ポリマー溶液の壁面滲出による乱流摩擦抵抗低減

Turbulent Drag Reduction with Blowing Polymer Solution from the Wall

○正 本澤政明 (東理大) 正 岩本薫 (農工大) 正 安藤裕友 (海技研)
正 千田哲也 (海技研) 正 川口靖夫 (東理大)

Masaaki Motozawa, Tokyo University of Science, 2641 Yamazaki, Noda, Chiba
Kaoru Iwamoto, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16 Nakamachi, Koganei, Tokyo
Hirotomo Ando, National Maritime Research Institute, 6-38-1 Shinkawa, Mitaka, Tokyo
Tetsuya Senda, National Maritime Research Institute, 6-38-1 Shinkawa, Mitaka, Tokyo
Yasuo Kawaguchi, Tokyo University of Science, 2641 Yamazaki, Noda, Chiba

Experimental investigation on the turbulent drag reduction with blowing polymer solution from the permeable channel wall was performed. Measurement of the drag reduction has been carried out with changing condition of blowing polymer solution (e.g. blowing rate and concentration). As a result, obvious drag reduction was obtained with blowing polymer solution and the maximum drag reduction rate achieved about 20 %. In addition, it seems that there is close relationship between the drag reduction rate and the mass flux of polymer. Because it is the merit of wall blowing that polymer can exist in the whole near-wall region, we discussed the difference between our results (wall blowing) and the effect of slot injection. Based on these results, the effect of wall blowing polymer solution on the heterogeneous drag reduction was discussed.

Key Words: Drag reduction, Polymer solution, Wall blowing

1. 緒言

水流に水溶性ポリマーを微量添加することで、乱流壁面摩擦抵抗を大幅に低減させることができ、この現象はトムズ効果⁽¹⁾として知られている。ポリマーは壁面近傍の乱流構造に作用して、顕著な抵抗低減に結びつくものと考えられているので、もし壁面近傍のみにポリマーを供給出来れば、壁面摩擦抵抗の低減をより効果的に実現できるものと考えられる。ポリマー溶液の壁面滲出による抵抗低減効果が実証され応用に結びつけば、抵抗低減効果を得るのに必要なポリマー添加量を抑えられ、船舶などの外部流れに対しても応用できると考えられる。しかしながら、これまでスロットからのポリマー溶液吹き出しによる実験的研究は多くなされている⁽²⁾ものの、壁面滲出による研究はほとんどなされていない。

そこで、本研究では矩形水路内に設置した多孔質壁面から水流にポリマー溶液を微量滲出させ、乱流摩擦抵抗低減を精密に測定した。測定は、壁面からの滲出流量、ポリマー溶液濃度を変化させて行った。ポリマー溶液の壁面滲出による壁面摩擦抵抗低減効果から、壁面近傍に存在するポリマーと乱流構造との干渉について検討したので、ここに報告する。

2. 実験装置と実験方法

図1に実験装置の概略を示す。水路はポンプ駆動の循環型水路で、長さ6000mm、高さ(2h)40mm、幅500mmのチャンネルを有している。チャンネルには、ポリマー溶液滲出用の多孔質壁面が3面、静圧測定孔が4つ取り付けられている。それぞれの位置関係は、図1(b)に示す通りである。

ポリマー溶液滲出壁面は、公称ろ過精度2μm、450mm×450mmの焼結金属板を用いており、これを3面取り付け、定量ポンプにより滲出開始点から1450mm下流までポリマー溶液を多孔質壁面から一様に滲出する事ができる。滲出流量(Q)は、滲出壁面全体で0.5から2.5L/minまで可変である。滲出ポリマー溶液は、ポリエチレンオキシド(PEO)を主成分とするPOLYOX WSR-205 (Dow Chemical 社製)をイオン交換水によって、質量濃度(C)を5, 10, 25, 50, 100ppmの各濃度に調整したものを用いた。実験は、水路高さ(2h)、水路内平均流速に基づくレイノルズ数Re=50000で行った。なお、最大の滲出流量(2.5L/min)に対応する吹き出し速度比(滲

出流の速度と水路内平均速度の比)は0.00007であり、極めて小さいことからポリマー溶液の滲出そのものが、流れに与える影響は小さいものと考えられる。

壁面摩擦係数は、滲出開始地点x=0(port1)を基準として、その下流のx=550mm(port2)、x=1100mm(port3)、x=1650mm(port4)の地点における差圧を測定することで、3区間において求めることができる。抵抗低減率(DR)は、各区間の測定において、水流のみの壁面摩擦係数(C_f)とポリマー溶液滲出時の壁面摩擦係数(C_{f,p})を比較することで、次式により算出される。

