

# Influence of Yarn Mechanical Properties on Internal Defects of Yarn Structures using Spring-Mass Models

SHIMOKAWA Tomotsugu<sup>a,\*</sup>, MASATO Ryuji<sup>a,b</sup>, KINARI Toshiyasu<sup>a</sup>, SHINTAKU Sukenori<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University,  
Kakuma-machi Kanazawa, Ishikawa 920-1192, Japan

<sup>b</sup> SEIREN Co., Ltd., 1-10-1, Keya Fukui, Fukui 918-8560, Japan

Received 3 June 2008; accepted for publication 1 October 2008

## Abstract

In order to understand the relationship between the internal defects of yarn structures and the mechanical properties of yarn, we developed a yarn model which consists of mass and three types of springs for expression and construction, and bending. The yarn model can express the Euler buckling phenomenon depending on its bending stiffness. Using the yarn model, the tension relaxation simulations of the yarn package structures were performed, and it was found that our yarn model has a sufficient ability to express the influence of the bending property of yarn on the internal defects like the circular buckling of the yarn package structures.

**Key Words:** Yarn structure, Spring-mass model, Buckling, Bending property, Mechanical property

## ばねマスモデルを用いた糸構造体の構造欠陥と 糸の力学特性の関係の解析

下川智嗣<sup>a,\*</sup>, 正藤龍二<sup>a,b</sup>, 喜成年泰<sup>a</sup>, 新宅救徳<sup>a</sup>

<sup>a</sup> 金沢大学大学院自然科学研究科, <sup>b</sup> セーレン株式会社

### 1. 緒 言

糸は複数の繊維の集合体であり、その力学特性は、構成する個々の繊維の物性（機械的、化学的性質等）のみではなく、形状（太さ等）や繊維集合体としての形態（撚り）に強く依存している[1]。例えば、構成する繊維の径が異なるが、同じ断面積を有する糸を考える。ここで、糸を構成する繊維は等方弾性体と仮定する。糸の断面積は同じであるため、伸長に対する抵抗（引張剛性）は同じと見なすことができるが、糸を構成する繊維の径が小さくなるほど、糸全体の断面二次モーメントが小さくなり、曲げ剛性は小さくなる。そのため、糸の伸縮、曲げ特性は繊維集合体の幾何学的なパラメータに依存し、その関係を変化させることがわかる。このような関係を積極的に利用することで、様々な風合いを持つ糸が作られている。さらに、このような複数の糸から構成される糸構造体の力学挙動は更に複雑になり、そのメカニズムを理解するこ

とは容易でなくなる。以下にその例として巻糸体を考える。

繊維製品の生産過程において、次工程の準備などのために、糸は芯筒に巻取られ巻層の形状にして保管される。この糸構造体を巻糸体といい、原糸段階での糸パッケージ、または織布生産段階における経糸ビームなどで見られる。巻糸体には様々な欠陥（バルジやサドル、リボン巻き等）が存在するが、ここでは内部の糸層が円周方向に波打つようにうねる「菊巻き」という欠陥に注目する。菊巻きの発生原因は以下のように考えることができる。糸を芯筒に巻き付けるときに負荷する張力は、巻き付け後に円周方向に働くため直径方向成分が発生する。巻き付け量の増加に伴い、芯筒近傍の各糸層が外層から受ける直径方向成分の力が増加するため、内部の力学状態が不均一となる。そして、内部の各糸層の径が小さくなり、円周方向の荷重が引張荷重から圧縮荷重に遷移する。このため円周座屈が生じ、菊巻きという欠陥が発生すると考えられる。このような欠陥を有する巻糸体では、糸の解じょ時に

\* 連絡先：金沢大学大学院自然科学研究科システム創成科学専攻 920-1192 金沢市角間町  
E-mail: simokawa@t.kanazawa-u.ac.jp, Tel: +81-76-234-4692, Fax: +81-76-234-4692

発生する解じょ不良や、繊維の内部構造の不均一性に起因する染色工程における染めむらという問題を引き起こす。ここで、菊巻きは糸の座屈変形を伴う糸構造体の欠陥であるため、個々の糸の曲げ剛性がこの欠陥発生に密接に関係していることが理解できる。

以上に挙げた糸の力学特性とその力学状態に起因した糸構造体の不均質な内部力学状態や内部構造状態を回避するためには、糸の力学特性に応じた巻付け張力、巻量等の制御が重要なポイントとなり、巻付け張力、巻量の巻層内部への影響を知ることが必要である。また、最適な巻付条件を得るために、内部の構造欠陥を詳細に検討する必要がある。現状では経験的にそれらの制御を実行し問題の発生の低下を実行しているに止まり、根本的な解決には至っていない。そのため、このような糸構造体の内部欠陥を表現できる力学モデルの構築が必要であると考えられる。これまで、巻糸体内部の応力・ひずみ状態について巻糸体の異方性を考慮した理論式の導出を行ない、実験値と比較検討を行なった研究が報告されているが[2-5]、個々の糸の力学特性を考慮した力学モデルは報告されていない。

そこで、本研究では、糸構造体の力学特性や内部欠陥を表現するために、座屈のような分岐を伴う現象も容易に表現できる個別要素法[6, 7]を用いて個々の糸をバネと質点でモデル化を行ない、長さ方向の伸縮特性、太さ方向の圧縮特性、糸の内部構造に起因する曲げ特性を表現する。本論文では、これらの糸モデルを組み合わせることにより、巻糸体を表現し、糸の曲げ特性の違いにより巻糸体内部で生じる菊巻き生成メカニズムを検討することで、提案する糸モデルの有効性を確認する。

