

希薄高分子溶液の円管内流れにおける摩擦損失と圧力変動特性*

方 義*¹, 長谷川 富市*²
渡 辺 博*³, 鳴海 敬倫*²Drag Reduction and Pressure Fluctuation
of Dilute Polymer Solutions in Pipe FlowYi FANG, Tomiichi HASEGAWA,
Hiroshi WATANABE and Takatsune NARUMI

Measurement of drag reduction and frequency analysis of the wall pressure fluctuation in pipe flow are carried out using dilute polymer solutions and aqueous detergent solutions in order to discuss the correlation between drag reduction and pressure fluctuation. Frequency analysis indicates that the power spectrum density of the pressure fluctuation of dilute polymer solutions is greater in the low frequency region and less above 30[Hz] than that of water (solvent). Moreover, the level of pressure fluctuation in dilute polymer solutions is on the whole greater than that in water.

Key Words: Non-Newtonian Fluid, Pipe Flow, Turbulent Flow, Drag Reduction, Pressure Fluctuation, Power Spectrum

1. 緒 言

高分子や界面活性剤などを微量添加した溶液は乱流状態において流動摩擦抵抗の著しい減少を示すことがよく知られている。これまでこの現象について、摩擦抵抗の実験のほか、平均流速や乱れ強さなどの測定がおもに円管流や二次元チャンネルにおける流れについて行われた^{(1)~(14)}。ここで、管内乱流で摩擦抵抗減少効果を生じている流れの主流方向の速度変動については、現在まで次のような報告がある。(1)乱流摩擦抵抗減少効果を生じている流れの主流方向の速度変動は、溶媒である水に比較し、特に壁近傍で増大する⁽¹²⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁰⁾。(2)乱流摩擦抵抗減少効果を生じている流れの主流方向の速度変動は、溶媒である水に比較し、減少する⁽¹⁷⁾。(3)乱流摩擦抵抗減少効果を生じている流れの主流方向の速度変動は、溶媒である水に比較し、大きな差は見られない⁽¹⁴⁾。このように、現在までの研究成果を見ると速度変動は、高分子種類、実験条件、測定方法、管内断面における測定位置、等の違いによって異なっ

た値を示すと考えることができる。

一方、円管内流れの圧力変動特性については著者らの知る限り詳細な報告はほとんどなく、不明な点が多く残されている。壁面における圧力変動は、摩擦抵抗に密接にかかわる壁近くの速度変動を反映している⁽¹⁵⁾ため壁面近傍の流れ解析上重要である。また、実験的にも圧力の測定は、速度変動の測定に比較し、安価な計測器および簡単な装置で手軽に行うことができること、広範囲の液体を対象とすることが可能なこと、流路のサイズに制限されず小寸法の流路にも対応することなどの利点を有する。

本研究では、内径1cm以下の3種類の管を用いて圧力損失を測定し管摩擦係数を求める。次にそのうちの一つの管について管壁における静圧変動を測定し、周波数解析を行い、その圧力変動特性と管摩擦抵抗減少との相関性について検討する。

