

水中での PVA の溶解を利用した分離と密度設計により 物体の浮き沈みや特定の水中姿勢を実現する手法

児玉智哉^{†1} 奥野優太^{†1} 伊藤大貴^{†1} 橋田朋子^{†1}

概要: 3D プリンタでの印刷において、PVA（ポリビニルアルコール）などの水溶性フィラメントはサポート材として利用されることがあるが、通常は印刷後に機能を持つことはなく廃棄される。PVA の水中で徐々に消失するという性質は、時間経過により水中で分離する構造物の作製に利用できる。また、印刷時の充填率の部分的な変更により構造物の密度を調整することで、浮き沈みの制御や水中での姿勢制御も可能となる。本研究では、二つの物体とサポート材の PVA からなる構造物を作製し、水中での分離後に一方が沈む動きと分離後に一方が浮く動きを実現するため、構造物全体の密度と分離後の二物体それぞれの密度を設計する。また、一物体の中で密度の偏りを生じさせることで、異なる姿勢で浮く同一形状の物体の設計を行う。

1. はじめに

3D プリンタは、既製品にはない形状を素早く製作するために広く使われるようになっていく。3D プリンタでの造形には、サポート材が使用されることが多い。サポート材があることにより、3D プリンタでの印刷が可能または容易になることも多く、サポート材は印刷時に重要な役割を果たす。一方で、サポート材は印刷後に機能を持つことはなく、基本的には廃棄される。最近では、入り組んだ構造でサポート材の取り外しが難しい場合などにサポート材として水溶性のフィラメントが使用されることもあり、この場合は水に浸して洗い流す形をとる。

筆者らは水溶性フィラメントを扱う中で、水中に入れると時間経過によって溶けるという性質は、消失により水中で分離する構造物の作製に利用できると考えた。さらに、3D プリンタでの印刷の設定として充填率の変更により密度を変えられるため、物体の密度を工夫して設計することで、水中での分離後に浮き沈みの動きを生み出すことができる。このように、水溶性フィラメントはサポート材としてだけでなく、造形後の物体の動きを生み出すものとして活用できる可能性がある。

本研究では、水溶性フィラメントとして PVA（ポリビニルアルコール）を構造物の一部に使用し、充填率の変更により密度を調整し、温度変化や外力を必要としない浮き沈みの動きを生み出す手法を提案する。また、浮き沈みの動きをより良く見せる表現の方法として、物体が水中で特定の姿勢になるような密度設計も行う。これらの手法と実装、アプリケーション、今後の課題と展望について述べる。

2. 関連研究

造形後の物体を特定の外部環境に置くことによって変形をさせる 4D Printing の手法は多く研究されている。特に

造形後に水環境を用いるものとして、Inkjet 4D Print[1]は、熱収縮するシートに伸縮性のあるインクを UV プリンタで部分的に印刷することで、熱水につけると変形を起こし立体に成形させる手法を実装している。また、水に触れると膨張する物質を用い、水中で折りたたまれる構造物を作製した研究[2]もある。これらは水環境による構造物の変形を行っているが、本研究では、水環境により構造物の一部を溶解・消失させる。

本研究と同様に水溶性フィラメントをサポート材以外の用途として使用した研究には、特定の条件下で変形や脆化を起こす材質を利用した unmaking の研究[3]がある。その内の一つとして、PVA のみで造形された構造物があり、これは水に浸すことで溶ける。この研究では他にも、水溶性フィラメントではないが、低沸点炭化水素を組み込むことによって構造物を膨張・分割させる手法も提案している。本研究では PVA を構造物全体でなく一部に使用し、水溶性フィラメントの消失により、それ以外の物体の分割（分離）を行う点、その後に水環境での物体の動きを生み出している点を特徴とする。

水環境での浮き沈みの動きを生み出す代表的なものとしては、浮沈子が挙げられる。これは外部から圧力を加えることで空気の量（体積）を変化させ、浮力を操作し、浮き沈みの動きを生み出す。ガリレオ温度計は浮沈子を利用して温度を計るものだが、これは温度変化による空気の体積変化を利用している。また、浮沈子をエンターテインメントに利用している研究[4]もあり、圧力を電子制御で連続的に調整することで、浮沈子が容器内で任意に浮き沈みすることを可能にしている。本研究では、浮き沈みを引き起こすものが水溶性フィラメントの消失であるため、温度や圧力の変化・制御が不要である点で異なる。

