

# LCGTのアライメント制御

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

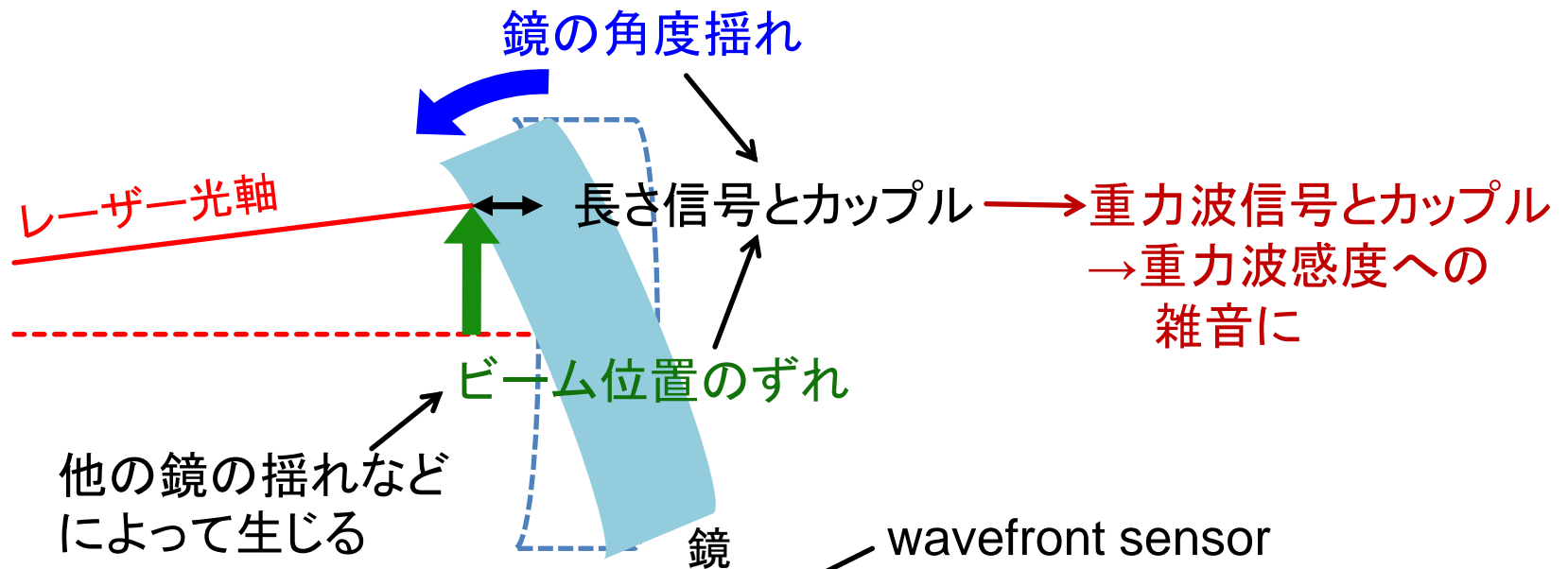
麻生洋一、我妻一博<sup>A</sup>、関口貴令<sup>B</sup>、Matt Evans<sup>C</sup>、Lisa Barsotti<sup>C</sup>、  
and the LCGT Collaboration  
東大理、国立天文台<sup>A</sup>、東大宇宙線研<sup>B</sup>、MIT<sup>C</sup>

# 大型低温重力波望遠鏡LCGT

- 大型レーザー干渉計型重力波検出器計画  
基線長3 km
- 2つの大きな特徴  
地下建設(岐阜県 神岡) ← 地面振動少ない  
低温(鏡を20 Kに冷却) ← 熱雑音低減
- 2010年に予算化、いよいよ建設開始
- 2014年～常温運転、2017年～本格観測
- 重力波の初検出を目指す  
250 Mpc以上離れた連星中性子星合体  
1年間に数イベント以上

# アライメント制御

- LCGTを高感度で運転するには鏡の姿勢を高精度に制御することが必須



- 鏡の姿勢情報は WFS を用いて得て、鏡のアクチュエータへフィードバック
- ASC: alignment sensing and control

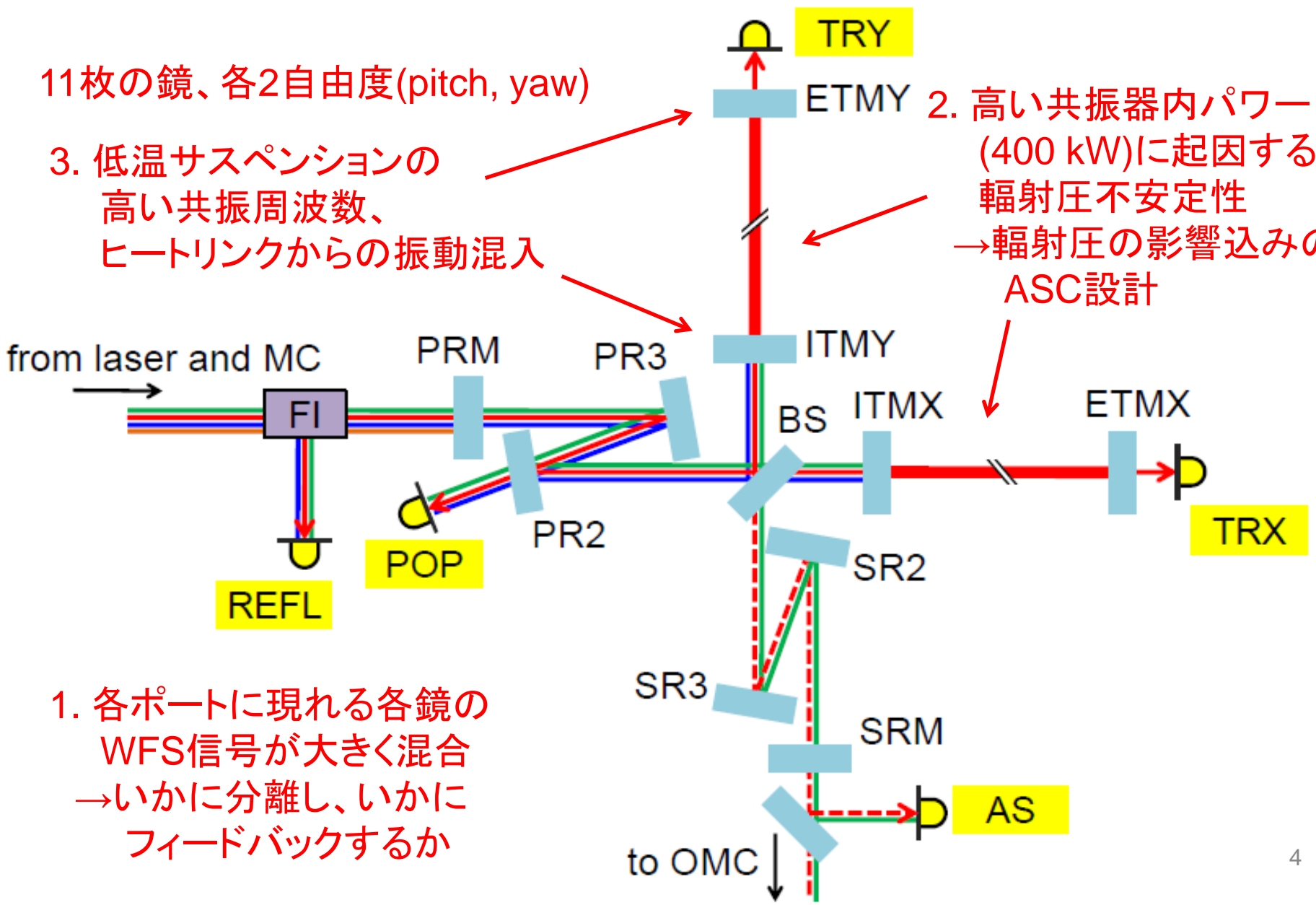
# ASCは大変！

11枚の鏡、各2自由度(pitch, yaw)

3. 低温サスペンションの  
高い共振周波数、  
ヒートリンクからの振動混入

2. 高い共振器内パワー  
(400 kW)に起因する  
輻射圧不安定性  
→輻射圧の影響込みの  
ASC設計

1. 各ポートに現れる各鏡の  
WFS信号が大きく混合  
→いかに分離し、いかに  
フィードバックするか



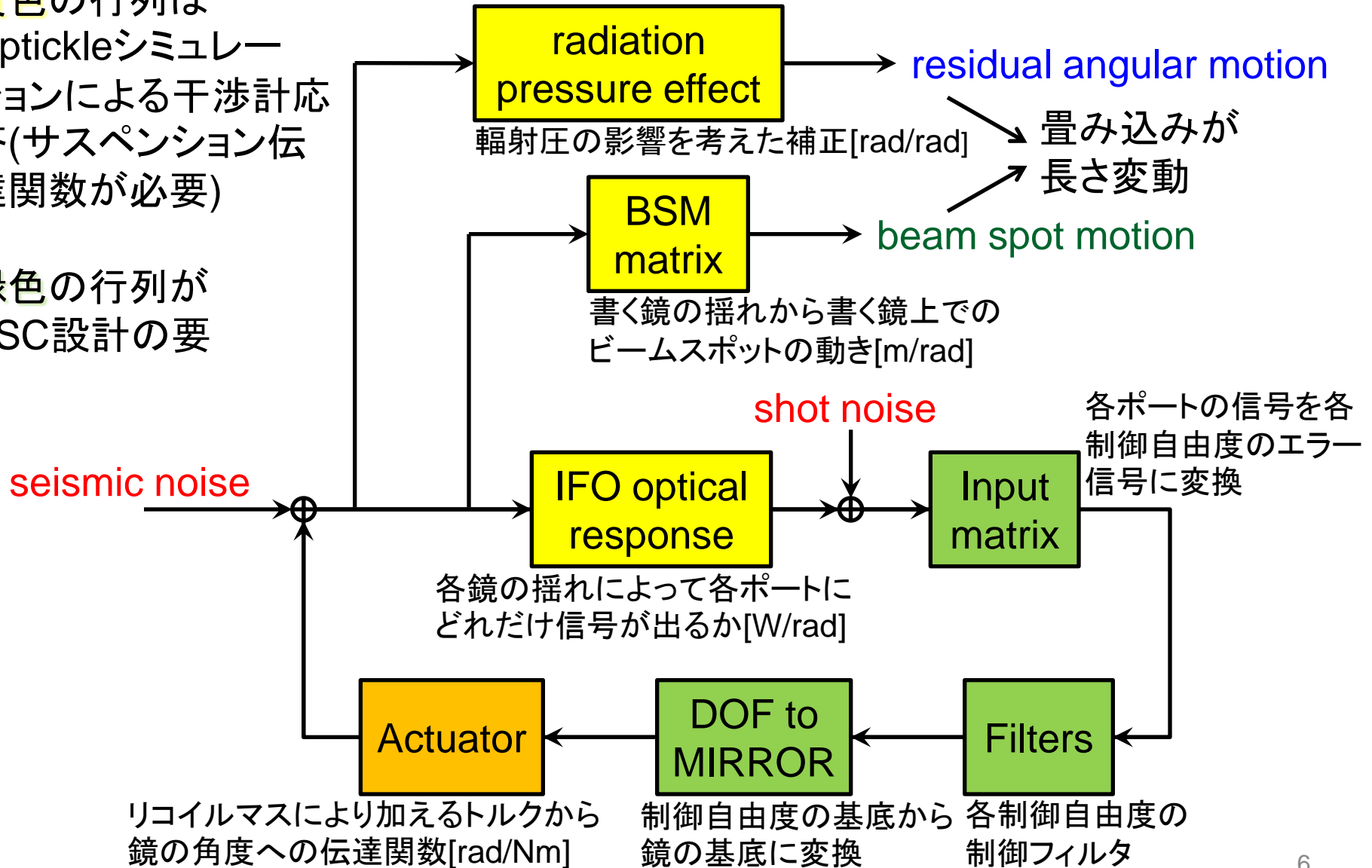
# ASC設計のためにしたこと

- サスペンション応答をシュミレートするための3次元剛体モデルを構築  
→関口君発表(18pSV-11)
- WFS制御系設計ツールを開発(本発表)
  - Optickleを用いた輻射圧の影響込みでの干渉計応答のシミュレーション  
各鏡間の光の電磁場を周波数領域で計算  
鏡の揺れで生じる01モードを伝搬させることでWFSをシミュレート
  - 剛体モデルとOptickleのシミュレーション結果を用いて制御系を設計
  - 残留角度揺れが干渉計感度に対してどの程度の雑音になるかを見積もり  
これが最小になるように設計する

