

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 4 日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760171

研究課題名（和文） 機能性ゲルの開発と機械構造物のセミアクティブ振動制御システムへの応用に関する研究

研究課題名（英文） Development of a new functional elastomeric material and its application to semi-active vibration control of machines and structures

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

研究成果の概要（和文）：本研究ではエラストマ中に磁性粒子を分散・固定することで MR 流体における分散粒子の沈殿や凝集の問題を解決し、機器や構造物を支持する特性可変の防振マウントとして応用することを目的として、磁気粘弾性エラストマ（MR エラストマ）の開発を行った。試作した MR エラストマに対する静的及び動的試験を行い、磁場に対するせん断方向の静的復元力特性及び動的粘弾性特性について基礎的検討を行った。さらに、本 MR エラストマを用いて 1 自由度の模型構造物を構成し、剛性を最大・最小値で切り替える on-off 型可変剛性制御則を用いたセミアクティブ振動制御について、数値的及び実験的検討を行い、本 MR エラストマの振動制御に対する有効性を検証した。

研究成果の概要（英文）：In this study, the stiffness controllable elastomer composites named as MRE is fabricated and their field-dependent static and dynamic properties are tested. When such material is exposed to external magnetic field, the strength of the inter-particle force will change and thus its apparent elastic modulus is changed depending on the magnitude of the field. The MRE is then applied to the vibration isolating mounts along with variable stiffness control scheme. Experimental investigations show that the vibration of the one-degree of freedom structure that is exposed to base excitation can be effectively reduced by the intermediating MRE mounts according to the semi-active on/off switching control algorithm.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：振動工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：機械力学・制御，機能性材料，振動制御，制振，免震

1. 研究開始当初の背景

機器や構造物が外乱の作用を受けると、共振現象によって大きな振動が発生することがあるため、制振技術の開発はこれらの破壊・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。機器類の防振に限らず、我が国では多くの地震が発生することから、制振・免震技術の高度化は喫緊の課題である。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。受動型は従来から一般的に採用されている方式であり、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減衰させるものである。基礎部から機器への振動を絶縁する目的で使用する場合、構造が簡単なために安価に構成でき、信頼性の点において優れている反面、振動系の共振ピークを抑制するために粘性係数を高く設定すると、高振動数域での振動絶縁性が悪化することはよく知られている。受動型の対極的な方法として、アクチュエータを装着してその発生力により能動的に振動を抑制する能動型があるが、振動制御性能の大幅な向上が見込める反面、動力源確保やエネルギー消費などの観点から装置の大型化、複雑化、コスト等が実用上問題となる。さらにこれらの中に位置するものとして、本来受動的な要素のパラメータを可変とすることにより制振効果を高める準能動方式の開発が近年盛んに行われている。制御性に限界はあるものの、受動型に由来する信頼性を確保しつつ、制御系の設計によっては能動型に近い振動絶縁効果を得ることが可能であり、かつ大きなエネルギー源を必要としないため安価に構築できる。

外部からの情報によって、自らの物性を変化させる性質を有する材料は機能性材料と総称され、準能動型制御手法と組み合わせる機械構造物の知能化を目指す研究が盛んに行われている。中でも機能性流体の一つとして、外部磁場に応答して見かけの粘性を変化させることのできる磁気粘性流体 (Magneto-rheological fluid, MR 流体) は良く知られている。特性変化に磁場を利用するため低電圧で駆動でき、特性変化幅が大きく、温度上昇に対しても特性が安定しており、応答性も良好であることなど、様々な魅力的特徴を有することから、減衰力を調整可能なダンパなど工学分野における幅広い応用が検討されている。しかしながら、流体のためシール性の確保が必要という本質的な問題に加え、分散粒子の沈降や凝集、経年劣化などの問題が解決すべき課題として挙げられ、走行中、流体が常に攪拌される車両サスペンションのような一部の応用を除き、当初期待したほどの実用化は進んでいない。従って、材料自身の安定性改善が普及の鍵と考えられる。

そこで、磁場に応じて物性の変化する機能性材料としての特質は維持しつつ、分散粒子の沈殿を回避して常に安定した特性を確保することを目論み、半固体のゲル状物質に粒子を分散させた新たな材料の開発を目指し、本研究課題の提案に至った。

