

磁気応答性ソフトコンポジットの機能と応用 Functions and Applications of Magnetic-Responsive Soft Composites

°三俣 哲 (新潟大学工学部)

°Tetsu Mitsumata (Faculty of Engineering, Niigata University)

E-mail: tetsu@eng.niigata-u.ac.jp

Abstract:

The viscoelastic property for magnetic soft materials dramatically changes in response to magnetic fields and they have attracted considerable attention since the past few decades. Magnetic soft materials consist of polymeric soft matrix and magnetic particles. Under magnetic fields, magnetic particles align in the direction of magnetic fields in soft matrix and make a chain structure which is an origin of high viscoelasticity. We have investigated so far the mechanism of the viscoelastic change in a cross-linked polymers and developed polyurethane-based elastomers demonstrating drastic and reversible changes in dynamic modulus by weak magnetic fields. In this review, our past studies and the recent development of magnetic soft materials are reported from fundamentals and applications.

Keywords: magnetic soft material, magnetic elastomer, magnetorheology

1. はじめに

磁気応答性ソフトマテリアルは高分子のマトリックスと磁性粒子からなる複合材料で、磁性ソフトマテリアルと呼ばれる (図 1)。構造的には自動車の初心者マークや冷蔵庫に貼るマグネットに用いられるボンド磁石と同じであるが、マトリックスの硬さが異なる。ボンド磁石にはプラスチックや硬質ゴムなどの硬い材料が用いられるが、磁性ソフトマテリアルには高分子ゲル、可塑剤を含むゴムやエラストマーなどのソフトな材料が用いられる。この磁性ソフトマテリアルを均一磁場に配すると、磁性粒子が磁力線の方向に配列し、バルクの弾性率が変化する。この現象は磁気粘弾性効果と呼ばれ、磁性流体の粘度が磁場で変化する現象として古くから知られている。“柔らかい”特徴をもつ磁性ソフトマテリアルは、人間に優しいアクチュエータ、インターフェイス、高効率なソフトマシンに応用でき、近年注目されている。

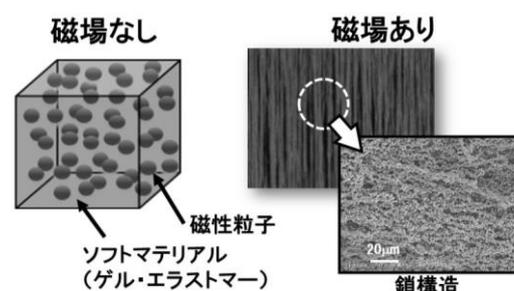


図 1 磁性ソフトマテリアルの磁場による構造変化

2. 磁性エラストマーの磁気粘弾性効果

磁性エラストマーのマトリックスはポリプロピレングリコールをトリレンジイソシアネートで架橋させたものである。磁性エラストマーは水系磁性ゲルと比較して力学強度が高く、大気中で1年以上保存しても磁気応答性などの物性が全く変わらない。また、氷点以下で使用できることも大きなメリットである⁽¹⁾⁽²⁾。

ポリウレタン磁性エラストマーの弾性率の磁気応答性を図 2 a に示す⁽¹⁾。磁場を印加していないときの貯蔵弾性率 G' は 4kPa。磁場を印加すると 1MPa に増加する。また、損失弾性率 G'' も貯蔵弾性率と同じようにパルス的に変化する。弾性成分だけでなく粘性成分も広範囲に磁場で変化させることができる。応答速度は磁性粒子の種類や磁性粒子とエラストマーの組合せなどによって異なるが、500ms で倍の弾性率になる。磁気粘弾性効果の大きさは透磁率 (飽和磁化) や磁性粒子の粒子径に依存するが、本質的にはマトリックス中での粒子分散性が重要である⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。逆に、磁気粘弾性効果の大きさから磁性粒子の二次粒子径を見積もることができる⁽⁶⁾。

