

Air Flow Analysis around High-speed Rotating Roller

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2019-05-27 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/10.24517/00054179

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



Air Flow Analysis around High-speed Rotating Roller

MATSUDA Keisuke^a, NUKUI Gunki^a, SAWADA Jun^b, HATTA Kiyoshi^c, KINARI Toshiyasu^{d,*}

^a Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa 920-1192, Japan

^b Research and Development Department, TMT Machinery, Inc., Takeda-Mukaishiro-cho, Kyoto 612-8686, Japan

^c National Institute of Technology, Ishikawa College, Kitachujo, Tsubata, Ishikawa 929-0392, Japan

^d Faculty of Mechanical Engineering, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa 920-1192, Japan

Received 23 September 2016; accepted for publication 24 November 2017

Abstract

In processing synthetic fiber yarn, a lot of rollers are rotated at high-speed. Power loss for rotating such rollers has become larger and larger according to increasing yarn processing speed. Former studies proposed that power consumption for rotating yarn package might be reduced by 30% by locating the cover around it in order to limit the air flow. It is important to limit the air flow for saving power consumption. Now it becomes possible to calculate much more complex flow because of development of both the hard-ware of the personal computer and the software for computational fluid dynamics (CFD) analysis. The present study focused on air flows around a single drawing roller as the first step of a series of studies in which we are going to numerically analyze air flows around drawing rollers to clarify the effect of structures of their covers on the reduction of power consumption to rotate them. The comparison of experimentally measured power consumption with corresponding computational results has identified the validity of the present CFD analysis. The CFD analysis also confirmed that the energy-saving effect of the cover exists even if there is a slit on the cover in order to thread air stream caused by high-speed yarn running.

Key Words : Air flow analysis, Drawing roller, Power consumption, Cover

高速で回転するローラ周りの空気流れ解析

松田啓佑^a, 抜井軍光^a, 澤田淳^b, 八田潔^c, 喜成年泰^{d,*}

^a 金沢大学 大学院自然科学研究科 機械科学専攻, ^b TMTマシナリー (株) 技術本部 開発部,
^c 石川工業高等専門学校 機械工学科, ^d 金沢大学 理工研究域 機械工学科

1. 緒言

糸の製造工程や加工工程においてローラを回転させることは多々あり、これらに消費される電力は大きい。空気中でローラが回転する場合、周囲の空気を攪拌することによって消費されるエネルギーを低減することは省エネルギーの観点から有益である。

空気中の回転体の動力については古くから実験または理論的な研究が行われている。物体が回転するとき、周囲の空気を攪拌するための動力 L は次式で表される [1]。

$$L = C_f \cdot \rho \cdot \int V_c^3 \cdot dA/2 \quad (1)$$

C_f は摩擦係数、 ρ は空気密度、 V_c は周速度、 dA は物体表面の微小面積である。さらに、新宅らは巻糸体の周りに流れを制限する容器 (カバー) を設置することで、実験により得られた巻糸体の動力を 30% 程度低下させることが可能であることを報告している [2]。また、流れ場から巻糸体の消費動力を算出し、巻糸体周りにカバーを設置することで動力が 20% 程度低減でき、流れ場の改善による消費動力低減効果を示している [3]。巻糸体周りの流れ場を有限要素法により解析し、当時の実験では容易に得ることができない流れ関数、渦度の等値線及び流れの逆流等が解析結果から得られたと報告している [4]。さらに、カバーの形状や巻糸体形状が損失動力に与える影響についても報告しており、これによると巻

* 連絡先：金沢大学理工研究域機械工学科 920-1192 金沢市角間町
E-mail : kinari@se.kanazawa-u.ac.jp, Tel : +81-76-234-4694, Fax : +81-76-234-4695

糸体とカバーの隙間が小さく、カバーが巻糸体を覆う面積が大きい程消費動力低減の効果が有り、巻糸体の形状については、体積が一定であれば最外径が小さいほど消費動力が小さくなるとしている [5,6]。巻糸体消費動力と周囲空気の圧力の関係についても報告されており、織度の小さい糸を外径が大きい巻糸体に巻きつけた場合、圧力を減少させると消費動力の低減効果が見られるとしている [1]。これらの例に見られるように流れ場を改善することは、回転機械の動力損失を低減させる上で重要な意味を持つ。

