

重力波検出器KAGRAにおける防振懸架装置の制御

玉木 諒秀 (東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻) tamaki83@icrr.u-tokyo.ac.jp



第54回 天文・天体物理若手夏の学校 @ 賢島 宝生苑 2024年7月23-26日 観測 c13

01. イントロダクション ～ 重力波検出器と防振 ～

重力波検出器における**防振懸架装置** (図1)

- ・ 地面振動による外乱の影響を低減
- ・ KAGRAでは要求に応じて4種類の懸架装置を使用

受動防振 (図2左)

- ・ 多段振り子型の懸架装置により、共振以上の周波数で防振比が向上

防振比 = (周波数)⁻² × 振り子の段数

能動防振 (図2右)

- ・ 共振周波数で振動が増幅される
≫ 検出器の運転のため抑制したい
- ・ センサの信号を制御器を通じてフィードバック：**ダンピング制御**

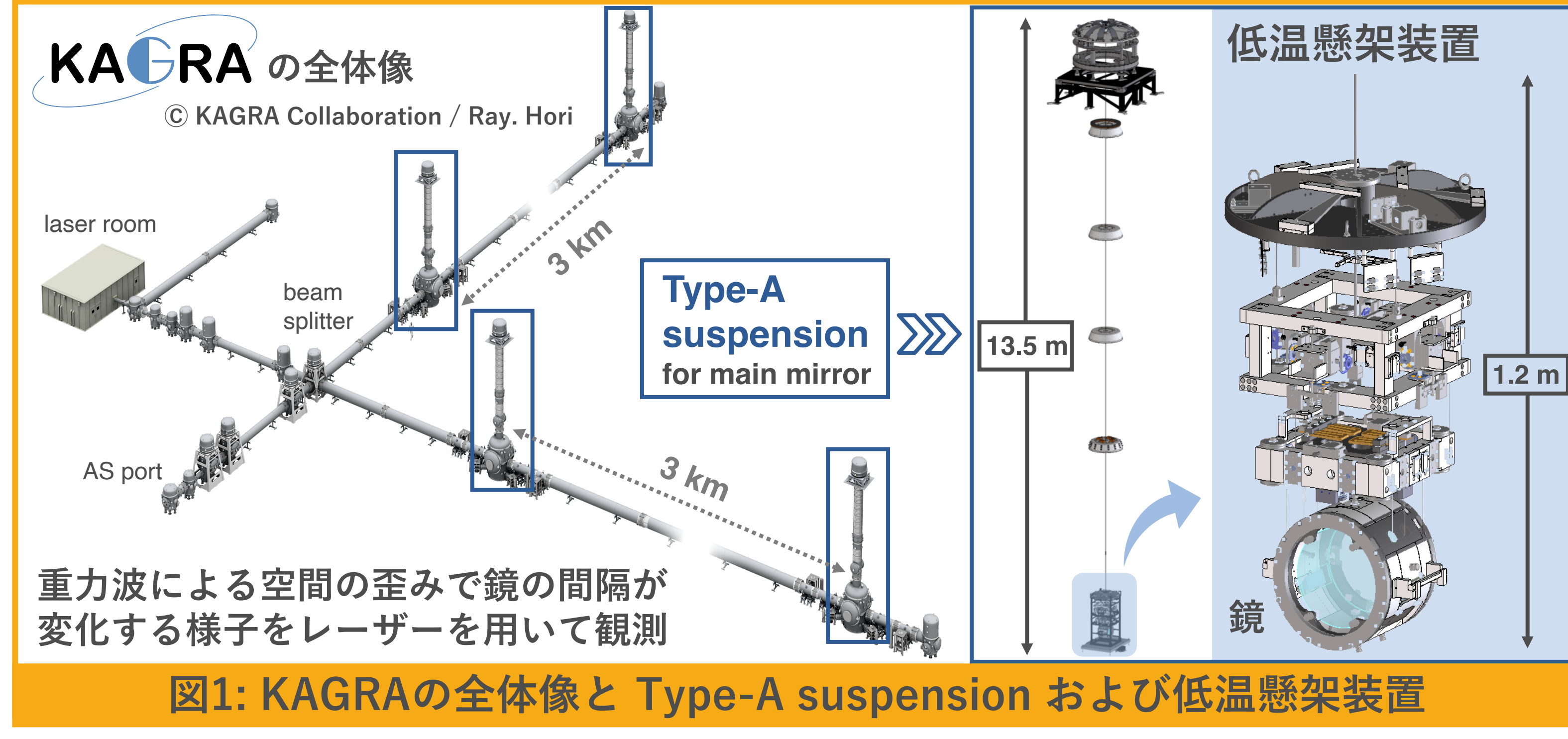


図1: KAGRAの全体像と Type-A suspension および低温懸架装置

02. モチベーション

ダンピング制御に伴う**制御雑音** (図3)

