

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 20 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560256

研究課題名(和文)磁気粘弾性エラストマによる同調型動吸振器の開発

研究課題名(英文)Development of an Adaptively Tuned Dynamic Vibration Absorber using Magnetorheological Elastomer

研究代表者

小松崎 俊彦(KOMATSUZAKI, Toshihiko)

金沢大学・機械工学系・准教授

研究者番号：80293372

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、外部磁場に応じて粘弾性が変化する磁気粘弾性エラストマを動吸振器に適用し、従来の受動型動吸振器と同様の信頼性を確保しつつ、外乱の多様性、制御対象構造物の動特性変化等に柔軟に対応して、受動型装置よりもさらなる振動低減が可能な同調型動吸振器の開発を行った。外乱振動数を自動検出し、動吸振器の固有振動数をリアルタイムに同調させる制御手段を実装して、定常外乱、及び振動数が時間とともに変化する非定常外乱に対して制振性能を評価した結果、最も制振効果の高い状態を維持しながら有効に主振動系の応答を抑制できることを数値計算及び実験によって確認した。

研究成果の概要(英文)：A passive type dynamic vibration absorber offers advantages in reliability and simple constitution, however, the use of the absorber with fixed property is usually limited to harmonically excited case, where the damper is only effective for pre-determined narrow frequency range. Design of the damper following well-known optimal tuning theory could extend the effective frequency range, yet the damping performance remains at a certain amount. In this study, the stiffness controllable elastomer composite known as Magnetorheological elastomer (MRE) is applied to the dynamic absorber along with stiffness switching scheme, where the natural frequency of the absorber is tuned in real time by the external magnetic field. Investigations show that the vibration of the structure can be fully reduced by the proposed dynamic absorber with variable stiffness functionality.

研究分野：振動工学

キーワード：機能性材料 磁気粘弾性エラストマ 動吸振器 振動制御 制振装置

## 1. 研究開始当初の背景

制振技術の開発は、機器や構造物の破壊・損傷を防止するだけでなく、人間の安全性や快適性を確保するうえでも重要である。制振方法は大きく分けて受動型、準能動型及び能動型の3通りに分類される。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。簡素かつ安価に構成でき、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。一方、受動型の対極的な方法として、アクチュエータの発生力により能動的に振動抑制する能動型があるが、制御性能を大幅に向上できる反面、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を得られ、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。可変性の確保には、機構的な実現方法以外に、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り、準能動型制御手法と組み合わせて機械の知能化を目指す試みが行われている。中でも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)については、減衰力を調整可能な準能動型ダンパなど、幅広い工学的応用が検討されている。ただし、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、経年劣化等の問題が依然指摘されている。

著者らはこれまでにMR流体にヒントを得て、上記の問題解決を図りつつ、機器や構造物を支持する防振マウントへの応用を目的として、エラストマ内に磁性粒子を分散固定し、外部磁場によって剛性を可変と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。磁場に対するせん断方向の粘弾性特性を検討した結果、復元力特性が数倍変化することを明らかにした。さらに、本エラストマを防振マウントに採用し、準能動型の可変剛性制御則を適用して変位励振を受ける構造物の振動絶縁性を評価したところ、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。磁気粘弾性エラストマの研究は海外において多く見られ、特性変化幅の向上を目指した材料選定・組成など基礎物性に関する研究や、特性変化の予測式の検討などに関するものがあるが、材料の一般的作製方法や評価法等は開発途上にある。また振動制御問題への適用について理論上の提案は見られるが、実際の材料を用いて機器を構成し、効果を示した事例は少ない。特に、我が国における関連研究の報告は少なく、材料としての認知度も低い。ここで、磁気粘弾性エラストマの特長を整理すると、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・安定性、③形状保

持されること、④任意形状に成形可能など、特筆すべき利点が挙げられる。一つの機能性材料として、これらの特質を生かした工学的アプリケーションは多数存在し、その具体的な応用例を示すことは新分野創出を目指すうえで意義深い。そこで本研究課題では、広範な機械構造物で利用され、振動工学において基本的かつ重要な制振装置である動吸振器へ磁気粘弾性エラストマを適用することを検討する。装置を簡易な構造、かつ低コストにて構成できることの優位性も期待できる。

