

ハイグロモーフを用いた松かさアクチュエータ

田丸純太郎^{†1} 油井俊哉^{†1} 橋田朋子^{†1}

概要：松かさは湿気により開閉する性質（ハイグロモーフ）があることが知られている．本研究では特に松かさを1枚の鱗片に分解しても湿気により変態することに着目し，2枚の鱗片を組み合わせることで適切な水分の供給と乾燥を行うことで，所望の角度に開閉できる開閉アクチュエータを提案する．さらにこの2枚の鱗片による開閉アクチュエータを任意に組み合わせることで鱗片の高さを任意に変えられる高さ変化アクチュエータと，2枚の鱗片による開閉アクチュエータと凹凸の接触面を組み合わせることで鱗片を移動できる移動アクチュエータを実現する．本稿では鱗片の変態特性の計測実験の結果との知見に基づいた機構の詳細を示す．

Pine Cone Actuator Using Hygromorph

JUNTARO TAMARU^{†1} TOSHIYA YUI^{†1} TOMOKO HASHIDA^{†1}

Abstract: Pine cones open and close through a moisture driven process called hygromorph. In this study, focusing on the fact that pine cones are composed of a lattice of scales that transform by moisture, we propose an opening / closing actuator that can be opened and closed at a desired angle by providing suitable moisture and aridity. In addition, the height of a scale can be arbitrarily changed by arbitrarily combining the opening / closing actuators. We realize a moving actuator that can move a scale by combining a height change actuator, the contact surface of an opening / closing actuator, and the unevenness of two scales. In this paper, a mechanism based on the findings of the experimental measurement results of the transformation characteristics of scales is shown.

1. はじめに

松かさは湿度の多い環境ではかさを閉じ，乾燥した環境ではかさを開く性質があることはよく知られている．この性質はハイグロモーフと呼ばれる．最近ではこのような松かさの湿度による変態の仕組みに着想を得た様々な仕組みが提案されている．例えば服を着た人の汗によって濡れると開き，乾燥すると自動的に閉じることで服の中の湿度を調節するスマートファブリック（繊維）[1]や，雨が降ると天井が閉じ，晴れると天井が開く屋根（建築物）[2]などが挙げられる．しかし，松かさそのものを使用して，湿度による開閉の性質を生かし，新たなモノや機能を作り出す試みは活発に行われていない．

一方，筆者らは実験を重ねる中で，松かさを1枚の鱗片に分解しても湿気により変態（開閉）することに気が付いた．そこで本研究ではこのような鱗片の性質に着目し，2枚以上の鱗片を組み合わせることで適切な水分の供給と乾燥を行うことで，所望の角度に開閉できる開閉アクチュエータを提案する（図1）．この鱗片による開閉アクチュエータは，積層させることで高さを変えられる高さ変化機構に展開することや，凹凸の接触面を組み合わせることで鱗片そのものが移動していく移動機構に展開することも可能である．本稿ではまず，1枚の鱗片の水分量と時間変化に応じた変態特性を明らかにする実験の結果を報告した上で，松かさ

アクチュエータの基本原理と高さ変化アクチュエータや移動アクチュエータの詳細について述べる．

2. 関連研究

開閉の機能をもったアクチュエータを用いて様々な機構を提案した関連研究がある．その例としてペーパーメカトロニクス[3]があり，印刷した紙が自律的に折り曲がることを利用してロボットの構造を組み立てる研究が挙げられる．また，電気回路と一体で印刷可能なアクチュエータによる動的インターフェイス及びロボットの試作[4]では，熱源によって駆動する印刷可能なアクチュエータを提案している．これらの研究に対し本研究は，素材が自然物である松かさであることや，印刷技術を必要とせず水分のみを必要とすること，開閉に可逆性を持たせることが可能である．

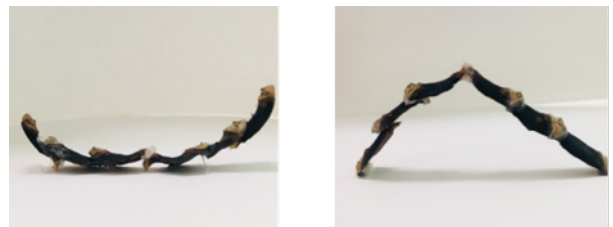


図1 開閉アクチュエータの動作．

(左)乾燥時，(右)水分供給時

Figure 1 Operation of opening / closing actuator. When left is dry, when right is moisture supply

