

界面活性剤添加水溶液の管内流動抵抗軽減と熱伝達*

稲葉 英 男*¹, 尾崎 公 一*¹
春木 直 人*², 浅野 秀 昭*²Flow Resistance and Heat Transfer Characteristics
of Water Solution Flow with Surfactant in Circular TubesHideo INABA, Koichi OZAKI,
Naoto HARUKI and Hideaki ASANO

The reduction characteristics of flow resistance and heat transfer of water solution flow with the surfactant (Cetyltrimethyl-ammonium Bromide) in tubes were investigated experimentally. The flow resistance and heat transfer of water solution flow with the surfactant were markedly reduced as compared with those of pure water flow. Useful nondimensional correlative equations of flow resistance and heat transfer were derived in terms of various non-dimensional parameters.

Key Words: Non-Newtonian Fluid, Flow-Drag Reduction, Convection Heat Transfer, Surfactant, Circular Tube.

1. 緒言

近年、熱エネルギーの効率的な管内輸送手段として、温冷水にある種の鎖状高分子や界面活性剤を添加し、その管内圧力損失の低減効果(トムズ効果)を利用する試みが注目されている。トムズ効果は、数～数十ppm程度の鎖状高分子や界面活性剤を水に添加することにより、管内流動抵抗軽減効果を意味し、管内輸送において、摩擦損失の減少による流量増加やポンプ動力の減少が期待できる。このトムズ効果のメカニズムは、添加した鎖状高分子が糸巻き状(ランダムコイル状)となって流体中に混合し、そのランダムコイルが乱流渦の発生や発達を抑制することとされている⁽¹⁾。一方、ある種の界面活性剤は、その添加濃度を増大すると棒状のミセル構造を形成し、鎖状高分子のランダムコイルと同じ働きをされると言われている⁽²⁾。トムズ効果を期待できる界面活性剤として、カチオン系界面活性剤である臭化セチルトリメチルアンモニウム(略して、CTAB:分子量364.46, 図1参照)を添加した水溶液の場合には、高分子系のものと比較して、せん断力による劣化が少なく、循環系への利用に適していると考えられる。しかしながら、CTAB水溶液のような界面活性剤を添加した場合には、トムズ効果が有効に作用するには、ミセル構造の形成に関係する温度範囲が存在し、その使用条件に限られる。また、一般に非ニュートン流体であるため、その特性の解明には困難さを伴うものである。本研究は、高分子水溶液としてポリエチレングリコール(略して、PEG:平均分子量約200万)、そして界面活性剤水溶液としてCTABを使用し、両水溶液の粘性特性を明らかにした後、PEG水溶液のトムズ効果の検討を行う。さらに、円管におけるCTAB水溶液の管摩擦係数や熱伝達率に影響を及ぼ

す諸因子の効果を実測し、この種の界面活性剤の流動抵抗軽減および熱伝達特性を解明するものである。

主な記号

A: 伝熱面積, C: 質量濃度, C_p: 比熱, DR: 流動抵抗減少率, HDR: 熱伝達減少率, K: 見かけの粘度, Nu: ヌセルト数, Pr': 修正プラントル数, Q: 熱量, Re': 修正レイノルズ数, T: 温度, V: 管内平均流速, d: 管内径, d_o: 管外径, ℓ: 試験部長さ, n: 指数,

ギリシア文字

α: 熱伝達率, γ: せん断速度, ρ: 密度, τ: せん断応力, λ: 管摩擦係数, κ: 熱伝導率, μ: 粘性係数,

添字

c: 臭化セチルトリメチルアンモニウム, h: ヒーター, i: 管分割, k: 高分子, ℓ: 損失, p: ポリエチレングリコール, w: 水, w': 管壁基準,

2. 実験装置および方法

本試験流体であるPEG水溶液は、水にPEGを所定の濃度で溶解させて作成した。また、CTAB水溶液は、ミセル形成促進のために、CTABの他に、CTABの反対イオンであるサリチル酸ナトリウム(図1)を、CTABと同じ質量で水に添加することで作成した。

CTAB水溶液用の実験装置の概要を図2に示す⁽⁴⁾。実験装置は、流動抵抗、および熱伝達測定用試験部と、管内流動動力源である遠心ポンプ、それらの要素をつなぐ配管系から構成されている。試験流体は貯蔵タンク内にて、冷凍機により冷却されたブラインによって、任意の温度に制御可能である。その試験流体の温度は、各測定部出入口に設置されたT型熱電対にて測定した。

このうち、流動抵抗測定用試験部は、長さℓ=1~6m、内径d=5.7, 9.4, 16, 25, 40, 50mmにわたる6種類の塩化ビニル製およびステンレス製の滑らかな円管を使用し、試験部入口上流には同じ内径の十分な長さの助走区間

