

直円管内を流動する界面活性剤添加有機ブラインの
流動抵抗と熱伝達挙動*春木直人^{*1}, 稲葉英男^{*1}, 堀部明彦^{*1}田中真司^{*2}, 中田 達^{*3}, 佐藤健次^{*4}Flow Drag and Heat Transfer Characteristics of Organic Brine with
Drag Reduction Surfactant in a Straight PipeNaoto HARUKI, Hideo INABA^{*5}, Akihiko HORIBE,
Shinji TANAKA, Toru NAKATA and Kenji SATO^{*5} Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Okayama University,
3-1-1 Tsushimanaka, Okayama-shi, Okayama, 700-8530 Japan

The flow drag and heat transfer reduction effects of brine flow with drag reduction surfactants have been investigated from the viewpoint of the effective energy consumption in an industrial cooling system. In this study, Oleyldihydroxyethyl Amine Oxide (ODEAO) of non-ion surfactant was used as a drag reduction surfactant additive, and Ethylene Glycol (EG) was used as an organic brine. It was found that the viscosity of EG brine with ODEAO had the non-Newtonian behavior. The flow friction coefficient and mean forced convection heat transfer coefficient of the EG brine with ODEAO in a straight pipe were measured for each parameter of concentration of EG, concentration of ODEAO and temperature of the brine with ODEAO. The obtained experimental results indicated that the EG brine with ODEAO exerted an influence on the flow drag and heat transfer reduction.

Key Words: Flow Drag Reduction Effect, Surfactant, Organic Brine, Flow Friction Coefficient, Heat Transfer Coefficient

1. 結 論

近年, ビルの空調システムや大規模工場および地域熱供給システム等の熱エネルギー輸送系において, 水系の熱輸送媒体に流動抵抗低減剤(界面活性剤, 鎖状高分子等)の添加による流動抵抗低減効果(乱流の層流化; いわゆるトムズ効果)を利用した省エネルギー技術が注目されている^{(1)~(2)}.

一般に, 流動抵抗低減効果を熱エネルギー輸送系に適用した場合, 熱輸送媒体の輸送ポンプ動力の低減効果そして壁面熱伝達の低下による配管からの熱損失低減効果により, 熱エネルギー輸送の効率化を図ることができる. 例えば, 川口ら⁽³⁾は, このような流動抵抗低減効果を用いることによって, 熱交換器を用いた熱エネルギー輸送システム全体のエクセルギー効率が約70%改善されると試算している. 一方で, 壁面熱伝達の低減効果は, 熱エネルギー利用のための熱交換器性能の低下をもたらす点が指摘されている⁽⁴⁾.

現在までに, 流動抵抗低減効果を用いた水系熱輸送システムの実用化に向けて, 様々な流動抵抗低減剤を用いた研究が盛んに行われている^{(5)~(10)}. 特に非イオン型アミン系界面活性剤は, 環境負荷が小さい水系熱輸送用流動抵抗低減剤として注目されている.

本研究においては, 低温熱輸送媒体としてのブラインの循環系搬送動力負荷が大きいことに着目し, その搬送動力低減に界面活性剤による流動抵抗低減効果を検討するものである. 一般にブライン循環系には, 有機系のエチレングリコールや無機系の塩化カルシウム等の水溶液が使用されている. しかしながら現状では, ブライン輸送系に適した流動抵抗低減用界面活性剤の選定やその粘性評価に関する研究は現在徐々に行われ始めているが, 未だ十分な結論は得られていないようである. 本研究は, 流動抵抗低減用界面活性剤の選定と, それを有機系ブライン(エチレングリコール水溶液)に添加した場合の流動抵抗と熱伝達特性の解明を実験的に行うものである. 実験では, 界面活性剤添加濃度, ブライン濃度およびブライン温度を実験因子とした粘度の測定, そして水平円管内を流動する界面活性剤添加ブラインの流動抵抗および熱伝達に関する測定を行い, それらの諸特性を明らかにするものである.

おもな記号

A : 伝熱面積[m²], C_e : エチレングリコール濃度[%],
 C_o : 界面活性剤 ODEAO の添加濃度[ppm], C_p : 比熱
[J/(kg·K)], d : 試験部円管内径[m], DR : 流動抵抗低減率[%],
 HTR : 熱伝達率低減率[%], K : 擬塑性粘度
[Pa·sⁿ], L : 試験部加熱部の長さ[m], l : 試験部円管
長さ[m], Nu : ヌセルト数 ($=\alpha_m d / \kappa$), n : 構造粘
度指数, ΔP : 圧力損失[Pa], Pr : プラントル数,

* 原稿受付 2004年3月26日.

^{*1} 正員, 岡山大学工学部(☎700-8530 岡山市津島中3-1-1).^{*2} 学生員, 岡山大学大学院自然科学研究科.^{*3} 正員, 東邦化学工業(株)(☎739-0046 横須賀市浦郷町5-2931).^{*4} 東邦化学工業(株).

E-mail: inaba@mech.okayama-u.ac.jp

Pr' : 修正プラントル数, Q : 正味加熱量[W], Re : レイノルズ数 ($= U_m d \rho / \mu$), Re' : 修正レイノルズ数, T_m : 試験円管内流体混合平均温度[°C], T_b : EG 水溶液温度[°C], $T_w(x)$: 管軸方向の位置 x における局所管壁温度[°C], T_{wm} : 平均管壁温度[°C], U_m : 円管内平均流速[m/s], x : 円管入口よりの管軸方向の位置[m]

ギリシア文字 α_m : 平均熱伝達率[W/(m²·K)], $\dot{\gamma}$: せん断速度[1/s], λ : 管摩擦係数, ρ : 密度[kg/m³], κ : 熱伝導率[W/(m·K)], μ : 粘度[Pa·s], μ_w : 円管壁面温度での粘度[Pa·s], τ : せん断応力[Pa], τ_{max} : 限界せん断応力[Pa]

