

# 修士論文

## 振り子を用いた広帯域傾斜計の開発と TAMA300用懸架システムの研究

理学系研究科物理学専攻 66093

高森 昭光

1998年1月

# 目次

第 1 章 はじめに	1
第 2 章 レーザー干渉計型重力波検出器	3
2.1 重力波	3
2.1.1 重力波の導出	3
2.1.2 重力波源	4
2.2 レーザー干渉計による重力波の検出	5
2.2.1 マイケルソン干渉計の応答	5
2.2.2 干渉計の種類	6
2.2.3 世界の研究動向	8
2.3 TAMA300	8
2.3.1 全体のデザイン	8
2.3.2 目的と目標感度	9
2.3.3 TAMA300 の特徴	10
第 3 章 懸架システムとモデル計算	13
3.1 地面振動と TAMA300 における防振の必要性	13
3.2 懸架システムの力学—質点モデル	15
3.2.1 理想的な単振り子の防振比	15
3.2.2 防振比の記述とカップリング	17
3.2.3 RMS 振幅	18
3.2.4 ダンピングの加わった場合と Q 値の定義	18
3.2.5 フレキシブルダンピングと多自由度系の運動の記述	22
3.2.6 熱雑音	25
3.3 TAMA300 の懸架システム	26
3.3.1 2 段振り子状懸架システム	26
3.3.2 並進防振特性に関わる各種パラメータの最適化	27
3.3.3 懸架システム試作機	30
3.4 懸架システムの回転運動—剛体モデル	32
3.4.1 懸架システムの回転と干渉計	32
3.4.2 回転の許容値と回転を扱う力学モデル	35

3.4.3	回転に関するパラメータ	37
3.4.4	防振特性の評価	40
3.4.5	懸架システムの非対称性と Pitch モード	48
3.5	モデル計算に関する結論	54
<b>第 4 章</b>	<b>懸架システムの回転に関する実験</b>	<b>57</b>
4.1	はじめに	57
4.1.1	実験の目的	57
4.1.2	実験の種類と方法	58
4.2	懸架システムの加振実験	59
4.2.1	実験のセットアップ	59
4.2.2	回転加振による剛体モデルの検証	66
4.2.3	並進加振によるカップリングの測定	69
4.2.4	コイル-マグネットアクチュエータによる Pitch モード加振	76
4.3	懸架システムの静置実験	78
4.3.1	実験の意義	78
4.3.2	実験のセットアップ	78
4.3.3	測定	81
4.4	測定に関する結論	84
<b>第 5 章</b>	<b>懸架システムの改良</b>	<b>85</b>
5.1	Pitch モードの問題と原因	85
5.1.1	Pitch モードの回転の起源	85
5.1.2	スタックの回転	85
5.1.3	スタックの並進振動	89
5.1.4	対策に関する考察	90
5.1.5	実験による検証	92
5.1.6	共振周波数の変更	94
<b>第 6 章</b>	<b>広帯域傾斜計の原理</b>	<b>101</b>
6.1	傾斜計開発の経緯	101
6.2	広帯域傾斜計の開発	102
6.2.1	地面ならびにスタックの傾斜に関する考察	102
6.2.2	回転検出計に関する考察	104
6.2.3	振り子を用いた傾斜計	105
6.2.4	その他の回転検出装置	109
<b>第 7 章</b>	<b>広帯域傾斜計の試作と試験</b>	<b>111</b>
7.1	広帯域傾斜計の試作	111
7.1.1	機械系の設計	111

7.1.2	並進センサー	113
7.1.3	その他の工夫	115
7.2	広帯域傾斜計の試験	116
7.2.1	実験のセットアップ	116
7.2.2	結果と考察	116
7.2.3	他の検出器との比較	117
<b>第8章 結論</b>		<b>121</b>
8.1	懸架システムに関する結論	121
8.2	広帯域傾斜計に関する結論	122

## 第1章

# はじめに

重力波は、一般相対性理論において Einstein 方程式を弱場近似の元で解いたときに得られる 4 重極放射の波動解であり、光速で伝播する時空の歪みである。重力波の存在は 1916 年に Einstein によって理論的に予言され、J.H.Taylor らの連星パルサー PSR1913+16 の公転周期変化の観測によって、その存在が間接的に証明された [1][2]。J.H.Taylor らはこの功績により 1993 年にノーベル物理学賞を受賞している [3]。しかし、重力相互作用は極めて微弱なものであるため、未だにその直接検出に成功した例はない。重力波の直接検出は、一般相対性理論の検証実験というだけでなく、現在の電磁波による天文学とは質の異なった、新しい天文学を拓く可能性を持っており、将来の発展が大いに期待される分野である。

近年のレーザー技術を始めとする様々な技術革新を受けて、長基線レーザー干渉計による直接検出計画が提案され、日本、欧米を中心にその研究開発が進められている。現在主流となっている Fabry-Perot-Michelson (FPM) レーザー干渉計では、光源からのレーザー光をビームスプリッター (BS) で直交する 2 方向に分割し、その両腕をなす 2 本の Fabry-Perot 共振器に入射する。共振器から戻る光の位相は、BS と共振器の間の固有距離に依存する。固有距離は重力波の影響を受けて変動するので、共振器から戻る光を再び BS 上で結合し、その干渉縞から重力波の信号を取り出すことができる。これがレーザー干渉計型検出器の重力波検出の原理である。

日本では、1995 年度から基線長 300m の FPM レーザー干渉計型重力波検出器 (TAMA300) の建設が始まっている。1998 年から観測を開始する計画である。この計画は、将来の数 km クラスの大型レーザー干渉計のための技術の開発、検証を行なう役割を担うと同時に、実証型検出器としての役割も期待されている。要求される感度を達成するために、TAMA300 にはレーザー技術や制御、防振を始めとする様々な新技術が投入される。

中でも地面の振動から干渉計を絶縁する防振技術は、TAMA300 にとって基礎的かつ重要な技術である。地面振動には地震などの突発的なもの以外にも、常時微動と呼ばれる微小振動が存在する。干渉計型検出器では、共振器を構成する鏡の変位を重力波の信号として読みとるため、地面振動による鏡の位置変動は直接的に感度を制限する。また、光学素子の振動の程度によっては、干渉計を長時間高感度に保つこと自体が困難になってしまう。鏡などの光学素子は、それらが自由質点として振る舞うという原理的な要請を満たすために振り子状に懸架される [5]。振り子は、

それ自体が防振効果を持っているが、TAMA300では、防振スタック、超長周期X振り子と組み合わせ、さらに2段振り子状の懸架システムを用いる [6][9][8][10][12][13]。TAMA 300 グループでは、主に1995年度から1996年度にかけて懸架システムの防振特性を最適化する方向で開発を進め、実際に製作した懸架システム試作機が並進振動について十分な防振機能を有していることを実証した [16]。

本論文ではこの結果を踏まえ、懸架システムの回転自由度の防振技術開発と、それに関連した研究として、広帯域傾斜計の開発について述べる。本論文の構成は以下の通りである。

第2章では、レーザー干渉計による重力波検出について述べる。測定原理と日本で現在開発中のTAMA300検出器について概説する。

第3章では、まず、懸架システムの力学を理解するための力学的諸概念を質点モデルを用いて概説する。さらに回転自由度を取り扱う力学モデルである剛体モデルについて説明し、懸架システムの回転防振についてモデル計算によって各種の見積を行う。

第4章では、前章の計算結果を受けて実際に行った懸架システム試作機を用いた測定、実験について述べる。実験によって、懸架システム単体の回転防振特性と、TAMA300で使用する状態での実際の鏡の回転について明らかにする。

第5章では、TAMA300における測定から明らかになった、鏡の回転量が許容値を満たさないという問題に対して、実験、計算の両面から解決法について考察を行う。

第6章からは、懸架システムの回転防振に関連する研究と並行して行った広帯域傾斜計の開発について述べる。まず第6章では広帯域傾斜計の動作原理とその他の回転検出器について述べる。

第7章では広帯域傾斜計試作機の製作と、試作機を用いたTAMA300サイトのスタック振動の回転成分の測定、他の検出器との比較について述べ、考察する。

第8章は全体の結論である。

## 第2章

# レーザー干渉計型重力波検出器

本章では、重力波の性質及びレーザー干渉計を用いた重力波検出の原理について概説し、レーザー干渉計型重力波検出器の雑音について述べる。また、日本で開発が進められている基線長 300m の干渉計型検出器 TAMA300 の特徴を紹介する。

### 2.1 重力波

#### 2.1.1 重力波の導出

ここでは、一般相対論の Einstein 方程式を線形化して重力波を導出する過程について述べる [4]。一般相対論では時空の 2 点間 ( $x^\mu \sim x^\mu + dx^\mu$ ) の固有距離は、

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \quad (2.1)$$

と表される。ここに  $\mu, \nu$  は 1 から 4 までの値をとり、 $x^\mu = (-ct, x, y, z)$  である。 $c$  は光速を表す。 $g_{\mu\nu}$  は時空の性質を表す計量テンソルの成分である。計量テンソルは、Einstein 方程式、

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (2.2)$$

に従う。 $G$  は万有重力定数である。また、 $T_{\mu\nu}, R_{\mu\nu}, R$  はそれぞれ、エネルギー-運動量テンソル、リッチテンソル、リッチスカラーと呼ばれ、以下のように関連付けられている。

$$R_{\mu\nu} = \frac{\partial\Gamma_{\mu\nu}^\rho}{\partial x^\rho} - \frac{\partial\Gamma_{\mu\rho}^\rho}{\partial x^\nu} + \Gamma_{\mu\nu}^\rho\Gamma_{\rho\sigma}^\sigma - \Gamma_{\mu\rho}^\sigma\Gamma_{\nu\sigma}^\rho \quad (2.3)$$

$$R = g^{\mu\nu}R_{\mu\nu} \quad (2.4)$$

$$\Gamma_{\rho\sigma}^\mu = g^{\mu\nu} \left( \frac{\partial g_{\sigma\nu}}{\partial x^\rho} + \frac{\partial g_{\rho\nu}}{\partial x^\sigma} - \frac{\partial g_{\rho\sigma}}{\partial x^\nu} \right) \text{ (Christoffel Symbol)} \quad (2.5)$$

真空中では  $T_{\mu\nu} = 0$  であるから、式 (2.2) は、

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 0 \quad (2.6)$$

と書き直せる。一般相対論は特殊相対論を包括するので、平坦な時空を表す Minkowski 計量、

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

は式(2.6)の解になっている。ここで、Minkowski計量に摂動項  $h_{\mu\nu}$  を加えてみる。つまり、 $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$  で表される時空が式(2.6)を満たすときの  $h_{\mu\nu}$  の性質を求める。このとき、 $h_{\mu\nu}$  の1次まで残すと、式(2.6)は、

$$\frac{\partial}{\partial x^\nu} \frac{\partial h_\mu^\rho}{\partial x^\rho} + \frac{\partial}{\partial x^\mu} \frac{\partial h_\nu^\rho}{\partial x^\rho} - \square h_{\mu\nu} - \frac{\partial^2 h_\rho^\rho}{\partial x^\mu \partial x^\nu} \quad (2.8)$$

となる。ただし、 $\square$  はダランベルシアン  $\square = \nabla^2 - \partial^2/c^2 \partial t^2$  である。ここで、座標について、次のような変換、条件付けを行う

$$\bar{h}_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \eta_{\mu\nu} h \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial \bar{h}_\mu^\nu}{\partial x^\nu} - \frac{1}{2} \frac{\partial \bar{h}_\rho^\rho}{\partial x^\mu} = 0 \quad (2.10)$$

このとき、式(2.8)は、

$$\square \bar{h}_{\mu\nu} = 0 \quad (2.11)$$

となる。これが線形化された Einstein 方程式である。この式は光速で伝搬する波動解を持つ。この解を重力波と呼ぶ。Z軸方向に進む重力波を表すテンソル  $\bar{h}_{\mu\nu}$  は適当な座標条件<sup>1</sup>のもとでは、

$$\bar{h}_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{h}_+ & \bar{h}_\times & 0 \\ 0 & \bar{h}_\times & -\bar{h}_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

と表すことができる。 $\bar{h}_+, \bar{h}_\times$  は重力波の2つの偏光に対応する。

### 2.1.2 重力波源

具体的な重力波の波形などに関しては高次の Post Newtonian 近似、数値計算などのアプローチが行われており、現在表 2.1 に示したような重力波源について、様々な理論的研究がなされている。

種類	頻度	$\bar{h}$ 典型値	帯域
連星中性子星の合体 (200Mpc)	数回/年	$10^{-21}$	10Hz~1kHz
超新星爆発 (銀河系内)	1回/数十年	$10^{-18}$	~1kHz
超新星爆発 (乙女座銀河団内)	数回/年	$10^{-21}$	~1kHz
巨大ブラックホールの形成	1/年	$10^{-17}$	~1mHz
背景波	-	$10^{-15}$	~ $10^{-7}$ Hz

表 2.1 主な重力波源

<sup>1</sup>Transverse Traceless ゲージという

## 2.2 レーザー干渉計による重力波の検出

### 2.2.1 マイケルソン干渉計の応答

前章までで重力波について性質がわかったので、単純なマイケルソン干渉計でこれを検出するための原理について述べる。

マイケルソン干渉計は、図 2.1 に示したように、光源からの光をビームスプリッター (BS) で 2 方向に分け、それぞれの光路上にある鏡による反射光をビームスプリッター上で干渉させる光学系である。干渉光を光検出器で検出し、その光量変化から 2 つの光路の光路長の差動変動を読みとることが可能である。

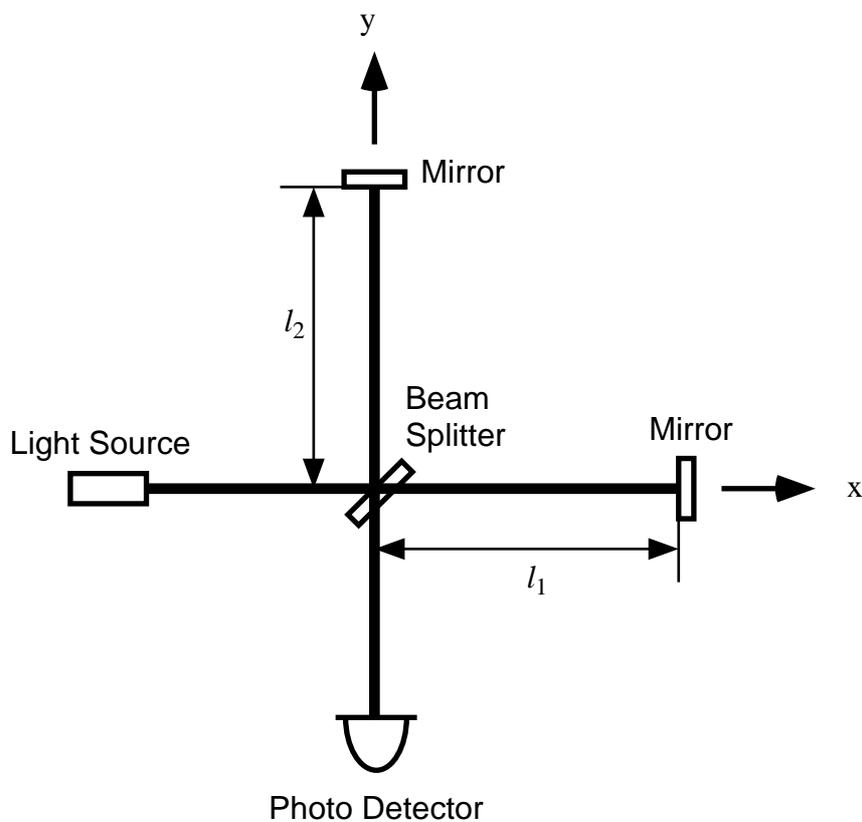


図 2.1 マイケルソン干渉計

いま、マイケルソン干渉計の 2 本の腕が、それぞれ  $X, Y$  軸上にあるものとする。これに先に求めた  $Z$  軸方向へ進行する重力波が入射したときのマイケルソン干渉計の応答を求める。以下では、 $\bar{h}_+ = h$  とする。

光の位相変化を求めるために、まず、 $X$  軸方向の光路について、光が BS から終端の鏡まで進み、反射して再び BS に戻ってくるのに要する時間  $\delta t$  を考える。一般相対論では、光の進行は、

$$ds^2 = 0 \quad (2.13)$$

$$\iff -c^2 dt^2 + (1 - h(t)) dx^2 = 0 \quad (2.14)$$

に従うので,  $h(t) \ll 1$  のとき,

$$dt \sim \left(1 - \frac{1}{2}h(t)\right)^{-1} \frac{dx}{c} \quad (2.15)$$

である. よって DC 成分も入れると,  $h \ll 1$  だから,

$$\delta t = \frac{2\ell_1}{c} + \frac{1}{2} \int_{t-\delta t}^t dth(t) \quad (2.16)$$

$$\sim \frac{2\ell_1}{c} + \frac{1}{2} \int_{t-\frac{2\ell_1}{c}}^t dth(t) \quad (2.17)$$

となる. 光の角周波数を  $\omega_0$  として, 位相変化として表現すると,

$$\phi_1 = \omega_0 \delta t = \omega_0 \left( \frac{2\ell_1}{c} + \frac{1}{2} \int_{t-\frac{2\ell_1}{c}}^t dth(t) \right) \quad (2.18)$$

となる. 同様に, Y 軸方向の腕についても計算すると,  $h$  の符号が異なるため,

$$\phi_2 = \omega_0 \left( \frac{2\ell_2}{c} - \frac{1}{2} \int_{t-\frac{2\ell_2}{c}}^t dth(t) \right) \quad (2.19)$$

である. したがって,  $\ell_1 = \ell_2 = \ell$  のとき, 両腕からの反射光の位相差は,

$$\phi_1 - \phi_2 = \omega_0 \int_{t-\frac{2\ell}{c}}^t dth(t) \quad (2.20)$$

と表される. マイケルソン干渉計ではこの位相差に対応する光量変化が検出されるが, 次にその周波数成分について考える.  $h$  を Fourier 変換すると, 位相差は

$$\int_{-\infty}^{\infty} h(\omega) \exp(i\omega t) d\omega \frac{\omega_0}{\omega} \sin\left(\frac{\omega\ell}{c}\right) \exp\left(-i\frac{\omega\ell}{c}\right) \quad (2.21)$$

となる. このことから, 基線長  $\ell$  と位相差が最大となる重力波の周波数との間には,

$$\sin\left(\frac{\omega\ell}{c}\right) = 1 \quad (2.22)$$

$$\implies \frac{\omega\ell}{c} = \frac{\pi}{2} \quad (2.23)$$

の関係が成り立つ.

### 2.2.2 干渉計の種類

前項ではマイケルソン干渉計を用いて重力波を検出することが可能であることが原理的に示されたが, マイケルソン干渉計を建設して重力波を検出することは現実的に可能なのであろうか. 現在観測が有望視されている重力波は 1kHz 程度の帯域に集中しているが, これに対する位相変化が最大となる基線長は約 75km となる. しかし, このように長大な施設を地上に建設することは非常に困難である. つまり, 単純なマイケルソン干渉計を用いるのには無理がある. そこで, より短い基線長で光路長を稼ぐ方法として, 以下の 2 方式が実際に採用されている.

### Delay-Line 方式

干渉計の腕の部分に鏡を向かい合わせて設置し、この間を往復させることによって光路長をのばす方式である。ただし、それぞれの光路は重ならないようになっている(図2.2)。この方式では鏡の位置の制御が容易であるという利点があるが、用いる鏡が大きくなるため製作が困難であり、その鏡や支持系の振動などが問題となりやすい。

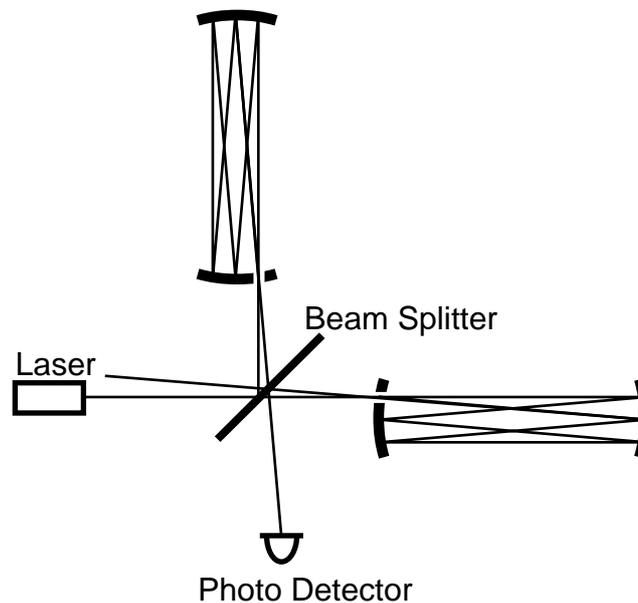


図 2.2 Delay-Line 方式 (折り返し回数 6)

### Fabry-Perot 方式

これも Delay-Line と同様干渉計の腕の部分に鏡を向かい合わせて設置し、この間を往復させることによって光路長をのばす方式である。ただし、腕の部分は Fabry-Perot 共振器であり、往復の光路を重ねて多重干渉を起こしている。この方法では Delay-Line 方式に比べて小さい鏡を利用できる上、比較的高い感度が得やすいなどの利点があるが、共振器を常に共振状態に保つために複雑な制御系を用いなくてはならない。

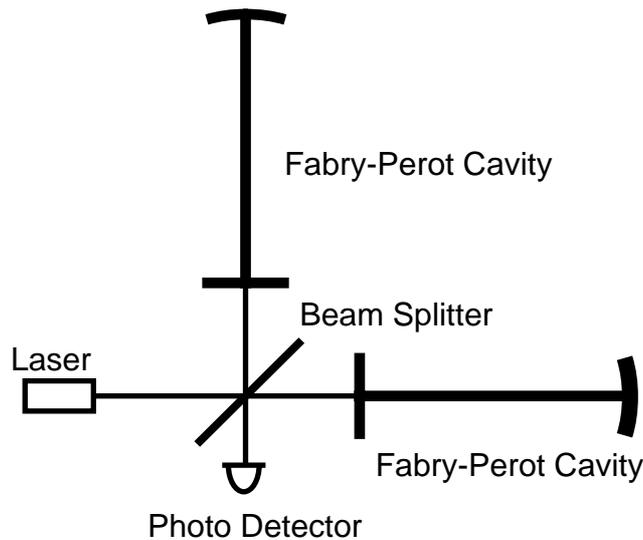


図 2.3 Fabry-Perot 方式

### 2.2.3 世界の研究動向

現在，世界各国でレーザー干渉計型重力波検出器の開発が精力的に行われている．すでに数 m~100m 規模のプロトタイプによる技術開発が相当進んでおり，実際に大型干渉計の建設が進行している．主な大型計画について表 2.2 にまとめた．

名称	主な参加国	方式 ( $h$ )	基線長	運転開始予定年	主な特徴
LIGO	アメリカ合衆国	Fabry-Perot	4km	2000	2 基同時に建設
VIRGO	フランス/イタリア	Fabry-Perot	3km	1999	低周波防振
GEO	イギリス/ドイツ	Delay-Line	600m	1998	Delay-Line 方式の採用
TAMA	日本	Fabry-Perot	300m	1998	早期運転

表 2.2 主な大型干渉計計画

## 2.3 TAMA300

ここでは，現在日本で開発が進行している 300m の基線長を持つレーザー干渉計型重力検出器 TAMA300 について述べる．TAMA300 は東京都三鷹市の国立天文台構内に建設されている．

### 2.3.1 全体のデザイン

TAMA300 の概要を図 2.4 に示す．干渉計を構成する腕は 300m の Fabry-Perot 共振器からなっている．光源から出射したレーザー光はモードクリーナーと呼ばれるリング共振器で整形され，主干渉計に入射する．Fabry-Perot 共振器は常に共振状態に制御されており，内部で効率よく多重

干渉が生じるようになっている．共振器内を適当な回数折り返した光は共振器から戻り，BS 上で干渉する．干渉光を光検出器によって検出し，重力波の信号を得る．

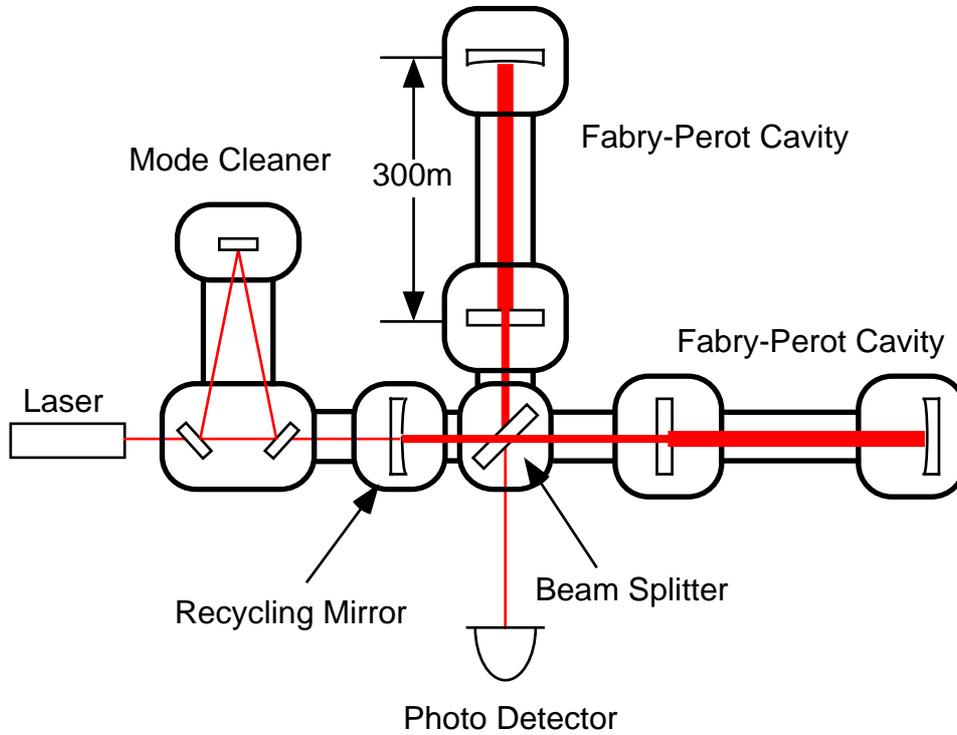


図 2.4 TAMA300 の概要

### 2.3.2 目的と目標感度

干渉計型検出器の原理からわかるように，基線長を伸ばすことによって重力波に対する感度を高めることが可能である．表 2.2 からもうかがえるように，現在主流となりつつあるのは数 km の基線長を持った検出器である．しかし，規模が大きくなるほど実現が困難であることも事実である．そこで，TAMA 計画では，将来の km クラス検出器へのステップとして，必要な要素技術の開発を主な目的として 300m 規模の Fabry-Perot Michelson 型レーザー干渉計 TAMA300 を開発している．さらに，単なる技術開発にとどまらず実際に近傍銀河の重力波を検出しようとする感度をもつことも視野に入れている．そのため目標感度は表 2.3 のように設定されている．

	目標感度 ( $h_{\text{RMS}}$ )	予定年度
Phase I	$3 \times 10^{-20}$	1998
Phase II	$3 \times 10^{-21}$	1999

表 2.3 TAMA300 の目標感度

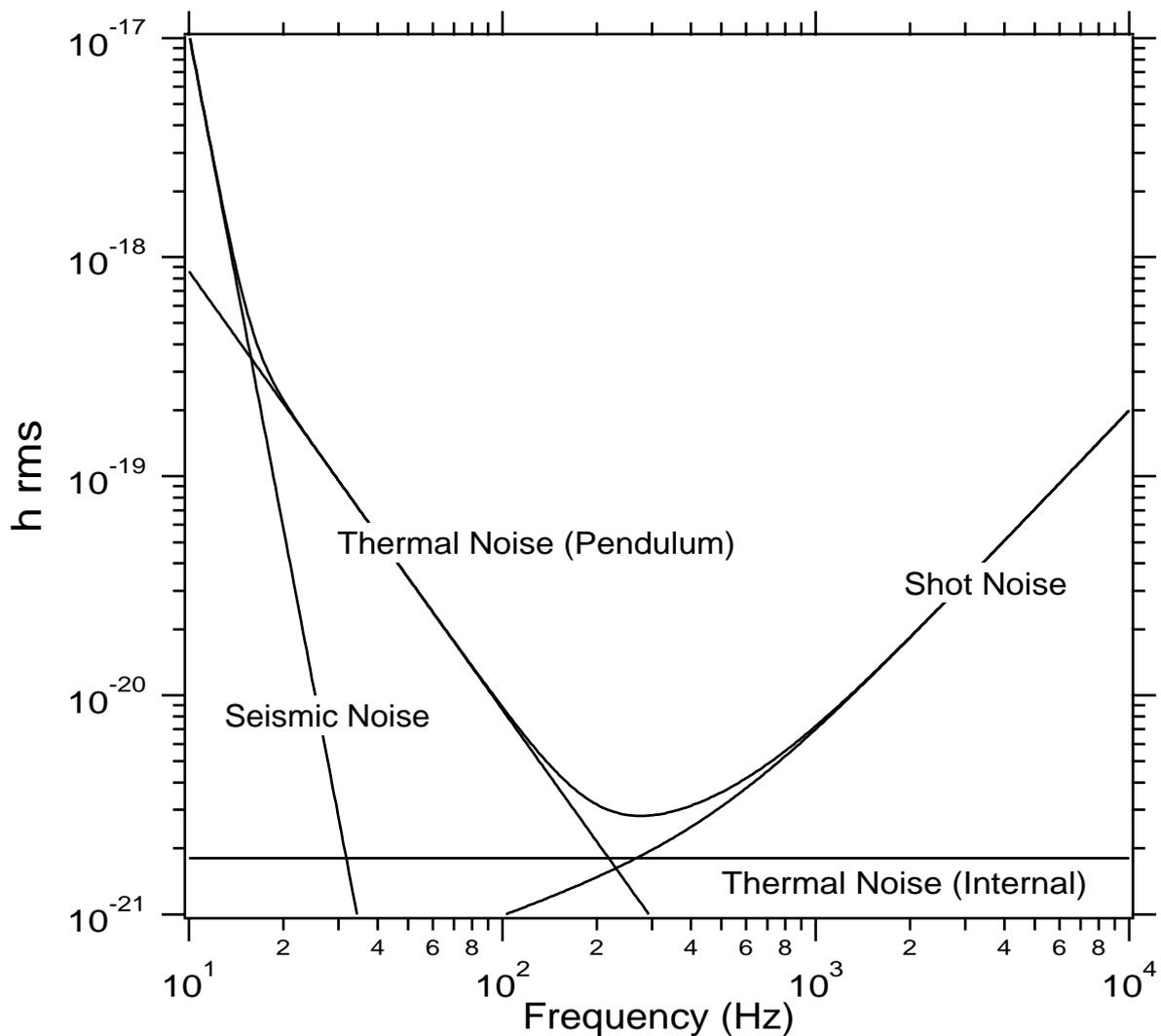


図 2.5 TAMA300 の感度

### 2.3.3 TAMA300 の特徴

TAMA300 の特徴を紹介する．主に干渉計型検出器の雑音と TAMA300 での対策について述べる．

#### 地面振動

干渉計の原理の項では、重力波以外による光路長変動について触れなかったが、実際の干渉計ではそれを構成する鏡などの光学素子が外乱振動によって振動してしまうことが避けられない．これは重力波による光路長変動と区別が付かないため雑音となる．特に数十 Hz 以下では地面の振動が主な雑音源となる (図 2.5 文献 [6][17] から引用)．地面振動の性質などについては次章以降で詳しく述べる．このような外乱によって引き起こされる振動への対策としては、

1. 外乱の小さな場所を選んで干渉計を建設する

2. 干渉計の基線長を大きくする
3. 外乱による光学素子の振動を何らかの方法によって抑制する

が考えられる．次章で詳しく述べるが，1,2の対策だけでは不十分である．したがって，TAMA300では地面振動の光学素子への伝達を抑制するためにいくつかの装置を導入する．

TAMA300での振動防止系は，基本的にステンレスブロックとゴムを交互に積み重ねたスタックと呼ばれる除振台と光学素子の懸架システムとからなる(図2.6 a)．また，将来さらに振動除去性能を高めるためにX振り子と呼ばれる装置を導入することも検討されている(図2.6 b)．これらの装置はそれぞれ機能する周波数帯が異なっており，スタックは主に数Hz以上，懸架システムは1Hz以上，X振り子は0.1Hz程度から上の帯域で機能する．懸架システムは本論文の主テーマであるから，次章以降で詳しく述べる．

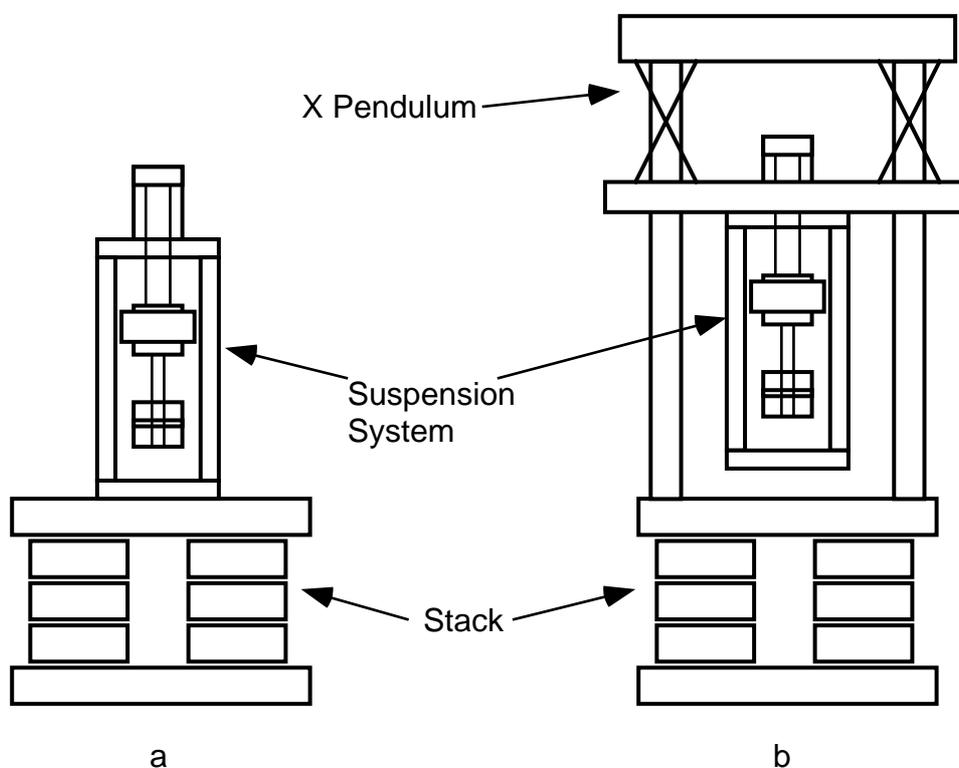


図 2.6 TAMA300 の振動防止装置

#### 熱雑音

光学素子の振動は地面振動などの外的要因によるものだけではない．TAMA300は常温で動作するため，その構成要素は常温の熱浴中におかれることになる．光学素子の支持機構の振動や，光学素子そのものの弾性振動による変形が熱的に励起される．これらもまた光路長変動を引き起こすので検出器にとっては雑音となり，熱雑音と呼ばれている．熱雑音は光学素子などで起こる力学的エネルギーの散逸によって引き起こされるため，対策としては，

1. 干渉計の基線長を大きくする

2. 干渉計を冷却する
3. エネルギー散逸の小さな光学素子，支持系を用いる

があげられる．TAMA300 では基線長は既に他の理由から決まっている．TAMA だけでなく，現在世界で開発の進んでいる干渉計計画では3の方法を採用している．干渉計の冷却については最近日本で活発に研究が行われており，将来的に採用することが検討されている [11]．

観測帯域での感度を最終的に決定するのは熱雑音であると考えられている (図 2.5)．

#### 散射雑音

高帯域で TAMA300 の感度を決定する雑音が光の散射雑音 (shot noise) である (図 2.5)．散射雑音は光の粒子性に起因する雑音である．レーザー光は光子の集まり，光検出器は光子計数装置と考えられる．計数装置の雑音はポワソン分布に従うので，相対雑音 (S/N 比) は，

$$r_{S/N} \propto \frac{I_p}{\sqrt{I_p}} \quad (2.24)$$

となる． $I_p$  は光電流を表す．式 (2.24) からわかるように，S/N 比を向上させるには，光電流  $I_p$  を大きくしてやればよい．つまり干渉計の光量を増やしてやればよい．これを実現するため，TAMA300 では，10W の高出力 Nd:YAG レーザーを光源として用いる．また，干渉計から光源側に戻る光を干渉計に打ち返して再利用し，実効的な光量を増加させる光リサイクリングの技術も導入され (PhaseII から)，そのための制御法などの研究が行われている．

#### 真空系

空気の屈折率のゆらぎや対流，光の散乱，吸収も干渉計にとって障害となる．また，光学素子の汚染も大きな問題となるため，TAMA300 では，干渉計全体が真空中に設置される．特に光学素子の収められる真空槽内は  $10^{-9}$ Torr という超高真空に保たれる計画である．

## 第3章

# 懸架システムとモデル計算

レーザー干渉計型重力波検出器は、重力波による自由質点間の固有距離変動を測定することによって重力波の信号を得る装置である。しかし、地上には地震のような大規模な振動の他に、1日平均20回以上といわれる無感地震や、波浪などの自然現象の他にも人間活動によって生じる地面の振動など様々な外乱が存在する。これらによって光学素子が振動してしまうことは避けられないので、その振動を許容範囲内に抑えるために防振することが必要である。

この章では、質点モデルを用いて懸架システムに関する力学的諸概念を説明し、次に実際にTAMA300で用いられる2段振り子状の懸架システムについて主にそのパラメータ決定について概説する。その後剛体モデルを用いた懸架システムの回転運動のモデル計算について述べることにする。

### 3.1 地面振動とTAMA300における防振の必要性

第2章で述べたように、レーザー干渉計型重力波検出器の低周波における雑音源は、地面振動などの機械的外乱である。TAMA300のphaseIIにおける目標感度は $h_{\text{rms}} \sim 3 \times 10^{-21}$ である<sup>1</sup>。光学素子の変位を $\delta x$ 、光路長を $\ell$ とすると、 $\delta x = h \times \ell$ の関係が成り立つから、 $\ell = 300\text{m}$ とすると、少なくとも300Hzで光学素子の変位は $5 \times 10^{-20}\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$ に抑えられなくてはならない。地震や近傍での大規模な人間活動(建設工事など)を除くと、干渉計が晒される外乱は定常的な地面振動である。これは常時微動と呼ばれ、その典型的なパワースペクトル密度は、

$$\begin{aligned} \delta x &= 10^{-5} \quad [\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}] \quad f < 0.1\text{Hz} \\ \delta x &= \frac{10^{-7}}{f^2} \quad [\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}] \quad f > 0.1\text{Hz} \end{aligned} \quad (3.1)$$

の周波数依存性を持つことがわかっている[14]。 $f$ は周波数を表す。図3.1は、TAMA300の建設される国立天文台三鷹キャンパス<sup>2</sup>と京都大学上宝地殻変動観測所トンネル内<sup>3</sup>の地面振動のパワースペクトル密度である。0.2Hz前後のピークはmicroseismic peakとよばれる構造である。これは海洋の波などにより地殻の共振が励起されているものである。また、都市部の三鷹キャンパスに比べ上宝では帯域によっては2桁ほど小さな振動しかないが、観測帯域でのパワースペク

<sup>1</sup>この値はRMS振幅と呼ばれ、パワースペクトル密度を観測帯域で積分したものである。RMS振幅の定義などは後述する。

<sup>2</sup>国立天文台 高橋 竜太郎氏によるデータ

<sup>3</sup>東京大学地震研究所 新谷 昌人氏によるデータ

トル密度は上に述べた許容値よりも少なくとも7桁も大きなものであるから，仮に地面振動の小さな場所に干渉計型検出器を設置しても，そのままでは十分な感度は得られない．

したがって，地面振動が光学素子に伝搬することを何らかの方法によって抑制する必要がある．このように抑制することを防振るといい，防振するための装置を防振系と呼ぶ．TAMA300では，機械的外乱が観測帯域で重力波の信号を乱さないという要請から防振系に求められる条件 ( $\delta x < h \times \ell$ ) は，防振系によって外乱が  $r$  倍に抑えられるとすると，

$$\sqrt{\int_{150}^{450} \left( r \frac{10^{-7}}{f^2} \right)^2 df} < h_{\text{rms}} \times 300 [\text{m}] \quad (3.2)$$

から， $r < -150\text{dB}$  となる．この  $r$  のように系に加わる外乱の変位と，それによって生じる被防振物体の変位の比を防振比という．防振比は力学系の周波数応答関数の一種である．ここでは  $r$  は周波数によらず一定と仮定したが，一般に防振比は実際には防振系の設計によって様々な周波数依存性を持つ．

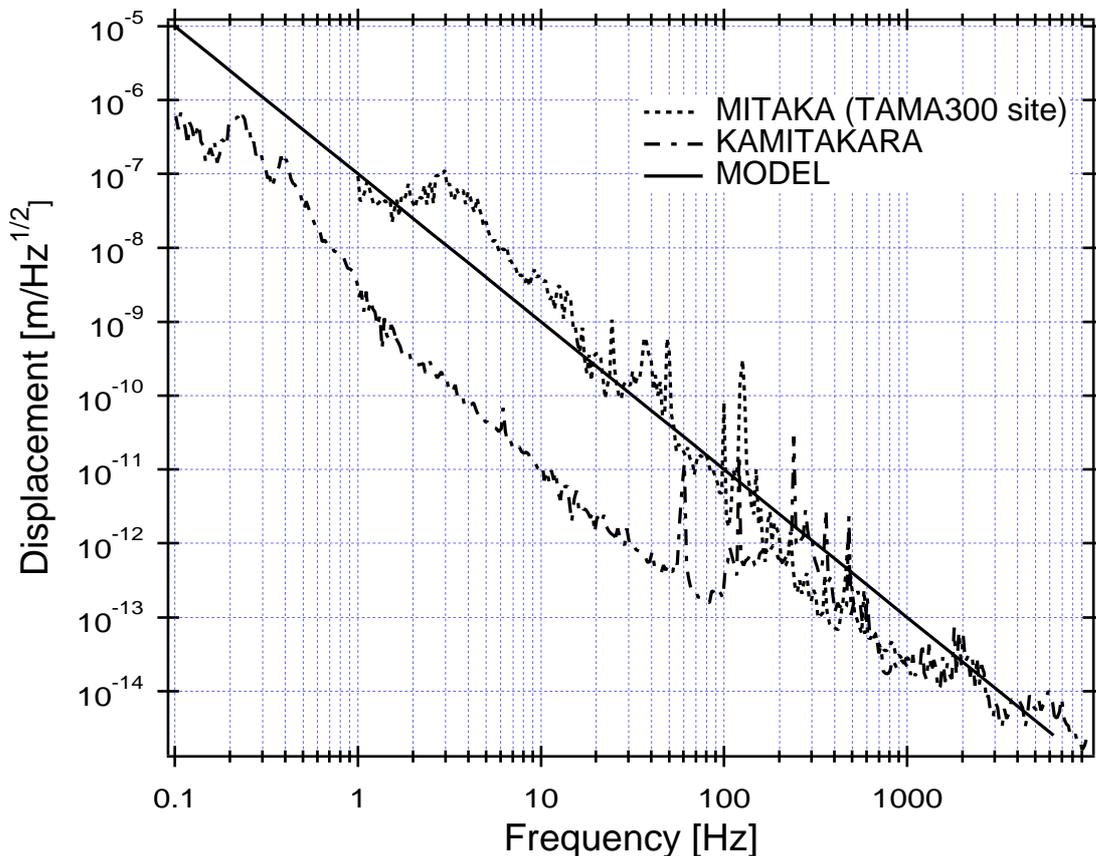


図 3.1 国立天文台三鷹キャンパスと京都大学上宝地殻変動観測所トンネル内の地面振動パワースペクトル密度 実線はモデル値を示す．

ところで，レーザー干渉計型重力波検出器では原理的な要請として，鏡などの光学素子が観測帯域で少なくとも光路方向に関しては自由質量として振る舞う必要がある．これを実現するために TAMA300 をはじめ，現在開発の進んでいる全ての干渉計型検出器では光学素子は振り子状に

懸架される．さらに懸架システムは，単に検出のための原理的な要請を満たすだけでなく，防振系として機能する．次の節では，懸架システムの防振特性を理解するために必要な力学的な諸概念を，単振り子の質点モデルを用いて説明する．

## 3.2 懸架システムの力学—質点モデル

### 3.2.1 理想的な単振り子の防振比

まず，図 3.2 のような，単振り子の系を考える．

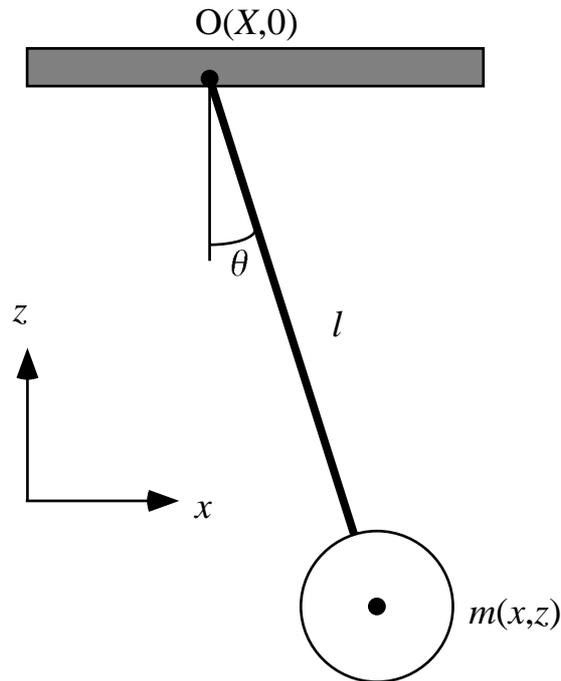


図 3.2 単振り子の質点モデル

振動子は質量  $m$  の質点とし，振動子を吊っているワイヤーには質量が無く，長さ  $\ell$  は一切伸縮しないものとする．系が一様に重力加速度  $g$  を受けているとき，系の運動方程式は，

$$m\ddot{x} = -\frac{mg}{\ell}(x - X) \quad (3.3)$$

となる．図示したように  $x, X$  はそれぞれ振動子と支点の水平座標である．なお，本論文ではこれ以降振動子をマス，支点をサスペンションポイントと呼ぶことにする．

この系の周波数応答を見るために，式 (3.3) の両辺を Fourier 変換すると，

$$-m\omega^2 \tilde{x} = -\frac{mg}{\ell}(\tilde{x} - \tilde{X}) \quad (3.4)$$

となる． $\omega$  は角周波数を表す．したがって，防振比を周波数空間で表現すると，

$$\frac{\tilde{x}}{\tilde{X}} = \frac{\frac{g}{\ell}}{-\omega^2 - \frac{g}{\ell}} = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (3.5)$$

となる． $\omega_0 = \sqrt{g/\ell}$  は，系の共振角周波数といい， $f_0 = \omega_0/2\pi$  を共振周波数という．

防振比を扱う際，絶対値と位相に分けて考えることが多い．上の例でいうと，絶対値は，

$$\left| \frac{\tilde{x}}{\tilde{X}} \right| = \left| \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \right| \quad (3.6)$$

であり，マスとサスペンションポイントの位相差（単に位相ということが多い）は，

$$\tan^{-1} \frac{\tilde{x}}{\tilde{X}} = \tan^{-1} \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (3.7)$$

である．絶対値のみを単に防振比ということもしばしばある．絶対値と位相を分けてプロットしたものが図 3.3 である<sup>4</sup>．

図 3.3 からわかるように，共振周波数より十分低い帯域では絶対値は 1(0dB)，位相は 0 なので，サスペンションポイントとマスは同じ運動をしている．徐々に周波数を上げていくと  $\omega = \omega_0$  で絶対値が発散しマスが振幅無限大で振動してしまうことになるが，実際の力学系では必ず力学的エネルギーが失われるので，このようなことは起こらない．また共振周波数では位相は 90 度遅れる．さらに十分高い周波数では絶対値は  $1/f^2$  に比例して小さくなる．これは懸架システムが防振系として機能していることを表している．また，位相は 180 度遅れ，サスペンションポイントとマスが逆相に運動する．

---

<sup>4</sup>このように絶対値と位相を並列してプロットしたものをボード線図という．

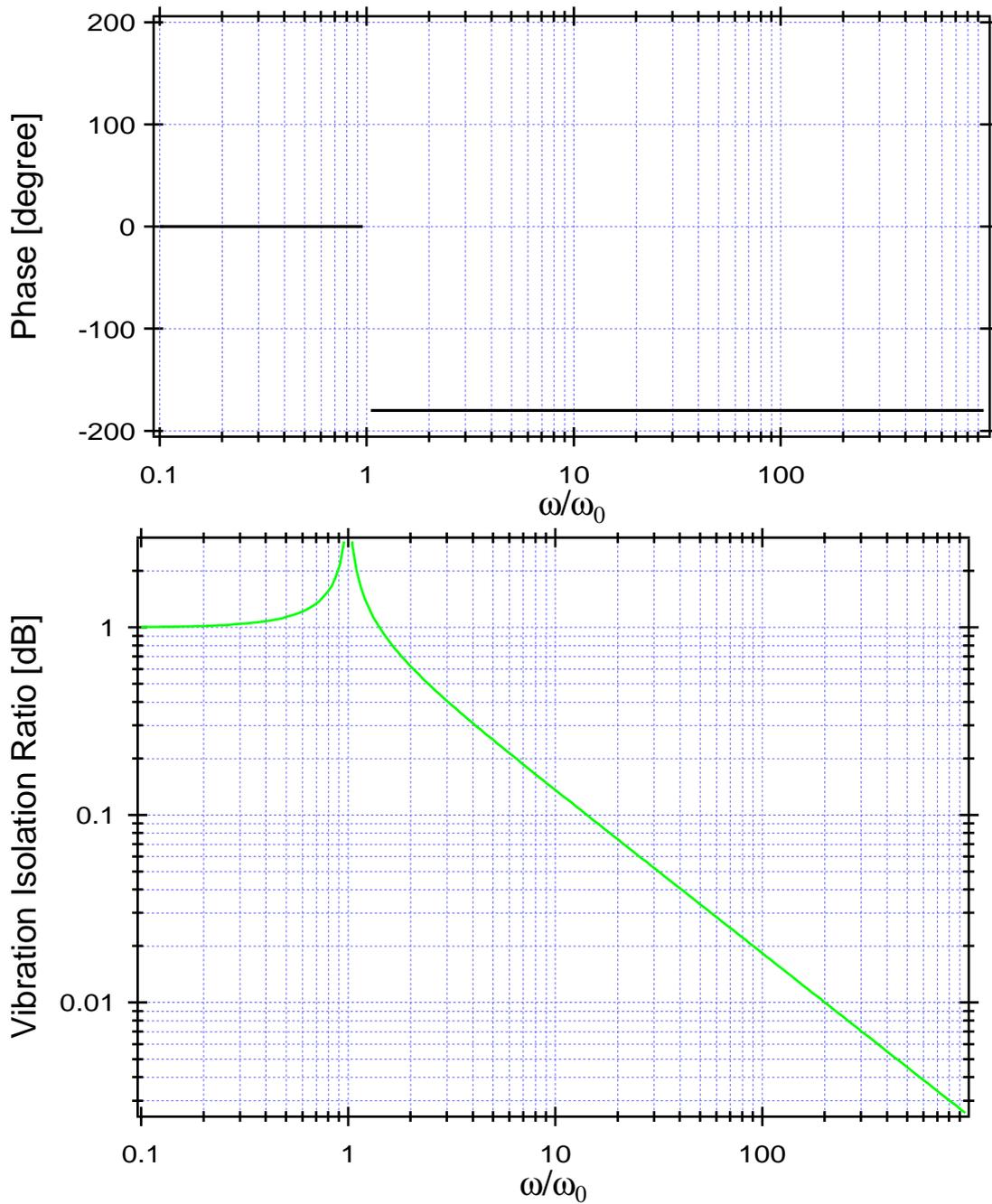


図 3.3 理想的な単振り子の防振比

### 3.2.2 防振比の記述とカップリング

防振比を,

$$H(\omega)_{ab} \quad (3.8)$$

と書くとき, これはサスペンションポイントの運動自由度  $a$  からマス of 自由度  $b$  への伝達関数を意味する. したがって図 3.3 に示した防振比は,  $H(\omega)_{xx}$  となる.

