

## 2019年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	茨城大学大学院 理工学研究科(工学野) 電気電子システム工学専攻
職位または役職	助教
氏名	加藤 雅之

### 1. 研究題目

遠心力により受動的に特性変化する磁気カップリング型ダイナミックダンパの開発

### 2. 研究目的

本研究は、レシプロエンジン向けの新構造のカップリング型ダイナミックダンパを開発するものであり、このダンパを採用することで、外部からエネルギーを供給することなく、エンジンによる不快な振動や騒音を抑制し、燃費改善を実現するものである。

往復運動を回転運動に変換するレシプロエンジンは、吸気、圧縮、爆発、排気の4サイクルで構成される。このサイクルのうち、トルクは爆発行程でのみ発生するため、エンジンからは駆動トルクに加えて、大きな脈動トルクが発生する。このトルク脈動がエンジン駆動系を伝達することによりドライブシャフトにおけるねじり振動を誘発し、不快なこもり音として車体に伝わるのが問題とされている。ねじれ振動の低減を狙い、機械式ばねを用いたダンパが搭載されているが、一部の回転数域でのみ効果が発揮されるため、広い回転数域で振動を低減するためには、ダンパのばね定数を回転数に応じて変化させることが要求される。

これに対して、遠心力により受動的に可変特性を実現させる遠心振り子式ダイナミックダンパが提案されている。このダンパは遠心力を活用するため、外部からエネルギーを追加する必要がないという利点がある。しかし、近年では低燃費化の流れを受けエンジンの低気筒化が進んでおり、これにより制振したいねじれ振動の周波数が低下してしまう。このダンパの動作原理上、振り子の長さを確保することが困難になり、ダンパの大型化を招いてしまう。

そこで本研究では、遠心振り子式ダイナミックダンパの代わりに、磁気的な吸引力により非接触でトルクを伝達できる磁気カップリングに着目する。磁気式のダンパにすることにより、振り子部の機械設計に対する問題点が解消されるという利点がある。遠心力により受動的に磁束の経路が変更され、磁気的なばね定数を変化させることができる可変特性ダイナミックダンパを提案し、アイドル回転数から高回転数域まで広範囲でねじれ振動を低減することを目的とする。

3. 研究内容及び成果

本研究では、エンジン回転数の上昇に合わせて、受動的に磁気ばね剛性を変化させることが可能な磁気カップリング型ダイナミックダンパの構造案を提示し、二次元有限要素法による電磁場解析からその可変特性を評価した。

図 1 にその基本構成を示す。本ダンパの磁気回路は、エンジン駆動軸に直結しているインナーロータ、ダイナミックダンパとして自由に運動できるアウターロータ、インナーロータ内に配置された自転磁石から構成される。事前検討から磁気カップリングの極数は 12 極としている。遠心力を利用して自転磁石を自転させるために、ラックピニオン機構を採用した。ラックギアは、コイルばねを介してシャフトと接続されており、遠心力の大きさに応じて、径方向に可動する。ラックギアの移動に伴って、自転磁石および自転コアと直結したピニオンギアが回転する。ロータ内の磁石の回転により、モータにおける強め界磁、弱め界磁制御と同様の作用が得られ、磁気ばね剛性が変化する(図 2)。提案ダンパの磁気ばね剛性を磁場解析から求めたところ図 3 のような結果が得られた。提案ダンパ単体では負のばね定数になる領域では動作できない。そこで、一般的な表面磁石型の磁気カップリングと組み合わせたハイブリッド構造とすることで動作領域をシフトさせ、磁気ばね剛性の可変幅を拡大できることが明らかになった。ハイブリッド構造にて得られた磁気ばね剛性の計算結果が図 4 である。提案ダンパと表面磁石型磁気カップリングの比率を適切に設定することにより、10Nm/deg.から40Nm/deg.までの変化幅がおおむね得られることがわかった。なお、この計算ではインナーコアと自転コア間のエアギャップを 0 と仮定しているが、エアギャップを設定した計算結果では、図 4 に比べて大幅に磁気ばね剛性の可変幅が減少することが明らかになった。また、実際にはラックピニオン機構は磁石によるトルクを受けるため、ラックピニオンのダイナミクスを含めたモデルで磁気回路設計を行う必要があることがわかった。