動吸振器は代表的な制振装置としてよく知られており、制振対象の振動数に合わせて固有振動数を調整した動吸振器を制振対象の振動系に取り付けることにより、その振動数および周辺の振動数域において制振効果を得るものである。しかし、動吸振器は基本的に受動型装置として構成されるため、その質量や剛性などのパラメータは一定であり、制振対象振動数付近における振動に対しては高い制振性能が得られる一方、それ以外の振動数域においては効果が期待できないという問題点が挙げられる。特に、非定常外乱の作用によって振動する構造物に対しては、動吸振器では十分に制振できない場合が起こり得る。さらに、動吸振器の最適設計方法として知られる定点理論に従って動吸振器の調整を行うことにより、制振効果の得られる帯域幅を拡張することは可能であるが、定点の高さで規定される振幅のレベルを大幅に下回るほどの効果は得られないことが明らかとなっている。これらの問題を解決する手段として、動吸振器を構成するばね要素に可変性を持たせ、外乱の振動数に合わせて自己の固有振動数を調整する同調型の動吸振器が提案されているが、機構的な手段で可変性を実現するこれらの方法では動作の再現性や信頼性、さらに応答性の点において不利な面があるように思われる。

## 2. 研究の目的

本研究では、磁気粘弾性エラストマをばね要素として採用することで外部磁場による固有振動数の可変性を簡易な構造で実現し、なおかつ広範囲の振動数領域においても制振効果を得ることが可能な可変剛性型動吸振器の開発を目的とする。磁気粘弾性エラストマを適用することにより、従来の受動型動吸振器と同様の信頼性を確保しつつ、外乱の多様性、制御対象構造物の動特性変化に柔軟に同調して、受動型装置と比べさらなる振動低減を目指す。まずは磁気粘弾性エラストマを作成し、磁場に対するせん断方向の復元力特性を評価した。次に、製作した可変剛性型動吸振器の基本特性として、固有振動数の可変範囲について評価した。さらに、定常及び非定常外乱の作用を受ける主振動系に同調型動吸振器を適用し、その制振特性について数値的・実験的に評価を行い、提案装置の有効性を検証した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 磁気粘弾性エラストマの作成と評価

提案材料の基質としてシリコンエラストマを採用し、磁性体としてカルボニル鉄粉を使用した。硬化開始前の材料混合と脱泡処理とを真空デシケータ内にて同時に行い、外部磁場の存在下、混合物を室温で 24 時間静置して硬化させた。エラストマ断面は一辺 25mm の正形状とし、試料厚さは 15mm、液材と鉄粉との体積比を鉄粉含有比 30%~50% に設定して試料の作製を行った。

粘弾性試験装置を図 1 に示す。加振台上の系を、エラストマをばね及び減衰要素、電磁石上部を質量とする 1 自由度振動系とみなして基礎部にランダム加振を与え、基礎部に対する上部質量の加速度伝達関数から複素ばね定数を求めた。複素ばね定数  $k^*$  は次式で定義される。

$$k^*(\omega) = k_0 \cdot \nu(\omega) \{1 + j\eta(\omega)\} \quad (1)$$

式(1)において、 $k_0$  は無磁場時に 1 自由度系から計算される基準ばね定数、 $\nu(\omega)$  は無次元ばね定数、 $\eta(\omega)$  は損失係数を表す。

#### (2) 数値計算による提案装置の性能予測

モデル主系構造物及び剛性可変型動吸振器の数値計算モデルを構築し、既存の受動型動吸振器の設計理論をベースにモデルの妥当性検証を行う。提案する装置によって有効な制振効果を得るための対象外乱振動数への同調アルゴリズムについて理論的検討を行うとともに、外乱作用時の振動系の応答を数値的に予測する。

1 自由度の主振動系及び可変剛性型動吸振器から成る 2 自由度振動系の数値モデルを図 2 に示す。 $m_1$ 、 $k_1$  及び  $c_1$  はそれぞれ主振動系の質量、ばね定数及び減衰係数を表し、 $m_2$ 、 $k_2$  及び  $c_2$  は動吸振器の質量、ばね定数及び減衰係数を表す。モデルの主振動系に対して強制外力  $F \cos \omega t$  を与え、動吸振器のばね要素  $k_2$  に関して、後述する実測値に基づき可変性を与える。ばね定数  $k_2$  を一定とした場合、2 自由度振動系の運動方程式は図に示す記号を用いて以下のように記述される。

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 + (k_1 + k_2) x_1 \\ \quad - c_2 \dot{x}_2 - k_2 x_2 = F \cos \omega t \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2 - c_2 \dot{x}_1 - k_2 x_1 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

