糸のヤング率がつば付ボビンの変形に及ぼす影響

金沢大学工学部 新 宅 救 徳 (会員)
金沢大学工学部 喜 成 年 泰 (会員)
金沢大学工学部 堀 純 也 (会員)

Effect of Yarn Modulus on Deformation of Flanged Bobbin

Sukenori Shintaku, Toshiyasu Kinari and Junnya Hori

Faculty of Technology, Kanazawa University, Kodatsuno, Kanazawa

Abstract

Stress distribution in the yarn package wound on the flanged bobbin is made clear by using the data of model experiment on which yarn packages are formed by several kinds of yarn that has different Young's modulus. They are also useful for obtaining the deformation of the flanged bobbin using the finite element analysis. The following results are obtained.

- (1) The smaller Young's modulus of the yarn, the larger the radial load compressing the barrel of the flanged bobbin. Increasing rate of the radial compressive stress decreases with accumulated yarn layer.
- (2) The smaller Young's modulus of the yarn, the larger the axial load expanding the flanges of the bobbin. Increasing rate of the axial expanding load increases with cumulated yarn layer.
- (3) The radial load compressing the barrel of bobbin is larger than the axial load expanding its flanges.
- (4) The smaller Young's modulus of the yarn, the larger the flanged bobbin deforms by internal stress in yarn package. The maximum deformation is generated near the root of its flanges.

(Received October 1, 1993)

(Accepted for Publication January 10, 1994)

摘 要

目的 ヤング率の異なる糸を用いてつば付ボビン上に巻糸体を形成した際の巻糸体内部の応力分布状態をモデル実験を通して求める。また、巻糸体内部の応力によるつば付ボビンの変形について有限要素法により解析する。

成果 (1)糸層がつば付ボビンの芯筒を圧縮する荷重は糸のヤング率が小さいほど大きく、その荷重増加の割合は糸層の増加に伴い小さくなる。

(2)糸層がボビンのつばを圧縮する荷重は糸のヤング率が小さいほど大きく、その荷重増加の割合は糸層の増加に伴い大きくなる。

(3)巻糸体はボビンのつばよりも芯筒を強く圧縮する。

(4)巻糸体内部応力によるつば付ボビンの変形は、糸のヤング率が小さいほど大きく、つばのつけ根付近での変位が最も大きくなる。

(平成5年10月1日受理)

(平成6年1月10日審査終了)

1. 緒 言

巻取工程において糸1本に加わる力は小さいものの、糸層を幾層にも累積していくことによって巻糸体内部で重畳されていく力は非常に大きくなる。そのため、伸度の大きい糸、特にナイロン加工糸や高

弾性糸などを用いての糸のパッケージ形成時やたて糸ビームへの巻き取り時にボビンやビームが変形・破損することがある。これらの現象は巻張力や巻量を小さくすることによって問題発生を減らすことができるが、ボビンやビームの設計強度という観点から考えると根本的な解決には至っていない。

これまでも巻糸体の内部状態についての理論解析や実験^{1~12)}は数多く報告され、巻糸体芯筒あるいはビームフランジ等の強度設計に役立っている。これらの中で巻糸体の芯筒やフランジの受ける力を測定した報告^{3~8)}はあるが、ポビンやバレルの変形について実際面から検討したものは見当たらない。

このため我々は、巻糸体の内部ひずみについてモデル実験によりその挙動を明らかにし¹³⁾、巻糸体内部の円周方向応力が全域にわたって均一となるような巻糸体を形成してその張力制御による効果を検討した¹⁴⁾。さらに、巻糸体の円周方向ヤング率から半径方向ヤング率を推定する方法について検討し¹⁵⁾、巻糸体の半径方向ヤング率分布を任意に設定できる理論式を導き、実際の巻糸体を用いた実験により測定された半径方向ヤング率分布を適用することによってより正確なひずみ解析を行ってきた¹⁶⁾。

