

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17934

研究課題名(和文) 表面エネルギーを考慮した微小構造体の力学理論の構築と形態制御への応用

研究課題名(英文) Mechanics of fine structures considering surface energy and its application to shape control

研究代表者

高橋 航圭 (Takahashi, Kosuke)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：60619815

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、固体表面のぬれ性に着目し、液面に浮かべたフィルムの中央部を引き上げることで円筒状の立体構造を形成する方法を提案した。様々な寸法のプラスチックフィルム、ゴムシートで実験を行った結果、適切な寸法を選択することで、円筒状構造が形成可能であることを示した。また、液体とフィルムの物性値、寸法を用いて、形成される円筒状構造の解析解ならびに形成に必要なフィルム厚さの条件を導出することができた。さらに、グラフェンシートからも円筒状構造が形成可能なことを、シミュレーションにより示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a new method of manufacturing cylindrical structure in small scale was proposed. When a thin film floated on water is pulled up, it automatically deforms due to capillarity and eventually wraps liquid drop to form a cylindrical structure. The proposed method was confirmed by polymer films and rubber sheets in various dimensions. In addition, an analytical model was established to predict size of the cylindrical structure and maximum thickness of films for formation. Molecular dynamics simulation was also conducted to show the manufacturing a graphene roll from graphene sheet.

研究分野：材料強度学, 破壊力学, 接着接合, 複合材料

キーワード：Capillarity Surface energy Microstructures Elastocapillary

### 1. 研究開始当初の背景

近年、エネルギー需要の増加と資源の有効活用の観点から、表面積の大きさを活かした高効率なバッテリーや熱交換器等のマイクロ・ナノデバイスの開発が盛んに行われている。微小構造体の設計にあたっては、マクロスケールでは見られない表面力の効果が顕著になり、特に固体表面間に液体が存在する場合には想定外の変形が生じないように注意が必要である。一方で、固体表面のぬれ性が及ぼす変形を積極的に活用すれば、液滴との相互作用によって平面から立体構造を形成することができるため、微小構造体の特性を活かした新たな成形法として注目されている。

しかし、材料と液体とのぬれ性を考慮に入れた変形量の評価方法が確立されていないために、構造体ごとに個別の解析モデルを構築するか、設計要求を満たすために材料や寸法の選定を試行錯誤せざるをえないのが現状である。そこで、表面エネルギーの効果を考慮に入れ、構造体の変形量を表す汎用的な評価式の確立が求められている。

### 2. 研究の目的

本研究では、従来の材料力学では考慮されていない表面エネルギーの取り扱いを一般化した力学理論の構築を目指した。具体的には、以下を目的に取り組んだ。

(1) ポリマーフィルムのぬれ性が及ぼす吸着力に着目し、図1のように平板からの円筒形成が可能であることを示す

(2) 系のポテンシャルエネルギーが最小となる条件から、形成される円筒状構造の形状を表す解析解を導出し、実験結果との比較によって有効性を示す。

### 3. 研究の方法

(1) 液面からのフィルム引き上げ実験による円筒状構造の形成

二次元の変形を対象とし、奥行きに対して長手方向に十分に長いフィルムを用いて実験を行う。試験片は弾性率の小さいポリマーフィルムとし、液体は表面エネルギーの大きい水を用意する。フィルムの中心に糸を接着し、図1のようにロードセルを介して吊るした状態でアクチュエータにより上下動できるように実験装置を構成する。

(2) 表面エネルギーの考慮による円筒状構造の解析解導出

液面に浮遊した平板を持ち上げると、液面との間に形成される液架橋が負圧となる(ラプラス圧)ことから平板を引き寄せられる力が生じる。フィルムの変形によるひずみエネルギー、液架橋形成に要する表面エネルギーのつり合い、持ち上げられた液体の重量による位置エネルギーを考慮して、微小構造体の変形に適用すべき基礎式を導出する。

