ハプティックロボットセンサの要素材料のための感温性と導電性を兼ね備えた MCF ゴムの開発*

島田 邦雄^{*1}, 鄭 耀 陽^{*1}

Development of MCF Rubber with Temperature and Electric Senses for an Element Material in Haptic Robot Sensor

Kunio SHIMADA^{*2} and Yaoyang ZHENG

^{*2} Department of Symbiotic Systems Sciences, Fukushima University,
1 Kanayagawa, Fukushima-shi, Fukushima, 960-1296 Japan

By the application of our developed magnetic intelligent fluid, MCF (magnetic compound fluid) to the silicon oil rubber, we can make the MCF rubber highly sensitive to temperature and electric conduction. It is useful for the element material in haptic robot sensor and et al.. By mixing Cu and Ni particles in the silicon oil rubber and by applying a strong magnetic field to it, it can have high density of magnetic clusters. The formation of the clusters is network, and the phenomena can be confirmed by optical observation. On the other hand, the MCF rubber with iron particles has needle-like magnetic clusters. By comparison between them, the former rubber has more temperature and electric sensitivity than the latter.

Key Words: Functional Fluids, MCF (Magnetic Compound Fluid), Composite Material, Magnetic Rubber, Magnetic Field, Magnetic Cluster, Haptic Sensor, Robot, Magnetic Fluid, Smart Material

1. 緒 言

機能性流体やスマート流体である磁性流体(MF)やMR流体(MRF)を用いた応用開発に関する研究は、これまで多く行われてきている⁽¹⁾。これらについて流体の観点からみると、MFについては、飽和磁化が小さいこと、一方、MRFについては、流体の粒子が沈降してしまうことや、粉体としての挙動を示すため流体力学的に扱うには困難を要することなどが、工学的利用のうえで大きな問題となっている。

これらの問題解決の一つとして、まず、流体の開発が挙げられる。その流体の開発として、島田は、MFとMRFの両方の特性を有する磁気混合流体(MCF)を提案した⁽²⁾。そして、このMCFの流体力学的特性や磁気特性について実験的に明らかにした。その結果、混合するMFやMRFの濃度、および、印加する磁場方向や磁場強度により、MCFの粘度や磁化特性が変化することなどについて実験的に明らかにした⁽³⁾⁽⁴⁾。

また、島田は、このMCFをシリコンオイルゴムに混合して磁場で硬化させることにより、新しい複合材料としてのMCFゴムを提案した⁽⁵⁾。その結果、磁気異方性と引張強度の異方性があり、さらに、MCFゴムは従来のシリコンオイルゴムより非常によく引張性があることを実験的に明らかにした。

一般に、ハプティックの機能をもたせた材料の開発には、いろいろな手法が考えられる^{(6)~(8)}。このMCFゴムをロボットの要素におけるハプティックとしての機能性を有する人工皮膚やハプティックセンサに応用展開するためには、温度や電気に対する反応性を高めることが一つの有効な手段として考えられる。

そこで本研究では、先に提案したMCFゴム⁽⁵⁾に対して成分を変えた新しいMCFゴムを作成し、熱や電気の伝導性を向上させたハプティックMCFゴムを開発した。そして、その感温性および導電性について実験的に調べた。

2. MCF ゴム

MF, MRF, MCFの場合には、磁場を印加することにより、粒子が磁気クラスタを形成することがわかっている⁽⁹⁾。特に、MFやMRFについては、多くの研究者により、クラスタの研究が行われている。

* 原稿受付 2007年4月16日。

^{*1} 正員、福島大学共生システム理工学類(〒960-1296 福島市金谷川1)。

E-mail: shimadaku@sss.fukushima-u.ac.jp

このクラスタに関して、MF や MRF, ER 流体などのコロイド溶液におけるクラスタそのものを取り出す工学的技術については、国内外ともにいまだ報告されていない。しかしながら、MCF や MR について、島田らは、流体中のクラスタを流体より抽出し、実体顕微鏡による観察に成功した。その工学的技術は、すでに特許を得たものであるが、その詳細については、他論文⁽⁹⁾を参照していただくとして、ここでは、本研究に関係する所見のみ述べる。すなわち、ある磁場強度の定常磁場を印加した状態で、溶媒を追加し、続いて溶媒を流し出すという操作を数回繰返し、クラスタをこしとる。このとき、クラスタを印加磁場に引き寄せるようにしておく。このような過程を通して、実体顕微鏡にて観察でき得るクラスタを抽出することができる。

