

交流モータの速度脈動を加振源とする 電磁式エネルギーハーベスタの基礎検討

Study on Electromagnetic Energy Harvester
Oscillated by Speed Ripple of AC Motors

©加藤 雅之 (茨城大学)

研究背景

埋込磁石型同期モータ (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor: IPMSM)
 一> 高効率・高出力密度だが、原理上トルク脈動が生じる

トルク脈動の要因

1. エアギャップ部磁束分布の空間高調波
 (IPMSMの固定子・回転子突極性に起因)
2. 電流波形の時間高調波
 (PWMインバータ駆動・矩形波通電駆動の原理に起因)

$$T_e = \phi \times I$$

① 構造的なアプローチ (磁石・鉄心形状の最適化) [1], [2]

○ CAEによる最適設計

× 加工・組み立てコスト増加

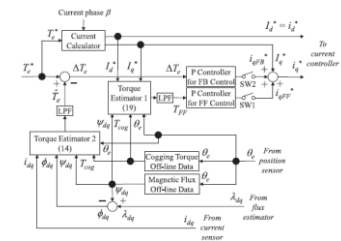
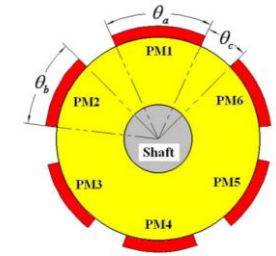
× 設計限界への到達

② 制御的なアプローチ (トルク脈動推定・補償) [3], [4]

○ センサレス・低コスト

× モータ定数のずれ

× 制御限界への到達



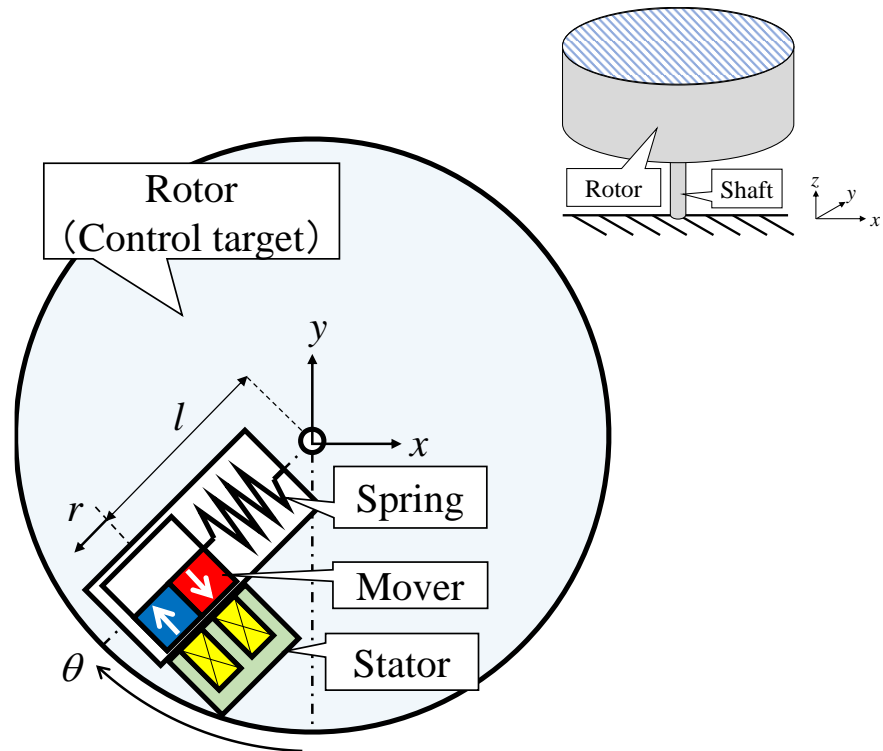
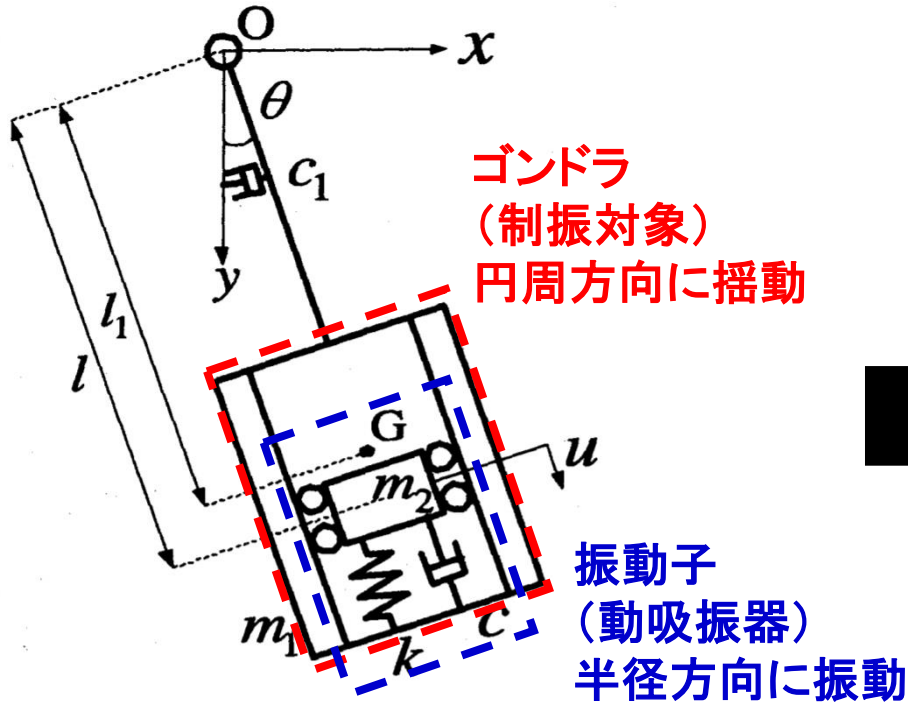
[1] T. M. Jahns, and W. L. Soong, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 43, No. 2, pp. 321-330, 1996.

[2] 平本健二, 武田洋次, 真田雅之, 森本茂雄, 電気学会論文誌 D, Vol. 124, No. 2, pp. 208-214, 2004.

[3] 中村建太, 藤本博志, 藤綱雅巳, 電気学会論文誌 D, Vol. 130, No. 11, pp. 1241-1247, 2010.

[4] 中尾矩也, 赤津観, 電気学会論文誌 D, Vol. 131, No. 9, pp. 1120-1127, 2011.

コリオリカによるトルク脈動抑制手法



コリオリカを用いたパッシブ動吸振器 [5]

- 主系振幅の3乗に比例した減衰力
- 減衰力の大きさを制御できない

リニア振動アクチュエータ(LOA)の位置制御によるトルク脈動抑制法 [6]

- 減衰力の制御が可能
- 非正弦波駆動により任意の脈動を抑制可能

[5] 松久, 宇津野, 磯野, 日本機械学会論文集(C編), Vol. 72, No. 722, pp. 3170-3176, 2006.

[6] M. Kato, and F. Kitayama, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 58, No. 2, 8200205, 2022.

