巻き取り機構における張力の研究*

(第1報) 走行糸の張力挙動

(昭和41年2月9日受理)

中 島 達 夫**

高 木 久 弥

青 山 太 喜 蔵

——→ 摘 要 ←——

目 的

走行中の糸に摩擦およびドラフトをそれぞれ2個所、計4個所でステップ状に与えたときの糸の張力の応答を測定し、理論との比較、検討を行なう。

成 果

走行中の糸に摩擦およびドラフトが与えられたときの張力の挙動は糸を完全弾性体として取り扱うことにより容易に計算でき、しかも実験結果とよく一致する値を得ることができる。ただしさらに正確に糸張力の挙動を推定するには糸のクリープおよび張力履歴を考慮に入れることが必要である。定性的には、ドラフトのステップ変化による張力の応答はドラフトを変動させた個所では1次遅れ、つぎのドラフトゾーンでは2次遅れである。

送り出し側が自由な状態で走行してきた糸に摩擦をステップ状に変化させて付加した場合の張力の応答は近似的に比例要素であり、ドラフトゾーン中で摩擦を付加する場合は、摩擦の与えられたゾーンで1次微分である。

摩擦およびドラフトのステップ変化に対する各ゾーンの張力変化が全部安定すると認められるには、糸が全コースを完走するにかかると時間の約3倍の時間を要する。

1. ま え が き

繊維工業の諸工程における走行糸の張力管理の重要性については改めてここに述べるまでもないが、とくに準備工程、サイジング工程あるいは製織工程における張力管理は必要欠くべからざるものである。巻糸体を例にとるならばそれがチーズあるいはコーンのごときのものである。またサイジング工程におけるように多数糸による平行巻きの場合であっても、巻糸体の張力分布や巻糸体の成形などに与える巻き取り張力の影響は大きく、巻かれた糸の性質（糸の履歴現象など）にも関連し、その後の工程に与える影響もはなはだ大となることは容易に想像のつくところである。かかる意味からいっても張力管理の重要性を知ることができるが、一口に張力管理といっても送り出し部から巻き取り部の間に外力のかからない簡単なものもあれば、走行中にいろいろの外力が加

えられるような複雑な工程もあり、それによって張力の変動の様子も異なるので張力管理の手段もそれに合わせて行なわなければならない。したがって張力管理の1段階として、走行糸に外的な力が加わった場合の張力の挙動を把握することが必要である。巻き取り工程中、糸に張力を発生させるような外的な力としては、糸にある種のブレーキ的役割をなす摩擦力があり、また把持ローラ間における送り出し量と巻き取り量の差、すなわちドラフトを与えることによって生ずる力もある。

走行糸の張力制御に関する研究報告はわが国でもかなりたくさんある。前田らは主^{1,2,3,4)}に粘弾性論的に、また酒井らは主^{5,6,7)}に弾性論的に取り扱っているが、いずれも単一糸の変化を対象としている。それに対しここでは数個所において入力^{1,2,3,4)}の与えられるシステムの張力応答、とくに過渡^{5,6,7)}応答に主眼点を置いたがその目的は張力の自動調整の基礎資料とすることにある。かかる意味で本報では以下

* Yarn Tension in Winding Mechanism. Part 1: Behavior of Tension on a Running Yarn.

** T. Nakashima, K. Takagi, Members, and T. Aoyama. 名古屋市工業研究所

に述べるような巻き取り機構において張力の発生現象をとらえることを試みた。すなわちドラフトゾーン2箇所、摩擦によるブレーキ付加箇所を2箇所の計4箇所において走行糸にドラフトおよび摩擦をステップ状に与えたときの張力の過渡応答および定常応答を調べ、ドラフトおよび摩擦が走行中の糸の張力にいかなる影響を与えるかを調べてみた。

2. 実験方法

本実験は多数糸をいっせいに平行に巻き取る方式ではなく、糸1本のみを走行せしめて巻き取る方式を採用した。(ただし一部については多数糸の実験も行なったが、その結果については付録に記す)

2.1 使用試料

測定対象となる糸はつぎの3種でそれぞれ記号 N_1 , N_2 , C で表わす。

N_1 : ナイロン マルチフィラメント糸 (100 d-24-20, ブライト普通糸) で市販ポビンより、直接糸を引き出し測定に供したものの。

N_2 : 同上糸。ただしポビンよりかせに巻き取り、72 hr 無張力状態に放置後、かせより糸を引き出し測定に供したものの。

C : 綿糸 (1/40 s, コーマ糸), コーンより直接糸を引き出し測定に供したものの。

2.2 実験装置および方法

本実験の装置の概略図を第1図に示す。装置はローラ間ドラフトゾーン2箇所と摩擦によるブレーキ付加箇所2箇所から成っている。図の R_s は糸の供給部で各試料によりポビン、かせ および コーン がこの個所に設置される。 P_0 はディスク型張力装置により走行糸に直接荷重を加え、摩擦力 f_0 を与えて張力を発生させる箇所である。なお $R_s P_0$ 間の糸張力はつねに無張力に保たれている。 P_1, P_2, P_4 はいずれも積極駆動ローラにより糸を把持、駆走せしめる個所で、 P_4 は図に示すごとく、主モータから変速機を介して回転が伝えられるようになっており、したがって糸の走行主速度 (以下 V で表わす) は P_4 の線速度でもって表わされる。 $P_1 P_2$ 間および $P_2 P_4$ 間にはそれぞれ差動歯車付き PIV 微変速装置があり、主軸からの回転はこれらの変速機を経て、ローラ $P_1 P_2$ に回転が伝えられるので $P_1 P_2$ 間のドラフト δ_{1-2} および $P_2 P_4$ 間のドラフト δ_{2-4} をこの2つのPIV微変速装置によって任意にそれぞれ単独に微量変化させることができる。 P_3 は $P_2 P_4$ 間にある2本

