

慶應義塾大学

2016年度森基金 研究報告書

研究課題名

**「デジタルファブリケーションによる
材料特性拡張の検討」**

慶應義塾大学 大学院 政策・メディア研究科

後期博士課程 2年

香田 祖光

学籍番号 81549196

1. 研究背景

世界自然保護基金(WWF)は Living Planet Report 2014 にて、人間の地球資源に対する需要は、地球が供給できる量を超過しており、現在の需要を満たすには 1.5 個分の地球が必要であること、更に 2050 年には世界総人口が 96 億人に達することを報告している[1]。つまり、このまま何の手段も講じなければ、既に使いすぎている地球資源が将来的に起きる人口増加により、更に枯渇することを示している。こうした報告を受け、近年地球資源を循環させるための様々な取り組みが積極的に進められている。一方、日々の我々の生活に目を向けると、複数の素材、材料が組み合わせられた製品群に囲まれている。これは、所望の物理/材料特性を実現させるために、各材料がもつ特性を組み合わせているからである。上述の資源循環を実現するにあたり、こうした製品群を廃棄する際には各材料へ分別しなければならないが、この分別作業が手間だと感じ、そのまま廃棄してしまう製品使用者も多くない。加えて、分別が困難な製品も存在する。これらは、地球資源の効率の良い循環を実現するための課題の 1 つである。

そんな中で近年、単一の材料のみで幅広い物理/材料特性を得ようという研究が進められている[2,3]。Greer らは、3 次元的に規則正しく配置された中空のニッケル金属構造体を形成することで、超軽量(低密度)かつ超硬度、弾性特性をも有する物理/材料特性を実現している[2]。また、Wegener らは、樹脂材料が 2 次元的に配置された構造体において、特定の領域で印加圧力を受け流すような振る舞い(特異的な圧力応答性)を示すことを報告している[3]。これら物理/材料特性を制御するような構造体は Greer らのように数十 μm から数百 μm の構造スケールで実現されていることが多いが、Wegener らは構造スケールが一桁大きくともその物理/材料特性が制御可能であることを示している。そのため、3D プリンターで出力可能な構造スケールとなり、Wegener らは設計した構造体を実際に 3D プリンターにて出力し、物理特性を評価している。

上述の研究は、いずれも構造体が規則正しいパターンにより形成されているが、自然界における植物の細胞構造分布や葉脈パターンなどといったランダムな構造パターンを利用(生物模倣)することで、単一材料でありながら異なる物理特性を有する構造体を 3D プリンターによって実現する取り組みも進められている[4]。つまり、近年発達している 3D プリンターを初めとしたデジタルファブリケーションツールを用いることで、物理/材料特性の制御や特異的な圧力応答性を示す構造体を形成可能に成りつつあることがわかる。

しかしながら、上記構造体と物理/材料特性との関係に関する研究は、まだまだ取り組み始められた研究領域であり、所望の物理特性に対する最適な構造体の設計や、構造体へ圧力が印加された場合における特異な圧力分布の実現やその評価など、基礎的、応用的な検討が十分に為されていない。加えて、デジタルファブリケーションツールにより形成された構造体に対する物理/材料特性の評価についても十分に為されていない。

2. 研究の目的

本研究では、3D プリンターやレーザーカッターといったデジタルファブリケーションツールを用い、単一材料を 2 次元あるいは 3 次元的に配置することで、物理/材料特性の制御及び、特異的な圧力応答性を有する構造体を形成し、その物理/材料特性を評価することを目的とする。加えて、そうした 2 次元あるいは 3 次元的な構造による効果の応用方法について模索する。

3. 先行文献調査

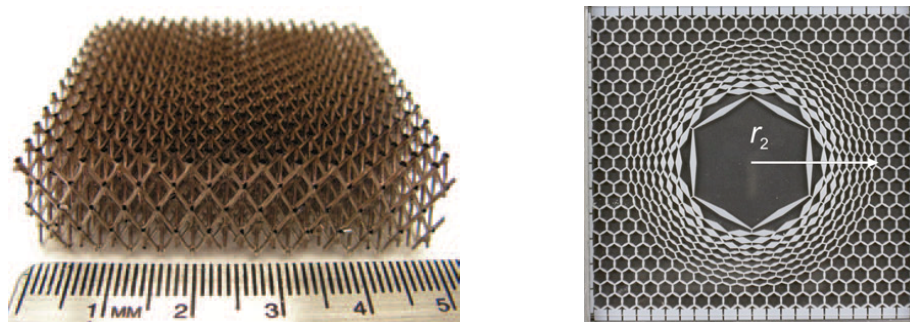
本研究に取り組むにあたり、先行文献調査として類似研究に関する論文調査、書籍調査を行った。

