矩形管路と平板境界層における高分子被覆による抵抗低減効果*

水 沼 博^{*1}, 中 島 広 司^{*2}, 大 野 康 明^{*3}Drag Reduction Effect due to Polymer Coating in a Channel
and a Boundary Layer FlowHiroshi MIZUNUMA^{*4}, Hiroshi NAKASHIMA and Yasuaki ŌNO^{*1} Department of Mechanical Engineering, Tokyo Metropolitan University,
1-1 Minamioshima, Hachioji-shi, Tokyo, 192-0397 Japan

We developed a method of effective polymer coating and investigated its new drag reduction effect. The ends of polymer chains are anchored on the wall by insoluble binder, and the other ends dissolve in water. The turbulent drag reduction by means of this polymer coating was investigated in a rectangular channel flow and in a boundary layer flow. The influence of molecular weight on the drag reduction was investigated in a channel flow. The polymer of molecule weight 3.6 millions showed highest drag reduction. The turbulent velocity profiles were measured in a channel flow using a LDV system. The drag reduction was caused by the increase in the intercept of the logarithmic velocity profile. For a boundary layer flow, the drag reduction was observed in the transitional region.

Key Words: Boundary Layer, Internal Flow, Turbulent Flow, Drag Reduction, Polymer Coating, Laser Doppler Velocimetry

1. 結 論

高分子添加剤による抵抗低減効果はトムズ効果としてよく知られ、1960～1970 年代に活発な研究が行われた。それらの研究の例は Hoyt⁽¹⁾と Virk⁽²⁾の総括的な論文の中にみることができる。現在、高分子添加剤の利用は米国を中心に原油などのパイプライン輸送に利用されており、Motier ら⁽³⁾⁽⁴⁾は米国で消費されるガソリンの 40%以上が添加剤を含んでいると報告している。航空機燃料の輸送へも応用が試みられ、また 20ppb の非常に希薄な濃度でも著しい抵抗低減が得られると報告されている。しかしながら、これらの例を除くと、高分子の劣化の問題もあり、トムズ効果は現在広く実用に供せられているとはいえない。ppb オーダーの希薄な濃度でも効果が期待できることを考えれば、ポンプによる機械的劣化などの課題が解決されれば、その実用的価値は非常に高いといえる。

添加剤の外部流れへの応用も検討されており、Kowalski⁽⁵⁾は添加剤の希薄溶液を間欠的に吹出すことによりその使用量を著しく減らすことが出来ると報告している。一方、著者ら⁽⁶⁾は添加剤を壁面に被覆する

方法を新たに考案し、その被覆高分子による抵抗低減効果を矩形管において調べた。その結果、高分子が水中へ溶出するタイプでは効果の持続時間が短い、非水溶性のつなぎとともに被覆させた場合には、効果が低レイノルズ数に限られるものの長時間にわたって維持されることがわかった。後者の方法は被覆が剥がれない限り効果が持続することから、外部流において効果的と考えられる。本論文では後者のつなぎと共に添加剤を被覆させる方法についてさらに研究を行い、添加剤分子量の影響と矩形管内の速度分布を測定した。また、高分子被覆を平板境界層流れに適用し、摩擦抗力の測定を行うことによりその抵抗低減効果について調べ、矩形管における結果と比較検討した。

記号

 d : 水力直径 C_f^* : 摩擦抗力係数 DR : 抵抗低減率 ℓ : 圧力損失測定区間の距離 L : 平板の長さ Δp : 圧力損失 Re : 矩形管におけるレイノルズ数, $=dV/\nu$ Re_L : 境界層流れにおけるレイノルズ数, $=Lu/\nu$ u : 局所速度 u_r : 摩擦速度 u^+ : 無次元速度, $=u/u_r$

* 原稿受付 2003 年 3 月 12 日.

^{*1} 正員, 東京都立大学工学研究科(☎ 192-0397 八王子市南大沢 1-1).^{*2} 本田技研工業(株)(☎ 107-8556 東京都港区南青山 2-1-1).^{*3} 日産ディーゼル(株)(☎ 362-8523 上尾市大字 1-1).