のガイドローラにブレーキを与えて糸とガイドローラ間に摩擦力 f_3 を付加する個所で、あとに述べる基準状態では2本のガイドローラはいずれもブレーキをかけない状態になっている。ガイドローラの軸受けにはボールベアリングを使用し、糸とガイドローラにははできる限り摩擦は発生しない状態にした。 R_d は巻き取り部で P_4 の線速度に合わせて巻き取る消極的巻き取り方式である。以上が本実験の主要部であり、走行糸の張力を変化させる入力因子として $f_0, \delta_{1-2}, \delta_{2-4}, f_3$ および V の5因子を選んだ。これらの因子を変化させることにより発生する各ゾーンの張力の測定は $P_0 P_1$ 間, $P_1 P_2$ 間, $P_2 P_3$ 間, $P_3 P_4$ 間の張力をそれぞれ T_1, T_2, T_3, T_4 とし、ストレインゲージを用いた3点ローラ型変位式張力計 G_1, G_2, G_3, G_4 にて検出し、ひずみ計に記録する方式である。

(第1図) 【実験装置】

実験方法は上述のごとく設置した装置において、試料を R_s より引き出し、 P_0, P_1, P_2, P_3, P_4 を経て R_d に巻き取る。そしてあらかじめ走行糸の状態を基準状態に保ったのち、因子 $f_0, \delta_{1-2}, \delta_{2-4}, f_3$ および V をそれぞれ単独にステップ状に変化させ、これに対する張力 T_1, T_2, T_3, T_4 の過渡応答および定常応答を調べる。変化させる1因子を除いた他の4因子は基準状態につねに固定しておく。ここにいる基準状態とは $f_0=1, \delta_{1-2}=0\%, \delta_{2-4}=1\%, f_3=0$ の状態をいう。ただし f_0 はディスク型張力装置にてベースのみのときを0とし、 $f_0=1$ はその上に1単位の荷重を加えた場合、 $f_0=2$ は2単位の荷重を加えた場合とする。 δ_{1-2} および δ_{2-4} はそれぞれ $(v_2-v_1)/v_1, (v_4-v_2)/v_2$ で表わす。ただし v_1, v_2, v_4 はそれぞれローラ P_1, P_2, P_4 の表面線速度を示す。また f_3 の値はブレーキのかけられたガイドローラの数を示し、 $f_3=0$ はガイドローラにブレーキをかけない場合、(ただしある一定量の摩擦がかけてある。) $f_3=1$ は1本、 $f_3=2$ は2本のガイドローラにブレーキをかけ摩擦を付加した場合を指す。なお走行主速度 V は 20 cm/sec と 10 cm/sec の2種類について実験した。過渡応答の測定にかける時間は $R_s R_d$ 間を糸が完

走する時間の大体3倍とするため、 $V=20$ cm/sec の場合は3 min、 $V=10$ cm/sec の場合は6 min とした。定常応答としては張力が安定したとき、すなわち $V=20$ cm/sec の場合は3 min 後、 $V=10$ cm/sec の場合は6 min 後の値を読みとって、これを定常値とした。

まずこの方式の装置における張力の挙動に関する理論的解析を行なってみる。

3. 理 論

3.1 伝 達 関 数

第1図の P_0P_1 間、 P_1P_2 間、 P_2P_3 間および P_3P_4 間の間隔をそれぞれ l_1, l_2, l_3, l_4 とし、またその部分の糸の線密度をそれぞれ $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$ とする。またローラ P_1, P_2, P_4 の表面線速度をそれぞれ v_1, v_2, v_4 (ただし $v_4=V$: 走行主速度) で表わし、糸を完全弾性体と仮定する。

〔 T_1 〕 送り出し部 R_s における摩擦および慣性が無視しうるものとすれば

$$T_1 = f_0$$

いま P_0 において摩擦をステップ状に Δf_0 だけふやすと、 P_0 において右側へ引っばる力 ($=T_1$) よりも潜在摩擦が大きくなるので、 P_0 では糸はしばらく停止する。その間 P_1 のローラはひきつづき糸を右方へ送っている。その間 P_0P_1 間の糸は次第に引き伸ばされ、張力 T_1 が時間にはほぼ比例して増大する。そしてその増大量 ΔT_1 が摩擦の付加量 Δf_0 に等しくなったところで P_0 点の糸は再び動き出し、その後 $\Delta T_1 = \Delta f_0$ の状態が持続される。(静摩擦と動摩擦は一応等しいものとする。) Δf_0 が加わって P_1 点で停止してから再び動きだすまでの時間 Δt はその停止間における P_0P_1 間の糸の伸び率 ($=v_1 \Delta t / l_1$) に対応する力が Δf_0 であると考えられる。すなわち糸の弾性係数を γ とすれば

$$\Delta f_0 = v_1 \Delta t \gamma / l_1$$

ゆえに

(第2図) Δf_0 による ΔT_1 の過渡応答

$$\Delta t = (\Delta f_0 / \gamma) \cdot (l_1 / v_1) = \left(\frac{\Delta f_0}{\gamma} \right) \cdot t_1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし

$$t_1 = l_1 / v_1$$

となる。したがって ΔT_1 の変化を図示すれば第2図が得られる。ただし普通の場合この時間 Δt はごく短いので近似的には ΔT_1 は瞬間的に Δf_0 に追従し、比例の形で変化すると考えてさしつかえない。

〔 T_2 〕 P_1P_2 間の連続の方程式は

$$l_2 \frac{d\rho_2}{dt} = v_1 \rho_1 - v_2 \rho_2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ところで供給源 R_s における糸の線密度を ρ_0 とすれば、フックの法則が適用できるものとして

$$\rho_0 / \rho_i = 1 + T_i / \gamma \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad \dots\dots\dots (3)$$

いま T_i が ΔT_i 変化することにより ρ_i が $\Delta \rho_i$ 変化するものとすれば (3) 式より

$$\frac{\rho_i}{\rho_i + \Delta \rho_i} = \frac{1 + T_i / \gamma + \Delta T_i / \gamma}{1 + T_i / \gamma} \quad \dots\dots\dots (4)$$

となり、 Δ はいずれも小さく、したがって $\Delta \rho_i \ll \rho_i$ 、 $\Delta T_i \ll T_i$ となり、また $T_i \ll \gamma$ とすれば (4) 式より近似的に次式が得られる。

$$\Delta T_i \doteq -\gamma \frac{\Delta \rho_i}{\rho_i} \quad \dots\dots\dots (5)$$