球状の鉄粒子 [HQ, 平均径 3 μm , 山石金属(株)製] からなる MCF や MRF の場合、抽出したクラスタは、棒状もしくは針状であり、球状のマグネタイト粒子 [MF (50 wt%, ケロシンベース, フェロテック(株)製) 中の Fe_3O_4 , 10 nm] との凝集体であることがわかっている⁽⁹⁾。今、鉄粒子と図 1(a)に示すような樹枝状の銅粒子 [MF-D 2, 平均長 8~10 μm , 山石金属(株)製] と MF からなる MCF よりクラスタを抽出すると図 2(a)に示すように、棒状もしくは針状の磁気クラスタが得られる。

それに対して、本研究では、後述する MCF ゴム中

でのクラスタがネットワーク構造をとるように、図 1(b)に示すような球状ではない粒状の Ni 粒子 [123, 平均長 3~7 μm , 山石金属(株)製] を用いると、図 2(b)に示すようにネットワーク状のクラスタが形成される。ここで、熱や電気の伝導性を向上させるために、図 1(a)に示すような樹枝状の銅粒子 (MF-D 2) をも用いる。銅粒子と Ni 粒子の球形でない形状と、Ni 粒子の鉄粒子より強磁性であるということから、ネットワーク状のクラスタが形成される。

次に、図 2(b)からなる MCF をシリコンオイルゴム [SH 9550, トーレダウコーニングシリコン(株)製] に混合し、磁場下で硬化させて、MCF ゴムを作成する。すなわち、Ni : 3 g, Cu : 3 g, MF : 4 g, SH 9550 : 10 g の混合割合である。図 3 に、印加磁場の方向が異なる MCF ゴムの断面と表面の写真を示す。銅粒子と Ni 粒子がクラスタを形成しているのがわかる。

3. 特 性

3・1 熱伝導特性 感温性、すなわち、熱伝導特性について調べるために、MCF ゴムに熱電対を表面に付けて、ある温度をもつ高温体に接触させたときの温度の時間的変化を測定する。

図 4 に、MCF ゴムの厚さ方向に対して垂直に磁場 (永久磁石の表面の磁場強度 3 800 G) を 15 分印加して硬化した場合について、Ni 粒子と鉄粒子をそれぞれ

(a) Cu

(b) Ni

Fig. 1 Photographs of Ni and Cu powder by microscope with magnifying ratio of 3000

(a) HQ: 3g, Cu: 3g, MF: 4g

(b) Ni: 3g, Cu: 3g, MF: 4g

Fig. 2 Photographs of clusters extracted from MCF by microscope with magnifying ratio of 20

(a) Applying magnetic field transversely to the thin MFC rubber with magnifying ratio of 100

(b) Applying magnetic field perpendicularly to the thin MCF rubber magnifying ratio of 200

Fig. 3 Photographs of MCF rubber by microscope

用いたときの比較を示す。ここで、MCF ゴムは、20 mm×15 mm×厚さ 0.682 mm である。また、鉄粒子を用いた MCF ゴムは、HQ:3 g, Cu:3 g, MF:4 g, SH 9550:10 g の混合割合である。Ni 粒子を用いた MCF ゴムのほうが、鉄粒子を用いた MCF ゴムよりも、熱伝導特性がよいことがわかる。これは、図 5 に示すように、ネットワークがクラスタが形成したほうが熱の伝わりがよいからと推察できる。

次に、図 6 に、無磁場下で硬化した場合と、MCF ゴムの厚さ方向に対して平行に磁場(電磁石の鉄心の表面の磁場強度 3 500 G)を 15 分印加して硬化した場合、垂直に磁場(永久磁石の表面の磁場強度 3 800 G)を 15 分印加して硬化した場合とを比較して示す。ここで、MCF ゴムは、20 mm×15 mm×厚さ 0.646 mm である。

垂直に、あるいは平行に磁場を印加しながら硬化させたほうが、無磁場下で硬化させたときより、時間に対する温度こう配が大きく、熱伝導特性がよくなる。これは、図 5(a)に示すように、クラスタが形成されるため、と考えられる。

次に、Ni 粒子を使用した MCF ゴムの熱伝導特性をよくするために、対向する磁石の間に MCF ゴムを挿入することにより、磁石に引き寄せられるクラスタの密度を高めて、MCF ゴムを作成する。そのようにして作成された MCF ゴムの温度変化を図 7 に示す。

Fig. 4 Difference of response of temperature between HQ and Ni used in MCF rubber

Fig. 5 Model of magnetic clusters in MCF rubber

Fig. 6 The effect of magnetic field on response of temperature at the case of using Ni

