

# 円筒スナップフィットはメタ接着機能を有するか？

立命館大学 総合科学技術研究機構

吉田 圭介

## 1. はじめに

スナップフィットとは、複数の部材の一方、あるいは両方がしなやかに曲がりながら、お互いを噛み合うように接合するシステムである。接合の際には、部材の飛び移り変形や摩擦による散逸を伴うこともあり、エネルギー吸収材としての機能も兼ね備えている。また、スナップフィットは(摩耗や破壊を除き)、接合と分離を繰り返すことが可能という利点もあり、環境保護の観点からも重要な技術である[1]。

スナップフィットが十分に機能する、つまり強固な結合が実現するためのパラメータセットを推定するためには、薄い材料の接触力学を詳しく理解する必要がある。近年の物理学分野ではそのような研究が大きく進展し、とくに筆者らは、C字型スナップフィットがうまく機能するための設計原理を明らかにする研究に取り組んできた[2-3]。本課題では、これまでに我々が進めてきた C 字型スナップフィットに関する基礎研究をさらに発展させ、スナップフィットがもつ環境適応性や、みかけの接着ともいえる接合性能を発揮するための設計原理を解明するための基礎研究に取り組んだ。

具体的には、C字型の弾性梁(開円筒シェル)が外界に適応しながら収納される条件を明らかにする研究と、摩擦がある系で薄い構造物がどのように接触形態をつくるかを調べる研究、そして、ジップロックのようにロッドが溝にはまり込むことで、ロッドのしなやかさと接合性能を両立した系の力学特性を明らかにする研究という3つの課題に取り組んだ。

## 2. 開円筒シェルを溝に収納する: 弾性シェルの接触適応性

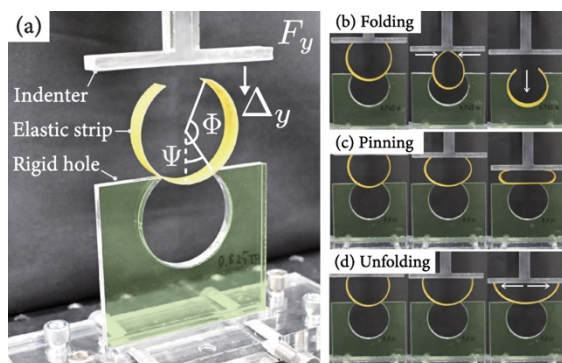


図 1 開円筒シェルの押し込み試験。(a)問題設定。円形のくぼみの上に開円筒シェルを置き、上からインデントで圧縮する。シェルとくぼみの幾何形状、シェルとインデントおよびくぼみとのあいだの摩擦係数によって、(b-d)の3通りの変形モードが生じる。これらは[6]から引用。

切込みを入れた円筒シェル(開円筒シェル)は、弱い荷重で潰れるような、あるいは収納(fold)されるような変形ができる。申請者らは、開円筒シェルをくぼみに押し込んだときに、どのようにくぼみの中に入り込むのか、あるいは入りこまないのかを調べる研究を実施した。この研究は慶応大理工学部 of 松本透歩学士(現 M2)・佐野友彦講師と共同で実施した。研究は松本学士が中心に遂行し、申請者は数値シミュレーションと理論解析に関わった。研究対象のモデルを図1に示す。平坦なインデントを用いてくぼみに向けてシェルを押し込むと、シェルの開端とインデント、およびシェルとくぼみのあいだの接触点はそれぞれ滑るかピン留めされ、その結果、収納のされ方や押し込み荷重が大きく変化する。

我々は、収納のされ方を(i)Folding, (ii) Pinning, (iii)Unfoldingの3種類に分類し、どの収納モードが実現するかはシェルとくぼみの幾何形状と摩擦係数によって予測可能であることを理論的に明らかにした。この理論予測は、実験や数値シミュレーションともよく一致

