

LCGT ASC現状報告

道村唯太

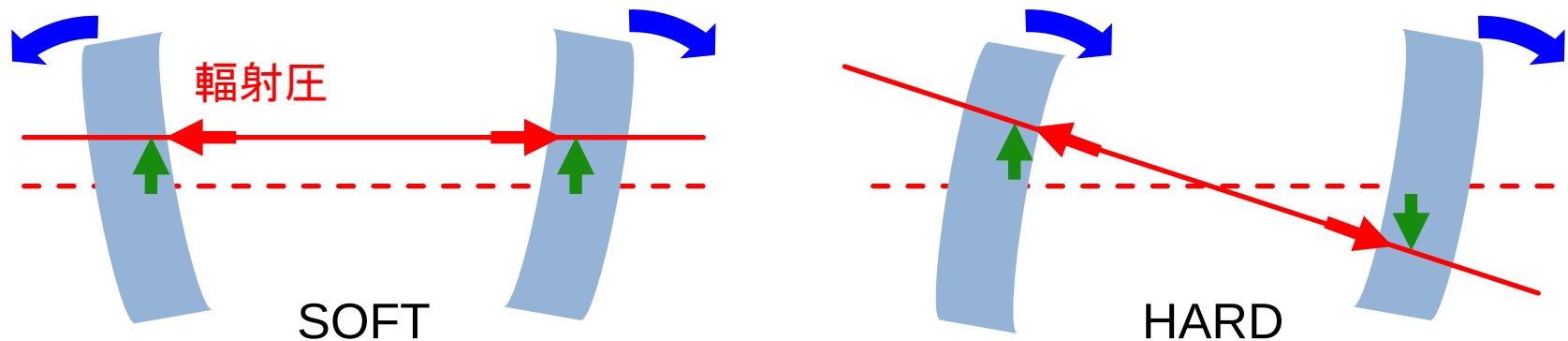
東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 坪野研究室 修士課程2年

なぜASCにsuspensionが重要か

- ASCで感度を汚さないようにするには、あまり制御帯域を広く持ちたくない。ショットノイズで鏡を揺らさないように、 $\sim 10\text{Hz}$ ではカットオフしていきたい。
- サスペンションの共振周波数が高すぎると、それができず、感度を汚してしまう。
- ASCの制御フィルタのデザインはサスペンション伝達関数ありき。サスペンション伝達関数があって初めて、どこにUGFを持ってくるか、どこにゲインが必要かなどが決まる。つまりノイズ特性もサスペンションで決まる。

なぜASCにg-factorが重要か

- ITM、ETMの共振周波数は輻射圧トルクによって2つに分裂する(SOFTモードとHARDモード)
- g-factor、曲率の組み合わせによってこの分裂の仕方が異なる
- 鏡の傾きで生じるビームスポットのずれが小さいほど、輻射圧の影響は小さい



輻射圧とサスペンション

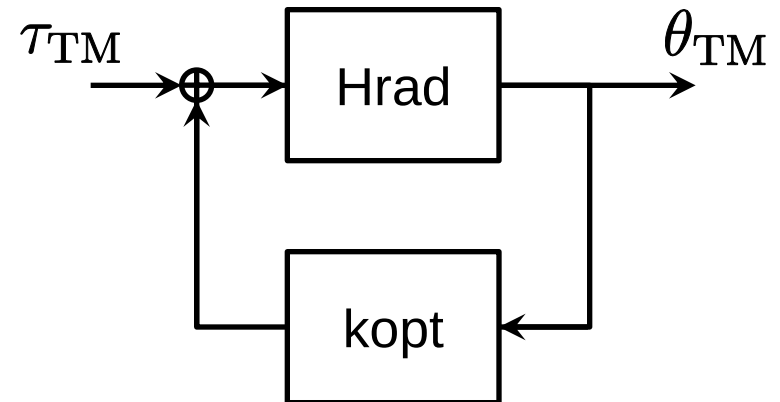
- 輻射圧がないとき鏡に加えたトルクから角度の伝達関数

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

- 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等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で制御するのがASC

輻射圧とサスペンション

- 簡単に単振り子だと思つと.....
- 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

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

g-factorで決まる

- k_{opt} が負なのがSOFT、正なのがHARD サスペンションで決まる
- 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

- 以下、iLCGTのサスペンションにbLCGTのパワーを入れたときの

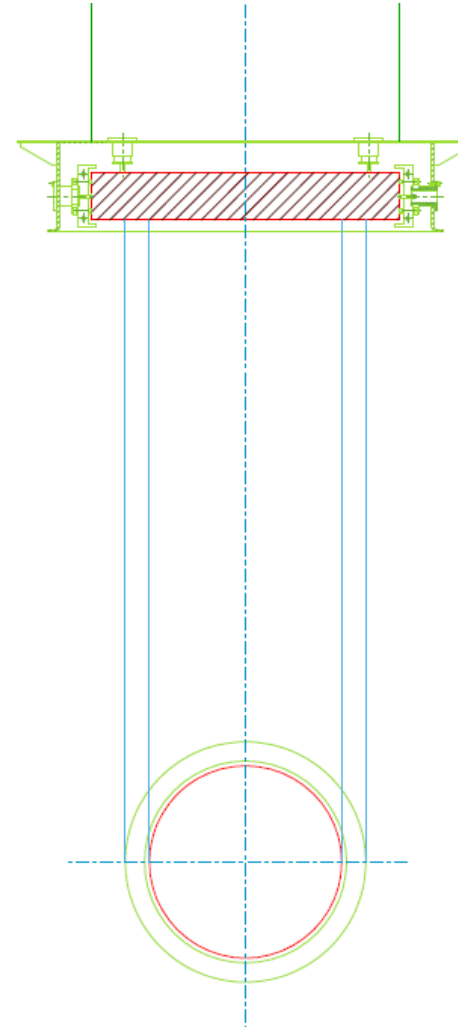
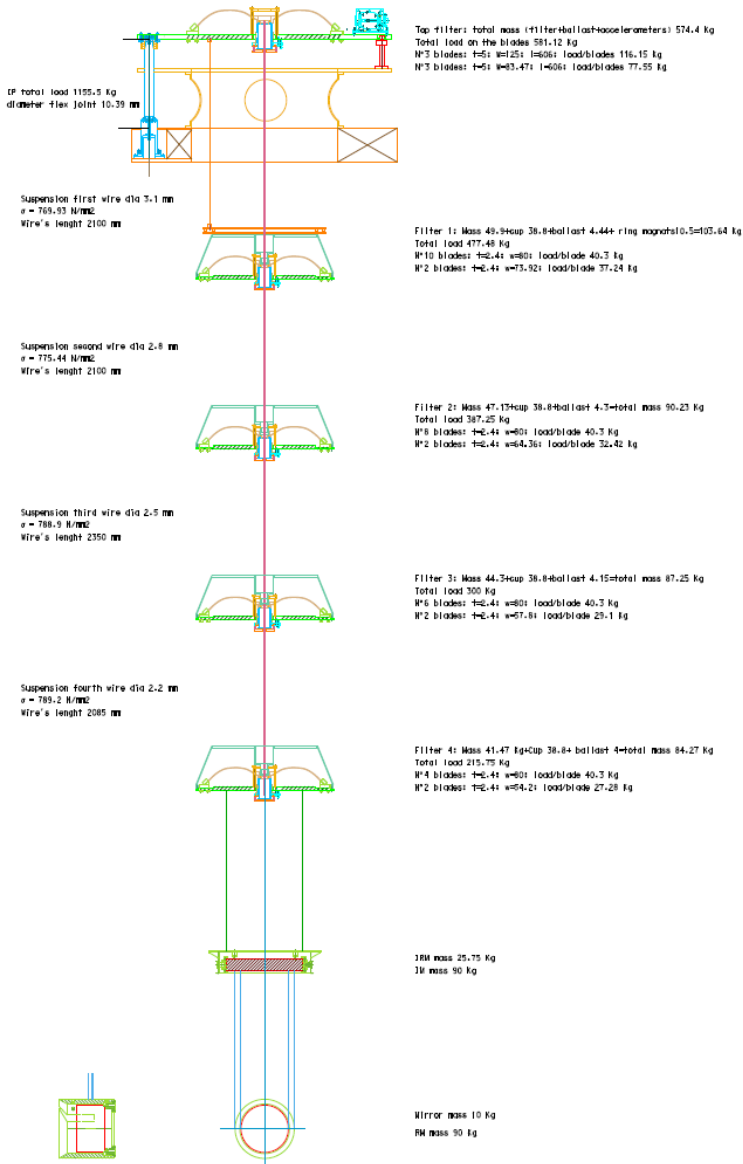
$$\frac{\theta_{\text{TM}}}{\tau_{\text{RM}}} = \frac{H_{\text{act}}}{1 + k_{\text{opt}} H_{\text{rad}}} \text{ を計算}$$

bLCGTサスペンションはパラメータ、デザインに不確定なところが多いため、とりあえずiLCGTサスペンションを計算に使う。

- bLCGTの腕内パワー: 400kW
- g-factorは以下の3パターンを計算
 - glTM= 1.00, gETM= 0.57(flat-7km)
 - glTM=-0.88, gETM=-0.58(1.6km-1.9km)
 - glTM=-0.58, gETM=-0.58 (1.9km-1.9km)
- 全てリコイルマスから制御をかけた場合
- サスペンション伝達関数は関口くんによるモデル計算(2011/5/13版)

iLCGT Suspension

FILTER'S CHAIN TYPE A
VERSION 1

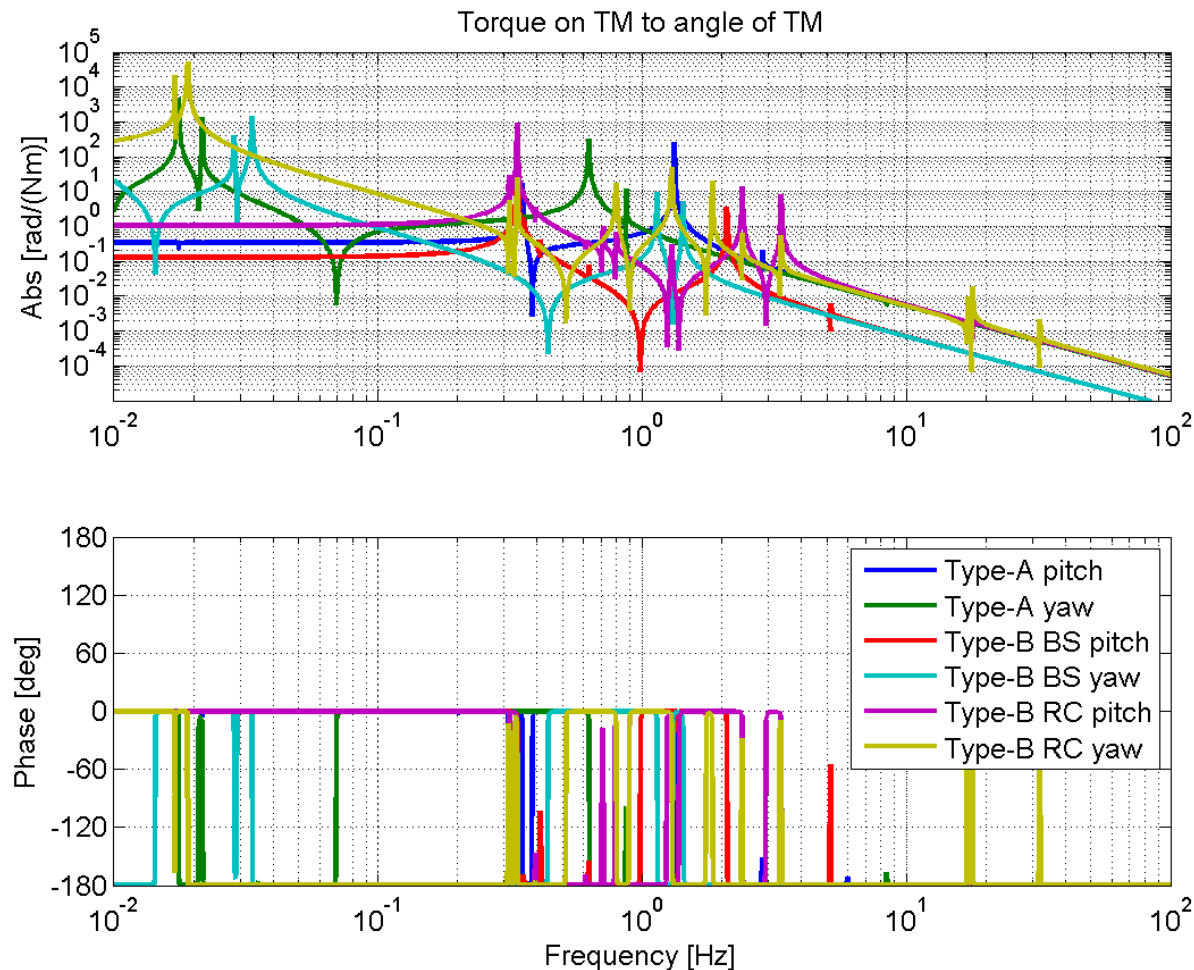


IRM mass 25.75 Kg
IM mass 90 Kg

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)

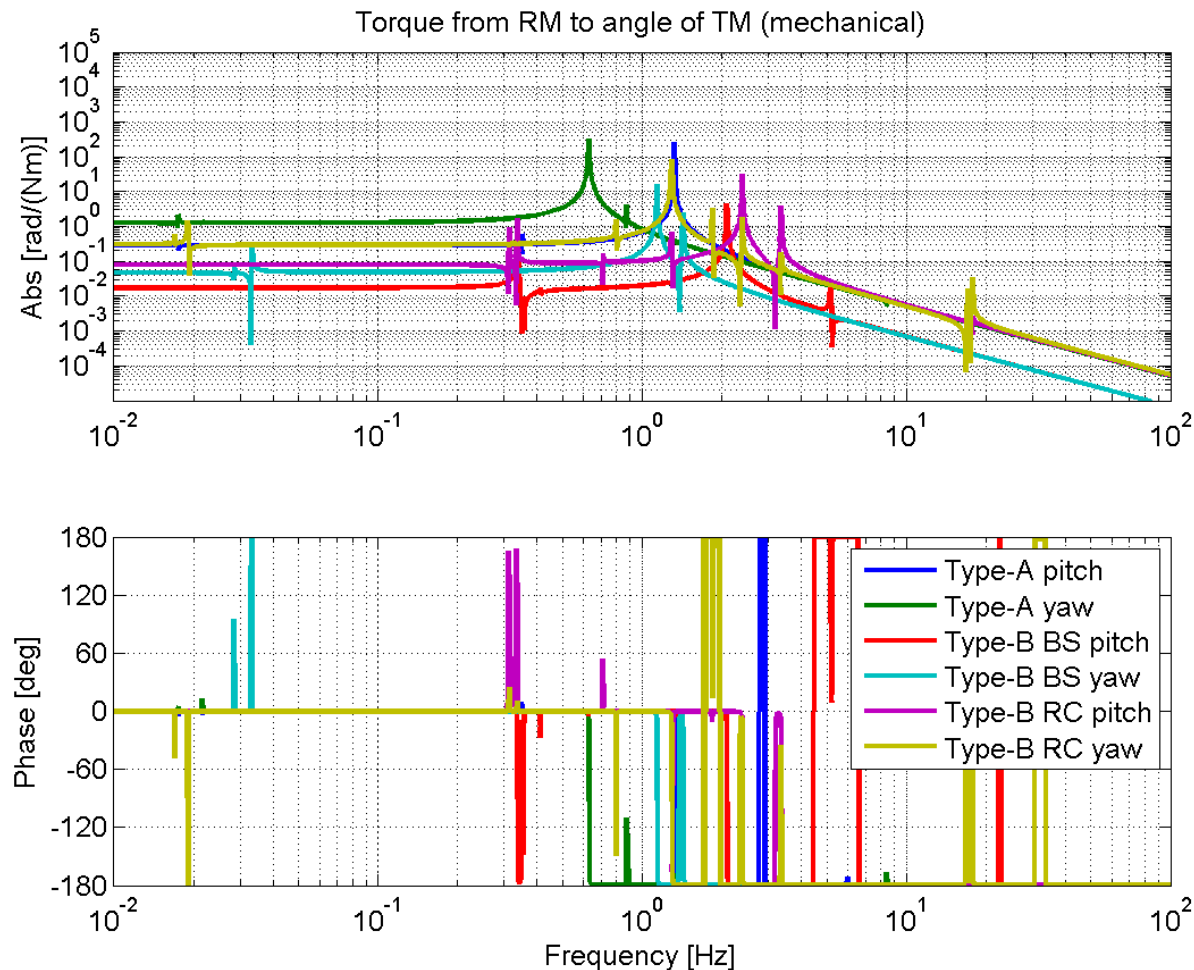


関口くん提供
(2011/5/13版)

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)



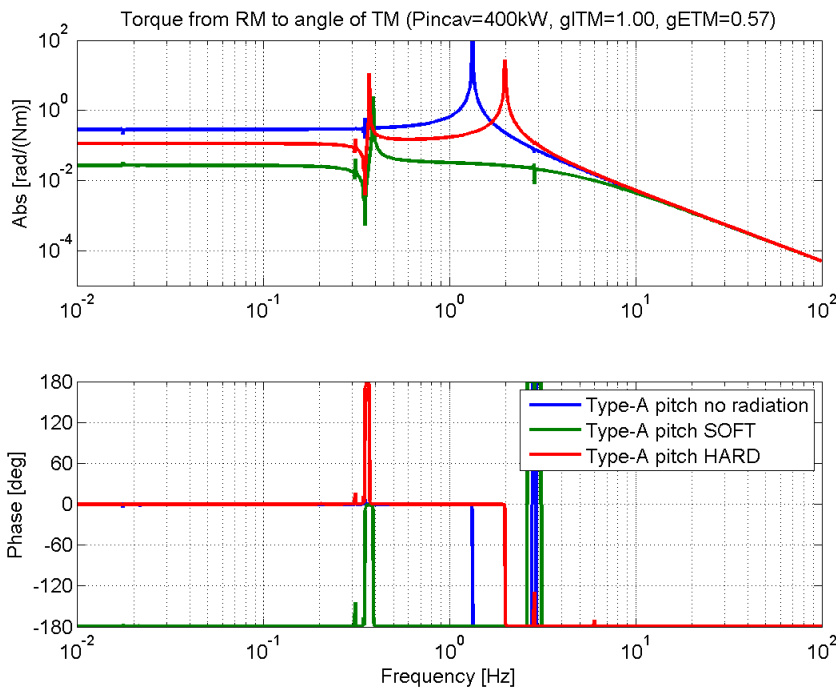
関口くん提供
(2011/5/13版)

