

Alignment Sensing and Control for LCGT —Hanford 2011春—

道村唯太

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 坪野研究室 修士課程2年

概要

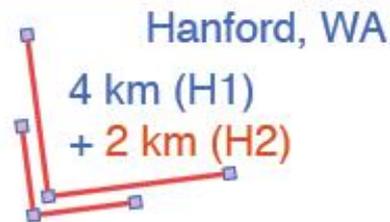
- 出張先: LIGO Hanford Observatory (LHO)
- 期間: 2011年4月20日-5月6日
- きっかけ: Ranaに会ってこいと言われ(2010年12月)
- 目的:
LCGTのASCを設計するにあたり、aLIGOのASCを設計したLisa Barsottiや、Optickleを開発したMatt Evansに会って直接いろいろ聞きながらASCについて勉強すること
LIGOのでかい干渉計を見ること
- お金: LIGO (Caltech)、麻生さん

目次

- LHOの紹介
- ASCとは
- ASC(WFS)の原理
- iLCGT向けASCの計算結果

LHO所在地

- Richland, Washington LIGO: Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory

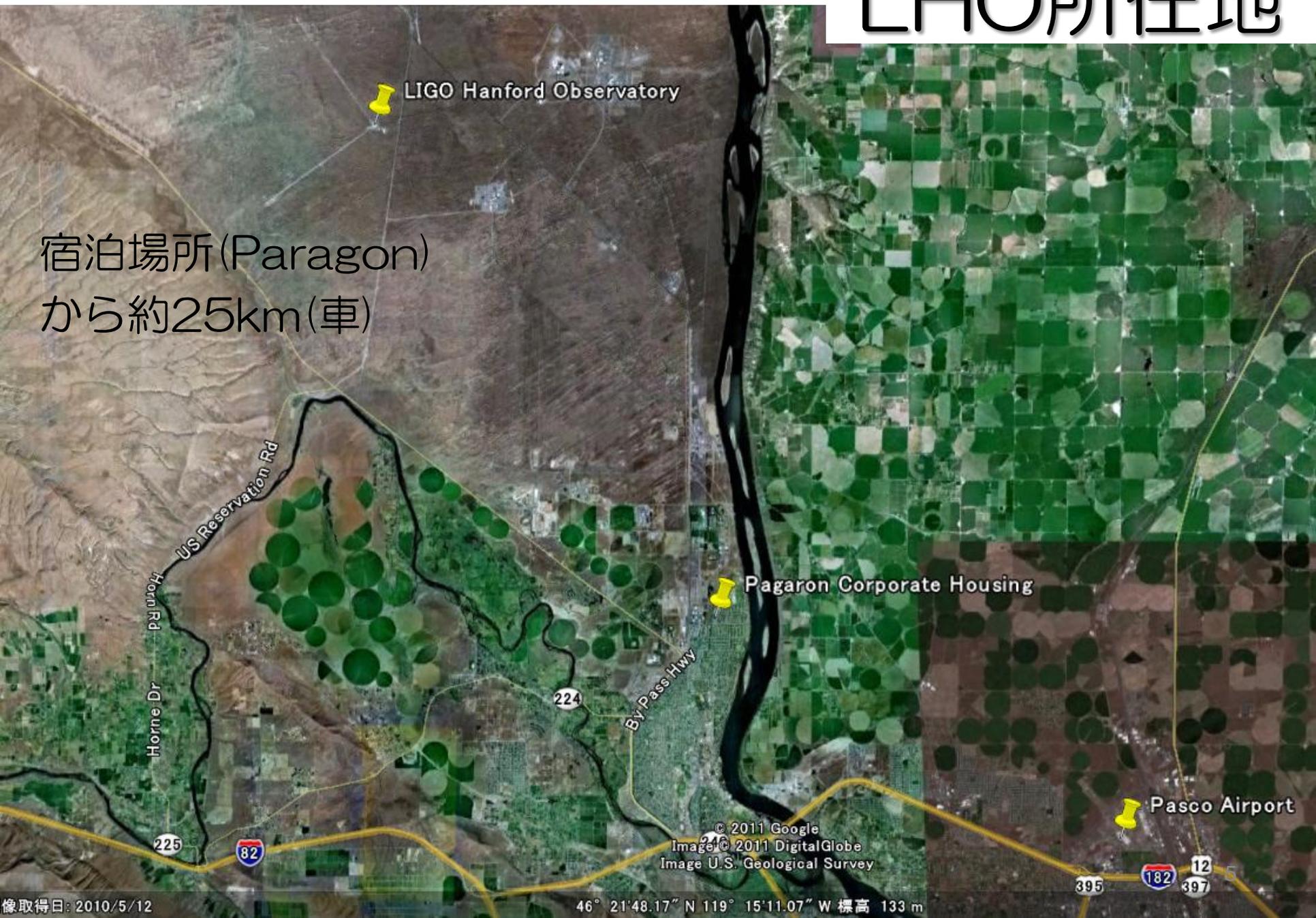


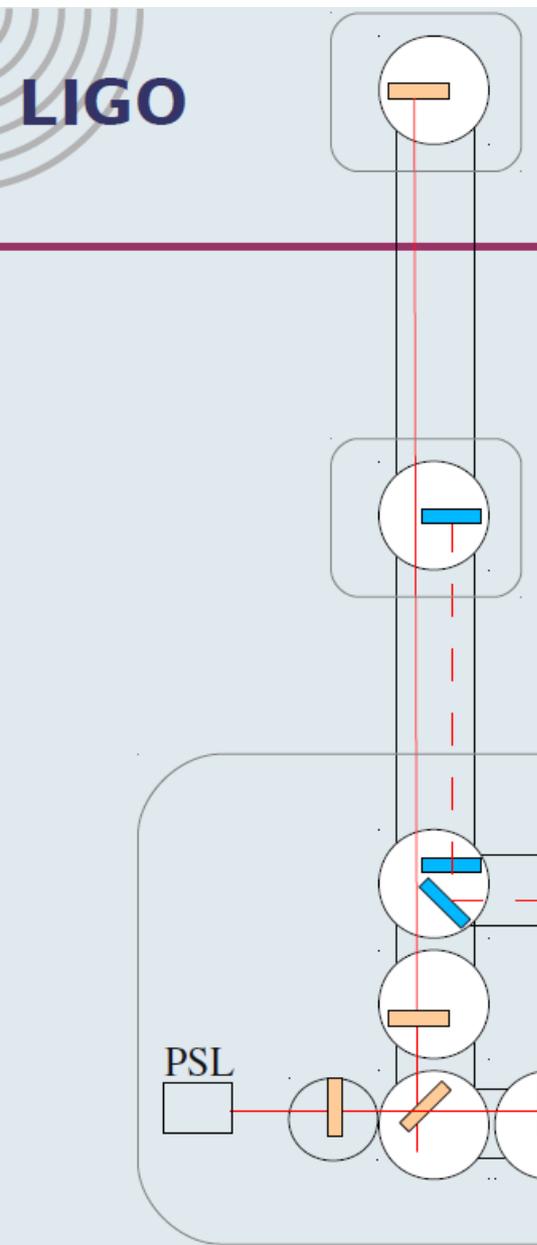
Livingston, LA



LHO所在地

宿泊場所(Paragon)
から約25km(車)



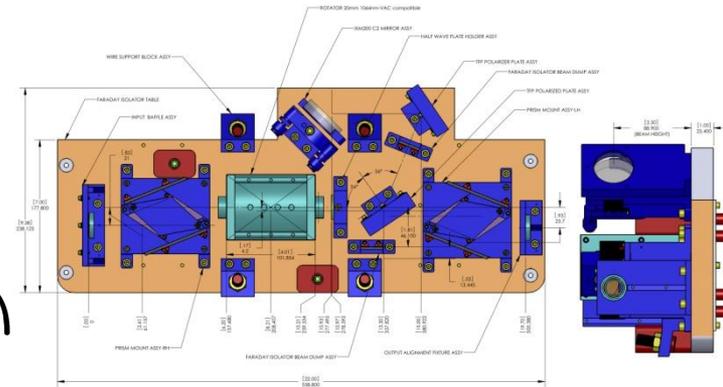


LHO status

- H2の新PSL(?)を建設中
- 危ないので鏡は全部クランプ
- squeezerインストール中
- 今後はH1にsqueezed vacuum入れてM1部分だけで動かす

LIGO関係でやったこと

- Advanced LIGOインストール関係は訪問者はできないらしい
- squeezing関係ならやってもよい
- squeezing定盤の設置の手伝い
- squeezed vacuumを入れる output Faradayの組み立て手伝い



09/23/2010

- 最初の1週間は河邊さんに手伝ってと言われれば出動という感じ。最後の1週間は河邊さんCaltechへ行ってしまったので、ずっとcontrol roomでLCGTのASC計算
- わからないところがあればMattやLisaをつかまえて質問

ASC

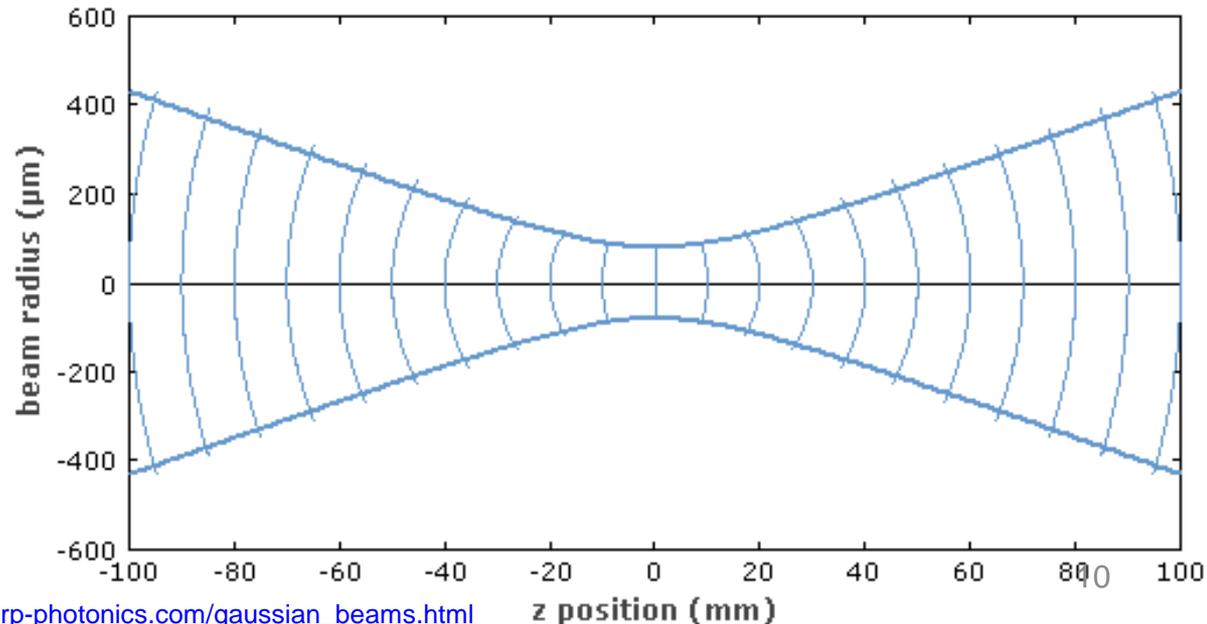
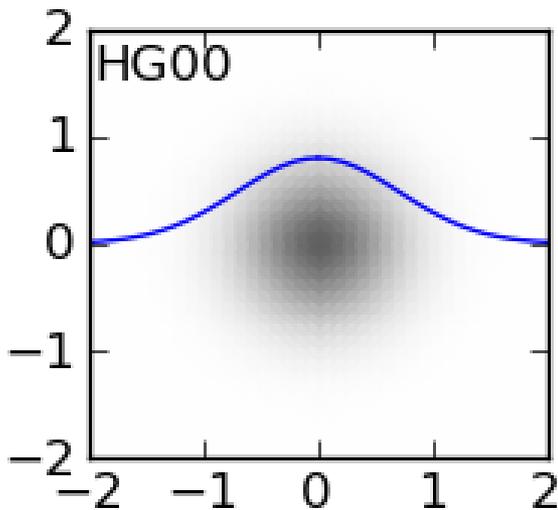


ASCとは

- Alignment Sensing and Control
- 干渉計を構成する鏡の姿勢(角度)を制御すること
- 鏡が角度揺れを起こすとビームスポットが中心からずれ、長さとかップルし、干渉計の感度を汚してしまう
- 鏡の姿勢を取得する方法としては
 - local sensor (鏡につけたshadow sensorなど)
 - 光てこ(OpLev)
 - wavefront sensor (WFS)

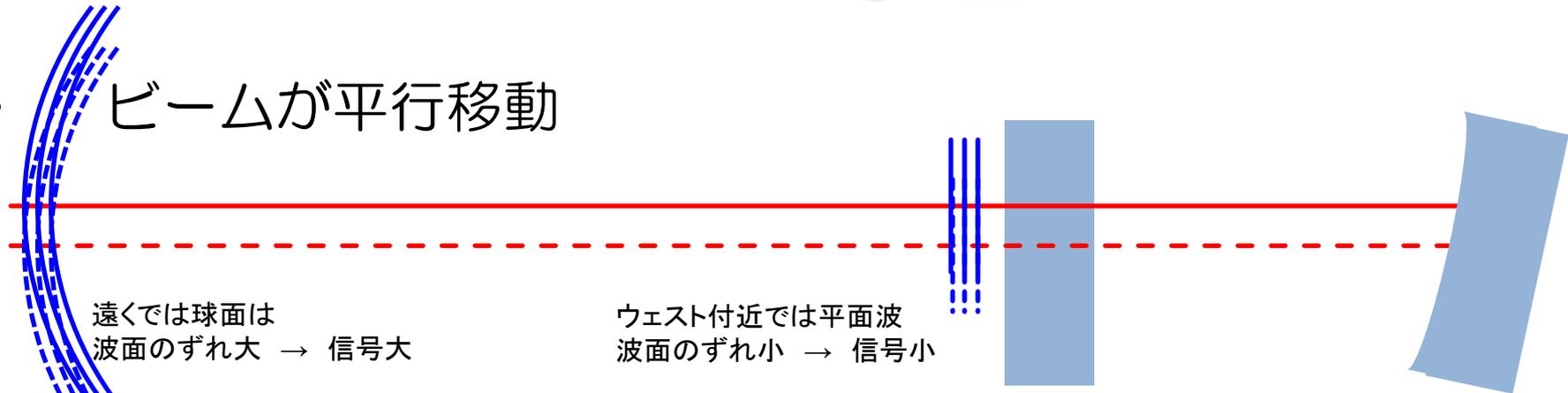
WFSの原理

- ガウシアンビーム
断面で電場振幅がガウス分布
ビーム半径はウェストで最小、
ウェストから離れるほどビーム半径大
ウェストでは平面波、遠くでは球面波
Gouy phase: 平面波とガウシアンビームの位相差

