粒子混合型磁性エラストマーの 磁気粘弾性効果

長 島 和 史・三 俣 哲*

Magnetorheological Effect for Bimodal Magnetic Elastomers

Kazushi NAGASHIMA and Tetsu MITSUMATA* (Graduate School of Science and Technology, Niigata University, 8050, Ikarashi 2-no-cho, Nishi-ku, Niigata-shi, Niigata 950-2181, Japan)

Magnetic soft materials such as magnetic gels or elastomers demonstrate drastic changes in the viscoelasticity synchronizing with the application of magnetic fields. The change in the viscoelasticity for magnetic soft materials is greatly enhanced by an addition of nonmagnetic particles causing by the stress transfer among imperfect chains of magnetic particles *via* nonmagnetic one. In this review, we survey the magnetic response of viscoelasticity for bimodal magnetic elastomers containing nonmagnetic particles, and the mechanism of the enhanced magnetic response has been explained.

(Received on August 31, 2016)

Key Words : Magnetorheology, Viscoelasticity, Magnetic Field, Magnetic Gel, Magnetic Elastomer, Stimuli-responsive Material

1. は じ め に

温度や電磁場などの刺激に応答して物性が変化する刺激応答性材料 (stimuli-responsive material) の研究開発は近年急速に進歩しており、ソフトアクチュエータ¹⁾ (soft actuator) への応用が加速している。特に国内では、柔らかい材料 (soft material) を用いてさまざまな刺激に応答するソフトアクチュエータの開発が盛んである^{2,3)}。本稿では、磁場に応答して物性が変化する磁性ソフトマテリアル (magnetic soft material) について解説する。空間的に磁界の乱れない均一磁場を与えると硬さが変化した^{4,5)}、磁界が不均一な勾配磁場を与えると伸縮や回転などの運動を示す材料である^{6,7)}。磁場によって誘起される力が大きいこと、応答速度が速いことが特徴である。また、磁場が直接磁性体に作用するので、材料に配線を施さなくても駆

動できることも大きなメリットである。

磁性ソフトマテリアルは高分子ゲル、ゴム、エラストマーなどのソフトな高分子材料と磁性粒子や磁性流体などの磁性体を複合化させた材料である。一般に、数 μm 以上の粒子径をもつ磁性粒子を用いると顕著な磁場応答性を確認することができる。磁場応答の本質は、磁性粒子と外部磁場の磁氣的相互作用なので、磁性粒子の磁気特性を活用できる。例えば、大きな残留磁化を持つ粒子を用いると、着磁によって回転運動するアクチュエータができる⁷⁾。

均一磁場でみられる硬さが変化する性質、可変粘弾性 (variable viscoelasticity) は磁性ソフトマテリアルの内部で磁性粒子が構造化することで発現する。基本的な原理は磁性流体 (magnetic fluid) と同じで、磁性粒子が磁力線に沿って配列した鎖構造 (chain structure) を形成し、高弾性になる。従って、ソフトマテリアルの内部で磁性粒子

長島 和史；新潟大学大学院自然科学研究科 (〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐2の町8050) 博士前期課程2年。学士 (工学)。平成26年、新潟大学工学部機能材料工学科卒業。

三俣 哲；新潟大学工学部機能材料工学科 (〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐2の町8050) 准教授 (研究教授)。博士 (理学)。平成11年、北海道大学大学院理学研究科博士後期課程修了。専門は、高分子材料の物性。

が移動・配列しやすいことが必要条件であり、マトリックスの粘弾性、磁性粒子とマトリックスの親和性が重要なパラメータになる。

著者らのグループは、これまで、永久磁石などの弱い磁場でも大きな粘弾性変化を示す磁性ソフトマテリアルを開発してきた⁸⁻¹¹⁾。近年では、国外でも優れた磁場応答性を示す磁性ソフトマテリアルが開発されている¹²⁻¹⁵⁾。しかしながら、単一の磁性粒子で作られる磁性ソフトマテリアルでは弾性率の変化量が頭打ちである。著者らは、更に高性能な材料を目指して新たなメカニズムをもつ材料を開発してきたが、その一つが、磁性粒子と非磁性粒子を混合した粒子混合型磁性ソフトマテリアルである¹⁶⁻²⁰⁾。本稿では、粒子混合型磁性ソフトマテリアルの磁気粘弾性効果、特に非磁性粒子による弾性率変化の増幅メカニズムについて解説する。

