

太陽光による物体の膨張変形制御のためのパウチ設計の基礎検討

Basic Study of Pouch Design for Controlling Deformation of Objects by Sunlight

上野太誠, 佐藤宏樹, 笥康明

Taisei UENO¹ Hiroki SATO^{1,2} Yasuaki KAKEHI¹

¹ 東京大学 ² 宮城大学

¹ The University of Tokyo ² Miyagi University

【要約】

近年 4D プリンティング技術を中心に、環境刺激に応じ形や体積を変化させる素材を物体に組み込むことで、造形後に物体の形態を環境に応じて動的に変化させる試みがみられる。中でも、電気や機械による制御に頼らず、温度や湿度などの自然環境変化を造形や変形のトリガとして取り込むアプローチは建築やファッションなどさまざまな文脈で取り組まれてきた。本研究では輻射熱に着目し、照射具合に応じて変形する構造体の設計に取り組む。ここで変形には、パウチパックに充填された低沸点液体の体積変化を利用した「Liquid Pouch Motors」を活用する。同研究でも周囲の熱環境を利用するプロトタイプは提案されているが、本研究では輻射熱を有効に活用するための新たな構造と素材の設計を行う。本稿では、パウチの表面色や素材について膨張・収縮時間の測定・比較を行い、また実際の太陽光のもとでの変形を試み、それらの結果について報告する。また、動的に形態変化する窓等、想定する応用シナリオに関しても述べる。

キーワード: 輻射熱, 太陽光, 4D Printing, インフレータブル

【Abstract】

In this study, we focus on radiant heat and investigate a structure that deforms in response to the degree of irradiation of radiant heat. For deformation, "Liquid Pouch Motors" that utilize the volume change of a low-boiling-point liquid filled in a pouch pack are utilized. Although a prototype that utilizes the ambient thermal environment has been proposed in the same study, this study will design a new structure and materials to effectively utilize radiant heat. In this paper, we measure and compare the expansion and contraction times for the surface color and material of the pouch. We also report the results of deformation under actual sunlight. We also discuss possible application scenarios, such as a window that changes its shape.

Keywords: radiant heat, sunlight, 4D Printing, inflatables

1. 序論

建築や衣服の主要な機能の一つは、膨大な輻射熱と有害な波長を含む日射を適切に遮ることである。日射は人間の生活のために必要不可欠である一方、輻射熱は人体で常に体感するには強く、また多量の日射光の暴露は人体に悪影響を与えるため、人は建築や衣服を用いて日射や熱の制御を試みてきた。地球温暖化によりこれらの諸問題が深刻化する現代では、場面によって異なる日射に応じて効率的に身体と外環境とを調節する方法が求められている。

上述の課題に対するアプローチの一つに、さまざまな環境の変化に応じて建築や衣服の形態を変化させる方法がある。特に近年では、熱や水分などの環境変動に応じて形や体積を変化させる物質や構造を物体に組み込むことで、造形後に物体の形態を変化させる試みがみられる [1][2][3]。4D Printing に代表されるこれらの取り組みでは、一般的な形状変化インタフェースに必要な電気やセンサ、複雑な機構を用いずに環境に応じた形態変化を実現する。この特徴は軽量性やエネルギー効率が要求される建

築・衣服等の人間-環境間インタフェースに適しており、日射や熱の制御のための活用が期待される。

そこで本研究では太陽光での変形動作を目的に、輻射熱で可逆的に膨張・収縮動作する軽量なシステムの検討を行う。構造体にはパウチパックに充填された低沸点液体の体積変化を利用した Liquid Pouch Motors [4]を用い、これを輻射熱で駆動させることが主な提案である。Liquid Pouch Motors は自身の質量に対して大きなエネルギーを生む軽量なモータで、曲げや持ち上げ等の動作を行うことができる。これを輻射熱で稼働させることができれば、日射を利用したインタフェースの制作が幅広く可能になると考えられる。以下では関連研究と本研究の意義について述べ、提案と基本原理、実装とその動作、アプリケーションについても述べる。