# ASCモデルの構造

黄色の行列は  
Optickleシミュレーションによる干渉計応答(サスペンション伝達関数が必要)

緑色の行列が  
ASC設計の要



# ASC設計手順

- step 0. 制御自由度を選択
- step 1. 信号取得ポートの選択  
復調位相、gouy位相の最適化
- step 2. 制御フィルタの設計
- step 3. 残留角度揺れの計算
- step 4. ビームスポットの動きを計算
- step 5. 感度へのカップリングを見積もる
  
- step 6. pitchとyaw共に0-5まで行う  
→ LCGTの感度への影響は？

# ASC設計手順

- step 0. 制御自由度を選択
- step 1. 信号取得ポートの選択  
復調位相、gouy位相の最適化
- step 2. 制御フィルタの設計
- step 3. 残留角度揺れの計算
- step 4. ビームスポットの動きを計算
- step 5. 感度へのカップリングを見積もる
  
- step 6. pitchとyaw共に0-5まで行う  
→ LCGTの感度への影響は？

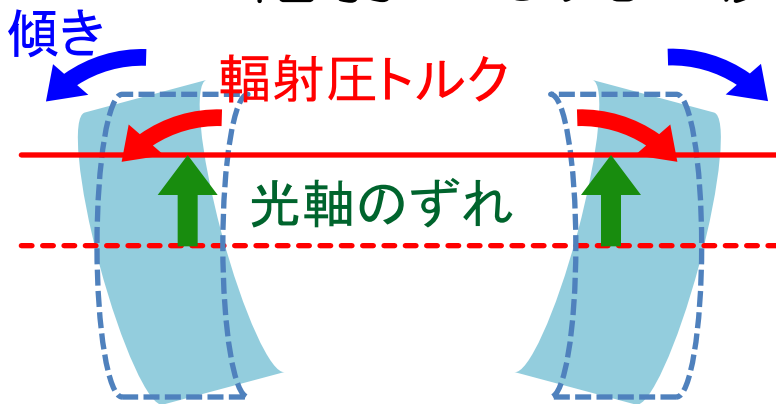


# 0. 制御自由度の選択

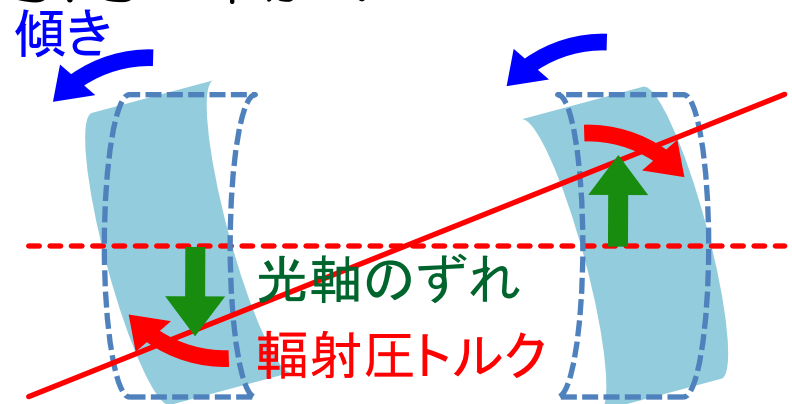
- 制御すべき鏡は11枚  
ETMX, ETMY, ITMX, ITMY,  
BS, PR3, PR2, PRM, SR3, SR2, SRM
- 対角化のしやすさを考え、制御自由度は  
CS, CH, DS, DH,  
BS, PR3, PR2, PRM, SR3, SR2, SRM
- C/DはX腕、Y腕の同相/差動
- S/HはSOFTモード/HARDモード  
輻射圧によってテストマスの共振周波数  
が2つに分かれる

# 0. 制御自由度の選択

- SOFTモード
  - ITMとETMが反対称に傾く
    - 輻射圧がさらに傾きを拡大
  - 輻射圧トルク  $>$  機械的復元トルクだと不安定
- HARDモード
  - ITMとETMが対称に傾く
    - 輻射圧は元に戻す方向に働く



SOFT



HARD

# ASC設計手順

- step 0. 制御自由度を選択
- step 1. 信号取得ポートの選択  
復調位相、gouy位相の最適化
- step 2. 制御フィルタの設計
- step 3. 残留角度揺れの計算
- step 4. ビームスポットの動きを計算
- step 5. 感度へのカップリングを見積もる
- step 6. pitchとyaw共に0-5まで行う  
→ LCGTの感度への影響は？

# 1. 信号取得ポートの選択

- 11自由度の分離比が大きくなるよう復調位相、gouy位相を最適化
- 得られた30個(以上)のポートから対角化しやすい11ポートを選ぶ
- すごい大変

# 1. 信号取得ポートの選択

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

(Gouy phases at POP A:80.8, POP B:42.2 REFL A:80.6, REFL B:-0.9, AS A:89.0, AS B:-1.0, TR A:-67.8 deg)

だいたい  
対角化できてる

← 制御  
自由度

	CS	CH	DS	DH	BS	PR3	PR2	PRM	SR3	SR2	SRM
TRX_ADC	-12.89	-2.36	-12.89	-2.36	0.00	-0.01	-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00
REFL_A1I	-29.45	-156.82	-0.00	-0.01	0.13	0.85	0.45	3.96	-0.04	-0.00	-0.00
TRY_ADC	-12.89	-2.36	12.89	2.36	-0.01	-0.01	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00
AS_A1Q	0.00	0.00	0.28	1.49	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00
AS_B1Q	0.00	0.00	-0.02	-0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00
POP_A2I	-6.83	2.65	0.02	-0.01	3.95	11.31	1.47	1.30	-0.00	-0.00	-0.00
POP_ADC	-0.09	0.08	-0.00	0.00	0.07	0.16	-2.72	-2.35	0.00	0.00	0.00
REFL_B1I	2.08	0.30	0.00	-0.00	-0.94	-2.84	-0.37	12.12	-0.29	-0.04	-0.03
POP_B1I	0.07	0.01	0.00	-0.00	0.02	-0.03	-0.00	-0.01	-0.07	-0.01	-0.01
AS_ADC	1.07	-0.93	0.29	-0.10	0.13	-1.01	-0.13	0.87	-0.91	-0.12	0.80

数字の色は  
信号の強さ

$\times 10^{-3}$

↑  
選択した信号取得ポート

信号が出にくい  
ためSR2はWFSでは制御しない

# ASC設計手順

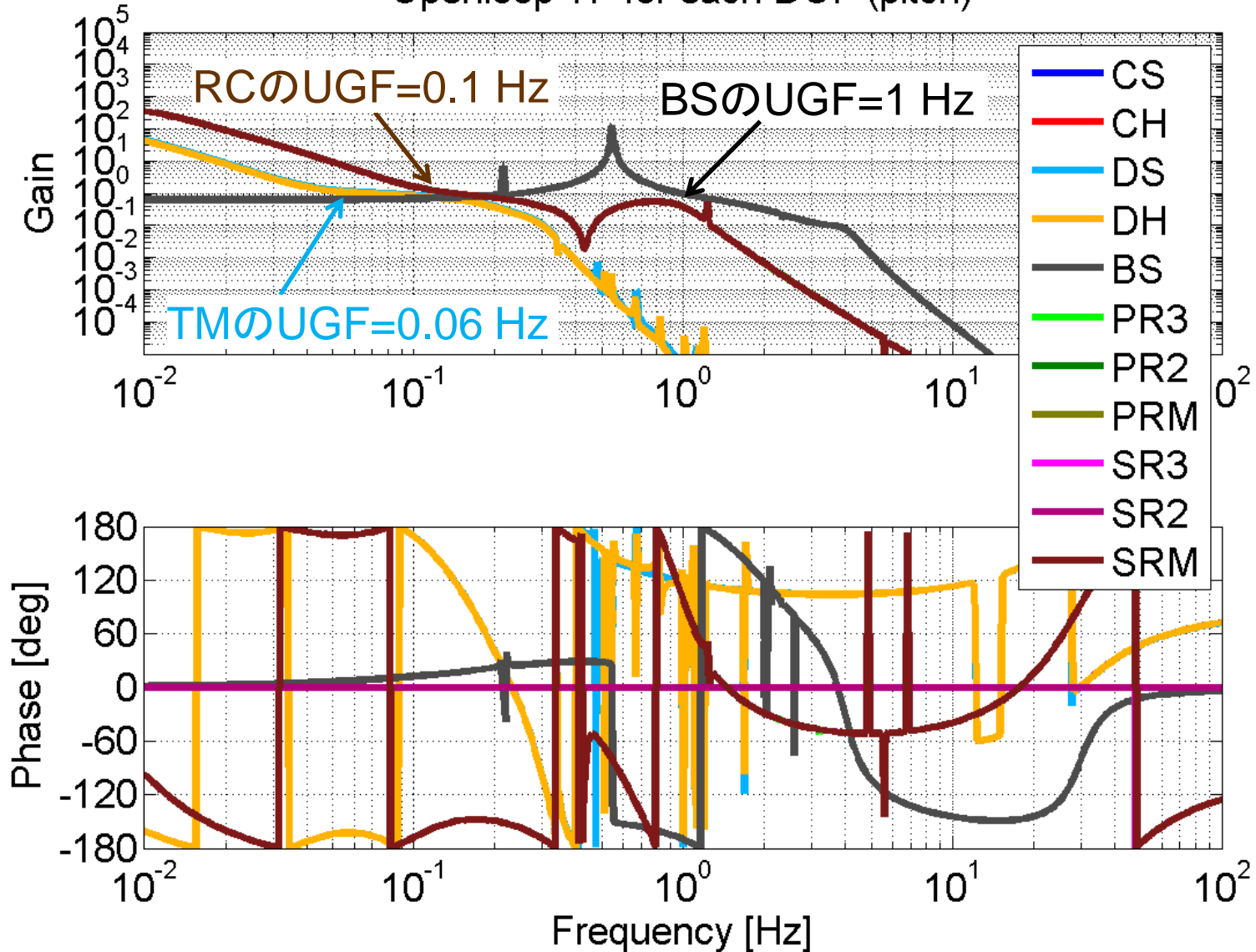
- step 0. 制御自由度を選択
- step 1. 信号取得ポートの選択  
復調位相、gouy位相の最適化
- **step 2. 制御フィルタの設計**
- step 3. 残留角度揺れの計算
- step 4. ビームスポットの動きを計算
- step 5. 感度へのカップリングを見積もる
  