本研究の方針

リニア振動アクチュエータ(LOA)の位置制御でトルク脈動をアクティブに抑制

LOA を駆動させるための

- 外部電源
- コントローラ
- センサ
- 電力/信号伝達用スリップリング

を要する



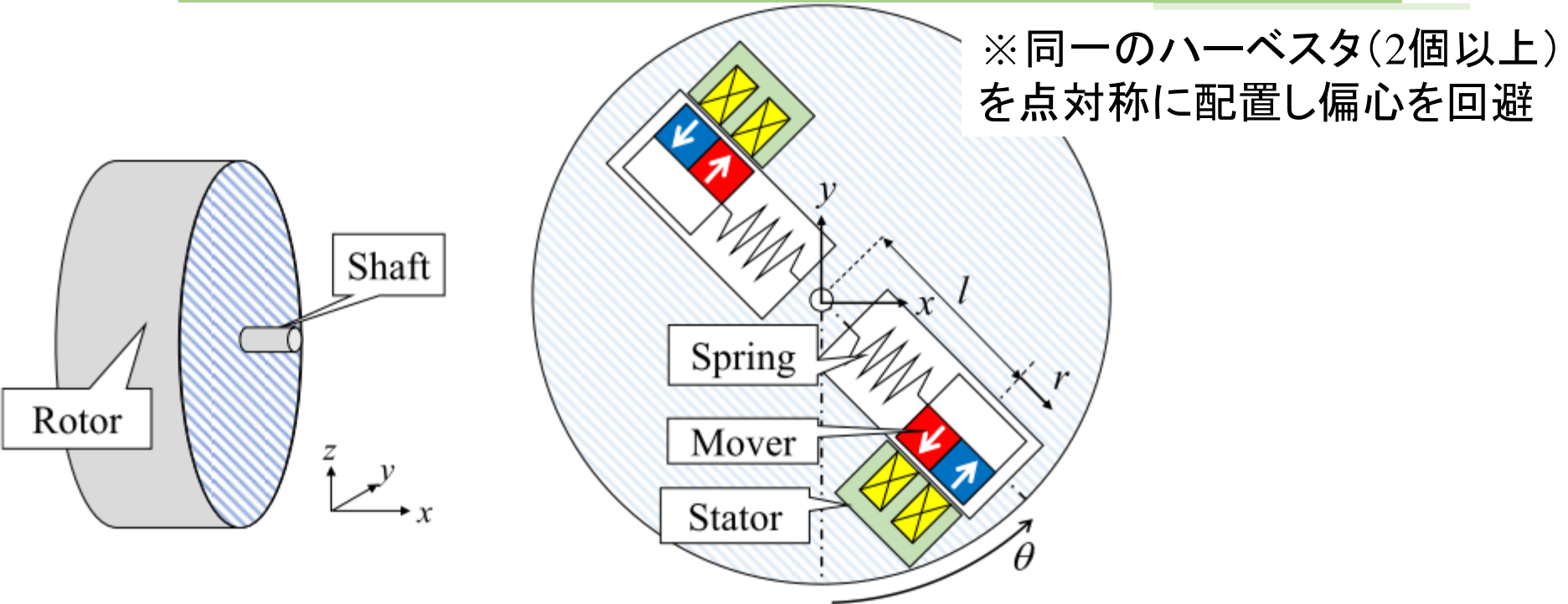
エネルギーハーベスタとして構成し、
電力回収とトルク脈動抑制の両方を狙う

LOA を駆動させるための

- ~~外部電源~~
- ~~コントローラ~~
- ~~センサ~~
- 電力/~~信号~~伝達用スリップリング

を要する

提案するハーベスタの基本構造・数学モデル



ロータの
運動方程式

$$J\ddot{\theta} + m(l+r)^2\ddot{\theta} + c_{\theta}\dot{\theta} + \underline{2m(l+r)\dot{r}\dot{\theta}} = T_e - T_l$$

コリオリカ・・・トルク脈動を抑制

ハーベスタ振動子の
運動方程式

$$m\ddot{r} + c_r\dot{r} + k_r r = \underline{m(l+r)\dot{\theta}^2} + K_t I$$

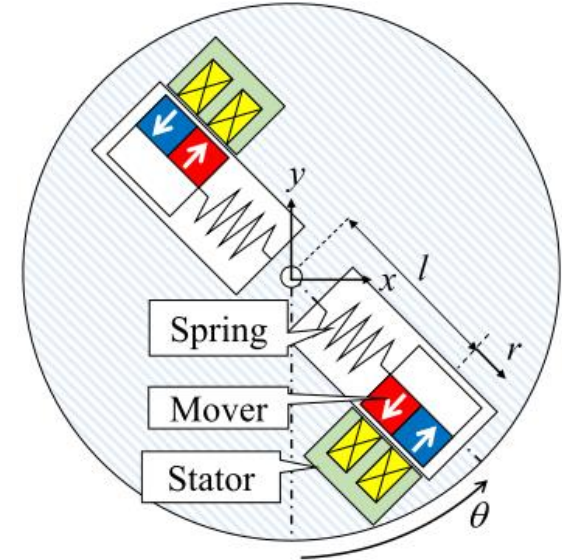
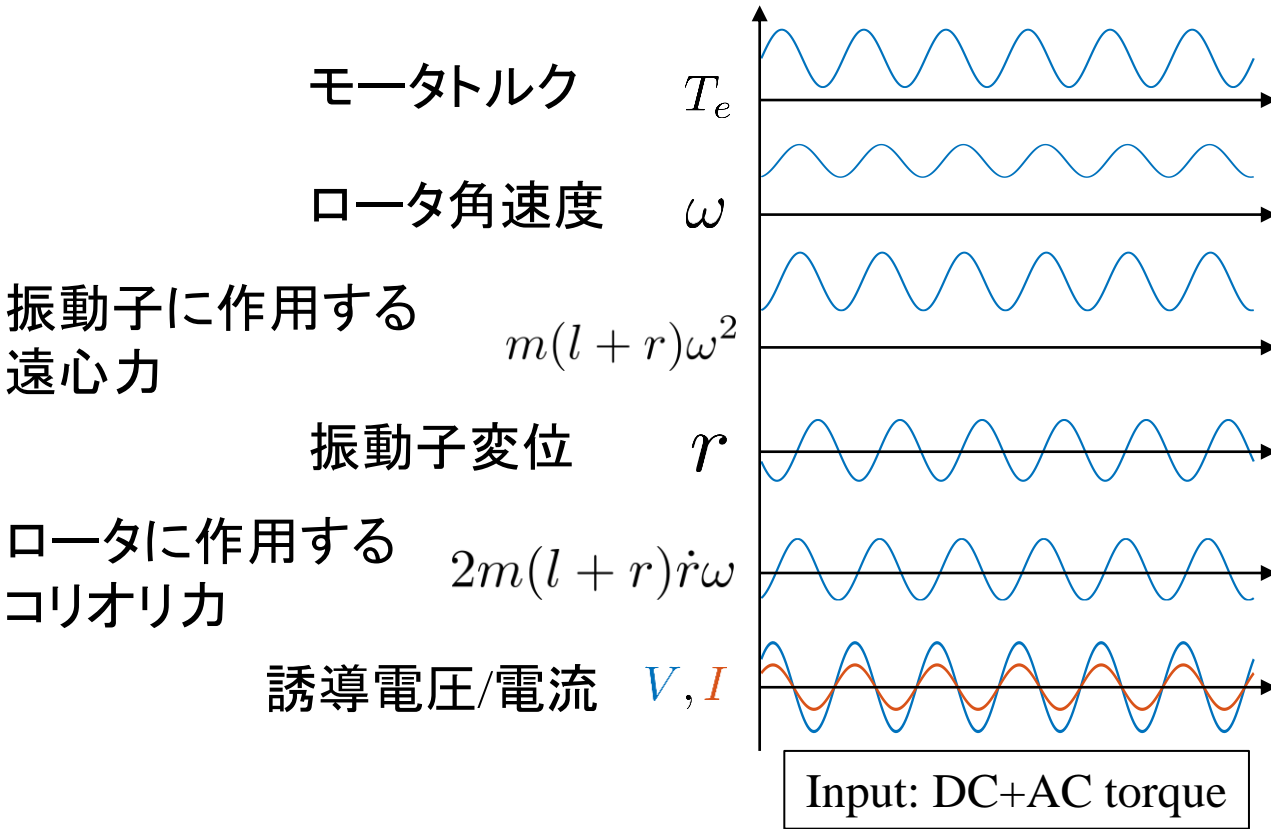
遠心力・・・振動子を加振

ハーベスタの
電圧方程式

$$(R_c + R_l)I + L\frac{dI}{dt} + K_e\dot{r} = 0$$

発電原理

※モータトルク脈動は回転6次成分のみを仮定

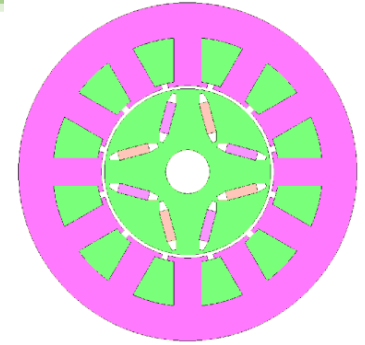


$$f_{\text{rip}} = \frac{P}{120} R(\text{rpm}) \times 6\text{th} \quad \bullet \quad f_{\text{harv}} = \sqrt{\frac{k_r}{m}} = 1 : 1$$

