

# 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

著者	小松? 俊彦, 岩田 佳雄, 山下 剛
雑誌名	日本機械学会論文集C編 / Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen / Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C
巻	77
号	784
ページ	4510-4520
発行年	2011-01-01
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/31408">http://hdl.handle.net/2297/31408</a>

doi: 10.1299/kikaic.77.4510

# 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\*

小松崎 俊彦<sup>\*1</sup>, 岩田 佳雄<sup>\*1</sup>, 山下 剛<sup>\*2</sup>

## Development of MR Elastomers and Its Application to Semi-Active Vibration Control

Toshihiko KOMATSUZAKI<sup>\*1</sup>, Yoshio IWATA and Go YAMASHITA

<sup>\*1</sup> Institute of Science and Engineering, Kanazawa University  
Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa, 920-1192 Japan

Magneto-rheological materials are a class of smart materials whose rheological or viscoelastic properties can be varied by applying external magnetic field. MR elastomers (MREs) are the solid analogues of MRF and are expected to overcome the disadvantages of the fluid such as the particle deposition and the sealing problems. When such MREs are exposed to external magnetic field, the strength of the inter-particle force will change and thus their apparent elastic modulus is changed depending on the magnitude of the field. In this paper, the stiffness controllable elastomer composites known as MREs are first fabricated and their field-dependent static and dynamic properties are tested. 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 algorithms.

**Key Words** : Magneto-rheological Elastomers, Functional Materials, Variable Stiffness, Semi-active Vibration Control

### 1. 緒 言

制振技術の開発は、機械構造物の破壊・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上でも重要な課題である。制振手法は大別して、受動型、能動型、準能動型の3種類に分類される。受動型は一般に広く採用されており、振動絶縁の目的で使用する場合、材料自身の有するエネルギー散逸効果で減衰が付与され、安価に構成可能で信頼性に優れている反面、共振ピークを抑制するために減衰係数を高く設定すると高振動数領域での絶縁性が悪化することはよく知られている。また、受動型の対極的な方法として、アクチュエータを装備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、振動抑制の大幅な向上が見込める半面、装置の複雑化やコスト等が実用上の問題となる。さらに、これらの中間に位置する準能動型では、受動型では本来変化しない減衰係数などのパラメータを可変とすることで、受動型に由来する信頼性を確保しつつ、制御性に限界はあるものの、比較的 low コストで能動型に近い制御性能を得ることが可能である。

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て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) は良く知られており、変化幅が大きく応答性も良好なため、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<sup>(1)</sup>。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る。

そこで、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 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

\* 原稿受付 2011 年 07 月 28 日

<sup>\*1</sup> 正員, 金沢大学理工研究域機械工学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

<sup>\*2</sup> 学生員, 金沢大学大学院自然科学研究科

E-mail: toshi@t.kanazawa-u.ac.jp

として、磁気粘弾性エラストマ (Magneto-rheological Elastomer, MR エラストマ) の開発を行った。本報告では、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 MR エラストマの振動制御に対する有効性を検証した結果について報告する。

## 2. MR エラストマの作製

### 2・1 MR エラストマの概要

MR 流体の強磁性体分散粒子は  $1\sim 10\mu\text{m}$  であり、無磁化時に粒子は分散媒中に均一に分散している。外部から磁場を印加すると、図 1 のように各粒子は磁気的に分極し、それぞれの粒子間に結合力が生じクラスタを形成する (MR 効果)。したがって MR 効果は粒子の磁化率、すなわち外部からの印加磁場強度によってある程度可変にできる。本研究では、鉄の磁場反応性に着目しつつ、MR 流体における粒子の沈殿を回避するために、半固体のエラストマ中に粒子を内包させた MR エラストマを開発し、その磁場に対する粘弾性特性を実験的に調べた。エラストマ中に粒子を固定することの利点として沈殿を回避することの他に、MR 流体のようにシール性を考慮する必要がないこと、任意形状に成形することが容易に可能で、形状保持されるためそのまま機構に組み込むことができることなどが挙げられる。ただしその反面、磁性粒子の易動性は悪くなるため、MR 流体ほどの特性変化は見込めない。また、弾性的性質が支配的なエラストマ材を基質として用いるため、MR 流体では主に粘性変化を評価するのに対し、MR エラストマでは粘弾性特性を評価する必要がある。

