

## 2021 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)<br>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、アイドリング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 可変磁気ばね剛性ダイナミックダンパの設計に指向したトポロジー最適化手法の提案

トポロジー最適化は設計者の予想を超える解が得られることから、モータ等に適用されてきている。既存の最適化手法を本対象に適用した場合、材料使用量を固定することができず、磁路が可動するという要件を満たすことができない。そこで本研究では、磁路の可動を厳密に考慮可能な新しいトポロジー最適化手法を提案した。概略を図 1 に示す。材料分布をビット列としてエンコーディングすると同時に、順序配列としてもエンコーディングする。材料の順序を最適化することによって、結果的に設計領域の材料使用量が厳密に保存される。トポロジー最適化の計算結果は割愛するが、最適化結果から図 2 に示すような可変磁路構造が想起された。図 2 では、I 字状の鉄心が可動し、徐々に X 字状へと遷移することで磁力を変化させている。磁界解析の結果、可変磁気ばね剛性の性質を示すことを明らかにした。

#### ② コリオリ力型ダイナミックダンパによるねじり振動抑制試験

回転座標上で半径方向に振動するアクチュエータが発生させるコリオリ力を利用したダイナミックダンパをこれまで提案してきた。本研究では、コリオリ力の原理検証を目的として、ソレノイドアクチュエータを振り子とみなし、プランジャ(可動子)の半径方向振動によって周方向の回転振動を抑制する簡易試験機を製作した。装置の全体を図 3 に示す。コリオリ力の効果が発揮されやすいよう、ロングストロークのソレノイドを選定している。プランジャとばねからなるマスばねダンパ系の固有振動数が振り子の固有振動数の 2 倍となるよう、錘を取り付けプランジャ質量を調整している。振り子運動に同期してソレノイドを往復運動させるために、加速度センサ信号をマイコン(Arduino Uno)にフィードバックし、ゼロクロス検出処理を施した。測定結果を図 4 に示す。錘を取り付けることで、同調が達成され、コリオリ力により回転振動が抑制されていることがわかる。さらに、ソレノイドを位置制御することでより大きなコリオリ力が発生し、回転振動をさらに抑制できることが明らかになった。

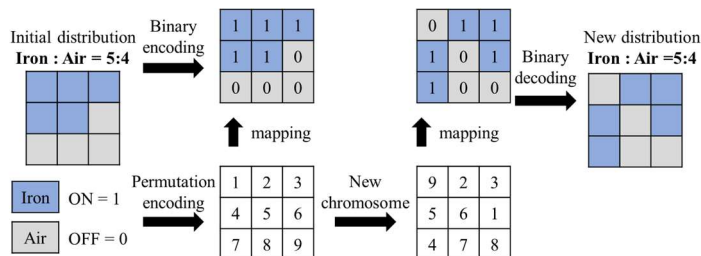


図 1 材料使用量が保存されるトポロジー最適化手法



図 2 トポロジー最適化手法から想起される可変磁気ばね剛性



図 3 ソレノイドアクチュエータを用いたばね振り子型の簡易試験機

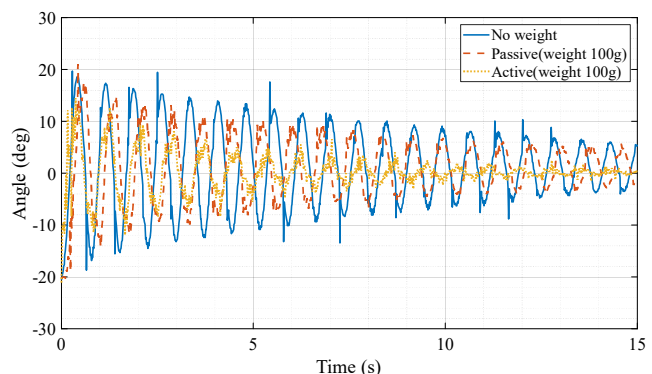


図 4 ねじり振動抑制の測定結果

#### 4. 今後の研究の見通し

---

前述の研究成果に対応する今後の見通しは以下のとおりである。

##### ① 製造可能な解を得るためのトポロジー最適化コードの改良と可変磁束モータへの応用

我々が開発した材料使用量が厳密に保存されるトポロジー最適化手法は ON/OFF 法をベースとしているため、多様な解が得られる反面、最適化計算により得られる形状が連続的であるとは保証されていない。図 2 に示した形状はトポロジー最適化計算の結果をもとに設計者が想起したものであって、実際に得られている結果では、鉄心小片が設計領域内に分散しているような形状となってしまう。このような形状は実際には製造が困難である。このような不連続性を回避するために、Nonlinear Gaussian Network (NGnet) が提案されている。現在、我々が独自に作成したトポロジー最適化コードに、NGnet による処理を追加しているところである。単純に既存の NGnet を流用しただけでは材料使用量が保存されないため、この課題を解決する手法を考案しプログラムに実装中である。

本研究では、可変磁気ばね剛性のダイナミックダンパを対象としてきたが、磁束量の増減を利用したいより一般的な用途は、可変磁束モータである。例えば電気自動車では高速走行と市街地走行では全く異なるトルク・回転数で運転される。両状態で同時に高効率に運転できるようなモータとして注目を集めているのが、可変磁束モータである。我々のトポロジー最適化プログラムを改良すれば、可変磁束モータの設計にも応用できる見込みが立っており、現在基礎検討を進めている。

##### ② 定常回転時のトルクリップル抑制を検証するための測定装置

前述のねじり振動抑制試験は、回転体の一定回転(定常回転)を考慮せず、振り子による往復運動のみを仮定している。交流モータのトルクリップル抑制等への応答を考えたとき、一定回転も考慮したより詳細な試験機が必要である。現在、測定装置の設計・製作を進めている。一定回転させつつトルクリップルを模擬するために、DC ギアードモータに DC+AC 電流を印加することを想定している。回転体状にアクチュエータを取り付けることになるが、アクチュエータへの電力信号およびアクチュエータからの位置センサ信号をやり取りするために、スリップリングと呼ばれる特殊な器具を用いることで対処する。測定装置の製作と同時に、今後アクチュエータの製作も進め、最終的にはトルクリップルが抑制できることを実験的に示す予定である。

#### 5. 助成研究による主な発表論文、著書名

---

##### 学術論文

1. 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. 58, No. 2, 2022.02

##### 国際会議

1. M. Kato, and K. Shimaguchi, “Topology Optimization of Electromagnetic Devices with Movable Magnetic Path under Fixed Amount of Materials”, Proceedings of CEFC2022, Online, O13-3, 2022.10

##### 国内会議

1. 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

2. 島口晃輔, 加藤雅之, “材料比率を固定したトポロジー最適化による可変特性磁気回路の探索”, 第 34 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 11B2-1, 2022.05

3. 長沼大樹, 加藤雅之, “半径方向に振動するソレノイドアクチュエータを用いた簡易試験装置によるトルク脈動低減技術の実験的検証”, 電気学会東京支部茨城支所研究発表会, IBK-22-050, 2022.12