

平成 30 年 9 月 5 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03936

研究課題名(和文) 自己センシング機能を有する磁気粘弾性エラストマの開発と振動制御装置への適用

研究課題名(英文) Development of a magnetorheological elastomer with self-sensing property and its application to semi-active vibration control devices

研究代表者

小松崎 俊彦 (Komatsuzaki, Toshihiko)

金沢大学・機械工学系・教授

研究者番号：80293372

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、外部磁場の印加により見かけの粘弾性が変化する磁気粘弾性エラストマに、新しい機能として自己センシング能力を付与し、セミアクティブ型の制振装置に適用して、低コストかつ自己完結的な構造物の振動制御を実現することを目的した検討を行った。積層形成したMREを検討対象に、弾性率可変性についてはセンシング層の介在に関わらず所望の変化倍率を確保できることがわかった。一方、センシングに関しては、変位の大きさに比例した電気抵抗の変化が得られ、変位の正負方向の判別についてはMREに初期変形バイアスを与える仕組みを付加したところ、外乱信号に同期した周波数の電気抵抗変化を検出することができた。

研究成果の概要(英文)：Magnetorheological elastomer (MRE) is known to belong to a class of smart materials whose elastic properties can be varied by an externally applied magnetic field. In addition to the property of the field-dependent stiffness change of the MRE, the electrical resistance of the composite is also changed by the induced strain, thereby providing a new self-sensing feature. The objective of this study is to develop a multi-layered MRE isolator having self-sensing property. The electric resistance of a conductive elastomer can be changed by its deformation. While the MRE works as a stiffness-variable spring element in the system, the material also works as a sensor. By applying the magnetic field to the laminated MRE, the stiffness could be changed. Furthermore, it was found that the elastomer could produce the signal that corresponded to the frequency and magnitude of its own deformation.

研究分野：振動工学

キーワード：機械力学・制御 振動制御 制振 機能性材料 磁気粘弾性エラストマ センサ

1. 研究開始当初の背景

機器や構造物の制振対策は受動型、準能動型及び能動型の3通りに大別される。一般的に採用される受動型方式では、材料自身が有するエネルギー散逸効果を利用して振動を抑制する。装置構成が簡素であり、コスト面、信頼性において優れるが、特性固定のため多様な外乱に対して幅広く制振効果を得ることは難しい。受動型の対極的な方法として、アクチュエータの発生力を利用して強制的に振動を抑制する能動型があるが、制御性能の大幅な向上の反面、動力源確保やエネルギー消費の観点から装置の大型化、複雑化、コスト等が問題となる。さらに、これらの中間型として、本来受動的な要素のパラメータ(減衰係数など)を変化させることにより制振効果を高める準能動方式が知られている。受動型に由来する信頼性を確保しつつ、能動型に近い制御効果が得られ、かつ大きなエネルギー源が不要なため安価に構築できる。準能動型方式の実現には、機構的な手段以外に、外部情報に依存して物性が変化する機能性材料を用いる方法がある。制振分野では特に、外部磁場に応答して見かけの粘性が変化する磁気粘性流体(MR流体)を用いた減衰力可変型ダンパ等の開発が実用化の事例も含め顕著に見られる。応答性が良好で特性変化幅が大きい利点を有するが、シール性の確保という流体特有の問題に加え、分散粒子の沈降や凝集等が依然問題となっており、ダンパのように常時流体が攪拌される応用例以外は磁性粒子の分散安定性の確保を待つ状況にある。

申請者はこれまでにMR流体の粒子沈殿の問題解決に着想を得て、エラストマ内に磁性粒子を分散固定し、外部磁場による分散粒子の磁氣的結合力の变化を利用して見かけの粘弾性、特に弾性率を可変にする新たな機能性材料として磁気粘弾性エラストマを提案した。磁気粘弾性エラストマの特長として、(1)外部磁場で瞬時に剛性が変化、(2)受動的要素に由来する信頼性、(3)任意形状に成形可能などが挙げられる。磁場による弾性率の変化幅は無磁場時に対して最大で6倍程度まで確保できることを明らかにした。この特性を利用して、共振周波数を回避するようにMREの剛性を制御することで、幅広い振動数領域で高い防振性能を発揮することが出来ると考えられる。そこで、構造物の防振マウントに本エラストマを適用し、準能動型可変剛性制御則を組み合わせた振動絶縁性の評価では、特性固定の受動型絶縁材料を上回る振動低減効果が得られることを確認した。さらに関連研究課題として、動吸振器のばね要素に磁気粘弾性エラストマを適用し、動吸振器自身の固有振動数を外乱振動数に同調させることにより、最も制振効果の高い状態を追従維持する同調型動吸振器の開発を行った。非定常外乱に対しても、周波数変化に追従して主系構造物の振動を効果的に抑制できること

