

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 崎 裕 夫 殿

報告日 2025 年 5 月 31 日

研究課題	切り紙により誘起される 3 次元構造を用いた緩衝パッケージの開発	助成金額
		100 万円
助成名	若手研究助成	
ふりがな	こじま ともひさ	研究助成申請年度
研究者氏名	小島 朋久	2024 年度
所属機関	埼玉大学	研究期間
		2024 年 4 月～2025 年 3 月
役 職	准教授	

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

本研究では、日本古来の切り紙技術を応用した 3 次元構造を用いた緩衝パッケージの開発を目標として、切り紙に引張力を加えて展開することで製造されるハニカム構造の力学的特性を調査した。この構造はシート状の材料に特定のスリットを加工し、引張力を負荷することによって展開して壁面が立ち上がり、緩衝性能を持つようになる(図 1)。スリットを加工するのみで製造可能であるため、製造工程が簡便であり、かつ緩衝材の資源削減にも寄与することが期待できる。またスリットの形状を変化させることで対象物によりフィットする構造が実現できる可能性がある。

対象物へのフィット性および緩衝性能は、引張時の構造の伸縮性と展開後の圧縮特性に密接に関係すると考えられる。そこで本研究では、切り紙により誘起されるハニカム構造に対して引張試験および圧縮試験を実施し、伸縮性とエネルギー吸収特性を定量的に評価した。

材料には厚さ 75 μm の黒色ポリエステルフィルムを使用し、レーザー加工機 (Podea-01, Podea) にてスリットを加工して試験片を作製した。スリットのパラメータとして、スリットにより形成される壁面高さ H 、スリット長さ L を変化させ、 $H:L = 1:1, 1:0.5, 0.5:1$ の 3 種類の試験片を作製した。

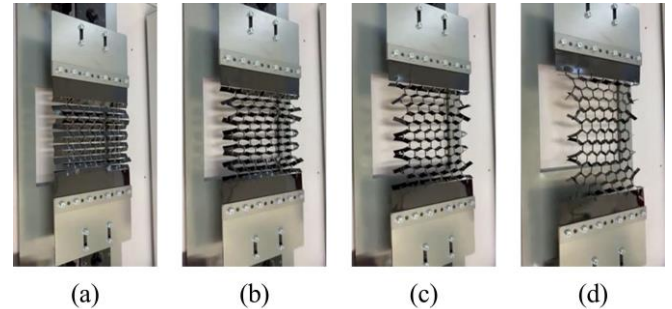


Fig. 1 Honeycomb structure formed by applying a tensile load to the Kirigami sheet

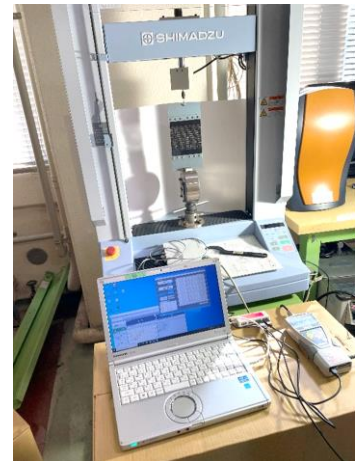


Fig. 2 Tensile test setup

まず、スリットを加工した試験片に対して万能試験機（AGS-X、島津製作所）を用いて引張試験を行った（図2）。引張試験により得られた荷重－変位関係から、切り紙ハニカム構造の伸長変形には次の3つの段階があることを確認した。第一段階は線形弾性変形領域であり、引張力によってスリットが開き始める。第二段階は荷重が増加せず変位のみ増加するプラトー領域であり、スリット間の帯状の部分か回転を伴って座屈変形し、面外に立ち上がることでハニカムのセル壁を形成する。第三段階は配向領域であり、座屈変形の進行が終わり、セル壁が配向することによって荷重が増加する。 $H:L$ の比率が異なるそれぞれの構造の試験結果から、 $H:L=1:0.5$ では伸長に必要な荷重が大きく、最大伸長量が小さく、 $H:L=0.5:1$ では小さい荷重で大きく伸長し、 $H:L=1:1$ は他の2種類の間mediateな特徴を示した（図3）。緩衝材料として使用することを考えると、小さい荷重でよく伸長する構造は保護対象物の形状によく追従する。したがって、スリット長さ L に対する壁面高さ H の比率が小さい構造の方がフィット性に優れることを確認した。