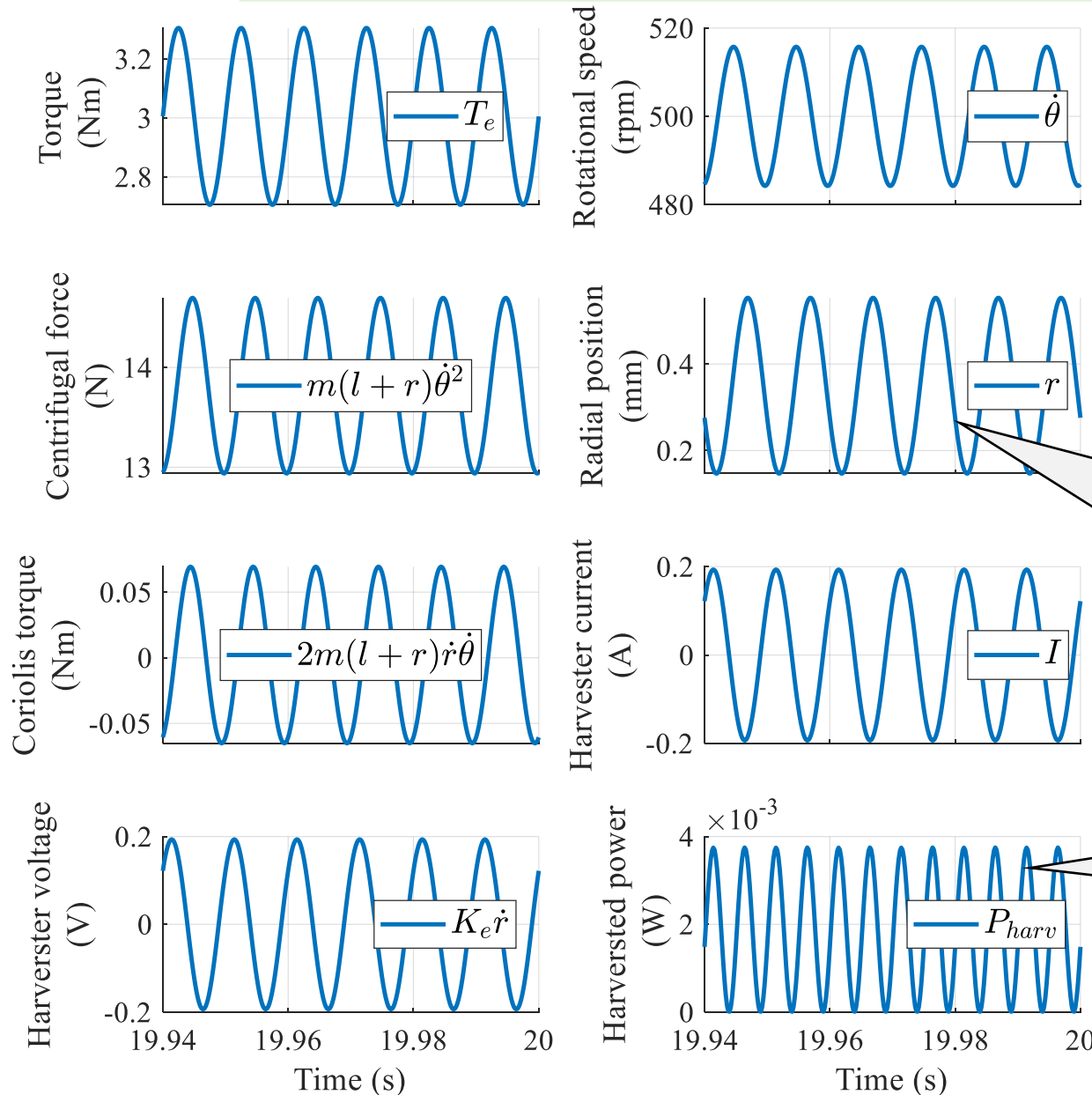
➤ 速度脈動に起因した遠心力脈動を振動子のマスばねダンパ系に同調させる

※計算条件は割愛
(予稿集を参照のこと)

発電原理の数値計算結果



4極12スロットIPMSMを想定



振動子のストロークは
0.41mm_{p-p}
ハーベスタが現実的に
設計可能なスケール

ハーベスタの
平均発電量は
1.9mW程度

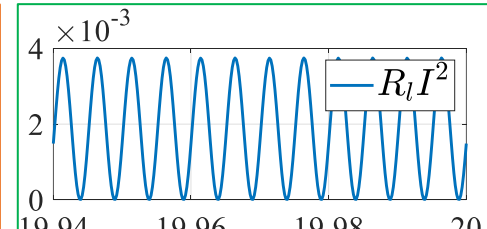
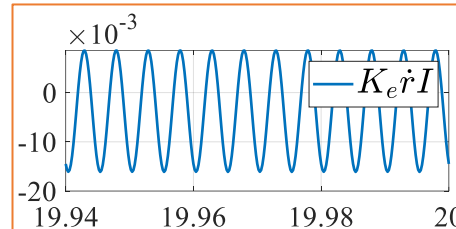
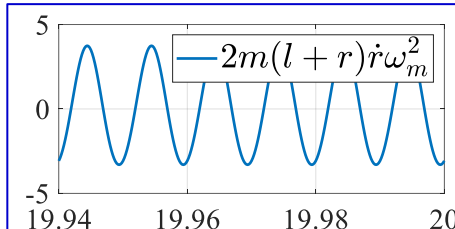
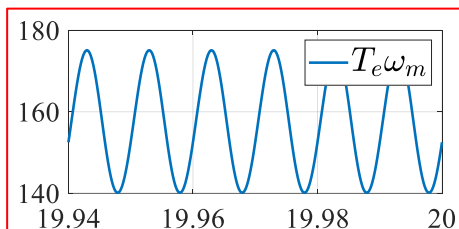
エネルギーフローに関する考察

トルク脈動(≡無効な機械出力)がハーベスタの電力回収に至るまでのエネルギー収受を明らかにし、発電のメカニズムを整理する
→前出の方程式をパワーの次元に変換

ロータ回転運動
$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \{ J + m(l+r)^2 \} \dot{\theta}^2 \right) + c_{\theta} \dot{\theta}^2 + \underline{2m(l+r)\dot{r}\dot{\theta}^2} = \underline{T_e \dot{\theta}} - T_l \dot{\theta}$$

ハーベスタ往復運動
$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} m \dot{r}^2 \right) + c_r \dot{r}^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} k_r r^2 \right) = m(l+r)\dot{\theta}^2 \dot{r} + \underline{K_t I \dot{r}}$$

ハーベスタ回路
$$(R_c + \underline{R_l}) I^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L I^2 \right) + \underline{K_e \dot{r} I} = 0$$



①モータによる出力

有効出力: 157W

無効出力: 35W_{p-p}

②コリオリカによる出力

有効出力: 100mW

無効出力: 7.0W_{p-p}

③電気出力

有効出力: 3.8mW

無効出力: 7.0W_{p-p}

④負荷の消費電力

有効出力: 1.9mW

無効出力: 0W_{p-p}

- コリオリカによる有効出力はブレーキトルクとして(微小ながら)作用する
- 無効出力がトリガとなり、エネルギー収受がなされる複雑なメカニズム

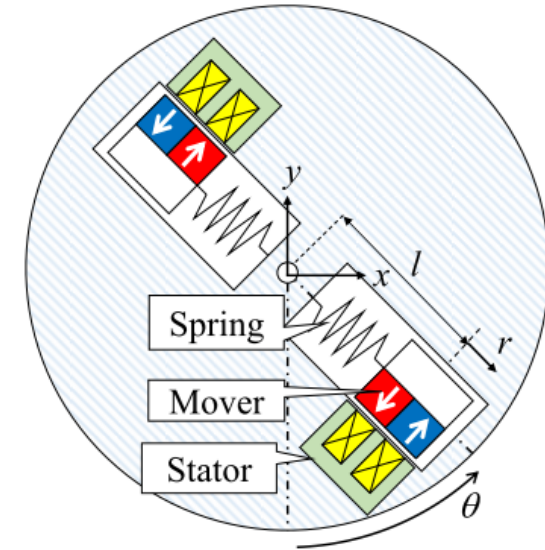
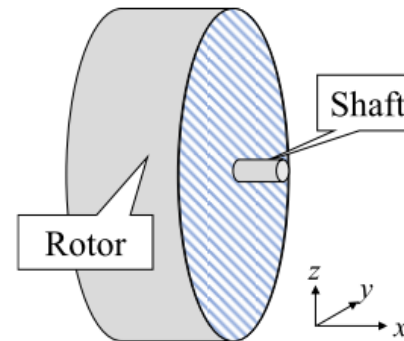
まとめ

交流モータで不可避に生じる速度脈動に起因した遠心力脈動を加振源とするエネルギーハーベスタを提案

- モータの無効な機械出力(=トルク脈動成分)の電力回収には失敗
- 無効出力がハーベスタ振動子を加振し、トルク脈動を抑制

今後の予定

- エネルギー收受メカニズムの精査
- エネルギーハーベスタの最適設計
- 試作機による実験検証



謝辞

本研究は公益財団法人JKAの2022年度研究補助事業(若手研究)
 ”交流モータの速度脈動を利用した振動発電およびトルクリップル低減技術開発”
 による助成を受けた。ここに感謝の意を表する。

パラメータスタディ

①発電量 および ②トルク脈動抑制効果 の最大化を狙い、
以下のパラメータスタディを行うことでハーベスタの設計指針を得る

- A. 振動子質量および周波数比（振動子の運動に関するパラメータ）
- B. 回転数およびトルク脈動振幅（モータに関するパラメータ）
- C. 発電定数およびインピーダンス整合（ハーベスタの発電に関するパラメータ）

ハーベスタ振動子の
運動方程式

$$m\ddot{r} + c_r\dot{r} + k_r r = \underbrace{m(l+r)\dot{\theta}^2}_{\text{遠心力}\cdots\text{振動子を加振}} + K_t I$$

