

## 研究論文

## 網の伸張変形シミュレーション技術の開発

宮本晃吉\*<sup>1</sup>、太田幸一\*<sup>2</sup>

## Development of Simulation Technique for Net Extension

Kokichi MIYAMOTO\*<sup>1</sup> and Kouichi OHTA\*<sup>2</sup>Mikawa Textile Research Center\*<sup>1\*2</sup>

本研究では、スプリングービーズモデルを用いて網の構成要素であるトワインや結節部を考慮したモデルを作製した。そして、粘性抵抗や結節部の影響を考慮した運動方程式を求め、1節2脚試験片や網全体（グラブ法）の応力ひずみ曲線の予測計算を行うシミュレーションソフトウェアを開発した。グラブ法において、実測の応力ひずみ曲線と開発ソフトウェアによる予測応力ひずみ曲線との差は8.5%と目標である±10%以内を満足した。

## 1. はじめに

機械、電気・電子、建築・土木、化学などの各分野ではコンピュータシミュレーションなどにより製品の設計、製造や工程設計の事前検討を行うCAE（Computer Aided Engineering：計算機支援工学）が導入されており、製品製造における最適な設計条件の求解や、試作回数の削減、リードタイムの短縮、開発コストの低減化などが実現されている。しかし繊維産業においては、繊維製品は微細な繊維の集合体であり、用いられる素材が柔軟であるという構造的な特徴から、CAE技術の開発は大幅に遅れている。

愛知県の東三河地方に国内有数の産地を有する網は、漁業用、陸上用など様々な用途で用いられている。網は複数の繊維を撚り合わせた繊維束（トワイン）を結ぶことや撚り込むことで結節部を構成している。網は使用されている繊維素材やその構成により異なった特性を持つ。そのため網の製品設計においては、知識と経験を活用し多種類の試作を繰り返し最適な製造条件を選び出すという試行錯誤的、人海戦術的な方法で多岐にわたる製品要求に対応しているのが現状である。そこで試作回数の削減、開発コストの低減化などのため網のシミュレーション技術の開発が求められている。

前報<sup>1)</sup>において、繊維ロープの設計情報から繊維ロープの3次元モデルを作成し、さらに伸張挙動の予測計算を実施する手法の検討を行った。そして、モデルの最小要素であるフィラメントの応力ひずみ曲線を元に、繊維ロープの構成要素である撚糸、ヤーン、ストランドの相互作用の影響を考慮した繊維ロープの伸張変形シミュレーションを可能とした。

本研究では、撚り構造を持つ繊維ロープのシミュレーション技術を応用し、スプリングービーズモデルを用いて網の構成要素であるトワインや結節部を反映したモデルを作製した。そして、網の構成要素であるトワインや結節部の相互作用を考慮した網の伸張変形シミュレーションソフトウェアを開発した。開発ソフトウェアの精度目標は、実測応力ひずみ曲線と比較し±10%以内とした。

## 2. 実験方法

## 2.1 モデルの構築

網はトワインを結ぶことや撚り込むことで結節部を構成しており、従来の撚り構造を持つ繊維ロープのシミュレーション技術では、結節部の変形挙動の予測が困難であった。そこで本研究では、結節部の構造解析を行い、新たに結節部をモデル化することで網の伸張挙動の予測計算を可能にした。トワインおよび結節部はスプリングービーズモデルを用いてモデル化を行った。図1にスプリングービーズモデルの模式図を示す。

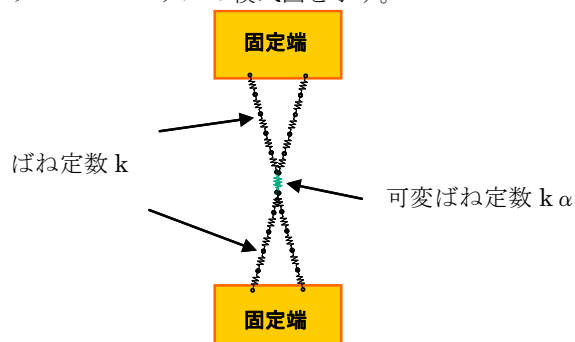


図1 スプリングービーズモデル模式図

\*1 三河繊維技術センター 産業資材開発室（現尾張繊維技術センター 素材開発室） \*2 三河繊維技術センター 製品開発室（現岐阜市立女子短期大学）

結節部のモデル化にあたり、マイクロフォーカス X 線 CT (島津製作所製 inspeXio SMX-225CT) を用いて、網の結節部について 3 次元非破壊測定を実施した。図 2 に結節部の内部構造を示す。網の結節部は他も部位よりも空隙が多く、寸法変化しやすい構造であることがわかった。そこで、結節部に可変ばね定数  $k\alpha$  を導入し、結節部のモデル化を実施した。