3.1 論文調査

2次元、あるいは3次元構造により物理特性を制御する研究は、Milton によって報告された1992年頃から取り組まれている[5]。その後、構造パターンによりどのような物理特性が得られるかに着目された研究[6,7]を始めとし、物質の物理特性の1つであるポアソン比(Poisson's Ratio)を制御するような構造に着目している研究が多く見られた[5,8-11]。近年では、光を用いた3次元的なリソグラフィー技術を用いて複雑な金属構造を造形する(図1(a))、あるいは3Dプリンターを用いて複雑な3次元構造を形成し、超軽量かつ超硬度な構造体を形成する研究[2,8](図1(b))や、同じく3Dプリンターを用いて2次元構造を形成し、ポアソン比を初めとした物理特性を制御するような研究も始められている[3]。なお、ポアソン比は物体に印加された応力方向に発生する歪みと、その応力に直角な方向に発生する歪みとの比率であり、以下の計算式により算出される。

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z}$$

ここで ε_x は応力の直角方向に発生する歪み量、 ε_z は応力方向に発生する歪み量である。通常、身の回りにある物体はポアソン比が正の値をとる。つまり、その材料へ圧力を印加した際、圧力方向に材料は潰れ($\varepsilon_z < 0$)、圧力の直角方向に材料は伸びる($\varepsilon_x < 0$)こととなる。



(a) 超軽量、超硬度かつ弾性特性を有するニッケル金属構造体[2]. (b) 印加圧力を受け流す特異的な圧力分布を実現する構造体[3].

図1. 複雑な構造体を2次元、3次元的に配列させることで物理/材料特性を制御している研究例.

これら論文調査より、様々な構造体を用いて構造体の物理特性を制御しようという研究は、90年代より始まっているが、加工技術の発展により近年盛んに取り組まれていることがわかった。

3.2 書籍調査

植物の細胞構造や、既に産業応用されている構造パターン等を調査することを目的として、各書籍を調べた。

新装版 植物構造図説[12]や植物解剖学入門[13]では、各種植物の細胞構造等がまとめられていた。以下に詳細を述べるが、実際に掲載されていた細胞構造を用いた実験も行った。また、傾斜機能材料[14-16]と呼ばれる材料も産業的に着目されていることがわかった。産業的に応用されている例として、フォトニック結晶光ファイバーや多層膜光フィルタなどの光学部品材料、2種類以上の高分子材料をブレンドさせて形成する高分子樹脂材料などがある。また、自然界における傾斜機能材料として、竹の繊維構造や人の骨における内部構造が挙げられていた。これらに共通していることは、2種類以上の材料がその密度を連続的に変化させる、あるいは1種類の構造パターンがそのサイズを連続的に変化させることにより得られた構造体という点である。

書籍調査より、植物(竹)の細胞構造パターンが1つの傾斜機能材料として注目されていることがわかった。今後、植物の細胞構造や機能傾斜材料とデジタルファブ리케이션とを組合せ、物理特性を制御するような報告例がないか調査する必要がある。

4. デジタルファブ리케이션による構造形成実験

4.1 レーザーカッターを用いた構造試作実験

キンボウゲ科の根における細胞構造パターン(図 1)[13]を、GCC 社製レーザーカッター SPILIT GLS を用いてアクリル板又は MDF 板へ形成した(図 2)。レーザーカッターにより、細胞構造パターンに含まれる微細な構造も再現良く形成できることがわかった。アクリル版に加工する際には、細かい構造が多いため本来穴が形成されるべき領域にて、アクリルが抜けずに、レーザーにて溶解した周囲と繋がってしまう現象が生じた。更に、熱の影響により加工後のアクリル板が反ることがわかった。一方、MDF 板を用いた際には、周囲と繋がることがなく、また熱による反りも発生せずに細胞構造パターンを形成できた。しかしながら、いずれの材料を用いても構造パターンが脆く、容易に壊れてしまった。そのため、物理特性を評価する為には、細胞構造パターンを最適化する、または異なる植物の細胞構造パターンを用いる必要がある。