2. 主要記号

D : 管の直径

f : 周波数

L : 圧力測定孔間距離

$P(f)$: パワースペクトル密度

p : 圧力

* 原稿受付 1995年8月16日。

*¹ 正員、新潟大学大学院自然科学研究科 (〒950 21 新潟市五十嵐2の町8050)。

*² 正員、新潟大学工学部。

*³ 准員、新潟大学大学院。

d_{rms} : 圧力変動の rms 値

Δp : 圧力損失

Re : レイノルズ数 $= UD/\nu$

t : 時間

U : 管断面平均流速

λ : 管摩擦係数 $= 2\Delta p D / L \rho U^2$

ν : 動粘度

ρ : 密度

3. 実験装置および使用流体

実験装置の概要を図1に示す。管摩擦損失の測定では、溶液タンクに畜えられた試験流体を空気圧により加圧し、流量調節バルブを経て水平管内を通過させ大気中に放出する。流量測定は重量法により行う。供試管は内径 $D=5.92, 4.00, 2.01$ mm の3種類のステンレスおよび銅製引抜管であり、それらには直径 $0.3\sim 0.5$ mm の静圧孔がつけられている。静圧孔間の差圧は差圧計(豊田工機製拡散形半導体差圧変換器 DD 102 A)により測定され、その信号はアンプで増幅した後マルチメータにより 25 s 100 点平均で出力する。一方、圧力変動の測定では、バルブの開閉による圧力変動への影響を除くため、バルブを通じた供試流体をいったんサージタンク内に導き乱れを減衰させた後、供試管内を流し大気中に放出する。流量は管摩擦損失測定時と同様に重量法で測定する。圧力変動の測定には $D=4.00$ mm の管のみを用いる。波形解析には管壁に取付けられた圧力センサ(豊田工機製半導体圧力変換器 PMS 5 0.5 H, 固有振動数: 10 kHz)の出力を A/D 変換してデータレコーダに記録し、パーソナルコンピュータを用いて周波数解析を行う。

実験に使用する溶液は、(1)水道水、(2)高分子ポ

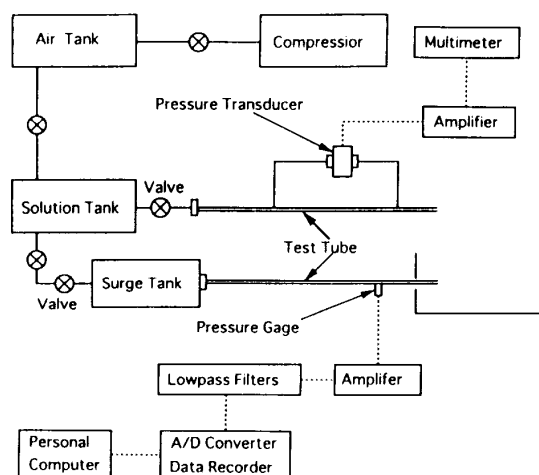
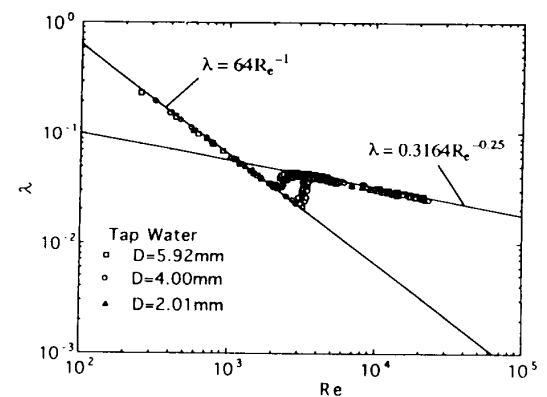
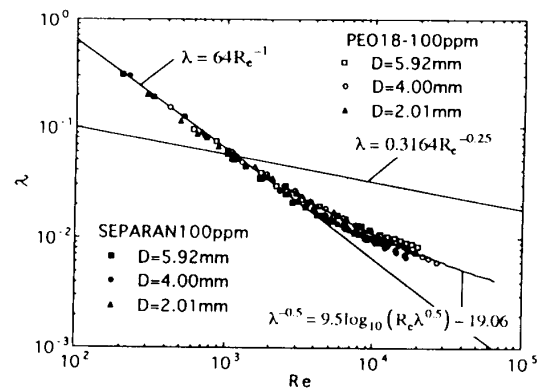


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

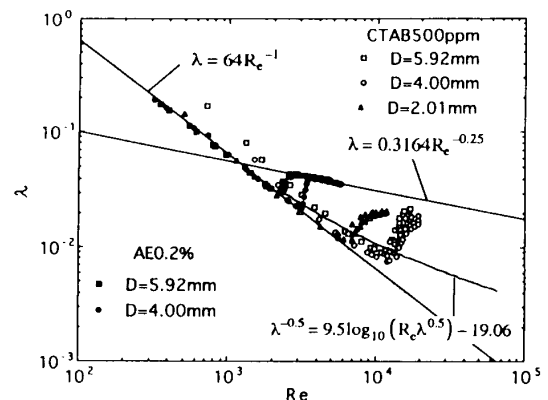
リエチレンオキサイド PEO-18 の 100 ppm 水溶液、(3)高分子ポリアクリルアミド SEPARAN AP 30 の 100 ppm 水溶液、(4)非イオン系界面活性剤ポリオキシエチレンラウリルエーテル AE の 0.1%, 0.2% 水溶液、(5)陽イオン系界面活性剤臭化ヘキサデシルトリメチルアンモニウム CTAB の 500 ppm 水溶液にサリチル酸ナトリウム NaSal をモル比率 1:1.5 で加えた水溶液で、合計 5 種類である。なお PEO 18, SEPARAN は長い鎖状をしており大きなずりをあたえると鎖が切れて永久的な劣化するため、いったん使用した溶液は再度使用することなく廃棄した。