2. 粒子混合型磁性エラストマーの磁気粘弾性効果

本稿で紹介する粒子混合型磁性エラストマーは、単一粒子型と同様にプレポリマー法により合成した。プレポリマー、ポリプロピレングリコール、架橋剤、可塑剤、磁性粒子、非磁性粒子の酸化亜鉛を混合攪拌し、アルミ製の鋳型に流し入れ、ホットステージ上で硬化させた。各試薬の配合比、反応温度などの条件については文献^{9, 11, 17, 18, 20)}を参照されたい。

粒子混合型の磁性ハイドロゲルにはポリビニルアルコール⁵⁾や多糖類などの高分子が用いられる。本稿で紹介する磁性ゲルはカラギーナンをマトリックスとするゲルで、1%程度のカラギーナン水溶液にカルボニル鉄、非磁性粒子の水酸化アルミニウムを分散させ、シリコンとガラス板からなる鋳型に流し入れゲル化させた。ゲル化条件など、実験の詳細は文献^{8, 10, 16)}を参照されたい。

2.1 低ひずみ領域における磁気粘弾性効果

Figure 1 (a) に1 Hz, ひずみ 10^{-4} における粒子混合型磁性エラストマーの貯蔵弾性率と非磁性粒子の体積分率の関係を示す¹⁷⁾。カルボニル鉄を15 vol%分散させたマトリックスに非磁性粒子を添加した結果で、磁場強度は0 mT, 500 mTである。実線は、Einsteinの式²¹⁾で与えられる貯蔵弾性率 G' であり、次式で表される。

$$G' = G'_0 (1 + 2.5 \phi^{\text{ZnO}}) \quad (1)$$

ここで、 G'_0 は非磁性粒子を含まない磁性エラストマーの貯蔵弾性率である。0 mTにおける弾性率は上式に従う。非磁性粒子が磁性エラストマー中で粒子ネットワークを形成しないことを示唆する。一方、500 mTにおける弾性率は、非磁性粒子の体積分率が高くなるにつれて顕著に増加する。非磁性粒子は磁化しないため自発的に動いて鎖を形成することができない。非磁性粒子が磁性粒子の短い鎖を橋渡しすることで高い弾性率が発現すると考えられる。

Figure 1 (b) に粒子混合型磁性エラストマーの500 mTにおける貯蔵弾性率の変化量と非磁性粒子の体積分率の関係を示す¹⁷⁾。非磁性粒子の体積分率0.02以下では、非磁性粒子による弾性率変化の増幅効果は認められない。体積分率0.02以上では、非磁性粒子の粒子径に依らず、体積分率が増加するにつれて顕著に増大する。非磁性粒子の添加によって、カルボニル鉄の濃度は2%増加してしまう。この増加に伴う弾性率の変化量の実験値を破線で示す。変化量は高々0.6 MPaであり、粒子混合型磁性エラストマーの大きな弾性率変化は、カルボニル鉄の濃度増加によるものではない。

Figure 2 (a) に粒子混合型磁性エラストマーの各磁場における非磁性粒子の臨界体積分率 ϕ_c^{ZnO} を示す¹⁷⁾。臨界体積分率は磁場が高くなるにつれて低下した。500 mTで

Fig. 1 (a) Storage modulus (1 Hz, $\gamma \sim 10^{-4}$) as a function of the volume fraction of nonmagnetic ZnO particles. (b) Absolute change in storage modulus by magnetic fields for bi-modal magnetic elastomers vs. volume fraction of nonmagnetic ZnO particles. The broken line represents the experimental value of $\Delta G'$ for monomodal magnetic elastomers as a function of volume fraction of magnetic CI particles.

Fig. 2 (a) Relationship between critical volume fraction of nonmagnetic ZnO particles and magnetic fields for bimodal magnetic elastomers with various diameters of nonmagnetic particles ($\phi^{\text{Cl}} = 0.15$). (b) Schematic illustration representing the number density of magnetic and nonmagnetic particles at the critical volume fraction for bimodal magnetic elastomers with various diameters of nonmagnetic particles.

