

# 硬さスイッチ: 局所加熱による低電圧動的硬さ制御構造体の提案

Stiffness Switch: Proposal of a Stiffness Controllable Structure by Low-Voltage Pinpoint Heater

徳田 雄嵩<sup>1</sup>, 小林 達也<sup>1</sup>

Yutaka TOKUDA<sup>1</sup>, Tatsuya KOBAYASHI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>株式会社 KDDI 総合研究所

<sup>1</sup>KDDI Research, Inc.

## 【要約】

低融点液体金属や熱可塑性樹脂等の熱を用いた硬さ制御技術がソフトロボティクスやヒューマンコンピュータインタフェースの分野で注目されている。熱を用いた硬さ制御技術の問題として構造体の加熱に要する時間やエネルギー効率が挙げられる。本研究では応力が集中する構造体の最小要素を局所的に加熱することで硬さを効率的に制御できる新たな動的硬さ制御構造体を提案する。カーボンナノマテリアル発熱塗料で試作した小型ジュール熱ヒーターを3D プリントした H 形鋼構造の支柱に組み込み、局所的に加熱し軟化させる事で構造体の座屈強度を 10V 以内の低電圧下で効率よく持続的に制御可能である事を実証した。

キーワード: 発熱塗料, カーボンナノマテリアル, 硬さ, 熱可塑性樹脂, H 型鋼, ジュール熱

## 【Abstract】

Built-in stiffness control of 3D printed structures using heat has been difficult due to high voltage requirements and low heating efficiency. We propose a new dynamic stiffness controlled structure whose hardness can be efficiently modulated by heating only the part of the structure where stress is concentrated. As a proof-of-concept, we have fabricated a small Joule heater using carbon nanomaterial heating paint and demonstrated efficient dynamic stiffness control method by attaching the heater to the pillar of a 3D printed H-beam structure. We experimentally showed that the proposed structure can sustainably control the buckling strength and thus stiffness with a voltage of less than 10 V.

Keywords: heating paint, carbon nanomaterial, stiffness, thermoplastic resin, H-shaped beam, Joule heating

## 1. 序論

熱溶解積層方式(FDM)の 3D プリント技術や低温熱可塑性樹脂の普及とともに、硬さを柔軟に調節できる機能性構造体が近年注目されている。Groeger らは、導電性銀ナノインクで印刷したフレキシブルヒーターをポリカプロラクトン(PCL)で3Dプリントしたモデル内部に挿入し加熱する事で硬さを動的に制御可能な HotFlex を提案している [1]。また Taghavi らは導電性 PLA を用いる事でヒーター要素を3D モデル内部に直接印刷し、硬さを動的に制御可能な3D プリント技術を提案している [2]。これら従来の熱を用いた 3D プリントモデルの硬さ制御には高抵抗値を持つ熱回路に電流を流し加熱するジュール熱ヒーターが用いられてきたが、熱可塑性樹脂が軟化されるガラス転移温度まで 3D モデルを加熱するのに高電圧と長時間の加熱サイクルを要する。また 3D プリントモデルの熱塑性変形により、圧縮後元の形状に戻すことができず、硬さを持続的に変化させ繰り返し用いる事は困難である。

これらの問題を解決するため、本研究では高導電性と優れた熱伝導性を合わせ持つカーボンナノマテリアル発熱塗料に着目した。低電圧で高速に加熱可能な新たな小型ジュール熱ヒーターを設計する事で、応力が集中する構造要素をピンポイントで加熱する事が可能となり、効率的に硬さを制御できると考えられる。また加

熱しない他の構造要素を弾性と形状記憶特性を持つ素材で構成する事で、持続的に硬さを制御可能な新たな動的硬さ制御構造体の実現可能であると考えられる。以下では、概念実証として H 型鋼を参考に考案した動的硬さ制御機構、硬さスイッチを紹介し、カーボンナノマテリアル発熱塗料を用いた小型ヒーターと硬さスイッチの実装方法および加熱速度と硬さ変化の検証結果、そしてアプリケーションについて述べる。