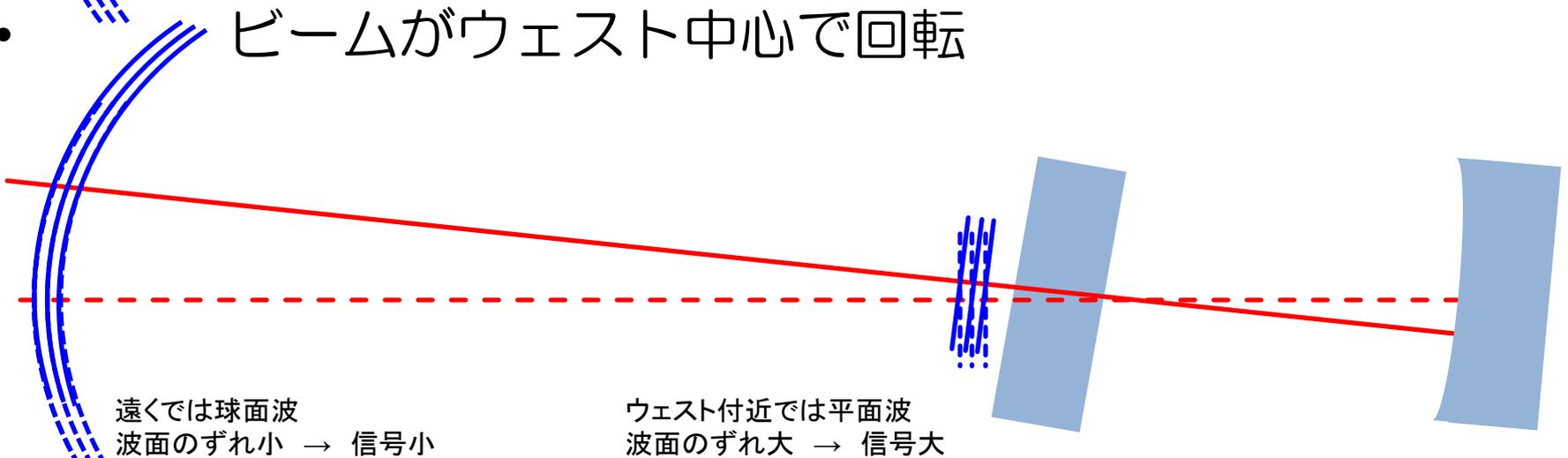


WFSの原理

- ビームが平行移動



- ビームがウェスト中心で回転



- 信号を取得する場所(Gouy phase)によって共振器軸の平行移動と回転を区別できる

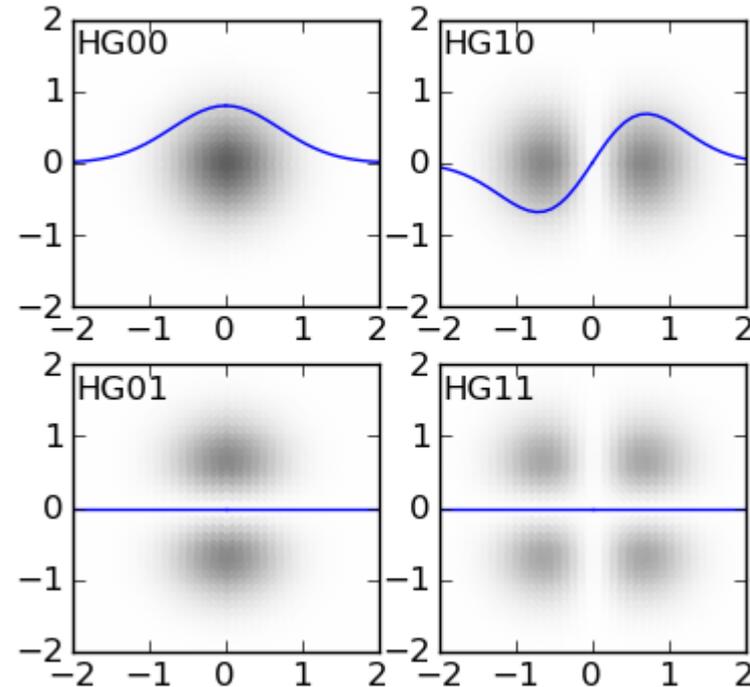
WFSの原理

- もう少し数学的に言うと.....
- 断面はHermite多項式と Gaussianの積(HGモード)
- ずれた00モードは元の00モードと10モードの重ね合わせ

$$U_{00}^{\text{shift}} \simeq U_{00} + \frac{\delta x}{w_0} U_{10}$$

$$U_{00}^{\text{tilt}} \simeq U_{00} + i \frac{\delta \theta}{\alpha_0} U_{10}$$

- 共振器の反射光に含まれる00モードと10モードの干渉を、上下(左右)が分割されたQPDで見る
- Gouy phaseは00モードと10モードの位相差



Optickleによるシュミレーション

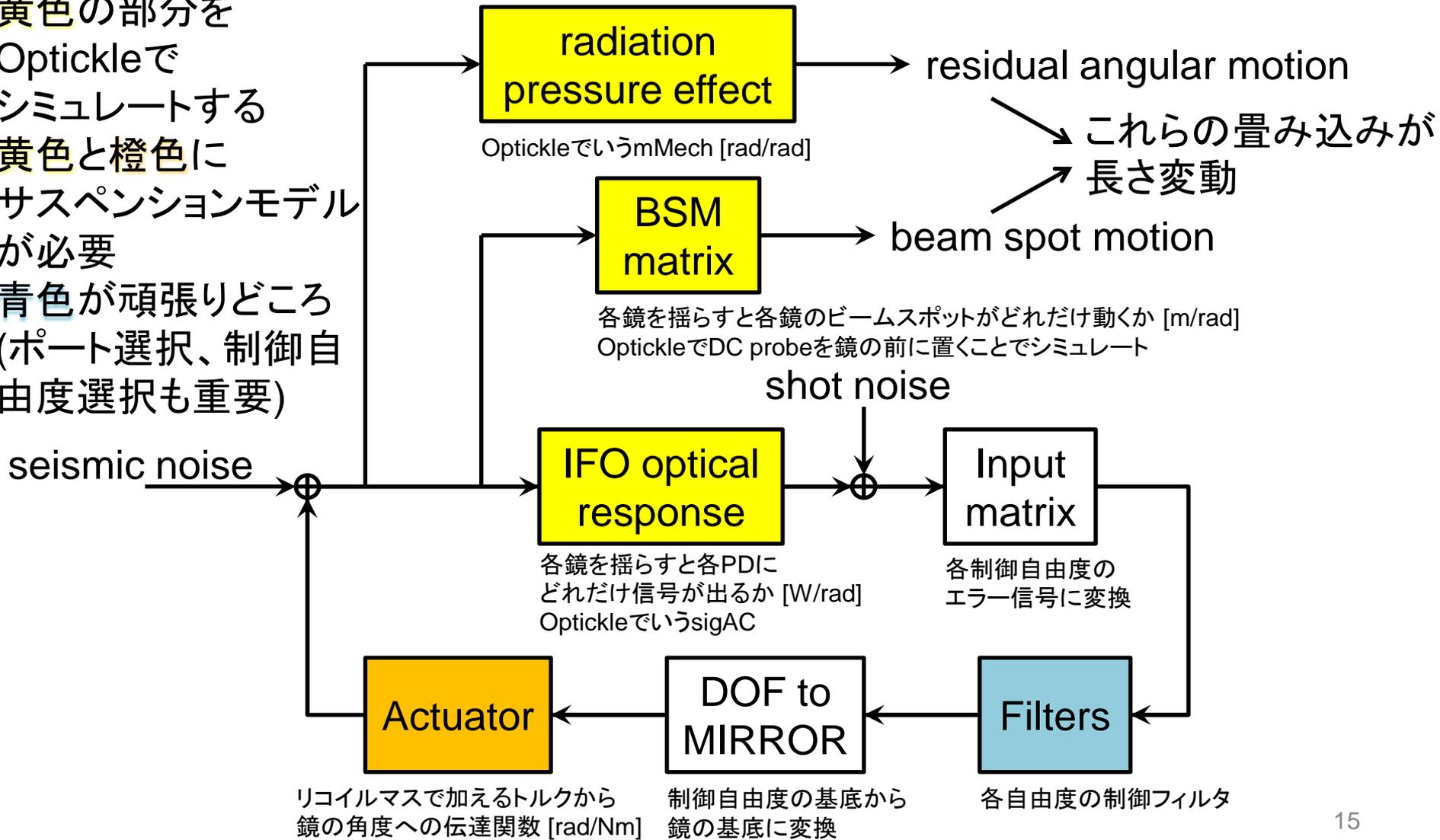
- 複雑な干渉計の出力を手計算でするのは大変
→ Optickle を使ってシュミレート
- ある鏡が傾くとどこにどのくらい信号が出るか
- シュミレーション結果を元に制御ループを設計
- 以降の計算は以下を参考:
Lisa Barsotti, Matt Evans: *Modeling of Alignment Sensing and Control for Advanced LIGO*,
LIGO-T0900511-v4 (2009)

ASC設計手順

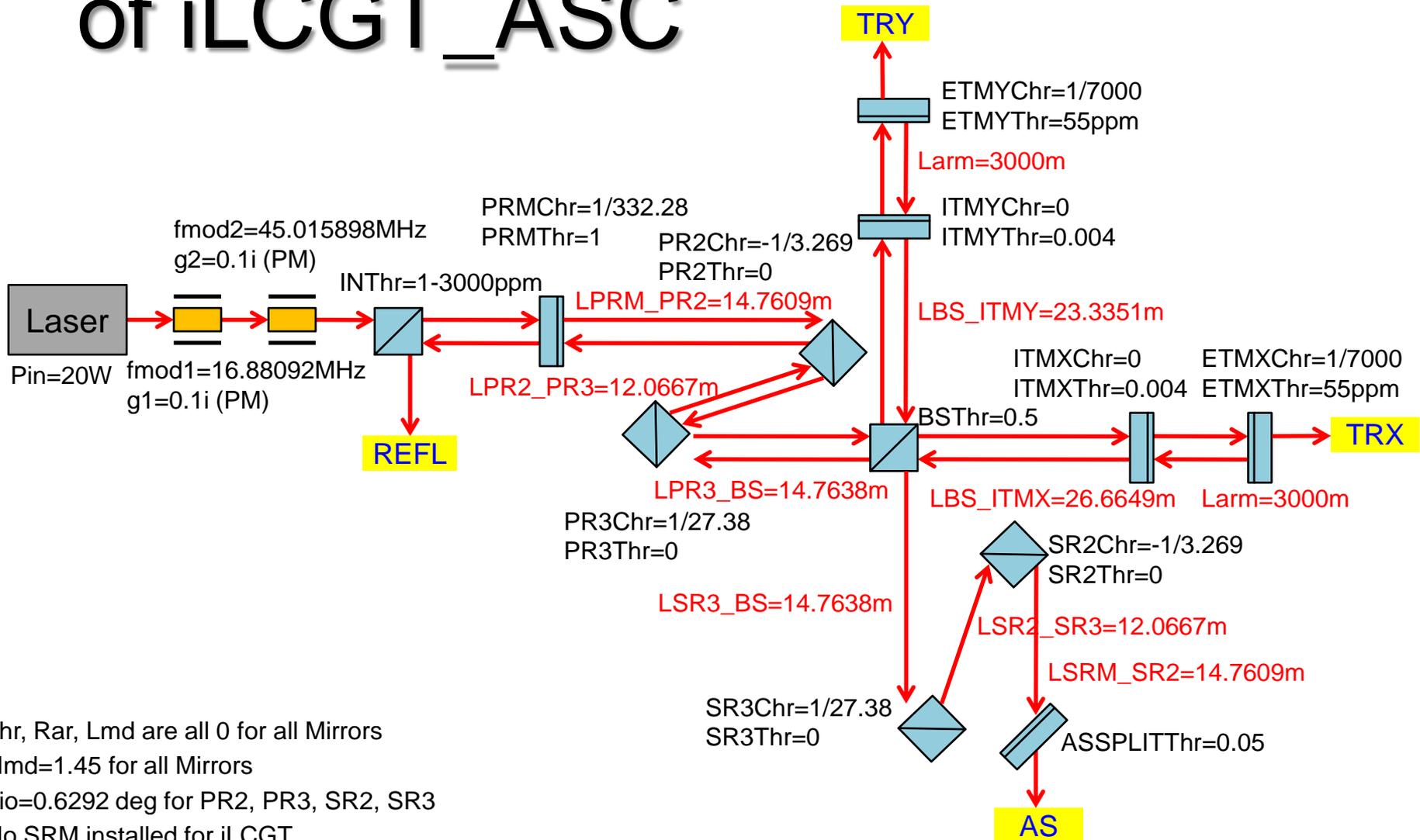
- 制御自由度の選択
- 信号取得ポートの選択、angular sensing matrix
- 各制御自由度の制御ループを設計
 - サスペンション伝達関数が重要
 - 地面振動を抑え、ショットノイズを導入しない
- ノイズを入れ、各鏡の残留角度揺れを計算
- 各鏡の残留角度揺れによって、各鏡のビームスポットがどれだけ動くか計算
- 上2つの畳み込みから長さへのカップリングを計算
- 適当な係数をかけてDARMへのカップリングを計算
- DARMを汚すかどうかで制御系を評価
 - DARM=differential arm
 - つまり干渉計の重力波に対する感度

角度制御系の構造

黄色の部分を
Optickleで
シミュレートする
黄色と橙色に
サスペンションモデル
が必要
青色が頑張りどころ
(ポート選択、制御自
由度選択も重要)



