

回転する巻糸体周りの流れと動力損失

(第2報) 有限要素法による流れ場解析とその考察

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

The Flow around the Rotating Pirn and Power Loss

Part 2: Flow Analysis by FEM and Considerations

Sukenori Shintaku, Juhachi Oda, Hiroyuki Yamazaki, Hideki Banba

Faculty of Engineering, Kanazawa University, Kanazawa

Abstract

The flow around a pirn rotating at high speed was analysed and considered by using parameters as numbers of revolutions and pirn surface conditions.

The results obtained from this analysis were as followed:

- 1) The flow around the rotating pirn with the boundary conditions of numbers of revolutions and pirn surface conditions can be analysed.
- 2) The velocity vector of flow in the proposed analysis has good agreement with experiment results for the previous described conditions.
- 3) From the flow analysis by FEM (finite element method), we can learn contour of Stokes' stream function, vortexes and circumferential reverse flow which can't be easily obtained from experiment.

(Received July 17, 1989)

摘 要

目的 巻糸体の回転数や表面状態をパラメーターとして、高速回転する巻糸体周りの流れ場を有限要素法により解析して、この結果を先に発表している実験結果と比較、検討しながら考察する。

成果 本研究によって得られた結果を以下に示す。

- 1) 巻糸体の回転数や表面状態の境界条件の扱いを含めて、巻糸体周りの流れ場を解析することができた。
- 2) 巻糸体周りの速度ベクトル解析値は、前報の各条件下の実験結果と比較してほぼ一致した。
- 3) 流れ場解析結果から、測定実験では容易に得ることのできない流れ関数や渦度の等値線及び円周方向の流れの逆流等を知ることができた。

(平成元年7月17日受理)

1. 緒 言

前報において著者らは、回転する巻糸体周りの流れ状態を可視化実験により定性的に観察した。又、定量的にはこれを実験的に求める手法を提案して実験を行った。さらに、この流れに伴う動力損失

をモーターの反力より測定し、これと流れ状態から求めた動力損失値との関係を考察した。そして実験結果をもとに、巻糸体からの流れの吹き出しを押さえ、かつ流れがスムーズになるようなカバーを推定し、実際に試作、設置して巻糸体周りの流れと動力損失の改善を図った。

ところで、現在までに報告されている回転体周りの流れに関する研究は、回転の対象体が円柱に限られたものがほとんどであり、又、本実験のような高速回転域の研究報告は数少ない。これは円柱以外の形状の回転体を扱う時は、その周りの流れは極端に複雑となり、この回転数域が高速になると流れの可視化及び速度や圧力分布などの測定が難しくなるからである。又、巻糸体のような表面が繊維で覆われた物体を扱う際に、数値計算におけるこの表面上の境界条件の取り扱いには特別な配慮が必要である。計算上においても、このような回転体の場合には、時間に対するその特性が周期的であり、よって計算において何回か収束する計算結果のいずれが正しいのかという点で、計算結果が真に安定したかどうかを判定しにくい欠点がある。

そこで本報では、最近では色々な分野で使用されるようになった有限要素法を用いて、上述した数値計算における境界条件の取り扱い方等を含めて、高速回転する巻糸体周りの流れ場を解析する。又、同時に、流れ場の速度ベクトル図や実験では容易に得ることができなかった流れ関数及び渦度の等値線等を同時に出力させ、巻糸体周りの流れを前報とは別の観点から考察する。そして、この結果と前報の測定結果を比較、検討することにより、巻糸体の表面状態の違いによる境界条件の扱い方や前報で設置したカバーの妥当性等を考察する。

2. 流れ場解析の有限要素法理論

巻糸体周りの空気流れを有限要素法によって解析する。対象が回転体であるので、座標系は図1に示すような巻糸体の自軸を中心軸にとった円筒座標系を用いる。仮定として、扱う流れの速度には円周方向(θ 方向)の変化はないものとする。これより主として解析及び結果は、半径方向(r 方向)と軸方向(z 方向)の座標で形成される面を中心に行う。又、本解析範囲内では、扱う流体は非圧縮性流体とする。

数値計算法は、時間に関する逐次計算法を用いる。逐次計算法による繰返し計算は、運動方程式と連続の式を基礎式として用いる。そして、これらの式をストークスの流れ関数(以下、流れ関数) ϕ^2 と渦度 q 及び円周方向速度成分 V_θ によって変形させた、渦度の式及び渦度方程式を時間的に準陰的なスキームに置き換えて用いる。そして、これらの ϕ と q 及び V_θ の空間方向への離散化には Galerkin

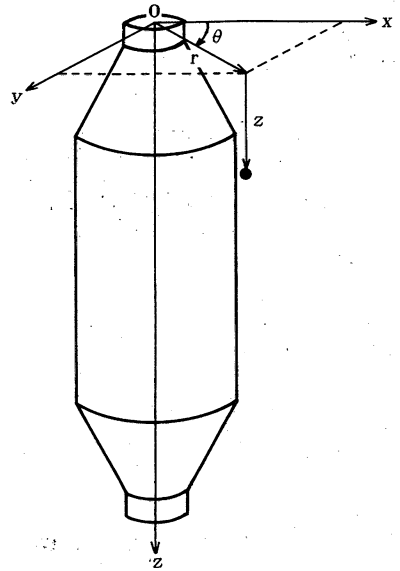


図1 座標系

法を用いた。 ϕ で表した V_r 、 V_z の式を以下に示す。

$$V_r = -\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (1), \quad V_z = \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \quad (2)$$

