

# 剛性特性と減衰特性の独立制御を可能とする機械振動制御アクチュエータの開発

## On the development of stiffness and damping tunable vibration absorber for the mechanical systems

富山県立大学 工学部 講師 寺島 修

Department of Mechanical System Engineering, Toyama Prefectural University, Osamu Terashima

### 要旨

軽量・安価・低消費電力の振動制御デバイスの開発を目的に、磁気応答性エラストマ(MRE)を用いた振動制御デバイスを製作した。デバイスは動吸振器の原理を利用し、可動マスを支える部分を MRE とし、デバイスに設けたコイルに電流を印加することで MRE に与える磁場を変化させ MRE の剛性を変え、可動マスの固有振動数を可変とした。また、磁場印加用のコイルを可動マスとすることで、可動マスとコイルを別々に設ける場合に比べてデバイス全体の重量を軽量化した。加えて、コイルを可動マスとすることで、振動の大きさが大きくなっても MRE へ印加される磁場が常に同一の閉ループを形成することができるため、コイルに印加する電流を抑制することができ、デバイスの低消費電力化を実現した。さらに、MRE の成分配合と硬化方法を適切に変更することで所望の減衰特性を得ることができた。最後にこのデバイスを用いて制振実験を行った結果、有効な制振効果を得た。

### 1. 緒言

機械製品の電動化・高速化・運転モードの多用化に伴い、従来に比べ発生する振動騒音の周波数が広帯域に渡るようになった。また、自動車産業における電気自動車や自動運転車の開発の加速・競争激化に伴い、自動車内騒音の静粛性や車体の軽量化要求が高まっており、従来に比べて高周波数で、なおかつ、広帯域に渡る周波数の振動騒音の制御が可能な技術が求められている。このため、これまで数多くの機械製品に適用され、振動騒音性能の向上に貢献した能動型の振動騒音制御技術<sup>1)</sup>が近年再び注目を浴びている。

このような背景を受け、近年の欧州では広帯域周波数の振動を低減するデバイスの研究が盛んに行われている。その一例として、Pan ら<sup>2)</sup>によるパイプラインで発生する広帯域の周波数の流体起因振動制御に関する研究があり、安価で実用的な振動問題の解決策の一つとなっている。また、電磁シャント回路を利用した時間追従型の振動低減装置の設計法に関する研究が Turco ら<sup>3)</sup>により行われており、薄肉円筒構造体に 6 つのシャント回路を利用した装置を備え付け、円筒内から円筒外への伝播音<sup>4)</sup>を低減する研究が行われている。その他にも Casagrande ら<sup>5)</sup>による周波数追従型 piezofilm 式の振動低減装置の理論研究が行われている。この研究は屋根に落ちる雨による振動低減を目的に行われており、5 つの piezofilm

ム式の振動低減装置を備え付け、シミュレーションでは 22 Hz から 1,000 Hz の広域の周波数で 5 から 15 dB の振動低減の結果が得られた。この他、近年注目されている PVDF を用いた能動型振動制御技術の研究も複数行われている<sup>6-8)</sup>。また、リニアアクチュエータを用いた能動型の振動低減デバイスの研究が Kobayashi ら<sup>9)</sup>により行われている。質量を強制的に加振するためにリニアアクチュエータが装置に組み込まれており、可動部と固定子と弾性支持を備えている。

このように、様々な広帯域振動制御技術が研究されている一方、これらの研究で扱っている装置の多くは、振動低減効果は高いが、重量、または、消費電力が大きく、装置で使用しているアクチュエータや特性可変材料も高価なものが多くという課題がある。

以上の背景から、本研究では安価、低消費電力、軽量の広帯域振動制御デバイスを開発する。デバイスのコスト低減は特性可変部への安価な材料の導入により実現し、消費電力の低減と軽量化はデバイスの構成と構造の工夫により実現する。

