

研究論文

GPUによる並列演算処理を利用した ロープの引張変形シミュレーション

太田幸一*¹、田中利幸*²、宮本晃吉*³

Simulation of Rope Extension with GPU Parallel Computing

Kouichi OHTA*¹, Toshiyuki TANAKA*² and Kokichi MIYAMOTO*³Mikawa Textile Research Center*^{1~3}

三つ打ちロープについて、フィラメント、撚糸、ヤーン、ストランドを個別の要素としてモデル化し、モデルの最小構成要素であるフィラメントの応力ひずみ曲線を元に、構成されている撚糸、ヤーン、ストランドの順にマルチスケールシミュレーションにより最終的に三つ打ちロープモデルの引張変形シミュレーションを行うソフトウェアを開発した。また、開発したシミュレーションソフトウェアはGPGPUを用いて並列演算処理化を行い、シミュレーション演算処理の高速化を図った。

1. はじめに

愛知県の東三河地方に国内最大の産地を有する繊維ロープは、漁業用、船舶・海事用、陸上用など様々な用途で用いられている。繊維ロープは複数の繊維が集まってストランドと呼ばれる繊維束を構成し、そのストランドが3本撚り合わされた構造となっている。使用されている繊維素材やその構成により、繊維ロープはそれぞれ異なる特性を持つが、その設計においては知識と経験を活用し試作を繰り返すという試行錯誤的、人海戦術的な方法で対応しているのが現状である。

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、用いられる素材の柔軟性および繊維製品は微細な繊維の集合体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。このため、現場ではさまざまな条件で多種類の繊維製品を試作し、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対応しており、繊維産業向けのCAEの開発が求められている。

前報¹⁾²⁾において、織物組織図の情報から織物3次元モデルを作成し、さらに引張および曲げの変形シミュレーションを実施する手法について検討を行い、従来の織物変形シミュレーションでは実現されていない、糸の物

性と織物の設計条件から織物の基本構造単位についての3次元モデルを作成し、さらに変形時における形状予測を可能とした。本研究では、シミュレーション技術を応用し、糸の構成要素であるフィラメントや、繊維ロープの構成要素であるストランド、ヤーンなどを対象にそれぞれ個別に要素化を行い、3次元モデルを作製し、並列計算処理およびマルチスケール解析手法を導入した3次元伸張変形シミュレーションソフトを開発した。

2. 実験方法

2.1 マルチスケールシミュレーションを用いたシミュレーションソフトの作製

撚糸や繊維ロープは複数の繊維(フィラメント)が集合して構成されて構成されている。繊維ロープは複数本のストランドの撚り合わせからなり、ストランドは複数本のヤーンの、ヤーンは複数本の撚糸の、撚糸は複数本のフィラメントの撚り合わせからなっており、これらの要素間の相互作用によって伸張挙動は複雑に振る舞う。このため、従来のシミュレーション手法では十分な精度の伸張挙動の予測は困難である。本研究では糸の構成要素であるフィラメントや、繊維ロープの構成要素であるストランド、ヤーンなどをそれぞれ個別に要素化を行い、既存の撚糸・繊維ロープの変形シミュレーションでは導入されていないマルチスケール解析手法を導入することで、構成要素間の相互作用の影響を考慮しながら撚糸および繊維ロープ全体の伸張挙動の予測計算を行い、前報で確立した織物と同様の変形予測手法の実現を目指す。

*1 三河繊維技術センター 産業資材開発室(現製品開発技術室) *2 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) *3 三河繊維技術センター 産業資材開発室

