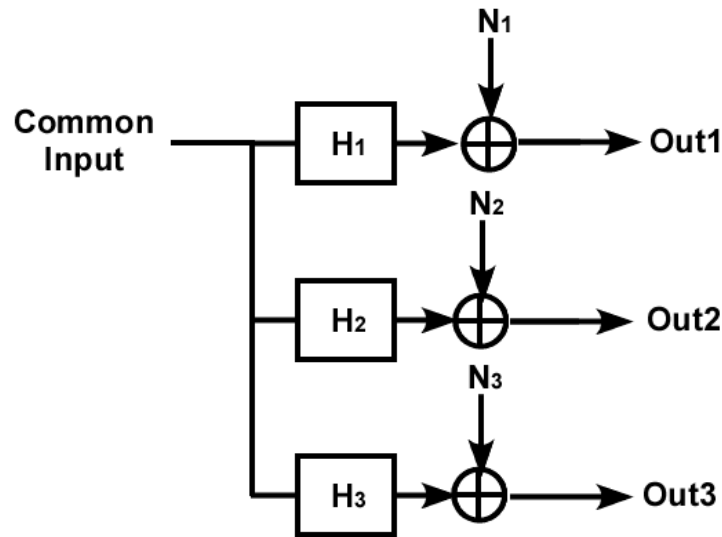
乗せて測る



EIB-SAS

Noise Measurement of Geophone

- 雑音解析の方法: 3チャンネル相関法



$$N_i = P_i - C_{ji} \frac{C_{ik}}{C_{jk}}$$

N_i : Noise Power Spectrum of Ch-i

P_i : Power Spectrum of Ch-i Signal

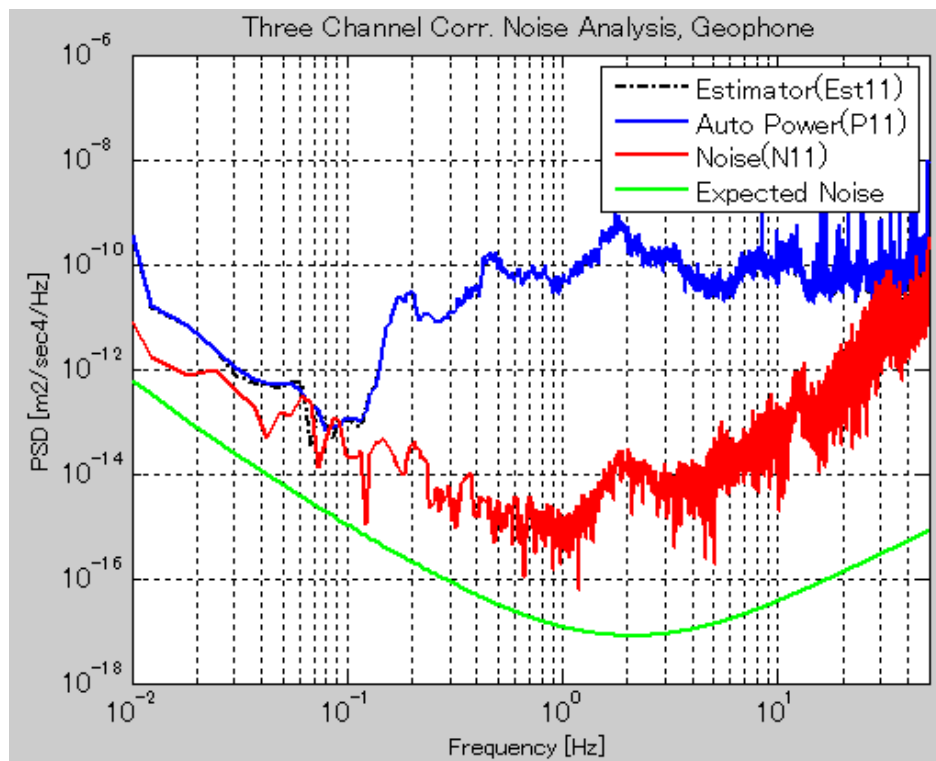
C_{ij} : Cross Spectrum between Ch-i and Ch-j