一方、上述の一連の研究からしばらく経った現在では、計算機の性能向上と数値流体力学（以下 CFD）を用いた解析ソフトの発展により、パーソナルコンピュータレベルの手軽さで複雑な流れ場の解析を行うことができるようになってきた。実際の繊維機械の中でローラが高速で回転することによって生じる流れは非常に複雑であるが、CFD ソフトを用いてローラが空気中で高速回転する際の動力損失を解析することによって、よりエネルギー効率の良い繊維機械開発の可能性がある。

本研究は CFD を用いて合成繊維用延伸ローラ群の流れ解析を行い、繊維機械設計上の基礎データを得ることを目的とする。本報ではその第 1 段階として、高速で回転する 1 個の延伸ローラに対して解析を行った結果を報告する。

従来の研究によって示されたカバーの有用性を示すため、1 個の延伸ローラについて CFD により解析した動力と実験による測定動力とを比較した後、延伸ローラ上に糸の走行をモデル化した随伴流を作用させ、流れ場の解析を行った。

2. 数値計算手法

2.1 流れ場の支配方程式

本論文で用いた支配方程式として、連続の式、レイノルズ平均 Navier-Stokes の式を以下に示す。

$$\text{div}U = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \text{div}(UU) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \text{div}(\text{grad}U) + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial(-\rho \overline{u'^2})}{\partial x} + \frac{\partial(-\rho \overline{u'v'})}{\partial y} + \frac{\partial(-\rho \overline{u'w'})}{\partial z} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \text{div}(VU) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \text{div}(\text{grad}V) + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial(-\rho \overline{u'v'})}{\partial x} + \frac{\partial(-\rho \overline{v'^2})}{\partial y} + \frac{\partial(-\rho \overline{v'w'})}{\partial z} \right] \quad (4)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \text{div}(WU) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \text{div}(\text{grad}W) + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial(-\rho \overline{u'w'})}{\partial x} + \frac{\partial(-\rho \overline{v'w'})}{\partial y} + \frac{\partial(-\rho \overline{w'^2})}{\partial z} \right] \quad (5)$$

ただし、 t は時間、 x, y, z は座標軸、 $U = (U, V, W)$ は時間平

均速度ベクトルであり、 P は時間平均圧力、 ρ は密度、 ν は動粘性係数を示す。また、 u', v', w' は変動速度成分である。上記の支配方程式を、有限体積法を用いて解く。有限体積法とは計算格子のセルに準じて解析ドメインを有限個の小さなコントロールボリュームに細分化し、個々のコントロールボリュームに支配方程式の積分形を離散化する手法である [7]。本研究では市販の CFD ソフトである CD-adapco 製 STAR-CCM+ を用いて解析を行った。解析条件を 3 次元、非圧縮性流体、 $k-\epsilon$ 乱流モデルとした。本論文では延伸ローラの消費動力の時間変化については評価しないこととし、(3)~(5) 式の左辺第 1 項を省略し、定常解析を行った。

2.2 消費動力算出法

回転機械を対象とした CFD 解析では、回転体に作用するモーメントから算出されるトルク値を得ることで回転機械に作用する動力を算出することができる。STAR-CCM+ で用いるモーメントの算出については以下の通り解析を進めた。

軸周りの軸対称形回転体の力のモーメント M は次式で定義される。

$$M = \sum_f [r_f \times f_f^{\text{shear}}] \cdot a \quad (6)$$

ここで、 f_f^{shear} は回転体の任意の面 f にかかるせん断力のベクトル、 a はモーメントが取得される点 Q を通る軸を定義する単位ベクトル、 r_f は Q に相対的な面 f の位置ベクトルである。

回転体の任意の面 f 上のせん断力 f_f^{shear} は次のように計算できる。

$$f_f^{\text{shear}} = T_f \cdot a_f \quad (7)$$

ここで、 T_f は任意の面 f にかかる応力テンソル、 a_f は面 f の面積ベクトルである。このせん断力は流体によって回転体に及ぼされる。

軸周りの回転体の力のモーメントにより動力 L を求める式は以下で表される。

$$L = M\Omega \quad (8)$$

ここで、 Ω は回転角速度である。

3. 延伸ローラの消費動力比較

3.1 実験装置概要

単体の延伸ローラを高速回転させた時の動力を測定する実験装置の概要図を Fig. 1 に示す。インバータによりモータの回転数を制御し、延伸ローラを回転させる。消費動力の測定には電力計（日置（株）製 PW3336 型）を用いて、延伸ローラの回転によって発生する有効電力を算出することにより動力を求める。モータの消費動力は運転開始直後から漸減していき、一定値に安定するまでに数時間を要する。本実験においては予備実験により、モータ運転開始から 4 時

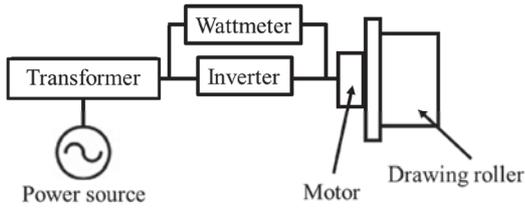


Fig. 1 Outline of experimental apparatus.