2. 流動抵抗低減剤添加ブラインの特徴

2.1 流動抵抗低減剤添加ブライン

本研究で使用した流動抵抗低減剤添加ブラインは、一般的な産業用ブラインであるエチレングリコール水溶液 (略して EG 水溶液, 水溶液濃度 $C_e = 30, 40, 50$ mass%) に、非イオン性界面活性剤であるオレイルジヒドロキシエチルアミノオキシド (Oleyldihydroxyethylamine oxide, 化学式 $C_{18}H_{35}N(C_2H_4OH)_2O$, 分子量 371.6, 略して ODEAO) を流動抵抗低減剤として添加したものである。用いた非イオン性界面活性剤 (ODEAO) は、従来の研究で使用された第4級アンモニウム塩 (陽イオン性界面活性剤) よりも殺菌作用が弱く (経口毒性 $LD_{50} = 3500$ mg/kg), 漏洩や廃棄時の環境負荷は非常に小さいものである。さらに、第4級アンモニウム塩系界面活性剤の棒状ミセル形成において必要不可欠な対イオン (サリチル酸ナトリウム等) の添加を伴わなくても、ODEAO のみの添加によって図1に示すような棒状ミセル塊 (又は紐状ミセル) を形成して、流動抵抗低減効果を発揮する熱輸送用流動抵抗低減剤 (11) である。

2.2 流動抵抗低減剤添加ブラインの粘性特性

一般に、流動抵抗低減剤添加水溶液の多くは強い粘弾性と高い伸張粘度を示す (12) もので、その粘性挙動の把握は流動抵抗および熱伝達低減効果の評価にとって重要である。本研究では、まず回転式粘度計 (ハーケ社製回転式レオメータ RS75, 測定精度 $\pm 2.9\%$, 測定可能範囲: せん断速度 $\dot{\gamma} = 0.01 \sim 2500$ [1/s], せん断応力 $\tau = 0 \sim 60$ [Pa]) により ODEAO 添加 EG 水溶液の粘性測定 (13) を行った。なお今回の測定では、せん断速度の増減時間を変化させた測定も行ったが、その

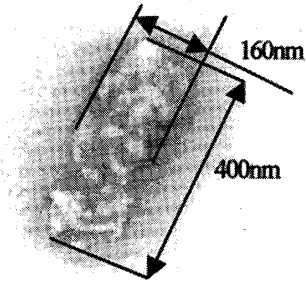


Fig. 1 Rod-like micelles of ODEAO

測定結果に差は認められなかった。

図2は、回転式粘度計によって測定された $T_b = -10^\circ\text{C}$ の ODEAO 添加 EG 水溶液 ($C_e = 50$ mass% 一定, ODEAO 添加濃度 $C_o = 3000, 6000, 9000$ ppm) のせん断速度 $\dot{\gamma}$ [1/s] と粘度 μ [Pa·s] の関係を示したものである。図2より、 $C_o = 3000$ ppm における粘度 μ の値は、低せん断速度の範囲 ($\dot{\gamma} = \sim 300$ [1/s]) では EG 水溶液のみの粘度と一致しているが、 $\dot{\gamma}$ を増加させると、 μ の値は急激に増加した後減少する傾向を示している。この μ の値の増加は、界面活性剤の棒状ミセルまたは紐状ミセルが高次のネットワーク構造を形成する、いわゆる SIS (Shear Induced State (14)) の状態となることでもたらされるものと判断される。一方、黒印の測定結果で示されるように、 $\dot{\gamma}$ を減少させた場合には、低せん断速度領域においても高い μ の値で存在し、安定な SIS 状態が持続することになる (15)。このように粘度 μ とせん断速度 $\dot{\gamma}$ の測定結果より、非イオン性界面活性剤 (ODEAO) を添加した EG 水溶液は、そのミセルが SIS 状態を形成することから、流動抵抗低減効果を示すものと期待される。さらに ODEAO 添加濃度を $C_o = 6000$ ppm から $C_o = 9000$ ppm のように増加させた場合、ODEAO 添加 EG 水溶液の粘度 μ は大幅に増加するが、SIS 状態が現れるせん断速度 $\dot{\gamma}$ の値は ODEAO 添加濃度 C_o の増加に伴って減少する傾向を示している。

図3は、ODEAO 添加濃度を $C_o = 3000$ ppm, EG 水溶

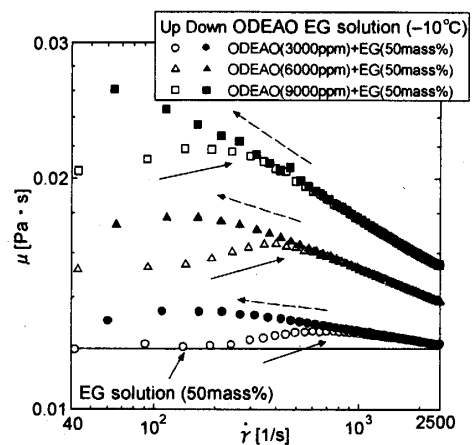


Fig. 2 Apparent Viscosity (μ) of ODEAO EG brine

液温度を $T_b = -10^\circ\text{C}$ 一定とし、EG 濃度を $C_e = 30, 40$ そして $50\text{mass}\%$ と変化させた場合の ODEAO 添加 EG 水溶液の粘性挙動を示したものである。図 3 より、低 EG 濃度の場合には、レオメータの測定下限界に近づいたことによる測定精度の低下により測定データが若干不安定になっている点も考慮すると、何れの EG 濃度の場合においても SIS 状態を示しているが、SIS 状態となるせん断速度の値は EG 濃度の増加に伴って低下する傾向を示している。一方、前報⁽¹³⁾で示したように、水に ODEAO を添加した場合に発生する SIS 状態は非常に弱い点を考慮すると、EG 水溶液に ODEAO を添加することによって SIS 状態が強く形成されることになる。このように EG 水溶液中の ODEAO が SIS 状態を強く形成する理由としては、以下のエチレングリコールと ODEAO の分子間の干渉が考えられる。すなわち、エチレングリコール分子は二つの OH 基を有しているが、この OH 基と ODEAO のミセルが持つ親水基との間に発生する水素結合等により、ODEAO の棒状または紐状ミセルがより大きなネットワーク構造（可溶化）となり SIS 状態を強く形成したものと考えられる⁽¹⁶⁾。

