

印象派物理学による 「切り紙」構造の高い伸張性の解明

Physical Principles of the High Stretchability of Kirigami Sheet Materials

奥村 剛*

高い伸張性を持つ日本の切り紙が、工学的応用のポテンシャルの高さから世界で注目されている。しかし、この高い伸張性の物理原理は未解明であった。本研究では、その原理の本質をシンプルな数式でほぼ正確に説明した。この結果は、今後の様々な応用の指導原理として利用される可能性がある。この研究のポイントは次の三つにまとめられる。

- (1) 「切り紙」^{注1)}の高い伸長性の鍵が、平面内変形から平面外変形への転移現象にあることを見出した。
- (2) 「切り紙」が持つ高い伸長性の物理原理をシンプルな数式で説明することに成功した。
- (3) 発見された数式は、切り紙構造を応用展開する際の明確な指導原理を与える。

1. 概要

「切り紙」構造は、シート状物質に規則的に穴を配置した構造で、引っ張ることで柔軟に変化し立体的な構造を創り出すことができる。我々に身近な例としては、ワインボトルなどにかぶせる緩衝材がある。この構造は、フレキシブルなグラフェン¹⁾、電極²⁾、太陽電池³⁾、リチウムイオン電池⁴⁾などの様々な工学応用の鍵として期待され、最近、急速に世界の注目を集めてきており、今後、再生医療では細胞シート^{注2)}への展開も期待される。

我々は、このように世界の注目を集める「切り紙」の構造が持つ高い伸長性の鍵が、平面内変形（二次元的な平らな状態を維持したままの変形）から平面外変形（三次元的な立体的な構造を取る変形）への転移現象（突然の変化）にあることを見出し、その物理原理をシンプルな数式で表すことに成功した⁵⁾。

具体的には、「切り紙」の柔らかさを表す量（弾性率）と「切り紙」が平面内変形から平面外変形に転移する条件を、シンプルで美しい数式により表すことに成功した。シンプルでありながら実験

^{注1)} 切り紙：紙に様々なパターンで切り込みを入れることで、様々な形を実現する伝統工芸技術。特に、立体的な形を実現することも行われてきた日本の「切り紙」という言葉が、最近の工学・科学分野では、折り紙と同様に非常によく用いられる。

^{注2)} 細胞シート：再生医療は、人体の組織が損傷しその機能を失った場合に、例えば、幹細胞と呼ばれる細胞のたねのような細胞が持つ自己修復性を使って、損傷した組織の機能を回復する技術。細胞シートは、細胞をシート状にして細胞間の接着や組織機構を再建させた細胞の集合体。細胞シートを、さまざまな臓器に張り、その部位に生着させることで、移植治療ができるようになると期待されている。特に、角膜や心筋を対象に臨床応用も始まり、再生医療への道を拓く技術として期待されている。

データと良く整合性を持ち、特に平面内変形の場合の弾性率の式と転移の条件式は極めて精度よく成立していることが分かった。これらの数式は、切り紙構造を応用展開する際の明確な指導原理となる。今後、最先端の自動車技術としてリチウムイオン電池など^{注3)}に組み込まれる多孔性ポリマーシートの強靱化などへの展開が期待される。

2. 研究の背景と経緯

我々のグループは、ソフトマター物理学^{注4)}で特に注目される印象派物理学の手法⁶⁾を用いて、実験と理論を同時に進行することで、様々な現象に対してシンプルで本質的な物理的理解をもたらしてきた。例えば、滴やバブルの動力学^{7,8)}、微細加工表面での浸透現象⁹⁾、粉粒体の動力学¹⁰⁾、天然物質の強靱性^{11,12)}について研究を展開してきている。

印象派物理学の手法とは、1991年にノーベル物理学賞を受賞した故ドゥジェンヌ博士が提唱した研究手法で、物理の研究を印象派絵画に例え、枝葉末節を意識的に排除し、シンプルに情景(物理)を捉えることで、その美的(物理的)本質をより鮮明に浮かび上がらせようとするものである。今後この手法で様々な分野で研究が進むことで、企業の開発現場などで指導原理として役に立つ原理が次々と明らかになって行く可能性がある。

我々のグループは、天然物質の強靱性の研究に関連して、多孔性ポリマーシートの強靱化に関連する基盤技術などの研究も行ってきた¹³⁾。これからの自動車技術を支えるリチウムイオン電池の性

能を向上させるためには、内部に組み込まれる多孔性ポリマーシートの厚みを薄くかつ丈夫にすることが求められている。一方、自然界には、多孔性の構造を取ることで強度を増している物質がある。例えば、日本でお酒の友としても親しみのあるナマコはその海面組織が多孔性構造を取ることで、あの弾力性に富んだ歯ごたえのある強靱性が生み出されている。これらの背景から、我々は、多孔性物質の研究を展開してきており、その一つのテーマとして切り紙構造の研究に取り組んできた。研究の発端は、スーパーマーケットなどで購入したワインが割れないように保護するためにボトルにかぶせる紙製の緩衝材(図1)にヒントを得た筆者が、研究室に仮配属された磯部翠氏(現修士2年生)と共に始めた実験であった。