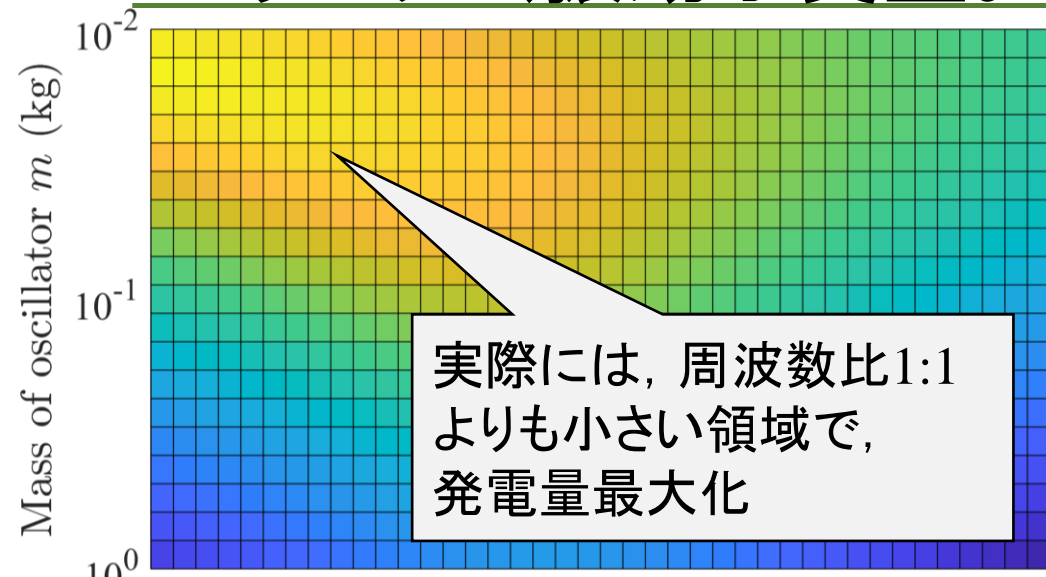
ロータの
運動方程式

$$J\ddot{\theta} + m(l+r)^2\ddot{\theta} + c_\theta\dot{\theta} + \underbrace{2m(l+r)\dot{r}\dot{\theta}}_{\text{コリオリカ}\cdots\text{トルク脈動を抑制}} = T_e - T_l$$

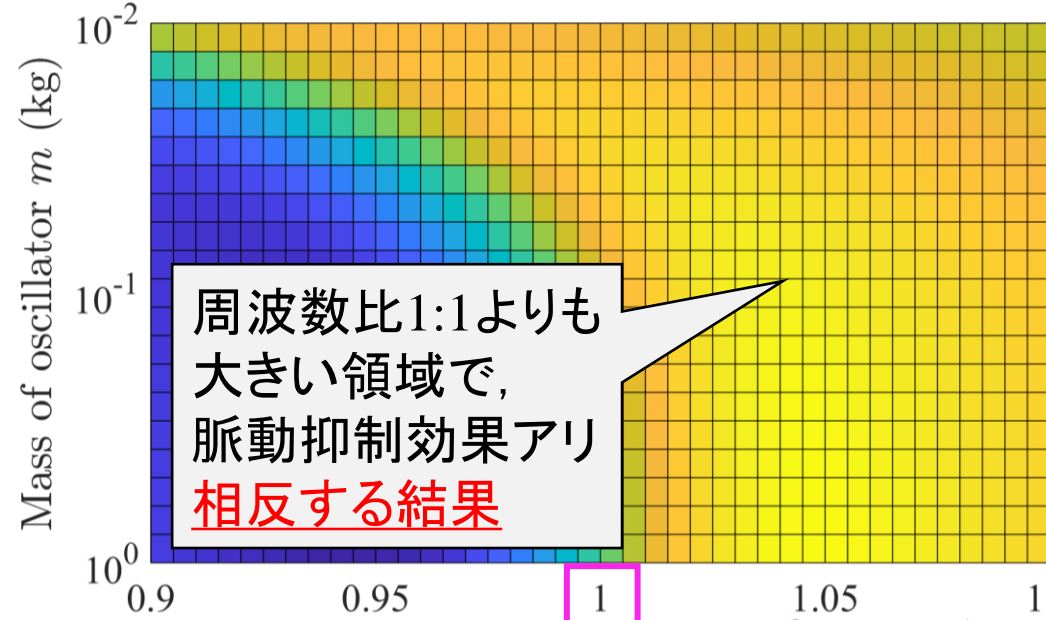
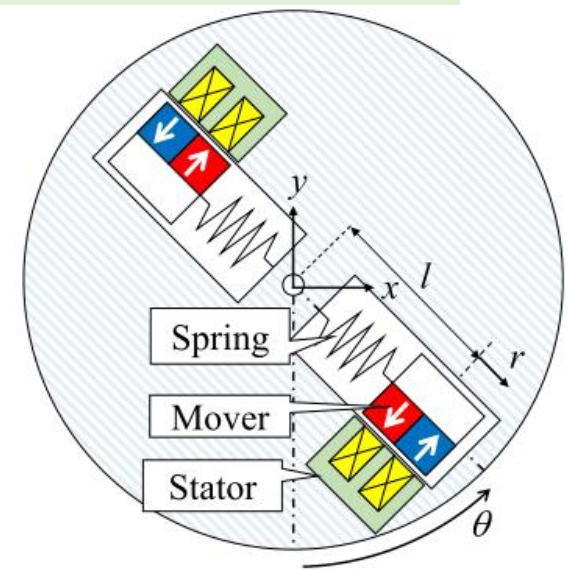
ハーベスタの
電圧方程式

$$(R_c + R_l)I + L\frac{dI}{dt} + K_e\dot{r} = 0$$

パラスタA(振動子質量および周波数比)



実際には、周波数比1:1よりも小さい領域で、発電量最大化



周波数比1:1よりも大きい領域で、脈動抑制効果アリ
相反する結果

Reduction rate (%) ↑ 脈動抑制 ↓ 脈動増幅

遠心力脈動とハーベスタが同調

発電原理の数値的検証

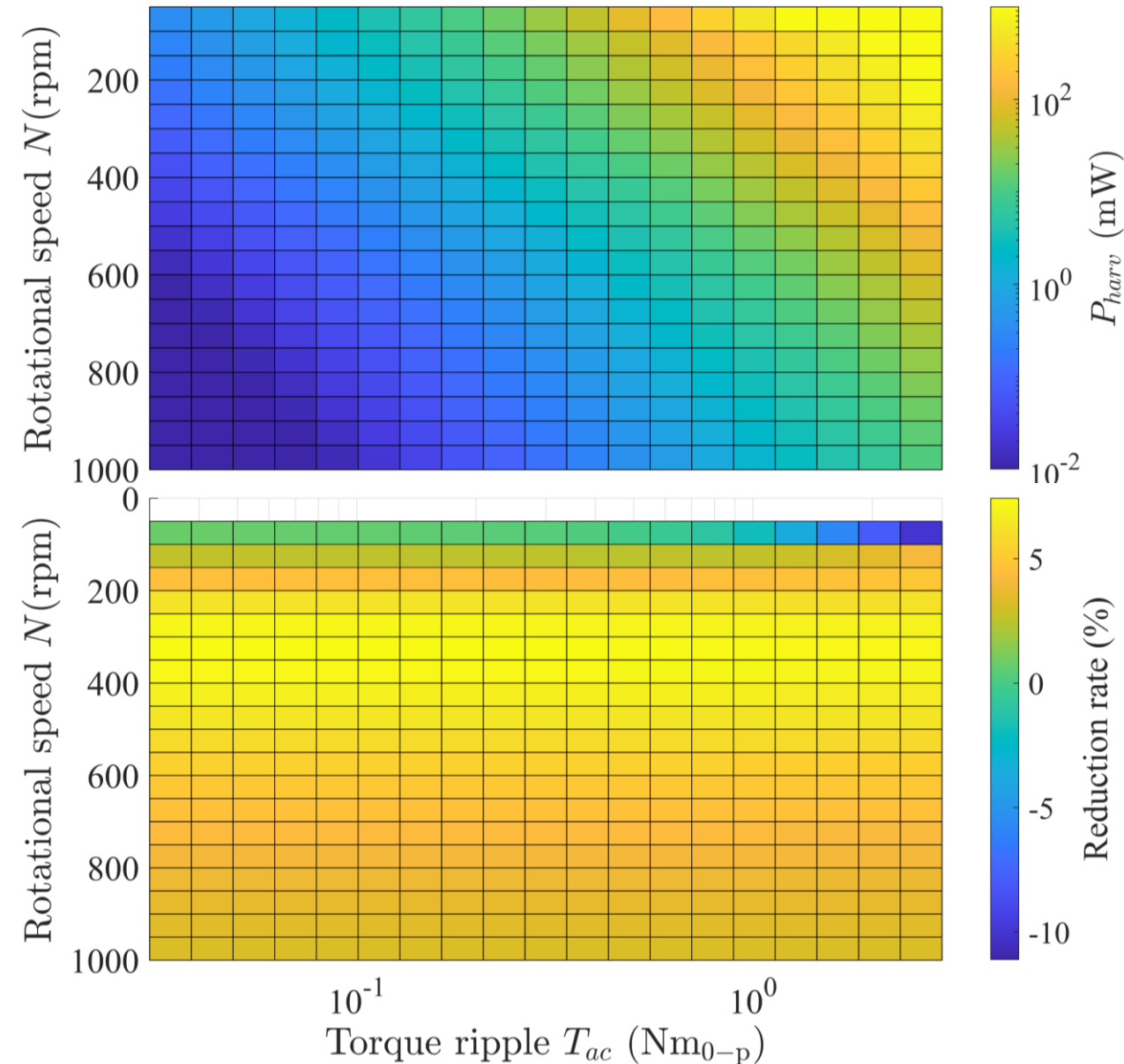
Table 1 Specifications for IPMSM.