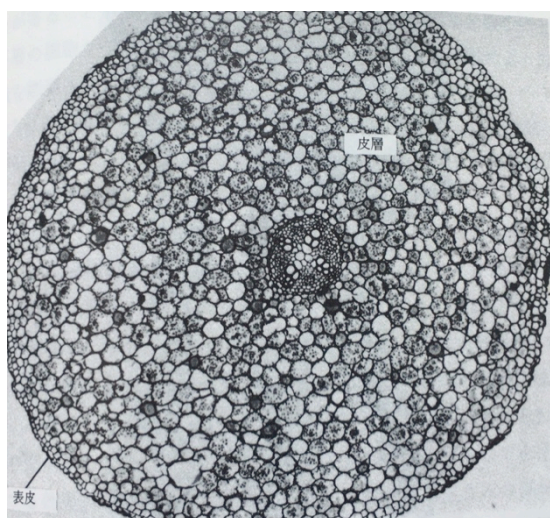
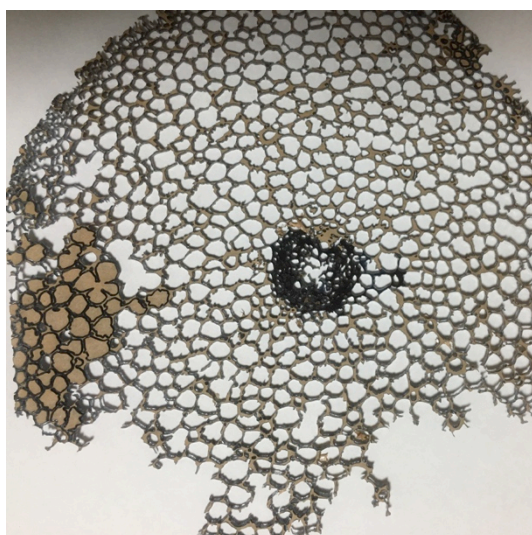
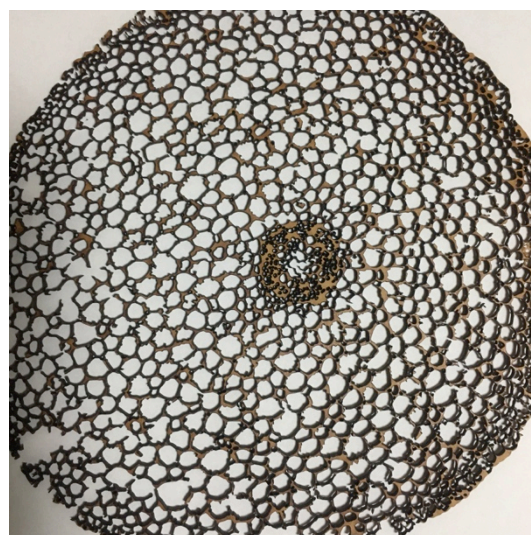


図 1. キンボウゲ科の根が有する細胞構造パターン[13].



(a) アクリル板への加工結果.



(b) MDF 板への加工結果.

図 2. レーザーカッターにより形成されたキンボウゲ科の根が有する細胞構造パターン.

4.2 3D プリンターを用いた構造試作実験

Mutoh 社製の3D プリンターMF-2200D を用いて各種構造パターンを出力した。なお、出力に用いた材料は表 1 に示す。

表 1. 3D プリント時に使用した材料.

材料	出力温度	備考
PLA	195℃	Mutoh 社製
Fabrial-R	140℃	JSR 社製 柔軟材料 生体適合性
SMP	195℃	Kyoraku 社製 形状記憶材料(55 度以上加熱時) 生体適合性

構造パターンを作成するにあたり、第 3 章にて述べたポアソン比を制御した構造[6,10]、Mutoh 社出願特許[17]と同様な井げた構造を参考にし、3DCAD ソフト Rhinoceros 及びそのプラグインの 1 つである Grasshopper により 3D モデルを生成、又は 3D プリンターの制御コードである G-Code を直接生成するプログラムを作成し、それらを用いて 3D プリント出力を行った。

ポアソン比制御構造においては、ポアソン比が負となるように設計し出力した。図 3 に出力結果を示す。また、図 4 に実際に圧力を印加した場合の結果を示す。図 4(a)では圧力を加えていないが、図 4(b)にて図中上方向より圧力を印加すると、圧力方向に平行な構造体高さが低くなると共に、圧力の直行方向に対応する構造体の幅も狭くなることわかった。この現象から、ポアソン比がマイナスであることを確認できた。図 4 に示した結果の構造体の高さ、幅の変化量を表 2 にまとめた。なお、変化量測定時には図 4 中の赤丸、青丸位置を基準に画像より測定した。

