

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14115

研究課題名(和文)多節環状弾性体の立体配座および双安定性の解明とその応用

研究課題名(英文)Elucidation of conformation and bistability of a multi-jointed elastic loop structure and its applications

研究代表者

田中 展 (Tanaka, Hiro)

大阪大学・工学研究科・講師

研究者番号：70550143

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、弾性部と関節部で連結された細長い環状構造(多節環状弾性体)の絡み合い変形について調査した。弾性部に直筒型/くびれ型/ペローズ型の3種類の形状を用いた牽引変形試験を実施して、ペローズ型モデルでのみ関節部のねじり回転に起因する立体配座が形成されることを観察した。そして、曲げ剛性とねじり剛性の比が立体配座の形成に重要な役割を果たすことを考察した。さらに異なる要素数の多節環状弾性体の牽引変形試験によって、大きいサイズの構造が初期立体配座から折り畳み挙動に遷移する多重分岐モードを明らかにした。そして、画像処理と凸包解析によってバルク固体に見られない立体配座と遷移メカニズムの定量化に成功した。

研究成果の概要(英文)：This study investigated the tangle deformation of a slender loop body connected with elastic tube segments and revolute hinges. We prepared three types of segment geometry: straight, necked, and bellows tubes. Demonstrating the traction-deformation tests for their elastic loop structures, we observed that the bellows-type model only formed a conformation induced by torsional rotation of the discrete hinges while the other models shrank without torsional rotation. According to the mechanics of materials, we discussed the ratio of bending to torsional stiffness, which plays an important role at the conformation. The further traction-deformation tests for the proposed structures with the different numbers of segments revealed multiple bifurcation modes that the large-sized models transit from the initial conformations to the folding behaviors. The image processing and convex hull analyses succeeded to quantify the conformation and transition mechanisms, which bulk solids might not have.

研究分野：固体力学

キーワード：多節環状弾性体 立体配座 絡み合い構造 双安定性 形態制御 非線形構造力学

1. 研究開始当初の背景

エントロピー弾性や相転移など高分子構造特有の力学特性は、モノマーと呼ばれる線状物体のねじり回転や曲げ変形の素過程から、多数のモノマーが結合したポリマーの集団的なもつれ変形までの階層的・統計的相互作用によって発現される。高分子構造の単位要素にあたる線状物体に注目すると、例えば一本鎖 DNA は両端部に張力とトルクを作用させることで"plectoneme"と呼ばれる形態に変化することが知られている[1]。また近年、液晶内に配列した微細コロイド粒子が生む欠損場を利用して、高分子による三つ葉結び目"trefoil knot"を生成できることが報告されている[2]。このように線状物体は、金属結晶のバルク固体にはみられない特殊な形態をもち、それらの絡み合いやねじれ変形は、ゴムのガラス転移やゲルの膨張収縮における相転移など高分子化合物が発現する特異な力学特性と密接な関係がある[3]。

Tangle モデルと呼ばれる玩具によって、ねじり回転が主体となる線状物体の新しい環状形態が具現化されている[4,5]。そのループ構造は、剛な 90 度曲がりほりを n 組用意して、回転ヒンジを介してそれらを環状に連結することで作製される[6]。Tangle モデルの形態自由度は n に依存する。例えば $n = 6$ のとき、Tangle モデルは 3 種類の形態に分類でき、これらは chair 型、boat 型および twist-boat 型といった空間的な原子配置を表す立体配座 (conformation) にそれぞれ対応させることができる(ここでは、形態の種類を表す用語として、結合回転と関連付けられる「立体配座」を広義に使用する)。さらに n が増えると、立体配座の組み合わせは爆発的に増加する。

本研究では、線状物体の変形に着目して、上記の Tangle モデルからヒントを得た離散的なねじり回転と連続的な曲げ変形が連成する多節環状弾性体を提案する。そして、構造模型を用いたモデル実験によって観察される特殊な変形能について考察する。

2. 研究の目的

上述した研究背景に基づいて、本研究では、「目的 1: Tangle モデルの剛体線素を弾性体に拡張した多節環状弾性体の開発」と「目的 2: 当該構造体の曲率変化による立体配座の制御とその双安定性に関する力学解明」の 2 つを主目的として設定する。