を確認した。

磁気粘弾性エラストマの研究は海外でも実施されており、例えば弾性率変化特性の向上を目指した研究や数値モデル化の検討等、基礎研究に関するものが見られるが、材料作製方法や評価法、予測式等に関する提案は現在も続いている。一方の応用研究については、理論上の提案はあるが、実際の材料を実機に適用して効果を示した事例は依然として少ない状況にある。申請者はこれまでの実績をもとに、当該材料の認知度を高める活動の一環として、学会講演会、展示会等にて積極的に発表を行ってきた。その結果、産業界からも徐々に関心が寄せられ、申請者らの研究グループと、ゴム応用製品メーカーや自動車メーカー等との連携が進みつつある。さらに、磁気粘弾性エラストマの実用製品への応用を目指した取り組みも独自に進めている。

以上のように、磁気粘弾性エラストマの基礎的検証段階はほぼ完了し、産業界の要望を受けながら実用レベルの応用展開を進めつつある現状の課題として、(1)さらなる弾性率変化特性の向上、(2)材料の歪みを自ら検出するセンサ機能の付与と弾性率可変性の両立、の2点に着目している。(1)は過去の取り組みの延長線上にある。また(2)については、セミアクティブ制振を行う際、制振対象の変位等物理量の測定が必須であるため、対象物の動的挙動の検知に外部センサを設置する必要があるが、設置にあたっての構造の複雑化やコスト面での負担等の問題のため、可能ならば外部センサの使用を省略したい実用上のニーズに応えるものである。そこで、導電性を有するMRE内の磁性粒子の含有率を高めることで、複合体に導電性を付与できる可能性に着目した。その際、MREの電気抵抗は変形量に依存して変化する。この特性を利用しMREにセンシング機能を付加させることで、一つの材料で防振とセンシングを両立させることができ、コスト低下や構造の簡易化が期待できる。さらに、従来知られている機能性材料では単一の機能に着目した利用方法を考える研究がほとんどであるが、本課題のように複数の機能を同時に実現する試み(多機能性材料の実現)は学術的にも意義があると考えた。

2. 研究の目的

本研究課題では、弾性率可変材料としての磁気粘弾性エラストマに新しい機能として自己センシング能力を付与し、弾性率の可変性を利用した構造物の準能動型振動制御を低コスト・自己完結的に実現する手法の開発を目的とする。

具体的には、まず、電気抵抗変化を生じるための粒子配向技術の検討を行った。導電性を有する磁性粒子を適切に配向・接近させることで複合体の歪みに応じた電気抵抗可変性が生じる。歪みに対する抵抗変化の直線性、再現性確保を目指す取り組みを行った。成型

過程での磁場印加による粒子配向は弾性率可変域の拡大に寄与することが過去の検討でわかっており、準能動型要素としての剛性可変性とセンシング機能の両立を図る。ただし、基質エラストマに高い割合で磁性粒子を充填すると、基礎剛性が著しく大きくなる問題が生じることが検討過程で明らかとなったことから、導電性 MRE に代わり既製の導電性シリコンシートをセンシング層として利用し、主として剛性可変性を持たせたシート状の MRE 層と積層することでの機能の両立を検討した。導電性エラストマの電気特性を調査し、次に積層状態にある導電性エラストマから振動波形を出力しセンシング性能を評価した。

続いて、上記センシング機能を有する MRE の応用として、自己センシング機能付き振動制御デバイスの開発を試みた。代表的な制振装置として防振マウント、同調型動吸振器のばね要素に自己センシング機能を付加し、外部センサを用いずに低コストかつ自己完結的に構造物の振動を制御可能な装置を開発し、その防振性能を評価した。

3. 研究の方法

(1) 導電性エラストマを用いたセンサ原理

導電性エラストマとは、シリコンゴム中に導電性粒子(グラファイト粒子等)が分散された特殊なゴム材料である。外部振動によって導電性エラストマがせん断方向に変形する場合、エラストマ内の導電性粒子の距離が離れることで、接触する粒子数が減少し、エラストマ全体の電気抵抗は大きくなる(図 1)。従って変形量に伴い電気抵抗が変化する特性を利用して、外部振動の波形を出力し、振動数を検出が可能となると考えられる。