2. 研究の目的

本研究では、ゴムやゲルなどのエラストマ中に磁性粒子を分散・固定することで、以上

の背景で述べた MR 流体における分散粒子の沈殿や凝集の問題解決を図り、外部磁場印加による特性変化を利用して機械構造物の振動を効果的に抑制可能な材料の提案を目的として、新しい機能性材料として「機能性 MR エラストマ」の開発を行った。試作した機能性 MR エラストマに対する静的及び動的試験を行い、磁場に対するせん断方向の静的復元力特性及び動的粘弾性特性について基礎的検討を行った。さらに、本材料を構造物の防振支持要素に適用して 1 自由度の模型構造物を構成し、剛性を最小値と最大値との 2 パターンで切り替える on-off 型可変剛性制御則を用いたセミアクティブ振動制御について、数値的及び実験的検討を行い、本材料の振動制御に対する有効性を検証した。

3. 研究の方法

(1) 機能性 MR エラストマの作製

本実験で作成した試料には、基質として二液性シリコンエラストマを使用し、磁性体に充填剤用鉄粉 (粒子径約 $10\mu\text{m}$) を使用した。磁性粒子がクラスタ形成された状態が試料内に保持されることを期待して、エラストマは磁力線の存在下、室温で 24 時間放置し硬化させた。エラストマの断面形状は $25\times 25\text{mm}$ の正方形に統一し、表 1 に示すように、液材と鉄粉との体積比や厚みなどの条件を様々に組み合わせて試料の作製を行った。さらに、硬化過程における磁場印加の効果を確認するために、無磁場での試料作製も行った。ただしこの場合は、放置すると重力の影響により粒子が沈殿してしまうため、容器をモータで回転し続けることにより粒子の分散性を維持した。硬化後の試料を磁界に平行な断面で切断し、粒子の整列状況を顕微鏡にて観察したものを図 1 に示す。磁力線に沿って粒子が整列している状況がわかる。

(2) 静的負荷試験

試料の磁場に対するせん断力の変化を調

(表 1)

試料厚さ (mm)	10, 15, 20
鉄粉体積割合 (%)	10, 20, 30, 40, 50, 60
硬化条件	室温 24 時間, 磁場存在下



(a) 磁場なし



(b) 磁場あり

(図 1)

べるために、図 2 に示す測定装置を製作し、静的負荷実験を行った。エラストマと磁性体の体積比、試料厚さ等の条件を変えて作製した数種類の機能性 MR エラストマについて、各々を電磁石の間に固定し、下部電磁石は基礎に固定、上部電磁石には水平方向に 0~200g の静的荷重を与え、変形量をレーザ変位計にて測定した。磁場を印加すると MR エラストマ内に磁力線に沿う磁性粒子のクラスターが形成され、結果として磁性粒子の結合力が増し、せん断方向の変形量が小さくなると予想される。本実験では印加電流値を 0~2A まで、0.5A 刻みで与えた場合の静的復元力特性の変化を調べた。

(3) 動特性試験

MR エラストマの動的な粘弾性特性を明らかにするために、図 3 に示す動特性試験装置を製作した。加振台上の系を、エラストマ自身が有する粘弾性特性、及びエラストマ上側の質量（電磁石）から成る 1 自由度振動系とみなして、基礎部に変位加振を与える。上載質量は 1.138 kg である。基礎部及び質量の加速度を同時に計測し、FFT アナライザにて両者の加速度伝達関数を求める。動的試験においても、作製条件の異なる数種類の MR エラストマを評価対象とした。これらの試料に対して、印加電流を 0~2.5A の範囲で 0.5A ずつ変化させ、ホワイトノイズ加振（~50Hz）により周波数応答を求めた。さらに、得られた加速度伝達関数より複素ばね係数及び損失係数を求めた。

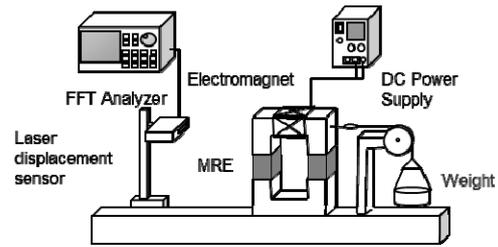
(4) セミアクティブ振動制御の検討

MR エラストマの外部磁場による弾性率可変性に着目して、基礎部において変位加振を受ける 1 自由度振動系の支持要素として MR エラストマを採用し、振動絶縁の観点からセミアクティブ剛性可変制御を試みた。本研究では剛性に対して二値の切り替えを行う on-off 型の可変剛性制御則を採用する。 x, \dot{x} を絶対変位及び絶対速度とし、位相平面上にて切り替え規則を模式的に表すと図 4 のようになり、第 1 及び第 3 象限においては磁場を印加することにより高剛性 (on)、第 2 及び第 4 象限では磁場を加えず低剛性 (off) に切り替えることに対応する。本規則により、理論上は減衰要素の有無に関わらず漸近安定なシステムの構築が可能である。