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

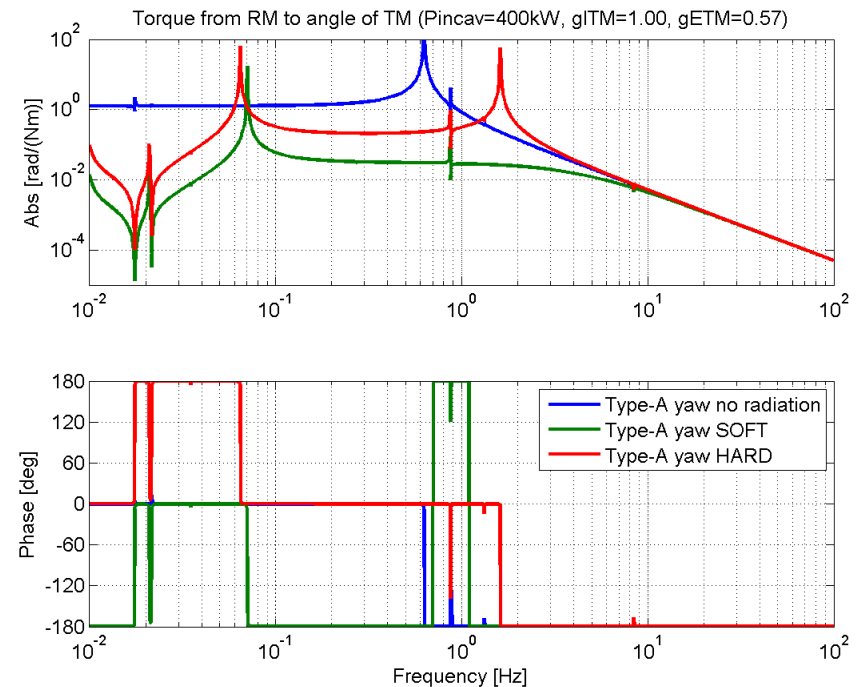
Opto-mechanical TF

- $g_{\text{ITM}}=1.00$, $g_{\text{ETM}}=0.57$ (flat-7km)
- $k_{\text{SOFT}}=-33.8$ Nm, $k_{\text{HARD}}=4.4$ Nm

pitch



yaw

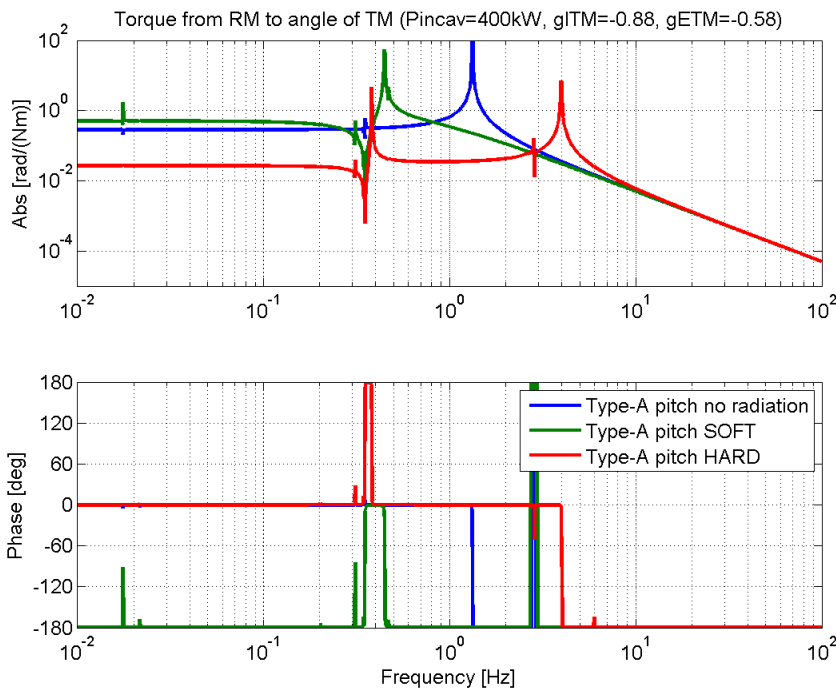


SOFTがunstableで、共振周波数も高いため、SOFTを制御するのは大変そう

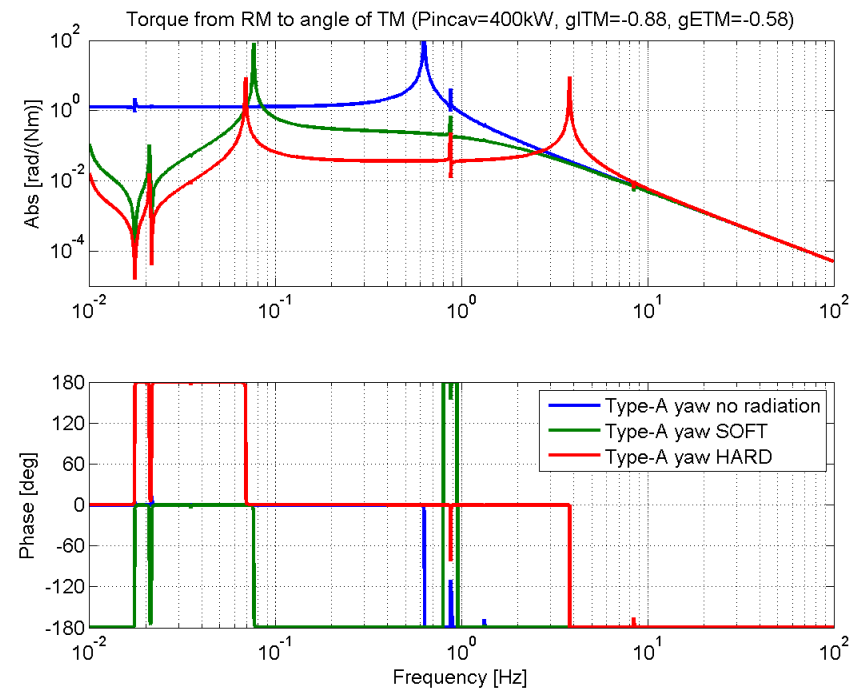
Opto-mechanical TF

- $g_{ITM} = -0.88$, $g_{ETM} = -0.58$ (1.6km-1.9km)
- $k_{SOFT} = -4.6$ Nm, $k_{HARD} = 28.2$ Nm

pitch



yaw

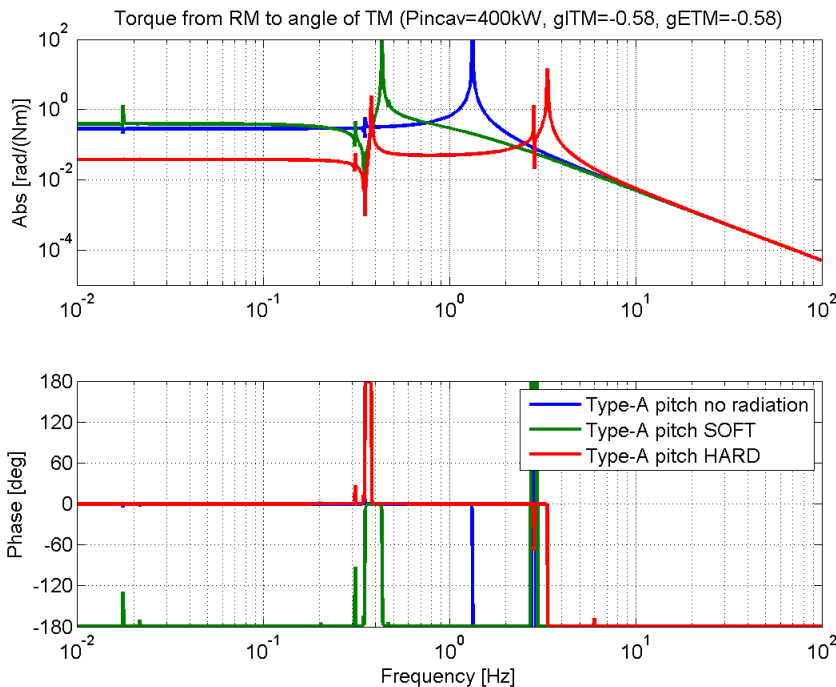


SOFTはunstable。pitchのSOFTに関してはまあまあ？
yawのSOFTは共振周波数ちょっと高い。
HARDが結構高い。

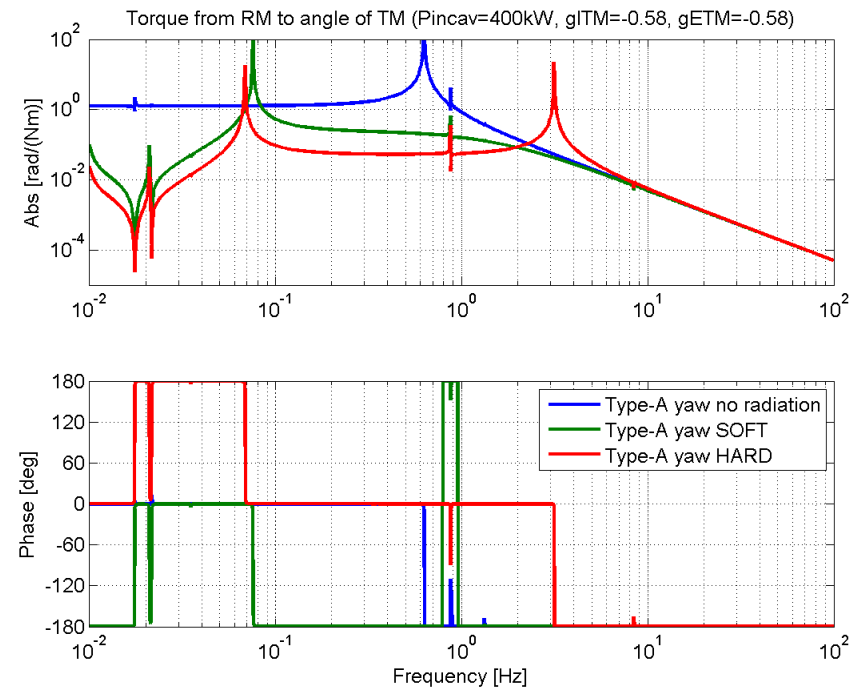
Opto-mechanical TF

- $g_{ITM} = -0.58$, $g_{ETM} = -0.58$ (1.9km-1.9km)
- $k_{SOFT} = -5.1$ Nm, $k_{HARD} = 19.0$ Nm

pitch



yaw



SOFTはunstableで、1.6km-1.9kmとあまり変わらない。
HARDが高くなりすぎない(1.6km-1.9kmに比べて)。

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
高いunstableは最悪
- SOFTが0.3 Hz (or 0.3i Hz) 程度以下だと制御しやすい
UGFを共振周波数より高くして、十分位相余裕を
もたせて高周波はカットオフさせたい
感度を考えると、 ~ 10 Hzではカットオフしていきたい
- HARDもあまり高すぎないようにしたい

ちなみにaLIGOでは機械的な共振周波数がpitch/yawともに0.6 Hzで、
SOFTが0.2i Hz (unstable)、HARDが3 Hz程度。
eLIGOではSOFTが1.5i Hz (unstable)でASCが感度を汚してしまったため、
g-factorを変えたい。
(LIGO-T0900511-v4の.3.3節参照)

ASC

- 以下、現状のg-factor
gITM= 1.00, gETM= 0.57 (flat-7km)
でASCの計算を試みた結果を示す
- 計算はこれを参考にした
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
- Optickleを使って干渉計をシミュレート
 - 各鏡の角度を振ると、どのポート(復調位相、Gouy phase含む)にどれだけの信号が出るか(sigAC)
 - 各制御自由度を振ると、どれだけの信号が出るか(WFS sensing matrix)
 - 各制御自由度の信号取得ポートを選択

各QPDに入るDC光量調整(アテネータでAS以外は約50mWに)

各鏡の角度を振ると、各鏡のビームスポットがどれだけ動くか

$$\text{鏡の前(frまたはfrA+frB)においたDC probeのsigACをm/radに較正} \delta x = w \frac{P_{\text{BSM}}^{\text{sigAC}}}{2P_{\text{sigDC}}}$$

輻射圧の影響(mMech) ← TMに加えたトルクからTM角度へのサスペンション伝達関数を与えて計算

- Optickleの結果を用いて、各制御自由度の制御ループを設計

$$\text{輻射圧トルクのかかったサスペンション} \frac{H_{\text{act}}}{1 + k_{\text{opt}} H_{\text{rad}}} \text{を制御する}$$

地面振動を抑え、ショットノイズを導入しないようなフィルタ

- 地面振動とショットノイズを与え、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つの畳み込みが長さ変動になる (RMSではDC的なすれ、ビームセンタリングのずれはとりあえず無視)

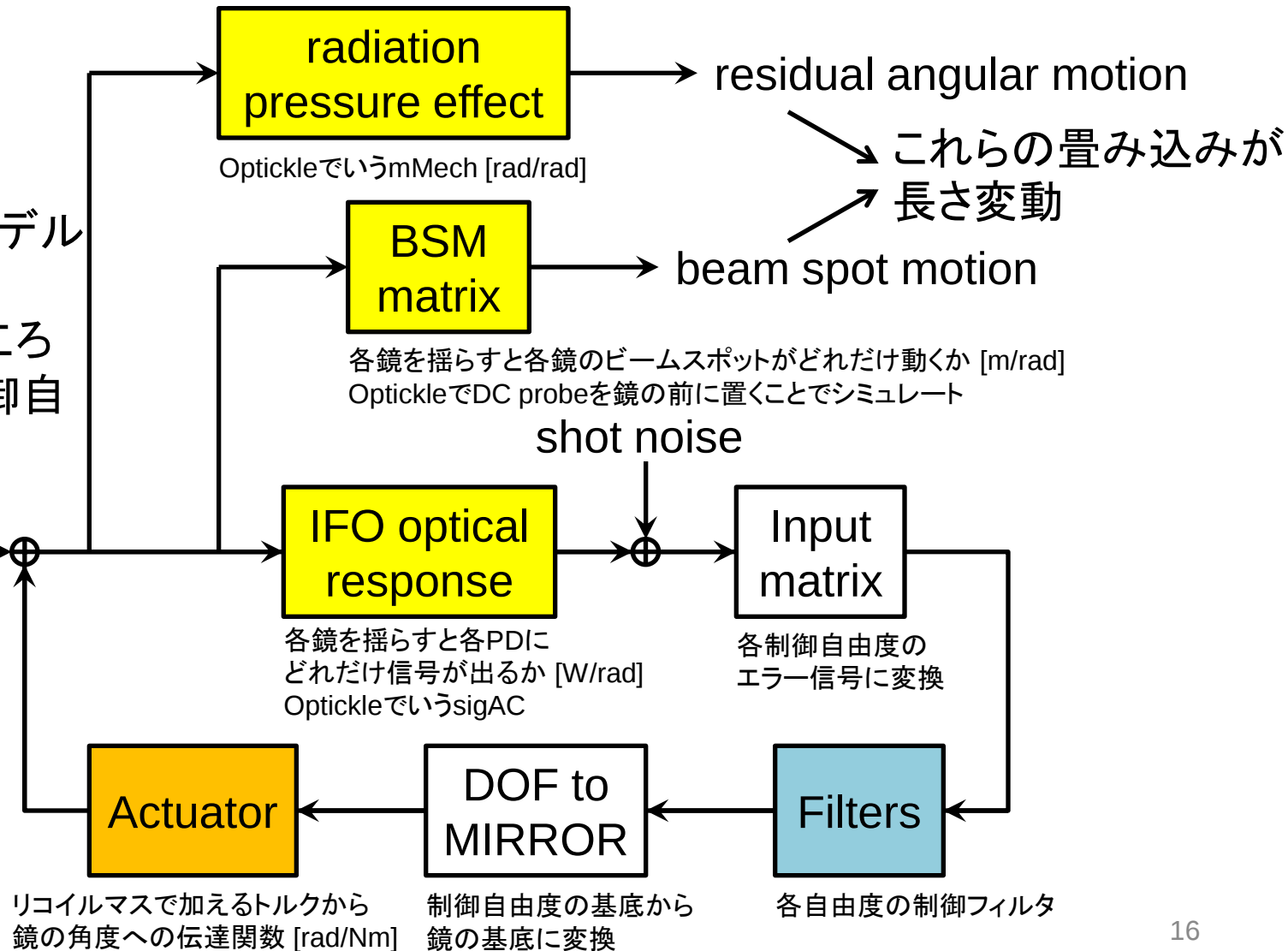
$$\begin{aligned} \Delta L(f) &= d_{\text{spot}}(f) * \theta_{\text{Mirror}}(f) \\ &\approx \theta_{\text{Mirror}}^{\text{RMS}} d_{\text{spot}}(f) + d_{\text{spot}}^{\text{RMS}} \theta_{\text{Mirror}}(f) \end{aligned}$$