しており、スナップフィットを用いたエネルギー吸収材[4-5]への応用が期待できる成果を得ることができた。なかでも、本研究で提示された弾性梁の線形応答を厳密に計算する手法は、申請者が過去に提案した手法[3]よりも計算が容易であり、後続の研究への貢献性が高いと考えている。これらの結果は、2025年度の物理学会年次大会・機械学会 M&M 材料力学カンファレンスで報告されたのち、2026年3月には Physical Review E に出版された[6]。

### 3. 薄いシートの接触力学: 弾性シェルの接触問題の理解のために

吉田・和田(2020, 2025[2-3])および松本・吉田・佐野(2026[6])が注目した円筒シェルの問題では、C字型の断面が曲げ変形を起こす一方、奥行方向の曲率は常に一様に0であるものを考えていた。つまり、計量を変えないような変形(isometric deformation)である。4節で扱うように、シェルは一般には、2方向の曲率が変化するような変形を起こす。ガウス曲率の変化は曲面の計量の変化と関係があり、そのような変形のもとでは、シェルには曲げ弾性力だけでなく面内伸縮の弾性力も発生する。曲げと伸縮という質の異なる弾性エネルギーが競合すると、isometric な変形では見られなかった応力集中構造が形成される[7]。円筒やボールジョイントのようなシェル構造をスナップフィットに利用する場合、シェルはペアの物体から接触力を受けながら複雑な変形をすることになる。シェルの接触力学の基礎を理解するためには、まずは十分にシンプルな構成要素が isometric でない変形を起こす仕組みを丁寧に調べていく必要がある。

我々はこれまで、重力下で摩擦がある床(剛体基盤)の上に弾性シートを置き、シートの中央部を鉛直上向きに持ち上げていく際に、どのような形態が自発的に形成され、その形がどのように変化していくのかを調べる研究を実施してきた。基盤から剥離した領域のシートがなす規則的なしわパターンは、持ち上げ変位 $d$ の増加に伴い徐々にかたちを崩れていき、臨界変位 $d = d_c$ に達したとき、対称性が明確に下がるような形態転移(global buckling)を起こす(図2(c-e))。

助成期間においては、先述の「シェルの接触力学の基礎理解」という動機をもとに、十分に高く持ち上げられた重いシートをもう一度基盤におろしていったときに、シートが複雑に折りたたまったり、応力集中構造を形成したりする過程を、実験と数値シミュレーションの両面から調べる研究に取り組んだ(図3)。シートをインデントで持ち上げる最大高さ $d_{max}$ が小さいときは、インデントの降下とともにシートはもとの平坦状態へと可逆的に戻っていく。ところが、 $d_{max}$ が $d_c$ を超える場合、インデントの上昇過程と降下過程でシートの形