## 2. 硬さスイッチ

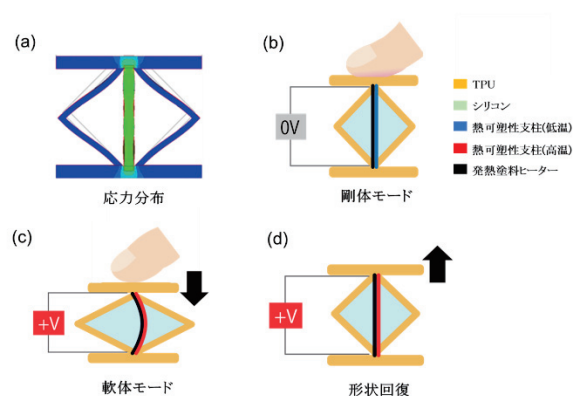


図 1. 硬さスイッチ概念図

少ない材料と重さで、降伏、曲げ、振動に効果的に

耐えられる構造要素として H 型鋼が建築分野で良く用いられている。図 1(a)が示すように、H 形鋼を含む構造体では応力分布が中央の柱に集中するため、H 型構造を熱可塑性樹脂で成型すると、構造物全体を加熱するのではなく、柱要素のみをピンポイントで加熱することで、硬さを効率的に制御できると考えられる。図 1(b)~(d)に H 型構造体をベースに考案した硬さスイッチの動作原理を示す。硬さスイッチは、熱可塑性樹脂からなる H 型構造体と小型ジュール熱ヒーターそして形状回復特性を付加するための弾性フレームとシリコン素材から構成された複合材料で構成されている。無電圧下では、H 型構造により鉛直荷重に対して高い剛性を示すが(図 1(b))、ヒーターに電圧を印可し柱を加熱する事で、H 型構造の座屈強度が下がり、軟体に移行する(図 1(c))。弾性フレームとシリコンが構造体を支えることで、負荷がなくなると軟化した柱が元の形状に弾性力で戻り(図 1(d))、温度が下がると再び高い剛性を発揮するため、形状を損なわず持続的に硬さを制御可能であると考えられる(図 1(b))。

### 3. 小型発熱塗料ヒーター

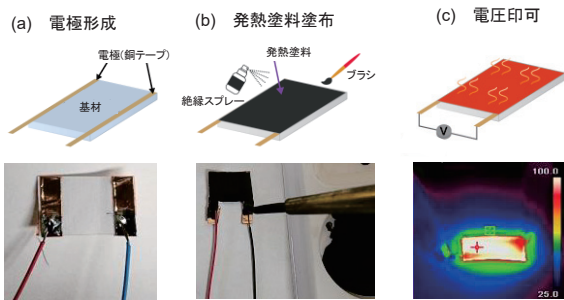


図 2. 発熱塗料を用いたヒーターの試作工程

#### 3.1 カーボンナノマテリアル発熱塗料

低電圧で熱可塑性樹脂を溶融させるのに十分な熱量を発生できる新たなジュール熱ヒーターを実装するため、カーボンナノマテリアル発熱塗料を用いた小型ヒーターの製造方法を検討した。グラフェンやカーボンブラックを含むカーボンナノマテリアル発熱塗料は、高い導電性、熱伝導性、柔軟性そして遠赤外線放射能力を有するため建物の床や壁 [3,4]や曲面状の製品(椅子、パイプ、浴槽など)[5]に暖房機能を組み込む用途で広く使用されてきた。発熱塗料は高い導電率( $30 \text{ } \Omega/\text{square}$ )を有し、電極間に均一に塗布するだけ塗布領域を均一に加熱するヒーターに変える事ができる。従来の導電性インクや電線を用いたジュール熱ヒーターでは複雑な熱回路パターンを加熱領域に描く必要があったため、小型で低電圧で駆動するヒーターを実装する事は困難であった [1]。また、導電性 PLA は抵抗値が非常に高いため( $> \text{k}\Omega$ )、樹脂を溶融させるのに十分なジュール熱を発生させるには 30V 以上の高電圧が必要である [2,6]。Markevicious らは、発熱塗料を用いた美術品保存用の大型ヒーター(0.25 m×0.16 m)の作成方法と加

