

# 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

著者	小松崎 俊彦, 岩田 佳雄, 林下 宗史, 川越 啓司
雑誌名	TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS Series C
巻	79
号	806
ページ	3680-3690
発行年	2013-01-01
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/36517">http://hdl.handle.net/2297/36517</a>

doi: 10.1299/kikaic.79.3680

# 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\*

小松崎 俊彦<sup>\*1</sup>, 岩田 佳雄<sup>\*1</sup>, 林下 宗史<sup>\*2</sup>, 川越 啓司<sup>\*2</sup>

## Development of a dynamic vibration absorber with variable stiffness property using Magneto-rheological Elastomer

Toshihiko KOMATSUZAKI<sup>\*1</sup>, Yoshio IWATA, Hirofumi RINGE and Keiji KAWAGOSHI

<sup>\*1</sup> Institute of Science and Engineering, Kanazawa University  
Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa, 920-192 Japan

The dynamic vibration absorber is well known as a kind of passive-type vibration control device, where the mass and the stiffness elements basically comprise 1-dof system. Despite the reliability and the simplicity in constitution, the absorber does not work effectively for unexpected disturbances. The use of the absorber with fixed property is usually limited to a harmonically excited case, where the damper is only effective for pre-determined narrow frequency range. The damper design following well-known optimal tuning theory can extend the effective range, whereas the damping performance remains at a certain amount and yet the vibration caused by transient disturbances cannot be reduced sufficiently. A frequency-tunable dynamic absorber incorporating element with variable stiffness property can be a measure for placing adaptability to the structure against non-stationary disturbances, but the realization of such variability would be mechanistically complex and the problem of response time may become an issue. The Magneto-rheological elastomer (MRE) is known as a class of smart materials whose elastic property can be varied by the applied external magnetic field. In this paper, the MRE is adopted as the stiffness element in the dynamic absorber whose natural frequency is tunable by the external magnetic field. Both numerical and experimental investigations show that the vibration of 1-dof structure can be fully reduced by the proposed dynamic absorber with variable stiffness functionality.

**Key Words** : Magneto-Rheological Elastomers, Functional Material, Variable Stiffness, Dynamic Absorber, Vibration Control

### 1. 緒 言

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御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<sup>(1)</sup>。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、建築物などは地震や風などの非定常外力によって振動するため、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<sup>(2)-(4)</sup>、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。

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

\* 原稿受付 2013年5月17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@se.kanazawa-u.ac.jp

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。アクチュエータの発生力を直接的に制振へ利用する能動型では制振性能の大幅な向上が見込める半面、装置の複雑化やコスト、投入エネルギーの大きさ等が実用上の問題となるのに対して、準能動型では減衰係数などのパラメータを何らかの手段で可変とすることで、受動型に由来する信頼性を確保しつつ、比較的低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。中でも機能性材料の一つとして、外部磁場に応じて見かけの粘弾性特性を変化させることのできる磁気粘弾性エラストマ (Magneto-rheological Elastomer, MR エラストマ) の開発及びその応用的研究が近年盛んになりつつある<sup>(5)-(11)</sup>。著者らは既報<sup>(6)</sup>において、MR エラストマの試作を行い、その静的復元力特性及び動的粘弾性特性について基礎的評価を行った。さらに、本エラストマを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、1 自由度の模型構造物に対して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を適用し、本 MR エラストマの振動制御に対する有効性を示した。ただし、MR エラストマの基本特性に関するばらつきを抑制するためには、作製過程における印加磁場の不均一性、気泡発生の問題等について改善を図る必要があり、継続的に見直しを行っているところである。

本研究では、MR 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。まずは、過去の試料作成方法の見直しを図り、攪拌と同時に脱泡処理を施しつつ、硬化過程において極力、磁場が均一になるように配慮して MR エラストマを作成し、その磁場に対するせん断方向の復元力特性について既報と同様に評価を行った結果を示す。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、1 自由度振動系に可変剛性型動吸振器を取り付け、振動系に調和外力を与えた際の振動制御シミュレーションおよび実験を行い、その制振特性について数値的及び実験的に評価することで、本 MR エラストマを用いた可変剛性型動吸振器の有効性を検証した。

## 2. 磁気粘弾性エラストマの概要

磁気粘弾性エラストマ (Magneto-rheological Elastomer, MRE) は機能性材料の一つであり、半固体のエラストマ中に鉄などの磁性微粒子を分散固定させたものである。同じく機能性材料に分類され、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、分散媒中に粒子径  $1\sim 10\mu\text{m}$  の強磁性体粒子を界面活性剤によって分散させた懸濁液である。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が<sup>(12)</sup>、流体のためシール性の確保が必要という本質的な事項に加え、分散粒子の沈降や凝集、経年劣化などがしばしば問題となる。MR エラストマの開発初期においては、MR 流体における粒子沈殿の問題解決を図ることに主眼が置かれていたようであるが、エラストマ中に粒子を固定することの利点として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等が挙げられることから、工学分野において様々な応用が期待される材料である。両者の本質的な違いは、MR 流体では主に見かけの粘性変化を生ずるのに対し、MR エラストマでは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、弾性的性質の変化が主となる。従って、試作した MR エラストマに対して、まずは静的負荷を与えた場合の復元力特性を実験的に調べるとともに、加振試験で得られた入出力間の伝達関数から粘弾性特性を調べた。