Parameter (Unit)	Value
Power (W)	1000
Number of poles	4
Number of slots	24
Diameter of stator (mm)	54
Diameter of rotor (mm)	27.5
Stack length (mm)	51
Winding type	Distributed winding
Number of turns	46
Inertia J (kgm ²)	1.8e-5
Torque constant (Nm/A)	0.126

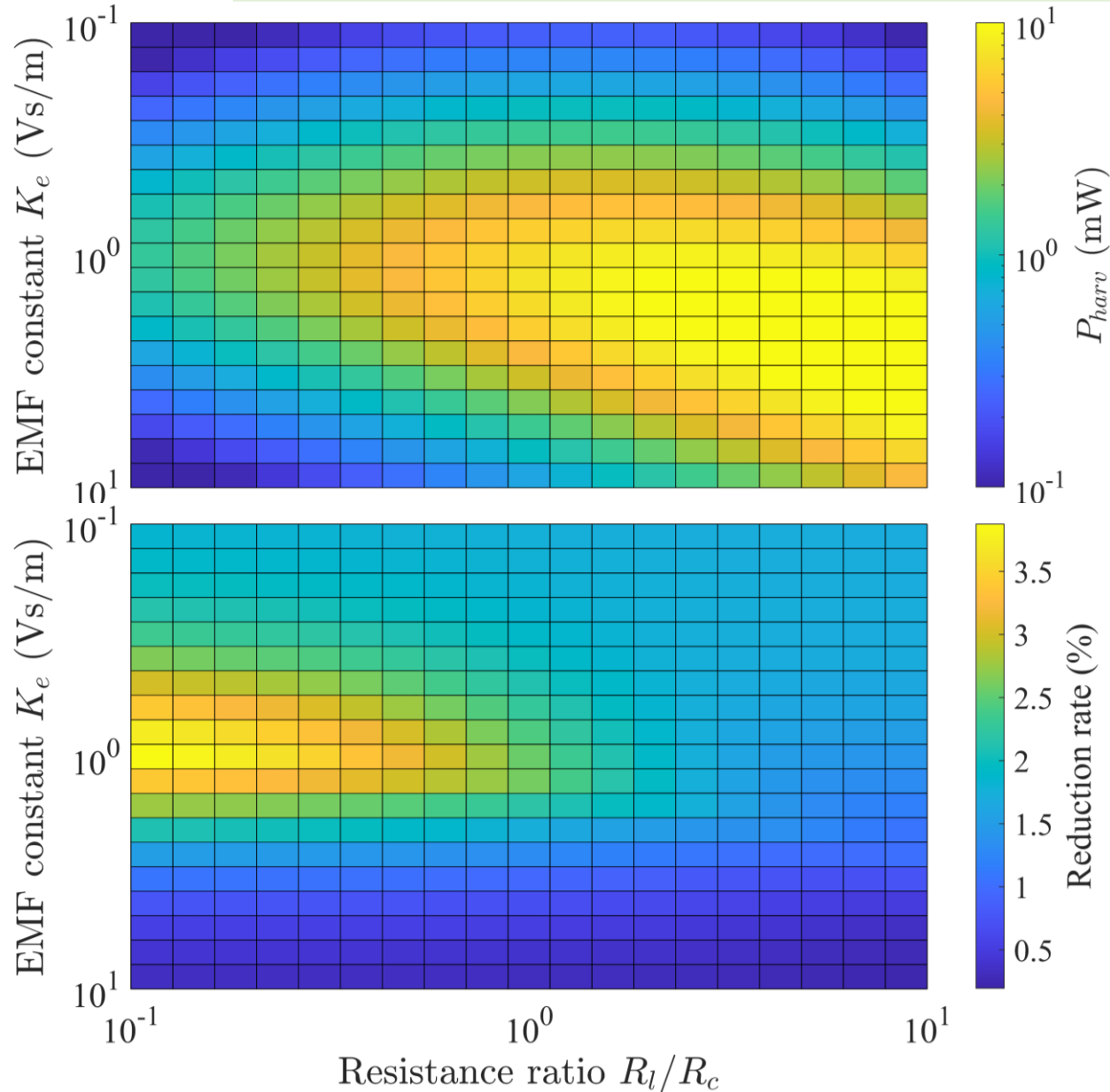
Table 2 Simulation condition.

Parameter (Unit)	Value
Rotational speed (rpm)	500
DC component of motor torque (Nm)	3
AC component of motor torque (Nm _{0-p})	0.3
Frequency of torque ripple (Hz)	100
Load torque T_l (Nm)	3
Mass of mover m (kg)	0.1
Spring constant k_r (N/mm)	39.5
Viscous damping coefficient c_r (Ns/m)	6.3
Thrust constant K_t ($=K_e$) (N/A)	1
Arm length l (mm)	50
Coil resistance R_c (Ω)	0.1
Load resistance R_l (Ω)	0.1

パラスタB(回転数およびトルク脈動振幅)



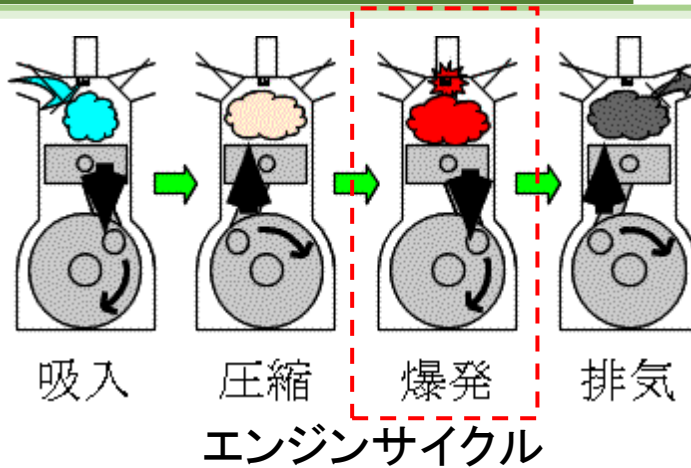
パラスタC(発電定数およびインピーダンス整合)



