

ワイヤーコイルを用いた流動抵抗低減用界面活性剤添加水の
直円管内熱伝達促進*稲葉英男^{*1}, 春木直人^{*1}, 中田 達^{*2}
堀部明彦^{*1}, 古本直行^{*1}, 佐藤健次^{*2}Heat Transfer Enhancement of Water Flow in a Straight Pipe
with Drag Reduction Surfactant by Using Wire CoilHideo INABA^{*3}, Naoto HARUKI, Toru NAKATA, Akihiko HORIBE,
Naoyuki FURUMOTO and Kenji SATO^{*3} Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University,
3-1-1 Tushima-naka, Okayama-shi, Okayama, 700-8530 Japan

This paper has dealt with the heat transfer enhancement of flowing water with flow drag reduction additive into a heat transfer tube by inserting wire coils. The non-ion type surfactant was used as the additive to decrease the pipe flow resistance for the heat energy transport system. However, the decrease in the flow resistance was allowed to reduce the heat transfer coefficient in the heat transfer tube. Some kinds of wire coils having different diameters were tried to enhance the heat transfer in the heat transfer tube. The effects of wire coils on the pipe friction and the heat transfer coefficients were elucidated under various experimental parameters of flow velocity, wire coil diameter, pitch and length.

Key Words: Surfactant, Flow Drag Reduction, Heat Transfer Enhancement, Wire Coil, Water Flow

1. 序 論

熱媒体水に鎖状高分子や界面活性剤等を微量添加することによる流動抵抗低減効果(トムズ効果)を利用した熱エネルギー輸送技術が注目されており, 実用化に向けて様々な研究が行われている. 著者ら^{(1)~(2)}は, 流動抵抗低減剤としての界面活性剤(第4級アンモニウム塩)を添加した水を, 直円管内に流動させた場合の流動抵抗や熱伝達等の測定, そして数値シミュレーションによる管内流動抵抗の予測検討結果を報告してきた. さらに, 著者らは, 実際の配管系を想定して, 界面活性剤添加水による曲管内の流動抵抗と熱伝達特性の解明を行ってきた⁽³⁾.

一方において, 使用済み界面活性剤の廃棄処理の問題, そして流動抵抗低減剤使用に伴う管内熱伝達の減少による熱交換効率の低下等, この種の流動抵抗低減法の欠点も指摘されている. 後者の欠点を克服するために, 熱交換器入口部にミセルスクィーザーを設けて界面活性剤の棒状ミセルおよび紐状ミセルを一時的に分断し, 流動抵抗低減効果を消失させる方法⁽⁴⁾や, 熱交換器の伝熱面にラムダ翼列状の乱流促進体の設置⁽⁵⁾や, 伝熱面を粗面にすること⁽⁶⁾によって, 伝熱促進を検討した研究も行われ始めている.

本研究は, 流動抵抗低減用界面活性剤利用による円管式熱交換器内の熱伝達低下を解消させるために, 乱流促進体としてワイヤーコイルを円管内に挿入した場合の熱伝達促進効果と流動抵抗の関係を実験的に明らかにしようとするものである. このワイヤーコイルによる乱流促進法⁽⁷⁾は, 大幅に設備の改修を行うことなく既設の熱交換器への適用が可能であるなど, 従来方法よりも早急な実用化が期待される. 本実験に用いる流動抵抗低減用の界面活性剤としては, 環境負荷の小さい非イオン性界面活性剤を採用し, ワイヤーコイル形状(素線径, ピッチおよび長さ)や界面活性剤添加水の流速が直円管内の熱伝達促進に及ぼす影響の検討を行うものである.

主な記号

A : 伝熱面積[m²], A_c : 粗面無次元流動抵抗量, C_o : 界面活性剤 ODEAO の添加濃度[ppm], d : 代表直径[m], d_i : 試験部円管内径[m], d_h : 水力直径[m], e : ワイヤーコイル素線径[m], G_c : 粗面無次元伝熱熱量, L_x : ワイヤーコイル長さ[m], L : 試験部円管長さ[m], Nu : ヌセルト数(= $\alpha d / \kappa$), P : ワイヤーコイルピッチ長さ[m], ΔP : 圧力損失[Pa], Pr : 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^* : 粗面レイノルズ数, St : スタントン数(= $Nu / (Re \times Pr)$), T : 温度[°C], T_m : 試験流体混合平均温度[°C], T_o : 界面活性剤 ODEAO の添加水温度[°C], $T_w(x)$: 流れ方向の位置 x における局所管壁温度[°C], T_{wm} : 試験部平均

* 原稿受付 2001年4月17日.

