

論文要旨

シンプルなモデルによる切り紙構造の力学特性

磯部 翠

切り紙 (“Kirigami”) は、近年では、折り紙 (“Origami”) に切れ込みや穴を加えたものとして、科学研究領域でも知られるようになったものである。これらの加工によって、二次元的なシート材料を三次元的な構造へと変形させることができるものとして知られている。様々な場面においてシート材料の活用が進む中、折る・切るといったマクロな加工によって幅広いスケールにおいてシート材料の利用の可能性を広げることができる [1]。そのようなものとして、Origami に加えて Kirigami も、今後幅広い応用を期待されている。我々が扱う“切り紙構造”は、Kirigami の中でも最もシンプルなパターンとして知られるもので、多数の短い切れ込みを等間隔で互い違いに入れたものである。この構造の特徴として、高い伸張性と立体的変形が挙げられる。どちらも切れ込みを入れるという簡単な加工によってシート材料の機能を大きく広げることができるものであり、様々な材料や特性に着目した応用研究も進んでいる [2, 3]。一方で、切り紙構造自体の物理的理解はほとんど得られていない。そのため、物理の立場による基礎的研究によってこの状況を解決することで、系統立てた応用展開に繋げることが、切り紙構造を用いた今後の技術開発の発展には必須である。

本研究では、この切り紙構造シートの物理的振る舞いを解明することを目的とした。具体的には、紙を用いて構造を再現した試料を作成し、定速での引っ張り実験を行い、切れ込みに垂直な方向の変位と力の関係を測定・解析した。それと同時に、構造の本質を表すシンプルな理論モデルを構築して物理的に記述し、実験結果と比較した。本研究の特色は、実験と理論構築を並行して進めることと、本質的なパラメータに着目し、物理的本質を損なわずに状況を単純化することである。簡単なモデルにより現象の物理を明らかにすることができるため、得られる理解は普遍的なものである。そのため、応用研究で扱われているような、原子レベルのスケール [4] から実験室スケール [5] まで、シートの素材にも関わらずに適用でき、今後の切り紙構造を用いた工学的応用等の技術開発において指導原理となることが期待できる。

こうした手法により、主に以下の成果を得た。(I) 切り紙構造の力学応答の初期に、線形領域を発見した。線形領域は、転移点と名付けられた極大点において次の領域に移行する。切り紙構造の特長である高い伸張性は、もう一つの特長である立体的変形が現れることによって実現される。引っ張り初期に起こるこれらの現象が、切り紙の物理を特徴付けるものだと示した。(II) 転移が起こるまでの初期領域における弾性係数 K_{in} と、転移が起こる点にお

ける臨界伸び Δ_c についてのスケーリング則を理論的に導き、実験結果をよく説明することを示した。この成果によって、シート材料の力学的性質を切り紙構造のパターンによってコントロールできることを、定量的に示すことができた。紙以外のシートについてもこれらのスケーリング則と整合する結果を得た。(III) 理論を発展させ、我々の実験で観察されている不連続性を導いた。理論的に導いた転移前後の力についてその比を導いて不連続性を表し、それらに対応する値を実験結果からも取り出し比較して、理論との整合を示した。(IV) これまでの理論について、変形を一般化させた理論を構築することで、これまでと異なる転移の形を発見した。転移までのエネルギーの変化をより詳細に議論し、数値計算と解析計算の両方で、連続転移となる場合を記述した。この現象は、熱力学的な臨界現象における連続転移とのアナロジーを示した。

-
- [1] L. Xu, T. C. Shyu, and N. A. Kotov: ACS nano **11** (2017) 7587.
- [2] T. C. Shyu, P. F. Damasceno, P. M. Dodd, A. Lamoureux, L. Xu, M. Shlian, M. Shtein, S. C. Glotzer, and N. A. Kotov: Nature Mater. **14** (2015) 785.
- [3] N. Hu, D. Chen, D. Wang, S. Huang, I. Trase, H. M. Grover, X. Yu, J. X. Zhang, and Z. Chen: Physical Review Applied **9** (2018) 021002.
- [4] M. K. Blees, A. W. Barnard, P. A. Rose, S. P. Roberts, K. L. McGill, P. Y. Huang, A. R. Ruyack, J. W. Kevek, B. Kobrin, D. A. Muller, et al.: Nature **524** (2015) 204.
- [5] D.-G. Hwang and M. D. Bartlett: Scientific reports **8** (2018) 3378.