次に、レーザー変位計（LK-G5000、KEYENCE）を用いて引張力負荷時にセル壁が立ち上がることにより生じる面外変位を測定した（図4）。面外変位は構造を引張った際の変位とともに増加し、荷重変位関係のプラトー領域にて収束し、最大値を示した。面外変位はセル壁が座屈し立ち上がる際に元の面に対して成す角度に依存しており、面外変位が最大値に近づくにつれてセル壁の元の面に対する角度は90度に近づく。本研究での緩衝性能の評価としてはハニカムの面外方向を対象としているため、セル壁の成す角度が90度に近い方が緩衝性能が大きくなることが予測できる。測定結果より、切り紙から誘起されるハニカム構造の面外方向の緩衝性能を十分に引き出すための荷重・変位条件を明らかにした。

さらに、形成されたハニカムの面外方向圧縮時のエネルギー吸収特性を得るため、万能試験機（AG-X、島津製作所）を用いて、立ち上がった壁面に対する圧縮試験を行った（図5）。圧縮試験の結果得られた荷重－変位関係はまず線形弾性領域を示し、その後、元の面に対して面外方向2方向に立ち上がったセル壁が段階的に座屈することにより、2段階での荷重のピークとプラトー領域が現れ、最後に構造が緻密化し、荷重が増加した。面外変位が最大値に収束するまで切り紙構造を引張ってから圧縮したが、圧縮前に与える変位（引張力）の大きさによって圧縮時の荷重が変化し、結果としてエネルギー吸収量も異なる結果になった。これは立ち上がったセル壁に引張り応力が発生することで座屈が発生しにくくなるためであると考えられる。

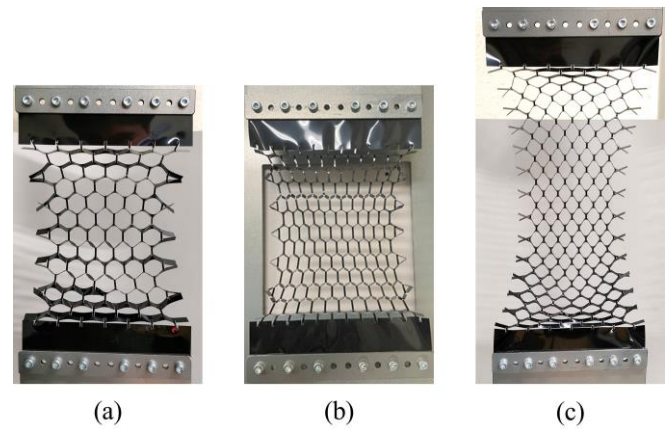


Fig. 3 Tensile test specimen with slits opened during the test; $H:L =$ (a) 1:1, (b) 1:0.5, (c) 0.5:1

