

磁性熱可塑性樹脂を用いたシェイプディスプレイの考案

前田 楓太^{1,a)} 山岡 潤一^{1,b)}

概要: 本研究では、温めることで形状を変化できる熱可塑性樹脂と混ぜ込むことでモノに磁性を与えられる磁性粉を用いて、熱と磁力によって何度でも書き換え可能なシェイプディスプレイを考案する。ユーザーは一定の温度に達した熱可塑性樹脂を磁力で制御することで、時間軸に応じた形状変化を制御し、自由な形状のシェイプディスプレイを作ることができる。本研究で考案する磁性熱可塑性樹脂は、動的に表面の形状を変形でき、また何度でも再設計できる。本稿では、磁性熱可塑性樹脂の形状変化に焦点を当てた実験を行い、今後の展望について論じる。

1. はじめに

コンピュータシミュレーションの具体化は、従来の情報表示を越えて、より豊かな体験を提供する可能性を秘めている。シェイプディスプレイ技術の発展に伴い、ディスプレイの形状は多様化し、ピンディスプレイを用いた構造 [1] から流動的な材質 [2]、更には紙や布を活用した可変形構造 [3] に至るまで展開している。これらの提案は、コンピュータシミュレーションの具現化における表現力の向上を示している。しかし、現在のシェイプディスプレイ技術に至るまでに多くの試行錯誤と提案が行われてきたが、依然として多くの課題を抱えている。本研究では、材料の再利用性に焦点を当てる。

現在のシェイプディスプレイ製造で、3D プリンタを使用する場合、フィラメントのほとんどが一度限りの使用に限定されている。コンピュータシミュレーションでは、微小な数値の変更が大きな影響を生み出すため、頻繁な数値の変更が必要となる。そのため、多量の試行錯誤を必要とするコンピュータシミュレーションの具体化では、材料のリサイクルプロセスを考慮する必要がある。また、シェイプディスプレイの形状は、初期に形成された形状から大幅な変更が困難である。そのため、材料の再利用性は3D プリンタを使用して製造するシェイプディスプレイにおいて、重要な課題と言える。

本研究では、加熱することで形状を変えられる熱可塑性樹脂と、物体に磁性を付与する磁性粉を組み合わせ、熱と磁力を利用して形状を変更できるシェイプディスプレイを考案する。本稿では、熱可塑性樹脂と磁性粉を組み合わせ

て製造される磁性熱可塑性樹脂の設計とプロトタイプングについて述べるとともに、その特性と将来性についても論じる。

2. 関連研究

ProtoMold[4] は、ピンディスプレイを制御して型を作り、その上に熱した樹脂板を置いて吸引器を用いて吸引することで、瞬時に型を成形する2.5D プリンタである。成形した樹脂板は再度加熱することで、フラットな状態に戻すことが可能であり、材料の再利用性に優れた仕組みである。Jamming User Interfaces[5] は、粒子間の圧力調整により物質の硬度と形状を自在に変えることが可能である。そのため、アクチュエータを使用せずに、複数のアクチュエータを使用したかのような挙動を実現し、主にソフトロボットの分野での注目を集めている。FormFab[6] では、入力から出力まで、ユーザーの物理的操作により熱可塑性樹脂の形状を変更できる。ユーザーの操作は、システムを介してロボットアームに取り付けられたヒートガンが熱可塑性樹脂を制御する。これら一連のプロセスは、一層インタラクティブな操作をもたらす。3D Printing Magnetophoretic Displays[7] は、3D プリンタで印刷した物質の表面に磁気を用いて文字や絵を描けることで、オブジェクトの表面を自由にカスタマイズできるシステムである。Programmable Blobs[8] は、磁力で制御可能な流動体を使用した、生命感を持つ情報表示技術である。触れることで形状を変えたり、押すことで硬さを調節できるため、磁性流体よりも高い自由度を有している。

¹ 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

a) futa.maeda@kmd.keio.ac.jp

b) yamaoka@kmd.keio.ac.jp

3. プロトタイプ

3.1 基本構造

提案システムの基本構造（図1）は、磁性熱可塑性樹脂（3.2節で詳述）、型（3.3節で解説）および磁石の三層から成る。第一層の磁性熱可塑性樹脂を第二層の型に適合させ、第三層の磁石を利用して形状変形を行う。将来的には、第三層の磁石を電磁石に置き換え、磁石を配置する過程の自動化や磁性熱可塑性樹脂の形状制御を可能にする。本稿で使用する型は7セグメントディスプレイを基にしている。