- 上の長さ変動に下記のカップリング係数をかけて、DARMへのカップリングとする
 - TM: 1 ← DARMに直接効く
 - BS: $\pi/(2F) \sim 1/980$ ← 1/フィネス
 - PRC mirrors: 1/100 ← 経験的には1%もカップルしないらしいが、こう見積もっていけば安全
 - SRC mirrors: $1.2e-2 \times (10\text{Hz}/f)^2$ ← なぜこうなるのかはまだ理解してない。今回はとりあえず1/100とした
- DARM(干渉計感度)を汚さなければよしとする

ASC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)

seismic noise

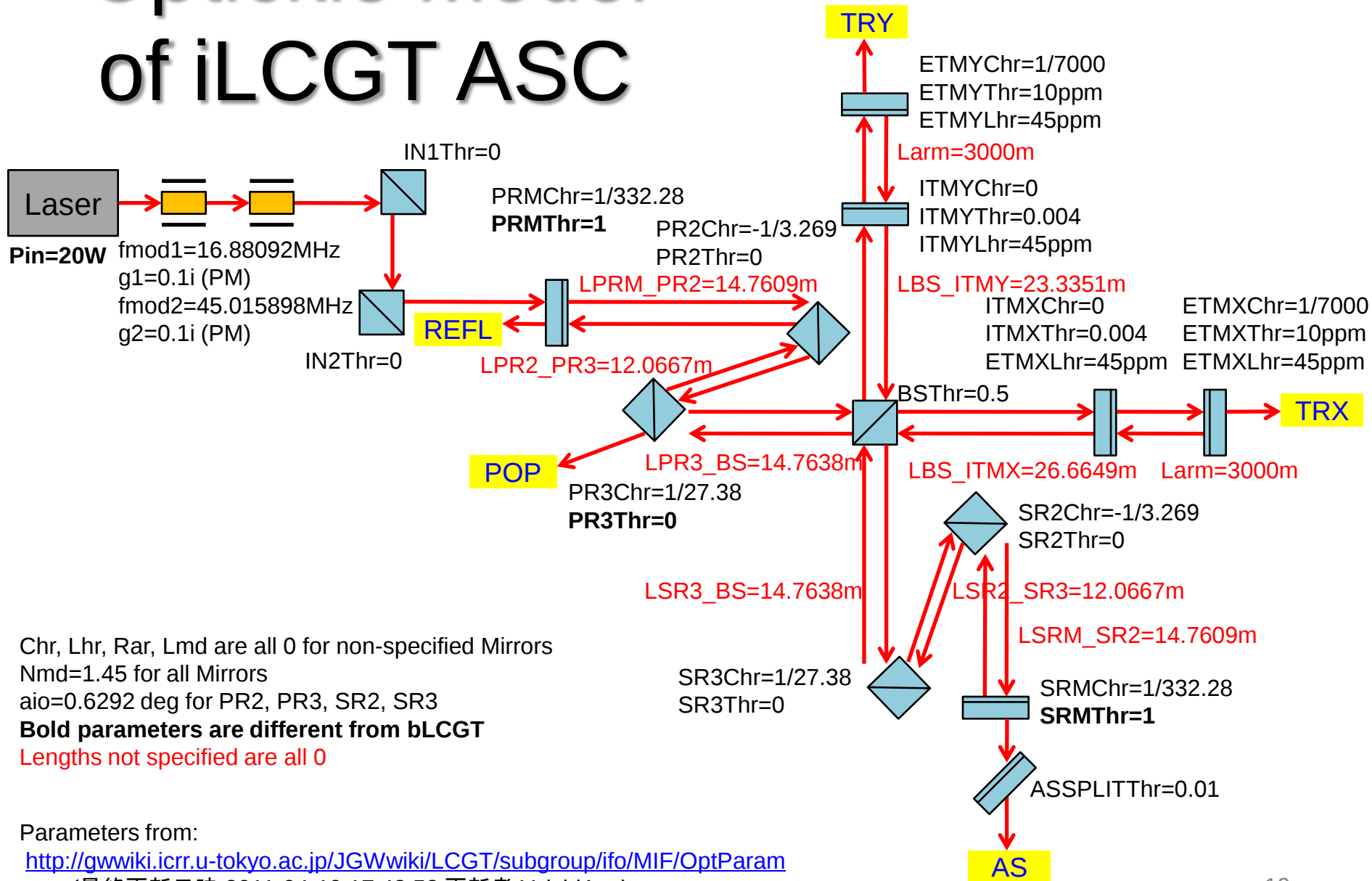


iLCGT ASC

iLCGT ASC計算時の仮定

- 制御したい鏡
ETMX, ETMY, ITMX, ITMY, BS, PR3, PR2
- 制御自由度
CS, CH, DS, DH, BS, PR3, PR2
- PR2はWFSでは制御しない
- サスペンション伝達関数は関口くん提供(2011/5/13)
- 全てリコイルマスから制御
- 全てpitchの計算
- POPは無いが、図や表には含まれているので注意
- SRMもiLCGTには導入しないが、モデルには入っている

Optickle Model of iLCGT ASC



Chr, Lhr, Rar, Lmd are all 0 for non-specified Mirrors

Nmd=1.45 for all Mirrors

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

Bold parameters are different from bLCGT

Lengths not specified are all 0

Parameters from:

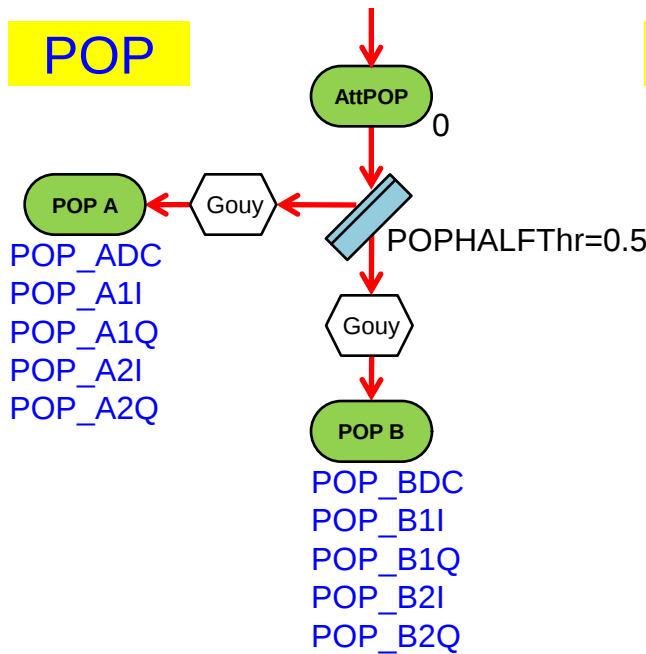
<http://gwwiki.icrr.u-tokyo.ac.jp/JGWwiki/LCGT/subgroup/ifo/MIF/OptParam>

(最終更新日時 2011-04-19 17:43:58 更新者 YoichiAso)

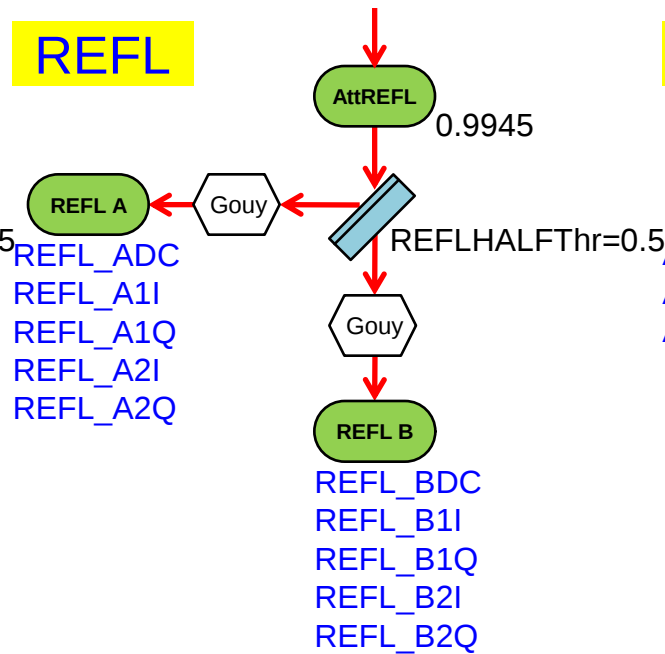
http://gwwiki.icrr.u-tokyo.ac.jp/JGWwiki/LCGT/subgroup/OCG/parametermeeting?action=AttachFile&do=view&target=interface_parameter_%28selected%29.pdf

Sensing Ports

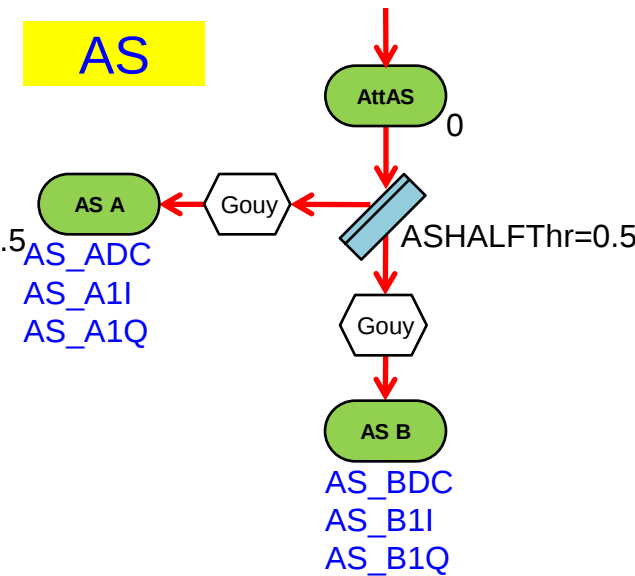
POP



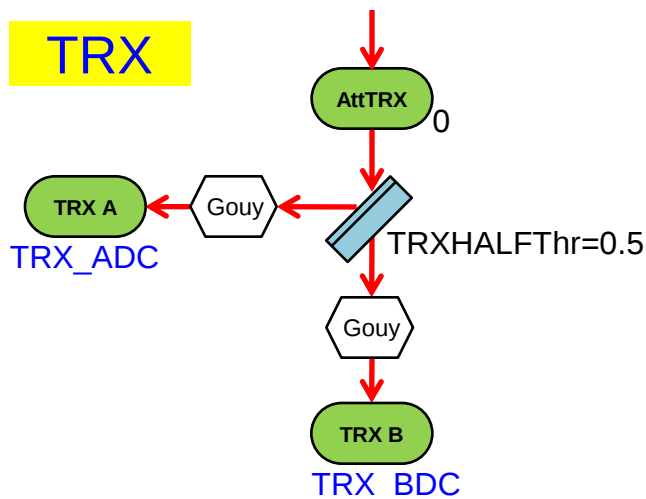
REFL



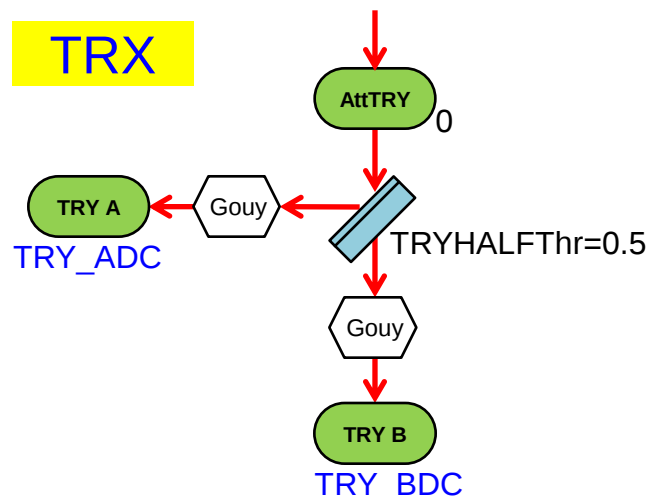
AS



TRX



TRX



POPはiLCGTでは使わない。
bLCGTと同じモデルを使っている
ため入っているだけ。

各所でのDC光量

- Laser: 20 W
- from PR3 to BS: 19.8 W キャリアのみのDC光量
- intra-cavity: 9.4 kW
- 各ポート
 - POP: 0 mW (iLCGTでは原理的に出ない)
 - REFL: 49.6 mW
 - AS: 0.42 mW
 - TRX/Y: 47.0 mW

各ポートに関しては、
サイドバンドも含めた全DC光量

AS以外、大体50mWになるように調整

どの程度に調整するのがいいか？

パワーを増やすと $1/\sqrt{P}$ でショットノイズによる
鏡の揺れは下がる

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
max Gouy	-19.4	-22.0	69.7	67.1	53.7	41.4	51.6
max demod	-85389.3	-13890.1	41.2	6.5	400.3	1238.1	301.1
Gouy	-48	71	70	NaN	70	70	70
ampl	-53033.7	509.8	29.1	NaN	271.7	768.9	91.9
contami	1.2	4.2	71.8	NaN	7.7	2.7	22.8
N big sig	1	2	6	NaN	4	1	5

表の見方

max Gouy、max demodはその自由度の信号を最大にする位相 [deg]

max amplはその時の信号の大きさ [W/rad/sqrt(2/pi)]

Gouy, demodはその自由度の信号の分離度が良くなる位相 [deg]

contamiはその時の信号混合レベル(1だと、その自由度の信号しか含まれていないということ)

N big sigはその位相で、その自由度が何番目に大きい信号か

	REFL f1 demodulation						
	CS	CH	DS	DH	BS	PR3	PR2
max Gouy	85.7	61.0	-19.7	-19.7	-19.7	-20.3	-22.0
max demod	0.0	-0.0	-89.9	-90.0	-67.0	0.0	0.0
max ampl	1261.0	456.5	789.7	-968.2	744.6	823.4	97.8
Gouy	70	-4	-3	-3	-2	-4	-4
demod	2	0	-90	-90	-90	0	0
ampl	1213.3	449.6	756.4	-927.4	653.0	790.4	93.0
contami	1.2	3.6	3.1	2.5	3.6	2.1	17.5
N big sig	1	2	2	1	3	1	4

REFL_A1I
(min PR3)

REFL_B1Q
(min BS)

REFL_B1I
(min CS)

	REFL f2 demodulation						
	CS	CH	DS	DH	BS	PR3	PR2
max Gouy	85.6	51.9	-4.3	-83.9	-20.0	-20.3	-22.0
max demod	-0.0	-0.0	-1.4	2.1	-0.0	-0.0	-0.0
max ampl	-3295.2	-1192.9	-1.6	-0.6	-760.8	-2151.8	-255.5
Gouy	70	-4	-4	-4	-4	-4	-4
demod	-89	88	90	90	90	88	88
ampl	-56.0	-40.8	0.0	-0.0	0.2	-71.7	-8.4
contami	1.2	3.6	23.2	19.0	5.3	2.1	17.4
N big sig	1	2	6	4	3	1	4

これまでは主に最大化で選んでいたが、sensing matrix対角化には信号混合レベル最小化の方がよい場合が多いことに気がついた(その方が実際にショットノイズが下がる)

その自由度の信号強度を少し損することで分離度がよくなるならそうして、損してもあまり変わらないなら最大化を選ぶようにする

min XX はXXの信号を最小にするようにGouy位相を決めるということ

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

AS DC

	CS	CH	DS	DH	BS	PR3	PR2
max Gouy	70.2	70.2	-3.0	-71.5	-1.2	69.7	68.0
max ampli	197.4	-242.1	-1.1	-0.5	-0.8	-242.3	-28.8
Gouy	-22	-22	-20	-20	-20	-19	-20
ampli	-5.4	6.6	-0.7	-0.2	-0.6	-4.0	-0.7
contami	3.4	2.8	6.0	20.4	7.8	2.7	6.0
N big sig	2	1	2	7	5	1	3

AS f1 demodulation

	CS	CH	DS	DH	BS	PR3	PR2
max Gouy	-19.5	-22.8	70.5	67.2	-32.4	69.6	67.9
max demod	-90.0	-90.0	-90.0	-90.0	-90.0	-90.0	-90.0
max ampli	-2.6	-0.4	-5337.5	-868.7	32.7	1.8	0.2
Gouy	-20	NaN	-23	-19	-20	NaN	NaN
demod	0	NaN	1	1	0	NaN	NaN
ampli	-0.0	NaN	-5.6	1.0	0.0	NaN	NaN
contami	50.0	NaN	1.1	2.3	4.0	NaN	NaN
N big sig	4	NaN	1	1	3	NaN	NaN

AS_A1Q
(max DS)

TRX DC

	CS	CH	DS	DH	BS	PR3	PR2
max Gouy	-25.5	74.8	-25.5	74.8	40.7	-0.6	-2.3
max ampli	-41157.8	14899.3	-41157.8	14899.3	-0.0	-42.2	-5.0
Gouy	-15	64	-15	64	NaN	NaN	NaN
ampli	-28613.6	10350.0	-28613.6	10350.0	NaN	NaN	NaN
contami	2.0	2.0	2.0	2.0	NaN	NaN	NaN
N big sig	2	2	2	2	NaN	NaN	NaN

TRX_ADC
(min CS/DS)

TRY DC

	CS	CH	DS	DH	BS	PR3	PR2
max Gouy	-25.5	74.8	-25.5	74.8	-0.3	-0.6	-2.2
max ampli	-41157.8	14899.3	41157.8	-14899.3	-29.8	-42.2	-5.0
Gouy	-15	64	-15	64	NaN	NaN	NaN
ampli	-28613.6	10350.0	28613.6	-10350.0	NaN	NaN	NaN
contami	2.0	2.0	2.0	2.0	NaN	NaN	NaN
N big sig	2	2	2	2	NaN	NaN	NaN

TRY_ADC
(min CS/DS)

TRX + TRY でCommon HARD
 TRX - TRY でDifferential HARD をとる
 GouyはCS/DSが最小になるように

全Sensing Matrix

WFS Sensing Matrix [W/mrad/sqrt(2/pi)]