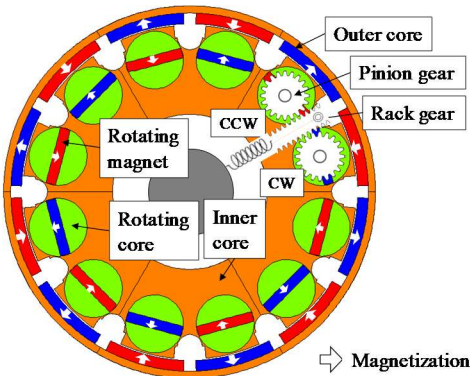


図 1 提案するダンパの基本構造

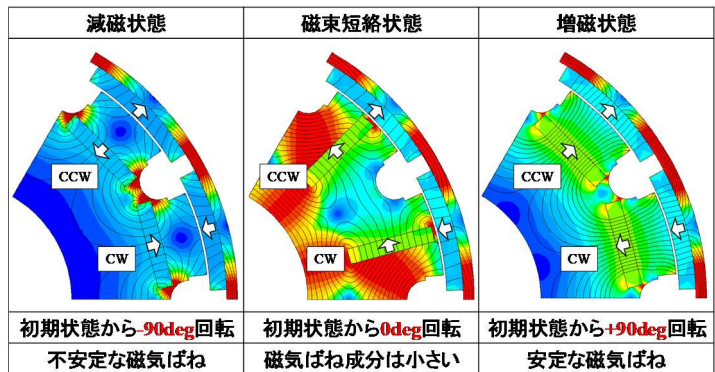


図 2 提案ダンパの可変特性原理

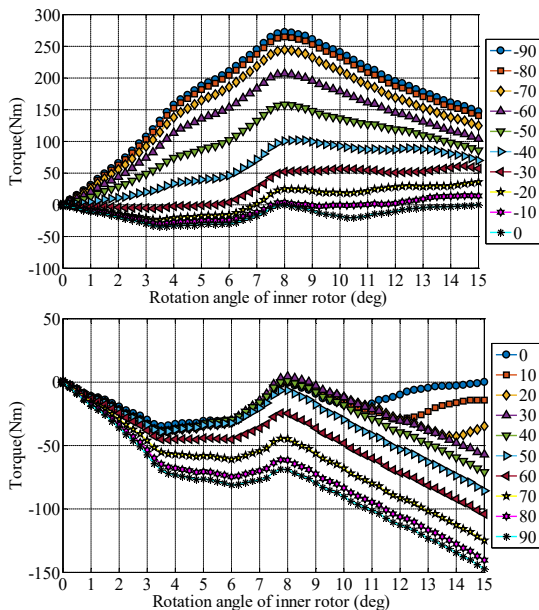


図 3 提案ダンパの磁気ばね特性

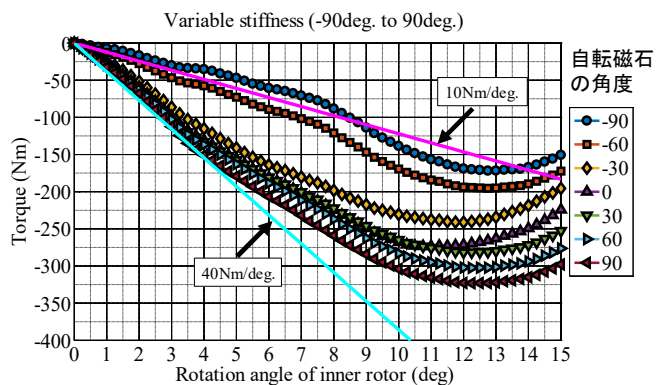


図 4 ハイブリッド構造での磁気ばね特性

#### 4. 今後の研究の見通し

2019年度の研究助成にて、磁気カップリング型可変特性ダイナミックダンパの基本構造案を提示し、ロータに発生する遠心力を利用した受動的な磁気ばね特性変化が達成されることを電磁場解析上で確認することができた。提案したダンパを実用化に近づけていくために、今後以下の3点について検討を進めていく。