の臨界体積分率は非磁性粒子の粒子径によらず0.02である。これは、Figure 1 (b) の弾性率変化が急激に立ち上がる体積分率と一致する。160 mT以下の磁場では、臨界体積分率は粒子径が大きくなるにつれて低下する傾向が見られ、粒子径が大きいほどパーコレーションしやすいことを示唆する。

Figure 2 (b) に臨界体積分率での粒子混合型磁性エラストマーの概念図を示す¹⁷⁾。臨界体積分率における非磁性粒子の数密度 N_c^{ZnO} は次式で表される¹⁷⁾。

$$N_c^{\text{ZnO}} = \frac{\phi_c^{\text{ZnO}}}{(4/3)\pi r^3} \quad (2)$$

ここで、 ϕ_c^{ZnO} は非磁性粒子の臨界体積分率、 r は非磁性粒子の半径である。直径11 μm の非磁性粒子は2.1 μm より2桁低い数密度でパーコレーションすることを示唆する。磁性粒子の数密度は $1.8 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ であり、磁性粒子に対する非磁性粒子の比率は、それぞれ206 : 55 (2.1 μm)、8 : 55 (5.9 μm)、1 : 55 (11 μm) と計算される。弱磁場では、直径2.1 μm の非磁性粒子は数密度が高く、磁性粒子の動きを妨げ、鎖を形成しにくい状態になると考えられる。Pengらは、非磁性粒子を添加すると磁性粒子の移動が遅くなることを二次元の数値シミュレーションで明らかにしている²²⁾。非磁性粒子などの添加で粒子の数密度が高くなる系では、磁性粒子の移動を良好にするための工夫が必要である。

Figure 3 (a) に1 Hzにおける単一粒子の磁性エラストマーの損失正接のひずみ依存性を示す²⁰⁾。0 mTにおける損失正接は低ひずみで0.20、高ひずみで0.23である。500

Fig. 3 Strain dependence of loss factor at 1 Hz for (a) monomodal and (b) bimodal magnetic elastomers at various magnetic fields.

mTでは、低ひずみでは一定 ($= 0.15$) で、ひずみ 10^{-3} 付近でわずかに増加する ($= 0.38$)。このように、単一粒子の磁性エラストマーの損失正接は、ほとんど磁場応答しない。

Figure 3 (b) に1 Hzにおける粒子混合型磁性エラストマーの損失正接のひずみ依存性を示す²⁰⁾。0 mTにおける損失正接は低ひずみで0.30、高ひずみで0.5まで増加する。500 mTでは、低ひずみで0.05、ひずみ 10^{-1} 付近で急激に増加する (> 3.0)。このように、粒子混合型磁性エラストマーの損失正接は、磁場をかけると低ひずみでは低下し、高ひずみでは増加するという両性の磁場応答性を示す。磁場応答性が負から正に転じるひずみは磁場が強くなるにつれて低ひずみ側にシフトする。

Figure 4 (a) に粒子混合型磁性エラストマーで見られる損失正接の両性応答のメカニズムを示す²⁰⁾。低ひずみ、磁場なしでは、磁性粒子と非磁性粒子からなる粒子ネットワークが形成されている。単一粒子の磁性エラストマーの貯蔵弾性率は $1.1 \times 10^4 \text{ Pa}$ で、酸化亜鉛15 wt%を添加するだけで約8倍も増加するからである。高ひずみでは、粒子混合型の弾性率は単一粒子と同じ値になることから、この混合粒子ネットワークはひずみによって完全に崩壊することがわかる (Figure 4 (b))。磁場を印加すると、低ひずみでの貯蔵弾性率は $6.0 \times 10^6 \text{ Pa}$ であり、磁場なしの弾性率 $8.2 \times 10^4 \text{ Pa}$ や単一粒子の磁場中弾性率 $7.3 \times 10^5 \text{ Pa}$ よりも高い (Figure 4 (c))。従って、非磁性粒子と磁性粒子からなる鎖構造が形成されていると考えられる。この鎖構造のため、磁性粒子、非磁性粒子の流動が制限され損失正接が低くなると考えられる。高ひずみでは、粒子混合型の弾性率は単一粒子と同じ値になることから、この非磁性粒子を介した鎖構造はひずみによって完全に崩壊すること

Fig. 4 (a) Schematic illustrations representing a possible mechanism of amphoteric response of loss tangent for bimodal magnetic elastomers. Strain dependence of storage modulus for monomodal and bimodal magnetic elastomers at (b) 0 mT and (c) 500 mT.