つぎに線形化するため、 v, ρ を不変部と可変部にわけ、 $v_i = \bar{v}_i + \Delta v_i$ 、 $\rho_i = \bar{\rho}_i + \Delta \rho_i$ に対応して $\rho_1 = \bar{\rho}_1 + \Delta \rho_1$ 、 $\rho_2 = \bar{\rho}_2 + \Delta \rho_2$ になるものとすれば

$$\frac{d\rho_2}{dt} \rightarrow \frac{d(\bar{\rho}_2 + \Delta \rho_2)}{dt} = \frac{d\Delta \rho_2}{dt}$$

$$\text{また } \bar{v}_1 \bar{\rho}_1 - \bar{v}_2 \bar{\rho}_2 = 0$$

であるから2次の微小項を省略すれば

$$\begin{aligned} v_1 \rho_1 - v_2 \rho_2 &= (\bar{v}_1 + \Delta v_1)(\bar{\rho}_1 + \Delta \rho_1) \\ &\quad - (\bar{v}_2 + \Delta v_2)(\bar{\rho}_2 + \Delta \rho_2) \\ &= \bar{v}_1 \Delta \rho_1 + \bar{\rho}_1 \Delta v_1 - \bar{v}_2 \Delta \rho_2 - \bar{\rho}_2 \Delta v_2 \end{aligned}$$

したがって (2) 式より

$$l_2 \frac{d\Delta \rho_2}{dt} = \bar{v}_1 \Delta \rho_1 + \bar{\rho}_1 \Delta v_1 - \bar{v}_2 \Delta \rho_2 - \bar{\rho}_2 \Delta v_2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

上記の線形化方式を (5) 式に適用するのには (5) 式の ρ_i を $\bar{\rho}_i$ とすればよく、そのように書きかえられた (5) 式を用いると (6) 式はつぎのようになる。

$$\frac{l_2}{v_2} \cdot \frac{d\Delta T_2}{dt} + \Delta T_2 = \Delta T_1 + \gamma \left(\frac{\Delta v_2}{v_2} - \frac{\Delta v_1}{v_1} \right)$$

両辺のラプラス変換により

$$\begin{aligned} L[\Delta T_2] &= \frac{1}{1 + s l_2 / v_2} \left\{ L[\Delta T_1] \right. \\ &\quad \left. + \gamma L \left[\frac{\Delta v_2}{v_2} - \frac{\Delta v_1}{v_1} \right] \right\} \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

となる。しかるに

$$\Delta \delta_{1,2} = \Delta \left(\frac{v_2 - v_1}{v_1} \right)$$

であるから

$$\begin{aligned} \Delta \delta_{1,2} &= \frac{\Delta v_2 - \Delta v_1}{v_1} - \frac{v_2 - v_1}{v_1^2} \cdot \Delta v_1 \\ &= \frac{\Delta v_2 - \Delta v_1}{v_1} - \delta_{1,2} \cdot \frac{\Delta v_1}{v_1} \end{aligned}$$

となり、 v_1 と v_2 の差が小さく、したがって $\delta_{1,2}$ も小さい場合には上式は近似的に

$$\Delta \delta_{1,2} \doteq \frac{\Delta v_2 - \Delta v_1}{v_1} \doteq \frac{\Delta v_2}{v_2} - \frac{\Delta v_1}{v_1}$$

となる。したがって $l_2/v_2 = t_2$ ($\doteq l_2/V$) とすれば (7) 式は

$$L[\Delta T_2] = \frac{1}{1 + st_2} \left\{ L[\Delta T_1] + \gamma L[\Delta \delta_{1,2}] \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

で表わされる。

$[T_3, T_4]$ $P_2 P_4$ 間の連続の方程式として

$$l_3 \frac{d\rho_3}{dt} + l_4 \frac{d\rho_4}{dt} = v_2 \rho_2 - v_4 \rho_4$$

(第1表) ステップ応答の理論結果

入 力		ΔT_1	ΔT_2	ΔT_3	ΔT_4
Δf_0	G	1	$\frac{1}{1 + st_2}$	$\frac{1}{(1+st_2)\{1+s(t_3+t_4)\}}$	同 左
	過 渡 応 答	比 例 1	1 次 遅 れ $1 - e^{-t/t_2}$	2 次 遅 れ $1 - \frac{t_3+t_4}{t_3+t_4-t_2} e^{-\frac{t}{t_3+t_4}} + \frac{t_2}{t_3+t_4-t_2} e^{-t/t_2}$	同 左
	定常応答	1	1	1	1
$\Delta \delta_{1,2}$	G	—	$\frac{\gamma}{1 + st_2}$	$\frac{\gamma}{(1+st_2)\{1+s(t_3+t_4)\}}$	同 左
	過 渡 応 答	—	1 次 遅 れ $\gamma (1 - e^{-t/t_2})$	2 次 遅 れ $\gamma \left\{ 1 - \frac{t_3+t_4}{t_3+t_4-t_2} e^{-\frac{t}{t_3+t_4}} + \frac{t_2}{t_3+t_4-t_2} e^{-t/t_2} \right\}$	同 左
	定常応答	0	γ	γ	γ
$\Delta \delta_{2,4}$	G	—	—	$\frac{\gamma}{1+s(t_3+t_4)}$	同 左
	過 渡 応 答	—	—	1 次 遅 れ $\gamma (1 - e^{-\frac{t}{t_3+t_4}})$	同 左
	定常応答	0	0	γ	γ
Δf_3	G	—	—	$-\frac{1+st_4}{1+s(t_3+t_4)}$	$\frac{st_3}{1+s(t_3+t_4)}$
	過 渡 応 答	—	—	1 次 微 分 $\frac{t_3}{t_3+t_4} e^{-\frac{t}{t_3+t_4}} - 1$	1 次 微 分 $\frac{t_3}{t_3+t_4} e^{-\frac{t}{t_3+t_4}}$
	定常応答	0	0	-1	0