(2) 導電性エラストマの電気的インピーダンス特性試験

導電性エラストマを剪断変形させ、変形量に対するインピーダンスの大きさ、位相差等の電気特性を調査した。図 2 のように単軸圧縮試験機に治具を設置し、導電性エラストマを剪断変形させた。この際、エラストマを最大 1.0mm まで、0.2mm 間隔で剪断変形させた。インピーダンスの大きさ、位相差はインピーダンスアナライザで測定した。測定対象の交流周波数は 10 ~ 10000Hz である。

評価する導電性エラストマはシリコンゴムにグラファイト粒子が分散されているサンプルを利用する。硬度(ショア A 値)は 20 で、サイズは一辺が 20mm の正方形型、厚さは 3mm である。このサンプルを治具に設置し剪断変形させて測定を行った。

(3) 導電性エラストマの電気信号出力試験

導電性エラストマから電圧信号を出力するための回路設計として、図 3 に示す抵抗分圧回路を用いる。ここで、導電性エラストマ、既知の電気抵抗を R_{sensor} 、 R_M 、印加電圧を V_{in}

とすると、オームの法則より出力電圧 V_{out} は次式で表される。

$$V_{out} = \frac{R_M V_{in}}{(R_{sensor} + R_M)} \quad (1)$$

外部からの力学的負荷に応じて導電性エラストマに生じる歪みと、電気抵抗特性の変化に応じて抵抗分圧回路から出力される電圧との関係を測定することにより、振動波形を電圧信号として出力する試験を行った。図 4 に示すように、防振マウント MRE 装着部に導電性エラストマを換装した。10 ~ 50Hz まで 10Hz 刻みで水平方向に正弦波加振を行い、それぞれの条件下でエラストマから出力される電圧の時間波形を測定した。また、マウント基礎部と制振対象に加速度ピックアップを取り付け、加速度波形を出力することで、基礎部振動の波形との比較を行った。

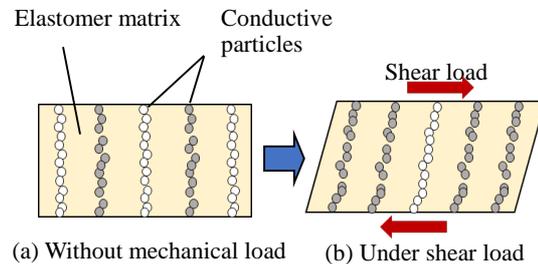


Fig.1 Model of particle contact

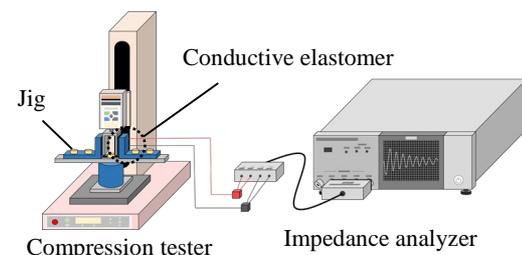


Fig.2 Static electrical characteristic test system (for shear deformation)

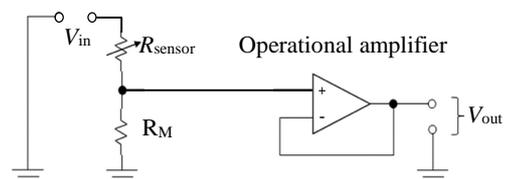


Fig.3 Voltage divider circuit for use with conductive elastomer sensor

(4) 作製した積層 MRE マウントの性能評価

防振試験装置の概略を図 5 に示す。装置は、積層 MRE、コイル、磁性体部材、非磁性体部材の 4 部材から構成されている。コイルから発生する磁場が磁性体内で閉ループを形成し、磁気回路内の MRE に磁場が供給されることで見かけの剛性が変化する仕組みである。装置に利用する積層 MRE は一辺が 20mm、厚さ 1mm の正方形型 MRE シート 9 枚と、同形状で厚さ 0.5mm の磁性体薄板 8 枚とが、交互に積層された構造となっている。

続いて防振試験装置の上部に 2.5kg の質量を載せ、電磁加振機で基礎部に 0~100Hz のランダム加振を水平方向に与えた。この際、装置の基礎部及び質量に取り付けた加速度ピックアップから、両者間の伝達関数を周波数応答として FFT アナライザにて計測した。また、コイルに 3A の電流を加え MRE に磁場を印加することで MRE の剛性を高めた場合と無磁場時の 2 つの条件でそれぞれ応答曲線を導出し、周波数応答特性の変化や共振点の変化幅を調査した。

