

iLCGT ASC現状報告

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

何をやっているのか

- Optickleを使って干渉計をシミュレート
 - 各鏡の角度を振るとどこにどれくらい信号が出るか
- その結果とサスペンション伝達関数をもとに制御ループを設計
- 地面振動とショットノイズから残留角度揺れを計算
- DARMにどれだけカップルするか評価

- Lisa Barsotti, Matt Evans: *Modeling of Alignment Sensing and Control for Advanced LIGO*, LIGO-T0900511-v4 (2009)
の計算をiLCGTパラメータで行った

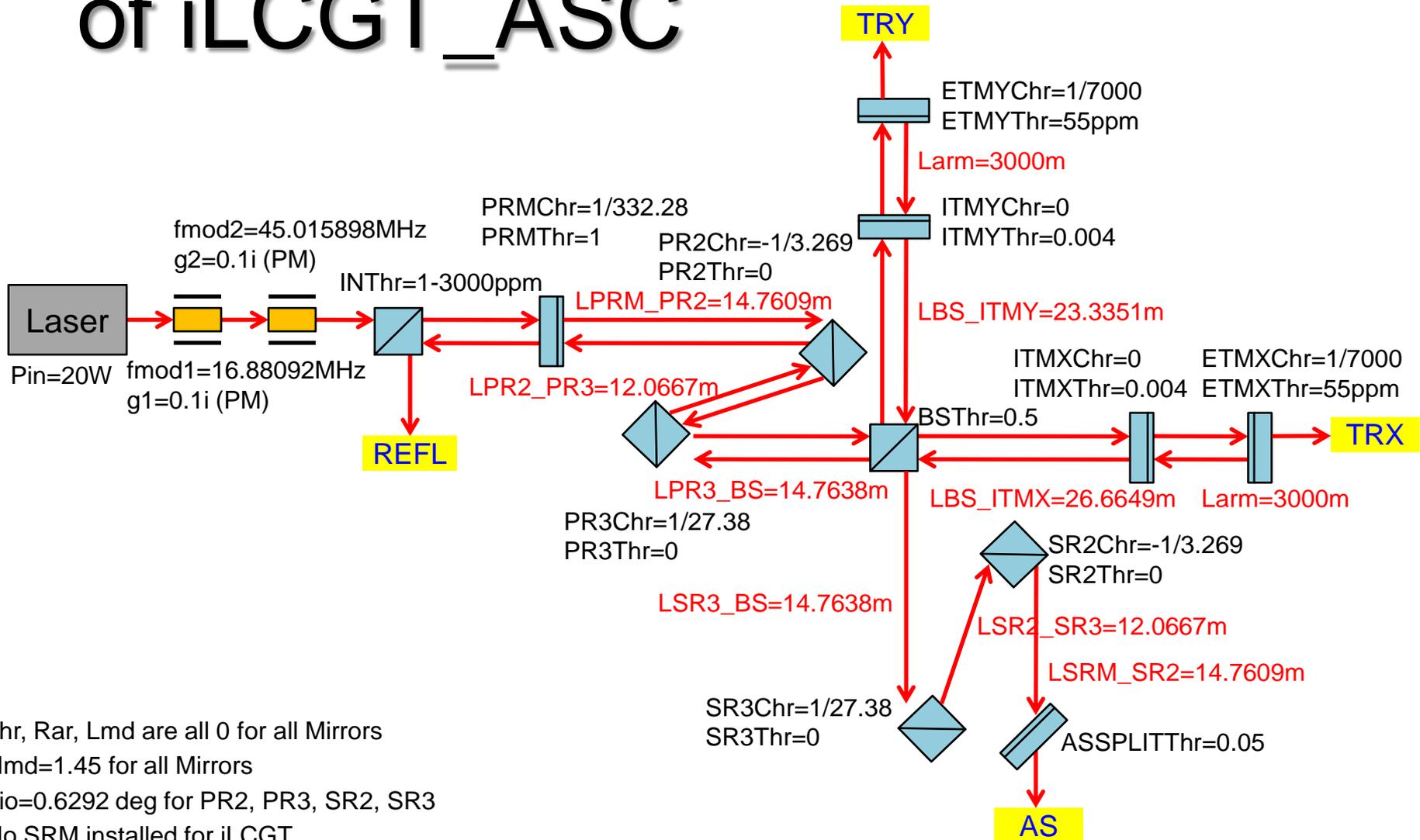
iLCGT ASC 現状

- これまでとの違い
 - RCの折り返しを入れた
(PR2, PR3, BSを考慮に入れた)
 - RFのWFSだけでなく、DCも行う
 - RFだけではcavityが揺れたのか入射光が揺れたのか
区別できない
- パラメータはWikiの2011-04-19 17:43:58版を使用
- 制御雑音の計算を試してみた
 - ノイズは鏡の地面振動と
 - QPDのショットノイズを考慮
 - iLCGTのサスペンション伝達関数を使用

ASCでやること

- 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

Optickle Model of iLCGT_ASC



Lhr, Rar, Lmd are all 0 for all Mirrors

Nmd=1.45 for all Mirrors

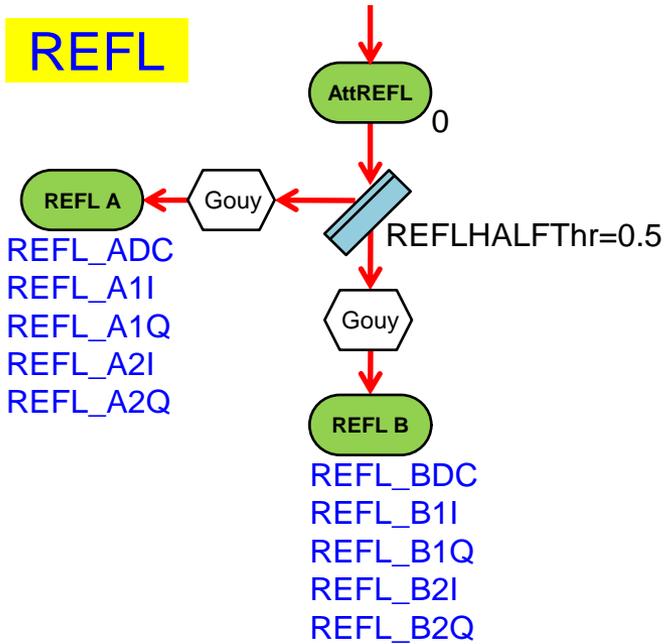
aio=0.6292 deg for PR2, PR3, SR2, SR3

No SRM installed for iLCGT

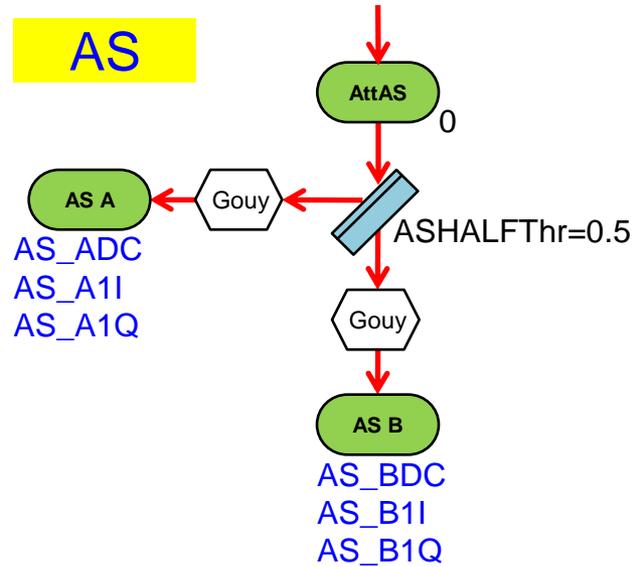
Lengths not specified are all 0

Sensing Ports

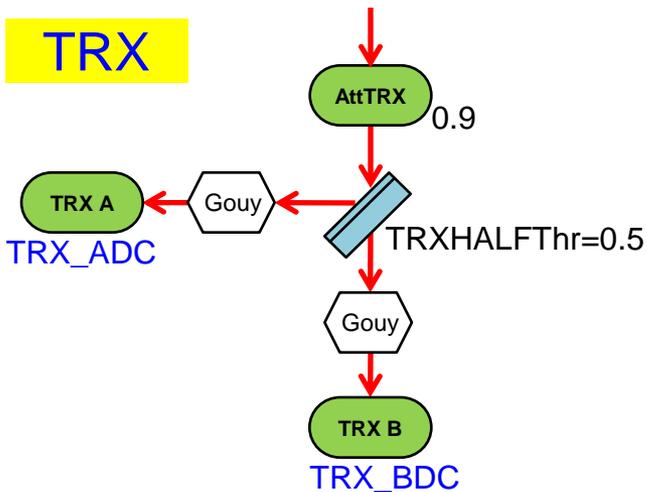
REFL



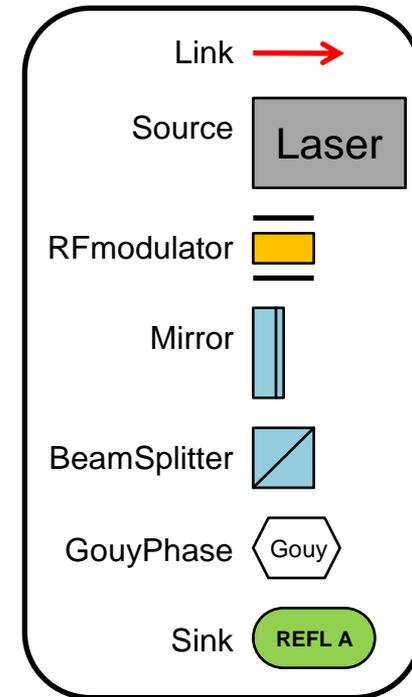
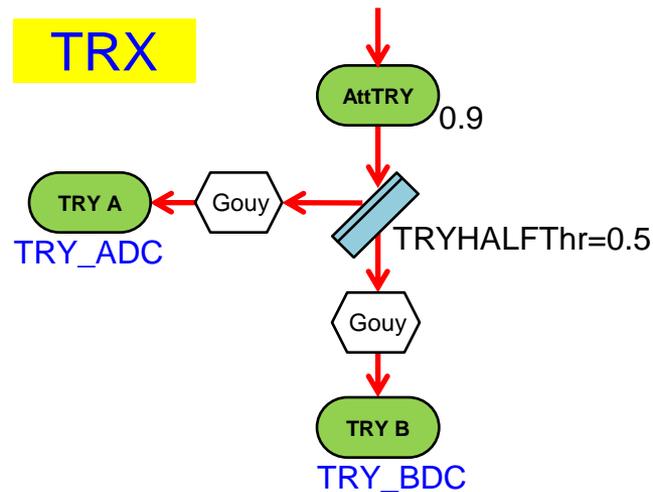
AS



