

令和 2 年 9 月 8 日現在

機関番号：13301

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2018～2019

課題番号：17KK0131

研究課題名（和文）自己センシング可能な磁気粘弾性エラストマを用いたセミアクティブ防振ブッシュ開発

研究課題名（英文）Development of a semiactive vibration isolator bushings using magnetorheological elastomers with self-sensing property

研究代表者

小松崎 俊彦（Komatsuzaki, Toshihiko）

金沢大学・フロンティア工学系・教授

研究者番号：80293372

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 6,300,000円

渡航期間： 6ヶ月

研究成果の概要（和文）：本課題では、積層型磁気粘弾性エラストマを防振ブッシュに適用して、セミアクティブ振動制御への応用を目的とした検討を行った。製作した防振ブッシュを用いて振動系を構成し、積層数や磁場強度に対する物性評価を行った。また、制御に際して検出信号にノイズが含まれる場合に、必要な信号成分を抽出するアルゴリズムの検討を行った。さらに、MRE物性の非線形性を再現可能な数値モデルを考案し、ひずみの大きさや周波数、磁束密度等のパラメータに対して、精度良く物性変化を予測するモデルを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁気粘弾性エラストマは、準能動的な制御手段、具体的には動吸振器や防振マウント、構造要素への適用等、振動・騒音制御への応用が検討されている。これら以外にも、特性変化幅の向上を目指した基礎物性に関する研究や、磁場に対する粘弾性変化の理論予測に関する検討などがあるが、実用上のニーズに対して解決すべき課題は多い。特性の優れた材料の開発が望まれるが、構造上の工夫により、材料の特質を失うことなく必要な機械特性の確保や、効率的な磁場印加方法、剛性の可変性を最大限活用するための制御アルゴリズム考案等により、機械構造の性能を高めることは十分に可能であり、本検討で得られた知見はその手段として有効と考えている。

研究成果の概要（英文）：Magnetorheological elastomers (MRE) are emerging as smart materials for application in the field of the intelligent devices and structures. In this study, application of a laminated-type MRE to bushings used to isolate vibration transmission in structures was investigated. Viscoelastic property of the laminated MRE bushing was evaluated through tests and calculations. In addition, a nonlinear MRE model consisting of three parts; a fractional viscoelasticity model, magnetic dipole model, and an adaptive smooth Coulomb friction model; was developed in order to mathematically represent the dynamic behavior of MRE with respect to excitation frequency, amplitude, and the applied magnetic field. Furthermore, a frequency estimation method based on an adaptive line enhancer algorithm was developed, which was used to generate appropriate control signal for semi-actively changing the MRE property.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：磁気粘弾性エラストマ 振動制御 防振 機能性材料 磁気応答性材料

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

基課題としての先行研究においては、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 (Magneto-rheological elastomer, 以下、MRE) に、新しい機能としての自己センシング能力を付与し、セミアクティブ防振マウント、同調型動吸振器に自己センシング機能を持たせ、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とした検討を行った。その基礎的な取り組みとして、弾性率可変性と電気抵抗可変性を両立させるための MRE 生成方法について検討した。また、MRE に生じる電気抵抗変化を電気信号の変化として取り出す仕組みを確立した。

電気抵抗可変性を実現するためのエラストマ生成方法については、2つの視点で検討した。まずは、液状エラストマ原料と磁性粒子との混合物に、局所的な収束磁場を加えながら硬化させるパターンニング成形について検討し、硬化後サンプルの電気抵抗変化幅が改善されることが認められた。次に、導電性に優れたグラファイト粒子を磁性粒子とともに混合する場合の複合体の電気抵抗特性を評価し、再現よく導通性を確保できる材料組成を見出した。ただし、異種の無機材料を混合しエラストマを硬化させる方法では、複合体の基礎剛性を必要以上に高め、MRE の可変剛性幅が犠牲になる問題は回避できないことが明らかとなった。この問題の解決手段の一つとして、可変剛性を受け持つ層と、センシングを受け持つ層をそれぞれ別々に成形し、積層化する方法を考案した。一方、当該 MRE の電気抵抗変化を電気信号に変換する方法については、抵抗分圧回路に着目した。可変抵抗要素としての MRE を回路に接続し、固定抵抗値と電源電圧値を適切に設定することで、基本的な回路ながらセンサ信号を取り出す仕組みに十分活用できることがわかった。

