

# 重力波望遠鏡KAGRAの 低温動作に向けた主干涉計開発

道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

麻生洋一、宗宮健太郎、宮川治、苔山圭以子、廣瀬榮一、

阿久津智忠、榎本雄太郎、小森健太郎、有富尚紀、

下田智文、新井宏二、山本博章

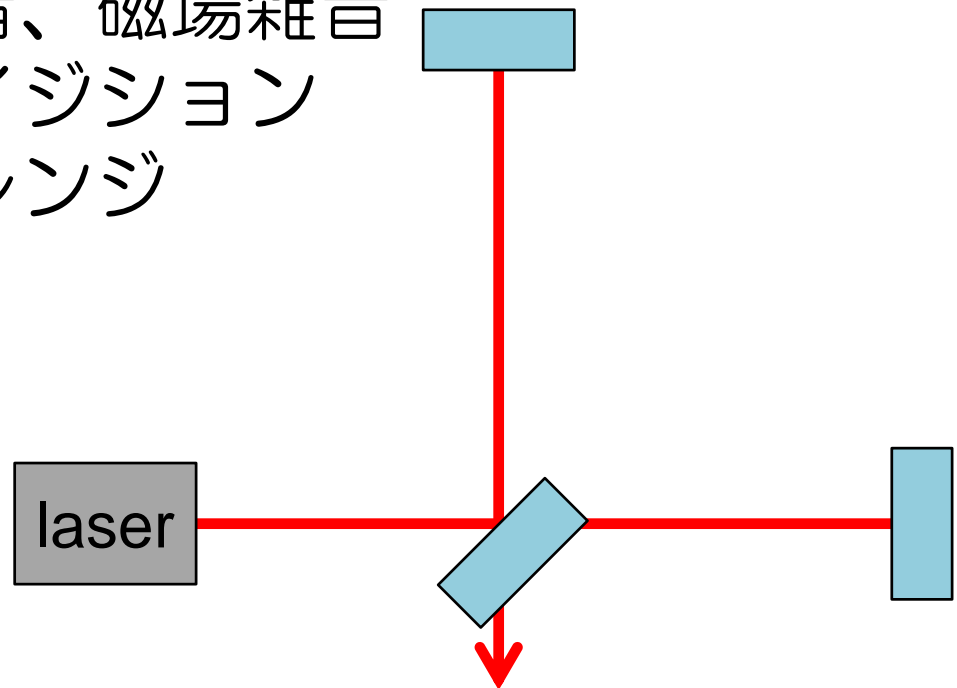
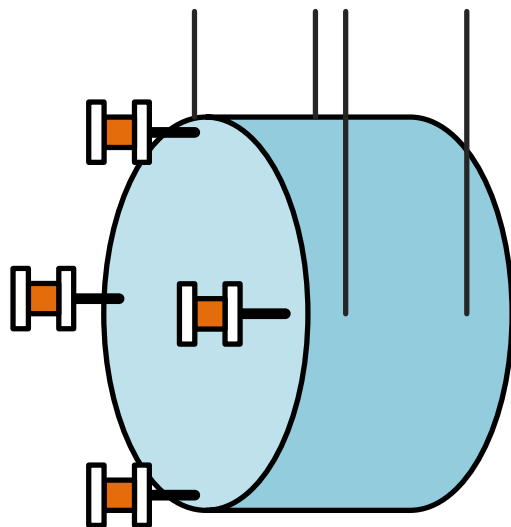
国立天文台、東京工業大学、東京大学宇宙線研究所、

東京大学、カリフォルニア工科大学

Thanks to: 正田亜八香、奥富弘基、宮本昂拓、田中宏樹

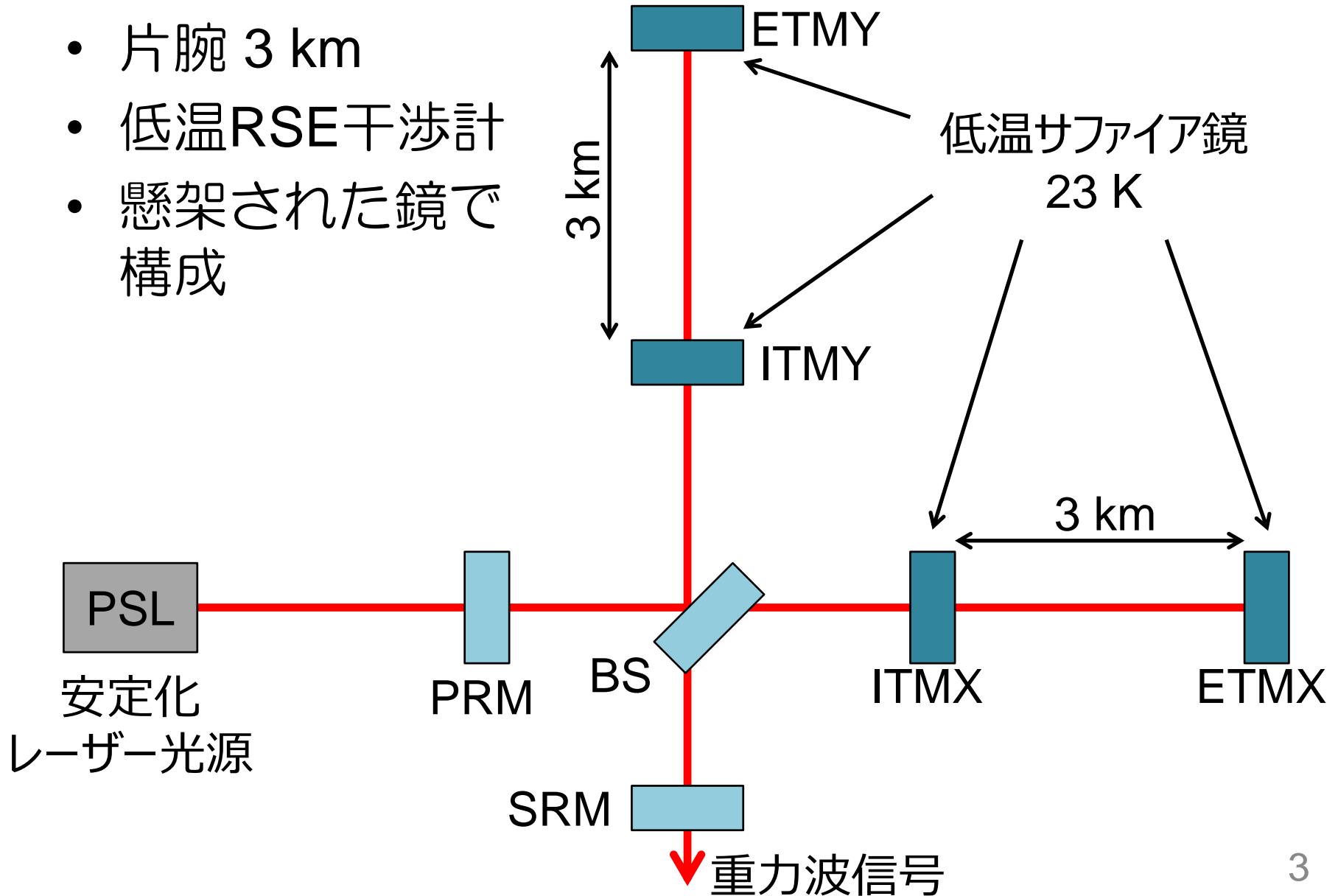
# 概要

- KAGRAはレーザー干渉計型重力波望遠鏡
- 高感度で動作させるためには鏡間の距離の高精度な制御が必要
- そのために必要な鏡のアクチュエータを設計した  
アクチュエータ雑音、磁場雑音  
制御とロックアクイジション  
のために十分なレンジ