質点モデルではサスペンションポイントとマスの各運動自由度 (3 軸並進) は全て互いに独立であるが、後述するように現実の懸架システムでは 3 軸並進の他にも回転の自由度があり、これら複数の運動自由度が分離できない。このように直交モード間の伝達関数が 0 でない状態をカップリングといい、2 つの自由度がカップルする等という。たとえば、サスペンションポイントの鉛直運動と (z) マスの水平方向への運動 (x) にカップリングが存在するとき、

$$H(\omega)_{zx} \neq 0 \quad (3.9)$$

である。また、このようなカップリングによって生じる伝達関数と本来結びついている自由度間の伝達関数との比をカップリング率という。上の例では、 $z \rightarrow z$  と  $z \rightarrow x$  とのカップリング率  $\tau_{zx}$  は、

$$\tau_{zx} = \frac{H(\omega)_{zx}}{H(\omega)_{zz}} \neq 0 \quad (3.10)$$

となる。逆にいえば独立な自由度間のカップリング率は 0 である。

質点モデルでは全ての並進自由度が独立なので、カップリング率は 0 である。しかし、現実の懸架システムでは、幾何学的な条件によって回転と並進のカップリングは 0 とはならない。また懸架システムに非対称性が存在すれば、たとえば  $z \rightarrow x$  のように、本来直交するモード間のカップリング率も 0 ではないので、最終的に x 方向の防振特性を良好にしたい場合、直交する全ての自由度についても防振比を調整する必要がある。

### 3.2.3 RMS 振幅

ここまでは、周波数応答関数の一種である防振比について述べてきたが、これは主に観測帯域において、外乱起因の振動と目標感度を比較するために用いられる量である。しかしながら、地面振動のパワーは観測帯域よりも低周波の帯域に集中しているため、観測帯域で十分な防振比を得られたとしても、マスが低周波で大きく揺れてしまうという事態が起こり得る。このようになると干渉計の安定な動作は望めない。したがって、マスが実効的にどれだけ揺れているかを評価するために、RMS 振幅 (2 乗平均振幅) という量を導入する。ある物理量  $x$  の RMS 振幅は次のように定義される。

$$x_{\text{RMS}} = \sqrt{\int_a^b G_x^2(\omega) d\omega} \quad (3.11)$$

$G_x(\omega)$  は、 $x$  のパワースペクトル密度である。積分区間は普通  $0 \sim \infty$  とするが、特に興味のある帯域のみで積分することもしばしば行われる。先に示した三鷹の地面振動のパワースペクトル密度を積分することにより、地面の RMS 振幅は  $1.2 \times 10^{-7} \text{ m}$  であることがわかる。これは都市部より 1 桁程度小さな値である。

### 3.2.4 ダンピングの加わった場合と Q 値の定義

次に、系に力学的エネルギーの散逸が存在する場合を考える。その例としてマスとサスペンションポイントの相対速度に比例するダンピング力 (減衰力) が働く系を取り扱う。このとき、系の運動方程式は、式 (3.3) に減衰項を加えて、

$$m\ddot{x} = -\frac{mg}{\ell}(x - X) - \gamma(\dot{x} - \dot{X}) \quad (3.12)$$

となる． $\gamma$  は減衰の強さを表すパラメータ (実数) である．先ほどと同様にこれを Fourier 変換して防振比を表すと，

$$\frac{\tilde{x}}{\tilde{X}} = \frac{i\frac{\gamma}{m} + \omega_0^2}{\omega_0^2 + i\frac{\gamma}{m}\omega - \omega^2} \quad (3.13)$$

となる．このような減衰の加わった現実的な系では， $Q$  値と呼ばれる値を定義しておくとなかなか系を取り扱う際に便利である．変位と復元力の比例係数を  $k = mg/\ell$  と定義し直すと，式 (3.12) は次のように書き直される．

$$m\ddot{x} = -k(x - X) - \gamma\dot{x} \quad (3.14)$$

これを複素指数関数法を用いて解く．解  $x$  は一般に複素数であるから，

$$x = x_0 \exp(i\omega t) \quad (3.15)$$

とする．初期値は  $X_0$ ，初期位相は簡単のため 0 とする．これを式 (3.14) に代入すると，

$$(-\omega^2 + i\gamma'\omega + \omega_0^2)x_0 \exp(i\omega t) = 0 \quad \forall t \quad (3.16)$$

となる．ただし， $\gamma' = \gamma/m$  である．これが任意の時刻で成り立つためには，

$$-\omega^2 + i\gamma'\omega + \omega_0^2 = 0 \quad (3.17)$$

でなくてはならない． $\omega$  が実数の範囲内ならば，減衰を表す複素数項が残ってしまうのでこれは成立しない．したがって，ここでは角周波数  $\omega$  を複素数に拡張して考える必要がある．そこで，

$$\omega = a + bi \quad (3.18)$$

と表すことにする． $a, b$  は実数である．これを式 (3.17) に代入すると，次の 2 つの条件，

$$-a^2 - b^2 - b\gamma' + \omega_0^2 = 0 \quad (3.19)$$

$$-2ab + a\gamma' = 0 \quad (3.20)$$

が得られる．これから，

$$a = \sqrt{\omega_0^2 - \frac{\gamma'^2}{4}} \quad (3.21)$$

$$b = \frac{\gamma'}{2} \quad (3.22)$$

となるので，式 (3.15) より， $x$  の絶対値は，

$$|x| = x_0 \exp(-\gamma't/2) \cos(at) \quad (3.23)$$

と表される． $X_0 = 1, a = 2\pi$  とし，適当に  $\gamma'$  を変化させてこの式をプロットしたものが図 3.4 である．

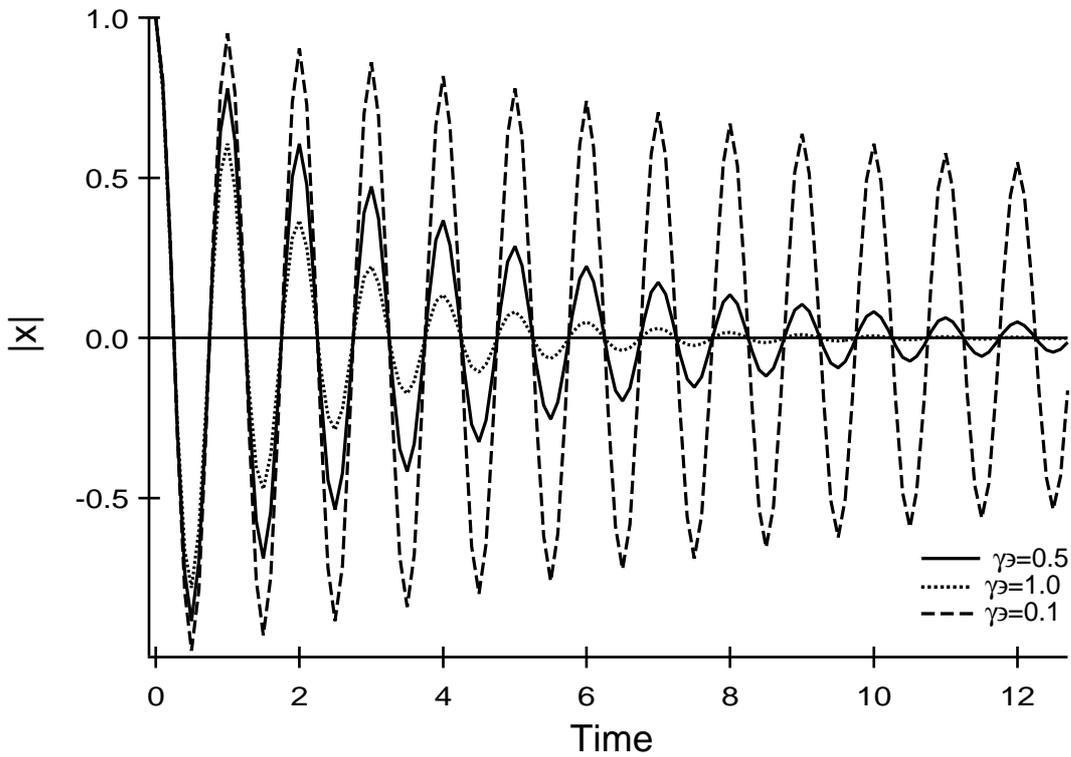


図 3.4 減衰の様子

減衰の時定数は  $2/\gamma'$  なので，図 3.4 からわかるように， $\gamma'$  が大きいほど急激に減衰する．ここで，

$$Q = \frac{\omega_0}{\gamma'} \quad (3.24)$$

と  $Q$  値を定義する．上の定義から明らかなように， $Q$  値については定性的に，

- 無次元量である
- 値が大きいほど系の減衰が弱い
- 散逸のない ( $\gamma = 0$ ) 理想的な系では  $Q$  値は無限大となる

という性質がある．次に  $Q$  値と周波数応答の関係について調べるため，再び式 (3.13) に戻って，防振比について考える．

式 (3.24) の定義を用いて防振比の式 (3.13) を書き直すと，

$$\frac{\hat{x}}{\tilde{X}} = \frac{i\omega\omega_0/Q + \omega_0^2}{\omega_0^2 + i\omega\omega_0/Q - \omega^2} \quad (3.25)$$

となる． $Q$  値を変化させてボード線図をプロットしたものが図 3.5 である．

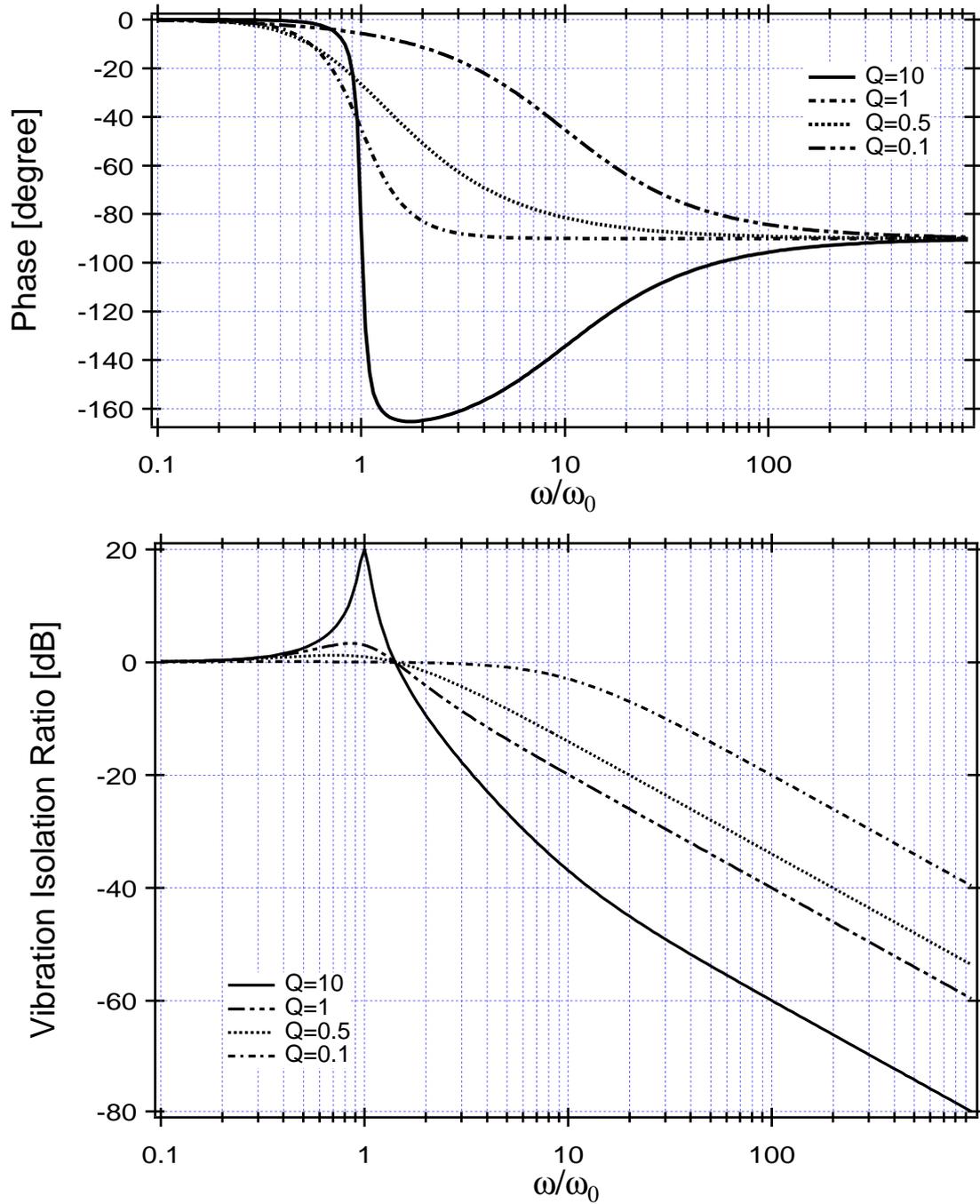


図 3.5 減衰を含む単振り子の防振比

図 3.5 から、減衰の存在するときは防振比の絶対値の最大値は有限値となり、対応する周波数は減衰のない場合の共振周波数よりも若干低くなることがわかる。このように共振周波数付近で絶対値が極大になるところを共振峰またはピークと呼ぶ。このような極大値に対応する周波数として、共振周波数が定義される。また、減衰のない場合と大きく異なるのは、共振周波数よりも十分高い帯域において、 $f^{-1}$  の周波数特性を持っている点である。これは、減衰がサスペンショ

ンポイントとマスの相対速度に比例しているためで、マスは静止しようとするが、サスペンションポイントの振動によって、ワイヤーを介してではなく減衰力を介してマスの振動が起きてしまうためである。これに伴って、共振周波数よりも十分高い周波数では位相の遅れが90度である点も減衰のない場合と異なる。

さらに、 $Q$  値と防振比の関係について新たに、

- $Q$  値が十分大きければ、ピークの高さ（フロアとの比）はほぼ  $Q$  値に等しい
- $Q$  値が高いほどピークは鋭くなる
- $Q$  値が高いほど位相変化も急激になる
- $Q$  値が小さいと高周波での防振比が損なわれる

ことも見て取れる。また、 $Q$  値が十分大きい場合ピークの半値全幅  $\Delta$  と  $Q$  値には、

$$\Delta = \frac{f_0}{Q} \quad (3.26)$$

の関係が成り立つことも有用である。

また、数学的にいえば、単振り子では防振比には複素共振角周波数の実部が正負で対称な極が必ず1組存在する<sup>5</sup>。共振周波数とは数学的には極に対応する複素角周波数のことである。 $Q = 0.5$  は、極に対応する複素角周波数の実部が0となりこの2つの極が一致する特別な場合である。これから、 $Q = 0.5$  を特に臨界減衰 (critical damping) と呼び、 $Q < 0.5$  を過減衰 (over damping) と呼ぶ。

### 3.2.5 フレキシブルダンピングと多自由度系の運動の記述

一般に、特にダンピングをかけずに細い金属ワイヤーで懸架された振り子では、振動のエネルギーはワイヤーの曲げなどで失われるだけなので、その  $Q$  値は  $10^5$  程度の比較的高い値をとる [18]。そのため、たとえば共振周波数 1Hz、 $Q = 10^5$  の単振り子が典型的な地面振動に晒されたとすると、系の RMS 振幅は約  $4\mu\text{m}$  であり、ほぼ共振のピークだけで決まってしまう。逆に言えば、何らかの方法で系にダンピングを加えてピークを低くつぶすことができれば、RMS 振幅を抑え干渉計をより安定的に動作させることが可能になる。しかし、単振り子の例で見たように、単にサスペンションポイントとマスの相対速度に比例するようなダンピングをかけただけでは、高周波帯域でマスがダンピング源との相互作用によって振動してしまうため、ダンピングがなければ  $f^{-2}$  に比例した防振比が  $f^{-1}$  に悪化してしまう。

これを避けるためには、ダンピング源が次のような運動をすればよい。

- マスの共振周波数付近ではマスとの相対速度が大きく、十分にダンピング力が働く
- 高周波帯域ではマスと同様の運動をし（相対速度が小さくなり）、ダンピング力がほとんど働かない

<sup>5</sup>実際には正の場合しか取り扱わない

このような条件を満足するためには，図 3.6 のように，ダンピング源をバネなどで支持し，防振してやればよい．以後，このように防振されたダンピング源を用いることを，フレキシブルダンピングという．

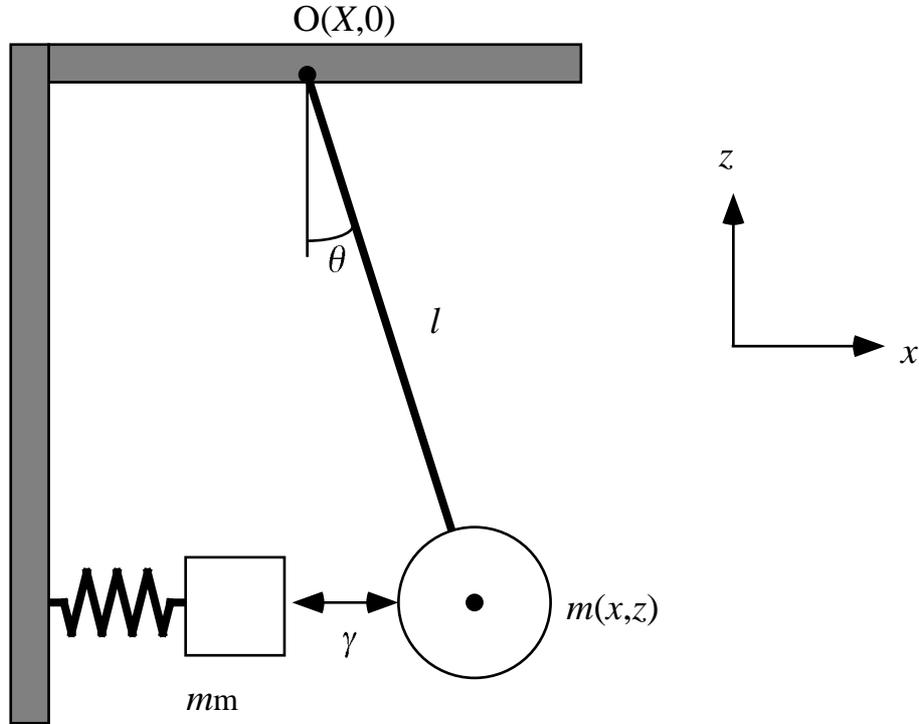


図 3.6 ダンピング源が防振された単振り子

このとき，系の運動方程式は，

$$m\ddot{x} = -\frac{mg}{l}(x - X) - \gamma(\dot{x} - \dot{x}_m) \quad (3.27)$$

$$m_m\ddot{x}_m = -k(x_m - X) + \gamma(\dot{x} - \dot{x}_m) \quad (3.28)$$

となる．添字  $m$  はダンピング源を表す．振り子の運動だけではなく，新たにダンピング源の運動が現れた．ここで，このような線形多自由度系の運動を統一的に表す手法について述べる．2つの自由度をベクトル  $\vec{x} = (x, x_m)$  で表し，式 (3.28) を Fourier 変換した後行列を用いて書き直すと，

$$-\omega^2 \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m_m \end{bmatrix} \vec{x} - i\omega \begin{bmatrix} \gamma & -\gamma \\ -\gamma & \gamma \end{bmatrix} \vec{x} + \begin{bmatrix} \frac{mg}{l} & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix} \vec{x} = \begin{bmatrix} \frac{mg}{l} \\ k \end{bmatrix} \tilde{X} \quad (3.29)$$

$$\iff (-\omega^2 M - i\omega C + K)\vec{x} = \vec{F} \quad (3.30)$$

となる．上式の左辺に現れた行列  $M, C, K$  はそれぞれ，質量行列，減衰行列，剛性行列という．右辺の  $\vec{F}$  はサスペンションポイントの変位によって与えられる外力ベクトルである．このように表現すると，防振比を求めるという作業は，

$$\vec{x} = (-\omega^2 M - i\omega C + K)^{-1} \vec{F} \quad (3.31)$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{X} \\ \hat{x}_m \\ \hat{X} \end{bmatrix} = H^{-1} \begin{bmatrix} \frac{mg}{\ell} \\ k \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

$$H = (-\omega^2 M - i\omega C + K) \quad (3.33)$$

のように，行列  $H$  の逆行列を計算し，外力ベクトルに乗じるということに他ならない．このことを利用すれば，さらに自由度が増えた場合にも外力ベクトルと  $H$  さえ求められれば統一的に線形系の力学が記述でき，防振比を計算することが可能である．

さて，フレキシブルダンピングされた単振り子の例に戻り，

$$m = 1 \text{ [kg]} \quad (3.34)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\ell}} = 1 \text{ [Hz]} \quad (3.35)$$

$$m_M = 1 \text{ [kg]} \quad (3.36)$$

$$f_M = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_M}{m_M}} = 3 \text{ [Hz]} \quad (3.37)$$

$$\gamma = 10 \text{ [N/m/s]} \quad (3.38)$$

として式 (3.32) を解き，マスとダンピング源の防振比をプロットしたものが図 3.7 である．これから，ダンピング源の共振周波数付近でマスの振動が励起されてはいるが，マスの共振は十分にダンピングされ，同時に高周波帯域で防振比が損なわれずに  $f^{-2}$  に比例していることがわかる．

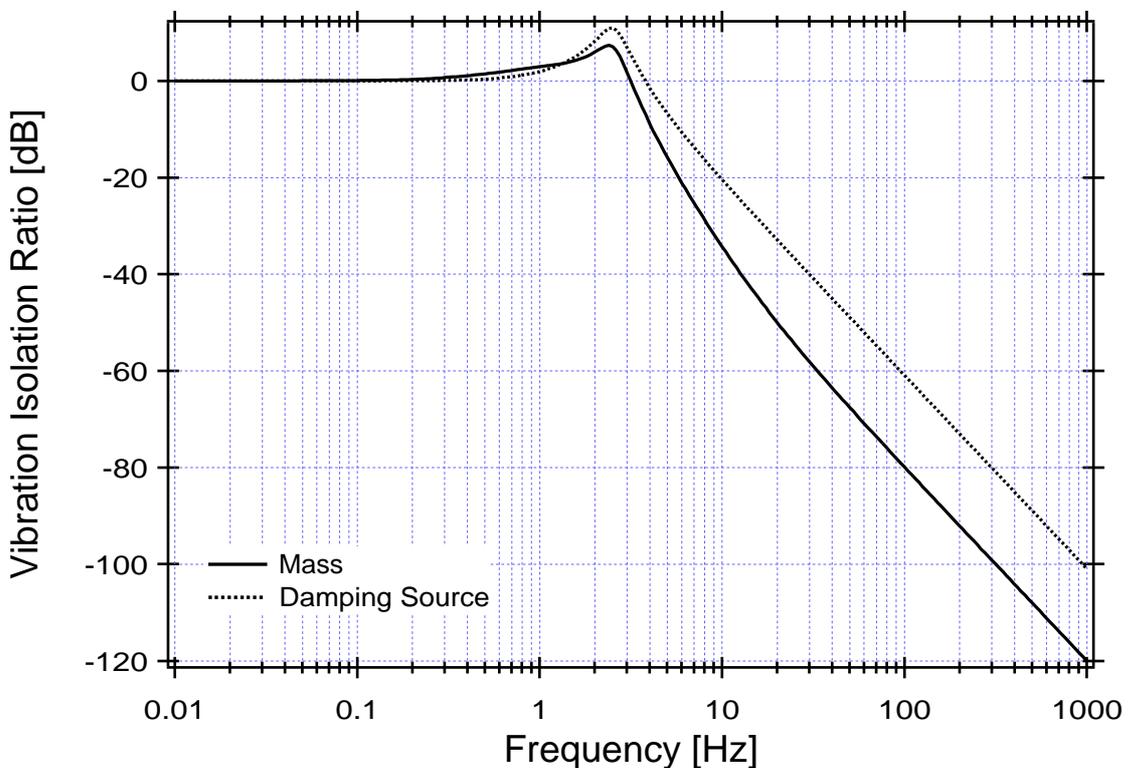


図 3.7 フレキシブルダンピングされた単振り子の防振比

### eddy current を利用したダンピング

ここまでは、具体的なダンピングの機構を与えずに議論してきたが、マスとダンピング源の相対速度に比例するダンピング力を生じる機構として、永久磁石を用いる手法が広く用いられている。導電性の物質で構成されたマスが永久磁石の作る磁場  $B$  の中にあるとき、マスが運動することによってその表面に渦電流 (eddy current) を生じ、ジュール熱として力学的エネルギーが散逸する機構である。このときマスに働くダンピング力  $F_m$  は、

$$F_m = A\sigma B \frac{\partial B}{\partial x} \dot{x} \quad (3.39)$$

となる。ここで、 $A, \sigma$  はそれぞれ、マスの形状因子と表面の導電率である。したがって、ダンピング力を強くするためにはマスに導電率の高い材質を用いる必要がある。フレキシブルダンピングは、永久磁石を弾性支持することによって実現される。TAMA300 でもこの手法が用いられる。

### 3.2.6 熱雑音

揺動散逸定理によれば、散逸を伴う物理過程には同時に揺動力が働く。揺動力によって生じる力学系の運動や電圧変化などの現象はしばしば雑音と認識され、熱雑音と総称されている。よく知られた例として、力学系のブラウン運動や電気回路の抵抗に生じるナイキスト雑音がある。ここでは力学系の熱雑音の一般論について簡単に述べる。

揺動散逸定理によると、物体に働く揺動力によって生じる変位  $x_{TN}$  の片側パワースペクトル密度の平均値<sup>6</sup> は、

$$\sqrt{\langle \tilde{x}_{TN}^2 \rangle} = \sqrt{\frac{4k_B T \tilde{\sigma}(\omega)}{\omega^2}} \quad (3.40)$$

と表される。 $k_B$  はボルツマン定数、 $T$  は系の温度、 $\sigma(\omega)$  は、機械的インピーダンス  $Z(\omega)$  と  $\sigma(\omega) = \text{Re}[1/Z(\omega)]$  の関係にある。機械的インピーダンスとは、系に加えられた力  $F_{ex}(\omega)$  と、それによって生じる系の速度  $v(\omega)$  との比で、

$$Z(\omega) = \frac{F_{ex}(\omega)}{v(\omega)} \quad (3.41)$$

と定義される。振動解析でよく用いられるモビリティ  $H(\omega) = v(\omega)/F_{ex}(\omega)$  と逆数の関係である。振動解析では、モビリティの他にも変位と外力の比、コンプライアンス  $G(\omega) = x(\omega)/F_{ex}(\omega)$  という量が用いられる。速度  $v(\omega)$  と変位  $x(\omega)$  には、周波数空間において  $\tilde{v}(\omega) = i\omega \tilde{x}(\omega)$  の関係が成り立つので、式 (3.40)、(3.41) とあわせて、熱雑音によって生じる変位  $x_{TN}$  の片側パワースペクトル密度をコンプライアンス  $G(\omega)$  を用いて表すと、

$$\sqrt{\langle \tilde{x}_{TN}^2 \rangle} = \sqrt{\frac{-4k_B T \text{Im}[\tilde{G}(\omega)]}{\omega}} \quad (3.42)$$

となる。

実際に振り子系の熱雑音を際には、運動方程式に外力項を加えて、コンプライアンスを求めて、式 (3.42) に代入してやればよい。既に単振り子の例で見たように、周波数空間で記述された懸架

<sup>6</sup>エルゴード仮定が成立するものとする。

システムの運動方程式においてはすべての項が変位に比例するので<sup>7</sup>，機械的インピーダンスを計算するよりもコンプライアンスを用いて熱雑音を表すのが便利である．コンプライアンスの虚部を用いることからわかるように，運動方程式では散逸は虚数単位  $i$  に比例する項として表現される．この項の表現法には，散逸の種類によって主に2つの種類が存在する．既に速度比例の減衰を与えるダンピングで見たとおり，速度に比例，つまり周波数空間において  $i\omega = 2\pi if$  に比例するものと，周波数によらず一定のものである．前者は速度比例の減衰を与えることから，viscous damping と呼ばれ，eddy current によるダンピングや流体の粘性によるダンピングを表すのに用いられる．後者は structure damping と呼ばれ，材質内部で生じるミクロスコピックな散逸に対応すると考えられている．防振特性にほとんど影響を与えないためここまでの議論では無視してきたが，懸架システムにおいてはマスを吊るすワイヤーの曲げなどで生じる散逸は structure damping を用いて表現される．

### 3.3 TAMA300の懸架システム

#### 3.3.1 2段振り子状懸架システム

第2章で述べたように，TAMA300では懸架システム以外にも，スタックと長周期X振り子といった防振系を用いる計画であるが，これらを構成する部品には弾性共振などの内部振動が存在するため，それらの共振周波数付近での防振比が悪化する．多くの場合これらの内部共振の周波数やピークの高さ，Q値を厳密に予言することは困難である．そのため，防振系を全て合わせてやっと目標値を達成できるようなのでは，観測帯域において防振系や真空系の内部共振ピークによって防振比が目標値を上回るおそれがある．したがって，基本的に懸架システム単体でも目標値を達成できるだけの性能を有しているべきである．

それでは，どのような懸架システムを用いればこのような目的が達成できるのであろうか．図3.3をみると，共振周波数付近では防振比が0dBを越え，マスのRMS振幅が増大してしまうが，十分高い帯域では単振り子状の懸架システムでも十分な防振比を達成することが可能であることがわかる．しかし，TAMA300の観測帯域である150~450Hzにおいて，理想的な単振り子状の懸架システムで目標値を達成するためには，共振周波数が少なくとも0.01Hz以下でなくてはならない．これを達成するためには， $f_0 = \sqrt{g/\ell}/2\pi$  より，振り子長が  $\ell > 2 \times 10^3\text{m}$  となり，実現不可能な大きさになってしまう．そもそも防振系は真空槽内に設置されるため，高々1mの大きさにしかできない．そこで，TAMA300では，図3.8のように，懸架システムを2段振り子状にする．一般に，ダンピングのない  $n$  段振り子系では共振周波数より十分高い帯域において防振比は  $f^{-2n}$  に比例する．たとえば，2段ならば上のマスが  $f^{-2}$  で防振されているので，上のマスから見ると下のマスはさらに  $f^{-2}$  で防振され，サスペンションポイントから見れば全体として  $f^{-4}$  で防振されることになる．もちろん，先に単振り子で見たように，フレキシブルダンピングを行えばダンピングによって共振をつぶすことと観測帯域で良好な防振比を得ることを両立することが可能である．また，熱雑音など考慮するとダンピングは上のマス(以後，中段マスと呼ぶ)にかけるのが有利である．これは，終段のマス(鏡)に直接ダンピングをかけると，揺動力が直接終段マスに働

<sup>7</sup>速度に比例するともいえるが，防振比計算のために書き下ろした周波数空間での運動方程式では変位で表現する

いてしまうため終段マスの揺れが大きくなる．中段マスにダンピングをかけた場合は，中段マスに働く揺動力は 1 段の振り子を介して終段マスに伝達するのでその分有利になるわけである．

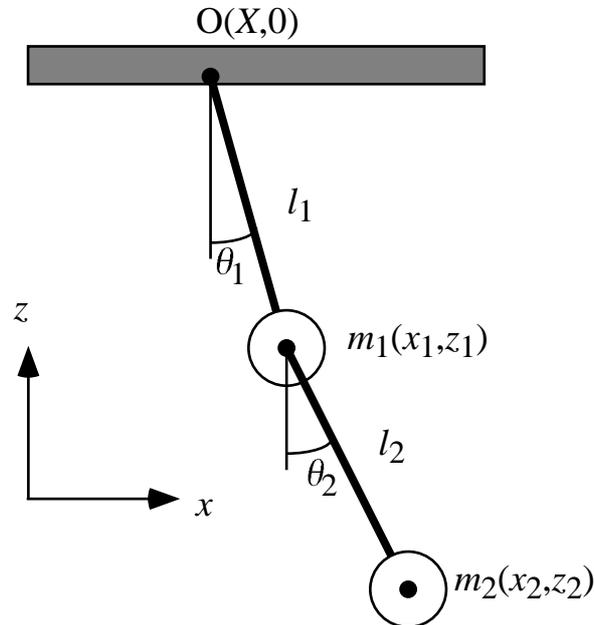


図 3.8 2 段振り子状の懸架システム

### 3.3.2 並進防振特性に関わる各種パラメータの最適化

TAMA300 では，終段マスを鏡とし，中段マスに永久磁石を用いた受動的なダンピングを施した 2 段振り子からなる懸架システムを採用する．この前提のもとで懸架システムの最適化とは，振り子の共振をダンピングしてつぶし，系の RMS 振幅を抑制しつつ，観測帯域での防振比が目標値を達成するようにパラメータを決定することである．

その他にも，懸架システムを設計するにあたっては現実的な問題として，各部品の材質やワイヤーの引っ張り強さなど考慮しなくてはならない事柄が多数存在するため，ここでは結果のみを示すことにする．詳しくは文献 [16] を参照されたい．表 3.1 に，モデル計算の結果を踏まえて実際に製作された懸架システム試作機のパラメータを示す．試作機においては材質や工作技術の限界から必ずしもモデルから得られた最適値を実現できていないが，図 3.10，図 3.11 に示された，水平，鉛直方向の試作機の防振比を見る限り，振り子共振が効果的にダンピングされ，観測帯域で十分な防振比を確保していることがわかる．

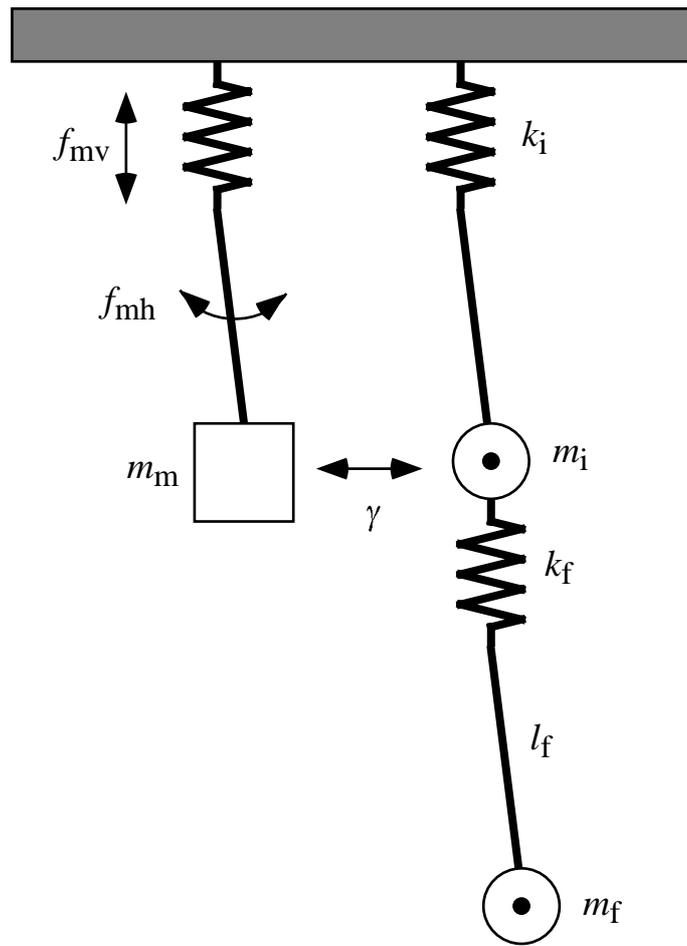


図 3.9 並進に係わるパラメータ

項目	試作機での値 (モデル値)
終段マス (鏡) の質量	$m_f = 1.2$ (1.034) kg
中段マスの質量	$m_i = 1.0$ (1.0) kg
ダンピングマグネットの質量	$m_m = 0.9$ (0.5) kg
上段のワイヤー長	$l_i = 0.26$ (0.25) m
下段のワイヤー長	$l_f = 0.25$ (0.25) m
上段バネ定数 (4本分)	$k_i = 1.9 \times 10^3$ ( $2.0 \times 10^3$ ) N/m
下段バネ定数 (4本分)	$k_f = 1.3 \times 10^4$ ( $1.3 \times 10^4$ ) N/m
ダンピングマグネットの鉛直方向共振周波数	$f_{mv} = 9.0$ (10) Hz
ダンピングマグネットの水平方向共振周波数	$f_{mh} = 4.8$ (5.5) Hz
減衰力	$\gamma = 15$ (15) N/m/s

表 3.1 試作機の並進に係わるパラメータ

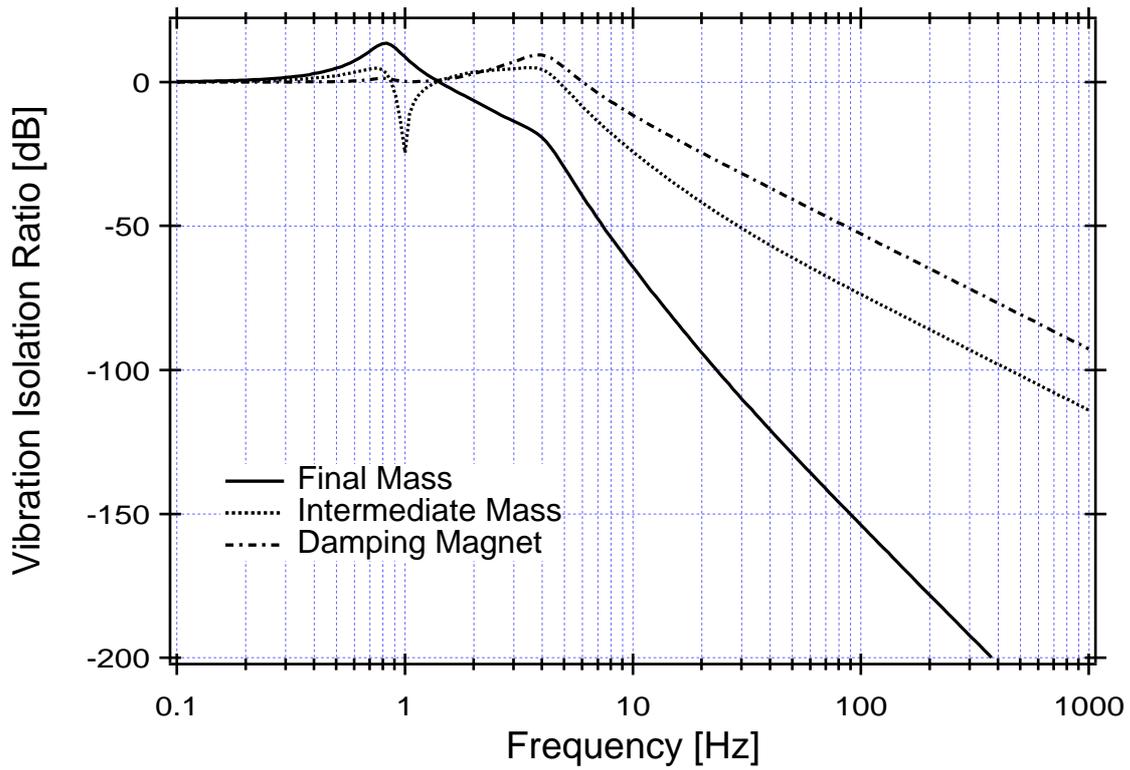


図 3.10 懸架システム試作機の水平防振比  $H_{Xx}$

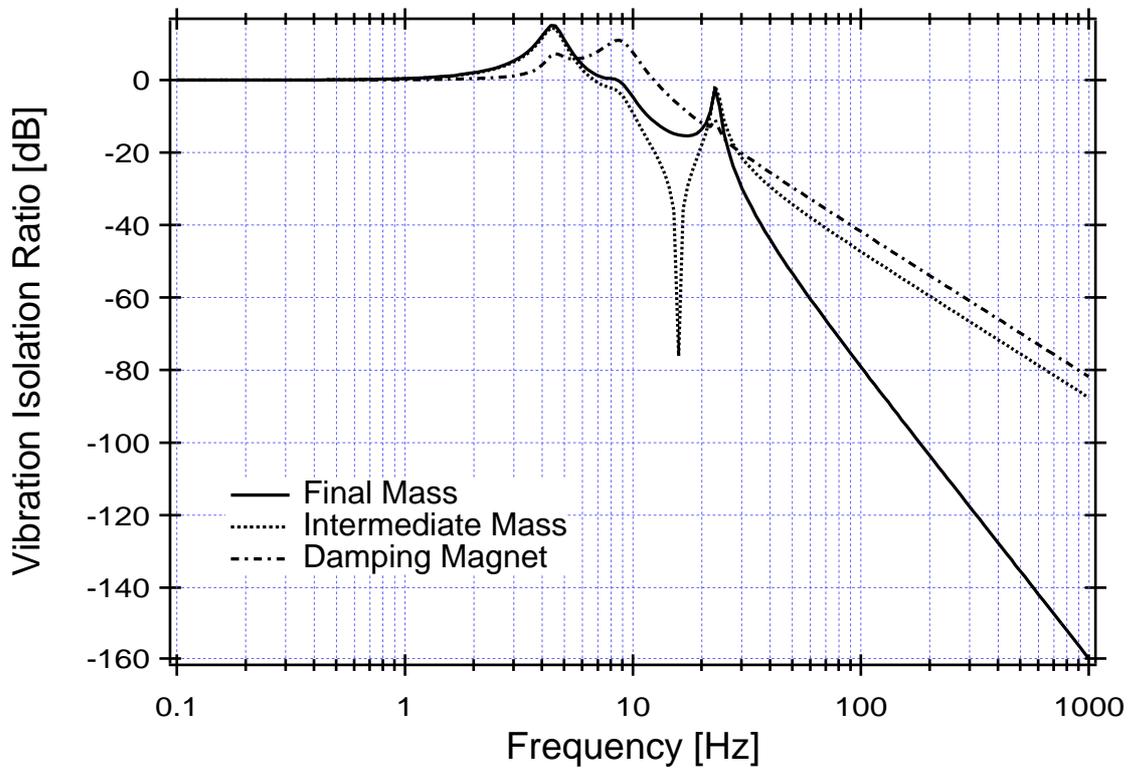


図 3.11 懸架システム試作機の鉛直防振比  $H_{Zz}$

### 3.3.3 懸架システム試作機

次に、パラメータ以外の懸架システム試作機の特徴を列挙する。

#### 鏡

鏡は2段振り子の終段マスとして懸架される。TAMA300で実際に用いられる鏡は直径100mm、高さ60mmの熔融石英製の円筒であり、全面研磨されている。質量は1.034kgである。試作機ではアルミ合金製のダミーマスを用いているため、これよりも若干重くなっている。

#### 中段マス

高さ61mm、幅80mm、奥行き100mmのアルミ合金製である。eddy currentを利用したダンピングを行うため、近傍に強力な永久磁石を配置するので、非着磁性の物質を用いる必要がある。

#### ダンピングマグネット

中段マスの周囲を取り囲むように配置される。ダンピングマグネットとして、Nd-B-Fe永久磁石(直径21mm、高さ5mm)を8個用いている。また、磁石を取り付ける枠は着磁性のステンレスを1体形成しており、磁場の漏れ出しを防いでいる。

#### ワイヤー

ダンピングマグネットの作る磁場によって防振特性が影響を受けないようにするために、非着磁性の材質を用いる必要がある。引っ張り強さも考慮してタングステン製のワイヤーを用いている。上段は直径 $100\mu\text{m}$ 、下段は直径 $50\mu\text{m}$ である<sup>8</sup>。引っ張り強さに関して、下段の安全率は2以上確保されている。上段は4本の独立なワイヤーで懸架され、下段は2本のワイヤーをそれぞれ環状にして鏡を懸架している。

#### 縦防振用バネ

Z-Xカップリングを考慮して、鉛直方向にも良好な防振特性を持たせるため、上段のワイヤーのクランプは溶接ペローズからなるバネに取り付けられている。耐荷重性やバネを入れるスペースの制約から選択された。バネ定数のばらつきを吸収するために、4本のペローズはそれぞれ独立に高さ調整を行うことが可能である。

また、下段については熱雑音を考慮すると比較的散逸の大きいバネ構造を入れることができないので、タングステンワイヤーの伸縮のみがバネとして作用する[17]。

ダンピングマグネットの縦方向の共振周波数を調整するために、リン青銅製の板バネを用いている。

---

<sup>8</sup>熱雑音も考慮されている

### コントロールブロック

懸架システムを設置するスタックは、温度変化や経年変化によって長期的なドリフトをする。これによるマスの位置、姿勢の変化を補正するために、サスペンションポイントは、全自由度にわたって可動するステージ群に取り付けられている。このステージ群をコントロールブロックという。

ステージはピコモータとピエゾアクチュエータによって遠隔操作される。

### 保護

地震など、激しい外乱によってワイヤーが切断されたり、懸架システムを運搬する際の便宜のために、鏡や中段マスを受けとめたりクランプする機構が取り付けられている。

鏡に触れる部品は全てテフロン製であり、鏡を傷つけないよう工夫されている。

### 真空対応

懸架システムは  $10^{-9}$ Torr という高真空中に設置されるので、真空を乱さないようにステージ、モーター類には可能な限り潤滑剤などを用いていない。これによって鏡などの光学部品を汚染しない効果もある。また、真空槽内に設置される前に厳重に洗浄される。

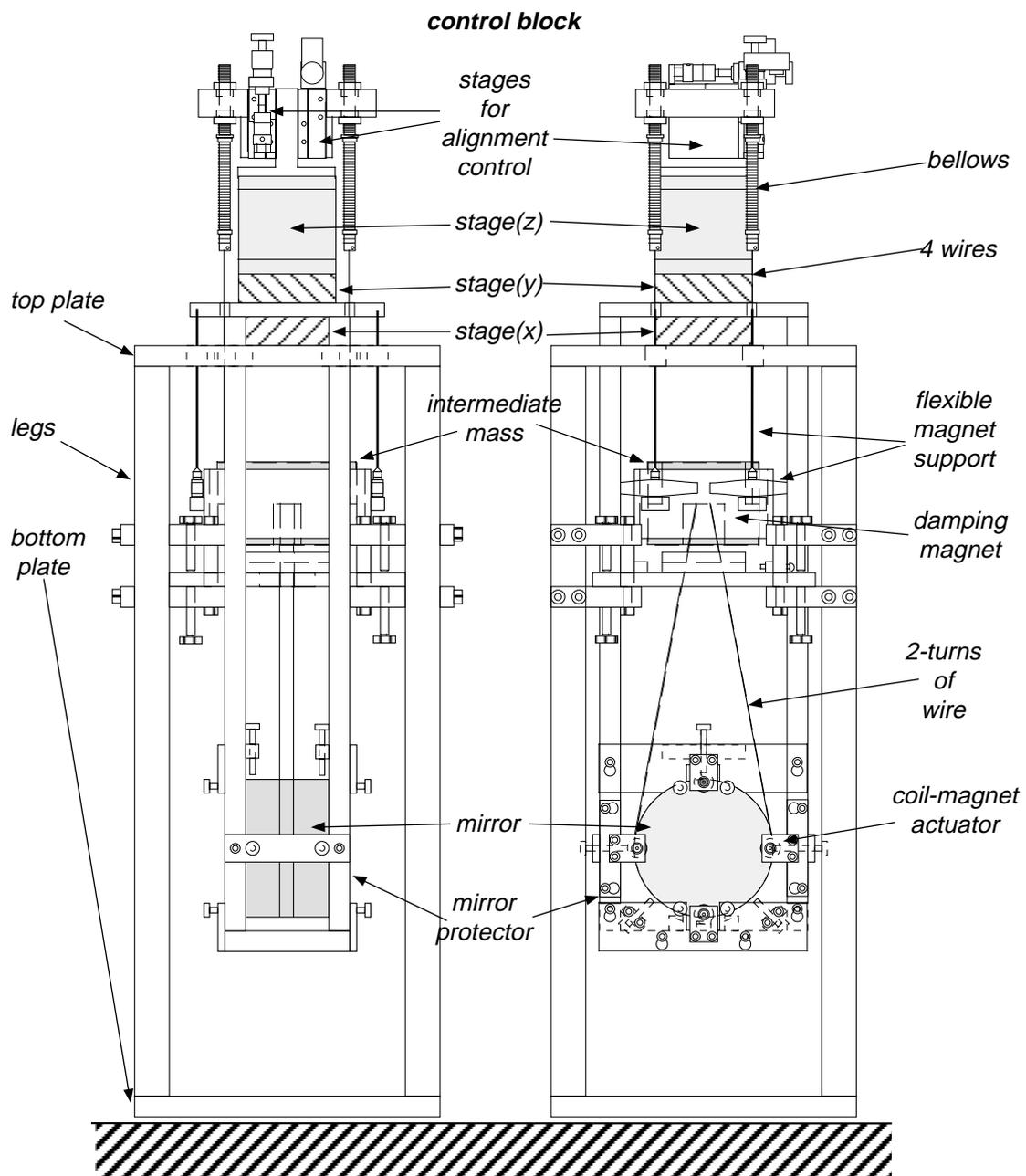


図 3.12 TAMA300 用懸架システム試作機

### 3.4 懸架システムの回転運動—剛体モデル

#### 3.4.1 懸架システムの回転と干渉計

前節までは懸架システムの並進防振について述べるために、マスを質点と見なし、ワイヤーの取付位置などの幾何学的な情報を考えずに議論を行ってきた。しかし、当然のことながら実際の懸架システムを構成する鏡や中段マスは固有の大きさや形状を持った物体である。したがって、質点とは異なり 3 軸の並進モードの他に 3 軸まわりの回転モードも存在し、その特性はワイヤー取

付位置などの幾何学的条件に大きく依存する。

### 座標系

懸架システムの各運動モードを区別するために座標系を定義し、以後各モードはその座標系に基づいて記述することにする。座標系は、懸架システムの鏡を基準にして定義する。すなわち、光軸方向を  $x$  軸とする右手系を用いる。 $x, y, z$  の各軸まわりの回転自由度はそれぞれ Roll, Pitch, Yaw と呼ぶこととする (図 3.13)。

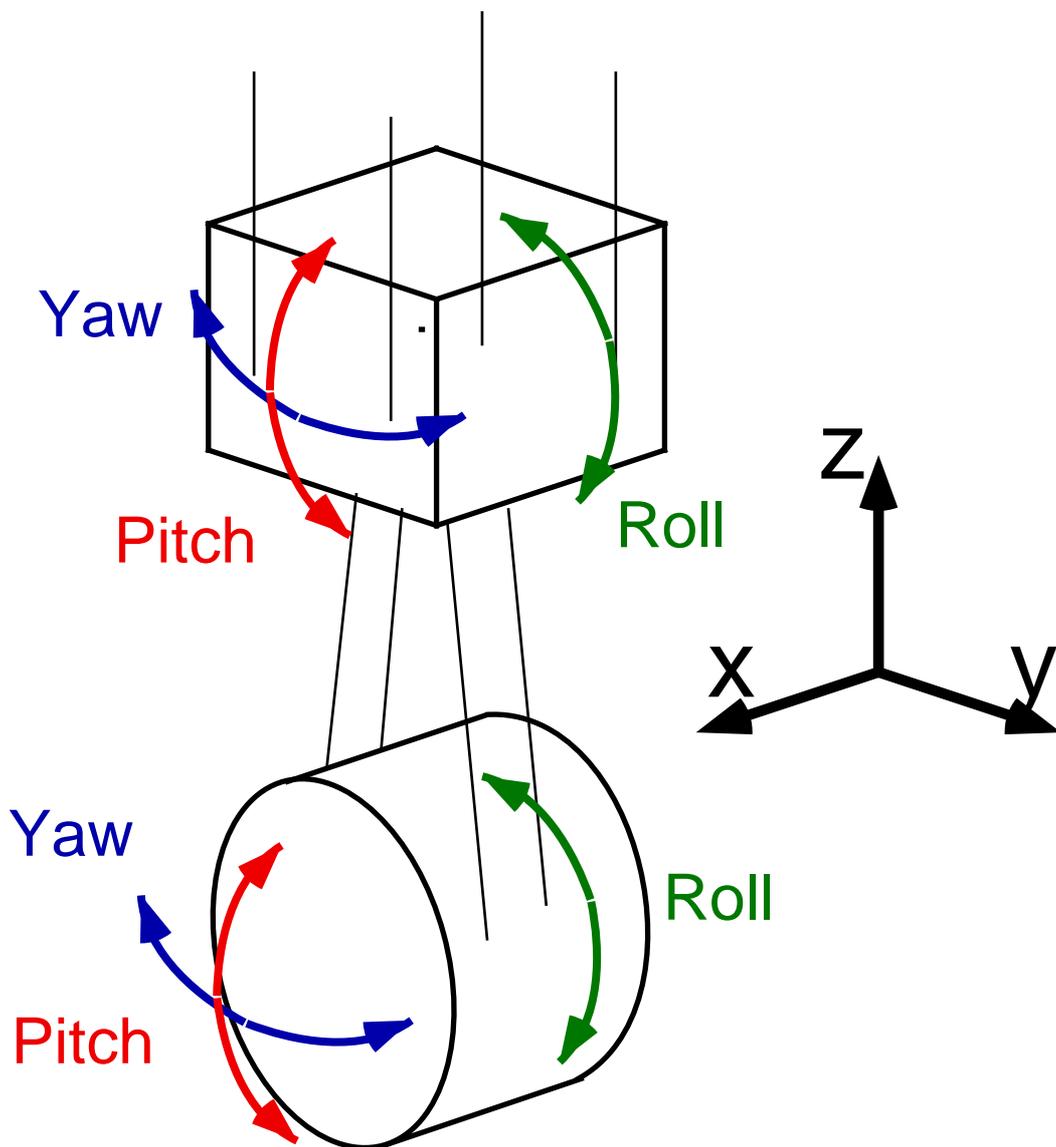


図 3.13 座標系

### 鏡の回転と干渉計

並進運動と同様に、鏡が回転することによって干渉計に生じる影響は次の 2 種類に大別される。

1. 防振比の悪化—図 3.14 に示したように，鏡が回転している場合，レーザーが回転軸と交わらなければ鏡の回転が変位として検出されてしまう．
2. 安定動作の障害—鏡が定常的に振動していると，干渉計を構成する Fabry-Perot 共振器の固有モードに乱れが生じ，レーザーとのマッチングが低下してしまい，干渉効率が悪化する．