従来の MR エラストマに関する研究としては、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>(6)-(8)</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>(9)-(11)</sup>などが行われているが、材料開発、理論及び応用面いずれも途上にあり、今後ますます多くの研究開発が進むことが期待される。

### 2.1 MR エラストマの作製

本研究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、磁性体に粒子径約  $10\mu\text{m}$  のカルボニル鉄粉を使用した。磁性粒子はエラストマ硬化後、試料内にはほぼ固定化され、MR 流体の場合ほど磁性粒子の易動性は見込めない。この問題については、硬化過程において外部磁場を加え、あらかじめ粒子が互いに接近シクラスタ形成された状態で試料内に保持されるようにすれば、磁氣的結合力の变化幅を大きく確保できることがわ

かっている。本報告でもそれに従い、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。硬化開始前の材料混合過程を真空デシケータ内にて脱泡処理と同時に行い、その直後に空芯コイル内へ混合物を容器ごと静置して磁場を与えた。エラストマ断面は25×25mm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10%～60%の6通りに設定して試料の作製を行った。

## 2・2 静的負荷試験

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1に示す測定装置を用いて静的負荷実験を行った。鉄粉含有率の異なる各々のMRエラストマ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0～400gの静的荷重を与え、このときの変形量をレーザ変位計にて測定した。また、印加電流値は0～2.0Aまで0.5A刻みで与え、印加磁場強度による静的復元力特性の変化を調べた。なお、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、0.5A印加時の磁束密度は約25mTである。

各々の鉄粉体積割合について作成した複数試料の特性のばらつきは少ないことが確認できたので、各割合の一つずつについて荷重と変形量との関係から算出したばね定数を図2に示す。図2(a)より、いずれの鉄粉割合の試料も印加電流の増加に伴って見かけの弾性率が上昇していることがわかる。また、図2(b)は磁場を印加しない状態の剛性を基準として、磁場印加時の剛性変化倍率をプロットしたものであるが、MRエラストマの鉄粉割合が10%から50%までの範囲においては、鉄粉の含有割合が高くなるほどばね定数の変化幅が大きくなり、50%付近においておおむね変化割合が最大に達しており、検討した試料の中では最大で約4.2倍の剛性の変化を示した。しかし、鉄粉割合が50%を超えると変化幅が小さくなる傾向にあり、鉄粉割合が増加したことで基質エラストマ内鉄粉の磁氣的結合力が増す一方、材料の充填効果によってMREの無磁場時における基礎剛性が増し、両者の兼ね合いによって磁場印加時の硬さの変化が40%や50%のMREと比較して小さくなったためと考えられる。

以上に述べた静的復元力特性の結果より、MRエラストマへの印加磁場強度が増大すると剛性も大きくなり、最大で約4倍の変化を示すことがわかった。

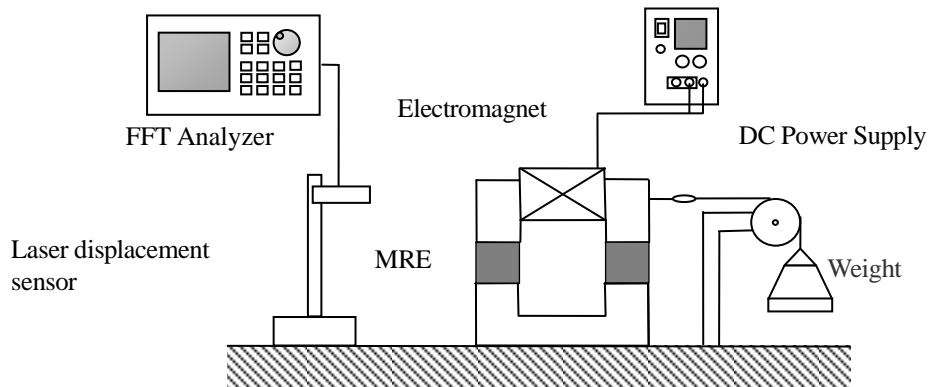
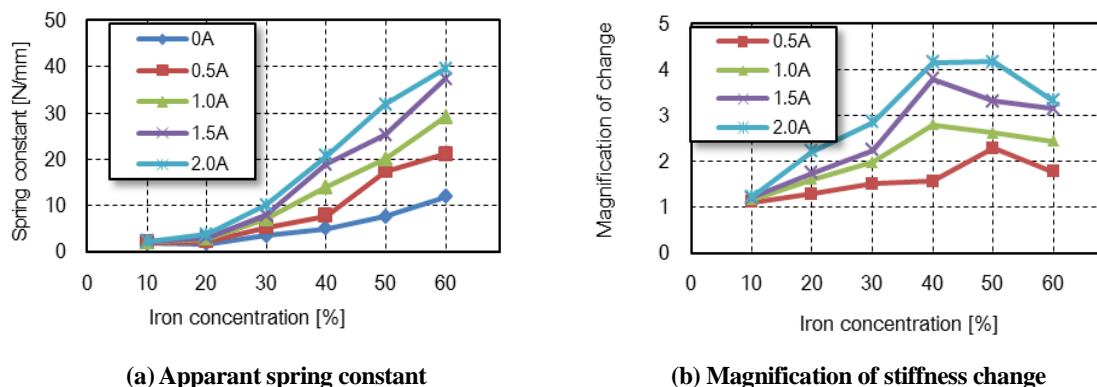