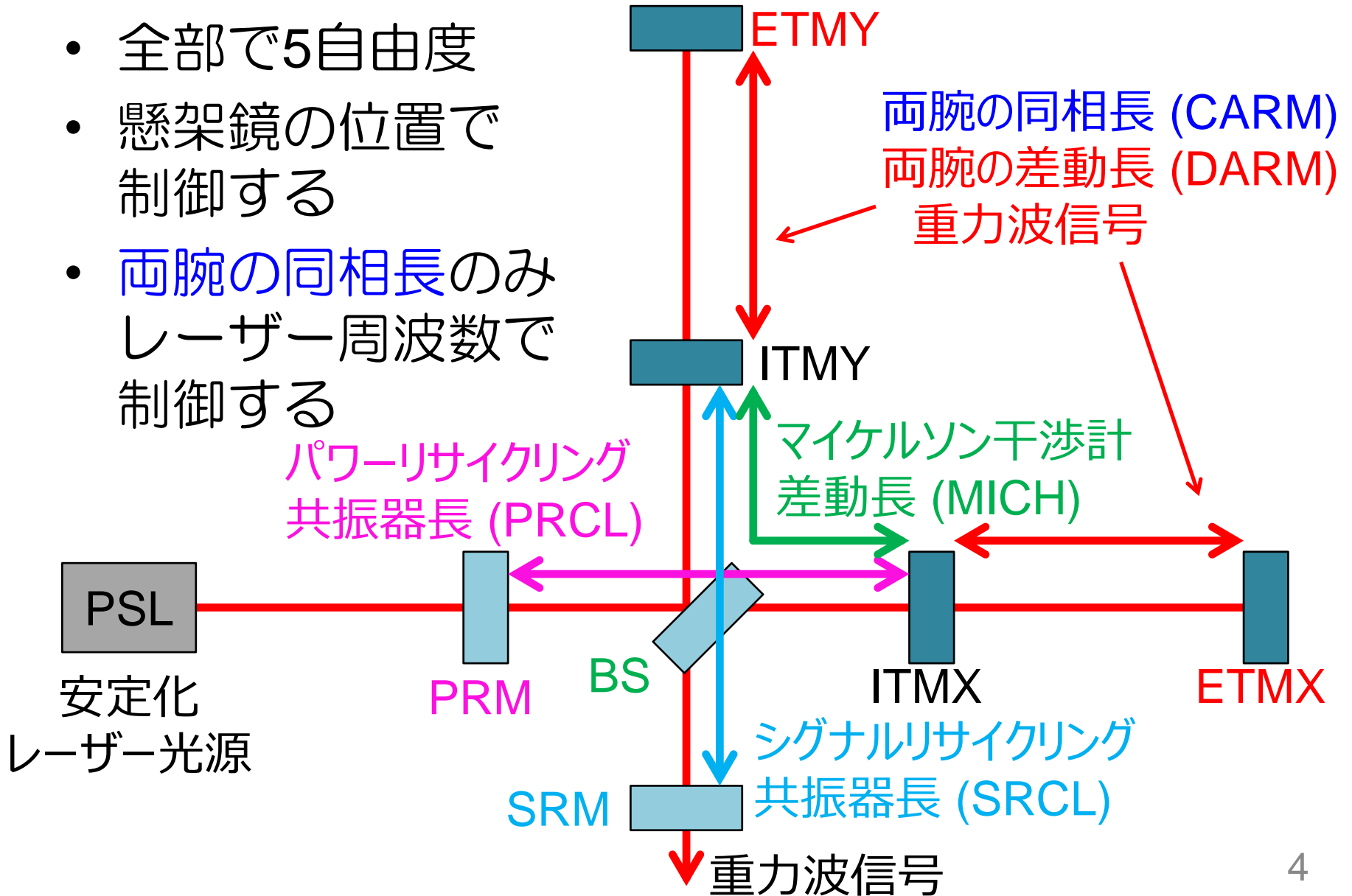
# KAGRAの主干渉計構成

- 片腕 3 km
- 低温RSE干渉計
- 懸架された鏡で構成



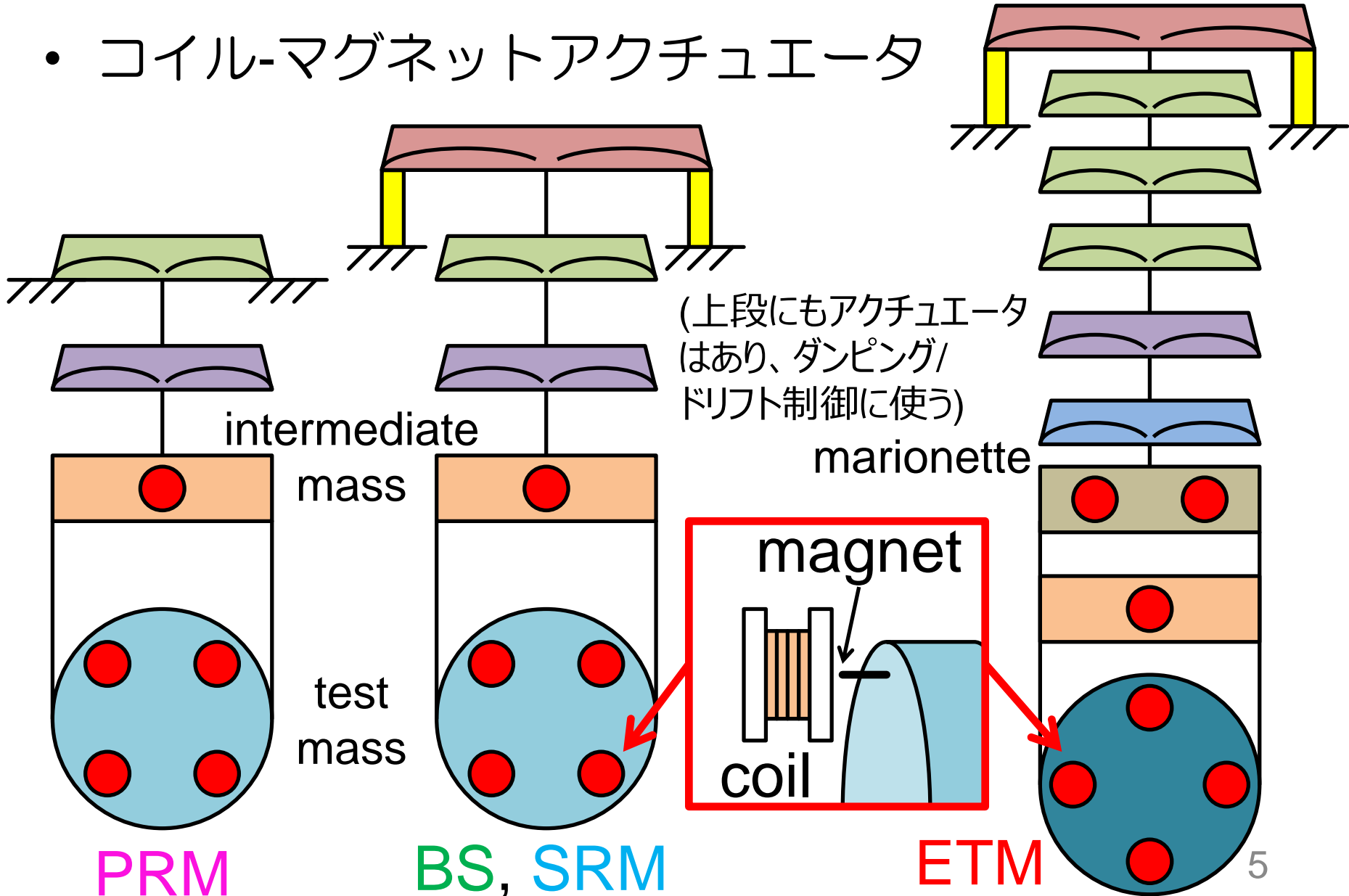
# 長さ制御

- 全部で5自由度
- 懸架鏡の位置で制御する
- 両腕の同相長のみ  
レーザー周波数で制御する



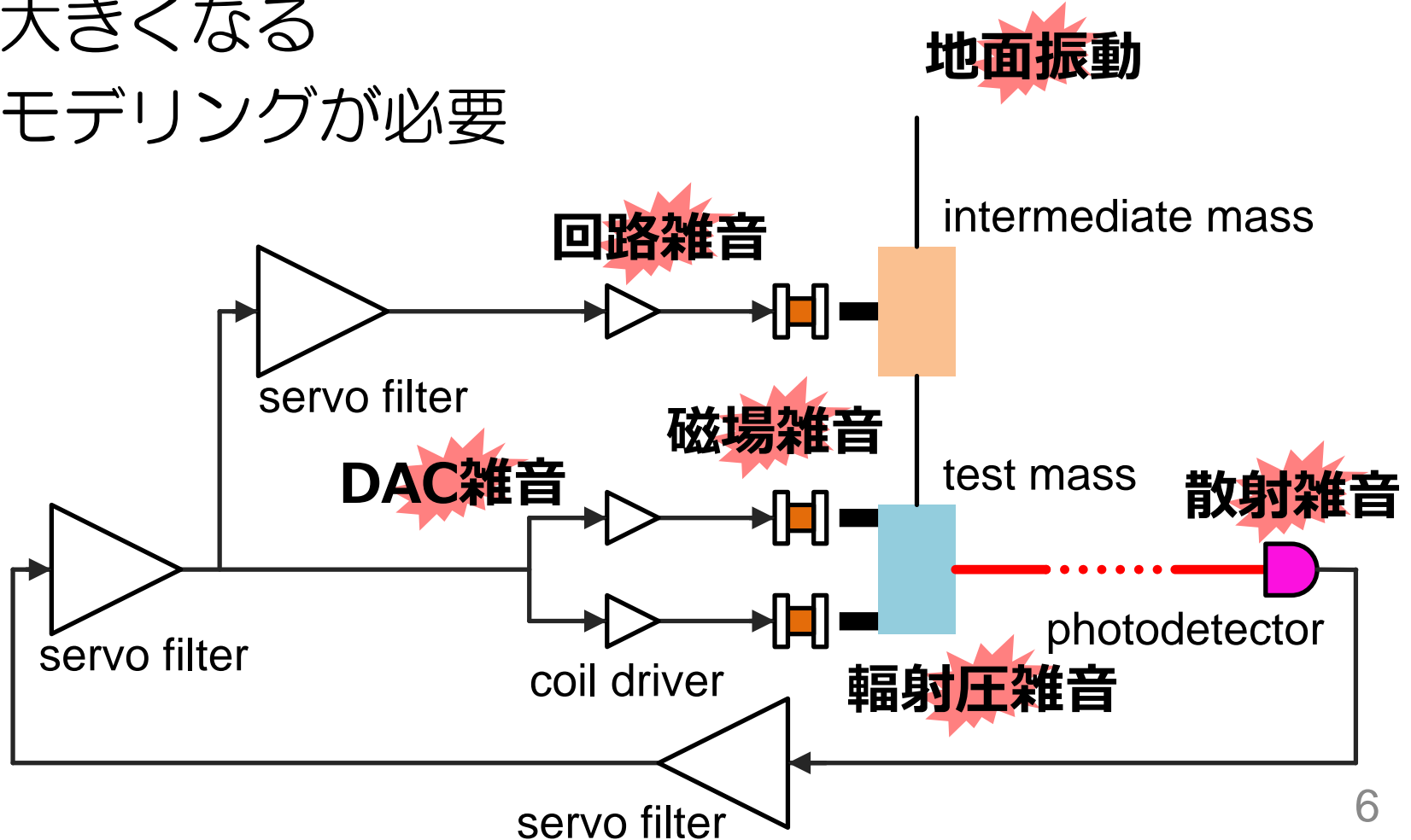
# 懸架系のアクチュエータ

- コイル-マグネットアクチュエータ



# アクチュエータのレンジと雑音

- さまざまな雑音を抑えるだけのレンジが必要
- 強すぎるとアクチュエータ雑音、磁場雑音が大きくなる
- モデリングが必要

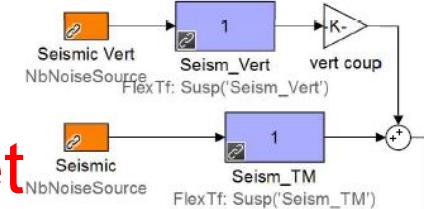


# モデリング



- Simulink NoiseBudget (by Chris Wipf)でモデル化

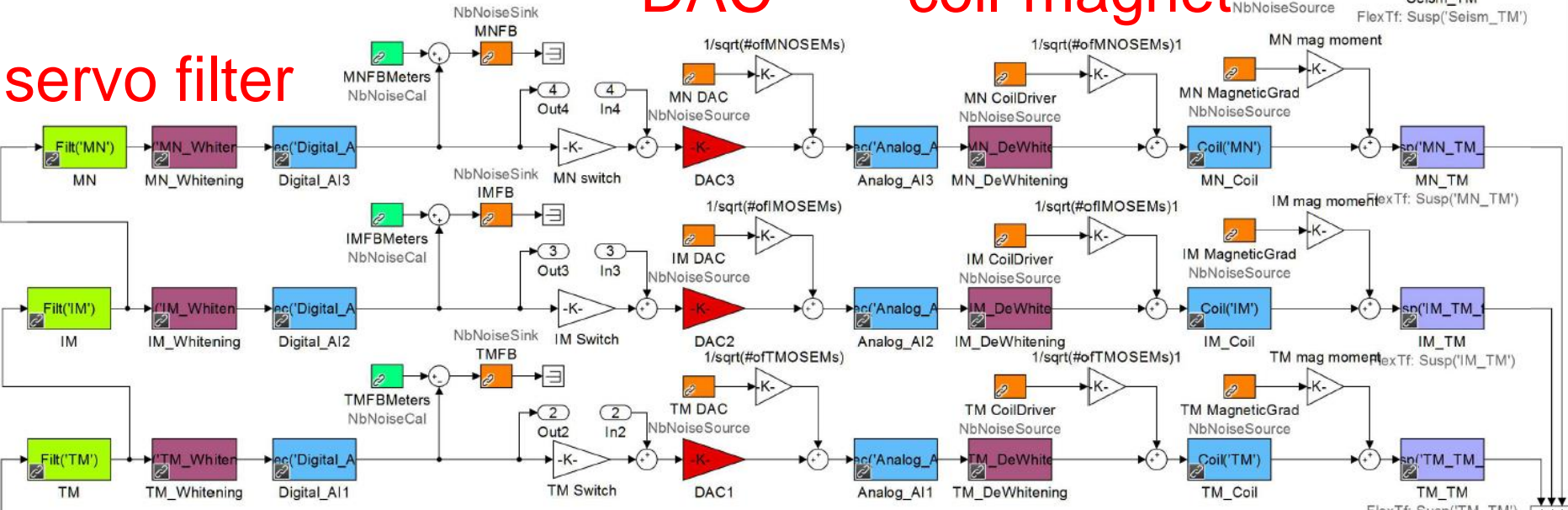
seismic noise



DAC

coil-magnet

servo filter

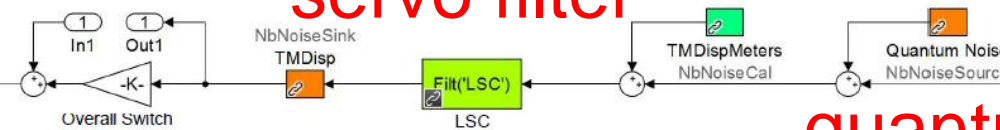


servo filter

coil drivers