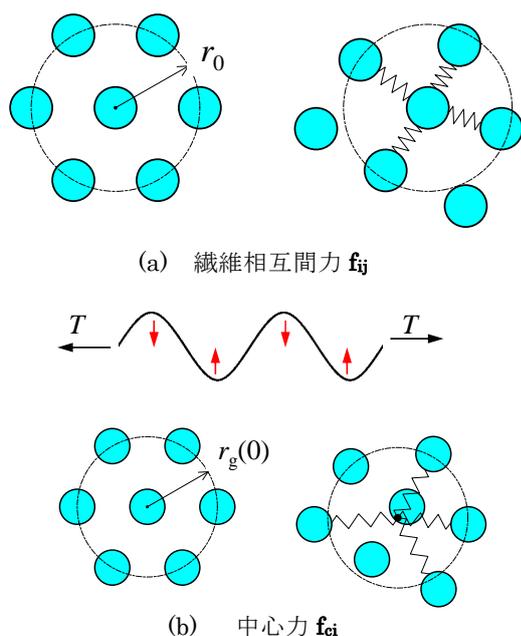


図1 繊維要素に加わる力

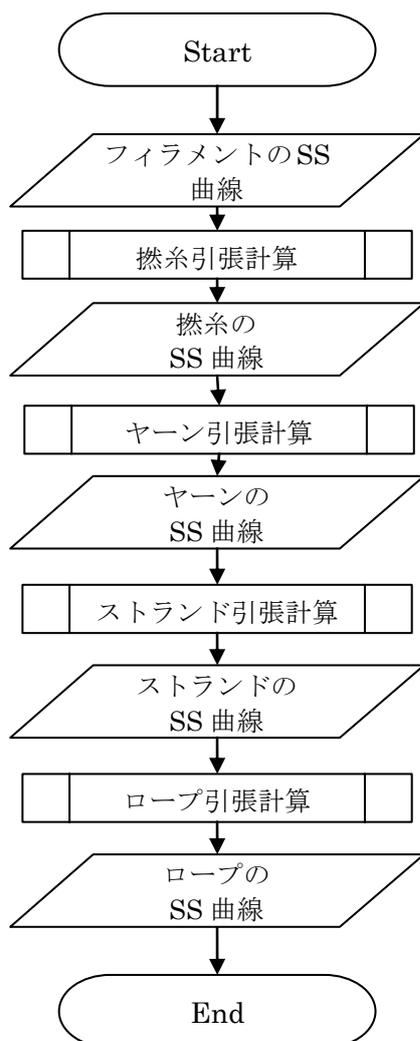


図2 フローチャート

上記の考え方にに基づき、繊維ロープのそれぞれの構成要素に対して図1に示した繊維相互間力 f_{ij} 、中心力 f_{ci} 、粘性抵抗 f_{vi} を計算⁸⁾する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り引張変形時の形状並びに応力ひずみ曲線を算出する計算手法を開発した。開発した計算手法を図2に示す。フローチャートに従い各スケールにおいて連成計算により計算することで、最小要素（マルチフィラメント）の測定した応力ひずみ曲線をパラメータとし、三つ打ちロープの変形形状と応力ひずみ曲線を算出することができる。

この手法を用いて、撚り構造の伸張変形シミュレーションソフトを開発した。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。

2.2 並列演算処理による高速化

本手法の実施にあたっては、撚糸・ロープを構成する繊維を個別に要素化するため、シミュレーションにおける計算量は膨大なものとなる。このため、本研究の実施に当たっては並列演算処理など高速計算手法の導入が必須となる。試作したシミュレーションソフトウェアについて、GPGPU を用いて並列演算処理化を行い、シミュレーション演算処理の高速化を図った。並列演算処理ソフトウェアの作製に際しては NVIDIA 社製 CUDA Toolkit 4.0 および GPU Computing SDK を使用した。

3. 結果及び考察

3.1 モデル化の検証

図3に作製したシミュレーションソフトウェアの主要画面を示す。三つ打ちロープなどの撚り構造体に対して、撚り構造体を構成するフィラメント・撚糸・ヤーン・ストランドを個別の要素として分割・モデル化した3次元モデルを生成するものである。各要素の太さ、各要素の構成本数、撚り方向、撚り回数、ピッチ・リードなどの撚り構造の条件をパラメータとして入力することで、撚り構造の3次元データを生成する。モデル化の検証として、マイクロフォーカス X 線 CT システム（島津製作所社製 inspeXio SMX-225CT）でロープ内各要素の配置について3次元非破壊測定を実施し、測定結果を元に各繊維要素の3次元モデルと比較を行った。X 線 CT による測定断面を図4に、3次元モデル生成手法で生成された断面を図5に示した。

3.2 引張試験との比較

1400dtex 204F のナイロンマルチフィラメントの応力ひずみ曲線から 6mm 径の三つ打ちロープのシミュレーションを行った。マルチフィラメントの実測応力ひずみ



図3 シミュレーションソフトウェア

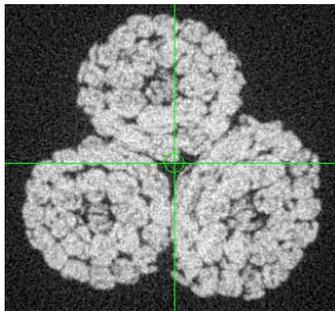


図4 X線CTによる測定断面

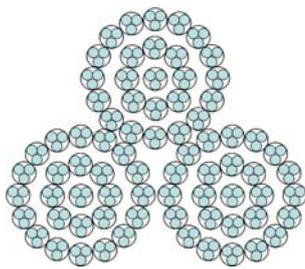


図5 3次元モデル生成手法による生成断面

曲線を図6に、単純引張時の予測応力ひずみ曲線を図7に、三つ打ちロープ(2フィラメント×3撚糸×7ヤーン×3ストランド)の予測応力ひずみ曲線を図8に示した。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フィラメント単純引張時で6.9%、三つ打ちロープで4.6%であった。

3.3 GPGPUの高速化効果測定

作製したCUDA使用並列演算処理ソフトウェアについて、GPGPU専用GPUボード(NVIDIA社製Tesla C2070)を搭載したGPGPUサーバー(リアルコンピューティング社製RC Calm III GPU WORKSTATION)上で動作速度の比較を行った。図9に示したとおり、CUDAによる並列演算未使用時と比較して9.8倍の高速化が達成された。