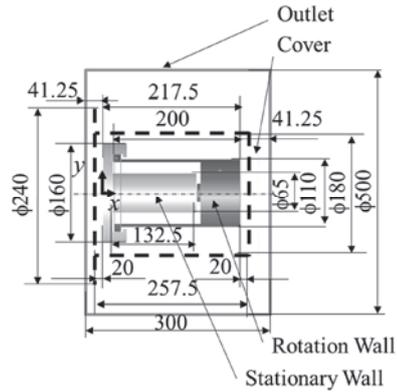


Fig. 3 Analysis model of drawing roller.

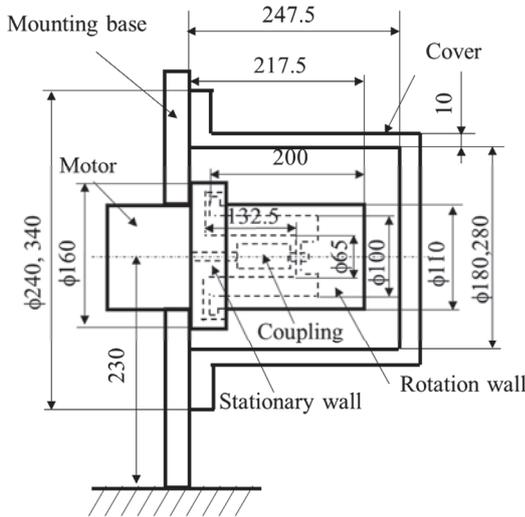


Fig. 2 Experimental apparatus of drawing roller.

間後の消費動力を計測することとした。実験に用いた延伸ローラの模式図を Fig. 2 に示す。延伸ローラは固定壁と回転壁から構成されている。モータ軸と延伸ローラの回転壁はカップリングにて締結されており、実験装置の底面から高さ 230mm の位置で取り付け台に固定されている。延伸ローラの回転壁外径は $\phi 110\text{mm}$ 、回転壁内径は $\phi 100\text{mm}$ 、延伸ローラの取付け部分の固定壁外径は $\phi 160\text{mm}$ 、延伸ローラの長さは 217.5mm である。回転壁部分は長さ 200mm である。固定壁部分の長さは 132.5mm である。Fig. 2 には、延伸ローラ周りの空気流れを制御するカバーも断面で表示した。カバーは板厚 10mm、深さ 247.5mm、内径は $\phi 180\text{mm}$ 及び $\phi 280\text{mm}$ 、また取り付け台に固定するために正方形形状を有した端面を設け、寸法を 240mm 及び 340mm とした。外周速度を 2000,3000,4000,5000m/min とした。また、解析条件と合わせるため、実際に得られた測定値からモータ単体を駆動した時の動力損失を減算した値を実測値とした。

また、上述のように、延伸ローラ周りの空気の制御にはアクリル製のカバーを使用し、カバー寸法による消費動力低減の効果を確かめるため内径 $\phi 180\text{mm}$ および $\phi 280\text{mm}$ の 2 種類のカバーを設置した場合の消費動力も測定した。

3.2 解析モデルの形状・寸法、境界条件及び計算格子

Fig. 3 に延伸ローラの解析モデルを示す。本研究で解析し

た延伸ローラは、実験で用いたモデルと同様に灰色で示した固定壁と黒色で示した回転壁から構成されており、回転壁に所定の回転数を与えることで、種々の回転壁外周速度における延伸ローラ周りの空気流れを計算する。延伸ローラの寸法は実験で用いたモデルと同様とし、固定壁は直径 65mm、長さ 132.5mm、回転壁は直径 110mm、長さ 200mm とした。Fig. 3 には破線で内径 $\phi 180\text{mm}$ (外径 $\phi 200\text{mm}$) のカバー寸法も併記した。カバーは延伸ローラ長手方向に 20mm、半径方向に 35mm の隙間を持ち、カバーの内側の長さは 257.5mm であり、カバー端面の寸法は $\phi 240\text{mm}$ である。また、直径 500mm、長さ 300mm の円柱の解析領域を設けた。解析時の座標軸は、x 軸をローラ中心軸と一致させ、ローラ端面に x 軸と直交するように y 軸、z 軸を置く。Fig. 2 に示した実験装置の寸法と解析モデルの境界条件は異なり中空に浮かんだような解析モデルとなっているが、周囲の壁面等が空気流れに及ぼす影響については、今後まとめて報告したい。