以上の基礎的検討を経て、MRE の弾性率可変性と電気抵抗可変性をともに活用した制振装置への応用について検討を進めるに至った。

2. 研究の目的

基課題では、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、自己センシング能力を付与するための検討を行い、2つの特性が両立する MRE を生成する手段として、機能別に成形されたエラストマの積層化に着目した。積層化により、圧縮方向の耐荷重性が向上し静荷重保持を可能にしつつ、せん断変形方向の基礎剛性は低く保たれるため剛性変化幅は維持される。本課題では、センシング機能を振動制御のための信号取得に利用しつつ、圧縮方向の耐荷重性とせん断方向の柔軟性を静荷重支持と振動絶縁に応用し、提案材料の実践的なアプリケーションとして防振ブッシュ開発を試みる。自己の歪みを検出し、剛性を任意に変化させることのできる MRE を防振ブッシュに適用して、セミアクティブ振動制御への応用を検討する。

まずは、矩形状の磁気粘弾性エラストマシートと鋼板を交互に積み重ねた積層エラストマと磁気回路とを別体製作して模擬ブッシュを構築した。続いて、質量体を載荷して振動系を構成し、積層数及び印加磁場強度に応じた弾性率、粘性係数の変化特性の計測と、積層数に応じた特性の予測式を構成した。本検討と並行して、積層エラストマと磁気回路を一体化しハウジング内に収めた小型積層ブッシュの試作も行った。製作と性能評価とは別に、制御に際して検出信号にノイズが含まれる場合を想定して、必要な信号成分を抽出するためのアルゴリズムの検討を行った。さらに、MRE 物性の非線形性を再現可能な数値モデルを考案し、ひずみの大きさや周波数、磁束密度等のパラメータに対して高精度に物性変化を予測するモデル構築を検討した。

3. 研究の方法

(1) 積層 MRE の基礎物性評価試験と物性予測式の検討

1 辺 20mm、厚さ 1mm の正方形の MRE と、同形状の厚さ 0.5mm の磁性体薄板とを交互に積層したサンプルを用いて 0~1kHz のランダム波での強制加振実験を行った。実験装置を図 1 に示す。積層枚数は 1~8 枚、印加電流値を 0、0.1~0.3、0.5、1、1.5、2A の 8 通りに設定し、積層枚数の違いによる無磁場時での基礎弾性率及び磁場印加による剛性変化幅の変化を評価した。一部の試験値から積層枚数に対するばね定数の変化を予測し、他の実測値と比較する。続いて予測値と実測値から近似式を算出し、任意の積層枚数のばね定数を予測可能か検討した。

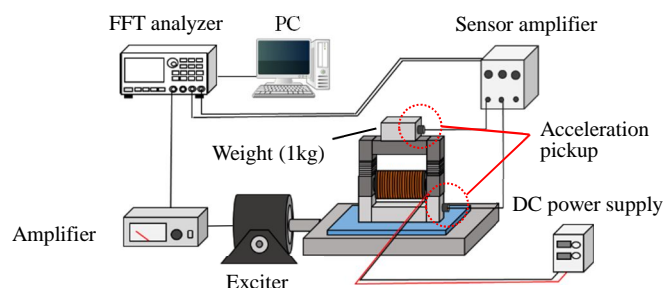


図 1 積層 MRE の基礎物性評価装置概略図

(2) 積層 MRE ブッシュの試作

本研究で作製したブッシュの全体図、断面図を図 2 に示す。断面図の黒の破線は磁氣的閉回路を意味し、MRE 内部の磁性粒子が反応して剛性が変化する仕組みになっている。MRE が磁性コアを挟んで上下に三層ずつ積層させコイルと共にハウジングで固定した。また固定用の軸をブッシュに通す際、磁氣的閉回路をブッシュ内で完結させるために軸との接触部には非磁性体であるジュラルミンを使用し、ゴムブッシュで固定を補強した。