- step 6. pitchとyaw共に0-5まで行う  
→ LCGTの感度への影響は？

## 2. 制御フィルタの設計

- 制御帯域(UGF)はできるだけ低く
  - WFSはドリフト制御のみ
  - WFSショットノイズを導入しないよう  
観測帯域10Hz以上では十分にカット
  - SOFTモードが輻射圧不安定な場合は  
不安定ポールより高くせざるを得ない
- 地面振動の大きなところはゲインを高く
  - ビーム揺れのRMSを下げる
  - 特に0.5 Hz付近の共振ピーク
  - WFSでは難しい

# 2. 制御フィルタの設計

Openloop TF for each DOF (pitch)



高周波では  
制御ゲインを  
十分小さく

pitchなので  
機械的に硬く、  
SOFTモードは  
安定

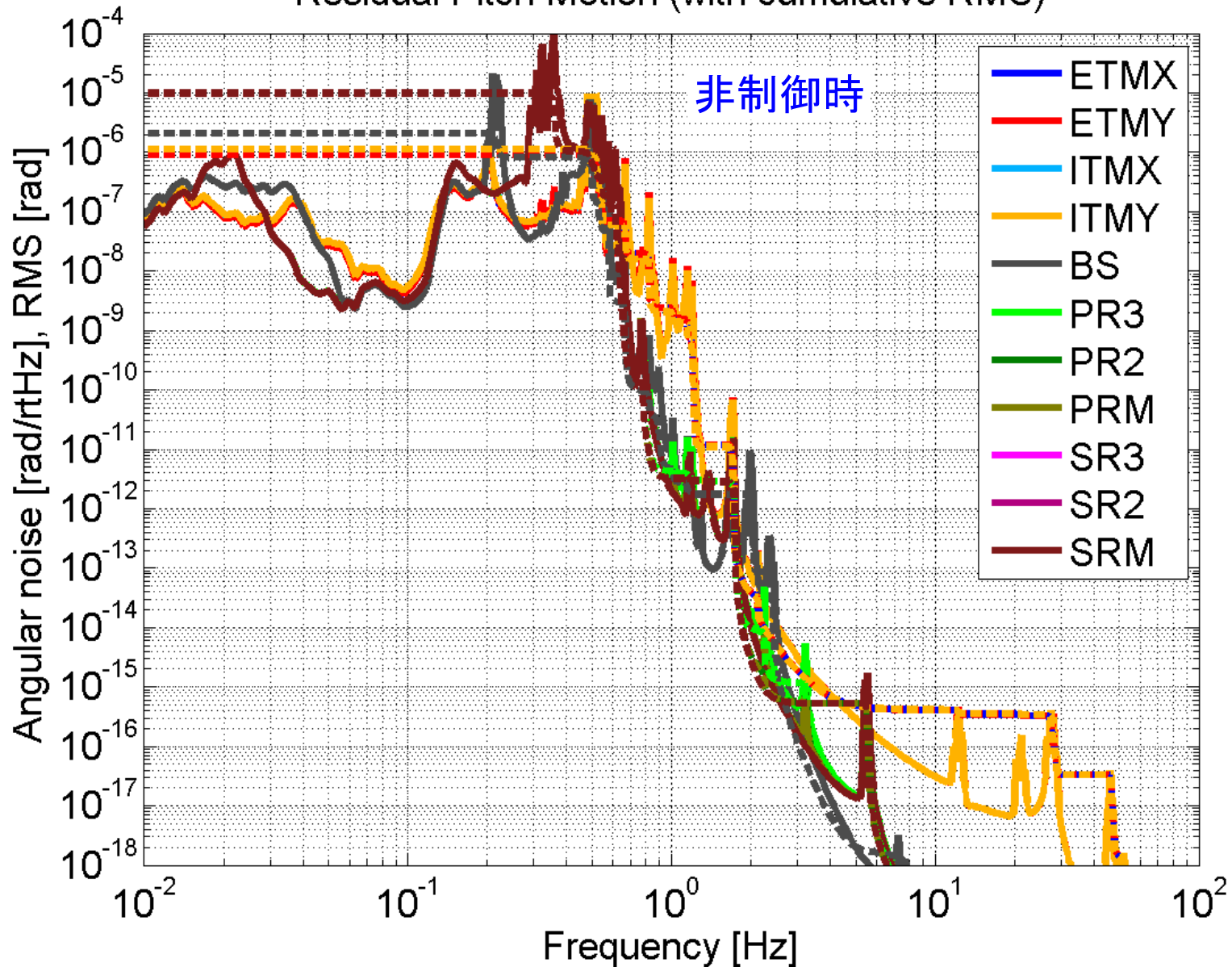


# ASC設計手順

- step 0. 制御自由度を選択
- step 1. 信号取得ポートの選択  
復調位相、gouy位相の最適化
- step 2. 制御フィルタの設計
- **step 3. 残留角度揺れの計算**
- step 4. ビームスポットの動きを計算
- step 5. 感度へのカップリングを見積もる
  
- step 6. pitchとyaw共に0-5まで行う  
→ LCGTの感度への影響は？

# 3. 残留角度揺れを計算

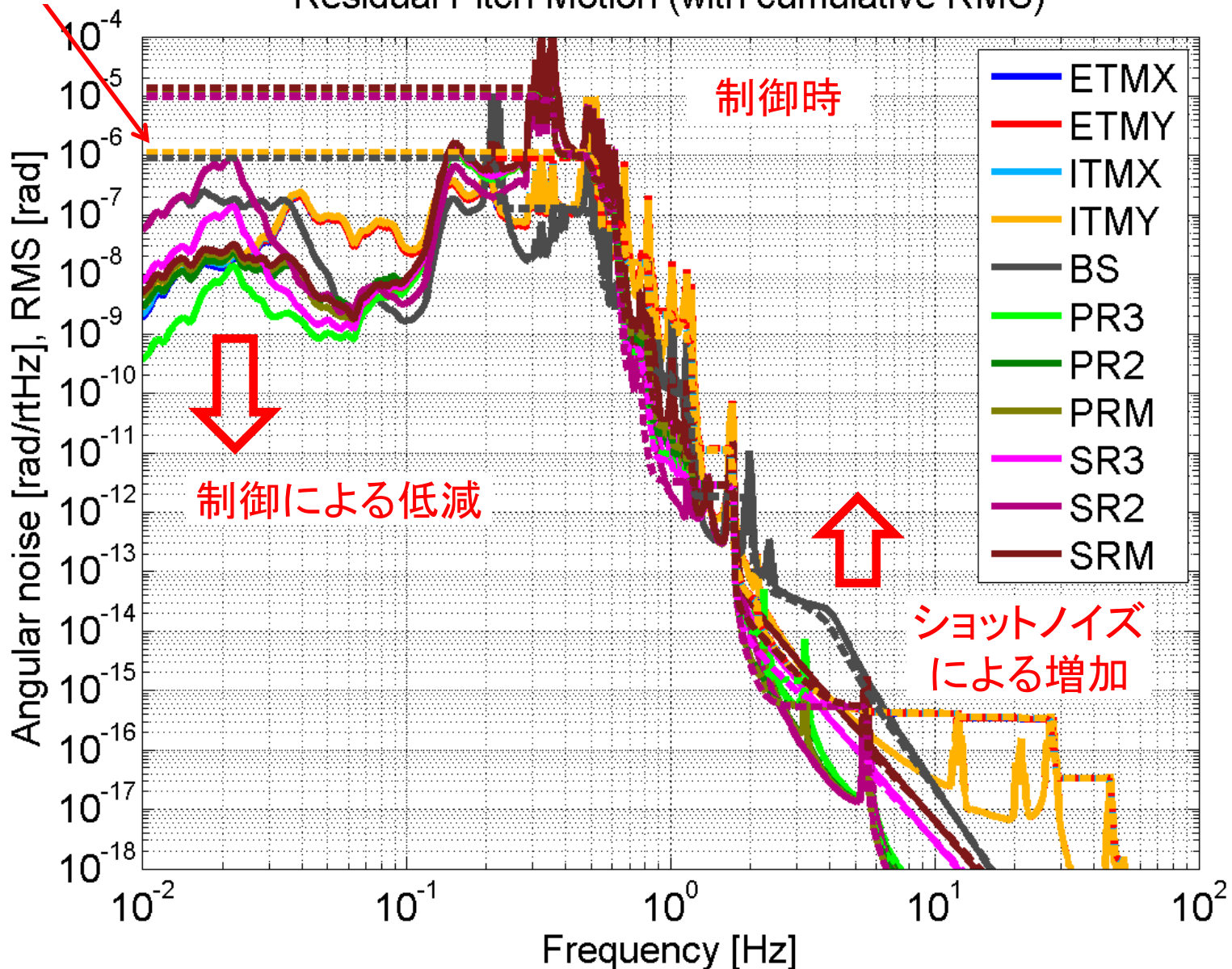
Residual Pitch Motion (with cumulative RMS)



# 3. 残留角度揺れを計算

Residual Pitch Motion (with cumulative RMS)