本実験では、各測定パラメータ（ODEAO 添加濃度 C_o 、EG 水溶液温度 T_b および EG 濃度 C_e ）を変化させて行った ODEAO 添加 EG 水溶液の粘度測定結果に対して、従来の研究⁽⁸⁾と同様にべき乗則近似式（ $\tau = K\dot{\gamma}^n$ ）を適用し、ODEAO 添加 EG 水溶液の擬塑性粘度 K [$\text{Pa}\cdot\text{s}^n$]、および構造粘度指数 n の値の算出を行い、その非ニュートン特性を定量化している。なお、図 2 および図 3 における粘度 μ のべき乗則による近似式の誘導範囲に関しては、 $\dot{\gamma}$ の増大と共に μ が増加する領域を除いた、すなわち $\dot{\gamma}$ の増大と共に μ の値の減少する領域を誘導範囲としており、後に述べる流動抵抗実験でのせん断速度範囲とほぼ一致している。

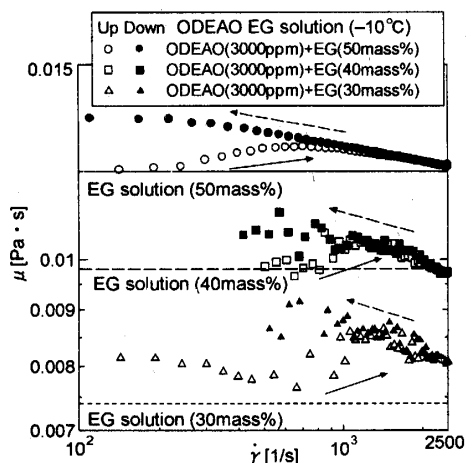


Fig. 3 Apparent Viscosity of ODEAO EG brine

図 4～図 6 は、それぞれ EG 濃度 $C_e = 30, 40, 50\text{mass}\%$ の EG 水溶液に対して、ODEAO を $C_o = 1500, 3000, 6000$ および 9000ppm 添加した ODEAO 添加 EG 水溶液の K, n の値を示したものである。図 4～図 6 より、いずれの EG 濃度においても $C_o = 1500\text{ppm}$ では $n=1$ であった。これは、ODEAO が $C_o = 1500\text{ppm}$ 添加された EG 水溶液では棒状ミセルが形成されなかったためであると考えられる。一方 $C_o = 3000\text{ppm}$ 以上の場合、ODEAO 添加濃度 C_o の増加とともに K の値は増加し、 n の値はより小さな値を示している。これは、図 2 に示したように、ODEAO 濃度の増加に伴って SIS 状態の形成による粘度が増大となり、特に高せん断速度域において粘度 μ の傾きが大きく（ n の値は小さく）なったためであり、ODEAO 添加 EG 水溶液の非ニュートン性が増大することになる。また、いずれの EG 濃度および ODEAO 濃度の場合においても、EG 水溶液の温度 T_b の低下とともに K の値は増加し、一方、 n の値は一定か、わずかに低下する傾向を示している。

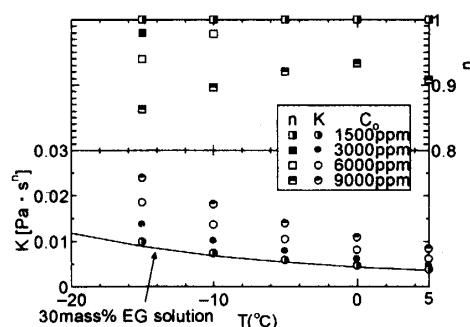


Fig. 4 Pseudoplastic viscosity K and n (EG 30mass%)

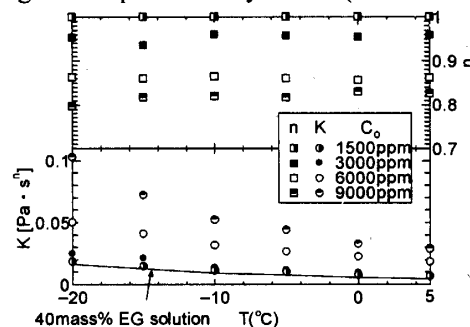


Fig. 5 Pseudoplastic viscosity K and n (EG 40mass%)

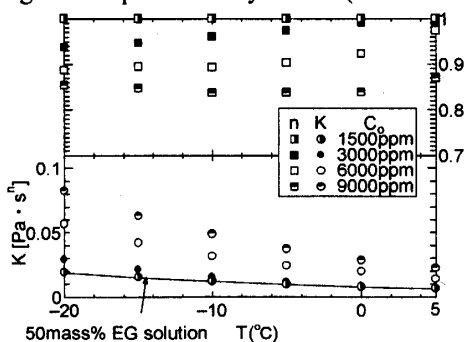


Fig. 6 Pseudoplastic viscosity K and n (EG 50mass%)

本研究では、後述の ODEAO 添加 EG 水溶液の流動・熱伝達特性の整理において、ODEAO 添加 EG 水溶液の非ニュートン特性を考慮した無次元数として、式(1)に示す修正レイノルズ数 (Re')、および式(2)に示す修正プラントル数 (Pr')⁽¹⁷⁾を適用した。

$$Re' = 8^{1-n} \left[\frac{3n+1}{4n} \right]^{-n} \left[\frac{\rho \cdot U_m^{2-n} \cdot d_i^n}{K} \right] \quad (1)$$

$$Pr' = \frac{C_p \cdot [(3n+1)/4n]^n \cdot K \cdot [(8U_m)/d_i]^{n-1}}{\kappa} \quad (2)$$