熱速度を報告しているが [6]、発熱塗料を用いた 3D プリントモデルの硬さ制御に応用した事例はまだ報告されていない。

#### 3.2 小型ヒーターの試作・検証

入手可能ないくつかの発熱塗料製品の中から、 $350 \sim 450 \text{ } \Omega\text{m}$  の低い抵抗率を持ち、柔軟性を有するポリウレタンベースの発熱塗料、Carbo e-Therm PUR 70-350B.01 を検証した [5]。本製品は、導電性を失うことなく、水で 25 重量%まで希釈することができ、また銅箔テープ、電線、銀導電性インク等様々な導電材料を電極材として使用することができる。電極との接触抵抗を最小限に抑えるため、電極材と加熱基材共に発熱塗料で均一に塗装することが推奨されている。一般的な塗料と同様に、ガラス、FR4、木材、プラスチック、紙など様々な素材に発熱塗料を塗布することができる。特に、不織布や滑らかな紙等を基材に用いると特に高い導電性が得られ、かつ曲げても高い導電性が維持されるため、柔軟なヒーターの基材として最適であると考えられる。発熱塗料は 3D プリントモデル表面に直接塗布し加熱できる事が確認されたが、3D プリント表面と加熱塗料の接着力が弱く、曲げると加熱塗料の塗膜に割れが生じ、導電性が失われることがわかった。本研究では柔軟性が高く、高い導電性を有する紙を基材に用いる事で、硬さスイッチの支柱部の座屈に適合した小型紙ヒーターを実装する事にした。

図 2 に小型紙ヒーターの試作工程を示す。Groeger ら [1] が報告した導電性銀ナノインクヒーターと比較するため、報告にあったサイズと同じ  $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  のヒーターを作製した。厚さ  $76.8 \text{ } \mu\text{m}$  の標準的なコピー用紙をカッターナイフで切断し、短辺側に幅 3 mm の銅箔テープを電極として貼り付けた。(図 2(a))。2 つの電極間の紙の幅は 2 cm である。直径 32 AWG の耐熱ラッピングワイヤーを銅電極フィルムにはんだ付けする事で配線を固定した。

疎水性のある銅電極表面に発熱塗料を塗布するため、発熱塗料は水で薄めずに高粘度 ( $3 \sim 4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ) を保ったまま使用した。図 2(b) に示すように標準的な絵の具筆を使って、銅箔電極、コピー用紙を均一に塗装した。また、紙の柔軟性を保つため、電線を貼り付けた片面のみを塗装した。発熱塗料の乾燥時間は室温で 50 分であるが、ヒートガンを使えば 10 秒程度で乾燥でき、高い導電性が得られることがわかった。筆塗りによる厚さと導電性の変化を検証するため、5 つの同サイズの紙ヒーターを試作し、膜厚計(Wintact WT230)とマルチメーター(KAIWEETS KM601)を用いて、発熱塗料の厚さと抵抗値を測定した。これらの試験サンプルの乾燥後の発熱塗料の平均厚さは  $54.6 \pm 9.2 \text{ } \mu\text{m}$ 、抵抗値は  $18.8 \pm 4.5 \text{ } \Omega$  であった。発熱塗料を接触による傷や水などから保護するために、発熱塗料表面を耐熱熱縁シリコンスプレーでコーティングした(図 2(b))。最後に

電極に直流電圧を印可し、発熱分布をサーモカメラで検証したところ電極間が均一に加熱されている事が確認された(図 2(c)).