(a)



(b)



(c)

Fig. 2 Friction factor λ

4. 実験結果および考察

4.1 管摩擦係数 図2(a)に溶媒である水道水の管摩擦係数の測定結果を示す。水道水はニュートン流体の層流に対する理論式 $\lambda=64Re^{-1}$ および乱流についての Blasius の実験式 $\lambda=0.3164Re^{-0.25}$ とほぼ一致していることから本装置による測定は正常に行われていることがわかる。PEO-18 100 ppm および SEPARAN 100 ppm 水溶液についての測定結果を図2(b)に示す。また希薄高分子溶液の円管流における最大摩擦係数減少漸近線 $[\lambda^{-0.5}=9.5 \log_{10}(Re\lambda^{0.5})-19.06]$ ⁽³⁾ も図2(b)に示す。図2(b)から乱流状態において PEO-18 100 ppm, SEPARAN 100 ppm 水溶液の管摩擦係数は溶媒の水よりかなり低く、また最大摩擦係数減少漸近線とほぼ一致していることがわかる。一方、図2(c)に AE 0.2% と CTAB 500 ppm 水溶液の管摩擦係数を示す。図2(c)から AE 0.2% 水溶液は水とほとんどかわらず、CTAB 500 ppm 水溶液は $Re=6000\sim 10000$ において水の遷移と類似した管摩擦係数の上昇を示す。以上のように、乱流状態において AE 0.2% 水溶液を除いていずれの溶液も溶媒である水より低い管摩擦係数を示している。

4.2 圧力変動特性 各試験溶液に対して水より

低い管摩擦係数を示すレイノルズ数領域において管壁の圧力変動を測定し、それらの特性を調べることにする。なお、測定時においてノイズの平均値はおよそ圧力変動値の 1/100 程度である。図3(a)~(e)にそれぞれレイノルズ数 $Re=10000, 20000$ 時における圧力変動波形例を水道水, PEO-18 100 ppm, SEPARAN 100 ppm, AE 0.1%, CTAB 500 ppm 水溶液について示す。図3からわかるように、水は相対的に高周波数成分が比較的多く含まれているのに対して、PEO-18 100 ppm および SEPARAN 100 ppm 水溶液は水に比べて低周波数の変動成分が卓越し、しかも全体的に圧力変動レベルが高い(図のスケールの違いに注