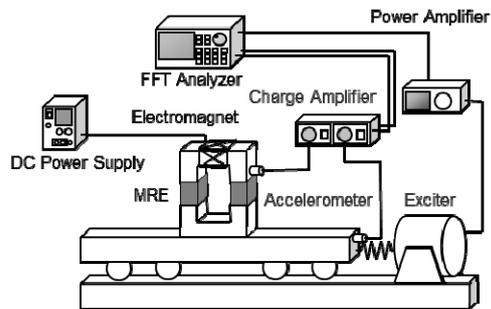
4. 研究成果

(1) 静的復元力特性試験結果

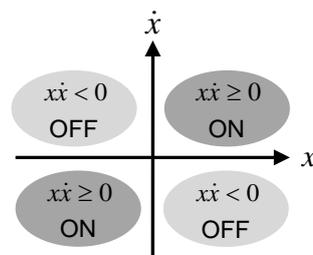
試料厚さ 15mm、磁性粒子の体積含有率 10~60%の機能性 MR エラストマについて、静的復元力特性評価試験結果の一例を図 5 及び図 6 に示す。図 5 は印加電流値に対するばね定数の変化を磁性粒子の含有率ごとに示したものであり、一方の図 6 は磁性粒子の含有率に対してばね定数の変化を印加電流ごと



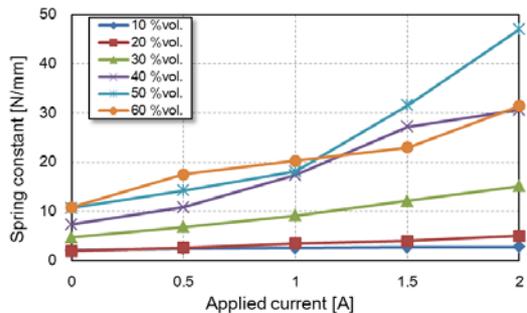
(図 2)



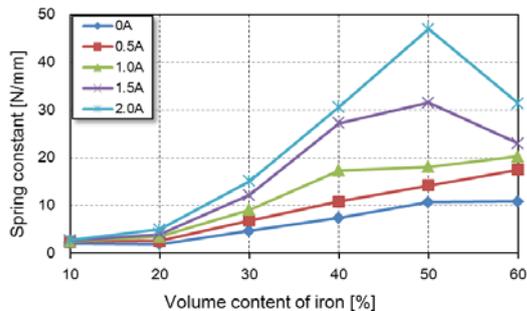
(図 3)



(図 4)



(図 5)



(図 6)

にプロットしたものである。これらの図より、印加電流、つまり磁界強度の増加とともに弾性率が增加することがわかり、無磁場時に対して 2A 印加時に最大で 4 倍強まればね定数が上昇している。また、磁性粒子の含有割合によって弾性率の変化幅が異なるが、検討した範囲では含有率 50%の試料がもっとも変化幅が大きく、材料組成に関する最適値が存在することが示唆される。鉄粉濃度が高くなるほど磁氣的結合力は強まる一方で、充填剤としての効果も高まり無磁場時のばね定数が大きくなるため、結果的に、変化幅を最大にする鉄粉濃度の最適値が存在すると考えられる。さらに、図 5 に示される弾性率の増加傾向から、いずれの試料も印加電流 2A までの範囲では磁束飽和に至っておらず、さらに大きい電流値を加えることでより大きな弾性率変化を得ることが可能と推察される。

なお、試料の硬化過程における磁場印加の有無で静的復元力特性の比較を行った結果、磁場を与えずに硬化させた試料では特性変化がほとんど見込めないのに対して、磁場存在下で作成した試料ではこれまでに述べたとおり大きく変化することが明らかとなった。せん断方向負荷に対する抵抗力の増加は主に分散粒子同士の磁氣的結合力によるものであり、球形粒子を前提とした場合、その結合力は粒子間距離の 3 乗に反比例する。無磁場状態で硬化させたものは粒子がエラストマ内でランダムに存在し、磁界方向へ整列している場合に比べ、粒子同士の平均的な距離が大きく、磁氣的結合力が小さいため、変化幅も小さいと考えられる。