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

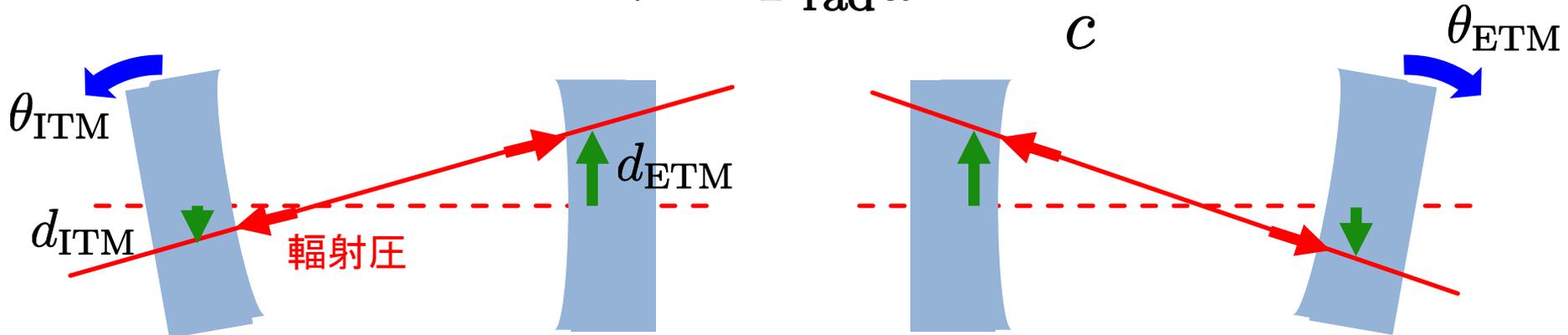
→CS, CH, DS, DH, BS, PR3, PR2の7自由度

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 $\tau = F_{\text{rad}}d = \frac{2Pd}{c}$



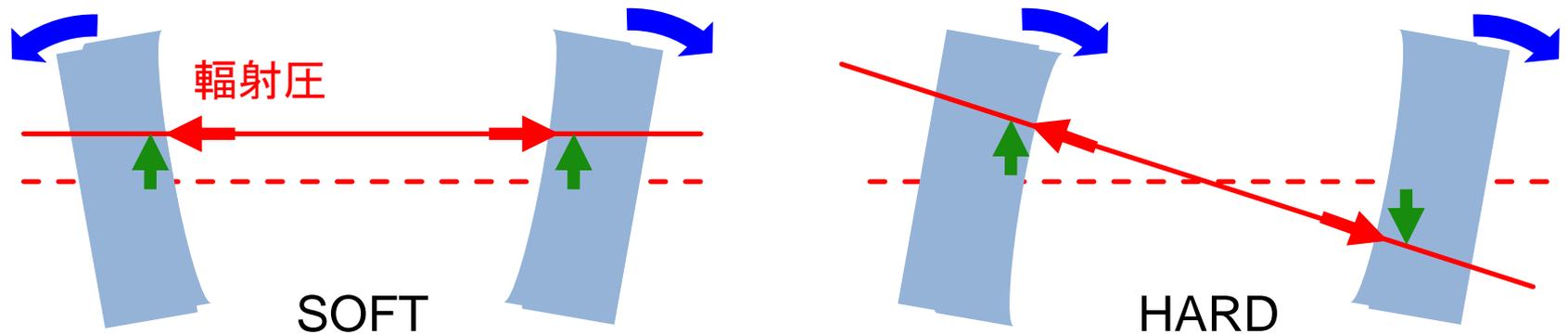
$$\begin{pmatrix} d_{\text{ETM}} \\ d_{\text{ITM}} \end{pmatrix} = \frac{L}{1 - g_{\text{E}}g_{\text{I}}} \begin{pmatrix} g_{\text{E}} & 1 \\ 1 & g_{\text{I}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_{\text{ETM}} \\ \theta_{\text{ITM}} \end{pmatrix}$$

$$g_i = 1 - L/R_i$$

- 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

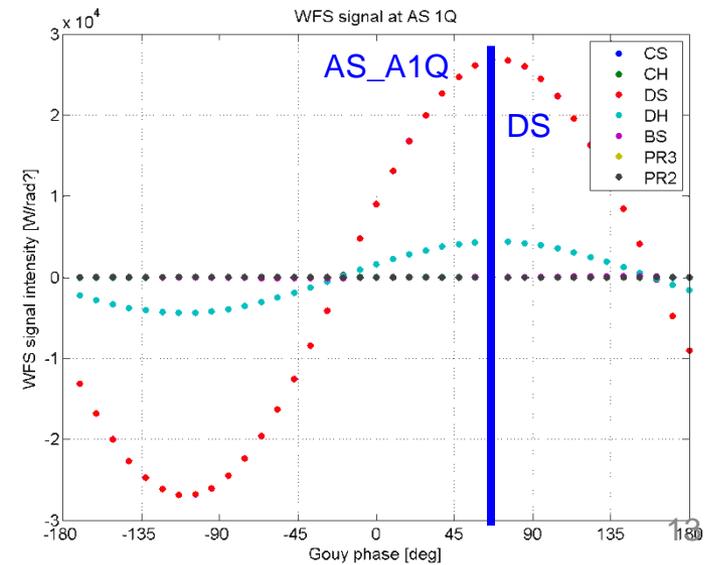
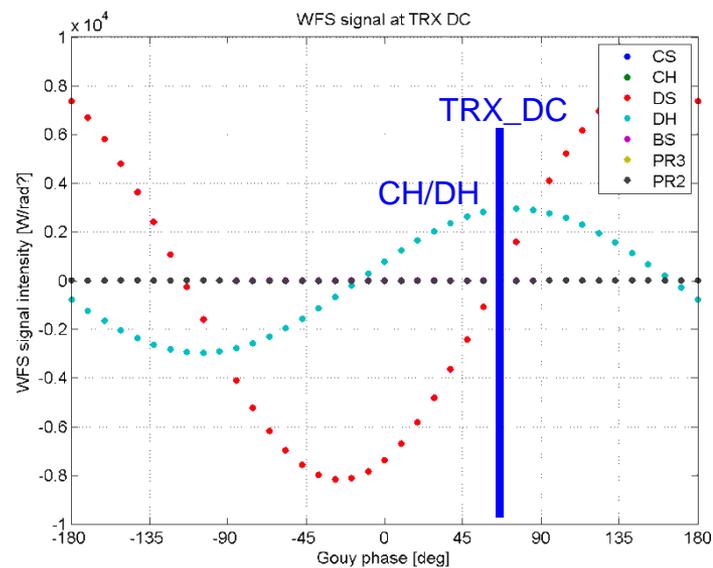
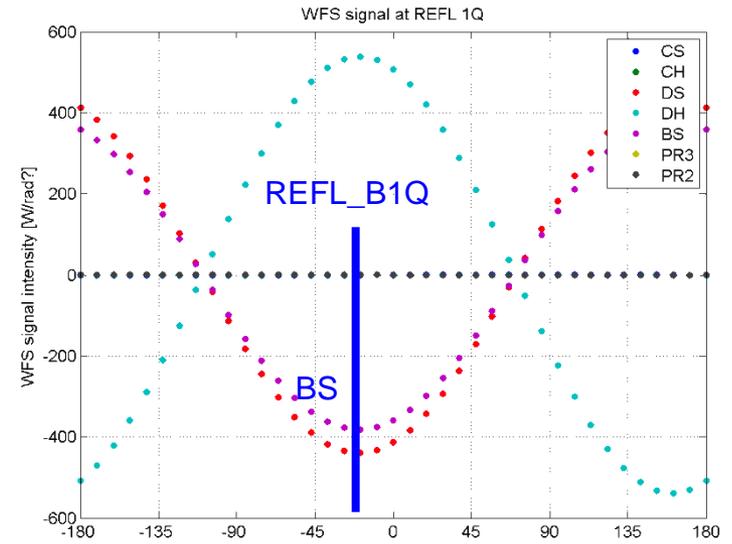
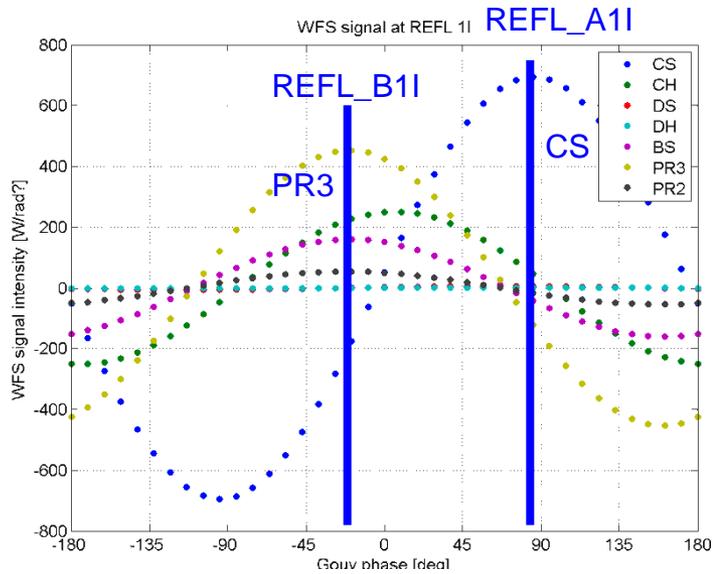
	CS	CH	DS	DH	BS	PR3	PR2
Gouy	-25.5	74.8	-25.5	74.8	-0.3	-0.6	-2.2
ampl	11536.1	4176.3	11536.1	4176.3	-8.3	-11.7	-1.4

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)