仮定: 入力信号と雑音は無相関、雑音同士は無相関

- 2チャンネル間の相関だけでは個々の雑音レベルは測れない
- 入力に対する伝達関数(H_i)を知らなくても雑音レベルを知ることができる

Noise Measurement of Geophone

- 3チャンネル相関法で測定されたGeophoneの雑音レベル(赤線)
- Geophone 3個を**実験室の地面**に置いて測定
- 入力信号(地面振動)が大きすぎて(青線)測れていない



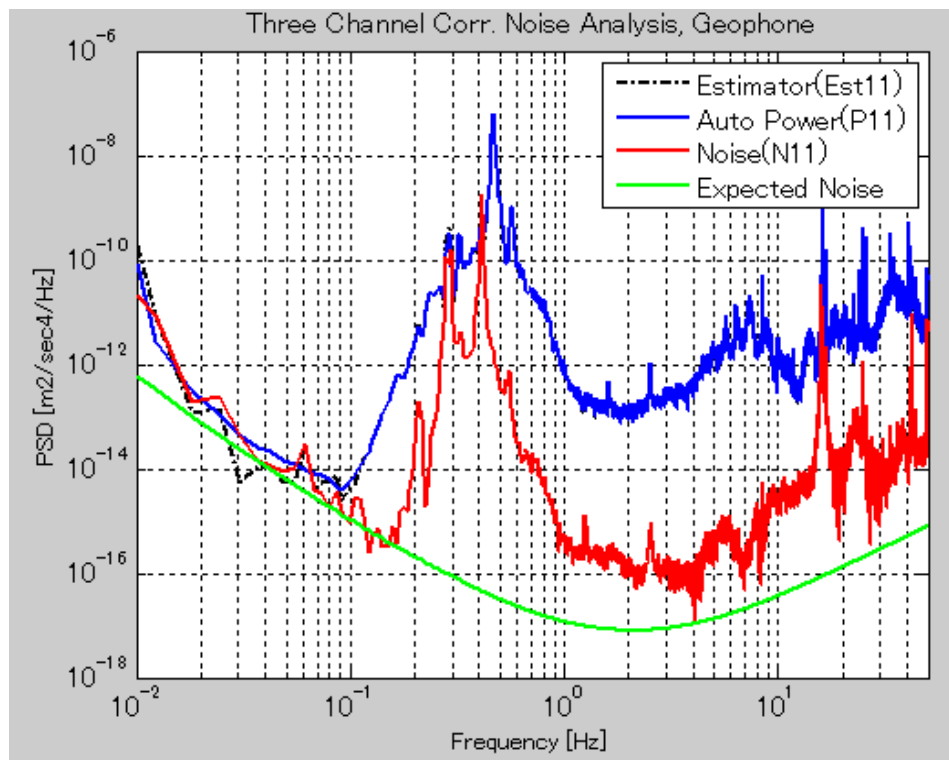
Geophone: L-22E (Sercel), Horizontal
Nikhef製のPreampを使用