解析領域の壁面を流出境界とし、解析領域内の空気流を解析する。流出境界は次式のように設定した。

$$P = 0 \tag{9}$$

$$\frac{\partial U}{\partial n_b} = 0 \tag{10}$$

ここで、 n_b は境界での法線方向座標である。延伸ローラおよびカバーの壁面はすべて滑らかな壁面であるとし、表面粗さは 0 とした。流出境界を除くすべての壁面を no-slip 条件と

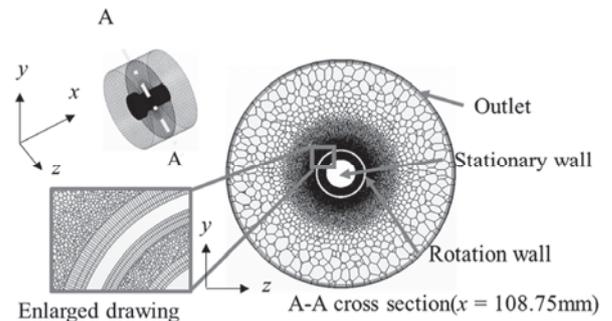


Fig. 4 Analysis grids.

した。回転壁には、回転軸 (x 軸) 周りの回転速度を与えている。

Fig. 4 に解析格子を示す。延伸ローラの長手方向の中心位置 ($x = 217.5/2 = 108.75\text{mm}$) を AA 断面として示した。解析格子は多面体メッシュと境界層メッシュを用いた。境界層メッシュは3層とし、その厚さの合計は5mmとした。また、壁面近くでは多面体メッシュを細かく、要素数は約540万とした。

3.3 数値計算結果

Fig. 5 に各外周速度における延伸ローラの消費動力について、実験による測定動力 L_M 、数値計算によって求めた解析動力 L_C を示す。 L_C は計算値が十分に収束したと判断できる繰り返し数付近の100回の平均値から算出している。横軸をカバー内径と Without cover、縦軸を延伸ローラの消費動力とした。Fig. 5 から、各外周速度、カバー条件で差はあるが、全体的に実測値と解析値はよく一致しており、解析の妥当性が確認できた。また、外周速度を大きくすると、延伸ローラの消費動力が急激に増加するが、延伸ローラ周りにカバーを設置することで消費動力を低減でき、内径の小さいカバーを

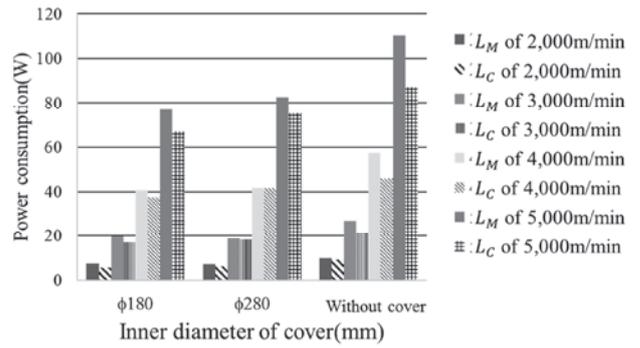


Fig. 5 Measured power and calculated power.

設置した方が、動力低減の効果が大きいことが示された。

また、回転壁外周速度 5,000m/min (83.3m/s) で回転する延伸ローラの x 軸に垂直な断面 ($x =$ (a) 50mm, (b) 109mm, (c) 180mm) における、3次元流速ベクトル $U(U, V, W)$ から求めた空気流速図を Fig. 6 に示す。ここで、図の色は U の大きさを示す。Fig. 6 の解析モデルのカバーは内径 φ180, 280mm である。Fig. 6 では線積分畳み込み法を用いて空気流速を可視化し、視覚的に見やすくするよう流れの方向 (y-z 平面におけ

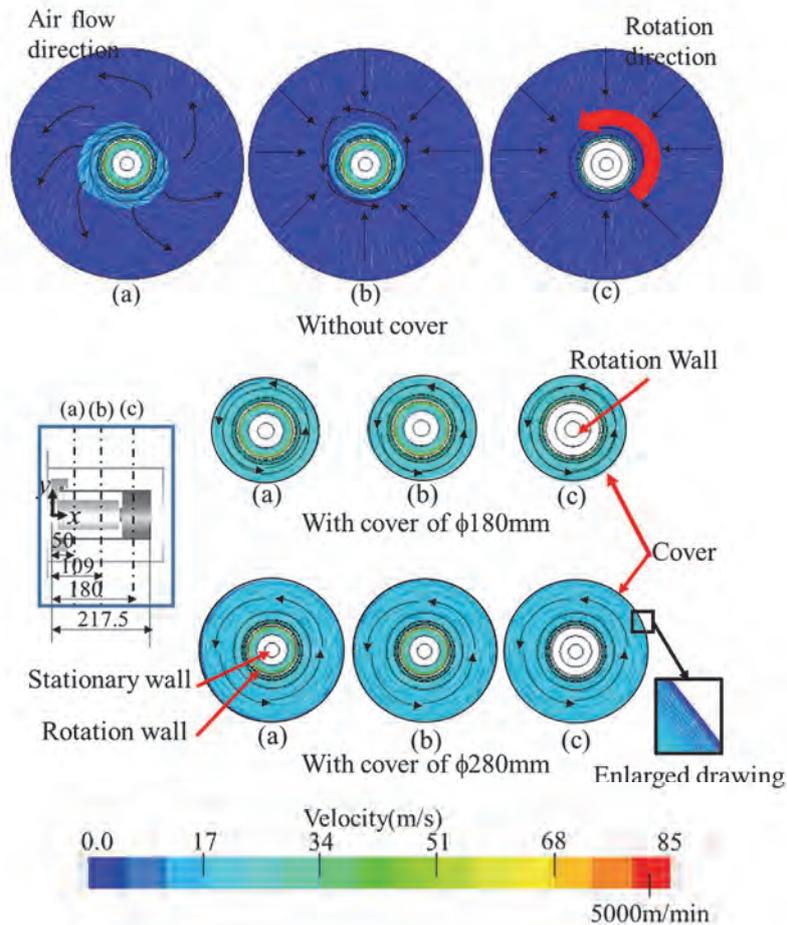


Fig. 6 Air flow velocity around drawing roller rotating at 5,000m/min at its surface. (a) $x = 50\text{mm}$, (b) $x = 109\text{mm}$, (c) $x = 180\text{mm}$

る速度ベクトルの向き)について黒色矢印で示した。(c)の断面図の白地の領域は回転壁, (a), (b)の断面図では内側の白地領域が固定壁, 外側の白地領域が回転壁の内壁(円筒状の延伸ローラの内側の壁)を表している。空気流速図内の黒い同心円はx軸方向から見たときの延伸ローラの輪郭線を示している。Fig. 6から, カバーなしの条件において, (a)の断面での流速分布は回転壁周囲で空気が螺旋軌道を描きながら吹き出し, また流速も大きくなっており, それに比べて(c)の断面では, 空気が回転壁に向かって放射状に吸い込まれていることが確認できる。これは3次元の流れ場はx軸に対して螺旋軌道を描きながら空気が旋回していると考えられ[5], 今回のような(a)では吹き出し, (c)では吸い込みが発生したと推定される。このように, 延伸ローラ上の座標 $x =$ (a)50mm, (b)109mm, (c)180mmの各断面位置で空気流速の変動は大きい, カバーを設置することでその変動が抑制され, 回転方向に空気が流れるようになったことが確認できる。延伸ローラ周りの空気流速は, カバーなしとカバーありの両方の条件で各断面において, x軸周りに概ね対称となっているが, 延伸ローラ周りの空気全体を捉えた場合, 上記で述べたように流れは非常に複雑になりx軸方向に一様でない。カバー内壁付近の流れは空気の流速が0に漸近していることが拡大図から確認できる。

実験及び解析結果より延伸ローラ周りにカバーを設置することで, 周囲の流れ場の乱れを抑制し, 動力を大幅に低減させることができると言える。

4. 糸の走行を考慮したモデル

4.1 解析モデルの概要

延伸ローラはローラ間の回転速度差を利用して合成繊維を延伸する。実現象では, 延伸ローラ上をPET 83dtex/36fの糸(糸1本を1本の円柱と近似したときの直径 $\phi 0.088\text{mm}$)が4mm間隔で32本走行する。解析モデルでは, これを考慮するため, 糸に見立てた $0.088\text{mm} \times 0.088\text{mm}$ の正方形断面の角柱32本にモデル化し, 糸と同じ速度で移動させる。その概要図をFig. 7に示す。ここでは糸走行経路の代表例として, (a)解析領域下方から糸束が上昇してきて, 延伸ローラに 90° 接触し, 左壁面から解析領域を出て行く走行経路I (Fig. 7A)と, (b)解析領域下方から糸束が走行してきて, 延伸ローラに 40° 接触

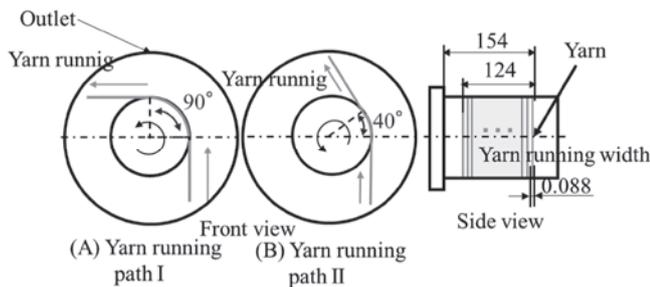


Fig. 7 Outline of yarn running model.

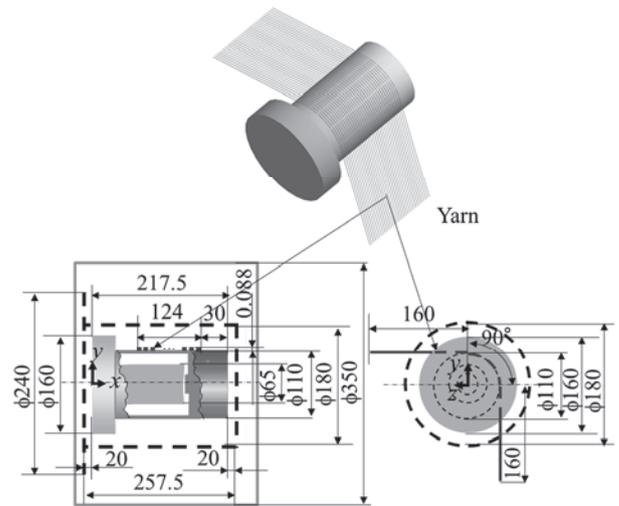


Fig. 8 Analysis model of drawing roller with yarn running.

し, 上方から解析領域を出て行く走行経路II (Fig. 7B)の2つのケースについて解析する。

解析モデルをFig. 8に示す。延伸ローラモデルは動力比較で用いたモデルと同様とし, 回転壁外周速度を $5,000\text{m/min}$ とした。またカバーによる消費動力低減の効果を確かめるため, 内径 $\phi 180\text{mm}$ のカバーを延伸ローラ周りに設置した。ローラを囲ったカバー近傍に糸束が接近し, また離脱していくためには, カバーの一部に糸束が走行可能な隙間を設ける必要がある。このため, カバーの糸束入口側および出口側の側面に $10\text{mm} \times 134\text{mm}$ の矩形の隙間を設けた。糸束は隙間10mmの中央から僅かにずれて走行するが, 糸束の位置は解析結果に大きな影響を与えないと判断し, この位置でも問題ないと考えた。カバーの有無や走行経路が, 消費動力に与える影響を数値解析により検討する。

4.2 境界条件及び計算格子

境界条件は, 解析領域を少し狭めたこと以外は前節と同等であるのでここでは省略する。解析時の座標軸も同様に, x

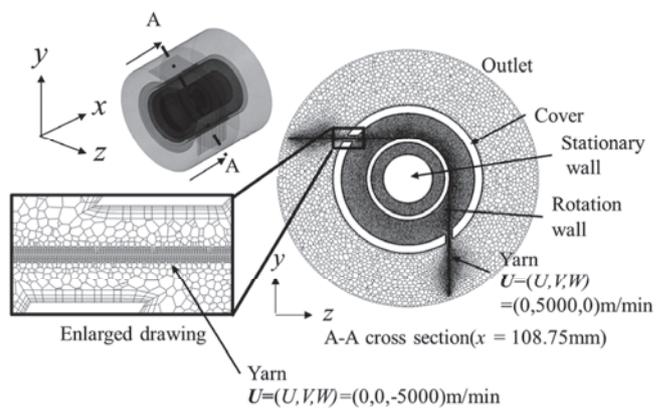


Fig. 9 Analysis grids with yarn running.

軸を延伸ローラ中心軸と一致させ、延伸ローラ端面に x 軸と直交するように y 軸, z 軸を置く。糸束は延伸ローラの回転壁外周速度と等しい速度で走行すると仮定し、進行方向に速

度を与えた。走行方向の速度は 5,000m/min, 走行方向に垂直な方向の速度は 0m/min である。

Fig. 9 に解析格子を示す。延伸ローラの長手方向の中心位

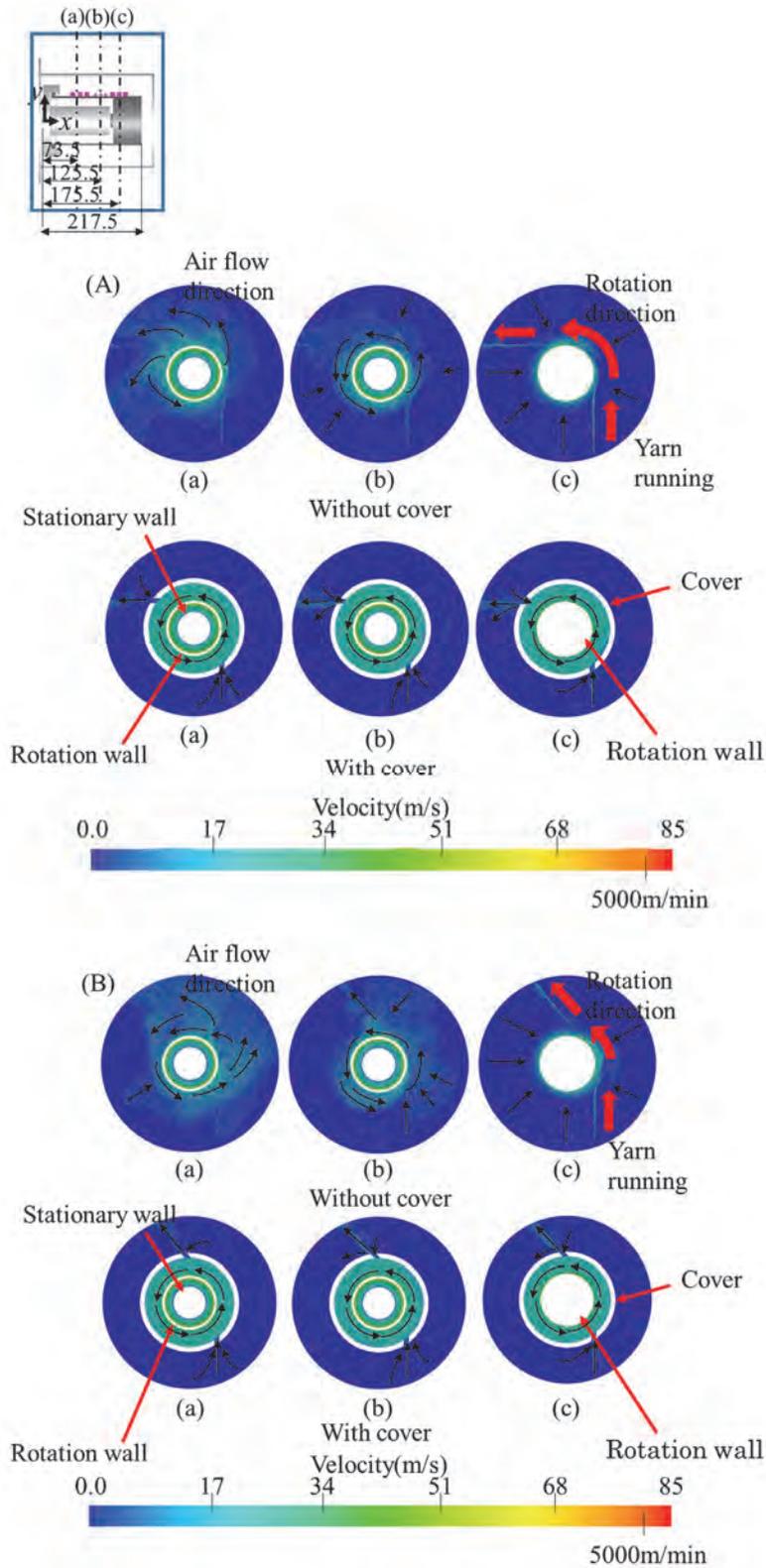


Fig. 10 Air flow velocity around drawing roller with yarn running at 5,000m/min. (A) Yarn running path I, (B) Yarn running path II (a) $x = 73.5\text{mm}$, (b) $x = 125.5\text{mm}$, (c) $x = 175.5\text{mm}$

Table 1 Calculated power consumption around drawing roller with/without cover of $\phi 180$ mm in diameter.

