フジシール財団　研究助成事業

成果報告書

公益財団法人フジシール財団

理事長　岡　﨑　裕　夫　殿　　報告日２０２４年３月２０日

研究課題	緩衝性能を有する熱を使わずフィットする紙パッケージの開発		助成金額 300 万円
ふりがな	しげむね　ひろき	研究助成申請年度	
研究者氏名	重宗　宏毅	2022 年度	
所属機関	芝浦工業大学	研究期間	
		2022 年 4 月 1 日～2023 年 3 月 31 日	
役　　職	准教授		
連絡先　所属機関	〒１３５－８５４８ 東京都江東区豊洲３－７－５ TEL　０３（５８５９）８２０７　　E-mail　hshige@shibaura-it.ac.jp		

下記の通り、研究成果を報告いたします。

記

１．研究成果の概要（こちらに報告いただいた内容はそのまま当財団ホームページ上で公開します。）

研究の背景としてソフトロボティクスがある。従来の硬い材料ではなく大変形できる柔らかい材料を用いることで、生物のように環境に対して適応するロボットを開発することを主目的とした研究分野である。海外では数億円規模のプロジェクトが立ち上がり、国内においても科学研究費助成事業内の新学術領域研究にて「ソフトロボット学」が立ち上がるなど台頭著しい。本研究ではソフトロボティクスのパッケージング技術への応用を睨み研究開発を行った。申請者はソフトロボットの１つとして印刷法と折紙技術を利用したペーパーメカトロニクスを提案している。電気回路を搭載した紙材料を自動的に折ることで折紙デバイス・折紙メカトロニクスを作製する。本申請では静電チャック機能を有した紙デバイスに緩衝機能を折り紙技術によって搭載することで機能を両立することを目標とした。

主に開発した技術は１．ノンサーマルフィット技術と２．パッケージ向け緩衝構造の２種類である。以下に順を追って詳細を説明する。

１．ノンサーマルフィット技術

ノンサーマルフィット技術では、自動で折れ曲がる紙面上に櫛型構造電極を形成することで静電チャック現象を実現した。静電チャックは、電圧を印加し静電分極・誘電分極を制御しクーロン力によって物体に接着する技術である。平面電極、櫛型電極などに電圧を印加することで接着が実現されている。櫛型電極の方が漏れ電界が大きくなるため接着力が向上することが知られているが、電極形成の難易度が上がる。我々はインクジェット印刷技術とカッティングプロッタを利用することで精密な櫛型電極を紙面上に形成する手法を開発した。実際に作製したデバイスを図１に示す。電極材料はインクジェット印刷で形成する場合は銀、カッティングプロッタ

で形成する場合は銅となる。

上記で作製したデバイスの接着力を評価するために、実験系を構築した。接着デバイスをロードセルに接続し、万能圧縮試験機（MCT-2150W、A&D）によって一定速度で引張した際の接着力を評価した。電圧は高電圧アンプリファイア（HEOPT、松定プレシジョン）を用いて印加した。櫛型の線幅T_wと線間隔T_sを変化して５種類の電極を比較したところ、最適な電極パターンを同定した。

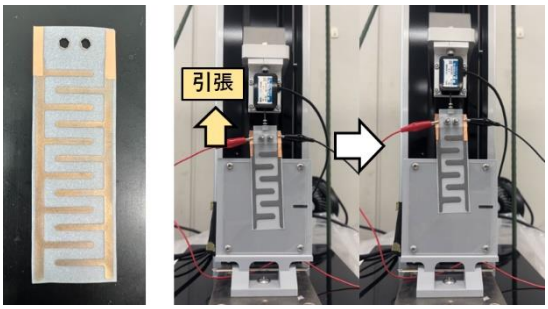

図１．櫛型電極と接着力評価実験系

静電チャック技術は高電圧を要するが、パッケージングとして用いる際に、高電圧アンプリファイアは初期コスト/設置個所の制約を大きくし社会実装の障壁となる。我々は静電チャック技術に必要な電圧と周波数を出力可能な高電圧回路も開発した（図２）。