Fig. 1 Experimental setup of static shear loading



(a) Apparent spring constant

(b) Magnification of stiffness change

Fig. 2 Comparison of stationary characteristics of MRE

### 2・3 動特性試験

図3に示す動特性試験装置を用いてMR エラストマの粘弾性特性を調べた。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、基礎部に変位加振を与える。上載質量は1.1 kgである。ホワイトノイズ加振時（～50Hz）の基礎部及び上部質量の加速度から加速度伝達関数を求める。印加電流は0～2.5Aの範囲で0.5Aずつ変化させた。さらに、得られた加速度伝達関数より複素ばね定数を求めた。周波数依存性を有する複素ばね定数は次のように定義される。

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

式(1)において、 $k_0$ は磁場を印加しない状態における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。加速度伝達関数は次式のように書ける<sup>(13)</sup>。

$$G(j\omega) = \frac{\nu(\omega) + j\eta(\omega)\nu(\omega)}{\{\nu(\omega) - \lambda^2\} + j\eta(\omega)\nu(\omega)} \quad (2)$$

式(2)において、 $\lambda = \omega / \omega_0$ 、 $\omega_0$ は無磁場時の1自由度系の固有振動数である。式(2)を、実部・虚部に分けて  $G(j\omega) = G_R + jG_I$  のように表現し、 $\nu(\omega)$ と $\eta(\omega)$ を伝達関数実測値の実部・虚部から次式で求める。

$$\nu(\omega) = \frac{G_R(G_R - 1) + G_I^2}{(G_R - 1)^2 + G_I^2} \lambda^2 \quad (3)$$

$$\eta(\omega) = \sqrt{-1 + \frac{(2G_R - 1)\lambda^2}{(G_R - 1)\nu(\omega)} - \frac{G_R\lambda^4}{(G_R - 1)\nu(\omega)^2}} \quad (4)$$

加振装置特性の都合上、10Hz以上を評価対象とし、無次元ばね定数と損失係数を算出した結果を図4に示す。50m/s<sup>2</sup>程度の入力加速度レベルに対して、振動系の応答加速度レベルがその1/10程度未満の場合に、高振動数領域において損失係数の値が著しく大きくなる傾向が見られ、エラストマが柔らかく、かつ振動数が高くなるほど基礎から振動系へ伝達される振動加速度の絶縁性が増し、その領域にて加速度伝達関数が精度よく計測できなかったことがその要因と考えられる。この点を除けば、無次元ばね定数と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。無次元ばね定数については、いずれの試料においても無磁場時で最低値を取り、印加電流が増加するにつれて値が大きくなる。MR エラストマの鉄粉含有率が高くなるとMR エラストマの無次元ばね定数の変化の割合も高くなり、最大で約4倍の変化が得られた。また、50%から60%にかけては変化の割合は小さくなり、静負荷試験のときと同様の傾向が見られた。一方、損失係数については、どのMR エラストマについても平均して約0.2の値となり、磁場の有無に関わらずほとんど変化しないことがわかった。以後の可変剛性型動吸振器の検討においては、鉄粉体積割合40%、50%、60%のMR エラストマを採用する。