## 2. 理 論

### 2.1 糸のモデル化

Fig. 1(a)に巻糸体の概略図を示す。Fig. 1(b)に示すように糸は巻層形成時に張力 $T$ を持つため、芯筒方向へ圧縮力 $F$ が生じる。この圧縮力 $F$ が芯筒方向に伝わることで、巻糸体の内部応力状態は不均一となり、菊巻きが生じると考えられる。つまり、前述したように、このような現象を表現するために必要な糸の特性として、(a)糸の伸縮特性、(b)糸間の圧縮特性、

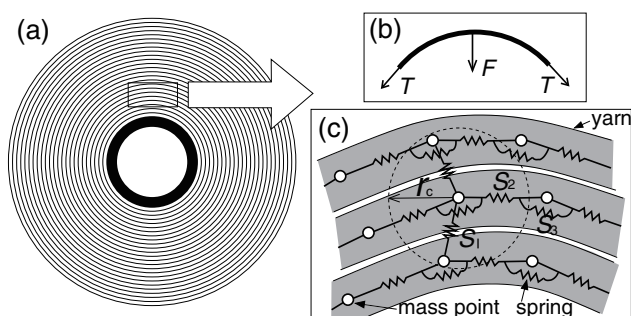


Fig. 1 Schematic of analysis models of a yarn package and each yarn.

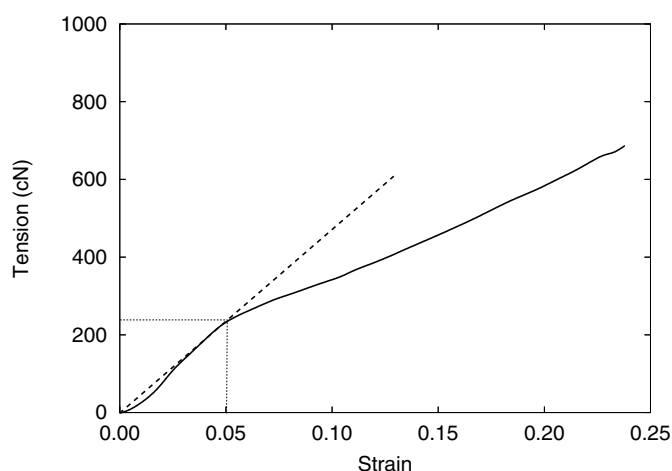


Fig. 2 Relationship between tensile load and strain of a polyester multi-filament yarn.

(c)糸の曲げ特性、が挙げられる。そこで、各糸をFig. 1(c)に示すように質点の集合体としてモデル化する。

まず、糸の伸縮特性は繊度33.3 tex、撚係数 $K = N \sqrt{Tt/1000} = 33.8$  ( $N$ は1mあたりの撚数、 $Tt$ は繊度)のポリエステルマルチフィラメント糸における糸の長さ方向の引張試験[8]を参考にして以下のように決定する。Fig. 2は、長さ $l_0 = 200$  mmのポリエステルマルチフィラメント糸の引張荷重-ひずみ関係である[8]。本研究では、Fig. 2に示す点線のように、ひずみ0.05までの領域の関係をj用いてポリエステルマルチフィラメント糸のばね定数を決定する。Fig. 2より、この糸のばね定数 $K'$ は

$$K' = \frac{F}{\Delta l} = \frac{F}{\epsilon l_0} \quad (1)$$

となる。ここで、 $\Delta l$ は基準長さからの伸びである。一方で、糸モデルは $r_0$ の間隔で質点がばねにより連結されているため、このばね定数 $K$ は、

$$K = \frac{F}{\Delta r} = \frac{F}{\epsilon r_0} \quad (2)$$

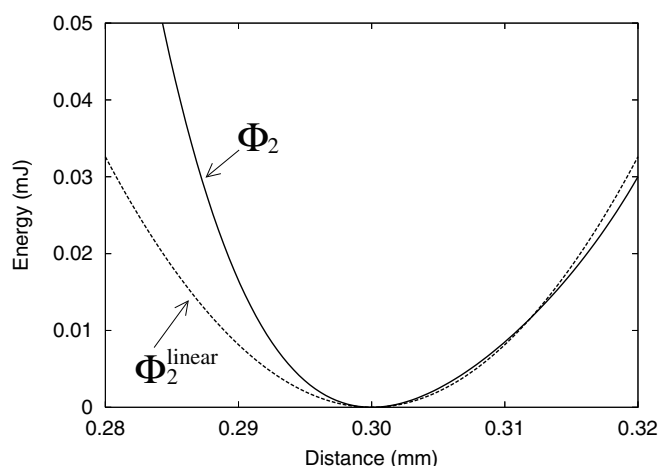


Fig. 3 Two-body potential energy curves with linear and nonlinear properties.