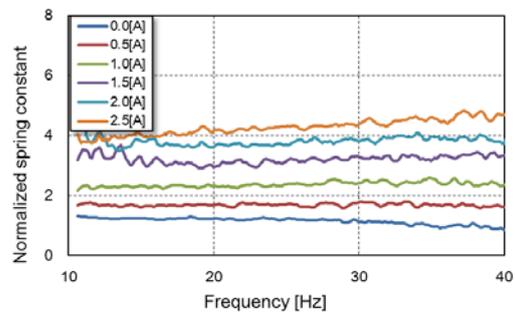
本研究では 3 種類の厚さについて試料を作製し、力学的評価を行ったが、検討した範囲内で厚さは特性変化幅にさほど影響しないことがわかった。ただし、MR エラストマの作製過程における磁場の与え方や気泡発生の問題が結果にばらつきを与えることがわかっており、試料厚さによらず安定した特性を得るためには、硬化過程にて厚さ方向に均一かつ強力な磁場を生成することが重要と考えられる。より確実な物性を得るために、今後さらに作製条件を見直す必要がある。

(2) 動的粘弾性特性試験結果

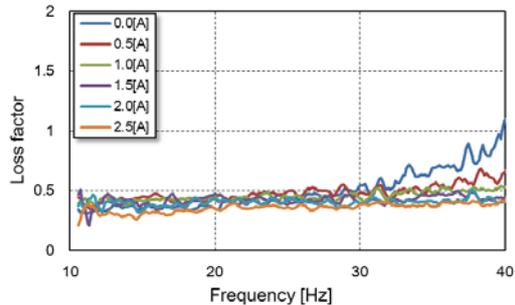
試料厚さ 15mm、磁性粒子の体積含有率 50% の機能性 MR エラストマについて、磁場印加時の動特性評価試験結果の一例を図 7 及び図 8 に示す。図 7 は無磁場時のばね定数を基準として磁場印加時のばね定数を変化倍率で表し、その周波数特性を示したもので、図 8 は損失係数の周波数特性を表す。図 7 より、静的負荷試験の結果と同様、印加電流の増大とともに弾性率が上昇し、その値はほぼ振動数に依存しないことがわかる。また 2.0A 通電時は約 4 倍まで変化しており、静的復元力の場合とほぼ同じ変化幅を確保できている。一

方、図 8 に示す損失係数については 0.5 程度でほぼ一定の値を示しており、印加磁場に応じた明確な特性変化は見られない。よって、提案する機能性 MR エラストマの振動制御への応用にあたっては、粘性ではなく主に弾性の可変性に着目した制御手段を検討する必要があると言える。

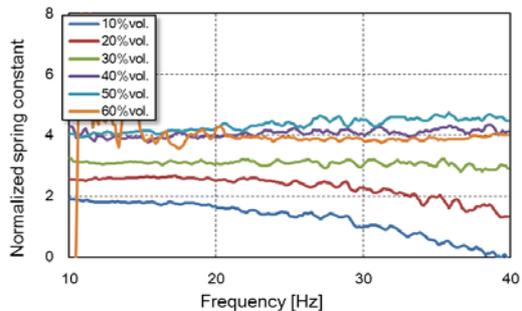
印加電流 2.5A における無次元ばね定数の周波数特性を磁性粒子の含有率が異なる試料と比較したものを図 9 に示す。静的試験で得られた結果と同様、変化幅が最も大きい含有率が存在し、鉄粉濃度が増すことによる磁氣的結合力の上昇よりも、基材のエラストマ自体が構造的に強化されることによる基礎弾性率の上昇効果が上回ることによるものと考えられる。本研究で検討した範囲内では、鉄粉の体積比率を 50%に設定することによって最も大きな弾性変化率が得られることがわかった。



(図 7)



(図 8)



(図 9)