E-mail: mizunuma@ecom.metro-u.ac.jp

U : 主流速度
 V : 平均流速
 x : 仮想原点からの距離
 y : 壁面からの高さ
 y^+ : 無次元高さ, $= u_\tau y / \nu$

$$\lambda: \text{管摩擦係数}, \quad = \frac{d}{l} \frac{\Delta p}{\rho V^2 / 2}$$

ν : 動粘度
 ρ : 密度

2. 実験装置及び方法

2.1 被覆高分子の顕微鏡観察 高分子被膜の作成法と矩形管流路の詳細は前報⁽⁶⁾で述べた。本報では高分子分子量の影響を調べるため、高分子としてポリエチレンオキサイド(PEO-3~27, 製鉄化学)を用いた。これら高分子の分子量は約 85 万から 650 万の範囲にわたっている。つなぎには前報と同じくポリビニルアルコール(クラレ, PVA124)を用いた。PVA124 は約 90℃の熱湯に溶解する。この PVA124 水溶液を常温でポリエチレンオキサイドの溶液と混合し、その溶液を壁面上で乾燥させて被覆面を作成する。乾燥後の PVA124 は常温ではほとんど水に溶けず、水溶性のポリエチレンオキサイドを壁面につなぎ留める役割を果たす。水中での被覆高分子の状態を調べるためガラス面上に作成した被膜を水に浸し、凍結乾燥したものを光学顕微鏡で撮影した。図 1 に示すように被覆表面には高分子鎖の絡み合いがあらわれているが、それら絡み合いの片端はつなぎにより壁面に固定されている。図 1(a)の PEO-3 は、用いた高分子の中では分子量が最も低く、壁面から伸びる高分子鎖の絡み合い長さも短い。分子量が高くなるにつれ図 1(b)のように高分子鎖の絡み合いも長くなり、水に浸った壁面に手で触るとヌルヌルとした感触が強まる。

2.2 矩形管内における乱流速度分布の測定 矩形管の断面形状は被覆なしの場合 100 mm × 10 mm である。

(a) PEO-3 (Mw 8.5x10⁵)
 (b) PEO-15 (Mw 3.6x10⁶)

Fig. 1 Strands of polymer chains on coating surface.

被覆ありの場合、その厚さは 0.5 mm であり、矩形管の断面形状は 100 mm × 9.5 mm である。矩形管路に対しては、圧力損失の測定と並行して、光ファイバー式レーザー流速計による速度分布の測定も行った。レーザーにはアルゴンレーザー(定格出力 4 W)を用い、壁面近傍で良質な信号を得るため前方散乱モードでの計測を行い、レーザーの集束レンズも短焦点のものを使用し、測定体積を長さ 90 μm、直径 20 μm と比較的小さくした。被覆は圧力損失の実験と同様に流路片側の壁面に対してのみ行った。この LDV の光学系は次節で述べる回流水層へは適用できなかったため、速度分布の測定は矩形管のみに対して行った。

2.3 平板境界層における摩擦抗力の測定 平板境界層流れにおける摩擦抗力の測定は以下のようにして行った。回流水槽の測定部に、その一部(503 mm × 303 mm)をくり抜いたアクリル平板を図 2 に示すように設置する。そのくり抜いた穴の中に同じ厚さのアクリル平板(500 mm × 300 mm)を 4 本のワイヤーでつり、この平板に対する抗力を図 3 の荷重変換器で測定する。すなわち、測定平板後端には先端が円錐状の細棒が取り付けられ、この円錐先端が測定平板に働く摩擦抗力を荷重変換器のカンチレバーに伝える。摩擦抗力によるカンチレバーの変位は 50 μm 程度であり、抗力測定への影響は無視してよいと考えられる。なお、測定される抗力は上記のように平板全体の抗力ではなく、ワイヤーでつるされた平板片面の抗力のみであり、この点を考慮して付録で定義した摩擦抗力係数 C_f^* を用いた。

境界層流れにおける平板摩擦抗力の測定誤差については、望月ら⁽⁷⁾により詳細な研究が行われており、測

Fig. 2 Test section in the water tunnel.

The step heights of the floating plate are measured at two locations A.

Fig. 3 Measurement of frictional drag by a load cell.

