(1997年1月10日受付・1997年9月19日受理)

ガラ紡の力学的な解析と実験

信州大学繊維学部 黄 更生・中沢 賢・河村 隆

Mechanical Analysis of Garabo and Related Experiments

Gengsheng Huang, Masaru Nakazawa and Takashi Kawamura

Faculty of Textile Science and Technology Shinshu University, Ueda, 386 Japan

Abstract : In Gara-bo spinning, relations among spinning conditions and structural parameters of yarn are very complicated and have not been formulated. when the spinning is in a steady state, some formulae were derived about a relation among the yarn thickness D , the twist rate λ , the established yarn tension T and the fiber density ρ_p . Namely,

$$\lambda = \frac{C_{t\lambda}}{\sqrt{T}} \rho_p^{\frac{1}{2b}}; \quad D = C_{td} \sqrt{T} \rho_p^{-\frac{1}{2b}}; \quad D\lambda = C_{d\lambda};$$

where, $C_{t\lambda}$, C_{td} and $C_{d\lambda}$ are coefficients without relation to T and ρ_p .

Moreover, based upon the essential principle of Gara-bo, a device was developed for the precise measurement by using electronic technology. Through some experiments done with the device, it is ascertained that $C_{t\lambda}$, C_{td} and $C_{d\lambda}$ can be almost considered as a constant and the theoretical formulae can be used with sufficient suitability. Therefore, when the yarn thickness deviated from the hoped value in spinning process, the compensation quantity of the established tension, which modifies the deviation, can be decided by the formulae.

(Received 10 January, 1997 ; Accepted 19 September, 1997)

1. 緒 言

ガラ紡機は1877年に日本人臥雲辰致により発明された紡績機械であり、それは明治初めに日本に輸入された西洋式の紡績機と原理を全く異にするきわめて独創的な紡績機である。この紡績機は和紡機とも称され、1890年代まで西洋式の紡績機と競合して用いられた〔1〕。しかし、高品質の糸が大量に求められる時代になると、洋式紡績機に比べ品質・生産性において劣ること、原料の筒への充填に熟練が必要なことなどの欠点のため、通常の紡績糸の生産には次第に使われなくなっていった。それでも、この機械は通常の紡績機では使えない屑繊維や落綿などを原料とすることができること、多品種少量生産が可能であることなど、西洋式紡績機にはない利点を持つ

ているため、現在でも愛知県を中心にわずかであるが稼動し、特殊な糸の生産に使われている。ガラ紡機を機械工学の面からみると、それは現在でも発明当初の機構と機械式の制御法をほとんど改良せず用いている。筆者らは、この機械を制御工学的に解析し現代の制御技術と電子機器によりメカトロニクス化と改良を行えば、上述の欠点をカバーできるとともに、従来のガラ紡機よりさらに特殊な形態の糸の製造が可能になると考えている。また、使用原料の面では金属繊維、植物の綿毛や廃棄されたカーボン繊維など紡績性の悪い材料の紡績あるいは混紡が可能になると考えている。

