

遠心力により自転する磁石を備えた 可変剛性ダイナミックダンパ

Variable Stiffness Dynamic Damper
with Magnets Rotating by Centrifugal Force

©加藤 雅之（茨城大学）

高村 康之（大阪大学）

新口 昇（大阪大学）

平田 勝弘（大阪大学）



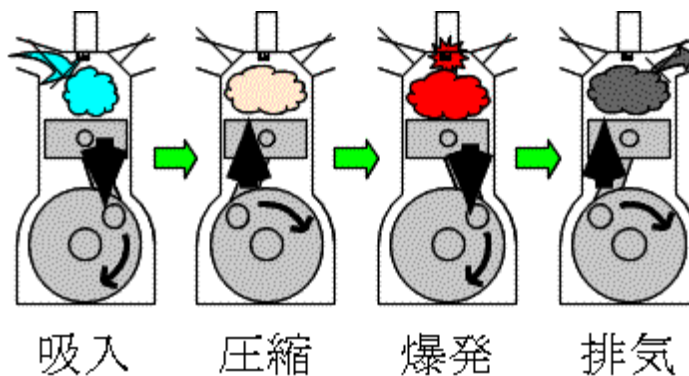
目次

- ・背景・先行研究・目的
- ・可変剛性ダイナミックダンパ
 - 基本構造
 - 可変特性の発生原理
- ・提案ダンパの特性評価
 - 解析モデル・解析条件
 - 解析結果
- ・表面磁石型磁気カップリングとのハイブリッド構造
 - 可変幅の拡大方法
 - SPMMCの磁気ばね特性
 - ハイブリッド構造の可変特性
- ・まとめ

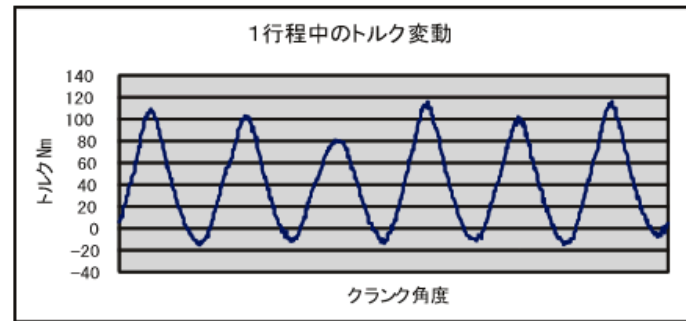
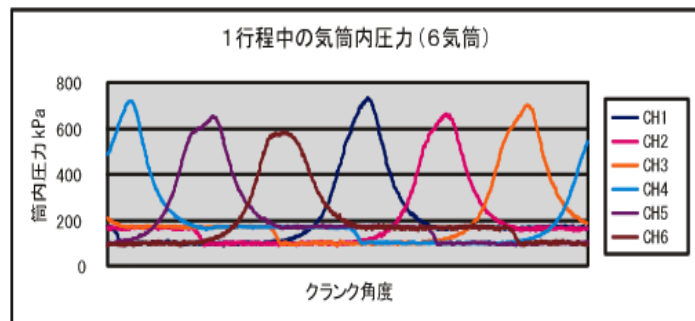
研究背景