図 2 結節部の内部構造

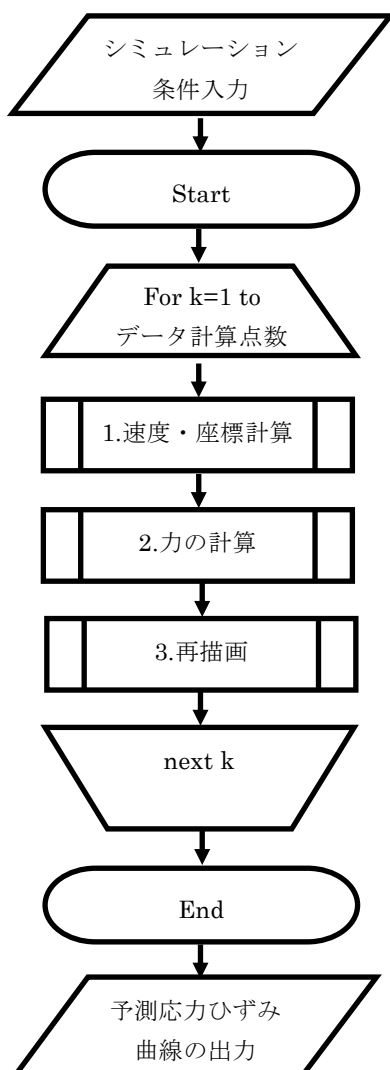


図 3 フローチャート

## 2.2 網のシミュレーションソフトウェアの作製

前報<sup>1)2)</sup>で確立した粘性抵抗  $f_i$  などを計算する手法に加え、結節部における可変ばね定数  $k\alpha$  の影響を考慮した引張変形の運動方程式を求め、離散化した微分方程式の数値計算によって引張変形時の形状および応力ひずみ曲線を算出した。図 3 にフローチャートを示す。トワインの実測応力ひずみ曲線をパラメータとし、フローチャートに従い時間刻み ( $\Delta t$ ) 毎の網の変形形状と応力・ひずみを算出することで、網の伸張変形時の応力ひずみ曲線を予測することができる。微分方程式の計算では高い精度が必要となるため、ルンゲクッタ法<sup>3)4)</sup>を用いて計算を行った。ソフトウェアの開発には Microsoft 社製 Visual Studio 2010 Professional を使用した。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 モデル化の検証

図 4 に作製した網のシミュレーションソフトウェアの主画面を示す。構成要素の太さ、織度、構成本数、撚り回数、目合いなどの条件をパラメータとして入力することで、網のモデルを生成することができる。

モデル化の検証として高速度カメラ (フォトロン社製 FASTCAM SA1.1) を用いて、引張試験における 1 節 2 脚試験片の挙動を解析した。図 5 に 1 節 2 脚試験片の挙動変化を、図 6 に 1 節 2 脚試験片の寸法変化率を示す。1 節 2 脚試験片の挙動変化を解析した結果、把持部に近いほど早く寸法が変化していることがわかった。つまり引張試験においては、把持部から中心部に向けて応力が伝播していると考えられる。なお結節部は、中心部にもかかわらず周辺部よりも早く寸法変化していることがわかった。このことから、結節部は他の部位よりばね定数が小さいと考えられ、可変ばね定数  $k\alpha$  を導入することで実際の挙動と近いモデルを生成できたと考える。