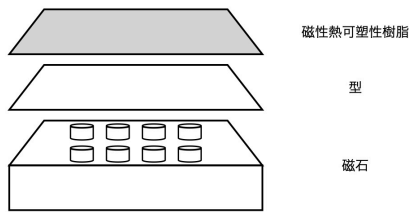


図1 基本のレイヤ構造



図2 磁性熱可塑性樹脂、型、磁石

3.2 磁性熱可塑性樹脂の試作

本稿で扱う磁性熱可塑性樹脂は、熱可塑性樹脂と磁性粉を組み合わせて製造された。採用した熱可塑性樹脂と磁性粉、磁性熱可塑性樹脂の製造に用いられた器具の概要を表1に示す。

材料・器具名	原材料	使用量
熱可逆性樹脂	ポリエチレン	20g
磁性粉	砂鉄	6.5g
熱湯	水道水	100度 75ml
紙コップ	紙パルプ	2個（容量：150ml）
割り箸	アスペン	1膳
ハンカチ	綿	1枚

磁性熱可塑性樹脂の製造手順を以下に示す。

(1) 直径5mmの球状の熱可逆性樹脂を紙コップAに入

れ、高さが均一になるように整える。その後、熱湯を75ml注ぐ。同時に、紙コップBには磁性粉を入れておく。

- (2) 熱湯を注いでから1分後、割り箸を使用して紙コップAの熱可逆性樹脂を取り出し、ハンカチで水分を拭き取る。
- (3) 熱可逆性樹脂が固まる前に紙コップBに移し、磁性粉と混ぜ合わせる。
- (4) 混ぜ合わせた磁性熱可逆性樹脂を再び紙コップAに戻し、10秒かけて熱可逆性樹脂を溶かす。
- (5) 磁性熱可逆性樹脂を紙コップAから取り出し、ハンカチで水分を拭き取った後、割り箸から外し、手で成形する。

3.3 実験器具の試作

磁性熱可塑性樹脂の磁力確認に使用するセグメント型は、3Dプリンタ (Flashforge社製 Adventure 5M Pro) と、フィラメント (Flashforge社製 1.75mm PLA) を用いて造形された。このセグメント型の寸法は、縦42mm、横25mm、厚さ3mmとなっている (図3)。

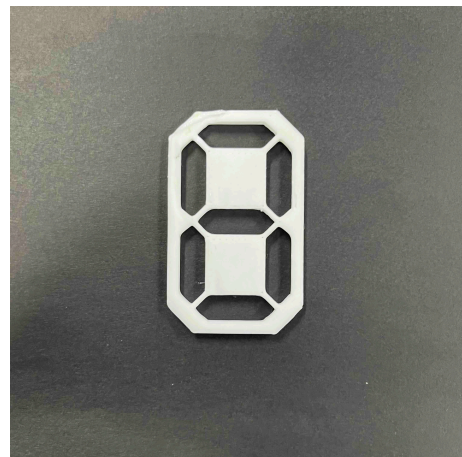


図3 セグメント型

3.4 磁性熱可塑性樹脂の評価

3.4.1 磁性熱可塑性樹脂の加熱実験

磁性熱可塑性樹脂は、低温乾燥機（アズワン社製 ONW-300SB）を使用して加熱する。磁性熱可塑性樹脂を低温乾燥機内に入れ、規定の温度（60度、70度、80度、90度、100度）に達したら、1分間の計測を行う。1分が経過した後、加熱を停止し、低温乾燥機から磁性熱可塑性樹脂を取り出し、その状態を観察する。

各温度での磁性熱可塑性樹脂の状態に焦点を当て、その特徴を記述する。

図4(b)：図4(a)と比較して、全体的に強い艶が観察される。この艶の発生は加熱による融解が原因と考えられ

る。しかし、形状においては、図 4(a) で見られた角の丸みを除き、大きな変化はない。これは、ポリエチレンの融解温度は 70~80 度程度であるため、表面のみが融解したと推測される。

