

# MRテクノロジー Magneto-Rheological Technologies

中野政身\*



## 1. はじめに

物質に磁場を印加するとその粘弾性が変化する現象の科学をマグネトレオロジー (Magneto-Rheology) といい、その機能をMR効果 (Magnetorheological Effect) と呼ぶ。その代表的な物質として、機能性流体の一つであるMR流体 (Magneto-Rheological Fluid) がある。MR流体は、シリコンオイル等の油を分散媒とし、その中に  $\mu\text{m}$  サイズの強磁性体粒子を高濃度で分散させた懸濁液であり、印加磁場によってその粘性 (厳密には、降伏せん断応力) を数ミリ秒のオーダーで電気的に可逆的かつ連続的に変化させることができる特筆すべき機能をもっている<sup>1)</sup>。すなわち、MR流体は磁場下では固体のように振舞い、磁場を切るとMR流体に流動性が生じ液体となる。この機能性をフルードパワー機器及びシステムに有効に活用することによって、従来になかった機能を持ち、かつ高速性、簡便性、コンパクト性、さらには知能性などの有意な特徴が付与される可能性を有しており、フルードパワーシステムのスマート化が志向される。MR効果を発揮する種々の機能性材料の創製技術からそれらの応用技術を総称して、本稿のタイトルである「MRテクノロジー」と呼んでいる。

本稿では、筆者の研究開発事例を中心に、MR流体に加えて、MR効果の向上と分散粒子の沈降抑制を期した多孔質体にMR流体を含浸させたMR流体多孔質コンポジット、MR効果の向上とより過酷な環境での使用を期したオイルを含まない強磁性体の粉体からなる高流動性のドライMR流体、そして強磁性体微粒子をシリコンゴム等のマトリックスに分散して硬化したMRエラストマーなどのMR効果を発揮する機能性流体・ソフトマテリアルの創製・評価、そしてそれらの種々の分野への応用技術など先進のMRテクノロジーに関して論説する。

## 2. MR流体とその応用

### 2.1 MR流体のMR効果

MR流体の磁場印加によってそのレオロジー特性を急速かつ可逆的に変化できる機能は、図1に示すように、多数の磁区を有する強磁性体粒子が磁場印加により磁気的に分極し、粒子同士が結合してクラスター構造を形成することによる。このMR効果の発現機構により、MR流体は磁場の印加によって降伏せん断応力 $\tau_y$ が誘起されるビンガム流体に類似した挙動を呈し、誘起せん断応力 $\tau$ は次式のように表せる。

$$\tau = \tau_y + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

ここで、 $\eta$ はMR流体の塑性粘度、 $\dot{\gamma}$ はせん断速度である。図2には、磁場印加型の平行2円盤レオメー

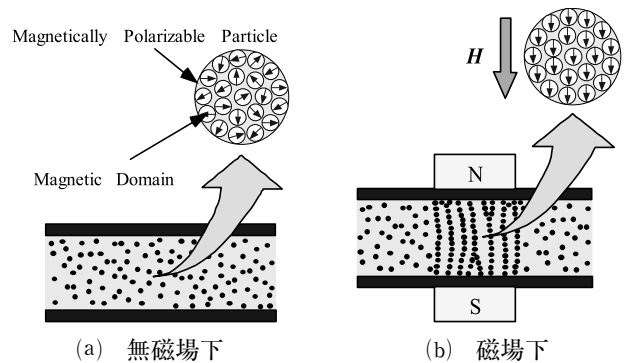


図1 MR流体の磁場下での粒子クラスターの形成

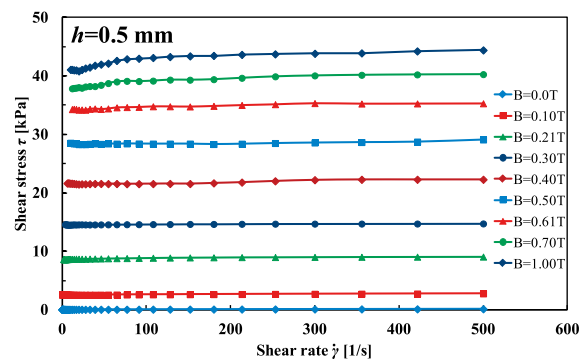


図2 MR流体 (MRF-132DG) の流動曲線

\*東北大学 教授 未来科学技術共同研究センター

タ（円盤間隙 $h=0.5\text{mm}$ ）を用いて計測した市販MR流体（MRF-132DG, Lord Co.）の代表的な電磁レオロジー特性（流動曲線；せん断速度 $\dot{\gamma}$ -せん断応力 $\tau$ 曲線）を示す<sup>2)</sup>。比較的高磁場での低せん断速度域を除いて、すべての印加磁束密度 $B$ においてせん断応力はせん断速度に依存せずほぼ一定の値を示している。また、せん断速度 $\dot{\gamma}=0\text{s}^{-1}$ での降伏せん断応力（流動曲線と縦軸との交点でのせん断応力値）は印加磁束密度にほぼ比例して増大するが、 $B=0.7\text{T}$ 程度から磁氣的に飽和する傾向がみられ、 $B=1.0\text{T}$ でせん断応力が $\tau=45\text{kPa}$ 程度に達しており、かなり大きな誘起せん断応力を発揮することができる。

2.2 MR流体の応用技術

現在年間300tonオーダーのMR流体が生産・販売されており、車両サスペンション用ショックアブソーバに代表されるように各種のMR流体を活用した機器・システムが実用化され普及してきている<sup>3)</sup>。ここでは、ダンパ、ブレーキ、クラッチなどのフルードパワー要素機器への応用とそれらを活用した各種のスマートマシンシステムに関して紹介する。

停電時にも信頼性をもって作動するMR流体を使ったダンパとして、電気的な制御系を一切使わずに、永久磁石とチェックバルブを用いて変位×速度の正負によって減衰力が変化するMR流体ダンパを開発し、その建築構造物の免震制御への有効性を実証している<sup>4)</sup>。図3に示すように、本ダンパは二つのピストンヘッドを有しており、それぞれのピストンヘッドには変位に応じて磁気回路が開閉することによって磁場が印加される環状流路と流れの向き（ダンパ速度の正負）に応じて開閉するチェックバルブが設置された磁場の影響を受けないバイパス流路が設けられている。これらの構造によって、本ダンパでは変位 $x$ と速度 $v$ の積の符号に応じて減衰力 $f$ の強弱が変化する（ $x \times v < 0 \rightarrow f$ 大,  $x \times v > 0 \rightarrow f$ 小）。

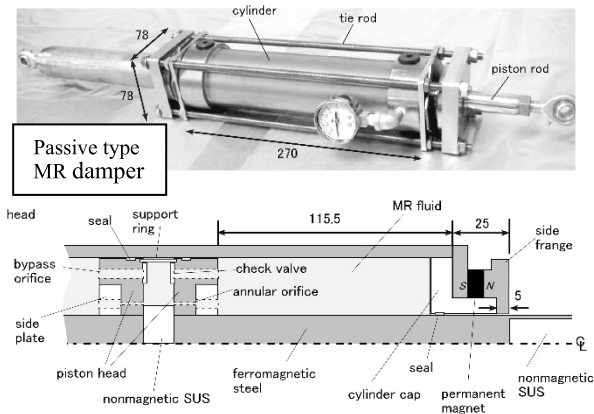


図3 変位×速度に依存して減衰力が可変なMRダンパの概略図

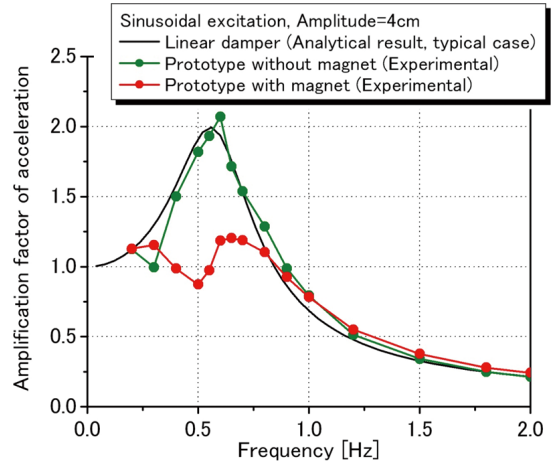


図4 開発したMRダンパからなるSDOF免震システムの免震制御特性

本MRダンパからなる一自由度振動系の免震制御特性（図4）からわかるように、共振振動数周辺の伝達率だけが著しく低下し免震制御の有効性が確認できる。

MR流体クラッチは、印加磁場（コイル電流）によるトルクリミッター機能及び一定トルクでの滑り回転機能を発揮するため、モータ等の他の動力源と組み合わせることによってバックドライバビリティが確保できようになり、人と接触して用いるロボット等の安全・安心の向上と確保に寄与することが期待できる。機能回復訓練用の下肢装着型パワーアシスト装具のバックドライバビリティを確保することによってその安全・安心の向上を目的に、サーボモータと多盤型MR流体クラッチそして各種減速機からなるMR流体アクチュエータを開発している（図5）<sup>5)</sup>。開発したMR流体クラッチは設計目標トルク（約4.5Nm）を十分に満たし、高い応答速度をもつ。また、回転速度依存性が低く、印加電流のみで伝達

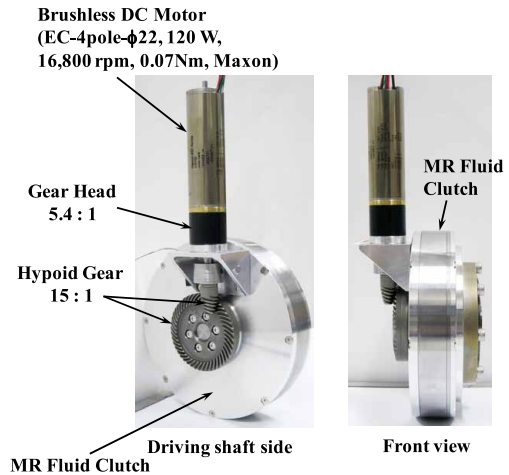


図5 下肢装着型パワーアシスト装具用に開発したMR流体アクチュエータ

トルクを任意に設定できることから制御性が高く、トルクリミッター機能を有するMR流体クラッチの構造上の安全性からバックドライブバリエーションを確保でき、開発したMR流体アクチュエータはパワーアシスト装置に適している。

MR流体クラッチ・ブレーキの動力伝達・制動系への応用の手始めとして、小型EV向けのMR流体ブレーキを設計・開発し、そのブレーキ特性を把握するとともに、実車（超小型EV）の4輪に搭載し走行試験を実施している。本車両用MR流体ブレーキは十分なブレーキ性能とブレーキフィーリング・ABS制御の適用など高速応答性と高い制御性があることが実証されている（図6）<sup>6)</sup>。今後、スマートモビリティなどへの実用展開が期待される。

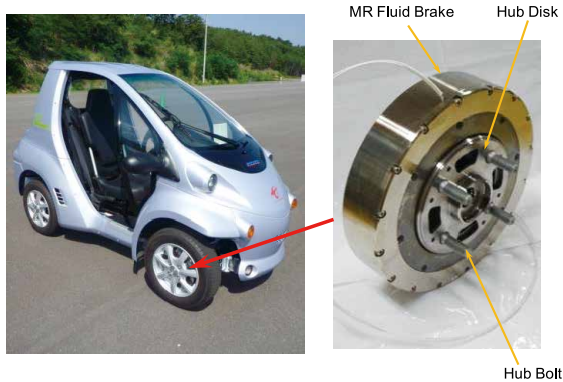
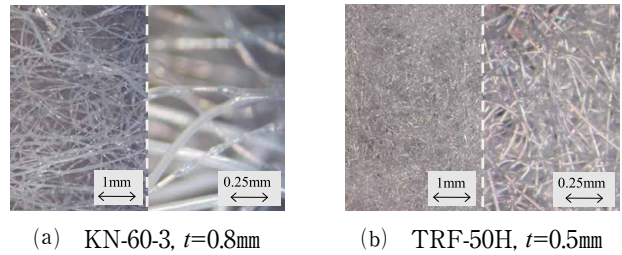


図6 車両用MR流体ブレーキと小型EVへの実装

### 3. MR流体多孔質コンポジットとその応用技術

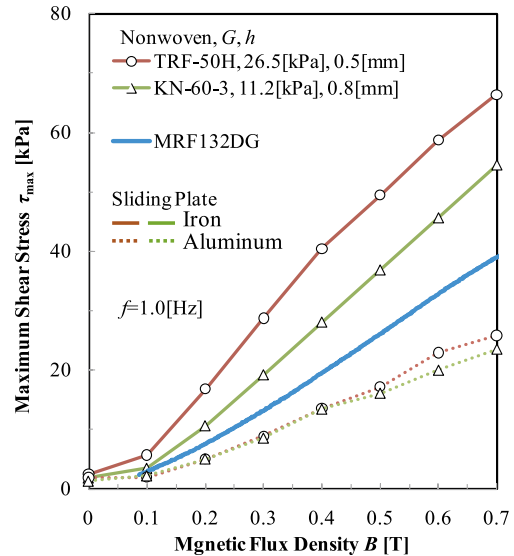
#### 3.1 MR流体多孔質コンポジットのMR効果

MR流体の分散粒子の沈降を防止することと、MR流体が多孔質体に保持されることから、活用の際の漏れ防止用シールを不要とすることを目的に、不織布にMR流体を含浸させたMR流体多孔質コンポジットを開発している<sup>7)</sup>。多孔質体として横弾性率 $G$ と多孔質構造の異なる二種の不織布（図7(a), (b)）にMR流体（MRF-132DG）を含浸させたMR流体多孔質コンポジットを創製し、一様磁場下での往復せん断モードにおけるMR効果を評価している。図7(c)には、得られた変位-せん断応力ヒステリシス曲線上の最大誘起せん断応力 $\tau_{max}$ の印加磁束密度 $B$ に対する変化を示す。MR流体多孔質コンポジットに往復せん断変形を与える可動平板は、接触材の磁性の有無による違いを調べるために、鉄製とアルミニウム製の二種類を用いている。いずれの不織布でも、鉄製の可動平板を用いた場合には、非磁性のアルミニウム平板の場合に比べて、最大せん断応力が総じて約2.0~2.5倍程度大きくなっており、かつMR流体よりも1.4~1.7倍程度大きいことから、MR流体多孔質コンポジッ



(a) KN-60-3,  $t=0.8\text{mm}$

(b) TRF-50H,  $t=0.5\text{mm}$



(c) 最大せん断応力 $\tau_{max}$  vs. 印加磁束密度 $B$ 曲線

図7 供試不織布とMR流体多孔質コンポジットのMR効果（接触可動平板の材質による違い）

トとすることにより著しいMR効果の向上が見込める。また、より細いファイバーが複雑に絡み合い横弾性率の大きな不織布（TRF-50H）を用いたMR流体多孔質コンポジットがより大きな最大せん断応力を呈する。

#### 3.2 MR流体多孔質コンポジットの応用技術

コイル巻線においては、線材の張力が変動して不適當であると断線や巻乱れの原因となる。このような巻線時の線材の張力を制御する装置としては、線材を巻き付けた回転プリーをメカ的な摩擦ブレーキやヒステリシスブレーキ等で制動する原理のものが多用されている。このような装置では、回転プリー・ブレーキ系の回転慣性が根本的な問題となり、線速の変動が著しい非円形コイルの巻線時には張力変動が避けられないなどの問題がある。図8には、この問題を根本的に解決するために開発した、線材がMR流体多孔質（66Nylon polyurethane foam）コンポジットの中を直接通過することにより抵抗力を受けて制動する機構を採用したブレーキ<sup>8)</sup>（四角形環状の電磁石を用い、その2.5mmの空隙部の両磁極面間にMR流体多孔質コンポジットを1枚ずつ貼り付け、その間を線材が通過する）を示す。線材の張力レベルは、MR流体多孔質コンポジットブレーキに印加する磁場強度に対してほぼ比例的に増加し

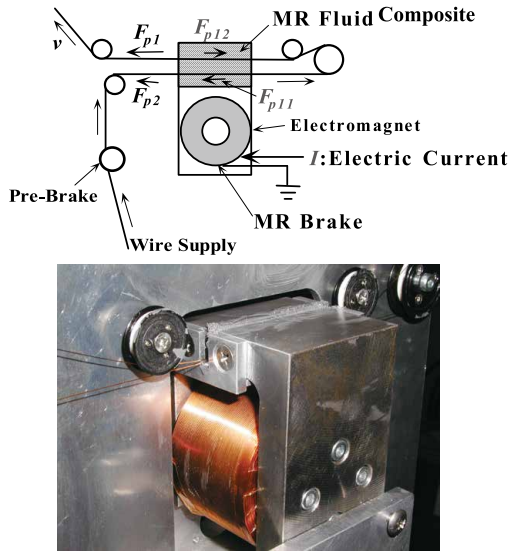
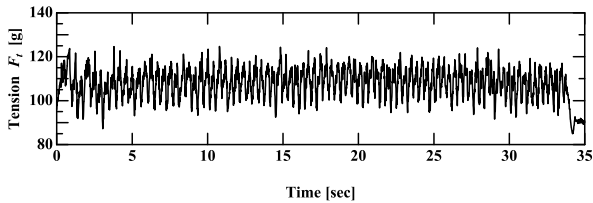
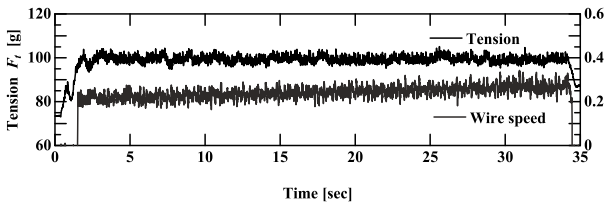


図8 コイル巻線用ワイヤ張力制御装置用に開発されたMR流体多孔質コンポジットブレーキ



(a) 在来のメカ的摩擦ブレーキ張力制御装置の場合



(b) MR流体多孔質コンポジットブレーキ張力制御装置にPID張力フィードバック制御を施した場合

図9 非円形コイル巻取り実験時の張力の時間的な変動の比較

て、張力制御装置のブレーキとして有効に機能することが確認されている。開発したMR流体多孔質コンポジットブレーキを利用した張力制御装置を用いて、線速の変動が必然的な4角形の非円形コイル(線径 $d=0.21\text{mm}$ )を平均線速 $v=0.28\text{m/sec}$ で実機による巻取り実験を行った。その際の張力変動を図9に示す。在来品のプーリーを用いたメカ的摩擦ブレーキを用いた張力制御装置(図9(a))では、全領域にわたって振幅10g程度の大きな張力変動が存在する。一方、開発したMR流体多孔質コンポジットブレーキを用いた張力制御装置を用い、PID張力フィードバック制御を適用した場合(図7(b))には、張力変動が振幅約2gと1/5程度に激減しており、さらに平均張力の時間的な変動も抑制されほぼ設定張力

に保持する機能が付与されて、良好な制御性能を示すことがわかる<sup>8)</sup>。

建築構造物の免震・制振システムにMR流体ダンパを適用する際には、長時間静置時のMR流体中に分散した強磁性体微粒子の沈降が信頼性などの実用上の問題となる。MR流体を多孔質体(不織布)に含浸させたMR流体多孔質コンポジットを活用することによりこの粒子沈降の問題が解決できる。このMR流体多孔質コンポジットを活用した多盤型回転MRブレーキとその回転を直動に変換するボールネジを用いた20kN級の免震・制振用の直動型可変減衰力MRダンパ(最大全長800mm, ストローク±100mm)を開発している(図10)<sup>9)</sup>。図11には、正弦波加振時( $f=0.3\text{Hz}$ ,  $x_a=50\text{mm}$ )の変位 $x$ に対する発生減衰力 $F$ のヒステリシス曲線を示す。すべてのコイルへの印加電流 $I$ において、矩形形状のヒステリシス曲線を呈し、 $I$ の増大に伴いその最大減衰力も大きくなり、 $I=0.5\text{A}$ で減衰力は設計値の20kNにほぼ達している。本MR流体多孔質コンポジットブレーキを用いた直動型MRダンパからなる一自由度振動系に対する免震制御の結果の一例を図12に示す。三

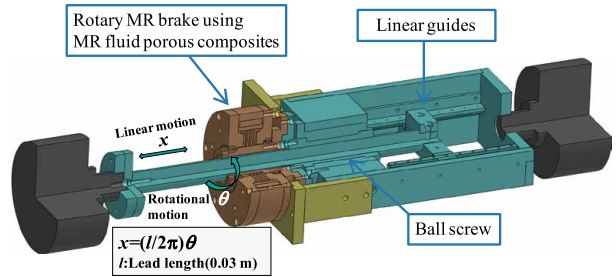


図10 MR流体多孔質コンポジット多盤型回転ブレーキを活用した直動型可変減衰力MRダンパ

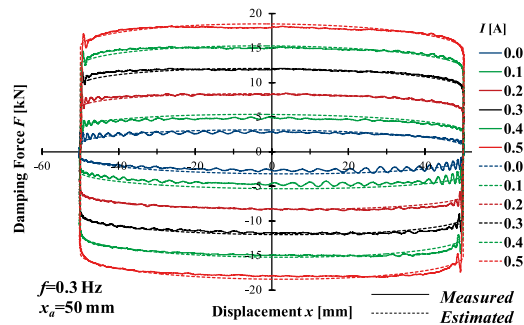


図11 正弦波加振時の変位 $x$ -減衰力 $F$ ヒステリシス曲線のコイル印加電流 $I$ による変化

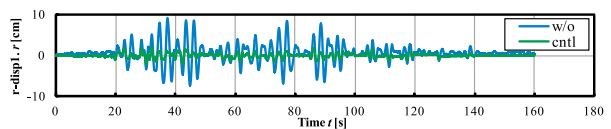


図12 MR流体多孔質コンポジット直動型ダンパからなるSDOF振動系の三の丸地震波に対する応答

の丸地震波に対するその応答を示し、相対速度フィードバック制御を適用することにより、著しく物体（建築構造物）の振動変位を低減できることがわかる。

#### 4. ドライMR流体と車両動力伝達・制動系への応用

##### 4.1 ドライMR流体のMR効果

既存のMR流体を車両の各種デバイスに応用する場合には、環境温度が $-40^{\circ}\text{C}\sim 160^{\circ}\text{C}$ 程度まで問題なく使用できることが要求される。MR流体がオイル等の液体を分散媒としていることから、低温時の粘度上昇が問題となる場合が多い。特に、クラッチやブレーキ等の動力伝達・制動装置に活用する場合には、低温環境下でのMR流体の粘度上昇による引摺りトルクの著しい増大が問題となる。その解決策として、オイル等の液体の分散媒を用いずにガス中にナノ $\text{SiO}_2$ の微粒子をCore-shellコーティングした強磁性体微粒子を分散した高い流動性を有する磁性紛からなるオイルフリーのドライMR流体を提案し、開発してきている<sup>10)</sup>。流動性の向上を維持しながら、大きなMR効果を得るための最適な $\text{SiO}_2$ の添加量を $0.49\text{wt}\%$ 程度としている。図13には、その最適な $\text{SiO}_2=0.49\text{wt}\%$ の添加量の場合の印加磁場による流動曲線（せん断応力-せん断速度曲線）の変化を示す。すべての印加磁束密度 $B$ においてせん断応力はせん断速度に依存せずほぼ一定の値を示し、 $B=0.9\text{T}$ でせん断応力が $\tau=50\text{kPa}$ 程度に達している。

##### 4.2 ドライMR流体の車両用ブレーキへの応用

開発したドライMR流体を車両用の車輪ブレーキに応用することを試みている。小型EV用の車両用多層ディスク型ドライMR流体ブレーキを開発し、小型EVの四輪に実装して走行試験を実施し、良好なブレーキ性能を発揮することを実証している（図14）。図15には、開発したドライMR流体ブレーキの定常トルク特性を示す。20秒間のコイルへの電流 $I$  Aの印加により制動トルクが瞬時に発生しほぼ一定レベルを保持し、OFFによって瞬時に引き摺りトルクに戻る。また、コイル印加電流の増大に伴っ