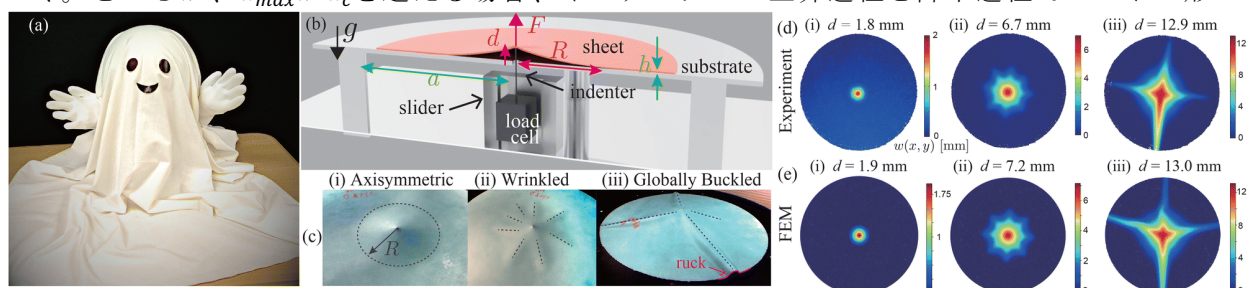


図 2 (a)布を突起物に被せると、重力、弾性、接触力によって複雑なしわが形成される。(b)インデント試験の様子。平坦な円形弾性シートを摩擦がある剛体平板の上に置く。平板の中央には小さな穴が空いており、ここに細い剛体円柱インデントを通し、シートを鉛直上向きに持ち上げる。持ち上げ高さ $d$ に対する荷重 $F$ や、シートが基盤から隆起する領域サイズ $R$ 、隆起形態を調べる。(c)実験で見られる典型的なパターン。 $d$ が小さな値のときは隆起領域が円形だが(i)、やがてしわが発生し(ii)、 $d$ がある臨界値 $d_c$ を超えると、シートの外縁が座屈を起こす(iii)。(d)3D スキャナで可視化した変位場とパターンの移り変わり。(e)有限要素シミュレーションにより(d)を再現した結果。これらは[8]から引用。

態は異なる。荷重-変位曲線も降下過程では上昇過程と異なる経路を取る。そして、インデーターの高さ $d$ がある程度小さいところまで下がると、荷重は上昇過程と同じ曲線上に復帰し、終状態では平坦な形になる。荷重変位関係にヒステリシスが見えるかどうかを決めるしきい値 $d_c$ は、先述の global buckling が生じるときの $d$ の値に対応する。 $d_{max}$ が $d_c$ よりも圧倒的に大きいときはさらに興味深い。降下過程で、シートは折れ曲がりや折りたたみを起こしながら複雑に自己接触していき、インデーターを完全に取り除いても( $d=0$ )、シートは平坦状態に戻ることはなく、テントのような構造をつくる。これは、シートが重力や摩擦がはたらく複雑な環境に適応しながら自発的に作り出した安定構造である。このような環境適応型の形態形成現象は、松本ら[6]の研究のほかに、外科手術のワイヤーや掘削ロッドのモデルとして研究された事例もあるが[9]、シートやシェルの計量変化を伴う変形に対してはこれまで十分に調べられてこなかった。しかし、次節で考慮するようなシェルの接触問題を考えるうえで、折れ曲がりや摩擦による安定構造形成は、接合機能に関わる重要な性質である。また、図3(b)に示すような、もともとかぶ状の構造(ruck)だったものが、インデーターの降下に伴い折れ曲がる現象は、円筒シェルの Brazier 座屈[10]とよく似ており、計量が変化するような変形が起きていることを示している。以上の成果は、これまでの研究成果とともに Soft Matter 誌に掲載された[8]。この論文は Soft Matter の Back cover にも選出された[11]。