一連の流れをフローチャートにして図2に示す。図中の右肩の添え字はタイムステップを意味する。この流れに沿って各ブロックを簡単に説明すると、最初は渦なし流れ(ポテンシャル流れ)から出発(ブロック1)する。そして、わずかずつ時間を増分させたタイムステップ(ブロック10)ごとに、この流れ場に渦度の式(ブロック2)と渦度方程式(ブロック4)及び θ 方向の運動方程式(ブロック6)によって、 ϕ と q 及び V_θ を求める。境界上の q 及び V_θ は、隣接する節点の ϕ と q 及び V_θ をテイラー展開した式に代入して求める。これより境界条件は、 ϕ と q 及び V_θ をタイムステップごとにそれぞれの方程式に与える(ブロック3, 5)。ここで、計算中のある流速が与えた周速の最大値を越えた場合を発散したと判定する。発散しないで、 q 及び V_θ の時間に関する変化率が十分小さくなった時に準定常な流れとみなして計算を打ち切り(ブロック7, 8)、巻糸体周りの粘性流体の流れ特性として速度ベクトルや流れ関数及び渦度の等値線等を得ることができる(ブロック9)。

3. 計算モデルと境界条件

巻糸体周りの流れ場の解析に用いたメッシュデータを図3に、又、流れの速度場を動力損失の点から

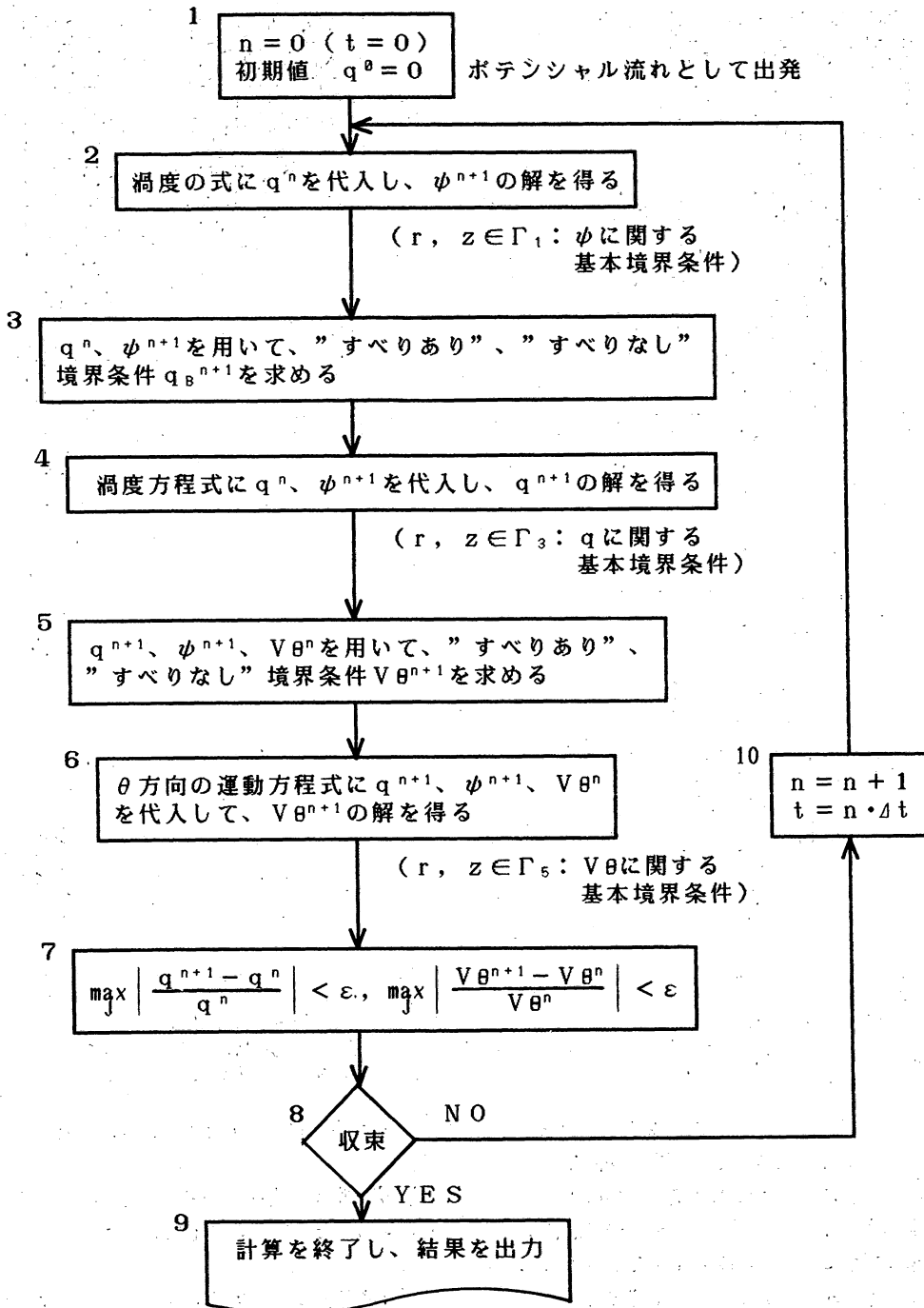


図2 回転体周りの流れ場解析のフローチャート

改善する目的で設置したカバー付き巻糸体周りの流れ場解析のメッシュデータを図4に示す。実験により巻糸体表面から200 mmを越えたところでは流れの速度変化はほとんどないことを確認しているた

め、図のように500 mm×180 mmの範囲をメッシュ分割した。メッシュは、節点数が208節点、要素数が348要素から成り、重要な巻糸体近辺については細かい分割を行った。なおカバー付きの流れ場に

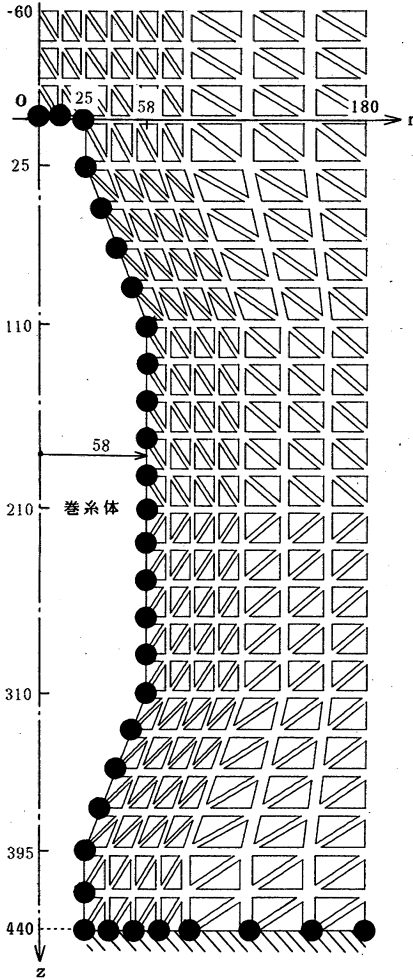


図3 巻糸体周りの流れ場解析のメッシュデータ (単位: mm)
(節点数208, 要素数348)
●: V_θ の境界値 \\\: すべりなし
巻糸体と平板のかど点: $q=0$