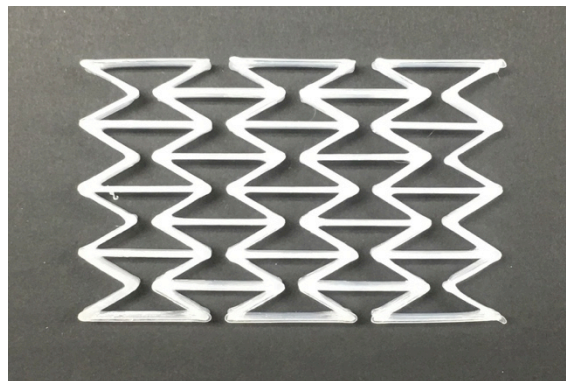
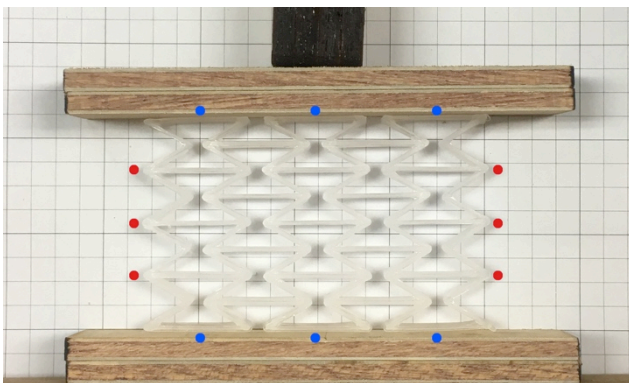
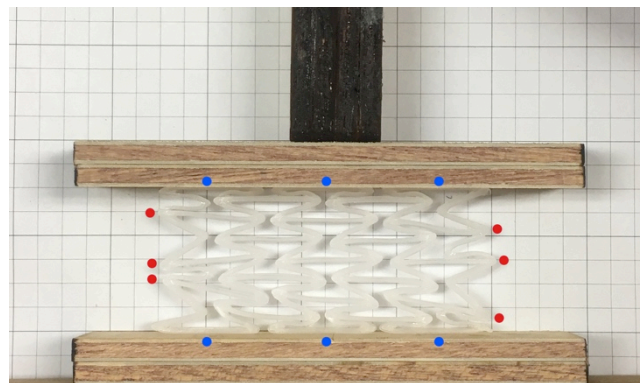


図 3. ポアソン比が負な構造体出力結果(Fabrial-R).



(a) 圧力印加前.



(b) 圧力印加時.

図 4. ポアソン比が負な構造体に対し、圧力印加有無による変化.

背景の方眼紙 1 マスが 5mm 角に対応.

表 2. ポアソン比が負な構造体の圧力印加有無による構造体高さ、幅変化量.

	圧力印加前	圧力印加時
構造体 平均高さ [mm]	44.9	30.3
構造体 平均幅 [mm]	72.5	69.2

次に井げた構造は、構造体の中心部の幅が構造体の厚み方向に対し、以下の式にて計算される変化率 Rate に沿うよう設計した。

$$Rate(z) = \frac{4(1-R)}{T^2} \left(z - \frac{T}{2} \right)^2 + R$$

ここで、T は構造体の最終的な設計高さであり、同じ方向の変数を z としている。また、R は構造体中心部に構造体の幅の変化率を示す。

実際に出力した構造体における変化率 Rate を図 5 に示す。図 5 を計算するにあたり、R を 0.2 から 20 の範囲で変化させ、T を 10 とした。

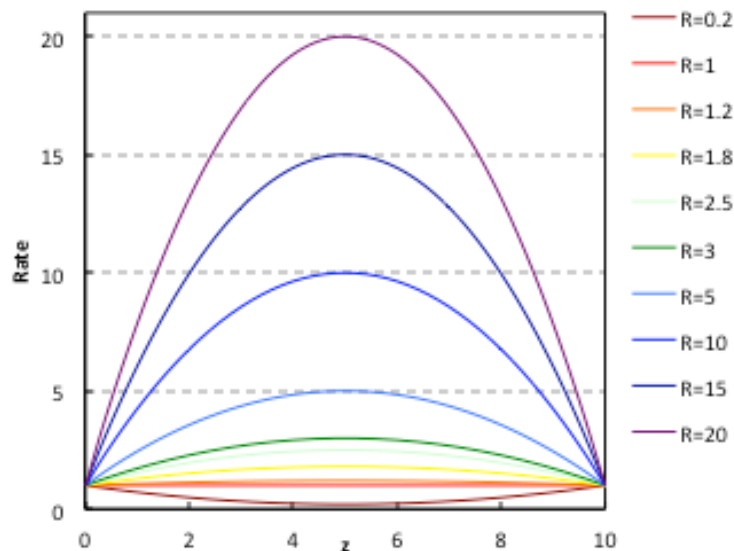


図 5. 井げた構造設計時における構造体内部の幅変化率.