これまでも MR エラストマに関する研究は見られるが<sup>(2)-(6)</sup>、特性変化幅の向上を目指し、効果的な材料選定や材料組成、磁性粒子の配向など基礎物性に関する研究<sup>(2), (3)</sup>や、磁場に対する粘弾性特性変化を理論的に予測する構成式の検討<sup>(4)-(6)</sup>などが主流であり、MR エラストマの一般的作成方法や特性評価法、予測式等は確立されておらず、開発途上にあると思われる。また振動制御への適用など、具体的応用事例は少ない。ただしこれらの研究において、基質のエラストマに低剛性のものを採用し、エラストマの硬化過程において磁場を印加して粒子を磁界方向に配向させることで、MR エラストマの特性変化幅をある程度大きくできることが示されている。本研究でもこの点に着目して MR エラストマの作成を行う。

### 2・2 MR エラストマの作製方法

本実験で作成した試料には、基質として二液性シリコーンゲルを使用し、磁性体に充填剤用鉄粉 (粒子径約  $20\mu\text{m}$ ) を使用した。また、硬化後の弾性率が無添加時に比べ小さくなるように希釈剤を使用し、原液と希釈剤との体積比が 10:3 の割合のものを液材とした。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 MR エラストマ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 2 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。

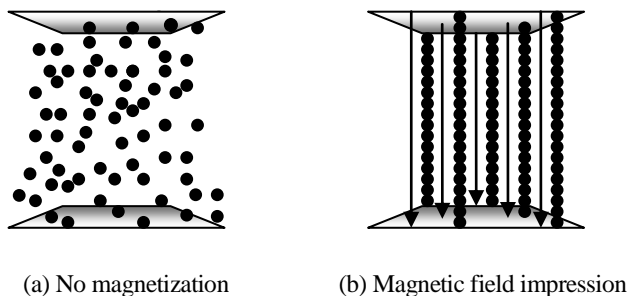


Fig.1 Expression mechanism of MR effect

### 3. 静的試験

試作した MR エラストマの磁場に対するせん断力の変化を調べるために、図 3 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配合比（体積比）、試料の厚み、及び硬化過程における磁場の有無の条件を変えて作製した数種類の 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、載荷後、10 秒程度の時間をおいて変形量が安定した際の値をレーザ変位計にて測定した。測定にあたっては、常に室温を 26°C に保った。電磁石に電流を印加すると 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。なお、図 4 に示すように、印加電流値と励起される磁束密度とはほぼ線形関係と見なすことができ、鉄粉含有率による通過磁束密度の差は小さい。

Table 1 Composition of MRE samples

Thickness	5, 10, 15, 20 (mm)
Volume content of iron	17, 23, 29, 33, 38, 44, 50 (%)
Curing condition	with / without magnetic field