suspension

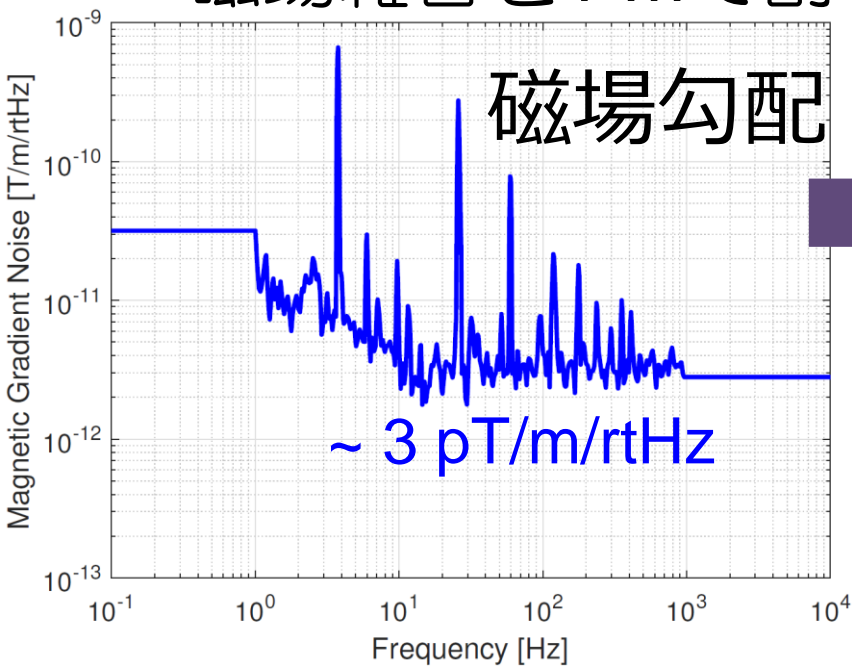
quantum noise



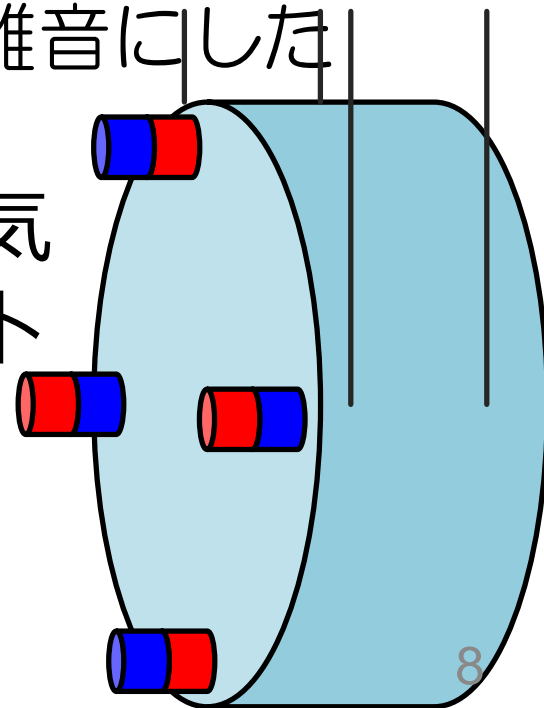
# 磁場雑音

- 磁場勾配と磁石のばらつきによる磁気モーメントのカップリングが一番効く
- 低温真空槽内で測定した磁場雑音を使用  
センサー雑音に制限  
(詳しくは田中くんの講演17pK25-4)

- 磁場雑音を1 mで割って磁場勾配雑音にした



残留磁気  
モーメント





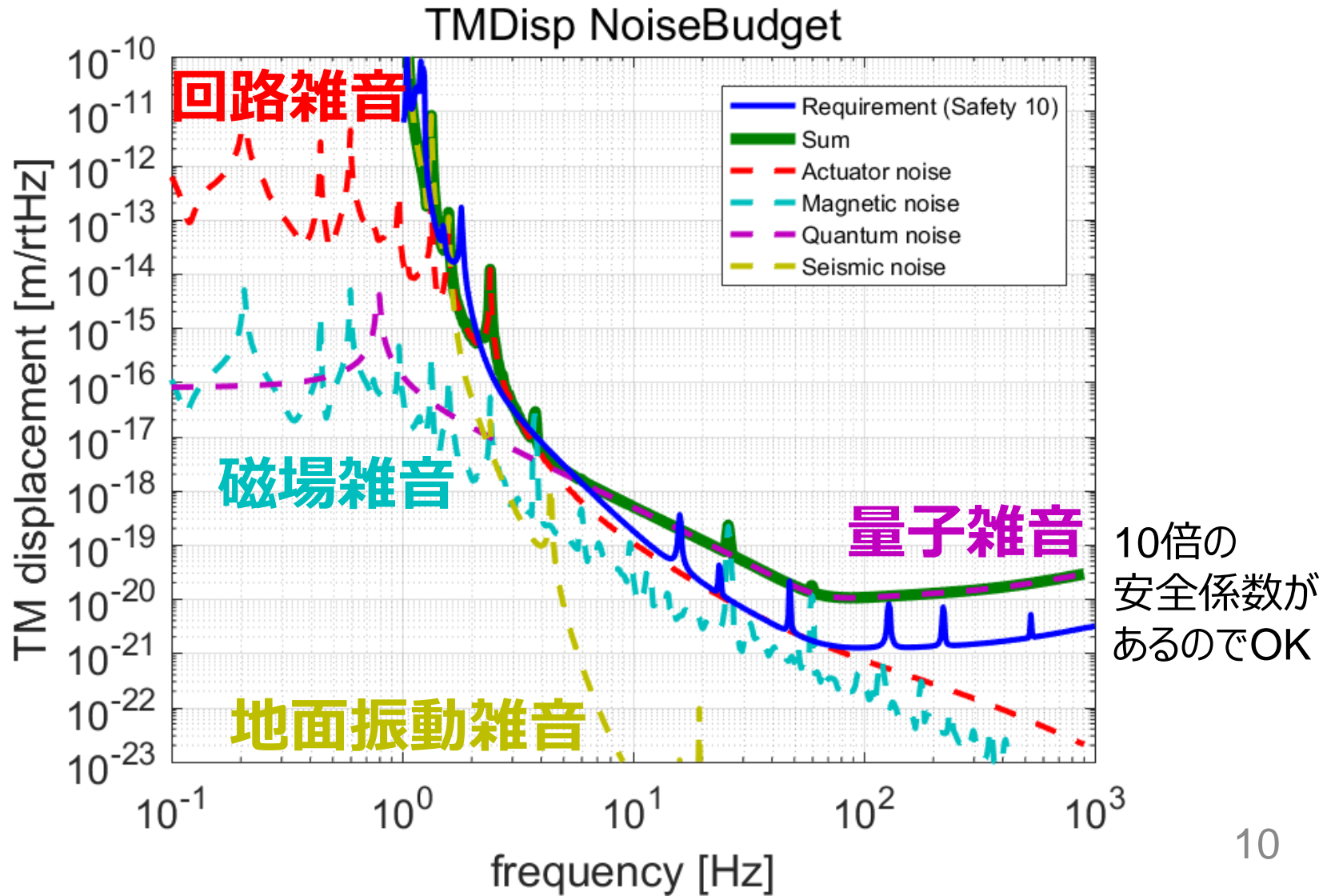
# 各鏡のアクチュエータ

- コイルの巻数と磁石の大きさ(mm)とコイルドライバの出力抵抗(小さいほうが強い)

	PRM	SRM	BS	ETM
Marionette	なし	なし	なし	585巻 φ2 x L 2 1.4 kΩ
Intermediate mass	600巻 φ10 x L 10 80 Ω	600巻 φ10 x L 10 7.8 kΩ	600巻 φ10 x L 10 7.8 kΩ	585巻 φ2 x L 2 1.4 kΩ
Test mass	600巻 φ6 x L 3 80 Ω	600巻 φ2 x L 5 7.8 kΩ	600巻 φ2 x L 3 7.8 kΩ	88巻 φ2 x L 2 7.8 kΩ

