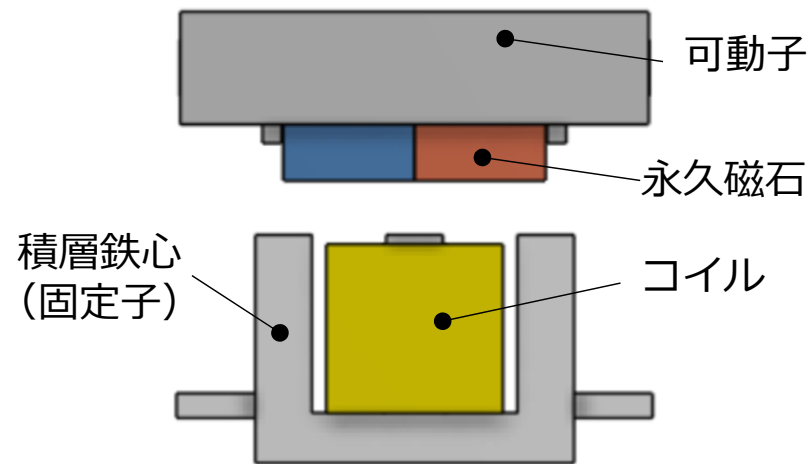


リニア振動アクチュエータ(LOA)

リニア振動アクチュエータ(LOA)とは

- ・ 交流電流により往復運動を与える電磁アクチュエータ
- ・ 力学モデル = マスバネダンパ系



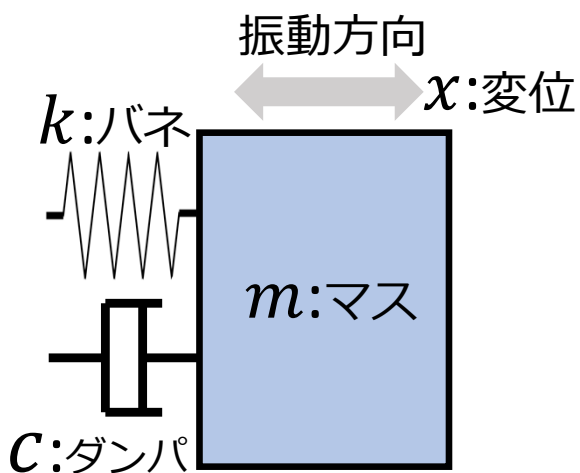
リニア振動アクチュエータ(LOA)

問題点

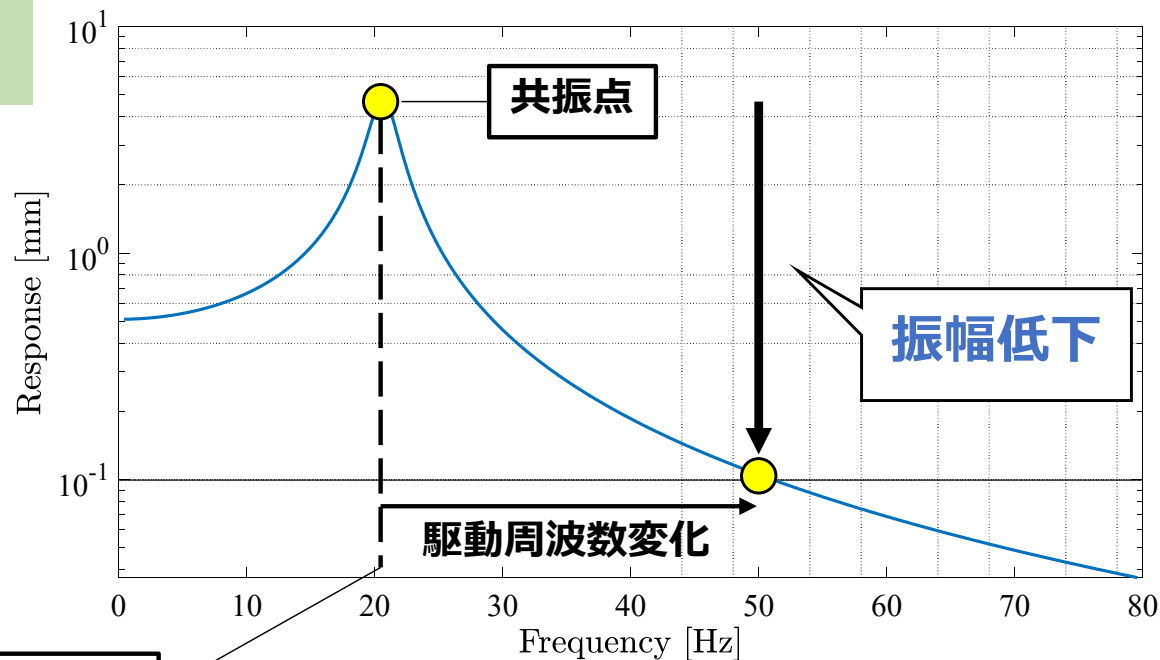
駆動周波数が共振周波数から変化



LOAの振動振幅低下



マスバネダンパ系
(1自由度振動系)



共振周波数

1 自由度振動系の振幅-周波数特性

リニア振動アクチュエータ(LOA)の最適な自由度への切換による振幅向上^[1]

LOAの問題

駆動周波数の変化による
振動振幅の低下

提案

自由度切換型LOA

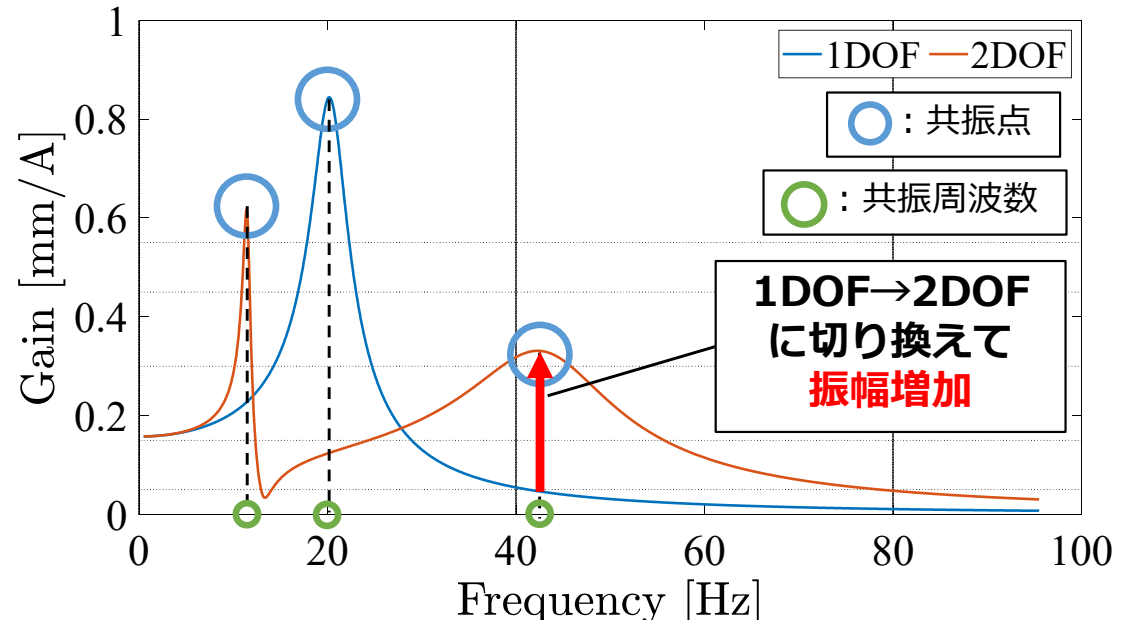
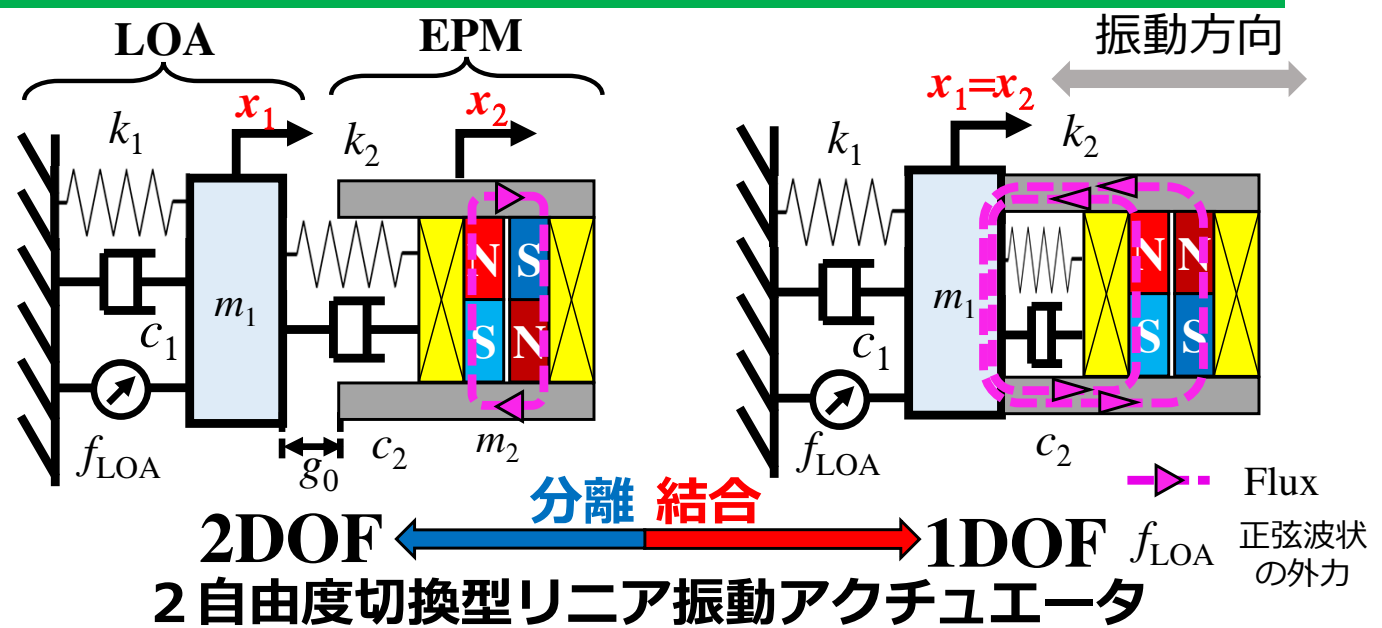
- ・ EPMにより自由度切換
- ・ 複数の異なる周波数応答曲線を持つ