* 原稿受付 1995年2月20日。

*¹ 正員, 岡山大学工学部 (〒700 岡山市津島中3-1-1)。*² 学生員, 岡山大学大学院。

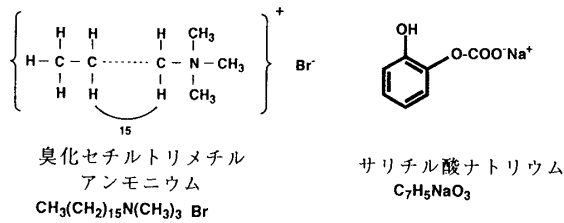


図1 臭化セチルトリメチルアンモニウムとサリチル酸ナトリウムの化学式

を設け、試験部入口にて十分発達した流れとしている。この試験部の出入口の圧力降下は、出入口に設置した圧力タップ(穴径2.5 mm)に接続した高精度圧力トランスジューサを介して自動記録されるようになっている。圧力測定システムの測定精度は、圧力トランスジューサの測定精度 $\pm 1.0\%$ を考慮すると $\pm 3.0\%$ と推定される。

図3は、熱伝達測定用伝熱試験部の詳細を示したものである。同試験部は、前報⁽³⁾で使用したものであり、ここでは、その概要のみ述べる。熱伝達測定用伝熱試験部は、内径 $d = 16 \text{ mm}$ 、外径 $d_o = 20 \text{ mm}$ 、長さ $\ell = 2 \text{ m}$ の銅管で、長さ ℓ を12区間にしてガラス繊維被覆マンガニ線ヒータを巻き、各ヒータ出力を調整することによって各区間の管壁温度を一定に制御し、等温加熱壁条件を得た。各区間の伝熱面温度 T_w は、銅管の分割区間中央に設けた深さ1.8 mm、直径0.5 mmの溝に埋め込まれたT型熱電対で測定した。さらに、ヒータ固定用の耐熱アスベストロープ(直径約1 mm)、グラスウール保温材(厚さ50 mm)、防水膜付きウレタン保温筒(厚さ50 mm)をヒータ外側に配置し、各ヒータからの熱損失軽減と試験部保護を行っている。熱損失の程度は、あらかじめ予備実験を行った結果、最大4.6%であり、比較的熱損失の少ない伝熱試験部とすることができた。円管伝熱面の熱伝達率 α は、次式(1)で求められる。

$$\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Q_i / (\Delta T_i \cdot A_i)] \dots \dots \dots (1)$$

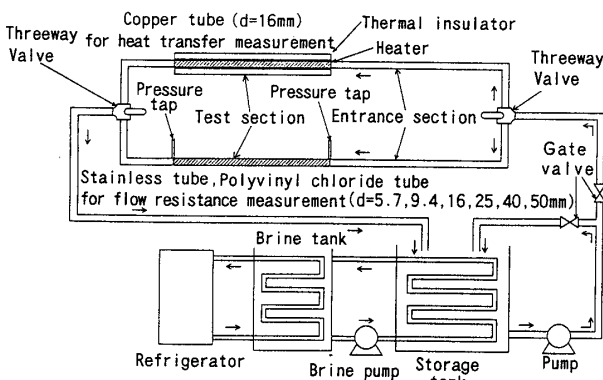


図2 実験装置の概要

ここで、 Q_i は各分割部における正味伝達熱量(ヒータ出力 Q_{hi} - 熱損失 Q_{ei})、 ΔT_i は各伝熱面温度 T_w と流体の混合平均温度の差、 A_i は各伝熱面積、添字 i は各伝熱面要素である。

また、PEG水溶液の実験装置の概略図を図4に示す。PEG水溶液の実験は、試験流体のポンプ等のせん断流れの強い部分での鎖状構造の切断による劣化を考慮して、ポンプを配置しない実験系とした。まず、試験部上部に設置した上部タンク内に作製したPEG水溶液を貯蔵し、そのタンク内のPEG水溶液が試験部を流動し、試験部下部の下部タンクに全て移動する流動系とした。下部タンクに移動した試験水は、容器に移し、その後手で上部タンクへ静かに移動した。この一回の流動を、実験回数一回として数回の実験を行い、流動抵抗軽減の効果を検討した。なお、PEG水溶液の実験に使用した流動抵抗試験部は、図2に示したCTAB水溶液の試験部の内径 $d = 16 \text{ mm}$ と同じものを使用した。

CTAB水溶液の流動抵抗実験は、そのトムズ効果が十分に作用する温度として、試験部入口水温を 20°C に調整し、各試験部の内径毎に濃度、および管内平均流速をパラメータとして行った。