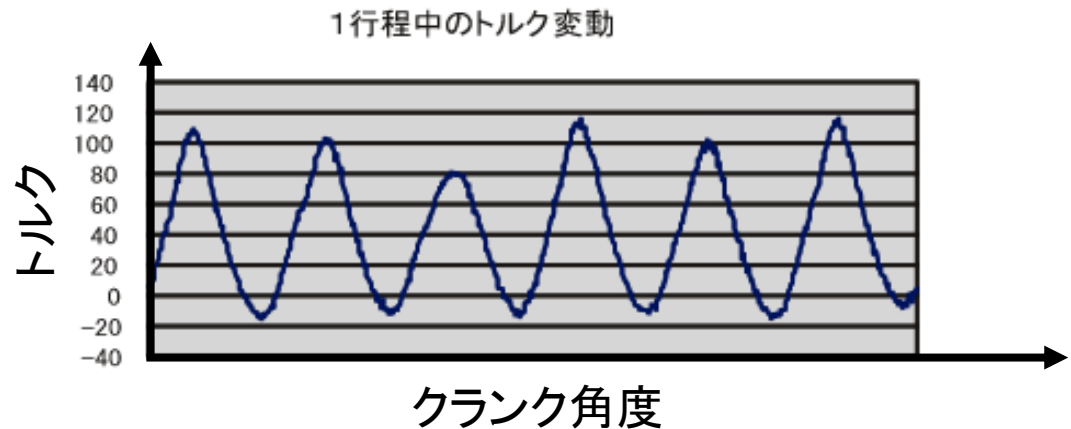
研究背景



レシプロエンジン

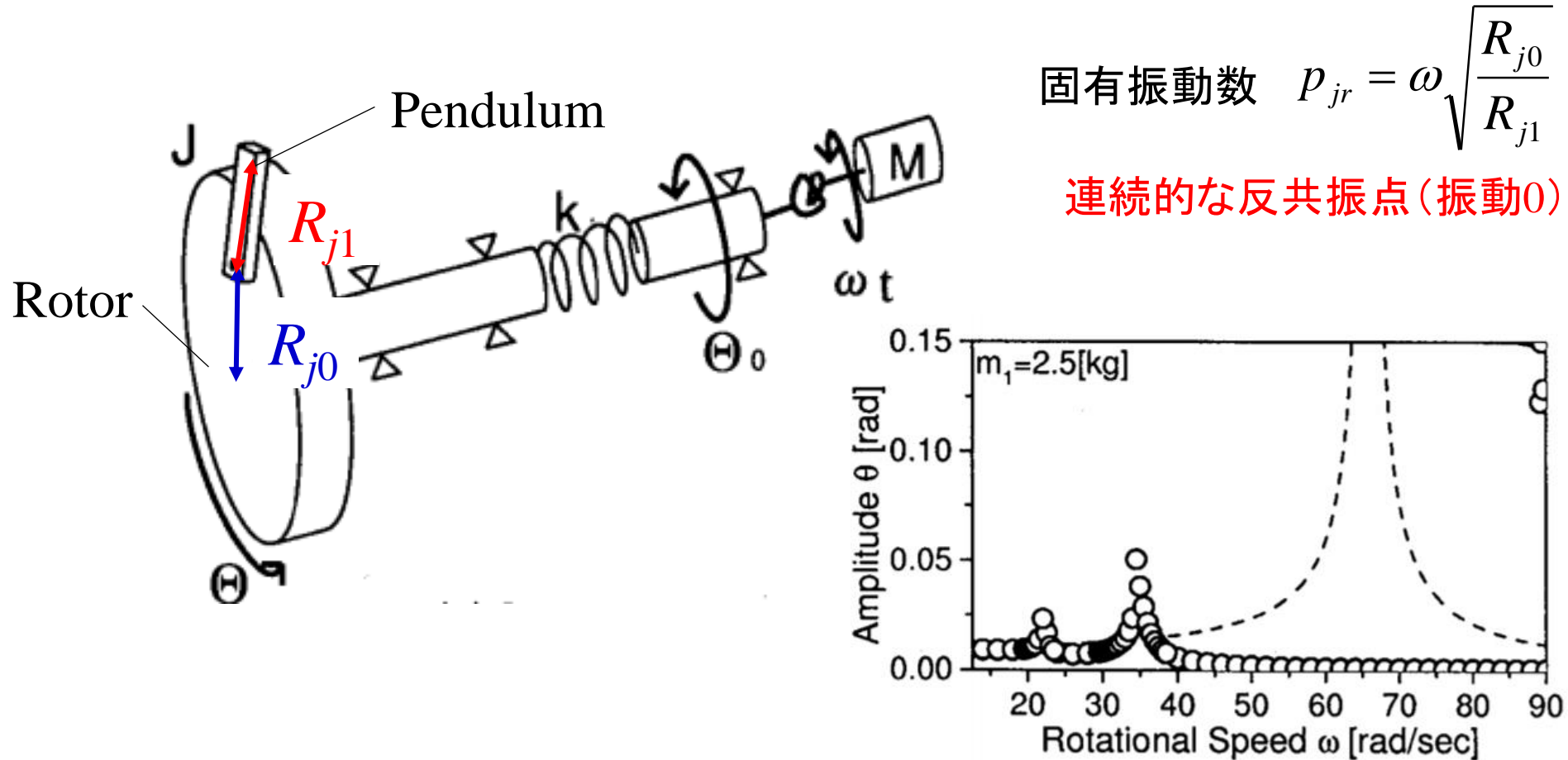


例: 6気筒エンジン
クランクシャフト2回転中に
6次の脈動成分



- レシプロエンジンの出力トルクには大きな脈動が発生
- 脈動周波数はエンジン回転数と応じてスイープ

遠心振り子式動吸振器[1]



振り子が共振することにより振動を吸収

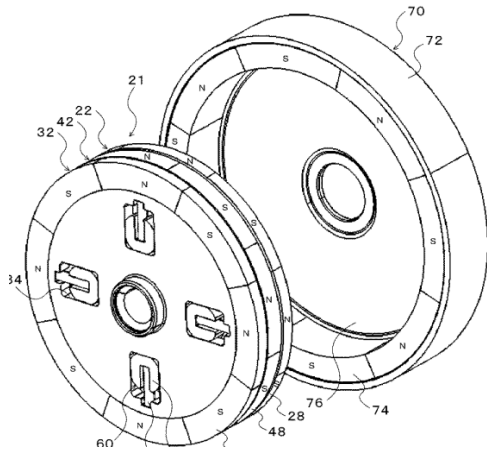
○ 振り子の固有振動数が回転速度に比例して変化

× 低気筒エンジンでは R_{j0}/R_{j1} の設計が困難

これまでの取り組み

- 磁石 (or 電磁石) による電磁力を利用した可変ばね剛性動吸振器を提案

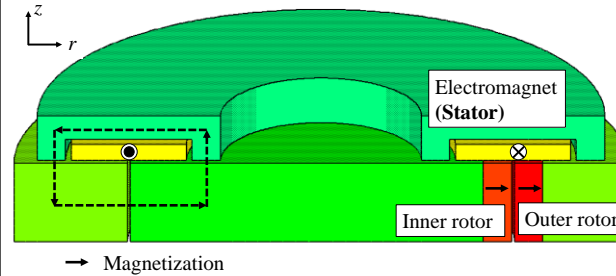
段スキュー型



遠心力で可変
段スキューにより
磁束の短絡量を増減

- パッシブ動作
- × 複雑な機構

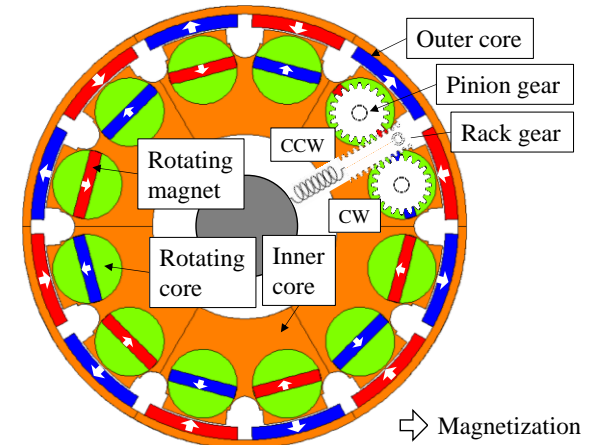
外部励磁型



コイル励磁で可変
励磁により
磁束量を増減

- アクティブ動作
- × 電力消費

自転磁石型

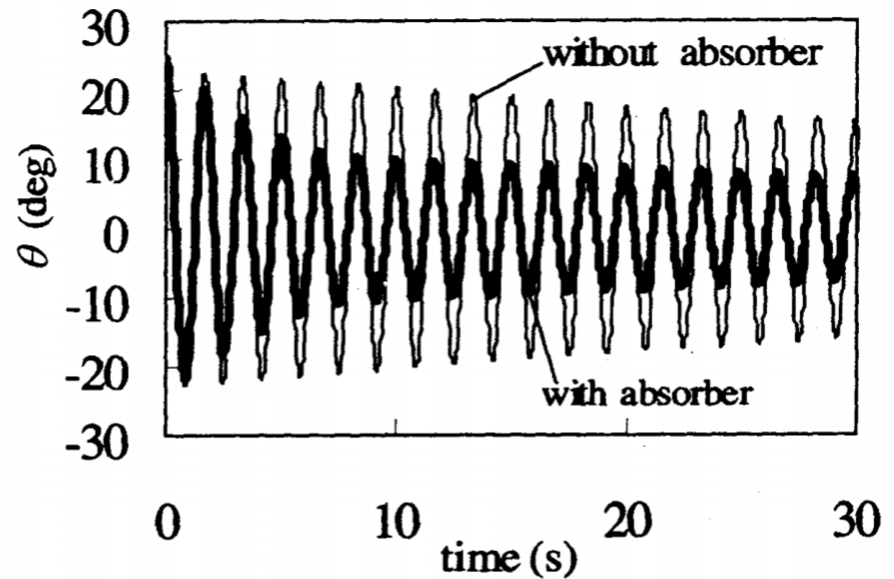
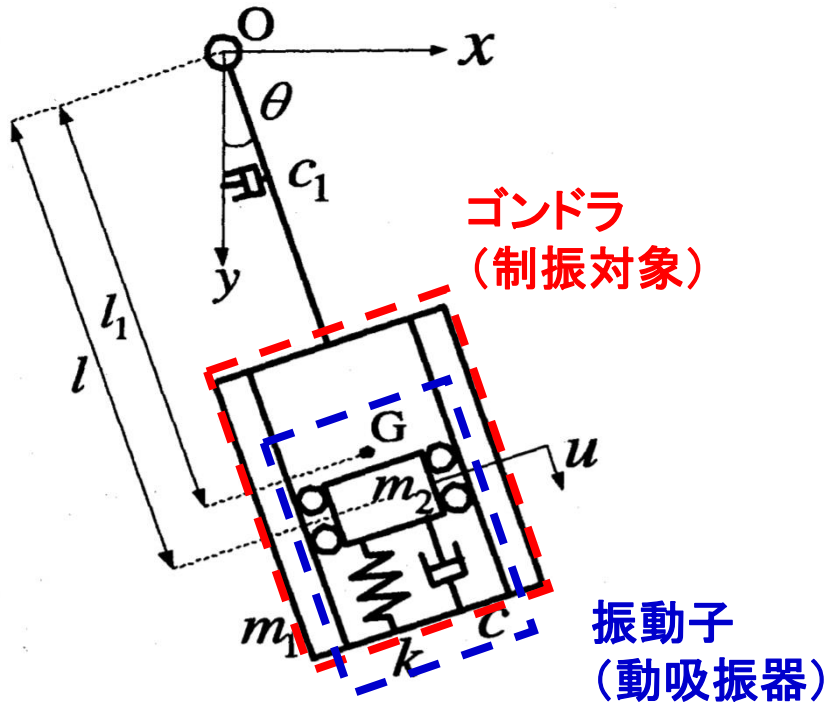


