

回転する巻糸体周りの流れと動力損失

(第1報) 実験とその考察

金沢大学工学部 新 宅 救 徳 (会員)
 " 尾 田 十 八
 " 山 崎 裕 之 (会員)

Air flow around the rotating pirn and power loss

Part 1 : Experiment and consideration

Sukenori Shintaku, Juhachi Oda, Hiroyuki Yamazaki

Faculty of Engineering, Kanazawa University, Kanazawa

Abstract

The flow around the high speed rotating pirn and energy loss are measured experimentally. A technique to decrease the energy loss is considered.

The results obtained are as follows :

- 1) It is shown quantitatively that the air around the rotating pirn is sucked from the upper and lower parts and is blown from the middle part.
- 2) When the cover, of which the cross sectional shape is triangle, is set around the rotating pirn, the energy loss is improved about 20 percent.

(Received April 18, 1989)

摘 要

目的 高速回転する巻糸体周りの流れ場と流れに伴う動力損失を測定して、動力損失の削減を計る。

成果 本実験によって得られた結果を以下に示す。

- 1) 巻糸体周りの空気は、巻糸体周りを回転しながらその上下部から中央部へと集まり半径方向に吹き出している。本実験ではこれを定量的に示すことができた。
- 2) 巻糸体周りの流れの測定結果より、巻糸体周りに断面が三角形でこの底辺が巻糸体円柱部に沿ったカバーを設置すれば良いことが予測され、この実験により動力は20%も改善された。

(平成元年4月18日受理)

1. 緒 言

常時高速回転している巻糸体周りの流れ状態を知り、流れ場を改善することは、これら回転機械の消費動力の減少へとつながる重要な意味を持ち、もし巻糸体周りの流れを人工的に制御することができ、浮遊繊維の周囲への飛散をおさえることができるならば、現場での作業環境の改善にも役立つ。本研究で取扱う巻糸体は円柱の両端に円錐がついた複雑な形をしており、これが高速回転することによって生

じる流れは三次元的で複雑である。その様相は巻糸体の上下部から吸い込まれた空気は回転しながら中央部へ集まり、ここから半径方向へと吹き出している。

回転による流れに関する現在までの研究報告をみると、中村ら¹⁾²⁾の低速域での回転円柱周りの流れや小林ら³⁾の回転円筒面上の二次元乱流境界層といった対象物が円柱であるごく限られたものしかない。

そこで本研究では、巻糸体周りの流れの可視化実験による定性化及び巻糸体周りの流速の定量化測定を試みた。具体的には、流れ域各点の空気抗力をひずみ計を利用して測定し、これを流速に換算することにより高速回転域での流れ状態を定量化した。又、巻糸体の動力を直接測定して流れ状態との関連性を考察した。そして、回転する巻糸体の摩擦抵抗については巻糸体を容器で囲うと動力が30%下がる例等を著者の1人⁹⁾が報告しているので、本報ではこれを応用して、巻糸体周りに流れをスムーズにするようなカバーを在上の実験結果から予測・設計して、このカバーを設置することにより流れ状態の改善を図りその効果を検討した。

2. 巻糸体周りの流れ

2.1 実験方法

巻糸体は通常の3kg巻であり、外形の詳細は、ボビン径50mm、最大直径116mm、高さ420mm、円柱部200mmで、又テーバ部は巻糸体中心軸に対して20degの傾きを持つ。

巻糸体周りの流れの可視化実験をするために、本実験では種々の可視化法⁹⁾を試みたが、ここでは追従性が良く、取り扱いも容易なタフト法を用いた。本実験で用いた単繊維とスポンジからなる複合タフトを図1に示す。この複合タフトは単繊維部が追従性の役割を、スポンジ部が見やすさの役割を受けている。このタフトを図2の実験装置の巻糸体周

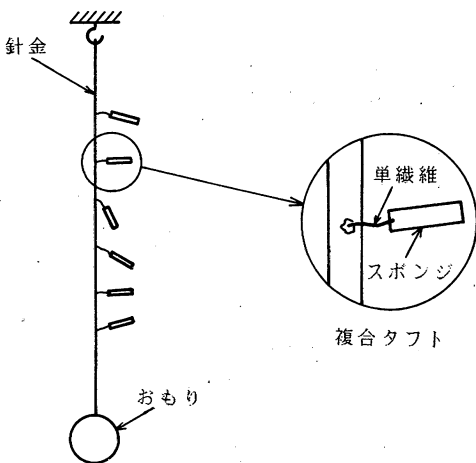


図1 複合タフト

りに軸方向9点×半径方向16点の計144点上に25mm間隔で取り付けて流れ場の写真撮影を行う。

以下、本報告では巻糸体上端部中心を原点にとり、巻糸体の半径方向は座標 r は半径が大きくなる方向を正に、円周方向へ座標 θ は巻糸体の回転方向を正に、また軸方向座標 z は下方向を正にとった円筒座標系を用いる。