# 雑音 (ETM)

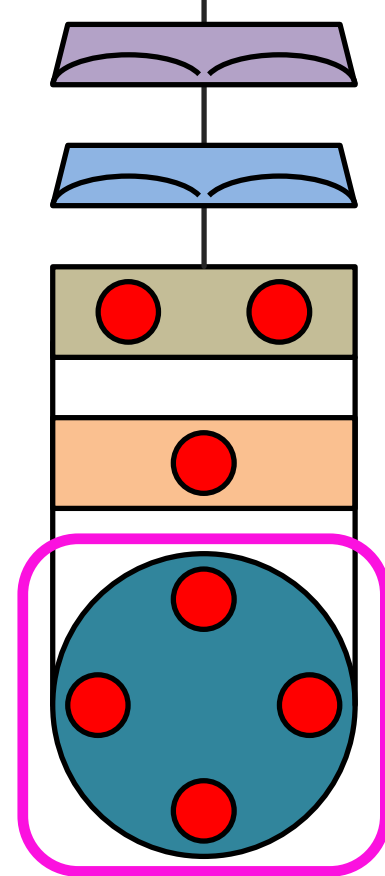
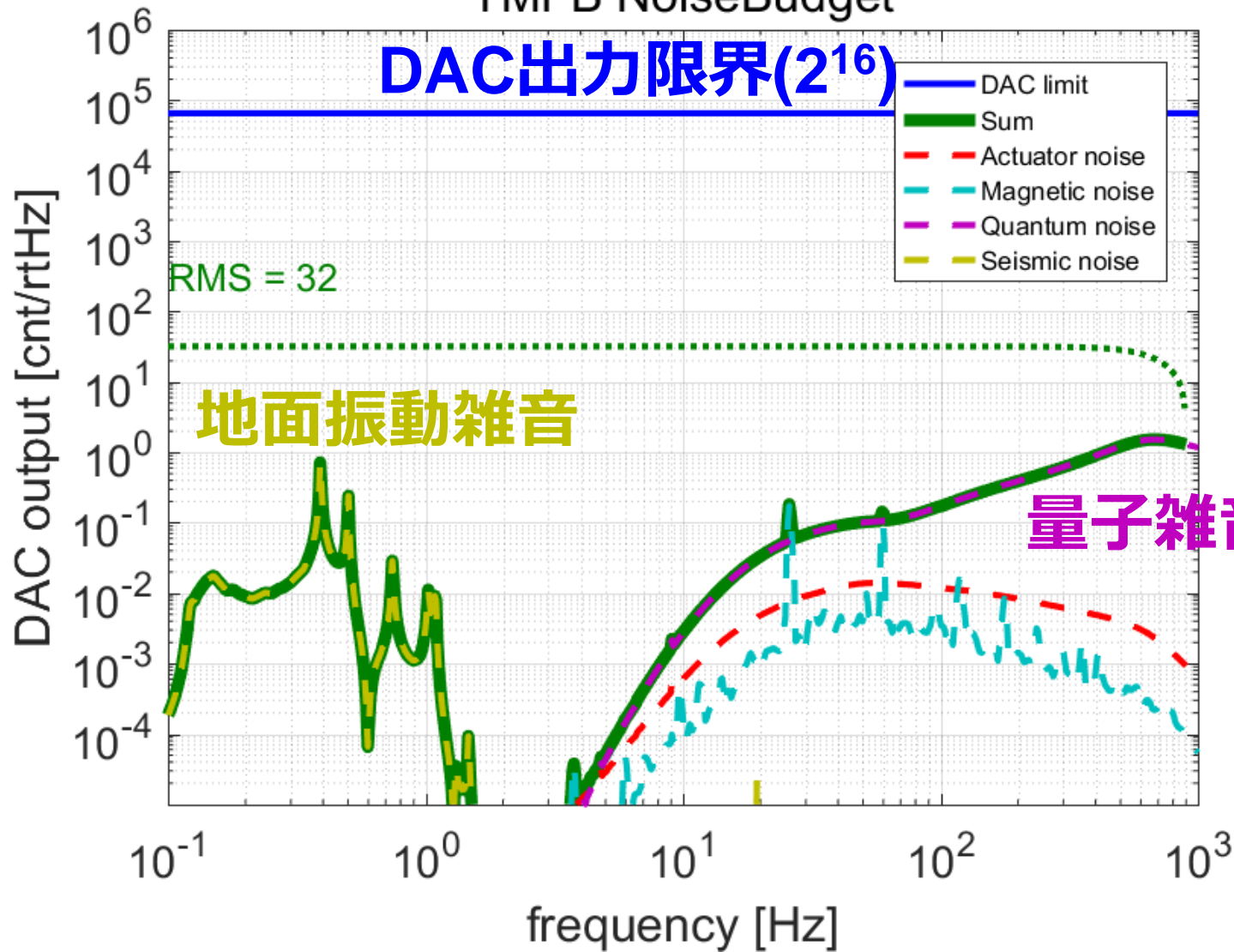
- 変位雑音要求値を満たす



# レンジ (ETM TM)

- TMは大丈夫

TMFB NoiseBudget

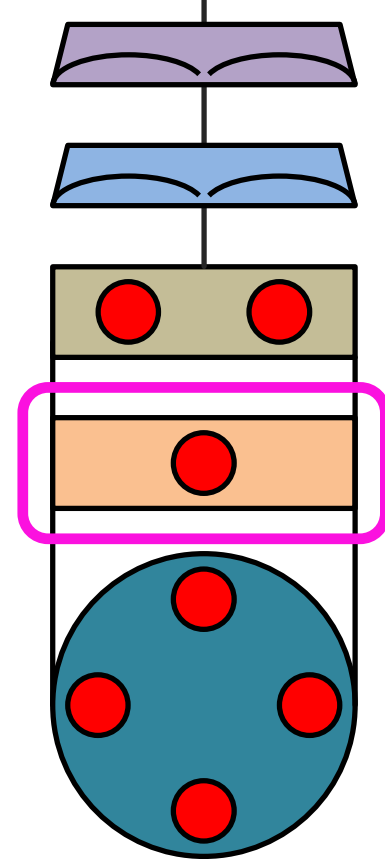
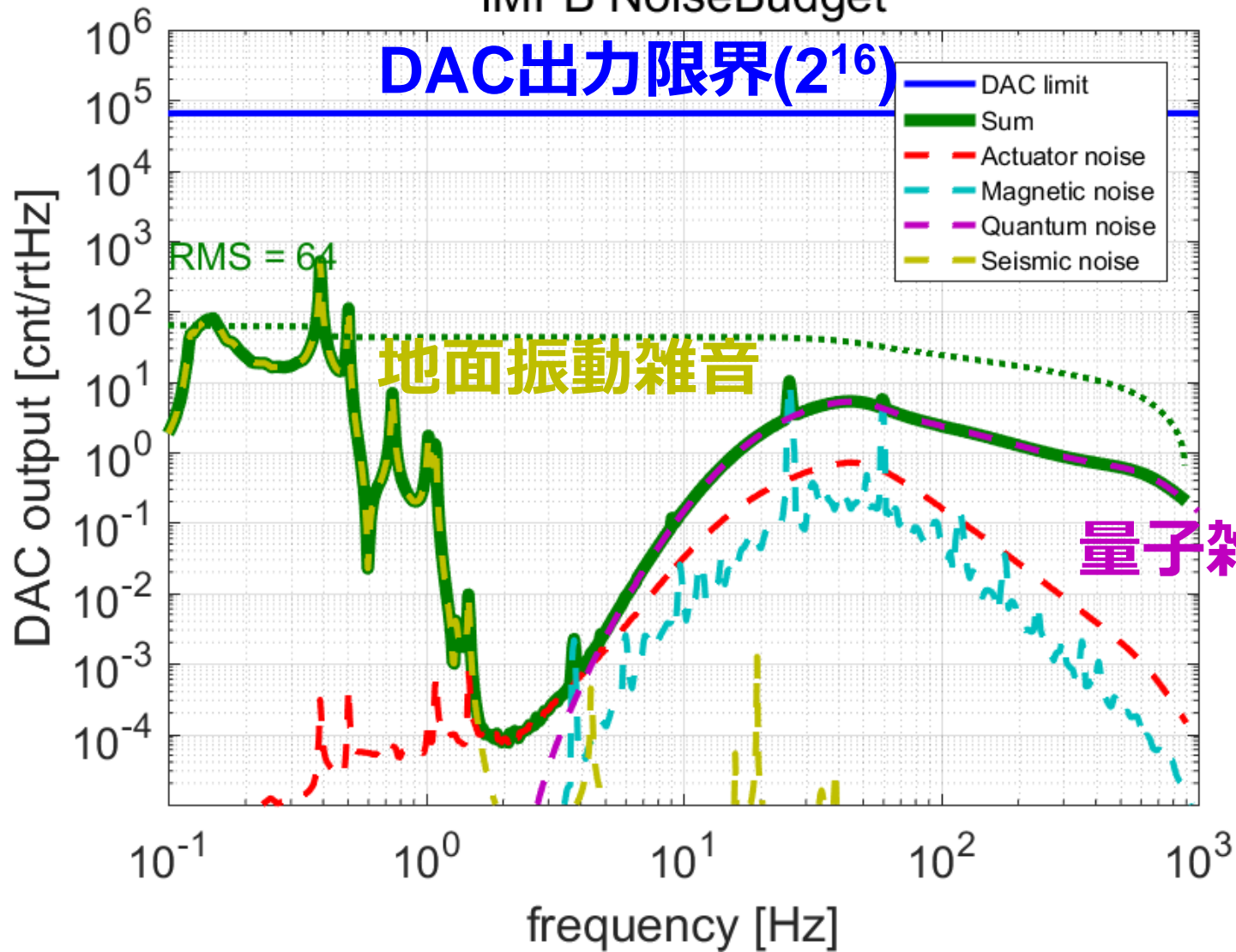