本報ではフィラメント糸の撚糸製造工程で使用されるつば付ポビン（以後本報ではポビンと記す）の変形に着目し、ヤング率の異なる糸を用いて巻糸体を形成した際のポビンの変形についてモデル実験を通して明らかにする。まず初めに、種々のヤング率の糸をつば付ポビンに張力を一定として巻き取り、糸層累積に伴う巻糸体内部応力によるポビンの芯筒圧縮荷重およびつば圧縮荷重の変化を測定し、糸のヤング率の違い（すなわち巻糸体の円周方向ヤング率の違い）がポビンの圧縮力に及ぼす影響について考察する。そして、この測定値と異方性を考慮した巻糸体内部応力理論より算出した値とを比較することにより、巻糸体の半径方向ヤング率を推定し、実際に近い巻糸体内部の応力分布状態を求める。さらに、得られたポビンの圧縮応力を用いて有限要素法によりポビンの変形について解析する。

なお、本報は巻糸体の形成が終了した時点でのポビンの状態について静力学的に解析を行うことを目的とし、巻糸体の形成過程でのポビンの変形や経時変化による糸の応力緩和現象については無視する。

2. 巻糸層がポビンに及ぼす圧縮力についてのモデル実験

2.1 つば付ポビン上での糸層の形成

合繊フィラメント糸に撚りをかける工程ではイタリア式撚糸機またはダブルツイスタが用いられる。イタリア式撚糸機は供給原糸のパッケージを回転させて糸に撚りを加えるアップツイスタの形式である

Fig. 1 Relation between the circumferential strain ε_θ and the cumulated yarn layer Δr a, b, c, d, e and f, ε_θ measured by the gauge placed at $\Delta r = 0\text{mm}$, 2mm , 4mm , 6mm , 8mm and 10mm , respectively

ため、小型のパッケージに巻き返すことが必要である。織物表面の光沢を重視するフィラメント織物などにおいては、このパッケージは糸の接圧を利用するRTワインダによらず、ポビンワインダと称されるワインダ（後述の図2参照）により、つば付ポビン（後述の図8参照）上に形成される。ポビンワインダではテンサにより一定張力に制御された糸が、別駆動のトラバースガイドによってトラバースを与えられながらポビン上に巻き取られる。

このように巻糸体を形成した場合、巻糸体内部の円周方向ひずみ（詳しい実験方法は文献13）参照）は巻糸体径増加に伴い、図1に示すように増加していく。図1はナイロンフィラメント糸70D無撚糸（実測によると7.60Tex（68.4D））を17gf（0.167N）の一定張力で糸層厚さ13.5mmまで巻き取った場合の一例である。糸層増加に伴うひずみは、初めに巻かれた張力を保持しながらその上に糸層が累積していくのであれば、直線的に増加するはずであるが、実験結果によれば初めは傾きが大きい、徐々に鈍くなっている。これは内層側の糸層のひずみがそれよりも外側の糸層の締め付け力によって減少しているためである。すなわち、糸層の半径方向におけるひずみ分布は複雑に変化していることが分かる。このような複雑な張力状態を種々の糸種に対して検討するため、本報では以下に示すような単位面積当たりの糸張力 T を用いて整理する。

$$T = (F \cdot t \cdot N) / S \quad (1)$$

ここで F は糸をポビンに巻き付けるときの張力、 t は糸層厚さが13.5mmになるまでに要する巻き取時間、 N はポビンの回転数（2,000rpmで一定）、 S

Table1 Properties of the yarn used in experiments

Yarn	Twist number	Yarn fineness	Cross sectional area	Young's modulus
Polyester original yarn	as spun	8.49 Tex (76.4 D)	$6.11 \times 10^{-3} \text{mm}^2$	12.4 GPa
Polyester twisted yarn	1500T/m	8.91 Tex (80.2 D)	$6.41 \times 10^{-3} \text{mm}^2$	5.0 GPa
Nylon original yarn	as spun	7.60 Tex (68.4 D)	$6.67 \times 10^{-3} \text{mm}^2$	2.7 GPa
Nylon twisted yarn	1500T/m	8.40 Tex (75.6 D)	$7.37 \times 10^{-3} \text{mm}^2$	0.51 GPa