OPアンプの電圧性雑音、電流性雑音、
抵抗の熱雑音、振り子の熱雑音より雑
音レベルを計算

Sampling Rate: 100 Hz,
FFT Bin: 81.92 sec
Taking ~30 average

Noise Measurement of Geophone

- Geophone 3個をEIB-SASの上に置いて測定
- 共振付近では逆に悪化、1 Hz以上は改善したがまだ計算値には届かず

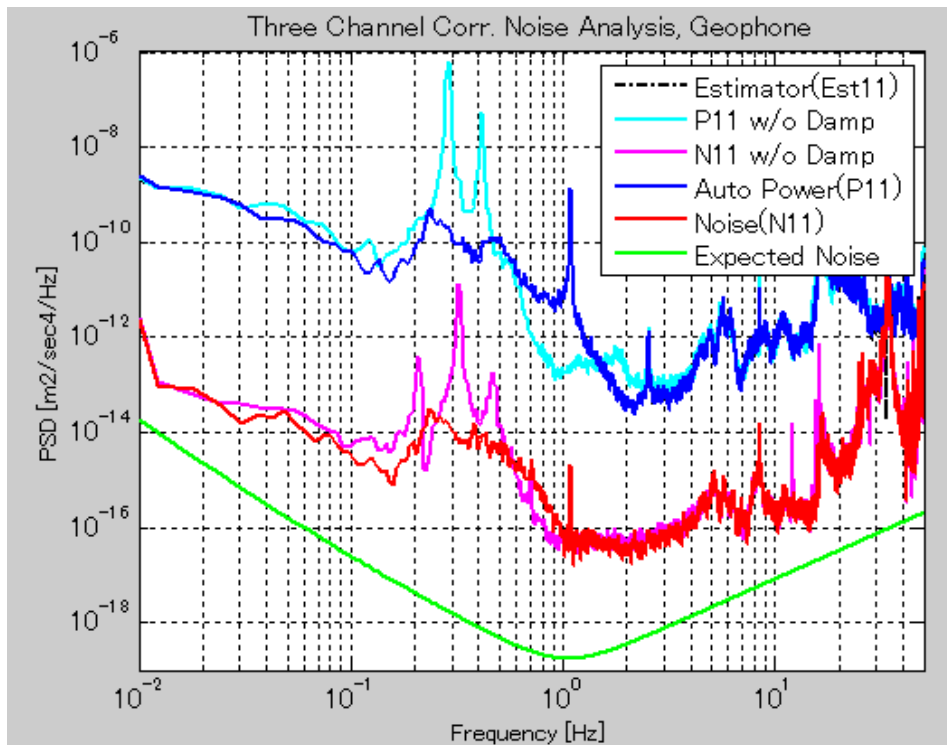


Geophone: L-22E (Sercel), Vertical
Nikhef製のPreampを使用

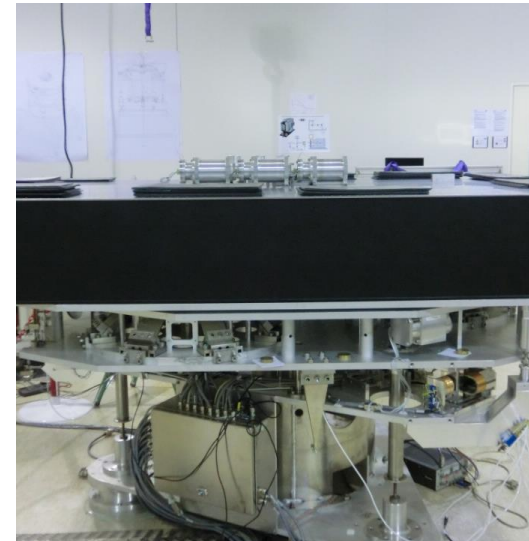


Noise Measurement of Geophone

- 感度の良いL-4C Geophoneで同様の測定
- 能動制御で共振をダンプしたがあまり改善せず



Geophone: L-4C (Sercel), Horizontal
Nikhef製のPreampを使用



Noise Measurement of Geophone

- うまく測れなかった原因：
 - EIB-SAS上の測定で1 Hz付近は1桁改善したが、まだ地面振動が大きすぎる
 - 水平Geophoneの場合、Tiltからのカップリングの影響が低周波で大きい
 - 3チャンネル相関法ではCommon Inputは一つを仮定しているため、他自由度からのカップリングがあるとその成分はうまく除去できない