RMSが  
DAC限界の  
1/50以下  
なのが要求値

# レンジ (ETM IM)

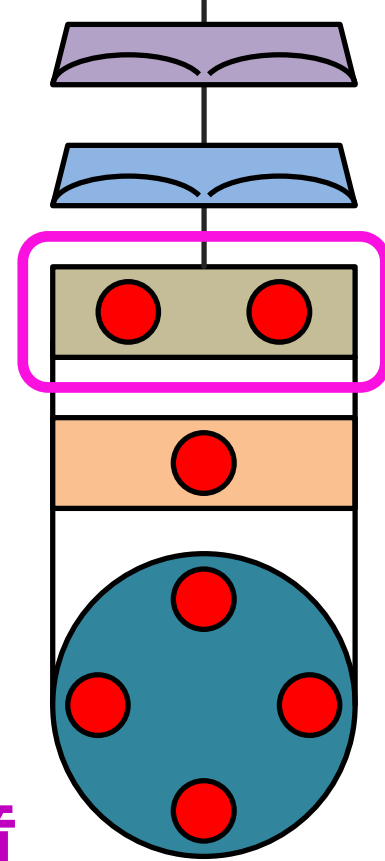
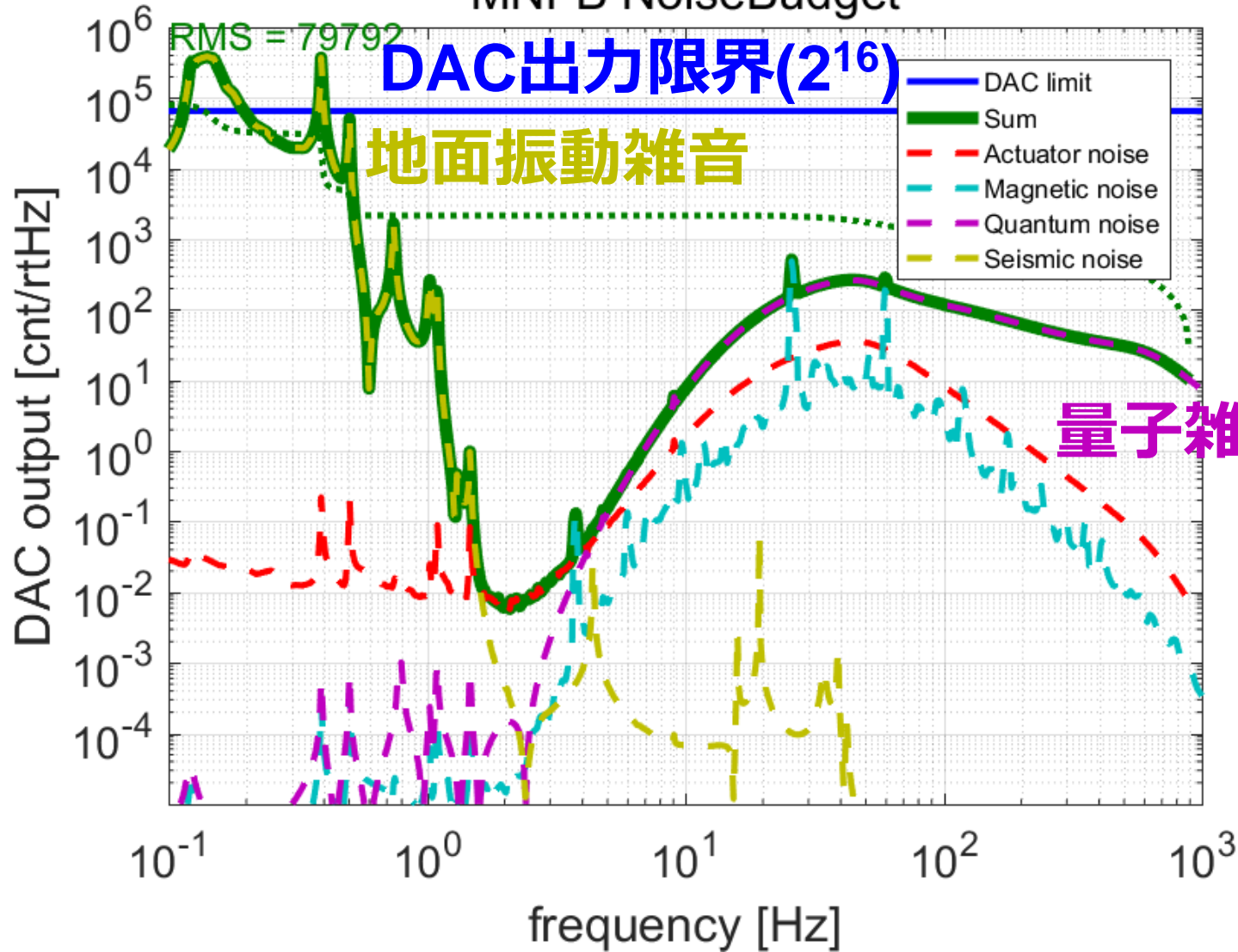
- IMも大丈夫

IMFB NoiseBudget



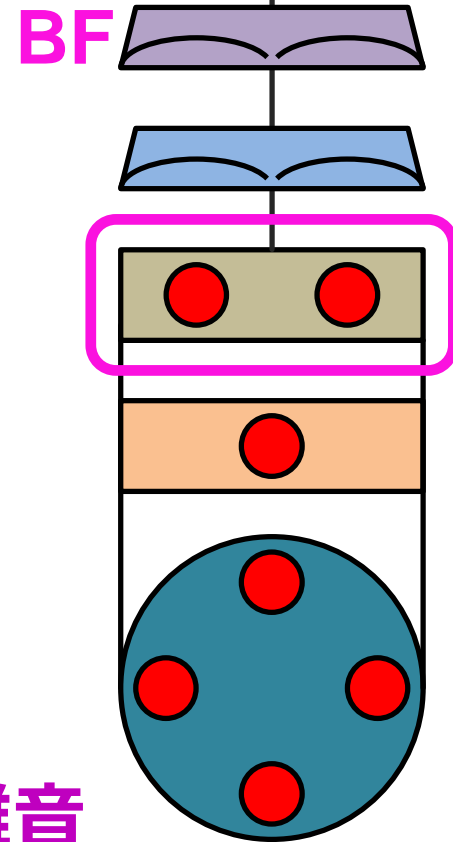
# レンジ (ETM MN)