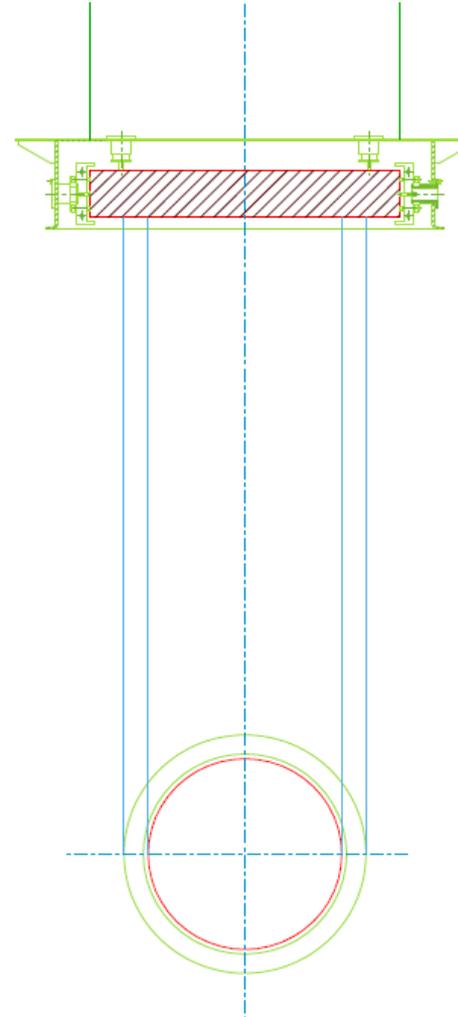
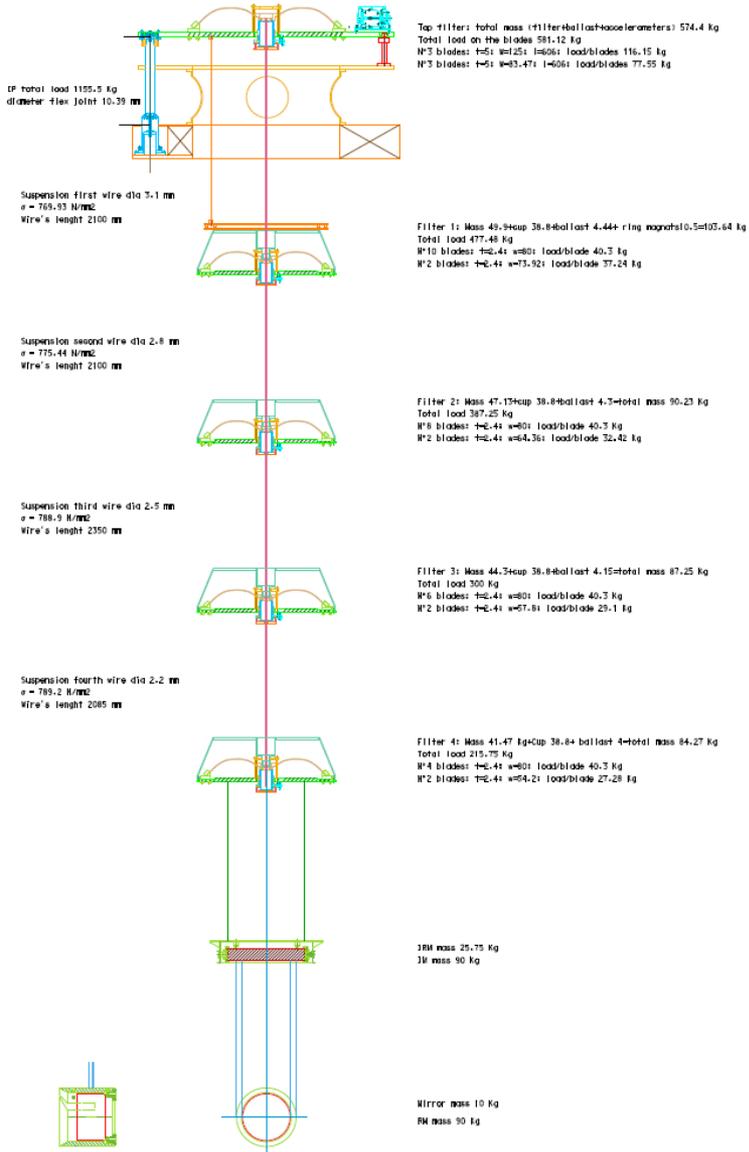
	CS	CH	DS	DH	BS	PR3	PR2
REFL_A1I	693.4	44.8	5.7	0.9	-43.3	-124.6	-16.3
TRX_ADC	7.5	2905.9	7.5	2905.9	0.0	-3.5	-0.4
AS_A1Q	-0.0	-0.1	26902.6	4372.3	36.3	-8.9	-1.1
TRY_ADC	7.5	2905.9	-7.5	-2905.9	-2.5	-3.5	-0.4
REFL_B1Q	-0.1	0.1	-439.2	538.5	-381.1	0.1	0.0
REFL_B1I	-191.0	225.1	0.4	-0.1	160.2	452.8	53.7

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

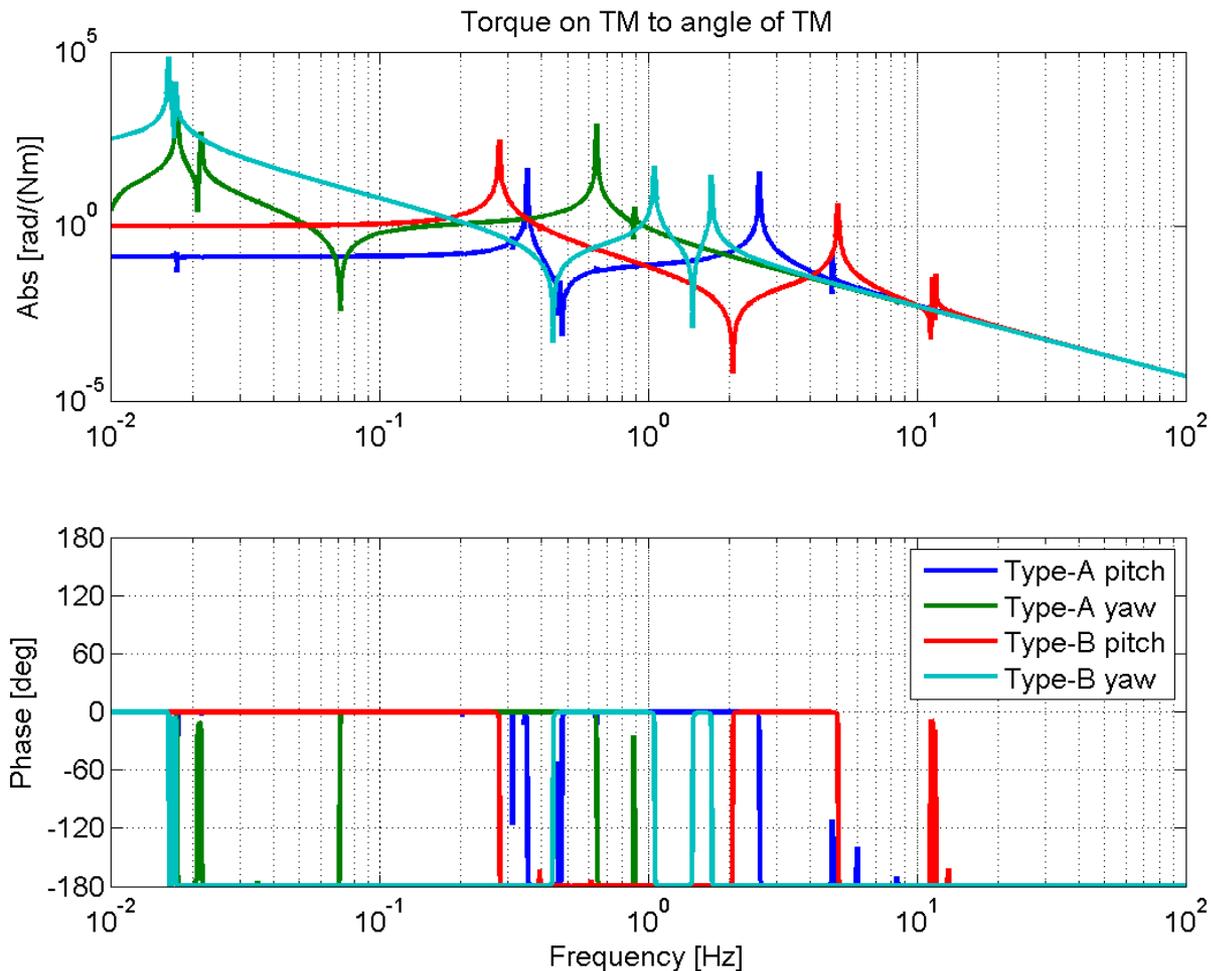


IRM mass 25.75 Kg
IM mass 90 Kg

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)

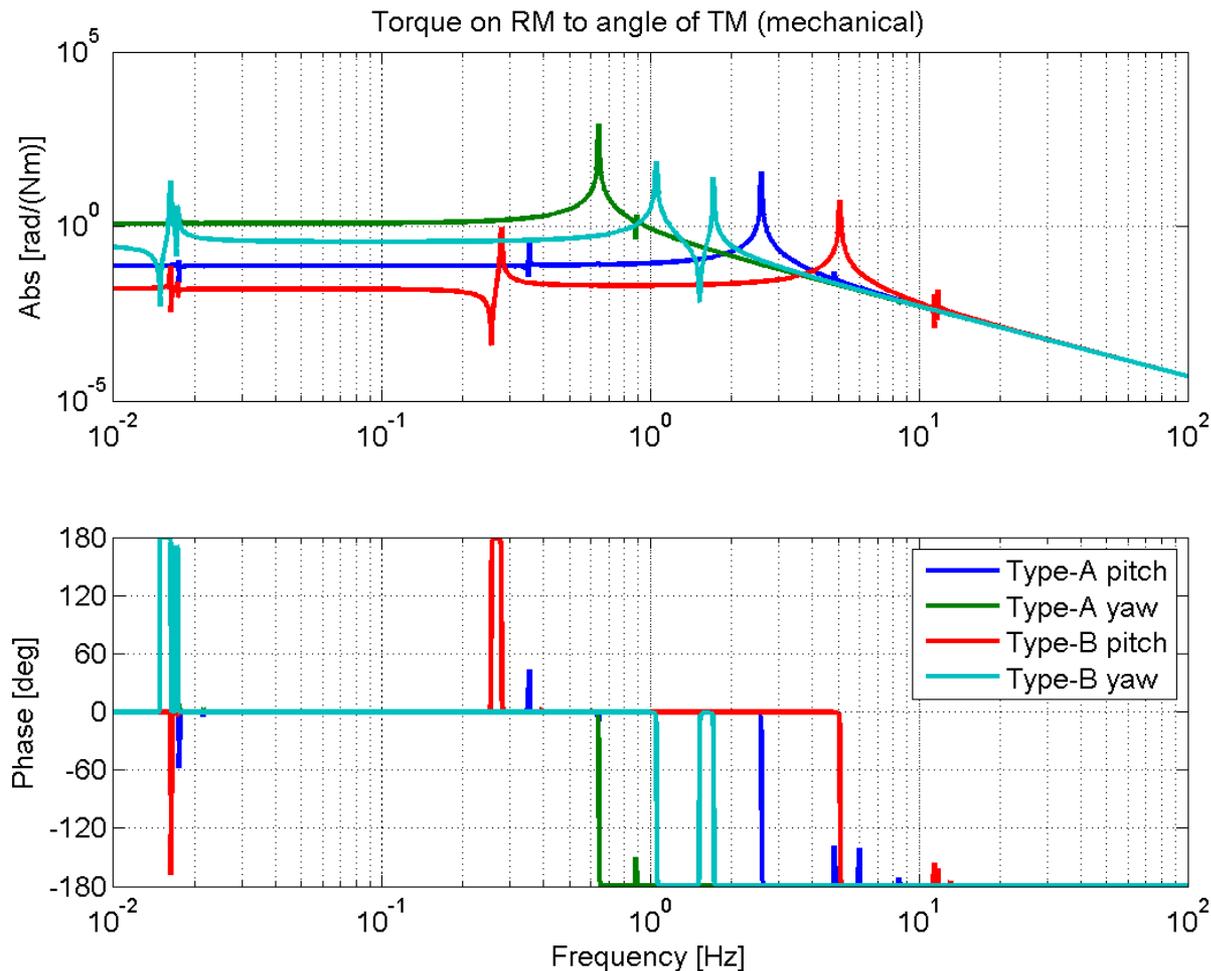


関口くん提供
(2011/5/1)