(3) セミアクティブ振動制御の検討

可変剛性制御則の妥当性を検証するために、まずは数値モデルに対してセミアクティブ振動制御シミュレーションを行った。数値計算モデルは機能性 MR エラストマの剛性可変性のみに着目して単純化し、基礎部で変位加振を受ける 1 自由度粘性減衰系として取り扱い、可変剛性制御則に従って磁場の on-off 時に対応した剛性に切り替える。数値モデルに与えたパラメータを表 2 に示す。質量は実測値を用い、剛性 low 及び high 時のばね定数については鉄粉含有率 30% の MR エラストマに関する無磁場時、2A 印加時の固有振動数実測値から逆算して求めた。可変剛性制御の効果を知りやすくするため、減衰係数は実際よりも小さく与えている。また、剛性の切り替わりは瞬間的であり、時間遅れはないものとしてシミュレーションを行った。

基礎加振の周波数を 0~15Hz の範囲に設定し、正弦波によるスイープ加振を行った際の周波数応答曲線を、ばね定数を一定に保持した場合と併せて図 10 に示す。on-off 制御により、伝達率のピークとともに 6Hz 以下の低振動数域では低剛性固定の場合と比較して十分低く抑制されており、同様に高振動数側においても高剛性固定の場合と比べると良好に振動が抑制されている。次に、基礎部にカットオフ 50Hz のランダムノイズによる変位加振を与えた場合の剛性可変制御シミュレーションについて、時刻歴応答波形を 3 通りで比較したものを図 11 に示す。剛性可変制御では明らかに振動制御の効果が表れており、全体的に応答振幅は非制御時の 1/5 程度まで抑えられている。これらの結果より、剛性を二値で切り替えるだけの単純な可変剛性制御則でも十分に制御効果が得られることが確認できた。

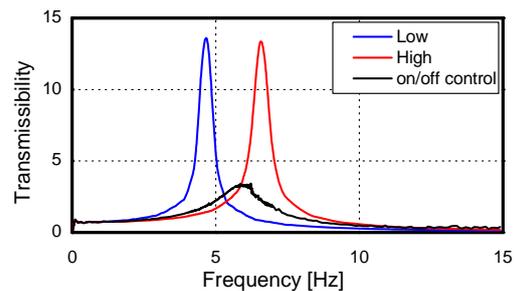
数値計算結果を踏まえ、質量を支持するマウントとして磁性粒子含有率 30%、厚さ 20mm の MR エラストマを採用し、1 自由度振動系を構成して数値計算と同様のセミアクティブ可変剛性制御に関する実験的検討を行った。実験装置は動的試験に用いたものを利用し、コイルを含めた上部鉄心を上載質量、MR エラストマをばね及び減衰要素と見なして構成した。on-off 制御に対応するばね定数の値は、無磁場時を off、2A 印加時を on に対応するばね定数に設定した。加振条件はカットオフ 50Hz のランダムノイズによる変位加振とし、振動絶縁性は、変位の伝達率を FFT アナライザにて求めることで評価した。

ランダム加振時の応答を計測したものを図 12 に示す。on-off 制御結果の比較のために、一定電流 0、1 及び 2A 通電時の応答も同時に示してある。系の持つ減衰が数値計算の場合に比べて大きいため、応答曲線は全体的に低くなっているが、シミュレーションと同

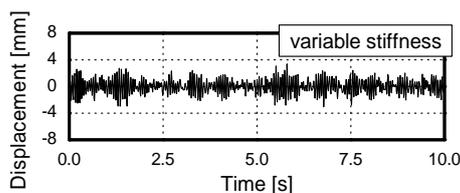
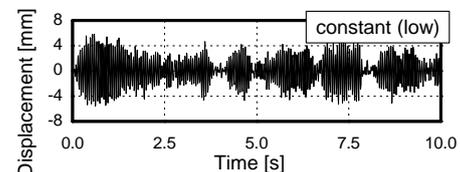
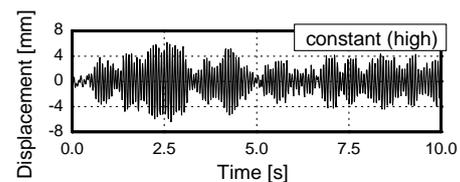
様、on-off 制御時には低振動数側の領域では剛性 high の場合に劣るものの、剛性 low 時と比べると振動絶縁性が高まるのがわかり、高振動数側の領域でも剛性 high の場合に対して十分に振動絶縁性が向上している。また、1A の一定電流を印加した場合に対しても、on-off 制御による伝達率の抑制効果は明らかである。切り替える剛性の高低差が大きいほど、より高い振動絶縁性を得ることができると考えられ、ここでの検討では通電する電流の上限値を 2A としたが、既に述べたように検討した範囲内では MR エラストマに磁束飽和が起きていないことから、より高い電流値を印加することによりさらなる可変剛性変化幅の確保が見込める。