駆動周波数において最大振幅を得られる自由度に切換



LOAの周波数応答の広帯域化が可能



1自由度および2自由度LOAの周波数応答曲線

[1]加藤, 北山, 永電磁石を用いた自由度切り換え型振動アクチュエータの実験的検証, 第35回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2023.

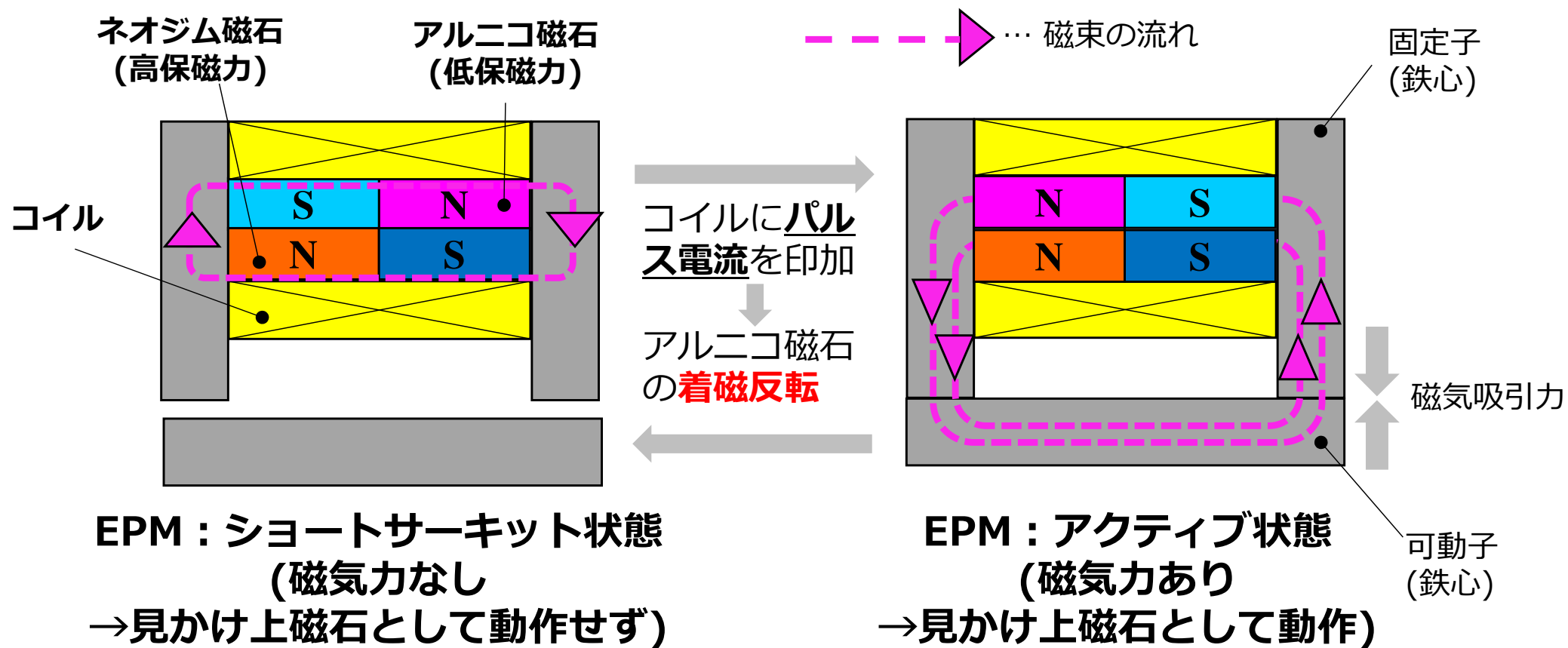
EPM(Electro Permanent Magnet)とは^[1]

