

Effect of Tensile Strain Rates and Twist Number on Stress-Strain Curves of Twisted Polyester Filament Yarn

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00009765

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



ポリエステルフィラメント撚糸の 応力-ひずみ曲線に及ぼす引張速度と撚数の影響

金沢大学工学部 喜 成 年 泰 (会員)
" 放 生 明 廣
" 新 宅 救 徳 (会員)
" 岩 木 信 男 (会員)

Effects of Tensile Strain Rates and Twist Number on Stress-Strain Curves of Twisted Polyester Filament Yarn

Toshiyasu Kinari, Akihiro Hojo

Sukenori Shintaku and Nobuo Iwaki

Faculty of Technology, Kanazawa University, Kanazawa

Abstract

A calculation procedure for simulating the stress-strain curves of twisted polyester multi-filament yarn was proposed. Although it needs only a little information of the yarn such as stress relaxation data and the degree of softening with temperature rise, it can calculate the stress-strain relations at any strain rates including high strain rates and at any twisted number. The procedure mainly consists of two groups of calculating steps. One is based on the over-stress model considering the effect of temperature rise during extension that shows the effect of strain rate, and the other is based on the energy method that shows the effect of twist.

The numerical results derived from this calculation were compared with the experimental data at wide range of strain rate from 10^{-3} s^{-1} to 10^2 s^{-1} and wide range of twist number beyond 2,000 t/m for fineness of 11.1 tex. Almost agreement of experimental and calculated values confirms the availability of the present calculation procedure for simulating the stress-strain curves of polyester multi-filament twisted yarn.

(Received July 17, 1991)

摘 要

目的 ポリエステルマルチフィラメント糸に対して種々の引張速度、種々の撚り数における応力-ひずみ挙動をシミュレーションし、実験結果と比較検討する。

成果 糸に対する一定の情報（応力緩和試験結果および温度上昇に対する糸の軟化の程度）から高ひずみ速度を含む任意のひずみ速度、任意の撚り数における応力-ひずみ曲線を求めるため、速度依存性の影響の要素として温度上昇の影響を考慮した過応力モデルを、また撚りの影響の要素としてエネルギー法を適用する計算方法を提案した。

提案した計算手法によりポリエステルフィラメント糸に対してひずみ速度 $10^{-3} \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ 、撚りでは無撚糸から強撚糸（11.1 tex の糸で 2000 t/m 以上）までについて数値計算を行い、実験結果と比較した。計算結果はひずみ 5% 前後の応力-ひずみ関係の曲率の変化の大きい箇所とひずみ 20% 以上の大ひずみ域でやや不満足はあるものの大体の応力レベルでは実験結果と一致した。これより本報の計算手法はポリエステルフィラメント撚糸の応力-ひずみ挙動を予想する手段として有用であることが確認できた。

1. 緒言

近年、消費者ニーズの多様化に伴って繊維製品に様々な加工が施されるようになってきた。また繊維の製造や加工工程中における糸の運動速度が大きくなり、糸の負荷履歴が複雑化してきた。一方、加工段階での糸の特性は繊維機械の設計や運転の上で重要であり、これを把握する必要がある。しかし、この目的のために1回1回実験をすることは多大の労力を要するので、原糸の基本的性質を基にして加工工程中の様々な糸の形態や負荷速度に対応した応力-ひずみ挙動をシミュレートすることは興味深いテーマである。

これに対して我々は糸の衝撃試験装置を試作し、ポリエステルマルチフィラメント糸について種々の引張速度における応力-ひずみ曲線を求め、過応力模型¹⁾に基づき、ひずみ速度の影響を考慮した構成式を提案した²⁾。そして引張過程中的フィラメント内部での温度上昇を概算し、高ひずみ速度における構成式に温度上昇の効果を導入し、ひずみ速度 $10^{-3} \text{ s}^{-1} \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ の応力-ひずみ曲線を表現することができた³⁾。

本報ではこれをポリエステルフィラメント糸の燃糸に拡張し、糸に対する一定の情報（無燃糸の応力緩和試験結果および温度上昇に対する軟化の程度）から任意のひずみ速度、任意の撚り数における応力-ひずみ曲線を求めることを目的とする。

2. 実験装置および実験方法

実験装置は前報^{2,3)}と同様、ロードセルと入力棒の間に、上下端をアルミ小片に接着した糸試料を取り付け、入力棒を下方へ押し下げることによって糸を引張するものを用いた。また、試料長は50 mmと