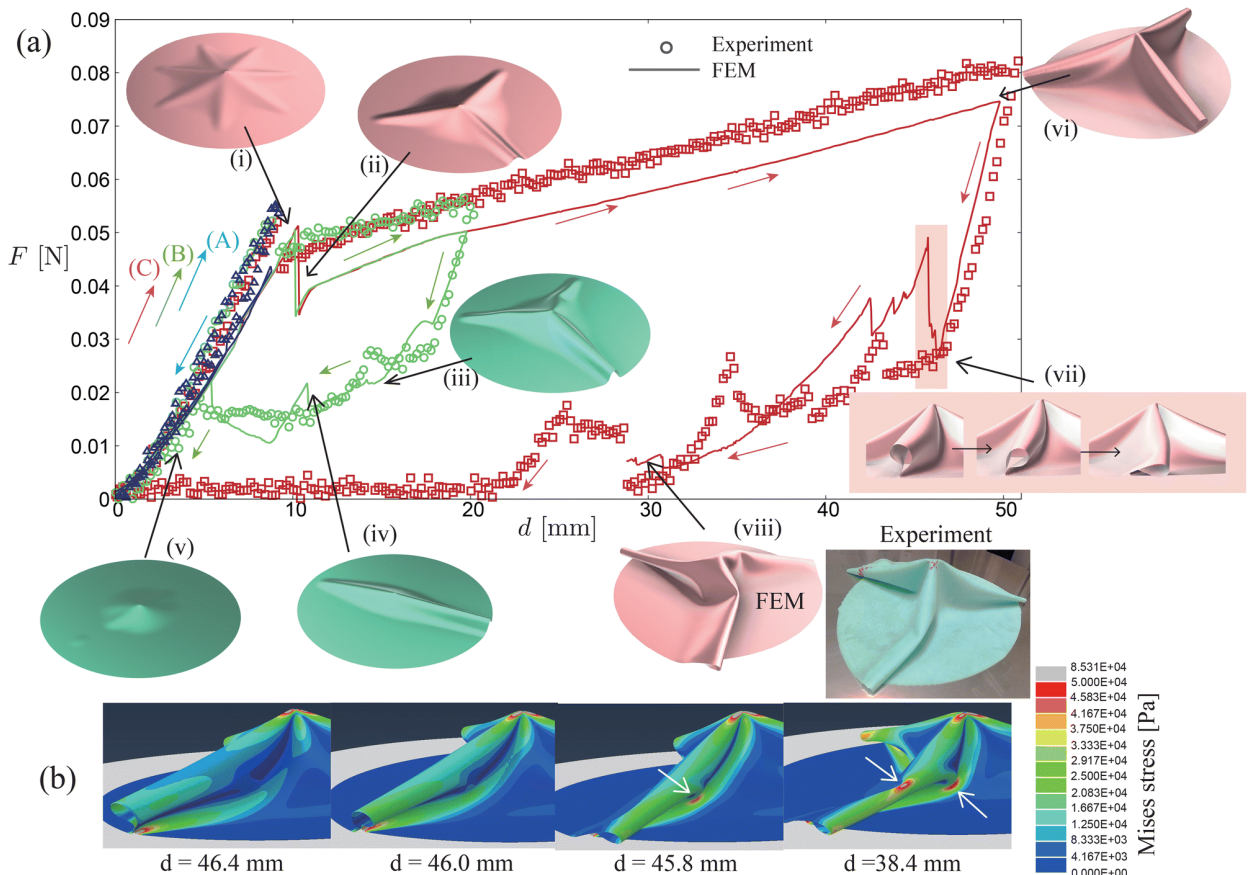


図 3 図 2 に示したインデーション試験について、持ち上げの最大高さ $d_{max}$ を 3 通り設定する。そして、 $d = d_{max}$ までシートを持ち上げたのちに、インデーターをゆっくりと、 $d = 0$ に向けておろしていく。(a)この一連の過程における荷重変位関係。点と実線はそれぞれ、実験、有限要素シミュレーションの結果を表す。 $d_{max}$ が小さいとき(青色のカーブ)は可逆的だが、 $d_{max} > d_c$ の場合はヒステリシスが見られる(緑色、赤色のカーブ)。 $d_{max}$ が $d_c$ よりも十分に大きいときは、インデーターの降下とともに隆起形態が折れ曲がり、折りたたまれたりしながら、複雑な自立構造を形成する。(b) かぶ(ruck)が折れ曲がり、応力集中が生じる様子。色は von Mises 応力を表す。これらは[8]から引用。