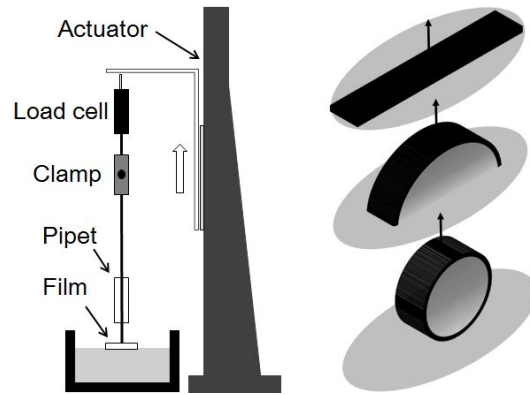


図1 フィルムの引き上げによる円筒状構造の形成

### (3) 提案手法の分子スケールへの展開

分子動力学を用いて、液面に浮遊したグラフェンシートの引き上げを計算する。グラフェンシートがロール状に変形していく過程を、円筒形成条件と比較検討することで、(2)で得た解析解を分子スケールにも適用できるように展開する。

### 4. 研究成果

(1) 様々な材質、面積、厚さを有する樹脂フィルムを液面に浮かべて糸で引き上げた結果、液面から離れた後の樹脂フィルムの形状は、液滴型、吸着部を有する液滴型、はく離して立体構造未形成の三通りに分類された。適切に条件を選定することで、立体構造の形成が可能であることを示すことができた。



図2 フィルムの引き上げによる円筒状構造の形成

(2) フィルムを液面から引き上げることで形成される立体構造について、ポテンシャルエネルギーが最小となる条件から解析解を導出した。これにより、立体構造を形成するために必要なフィルム厚さ、フィルム長さの条件を決めることができた。図3の実線上が液滴型となる条件、実線より上の領域が吸着部を有する液滴型、下側がはく離してしまい立体構造を形成できない領域である。様々な厚さ、長さのポリエチレンフィルム、シリコンゴムフィルムを水面から引き上げ、液滴型になった場合を○、吸着を有した場合を●、形成できなかった場合を×で図2に示した。解析解から導かれた形成条件とよく一致することが示され、有効性を示すことができた。また、表面処理によって接触角を変えて実験を行ったところ、図4のように形状には影響しないことが明らかとなり、これも解析解で示された通りであった。

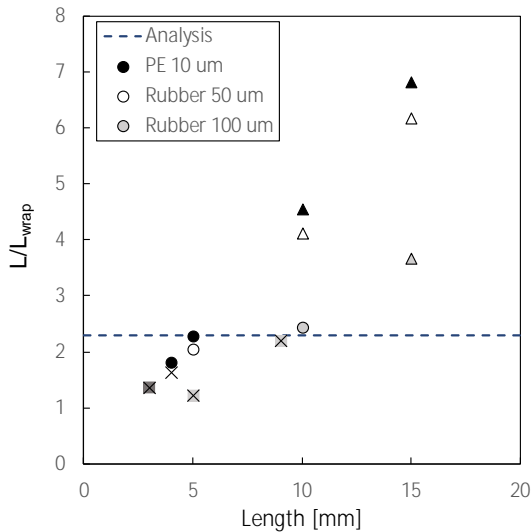


図 3 実験で得られた形成結果と解析解との比較

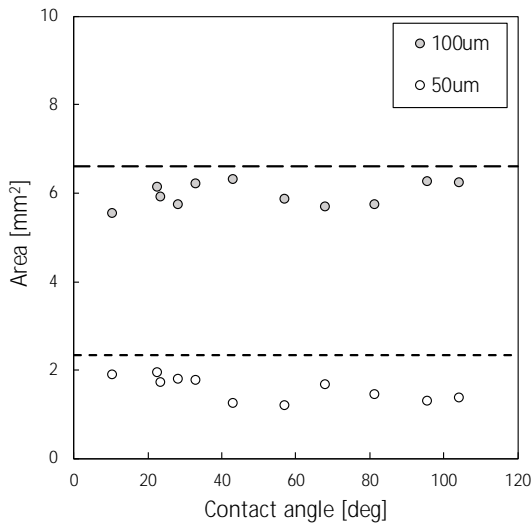


図 4 円筒状構造の形状に及ぼす接触角の影響

(3) 提案している立体構造形成法を分子スケールへと展開していくため、分子動力学シミュレーションによって、単層グラフェンシートを液面から引き上げる計算を行った。グラフェンシートと水分子の間のポテンシャルを決めるパラメータによって接触角を変化させ、引き上げた後に形成される円筒構造の違いについて考察した。結果、接触角が  $90^\circ$  よりも大きいときには液体からはく離してしまうが、接触角が小さいときには図 5 のように円筒構造が形成されることを確認した。しかし、形成された円筒構造は解析解よりも遥かに小さい寸法であったことから、単層グラフェンシートからの立体構造形成には分子スケール特有の現象を考慮に入れ、理論の修正が必要であることが明らかとなった。