となる。ここで、 $\Delta r$ は基準長さからの伸びであり、 $r_0=0.3$  mmとする。(1)式と(2)式より

$$K = \frac{F}{\epsilon r_0} = \frac{245 \times 10^{-2}}{0.05 \times (0.3 \times 10^{-3})} = 163 \text{ (kN/m)} \quad (3)$$

となる。線形ばねを用いた場合、

$$\Phi_2^{\text{linear}} = \frac{1}{2} K (r - r_0)^2 \quad (4)$$

という関係でエネルギーを表現することが可能である。しかしながら、糸の圧縮特性に関する大変形領域までの実験を行っていないが、原子間結合の非線形性を考慮して、微小弾性領域に対して $\Phi_2^{\text{linear}}$ をフィッティングした次式に示す4次関数を用いてエネルギーを表現する。

$$\Phi_2(r) = A_4 (r - r_0)^4 + A_3 (r - r_0)^3 + A_2 (r - r_0)^2 \quad (5)$$

ここで、 $A_4 = 1 \times 10^{14}$  N/m<sup>3</sup>、 $A_3 = -4 \times 10^9$  N/m<sup>2</sup>、 $A_2 = 1.15 \times 10^5$  N/mとし、 $\Phi_2^{\text{linear}}$ と $\Phi_2$ の形状をFig. 3に示す。つまり、本研究では糸の圧縮変形が微小領域から外れて大きくなるにつれて、その抵抗が大きくなる仮定を用いる。

つぎに、糸間の相互作用を表現するために、隣接する糸層間の質点間に反力のみを有するばね $S_1$  (層間ばね)を配置する。ここで、ある糸層を構成する質点と隣接する糸層を構成する質点が相互作用する範囲はカットオフ距離 $r_c$ 以内とし、 $r_c$ でバネのエネルギーとその配が零となるように、ポテンシャルエネルギーは、次式で表現する。

$$\begin{aligned} \Phi_1(r) &= D[\exp\{-2\alpha(r-r_c)\}-1] + 2D\alpha(r-r_c), \text{ (if } r \leq r_c) \\ &= 0, \text{ (if } r > r_c) \end{aligned} \quad (6) \quad (7)$$

ここで、 $D$ 、 $\alpha$ は、 $S_2$ の場合と同様に、糸の太さ方向の圧縮試験[9]を参考にして決定し、 $D = 1.33 \times 10^{-8}$  N/m、 $\alpha = 2.2 \times 10^3$  m<sup>-1</sup>となる。参考のために、Fig. 4に、 $r_c = 2.5$  mmの場合の $\Phi_1(r)$ を示しておく。

最後に、糸の曲げ特性は、隣接する三質点間の角度変化に対して抵抗を持つばね $S_3$  (三体ばね)により表現する。そのポテンシャルエネルギーは、次式で表現する。

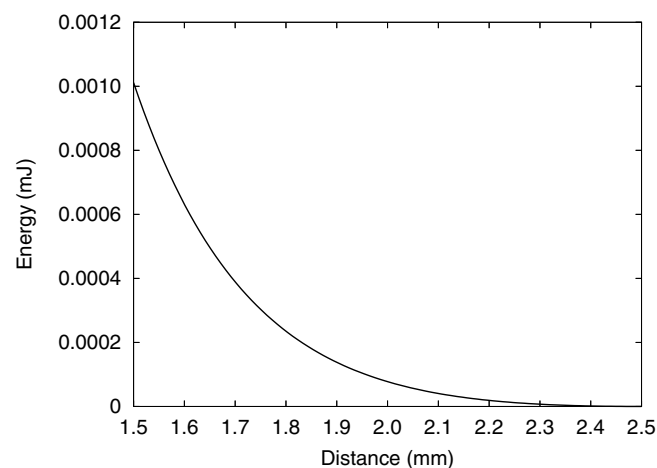


Fig. 4 Potential energy curve for interactions of yarn layers.

$$\Phi_3(\theta) = \frac{1}{2} K_3 (\theta - \theta_0)^2 \quad (8)$$

ここで、 $\theta$ は、隣接する3質点間の角度であり、 $\theta_0$ は外力のない状態での安定角度である。つまり、直線が平衡状態の糸では $\theta_0 = \pi$ となる。曲げ剛性を表現する $K_3$ は、二体ばねを表現するときに用いたポリエステルマルチフィラメント糸を等方弾性体と仮定し、理論的に算出できる太さ0.5 mmの正方形断面の片持ちはりのたわみ曲線に一致するように決定する。本研究では、 $K_3 = 1.36$  mNとなる。

以上のようにして決定した糸モデルを本研究における標準糸モデルとし、 $K_3$ のみを変更することで、伸縮特性は変化しないが、曲げ特性のみが異なる異方性を有する糸モデルを表現することが可能となる。本研究では、標準糸モデルをyarn-Bとし、曲げ特性を支配する三体ばねのばね乗数 $K_3$ を0.1倍、10倍したものをそれぞれyarn-A、yarn-Cとする。つまり、yarn-Cが本解析において最も曲げ剛性が強い糸を表現することになる。

糸を構成する質点に生じる力は、各ポテンシャルエネルギーから導出される。また、各質点の運動方程式を速度ベレ法[10]により数値積分し、質点の時間発展を追跡する。1タイムステップは、その質点の運動を追跡できるように糸の質点の固有振動数を参考に10 nsとする。また、各ばねに並列にダッシュポットを配置することで、糸の粘性、糸層間の摩擦等のエネルギー散逸を表現する。ただし減衰係数の値はそれぞれの結合の固有振動数を参考に決定し、また、二体ばねの減衰に関しては、二質点方向の相対速度成分に対して減衰を行ない、三体ばねの減衰に関しては、結合を構成する三質点のうち両端の質点の相対速度成分から回転方向成分(質点間の結合方向に垂直方向速度成分)を取り出し、その速度成分に対して減衰を行なうこととする。