ガラ紡に関する学術的な研究は古くより時折り行われて来た。1940年代の研究〔2,3〕は、綿筒への原料の詰め方、綿筒や巻き取りローラの回転速度の設定など技能的技術

的な研究が主である。ガラ紡機を機構の面から洋式紡績機と比較した研究は比較的新しい。玉川〔4〕はガラ紡が撚り掛けとドラフトを同時に行う点でミュール紡績機に、繊維束から直接糸を形成する点ではオープンエンド紡績機に似ていることを指摘している。ガラ紡では糸の太さは撚り率により敏感に変わるので、撚りと太さの関係の研究が重要である。Liddy, 西脇ら〔5,6〕は、両者が逆比例に近い関係になることを実験により示している。ガラ紡の機構上の特徴の一つは原料を保持する筒が間欠的な回転と上下運動をすることである。松本ら〔7,8〕は原料筒の上下運動が糸の撚り率と太さに与える影響を測定し、さらにガラ紡糸の太さと撚り率の関係を検討し、ガラ紡機が撚り率を糸の番手の平方根で除した値が一定になるように撚り率と糸の太さが変化する自己平衡性を持つことを実験により明らかにしている。松本らの研究ではガラ紡をカバード・ヤーンの製造に応用することを目指している。筆者ら〔9〕は力学的制御工学的な観点から紡糸の設定張力(紡糸時の糸の張力の制御目標値)、筒内の原料繊維の密度、糸の巻取り速度などのパラメータが糸の太さおよび撚り率に及ぼす影響を調べ、それらの結果よりガラ紡にはワットの調速機に匹敵するフィードバックコントロールの機構(自力制御機構)が内在することを明らかにしている。ガラ紡糸の撚り率と太さは紡糸張力と筒内原料の繊維密度により定まるというのが、筆者らの基本的な考えである。筒内繊維密度は紡糸にきわめて重要な影響を及ぼすにもかかわらず、これまで理論、実験ともに全く検討されていない、また糸の張力が撚り率と太さに与える影響については一部測定も行われているが、そこに見られる定性的な傾向を説明できる理論はまだ提案されていない。この理論ができないと太さの修正を行うためのパラメータの変更量を定めることができない。

本論文は紡糸の張力、筒内の繊維密度、形成される糸の太さおよび撚り率の間の関係をできるだけ厳密に測定し、それら諸量の間に見られる傾向を力学的な関係式で説明することを試みるものである。筆者らはこれまでのガラ紡に関する一連の研究の中で、ガラ紡は糸の張力を一定にするように、撚りを操作する紡績法であることを明かし、その原理をメカトロニクス化したメカトロニクス化ガラ紡機(TDS)を考案し、それが制御パラメータの選定により実際にガラ紡と同様の紡績が可能であることを示した〔10〕。メカトロニクス化ガラ紡機は原理は従来のガラ紡機と同じであるが、従来のガラ紡機より制御システムの応答性がよくなり、糸の張力の制御精度も改善されているので、今回の実験ではその装置を用いて測定を行った。

2. ガラ紡制御の基本動作

図1はガラ紡の機構の模式図である。筒から引き出された繊維により形成された糸は、上部の巻き取りローラに巻き取られる。原料筒はモータにより回転され筒から引き出された繊維に撚りを与える。糸にかかる張力が筒を持ち上げるに必要な力より大きくなると、筒は上方に引き上げられる。これによりクラッチ C_1 、 C_2 が外れるので回転駆動力がなくなり、筒は回転を停止する。このときでも糸は、巻き取りローラにより常に等速で巻き上げられているので、リフト間に貯まった撚りが次第に少なくなり糸にかかる等価筒荷重(筒の見かけの重さ)により、糸形成域において繊維間に滑脱が発生し、糸は細くなる。そしてこの滑脱のため、筒は落下してクラッチが噛み合い、筒は回転され撚りが再び増加する。撚りが増加すると繊維間の滑脱がなくなり筒から糸形成域への引抜き繊維数が増加するので、糸は太くなる。やがて、筒は上方に引上げられ、前と同様の動作を繰り返す。

Fig. 1 Sketch of Garabo

3. 理論式の誘導

図2に筒内原料繊維域, 糸形成域, 糸域の関係を模式的に示す。ガラ紡では糸を紡ぐ時, 原料側と糸側の間の遷移域では繊維の先端が糸に撚り込まれ後端が原料筒から引抜きに対する抵抗力を受けている。この領域では繊維が相互に滑る滑脱状態にあるものとする。本論文ではこの領域を糸形成域と呼ぶ。この領域の繊維の挙動は, 筒内の繊維の密度や繊維長分布などが影響してかなり複雑になる。ここでは筒中の繊維密度は場所によらず常に一定とする。また本報では紡糸糸の長さに沿って糸の太さが変化しない定常状態のみを扱うものとし, 糸形成域を図3のようにモデル化する。