ただし G : 伝達関数 γ : 糸の弾性係数 t_i : l_i/V

の関係が得られる。また $[T_1]$ のところで述べたのと同じように近似的に

$$T_4 - f_3 = T_3$$

であり、 $L[\Delta T_2]$ を求めたのと同じ方法により

$$L[\Delta T_3] = \frac{1}{1+s(t_3+t_4)} \left\{ L[\Delta T_2] - (1+st_4) L[\Delta f_3] + \gamma L[\Delta \delta_{2,4}] \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$L[\Delta T_4] = \frac{1}{1+s(t_3+t_4)} \left\{ L[\Delta T_2] + st_3 L[\Delta f_3] + \gamma L[\Delta \delta_{2,4}] \right\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 $t_3 = l_3/v_3$ ($\doteq l_3/V$) , $t_4 = l_4/v_4 = l_4/V$

以上の伝達様式を各入力に対する出力 ΔT_i の伝達関数 G として第1表に示す。

3.2 過 渡 応 答

入力 f_0 , $\delta_{1,2}$, $\delta_{2,4}$, f_3 をそれぞれ単独にステップ状に変化させた場合の T_1 , T_2 , T_3 , T_4 の変化量 ΔT_1 , ΔT_2 , ΔT_3 , ΔT_4 の過渡応答を上記の理論より求めると第1表および第3図のステップ応答が得られる。

(第3図) ステップ応答の理論結果

すなわち f_0 をステップ状に Δf_0 だけ変化させた場合, 3.1 [T₁] で述べたごとく近似的に ΔT_1 は入力と同じくほとんどステップ状に変化するが ΔT_2 は1次遅れ, $\Delta T_3, \Delta T_4$ はともに2次遅れの形となって変化する。

$\delta_{1,2}$ の変化に対しては, ΔT_1 では影響はなく, ΔT_2 が1次遅れ, $\Delta T_3, \Delta T_4$ がともに2次遅れの形となって表われてくる。同様に $\delta_{2,4}$ のステップ状変化に対しては, $\Delta T_1, \Delta T_2$ への影響はなく, $\Delta T_3, \Delta T_4$ がともに1次遅れとなって変化する。また f_3 を変化させた場合, $\Delta T_1, \Delta T_2$ への影響はなく, $\Delta T_1, \Delta T_4$ はともに1次微分となって表われてくるが ΔT_3 は瞬間的に減少し以後時間とともに指数関数的に減少する。 ΔT_4 もまた1次微分の形であるが瞬間的に増加し, 以後時間とともに指数関数的に減少し, 定常状態ではもとの状態の値にまで下がる。

3.3 定常応答 (静特性)

$f_0, \delta_{1,2}, \delta_{2,4}, f_3$ が与えられた場合の T_1, T_2, T_3, T_4 の定常値は 3.1 よりつぎのごとく近似的に求められる。

$$[T_1] \quad T_1 = f_0 \quad \dots\dots\dots (11)$$

[T₂] (3) 式より $\rho_1/\rho_2 = (\gamma + T_2)/(\gamma + T_1)$ であり, また $\rho_1/\rho_2 = v_2/v_1 = 1 + \delta_{1,2}$ であるから

$$T_2 = T_1(1 + \delta_{1,2}) + \gamma \delta_{1,2}$$

となる。いま $T_1(1 + \delta_{1,2}) \doteq T_1$ であるから (11) 式より

$$T_2 = f_0 + \gamma \delta_{1,2} \quad \dots\dots\dots (12)$$

[T₃, T₄] 同様にして

$$\begin{aligned} T_4 &= T_2(1 + \delta_{2,4}) + \gamma \delta_{2,4} \\ &\doteq T_2 + \gamma \delta_{2,4} \\ &= f_0 + \gamma(\delta_{1,2} + \delta_{2,4}) \\ &= f_0 + \gamma \delta_{1,4} \quad \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

また $T_3 = T_4 - f_3$ より

$$T_3 = f_0 + \gamma \delta_{1,4} - f_3 \quad \dots\dots\dots (14)$$

で表わすことができる。ただし $\delta_{1,4}$ は $P_1 P_4$ 間のドラフトを示し

$$\delta_{1,4} = \frac{v_4 - v_1}{v_1} \doteq \frac{v_2 - v_1}{v_1} + \frac{v_4 - v_2}{v_2} = \delta_{1,2} + \delta_{2,4}$$

である。

4. 実験結果

4.1 過渡応答

変化させるべき因子 $f_0, \delta_{1,2}, \delta_{2,4}, f_3$ および V をそれぞれステップ状に変えたときの T_1, T_2, T_3, T_4 の過渡応答の結果を第4図に示す。

その場合, 変化させる1因子を除いた他の4因子は基準状態 ($f_0=1, \delta_{1,2}=0\%, \delta_{2,4}=1\%, f_3=0, V=20$ cm/sec) に固定した。第4図aは f_0 のみを0単位荷重から2単位荷重に変化させたときの各ゾーンの張力の過渡応答を示す。第4図bは $\delta_{1,2}$ のみを -0.5% から 0.5% に変化させたとき, 第4図cは $\delta_{2,4}$ を 0.5% から 1.5% に, 第4図dは f_3 を0から1に, そしてまた第4図eは V を10 cm/secから20 cm/secに増速させたときの各試料に対する T_1, T_2, T_3, T_4 の過渡応答を示したものである。なお第4図において, T_3 と T_4 の初期値 (時刻=0のときの張力の値) は $f_3=0$ の場合であるから2本のガイドローラのいずれにもブレーキをかけていないが $P_2 P_4$ 間にはベースになる一定の摩擦を与えてあるので T_3 と T_4 の初期値にかなりの差が生じているのである。また f_0 の個所においては, たとえ $f_0=0$, すなわちディスク型張力装置にかかる荷重が0であってもベースの荷重はつねにかけられているため, $f_0=0$ のときでも $T_1=0$ とはならず, ある一定の張力を発生させるようになっている。第5図の実験結果 ($V=20$ cm/sec) および $V=10$ cm/secのときの実験結果 (図は省略) からその変化の時定数を求めたものを第2表に示す。同表には

