

不織布を用いた円管内流れの流体抵抗低減

坂本 雅彦 澤辺 敏幸*1 泉 喜一郎*2

Friction Drag Reduction in Circular-Cylinder Pipe Coated with Nonwoven Fabrics

Masahiko SAKAMOTO, Toshiyuki SAWABE*1 and Kiichiro IZUMI*2

Although the amount of produced nonwoven fabric has been increasing for the last fifty years, but the ratio of the amount of used nonwoven fabric to the total amount of used fiber does not exceed 20%. It is important to consider an application of nonwoven fabric to new industrial products. The purpose of this study is to investigate the effect on the drag reduction in a circular pipe flow by means of wall coated with the nonwoven fabric. Three types of nonwoven fabric used in this experiment are an electret one made of polypropylene, and the basis weight is 10 to 50g/m². The diameter of the fiber is approximately 4 to 30μm, the fiber distribution of these types is a random laying. The pressure drop was measured for various parameters such as Reynolds number and type of nonwoven fabric. It was proven that the wall coated with the nonwoven fabric has the ability to reduce the drag in the circular pipe flow.

1. 緒言

生産コストが安価でかつ大量生産が可能な不織布は、日常生活用品はじめ一般産業用品として幅広く用いられてきている。不織布の生産量は、過去50年間増加し続けているが、繊維使用量のうち不織布生産量は未だ20%にも達していない⁽¹⁾。不織布はその生産工程にて高通気性、高撥水性、さらには静電性など様々な機能を付加することができるため種々の製造工程におけるマスクやキャップ、さらには空気フィルターとして利用されている。今後、不織布の新たな市場開発や技術的ブレークスルーが期待されている⁽²⁾。

著者らは、これまでにポリプロピレン製の静電不織布を室内空調用の空気清浄フィルターとして適用し、その設計条件を同定することを目的に、実際の設置状態を模倣した実験装置を試作し、空管への空気流量、ソックタイプ⁽³⁾の形状、そして布不織布の種類をパラメータに清浄空管内流動特性及び不織布基礎特性について検討した⁽³⁾⁽⁴⁾。その結果、前者では、清浄空管内圧力が流入する空気流量の増加に伴ない増加すること、直径と長さとの比が0.1より小さい場合、清浄空管内圧と流量とはダーシーの法則を満足していること、提案した一次元流動モデル

で管内流れをある程度説明できていることなどを明らかにした。一方、後者では、不織布布地の透過率がおよそ10⁻¹¹(m²)のオーダーであること、不織布を塩ビ円管の内壁面に貼付し、2点間の圧力差を測定した際、およそ10³~10⁴のレイノルズ数の範囲においてほぼ単調に管摩擦係数が減少していること等を明らかにした。

壁面にマイクロファイバーを植毛することによる乱流摩擦抵抗減少効果が高田等⁽⁵⁾により報告されている。彼らは、数μmの直径を持つマイクロファイバーをFRP円管内壁に植毛し、水道水を作動流体に摩擦係数を測定した。その結果、ある種のマイクロファイバで最大50%もの乱流摩擦抵抗が低減すること、マイクロファイバの起毛方向が摩擦抵抗低減に大きな影響を及ぼすこと等の結果を報告している。摩擦抵抗低減のメカニズムについて彼らは、マイクロファイバが粘性低層領域に存在することにより、乱流摩擦抵抗の原因である大規模渦の発生が抑制され、結果として抵抗が減少すると述べているだけで、未だ十分な考察はなされていない。本研究で提案する不織布を添付した管においても同様の効果が予想され、不織布の新たな技術的応用を図る上で極めて重要な課題であると考えられる。渡辺等⁽⁶⁾は、超撥水性流路壁を持つ長方形管路の圧力損失を測定し、管摩擦係数特性について検討した結果、アクリル樹脂壁面の管路と

*1 元奈良工業高等専門学校専攻科

*2 (株)サンロード

比べ低減を示す減少効果が明らかにされ、抵抗低減の本質が壁面と流体とのすべりに起因すること等を明らかにしている。撥水性の機能を持つ不織布においても同様の効果が期待でき、これら両面から抵抗低減の効果が期待できる。

本研究では、内径が25mmのアルミニウム円管内壁に不織布を貼付し、管流れ方向の圧損から管摩擦係数を測定し、円管内流れの摩擦抵抗低減の効果について検討することを主な目的とする。なお、実験では動作流体として水道水を用い、3種類のタイプの不織布で比較した。

2. 実験装置及び方法

試作した実験装置概略図を図1に示す。本実験には動作流体として水道水を使用し、3.5mの水頭差で一定となるようタンク内のドレインからオーバーフローさせた。水道水は上流部タンクから各種配管系を経てテストセクション部へと導かれ、下流側タンクに回収された後、電磁ポンプにより上流側タンクへと循環する。なお、配管系には内面が滑らかな、内径が25mmのアルミニ

