

塩ごろも：塩結晶の析出量を制御することで 3D プリント造形物の所望の位置に特定の機能を付与する手法

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

概要：塩結晶の析出量を制御することで 3D プリント造形物の所望の位置に新たな機能を付与する手法「塩ごろも」を提案する。本研究では、印刷構造体を飽和食塩水に浸漬し、加熱状態から緩やかな冷却過程を繰り返すことで、効率的な塩結晶の析出を実現した。また、印刷構造体の空間充填率を調整することで、塩結晶の析出量を制御可能であることを示した。さらに、塩結晶の、成長過程でサイズが徐々に大きくなる、色が白く半透明である、体積増加に伴い重量を増す、水分の吸放湿により結晶同士が結合し固結する、方解石並みの硬度を持つという性質を活用することで、装飾、光学的機能、重量増加、接合、構造補強の機能を所望の位置に有する析出構造体を生成できることを示した。応用例として、照明器具や、ペン立てなどを生成し、本手法の有用性を実証した。

1. はじめに

塩は地球上に豊富に存在する資源であることから、近年、その活用が益々盛んになっている。筆者らは特に、塩結晶に着目しており、その魅力は結晶の形成過程において体積が増加するだけでなく、温度や濃度などの物理的な制御条件にある程度従いながらも、微細な環境変化によって偶発的な形状が生まれる点や、結晶内部での光の散乱と透過を生み出す白色半透明性、方解石並みの硬度を持つなどの多様な性質にあると考えている。また、結晶がその生成過程において時間と共に形状が変化する様子は、成形後に外部刺激などによって時間と共に形が変わる造形物を作る試み 4D printing の考えにも通じるものがある。

4D printing の先行事例の多くは人工的な材料を用い、変形そのものに主眼を置くものが多いが、最近では変形による様々な特性の変化を新たな機能として活用する試みもある。本研究では、自然素材である塩結晶の成長過程に着目し、3D プリント造形物の構造設計や塩結晶の析出方法を工夫することで、所望の位置に塩結晶を析出して、造形物の最終的な形状を変化させると共に新たな機能を付与することを目指す。なお、3D プリントで印刷された構造体を印刷構造体、印刷構造体に塩結晶が析出された後の全体の構造体を析出構造体と呼ぶ。本稿では、空間充填率を調整した印刷構造体を飽和食塩水に浸漬することで、構造体の表面に任意の量や位置で塩結晶を析出させた析出構造体を生成することと、それにより析出構造体に、装飾、光学特性の変化、重量の増加、接合、構造の補強といった複数の機能を持たせる手法を“塩ごろも”と呼び、提案・実装する。

2. 関連研究

4D printing[1]の分野では、人工的な材料による 3D プリント造形物を水などの外部要因によって造形後に変形させ

ることで、製造プロセスの効率を大幅に向上する手法が多数検討されている。最近では Reactive Wall Project[2]のように変形後の機能付与までを視野に入れた検討も行われつつある。これらは 1 つの素材で単一の機能例を示すものが多い。本研究では人工的な材料と自然素材を組みあわす点や、造形後の変形により 1 つの機能だけでなく複数の機能を実現する点が異なる。

本研究と同様に塩に着目し、その有効活用を検討する事例としては、塩結晶が方解石と同程度の硬度を有することからコンクリート代替材料としての可能性を示唆するものや[3]、塩の吸湿性を活用した自律的湿度調整壁の実現[4]など、建材分野での応用が進められている。しかし、これらの多くは、死海や塩湖などの特定の地理条件での実現に限定されている。

一方、一般的な食塩と水のみを用い、基本的な実験室環境において、印刷構造体への機能を付与する先行研究として、Crystal Deposition Printing[5]が挙げられる。この研究では、FFF 式 3D プリントで体心立方格子 Lattice を Grid や Cube 状に配列した印刷構造体の空間充填率と塩結晶析出量の関係を調査しており、その結果を応用することで、意図した位置に塩結晶を析出できる可能性を示し、光透過度が可変な障子型壁パネルへの応用を提案している。なお、析出には、80 度の飽和食塩水に印刷構造体を 100 時間静置する手法（本稿では簡単のため以下、継続浸漬法と呼ぶ）を採用している。しかし、塩結晶の成長に長時間を要することが技術的課題として残されており、印刷構造体を飽和食塩水に浸漬することで実際の析出構造体を生成するまでには至っていない。本研究では、塩結晶を短時間で意図的に析出させることで構造体を実際に変形させ、その結晶自体によって意図的な機能を実現する点が特徴と言える。