し、試料は繊維の標準状態 (20°C, 65% RH) 中に12時間以上放置し、その条件下で実験を行った。

引張速度は表1に示す6種類に設定した。同表にはそれぞれの引張速度に対する公称ひずみ速度もあわせて示す。条件番号①~③の低速度での実験では、定速引張試験機（東洋測器製、テンシロン UTM III型）を利用して入力棒を押し下げることにより試料を定速で引張した。④~⑥の高速域ではガイドを介して重りを落下させ、入力棒に衝撃速度を与え、糸を引張した。

糸試料は前報^{2,3)}と同様のポリエステル連続マルチフィラメント糸 11.1 tex/36 fil に所定の撚りを掛けて用いた。撚りは検撚機に長さ500 mmの原糸を取り付け、0.03 Nの初荷重を掛けて所定の撚りを加え、自由に収縮させた。本実験に用いた加撚撚数 T_m と収縮量 c および収縮の結果による実撚数 T_e を表2に示す。

3. フィラメント燃糸の応力-ひずみ曲線

J. C. Smith⁴⁾は高ひずみ速度における数種のフィラメント糸の応力-ひずみ曲線を求めているが、そこでは定量的な扱いはされていない。また C. F. Zorowski⁵⁾は音波を使って、撚りによる初期弾性率の変化を測定しているが、低ひずみでの弾性率に限られているため、弾性限界や降伏後の挙動を予測はしていない。

一方、フィラメント糸の応力-ひずみ挙動を解析した報告は Hearle⁶⁻⁹⁾を始めとして非常に多いが、この中で数値計算に適するものとして、Treloar¹⁰⁾らによって提案されたエネルギー法がある。これは無撚り状態の荷重-伸び曲線 $f[\lambda]$ を入力して任意の撚り数における応力-ひずみ曲線を予

Table 1 Strain Rates

Term number	①	②	③	④	⑤	⑥
Tensile speed (m/s)	1.67 $\times 10^{-4}$	1.67 $\times 10^{-3}$	1.67 $\times 10^{-2}$	0.415	2.17	3.76
Nominal strain rate (s^{-1})	3.33 $\times 10^{-3}$	3.33 $\times 10^{-2}$	3.33 $\times 10^{-1}$	8.30	43.4	75.2

Table 2 Twist contraction

T_m (t/m)	L_0 (mm)	L_1 (mm)	C	C'	T_0 (t/m)
200	500	499.1	0.002	0.002	200
500		495.1	0.010	0.010	505
800		487.1	0.024	0.025	820
1000		480.0	0.040	0.042	1042
1200		469.9	0.060	0.064	1277
1500		450.0	0.100	0.111	1667
1800		424.1	0.152	0.179	2122
2000		404.1	0.192	0.238	2475

$$C = (L_0 - L_1) / L_0, \quad C' = (L_0 - L_1) / L_1$$

測するものである。本報ではこの方法を用いて構成式の適用範囲を広げるため、以下にエネルギー法の概略を述べる。

図1に撚数 T_0 の撚糸において糸軸からの半径が r_0 の位置にあるフィラメントの展開図を示す。実線は糸を引張していない状態、破線は糸を λ_c 倍に引張（この時繊維は λ_r に引張される）した状態を示す。撚り1周期に対する長さを H で表した糸軸と、同じく l_0 で表した繊維とのなす角を撚角度 α_0 とする。糸を λ_c 倍に引張ることによって $T_0 \rightarrow T$, $r_0 \rightarrow r$, $\alpha_0 \rightarrow \alpha$ と変化し、この間の体積変化がないとすると、

$$r^2 = r_0^2 / \lambda_c \quad (1)$$

となり、引張前後の撚角度は、

$$\tan \alpha_0 = 2\pi T_0 r_0 \quad (2)$$

$$\tan \alpha = 2\pi T r = \lambda_c^{-3/2} \cdot \tan \alpha_0 \quad (3)$$

となる。これより λ_c と λ_r の間には、

$$\lambda_r^2 = \lambda_c^2 \cdot \frac{1 + \lambda_c^{-3}(2\pi T_0)^2 r_0^2}{1 + (2\pi T)^2 r^2} \quad (4)$$

の関係が成り立つ。一方、構成繊維の無撚り状態での荷重—伸び曲線を $f[\lambda]$ とすればその引張エネルギー W_r は、

$$W_r = \int_1^{\lambda_r} f[\lambda] d\lambda \quad (5)$$

となる。糸の構成繊維本数が多く、考慮する糸の単位長さが糸の太さに比べて十分大きく、マイグレーションがある場合、糸の撚り角度分布すなわち糸軸からの構成繊維までの半径分布は連続的に変化していると考えられる。このため、糸全体の引張エネルギー