^{†1} 早稲田大学
Waseda University

3. 松かさのハイグロモーフの原理

松かさがハイグロモーフにより開閉する原理を以下に示す(図2)．松か사의鱗片は内側と外側異なる繊維で構成されている．外側の繊維は吸水性の維管束が厚いため、乾燥すると維管束が縮み強く引っ張る力を生じ、鱗片を開かせる．反対に、水分を得ることで外側の繊維の引っ張る力が緩み鱗片を閉じさせるような仕組みである．湿度変化により開閉するこの原理は、乾燥時に松か사의内側にある種子を遠くに飛ばせるようにするためである．

4. 鱗片の変態特性に関する基礎実験

ここでは1枚の鱗片の変態特性を明らかにするため、松か사의鱗片が起こすハイグロモーフを研究したE. Reyssatら[5]の実験を参考に、鱗片に与える水分量を変えた時の変態の角度や、開閉の時間特性などを検討する．図3に示すように、松か사의鱗片が水分を吸収する前の開いている時の角度と水分を得て閉じる角度のなす角を θ とする．

4.1 実験1：水分量に対する鱗片の角度

実験1では、1枚の鱗片に与える水分量を変えた時の得られる角度の関係を明らかにする．本実験では松か사의鱗片の外側に水分を0～1400mgまで200mgごとに増やしながら与え、松か사의鱗片の開閉角度 θ の計測をした．計測は3回行った．図4に水分量と松か사의鱗片の開閉角度 θ の平均値の関係を示す．このグラフより、松か사의鱗片の外側に約1000mgの水分を与えることで鱗片は最大角度を示すことが読み取れ、その角度はおよそ 50° であった．

4.2 実験2：経過時間における開閉角度

実験2では、一枚の鱗片における一定の水分を与えてからの経過時間における開閉角度の関係を明らかにする．本実験では実験1の結果に基づき、最大角度を示すことのできる1000mgの水分を松か사의鱗片の外側に与え、経過時間に伴う角度 θ の測定を行った．図5に水分吸収時から乾燥時までの角度をまとめて示す．このグラフより、水分を完全に吸収する時間は70分かかり、乾燥する時間は350分かかると見て取れる．つまり、乾燥にかかる時間は水分を吸収する時間の約5倍かかることがわかった．