Fig. 2 Schematic diagram of yarn forming section

Fig. 3 Dynamic model of yarn forming section

筒から引出された繊維の総本数を N とする。そのうち, 筒の中に下端(図3では左端)が入っているが糸形成域で糸に対し滑脱しない繊維の本数を N_y , その筒中での平均長さを L_{yp} , 筒の中に下端(図3では左端)が入っているが糸形成域で糸に対して滑脱の可能性がある繊維の本数を N_p , その筒中での平均長さを L_p , 糸形成域での平均長さを L_y とする。繊維の長さを L とすると

$$L = L_y + L_p$$

である。ここでは単純化のため, L はすべての単繊維で同じであるとする。また, 糸の巻取り速度は一定であるとする。 N に占める N_p , N_y の割合を β_p , β_y とすると,

$$\beta_p = N_p/N, \beta_y = N_y/N \quad (1)$$

このとき,

$$N = N_p + N_y \quad (2)$$

であるから,

$$\beta_p + \beta_y = 1$$

である。定常状態では定数と仮定する。

3.1 筒側繊維の拘束力

まず, 筒から糸形成域に筒側の拘束力に抗して N 本の繊維を引出すに必要な力を考える。Cox[11], Hannah[12], 我妻[13]の提案する理論を用いると, L_{yp} の長さが筒内にある N_y 本の繊維を引き出すに要する力 f_p はいずれも次式により表される。

$$f_p = g \left\{ N_y \frac{2d\mu L_{yp}}{1 - \epsilon_p} P_p \right\}$$

ここで, P_p は原料筒中の繊維に働く横方向圧力, d は繊維の直径, μ は繊維間の摩擦係数である。 ϵ_p は繊維束の空隙率であり, n を繊維束断面積の単位面積あたりの繊維本数とすると, $\epsilon_p = 1 - \pi d^2 n / 4$ である。 g は定数係数で, Coxらの理論を用いると $g=1$, 繊維長が一定としてHannahの理論を用いると, $g=1/3$ 我妻の理論では $g=1/2$ となる。Coxの理論は横方向からの圧力を受けている平行繊維の束から単繊維を引抜く際の摩擦抵抗力を求めたものであり, Hannahと我妻の理論は繊維束を2点で把持して引くときの滑脱の摩擦抵抗力を扱ったものであり, 引く繊維とこれを拘束する繊維の本数が同程度である。木下ら[14]は繊維束から数本の繊維を引抜く時の摩擦力を測定し, それが引抜き繊維本数にほぼ比例することを示している。以上いずれの理論および実験も引抜きの抵抗力は引き抜く繊維本数に比例することを示している。本研究の場合には繊維束の繊維本数に比べ引き抜く繊維本数が少ないので, 便宜上 $g=1$ を採用することにする。したがって

$$f_p = N_y \frac{2d\mu L_{yp}}{1 - \epsilon_p} P_p \quad (3)$$

同様に L_p の長さが筒内にある N_p 本の繊維を引き出すに必要な力 f_{py} は次のようになる

$$f_{py} = N_p \frac{2d\mu L_p}{1 - \epsilon_p} P_p \quad (4)$$

筒から N 本の繊維を引き出すに必要な力すなわち糸の張力は $F = f_p + f_{py}$ であるから, 式(1)~(4)より

$$F = N \frac{2d\mu L_s}{1 - \epsilon_p} P_p \quad (5)$$

ただし, L_s は筒側の拘束を受ける繊維の拘束の等価長さであり,

$$L_s = \beta_p L_p + \beta_y L_{yp}$$

3.2 糸側の撚りによる拘束力

糸形成域で滑りうる N_p 本の繊維が, 糸側の撚りから受ける拘束力 f_{py} は, Hannahの理論により,

$$f_{yp} = N_p \frac{2d\mu L_y}{3(1-\varepsilon_y)} P_y \quad (6)$$

となる。 ε_y は糸の空隙率、 P_y は糸が繊維に与える拘束の平均圧力である。糸、あるいは撚りのかかった繊維束においては撚りに起因して横方向圧力が生じるがSmith[15]の考え方を採用すると、その平均圧力は P_y

$$P_y = 2\pi F \lambda^2 \quad (7)$$

となる。ここで λ は糸の撚り率である。定常状態では紡糸張力は制御の目標値 T (設定張力)に一致していると考えてよいので、

$$F = T \quad (8)$$

とすると、式(6)～(8)より

$$f_{yp} = N_p \frac{4\pi d\mu L_y}{3(1-\varepsilon_y)} T \lambda^2 \quad (9)$$

3.3 糸形成域での力の釣り合い

糸形成域で滑りうる N_p 本の繊維が滑らず引出される条件は $f_{yp} \geq f_{py}$ である。撚りが増加して繊維が引出されるようになるのは、式(4)、(9)より

$$\frac{2\pi L_y}{3(1-\varepsilon_y)} T \lambda^2 = \frac{L_p}{1-\varepsilon_p} \quad (10)$$