永久磁石の長所：**外部エネルギー無し**で磁気力発生

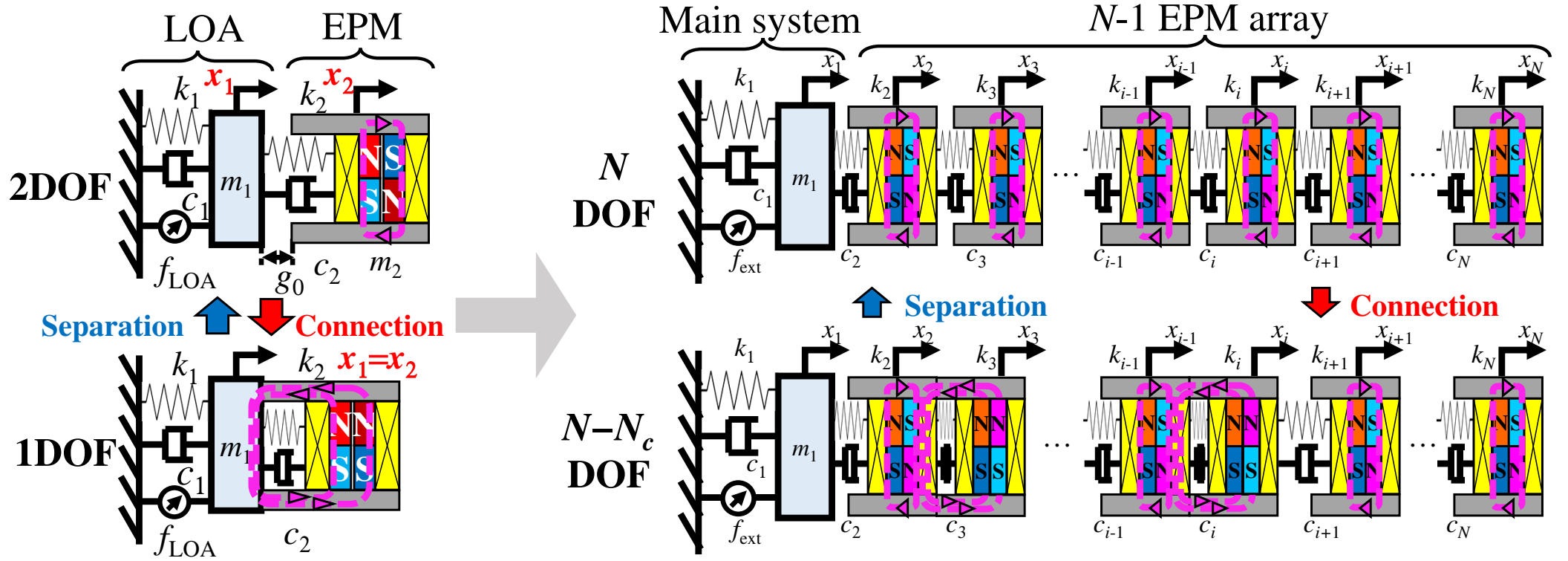
電磁石の長所：**磁気力のON/OFF可能**

の両方の性質を有する磁気回路

コイルにパルス電流を印加し、
小電力で磁気力のON/OFFの切り換えが可能



N自由度系への拡張



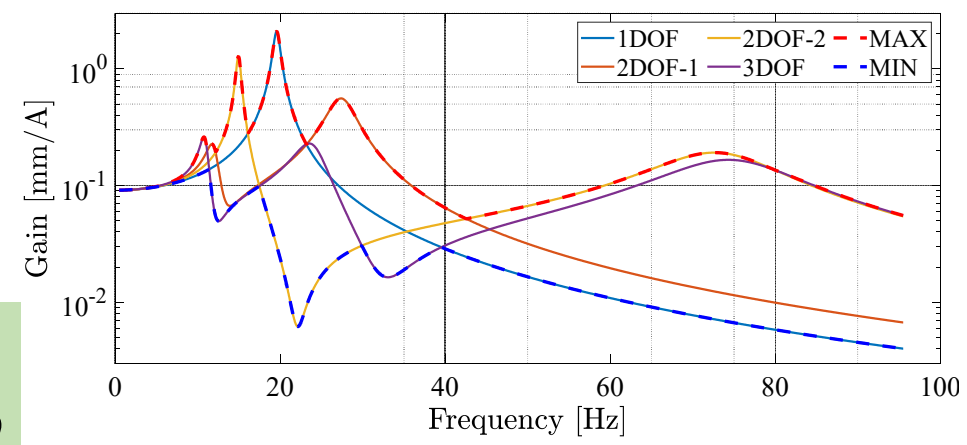
2自由度切換型振動系

N自由度切換型振動系(簡易モデル)

先行研究：2自由度切換型振動系
周波数応答曲線の広帯域化が**不十分**

↓
多自由度化

本研究：N自由度切換型振動系
周波数応答曲線の更なる広帯域化を狙う



周波数応答曲線(N=3)

N自由度切換型振動系の理論式

周波数応答曲線の総数 N_{resp}

$$N_{resp} = \sum_{N_C=N-1}^0 \binom{N-1}{N_C} = 2^{N-1}$$

共振点(共振周波数)の総数 N_{eig}

$$N_{eig} = \sum_{N_C=N-1}^0 \left((N - N_C) \binom{N-1}{N_C} \right)$$

N_C : 結合するEPMの数

提案するN自由度切換型振動系

N	2	3	4	5	6	...
N_{resp}	2	4	8	16	32	...
N_{eig}	3	8	20	48	112	...

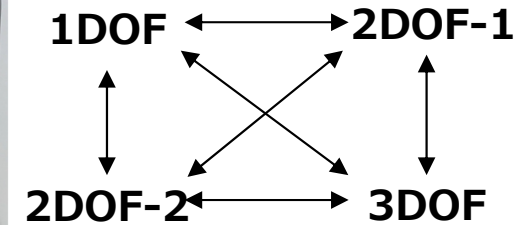
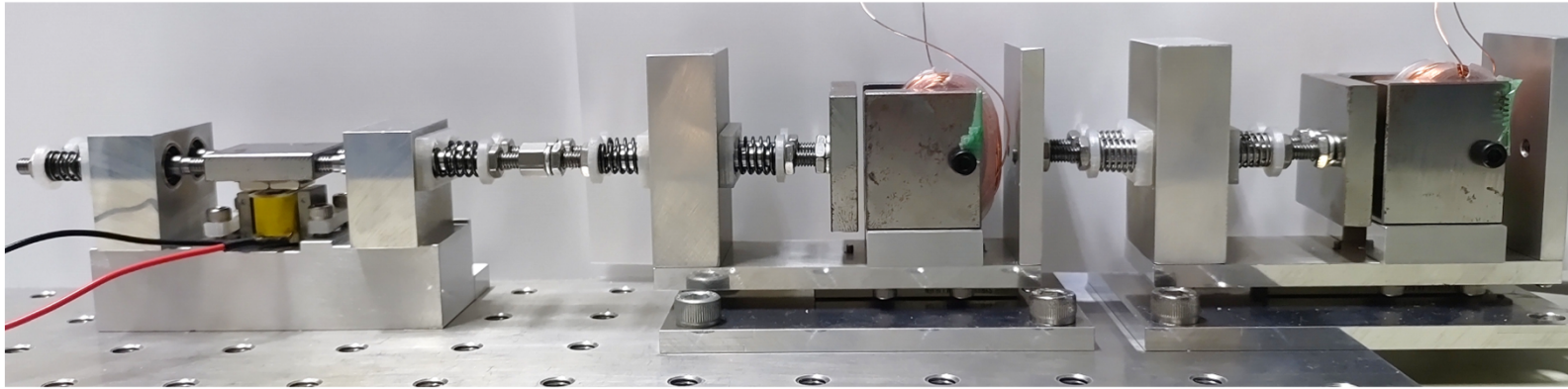
N自由度振動系(EPM不使用)

N	2	3	4	5	6	...
N_{resp}	1	1	1	1	1	...
N_{eig}	2	3	4	5	6	...

- (EPMを用いない) 一般的なN自由度振動系
自由度Nの増加に伴い, N_{resp} は一定で N_{eig} が比例増加
- 提案するN自由度切換型振動系
 N_{resp} , N_{eig} ともに, 指数関数的に増加している
→ 広帯域の実現が容易

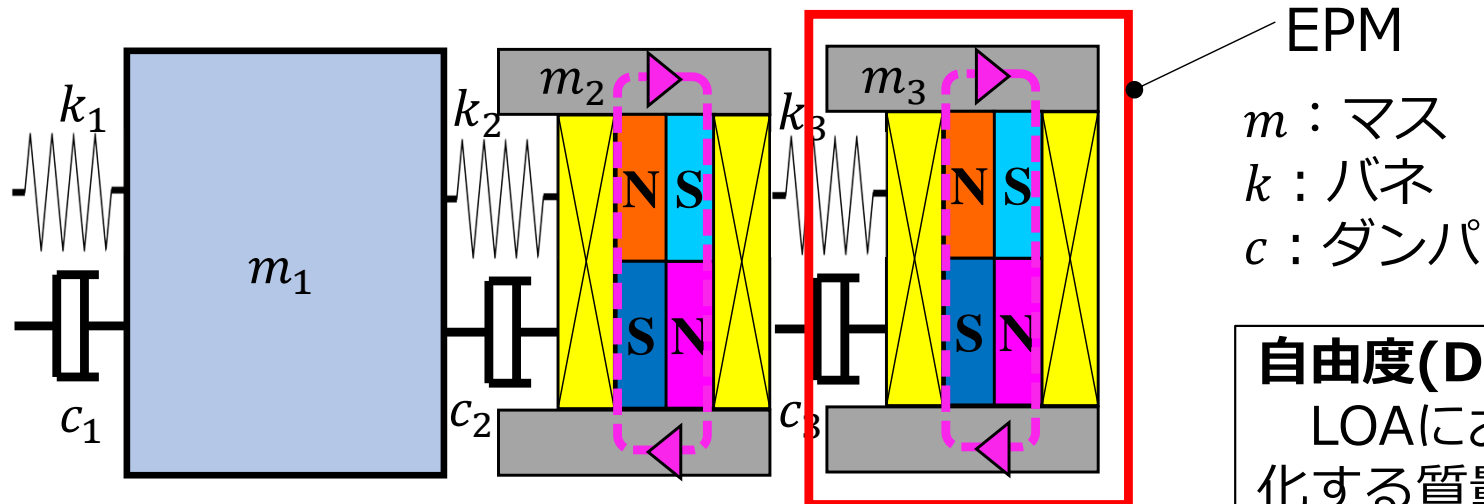
3自由度切換型リニア振動アクチュエータ

N自由度切換型振動系を検証するため、3自由度切換型LOAを製作し検証する。3自由度切換型リニア振動アクチュエータでは、**2つのEPM**の吸着力をON/OFFし、**自由度を切り換える**。



自由度の
遷移パターン

3自由度切換型リニア振動アクチュエータ（実験装置）



自由度(DOF)