がわかる。磁性粒子だけの鎖構造は完全に崩壊しない。

Figure 5 (a) に 1 Hz, ひずみ 10^{-4} における粒子混合型磁性ゲルの貯蔵弾性率の磁場応答性を示す¹⁶⁾。マトリックスは多糖であるカラギーナンの水系ゲルで、非磁性粒子は水酸化アルミニウムである。60 秒おきに 500 mT の磁場を印加している。磁性粒子に対する非磁性粒子の混合比 $r = 0$ のとき、弾性率の大きな変化が認められる。一方、 $r = 1$ ではもちろん磁場応答しない。 $r = 0.58, 0.82$ では、1 回目

Fig. 5 (a) Storage modulus (1 Hz, $\gamma \sim 10^{-4}$) for bimodal magnetic hydrogels containing $\text{Al}(\text{OH})_3$ in response to stepwise magnetic fields. (b) Storage modulus of bimodal magnetic hydrogels containing $\text{Al}(\text{OH})_3$ at 0 and 500 mT as a function of mixing ratio.

の磁場印加後の弾性率は、印加前よりおよそ 2 kPa 低下する。これは、磁性粒子と非磁性粒子からなる粒子ネットワークが磁場で破壊されることを示唆している。2 回目の磁場印加ではこのような現象は見られず、構造が変化しないことを示している。

Figure 5 (b) に粒子混合型磁性ゲルの貯蔵弾性率と磁性粒子に対する非磁性粒子の混合比の関係を示す¹⁶⁾。0 mT での弾性率は混合比に依存しない。前述した酸化亜鉛と同様に、水酸化アルミニウムもマトリックスで良好に分散していることを示唆する。驚くことに、カルボニル鉄の 34 vol% を水酸化アルミニウムに置換しても高い弾性率を維持している。これは、カルボニル鉄粒子間に働く磁氣的相互作用が $4 \mu\text{m} \sim 6 \mu\text{m}$ (非磁性粒子 2 ~ 3 個分) に及ぶことを示唆している。

粒子混合型磁性ゲルの比透磁率 μ_r は次式で書ける¹⁶⁾。

$$\mu_r = \phi_{\text{CI}} \mu_{\text{CI}} + (1 - \phi_{\text{CI}}) \mu_{\text{CA}} \quad (3)$$

ここで、 μ_{CI} 、 μ_{CA} はカルボニル鉄、カラギーナンの比透磁率で、それぞれ 5.48, 1.0 である。一方、磁性ゲルの磁氣的相互作用による弾性率の変化 $\Delta G'$ は次式で与えられる¹⁸⁾。

$$\Delta G' = \mu_r \mu_0 (M \phi)^2 \quad (4)$$

ここで、 μ_r は磁性ゲルの比透磁率、 μ_0 は真空の透磁率、 M は磁性ゲルの磁化、 ϕ は体積分率である。磁気測定で得られた μ_r 、磁化曲線で得られた磁化の値 M を式 (4) に代入すると、磁氣的相互作用による弾性率変化量の計算値 $\Delta G'$

Fig. 6 Strain-stress curves for (a) monomodal and (b) bimodal magnetic elastomers containing 9.6 vol.% nonmagnetic ZnO particles at 0 mT and 320 mT. (c) Young's modulus for magnetic elastomers as a function of the volume fraction of nonmagnetic ZnO particles. Broken line represents the Young's modulus calculated by the Einstein's formula.

が求められ、大きな $\Delta G'$ の値は磁氣的相互作用だけでは説明できないことがわかった。また、磁性粒子より密度が低い水酸化アルミニウムを用いることで、弾性率の磁場応答性を損なうことなく21%軽量化することがわかった。

2.2 高ひずみ領域における磁気粘弾性効果

Figure 6 (a) に単一粒子の磁性エラストマーの0 mT, 320 mTにおける応力ひずみ曲線を示す¹⁸⁾。ひずみ0.2における応力は磁場を印加すると2倍になる。実際に物体を指で押したときの条件に近い圧縮速度100 mm/minでも同様の結果が得られる。Figure 6 (b) に粒子混合型磁性エラストマーの応力ひずみ曲線を示す¹⁸⁾。ひずみ0.2における0 mTの応力は、単一粒子の磁性エラストマーとほぼ同じである。ひずみ0.2における応力は磁場を印加すると6倍になる。大変形下でも顕著な応力の増加が認められる。