定平板と周囲の平板との段差及びすきまの大きさがその測定誤差に影響を与えると報告されている。特に段差については、測定平板が流れの中に突き出るような段差が非常に大きな誤差を導くことを望月らは明らかにしている。したがって測定平板に高分子を被覆させて実験を行う場合にも、周囲の平板と測定平板との段差をゼロとすることが重要である。この段差を調整するためには、その被覆厚さだけ測定平板を上方へ移動させなければならない。この点に留意し、測定平板をつっている4本のワイヤーは段差の調整が可能となるよう各々マイクロメーターのヘッドと連動して上下に移動可能になっている。測定平板と周囲の平板との段差は図2の位置Aで非接触の光学式変位計で測定される。本装置において段差が抗力測定にどのような影響を与えるかを調べるため、段差をゼロの状態から変化させたときの抗力変化を調べた。図4はこの段差を変えたときの平板抗力の変化を示し、横軸の段差の正負符号は測定平板の表面が流れの中に突き出た場合を正、周囲平板側にもぐり込む場合を負としている。縦軸は、段差ゼロのときの抗力で測定抗力を除した値である。望月らが指摘しているように測定平板が流れの中に突き出ている正の段差の場合には大きな測定誤差が生じた。逆符号の段差の場合には抗力の変化は少なく、段差が -0.3 mm でもその抗力測定誤差は1~2%程度であった。平板に高分子を被覆させたときの被膜厚さは水に濡れた状態で 0.3 mm であり、被覆平板に対する実験を行うときには、平板を 0.3 mm だけ上方すなわち負の段差方向に移動させて実験を行った。図4よりこの 0.3 mm 程度の移動は被覆の有無にかかわらず抗力測定に及ぼす影響は小さいといえる。なお、被膜は水分を吸収してその厚さが増す。水中での厚さは前報と同様に、水に浸した被覆平板に別の平板を被膜を挟

Fig. 4 Change in frictional drag as a function of step height. Change in drag is a change relative to drag obtained for zero step height.

むように重ね、これら平板間の厚さから被膜厚さを求めた。

3. 実験結果と考察

3.1 高分子分子量が矩形管における抵抗低減に及ぼす影響

管摩擦係数とレイノルズ数の関係を種々の分子量の高分子に対して調べた。それらの測定結果が PEO-3 と PEO-8 に対して図5に、PEO-15 と PEO-27 に対して図6に示されている。最も分子量が低い PEO-3 の場合には、ほとんど抵抗低減効果が生じていないが、その他の PEO-8~PEO-27 においては低レイノルズ数で最大5~6%程度の抵抗低減が生じている。図7は図5と図6の結果から、レイノルズ数が4000と7500のときの抵抗低減率を求め、それらを分子量の関数として示している。分子量が高くなるにつれ、抵抗低減率も高くなるが、最も分子量が高い PEO-27 ではむしろ PEO-15 よりも抵抗低減率はやや低い。PEO-27 の溶液は粘度が非常に高く、均一な被膜の形成に困難を伴った。このような点が PEO-27 の抵抗低減率抑制の原因になっている可能性がある。分子量360万で最も高い低減率が得られ、 $Re = 4000$ での低減率は約6%であった。

被覆高分子はそのほとんどがつなぎによって壁面に付着していると推測される。一方、その高分子は水溶性であるから、一部が溶出している可能性も考えられる。仮に被覆高分子全てが循環管路内の水へ溶出したと仮定してもその濃度は 0.26 ppm とわずかである。この濃度の PEO-15 と 27 の水溶液に対し抵抗低減効果を調べた。それらの管摩擦係数に対する測定結果は図8に示すようにほぼ水の場合と一致し、抵抗低

Fig. 5 Pipe frictional factor for PEO-3 and PEO-8 coating.

Fig. 7 Drag reduction as a function of molecular weight.

減は測定されなかった。PEO は一般にポンプによる機械的劣化が著しく、かつ濃度も 0.26 ppm と非常に低いため、このようにトムズ効果は生じていない。したがって被覆矩形管における抵抗低減効果は、被膜から溶出した高分子によるものではないといえる。

3.2 矩形管における乱流速度分布 速度分布の測定は PEO-15 の被覆に対して行った。測定レイノルズ数は、 $Re = 4000$ と 7500 であり、被覆面から非被覆面までの約 10 mm の平板間に渡って速度分布を測定した。図 9 は被覆無しのときの測定結果を示し、対数則領域に対する結果は Patel ら⁽⁸⁾による縦横比 48 の矩形管に対する結果とほぼ一致した。なお、速度分布の無次元化に用いた摩擦速度には前報⁽⁶⁾と同様に圧力損失から求めたずり応力を用いた。図 10 は $Re = 4000$ で被覆ありのときの結果を示す。被覆は片側の壁面に対してのみ行い、非被覆壁近くの遷移領域の速度分布は被覆なしのときの図 9 の結果とほぼ一致している。しかし、対数速度分布は被覆無しの場合より 4 % 上方へ平行移動し、この変化は約 4 % の抵抗低減効果を与える。また、被覆面近くの速度分布は粘性底層内で高い流速を示す。この粘性底層内での高い流速は壁面位置

Fig. 6 Pipe frictional factor for PEO-15 and PEO-27 coating.