$$DR = \frac{C_f - C_{f,p}}{C_f} \cdot 100 \% \quad (1)$$

Fig. 1 Experimental facility

Fig. 2 Polymer concentration dependence on DR

Fig. 3 Blowing rate dependence on DR

3. 結果と考察

3-1 壁面滲出による抵抗低減効果 各ポリマー濃度、滲出流量でポリマー溶液を壁面から滲出したときの抵抗低減率を図2, 図3に示す。抵抗低減率はPort1-4間で測定したものであり、図2は濃度依存性、図3は滲出流量への依存性を調べたものである。両図に示される通り、ポリマー溶液の壁面滲出により抵抗低減効果があることが実証された。この抵抗低減効果は高濃度のポリマー溶液、大きな滲出流量であるほど効果も大きいものの、ポリマー濃度50ppm、滲出流量2.0L/minで効果が上限を迎えた。

ポリマー溶液による抵抗低減効果については、バッファ層に存在するポリマーが乱流抑制に重要な役割を果たすと考えられている。壁面滲出による本結果を考えると、大きな滲出量、高濃度のポリマー溶液の滲出では、バッファ層内に高濃度にポリマーが存在することになり、このため、ポリマーの供給量を増やすことで抵抗低減効果は増加したものと考えられる。しかし、バッファ層域外のポリマーは抵抗低減にほとんど寄与しないと考えられ、さらにポリマー供給量を大きくすると、バッファ層域外にもポリマーが放出されてしまい、過剰に供給されたポリマーは有効に働かず、抵抗低減効果もそれ以上に増加しなかったものと考えられる。

3-2 ポリマー放出量と抵抗低減効果の関係 このように壁面滲出による抵抗低減は、滲出ポリマー濃度、滲出流量の両者に依存があり、どちらにも上限が存在したため、両者から算出されるポリマー放出量（質量流束） $\dot{m}$ を用いて、 $\dot{m}$ と抵抗低減率の関係を考える。 $\dot{m}$ は、滲出ポリマー濃度 C 、滲出流量 Q 、滲出壁面面積 S から $\dot{m}=CQ/S$ で与えられる。

図4にポリマー放出量と抵抗低減率の関係を示す。図に示されるように、抵抗低減率は一定の範囲でポリマー放出量に対し一価の関数となり、ポリマー放出量が大きくなると抵抗低減率も大きくなる。このことから、図中の点線で示した部分が、ポリマー滲出時に抵抗低減を得るのに最も効果的な滲出条件であると考えられる。

しかしながら、濃度一定でポリマー滲出量を増やしても抵抗低減は飽和し、点線からはずれる。これは、乱流抑制が必

Fig. 4 Relation between mass flux of polymer and DR

Fig. 5 Streamwise development of DR

要量のポリマーによって十分なされると、過剰なポリマーはそれ以上乱流渦には作用せず、むしろ弾性応力を増加させ、壁面摩擦が一定もしくは増加したものと考えられる。

図中の実線は、Hou ら⁽³⁾による壁面に設けたスロットからのポリマー溶液吹き出しの結果である。壁面滲出とスロット吹き出しとを比較すると、壁面滲出の方が、少ないポリマー放出量で高い抵抗低減効果が得られていることが分かる。

3-3 各区間における抵抗低減効果 本実験装置では、port1を基準として、port2, 3, 4 における抵抗低減率を測定できる。そこで、図5に滲出開始点から各区間における抵抗低減率を示す。図に示される通り、滲出開始点から下流へ行くほど、抵抗低減効果は大きくなるが、ある程度で上限を迎えた。しかしながら、図中実線で示すように、抵抗低減効果が上限を迎えても、下流に向けて、その効果を保持し続けている。壁面滲出の場合、下流でも壁面から一様にポリマーを供給し続けているためである。逆に、スロット吹き出しでは、下流でポリマーが拡散してしまい、このように抵抗低減効果を保持することが出来ない。この点も壁面滲出の利点であるといえる。この結果を考えると、滲出壁面が長ければ長いほど、トータルの抵抗低減効果は大きくなるため、船舶に応用できれば、大きな省エネ効果を生むことが期待される。

4. 結 言

ポリマー溶液の壁面滲出による抵抗低減効果を測定し、滲出量とその効果の関係を検討した。抵抗低減率はポリマー放出量で整理でき、抵抗低減を得るのに効果的な放出量が存在する。スロット吹き出しと比較して抵抗低減効果は大きく、ポリマー溶液の壁面滲出によって効果的に乱流壁面摩擦を制御できる可能性がある。最後に、本研究は NEDO の委託研究として実施したことを記し、謝意を表す。

引用文献

- (1) Toms, B. A., Proc. 1st Int. Cong. Rheology, (1948), 135-141.
- (2) White, C. M. et al., Annu. Rev. Fluid Mech., 40(2008), 235.
- (3) Hou, Y. X. et al., J. Fluid Mech., 597(2008), 31.