## 2.2 糸モデルの座屈シミュレーション

菊巻きには糸の曲げ特性が大きく影響すると考えられる。前節では、糸の曲げ特性を三体ばねを導入することで表現する糸モデルを考えた。ここでは、その有効性を検討するために、糸モデルの片側固定、片側自由の条件で座屈シミュレーションを考える。Fig. 5(a)に示すように長さ $l$ のyarn-A、B、Cを考え、軸方向荷重として自由端Aに圧縮荷重 $P$ を加える。このとき糸に対して、初期不整として自由端aに微小変位 $\delta_0 = l/1000$ となるような微小の1次の座屈モードを与える。また、固定端を表現するために、質点b、cは固定する。自由端aの $x$ 軸方向変位を $\delta$ とし、軸方向荷重 $P$ との関係を検討する。ここで、固定端の質点b、cを除く質点の数は10個とし、 $l = 3$  mm、 $\delta_0 = 3$   $\mu$ mとなる。

座屈シミュレーションから、本論文で提案した曲げ特性と引張特性が独立した各糸モデルの座屈荷重 $P_{cr}$ を求めることができる。一方で、この糸モデルを等方弾性体と考えることで、見掛け上の曲げ剛性 $EI$ を見積もることが可能となり、この値を用いれば、次式に示す解析的なオイラーの座屈荷重



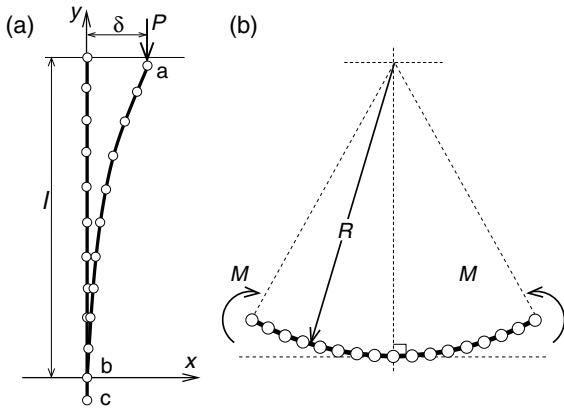


Fig. 5 (a) Analysis model for Euler buckling simulations, (b) Bending yarn model.

$P_{cr}^E$ を算出でき、座屈シミュレーションから得られた座屈荷重 $P_{cr}$ と比較を行なうことが可能となる。

$$P_{cr}^E = \frac{\pi^2 EI}{4l^2} \quad (9)$$

各糸モデルの見掛け上の曲げ剛性 $EI$ を見積もるために、Fig. 5(b)に示すように各糸モデルを曲率半径 $R$ の形状に変形させ、その単位長さ当りに蓄えられるひずみエネルギー $\bar{U}$ を計算する。この $\bar{U}$ を用いることで、次式に示すように各モデルの見掛け上の曲げ剛性 $EI$ を得ることができる。

$$EI = 2R^2 \bar{U} \quad (10)$$

## 2.3 巻糸体の内部欠陥生成シミュレーション

本研究では、巻糸体を2次元モデルで表現することから、芯筒の周りに同心円状の糸層が巻き重ねられているものとし、20層から構成されているモデルを考える。初期配置において、糸層を構成する質点間の距離を変化させることで円周方向に対して初期ひずみを与え、これにより初期巻付張力を表現する。ここでは、初期ひずみ0.03を考えるが、巻糸体形成時の巻付張力にばらつきが生じることを考慮し、初期ひずみは最大最小で $\pm 10\%$ のランダム分布を持つものとする。芯筒に隣接した第1層目は、芯筒による拘束が強いと考え、質点を固定する。また、全糸層は約3万個の質点で表現される。

実際の巻糸体は、3次元構造を有しており、巻取り時の機構的な観点から、各糸は他の糸と点接触により相互作用しており、また、綾角の大きさにより各糸層を構成する糸の密度は大きく影響を受けると理解できる。つまり、実際の巻糸体の質量は、同じ体積の糸よりも小さく、多くの空間を含んでいると推測できる。これに対して本解析モデルでは、3次元構造を2次元モデルで表現することを試みており、実際の糸に比べて、糸モデルの変形の自由度が低減している。そこで、このような幾何学的な拘束を考慮して、平均層間距離を糸の太さ0.5 mmから2.5 mmに拡張する。この糸層間の変更は、Fig. 1(c)に示すカットオフ値 $r_c$ で表現する。また、実際に巻糸体が作られる際は、巻き付けられながら構造が緩和されるため、層間距離が変化しないと仮定した場合に見積もること

ができる各層の半径は、外側に行くに連れて実際の半径に比べて大きくなることを理解できる。本解析モデルでは、前述したように質点を配置していくため、初期状態において巻糸体の巻き付け終了時の状態を模擬することになる。そこで、この巻取り時に生じる動的な径の変化を表現するため、初期の層間距離を3.0 mm（最内層）から2.0 mm（最外層）に線形的に変化させる。第1層の直径は、約10 cmとし、最外層は約14 cmとなる。

本解析で注目する菊巻きは、各糸層が円筒座屈を生じることで発生すると考えられることから、各糸層の直径方向に対して微小な初期不整として振幅0.01 mm、4～40周期（4周期おき）の波の合成波を、初期配置に加える。

曲げ特性の異なる yarn-A, B, Cにより構成される巻糸体モデルに対して、張力緩和シミュレーションを行ない、張力緩和に伴う巻糸体内部の欠陥生成メカニズムを検討する。