また、伝熱実験は、試験部入口水温を $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ に調

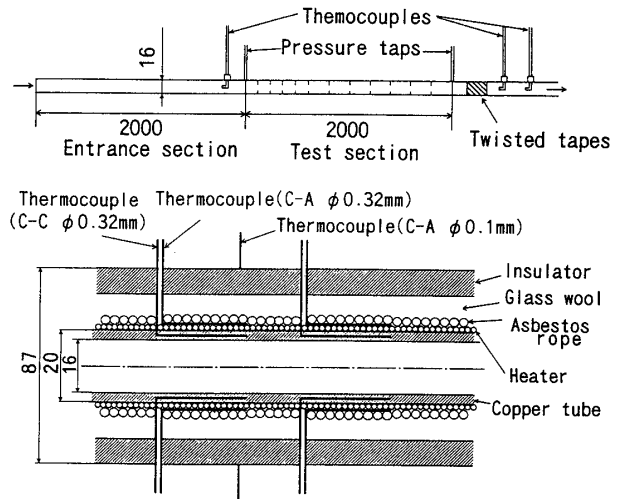


図3 伝熱試験部の概要とその詳細

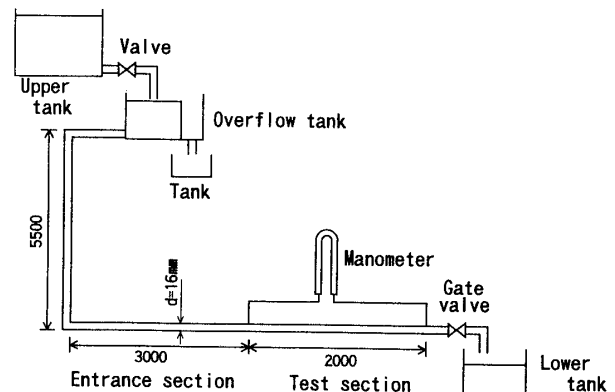


図4 PEG水溶液用流動抵抗測定装置概要

整し、銅管壁温度を 22°C 一定の条件にし、濃度および管内平均流速をパラメータとして行った。いずれの実験に関しても、実験前そして終了後に試験流体の濃度測定を、JIS K 0101 にもとずき分光光度計にて行った。

一方、PEG 水溶液の実験は、試験部入口温度を 20°C 一定とし、実験回数をパラメータとして行った。

3. 流動抵抗軽減剤の添加水溶液の粘性測定

PEG および CTAB 水溶液の粘性測定を、回転粘度計および細管粘度計により行った。測定に使用した回転および細管粘度計をあらかじめ蒸留水により検定を行った。蒸留水の測定粘度の値は、回転粘度計で ±1.9%、そして細管粘度計で ±3.14% 以内で文献値⁽⁶⁾と一致し、両粘度計の測定精度は十分と判断した。図 5 は、PEG 濃度 $C_p = 10$ ppm および蒸留水(水温 $T_w = 25^\circ\text{C}$)のせん断応力 τ_p とせん断速度 γ_p の関係で、測定結果を水溶液温度 T_p をパラメータとして示したものである。PEG 水溶液の τ_p と γ_p は、直線的な比例関係とはならず、非ニュートン挙動を示す。また、蒸留水の測定結果と比較した場合(25°C)、せん断速度 γ 一定の条件では、PEG 水溶液の粘度は大きなものとなる。PEG 水溶液のせん断応力 τ_p は、次式(2)に示すべき乗則近似により、せん断速度 γ_p の関係として、標準偏差 ±6.3% 以内で近似できる。

$$\tau_p = K_p \cdot \gamma_p^{n_p} \dots \dots \dots (2)$$

$$n_p = 0.770 - 3.59 \times 10^{-3} T_p + 2.64 \times 10^{-4} T_p^2$$

$$K_p = 4.51 \times 10^{-3} - 1.07 \times 10^{-4} T_p \quad (\text{mPa} \cdot \text{s}^n)$$

適用範囲: $T_p = 10 \sim 25^\circ\text{C}$ $\gamma_p = 1.81 \sim 72.41$ (1/s)

図 6 は、CTAB 水溶液および蒸留水のせん断応力 τ_c とせん断速度 γ_c の関係を、水温 20°C で CTAB 濃度 C_c をパ

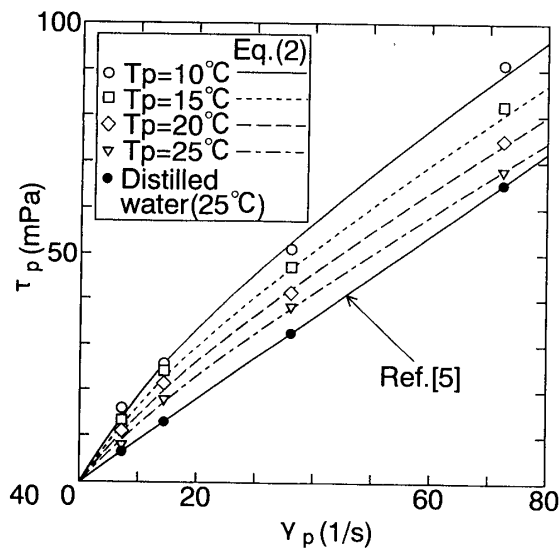


図 5 PEG 水溶液のせん断応力 τ_p とせん断速度 γ_p の関係

ラメータとして示したものである。CTAB 水溶液の粘性も、非ニュートン挙動を示すことがわかる。さらにせん断速度 γ 一定の条件において、 C_c の増加に伴い大きな τ の値となり、非ニュートン性の増大となる。CTAB 水溶液のせん断応力 τ_c をべき乗則により、測定値を標準偏差 ±9.5 以内にて次式(3)にて近似した。

$$\tau_c = K_c \cdot \gamma_c^{n_c} \dots \dots \dots (3)$$

$$n_c = 0.707$$

$$K_c = 4.41 \times 10^{-3} + 4.74 \times 10^{-5} C_c + 2.57 \times 10^{-7} C_c^2 (\text{mPa} \cdot \text{s}^n)$$

