

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360087

研究課題名(和文)MRコンポジットを活用した革新的なスマートダンパの開発とその免震・制振への応用

研究課題名(英文)Development and application to seismic isolation and vibration control of innovative smart damper exploiting MR composites

研究代表者

中野 政身(NAKANO, Masami)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：40147947

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円

研究成果の概要(和文)：磁場下で粘性の変化するMR流体(磁気粘性流体)の分散磁性粒子の沈降を防止し、かつ密閉のためのシールを不要とすることを目的に、不織布等の多孔質体にMR流体を含浸させたMR流体多孔質コンポジットと、強磁性体粒子をシリコンゴム等の柔軟性のある材料中に分散させたMRゴムコンポジット(MRエラストマー)の二種類のMRコンポジットを開発した。それぞれのMRコンポジットの特徴と機能性を活用して印加磁場により可変減衰機能を有するMRスマートダンパ及び可変剛性機能を有するMR積層ゴムを開発・試作し、それらを活用した構造物等の高性能な免震・制振制御システムを提示することができた。

研究成果の概要(英文)：In order to solve the sedimentation problem of dispersed particles in the MR fluid in the off-working state, two types of novel MR composites; "MR fluid porous composite" made of nonwoven impregnated with MR fluid and "MR rubber composite (MR elastomer)" consisting of micro-sized iron particles dispersed in a silicone rubber, have been newly fabricated. Exploiting the features and functionalities of two types of the MR composites, a damping-variable seismic MR fluid composite smart damper and a stiffness-variable multilayered MR elastomer isolator with magnetic field have been designed and developed, and applied to semi-active control systems for the seismic isolation and vibration of structures.

研究分野：工学、機械工学、流体工学、機械力学・制御、知能機械学

キーワード：機能性流体・材料 マグネトロロジー ダンパ 免震アイソレータ 振動制御 知能制御システム

1. 研究開始当初の背景

1995年に発生した兵庫県南部地震以降、建築構造物の地震対策技術として、地震エネルギーを柱・梁や壁などの構造体だけでなく、特殊な部材や装置、特定の層で吸収させより高い安全性を確保しようとする「免震・制振構造」に対する関心が急速に高まってきており、近年、免震・制振構造の適用数は急激に増加してきている。特に超高層ビルでは風揺れ対策も含めて何らかの制振システムを設備することが当たり前となってきている。免震システムは、建物重量を支持しつつ大変形を許容するアイソレータと振動エネルギーを吸収するダンパから構成されており、現状では、アイソレータとして積層ゴム、ダンパとして弾塑性ダンパやオイルダンパなどを用いるのが主流である。また、制振システムとして、現在最も普及しているのはパッシブ型であり、簡易で低廉な弾塑性ダンパや守備範囲の広いオイルダンパが多用されている。他に、コンピュータ制御の開閉制御弁を内蔵したセミアクティブ型のエネルギー吸収能力の高いオイルダンパなども開発されてきているが、地震動に応じてダンパ減衰力を自在に可変する能力という点ではまだ十分とはいえない。

2011年に起った東北地方太平洋沖地震のような巨大地震を契機として、建築構造物の免震・制振システムに求められる要求性能は益々高度なものとなってきている。このようなニーズに応えられるダンパの一つとして、磁場に反応して粘性（降伏せん断応力）の変化するMR (Magneto-Rheological) 流体を活用した可変減衰力ダンパが挙げられる。このMRダンパの建築分野への適用に関する研究については、1998年から5年間にわたって実施された日米共同構造実験研究「高知能建築構造システムの開発」において、各研究グループによって精力的に展開され、免震・制振用の可変減衰力ダンパとして用い、各種のセミアクティブ制御が試みられ高い振動制御性能を発揮することが実証されている。日本科学未来館のように、MRダンパを制振装置として試験的に実装した例もあるが、長期間静置時のMR流体中に分散した強磁性体粒子の沈降が信頼性などの実用上の問題となり、その後、広範な普及には至っていないのが現状である。

本研究では、MR流体中に分散した数 μm サイズの強磁性体粒子の沈降の問題を回避する方策として、この分散微粒子の沈降を防止し、かつ密閉のためのシールを不要とするMRコンポジット (MR流体多孔質コンポジットとMRゴムコンポジット) を創製し、可変減衰力ダンパや積層ゴムアイソレータに活用することを提案する。