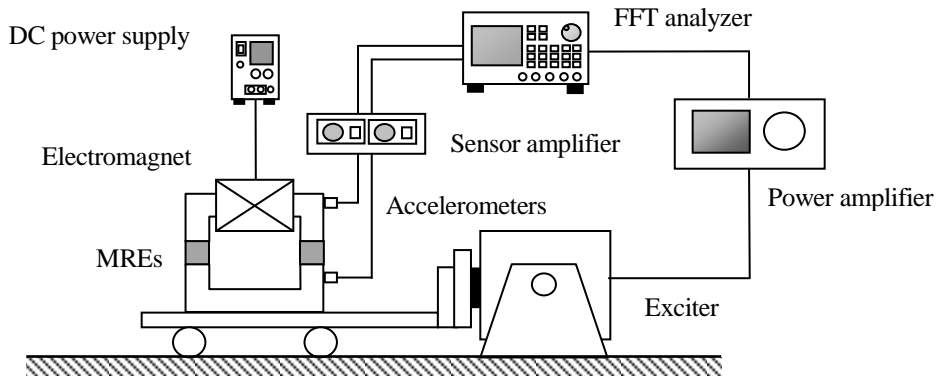
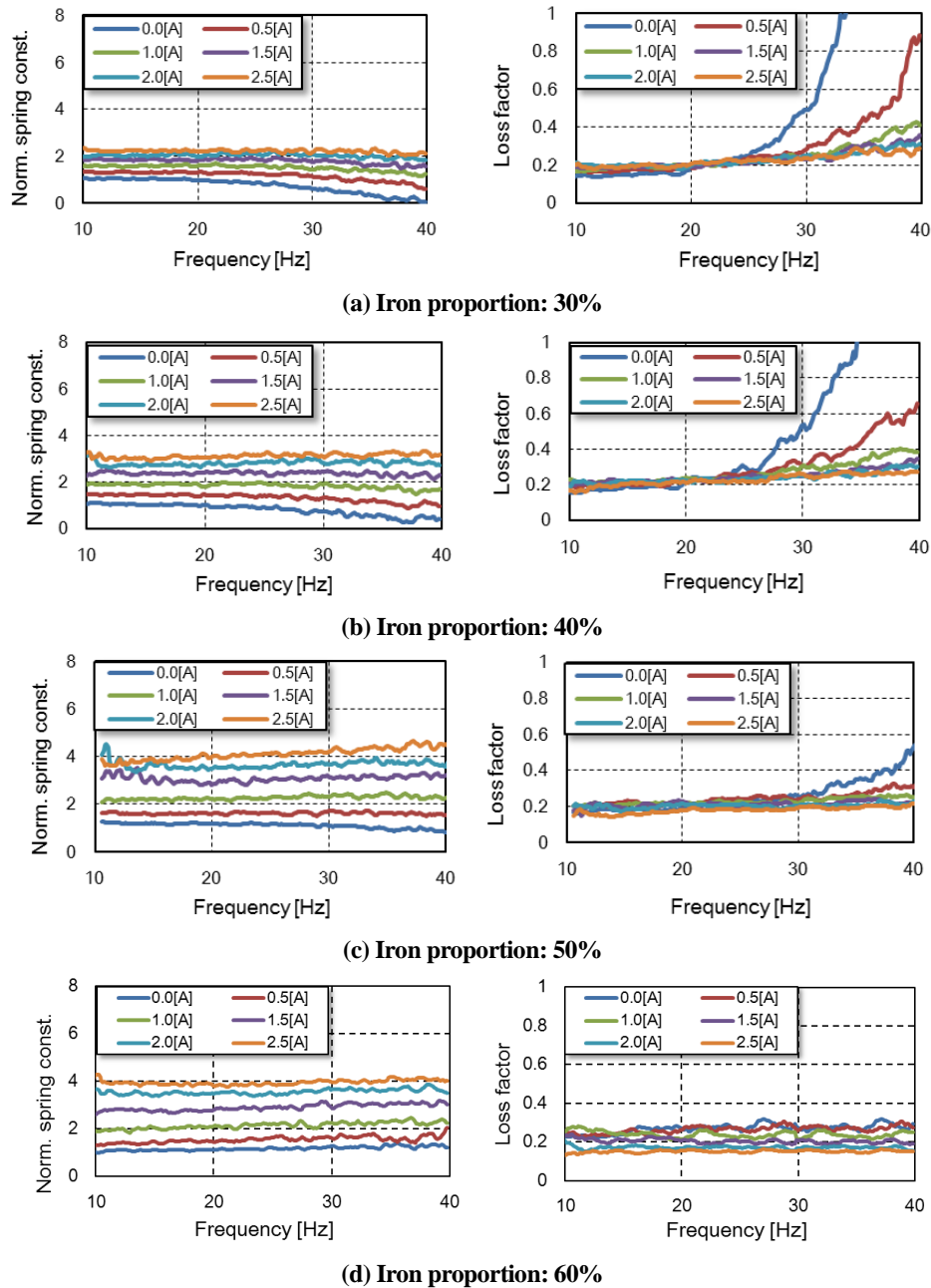


Fig. 3 Viscoelastic property measurement system



**Fig. 4** Calculation result of complex stiffness constant for MRE with thickness:15mm. Left: normalized spring constant, right: loss factor.

### 3. 数値計算による可変剛性型動吸振器の制振性能予測

本研究では外部磁場に応じて見かけの弾性率を変化させることのできるMRエラストマを用いて可変剛性型動吸振器を開発する。ここでは、可変剛性型動吸振器を付加した1自由度系の数値モデルに対して、後述する固有振動数変化幅の実測値に基づく制振効果の理論予測を行った。

#### 3・1 2自由度振動系の運動方程式

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5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

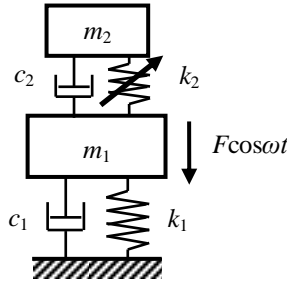


Fig. 5 Analytical model of variable stiffness dynamic absorber

用いて以下のように記述される.