^{†1} 早稲田大学

3. 提案

PVA（水溶性フィラメント）が水中で溶解し時間経過により消失する性質を利用し、PVA を含む構造物の密度を工夫して設計することで、構造物を水環境に入れたとき時間経過により分離し、浮き沈みの動きを生み出す手法を提案する。また、密度の偏りにより物体が水中で特定の姿勢になるような設計を行う。水環境は PVA を消失させる外部刺激としての役割と、PVA で結合されていた構造物が分離後に浮き沈みする環境の二つの役割を担う。本章では、動作原理と密度設計の指針について述べる。

3.1 動作原理

浮き沈みの動きを生み出す構造物は、3D プリンタで造形された 2 つの物体（PLA）と、それらを繋ぐサポート材として同時に造形された物体（PVA）により構成される。動作原理の簡易的な説明のため、サポート材の上部の物体を A、サポート材の下部の物体を B と呼ぶ。印刷後は A と B とサポート材が一体となって一つの構造物となっているが、水中に入れて時間が経つと、PVA が溶解し、消失することによって A と B に分離する。

本研究では、物体を浮かすまたは沈める流体として水のみを使用するため、物体の密度が水の密度（ 1g/cm^3 ）を上回れば沈み、下回れば浮く。密度設定の組み合わせは、A のみ、B のみ、A と B とサポート材を組み合わせた全体（以下、構造物全体と呼ぶ）の密度がそれぞれ 1g/cm^3 より小さいか、大きいかにによって複数考えられる。

3.2 設計指針

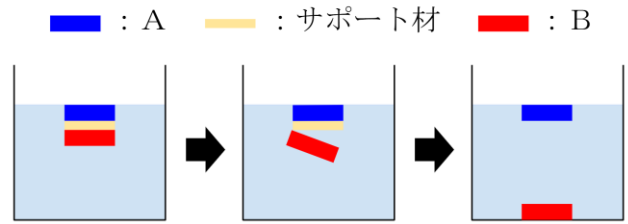
本研究では、物体の浮き沈みとして効果的な動きが予想される密度設定を用いて二種類の手法を提案する。

二つの手法に共通して、二つの物体の密度を A は 1g/cm^3 より小さく、B は 1g/cm^3 より大きくすることで、分離後に A が浮き、B が沈む状態となるように設計する。構造物全体の密度は、水に入れた直後（以下、始めの状態と呼ぶ）に浮くか沈むかを設計する指針となる。また、サポート材自体の重力と浮力が構造物の浮き沈みに及ぼす影響をできるだけ小さくするため、サポート材の密度は 1g/cm^3 程度になるように設計する。

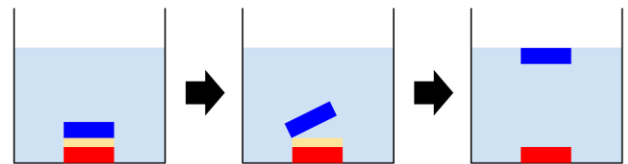
手法 1 では、構造物全体の密度を 1g/cm^3 より小さくなるように設計する。これにより、図 1(a)のように、始めの状態では浮き、時間経過により分離し、B が沈む動きを生み出す。手法 2 では、構造物全体の密度を 1g/cm^3 より大きくするように設計する。これにより、図 1(b)のように、始めの状態では沈み、時間経過により分離し、A が浮く動きを生み出す。

ここまでの浮き沈みの動きの手法とは独立に、水中での姿勢制御手法も提案する。一つの物体で密度の偏りを生じさせることで、物体を水中で特定の姿勢（密度が一樣な同一形状のものとは異なる姿勢）で浮かすことができる。水

中の姿勢で上になる部分の密度が小さく、下になる部分の密度が大きくなるように設計することで密度の偏りを生じさせる。



(a) 時間経過で一方が沈む動き（手法 1）



(b) 時間経過で一方が浮く動き（手法 2）

図 1 時間経過による浮き沈みの動き

4. 実装

浮き沈みの動きの実現には、密度設定の設計指針をもとに適切な充填率で印刷する必要がある。構造物の大きさや形状によって、同じ密度にするための充填率は異なる。本章では、各手法の密度設定を実現するための充填率を選定し、浮き沈みの動きと姿勢制御の実装を行う。

4.1 構造物の作製

3D プリンタはデュアルノズルの Raise3D E2（日本 3D プリンター株式会社製）を使用し、樹脂は PLA、サポート材に PVA を使用する。印刷の安定性と設計のしやすさの観点から、作製する構造物に用いる形状は直方体とする。

スライスソフト（ideaMaker）上で、2 つの直方体（縦横 20mm、高さ 5mm）を高さ方向に 2mm 離して配置する。PVA をサポート材として設定することで、この 2mm の隙間に PVA を印刷する。提案で述べた名前の振り方に合わせて、サポート材の上部を直方体 A、下部を直方体 B と呼ぶ。