適用範囲: $C_c = 50 \sim 300$ ppm $\gamma_c = 1.81 \sim 72.41$ (1/s)

4. 実験結果および考察

4.1 管内流動抵抗

4.1.1 PEG 水溶液

図 7 は、内径 $d = 16$ mm の直管において測定された水および PEG 水溶液(PEG 濃度 $C_p = 10$ ppm)の管摩擦係数 λ と、修正レイノルズ数 Re' の関係で、PEG 水溶液の実験回数をパラメータとして示したものである。ここで、修正レイノルズ数 Re' は、式(2)で表された PEG 水溶液の非ニュートン特性を用いた次式(4)で定義される⁽⁵⁾。

$$Re' = 8^{1-n} \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^{-n} \left(\frac{\rho V^2 d^n}{K} \right) \dots \dots \dots (4)$$

ニュートン流体である水の場合は $n = 1$ となるため、式(4)は通常のレイノルズ数の定義式となる。従って、式(4)で、ニュートンおよび非ニュートン流体の流れ状態を同一のグラフで取り扱うことが可能である。

また、図中の実線で示される式(5)、式(6)は、十分発達した円管内層流の理論式、および円管内乱流に関する Blasius の実験式を示す⁽⁶⁾。

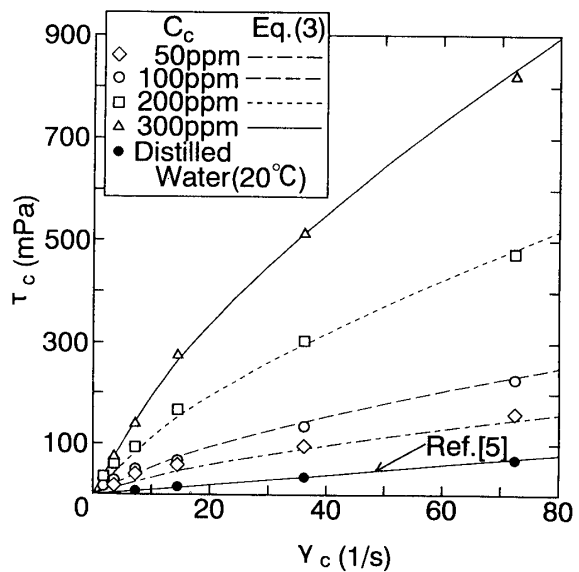


図 6 CTAB 水溶液のせん断応力 τ_c とせん断速度 γ_c の関係

$$\lambda = 64/Re' \dots \dots \dots (5)$$

$$\lambda = 0.3164 \cdot Re'^{-1/4} \dots \dots \dots (6)$$

図7に示すように、水の測定値は、上式(5)および式(6)とほぼ一致していることより、本実験装置の測定精度は十分と判断される。

PEG水溶液の一回目の実験において、 λ_p の値は、 $Re' < 3000$ までは層流の従来式(5)と一致する。そして、 Re' の増加に伴い、徐々に式(5)の値より大きくなる傾向を有する。しかしながら、乱流の経験式(6)の λ 値よりも、PEG水溶液の λ_p 値は小さくなり、トムズ効果が現れていることがわかる。また、 $Re' = 5.5 \times 10^4$ よりPEG水溶液の λ_p 値の急激な増大となり、最終的に $Re' = 1.5 \times 10^5$ 以上の領域で、 λ_p の値は式(6)の値と同じになり、トムズ効果の消失がみられる。

次に、実験回数の影響について検討すると、実験回数が2回3回と増大するに従って、測定した λ_p 値が増大し、5回目の実験でほぼ水のみ λ 値に近づく結果となる。これは、鎖状高分子であるPEGは、強いせん断力(高 Re' 数)のもとで鎖状構造の切断(劣化)が進行し、最終的に、鎖状構造での乱流抑制機能が消滅することによるものと判断される。従って、PEG添加水溶液による流動抵抗軽減に対して、その水溶液を1, 2回までしか再利用できない欠点を有することになる。

4.1.2 CTAB水溶液

図8は、内径 $d = 16$ mm の直管、水温 20°C の実験条件における水およびCTAB水溶液の管摩擦係数 λ_c と修正レイノルズ数 Re' の関係で、CTABの質量濃度 C_c をパラメータとして示したものである。図中の実線は、十分発