#### 4. “メタ接着”されたチューブのピーリング問題

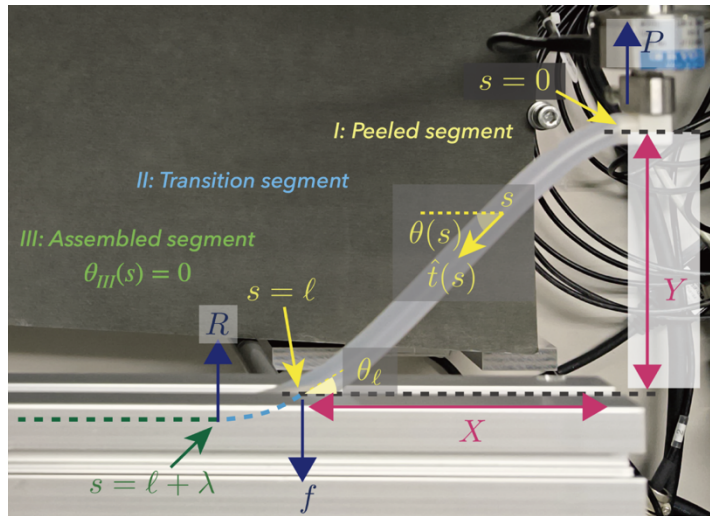


図 4 チューブのピーリング試験。シリコン製のチューブをアルミフレームの溝にはめ込んでおき、片端をクランプ支持しながら持ち上げることで引き剥がす。持ち上げ変位を $Y$ とする。クランプ点からチューブの中立線に沿って弧長パラメータ $s$ をとる。 $0 < s < \ell$ のチューブは溝から剥離しており、 $s \gg \ell$ のチューブは真っ直ぐな自然状態でアルミフレーム内に収まっている。 $s = \ell$ の近傍には、両状態を接続する遷移領域が存在する。

する実験をおこなった(図 4)。クランプ支持部にはロードセルを取りつけ、クランプ部の変位 $Y$ ,そこにはたらく荷重 $F$ 、および剥離部位の長さ $\ell$ ,剥離角 $\theta_\ell$ のあいだの関係を調べた。

荷重変位関係と剥離形態を図 6 に示す。図 6 の横軸は、変位 $Y$ をチューブの断面半径 $a$ で規格化している。 $Y \sim a$ まではチューブが強いせん断変形を受けるが(i)、その後は荷重が大きく減少し(ii)、定常的な剥がれ方をするようになる(iii)。剥離点 $s = \ell$ がチューブの末端に近づいてくると、末端はある点で急に回転し(iv $\rightarrow$ v)、これと同時に荷重も大きく減少する。申請者は、この荷重変位関係、あるいは剥離長さ、剥離角の背後にあるスケーリング則の解明を目指して研究を進めている。これらのスケーリング則が特定できれば、チューブの弾性率、径、チューブに対する溝の“狭さ”、そして摩擦係数によって、この系の剥離強度がどのように調節できるかが定量的に明らかになる。申請者はこの問題の解決に向けて、チューブを

しなやかな曲げと強固な接合を両立したスナップフィットシステムである“ジップロック”を参考に、図 4, 5 に示すような、溝にはめ込まれたチューブを引き剥がす問題を考えた。簡単のため、図 5 のように完全にはめ込まれた状態のチューブは自然状態にあるとする。チューブは引き剥がしの際に溝のつかかりの部分(このモデルでは剛体棒にする)と接触し、この状況にうまく適応するように断面を潰しながら棒の隙間を通過することで、溝から“剥離”する。我々は、チューブの片端をクランプ固定し、はめ込み状態からゆっくりと持ち上げていくことでピール

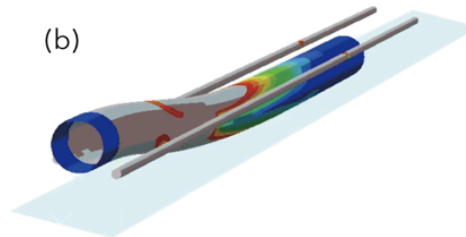
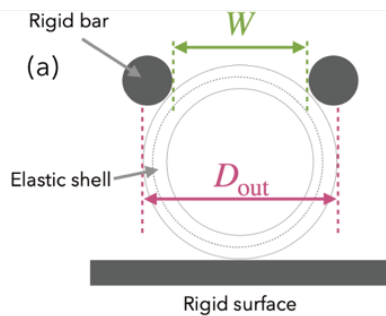