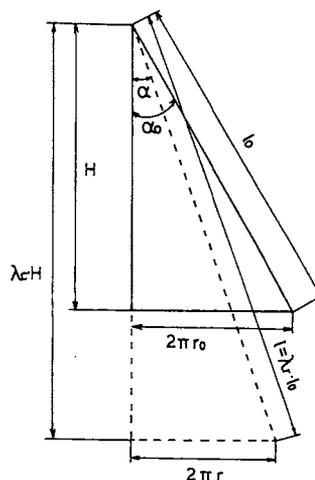


Fig. 1 Schematic diagram of twisted yarn.

ギ— W は W_r を $r_0 = 0$ から最外層半径 R_0 まで積分して次式で与えられる。

$$W = 2\pi \int_0^{R_0} \left\{ \int_1^{\lambda_r} f[\lambda] d\lambda \right\} r_0 dr_0 \quad (6)$$

糸は回転せずに引張されるため、トルク成分は仕事をしない。よって総エネルギー W は引張力 F によってなされる仕事に等しい。これより糸軸方向の力 F は次式となる。

$$F = \frac{dW}{d\lambda_c} = 2\pi \int_0^{R_0} \frac{\partial}{\partial \lambda_c} \left\{ \int_1^{\lambda_r} f[\lambda] d\lambda \right\} r_0 dr_0 \quad (7)$$

Hearle ら¹¹⁾はエネルギー法を用いてインターレース糸の強伸度曲線を予測し、Komori ら¹²⁾はナイ

ロン糸の撚角度分布を実測により求め、エネルギー法による計算結果と引張試験結果を比較し、その有効性を確認した。

(7)式を計算するには $(\partial\lambda/\partial\lambda_c)$ および R_0 を求める必要がある。撚糸構造のモデルを図1のようにとった場合、 $(\partial\lambda/\partial\lambda_c)$ は r_0 の分布を決定することによって幾何学的に求められる。このために糸中のフィラメントの配列が図2のように最密充填されると考えると、中心から i 番目の層（最外層を n 層とする。本試料の場合には全フィラメント数 N は36だから $n=4$ ）に含まれるフィラメント数 N_i は、

$$\begin{aligned} N_i &= 1 & (i=1) \\ &= 6(i-1) & (i=2, \dots, n-1) \\ &= N - \sum_{i=1}^{n-1} N_i & (i=n) \end{aligned} \quad (8)$$

となり、未伸張時の糸軸から第 i 層目のフィラメント中心までの距離 $r_{0,i}$ は

$$r_{0,i} = \frac{1}{n}(i-1) \cdot R_0 \quad (9)$$

によって決まってしまうように思われる。ところが糸に撚りを加えた場合、撚りによる収縮を生ずるため、与えられた撚り数 T_0 における最外層繊維半径 R_0 は無撚りの場合に比べて撚り縮みによる織度増大に応じて増加している。マルチフィラメント糸に撚りを加えた場合の糸の収縮については、吉田ら¹³⁾、Zurek¹⁴⁾、藤野ら¹⁵⁾ など多くの研究がされており、種々の考え方に基づいて収縮量が見積られている。本報では吉田ら¹³⁾の方法を参考に、実験結果に一致するように以下の方法により収縮 c を決定した。

$$c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{1}{\cos \alpha_i} - 1 \right) \cdot N_i \quad (10)$$

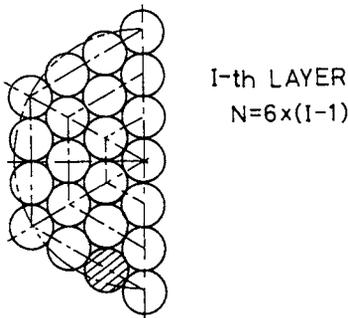


Fig. 2 Cross section of idealized yarn.