Fig. 8 Pipe frictional factor for PEO-15 and PEO-27 solution.

の定義に起因すると考えられる。被覆面側の壁面の位置、すなわち図 10 の横軸原点は被覆無しのときの壁面位置に被覆厚さを加えた高さで定義した。この被覆厚さは高分子鎖の絡み合いを固体壁側へ押しつけることによって測定された値である。水中ではむしろ図 1 のような高分子鎖の絡み合いがその被覆厚さよりも高い位置にまで先端を伸ばす一方で、被覆厚さよりも低い位置であっても水は高分子鎖の絡み合いのすきまを通過して流れていると考えられる。したがって、被覆面側の原点で見かけ上すべり無し⁽⁹⁾の条件が満たされず、図 10 に示されるような粘性底層内での高い流速が生じていると考えられる。

図 11 は $Re = 7500$ で被覆ありのときの結果を示す。抵抗低減率はレイノルズ数が高くなるにつれて低くなり、図 7 に示すように $Re = 4000$ の場合よりも低い。図 11 の速度分布も $Re = 4000$ の場合に比べ低い u^+ の値を示し、図 9 の被覆無しの速度分布に近づいている。

図 10 の速度分布を横軸に $(y^+ - 3)$ をとって図 12 に示すと、粘性底層から遷移層の速度分布は被覆無しの場合に近づく。すなわち、被覆面での見かけのすべりは、速度分布に関しては原点が $y^+ \sim 3$ ($Re = 4000$ の

Fig. 9 Turbulent velocity profiles in the uncoated channel.

Fig. 10 Turbulent velocity profiles in the coated channel. Re = 4000.

Fig. 11 Turbulent velocity profiles in the coated channel. Re = 7500.

 Fig. 12 Turbulent velocity profiles as a function of y^+ and $(y^+ - 3)$.

とときで 0.17 mm) の高さだけ下の位置に移動したとみなすことができる。この y 座標原点の下方への移動は、被膜の有効厚さが薄くなり、流路の有効断面積が増加することに等しい。断面積の増加は、流速の低下をもたらす、圧力損失と管摩擦係数の低下をもたらす。一方、レイノルズ数は流速の低下と水力平均直径の増加がほぼ相殺するので変化しない。このような有効断面積の増加が矩形管における抵抗低減効果の一因と考えられる。断面積の変化は速度分布の原点移動 0.17 mm から推測すると約 2 % であり、これによる抵抗低減も約 2 % である。これと前述の対数速度分布の上方への移動による 4 % の抵抗低減との組み合わせが全体としての抵抗低減 6 % の原因と考えられる。対数速度分布の変化は溶液におけるトムズ効果にも生ずることが知られている。トムズ効果の場合にはポリマー溶液が壁面近傍の乱流構造を変化させることによりその速度分布の変化が生ずる。同じような乱流構造の変化が図 1(b) に示すような被覆によっても生じていると考えられる。

3.3 平板境界層流れにおける摩擦抗力の測定

平板摩擦抗力係数 C_f^* の測定結果を図 13 に示す。レイノルズ数の代表寸法 L は境界層の仮想原点から測定部までの距離であり、ここでは $L = 1.3 \text{ m}$ とした。測定は被覆なしの場合と、PEO-15 の被覆をした場合に対して行なった。PEO-15 の場合は、乱流域で抵抗低減が生じていないものの、遷移域ではわずかに抵抗低減が観察された。この抵抗低減は遷移の遅れによると推測されるが、荷重変換器の測定範囲が層流域の摩擦抵抗係数を測定できる範囲にまで及ばなかったため、遷移レイノルズ数の値は測定できなかった。Gad-el-Hak⁽⁹⁾ により解説されているように柔軟壁が乱流遷移を遅らせることはこれまでも良く知られている。また、小栗ら⁽¹⁰⁾ は壁面への繊維の植毛が境界層流れの遷移を遅らせることを報告している。図 1 に示される被覆高分子の水中での形態は植毛表面における繊維の形態と似ている。この意味では遷移域における抵抗低減

Fig. 13 Coefficient of skin friction as a function of Reynolds number in a boundary layer flow.