### 3.3 加熱速度の評価

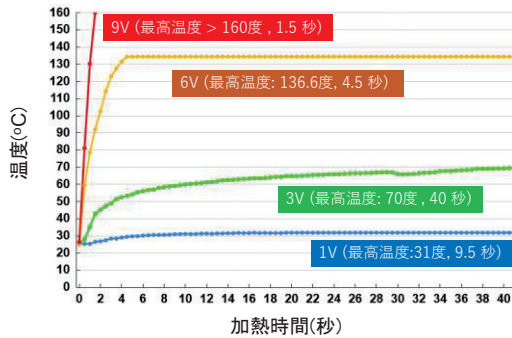


図 3. 異なる印可電圧におけるヒーターの温度変化

作製した小型紙ヒーターの異なる電圧下での温度上昇速度を検証した。直流安定化電源 (Wanptek WPS300) を用いて、一定電圧を電極に印可した状態で、サーモグラフィカメラ (HIKMICRO B10) を用いて、0.5 秒間隔で紙ヒーター表面の温度変化を計測した。図 3 のグラフが示すように 20 mm × 10 mm サイズの紙ヒーターの温度は 9 V では数秒以内にサーモグラフィカメラが測定できる最大温度の 160 度まで上昇した。ヒーターは 6 V で 4 秒後に 136 度、3 V で 60 秒後に 70.5 度、1 V では 20 秒後に 32.5 度の最高温度で安定した。Greoeger らの報告によると、銀ナノインクヒーターは 9 V の電圧下で 60 度の温度に達するのに 11 秒を要しており、銀ナノインクヒーターと比較して発熱塗料を用いた紙ヒーターは約 22 倍の加熱速度を持つ事が確認された。ポリウレタン系加熱塗料の制御可能な最高温度は 120 度で、PLA 等が軟化するガラス転移温度は 60 度 ~ 70 度の範囲にあるため、3 V ~ 9 V の電圧範囲であれば、硬さスイッチのヒーターとして十分に持続的に機能すると考えられる。