巻糸体周りの流れを定量的に測定するための実験装置を図2に示す。インバータ①によりモータ②の回転を制御し、プーリ③及びベルト④を介して巻糸体⑤を回転させる。流速測定には一方向性のUゲージの先に直径10mmの球を取り付けたセンサ⑥を用いる。円筒座標の円周方向に速度変化はないと仮定して、測定面は図2のように任意の θ における $r-z$ 平面をとる。測定点は巻糸体上部のテーバ部で5点、円柱部で40点、計45点を設ける。空気抗力の測定値は多少のばらつきがあるので、測定値が安定することを確認しながら行った。なお、予備実験により巻糸体上下部の流れの対称性がほぼ確認されているため、測定は巻糸体の上部を優先した。このような方法で流れ域各点において、球が流体から受ける抗力 F_b から流速 V を次式より算出する。

$$F_b = C_d \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_b / 2 \quad (1)$$

ここで、 C_d 及び A_b は球の空気抗力係数(0.39)及び投影面積で、 ρ は空気密度であり、以上は本実験範囲内で一定とする。 V は測定値のばらつきが大きい、(1)式のように F_b と V^2 とは比例の関係があるので、 V のばらつきは F_b のばらつきの平方根になる。よって、この方法による流速決定は直接測定するよりも容易である。

用意した試料は、巻糸体表面上の違いをみるために表面がなめらかな旭化成(株)製のナイロン巻糸体(7.8 tex/13F)と表面があらひ綿巻糸体(前者のナイロン巻糸体の表面に大和紡績(株)製の19.7 texの糸を一重巻いたもの)の2種類である。

2.2 実験結果

4000 rpmで回転させたナイロン巻糸体周りの流れの可視化の撮影結果を図3(a), (b)に示す。図3の(a)により巻糸体周りの半径方向と軸方向の流れが、又(b)により巻糸体の円周方向と軸方向の流れが可視化されている。これより、図3の(a), (b)を合成することにより巻糸体周りの流れ状態を定性化することができる。

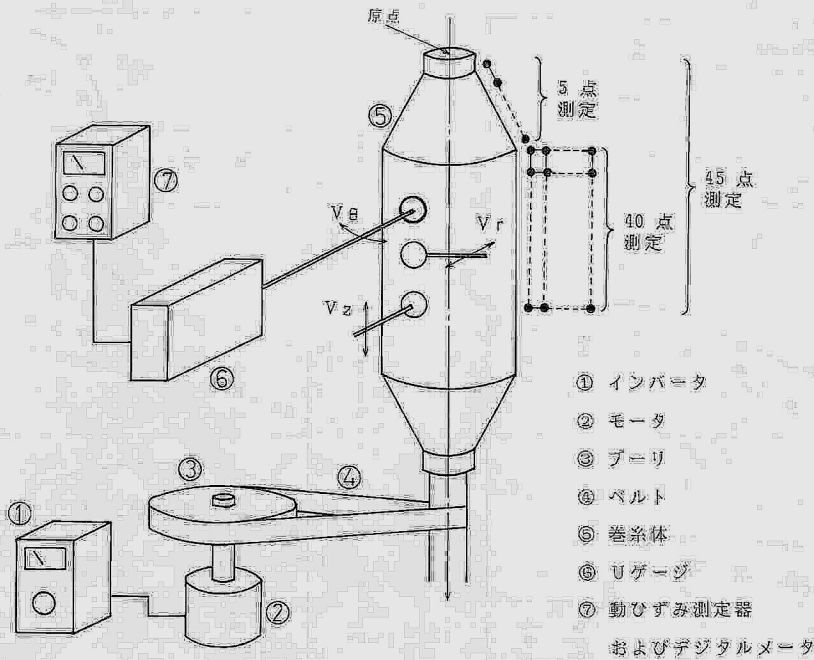
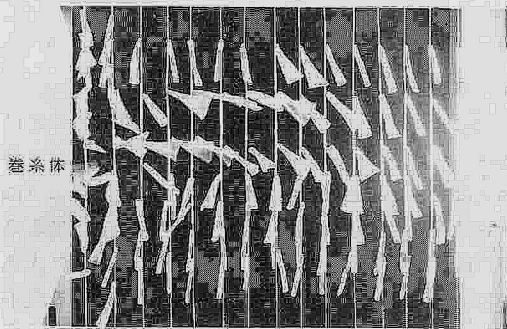
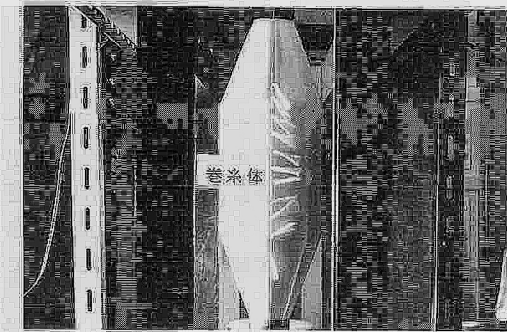