磁性流体では磁性粒子が磁力線に沿って鎖構造を形成することで粘稠になる。三次元的に架橋されたエラストマーでは磁性粒子が動きにくいと考えられるが、同様のことが起こる。近年、磁性エラストマーの磁場下での X 線コンピュータ断層撮影画像により、磁性粒子がエラストマー中で移動し、鎖構造を形成することが明らかになった⁽⁷⁾⁻⁽⁸⁾ (図 2 b)。弾性率変化、応答速度を改善するためには微視的な鎖構造制御が必要不可欠である。超音波の音速から求められる縦波弾性率により、メゾスコピック領域での磁気粘弾性効果と X 線 CT 画像の相関についても解析を進めている⁽⁹⁾。細胞培養基板など、微小物体

への応用では重要な知見となり得る⁽¹⁰⁾。

磁性粒子だけでは弾性率変化量、磁場応答性ともに限界がある。そこで開発したのが、磁性粒子と非磁性粒子を混合した粒子混合型磁性エラストマーである。非磁性粒子と呼んでいるのは、磁性粒子に比べて磁化率が無視できるほど小さいからであり、実際は常磁性体や反磁性体である。きっかけは磁性流体に非磁性粒子を混合すると磁気粘弾性効果が増幅すると報告した **Klingenberg** らの論文である⁽¹¹⁾。筆者らもカルボニル鉄と酸化亜鉛粒子からなる磁性エラストマーの磁気粘弾性効果を調査し、非磁性粒子が磁性粒子の鎖構造に介入することを明らかにした(図3a)^{(12)~(14)}。さらに、磁性粒子をテトラポッド型の酸化亜鉛に置換すると、置換率 0.2 付近で弾性率変化が最大となる興味深い現象を見出した(図3b)⁽¹⁵⁾。また、粒子混合型にすることで磁場応答性を 10%、時間的な応答性を 27%改善することができた⁽¹⁶⁾。弱い磁場で素早く弾性率を変えられる粒子混合型は実用的に大きな可能性があるかと期待している。ごく最近、大粒子径(直径 $200\ \mu\text{m}$)のプラスチックビーズを高体積分率で充填し、ビーズの隙間で鎖構造ができる磁性エラストマーを公表した。磁性粒子がわずかでも磁気粘弾性効果が発現する。さらに、この複合化によって 59%の軽量化を達成した⁽¹⁷⁾。

3. 磁気粘弾性効果の応用

まず、粘弾性の変化を体感できるゲーム用の力触覚提示装置である。磁性エラストマーでできたマットに乗ると、足裏に伝わる感覚が磁場で変化するのが体感できる⁽¹⁸⁾。視覚、聴覚と組み合わせたこのシステムは家庭用ゲーム機や歩行リハビリテーション支援装置などに応用できる。力触覚を導入したバーチャルリアリティー技術は今後飛躍的に進歩すると確信している。

粒子混合型磁性エラストマーは鉄道車両のような重量物にも応用できる(図4a)。鉄道車両の車輪はゴムブッシュと呼ばれる部材で台車とつながっている。カーブではゴムが変形し、ある程度の舵をきれるようになっている。ゴムを柔らかくすると操舵性は向上するが、直線での走行安定性が失われる。ゴムのかわりに磁性エラストマーを用いれば、カーブ、直線ともに安定した走行を実現できる。近年、粒子混合型磁性エラストマーを車両に搭載して半径 160 m の円軌道を時速 15 km で走行することに成功した^(19,20)。磁場の有無で 2 割程度の横圧変化が認められた。カーブ通過時の騒音低減に貢献すると考えられている。

可変弾性材料は古くから振動制御材料として注目されており、ここ数年で論文数が増えている^{(21)~(23)}。筆者らのグループでも小型の電磁石で共振周波数が大きく変化する振動吸収装置の開発を行っている⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾。図4(b)に共振周波数および共振周波数の変化量と磁性粒子の体積分率の関係を示す。荷重 69 g、224 g を与えたときの結果である。共振周波数は磁場の有無に関わらず体積分率とともに高くなる。最大で 23 Hz 変化した。磁場を発生させる電磁石は 200 g 程度である。現在、実用化を目指した研究を進