1 の効果をミスセンタリングという．鏡を厳密にセンタリングすることは不可能であるという現実的な問題から生じる効果である．これはおもに観測帯域での鏡の回転に対する防振比に関係する．2 の効果はミスアラインメントと呼ばれる．TAMA300 では干渉効率(コントラスト)の他にもリサイクリングゲインに影響を与える．これは仮にセンタリングが正確に行われていても生じる効果である．これは主に回転の RMS 振幅に関係する．いずれの効果も，回転の 3 つの自由度のうち，Pitch, Yaw モードにのみ関係し，Roll 方向にいくら鏡が回転していても，他のモードにカップルしない限りは問題とならない．

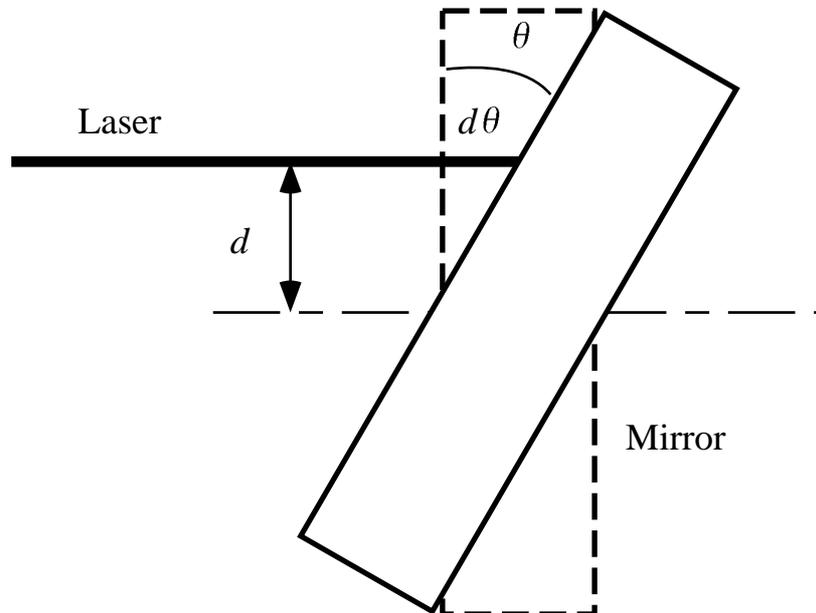


図 3.14 鏡の回転運動とミスセンタリング

では，このような鏡の回転運動はどのようにして引き起こされるのであろうか．並進運動の場合と同様に，回転の導入経路は次の 2 種類が考えられる．

1. カップリングによる並進-回轉變換 剛体の運動では，剛体の重心と外力の入力点とがずれていれば剛体には並進力の他にトルクが働くので，回転運動を起こす．懸架システムでは様々な制約から重心でワイヤーをクランプすることは不可能なので，たとえば X-Pitch のようなカップリングが常に存在する (図 3.15) ．
2. 外乱の回転成分による経路 地面振動などの外乱には，並進運動以外にも回転運動が存在する可能性がある．ちょうど地面の並進が鏡の並進運動を引き起こすように，地面の回転が鏡の回転に伝達する経路も存在する．

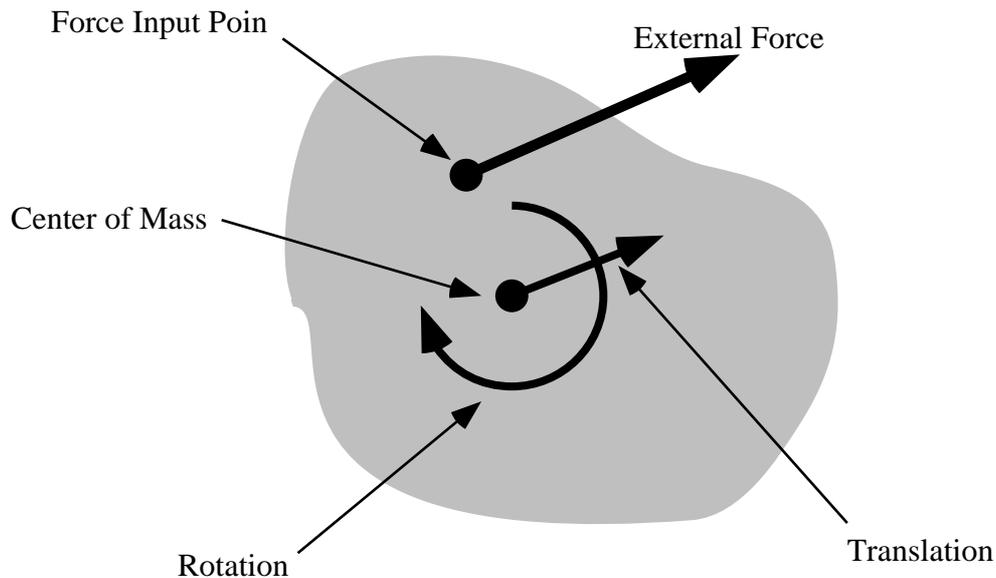


図 3.15 剛体の回転

### 3.4.2 回転の許容値と回転を扱う力学モデル

#### 回転の許容値の検討

懸架システムの並進運動に係わるパラメータを決定する際には、既に述べたように、まず目標値と外乱のモデル値を設定し、目標値を満たすための機構として2段振り子状の懸架システムを採用することを決定した。その後、これに現れるパラメータを質点モデルを用いて決定するという手続きを踏んでいる。しかし、回転運動に関するパラメータ決定においては、外乱の大きさに定説がないうえ、カップリングの特性も並進に係わるパラメータを決定した際にある程度制限されてしまうので、並進のパラメータ決定ほどの自由度はない。また全てのパラメータは、防振特性だけではなく実現可能な値をとらなくてはならない。たとえば鏡を吊るワイヤー間の間隔を1mmとしてしまうと、鏡を安定に吊ることが困難なので、これは採用できない。その他にも、コントロールブロックには既製の光学ステージを利用するため、中段マスを吊るすワイヤーの間隔がステージの大きさによって制限を受ける。したがって、ここではまず回転に係わるパラメータを現実的な要請から適当に決定し、これが目標値を満たすことを確認することにする。

地面振動の回転成分については、その起源、典型値などの性質がほとんど知られていない。したがって、懸架システム試作機のパラメータ決定を行った時点では前節第1項の並進-回転のカップリングにのみ着目して、カップリングを抑制することによって回転を防振しようと試みられた[16]。ここでは1の項目に加えて2についても地面振動の回転成分の推定値を用いて検討する。

ミスセンタリングによって現れる変位は、レーザーが鏡の回転中心からどれだけずれているかということに依存する。ミスセンタリングの大きさや、これを抑制する方法については実験例はないが、1mmの精度ならば可能であると考えられている[20]。

TAMA300のphaseIIでの目標感度は $h_{\text{RMS}} \sim 3 \times 10^{-21}$ であり、これが観測帯域150~450Hz

で一定なスペクトル分布を持つとすると、 $5.2 \times 10^{-20} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$  となる。ミスセンタリングによって生じる擬似的な並進運動がこれを下回らなくてはならない。すなわち、ミスセンタリングが  $d_m$  のとき、鏡の回転角が  $\theta_{\text{rad}}/\sqrt{\text{Hz}}$  ならば、 $d\theta_m/\sqrt{\text{Hz}}$  だけ鏡が光軸方向に移動することと等価であり、鏡は4枚あるため1台の懸架システムでの値を2倍した量が目標値より十分小さいことが必要である<sup>9</sup>。本論文では、ちょうどこの条件が満たされている状態を安全率1とする。

干渉計のコントラストが99%、ミスアラインメントによって生じるリサイクリングゲインの低下が10%以内という条件から、鏡の回転のRMS振幅については  $5 \times 10^{-7} \text{ rad}$  以下という制約が課せられる [15]。

## 剛体モデル

懸架システムの並進運動に係わるパラメータを決定する際には、質点モデルという比較的単純なモデルを利用した。しかし、既に述べたように質点モデルではマスの回転を扱うことはできない。そこで、マスの大きさやワイヤークランプ点の位置などの幾何的な条件を盛り込んだモデルを用いる必要がある。

懸架システムを構成する鏡や中段マス、サスペンションポイントを構成する枠体等はすべて弾性体である。そのためそれらには伸びや曲げといった内部振動の自由度が存在する。したがって、厳密にはこれらを全て弾性体として取り扱い、内部振動を盛り込んだ力学モデルを用いるべきである。しかし、たとえばマスの内部運動の共振周波数は10kHz以上であり [17]、観測帯域と比べても十分に高い。そのためマスのような比較的小さく、硬い弾性係数を持つ物体の内部共振が地面振動等の外乱によって励起される効果はほとんど無視できる。

しかしながら、懸架システムを支持する枠体の内部共振や、縦防振に用いるバネなど柔らかい部品の内部共振周波数は数十Hzから存在し、多くの場合その高次モードも存在するため、観測帯域にこれらの内部共振が存在する可能性があるため、やはりこれらを弾性体として取り扱うべきであるが、これらの構成部品の形状が複雑であるため内部振動を厳密に計算することは困難である。そこで、ここでは懸架システムの構成部品は全て理想的な剛体と見なした剛体モデルと呼ばれるモデルを用いて計算を行う。剛体モデルでは、鏡と中段マス、ダンピングマグネットは全て理想的な剛体であるから、その内部共振は存在せず、3軸並進と3軸回りの回転運動のみを取り扱う。また、ワイヤーやバネはフック則にしたがうものとして取り扱い、その弦振動モードや高次の振動モードは扱わない。

剛体モデルにおいても、防振比などの計算自体は多自由度の質点モデルの場合と本質的には全く同一の扱いが可能である。質点モデルにおいては並進の自由度のみを取り扱ったが、剛体モデルでは並進自由度に加えて回転の自由度を加える点異なる。これに伴って質量行列  $M$  には、マスの質量だけでなく慣性モーメントの項が加わり、剛性行列  $K$  と減衰行列  $C$  の成分も若干複雑になる。坪野研究室には *Mathematica* を利用して剛体モデルの行列  $H$  を数値的に計算するプログラムがあり、実際の計算にはこれを用いた。このプログラムには、懸架システムを (a)  $x$ - $z$  平面に投影して計算を行うものと (b)  $x$ - $y$  平面への投影に対して計算を行うものの2種類がある (図 3.16)。(a) のモデルでは、 $x, z, \text{pitch}$  の自由度、(b) は  $\text{yaw}$  の自由度を計算するために用いた。 $y$  及び  $\text{roll}$

<sup>9</sup>2 乗振幅で4倍 (鏡の枚数倍) であり、RMS 振幅でいえば、 $\sqrt{4} = 2$  倍ということになる。

の自由度に関しては，懸架システムの防振特性にあまり影響を与えないため，ここではモデルによる評価は行わない．

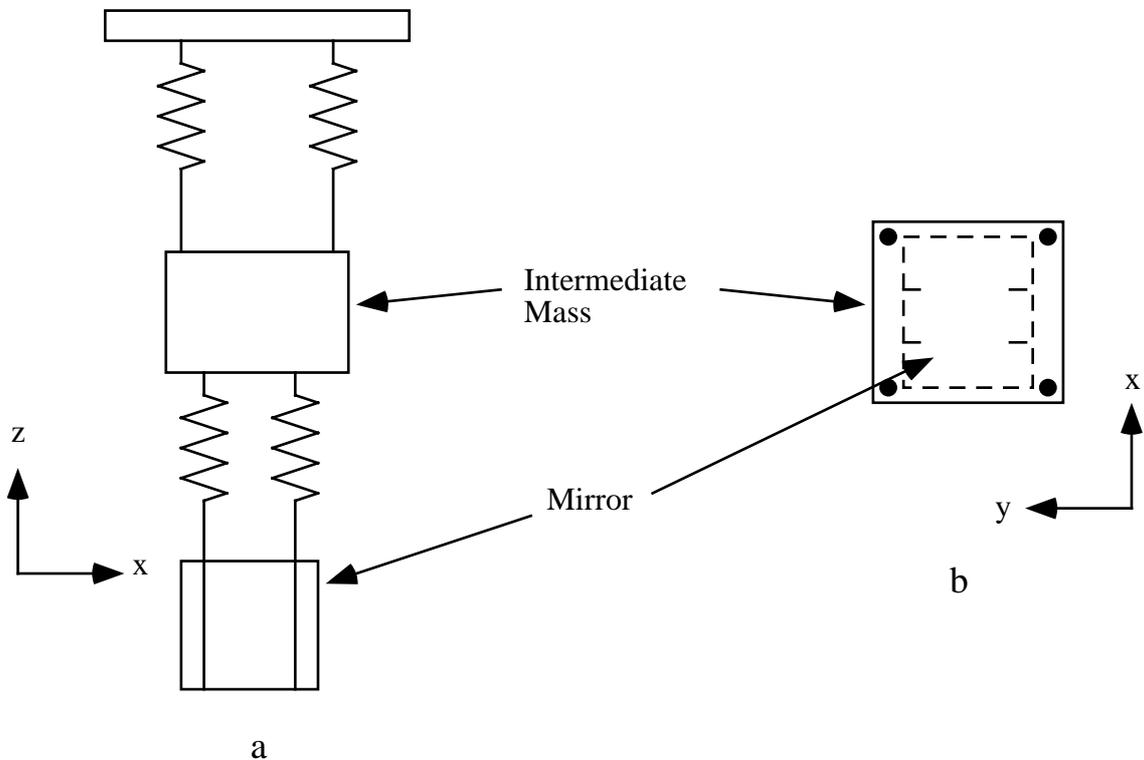


図 3.16 剛体モデル

### 3.4.3 回転に関するパラメータ

#### ワイヤーの取付位置

さて，並進方向の防振特性から表 3.1 のとおりパラメータを決定した上で，試作機の回転に関して新たに現れるパラメータとは具体的にいうと，図 3.17 に示した，ワイヤーがマスから離れる点の位置である．TAMA300 の懸架システムではサスペンションポイントを移動させてマスの位置，姿勢のドリフト制御を行うため，上下のマスはどちらも 4 本のワイヤーで懸架される必要がある．マスに働く力の入力点はこれらのワイヤーとマスとの接点であるから，ワイヤーの位置が入力トルクに大きく影響するのである．既に述べたとおり，実際の懸架システムでは防振特性以前に安定的にマスを吊る必要などからこれらのワイヤー取付位置の自由度はそれほど高くはない．表 3.2 に，中段マスに関するパラメータを示した．

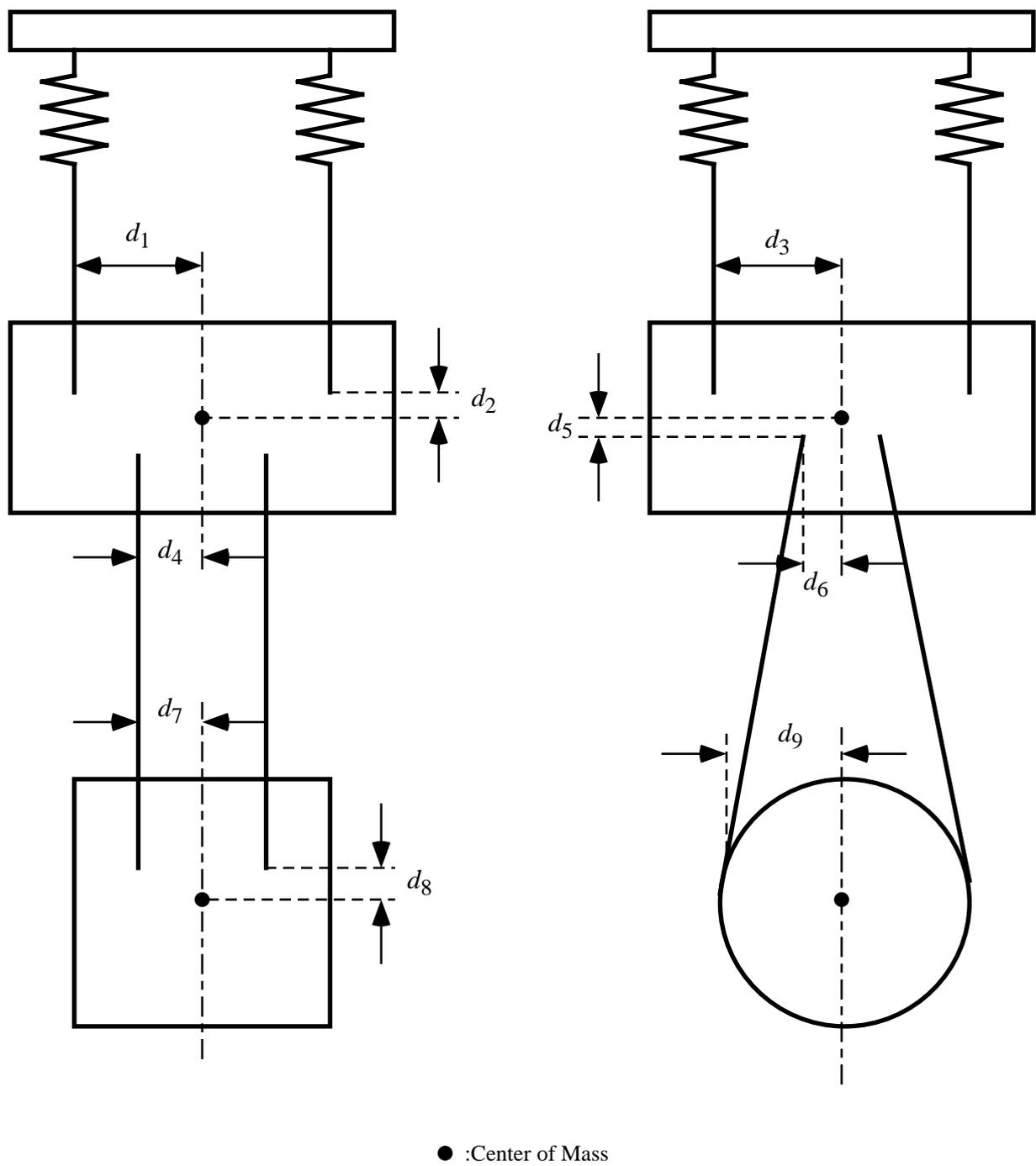


図 3.17 ワイヤの取付位置

$d_1$	45 mm*
$d_2$	0.2 mm
$d_3$	35 mm*
$d_4$	10 mm
$d_5$	0.2 mm
$d_6$	5.9 mm**

表 3.2 中段マスへのワイヤー取付位置

表 3.2 内で，\* をつけたものはコントロールブロックに用いる光学ステージの大きさによって制限を受けた量である．\*\* は，ワイヤーの弦振動モードの共振周波数が観測帯域以上になるようにするという制限から決定された量である [16] ．

ところで，図 3.15 に示したように，外力の入力点とマスの重心とがずれている場合マスにトルクが働くが，たとえば  $d_8 = 0$  のように，マスの重心とワイヤー取付位置の高さが一致している場合，ワイヤーを介して  $x$  方向に外力が加わっても，トルクは発生しない．したがって，X-pitch のカップリングを抑制するためには，ワイヤー取付点とマスの重心の高さを可能な限り一致させるのが有効である．中段マスにおいてはこの高さの差は表 3.2 に示したように 0.2mm 程度に抑えられているが，鏡については，パラメータ  $d_6$  と中段マスと鏡の重心間距離が決まってしまうと， $d_8$  も幾何学的に自動的に決定されてしまう．ワイヤーで直接鏡を吊ったとすると， $d_8 = 8.8\text{mm}$  となり，これでは重心とワイヤー取付点とが離れすぎてしまう．そこで，図 3.18 に示したように，ワイヤーと鏡の間に棒状の物体を挟み込んで，この棒の位置を調節して鏡の重心とワイヤークランプ点を一致させる．このようにすると両者の高低差は約 0.1mm 程度に抑えることが可能である．この棒状の物体をスタンドオフと呼ぶ．懸架システム試作機では直径 3mm の銅製の棒をスタンドオフとして用いた．これを用いた場合の鏡に関するパラメータを表 3.3 に示す．

$d_7$	10 mm
$d_8$	0.1 mm
$d_9$	51.5 mm

表 3.3 鏡へのワイヤー取付位置

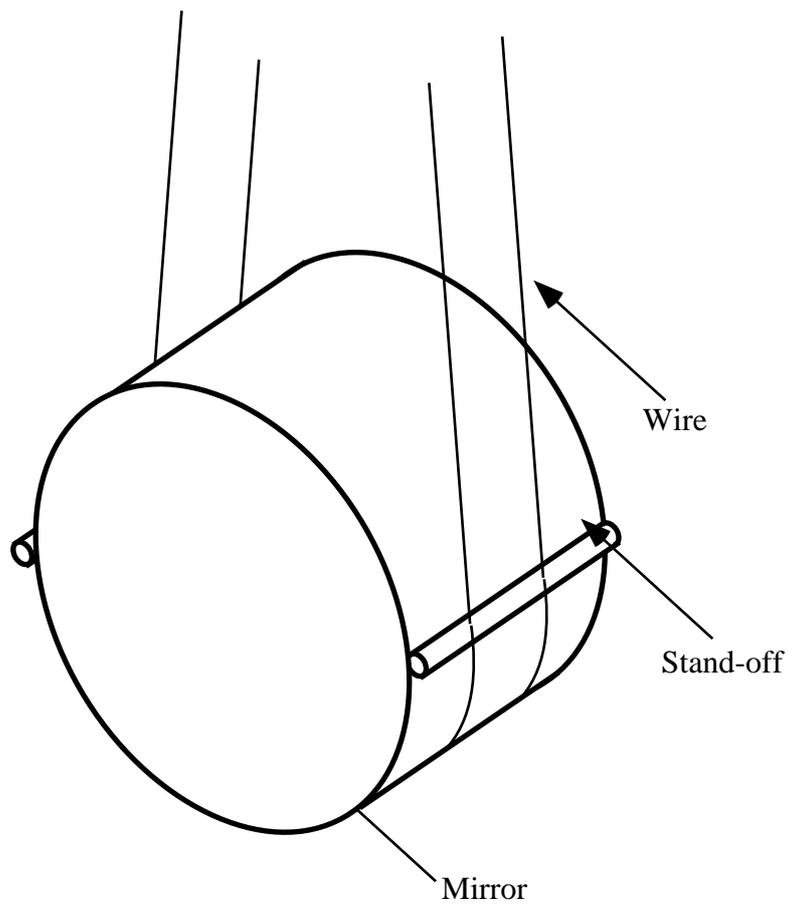


図 3.18 スタンドオフ

#### 3.4.4 防振特性の評価

前節で決定されたパラメータに基づいて、懸架システムの Pitch, Yaw 回転に関する防振比を剛体モデルで数値計算した。その結果について議論する。

##### 試作機の共振

剛体モデルを用いて、懸架システム試作機各モードの共振周波数と、その Q 値を求めた (表 3.4)。

共振の種類	共振周波数 [Hz]	Q 値
X	0.83	3.39
Yaw	1.56	1.59
X	1.98	0.80
X(ダンピングマグネット)	4.08	2.2
Pitch	4.40	24.3
Z	4.49	24.3
Yaw	4.71	4.48
Yaw(ダンピングマグネット)	8.29	10.2
Z(ダンピングマグネット)	8.85	3.3
Pitch	10.54	3.78
Pitch(ダンピングマグネット)	10.76	73.6
Z	23.2	21.7

表 3.4 試作機的主要共振の周波数と Q 値

### X-Pitch 防振特性

図 5.14 に、鏡、中段マスおよびダンピングマグネットの X-Pitch 防振比を示した。どのマスについてもワイヤー固定点とマスの重心の高さがある程度一致しているため、ピーク部でも伝達関係が 1 を越えない。

パワースペクトル密度および RMS 振幅を評価するために、鏡の X-Pitch 防振比に、式 (3.1) の地面振動のモデル値をかけたものを図 3.20 に示す。図中、実線は X-Pitch の伝達経路で引き起こされる鏡の Pitch 振動のパワースペクトルの推定値あり、破線はこれを 1kHz から低い周波数に向かって積分した RMS 振幅を示す。たとえば、100Hz に対応する値は 100Hz~1kHz の積分値を表している。また、ハッチした部分は、ミスセンタリングを 1mm とし、観測帯域で平坦な感度特性を仮定した場合の光路長変化の許容値に対応するパワースペクトル密度を示している。

これによると、観測帯域では十分に余裕を持って目標値を実現していることが分かる。観測帯域での RMS 振幅は  $3.2 \times 10^{-19}$  rad であり、ミスセンタリングを 1mm とすると、これは  $h_{\text{RMS}} = 1.1 \times 10^{-24}$  に対応するため、TAMA300 の phaseII での目標感度に比べると、安全率は  $10^3$  ほどなので、無視できるほどである。また、全帯域 (0.1Hz~1kHz とする) での RMS 振幅はほぼ 4Hz 付近の共振で決定されており、その値も許容値  $5 \times 10^{-7}$  rad よりも 1 桁以上小さな値にとどまっており、十分に目標を達成している。モデルと異なり、実際の地面振動には microseismic peak などのピーク構造が存在するため、RMS 振幅は若干大きくなることが予想されるが、この経路で許容値を超える可能性は低い。

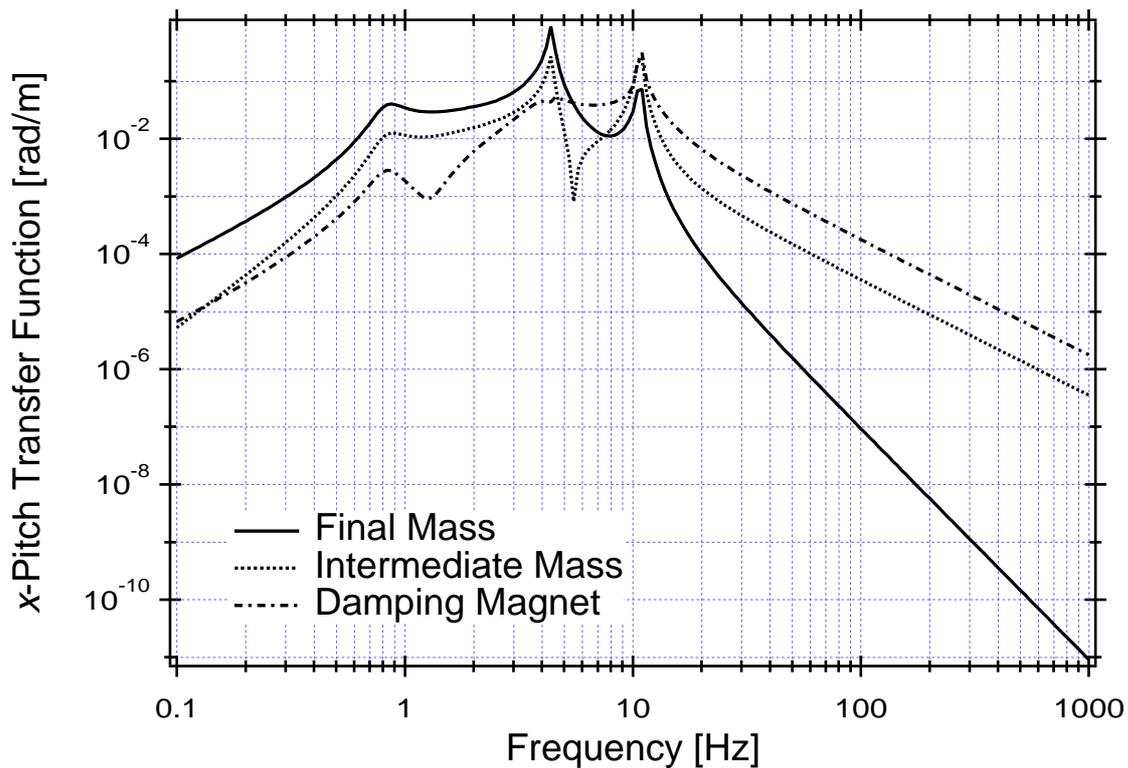


図 3.19 X-Pitch 伝達関数

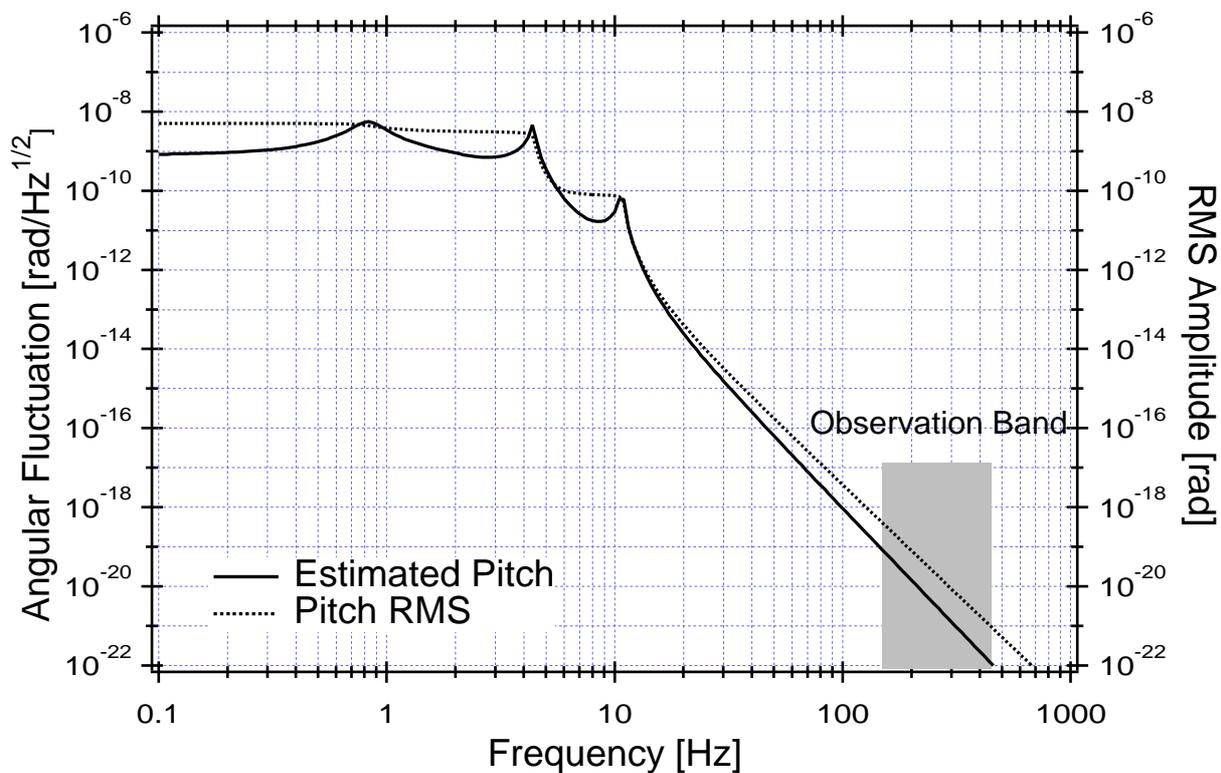


図 3.20 X-Pitch 経路による Pitch 揺れのパワースペクトル密度と RMS 振幅

### Pitch-Pitch 防振特性

図 5.14 に、鏡、中段マスおよびダンピングマグネットの Pitch-Pitch 防振比を示した。

Pitch-Pitch の防振特性を評価するためには、地面振動の Pitch 成分のパワースペクトル密度を知る必要がある。第 6 章で地面振動の回転成分の測定について述べるが、ここでは簡単なモデルを用いて Pitch 成分のパワースペクトル密度を推定する。

一般に地面振動の回転成分の発生起源は明らかにされていないが、傾斜 (Pitch) 成分に関して、しばしば地震波の SV 波<sup>10</sup> との関連が指摘されており、縦振動のスペクトルとの間に次のような関係が成り立つと考えられている [23][29]。

$$S_{\theta}(\omega) = \frac{\omega}{c} S_V \quad (3.43)$$

ここに、 $S_{\theta}, S_V$  はそれぞれ、地面振動の Pitch、鉛直成分のパワースペクトル密度を表し、 $c$  は地震波の進行速度である。これは周波数にもよるが通常 1km/sec 程度の値をとる [23]。地面振動に関しては、広くその等方性が認められており、3 軸の並進成分は全て等しいパワースペクトル密度を持ち、3 軸まわりの回転成分に関しても等方的であると考えられている。したがって、鉛直成分にモデル式 (3.1) を用いると、Pitch 成分のパワースペクトル密度は、

$$\begin{aligned} & 2\pi 10^{-8} \quad [\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}] \quad (f < 0.1\text{Hz}) \\ & \frac{2\pi 10^{-9}}{f} \quad [\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}] \quad (f > 0.1\text{Hz}) \end{aligned} \quad (3.44)$$

となる。これと剛体モデルによって求められた Pitch-Pitch 伝達関数との積を示したものが図 3.22 である。図中、ハッチした部分は図 3.20 と同義である。推定スペクトル密度が観測帯域下端でハッチ部と重なってしまうが、観測帯域での RMS 振幅は  $7.4 \times 10^{-17}$  rad であり、これは  $h_{\text{RMS}} = 2.5 \times 10^{-22}$  に対応するため、phaseII での感度を十分に下回っている。全帯域での RMS 振幅は共振部で決定され、その値は  $3.5 \times 10^{-9}$  rad であり、これも許容値を十分に下回っている。

<sup>10</sup>地面振動の鉛直成分と傾斜の起源とされる横波。地震波にはこの他にも SH 波 (水平成分と Yaw 回転の起源とされる)、P 波 (縦波) がある

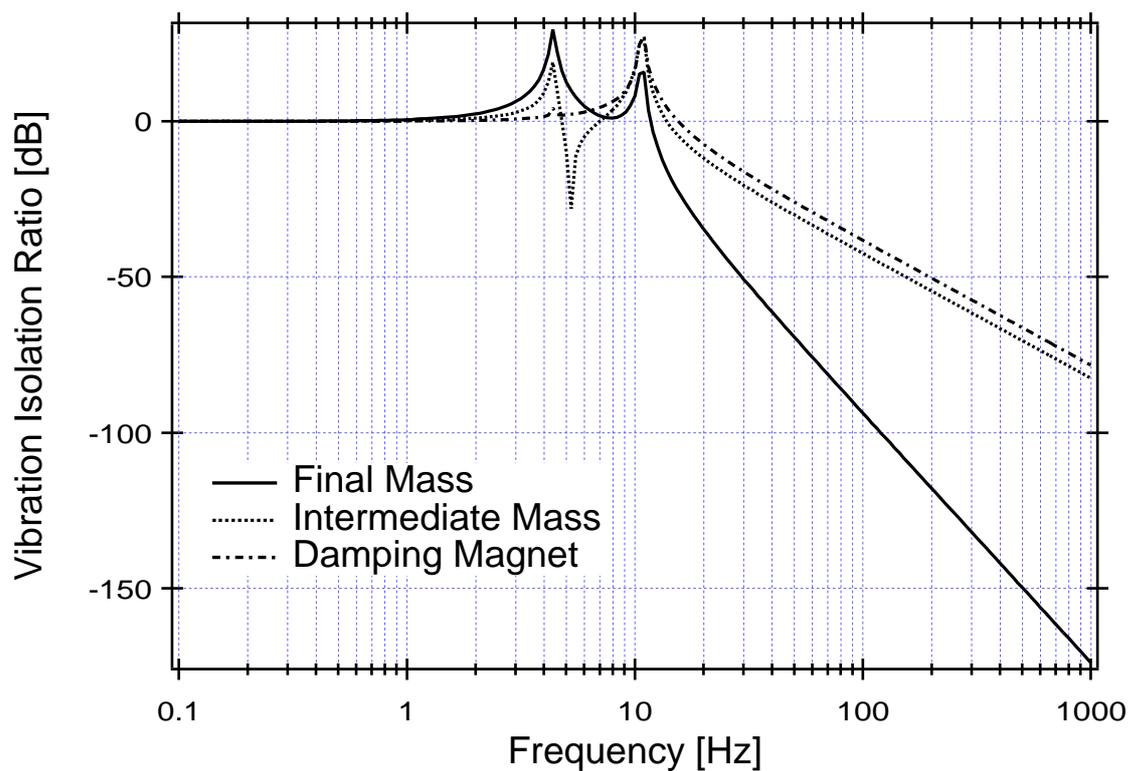


図 3.21 Pitch-Pitch 伝達関数

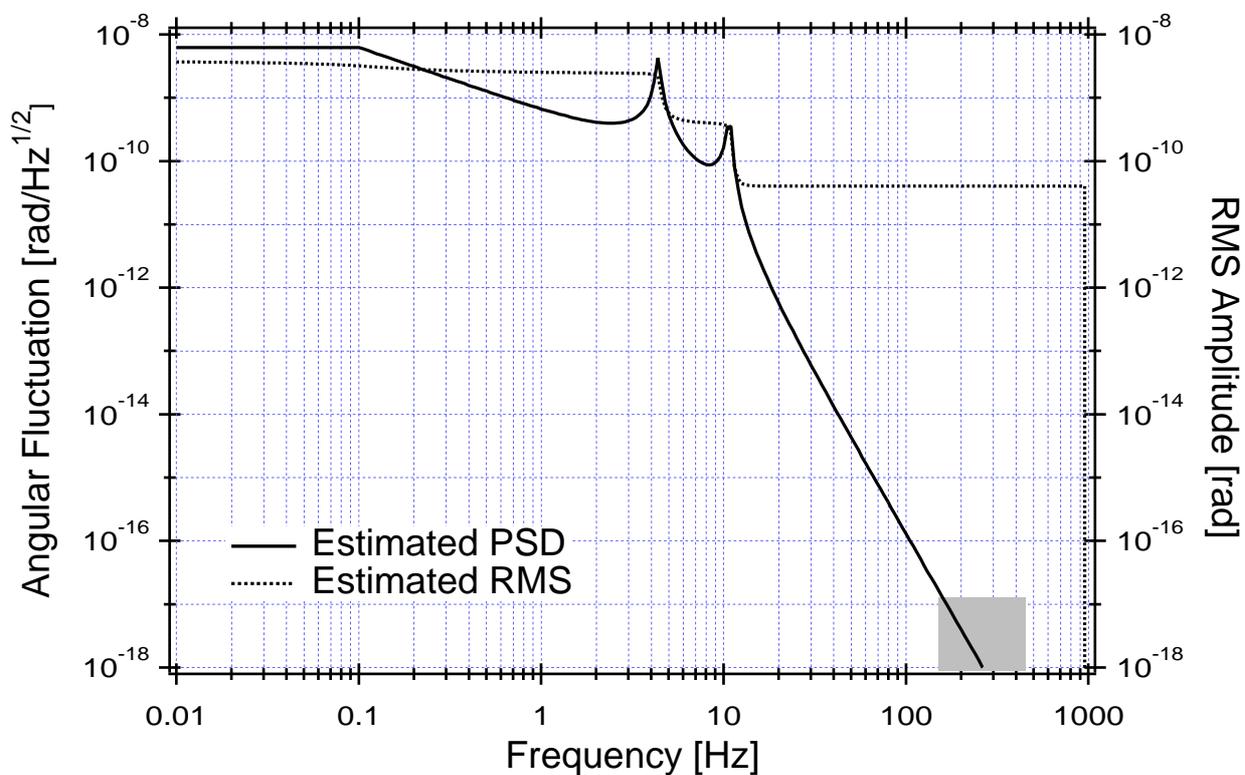


図 3.22 Pitch-Pitch 経路による Pitch 揺れの推定パワースペクトル密度と RMS 振幅

## Yaw-Yaw 防振特性

懸架システムを真上から見ると、マスに関しては完全に2回対称になっているため、X-Pitchのカップリングの項で見たマスの重心とワイヤー固定点の高さの食い違いのように、設計段階で予見される非対称性は存在しない。したがって、ここでは外乱の Yaw 成分から鏡の Yaw 回転への伝達関数に限ってを評価する。

図 5.13 に剛体モデルで求めた Yaw-Yaw 伝達関数、図 3.24 に、推定される地面の Yaw 回転スペクトルに鏡の Yaw-Yaw 伝達関数を乗じて求めた Yaw の推定スペクトルを示す。地面振動の Yaw 成分に関しては、Pitch との一樣性を仮定し、式 (6.2) を用いた。これによると、パワースペクトル密度に関しては、観測帯域で目標値を 100 分の 1 以下になっており、問題とならない。また、観測帯域での RMS 振幅は  $2.2 \times 10^{-19} \text{ rad}$  ( $h_{\text{RMS}} = 7.2 \times 10^{-25}$ ) であり、これも目標値を達成している。全帯域での RMS 振幅についても、全く問題とならないことがグラフから見て取れる。

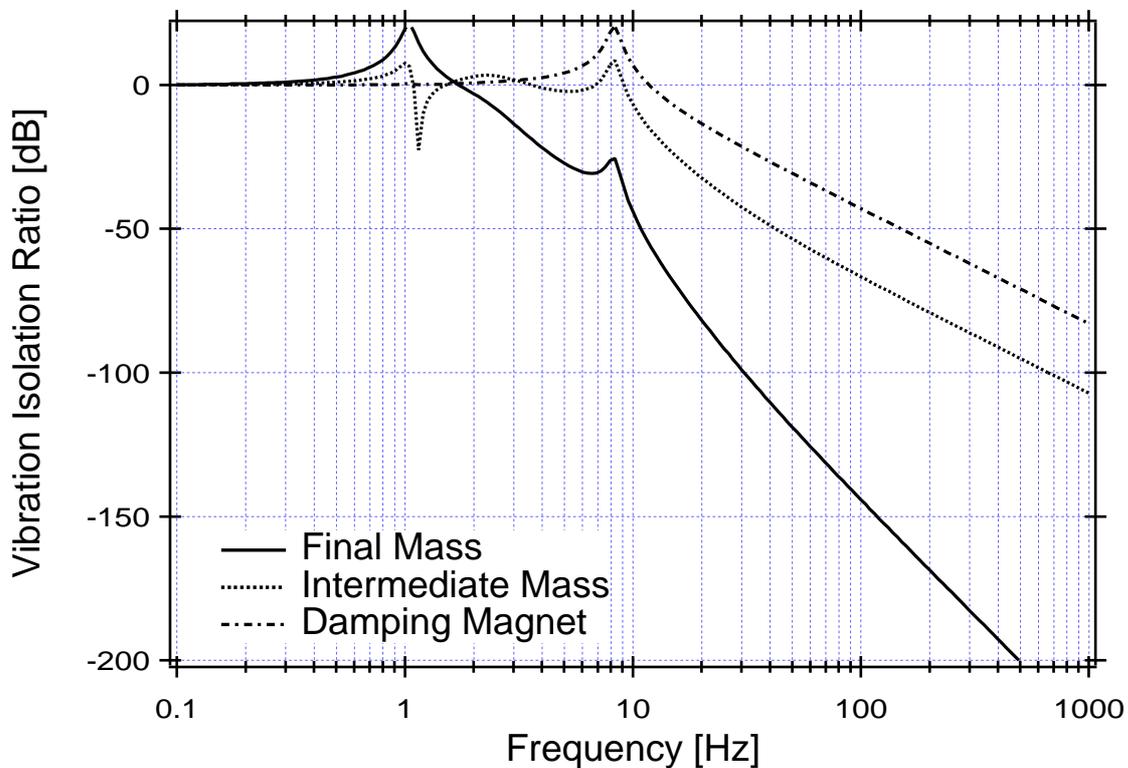


図 3.23 Yaw-Yaw 伝達関数

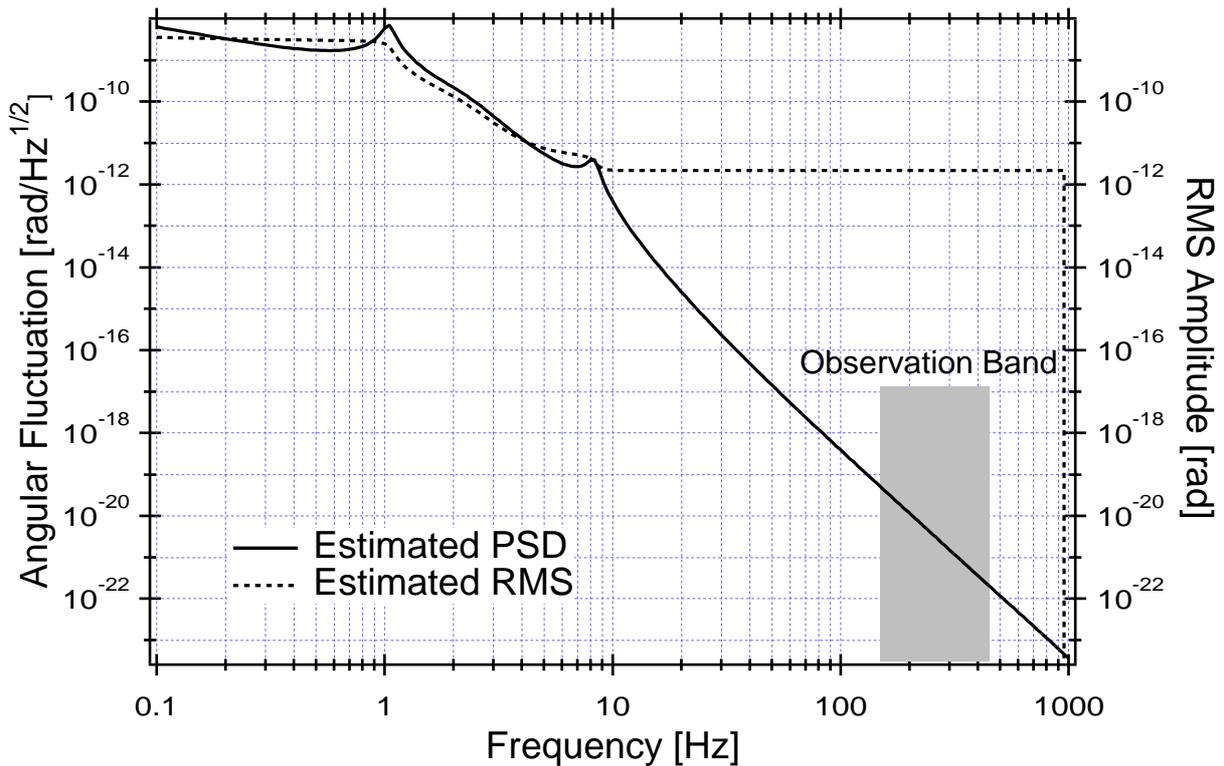


図 3.24 Yaw-Yaw 経路による Yaw 揺れの推定パワースペクトル密度と RMS 振幅

### 熱雑音

ここまでの議論では、地面振動についてあるモデルを仮定すると、懸架システム試作機が回転について十分な防振特性を有していることを確認してきたが、懸架システム内部に起源を持つ熱雑音についてはどうであろうか。

既に 3.2.6 節で述べたように、力学系の熱雑音を知るためには系のコンプライアンスを求めればよい。そのためには系の運動方程式をたてる必要があるが、防振比計算をするために用いた剛体モデルはまさにそのための力学モデルである。すなわち、剛体モデルを用いて運動を記述する各種行列  $M, C, K$  をもとめ、これから行列  $H$  を計算し、その逆行列を適当な外力ベクトル  $\vec{F}$  にかけてやればよい。 $\vec{F}$  は、防振比計算の場合にはサスペンションポイントの運動によって系に加わる外力に対応したが、コンプライアンスを計算するときは単にある自由度に任意の力を与えればよい。

このようにして、Pitch の熱雑音のパワースペクトル密度を求めたものを図 3.25 に破線で示す。ただしこのとき、剛体モデルは防振比計算の場合と全く同様に取り扱い、熱雑音源としてはダンピングマグネットによる力学的エネルギーの散逸しか仮定していない。このとき、共振周波数より十分高い帯域において熱雑音のパワースペクトル密度は  $f^{-4}$  に比例する。これに対して、剛体モデルにおいて剛性行列  $K$  の成分  $k_{ij}$  を、

$$k_{ij} \rightarrow k_{ij}(1 + i\phi) \quad (3.45)$$

$$\phi = \frac{1}{Q_{\text{wire}}} \quad (3.46)$$

とおきかえ，structure damping を導入した場合のスペクトル密度を図 3.25 に実線で表した．ただし，ワイヤーによる散逸の  $Q$  値は，過去になされた測定の結果から  $10^5$  とした [18]．structure damping では，パワースペクトル密度は低周波においてはダンピングマグネットの寄与に比べてずっと小さいが， $f^{-5/2}$  に比例するため，ちょうど観測帯域あたりでダンピングマグネットの寄与を凌駕する．そのため 150Hz 付近でグラフの傾きが変化するのである．

防振比を計算する際には問題とならないワイヤーによる散逸であるが，熱雑音を議論する際には，特に高周波において考慮すべき量となってくる．

さて，このようにして求められた Pitch の熱雑音と防振の目標値とを比較してみよう．まず，パワースペクトル密度に関しては，グラフからわかるように観測帯域下端でパワースペクトル密度がハッチ部を越えているため，観測帯域で平坦な感度曲線を得るには不十分である．しかし，観測帯域での RMS 振幅は  $1.5 \times 10^{-16} \text{ rad}$  ( $h_{\text{RMS}} = 4.9 \times 10^{-22}$ ) であるから，許容値は十分に達成しているといえる．全帯域での RMS 振幅は  $6.5 \times 10^{-11} \text{ rad}$  であり，ミスアラインメントに関しては問題にならない．

Yaw についても同様に熱雑音の推定を行った (図 3.26)．パワースペクトル密度はハッチ部を越えず，観測帯域での RMS 振幅  $1.9 \times 10^{-17} \text{ rad}$  ( $h_{\text{RMS}} = 6.4 \times 10^{-23}$ )，全帯域での積分値  $2.8 \times 10^{-23} \text{ rad}$  であるので，RMS 振幅，スペクトルともに目標値を下回っている．