Figure 6 (c) に粒子混合型磁性エラストマーのヤング率と酸化亜鉛の体積分率の関係を示す¹⁸⁾。0 mTでのヤング率は(1)式に従う。320 mTにおけるヤング率は、酸化亜鉛の体積分率とともに増加し、体積分率0.06付近で急激に増加する。カルボニル鉄の不完全な鎖が酸化亜鉛によって連結するパーコレーション^{しきい}値と考えられる。Figure 2 (a) で示した粒子混合型磁性エラストマーの臨界体積分率は0.07であり、カルボニル鉄の体積分率は異なるが、良い一致を示す。ヤング率の変化率は単一粒子で1.8倍、粒子混合型で5.8倍である。線形粘弾性領域における貯蔵弾性率の変化率は、単一粒子で45倍、粒子混合型では86倍である。変化率は1桁小さくなるが10%程度 of 非磁性粒子と混合するだけで弾性率変化を3倍増幅することができる。

Figure 7 (a) に印加電圧50 Vで測定したときの粒子混合型磁性エラストマーの抵抗率の磁場応答性を示す¹⁸⁾。60秒おきに320 mTの磁場を印加した。はじめの60秒間では、荷電した不純物の電極分極による抵抗率の増加が見られる。磁場を印加すると、単一粒子では2.36 GΩcm、粒子混合型では0.78 GΩcm低下する。酸化亜鉛の抵抗率はkΩcmのオーダーで半導体的である。磁性粒子の鎖構造の間に酸化亜鉛粒子が介在したことが電気抵抗率からもわかる(Figure 7 (b))。一次元的な電気伝導を仮定すると、磁性エラストマーの抵抗率 ρ_{obs} は、鎖の抵抗率 ρ_c と鎖間に存在する絶縁層の抵抗率 ρ_i を用いて次式で書ける¹⁸⁾。

$$\rho_{obs} = \frac{\xi_i}{\xi} \rho_i + \left(1 - \frac{\xi_i}{\xi}\right) \rho_c \quad (5)$$

ここで、 ξ は鎖の特徴長さ、 ξ_i は絶縁層の特徴長さである。 ρ_c は ρ_{obs} 、 ρ_i に比べて無視できるほど小さいので、 ξ_i は $\xi_i \approx (\rho_{obs}/\rho_i) \xi$ と書ける。絶縁層の特徴長さ ξ_i は単一粒子では0.12 ξ 、粒子混合型では0.36 ξ と計算される。従って、一本の鎖で磁性粒子の27%が非磁性粒子に置き換わったことを示す¹⁸⁾。

Figure 8に30 N (= 3.1 kgf) で圧縮したときの写真を

Fig. 7 (a) Electric resistivity for monomodal and bimodal magnetic elastomers containing 9.6 vol.% nonmagnetic ZnO particles under a pulsatile magnetic field of 320 mT. (b) Schematic illustration representing chain structure consisting of magnetic and nonmagnetic ZnO particles.

Fig. 8 Photographs of (a, b) monomodal and (c, d) bimodal magnetic elastomers containing 9.6 vol.% nonmagnetic ZnO particles under a constant load of 30 N (a, c) 0 mT, (b, d) 320 mT.

示す¹⁸⁾。磁場なしでは、単一粒子も粒子混合型も大きく変形する。磁性エラストマーの下部に320 mTの永久磁石を置くと、単一粒子の磁性エラストマーは大きく変形する。一方、9.6 vol.%の酸化亜鉛を含む粒子混合型磁性エラストマーではほとんど変形しない。

3. お わ り に

粒子混合型磁性エラストマーの磁場応答性について概説した。非磁性粒子を介した磁性粒子の鎖構造形成で、数vol%の非磁性粒子を添加するだけで磁場応答性が劇的に向上することを示した。弾性率変化が大きいため、低磁場でも従来材料と同程度の弾性率変化が得られる。また、粒子混合型磁性エラストマーに用いられる非磁性粒子は磁性粒子より低密度であるため、材料やデバイスの軽量化に貢献できる。物体の質感が可変な力触覚装置、あらゆる周波数の振動を減衰できる制振装置として有用だと考えている。実用化を目指した研究も日々進歩しており、最近、高強度の粒子混合型磁性エラストマーが鉄道の実験車両に搭載された²⁰⁾。弾性率をより効率的に変えるための磁場装