レシプロエンジン



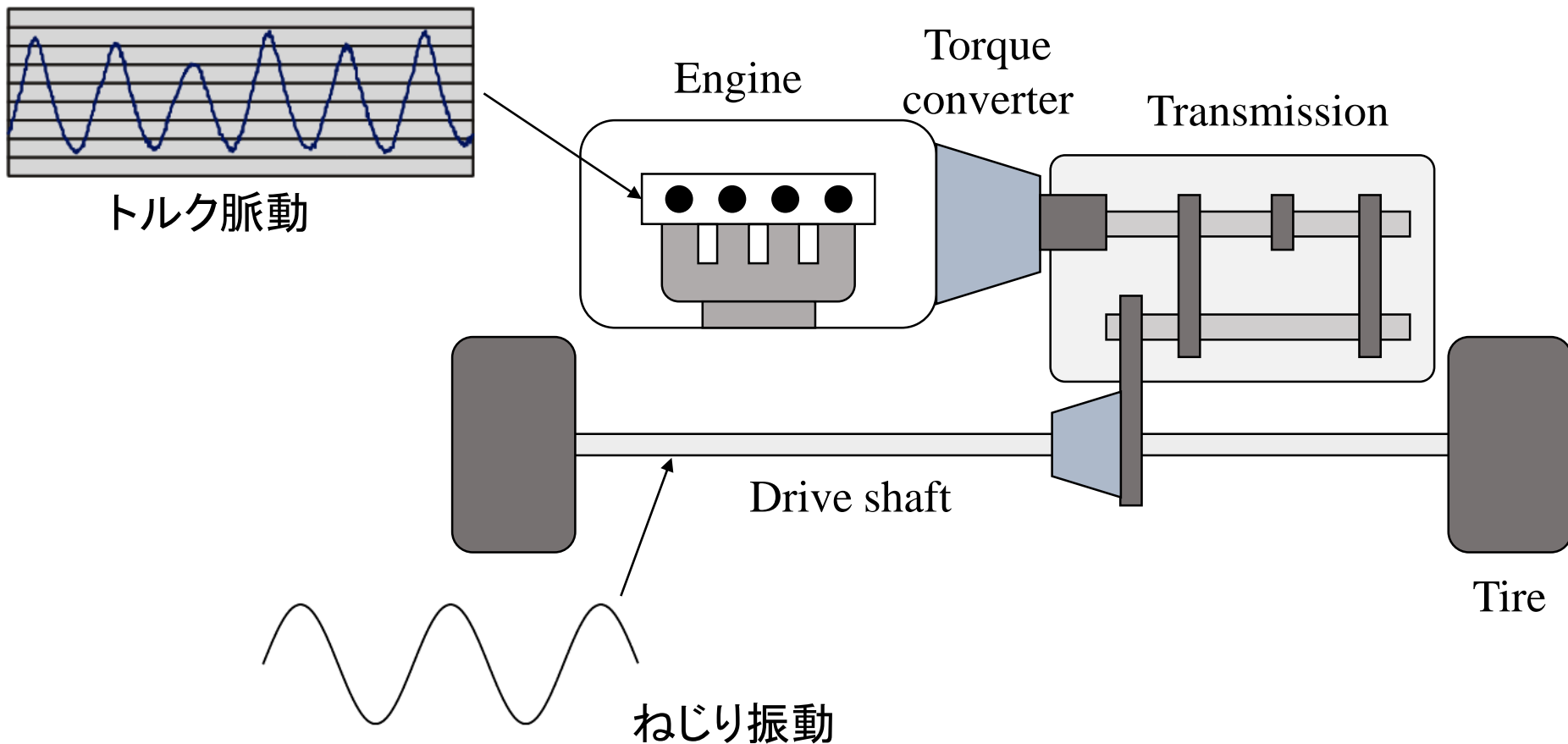
エンジンサイクル



6気筒エンジンのトルク脈動

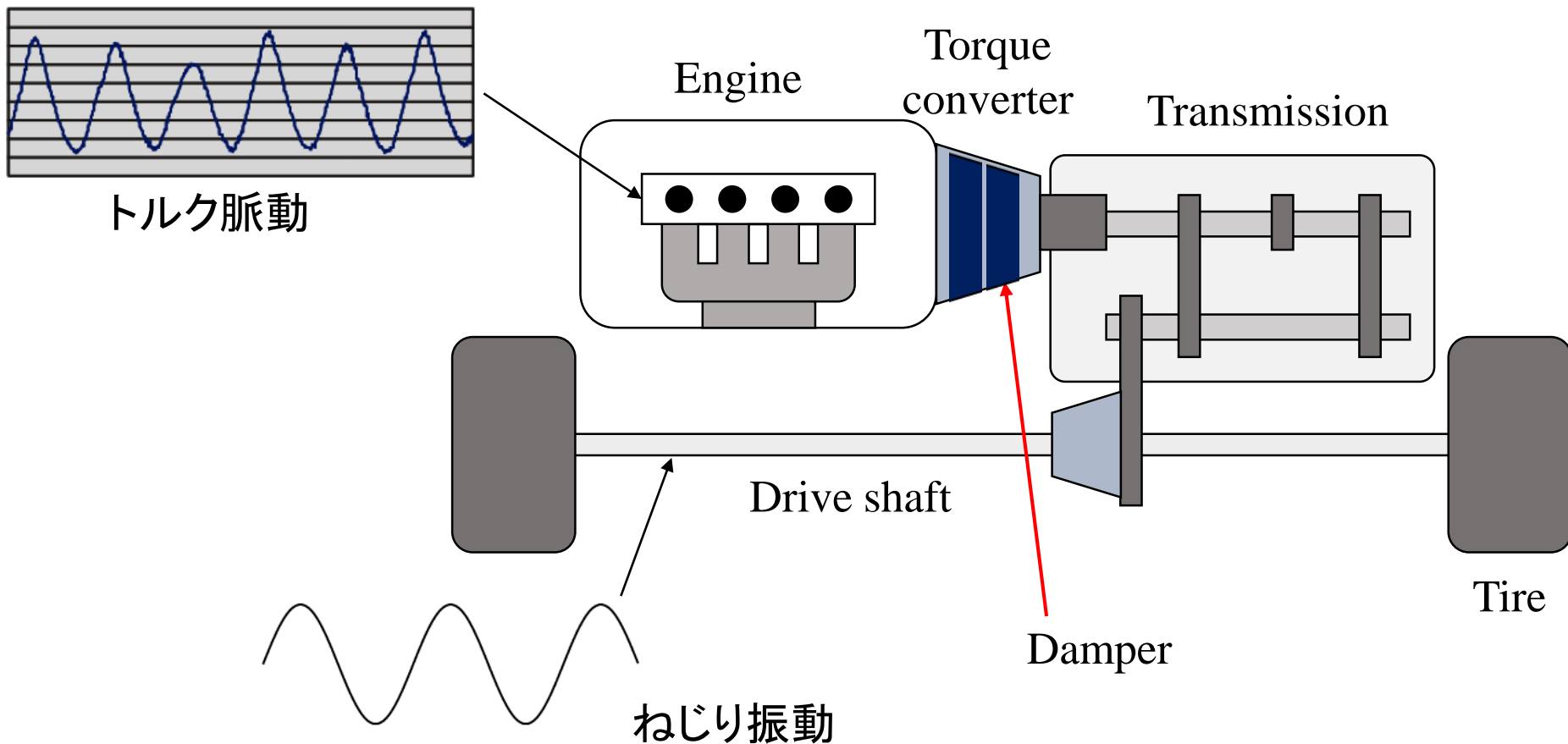
複数気筒エンジンのトルクには大きな脈動が発生

研究背景



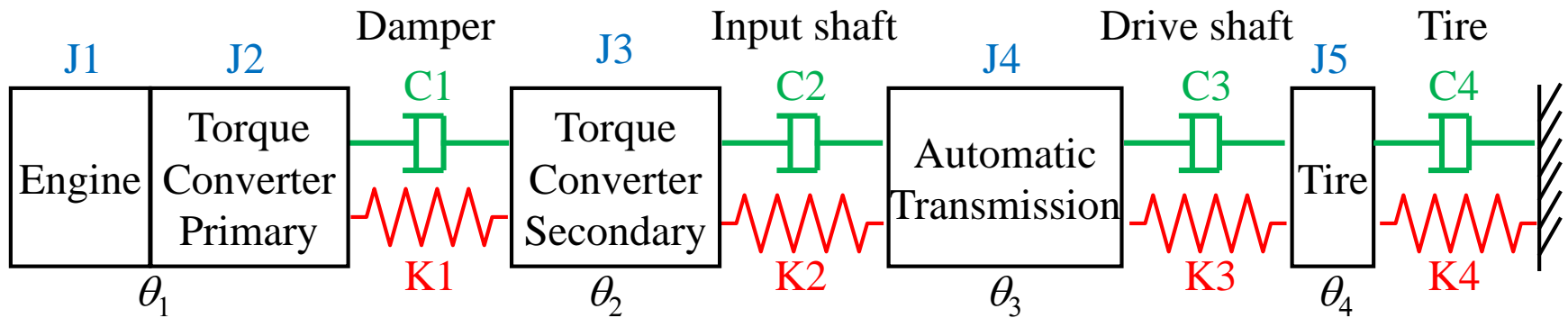
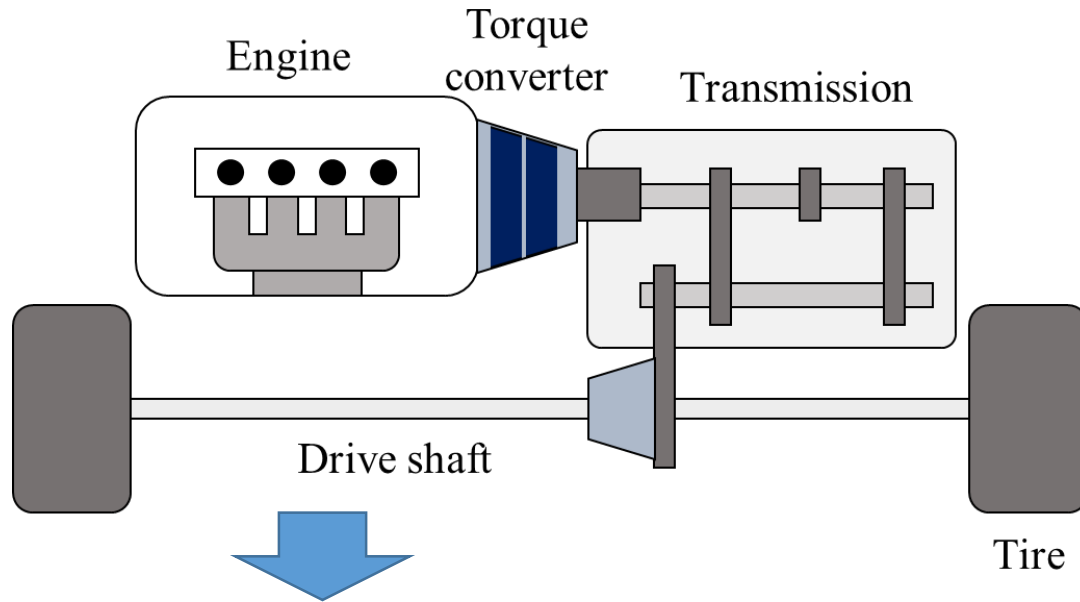
エンジントルクには大きな脈動が発生
ドライブシャフトにおけるねじり振動を誘発

研究背景



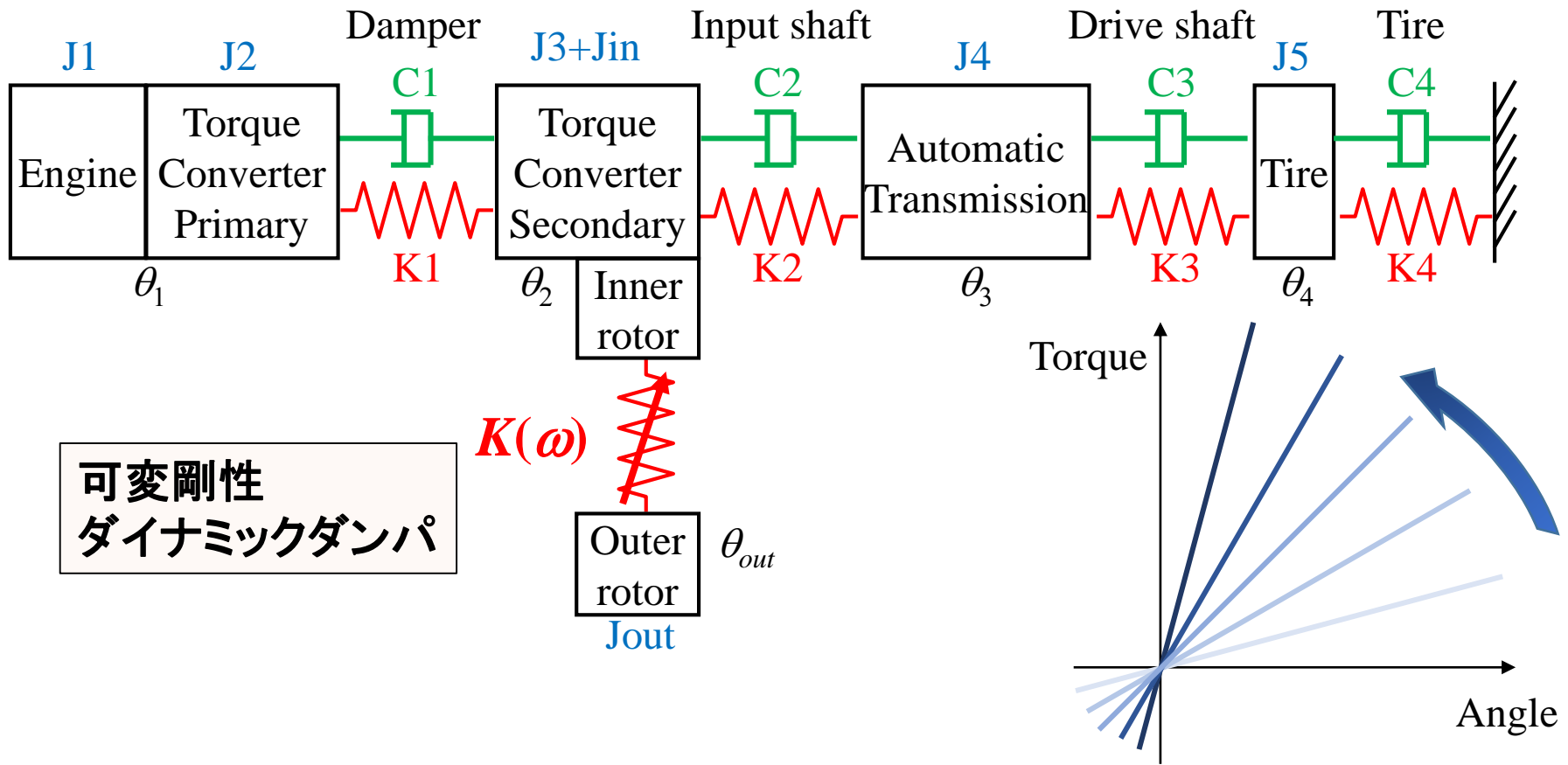
ダンパによる低速回転域でのねじり振動の低減
→回転数全域での振動低減効果は得られにくい

エンジン駆動系の力学モデル



エンジン駆動系は4慣性のばね・ダンパ系でモデル化可能

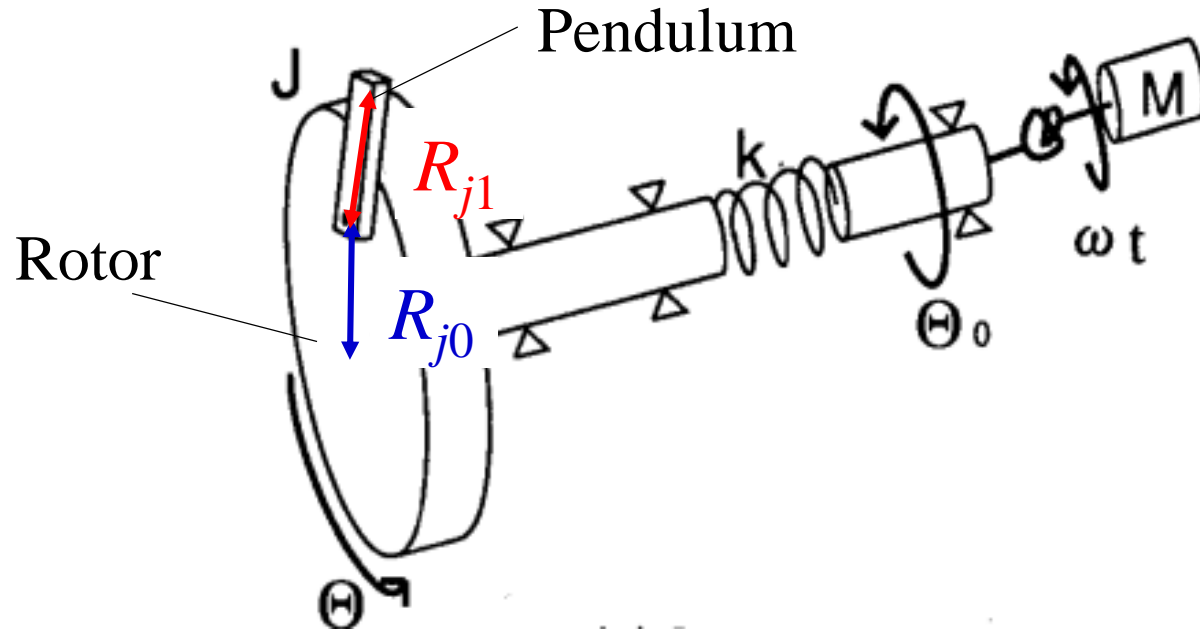
ダイナミックダンパの付加



可変剛性
ダイナミックダンパ

- ①ダイナミックダンパを付加する・・・ある周波数での振動低減
- ②剛性を可変にする(回転数に比例)・・・広い周波数での振動低減

先行研究 遠心振り子式動吸振器[1]

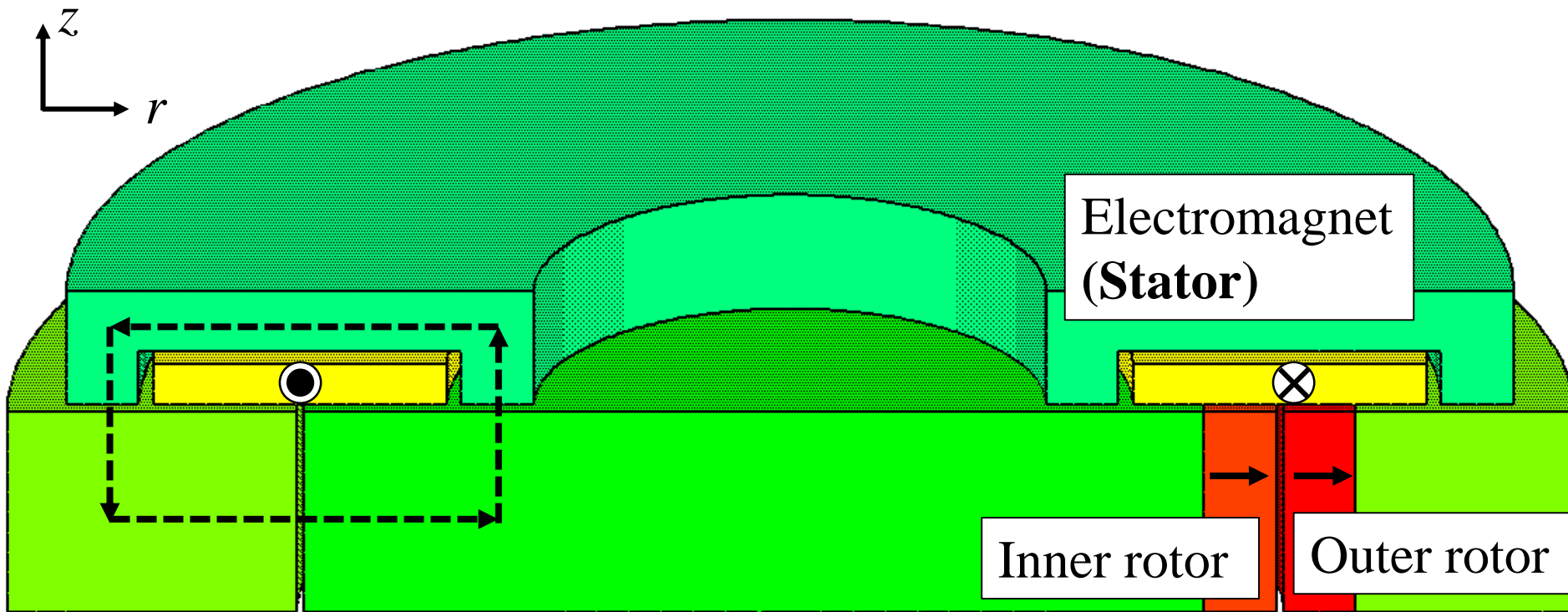


固有振動数

$$p_{jr} = \omega \sqrt{\frac{R_{j0}}{R_{j1}}}$$

- 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
- × 振り子の遠心力に耐える材料強度が必要
- × 低気筒エンジンでは R_{j0}/R_{j1} の設計が困難