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

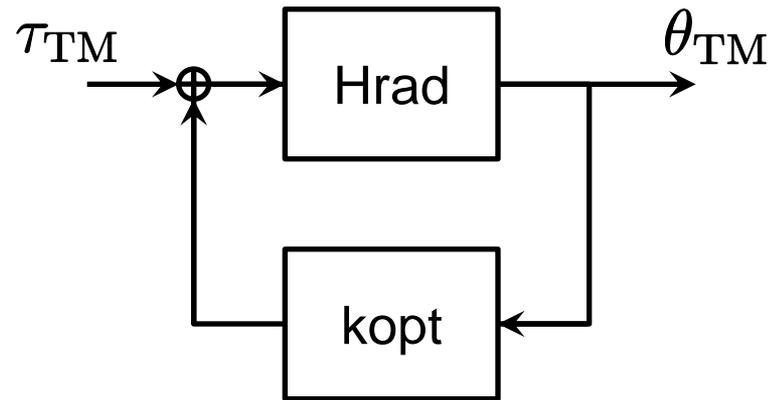
- 輻射圧がないとき鏡に加えたトルクから角度の伝達関数

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

- 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

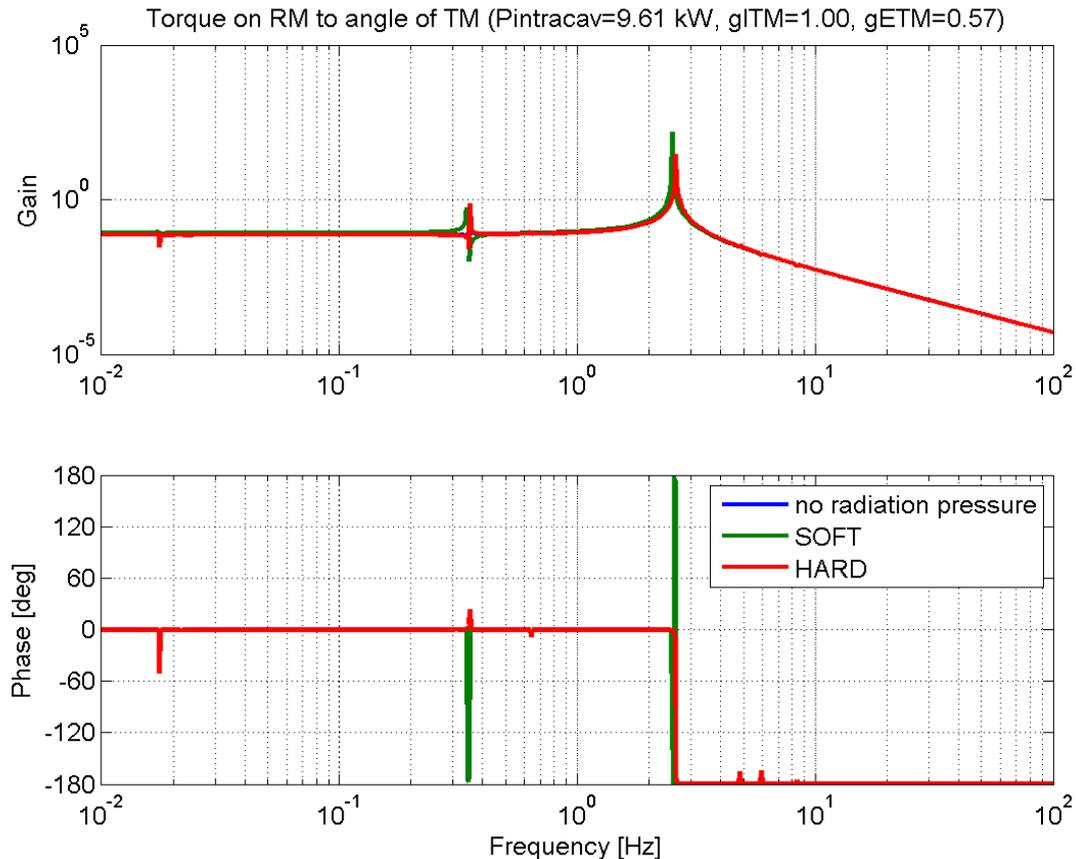
- 実際にはリコイルマスでトルクをかけるので

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

↑ この系をWFSやOpLevで制御する

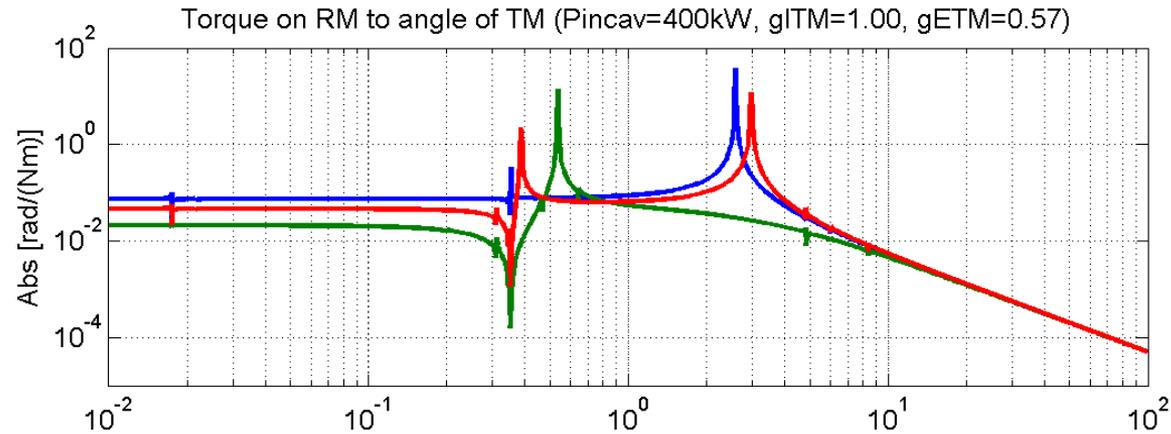
Opto-mechanical TF

- 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

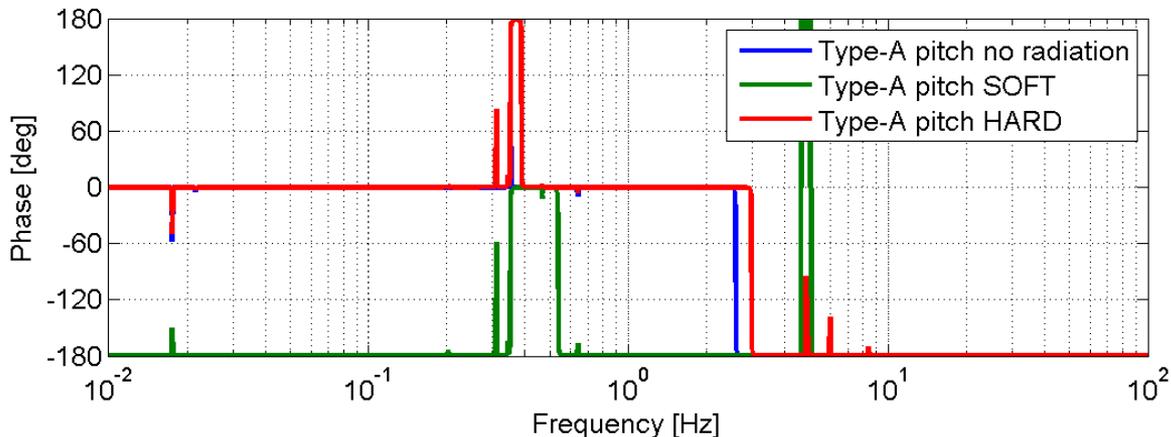


ちなみに

- 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



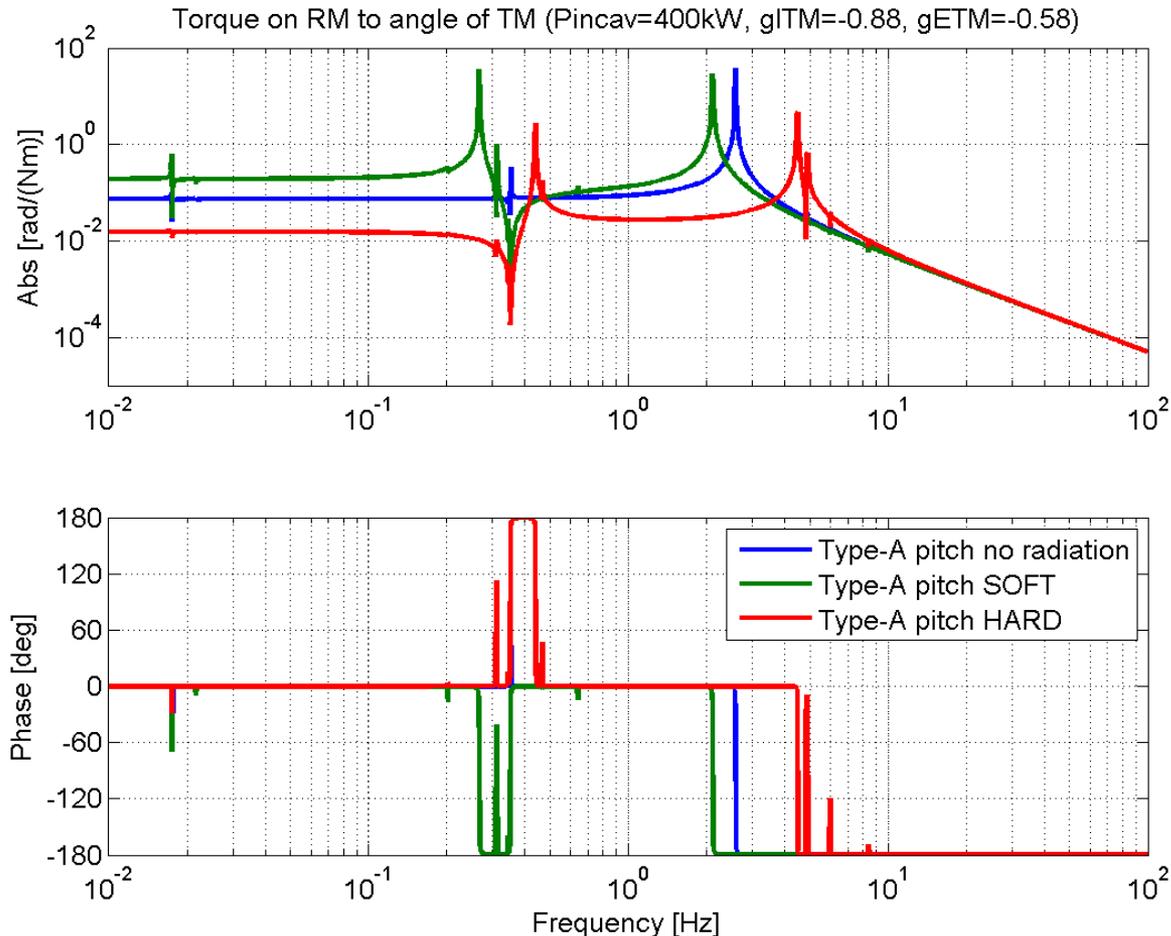
SOFTモードはunstable



SOFTの共振周波数は
5 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

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

角度制御系の設計

- ノイズは地面振動とセンサーのショットノイズを考える
- 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