目的 1 では、Tangle モデルの剛体曲がりほりを弾性体に置き換えた環状構造体を新たに提案する。このとき、当該構造体は弾性部

と関節部の繰り返し構造となる。ここで、弾性部および関節部に対して市販の樹脂部品を選定し、また必要に応じて 3D プリントを用いて設計開発する。

目的 2 では、目的 1 で開発した多節環状弾性体に対して、弾性部に曲げ変形を作用させる牽引機構を開発する。続いて、その機構を用いた牽引変形試験を実施して、構造体の変形形態を定量的に計測するための撮影システムと画像処理解析の構築に従事する。そして、得られた実験データに基づいて特殊な変形・機構を発現する多節環状弾性体の力学的メカニズムに対する考察を与える。

3. 研究の方法

3.1 模型開発

Tangle モデルを応用して剛な曲がりほり線素を弾性体に置き換えた多節環状弾性体を提案する。ここで、弾性部としては市販の樹脂製品を、関節部としては 3D プリントを用いて特殊加工した樹脂部品を用いて、それらを組み合わせて作製する。弾性部には図 1(a)-(c) に示すような 3 種類のチューブ形状をもつ構造を考える。それぞれ、直筒型、くびれ型、およびベローズ型のチューブ形状とする。ここで、前者 2 つの材料にはシリコンゴムを、後者にはテフロンを用いる。次に、弾性チューブ間を連結する関節部に当たる回転ヒンジ機構の CAD データを図 2 に示す。

3.2 節で後述する牽引変形試験のために、当該関節部には中心軸に直径 1 mm の貫通穴が加工されている。この加工によって構造全体に 1 本の牽引用糸を貫通させることが可能となる。実際に作製した関節部と直筒型弾性部の 1 組のユニット構造を図 3 に示す。このユニット構造を n 組用意して、互いに連結して組み立てることで、所望の多節環状弾性体を作製することができる。

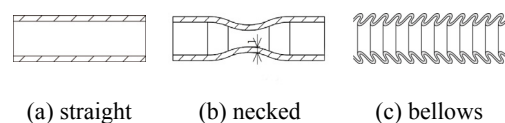


Fig. 1 Three types of elastic components.

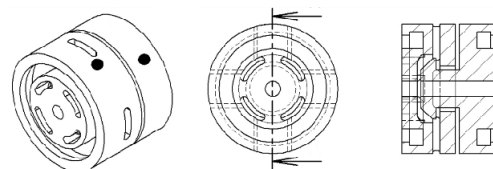


Fig. 2 CAD data of a revolute hinge.



Fig. 3 A unit of the segment.

参考文献: [1] S. Neukirch, J.F. Marko, *Phys. Rev. Lett.*, **106** (2011). [2] W.T.M. Irvine, D. Kleckner, *Nature Materials*, **13** (2014). [3] 田中豊一, "ゲルの相転移", *JPS*, **41** (1986). [4] S.D. Guest, P.W. Fowler, *Proc. R. Soc. A.*, **466** (2010). [5] Tangle model (<http://www.tanglecreations.com>). [6] R. Zawitz, US Patent, D334,416 (1991).

3. 2 牽引変形試験

多節環状弾性体を用いた牽引変形試験の概観を図4に示す。万力で構造体両端が閉じて固定されており、構造内部に牽引用糸が貫通されている。両端から出ている貫通糸はともにラチェット式ハンドウィンチに固定されている。このハンドウィンチより両側から牽引糸を巻き取ることで、当該環状構造に周方向の圧縮荷荷が作用して全体が縮小する。本試験は先に示した3種類の形状の弾性チューブに対して実施した。

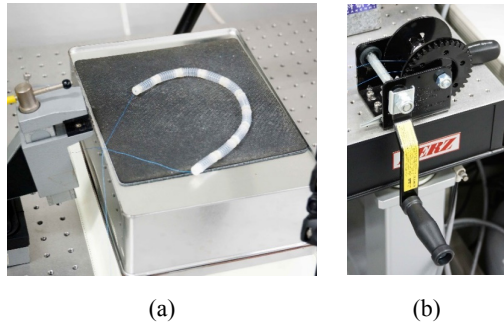


Fig. 4 Traction-deformation test.