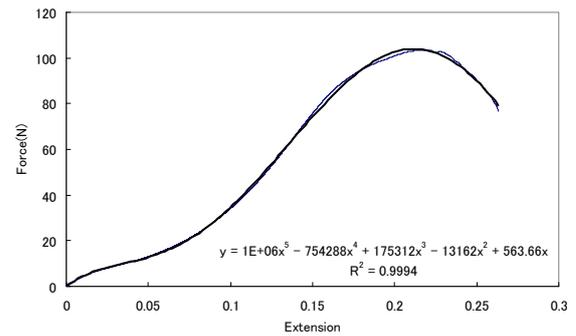


図6 フィラメント実測応力ひずみ曲線

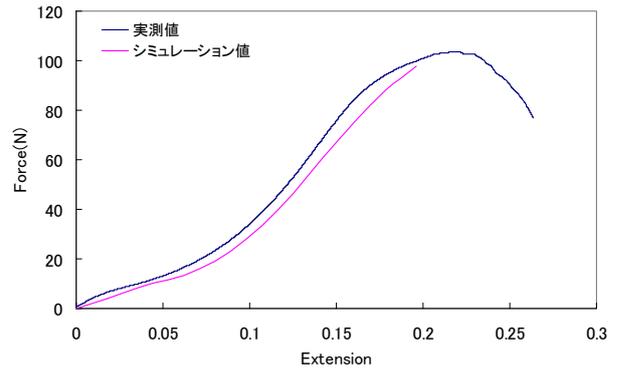


図7 フィラメント単純引張時の予測応力ひずみ曲線

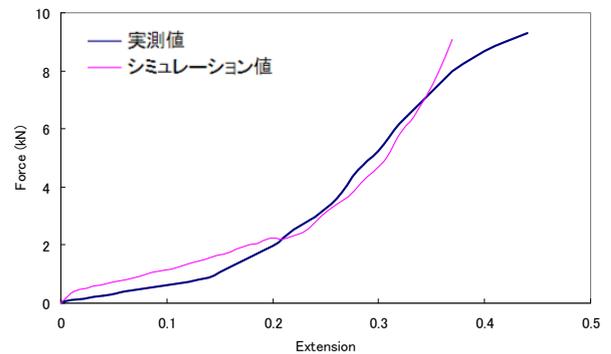


図8 三つ打ちロープの予測応力ひずみ曲線

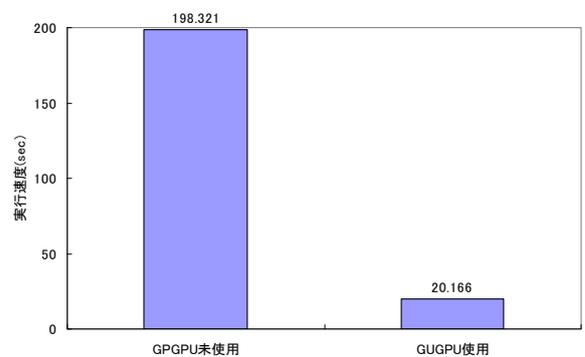


図9 動作速度の比較

3.4 考察

三つ打ちロープのシミュレーション結果では、応力ひずみ曲線について高伸度領域での実測値とシミュレーションによる予測値との間にズレが生じていた。これは、

本研究では横圧縮による各要素の変形は考慮していないために生じた物と考えられる。断面の変形は高伸張時に起こるため、初期での応力ひずみ曲線において影響は少ないものと考えられる。

4. 結び

本研究では三つ打ちロープについて、フィラメント、撚糸、ヤーン、ストランドを個別の要素としてモデル化し、モデルの最小構成要素であるフィラメントの応力ひずみ曲線を元に、構成されている撚糸、ヤーン、ストランドの順にマルチスケールシミュレーションにより最終的に三つ打ちロープモデルの引張変形シミュレーションを行うソフトウェアを開発した。また、開発したシミュレーションソフトウェアはGPGPUを用いて並列演算処理化を行い、GPGPU未使用時と比較して約10倍の高速化が図られた。

本研究の手法はロープの引張試験を対象としているが、落下衝撃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、八つ打ちロープ（組物）や網など他の産業資材の物性試験シミュレーションへの応

用も考えられる。

付記

本研究は、独立行政法人科学技術振興機構 平成23年度研究成果展開事業研究成果最適展開支援プログラム（A-STEP）フィージビリティスタディ【FS】ステージ探索タイプの一環として行った。

文献

- 1) 池口達治, 太田幸一: 愛知県産技研研究報告, **4**, 188(2005)
- 2) 特許第 479394 号
- 3) 太田幸一: 学位論文, 金沢大学, (2005)
- 4) 太田幸一, 池口達治: 愛知県産技研研究報告, **4**, 192(2005)
- 5) 特開 2006-100230
- 6) 太田幸一, 池口達治: 愛知県産技研研究報告, **5**, 178(2006)
- 7) 特開 2008-242516
- 8) 特許第 5050145 号