は、カバー部のメッシュを消去して199節点、316要素とした。又、同図には与えた境界条件も同時に示した。ここで、巻糸体表面の速度境界層の厚さやこの付近の流れ状態は、巻糸体表面の周速や表面状態及びその他の要因によって随時変化すると考えられるが、ここでは原則的に次の3条件を境界条件として与える。

境界条件1. 巻糸体の表面で流れの主方向となる θ 方向に周速度を与える(図3、4中の●印の点)、又、カバー付きの場合にはカバー表面では $V_\theta=0$ である(図4中のカバー部の●印の点)。

境界条件2. 綿巻糸体の場合、毛羽周りの渦によ

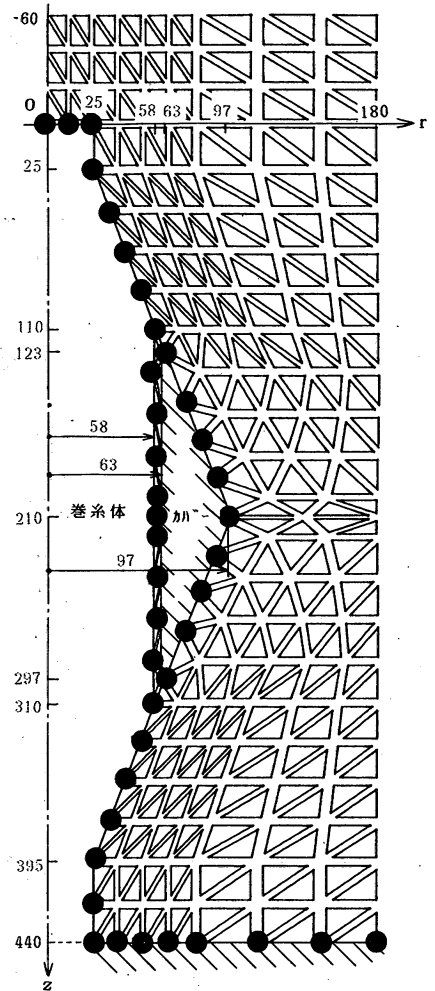


図4 カバー付き巻糸体のメッシュデータ (単位: mm)
(節点数199, 要素数316)
●: V_θ の境界値 \\\: すべりなし
巻糸体と平板のかど点: $q=0$

る損失や毛羽同士の相互干渉は考慮しないものとする。

境界条件3. 巻糸体を支える底面を $\phi=0$ の基準面とする。そしてこの底面ではすべりはないものとする。

以下各条件について説明する。条件1について、巻糸体の表面がなめらかな場合には巻糸体の表面の V_θ として巻糸体の半径 r に角速度 ω を乗じた周速度($r \cdot \omega$)を与える。しかしながら、綿巻糸体の様に綿糸の毛羽により表面が粗い場合は、これを取り扱う際に図5のように毛羽流れに対して直角に置かれた円柱と仮定する。これより、ある要素内の毛羽

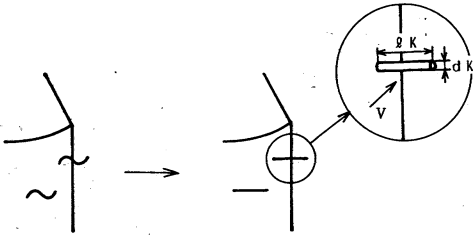


図5 毛羽のモデル化

に作用する空気抗力 F_k を次式より求める。

$$F_k = C_D \cdot \rho \cdot V^2 \cdot d_k \cdot l_k / 2 \quad (3)$$

ここで C_D は空気抗力係数であり、 d_k 及び l_k は巻糸体表面のある要素の毛羽の直径と全長である。毛羽直径は 0.01 mm として、この値は巻糸体の表面において一定とする。毛羽長さとの関係は、綿糸の毛羽長分布図である図 6 より求められる。この毛羽測定には東レ製光電式毛羽計測装置を用いた。なお同図において、毛羽長さ 0 における毛羽数とは糸表面上で測定される毛羽数を累積した値である。よって、その数は糸表面で最大となるので、この位置を糸表面と定義する。いま、巻糸体表面に巻いた 19.7 tex の綿糸の毛羽長分布の関係を片対数グラフ上で近似すると、

$$\log N_k = -0.5 \cdot dH_k + 2.7 \quad (4)$$

(N_k : 本/m, dH_k : mm)

を得る。この関係式の N_k を図 6 の縦軸から分かる

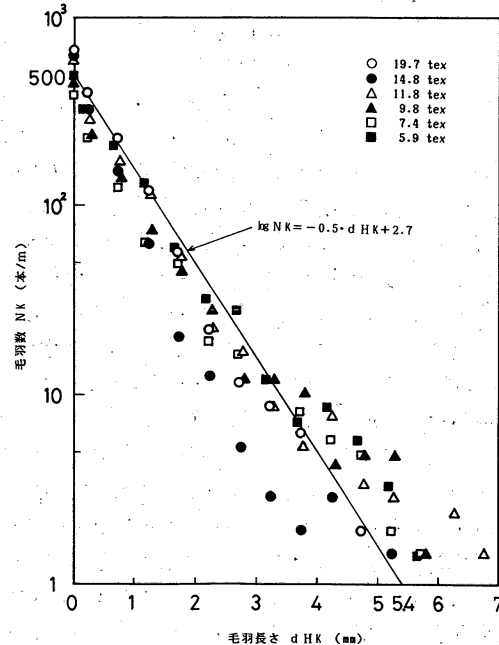


図6 綿糸の毛羽長分布図

ように、1 本から 500 本まで積分することにより、1 m 当たりの毛羽の全長 H_k が分かる。

$$H_k = \int_1^{500} dH_k = \int_1^{500} (5.4 - 2 \cdot \log N_k) dN_k \\ = 430 \text{ mm/m} \quad (5)$$