- MNはレンジを超えてしまう  
MNFB NoiseBudget

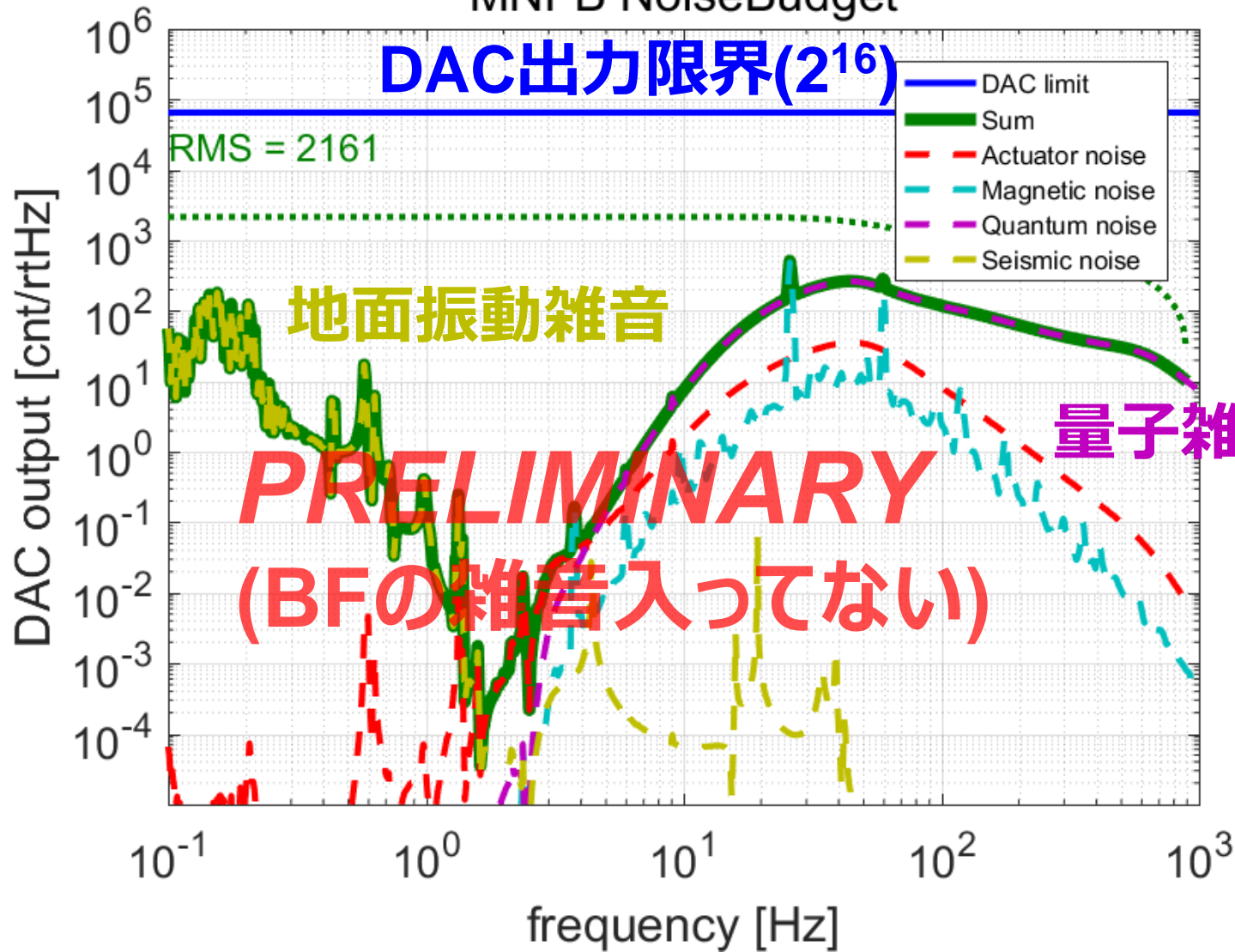


さらに上段への  
フィードバックを  
考慮に入れる

# レンジ (ETM MN)



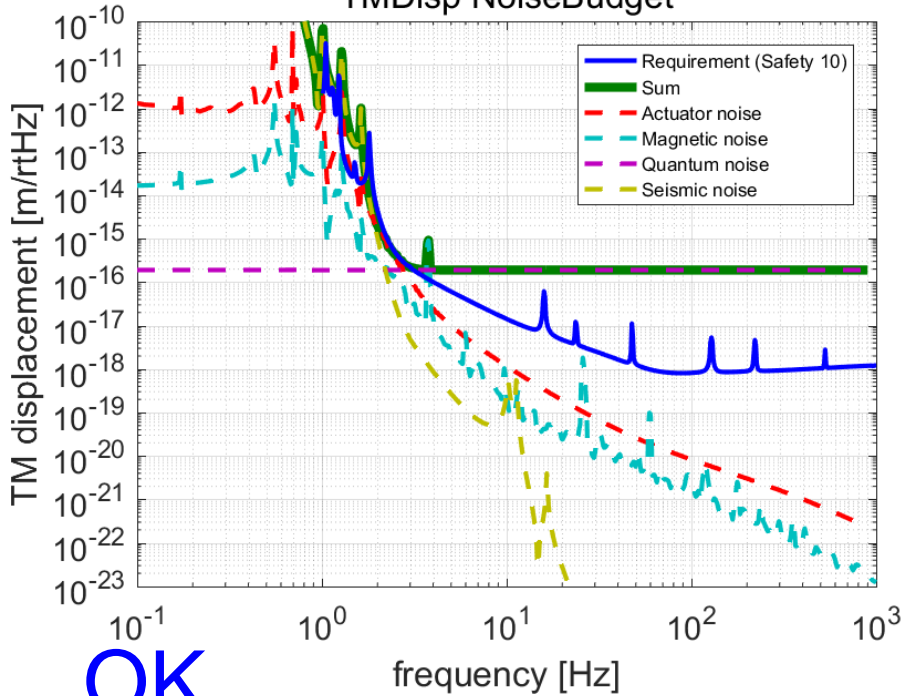
- 上段(BF)を制御に追加した場合  
MNFB NoiseBudget



可能であれば  
MNの磁石も  
強くする？

# BSの結果

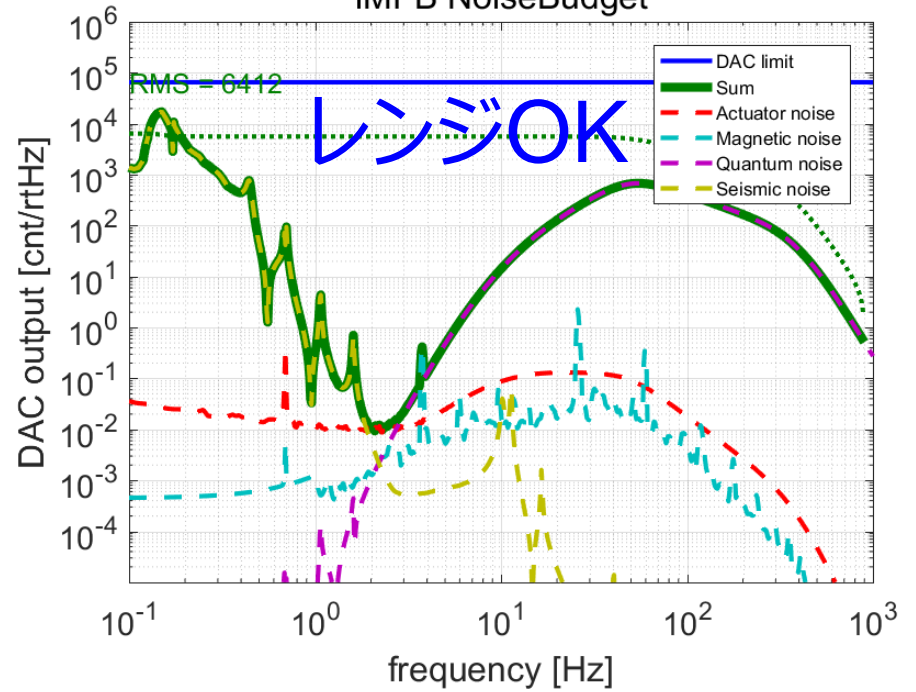
### TMDisp NoiseBudget



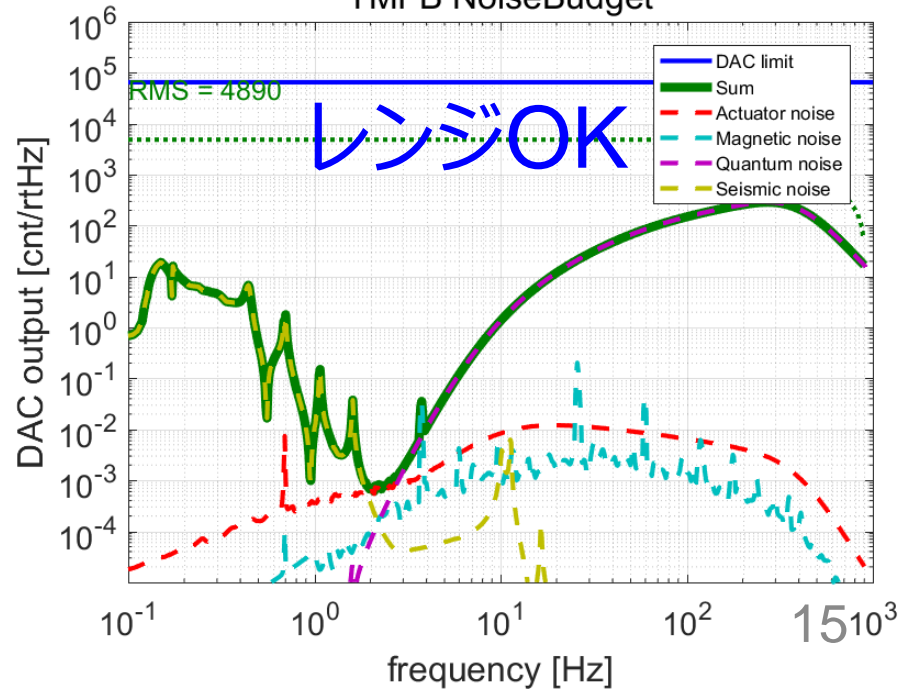
OK

(feed forwardは必要)