2. 研究の目的

本研究では、磁気レオロジー効果を発揮する二種類のMRコンポジットを新規に創製

して、それらを活用したスマートな可変減衰力ダンパや積層MRゴムを開発し、革新的な免震・制振システムへの適用可能性を検討するために、下記の3点を研究目的とする。

(1) MR流体多孔質コンポジットとMRゴムコンポジット (MRエラストマー) の二種類のMRコンポジットについて、MR効果発現機構の解明と同時に、素材や組成を変え高い信頼性と性能向上を両立するコンポジットを創製する。

(2) MR流体多孔質コンポジットを活用した多層円盤型回転ブレーキと直動を回転運動に変換するボールネジとを組み合わせた直動型の可変減衰力ダンパ (20kN級) を開発し、その減衰力および減衰特性を明らかにして、免震・制振制御への応用可能性について検討する。

(3) MRゴムコンポジット (MRエラストマー) を免震層に用いる積層ゴムのゴム材として適用し、印加磁場による可変剛性機能を兼備したアイソレータの役割をする積層MRゴムを開発して、その磁気レオロジー (粘弾性) 特性を明らかにして、免震技術への応用可能性について検討する。

3. 研究の方法

(1) MR流体多孔質コンポジットの創製：磁場に反応して粘性（降伏せん断応力）の変化するMR流体を不織布等の多孔質体に含ませたMR流体多孔質コンポジットに関して、可変速モーターとスライダー・クランク機構から成る加振装置 (ダブルギャップ型レオメータ) を用いた往復せん断モードでの試験によって、組成、内部構造、空隙率等の異なる不織布を多孔質体として用いることによって、高い信頼性と性能向上を図る。同時に、MR流体の性能向上という観点からナノ・マイクロ粒子混合系MR流体を、また高せん断領域で急激にせん断応力が増大する特異なMR特性を呈するMR Shear-Thickening 流体を開発する。

(2) MR流体多孔質コンポジットを用いた可変減衰力ダンパの開発：信頼性 (耐久性) と性能向上を図ったMR流体多孔質コンポジットを媒体とした多層円盤型回転ブレーキと直動を回転運動に変換するボールネジとを組み合わせた直動型の可変減衰力ダンパを設計・製作する。門型疲労・強度試験機を用いた正弦波鉛直加振試験によって、その開発したダンパの発生減衰力特性を明らかにするとともに、その減衰力を予測する機械モデルを構築する。

(3) 開発した可変減衰力ダンパの免震システムへの適用可能性の検討：水平に可動な建築物に相当する物体 (マス) をバネ及び開発した可変減衰ダンパとで水平に支持した1自由度振動系モデルを大型振動試験機の水平テーブル上に設置して、振動テーブルの水平加振に対する物体の応答特性を測定することによって、開発した可変減衰力ダンパに

よる免震性能を評価する。可変減衰力ダンパの制御法として、疑似スカイフック制御や最適制御等を適用して、その効果を実験とシミュレーションによって検討し、適切な制御法について検討する。

(4) MRゴムコンポジット (MRエラストマー) を活用した積層MRゴムの開発：鋼板の間にMRゴムコンポジットを積層して、MRゴムコンポジットに永久磁石で磁場を印加できるようにし、かつその外部に設けた円環状電磁コイルで印加磁場を変化できるようにした積層MRゴム (積層MRエラストマー) を開発する。正弦波水平加振試験によって、その粘弾性特性を明らかにする。

(5) 積層MRゴムの免震システムへの応用可能性の検討：開発した積層MRゴムの上に物体 (マス) を搭載して、水平加振テーブル上に設置し、水平加振に対する物体の応答特性を測定することによって、開発した積層MRゴムによる免震性能を評価するとともに、その効果的な制御法について検討する。