## 3. 結果と考察

### 3.1 糸モデルの曲げ特性と三体ばねの関係

Fig. 6(a)に yarn-A, B, Cの各糸モデルの座屈シミュレーションにおける変位 $\delta$ と荷重 $P$ の関係を示す。また、Fig. 6(b)に標準糸モデル yarn-Bの荷重 $P = 0.148$  Nにおける糸の形状変化を示す。Fig. 6(a)より荷重が小さいとき、各糸モデルの $\delta$ はゼロを示し、単純圧縮変形をしていることが理解できる。しかしながら、 $P$ がある臨界荷重よりも大きくなると、Fig. 6(b)に示すように、糸は大きく曲がり、座屈することが確認できる。このときの座屈荷重は、 $P_{cr,A} = 1.01 \times 10^{-2}$  N,  $P_{cr,B} = 1.02 \times 10^{-1}$  N,  $P_{cr,C} = 1.03$  Nであり、二体ばねは同じであっても、三体ばねのばね定数が大きなモデルほど座屈しにくいことが確認でき、本研究で用いる糸モデルは曲げ特性と引張特性の独立性が表現できていることが理解できる。

一方で、糸を等方弾性体と仮定した場合、糸の曲げ変形の抵抗は曲げ剛性 $EI$ として評価することができる。そこで、(10)式に示すように、各糸の曲げ変形から見かけ上の曲げ剛性を算出することができ、また、(9)式より見かけ上の $EI$ を有する等方弾性体の各糸の座屈荷重 $P_{cr}^E$ を算出することがで

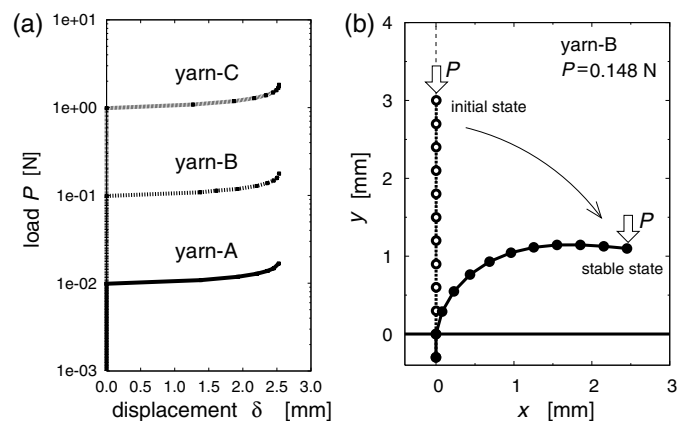


Fig. 6 (a) Load  $P$  vs. displacement  $\delta$ . (b) Buckling of yarn-B under  $P = 0.148$  N.

きる。ここで、今回の糸モデルの縦弾性率 $E$ は一定と考えるので（二体ばね定数が同じであるため）、 $P_{cr}^E \propto I$ と考えることができる。つまり断面積は一定であるが、断面二次モーメントの異なる等方弾性体の糸として考えることができる。実際に、(9), (10)式より算出した座屈荷重 $P_{cr}^E$ と座屈シミュレーションにより算出した $P_{cr}$ の関係は、

$$P_{cr, A} = 0.906 P_{cr, A}^E$$

$$P_{cr, B} = 0.908 P_{cr, B}^E$$

$$P_{cr, C} = 0.917 P_{cr, C}^E$$

であり、よく対応していることが確認できる。つまり、本解析モデルの三体ばねの値を制御することは、異なる断面二次モーメントを有する糸（例えば、「緒言」で述べた、構成する繊維の径は異なるが同じ断面積を有する糸など）を表現していることに対応すると解釈することも可能である。

### 3.2 巻糸体の内部欠陥生成メカニズム

前節では、本研究でモデル化した糸が座屈変形を表現できることを確認した。本節では、曲げ特性の異なる糸モデル yarn-A, B, Cにより構成される巻糸体（それぞれを model-A, model-B, model-Cと呼ぶ）の初期巻き付け張力の緩和シミュレーションを行ない、個々の糸の力学特性と糸構造体の構造欠陥発生メカニズムとの関係を検討する。ここでは、内部力学状態変化と巻糸体の形態変化の関係を調べるため、まず

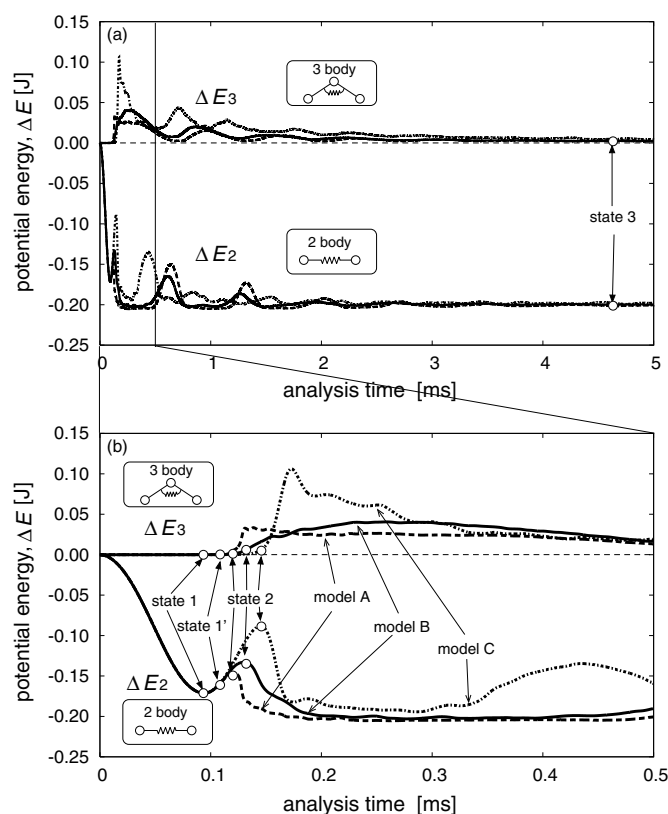


Fig. 7 Change of potential energies of 2 and 3 body terms from the initial state,  $\Delta E_2$  and  $\Delta E_3$ .