3. 3 撮影システムと画像処理解析

多節環状弾性体の立体配座の3次元情報を取得するため、多方向から多節環状弾性体(構造模型)を撮影する計測システムを開発した。開発した計測システム全体を上方と前方から撮影した様子を図5(a), (b)にそれぞれ示す。

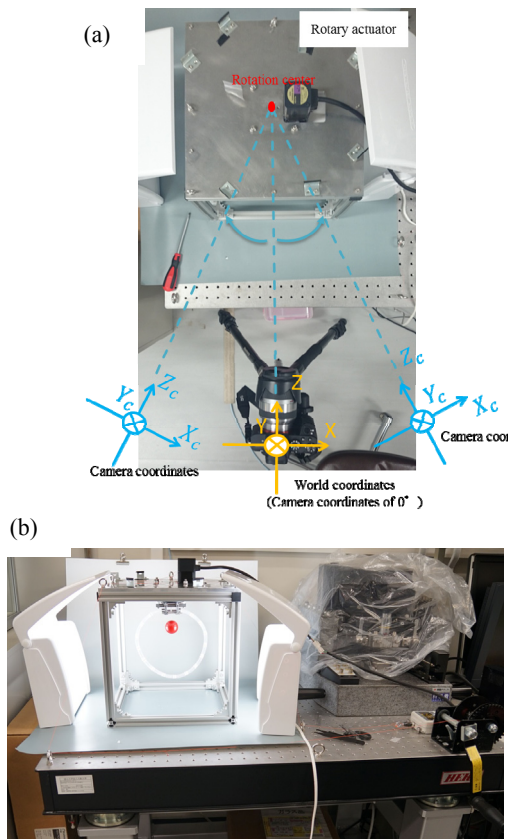


Fig. 5 Measurement system: (a) upside; (b) front.

図5に示すようにアルミフレームに中空ロータリーアクチュエータを固定し、それを介して構造模型を取り付けている。そして、ロータリーアクチュエータを駆動させることで構造模型がy軸回りに回転し、固定カメラを用いて任意の角度方向から変形画像を取得することが可能となる。また、構造内部を貫通している牽引用糸は、アクチュエータの中空部を通してアルミフレームの上面に出ている。そこから、外部に設置しているハンドウィンチまで接続させることで、ハンドウィンチの回転によって構造模型に変形が作用する機構となっている。

取得した変形画像より関節部にマーキングした楕円を抽出して、画像処理解析によって各関節部の中心の位置座標を推定する。ここで、弾性部の番号として構造体の左端より $i = 1, \dots, n$ と番号を与える。同様に関節部についても $j = 0, \dots, n$ と番号を与える。例えば、 $n = 8$ の場合を図6に示す。このとき、ハンドウィンチの巻き取り数を R として、 j 番目の関節中心位置を ${}^{(R)}\mathbf{c}_j$ としたとき、隣接する関節間の距離を要素長さとして以下のように計算する。

$${}^{(R)}\ell_i = \left\| {}^{(R)}\mathbf{c}_{j+1} - {}^{(R)}\mathbf{c}_j \right\| \quad (1)$$

式(1)を用いて、異なる要素数 n に対する構造模型の変形形態の推定と定量的評価を行った。その詳細を4. 2節で後述する。

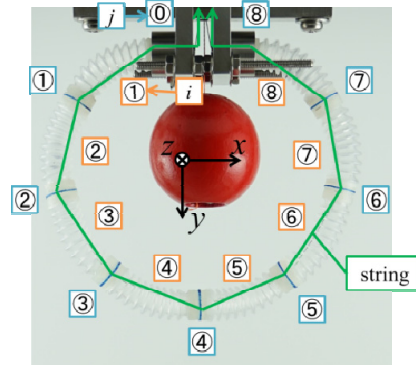


Fig. 6 Symbolic descriptions of the structure.