なお、動吸振器固有振動数の可変範囲等に関する検討においては、式(2)を時間及び変位に関して無次元化処理した方程式を用いた。

可変剛性型動吸振器の制振特性を予測するにあたり、主系と動吸振器との質量比を複数設定した。各々の質量比について可変剛性範囲に対応する振動数の変域を、最適同調・最適減衰の値と併せて表 1 に示す。固有振動数の可変範囲は実測値 1.5 倍を踏まえつつ、動吸振器

質量を主系に固定した場合の振動数比が変域の中央になるように定めた。図 3 に示すように、可変型動吸振器の剛性切り替え規則は可変振動数範囲よりも低域で最低値、高域では最高値を保持し、可変範囲では外力振動数に同期して固有振動数を変化させることとした。

#### (3) 同調型動吸振器の製作と基本性能評価

数値的な検証の結果を踏まえて製作した可変剛性型動吸振器の模式図を図 4 に示す。幅 70 mm×高さ 60 mm×奥行 20mm のフレーム部には鋼材を利用し、閉磁路を形成している。また、中央のコイルは磁場を生成するとともに、動吸振器の可動質量 (約 370g) を兼ねている。コイルの上下には直径 20mm、厚さ 10mm の MR エラストマ 2 つを配置し、エラストマ内を磁束が通過することによって、見かけの剛性が変化する。エラストマには鉄粉体積割合 30%、40%、50% のものを採用した。

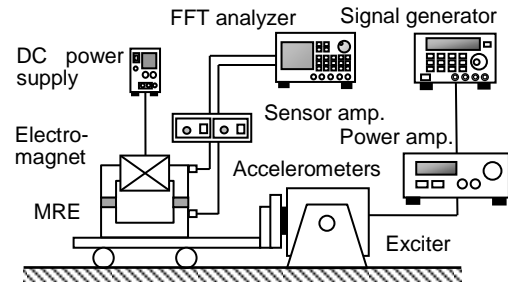


図 1 粘弾性評価装置

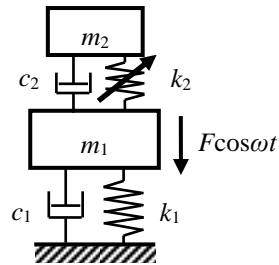


図 2 数値計算モデル

表 1 数値計算モデルのパラメータ

	Mass ratio		
	0.1	0.2	0.3
Tuned freq. ratio	0.91	0.83	0.77
Opt. damping ratio	0.17	0.21	0.23
Freq. Ratio (damper fixed)	0.95	0.91	0.88
Freq. variation range	0.79-1.14	0.76-1.06	0.73-1.03

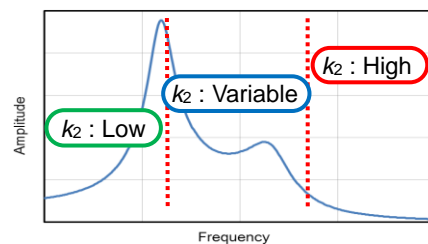


図 3 動吸振器の剛性切り替え規則

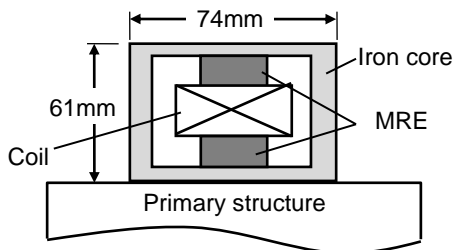


図 4 可変剛性型動吸振器の模式図

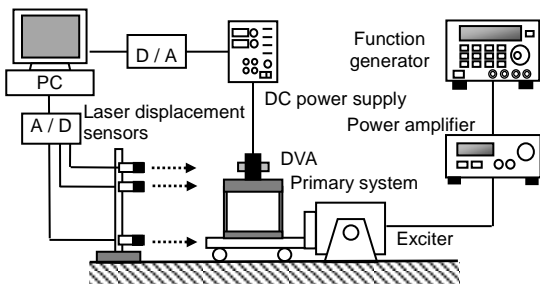


図 5 制振性能評価実験装置図

可変剛性型動吸振器の基本性能評価として、可動質量にインパクト力を加えた際の自由振動波形から、電流印加時における動吸振器の固有振動数及び減衰比の変化を調べた。得られた波形の隣り合うピークから周期と振幅比を複数読み取り、固有振動数と減衰比を平均値として求めた。コイルに印加する電流値は0~4Aとした。