Table 2 Winding condition to form yarn package on flanged bobbin

Yarn	F (mN/yarn)	t (min)	T (MPa)
Polyester original yarn	176	90	19.6
Polyester twisted yarn	225	70	19.5
Nylon original yarn	167	95	19.5
Nylon twisted yarn	206	76	19.3

F : Winding tension of a yarn
 t : Required time to form yarn package
 T : Tension per unit cross sectional area of yarn package

はボビンを回転軸方向に中央で切断したときの糸層の断面積 ($120 \times 13.5 \text{mm}^2$) である。これを表 1 に示す 4 種類のヤング率 E_0 の異なる糸に対して T が一定値 2kgf/mm^2 (19.6MPa) となるように、各糸種に応じて F を調節した。このときの F と t を表 2 に示す。なお表 1 中の各糸に対する E_0 はそれぞれの糸が表 2 に示された F の値になったとき (すなわち T が 2kgf/mm^2 (19.6MPa) となったとき) のひずみに対する応力 (糸の単位断面積当たりの) の割合である。

2.2 実験方法

巻糸体形成時のボビンにかかる荷重を測定するための実験装置の概略を図 2 に示す。装置はつば付ボビンの代わりに、糸層がボビンの芯筒を圧縮する荷重 (以後芯筒圧縮荷重) またはボビンのつばを押し広げようとする荷重 (以後つば圧縮荷重) を測定するためのモデルボビンを取り付け、ボビン状の巻糸体形成をしながら上記荷重の測定ができるモデルワインドである。給糸パーン①から解じょされた糸はテンサ②に入る。テンサにより T が 2kgf/mm^2 (19.6MPa) となるようにテンサ重りを調節する。

Fig. 2 Schematic illustration of the experimental apparatus

その後、糸はトラバース装置⑩により綾振りを受けながら、モデルボビン④上へ巻かれていく。ボビンの回転数は $2,000 \text{rpm}$ とする。芯筒圧縮荷重測定用モデルボビンの概略を図 3 に示す。アルミ合金製の芯筒は上下二つの部分に分割されており、それぞれの部分は軟鋼製の薄板 (以後ステイ) により結合されているため、芯筒圧縮荷重によってステイ部だけが変形しやすくなっている。ステイには図中にハッ

Fig. 3 Bobbin to measure the radial load compressing its barrel

チングで示すようにひずみゲージが貼り付けてあり、4枚のゲージによってブリッジを形成している。これより出力されるひずみから芯筒圧縮荷重を算出する。つば圧縮荷重測定用モデルボビンの概略を図4に示す。このボビンの片側のつばはボビンのバレルとは分離されており、外側から固定されている2本のステイによって支えられているため、つば圧縮荷重によってステイ部だけが変形しやすくなっている。ステイに貼られたひずみゲージから出力されるひずみより、2ゲージ法によってつば圧縮荷重を算出する。モデルボビンのひずみゲージから検出された荷重の信号はスリップリング⑤、ブリッジボックス⑥（図3の4ゲージ法の場合でも⑦への接続のために⑥を用いる）、動ひずみ計⑦を介してデジタル電圧計⑧に出力される。

ボビン上に巻き付ける糸は、表1に示したポリエステルフィラメント糸およびナイロンフィラメント糸のそれぞれ原糸と撚糸、計4種類のヤング率の異なる糸である。これらの糸をモデルボビン上に巻き取っていった場合、ボビン回転数と巻き取り張力は一定であるので、巻き取り開始からの経過時間と巻

Fig. 4 Bobbin to measure the axial load expanding its flanges

糸体直径との関係をあらかじめ求めておき、ある時間におけるデジタル電圧計⑧の出力を読み取れば、それに対応する糸層厚さ Δr における芯筒圧縮荷重またはつば圧縮荷重を求めることができる。測定は Δr が 15mm になるまで行った。