	Cover	Yarn path	Power (W)
i	Without	Without	87.3
ii	Without	I	82.7
iii	With	I	66.0
iv	Without	II	81.7
v	With	II	67.3

置 ($x = 217.5/2 = 108.75$ mm) を AA 断面として示した。AA 断面は糸と糸の間である。解析格子には前節の解析と同様、多面体メッシュと境界層メッシュを使用した。解析領域全体の要素数は約 450 万とした。

4.3 数値計算結果

各解析条件における延伸ローラの消費動力計算値を Table 1 に示す。カバー無しの場合の 3 条件である i, ii, iv を比較すると、糸束の走行によって消費動力が減少した。糸束は延伸ローラの回転方向に沿って走行しているため、延伸ローラ表面に対する空気の相対速度が小さくなったと考えられ、(1) 式から消費動力が小さくなったと推定できる。また、ii と iv を比較すると、糸接触角度の大きさは延伸ローラの消費動力に大きな影響を及ぼさないと推定できる。ii と iii および iv と v を比較すると、延伸ローラ周りにカバーを設置することで、消費動力が約 20% 低減できるという解析結果が得られ、カバーに隙間を有し、糸束が走行していても消費動力低減効果が期待される。

延伸ローラの x 軸に垂直な断面 ($x = (a) 73.5$ mm, (b) 125.5mm, (c) 175.5mm) における、3 次元流速ベクトル U を示す空気流速図を Fig. 10 に示す。前節と同様に Fig. 10 は線積分量み込み法を用いて空気流速を可視化し、流れの方向については黒色矢印で示した。Fig. 10 から糸走行経路 I, II いずれの場合でも、それぞれ延伸ローラ周りにカバーを設置することによって、回転方向に沿って空気が流れていることが確認できる。糸走行経路 I モデルのカバー隙間部分では、糸束に伴って空気が流れる。糸束出口側の隙間では、糸束に伴って空気が流出していることが確認できるが、その上下から流入していることも確認できる。糸走行経路 II モデルにおいても同様な現象が見られた。しかし、これらの現象は延伸ローラの消

費動力に及ぼす影響はごく小さいと推定される。糸走行を考慮した隙間を設けたカバーを設置した場合でも、延伸ローラ周りの空気の渦度を低減でき、消費動力低減効果がある。

5. 結 言

延伸ローラが高速回転する際の実測動力と CFD 解析により計算された動力を比較した後、延伸ローラに糸束の走行を考慮した流れ場の解析を行った結果、以下の結果が得られた。(1) 延伸ローラを回転させた際の消費動力は、実験により求めた測定値と、解析により求めた解析値ではよく一致しており、シミュレーションの妥当性を確認できた。

(2) 延伸ローラに糸束を走行させた場合、消費動力は小さくなり、また糸束とローラとの接触角度の大きさは消費動力に大きな影響を及ぼさないと推定される。

(3) 延伸ローラを回転させた場合の消費動力は、回転体周りをカバーで覆うことにより大幅に低減することができ、カバーに隙間が存在しても消費動力低減の効果がある。

(4) 延伸ローラの外周速度が大きい場合、カバー設置による動力低減効果が顕著である。

以上より、延伸ローラ周りにカバーを設置することで、延伸ローラ周りの流れの乱れが抑制され、消費動力が大幅に低減できることが示された。今後の課題として、より適切なカバー形状の考察や、糸走行実験により今回の解析結果の妥当性を確かめる必要があると考えられる。

References

- [1] Shintaku S, Kinari T, Hatta K (1995) J Text Mach Soc Japan (predecessor journal of J Text Eng), **48**, T145 - T152
- [2] Shintaku S, Iwaki N, Kinari T (1983) Sen'i Gakkaishi, **39**, T432 - T437
- [3] Shintaku S, Oda J, Yamazaki H (1990) J Text Mach Soc Japan (predecessor journal of J Text Eng), **43**, T1 - T9
- [4] Shintaku S, Oda J, Yamazaki H, Banba H (1990) J Text Mach Soc Japan (predecessor journal of J Text Eng), **43**, T34 - T44
- [5] Shintaku S, Oda J, Yamazaki H, Banba H (1990) J Text Mach Soc Japan (predecessor journal of J Text Eng), **43**, T68 - T77
- [6] Shintaku S, Oda J, Yamazaki H, Banba H (1992) J Text Mach Soc Japan (predecessor journal of J Text Eng), **45**, T10 - T18
- [7] Versteeg HK, Malalasekera W (2012) "An Introduction to Computational Fluid Dynamics Second Edition", Chap 3, Morikita Publishing Co, Ltd, Tokyo (Japanese Edition)