(a) MRE without magnetic field

(b) MRE under magnetic field

Fig. 2 Microscopic view of MRE

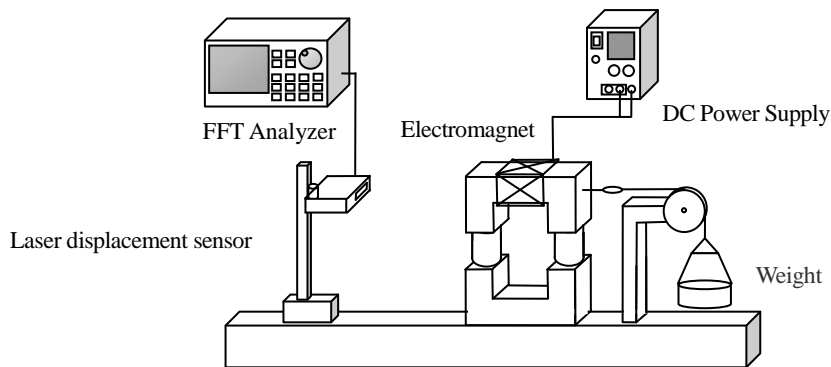


Fig.3 Experimental setup of static shear loading

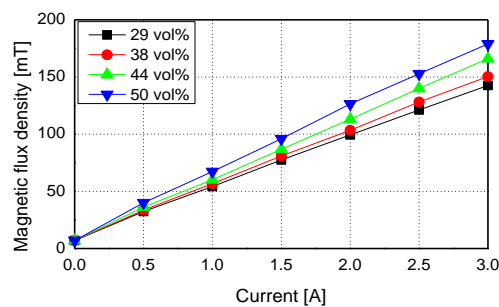


Fig.4 Measured magnetic flux density for respective MRE samples

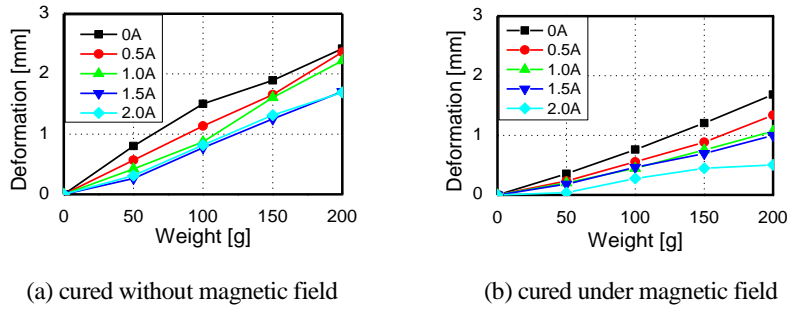


Fig.5 Comparison of stationary characteristics of MRE

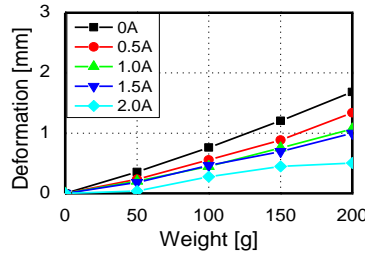


Fig.6 Stiffness variation of MRE against applied current

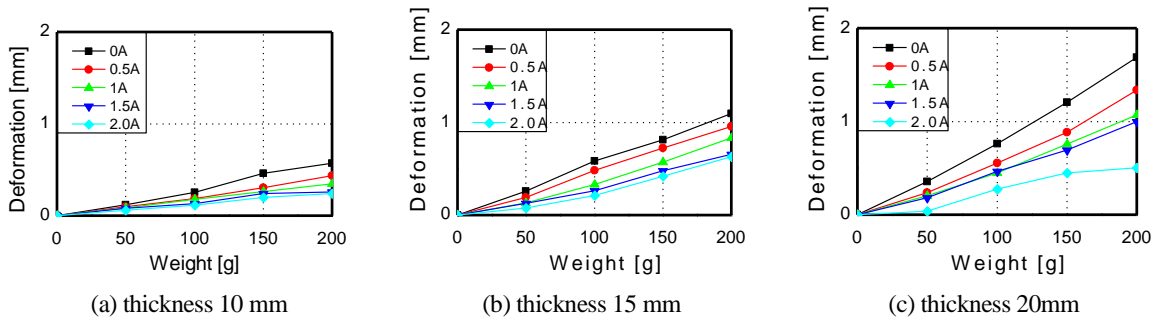


Fig.7 Comparison of stationary characteristics by thickness of processed MRE

### 3・1 硬化時の磁場の有無による復元力特性比較

エラストマの厚みを 20mm, 混合する基材と鉄粉との体積比を 10:4 (鉄粉の体積割合 29%) に固定し, 硬化過程において磁場を印加した場合としない場合との静的復元力特性の比較を行った. これら 2 種類の MR エラストマについて, 荷重に対する変形量をプロットしたものを図 5 に示す. 図 5 より, 磁場の無い状態で作製した MR エラストマでは, 印加磁場による変形特性の差異は小さいのに対して, 磁場存在下で硬化させたエラストマでは印加磁場の大きさに応じて変形量が小さくなっていることがわかる. また, 荷重 - 変形量の関係が線形であると見なし等価的なばね定数を求め, 磁場を印加しない場合のばね定数に対する変化率として表したものを図 6 に示す. 磁場存在下で硬化させた MR エラストマでは, 2A の電流印加時に約 3 倍程度まで剛性が高くなっている. 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<sup>(4)</sup>. 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, 後者のように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.