LOAにおいて独立して変化する質量 m の変位 x の数

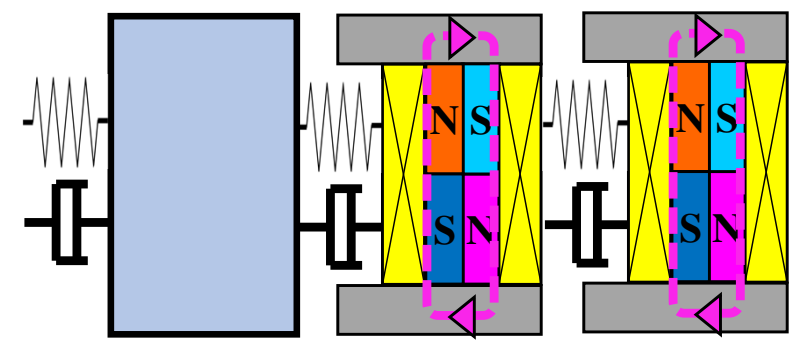
3自由度切換型リニア振動アクチュエータ

3自由度切換型LOAの状態一覧

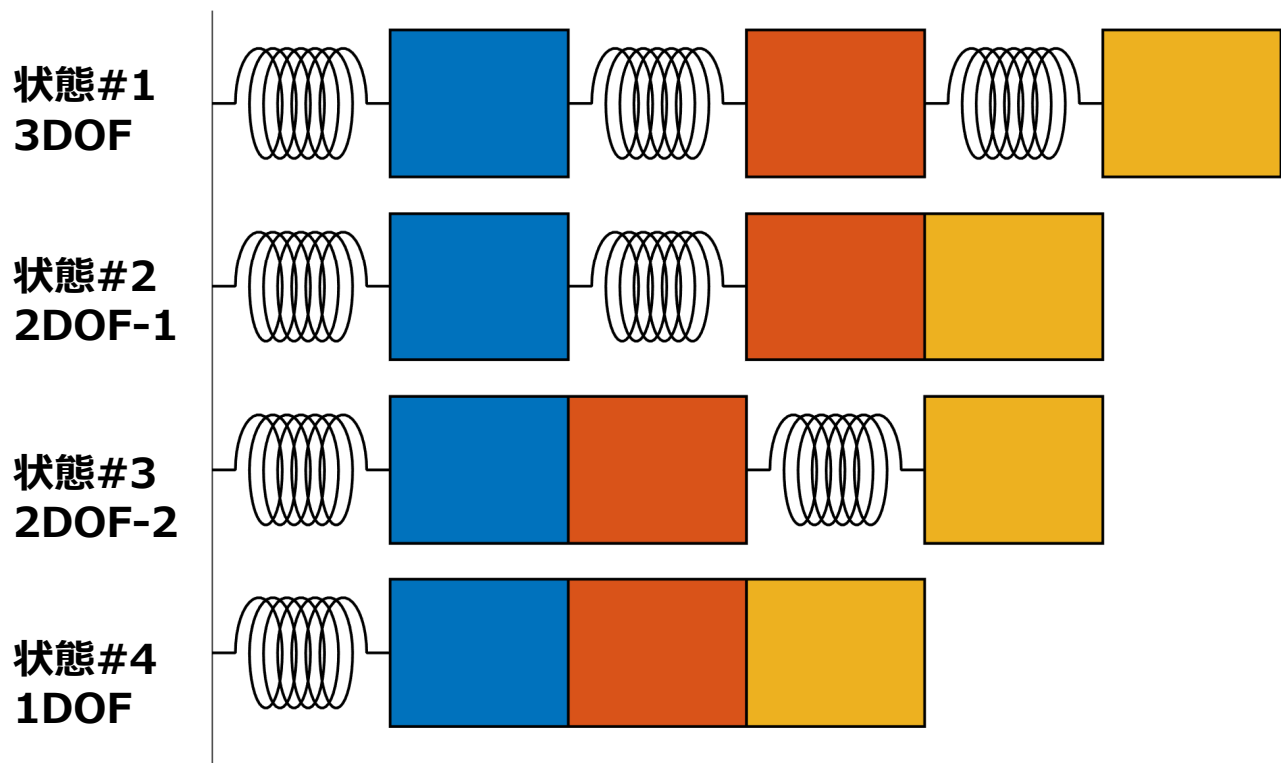
状態…EPMの吸引力のON/OFFの組み合わせで決まるマスバネダンパ系

状態数： $(3 - 1)^2 = 2^2 = 4$ 個 (3自由度切換型時)

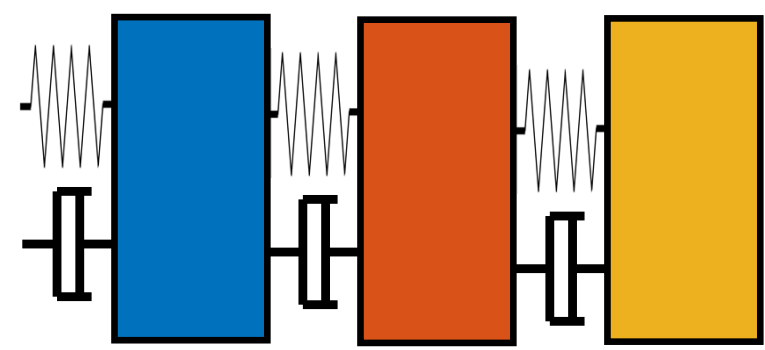
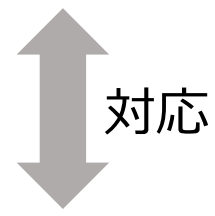
- ・ 全ての状態でリニア振動アクチュエータの周波数応答曲線が異なる
- ・ 各周波数応答曲線の共振点の数 = 状態の自由度



3自由度切換型
リニア振動アクチュエータ



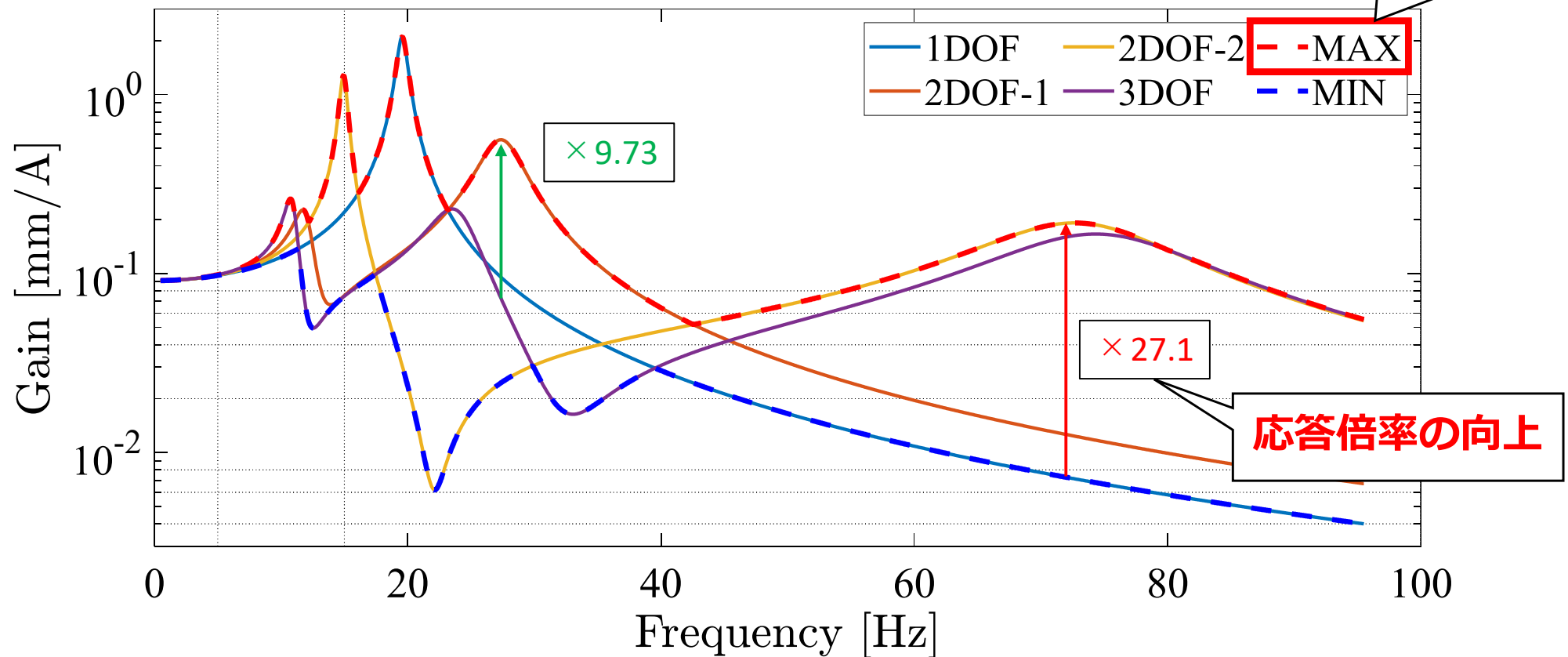
3自由度切換型リニア振動アクチュエータの状態一覧



3自由度切換型リニア振動
アクチュエータ(力学モデル)