なお、式(1)と式(2)において、 d_i は試験部円管内直径、 U_m は試験流体の平均流速である。また式(1)と式(2)における C_p , κ , ρ は、それぞれ ODEAO 添加 EG 水溶液の比熱、熱伝導率、密度であるが、ODEAO の添加量が微量 ($C_o = 1500 \sim 9000\text{ppm}$) であるため、それぞれが同じ温度および濃度における EG 水溶液の物性値⁽¹⁸⁾を採用した。また、ニュートン流体の場合には、 $n=1$ となるため、 K の値に水の粘度を用いることによって、 Re' , Pr' は従来のレイノルズ数とプラントル数の定義となる。

3. 実験装置および実験方法

本実験では、任意の低温度域まで試験流体である EG 水溶液を冷却・維持する必要があるため、前報⁽⁹⁾の実験装置を参考にして、低温恒温水槽によって試験流体を任意の低温度域 ($\sim -20^\circ\text{C}$) まで冷却・維持可能な新たな流動抵抗および熱伝達測定用装置を製作した。図7に、本実験装置の概略図を示す。図7に示すように、本実験装置は、主に直円管試験部、流動ポンプ、試験流体冷却・貯蔵用低温恒温水槽そして各部を接続する配管ラインから構成されている。

このうち、流動抵抗および熱伝達測定用試験部には、管内直径 $d_i = 16\text{mm}$ 、長さ $l = 1.74\text{m}$ のステンレス鋼製直円管を使用した。この直円管試験部の出入口部には、流動抵抗の測定のために穴径 3.0mm の壁面静圧測定孔を設置しており、その測定孔間における流体の圧力損失 (ΔP) が差圧発信器 (測定精度 $\pm 1.5\%$) およびマンオメーター (最小目盛 1.0mm) によって測定可能である。なお、流動抵抗は、次式(3)で定義される直円管試験部における管摩擦係数 λ によって評価してある。

$$\lambda = \frac{\Delta P}{l/d \cdot 1/2 \rho U_m^2} \quad (3)$$

一方、直円管試験部における熱伝達実験は、ステンレス鋼製直円管に交流電流を通電することによって発生するジュール熱を印加熱源とした等熱流束加熱境界条件で行った。この熱伝達測定用直管試験部には、局所熱伝達率の算定において必要となる管壁温度の測定

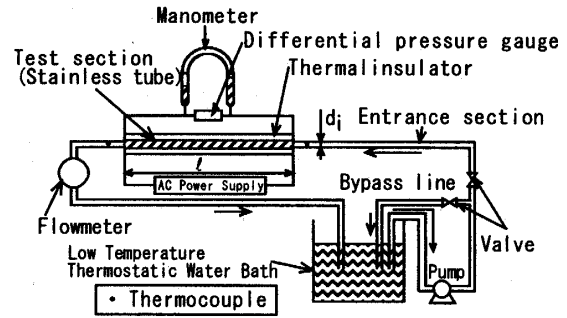


Fig. 7 Schematic diagram of experimental apparatus

のために、試験部の入口から $x = 0$ (加熱入口部)、 $0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25$ および 1.5m (加熱出口部) の計 10 カ所の各位置において、円周方向上の試験部外壁側上部および下部に素線径 0.3mm の T 型熱電対 (測定精度 $\pm 0.05^\circ\text{C}$) が設置されている。なお、各位置 (x) における局所管壁温度 $T_w(x)$ は、円周方向の上・下部で測定された管壁温度の平均値とした。この結果、直円管試験部全体の平均管壁温度 T_{wm} は、局所管壁平均温度 $T_w(x)$ を加熱部長さ $L (= 1.5\text{m})$ で積分した次式(4)により求められる。

$$T_{wm} = \frac{1}{L} \int_0^L T_w(x) dx \quad (4)$$

さらに、直円管試験部における平均熱伝達率 α_m [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$] は、次式(5)で求められる。

$$\alpha_m = Q/[A \cdot (T_{wm} - T_m)] \quad (5)$$

ここで、 T_m : 試験流体混合平均温度、 Q : 正味加熱熱量 (試験部に加えた熱量 - 熱損失量)、 A : 伝熱面積 ($= \pi d_i L$) である。なお、熱伝達実験における外部への熱損失を低減するため、試験部の加熱管壁温度は試験流体の混合平均水温 T_m より $1 \sim 2^\circ\text{C}$ 程度高くし、さらに、試験部全体に厚さ 8.0mm のウレタン系断熱材を巻き付けている。

流動抵抗および熱伝達実験は、予め、試験流体 (水、ODEAO 添加 EG 水溶液) を低温恒温水槽によって所定の水温 ($-20 \sim 5^\circ\text{C}$) まで冷却した後、流動ポンプによって試験流体を任意の流速で流動させた状態でのステンレス鋼製直円管試験部における流動抵抗と熱伝達率の測定によって行った。なお、管内平均流速 U_m の測定には、試験部出口部に設置された電磁流量計 (測定精度 $\pm 0.5\%$) を使用した。

最終的な本実験装置による流動抵抗と平均熱伝達率の測定精度の確認は、純水の流動抵抗と平均熱伝達率を測定して行った。その結果、流動抵抗の場合では、水の流動抵抗の文献式 (後述する式(6)および式(7)) と標準偏差 $\pm 5.3\%$ で一致した。また、水の平均熱伝達率の測定値は、文献値 (後述する式(8)および式(9)) との標準偏差が $\pm 7.5\%$ であることから、本実験装置全体で

の流動抵抗と平均熱伝達に関する測定精度は十分であると考えられる。

なお、ODEAO の添加濃度は実験中の ODEAO 添加 EG 水溶液をサンプリングして、液体クロマトグラフを用いて測定した。その測定値は、溶媒である EG 水溶液質量と実際に投入された ODEAO 質量値から算出した濃度よりも、約 1000ppm 程度低下していたが、これは、投入した ODEAO の一部が配管や恒温水槽タンクの内壁に付着することによるものと思われる。なお、今後の実験整理における ODEAO 添加ブラインの Re' および Pr' の値は、図 4~図 6 の K と n の値から、液クロにて測定された ODEAO 濃度に相当する値を外挿して算出している。