図2 流速測定の実験装置概略図



(a) r - z 平面の流れ



(b) $\theta - z$ 平面の流れ (半径方向距離 $r = 78$ (mm))

図3 卷糸体周りの流れの可視化

次に、回転数が7000 rpmのナイロン巻糸体の円柱部についての流速測定値を巻糸体軸方向距離 z によって整理した結果を図4に示す。パラメータは測定した半径方向距離 r である。ここでは縦軸の各速度成分の符号は表1の意味を持つ。又図5は、半径方向距離68 mm(巻糸体表面より10 mm)での速度成分の回転数による違い及び表面あざによる違いを比較した測定結果を示す。

以上の V_r 及び V_z の結果を利用して、速度を $r-z$ 平面上でベクトル表示したものを図6に示す。

2.3 考察

複合タフトを用いた可視化実験の結果である図3より、巻糸体周りの空気は巻糸体の上下部で吸い込まれ、中央部で巻糸体に垂直な方向に吹き出していることが定性的に確認できる。ただし、流速が小さいところでは、可視化実験はタフトの重力の影響により正確な方向を示していない。

次に流れの速度定量化実験の結果である図4及び図5より、半径方向速度成分 V_r 及び軸方向速度成分 V_z の流れの逆転位置は、半径方向距離、や回転数及び試料によらずほとんど同じ位置であることがわかる。又図4の各速度成分について詳しくみる

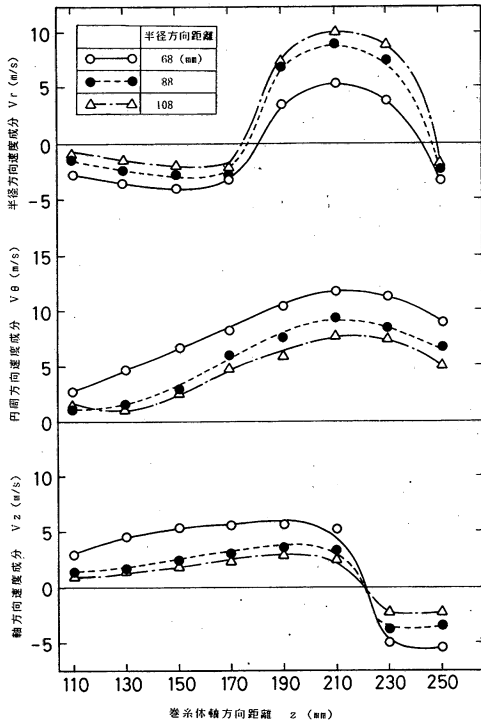


図4 巻糸体周りの流速測定値 (ナイロン巻糸体, 7000 rpm)