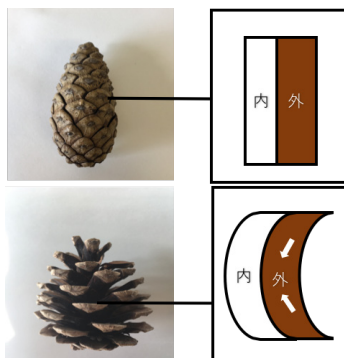


図2 松か사의ハイグロモーフの原理

Figure 2 Principle of opening and closing

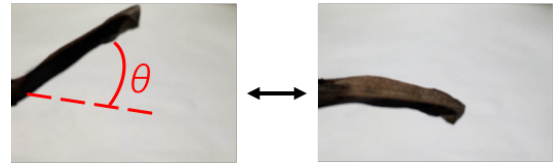


図3 松か사의鱗片の開閉角度 θ

Figure 3 The opening and closing angle θ of the scales of the pine cone

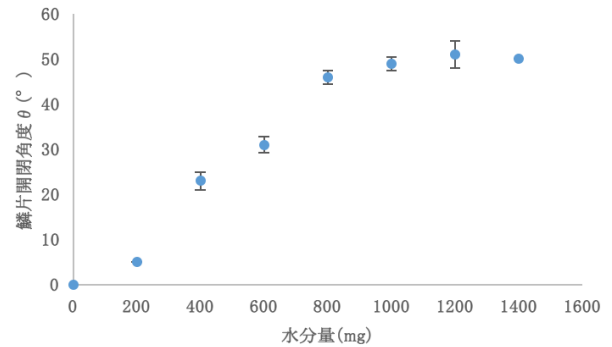


図4 水分量と松か사의鱗片の開閉角度 θ の関係

Figure 4 The opening / closing angle θ of the pine cones to the moisture content

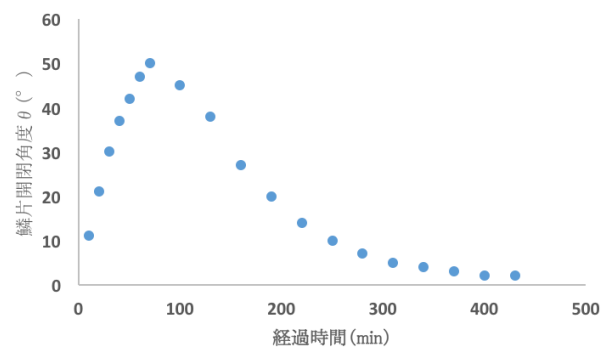


図5 水分供給より経過時間と鱗片の開閉角度 θ の関係

Figure 5 Relation between elapsed time and angle

5. 松かさアクチュエータ

松か사의鱗片を組み合わせて接合することによってアクチュエータを提案する．作成したアクチュエータは開閉アクチュエータ、高さ変化アクチュエータ、移動アクチュエータの3種である．これらのアクチュエータの鱗片の接合の手法としてはグルーガンを利用した．ここで、基礎実験では1枚の鱗片の変態特性を計測したが、本アクチュエータでは2枚以上の鱗片を組み合わせて用いる．アクチュエータの実装に先立ち2枚の鱗片を接合し、十分な水分を与えて開閉角度を計測したところ 108° であった．基礎実験時で求めた鱗片1枚当たりの同条件の開閉角度から得られる角度を2倍にして算出した予測角度は 100° であるが、鱗片1枚の場合でも開閉角度の誤差は 5° 程度生じることから接合による開閉角度への影響は少ないと考えている．

5.1 開閉アクチュエータ

2枚以上の松かさの鱗片の末端を接合することにより、松かさ開閉アクチュエータを提案する。開閉のパターンと動作の様子を図6に示す。開閉パターンは図6(a)の鱗片の内側同士を接合した場合、図6(b)の外側同士を接合した場合の2パターン作成した。内側同士を接合した場合は、水分を吸収すると閉じる仕様に、外側同士を接合した場合は、水分を吸収すると開く仕様になっている。このように、開閉の動作を鱗片の組み合わせ方によって変えることが可能である。

5.2 高さ変化アクチュエータ

3枚以上の松かさの鱗片を接合することにより、高さ変化アクチュエータを提案する。さらに、各鱗片の末端に鱗片を連ねて接合していくことで、より高い高さを作り出すことができる。床面に安定して立たせるため、鱗片を3枚接合したものを高さアクチュエータの基本型(1段)とする。図7に1段・2段(6枚)、3段(9枚)と連ねて接合したものの例を示す。図7(a)が各アクチュエータの乾燥時、図7(b)が水分吸収後の形である。さらに、参考として表7に示した高さ変化アクチュエータの高さの変化を2度計測し、その平均の値を表1に示す。段数に応じて高さがおおよそ2倍、3倍と変化することがわかる。なお、計測の結果、組み合わせた鱗片の枚数に関係なく、図5の経過時間に従い、水分吸収と乾燥が行われることがわかった。

5.3 移動アクチュエータ

開閉アクチュエータの応用として、開閉アクチュエータに凸凹の接触面を加えることにより移動を可能とする移動アクチュエータを提案する。本稿で使用した開閉アクチュエータは図6(a)の開閉アクチュエータの原理を用いており、2枚の鱗片を連ねたものと、アクチュエータを支え安定させるために2枚の鱗片が一枚ずつ横付けにされている。なお、2枚の支えには防水加工がされており、水分供給による開閉は見られず、鱗片を2枚連ねた部分のみが、水分供給時に閉じ、乾燥時に閉じる仕組みになっている。また、床面は緩やかな面と直角な面が交互に連なって出来ており、3Dプリンターを用いて作成した。これらの仕組みにより、移動アクチュエータは水分供給された時に緩やかな面を滑るように閉じ、乾燥した時には、直角の面を押し出すことを繰り返すことによって移動する仕組みである。本稿では2mm間隔の凹凸の床面を使用した(図8)。この床面において一回あたりの水分供給、乾燥の一連の動作で進んだ移動アクチュエータの距離は4mmであった。

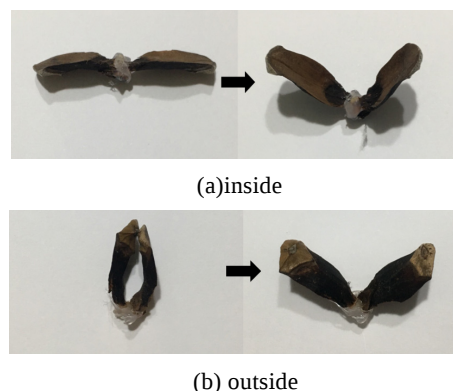


図6 開閉パターンとその動作

Figure 6 Opening and closing pattern and its behavior

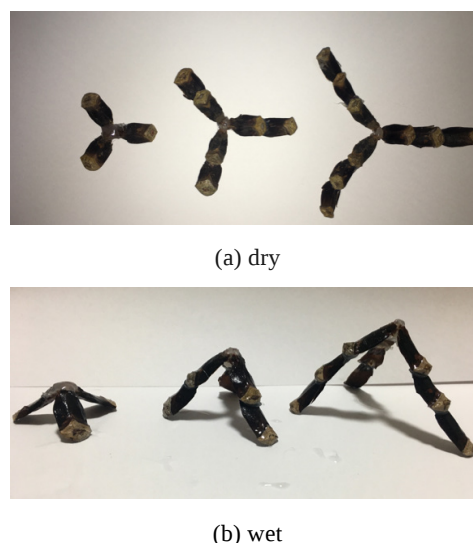


図7 高さ変化アクチュエータ(1段・2段・3段)