(Gouy phases at POP A:0, POP B:0 REFL A:69.7, REFL B:-4.3, AS A:70.5, AS B:160.5, TR A:64.5 deg)

	CS	CH	DS	DH	BS	PR3	PR2
POP_ADC							
POP_BDC							
POP_A1I							
POP_A1Q							
POP_B1I							
POP_B1Q							
POP_A2I							
POP_A2Q							
POP_B2I							
POP_B2Q							
REFL_ADC	-0.90	0.29	0.03	0.00	0.27	0.77	0.09
REFL_BDC	-58.28	-9.36	0.01	0.00	0.15	0.61	0.21
REFL_A1I	1.21	0.20	0.01	0.00	0.00	0.00	-0.00
REFL_A1Q	0.00	-0.00	-0.01	0.01	-0.01	-0.00	-0.00
REFL_B1I	0.00	0.45	0.00	0.00	0.28	0.79	0.09
REFL_B1Q	0.00	0.00	-0.76	0.93	-0.66	0.00	0.00
REFL_A2I	-3.17	-0.53	-0.00	0.00	-0.00	0.00	0.01
REFL_A2Q	0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00
REFL_B2I	-0.00	-1.17	-0.00	-0.00	-0.73	-2.07	-0.24
REFL_B2Q	-0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00
AS_ADC	0.14	-0.17	-0.00	0.00	-0.00	-0.17	-0.02
AS_BDC	-0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
AS_A1I	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00
AS_A1Q	0.00	-0.00	5.34	0.87	0.01	-0.00	-0.00
AS_B1I	0.00	0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00
AS_B1Q	-0.00	-0.00	0.01	-0.05	0.03	0.00	0.00
TRX_ADC	0.03	10.37	0.03	10.37	-0.00	-0.01	-0.00
TRX_BDC	29.10	1.88	29.10	1.88	0.00	0.03	0.00
TRY_ADC	0.03	10.37	-0.03	-10.37	-0.01	-0.01	-0.00
TRY_BDC	29.10	1.88	-29.10	-1.88	0.02	0.03	0.00

PR2は信号が小さいし、DARMへのカップリングも小さいので干渉計出力を使つての制御はしない (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/mrad/sqrt(2/pi) になっているのはOptickleのtickle01の出力はファクターsqrt(2/pi)だけずれているっぽいから

選択後のSensing Matrix

WFS Sensing Matrix [W/mrad/sqrt(2/pi)]

(Gouy phases at POP A:0, POP B:0 REFL A:69.7, REFL B:-4.3, AS A:70.5, AS B:160.5, TR A:64.5 deg)

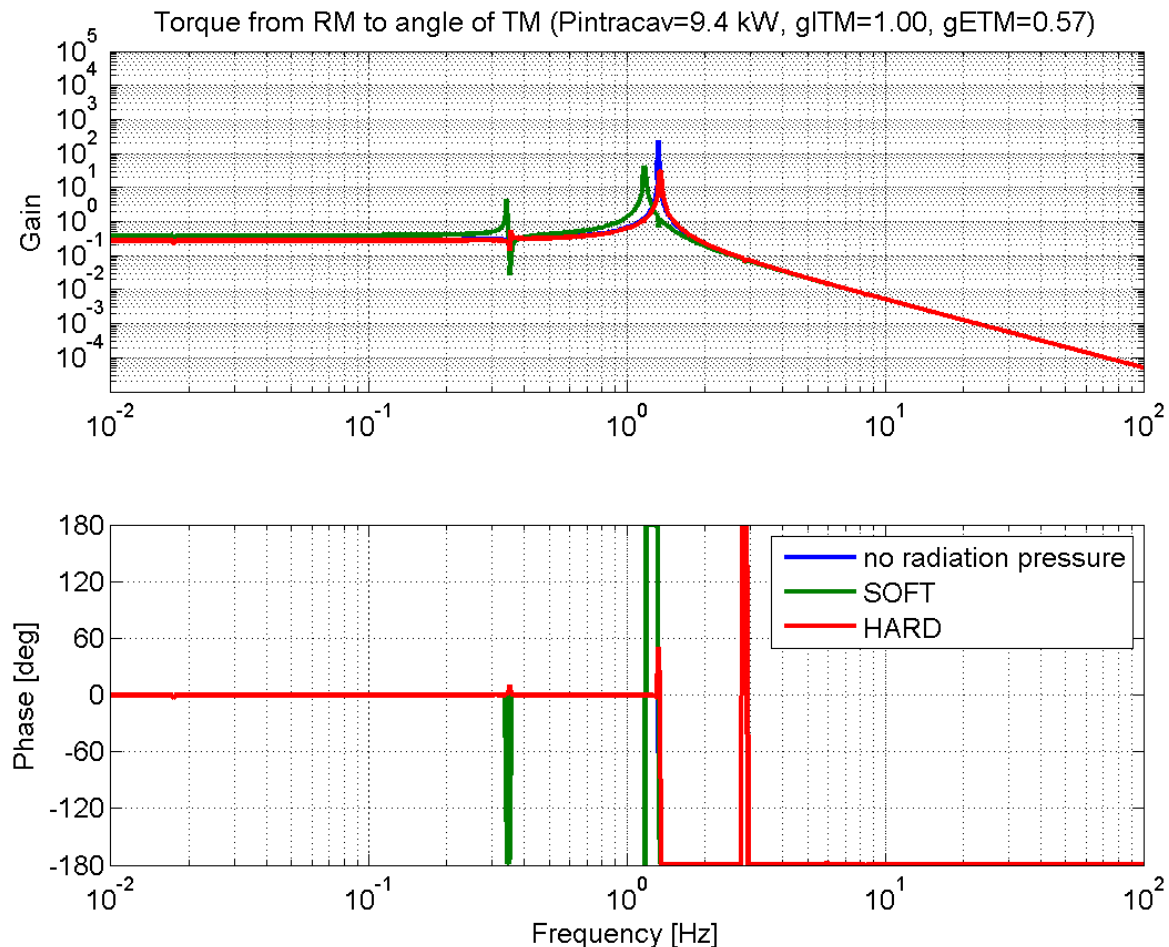
	CS	CH	DS	DH	BS	PR3	PR2
REFL_A1I	1.21	0.20	0.01	0.00	0.00	0.00	-0.00
TRX_ADC	0.03	10.37	0.03	10.37	-0.00	-0.01	-0.00
AS_A1Q	0.00	-0.00	5.34	0.87	0.01	-0.00	-0.00
TRY_ADC	0.03	10.37	-0.03	-10.37	-0.01	-0.01	-0.00
REFL_B1Q	0.00	0.00	-0.76	0.93	-0.66	0.00	0.00
REFL_B1I	0.00	0.45	0.00	0.00	0.28	0.79	0.09

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、PR2の信号は無視してInput matrixを作って計算した)

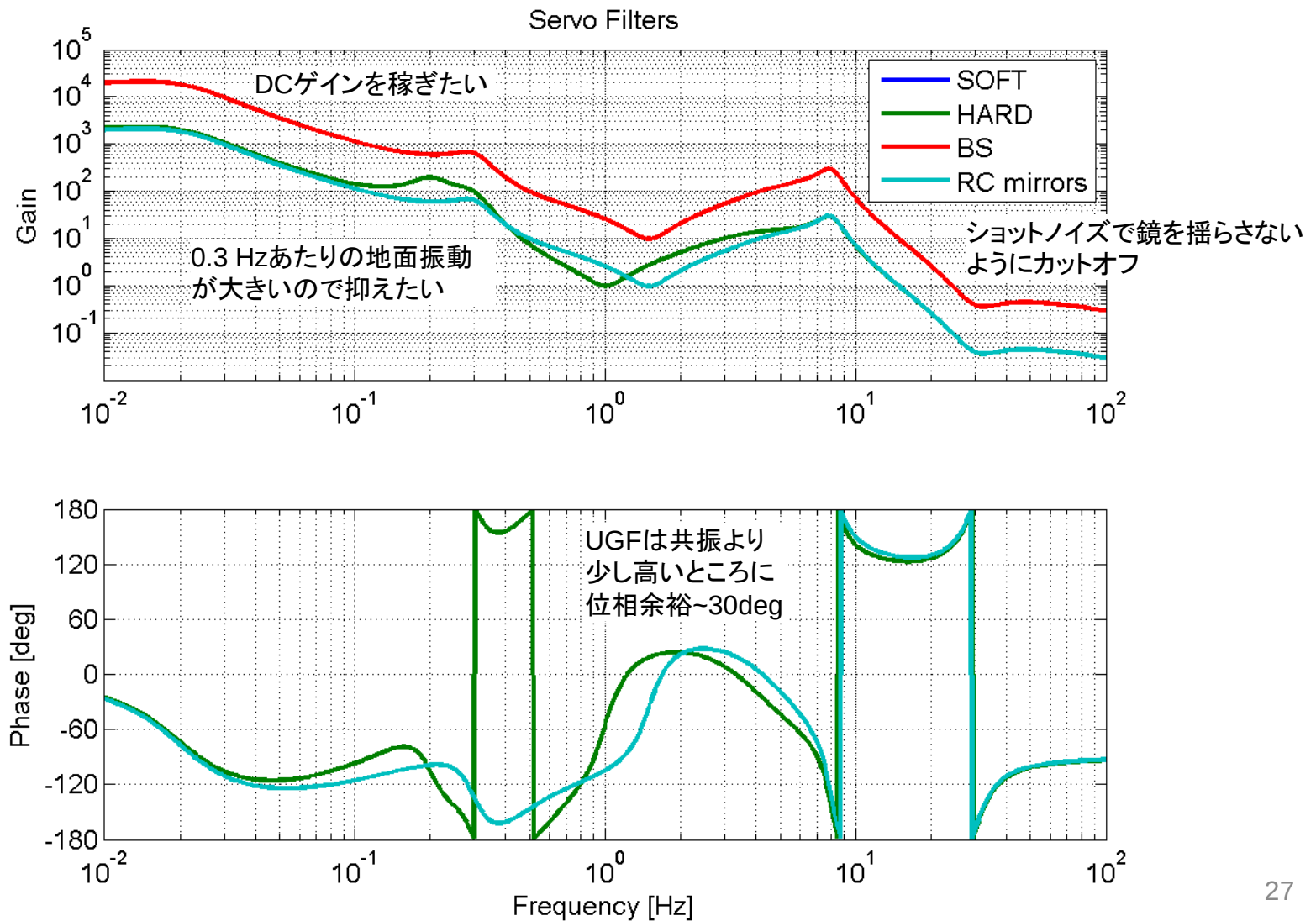
PR2はWFSでは制御しない

Opto-mechanical TF

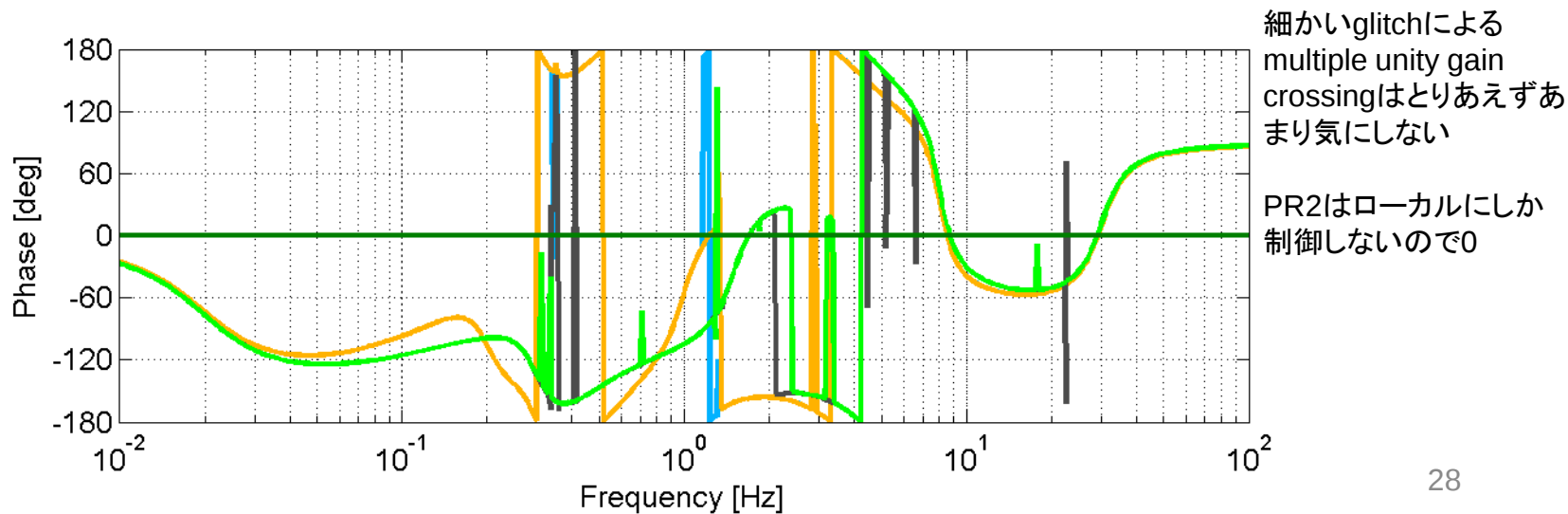
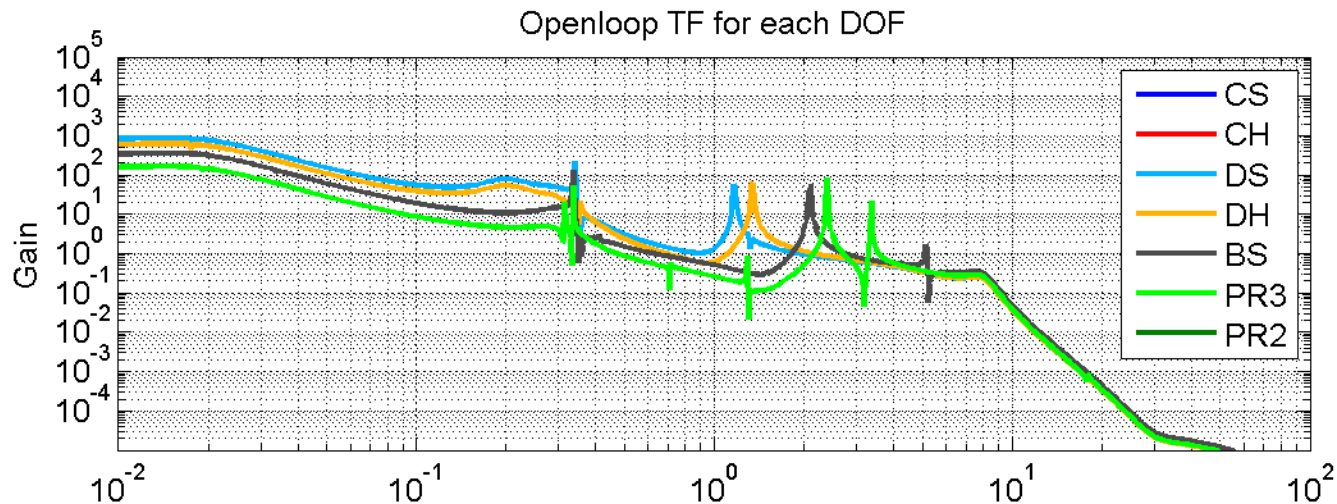
- リコイルマスに加えたトルクから鏡の角度へのTF (pitch)
青が輻射圧($P_{\text{incav}}=9.4\text{ kW}$) 下で緑と赤に