(第4図a) 入力 f_0 を0単位から2単位に変化させた場合

(第4図d) 入力 f_3 を0単位から1単位に変化させた場合

(第4図b) 入力 $\delta_{1.2}$ を-0.5%から0.5%に変化させた場合

(第4図e) 入力 V を10 cm/secから20 cm/secに変化させた場合

(第4図c) 入力 $\delta_{2.4}$ を0.5%から1.5%に変化させた場合

(第4図) ステップ応答の実測結果

(第2表) 時 定 数

区分 糸 張力 入力因子	実 験 値												理 論 値			
	N_1				N_2				C							
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_1	T_2	T_3	T_4	T_1	T_2	T_3	T_4	T_1	T_2	T_3	T_4
f_0 0 → 2	0	7	61	61	0	4	68	55	0	6	42	42	0	5.6	51.2	51.2
	0	15	108	100	0	11	100	100	0	18	98	80	0	11.1	102.4	102.4
$\delta_{1.2}$ -0.5 → 0.5%		8	54	52		6	50	40		7	46	39		5.6	51.2	51.2
		15	109	98		13	100	80		14	100	88		11.1	102.4	102.4
$\delta_{2.4}$ 0.5 → 1.5%			51	49			28	25			43	42			45.2	45.2
			70	76			100	80			58	58			90.4	90.4
f_3 0 → 1			40	35			12	25			40	38			45.2	45.2
			78	77			48	50			82	70			90.4	90.4

各入力因子における上段の値は $V=20\text{ cm/sec}$ のときの時定数, 下段の値は $V=10\text{ cm/sec}$ のときの時定数を示す

前記の理論より計算した値もあわせて記した。

この時定数はすべて $V=20$ cm/sec のときは 3 min, $V=10$ cm/sec のときは 6 min の T_i の全変化量の 63.2 % ($=1-e^{-1}$) だけ変化するに要する時間を示す。なお実験値は 3 回の実測値の平均値を示す。

4.2 定 常 応 答

上記実験において入力の変化後、ある時間経過して出力が安定したとき ($V=20$ cm/sec のときは 3 min 経過後, $V=10$ cm/sec のときは 6 min 経過後) の T_1 , T_2 , T_3 , T_4 の変化量を測定し、定常変化量とした。3.3 の理論よりもわかるごとく、 f_0 に関する定常特性 (静特性) は T_1 の値で表わされる。すなわち (1) 式より $T_1=f_0$, また $\delta_{1,2}$, $\delta_{2,4}$ に関する定常特性はそれぞれ T_2 と T_1 との定常差および T_4 と T_2 との定常差で表わされる。すなわち (12) 式より $T_2-T_1=\gamma \delta_{1,2}$, (13) 式より $T_4-T_2=\gamma \delta_{2,4}$ となる。そして f_3 に関する定常特性は T_4

(第5図a) f_0 と T_1 との関係 (第5図b) $\delta_{1,2}$ と (T_2-T_1) との関係

(第5図c) $\delta_{2,4}$ と (T_4-T_2) との関係 (第5図d) f_3 と (T_4-T_3) との関係
(第5図) 実験結果より得られた静特性

と T_3 との定常差で表わされる。すなわち (14) 式より $T_4-T_3=f_3$ 。そこで各因子 f_0 , $\delta_{1,2}$, $\delta_{2,4}$, f_3 の変化に対しそれぞれ T_1 , (T_2-T_1) , (T_4-T_2) , (T_4-T_3) の値を実験値より求めてプロットしたのが第5図であり、この図から定常特性を知ることができる。ただし第5図は $V=20$ cm/sec のときの実験結果から得たものである。すなわち第5図aは f_0 を 0, 1, 2 と変化させたときの T_1 の値を示す。(他の因子は前記同様基準状態とした。以下同じ) 第5図b, 第5図cはそれぞれ $\delta_{1,2}$ 対 (T_2-T_1) , $\delta_{2,4}$ 対 (T_4-T_2) の定常特性を示す。ただしPIV微変速機によるドラフトの指示目盛と実際にかかるドラフトの間に若干の差異が検出されたため、その補正を行なって図を描いたものである。第5図dは f_3 を 0, 1, 2 と変化させたときの (T_4-T_3) の値を示す。

5. 実験結果と理論の比較考察

5.1 f_0 の影響

f_0 に対する張力の応答は理論では T_1 は近似的に比例, T_2 は1次遅れ, T_3 , T_4 は2次遅れとなり、また定常応答では各 T_i の増加分 ΔT_i は Δf_0 に等しい。第4図aに示すごとく実験結果も定性的には理論と一致し、定量的にも大体一致した結果を示している。実験結果から得た時定数は第2表に示されているがかなりのばらつきがあり、とくに N_2 においてその傾向が強かった。理論計算より求めた時定数と実験値より求めた時定数の間には多少の差は認められるが大体において合致するものといえる。

5.2 $\delta_{1,2}$ および $\delta_{2,4}$ の影響

理論によれば $\delta_{1,2}$ の変化に対し T_1 は不変, T_2 は1次遅れ, T_3 , T_4 は2次遅れとなり, T_2 , T_3 , T_4 の定常変化量は $\gamma \delta_{1,2}$ に等しい。また $\delta_{2,4}$ の変化に対しては T_1 , T_2 は不変, T_3 , T_4 は1次遅れとなり, T_3 , T_4 の定常変化量は $\gamma \delta_{2,4}$ に等しい。一方実験結果によれば第4図a, bのごとく定性的にはよく一致し、1次遅れあるいは2次遅れの曲線を得ることができたが定量的にみると多少理論と一致せず時定数は N_2 の $V=20$ cm/sec の場合および C の $V=10$ cm/sec の場合はやや小さみに出ており (第2表)、即応性が若干早くなっている。定常的にみると、本実験の場合、 $\delta_{1,2}$, $\delta_{2,4}$ の変化量がともに 1% (ただし $\delta_{1,2}$ は $-0.5 \rightarrow 0.5\%$, $\delta_{2,4}$ は $0.5\% \rightarrow 1.5\%$ に変化) であるので理論からすれば T_2 , T_3 , T_4 の定常変化量はいずれも 0.01γ となり、すべて等し