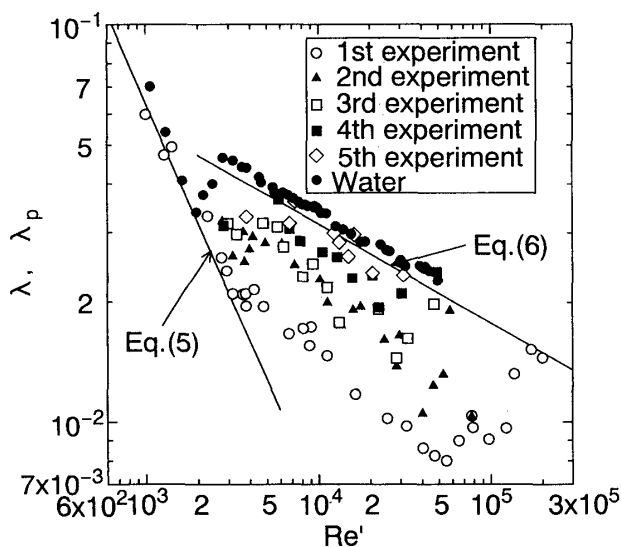


図7 PEG水溶液の管摩擦係数 λ_p と修正レイノルズ数 Re' の関係 ($d=16\text{mm}$)。

達した円管内層流の理論式(5)、および円管内乱流に関するBlasiusの実験式(6)である⁽⁶⁾。また、式(7)で示す実線は、滑らかな円管内を流れる高分子溶液(数十ppm以上)の、乱流域($Re' \geq 6000$)における十分に発達した実験整理式である⁽⁵⁾。

$$\lambda_k = 1.328 \cdot Re'^{-0.55} \dots \dots \dots (7)$$

図8に示すように、水とCTAB水溶液の管摩擦係数 λ_c 値は、 $Re' \leq 1800$ では層流の理論式(5)と良く一致する。一方、 $Re' \geq 2000$ において、水の λ 値は、遷移状態を経て乱流状態へと移行するため、乱流の実験式(6)に一致するのに対して、CTAB水溶液の λ_c 値は $Re' \approx 3000$ 付近まで層流の理論式(5)とほぼ一致する。これは、CTAB水溶液は、その界面活性剤の棒状ミセルによる乱流渦の発生そして発達の抑制の効果により、層流状態を維持するためと考えられる。さらに大きな Re' 数となるに従って、その λ_c 値の Re' 数に対する減少割合は小さくなるが、 Re' 数の増大と共に、 λ_c 値の減少傾向は続き、 λ_c 値の極小値を示した後、 Re' 数の増大と共に λ_c 値の増加となり、最終的に水の乱流状態の管摩擦係数に漸近することになる。この λ_c 値の増大は、CTABの棒状ミセル構造が強いせん断力により分断され、トムズ効果が減少することにより起こるものと思われる。

ここで、図8に示した鎖状高分子水溶液における従来の実験整理式(7)の λ_k 値と、CTAB水溶液の λ_c 値とを比較してみると、 λ_c 値の方が λ_k 値よりも全般にわたって大きな値を示している。両者の差は、 Re' が大きくなるほど大きくなる傾向にある。これは、鎖状高分子に比較して、CTABの棒状ミセル構造の方がせん断力によって分断され易いことや、CTABの棒状ミセル長さが高分子鎖の長さ比べて短いことなどが、CTABの乱流抑制効果の低減となって現れたものと判断できる。

図9は、内径 $d = 50$ mm の直管および水温 20°C の実験条件における水そしてCTAB水溶液の管摩擦係数 λ_c と修正レイノルズ数 Re' の関係で、CTABの質量濃度 C_c をパラメータとして示したものである。図8の $d = 16$ mm の場合と比較すると、 λ_c 値の Re' 数に対する変化の傾向は、定性的には同じであることが観測される。しかしながら、内径 d の増大に伴って、その条件において得られる最小の λ_c 値はより小さな値を示し、そして最小の λ_c 値を示す Re' 数は増大する傾向にある。

管内直径 $d = 5.7 \sim 50$ mm にわたる λ_c の測定結果より、次に示すような λ_c に関して、CTAB濃度 C_c 、修正レイノルズ数 Re' 、そして管内直径 d の無次元量をパラメータとした実験整理式(8)を、標準偏差 $\pm 8.9\%$ で誘導することができた。図8および9に実験整理式(8)の値も示してある。なお、 $C_c = 55$ ppm とは、CTABが反対イオン(サリチル酸ナトリウム)の存在下において、ミセルを形成する最小濃度(限界ミセル濃度)である。

$$\lambda_c = \left(4.5 + 0.72 \ln\left(\frac{d}{l}\right)\right) \left(\frac{C_c}{55}\right)^{-0.23} Re'^{-0.61 + 9.52 \times 10^{-4} \left(\frac{1}{d}\right)} \dots (8)$$

適用範囲: $d/\ell = 2.85 \times 10^{-3} \sim 2.5 \times 10^{-2}$
 $C_c = 60 \sim 150\text{ppm}$
 $Re' = 2000 \sim 80000$