(3) 外乱からの調和信号成分検出方法の検討

非常外乱の作用を受ける振動系を制振するには、時間変化する外乱周波数をリアルタイムで検出し、制御系内における適切な処理を経て、制御信号を生成する必要がある。その際に、信号に含まれる周波数成分の検出精度と検出時間は重要となる。勾配を用いた周波数検出法は、制振対象である振動体の加速度信号と予備的検討にて得た変数値を用いて、係数の値を更新し続けて周波数を推定する。先行研究⁽¹⁾において、磁気粘弾性エラストマを動吸振器のばね要素に適用することによって、本来一定である弾性率を可変にし、広範囲の周波数領域において制振性能を維持できる可変剛性型動吸振器を開発した。ここでは可変剛性型動吸振器を対象に、外乱振動数をリアルタイムで検出し、電流制御により瞬時に固有振動数を同調させるアルゴリズムを、Hush らの勾配を用いた周波数検出法⁽²⁾を参考に考案する。本手法はブッシュの剛性切り替え則への応用も可能である。MRE を用いた動吸振器の外観、固有振動数の可変特性を図 3 に示す。また、信号検出評価とともに、動吸振器の制振性能を評価するための実験装置を図 4 に示す。制振対象は箱型で形成され、スピーカ音(周波数 40 ~ 250 Hz 範囲のスイープ信号)によって 15mm 厚アクリル板を振動させる。加振レベル 0.5G における動吸振器の可変範囲は 95 ~ 175Hz である。

(4) MRE 粘弾性を再現する数学モデルの検討

MRE の粘弾性は印加磁場、負荷に伴うひずみの大きさ、外乱周波数等に依存することがわかっている。MRE の機器応用にあたっては、物性を精度よく再現するモデルが必要である。そこで、非線形特性を近似する数学モデルの構築を検討した。モデルは、摩擦要素、粒子の磁気結合要素、拡張型マクスウェル要素、及び線形ばね要素が並列に配置されたものを考える(図 5)。実測データからパラメータのフィッティングを行い、磁場に依じた弾性率変化、ヒステリシス特性等の再現を試みた。