### 2. デバイスの設計と製作

図 1、図 2 に本研究で設計・製作したデバイス、表 1 にデバイスの各部品の仕様を示す。

このデバイスは動吸振器<sup>10-12)</sup>の原理を利用

しており、磁場を印加することで見かけ上の剛性の変化が可能となる磁気応答性エラストマ (Magneto-rheological Elastomer, MRE) でデバイスの中の可動マスの固有振動数を可変とし、さらに、MRE に磁場を印加するためのコイルを可動マスとした点に特徴がある。また、MRE を作成するときの成分配合、及び、MRE の硬化方法を変更することで減衰特性の制御を可能とした。デバイスや MRE の詳細は文献<sup>13)</sup>を参照されたい。

### 3. デバイスの性能検証

#### 3.1 磁場印加時の剛性(固有振動数)の変化

コイルへ電流を印加して磁場を発生させ、MRE に磁場を印加した際のデバイスの中のコイルの固有振動数 $f_0$ の変化を調べた。以下に詳細を示す。

デバイスの上部の同心円鉄リング部に加速度センサ (PCB 社製 352C22) を設置し、可動マスにハンマー (PCB 社製 08C03) でインパクト力を加えた際の自由振動波形を計測した。加速度センサの信号はデータロガー (Keyence 社製 NR-500) 及び加速度計測ユニット (Keyence 社製 NR-CA04) を用いて PC に取り込んだ。サンプリングレートは 100 kHz, サンプリング時間は 10 秒とした。直流電源装置には CUSTOM 社製 DC POWER SUPPLY 30V5A を使用し、コイルに印加する電流値は 1 A 刻みで 1, 2, 3, 4 A とした。

PC に取り込んだ自由振動波形の振動の周期から固有振動数を求めた。その結果、図 3 に示すように 0 A の無磁場の時の固有振動数 43 Hz に対し、4 A (10 W) 印加時は 233 Hz まで増加し 5 倍程度変化した。

#### 3.2 MRE の成分配合による減衰特性の変化

これまでの磁気応答性エラストマを用いた振動制御デバイス<sup>14, 15)</sup>では剛性を変化させた際にエラストマの減衰特性も同時に変化し、場合によっては所望の減衰特性とならず、ひいては所望の振動制御効果が得られない可能性も有していた。このような背景から、MRE 作成時の材料の配合量と硬化方法を変更し、所望の減衰特性を得ることを目指した。

図 4 に減衰特性を変更した結果の一例を示す。図 4 は前節に述べた方法と同様の方法でコイルに印加する電流を変化させた際の可動マ

スの減衰率の変化を表している。図 4 より、配合量と硬化方法を変更することで減衰率と印加電流の関係が変化しており、減衰特性の制御が可能であることが示された。

#### 3.3 平板の振動制御結果

デバイスによる制振効果を検証するため、図 5 に示すように厚さ 8 mm のアクリル平板上にデバイスを設置し、スピーカを用いて平板を音響加振した際の平板の振動加速度(以下、加速度と略記)の計測を行った。

図 6 にスピーカによる音響加振の周波数を 50 Hz から 160 Hz まで 10 Hz 刻みで変化させた際の加速度の計測結果を示す。横軸は音響加振の周波数、縦軸は加速度センサで計測した平板の加速度の大きさである。可動マスの重さが同一の動吸振器を設置した場合は共振周波数 $f_0$ に近い周波数の振動の低減は図れているものの、その他の周波数で振動が増大していることが分かる。一方、本研究で製作したデバイスを用いて、常に最適な電流を印加し、発生させる磁場の強さを最適にした場合、常にデバイスを設置しない時の振動に対して加速度が小さくなっており、いずれの振動数に対しても振動低減デバイスとして機能していることが分かる。