- ・ フィードバック制御ではセンサの雑音が制御器を介してシステムにフィードバックされる

設計感度を達成するため**ダンピング制御雑音を低減したい**

低周波感度向上による利点の例

- 01 質量の大きなBH連星合体による重力波への感度向上
- 02 合体までの時間：(周波数)^{-8/3} に比例 [Ref.1]
≫ 低周波感度向上による早期検出 / 観測時間増加

図2: 受動防振 (左) と能動防振 (右)

左: N 段振り子による防振性能。 suppression ratio vs frequency plot showing a sharp drop at resonance. Formula: 防振比 = (周波数)^{-2N} @ 共振以上の周波数.

右: ダンピング制御の概略図。 1. マスの振動を検知 (センサ). 2. 制御器に信号を送る (制御器). 3. 振動を減衰させる信号を生成してアクチュエータに送る (アクチュエータ). 4. マスにFB (フィードバック).

KAGRAに関する補足

- ・ KAGRAは現存する重力波検出器のうち、唯一以下の2つの特徴を持つ
- 地下に建設**：地面振動雑音低減のため、地下に検出器を建設
- 鏡を極低温に冷却**：熱雑音低減のため、低温懸架装置を用いて 20 Kまで冷却する

03. 解決策

モード制御

従来のダンピング制御
複数のモードをまとめて制御

モード制御 (振動をモードに基づき分解)
制御対象の単純化・最適な制御設計が容易に
振動減衰の要求を満たしつつ雑音を最小化

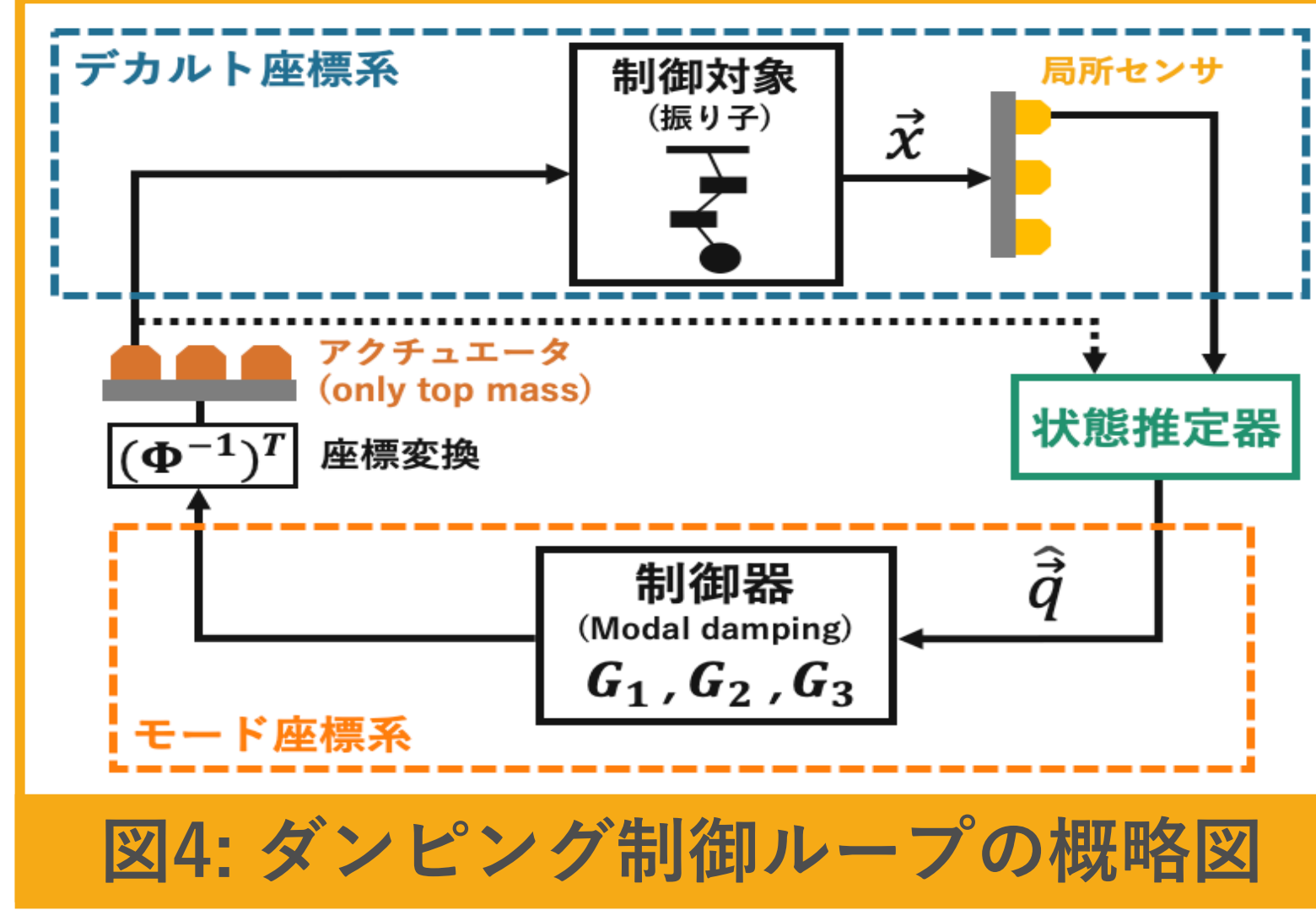
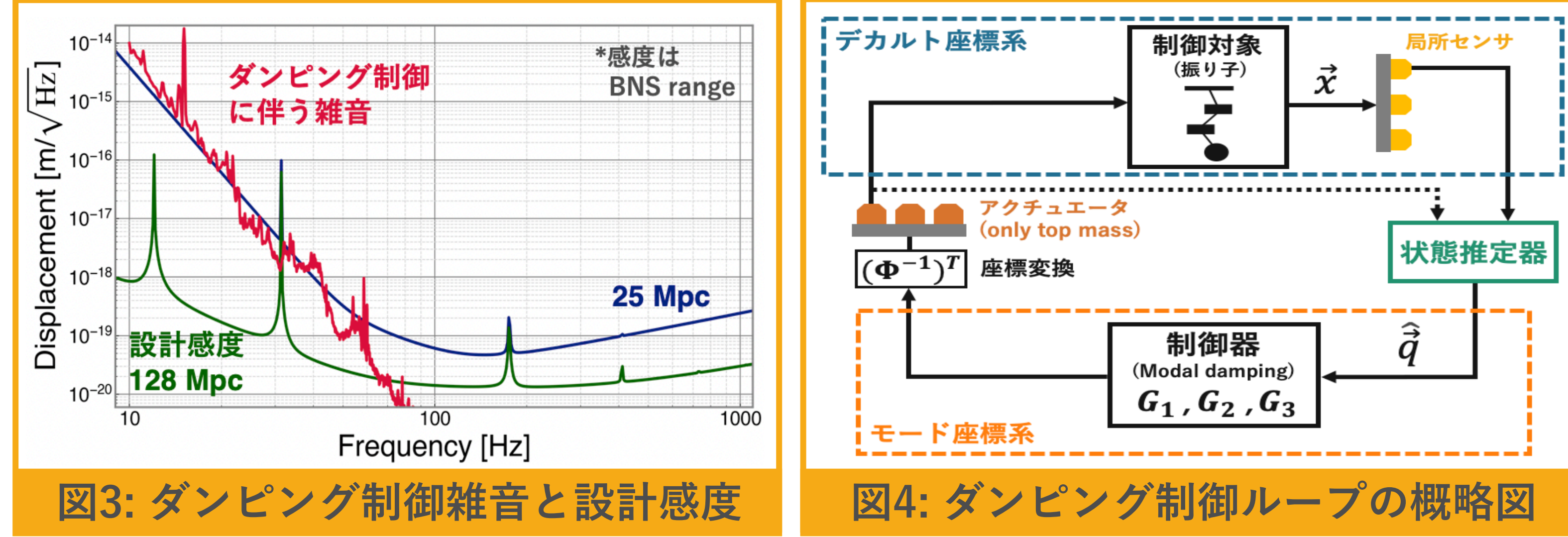
状態推定