図 4(c)：図 4(b) の左下にあった小さな溝が埋まり始めていることが確認できる。これは、ポリエチレンの融解温度に達したことにより、融解が進行し、図 4(b) よりも中心部の近くでも融解が起こったと考えられる。

図 4(d)：図 4(c) で見られた溝が完全に埋まり、表面が広がっている。この結果から、磁性熱可塑性樹脂のポリエチレンが完全に融解する温度は 80 度であることが示唆される。

図 4(e)：図 4(d) と比較して、外側の透明度が増している。この透明度の増加は、磁性粉の保有量の減少が原因であると考えられる。融解により磁性熱可塑性樹脂がシャーレ全体に広がる傾向があり、一定の大きさに達すると外側から伸長が起こり、磁性熱可塑性樹脂が薄くなると推測される。

図 4(f)：図 4(e) と比較して、大きな変化ないが、外側に見え、透明度が増している。これは、80 度を超える温度で中央の磁性熱可塑性樹脂が外側に広がる速度を上回り、外側に位置する磁性熱可塑性樹脂がさらに外側へと進んでいることが考えられる。

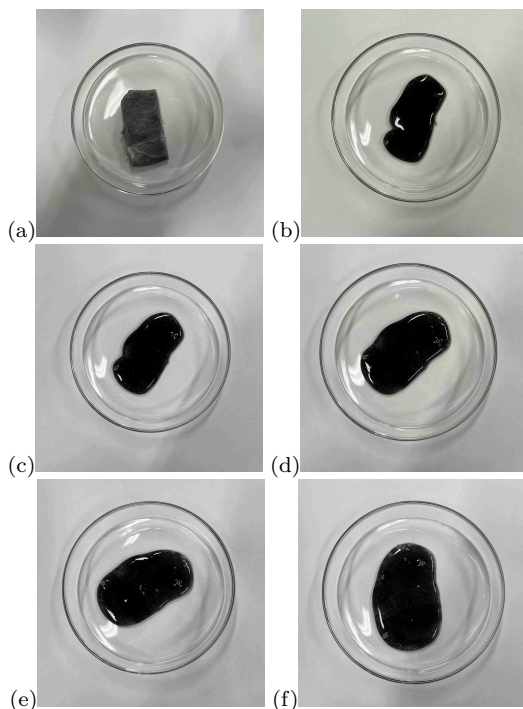


図 4 磁性熱可塑性樹脂, (a) 加熱前, (b)60 度, (c)70 度, (d)80 度, (e)90 度, (f)100 度

これらの観察結果から、60 度では艶が発生するものの、形状に大きな変化は見られないことがわかった。70 度からは形状に少しずつ変化が現れ始める。80 度を超えると、

形状の変化が一目で明確になる。同時に、磁性熱可塑性樹脂は外側に広がる傾向が強くなり、外側に進むほど磁性粉の保有率が低下し、透明度が増すことも明らかになった。

3.4.2 磁性熱可塑性樹脂の磁力実験

磁性熱可塑性樹脂の磁力を調査するため、本実験では図 5(d) をシャーレの上に置き、低温乾燥機内で加熱する。加熱する温度は観察実験と同様、60 度、70 度、80 度、90 度、100 度の 5 種類である。規定の温度に達したら、10 分間計測し、その後シャーレを乾燥機から取り出して固まるまで放置する。磁性熱可塑性樹脂の形状が安定したらセグメント型から取り外し、観察する。実験ではアラビア数字「7」の成形を試みる。実験結果を図 6 に示す。図 6(f) は成形した磁性熱可塑性樹脂のおモテ面である。

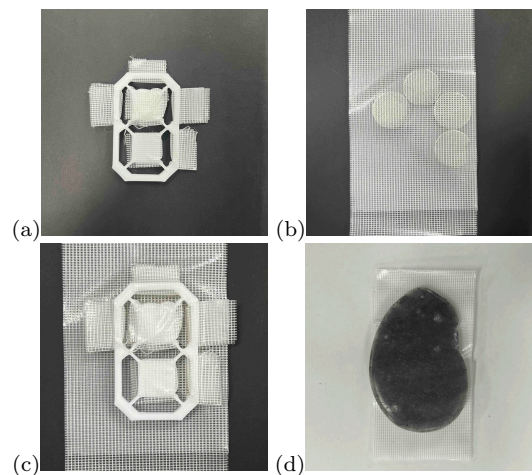


図 5 磁性熱可塑性樹脂, (a) 磁性熱可塑性樹脂がセグメント型に付着しないように養生テープを貼る, (b) アラビア数字「7」の形に磁石を配置する, (c) 磁石の上にセグメント型を設置して養生テープで固定する, (d) さらにセグメント型の上に磁性熱可塑性樹脂を設置する