2. 関連研究

環境変動で形・体積が変化する物質の埋め込みにより物体の形態変化を起こす手法において、日射やその輻射熱を変化のトリガとするインタフェースは

複数存在する。Invert Auto-Shading Windows [1]は熱膨張係数の異なる金属を張り合わせたバイメタルを繋ぎ合わせて窓に吊り下げ、一定以上の熱が加えられた時にバイメタルの曲がり角度が変化することで遮光制御を行う。Breathing Façade [2]は熱で軟化する素材を用いたファサードで、夏には柔軟になることで風の影響で開口し、冬には固定的になる。Climate-Active Textiles [3]は可逆的に形態変化する繊維を布に織り込むことで、気孔率や厚みを気候変動に応じて変化させる試みである。

一方で、日射制御のように大スケールの変化を行う事例[1]は、大型で重く素材が硬質で、一般住宅や衣服等への応用は難しい。一方軽量の衣服繊維の事例[3]では外観には大きく現れない程度の小スケールの形態変化による温度調節が主眼である。システムの重さ・硬さと形態変化の大きさはトレードオフの関係にあり、両者を高いレベルで両立した事例はみられない。またいずれの場合も、日常レベルの日射エネルギーの変動から日射量を大幅に制御する程の変化を起こすには至っていない。しかし大きな変化量は日射・熱の効率的制御のために重要であり、軽量性は建築や衣服に応用する上で必要である。

そこで本研究では、輻射熱により大きな変化を起こす軽量のシステムの足がかりとして、Liquid Pouch Motors の輻射熱による駆動検証を行う。これはパウチに充填された低沸点液体の体積変化を利用したパウチモータで、パウチは物質の相変化を利用することで、軽量ながら大幅な体積変化を起こすことができる。また外部機構に作用するモータとしての用途があるためパウチ部分の体積変化よりも大きな変化を起こすことができる。なお同研究では周囲の温度環境の変化によって蝶の羽が稼働する Papilion[4]が示されたが、Liquid Pouch Motors は輻射熱利用を目的としたシステムではないため動作の大きさには限界がある。

そこで本稿では、この Liquid Pouch Motors の基本的構造を利用しつつ新たに輻射熱利用のための層を追加し、輻射熱をエネルギー源として効率的に駆動するパウチモータの設計を行う。

3. 概要

3-1. 提案概要

本稿の提案は、

- 1) パウチに熱吸収層を設けることでパウチモータを輻射熱で駆動させることができる
- 2) 熱吸収層の素材や色によって動作速度を変化させることが可能

である。

Liquid Pouch Motors は、パウチ内部に液体 Novec7000 を少量密封したものである。Novec は 34℃ で気化するため、比較的容易に相変化を起こす。本稿

で追加する熱吸収層により、パウチ表面に太陽光やハロゲン光等を照射すると、その輻射熱により Novec が相変化を起こし膨張する。また照射を止めると収縮する可逆的性質がある(図 1)。

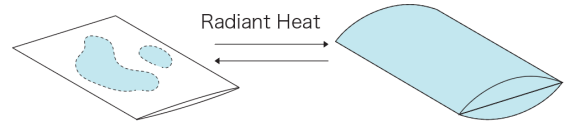


図 1. 本研究で扱うパウチの動作概要

3-2. 構造と素材

パウチの密封には密封層には高いガスバリア性を持つアルミ蒸着フィルム(厚み 50 μm)を用いた。一方アルミ蒸着フィルムは赤外線波長の多くを反射するため、パウチ表面への赤外線照射によってパウチ内の物質を温めるには工夫が必要となる。本稿では輻射熱を吸収する熱吸収層をパウチ表面に追加する方法をとり、アルミ蒸着フィルムが持つ高い熱伝導性を活かして Novec へ効率的に熱を伝えるための設計を行う。なお Liquid Pouch Motors ではより複雑な素材構成を用いることで更に高いガスバリア性を実現しているが、本研究ではアルミ蒸着フィルムの熱伝達性能を利用するために簡易な構造を用いて制作を行った。