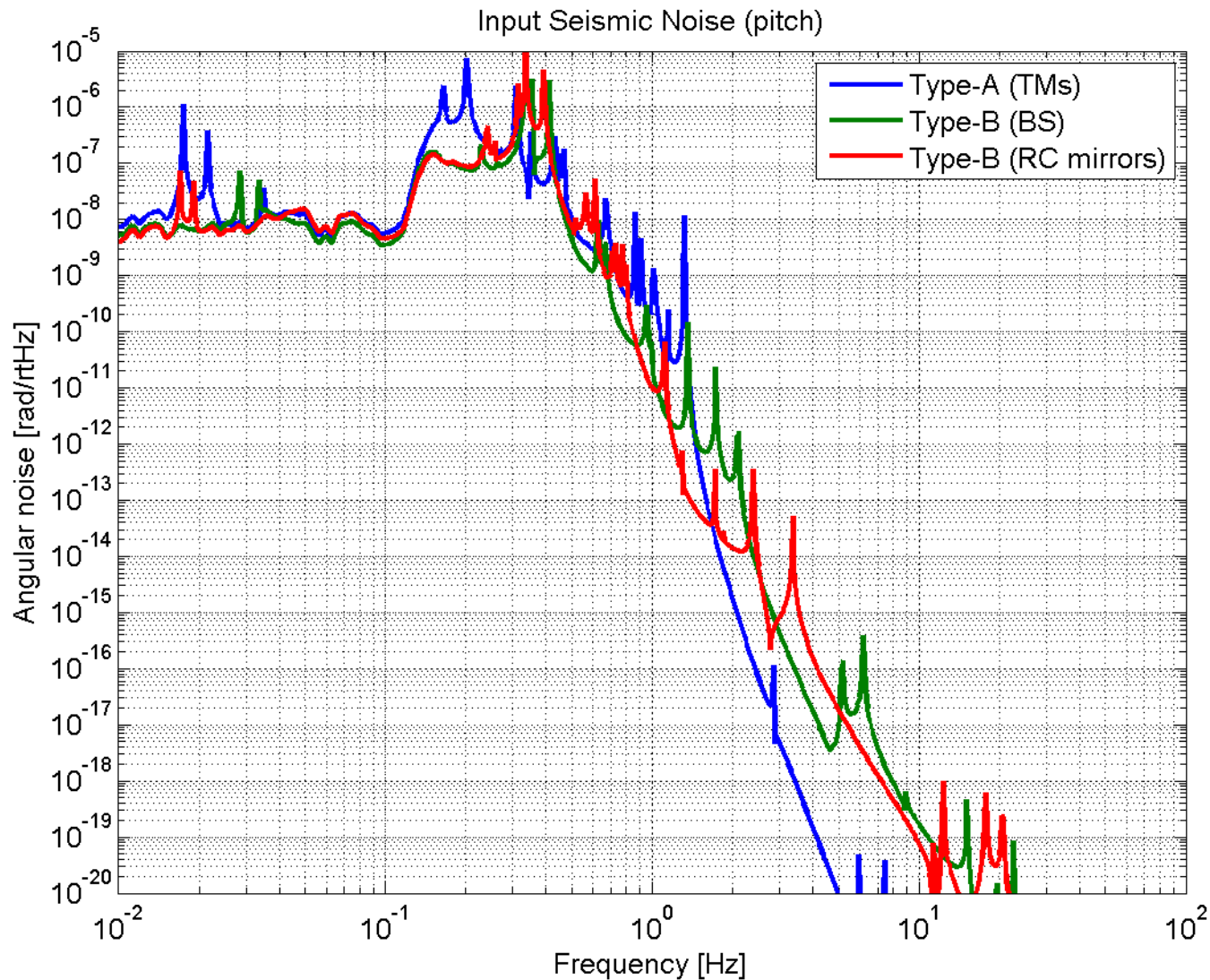
制御フィルタの設計



オープンループ伝達関数

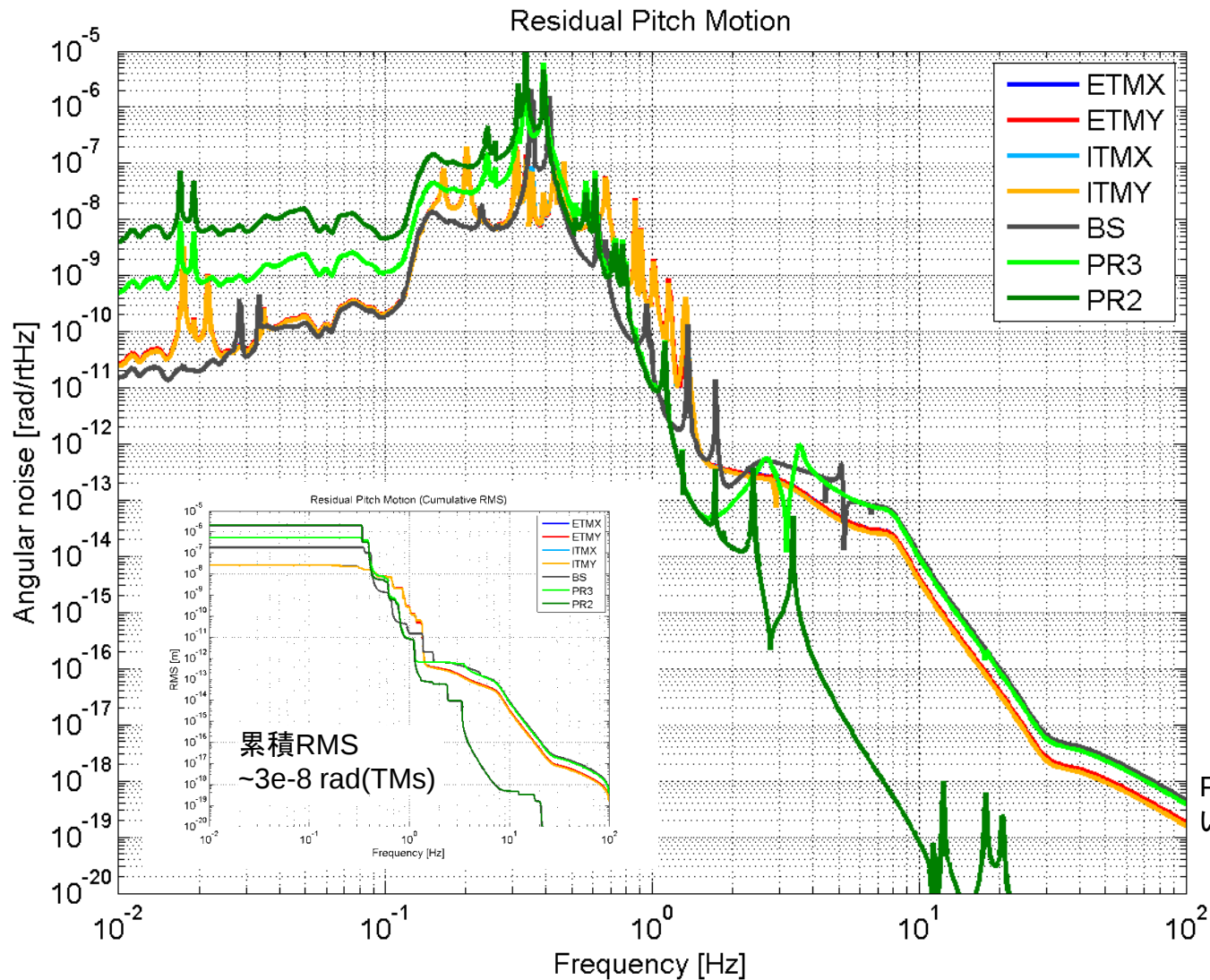


地面振動による角度揺れ



関口くん提供
(2011/5/13版)
“Noisy day”

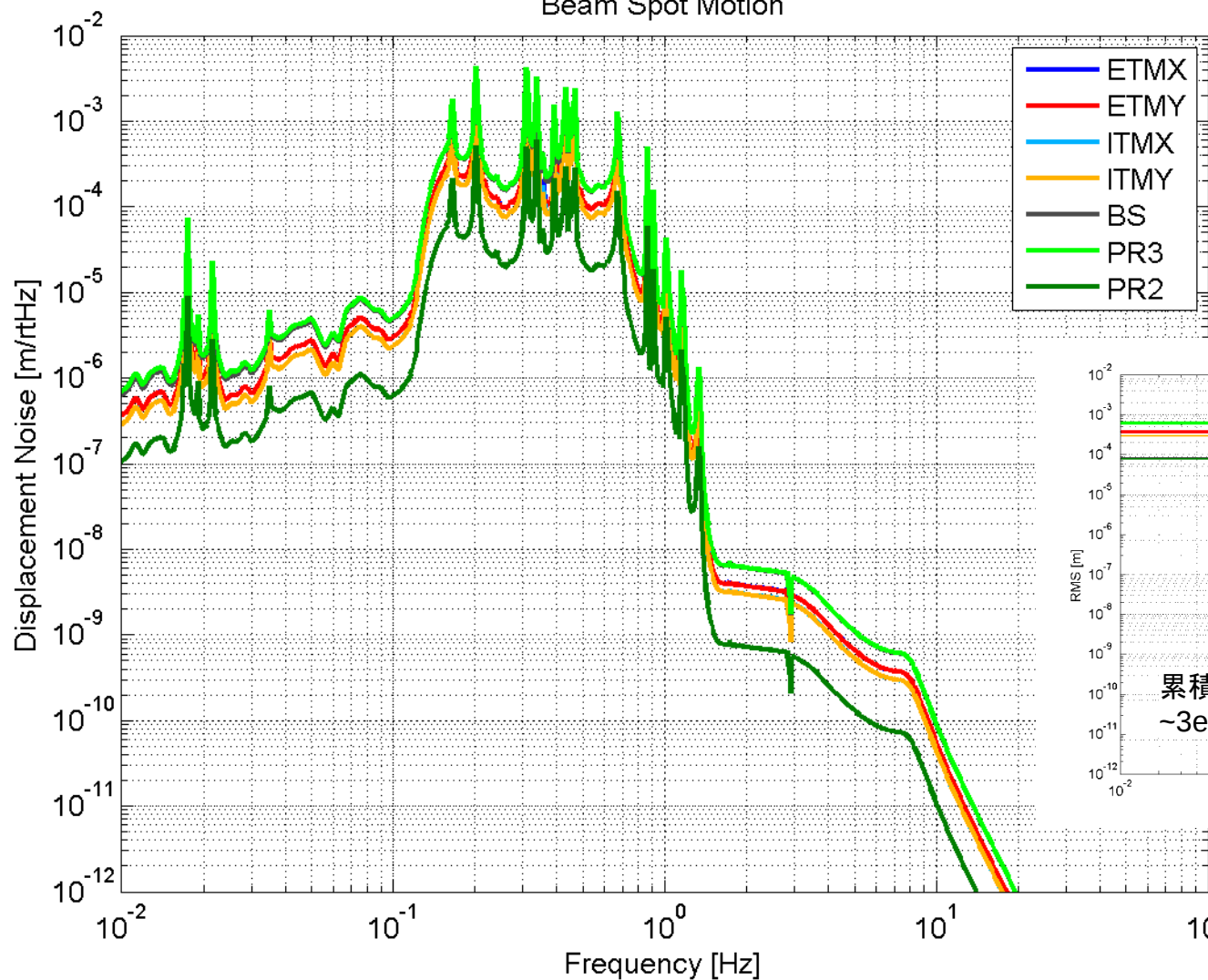
残留角度揺れ



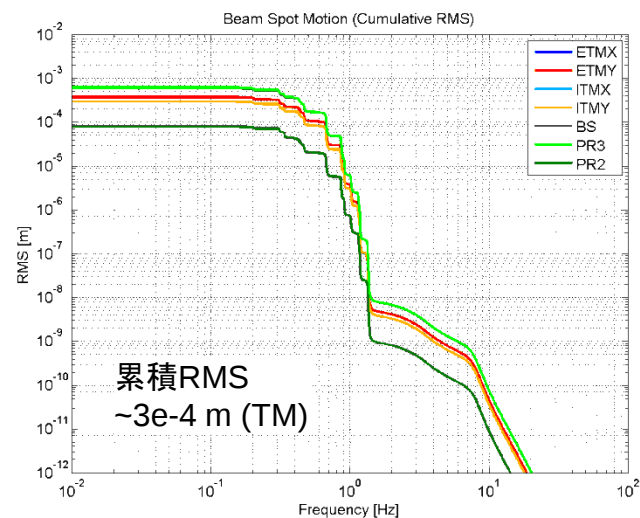
PR2の制御はしていないので変わらない

ビームスポットの動き

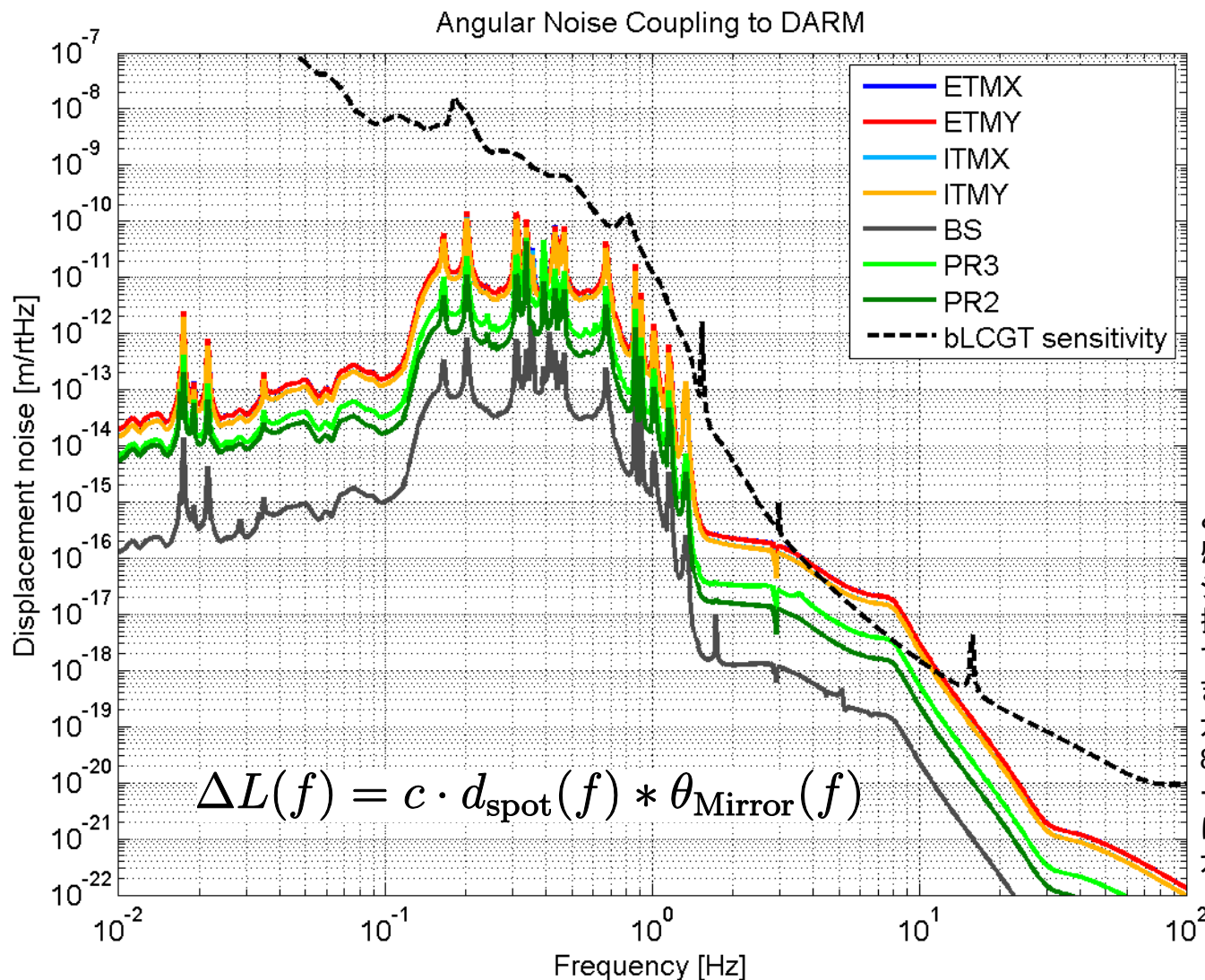
Beam Spot Motion



実際にはビームセンタリングが完璧ではないのでRMSはさらに悪い可能性も。
1e-4 m程度はビームセンタリングできるらしいなので、今回はとりあえずビームセンタリング完璧とする。

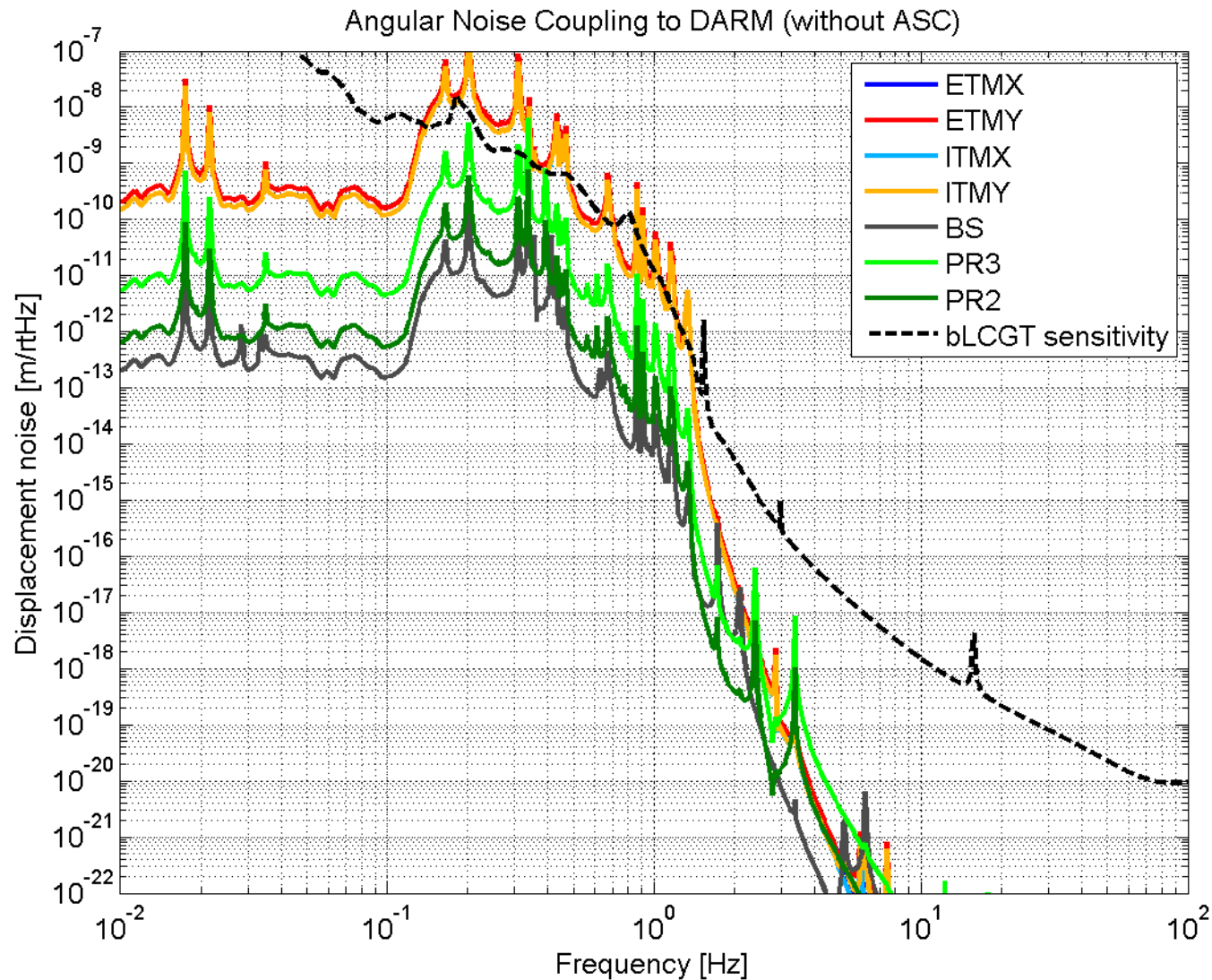


DARMへのカップリング



とりあえずbLIGO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
カットオフの始まりが8 Hzなのでそれより十分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.....