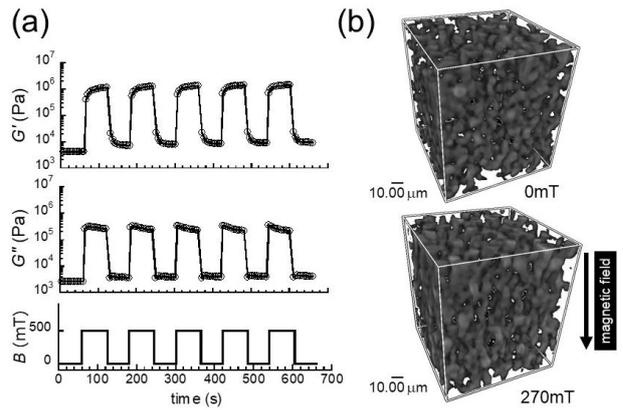


図2 ポリウレタン磁性エラストマーの(a)弾性率の磁場応答性、(b)0mT、270mTでのCT画像

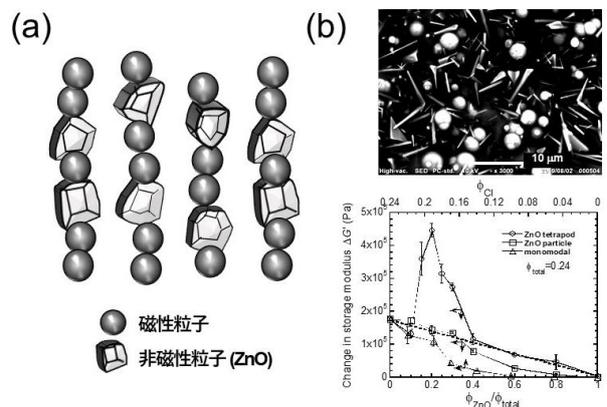


図3 (a)粒子混合型磁性エラストマーの鎖構造の概念図(b)テトラポッド型酸化亜鉛を含む磁性エラストマーのSEM画像(c)磁場による弾性率の変化量と置換率の関係

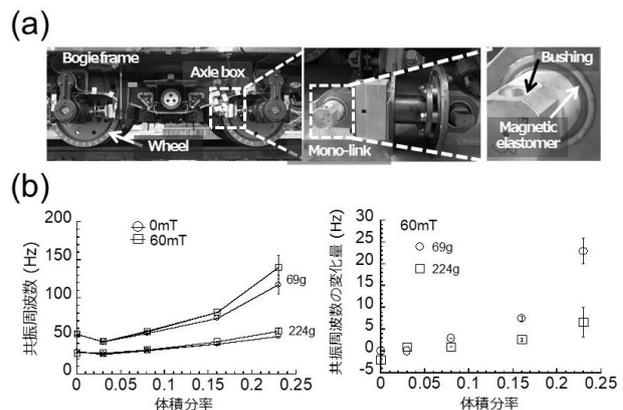


図4 (a)鉄道車両での実証実験に用いられた磁性エラストマー(b)共振周波数および磁場による共振周波数の変化量と磁性粒子の体積分率の関係(荷重: 69g, 224g)

めている。この他にもピンポン玉の跳ね返り係数を磁場で大きく変えられる積層磁性エラストマーを開発した⁽²⁶⁾。

磁性ソフトマテリアルの磁場印加方法には、不均一磁場と均一磁場の二種類がある。上述した応用例はすべて、磁性ソフトマテリアルの片側から磁場を印加した不均一磁場である。この場合、磁性ソフトマテリアルと磁石のサイズによって弾性率の変化量が大きく変化することがわかっており^{(27)~(30)}、磁場印加装置を含めたデバイスの設計には注意が必要である。