^{†1} 早稲田大学

3. 塩ごろも

本研究では、印刷構造体の造形後に塩結晶を所望の位置に析出することで、変形とそれに伴う新たな機能の付与を特徴とする析出構造体を実現する。そのためには印刷構造体に対し、塩結晶を効率的に析出する手法と、塩結晶を意図した量で析出する手法が必要となる。本章ではこの2つの手法を説明した後に塩結晶によって付与可能な機能についてもまとめる。

なお本研究の基本の印刷構造体はFFF式3Dプリンタでの製造を可能とするため、先行研究[5]を参考に、図1左に示すような体心立方格子から立方体の辺を除いた形状を単位格子として採用する。これを図1中に示すGrid状、および図1右に示すCube状のように配列することで、内部に空隙を持つLattice構造体を印刷構造体として設計する。またフィラメントは、後述する加熱溶液への浸漬工程を考慮し、熱変形温度の高いものを選定する。

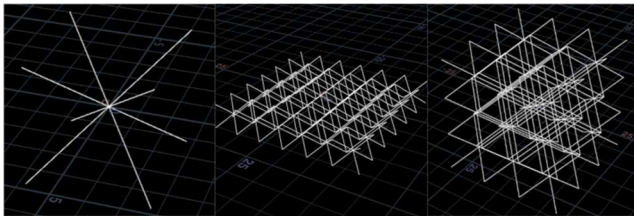


図1 単位格子(左)、単位格子をGrid(中)、Cube(右)状に配置した様子

3.1 塩結晶の効率的な析出手法

塩結晶の析出量は主に、溶液温度、溶液濃度、溶液の流動状態、析出時間、析出工程の繰り返し数に依存する。大きな塩結晶を析出するには、熱した飽和食塩水を静止状態に保ち[6][7]、緩やかな冷却過程を複数回繰り返すことが効果的である[8][9]。これらの知見に基づき、本研究では塩結晶の効率的な析出手法として、一定の空間充填率を有する印刷構造体を飽和食塩水に浸漬し、加熱状態から緩やかな冷却過程を複数回繰り返す手法(以下、反復浸漬法)を提案する。

3.2 塩結晶析出量の制御手法

塩結晶は印刷構造体の空隙部分に析出し、それを埋めるように成長するため、空間充填率の調整により析出量の制御が可能である。空間充填率を変更する設計パラメータとして、単位格子の「柱幅」と「格子サイズ」の2つが挙げられるが、3Dプリンタの造形限界により柱幅を細くすると造形が困難となるため、安定した印刷が可能な最小柱幅に固定し、格子サイズを変更することで調整を行う。また、塩の密度は固体状態で 2.16g/cm^3 である[8]ことから、モデリング段階での印刷構造体の空隙体積から理論上の最大析出塩量を予測できる。これらにより、塩結晶析出量の制御

が可能である。ここまでの手法を応用し、塩結晶を析出させたい部分をLattice構造、析出させたくない部分を内部に空隙をもたない非Lattice(以下、Plain)構造として印刷構造体を設計することで、塩結晶の析出位置を選択的に制御することも行う。

3.3 塩結晶の性質と特定の機能の付与

塩結晶にはさまざまな性質があるが、本研究では成長過程でサイズが徐々に大きくなる、色が白く半透明である、体積増加に伴い重量を増す、水分の吸放湿により結晶同士が結合し固結する、方解石並みの硬度を持つという5つに着目する。これらの性質を用いて析出構造体において、以下に述べる5つの機能を実現する。

- (1) **装飾**：塩結晶の体積増加と白色半透明性により、構造体に塩結晶が析出することで構造体表面への凹凸形成と白色付与ができる。これを本稿では装飾と呼ぶ(図2上左)。
- (2) **光学的機能**：塩結晶の体積増加と白色半透明性により、構造体の空隙が充填され光の透過や拡散の具合を変化できる。これを本稿では光学的機能と呼ぶ(図2上中)。
- (3) **重量増加**：塩結晶の重量増加に伴い、構造体に塩結晶が析出すると、構造体の重量も増やすことができる。これを本稿では重量増加と呼ぶ(図2上右)。
- (4) **接合**：塩結晶の固結により、異なる構造体に析出した塩結晶同士が結合することで構造体を一体化することができる。これを本稿では接合と呼ぶ(図2下左)。
- (5) **構造補強**：塩結晶の体積増加により、構造体の空隙が充填され、構造体への外部荷重が全体に分散される。また硬度を活用することで構造体の圧縮強度を増すことができる。これを本稿では構造補強と呼ぶ(図2下右)。