ここで c は加撚前の糸長 L_0 で加撚による収縮量 ΔL を除したもので、織物分解設計の際に多用されている撚縮み c' (加撚後の糸長 L_1 で加撚による収縮量 ΔL を除したもの：参考のために表2に示す)とは異なる。また各層での撚り角度 $\alpha_{0,i}$ は、

$$\alpha_{0,i} = \tan^{-1}(2\pi T_0 r_{0,i}) \quad (11)$$

であり、糸の最外層 (すなわち $i=n$ または $r_{0,i}=R_0$) におけるフィラメントと糸軸とのなす角を α_m とする。

(9)~(11)式は R_0 の関数となるため、撚り数と織度を与えただけでは一義には定まらない。このため無撚りの状態での最外層半径 R_∞ を仮定し、

$$R_0 = R_\infty / \sqrt{c} \quad (12)$$

により R_0 を計算し、(9)~(12)式により $r_{0,i}$ 、 c 、 $\alpha_{0,i}$ および R_0 を数回繰り返して計算し、収束した値をそれぞれの計算値とした。以上の計算ではマイグレーションが理想的に行われ、糸を構成する繊維は等しい収縮、等しいひずみを持っていることを暗黙の内に仮定していることになる。また出発の R_∞ は繊維が完全に円形断面を持ち、図2のように配列していると考え、

$$R_\infty = (n-1) \sqrt{\frac{4}{n} \cdot \frac{\text{Tex}}{N\rho}} \times 10^{-3} \quad (13)$$

と仮定した。ただし Tex は糸の無撚の状態での織度 (テックス数)、 ρ は密度である。

表2に示された本試料の糸収縮を(10)式と比較して図3に、また糸表面の接写撮影から得られた実測の α_m と(11)式による α_m の計算結果を比較して図4に示す。図3および図4をみると本手法により実験に用いた糸試料の収縮量やフィラメント分布を良く説明できたように思われる。もっとも実際の (より大きな加撚張力がかかったり、糸送りがあったりする)

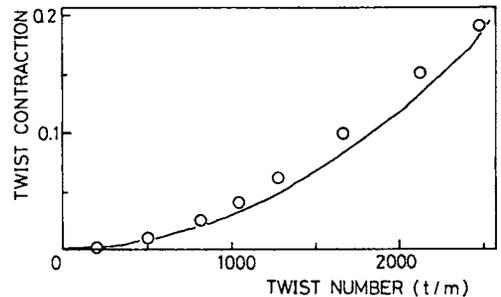


Fig. 3 Relation between twist contraction and twist number. Solid line is obtained from eq. (10), and open circles are experimental ones.

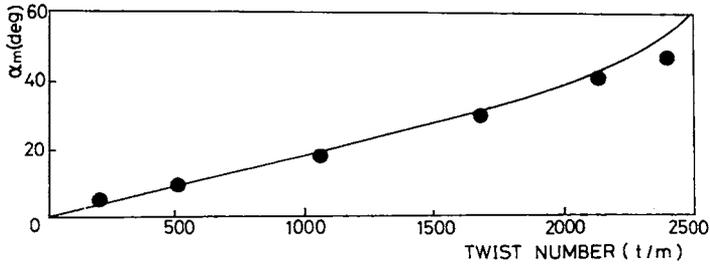


Fig. 4 Relation between α_m and twist number. Solid line is obtained from eq. (11), and solid circles are obtained from photographing yarn surface.

加撚機構において $\alpha_m=40^\circ$ 以上までこのように簡単な収縮理論で説明できるか否かは疑問が残るので、この点に関しては別の機会に論じたい。とにかく何らかの仮定を用いてフィラメント分布を推定しない場合には Komori ら¹²⁾ の行ったように (引張試験よりは随分と煩雑な) フィラメントの撚り角度分布の実測をしなければいけないので、本報においては、(9)~(13)式によって撚りによる収縮の影響を考慮した上で、フィラメント分布を仮定して計算を進めることにした。

4. 過応力模型を用いた無撚糸の構成式

無撚糸の応力-ひずみ特性 $f[\lambda]$ を予想するため、前報²³⁾ で求めた過応力模型を用いる。すなわちひずみ速度依存性を考慮した構成式として、

$$\dot{\epsilon} = \dot{\sigma}/E + (\sigma - g[*]) / (E \cdot K[*]) \quad (14)$$

を採用する。 σ は応力、 ϵ はひずみ、ドットは時間に関する微分、 $[*]$ は引数 $*$ の関数であることを示す。 $g[*]$ はひずみ ϵ において $\dot{\epsilon}$ や $\dot{\sigma}$ の影響を受けないときの応力で平衡応力と呼ぶ。また E は瞬間弾性係数、 $K[*]$ は速度依存の程度を表す係数である。 $g[*]$ および $K[*]$ の関数形および各定数は以下のように決定した²³⁾。なお本報では特にことわらない限り、応力としては引張により体積変化がないものとして、引張過程中的の織度で荷重を除いた真応力 (N/tex) を、ひずみとしては対数ひずみをそれぞれ用いることにする。

$$g[\epsilon, 293] = E\epsilon - \int_0^{\epsilon} \int_0^{\xi} P\left[\frac{\eta}{\epsilon^*}\right] d\eta d\xi \quad (15)$$