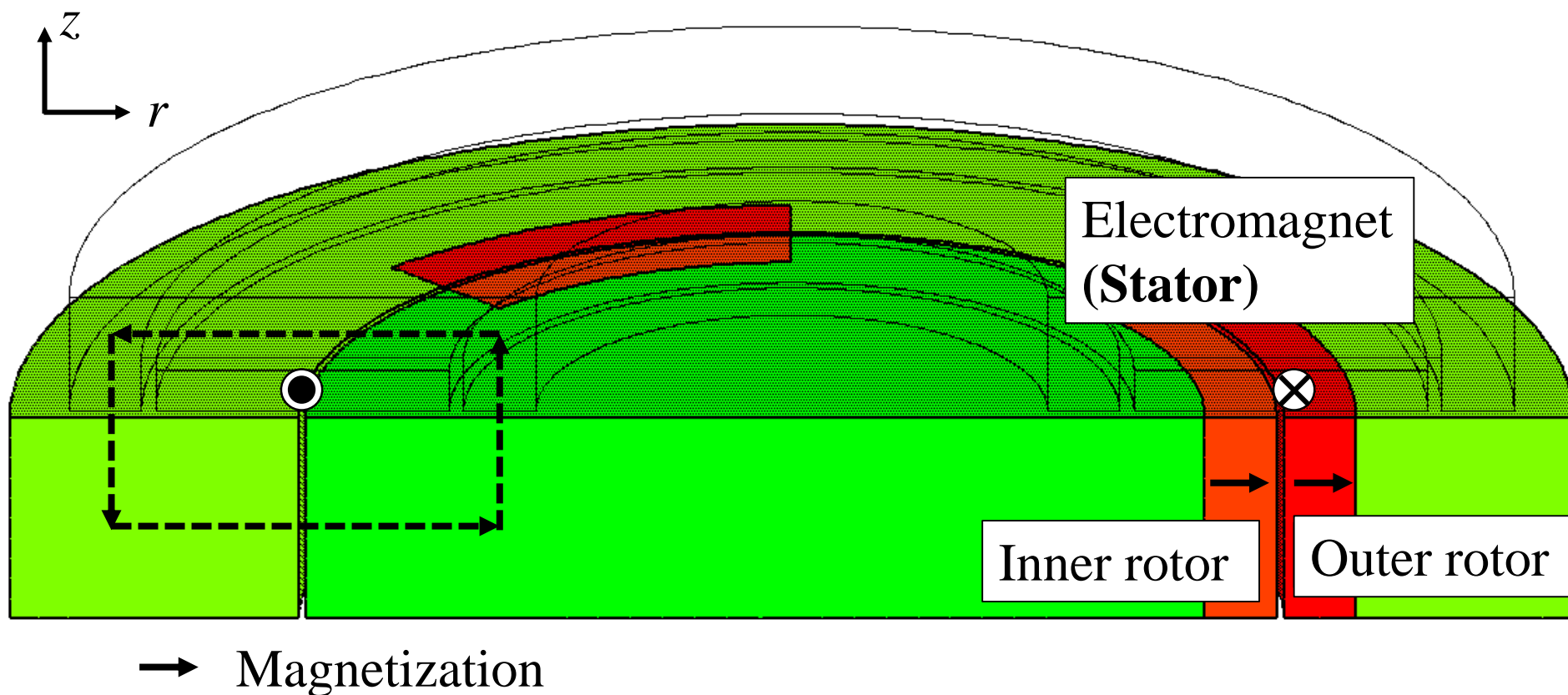
コンシクエントポール型ダイナミックダンパ



→ Magnetization

コンシクエントポール構造のため、電流による磁束の経路が制限される
電流の増減により磁気ばね定数を可変に

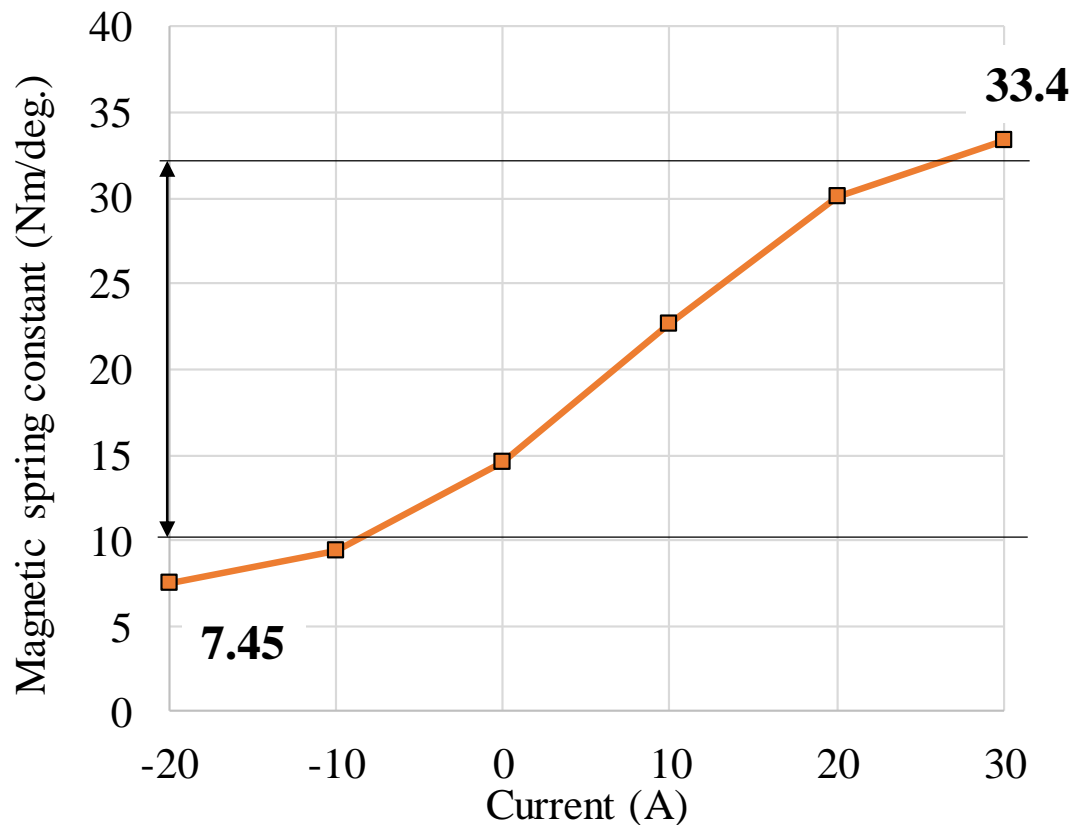
動作原理



→ Magnetization

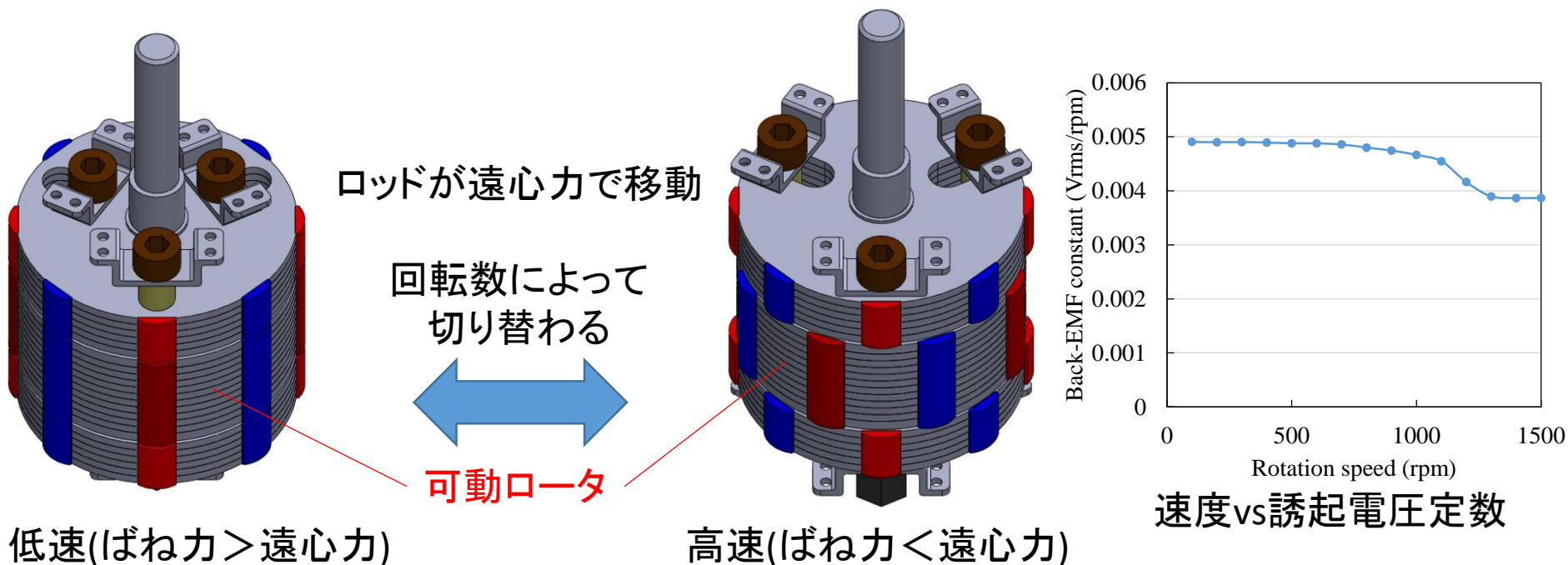
コンシクエントポール構造のため、電流による磁束の経路が制限される
電流の増減により磁気ばね定数を可変に