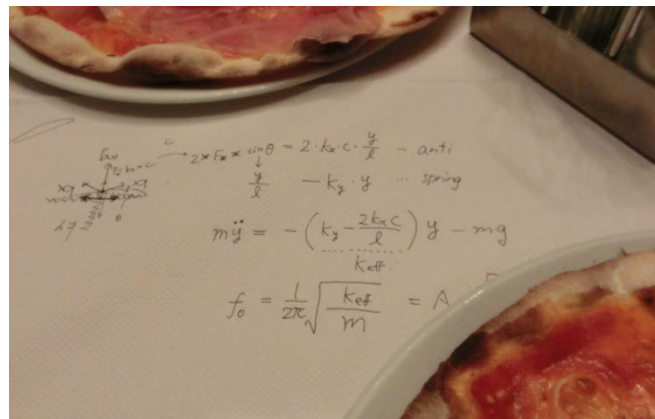
- 結論：

—神岡の地面で測ろう

Q-Factor Measurement of Top GAS Filter

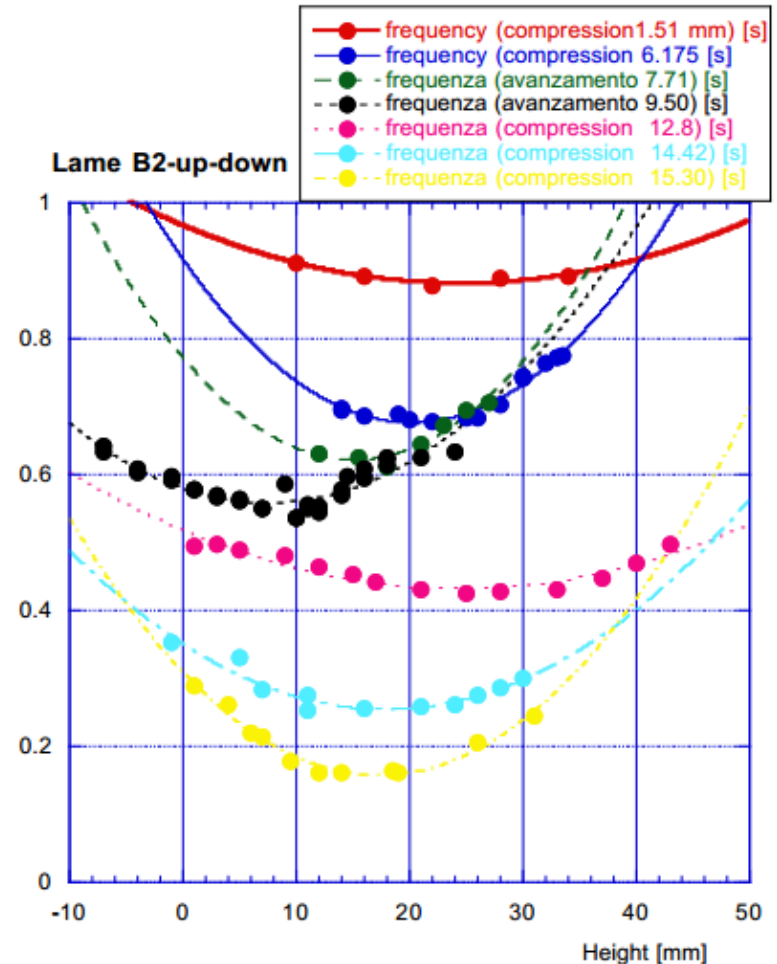
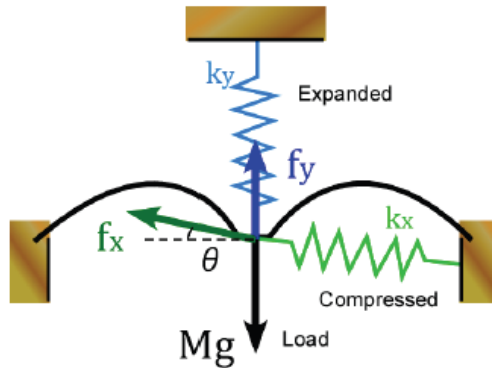
Visiting Italy

- KAGRA用防振系のアセンブリを行っているG&Mを1週間訪問(1/23-30)
- Top GAS Filterのチューニングを手伝う
- ピサ郊外のVirgoサイトの見学も行った