MATLABによる周波数応答曲線の計算結果

運動方程式 $[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\}$

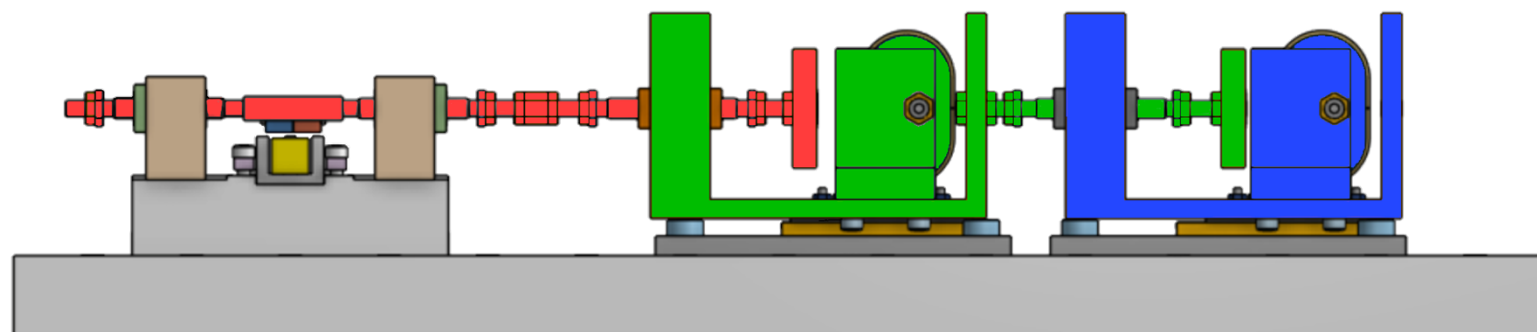


駆動周波数において最大の応答倍率をとる周波数応答曲線を選択

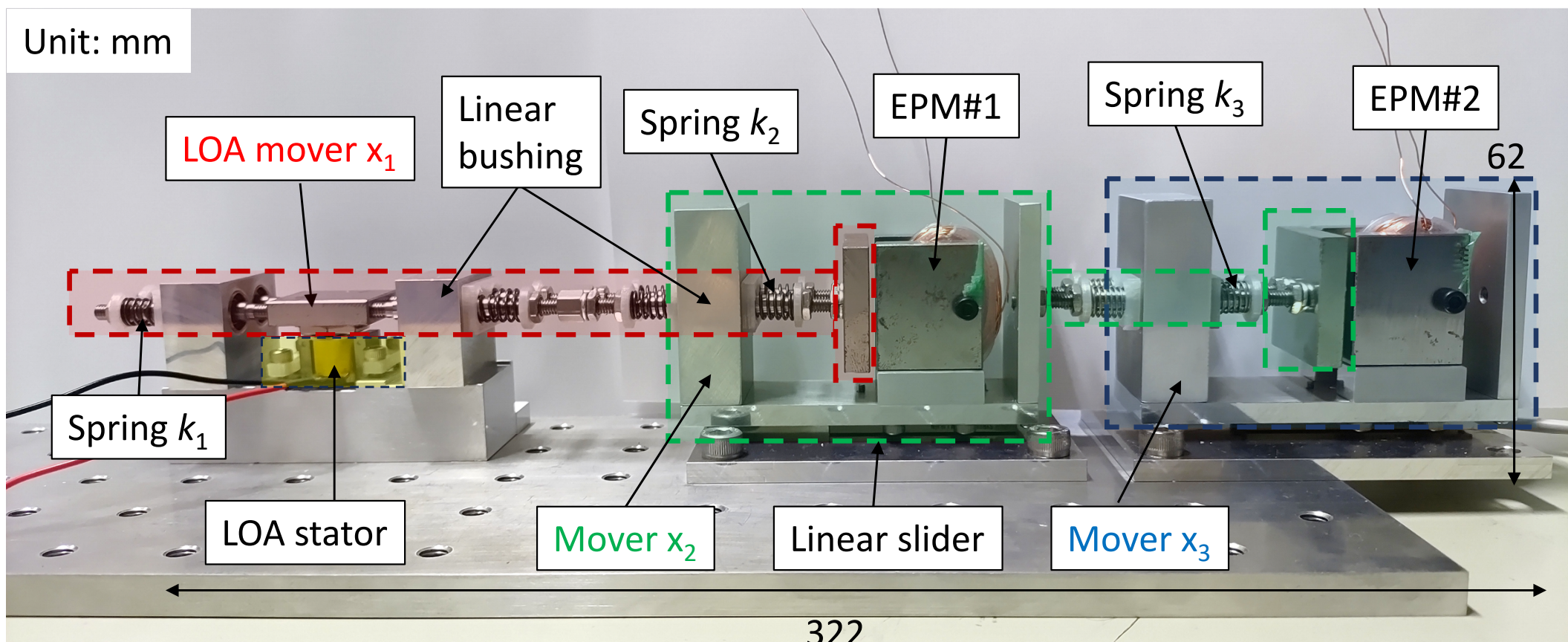


任意の周波数で応答倍率が最大化された**広帯域な周波数応答**を得る

3自由度切換型LOAの実験装置



3自由度切換型リニア振動アクチュエータの3Dモデル



製作した3自由度切換型リニア振動アクチュエータの実験装置

パルス電流制御回路

3自由度切換型リニア振動アクチュエータ

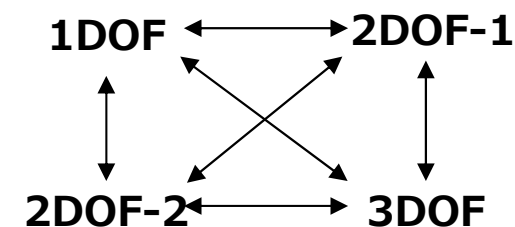
パルス電流で2つのEPMのアルニコ磁石の着磁を反転させて自由度切換