要求特性との比較



- 電流を正負に流すことで磁気ばね剛性を大きく変えられる
- × 特性変化に電力を消費してしまう

ロータの遠心力を利用した可変磁束モータ



ロッドが遠心力で移動し、可動ロータのみが段スキュー

- 遠心力を利用するため、特性変化のためにエネルギーを注入する必要がない
- × ステータ側から反力を受けるため、動作中に適切なスキュー角度を維持できない

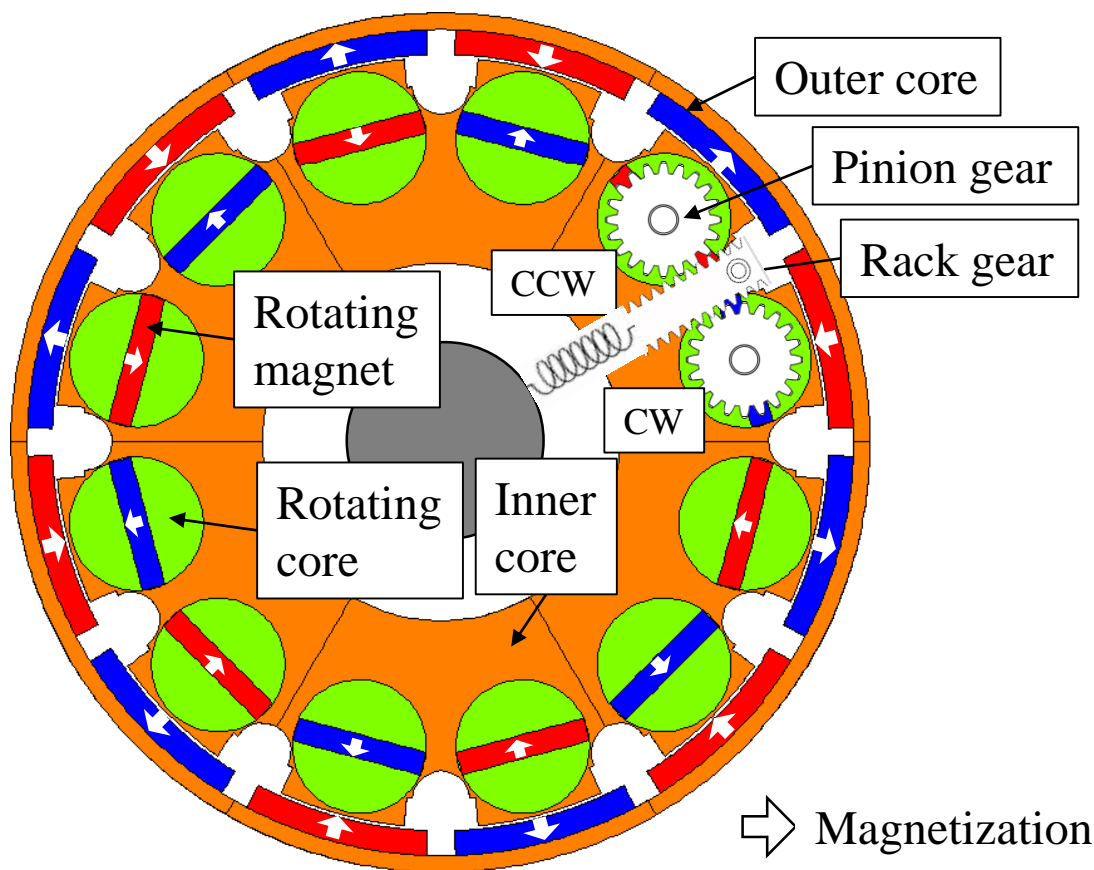
本研究の目的

- ①外部からのエネルギーを必要とせず，可変特性を実現したい
 - ②アウターロータから受ける反力を低減し，所望の特性を得たい
-
- インナーロータ内に自転可能な磁石を備えた可変剛性ダイナミックダンパを提案
 - 表面磁石型の磁気カップリングとの併用により，要求される可変幅に漸近できることを示す

目次

- ・背景・先行研究・目的
- ・可変剛性ダイナミックダンパ
 - 基本構造
 - 可変特性の発生原理
- ・提案ダンパの特性評価
 - 解析モデル・解析条件
 - 解析結果
- ・表面磁石型磁気カップリングとのハイブリッド構造
 - 可変幅の拡大方法
 - SPMMCの磁気ばね特性
 - ハイブリッド構造の可変特性
- ・まとめ

提案するダイナミックダンパの基本構造

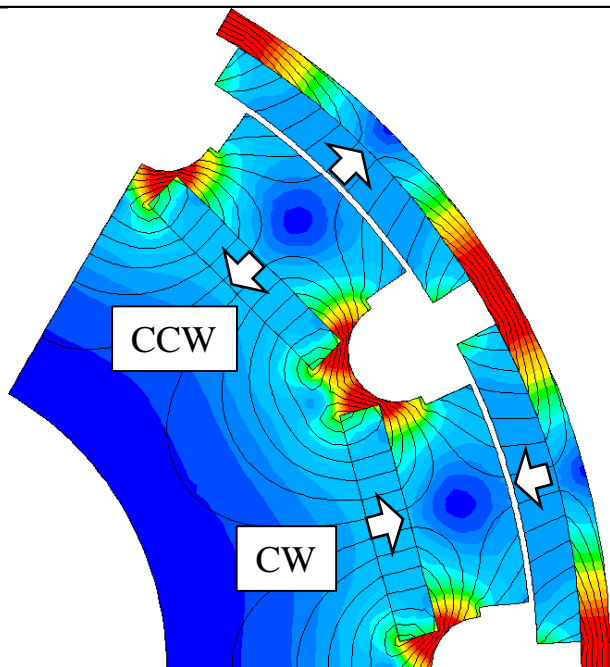


Pole number	12
Magnet	NdFeB (Br=1.4T)
Core	50JN470

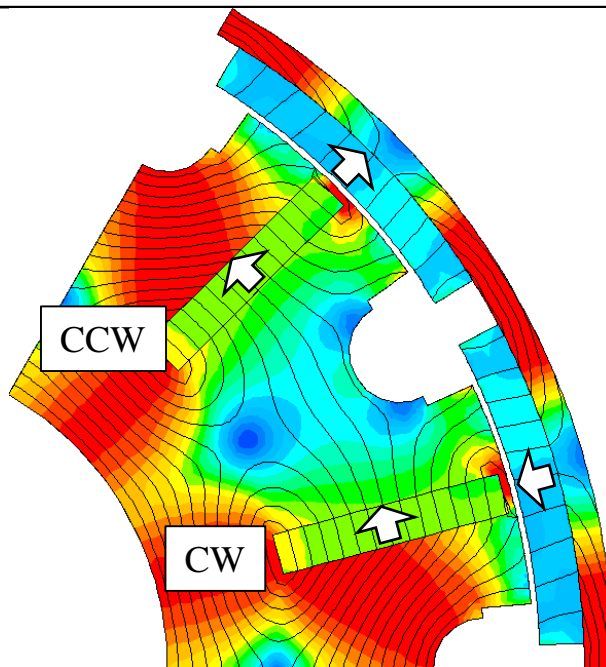
インナーロータ(インナーコア, 自転磁石, 自転コア): エンジン駆動軸に直結
 アウターロータ(永久磁石, アウターコア): ダイナミックダンパとして自由に運動
 遠心力を変換するために, ラック&ピニオン機構を採用