4. 研究成果

4. 1 牽引変形試験の結果と考察

要素数 $n = 10$ の多節環状弾性体に対して3. 2節で説明した牽引変形試験を実施した。3種類の形状の弾性チューブに対して本試験によって観察された変形形態を図7にそれぞれ示す。ここで、図7(a)–(c)は各構造体の初期形状を表し、図7(a)'–(c)'は牽引変形試験中の各構造体の特徴的な形状を表す。試験結果より、直筒型の場合は弾性部にあたる各セグメントの圧縮変形が主体となっていることがわかる(図7(a)'参照)。また、くびれ型の場合は、セグメントの一樣な圧縮変形から局所的な曲げ座屈に移行している(図7(b)'参照)。これら2つの構造体においては明らかに関節

部のねじり回転が生じていない。一方、ペローズ型の場合は、他と同様に变形初期期では一様な圧縮変形が進行するが、ある臨界点において関節部のねじり回転が生成して全体が収縮していることが観察される(図 7(c)' 参照)。その形状は同じ要素数をもつ Tangle モデルの立体配座と類似している。

材料力学に基づいて直筒型とペローズ型のチューブ形状の剛性を比べると、ペローズ型は曲げ剛性と比較してねじり剛性が非常に大きいことがわかる。図 7(c)' の変形形態をみると、各弾性部が曲げ変形を担い、各関節部にねじり回転が生じている。すなわち、ペローズ型特有の剛性比率によって弾性要素のねじり変形を抑制することで曲げとねじり回転の 2 つの変形モードが連成し、構造全体として Tangle モデルにみられるような立体配座が誘起されたと考える。

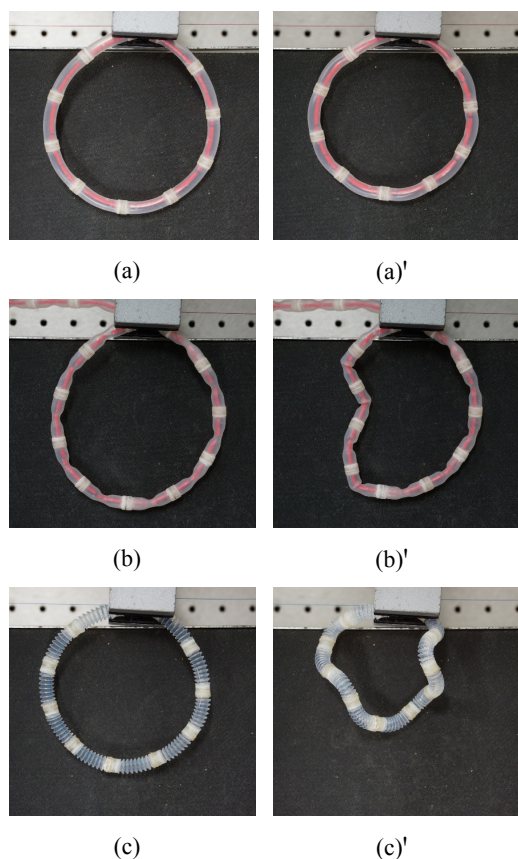


Fig. 7 Undeformed and deformed shapes.

4. 2 変形形態の推定と定量的評価

異なる要素数 $n = 8, 12, 16$ の多節環状弾性体に対して前節と同様の牽引変形試験を行い、3. 3 節に示した変形形態の推定とその定量的評価を行った。 $n = 8$ の変形の様子を図 8 に示すように、図 7(c)' と同様の立体配座が確認できる。次に、 $n = 12, 16$ の変形の様子を図 9 に示す。ここで、図(a-i)-(a-iv)は $n = 12$ の場合の形態変化を、図(b-i)-(b-iv)は $n = 16$ の場合の形態変化を示す。ここで、図中の赤い球体はロータリーアクチュエータの回転軸(y 軸)を取得するためのもので、構造模型の変形には関与しない。図 9 より、 $n = 12, 16$ の