となるときである。上式中の ε_p 、 ε_y はそれぞれ P_p および T 、 λ により生じる P_y によって変化する。 P_p 、 P_y は繊維集合体の密度の関数とみることできる。一般に繊維集合体の充填率(1-繊維集合体の空隙率)と繊維集合体の密度との間には比例の関係があり、筒内の原料と形成される糸の密度 ρ_p 、 ρ_y は次式で与えられる。

$$1 - \varepsilon_p = \frac{\rho_p}{\rho_f} \quad (11)$$

$$1 - \varepsilon_y = \frac{\rho_y}{\rho_f} \quad (12)$$

ここで ρ_f は単繊維の密度である。

Sebastyenら[16]は圧力 P と密度 ρ の関係として、次の実験式を提案している。

$$\rho = aP^b \quad (13)$$

ここで a 、 b は繊維の物性値、形状および繊維長分布などで定まる定数である。彼らの研究は羊毛に対して行われたものであるが、ほかの繊維にもほぼ適用できると考えられる。式(11)～(13)を用いて式(10)より λ を ρ_p 、 T の関数として求めると、

$$\lambda = \frac{C_{t\lambda}}{\sqrt{T}} \rho_p^{\frac{1}{2b}} \quad (14)$$

ただし、

$$C_{t\lambda} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}} a^{-\frac{1}{2b}} \left(\frac{3L_p}{L_y} \right)^{\frac{1}{2(1-b)}}$$

糸の直径を D とすると、 N との関係は

$$\frac{D^2 \pi}{4} = \frac{d^2 \pi}{4(1-\varepsilon_y)} N \quad (15)$$

であるから、式(5)、(7)、(11)～(14)を上式に用いると、

$$D = C_{td} \sqrt{T} \rho_p^{-\frac{1}{2b}} \quad (16)$$

ただし、

$$C_{td} = \frac{d C_{t\lambda}^{-b}}{\sqrt{(2\pi)^b 2d\mu L_s a^{\frac{b-1}{b}}}}$$

式(14)、(16)より、 D と λ の関係は次のようになる。

$$D\lambda = C_{d\lambda} \quad (17)$$

ただし、

$$C_{d\lambda} = C_{td} C_{t\lambda}$$

式(17)は T と ρ_p を陽に含まない。

4. 実験装置および方法

4.1 綿繊維集合体の圧縮特性の測定

筒内原料について式(13)の定数 a 、 b を定めるために次の実験を行った。図4のように原料の綿繊維を長さ68mm、幅68mm、高さ67mmの内壁を研磨した立方体の容器に入れ、図4のような精密万能試験機(Computer control system Shimadzu Autograph AG-20 KND)により圧板に圧縮力を加え、その変形量を調べた。測定は次の三種類の綿繊維集合体の状態に対して行った。

- (A) 引きそろえた平行綿繊維をそのまま測定容器に入れた状態。

Fig. 4 Sketch of compression test apparatus

Fig. 6 Relation between pressure and density

Table 1 Measured values of b

Kind of fibrous mass	A	B	C
Measured value of b	0.26	0.28	0.34

5.2 TDSの紡糸結果と考察

5.2.1 糸の制御張力の影響

図7～9に平均撚り率と太さに対する平均糸張力の影響を示す。縦、横軸ともに対数目盛で表示している。○印は測定値を、それに接続する座標方向の直線はその測定値の上下限を示す。実験値に対し、最小二乗誤差法により求めた近似直線を実線で示す。また、式(14)、(16)、(17)による理論勾配直線を破線で示す。