#### 3.4 自動車のトルクロッドの振動制御結果

本研究で提案したデバイスの実用可能性を探るべく、代表的な機械製品である自動車を対象とした制振実験を行った。

実験には直列 4 気筒エンジンを搭載した自動車を使用した。エンジン回転数情報から直列 4 気筒エンジンで課題となる 2 次のエンジン振動の周波数を求め、その周波数の振動を最も低減可能な $f_0$ となるようにデバイスのコイルに印加する電流を制御し、MRE の剛性を制御した。図 7 に実験の様子を示す。

図 8 にギアをニュートラルとし、エンジン回転数を 1,500 回転から 4,500 回転まで徐々に変化した場合のトルクロッドの上下方向の加速度を示す。図 8 より、常に最適な電流を印加することで、2,000 回転から 4,500 回転の広い範囲で振動の低減を達成できた。

### 4. 結言

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (a) MRE を用いた振動制御デバイスに関し、軽量化と磁場印加効率の向上による消費電力の低減を目的に、磁場印加用のコイルを可動マスとしたデバイスを設計製作した結果、コイルへの電流の印加量を制御することでデバイスの固有振動数を制御できることが明らかとなった。
- (b) MRE 作成時の材料の配合量と硬化方法を適切に変化させることで、剛性を変化させた際のデバイスの減衰特性の変化を制御できることが明らかとなった。
- (c) デバイスを用いて振動平板と自動車のトルクロッドを対象にその制振効果を確認した結果、常にデバイスのコイルに最適な電流を印加することで広帯域に渡り振動の低減が可能であることが明らかとなった。



Fig. 1 Perspective view of the device.

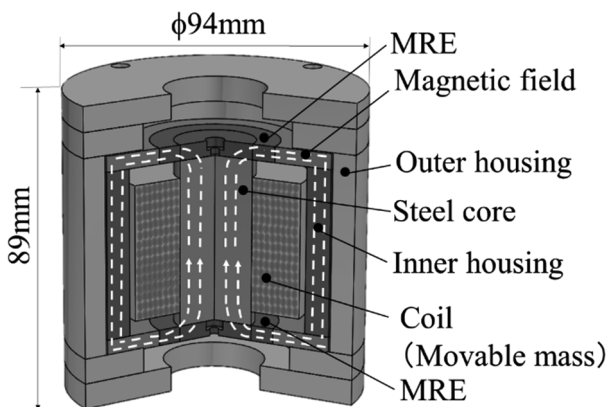


Fig. 2 Schematic view of the device.

Tab. 1 Specifications of the present device.

Component	Dimensions [mm]	Weight [kg] (Material)
Outer housing	$\phi 94 \times 63$	0.56 (Duralumin)
Inner housing	$\phi 78 \times 53$	1.06 (Steel)
MRE	$\phi 31.5 \times \phi 25.5 \times 5$	0.010 (Silicon rubber/Iron powder)
Steel core	$\phi 25.5 \times 51$	0.20 (Steel)
Coil	$\phi 25.5 \times \phi 58 \times 36$	0.50 ( $\phi 1.3$ mm-Copper wire)

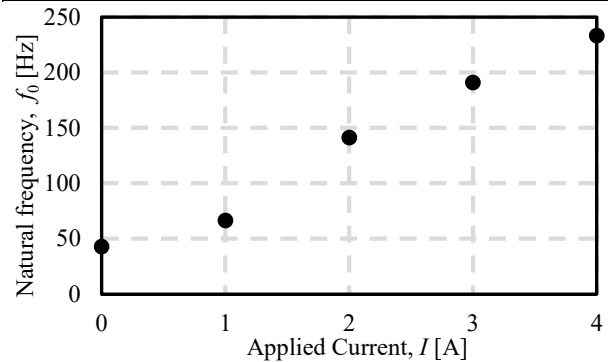


Fig. 3 Dependence of the natural frequency on the applied current.