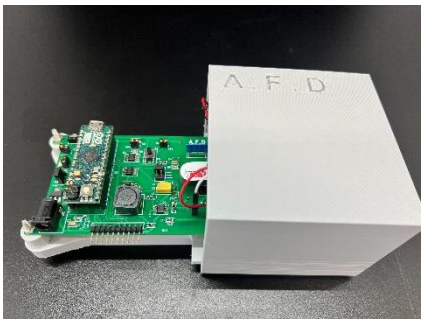
図２．静電チャック制御用駆動回路

また、紙の自律構造形成技術を用いた熱を使わないフィット技術として水爆構造による双安定メカニズムを利用した技術を開発した。双安定メカニズムを利用することで、オープン・フィットの移行時のみにエネルギーが必要となり、状態を維持するためにはエネルギーを必要としない実用的な省エネルギーパッケージとして期待できる。

２．パッケージ向け緩衝構

静電チャック用櫛型電極を搭載可能な緩衝構造として複数のプロトタイプを考案し緩衝性能を評価した。実際に考案したプロトタイプを図３に示す。それぞれ、緩衝性能と静電チャックとの統合性を睨みながら設計した。機械圧縮試験評価をすることで、パターン３の構造が最も衝撃吸収性能が良いことが判明したため、３章において静電チャック技術の統合を試みた。また、緩衝構造として密度当たりのエネルギー吸収量の高いハニカム構造を自律構造形成技術によって作製することに成功した。セルサイズ・セルウォールの高さが異なる構造を作製することに成功し、それぞれの設計がエネルギー吸収性能に与える影響を調査した。ハニカム構造は接地面積が小さく静電チャックと統合することは難しいため、今後設計を改良し統合を目指す。

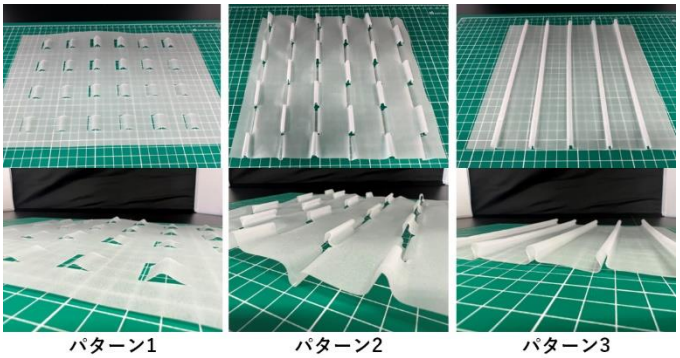

図３．パッケージ向け緩衝構造プロトタイプ

３．技術統合

最終的に、今回開発したノンサーマルフィット技術とパッケージ向け緩衝構造を統合し、緩衝性能を有する熱を使わずフィットする紙パッケージを開発した。図４に実際に開発したデバイスの様子を示す。実際にパッケージ向け緩衝構造内に静電チャック用の櫛型電極を実装し、電圧を印加することによって緩衝構造を静電チャック現象によって対象物にフィットすることに成功した。今後は、静電チャック現象の低電圧化や、緩衝構造の改良、センサ・エナジーハーベスティング技術との統合も含めたエッジデバイスパッケージの実現に向けて引き続き研究開発を進める。

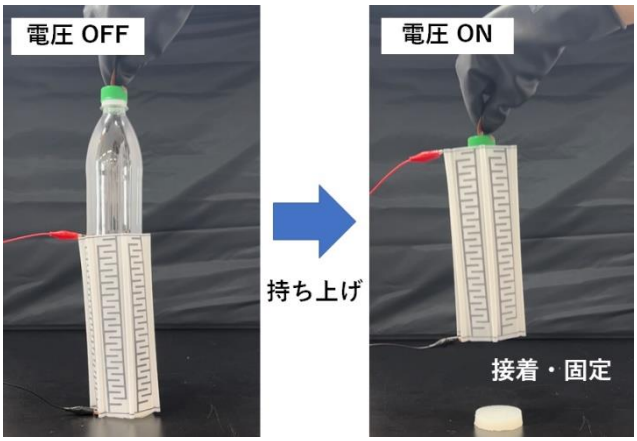

図４．デモンストレーション

２．研究成果のパッケージ産業への貢献の可能性（こちらに報告いただいた内容はそのまま当財団ホームページ上で公開します。）

本研究で申請者は緩衝性能を有する熱を使わずフィットする紙パッケージを提案した。パッケージ分野への貢献として２つある。１つ目は熱を利用しない静電チャック技術を応用するため耐熱性の低い材料に対して特性を損なうことなくフィットする。２つ目は緩衝性能を持つため物流工程での破損を抑制できる。緩衝性能には自動的に折り紙構造を形成する自律構造形成技術を用いることで追加の部材なしで効果的に内容物を保護できる。静電チャック技術と自律構造形成技術に関して専門とする申請者がパッケージの観点から両技術を考究し発展に貢献した。