例えば、この値が意味しているのは、19.7 tex の綿糸 1 m 当たりに 1 mm 長の毛羽が 430 本あると考えてもよい数値である。この値に巻糸体表面の要素長さを乗ずることによって、その要素の毛羽の全長が分かる。一方、 d_k に比して l_k は非常に大きいので、毛羽の抗力係数 C_D は $l_k/d_k = \infty$ の時の係数である $C_D = 1.20$ を用いる。又、(3)式内の流速 V には巻糸体表面の周速度を代入する。そして巻糸体表面に接する要素辺において、 θ 方向の運動方程式の外力成分の項に、(3)式より算出した F_k を要素ごとに加算した方程式によって有限要素解析を行う。又、カバーは固定されているので、カバー表面の V_θ は 0 である。

次に条件 2 については、綿巻糸体の場合には綿糸表面に毛羽があるために表面が粗く、毛羽同士のからみ合いがあったり、又、この毛羽周りに二次的な渦流れが発生していると考えられる。しかしながら、毛羽周りの渦損失や毛羽同士の相互干渉はここでは考慮しないものとする。

最後に条件 3 については、巻糸体を支える底面は r 方向に無限に広く表面がなめらかな固定平板を想定し、ゆえにここでの流体の出入りやすべりはないものとして $\phi = 0$ 及びすべりなし条件³⁾を代入した。又、巻糸体とこの平板のかど点には $q = 0$ を代入した。

ここで計算に用いた準陰的なスキームは、陽的なスキームに比して計算は速くなるが、レイノルズ数(粘性力に対する慣性力の比)が大きくなると計算が不安定になる傾向がある。そこで本解析では、各要素ごとに動粘性の項に人工粘性係数⁹⁾を導入し、又、Courant 数⁹⁾による時間増分を十分小さくすることによって数値計算を安定させながら計算を行った。Courant 数を以下に示す。

$$\text{Courant 数} = \frac{U \cdot \Delta t}{S} < 1 \quad (6)$$

ここで U は代表速度を表し、ここでは巻糸体表面の周速度を代入する。又 Δt は時間増分量、 S は三角形要素の最小辺長さを表す。そしてこの式を満たすように Δt を決定する。

4. 解析結果及び考察

カバーなしである図3のモデルにおける巻糸体周りの各方向の速度成分の前報の実測値と解析した理論値を上下に対比させて、半径(r)方向については図7に、円周(θ)方向については図8に、軸(z)方

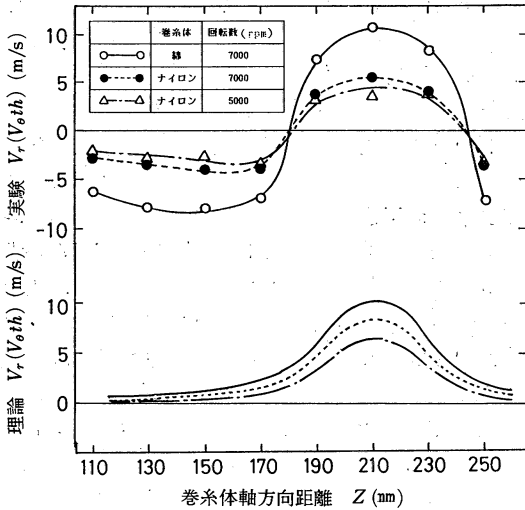


図7 巻糸体周りの半径方向速度成分
(半径方向距離 $r = 68$ (mm))

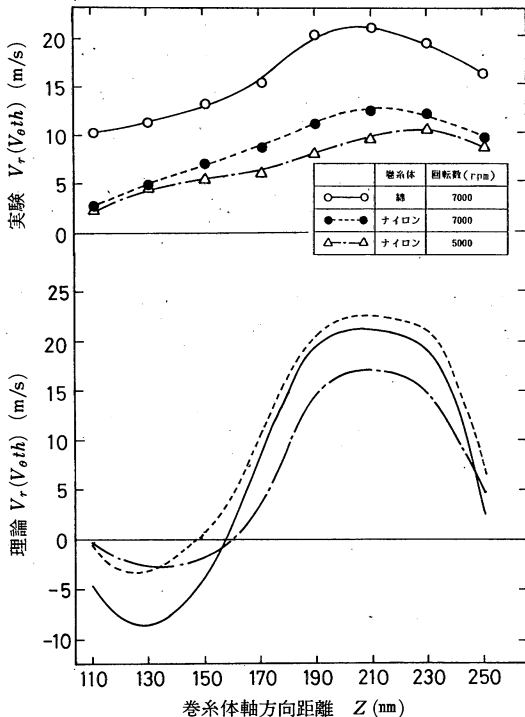


図8 巻糸体周りの円周方向速度成分
(半径方向距離 $r = 68$ (mm))

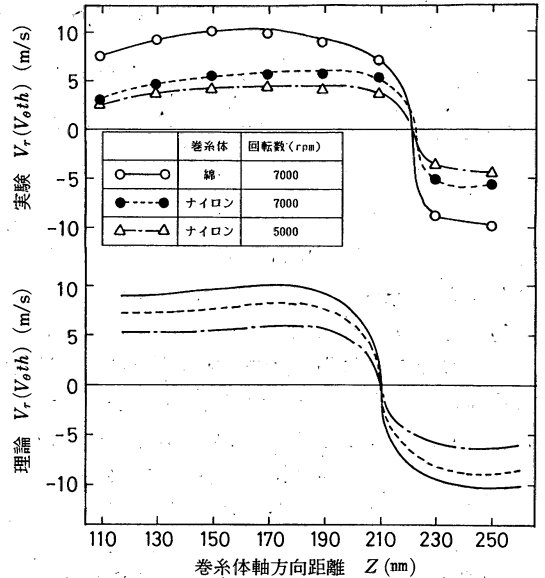


図9 巻糸体周りの軸方向速度成分
(半径方向距離 $r = 68$ (mm))