TMのRMS  
~1 urad



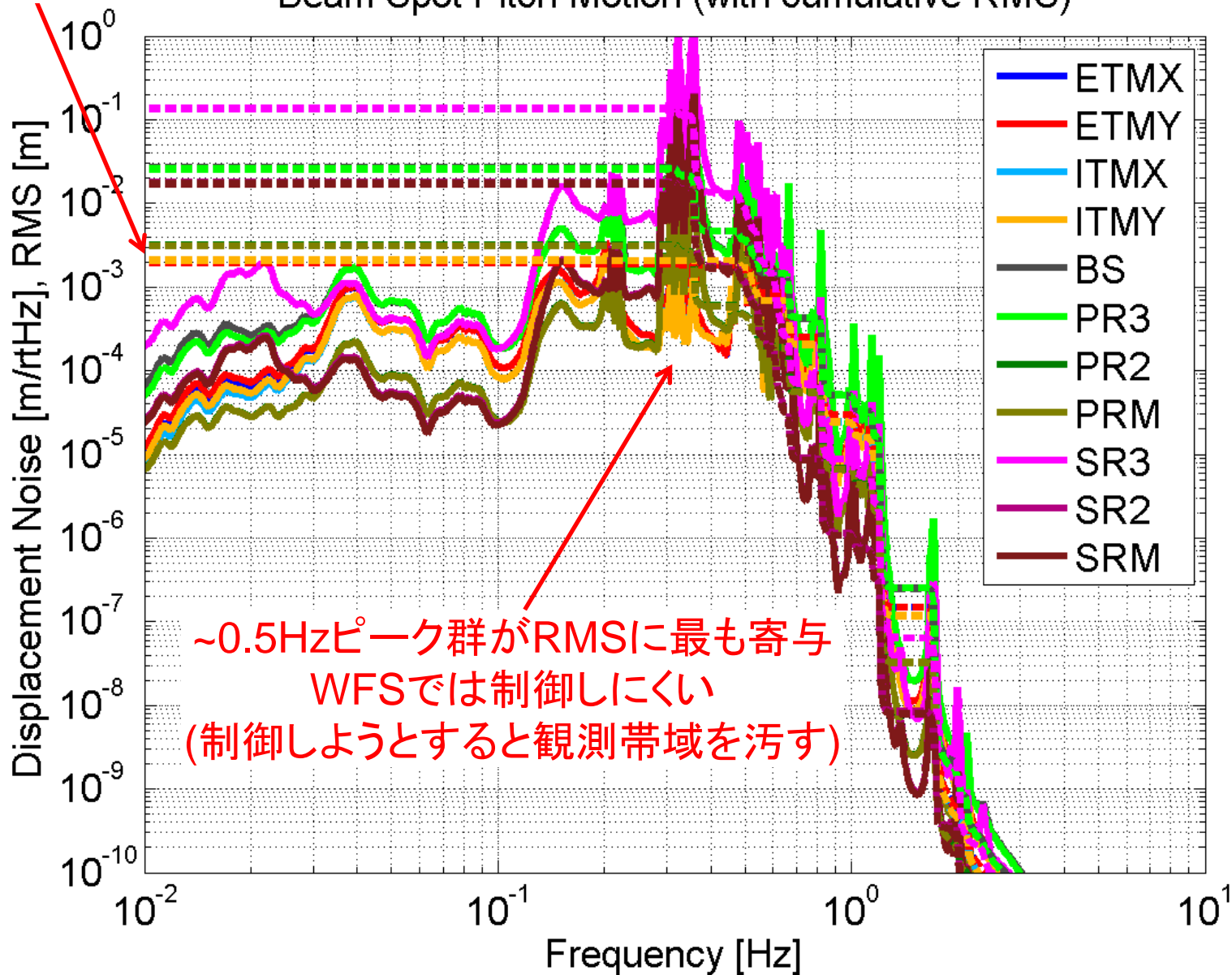
# ASC設計手順

- step 0. 制御自由度を選択
- step 1. 信号取得ポートの選択  
復調位相、gouy位相の最適化
- step 2. 制御フィルタの設計
- step 3. 残留角度揺れの計算
- **step 4. ビームスポットの動きを計算**
- step 5. 感度へのカップリングを見積もる
  
- step 6. pitchとyaw共に0-5まで行う  
→ LCGTの感度への影響は？

TMのRMS  
~2 mm

# 4. ビームスポットを動き

Beam Spot Pitch Motion (with cumulative RMS)



# ASC設計手順

- step 0. 制御自由度を選択
- step 1. 信号取得ポートの選択  
復調位相、gouy位相の最適化
- step 2. 制御フィルタの設計
- step 3. 残留角度揺れの計算
- step 4. ビームスポットの動きを計算
- step 5. 感度へのカップリングを見積もる
- step 6. pitchとyaw共に0-5まで行う  
→ LCGTの感度への影響は？

# 5. 感度へのカップリング

- 残留角度揺れとビームスポットの動きの畳み込みが長さ信号へのカップリング量

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

- これにカップリング係数をかけて干渉計感度への影響を見積もる

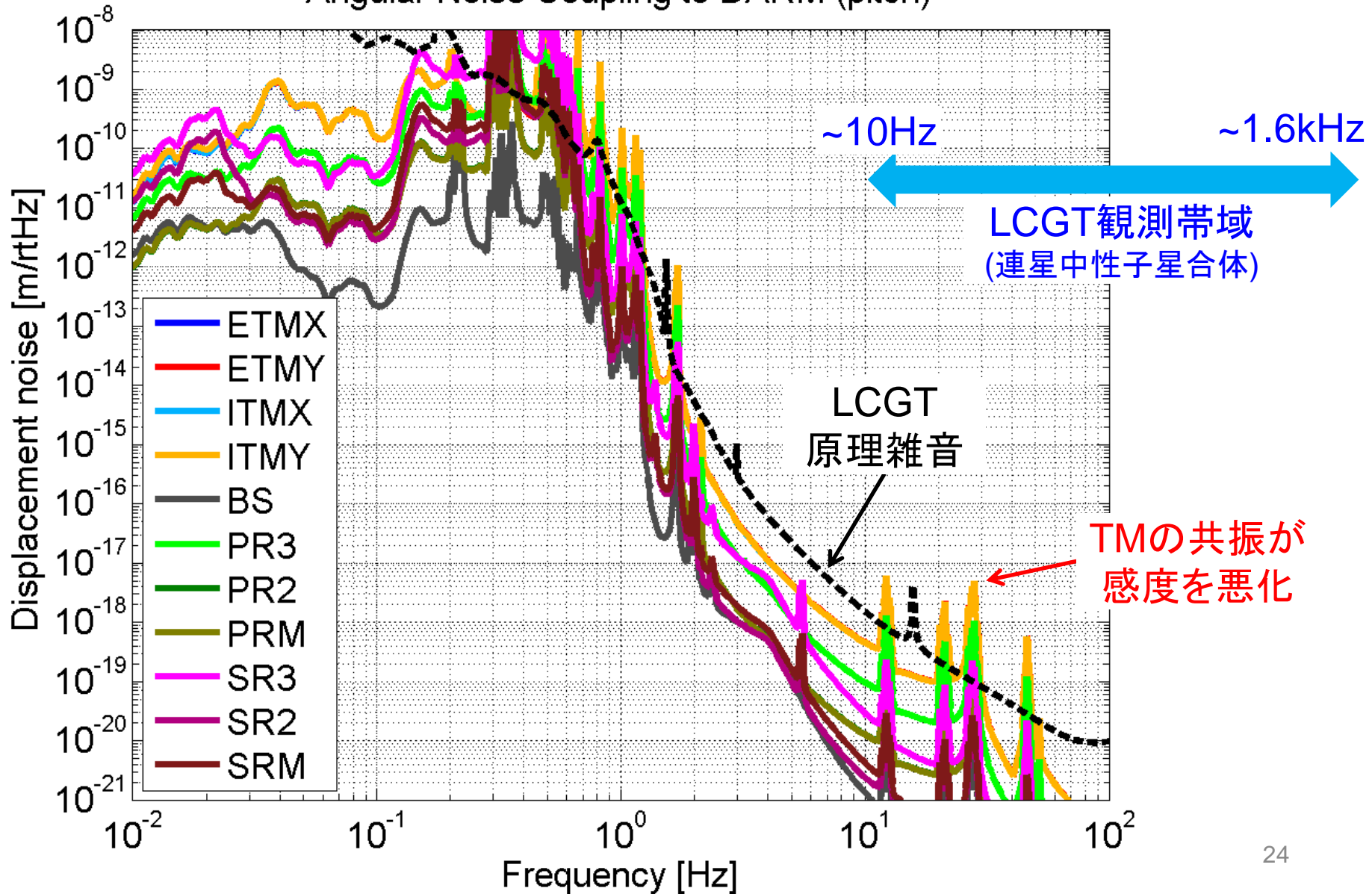
TM: 1

BS:  $\pi / (2F) \sim 1/980$

RC: 1/100

# 5. 感度へのカップリング

Angular Noise Coupling to DARM (pitch)





# ASC設計手順

- step 0. 制御自由度を選択
- step 1. 信号取得ポートの選択  
復調位相、gouy位相の最適化
- step 2. 制御フィルタの設計
- step 3. 残留角度揺れの計算
- step 4. ビームスポットの動きを計算
- step 5. 感度へのカップリングを見積もる
- step 6. pitchとyaw共に0-5まで行う  
→ LCGTの感度への影響は？

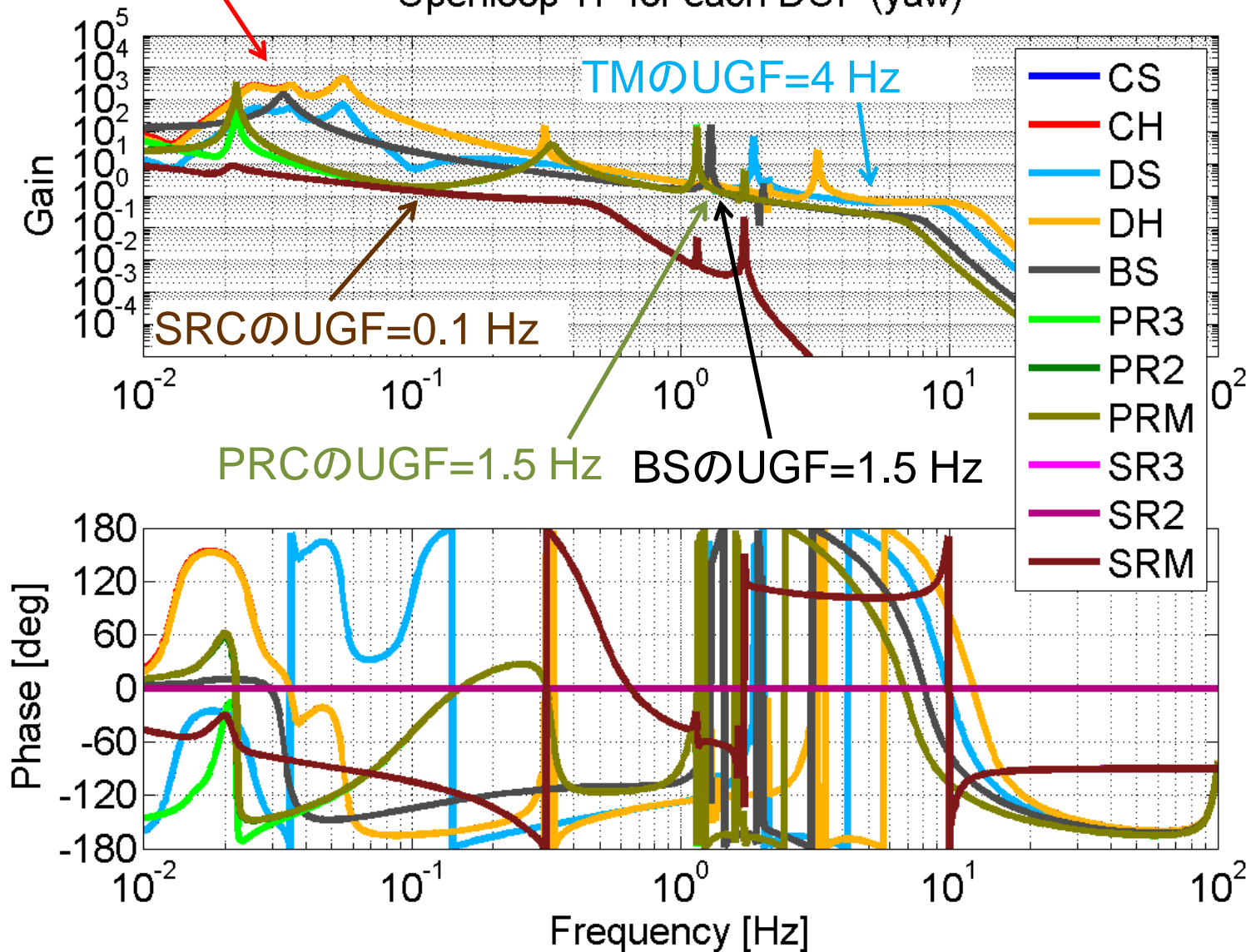
## 6. yawも計算

- これまでの計算は全てpitch
- yawはSOFTモードが不安定  
不安定ポール $\sim 1\text{Hz}$   
→TMのUGFそれより高く(4Hz)
- ただし、RMSに寄与するピークが低周波( $\sim 0.04\text{Hz}$ )なのでWFS制御しやすい

