

東工大 正員 日野幹雄

○東工大院 学生員 大川秀雄

1. まえがき 単純液体に、微量の線状高分子を添加すると、管内流での乱流域における摩擦抵抗が著しく減少することが1948年トムズによって発見された。その後の研究から、高分子とその濃度を適当に選ぶと、管内流では80%もの抵抗減少が得られることが知られている。この現象はトムズ効果と呼ばれ、工学的応用上、また乱流とその発生機構という基礎的課題への解をさぐる手掛りとして、多くの分野で研究されている。その多くは、流れの微細構造を知るために、ホットフィルムやビトー管を使用しているが、良い結果が得られていない。そのため著者は流れの中に異物を全く入れずに、最も単純ではあるが、それゆえ正確なデータが得られる円管での抵抗を調べることにした。そのためレイノルズ数が2000前後の乱流と層流の遷移領域に注目して、小口径のガラス管にポリマーの稀溶液を流してヘッドロスと測定することによって明らかにされたことを述べてみたい。

2. 実験結果 図1はポリマー溶液のレイノルズ数 Re と抵抗係数 f の関係を示したものである。ただし粘性係数は水を用いた。これからわかるように、乱流領域では水よりも抵抗係数が小さくなって、トムズ効果が現れている。ポリマー稀溶液はかなりドロドロした溶液であるから、粘性係数を水と同じとは思えない。それでレオロジーで用いられるコンシステンシー変数を用いてその勾配から静止粘性係数を求め、その粘性係数でレイノルズ数 Re を計算したものを図2、図3に示す。これからわかるようにポリマー溶液は水のように層流から乱流へ急激に遷移するのではなく、徐々に遷移している。そして、層流からはずれ始めるレイノルズ数は1000あるいはそれ以下である。この点は、 $f Re = 64$ の層流の式と、 $\frac{1}{f} = 2 \log Re \sqrt{f} - 0.8$ の乱流の式との交点に一致している。

3. 考察 上記のことをさらに検討するために、円管内の速度分布における対数法則 $\frac{u}{u_k} = A_0 + 5.75 \log \frac{u_k r}{\nu}$

を積分して、平均流速 u_m に書き直した $\frac{u_m}{u_k} = A_0 - 3.75 + 5.75 \log \frac{u_k D}{\nu}$ (u_k : 摩擦速度, D : 管径)

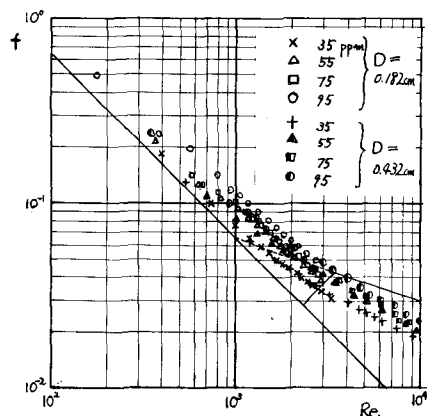


図 1

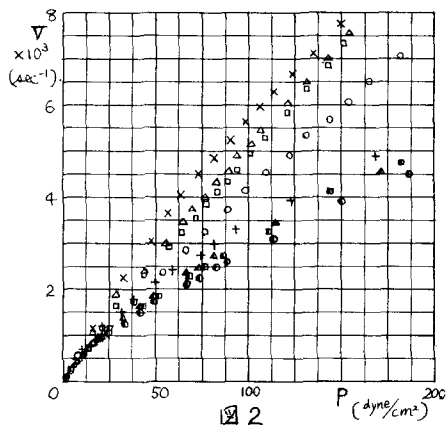


図 2

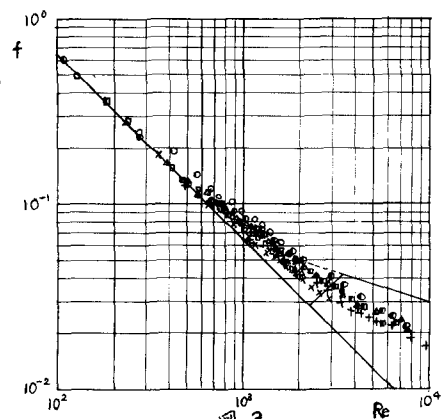


図 3

を用いて、 $\Delta A_s = A_s - 5.5 = \frac{U_{kr}}{U_*} - 1.75 - 5.75 \log \frac{U_* D}{\nu}$ より、 A_s が 5.5 と考えたときの ΔA_s と U_{kr} の関係を図4に示す。水ならば $\Delta A_s \approx 0$ であるが、ポリマー溶液では U_{kr} の増加とともに ΔA_s も増加する。それも $\Delta A_s = 0$ を境として、その勾配が少し違っている。また、 ΔA_s と Re のグラフ図5と合わせて考えると、レイノルズ数が1000以下で、普通の意味での層流からはずれ始めていることがわかった。なお、管径が小さいほどポリマー効果は大きいとされているが、図1では、