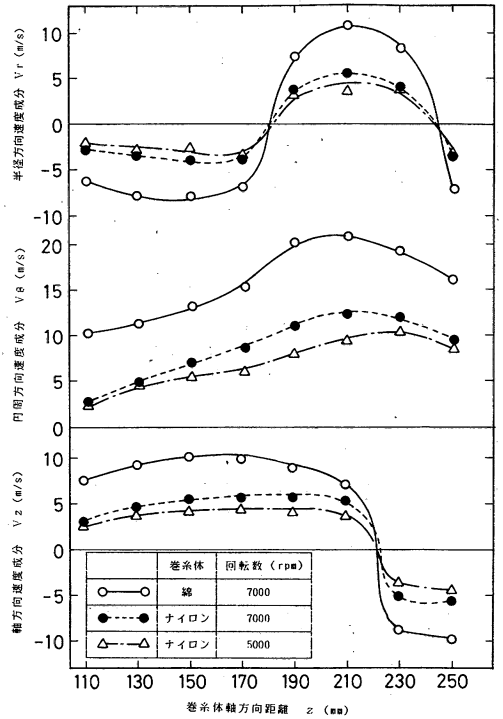


図5 巻糸体周りの流速測定値 (半径方向距離 $r = 68$ (mm))

表1 各速度成分と符号の意味

	正	負
V_r	吹き出し	吸い込み
V_θ	巻糸体の回転と同方向の流れ	巻糸体の回転と逆方向の流れ
V_z	上から下の流れ	下から上の流れ

と、まず V_r については、測定部が巻糸体より遠くなるに従って吹き出しの幅及び V_r はわずがずつ増加していることがわかる。これは、巻糸体から遠ざかるにつれて流れの主流は、円周方向から半径方向へと移り、この方向の吹き出しの幅も大きくなることを示している。それゆえ、 V_θ は r の増加とともに減少する。ここでは示していないが、空気抗力センサの球の直径を小さくした場合に、まれに値は小さいが V_θ の逆流が確認された。この現象は r が大きいところで多くみられ、このような乱流せん断流れは巻糸体の回転に多大の動力損失を与えていると考えられる。又、 V_z については、巻糸体中央付近でそれらの向きが逆転する。即ち流れの衝突が確認された。このような流れの衝突現象は動力損失の要因と

なっているものと考えられる。

次に図5より、回転数に対する各速度成分の差は小さいが、巻糸体表面状態の違いによる各速度成分の差は大きいことが確認できる。表面がこのようなあらかると速度ヘッド及び流量が大きくなるので、後述するこれらの乗算である動力はさらに大きな差となって現れる。 V_r 及び V_z は、 V_θ により発生する二次的な速度成分であるが、巻糸体の中央付近では V_r は V_θ の半分を越え、無視することはできないほどに大きくなる。

以上述べてきた結果は図6の流速のベクトル表示をみればさらに明確になる。つまり巻糸体周りの流れの状態は、その上下のテーパ部から吸い込まれた空気が巻糸体中央の円柱部から半径方向へと吹き出しており、この幅は円柱部長さの約1/2であり、巻糸体全長の1/3である。このことは、先の図3の巻糸体周りの流れの可視化実験結果とほぼ同じ結果である。