2つのEPMへのパルス電流の印加時間・通電方向を制御する回路が必要



2個のHブリッジインバータを並列接続した回路を採用



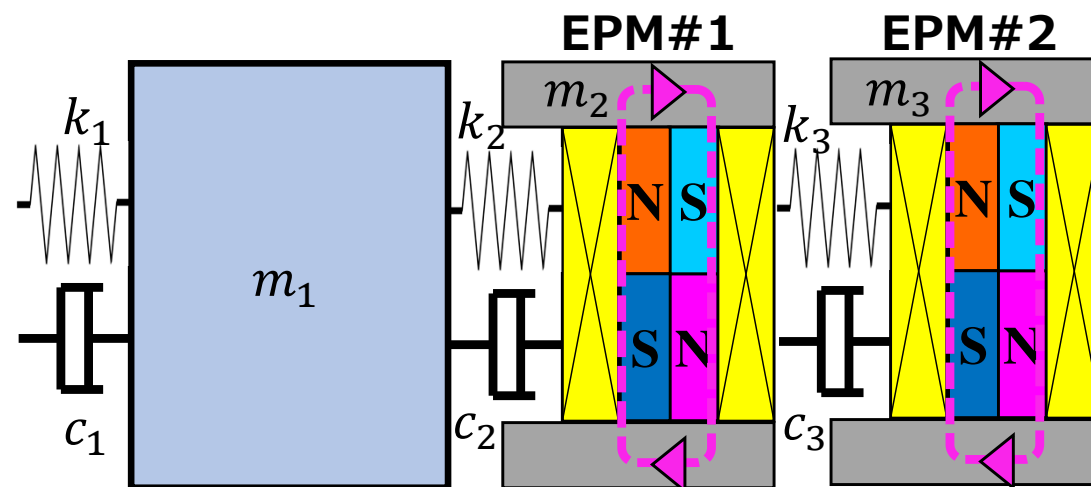
自由度の
遷移パターン

採用理由

2つのEPMの結合/離脱を
独立かつ同時に制御可能

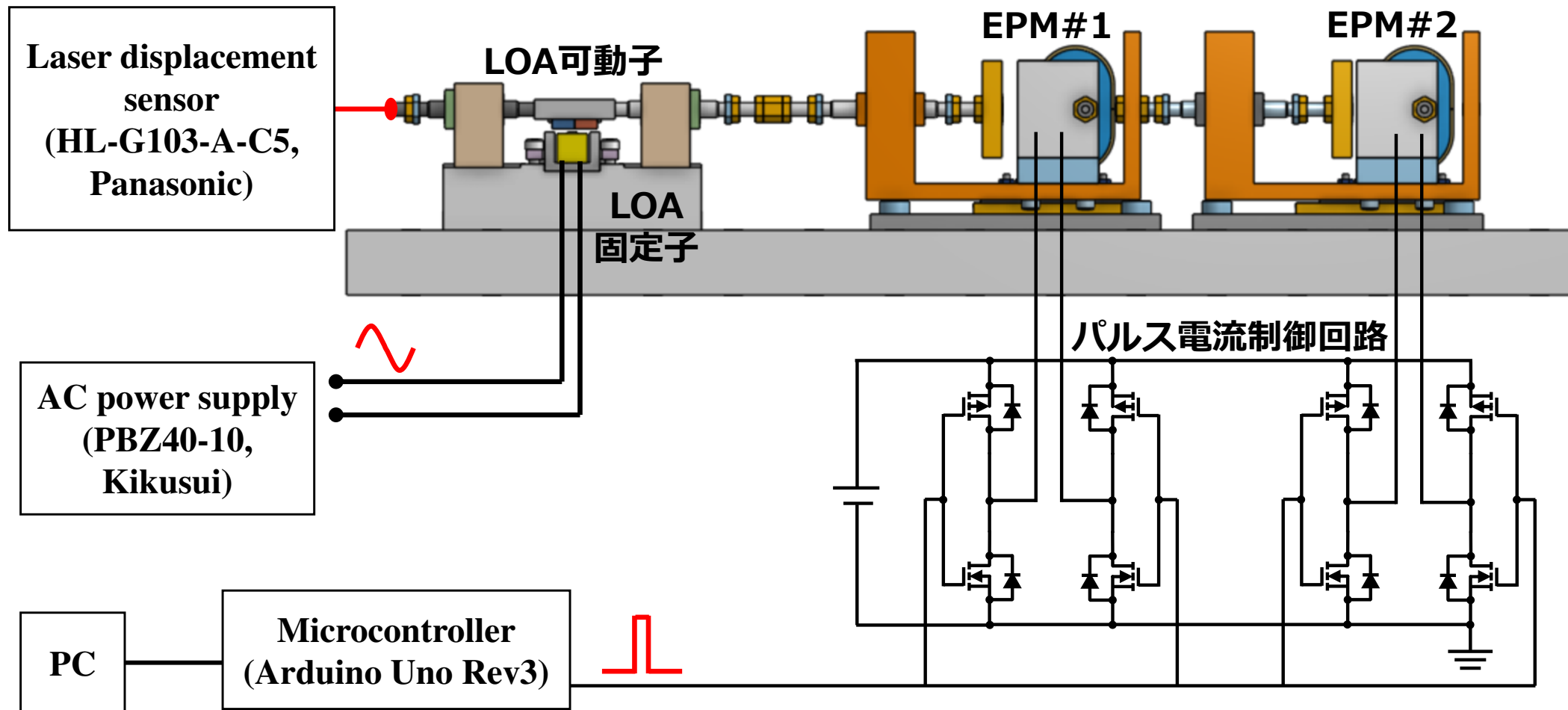


3自由度切換型LOAの
4つの自由度間の
自由な遷移が可能



3自由度切換型リニア振動アクチュエータ

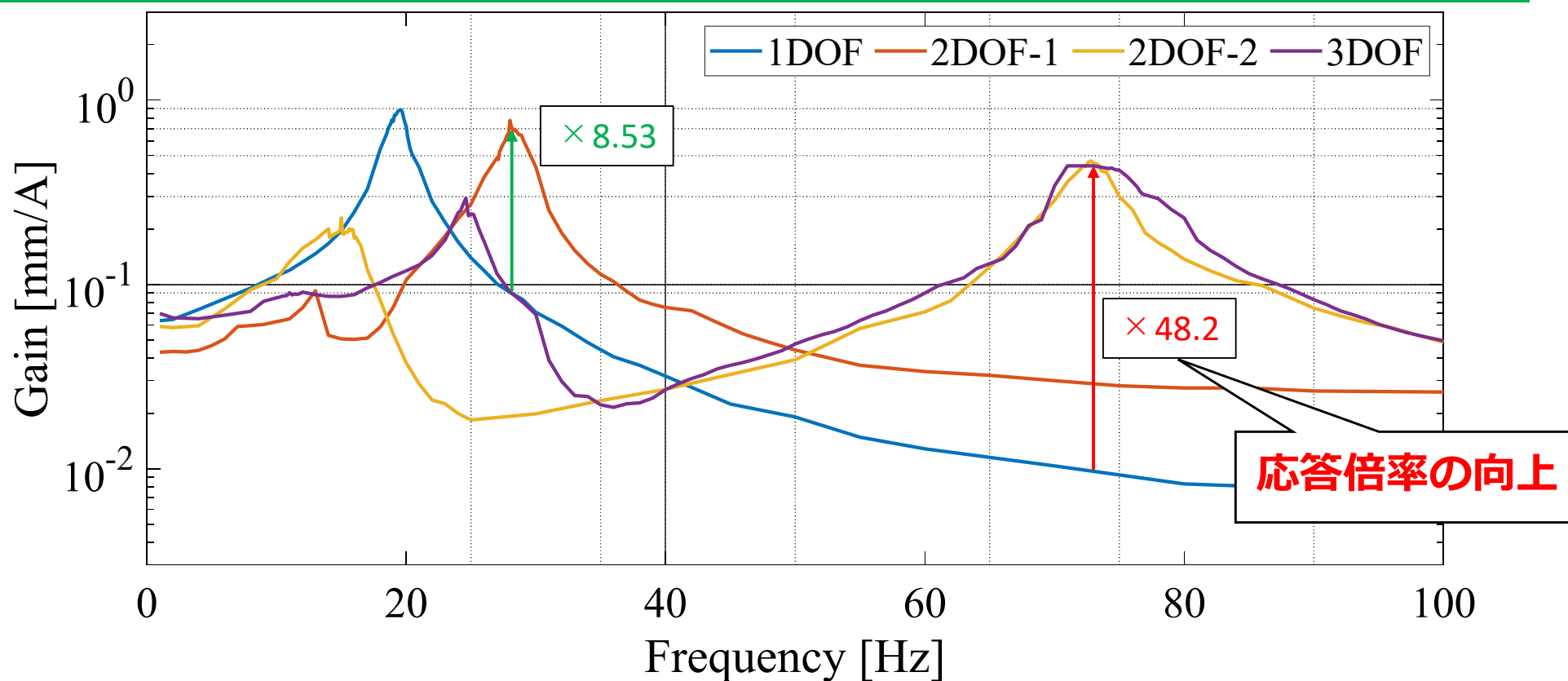
提案した3自由度切換型LOAの実験構成



各実験器具の役割

- ・ 交流電源：正弦波電圧の印加によるLOAの加振
- ・ Arduino：パルス電流制御回路の制御
- ・ 直流電源：EPMへのパルス電流の印加
- ・ レーザー変位計：LOA可動子の変位を計測