遠心力で可変
磁石を回転させ
磁化方向を変化

- パッシブ動作
- × 複雑な機構

コリオリ力を利用した動吸振器

- 付加質量を半径方向に振動させることで減衰力(コリオリ力)を得る

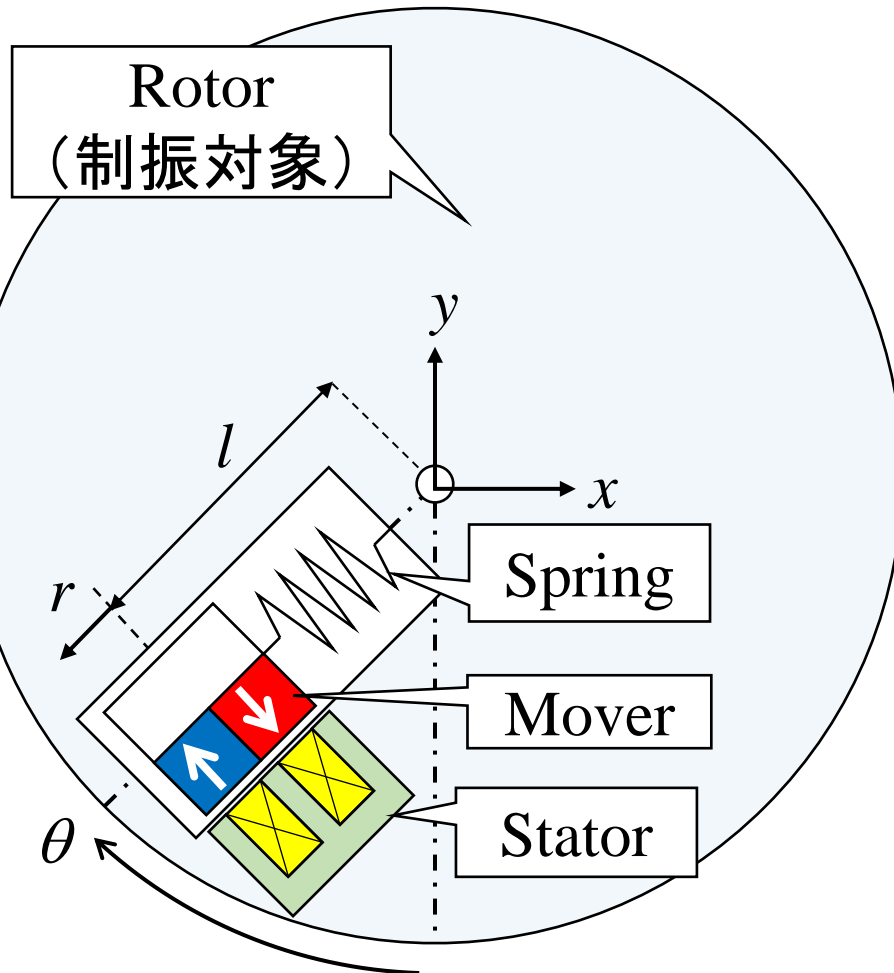


動吸振器の制振効果

コリオリ力を用いた動吸振器 [2]

- 回転振動の振幅が大きい場合に有効(主系振幅の3乗におおよそ比例)
- コリオリ力による減衰は非線形であり, 粘性減衰力(速度に比例)とは異なる
- 減衰力の調整不可能(振動子はパッシブに加振されるため)

ハイブリット動吸振器の構成



制振原理

コイルの励磁により電磁力が発生し、LOAを**半径**方向に加振

→LOA変位の振幅が増加しコリオリ力が増加

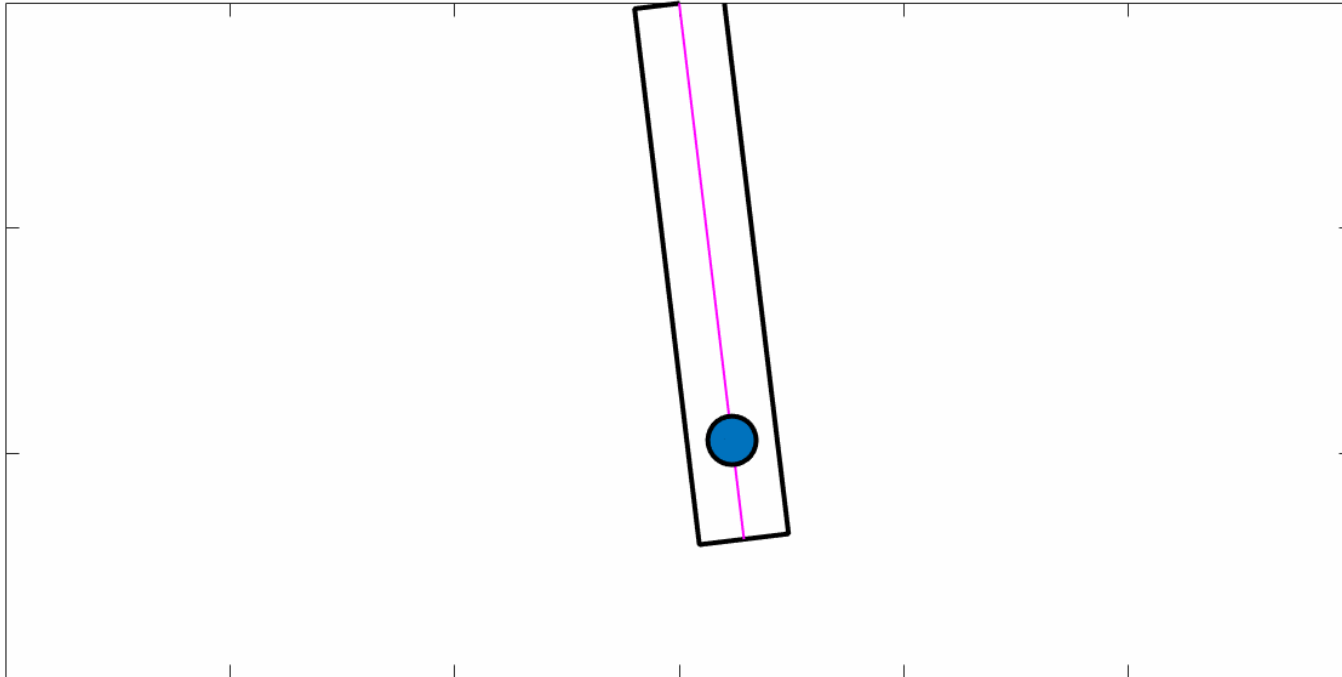
- ✓ 減衰力は間接的に発生
- ✓ パッシブ動作のみでも減衰力発生

LOA

- ロータ表面に配置(後付け可能)
- コイルはロータに同期して運動するため、回転体への給電が必要
- ✓ ロータに設置されたバッテリーからの直接的な電力供給を仮定
- 実用上は複数のLOAを対称配置(偏心の回避)