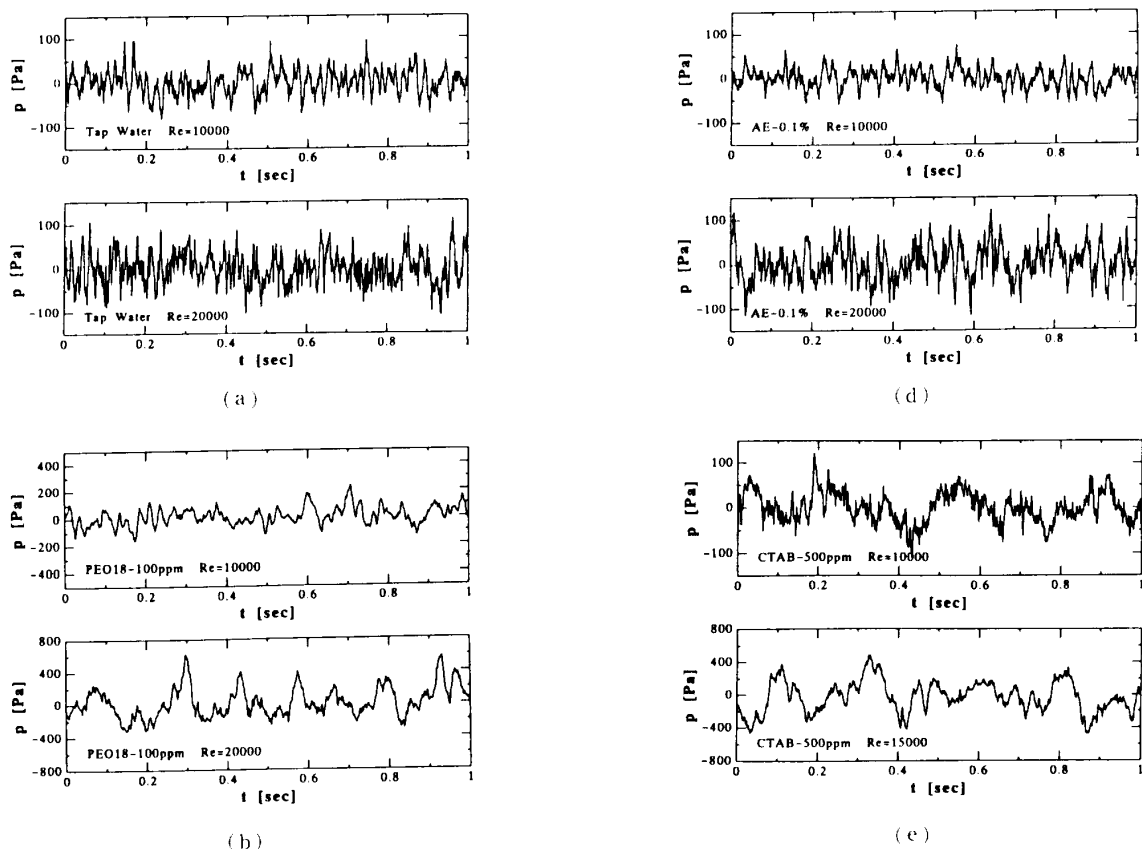


Fig. 3 Pressure fluctuation

意)。またレイノルズ数 $Re = 10\,000$ 時より $Re = 20\,000$ 時の圧力変動がかなり大きいことがわかる。AE 0.1% 水溶液は水とほとんど変わらず、CTAB 500 ppm 水溶液の場合は $Re = 10\,000$ において水と同様な高周波数成分を含むのに対して $Re = 15\,000$ で高分子水溶液に近い圧力変動特性を示している。

上述の圧力変動の時系列信号をパーソナルコンピュータに取り込んで周波数解析を行い、圧力変動のパワースペクトル分布を求める。図 4(a), (b)にはそれぞれレイノルズ数 $Re = 10\,000$, $20\,000$ における水道水、PEO-18 100 ppm, SEPARAN 100 ppm, AE 0.1%, CTAB 500 ppm 水溶液についての圧力変動パワースペクトル分布を示す。横軸は周波数 f [Hz], 縦軸は圧力変動パワースペクトル分布 $P(f)$ を圧力変動の rms 値 p_{rms} で除したものである。水の場合 $Re = 20\,000$ において慣性小領域の存在を示すと思われる $P(f) \propto f^{-5/3}$ が現れている。PEO-18 100 ppm と SEPARAN 100 ppm 水溶液の場合は、低周波数域において溶媒である水よりパワー密度が高くなっているのに対して 30 Hz を過ぎた高周波数域において逆に水より下がる傾向を示している。この傾向は SEPARAN 100