^{*1} 正員, 岡山大学大学院自然科学研究科(☎700-8530 岡山市津島中3-1-1).^{*2} 正員, 東邦化学工業(株)(☎237-0062 横須賀市浦郷町5-2931).

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

管壁温度 $^{\circ}\text{C}$], U_m : 試験部円管内平均流速 $[\text{m/s}]$, x : 円管入口よりの流れ方向の位置 $[\text{m}]$

ギリシア文字 α_m : 平均熱伝達率 $[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$, λ : 管摩擦係数, ρ : 密度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$, κ : 熱伝導率 $[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$, μ : 粘性係数 $[\text{Pas}]$, μ_w : 試験部壁面温度での粘性係数 $[\text{Pas}]$

添字 h : 水力直径 $[\text{m}]$, i : 内径, m : 平均, o : 界面活性剤オレイルジヒドロキシエチルアミンオキシド (ODEAO), w : 壁面,

2. 流動抵抗低減用界面活性剤の特徴

本研究で使用した流動抵抗低減用界面活性剤は、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ンオキシド ($\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{N}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OH})_2\text{O}$, 以下 ODEAO と略する) である。この界面活性剤は、洗顔剤の原料として広く使用されており、従来の研究において流動抵抗低減用界面活性剤として用いられている陽イオン性界面活性剤である第4級アンモニウム塩よりも、大幅に環境負荷が小さな物質である。

本実験では、低温熱エネルギー輸送システムへの応用を目的として、予め ODEAO 添加水の ODEAO 添加濃度 C_o および水温 T_o をパラメーターとした流動抵抗低減効果の予備検討を行い、十分な流動抵抗低減効果が得られる最適条件 ($C_o = 1500 \text{ ppm}$, $T_o = 15^{\circ}\text{C}$) を特定した。その添加水の条件において、ワイヤーコイルを挿入した場合の流動抵抗と熱伝達の測定実験を行っている。なお、実験に先立ち、前報⁽⁸⁾において使用した回転粘度計を用いて、実験条件における ODEAO 添加水の粘性の測定を行った結果、ODEAO 添加水の粘性はほぼニュートン流体の傾向を示したため、本実験では、得られた粘性データより算定された粘性係数 μ を用いて無次元数の計算を行った。

3. 実験装置および実験方法

図1は、流動抵抗および熱伝達測定実験装置の概略図を示したものである。図1に示すように、実験装置は、主に直円管試験部、流動ポンプ、試験流体貯留タンク、そして各部を接続する配管系から構成されている。さらに、試験流体貯留タンクに温度制御装置 (冷凍機、ブライントークおよびブラインポンプ) を設置することによって、試験部における試験流体温度を任意に制御できるようにしてある。なお、図1に示した実験装置のうち、試験部以外の構成部分は前報⁽²⁾と同一のものを使用してあるので、ここでは、その詳述は省略する。