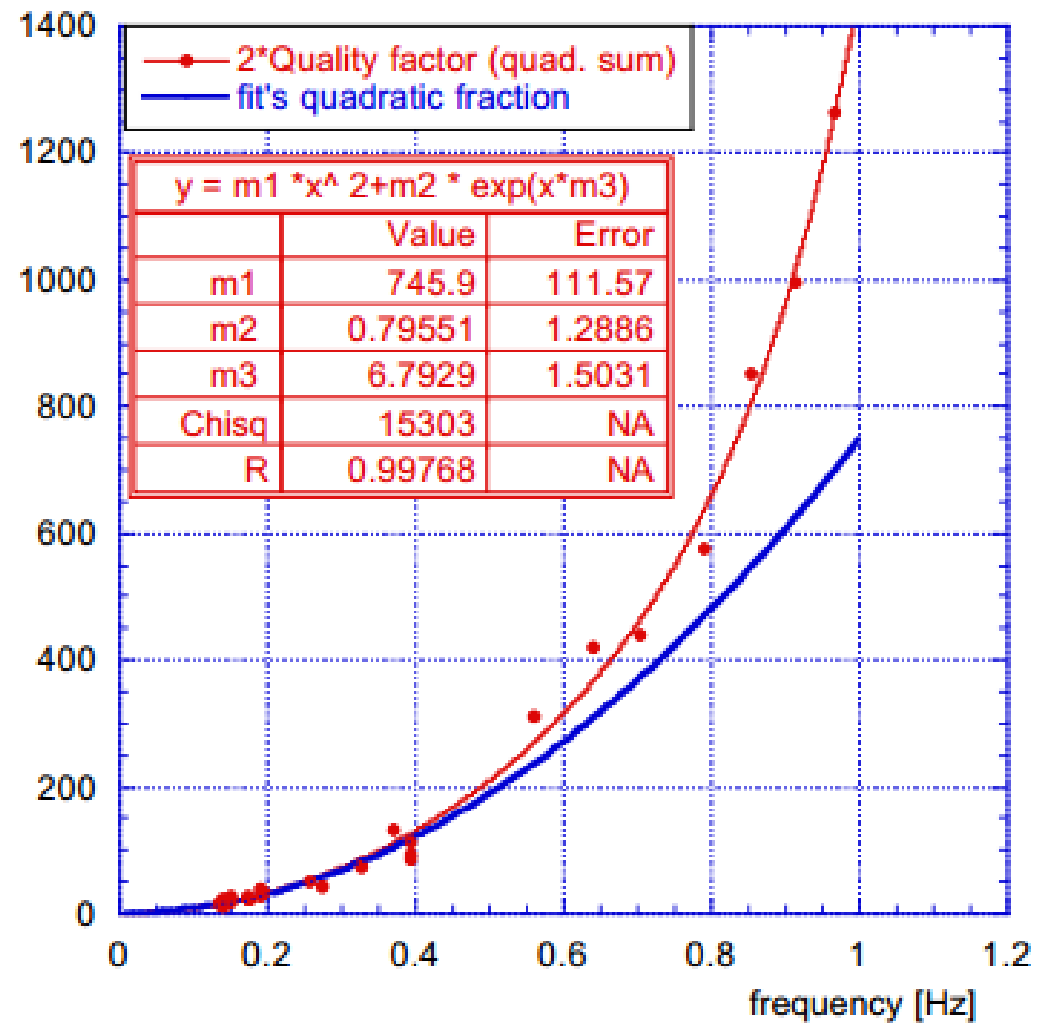
Top Filter Tuning

- KAGRA防振系の最上段で使われるTop Filterをチューニング
- 0.15 Hz程度まで追い込むことに成功(それ以下では不安定性が増す)