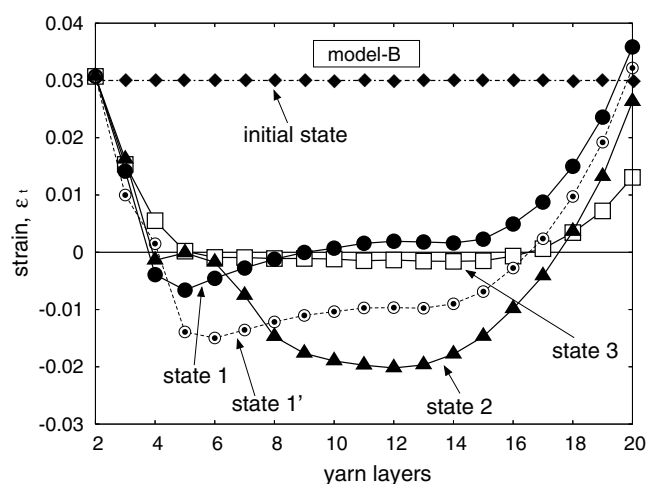


Fig. 8 Change of circumferential strains  $\epsilon_t$  of each yarn in model-B.

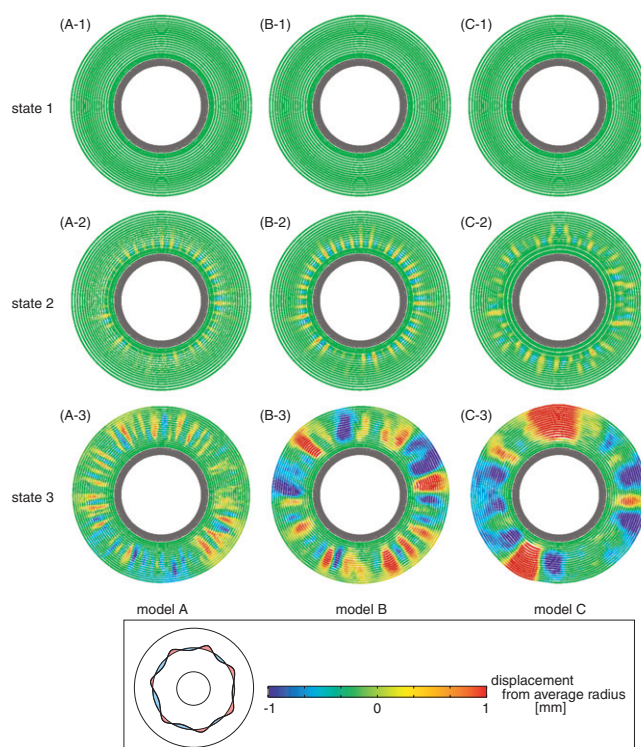


Fig. 9 Deviations of each yarn from its average radius.

Fig. 7に、各巻糸体モデルを構成する糸モデルの平均二体、三体ポテンシャルエネルギーの初期値からの経時変化 $\Delta E$ を示し、Fig. 8にmodel-Bの各糸層における糸の長さ方向ひずみ変化を示す。つぎに巻糸体の内部構造変化を調べるために、Fig. 9に各糸層の平均半径からのずれ（ここでは「うねり」と呼ぶ）に対して色分けしたものを示し、Fig. 10にFig. 9に対応した状態における各糸層のうねりの周波数分布を示す。なお、欠陥生成メカニズムを理解しやすくするために、3つの状態に注目して考察を行なう。状態1は単純変形領域であり、状態2はうねりの発生する領域、状態3は平衡状態にそれぞれ対応する。