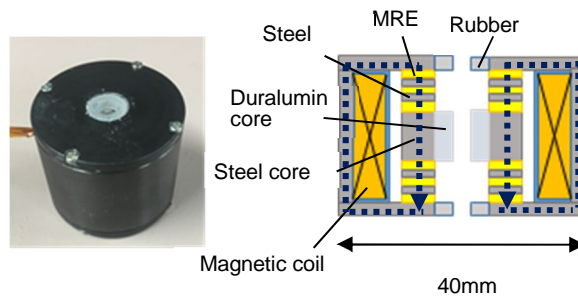


図 2 試作した小型積層 MRE ブッシュ

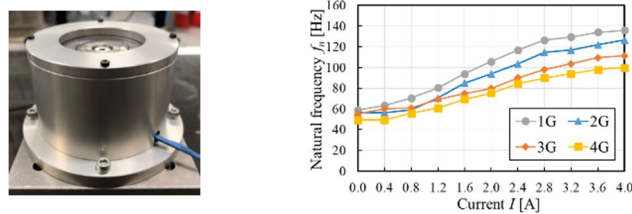


図 3 MRE を用いた可変剛性型動吸振器の外観と固有振動数変化特性

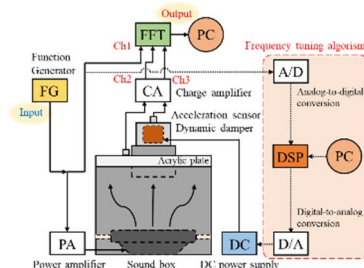


図 4 可変剛性型動吸振器の制振性能及び外乱同調アルゴリズムの評価装置

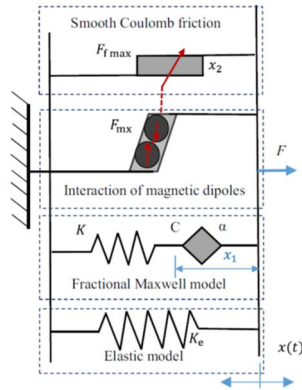


図5 MREの粘弾性を表す数学モデル

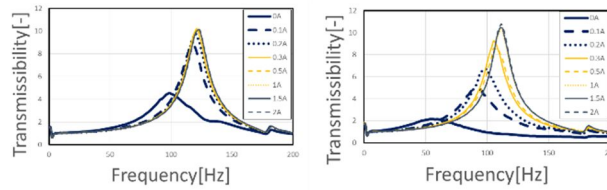


図6 積層 MRE を支持部材とした振動系の伝達率特性（左：単層 MRE の場合，右：積層 MRE の場合）

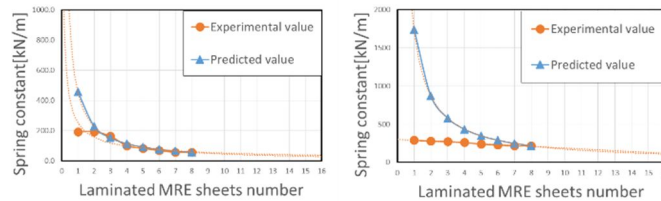


図7 積層 MRE の弾性率変化（左：磁場印加なし，右：0.3A 通電時）

4. 研究成果

(1) 積層 MRE の弾性率変化特性と数値予測

無磁場下において、積層 MRE を用いて構成した振動系の共振周波数が積層枚数に応じて下がることを確認したうえで、積層数 1 層と 8 層の場合の周波数応答を比較したものを図 6 に示す。1 層の周波数応答では印加電流値が 0.3A までの範囲で共振周波数の変化がほぼ頭打ちになるのに対し、8 層では 1A まで大きな特性変化が観察される。これは積層枚数の増加に応じて磁束飽和が生じる電流値が大きくなっているためと考えられる。これらの結果から、積層枚数に応じて剛性変化幅は拡張可能と推測される。

積層枚数に対するばね定数の実測値と予測値を比較したものを図 7 に示す。無磁場時では、3～8 層での実測値と予測値は非常に近い。一方、磁場印加時(0.3A 印加時)には、実測値が積層枚数に対して小さな勾配で推移した。考えられる要因として、積層枚数が少ない層ほど磁束飽和が早く起こり、予測値ほど剛性が高まらなかったことが挙げられる。しかし、どちらも 8 層以降の近似式はほぼ一致しているため、8 層以上のばね定数は予測できると考えられる。

(2) 試作 MRE プッシュの特性評価

おおむね予定通りの構造、動作を実現したが、個々のエラストマ層の厚さ、及び接着層の厚さを厳密にコントロールすることが難しいことが判明した。さらに、組み上げ後のプッシュの印加磁場に応じた弾性率変化特性を把握するために、打撃試験に基づく周波数応答の測定を実施したが、粘性の影響が大きく十分な精度での動特性計測が困難であった。積層プッシュの弾性率変化特性を図 8 に示す。積層型プッシュでは積層すべき MRE 層そのものや、接着層の厚さのコントロールが難しく、装置組み上げ後の MRE 層に予圧縮が負荷されること、また、摺動部の摩擦や小型磁気回路の発生磁場が不十分であることが複合的に影響して、意図する弾性率変化幅が確保されず、また減衰が過大となる問題が明らかとなった。期待する程度の弾性率変化特性は得られなかったが、積層化の原理上の効果は確認できたと考えている。