図2は、試験部である直円管内に挿入して熱伝達

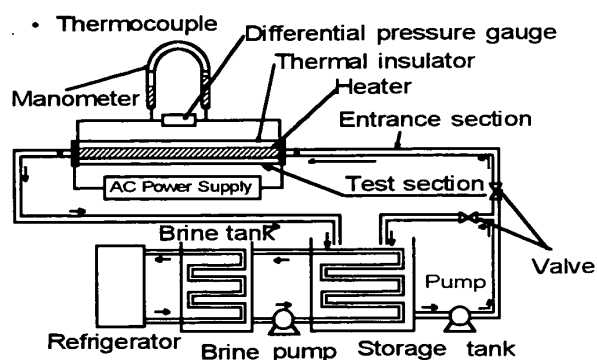


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

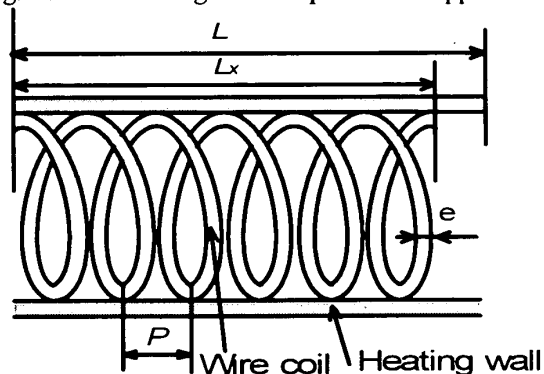


Fig.2 Detail of heat enhancement wire coil

促進を行うワイヤーコイルの形状と、円管内部への挿入状態を示したものである。直円管は、管内径 $d_i = 0.0156 \text{ m}$ 、長さ $L = 2.0 \text{ m}$ のステンレス製である。直管試験部上流側には、長さ約 2.0 m の助走区間を設けており、直管試験部入口では、試験流体は十分に発達した流れ状態を形成する。

本実験データの整理において、直円管試験部の代表直径 d としては、平滑管の場合には円管内径 d_i を使用し、図2に示すようにワイヤーコイルが挿入された場合には、ワイヤーコイルの素線径 e 、コイルピッチ長さ P およびコイル挿入長さ L_x の値から、次式(1)で求められる水力直径 d_h ($= 4 \times \text{流路体積} / \text{濡れ縁面積}$) を用いた。

$$d_h = \frac{4 \times \left(\frac{\pi d_i^2 L}{4} \right)}{\pi d_i L + \pi e \sqrt{P^2 + \left\{ \pi (d_i - e) \right\}^2} \times \frac{L_x}{P}} \quad (1)$$

流動抵抗実験では、直円管試験部における試験流体の圧力損失の測定のため、ステンレス製直円管の出入口部に圧力タップ (穴径 3.0 mm) を設置し、この圧力タップ間に接続された精密差圧発信器 (測定精度 $\pm 1.5\%$) およびマノメーター (最小目盛 1.0 mm) によって試験流体の圧力損失 ΔP の測定を行った。なお、流動抵抗は、次式(2)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。

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

一方、熱伝達実験は、ステンレス製円管に交流電流を通电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ある。なお、試験部の円管壁温度は、試験流体の混合平均水温 T_m より 1～2℃程度高く設定した。直円管試験部の管壁温度測定は、試験部の入口から $x=0\text{m}$ (入口部), 0.1m, 0.2m, 0.4m, 0.6m, 0.8m, 1.0m, 1.3m, 1.6m および 2.0m (出口部) の各位置において、円周方向上の試験部外壁側上部, 下部および側部に設けた素線径 0.1mm の T 型熱電対 (測定精度 $\pm 0.05^\circ\text{C}$) によって行った。各位置における局所管壁温度 $T_w(x)$ の評価は、円周方向の上・下・側部での管壁温度の平均値によって行っている。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 $T_w(x)$ を試験部長さ L で積分した次式(3)により求められる。

$$T_{wm} = \frac{1}{L} \int_0^L T_w(x) dx \quad (3)$$

この結果、直円管試験部における平均熱伝達率 α_m は、次式(4)で求められる。

$$\alpha_m = \frac{Q}{A \cdot (T_{wm} - T_m)} \quad (4)$$

ここで、 T_{wm} : 試験部平均管壁温度, 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、本実験で使用したワイヤーコイルは、ステンレス管加熱壁よりの漏洩電流を避けるために、表面が薄い絶縁体で被覆されており、コイル自体が発熱体となることを防止している。直円管試験部からの周囲環境への熱損失量は、全熱入力量の $\pm 2\sim 3\%$ 以下であった。

なお本実験では、試験流体 (水, ODEAO 添加水) の試験部入口温度を 15°C 一定に維持するため、試験流体貯留タンクでの冷却動作によって温度調整を行っている。さらに熱伝達測定実験では、試験部管壁温度を $16\sim 17^\circ\text{C}$ 以内とした。

4. 実験結果および考察

4.1 ワイヤーコイル長さの影響

4.1.1 流動抵抗特性 図3は、実験パラメータとして、ワイヤーコイル長さ比 (L_x/L , L_x : ワイヤーコイル長さ, L : 試験直管長さ) を 1.00, 0.75, 0.50 および 0.25 に変化させた標準ワイヤーコイル (コイルピッチ長さ $P=20\text{mm}$, コイル素線直径 $e=2.0\text{mm}$) を直円管試験部に挿入した場合の ODEAO 添加水 ($C_0=1500\text{ppm}$, $T_0=15^\circ\text{C}$) の流動抵抗の測定結果を、レイ

