

令和6年9月26日

構造の安定性を小さな渦でみる新たな検査法を発見

～折りたたみ構造から生まれる渦の制御および探索の技術基盤を開発～

■ポイント■

1. 折り紙をモデルにした新しい検査法が、生命科学や材料工学、そしてデバイス設計に新たな視点を提供します。
2. 折り紙は、山折りと谷折りの組み合わせでさまざまな構造体に変形できます。分子配向シートの折りたたみに注目し、複屈折の空間配置から偏光の渦の形成に成功しました。
3. 折り紙の節目やつなぎ目で、上記と性質の異なる小さな渦の発生を発見しました。小さな渦が多くなると、構造体が不安定であることがわかりました。
4. 小さな渦は構造体の安定性を表すパラメータとして応用が期待されます。

■概要■

埼玉医科大学(学長 竹内勤)の若山俊隆教授と相澤康平助教、樋口裕大大学院生(当時)、そして宇都宮大学(学長 池田宰)の東口武史教授らは、折りたたみ構造から生まれる渦の制御および探索の技術基盤を開発しました。

自然界には花のつぼみや新芽、昆虫の翅など多様な折りたたみ構造が存在します。同様に、私たちの体内にあるタンパク質も複雑な折りたたみ構造をもち、その折りたたみの欠陥は多くの疾患の原因となっています。私たちの身近にある折り紙でも折り方を間違えば、ねらったものと異なる構造体ができしまいます。重ね合わせのズレなどの折りたたみの欠陥はどのように生じてしまうのか、どのような結果を引き起こすのか、まだ詳しくわかっていません。

本研究では、折り紙工学を応用し、分子配向された折り紙シートを用いて回転対称折り紙という立体構造を設計・試作しました。光をプローブとして使用し、この構造のダイナミクスを観察したところ、規則的に織り込まれた分子配向によって大きな偏光の渦の制御に成功しました。大きな渦に対して、折り紙の折り目やつなぎ目に性質の異なる小さな偏光の渦が数多く現れることを発見しました。山折りと谷折りを変更すると、折り紙の立体構造を制御できます。結果として、小さな渦の個数が変化しました。

立体構造を詳しく調べてみると、小さな渦は構造体が不安定になると増加することが明らかになりました。折り目やつなぎ目が設計と異なって欠陥が生まれることに起因しています。小さな渦は、構造体の安定性を評価する新たな手段として応用できることがわかってきました。

生命現象の中では細胞やタンパク質のダイナミクス、特に細胞の中や膜上で、分子の集合や輸送メカニズムに渦が関与しているともいわれています。現在は折り紙モデルを使用していますが、将来的には本技術を生物学的プロセスに応用していくことで、細胞内ダイナミクスの理解や疾患の診断などに役立つ新たな展開が切り拓かれることを期待しています。

この成果は2024年9月号のScientific Reports誌に掲載されました。

■ 研究背景 ■

自然界は、花のつぼみや新芽、昆虫の翅など多種多様な折りたたみ構造にあふれています。私たちの体の中でもタンパク質といった折りたたみ構造が存在しています。その折りたたみ構造は非常に重要で、折りたたみの誤りによってさまざまな疾病にかかってしまうこともわかってきました。折りたたみ構造を自由に変わられる折り紙は、日本の伝統的な遊びとして世界中に親しまれていますが、機械材料やロボット工学分野では機械的メタマテリアルとして先端研究に折り紙工学が活用されています。ここでは、強靱な材料特性や負のポアソン比を得るための興味深い構造が研究されています。あまり一般には知られていませんが、医療分野でも折り紙は臨床応用されています。その代表的なものはステントです。ステントは人工血管を補強する金属材料で切り紙を採用しています。カテーテルと一緒に細い血管を通して、狭窄した血管を広げるために、切り紙細工が施されたステントが活用されています。近年の折り紙は、アートとしての興味に留まらず、数学、コンピュータグラフィックスや機械工学、ロボット工学、ナノテクノロジー、建築、航空宇宙、そして、医療にまで広がっています。