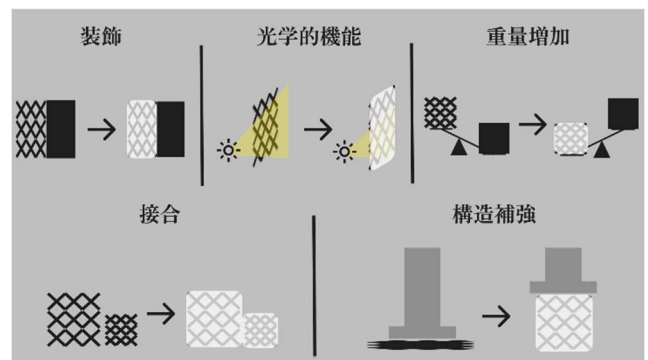


図2 機能付与手法

4. 実験

3章で提案した2つの手法について、塩結晶が効果的に得られるかや、塩結晶析出量を精度良く制御するために適した条件を明らかにするための2つの実験を行う。

試験片となる印刷構造体は3Dプリンタ(K1 Max, Creality)とABSフィラメント(HyperABS, Creality)を用いて作製する。単体格子の柱は図3左に示すように直方体で構成する。予備実験において、K1 Maxで安定して造形可能な最小柱幅(直方体底面の一边の長さ)は $\sqrt{2}\text{mm}$ であったため、本研究では特に断りがない限り、印刷構造体の柱幅は全てこの値に固定する。

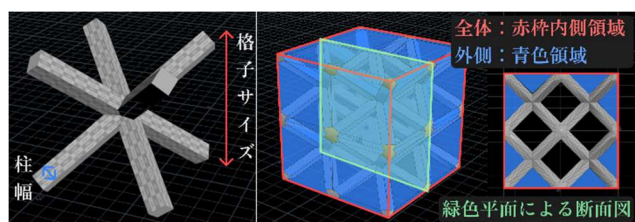


図3 単体格子の印刷構造体モデル(左), 印刷構造体の全体空隙と外側空隙の可視化(中, 右)

4.1 実験1: 塩結晶の析出手法による析出量の比較

実験1は、提案する反復浸漬法と、先行研究[5]を参考にした継続浸漬法を比較し、より多くの析出量を得られる手法を検討する。試験片として格子サイズ6mmのLatticeで構成された一辺48mmのCubeを印刷構造体として、2つ用意する。実験手順は、まずそれらをそれぞれ、80度の飽和食塩水に浸漬し(図4左)、紙を敷き詰めた個別の発泡スチロール容器内で静置する(図4右)。その後、反復浸漬法の印刷構造体は、24時間後にピーカーから取り出し、新しい80度の飽和食塩水に再び浸漬して発泡スチロール容器内で静置するという工程を4回(24×4=96時間)繰り返すことで、過熱状態から緩やかな冷却過程を繰り返し行う。継続浸漬法は1回目の浸漬後、100時間連続して静置する。析出構造体を十分に乾燥させた後、析出構造体と印刷構造体の重量差を算出することで析出量を求め、目視でも観察する。

析出量を算出した結果、反復浸漬法では19.04g、継続浸漬法では2.00gの析出量となり、反復浸漬法は継続浸漬法と比較して9.52倍の塩結晶が析出した。析出後の様子を図5に示す。反復浸漬法(図5左)の方が継続浸漬法(図5右)に比べて析出構造体における塩結晶析出量が多いことが目視で観察できた。以上より、提案手法を用いることで効率的に塩結晶を析出可能であることが示唆される。



図4 析出環境



図5 析出構造体比較: 反復浸漬法(左), 継続浸漬法(右)