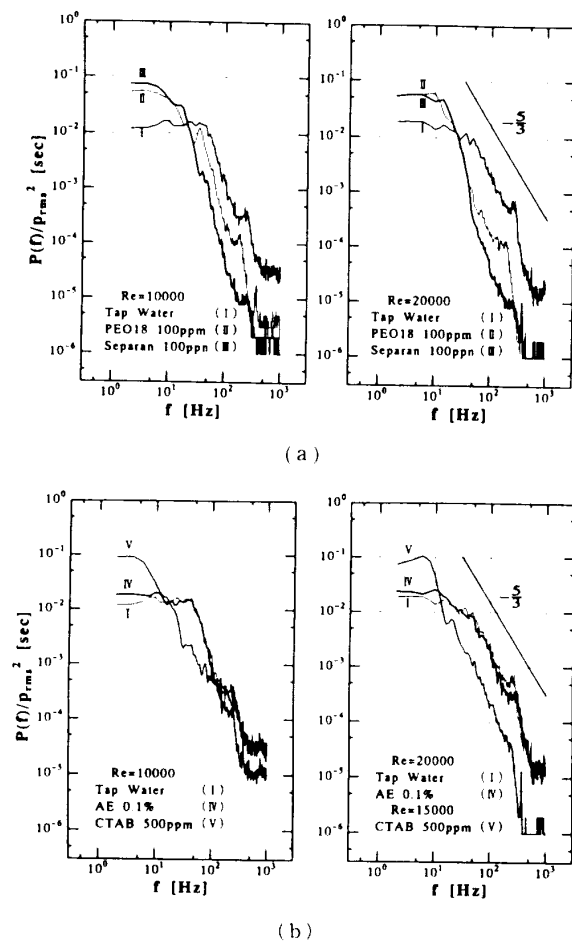


Fig. 4 Power spectrum of pressure fluctuation

ppm 水溶液に最も顕著に現れている。Allan ら⁽¹⁰⁾ は本論文と同種の希薄高分子水溶液について管壁近くの乱流速度変動を測定し、一次元エネルギースペクトルを求めた。その結果によれば、比較的高い濃度 (PEO > 100 ppm, SEPARAN > 50 ppm) で、速度変動エネルギーが低波数域においては水より大きくなるけれども、高波数域においては減衰を示し、また SEPARAN 水溶液の高波数域における減衰は PEO より顕著である。これは本研究の管壁圧力変動周波数特性の結果と定性的に一致している。一方、AE 0.1% 水溶液では全周波数領域において水とほとんど変わらない。また、CTAB 500 ppm 水溶液は $Re = 10\,000$ 時低周波数領域において高いパワー密度を示すのに対して高周波数領域においては水に近い値を示し、 $Re = 15\,000$ では PEO-18 100 ppm および SEPARAN 100 ppm 水溶液と同様な傾向を示している。

各試験溶液の圧力変動の大きさを定量的に示すために圧力変動強さ(すなわち圧力変動の rms 値)を図 5(a)(水道水, PEO-18 100 ppm, SEPARAN 100 ppm 水溶液), (b)(水道水, AE 0.1%, CTAB 500 ppm 水溶液)に示す。横軸にレイノルズ数, 縦軸に圧力変動強さ(rms 値)をとっている。図 5 において点線を示す領域は遷移区間を表す。AE 0.1% 水溶液が水とほぼ同じ値を示すのを除いて、ほかの水溶液ではすべてレイノルズ数が大きくなるにつれ、全体的に圧力変

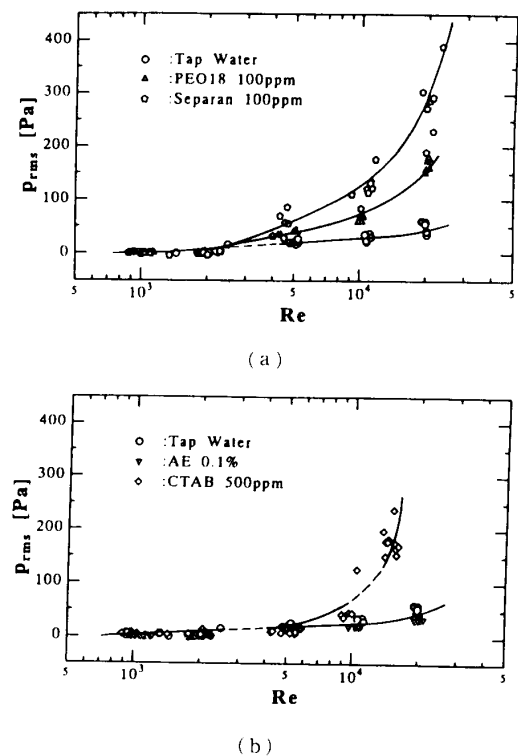


Fig. 5 RMS value of pressure fluctuation

動レベルの増大が見られる。また、濃度が同じでも SEPARAN 100 ppm 水溶液のほうが PEO-18 100 ppm 水溶液より大きい値を示していることがわかる。