4. 研究成果

(1) 高性能なMR流体多孔質コンポジットの創製とMR効果：MR流体多孔質コンポジットの多孔質体として、組成と内部構造が大きく異なる二種類の不織布を用い、これらの不織布に Lord 社製MR流体 (MRF-132DG) を十分量含浸させてMR流体多孔質コンポジットとした。ダブルギャップレオメータによる往復せん断モードでのせん断歪に対するせん断応力のヒステリシスループは、降伏前の弾性域と降伏後のせん断応力がほぼ一定となる塑性域とからなるほぼ矩形状を呈する。塑性域の一定せん断応力 (最大せん断応力 τ_{max}) が印加磁場の増大に伴って増大することから、印加磁場によって降伏せん断応力が可変なことを明らかにできた。

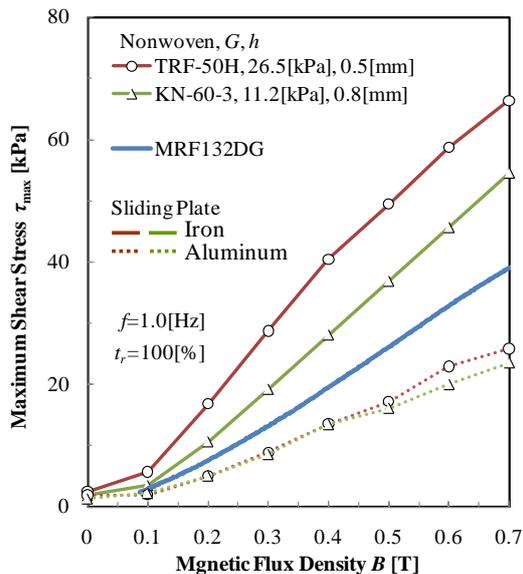
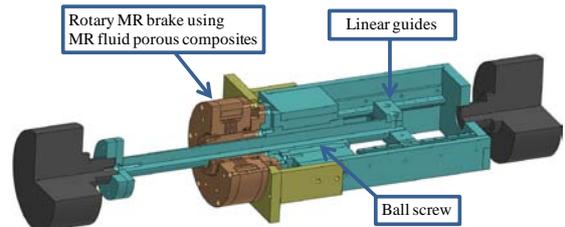


図1 MR流体多孔質コンポジットのMR効果 (多孔質材と接触平板材質の違い)

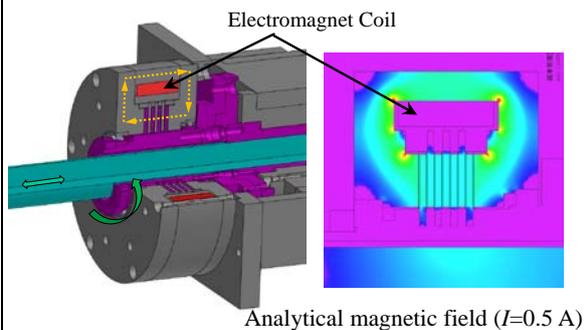
その最大せん断応力 τ_{max} の印加磁束密度 B に対する変化を図1に示す。いずれのコンポジットでも τ_{max} は B の増大に伴い増加し、コンポジットに接触してせん断を与える可動平板がアルミニウム製のものに比して鉄製の方が2倍以上高い最大せん断応力を示す。また、KN-60-3に比べ、TRF-50Hの不織布を用いたものの方がより高い最大せん断応力を発生することから、横弾性率 G が大きく細い繊維が密に絡み合う不織布を用いたコンポジットがより高いMR効果を発揮し、MR流体単体で用いた場合よりも1.7倍程度高いせん断応力を示すことを明らかにできた。以上より、MRダンパにはTRF-50Hの不織布を用いたMR流体コンポジットを用いた。

MR流体多孔質コンポジットのMR特性の向上と特性変更を目的に、多孔質材に含浸させる二種類の新規MR流体の開発を実施した。マイクロ粒子分散MR流体にナノ粒子を混合したマイクロ・ナノ粒子混合系MR流体を開発し、ナノの粒子混合比25%の混合系MR流体が高せん断領域でマイクロ粒子MR流体に比して約2倍程度のMR効果を発揮することを見いだした。また、高せん断領域で急激にせん断応力が増大するMR Shear-thickening 流体を開発し、その誘起せん断応力の特徴的な特性とその特性を印加磁場で可変なことを明らかにできた。これらの二種のMR流体は、ダンパの減衰力の向上とその特性の特徴的変更という点で、免震・制振用ダンパの作動流体としての適用の可能性を有している。