図 5 (a) ピーリング試験を単純化したモデル。はめ込まれたチューブは自然状態にあり、剥離領域だけが溝の角と底面に接触する。そこで、溝の角を細い剛体棒でモデル化する。(b) (a)のモデルを有限要素シミュレーションで再現した図。

ブを図 4 のように(I)外力が境界にしか作用していない剥離領域、(III)自由状態にある、はめ込まれた領域、そして(I)と(III)を連続に接続する(II)遷移領

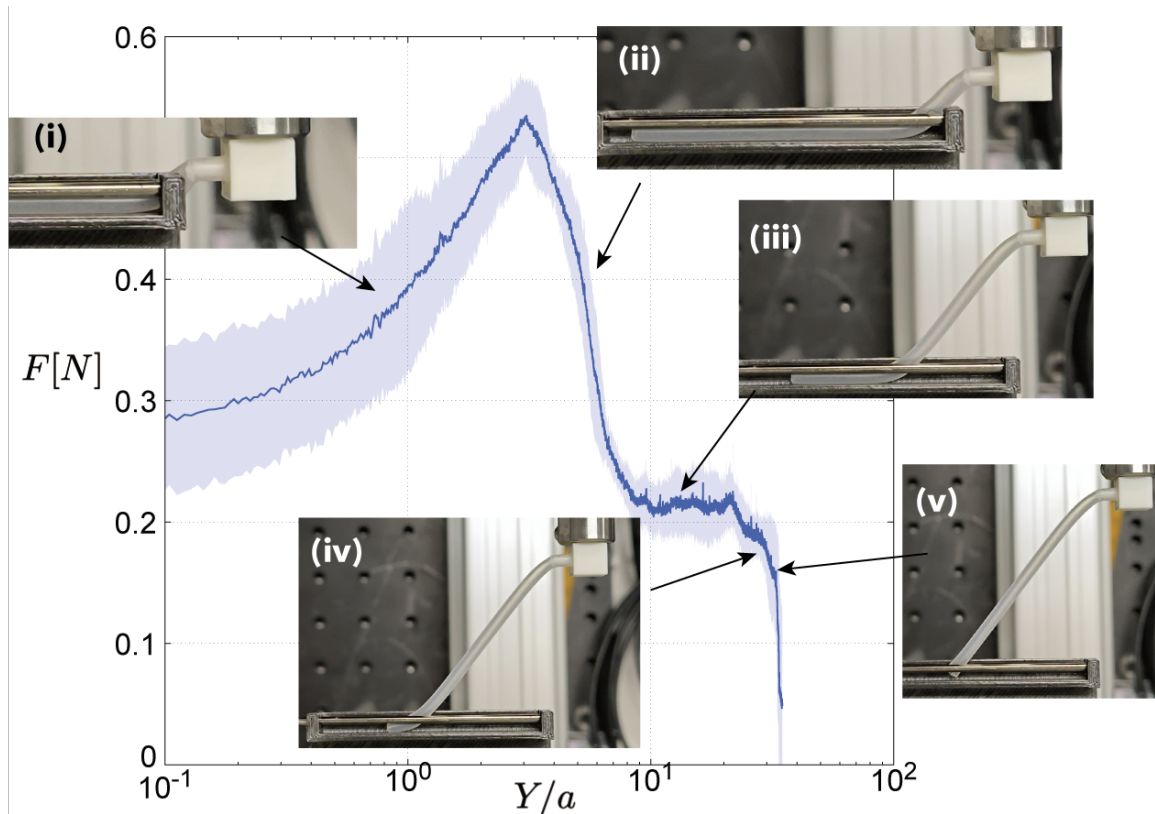


図 6 ピーリング試験の際の典型的な荷重-変位曲線。図 5(a) と等価なモデルで実験している。横軸は持ち上げ変位  $Y$  をチューブ半径  $a$  で規格化し、対数表示している。縦軸は剥離に要する荷重  $F$  を表す。紫色に塗りつぶした領域は実験で得られた荷重値の標準偏差を表す。(i)-(v) は剥離過程でチューブが示す形態を表しており、それぞれの画像に対応する荷重値が矢印で示されている。