RMSに寄与する  
ピークをダンプ

# 6. yawも計算

Openloop TF for each DOF (yaw)

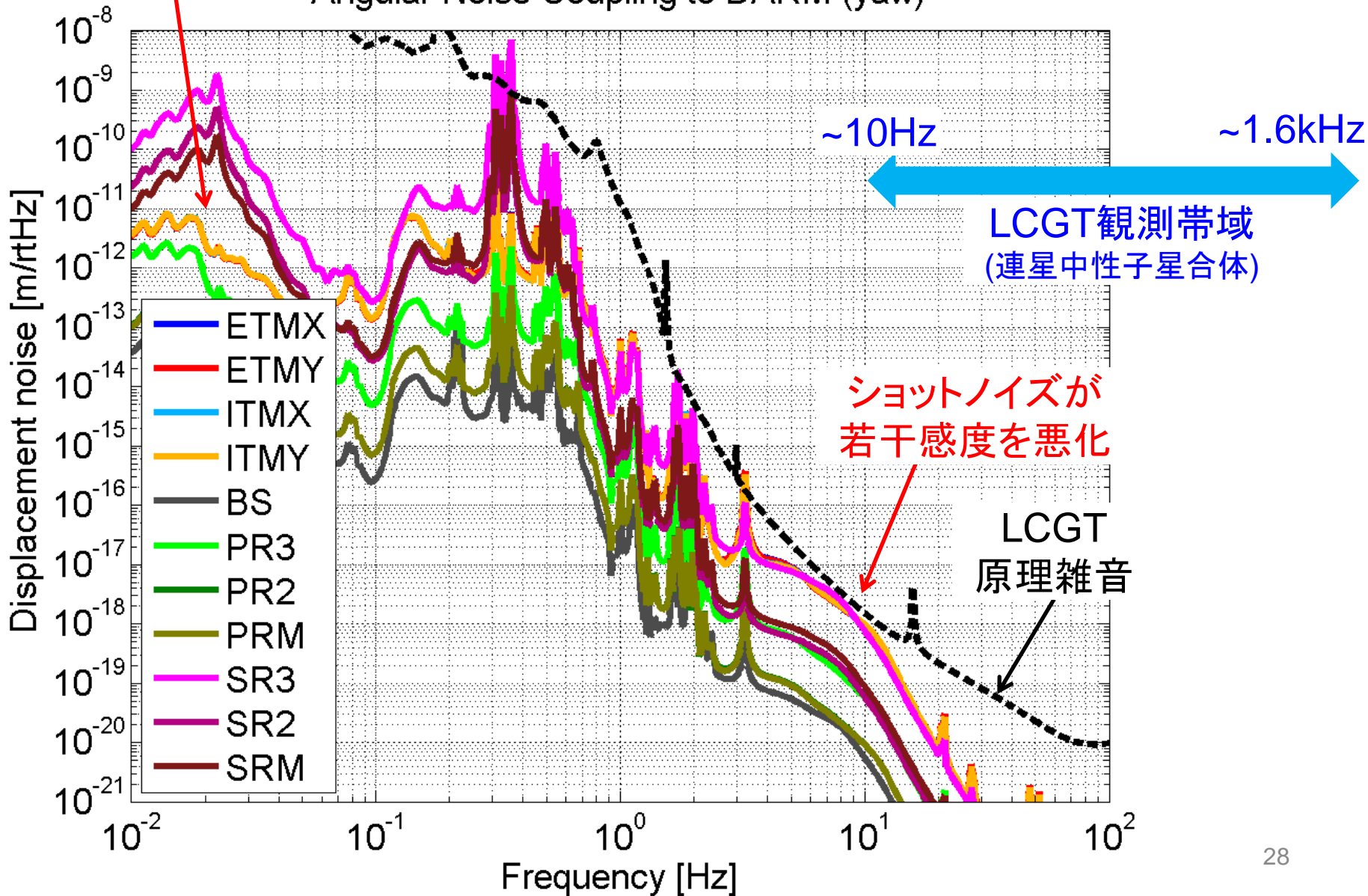


yawなので  
機械的にやわ  
らかく、  
SOFTモードは  
不安定

RMSに寄与する  
ピーク潰れてる

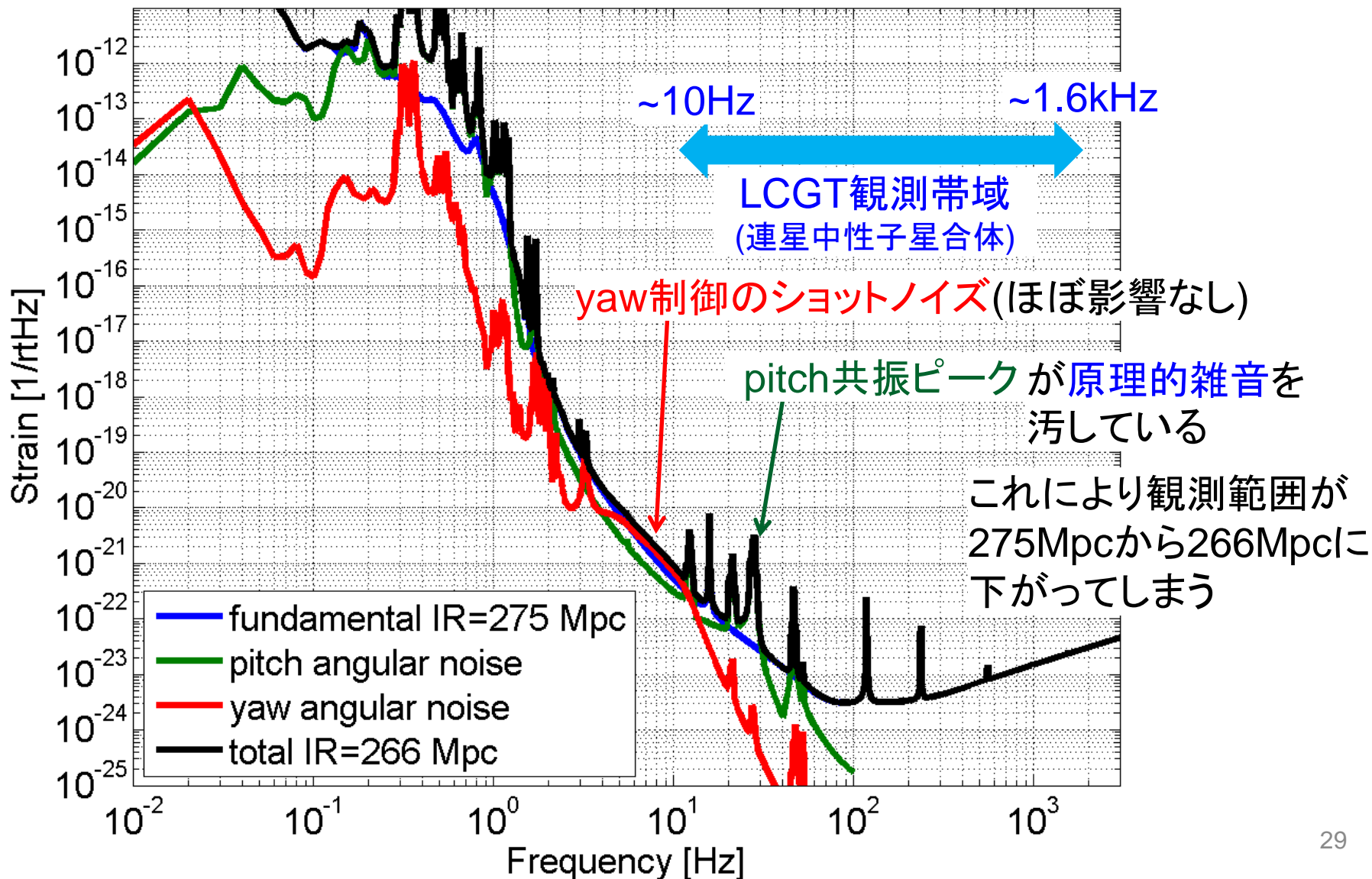
# 6. yawも計算

Angular Noise Coupling to DARM (yaw)



# 全角度揺れの感度への影響

Total Angular Noise Coupling to DARM (pitch and yaw)



# 角度揺れ雑音を低減するには

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

- RMSを下げる
  - 今回の計算ではローカルダンピング未考慮
  - 光てこなどにより鏡の姿勢信号を得る  
ローカル制御が必須
  - 特にpitchの0.5 Hz付近のピーク  
(WFSではダンプしにくい)
- 観測帯域の角度揺れを減らす
  - 特にpitchの20 Hz付近の共振ピーク
  - サスペンションデザインの改良が必要

# まとめ

- ASC設計のためのシミュレーションツールを開発した
- これを用いて鏡の角度揺れに起因する雑音の干渉計感度への影響を見積もった  
原理的雑音より大きい結果に
- 角度揺れ雑音を低減するには
  - ローカル制御の導入
  - サスペンション設計の改良が必要→work in progress