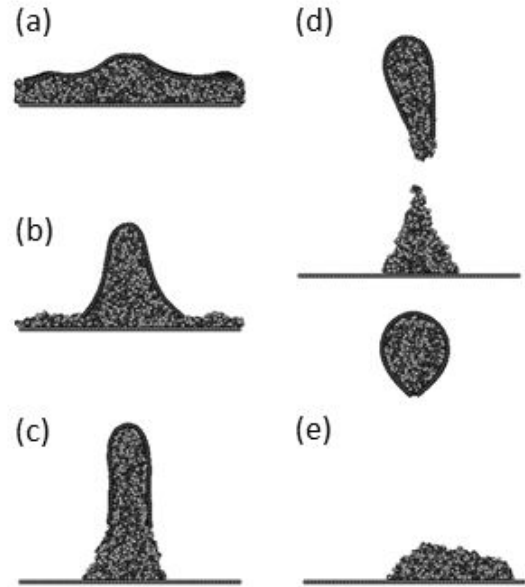


図 5 分子動力学シミュレーションによるグラフェンシートからの立体構造形成

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Kousuke TAKAHASHI, Takahiro MATSUO, Masakazu FURUTA, Shuzo OSHIMA, Kazuaki INABA, Kikuo KISHIMOTO, “Wetting-induced attraction of thin plates due to capillary flow” Mechanical Engineering Letters 2, 16-00227 (査読有り)

〔学会発表〕(計 7 件)

Kosuke Takahashi, Daiki Hizukuri, Kazuaki Inaba, Kikuo Kishimoto, “Capillary Induced Fabrication of Cylindrical Structures”, The 7th East Asia Mechanical and Aerospace Engineering Workshop, (Nov. 2017), Sapporo, Japan

高橋航圭, “微細構造体の表面エネルギーに起因する吸着力・接着力の評価に関する研究”, 日本機械学会 M&M2017 材料力学カンファレンス(招待講演), (2017 年 10 月), 札幌

檜作大樹, 高橋航圭, 因幡和晃, 岸本喜久雄, “ぬれ性起因の平板変形を利用した円筒構造形成”, 日本機械学会 M&M2017 材料力学カンファレンス(招待講演), (2017 年 10 月), 札幌

Kosuke Takahashi, Bentang A. Budiman, Kazuaki Inaba and Kikuo Kishimoto, “Characterization of interfacial strength between fiber and matrix based on image analysis of photoelasticity”, 17th European Conference on Composite

Materials, (June, 2016), Munich, Germany

Kosuke Takahashi, Shuzo Oshima, Kazuaki Inaba and Kikuo Kishimoto, "Evaluation of capillary attraction between thin plates", The 6th East Asia Mechanical and Aerospace Engineering Workshop, (June, 2016), Tainan, Taiwan

Kosuke Takahashi, Bentang Arief Budiman, Kazuaki Inaba, Kikuo Kishimoto, "Evaluation of interfacial strength of fiber/matrix in composites by characteristic length of Tresca stress contour", The 3rd International Workshops on Advances in Computational Mechanics ,(October, 2015), Tokyo, Japan

Kosuke Takahashi, Masakazu Furuta, Shuzo Oshima, Kazuaki Inaba, Kikuo Kishimoto, "Dependence of Capillary Speed on Capillary Bending of Thin Plates", ASME 2015 Applied Mechanics and Materials Conference, McMAT2015, (June, 2015), Seattle, US

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高橋 航圭 (Takahashi, Kosuke)  
北海道大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号：60619815

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：

(4) 研究協力者

( )