ノルス数 Re と管摩擦係数 λ の関係で示したものである。図3には、 $L_x/L=1.00$ のワイヤーコイルを試験部に挿入した場合の水の流動抵抗 (×印), およびワイヤーコイル未挿入の場合での ODEAO 添加水の直管試験部における流動抵抗の測定結果 (●印) も示してある。

図3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(5)は層流の状態および式(6)は乱流の状態 (Blasius の実験式) を示しており、本試験部における純水の流動抵抗は、式(5)および式(6)と標準偏差 $\pm 5.3\%$ で一致したことから、本実験装置全体の流動抵抗の測定精度は十分である。

$$\lambda = 64/Re \quad (5)$$

$$\lambda = 0.3164 Re^{-0.25} \quad (6)$$

図3より、ワイヤーコイル未挿入状態の ODEAO 添加水の λ 値 (●印) は、 $Re < 2300$ では水の層流流れの式(5)と一致するが、 $Re = 2300\sim 60000$ の乱流範囲において水の値 (式(6)) よりも最大約 70%低下している。この結果、本実験で用いた ODEAO は、乱流領域において十分な流動抵抗低減効果を示すことが確認される。さらに、 $Re > 60000$ では、前報⁽²⁾と同様に ODEAO 添加水流動時の強いせん断応力のために、ODEAO の棒状ミセルが破壊され、さらにミセル同士の絡み合いで形成されている紐状ミセルがほぐれて破壊される。その結果、ODEAO 添加水の λ の値は、乱流の式(6)の値まで急激に増加している。

一方、ワイヤーコイルを試験部に挿入した場合の ODEAO 添加水および水の λ 値は、本実験で使用した全てのワイヤーコイル長さにおいて、水の場合には式(5)および式(6)の λ 値、そして ODEAO 添加水の場合に

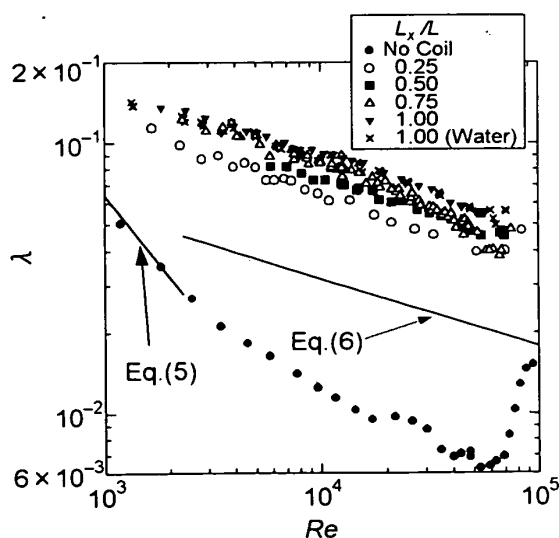


Fig. 3 Relationship between λ and Re

はワイヤーコイル未挿入の λ 値 (●印) よりも高い値を示す結果となる。さらに、同じ長さのワイヤーコイル ($L_x/L = 1.00$) を挿入した場合、水のみ λ 値 (×印) に対して、ODEAO 添加水の流動抵抗の値 (▼印) は、測定された Re 数の全範囲において、水の値とほぼ同じか、わずかに低い値を示しており、ワイヤーコイルの挿入によって、ODEAO 界面活性剤による流動抵抗低減効果自体も低下することが分かる。

既に著者ら⁽⁷⁾が明らかにしたように、円管内へのワイヤーコイルの挿入によって、流動水にはワイヤーコイルに沿った旋回流およびワイヤーコイルからの流れの剥離と円管伝熱面への再付着現象による循環流れが同時に発生する。このため、循環流れによる速度境界層のかく乱と、旋回流による管中央部と管壁近傍の流れの混合作用が同時に作用して、流動抵抗は増加する。一方、ODEAO 添加水の場合には、コイル挿入によって水の場合と同様に、添加水内には旋回流、そして流れの剥離と再付着現象に伴う比較的大きな循環流れが形成される。しかしながら、添加水中に存在する棒状ミセル (ミセル長さ 100~200nm 程度⁽²⁾) や紐状ミセルは、サブミクロンからミクロン程度の比較的小さな乱流渦の減衰に寄与するために、コイルにより発生した旋回流のような比較的大きな循環流れを抑制することが出来ず、図3に示すように ODEAO 添加水の λ 値の減少は認められなくなる。また、流れの剥離現象等により、コイル近傍にて局所的にせん断速度が増大して棒状ミセル自体を部分的に破壊することも、ODEAO 添加水の λ 値の増加に寄与するものと思われる。