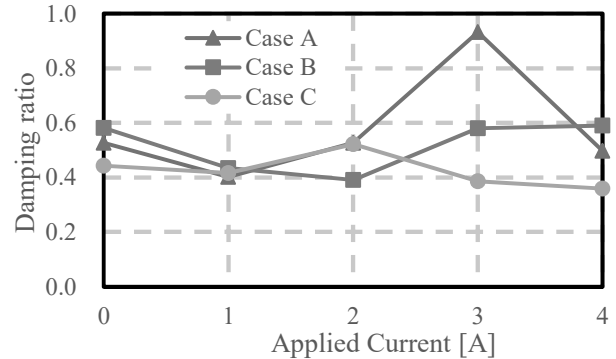


Fig. 4 Dependence of the damping ratio on the applied current.

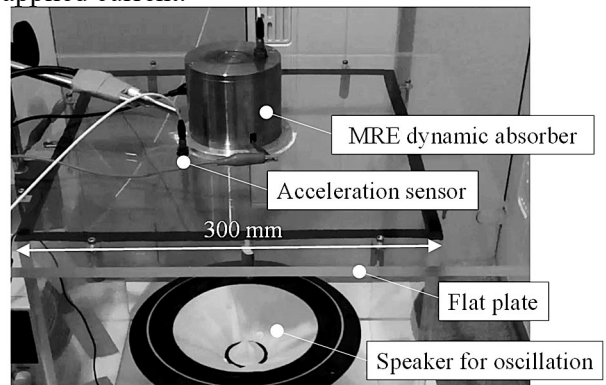


Fig. 5 Experimental setup for the vibration control of a thin plate.



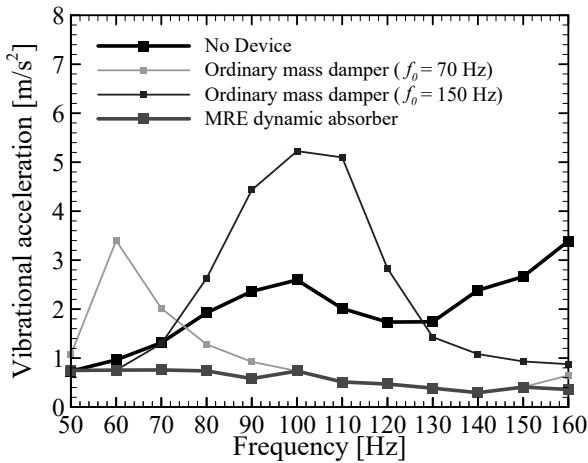


Fig. 6 Results of the vibration control of a flat plate.

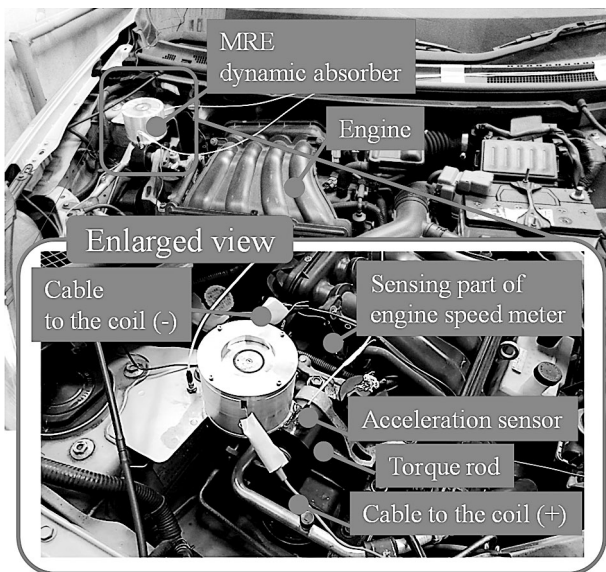


Fig. 7 Experimental setup for the vibration control of a torque rod.