図 5 より、井げた構造を形成する構造の幅が、構造体の中心部にて狭く、あるいは広くなるように設計されることがわかる。図 5 の設計値に合わせ、実際に 3D プリンターにて出力した結果を図 6 に示す。

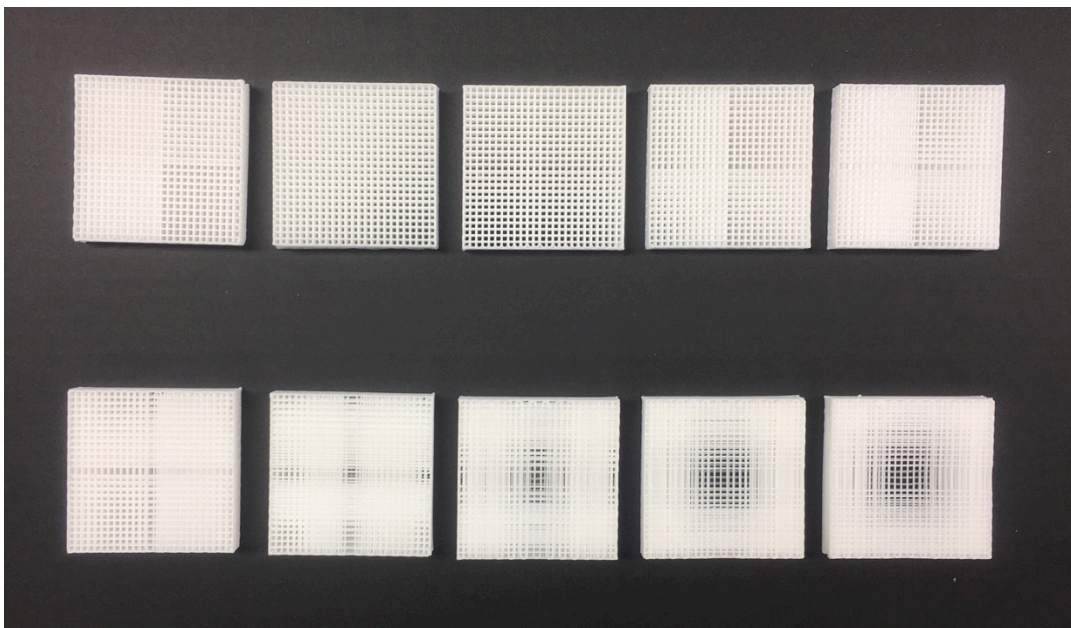


図 6 の左上から右下に向かって構造体の幅の変化率 R は 0.2, 1, 1.2, 1.8, 2.5, 3.5, 10, 15, 20 となっており、異なる幅変化率による井げた構造出力結果(PLA)。

井げた構造体中心部を広げることで、従来硬い PLA 材料へ柔らかさを持たせることができた(図 7)。この理由は、構造体中心部における PLA 材料の密度が粗になったと共に、空洞が形成されている為、外周部に形成された PLA 材料がしなり易くなるためだと考えられる。このように、硬い材料であっても、形成する構造の粗密及び空間をデザインすることにより、構造体の硬さを部分的に制御できる可能性を見出した。

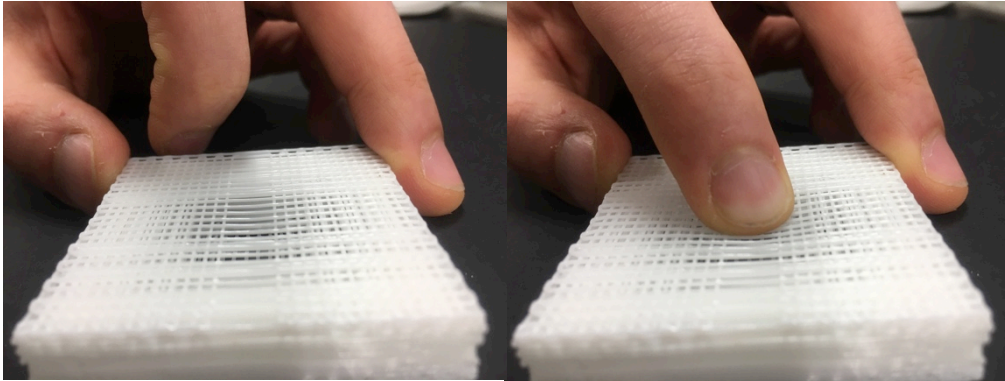


図 7. 変化率 $R=20$ の井げた構造体中心部拡大画像.