##### ①3次元電磁場解析によるフルモデル評価

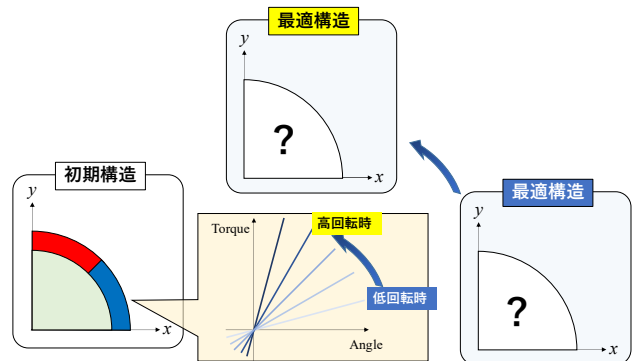
本年度対象とした2次元モデルは、短時間での特性評価が可能である一方、3次元的な磁束漏れが磁気ばね特性に及ぼす影響や2次元解析と3次元解析の差を評価することができなかった。磁気回路部に加えて、ラックピニオン機構部を含めた3次元モデルを作成し、磁場解析ソフト(JMAG)を用いて磁気ばね剛性を評価する。さらに、インナーロータ回転時の応力解析を行い、インナーコアの薄肉部にかかる応力についても評価する。これにより、回転時の機械的強度を確保したまま、磁気ばね剛性を変化させることが可能だと考えられる。

##### ②ミニモデルによる実機検証

①の実施内容にて目標性能が得られた後、実機検証によりその有効性を検証していく。ただし、本ダンパは最大100Nm以上の非常に大きなトルクを発生させるため、磁気ばね特性を測定するだけでも大型のサーボモータ・トルク計・ブレーキを必要とする。そこで、ダンパの形状を相似形に保ったまま、外径を小さくし磁気ばね定数を低下させたミニモデル(最大20Nm程度)を試作し、実機検証を行う。

##### ③トポロジー最適化による大域的新規磁気構造探索

遠心力により受動的に磁気ばね特性が変化していくような機構は、提案ダンパの限りではない。つまり、遠心力により何(鉄心、永久磁石、非磁性体など)を移動させるか、遠心力によりどの方向(径方向、周方向、軸方向)に移動させるかといった複数のパラメータが存在する。これらの組み合わせは膨大であるため、最良の可変機構を決定することは容易ではない。そこで、トポロジー最適化による大域的な新規構造探索を実施する(図参照)。制約条件を適切に設定し、低速回転時・高速回転時の最適構造をトポロジー最適化により導く。この一連の最適化により、即座に実現可能な可変機構が得られるわけではないが、二つないし三つの最適構造の特徴や類似性から、可変磁束特性を実現できる磁気回路設計に関する新たな知見が得られると予想している。



#### 5. 助成研究による主な発表論文、著書名

国際会議(査読付)

1. M. Kato, Y. Takamura, N. Niguchi and K. Hirata, Variable Stiffness Dynamic Vibration Absorber with Magnets Rotating by Centrifugal Force, Proceedings of INTERMAG2020, Montreal, Canada, ED-08, 2020.05

国内会議(査読無)

2. 加藤雅之, 高村康之, 新口昇, 平田勝弘, “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”, 電気学会 交通・鉄道 リニアドライブ合同研究会, TER-20-042, LD-20-042, pp. 91-95, 2020.01