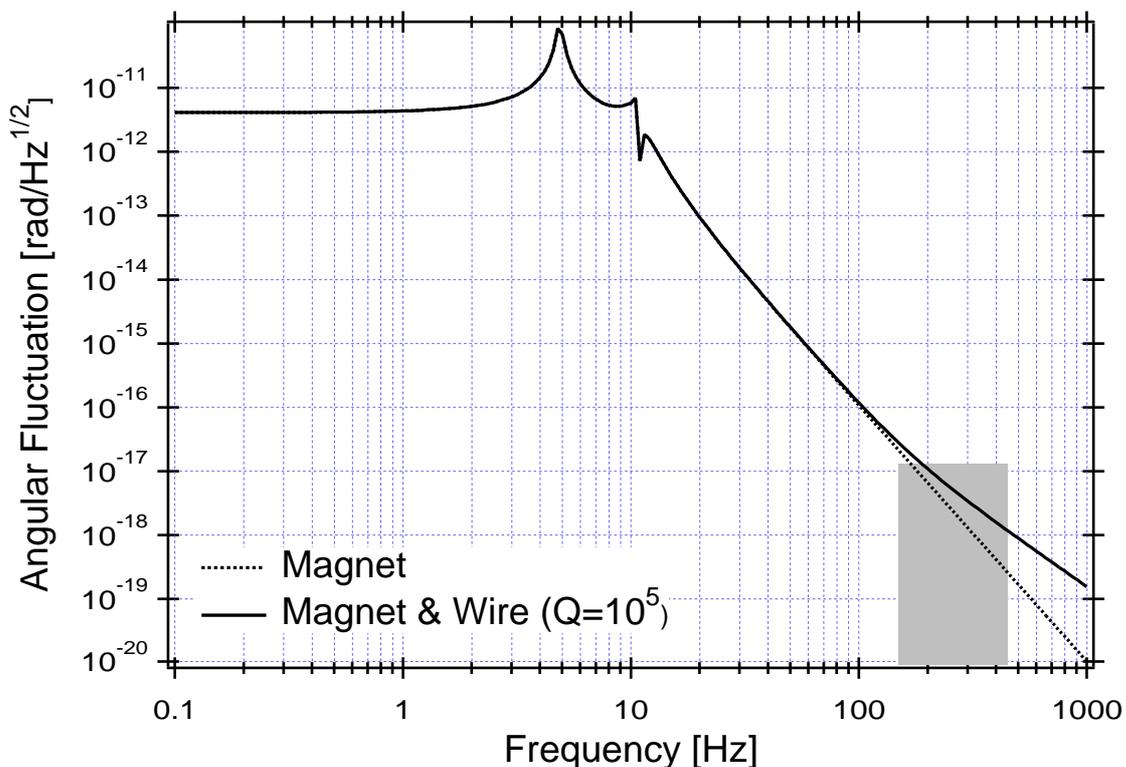


図 3.25 Pitch モードの熱雑音のパワースペクトル密度

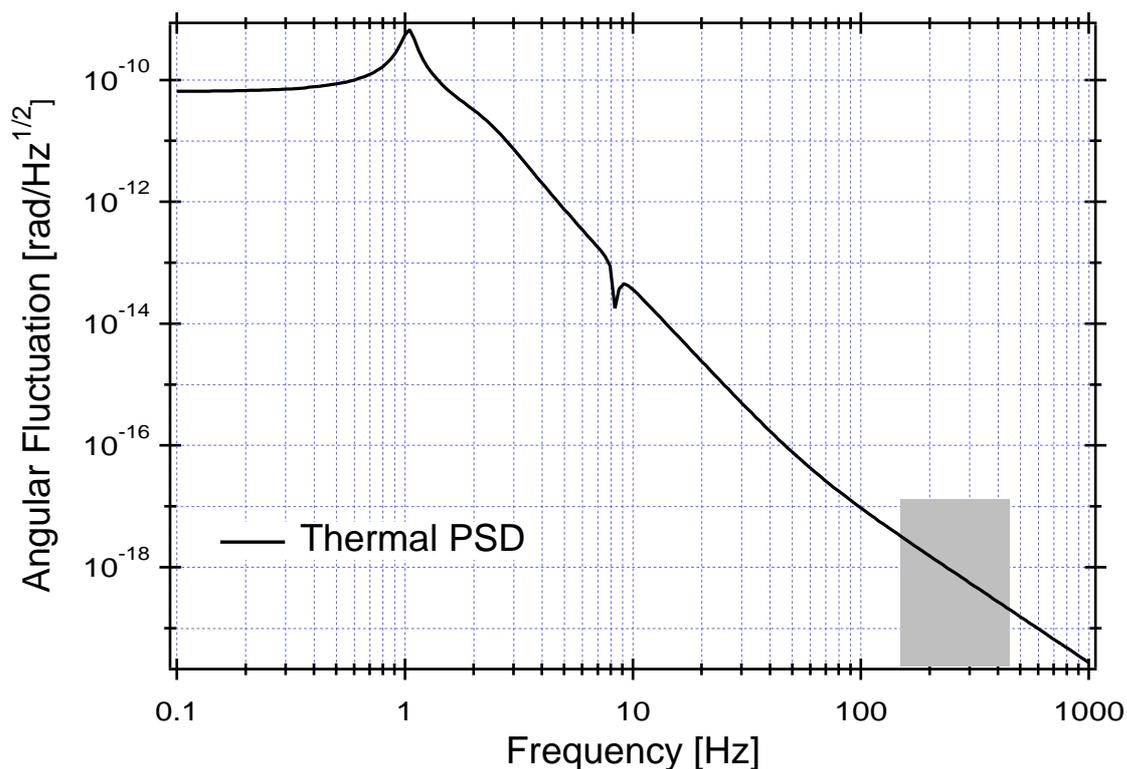


図 3.26 Yaw モードの熱雑音のパワースペクトル密度

### 3.4.5 懸架システムの非対称性と Pitch モード

懸架システムの回転運動についてここまで述べてきたのは、

- 地面振動の水平成分を起源とする Pitch モードの振動
- 地面振動の回転成分を起源とする懸架システムの回転
- ダンピングやワイヤー等での力学的エネルギー散逸を起源とする熱雑音

である。これらはいずれも懸架システム的设计段階で予想される、比較的不確定性の少ない要素であった。しかし、現実の懸架システムにおいては、これら確定的な要因の他に、非対称性という問題が存在する。懸架システムに非対称性があると、たとえばサスペンションポイントの  $z$  振動がマスの Pitch 振動を引き起こすなど、理想的な懸架システムでは直交するモード間にカップリングが生じることになる。先に述べた X-Pitch カップリングも一種の非対称性ととらえることもできる。ワイヤー固定点がマスの重心高さとは必ず異なるという非対称性が存在するからこそ、両者が正確に一致しているときにはカップリング 0 である X-Pitch のカップリングが生じるわけである。

では、設計時には盛り込まれない非対称性とは具体的にはどのようなものであろうか。まず考えられるのは、工作精度の問題である。懸架システムを構成する部品数は 100 を越える。そのため、部品 1 つ 1 つの工作精度が高くても全体としてみたときにある程度の誤差がたまってしま

ことは避けられない．これによって，実際に製作された懸架システムと設計との間に食い違いが生じてしまう．また，工作精度の限界によって生じる誤差の入る位置は普通対称的ではないから，たとえば中段マスに取り付けられるワイヤークランプの位置のちょうど中心に中段マスの重心が来るとは限らない．また，工作精度だけではなく，材料の非対称性（非一様性）も問題となる．他にもペローズのバネ定数のばらつきなど，部品起因のものに限っても非対称性の入り込む余地は枚挙にいとまがない．さらに，これらの部品に生じる非対称性の他にも，組立時に生じる非対称性も考えられる．ワイヤーを固定する際にはワイヤーを金属片で挟み込むクランプと呼ばれる機構を用いるが，この金属片の締め付けトルクのばらつきによって真の固定位置がばらついてしまうし，ワイヤー切断時の長さのばらつきなどもある．その他にも作業をする台の水平が正確にでないことから生じる非対称性など，実に多岐にわたって非対称性の存在が予想されるうえ，これらを完全に取り除く手段は残念ながら存在しない．したがって，ここでは，予想される主な非対称性の量を見積もって，その防振特性への影響を考察することにする．本来ならば「非対称性に強い懸架システム」の設計を行うべきであるが，既に述べたように回転に関するパラメータ決定の自由度は高くはないのでこれは行わなかった．

ここでは，懸架システムに非対称性を導入するにあたって，剛体モデルを用いたモンテカルロシミュレーションを行った．すなわち，本来あるパラメータがとるべき値を  $\alpha$  とし，その非対称性によるずれを  $\delta\alpha$  とすると，非対称性導入後の  $\alpha_{as}$  は，

$$\alpha_{as} = \alpha + \delta\alpha \quad (3.47)$$

となるが，ここで  $\delta\alpha$  は適当な標準偏差  $\sigma$  をもったガウス分布に従うものとしてランダムに発生させた．このようにして各所に非対称性を盛り込んだ懸架システムについて，剛体モデルを用いて防振比を求めるという試行を，非対称性を導入する場所を変えながら 100 回ずつ行った．

今回のシミュレーションで考慮した非対称性は表 3.5 の通りである．ペローズのバネ定数のばらつきは実測値から経験的に決定した．また，ワイヤーの自然長が変動することによって，同時にそれらのバネ定数もそれに応じて変化する．ワイヤー固定点の位置のばらつきは懸架システム試作機のワイヤークランプに残ったワイヤーの跡から判断した．

場所	中心値	$\sigma$
ペローズのバネ定数	450 [N/m]	45 [N/m]
中段マスを吊るワイヤーの自然長	245.7 [mm]	2 %
鏡を吊るワイヤーの自然長	252.6 [mm]	2 %
ワイヤー固定点の位置 (上下左右)	-	0.1 [mm]

表 3.5 シミュレーションで用いた非対称性

さらに，ある場所の非対称性が防振特性に与える影響を個別に見るために，全体に一度に非対称性を与えるだけではなく，

#### 1. ペローズのみに非対称性を与える

2. 中段マスを吊るワイヤーの自然長と固定位置にのみ非対称性を与える
3. 鏡を吊るワイヤーの自然長と固定位置にのみ非対称性を与える
4. 上記3項同時に非対称性を与える

の4通りについて計算を行った。

一度に全ての非対称性を導入した場合

図3.27, 図3.28, 図3.29に, 一度に全部の非対称性を盛り込んだ試行の結果を示す。ハッチされた部分は, 全100回の試行の最大値と最小値に挟まれた領域である。図3.27に実線で示したものは, 非対称性が存在しない場合の Pitch-Pitch 防振比である。図3.28, 図3.29では非対称性のない場合の X-Pitch 防振比を実線で示す。

図3.27からわかるように, Pitch-Pitch の防振比は非対称性の影響をほとんど受けないが, 他の図からは並進-Pitch のカップリングの大きさは非対称性によって大きくばらつくことが見て取れる。特に, 非対称性によって現れる Z-Pitch の伝達関数は最小の場合でもほぼ全帯域で X-Pitch 伝達関数を凌駕しているうえ, 最悪値はピーク部で100を越えている。これに対して X-Pitch の伝達関数は最悪でも非対称性を考慮しない場合の10倍程度にとどまっている。それぞれの伝達関数に関して, 並進地面振動として式(3.1)を仮定した場合のRMS振幅について表3.6にまとめる。Z-Pitch カップリングの最大値では, 観測帯域, 全帯域でのRMS振幅ともに目標値を満たさない。したがって, この経路によって懸架システムが目標を達成しない可能性があるが, これはできるだけ非対称性ができないように製作した懸架システムを用いて, 実際に実験的に検証しなくてはならない。

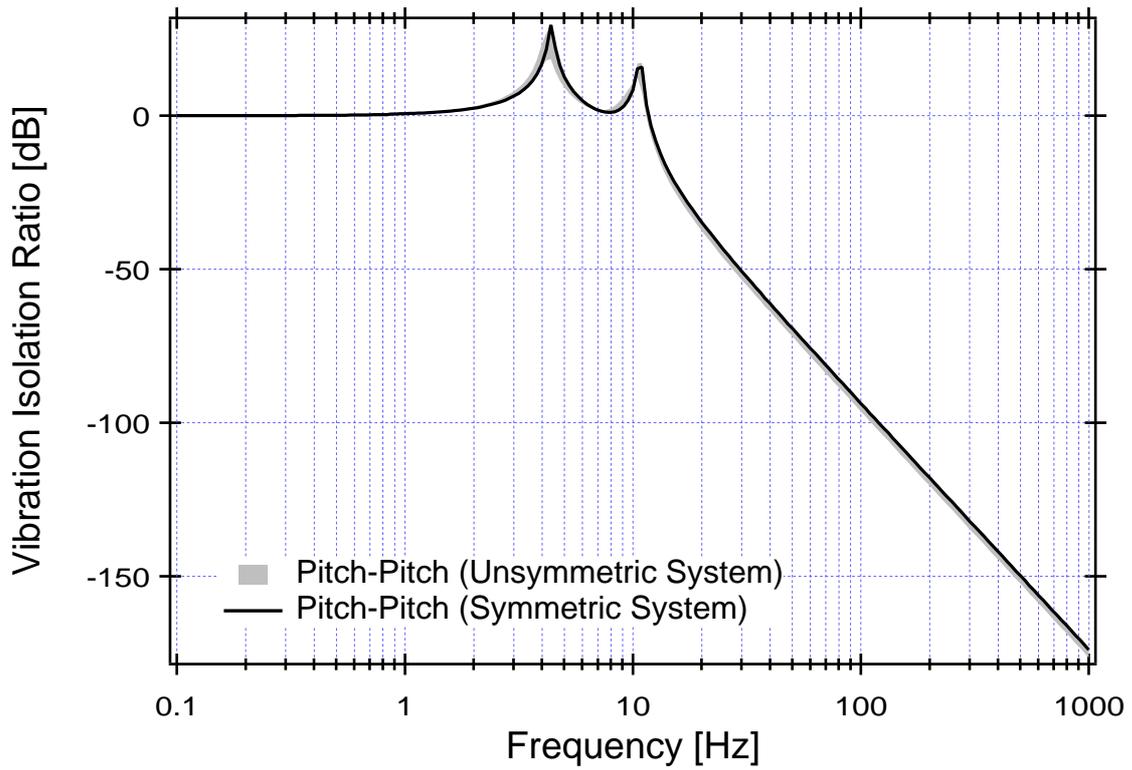


図 3.27 非対称性の存在するときの Pitch-Pitch 防振比

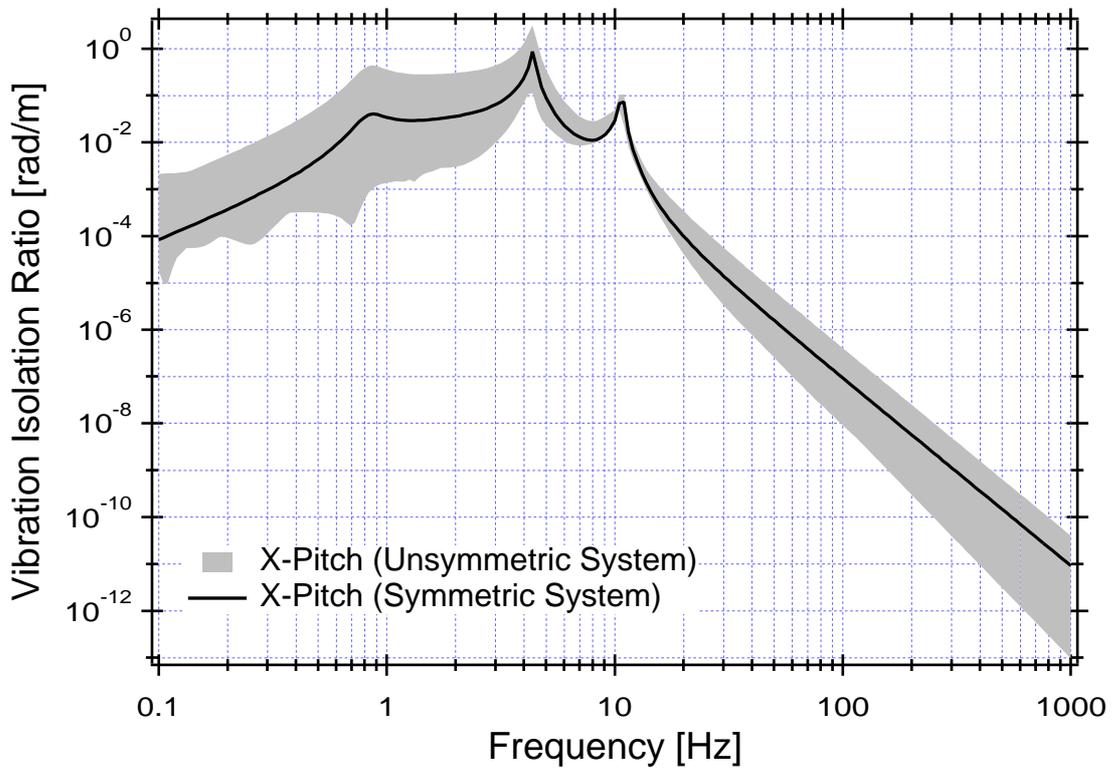


図 3.28 非対称性の存在するときの X-Pitch 防振比

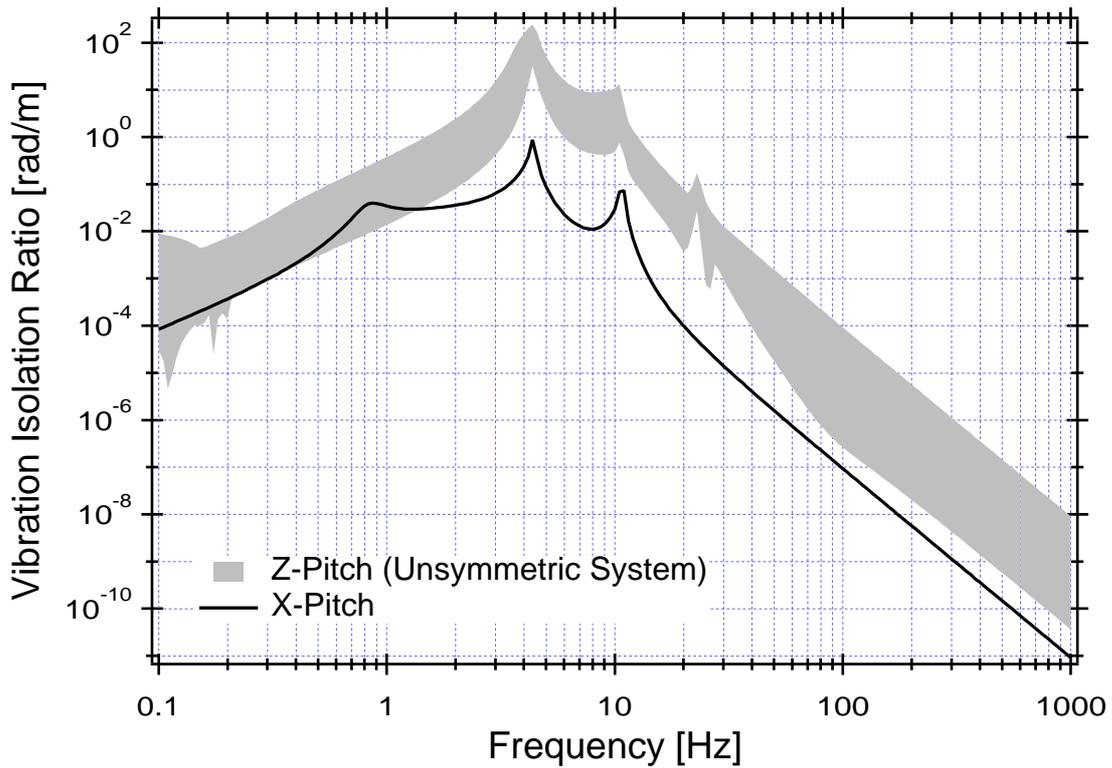


図 3.29 非対称性の存在するときの Z-Pitch 防振比

	観測帯域での RMS 振幅 [rad]	全帯域 RMS 振幅 [rad]
X-Pitch 最大	$1.4 \times 10^{-18} (h = 4.7 \times 10^{-24})$	$4.0 \times 10^{-8}$
X-Pitch 最小	$2.1 \times 10^{-20} (h = 7.1 \times 10^{-26})$	$5.3 \times 10^{-10}$
Z-Pitch 最大	$3.2 \times 10^{-16} (h = 1.1 \times 10^{-21})$	$1.1 \times 10^{-6}$
Z-Pitch 最小	$1.1 \times 10^{-18} (h = 3.6 \times 10^{-24})$	$9.1 \times 10^{-8}$
Pitch-Pitch 最大	$7.6 \times 10^{-17} (h = 2.5 \times 10^{-22})$	$3.7 \times 10^{-9}$
Pitch-Pitch 最小	$5.5 \times 10^{-17} (h = 1.8 \times 10^{-22})$	$2.3 \times 10^{-9}$

表 3.6 非対称性が存在するときの RMS 振幅

### 非対称性を個別に導入した場合

ここまでの議論で、非対称性を考慮すると並進-Pitch の防振特性が著しく悪化することがわかった。では、具体的にはどの場所の非対称性を抑えれば防振特性の悪化を最小限に食い止められるのだろうか。それを知るために非対称性を入れる場所を限定して求めた防振比の最悪値を図 3.30、図 3.31 に示す。

X-Pitch 防振比については、鏡を吊るワイヤーに非対称性が存在するとき最も悪化するのである。しかし、ピークでも値が  $1[\text{rad/m}]$  を越えない。全体域の RMS 振幅はほぼピーク部のみ

で決定されるため、この程度のピーク高ではさほど深刻な影響はないと思われる。

Z-Pitch の伝達特性は、ベローズのバネ定数のばらつきの寄与が最も大きい。ついで鏡を吊るワイヤーに関する非対称性が効いているようである。これは、X-Pitch の場合と同様、鏡を吊るワイヤー間距離の中間点とマスの重心が一致しない効果が現れているのであろう。ただし、ベローズはほぼ全帯域でワイヤーの10倍以上の寄与を持つので、問題になりそうなZ-Pitch防振特性の悪化を抑制するためには、できるだけベローズのバネ定数をそろえる必要があることがわかる。

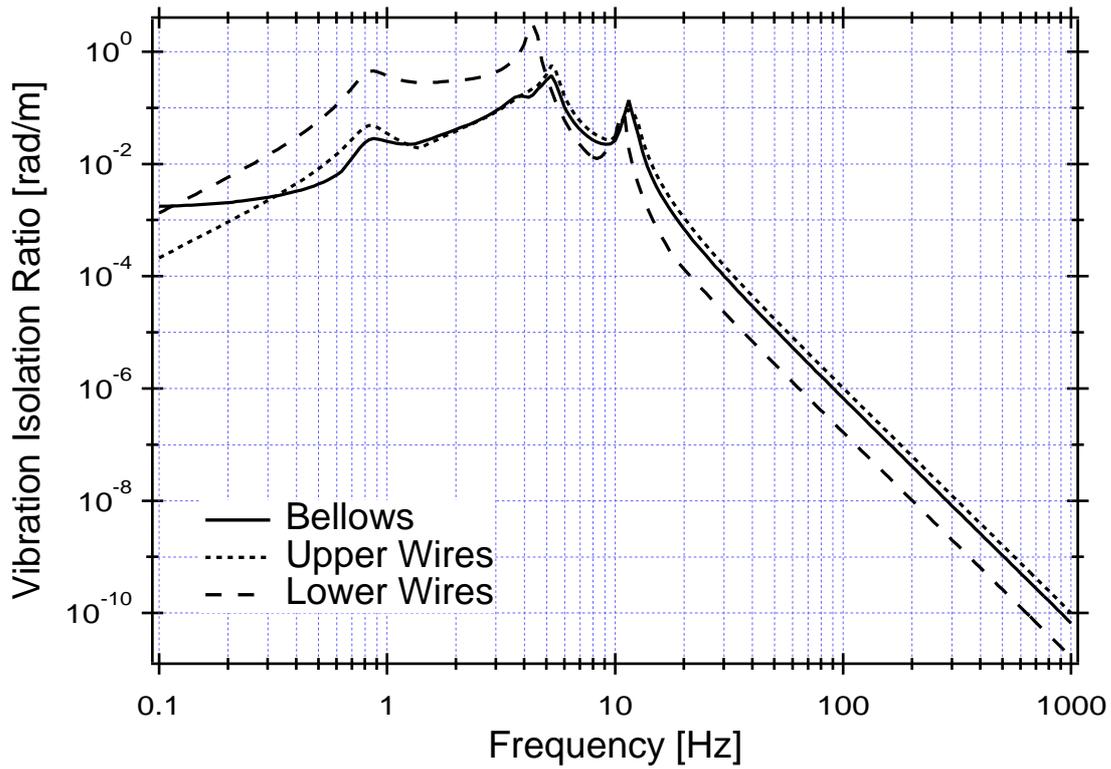


図 3.30 局所的に非対称性を導入したときの X-Pitch 防振比

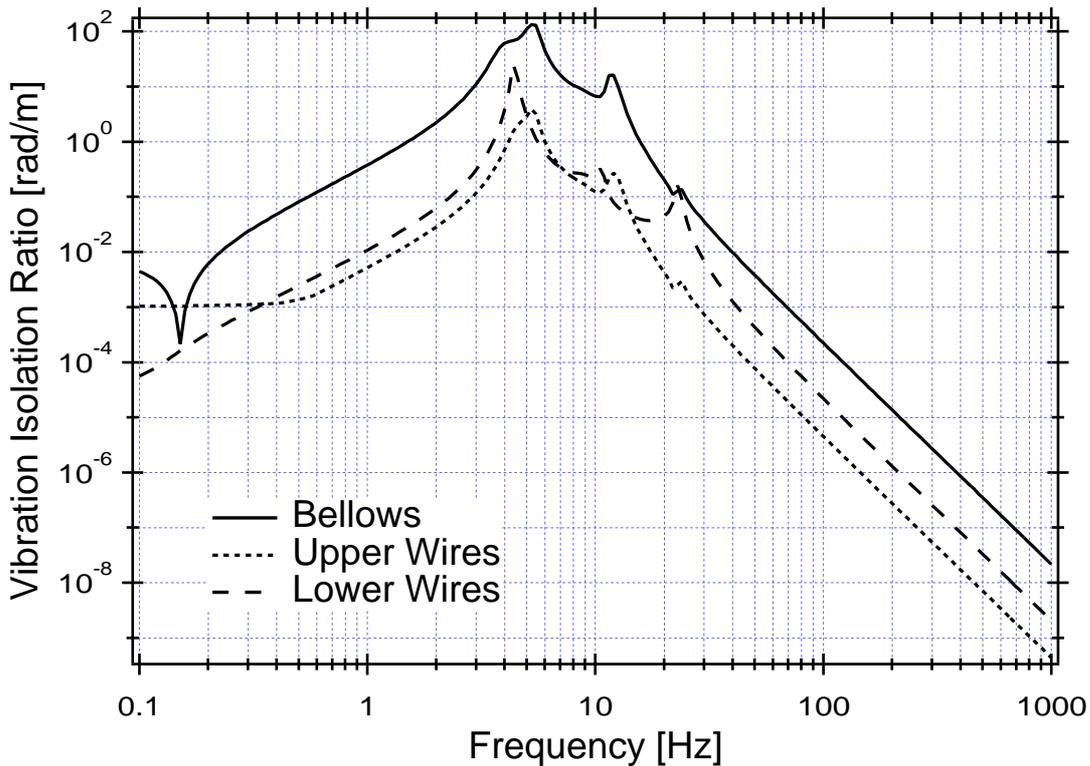


図 3.31 局所的に非対称性を導入したときの Z-Pitch 防振比

ここで取り扱った非対称性のモデルについて断っておくと、 $x-z$  平面への投影モデルを用いているため、非対称性を盛り込んだといっても、 $y-z$  平面で見れば対称的な形でしか盛り込んでいない。したがって、完全に全てのベローズあるいはワイヤー固定点が独立にばらついているわけではない。全てのパラメータが独立にばらついた場合、非対称性の影響はここで述べたものより大きくなる可能性がある。また、非対称性によってマスが傾き、運動方程式内で質量行列  $M$  の慣性モーメント部に非対角成分が発生する効果も無視している。これらの単純化を行っても本質的にはここで述べた結論が変わることはないと思われるが、より正確な見積を行う場合にはこういった効果も考慮するべきである。

### 3.5 モデル計算に関する結論

この章では、以下の事柄について述べた。

1. 並進防振の必要性と目標値—典型的な地面振動のもとでは、TAMA300 の目標感度を達成するためには 2 段振り子状の懸架システムを用いた防振系が必要である。
2. 質点モデルによる並進パラメータの決定—懸架システムを取り扱う力学モデルとしては最も単純な質点モデルを用いて振り子長などのパラメータが決定された。
3. 剛体モデルによる回転運動の評価

第3項に関して詳しく述べると、

- 並進の場合と異なり、パラメータは部品の大きさや取り扱いの難易度など現実的な観点からすでに仮決定されている。
- 仮決定されたパラメータをもとに、X-Pitch カップリングのスペクトルを推定し、これが目標を満たすことを確認した。
- さらに、地面振動の回転パワースペクトルをSV波との関連から推定し、これと懸架システムの回転-回転防振比を用いて、この経路によって導入される回転スペクトルを求めた。Pitch-Pitch 経路による Pitch 回転が平坦な感度曲線からは外れるが、観測帯域でのRMS振幅は phaseII の目標値を十分に達成できることを示した。
- 熱雑音についても推定を行い、やはりRMS振幅で見ると目標値を達成していることを確認した。
- さらに、Pitch モードに関しては適当な仮定において非対称性の影響を推定し、最悪値をとれば目標を満たさない可能性があることを示した。特にZ-Pitch の経路が深刻だが、これに対処するためには縦防振用のバネのこわさができるだけばらつかないようにすることが必要であることがわかった。

この章での議論は全て、地面振動に典型的なモデルを採用しておこなったが、実際にTAMA300のサイト、特に懸架システムが設置される場所でこのようなモデルが成り立たない可能性もある。また、非対称性についても適当な仮定をおいたが、実際の非対称性は予見不能である。

これらの不確定要因があるため、懸架システムの防振特性の評価にはモデルによる検証だけでは不十分であることは明白である。そこで、次章では実際に懸架システム試作機(一部実機)を用いて懸架システムの防振特性を評価するために行った実験について述べる。



## 第4章

# 懸架システムの回転に関する実験

第3章では、レーザー干渉計型重力波検出器で用いる懸架システムの回転防振特性について理論的な検証を行った。その結果、非対称性によるカップリングを除けば、懸架システムが十分な防振特性を有していることが推定された。しかし、その結論はあくまでも仮定の上になり立ったものなので、現実の懸架システムの振る舞いがモデルと異なることもあり得る。ここでは実際に製作された懸架システムの試作機を用いて<sup>1</sup>、その防振特性を評価するために行った実験とについて述べる。

### 4.1 はじめに

#### 4.1.1 実験の目的

剛体モデルを用いた計算によると、懸架システムは回転運動に関して次の目標

1. 観測帯域で  $\theta_{\text{RMS}} < 4.50 \times 10^{-16} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$  (ミスセンタリング 1mm, 安全率 1 を想定)
2. 全帯域で  $\theta_{\text{RMS}} < 5 \times 10^{-7} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$

を、概ね満たすことがわかった。「概ね」と断ったのは、第3章で推定した非対称性が存在する場合、Z-Pitch のカップリングによってこれらの目標が満たされない可能性があることがわかっているからである。また、目標を満たすという評価を得るためには、いくつかの前提が必要であった。すなわち、

- 懸架システムに加わる外乱が「典型値」をとること
- 懸架システムの運動が剛体モデルで記述可能であること
- 懸架システムの非対称性に関する推定が妥当であること
- その他、簡単のために無視した高次の効果が実際の防振特性に影響を及ぼさないこと
- 評価を行わなかった量 (X-Yaw カップリングなど) が、目標を満たすこと

---

<sup>1</sup>一部の実験では実機を用いている

である。これらはあくまでも仮定であるから、実際の懸架システムの防振特性を評価するためには実験が不可欠である。

ここで述べる実験の目的は、

- 剛体モデルの妥当性の評価
- 懸架システムの回転防振特性の評価
- 実際にTAMA300サイトに設置された懸架システムの回転量の評価

を通して、現実の懸架システムがTAMA300で利用可能であるかどうかを検証することであり、不具合が生じた場合、それを解消する方法を探ることである。

#### 4.1.2 実験の種類と方法

では、前章のような目的を達成するためにはどのような実験を行えばよいのであろうか。それを考えるために、まずは実際に懸架システムを適当な場所—たとえばTAMA300サイトに設置したとしよう。このとき、我々は何らかの方法によって懸架システムのサスペンションポイントに加わる外乱の大きさと、その結果としての懸架システムの運動のスペクトルを測定できるとする。当然懸架システムには全ての自由度について何らかの外乱が加わり、それに対応してマスは全ての自由度について応答を示しているはずである。単にマスの回転量を知りたいだけならば実験はここで完結してしまうが、PitchあるいはYawに関する防振特性を評価するためには、マスの回転がどのような伝達経路を経て引き起こされているのかを知る必要がある。しかし、実際には全ての自由度の外乱が一度に加わっているため、どの自由度の外乱が最終的にマスにどのような運動を起こしているのかを分離することは困難である(図4.1a)。

そこで、ある自由度に対する懸架システムの防振特性を知るためには、系を自然に放置するのではなく、その自由度の外乱のみを増幅して加えてやればよい(図4.1b)。つまりある方向にのみ振動を加えるので、このような実験を加振実験という。これに対して、適当な環境下に系を設置して、自然な外乱のもとでのマスの運動を測定する実験を静置実験あるいは非加振実験という。つまり懸架システムの防振特性を評価するためには加振実験を行い、TAMA300サイトでの実際の揺れを評価するためには静置実験を行えばよい。

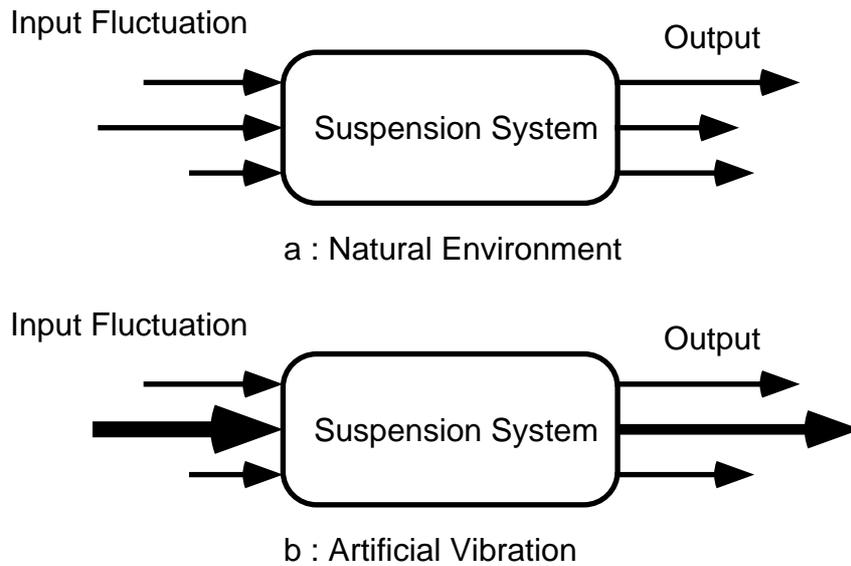


図 4.1 静置実験と加振実験

## 4.2 懸架システムの加振実験

### 4.2.1 実験のセットアップ

加振実験には懸架システム試作機を用いた。実機と異なる点は、ダミーマスを用いているということと、加振に耐えるためにダミーマスを吊るワイヤーには直径  $60\mu\text{m}$  のものを用いているという点である。このため、防振特性が実機や  $50\mu\text{m}$  のワイヤーを用いた場合の試作機とは若干異なる。

#### 加振方法

加振実験は、懸架システムの防振特性を評価するために特定の外乱を人工的に加え、そのときの系の応答を測定する実験である。このように人工的に外乱を加える操作を加振という。前章で述べたように、懸架システムに加わる外乱は並進成分、回転成分をともに持っているが、どの自由度を加振するかによって異なった加振方法を用いる。

並進成分の加振を行うときには、加振機と呼ばれる装置を用いる。本実験では、株式会社アカシの動電式振動試験装置 E・DES-452 を用いた。これは大型のボイスコイルとこれに接続される振動試験台とからなる装置であり、ボイスコイルに適当な電圧（多くの場合正弦波）を加えるとそれに応じた振動が振動試験台に発生するものである。最大加振力は  $4000\text{N}$  である。加振帯域は仕様では  $5\text{Hz}\sim 5500\text{Hz}$  とされているが、これは十分なゲインを得られる範囲という意味で、実際には下限は  $0.1\text{Hz}$  程度である。振動試験台は板バネと自重で拘束されており、油膜の上を直線的に滑走する（図 4.2）。装置全体は空気バネで支えられているが、本実験では用いなかった。通常、被検体は振動試験台の上に設置するが、本実験では図に示したようにサスペンションポイントに加振力を加えるために振動試験台とサスペンションポイントを駆動棒で接続して水平加振を行った。

振動試験台の上に懸架システムを設置してしまうとフレームによって加振力が減衰してしまい、サスペンションポイントに十分な S/N を得るだけの加振力を与えることができないからである。また、研究開始当初、TAMA300 では懸架システムはフレーム天板を X 振り子に接続して吊り下げ方式で支持する計画であったため、フレームの特性は重要でなかったという事情もある。

また、ボイスコイルを 90 度回転し直立させ、鉛直方向への加振を行うことも可能である。このときは振動試験台は用いずに、ボイスコイルにテーブル上の天板を接続してその上に懸架システムを設置する。ボイスコイル内の可動部はローラーガイドとリニアベアリングによって拘束され回転や横振動を極力抑える構造となっている。

回転加振は 2 通りの方法で行った。一つは図 4.3 a に示したように、コントロールブロックにあるマスの姿勢制御用ステージ (アラインメントステージ) に取り付けられたピエゾアクチュエータ (PZ) に適当な電圧を加えてこれを伸縮させ、サスペンションポイントに擬似的な回転を加える方法である。もちろん、これは純粋な回転ではないが、微小な回転を扱う場合、 $\sin \delta\theta \sim \delta\theta$ ,  $\cos \delta\theta \sim 1$  であるから、実質的にサスペンションポイントに回転運動が起こっていることと特別がつかない。

もう一つの方法では、マスに磁石を貼り付け、そのまわりに中空のコイルを設置して、このコイルに適当な電流を流すことによって磁場を生じさせ、磁石を押し引きさせるようなアクチュエータ (コイル-磁石アクチュエータと呼ぶ) を用いる。コイル-磁石アクチュエータをマスの重心を含む平面について対称な 2 箇所に取り付け、差動で振動させることによってマスにトルクを加えることができる (図 4.3 b)。

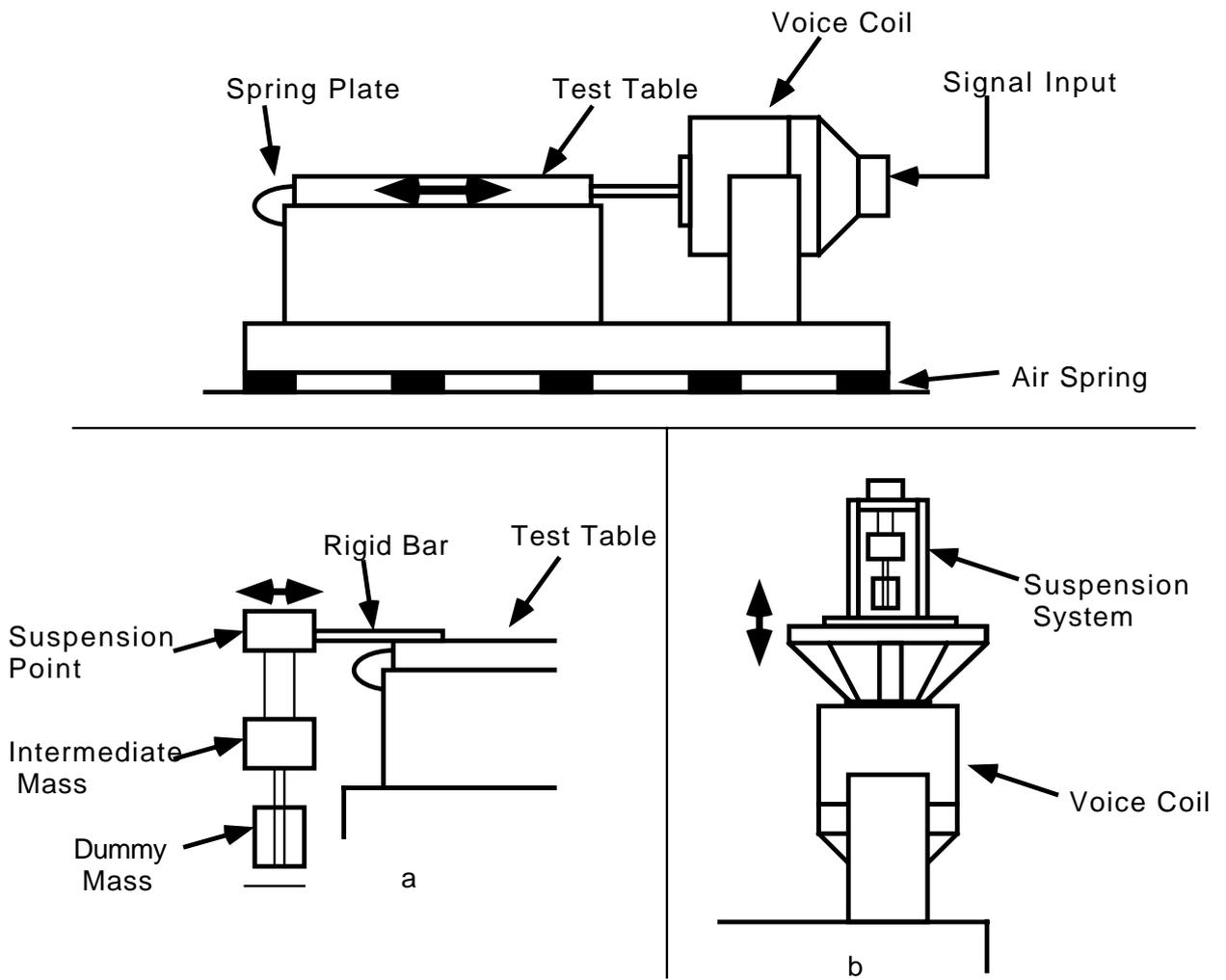


図 4.2 加振機と並進加振法

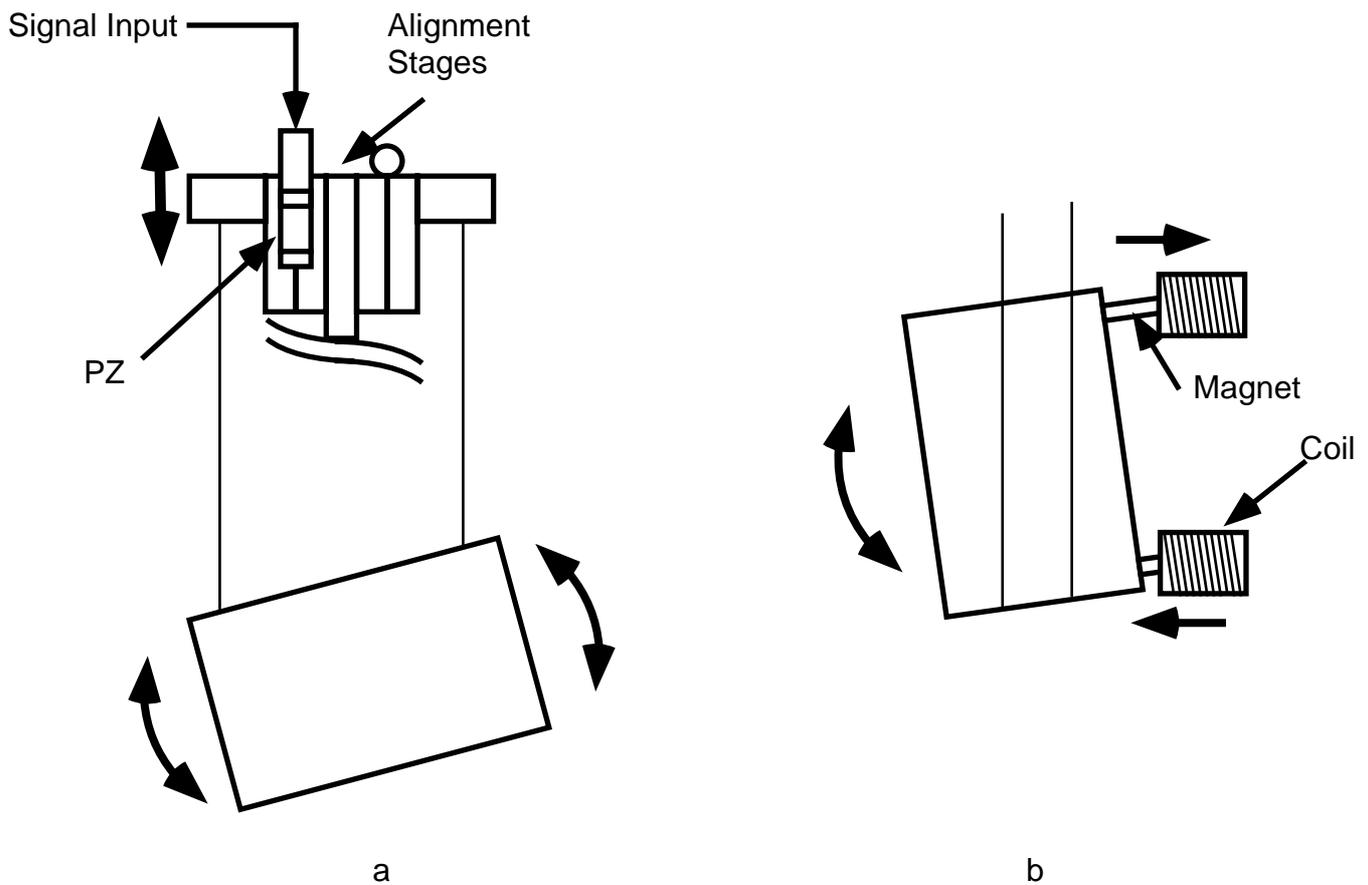


図 4.3 回転加振法

#### 振動検出法—センサーの種類と特性

マスの振動を検出する装置 (ピックアップ) には, できるだけマスと力学的に接触しないものを用いるのが望ましい. ピックアップによって懸架システムの特性が変化してしまったり, ピックアップを介して外乱が直接マスに伝達することを防ぐためである. しかし, ここでは加振実験においては piezo 素子を用いた小型 piezo 加速度計をマスに取り付けてマスの運動を測定している. これは,

- マスの質量に比べて加速度計の質量は十分小さく系の特性を大きく変えない
- サスペンションポイントに十分大きな外乱を加えればピックアップ経由の外乱は無視できる

という事情による. 本実験では KISTLER 社の加速度計 8628B5 を用いた. これは  $1V/G$  と高感度であり, 重量も約  $7g$  とマスに比べて十分小さいという利点がある. また, 電源供給, 信号取得に用いるケーブルが直径約  $1mm$  とこの種のセンサーとしては非常に細く, 系に大きな影響を与えないなど, 上に述べた条件を満足している. 動作原理を説明すると, 直径約  $14mm$ , 高さ  $16mm$  の円筒内にリファレンスとなるマスを取り付けた piezo 素子のビームが内蔵されている. 加速度が加わるとリファレンスの慣性によってビームに歪みが生じ, この歪みが起電力を生じる. これ

をオペアンプで増幅，測定することによって加速度の信号を得ている．なお，加速度計の取付には専用のワックスを用いるが，この場合の共振周波数は約 10kHz となる [31]．これは TAMA300 観測帯域より十分高い帯域であるから，問題とはならない．

ピエゾ加速度計を用いてマスの回転運動を測定するには，図 4.4 のようにマスの同一表面上の 2 箇所に加速度計を取り付け，その差動信号をとればよい，すなわち，

$$\theta = \frac{X_1 - X_2}{d} \quad (4.1)$$

の関係を用いる．このように差動信号を利用する場合，センサーの感度が正しくそろっていないと信号の差をとったとき同相信号が完全に除去されずに混入する問題がある．実際，加速度計の感度は 1 台 1 台わずかに異なるが，適切なリファレンスを用いて各個体の感度は完全に把握されているので，それに応じて信号のゲインを調節すれば高い同相除去比 (Common Mode Reduction Ratio : CMRR) を得ることができる [16]．しかし，完全に同相信号を除去することは不可能なので，できるだけ精度の高い信号を得るためには，測定する回転の自由度によって，加速度計の取り付け方を変える (図 4.6)．懸架システムを並進加振しているため，マスの運動は回転よりも加振方向と同一の並進の方が卓越している．したがって，加速度計が加振方向に最大感度を持つように取り付けてしまうと (図 4.5 a)，大きな信号同士の引き算を行ってわずかな差動信号を得ることになる．もとの信号が大きいため，混入する同相信号も大きく，これと得たい差動信号の比 (S/N 比) は小さくなってしまふ．これに対して，加振方向とは直交する方向に感度を持つように加速度計を取り付けると (図 4.5 b)，この方向の運動はカップリングによるものであるから先ほどと異なり得られる信号は小さくなり，雑音となる同相信号も小さい．しかし，回転に関する信号の大きさはセンサーの取り付け方向に依らないので，比較的高い S/N 比を得ることができる．このような事情を考慮して，図 4.6 のように，ダミーマスに加速度計を取り付ける方向を工夫した<sup>2</sup>．なお，中段マスに関しては，まわりをダンピングマグネットの枠体を取り囲んでいるため，一部を除いて測定を行うことはできなかった．

また，力学的なセンサーには同相除去とは別の問題も存在する．一般に加速度計などのセンサーは単体では 1 自由度の運動のみを測定するように設計されているが，実際にはその他の自由度にも感度を持ってしまふ．これを横感度というが，横感度が存在する理由はいくつかあり，たとえばピエゾ加速度計の場合，内部のピエゾビームがわずかに曲がって取り付けられているとか，取り付け面の平面度が完全ではないなどセンサー起因のものもあるが，加速度計を取り付けるマスの側の面が正しくでない，取り付けに用いるワックスの厚さにムラがあるなど，センサーとは別のところに原因がある場合もある．いずれにせよ，加速度計が横感度を持ってしまふことは避けられないが，本実験で用いた加速度計ではこれは 1% 以下であることが保証されている．

<sup>2</sup>Yaw に関しては，ダミーマスの側面にはスタンドオフがありセンサーを取り付けられないので，正面にのみ取り付けられた

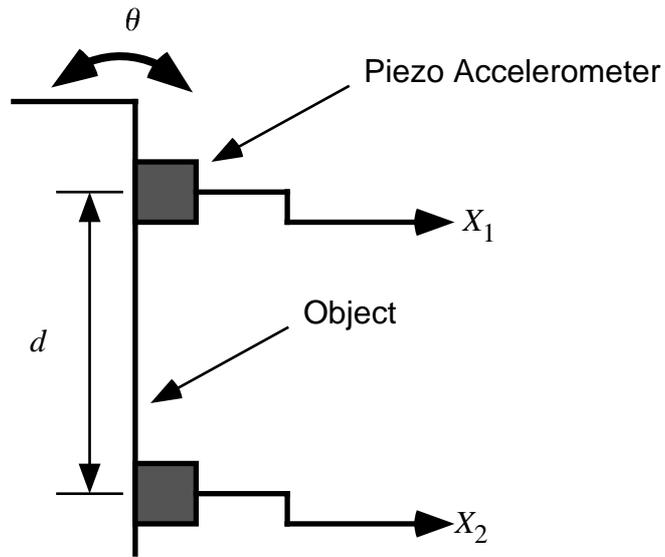


図 4.4 ピエゾ加速度計による回転の測定

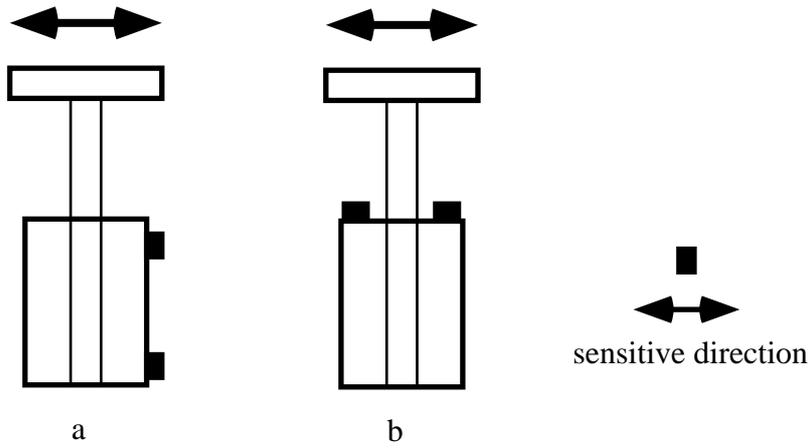


図 4.5 加振方向と加速度計の向き

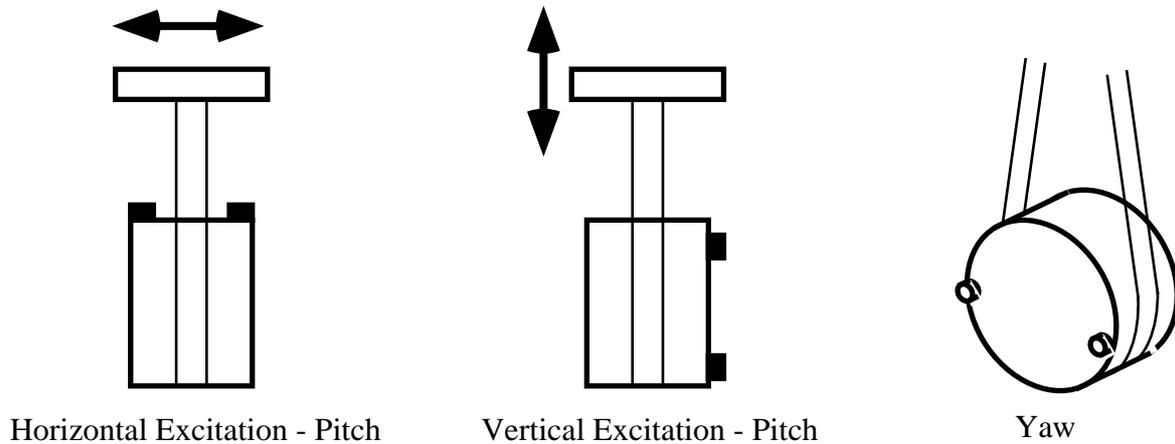


図 4.6 各自由度の測定法

センサーの感度について、ピエゾ加速度計の感度を知るためには、ピエゾビームに取り付けられたマスを固定するなどして、ピエゾ素子への加速度の入力が0となるようにしたときの加速度計の出力、つまりノイズを調べる必要があるが、本実験で用いた加速度計は密閉型であるため、このような操作は行えなかった。そこで、懸架システムによって地面振動が防振されていることを利用して、ダミーマスに加速度計を取り付け、加振を行わずに静置したときのセンサー出力を感度と見なすことにした。