くなるはずであるが第4図b, cからわかるごとく若干ながら定常変化量に差がでてきている. 第4図bからすれば T_2 の定常変化量より T_3 , T_4 の定常変化量の方がいくぶん小さめになっている. このことを第5図b, cより検討してみると $[T_2 \text{ と } T_1 \text{ との定常差}]$ と $\delta_{1.2}$ との比および $[T_4 \text{ と } T_2 \text{ との定常差}]$ と $\delta_{2.4}$ との比は理論ではいずれも γ に等しいが実験結果の第5図b, cから逆算した見かけの γ (第3表)はそれぞれ異なり, 第5図bから求めた γ より第5図cから求めた γ の方が小さい. この原因は糸の粘弾性的な性質によるもので, とくにクリープの影響が介在するものと考えられる. 糸は $P_1 P_2$ 間 (長さ l_2) で T_2 の力を受けつつクリープし, l_2 全体として $\delta_{1.2}$ だけの伸びを生じ, またさらに $P_2 P_3$ 間 (長さ l_3) で T_3 の力を受けつつクリープし, ついで $P_3 P_4$ 間 (長さ l_4) で T_4 の力のもとにクリープし, $P_2 P_4$ 間 (長さ l_3+l_4) 全体として $\delta_{2.4}$ だけの伸びを生じている. ところでクリープを受ける時間が長いと見かけの γ は低下するものと考えられる. ここに l_2 は111 cm, l_3+l_4 は904 cmであり, ローラ間隔にかなりの差があり, それが第3表のような γ の差となって表われてくるものと思われる.

前田らは送り出しローラから出て巻き取られるまでの時間をクリープ時間とみなし, 静的クリープ曲線と走行糸の張力とを関連させてクリープ時間を短縮することによりいちじるしく張力の増加をきたすと述べているが, 本実験による見かけの γ は $P_1 P_2$ 間から逆算した γ が大きく出ているのも原因はそこにあるものと思われる. 前田らの実験による糸速は本実験の場合にくらべいちじるしく小さく, またクリープの影響に関する解釈にも相違はあるが走行糸の張力に対するクリープの影響は無視できないところであろう.

走行糸のドラフト特性と糸の静的引っぱり特性を比較検討するために, 別に引っぱり速度約1%/secにて静

的な引っぱり試験を行なった. 第6図aは本実験のときの雰囲気 (32°C, 50% RH) における結果を, 第6図bは標準状態 (20°C, 65% RH) で行なった場合の結果を示す.

(第6図a) 32°C, 50% RHの場合 (第6図b) 20°C, 65% RHの場合
各糸について傾斜のゆるい方の曲線はクリープ後 (3 min) のもの
(第6図) 荷重—伸長曲線

第6図bには各試料ごとに2本の曲線が示されているが傾斜の大きい方の曲線は1%/secの引っぱり速度で測定した荷重—伸長曲線で, 傾斜のゆるい方は各荷重において3 min クリープさせたあとのひずみをプロットして得た曲線である. これらの曲線の勾配から求めた γ の値が第3表に示されているが, それによると標準状態で引っぱり試験から求めた γ にくらべ, クリープ曲線から得た γ はかなり小さくなっており, 32°C, 50% RHの場合もクリープ曲線から γ を求めたとすれば同じような傾向で表中の γ より小さくなることは想像できる. すなわち, さきの定常特性より求めた見かけの γ に近づくとと思われる. したがって静的な引っぱり試験より求まる γ に第6図bのクリープ曲線からプロットして得た荷重—伸長曲線を考慮して見かけの γ の値を推定すれば多少

(第3表) 弾性係数 (γ) の比較

		N_1	N_2	C	備 考
引っぱり試験より	32°C 50% RH	3.10	2.40	2.80	第6図aの伸び0~2%間の平均
	20°C 65% RH	4.35~3.55	3.45~2.35	3.25~2.60	第6図bの伸び0~2%間の平均
実験結果より	$\delta_{1.2} : (T_2 - T_1)$	3.70	2.25	3.00	第5図bの $\delta_{1.2} 0 \sim 1\%$ 間の平均
	$\delta_{2.4} : (T_4 - T_2)$	3.55	1.85	2.35	第5図cの $\delta_{2.4} 0 \sim 1\%$ 間の平均

(単位 kg/本)

20°C, 65% RHにおける後記の値は3 min クリープさせたときの見かけの値を示す

ラフではあるが上記の弾性の理論で充分張力の挙動を説明することはできる。

糸を粘弾性学的見地から考え、理論にクリープの影響をとり入れることは当然正確さは増すが同時に理論が複雑なものとなるので上述のごとく γ の値をクリープを勘案して適当に調整して考慮するに止める方が目的によっては得策かと思われる。

5.3 f_3 の影響

理論によれば f_3 の変化に対し T_1 , T_2 は不変, T_3 , T_4 は1次微分で変化し, 定常変化量は T_3 は f_3 の変化量に等しく, T_4 は0となる。実験結果と比較するとやはり定性的には比較的良好一致した曲線で応答するが定量的には再現性がやや不良であった。これはブレーキによりローラと糸の間に摩擦抵抗を生じせしめるわけであるが, この摩擦抵抗の不安定性によるものと思われる。

5.4 走行速度の影響

走行主速度 V をステップ状に変化させると R_3 をはじめ, 各所の摩擦, 慣性の影響により張力が変化することが予想される。また粘弾性的にみて走行時間の短縮はクリープ量の減少をきたし, そのためドラフトによる張力増加量が大きくなることも考えられる。第4図eは V を10 cm/sec から20 cm/sec に変えたときの過渡応答曲線を示す。速度を早くすると各張力は若干増加する傾向が認められ, その定常状態での増加量は0~15%程度であった。

以上因子 f_0 , δ_{1-2} , δ_{2-4} , f_3 の各ゾーンの張力に対する影響を記したがこれらは主に $V=20$ cm/sec の場合であり, $V=10$ cm/sec において実験した f_0 , δ_{1-2} , δ_{2-4} , f_3 の影響は過渡応答, 定常応答ともに $V=20$ cm/sec のときと傾向は変わらなかったため図は省略した。