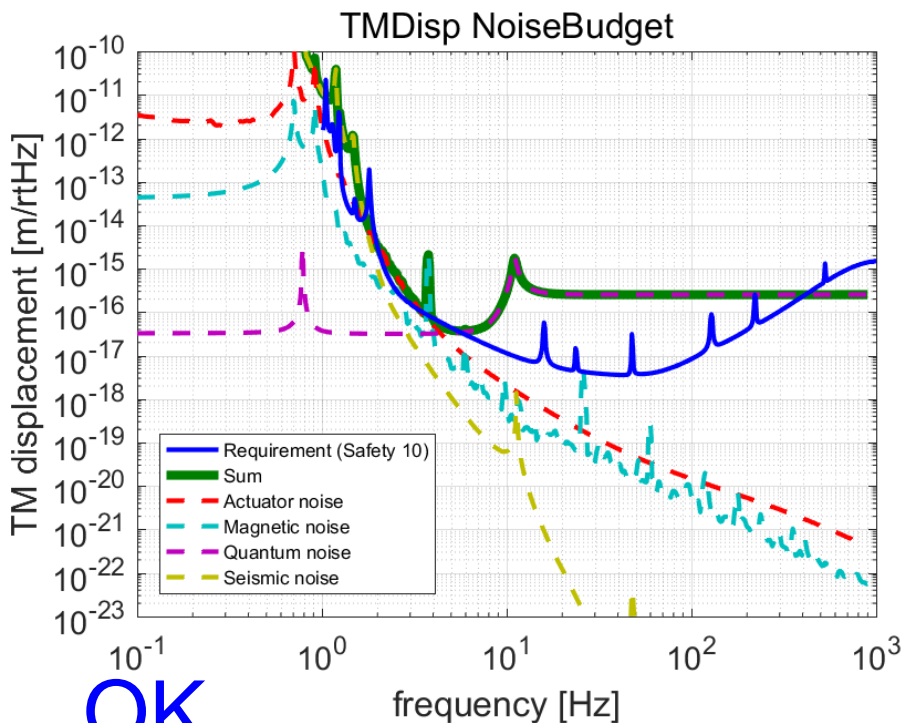
### IMFB NoiseBudget



### TMFB NoiseBudget

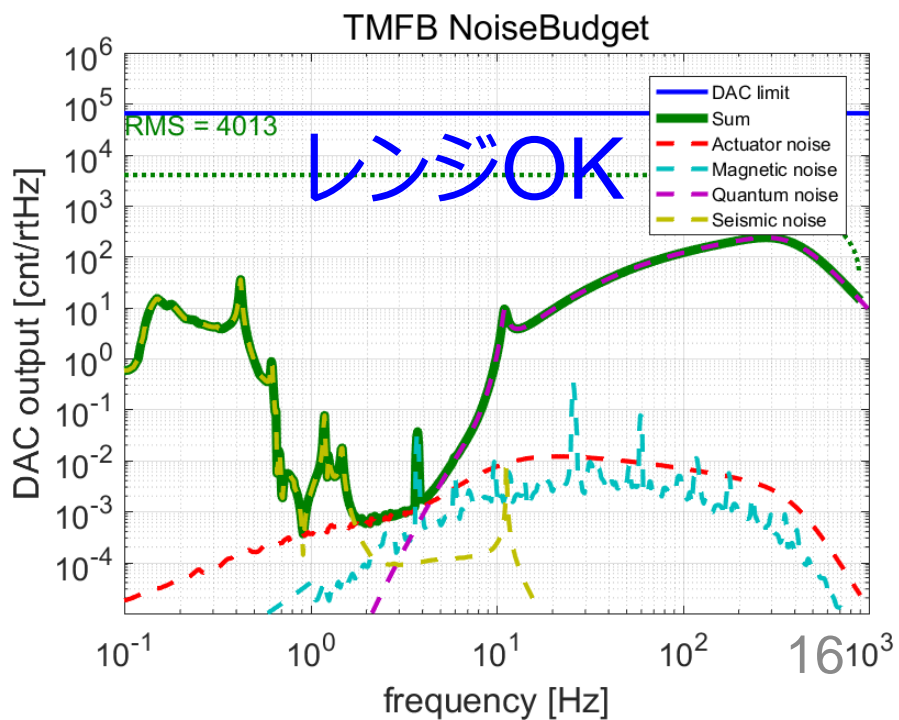
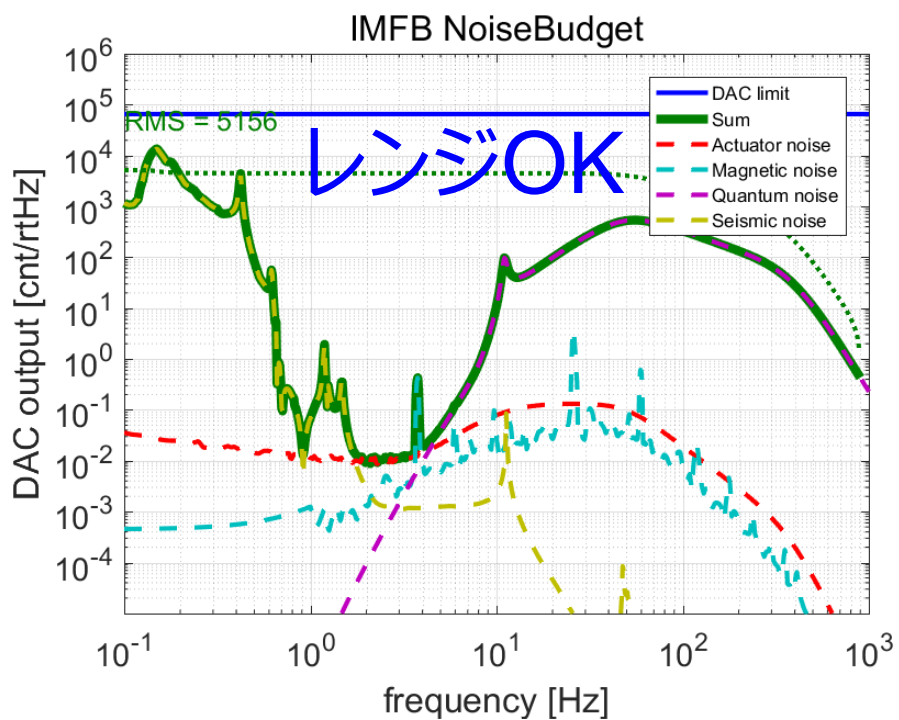


# SRMの結果



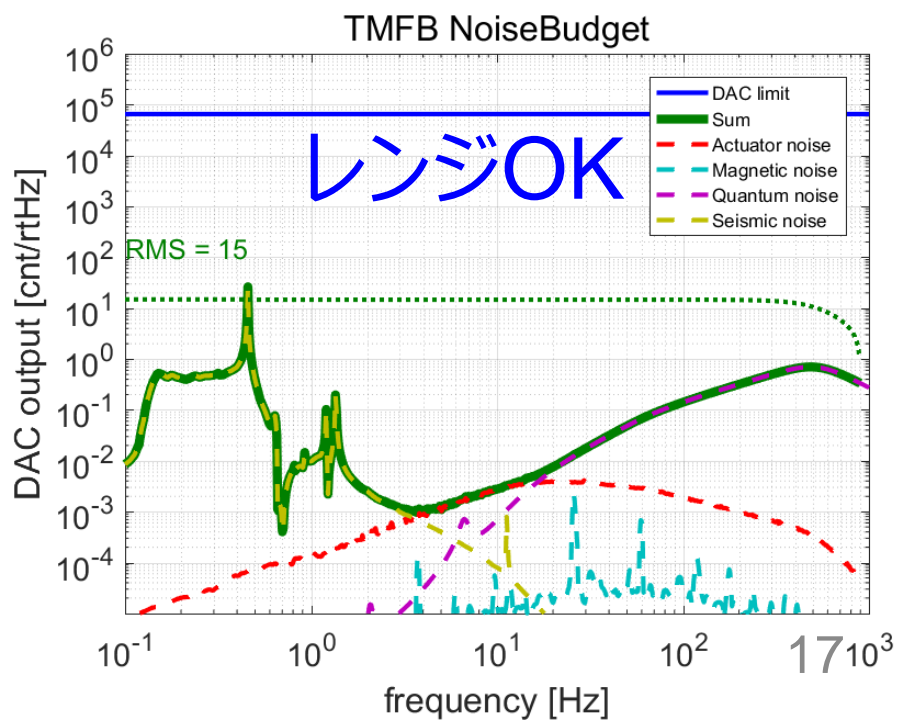
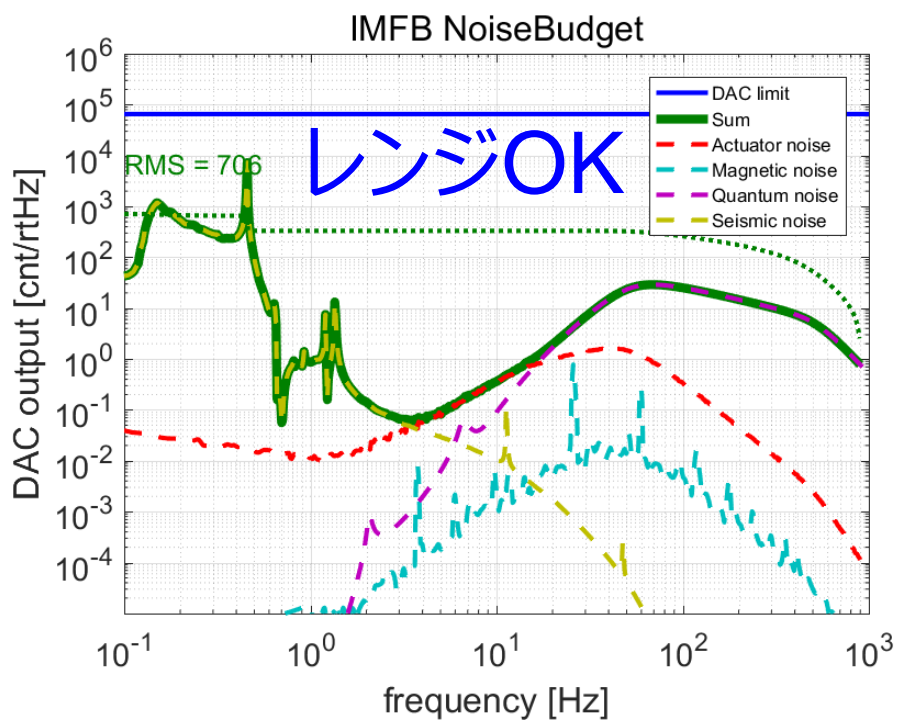
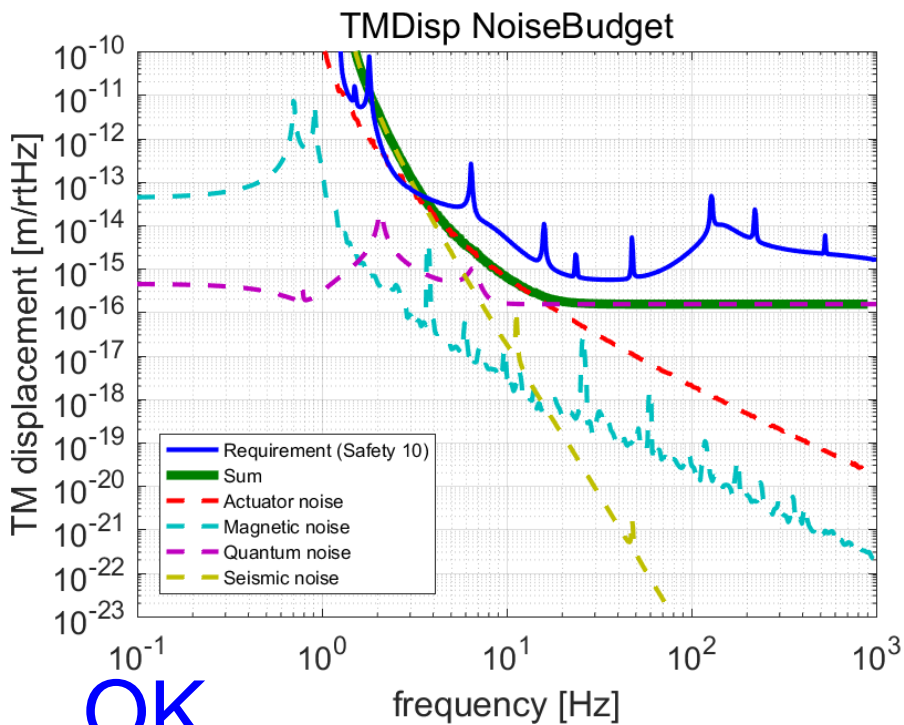
OK

(feed forwardは必要)