■ 研究内容 ■

今回、注目したのは、日本で古くから親しまれている折り紙です。一枚の細長い分子配向された高分子フィルムを「回転対称折り」と呼ばれる方法で規則的に折り込んだ立体構造を作製しました（図 1.a1~1.a3 及び図 1b）。回転対称折りの折り紙は、回転対称性によってフィルムの分子配向が立体的かつ規則的に変化する構造となるように設計されています。光を評価プローブとして用いることで、折り紙からの光の応答を偏光観察しました。偏光解析法として用いた回転 1/4 波長板法から偏光像を取得すると、図 1c に示すような規則的で美しい色彩の変化が現れました。

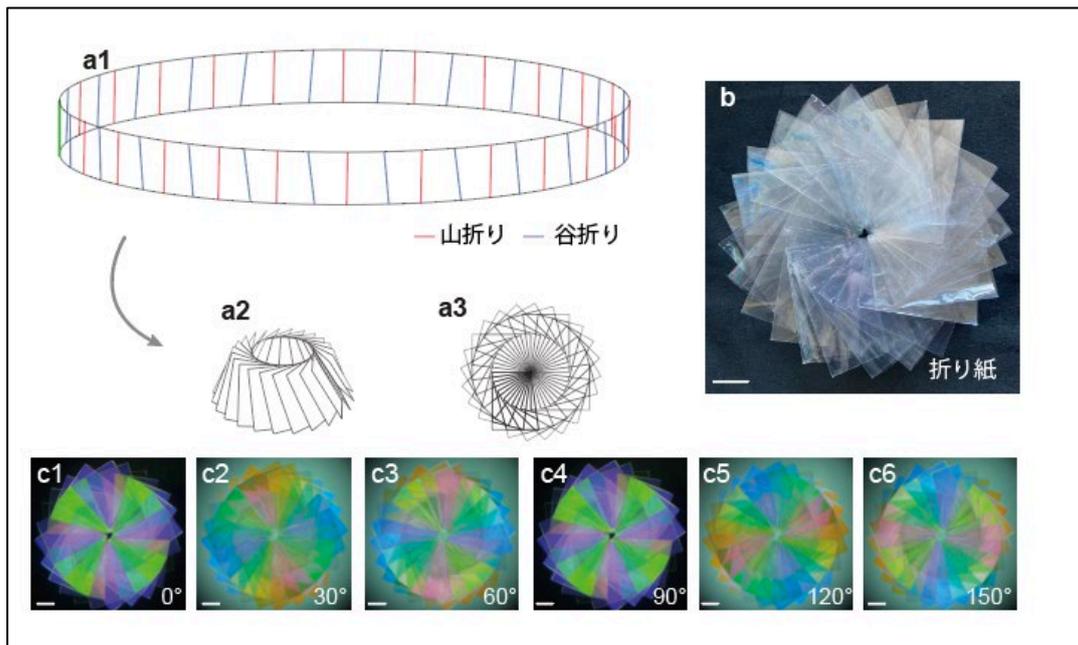


図 1 本研究の概要

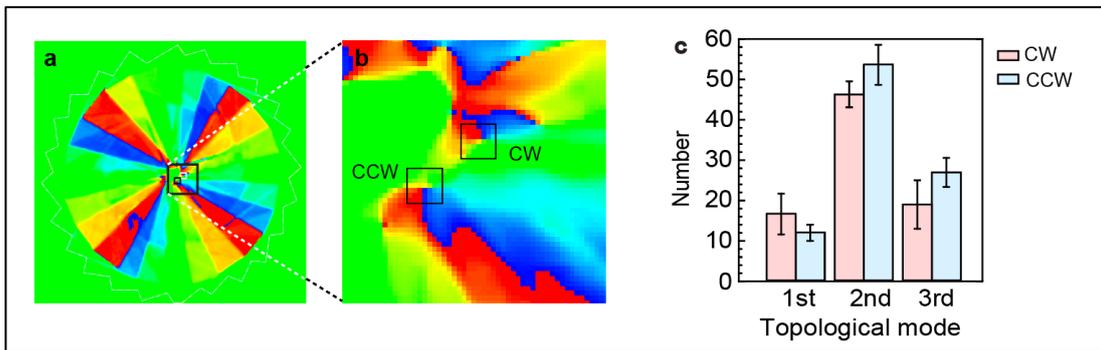


図2 巨視的な渦と微視的な渦

出射光の偏光特性を調べてみると、図 2a に示したような光のパターンは偏光の渦を形成していることが明らかになりました。我々の提案する折り紙は柔らかく、山折りを谷折りに、谷折りを山折りに自由に変形することが可能です。上手に折り目を変えることで、今回作製した折り紙は、渦の個数を 1 つでなく、同時に 3 つまで増やすことができました（図 3）。折り方を変えた折り紙によって光の空間的な渦を規則的に制御させることに成功しました。

さらに、丁寧にその偏光分布を調べてみると、折り紙の節目や繋ぎ目には特徴的な光の小さな渦が観察されていることもわかってきました（図 2b）。興味深いことに、これは上述した大きな渦とは性質が異なるものでした。著者らは小さな偏光渦に注目し、これらを丁寧に解析および分析する方法の開発にも着手しました。折り紙の中でどのように偏光の渦を作り出しているのかを詳しく調査した結果、折り紙の折り方によって微視的な渦の発生に違いが現れました（図 2c）。我々は、折り紙の立体構造が 2 次のとき、不安定となることが原因で小さな渦が増大することを突き止めました。これらの小さな偏光渦は、これまで磁性体や液晶といった固体物理の中に点在することがトップサイエンスとして報告されていた『スキルミオン』と呼ばれる渦構造の仲間であることを見出しました。折り紙の中にこのような渦が潜んでいた報告例はこれまでになく、世界で初めて折り紙の中の渦構造（スキルミオン）を実証することに成功しました。