ここで、圧力変動特性と管摩擦抵抗の減少との相関性について考える。共に大きな管摩擦抵抗の減少を示す高分子 PEO と SEPARAN 水溶液は図 4 のように似た周波数特性を示す。しかも全レイノルズ数範囲において管摩擦抵抗の減少の割合が大きくなるにつれて、圧力変動強さが増大している(図 5)。ここでさらに詳細に図 2(b)を見ると、SEPARAN 水溶液の管摩擦係数 λ は PEO 水溶液より若干低いことが確認でき、それに対応させて図 5(a)を見ると圧力変動強さは SEPARAN 水溶液のほうが PEO より大きい値を示している。また、AE 水溶液は管摩擦抵抗の低減がほとんど見られないことに対応して、圧力変動特性も水と酷似している。ただし CTAB 水溶液は $Re=10\,000$ 前後で遷移状態にあるため圧力変動は不安定で、管摩擦抵抗の低減との対応関係はわかりにくい。このように圧力変動の増大と管摩擦抵抗の減少との間にはある程度の相関関係があると思われる。また、圧力変動が壁近くの速度変動を反映しているとすれば、上記の結果は第 1 章で速度変動に関して述べた(1)を支持していることになる。これについては概略以下のように考えることができよう。高分子溶液の管内流れをばねのような弾性を含んだ流体の流れと考えるとばねの固有振動数付近の周波数の乱れはおもにばねを振動させるため減衰が遅くなり、相対的にその周波数の乱れ成分が卓越することになる。しかし、ばねが振動していてもエネルギーの散逸はないため、速度変動が大きくとも摩擦抵抗は減少することになる。今後はこの考えに基づいた理論解析を行う必要がある。

5. 結 言

本研究において円管内流れについて摩擦抵抗減少の

原因および流動機構を解明するため、直径 1 cm 以下の 3 種類の管を用いて圧力損失を測定し管摩擦係数を求めた。また 1 種類の管について管壁における静圧変動を測定して周波数解析を行った。その結果、界面活性剤 AE の水溶液は管摩擦係数および圧力変動について水と同じ値を示すけれども、高分子である PEO-18 100 ppm, SEPARAN 100 ppm, 界面活性剤である CTAB 500 ppm 水溶液の各試験溶液は管摩擦減少効果を示し、その圧力変動パワースペクトルについては水より相対的に低周波数域におけるエネルギーの含有率が高く 30 Hz を過ぎた高周波数域において逆に水より下がる傾向を示し、さらに、全体の圧力変動強さは水より大きいことが明らかとなった。

文 献

- (1) Virk, P. S., ほか 3 名, (Eskinazi, S., 編), *Modern Development in the Mechanics of Continua*, (1966), 37-52, Academic Press.
- (2) Seyer, F. A. and Metzner, A. B., *Can. J. Chem. Eng.*, **45** (1967), 121-126.
- (3) Virk, P. S., *AIChEJ.*, **21**-4(1975), 625-656.
- (4) 長谷川富市・富田幸雄, 機論, **35**-274(1969), 1277-1284.
- (5) 富田幸雄, 機論, **35** 279(1969), 2243-2250.
- (6) 長谷川富市・ほか 2 名, 機論, **38** 305(1972), 166-176.
- (7) 長谷川富市・富田幸雄, 機論, **39** 321(1973), 1542-1552.
- (8) Goren, Y. and Norbury, J. F., *Trans. ASME, Ser. D*, **89**-4(1967), 814-822.
- (9) 富田幸雄, 機論, **35** 279(1969), 2251-2258.
- (10) Allan, J. J., ほか 2 名, *J. Phys. D*, **17** 3(1984), 533-549.
- (11) Wells, C. S., Jr., ほか 2 名, *AIAA J.*, **6**-2(1968), 250-257.
- (12) Virk, P. S., ほか 4 名, *J. Fluid Mech.*, **30** 2(1967), 305-328.
- (13) Mizushima, T. and Usui, H., *Phys. Fluids*, **20**-10(1977), 100-108.
- (14) Wei, T. and Willmarth, W. W., *J. Fluid Mech.*, **245** (1992), 619-641.
- (15) Hinze, J. O., *Turbulence*, 2nd, (1975), 673-680, McGraw-Hill.
- (16) Rudd, M. J., *J. Fluid Mech.*, **51**(1972), 673-685.
- (17) Seyer, F. A. and Metzner, A. B., *AIChEJ.*, **15** 3(1969), 426-434.