#### (4) 同調型動吸振器の制振性能評価

同調型動吸振器を主振動系と結合し、その制振性能を図5に示す装置によって評価した。主系質量は1450g、動吸振器質量は370gより、両者の質量比は約0.25、主系単体での減衰比は0.01である。両者を組み合わせて2自由度振動系を構成し、水平加振台上に固定する。加振器を用い、定常及び非定常の入力によって構造物基礎部を変位加振し、その際の主系応答を計測する。動吸振器の剛性の切り替え規則は数値計算と同様、図3で示す規則を採用する。

### 4. 研究成果

#### (1) 粘弾性試験結果

印加磁場の強さに対する無次元ばね定数と損失係数の変化を、鉄粉含有率の異なる3つの磁気粘弾性エラストマについて求めた結果を図6に示す。まず、無次元ばね定数については印加磁場が強くなるほど上昇し、鉄粉含有率40%のものが最も変化幅が大きく、磁束密度200mTに対して約6倍の変化を得ることができている。鉄粉量増加に伴い、基質エラストマ内の磁氣的結合力が増す一方、材料の充填効果によって無磁場時の基礎剛性が増すため、変化幅を最大にする鉄粉充填量には最適値が存在すると考えている。一方、

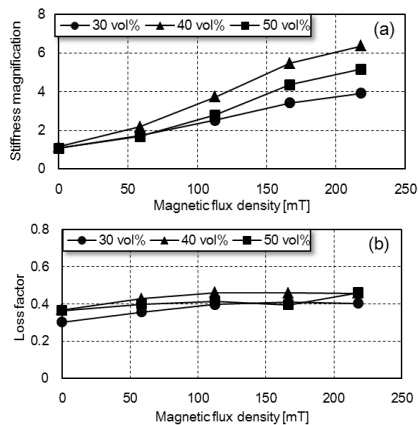


図 6 粘弾性試験結果。(a)ばね定数変化,(b)損失係数変化。

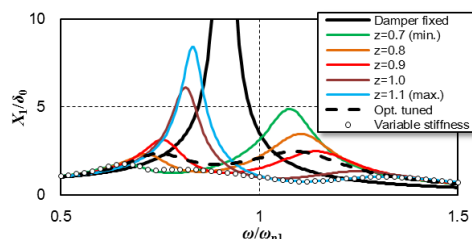


図 7 主振動系の周波数応答曲線

損失係数はともに振動数に依らずほぼ一定であり、振動数への依存性は小さい。

#### (2) 動吸振器応答特性に関する数値的検討

動吸振器の固有振動数を外乱振動数と同調させた場合の主系応答を、質量比0.2について計算した結果を図7に示す。比較のために、動吸振器のばね定数を最低値から最高値の間で数通りに固定した場合、および最適同調理論による在来型動吸振器の応答も示す。最適同調・減衰を適用した動吸振器では定点の高さで規定される制振効果に留まるが、可変剛性型では振動数可変範囲において、特性固定時の反共振点を辿るような応答曲線を描き、前者と比べさらに振動を低減できていることがわかる。動吸振器の減衰が非常に小さい場合には、主系応答に現れる反共振点の振幅は理想的にゼロに近づくので、最適設計条件による動吸振器の制振効果との差異がさらに明確になるが、ここでの数値的検討では減衰比を実測値に合わせたため、制振効果はこの程度に留まっている。

#### (3) 同調型動吸振器の基本特性計測結果

3種の磁気粘弾性エラストマを動吸振器に用いた場合について、印加電流に対する動吸振器固有振動数及び減衰比の値をそれぞれプロットしたものを図8に示す。また、固有振動数の変域及び減衰比の具体的な数値を表2に示す。減衰比については磁場への依存性は小さく、以後は一定と見なして取り扱うこととした。固有振動数を変化幅の観点で見た場合には、鉄粉含有

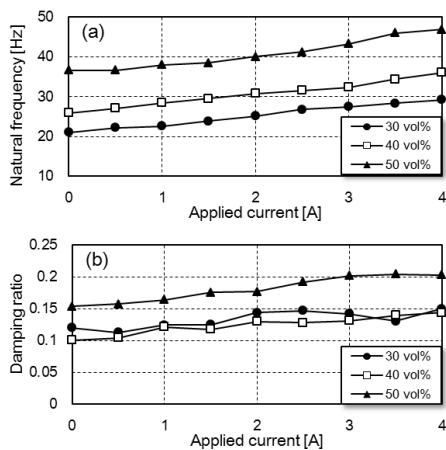


図 8 同調型動吸振器の基本特性計測結果. (a) 固有振動数, (b) 減衰比.