4. 研究成果

(1) 導電性エラストマの電気的インピーダンス測定結果

MRE サンプルのインピーダンス特性測定結果を図 6 に示す。図 6(a) は交流周波数を 10, 100, 1000, 10000Hz に設定した際の変形量とインピーダンスの大きさの関係を、図 6(b) は交流周波数を変化させた際の各変形量における位相差を表す。図 6(a) より、変形量の増加に伴い、インピーダンスの大きさは指数関数的に増大する傾向となった。この特性より導電性エラストマに電流を流し、振動による変形量を電気信号として出力することで振動数を測定することが可能であると考えられる。また、図 6(b) より、交流周波数の増加に伴い、位相差の絶対値は増大していることがわかる。このことから、導電性エラストマをセンシングに利用する場合、振動時のインピーダンス変化に対する追従性を考慮すると、位相差の小さい 100Hz 以下の低周波数領域での測定が望ましいと考えられる。

(2) 電気信号出力試験結果

測定結果の一例として、加振振動数を 30Hz に設定して水平加振した際の、基礎部から検出される加速度波形及びエラストマから出力された電圧波形を図 7 に示す。図より導電性エラストマの電圧波形は元の振動数に対して 2 倍となった。これは、エラストマの電気抵抗値は変形量の絶対値に応じて増減することから、変位が負方向であっても電圧は正の信号を示すためと考えられる。さらに、出力電圧波形のゲインは制振対象の振幅に比例して増減していることが分かった。この結果、加振信号の 2 倍の振動数で良好に出力されている波形を元に基礎部の振動数や対象物の振幅を推定することが可能である。

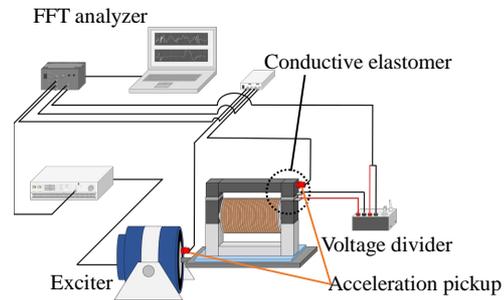


Fig.4 Electrical signal output test of conductive elastomer

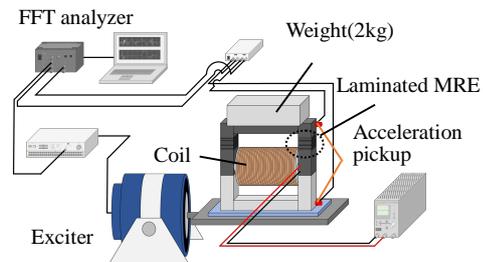


Fig.5 Schematic of transmissibility measurement setup

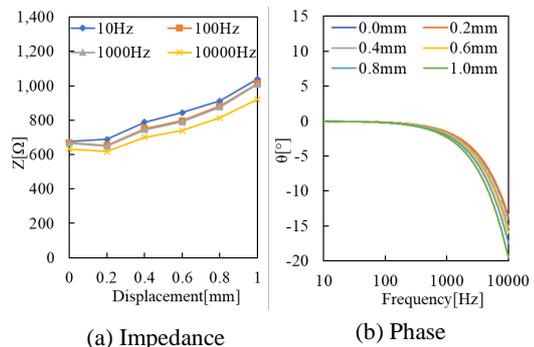


Fig.6 Measurement results of static electrical characteristics

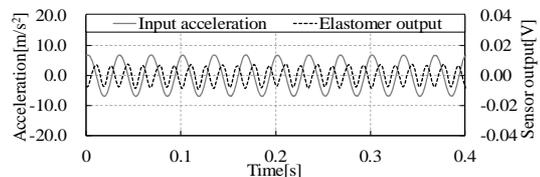


Fig.7 Comparison of the time history (30Hz sinusoidal excitation)

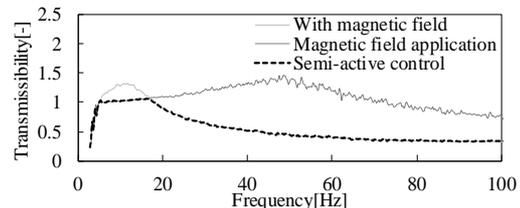


Fig.8 Frequency response of isolator system using laminated MRE

(3) 積層 MRE マウントの性能評価結果

無磁場時、磁場印加時における周波数応答を図 8 に示す。無磁場時、磁場印加時の共振周波数はそれぞれ約 12Hz, 49Hz であり、剛性を切り替えることで、共振点を約 37Hz ずらすことができた。さらに、図 8 の破線に示すように共振点を避けるような MRE の剛性切替制御を行うと仮定した場合、無磁場時の応答に対し伝達率のピークを約 19% 抑えることが可能である。従って、防振マウントに積層 MRE を適用し、共振を回避するように MRE の剛性制御を行うことで、幅広い周波数領域で低い伝達率を維持することが可能であると考えられる。