4.2 管内熱伝達

図10は、水およびCTAB水溶液の熱伝達率に関して、内径 $d = 16\text{ mm}$ の実験条件において、 $Nu/Pr^{1/3}$ と Re' 数の関係を、様々な C_c について示したものである。ここで、修正プラントル数 Pr' は、修正レイノルズ数 Re' と同じように、従来の非ニュートン流体の整理法⁽⁵⁾による次式(9)

にて定義される無次元数である。なお、CTAB水溶液の熱伝導率、比熱は、同温の水の物性値とほぼ等しいため、式(9)での熱伝導率 κ 、比熱 C_p は、水の文献値⁽⁶⁾を使用した。

$$Pr' = \frac{C_p \left(\frac{3n_c + 1}{4m_c} \right)^{n_c} K_c \left(\frac{8V}{\ell} \right)^{n_c - 1}}{\kappa} \dots\dots\dots(9)$$

図中の実線は、Sieder-Tateの円管における十分発達した層流熱伝達式(10)、および乱流熱伝達式(11)を示しており、水に関する測定結果は、式(10)、(11)と良く一致し、熱伝達に関する本実験装置の測定精度は十分と判断される。

$$Nu = 1.86(Re' \cdot Pr' \cdot (d/\ell))^{1/3} (\mu/\mu_w)^{0.14} \dots\dots\dots(10)$$

$$Nu = 0.027 Re'^{0.8} Pr'^{1/3} (\mu/\mu_w)^{0.14} \dots\dots\dots(11)$$

ここで、 μ は粘性係数、添字 w' は管壁温度基準を表す。さらに、図中で式(12)で示される実線は、式(7)とおなじように、滑らかな円管内を流れる高分子水溶液(数十ppm以上)の、乱流域($Re' \geq 6000$)における十分に発達した熱伝達実験整理式を示している⁽⁵⁾。

$$Nu = 0.1857 \cdot \left(\frac{\ell}{d} \right)^{-0.3} \cdot Re'^{0.6} \cdot Pr'^{1/3} \dots\dots\dots(12)$$

図10で示されるように、CTAB水溶液と水に関する測定結果を比較すると、おおよそ Re' 数が3000以下の領域においては、 $Nu/Pr^{1/3}$ 値は、層流熱伝達式(10)にほぼ一致する。さらに Re' が増加すると、水の $Nu/Pr^{1/3}$ 値は、乱流状態に遷移するため、式(11)と一致する。しかしながら、CTAB水溶液の $Nu/Pr^{1/3}$ 値は、流動抵抗低減効果が観察された $Re' = 3000 \sim 20000$ の領域においては、 $Nu/Pr^{1/3}$ 値は、層流の関係式(10)よりも大きくなるが、乱流の関係式(11)よりは小さく、CTAB水溶液による管内熱伝達の低減効果が現れている。一方、 $Re' \geq 20000$ の領域になると、図8において、 λ_c 値が急激に増大した傾向と同じように、CTAB水溶液の $Nu/Pr^{1/3}$ 値も、急激に増大し、水の乱流整理式(11)と一致することになる。

また、CTAB水溶液の $Nu/Pr^{1/3}$ 値に及ぼすCTAB濃度 C_c の影響を観察してみると、 $Re' \leq 6000$ の領域では、CTAB濃度 C_c の $Nu/Pr^{1/3}$ に対する依存性は少ない。一方、CTABによる熱伝達の低減効果が現れる領域 ($6000 \leq Re' \leq 20000$) では、 C_c の増加に伴い $Nu/Pr^{1/3}$ 値は、減少する傾向を示す。

さらに、図10に示した高分子溶液における従来の実験整理式(12)の $Nu/Pr^{1/3}$ 値と、CTAB水溶液の $Nu/Pr^{1/3}$ 値とを比較してみると、 $Re' = 6000 \sim 15000$ の領域においては、高濃度CTAB水溶液の $Nu/Pr^{1/3}$ 値は、式(12)の高分子水溶液のものとはほぼ一致する傾向を有するが、低濃度CTAB水溶液のものは、式(12)よりも上回るようになる。この低濃度CTABと式(12)の差は、前述したように、CTABの棒状ミセル構造が鎖状高分子よりも乱流抑制効果が小さいことによるものと思われる。

本実験における $Nu/Pr^{1/3}$ 値を、CTAB濃度 C_c と Re' 数をパラメータとして実験整理したものが式(13)であ

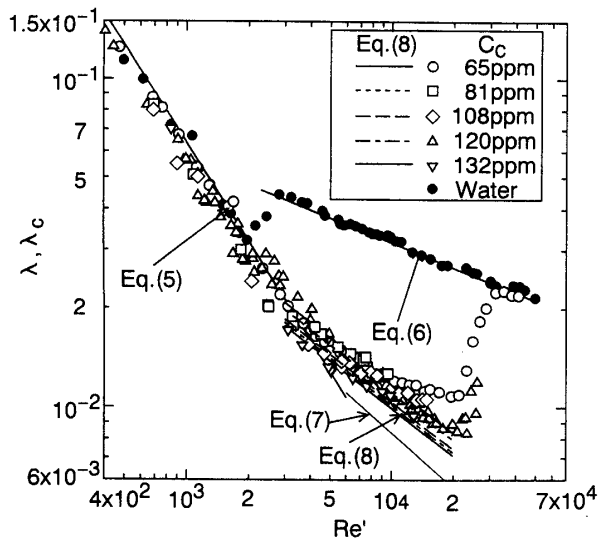


図8 CTAB水溶液の管摩擦係数 λ_c と修正レイノルズ数 Re' の関係 ($d=16\text{mm}$).