この隙間、すなわち PVA の厚さについて、薄いとき上下の直方体によりサポート材に水が入りにくく、PVA が溶けて分離するまでに膨大な時間を要する。一方で、溶解した PVA により水が白く濁るが、PVA が厚いと使用量が多くなり、この濁りが強まることで視認性が下がる。これらの観点から適切な厚さとして、今回は 2mm とする。

密度の調整は、印刷時の設定で充填率を変えることにより行う。物体ごと、または部分ごとに充填率を変更することにより、樹脂の使用量を変え、密度の調整ができる。

予備的な検討の結果、今回使用するサイズ・設定の場合、直方体は充填率が 60% 以下では浮き、65% 以上では沈んだため、密度が 1g/cm^3 となるのは充填率 60% から 65% の間で

あると推測され、これを実装の指針とする。充填率の違いにより内部空間がどのように異なるかを図2に示す。

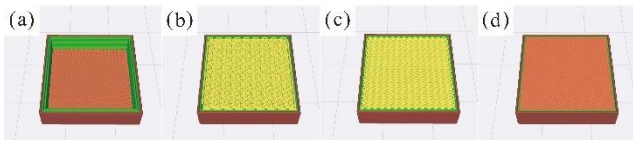


図2 充填率による内部空間の違い：(a) 0%, (b) 50%, (c) 80%, (d) 100%

4.2 浮き沈みの動き

手法1では、始めの状態で浮き、時間経過により分離し、Bが沈む動きを実現するため、直方体Aの密度を $1\text{g}/\text{cm}^3$ より小さく、直方体Bの密度を $1\text{g}/\text{cm}^3$ より大きく、構造物全体での密度が $1\text{g}/\text{cm}^3$ より小さくなるように設計する必要がある。そのため、直方体Aの充填率を0%, 直方体Bの充填率を80%に設定する。また、サポート材部分は、密度が $1\text{g}/\text{cm}^3$ 近くになるように、充填率を80%に設定する。

水を7, 8割ほど入れた10cm角の亚克力BOXに構造物を入れて静置する。構造物は水面に浮いている間にBOX内の奥の方へ移動する可能性があるが、PVAが溶けると水が濁り、奥の方にあると動きが見えにくくなる。撮影の都合上、視認性を維持する必要があるため、ガラス棒で柵を作り、構造物が手前側に留まるようにする。

作製した構造物(図3)を水中に入れて(図4(a))静置すると(図4(b)), 約13時間後に分離し(図4(c)(d)), 直方体Bのみが沈む(図4(e)(f))ことが確認できた。



図3 作製した構造物の外観(手法1)

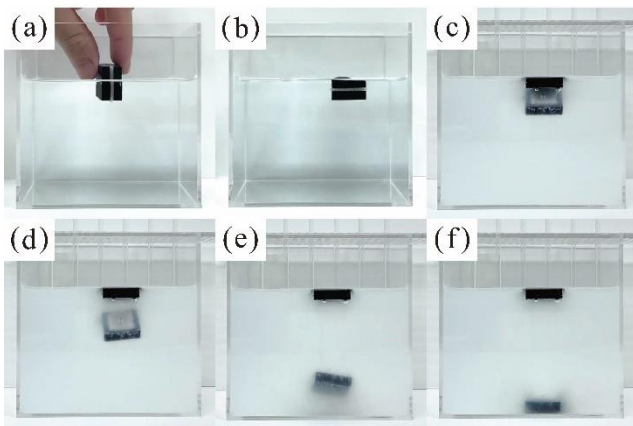


図4 時間経過で一方が沈む様子(手法1)

次に、手法2では、始めの状態で沈み、時間経過により分離し、Aが浮く動きを実現するため、直方体Aの密度を $1\text{g}/\text{cm}^3$ より小さく、直方体Bの密度を $1\text{g}/\text{cm}^3$ より大きく、構造物全体の密度を $1\text{g}/\text{cm}^3$ より大きくする必要がある。そのため、直方体Aの充填率を50%, 直方体Bの充填率を100%に設定する。また、サポート材の充填率は手法1と同様の理由から80%に設定する。

水を7, 8割ほど入れた10cm角の亚克力BOXに、作製した構造物(図5)を入れて(図6(a))静置すると(図6(b)), 約5時間30分後に分離し(図6(c)(d)), 直方体Aのみが浮く(図6(e)(f))ことが確認できた。