### 3・2 試料の厚みによる復元力特性の比較

厚みを 10mm, 15mm 及び 20mm の 3 通りに作製した MR エラストマについて, 磁場印加時の荷重に対する変形量をプロットしたものを図 7 に示す. また, 図 7 をもとに, 無磁場時に対する磁場印加時のばね定数の変化割合を求めたものを図 8 に示す. これらの試料はいずれも鉄粉の体積割合を 29% に設定し, 硬化過程で磁場を与えて作製したものである. 図 7 より, 厚みが小さいほど変形量は小さく, ばね定数は全体的に高くなるが見て

取れるが、図8に示されているように外部磁場に対するばね定数の変化幅は、厚みによらずほぼ同程度であることがわかる。ただし、20mm厚のものについては2.0A印加時に3倍程度まで変化しており、より強力な磁場を印加した場合についてもばね定数の変化量を検証する必要がある。

### 3・3 鉄粉の配合比による復元力特性の比較

MR エラストマの厚みを20mmに固定し、混合する鉄粉の体積割合を数種類に変えて磁場印加時の剛性変化幅を比較した。ばね定数の変化割合を印加電流に対してプロットしたものを図9に示す。印加電流値が1A程度までの範囲においては、鉄粉含有量によらずばね定数の変化幅はほぼ同じであるが、それ以上では鉄粉含有量の違いによって結果に差異が現れている。これを詳しく見るために、ばね定数の変化割合を鉄粉含有率に対してプロットし、印加電流の違いで比較したものを図10に示す。これより、電流値1.5A、2.0Aにおいて試料間に明らかな違いが現れていることが確認でき、本実験で検討した範囲内では体積含有率44%（基材と鉄粉の体積比率10:8）のものが、もっとも大きく変化している。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。

以上に述べた静的復元力特性の結果より、エラストマの硬化過程において磁場を与え、磁性粒子を磁力線の方に整列させたほうが変化幅が大きくなること、試料の厚みについては検討した範囲内でさほど影響しないこと、及び変化幅を最大にする最適な鉄粉濃度が存在することがわかった。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、より確実な物性を得るために今後、これらの作製条件を見直す予定である。