#### 信号取得系

並進加振実験での信号取得系は図 4.7 a に示したとおりである。振動波形を与える信号は、サーボアナライザ (ADVANTEST R9211C) から加振機のパワーアンプへ入力し、加振機を励振する。懸架システムの揺れは PZ 加速度計で測定し、その信号をゲイン調整付アンプ (TEAC SA-610) で増幅し、サーボアナライザの差動入力端子に入力する。サーボアナライザではこの信号と出力信号との比 (伝達関数) を測定する。このようにして各所の信号比を得、オフラインでパーソナルコンピュータに移し、解析を行なった。

回転加振実験でも、ほぼ同一の測定系を用いている (図 4.7 b)。サーボアナライザからの信号の入力先が異なっている。

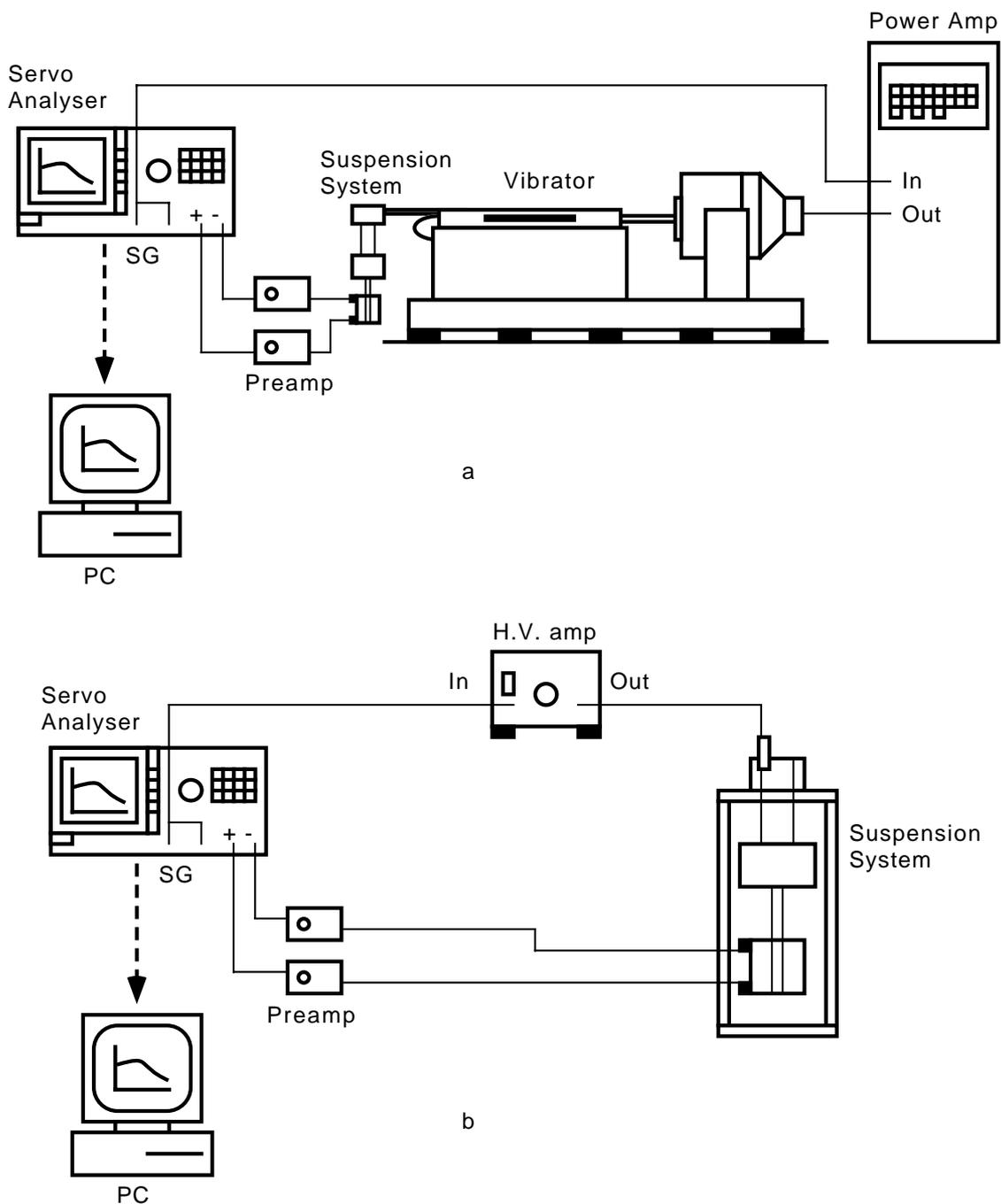


図 4.7 データ取得系

#### 4.2.2 回転加振による剛体モデルの検証

図 4.3 a に示した piezo actuator を用いた回転加振を行い、懸架システムの防振比を測定し、剛体モデルの計算と比較することによって、モデルの妥当性を評価した。この加振方法ではサスペンションポイントのみを加振しており、ダンピングマグネットには加振力が加わっていない。したがって、外力ベクトルが全体加振したときと異なるが、剛体モデルでこのような事情

を盛り込んで計算を行えば、モデル値と実測値を比較することによって、剛体モデルという手法の検証を行うことになら問題はない。

また、この実験の Yaw 加振に関してのみ、下のワイヤーに直径  $150\mu\text{m}$  のものを用いている。これは時期的な都合によるもので、特に合理的な理由があつてのことではない。

### 加振特性

ピエゾアクチュエータによって、サスペンションポイントに加えられる回転加振力の特性を、図 4.8 に示した。アクチュエータへの入力電圧で規格化している。また、ピエゾ加速度計の感度も示した。Yaw, Pitch で加振特性に違いは見られない。2Hz 以下では加速度計の感度によって測定が制限されている。170Hz 付近のピークはサスペンションポイントまたはコントロールブロックの部品の共振、550Hz のノッチ構造はピエゾアクチュエータの共振に対応すると思われる。

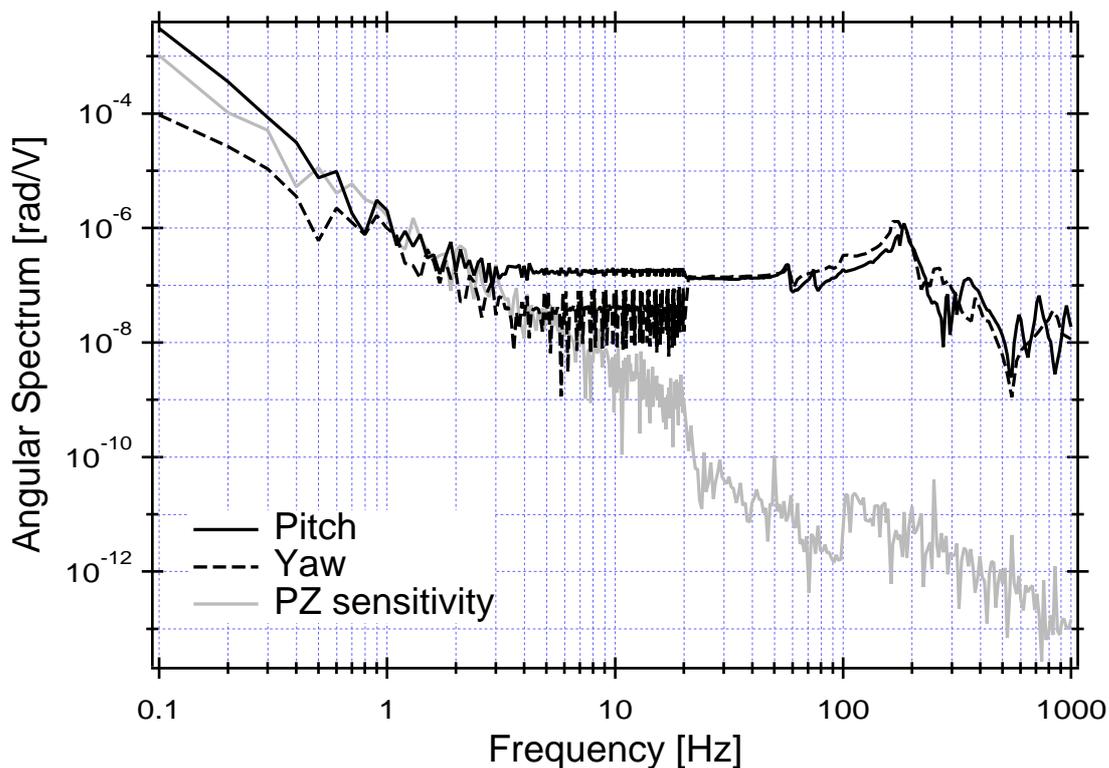


図 4.8 ピエゾアクチュエータによる回転加振特性 (アクチュエータ入力電圧で規格化)

図 4.9 に、実測されたダミーマスの Pitch, Yaw の回転スペクトルと加振電圧の比を示す。Yaw の信号が小さく良好な S/N が得られなかった。これは、Yaw モードの共振周波数が Pitch モードに比べると低く、低周波からより良く防振されるためである。加振力を上げればマスの揺れを大きくすることができるが、本実験で用いた高圧アンプは 200V で出力が飽和してしまい、十分な加振力を与えることができなかった。

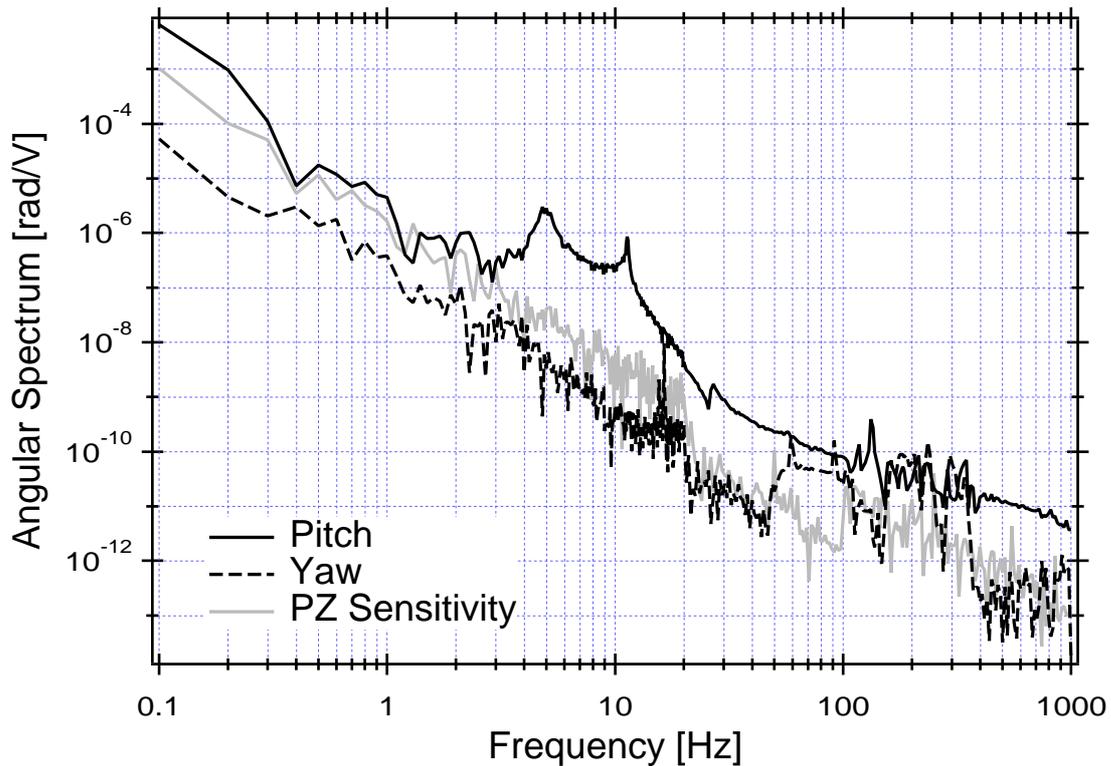


図 4.9 ダミーマスの回転スペクトル(アクチュエータ入力電圧で規格化)

#### 実測された防振比

ダミーマスとサスペンションポイントの Pitch の回転スペクトルの比、つまり Pitch-Pitch 防振比を図 4.10 に示す。Pitch に関しては、中段マスの回転も測定できたのでこれも示す。

中段マス、ダミーマスともに共振周波数に若干のずれが見られるが防振比は剛体モデルと概ね一致している。これは剛体モデルの妥当性を示している。中段マスの防振比をみると 100Hz~300Hz に立ついくつかのピークはこれはベローズやフレームの内部共振である。剛体モデルではこのような弾性体共振は無視したので計算には現れない。ただ、200Hz 付近から防振比が悪化しているように見えるが、この帯域ではマスの揺れよりも音等に起因する測定系の雑音優勢であり [16]、実際の防振比はこのグラフに示したものよりも良好だと考えられるが、観測帯域での防振特性の評価は困難である。

Yaw については、前述したとおりダミーマスの S/N が非常に悪く、有意な測定が行えなかったため防振比は示さない。

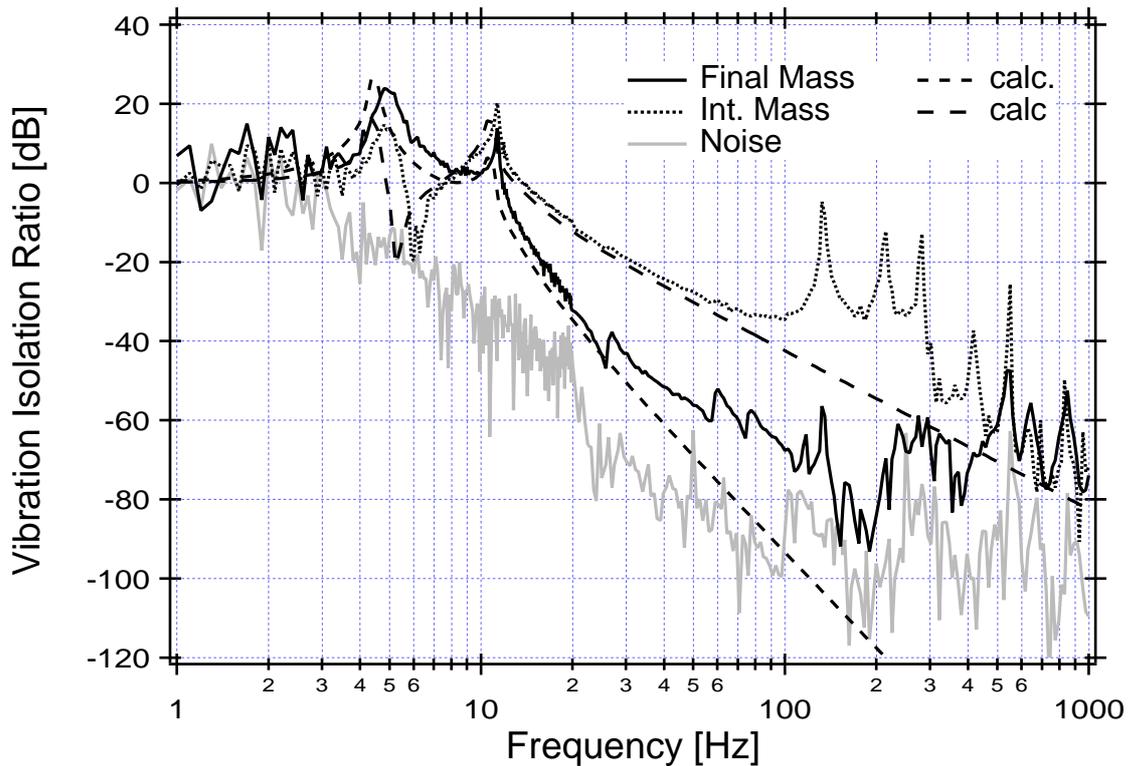


図 4.10 PZ 加振によって実測された Pitch-Pitch 防振比

#### 4.2.3 並進加振によるカップリングの測定

事前に予想可能な X-Pitch カップリングや、予測不能な非対称性に起因するその他のカップリングを調べるために、加振機を用いてサスペンションポイントに並進加振力を加え、マスへの伝達を測定した。

##### 加振力

回転加振の場合と同様に、サスペンションポイントに加わる加振変位と入力電圧の比を測定した。加振方向への加振特性を示したのが図 4.11 である。X 方向へ加振した場合、コントロールブロックの共振が 20Hz 台と 60Hz 付近に見える。Z 方向への加振では 100Hz 以下にはこのような構造はないが、200Hz 以上にいくつかの共振が存在する。

加振機ではボイスコイルの駆動体や振動試験台は直線運動をするように拘束されているが、わずかながら角度方向にも振動している。また、サスペンションポイントでも並進入力に対してわずかに回転が生じる可能性がある。サスペンションポイントにおける並進加振から回転へのカップリングを測定した。図 4.12 に角度加振特性を示す。X 方向への加振時にはコントロールブロックの共振に対応して大きな Pitch 揺れが起こっている。縦方向に加振したときに生じる Pitch へのカップリングはあまり大きくない。

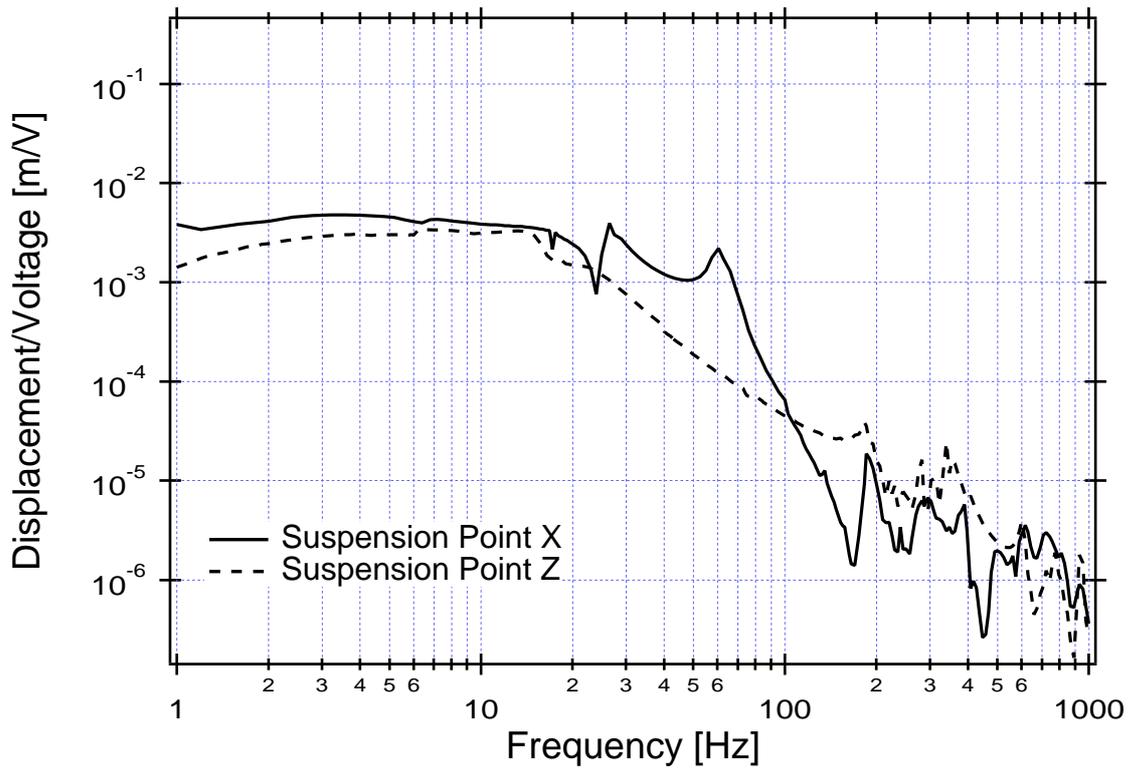


図 4.11 加振機の加振特性 (入力電圧で規格化)

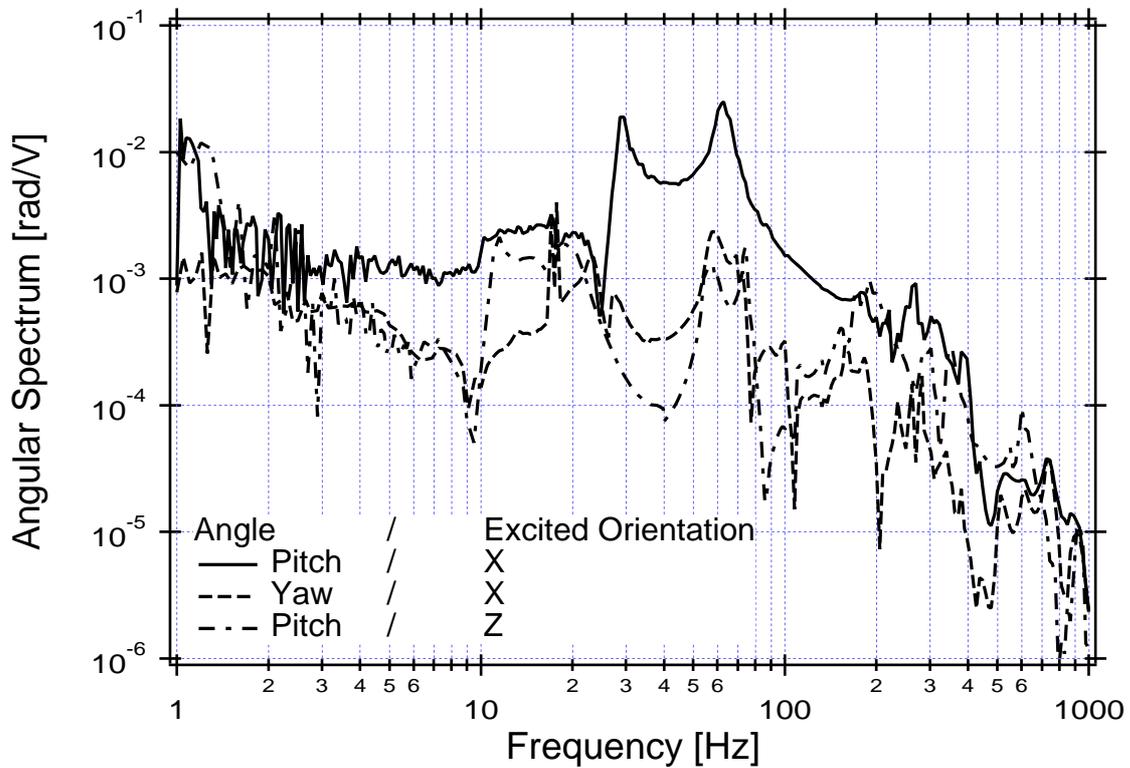


図 4.12 カップリングによって生じる加振機の回転 (入力電圧で規格化)

### 水平加振実験

X-Pitch, X-Yaw のカップリングなどを調べるためにサスペンションポイントを X 方向に加振した。

図 4.13 は, X 方向へ加振したときの X-Pitch 防振比である。中段マス, ダミーマスともに計算値と大きく食い違っている。これは非対称性を考慮しても剛体モデルで説明できる範囲を超えている。このようなことが起こる原因として考えられるのは,

1. X 方向への並進以外の外乱によってマスの Pitch モードが励起されている
2. 非対称性が見積よりもはるかに大きい
3. 剛体モデルが誤っている

などがある。2,3 の場合検証が困難であるが 1 は実験的に確かめられる。先に測定したサスペンションポイントの Pitch 揺れの伝達関数を用いて, X 方向への加振時の Pitch-Pitch 伝達関数を求めた(図 4.14)。中段マス, ダミーマスともにモデルと非常に良く一致している。つまり, X 方向への加振を行ったが, 実際にマスを揺らしていたのはサスペンションポイントにおける Pitch 回転だったのである<sup>3</sup>。

---

<sup>3</sup>これによって, ただちに 2,3 の可能性が否定されるわけではない

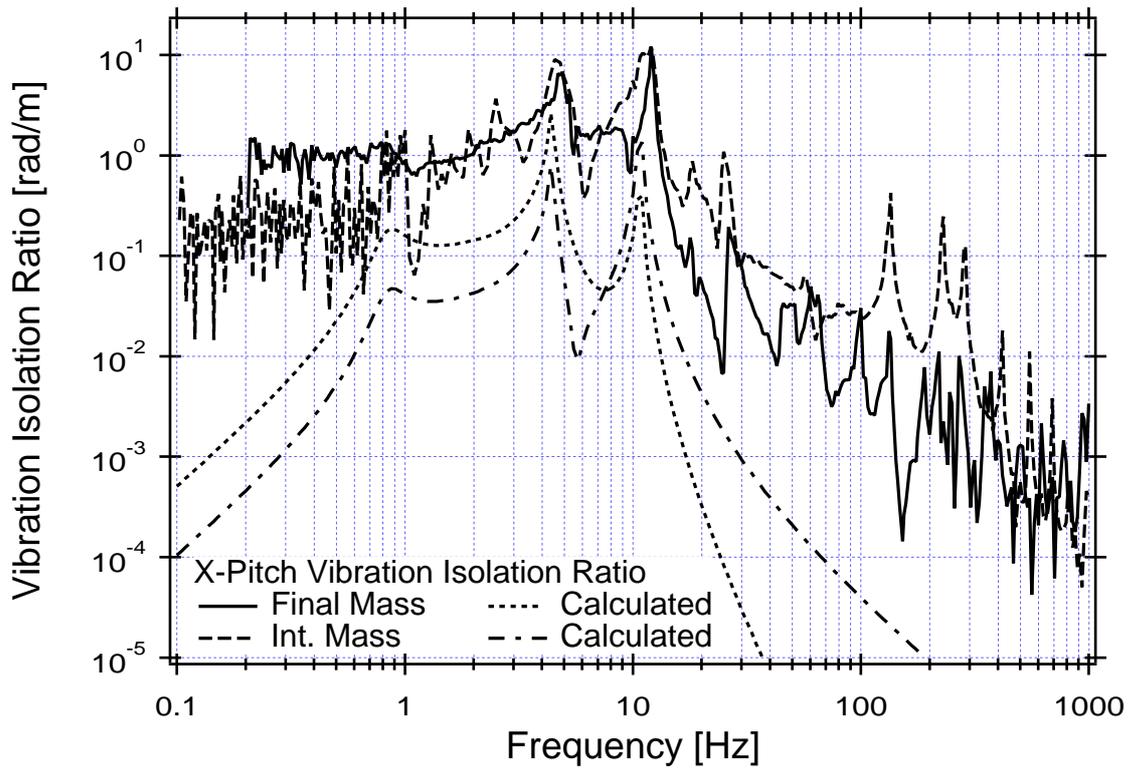


図 4.13 X-Pitch 伝達関数

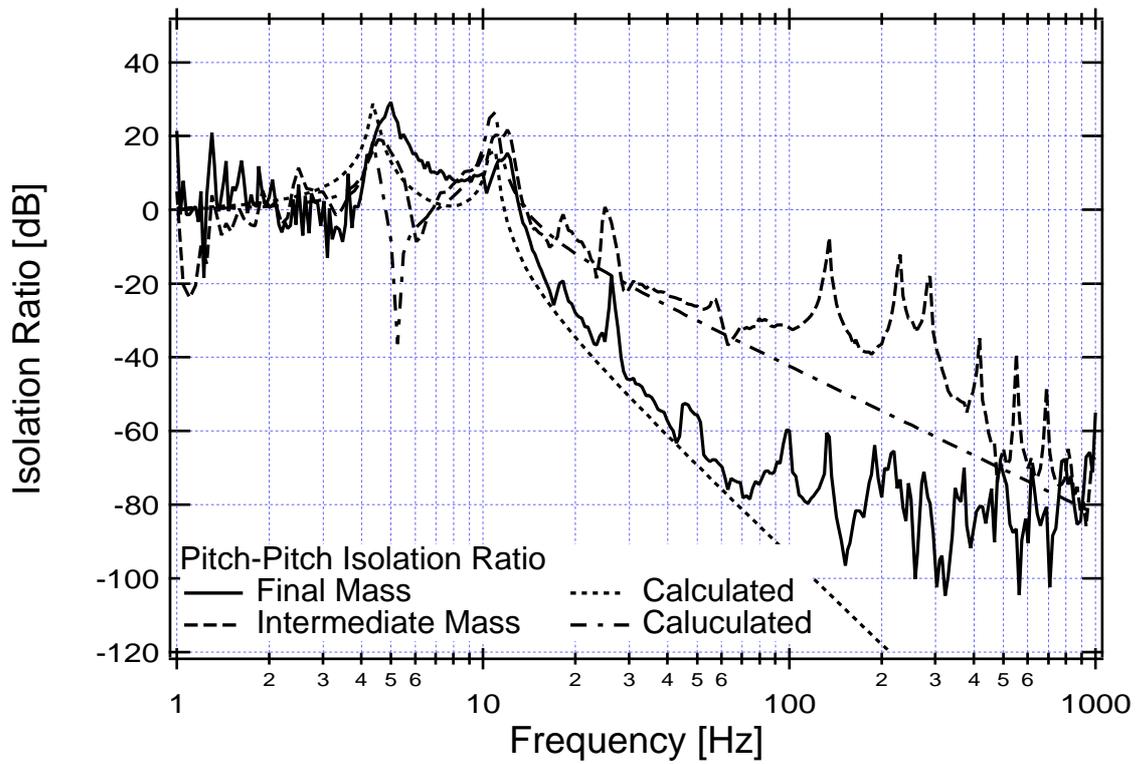


図 4.14 Pitch-Pitch 伝達関数

Yaw については, X-Yaw 伝達関数, Yaw-Yaw 伝達関数をそれぞれ図 4.15, 図 4.16 に示す. Yaw-Yaw 伝達関数が計算値から大きく外れることから, Pitch とは異なりサスペンションポイントの Yaw 揺れがマスの Yaw 揺れを起こしているわけではないことがわかる. X-Yaw 伝達関数と X-Pitch 伝達関数とを比較すると, 2Hz 以上では X-Pitch 伝達関数の方が卓越しているのですが, 高帯域では X-Pitch が優勢だが, X-Yaw 伝達関数の 1Hz のピークは, 全帯域での RMS 振幅に大きく寄与する. 地面振動にモデル値を用いて求めると, このピークの RMS 振幅はおよそ  $10^{-7}$  rad 程度である.

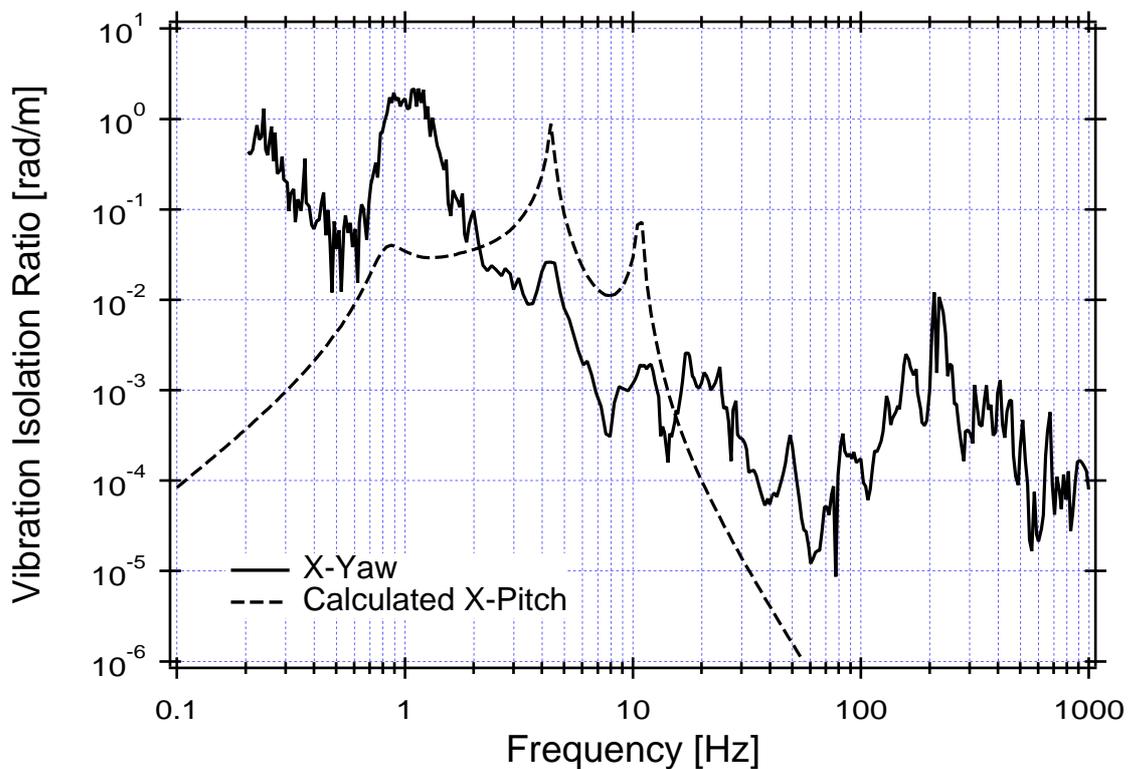


図 4.15 X-Yaw 伝達関数

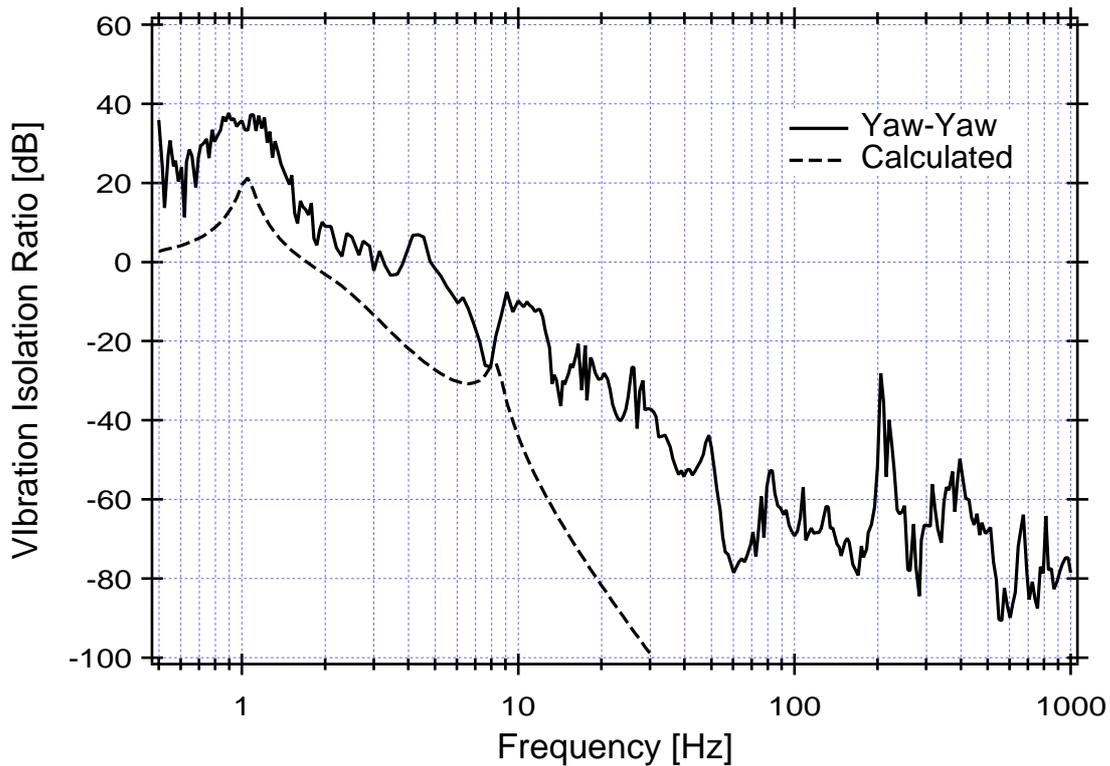


図 4.16 Yaw-Yaw 伝達関数

## 鉛直加振実験

Z-Pitch や Z-Yaw のカップリングを測定するために行った鉛直加振実験の結果を図 4.17～図 4.19 に示す。

Pitch-Pitch カップリングが計算値から外れていることから、Pitch モードに関しては、水平加振時とは異なり、サスペンションポイントの Pitch 回転は支配的ではない。Z-Pitch カップリングについては、非対称性を考慮した場合の最大値、最小値の間にほぼ実測値が収まる。26Hz のピークは懸架システムの Z モードに対応するが、この部分のみ計算値を大きく超えている。しかし、この周波数では地面振動は十分に小さいため、RMS 振幅への寄与は問題とならない。4Hz 付近の盛り上がった構造の RMS 振幅は、地面振動のモデル値を仮定すると、約  $10^{-6}$  rad になり、実際に懸架システムを静置したときに許容値を超える可能性がある。

Yaw モードについては、X-Pitch の計算値を大きく下回ることから、RMS 振幅は問題とならないことがわかる。

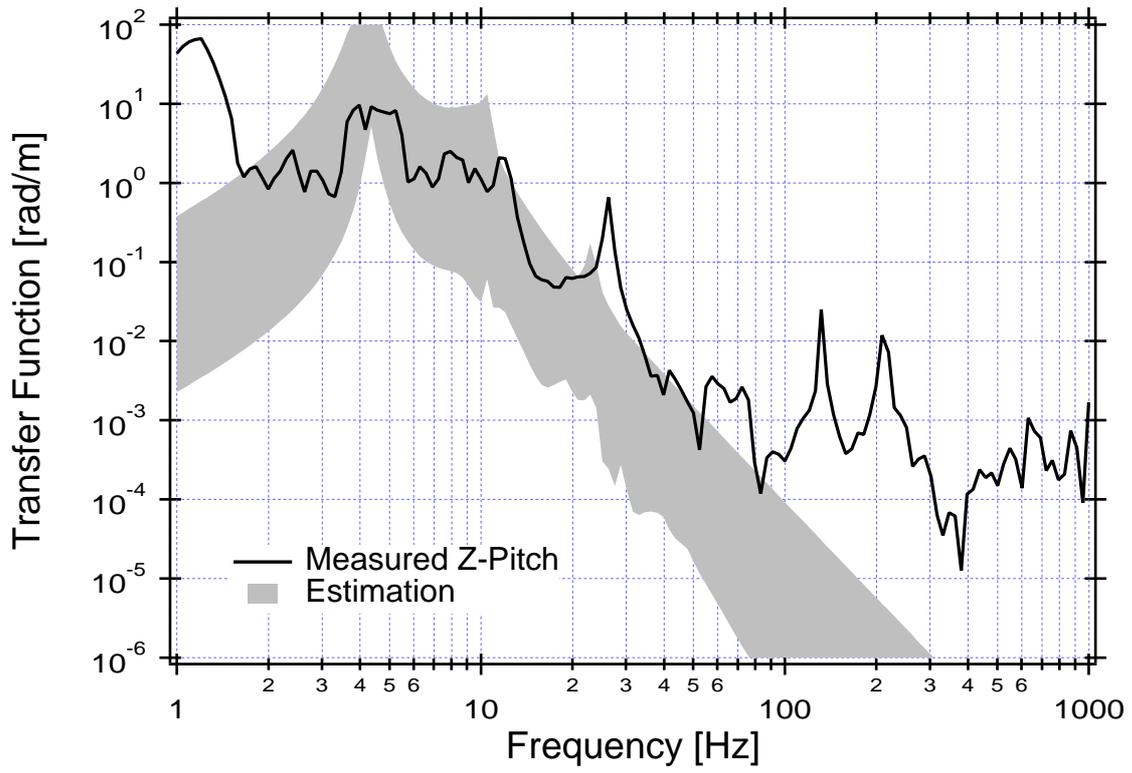


図 4.17 Z-Pitch 伝達関数

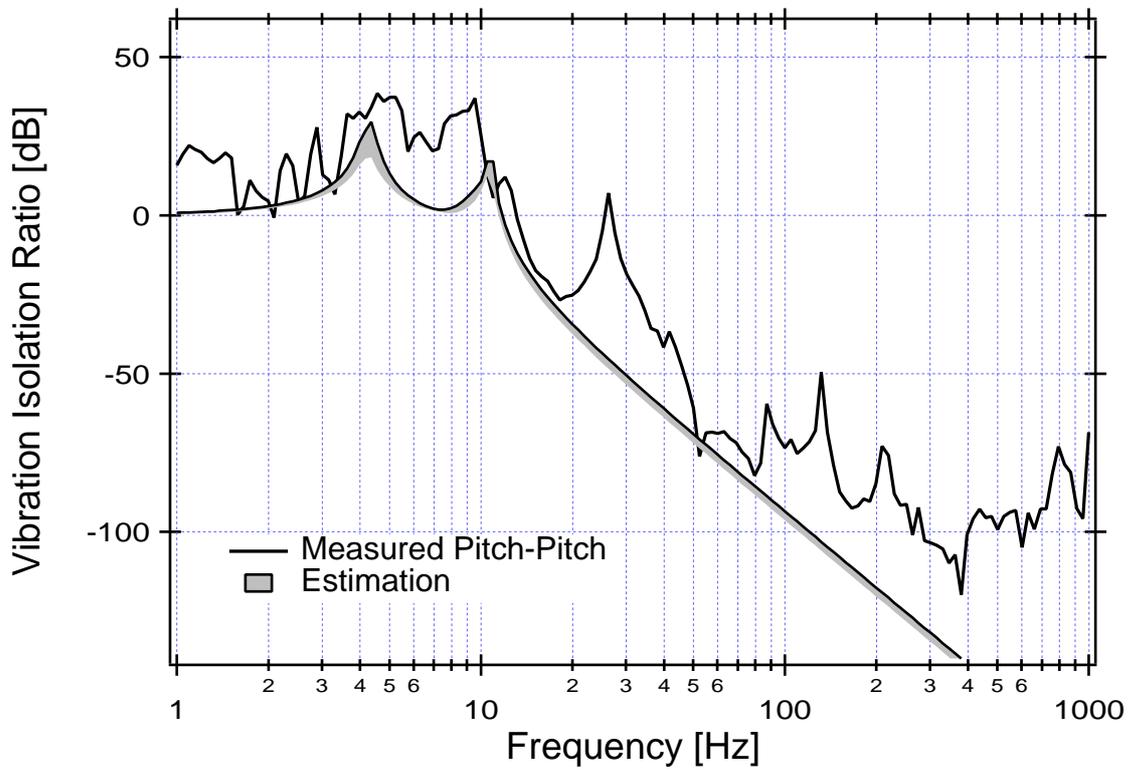


図 4.18 Pitch-Pitch 伝達関数

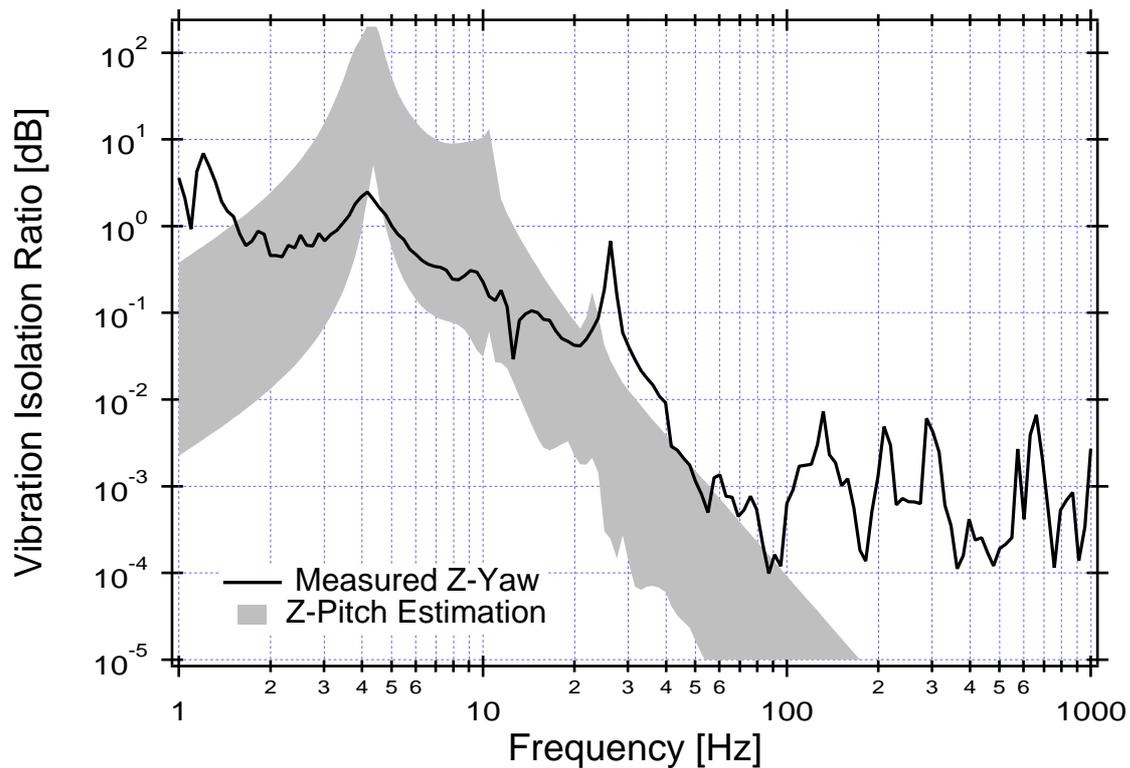


図 4.19 Z-Yaw 伝達関数

#### 4.2.4 コイル-マグネットアクチュエータによる Pitch モード加振

剛体モデルによる計算によれば、非対称性に伴う Z-Pitch カップリングによって防振特性が著しく悪化する可能性があることがわかった。特に Pitch の低周波側のモードの RMS 振幅への寄与が問題となることがわかっているが、RMS 振幅は共振の Q 値に大きく依存する。そこで、コイル-マグネットアクチュエータによってダミーマスに Pitch を加振し、コイルに流す電流（力に比例する）から Pitch 揺れの角度への伝達関数を測定して、Q 値を実測した。

伝達関数を図 4.20 に示す。共振周波数から高周波側がより測定精度が高いため、こちらにあわせてフィッティングを行った。そのため低周波側は実測値とフィッティング値がずれている。Q 値に関しては約 18 という結果を得た。これは剛体モデルで計算される値は約 16 であったから、ずれは 1 割程度である。

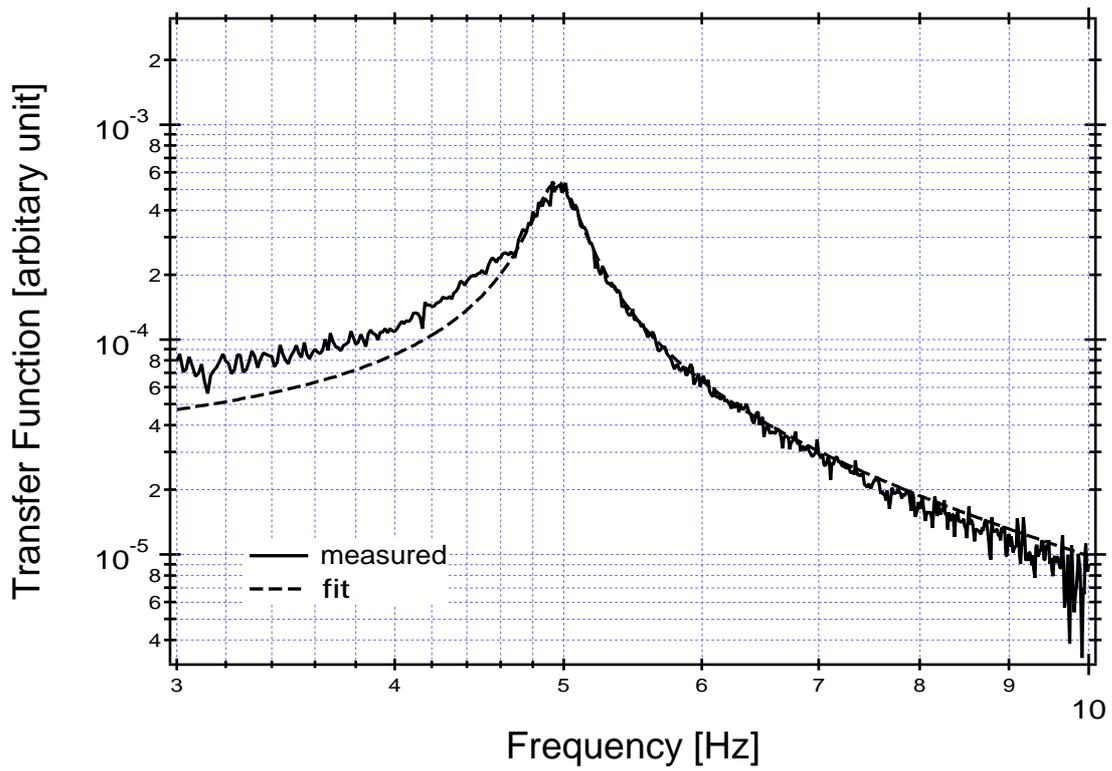
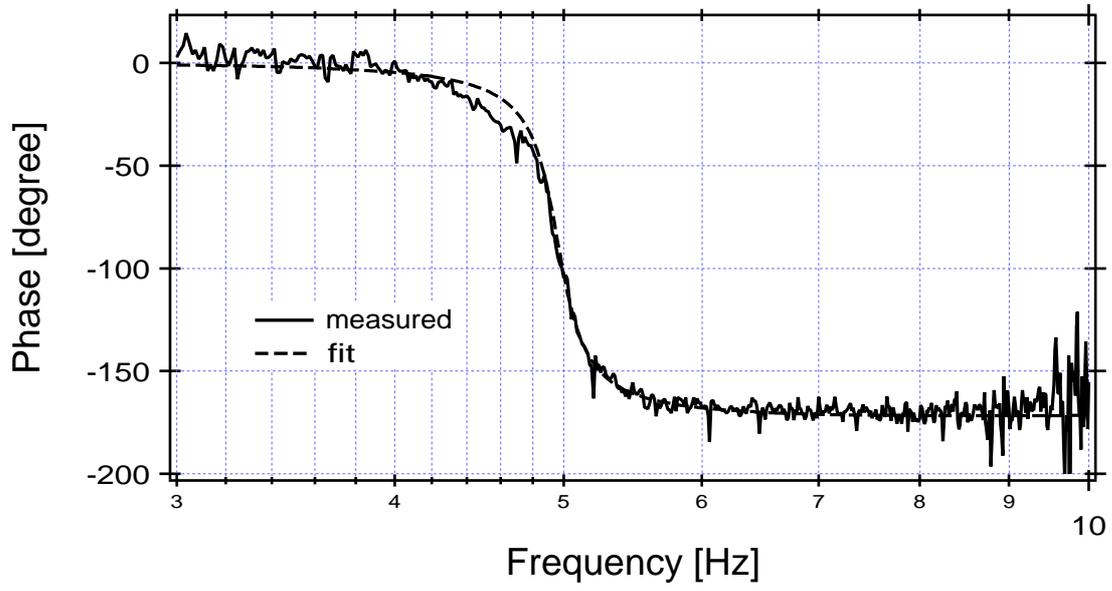