動作原理

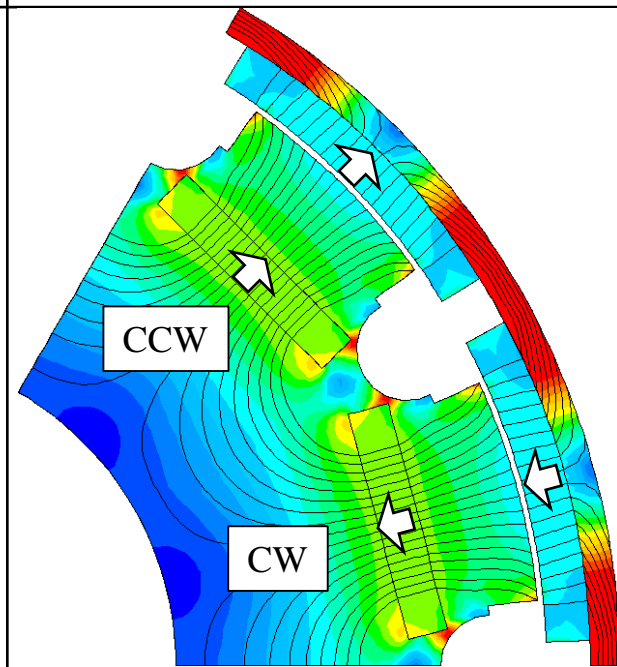
減磁状態



磁束短絡状態



増磁状態



初期状態から**-90deg**回転

不安定な磁気ばね

初期状態から**0deg**回転

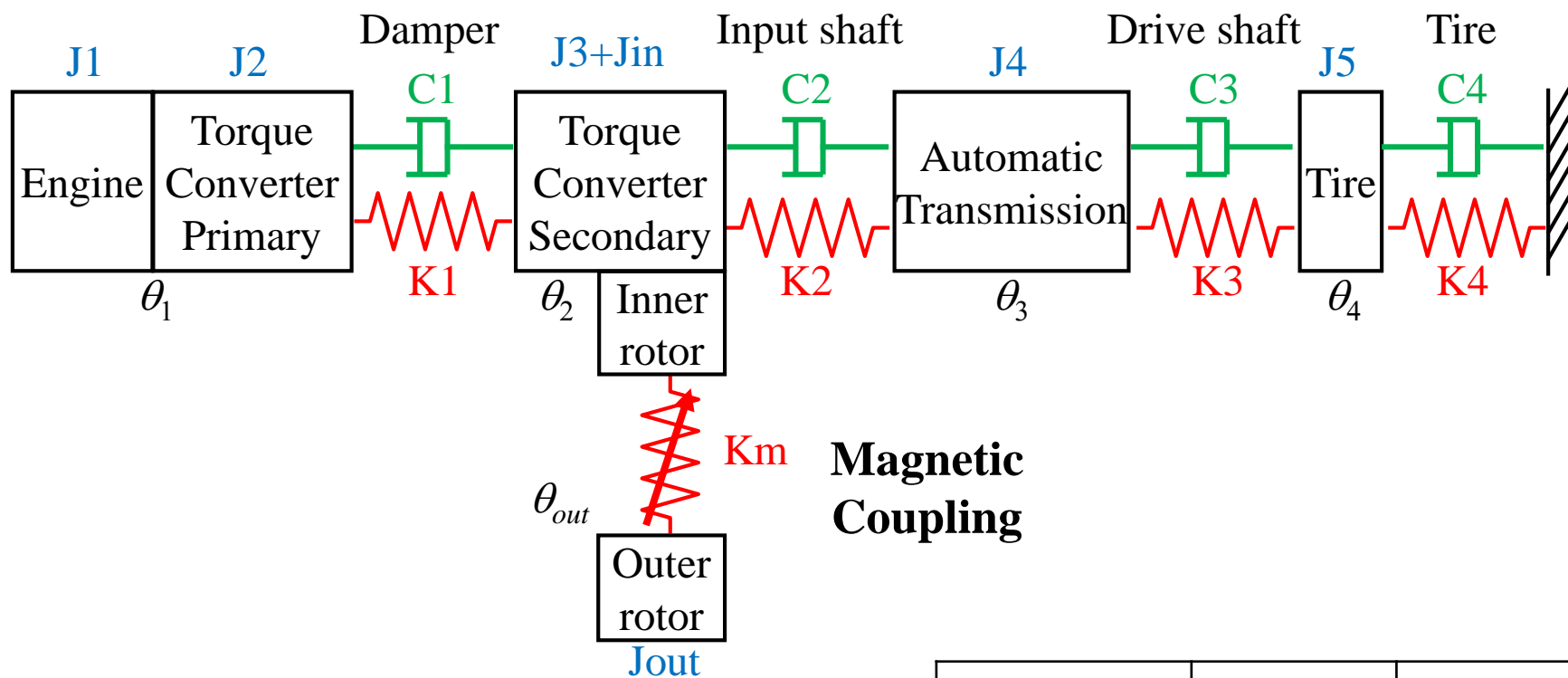
磁気ばね成分は小さい

初期状態から**+90deg**回転

安定な磁気ばね

遠心力によりラックギアが径方向に可動→ピニオンギアがCW, CCWに回転
 インナーロータ内の自転磁石 & コアが自転することにより、磁路が変化する

目標特性の算出



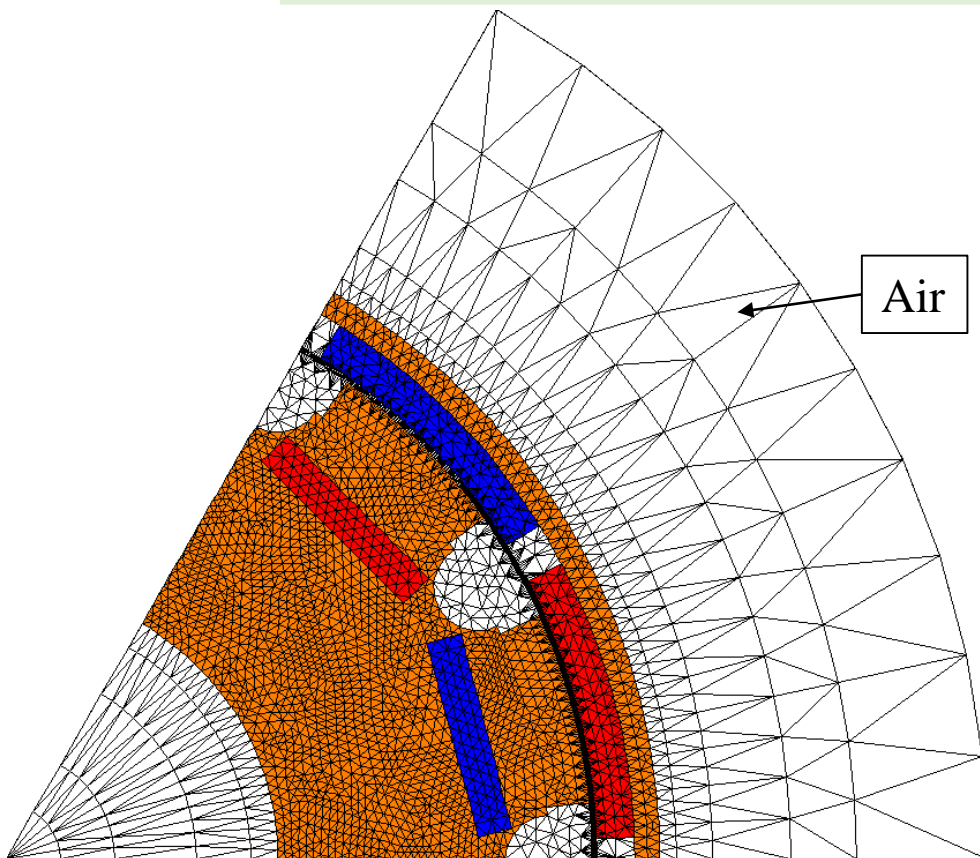
トルク脈動の周波数 $f = \frac{N}{2} * \frac{r_{eng}}{60}$

必要なばね定数 $K_{mag} = J_{out} * (2\pi f)^2$

K_{mag} (Nm/deg.)	下限	10
	上限	40
振れ角 (deg.)	下限	12.8

目標の可変幅を満たすことができるかどうかを磁場解析にて検証する

提案ダンパの二次元有限要素解析

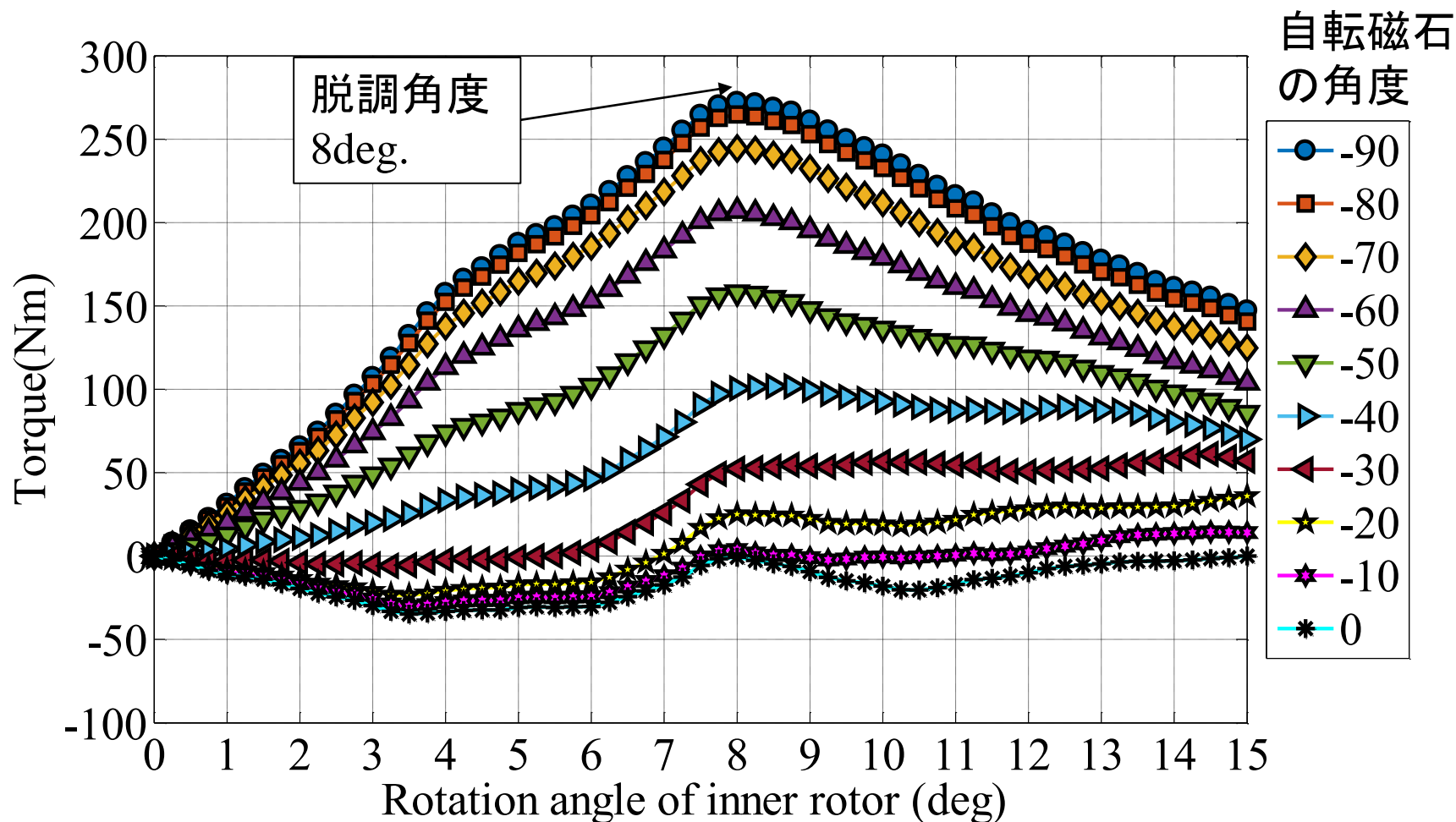


2-D Finite element mesh

Analysis type	A-method
Number of elements	10,000
Number of edges	5,020
Magnetization	Parallel
Boundary condition	Periodic
Model size	1/6
Airgap	1mm

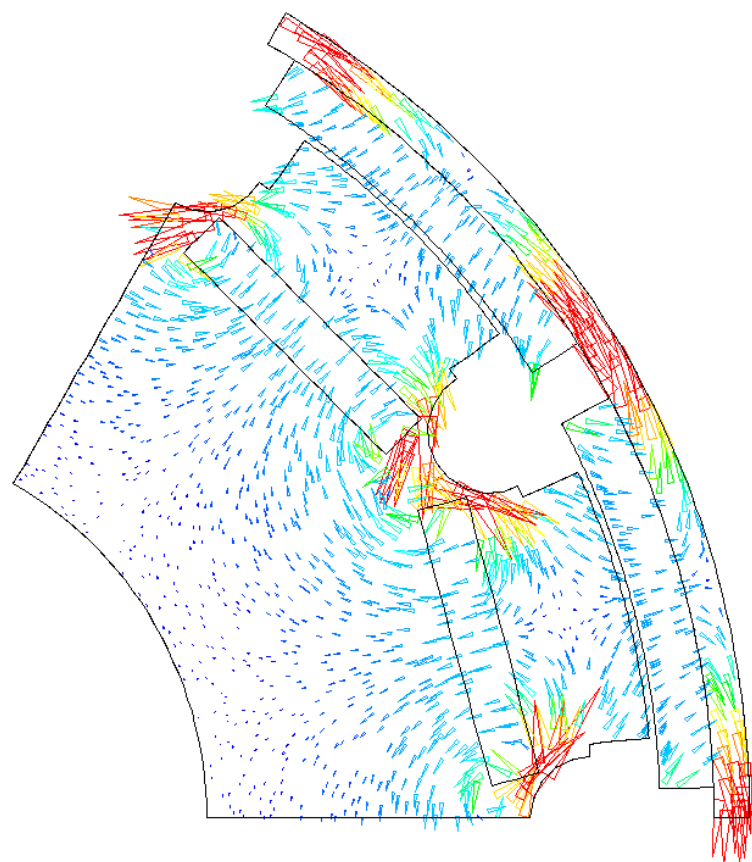
- ・自転コアとインナーロータ間の空隙は考慮しない
- ・ラック&ピニオンギア, コイルばねは磁気回路に干渉しないと仮定

解析結果 (-90deg. ~ 0deg.)