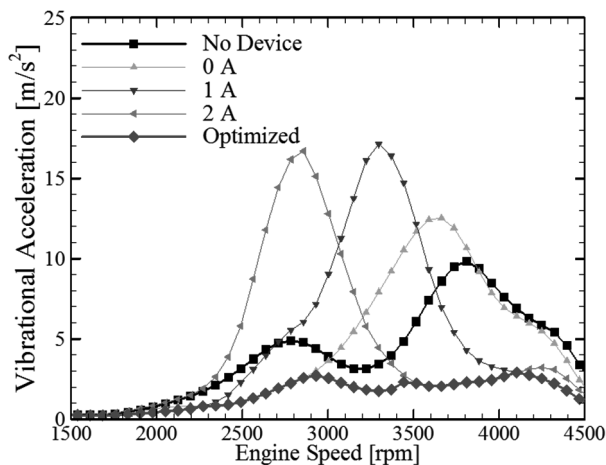


Fig. 8 Results of the vibration control of the torque rod.

## 謝辞

本研究の遂行に際し、公益財団法人京都技術科学センターより財政的な援助をえた。また、研究の遂行に際し、金沢大学の小松崎俊彦教授、富山県立大学の真田和明教授から有益な助言を得た。さらに、研究および実験の遂行に際し、中田好香氏に協力を仰いだ。ここに記して謝意を表す。

## 文献

- (1) C. Hansen, S. Snyder, X. Qiu, L. Brooks, and D. Moreau, *Active Control of Noise and Vibration* (2nd ed.), CRC Press (2012), pp. 1-13.
- (2) M. Pan, N. Johnston, and A. Plummer, Hybrid Fluid-borne Noise Control in Fluid-filled pipelines, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 744, No. 1 (2016), Paper No. 012016.
- (3) E. Turco and P. Gardonio, Sweeping shunted electro-magnetic tuneable vibration absorber: Design and implementation, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 407 (2017), pp. 82-105.
- (4) D. R. Thomas, P. A. Nelson, and S. J. Elliott, Active control of the transmission of sound through a thin cylindrical shell, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 167, No 1 (1993), pp.113-128.
- (5) P. Gardonio and D. Casagrande, Shunted piezoelectric patch vibration absorber on two-dimensional thin structures: Tuning considerations, *Journal of Sound and vibration*, Vol. 395 (2017), pp. 26-47.
- (6) I. Bruant and L. Proslie, Optimal location of piezoelectric actuators for active vibration control of thin axially functionally graded beams, *International Journal of Mechanical Material Design*, Vol. 12 (2016), pp. 173-192.
- (7) Z. Zaho, C. Shuai, Y. Gao, E. Rustighi, and Y. Xuan, An application review of dielectric electroactive polymer actuators in acoustics and vibration control, *Journal of Physics*, Vol. 744 (2016), Paper No. 012162.
- (8) O. Terashima, On the active vibration control of a flat plate with a self-made PVDF actuator, *Proceedings of 13th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics* (2018), Paper No. F09013.
- (9) Y. Kobayashi and T. Inoue, Active vibration control apparatus, *United States Patent*, Patent No. 8659245 (2014).
- (10) 岩田佳雄, 小松崎俊彦, 佐伯暢人, 機械振動学, 数理工学社 (2011).

- (11) 石田幸男, 井上剛志, 機械振動工学, 培風館 (2008).
- (12) 日本機械学会編, 振動学 (JSME テキストシリーズ), 日本機械学会 (2005).
- (13) 中田好香, 寺島修, 小松崎俊彦, 軽量化と低消費電力化を実現する磁気応答性材料を用いた能動型振動低減装置の開発, 日本機械学会 北陸信越学生会 第 48 回学生員卒業研究発表講演会講演論文集 (2019), 論文番号 0024, 全 2 頁.
- (14) T. Komatsuzaki, T. Inoue, and O. Terashima, Broad-band vibration control of a structure by using a magnetorheological elastomer-based tuned dynamic absorber, *Mechatronics*, Vol. 40 (2016), pp. 128-136.
- (15) O. Terashima and T. Inoue, Active vibration controller, *United States Patent*, Patent No. 10161467 (2018).