以上

# アップルパイ食べくらべ



まるごと



うまい



独特



シャキシャキ



サクサク



レーズン

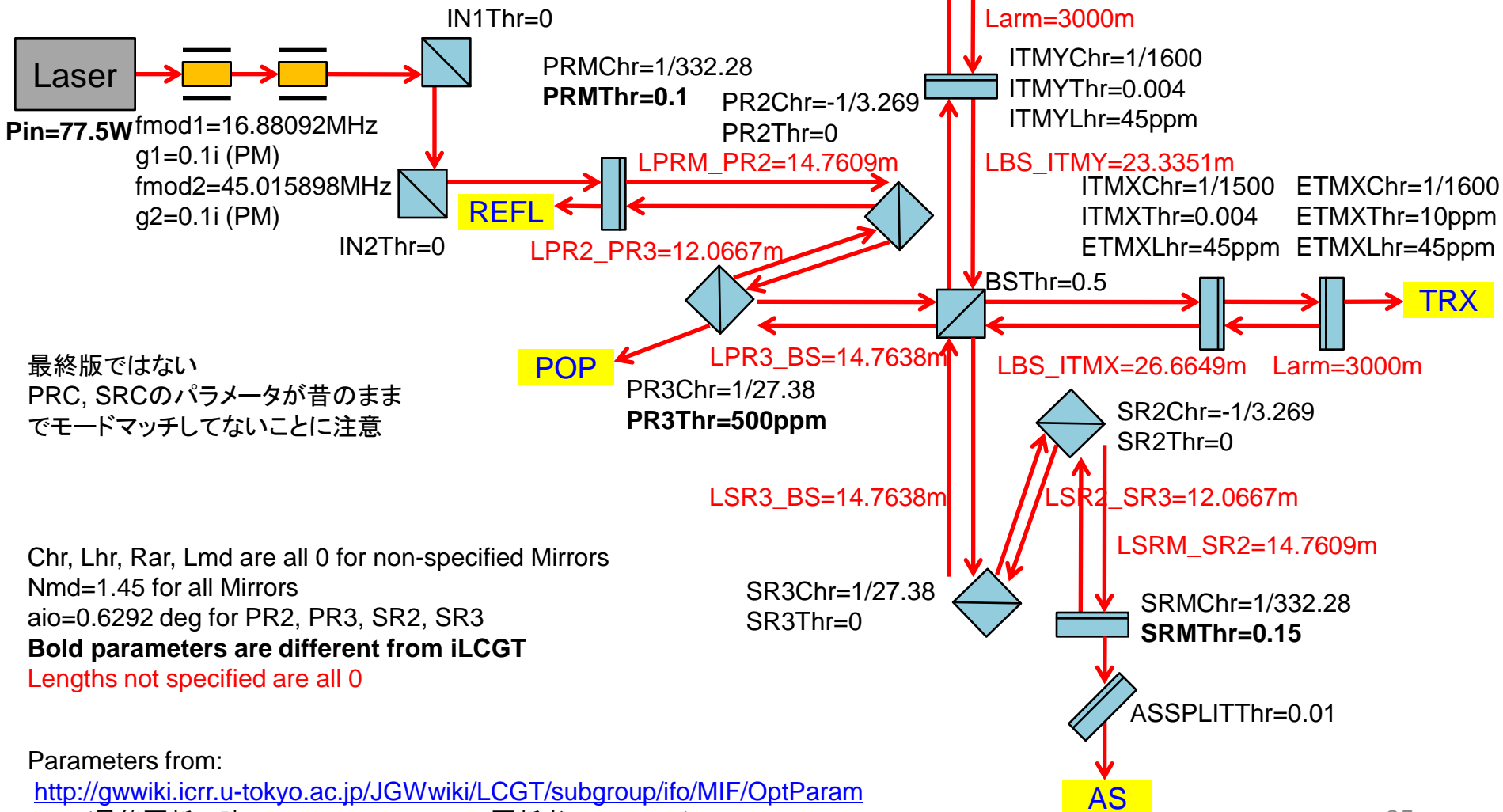


おまけスライド

# 用いたデータについて

- (古い)negative g-factorを使用
  - ITM曲率1.6km、ETM曲率1.9km
- (古い)bLCGT感度
  - 公式VDRSE
  - <http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/researcher/parameter>
- サスペンション
  - テストマス直径は22 cm
  - ダンピングは最上段のDeddy currentのみ
  - 非対称性をランダムに入れた時の最大の角度揺れを用いている
  - 詳しくは関口君の発表を

# Optickle Model of bLCGT ASC



最終版ではない  
 PRC, SRCのパラメータが昔のまま  
 でモードマッチしてないことに注意

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 iLCGT**  
 Lengths not specified are all 0

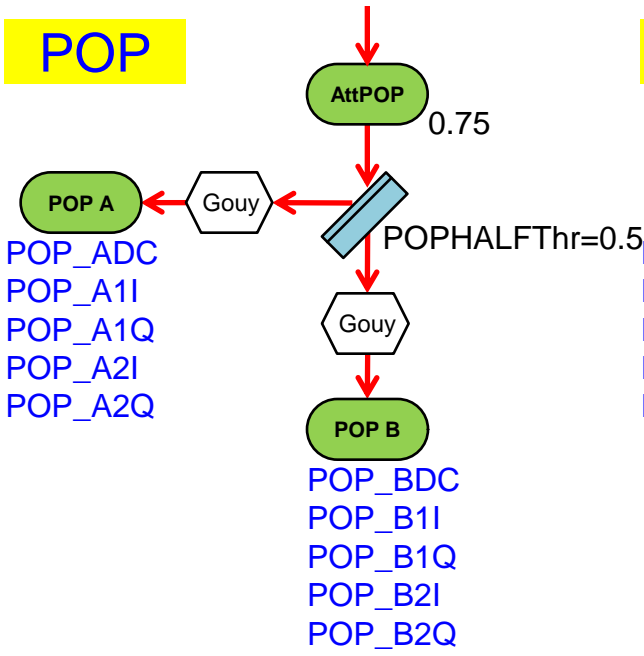
Parameters from:  
<http://gwwiki.icrr.u-tokyo.ac.jp/JGWwiki/LCGT/subgroup/ifo/MIF/OptParam>

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

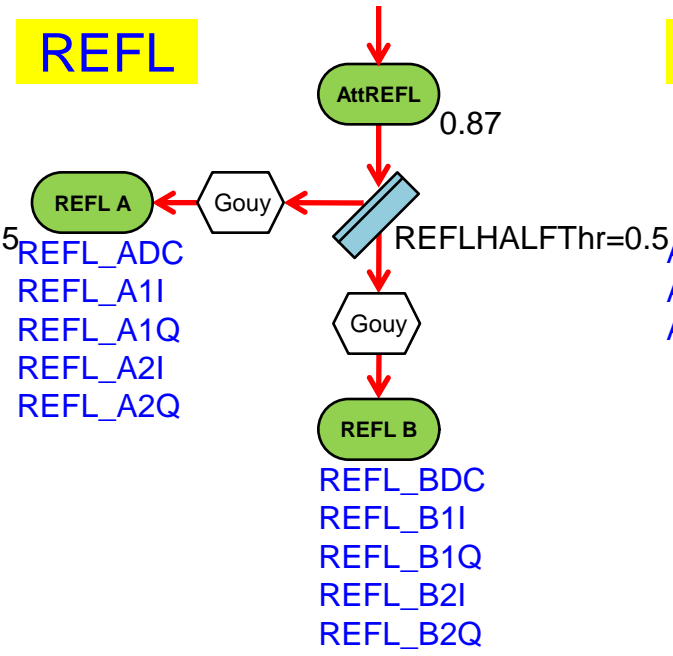
[http://gwwiki.icrr.u-tokyo.ac.jp/JGWwiki/LCGT/subgroup/OCG/parametermeeting?action=AttachFile&do=view&target=interface\\_parameter\\_%28selected%29.pdf](http://gwwiki.icrr.u-tokyo.ac.jp/JGWwiki/LCGT/subgroup/OCG/parametermeeting?action=AttachFile&do=view&target=interface_parameter_%28selected%29.pdf)