構造模型はステップ(ii)において $n = 8$ と類似する立体配座が発現するが、ステップ(iii)以降に構造が折り畳まれるような変形が開始して全体が収縮する様子が観察される。

図 9 の変形様式に対する弾性部の要素長の変化を図 10($n = 12$)および図 11($n = 16$)にそれぞれ示す。ここで、縦軸は式(1)の要素長さを、横軸はハンドウィンチの巻き取り数を表す。図 10 および図 11 より、数 mm 程度の大きな誤差を含んでいるものの、各要素長は一樣に減少していることがわかる。

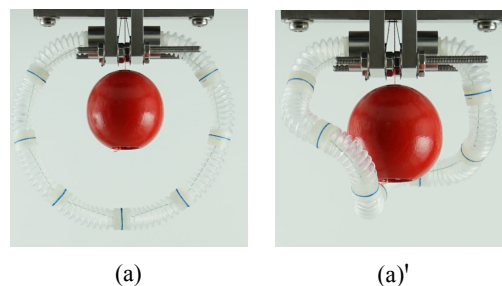


Fig. 8 Undeformed and deformed shapes ($n = 8$).

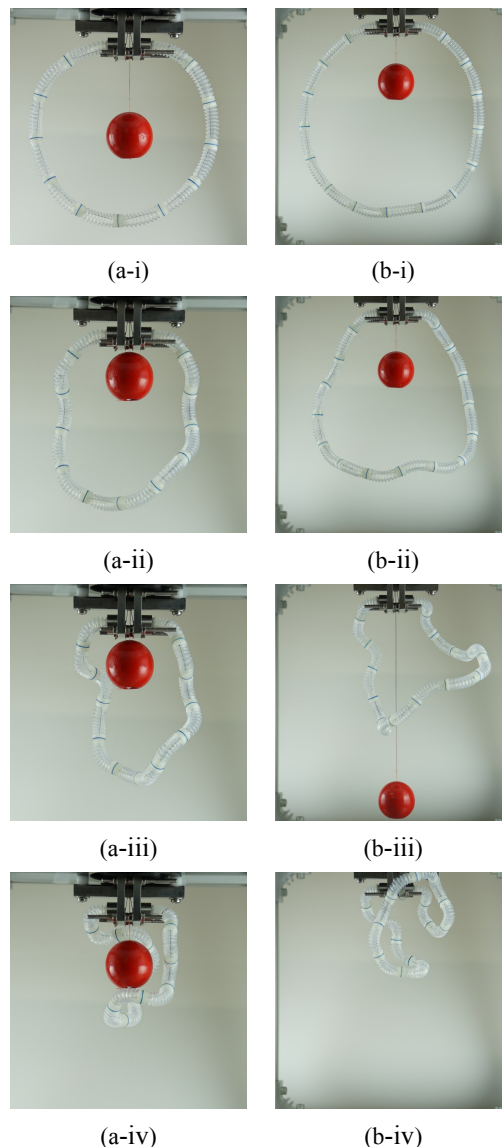


Fig. 9 Deformation process: (a) $n = 12$; (b) $n = 16$.

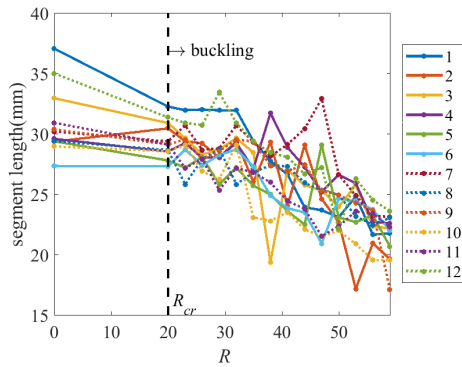


Fig. 10 Segment length variations ($n = 12$).

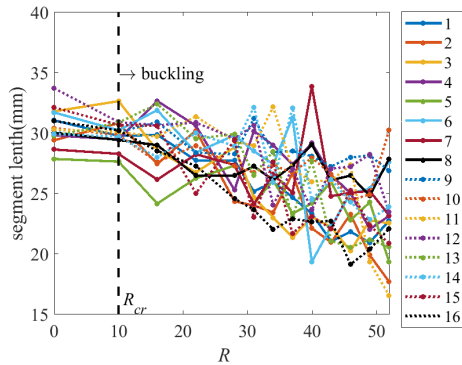


Fig. 11 Segment length variations ($n = 16$).