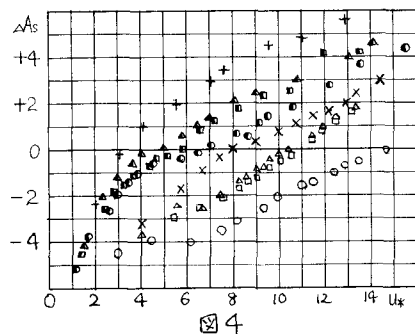


図4

顕著ではない。そしてポリマーの濃度が小さいのが抵抗係数は小さい。図4、図5では、濃度 C が大きくなるほど、また、管径 D が小さくなるほど右に (U_{kr} の増加方向) ずれている。次に、濃度 C と管径 D のトムズ効果に与える影響と $\frac{U_{\delta}}{U_*}$ について調べてみる。流速分布を $\frac{U}{U_*} = A_s + 5.75 \log \frac{U_* r}{\nu}$ (A_s が 5.5) で与えたとき、 $\frac{U}{U_*} = \frac{U_* r}{\nu}$ との交点、すなわち $\frac{U_{\delta}}{U_*} = \frac{U_* \delta}{\nu}$ (δ : 粘性底層厚さ, U_{δ} : 粘性底層上端の速度) と、 $\frac{D}{\sqrt{C}} U_{kr}$ とで整理したのが図6である。これによると、水の場合とは違って、 $\frac{U_{\delta}}{U_*} = 11.6$ ではなく、 U_{kr} の増加によ

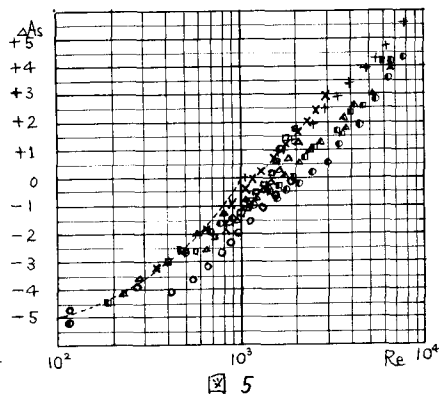


図5

て $\frac{U_{\delta}}{U_*}$ の値も大きくなっている。それで、 $\frac{U_{\delta}}{U_*} = \frac{U_* \delta}{\nu} = 11.6 \cdot f(U_{kr}; C, D)$ とおいて $\delta = \frac{11.6 \nu}{U_*} f(U_{kr}; C, D)$ として $f(U_{kr}; C, D)$ と $\frac{D}{\sqrt{C}} U_{kr}$ の関係を見ると図7のようになる。これによれば、 U_{kr} の増加にともなって $f(U_{kr}; C, D)$ も大きくなるので、粘性底層厚さ δ は、 U_{kr} の変化に対して、あまり変わらないと考えられる。ところで、 $\frac{D U_{kr}}{\sqrt{C}}$ と $\frac{U_* r}{\nu}$ の対応をみると、 $D \sim r$, $\sqrt{C} \sim \nu$ となっていることがわかる。 $\sqrt{C} \sim \nu$ については、 $C \rightarrow 1$ で $\nu \rightarrow \infty$, $C \rightarrow 0$ で $\nu \rightarrow \nu_w$

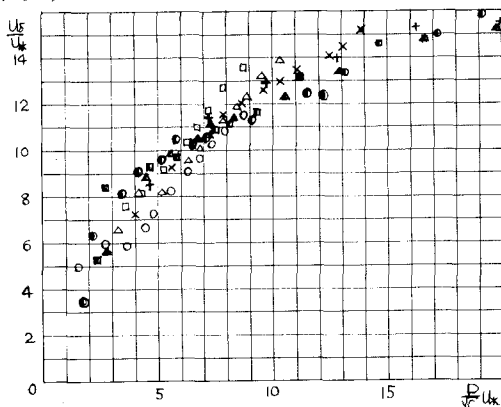


図6

(ν_w は水の動粘性係数) の特性を有していなくてはならない。二乗すると、 $\frac{D^2 U_{kr}^2}{C}$ となり、このうち $\frac{U_{kr}^2}{C}$ は、一個のポリマー分子が受ける壁面剪断力を意味していると考えられる。 D の意味については、まだはっきりとはしていないが、重要なパラメータである。

4. まとめ レイノルズ数が1000以下で層流からずれ始める。また、ポリマーの濃度 C と、管径 D は重要なパラメータであり、 $\frac{D}{\sqrt{C}}$ を使ってデータさうまくまとめることができた。

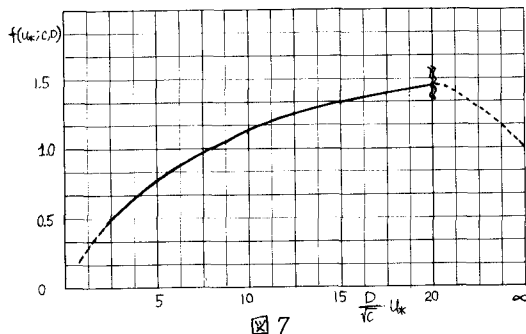


図7

参考文献 M. Reiner : レオロジーの基礎理論