5.2.1.1 平均撚り率に対する影響

図7は平均撚り率に対する平均糸張力の影響を示す。糸の平均張力の増加に従って糸の平均撚り率は両対数目盛の平面でほぼ直線的に下がっており、その勾配の大きさを求めると $K=0.57$ となり、理論式(14)の T のべき数0.5にかなり近い値になる。このことは C_{td} はほぼ T の関数でないと見てよいことを意味している。実験の近似直線の勾配は理論のそれより小さくなるが、その原因は張力が

Fig. 7 Relation between tension and twist rate

大きくなると糸形成域に引き出される繊維本数が多くなるので、繊維引き出し点近傍の綿筒表面の繊維密度が小さくなるためと考えられる。

5.2.1.2 糸の平均太さに対する影響

図8に糸の平均張力と糸の平均太さの関係を示す。糸の平均張力の増加に従って糸の平均太さは大きくなる。実験値の近似直線の勾配の大きさは $K=0.55$ となり、前節の λ の場合と同様、理論式(16)の T のべき数0.5にかなり近い値となり C_{td} も大略 T の関数でないと見てよいことがわかる。図7,8において理論と実験の勾配の大きさがともに0.5に近いことは理論における $\lambda \propto 1/\sqrt{T}$ 、 $D \propto \sqrt{T}$ が妥当であることを意味し、それは撚りによる拘束力の扱いに関してSmithの理論を採用することが妥当であることを意味している。

Fig. 8 Relation between tension and yarn diameter

5.2.1.3 糸の平均太さと平均撚り率の関係

糸の平均太さと糸の平均撚り率の関係を求めると、図9のようになる。実験値は糸の太さが太くなると撚り率が直線的に下ることを示している。その近似直線の勾配

Fig. 9 Relation between yarn diameter and twist rate

はとなり、式(17)において C_{dx} を T に無関係な定数とみなしたときの勾配 -0.1 にほとんど一致する。

5.2.2 筒内原料密度の影響

図10~12に平均撚り率と太さに対する筒内原料密度の影響を示す。縦、横軸ともに対数目盛で表示している。○印は測定値を、それに接続する縦座標方向の直線はその測定値の上下限を示す。図7~9と同様、実線は実験値の最小二乗誤差の近似直線を、破線は理論勾配直線を示す。A, B, Cは4.1節の(A), (B), (C)に対する測定値を用いた式(14), (16), (17)による理論勾配直線を示す。

5.2.2.1 平均撚り率への影響

図10に各筒内原料密度に対する平均撚り率の変化を示す。筒内原料密度に対する平均撚り率の実験値の変化はほぼ直線状になる。 C_{tx} を仮りに ρ_p に無関係な定数として実験の近似直線の勾配より逆算して係数 b の値を求めると、 $b=0.37$ となる。これに対し4.1節の(A), (B), (C)の状態それぞれに対する b の測定値は表1の通りで実験値に近い。これより C_{tx} はほぼ ρ_p と無関係な定数と見なしてよいことがわかる。(C)の測定値が実験値に最も近くなっている。

Fig.10 Relation between density and twist rate

5.2.2.2 平均太さへの影響

図11に筒内原料密度と糸の平均太さの関係を示す。原料密度の増加に従って糸の平均太さは下がるという傾向を示している。前節と同様、 C_{tx} を ρ_p に無関係な定数と仮定して、実験の近似直線より b を逆算して求めると、 $b=0.35$ となり、表1の値にかなり近く、 C_{tx} は ρ_p に無関係な定数とみなせることがわかる。直感では円筒状に繊維集合体を巻いた状態(B)が実際の筒内の繊維の配列状態に一番近いので、そのときの b を用いた理論線が(A), (C)による理論線より実験値に近いと予想したが、現実ランダム状(C)に対して得た b を用いたCの理論勾配直線が実験値に一番近くなっている。しかし、その理由ははっきりし