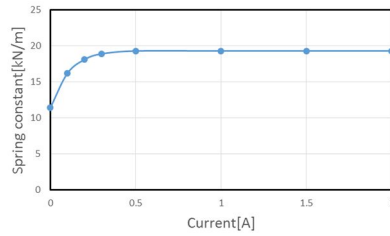


図 8 積層 MRE プッシュの弾性率変化

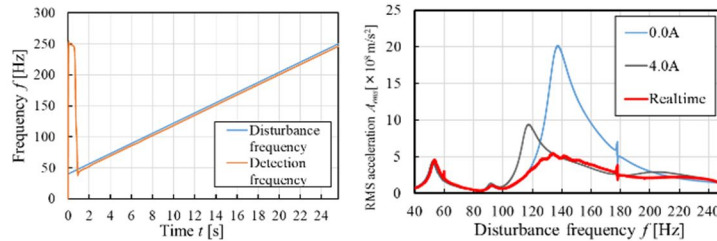


図 9 外乱同調アルゴリズムによる周波数推定結果（左）と動吸振器同調時の主系周波数応答（右）

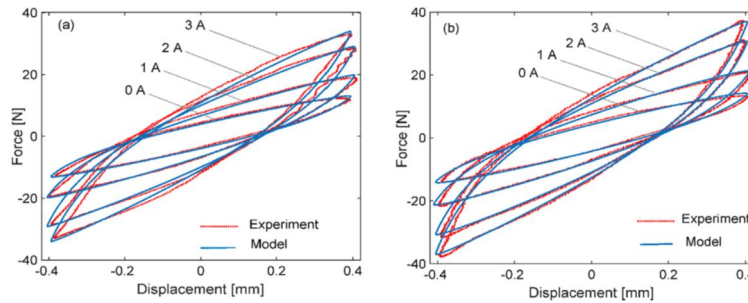


図 10 変位振幅 0.4mm 加振時における MRE 粘弾性力と変位の履歴特性（左：1 Hz，右：10 Hz 加振時）

(3) 外乱からの調和信号成分検出方法の検討

勾配を用いた周波数検出法に基づく外乱周波数推定結果，及び周波数同調アルゴリズムを動吸振器に適用したときの制振対象振動系の周波数応答を図 9 に示す．入力信号からリアルタイムで検出した周波数に応じて電流値を自動制御し，動吸振器の固有振動数を同調させた．図より，およそ 1s で周波数検出値が外乱周波数と一致し，その後高周波数域においても周波数の検出ができています．比較のため，電流を 0A 及び 4.0A に固定した場合の応答も併せて示した周波数応答の測定結果より，広範囲の周波数領域において制振できていることがわかる．その低減率は最大で約 0.25 倍である．

(4) MRE 粘弾性モデルの物性予測精度の検証

準静的な状態を含めたいくつかの加振条件の下で MRE の粘弾性力を測定し，モデルを構成する全てのパラメータ値を同定した．それらの値を適用して再構成したモデルを用いて，任意の加振条件に対してモデルから得られる粘弾性力の再現精度を検証した．一例として，加振変位 0.4 mm，加振周波数 1 Hz または 10 Hz，励磁コイルへの印加電流 0 ~ 3A (1A 刻み) に設定したときの粘弾性力と変位との間の履歴特性を図 10 に示す．図に示されている全ての加振条件の組み合わせについて，履歴特性が非常に良く一致していることがわかる．他の加振変位及び周波数でも同様の結果が確認できたため，提案モデルの有効性が示されたと考えている．

< 引用文献 >

- (1) T. Komatsuzaki, T. Inoue, O. Terashima, Broadband vibration control of a structure by using a magnetorheological elastomer-based tuned dynamic absorber, *Mechatronics* 40 (2016) 128–136.
- (2) Hush, D.R. et al, “An Adaptive IIR Structure for Sinusoidal Enhancement, Frequency Estimation, and Detection”, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, pp.1380-1390, (1986)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 河合 竜平, 小松崎 俊彦	4. 巻 1
2. 論文標題 磁気粘弾性エラストマを用いた可変剛性型動吸振器の外乱同調アルゴリズムの検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本機械学会Dynamics and Design Conference 2019講演論文集	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1299/jsmemc.2019.211	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 河合 竜平, 小松崎 俊彦	4. 巻 85
2. 論文標題 可変剛性型動吸振器の同調アルゴリズム検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.19-00231	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Tappei Kawai, Toshihiko Komatsuzaki, Haruhiko Asanuma	4. 巻 3
2. 論文標題 Development of a tuning algorithm for a dynamic vibration absorber with a variable stiffness property	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Vibration Engineering for a Sustainable Future - Numerical and Analytical Methods to Study Dynamical Systems	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-46466-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Xuan Bao Nguyen, Toshihiko Komatsuzaki, Nong Zhang	4. 巻 141
2. 論文標題 A nonlinear magnetorheological elastomer model based on fractional viscoelasticity, magnetic dipole interactions, and adaptive smooth Coulomb friction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mechanical Systems and Signal Processing	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.106438	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 梶山晋生, 小松崎俊彦, Nong Zhang, 岩田佳雄, 浅沼春彦
2. 発表標題 積層型磁気粘弾性エラストマの磁場応答特性に関する基礎的考察
3. 学会等名 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
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河合 竜平, 小松崎俊彦
2. 発表標題 磁気粘弾性エラストマを用いた可変剛性型動吸振器の外乱同調アルゴリズムの検討
3. 学会等名 日本機械学会Dynamics and Design Conference 2019講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tappei Kawai, Toshihiko Komatsuzaki, Haruhiko Asanuma
2. 発表標題 Development of a tuning algorithm for a dynamic vibration absorber with a variable stiffness property
3. 学会等名 The 18th Asia-Pacific Vibration Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
主たる 要 領 先 の 主 たる 海 外 共 同 研 究 者	張 農 (Zhang Nong)	シドニー工科大学・School of Mechanical and Mechatronic engineering・Professor	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
その他の研究協力者	グエン スアンバオ (Nguyen Xuan Bao)	ダナン大学・Mechanical Department・Lecturer	