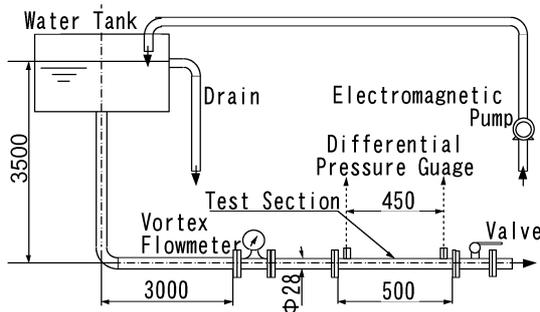


図1. 実験装置概略

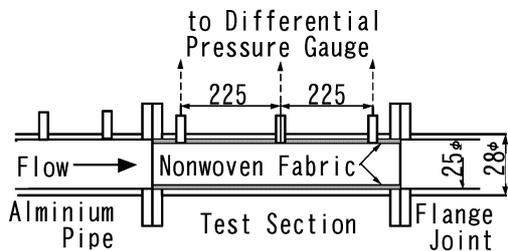


図2. テストセクション部

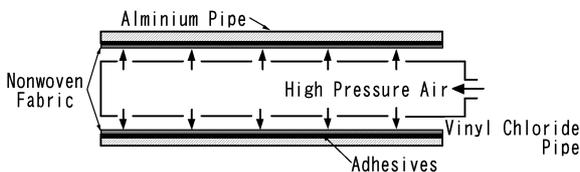


図3. 管内壁への不織布貼付方法

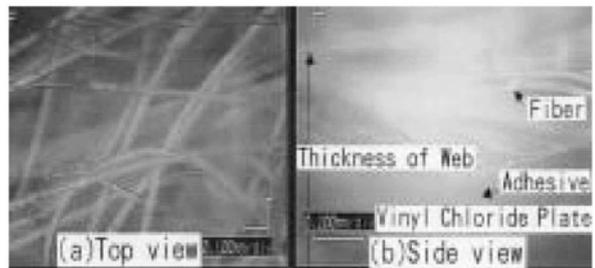
ウム管を使用した。図2にテストセクション部の詳細を示す。流れ方向の圧損は、測定孔間隔を22.5cmとし、直径が5mmの小孔よりマンノメータを介して微差圧計（柴田科学(株) HP-20型：分解能1Pa）で測定した。なお、測定箇所は流れが十分発達した下流部で実施した。

アルミニウム管内壁面に貼付する不織布は、図3に示すような周方向に4箇所、軸方向に5箇所の小孔を開けた塩ビ管に予め巻き付け、アルミニウム管へ挿入した後圧縮空気を通風させて接着剤により内壁面に貼付した。なお、接着箇所は不織布各部とした。

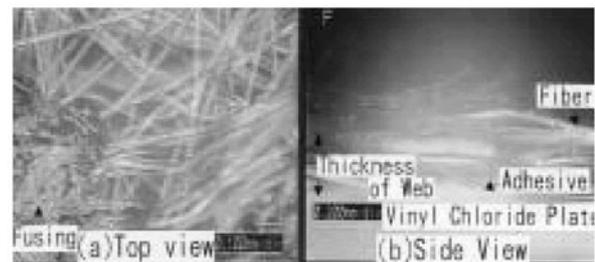
実験に使用した3種類の不織布は、いずれもポリプロピレン製の静電不織布である。図4に、本実験に使用した不織布の拡大写真を、表1に不織布繊維の各形状を示す。同じ不織布でも測定した繊維の太さにバラツキは見られたが、いずれの繊維も特定の方向性をもっていないことが分かった。なお、実験に用いた不織布はいずれもゴミ等が付着していないものを使用した。



(1) Type I



(2) Type II



(3) Type III

図4. 実験に用いた不織布のタイプ

表1. 不織布繊維の形状

No.	Diameter of fiber [μm]	Thickness of web [mm]	Height of fiber [mm]	Pipe inner diameter [mm]
Type I	4.03	0.58	0.181	22.75
Type II	28.57	0.784	0.385	23.85
Type III	22.1	0.146	0.069	24.25

3. 実験結果及び考察

管摩擦係数λとレイノルズ数Reとの関係を図5に示す。図中の破線はハーゲンポアズイユによる結果を、実線がブラジウスの結果を、それぞれ示す。アルミニウム円管自体の実験値は、ややばらつきは見られるもののReがおよそ1.0×10⁴以上の範囲ではほぼ定常な乱流状態にあることが確認できる。

一方、Reがおよそ1.0×10⁴以上の範囲で、TypeⅢの不織布を用いた管摩擦係数の値はアルミニウム円管自体の結果に比べ明らかに減少しており、本タイプが円管内流れの摩擦抵抗低減に極めて有効であることが分かる。摩擦抵抗低減率として、ここでは高田等と同様に次式を用いた。

$$DR(\%) = \frac{\lambda_{blasius} - \lambda_{nonwoven}}{\lambda_{blasius}} \cdot 100 \quad (1)$$