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

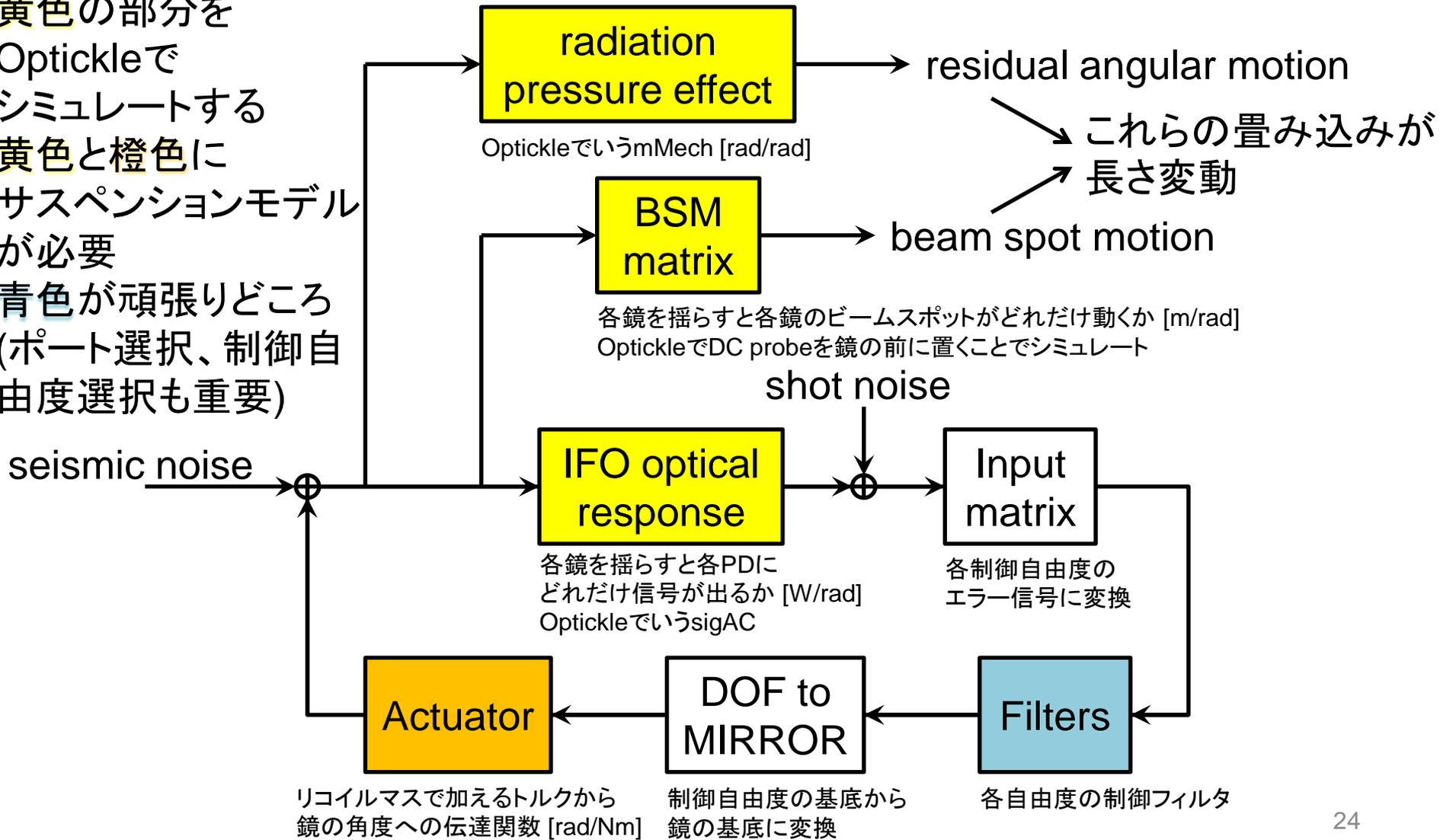
BSMよりもビームが鏡の中心にいないことの方が大きいかもしれない。iLIGOでは $1e-4$ mくらいビームセンタリングはできたらしい。

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

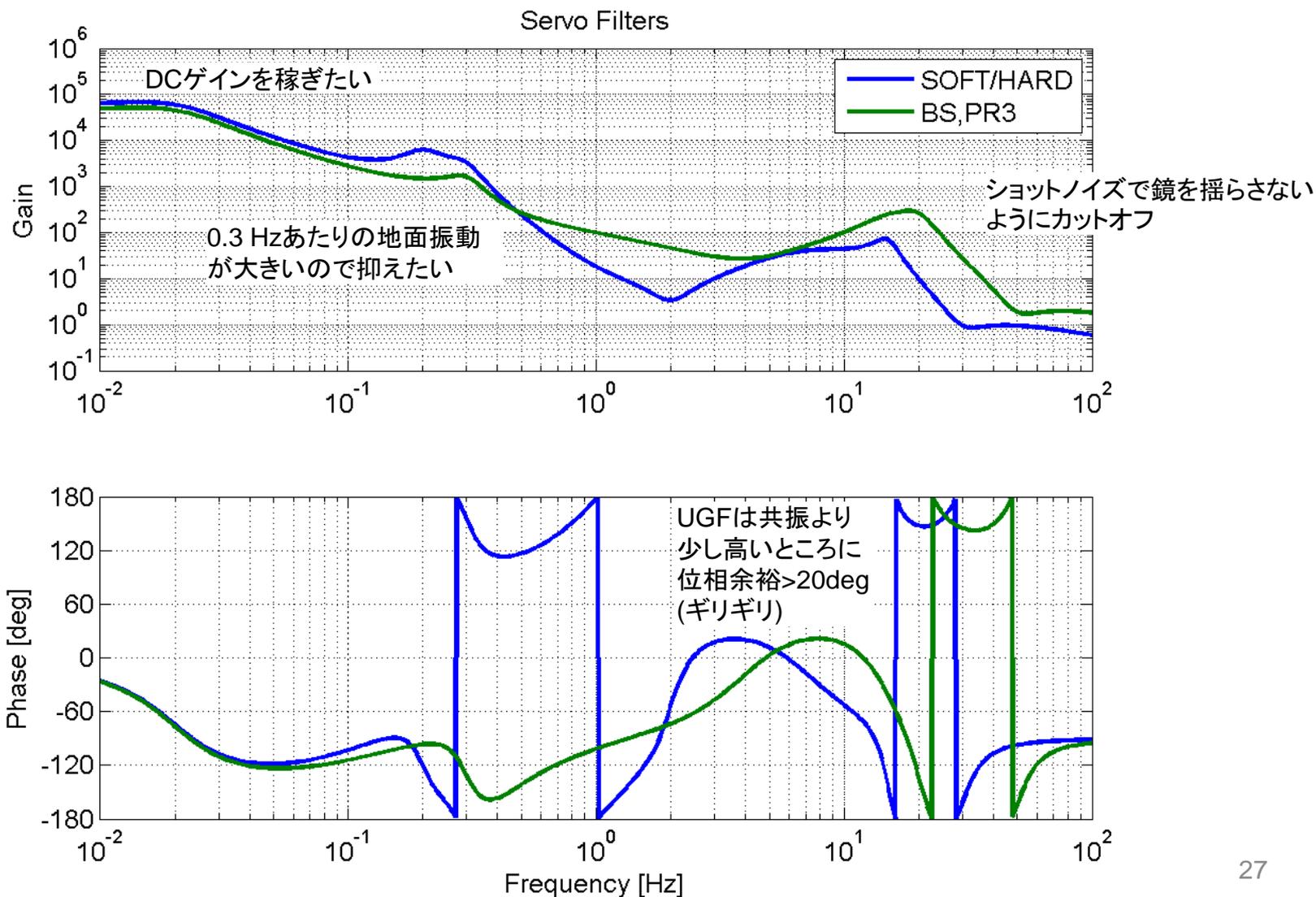
で、二乗して左右(上下)の差をとるので $U_1^* U_0^* U_0 U_0$ の積分が必要