又、流れの方向は回転数及び表面状態によらず同じであり、流速の大きさのみが変化していることがわかる。さらに図6(a)と(c)より、 $r-z$ 平面の流れ

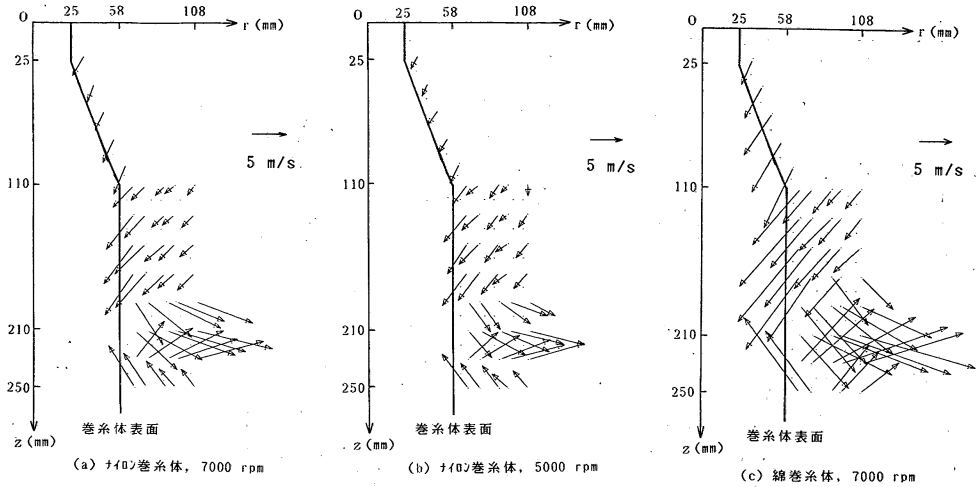


図6 r-z平面の速度ベクトル表示

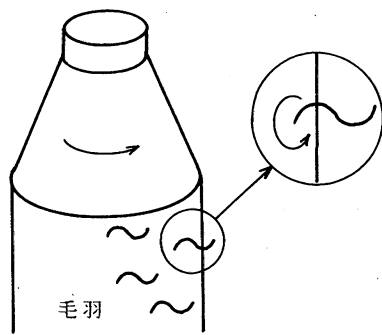


図7 毛羽周りの渦流れ

の速度ベクトルの大きさは巻糸体の表面状態に大きく影響されていることがわかる。これは表面に毛羽がある場合、図7のように毛羽周りに θ - z 平面での渦流れが形成され、これが速度境界層の厚さ及び大気との圧力差を増大させているためであろう。

以上の実験によって得られた流れ状態により、巻糸体の動力損失を改善するためには、 z 方向の流れの衝突をなくし、巻糸体中央付近の吹き出しの速度および流量を小さくすれば良いことが推察できる。そこで、このような流れ場を改善する一方法として、巻糸体のテーパ部を延長した図8に示すようなカバーを巻糸体周りに設置してみた。図9はカバー付き巻糸体周りの流速の測定実験により得られた速度ベクトル図である。これよりカバー設置によっ

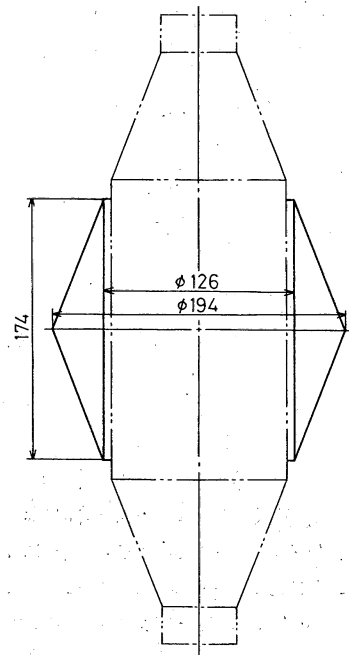


図8 カバー

て、ナイロン、綿の巻糸体を問わず全体の速度は低下し、動力損失の主原因となる吹き出しはほとんどおさえられていることがわかる。そしてこのことが後述する消費動力を全体的に低減させることになったものと考えられる。