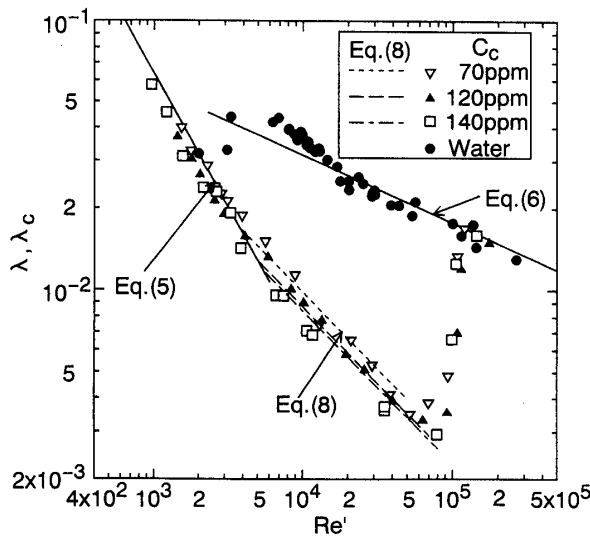


図9 CTAB水溶液の管摩擦係数 λ_c と修正レイノルズ数 Re' の関係 ($d=50\text{mm}$).

る。なお、式(13)は、実験値と標準偏差±8.0%以内で一致する。

$$\frac{Nu}{Pr^{1/3}} = \exp(1.74 + 9.63 \times 10^{-6} C_c^{-0.557} Re') \dots \dots \dots (13)$$

適用範囲: $Pr' = 10 \sim 29$
 $C_c = 60 \sim 150 \text{ppm}$
 $Re' = 2000 \sim 80000$

4.3 流動抵抗減少率および熱伝達減少率

界面活性剤添加水溶液の流動抵抗および熱伝達の減少割合を評価する量として、熱伝達減少率 HDR および流動抵抗減少率 DR がある⁽⁶⁾。ここで、 HDR 、 DR は、それぞれ同一の実験条件において、水に対するCTAB水溶液のヌセルト数 Nu_c 数および管摩擦係数 λ_c の減少割合で、それぞれ次式(14)、(15)により定義される。

$$HDR = \frac{Nu_w - Nu_c}{Nu_w} \times 100 \quad (\%) \dots \dots \dots (14)$$

$$DR = \frac{\lambda_w - \lambda_c}{\lambda_w} \times 100 \quad (\%) \dots \dots \dots (15)$$

図11に、CTAB濃度 $C_c = 110 \sim 150 \text{ppm}$ 、管内直径 $d = 5.7 \sim 50 \text{mm}$ の範囲における DR (%) と、管内平均流速 V (m/s) の関係を示したものである。図11に示すように、管内直径 d の増加に伴い、 DR が現れる流速 V の範囲が増大しているのが観察される。また、 DR も d の増加によって、最大93% ($d = 50 \text{mm}$) まで増加する。

図12は、管内直径 $d = 16 \text{mm}$ の実験条件において、CTAB濃度 C_c をパラメータにした場合の DR および HDR と、管内平均流速 V の関係を示したものである。 DR および HDR は、いずれの C_c に関しても $V = 1.0 \sim 2.0 \text{m/s}$ に

ピークを持つ山形の分布となる。また、 HDR および DR の現れる流速 V の範囲は、ほぼ一致しており、流動抵抗の減少効果がある流速範囲では、同様に熱伝達の減少効果もあることもわかる。しかしながら、流速一定の条件においては、 DR よりも HDR の方が大きくなる傾向にある。このCTAB水溶液の結果は、高分子水溶液において、熱伝達減少率は、流動抵抗減少率よりも大きくなるという報告⁽⁵⁾と一致するものである。