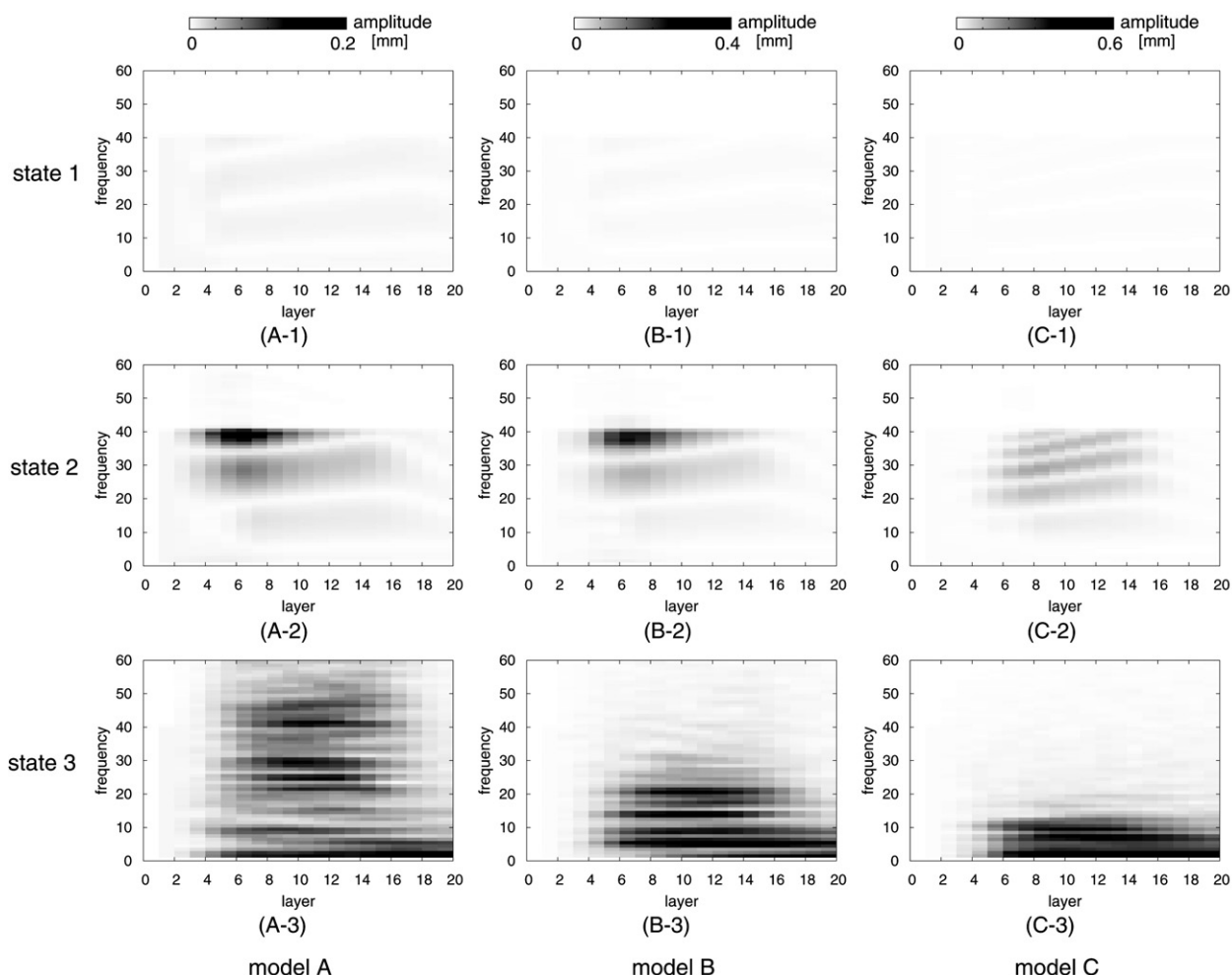


Fig. 10 Frequency distributions of each model.

### 3.2.1 単純変形領域（円周方向引張りずみの緩和）： state 1 (state 1')

Fig. 7(b)は、Fig. 7(a)の0～0.5 ms間を拡大表示したものである。状態1は、二体ばねの $\Delta E_2$ が最初に下に凸を迎える0.1 ms近傍である。全ての巻糸体モデルにおいて、状態1までは $\Delta E_2$ の経時変化は一致しており、また、三体ばねの $\Delta E_3$ は変化がないことが確認できる。また、Fig. 8より各糸層の長さ方向ひずみ $\varepsilon_l$ は、初期状態では引張りひずみ0.03を有していたが、状態1では糸層の径が小さくなることで張力が解放されることが確認できる。このとき、 $\Delta E_3$ が変化しないことやFig. 9の状態1の様子から、糸は初期の形態を保ちながら糸層の径が変化していること（単純変形）が理解できる。状態1の後、 $\Delta E_2$ は増加するが、これはFig. 8の状態1'に見られるように、芯筒近傍から外側に向かい糸層の圧縮変形が伝播するためである。以上のように、この単純変形領域では、初期巻き付け張力が解放され（state 1）、その後、芯筒近傍から糸軸方向の圧縮変形が開始するため（state 1'）、各糸モデルの引張・圧縮特性に違いがない各巻糸体モデルに顕著な違いは生じないことが理解できる。

### 3.2.2 うねりの発生する領域：state 2

Fig. 7(b)より、状態1（1'）から時間がさらに経過すると、 $\Delta E_2$ は増加を示すが、その後、極大値を示し、減少していることが確認できる。ここでは、それぞれの巻糸体モデルにおける極大値近傍を状態2とする。極大値は、三体ばねが小さいmodel-Aほど早く発生し、またその値が小さいことが確認できる。また、各モデルにおいて、 $\Delta E_2$ が極大値を示す領域で $\Delta E_3$ が増加し始めることがわかる。このことは、糸の長さ方向の圧縮変形が曲げ変形に遷移したと理解できる。またFig. 8のmodel-Bの状態2より、芯筒近傍の4～6層目の圧縮ひずみが解放されていることがわかり、曲げ変形は芯筒近傍から生じていることがわかる。Fig. 9の状態2の様子から、芯筒近傍にうねりが生じていることが確認でき、円環座屈が発生していることがわかる。このときのうねりの周波数はFig. 10の状態2に示すように初期不整として導入した最大の周波数（40周期の波）が最も顕著に発生していることがわかる。つまり、各巻糸体モデルにおいて、まず同じ座屈モードが生じていると考えることができる。一般的に、糸の曲げ剛性の大きなモデルほど、大きな座屈荷重が必要となり、本解析モデルでは、Fig. 7(b)に示すようにmodel-Cが座屈する