4. 熱吸収層の実験と検証

4-1. 熱吸収実験の概要

本項では、図 2 のように熱吸収層における塗装色(塗膜)と素材をそれぞれ熱吸収層 1, 熱吸収層 2 とし、両者のタイプによるパウチ駆動速度の比較実験を行う。

実験プロセスは以下の通りである。

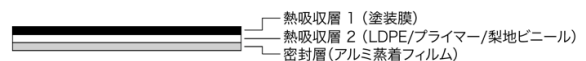


図 2. パウチに用いたフィルムの素材構成

- 1) 素材による変形効率の差異に着目する。3 種類の素材を黒色に塗装(PVC は予め黒色のもの)して変形実験を行い、素材毎の変形速度の違いを確認する。
- 2) 色による変形効率の差異に着目する。1 で比較した中で最も変形速度の速い素材を用い、複色で変形速度を比較する。

表 1 のように、3通りの素材構成を検討する。

熱吸収層 1 はアクリルラッカー(アサヒペン社製)で形成する。熱吸収層 2 は加工性に優れた LDPE(厚み 50

表 1. 検証するフィルムの 3 タイプ

Type	Type A	Type B	Type C
熱吸収層 1	塗膜	塗膜	-
熱吸収層 2	LDPE	メタルプライマー	梨地ビニール
密封層	アルミ蒸着フィルム		

μm), 柔軟性のある PVC (梨地 厚み $80\ \mu\text{m}$), メタルプライマ (「メタルプライマー 非鉄金属下塗り用」アサヒペン) の 3 種類を比較した. アルミ蒸着フィルムは直接塗装するのが難しく下地に塗膜を形成するプライマを用いたため, これも熱吸収層 2 に含めた. なお PVC は伸縮する性質から均一塗装が難しいため有色で販売されているものを使用し, 熱吸収層 1 は付加しない.

素材の溶着は $300\ \text{W}$ のヒートシーラ (HS-300 太洋電機産業) を用いた. 加熱レベルの目盛りは 5 に設定した.

4-2. 動作検証の手法

パウチの膨張速度比較には, Liquid Pouch Motors でも用いられたパウチの曲げアクチュエータとしての利用方法を用いる (図 3). 同研究では一枚の紙の折り曲げが行われたが, 今回は折り曲がりによる歪みを低減する為に板 (アクリル, 厚み $2\ \text{mm}$) を二つ用意し, 並置状態で接面にパウチモータをヒンジ状に設置した. パウチの膨張によって折り目を支点に二つ折りの動作を起こす.

この動作角度を変形比較のための指標とし, パウチの膨張・収縮動作を比較する. 動作角度は支点部分を横から撮影し, PC の画面上で測定する (図 4). 測定は個体差を考慮し, 種別に 3 つ製作しその平均値をとる. 板の大きさは $100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$, パウチは $25\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$ とした.

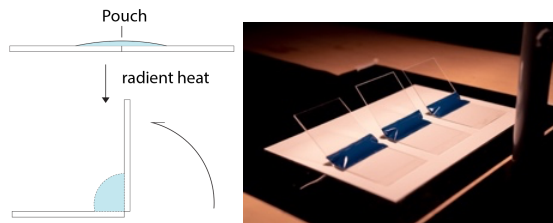


図 3. パウチモータの動作概要 (左) と様子 (右)

本実験では輻射熱検証用の熱源にハロゲンランプ (日動工業 HS-500L), パウチモータを置く面にアルミニウム複合板を用いた. ハロゲンランプは他の照明よりも近・遠赤外線波長を多く持ち, また発光直後から光量が比較的一定なことから採用した. なおランプには前面に防護ガラスが取り付けられているが, 赤外線利用の観点からガラスを取り外して用いる. また, 照明から対象物までの距離は $40\ \text{cm}$ に設置した. 室温は $26\ ^\circ\text{C}$ に設定した.



図 4. パウチモータを用いた膨張動作の計測

4-3. 素材構成による変形速度の変化

本項では素材による変形速度の差異に着目する. 3 種類の素材を黒色に塗装 (PVC は予め黒色のもの) し

て変形実験を行い, 素材毎の変形速度の違いを確認する. ここで検証した素材構成は表 2 の 4 通りとなる.