4. 実験結果および考察

4.1 ODEAO 添加 EG 水溶液の温度変化に伴う流動抵抗および熱伝達低減効果

図 8 は、実験パラメータとして、EG 水溶液温度を $T_b = 5, 0, -5, -10, -15, -20^\circ\text{C}$ とした場合の ODEAO 添加 EG 水溶液 ($C_o = 2180\text{ppm}$, $C_e = 40\text{mass}\%$) の流動抵抗の測定結果を、修正レイノルズ数 Re' と管摩擦係数 λ の関係で示したものである。なお図 8 において実線で示した直線は、ニュートン流体が直円管内を十分に発達した状態で流動する場合の管摩擦係数を示したもので、式(6)は層流の状態、および式(7)は乱流の状態 (Blasius の実験式) を示している。

$$\lambda = 64/Re \quad (6)$$

$$\lambda = 0.3164 Re^{-0.25} \quad (7)$$

図 8 より、 $T_b = -15 \sim 5^\circ\text{C}$ の ODEAO 添加 EG 水溶液の λ 値は、層流域 ($Re < 2300$) ではニュートン流体の層流の式(6)と一致するが、 $Re > 2300$ の乱流範囲においては、式(7)で示されるニュートン流体の乱流流動抵抗よりも低下して、層流式(6)の延長線上に漸近する傾向を示している。これは、水に界面活性剤を添加した従来の流動抵抗の測定結果⁽⁹⁾ とほぼ同様であることから、本実験で用いた ODEAO 添加 EG 水溶液は、乱流域において十分な流動抵抗低減効果を有することが確認された。さらにある一定の Re' 数以上において、ODEAO 添加 EG 水溶液の λ 値は急激に増加して乱流の流動抵抗値 (式(7)) に漸近している。これも従来の流動抵抗の測定結果⁽⁹⁾ と同様に、高流速で流動する ODEAO 添加 EG 水溶液に加えらる高せん断応力のため、流動抵抗低減効果の主要因である ODEAO の棒状ミセルや紐状ミセルの構造が破壊、またはミセル同士のネットワークの解消のために、流動抵抗低減効果が消失したためであ

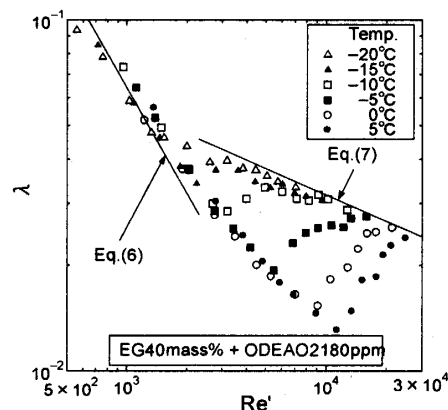


Fig.8 Relationship between Re' and λ ($C_o = 2180\text{ppm}$)

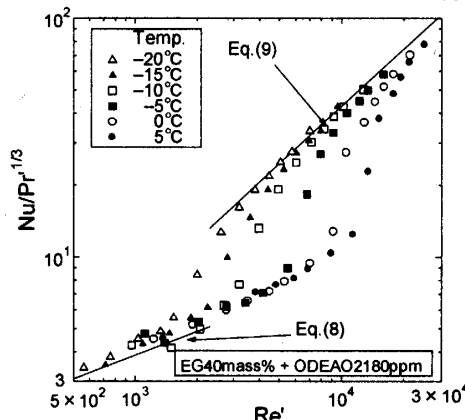


Fig.9 Relationship between Re' and $Nu/Pr^{1/3}$ ($C_o = 2180\text{ppm}$)

る。この流動抵抗低減効果が消失する Re' 数の値は、図 8 より ODEAO 添加 EG 水溶液温度 T_b の低下とともに減少する傾向を示している。

図 9 は、図 8 の流動抵抗実験と同時に測定された ODEAO 添加 EG 水溶液の直円管試験部管内壁に対する平均熱伝達率の測定結果を、式(5)による平均熱伝達率 α_m から求められた無次元数 $Nu/Pr^{1/3}$ (平均ヌセルト数 $Nu = \alpha_m \cdot d/\kappa$, κ : ODEAO 添加 EG 水溶液の熱伝導率) と Re' 数の関係として示したものである。なお図 9 中の実直線は、それぞれ直円管内を流動するニュートン流体の層流熱伝達に関する実験式(8)および乱流熱伝達に関する実験式(9)を示している。

$$Nu = 1.86 \cdot (Re \cdot Pr)^{1/3} \cdot (d_i/\ell)^{1/3} \cdot (\mu/\mu_w)^{0.14} \quad (8)$$

$$Nu = 0.027 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{1/3} \cdot (\mu/\mu_w)^{0.14} \quad (9)$$

図 9 より、ODEAO 添加 EG 水溶液の平均熱伝達率においても、図 8 で示した流動抵抗低減効果とほぼ同じ Re' 数の範囲においてニュートン流体の乱流熱伝達の実験式(9)よりも低い値を示している。さらに、図 8 で流動抵抗の値が急激な増加傾向を示したと同時に熱伝達の値も急激に増加し、乱流の実験式(9)に漸近しているなど、定性的には流動抵抗低減効果と同様の傾向で ODEAO 添加 EG 水溶液の熱伝達低減が確認された。