Optickle Model of iLCGT_ASC



Lhr, Rar, Lmd are all 0 for all Mirrors

Nmd=1.45 for all Mirrors

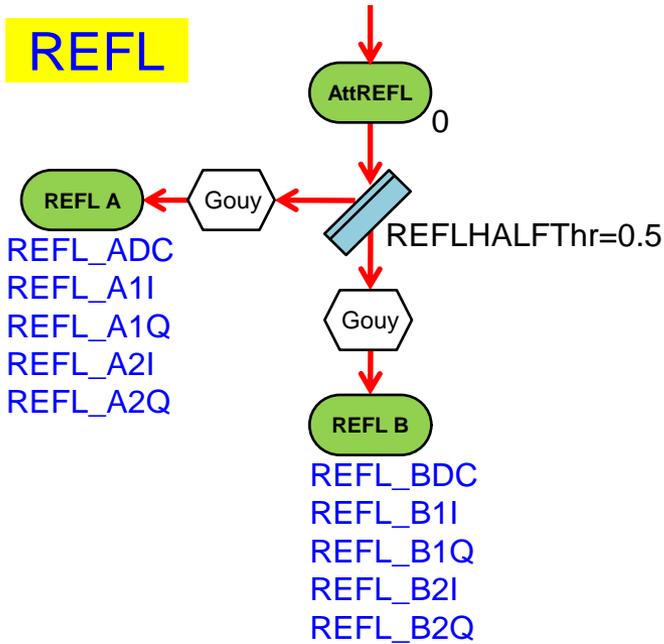
aio=0.6292 deg for PR2, PR3, SR2, SR3

No SRM installed for iLCGT

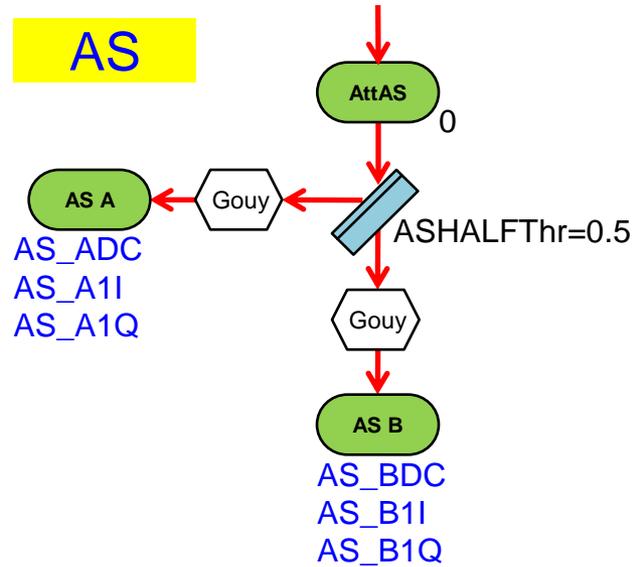
Lengths not specified are all 0

Sensing Ports

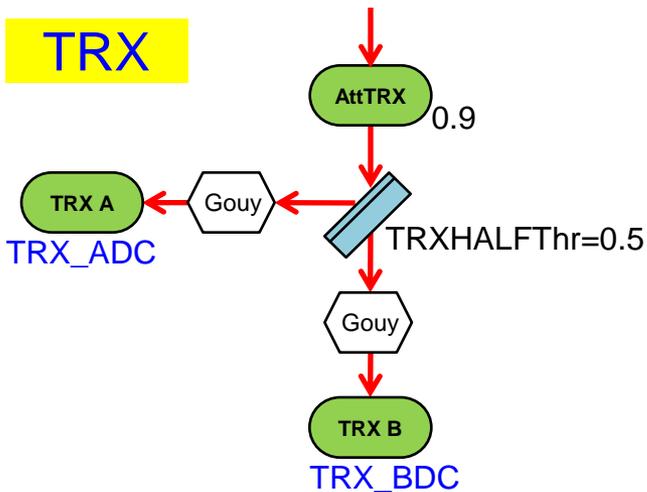
REFL



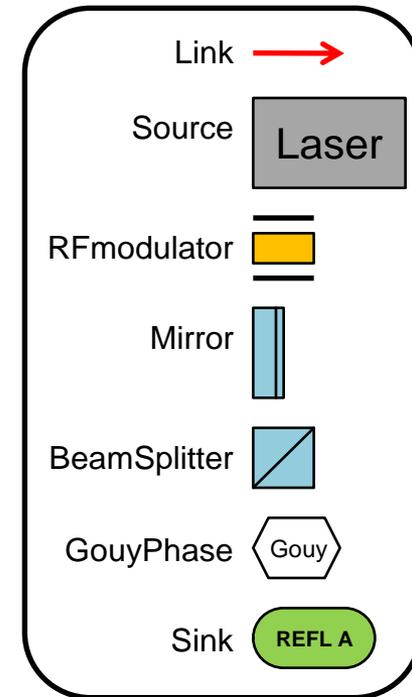
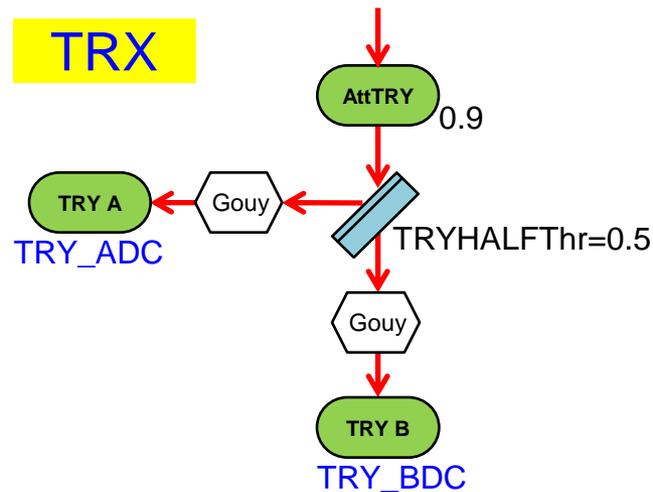
AS



TRX



TRX



各ポートでの光量、腕内パワー

- だいたい同じに調整(AS以外)

REFL 28 mW

AS 2.1 mW

TRX/Y 26 mW

REFLはINの3000ppm反射

ASはASSPLITの0.05透過

TRX/YはETMの55ppm透過で、その後アテネータ0.9

- どのくらいがいいのか？
aLIGOでは50mW(ASは2.5mW)
- パワーが大きい方がショットノイズで鏡を揺らしにくい
1/sqrt(P)で効く
以前は数mWにしていたが、今回増やしてみた
- 腕内パワーは9.6 kW
iLCGTではなんでもよいが、
bLCGTになると400 kWになるので
SOFT/HARDが重要になってくる

制御自由度の選択

- 腕cavityはETM/ITMではなく輻射圧の影響を考えたSOFT/HARDがよい
- 両腕でcommon/differential

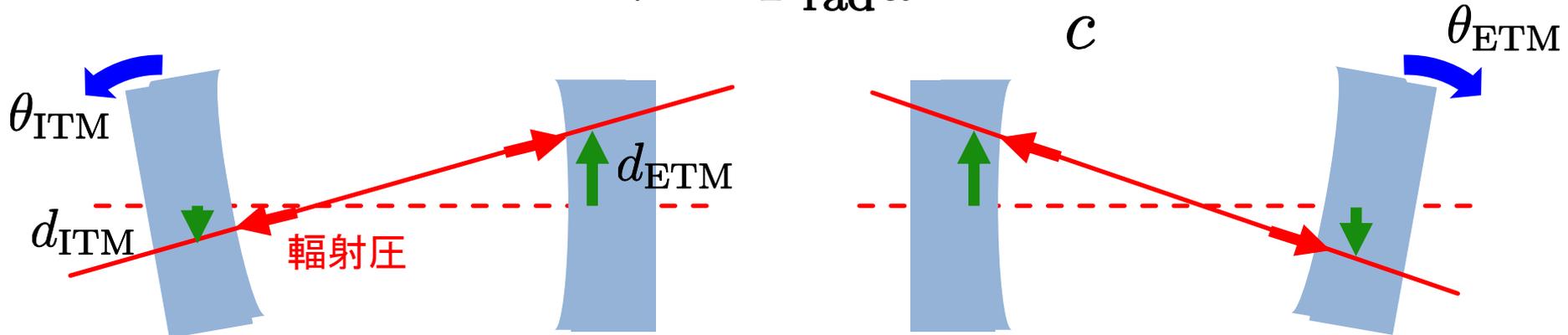
→CS, CH, DS, DH, BS, PR3, PR2の7自由度

別にこの7自由度でなくてもよい
PR2, PR3を組み合わせで別の2つの自由度にしてもよい
し、BSもCS, CH, DS, DHの組み合わせで表せる
要検討

輻射圧の影響

- ETM、ITMが回転すると鏡にビームが当たる場所が動く
→ 輻射圧の加わる場所が変化する

→ 輻射圧トルク $\tau = F_{\text{rad}}d = \frac{2Pd}{c}$



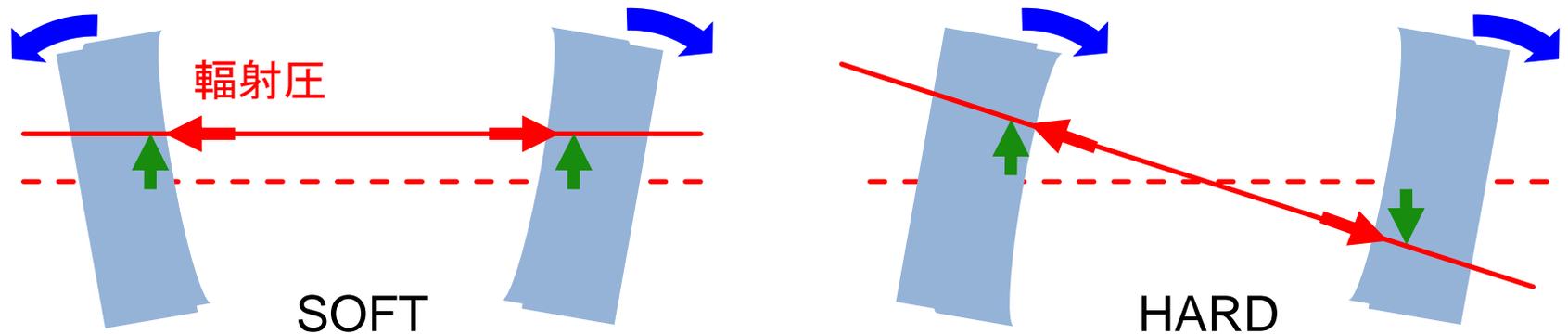
$$\begin{pmatrix} d_{\text{ETM}} \\ d_{\text{ITM}} \end{pmatrix} = \frac{L}{1 - g_{\text{E}}g_{\text{I}}} \begin{pmatrix} g_{\text{E}} & 1 \\ 1 & g_{\text{I}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_{\text{ETM}} \\ \theta_{\text{ITM}} \end{pmatrix}$$

$$g_i = 1 - L/R_i$$

- 一方が回転すると他方も輻射圧で回転してしまう
- この行列を対角化したい

輻射圧の影響

- 輻射圧が鏡の傾きを大きくさせようとするモード: SOFT
小さくさせようとするモード: HARD



- SOFT/HARDを使うと対角化できる

$$\begin{pmatrix} \theta_{\text{SOFT}} \\ \theta_{\text{HARD}} \end{pmatrix} = \frac{1}{1+r^2} \begin{pmatrix} 1 & r \\ r & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_{\text{ETM}} \\ \theta_{\text{ITM}} \end{pmatrix}$$

規格化の $1/(1+r^2)$ は単なる慣習
たまたま逆行列の方でメインに考えてるから

$$r = \frac{2}{(g_I - g_E) + \sqrt{(g_I - g_E)^2 + 4}}$$

同相と差動SOFT/HARD

- FPMIでは同相と差動があるので
common/differential SOFT/HARD

$$\begin{pmatrix} \theta_{CS} \\ \theta_{CH} \\ \theta_{DS} \\ \theta_{DH} \end{pmatrix} = \frac{1}{2(1+r^2)} \begin{pmatrix} 1 & 1 & r & r \\ r & r & -1 & -1 \\ 1 & -1 & r & -r \\ r & -r & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_{ETMX} \\ \theta_{ETMY} \\ \theta_{ITMX} \\ \theta_{ITMY} \end{pmatrix}$$

- 以下制御の自由度として、ETM/ITMの基底でなく
SOFT/HARDの基底を使う

ポートの選択と位相の最適化

- 位相は全て相対的な値(差だけが重要)
- Gouyまたは復調位相が離れているものを選ぶ

REFL DC

| | CS | CH | DS | DH | BS | PR3 | PR2 |
|------|---------|---------|------|------|------|-------|------|
| Gouy | -19.6 | -20.7 | 69.6 | 68.5 | 34.5 | 17.1 | -8.7 |
| ampl | 24009.3 | 33903.1 | 11.6 | 1.8 | 54.9 | 209.7 | 78.0 |

REFL_A1I REFL f1 demodulation REFL_B1I

| | CS | CH | DS | DH | BS | PR3 | PR2 |
|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| Gouy | 85.7 | 6.0 | -19.7 | -19.7 | -19.7 | -20.3 | -22.0 |
| demod | 0.0 | -0.0 | -89.9 | -90.0 | -67.2 | 0.0 | 0.0 |
| ampl | 693.4 | 251.0 | 439.2 | -538.5 | 413.4 | 452.8 | 53.8 |

REFL f2 demodulation

| | CS | CH | DS | DH | BS | PR3 | PR2 |
|-------|---------|--------|------|-------|--------|---------|--------|
| Gouy | 85.6 | 5.9 | -4.3 | -83.9 | -20.0 | -20.3 | -22.0 |
| demod | 0.3 | 0.3 | -1.1 | 2.4 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| ampl | -1811.9 | -655.9 | -0.9 | -0.3 | -418.3 | -1183.2 | -140.5 |

AS DC

| | CS | CH | DS | DH | BS | PR3 | PR2 |
|------|-------|--------|------|-------|------|--------|-------|
| Gouy | 70.2 | 70.2 | -3.0 | -71.5 | -1.2 | 69.7 | 68.0 |
| ampl | 492.1 | -603.4 | -2.6 | -1.2 | -2.1 | -604.0 | -71.7 |

REFL_B1Q

AS f1 demodulation

| | CS | CH | DS | DH | BS | PR3 | PR2 |
|-------|-------|-------|---------|--------|-------|-------|-------|
| Gouy | -19.6 | -21.5 | 70.4 | 68.5 | -41.9 | 69.6 | 67.9 |
| demod | -89.8 | -89.8 | -89.8 | -89.8 | -89.8 | -89.8 | -89.8 |
| ampl | -12.9 | -2.1 | 26902.6 | 4374.7 | 95.4 | 8.9 | 1.1 |

AS_A1Q

TRY DC

| | CS | CH | DS | DH | BS | PR3 | PR2 |
|------|---------|--------|---------|--------|-----|-------|------|
| Gouy | -25.5 | 74.8 | -25.5 | 74.8 | NaN | -0.6 | -2.3 |
| ampl | 11536.1 | 4176.3 | 11536.7 | 4176.3 | NaN | -11.7 | -1.4 |

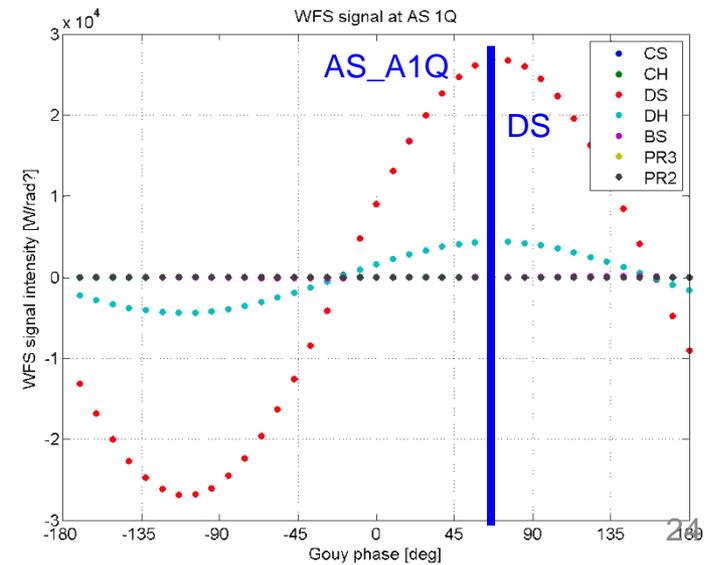
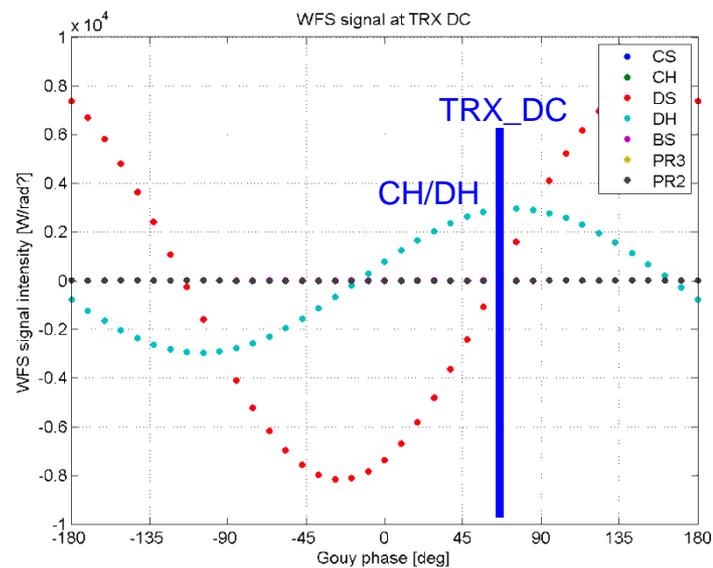
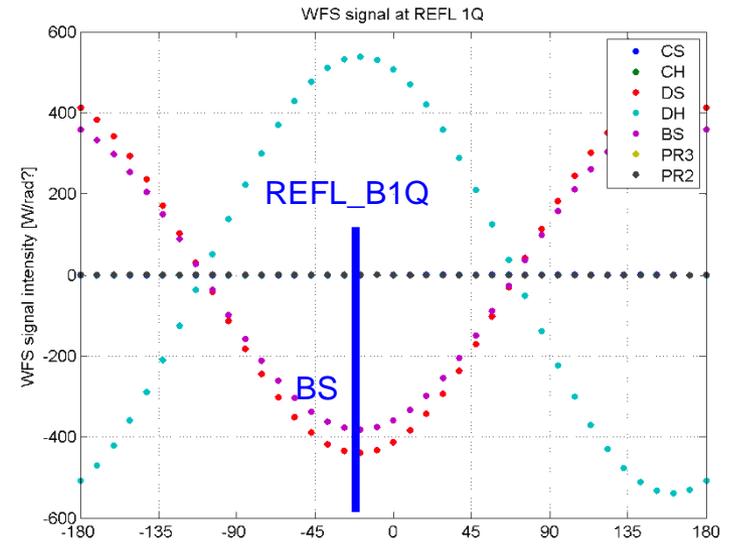
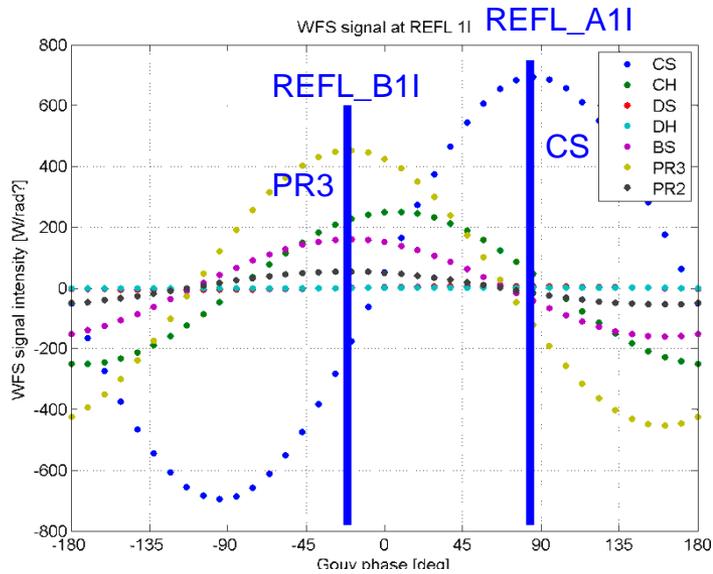
| | CS | CH | DS | DH | BS | PR3 | PR2 |
|------|---------|--------|---------|--------|------|-------|------|
| Gouy | -25.5 | 74.8 | -25.5 | 74.8 | -0.3 | -0.6 | -2.2 |
| ampl | 11536.1 | 4176.3 | 11536.1 | 4176.3 | -8.3 | -11.7 | -1.4 |

TRX + TRY でCommon HARD

TRX - TRY でDifferential HARD をとる

Gouy phaseはSOFTの信号が最小になるところで(つまり $-25.5+90=64.5$ deg)

Gouy phase依存性で見ると



全Sensing Matrix

WFS Sensing Matrix [W/rad?]