は小栗らが植毛平板に対して報告した遷移レイノルズ数の遅れと一致した結果を示しており、これらの抵抗低減効果は何らかの共通の原因に基づいていると推測される。

矩形管の場合に観察された低レイノルズ数における抵抗低減は平板境界層の場合に生じなかった。この理由として、矩形管の速度分布において被覆厚さがみかけ上薄くなり、管断面積が増す効果が平板境界層では抵抗低減をもたらさないことがあげられる。また、水中に伸びる被覆ポリマーは静水中ではその平均被覆厚さより 0.2mm 程度高い位置まで達する。測定平板が周囲の平板より突出すると図 4 に示すように過大な抗力を発生させるから、このような突出したポリマーが被覆平板先端と周囲平板との間で抗力増加をもたらすことも推測できる。このような被覆平板と周囲の平板との段差の影響は平板全体を被覆することにより除去することが可能かもしれない。本被覆法による抵抗低減率は実用的観点からはまだ十分なものとはいえず、より高い抵抗低減が得られるような工夫が今後さらに必要である。

4. 結論

1. 被覆高分子の分子量が矩形管の低レイノルズ数における抵抗低減に及ぼす影響を調べ、分子量 360 万近傍で最も高い効果が得られる結果を得た。
2. 矩形管における乱流速度分布の測定を行い、抵抗低減が生ずるときに対数速度分布切片の増加と粘性底層における速度の増加が観察された。
3. 平板境界層流れにおける高分子被覆による抵抗低減は遷移レイノルズ数域においてのみ生じ、矩形管のように低レイノルズ数の乱流では生じなかった。

終わりに、実験装置の試作にあたり協力していただいた本学工作施設の皆様に謝意を表します。

文献

1. Hoyt, J.W., Trans. ASME, J. Basic Eng., (1972), 258-285.
2. Virk, P.S., AIChE J. 21-4, (1975), 625-656.
3. Motier, J.F. and A.M. Carrier, DRAG REDUCTION IN FLUID FLOWS (1989), 197-204, Ellis Horwood Pub.
4. Motier, J.F., Chou, L-C., Harris, J. R. and Kommareddi, N., 12th European Drag Reduction Meeting (2002).
5. Kowalski, T, Proc. of the Int. Sym. on Seawater Drag Reduction (1998), 289-293.
6. 水沼 博, 江森 正憲, 上田 耕一, 機論, 65-629, B (1999), 174-178.
7. 望月信介, 大坂英雄, 機械の研究, 45-6 (1993), 684-690.
8. Patel, V.C. and Head, M.R., J. Fluid Mech. 36-1, (1969), 181-201.
9. Gad-el-Hak, M., Flow Control (1998), 28-29, Springer.
10. 小栗英美, 小濱泰昭, 機論, 64-625, B(1998), 2942-2949.

付録 - 境界層流れにおける摩擦抗力係数 C_f^* の定義

測定された平板摩擦抗力 D は平板全体ではなく、ワイヤーで吊り下げられた部分にのみ働く抗力である。したがって、単位幅幅あたり

$$D = \int_{x_f}^L \tau_w dx \quad (A1)$$

である。ここで x_f と L は各々測定平板の先端位置と後端位置である。境界層の乱流速度分布と摩擦公式に対してべき乗則を適用すると、測定平板に対する摩擦係数 c_f は次式により与えられる。

$$c_f = \frac{D}{\rho U^2 \cdot \ell_f} = 0.074 Re_L^{-0.2} \left\{ \frac{x_f}{\ell_f} + 1 - \frac{x_f}{\ell_f} \left(\frac{x_f}{L} \right)^{-0.2} \right\} \quad (A2)$$

ここで、 $\ell_f \equiv L - x_f$ である。一方、長さ L の平板全体に対するべき乗則は $C_f = 0.074 Re_L^{-0.2}$ である。測定平板に対して次式で定義される C_f^*

$$C_f^* = c_f / \left\{ \frac{x_f}{\ell_f} + 1 - \frac{x_f}{\ell_f} \left(\frac{x_f}{L} \right)^{-0.2} \right\} \quad (A3)$$

を用いると、この摩擦係数 C_f^* は平板全体に対する公式と同様、次式

$$C_f^* = 0.074 Re_L^{-0.2} \quad (A4)$$

に従うので、その摩擦抗力がべき乗則に比べどのように変化したかを調べるのに都合が良い。この目的で、式(A3)の C_f^* を用いた。