従来、領域毎に異なる硬さ、柔らかさを持つ構造体を形成するためには、それぞれ所望の硬さを持った材料を繋ぎ合わせる、又は部分的に配置する必要があったが、本手法を用いることで単一材料により硬さを制御することが可能となる。こうすることで、構造体形成時に必要となる材料の省資源化が可能になると共に、リサイクル性を高めることが可能となる。

また、近年では複数種類の材料を出力する FDM 方式の 3D プリンターも販売されている。こうしたプリンターを用いることで、例えば材料 2 種類と空隙の 3 つを組み合わせることにより、より複雑な物理特性を実現でき、材料の省資源化を実現できる可能性があると考えられる。

5. 応用探索

3D プリントにより得られた井げた構造を含む構造体は、非常に細い線(線幅約 0.5mm 前後)により形成されている。更に、図 8 のように構造体を透かして観察した際、その観察角度によって光の透過するパターンが異なる。これらの特徴を活かすための応用探索を行った。

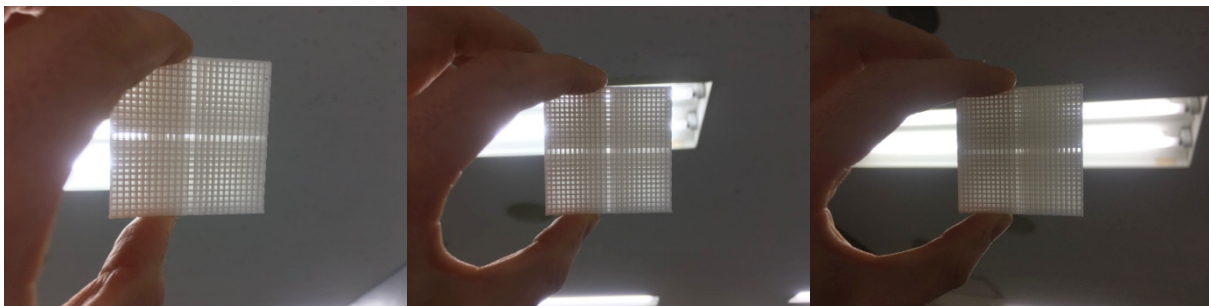


図 8. 変化率 $R=3$ の井げた構造体を左、正面、右から光源に透かして観察した様子.

5.1 機能性建装材への応用

構造体が細い線で形成されていること、加えて光の透過パターンを制御できることから、機能性建装材としての応用可能性を試した。なお、建装材としてコンクリートブロックに着目した。従来のコンクリートブロックは、内部が全て充填されていることで強度を得ている一方で、

機能性という面が限られている。近年では、ALC (Autoclaved Lightweight aerated Concrete) と呼ばれるコンクリート内部に細かな気泡を含むコンクリート材料にて、水や空気が透過し、且つ軽量なコンクリートブロックが実現されているが、そうした機能性を有するコンクリート材料は数少ない。そこで、本研究にて作成した構造体のパターンとコンクリートブロックを組み合わせることで、コンクリートブロックへの機能性付与を狙う。

3D プリンターにて作成した構造体へコンクリートを流し込み、硬化させた後に、電気炉へ投入して焼成することで構造体の材料 (PLA) を熱分解させた。こうすることで、コンクリート内部に PLA が存在した位置に空隙が形成される。形成された空隙およびその粗密を制御することで、ALC と同様に水や空気を透過させる効果や、コンクリートブロックの熱伝導性を制御できるのではないかと考えている。また、図 8 のように観察角度によって異なる印象を有するコンクリートブロックを形成できるのではないかと考えている。

実際に作成したコンクリートブロックを図 9 に示す。元の構造体にて PLA が存在した位置に空隙が形成されていることが確認できた。また、観察角度により透過する光の位置を制御することも確認できた (図 9(b))。



(a) コンクリートブロック外観。



(b) コンクリートブロックを左、正面、右から光源に透過させて観察した様子。

図 9. 井げた構造体へコンクリートを流し込み作成したコンクリートブロックとその光透過性機能。

現在はコンクリートブロックを形成する材料の選定と、電気炉により焼成する条件が最適化されていないため、図 9 のように構造が崩れているが、今後はそれぞれを最適化させ、より建築材として利用可能なコンクリートブロックを作成する事を狙う。

5.2 ヘルメット部材への応用

現在、同研究室 (政策・メディア研究科 田中研究室) に所属している博士学生が、企業と共に 1 人 1 人にデザインされたヘルメットを 3D プリンターにて出力することを目的とした共同研究を進めている。この研究にて、そのヘルメット内部の人体へ直接触れる部品を本研究の応用の 1 つとして出力することとした。