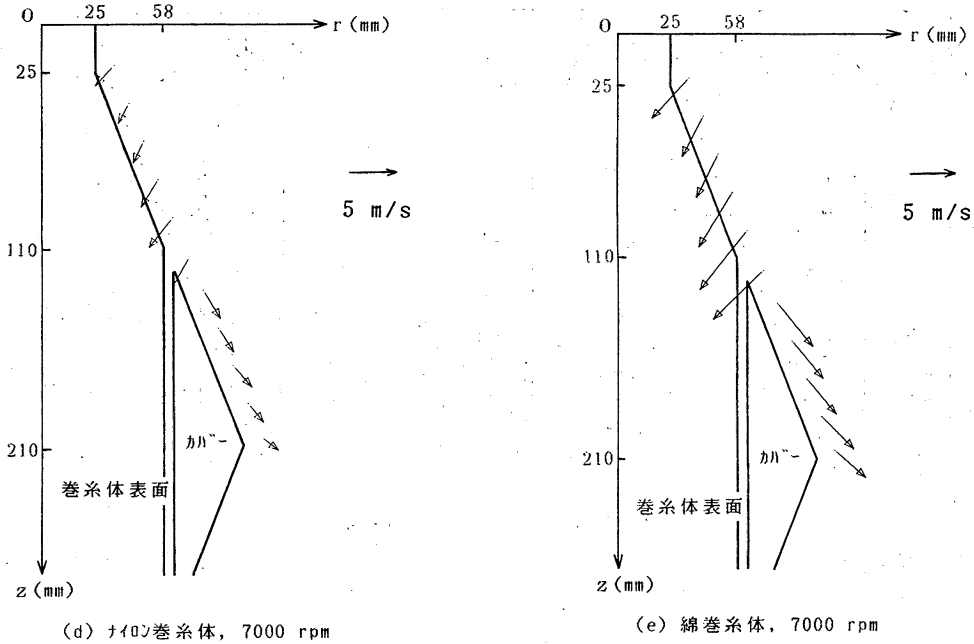


図9 カバー付巻糸体周りの流れのr-z平面の速度ベクトル表示

3. 巻糸体の動力損失

3.1 動力損失の実測

巻糸体の回転に要する動力モータの反力から求める実験装置⁹⁾を図10に示す。その装置の概要は2節に同じであるが、モータに作用する反力を測定するためにモータの両端をベアリング^③で支持する。これよりモータ^②自体は自軸周りを自由に回転できる状態となる。そして、モータの外枠に巻き付けた糸の張力をUゲージ^⑦で測定することによってモータ外周での反力が測定される。ただし、この測定には、モータの反力が安定化するために十分な時間をおく必要がある。このようにして巻糸体^⑥を取り付けたときと外したときの反力の差をとり、これによるトルクをT、回転角速度を ω とすると、動力Lはこれらの積($T\omega$)で与えられる。なお、動力測定実験では、回転数は2000～7000 rpmの200 rpm間隔とし、試料は2節と同じものを用いた。

図11は、このようにして求められた各試料に対する動力Lの値を、横軸に次式のレイノルズ数 R_r をとって示したものである。

- ① インバータ
- ② モータ
- ③ ベアリング
- ④ プーリ
- ⑤ ベルト
- ⑥ 巻糸体
- ⑦ Uゲージ
- ⑧ 動はずみ測定器
およびデジタルメータ

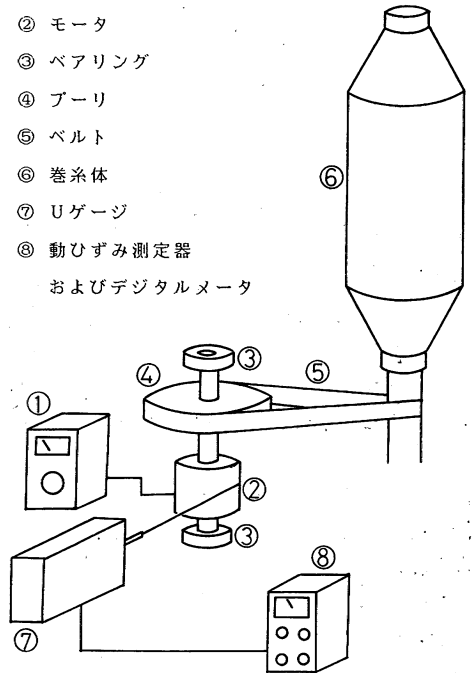


図10 動力測定実験装置概略図

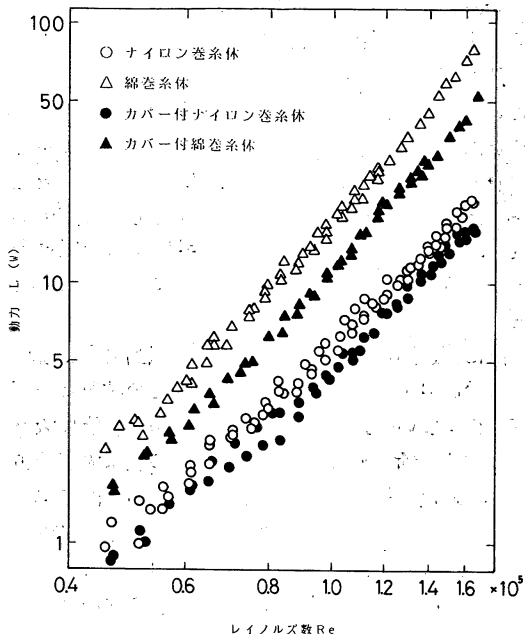


図11 巻糸体回転に要する動力Lとレイノルズ数Reの関係

$$R_e = V_s \cdot r_s / \nu \quad (2)$$

ただし、 r_s は巻糸体の最大半径で、 V_s は r_s の巻糸体表面の周速度であり、 ν は空気動粘度である。

3.2 速度分布による動力の推定

巻糸体周りの流れ状態が流体機械のポンプに似ていることから、本報ではすでに確立されているポンプの動力理論を利用してその空気動力を求める。又、カバーを取り付けた場合は、巻糸体とカバー間のせん断流を扱うに当たり、巻糸体の表面を平板とみなした速度境界層理論より、せん断力を求めて前者の空気動力に加算することを考えた。