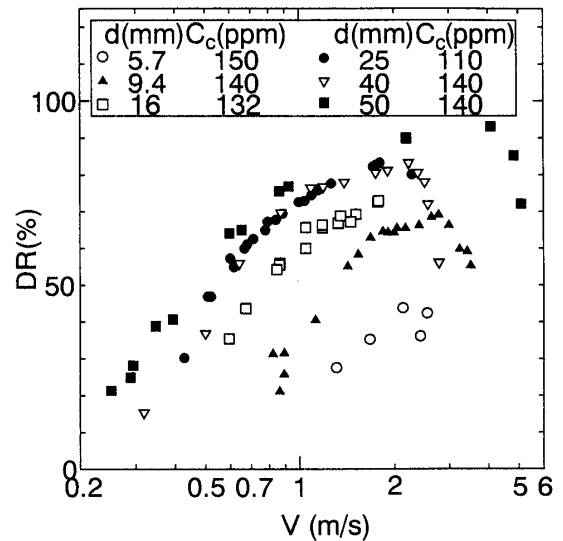


図11 流動抵抗減少率 DR と管内平均流速 V の関係。

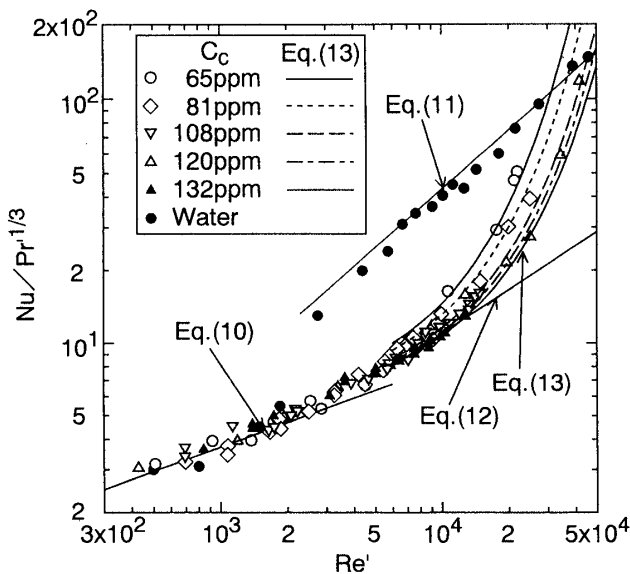


図10 CTAB水溶液および水の $Nu/Pr^{1/3}$ と Re' の関係 ($d = 16 \text{mm}$)。

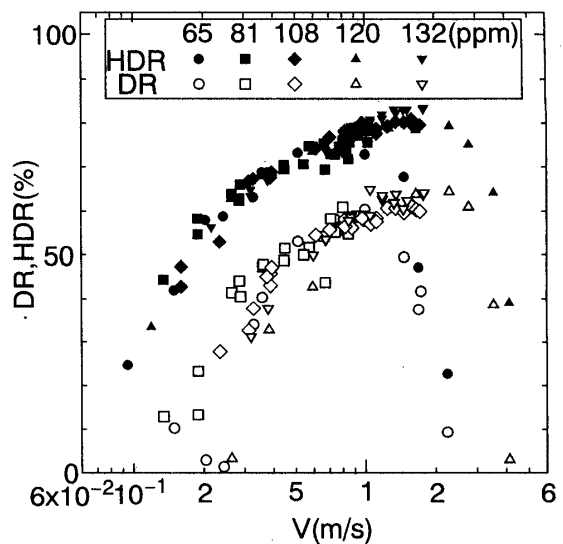


図12 流動抵抗減少率 DR および熱伝達率減少率 HDR と管内平均流速 V の関係 ($d=16\text{mm}$)。

5. 結言

鎖状高分子であるポリエチレングリコール(PEG)水溶液および界面活性剤である臭化セチルトリメチルアンモニウム(CTAB)水溶液の管内流動抵抗および熱伝達についての実験結果から、次のような結論を得た。

- (1) PEG水溶液は、同じ水溶液で数回実験を繰り返すことにより、鎖状構造の切断により劣化を起し、その流動抵抗低減効果が減少し、最終的に流動抵抗低減効果がなくなる。
- (2) CTAB水溶液の圧力損失低減は、本実験における管内直径 $d = 5.7 \sim 50$ mm の範囲において認められた。低減割合は、管内直径の増加と共に増大し、最大93%程度に達する。また、圧力損失低減の現れる修正レイノルズ数 Re' の上限値は、管径や濃度の増加とともに増大する。また、CTAB水溶液の管摩擦抵抗軽減割合は、濃度により鎖状高分子水溶液とほぼ同じか、それよりも小さくなる傾向を有し、その適用修正レイノルズ数範囲も狭いことが判明した。
- (3) CTAB水溶液の、管内直径 $d = 16$ mm の熱伝達実験では、乱流状態において、乱流の抑制効果により熱伝達が低減し、その低減率は、鎖状高分子水溶液よりも小さくなることが判明した。
- (4) 管内流動抵抗および熱伝達に関する有用な無次元整理式の提案を行うことができた。

参考文献

- (1) 四方・平田: 第37回レオロジー討論会講演要旨集, (1989), 109.
- (2) P. S. Virk 他, *J. Fluid Mech.*, 30-2 (1967), 305.
- (3) 稲葉・尾崎・金岡: 機論, 60-569(1994), 240.
- (4) 稲葉・尾崎・浅野: 第31回日本伝熱シンポ講演集, E343 (1994), 1063.
- (5) J.P.Hartnett ほか, *Handbook of Heat Transfer Applications*, (2nd Ed.), (1985), 2-1 - 2-50.
- (6) 日本機械学会編, 伝熱工学資料(改訂4版), (1986), 331.