モード制御では完全な状態が必要 (各段の位置や姿勢の全ての信号)
≫ 状態推定を用いる

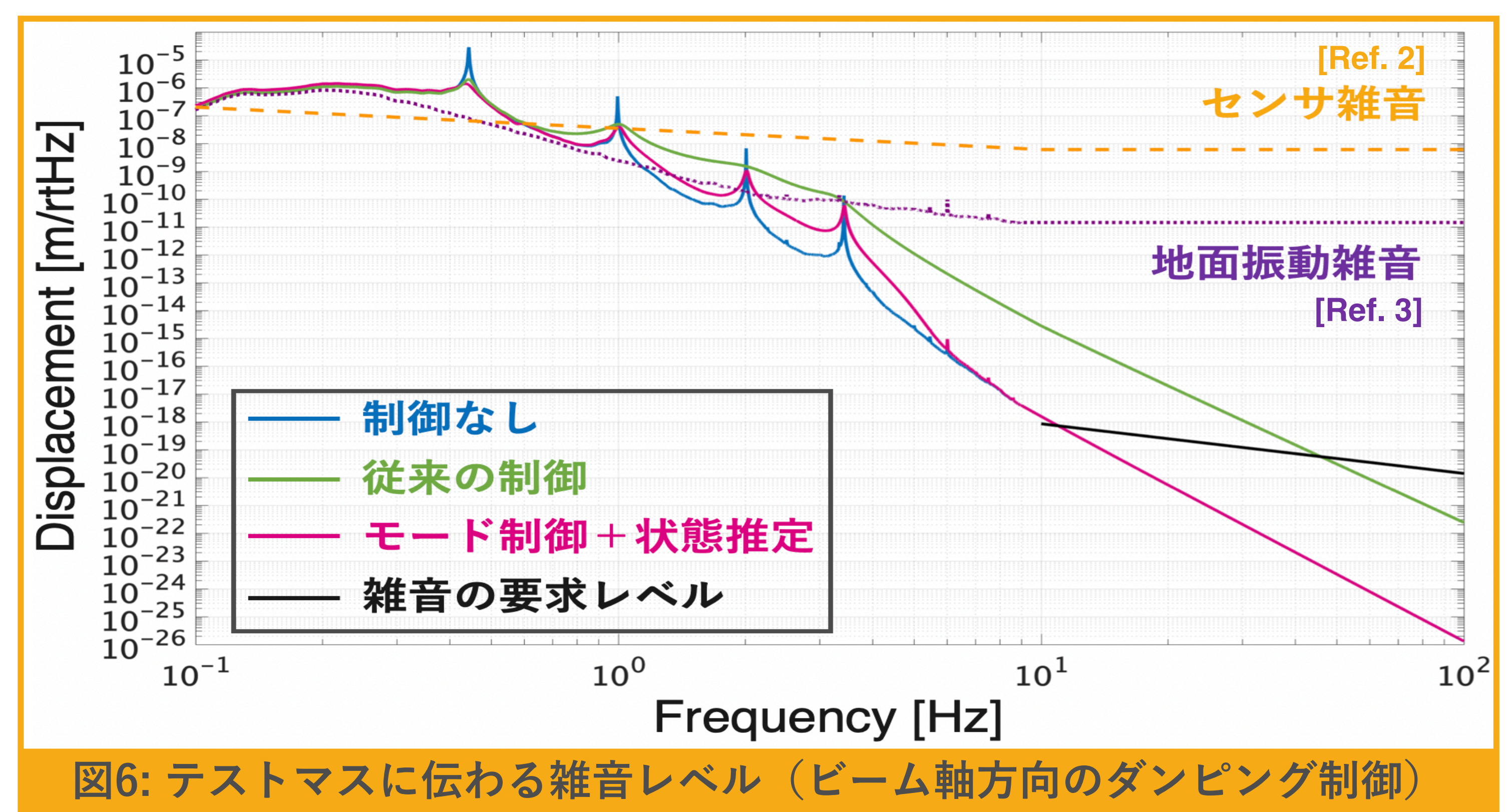
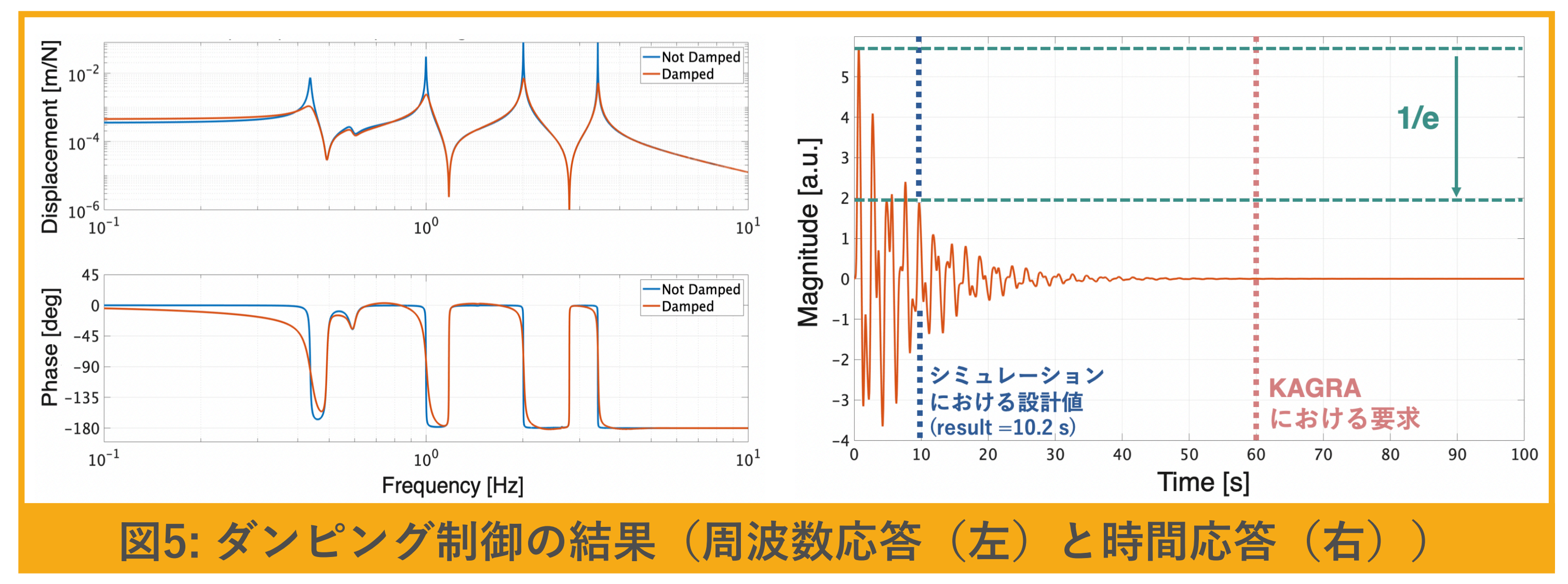
$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{q}} \\ \hat{q} \end{bmatrix} = A_m \begin{bmatrix} \hat{q} \\ \dot{\hat{q}} \end{bmatrix} + B_m \ddot{u} - L_m \left(C_m \begin{bmatrix} \hat{q} \\ \dot{\hat{q}} \end{bmatrix} - \ddot{y} \right)$$

目標：最適な L_m を設計

LQR法による推定器の設計

$$J = \int_0^\infty \left(\begin{bmatrix} \tilde{q}^T & \dot{\tilde{q}}^T \end{bmatrix} Q \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{\tilde{q}} \end{bmatrix} + \dot{\tilde{z}}^T R \dot{\tilde{z}} \right) dt$$
$$L_m = \text{argmin}(J)$$


04. シミュレーション結果



05. まとめと展望

- ・ モード制御と状態推定を用いたダンピング (図4) のシミュレーションにより **ダンピング制御雑音を低減可能** であることを示すことができた (図5・6)
- ・ 試験用低温懸架装置を用いて実験的に確かめる準備を行なっている

06. 参考文献

[Ref. 1] B. Sathyaprakash *et al.*, Class. Quantum. Grav. 29, 124013, 2012
[Ref. 2] T. Ushiba, klog17939 (log for KAGRA activity), 2021
[Ref. 3] K. Miyo, JGW-T1910436 (internal document), 2020