向については図9に示す。又、同時にこれらの図から、巻糸体の表面状態及び回転数の違いによる各速度成分の特性を読み取ることができる。それでは、まず図7に注目しよう。半径方向の吹き出し流は、実験、理論の両者とも巻糸体の中央部である $z = 210$ mmで最大となり、その大きさもほぼ等しい。ただ、実験値は円柱部の端部で V_r が負となっていることから、吸い込み流れが認められたが、理論値ではそこでの V_r はほぼ0であり、その傾向は認められなかった。これは、数値計算において考慮したのは連続の理論による吹き出しと吸い込みの流量関係の釣り合いのみであり、これだけでは巻糸体回転によって表面に生ずる、速度境界層内の流れがうまく表現されなかったためと考えられる。次に図8において、理論の綿巻糸体の V_θ がナイロン巻糸体のそれより小さくなった。回転数が同じであれば巻糸体表面の V_θ は同じであるのに対して、 V_θ の逆流値(V_θ の負の値)は綿巻糸体の方が大きい。このため、巻糸体表面付近は V_θ の正流、逆流が r に対して交互に発生しており、この間を平均した計算点の綿巻糸体の V_θ はナイロン巻糸体のそれに比して小さくなるからである。ゆえにこれは、巻糸体近辺のメッシュ分割の精度の問題であり、本来の綿巻糸体の理論値はナイロンのそれに重なるか、それよりわずかに大きくなるものと考えられる。又、ナイロン巻糸体の場合で、理論値は実験値よりも大きい傾向を示

しているが、これは巻糸体表面から 10 mm 付近は r 方向に対する V_θ の速度差は非常に大きく、例えば r が 1 mm 違うとき 3 m/s も違うので、この差は実験値の測定誤差と考えられる。又、理論では、円柱部の端部で V_θ が負となっていることから、回転とは逆方向の流れの存在が予測される。実験においても V_θ の逆流は認められたがその点の測定値が不安定であり、しかもその逆流の検出が瞬間的であるので、測定時間を十分にとると結局データとしてこの逆流は検出されなかった。これは図10に示すように、実験ではこの付近の r 方向に対する V_θ の速度差が大きいのに対し、これを測定するセンサー部(球直径 10 mm)が大きかったために、この逆流を検出できなかったものと考えられる。又、このせん断流は巻糸体に近いこともあって、流れに多大の損失を与えていると考えられる。しかしながら、後に示す速度ベクトル図から分かるようにカバーを設置することにより、カバー部は巻糸体円柱部の流れ場の逆流発生箇所位置に位置しているので、カバーを設置することで逆流発生箇所は減り、又、発生したとしてもこの逆流の最大値は設置していないものに比して小さくなる。一方、図9において z 方向の流れの衝突位置は実験、理論とも巻糸体の中央であり、その速度分布も又ほとんど一致していることが認められる。ただカバーを設置すれば、巻糸体中央部での流れの衝突はほとんどなくなることも後の結果から分かる。

図7～9より、本実験の範囲内ではいずれの場合も回転数より表面状態による要因が速度に大きく影響することを示している。又、これらの結果は各条件に対して、実験、理論の両者ともほぼ一致していることから、境界条件の考え方を含めて本手法は巻

糸体周りの流れ場をよく解析しているといえる。

以上の3つの解析例の結果とカバー付きの場合の結果を含めて、動力値及び収束した計算回数を表1に示す。計算全般において、カバーなしの場合はすべて1,800回を越えたところで収束したが、カバー付きの流れの場合では計算回数が極端に少なくなり収束がはやい。これは、カバーを設置することで大きな流速の出現のない流れ状態となったためと考えられる。又、巻糸体の表面がなめらかな場合には計算動力値は実際の動力値にほとんど一致する。このことは逆に、ナイロン巻糸体はその表面が十分になめらかであることを意味している。しかしながら、表面が粗い綿巻糸体の(c)の場合には計算動力値は実際のそれよりも低い値を示す。このように、高速な空気流に対して、あらゆる形状や方向を示す毛羽をモデル化することは大変難しく、流れ場を考察すると綿巻糸体においておよそその解析はできたといえる。

次に、図7～9を分かりやすく r - z 平面においてベクトル表示し、さらにカバー付きのこの種の結果を含めて図11に示す。ここで左図は実測した速度ベクトル図である。又、本解析から同時に得られた ϕ の等値線を図12に、 q の等値線を図13及び V_θ の等値線を図14に示す。ここに各図の(a)～(d)は表1に同じである。速度ベクトル図及び ϕ の等値線図である図11と図12から全体的にいえることは、巻糸体付近の空気は巻糸体上下部のテーパ部から吸い込まれて、巻糸体中央の円柱部から吹き出している。各条件においてもこの流れ状態は同じであり、巻糸体の表面状態や回転数によって流速の絶対値のみが大きくなる。 q の等値線である図13より、渦の発生位置(巻糸体表面全体)や渦度の大きな位置(巻糸体の中央部付近)は、カバーなしのすべての場合において同じであり、この位置の渦形を何かで置き換えることによりこの渦による流れの損失をなくすことができる。渦度の大きい位置の円柱部の渦は、前報のようなカバーで置き換えができるが、テーパ部のカバーは実際問題において難しいと考えられる。図14の V_θ の等値線を見ると、円柱部においては V_θ の逆流は考察したが、それ以上に巻糸体のテーパ部でこれが最大となっていることから、渦度の問題も含めてテーパ部に何らかの対策が必要かもしれない。ここで、巻糸体周りの流れの改善箇所を探るために、巻糸体を z 方向に5分割してここに表面が粗い異種の糸を各部分に巻き付けた7種類のモデルに