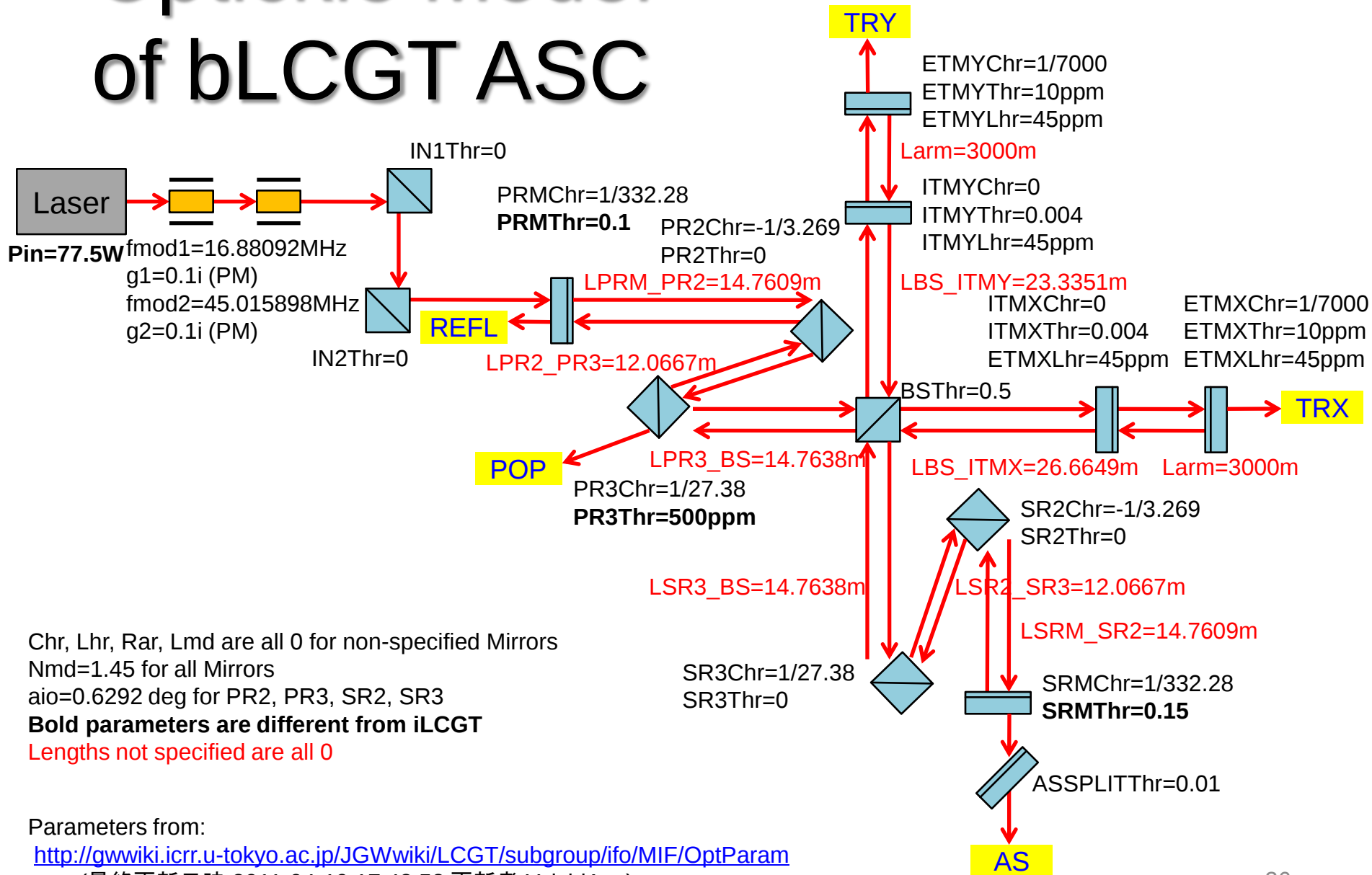


bLCGT ASC

bLCGT ASC計算時の仮定

- 制御したい鏡
ETMX, ETMY, ITMX, ITMY, BS, PR3, PR2, PRM, SR3, SR2, SRM
- 制御自由度
CS, CH, DS, DH, BS, PR3, PR2, PRM, SR3, SR2, SRM
- SR2はWFSでは制御しない
- サスペンション伝達関数はiLCGTと同じものを使用
bLCGTはパラメータが非常に不確定なため
- 全てリコイルマスから制御
- 全てpitchの計算
- SRCLのDARMへのカップリングはとりあえず今回は
1/100とした
- bLCGTの方はとりあえず計算したという感じで、直感的な理解はまだできてない

Optickle Model of bLCGT ASC



Parameters from:

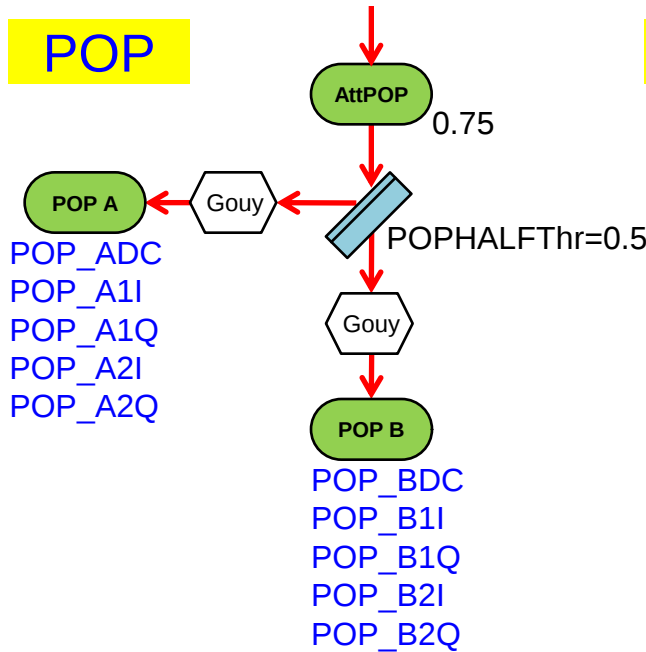
<http://gwwiki.icrr.u-tokyo.ac.jp/JGWwiki/LCGT/subgroup/ifo/MIF/OptParam>

(最終更新日時 2011-04-19 17:43:58 更新者 YoichiAso)

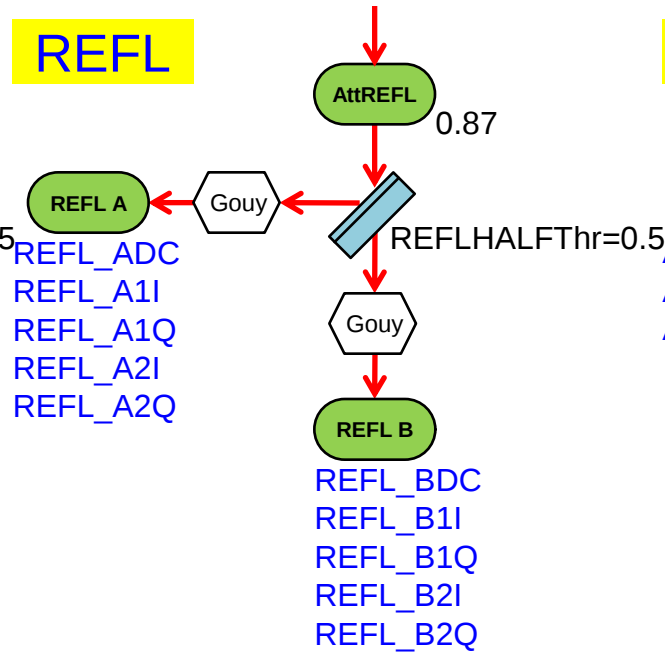
http://gwwiki.icrr.u-tokyo.ac.jp/JGWwiki/LCGT/subgroup/OCG/parametermeeting?action=AttachFile&do=view&target=interface_parameter_%28selected%29.pdf

Sensing Ports

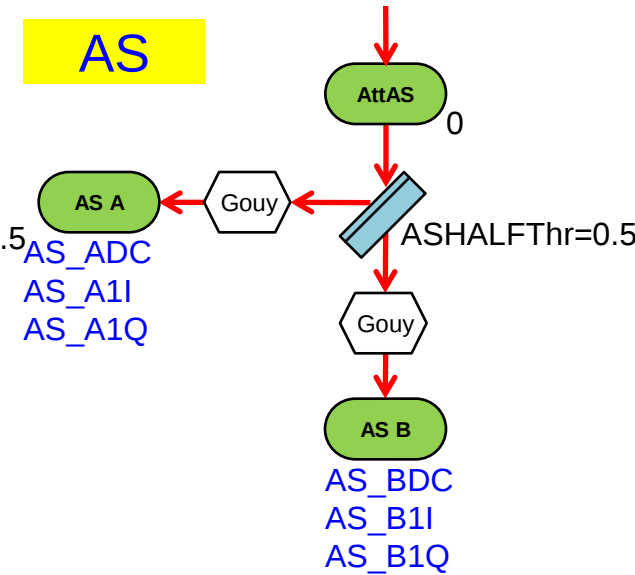
POP



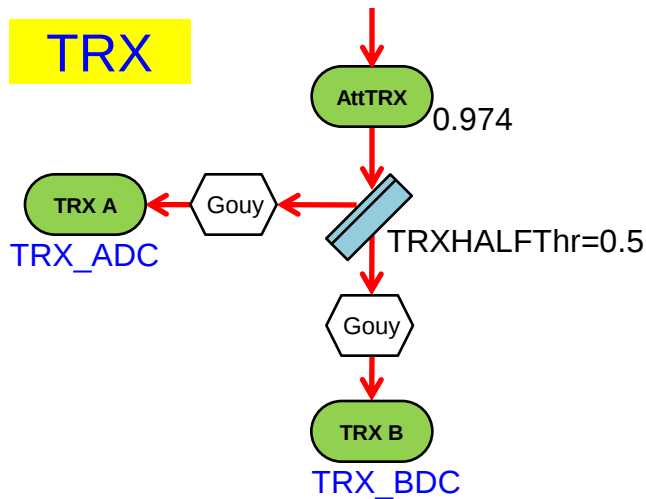
REFL



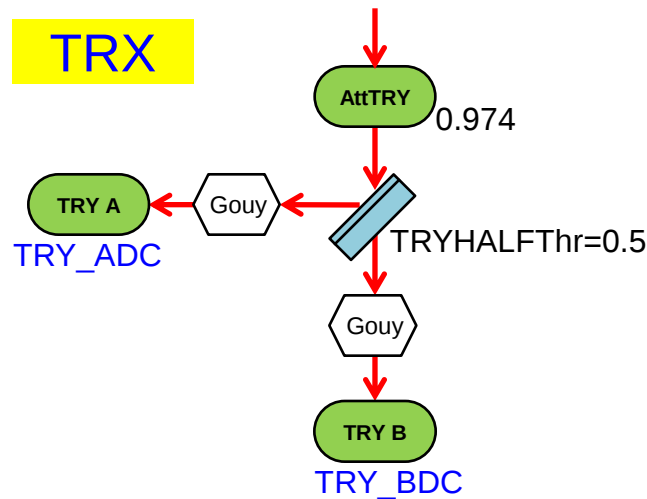
AS



TRX



TRX



各所でのDC光量

- Laser: 77.5 W
- from PR3 to BS: 799 W
- intra-cavity: 379 kW
- 各ポート
 - POP: 50.9 mW
 - REFL: 51.1 mW
 - AS: 0.018 mW
 - TRX/Y: 49.3 mW

キャリアのみのDC光量

各ポートに関しては、
サイドバンドも含めた全DC光量
ASはサイドバンドしか出ないこと
になってる

AS以外、大体50mWになるように調整

ポートの選択と位相の最適化

min XXはXXの信号を最初にするようにGouy phaseを決めるということ

何も条件が書いていないのは他でGouyを決められてしまったもの(Gouyをどう頑張っても分離できないもの)

POP DC

	CS	CH	DS	DH	BS	PR3	PR2	PRM	SR3	SR2	SRM
max Gouy	-19.4	-22.0	-24.7	-81.4	-44.3	-46.9	88.1	87.0	64.5	64.5	64.5
max ampli	-42003.1	-7661.3	-8.2	-0.5	-507.3	-1310.5	-3375.0	-1680.9	1.3	0.2	0.1
Gouy	-2	-2	NaN	NaN	71	71	70	70	NaN	NaN	NaN
ampli	-28338.6	-5091.0	NaN	NaN	153.3	433.5	-2268.6	-1136.5	NaN	NaN	NaN
contami	-1.2	6.8	NaN	NaN	29.4	10.4	2.0	3.9	NaN	NaN	NaN
N big sig	-1	2	NaN	NaN	6	3	1	2	NaN	NaN	NaN

POP_ADC (min CS)

POP f1 demodulation

	CS	CH	DS	DH	BS	PR3	PR2	PRM	SR3	SR2	SRM
max Gouy	-17.1	-32.9	51.8	51.8	39.3	-28.6	-27.3	19.6	-25.5	-25.5	-25.5
max demod	0.1	0.1	-89.9	-89.9	-71.0	-0.1	-0.1	0.5	-0.0	-0.0	-0.0
max ampli	-118.7	-119.7	53.4	-65.5	48.4	-70.7	-8.2	-8.3	-164.2	-19.7	-10.3
Gouy	64	-73	-81	-81	-82	-73	-73	-38	-73	-73	-73
demod	0	-2	-89	-89	-82	-73	-73	-2	-2	-2	-2
ampli	-81.1	-91.5	-36.3	44.5	-32.3	-50.5	-5.7	0.1	-110.7	-13.3	-7.0
contami	1.3	3.3	3.1	2.5	3.6	6.0	52.9	13.1	2.7	22.7	43.2
N big sig	-1	2	2	1	3	3	7	6	1	5	6

POP_B1I (min CS)

POP f2 demodulation

	CS	CH	DS	DH	BS	PR3	PR2	PRM	SR3	SR2	SRM
max Gouy	-72.6	76.6	81.8	79.5	75.5	75.5	75.4	81.5	81.5	81.5	81.5
max demod	0.1	0.1	-26.9	-23.0	0.0	0.1	0.1	0.1	-90.0	-90.0	-90.0
max ampli	-5076.6	2282.9	2.8	-4.0	1947.9	5511.2	660.5	335.8	0.0	0.0	0.0
Gouy	-17	-20	70	70	68	-20	-20	-14	NaN	NaN	NaN
demod	-70	-70	90	90	90	-70	-70	75	NaN	NaN	NaN
ampli	-90.6	-55.7	-1.3	1.6	-2.6	-98.2	-11.6	-4.2	NaN	NaN	NaN
contami	1.2	3.7	6.7	5.6	4.9	2.1	17.8	36.2	NaN	NaN	NaN
N big sig	-1	2	4	2	2	1	4	5	NaN	NaN	NaN

POP_A2I

AS DC

	CS	CH	DS	DH	BS	PR3	PR2	PRM	SR3	SR2	SRM
max Gouy	-16.9	-16.9	-87.3	-30.2	-6.2	-24.9	-26.6	83.7	-13.3	-12.9	23.8
max ampli	-7.5	9.2	-0.2	0.3	-2.7	5.7	0.6	0.9	12.7	1.6	1.1
Gouy	-66	-66	74	77	73	77	77	73	64	65	73
ampli	-3.5	4.3	0.1	-0.1	-0.4	-0.8	-0.1	0.6	2.0	0.2	0.5
contami	5.5	4.5	22.3	53.4	8.4	3.9	31.1	4.9	3.1	24.5	5.9
N big sig	-3	2	6	9	5	1	8	1	1	7	4

AS_BDC (min CS/CH)

AS f1 demodulation

	CS	CH	DS	DH	BS	PR3	PR2	PRM	SR3	SR2	SRM
max Gouy	-84.8	81.4	89.5	86.2	-13.4	89.6	89.5	88.6	76.8	77.1	-67.5
max demod	-90.0	-90.0	-90.0	-90.0	-90.0	-90.0	-90.0	-90.0	-90.0	-90.0	89.3
max ampli	-0.3	-0.0	-1511.0	-245.9	9.2	0.5	0.1	0.0	-0.0	-0.0	-0.0
Gouy	NaN	NaN	-4	0	-1	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
demod	NaN	NaN	0	0	0	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
ampli	NaN	NaN	0.0	-0.0	0.0	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
contami	NaN	NaN	1.1	2.3	3.9	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
N big sig	NaN	NaN	1	1	3	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN

AS_A1Q (max DS)

REFL DC

	CS	CH	DS	DH	BS	PR3	PR2	PRM	SR3	SR2	SRM
max Gouy	-3.5	3.8	-0.8	-16.8	2.1	3.9	4.0	36.0	83.8	83.8	83.8
max ampli	-66522.5	-57318.2	-57.7	43.8	-28726.4	-81234.2	-9402.2	-3818.7	-2485.2	-297.9	-156.4
Gouy	-86	86	NaN	NaN	-6	86	86	-87	-86	-86	-86
ampli	-6172.3	-5533.9	NaN	NaN	-20108.3	-7887.1	-923.3	1472.1	1729.5	207.3	108.9
contami	1.7	3.7	NaN	NaN	8.6	2.6	22.4	7.3	6.1	50.9	96.9
N big sig	-1	2	NaN	NaN	4	1	6	3	2	5	6