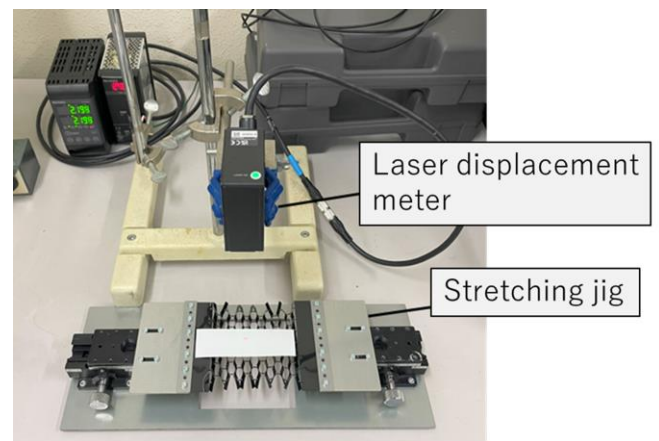


Fig. 4 Measurement of out-of-plane displacement due to the slits opening

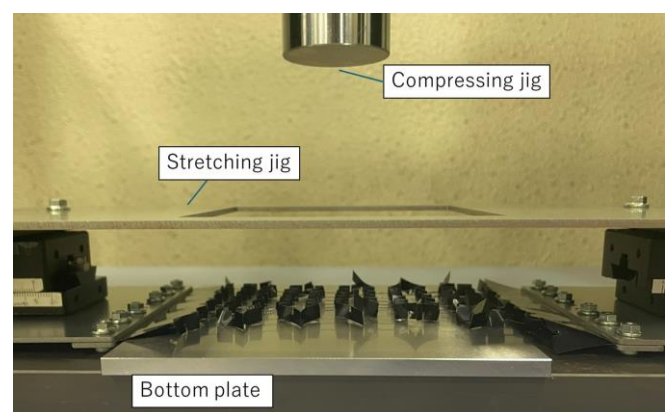


Fig. 5 Compression test set up

圧縮試験の荷重－変位関係を緻密化開始点まで積分することで、エネルギー吸収量を算出した。今回調査した条件の中では $H:L=0.5:1$ の構造が最もエネルギー吸収量が小さく、 $H:L=1:0.5$ の構造が最も大きかった。ただし、 $H:L=1:1$ の構造のエネルギー吸収量は $H:L=1:0.5$ と同等の値であり、差は 10%であった。緩衝材料としての応用を考えると、より小さい荷重で良好な伸長性を示すことから、今回の条件の中では $H:L=1:1$ の構造が対象物へのフィット性が優れ、緩衝性能も大きいと判断された。

以上の結果より、切り紙によって誘起されるハニカム構造の引張り時の伸縮性（対象物へのフィット性と関係）および圧縮時のエネルギー吸収性能（緩衝性能と関係）を評価し、壁面高さ H 、スリット長さ L の比率がそれらに与える影響を明らかにした。

2. 研究成果のパッケージ産業への貢献の可能性

持続可能な開発目標（SDGs）の達成に向けて、パッケージ分野においても省資源化や工程の簡素化が求められている。本研究では、日本古来の切り紙技術を応用した 3 次元構造を用いた緩衝パッケージを提案しており、その伸縮性およびエネルギー吸収特性を定量的に評価した。本構造はシート状の材料に切込みを加工し、引張力を負荷するだけで容易に製造可能である。これにより、汎用的にどのようなパッケージ材料にも緩衝性能を付与可能であり、かつ対象物の形状へ柔軟にフィットするパッケージを創出できる可能性がある。本研究の成果は、以下の 3 点においてパッケージ産業への貢献の可能性がある。

1) 省資源化と工程の簡素化による環境負荷の低減

緩衝性能が求められるパッケージにおいて、パッケージ材料の一部を延長し、適切な切込みを加工して引張ることで、追加の緩衝材を使用せずに緩衝性能を持たせることができる。これにより、使い捨ての緩衝材の削減や梱包工程の簡略化が実現でき、省資源化と環境負荷の低減に貢献する。

2) パッケージ機能の拡張と新たな応用展開

パッケージに適切な切込みを加工することにより伸縮性が発現し、引張ることで壁面が立ち上がり緩衝性能を持たせることができる。このように、既存のパッケージ材料に後加工で機能を付加することが可能である。将来的には断熱性、通気性、振動減衰など、さらなる機能拡張への応用も期待される。

3) 日本の伝統工芸を活かした意匠の開拓

切り紙は日本の伝統工芸であり、その技術をパッケージに応用することで、機能性だけでなく意匠性・デザイン性にも新たな価値を創出できる可能性がある。伝統文化と先端技術の融合により、国内外の市場において差別化された製品展開が可能となることが期待される。

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。）

国内学会発表

[1] 富樫瞭，蔭山健介，小島朋久，切り紙により誘起される 3 次元ハニカム構造の機械的特性評価，日本材料学会関東支部 2024 学生研究交流会，2024 年 10 月 26 日