$$P[x] = -\frac{d^2g}{d\epsilon^2} = Ax^{2n-1} \cdot \exp\{-(a^2x^2 + b^2x^{-2})\} \quad (16)$$

$$g[\epsilon, \theta] = g[\epsilon, 293] \{1 + J(\theta - 293)\} \quad (17)$$

$$E[\theta] = E[293] \{1 + J(\theta - 293)\} \quad (18)$$

$$K[\epsilon, \sigma] = K_0 \exp\{-K_1[\epsilon](\sigma - g[\epsilon])\} \quad (19)$$

$$K_1 = P_0 + P_1/\epsilon \quad (20)$$

ただし x は $d^2g/d\epsilon^2$ の絶対値が最大値を示すときのひずみを ϵ^* として $x = \epsilon/\epsilon^*$ で与えられる²⁾。実験に用いた試料の 293 K における応力-ひずみ曲線を記述するための適当な定数は $\epsilon^* = 0.006$, $A = 863 N/\text{tex}$, $a = 0.164$, $b = 0.726$, $K_0 = 86,400 s^{-1}$, $P_0 = 51.1 \text{ tex}/N$, $P_1 = 2.81 \text{ tex}/N$, $E[293] = 8.82 N/\text{tex}$ であった。 J は構成式中に簡便に温度の影響を導入するための定数で、本報に用いた試料の場合、 $J = -0.008 K^{-1}$ とすると、($K[*]$ に θ の影響を導入しなくても) 常温付近での温度の影響をよく表現することができた。

ひずみ速度が小さく、糸の変形が等温的に進行すると考えられる場合には糸の温度が 20°C ($\theta = 293 K$) であるとして $g[*]$ には(15)式を用いることができるが、ひずみ速度が大きくなった場合は断熱変形に近くなり、 $g[*]$ として温度の影響を考慮した(17)式を用いなければならない。引張中の糸の温度上昇 θ' の概算は以下によって行った³⁾。

$$\theta'[\epsilon_1] = \left[\int_0^{\epsilon_1} \gamma[\epsilon] \cdot \beta[\epsilon] d\epsilon \right] / \beta[\epsilon_1] \quad (21)$$

$$\gamma[\epsilon] = \frac{(s/\rho) - (\partial u/\partial \epsilon)_T}{c_v} \quad (22)$$

$$\beta[\epsilon] = \exp\left[\int_0^{\epsilon} \beta'[\xi] d\xi \right] \quad (23)$$

$$\beta'[\varepsilon] = 2h / (c_v \cdot R_0 \cdot \rho \cdot \varepsilon) \quad (24)$$

ただし ρ は糸の密度で $\rho = 1.380 \text{ kg/m}^3$, c_v は定容比熱で $c_v = 1.34 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, h は糸表面の熱伝達率で $h = 38.5 \text{ J/(m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s)}$ とした。 u としては弾性エネルギーのみを考え、

$$(\partial u / \partial \varepsilon)_T = \{s / (E' \cdot \rho)\} \times (ds / d\varepsilon) \quad (25)$$

とした。ただし、 E' は $s-\varepsilon$ 曲線の原点付近の勾配である。

以上により(14)式中の関数形および定数が定まった。ここで $\dot{\varepsilon}$ として一定ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_0$ を与えると(14)式は σ の t に関する1階の線形微分方程式となる。これを(2)式によって各ひずみにおける糸中の温度上昇を概算しながら(14)式をルンゲ・クッタ法によって数値解析することにより、ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_0$ における応力-ひずみ曲線が得られる。

5. 数値計算結果と引張試験結果との比較

以上で述べた理論を基にポリエステルフィラメント糸の燃糸の応力-ひずみ曲線をシミュレーションする手順を図5に示す。計算はまず①糸試料を特定し、②応力緩和試験や静的な(雰囲気温度を変えての)引張試験から得られた基本的物性を入力して g [*], K [*], γ [ε] 等の式に含まれる定数を定める。そして③引張速度を入力し、 $\dot{\varepsilon}$ 一定として(2)式で温度上昇を計算しながら、(14)式をルンゲクッタ法により数値解析し、④無燃の状態での応力-ひずみ曲線を得る。ここで本研究に用いた試料の場合、ひずみ速度が1けた違っても応力レベルの差はたかだか数パーセントに過ぎず、また公称ひずみと対数ひずみの差もたかだか数パーセントに過ぎないため、 $\dot{\varepsilon}_0$ としては表1に示した公称ひずみ速度で代用した。