(Gouy phases at REFL A:85.7, REFL B:-20.3, AS A:70.4, AS B:160.4, TR A:64.5 deg)

| | CS | CH | DS | DH | BS | PR3 | PR2 |
|----------|----------|---------|---------|---------|--------|---------|--------|
| REFL_ADC | 4484.6 | 777.4 | 7.9 | 1.2 | 24.3 | 54.1 | -4.2 |
| REFL_BDC | -16975.9 | -2759.9 | 0.0 | 0.0 | 22.4 | 117.8 | 54.0 |
| REFL_A1I | 693.4 | 44.8 | 5.7 | 0.9 | -43.3 | -124.6 | -16.3 |
| REFL_A1Q | 0.4 | -0.2 | 116.5 | -142.8 | 100.9 | -0.5 | -0.1 |
| REFL_B1I | -191.0 | 225.1 | 0.4 | -0.1 | 160.2 | 452.8 | 53.7 |
| REFL_B1Q | -0.1 | 0.1 | -439.2 | 538.5 | -381.1 | 0.1 | 0.0 |
| REFL_A2I | -1811.9 | -116.4 | 0.0 | 0.3 | 113.4 | 326.6 | 42.7 |
| REFL_A2Q | -9.0 | -0.6 | -0.0 | 0.0 | 0.6 | 1.6 | 0.2 |
| REFL_B2I | 497.5 | -588.4 | -0.8 | -0.1 | -418.3 | -1183.2 | -140.4 |
| REFL_B2Q | 2.5 | -2.9 | 0.0 | -0.0 | -2.1 | -5.9 | -0.7 |
| AS_ADC | 348.0 | -426.7 | -0.5 | 0.7 | -0.5 | -427.1 | -50.7 |
| AS_BDC | -1.1 | 1.4 | 1.8 | 0.5 | 1.4 | 5.4 | 2.1 |
| AS_A1I | 0.0 | 0.0 | -108.3 | -17.6 | -0.1 | 0.0 | 0.0 |
| AS_A1Q | -0.0 | -0.1 | 26902.6 | 4372.3 | 36.3 | -8.9 | -1.1 |
| AS_B1I | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.6 | -0.4 | -0.0 | -0.0 |
| AS_B1Q | -12.9 | -2.1 | -28.6 | -143.9 | 88.3 | 0.1 | 0.0 |
| TRX_ADC | 7.5 | 2905.9 | 7.5 | 2905.9 | 0.0 | -3.5 | -0.4 |
| TRX_BDC | 3514.8 | 2849.3 | 3514.8 | 2849.3 | 0.0 | 0.1 | 0.0 |
| TRY_ADC | 7.5 | 2905.9 | -7.5 | -2905.9 | -2.5 | -3.5 | -0.4 |
| TRY_BDC | 3514.8 | 2849.3 | -3514.8 | -2849.3 | 0.0 | 0.1 | 0.0 |

PR2は信号が小さい、DARMへのカップリングも小さいので干渉計出力を使っての制御はしない(aLIGOでもローカルに制御すれば十分としている)

本当に十分かは要検討

単位が W/rad? になっているのはOptickleの tickle01の出力はファクター $\sqrt{2/\pi}$ だけずれている疑惑があるから

選択後のSensing Matrix

WFS Sensing Matrix [W/rad?]

(Gouy phases at REFL A:85.7, REFL B:-20.3, AS A:70.4, AS B:160.4, TR A:64.5 deg)

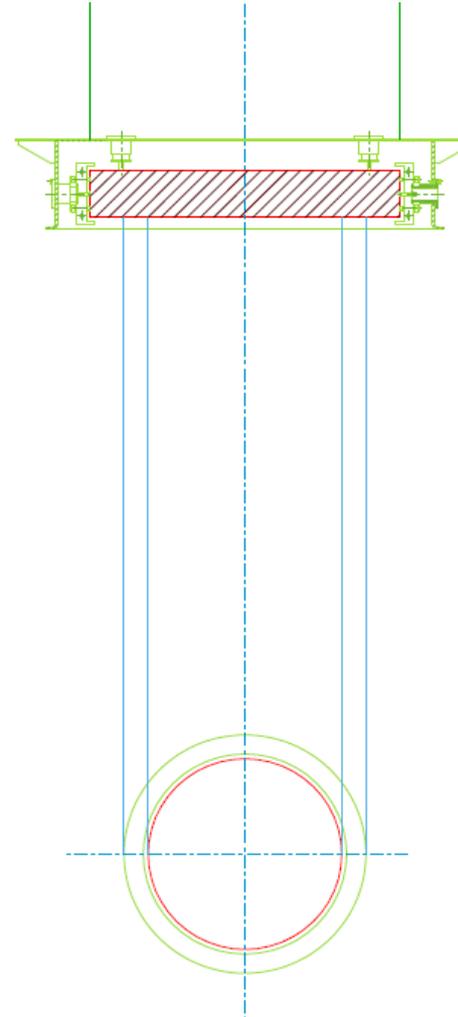
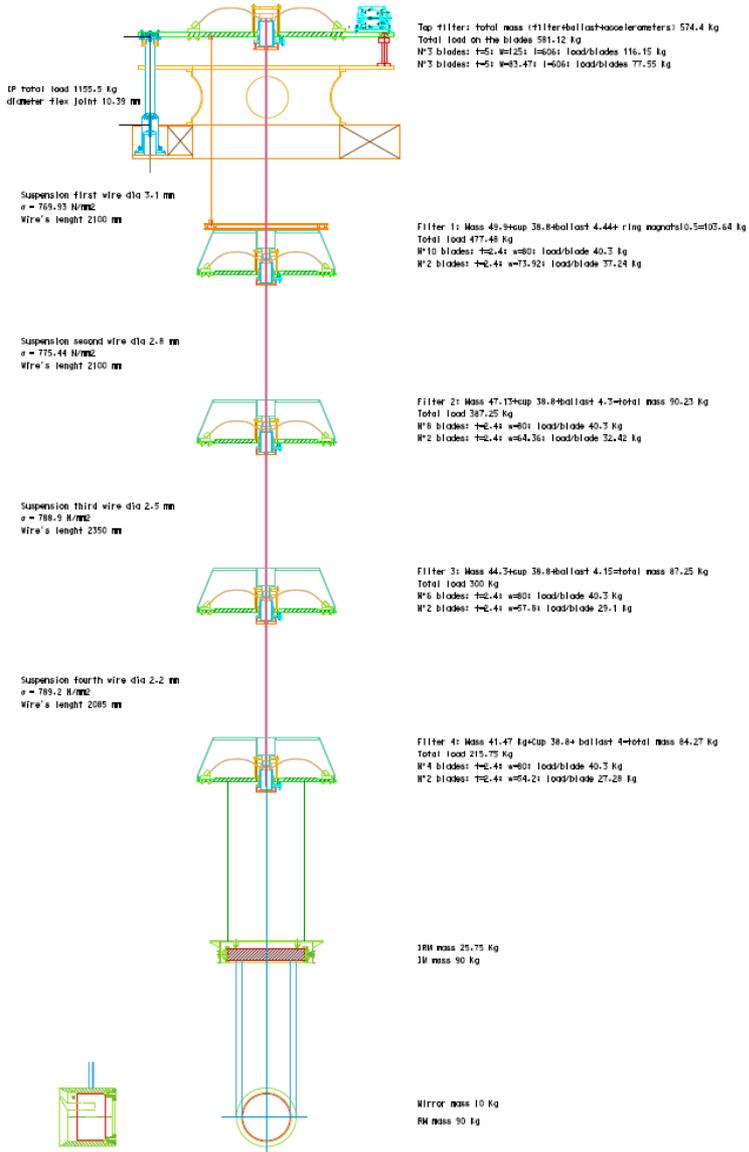
| | CS | CH | DS | DH | BS | PR3 | PR2 |
|----------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|-------|
| REFL_A1I | 693.4 | 44.8 | 5.7 | 0.9 | -43.3 | -124.6 | -16.3 |
| TRX_ADC | 7.5 | 2905.9 | 7.5 | 2905.9 | 0.0 | -3.5 | -0.4 |
| AS_A1Q | -0.0 | -0.1 | 26902.6 | 4372.3 | 36.3 | -8.9 | -1.1 |
| TRY_ADC | 7.5 | 2905.9 | -7.5 | -2905.9 | -2.5 | -3.5 | -0.4 |
| REFL_B1Q | -0.1 | 0.1 | -439.2 | 538.5 | -381.1 | 0.1 | 0.0 |
| REFL_B1I | -191.0 | 225.1 | 0.4 | -0.1 | 160.2 | 452.8 | 53.7 |

対角成分、大きい非対角成分を取り出して逆行列をとって対角化 (今回は対角成分の10%以下の信号は無視してInput matrixを作って計算した)

PR2は干渉計出力では制御しない

iLCGT Suspension

FILTER'S CHAIN TYPE A
VERSION 1

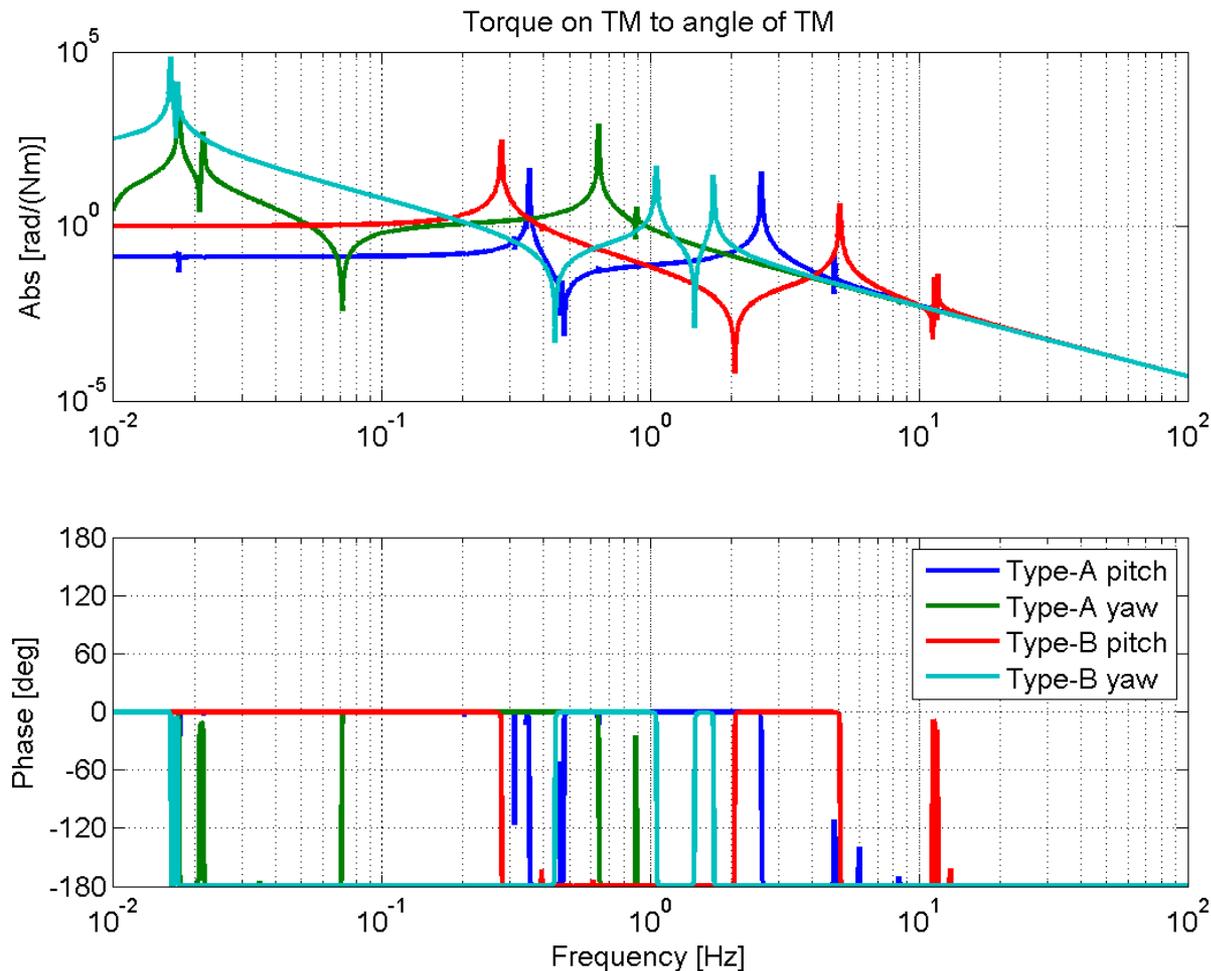


IRM mass 25.75 Kg
IM mass 90 Kg

Mirror mass 10 Kg
RM mass 90 Kg

iLCGT Suspension

- 鏡に加えたトルクから鏡の角度へのTF (Hrad)