(2) MR流体多孔質コンポジットを用いた可変減衰力ダンパの開発：開発した直動型MR



(a) MR流体多孔質コンポジットを活用した直動型の可変減衰力ダンパ

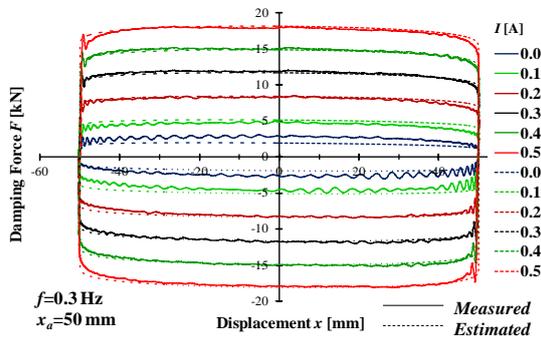


(b) MR流体コンポジットを用いた回転型MRブレーキ

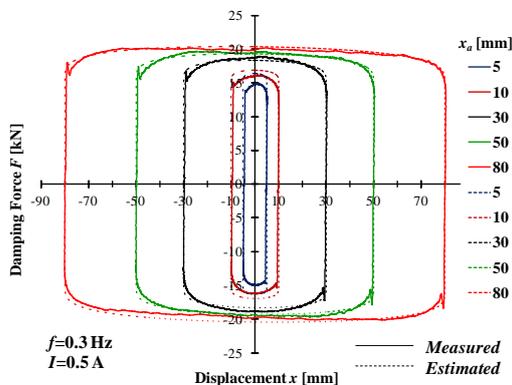
図2 開発した可変減衰力MRダンパ

Rダンパは、図2(a)に示すように、ダンパの直線運動を回転運動に変換するボールネジを用いた直動-回転変換機構、リニアガイドを用いたネジ軸回転防止機構、ボールネジの回転ナット部に直結した回転型MR流体コンポジットブレーキの三要素で構成される。ダンパの最大全長800mm、幅240mm、ストローク±100mm、設計減衰力は20kNである。回転型MR流体コンポジットブレーキは、図2(b)に示すように多層円盤構造となっており、電磁石によって磁場が印加される構造となっている。

図3には、MRダンパの正弦波加振試験によって得られた印加電流 I 及び振動振幅 x_a による x - F ヒステリシスループ (x : 変位, F : 減衰力) の変化を示す。ヒステリシスループはMR流体多孔質コンポジットのMR効果 (可変降伏せん断応力) に対応してほぼ矩形を描いており、最大ダンパ減衰力は、印加電流値 I の上昇に伴って増大し $I=0.5A$ において設計値の約20kNが発揮できている。また、減衰力がほぼ一定値を示す変位領域で若干ながらループが湾曲していることから僅かな速度依存性が認められる。振動振幅 x_a が大きくなると、減衰力がほぼ一定の領域が拡大してループ面積が広がることわかる。図3には、MRダンパの発生減衰力の機械モデルによる予測曲線も示すが、良好に模擬することができた。



(a) 印加電流 I による変化



(b) ダンパ変位 x_a による変化

図3 開発したMRダンパの減衰力特性

(3) 開発した可変減衰力ダンパの免震システムへの適用可能性の検討: 開発したMRダンパとマス・バネからなる1自由度免震制御

系に関して、大型振動台による加振試験によってその免震性能を評価した。地震波としては、El Centro、JMA Kobe、三の丸を用いて加振し、定電圧、スカイフック制御、最適制御、相対速度フィードバック制御を適応した。いずれの地震波でも、それぞれの制御法の効果は確認できたが、図4に示すように、特に、三の丸地震波の場合には、マスの相対変位及び加速度の両者を低減でき有意な効果があることを確認できた。