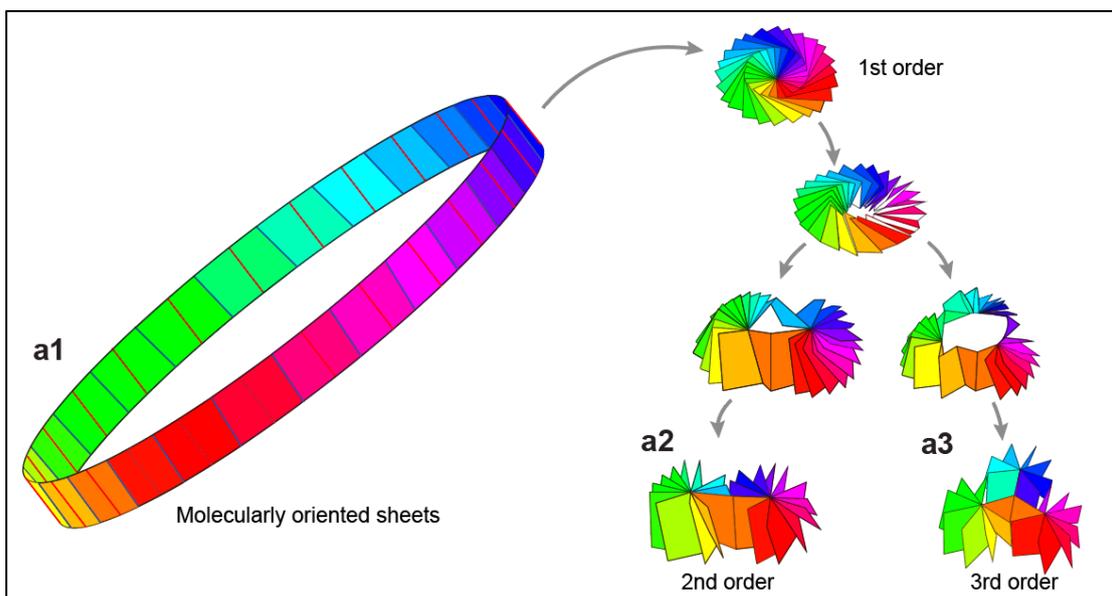


図3 タンパク質の構造変化のように変形する折り紙

■今後の展望■

提案した技術は、アートで世界的に知られる折り紙から光学的偏光渦の発生と折りたたみ構造の中に潜む小さな渦（スキルミオン）の探索による構造安定性の理解に繋げる技術基盤の開発です。折り紙から得られる大きな渦は、光学分野で興味深い偏光渦の制御を実現しました。一方、折りたたみのエラーや欠陥によって生まれる小さな渦の発見は、折りたたみ構造の安定性を理解するツールとして応用できることを実証しました。現在、折り紙工学において、折りたたみの欠陥の問題は未解決といわれています。材料の不均一性、折り目の精度、繰り返しの折り曲げの疲労、外部環境の影響など欠陥の発生する原因はさまざま、我々の方法はこれを検出する方法になると考えています。また、折り紙で起こっている現象はタンパク質の折りたたみエラーとよく似ており、今回の小さな偏光渦の探索技術はバイオイメージングに活かせると考えられます。細胞の運命、細胞の誕生（細胞分裂）と終焉（細胞死）における細胞の流体的なダイナミクスや分子の輸送機構にも渦が支配している可能性が示唆されており、我々の提案した解析技術が細胞の運命のカギになる発見に関与していくことが望まれます。

この成果は2024年9月17日号のScientific Reports誌（Nature Publishing group）に掲載されました。

■論文の情報■

論文名：Skyrmion Engineering with origami

雑誌名：Scientific Reports

著者：Toshitaka Wakayama, Kohei Aizawa, Yudai Higuchi, and Takeshi Higashiguchi

URL：<https://doi.org/10.1038/s41598-024-71566-1>

Wakayama, T., Aizawa, K., Higuchi, Y. et al. Skyrmion engineering with origami. Sci Rep 14, 21673 (2024).

■研究資金■

本研究は、JSPS 科研費(21H03842, 23H03656, 23H01416, 24K03312, 24H00838)、天田財団 (AF-2023226-B3); 上原記念生命科学財団 (2022)より支援を受けて実施されました。

■謝辞■