日本では多くの人に親しみのある切り紙構造(図1(a),(b))に関しては、ここ1~2年世界で様々な工学的応用研究が爆発的な速度で発展してきている。例えば、「切り紙」を用いて、大きな伸長性をもつ電極²⁾やバッテリー⁶⁾、太陽電池³⁾が実現されたり、グラフェンシート^{注5)}を「切り紙構造」によって柔らかくすることで極微のスケールで電磁式アクチュエータが作られたりしている¹⁾。しかし、物理原理を明らかにする研究はほとんど手つかずの状況にあった。

3. 研究内容

筆者は磯部氏と共に、印象派物理学の手法に基づいて、ワインボトルにかぶせる切り紙を、物理的本質を損なわずに単純化した切り紙パターン

注3) リチウムイオン電池：板状の電極を多孔性のポリマーシートで仕切り、それをユニットとして積層することで性能が向上する電池。これらの電池の積層効率を上げるためには、薄くて丈夫な多孔性ポリマーシートが欠かせない。このためにタフでしなやかな多孔性ポリマーのシートの開発は、これからの自動車技術の要となる重要な研究課題である。

注4) ソフトマター(あるいは、ソフトマター物理学)：固体と液体の間のような性質を持つ高分子・液晶・コロイド、さらには、粉粒体などを含む物質群、あるいは、それらを研究対象とする物理学の一分野。ドゥジェンヌ博士がソフトマターというタイトルでノーベル賞受賞講演を行ったことから定着した。

注5) グラフェンシート：炭素原子が蜂の巣のような六角格子に配列されたシートで、その厚みは炭素原子一個分の厚みしかない。電気的性質に優れ、薄くてしなやかで透明なため、様々な電氣的デバイス(例えば、タッチパネル)への応用も期待される。初めてグラフェンの単離に成功したガイム博士とノボセロフ博士は、その功績で2010年度のノーベル物理学賞を受賞している。

(図2(a))に着目した。そして、実験と理論の両面から研究を進めた結果、最近の応用研究で注目されている切り紙構造の高い伸長性が、平面内変形から平面外変形への転移現象のおかげで実現していることに気づいた(図2(b), (c))。この事実を基に、筆者らは、この転移現象を記述する物理モデルを構築した。その結果、①切り紙が少しだけ引っ張られた場合(平面内変形)と②大きく引っ張られた場合(平面外変形)のそれぞれに、切り紙の柔らかさを表す量(弾性率)を数式で表すことに成功した。さらに、③平面内から平面外の転移

が起こる条件も数式で表した。この条件は、「切り紙」の弾性率を表す2つの数式が入れ替わる転移条件に相当し、これによって転移点での「切り紙」の伸びを知ることができる。

また、①~③に対応した3つの数式は実験データと良く整合性を持つことが分かった。特に①と③に相当する、平面内変形の場合の弾性率を表す式と転移点の伸びを表す式は極めて精度よく成立していることが分かった。こうして、確立された物理法則を表す数式は、いずれも驚くほどにシンプルであるため(図3)、今後の工学的応用などの

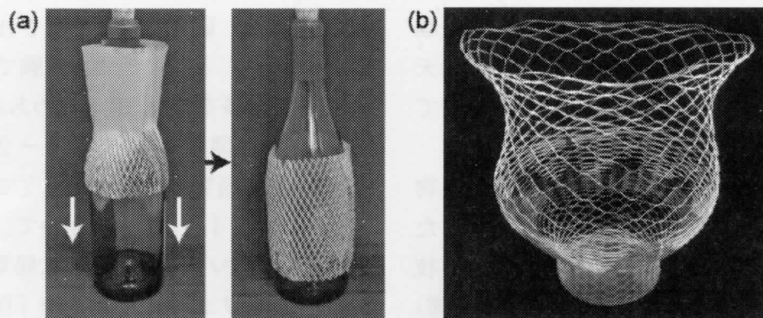


図1 日本で身近に使われる切り紙の例, (a)ワインボトルにかぶせて利用される切り紙構造を利用した緩衝材, (b)「空気の器(トラフ建築設計事務所)」, 世界中の美術館のショップなどで販売されている

Sci. Rep., (2016), <http://www.nature.com/articles/srep24758>. (CC BY 4.0)