これは、流動抵抗低減効果の発生に伴って ODEAO 添加 EG 水溶液の流動が層流化傾向となるために、乱流による熱伝達の促進効果が低減したものである。

図 8 および図 9 で示したように、ある Re' 数以上において ODEAO 添加 EG 水溶液の流動抵抗および熱伝達低減効果が消失する現象は、従来の研究より、せん断応力による ODEAO の棒状および紐状ミセルや、そのネットワークの破壊が主要因であると考えられる。このため図 8 および図 9 の各測定 Re' 数における壁面せん断応力 $\tau (= \lambda \rho U_m^2/8)$ と、ODEAO 添加 EG 水溶液のニュートン流体に対する流動抵抗低減率 DR [%] と熱伝達低減率 HTR [%] の算定を行った。図 10 にその算定結果を示す。なお DR および HTR は、ステンレス鋼製直円管試験部において、同一の Re' にて流動する場合のニュートン流体 (添字 N) および ODEAO 添加 EG 水溶液 (添字 O) の λ と Nu を用いて、それぞれ次式(10)および式(11)で定義される。

$$DR = (\lambda_N - \lambda_O) / \lambda_N \times 100 \quad [\%] \quad (10)$$

$$HTR = (Nu_N - Nu_O) / Nu_N \times 100 \quad [\%] \quad (11)$$

図 10 より、 DR と HTR の値はいずれの EG 水溶液温度においても $\tau = 15 \sim 25$ [Pa] 付近において最大値を示した後、 $\tau > 25$ [Pa] の領域にて急激な低下 (低減効果の消失) を示している。これは、図 8~9 での実験条件 ($C_o = 2180$ ppm, $C_e = 40$ mass%) では、 $\tau_{max} = 15 \sim 25$ [Pa] 以上のせん断応力の印加によって ODEAO の棒状ミセルや紐状ミセルの構造が破壊され、流動抵抗および熱伝達低減効果を消失したことを意味している。また、この限界 τ_{max} の値はあくまで Re' 数の測定点での値を算定しているため、実験結果からは明確な限界 τ_{max} 値を規定することは困難であるが、定性的には、EG 水溶液温度 T_b の低下とともに限界 τ_{max} 値はわずかに低下する傾向を示している。これは、EG 水溶液温度の低下によって ODEAO の有する EG 水溶液への可溶性が低下したことによるものと思われる。

4.2 界面活性剤濃度の変化に伴う流動抵抗および熱伝達低減効果

図 11 および図 12 は、EG 濃度 $C_e = 40$ mass%, EG 水溶液温度 $T_b = -10^\circ\text{C}$ とし、ODEAO 添加濃度を $C_o = 1500$ ppm ~ 7800 ppm と変化させた場合の ODEAO 添加 EG 水溶液の流動抵抗と熱伝達の測定結果を示したものである。図 11 および図 12 に示すように、ODEAO 添加濃度 $C_o = 2180$ ppm 以上の添加時において、流動抵抗および熱伝達低減効果が明確に示されている。さらに、ODEAO 添加濃度の増加とともに、流動抵抗および熱伝達低減効果を示す Re' 数の範囲は増加し、より高い Re' 数までその効果が持続することが確認できる。

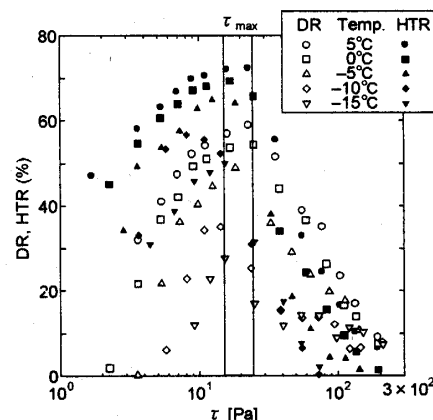


Fig.10 Relationship between τ and DR, HTR ($C_o = 2180$ ppm)

ODEAO 添加濃度の変化に対する流動抵抗および熱伝達低減効果が維持される限界せん断応力 τ_{max} 値に関しては、前節より $C_o = 2180$ ppm では (ODEAO 添加 EG 水溶液温度 $T_b = -15 \sim 5^\circ\text{C}$ の測定範囲において) $\tau_{max} = 15 \sim 25$ [Pa] であることが示されているが、図 11 および図 12 より $C_o = 5310$ ppm においては $\tau_{max} = 32 \sim 62$ [Pa]、 $C_o = 7800$ ppm では $\tau_{max} = 55 \sim 88$ [Pa] であった。なお、これらの τ_{max} 値の範囲は、図 11 および図 12 で示した $T_b = -10^\circ\text{C}$ での ODEAO 添加 EG 水溶液温度以外での流動抵抗および熱伝達の測定結果も考慮してある。この

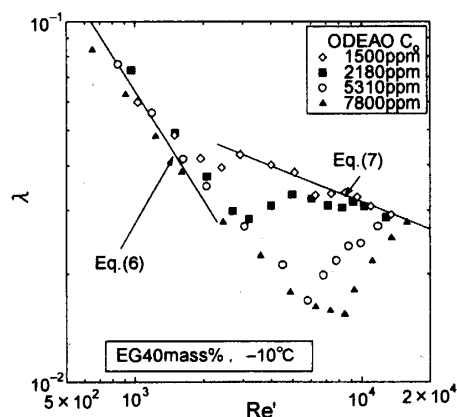


Fig.11 Relationship between Re' and λ ($T_b = -10^\circ\text{C}$)

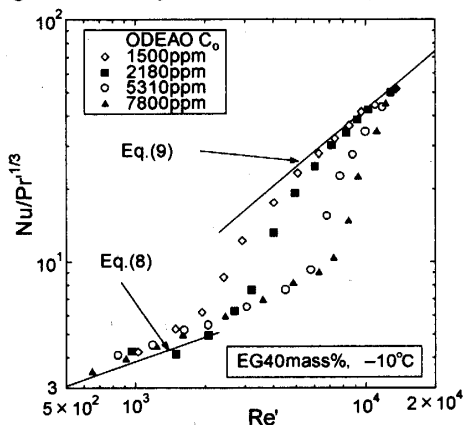


Fig.12 Relationship between Re' and $Nu/Pr^{1/3}$ ($T_b = -10^\circ\text{C}$)