Figure 7 Height actuator of each pattern: basic form, 2 steps, 3 steps

表1 高さアクチュエータの段数とその高さ

Table 1 Number of stages of the height actuator and its height		
基本	2段	3段
15mm	32mm	49mm



図8 移動アクチュエータの動作(左から乾燥1回目、水分供給1回目、乾燥2回目)

Figure 8 Operation of the moving actuator (1st drying from the left, 1st moisture supply, 2nd drying)

6. 松かさアクチュエータの応用例

6.1 高さ変化アクチュエータを用いた花壇の水やりの提示

高さ変化アクチュエータの応用例として、花壇の水やりのタイミングを提示する仕組みが考えられる。高さ変化アクチュエータをそのまま花壇の横に設置することにより、水やりが足りている時には高くなり、水やりが足りていない時には低くなることで水やりのタイミングをその高さで提示することができる。また、松かさ自体が自然物であるのでより自然に溶け込むことが可能である（図9）。

6.2 移動アクチュエータを用いた雨による累積移動

移動アクチュエータの応用例として、雨の降った回数に応じて累積移動する仕組みが考えられる。屋外や、湿度変化の大きい場所に置くことによって、雨が降り湿度変化した際に前へ進む。末端とメモリの重なったところを読み取ることによって設置した日から雨が何回降ったのかをさりげなく提示することが可能である（図10）。

7. おわりに

本稿では、湿気により開閉する松かさのハイグロモーフを用いたアクチュエータを提案した。また基礎実験より松かさの鱗片に供給する水分量 1000mg で鱗片の最大角度になること、その時の最大角度が 50° であることが分かった。これらの結果を踏まえ、今回開閉アクチュエータ、高さ変化アクチュエータ、移動アクチュエータの3種を作成しそれらの有用性を示した。

今後の課題としては、より多くの種類の松かさをを用いたアクチュエータの考案と検討が挙げられる。本稿では同じ大きさで同じ種類から取れる松かさの鱗片を使用して各アクチュエータを作成したが、松かさには多数の品種があり、一つの種の中でも部位によって取れる鱗片大きさや形は異なる。そのため、本稿で紹介したもの以外にも、品種、部位、組み合わせを変えることによって無数の種類の松かさアクチュエータを作成することができる。一方で、一様でないため、より正確なデータをとっていくことが必要である。より正確なデータを算出し、与える水分量によって制御すること、より多くの組み合わせを見つけ出し、機械として組み込めるようにすること、また、移動アクチュエータで鱗片の一部を3Dプリンターで作った人工物にすることで、水分の与え方をかえなくても移動する仕組みを作ることを今後の課題とする。



図9 高さ変化アクチュエータの水やりタイミングの提示

Figure 9 Present the timing of watering according to height.



図10 進んだ距離による雨の降った回数を累積

Figure 10 Accumulate the number of times the rain has fallen due to the distance

参考文献

- [1] 加藤康平. スマートファブリックヒータの開発. トヨタ紡織, 7, 25-28. 2013. (2017/12/18 参照)
- [2] Water-Reacting Architectural Surface. https://www.gizmodo.jp/2015/07/post_17554.html (2017/12/12 参照)
- [3] 重宗宏毅. 有機アクチュエータを用いた印刷方による髪ロボットの製作: ペーパーメカトロニクス の提案. Proceedings of JSME annual Conference on Robotics and Mechatronics, 2A2-V05_1-2A2-V05_4. (2017/12/18 参照)
- [4] 中原健一, 鳴海紘也, 河原圭博. 電気回路と一体で印刷可能なアクチュエータによる動的インターフェイス及びロボットの試作. 情報処理学会第79回全国大会 4-327-4-328. (2017). (2017/12/18 参照)
- [5] E. Reyssat, L. Mahadevan. Hygromorphs: from pine cones to biomimetic bilayers, J. R. Soc. interface 6, 951-957. (2009), (2017/12/18 参照)