4.2 実験2: 塩結晶析出量の制御実験

実験2ではどの格子サイズが析出量の予測が最もうまくできるか(予測と実測の誤差が少ないか)を明らかにする。モデリングツール(Houdini, SideFX)内で、印刷構造体モデルの空隙体積を事前に計算し、塩の固体状態での密度 2.16g/cm^3 を乗算することで、塩結晶の析出量を予測できる。試験片として格子サイズ4, 5, 6, 8, 10mmでそれぞれ一辺48, 50, 48, 48, 50mmのGrid状(厚みはそれぞれの格子サイズ)の印刷構造体と、Plain構造の一辺48mm, 厚さ6mmのGrid状の印刷構造体を1つずつ用意し、それぞれ5回の繰り返し析出を行った。

まず全体空隙(図3中, 右の赤枠内側領域における空隙)の析出量の実測値と予測値, 予測値との誤差を表1に示す。なお, 実測値は印刷構造体と析出構造体の重量差を算出することで得る。全体予測値と実測値の誤差が大きく平均53.09%であった。この原因として、塩結晶が印刷構造体の外側の空隙に優先的に析出し、内側の空隙にはほとんど析出していないことが考えられる。そこでこの仮説を検証するため、次に印刷構造体の外側空隙(図3中, 右の青色領域)の体積のみを考慮し外側析出量を予測した。その結果と誤差を、表1に示す。外側予測値と実測値の誤差は平均39.57%となり、予測精度が向上した。

格子サイズに関して、外側予測値を用いた時の実測値との誤差は、格子サイズ6mmでもっとも小さく、17.57%であった。このことから、印刷構造体における塩結晶の析出量は、格子サイズ6mmであれば、その外側の空隙体積を基に誤差20%以内で予測可能であることが示唆される。なお、Plain構造の印刷構造体においても若干の塩結晶析出が確認されたが、その量はLattice構造と比較して少なく、結晶の大きさが小さかった。

表 1 Grid 状の印刷構造体への塩結晶析出量実測値(g), 予測値(g), 予測値との誤差(%)

試験片	Plain	4mm	5mm	6mm	8mm	10mm
実測析出量(g)	4.81	6.51	8.44	10.37	11.45	12.62
全体予測析出量(g)	0	8.96	16.41	21.16	32.77	47.61
外側予測析出量(g)	0	3.48	6.56	8.82	14.56	22.22
全体予測誤差(%)	×	27.34	48.57	50.99	65.06	73.49
外側予測誤差(%)	×	87.07	28.66	17.57	21.36	43.20

5. 塩ごろもの実装とアプリケーション

「塩ごろも」を 4 章の実験で得られた知見に基づき実装し、その応用例を示す。4.1 節の実験では、反復浸漬法による効率的な塩結晶の析出が可能であること示唆されている。また、4.2 節の実験では析出量予測が柱幅 $\sqrt{2}$ mm, 格子サイズ 6mm で最も精度よくできること, Lattice 構造と Plain 構造では析出量に顕著な差が生じること, 印刷構造体の外側空隙には十分に塩結晶が析出すること, 結晶サイズは Lattice 構造と Plain 構造で異なり Lattice 構造でより大きな結晶が形成されること, そして塩結晶の析出により構造体の重量が増加することが示唆されている。

以降の実装では、特に断りがない限り、柱幅 $\sqrt{2}$ mm, 格子サイズ 6mm を単位格子とした Lattice で印刷構造体を作製し、反復浸漬法を用いて析出構造体を生成する。なお、析出の繰り返しは、印刷構造体の外側空隙が埋まった時点で終了することが出来るが、本実装の繰り返し数は 5 回とする。

5.1 装飾

表面に白色や凹凸形状などの装飾を有する析出構造体を生成する。Lattice 構造と Plain 構造を組み合わせた印刷構造体を作製して塩結晶を析出することで、構造体全体を白色化しつつ、Lattice 部においてより顕著な凹凸形成が可能である。

今回の実装では、Lattice 構造と Plain 構造を半分ずつ組み合わせた Grid 状の印刷構造体を作製し (図 6 左), 析出させた (図 6 右)。構造体全体が黒色から白色へと変化し、予想通り Lattice 部では Plain 部と比較してより大きな結晶が形成した。

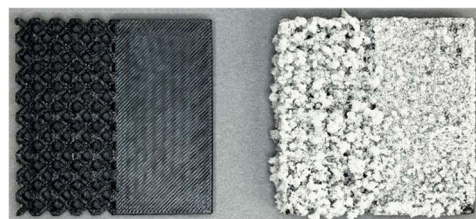


図 6 装飾：印刷構造体 (左), 析出構造体 (右)