まず巻糸体回転に要する動力 L_e を巻糸体周りの速度分布から算出する。図12のような微小幅 dz の帯を半径方向に通過する流量 dQ は次式で与えられる。

$$dQ = 2\pi \cdot r \cdot dz \cdot V_r \quad (3)$$

又、この帯を通過する流体の速度ヘッド H は、

$$2 \cdot g \cdot H = V^2 = V_r^2 + V_\theta^2 + V_z^2 \quad (4)$$

ここで g は動力加速である。

よって、空気動力 L_a は次式で与えられる。

$$L_a = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \\ = \pi \cdot \rho \cdot \int_0^{0.42} r \cdot V_r \cdot (V_r^2 + V_\theta^2 + V_z^2) \cdot dz \quad (5)$$

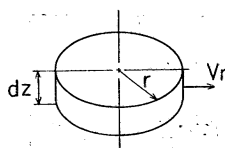


図12 流量の説明図

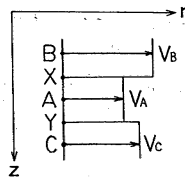


図13 仮定1の説明図

(5)式において、積分範囲は巻糸体のZ方向の全長の0~0.42mである。ここで流量及び速度ヘッドに対して次のような仮定をおく。

仮定1. 図13のような流れ域中の r —一定の面内の点Aとz方向に隣接する点B、Cにおいて、それぞれの中点をX、Yとし、XY間の速度 V は点Aの速度 V_a に等しい。

仮定2. 吹き出した空気の流速は無限遠点で0となり、吸い込まれる空気速度エネルギーは常に0である。

以上の仮定により L_a は、

$$L_a = \pi \cdot \rho \cdot \sum r_i \cdot (V_{ri}^2 + V_{\theta i}^2 + V_{zi}^2) \cdot \Delta z_i \quad (6)$$

この i は測定点を、 Δz_i は i 点でのz方向の測定点間距離を示す。なお計算の対象となる面は、巻糸体の表面に最も近い測定点(本実験では巻糸体表面から10mm離れた面)とする。

次にカバーを取り付けた場合の巻糸体とカバー間のせん断流を考える。ここでは巻糸体の表面を平板とみなした境界層理論よりせん断応力 τ を求める。1/8乗法則から出発して次式⁷⁾が与えられる。

$$\tau = 0.0296 \cdot \rho \cdot V_s^2 \cdot \left(\frac{V_s \cdot l}{\nu} \right)^{-1/5} \quad (7)$$

ここで l には巻糸体円周長を代入する。

せん断応力 τ に巻糸体のカバー部分の表面積 A_p を乗ずることによって巻糸体全体のせん断力 F_p を求め、これに周速 V_s を乗ずると巻糸体とカバー間の消費動力 L_c が求められる。

$$F_p = \tau \cdot A_p \quad (8)$$

$$L_c = F_p \cdot V_s \quad (9)$$

L_c を(5)式の空気動力 L_a に加算するとカバー付きの巻糸体回転動力 L_e が算出される。ただし、上式の L_c は平板の表面がなめらかな状態の場合のみにあてはまり、表面があらい状態の場合は境界層の剝離などを考慮しなければならないが、今回はこれを含んでいない。