ODEAO 添加濃度の増加に伴う限界せん断応力 τ_{\max} 値の増加傾向は、ODEAO 添加濃度の増大とともに形成された ODEAO の棒状ミセルや紐状ミセルの構造やミセル間の結合強さが変化して、より大きなせん断応力値まで破壊されなくなったためと考えられる。一方、 $C_0 = 1500$ ppm の場合には、ODEAO の添加量が微量であるために、ODEAO の棒状ミセルが形成される最低濃度（臨界ミセル濃度）に達しておらず、低減効果を起こすのに必要な棒状ミセルが形成されなかったため、流動抵抗および熱伝達低減効果を示さなかったものと考えられる。

4.3 EG 濃度の変化に伴う流動抵抗・熱伝達低減効果

図 13 および図 14 は、ODEAO 添加濃度を $C_0 = 5310 \sim 5520$ ppm の範囲で、EG 水溶液温度 $T_b = -10 \sim 5^\circ\text{C}$ の実験条件において、EG 濃度の変化 ($C_e = 30, 40, 50$ mass%) が ODEAO 添加 EG 水溶液の流動抵抗と熱伝達低減効果に与える影響を示したものである。なお図 13 には、参考のために 5°C の水に ODEAO を添加した場合 ($C_e = 0$ mass% に相当) の流動抵抗の測定結果も併記してある。

図 13 および図 14 より、いずれの EG 水溶液温度 T_b の条件においても、EG 濃度の変化によって、流動抵抗と熱伝達低減効果を示す Re' 数の範囲は異なっている。すなわち、 $C_e = 50$ mass% での低減効果を示す Re' 数の範囲は $C_e = 40$ mass% での低減効果範囲と比較して大きく減少している。また、 $C_e = 40$ mass% と 30 mass% での低減効果を示す Re' 数の範囲の差は少ない。一方、水に ODEAO を添加した場合 ($C_e = 0$ mass%) の低減効果を示す Re' 数の範囲よりも、 $C_e = 30 \sim 40$ mass% での ODEAO 添加ブラインの低減効果を示す Re' 数の範囲は、EG 濃度が増加することにより拡大している。この両者の差の要因として、EG 水溶液に界面活性剤を添加した場合には、エチレングリコールの二つの OH 基が ODEAO の親水基と水素結合することによる相互干渉の強さにより、SIS 状態が発生した状態での流動抵抗低減効果の範囲が変化している。一方、水と ODEAO の場合には、他の物質による SIS 状態への補強がなされなかったことによるものと考えられる。

上記の考察を検討するため、本実験では測定されたすべての実験条件における限界せん断応力 τ_{\max} 値の算定を行った。図 15 にその算定結果を示す。なお、図 15 に τ_{\max} 値が示されていない条件では、EG 水溶液の凝固点以下での EG 水溶液温度の場合か、もしくは EG 濃度の増加により ODEAO の臨界ミセル濃度が増加⁽¹⁹⁾して、ODEAO のミセルが形成されない条件であることを示している。

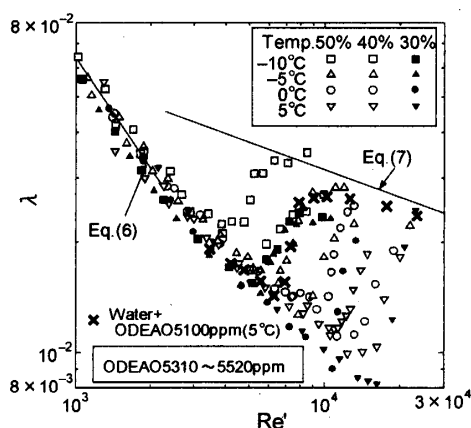


Fig.13 Relationship between Re' and λ

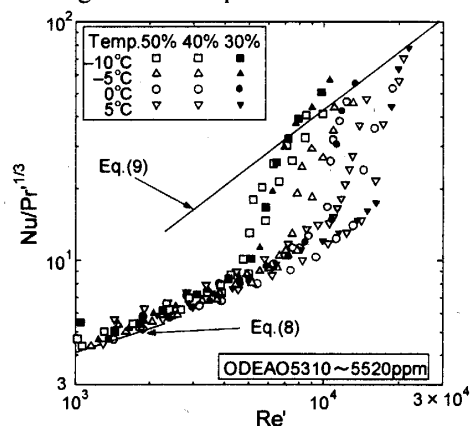


Fig.14 Relationship between Re' and $Nu/Pr^{1/3}$

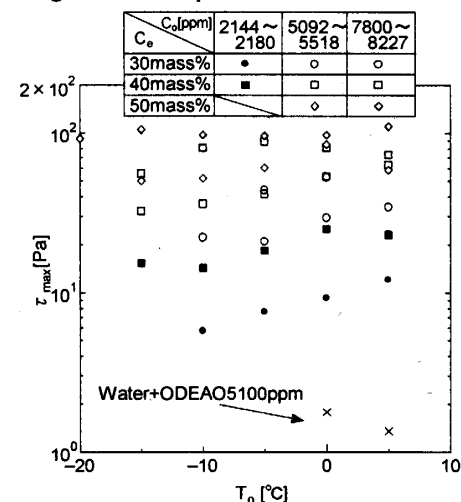


Fig.15 Relationship between T_b and τ_{\max}

図 15 より、まず前述の 4.1 節および 4.2 節で明らかとなった傾向 (4.1 節：いずれの実験条件の場合においても、定性的には EG 水溶液温度 T_b の低下とともに τ_{\max} 値が減少する。4.2 節：同一の EG 濃度 C_e の場合には、ODEAO 添加濃度 C_0 の増加とともに、 τ_{\max} 値は増加する) が確認された。一方、ODEAO 添加濃度 C_0 がほぼ一定の条件下では、EG 濃度 C_e が大きいものほど τ_{\max} 値も増加している。さらに ODEAO 添加 EG 水

溶液温度 $T_b = 5^\circ\text{C}$ の条件では、いずれの EG 濃度での τ_{\max} 値は水に ODEAO を添加した場合の τ_{\max} 値よりも大きな値を示している。