(表 2)

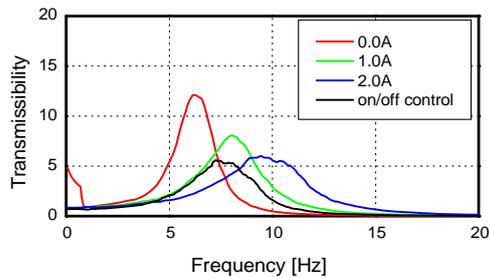
粘性減衰係数	1 Ns/m
質量	1.138 kg
ばね定数 (低剛性)	974.5 N/m
ばね定数 (高剛性)	1948.9N/m
基礎励振振幅	1 mm



(図 10)



(図 11)



(図 12)

以上の結果より、可変剛性型の on-off 制御則を MR エラストマと組み合わせて用いることで、効果的なセミアクティブ振動制御が可能である。

(4) まとめ

本研究では新しい機能性材料として磁場に反応する機能性 MR エラストマを提案し、その静的・動的特性について実験的に評価を行った。また本エラストマを、変位加振を受ける 1 自由度振動系のセミアクティブ振動制御に適用し、可変剛性型の on-off 制御と組み合わせて数値的及び実験的に振動絶縁性の評価を行った。得られた結論は以下の通りである。

①静的試験結果より、電流の大きさによってせん断方向の弾性率が変化することがわかった。本報告における試験では 2.0A の電流印加時に、無磁場時と比較して約 4 倍まで剛性を増加させることができた。

②動的試験において、1 質点系の理論に基づき周波数依存のばね定数および損失係数を推定した。どの振動数領域でも一様に弾性率が大きくなり、最大で 4 倍程度増加した。一方、損失係数についてはほとんど変化しないことが示された。

③可変剛性制御則と組み合わせたセミアクティブ振動制御に関する数値計算及び実験を行い、特性固定時と比較して振動伝達率を抑制することができた。

以上より、本研究で作成した MR エラストマは外部磁場に応じて弾性率可変とすることにより、セミアクティブ防振マウントへの応用が可能であるといえる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

1. 小松崎俊彦, 岩田佳雄, 山下剛, 磁気粘弾性エラストマの開発とセミアクティブ振動制御への応用, 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, 第 77 巻, 第 784 号 (2011), 4510-4520.

[学会発表] (計 6 件)

1. Toshihiko Komatsuzaki, Yoshio Iwata and Shin Morishita, Semi-active Vibration Control of Structures using MR Elastomers, The 14th Asia-Pacific Vibration Conference, 2012 年 12 月 7 日, 香港理工大学 (中国).

2. 小松崎俊彦, 岩田佳雄, 林下宗史, MR エラストマを用いた可変剛性型動吸振器の開発, 日本機械学会北陸信越支部第 49 期総会・講演会, 2012 年 3 月 10 日, 金沢工業大学 (石川県).

3. 小松崎俊彦, 岩田佳雄, 磁気粘弾性エラストマによるセミアクティブ振動制御, 日本機械学会 2011 年度年次大会, 2011 年 9 月 14 日, 東京工業大学 (東京都).

4. 小松崎俊彦, 山下剛, 岩田佳雄, 磁気粘弾性エラストマによるセミアクティブ制振, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2011, 2011 年 9 月 6 日, 高知工科大学 (高知県).

5. 山内勇樹, 木下裕道, 小松崎俊彦, 岩田佳雄, 磁場に反応する MR エラストマの粘弾性特性, 日本機械学会北陸信越支部第 48 期総会・講演会, 2011 年 3 月 5 日, 信州大学 (長野県).

6. 小松崎俊彦, 木下裕道, 岩田佳雄, 小川孝吉, 磁場に反応する機能性エラストマの粘弾性特性, 日本機械学会 2010 年度年次大会, 2010 年 9 月 6 日, 名古屋工業大学 (愛知県).

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 磁性粒子複合粘弾性体及びそれを用いた可変剛性型動吸振器

発明者: 小松崎俊彦, 岩田佳雄

権利者: 金沢大学

種類: 特許

番号: 特願 2012-045308

出願年月日: 2012 年 3 月 1 日

国内外の別: 国内

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

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし