

## 円筒型MR流体ブレーキを用いたバーチャルリアリティー自転車の開発

### Development of virtual cycling system with Cylindrical MR Fluid Brake

○小林慧吾\*, 菊池武士\*, 杉山正雄\*

○Keigo Kobayashi\*, Takehito Kikuchi\*, Masao Sugiyama\*

\*山形大学

\*Yamagata University

キーワード：機能性流体 (functional fluid), 磁気粘性流体 (Magnetorheological Fluid), MR ブレーキ (MR Fluid Brake), 触覚制御 (haptic control), 機械設計 (mechanical design)

連絡先：〒992-8510 米沢市城南 4-3-16 山形大学 工学部 機械システム工学科 菊池研究室  
菊池武士, Tel.: (0238)26-3892, Fax.: (0238)26-3892, E-mail: t\_kikuchi@yz.yamagata-u.ac.jp

## 1. 諸言

高齢者が抱える病気の上位 3 つは「ガン」, 「心疾患」, 「脳血管疾患」である。加齢とともに発症しやすいとされる“脳梗塞(脳卒中)”や“認知症”は, そのうちの「脳血管疾患」に含まれる。Fig.1 に示す日本の年齢階級別の死亡数<sup>1)</sup>を見ると, 高齢者のほとんどが「老衰」ではなく先の 3 つの病気もしくはその他の原因により亡くなっていることがわかる。

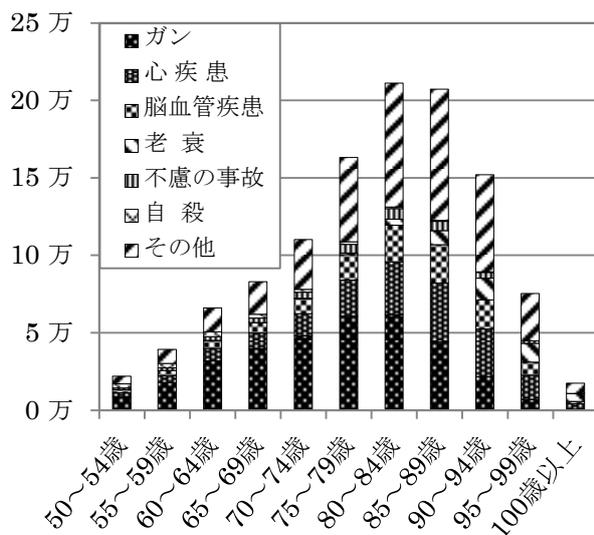


Fig. 1 死因順位別にみた年齢階級別死亡数 (平成 22 年, 厚労省調べ)<sup>1)</sup>

「心疾患」や「脳血管疾患」は, 心臓や脳へと繋がる血管が損傷, もしくは高脂血症による肥厚硬化により器官に正常に血液が送られなくなることによって発症する。血液中の脂質を減らすためには, 有酸素運動による脂肪燃焼が効果的であり, 中でもサイクリングは脚への負担が少なく, また運動施設も必要としないため, 手軽に有酸素運動を行うことができる有効な手段である。

しかし, 加齢に伴い筋力が低下した高齢者にとって, サイクリングは転倒や交通事故の危険性が伴う。屋内で安全にサイクリングを行う方法として, エルゴメータなどの自転車型運動機器を使用する方法もあるが, 実際のサイクリングにより得られる運動効果と同じ効果を得られるとは言い難い。近年ではパソコンと自転車および摩擦ブレーキを組み合わせた仮想サイクリングシステム<sup>2)</sup>も販売されているが, 摩擦ブレーキの静音性と耐久性があまり優れていないことに加え, アスリート向けのトレーニング機器として設計されていることから, 高齢者向けの運動機器として使用するのには適切ではない。

そこで本研究では, 高齢者向けの安全かつ継続可能な運動を提供する自転車シミュレ

ーションシステムの開発を目標とする。ブレーキ装置には、静音性と応答性に優れた MR 流体ブレーキを新規に開発し、ペダル負荷をベルトドライブ方式により直接制御する。自転車シミュレーションにおいて、ペダル負荷制御に MR 流体ブレーキを使用した研究例<sup>3)</sup>も存在するが、こちらは後輪の回転に負荷を加える構造となっているため、ブレーキ装置の構造上の利点を比較する上でも本研究は有効であると言える。

本稿では、MR 流体ブレーキの設計と開発、および特性試験の結果について報告し、最後に自転車シミュレーションシステム開発の現状について述べる。

## 2. 円筒型MR流体ブレーキの設計

### 2.1 基本設計

開発する円筒型 MR 流体ブレーキの基本構造、トルク計算および磁気回路設計については、JSDD の記事<sup>4)</sup>に詳細を記載している。

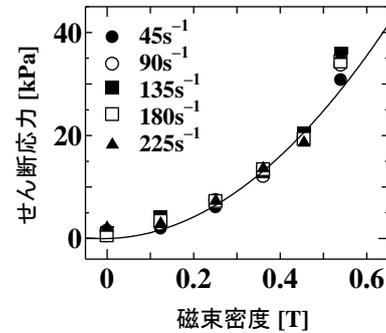
### 2.2 MR流体

MR 流体は、油系の溶媒に磁性体金属粒子を混ぜた非コロイド溶液である。磁場の印加により金属粒子が鎖状に連結し、溶媒の流れの抵抗となって見た目の粘度に変化が生じる特性を持つ。

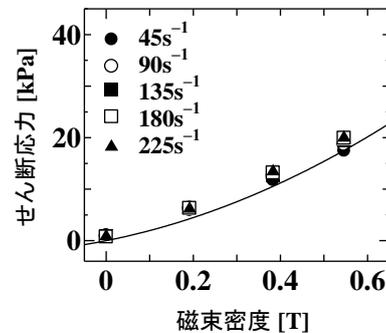
ブレーキの開発に使用する MR 流体は、米 Lord 社製の MRF-132DG<sup>5)</sup>と、株式会社栗本鐵工所製の SoftMRF<sup>6)</sup>を検討した。MRF-132DG は既にいくつかの製品に応用されており、大型車の座席の振動を減衰するためのダンパなどに使用されている。これに対し、SoftMRF は近年開発された新規の MR 流体であり、使用されている金属粒子の径が MRF-132DG の数ミクロンサイズと比べて 1/100 倍程度のナノメートルサイズへと微細化された。これにより、最大せん断応力は MRF-132DG より劣るが、金属粒子が沈降しにくく<sup>5)</sup>、また接触部品の摩耗が少ないなど

の特徴を持つ。SoftMRF をブレーキデバイスに使用することで、長寿命なブレーキの開発が期待できる。

MRF-132DG の特性については、JSDD の記事<sup>4)</sup>に詳細を記載している。せん断応力  $\tau$  [Pa]- 磁束密度  $B$  [T]線図を Fig.2(a)に示す。



(a)MRF-132DG



(b)SoftMRF

Fig. 2 MR 流体のせん断応力-磁束密度線図

SoftMRF の特性については、株式会社栗本鐵工所より提供して頂いた磁束密度  $B$  [T]- 磁場強度  $H$  [A/m]データに加えて、MRF-132DG と同様、円筒型 MR 流体試験機による試験結果からせん断応力  $\tau$  [Pa]- 磁束密度  $B$  [T]線図を作成し、近似式を定めた。 $\tau$ - $B$  線図を Fig.2(b)に、近似式を次に示す。

$$\tau = 2.79 \times 10^4 \cdot B^2 + 1.69 \times 10^4 \cdot B$$

$$(B \neq 0) \quad (1)$$

ただし磁束密度が 0[T]の場合のせん断応力については、栗本鐵工所提供のデータを基に Casson 式を作成し、これを元にせん断応力を算出する。作成した式を次に示す。