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_1 - c_2 \dot{x}_2 - k_2 x_2 &= F \cos \omega t \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2 - c_2 \dot{x}_1 - k_2 x_1 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、動吸振器固有振動数の可変範囲を定めるにあたり、質量やばね定数等について個別に数値を与えて検討するより、無次元化運動方程式を用いた方が定性的に把握しやすいため、式(5)を時間および変位に関して次式のように無次元化する.

$$\left. \begin{aligned} \ddot{p} + 2(\zeta_1 + \mu z \zeta_2) \dot{p} + (1 + \mu z^2)p - 2\mu z \zeta_2 \dot{q} - \mu z^2 q &= \cos \Omega \tau \\ \ddot{q} + 2z \zeta_2 (\dot{q} - \dot{p}) + z^2 (q - p) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ただし、式(6)のパラメータは以下の通りである.

$$\Omega = \omega / \omega_1, \quad z = \omega_2 / \omega_1, \quad p = x_1 / x_{st}, \quad q = x_2 / x_{st}, \quad \omega_1^2 = k_1 / m_1, \quad \omega_2^2 = k_2 / m_2, \quad \mu = m_2 / m_1, \quad x_{st} = F / k_1, \quad \zeta_1 = c_1 / 2\sqrt{m_1 k_1}, \quad \zeta_2 = c_2 / 2\sqrt{m_2 k_2}.$$

### 3・2 動吸振器の最適同調・最適減衰について

幅広く制振効果を得るための動吸振器の設計方法として、最適同調及び最適減衰条件式はよく知られている<sup>(1)</sup>. 本報告では可変剛性型動吸振器の性能評価の目安として、これらの設計理論に基づく動吸振器の応答を比較対象として利用する. 固有振動数比を定める最適同調条件は、質量比を  $\mu$  として次のように表される.

$$\omega_2 / \omega_1 = \frac{1}{1 + \mu} \quad (7)$$

また、動吸振器に付与する減衰比  $\zeta_{opt}$  は、最適減衰条件として次のように決定される.

$$\zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)^3}} \quad (8)$$

### 3・3 可変剛性型動吸振器の応答特性に関する数値的検討

無次元化方程式(6)及び後述の固有振動数変化に関する計測結果に基づき、可変剛性型動吸振器の制振特性について数値的に検討した. 主系と動吸振器との質量比は 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 及び 0.4 の 5 通りに設定した. 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 4.1 節にて後述する実測値 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 6 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は最低値、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.

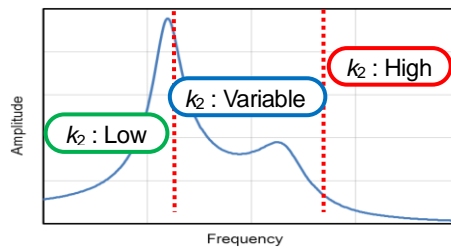
動吸振器の固有振動数を外乱振動数に同調させた場合の主系応答を、質量比 0.2 について計算した結果を図 7 に示す. 比較のために、動吸振器のばね定数を最低値から最高値の間で数通りに固定した場合、および最適同調に従う在来型動

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。

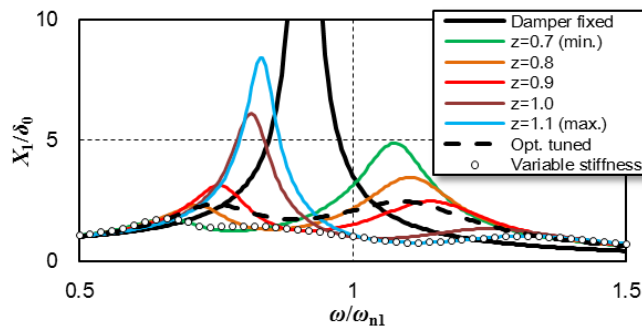
さらに、5種の質量比について、可変剛性型動吸振器の応答を比較したものを図8に示す。質量比が0.1以下の場合、最適条件を適用した動吸振器応答と比較すると全体的に振幅は下回るものの、主系応答にはピークが目立つ。一方、動吸振器の質量が大きいほど制振効果は高まるが、実用上、質量比を大きく設定することは難しいため、エラストマ自体の減衰を小さくするか、減衰比がこのままの値であれば質量比は0.2~0.3あたりが適当と考えられる。