社会的な貢献は２つある。１つ目はパッケージ材料として紙を用いるため SDGs にて期待される循環型開発に資する点である。紙材料を用いて作製することによって古紙回収ルートによってリサイクル可能な環境負荷の低いパッケージとなることが期待できる。２つ目は緩衝性能によるフードロスの抑制がある。熱に弱い物として裂傷からの腐食が促進する青果物がある。緩衝機能を有した青果物パッケージング技術を開発することによって、流通下で発生するフードロスを抑制し強靭な農業・食品バリューチェーンに資するデバイスとする。

本研究はソフトロボティクス技術のパッケージング応用の先駆けとなる研究である。ソフトロボティクスは柔軟材料の採用と制御の面でパッケージング技術との親和性は高いと期待している。今後さらに材料の厳選・設計の改善を行うことで、社会に新しい価値を提供できるパッケージングの開発に貢献する。

３．学会発表、学会誌等への論文掲載、産業財産権出願などの実績（現時点で未発表・未掲載・未出願のため、上記「１．研究成果の概要」、「２．研究成果のパッケージ産業への貢献の可能性」の当財団ホームページ上の公開の延期を希望される場合、その旨 記載してください。）

1. 【査読付き英文学術論文誌 IF 9.4】Naritomi, D., Hosoya, N., Ando, G., Maeda, S., & Shigemune, H. (2022). Creation of origami-inspired honeycomb structure using self-folding paper. Materials & Design, 223, 111146.
2. 【査読付き英文学術論文誌 IF 5.2】Okamoto, S., Fukatsu, Y., Premachandra, C., & Shigemune, H. (2024). Paper based bistable origami gripper to make quadcopters multi-functional. IEEE Robotics and Automation Letters.
3. 【査読付き国際学会】Okamoto, S., Akitsu, Y., & Shigemune, H. (2023, October). Electrostatic adhesion technology based on a folded paper. In 2023 IEEE 12th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE) (pp. 1038-1039). IEEE.
4. 【査読付き国際学会】Okamoto, S., Premachandra, C., & Shigemune, H. (2022, October). Development of lightweight soft gripper for quadcopter-based grasping operations. In 2022 IEEE 11th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE) (pp. 241-242). IEEE.
5. 【査読付き国際学会】Naritomi, D., Waragai, N., Minamide, H., Ueno, S., & Shigemune, H. (2022, October). Paper cushioning structure with an embedded printed sensor. In 2022 IEEE 11th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE) (pp. 243-244). IEEE.
6. 【国内会議（発表・受賞）】成富大智, 藁谷尚哉, 南出浩章, 上野聡司, 重宗宏毅、ポストハーベストロス低減に向けた自己折畳ハニカム緩衝材の検討、2023 年 農業施設学会 学生・若手研究発表会 2023 年 2 月 18 日
7. 【国内会議（発表・受賞）】南出浩章, 成富大智, 重宗宏毅、Paper-based self-folded honeycomb device、第 2 回グリーンエレクトロニクス国際シンポジウム 2023 年 2 月 16 日

成果報告書の作成上の留意事項

(1)　当財団指定の様式（Ａ４サイズ）を用い、報告書の様式は変更しないでください。「１．研究成果の概要」、「２．研究成果のパッケージ産業への貢献の可能性」、「３．学会発表、学会誌等への論文掲載、産業財産権出願などの実績」の間での行数の変更は可能ですが、総ページ数を３ページとしてください（本留意事項を除く）。

(2)　日本語で作成してください。但し、英語での業績、論文、成果は英語のまま記入してください。

(3)　フォントは MS明朝の10.5ポイントを使用してください。

(4)　すべてのページのフッター部分に研究者の氏名を記入してください。

以上