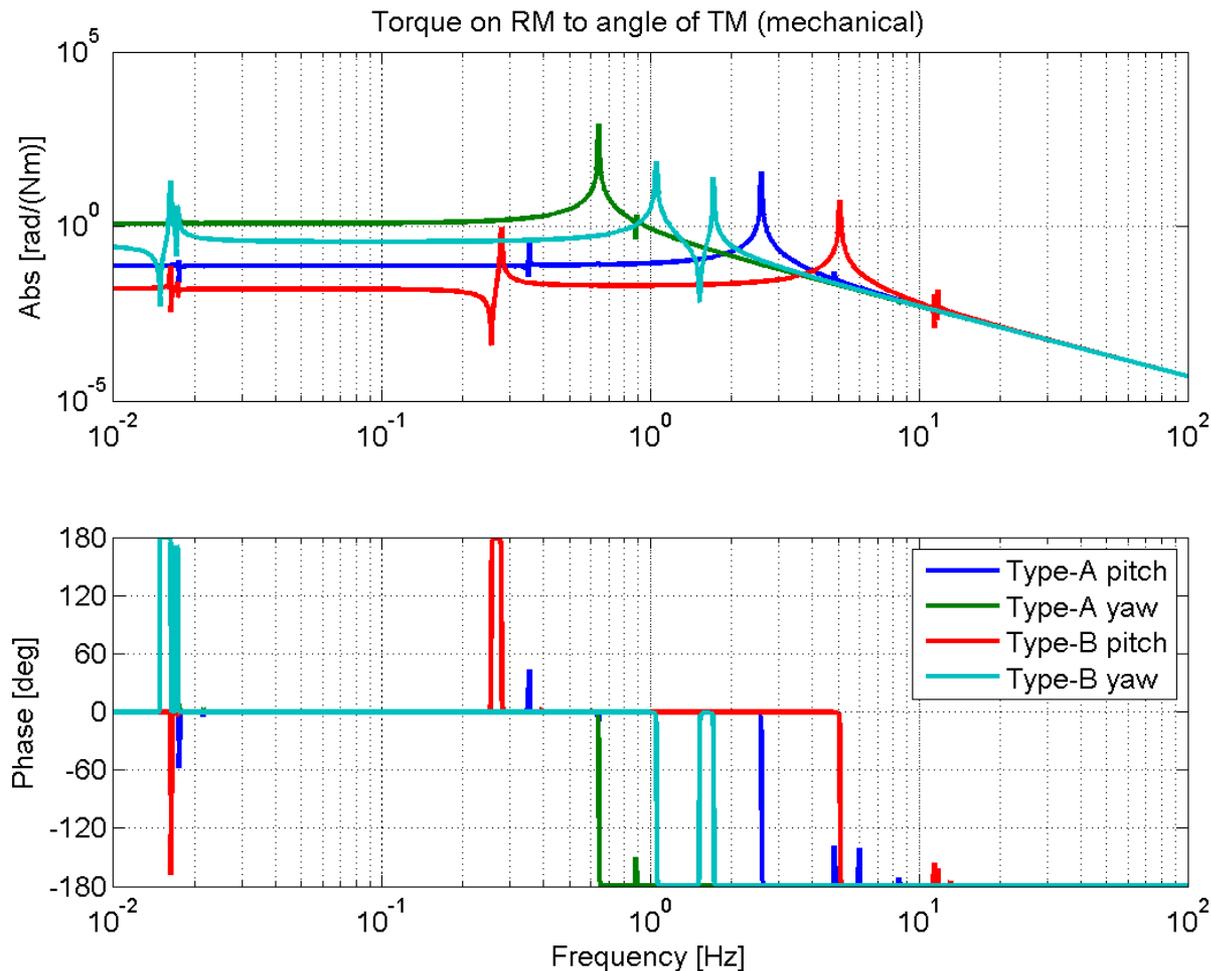


関口くん提供
(2011/5/1)

上段をクランプしない
フルの状態でのモデル
計算

iLCGT Suspension

- リコイルマスで加えたトルクから鏡の角度へのTF (Hact)



関口くん提供
(2011/5/1)

RMとTMは同じIMから
吊られているのでほぼ
単振り子の伝達関数

輻射圧トルクの影響

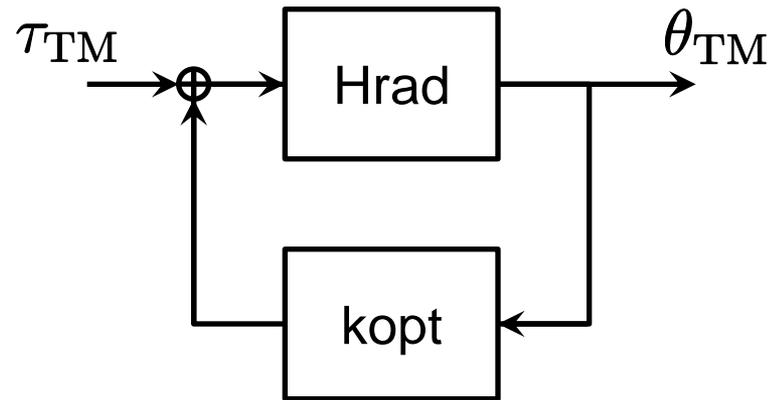
- 輻射圧がないとき鏡に加えたトルクから角度の伝達関数

$$\frac{\theta_{\text{TM}}}{\tau_{\text{TM}}} = H_{\text{rad}}$$

- 輻射圧があると

$$\frac{\theta_{\text{TM}}}{\tau_{\text{TM}}} = \frac{H_{\text{rad}}}{1 + k_{\text{opt}} H_{\text{rad}}}$$

この分母がOptickle
でいうmMech



kopt: 輻射圧トルク
SOFT/HARDの2つ
のモードがある

- 実際にはリコイルマスでトルクをかけるので

$$\frac{\theta_{\text{TM}}}{\tau_{\text{RM}}} = \frac{H_{\text{act}}}{1 + k_{\text{opt}} H_{\text{rad}}}$$

↑ この系をWFSやOpLevで制御する

輻射圧トルクの影響

- 簡単に言うと.....
- 伝達関数が

$$\frac{\theta}{\tau} = H \quad \rightarrow \quad \frac{\theta}{\tau} = \frac{H}{1 + k_{\text{opt}}H}$$

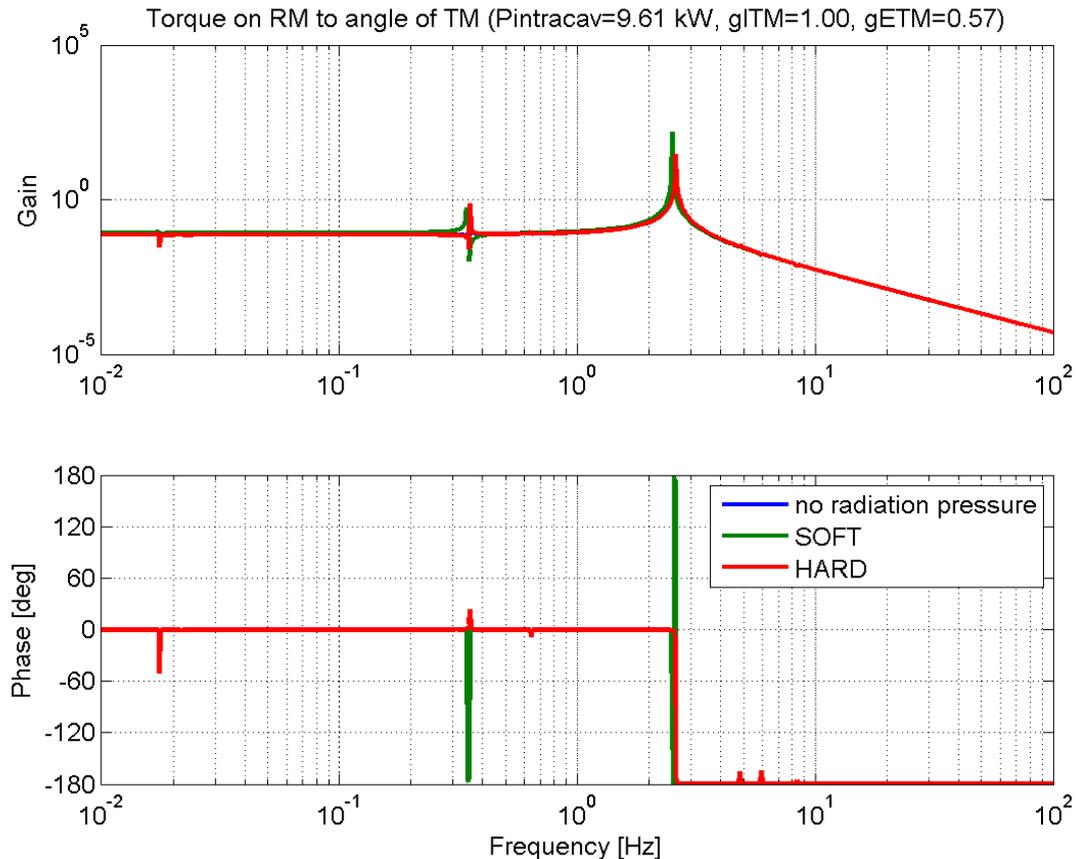
となると、共振周波数が

$$\omega = \sqrt{\frac{k_{\text{mech}}}{I}} \quad \rightarrow \quad \omega_{\text{S/H}} = \sqrt{\frac{k_{\text{mech}} + k_{\text{opt}}}{I}}$$

- k_{opt} が負なのがSOFT、正なのがHARD
- 腕内パワーが上がる or 鏡の傾きでビームがよくずれる
g-factorだと k_{opt} の絶対値が大きくなる
- $k_{\text{mech}} + k_{\text{SOFT}} < 0$ になるとunstable