- 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

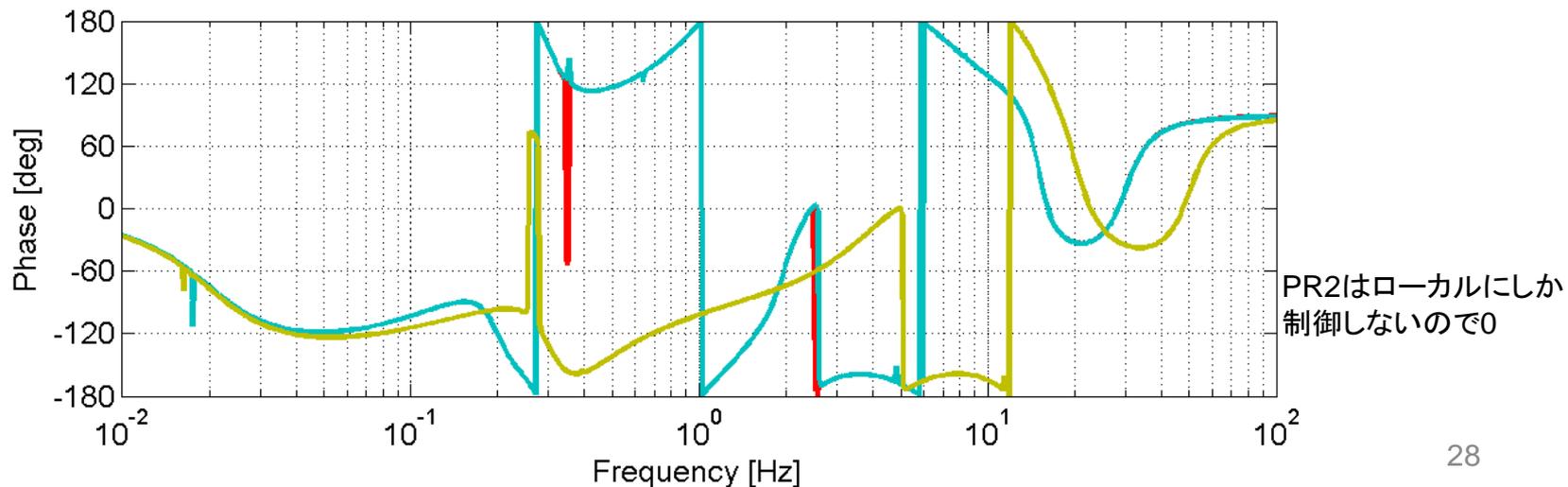
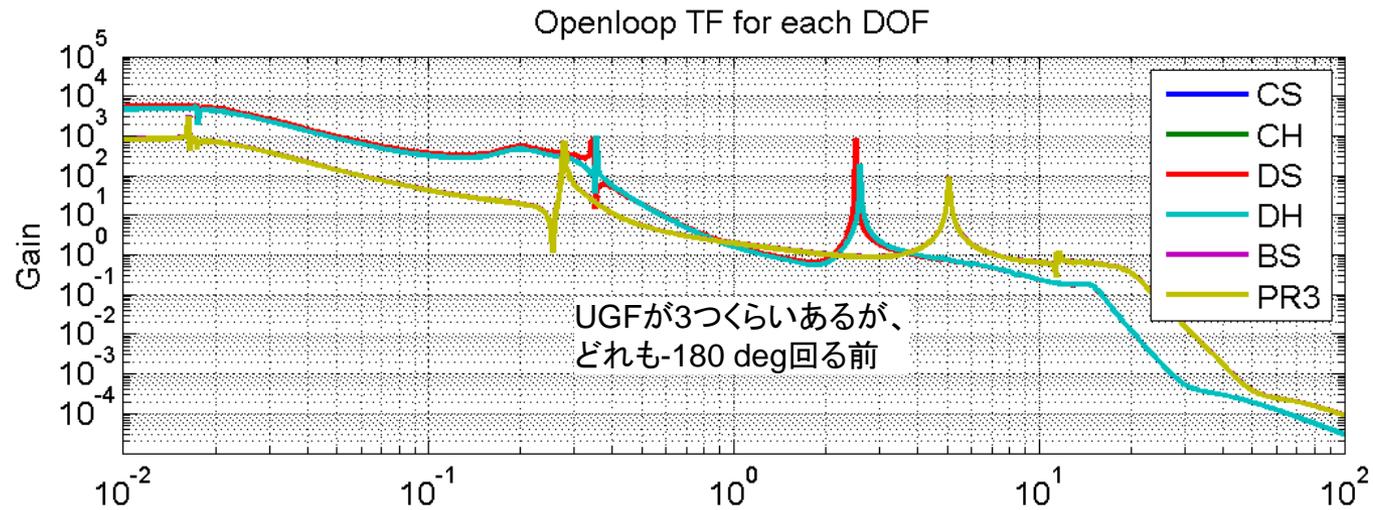
$$\delta x = w \frac{P_{\text{BSM}}}{2\sqrt{2/\pi}P} \text{ だが、 } \delta x = w \frac{P_{\text{BSM}}^{\text{sigAC}}}{2P_{\text{sigDC}}} \text{ で。}$$

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もいらない。(tickle01.mを正しく戻す方がよいが)

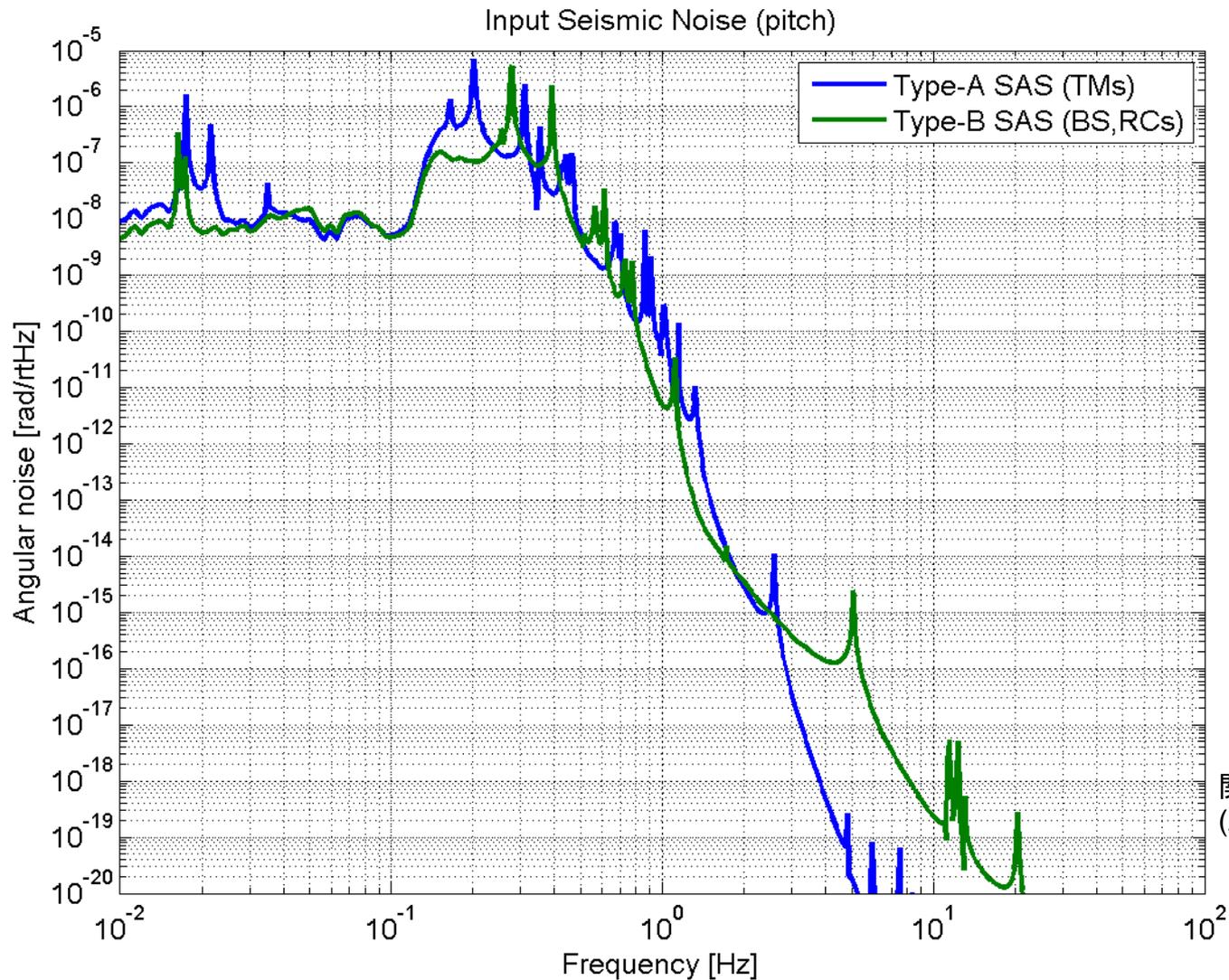
制御フィルタの設計



オープンループ伝達関数

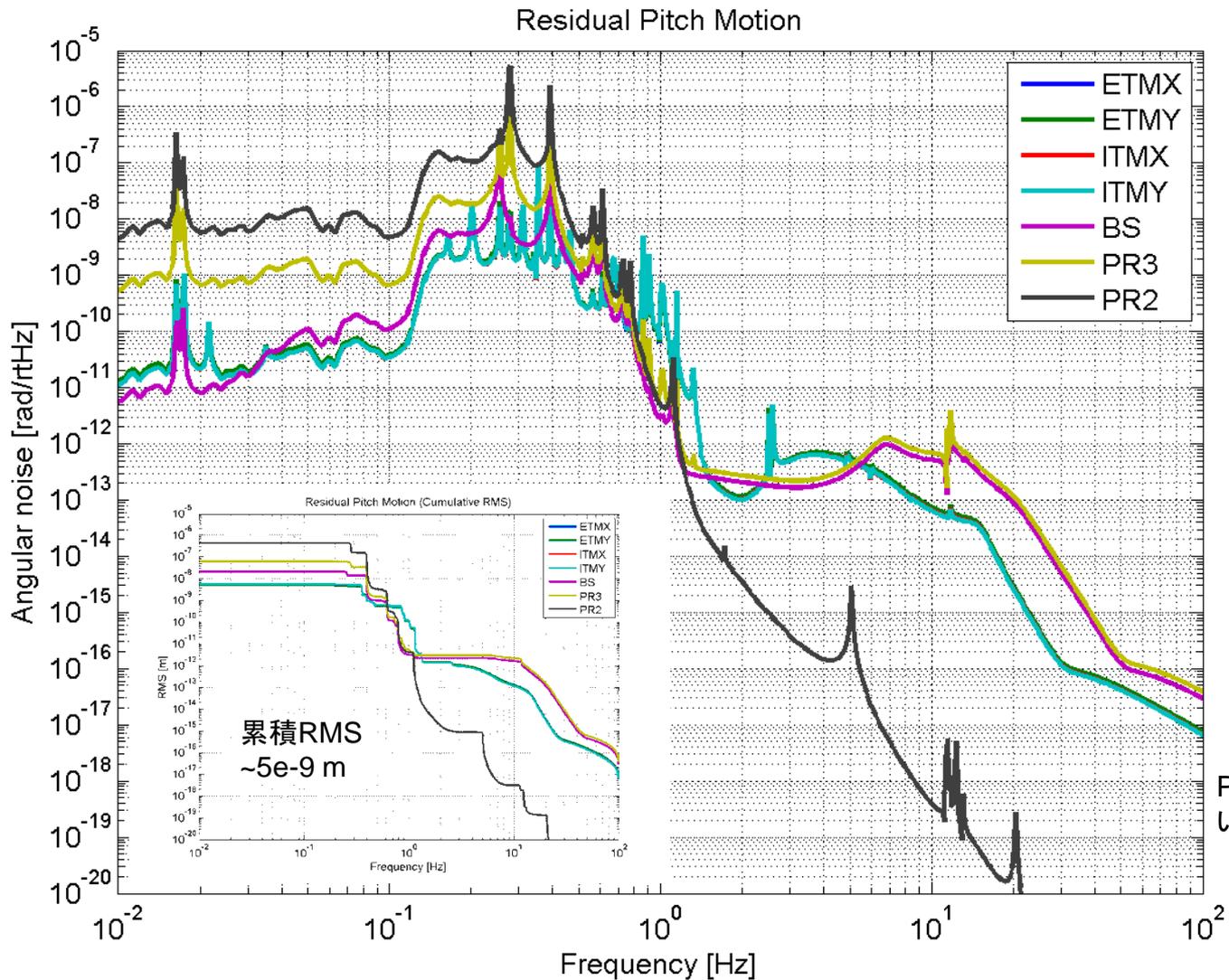


地面振動による角度揺れ



関口くん提供
(2011/5/1)