ためには、大きな圧縮変形を必要とすることが表現できていることが確認できる。このことから、本研究で作製した糸モデルにより構成した巻糸体モデルについても、各糸の曲げ剛性を反映した座屈現象を表現することが可能であることが確認できる。

### 3.2.3 平衡状態領域：state 3

Fig. 7(a)に示すように $\Delta E$ の変化が十分小さくなった平衡状態の領域を状態3とする。この平衡状態では、Fig. 8より外層に長さ方向の引張ひずみ $\varepsilon_t$ が残っており、巻糸体が締め付けられていることになるが、中間層の $\varepsilon_t$ がほぼゼロを示していることが確認できる。これはFig. 9の状態3に示すように、中間層に大きなうねりが発生しており、糸層が曲げ変形を生じることにより、その径を小さくすることができ、曲げ変形からの回復力と外層からの締め付け力が釣り合っているためと理解できる。このように平衡状態において生じているうねりは、実際の巻糸体の欠陥の一つである菊巻きと見なすことができる。また、Fig. 10の状態3より、糸モデルの曲げ抵抗が小さな巻糸体モデルほど、中間層に高周波のうねりが生じていることが確認できる。このことから、状態2で発生した初期不整に従ううねりは、時間の経過とともにその形態を変化させ、最終的に外層の引張力と釣り合う曲げ変形モードが出現すると考えることができる。つまり、同じ張力で糸を巻きつけた場合、曲げ剛性の大きな糸ほど菊巻きは生じにくいことがわかり、曲げ剛性の小さな糸はうねりの数が多くなるため局所的に不均一な変形を生じることになり、糸の品質を損なう可能性が高いことが理解できる。

### 3.3 糸・糸構造体モデルについての考察

本論文では、2.1で述べたように糸を二体、三体、層間ばねによりモデル化することで、伸縮、曲げ特性を表現し、これらの糸モデルにより糸構造体である巻糸体を構築し、その内部構造変化を個々の糸の力学特性に基づいて表現することが可能であることを示した。ここでは、糸・糸構造体のモデル化について注意すべき事項について述べる。

糸の力学特性は、糸モデルにおける質点間の相互作用により決定される。実験では得ることが困難である圧縮側の変形やスパンデックス糸のような高延性を表現するためには、線形性の強い微小変形領域から離れた非線形領域をどのように表現するかが重要であると考えられる。また、糸の要素分割数においても、解像度を高めるために細かくしすぎると、二体ばね定数が大きくなり、また質点の質量は小さくなるため、固有振動数が大きくなり、時間発展させる時間刻みを小さくとる必要がある。そのため、注目する現象に応じた自由度を選定することに注意が必要である。

本論文で糸構造体として取り上げた巻糸体は、その形成時

に、芯筒に糸が巻きつけられながら巻き付け張力が緩和され、内部構造が変化する動的な現象を含んでいるため、解析モデルの初期状態を正確に決定することは非常に困難である。そこで、本研究では、2.3で述べたような仮定に基づいて解析モデルを構築した。原理的には、糸モデルを用いて、現実のプロセスのように芯筒への巻取りシミュレーションを行ない、動的な内部構造変化を検討することは可能であるが、先述したように時間刻み幅が小さい場合には、計算コストが大きくなることを考慮してモデル化を行なう必要がある。

## 4. 結 言

本研究では、糸構造体の力学特性や内部欠陥を、それを構成する糸の力学特性に基づいて表現するために、質点とバネにより長さ方向の伸縮特性、曲げ特性、太さ方向の圧縮特性を表現できる糸モデルを構築した。また、その糸モデルを用いて巻糸体を表現し、初期巻き付け張力の緩和計算を行なうことで、糸の曲げ特性と巻糸体の内部欠陥生成メカニズムの関係について検討を行なった。結果として、個々の糸の曲げ特性を表現するために導入した三体ばねにより、糸の座屈挙動を制御することが可能であることを示した。また、異なる曲げ特性を有する糸モデルにより巻糸体を構成し、その後発生した内部欠陥構造は、個々の糸の力学特性に基づいていることが確認できた。これにより、本研究で構築した糸モデルにより糸構造体を構築し、その力学挙動を表現することの有効性が確認できた。

## References

- [1] Matsudaira M (1999) “21 seiki no tekisutairu kagaku”, Chap2, The Textile Machinery Society of Japan, Osaka
- [2] Beddoe B (1967) J Strain Anal, **2**, 207–212
- [3] Nishihara T, Fujino K, Hirai T, Tsukuma S (1960) Trans Jpn Soc Mech Eng, **26**, 558–566
- [4] Shintaku S, Oda J, Tani Y, Okuno T (1990) J Text Mach Soc Japan (predecessor journal of J Text Eng). **43**, T86–T92
- [5] Shintaku S, Oda J, Tani Y, Okuno T (1990) J Text Mach Soc Japan (predecessor journal of J Text Eng). **43**, T105–T110
- [6] Hakuno M (1997) “Hakai no shimyuresyon” Morikita Syuppan, Tokyo
- [7] Choi K, Ko H (2005) ACM Transactions on Graphics, **21**, 604–611
- [8] Yamashita T (2004) “Gazou syori niyoru ito no assyukutokusei no sokutei”, Master’s Thesis, Kanazawa University, Japan
- [9] Kinari T, Ishihara R, Shimokawa T, Ohta K (2007) Proc 36th Text Res Symp at Mt. Fuji, 93–98
- [10] Kitagawa H (1997) “Shoshinsya no tame no bunshidou rikigaku hou”, Yokendo, Tokyo