

## 2020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を提案することにより、エンジントルク脈動による振動騒音の低減を狙うものである。大きく二つの研究成果が得られた。

① 磁気回路構造の改良

前年度までに可変磁気ばね剛性ダイナミックダンパの基本構造を提案した。インナーロータ内に自転可能な磁石を配置し、磁石が回転することによって磁気ばね剛性を可変にする。ダンパの磁気ばね剛性は静磁界解析により算出されており、ラックピニオン機構を含めた運動モデルとしての動的な評価は行えていなかった。そこで今年度は自動車駆動系の4慣性系に対してダイナミックダンパおよびラックピニオン機構を連成した連成モデルの数値シミュレーションを行った。理想状態を仮定すると、遠心力(=ロータの回転速度)に応じて自転磁石が自転することで受動的に磁気ばね剛性が変化することが確認された。その一方で実駆動状態をシミュレーションした結果、自転磁石は磁気回路からトルクを受けるため、所望の回転角度遷移が達成されないことが判明した。この問題点に対して、自転磁石間にスリットを入れ、磁束の相互干渉を低減させる改良モデルを提案した(図1参照)。スリット長を適切に設計することにより、自転磁石が磁気回路から受けるトルクを軽減させることに成功した。

② 半径方向に振動する電磁アクチュエータを利用したダンパの提案

ロータが受ける遠心力を磁気ダンパの可変磁束効果に利用するためには、半径方向に発生する力である遠心力を円周方向の力にラックピニオン機構を介して変換する必要がある。関連研究の調査過程にて、遠心力を受けた可動体が半径方向に振動することにより、コリオリ力と呼ばれる円周方向の力が発生し、これをダンピング成分として利用できる可能性に気づいた。

そこで本年度は、半径方向に駆動するリニア振動アクチュエータ(LOA)を制振対象に付加した新しいハイブリッドダンパを考案した(図2)。制振原理そのものは、すでに前述の関連研究例が存在する。ただし、LOAを電流制御することで、ハイブリッドダンパの減衰性能を可変にした点が異なる。LOAの運動を能動制御することになるため、当初の研究課題であった遠心力を活用した受動動作とは異なるものの、これまでのLOAおよび磁気ダンパの知見から得られた独創的なアイデアである。MATLAB/Simulinkによる数値計算より、図3に示すような振動減衰効果が発揮されることがわかった。さらに、大きなトルクリップルが問題となっているSRモータを本ダンパの適用対象とし、トルクリップルの低減効果を確認したところ、図4に示すようにリップルの基本波を約50%低減することに成功した。LOAの振動波形を非正弦波(のこぎり波)とすることでさらなるリップル低減が見込めることが明らかになった。