5.2 光学的機能

透過光の散乱や、照度を低下させる光学的機能を有する析出構造体を生成する。全体空隙に対して、外側空隙の割合が大きい Grid のような 1 層の格子配列で設計した印刷構造体を採用することで、空隙を十分に埋めるように析出した塩結晶によって Lattice 部を通る透過光の散乱や照度低下が可能である。

今回の実装では、Grid 状の印刷構造体を作製し、析出させた。ライト前方に印刷構造体 (図 7 左) と析出構造体 (図 7 右) をそれぞれ設置した。析出構造体では、印刷構造体と比較して、透過光が白く拡散される現象を確認し、さらに、構造体中央部の照度を測定した結果、印刷構造体では 340lx, 析出構造体では 22lx となり、照度の低下を実現した。

これを応用することで、図 8 に示すような照明器具を生成した。Grid で 5 面を構成した中空直方体状 (以下、凹状) の印刷構造体を作製し、析出させた後に内部に LED テープを設置することで実現した。なお、空隙サイズを増大すると結晶サイズも大きくなり [5], 光学的機能の効果がより顕著に表れるため、格子サイズは 10mm とし、それに伴い析出繰り返し数は 10 回とした。光学的機能を有した析出構造体により透過光を拡散させ柔らかな発光を実現した。また、装飾付与により表面に特徴的な凹凸形状が出来ることで、周囲に投影される光と影が有機的なパターンを形成した。

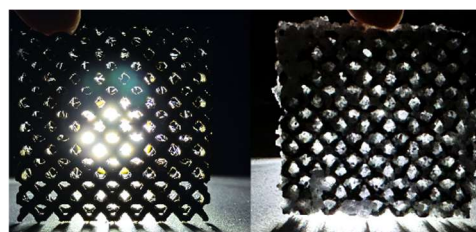


図 7 光学的機能：印刷構造体 (左), 析出構造体 (右)

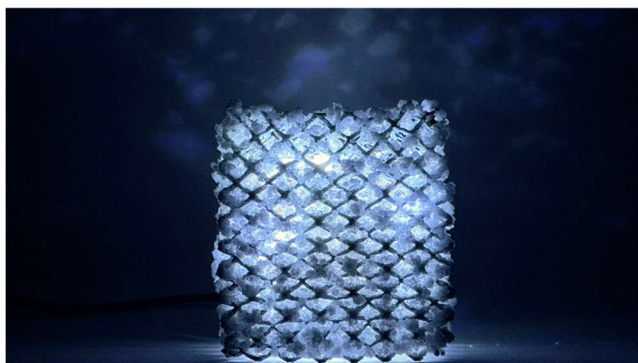


図 8 光学的機能：照明器具への応用例

5.3 重量増加

析出構造体を生成すると、構造体の重量は増加する。構造体の Lattice 部では Plain 部に比べて顕著な重量増加が可能である。なお、重量増加の実装は節 4.2 の実験において既に実現しているため省略し、本節では応用例として印刷構造体の設計段階で重量変化量を予測することで、意図的な浮沈変化や重心移動、2 物体の合成重心移動を実装する。

今回の実装では、まず浮沈変化を実現する。ABS フィラメントの比重と印刷時の充填率から構造体全体の密度が 1 g/cm^3 を下回るように設計した印刷構造体を作製し、その後の塩結晶析出により析出構造体では密度が 1 g/cm^3 を上回るように設計した。印刷構造体（図 9 左）では水に浮く状態から、塩結晶の析出により水中に沈む状態（図 9 右）への変化を実現した。

次に、重心移動を実現する。Lattice 構造と Plain 構造を使い分け、Lattice 部に顕著に塩結晶が析出するような印刷構造体を設計し、モデリング時に印刷構造体と析出造像体の重心位置を事前に算出することで、印刷構造体（図 10 左）では自立しないが、析出構造体（図 10 右）では重心が移動することで、安定した自立を実現した。なお、塩結晶の析出位置の制御には、Lattice と Plain 構造の使い分けに加え、印刷時の充填率を 15%程度に抑えることで印刷構造体を浮かせ、意図的に析出位置を制御する手法も効果的である。今回はこの手法も組み合わせることで、左半分のみに塩結晶を析出させることを実現した。