(4) 検討結果まとめ

導電性エラストマをセンサに利用する場合、加振信号の 2 倍の振動数で良好に電圧波形が検出できる。従って、その波形を元に振動数や振幅を評価することが出来る。また、本報告書には記載を省略したが、エラストマに予歪みを加えて電気抵抗値の中立点をソフトさせ、抵抗値を増減方向に変化させることで、外乱振動数と 1 対 1 に同期した振動数の検出が可能であることがわかった。

当該 MRE の応用に関しては、積層構成した MRE を防振マウントに適用し、その剛性切り替えを行うことで、振動系の共振点を大きく変化させることが出来た。可変剛性制御を行うことで、幅広い周波数帯で防振性能を維持することが出来る。

以上の結果より、積層 MRE に導電性エラストマを介在させることで、基礎剛性を低く保ち磁場印加時の剛性変化幅を大きく確保しながら、自己センシング機能を有する MRE マウントの開発が可能であると考えられる。単一材料として両機能を同時実現するには解決すべき課題が残されたが、引き続き取り組んでいきたいと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

Xuan Bao Nguyen, Toshihiko Komatsuzaki, Yoshio Iwata, Haruhiko Asanuma, Modeling and semi-active fuzzy control of magnetorheological elastomer-based isolator for seismic response reduction, Mechanical Systems and Signal Processing 101, 449–466 (2018).

Xuan Bao Nguyen, Toshihiko Komatsuzaki, Yoshio Iwata, Haruhiko Asanuma, Fuzzy Semiactive Vibration Control of Structures Using Magnetorheological Elastomer, Shock and Vibration, Vol. 2017, Article ID 3651057 (2017).

Toshihiko Komatsuzaki, Toshio Inoue, Yoshio Iwata, Experimental Investigation of an Adaptively Tuned Dynamic Absorber Incorporating Magnetorheological Elastomer with Self-sensing Property, Experimental Mechanics, Vol. 56, Issue 5, pp 871–880 (2016).

〔学会発表〕(計 7 件)

Toshihiko Komatsuzaki, Nguyen Xuan Bao, Keiya Nimura, Toshio Inoue, Semi-active control of a system with rotating unbalance using magnetorheological elastomer-based isolator, The 17th Asian Pacific Vibration Conference (APVC2017), 2017 年 11 月 13 日～2017 年 11 月 15 日, Grand Metropark Hotel (中国南京市)

岩佐尚記, 小松崎俊彦, 岩田佳雄, 浅沼春彦, 積層型 MRE を用いた防振装置の開発, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2017, 2017 年 8 月 29 日～2017 年 9 月 1 日, 愛知大学(愛知県豊橋市) Nguyen Xuan Bao, Toshihiko Komatsuzaki, Yoshio Iwata, Haruhiko Asanuma, Fuzzy semi-active control of multi-degree-of-freedom structure using magnetorheological elastomers, ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference (PVP2017), 2017 年 7 月 16 日～2017 年 7 月 20 日, Waikoloa(米国ハワイ州)

岩佐尚記, 小松崎俊彦, 岩田佳雄, 浅沼春彦, 自己センシング機能を有する積層型 MRE マウントの開発, 日本機械学会北陸信越支部第 54 期総会・講演会, 2017 年 3 月 9 日, 金沢大学(石川県金沢市)

岩佐尚記, 小松崎俊彦, 岩田佳雄, 浅沼春彦, 磁気粘弾性エラストマのセンサ応用に関する検討, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2016, 2016 年 8 月 23 日～2016 年 8 月 26 日, 山口大学(山口県宇部市)

Toshihiko Komatsuzaki, A broadband frequency-tunable dynamic absorber for the vibration control of structures, The 13th International Conference on Motion and Vibration Control (MOVIC & RASD 2016), 2016 年 7 月 3 日～2016 年 7 月 6 日, University of Southampton (英国サウサンプトン)

川北恭史, 小松崎俊彦, 井上敏郎, センシング機能を有する磁気粘弾性エラストマを用いた同調型動吸振器の開発, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2015, 2015 年 8 月 25 日～2015 年 8 月 28 日, 弘前大学(青森県弘前市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小松崎 俊彦 (KOMATSUZAKI, Toshihiko)
金沢大学・機械工学系・教授
研究者番号: 80293372

(2) 研究分担者

森下 信 (MORISHITA, Shin)
横浜国立大学・環境情報研究科・教授
研究者番号: 80166404