図 4.20 力-Pitch 伝達関数

### 4.3 懸架システムの静置実験

#### 4.3.1 実験の意義

加振実験によって、懸架システム単体の防振特性が明らかになった。ここでは、懸架システムを実際に使用するのと同じ条件下におき、環境も含めた回転防振特性の評価を行う。

#### 4.3.2 実験のセットアップ

##### 設置場所

静置実験には、TAMA300 中央真空槽室にある 6 箇所ある真空槽の内、主にリサイクリングミラーを収める真空槽内の防振スタックを利用した。スタックの特性は有限要素法による解析やドリフトや防振特性に関する様々な測定により明らかになっている [8][9][10]。水平方向及び Yaw の回転モードの共振周波数は数 Hz に集中しており、鉛直、Pitch の共振は 10Hz~20Hz 周辺に存在する。ただし、これらは典型値であり、実際にはある程度のばらつきや方向依存性が存在するものと思われる。Q 値に関しては明らかになっていないが、同種のスタックに関する LIGO グループの報告によると高いもので 30 程度の値をとると推定される [24]。

##### 懸架システム

懸架システムはスタック上に設置された光学定盤中央にボルト止めした。ダミーマスにアルミ蒸着ミラーを取り付け、50 $\mu$ m のタングステンワイヤーで懸架した。なお、アルミ蒸着ミラーはダミーマスの両面に対称に取り付け、重心位置が偏らないようにした。

##### 測定系

マスの回転を測定するために、レーザー光源を用いた光てこを利用した。光てこは、対象からの反射光の位置変化を測定し回転の情報を得る装置である。対象の反射面と位置敏感光検出器 (Position Sensitive Photodetector : PSD) の距離を  $d$  とし、対象が角度  $\theta$  だけ回転したとすると、PSD 上でのスポットの移動量は  $\delta x = 2d\theta$  となる (図 4.21)。逆に、 $\delta x$  が測定できれば回転角  $\theta$  が求められる。

本実験ではレーザー光源として 4mW YAG:Nd レーザーを用いた。PSD としては、受光面が 4 分割されているフォトダイオード (Quadrant PSD : Q-PSD, 浜松ホトニクス S4939) を用いた (図 4.22)。図示したように 4 分割面の内、2 面を 1 組として 2 つの組間で受光量の差をとれば、スポットの変位が測定できる。変位-光電流の変換係数の大きい方が微小変位の測定には有利であるから、光源とマスのミラーとの間に適当なレンズ系を組み、Q-PSD がレーザーのウエスト<sup>4</sup> 付近にあたるように工夫した。ウエストのスポットサイズは 0.2mm~0.6mm であった。レンズ系を組まないとスポットサイズは数 mm~1cm 程度になる。

<sup>4</sup>レーザー光の拡がり最小となっている場所

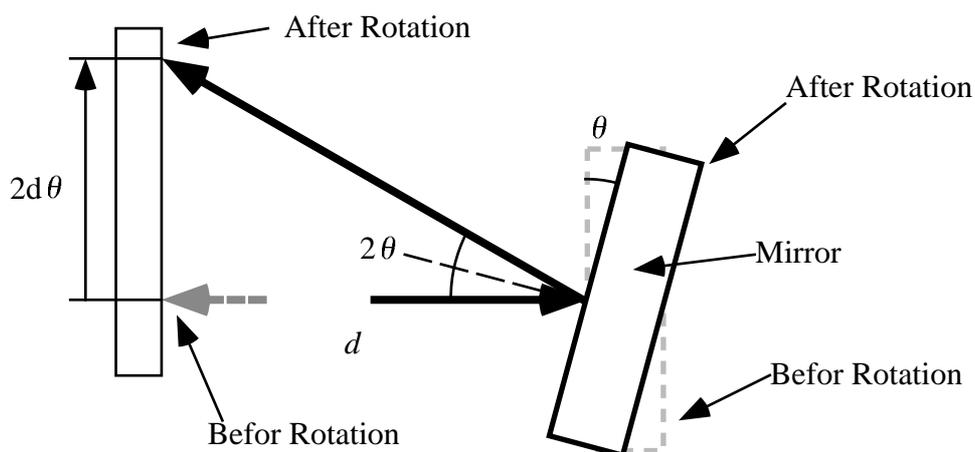


図 4.21 光てこの動作原理

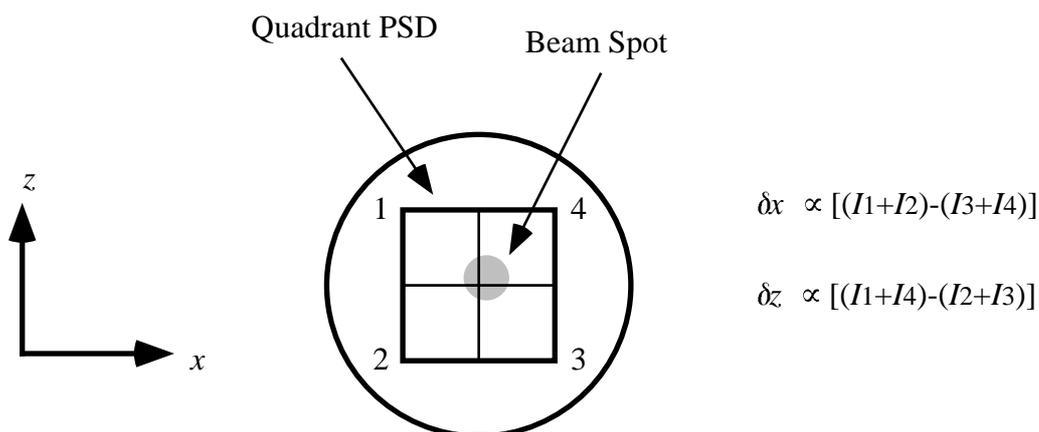


図 4.22 Q-PSD(位置敏感光検出器)の動作

TAMA300 サイトでは、真空槽の側に光学定盤を設置し、その上に光源や Q-PSD 等の光学系を組んだ。適当にステアリングされたレーザー光は真空槽の光学窓から入射してダミーマスに取り付けたアルミ蒸着ミラーに照射した。反射光も同一の光学窓から取り出し、PSD に入射させた。

塵や空気の対流による屈折率変化によってレーザー光曲げられてしまう現象 (ビームジッター<sup>5)</sup>) を避けるために、光学定盤はビニールシートのケースで覆い、ケースと光学窓の間の光路はアクリルパイプ内を通るようにした。また、真空槽内は 1Torr 程度の低真空に排気してあるため、真空槽内で塵や対流由来のビームジッターは起こらない。図 4.23 にデータ取得系も含めた実験のセットアップの概念図を示す。Q-PSD で得られた光電流はプリアンプで直ちに電流-電圧変換し、差動信号をとる。DC 及び高周波ノイズを除去するためにフィルターに通した後に FFT アナライザでスペクトルを測定する。データはオフラインでパソコンに移し、解析を行う。

<sup>5)</sup>ビームジッターは主に 10Hz 以下の帯域で光りてこの雑音源となる。

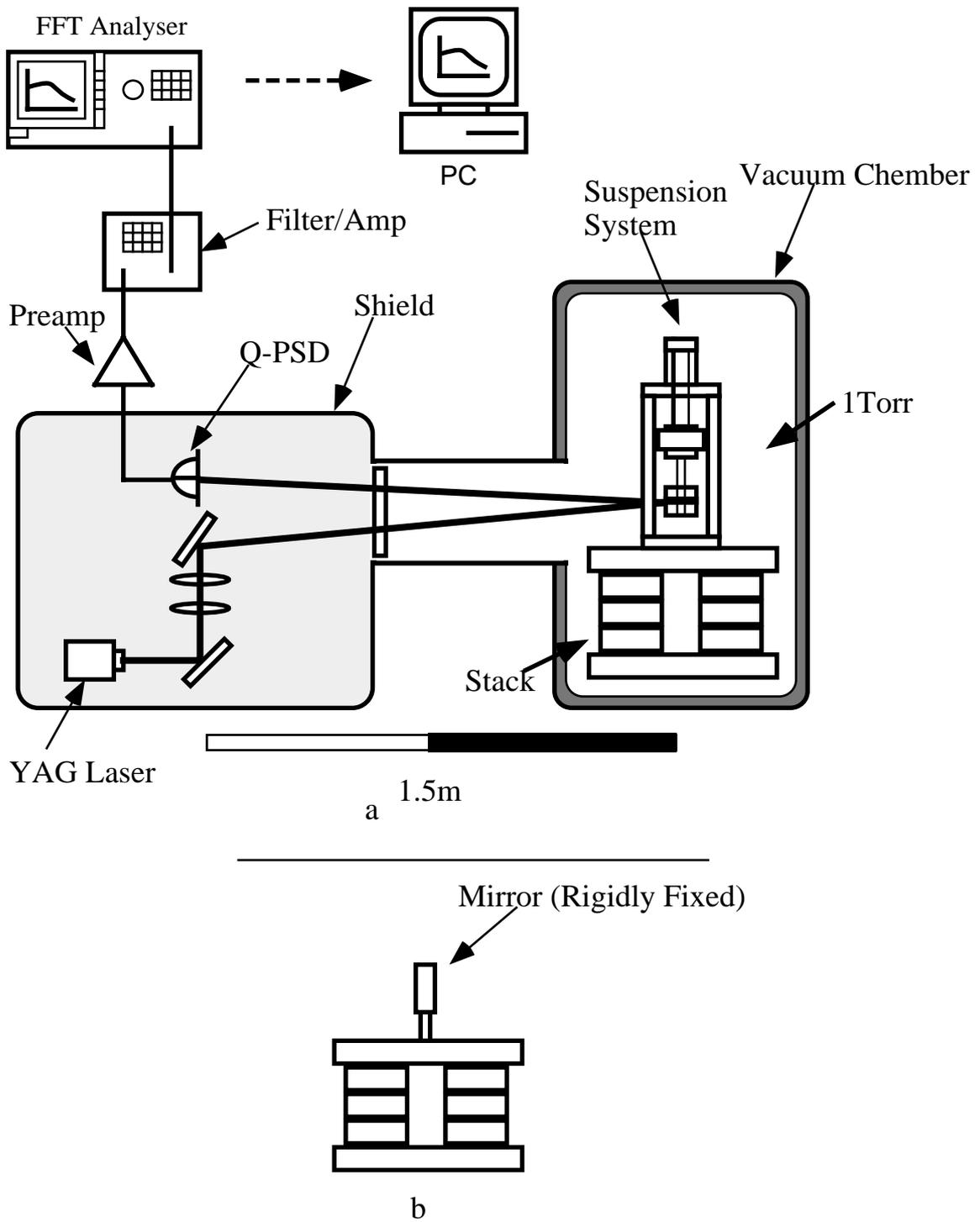


図 4.23 実験のセットアップ

## 4.3.3 測定

光てこの感度

予備測定として光てこの特性を調べた。同一の定盤上に光りてこを組み、ビームジッター等を含めた測定系の感度を測定した。レーザーヘッドは定盤に固定し、84mm 離れた位置にある Q-PSD は定盤に固定した光学ステージに固定し、スポットに対して位置を変化させながらプリアンプの出力電圧を読み、変位-電圧の変換係数を求めた(図 4.24)。そして Q-PSD の位置を水平、鉛直とも出力信号の DC 電圧が 0V となるように調節した後、ビームの位置を測定し、角度に直したものが図 4.25 である。なお、光路は全てアクリルパイプで覆われている。

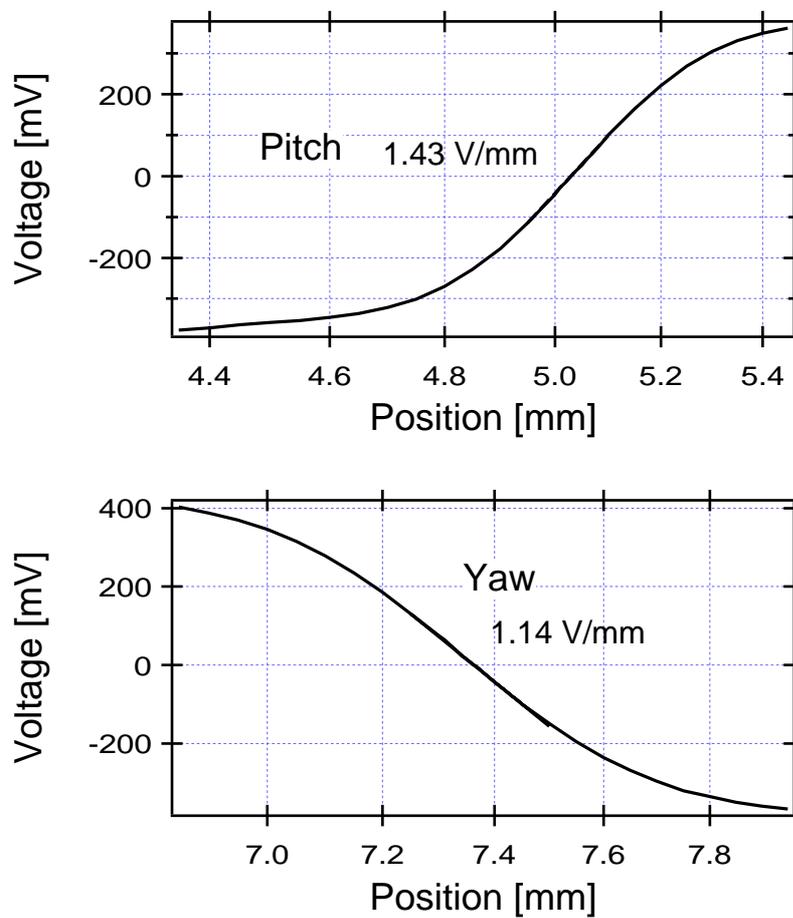


図 4.24 Q-PSD における変位-出力電圧の関係

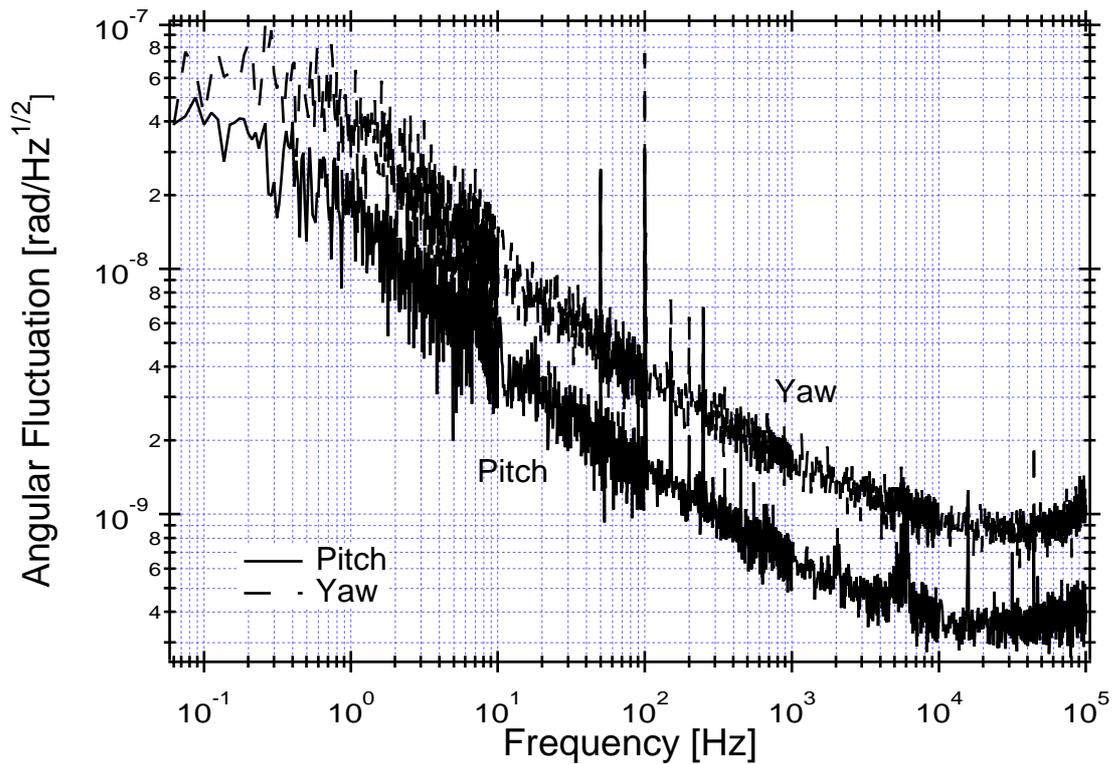


図 4.25 Q-PSD による光てこの感度

#### 懸架システムの回転スペクトル

リサイクリングミラー用光学定盤に懸架システムを設置し，ダミーマスの回転スペクトルを測定した(図 4.26，図 4.27)．RMS 振幅もプロットしてある．測定時に FFT アナライザで Hanning 窓関数をかけているが，RMS 振幅を求める際にはピーク部のみでなく広帯域の積分を行っているため，実効バンド幅の補正などは必要ない．

Pitch，Yaw どちらの測定も，ピーク部を除いてノイズに埋もれてしまい，スペクトルの詳細は不明である．特に観測帯域に関してはほとんど情報が得られない．100Hz にあるラインスペクトルは蛍光灯によるものである．測定系が大きかったため，遮光はできなかった．Yaw のスペクトルで，4.3Hz にピークが現れるが，これは Q-PSD が傾いている効果などによると思われる．全帯域の RMS 振幅に関しては，Pitch では 4.3Hz の低周波の共振によって決定されている．Yaw では本来存在しない 4.3Hz のピークの寄与が無視できないが，このピークがなくとも 0.8Hz の共振のみでも同程度の RMS 振幅を生じる．それぞれのモードの RMS 振幅と，最低次の共振周波数，半値幅から見積もった Q 値について表 4.1 にまとめる．また，Pitch モードに関しては全帯域での RMS 振幅が許容値を大きく超えてしまっている．Pitch モードの最低次共振は半値幅から Q 値を求めると 30 弱の値が得られるが，スペクトルを見るとピークとフロアの高さ比は 100 以上あると思われる．しかし，剛体モデル及び加振実験からわかるようにこのような Q 値の高いモードは存在しないはずである．この問題については次章で詳しく議論する．

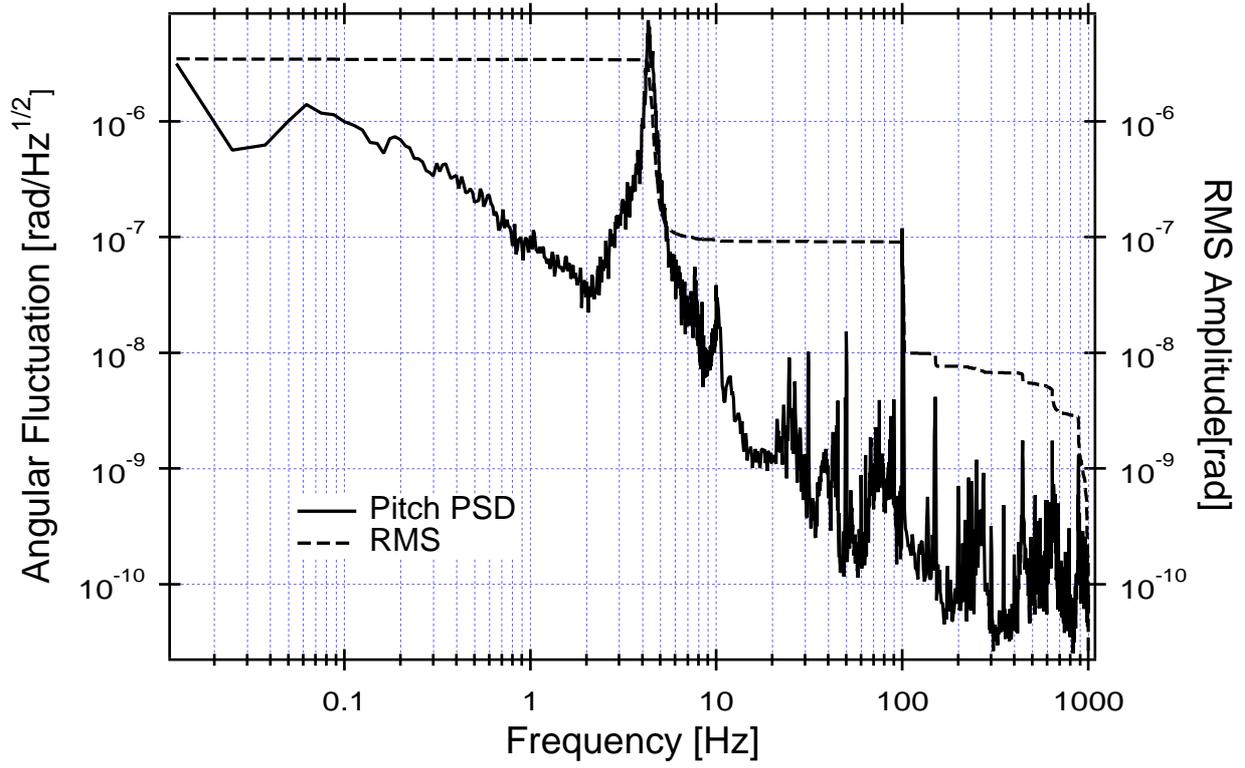


図 4.26 スタック上の懸架システムの Pitch スペクトル

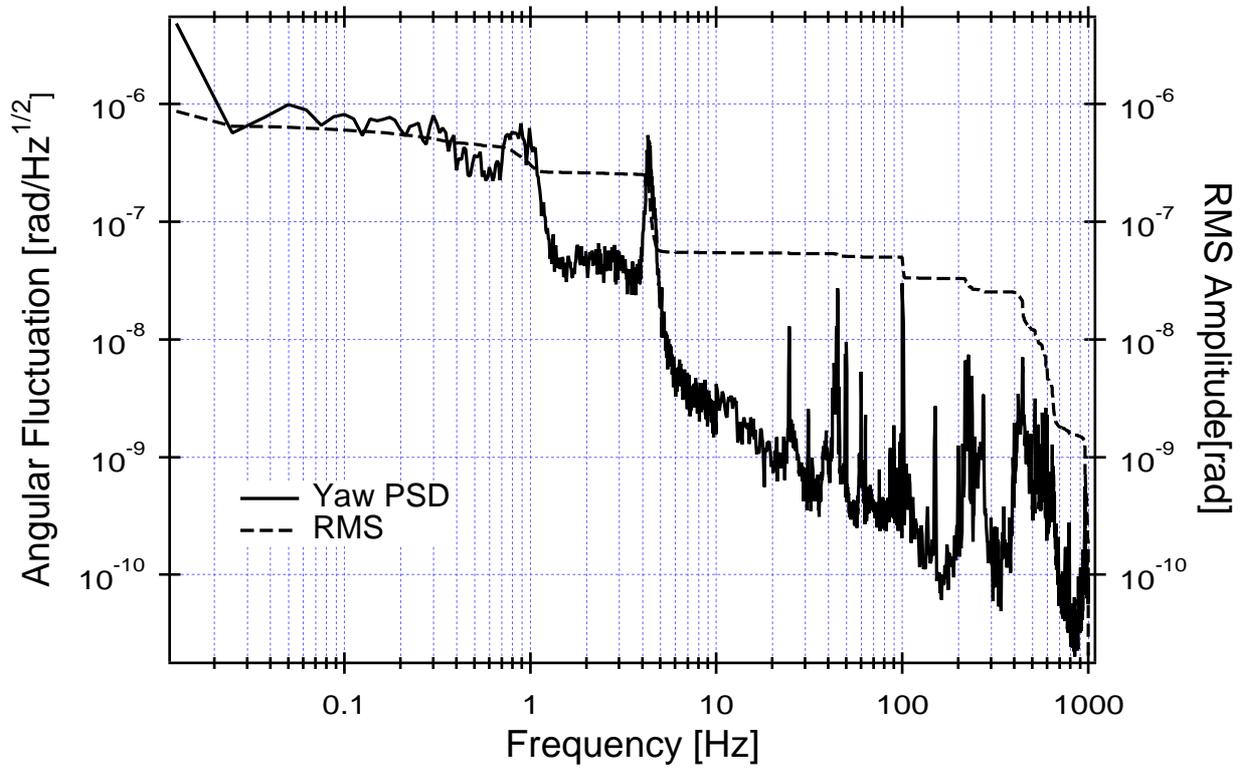


図 4.27 スタック上の懸架システムの Yaw スペクトル

モード	共振周波数 [Hz]	Q 値	全帯域 RMS 振幅 [rad]
Pitch	4.3	29	$3.2 \times 10^{-6}$
Yaw	0.9	2.6	$4.0 \times 10^{-7}$

表 4.1 回転モードの最低次の共振と全帯域での RMS 振幅

#### 4.4 測定に関する結論

懸架システムの加振実験，静置実験を通して以下のことが明らかになった．

- 剛体モデルの妥当性 モデルに取り込まなかった弾性体によるものを除いて，全ての共振，及び Q 値に関して精度の高い予想ができた．
- 懸架システムの防振特性 加振実験によって，30Hz 以下で懸架システムの防振特性はほぼ設計通りであることが確かめられた．観測帯域については音の影響などがあり感度の限界から明らかにできなかった．
- Pitch モードの RMS 振幅の問題 静置実験によって，全帯域での RMS 振幅について Yaw モードでは許容範囲内であることが確かめられた．しかし Pitch モードに関しては，許容値を大きく超えてしまっていることが明らかになった．観測帯域の RMS 振幅に関しては，これも測定系の感度が不十分なため明らかではない．

懸架システム単体で見たときには防振特性はほぼ設計の通りであることがわかったが，スタック上に設置したときには特に Pitch モードが予想外に大きく揺れていることが明らかになった．本実験とは別のスタック上で行った測定でも Pitch モードの最低次共振が許容値を大きく越えて振動していることがわかっている [19]．この問題に関しては次章で詳しく述べる．また，観測帯域で十分な防振比が得られているかどうかは測定系の限界から明らかにできなかった．この点も今後の課題である．

## 第5章

# 懸架システムの改良

前章で、単体ではほぼ設計通りの防振特性を示した懸架システムが、スタック上に設置すると特に Pitch モードが予想外に大きく揺れてしまっていることが明らかになった。本章では、この問題の解決法を考察，検証する。その上で懸架システムの回転防振についての結論を述べる。

### 5.1 Pitch モードの問題と原因

#### 5.1.1 Pitch モードの回転の起源

前章，リサイクリングミラー用スタック上での静置実験から，Pitch モードの第 1 共振 (4.3Hz) の揺れが大きく，RMS 振幅がミスアラインメントの要求値 ( $5 \times 10^{-7}$  rad) の 6 倍ほどになってしまったことが明らかになった。この問題は懸架システム試作機だけではなく，TAMA300 で用いる実機でも発生している。TAMA プロジェクトで行われている，東西の腕を使った 300m Fabry-Perot の制御に関する実験では懸架システム実機を用いている。この実験で，実機の Pitch モードの RMS 振幅が第 4 章で述べた試作機の場合と同程度であることが明らかになった [21]。よって，本章ではこの問題に対して，懸架システムを改良することで対処することを検討する。

マスの回転に対処するためには，その原因を知る必要がある。第 3 章で述べたとおり，懸架システムのマスの回転には，次の 2 つの起源が存在する。

1. 外乱の回転成分
2. 並進外乱と懸架システムの並進-回転カップリング

2 の場合は基本的に懸架システムの非対称性が介在するが，実際の懸架システムに存在する非対称性を具体的に知ることはできないので，検証は困難である。そこでまず，リサイクリングミラー用スタックの回転を測定し，1 の可能性を検討した。

#### 5.1.2 スタックの回転

スタックの回転を測定するために，リサイクリングミラー用光学定盤上に鏡を固定し，この鏡の回転を懸架システムの場合と同様に光りてこを用いて測定した (図 4.23 b)。Pitch，Yaw についての結果をそれぞれ図 5.1，図 5.2 に示す。どちらのモードにも問題となっている懸架システムの

Pitch モードに極めて近い周波数 (4.5Hz) にピーク構造が存在する．これはスタックの水平モードに対応する周波数であり，本来の Pitch や Yaw のモードはもっと高い共振周波数を持つ [8]．おそらくスタックの並進-回転カップリングによるものと思われる．スタックは基本的にステンレスのブロックの間にゴムを挟んだ構造をしている．ゴムのブロックなどは一様に製造するのが困難なので非対称性が起こりやすいと考えられる．

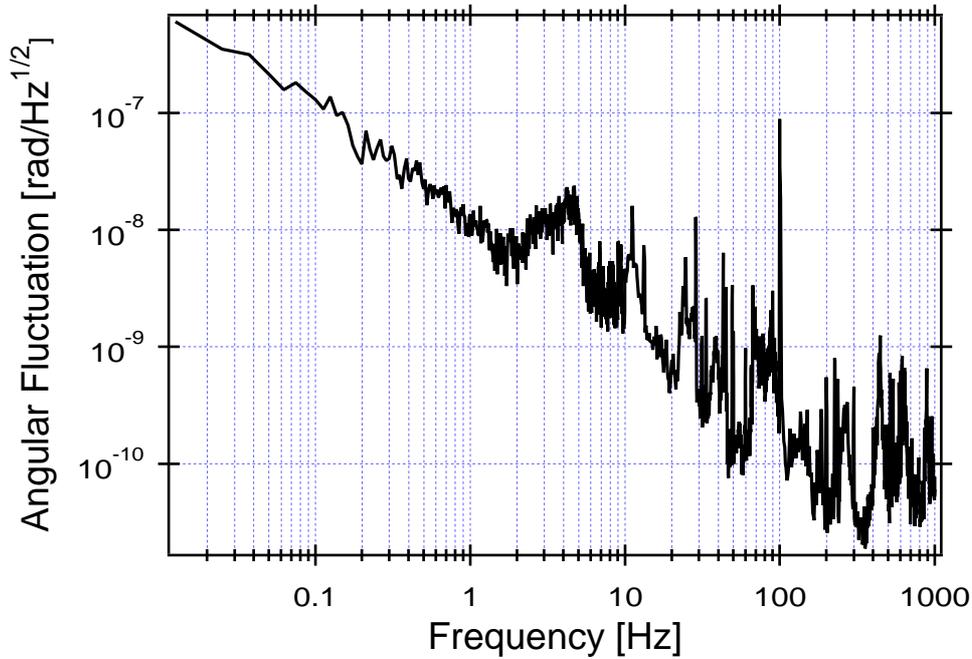


図 5.1 スタックの Pitch スペクトル

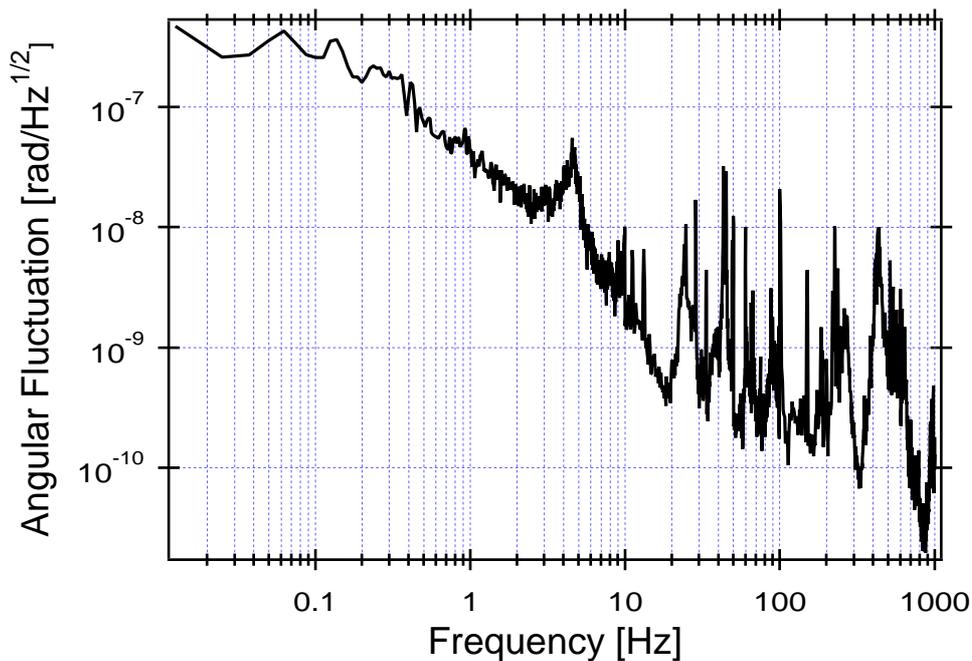


図 5.2 スタックの Yaw スペクトル

次に、これらのスタックの回転スペクトルに懸架システムの回転-回転伝達関数をかけたものと、実測された懸架システムの回転スペクトルを図 5.3，図 5.4 に示す。Yaw の 1Hz の第 1 共振に関してはスタックの回転から見積もられたスペクトルと測定値が概ね一致するため、この共振は主にスタックの Yaw 回転によるものであると考えられる。これに対して、Pitch については、第 2 共振 (10Hz) は見積と実測が良く一致しているが、第 1 共振に関してはスペクトルの形状は非常に良く一致しているが絶対値は見積の 10 倍程度なので、Pitch-Pitch の伝達経路だけでマスの揺れを説明することはできない。

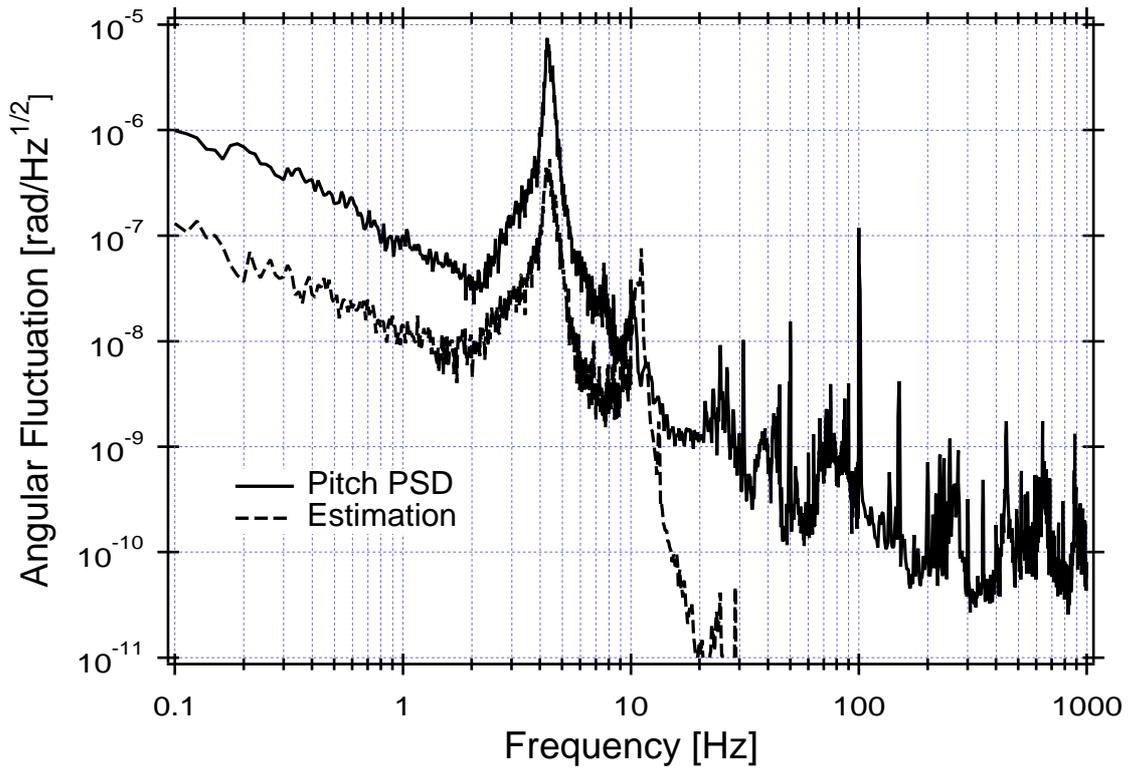


図 5.3 Pitch-Pitch 伝達経路を仮定したスペクトルと実測値

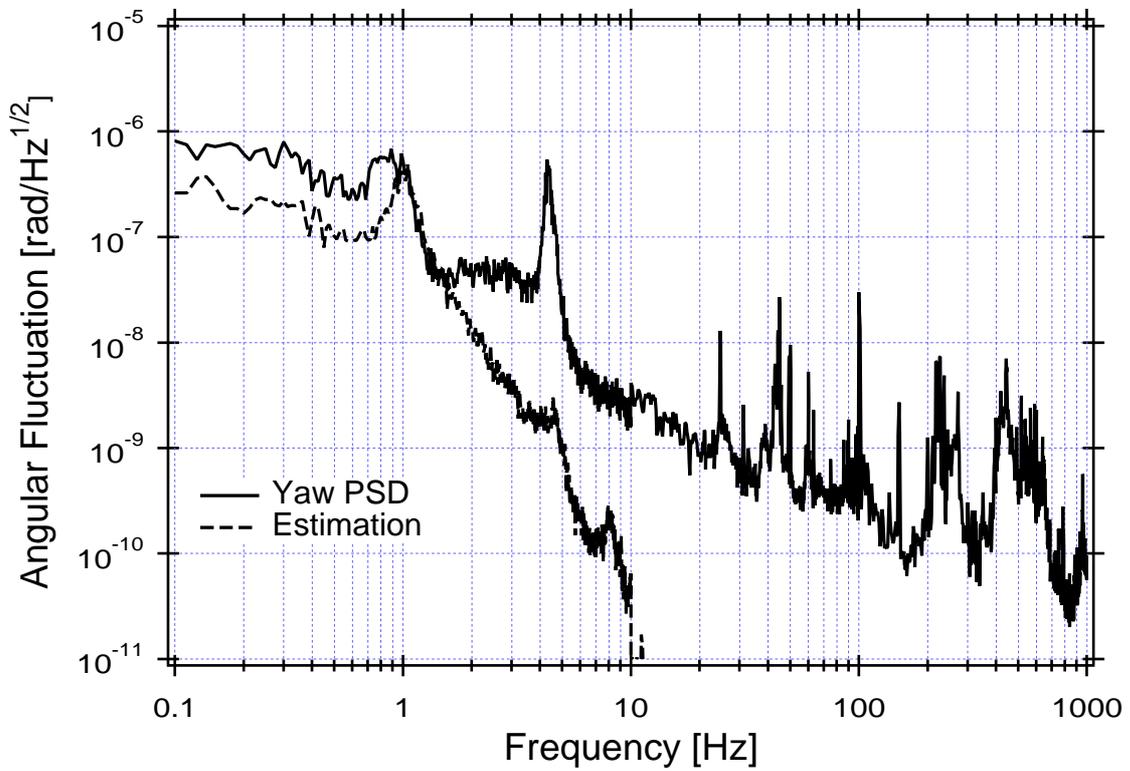


図 5.4 Yaw-Yaw 伝達経路を仮定したスペクトルと実測値

### 5.1.3 スタックの並進振動

前節で Pitch モードの第 1 共振を引き起こしているのが、Pitch-Pitch の伝達経路だけではないことが明らかになったので、並進-回転の伝達経路について考察する。スタック上の並進振動はサーボ型レーザー地震計 (RION LA-50) によって測定した (図 5.5)。水平方向に比べて縦方向の方が大きく振動していることがわかる。

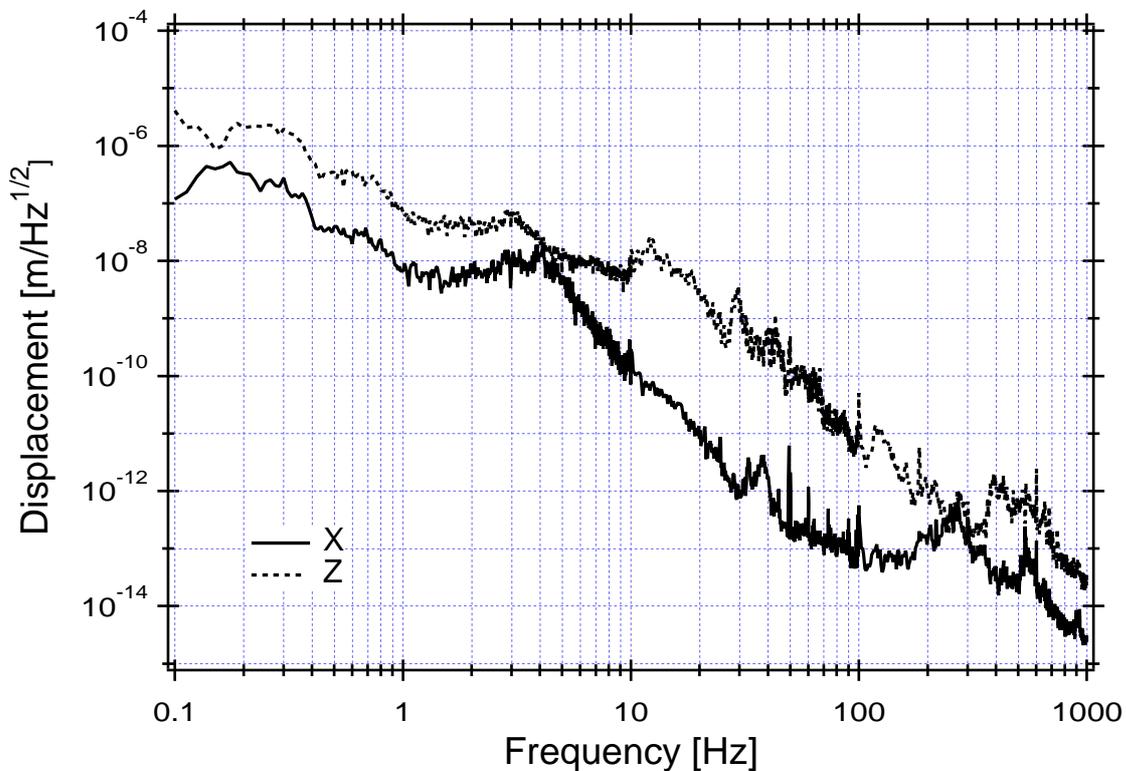


図 5.5 スタックの並進振動

次に、このスタックの並進振動スペクトルに第 3 章で非対称性を仮定して見積もった並進-回転伝達関数をかけたものと実測値を比較する (図 5.6)。伝達関数は、Z-Pitch、X-Pitch とともに最悪値を用いている。推定値ピークが広がっているのは伝達関数に最悪値を用いたためである。図によると、X-Pitch のカップリングは無視できるが、Z-Pitch のカップリングは大きく、非対称性の最悪値を用いれば懸架システムの Pitch 第 1 共振の揺れが説明できるように見える。

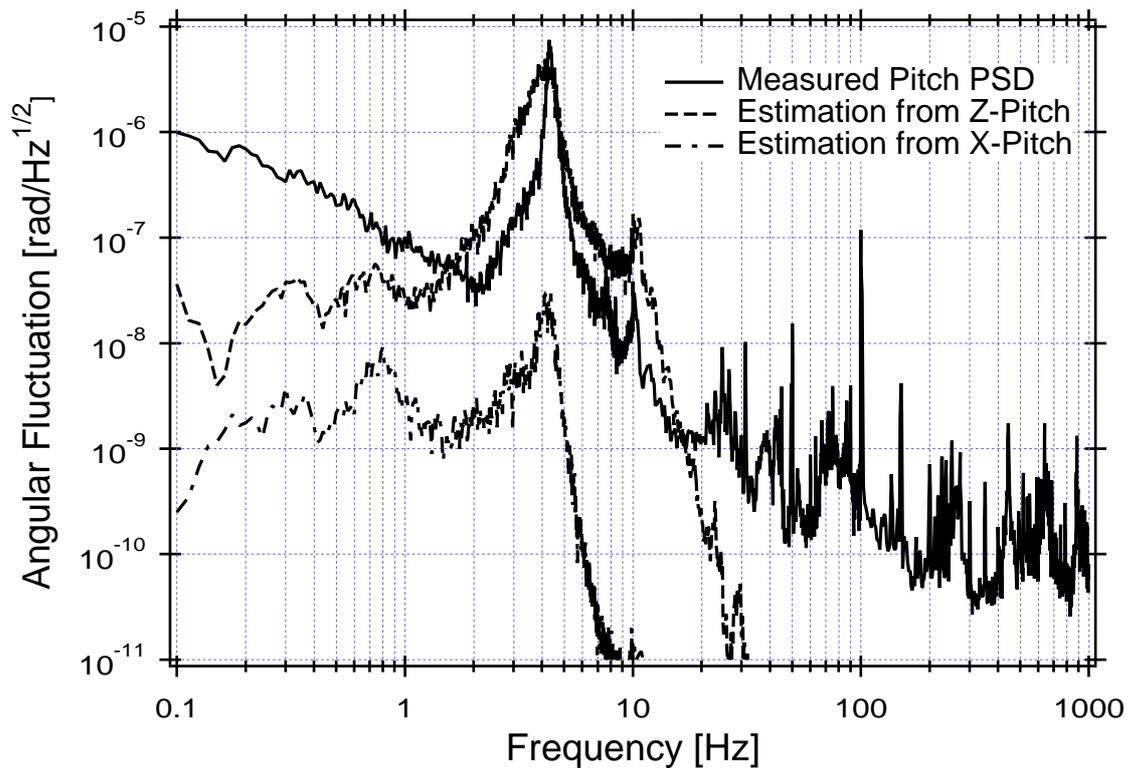


図 5.6 並進-Pitch 伝達経路を仮定したスペクトルと実測値

#### 5.1.4 対策に関する考察

Pitch の第 1 共振は Z-Pitch カップリングのみで決定されているのか

ここまでの考察から、Z-Pitch のカップリングを導入すれば懸架システムの Pitch 第 1 共振は説明できるように見える。では、実際にこの経路によってのみ Pitch の揺れが決定されているのだろうか。ここでは、まずこの点を議論する。

第 3 章の考察から、このカップリングは懸架システムに用いているベローズの硬さのばらつきが支配的であることがわかっている。そこで注意が必要なのは、同じベローズを用いたにも関わらず<sup>1</sup>、第 4 章で見たように鉛直加振を行った結果、Z-Pitch カップリングは最悪値の 10 分の 1 程度であったという点である。静置実験を行ったときのみ懸架システムの非対称性が特に大きくなるということは考えにくい。従って Pitch モードの第 1 共振を Z-Pitch カップリングのみで説明するのは不自然である。実際には Z-Pitch の伝達経路のみが卓越しているのではなく、Pitch-Pitch あるいは Yaw-Pitch のようにここでは考慮していないカップリングの寄与も無視できないと考えられる。このように考えると、特に、スタックの回転共振が、Yaw, Pitch とともに懸架システムの Pitch 第 1 共振と極めて近い周波数に存在することは好ましくない。

<sup>1</sup>ベローズの配置も同一である。

### 対策法の考察

さて、以上のような観点に立つと、スタックの回転共振が 4.5Hz にあるという点が問題となってくる。このことも考慮すると、Pitch モードの問題に対する対応策としては次のような方法が考えられる。

1. ベローズのバネ定数をそろえる。Z-Pitch のカップリングを抑えるためにできるだけベローズの非対称性をなくす。
2. Pitch モードの共振周波数をずらす。懸架システムの Pitch の第 1 共振とスタックの回転共振が非常に近い。つまり懸架システムに加わる外乱が大きいので、懸架システム側の共振周波数をずらして対応する。

1 の方法に関しては、ベローズのバネ定数を実測し、できるだけばらつきが少なくなるような組み合わせで用いればよい。この方法は特にこれ以上考察する必要がない。しかし、2 の方法は懸架システムの設計変更に関わることなので良く考慮する必要がある。以下、2 の方法について、実際に共振周波数をずらして試作機機を用いて静置実験を行い、この方法の有効性を確認した上で、実機では具体的にどのような方法を用いて共振周波数をどの程度ずらすのかを検討する。

## 5.1.5 実験による検証

懸架システム試作機で Pitch モードの共振周波数をずらすために、ダミーマスを吊るワイヤーの直径を  $50\mu\text{m}$  から  $150\mu\text{m}$  に変更して、バネを硬くした。この改造試作機を前章と同様にリサイクリングミラー用光学定盤上に設置してマスの回転を測定した。ワイヤー径を変更したことによる回転の共振の変化を表 5.1 に示す。Pitch モードは大きく変化するが、Yaw モードに関してはほとんど影響がない。また、Pitch、Yaw に関する測定結果をそれぞれ図 5.7、図 5.8 に示す。前章と同様にスタックの回転-マスの回転の伝達関数から見込まれるスペクトルと RMS 振幅もあわせて示す。全帯域での RMS 振幅はいずれのモードも最低次の共振で決まっており、Yaw で  $5.5 \times 10^{-7}\text{rad}$ 、Pitch は  $2.0 \times 10^{-7}\text{rad}$  である。Pitch モードは大幅に改善され、許容値を下回った。また、Pitch-Pitch 経路を仮定した推定値との一致も改造前に比べて良好である。4Hz 台にピークが見えるが、これはスタックの回転がそのまま現れた結果である。このピークだけでも RMS 振幅が  $1.2 \times 10^{-7}\text{rad}$  程度あるので、懸架システムの Pitch 共振が存在しなくともこの程度の RMS 振幅は常に存在することがわかる。しかし、許容値の範囲内である。

このことから、Pitch モードの共振周波数をずらすという方法が RMS 振幅改善のために有効な手法であることが確かめられた。

モード	共振周波数 [Hz]	Q 値
Pitch	6.23 (4.40)	6.41 (24.3)
Pitch	10.93 (10.76)	9.58 (3.78)
Yaw	1.57 (1.56)	1.59 (1.59)
Yaw	4.71 (4.71)	4.47 (4.48)

表 5.1 下ワイヤー径  $150\mu\text{m}$  の時の回転共振。括弧内はワイヤー径  $50\mu\text{m}$  の時の値

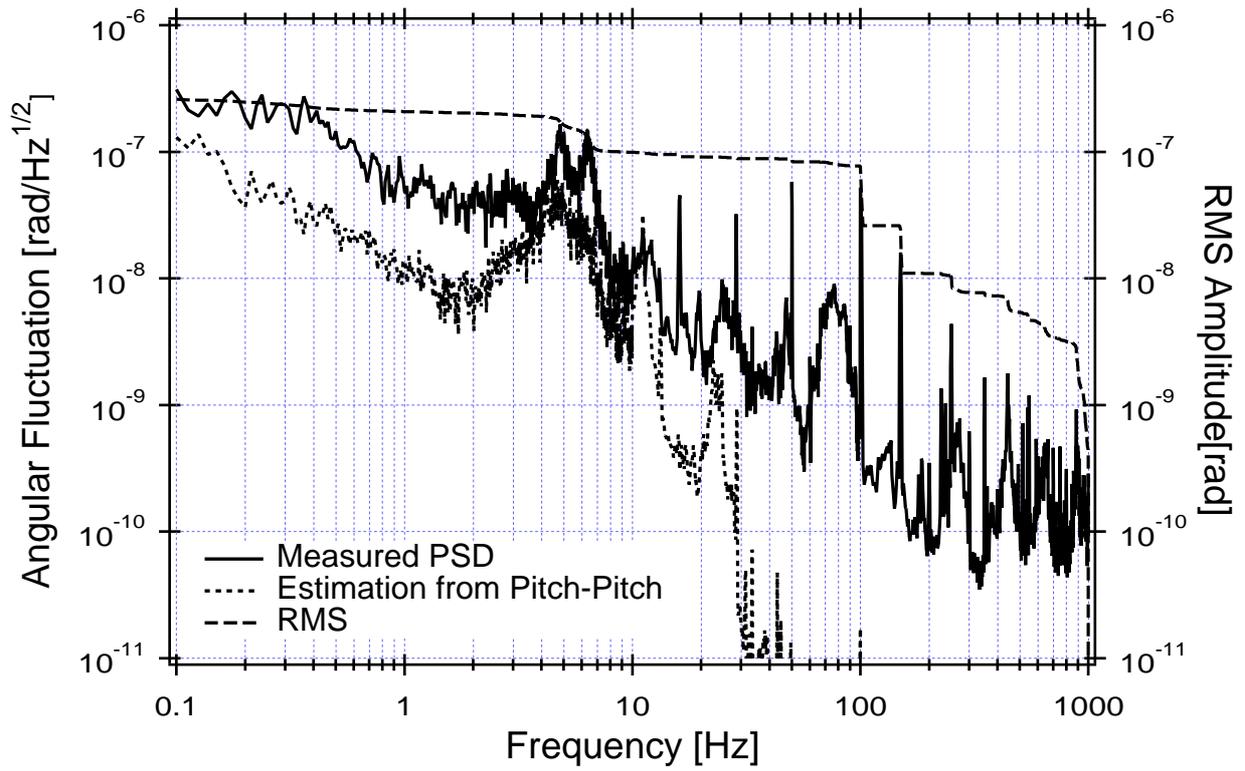


図 5.7 下ワイヤー径を変更したときの Pitch スペクトル

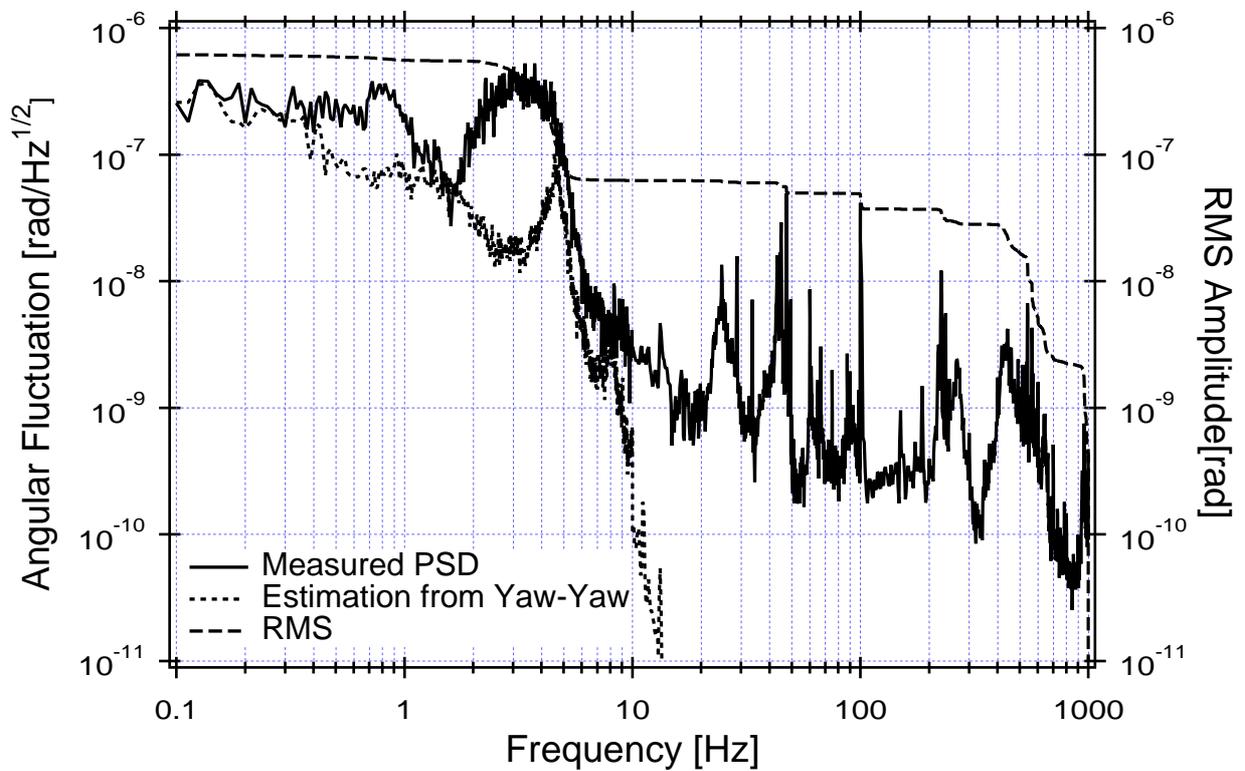


図 5.8 下ワイヤー径を変更したときの Yaw スペクトル

### 5.1.6 共振周波数の変更

#### 変更法についての考察

前節で Pitch モードの共振周波数をずらす手法の有効性が実験的に確認されたので、つぎに TAMA300 で共振周波数をずらす方法について考察する。Pitch モードの共振周波数をずらすためには、