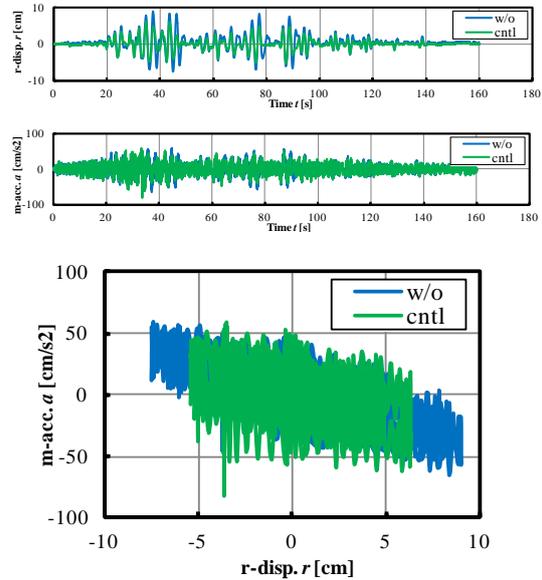


図4 MRダンパ1自由度免震制御系の三の丸地震波に対する応答: 相対変位 r -disp とマス加速度 m -acc (スカイフック制御)

(4) MRゴムコンポジット (MRエラストマー) を活用した積層MRゴムの開発: 可変剛性・減衰機能とアイソレータ機能を兼備する免震基礎アイソレータとして、開発したスマート積層MRゴム (エラストマー) を図5に示す。CI粒子とシリコンゴム及びシリコン油をある一定割合で混合して硬化させたシート状のMRエラストマーを創製し、それを鉄製円盤と交互に積層した円柱状の積層MRエラストマー (積層MRE) を製作し、この円柱状の積層MREに様に磁場が印加されるようにその両端に2つの円盤型永久磁石を配置し、その周囲に積層MREへの印加磁場を可変するための電磁石と磁性体からなる円筒状の磁気回路を配置した構造をとっている。電磁石への印加電流の増大に

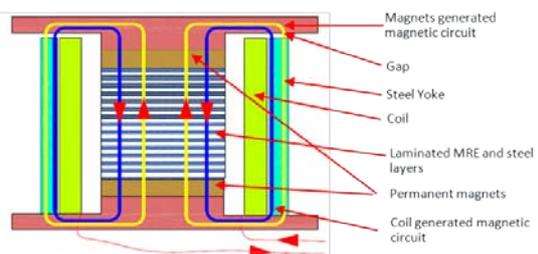


図5 開発した積層MREアイソレータ

に伴い積層MREへの印加磁場が減少するように設計してある。本積層MREは、印加電流の増大にともない、粘性減衰能よりも剛性が大きく変えられることが明らかとなった(図6)。従って、積層MREとその上部の小さなマスからなる1SDOF振動系としてのその横加振に対する伝達率の周波数応答は、図7に示すように、印加電流の増大に伴い、共振周波数が低周波数側にシフトする応答を呈する。すなわち、積層MREアイソレータの剛性を印加電流によって低下できる。

さらに、PDMSをベースに数 μm サイズの強磁性体粒子を分散して硬化させたMRエラストマーも創製し、シリコンゴムと同様に印加磁場により主に弾性的な特性を大きく変化できることから、可変剛性機能をもつスマート積層MREへの応用の可能性を示すことができた。