次に⑤撚り数を入力し、(9)~(13)式によって⑥糸中のフィラメントの α_0 の分布を予測することにより $(\partial \lambda / \partial \lambda_c)$ が求められる。 $f[\lambda]$ と $(\partial \lambda / \partial \lambda_c)$ が与えられれば(7)式によってあるひずみにおける糸軸方向の力すなわち⑦引張試験における荷重-伸び曲線が求められる。このときの λ および $f[\lambda]$ は④までで用いていた ε および σ と、

$$\lambda = \exp[\varepsilon] \quad (26)$$

$$f[\lambda] = \sigma[\varepsilon, \dot{\varepsilon}] / \times \text{Tex} \quad (27)$$

の関係がある。この荷重-伸び曲線を⑧真応力-対数ひずみ曲線に変換して任意のひずみ速度、任意の

撚り数における応力-ひずみ曲線が得られる。⑨他のひずみ速度や撚り数における応力-ひずみ曲線が得たい場合にはそのステップまで戻って計算を繰り返せば良い。

なおフィラメントのひずみ速度は厳密には撚り角度 α_0 によって異なる。すなわち糸が λ_c 倍に伸びたときフィラメントは λ 倍にしか伸びていないため、例えば $T_0 = 2,122 \text{ t/m}$, $\lambda_c = 1.2$ の場合、最外層にあるフィラメントでは(4)式より $\lambda_r = 1.11$ となる。しかし、前述のように1けたのひずみ速度の差が応力

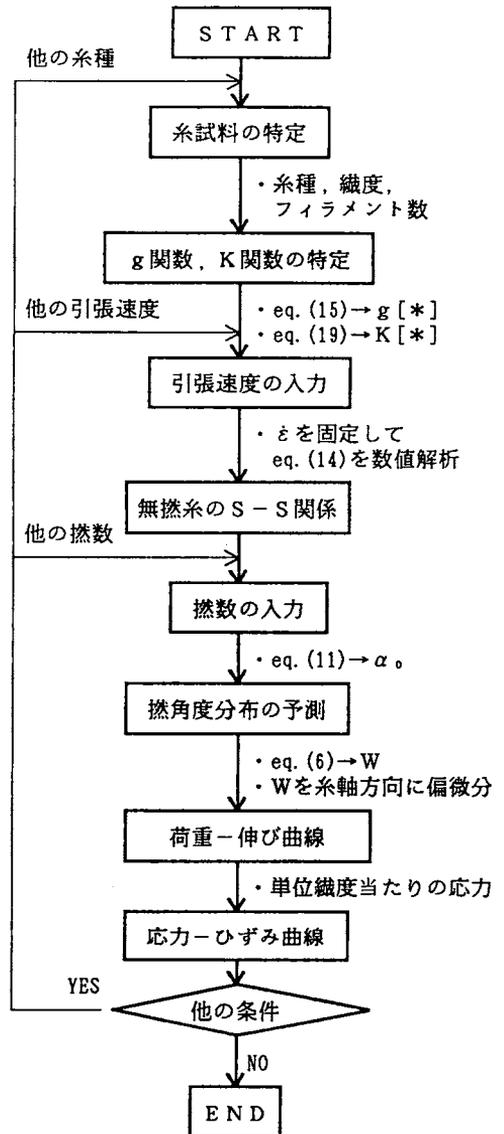


Fig. 5 Procedure for calculating stress-strain curves of polyester yarn.

一ひずみ関係に及ぼす影響はたかだか数%である。このためあるひずみ速度においては全てのフィラメントの f [λ] として糸軸方向のひずみ速度に応じた同一の f [λ] を用いた。

以上の手順により得られた応力-ひずみ曲線の計算例を図6～図11に破線で、これに対応する実験結果を実線で示す。各図において $T_0 = 0 \text{ t/m}$ の曲線は無撚糸の応力-ひずみ曲線であり、実験結果と計算結果はほとんど差が見られないほどよく一致している。これより f [λ] として実測値ではなく、(14)式から得られる計算値を用いても結果に大きな影響を及ぼさないことが分かる。