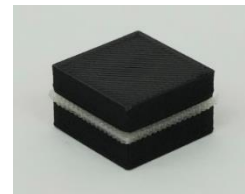


図5 作製した構造物の外観(手法2)

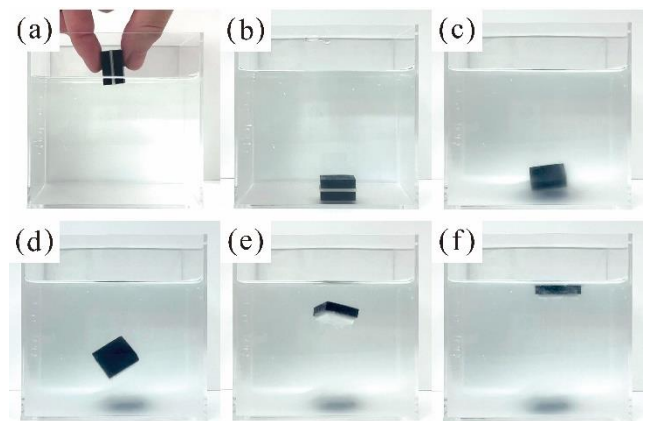


図6 時間経過で一方が浮く様子(手法2)

4.3 水中での姿勢制御

物体を特定の姿勢で浮かせるために、物体に密度の偏りを生じさせる方法として、部分的な充填率の変更を行う。これにより、水中姿勢が異なる同一形状の物体を作製することができる。本実装では、直方体(縦横20mm, 高さ5mm)が特定の姿勢で浮くような設計をする。具体的には、(1)底面の正方形(以下、正方形面と呼ぶ)が水平になる姿勢、(2)正方形面が鉛直で正方形の一边が水平になる姿勢、(3)正方形面が鉛直で正方形の一边が水面となす角が45度となる姿勢の三種類を実装する。

まず、(1)を実装するために、図7(a)に示すように、全体の充填率を50%に設定して印刷し、密度の偏りがない直方体を作製する。これを水中に入れると、図8(a)に示すように正方形面が水平になる姿勢で浮くことが確認できた。

次に、(2)と(3)を実装するために、スライスソフト上で直方体を二分割し、一方の充填率を0%, もう一方の充填率を

100%に設定する。なお、スライスソフト上で分割して印刷しても分割面に隙間が生じることはなく、ひと続きの直方体として印刷される。分割面は正方形面に垂直とし、(2)は正方形面の一边と平行な面(図7(b)), (3)は正方形面の対角線を通る面(図7(c))とする。

作製した直方体を水中に入れると、図8(b)(c)に示すように、どちらも正方形面が鉛直になる姿勢で浮き、密度が一樣な直方体とは異なる姿勢となることが確認できた。また、分割面が正方形面の一边と平行な面の時は、正方形の一边が水平になる姿勢、分割面が正方形面の対角線を通る面の時は、水面となす角が45度となる姿勢となり、分割する面の違いによって浮く姿勢が変わることも確認できた。

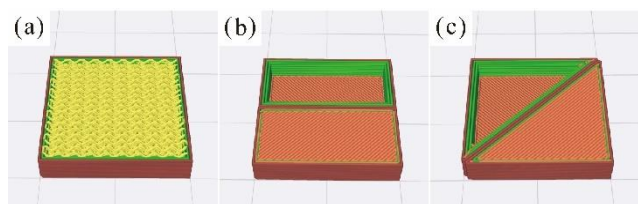


図7 分割面の向きと充填率：(a)分割なし，(b)辺に平行な面で分割，(c)対角線に平行な面で分割

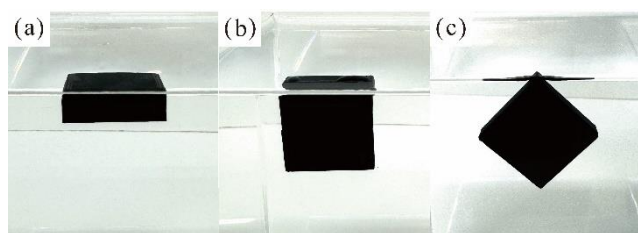


図8 水中での姿勢：(a)水平，(b)鉛直，(c)鉛直（45度）

5. アプリケーション

浮く動きと水中での姿勢制御を組み合わせたアプリケーションの例を示す。時間経過により一方が浮く動きである手法2において、サポート材の上部の物体Aとして、密度の偏りを生じさせた物体を設計することで、分離中に回転し、始めと異なる姿勢で浮く動きを生み出すことができる。