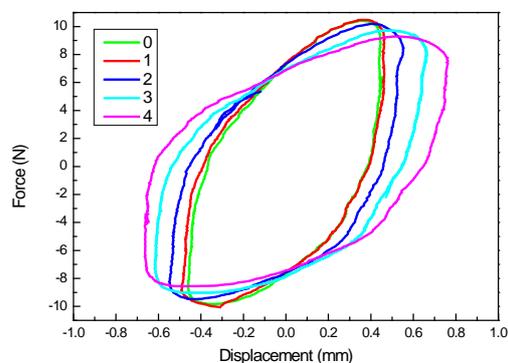


図6 積層MREの変位-発生力曲線の印加電流 I に対する変化

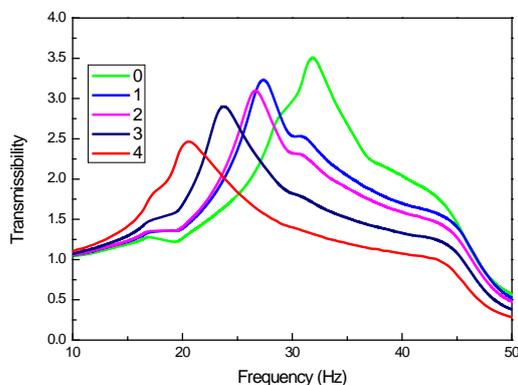


図7 積層MREアイソレータ(1SDOF系)の周波数伝達率の印加電流に対する変化

(5) 積層MRゴムの免震システムへの応用可能性の検討: 開発した可変剛性機能を有する積層MREアイソレータ4台の上に物体(マス)を搭載して、水平加振テーブルの上にモデル化した1SDOF免震システムを構築し、水平加振に対する物体の加速度応答を計測することによって、その免震性能を評価した。図8には、水平加振テーブルの加振周波数を4Hzから15Hzまでスイープした際のマスの加速度応答の時間履歴を示す。積層MREアイソレータにスカイフック制御を適用した際のもので、印加電流ゼロの場合の

Passive制御の場合に比して、いずれの周波数でも著しく加速度レベルが低下し、効果的な免震制御が可能なることを明らかにできた。

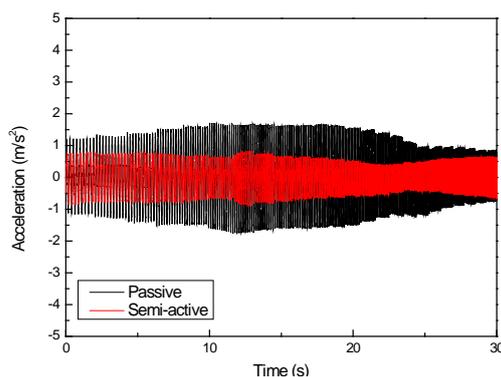


図8 積層MRE・マス免震システムの周波数スイープ(4Hz→15Hz)に対する加速度応答(Semi-activeスカイフック制御適用)

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11件)

- ① J. Yang, S.S. Sun, W.H. Li, H. Du, G. Alici, M. Nakano, Development of a linear damper working with magnetorheological shear thickening fluids, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 査読有, (2015), pp.1-7, Online Publication, DOI: 10.1177/1045389X15577653
- ② S.S. Sun, J. Yang, H.X. Deng, H. Du, W.H. Li, G. Alici, M. Nakano, Horizontal vibration reduction of a seat suspension using negative changing stiffness magnetorheological elastomer isolators, *International Journal of Vehicle Design*, 査読有, (2015), in press.
- ③ S.S. Sun, H. Deng, J. Yang, W.H. Li, H. Du, G. Alici, M. Nakano, An adaptive tuned vibration absorber based on multilayered MR elastomers, *Smart Materials and Structures*, 査読有, Vol.24, Article No.045045, (2015), pp.1-13. DOI:10.1088/0964-1726/24/4/045045
- ④ M. Nakano, A. Totsuka, T. Inaba, A. Fukukita, Damping properties of seismic linear motion damper with MR fluid composite rotary brake, *USB Proceedings of the 9th JFPS Int. Symp. on Fluid Power*, Matsue, Japan, 査読有, Paper No.2A3-1, (2014-10.29), pp.550-555.
- ⑤ W.H. Li, M. Nakano, T.F. Tian, A. Totsuka, C. Sato, Viscoelastic properties of MR shear thickening fluids, *Journal of Fluid Science and Technology*, 査読有, Vol.9, No.2, Article No.14-00059, (2014), pp.1-8. DOI:10.1299/jfst.2014jfst0019
- ⑥ G.R. Peng, W.H. Li, T.F. Tian, J. Ding, M. Nakano, Experimental and modeling study of viscoelastic behaviors of MR shear thickening fluids, *Korea-Australia Rheology Journal*, 査読有, Vol.26, No.2, (2014), pp.149-158.

DOI: 10.1007/s13367-014-0015-3

⑦ H. Abe, M. Nakano, Steady and dynamic magnetorheological responses of iron-based hybrid MR suspensions, USB Proceedings of the 12th Int. Symp. on Fluid Control, Measurement and Visualization, Nara, Japan, 査読有, Paper No.OS5-01-4, (2013-11.20), pp.1-8.

⑧ 中野政身, 振動制御系への電磁レオロジー流体の応用, 日本ロボット学会誌, 査読無, Vol.31, No.5, (2013), pp.452-456.