ここで、λ_{blasius} はブラジウスの式による摩擦係数の値を、λ_{nonwoven} は内壁面に不織布を貼付した際の摩擦係数の値をそれぞれ表す。図6は、縦軸に摩擦抵抗低減率を、横軸に代表速度として摩擦速度を、代表長さとして不織布高さをとった無次元の不織布高さを示す。本実験範囲では、TypeⅢの不織布が管内流れ摩擦抵抗低減に有効であることが分かる。摩擦抵抗低減率は、無次元高さがおよそ5前後で最大値をとり、約35%程度であった。

Reが10⁴より小さい範囲で、いずれの測定値にもばらつきが見られる原因として、同一流量でも不織布繊維の微妙な起毛状態が変化している可能性があること、水温の変化により繊維の状態に違いが生じていること、微差圧計の分解能が1Paのため十分な測定精度を得ることができなかった等が考えられる。

乱流摩擦抵抗が減少した理由として、高田等も報告しているように、粘性低層内に見られる速度差のある縞状構造により大規模渦構造が引き起こされるが、この大規模渦構造が粘性低層内に存在する不織布繊維により変化し抑制され、結果として摩擦抵抗が減少していると考えられる。アスベスト等のマイクロファイバーが添加さ

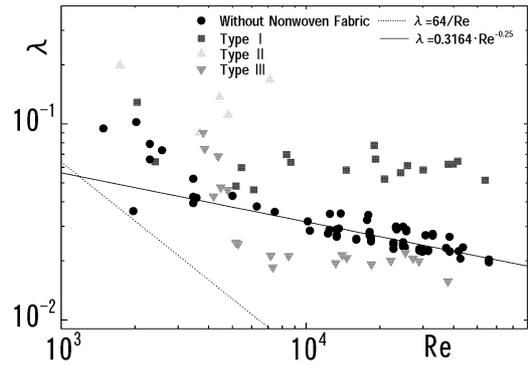


図5. 管摩擦係数λとReの関係

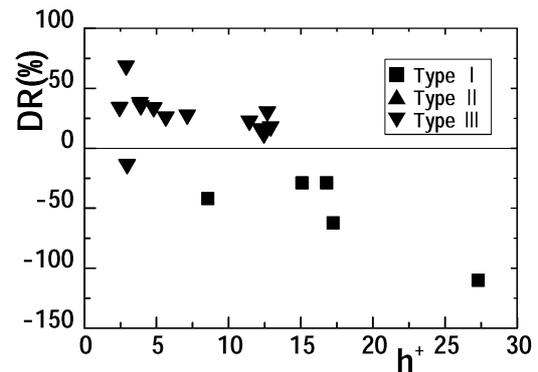


図6. 摩擦抵抗低減率

れた場合、トムズ効果と同様な現象で摩擦抵抗が減少することが確かめられているが、不織布布地の凹凸の構造や不織布自体の撥水性、さらには静電気力等が何らかの影響を及ぼしていると考えられ、これらの影響については今後の大きな検討課題である。また、摩擦抵抗低減が長時間有効であるか、あるいは動作流動体中に剥がれた不織布の繊維や異物が混入していないか等についても今後検討する必要があると考える。

本実験では、3種類の不織布を使用し動作流体に水道水を用いた。今後は、他の不織布を含め多種多様な機能を持つ不織布について、水と空気とを動作流体に検討する予定である。

4. 結 言

内径が25mmのアルミニウム円管内壁面に不織布を貼付し流れ方向の圧損から摩擦係数を測定し、管内流れの摩擦抵抗低減の効果について検討した。得られた結論は以下の通りである。

- (1) あるタイプの不織布でおよそ数十%程度の摩擦抵抗が低減することを確認した。
- (2) h⁺~12前後が摩擦抵抗低減に有効であることが分かった。

本研究は、科学研究費補助金(課題番号145655076)の援助により行われたものである。ここに記して感謝申し上げます。さらに、実験にご協力頂いた奈良高専学生の岩井君、谷君、ケネディ君、中森さんに感謝の意を表します。

文 献

- (1) INDA米国不織布工業会、野瀬恭平訳、不織布便覧、(株)不織布工業会、1996.
- (2) 中村義男著、不織布の製造と応用、(株)シーエムシー、2000.
- (3) 坂本等、日本機械学会流体工学部門講演会、2001.10.2
- (4) 坂本等、36th 空気調和・冷凍連合講演会、2002.4.16.
- (5) 高田、京極、中原、日本機械学会論文集B、No.62 596号, pp1383-1387. 1996.
- (6) K. Watanabe, Yanuar and H. Udagawa, Vol.381, pp.225-238, J. Fluid Mech., 1999.