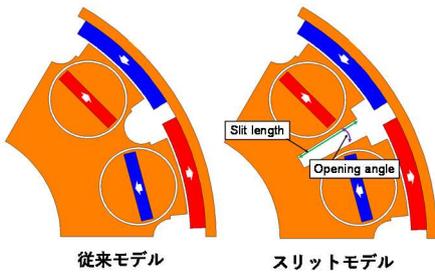


図1 スリット付きモデル

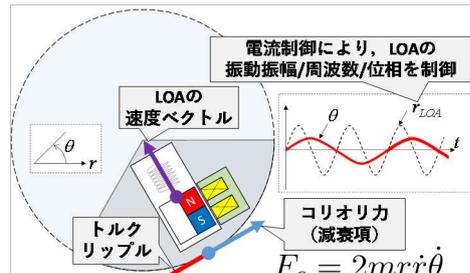


図2 リニア振動アクチュエータを利用したハイブリッドダンパ

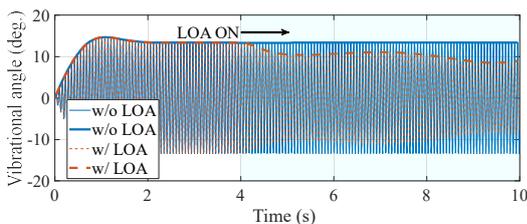


図3 ハイブリッドダンパの振動抑制効果

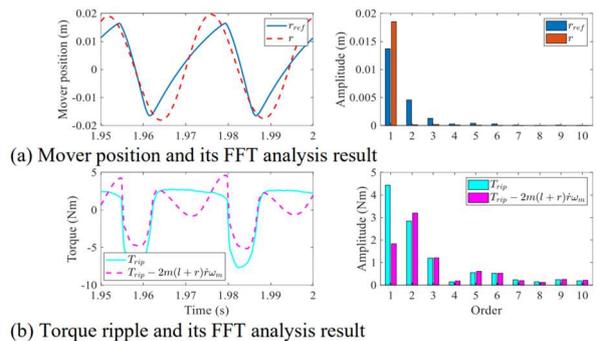


図4 SRモータを対象としたときのハイブリッドダンパの効果

#### 4. 今後の研究の見通し

##### ① 可変剛性ダイナミックダンパの実機検証に関する見通し

提案ダンパはインナーロータ、アウターロータの2つの回転体に加え、遠心力を自転磁石の自転運動に変換するためのラックピニオン機構を備える必要があり、機械設計が困難を極めた。そこで、対象を単純化した。具体的には、ラックピニオン機構を一旦除外し位置決めピンとギアを組み合わせ、特定の角度に自転磁石を保持するような改良構造を考案した(図5参照)。ピンを挿入できる箇所を複数設け、自転磁石の角度を 0deg,45deg,90deg と3段階で変化させられるようにした。ダンパ部の試作が完了したため、今後実験系を構築し磁気ばね特性を測定する予定である。

##### ② LOA を利用したハイブリッドダンパに関する見通し

数値シミュレーションにおいて提案するハイブリッドダンパの有効性が確認されたが、現段階ではまだ数学モデルにすぎない。今後は、得られた結果から LOA の要求仕様(最大推力・最大ストローク)を決定し、具体的な LOA の磁気回路設計を進めていく予定である。報告者は過去に LOA の設計経験があり、構造提案だけでなく、コンピュータ援用による最適化計算等も円滑に遂行できると予想している。

##### ③ トポロジー最適化による新規構造の大域的探索

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。遺伝的アルゴリズムに基づくトポロジー最適化による磁気ばねの進化計算を現在コーディング中であり、そのプログラムの動作が妥当であることをすでに確認済みである。当面の目標としては、可変剛性ではなく一定剛性の磁気ばねを想定し、そのばね定数を最大化させるような進化的計算を実行する予定である。

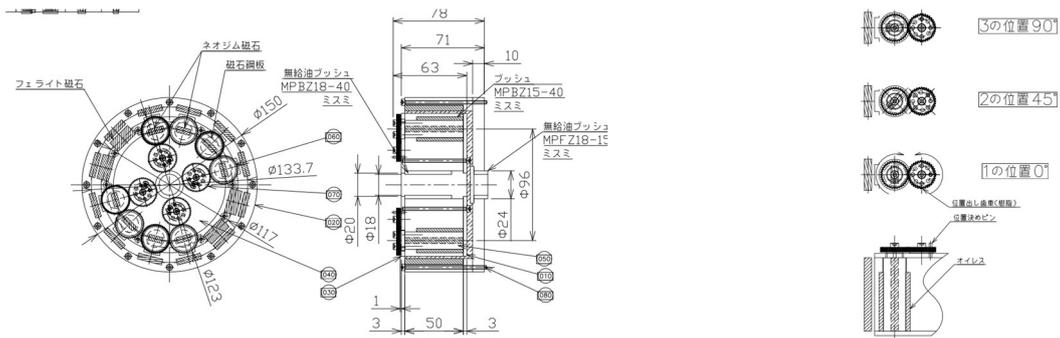


図5 試作に向けた改良構造

#### 5. 助成研究による主な発表論文、著書名

##### 学術論文

1. 加藤雅之, 内藤智子, 北山文矢, “リニア振動アクチュエータを利用した回転振動抑制法の基礎検討”, 日本 AEM 学会誌, Vol. 29, No. 2, pp. 309-314, 2021.06
2. M. Kato, and F. Kitayama, “Reduction of Rotational Vibration Using Coriolis Force Generated by Electromagnetic Oscillatory Actuator Moving in Radial Direction”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. \*, No. \*, pp.--, Early Access 版で発行済み

##### 国際会議 (査読付)

1. M. Kato, and F. Kitayama, “Reduction of Rotational Vibration Using Coriolis Force Generated by Electromagnetic Oscillatory Actuator Moving in Radial Direction”, Proceedings of INTERMAG2021, Lyon, France, BD-06, p. 217, 2021.04.

##### 国内会議 (査読無)

1. 下野晃大, 加藤雅之, “遠心力により磁石が自転する可変剛性ダイナミックダンパを用いた自動車駆動系のねじり振動低減”, 電気学会東京支部茨城支所研究発表会 (オンライン), IBK-20-204, 2021.02
2. 長沼大樹, 加藤雅之, “交流モータのトルクリップル低減を目的とした半径方向に可動するリニア振動アクチュエータの特性解析”, 電気学会東京支部茨城支所研究発表会 (オンライン), IBK-21-050, 2021.12