3.3 考察

動力損失の実験結果図11と、この縦軸の動力 L を

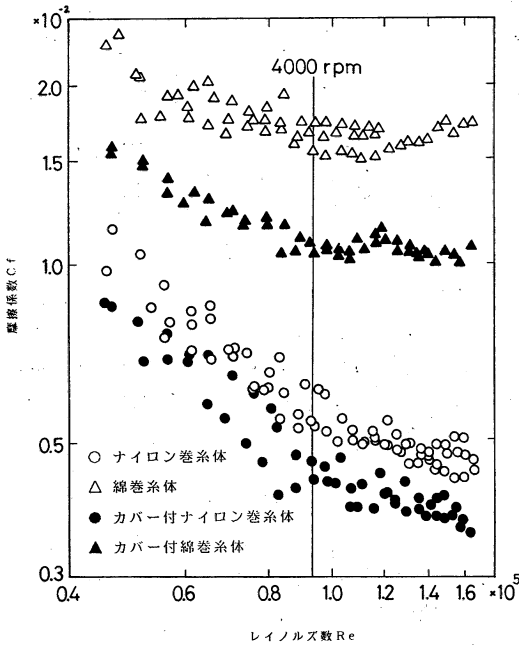


図14 摩擦係数Cfとレイノルズ数Reの関係

次の(10)式で無次元化した摩擦係数 $C_f^{(5)}$ で整理しなおした結果、図14に注目しよう。

$$L = C_f \cdot \rho \cdot V_s^2 \cdot A_p \cdot V_s / 2 \quad (10)$$

図14より、レイノルズ数 0.9×10^5 (回転数 4000 rpm) 付近で層流から乱流への移行が認められた。又、図11より、綿巻糸の動力はナイロンのそれに比して非常に大きく、これは流れ場解析でも述べたように、綿表面の毛羽周りにも渦流れが発生して巻糸体表面の境界層厚さが増加するためである。このことは、何らかの原因で巻き取りの工程中に巻糸体表面にはつれや毛羽が生じた場合に、動力は急激に増加することを意味している。

一方、カバーを設置することで、回転数にかかわらずナイロン巻糸体で約 20%、綿巻糸体で約 30% も消費動力が減少し、カバー効果が十分にあらわれたことが確認できる。このカバー設置による動力のほとんどは巻糸体とカバー内側間のせん断力で消費される。表2において L と L_e がよい一致をみせたナイロン巻糸体の場合、せん断力による消費動力 L_c は 10.91 W であり、ポンプ作用による空気動力 L_a は 1.33 W で、この動力値は全体の 11% 以上である。

次に流速測定結果からポンプの空気動力及び境界層理論を引用した値を表2に示す。この結果より両者はほぼよい一致をみせたといえるが、一般に流速から求めた動力値が低い。この両者の差は流速分布の測定誤差、特に計算対象面が巻糸体の表面でないこと及び機械的損失だと考えられる。又表2中のケース(e)で、流速による計算値と測定値とにかなり大きな差が出ているのは、この巻糸体の表面があらかじめ示した境界層理論の適用に無理があったものと解釈される。

4. 結 言

- 1) 回転する巻糸体周りの流れは、巻糸体の上下部から回転しながら中央部に集中して、ここから半径方向に吹き出していた。この現象をその速度分布から定量的に示すことができた。
- 2) 巻糸体周りの流速分布から回転に要する動力を推定することができた。
- 3) 本実験範囲内では、回転数や巻糸体表面状態による流れ状態の変化は少なく、ただ回転数が大きいくほど、また表面状態があらいくほど流速が大きくなった。この傾向は動力についても同様であった。
- 4) 設計・試作したカバーにより、巻糸体周りの

表2 流れ場から求めた動力と測定した動力の比較

(単位はW)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
測定動力値 L	21.05	8.43	80.01	16.34	53.18
流れ場動力値 L_e	12.95	6.05	60.65	12.24	18.33

※表内の(a)~(e)の意は次の様である。

- (a)一 試料：ナイロン巻糸体、回転数：7000rpm
- (b)一 試料：ナイロン巻糸体、回転数：5000rpm
- (c)一 試料：綿巻糸体、回転数：7000rpm
- (d)一 (a)のカバー付き
- (e)一 (c)のカバー付き

ただし(d)と(e)の場合に限り、巻糸体とカバー間のせん断力から算出される動力 L_c はいずれの場合も 10.91W とした。

吹き出しをおさえスムーズな流れが生じ、これより動力は20%も改善された。

なお、本研究は、平成元年度の日本繊維機械学会の年次大会で発表したものである。又、本研究の流れ場の理論的考察については、本学の上野久儀、松井良雄両先生にお世話になった。そして実験実施にあたって、伴場秀樹君、加藤宏明君の協力を受けた。さらに旭化成工業(株)より試料を提供して頂いた。いずれもここに記して感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 中村ら；日本機械学会論文集 B, 49, 446, 2230, (1983-10)
- 2) 中村ら；日本機械学会論文集 B, 51, 470, 3391, (1985-10)
- 3) 中村ら；日本機械学会論文集 B, 52, 478, 2374, (1986-6)
- 4) 小林ら；日本機械学会関西 233 回講演論文集：308, p. 24 (1975-6)
- 5) 新宅ら；繊維学誌, 39, 10, 96, T-432 (1983-10)
- 6) “技術資料 流体計測法”, p. 308, 日本機械学会 (1985)
- 7) “機械工学便覧”, p. 8-49, 日本機械学会 (1976)