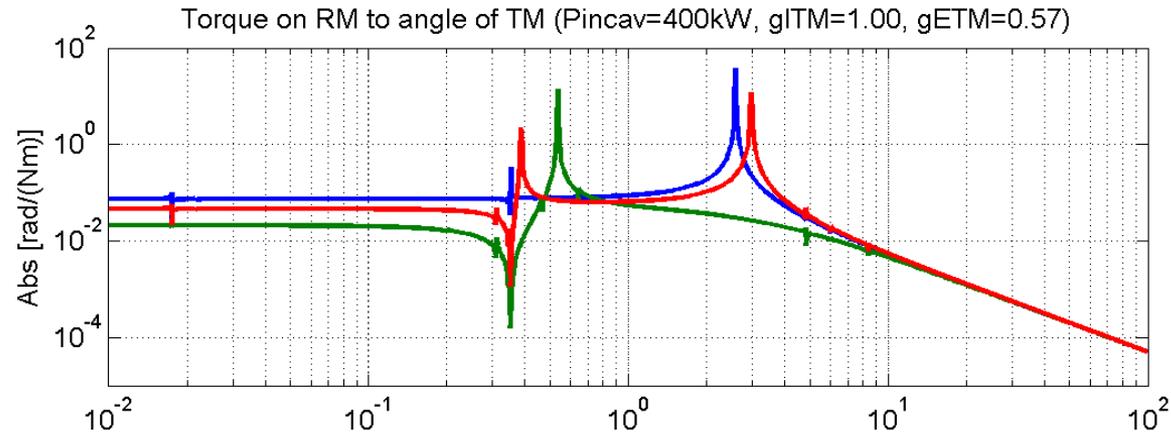
Opto-mechanical TF

- リコイルマスに加えたトルクから鏡の角度へのTF (pitch) 輻射圧 ($P_{\text{incav}}=9.6\text{kW}$) 下で

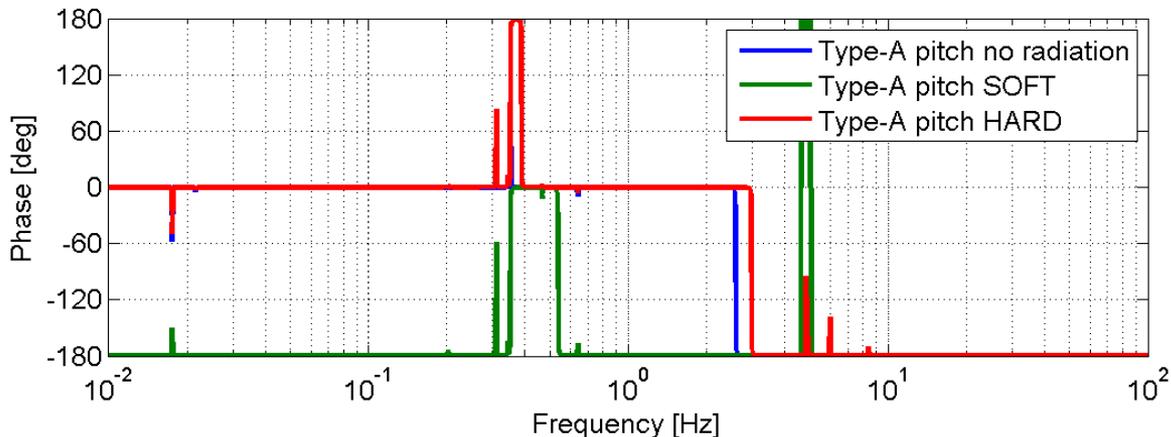


ちなみに

- iLCGTサスペンションにbLCGTのパワーを入れると？
腕内パワー400kW, pitch



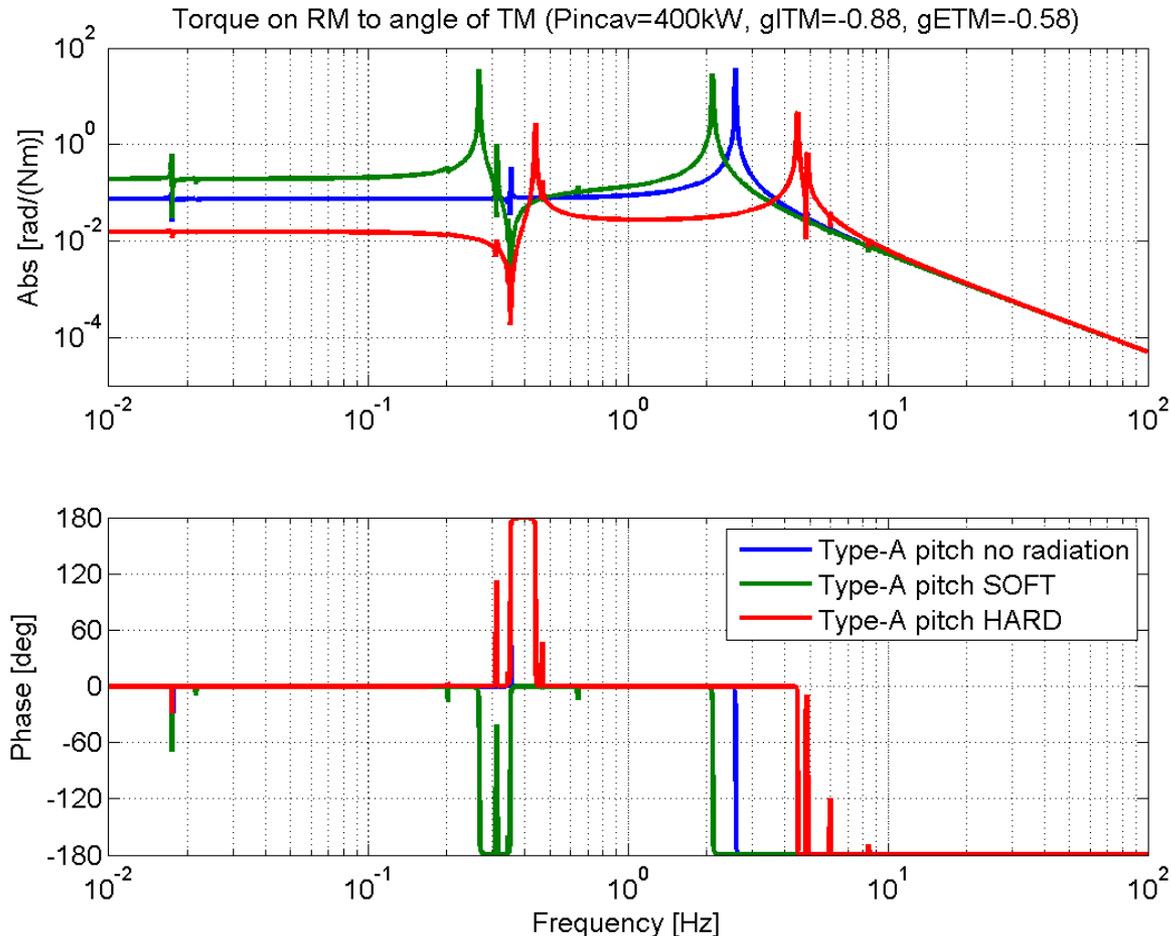
SOFTモードはunstable



SOFTの共振周波数は
5i Hz程度
これよりUGFは高くした
いこと、カットオフ周波数
はさらに高くなることを考
えれば制御が大変

ちなみに

- 曲率をITM1.6km, ETM1.9kmにすると？
腕内パワー400kW, pitch



SOFTモードもstable

g-factorが-1に近づいたことにより、鏡の傾きによってビームがずれにくくなったため

SOFTの共振周波数は2 Hz程度。stableなのでまだいいが、それでも共振周波数が高い

どの程度の共振周波数ならよいか

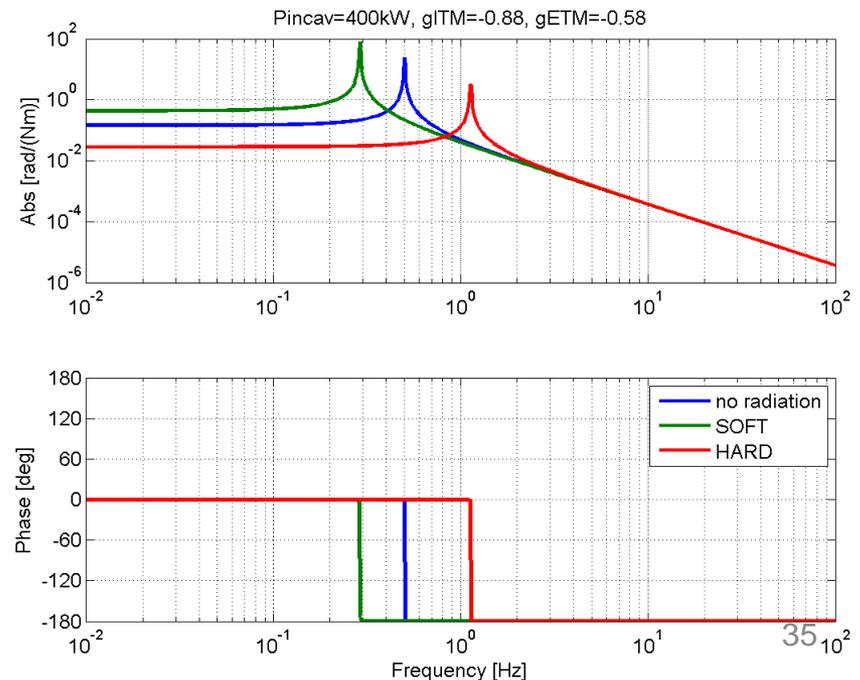
- SOFTがstableかunstableかはあまり関係ない
- SOFTが0.3 Hz (or 0.3i Hz) 程度以下だと制御しやすい
UGFは共振周波数より高く、それより高いカットオフ周波数を考えると~10Hzではカットオフしていきたい
- たとえば元々の共振周波数0.5 Hzだと

SOFT 0.3 Hz

HARD 1.1 Hz

で制御しやすい
単振り子
慣性モーメント
 $I = 0.7 \text{ kgm}^2$ を仮定

- ただ、ビームがずれにくい
ということはWFS信号が小さいということでもある



角度制御系の設計

- 先程のOpto-mechanicalな系を制御する
- 地面振動を抑えつつ、ショットノイズを導入しない制御
- 角度の残留ノイズとビームスポットの動き(BSM)が長さ変動にカップルする

$$\begin{aligned}\Delta L(f) &= d_{\text{spot}}(f) * \theta_{\text{Mirror}}(f) \\ &\approx \theta_{\text{Mirror}}^{\text{RMS}} d_{\text{spot}}(f) + d_{\text{spot}}^{\text{RMS}} \theta_{\text{Mirror}}(f)\end{aligned}$$

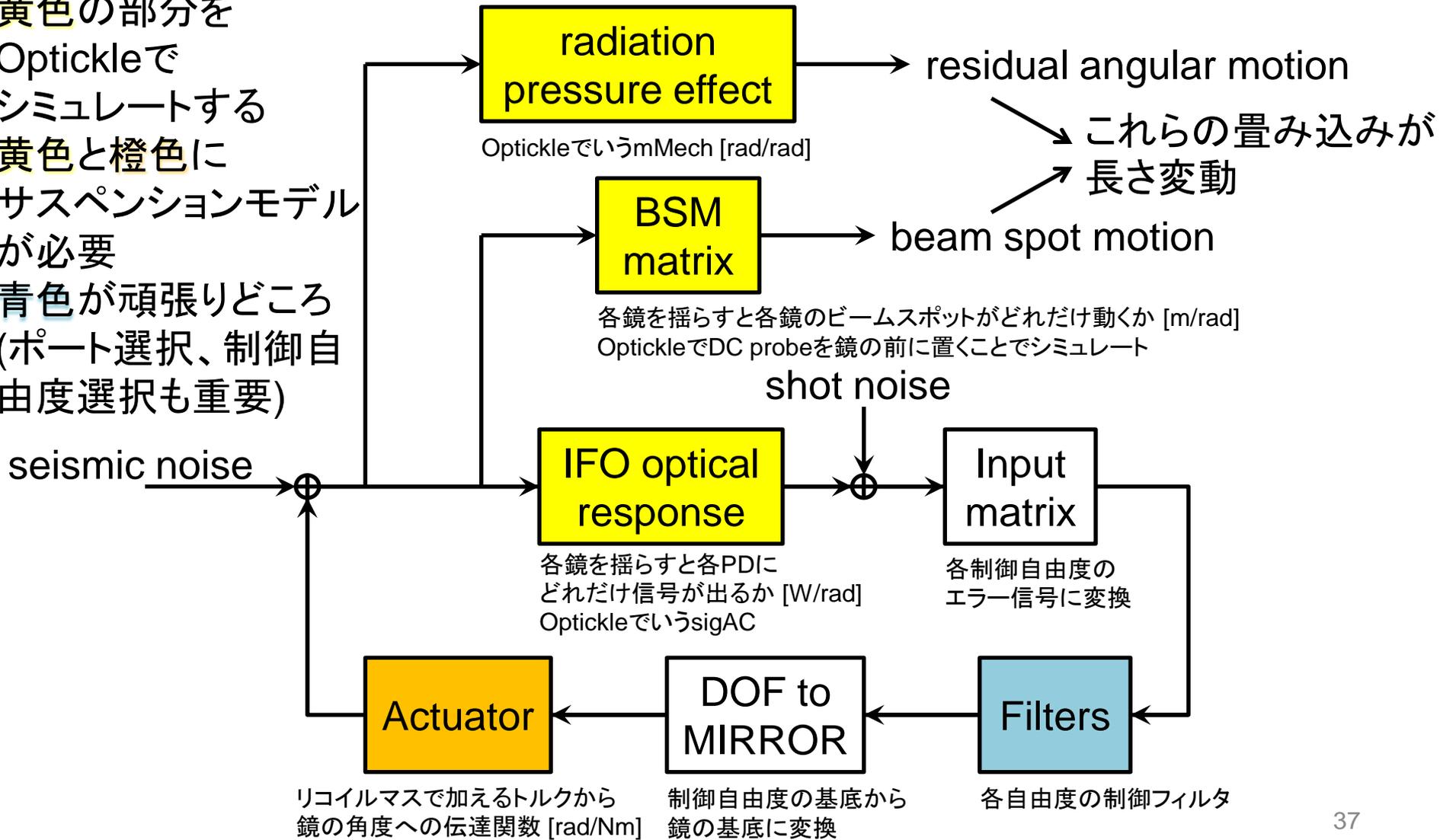
BSMよりもビームが鏡の中心にいないことの方が大きいかもしれない。iLIGOでは1e-4 mくらいビームセンタリングはできたらしい。

- TMはDARMに直接効く(カップリング係数 $c=1$)
他の鏡は下記の係数を仮定
BS: $\pi/(2F) \sim 1/980$
PR2, PR3: $1/100$
- とりあえず全てpitchを計算

PRCの鏡が1/100もカップルすることはないらしいが、とりあえずこれで計算しておけば安全

角度制御系の構造

黄色の部分を
Optickleで
シミュレートする
黄色と橙色に
サスペンションモデル
が必要
青色が頑張りどころ
(ポート選択、制御自
由度選択も重要)



sigACとmMech

- mMechは「輻射圧がなかったら回転させられる角度から輻射圧下で実際に回転する角度」の伝達関数 [rad/rad]

$$\frac{\theta_{\text{TM}}}{\tau_{\text{RM}}} = \frac{H_{\text{act}}}{1 + k_{\text{opt}} H_{\text{rad}}} = H_{\text{act}} \cdot \text{mMech}$$

- sigACにはmMechも入っている(輻射圧の影響入ってる)

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \text{probe} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \text{sigAC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{各鏡の揺れ} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \text{sigAC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{DOF} \\ \text{to} \\ \text{MIRROR} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{各自由度の揺れ} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

ある周波数でこれを見たのがSensing matrix
(さらに、これの逆行列がInput matrix)

tickle01 (余談)

- Optickleではずれに応じた振幅の10モードを発生させ、00モードの振幅とかけたものをtickle01の出力(sigAC)としている

- 実際には $U'_{00} \simeq U_{00} + c_{\text{disp}} U_{10}$

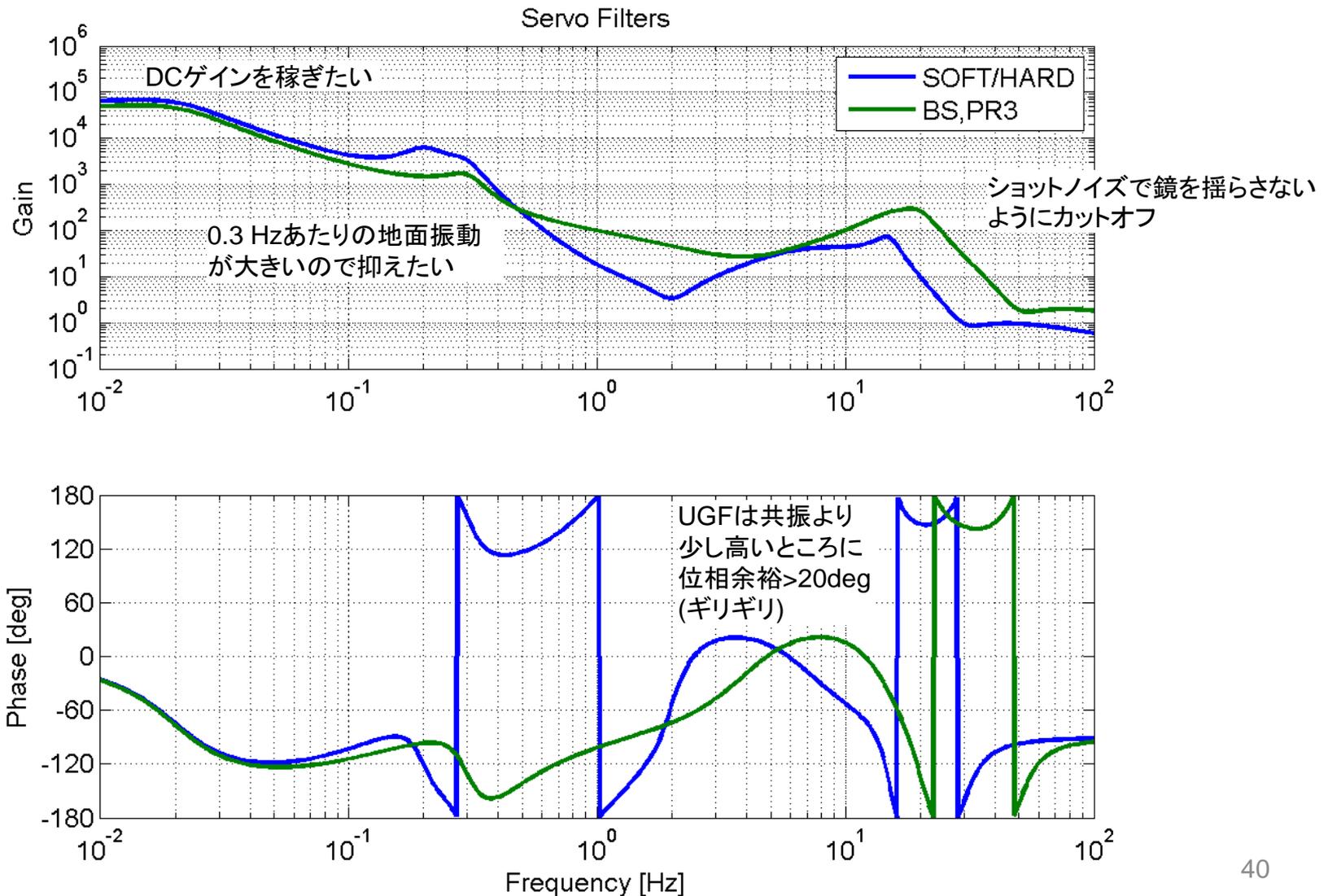
で、二乗して左右(上下)の差をとるので $U_1^* U_0^* U_0 U_0$ の積分が必要

- なので $\sqrt{2/\pi}$ だけtickle01のsigACはずれていると思う
- sigACに $\sqrt{2/\pi}$ をかけると理論値[W/rad]と一致
- DCのBSMでパワーを変位に換算するには実際には

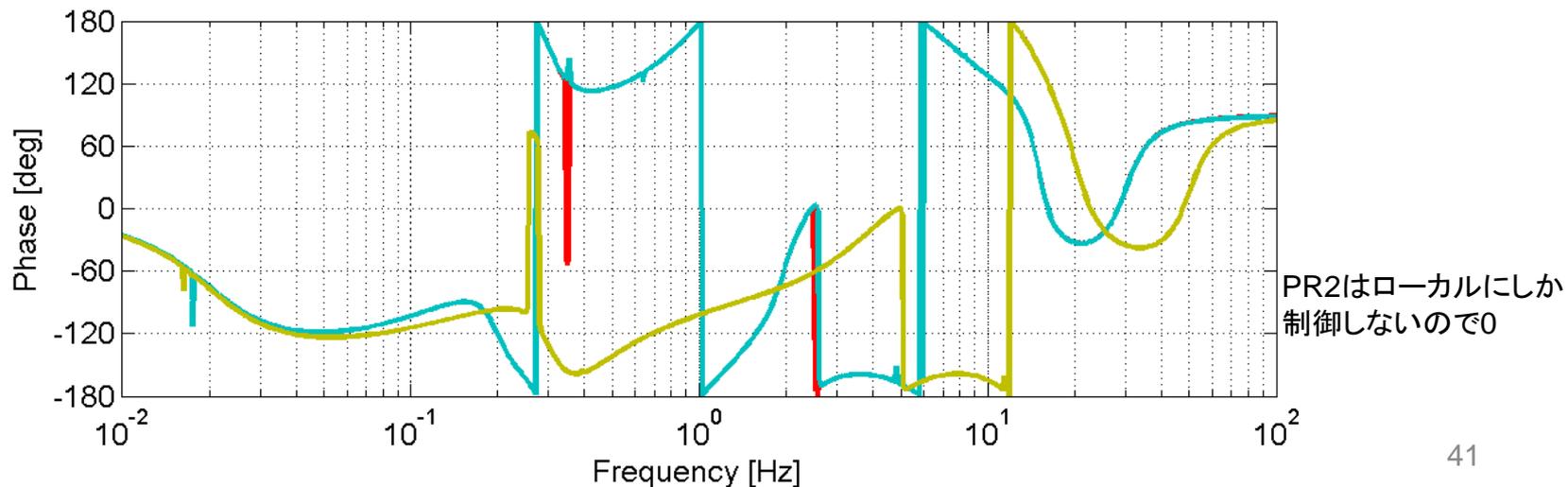
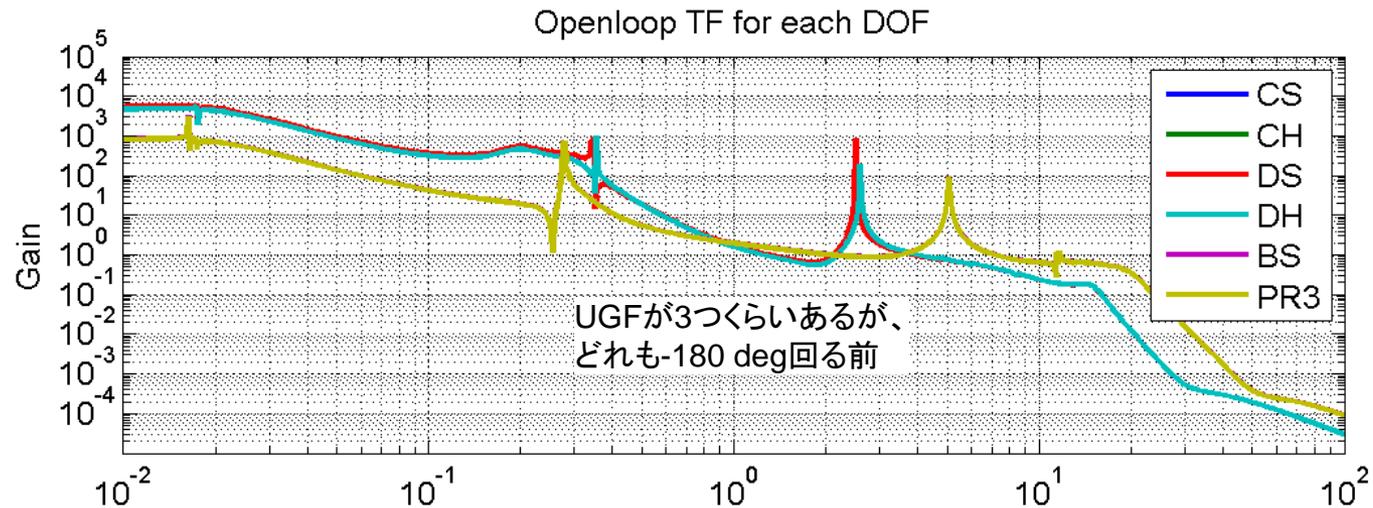
$$\delta x = w \frac{P_{\text{BSM}}}{2\sqrt{2/\pi}P} \text{ だが、 } \delta x = w \frac{P_{\text{BSM}}^{\text{sigAC}}}{2P_{\text{sigDC}}} \text{ で。}$$