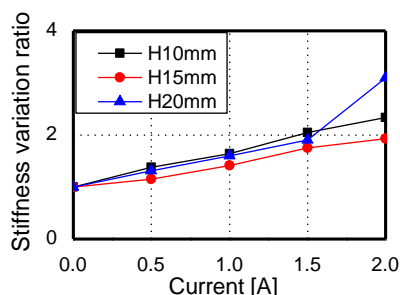


Fig.8 Stiffness variation of MRE with different thickness

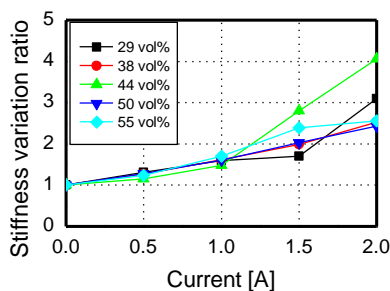


Fig.9 Stiffness variation of MRE with different iron content

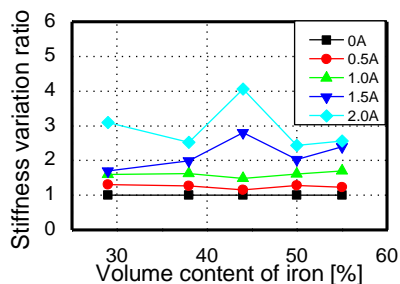


Fig.10 Stiffness variation against iron volume content

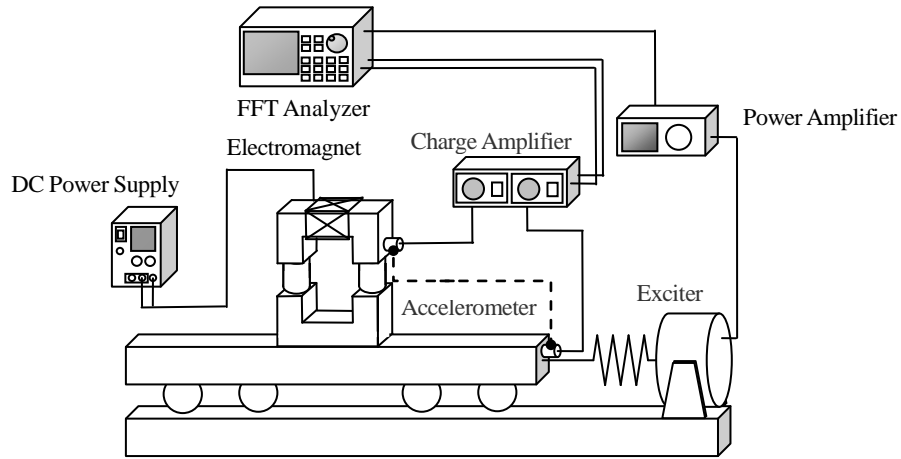


Fig.11 Viscoelastic property measurement system

#### 4. 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 11 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。動的試験では、エラストマと鉄粒子の配合比を変えた数種類の MR エラストマを対象とし、厚みは 20mm に統一した。また、静的試験の場合と同様に、硬化過程における磁場印加の効果を確認するために、2 通りの方法で作成した試料の比較も行った。これらの試料に対して、印加電流を 0~2.0A 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、得られた伝達関数より、下記の理論<sup>7)</sup>に従い複素ばね係数を求めた。

質量を  $m$ 、絶対変位を  $x$ 、振動台の変位を  $u$ 、試料の複素ばね定数を  $k^*$  とすると、強制振動の運動方程式は次のように書ける。

$$m\ddot{x} = -k^*(x-u) \quad (1)$$

質量の振動台からの相対変位を  $y$  とすると、式(1)は次のように書き直せる。

$$m\ddot{y} + k^*y = -m\ddot{u} \quad (2)$$

ここで複素ばね定数  $k^*$  を、周波数依存性を考慮して次のように定義する。

$$k^*(\omega) = k'(\omega)\{1 + j\eta(\omega)\} \quad (3)$$

式(3)において、 $k'(\omega)$  はばね定数、 $\eta(\omega)$  は損失係数である。式(2)及び式(3)より、加速度伝達関数は次式のように求まる<sup>2)</sup>。

$$G(j\omega) = \frac{k'(\omega) + jk'(\omega)\eta(\omega)}{\{k'(\omega) - m\omega^2\} + jk'(\omega)\eta(\omega)} \quad (4)$$

ここで式(4)を  $G(j\omega) = G_R + jG_I$  のように表現すると、 $k'(\omega)$  と  $\eta(\omega)$  は伝達関数実測値の実部・虚部より次式で求めることができる。

$$k'(\omega) = \frac{\{G_R(G_R - 1) + G_I^2\}m\omega^2}{(G_R - 1)^2 + G_I^2} \quad (5)$$

$$\eta(\omega) = \sqrt{-1 + \frac{(2G_R - 1)m\omega^2}{(G_R - 1)k'(\omega)} - \frac{G_R m^2 \omega^4}{(G_R - 1)k'(\omega)^2}} \quad (6)$$

#### 4・1 試料作製方法の違いによる粘弾性特性の比較

静的試験と同様に、まずは硬化過程における磁場の有無によって作成方法の異なる2種類の試料の特性比較を行った。試料の厚みは20mm、鉄粉の体積割合は29%で統一している。これらの試料について、実測した加速度伝達関数の実部・虚部から式(5)、(6)に従い計算されたばね定数  $k'(\omega)$  及び損失係数  $\eta(\omega)$  のグラフを図12、図13に示す。なお、加振器及び加速度センサの特性上、10Hz以下の領域については伝達関数が乱れ、信頼性のある結果が得られないため除いている。ばね定数及び損失係数ともに、無磁場状態で作成した試料のほうが磁場に対する特性の変化幅が小さく、その一方で、磁場存在下で作成した試料では両パラメータともに最大で約1.5倍まで周波数域全体に渡り変化していることがわかる。また、ばね定数に関しては若干の周波数依存性も現れている。静的復元力特性ほど変化幅は大きくはないが、ここでも硬化過程における磁場印加の効果を確認できた。