従来のヘルメットでは、ヘルメット内部に直接頭に触れる部材がある (図 10(b))。この部材は通常樹脂で形成されている為、暑い時期にヘルメットを装着している際、その部材と触れ

ている頭皮部分が汗により蒸れ、不快感を与える。そこで、本研究にて細線な構造体が得られると共に、内部構造で構造体の柔らかさを制御できる特長を活かし、水分を透過させる穴を形成させた、より快適なヘルメット部材を形成することを狙う。

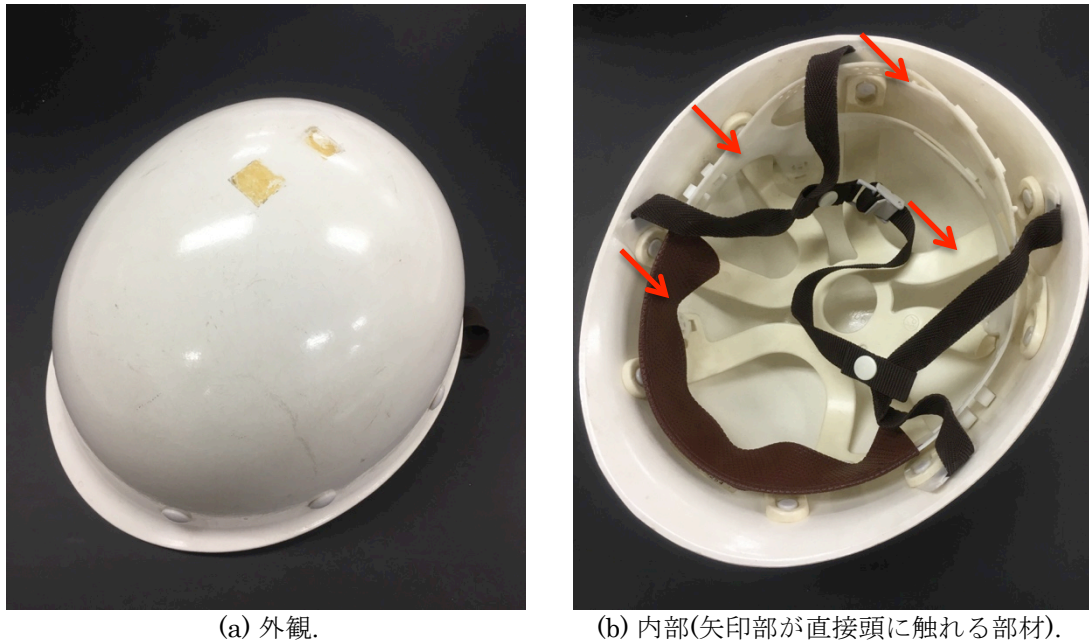


図 10. 従来のヘルメット.

実際に図 10(b)に示した部材に対応するよう設計し、生体適合性があり、且つ柔軟性のある Fabrial-R を用いて出力を行った。その結果を図 11 に示す。使用した 3D プリンターの出カサイズの制約により、3 つに分割しそれらを結合させた。現状、Fabrial-R を用いて等間隔ピッチで内部構造を形成しているが、内部構造を制御し、例えば耳があたる部分を柔らかくし、他の部分を少し硬くする等といった出力を試みる。加えて、Fabrial-R と同じく生体適合性があり、形状記憶可能な SMP を用いて出力することを試みる。

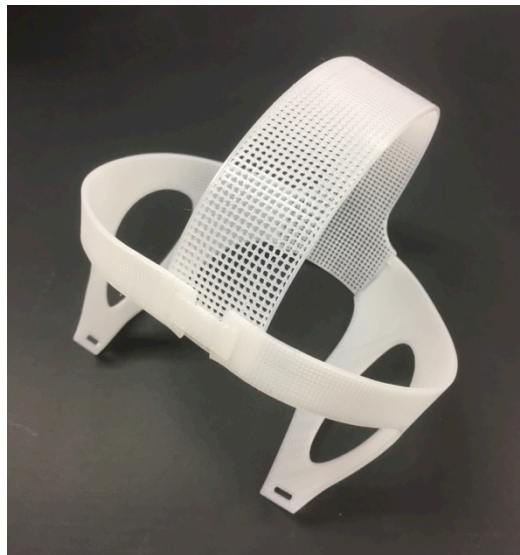


図 11. Fabrial-R を用いて出力したヘルメット部材.