バージョンによっては較正時のファクター2を忘れていたため、Optickleが誤って修正されている場合があり、その場合はファクター2もいらぬ。(tickle01.mを正しく戻す方がよいが)

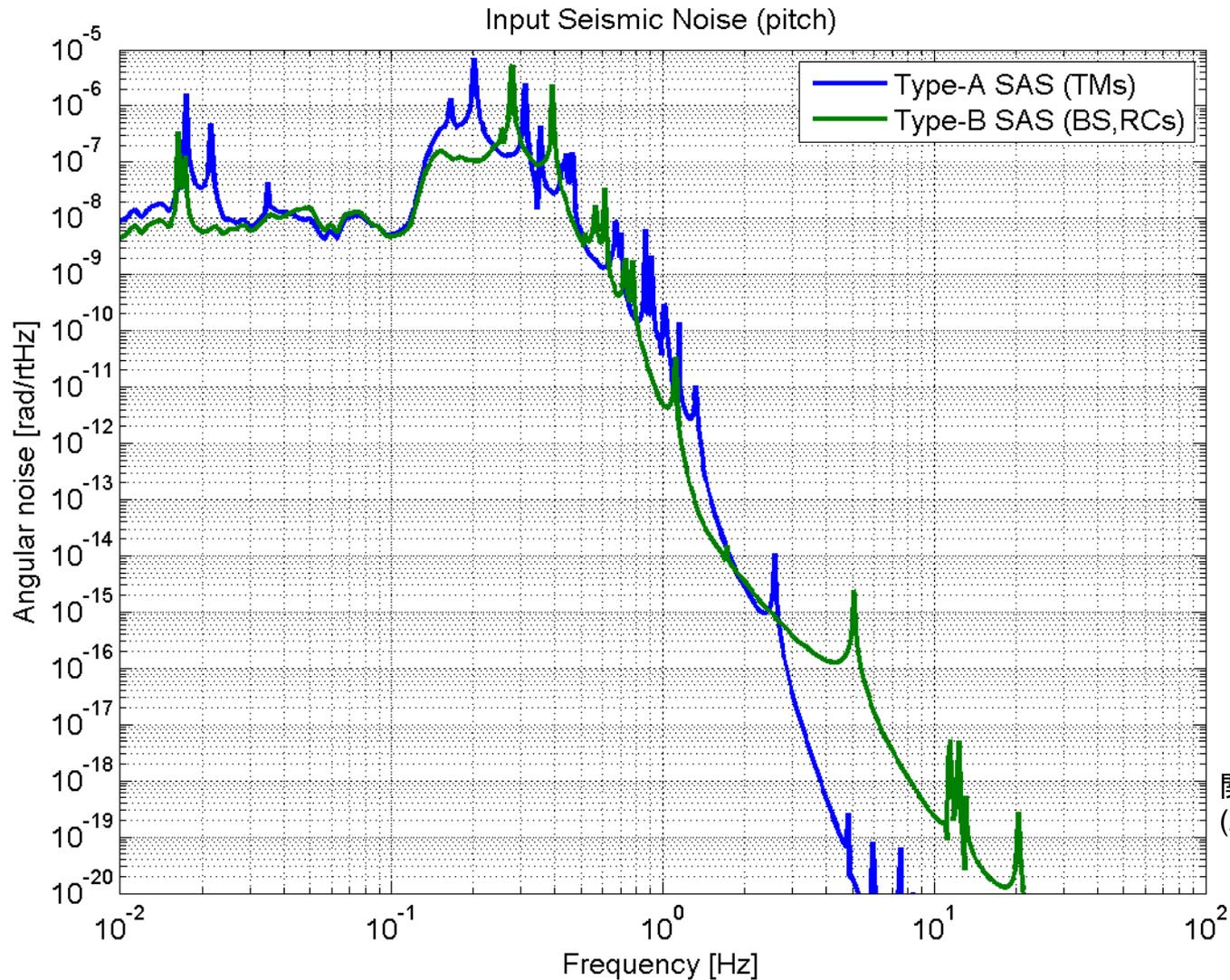
制御フィルタの設計



オープンループ伝達関数

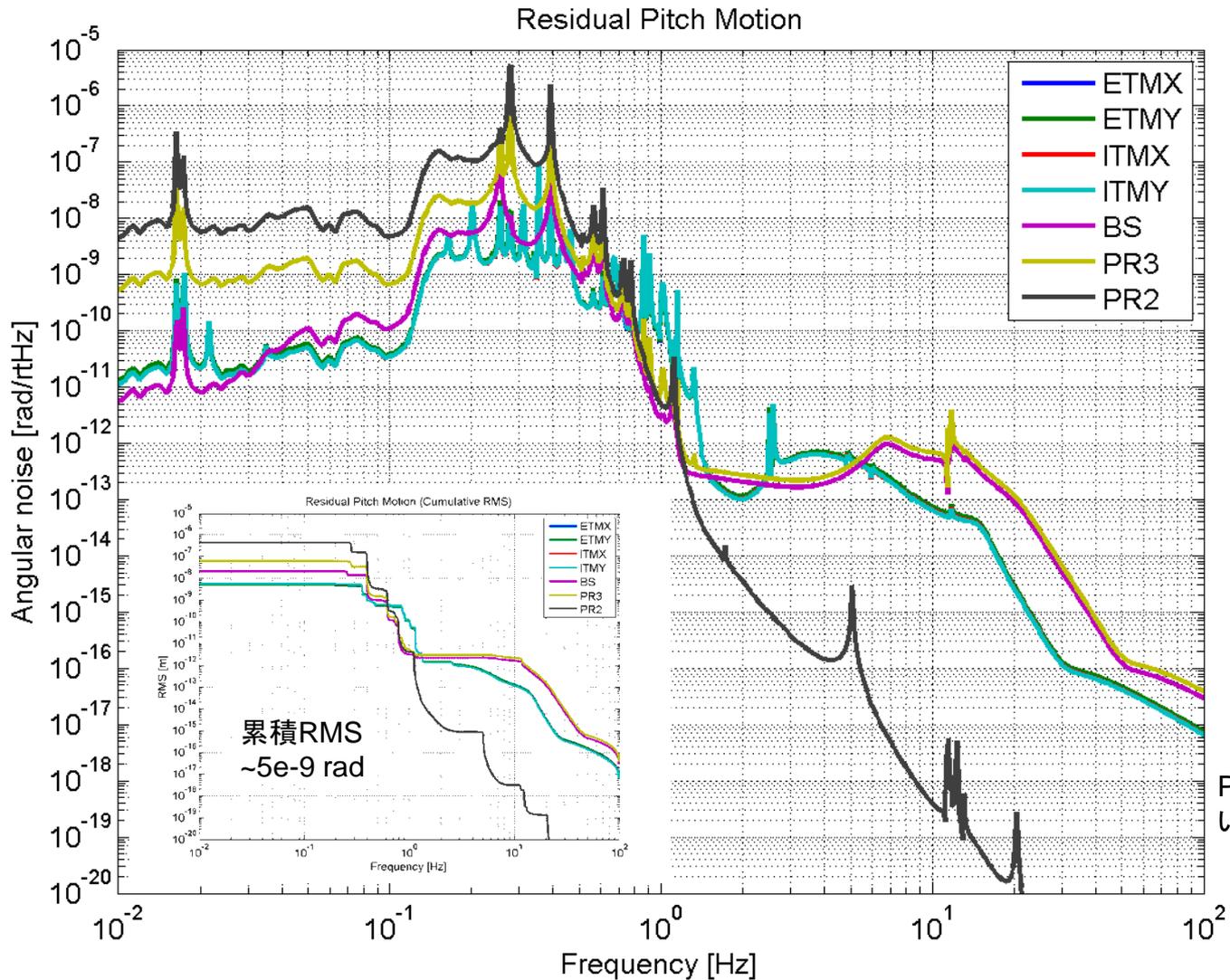


地面振動による角度揺れ



関口くん提供
(2011/5/1)