#### 4・2 鉄粉の配合比による粘弾性特性の比較

続いて、エラストマに混合する鉄粉の体積割合を数種類に変えて磁場印加時の粘弾性特性を比較した。ここでは各々の試料について、無磁場時の固有振動数におけるばね定数を基準として、印加電流2Aの場合のばね定数の変化割合を求め、相互に比較を行った。図14に示すように、鉄粉の体積割合が44%までは濃度が増すにつれ変化幅も大きくなっているが、それ以上になると反対に変化幅が小さくなっている。これは静的試験で現れた結果と同様に、鉄粉濃度が増すことによる磁氣的結合の上昇よりも、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。従って、本報告で検討した範囲内では、鉄粉の体積比率44%のMRエラストマが最も変化率が大きいため、以後のセミアクティブ振動制御においてはこの試料を可変剛性型のマウントとして採用することとした。なお粘性率の可変性についても振動制御に利用可能であるが、そもそも無磁場時の基礎粘性が小さいためダンピングには不向きと考えられること、及び見かけの粘性を大幅に可変にできるMR流体との差別化を図る意味でも、ここでは弾性率の変化のみに着目して振動制御を試みることにする。

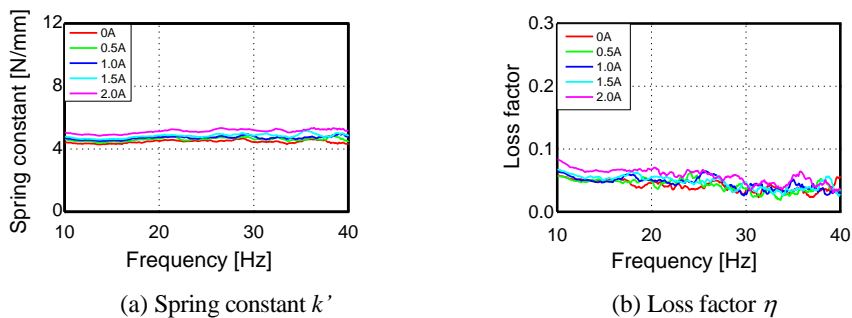


Fig.12 Complex stiffness constant for MRE cured without magnetic field

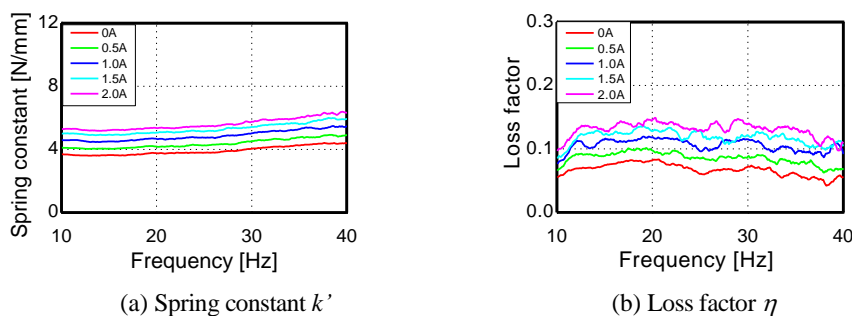


Fig.13 Complex stiffness constant for MRE cured under magnetic field



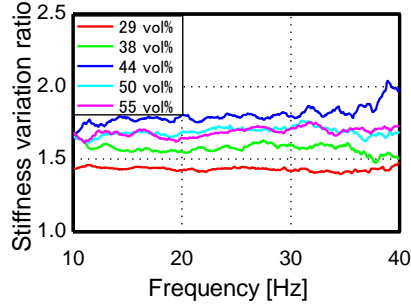


Fig.14 Comparison of stiffness variation with different iron powder concentration

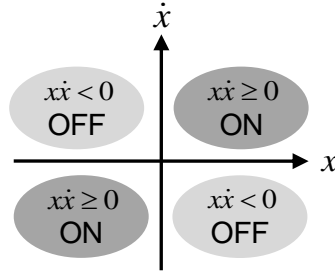


Fig. 15 On-off switching in variable stiffness control

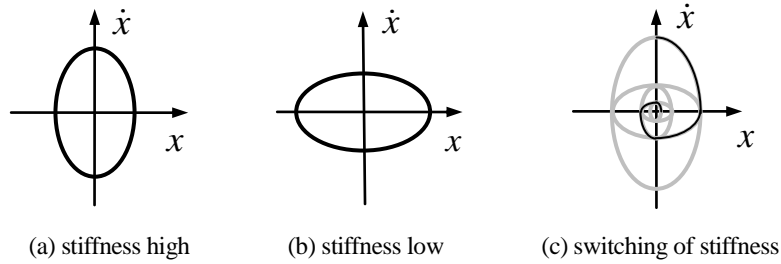


Fig. 16 Illustration of variable stiffness control concept

## 5. MR エラストマのセミアクティブ振動制御への応用

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 自由度振動系モデルの支持要素として 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。粘性の可変性に着目したセミアクティブ型の制御方式としてスカイフック理論が良く知られており<sup>(8)</sup>、その中でも装置、制御則が簡略化される利点を持つ on-off 型の制御方式が存在するが<sup>(9)</sup>、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<sup>(10)</sup>。切り替え規則は式(7)で表現される。