表 2. 検証するフィルム構成

Type	Type A	Type B	Type C	(熱吸収層なし)
熱吸収層1	塗膜 (黒)	塗膜 (黒)	-	-
熱吸収層2	LDPE	メタルプライマー	梨地ビニール (黒)	-
密封層	アルミ蒸着フィルム			

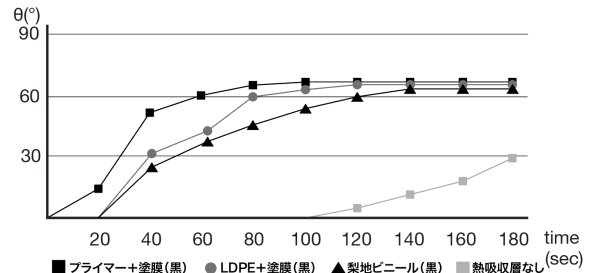


図 5. 熱吸収層の素材による膨張速度の比較

膨張速度の比較結果を図 5 に示す. 熱吸収層の採用により, パウチの変形動作が促進された. 素材による変形速度は, プライマー+ラッカー塗装を重ねたものが最も速い結果となった. なお収縮速度については素材の違いによる差はほぼ見られなかった. 次項ではこのプライマー+ラッカー塗装の構成について, 複数の色を用いて検証する.

4-4. 塗装色による膨張効率の変化

次に, 色による変形速度の差異に着目する. 図 5 で比較した中で最も変形速度の速かった以下の構成を用い, 複色で膨張速度を比較する. 比較する素材構成は表 3 の 4 通りとなる.

表 3. 検証するフィルム構成

Type	Type B			
熱吸収層1	塗膜 (黒)	塗膜 (青)	塗膜 (赤)	塗膜なし
熱吸収層2	メタルプライマー			
密封層	アルミ蒸着フィルム			

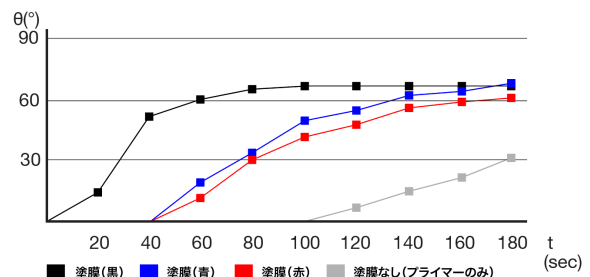


図 6. メタルプライマー層+塗装層の膨張速度

結果を図 6 に示す. 塗装色に応じて, 変形開始までの時間や変形速度が大きく変化する. 一方で青と赤は彩度が近いことから変形速度が似通っている. またプライマーのみでは, 前項の熱吸収層なしのものと殆ど動作が変わらない. また収縮速度について色の違いによる差は見られなかった. 以上の検証から熱吸収層により膨張

速度が向上することを確認した。また素材と色、特に色による熱吸収率の違いが膨張速度に影響する。

4-5. 太陽光環境での動作検証

輻射熱を用いた実験のうち、最も膨張速度の早かった Type A (アルミ蒸着フィルム+プライマ+塗装) について、太陽光の直射日光下での動作実験を実施した。結果は以下の通り。なお実験環境は、9月22日 12:18, 晴, 気温 23.4 度である。結果を図 7 に示す。

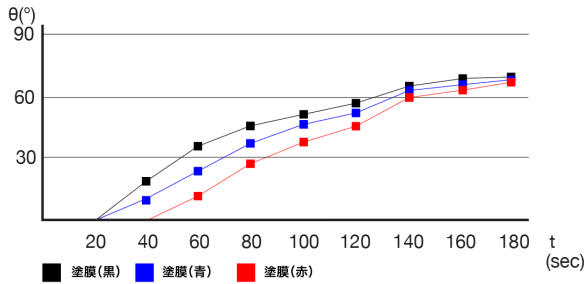


図 7. 太陽光の下での膨張速度

太陽光を用いた場合も色に応じた膨張速度の傾向は共通であるが、黒は動作開始が遅くなり、一方で赤・青は早まった。光の性質によって膨張変形動作が異なることが予測されるため、用いる熱源ごとにその特性を把握することが必要である。