本動吸振器の制振原理

Parametric Excitation, $\omega/\omega_0=2, t=1.99$



$$2 \times (\text{振り子の } \omega) = (\text{振動子の } \omega)$$

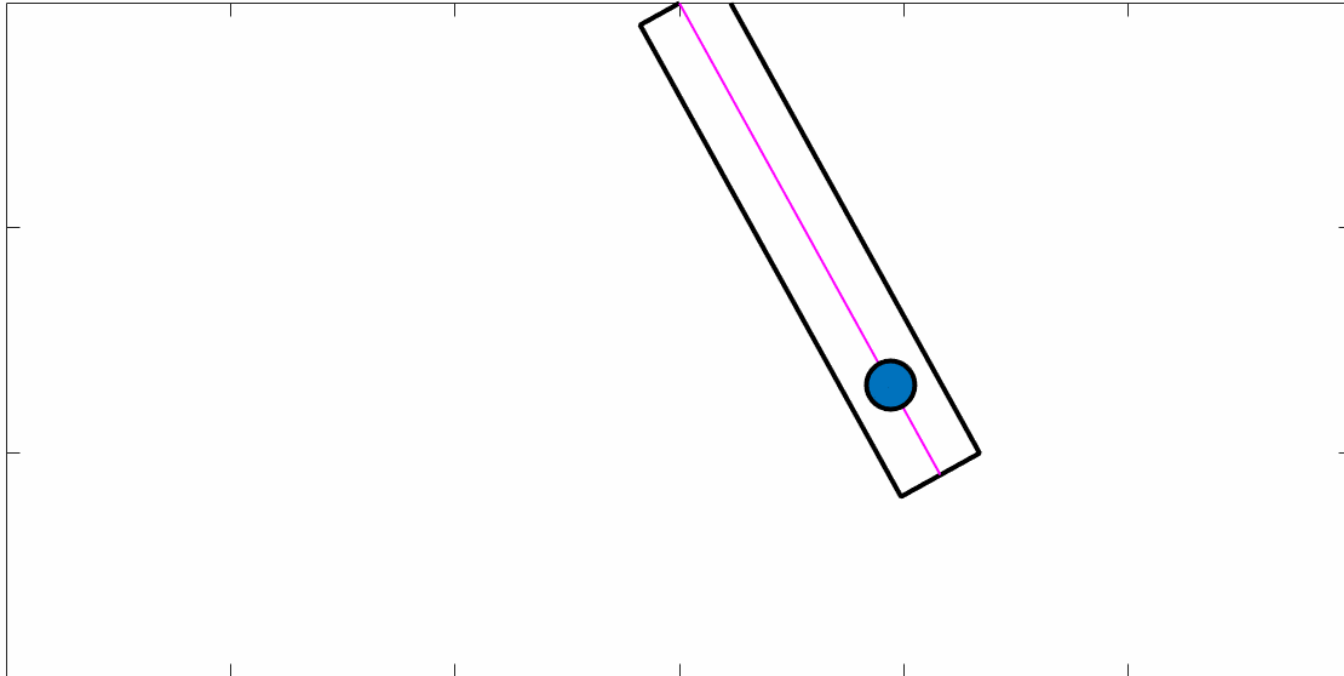
(a) Parametric excitation

振動子が系に対して正の仕事

本動吸振器の制振原理

- 係数励振(パラメトリック励振)の性質を**逆向き**に利用することでダンパとして作用

Parametric Damper, $\omega/\omega_0=2, t=2.03$



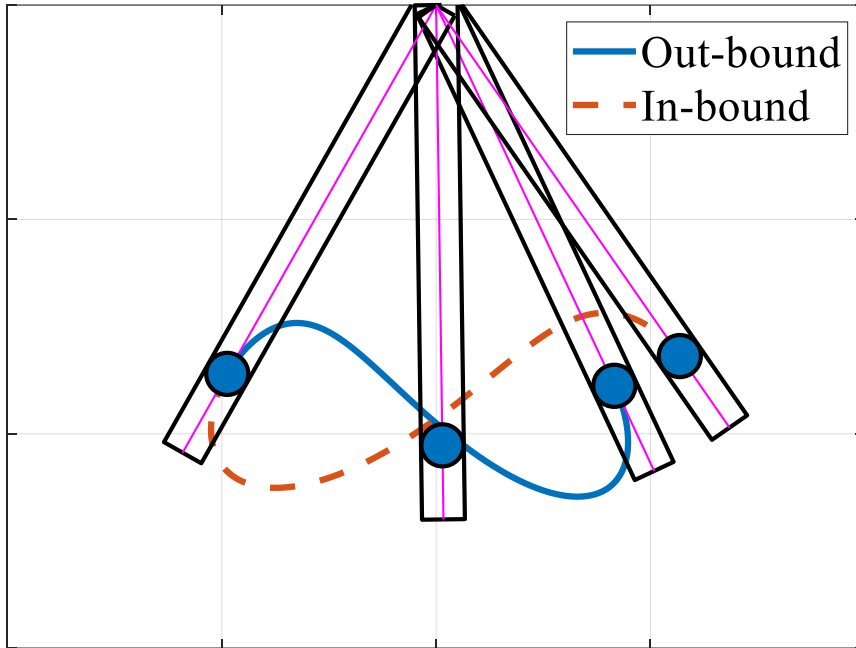
$$2 \times (\text{振り子の } \omega) = (\text{振動子の } \omega)$$

(b) Parametric damper

振動子が系に対して負の仕事

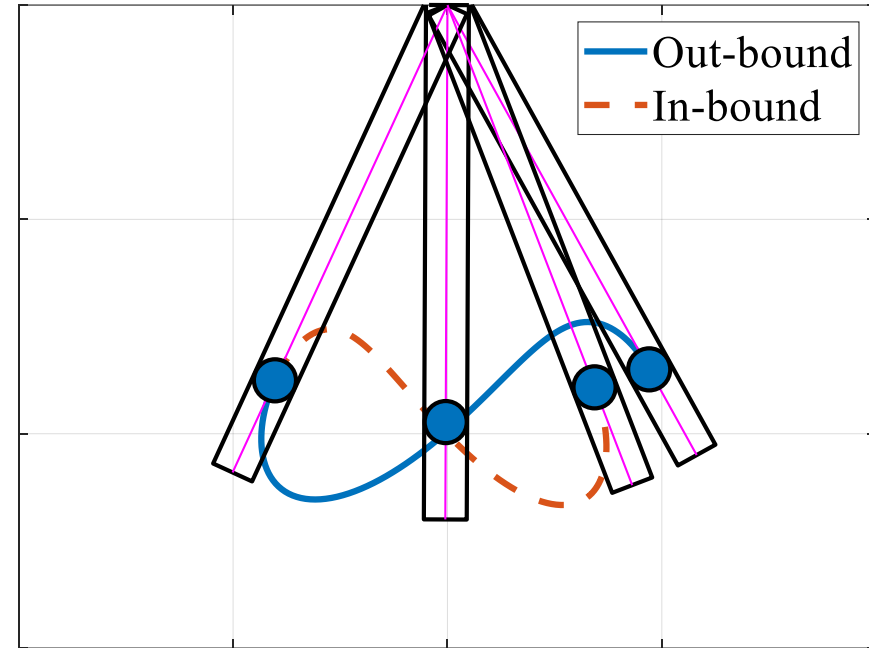
本動吸振器の制振原理

- 係数励振（パラメトリック励振）の性質を**逆向き**に利用することでダンパとして作用



(a) Parametric excitation

振動子が系に対して正の仕事



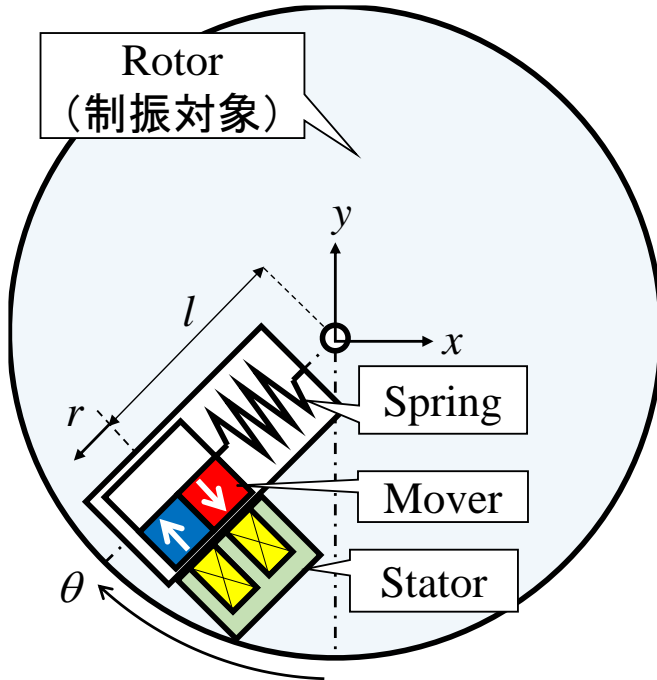
(b) Parametric damper

振動子が系に対して負の仕事

- 振動子の位相を180度ずらすことで減衰効果を発揮する

運動方程式の導出

- 一般化座標(変位, 速度)を用いてラグランジュ方程式を導出する



XY座標への変換

$$(x, y) = ((l+r) \sin \theta, (l+r) \cos \theta)$$

系全体の運動エネルギー

$$T = \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m [(l+r)^2 \dot{\theta}^2 + \dot{r}^2]$$

ロータ

LOA可動子

ばねのポテンシャルエネルギー

$$V = \frac{1}{2} k_{\theta} \theta^2 + \frac{1}{2} k_r r^2$$

散逸関数

$$F = \frac{1}{2} c_{\theta} \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} c_r \dot{r}^2$$

ラグランジアン $L=T-V$ から以下の運動方程式を得る

ロータ (θ 方向) $J\ddot{\theta} + m(l+r)^2 \ddot{\theta} + c_{\theta} \dot{\theta} + \underbrace{2m(l+r)\dot{r}\dot{\theta}}_{\text{コリオリ力}} + k_{\theta} \theta = T_{in} \cos \omega t$

コリオリ力・・・ θ 方向の制振力

可動子 (r 方向) $m\ddot{r} + c_r \dot{r} + k_r r = \underbrace{m(l+r)\dot{\theta}^2}_{\text{遠心力}} + K_t I + K_d r$

遠心力・・・ r 方向の加振力

ロータが制振される条件

ロータ(θ 方向) $J\ddot{\theta} + m(l+r)^2 \ddot{\theta} + c_\theta \dot{\theta} + \underline{2m(l+r)r\dot{\theta}} + k_\theta \theta = T_{in} \cos \omega t$

コリオリ力... θ 方向の制振力

可動子(r 方向) $m\ddot{r} + c_r \dot{r} + k_r r = \underline{m(l+r)\dot{\theta}^2} + K_t I + K_d r$

遠心力... r 方向の加振力

ロータの共振

$$\omega_{ext} = \omega_\theta$$

ロータの固有振動数
(※ $r=0$ を仮定)

$$\omega_\theta = \sqrt{\frac{k_\theta}{J + ml^2}}$$

制振される条件

$$\omega_r = 2\omega_\theta$$

LOAの固有振動数

$$\omega_r = \sqrt{\frac{k_r - K_d}{m}}$$

- 制振される条件を満たすとき, コリオリ力による減衰効果が発生
- コイルの励磁によるアクティブな電磁力と併用可能(減衰力調整可)
- ✓ LOAの電磁力はあくまでも可動子を加振する成分