表 2 同調型動吸振器のパラメータ

Iron vol%	Frequency variation	Damping ratio
30%	21.1-29.2[Hz]	0.13
40%	25.8-36.0[Hz]	0.12
50%	36.6-46.8[Hz]	0.18

率 40% 及び 50% のエラストマを用いた場合が同等に大きく、無磁場時の特性を基準に変化倍率でみた場合には、40% の MRE の変化が最も大きいという結果が得られた。粘弾性試験結果から予測される剛性変化の最大値は 4 倍程度であり、これを振動数の変化に換算すると 2 倍程度となるが、それよりは若干低い変化倍率となった。動吸振器に適用したエラストマが円柱形状のため回転運動が生じやすいことや、エラストマとフレームとの結合が不完全であること等が影響していると考えている。

#### (4) 同調型動吸振器の制振特性評価

鉄粉割合 40% の磁気粘弾性エラストマを用いた動吸振器について、周波数応答を計測した結果を図 9 に示す。図 9(a) において、単一ピークの曲線は動吸振器を構造物に固定したときの主系構造物の周波数応答、0A~4A で示す曲線群はエラストマに一定磁場を印加し、弾性率を固定した場合の応答を表す。さらに、破線で示す曲線は動吸振器の剛性を外乱振動数に応じて可変にした場合の主系応答である。剛性固定時の応答曲線において、最低剛性時のピーク値が最高剛性時のそれよりも高く現れており、数値計算結果と逆の傾向を示しているが、わずかな固有振動数比の違いによって曲線形状は変わり、この比率に関して数値計算での条件と完全に一致させることができないことが主な原因と考えられる。また、最適同調・減衰条件を満たす

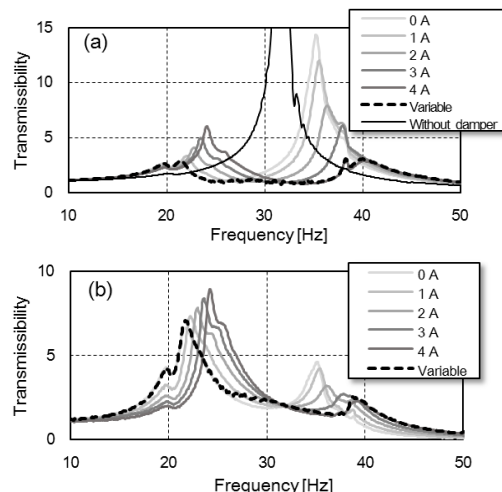


図 9 同調型動吸振器の制振特性計測結果. (a) 主系応答, (b) 動吸振器応答.

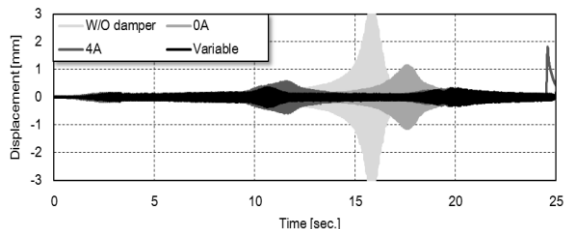


図 10 掃引正弦波加振時の主系時刻歴応答

動吸振器を簡易に実現することが困難なため、実験では比較対象としていない。動吸振器の剛性を可変にした場合には、数値計算による予測結果と同様に、動吸振器の特性を固定したものと比較して最大振幅が減少しており、動吸振器を取り付けない場合に対して、振幅を最大で約 4% まで抑えることができた。

時間とともに周波数が変化する非定常外乱を系に加えた場合の主振動系の時刻歴応答波形の例を図 10 に示す。ここでは動吸振器が無い場合、動吸振器の剛性を最小値・最大値に固定した場合、及び同調制御を行った場合の 4 通りを比較している。外乱振動数に動吸振器固有振動数を同調させた場合は常に主系応答振幅を小さく抑制できていることがわかる。以上の結果より、固有振動数の変化幅は小さいが、1 自由度系に対しては本研究が提案する磁気粘弾性エラストマを用いた同調型動吸振器でも十分効果的に制振が可能である。より大きな特性変化幅を確保するためのさらなる方策として、まずはエラストマそのものの弾性率変化幅の向上に関する検討が必要であるが、その他の事項として、より効率的かつ強力な磁場を与えることのできる電源、磁気回路、磁気粘弾性エラストマを用いたばね要素の形状に工夫を加えること等の課題について、引き続き検討していきたいと考えている。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① Toshihiko Komatsuzaki and Yoshio Iwata, Design of a Real-time Adaptively Tuned Dynamic Vibration Absorber with a Variable Stiffness Property using Magnetorheological Elastomer, Shock and Vibration, 2015, pp. 1-11.  
DOI: 10.1155/2015/6765082015
- ② 小松崎俊彦, 岩田佳雄, 林下宗史, 川越啓司, 磁気粘弾性エラストマを用いた可変剛性型動吸振器の開発, 日本機械学会論文集 C 編, 第 79 巻, 2013, pp.3680-3690.  
DOI: 10.1299/kikaic.79.3680