ここで、MCF ゴムは、20 mm×15 mm である。

初期の温度こう配がほぼ直線的であることから、この領域について、表 1 に示すように、実験データを整理してみる。ここで、 δ は MCF ゴムの厚さ、 ΔT は温度変化、 ΔT_0 は MCF ゴムに印加する温度差、 Δt は時間変化を表す。膜厚 δ が小さいほど、クラスタの密度が大きくなるため、 $\Delta T / (\Delta T_0 \Delta \delta)$ が大きくなる、すなわち、熱伝導特性がよくなる。その様相を図 8 に示す。

Fig. 7 Effect of thickness of MCF rubber on response of temperature

本供試 MCF ゴムの場合、式(1)が得られる。式(1)より、MCF ゴム作成時の膜厚が決まると温度の時間的変化における温度こう配が決まる。

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_0 \Delta t \delta} = 0.141 e^{-5.205 \delta} \dots\dots\dots (1)$$

3.2 導電性 次に、図7と同様に、対向する磁石の間に MCF ゴムを挿入することにより、磁石に引き寄せられるクラスタの密度を高めて作成した MCF ゴムについて、導電性を調べる。すなわち、図9に示すように、万力に挟んだ MCF ゴムに対して、一定圧力を加えて圧縮させ、そのときの変形量をレーザ変位計により測定する。図10に、変形量に対する電気抵抗 R について、Ni 粒子と鉄粒子をそれぞれ用いたときの比較を示す。ここで用いた MCF ゴムは、図4で用いた MCF ゴムである。Ni 粒子を用いた MCF ゴムのほうが、鉄粒子を用いた MCF ゴムよりも、小さな変形量でも導電性がよいことがわかる。これは、図5に示すように、ネットワークがクラスタが形成したほうが電気の伝わりがよいと推察できる。

次に、Ni 粒子を用いた MCF ゴムについて、それぞれの成分の混合する量を変えたときの変形量に対する電気抵抗 R について図11に比較して示す。ここで、MCF ゴムは、20 mm×15 mm×厚さ 0.646 mm である。

図4から図10までにおいて用いてきた Ni 粒子を用いた MCF ゴムにおける Cu, Ni, MF の割合のときがいちばん、小さな変形量でも導電性がよいことがわかる。すなわち、Ni : 3 g, Cu : 3 g, MF : 4 g, SH 9550 : 10 g のときに対して、銅粒子や Ni 粒子、マグネタイト粒子のどれかが多くなると、小さな変形量に対する導電性が悪くなる。このように、Ni 粒子を用いた MCF ゴムについて、変形量に対する電気抵抗

Table 1 Magnetic field intensity and temperature response

Thickness δ [mm]	Magnetic intensity H [Gauss]	ΔT [°C]	ΔT_0 [°C]	Δt [ms]	$\Delta T / (\Delta T_0 \Delta \delta)$ [1/s · m]
0.298	5.80	13.6	44.7	35	1.30
0.5	5.56	9.1	43.6	35	0.52
0.601	5.44	5.0	43.5	35	0.24
0.949	5.03	1.45	42.5	35	0.04

Fig. 8 Relation between thickness of MCF rubber and sense of temperature

Fig. 9 Schematic diagram of measurement of electric resistance of MCF rubber

Fig. 10 Difference of electric resistance between HQ and Ni used in MCF rubber

Fig. 11 Electric resistance by components of MCF rubber

抗には、成分の混合する量に最適値が存在することがわかる。

次に、対向する磁石の間に挟んで硬化させる MCF ゴムの厚さ δ と、その硬化する MCF ゴムの厚さ方向に対する中心点における磁場強度 H に対する電気抵抗 R をそれぞれ図 12, 13 にそれぞれ示す。ここで、電気抵抗は、図 10 に示すように、電気抵抗が一定に達したときの変形量のときにおける値である。厚さ δ が薄いほど電気抵抗は小さくなる。すなわち、膜厚がより小さいほど、クラスタの密度が高くなるため、導電性がよくなる。これは、挟まれた MCF ゴム中での磁場強度が大きいほど、磁石に引き寄せられるクラスタの密度は大きくなるためである。すなわち、電気抵抗は磁場強度 H に依存し、磁場強度 H が大きいほど電気抵抗は小さくなる。

ところで、熱伝導特性の場合でも、表 1 に示すように、 $\Delta T/\Delta T_0 \Delta t \cdot \delta$ は、挟まれた MCF ゴム中での磁場強度 H に依存する。すなわち、図 13 に示す導電性の場合と同様に熱伝導特性は、厚さ δ と磁場強度 H は相関関係があることに起因する。本来、同じ厚さ δ であっても、磁場強度によって $\Delta T/\Delta T_0 \Delta t \cdot \delta$ や電気抵抗 R が変化するので、同じ磁場強度 H により $\Delta T/\Delta T_0 \Delta t \cdot \delta$ や R を整理し直す必要がある。そこで、表 1 と図 13 より、同じ磁場強度 H における $\Delta T/\Delta T_0 \Delta t \cdot \delta$ と電気抵抗 R の関係を求めた結果を図 14 に示す。図 14 における関係式は式 (2) のように表される。