これらの結果を用いると、EG 水溶液へ ODEAO を添加した場合に、前述の ODEAO とエチレングリコール分子間の相互作用（可溶化）によってミセル構造の強化が起こることによって、流動抵抗および熱伝達低減効果を示す Re' 数の範囲の変化を説明することができる。まず、EG 水溶液に ODEAO を添加した場合、このような ODEAO とエチレングリコールとの分子間の可溶化によって τ_{\max} 値が増大するため、流動抵抗および熱伝達低減効果がより高い平均流速値まで維持されることになり、その低減効果を示す Re' 数の範囲が拡大することになる。さらに EG 濃度の増加に伴って SIS 状態を示すミセル構造のネットワークがより強化することに起因して τ_{\max} 値も増加するため、EG 濃度の増加は、流動抵抗および熱伝達低減効果を示す Re' 数の範囲を拡大させる。一方、図 4～図 6 に示すように、EG 濃度の増加によって ODEAO 添加 EG 水溶液の粘度は増大するため、EG 濃度が増加した場合には、同一の τ_{\max} 値が得られる実験条件でも、その流動抵抗および熱伝達低減効果を示す Re' 数の範囲は縮小するものと考えられる。また、ODEAO 添加濃度が増加した場合には、図 4～図 6 に示した粘度の増加が流動抵抗および熱伝達低減効果を示す Re' 数の範囲を縮小する効果よりも、図 15 の τ_{\max} 値の増加による Re' 数範囲の拡大の影響が相対的に大きいため、図 11～図 12 のように低減効果を示す Re' 数の範囲を増大する。このような関係から、本実験での流動抵抗および熱伝達低減効果を示す Re' 数の範囲は、EG 濃度および ODEAO 添加濃度の増加に伴う τ_{\max} 値の増大による Re' 数の範囲の拡大と、ODEAO 添加 EG 水溶液の粘度の増加による Re' 数範囲の縮小が相互に影響しあって決定されるものと考えられる。

本実験での流動抵抗および熱伝達低減効果を示す Re' 数の範囲は、まず EG 水溶液に ODEAO を添加した場合にミセル構造のネットワーク化の効果によって水に添加した場合よりも拡大し、EG 濃度 $C_e = 30 \sim 40 \text{ mass\%}$ 付近において最大値を示している。一方 EG 濃度 $C_e = 50 \text{ mass\%}$ の場合には、逆にミセル構造のネットワーク化の効果による τ_{\max} 値の増大よりも、ODEAO 添加 EG 水溶液の粘度増加の影響が相対的に大きくなるため、流動抵抗・熱伝達低減効果を示す Re' 範囲が $C_e = 30 \sim 40 \text{ mass\%}$ の範囲よりも狭くなったものと考えられる。また、ODEAO 添加濃度の増加によっても流動抵抗・熱伝達低減効果を示す Re' 範囲は増加する。

5. 結 論

界面活性剤添加による流動抵抗および熱伝達低減効果を冷熱輸送用有機ブライン（エチレングリコール水溶液）に添加した場合の挙動に関して実験的検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) 回転式粘度計による界面活性剤（ODEAO）添加エチレングリコール水溶液の粘度測定を行い、水に添加した場合よりも SIS 状態による粘度の増減現象が大きく現れることを解明した。
- (2) 流動抵抗および熱伝達の測定を行い、エチレングリコール水溶液温度および界面活性剤濃度の増加による流動抵抗・熱伝達低減効果の範囲の増加、およびエチレングリコール濃度の増加によるそれらの低減効果範囲の変化を定量的に明らかにした。
- (3) 流動抵抗および熱伝達低減効果を有する範囲を規定する限界せん断応力値を算定し、その値が水に界面活性剤を添加した場合よりも大きいことや、エチレングリコール水溶液温度、界面活性剤濃度、エチレングリコール濃度の増加に伴って増加することを明らかにした。

参 考 文 献

- (1) 薄井・鈴木, 機論, 67-658, B, (2001), 1305
- (2) 川口, 省エネルギー, 51-13, (1999), 18
- (3) Y. Kawaguchi, *Proceedings of Joint Irano-Japanese Seminar on Renewable Energy*, (2000)
- (4) 佐藤・三松・熊田, *Thermal Science and Engineering*, 7-1, (1999), 41
- (5) H. Usui, T. Itoh and T. Saeki, *Rheologica Acta*, 37-2, (1998), 122
- (6) K. Gasljevic and E. F. Mathys, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 84, (1999), 123
- (7) J. F. Eschenbacher, 中部, 鈴木, 熱工学カンファレンス講演論文集, No.03-30, (2003), 415
- (8) 稲葉・春木, 機論, 63-608, B, (1997), 1336
- (9) 稲葉・春木・堀部, 機論, 66-647, B, (2000), 1818
- (10) 春木・稲葉・堀部・古本・川合・中田・佐藤, 空気調和・衛生工学会論文集, 89, (2003), 1
- (11) 中田・稲葉・堀部・春木・佐藤, *トライボロジスト*, 49-1, (2004), 56
- (12) B. Lu, X. Li, J. L. Zakin and Y. Talmon, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 71, (1997), 59
- (13) 春木・稲葉・堀部・田中・中田・佐藤・Wael I. A. Aly, 第 24 回日本熱物性シンポジウム講演論文集, (2003), 363
- (14) H. Usui, T. Itoh and T. Saeki, *ASME Fluid Eng. Div. Conf.*, FED 237-2, (1996), 159
- (15) J. Myska and P. Stern, *Colloid Polym. Sci.*, 276, (1998), 816
- (16) 吉田, 進藤, 大垣, 山中, 新版界面活性剤ハンドブック, (1987), 8, 工学図書
- (17) W. M. Rohsenow, J. P. Hartnett and E. N. Ganic, *Handbook of Heat Transfer Applications Second Edition*, (1985), 2-1～2-50, McGraw-Hill Book Company
- (18) 日本熱物性学会編, 熱物性ハンドブック, (1990), 407, 養賢堂
- (19) 西・今井・笠井編, 界面活性剤便覧, 141, 産業図書