1. 鏡を吊るワイヤー径、材質を変更する
2. 鏡を吊るワイヤー間の距離を変更する

の2通りの方法が考えられる。まず前節の実験で用いた1の方法について考察する。現状では直径  $50\mu\text{m}$  のタングステンワイヤーを用いているが、第3章で述べたように、これはワイヤーの引っ張り強さと非磁性体であるという理由、ワイヤーの弦振動の共振周波数が観測帯域以上になるという点から選択されたものである [16][17]。また、振り子モードの Q 値に関しても、タングステンでは良好な結果が報告されている [22]。このように振り子に用いるのに適した材料は他には見つけにくい。従って材質を変更することは困難である。また、直径  $40\mu\text{m}$  以下のワイヤーでは、1kg 程度のマスを吊ることが困難であることが経験的にわかっている。したがって、ワイヤーを細くして共振周波数を下げることが困難である。また、弦振動の共振周波数を観測帯域以上にするという条件から、ワイヤーを太くすることも実機では許されない。したがって、Pitch モードの共振周波数を変化させるためには光軸方向について下ワイヤーの間隔を変化させるのが現実的である。以下では下ワイヤー間隔を変更した場合の防振特性への影響を論ずることとする。なお、第3章で示したとおり、仮決定の段階ではワイヤー間隔は 20mm となっている。

#### 並進防振特性への影響

図 5.9 に、下ワイヤー間隔を変化させたときの X-X 防振比の変化を示したが、これはワイヤー間隔に依存しない。同様に Z-Z、Y-Y の防振比も変化しない。したがって、ワイヤー間隔を変化させても並進防振特性に大きな影響は生じないと考えられる。

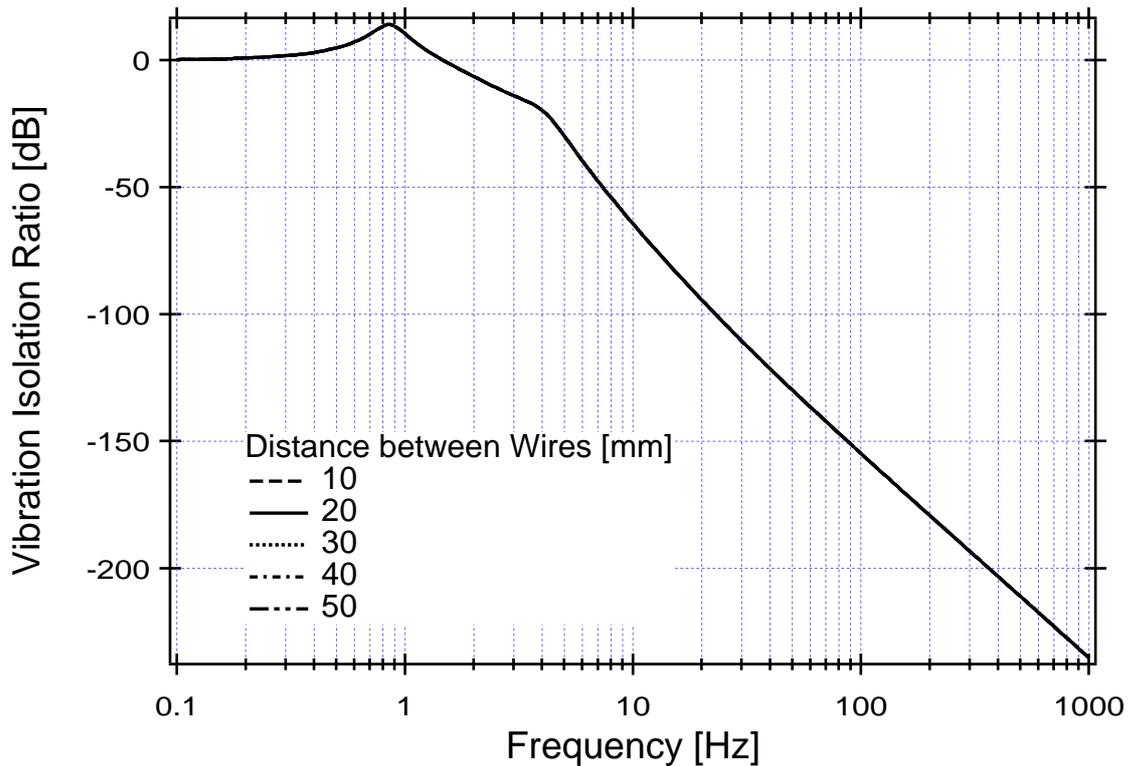


図 5.9 下ワイヤーの間隔を変化させたときの X-X 防振比の変化

#### 回転モードの共振周波数と Q 値および伝達関数

図 5.10 は、下ワイヤーの間隔を変化させたときの Pitch モードの共振周波数を横軸に、Q 値を縦軸にプロットしたものである。実機のパラメータで計算を行ったため、共振周波数は試作機に比べて若干高くなっている。図からわかるように、ワイヤー間隔を狭くすると、低周波側の共振の Q 値が高くなってしまふ。ダンピングは中段マスの運動と密接に結びついているが、ワイヤー間隔を狭くすることによって、中段マスがより静止状態に近いままで鏡が共振してしまうので、ダンピングが効きにくくなり Q 値が高くなるものと理解できる。低周波に Q 値の高い共振が存在すると、RMS 振幅が大きくなってしまふことから、ワイヤー間隔を狭くすることは Pitch モードを改良することにはならない。

よって、ワイヤー間隔を広げて Pitch モードの第 1 の共振周波数を高くすることによって対処するという選択肢しか残らない。しかし、そうすることによって懸架システムの防振特性を損なってはならないので、ここでは、以下のことに注意しながらワイヤー間隔を変更する必要がある。

- 現状からは可能な限り大きくずらした方が良い。
- 他の自由度の防振比が著しく悪化しないようにする。
- 他モードの共振周波数がスタックの共振周波数と接近しないようにする。
- 熱雑音が観測帯域で TAMA300 の感度を上回らないようにする。

まず、影響が大きいと思われる Pitch, Yaw の回転自由度についてみる。図 5.10 をみると、Pitch の第 1 共振周波数はワイヤー間隔を 30mm 以上に広げても余り変化しないのに対して、第 2 共振周波数はほぼワイヤー間隔に比例して大きくなる。スタックの Pitch モードの共振が 15~20Hz に存在するので、これと懸架システムの第 2 共振が干渉しないためには、ワイヤー間隔は 35mm 程度が上限となる。したがって、Pitch モードに着目すると、ワイヤー間隔は 35mm 以下ということになる。

図 5.11 は、Yaw モードについて図 5.10 と同様にプロットしたものである。やはり、第 1 共振周波数はある程度ワイヤー間隔が広がると変化しなくなるのに対し、第 2 共振はワイヤー間隔に敏感である。ここで示したワイヤー間隔の範囲内では Yaw モードについては、熱雑音は問題にならない。したがってスタックとの共振のオーバーラップにのみ注意すればよい。スタックの X モードの共振周波数は 4~5Hz、Yaw モードは 7~9Hz 程度であるから、Yaw モード同士ではスタックとの干渉は問題にならないが、ワイヤー間隔を広げすぎて懸架システムの Yaw モード第 2 共振とスタックの X モードの共振が一致してはならないので、ワイヤー間隔は 40mm 以下にするべきである。

図 5.12、図 5.13 にそれぞれ、ワイヤー間隔を変化させたときの Pitch モード、Yaw モードの伝達関数の変化の様子を示す。ワイヤー間隔を広げれば、どちらの場合も第 1 共振の Q 値が下がるので、スタックとの共振のオーバーラップがない限り RMS 振幅が減少する。

次に、X-Pitch カップリングの伝達関数を示した図 5.14 をみると、ワイヤー間隔を広げることによって、低周波側で伝達関数が小さくなるのがわかる。また、共振部の Q 値も低くなることから、低周波の RMS 振幅が改善されることが予想される。ピークの周波数は Pitch モードの共振周波数と一致するため、ワイヤー間隔には 35mm 以下という制限が生じる。

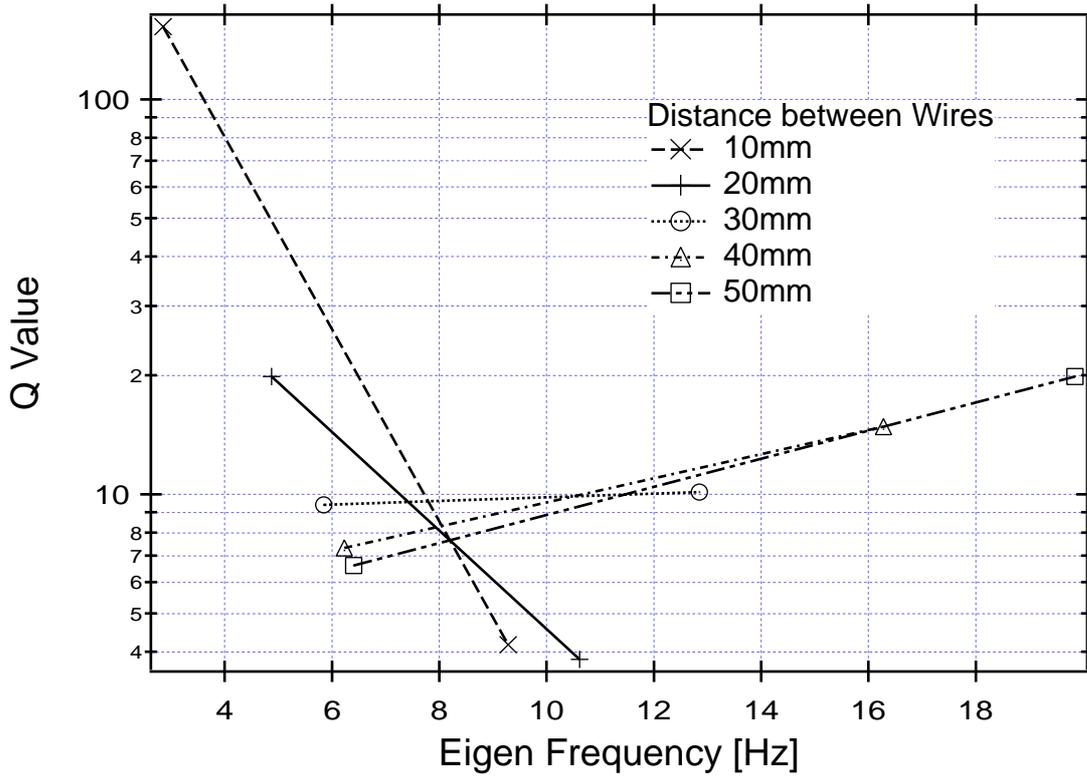


図 5.10 下ワイヤーの間隔を変化させたときの Pitch モードの共振周波数と Q 値の変化

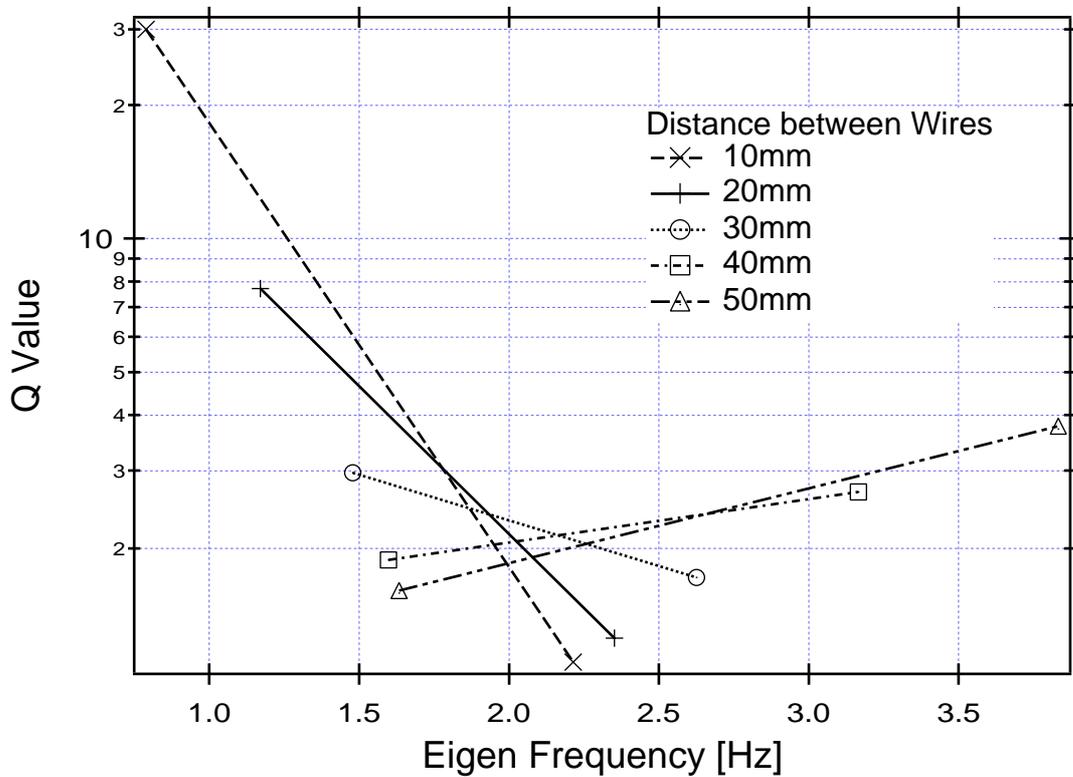


図 5.11 下ワイヤーの間隔を変化させたときの Yaw モードの共振周波数と Q 値の変化

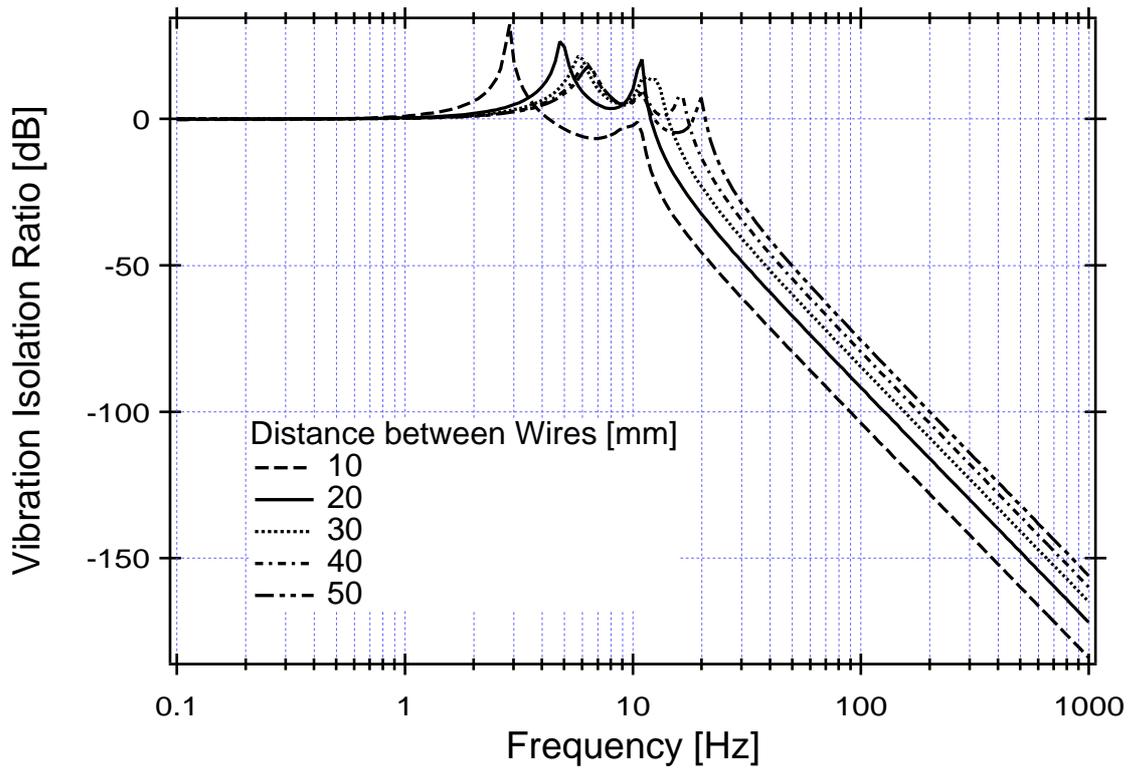


図 5.12 下ワイヤーの間隔を変化させたときの Pitch-Pitch 伝達関数の変化

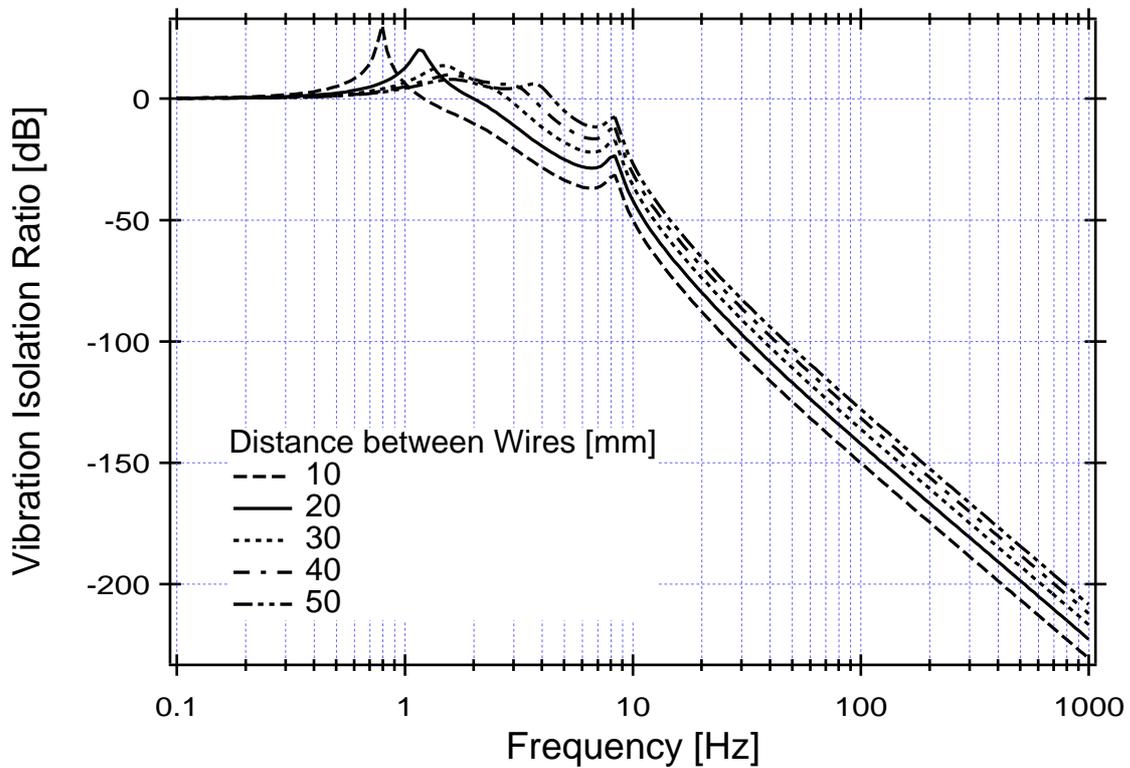


図 5.13 下ワイヤーの間隔を変化させたときの Yaw-Yaw 伝達関数の変化

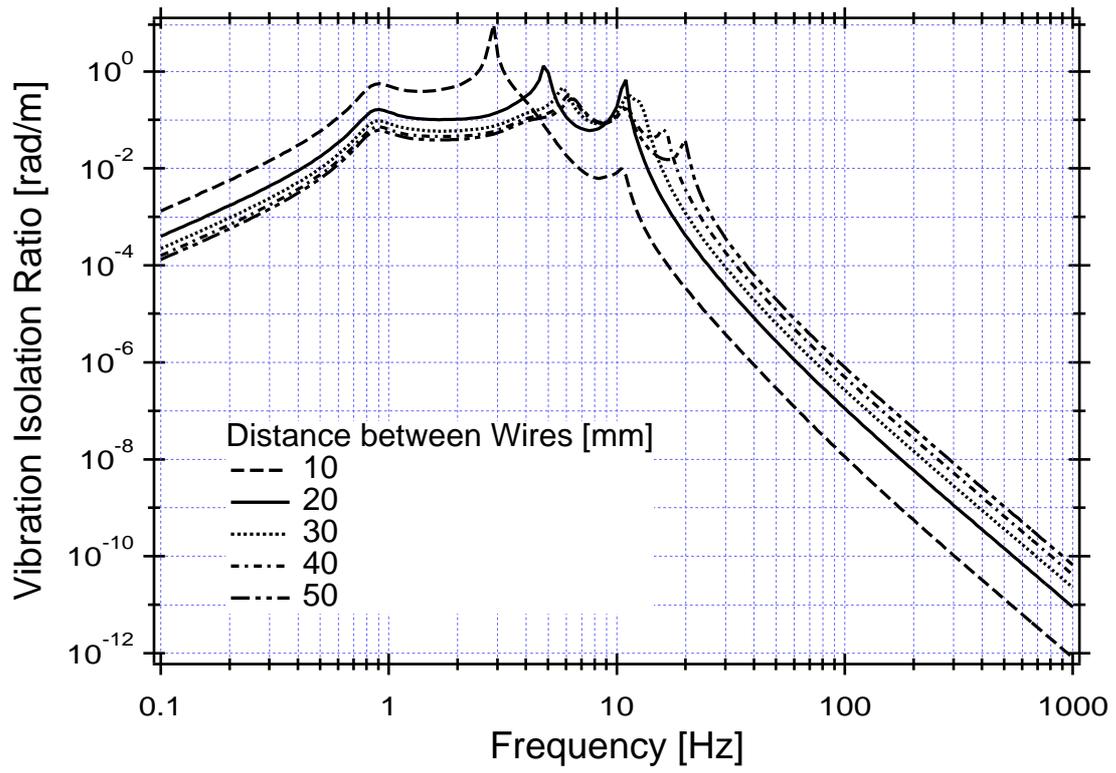


図 5.14 下ワイヤーの間隔を変化させたときの X-Pitch 伝達関数の変化

## 熱雑音

ワイヤー間隔を 10mm から 40mm まで、10mm 間隔で変化させたときの熱雑音の観測帯域での RMS 振幅を図 5.15 に示す。図中の実線が目標値を示す。これによるとワイヤー間隔 40mm では目標値と同程度の RMS 振幅が得られるので、これは採用できない。間隔 30mm なら安全率がおよそ 1.5 となり、許容できる範囲である。

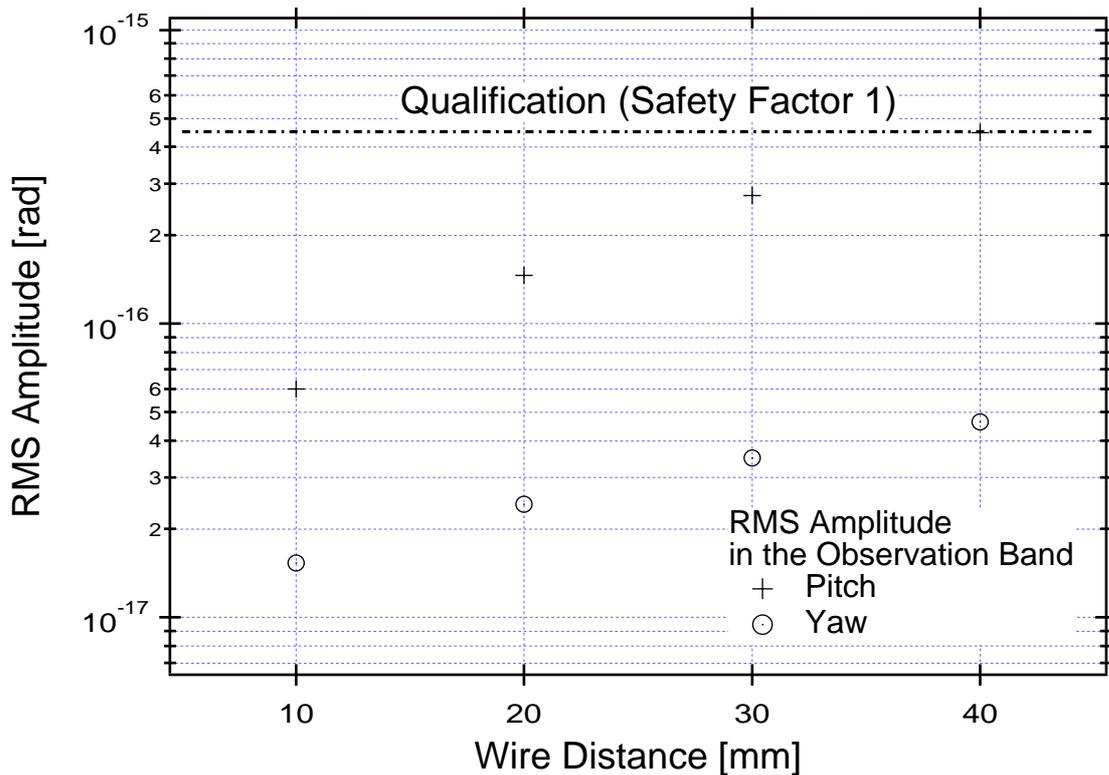


図 5.15 熱雑音による観測帯域での RMS 振幅

## 改良に関する結論

以上に加え、ワイヤー間隔を広げたときの非対称性についても検討を行ったが、ワイヤー間隔 30mm では 20mm の場合と比べて特に大きな変化は見られなかった。したがって、懸架システムの伝達特性の変化、スタック上に設置したときの回転、熱雑音など全ての要因を満足しつつ Pitch モードの RMS 振幅を抑制するための解としてワイヤー間隔を 30mm 程度に広げることが妥当である。

## 第6章

# 広帯域傾斜計の原理

本章から、懸架システムの研究と並行して行った広帯域傾斜計の開発について述べる。懸架システムの回転に関する研究が進むにしたがい、特に Pitch モードに大きな問題が存在することが判明した。その原因を検証するために、スタックの傾斜回転の情報が必要となったが、意外なことに、地震学の分野などでも、地面振動の回転成分を測定する手法は並進成分に比べると十分に研究されているとはいえない。しかし近年、様々な理由からこの回転成分の測定が重要性を増してきている。ここでは、広帯域傾斜計の開発が行われた背景と、その動作原理、他の手法との比較について述べる。

### 6.1 傾斜計開発の経緯

前章までで述べたレーザー干渉計型重力波検出器で用いる光学素子の懸架システムにおいて、回転に対する要求を満たすことは比較的困難であった。特に、懸架システムの開発当初は地面振動についてはそのもっぱらその並進成分のみに着目しており [16]、回転外乱が加わることは想定されていなかった。しかし、第4章で述べたとおり、懸架システム試作機の Pitch モードの第1共振 (4.3Hz) が許容値を大きく超えて振動する問題が明らかになった。また、その起源については、問題となった懸架システムの Pitch 共振と極めて近い周波数に存在するスタックの Pitch 振動のピークが重要な役割を果たしていることも明らかになった。そこで、スタックの Pitch 振動、すなわち傾斜の性質を知るためにこれを精度良く測定する手法が必要になったのである。また、近年地震学の分野でも地面の回転を知ることの重要度が高まっている。これは主に、

1. 並進振動の高精度測定
2. 地球内部構造の探求

を動機としている。図 3.15 に示したとおり、物体が重心で支持されていない場合、これに外力が加わると物体にトルクが働き回転が引き起こされる。これと逆の関係が多く地震計で成り立ち、問題となる。たとえば図 6.1 に示すように、振り子状のリファレンス (基準) を持つ地震計<sup>1</sup>について考えよう。この地震計では振り子の共振周波数より十分高い帯域ではマスは慣性系に静止しているように見なせるため、マスと地面との相対変位を測定することによって地震を測定することができる。ところが、これを設置した地面に傾斜が起こると、リファレンスとなるマスが並進

<sup>1</sup>文献 [14] 参照

運動してしまう(図6.1 b)．また，地面が水平面内で回転するときも，偶然回転中心に地震計を設置しない限り回転による振動と水平並進振動との区別は付かない．つまり一般に地震計は地面の回転に対して感度を持ってしまい，地面の回転は並進振動測定に対する雑音となる．これを排除するためには地震計による並進振動測定と同時に回転の測定を行い，地震計のデータに適当な補正を加えてやればよい．これが1の項目である．また，理論的に地震波には回転成分が含まれていることが示されている．これを測定することによって地球の内部構造に関する情報が得られる可能性が指摘されており，回転そのものも地震学の研究対象として注目されている [25] ．

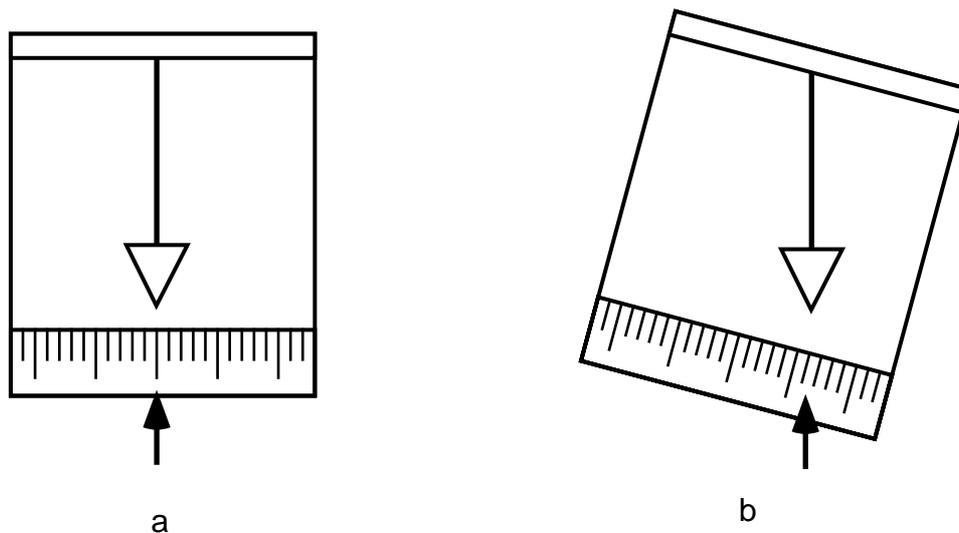


図 6.1 振り子を用いた地震計と地面の傾斜

これらは全て数 Hz 以上の AC 的な地面の回転に関する話題であるが，従来，地面の傾斜を測定するために用いられてきたセンサーは大部分が非常にゆっくりしたタイムスケールを対象としている．次節以降で述べるように AC 的な回転を測定する手法も存在するが，感度などに難点を抱えるものが多く，この分野の測定手段には未だ決定的なものが存在しない．

以上のような背景を受けて，スタックの傾斜を測定することを当面の目的として，懸架システムの研究から得られた振り子に関する知見を応用し，振り子を用いた広帯域 ( $\sim 10\text{Hz}$ ) 傾斜計の開発を行った．将来的には地面振動の傾斜成分も感度良く測定することを目標としている．なお，水平面内での回転はここでは取り扱わない．

## 6.2 広帯域傾斜計の開発

### 6.2.1 地面ならびにスタックの傾斜に関する考察

地面の傾斜—地震波との関連，遠距離相関

第 3.4.4 節では，地震波の SV 波との関連を用いて地面振動の Pitch 成分のパワースペクトル密度を見積もった．改めて示すと，地面振動の Pitch，鉛直成分のパワースペクトル密度  $S_{\theta}$ ,  $S_V$  と

の間には,

$$S_{\theta}(\omega) = \frac{\omega}{c} S_V \quad (6.1)$$

という関係が成り立つと考えられている.  $c$  は地震波の進行速度であり, 0.1Hz 以上の帯域では通常 1km/s 程度の値をとる. したがって, 振幅のパワースペクトル密度に関しては鉛直振動にモデル関数を当てはめると,

$$\begin{aligned} & 2\pi 10^{-8} \quad [\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}] \quad (f < 0.1\text{Hz}) \\ & \frac{2\pi 10^{-9}}{f} \quad [\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}] \quad (f > 0.1\text{Hz}) \end{aligned} \quad (6.2)$$

程度であると推定される. 地面の傾斜を測定するためにはこの程度の感度が必要である.

ところで, 地震波の波長は  $\lambda = c/\omega$  の関係から, 1Hz~10Hz の帯域では数十 m~100m 程度と考えられ, この程度の距離内ならば強い相関があり, 同様の傾斜を起こしていると推定される.

### スタックの傾斜

スタックの傾斜については, 既に第 5.1.2 節で示したように, 10Hz 以下のピーク部は光てこによる測定である程度見積もることが可能である. また, 光学定盤上に加速度計を 2 台取り付け, その鉛直振動の差動信号を得ることによって 10Hz 以上の帯域についても上限値が見積もられている<sup>2</sup>. これらをまとめたものが図 6.2 である. これによると, 1Hz~10Hz では, ほぼ  $10^{-8}$  rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$  程度の揺れが見積もられ, 10Hz 以上の帯域では  $f^{-2}$  に比例して減少している. したがって, 1Hz~10Hz で測定を行うためには,  $10^{-9} \sim 10^{-8}$  rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$  程度の感度が必要である.

---

<sup>2</sup>国立天文台 高橋 竜太郎氏による測定

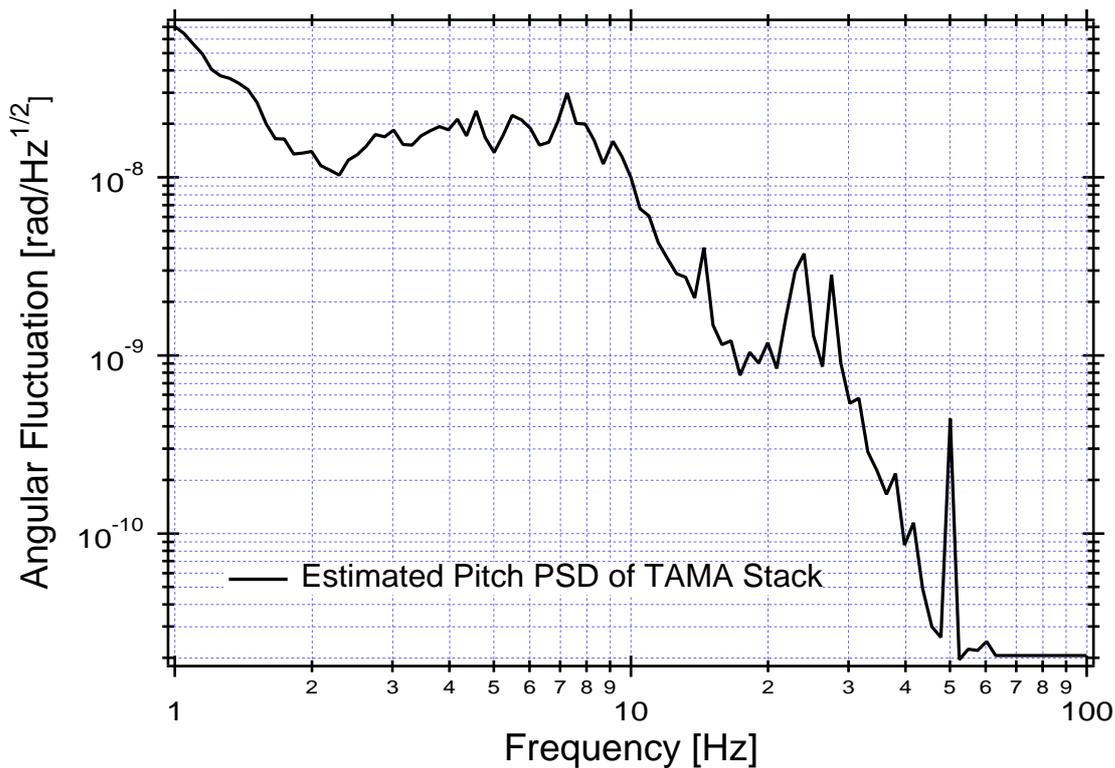


図 6.2 スタックの傾斜の上限値

### 6.2.2 回転検出計に関する考察

#### 光てこによる測定

第 6.2.1 節で述べたように、100m 程度の距離内で地面振動の傾斜成分に相関があると仮定すると、第 4 章で行ったように、長さ 1m 程度の光てこを用いてスタックの傾斜を測定する場合、スタック上に固定された鏡と光てこの光源、受光部の間では、地面の傾斜はほぼ同一であり、測定にかからないと考えられる (図 6.3 の a)。これは SV 波の波長より短い距離だけ離れた 2 点間の傾斜を比較しても、地面の傾斜の情報は得られないことを意味する。また、地震波の波長よりも十分長い距離離れた 2 点を用いても、相対的な傾きが測定できるだけで、ある地点の傾斜を測定することにはならない (図 6.3 の b)。従って、光てこはスタックの共振などを測定するには有効だが、地面の傾斜の絶対量を測定することはできない。本論文で考察する傾斜計は当面はスタックの傾斜を測定することを目標とするが、将来的には地面の傾斜の測定も行うことを視野に入れたものであるから、光てこのように異なる 2 点間の相対角度を測定する装置ではなく、重力方向のリファレンスを自分自身が持っているか、慣性系に対する傾きを検出できるようなものでなくてはならない<sup>3</sup>。逆に、局所的に地面の傾きを測定することができれば、遠距離間の傾斜の相関について検証することが可能である。

<sup>3</sup>本論文で取り扱う傾斜は重力方向に対する傾きである。なお、慣性系に対する角度変動を測定する装置は、傾斜だけでなくその他の回転成分も測定可能である。

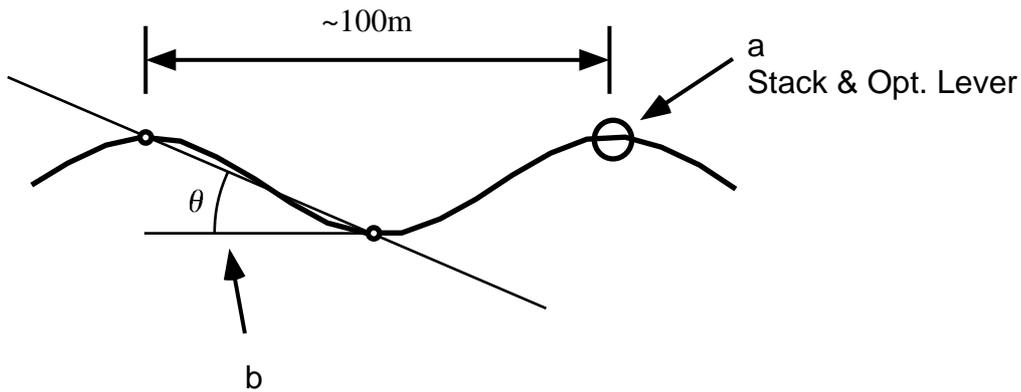


図 6.3 地面の傾斜の相関と検出

### 6.2.3 振り子を用いた傾斜計

#### 動作原理

重力方向のリファレンスを持つ機構として、ワイヤー 1 本で懸架された振り子について考える (図 6.4)。このような振り子のサスペンションポイントに回転が与えられても、ワイヤーの剛性を無視すればサスペンションポイントの回転の情報はマスに伝わらないので、マスは静止したままである (図 6.4 b)。つまり、回転成分の外乱に対してこのマスへの伝達関数は周波数によらず 0 であり、慣性系に対して静止していると見なすことができる。したがって、サスペンションポイントからマスへの相対角度変化を測定すれば、その角度がサスペンションポイントの回転の絶対量を表す。これが広帯域傾斜計の動作原理である。

実際には、マスを 1 本のワイヤーで吊るのは困難なので、傾斜計では 2 本のワイヤーでマスを懸架することにした。こうすると、ワイヤー固定点を結ぶ軸まわりの回転に対して上記のような原理が適用できる (図 6.5)。図示したようにマスの異なる 2 点の鉛直並進振動を測定し、その差動信号からサスペンションポイントとマスの相対角度を読みとることができる。懸架システムの加振実験で用いた手法と同様である。この方法では、並進運動を検出する 2 点間の距離が長いほど傾斜に対して鉛直振動が大きくなるので、この 2 点は可能な限り離れた方がよい。

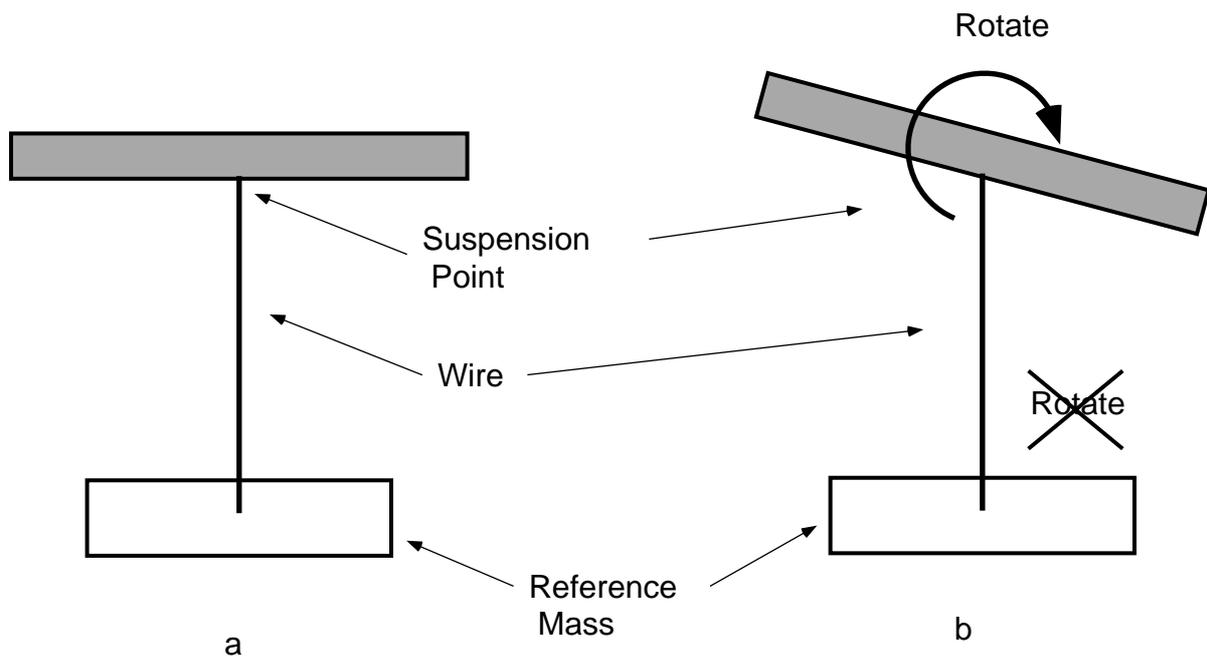


図 6.4 回転計の動作原理

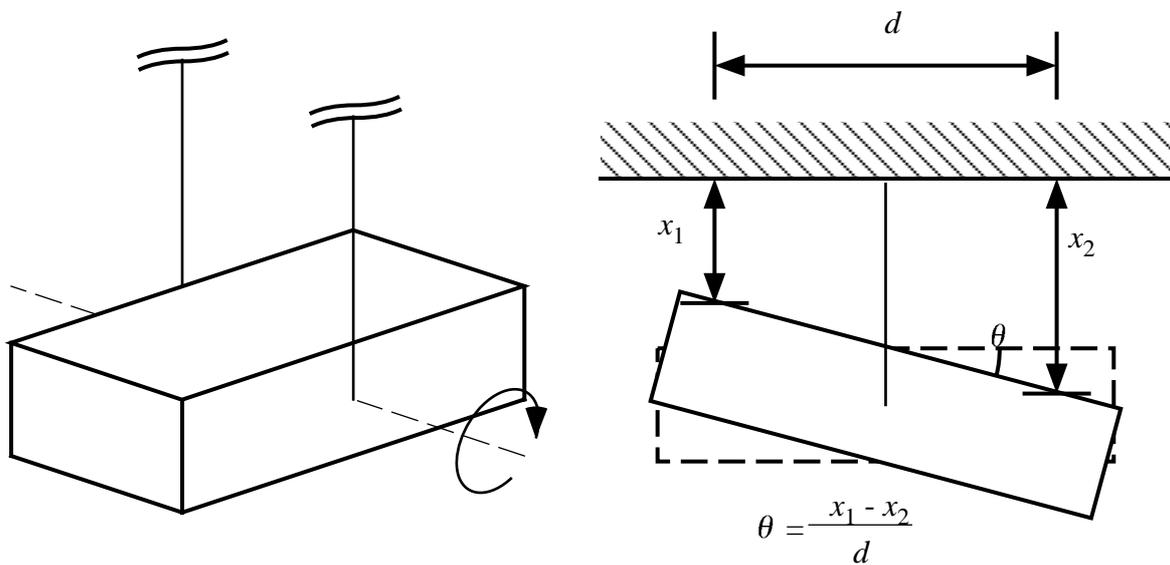


図 6.5 傾斜計の基本デザイン

振り子式の特徴

リファレンスとなるマスを軸支持したり、「やじるべえ」のように支持する機構を用いて傾斜計を製作することは VIRGO グループで行われている [29][30]。これらは既製の弾性支持軸を用いたり、板バネでやじるべえを支えたりしているが、支持機構が複雑なため、マスの伝達特性の再現

性が低いと思われる<sup>4</sup>。

これに対して振り子を用いる場合は、支持機構が非常に単純なため支持機構起因の弾性共振などがなく、機械的特性の再現性が非常に高い。また、原理的には傾斜に対してマスは静止しているため、次節で述べる X-Pitch 等のカップリングが問題とならなければ感度は純粋に並進センサーのみで決まる点も有利である。

## 問題点と対策

2本のワイヤーで吊られたマスでは、傾斜の伝達関数は周波数によらず0であるが、他の自由度からのカップリングによってマスが傾いてしまうと、傾斜検出の雑音となる。実際、懸架システムの X-Pitch カップリングと同様に水平方向への並進外乱が加わるとこれによってマスが回転してしまうことが考えられる。これを避けるためには、懸架システムでスタンドオフを用いたのと同様に、マスのワイヤー固定点の高さをできるだけマスの重心の高さと一致させるしかない。本実験で用いたマスが、3cmのワイヤーで吊られているとして、ワイヤー固定点と重心との距離を変化させながら X-Pitch 伝達関数を求めたものを図 6.6 に示す。どの程度この距離を小さくしなくてはならないかは、測定対象に加わる並進外乱と傾斜外乱の大きさの関係によるが、スタックの場合、1Hz 台では並進外乱は  $10^{-7}\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$  以下、傾斜の見積は図 6.2 から  $10^{-8}\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$  なので、図示した伝達関数の例では 0.1mm 程度までなら許容されることがわかる。しかし、振り子共振に対応する 2.8Hz のピークは何らかの方法によってダンピングしなければならない。また、一般的な問題として、2台の並進センサーの特性が良くそろっていなければ、CMRR が悪化し、振幅、位相が正しく測定できない(図 6.7)。

<sup>4</sup>引用論文では再現性の低さについて直接には触れていないが、支持機構に起因すると思われる弾性共振が問題となることが述べられている。

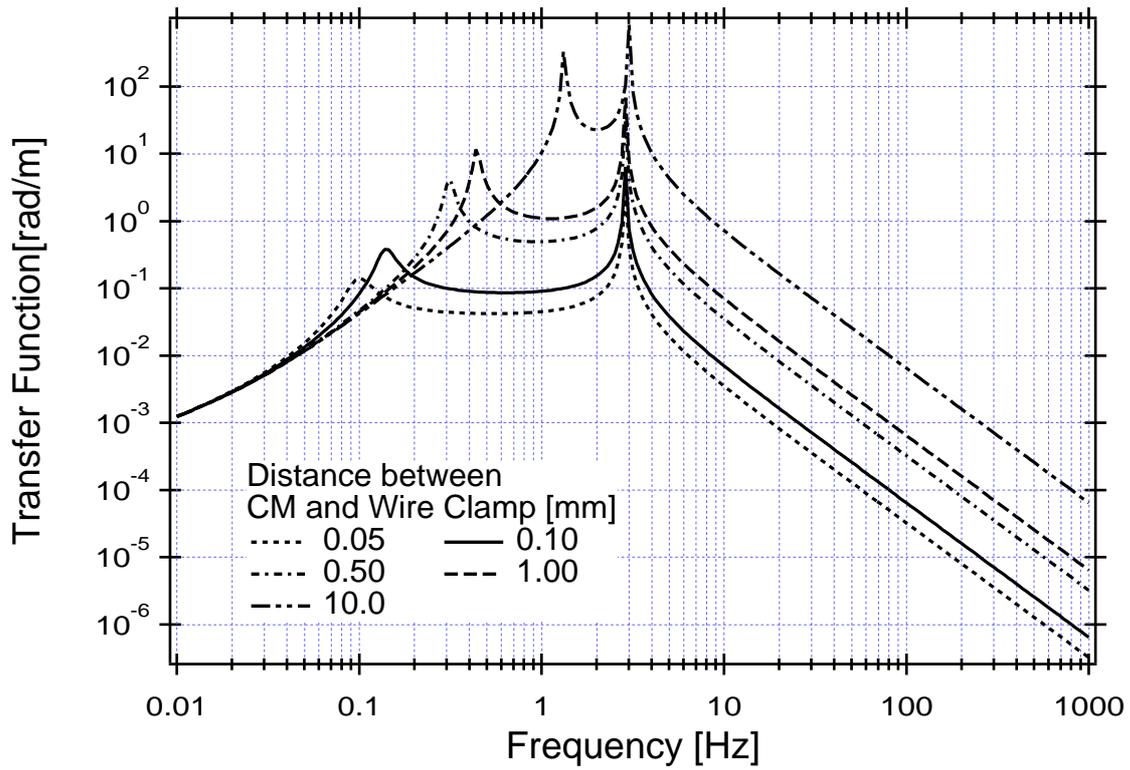


図 6.6 X-Pitch カップリング伝達関数．傾斜計で用いたマスが 3cm のワイヤーで懸架されているとして，マスの重心とワイヤー固定点との距離を変化させている．