2.3 測定結果と考察

芯筒圧縮荷重をモデルボビンの円筒部分の表面積で除すことによって半径方向圧縮応力が算出できる。糸層厚さ Δr の増加に伴う半径方向圧縮応力 σ_r の変化を図5に示す。この測定値は各試料糸において3~5回測定したときの平均値である。糸のヤング率が小さいほど半径方向圧縮応力が大きく、その増加割合も大きくなっている。このことは以下の原因によると考えられる。すなわち、本研究では巻糸体の単位面積当たりの張力を一定として巻き取りを行っているため、ヤング率が小さい糸ほど糸に大きなひずみを与えながら糸層を形成していることになる。また図1で示したような外側への糸の累積に伴う内側の糸層のひずみの減少が各糸に対して同程度生じているとすると、このひずみの減少による応力の減少はヤング率の小さな糸の方が小さくなる（すなわち大きな応力となる）。

つば圧縮荷重をそのときのつばに接している糸層の面積で除すことによって平均つば圧縮応力が算出できる。糸層厚さ Δr の増加に伴う平均つば圧縮応力 σ_{zAVE} の変化を図6に示す。糸のヤング率が小さいほど平均つば圧縮応力は大きくなっている。これは図5の場合と同じ理由によると考えられる。また、つばに接している糸層の面積は糸層厚さに対して2次曲線的に増加していくので、実際のつば圧縮荷重も糸層厚さに対して2次曲線的に増加していく

Fig. 5 Relation between the radial compressive stress σ_r and the cumulated yarn layer Δr

Fig. 6 Relation between the average axial compressive stress σ_{zAVE} and the cumulated yarn layer Δr

ことに注意を要する。

しかし図5と図6の縦軸を比べると、どの糸種においても σ_{zAVE} より σ_r の方がはるかに大きいので、(図3および図4のモデルボビンの概略の寸法は後述の図8とほぼ同じ) 巻糸体はボビンのつばよりは芯筒を強く圧縮することが分かる。

3. ボビン変形の有限要素法による解析

3.1 基礎方程式¹⁷⁾

本解析では、対象が回転体であるためボビンの自転を中心軸にとった円筒座標系を用い、ボビンに対し荷重が軸対称にかかっているため2次元的な形で解析を行う。

座標系は図7のような円筒座標系 $(r-\theta-z)$ を用いる。各方向の直ひずみ、直応力をそれぞれ、 $\epsilon_r, \epsilon_\theta, \epsilon_z, \sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, r-\theta, \theta-z, r-z$ 面内のせん断ひずみ、せん断応力をそれぞれ $\gamma_{r\theta}, \gamma_{\theta z}, \gamma_{rz}, \tau_{r\theta}, \tau_{\theta z}, \tau_{rz}$ と定義する。 r 方向の変位を u, z 方向の変位を w で表すと

Fig. 7 Coordinate system for the bobbin

し、軸対称な変形しか生じないので変位の θ 方向成分は0となる。考慮すべきひずみと変位の関係は次の(4)式となる。

$$\epsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}$$
 (2)

$$\epsilon_\theta = \frac{u}{r}$$
 (3)

$$\epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$$
 (4)

$$\gamma_{rz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r}$$
 (5)

応力とひずみの関係は、次のようになる。

$$\begin{bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \sigma_z \\ \tau_{rz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & d_2 & 0 \\ d_2 & d_1 & d_2 & 0 \\ d_2 & d_2 & d_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_r \\ \epsilon_\theta \\ \epsilon_z \\ \gamma_{rz} \end{bmatrix}$$
 (6)

なお、 d_1, d_2, G は

$$d_1 = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$
 (7)

$$d_2 = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$
 (8)

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$
 (9)

である。ここで E はヤング率、 ν はポアソン比である。力のつり合い方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + f_r = 0$$
 (10)

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} + f_z = 0$$
 (11)

ただし f_r, f_z はそれぞれの方向の荷重密度(体積力)である。境界条件は以下のようになる。

対称軸上において $u=0$ (12)

固定端において $u=0, w=0$ (13)