参考文献

- [1] T. Mitsumata, S. Ohori: *Polym. Chem.*, 2, 1063 (2011).
- [2] T. Mitsumata, S. Ohori, A. Honda, M. Kawai: *Soft Matter*, 9, 904 (2013).
- [3] T. Mitsumata, N. Abe: *Smart Mater. Struct.*, 20, 124003 (2011).
- [4] T. Mitsumata, T. Wakabayashi, T. Okazaki: *J. Phys. Chem. B*, 112, 14132 (2008).
- [5] N. Chiba, K. Yamamoto, T. Hojo, M. Kawai, T. Mitsumata: *Chem. Lett.*, 42, 253 (2013).
- [6] J. Ikeda, D. Takahashi, M. Watanabe, M. Kawai, T. Mitsumata: *Gels*, 5, 39 (2019).
- [7] M. Watanabe, Y. Takeda, T. Maruyama, J. Ikeda, M. Kawai, T. Mitsumata: *Int. J. Mol. Sci.*, 20, 2879 (2019).
- [8] M. Watanabe, J. Ikeda, Y. Takeda, M. Kawai, T. Mitsumata: *Gels*, 4, 49 (2018).
- [9] Y. Tsujiei, S. Akama, J. Ikeda, Y. Takeda, M. Kawai, T. Mitsumata: *React. Funct. Polym.*, 130, 1 (2018).
- [10] M. Watanabe, Y. Tanaka, D. Murakami, M. Tanaka, M. Kawai, T. Mitsumata: *Chem. Lett.*, 49, 280 (2020).
- [11] J. C. Ulicny, K. S. Snavely, M. A. Golden, D. J. Klingenberg: *Appl. Phys. Lett.*, 96, 231903 (2010).
- [12] T. Mitsumata, S. Ohori, N. Chiba, M. Kawai: *Soft Matter*, 9, 10108 (2013).
- [13] K. Nagashima, J. Nanpo, M. Kawai, T. Mitsumata: *Chem. Lett.*, 46, 366 (2017).
- [14] K. Nagashima, S. Kanauchi, M. Kawai, T. Mitsumata, S. Tamesue, T. Yamauchi: *J. Appl. Phys.*, 118, 024903 (2015).
- [15] Y. Kobayashi, S. Akama, S. Ohori, M. Kawai, T. Mitsumata: *Biomimetics*, 6, 48 (2019).
- [16] J. Nanpo, K. Nagashima, Y. Umehara, M. Kawai, T. Mitsumata: *J. Phys. Chem. B*, 120, 12993 (2016).
- [17] S. Akama, Y. Kobayashi, M. Kawai, T. Mitsumata: *Polymers*, 12, 290 (2020).
- [18] Y. Masuda, T. Kikuchi, W. Kobayashi, K. Amano, T. Mitsumata, S. Ohori: *Proceedings of IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, 541 (2012).
- [19] 梅原康宏, 鴨下庄吾, 小黒翼, 三俣哲, *日本機械学会論文集* 83, 16-00523 (2017).
- [20] Y. Umehara, Y. Yamanaga, S. Akama, S. Kato, S. Kamoshita, M. Kawai, T. Mitsumata: *Polymers*, 10, 1351 (2018).
- [21] T. Komatsuzaki, T. Inoue, O. Terashima: *Mechatronics*, 40, 128 (2016).
- [22] T. Komatsuzaki, Y. Iwata: *Shock and Vibration*, ID 676508 (2015).
- [23] X. B. Nguyen, T. Komatsuzaki, Y. Iwata, H. Asanuma: *Shock and Vibration*, ID 3651057 (2017).
- [24] Y. Umehara, H. Endo, M. Watanabe, T. Kikuchi, M. Kawai, T. Mitsumata: *AIMS Mater. Sci.*, 5, 44 (2018).
- [25] H. Endo, S. Kato, M. Watanabe, T. Kikuchi, M. Kawai, T. Mitsumata: *Polymers*, 10, 104 (2018).
- [26] T. Oguro, H. Endo, M. Kawai, T. Mitsumata: *Mater. Res. Express*, 4, 126104 (2017).
- [27] T. Oguro, S. Sasaki, Y. Tsujiei, K. Nagashima, M. Kawai, T. Mitsumata, T. Kaneko, M. Zrinyi: *J. Nanomaterials*, Article ID 8605413 (2017).
- [28] T. Oguro, J. Nanpo, T. Kikuchi, M. Kawai, T. Mitsumata: *Chem. Lett.*, 46, 547 (2017).
- [29] T. Oguro, H. Endo, T. Kikuchi, M. Kawai, T. Mitsumata: *React. Funct. Polym.*, 117, 25 (2017).
- [30] T. Kikuchi, Y. Kobayashi, M. Kawai, T. Mitsumata: *Int. J. Mol. Sci.*, 19, 10(2019).