# Sensing Ports

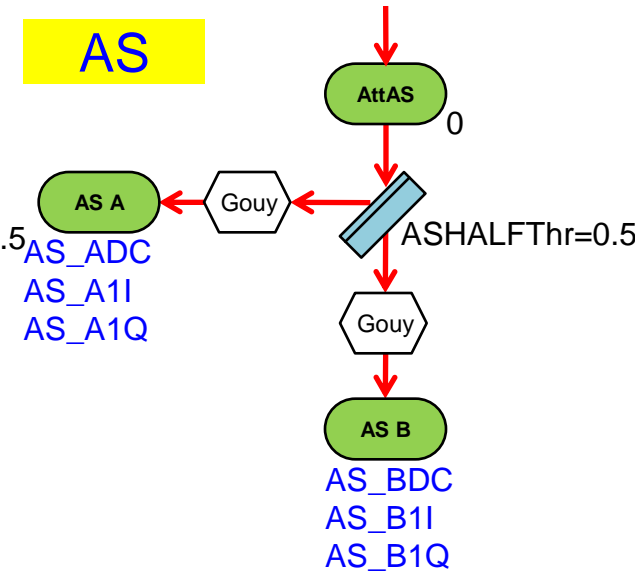
**POP**



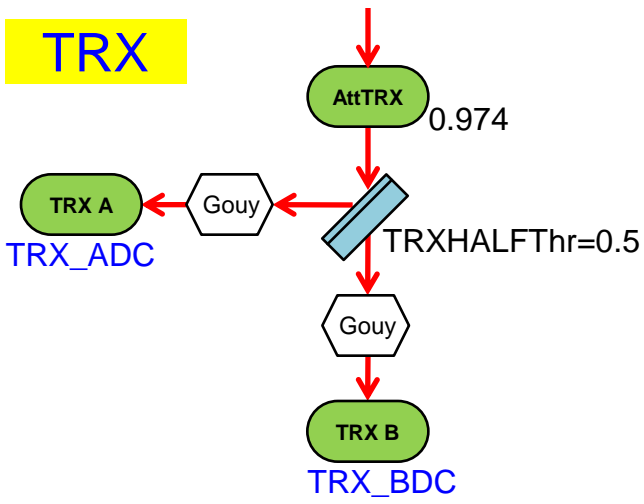
**REFL**



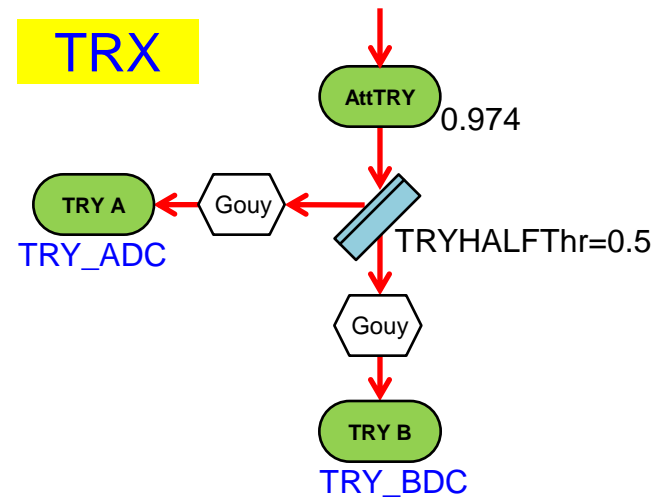
**AS**



**TRX**



**TRX**



# 各所でのDC光量

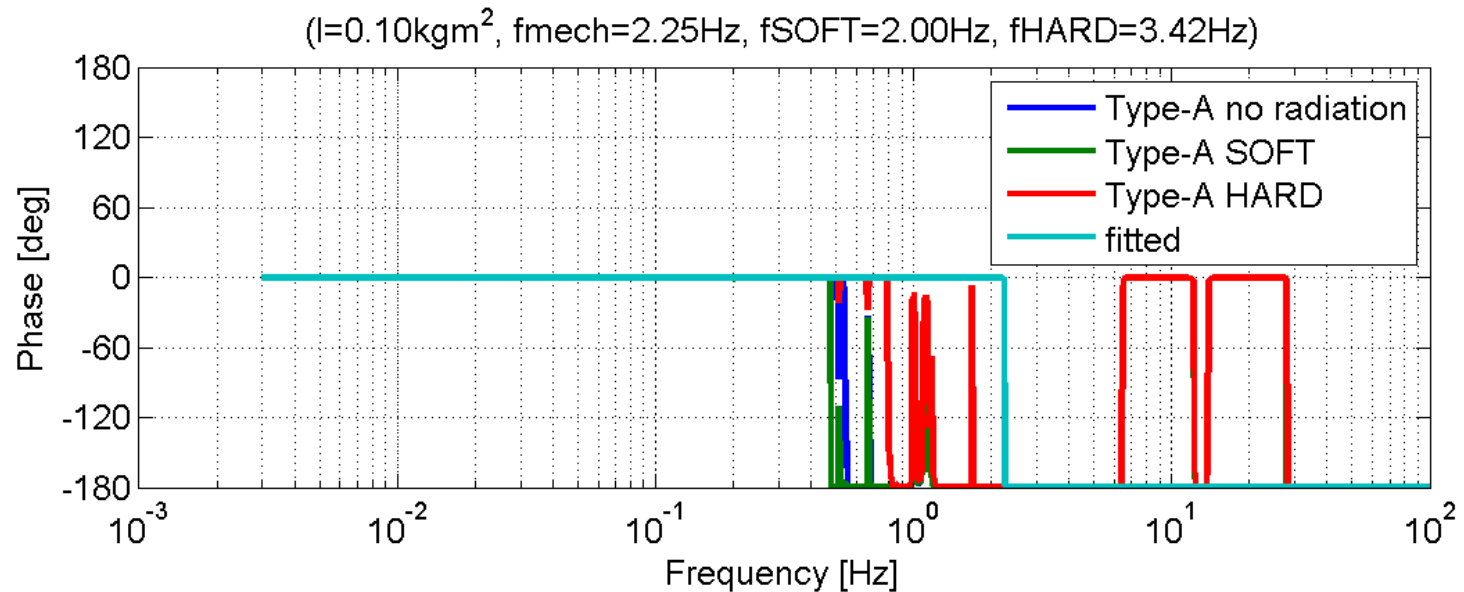
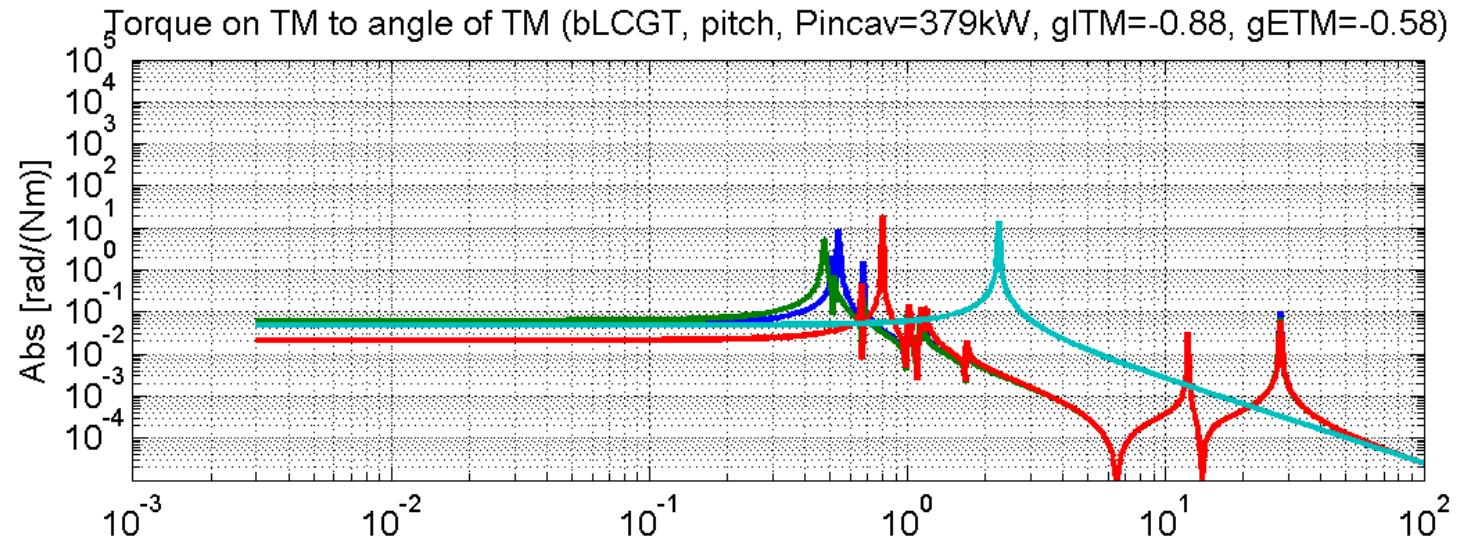
- Laser: 77.5 W
- from PR3 to BS: 799 W
- intra-cavity: 379 kW
- 各ポート
  - POP: 50.9 mW
  - REFL: 51.2 mW
  - AS: 0.018 mW
  - TRX/Y: 49.3 mW

キャリアのみのDC光量

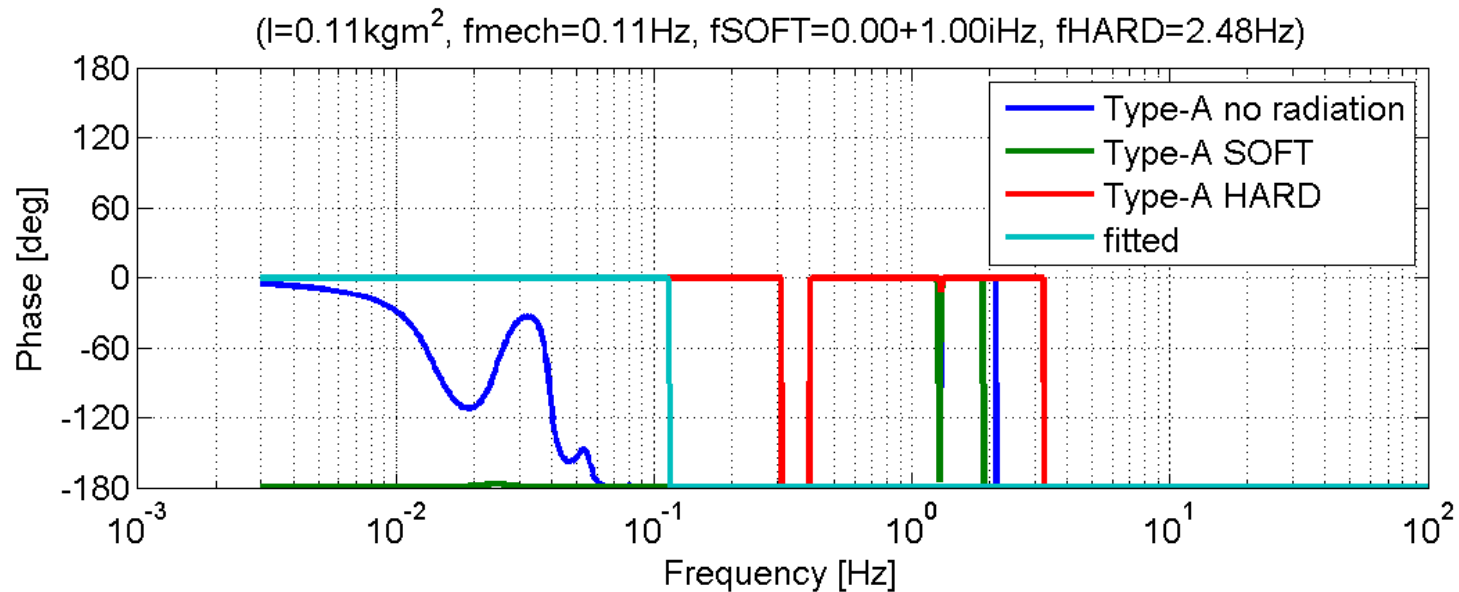
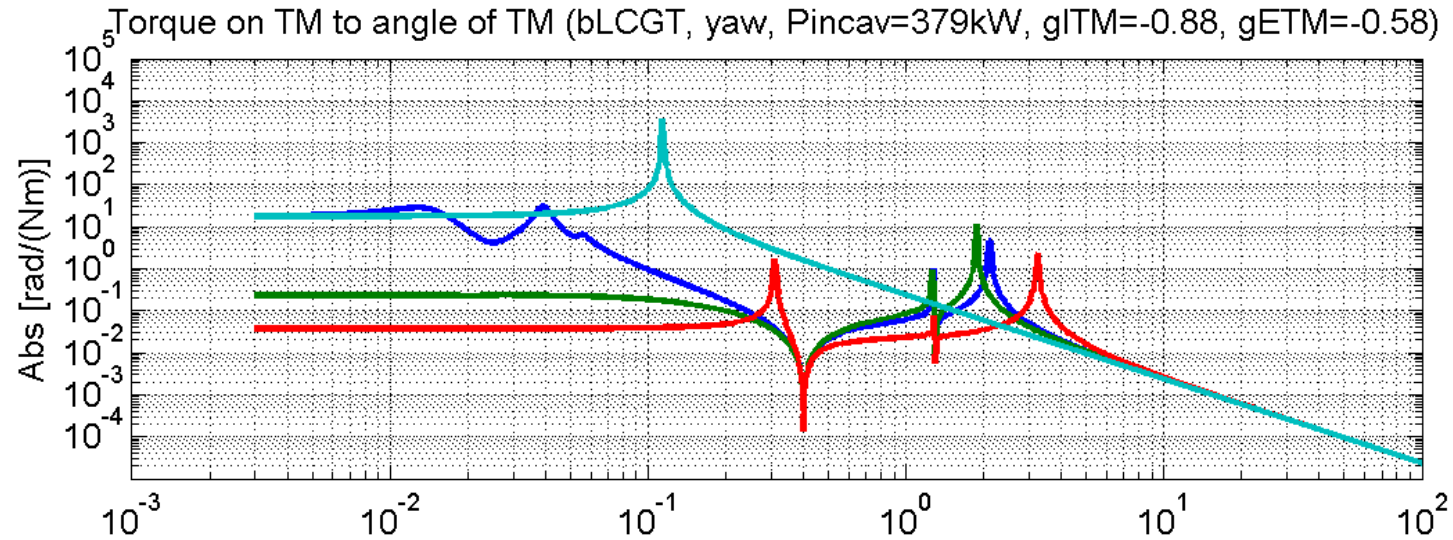
各ポートに関しては、  
サイドバンドも含めた全DC光量  
ASはサイドバンドしか出ないこと  
になってる(DC readoutに対応し  
ていないし、腕の非対称性を導入  
していない)