$$K = \begin{cases} k_1 \text{ (high)} & \text{if } x\dot{x} \geq 0 \\ k_2 \text{ (low)} & \text{if } x\dot{x} < 0 \end{cases} \quad (7)$$

ただし、 $k_1$ 、 $k_2$  はばね定数 ( $k_1 > k_2$ )、 $x$ 、 $\dot{x}$  は絶対変位と絶対速度を表す。式(7)の規則を位相平面上にて模式的に表すと図 15 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。理論上は、可変剛性制御則を用いることで、減衰項がなくても漸近安定なシステムを構築することができる。その理由は図 16 に示す通り、剛性が高い場合は位相平面上で速度軸の方向に縦長の軌跡 (図 16(a))、低い場合は変位軸の方向に横長の軌跡を描き (図 16(b))、両軌跡を適切なタイミングで切り替えることで、図 16(c) のように原点に収束する軌跡が描かれることによる。

### 5・1 セミアクティブ振動制御シミュレーション

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。数値計算モデルは弾性的性質が支配的な 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 MR エラストマに対する磁場の 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。質量は実測値をそのまま用い、剛性 low 及び high 時のばね定数についてはそれぞれ無磁場時、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わかりやすくするため、減衰係数について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ている。

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図 17 に示す。on-off 制御結果とともに、ばね定数を low 及び high 一定のまま保持した場合の結果も示してある。on-off 制御により、伝達率のピークは抑制されており、6Hz 以下の低振動数域では剛性 high の場合と比べると振動絶縁性がやや劣るものの、剛性 low の場合と比較すると十分低く抑制されている。同様に高振動数側においても、剛性 high 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を行った。剛性 low 及び high で固定した場合と併せて、時刻歴応答波形を 3 通りで比較したものを図 18 に示す。剛性を固定した場合に比べ、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比較的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。

Table 2 Parameter used in simulation

Damping coefficient	1 Ns/m
Mass	1.138 kg
Spring constant (low)	974.5 N/m
Spring constant (high)	1948.9N/m
Base excitation amplitude	1 mm

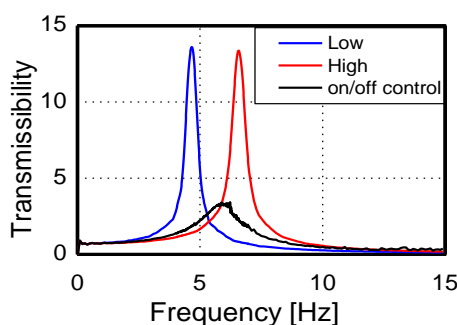


Fig. 17 Frequency response by sweep excitation (simulation)

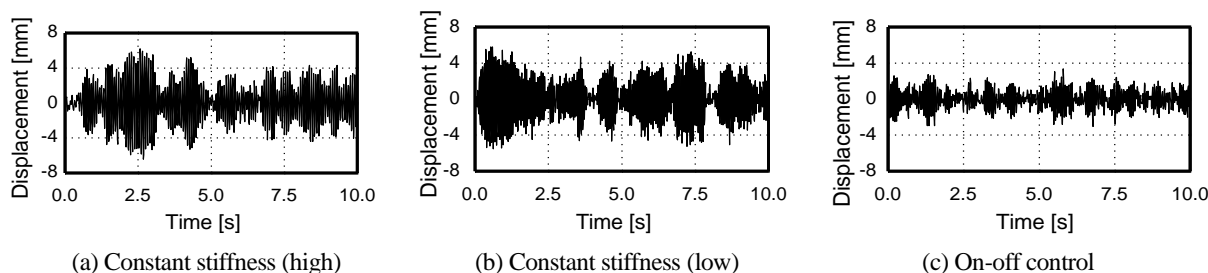


Fig. 18 Time history of random excitation (simulation)