図 6 の結果から、表裏関係なく情報表示が可能であることが明らかになる。各磁性熱可塑性樹脂において、情報表示部分はおモテ面が凹み、ウラ面は凸になっている。各温度における磁性熱可塑性樹脂の形状に焦点を当てた特徴を記述する。

図 6(b)：磁性熱可塑性樹脂に明確な形状の変化は見られない。取り出した直後は若干の柔らかさを有していたが、すぐに固まった。これは設定温度が融解温度に達しなかったため、形状の変化が見られなかったと考えられる。

図 6(c)：磁石の位置に磁性熱可塑性樹脂が移動し、「7」が視認できる。磁性粉が磁石に引き寄せられたため、その他の部分の磁性粉の量が減少し、外側に向かうにつれ透明度が増している。

図 6(d)：図 6(c) 同様に「7」をはっきり見えるが、余分な磁性熱可塑性樹脂が外側に溜まっている。

図 6(e)：図 6(c)(d) 同様に「7」を確認できるものの、右下

のセグメントが左に曲がっている。これはセグメント型に貼られた養生テープが磁性熱可塑性樹脂の流れを妨げたためと考えられる。

図 6(f)：意図しないセグメントが形成されてしまった。ポリエチレンの融解温度が 60～70 度であるため、融解が進みすぎ、自重で磁性熱可塑性樹脂が落ちたと考えられる。

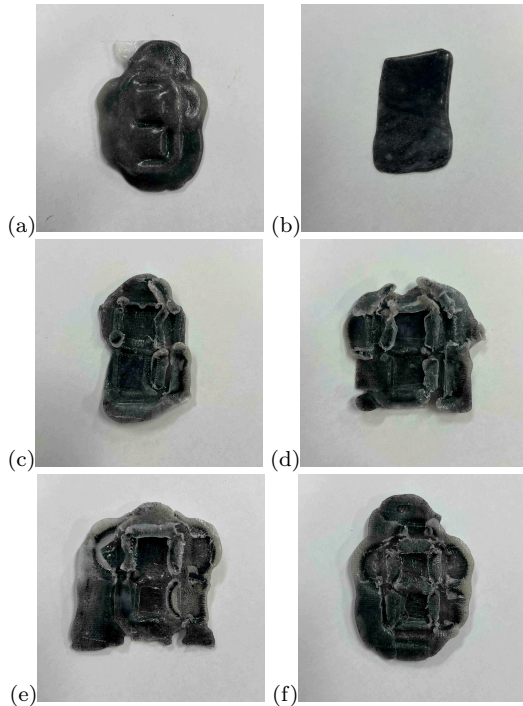


図 6 セグメント型上で溶かした磁性熱可塑性樹脂，(a) オモテ面，(b)60 度，(c)70 度，(d)80 度，(e)90 度，(f)100 度

本実験で使用した図 6(f) 以外の磁性熱可塑性樹脂は、一度溶かした後に再度形成したものを使用した。そのため、磁性熱可塑性樹脂の重量に差異が生じた。図 6 の磁性熱可塑性樹脂の各重量を測定した結果、図 6(b) は 3.0g、図 6(c) は 3.5g、図 6(d)(e) は 4.5g、図 6(f) は 6.0g であった。図 6(d)(e) では、余分な重量はセグメント型の外に流出していることが観察された。一方、図 6(f) では余分な磁性熱可塑性樹脂が外側に流れきれず、セグメント部分に隣接する形で固まり、数字が識別が困難になった。これは意図しないセグメントが自重で落ちた原因の一つと考えられる。

4. アプリケーション

熱により形状を変えることが可能な磁性熱可塑性樹脂は、多種多様な応用が考えられる。例えば、筆記用具、ゲームコントローラ、自動車のハンドルなどは、形状を変えることで、ユーザに最適化されたインタラクション性の高い製品にすることができる。筆記用具では、鉛筆グリップが応用例として適している。加熱により形状を変更できる上、手に取り付ける際に、薄い磁石を装着することでグリップ