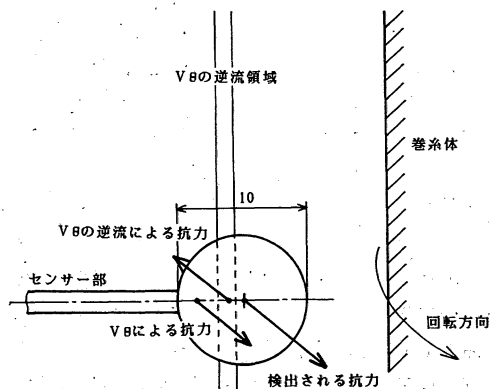


図10 実験で逆流を検出できない理由

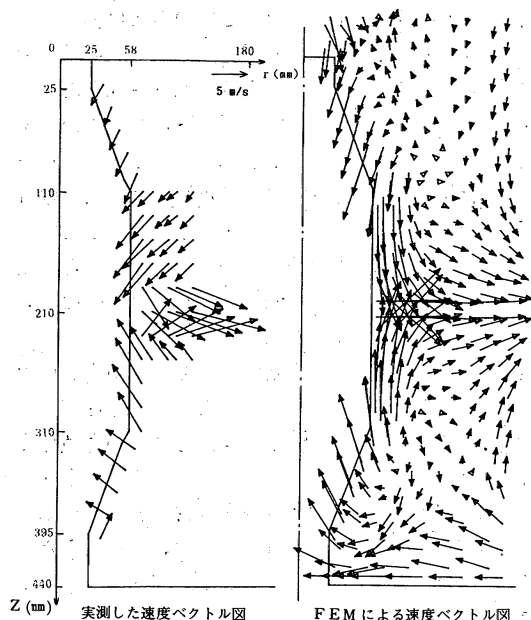


図11(a) 流れ場の r - z 平面の速度ベクトル図
(ナイロン巻糸体, 7000 rpm)

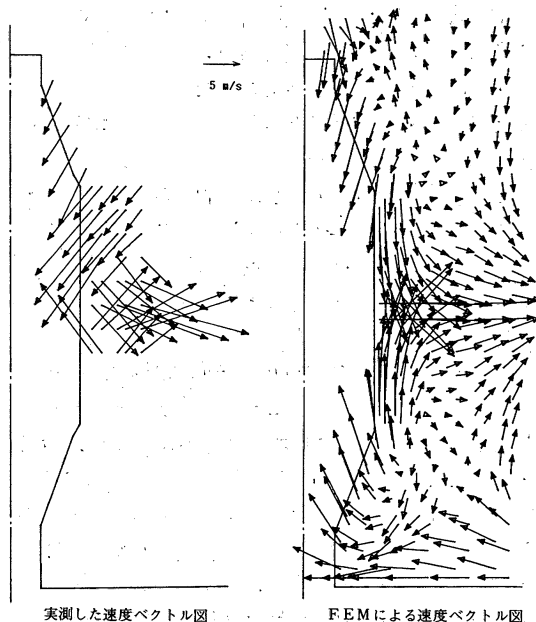


図11(c) 流れ場の r - z 平面の速度ベクトル図
(綿巻糸体, 7000 rpm)

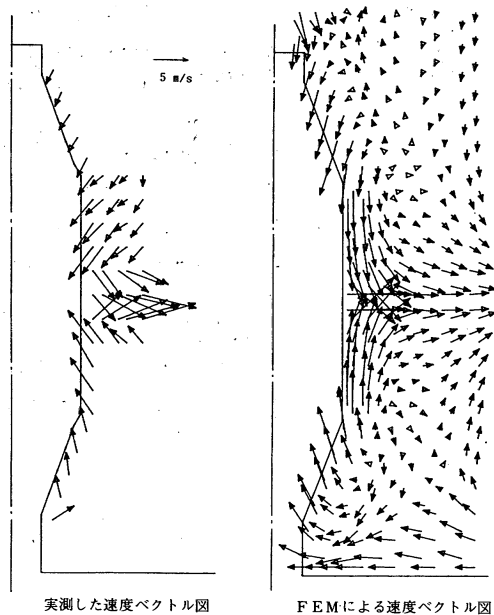


図11(b) 流れ場の r - z 平面の速度ベクトル図
(ナイロン巻糸体, 5000 rpm)

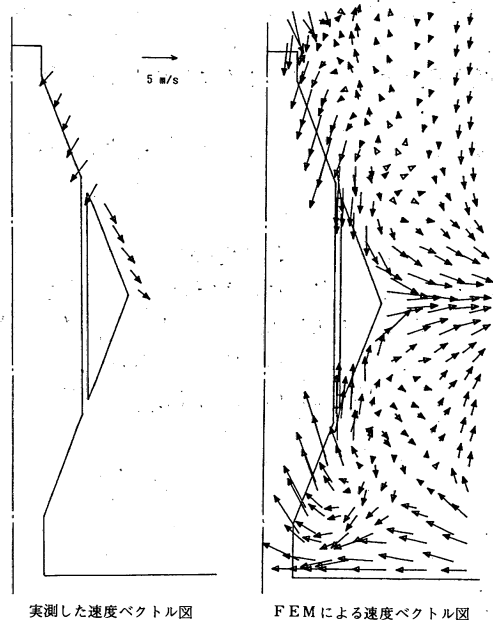


図11(d) 流れ場の r - z 平面の速度ベクトル図
(ナイロン巻糸体, 7000 rpm, カバー付き)

おける消費動力値を表2に示す。右にあるモデルほど消費動力は大きくなっている。これから読み取れるように、動力に大きく影響している部分は、吸い込みよりも吹き出し部分であることがはっきりと分かる。これは吸い込み部分では、表面を粗くしてい

る毛羽は吸い込み流により巻糸体側へと押し付けられるのに対して、吹き出し部分ではこの毛羽が引っ張られて、これが管内流れでいうと管壁の突起物のような存在となり、その分円周方向の流れ抵抗を大きくするために損失動力が大きくなっているの

