

補助事業番号 2022M-216  
補助事業名 2022年度 多重らせん構造のコード部材に生じる  
接触幾何と力学干渉の解明 補助事業  
補助事業者名 島根大学総合理工学部 機械・電気電子工学科 森本卓也

## 1 研究の概要

本研究では、多重らせん構造のコード部材の引張挙動に対して、有限要素法を用いた接触相互作用を伴う統合的な3Dシミュレーション技術を構築する。そして、微視的な素線の材料因子と幾何因子から、素線間で多数の接触干渉を伴う巨視的な力学応答を予測する。さらに、CTスキャナ内で引張試験を行うことで素線間の内部で生じる接触干渉を3Dで観察し、微視的な構造変化と巨視的な引張応答を定量的に関係づける。これによって、初めてシミュレーションによる接触干渉の妥当性が検証されるとともに、これまで経験的に議論されてきた素線間の接触相互作用が巨視的な引張応答に及ぼす影響を定量的に評価することができる。

## 2 研究の目的と背景

らせん状コードは、自転車用ブレーキケーブル、タイヤ用補強芯線のスチールコード、ワイヤハーネス、エレベータや吊り橋のワイヤロープ、光ファイバケーブルなど、様々な分野で社会基盤の部材として古くから利用されてきた。基本構造は中心に位置するコアの素線まわりに  $n$  本の素線をらせん状に撚り合わせた束（ストランド）で構成される。さらにこのストランドを用いて、コアのストランドまわりに  $n$  本のストランドが撚り合わされたものが  $(1+n)$  コードとなる。このように、素線→ストランド→コードのらせん構造の階層性が、高い屈曲柔軟性と信頼性を生み出している。

コード部材の引張応答は、素線の材料、直径、撚り合わせる際のらせん角とその方向の組み合わせに依存する。様々な目的に適った荷重-変位応答（引張とねじりの変形を同時に生じる力学応答）を得るためには、これらの材料因子と幾何因子の設計パラメータをどのように組み合わせればよいのかを明らかにして、最適設計を行う必要がある。しかし、何世紀にも渡る「らせん構造体の力学」の進展にも関わらず、素線同士の複雑な接触幾何と力学干渉を伴う挙動は未だに定量的に理解されていない。直感的もしくは経験的にノウハウとして定性的な知見が集積されているに留まる。その困難さの理由は、素線の中心線をベースとした伝統的なモデル化では、接触幾何や力学干渉による断面形状の変化などを取り扱うことができない点にある。

そこで、本事業では、個々の素線の微視的構造からコード全体の巨視的応答を予測する統合的な3Dシミュレーション技術を確立し、その妥当性をCTスキャナ内での引張試験により検証することを目的としている。この目的の達成のために、①シミュレーションの実施、②実験の実施、③シミュレーションと実験の比較検討が本事業の主な実施内容である。

## 3 研究内容

### (1) 多重らせん構造のコード部材に生じる接触幾何と力学干渉の解明

#### ①シミュレーションの実施 (図1a)

多重らせん構造の幾何モデルを作製する方法を構築した。幾何モデルは、多重らせん構造

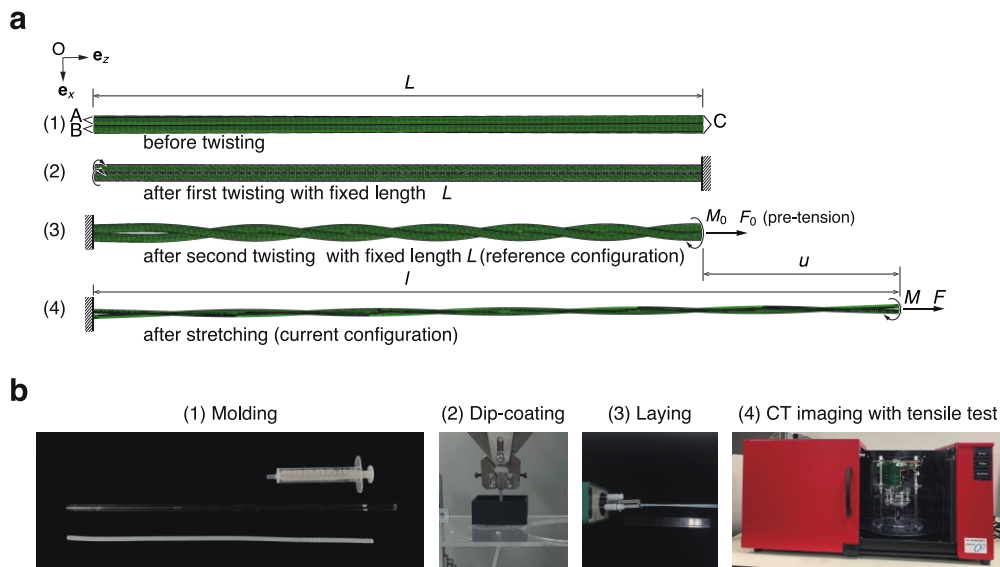


図1: (a) 2重らせんコードの有限要素モデル. (b) 実験手順.