Q-Factor Measurement

- 各共振周波数におけるQ値を測定
- Structure dampingで予想される f^2 プロットからずれた結果が得られた

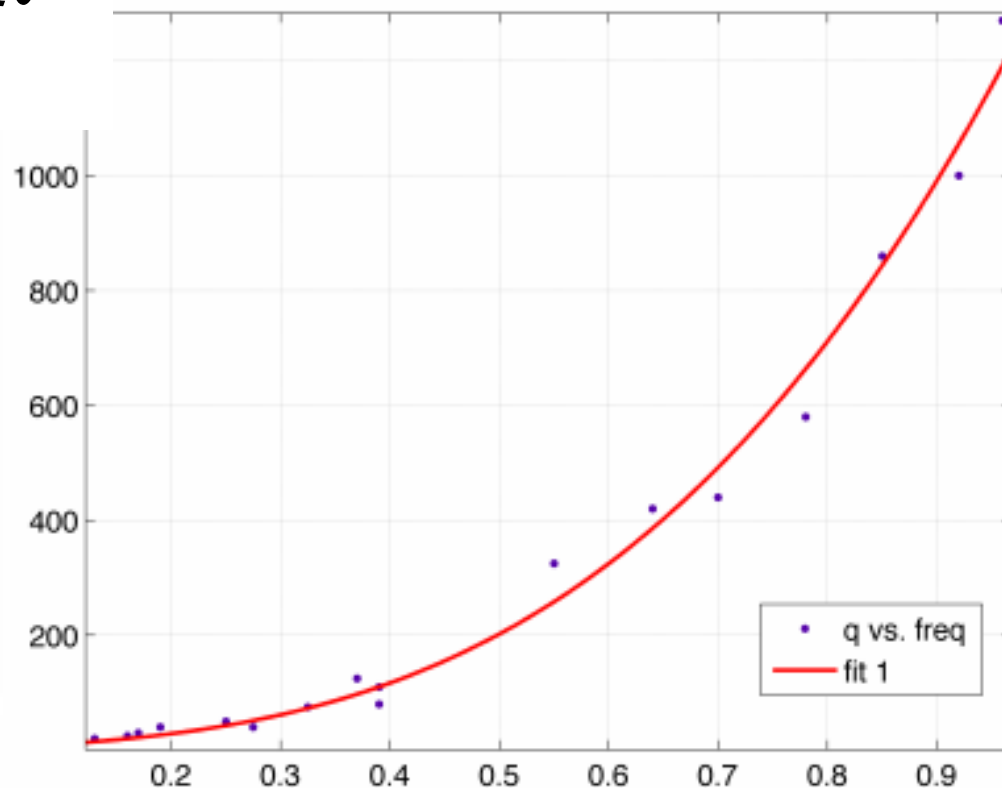
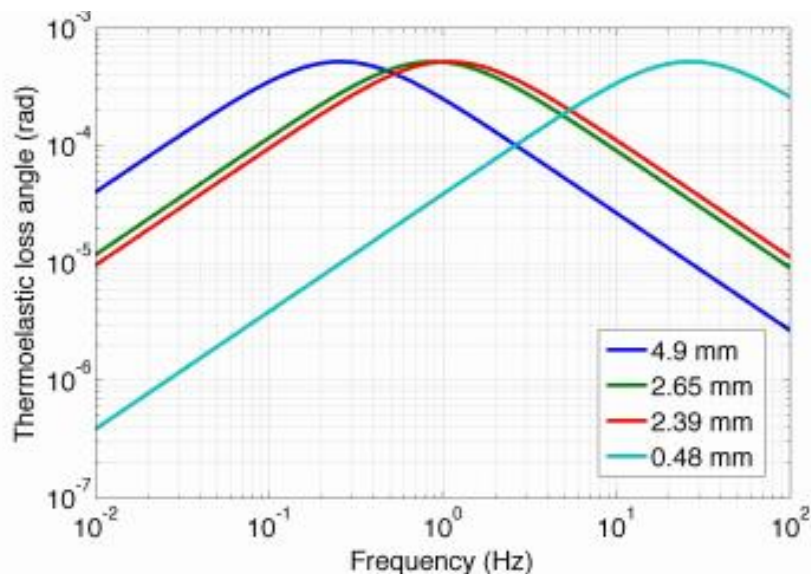