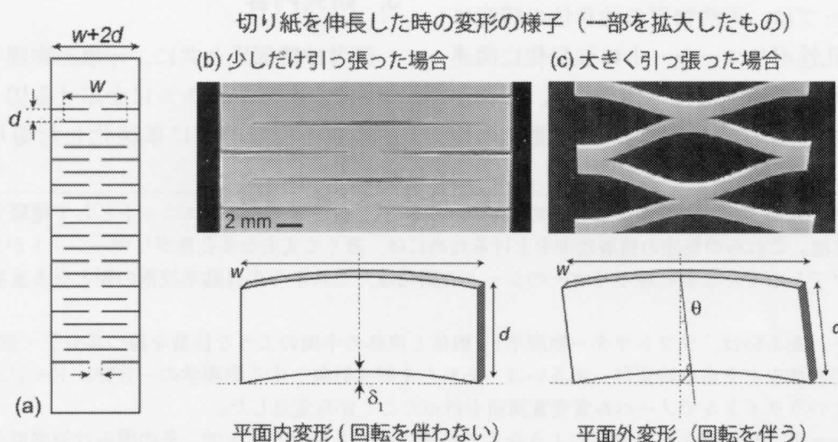


図2 (a)本研究で着目した本質を損なわずにシンプル化した切り紙パターン, (b)少しだけ引っ張った場合の写真(上)とその場合の平面内変形(二次元的な平らな状態を維持したままの変形)を説明する図, (c)大きく引っ張った場合の写真(上)とその場合の平面外変形(三次元的な立体的な構造を取る変形)を説明する図

- | | |
|-----------------|---------------------------------|
| (1) 平面内変形下での弾性率 | $E_{in} = \alpha(d/w)^4 E$ |
| (2) 平面外変形下での弾性率 | $E_{out} = \beta(hd/w^2)^2 E$ |
| (3) 転移点でのひずみ | $\varepsilon_c = \gamma(h/d)^2$ |

図3 本研究で示された切り紙構造の高い伸長性の物理的本質を表すシンプルな3つの数式。弾性率は、「切り紙」の柔らかさを表す量であり、「ひずみ」は切り紙ののびを表す量。d, h, wは図2(a)に定義された切り紙のパターンを表す量(hはシートの厚さ)。Eはもともとの素材(例えば紙)の弾性率(α , β , γ は数値係数)。

技術開発の指導原理として役立つことが期待される。

4. 今後の展開

本研究は、物理学と工学の知見を融合して応用研究を展開している。本研究は物理が専門の筆者のグループで行われてきたが、最近、工学部出身の武居淳氏(お茶の水女子大学特任助教)が本研究に加わり、応用展開を開始している。紙を始めとして、ゴムやプラスチックなどのポリマー系の材料で研究を進めることで、材質に関わらず、本研究で発見された法則が様々な物質に共通に当てはまることを確認し、具体的な応用例を示している(特許出願済み)。

例えば最近、再生医療分野で注目を集める細胞シートにこの切り紙構造を応用すれば、患者の被移植部位の状態に合わせた弾性率を持たせることで、手術の成功確率を上げるメリットも期待される。ワインボトルの緩衝材のように円筒形状で応用すれば(図1(a)), 弾性率可変の医療・スポーツ用のサポーターなどへの応用も期待できる。また平面内の変形から平面外の変形への転移現象は、検出が容易である。このため、この転移点を利用した、力を感知するデバイス(フォースセンサー)の開発も期待できる。グラフェンシートなどで作

成すれば、ごく微弱な力を測定するセンサーの作製も可能と考えられる。

本稿は、内閣府 総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)の伊藤耕三プログラム・マネージャーの研究開発プログラムの一環として、行われた、お茶の水女子大学の磯部翠氏と奥村の共同研究の成果⁴⁾を中心にまとめたものである。

文 献

- 1) M.K. Blees *et al.*, *Nature*, **524**, 204-207 (2015)
- 2) T.C. Shyu *et al.*, *Nat. Mater.*, **14**, 785-789 (2015)
- 3) A. Lamoureux, K. Lee, M. Shlian, S.R. Forrest, M. Shtein, *Nature communications*, **6**, 8092, doi: 10.1038/ncomms9092 (2015)
- 4) Z. Song *et al.*, *Sci. Rep.*, **5**, 10988, doi: 10.1038/srep10988 (2015)
- 5) M. Isobe, K. Okumura, *Sci. Rep.*, **6**, 24758, doi: 10.1038/srep24758 (2016)
- 6) 奥村剛訳, 表面張力の物理学—しずく, あわ, みず, たま, さざなみの世界— (P.G. de Gennes, F. Brochard-Wyart, D. Quéré 著), 314頁, 吉岡書店(2003), 訳者あとがき参照
- 7) M. Yokota, K. Okumura, *Proc. Nat. Acad. Sci. (USA)*, **108**, 6395-6398 (2011)
- 8) A. Eri, K. Okumura, *Soft Matter*, **7**, 5648 (2011)
- 9) M. Tani, R. Kawano, K. Kamiya, K. Okumura, *Sci. Rep.*, **5**, 10263 (2015)
- 10) Y. Takehara, K. Okumura, *Phys. Rev. Lett.*, **112**, 148001 (2014)
- 11) Y. Aoyanagi, K. Okumura, *Phys. Rev. Lett.*, **104**, 038102 (2010)
- 12) K. Okumura, *MRS Bulletin*, **40**(04), 333-339 (2015)
- 13) Y. Kashima, K. Okumura, *ACS Macro Lett.*, **3**, 419-422 (2014)