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jrsj/31/5/31_31_452/_pdf

⑨ W.H. Li, M. Nakano, Fabrication and characterisation of PDMS based magnetorheological elastomers, Smart Materials and Structures, 査読有, Vol.22, No.5, Article No.055035, (2013), pp.1-7. DOI:10.1088/0964-1726/22/5/055035

[学会発表] (計 29 件)

① 中野政身, 戸塚厚, 佐藤忠一郎, MR 流体コンポジットのマグネトレオロジー, 日本レオロジー学会第 62 回レオロジー討論会講演要旨集, 2014 年 10 月 17 日, (福井), pp.390-391

② J. Yang, S.S. Sun, W.H. Li, M. Nakano, Development of a Novel Multi-Layer MRE Isolator, USB Proceedings of Eleventh International Conference on Flow Dynamics (11th ICFD2014), 2014 年 10 月 9 日, Sendai (Japan), pp.390-391.

③ M. Nakano, Magnetically Controllable Friction Properties of Magneto-Rheological Rubber Composite, 2014 Annual ELYT Workshop, 2014 年 2 月 20 日, Frejus-Saint Raphael (France), p.2.

④ M. Nakano, T. Inaba, A. Totsuka, A. Fukukita, Design and Evaluation of Linear Seismic Damper Using MR Fluid Composite Rotary Brake, USB Proceedings of Tenth International Conference on Flow Dynamics (10th ICFD2013), 2013 年 11 月 26 日, Sendai (Japan), pp.448-449.

⑤ T.F. Tian, W.H. Li, M. Nakano, Design and Evaluation of a Linear Damper Working with MR Shear Thickening Fluids, USB Proceedings of Tenth International Conference on Flow Dynamics (10th ICFD2013), 2013 年 11 月 26 日, Sendai (Japan), pp.440-441.

⑥ 中野政身, Li Weihua, 戸塚厚, 佐藤忠一郎, Shear-Thickening MR 流体のマグネトレオロジー効果, 第 91 期日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, No.13-33, Paper No.0806, 2013 年 11 月 9 日, (福岡), pp. 1-2.

⑦ 中野政身, 稲場智亮, 戸塚厚, 福喜多輝, MR 流体コンポジット回転ブレーキを活用した免震・制振用直動ダンパとその減衰力特性, JFPS 平成 25 年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, 2013 年 11 月 8 日, (神戸), pp.118-120.

⑧ 中野政身, 阿部浩也, ナノ・マイクロ粒子分散系 MR 流体の構造形成とマグネトレオロジー効果, JFPS 平成 25 年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, 2013 年 11 月 8 日, (神戸), pp.115-117.

⑨ 中野政身, 稲場智亮, 戸塚厚, 福喜多輝, MR 流体多孔質コンポジット回転型ブレーキを活用した直動型免震・制振ダンパの減衰特性, 第 90 期日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, No.12-40, 2012 年 11 月 17 日, (京都), pp.105-106.

⑩ M. Nakano, MR Effects of MR Rubber Composite in Oscillatory Shear Mode, The 13th International Conference on ER Fluids and MR Suspensions, 2012 年 7 月 4 日, Ankara, (Turkey)

[図書] (計 1 件)

① 中野政身編集・分担執筆, 日本フルードパワーシステム学会, 「機能性流体を核としたフルードパワーシステムの融合化に関する研究委員会」研究成果報告書, ISBN4-931070-26-4 C3453, (2012), pp.1-3, pp.9-18, pp.19-26, pp.35-40.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: MR ダンパー

発明者: 中野政身

権利者: 東北大学

種類: 特許

番号: 特願 2012-197438 号

出願年月日: 2012 年 9 月 7 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

① HP: 中野教授らが清水建設と共同で, MR 流体コンポジットを用いた免震・制振用減衰力可変ダンパを開発.

http://www.ifs.tohoku.ac.jp/news/20131106_nakano.pdf

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中野 政身 (NAKANO, Masami)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号: 40147947

(2) 研究分担者

戸塚 厚 (TOTSUKA, Atsushi)

東北大学・流体科学研究所・技術専門職員

研究者番号: 40626313

(3) 連携研究者

福喜多 輝 (FUKUKITA, Akira)

清水建設(株)・技術研究所・グループ長

研究者番号: 20426589