周波数応答曲線の測定結果



数値計算と測定結果の共振周波数の比較

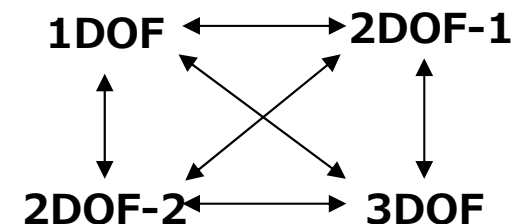
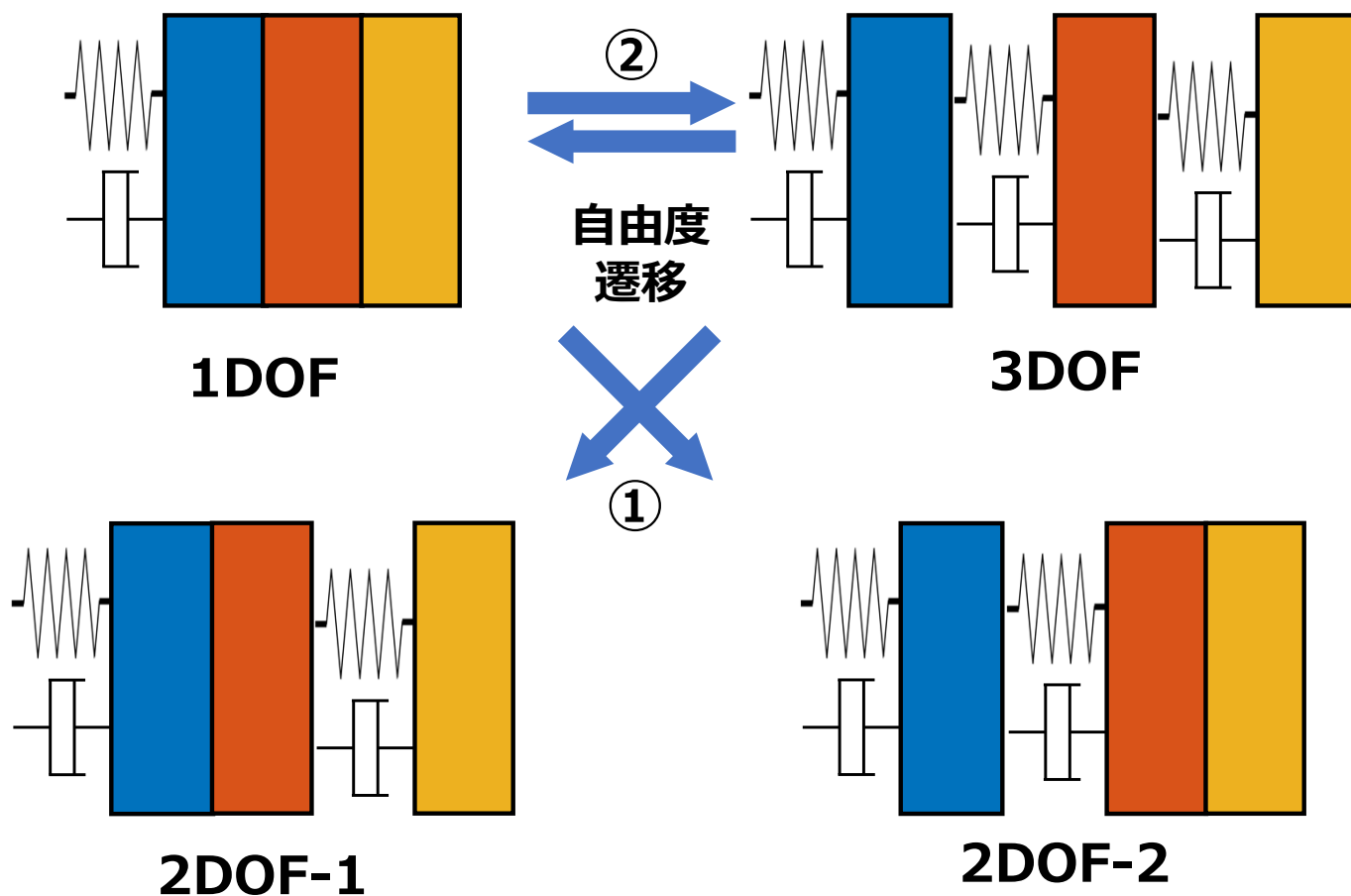
DOF	1DOF	2DOF-1	2DOF-2	3DOF				
Calculated [Hz]	19.6	11.7	27.4	14.9	72.6	10.7	23.5	74.6
Measured [Hz]	19.6	13.0	28.0	15.0	72.8	11.4	24.6	72.4
Error [Hz]	0	1.3	0.6	0.1	0.2	0.7	1.1	-0.2