**Table 1 System parameter used in numerical investigation**

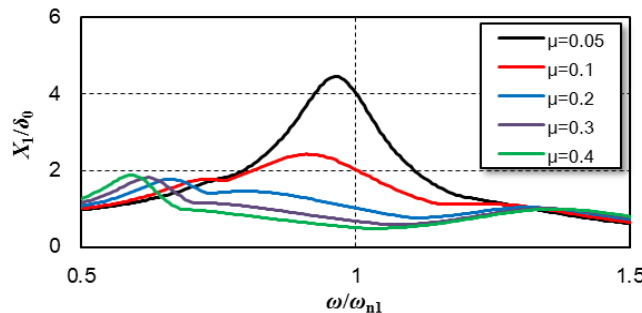
	Mass ratio				
	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4
Tuned freq. ratio	0.95	0.91	0.83	0.77	0.71
Optimal damping ratio	0.13	0.17	0.21	0.23	0.23
Freq. ratio (damper fixed)	0.98	0.95	0.91	0.88	0.85
Freq. variation range	0.78-1.18	0.76-1.14	0.73-1.10	0.70-1.05	0.68-1.01



**Fig. 6 Switching rule for the variable stiffness absorber**



**Fig. 7 Damping performance of stiffness variable absorber ( $\mu=0.2$ )**



**Fig. 8 Comparison of frequency responses by mass ratio**



## 4. MR エラストマの可変剛性型動吸振器への適用

### 4・1 可変剛性型動吸振器の基本特性

図9に、MR エラストマをばね要素として用いた可変剛性型動吸振器の模式図を示す。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。MR エラストマには、鉄粉体積割合 40%、50%、60% のものを採用した。

可変剛性型動吸振器の基本性能評価として、コイルへの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。図9の動吸振器を基礎に剛結合し、コイル部にインパクト力を加えた際の自由振動波形を計測した。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 0.5A 刻みで 0~4A とした。

3 種の MR エラストマを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10に示す。また、固有振動数の変域及び変化倍率の具体的な数値を、減衰比と併せて表2に示す。固有振動数を変化幅の観点で見た場合には、鉄粉濃度 50% の MRE を用いた場合が最も大きく、無磁場時の 23Hz に対して 4A 印加時に 33Hz まで増加し、約 10Hz の変化幅が確保された。一方、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 の変化が最も大きく 1.5 倍となった。静的負荷試験及び動的試験結果から予測される剛性変

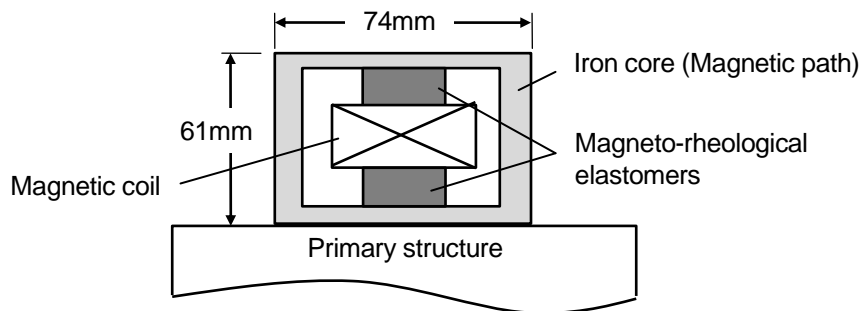


Fig. 9 Schematic of variable stiffness dynamic absorber

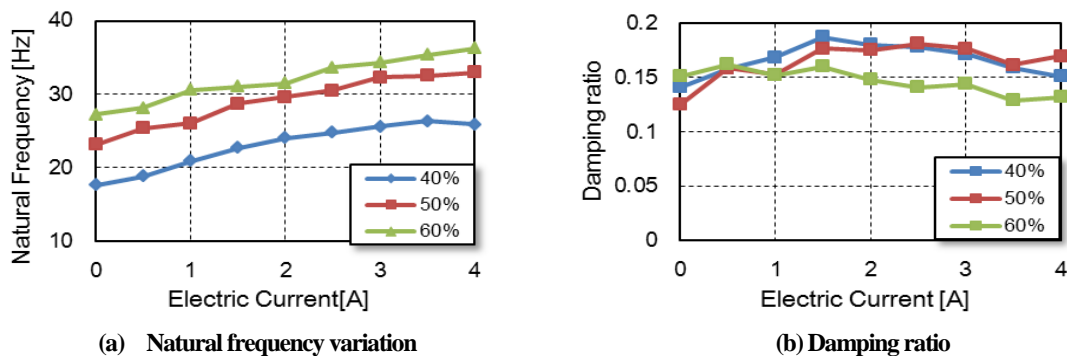


Fig. 10 Property change of variable stiffness dynamic absorber

Table 2 Variation characteristic of variable stiffness dynamic absorber

Iron concentration	Frequency variation range	Bandwidth	Magnification to the baseline	Damping ratio
40%	17.6-26.4[Hz]	8.8[Hz]	1.50	0.16
50%	23.2-32.9[Hz]	9.7[Hz]	1.42	0.16
60%	27.2-36.2[Hz]	9.0[Hz]	1.33	0.15

化の最大値はいずれの鉄粉割合についても4倍程度であり、これを振動数の変化に換算すると2倍となるが、それよりは若干低い変化倍率である。動吸振器に適用したMR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などが影響していると考えている。一方、減衰比については鉄粉濃度や印加電流への明確な依存性は見受けられず、いずれの鉄粉割合のMRエラストマについても平均して0.15程度の値であった。