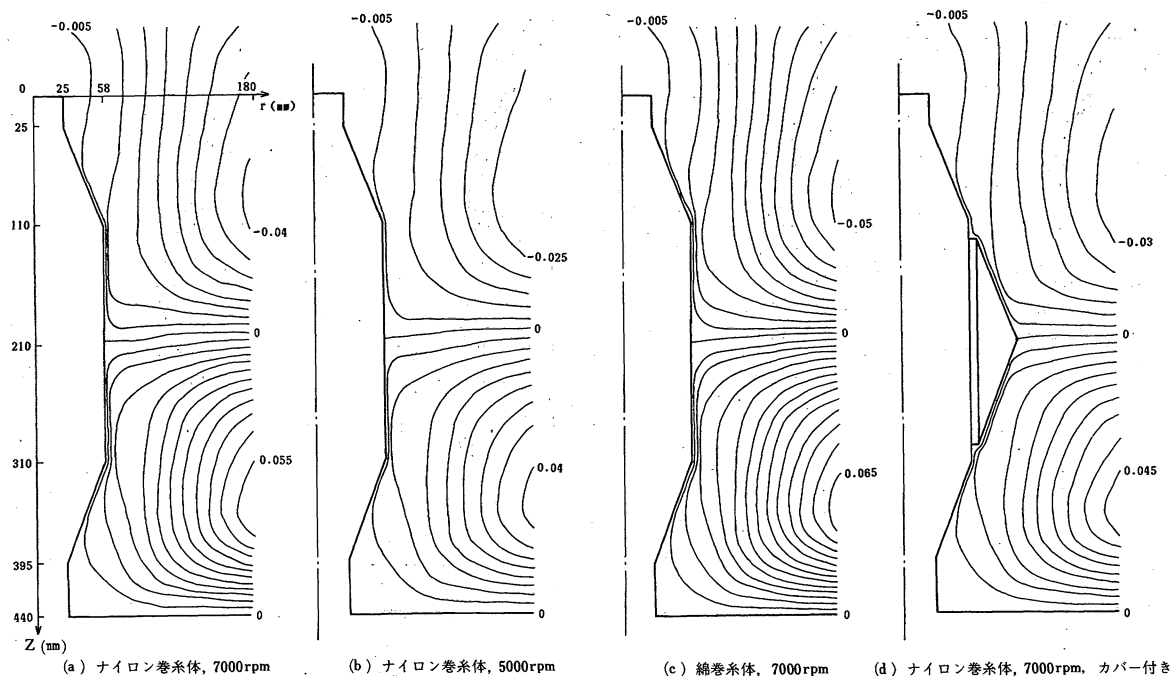


図12 FEM から得られた ϕ の等値線 (単位: m^3/s)
(等値線の間隔 $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$)

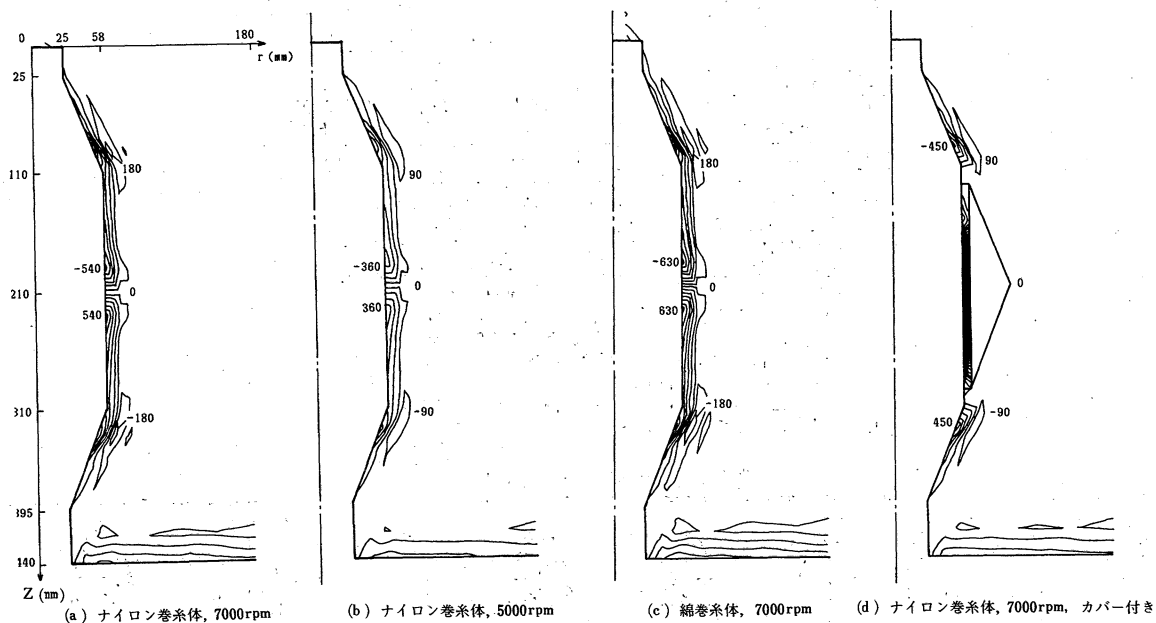


図13 FEM から得られた q の等値線 (単位: $1/\text{s}$)
(等値線の間隔 90 1/s)