撚りを加えた場合でも計算結果は実験結果とほぼ一致している。実験値と計算値の差について詳しく検討するため、2%ひずみから14%ひずみまで2%おきに7個の実験値と計算値の差を取り、その平均値を実験値と計算値の差を表す変数 MD として導入した。本研究における最低のひずみ速度および最高のひずみ速度に対する MD と(11)式より求めた最外層撚り角度 α_m の関係について図12にそれぞれ○および●で示す。図には比較のため Treloar ら¹⁰⁾ や Komori ら¹²⁾ の結果についてもそれぞれ□および■で示す。なお Treloar ら¹⁰⁾ はレーヨンについての、Komori ら¹²⁾ はポリアミドについての実験であり、実験方法も異なる。また糸の太さも異なり、撚り角度の算出を筆者らの判断で行っている場合もある。さらにこれらの文献値は図からの読み取り値なので、一概に結論を下すことはできない。しかし大まかな傾向として、(1)MD は α_m の増加関数であること、(2)低ひずみ速度での MD は Treloar ら¹⁰⁾ と同程度であること、(3)高ひずみ速度における MD も Treloar ら¹⁰⁾ の MD より大きくはない（むしろ小さい）こと、(4)Komori ら¹²⁾ の MD は他に比べて小さいことなどが読み取られる。これらのことから本計算手法は低ひずみ速度ばかりでなく、高ひずみ速度の応力-ひずみ曲線に対しても有効であることが確認された。また実験値と計算値の差の主な原因は撚り角度分布の影響によると考えられ、これ以上一致させるためには Komori ら¹²⁾ が行ったように、撚り角度分布とその引張過程における変化の情報を導入する必要があると考えられる。本報のように仮定の多い計算方法では、Treloar ら¹⁰⁾ の結果が示すように、10%程度の差は止むを得ないものと考えられる。

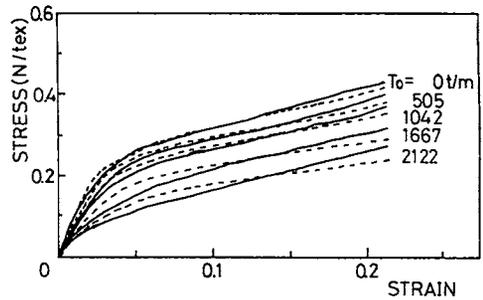


Fig. 6 Stress-strain curves of polyester yarn for several twist number at $\dot{\epsilon} = 3.33 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Solid lines are experimental ones, dotted lines are calculated ones.

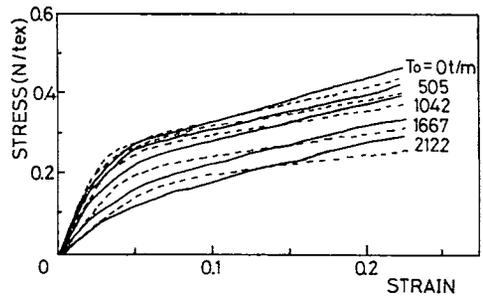


Fig. 7 Stress-strain curves of polyester yarn for several twist number at $\dot{\epsilon} = 3.33 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$. The lines are the same as shown in Fig. 6.

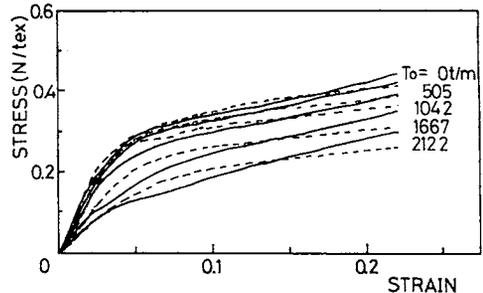


Fig. 8 Stress-strain curves of polyester yarn for several twist number at $\dot{\epsilon} = 3.33 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$. The lines are the same as shown in Fig. 6.

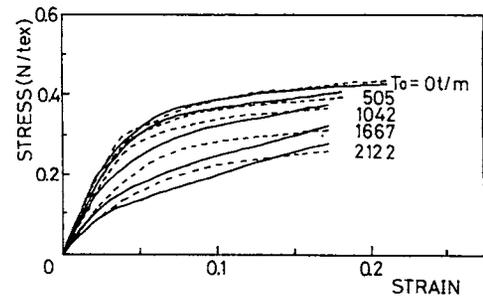


Fig. 9 Stress-strain curves of polyester yarn for several twist number at $\dot{\epsilon} = 8.3 \text{ s}^{-1}$. The lines are the same as shown in Fig. 6.

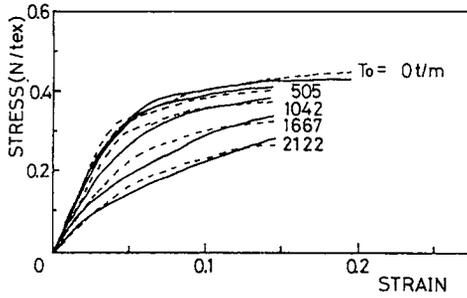


Fig. 10 Stress-strain curves of polyester yarn for several twist number at $\dot{\epsilon} = 43.4 \text{ s}^{-1}$. The lines are the same as shown in Fig. 6.