AS以外、大体50mWになるように調整

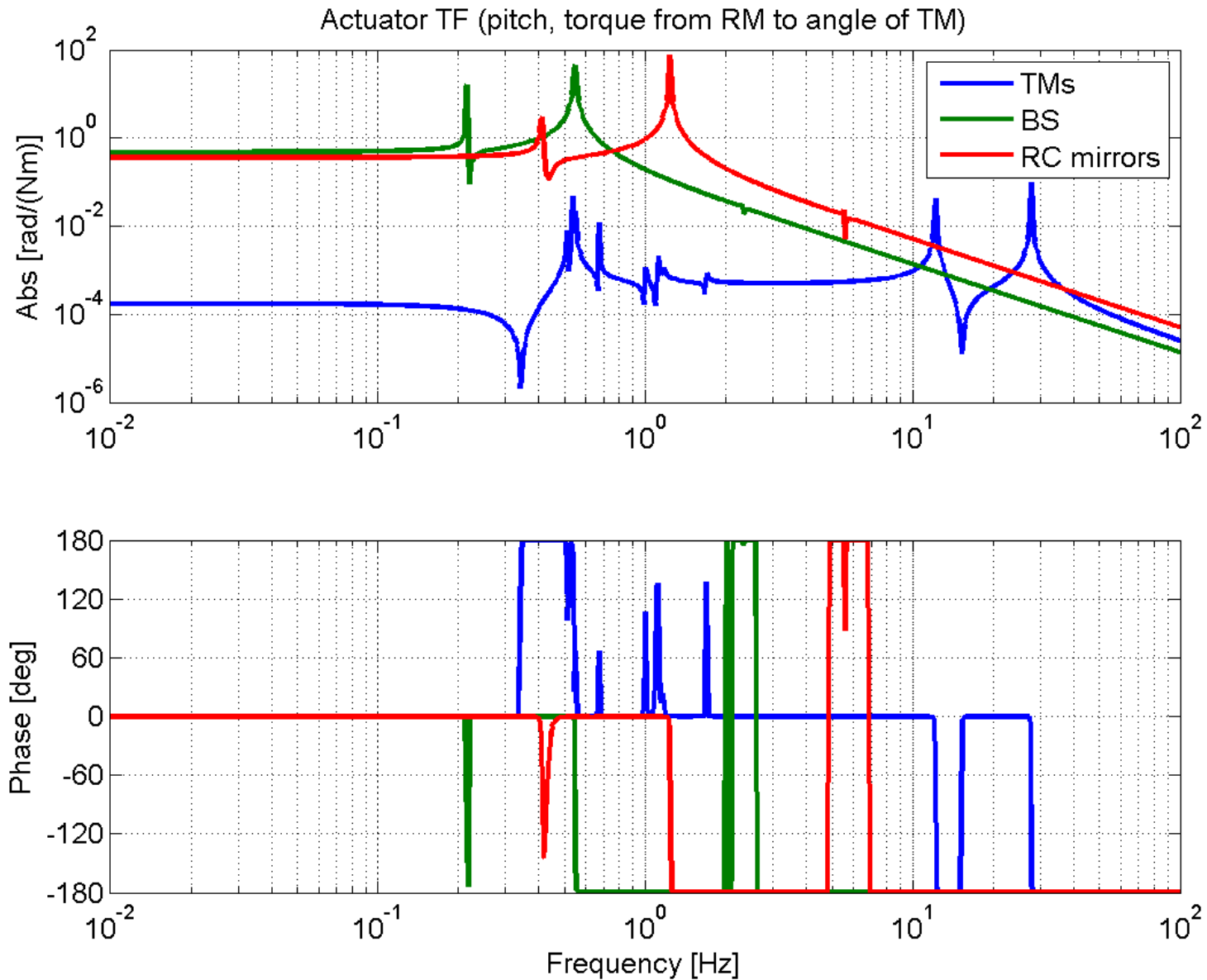
# Opto-mechanical TF (pitch)



# Opto-mechanical TF (yaw)

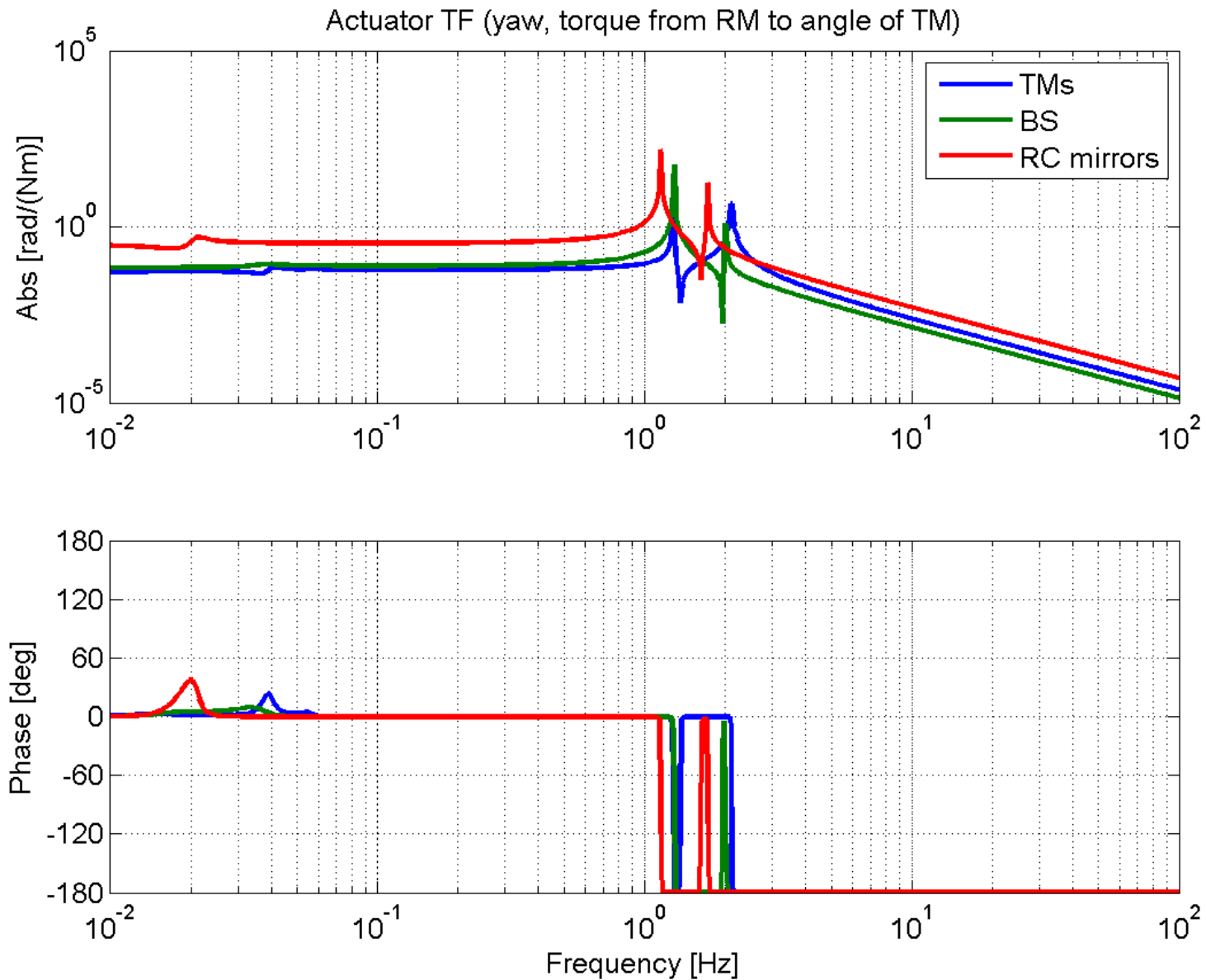


# Actuator TF (pitch)

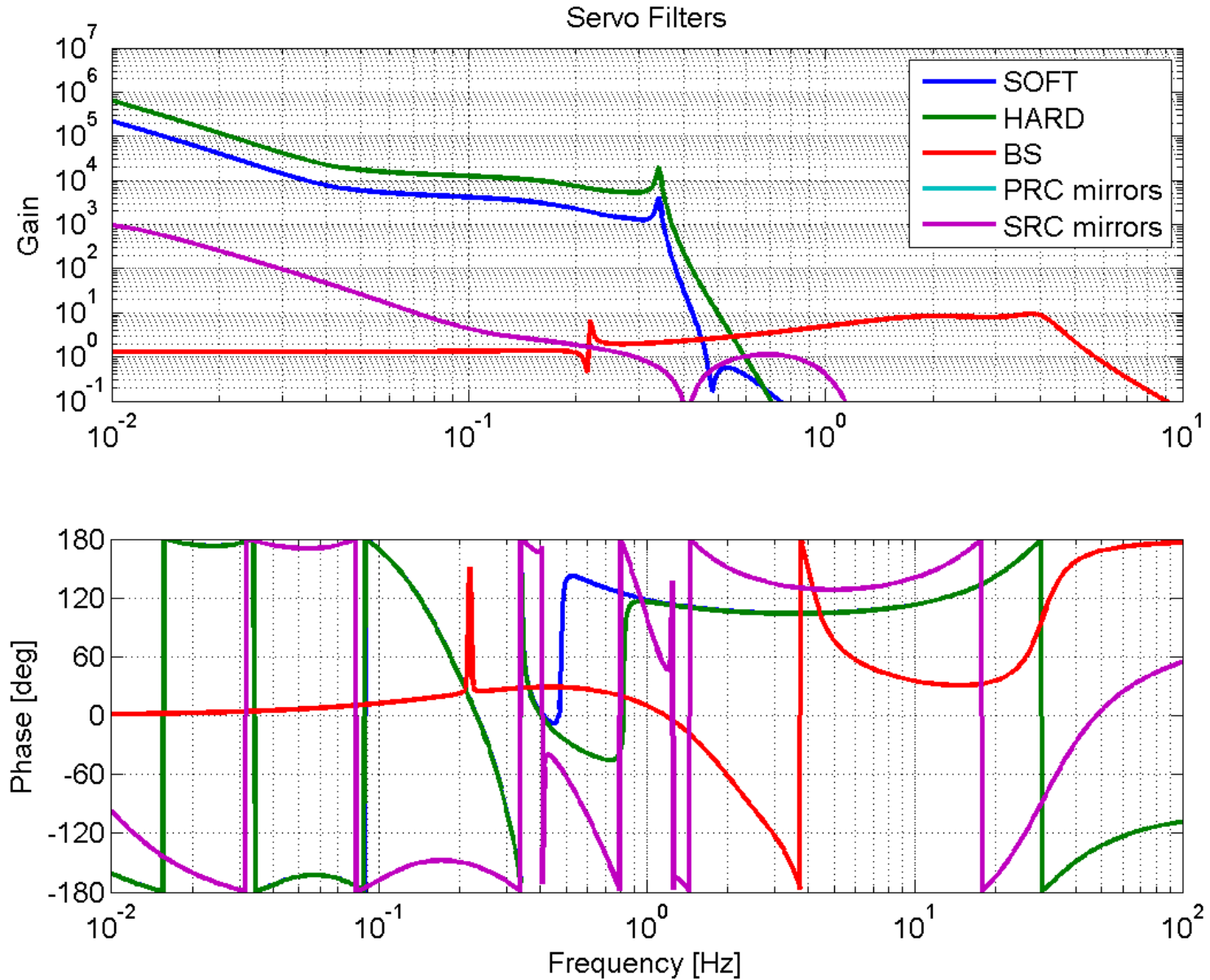




# Actuator TF (yaw)



# Filter (pitch)



# Filter(yaw)