5.5 糸の種類による影響

同種のナイロンでありながら N_1 と N_2 を比較すると, 張力の大きさにかなりの差がみうけられる。これは P_1 に導かれるまでの糸の履歴がいちじるしく影響していると考えるのが妥当であろう。 N_2 は無張力で72 hr 放置したもので第6図からも見かけの γ は N_1 にくらべ小さく, またクリープ量も大きいことがわかる。(このことについてはE. Catsiff⁸⁾らの論文に詳しい試験結果が示されている。)したがって N_1 とくらべて N_2 の定常変化量は小さい。このように糸の送り出し以前の糸の受けた履歴により張力の応答が相当大幅に異なることは張力管理の点からも, はなはだ重要なことである。なお綿糸の場合はコーンの状態においてはナイロンのボビンの

状態と異なって非常に低い張力状態にあると思われるので, ナイロンのようにあえて無張力状態に放置したものと比較はしなかった。

6. む す び

走行中の糸に摩擦およびドラフトのステップ状変化を与えた場合に, 張力の変化する状態を過渡状態と定常状態から観察し, その理論的根拠を得た。

(1) 走行中の糸に張力を変動させるような因子が加わった場合の糸の張力挙動は糸を完全弾性体として取り扱うことにより, 比較的容易に計算でき, しかも近似性のよい理論的結果を得ることができる。

(2) ドラフトによる走行糸の張力の変動は静的な荷重一伸長曲線の結果をクリープ曲線の結果によって補正した見かけの弾性係数を用いて, より正確に推定できる。定性的にはドラフトを変動させた個所では1次遅れで張力は変動し, つぎのドラフトゾーンでは2次遅れの形で変動する。

(3) 送り出し側が自由の状態で行走してきた糸に摩擦を付加する場合, 張力は近似的に比例の形で変化するが, ドラフトゾーン中で摩擦を付加する場合はその個所では1次微分の形で張力が変動する。

(4) 糸の履歴効果の差はクリープおよび荷重一伸長曲線に大きな影響をあたえ, したがって張力の発生状態にも大きな差をもたらすと考えられる。

(5) 摩擦およびドラフトのステップ変化に対する各ゾーンの張力変化が全部安定すると認められるのには, 糸が全コースを完走するにかかる時間の約3倍の時間を要する。

付録・ビームから送り出す場合の張力挙動

本文では糸が1本でしかも送り出し部の慣性は無視しう程度の場合をとりあげたが, サイジング工程や製織工程においてはビームからの送り出しが行なわれる。そこでビームから送り出す場合の送り出し部分の張力挙動について若干考察する。糸は複数本が平行して引き出されるものとする。

a. 理 論

付・第1図に示されるようなモデルについて考える。すなわち n 本の糸が駆動ローラに引っぱられてビームから送り出される。ビームにはブレーキトルク τ_0 が働き, 糸に張力 T_1 (1本当り)を与える。ビームの送り出し点から駆動ローラまでの間隔を l_1 , ビームの糸層半径を

(付・第1図) ビームからの送り出し部

r_0 、ビームと糸層その他回転部分を合わせたものの慣性
能率を I_0 とする。また 駆動ローラの表面速度を v_1 、ビ
ームの回転角速度を ω_0 とすると、連続の方程式として

$$l_1 \frac{d\rho_1}{dt} = v_0 \rho_0 - v_1 \rho_1 \quad \dots\dots\dots (1')$$

ただしビーム上で糸はすべらないものとして $v_0 = r_0 \omega_0$
とする。また ρ_0 、 ρ_1 はそれぞれビーム上および l_1 間
における糸の線密度とする。つぎにビームの回転には摩擦
は働かないものとする運動方程式は

$$I_0 \frac{d\omega_0}{dt} = nr_0 T_1 - \Delta\tau_0 \quad \dots\dots\dots (2')$$

となる。(1') 式より本文と同じ方法で

$$l_1 \frac{d\Delta\rho_1}{dt} = -v_1 \Delta\rho_1 + \rho_0 \Delta v_0 - \rho_1 \Delta v_1$$

となる。ただし ρ_0 は一定値とする。本文(5) 式を用
いて、上式から次式がえられる。

$$(s+1/t_1)L[\Delta T_1] = -\frac{\gamma}{t_1 v_0} L[\Delta v_0] + \frac{1}{t_1 v_1} \gamma L[\Delta v_1] \quad \dots\dots\dots (3')$$

ただし $t_1 = l_1/v_1$ 。また(2') 式より

$$\frac{I_0}{r_0} s L[\Delta v_0] = nr_0 L[\Delta T_1] - L[\Delta\tau_0] \quad \dots\dots\dots (4')$$

となり、(4') 式を(3') 式に代入すると

$$L[\Delta T_1] = \frac{1}{1+st'_1+s^2t_1t'_1} \left\{ \frac{1}{nr_0} L[\Delta\tau_0] + st'_1 \frac{\gamma}{v_1} L[\Delta v_1] \right\} \quad \dots\dots\dots (5')$$

が得られる。ただし $t'_1 = (I_0 v_0)/(n \gamma r_0^2)$ とおく。

(i) T_1 に対する $\Delta\tau_0$ の影響

τ_0 をステップ状に $\Delta\tau_0$ だけ変化させた場合の T_1 の過

(付・第2図) $\Delta\tau_0$ による ΔT_1 の応答モデル

渡応答 ΔT_1 は(5') 式の逆ラプラス変換を行なって次
式で示される。

$$\Delta T_1 = \frac{\Delta\tau_0}{nr_0} \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \cos(\sqrt{1-\xi^2} \omega_n t - \tan^{-1} \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}) \right\} \quad \dots\dots\dots (6')$$

$$\text{ただし } \xi = \frac{1}{2} \sqrt{t'_1/t_1}, \quad \omega_n = 1/\sqrt{t_1 t'_1}$$

この変化量 ΔT_1 は ξ が小さいときには付・第2図の
ように、 $\Delta\tau_0/nr_0$ の大きさの上下に減衰振動し、 $t \rightarrow \infty$
で $\Delta T_1 = \Delta\tau_0/nr_0$ になるものである。この振動は ξ が小
さいほどはげしい。

(ii) T_1 に対する Δv_1 の影響

ローラの 駆動速度 v_1 をステップ状に Δv_1 だけ変化さ
せたときの T_1 の変化量 ΔT_1 は(5') 式より次式で示さ
れる。

$$\Delta T_1 = \gamma \frac{\Delta v_1}{v_1} \cdot \frac{2\xi e^{-\xi\omega_n t}}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin \sqrt{1-\xi^2} \omega_n t \quad \dots\dots (7')$$