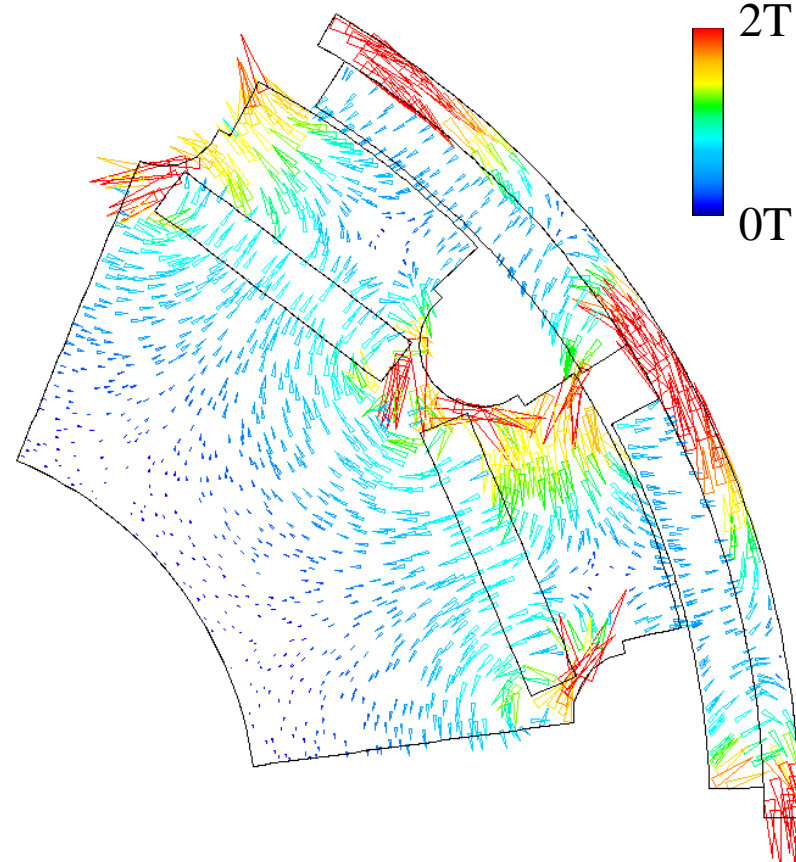


自転磁石の角度により磁気ばね剛性の傾きが大きく変化することを確認
磁束短絡状態(0deg)では極数が変化したような波形となる

磁束密度ベクトル分布



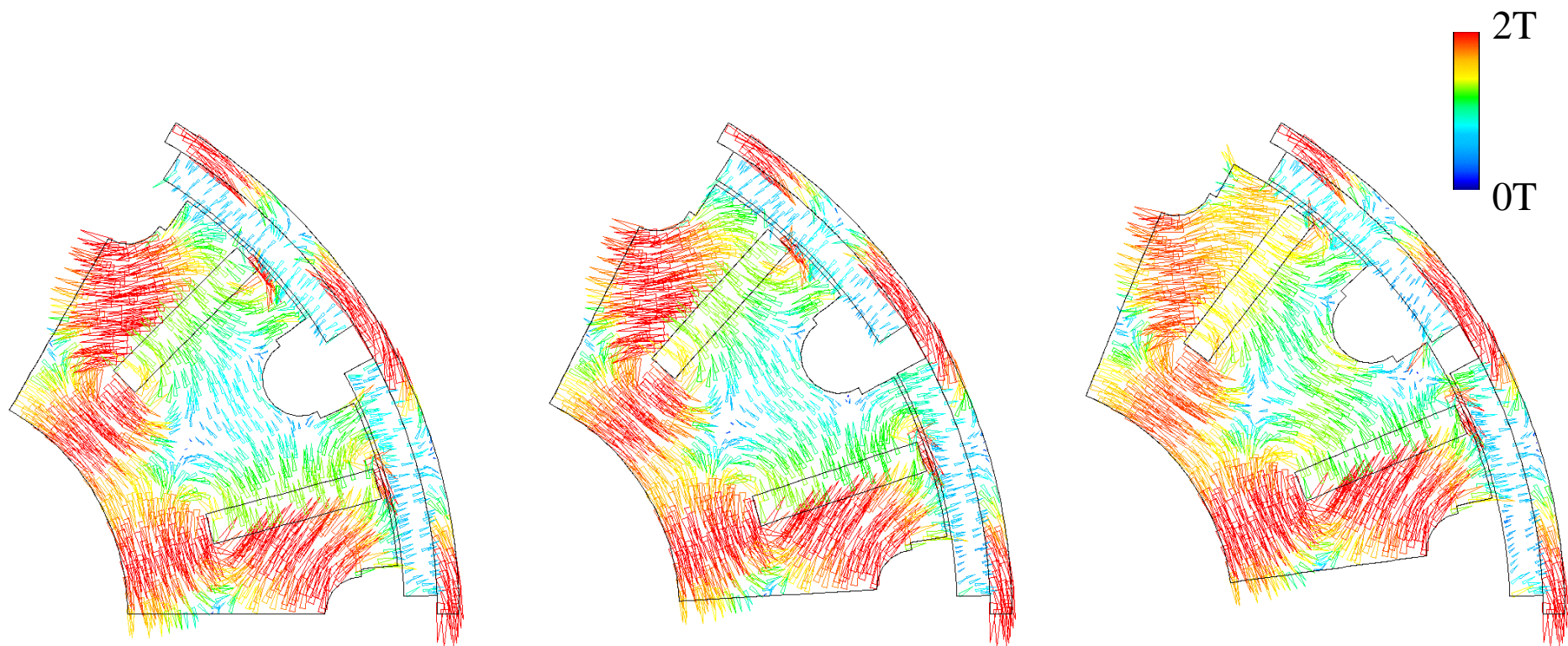
インナーロータ: 0deg
自転磁石: -90deg



インナーロータ: 8deg
自転磁石: -90deg

磁石端部で磁気飽和が発生
インナーコアがアウターPMと対向し始める角度で脱調する

磁束密度ベクトル分布



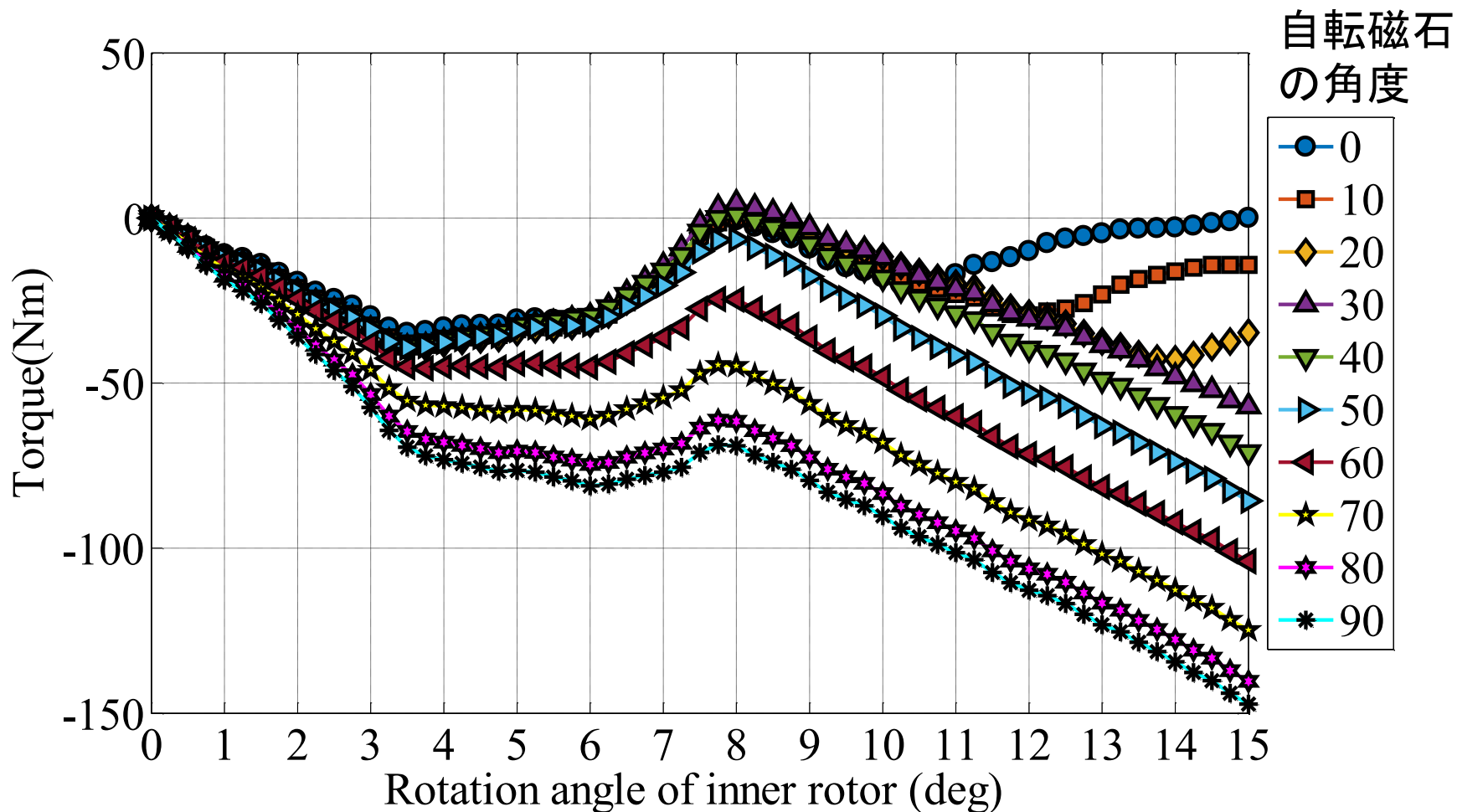
インナーロータ: 0deg
自転磁石: -90deg

インナーロータ: 3.5deg
自転磁石: -90deg

インナーロータ: 8deg
自転磁石: -90deg

インナーコア内部で磁気飽和が発生
インナーコア端部がアウターPM端部と一致する角度で脱調
インナーコアがアウターPMと対向し始める角度で安定

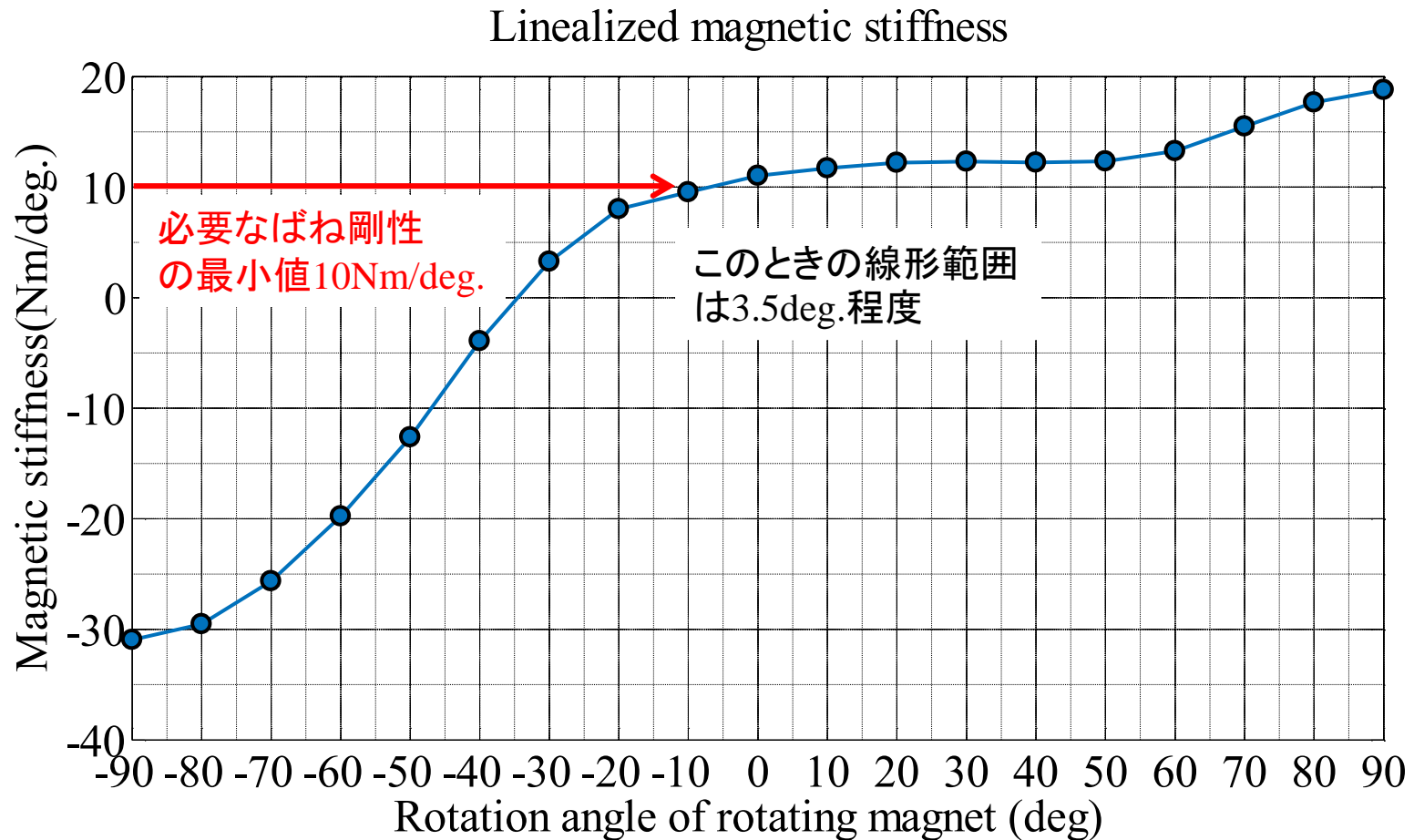
解析結果 (0deg. ~ +90deg.)