置，複合化の手法についても研究を進めており，早期の実用化を目指している．

謝辞

本研究の一部はJST/ALCAの助成により行われた．

References

- 1) Eds. Asaka, K.; Okuzaki, H.: “Soft Actuators, Materials, Modeling, Applications, and Future Perspectives”, Springer (2014)
- 2) Osada, Y.; Taguchi, T.: “Mirai wo Ugokasu Soft Actuator—Kobunshi・Seitaizairyo o Chusin Toshita Kenkyu Kaihatsu—”, CMC Publishing, Tokyo (2010)
- 3) Higuchi, T.; Ohka, M.: “Actuator Kenkyu Kaihatsu no Saizensen”, N・T・S (2011)
- 4) Shiga, T.; Okada, A.; Kurauchi, T.: *J. Appl. Polym. Sci.*, **58**, 787 (1995)
- 5) Mitsumata, T.; Ikeda, K.; Gong, J. P.; Osada, Y.; Szabo, D.; Zrinyi, M.: *J. Appl. Phys.*, **85**, 8451 (1999)
- 6) Zrinyi, M.: Eds. Osada, Y.; Khokhlov, A. R.: “In Polymer Gels and Networks”, Marcel Dekker, New York, Chapter 11 (2002)
- 7) Mitsumata, T.; Kakiuchi, Y.; Takimoto, J.: *Res. Lett. Phys. Chem.* ID671642 (2008)
- 8) Mitsumata, T.; Abe, N.: *Chem. Lett.* **38**, 922 (2009)
- 9) Mitsumata, T.; Ohori, S.: *Polym. Chem.* **2**, 1063 (2011)
- 10) Mitsumata, T.; Honda, A.; Kanazawa, H.; Kawai, M.: *J. Phys. Chem. B*, **116**, 12341 (2012)
- 11) Mitsumata, T.; Ohori, S.; Honda, A.; Kawai, M.: *Soft Matter*, **9**, 904 (2013)
- 12) Chertovich, A. V.; Stepanov, G. V.; Kramarenko, E. Yu.; Khokhlov, A. R.: *Macromol. Mater. Eng.* **295**, 336 (2010)
- 13) An, H. N.; Sun, B.; Picken, S. J.; Mendes, E.: *J. Phys. Chem. B*, **116**, 4702 (2012)
- 14) Xu, Y.; Gong, X.; Xuan, S.; Li, X.; Qin, L.J.; Jiang, W.Q.: *Soft Matter*, **8**, 8483 (2012)
- 15) Xu, Y.; Gong, X.; Xuan, S.: *Smart Mater. Struct.*, **22**, 075029 (2013)
- 16) Ohori, S.; Fujisawa, K.; Kawai, M.; Mitsumata, T.: *Chem. Lett.*, **42**, 50 (2013)
- 17) Mitsumata, T.; Ohori, S.; Chiba, N.; Kawai, M.: *Soft Matter*, **9**, 10108 (2013)
- 18) Nagashima, K.; Kanauchi, S.; Kawai, M.; Mitsumata, T.; Tame-sue, S.; Yamauchi, T.: *J. Appl. Phys.* **118**, 024903 (2015)
- 19) Umehara, Y.; Kamoshita, S.; Oguro, T.; Kawai, M.; Mitsumata, T.: Nippon Kikai Gakkai 24kai Kotsu・Butsuryu Bumon Taikai Kouen Ronbunshu (2015)
- 20) Nagashima, K.; Kawai, M.; Mitsumata, T.: *Chem. Lett.* **45**, 1033 (2016)
- 21) Einstein, A.: *Ann. Phys.* **324**, 289 (1906)
- 22) Peng, X.; Min, Y.; Ma, T.; Luo, W.; Yan, M.: *J. Magn. Magn. Mater.*, **321**, 1221 (2009)

日本語表記参考文献

- 2) 長田義仁，田口隆久：“未来を動かすソフトアクチュエーター—高分子・生体材料を中心とした研究開発—”，シーエムシー出版，東京（2010）
- 3) 樋口俊郎，大岡昌博 監修：“アクチュエータ研究開発の最前線”，エス・ティー・エス（2011）
- 19) 梅原康弘，鴨下庄吾，小黑翼，川合巳佳，三俣哲：日本機械学会第24回交通・物流部門大会講演論文集（2015）

*

*

*

*

*