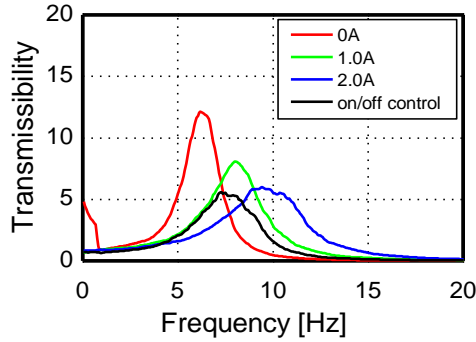


Fig. 19 Frequency response by random excitation (experiment)

## 5・2 セミアクティブ振動制御実験

数値計算によって可変剛性制御則の有効性が確認されたので、質量を支持するマウントとして鉄粉の体積比率44%、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。実験装置は粘弾性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制御に用いるばね定数の値は、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、上載質量及び振動系基礎部の変位をともにレーザ変位計にて取得した。変位データはリアルタイムにADボードを介してPCへ取り込まれ、式(7)の制御則に従ってコイルへ通電するon-off信号を生成し、DAボードを介して直流アンプへ出力する。なお、質量の絶対速度は変位取得値を数値的に時間微分することで得た。振動絶縁性は、変位の伝達率に相当する両変位間の伝達関数をFFTアナライザにて求めることで評価した。

ランダム加振による応答を計測したものを図19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ことがわかり、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、今回の検討では通電する電流の上限値を2Aとしたが、静的及び動的的特性試験での結果を見る限り、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。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。

## 6. 結 言

本研究では新しい機能性材料として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制御と組み合わせることで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3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 $k(\omega)$ および損失係数 $\eta(\omega)$ を推定した。どの振動数領域でも一様にばね定数及び損失係数が大きくなることがわかった。これらはともに最大で1.5倍程度増加した。
- (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特性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。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、パウダーテック株式会社より素材を提供いただいたことに謝意を表す。また本研究は、科学研究費補助金（若手研究(B)，課題番号 22760171）の交付を受けて実施されたものである。

## 文 献

- (1) 土屋高志, 森下信, 安永供, 阿部裕子, “MR 流体を用いた可変減衰マウントによる振動制御”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 65, No. 640 (1999), pp. 4671-4676.
- (2) Gong, X. L., Zhang, X. Z. and Zhang, P. Q., “Fabrication and Characterization of Isotropic Magnetorheological Elastomers”, *Polymer Testing*, Vol. 24 (2005), pp. 669-676.
- (3) Zhang, X., Peng, S. Wen, W. and Li, W., “Analysis and Fabrication of Patterned Magnetorheological Elastomers”, *Smart Materials and Structures*, Vol. 17 (2008), pp. 1-5.
- (4) Jolly, M. R., Carlson, J. D., Muñoz, B. C. and Bullions, T. A., “The Magnetoviscoelastic Response of Elastomer Composites Consisting of Ferrous Particles Embedded in a Polymer Matrix”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 7 (1996), pp. 613-622.
- (5) Davis, L. C., “Model of Magnetorheological Elastomers”, *Journal of Applied Physics*, Vol. 85, No.6 (1999), pp. 3348-3351.
- (6) Zhou, G. Y., “Shear Properties of a Magnetorheological Elastomer”, *Smart Materials and Structures*, Vol. 12 (2003), pp. 139-146.
- (7) 清水信行, 山崎秀夫, “新素材シリコーンゲルを用いたインシュレータの開発”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 59, No. 568 (1993), pp. 3717-3724.
- (8) Karnopp, D., Crosby, M. J. and Harwood, R. A., “Vibration Control Using Semi-Active Force Generators”, *Transactions of ASME, Journal of Engineering for Industry* (1974), pp. 619-626.
- (9) Rakheja, S. and Sankar, S., “Vibration and Shock Isolation Performance of a Semi-Active “On-Off” Damper”, *Transactions of ASME, Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*, Vol. 107 (1985), pp. 398-403.
- (10) 根來仁, 上野山勝, 朝見聡, 光田慎治, 辻英樹, 伊藤博幸, “2 室型空気ばねを用いたスカイフック剛性制御”, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2002 講演論文集, No. 02-9 (2002), CD-ROM.