REFL f1 demodulation

	CS	CH	DS	DH	BS	PR3	PR2	PRM	SR3	SR2	SRM
max Gouy	-89.9	85.9	71.8	71.1	-13.8	-22.3	-57.0	19.2	-6.2	-6.2	-6.2
max demod	0.0	0.0	77.6	-88.3	0.6	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.1	-0.1
max ampli	-16213.2	226218.0	-128.0	-153.4	-909.2	-3111.6	-620.1	6313.7	-384.4	-46.1	-24.2
Gouy	-71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
demod	0	0	-90	-90	-90	-3	-3	-3	-4	NaN	NaN
ampli	-52357.5	-1858.0	40.5	-49.7	35.9	-2876.0	-337.4	5954.7	-381.3	NaN	NaN
contami	1.2	6.3	3.3	2.7	3.7	4.4	3.1	2.1	32.8	NaN	NaN
N big sig	-1	3	2	1	3	2	6	1	5	NaN	NaN

REFL_B1I (min CS)

REFL f2 demodulation

	CS	CH	DS	DH	BS	PR3	PR2	PRM	SR3	SR2	SRM
max Gouy	-89.9	84.0	76.4	-86.7	-74.9	-75.4	-78.1	26.3	-79.3	-79.3	-79.3
max demod	0.1	0.2	8.5	-16.5	0.0	0.0	0.0	-0.0	89.8	89.8	89.8
max ampli	-163972.4	19501.2	-21.6	13.3	-4926.0	-14407.0	-2073.0	6213.0	0.0	0.0	0.0
Gouy	-78	40	NaN	-79	40	40	40	-1	NaN	NaN	NaN
demod	-90	-90	NaN	-90	-90	-90	-90	-87	NaN	NaN	NaN
ampli	265.0	105.4	NaN	3.7	67.6	185.4	21.8	291.7	NaN	NaN	NaN
contami	1.2	3.7	NaN	87.6	5.7	2.1	17.8	1.2	NaN	NaN	NaN
N big sig	-1	2	NaN	3	3	1	4	1	NaN	NaN	NaN

REFL_A2I (max CS)

TRX DC

	CS	CH	DS	DH	BS	PR3	PR2	PRM	SR3	SR2	SRM
max Gouy	-25.6	74.8	-25.6	74.8	-10.4	0.5	0.4	-0.6	-36.3	-36.3	-36.3
max ampli	-43183.8	15641.0	-43183.3	15640.8	0.0	-43.4	-5.2	-2.6	0.0	0.0	0.0
Gouy	-15	64	-15	64	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
ampli	-30013.6	10865.5	-30013.4	10865.4	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
contami	-2.0	2.0	2.0	2.0	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
N big sig	-1	1	2	2	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN

TRX_ADC (min CS/DS)

TRY DC

	CS	CH	DS	DH	BS	PR3	PR2	PRM	SR3	SR2	SRM
max Gouy	-25.6	74.8	-25.6	74.8	0.5	0.5	0.4	-0.6	-23.9	-23.9	-23.9
max ampli	-43183.8	15641.0	-43183.4	15640.8	-30.6	-43.4	-5.2	-2.6	-0.0	-0.0	-0.0
Gouy	-15	64	-15	64	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
ampli	-30013.7	10865.5	-30013.5	10865.4	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
contami	-2.0	2.0	2.0	2.0	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
N big sig	-1	1	2	2	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN

TRY_ADC (min CS/DS)

全Sensing Matrix

WFS Sensing Matrix [W/mrad/sqrt(2/pi)]

(Gouy phases at POP A:70.6, POP B:-72.9 REFL A:-89.9, REFL B:-0.1, AS A:89.5, AS B:73.1, TR A:64.4 deg)

	CS	CH	DS	DH	BS	PR3	PR2	PRM	SR3	SR2	SRM
POP_ADC	0.03	0.24	0.00	0.00	0.15	0.43	-2.28	-1.14	0.00	0.00	0.00
POP_BDC	-17.67	-3.42	-0.00	-0.00	-0.31	-0.83	2.26	1.12	-0.00	-0.00	-0.00
POP_A1I	0.07	0.03	-0.00	0.00	-0.00	0.01	0.00	-0.01	0.02	0.00	0.00
POP_A1Q	0.00	0.00	-0.05	0.06	-0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
POP_B1I	-0.00	-0.09	0.00	-0.00	0.02	-0.05	-0.01	0.00	-0.11	-0.01	-0.01
POP_B1Q	-0.00	-0.00	0.03	-0.04	0.03	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00
POP_A2I	-5.07	2.27	0.00	-0.00	1.94	5.49	0.66	0.33	-0.00	-0.00	-0.00
POP_A2Q	-0.00	-0.00	-0.00	0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00
POP_B2I	4.18	-1.97	-0.00	0.00	-1.66	-4.69	-0.56	-0.29	-0.00	-0.00	-0.00
POP_B2Q	0.05	-0.02	0.00	-0.00	-0.02	-0.05	-0.01	-0.00	0.00	0.00	0.00
REFL_ADC	-2.99	2.65	-0.00	0.01	0.72	3.80	0.45	1.58	1.75	0.21	0.11
REFL_BDC	-46.95	-40.43	-0.04	0.03	-20.30	-57.30	-6.63	-2.18	-0.19	-0.02	-0.01
REFL_A1I	161.21	26.15	0.03	0.00	-0.22	-1.18	-0.52	-2.06	-0.04	-0.01	-0.00
REFL_A1Q	0.08	0.01	0.12	-0.14	0.10	-0.00	-0.00	-0.00	-0.01	-0.00	-0.00
REFL_B1I	0.27	-1.81	-0.00	-0.00	-0.88	-2.88	-0.34	5.96	-0.38	-0.05	-0.02
REFL_B1Q	-0.00	0.00	-0.04	0.05	-0.04	-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
REFL_A2I	163.97	19.39	0.02	0.01	-4.76	-13.95	-2.03	-2.74	0.00	0.00	0.00
REFL_A2Q	-0.23	0.06	0.00	-0.00	0.02	0.04	0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00
REFL_B2I	0.42	-2.01	-0.01	0.00	-1.30	-3.66	-0.43	5.57	-0.00	-0.00	-0.00
REFL_B2Q	-0.19	-0.09	-0.00	0.00	-0.07	-0.21	-0.02	-0.00	0.00	0.00	0.00
AS_ADC	0.00	-0.00	0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	0.00
AS_BDC	-0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
AS_A1I	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
AS_A1Q	0.00	0.00	1.51	0.25	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00
AS_B1I	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00
AS_B1Q	0.00	0.00	1.45	0.24	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00
TRX_ADC	0.03	10.88	0.03	10.88	0.00	-0.01	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00
TRX_BDC	30.54	1.99	30.54	1.99	-0.00	0.03	0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00
TRY_ADC	0.03	10.88	-0.03	-10.88	-0.01	-0.01	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00
TRY_BDC	30.54	1.99	-30.54	-1.99	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

SR2はWFSでは
制御しない

選択後のSensing Matrix

WFS Sensing Matrix [W/mrad/sqrt(2/pi)]

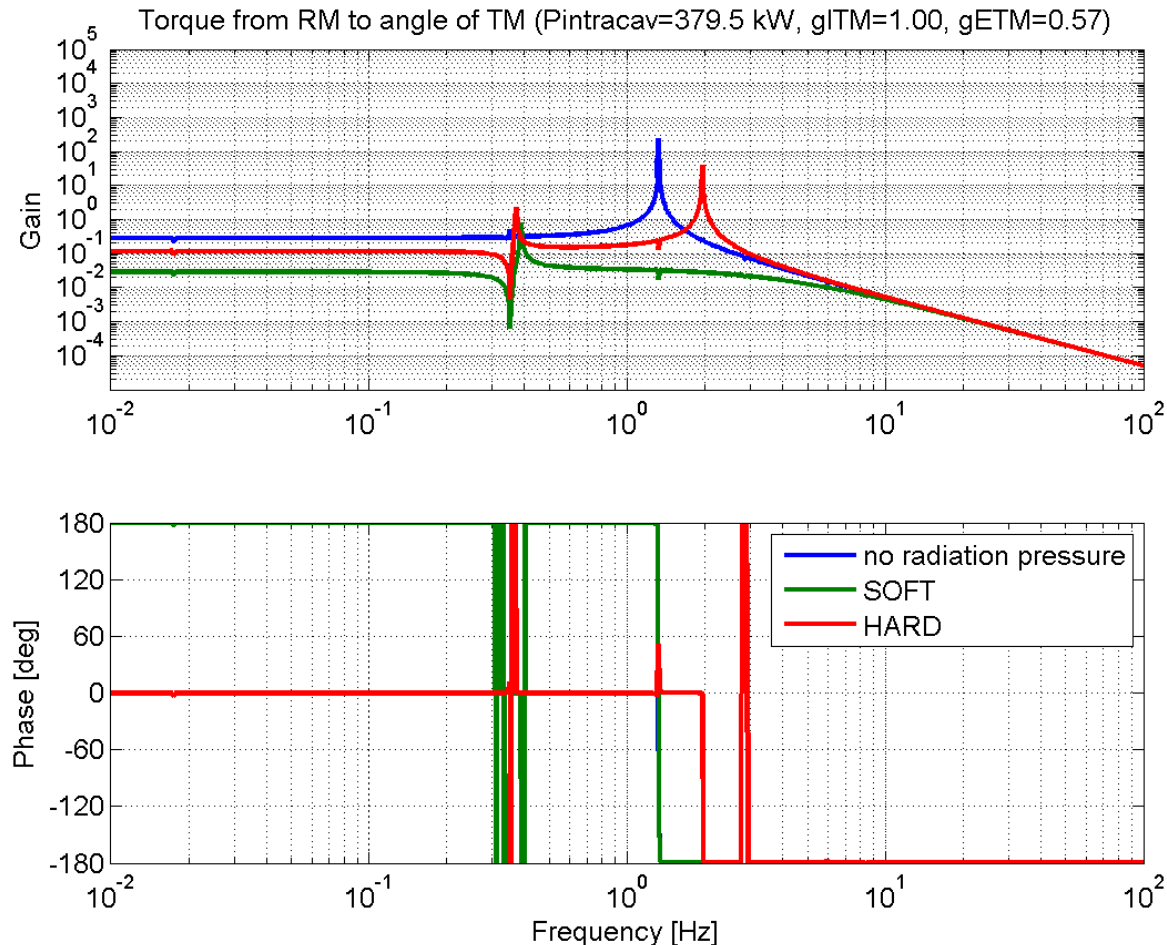
(Gouy phases at POP A:70.6, POP B:-72.9 REFL A:-89.9, REFL B:-0.1, AS A:89.5, AS B:73.1, TR A:64.4 deg)

	CS	CH	DS	DH	BS	PR3	PR2	PRM	SR3	SR2	SRM
REFL_A2I	-163.97	19.39	0.02	0.01	-4.76	-13.95	-2.03	-2.74	0.00	0.00	0.00
TRX_ADC	-0.03	10.88	0.03	10.88	0.00	-0.01	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00
AS_A1Q	-0.00	0.00	1.51	0.25	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00
TRY_ADC	-0.03	10.88	-0.03	-10.88	-0.01	-0.01	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00
POP_A2I	-5.07	2.27	0.00	-0.00	1.94	5.49	0.66	0.33	-0.00	-0.00	-0.00
REFL_BDC	-46.95	-40.43	-0.04	0.03	-20.30	-57.30	-6.63	-2.18	-0.19	-0.02	-0.01
POP_ADC	-0.03	0.24	0.00	0.00	0.15	0.43	-2.28	-1.14	0.00	0.00	0.00
REFL_B1I	-0.27	-1.81	-0.00	-0.00	-0.88	-2.88	-0.34	5.96	-0.38	-0.05	-0.02
POP_B1I	-0.00	-0.09	0.00	-0.00	0.02	-0.05	-0.01	0.00	-0.11	-0.01	-0.01
AS_BDC	-0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

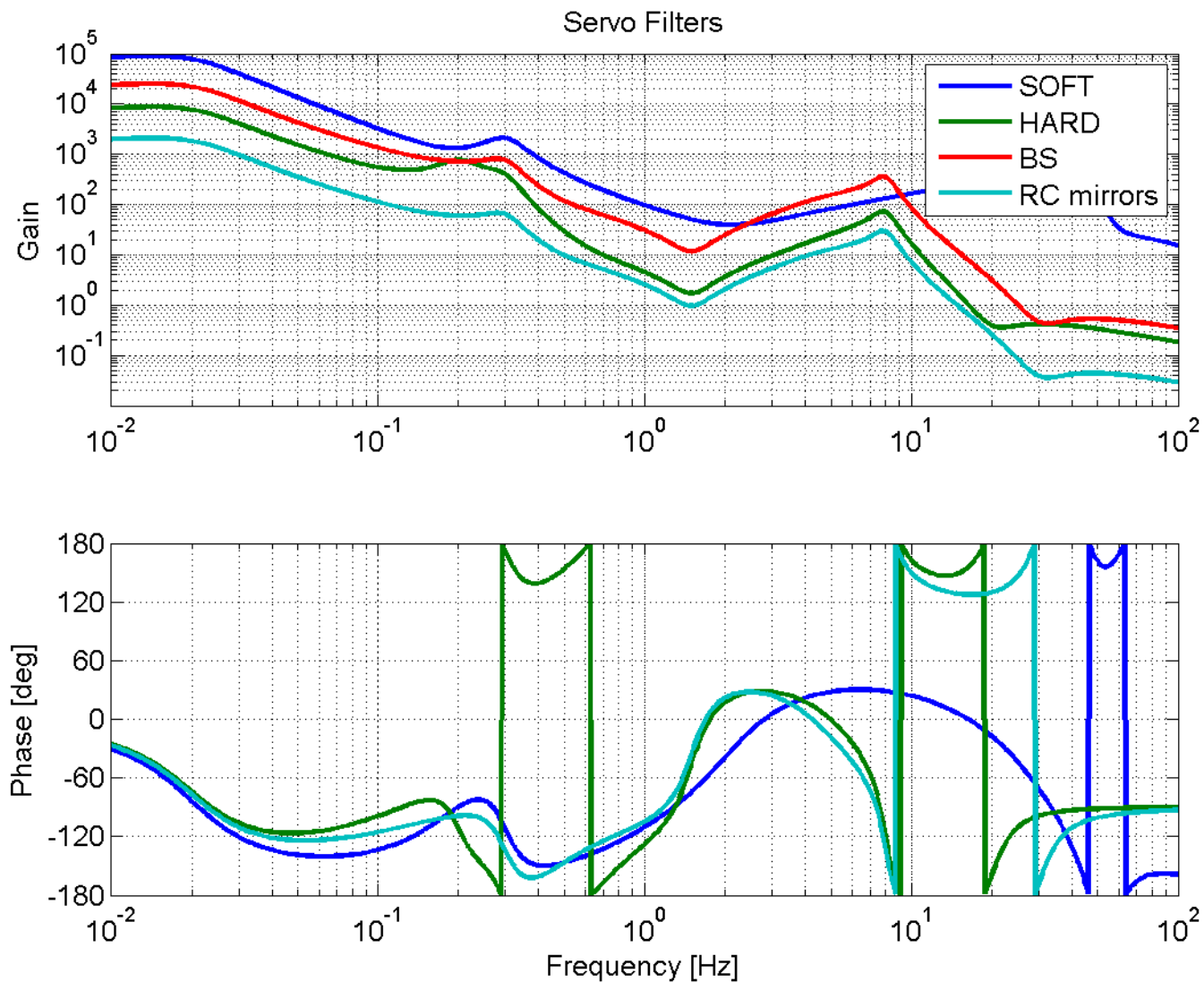
SR2はWFSでは
制御しない

Opto-mechanical TF

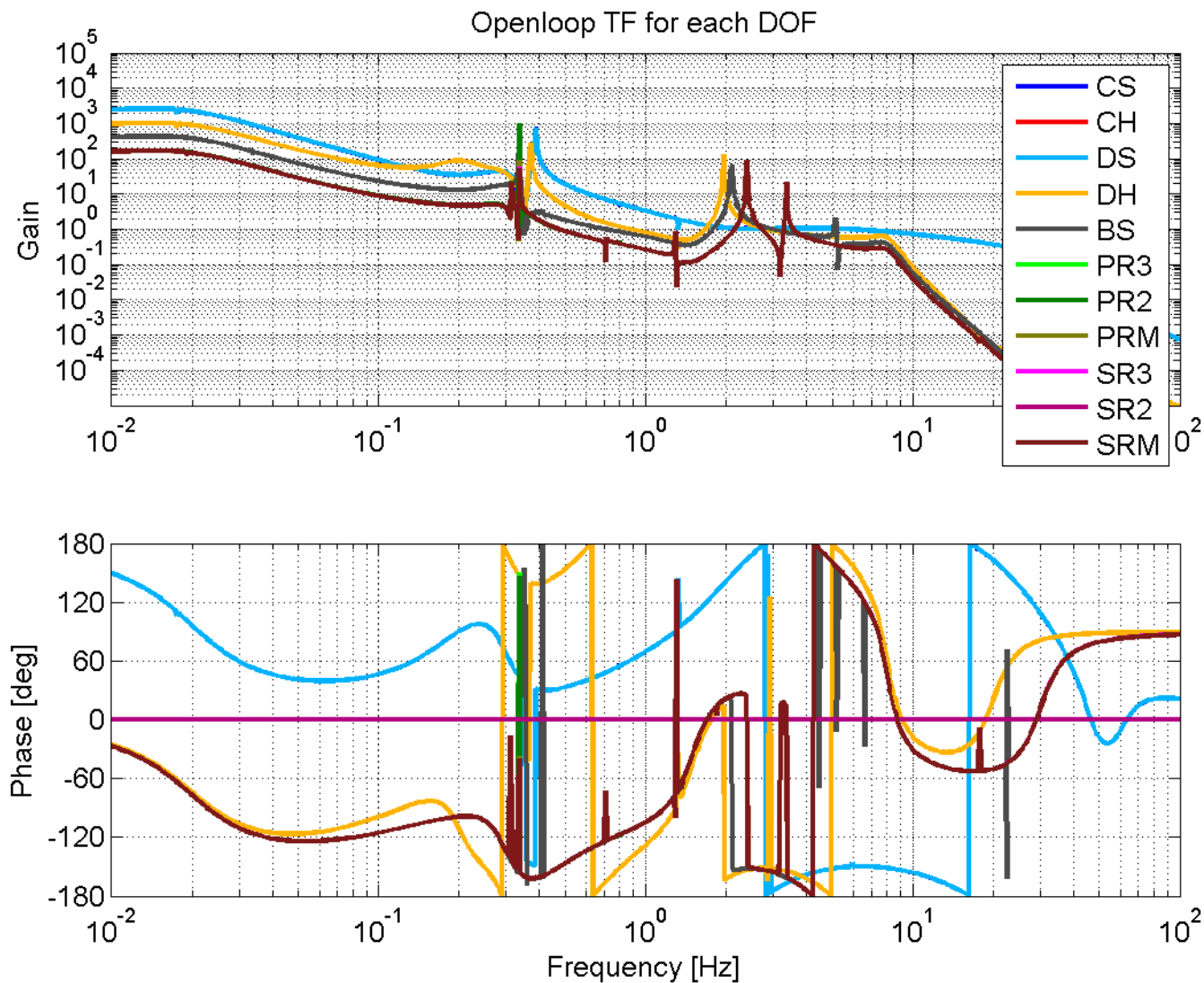
- リコイルマスに加えたトルクから鏡の角度へのTF (pitch)
青が輻射圧($P_{\text{incav}}=379\text{kW}$) 下で緑と赤に



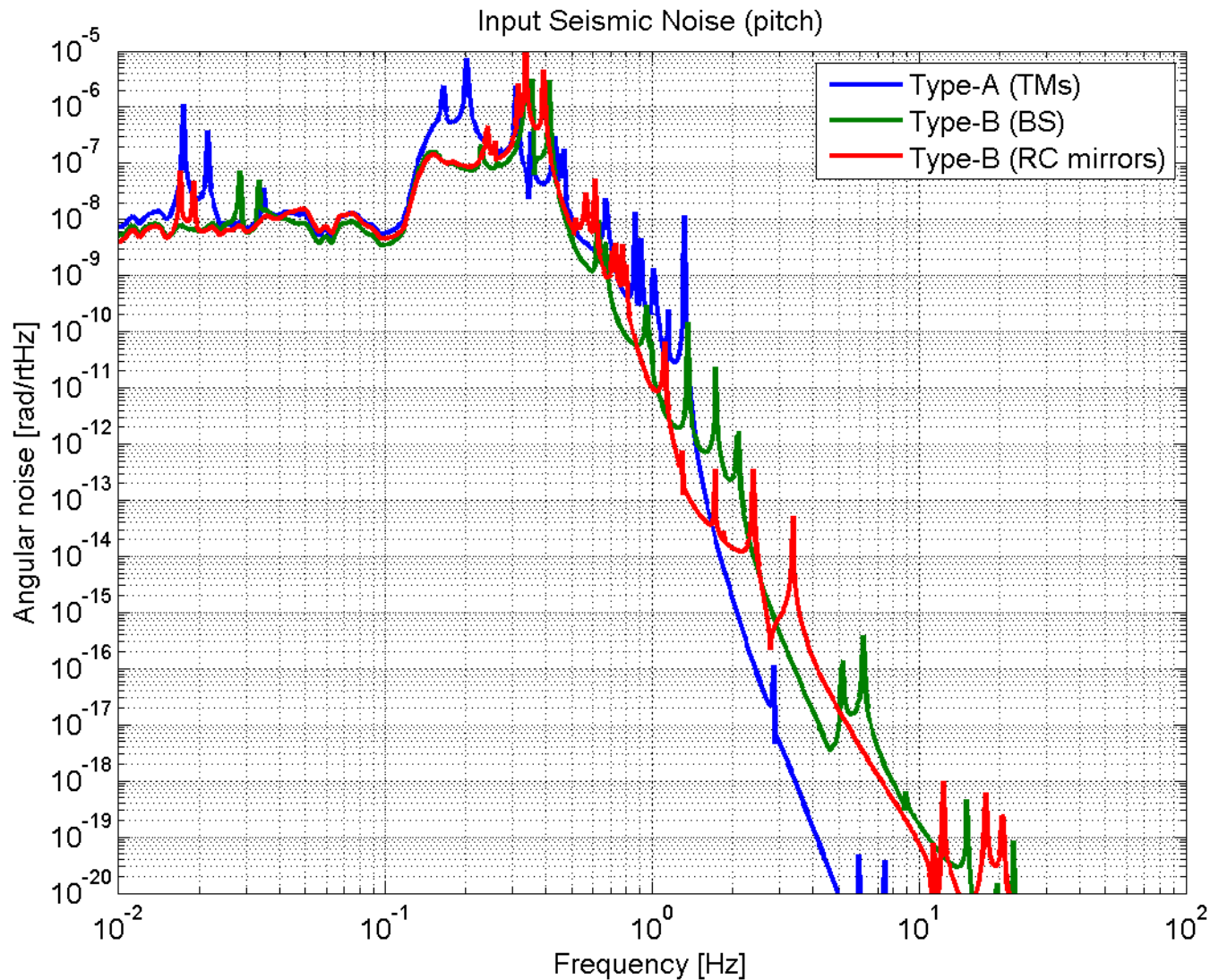
制御フィルタの設計



オープンループ伝達関数

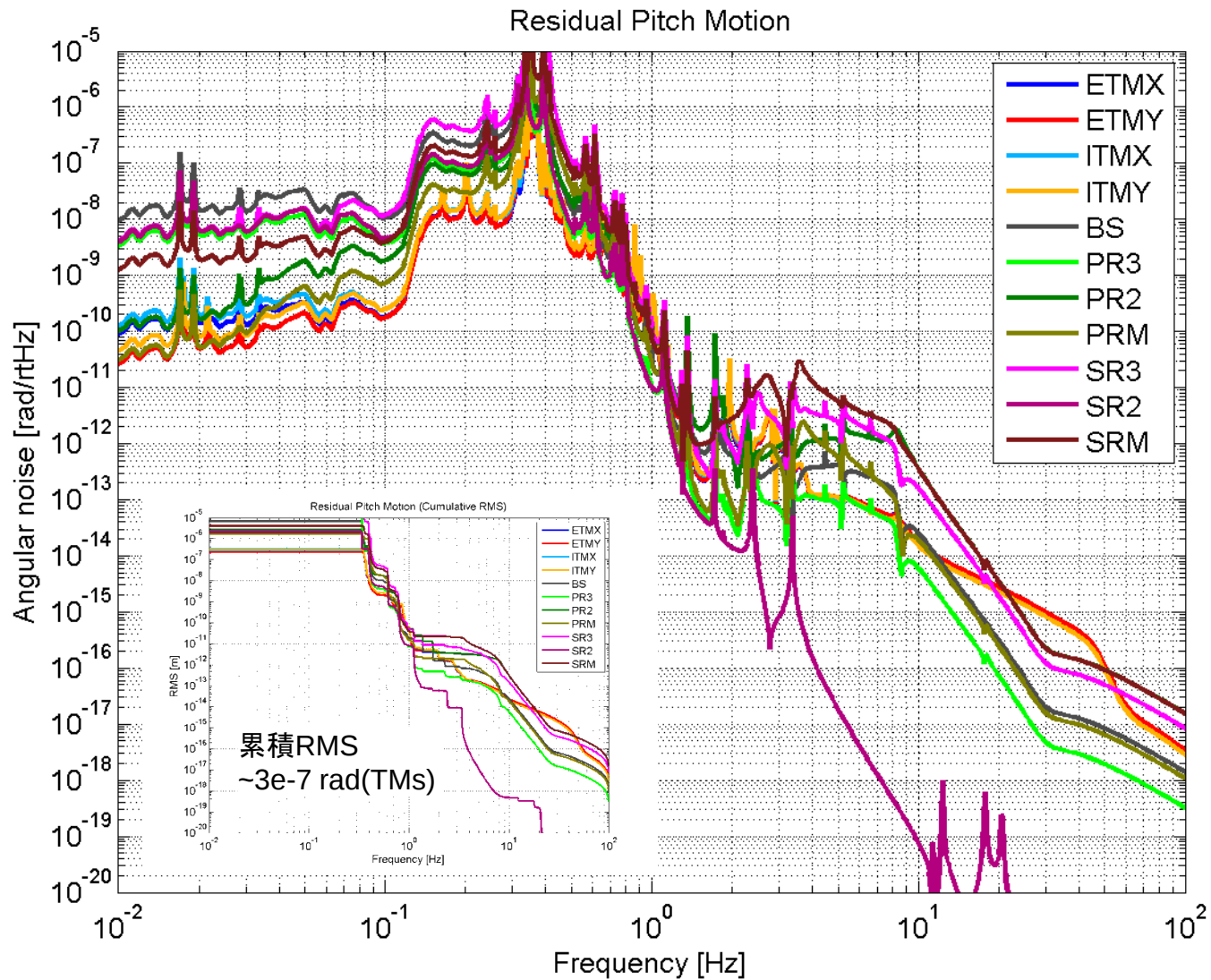


地面振動による角度揺れ



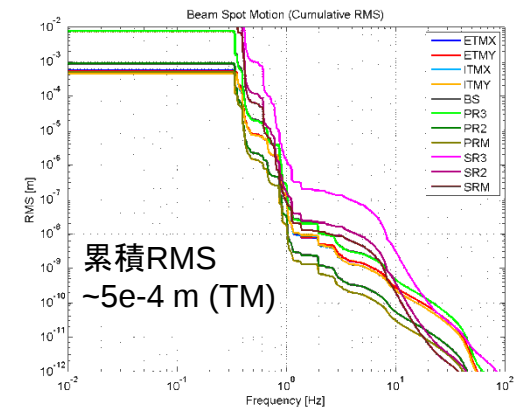
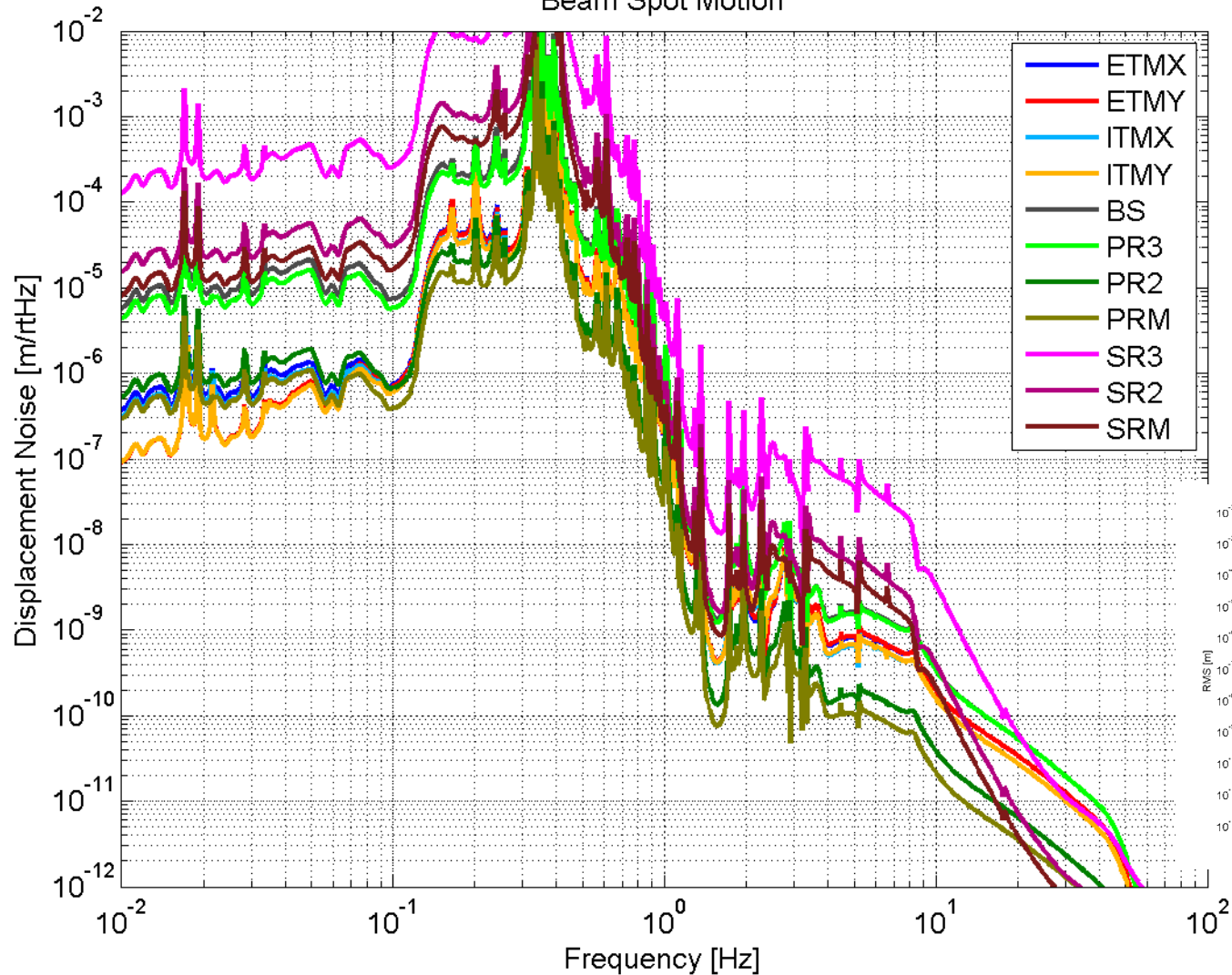
関口くん提供
(2011/5/13版)
“Noisy day”

残留角度揺れ

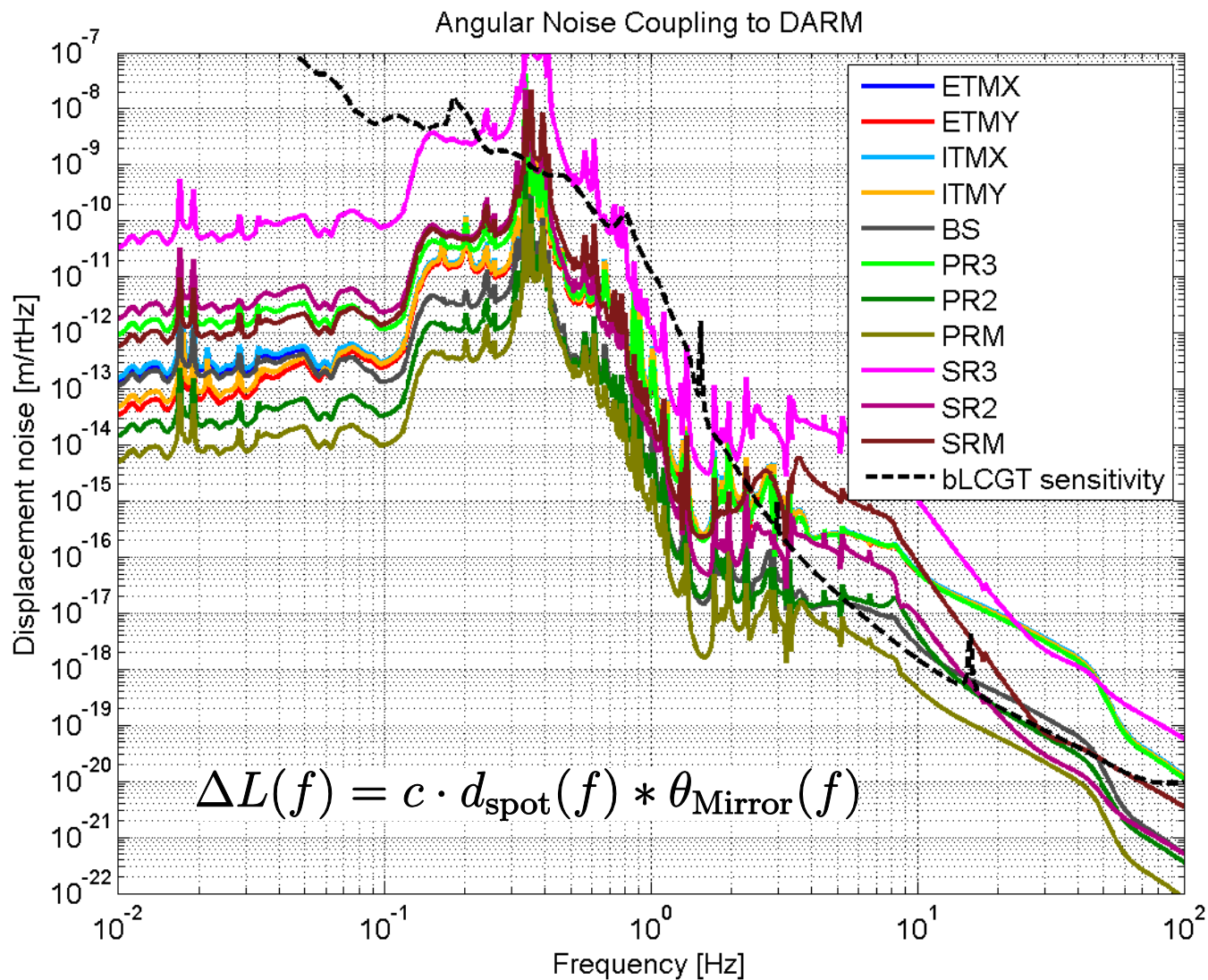


ビームスポットの動き

Beam Spot Motion



DARMへのカップリング



なんでこんな悪いのかは謎

ちなみに制御しないと.....