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_0 \Delta t \cdot \delta} = 2 \times 10^{-6} R^{-2.44} \dots \dots \dots (2)$$

同じ磁場強度 H により作成された、すなわち、印加磁場下において同じクラスタの密度を有する MCF ゴムについて、 $\Delta T/\Delta T_0 \Delta t \cdot \delta$ と電気抵抗 R の間には、

Fig. 12 Electric resistance by thickness of MCF rubber

Fig. 13 Electric resistance by magnetic field intensity at the case of making MCF rubber

Fig. 14 Relation between temperature sensitivity and electric resistance

式 (2) で表されるような算術関数の関係にある。これより、電気抵抗が小さくなる、すなわち導電性がよくなると、熱伝導特性が急激に高くなることがわかる。また、厚さ δ が決まった場合、印加する温度に対する

温度の時間的変化が電気抵抗の一方がわかれば、もう一方もわかることになる。

4. 結 言

熱伝導特性と導電性を高めるために、Ni 粒子や銅粒子を使用した MCF をゴムに適用することにより、熱伝導特性と導電性を高めたハプティックセンサの製作が可能となる。これについて、要点をまとめると次のようになる。

(1) Ni 粒子を用いた MCF ゴムのほうが、鉄粒子を用いた MCF ゴムよりも、熱伝導特性や導電性がよくなる。これは、ネットワークを構成するクラスとかかわりがあると推察される。

(2) 垂直に、あるいは平行に磁場を印加しながら MCF ゴムを硬化させたほうが、無磁場で硬化させたときより、熱伝導特性がよくなる。

(3) 膜厚 δ が小さいほど、また、MCF ゴムの硬化時における印加する磁場強度が大きいほど、熱伝導特性や導電性がよくなる。

(4) 膜厚が決まると温度の時間的変化における温度こう配が決まる。

(5) Ni 粒子を用いた MCF ゴムについて、変形量に対する電気抵抗には、成分の混合する量に最適値が存在する。

(6) 同じ磁場強度により作成された、すなわち、同じクラスタの密度を有する MCF ゴムについて、 $\Delta T/\Delta T_0 \Delta t \cdot \delta$ と電気抵抗の間には、一定の関係式が存在し、導電性がよくなると、熱伝導特性が急激に高くなる。

本研究の一部は、平成 18～20 年度文部科学省都市エリア産学官連携促進事業(発展形)の補助を受けている。ここに付記し、謝意を表する。

文 献

- (1) Shimada, K., Development and Applications of Intelligent Magnetic Responsive Fluids, with Particular Attention to Magnetic Compound Fluids (MCFs), *Journal of the Magnetics Society of Japan*, Vol. 28, No. 6 (2004), pp. 766-773.
- (2) Shimada, K. et al., Hydrodynamic and Magnetized Characteristics of MCF (Magnetic Compound Fluid), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 67, No. 664, Ser. B (2001), pp. 3034-3040.
- (3) Shimada, K. et al., Characteristics of MCF (Magnetic Compound Fluid) in a Rotating Rheometer, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 25 (2002), pp. 235-237.
- (4) Shimada, K. and Oka, H., Magnetic Characteristics of Magnetic Compound Fluid (MCF) under DC and AC Magnetic Fields, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 290/291 (2005), pp. 804-807.
- (5) Shimada, K. et al., Magnetic Rubber Having Magnetic Clusters Composed of Metal Particles, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 16 (2005), pp. 15-20.
- (6) Tanaka, M. et al., Haptic Sensor for Monitoring Skin Conditions, *International Journal of Applied Electromagnetic Mechanics*, Vol. 14 (2001/2002), pp. 397-404.
- (7) Kuzuya, C. et al., Application of CMC to Tactile Sensor, *Materials integration*, Vol. 17, No. 8 (2004), pp. 9-16.
- (8) Motojima, S. and Kawabe, K., Super Tactile Micro Sensor Utilizing Carbon Microcoil (CMC), *Ceramics*, Vol. 40, No. 2 (2005), pp. 111-114.
- (9) Shimada, K. et al., Extraction of Magnetic Clusters Self-Assembled by a Magnetic Field, *Smart Materials and Structures*, Vol. 12, No. 2 (2003), pp. 297-303.