域の 3 つに分割し、それぞれのチューブのつりあい方程式 (Kirchhoff 方程式 [7]) を解く解析計算に取り組んでいる。この解析では、領域 (I)、(III) の解を不定パラメータ付きで得ることは容易だが、3 領域を連続的に接続する境界条件と領域 (II) にはたらく接触力を特定して不定パラメータを定めることは簡単ではない。申請者は、領域 (II) に作用する接触力がどのように分布しているか明らかにするために、実験を再現する数値シミュレーションに取り組んでいる。

チューブと剛体棒のあいだの接触や、それに伴うチューブの局所変形を詳しく調べるため、さらに摩擦係数の影響を定量的に明らかにするために、申請者は数値シミュレーションの実装に取り組んでいる。当初は、CAE のソフトウェア Abaqus (Dassault Systèmes) を用いて有限要素シミュレーションを試みたが、チューブが潰れるような変形 (Brazier 座屈 [10]) を再現するためには膨大な計算コストが必要となり、研究への利用は現実的ではないと判断した。次に、オープンソースの分子動力学ソフトウェア LAMMPS [12] を用いたシミュレーションを検討した。Boston University に在籍していた A. Guerra 博士は LAMMPS によって薄膜やロッド、シェルの弾性変形を直接的に計算するオープンソースコードを開発し [13]、これまでに薄膜に生じるしわや折りたたみ、弾性梁どうしの接触変形に関する研究を実施してきた [14-16]。彼らの手法を用いれば、シェルを三角格子の粒子ネットワークとして離散化し、伸縮、曲げ変形に関するエネルギーペナルティをそれぞれ設定することで、分子動力学の手法で高速計算することが可能となる。図 7 はテスト計算の結果で、摩擦がない場合ではあるが、実験結果と定性的に似た形状を再現できている。接触領域近傍に大きな曲げエネルギー

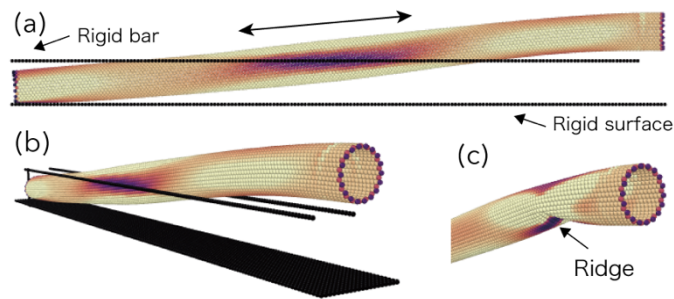


図 7 分子動力学シミュレーションによるピーリング試験の再現。色は曲げエネルギー密度の大きさを表し、色が濃いほどその値は大きい。(a)チューブを横から見た図。矢印で示す領域に相対的に大きな曲げエネルギーが分布していることが確認できる。(b) (a)を斜めから見た図。(c)  $Y$ が大きな値のとき、Brazier 座屈が生じる。図 3(b)と似た応力集中構造が見られる(図中の矢印)。

が分布している様子(図 7(a))や、変位  $Y$  がある程度大きな値のときに発生する Brazier 座屈(図 7(c))も実験結果と定性的に一致している。今後は、摩擦を伴う接触に関するベンチマークテストを完了させ、数値計算シミュレーション上でのピーリング試験の結果と実験結果の定量的な比較に取り組む予定である。また、数値シミュレーションから応力分布を詳細に調べ、このシステムにおける“メタ接着強度”を与えるスケーリング則の導出も実現したい。