本研究の実験の中で、座間 あかね さん、相澤 菜摘 さんに実験の一部を手伝っていただきましたので、ここに感謝申し上げます。

■用語の説明■

- ・ **分子配向**：材料中の分子が特定の方向に整列している状態を指します。例えば、液晶ディスプレイでは、液晶分子が一方向に揃うことで、光の通り方や画面の表示が制御されます。
- ・ **偏光**：光の波動性に関する現象で、光の電磁波が特定の方向に振動する性質を指します。
- ・ **偏光渦**：光の偏光が空間的にねじれたパターンを形成する現象です。光の偏光方向が光の進行方向に沿って連続的に回転することで、螺旋状の構造になります。偏光渦は、光通信、顕微鏡検査、計測技術など、多くの応用分野で利用されています。
- ・ **ステント**：狭くなったり、閉塞した血管を開いて流れを改善するために使用される小さなチューブです。主に、心臓治療で冠動脈に挿入され、血流を改善して心筋梗塞のリスクを減少させるために使用されます。ステントは、金属製またはプラスチック製のメッシュでできています。カテーテルを使って狭窄部位に挿入された後に切り紙技術を使って展開され、血管を広げてその位置に固定されます。
- ・ **スキルミオン**：磁性材料や液晶、凝縮系物質中で観察されるトポロジカルな渦構造の一種です。スキルミオンは、特異なスピン配置を持つ渦状の磁気構造で、そのトポロジカルな性質により非常に安定していることが特徴です。

※取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。

▷ 研究についてのお問い合わせ

若山 俊隆（わかやま としたか）

埼玉医科大学 保健医療学部 臨床工学科 教授

TEL: 042-984-0686

Email: wakayama@saitama-med.ac.jp

東口 武史（ひがしぐち たけし）

宇都宮大学 工学部 基盤工学科 教授

TEL: 028-689-6087

Email: higashi@cc.utsunomiya-u.ac.jp

▷ 取材、報道についてのお問い合わせ

埼玉医科大学 広報室（担当：蒔田）

TEL: 049-276-2125, FAX: 049-276-2086

Email: koho@saitama-med.ac.jp

宇都宮大学 企画総務部 企画総務課 広報・渉外係（担当：石川）

TEL: 028-649-5201, FAX: 028-649-5027

Email: kkouhou@a.utsunomiya-u.ac.jp