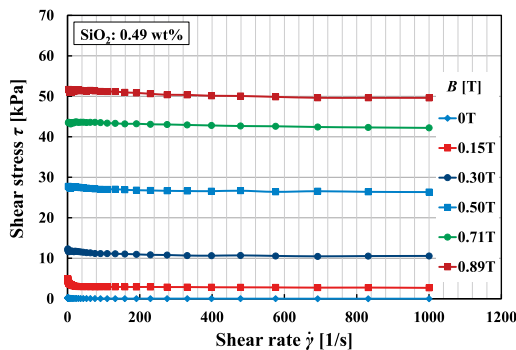


図13 ドライMR流体 ( $\text{SiO}_2: 0.49\text{wt}\%$ ) の流動曲線



図14 四輪にドライMR流体ブレーキを実装した小型EV

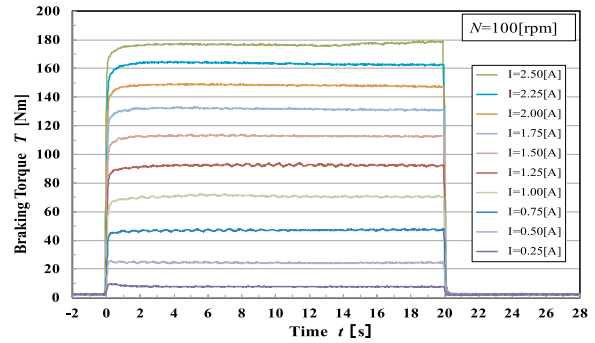
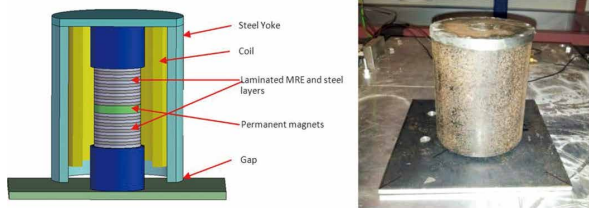


図15 小型EV用ドライMR流体の定常トルク特性

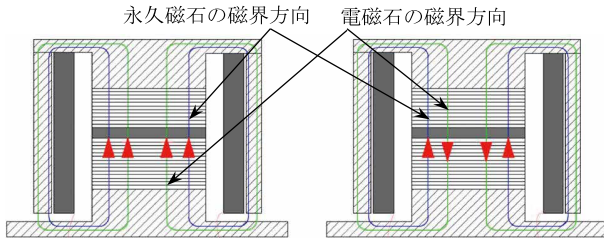
て、定常制動トルクも増大し $I=2.5\text{A}$ 印加時に設計目標トルク $160\text{Nm}$ を上回る最大 $180\text{Nm}$ の制動トルクが得られている。

##### 5. MRエラストマーと剛性可変デバイスへの応用

MR流体の分散媒はオイル等の液体であるが、シリコンゴム等のマトリックスに強磁性体粒子を分散させて硬化させることによって、磁場印加に対して主に弾性的特性（剛性）が可変なMRエラストマーを創製できる<sup>11)</sup>。免震基礎アイソレータとして、図16(a)に示すように、MRエラストマーシートと銅板を交互に積層して、その中間に永久磁石を、その周囲に電磁石を配置して磁気回路を構成した可変剛性機能を有する、積層MRエラストマーアイソレータを開発している<sup>12)</sup>。本免震基礎アイソレータは、電磁石へのコイル電流の印加方向により、積層エラストマーに印加される磁界を強めたり（図16(b)）、弱めたりする（図16(c)）ことにより、永久磁石だけによる磁界印加時の剛性を中心に剛性を増大及び低下させることができる。図17に示す本積層MRE免震基礎アイソレータの周波数伝達率特性からわかるように、コイル印加電流 $I$  Aに応じて共振周波数は、 $14\text{Hz}$  ( $I=0\text{A}$ ) を中心に正電流印加時に上昇し、負電流印加時に低下しており、 $3\text{Hz}$  から  $20\text{Hz}$  程度まで可変ことがわかる。本積層MRE免震基礎アイソレータ4台の上に物体（建築構造物モデル）を搭載したSDOF免震システムを構築し、スカイフック制御を施すことによって、効果的な免震制御が可能なることを明らかにしている<sup>13)</sup>。