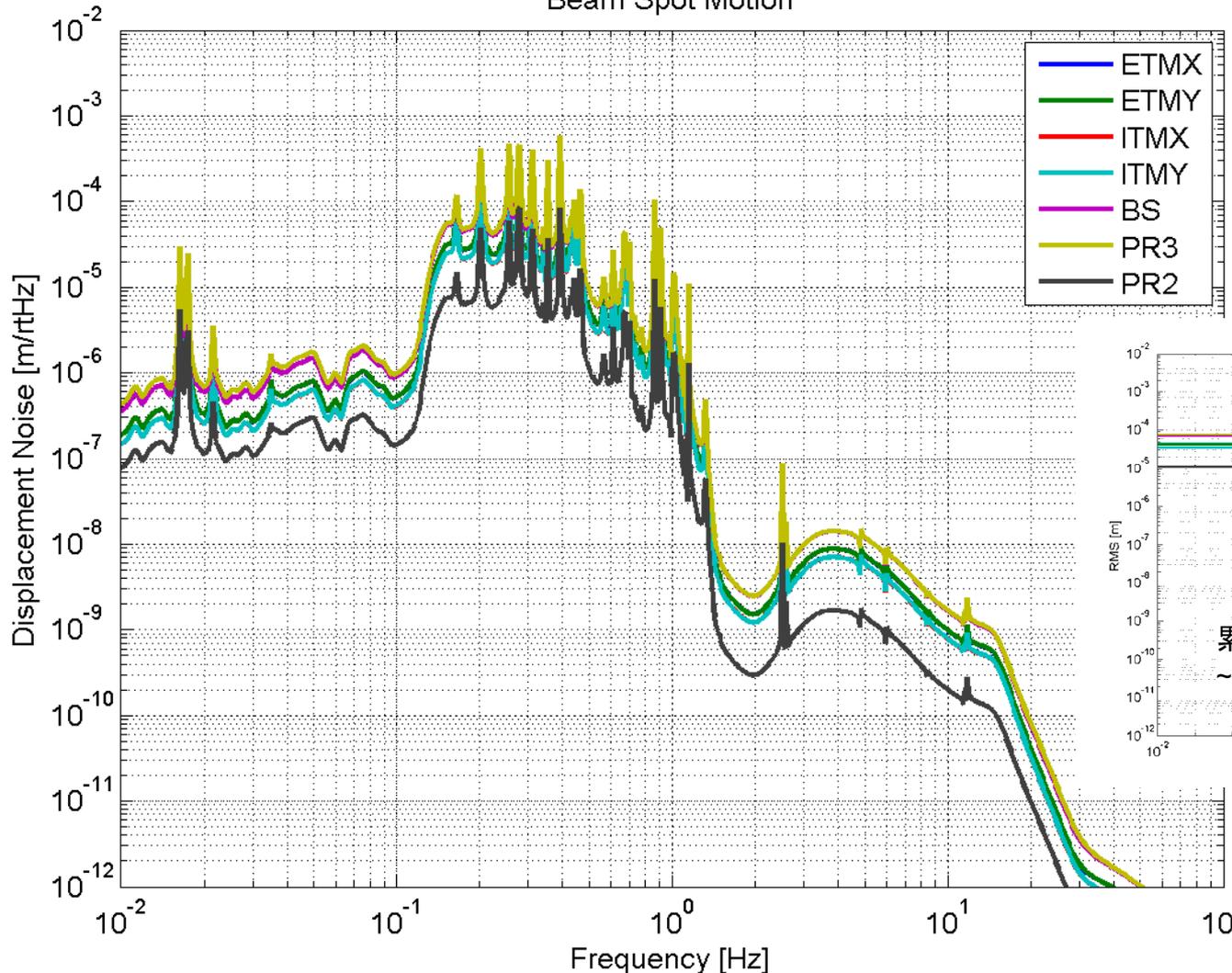
残留角度揺れ



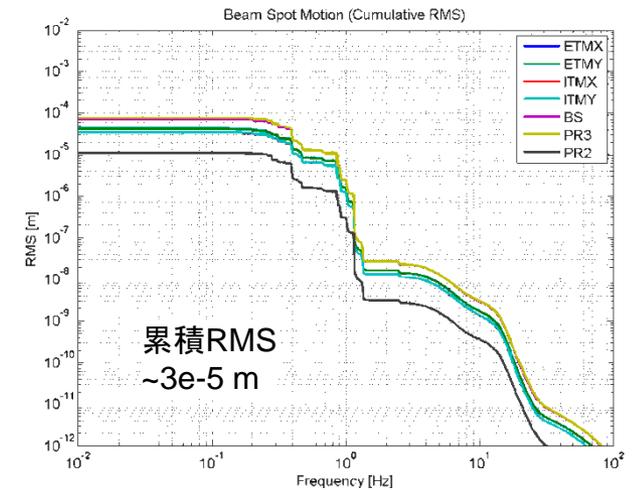
PR2の制御はしていないので変わらない

ビームスポットの動き

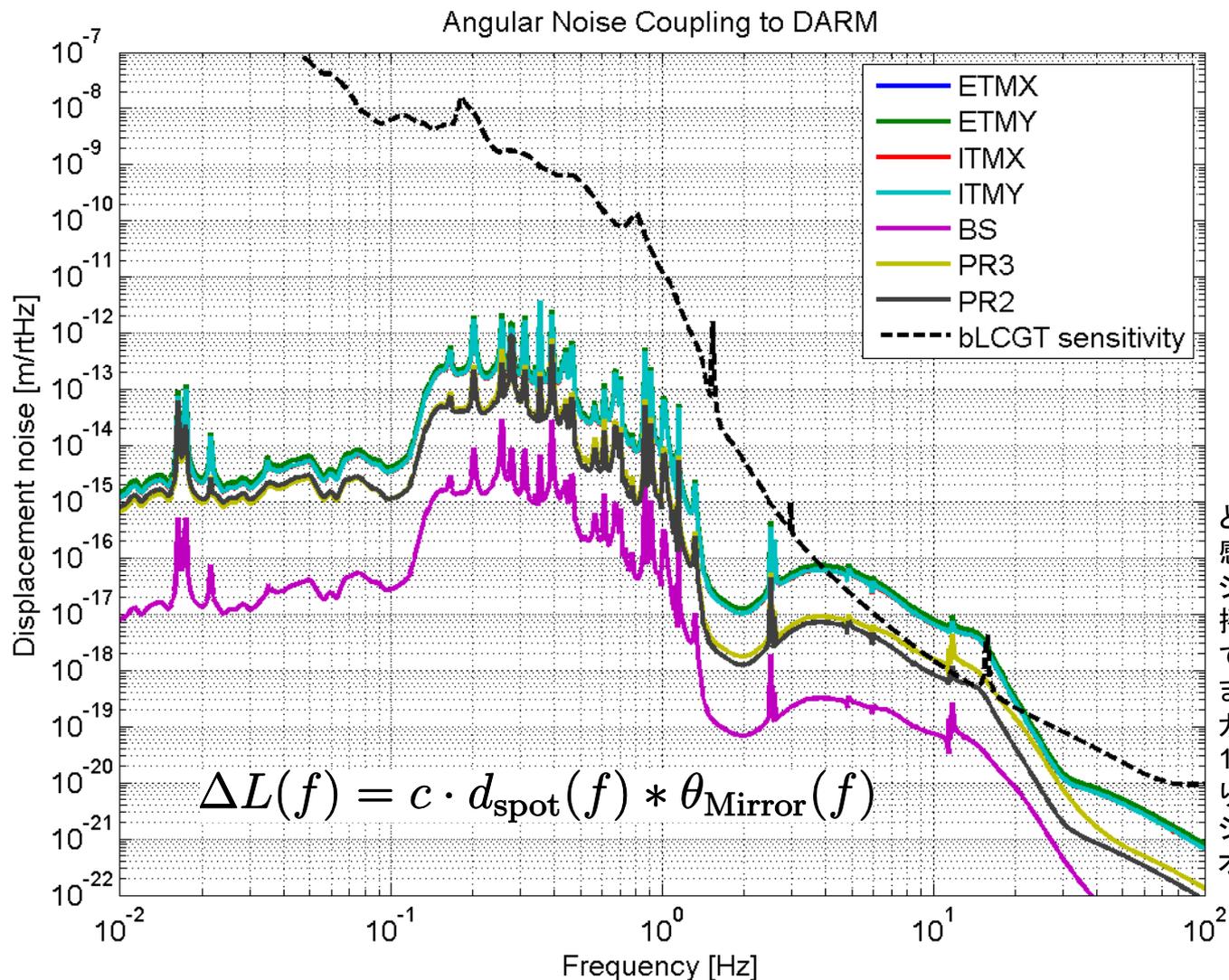
Beam Spot Motion



実際にはビームセンタリングが完璧ではないのでRMSはさらに悪いはず。
1e-4 m程度？
今回はとりあえずビームセンタリング完璧とする。

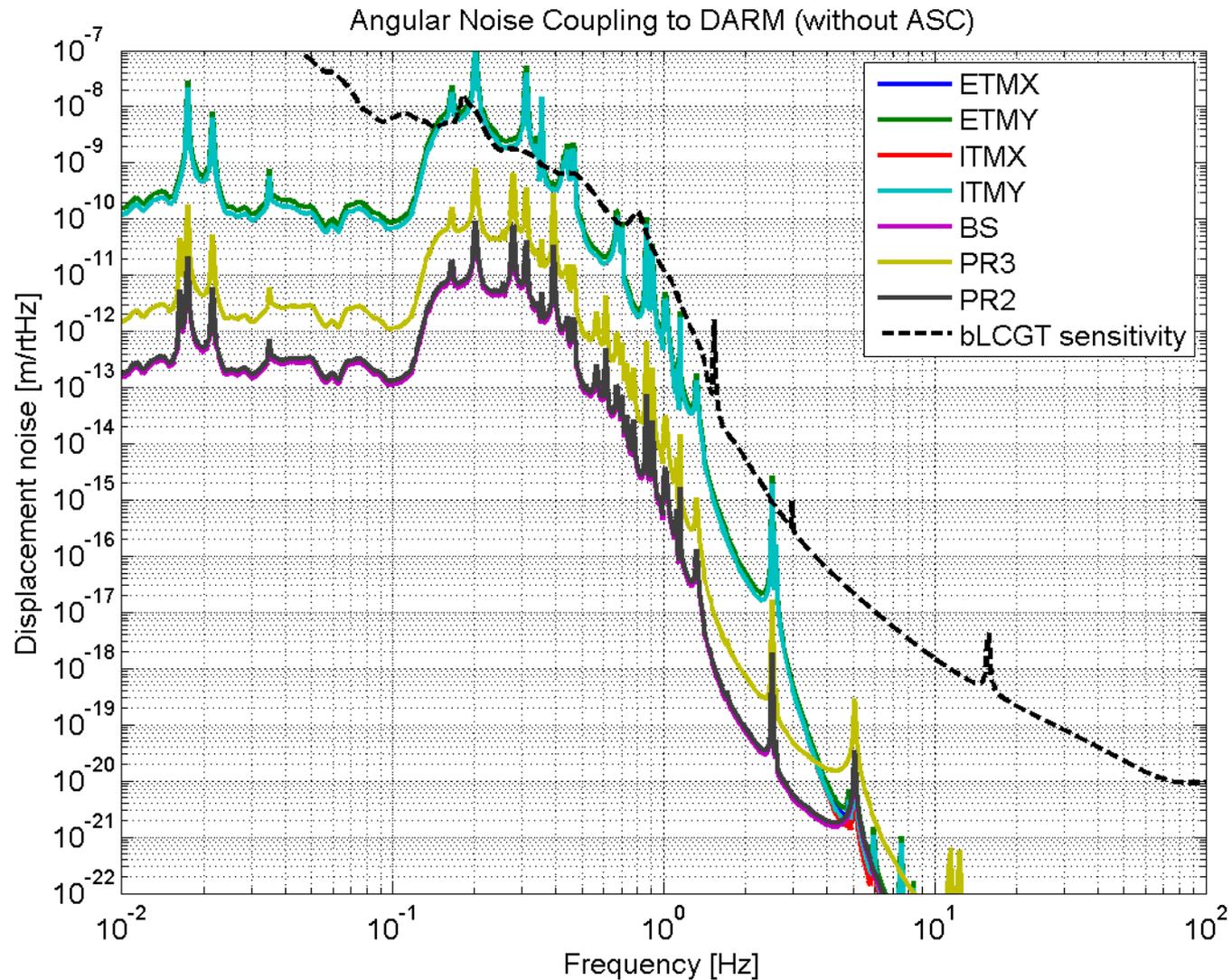


DARMへのカップリング



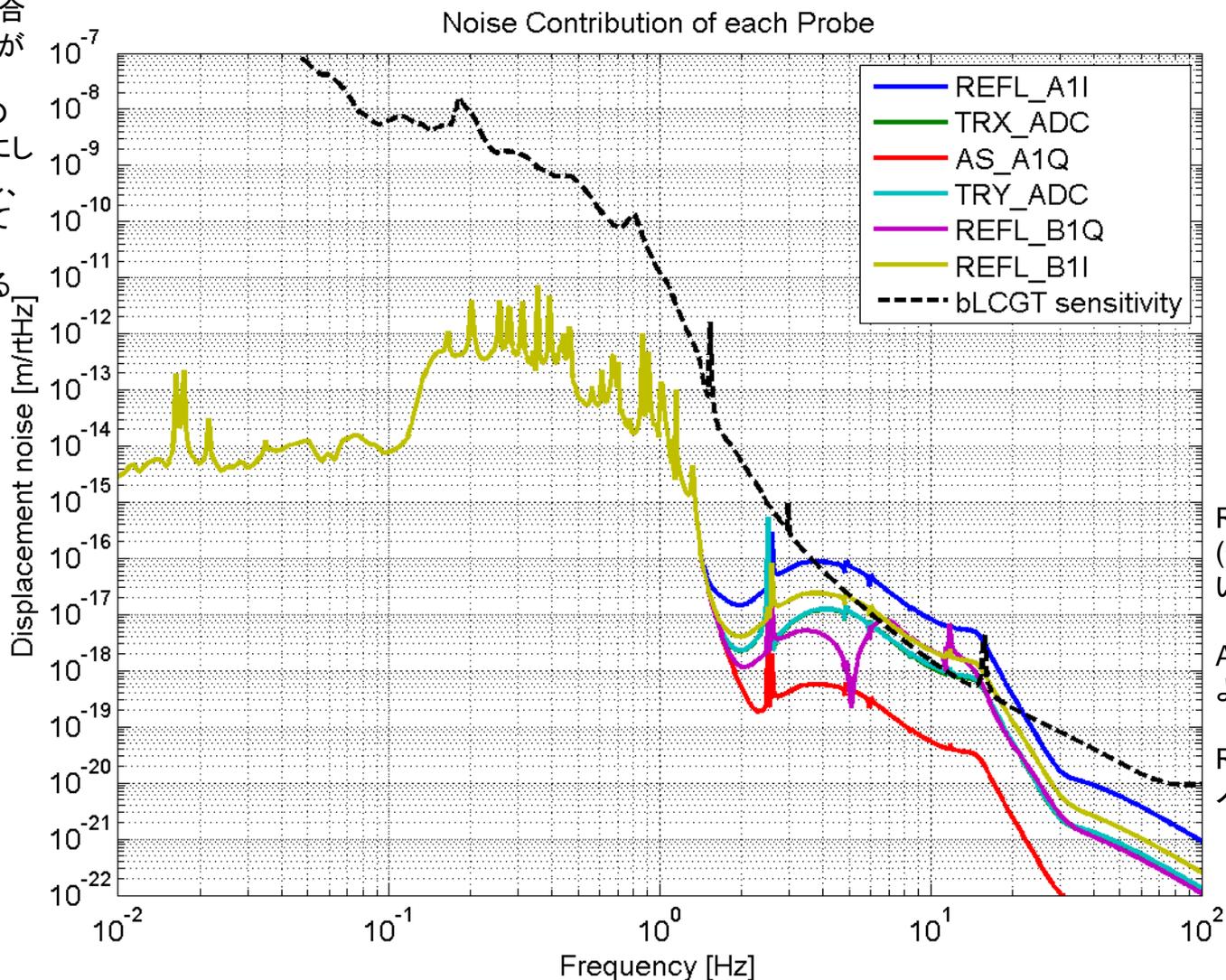
ととりあえずbLCGTの感度を使った
ショットノイズが鏡を揺らし、10 Hz周辺でDARMを汚してしまっている
カットオフ周波数が15 Hzなのでそれより高い周波数ではショットノイズがカットオフされている

ちなみに制御しないと.....



各QPDショットノイズの寄与

1つのQPDのショットノイズでDARMに合計どれだけノイズが出るか
1つのQPD以外のショットノイズを0にして先程の計算をし、各鏡の寄与を全て足したものをそのQPDの寄与とする



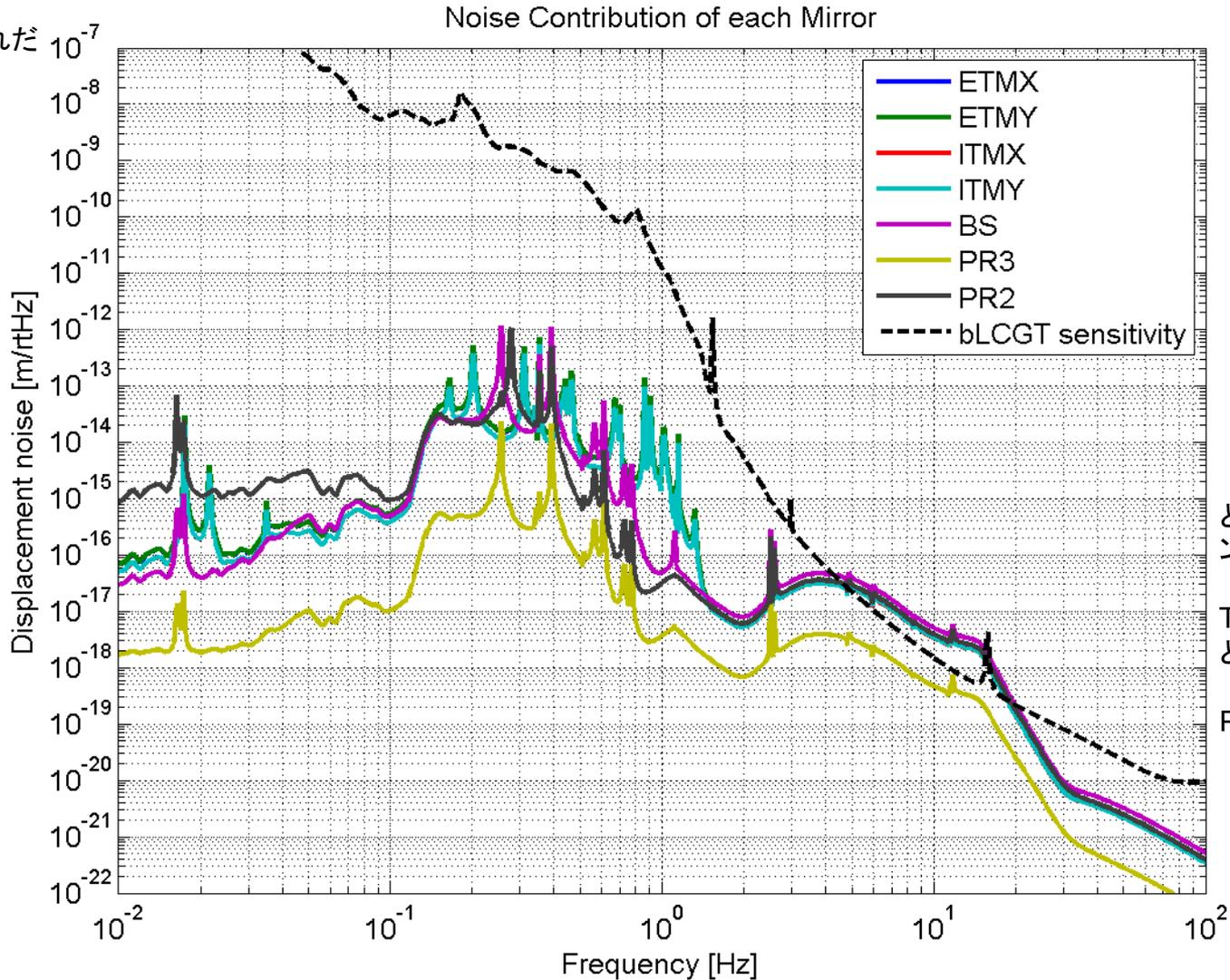
REFL が悪いらしい
(信号が他に比べて小さい、混ざってるため)

ASはショットノイズがよい(信号が大きい)

REFL_B1Qにあるノッチはなぜ？

各鏡の地面振動の寄与

1つの鏡だけを地面振動で揺らすとDARMIに合計どれだけのノイズが出るか



どのループにもっとゲインが必要かわかる

TMだけでなくBSにもっとゲインが必要

PR2も制御が必要？

コメントなど

- BSとPR2/3は揺れやサスペンション同じとしている、
ビームセンタリング完璧、QPD(DC)の防振完璧など簡単
化しているところあり
- 制御自由度の変更、フィルタ行列の変更、IMに返すなど
改良の余地はあり
- PR2をDC WFSで制御すればビーム平面が決まる？
- 制御しやすいacquisition modeも考えるべき？
POX/POYを使うなど
- サスペンションの伝達関数が超重要
確定するまでフィルタの設計はするな
- pickleとのつき合わせはまだやってない
LIGOのパラメータで計算をしてみて、pickleと同じ
結果になるか確かめることはできる

まとめ

- ASCで何をやればよいのかわかってきた
- iLCGTのパラメータでASCの設計とその評価を行った
- pitchの共振周波数が高く、ショットノイズで鏡を揺らし
れしまう問題が見つかった
- ハイパワーにすると現状のg-factorでは厳しいかもしれ
ないことがわかった

- 次はbLCGTの計算
- aLIGO ASCのその先へ