[学会発表] (計11件)

- ① T. Komatsuzaki, T. Inoue and Y. Iwata, MRE-based Adaptive-tuned Dynamic Absorber with Self-sensing Function for Vibration Control of Structures, ASME 2014 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, 2014年09月08日~2014年09月10日, Newport, Rhode Island (米国)
- ② 川北恭史, 小松崎俊彦, 岩田佳雄, 磁気粘弾性エラストマを用いた動吸振器による力伝達抑制の検討, 日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会, 2014年08月26日~2014年08月29日, 上智大学(東京都).
- ③ 松本卓也, 小松崎俊彦, 岩田佳雄, 磁気粘弾性エラストマを用いた多自由度系のセミアクティブ制振, 日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会, 2014年08月26日~2014年08月29日, 上智大学(東京).
- ④ 小松崎俊彦, 岩田佳雄, 林下宗史, 磁気粘弾性エラストマを用いた可変剛性型動吸振器による薄板伝達音の抑制, 日本機械学会北陸信越支部第51期総会・講演会, 2014年03月08日~2014年03月08日, 富山県立大学(富山県射水市)
- ⑤ Toshihiko KOMATSUZAKI, Yoshio IWATA, Hirofumi RINGE and Keiji KAWAGOSHI, Adaptive Tuned Dynamic Vibration Absorber with Variable Stiffness Property using Magnetorheological Elastomers, ASME 2013 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, 2013年09月16日~2013年09月18日, Snowbird, Utah(米国).
- ⑥ 小松崎俊彦, 林下宗史, 川越啓司, 岩田佳雄, MR エラストマを用いた可変剛性型動吸振器による構造物の制振, 日本機械学会2013年度年次大会, 2013年09月08日~2013年09月11日, 岡山大学(岡山市).
- ⑦ 小松崎俊彦, 岩田佳雄, 林下宗史, 川越啓司, 磁気粘弾性エラストマを用いた同調型動吸振器の開発, 日本機械学会第13回運動と振動の制御シンポジウム, 2013年08月27日~2013年08月30日, 九州産業大学(福岡市).

- ⑧ Toshihiko KOMATSUZAKI, Yoshio IWATA, Hirofumi RINGE and Keiji KAWAGOSHI, Development of a Dynamic Absorber with Variable Stiffness Property using Magnetorheological Elastomers, The 15th Asia Pacific Vibration Conference (APVC2013), 2013年06月02日~2013年06月06日, 済州島(韓国).
- ⑨ 山下剛, 小松崎俊彦, 岩田佳雄, 磁気粘弾性エラストマを用いた構造物のセミアクティブ振動制御, 日本機械学会北陸信越支部第50期総会・講演会, 2013年03月09日~2013年03月09日, 福井大学(福井市).
- ⑩ 山下剛, 小松崎俊彦, 岩田佳雄, MR エラストマによる構造物のセミアクティブ制振, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2012, 2012年09月18日~2012年09月21日, 慶應義塾大学(横浜市).
- ⑪ 林下宗史, 小松崎俊彦, 岩田佳雄, 磁気粘弾性エラストマを用いた可変剛性型動吸振器の開発, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2012, 2012年09月18日~2012年09月21日, 慶應義塾大学(横浜市).

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 特許  
発明者: 小松崎俊彦, 井上敏郎  
権利者: 国立大学法人金沢大学  
種類: 特許  
番号: 特願 2014-190102  
出願年月日: 2014年9月8日  
国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等  
<http://www.me.se.kanazawa-u.ac.jp/dyna/>

## 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・准教授  
研究者番号: 80293372

(2) 研究分担者

岩田 佳雄 (IWATA, Yoshio)  
金沢大学・機械工学系・教授  
研究者番号: 90115212