## 9. まとめ

本研究では、系の幾何的なパラメータと弾性率を通じて接合強度をチューンできるようにスナップフィットシステムの開発を目指す基礎研究として、開円筒型シェルの接触・収納の力学、摩擦環境下でのシートの折れ曲がりや折りたたみ形態の形成過程、そして、溝にはめ込んだロッドを引き剥がす試験という 3 種類の問題に、実験、数値シミュレーション、理論解析の 3 つのアプローチを組み合わせることで取り組んだ。これらの研究により、摩擦を伴う接触条件におかれたシェルやシートが、外界に適合しながら自発的な構造形成を起こすことが、一般的な振る舞いとして観測されることが明らかになった。この性質がより便利なスナップフィットシステムを設計するためにどのように活かせるのか、数値シミュレーションを利用した詳細な応力場解析を進めていく必要がある。

## 謝辞

本研究は（公益財団法人）天野工業技術研究所、2025 年研究助成を受けて実施されました。

## 参考文献

- 1) T. Abreu, J. Laranjeira, R. Leal, C. Leitão, and I. Galvão, Mechanical interlocking in materials joining by additive manufacturing: A short review, *Proc Inst. Mech. Eng. L: J Materials: Design and Applications*, 14644207251389133 (2025).
- 2) K. Yoshida and H. Wada, Mechanics of a snap fit, *Phys.Rev. Lett.* 12, 194301, (2020).
- 3) K. Yoshida and H. Wada, Indentation of an elastic arch on a frictional substrate: Pinning, unfolding, and snapping, *Phys. Rev. E* 109, 045001 (2024).
- 4) T. G. Sano, E. Hohnadel, T. Kawata, T. Métivet, and F. Bertails-Descoubes, Randomly stacked open cylindrical shells as functional mechanical energy absorber, *Commun. Mater.* 4, 59 (2023).
- 5) R. Xu, Y.He, X.Li, M. Lu, and Y. Chen, Snap-fit mechanical metamaterials, *Appl. Mater. Today* 30, 101714 (2023).

- 6) Y. Matsumoto, K. Yoshida, and T. G. Sano, Sliding of cylindrical shell into a rigid hole, *Phys. Rev. E* 113, 035501 (2026).
- 7) B. Audoly and Y. Pomeau, *Elasticity and geometry: from hair curls to the non-linear response of shells*, Oxford university press (2010).
- 8) K. Yoshida and H. Wada, Wrinkles, rucks, and folds formed in a heavy sheet on a frictional surface, *Soft Matter* 22, 3320 (2026).
- 9) J. T. Miller, T. Su, E. B. Dussan V., J. Pabron, N. Wicks, K. Bertordi, and P. M. Reis, Buckling-induced lock-up of a slender rod injected into a horizontal cylinder, *Int. J. Solids Struct.* 72, 153-164 (2015).
- 10) C. R. Calladine, *Theory of shell structures*, Cambridge university press (1983).
- 11) K. Yoshida and H. Wada, Back cover, *Soft Matter* 22, 3422 (2026).
- 12) A. P. Thompson, et al. LAMMPS - a flexible simulation tool for particle-based materials modeling at the atomic, meso, and continuum scales, *Comp. Phys. Comm.* 271, 108171 (2022).
- 13) A. Guerra, *LAMMPS Structures*, Github (2023).
- 14) A. Guerra and D. P. Holmes, Elastogranular sheets, *Matter* 6 (4), 1217 (2023).
- 15) L. Stein-Montalvo, A. Guerra, K. Almeida, O. Kodio, and D. P. Holmes, Wrinkling and developable cones in centrally confined sheets, *Phys. Rev. E* 108, 035002 (2023).
- 16) A. Guerra, A. C. Slim, D. P. Holmes, and O. Kodio, Self-Ordering of Buckling, Bending, and Bumping Beams, *Phys. Rev. Lett.* 130, 148201 (2023).