Q-Factor Measurement --- Interpretation

ブレードが大きいためにThermoelastic dampingのピークが低周波(~0.1 Hz)に移動

$$Q_{ted} = \frac{\omega + \omega^3 \tau^2}{\omega_e^2 T \Delta}$$

Thermoelastic dampingでQが制限されると仮定すると理論と実験がほぼ一致



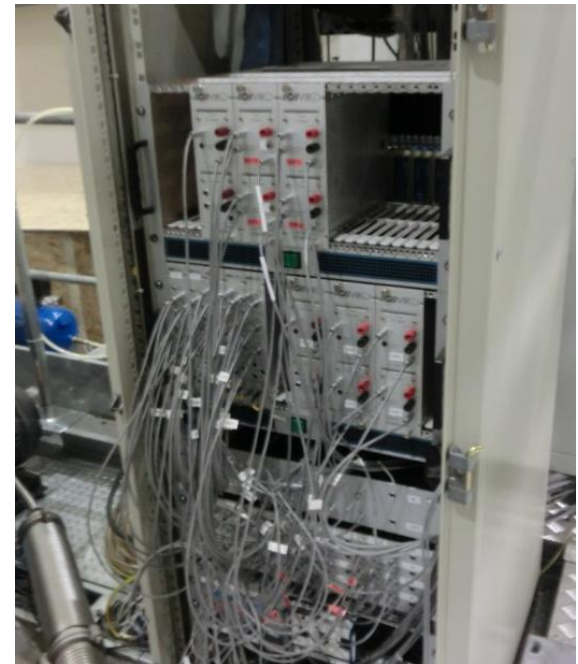
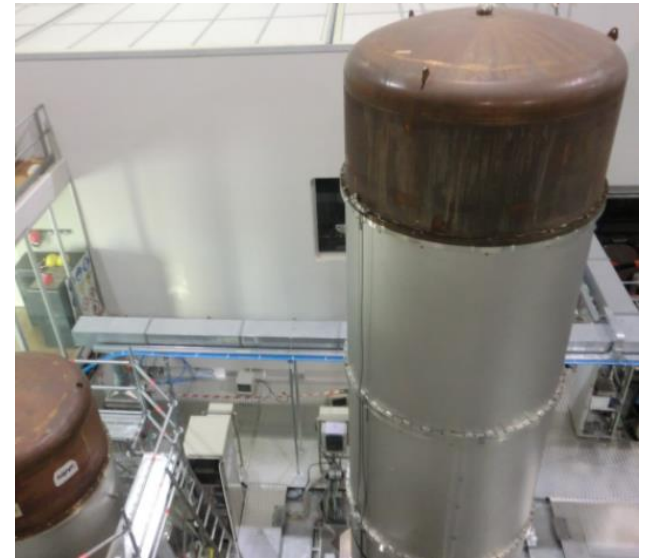
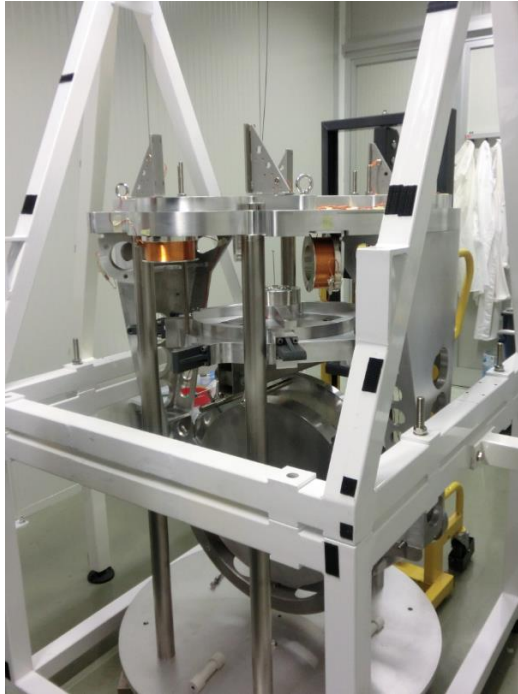
Virgo Site Visit

Broken Maraging Spring

- 破断したマレージング鉄のブレード
- 高湿度環境に長時間保管したことが原因とみられる



Photos





SUMO
JAPANESE, SUSHI & GRILL RESTAURANT