#### 4・2 可変剛性型動吸振器の応答特性に関する実験的検討

前節の数値計算結果を踏まえ、可変剛性型動吸振器を振動系に適用したときの系の周波数応答を図11に示す装置によって実験的に評価した。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。主系構造物と動吸振器とを組み合わせて2自由度振動系を構成し、水平加振台上に固定する。10Hzから50Hzまで加振器により構造物基礎部に変位励振を加え、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としては、数値計算で用いた方法と同じ規則を採用する。3種の鉄粉割合のMREを採用した場合について、動吸振器を主系に剛固定して1自由度系と見なしたときの固有振動数と、可変剛性型動吸振器の固有振動数変域との対応を表3に整理する。いずれの場合も、1自由度系の固有振動数が変域のほぼ中央になるように設定した。

鉄粉割合の異なる3種のMRE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12に示す。単一ピークを有する実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、破線はMREを最低剛性・最高剛性に固定した場合の応答を表し、さらにプロット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。

いずれのMREを採用した場合においても、動吸振器の剛性を可変にした場合には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いることがわかる。最も高い制振効果を示したのは50%のMREを採用したときで、最大振幅を約4%にまで抑えることができています。

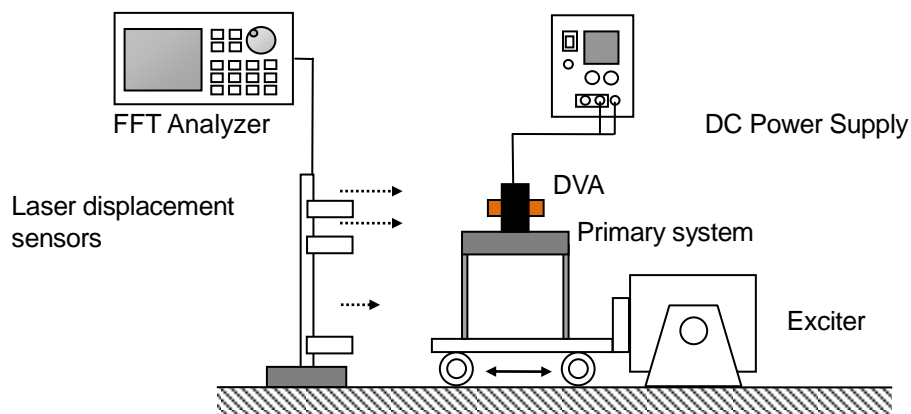


Fig. 11 Experimental Setup of 2-dof system evaluating performance of DVA

Table 3 Natural frequency of the primary system and corresponding frequency variation range of DVA

MRE	Natural frequency of primary system when DVA fixed	Frequency variation range of DVA
40%	23.7[Hz]	17.6-26.4[Hz]
50%	28.2[Hz]	23.2-32.9[Hz]
60%	33.1[Hz]	27.2-36.2[Hz]