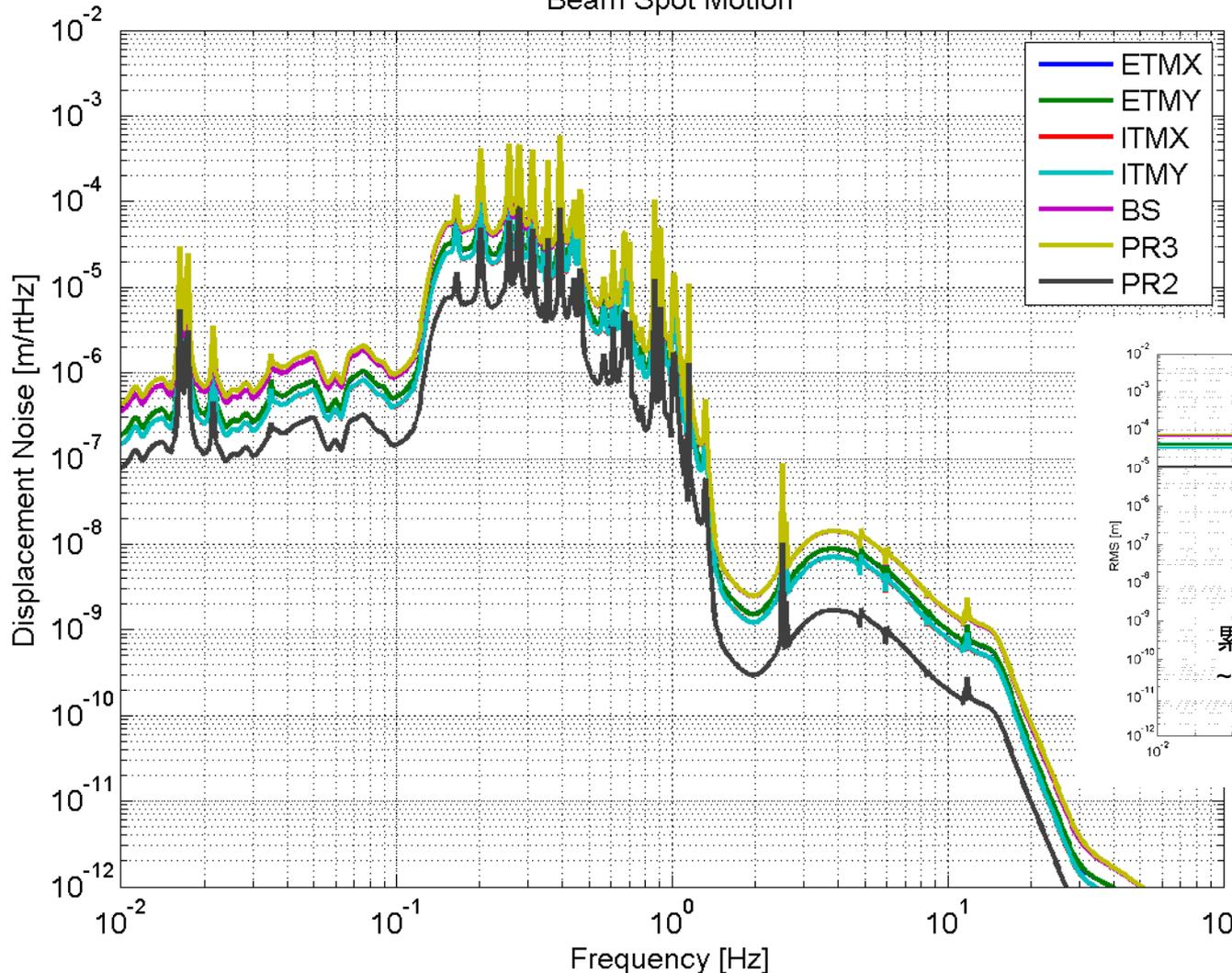
残留角度揺れ



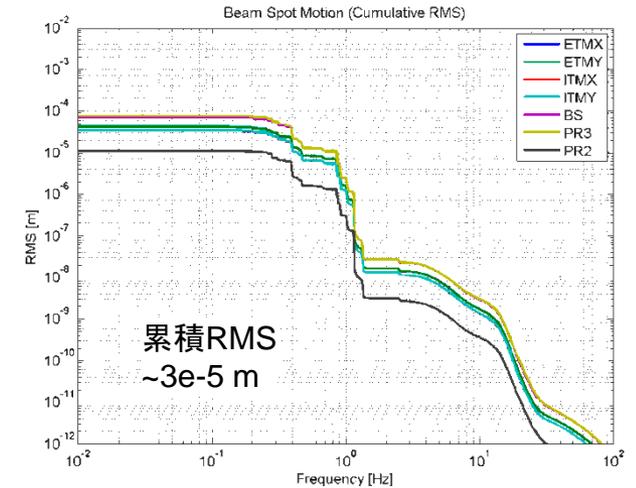
PR2の制御はしていないので変わらない

ビームスポットの動き

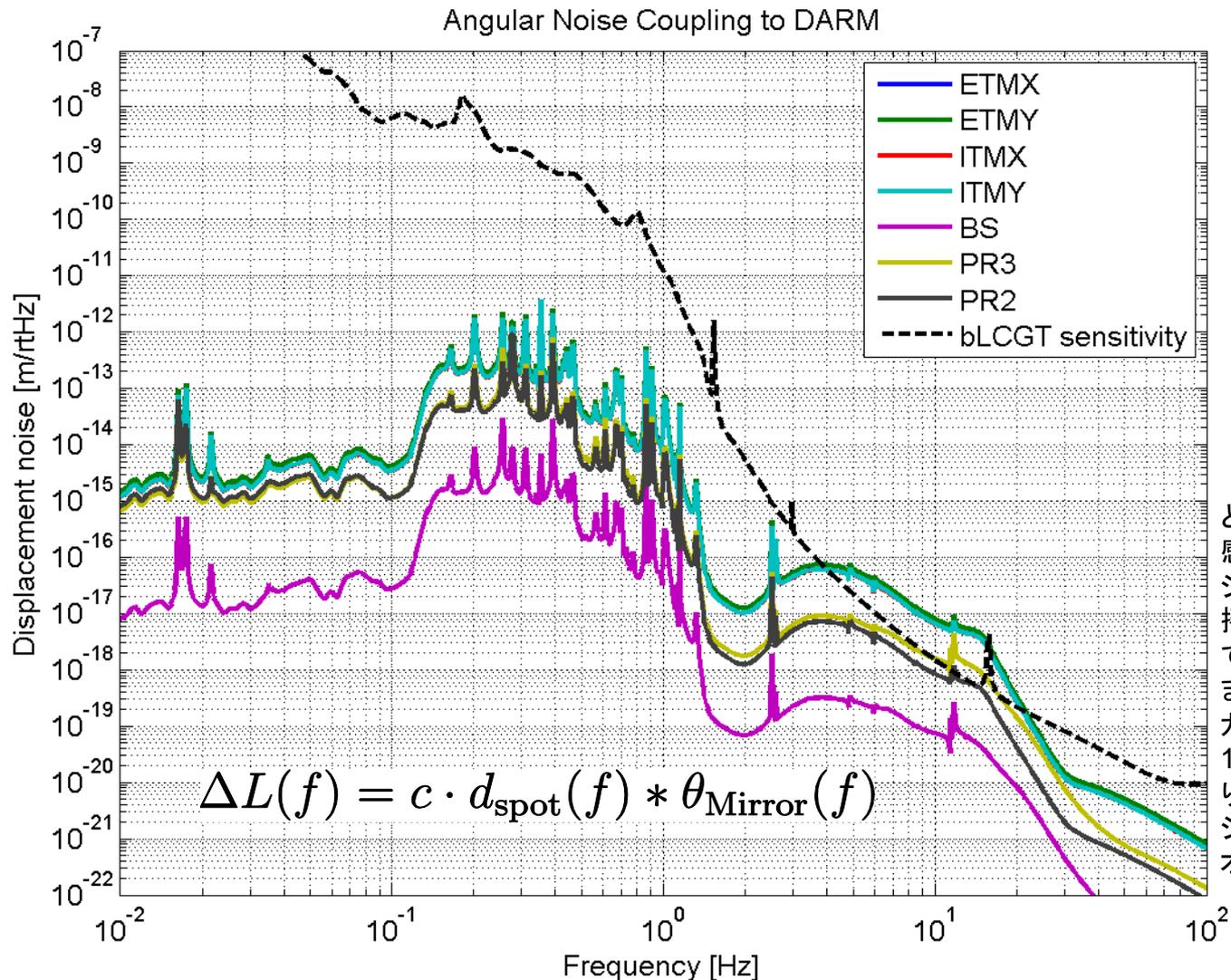
Beam Spot Motion



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。

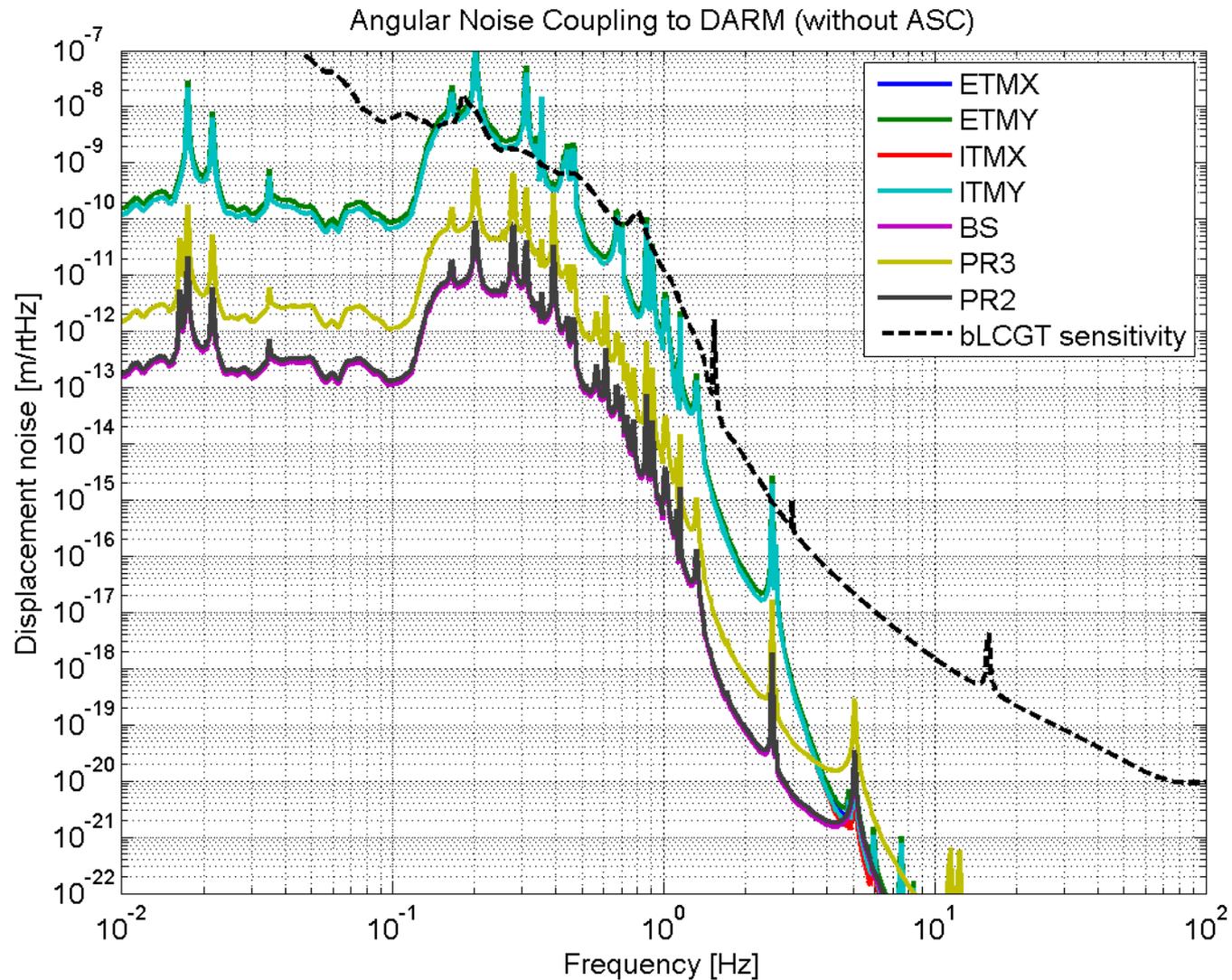


DARMへのカップリング



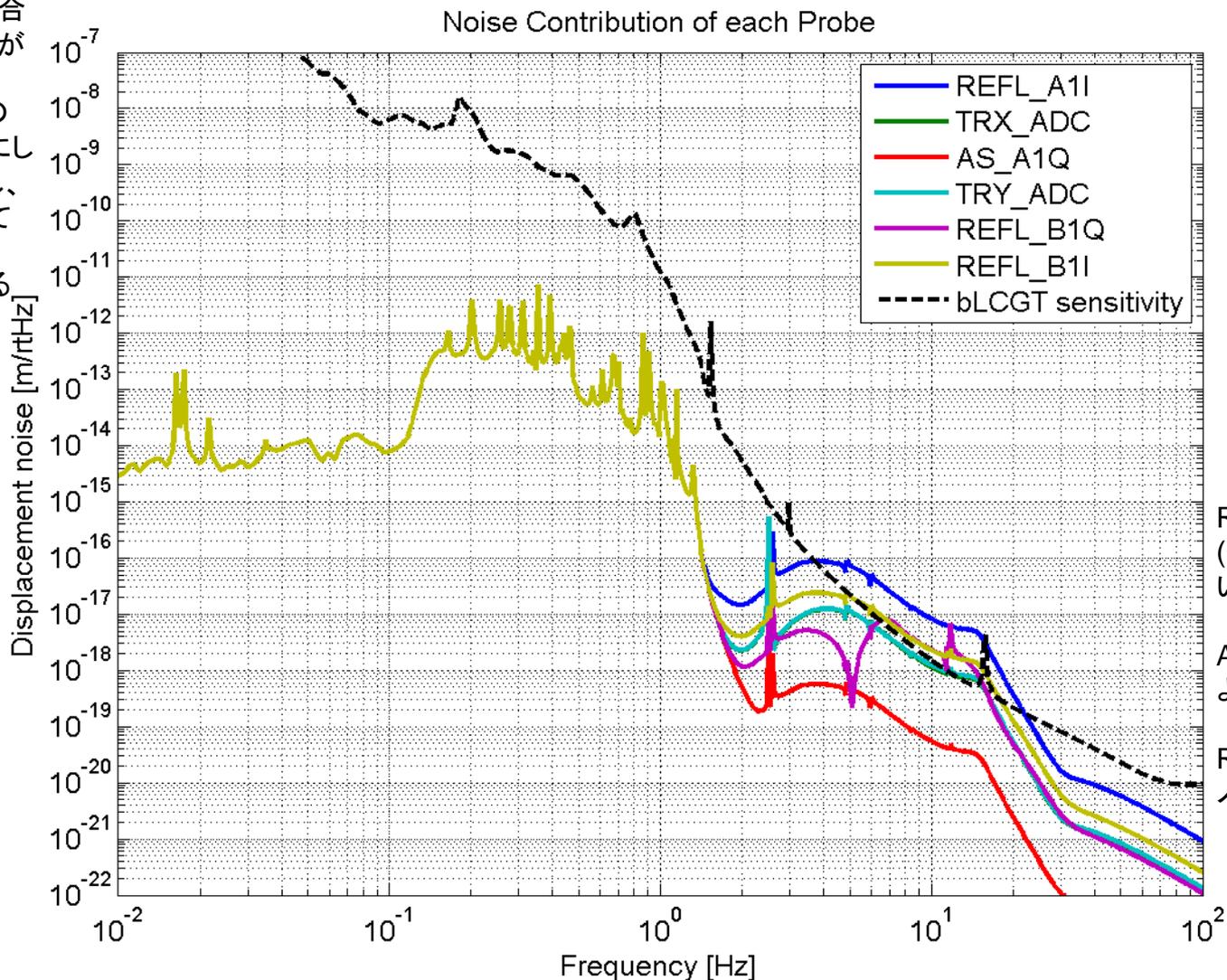
とりあえずbLCGTの感度を使った
ショットノイズが鏡を揺らし、10 Hz周辺でDARMを汚してしまっている
カットオフ周波数が15 Hzなのでそれより高い周波数ではショットノイズがカットオフされている