5. 日射に応じて開閉するファサード

本手法を用いた応用事例として、一定量の日光の照射により割れ目が開口し、日光が弱まると閉じるファサードを制作した (図 8)。

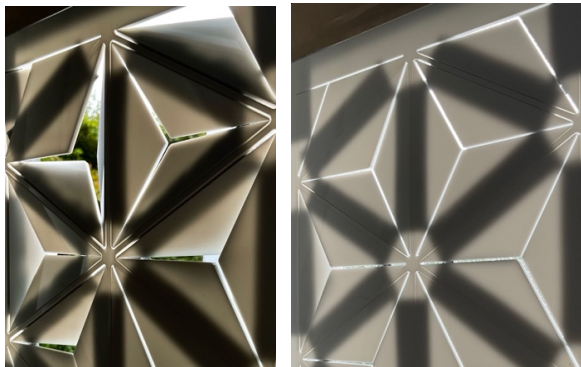


図 8. 動作の様子(左:日光照射状態, 右:照射なし)

図 8 は、日光照射により駆動させた様子である。太陽光の輻射熱により駆動したパウチモータが羽部分を持ち上げ、開口動作を発生させる (図 9 左)。

ファサードは亚克力板 (270mm×380mm, 厚み 2mm) とパウチモータ (15mm×80mm) で構成する。なお、パウチモータは Type A の素材構成 (アルミ蒸着フィルム+プライマ+塗装) を用いた。亚克力板を図 9 右のパターン (黒線部) にレーザーカッターでカットし、稼働する羽部分と固定されるファサードのフレーム部分とに切り分け、羽部分とフレーム

部分との接合部にパウチモータを設置した。軽量なパウチモータで薄手の亚克力板を稼働するシステムとしたことで、市販の両面テープで設置が可能なほど軽量に、輻射熱を利用して形態変化する簡易的なファサードを構築できた。

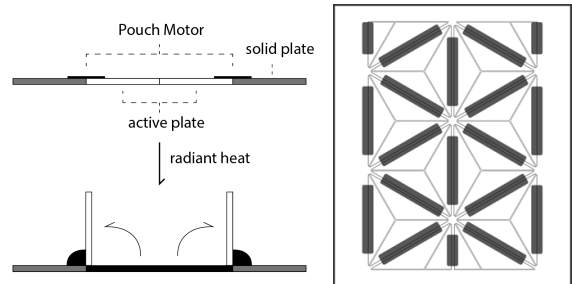


図 9. 左: アクリルカットパターンとパウチの設置位置, 右: 稼働構造の模式図

6. むすびと今後の課題

本稿では輻射熱により動作する軽量構造の実装のため、輻射熱で駆動する相変化パウチモータを提案し、その手法の検討及びアプリケーションの制作を行った。その結果、パウチモータに熱吸収層を設けることで輻射熱によって膨張・収縮し、また素材や色の違いによりその動作速度が変化することを確認した。また輻射熱を利用して形態変化するファサードを制作した。

今後の課題として、ガスバリア性の向上が挙げられる。先行研究 Liquid Pouch Motors では本稿の事例よりもガスバリア性が高く動作安定性の高いものが用いられているが、本稿では伝導熱利用の性質上一部のレイヤーを除去している。例えばアルミ蒸着フィルムと熱吸収層の間に新たなガスバリア層を設けるなどが考えられるが、本稿では検証には至らなかった。ガスバリア性と集熱構造を両立し、かつインフレータブルの柔軟性を損なわない素材構成についても検討したい。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP20H05960 の支援を受けたものである。

参考文献

1. Yong, Jae, and Doris Sung. "Invert Auto-Shading: Daylighting Performance and Visual Comfort Analysis of Dynamic Thermostatic Bimetal Shading." (2020).
2. H. Kuboki and H. Tanaka, "Breathing Facade," <https://www.archifab.co/reactivewall>. (2022 年 9 月 19 日閲覧)
3. Self-Assembly Lab, MIT + Ministry of Supply + Hills Inc. + U. Maine + Iowa State U. <https://selfassemblylab.mit.edu/climateactive-textiles> (2022 年 9 月 19 日閲覧)
4. Narumi, Koya, et al. "Liquid pouch motors: Printable planar actuators driven by liquid-to-gas phase change for shape-changing interfaces." *IEEE Robotics and Automation Letters* 5.3 (2020): 3915-3922.