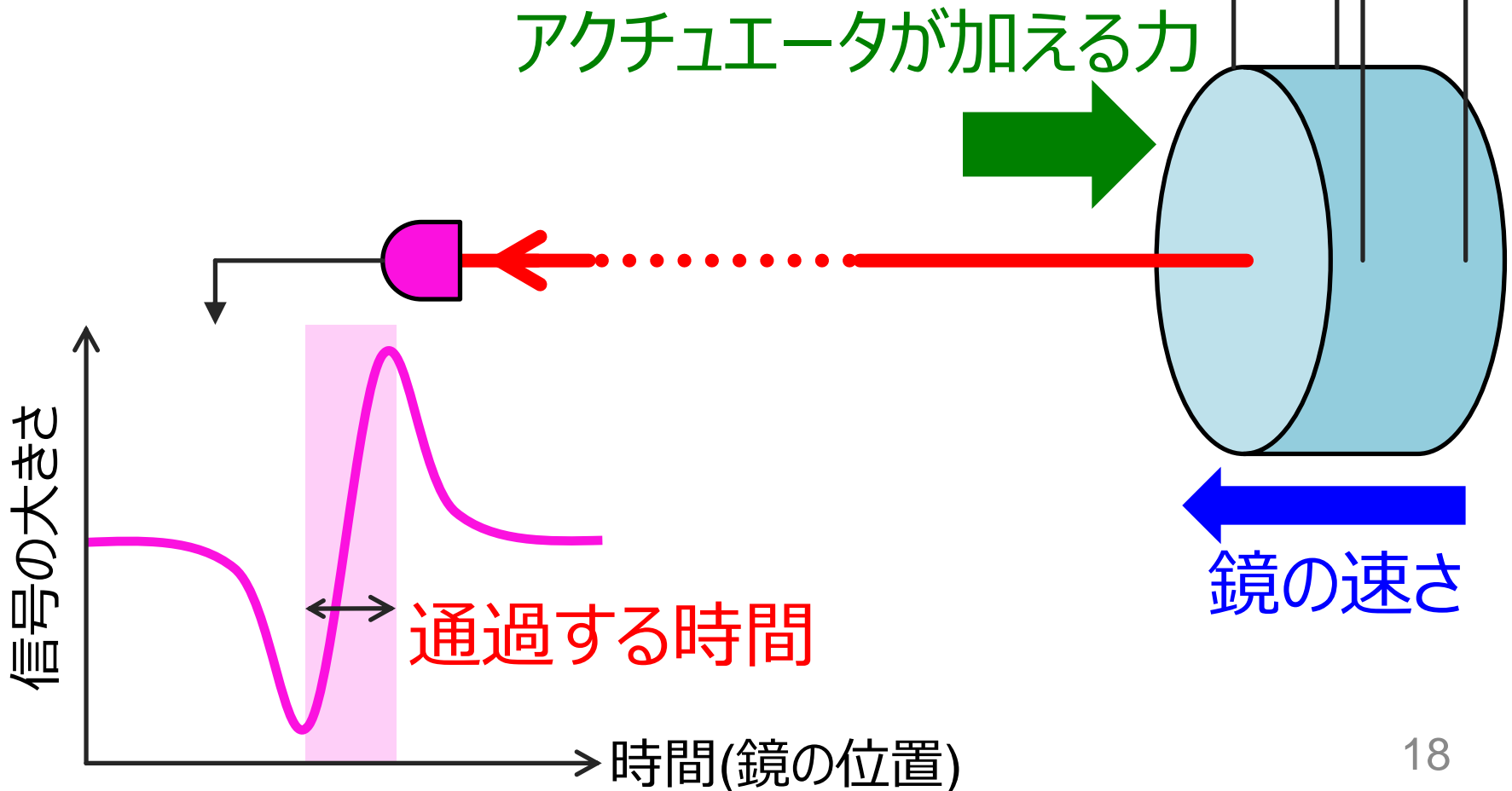


# PRMの結果



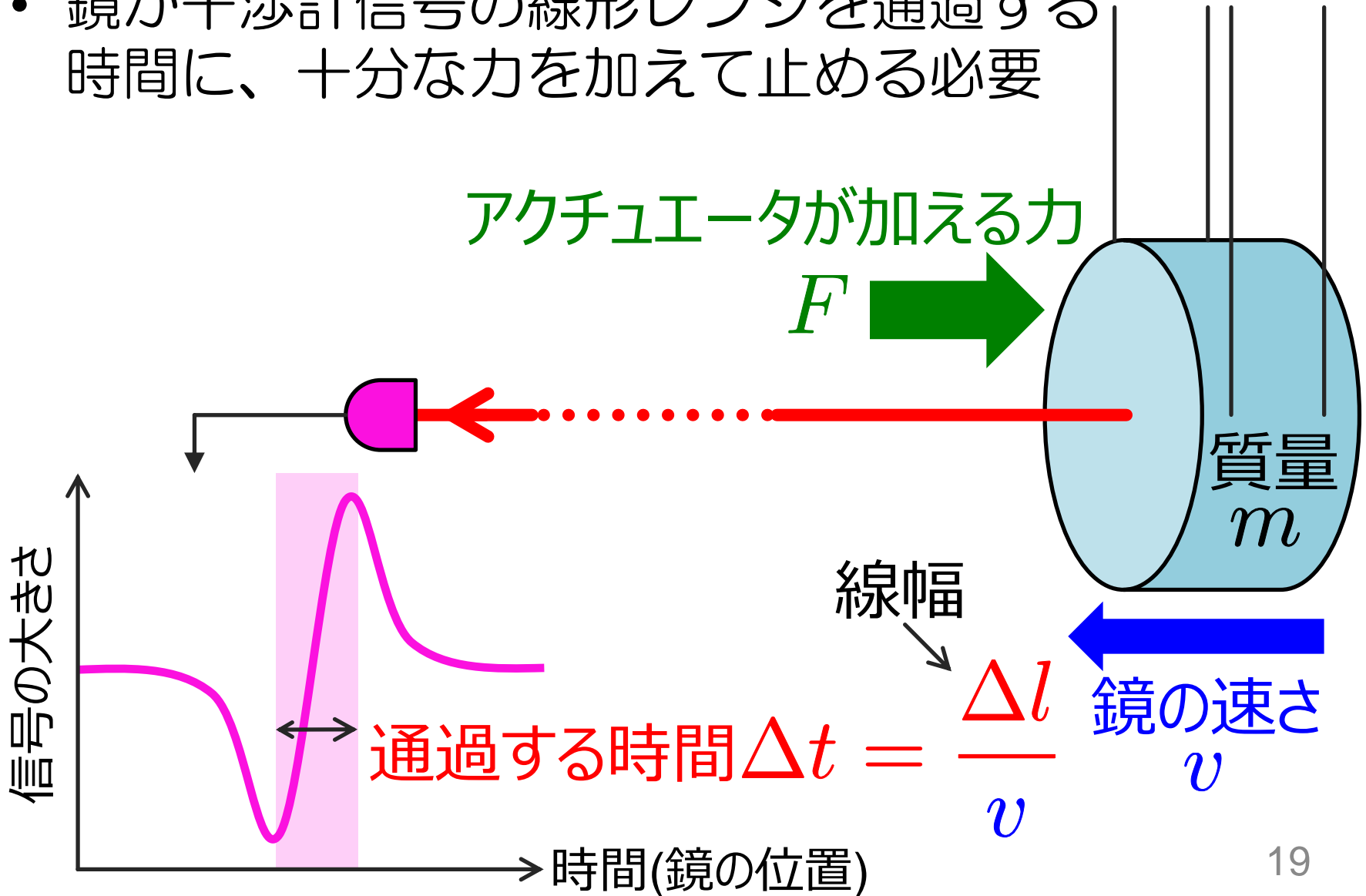
# ロックアクイジション

- 鏡が干渉計信号の線形レンジを通過する時間に、十分な力を加えて止める必要



# ロックアクイジション

- 鏡が干渉計信号の線形レンジを通過する時間に、十分な力を加えて止める必要



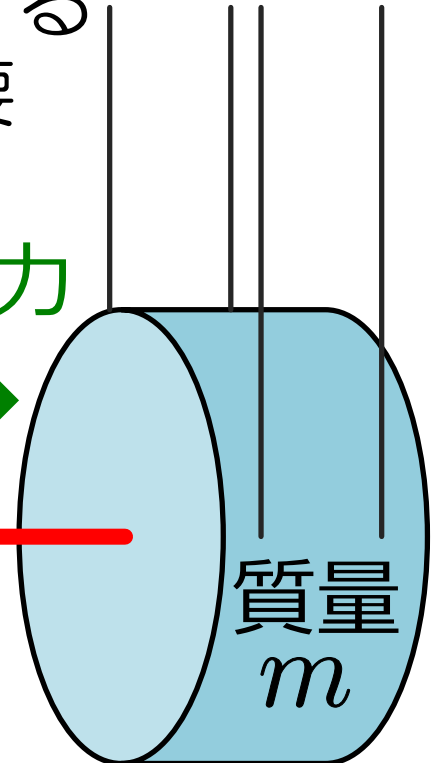
# ロックアクイジション

- 鏡が干渉計信号の線形レンジを通過する時間に、十分な力を加えて止める必要

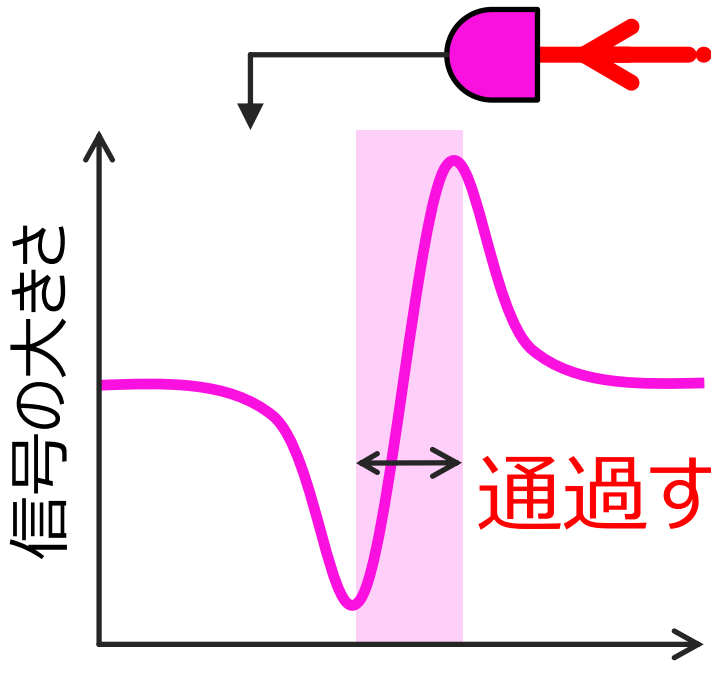
$$F \Delta t = mv$$

力積          運動量

アクチュエータが加える力



質量  
 $m$



線幅

$$\text{通過する時間 } \Delta t = \frac{\Delta l}{v}$$

鏡の速さ  
 $v$

# 速度への上限值

- アクチュエータが加えられる力の最大値から、鏡の速度への上限值が決まる

$$v < \sqrt{\frac{F_{\max} \Delta l}{m}}$$

	PRM	SRM	BS	ETM
Max force $F_{\max}$	65 mN	120 uN	71 uN	グリーンレーザーを使うので関係なし
Linewidth $\Delta l$	9 nm (PRCL)	14 nm (SRCL)	532 nm (MICH)	
Mass $m$	10.8 kg	10.8 kg	18.9 kg	
Requirement on velocity $v$	7.3 um/s	0.38 um/s	1.4 um/s	

参考: 神岡の地面振動速度 ~ 10 um/s

# まとめ

- KAGRA主干涉計の長さ制御モデルを作った
- アクチュエータ雑音、磁場雑音が変位雑音要求値を満たすか、レンジは十分かを確認
- 常温鏡についてはOK
- 低温鏡については検討中  
さらに上段へのフィードバックを考慮に入れる  
Marionetteにより大きい磁石？
- ロックアクイジションも大丈夫そう