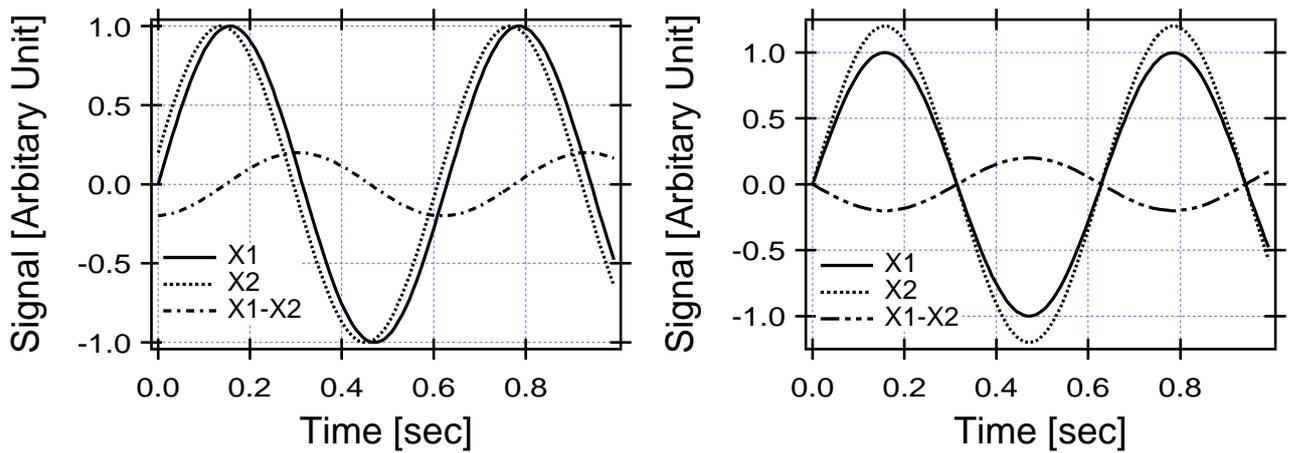


図 6.7 差動信号の誤差．並進センサーの位相，振幅特性ともに良くそろっていないと，正しく同相除去できない．

### 6.2.4 その他の回転検出装置

本実験では、対照として2種類の回転センサーを利用した。これらの動作原理について簡単に触れておく。なお、本実験で用いたものはいずれも市販されているものである。

#### 光ジャイロ

Sagnac 干渉計を用いる手法である。Sagnac 干渉計は、閉じた光路を持つ干渉計で、回転に対して感度を持つ(図6.8)。Sagnac 干渉計では、位相差  $\delta\phi$  は系に加わる回転の角速度と光路で囲まれた面積の平方根に比例するので、できるだけ大きな面積を持つことが望ましい。そこで、光路を光ファイバージャイロのコイルで形成して実効的な面積を増やした、光ファイバージャイロが良く用いられている。この手法は、回転以外の並進外乱に対する感度を極めて低くできるので、回転検出器として優れている。また、機械式ジャイロ<sup>5</sup> と異なり、可動部を持たないために寿命が長く、メンテナンスも容易であるため、現在では航空機などの姿勢計測にはほとんど全て光ファイバージャイロが用いられている。本実験では(株)日本航空電子の光ファイバージャイロ JG-201FA00 を用いた。これは市販されている光ジャイロの中でも特に高感度のものである。

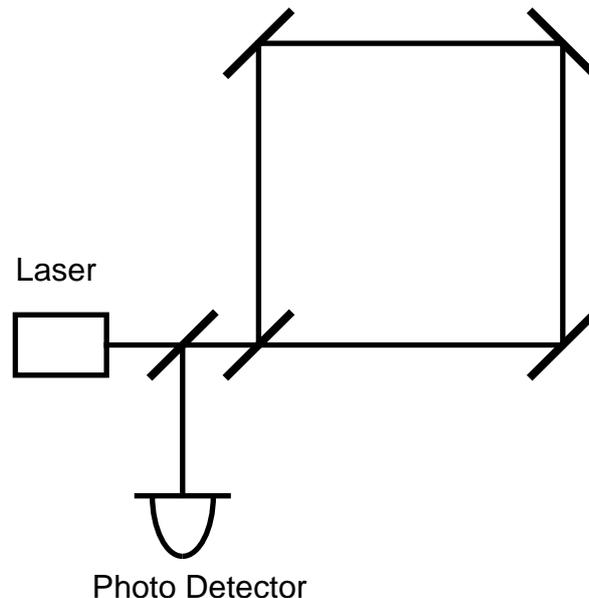


図 6.8 Sagnac 干渉計

#### 流体回転計

図 6.9 に示したように、環状の管に流体(水銀)を満たした構造をしている。軸まわりに管が回転すると流体は慣性で静止しようとするので、開口部の水位に差が生じる。これを検出することによって系に加わった角加速度を検出する装置である。本実験で用いた装置では、水位が一定となるように制御を行っている[26]。本実験では、Systron Donner 社の 8301F という製品を用いた。

<sup>5</sup>文献 [27] 参照。

この製品はNASAのハッブル宇宙望遠鏡の姿勢制御などに利用されている。

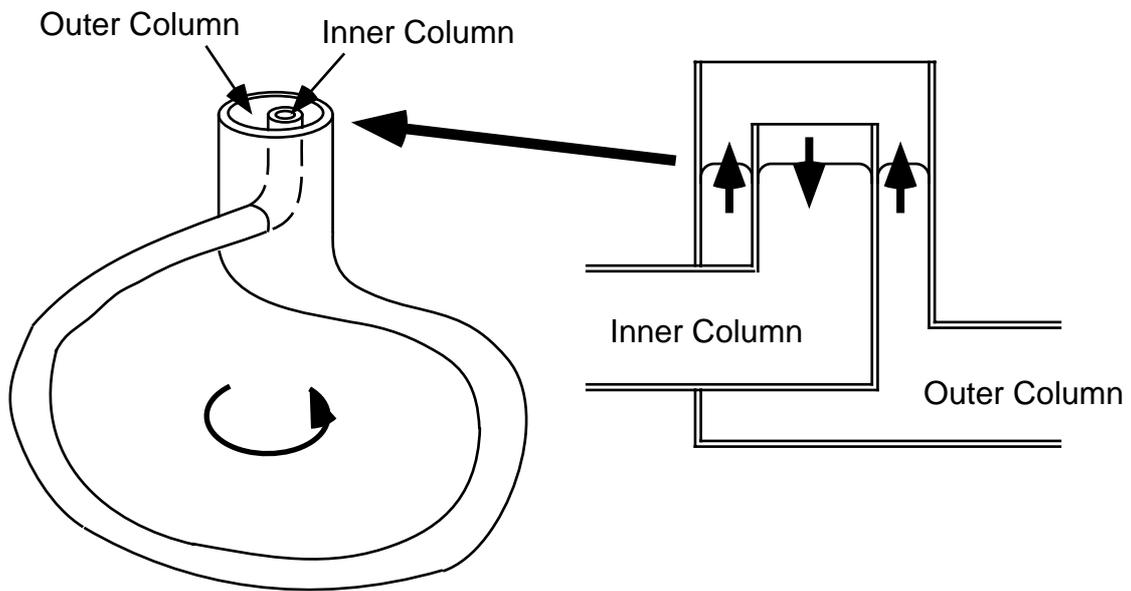


図 6.9 流体回転計

## 第7章

# 広帯域傾斜計の試作と試験

前章で述べた動作原理，基本デザインにしたがって広帯域傾斜計の設計を行い試作した．本章では設計の詳細と試作機による TAMA300 ビームスプリッター用スタックの傾斜測定，市販のセンサーとの比較について述べる．

### 7.1 広帯域傾斜計の試作

前章で原理的な考察を行った広帯域傾斜計を実際に試作した．ここでは試作機の設計について具体的に述べる．

#### 7.1.1 機械系の設計

広帯域傾斜計の基本的なデザインは 6.2.3 節で述べたように，ワイヤー 2 本で吊られた単振り子である．機械系の大きさを決定するにあたって留意すべき点は，

1. 並進運動測定点間の距離
2. 部品の弾性共振
3. マスのワイヤー固定点と重心との位置関係

である．本実験で製作する傾斜計では，リファレンスマスとサスペンションポイントとの相対角度を 2 箇所の並進センサーを用いて検出するため，この並進変位検出点の間の距離が長いほど同じ角度変動に対する並進変位が大きくなり，検出が容易となる．したがってこの距離を長くするためにリファレンスとなるマスの大きさは可能な限り大きな方がよい．マスの大きさを原理的に制限するのは，第 2 項のマスの弾性共振である．マスの弾性共振が観測帯域 ( $\sim 10\text{Hz}$ ) に存在すると雑音となるため，弾性共振周波数が観測帯域以上となるようにマスやその他の部品の大きさを決めなくてはならない．試作機では，マス等の部品は全てアルミ合金で製作したので，形状にもよるが，数十 cm の大きさならば弾性共振は観測帯域よりも高くなる．このような原理的な要請と，取り扱いの容易さを考慮して，試作機ではマスの大きさは  $3 \times 6 \times 12\text{cm}$  とした．質量  $0.57\text{kg}$ ，Pitch の慣性モーメント  $I = 7.33 \times 10^{-4}\text{kg/m}^2$  である．並進センサーの測定点間の距離は  $10\text{cm}$  とした．また，全体のフレームもマスの大きさに合わせて可能な限り小さくなるようにした．

また，マスでのワイヤー固定点と重心の高さが良く一致していないと X-Pitch カップリングによってマスの Pitch 振動が励起されてしまう．そこで試作機では図 7.1 に示したように，マスの上下面および側面に重心位置調節用の重りを取り付けた．以下，この重りをバランスマスと呼ぶ．バランスマスは真鍮製の円盤であり，中央に雌ねじを切っており，これをマスに取り付けたアクリル製の雄ねじにねじ込む機構を採用して，微小な位置調節が可能となるように工夫してある．ワイヤー固定点と重心との高さの差を  $d$  とすると，マスの Pitch の共振周波数  $f_0$  は，

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{mgd}{I}} \quad (7.1)$$

である．マスを懸架したときに Pitch モードを励起し，その共振周波数を測定することによって  $d$  を知ることができる．なお，ワイヤー長は 3cm とした．

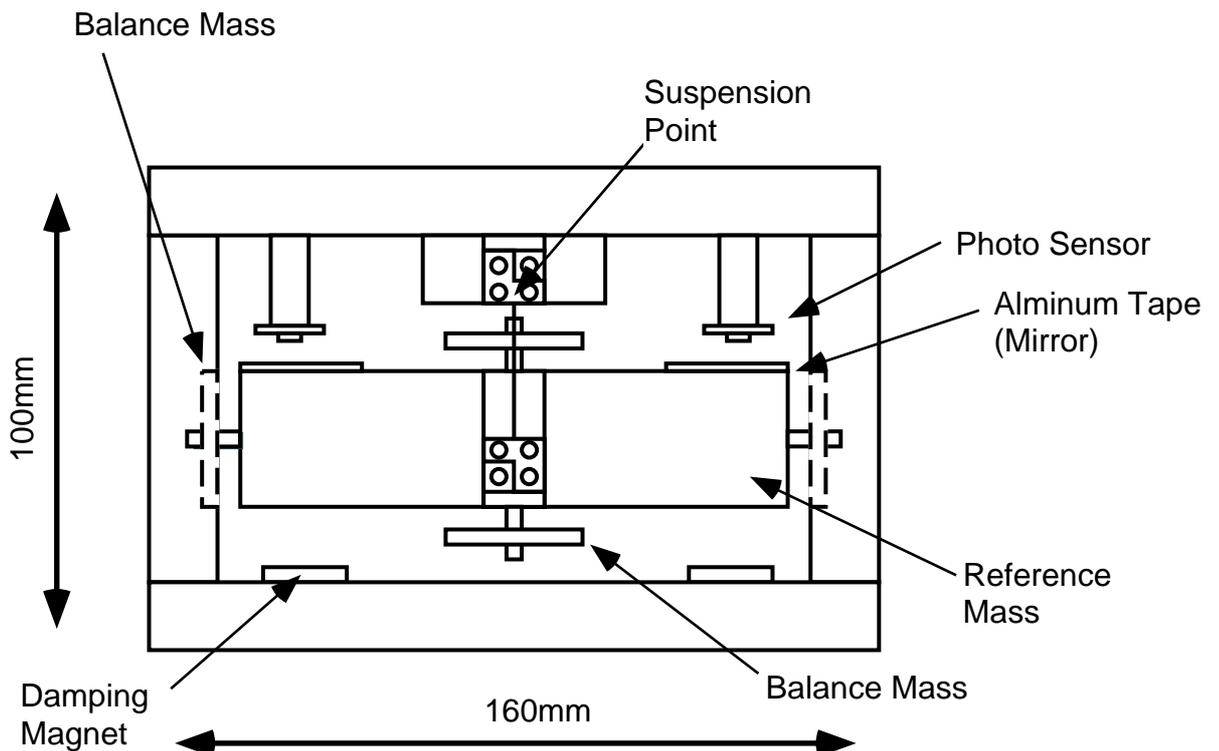


図 7.1 広帯域傾斜計試作機

## 7.1.2 並進センサー

試作機では、マスとフレームの間の相対角度を検出するための並進センサーとして反射式のフォトセンサーを利用した。これは、LED光源とフォトダイオードからなるヘッド部とLEDに電流を供給する電源、フォトダイオードの光電流-電圧変換部とからなる装置である。測定対象に鏡を取り付け、ヘッドをこの鏡に相對させて用いる(図7.2)。光源から出た光は、鏡によって反射されフォトダイオードに入射する。このときの入射光量はヘッドと鏡の間の距離に依存するため、入射光量からこの距離を読みとることができる。試作機では、マスのバランスを崩さないために鏡としては市販のアルミ粘着テープ(アルミの薄板)をマスに貼り付けた。ヘッドには、高輝度の赤外LED LM2656とフォトダイオード S11902 個(共に浜松ホトニクス製)をもちいた。LEDには電圧安定化電源を用いて光強度のドリフトを抑えている。フォトダイオードを2個用いるのは、できるだけ反射光を無駄にせず散光雑音を低下させるためである。試作機に用いたフォトセンサーの電圧-変位特性は図7.3に示した通りである。鏡としてアルミテープを用いている。実際に使用するときは鏡面とヘッドとの距離が1mmとなるようにしている。フォトセンサーのDC出力を読むことで精度良く1mmの距離にマスを吊ることができる。また、2台のフォトセンサーで高いCMRRを得るために、1台のフォトセンサーを基準として他方のフォトセンサーのゲインを調節した。なおフォトセンサーの横感度は0.1%程度であり、ほぼ無視できる。

ヘッドと鏡面の距離を1mmとしたときの感度を図7.4に示す。2つのセンサー間の距離を10cmとして角度に直してある。7Hz付近のピークは鏡の支持系の共振である。1Hz~10Hzでの感度が $10^{-8}\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ であるから、地面振動の測定には感度が足りないが、スタックの共振構造ならばS/N比は悪いが測定可能と思われる。

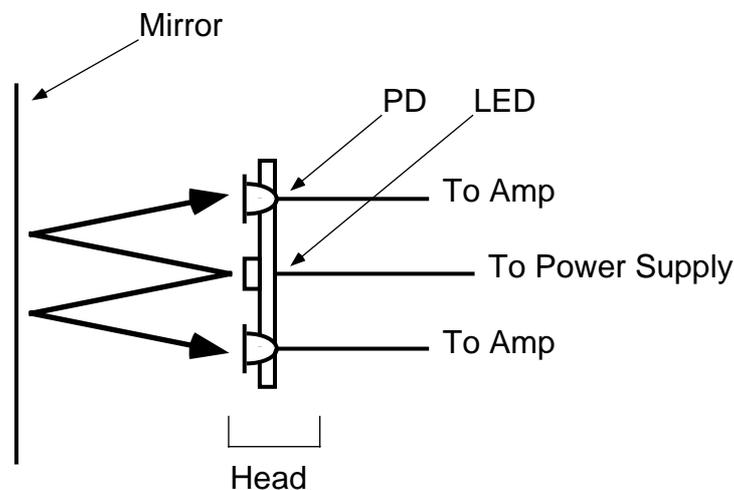


図 7.2 反射式フォトセンサー

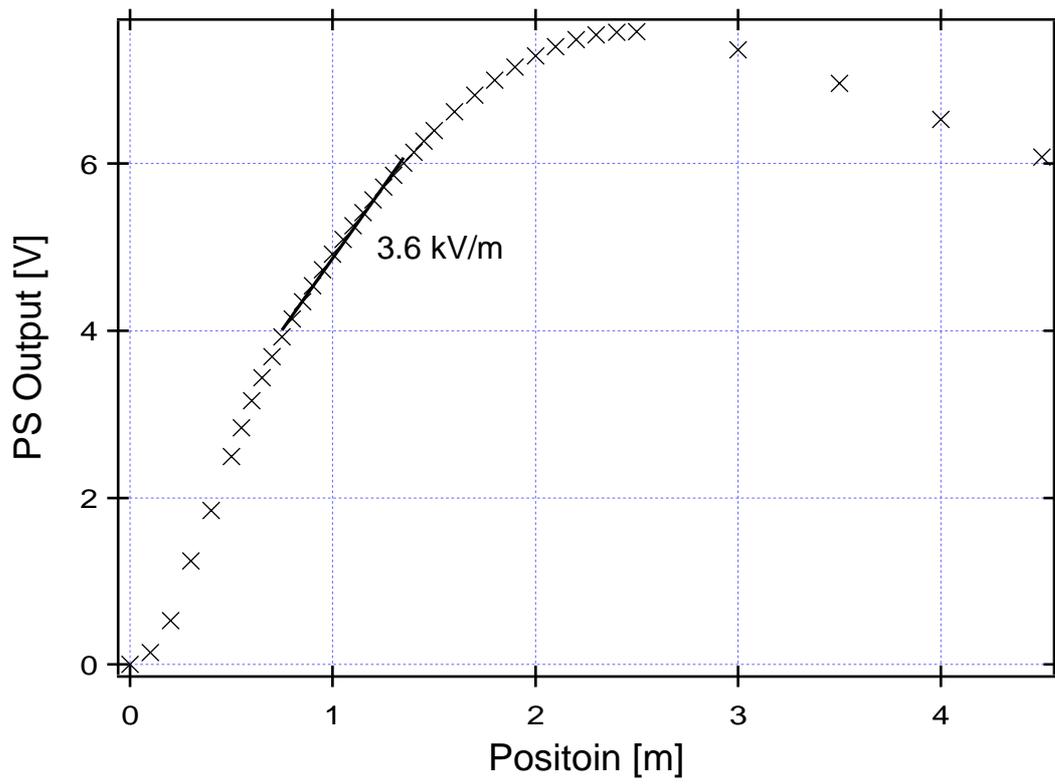


図 7.3 フォトセンサーの変位-出力特性

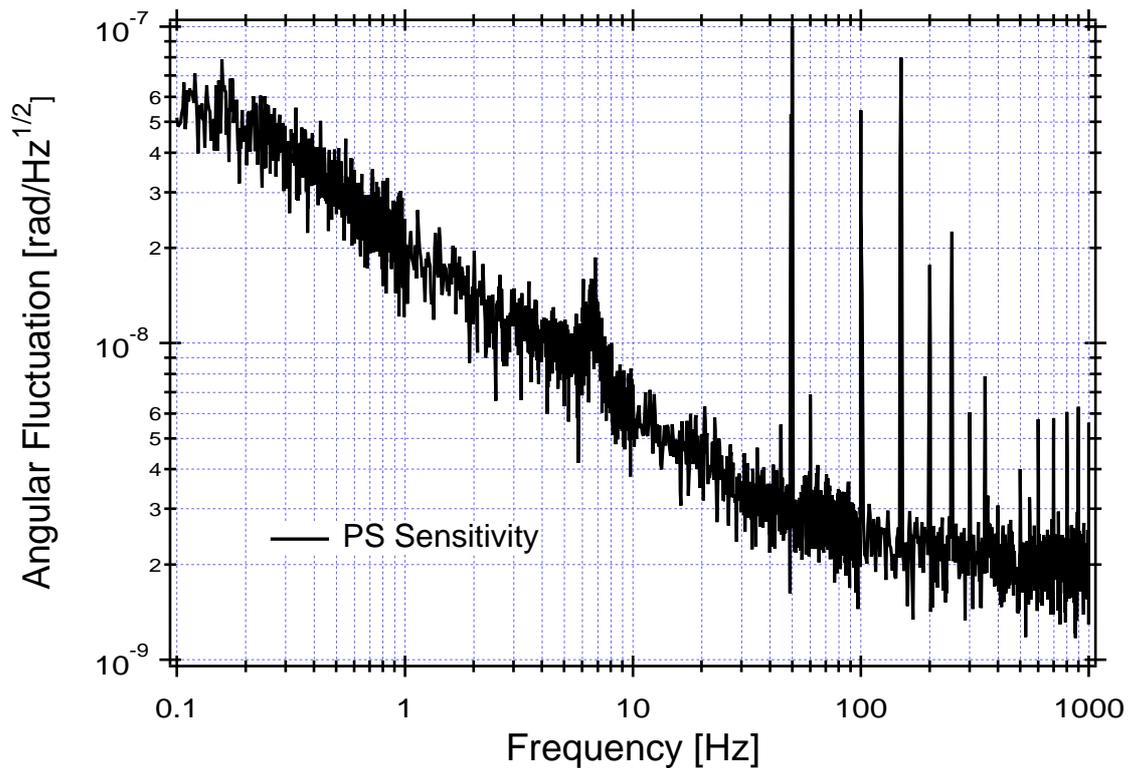


図 7.4 フォトセンサーの感度 . 7Hz の共振は鏡の支持系によるものでセンサーの特性ではない .

### 7.1.3 その他の工夫

マスの水平を精度良く出すために、ワイヤーは鉛直ステージに仮止めし、このステージを上下させることによってマスの水平を調節できるようにした。また、マスの重心とワイヤー固定点との距離が近いため、振り子は不安定となるからマスを吊るときには人の手ではなく鉛直ステージを用いたリフトでマスを支持し、安定的に吊ることができるようになっている。また、X-Pitch カップリングによるマスの Pitch 回転を抑えるために、懸架システムと同様に eddy current によるダンピングを行った。

## 7.2 広帯域傾斜計の試験

広帯域傾斜計の試作機の試験として、TAMA300のビームスプリッター用スタックの傾斜を測定した。同時に市販の他の回転計による測定も行い、試作機との比較を行った。

### 7.2.1 実験のセットアップ

懸架システムの静置実験とほぼ同様のセットアップを用いた(図7.5)。試作機をビームスプリッター用スタック上に設置し、フォトセンサーの出力をゲイン調整付プリアンプを通した後フィルターアンプ(Stanford Research Instrument SR560)に入力し、差動信号をとりFFTアナライザでスペクトルを得る。データはパソコンで解析した。

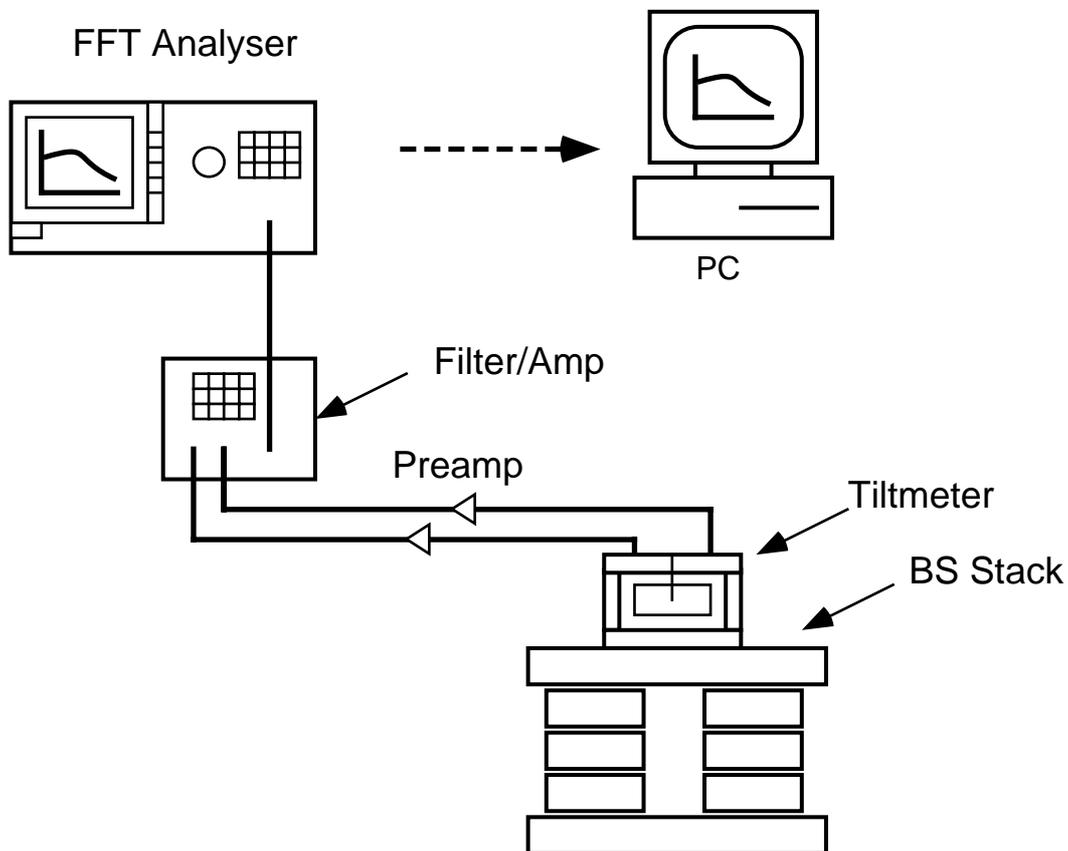


図 7.5 傾斜計試作機の試験

### 7.2.2 結果と考察

図7.6に、傾斜計によるビームスプリッター用スタックのPitch振動の測定結果を示す。1Hz以下の帯域を見ると0.16Hzにピークがある。これはマスのPitchモードの共振である。この共振が励起されているのは、ワイヤーの剛性が空気の流れによるものと思われる<sup>1</sup>。観測帯域である

<sup>1</sup>傾斜計におおいをかけるとこのピークが低くなることが確認されたが、覆いが不完全なため空気の影響を完全に除去できていない

1Hz~10Hz についてみると、ほぼフォトセンサーの感度で測定が制限されていることがわかる。2.15Hz のピークは X-Pitch カップリングによって振り子共振 (振り子長 3cm) が見えている。このピークの周波数ならびに高さは剛体モデルによって計算された X-Pitch の伝達関数と、地震計で測定したスタックの X 振動との積による推定値と良く一致している。4.3Hz ならびに 6.6Hz にピークが見える。これについては後述する。また、観測帯域を外れているが、20Hz にもピークが見える。これはスタックの Z モードの共振と思われる。スタックの Z モードと Pitch モードの共振周波数はかなり接近しているが、後述する流体回転計との比較から、傾斜計試作機では Z モードが見えていると結論づけられる。

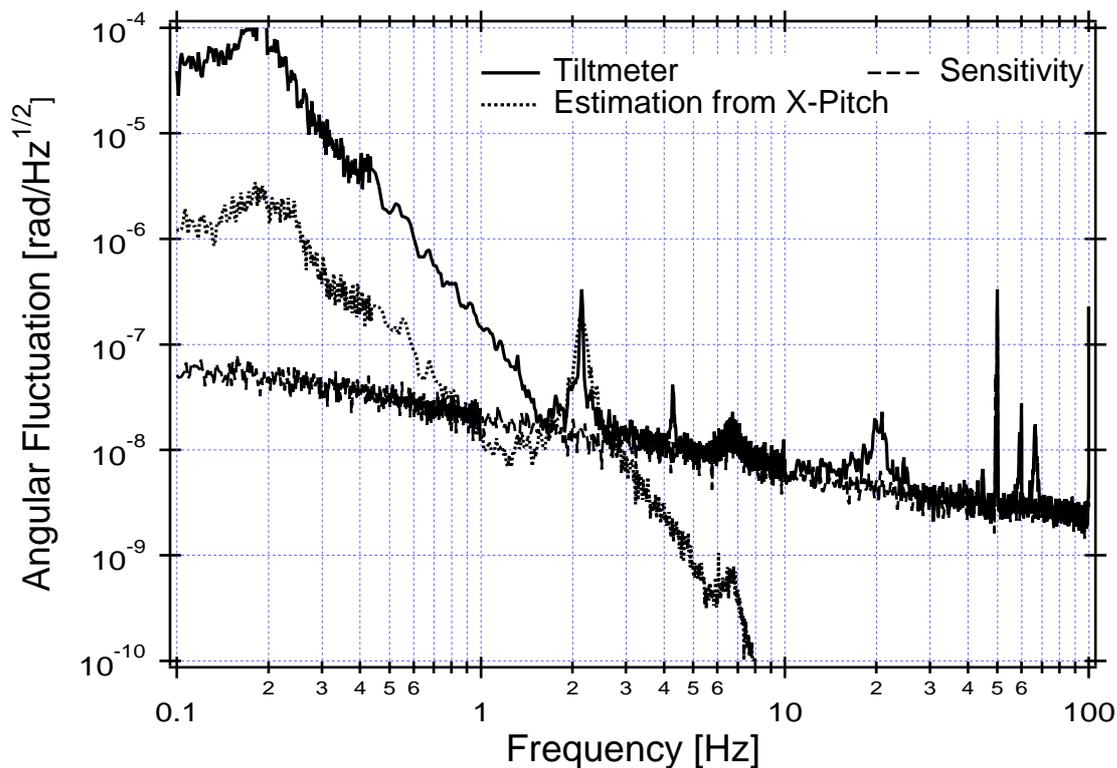


図 7.6 傾斜計によるビームスプリッター用スタックの Pitch スペクトル

### 7.2.3 他の検出器との比較

試作機と同時に、光ファイバジャイロならびに流体回転計による測定を行った。流体回転計の周波数特性は図 7.7 の通りなので、これを用いて実測値を補正している。1Hz 以下を見ると、傾斜計試作機ではマスの Pitch モードが揺れているため、傾斜の測定が正しくできていない。この帯域では流体回転計が最も小さな値を示しているが、他のセンサーによる裏付けがないので、これが正しい傾斜スペクトルを示しているかどうかは不明である。また、1Hz~100Hz にわたって、光ファイバジャイロの出力は他の 2 つのセンサーを越えている。これは光ファイバジャイロの検出限界 (雑音) を示している。また、10Hz 以上の帯域では流体回転計が最も良い感度を持っていることがわかる。20Hz にピークが見えるが、これは試作機のピークの 1/10 程度の値を示しているため、少なくとも試作機で見えるピークは Pitch モードを表しているわけではないことがわかつ

た．特に興味のある 1Hz~10Hz の帯域を傾斜計試作機と流体回転計についてみると (図 7.9)，試作機の方が若干小さな値を示すが，流体回転計と有意な差はないと思われる．ただし，試作機で見える 4.3Hz，6.6Hz のピークはどちらも流体回転計とは一致せず，流体回転計の値を下回っているため，これが真の Pitch モードのピークであるとは断言できない．いずれにしても，この帯域では 2.3Hz の振り子モードのピークを除いて傾斜計試作機でスタックの Pitch 振動の上限を抑えることに成功したと考えられる．

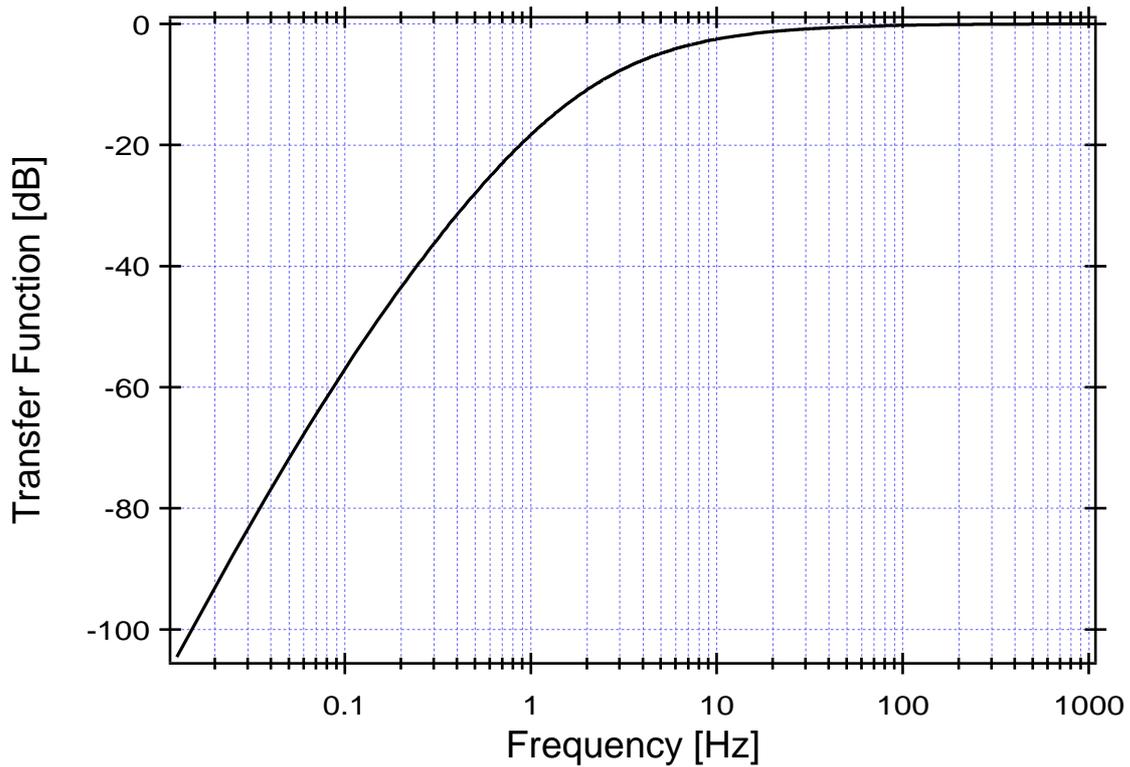


図 7.7 流体回転計の伝達関数．Systron Donner 社の資料による．

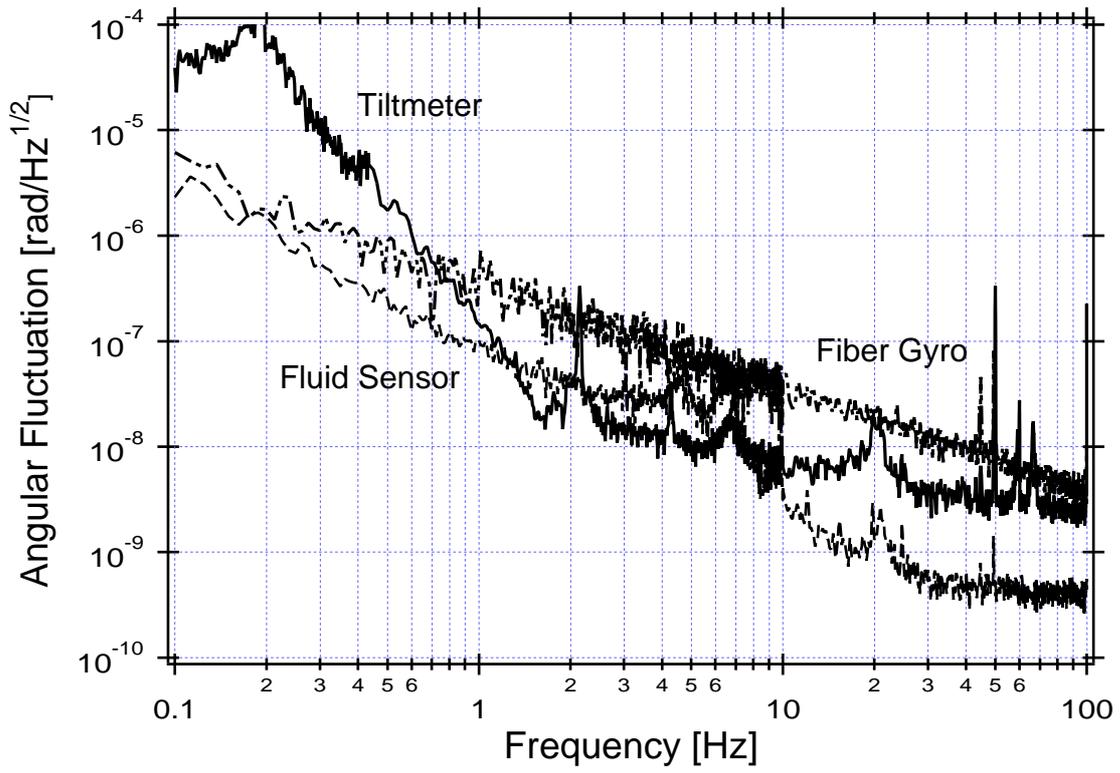


図 7.8 各種検出器による Pitch スペクトル

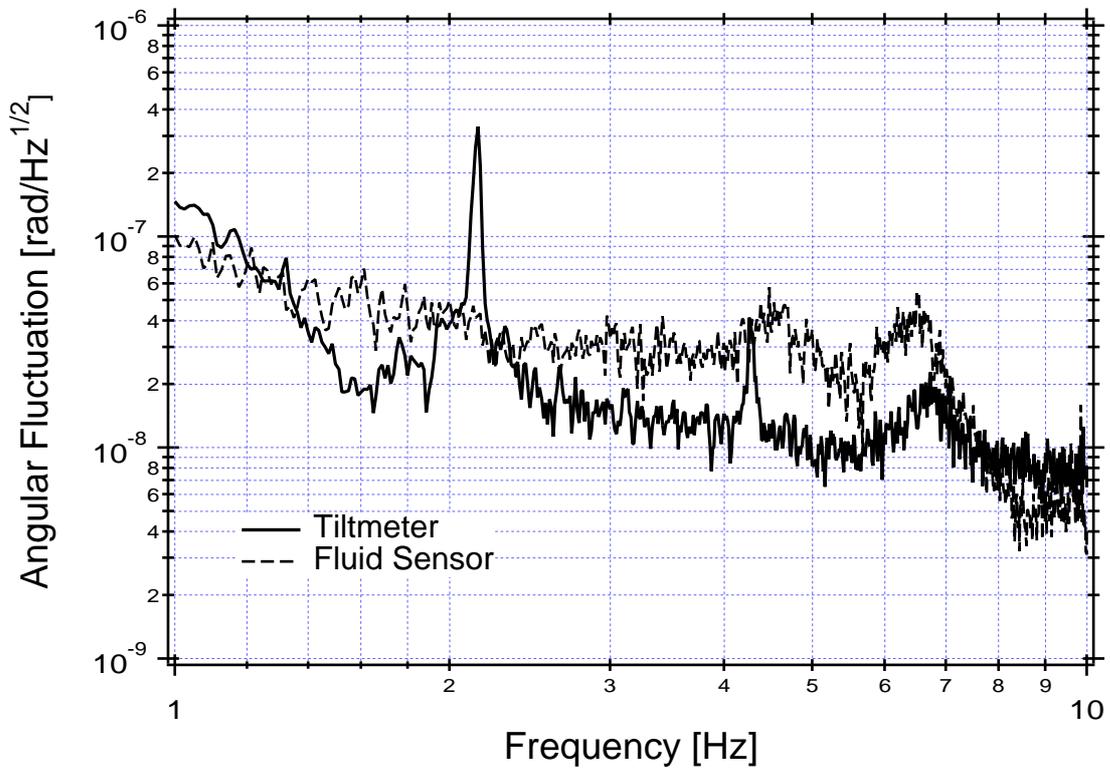


図 7.9 傾斜計試作機と流体回転計の比較



## 第8章

# 結論

本論文では，TAMA300 で用いる懸架システムに関して主にその回転防振について述べた．また，関連する研究として広帯域傾斜計についても述べた．本章では，これに関する結論を述べる．

### 8.1 懸架システムに関する結論

第3章から本章までに述べた懸架システムに関する議論から，以下のような成果が得られ，結果として TAMA300 用懸架システムの最終的な仕様を決定することができた．

- 剛体モデルの妥当性
- 仮決定された試作機のパラメータの妥当性 部品の干渉などの現実的な要請から決定されたワイヤー間隔などの懸架システムのパラメータを仮定した議論から，基本的にこのパラメータで TAMA300 で使用するに耐え得る回転特性が得られることがわかった．ただし，非対称性の程度によっては要求を満たさない可能性があることも明らかになった．
- 懸架システム単体での防振特性 加振実験から，単体での防振特性は剛体モデルから予想される範囲内であることがわかった．
- スタック上での回転特性 実際に TAMA300 サイトでスタック上に懸架システムを設置すると，Pitch モードの共振が大きく励起されミスアラインメントの上限値を満たさないことが明らかになった．
- ワイヤー間隔変更による Pitch モード RMS 振幅の抑制 問題となる Pitch モードの共振は，スタックの共振と極めて近い周波数であった．そこで懸架システム側の共振周波数を変更することによって改良を試みたところ，改良後の RMS 振幅が大幅に改善することが実験的に確かめられた．
- 実機のパラメータ変更 Pitch モードの共振周波数をずらすためには，鏡を吊るワイヤーの間隔を従来の 20mm から 30mm に変更すればよいことが明らかになった．

また，今後の課題としては，

- 観測帯域での回転特性の把握 加振実験，静置実験ともに検出系の感度等に制限されて，観測帯域での回転防振特性，実地での回転スペクトルの測定が行えなかった．ミスセンタリングの許容値を満たしていることを確かめる必要がある．
- パラメータ変更の実験的検証 実際にワイヤー間隔を 30mm に変更し，静置実験を行って Pitch モードの RMS 振幅などを評価する必要がある．

がある．懸架システムの伝達特性は剛体モデルによって記述できるので，観測帯域においても基本的に所期の防振特性が得られていると推定されるが，剛体モデルには取り込まれていない各種弾性体共振によって防振特性が悪化している可能性が高いので，許容値との関係を調べるのが重要である．

以上が，懸架システムの回転特性に関する研究の結論である．

## 8.2 広帯域傾斜計に関する結論

傾斜計のリファレンスとしてワイヤー 2 本で懸架された振り子を用いることには，

- 力学系が単純にでき，再現性が高い
- マスは全帯域で慣性系に静止するので，感度は並進センサーのみに依存する

という利点があった．

実際にこのような傾斜計を試作し，TAMA300 で用いるビームスプリッター用スタックの傾斜を測定した．同時に市販の光ファイバジャイロ，流体回転計による測定も行った．その際明らかになったことは，

- 1Hz~10Hz で，傾斜計の感度は並進センサー（反射式フォトセンサー）によって決定されている．
- 傾斜計のマスの Pitch 共振，X-Pitch カップリングによる共振が一部帯域で観測を阻害している．
- 1Hz~10Hz では，市販の光ファイバジャイロに比べて，傾斜計と流体回転計の方が高感度であり，ほぼ両者の結果が一致していた．

である．特に最後の項目について詳しく述べると，フロアレベルは傾斜計に用いているフォトセンサーのノイズレベルなので，スタックの傾斜の上限値を抑えることしかできなかった．しかし，2つのピーク構造が存在することが明らかになった．ピークの形状，高さに関しては傾斜計と流体回転計との結果が一致しなかったが，ピーク高に関してはどちらのピークについても傾斜計によるものの方が低いので，傾斜計によってピーク高の上限値を知ることができた．

また，今後の課題としては，

- 並進センサーの感度向上
- 傾斜計の特性の最適化

があげられる．並進センサーの感度を向上させるためには，高感度シャドーセンサーや，レーザー干渉計を用いればよい．とくに，干渉計では電気回路の非対称性をのぞけば CMRR がきわめて高いので，この種の差動計測に適している．

傾斜計の振り子の力学的特性を最適化するには，X-Pitch カップリングの影響を小さくするために，より重心近くでマスを支持することや，用いるワイヤーの長さを mm オーダーにし，X-Pitch カップリングによるピークを観測帯域の外に設定することなどである．

以上が広帯域傾斜計の開発に関する結論である．



## 参考文献

- [1] A. Einstein, “Über Gravitationswellen”, S. B. Preuss. Akad. Wiss, 154 (1916).
- [2] J. H, Taylor, J. M. Weisberg, *Ap. J.* **345**, 323 (1989).
- [3] J. H, Taylor, *Rev. Mod. Phys* **66**, 711 (1994).
- [4] B. F. Schutz, 'A first course in general relativity',Cambrigde University Press (1985).
- [5] 三尾 典克, 大橋 正健, 「重力波アンテナ技術検討書 干渉計ハンドブック」, (1992).
- [6] 坪野 公夫 編, TAMA300 PROJECT DESIGN REPORT (1996).
- [7] A. Araya, K. Kawabe, T. Sato, N. Mio, and K. Tsubono, *Rev. Sci. Instrum.* **64**, 1337 (1993).
- [8] R. Takahashi, 'Gravitational Wave Detection', Universal Academy Press (*Proc. of TAMA Workshop*)**95**(1997)
- [9] 高橋 竜太郎, 桑原 文彦, 黒田 和明, 「300m 干渉計用スタック防振系の開発 IV」, 日本物理学会 1997 年年会 (名城大) .
- [10] 桑原 文彦, 高橋 竜太郎, 黒田 和明, 藤本 眞克, 「300m 干渉計用スタック防振系の開発 III」, 日本物理学会 1996 年秋の分科会 (佐賀大) 9aC13.
- [11] 内山 隆, 鈴木 敏一, 辰巳 大輔, 山本 明, 新富 孝和, 春山 富義, 神田 展行, 黒田 和明, 「重力波レーザー干渉計用低温鏡の開発 I」, 日本物理学会 1997 年秋の分科会 (都立大) 22pJ8.
- [12] N. Kanda, M. Barton, K. Kuroda, *Rev. Sci. Instrum.* **65**, 3780 (1994).
- [13] M. Barton, N. Kanda, K. Kuroda, *Rev. Sci. Instrum.* **67**, 3994 (1996).
- [14] 新谷 昌人, 東京大学理学部修士論文 (1992).
- [15] 朽久保 邦治, 東京大学理学部修士論文 (1996).
- [16] 新井 宏二, 東京大学理学部修士論文 (1997).
- [17] 山元 一広, 東京大学理学部修士論文 (1997).

- [18] 河邊 径太, 落合 洋敬, 高野 浩一, 坪野 公夫「連星振動子の逆相振動モードを利用した干渉計型重力波検出器懸架装置の Q 値測定」日本物理学会 1996 年秋の分科会 (佐賀大) 8pC7.
- [19] 高森 昭光, 新井 宏二, 内藤 豊, 大塚 茂巳, 新谷 昌人, 河邊 径太, 坪野 公夫「干渉計懸架システムの防振特性 V」日本物理学会 1997 年年会 (名城大) .
- [20] 山元 一広, 河邊 径太, 坪野 公夫, 「干渉計型重力波検出器のビームのセンタリング」, 日本物理学会 1997 年秋の分科会 (都立大) 22pJ9.
- [21] 枋久保 邦治, private communications.
- [22] A.Rakhmanov, 'Experimental study of Q-factor of TAMA 300 pendulum suspension', 坪野研究室輪講, Jan 28 (1997)
- [23] G. Gonzalez, *LIGO Internal Report* , July (1996).
- [24] J. Giaime, P. Saha, D. Shoemaker, L. Sievers, *Rev. Sci. Instrum.* **67**, (1996).
- [25] M. Takeo, H. M. Ito, *Geophys. J. Int.* **129**, 319 (1997).
- [26] H. D. Morris, AIAA Paper No.71-909, AIAA Guidance, Control and Flight Mechanics Conference (1971).
- [27] 横井 錬三, 「航空計器」, 地人書館 (1979).
- [28] 高橋 竜太郎, 桑原 文彦, private communications.
- [29] A. N. Luiten *et. al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **68**, 1889 (1997).
- [30] C. C. Speake, D. B. Newell, *Rev. Sci. Instrum.* **61**, 1500 (1990).
- [31] 長松 昭男, 「モード解析入門」, コロナ社 (1993).

## 謝辞

本研究を進めるにあたっては、多くの方々のご協力を頂きました。

東京大学理学部の坪野公夫助教授は、懸架システムの開発という重要なテーマを与えて下さいました。また、実際の研究についても物心両面から暖かく指導、支援して下さいました。そればかりでなく、私の拙い思いつきに過ぎなかった傾斜計の実験まで行わせて下さいました。

坪野研究室助手である河邊径太氏には、大学院入学当初から折に触れる確な指導をしていただきました。本研究に関してもいくつか貴重な助言を頂きました。特に氏の助言によって、傾斜計に用いたフォトセンサーの回路を非常に低雑音にすることができました。また、学会講演や各種原稿について、お忙しい中常にチェックをしていただいたおかげで安心して発表を行えました。

東京大学地震研究所助手である新谷昌人氏は、TAMA300用懸架システム開発グループのリーダーであり、研究方針や具体的な実験法等、非常に多くの指導をして下さいました。また、ご多忙の中天文台と研究室間の機材運搬に何度も車を出していただきました。地震研の武尾先生の御協力が得られたのも氏の仲介によるものです。

国立天文台助手の高橋竜太郎氏には、天文台での実験を全面的にサポートしていただきました。無理なスケジュールにも関わらず協力に応じて下さった氏の寛大さに感謝いたします。また、常にスタックに関して最新の情報を提供していただき、実験の指針を与えて下さいました。

坪野研究室博士課程の新井宏二氏は、TAMA300の懸架システムの開発に多大な貢献をなさっており、私も修士課程1年次に氏と共同で試作機の開発、実験を行わせていただきました。当時、懸架システムの開発に関して漠然とした知識しか持っていなかった私に、氏は理論、実験の両面にわたって非常に詳しく教えて下さいました。また、氏の着想と行動力には大いに刺激を受けました。本論文で用いている剛体モデルの数値計算プログラムは、氏が開発されたものにほんのわずか手を加えたに過ぎないものです。本研究を曲がりなりにも遂行できたのは、氏による実験、計算環境の整備、実験手法の開発などの蓄積があったからに他ならず、感謝の言葉もありません。

東京大学理学部技官の大塚茂巳氏には、様々な実験装置の製作を行っていただきました。傾斜計の振動子の製作はほとんど氏によるものです。

坪野研究室博士課程の山元一広氏、大石奈緒子氏には、実験手法や干渉計の理論について教えていただきました。また実験機材の提供にも快く応じていただきました。特に、本論文で熱雑音の計算を行うにあたり、山元氏による文書や助言が大きな助けとなりました。

同研究室博士課程の朽久保邦治氏は、御自身の研究で御多忙にも関わらず天文台での実験の際には必ず時間を割いて手伝って下さいました。機材の貸し出しにも快く応じていただき、研究室を離れた実験もスムーズに行えました。なにより、本論文で用いている鏡の回転の許容値は、氏の計算から導かれたものに他なりません。

同研究室博士課程の安東正樹氏には、研究に行き詰まっているときに適切な助言を何度も頂きました。研究に対する氏の態度には見習うべき点が非常に多くあり、常に良き範を示していただきました。また、研究活動以外の相談にも快く応じて下さいました。

坪野研究室修士課程の佐々木愛一郎氏、谷口信介氏、堀越一雄氏には天文台での作業を手伝っていただきました。三氏だけでなく同研究室修士課程の内藤豊氏、上田晃三氏にも公私にわたって色々な意味で良い刺激を受けました。

スタックと懸架システムの関係について、東京大学宇宙線研究所黒田研修士課程の桑原文彦氏と有益な議論をかわすことができました。また、氏には天文台での実験に協力していただきました。

VIST300 グループの方々には、TAMA300 の防振系について教えていただきました。会合では初心者の私も活発な議論に加えて下さり、防振系を通して早い段階から TAMA300 の全体像を掴むことができました。

東京大学地震研究所の武尾実助教授には、傾斜計との比較実験で用いた流体回転計を快く貸し出していただきました。また、地面の回転と地震学の関連という、それまで私が知らなかった分野について貴重な情報を教えていただきました。

日本航空電子株式会社には、本実験で用いた光ファイバージャイロの貸し出しに応じていただきました。

TAMA300 開発グループの皆様を始め、ここに書ききれないほど多くの方々の御協力によって本論文をまとめることができました。厚く感謝いたします。