自転磁石の角度を増加させても、磁気ばね剛性増加の効果は小さい
高剛性側で必要な捩れ角は小さいため、線形性については十分

磁気ばね剛性の可変幅

原点近傍のデータ(2.5deg.)から線形近似した磁気ばね剛性と自転磁石角度の関係



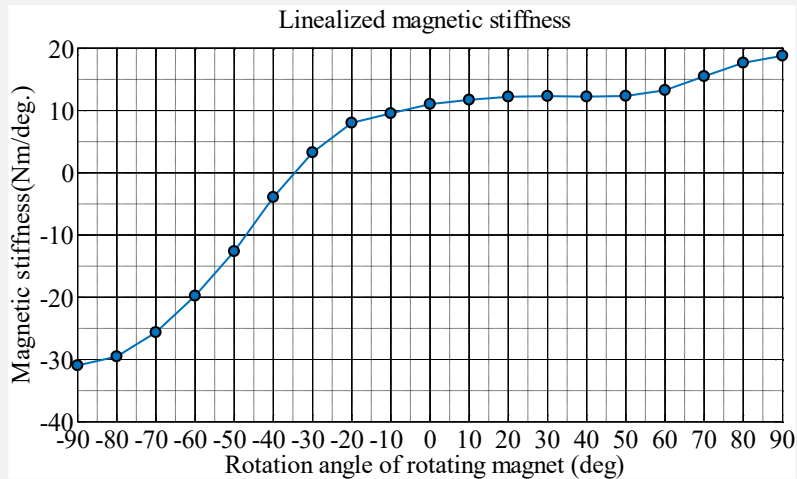
最大値は18.8Nm/deg.で、目標値(40Nm/deg.)を満たしていない
線形性も確保できていない

目次

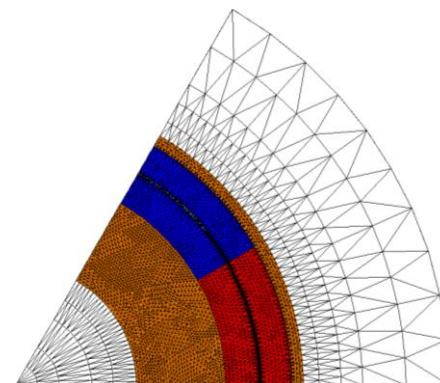
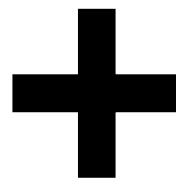
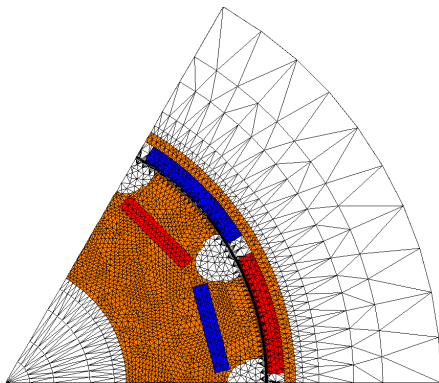
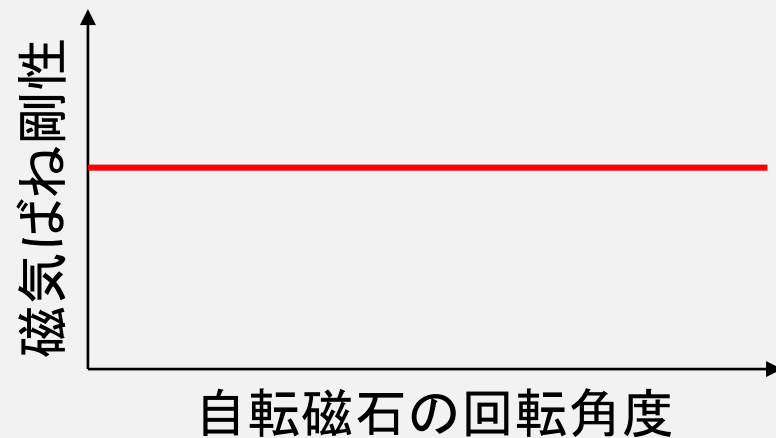
- ・背景・先行研究・目的
- ・可変剛性ダイナミックダンパ
 - 基本構造
 - 可変特性の発生原理
- ・提案ダンパの特性評価
 - 解析モデル・解析条件
 - 解析結果
- ・表面磁石型磁気カップリングとのハイブリッド構造
 - 可変幅の拡大方法
 - SPMMCの磁気ばね特性
 - ハイブリッド構造の可変特性
- ・まとめ

可変幅の拡大方法

可変特性

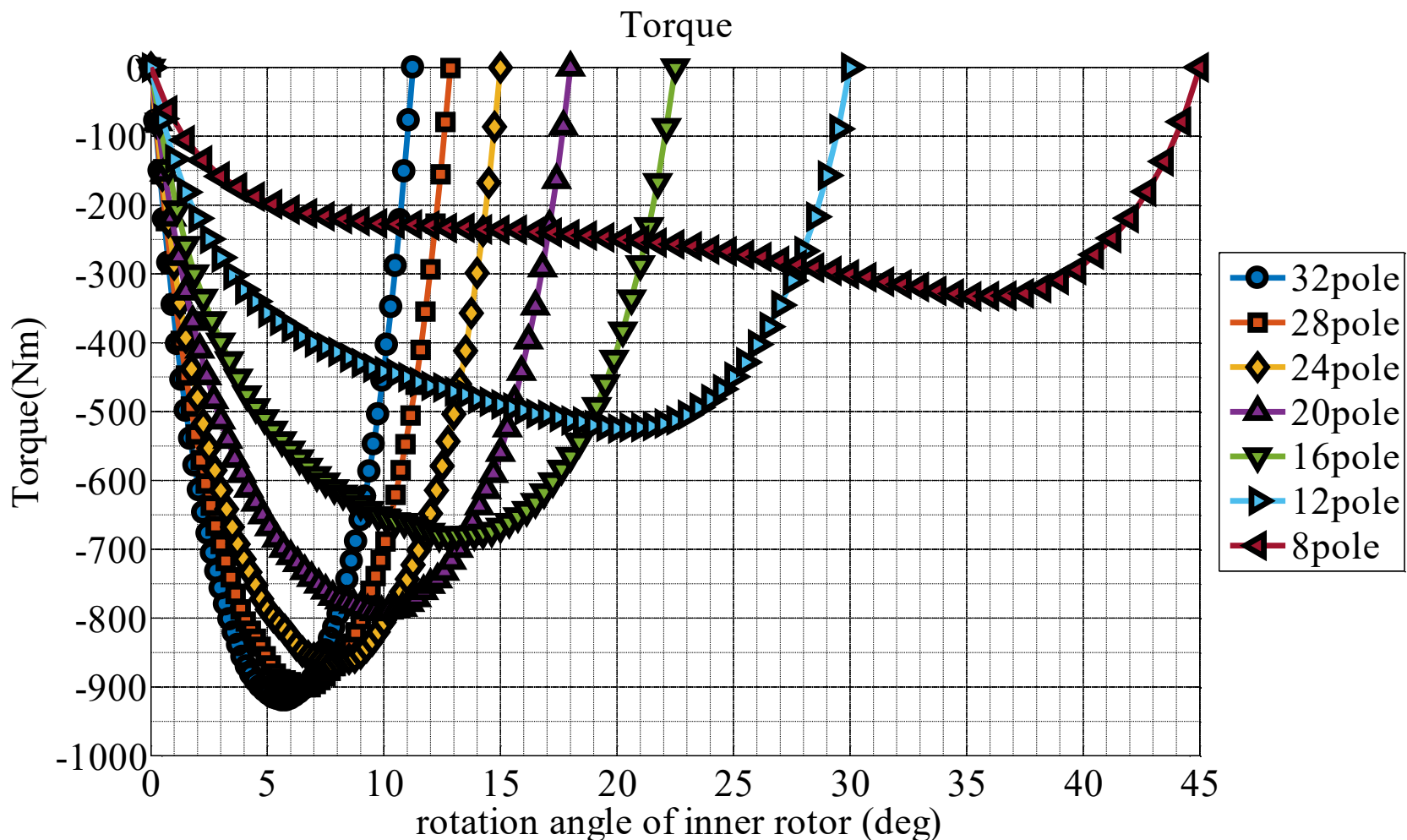


固定特性



負の領域まで含めると可変幅は49.7Nm/deg.となり, 要求される可変幅を上回る
 →表面磁石型磁気カップリング (SPMMC) と組み合わせるハイブリッド構造に変更

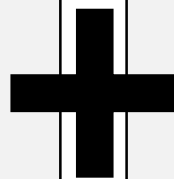
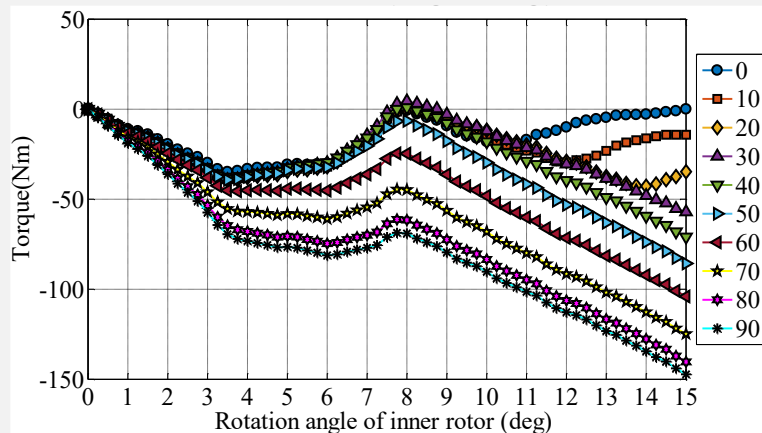
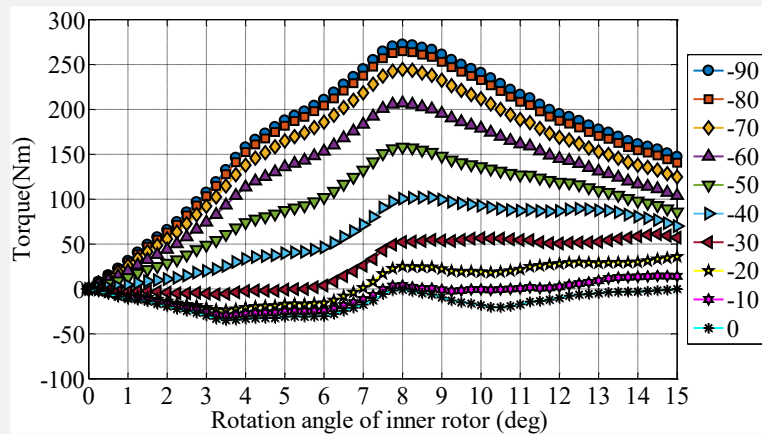
SPMMCの解析結果



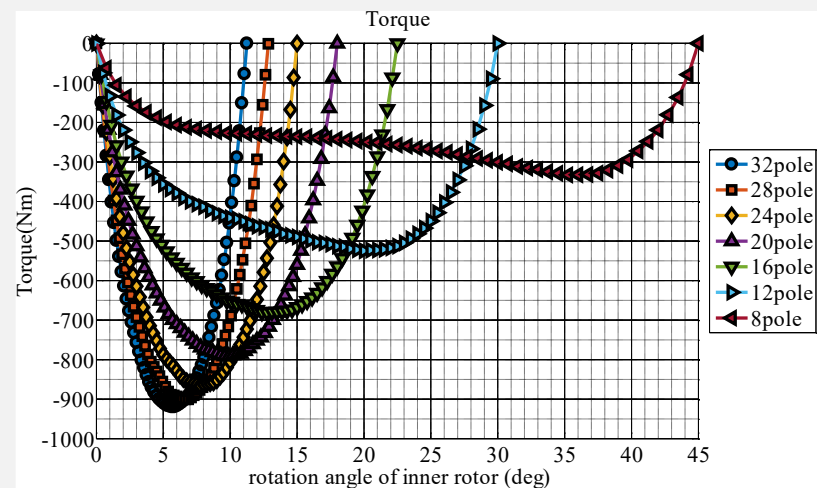
多極にすると磁気ばね剛性は増加するが、ばねとして動作できる範囲は減少する
→設計条件に応じて最適な極数を選択する必要がある