## 4. 硬さスイッチ概念実証

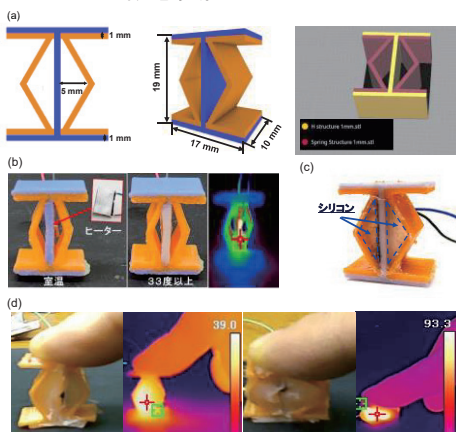


図 4. H 型硬さスイッチ試作機

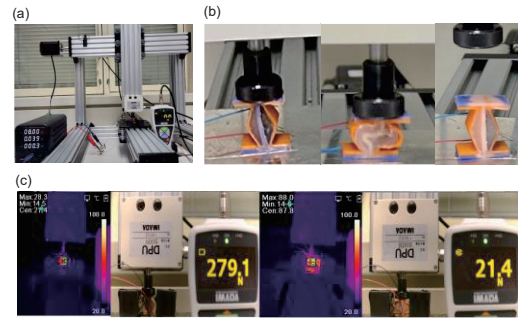


図 5. 硬さスイッチ圧縮試験

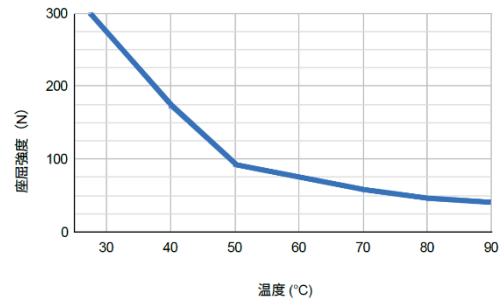


図 6. 加熱による座屈強度変化

### 4.1 硬さスイッチの試作

概念実証として、デュアルエクストルーダーを有する FDM 3D プリンター (Raise 3D Pro3 plus, Snapmaker J1) を用いて、硬さスイッチの試作を行った(図 4(a)). フィラメントの充填率を 100% に設定し、TRONXY サーモミック PLA を用いて H 型構造部を印刷し、支柱の加熱状態を可視化できる設計にした。図 4 (b) に示すように、室温では PLA の柱の色は青色であるが、33 度以上の温度に加熱されると徐々に白色に変色するためヒーターが機能しているかどうかを目視で確認する事ができる。H 形構造の大きさは、17 mm (W) × 19 mm (H) × 10 mm (D) である。H 型構造の印刷と並行して、弾性フレーム部を Polyflex TPU95 を用いて成型した。弾性フレームと H 形構造部の厚みは 1 mm で、支柱と弾性フレームの間の最大距離は 5 mm である。次に 13 mm × 10 mm サイズの紙ヒーターを作成し、ヒーターの塗装面側を両面熱転写テープを用いて支柱に貼り付けた。最後に図 4 (c) に示すように、柱と弾性フレームの間にできた二つの三角形状の空間に形状回復素材としてシリコン (Ecoflex00-35 ファスト) を注入し乾燥させた。室温では高い剛性を示していたが、8 V の電圧をヒーターに印可し支柱部をガラス転移温度 (65 度) 以上の温度で 30 秒程加熱したところ、人差し指で押さえても容易に圧縮出来るほど軟らかくなり、離すと元の形状に数秒に戻る事が確認された(図 4 (d)).

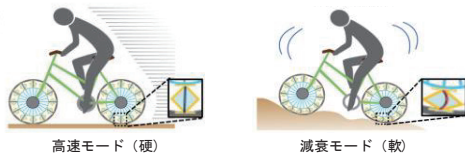
### 4.2 硬さスイッチ機能検証

次に CNC マシン (Avalontech C-beam マシン) とデジタルフォースゲージ (IMADA ZTS-DPU-500N) を用いて

実装した圧縮試験機を用いて硬さスイッチの座屈強度の温度変化を測定した(図 5(a)(b)). 室温である 27 度から最大 90 度の温度範囲で 10 度毎に柱の温度を変えながら 試作した硬さスイッチの座屈強度を計測した. 図 5(c)および図 6 のグラフが示すように, 27 度での硬さスイッチの座屈強度は 279.1 N であったが, 8 V の電圧で柱をヒーターで加熱する事で座屈強度が 27 度から 50 度の間で一定速度で低下し, 50 度以上では低下速度が緩やかになる事が確認された. 柱の温度が 90 度に至ってから 30 秒後には最小の 21.4 N まで座屈強度が低下し, 10 mm まで圧縮できる事が確認された. シリコンと弾性フレームの弾性特性と PLA の加熱による形状記憶効果により, 圧縮試験機のプローブを上昇させたところ, すぐに元の形状に回復し, 室温で強い座屈強度 (163N) を回復した. 本結果から硬さスイッチは PLA のガラス転移温度 (約 65 度) よりも低い温度範囲においても硬さを劇的に低下させることができるため, 低電圧で硬さを効率よく加熱制御する方法として有効であると考えられる.