が手に吸着し、個々のユーザに合わせた形状にすることが可能である。このため、鉛筆の持ち方を学ぶ幼児にとっても、鉛筆とのインタラクションが深まる。また、ゲームコントローラはスティックを成形することで細かい操作が可能になる。自動車のハンドルは磁力で付加されたパーツによりカスタマイズ性が向上する。さらに、自動車のように熱を発するオブジェクトでは、レイヤを用意することで、いつでも形状を自由に変えられる。

さらに、磁力を持つことでアクセサリやインテリアとしての応用も考えられる。複数のパーツを組み合わせることでユーザの創造性を活かすことができる。

5. まとめ

本稿で実施した実験を通じて、磁性熱可塑性樹脂がシェイプディスプレイとしての開発と運用の可能性を確認した。磁性熱可塑性樹脂では熱可塑性樹脂に磁性粉を混ぜ合わせたが、その融解温度は熱可塑性樹脂の原材料であるポリエチレンの融解温度と同等の 70～80 度であることが判明した。しかし、磁性熱可塑性樹脂の重量、加熱温度、加熱時間などが形状変化に影響を及ぼす可能性があり、これらの要因を明確にする必要がある。加えて、磁性粉が磁力の影響で移動し、一部に集中する傾向があり、これが再度の形状変化に影響を与えることが懸念される。

今後は、形状変化に影響を与える要素の詳細な調査と、再度の形状変化における課題の検証に着手し、シェイプディスプレイとしての磁性熱可塑性樹脂の改良を目指す。現状では、磁石の配置を手動で行っているが、これは手間がかかり再現性に誤差が生じるため、好ましい方法ではない。セグメント型の不要な穴を塞ぐ代替案は再現性を高めるが、セグメント型を必要な数だけ作る必要があるため、再利用性に欠ける。そのため、磁石の手動配置は労力がかかり、セグメント型を都度作り直す必要があるため、材料の再利用性は低い。

6. 今後の展望

今後の研究では、磁性熱可塑性樹脂の形状変形の検証を中心に展開していく。さらに、磁性熱可塑性樹脂の材料の配合割合が特性に与える影響についても検証し、より立体的な情報表示を試みる。コンピュータシミュレーションの具体化システムの構築を通じて、時間軸に沿って変化する情報や任意のタイミングでの形状変化が可能な食器やお面など、ものづくりに関わる人々に向けたデザインシステムの開発も目指す。また、電磁石を制御する装置を開発し、磁石の配置を手動で行う必要性を排除していく。レイヤに用いる型についても、再利用性のある方法を模索する。

参考文献

- [1] Sean Follmer, Daniel Leithinger et al: *The LaTeX Companion*, inFORM: Dynamic Physical Affordances and Constraints through Shape and Object Actuation(2013).
- [2] Hideki Koike, Yasushi Matoba, Yoichi Takahashi: *The LaTeX Companion*, AquaTop Display: Interactive Water Surface for Viewing and Manipulating Information in a Bathroom(2013).
- [3] Zekun Chang¹, Tung D. Ta et al: *The LaTeX Companion*, Kirigami Haptic Swatches: Design Methods for Cut-and-Fold Haptic Feedback Mechanisms(2020).
- [4] Yamaoka, Junichi, and Yasuaki Kakehi: *The LaTeX Companion*, ProtoMold: An interactive vacuum forming system for rapid prototyping(2017).
- [5] Follmer Sean, Daniel Leithinger¹ et al: *The LaTeX Companion*, Jamming user interfaces: programmable particle stiffness and sensing for malleable and shape-changing devices(2012).
- [6] Mueller Stefanie, Anna Seufert et al: *The LaTeX Companion*, Formfab: Continuous interactive fabrication(2019).
- [7] Zeyu Yan, Hsuanling Lee et al: *The LaTeX Companion*, 3D Printing Magnetophoretic Displays(2023).
- [8] Akira Wakita, Akito Nakano, Nobuhiro Kobayashi: *The LaTeX Companion*, Programmable Blobs: A Rheologic Interface for Organic Shape Design(2011).