6. 今後の展望

レーザーカッターを用いた構造形成については、植物の細胞構造パターンを元に、より簡便な構造を設計し、再度加工を行いたい。3D プリンターを用いた構造形成においては、構造体内部を制御することで物理特性を制御できることがわかったため、今後はポアソン比が負となる構造や井げた構造だけではない幾何学的なパターンを形成し、その特性を把握するとともに、そういった構造を制御できるようなソフトウェアの構築も狙いたい。加えて、いずれの手法においても構造体を形成した後に、その物理特性を測定したい。

応用探索においては、今回報告した2つの用途の完成度を上げると共に、それ以外の分野や領域を探索したい。

7. まとめ

3D プリンターやレーザーカッターといったデジタルファブリケーションツールを用い、単一材料を2次元あるいは3次的に配置することで、物理/材料特性の制御及び、特異的な圧力応答性を有する構造体を形成し、その物理/材料特性を評価することを目的とし、本研究を進めてきた。また、それらの応用についても模索してきた。

その結果、レーザーカッターを用いた場合においては、植物の細胞構造パターンを再現できたが、加工条件などの最適化ができなかったため、詳細な物理特性の評価まで進めることができなかった。一方、3D プリンターを用いた場合では、出力した構造体の内部構造を制御することにより、構造体の硬さを制御可能なことを見出した。しかしながら、実際にそれらの物理特性評価まで進めることができなかった。

応用探索においては、コンクリートへ機能性を付与させる実験に加え、ヘルメット用の部材を作成することに取り組んだ。

今後は実際に作成した構造体の物理特性を評価することに加え、今回報告したパターンとは異なるパターンを用い、更なる検討を進めたい。また、今回報告した以外の分野についても視線を向け、応用可能性について模索を進めていきたい。

8. 本研究に関する活動実績

- SPIE Smart Structures NDE
2017年3月28日 口頭発表予定(発表タイトル: Direct material weaving by G-code manipulation)
- SPIE Smart Structures NDE
2017年3月27日 デモンストレーション実施予定

参考文献

- [1] WWF, "Living Planet Report 2014" (2014).
- [2] T. A. Schaedler, J. Lian, J. R. Greer, and L. Valdevit, "Ultralight metallic microlattices", *SCIENCE* **334**, 962(2011).
- [3] T. Buckmann, M. Kadic, R. Schittny, and M. Wegener, "Mechanical cloak design by direct lattice transformation", *PNAS* **112**, 4930(2015).
- [4] BIOMIMICRY: 3D printed soft seat, <http://lilianvandaal.com/?portfolio=3d-printed-softseating>, (2016年5月確認).
- [5] G. W. Milton, "Composite Materials with passion's ratios close to -1," *J. Mech. Phys. Solids*, **40**, 1105(1992).
- [6] G. W. Milton and A. V. Cherkaev, "Which elasticity tensors are realizable?," *J. Eng. Mat. Tech.*, **117**, 483(1995).
- [7] J. T. B. Overvelde, S. Shan, and K. Bertoldi, "Compaction through buckling in 2D periodic, soft and porous structures: effect of pore shape," *Adv. Mater.*, **24**, 2337(2012).
- [8] K. Bertoldi, P. M. Reis, S. Willshaw, and T. Mullin, "Negative Poisson's ratio behavior induced by an elastic instability," *Adv. Mater.*, **21**, 1(2009).

- [9] B. Florijn, C. Coullais, and M. Hecke, "Programmable mechanical metamaterials," *Phys. Rev. Lett.*, **113**, 175503(2015).
- [10] D. Park, J. Lee, and Al Romo, "Poisson's ratio material distribution," *CAADRIA 2015*, 735(2015).
- [11] A. Ghaedizadeh, J. Shen, X. Ren, and Y. M. Xie "Tuning the performance of metallic auxetic metamaterials by using buckling and plasticity," *Materials*, **9**, 54(2016).
- [12] 植田 利喜造 編著, 「植物構造図説 新装版」, 森北出版, 2011年10月25日発行.
- [13] Paulo Rudall 著, 鈴木 三男, 田川 裕美 訳, 「植物解剖学入門 -植物体の構造とその形成-」, 八坂書房, 1997年4月5日発行.
- [14] 第14回「大学と科学」公開シンポジウム組織委員会 編集, 「21世紀の新素材 産業界を活性化させる傾斜機能材料」, クバプロ, 2000年11月15日発行.
- [15] 上村 誠一, 野田 泰稔, 篠原 嘉一, 渡辺 義見 編集, 「傾斜機能材料の技術展開」, シーエムシー出版, 2003年10月31日発行.
- [16] 上村 誠一, 渡辺 義見 編著, 「傾斜機能材料の基礎と応用」, コロナ社, 2014年5月7日発行.
- [17] 當間 隆司, 「三次元造形物の製造方法」, 特開 2016-135597, 2016年7月28日.