自由において $\begin{bmatrix} \sigma_r & \tau_{rz} \\ \tau_{rz} & \sigma_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_r \\ n_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ (14)

ただし、 n_r, n_z は法線方向余弦である。

これらの基礎方程式をもとに有限要素による解析を行う。

3.2 解析モデルとメッシュデータ

本解析に用いたボビンの寸法を図8に示す。今回モデルとしたボビンは、上下左右対称であるため全体の1/4について解析を行う。材料にはフェノールパルプチップを想定して、ヤング率は6.9GPa、ポアソン比0.33とする。図9にメッシュデータを示す。ボビンに $\Delta r=13.5\text{mm}$ となるまで糸を巻き付けた状態を巻糸体形成終了時とし、このときの変形

Fig. 8 Dimensions of the analyzed bobbin

Fig. 9 Mesh data of the analyzed model

状態について解析する。メッシュは接点数が126接点、要素数が204要素からなり、つばのつけ根付近については細かい分割を行った。図中の●印は荷重条件を与える接点であり、この●印を結んだラインより左上部が糸層の部分であり右上部または下部がボビンである。

3.3 荷重条件

本解析において、境界条件として与える r 方向および z 方向の応力は、より実際の結果を得るため芯筒圧縮荷重およびつば圧縮荷重の測定結果をもとに算出する。

ここで、巻糸体がボビンの芯筒を圧縮する応力は、芯筒表面上の各位置において一定であると考えられるため、境界条件として与える r 方向の応力は図5における $\Delta r = 13.5\text{mm}$ のときの σ_r の値を用いる。図10に糸のヤング率の違いによる巻糸体形成終了時の半径方向圧縮応力の変化を示す。

一方、 σ_z としては図6に示した単純な平均値ではなく、 r 方向での分布を考慮して以下のように求めた。半径 r から最外層半径 R_0 までの糸層がボビンのつばを圧縮する応力 $\sigma_z^*(r, R_0)$ は、先に報告した巻糸体内部応力理論¹³⁾より、次のようになる

Fig. 10 The compressive stress in radial direction when yarn package completed

$$\sigma_r^*(r, R_0) = -T \{ (\nu_3 + \alpha \nu_1) r^{a-1} + \beta r_0 (\nu_3 - \alpha \nu_1) r^{-a-1} \} I(r, R_0) \quad (15)$$

$$I(r, R_0) = \int_r^{R_0} \frac{dR}{R^a + \beta r_0^{2a} R^{-a}} \quad (16)$$

$$a^2 = \frac{1 - \nu_3^2}{\omega - \nu_1^2} \quad (17)$$

$$\beta = \frac{-\nu_1 \omega_0 (1 + \nu_3) + \alpha (1 - \omega_0 \nu_1^2)}{\nu_1 \omega_0 (1 + \nu_3) + \alpha (1 - \omega_0 \nu_1^2)} \quad (18)$$

$$\omega_0 = \frac{E_\theta}{E_r} \left(= \frac{1}{\omega} \right) \quad (19)$$

ただし T は単位断面積当たりの巻張力、 ω は半径方向ヤング率 E_r の円周方向ヤング率 E_θ に対する比、 ν_1 、 ν_3 はそれぞれ r または z 方向のひずみに対する θ 方向のポアソン比および r または z 方向のひずみに対する z または r 方向のポアソン比を示す。式(15)において、 E_θ としては前報⁶⁾の結果より、ボビン上に巻かれた糸のヤング率(表1に示した各糸のヤング率)を用いる。次に ω をパラメータとして変化させ、得られた σ_r から算出した巻糸体形成終了時のつば圧縮荷重が測定結果と一致したときの E_r を巻糸体の半径方向ヤング率として用いた。ここで、ポアソン比は $\nu_1 = \nu_3 = 0.4$ と一定に、また $E_r = E_z$ としている。図11に各試料糸での実験結果をもとにした

Fig. 11 Distribution of the flange's compressive stress when yarn package completed

Fig. 12 Chart of the bobbin deformed (Polyester)

Fig. 13 Chart of the bobbin deformed (Nylon)