さらに、2 物体の合成重心移動を実現するため、図 11 に示すペン立てを生成した。析出構造体の重量がペンと比較して十分に大きくなるように設計した凹状の印刷構造体を作製し、析出させた。印刷構造体では、ペン挿入時にペンと構造体の合成重心位置が構造体の支持範囲外となり自立しないが、析出構造体では支持範囲内に収まるように移動することで、安定した自立を実現した。

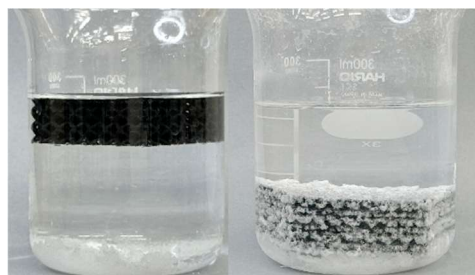


図 9 重量増加（浮沈への応用）：印刷構造体（左），析出構造体（右）



図 10 重量増加（重心移動への応用）：印刷構造体（左），析出構造体（右）

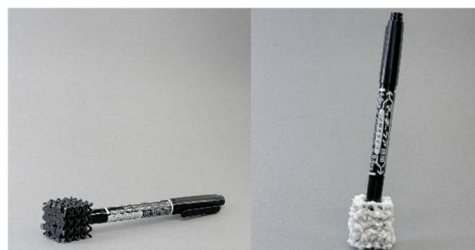


図 11 重量増加（2 物体の合成重心移動への応用）：印刷構造体（左），析出構造体（右）

5.4 接合

塩結晶析出により、異なる構造を接合して一体化する析出構造体を生成する。Lattice 部が近接配置された印刷構造体を飽和食塩水に浸漬すると、各構造体の Lattice 部表面に析出した塩結晶同士が結合し、構造体の一体化が可能である。

今回の実装では、中央部に穴を設けた凹型の印刷構造体と、その穴に挿入可能な直方体状の印刷構造体を作製し、析出させた。ここで、穴と直方体の寸法差は上下左右それぞれ 1.5mm とし、印刷構造体の状態では容易に着脱可能であるが、析出後は分離不可能となるよう設計した。また、構造体間の隙間に十分な塩結晶が析出し接合するよう、全体を Lattice で構成した。印刷構造体の状態では容易に分離可能であったが（図 12 左）、塩結晶析出後には一体化し、分離されなくなった（図 12 右）。

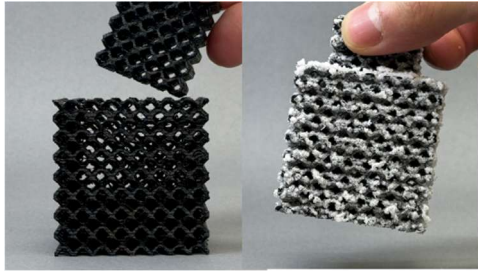


図 12 接合：印刷構造体（左），析出構造体（右）

5.5 構造補強

塩結晶析出により構造が補強され、圧縮強度が向上する析出構造体を生成する。Lattice で構成した印刷構造体の空隙に塩結晶が析出することで、圧縮応力が分散され、Lattice 部での構造体の圧縮強度を強化することが可能である。また、塩結晶はその硬度により、充填剤として十分な機能を果たす。

今回の実装では、元の構造が脆いほど構造強化の効果を顕著に示すと仮説を立てたため、2 種類の細い柱幅 ($0.3\sqrt{2}$, $0.5\sqrt{2}\text{mm}$) で構成した一辺 24mm の Cube 状の印刷構造体を、光造形プリンタ (Figure4, 3D システムズ) とフィラメント (HI TEMP 300-AMB, 3D システムズ) を用いて作製し、析出させた (図 13)。その後、圧縮試験を行った結果を図 14 に示す (エラーバーは標準誤差)。柱幅 $0.3\sqrt{2}\text{mm}$ の構造体では約 5.25 倍、柱幅 $0.5\sqrt{2}\text{mm}$ の構造体では約 1.53 倍の圧縮強度の向上が確認され、塩結晶の析出による構造補強が実現可能であることが示された。特に、柱幅が細く印刷構造体の強度が低い場合に、より顕著な補強効果が得られることが明らかとなった。