Fig.11 Relation between density and yarn diameter

ない。

5.2.2.3 平均太さと撚り率の関係

図12は平均太さと平均撚り率の関係を示す。実験値の近似直線の勾配は -0.96 であり、理論式(17)と比べると C_{dx} はほぼ ρ_p に無関係な定数とみなしたときの理論勾配 -1.0 にほぼ一致する。図12を図10, 11と比べると、理論値と実験値のずれがかなり小さいことがわかる。これは式(17)に b の影響がでやすい ρ_p が入っていないことによると考えられる。

Fig.12 Relation between yarn diameter and twist rate

5.2.3 係数 C_{tx} , C_{td} , C_{dx} の定数性

5.2.1節, 5.2.2節において扱った実験値より得られた K , b の平均値を求めると、 $K=0.56$, $b=0.36$ となる。この値を用いて今回の実験における C_{tx} , C_{td} を求めると表2になる。表より平均張力、筒内原料密度のいずれの値を変化させた場合にも得られる係数値はお互にかなり近いことがわかる。すなわち、係数 C_{tx} , C_{td} , C_{dx} はおよその近似としては T , ρ に無関係な定数と考えてもよいことがわかる。これより、定常状態のとき、解析モデルにおけ

Table 2 Measured values of $C_{t\lambda}$, C_{td} , $C_{d\lambda}$

Test condition	$C_{t\lambda}$	C_{td}	$C_{d\lambda}$
T = Variable ρ = Constant	41.26	0.052	2.10
T = Variable ρ = Constant	42.96	0.054	2.33

る L_s , L_p は定数と仮定してもよいことになる。また、糸の太さと糸の撚り率の積は糸の張力と原料繊維密度に無関係であることが明らかになった。

6. 結 言

本論文では、まずガラ紡においては糸と原料筒間に繊維の滑脱が可能な遷移領域が存在すると仮定してモデル化を行い、定常状態の場合につき、糸の太さおよび糸の撚り率を糸の制御張力と筒内原料密度より定める理論式を導いた。それによると、糸の太さは糸の制御張力の平方根および筒内原料密度の $(-1/2b)$ 乗の積に比例し、撚り率はそれに逆比例する。次にメカトロニクス化ガラ紡機を用いて、筒内原料密度と糸の制御張力の影響を調べる実験を行い、糸の平均張力、筒内原料密度、糸の平均太さおよび平均撚り率の間の関係を調べた。それより、定常状態においては撚り率、太さ、太さと撚り率の積を与える式の係数 $C_{t\lambda}$, C_{td} , $C_{d\lambda}$ は近似的に糸張力と筒内の原料密度によらない定数と考えてよいことがわかり、理論の妥当性が立証された。これらの関係式を用いればガラ紡の紡糸中に糸の太さが希望する値からずれたときに、

これを修正する設定張力の補正量を知ることが可能になる。

文 献

1. 北野 進, 「臥雲辰致とガラ紡機」, アグネ技術センター(1994).
2. 矢橋彦四郎, 繊維技術, **34**, 963-1055(1943).
3. 矢橋彦四郎, 繊維技術, **35**, 98-102(1944).
4. 玉川寛治, 技術と文明, **3**, 1-20(1986).
5. D. T. Liddy and E. F. Denby, *J. Text. Inst.*, **51**, T1109-T1119(1960).
6. 西脇慈圓ほか, 織学誌, **33**, 138-140(1950).
7. 松本陽一ら, 織機誌, **46**, T215-T225(1993).
8. 松本陽一ら, 織機誌, **47**, T83-T88(1994).
9. 中沢 賢ら, 織機誌, **47**, T181-189(1994).
10. M. Nakazawa et al., Proceedings of The 2nd International Silk Conference, China, P.366.-373(1993).
11. D. R. Cox, *J. Text. Inst.*, **43**, T87-T90(1952).
12. M. Hannah, *J. Text. Inst.*, **41**, 57(1950).
13. 我妻直夫, 「基礎繊維工学[I]」, 日本繊維機械学会, P.293-P.297(1965).
14. 木下ら, 織学誌, **16**, 935-939(1960).
15. P. A. Smith, *J. Text. Inst.*, **53**, T511-T528(1962).
16. E. Sebestyen, T. Shickie, *J. Text. Inst.*, **62**, 545-560(1971).
17. 渡辺 茂, 機械の研究, **1**, 441-446(1951).