すなわち減衰正弦振動を示し、 $t \rightarrow \infty$ では $\Delta T_1 = 0$ で
ある。(付・第3図)

(付・第3図) Δv_1 による ΔT_1 の応答モデル

b. 実験 結果

下記の要項によってナイロン糸について、実験を行な
うてみた。

n : 100 本	v_1 : 20cm/sec
l_1 : 1.54 m	r_0 : 70 mm
I_0 : 0.1 kgm ²	

したがって $\gamma = 2.5$ kg/本とすると

t_1 : 7.7 sec	t'_1 : 1.66×10^{-3} sec
ξ : 0.0073	ω_n : 8.9/sec

となる。なおブレーキ トルクは電磁パウダ ブレーキに
よって発生させ、また張力は100 本中の任意の1 本につ
いて、本文と同じ方式で記録した。

(i) まずブレーキ トルク τ_0 を 10 kgcm より 26 kgcm
にステップ状に変化させた場合の実測記録結果を付・第
4 図に示す。この結果では糸張力 T_1 がトルクの変化に

(付・第4図) τ_0 の変化に対する T_1 の応答の実例
ただし A は τ_0 を変化させたときの時刻を示す

ほとんど瞬時的に追従しており、比例に近い状態である。図にみられる細かい振動は機械振動その他の定常的なものである。この実験においては ξ が非常に小さいので理論によれば、はげしい振動がみられるはずであるが実際にはそれがほとんどみられないのは主につぎの原因によるものと思われる。すなわちブレーキ トルクを変化させるに当りパウダ ブレーキの電源の電圧を変化させて行なったが、その電圧を変化させるダイヤルをまわすのに若干の時間 (1 sec 程度) を要し、理想的なステップ状入力になっていない、

いま入力変化 $\Delta\tau_0$ がステップ状でなく $\Delta\tau_0 (1-e^{-kt})$ の形であらわれたとすると、(5') 式より

$$L[\Delta T_1] = \frac{\Delta\tau_0}{n r_0} \cdot \frac{1}{1+s t_1' + s^2 t_1 t_1'} \cdot L[1-e^{-kt}]$$

$$= \frac{\Delta\tau_0}{n r_0} \cdot \frac{1}{1+s t_1' + s^2 t_1 t_1'} \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s+k} \right)$$

となり、この逆ラプラス変換をとると出力 ΔT_1 の過渡応答が得られる。すなわち

$$\Delta T_1 = \frac{\Delta\tau_0}{n r_0} \left[1 - \frac{e^{-kt}}{k'} - e^{-\zeta \omega_n t} \left\{ \left(1 - \frac{1}{k'} \right) \cos(\sqrt{1-\xi^2} \omega_n t) + \frac{\xi \omega_n (1-1/k') + k/k'}{\sqrt{1-\xi^2} \omega_n} \sin \sqrt{1-\xi^2} \omega_n t \right\} \right]$$

..... (8')

ただし $k' = k^2 t_1 t_1' - k t_1' + 1$

$$= (k^2 - 2\xi \omega_n k + \omega_n^2) / \omega_n^2$$

この実験の場合 ($k=2$ とする) t_1' が非常に小さいので $k' \approx 1$ となり、したがって (8') 式は

$$\Delta T_1 = \frac{\Delta\tau_0}{n r_0} \left[1 - e^{-kt} - e^{-\zeta \omega_n t} \cdot \frac{k}{\sqrt{1-\xi^2} \omega_n} \sin \sqrt{1-\xi^2} \omega_n t \right]$$

..... (9')

となる。数値を入れると

$$\Delta T_1 = \frac{\Delta\tau_0}{n r_0} \left(1 - e^{-2t} - 0.22 e^{-0.065t} \sin 8.9t \right)$$

..... (10')

となる。(ただし t の単位は sec) 図示すれば付・第5図のようになる。すなわち振動は若干残るが (6') 式に数値を入れたもの、すなわち

$$\Delta T_1 = \frac{\Delta\tau_0}{n r_0} \left(1 - e^{-0.065t} \cos 8.9t \right)$$

..... (11')

(付・第5図) τ_0 が指数関数的に変化した場合の T_1 の応答計算例

にくらべると振動分が小さくなり

$$\frac{\Delta\tau_0}{n r_0} (1 - e^{-2t})$$

すなわち、入力変化に比例する部分が大きくなる。なおビーム上では糸はすべらないものとしたが、前田らが指摘しているがごとく、実際にはビーム上でも糸は張力 T_1 の影響を受けており、そのため T_1 の変動により、ビーム上で若干の伸びおよびすべりがみられ、これが一種の振動緩衝にもなることも考えられる。したがって実際の T_1 の挙動は複雑な諸因の影響を受けるものと考えられる。

(ii) つぎにローラ速度 v_1 をステップ状に変化させたときの実験結果は出力 T_1 にほとんど目立った変化はみられなかった。これは (7') 式に示される ΔT_1 は ξ に大体比例するがこの実験では ξ が非常に小さいので ΔT_1 も非常に小さく、結果として目立った変化があらわれなかったのも当然の帰結であろう。

最後に本研究にあたり、有益な御助言を与えてくださった名古屋市工業研究所自動制御グループの方々に感謝します。

なお当研究は繊維産業 連合講演会 (1965 年 10 月) において発表したものである。

文 献

- 1) 前田, 山口; 本誌, 12, 183 (1959)
- 2) 前田, 山口; 本誌, 12, 493 (1959)
- 3) 前田, 山口; 本誌, 13, 177 (1960)
- 4) 前田, 山口; 本誌, 14, 124 (1961)
- 5) 酒井, 久世; 本誌, 14, 243 (1961)
- 6) 酒井, 久世; 本誌, 14, 250 (1961)
- 7) 酒井, 久世; 本誌, 15, 670 (1962)
- 8) E. Catsiff, T. Alfrey, Jr. and M. T. O'Shaughnessy; Text. Res. J., 23, 808 (1953)