図9(a)に示すように、Aとして矢印形の物体、Bとして直方体（縦横20mm、高さ5mm）、その隙間の2mmにPVAをサポート材として印刷する。矢印形の三角部分の充填率を0%、四角部分の充填率を80%に設定し、矢印全体としては密度が $1\text{g}/\text{cm}^3$ を下回るようにする。

作製した構造物を図9(b)に示す。これを図10(a)のように矢印が下向きになる姿勢で沈めて静置すると、約14時間30分後に分離し(図10(b)(c))、矢印が上向きになる姿勢で浮く(図10(d)(e))ことが確認できた。さらに、図10(a)から(b)までの詳細な様子を図11に示す。図11(a)は図10(a)

を拡大、図11(d)は図10(b)を拡大したもので、分離する前に矢印は時計回りに回転し、姿勢を変えていることが分かる。

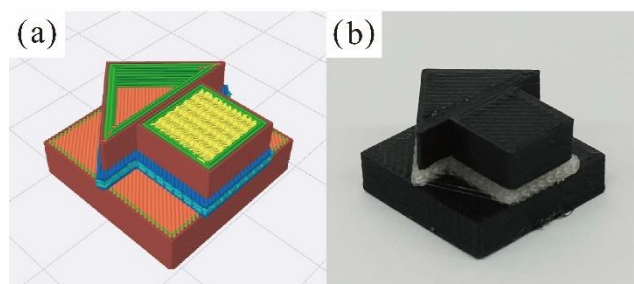


図9 アプリケーション：(a)設計モデル，(b)外観

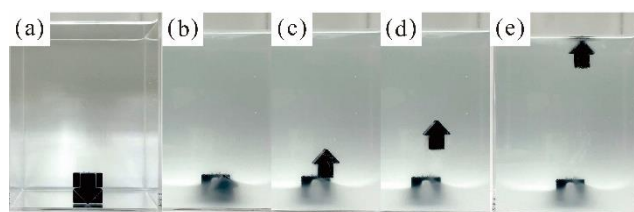


図10 矢印が浮く様子

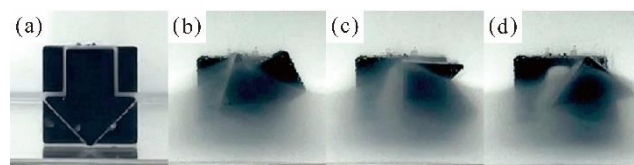


図11 矢印が回転する様子（拡大）

6. おわりに

本研究では、PVAの水溶性を利用してサポート材以外の用途に使用する例として、PVAを含む構造物の密度を工夫して設計することで、時間経過による浮き沈みの動きを実現し、密度の偏りによる姿勢制御を行った。さらにその表現として、これらを組み合わせたアプリケーションの例を提示した。

課題としては、静置しているだけではPVAの溶解にかなりの時間を要することと、水中に入れてから分離するまでの時間の制御ができていないことが挙げられる。分離までの時間についてある程度の予測はできるものの、同じ設定で印刷しても個体差があり正確な時間は制御できていない。サポート材の形状や層数などを変えることにより、分離までの時間を制御することが可能であれば、一定時間後に水中で動きを出せるためタイマーの機能を持たせることができる。

本研究では生み出した動きは浮き沈みのどちらかのみで一段階の動きだったが、手法2においてサポート材の充

充填率を下げることなどにより、始めの状態で浮くような設計ができれば、浮いていたものが途中で沈み、その後一方が浮くという二段階の動きを実現できる可能性もあり、研究を進めている。その他にも、水平方向の移動などの動きを生み出せるかについて検討中である。

また、密度が 1g/cm^3 となる充填率の割り出し方について、本研究で実装する際には、おおよその体積と使用するフィラメントの重量からある程度の予測を立てた上で検証することで行ってきたが、任意のサイズ・形状でこれを行うには時間と労力、フィラメントを要してしまうため、自動計算をするアルゴリズムが必要であると考える。

参考文献

- [1] Koya Narumi and Kazuki Koyama et al.. Inkjet 4D Print: Self-folding Tessellated Origami Objects by Inkjet UV Printing. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2023, vol. 42, no. 117, p. 1-13
- [2] Skylar Tibbits. 4D Printing: Multi-Material Shape Change. Architectural Design, 2014, vol. 84, p. 116-121
- [3] Katherine W Song, Eric Paulos. Unmaking: Enabling and Celebrating the Creative Material of Failure, Destruction, Decay, and Deformation. CHI '21: Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2021, no. 429, p. 1-12
- [4] 小池栄美, 落合陽一. <研究ノート>浮沈子を用いた水中エンターテインメントの新しい表現方法の研究. 工作ニュース, 2017, 巻 9, p. 12-14