る。この実験から、渦及び V_0 の逆流で問題となったテーパ部は吸い込み部であるから、動力的にはさほど影響しないと思われる。むしろそれよりも、

円柱部の吹き出し流れ及び z 方向の流れの衝突をうまく制御し、又は緩和するような方向でカバーを設計した方がよいと考えられる。そういったことも含

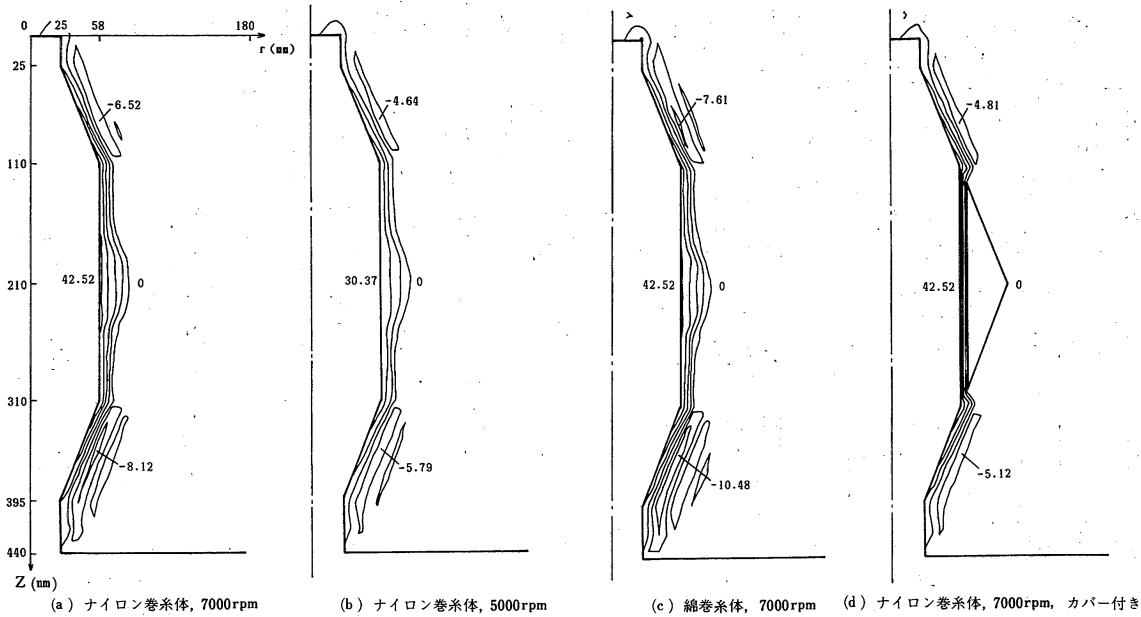


図14 FEMから得られた V_0 の等値線 (単位: m/s)
(等値線の間隔 8 m/s, 負の値は V_0 の逆流の最大値を示す)

表1 測定した動力値と計算及び前報の実験から求めた動力値の比較

(単位はW)	(a)	(b)	(c)	(d)
測定動力値	21.05	8.43	80.01	16.34
計算動力値 ()内は計算回数	21.00 (1828)	7.72 (1829)	34.69 (1857)	13.05 (1602)
実験動力値	12.95	6.05	60.65	12.24

※表内の各動力値及び (a)～(d) の意は次の通りである。
測定動力値—モーターの反力より求めた動力値
計算動力値—本解析より得られた流れ状態から求めた動力値
実験動力値—実験により得られた流れ状態から求めた動力値
ここで、測定及び実験動力値は前報の値を用いた。
(a)—試料: ナイロン巻糸体, 回転数: 7,000rpm
(b)—試料: ナイロン巻糸体, 回転数: 5,000rpm
(c)—試料: 綿巻糸体, 回転数: 7,000rpm
(d)—(a)のカバー付き
また(d)については、13.05 Wの内10.91 Wは巻糸体とカバー間のせん断流れによる損失動力である。

表2 部分巻パーンの実際動力 (W)

回転数 (rpm)							
5000	8.4	10.4	12.4	14.9	17.5	18.3	21.3
7000	21.1	29.9	32.1	43.6	49.1	52.2	62.5

※白 部: ナイロン巻糸体 斜線部: ナイロン粗糸巻糸部

めて、前報のカバーは動力的にみてよい結果を生んだものと思われる。

以上の流れ場観察から、巻糸体の定性的な流れ状態や渦の発生位置が糸種や回転数によらずほぼ同じであることから、巻糸体周りのカバーを設計するときは巻糸体の形状のみによって設計すればよいと考えられる。形状といっても、糸の巻き付けによって巻糸体の形状は随時変化するわけであるが、設計対象はもっとも動力を必要とする最大形の巻糸体において設計すればよいと考えられる。実際には、回転円板において無限空間と密閉容器内とでは摩擦抵抗係数は、後者が前者の60%まで低下させられることが知られている⁹⁾。よって巻糸体についても、この全体を覆うようなカバーが理想的であるが、設置及び糸道などの条件があるためにカバーは種々の制約を受ける。そこで前報の断面が三角形のカバーはほとんど吹き出しをおさえているので、動力は巻糸体とカバー間のせん断力のみに失われており、これがそれほど大きくないので、結果として損失動力は20%分改善されたと思われる。

5. 結 言

1) 巻糸体の回転数や表面状態のパラメーターを

含めて、巻糸体周りの流れ場を解析することができた。この結果によれば、前報のパラメーターによる流れ状態の変化は少なく、上下部から吸い込まれた巻糸体近辺の空気は、回転しながら中央部に集まってここから吹き出していた。

2) 巻糸体周りの速度ベクトル解析値は、前報の各条件下の実験結果と比較してほぼ一致した。この結果をもとに前報に示したポンプの動力理論により、巻糸体回転の損失動力を求めることができた。

3) 流れ場解析結果から、測定実験では容易に得ることのできない流れ関数や渦度の等値線及び円周方向の流れの逆流等を知ることができた。この結果を考察して、巻糸体周りの流れ場の改善箇所が分かった。

参考文献

- 1) 新宅ら; 織機誌, 43, T1 (1990)
- 2) “機械工学便覧”, p. 8~45, 日本機械学会 (1976)
- 3) 林ら; “パソコンによる流れ解析”, p. 86, 朝倉書店 (1987-5)
- 4) 松田ら; 機械学会論文集 B, 45, 395, 915 (1979-7)
- 5) 林ら; “パソコンによる流れ解析”, p. 85, 朝倉書店 (1987-5)
- 6) “機械工学便覧”, p. 8-15, 日本機械学会 (1976)