(a) 積層MRエラストマー免振基礎アイソレータ



(b) 同方向磁界印加

(c) 反対方向磁界印加

図16 積層MRエラストマー免振基礎アイソレータとコイル電流方向による磁界制御

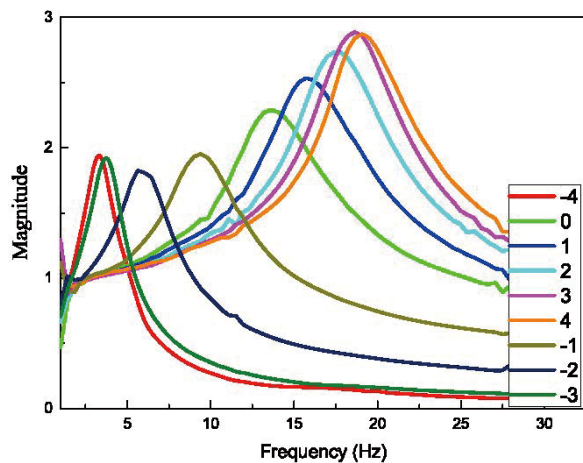


図17 可変剛性機能を有する積層MRE免震基礎アイソレータの周波数伝達率（コイル印加電流IAによる変化）

## 6. おわりに

21世紀の技術革新をもたらす原動力の一つとして、新物質や新材料、特に高機能性材料があげられ、本稿で取りあげたMR効果を示すMR流体・ソフトマテリアルも高付加価値製品の創出という観点からも産業及び工業技術面において大きなブレークスルーをもたらすポテンシャルを有している。物質の粘弾性特性を印加磁場によって可変な稀有な機能性を最大限に活用して、独自の機能を発揮するコストパフォーマンスの高い先進機器・システムの開発とその実用化・製品化が期待される。本稿がそのための一助となれば幸いである。

## 参考文献

- 1) Nakano, M., Yamamoto, H., Jolly, M.R.: Dynamic viscoelasticity of a magnetorheological fluid in oscillatory slit flow, *Int. J. of Modern Physics B*, Vol. 13, No. 14, 15&16, 2068/2076 (1999)
- 2) 中野政身：磁場印加型レオメータの開発とMR流体の磁気レオロジー計測, *フルードパワーシステム*, Vol. 48, No. 2, 78/81 (2017)
- 3) 中野政身：機能性流体の研究開発と実用化の動向, *フルードパワーシステム*, Vol. 47, No. 6, 265/271 (2016)
- 4) 村上貴裕, 酒井理哉, 中野政身：変位と速度に応じて減衰特性の変化するパッシブ式MRダンパの開発, *日本機械学会論文集 (C編)*, Vol. 77, No. 774, 257/269 (2011)
- 5) 中野政身：パワーアシスト用MR流体アクチュエータ, *油空圧技術*, Vol. 54, No. 3, 34/39 (2015)
- 6) 中野政身, 道辻善治：MR流体ブレーキの開発とEVへの適用, *電気自動車のモーションコントロールと走行中ワイヤレス給電技術*, 堀洋一, 横井行雄監修, エヌ・ティー・エス, 116/129 (2019)
- 7) 中野政身：MR流体コンポジットの開発とその応用, *フルードパワーシステム*, Vol. 42, No. 1, 41/45 (2011)
- 8) 中野政身, 熊坂利治, 工藤亮介：MR流体コンポジットブレーキの開発とそのコイル巻線用線材張力制御装置への応用, *日本機械学会論文集 (B編)*, Vol. 75, No. 753, 993/999 (2009)
- 9) Nakano M, Yang J., Sun S., Totsuka A., Fukukita A.: Development and damping properties of a seismic linear motion damper with MR fluid porous composite rotary brake, *Smart Materials and Structures*, Vol. 29, No. 11, Article No. 115043, 1/13 (2020)
- 10) Nakano, M., et al.: Magneto-rheological effects and fluidity improvement of novel dry MR fluids, *Proceedings of the 10th JFPS International Symposium on Fluid Power*, Fukuoka, Japan, Paper No. 1B11, 1/5 (2017)
- 11) Tian T., Nakano M.: Fabrication and dynamic viscoelastic properties of silicone rubber-based MR elastomers with silicone oil, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 59, No. 1, 349/355 (2019)
- 12) Sun S., Deng H., Yang J., Li W., Du H., Alici G., Nakano M.: An adaptive tuned vibration absorber based on multilayered MR elastomers, *Smart Materials and Structures*, Vol. 24, No. 4, Article No. 045045, 1/13 (2015)
- 13) Yang J., Sun S., Tian T., Li W., Du H., Alici G., Nakano M.: Development of a novel multi-layer MRE isolator for suppression of building vibrations under seismic events, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 70-71, 811/820 (2016)