$$\sqrt{\tau} = 5.79 + 0.693\sqrt{\dot{\gamma}} \quad (B = 0) \quad (2)$$

Casson 式は塑性流動を表すモデルとしてしばしば用いられる。MR 流体はビンガム塑性

流体に近い特性を示すことから、SoftMRF の磁場無印加時のせん断応力  $\tau$  [Pa]-せん断速度  $\dot{\gamma}$  [ $s^{-1}$ ] の関係を表すのに Casson 式は有効である。ただし、SoftMRF は現在開発途中であり、(2)式は 2010 年 7 月時点での SoftMRF の特性データを元に作成した。

栗本鐵工所提供の SoftMRF のデータは、室温において市販の平行平板型粘度計 (RheoStress600, HAAKE, Germany) により得られたデータである。また、磁場の印加には本装置付属の磁場印加システム (MR-100N, EKO Instruments, Japan) が用いられている<sup>6)</sup>。

Fig.2 のグラフには、各 MR 流体をブレーキに応用する際に重要な特性が示されている。まず、グラフには異なるせん断速度でのせん断応力-磁束密度特性が示されているが、これらのプロットはほぼ重なっている。このことから、MRF-132DG と SoftMRF のせん断応力特性は流体のせん断速度に依存しないと言える。故に、これらの MR 流体をブレーキに応用した際、出力軸の回転速度に依存しない安定したブレーキ力が得られると期待できる。そしてもう 1 つの重要な特性として、SoftMRF が MRF-132DG より全体的にせん断応力が低く、また透磁率も MRF-132DG の方が勝っている。このことから、SoftMRF をブレーキに使用する際は、MRF-132DG を使用する場合と比べて少し大きめの電流を流す必要がある。

上記の特性を考慮し、SoftMRF を使用する場合のブレーキの目標最大トルクを MRF-132DG の半分である 5.0Nm とした。

### 3. 静磁場解析

設計したブレーキの出力トルクを予測するため、磁気回路の解析モデルを作成し、静磁場解析により MR 流体内部に生じる磁束密度を解析した。得られた磁束密度の値を各流体のせん断応力  $\tau$  [Pa]-磁束密度  $B$  [T] 曲線の近似式に代入し、得られたせん断応力値からトルク計算式によってデバイスの予想出力トルクを算出す

る。解析モデル、および MRF-132DG での解析結果は、JSDD の記事<sup>4)</sup> に詳細を記載している。SoftMRF での解析結果を Fig. 3 示す。

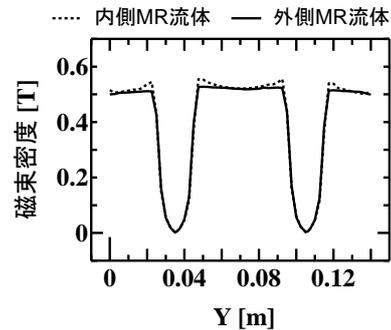


Fig. 3 MR 流体層の X 軸方向磁束密度分布 (コイル電流 2.0A)

### 4. 円筒型MR流体ブレーキの特性試験

本研究で開発した円筒型 MR 流体ブレーキの断面図を Fig.4 に示す。寸法等の仕様については JSDD の記事<sup>4)</sup> に記載されている。

出力軸の回転速度、およびコイル電流を変化させ、デバイスの出力トルクを測定した。特性試験の結果を Fig.5 に示す。MRF-132DG 使用時の最大出力トルクは、目標値である 10Nm の 1 割未満の誤差に収まった。SoftMRF 使用時の最大出力トルクは、目標値である 5.0Nm を超える値が得られた。しかし、いずれの結果も最小・最大出力トルクにおいて 1.0Nm 程度のズレが存在することについては、考察が必要である。

試験の結果から、回転速度 6.28rad/s 以下において出力トルクは回転速度に依存しないことが分かった。このことは、Fig.2 の MR 流体の特性と一致する。