の振率とねじりをパラメータとして、3D CADソフトウェアAutoCAD®を用いて生成した。有限要素モデルの妥当性を検証するためのシミュレーションを実施した。汎用有限要素ソフトウェアAbaqus®/Standardを用いて、最も単純な多重らせん構造を容易に実現する「ゴム紐の一重結び」の解析を実施して、有限要素モデルの妥当性検証を実施した。同様にして、最も基礎となる二重らせん構造へと拡張した有限要素モデルを構築した。実験の作製過程と同様にして、自転と公転を組み合わせた振率（幾何）とねじり（力学）をパラメータとした二重らせん構造の幾何モデルから有限要素モデルを作製し、引張変形下での荷重—変位応答と接触応答のシミュレーションを実施した。

## ②実験の実施（図1b）

ゴム素線による多重らせん構造のコード作製方法を確立した。シリコンゴム（Dragon skin 30, Smooth-On）をアクリルのモールドに注型成型し、CT画像で接触面を明確にするために密度の異なるシリコンゴムをディップコーティングして素線を作製した。そして、ツイスター（TW-2N, (株)東京アイデアル）を用いて、ゴム素線を自転と公転を組み合わせたパラメータを制御することで、振率（幾何）とねじり（力学）を組み合わせた多重らせん構造を作り出す方法を構築した。CTスキャナ内（NAOMi CT 3D-M, (株)アールエフ）での引張試験治具の製作・設置を行い、引張負荷による力学特性と接触幾何の同時測定が可能になるようにセットアップした。産業用X線CT装置内に設置して、らせん構造体の引張負荷下での接触幾何を観察するための引張治具を設計し、メーカーに製作発注した。CTスキャナ内での引張伸張下でらせん構造体の荷重—変位線図と撮像の同時測定を行い、接触幾何を抽出した。

## ③シミュレーションと実験の比較検討

引張伸張下での2重らせん構造のコードの荷重—変位応答において、実験とシミュレーションの結果は30%以内の精度で一致することを確認した（図2）。下撚り数  $m$  と上撚り数  $n$

が大きくなるほど初期荷重  $F_0$  が大きくなるが、コードの剛性はほぼ同じであることがわかった。一方で、次に述べるように接触応答に大きな影響を与えることが明らかになった。

素線間の接触断面の幾何形状について、実験とシミュレーションの結果がほぼ一致していることも確認できた(図3)。下撚り数および上撚り数が大きくなるほど、撚り角が小さくなるため、半径方向の接触力が高くなる。その結果、素線断面は大きく変形していることがわかる。これらの断面形状はシミュレーションの結果とも一致しており、これにより3D有限要素シミュレーションによる接触幾何の予測も妥当性が検証された。

#### 4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

以上の成果により、シミュレーションにより2重らせん構造のコードに対する引張応答の予測を実現した。そして、撚り数の変更によるコードの荷重—変位応答は、初期荷重に影響