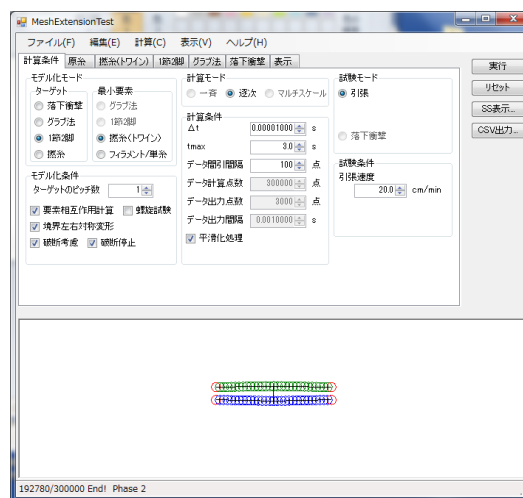


図 4 シミュレーションソフトウェア

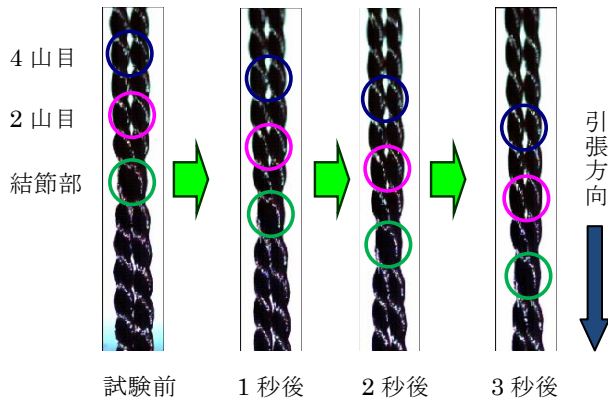


図5 1節2脚試験片の挙動変化（結節部周辺）

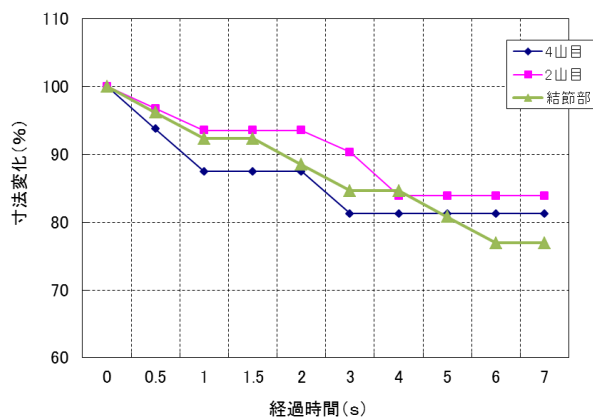


図6 1節2脚試験片の寸法変化

### 3.2 引張試験との比較

ナイロン無結節網を用いて実測の応力ひずみ曲線と開発ソフトウェアによる予測応力ひずみ曲線との差を比較した。予測応力ひずみ曲線を算出するために必要となるトワインの実測応力ひずみ曲線を図7に示す。実測応力ひずみ曲線の近似式における定数をシミュレーションのパラメータとして使用した。

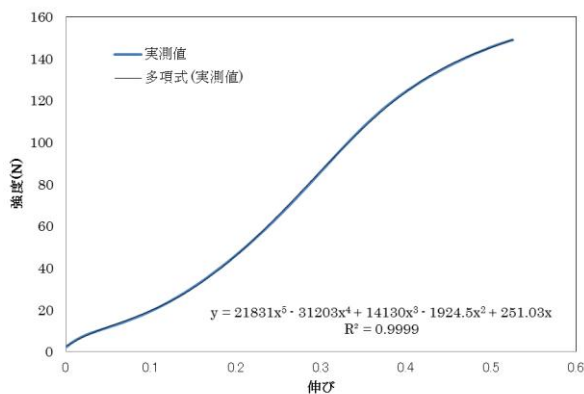


図7 トワインの実測応力ひずみ曲線

### 3.2.1 1節2脚試験片における比較

シミュレーションモデルを図8に、1節2脚試験片の予測応力ひずみ曲線を図9に示す。実測の応力ひずみ曲線と開発ソフトウェアによる予測応力ひずみ曲線との差は11.3%と目標である±10%以内を僅かに満たさなかった。しかしながら、予測応力ひずみ曲線は低伸度領域から高伸度領域まで実測値と非常に近い値を示していることから、トワインの交差をモデルに反映することで精度目標を達成できると考える。



図8 シミュレーションモデル（1節2脚試験片）

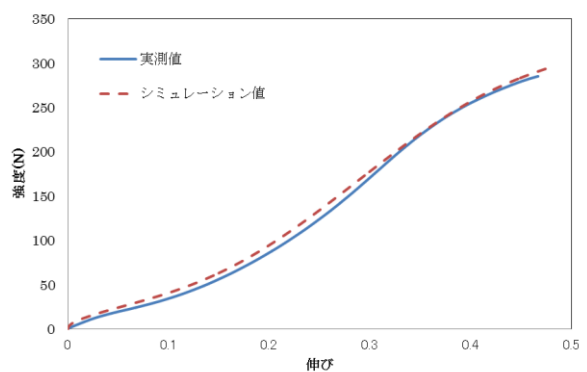
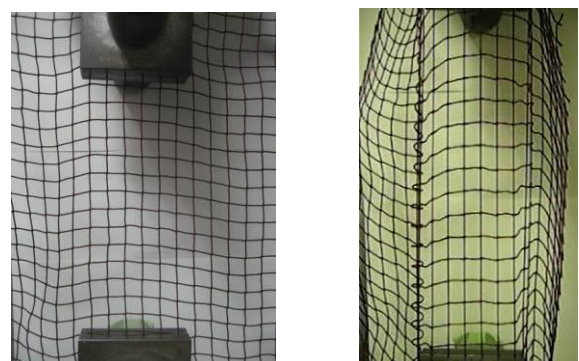