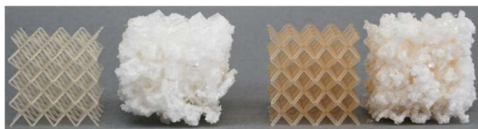


図 13 構造補強：左から柱幅 $0.3\sqrt{2}\text{mm}$ の印刷構造体、析出構造体、柱幅 $0.5\sqrt{2}\text{mm}$ の印刷構造体、析出構造体

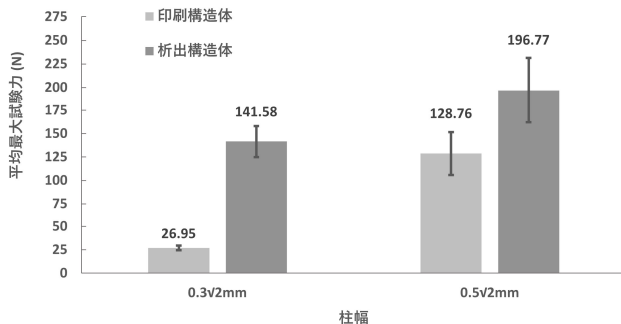


図 14 平均最大試験力(N)

6. まとめと課題

本研究では、3D プリンタ造形物に新たな機能を付与する手法「塩ごろも」を提案した。印刷構造体を飽和食塩水に浸漬し、加熱状態から緩やかな冷却過程を繰り返すことで効率的な塩結晶の析出を実現した。また、印刷構造体における空間充填率を調整することで、塩結晶析出量の制御が可能であることを示した。さらに、塩結晶の 5 つの性質 (体積増加、白色半透明性、重量増加、固結、硬度) を活用することで、5 つの機能 (装飾、光学的機能、重量増加、接合、構造補強) を意図した位置に有した析出構造体を生成した。応用例として、光の拡散性と装飾性を兼ね備えた照明器具や、重量増加により安定性を向上させたペン立てなどを実装し、本手法の有用性を実証した。

本研究の課題と展望として、以下の 3 点がある。第 1 に、より多くの応用例開発が必要な点である。複数の凹凸構造体を自由に組み合わせた後に一体化することや、椅子などの家具の構造補強などが考えられる。なお、モールドでの予備的な実験では、鉄分によって発生する錆により塩結晶が茶色に変化することを確認しており、白色以外の色を有する析出構造体の実現可能性も検討していきたい。第 2 に、現状の平面体の応用例から発展させ、曲面体による自由度の高い構造体での応用例を検討する必要がある点である。第 3 に、本研究で着目した性質以外にも、塩結晶の持つ吸湿性などを活用することで、新たな機能付与の可能性を検討する必要がある点である。これらの課題を解決し、より汎用性、自由度の高い応用例を開発していきたい。

参考文献

- [1] Tibbitts, S. 4D Printing: Multi-Material Shape Change. Architectural Design. 2014, vol. 84, p. 116-121.
- [2] “Reactive Wall Project”. https://fab.sfc.keio.ac.jp/paper/files/special_research_project/ReactiveWallProject_web.pdf, (参照 2024-12-05)
- [3] “Alchemic Fabrication Studio”. https://fab.sfc.keio.ac.jp/semester-report/autumn_2017.pdf, p.18-31, (参照 2024-12-05).
- [4] “Salt Imaginaries”. <https://studio-male.com/projects-2/salt-imaginaries>, (参照 2024-12-05)
- [5] 大村まゆ記, 荒井将来, 田中浩也. Crystal Deposition Printing: 結晶析出を用いた 3D プリンタ造形物のポストプロセスの探求. Conference on 4D and Functional Fabrication 2021. 2021, p. 103-106.
- [6] 村上正祥. 食塩の結晶形態について. 日本海水学会誌. 1986, vol. 40, no. 1, p. 17-32.
- [7] 村上正祥. 塩の析出環境条件と結晶形状(1). 日本海水学会誌. 2000, vol. 54, no. 2, p. 151-154.
- [8] たばこと塩の博物館. たばこと塩の博物館 常設展示ガイドブック. たばこと塩の博物館, 2015, p.89-142.
- [9] たばこと塩の博物館. 塩の楽しい実験 自由研究ヒント集. たばこと塩の博物館, n.d. p.6-7.