可変幅の拡大方法

可変特性

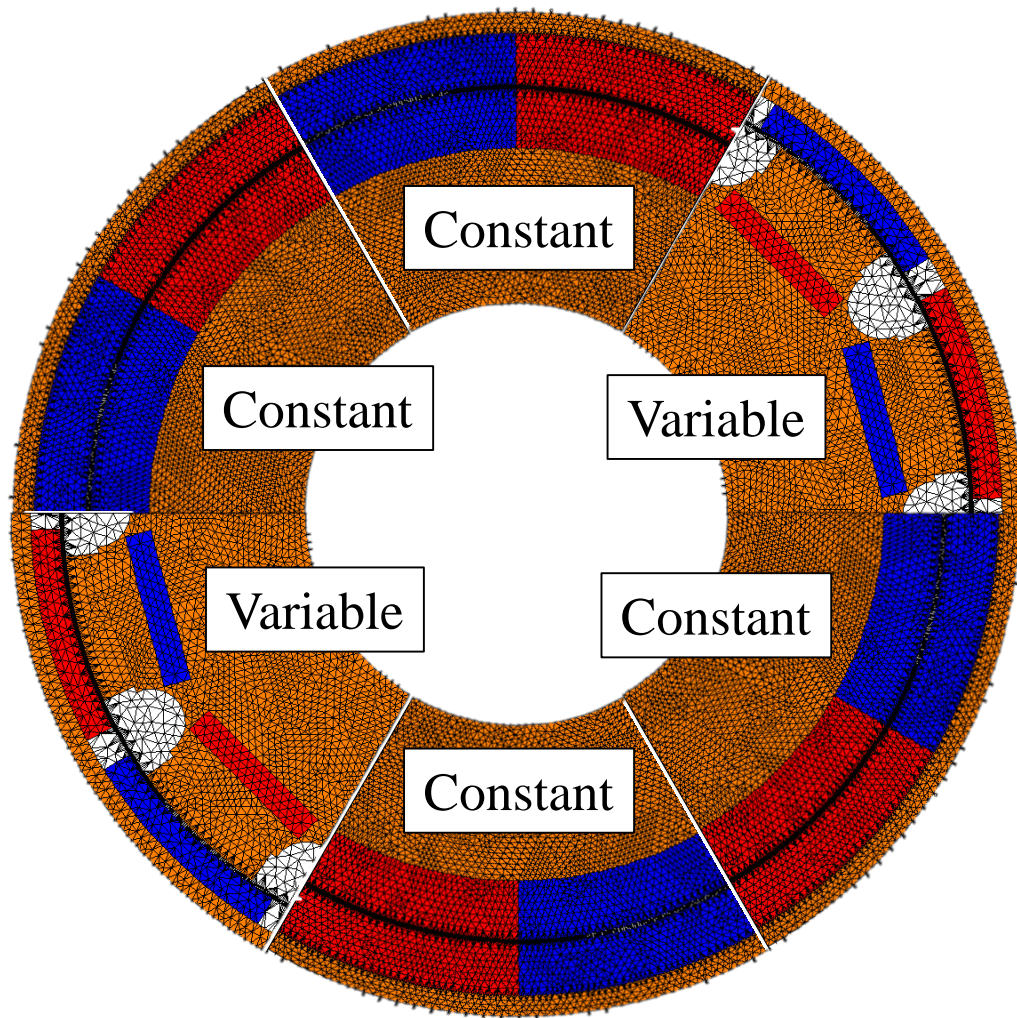


固定特性



両者を組み合わせることで、負の傾きを持つ領域を正の領域にシフト可能

ハイブリッド構造



Constant: Variable = 2:1

$$T_{total} = w_1 T_{SPMMC} R + T_{VAR} (1 - R)$$

R : 固定特性と可変特性の比率
 w_1 : SPMMCの重み

12極モデルの場合

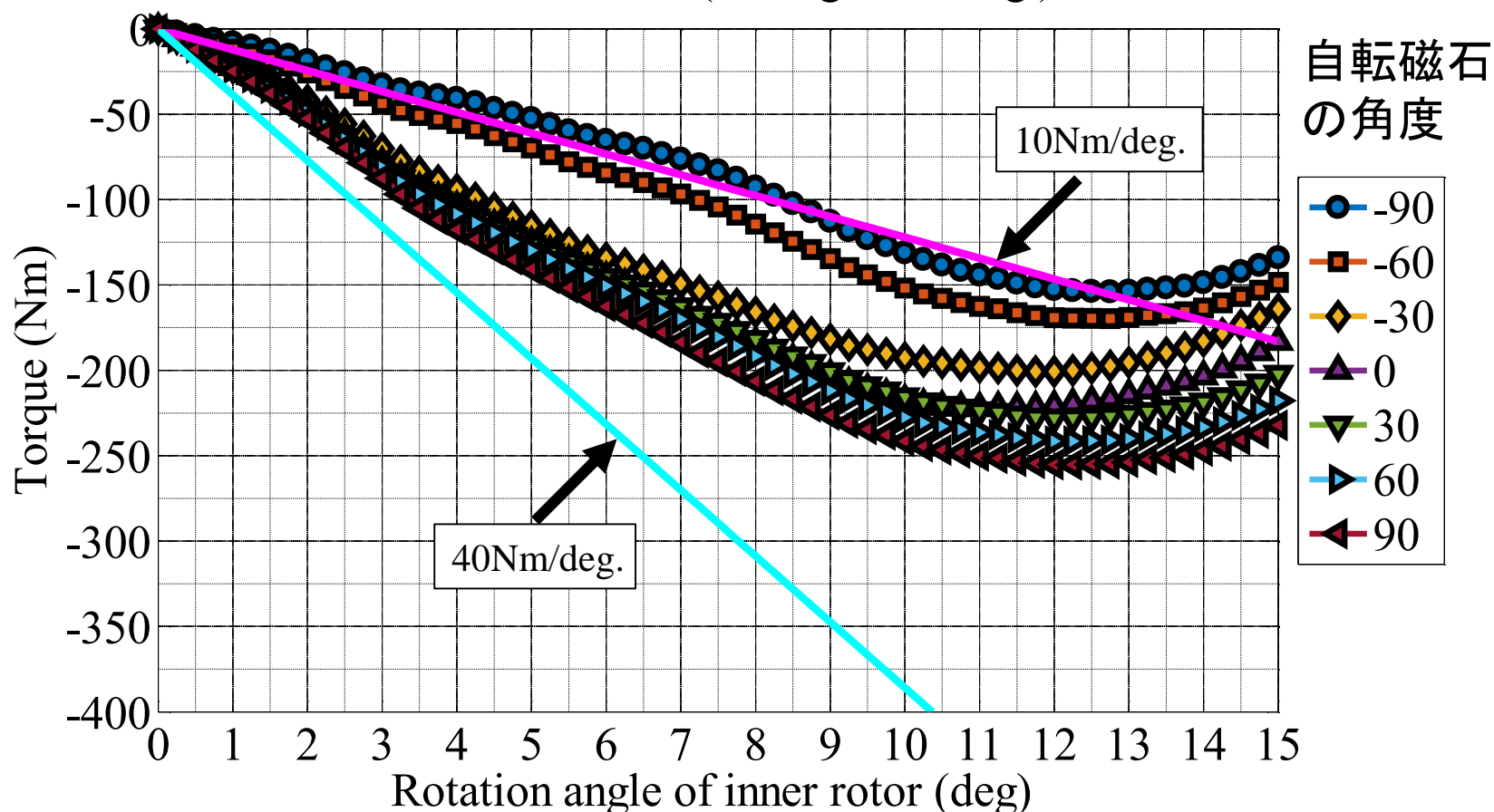
固定:可変	R
1:2	0.33
1:1	0.5
2:1	0.66

提案ダンパとSPMMCを径方向に組み合わせたハイブリッド構造(軸方向でも可)

ハイブリッド構造 解析結果①

$$R=0.66, w_1=0.74$$

Variable stiffness (-90deg. to 90deg.)

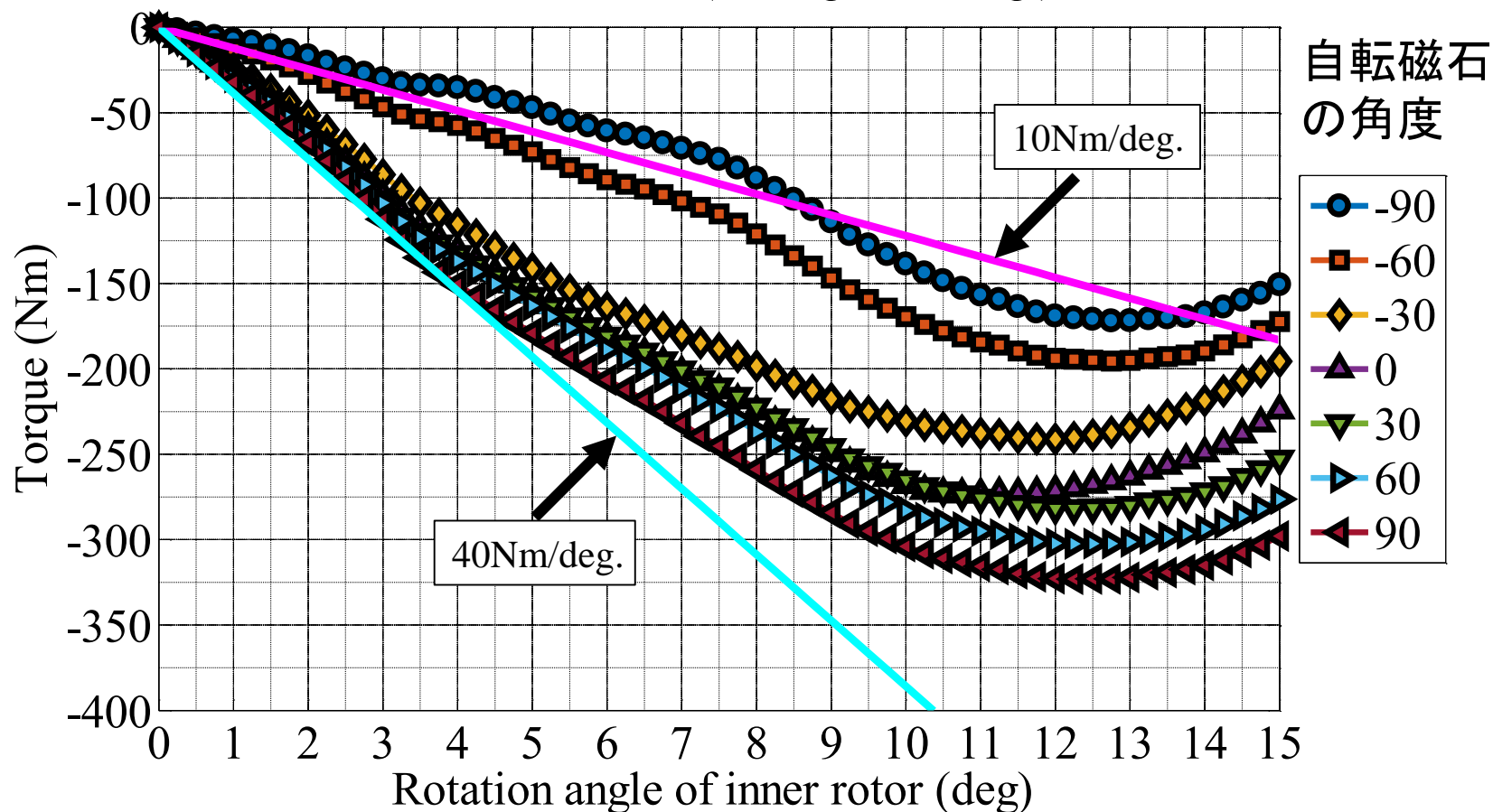


低剛性側の要求値10Nm/deg.を満たしているが、高剛性側が不十分

ハイブリッド構造 解析結果②

$$R=0.5, w_1=1.2$$

Variable stiffness (-90deg. to 90deg.)



高剛性側の要求値40Nm/deg.を満たせているが、低剛性側の線形性が不十分

まとめ

まとめ

- ・インナーロータ内に自転可能な磁石を備えた可変剛性ダイナミックダンパを提案した
 - ラックピニオン機構を利用し遠心力により自転磁石を回転させる
 - 磁気ばね剛性の十分な線形性および可変幅は得られず
- ・表面磁石型磁気カップリングとのハイブリッド構造を提案した
 - 負のばね剛性を持つ領域を正の領域にシフトさせる働き
 - 低剛性および高剛性の目標値に漸近できたが、両方同時には達成できず