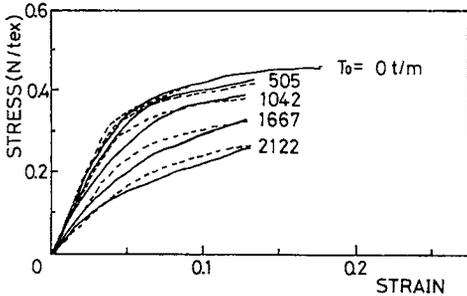


Fig. 11 Stress-strain curves of polyester yarn for several twist number at $\dot{\epsilon} = 75.2 \text{ s}^{-1}$. The lines are the same as shown in Fig. 6.

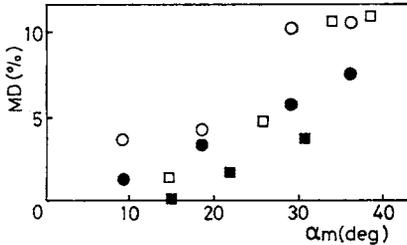


Fig. 12 Relation between MD and α_m . \circ indicates MD at $\dot{\epsilon} = 3.33 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ and \bullet indicates MD at $\dot{\epsilon} = 75.2 \text{ s}^{-1}$. \square and \blacksquare are quoted from papers by Treloar et al.¹⁰⁾ and Komori et al.¹²⁾ respectively.

6. 結 言

本報では糸に対する一定の情報（無撚糸の応力緩和試験結果および温度上昇に対する軟化の程度）から任意のひずみ速度、任意の撚り数における応力—

ひずみ曲線を求めるため、速度依存性の影響の要素として温度上昇の影響を考慮した過応力模型を、また撚りの影響の要素としてエネルギー法を適用する計算方法を提案した。

提案した計算手法によりポリエステルフィラメント糸に対してひずみ速度では $10^{-3} \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ 、撚りでは無撚糸から強撚糸（11.1 tex の糸で 2,000 t/m 以上）までについて数値計算を行い、実験結果と比較した。計算結果は大体の応力レベルでは実験結果と一致した。これより本報の計算手法はポリエステルフィラメント撚糸の応力—ひずみ挙動を予想する手段として有用であることが確認できた。

なお、この研究の一部は1991年日本繊維機械学会年次大会で発表したものである。

また本報をまとめるに当たり、有益なご助言を頂きました金沢大学工学部 茶谷明義先生並びに石川県工業試験場 山本孝氏に謝意を表します。さらに実験にご協力頂いた学生の南誠君（現在の所属：渋谷工業(株)）および宮本隆一君（現在の所属：石川県立工業高校）に感謝します。

参考文献

- 1) M. C. Liu, E. Krempl; *J. Mech. Phys. Solids*, **27**, 377 (1979)
- 2) 喜成, 放生, 新宅, 岩木; *織学誌*, **46**, 311 (1990)
- 3) 喜成, 放生, 新宅, 岩木; *織機誌*, **44**, T 118 (1991)
- 4) J. C. Smith, J. M. Blandford, P. J. Shoue, K. M. Towne; *Text. Res. J.*, **32**, 472 (1962)
- 5) C. F. Zorowski, T. Murayama; *Text. Res. J.*, **37**, 852 (1967)
- 6) J. W. S. Hearle; *J. Text. Inst.*, **49**, T 389 (1958)
- 7) J. W. S. Hearle, H. M. A. E. El-Behery, V. M. Thakur; *J. Text. Inst.*, **52**, T 197 (1961)
- 8) J. W. S. Hearle; *J. Text. Inst.*, **60**, T 95 (1969)
- 9) J. W. S. Hearle, L. R. G. Treloar; *J. Text. Inst.*, **53**, T 446 (1962)
- 10) L. R. G. Treloar, G. Riding; *J. Text. Inst.*, **54**, T 156 (1963)
- 11) J. W. S. Hearle, T. Sakai; *織機誌*, **31**, T 126 (1978)
- 12) T. Komori, K. Makishima, M. Itoh; *Text. Res. J.*, **50**, 548 (1980)
- 13) 吉田, 酒井, 小形, 柳川; *織学誌*, **43**, 27 (1987)
- 14) W. Zurek; *Text. Res. J.*, **31**, 504 (1961)
- 15) 藤野, 熨斗; *織機誌*, **5**, 567 (1952)