数値計算との比較の結果、各周波数応答曲線において、共振周波数の数・値においてよい一致を見せた

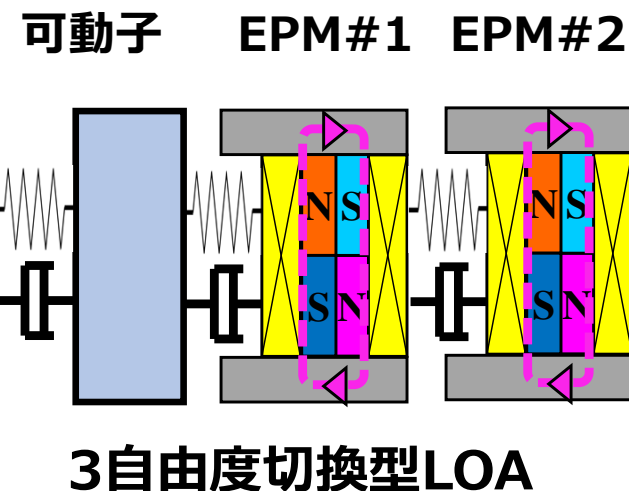
LOA動作時の過渡応答の測定

LOAの可動子を加振させた状態でパルス電流を印加し、自由度遷移の際の過渡応答を計測した。

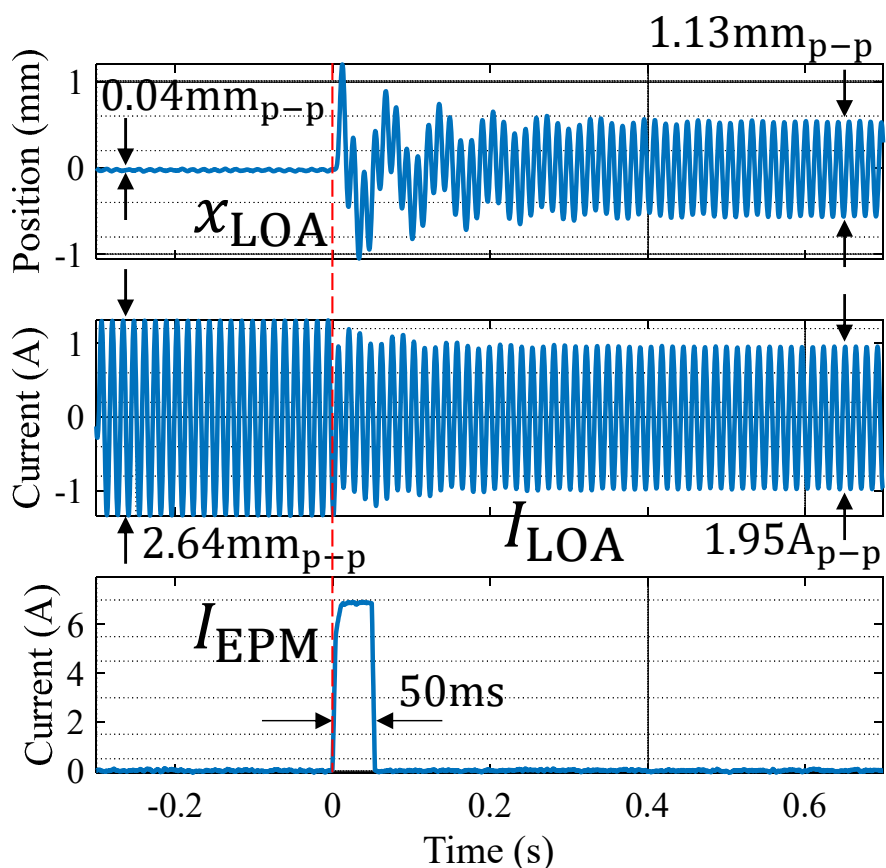
計測した自由度遷移の過渡応答パターン



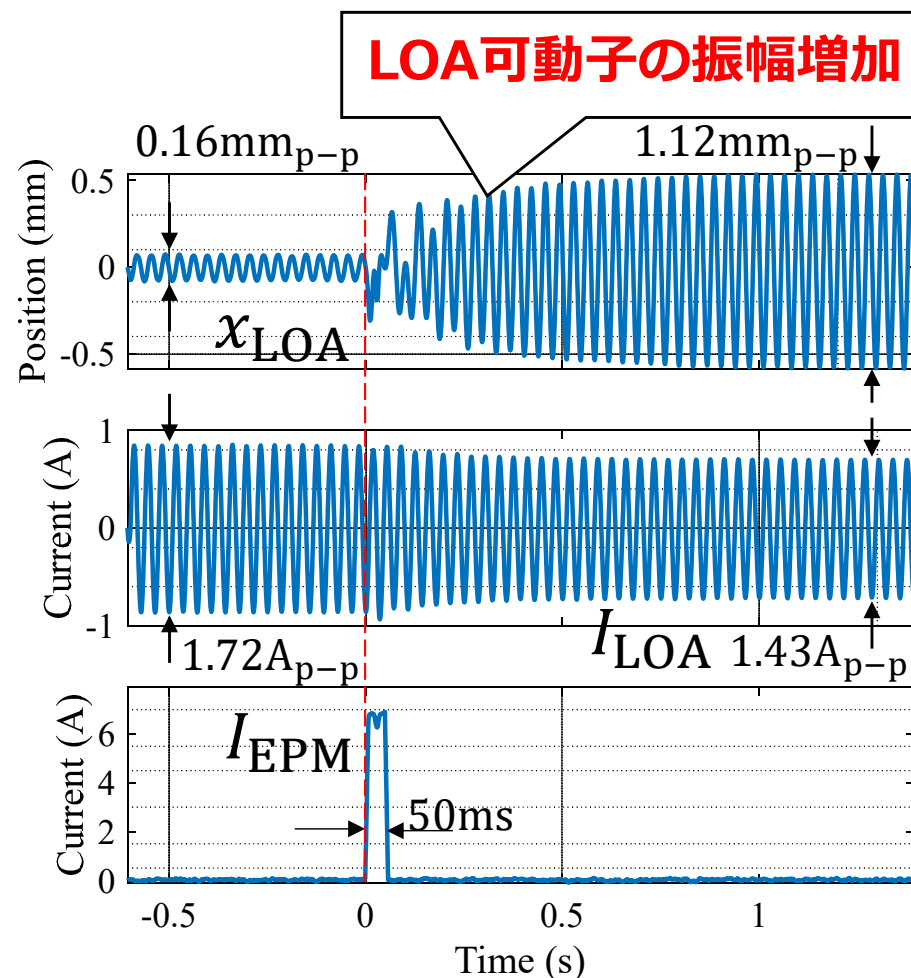
3自由度切換型LOAの
自由度の遷移パターン



① 過渡応答の測定結果(1つのEPMを着脱)



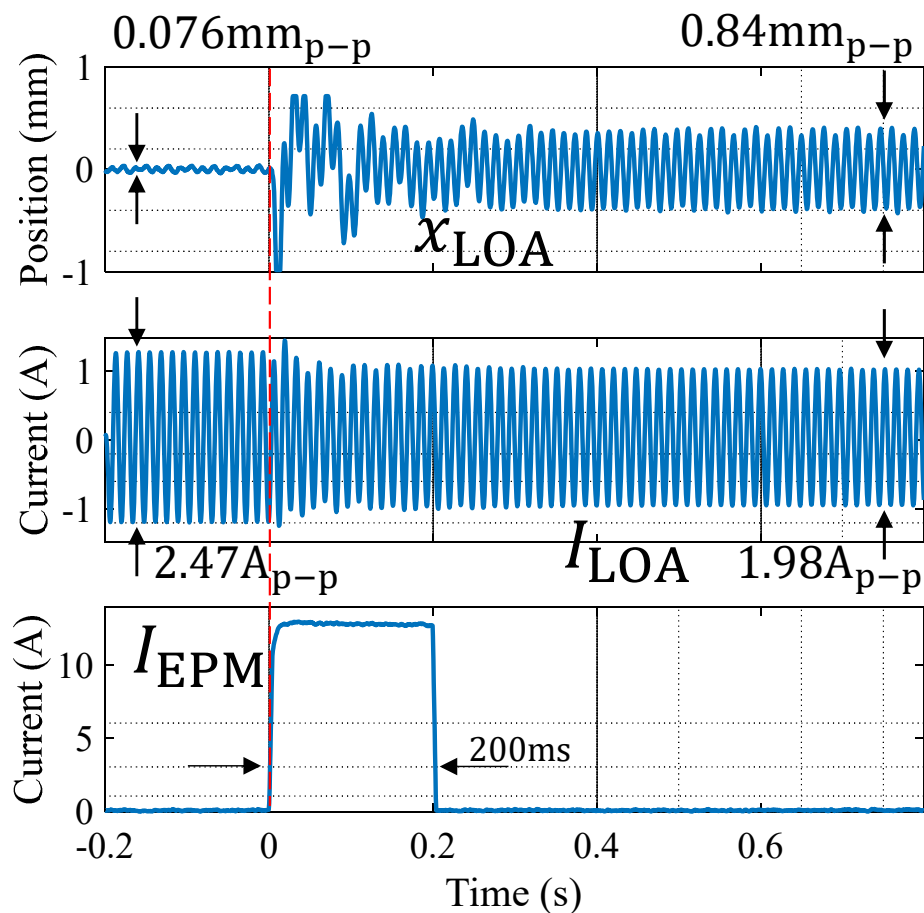
73Hzでの1DOF→2DOF-2への
遷移(離脱動作)



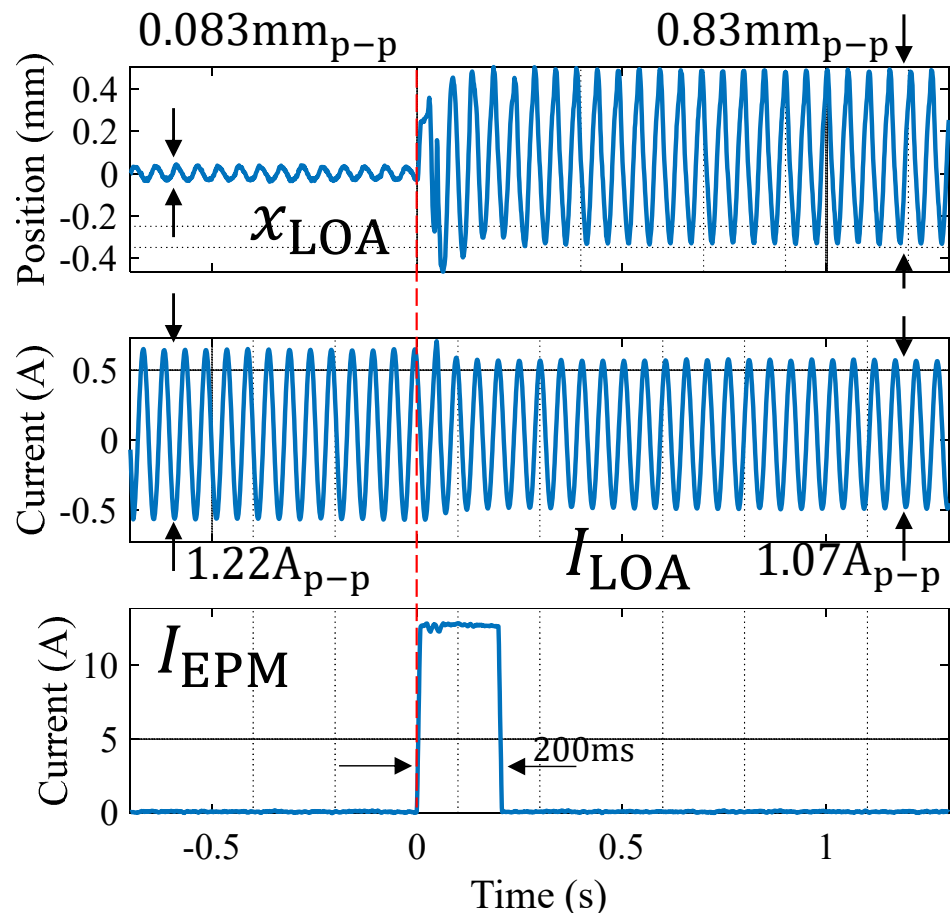
28Hzでの3DOF→2DOF-1への
遷移(吸着動作)

- パルス電流印加→アルニコ着磁→自由度遷移→共振発生により**可動子振幅が増**
- 離脱時に2DOFの固有振動モードが発生→時間とともに減衰

② 過渡応答の測定結果(2つのEPMを同時着脱)



72.4Hzでの1DOF→3DOF
への遷移(離脱+離脱動作)



19.6Hzでの3DOF→1DOF
への遷移(吸着+吸着動作)

2つのEPMに同時にパルス電流を印加した際も、自由度切換による振幅向上効果を確認できた。

まとめ・今後の展望

まとめ

- ・本研究では、広帯域周波数応答を目的として、EPMにより複数の自由度を切り替え可能なN自由度切換型振動系を提案した。
- ・共振周波数の数・値が数値計算・測定結果でよく一致し、提案したN自由度切換型振動系の有効性が実験的に示された。

今後の展望

- ・自由度切換の順序による消費電力の最小化・遷移時間の短縮を検討する
- ・パルス電流の振幅値・印加時間のバランスによる消費電力・遷移時間の最適化を行う