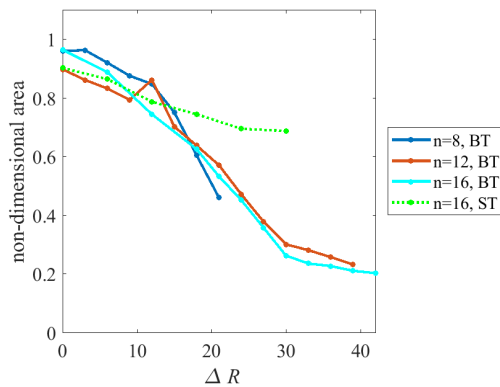


Fig. 12 Non-dimensional area variations.

次に、多節環状弾性体の変形機構を評価するために、多節環状弾性体を x - y 平面に投影させたときの面積(凸包領域)を考える。各要素数に対する構造模型の投影面積の変化を図 12 に示す。ここで、縦軸は変形状態の投影面積を初期状態の投影面積で除した無次元面積を表し、横軸は立体配座の開始点からの巻き取り数を表す。また、図 12 には両側牽引の変形試験の結果($n = 8, 12, 16, BT$)に加えて、片側固定・片側牽引の結果($n = 16, ST$)を追加する。図 12 より両側牽引の場合、3 種類の要素数に対して無次元面積の変化がよく一致している。特に $n = 12, 16$ では折り畳みモードに切り替わる遷移点と遷移以降の傾向もよく一致する。一方、片側牽引ではこのような変形遷移が見られない。

本変形メカニズムが一般的に成り立つこ

とを実証するためには、更に異なる要素数の追実験による初期値依存性および再現性を確認して、折り畳みモードなど多節環状弾性体に潜在する多重分岐特性と双安定性に関する変形機構について調査する必要がある。

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)

[学会発表] (計 5 件)

① H. Tanaka, T. Nanjo, Y. Shibusaki, “Conformation of an elastic loop structure connected with multiple revolute hinges and its measurement”, *The 10th European Solid Mechanics Conference (ESMC2018)*, Bologna, Italy, 2018/7/2–6 (accepted)

② 南條隆正, 田中 展, 渋谷陽二, “周方向圧縮による局所的なねじり回転を許容する環状構造体の座屈後変形挙動”, 日本機械学会関西学生分会2017年度学生員卒業研究発表講演会, 摂南大学寝屋川キャンパス, 大阪府寝屋川市, 2018/3/10.

③ 田中 展, 南條隆正, 渋谷陽二, “離散的なねじり回転に伴う環状弾性体のもつれ変形に関する考察”, 日本機械学会 M&M2017材料力学カンファレンス, 北海道工学部, 札幌市, 2017/10/7–9.

④ 浜田一駿, 田中 展, 渋谷陽二, “単軸圧縮下における低自由度周期リンク構造の変形遷移解析”, 日本機械学会 M&M2017材料力学カンファレンス, 北海道工学部, 札幌市, 2017/10/7–9.

⑤ 須賀海斗, 田中 展, 奥村 大, 渋谷陽二, “均質化法に基づく負のポアソン比を示す異方性積層セル構造体の有限要素解析”, 日本機械学会 M&M2017材料力学カンファレンス, 北海道工学部, 札幌市, 2017/10/7–9.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 多節環状弾性体

発明者: 田中展, 岩田直己, 渋谷陽二

権利者: 大阪大学

種類: 特許

番号: 特願 2017-045107

出願年月日: 2017 年 3 月 9 日

国内外の別: 国内

[その他]

研究室ホームページ: <http://www-comec.mech.eng.osaka-u.ac.jp/tanaka.html>

大阪大学研究者総覧: <http://www.dma.jim.osaka-u.ac.jp/view?l=ja&u=6364>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 展 (TANAKA Hiro)

大阪大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号: 70550143