0A 時のトルクが解析より 1.0Nm ほど高いのは、流体の漏れを防いでいるシール部品の摩擦抵抗が原因であり、これについては今後より摩擦の小さいシール部品との交換を考えている。

最大出力トルクの実験結果と解析結果との誤差の原因については現在のところ明確にはできていないが、MR 流体層の磁束密度の解析における誤差が原因であると考えて

いる。今後シール部品の改善により出力トルクの値が下がった場合、この問題はより深刻なものになると予想される。

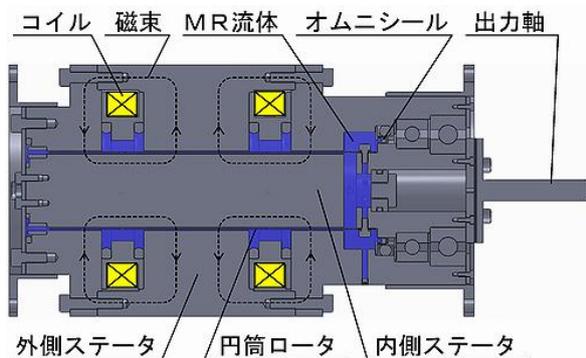
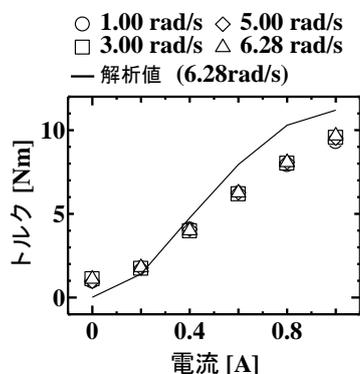
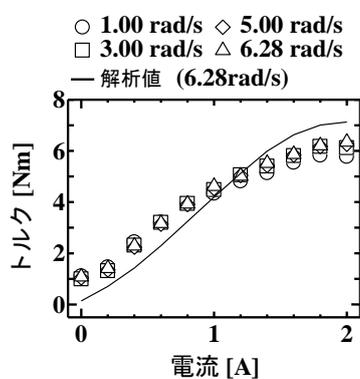


Fig. 4 円筒型MR流体ブレーキ断面図



(a)MRF-132DG 使用時



(b)SoftMRF 使用時

Fig. 5 円筒型MR流体ブレーキのトルク-電流特性

## 5. VR自転車システム

本研究では、開発した円筒型MR流体ブレーキを市販の自転車に取り付けることで、ペダルに作用する負荷トルクを高速に制御可能な自転車型力覚提示装置（VR自転車）を開発している。製作中のVR自転車の外観を

Fig.6に示す。今後はシール部品の改善とソフトウェア製作を進めていく。



Fig. 6 VR自転車の外観

## 6. 結言

本研究では、VR自転車に使用する円筒型MR流体ブレーキの設計を行い、実際に開発したデバイスの特性を評価した。

## 謝辞

本研究は、株式会社栗本鐵工所の支援のもと、財団法人JKA、および、文部科学省によるテニユアトラック普及・定着事業（山形大学）の一環として実施したものである。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 人口動態統計年報 主要統計表（平成22年，厚労省調べ）. (<http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/suii10/index.html>)
- 2) Virtual Bike Training (<http://www.virtualbiketraining.com/>)
- 3) D. Kwon, C. Lee, Y. Park, D. Lee, S. Han, K. Wohn, J. Ahn: KAIST Interactive Bicycle Simulator, Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 2313-2318 (2001)
- 4) K. Takehito, K. Kobayashi: Design and Development of Cylindrical MR Fluid Brake with Multi-Coil Structure, Journal of System Design and Dynamics, (in press)
- 5) LORD website (<http://www.lord.com>)
- 6) 磁気粘性流体 SoftMRF（第14回関西機械要素技術展 株式会社栗本鐵工所配布資料）