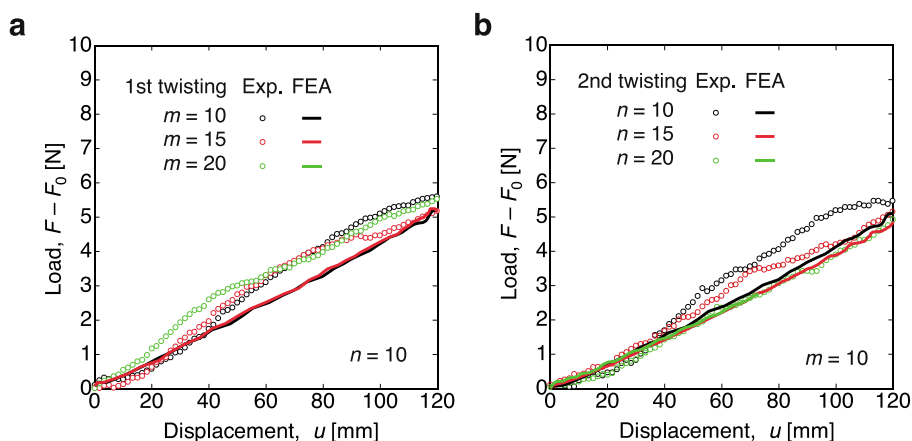


図2： 引張伸張下での2重らせん構造のコードの荷重—変位応答。

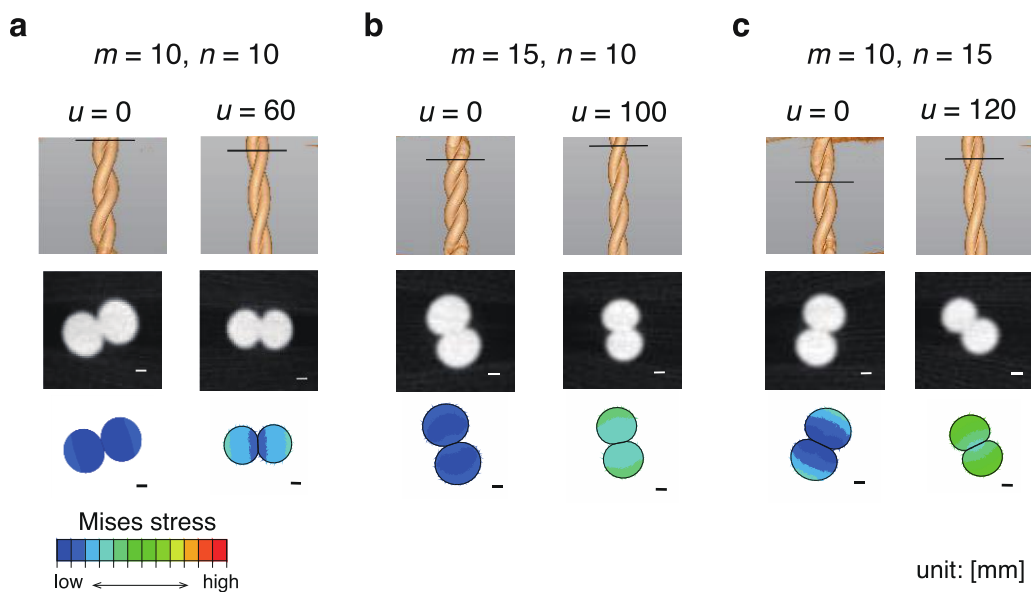


図3： 断面の接触変形応答。

響を与えるものの、コードの剛性自体にはほとんど影響を与えないことが明らかになった。

その理由は素線間の接触応答にあり、断面形状が大きく変形することで剛性を高めるような力学的拘束がないためである。視点を変えると、素線間の接触応答に力学的拘束を付与するような多重らせん構造を導入することで、剛性が変調可能な新構造のコード開発につながる知見が得られる可能性を示唆している。また、多様な多重らせん構造に対して、所望のコードの引張応答を実現するためには、素線の幾何と材料の組合せによる微視構造をどのように設計すればよいのかを示すことができるツールとなる。シミュレーションと実験の基盤技術を確立したことにより、多重らせん構造のコード部材に対するデジタルツイン構築という最終的な目標へ向けて、今後は両者の高度化と最適構造を見出すための研究開発を推進することが可能となる。

## 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

「やわらかい材料」と「しなやかな構造」の力学に関する教育・研究活動を行っている中で、特に座屈現象に興味を持っている。その中で、やわらかい材料であるゴムと局所座屈現象を組み合わせた本課題を着想した。本事業では、計算技術と実験技術の統合によって、限られた研究資源しか持たない小さな研究開発規模で実現可能なモデルベースデザインのフレームワークを構築した。

## 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

### 【学会発表】

1. 林 将吾, 森本卓也, 素線のねじりを考慮した多重らせんストランドの引張挙動, 第14回日本複合材料会議講演会 (2023年3月16日, 早稲田大学).

## 7 補助事業に係る成果物

- (1) 補助事業により作成したもの  
該当なし
- (2) (1) 以外で当事業において作成したもの  
該当なし

## 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 島根大学  
(シマネダイガク)

住 所： 〒690-8504  
島根県松江市西川津町1060

申 請 者： 准教授 森本 卓也 (モリモト タクヤ)

担 当 部 署： 総合理工学部 機械・電気電子工学科  
(ソウゴウリコウガクブ キカイデンキデンシコウガクカ)

E - m a i l : [morimoto@riko.shimane-u.ac.jp](mailto:morimoto@riko.shimane-u.ac.jp)

U R L : [http://ecs.riko.shimane-u.ac.jp/~em/index\\_jp.html](http://ecs.riko.shimane-u.ac.jp/~em/index_jp.html)