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



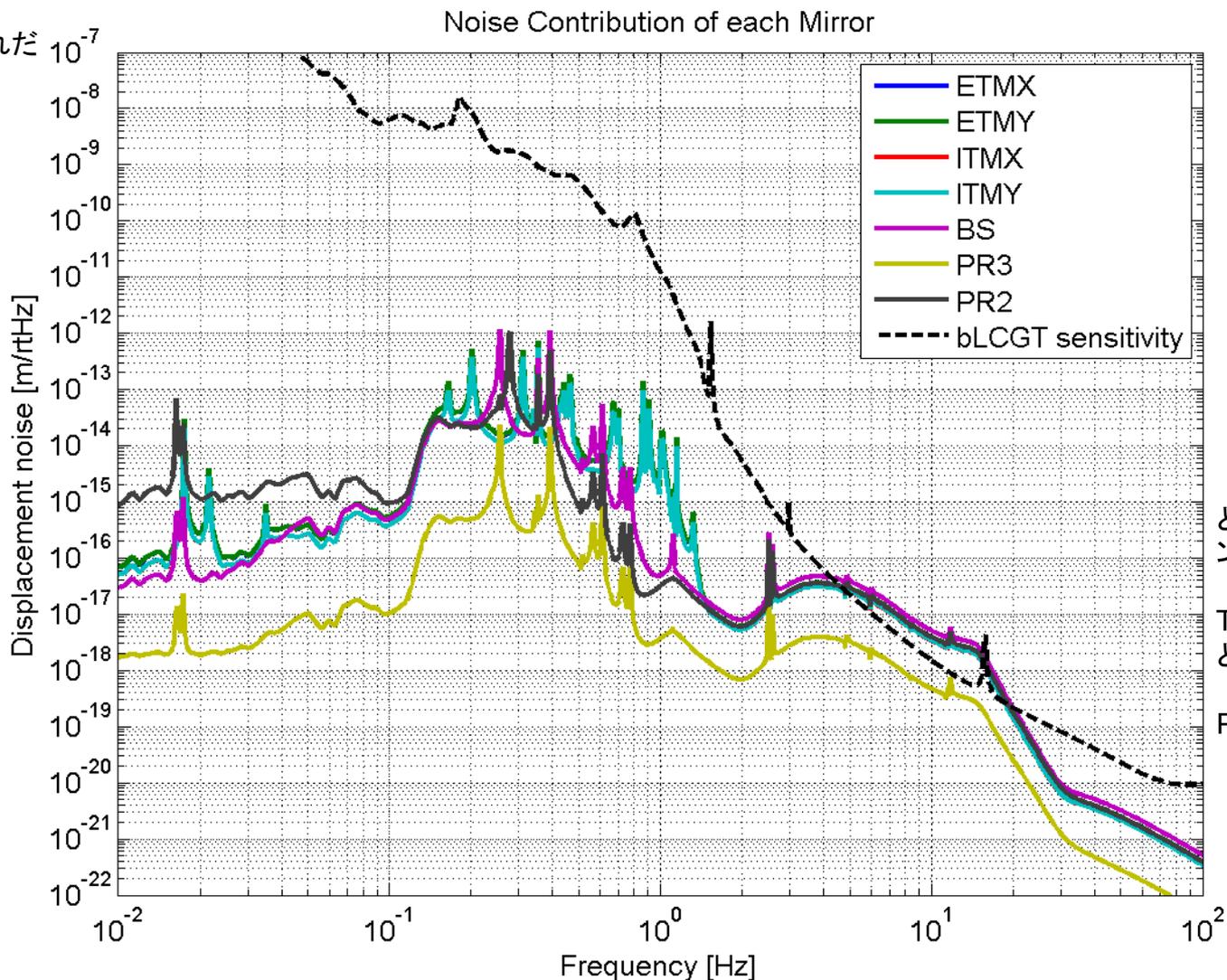
REFL が悪いらしい
(信号が他に比べて小さい、混ざってるため)

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？

まとめなど

- 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
- とはいえ共振周波数(pitch)
Type-A 2.6 Hz
Type-B 5.1 Hz
はきつい。カットオフ周波数が10Hzより大きくなって
しまい、ショットノイズで鏡を揺らしてしまう
- サスペンションの伝達関数が超重要
制御ループは全てこれに依存する
- pickleとのつき合わせはまだやってない