つば圧縮応力分布 (巻糸体内部の応力 σ_r の分布) の計算結果を示す。これより境界条件として与える z 方向の応力を求める。

3.4 解析結果および考察

図12および図13にヤング率の異なる糸を用いて巻糸体を形成した際のボビンの変形の様子を有限要素法により解析した結果を示す。糸のヤング率が小さいほどボビンの変形は大きくなる。この図より、つばのつけ根の外側の位置での変位が最も大きくなっている。これは z 方向の荷重がつばのつけ根の位置で最も大きいためと考えられる。また、つばは相対的に内側に傾くような形で変形していることが分かる。これはボビンの芯筒を圧縮する r 軸方向の荷重がつばを圧縮する z 軸方向の荷重に比べかなり大きいことによるものと思われる。この現象は糸のヤング率が小さくボビンに加わる荷重が大きくなるほど顕著になる。

これらの結果、ボビンの設計を行うとき、芯筒とつばの接点付近に応力が集中しないよう考慮しなければならないことが分かる。

4. 結 言

本研究では、ヤング率の異なる糸を用いてつば付ボビン上に巻糸体を形成することにより、糸のひず

みの違いによってボビンに加わる力がかなり変わってくるということが分かった。また、巻糸体内部応力によるつば付ボビンの変形についてモデル実験を通して明らかにした。

その結果、以下の結論を得た。

- (1)糸層がつば付ボビンの芯筒を圧縮する荷重は糸のヤング率が小さいほど大きく、その荷重増加の割合は糸層の増加に伴い小さくなる。
- (2)糸層がボビンのつばを圧縮する荷重は糸のヤング率が小さいほど大きく、その荷重増加の割合は糸層の増加に伴い大きくなる。
- (3)巻糸体はボビンのつばよりも芯筒を強く圧縮する。
- (4)巻糸体内部応力によるつば付ボビンの変形は、糸のヤング率が小さいほど大きく、つばのつけ根付近での変位が最も大きくなる。

なお、この研究成果の一部は平成3年日本繊維機械学会北陸支部研究発表会および平成4年日本繊維機械学会北陸支部研究発表会において発表した。最後に本研究を遂行するに当たり、太平株式会社岡本正氏に多大なる協力を頂いた。また本研究室の卒業生である近藤寿彦氏、伴場秀樹氏、谷義則氏には実験やプログラム作成においてご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

文 献

- 1) 西原利夫、藤野清久、平井恒夫、津久間新；機論，26，588 (1960)
- 2) 中島達夫；織機誌，20，T194 (1967)
- 3) 中島達夫、太田計正、高木久弥；織機誌，20，T226 (1967)
- 4) 大沢源一郎、小山敏夫；織学誌，33，T423 (1977)
- 5) 新宅救徳、山本孝、土定育英、喜成年泰；織学誌，44，353 (1988)
- 6) B. G. Neal；J. Strain Anal., 2，213 (1967)
- 7) B. Beddoe；J. Strain Anal., 2，207 (1967)
- 8) V. Vicentini；J. Strain Anal., 4，48 (1969)
- 9) P. Ursiny；Textiletechnik；36，535 (1986)
- 10) M. G. Catlow, G. W. Walls；Shirley Inst. Mem., 35，T410 (1962)
- 11) S. K. Batra, D. S. Lee, S. Backer；Text. Res. J., 46，453 (1976)
- 12) S. K. Batra, D. S. Lee, S. Backer；Trans. ASME, Series B, 100, FEB, 8 (1978)
- 13) 新宅救徳、尾田十八、奥野登起男；織学誌，45，278 (1989)
- 14) 新宅救徳、尾田十八、奥野登起男；織学誌，46，115 (1990)
- 15) 新宅救徳、尾田十八、谷義則、奥野登起男；織機誌，43，T86 (1990)
- 16) 新宅救徳、尾田十八、谷義則、奥野登起男；織機誌，43，T105 (1990)
- 17) 戸川隼人；“有限要素法概論”，p. 219，培風館 (1981)