## 5. アプリケーション

### (a) 適応型弾性車輪



### (b) マルチ弾性タッチペン

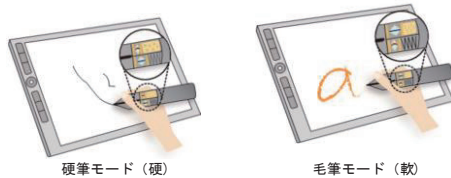


図 7. 硬さスイッチ応用イメージ

硬さスイッチの応用イメージとして, 弾性セル構造を利用したエアスタイヤの機能拡張が考えられる(図 7(a)). エアスタイヤは地面が滑らかであればスムーズに走行可能であるが, ゴムタイヤと比較してサスペンション能力が低いため, 凹凸のある道路では振動が吸収されず快適な走行が難しい. 硬さスイッチを弾性セル構造に応用する事で, 道路状態に応じて自転車のタイヤの弾性を動的に制御可能な適応型弾性車輪が実現でき, 平面では硬さスイッチの硬度を上げ高速で疾走し, 凸凹した山道などでは硬さスイッチを軟らかくし, 振動を減衰しながら快適な走行を支援できると考えられる.

また, 2種の異なる硬さを持つ素材の硬さを硬さスイッチで動的に複合し伝達する事で, 多様な弾性が表現できるマルチ弾性タッチペンへの応用も考えられる(図 7(b)). 硬さスイッチが硬い状態では直列に繋がった素材の硬さが減衰する事なく伝わり, 硬さスイッチが軟化した状態では, 素材の弾性力が吸収され素材の弾性を

減衰または無視することができる. 複数の硬さスイッチの状態を制御する事で, 動的にペンの硬さを硬筆モードや毛筆モード等のように切り替える事ができ, 様々な描画ツールの弾性特性を再現した触覚フィードバックが得られる硬さ制御タッチペンが実現できると考えられる.

## 6. 結論

従来の加熱方式による3Dプリントモデルの硬さ制御は, 熱可塑性樹脂の塊を軟化させるために高電圧と長い加熱サイクルが必要であり, また加熱により弾性が失われるため, 低電圧下で持続的に硬さを制御する事が困難であった. そこで本研究では高導電性カーボンナノマテリアル発熱塗料を用いた小型ヒーターと形状回復機能を持つH型構造体を複合させた新たな熱構造体を考案し, 低電圧で持続的に硬さを制御できる硬さスイッチを提案した. 応力が集中するH型構造の柱のみをカーボンナノマテリアルを用いた小型ヒーターで局所的に加熱する事で, 硬さ制御の効率を向上できる事を実証した. また, 他の構造要素を弾性素材で設計し, 加熱による弾性損失を避ける事で, 圧縮後の大きな歪みからも元の形状に自律的に戻り, 持続的に機能する硬さ制御デバイスが実現可能である事を実証した.

## 参考文献

1. D. Groeger, E. Chong Loo, and J. Steimle, "HotFlex: Post-Print Customization of 3D Prints Using Embedded State Change", CHI'16 (2016). pp.420-432.
2. M. Taghavi, T. Helps, B. Huang, and J. Rossiter, "3DPrinted Ready-To-Use Variable-Stiffness Structures", IEEE Robotics and Automation Letters (2018), Vol.3, No.3, pp.2402-2407.
3. Thermoheld Global.<https://www.thermoheld.global>. (2023年9月10日閲覧)
4. Graphen Star. "Examples of real installations of heating G Therm coatings" <https://graphen-star.com/installation>. (2023年9月10日閲覧)
5. Carbo e Therm Cosmopolitan Inc. [http://www.cosmopoltn.co.jp/product/carbo\\_e-therm.html](http://www.cosmopoltn.co.jp/product/carbo_e-therm.html). (2023年9月10日閲覧)
6. K. Moon, H. Lee, J. Kim, and A. Bianchi. "ShrinkCells: Localized and Sequential Shape-Changing Actuation of 3D-Printed Objects via Selective Heating", UIST'22 (2022). No.8, pp. 1 - 12.
7. T. Markevicius, R. Furferi, N. Olsson, H. Meyer, L. Governi, M. Carfagni, Y. Volpe, and R. Hegelbach. "Towards the Development of a Novel CNTs-Based Flexible Mild Heater for Art Conservation", *Nanomaterials and Nanotechnology* (2014). No.4.