図9 予測応力ひずみ曲線（1節2脚試験片）

### 3.2.2 グラブ法における比較

グラブ法試験片を図10に、シミュレーションモデルを図11に、グラブ法における予測応力ひずみ曲線を図12に示す。グラブ法における伸張変形挙動を評価した結果、グラブ法での伸張変形においてヨコ糸および把持部以外のタテ糸はほぼ影響しないことがわかった。そこで、把持部のタテ糸および結節部を中心とした簡略化したモデルを作製し、伸張変形時の予測計算を行った。

その結果、開発ソフトウェアによる予測応力ひずみ曲線は低伸度領域から高伸度領域まで実測値と非常に近い値を示し、実測の応力ひずみ曲線との差は8.5%と目標である±10%以内を満足した。



引張試験前

破断直前

図10 グラブ法の試験片

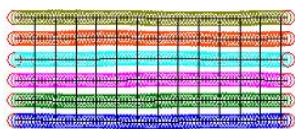


図 11 シミュレーションモデル (グラフ法)

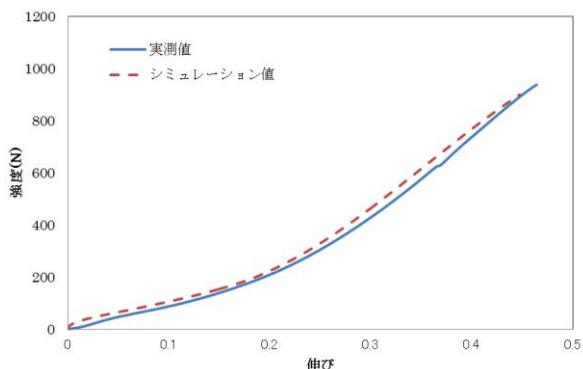


図 12 予測応力ひずみ曲線 (グラフ法)

### 3.2.3 10節4.5目9脚試験片における比較

10節4.5目9脚試験片を図13に、シミュレーションモデルを図14に、グラフ法における予測応力ひずみ曲線を図15に示す。



図 13 10節4.5目9脚の試験片

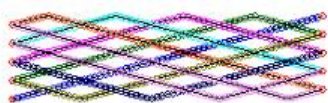


図 14 シミュレーションモデル(10節4.5目9脚)

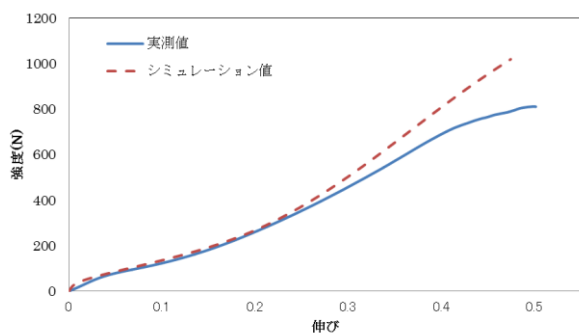


図 15 予測応力ひずみ曲線 (10節4.5目9脚)

開発ソフトウェアによる予測応力ひずみ曲線は、低伸度領域において実測値と非常に近い値を示したが、高伸度領域ではズレが生じた。これは本研究では無結節網を使用したため、高伸度領域において結節部がほどける現象が発生したことが原因と考える。そのため今後は、有結節網を用いて10節4.5目9脚試験片における伸張変形モデルの検証を進める。

## 4. 結び

本研究では、スプリングービーズモデルを用いて網の構成要素であるトワインや結節部を考慮したモデルを作製した。そして、粘性抵抗や結節部の影響を考慮した運動方程式を求め、トワインの実測応力ひずみ曲線をパラメータとし、1節2脚試験片や網全体(グラフ法)の応力ひずみ曲線の予測計算を行うシミュレーションソフトウェアを開発した。

実測の応力ひずみ曲線と開発ソフトウェアによる予測応力ひずみ曲線との差は、1節2脚試験片において11.3%、グラフ法において8.5%であった。いずれの予測応力ひずみ曲線も、低伸度領域から高伸度領域まで実測値に近い値を示した。

本研究の手法は網の引張試験を対象としているが、網への落錘試験など他の物性試験のシミュレーションへの応用が考えられるほか、繊維ロープと網の複合物である安全ネットなど実用に近い形でのシミュレーションへの応用も考えられる。

## 文献

- 1) 太田, 田中, 宮本: あいち産業科学技術総合センター研究報告, 1, 126-129(2012)
- 2) 特許第5050145号
- 3) W.H.Press ほか 著, 丹慶ほか 訳: Numerical Recipes in C, 530-541(1993)
- 4) 山住, 森, 小池: 理系のための Visual Basic 2005 実践入門, 334-343(2007)