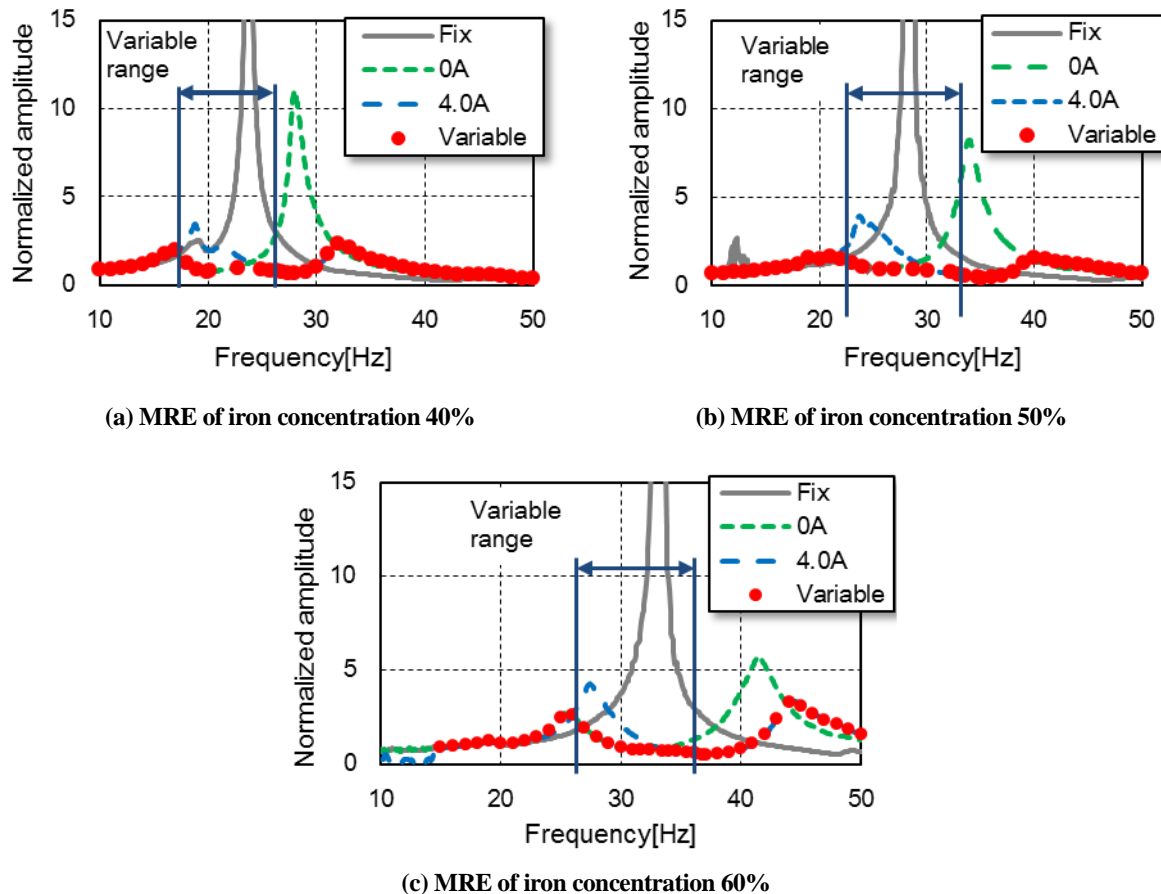


Fig. 12 Comparison of the primary system response curves damped by DVA

以上の結果より、現状の変化幅の程度であっても、1自由度系に対しては本研究が提案する MRE を用いた可変剛性型動吸振器でも十分効果的に制振が可能と言える。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 MRE の製造過程そのものに改良の余地があるが、少なくとも基本特性試験の結果からは材料が磁束飽和に至っていないことが読み取れることから、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、MRE を用いたばね要素の形状に工夫を加えること等の課題が考えられる。

## 5. 結 言

本研究では、磁場に反応して見かけの剛性が変化する機能性材料である MR エラストマを作成し、その静的及び動的特性について実験の評価を行った。また、MR エラストマを適用した可変剛性型の動吸振器を提案し、その制振性能をシミュレーションおよび実験によって検討した。得られた結論を以下に示す。

- (1) 静的負荷試験結果より、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、無磁場時を基準として約 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、計測された加速度伝達関数から周波数依存のばね定数  $\nu(\omega)$  および損失係数  $\eta(\omega)$  を推定した。振動数領域に渡り一様にばね定数が大きくなることがわかり、検討した磁場強度の範囲内において、静的試験と同様、約 4 倍まで変化した。一方、損失係数については周波数及び磁場強度への依存性は非常に小さいことがわかった。
- (3) MRE の基本特性試験結果より、剛性変化幅は基質内の鉄粉含有割合に大きく依存し、最も変化幅が大きく確保される鉄粉含有率は、体積割合で 40~50% 付近にあることが示唆された。
- (4) 数値計算および実験の評価を行った結果、可変剛性型動吸振器では従来の動吸振器よりも高い制振性能が得られることを示した。

以上より，本研究で作成した MR エラストマを動吸振器に適用した可変剛性型動吸振器は従来の動吸振器より制振可能な振動数領域が広く，制振性能に優れていると言える。

## 謝 辞

本研究は，科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）（基盤研究(C)，課題番号 24560256）の交付を受けて実施されたものである。ここに記して謝意を表する。

## 文 献

- (1) Den Hartog, J. P., *Mechanical Vibrations* (1956), p. 93, McGraw-Hill.
- (2) Nagaya, K., Kuruu, A., Ikai, S. and Shitani, Y., “Vibration Control of a Structure by Using a Tunable Absorber and an Optimal Vibration Absorber under Auto-Tuning Control”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 228, No. 4 (1999), pp. 773-792.
- (3) Walsh, P. L. and Lamancusa, J. S., “A Variable Stiffness Vibration Absorber for Minimization of Transient Vibrations”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 158, No. 2 (1992), pp. 195-211.
- (4) Nagarajaiah, S. and Sonmez, E., “Structures with Semiaactive Variable Stiffness Single/Multiple Tuned Mass Dampers”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 133, No. 1 (2007), pp. 67-77.
- (5) 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, Vol. 77, No. 784 (2011), pp. 4510-4520.
- (6) Chertovich, A. V., Stepanov, G. V., Kramarenko, E. Yu. and Khokhlov, A. R., “New Composite Elastomers with Giant Magnetic Response”, *Macromolecular Materials and Engineering* (2010), pp. 336-341.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) Jolly, M. R., Carlson, J. D., Munoz, 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.
- (10) Davis, L. C., “Model of Magnetorheological Elastomers”, *Journal of Applied Physics*, Vol. 85, No.6 (1999), pp. 3348-3351.
- (11) Zhou, G. Y., “Shear Properties of a Magnetorheological Elastomer”, *Smart Materials and Structures*, Vol. 12 (2003), pp. 139-146.
- (12) 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.
- (13) 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.