また、ワイヤーコイル長さ比 L_x/L の減少と共に、ODEAO 添加水の λ 値は低下する傾向にある。これは、ワイヤーコイル後流の円管のみの流動領域において、 L_x/L の減少と共にワイヤーコイルにより発生した複雑な旋回流や循環流の効果が及ばない領域が増大、すなわち界面活性剤による流動抵抗低減効果が現れる領域の増大から説明することができる。

4・1・2 熱伝達特性 図4は、局所管壁温度 $T_w(x)$ の測定から求められた、様々なコイル長さ比のワイヤーコイル挿入状態での ODEAO 添加水の局所ヌセルト数 Nu_x (式(7)参照) の分布を示したものである。なお、測定はコイル未挿入の場合に十分な流動抵抗低減効果を示した $Re = 10000$ にて行い、他のワイヤーコイルの形状は図3と同じである。

図4に示すように、各ワイヤーコイルの挿入領域においての ODEAO 添加水の α_x 値は、全ての無次元コイル長さ (L_x/L) の場合においても、 $Nu_x = 90 \sim 110$ で

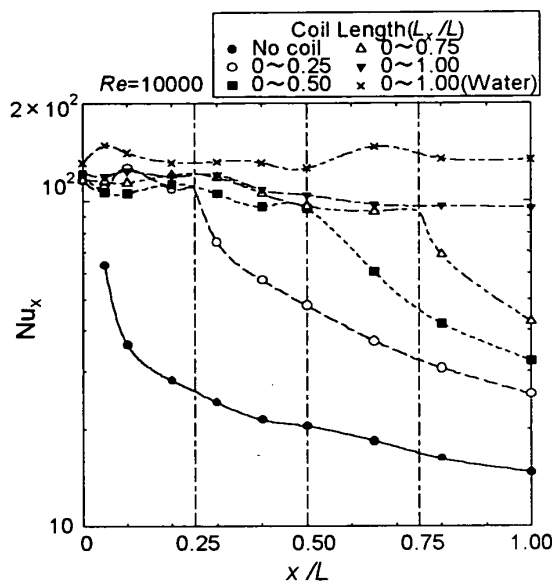


Fig. 4 Relationship between Nu_x and x/L

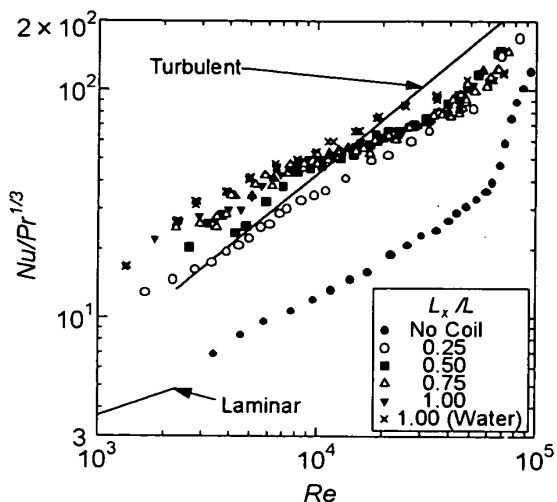
あり、未挿入の場合 (●印) よりも大幅に増加している。これは、ワイヤーコイル挿入領域においては、コイルによって発生した複雑な旋回流および流れの剥離と円管伝熱面への流れの再付着現象による2次的な循環流によって、前述の ODEAO による乱流抑制効果が減少し、結果として熱伝達が増大したためである。一方、 $L_x/L = 0.25, 0.50$ および 0.75 のワイヤーコイルの場合、コイル後流側に存在する円管のみの流動領域では、 Nu_x 値は流れ方向と共に徐々に減少して、最終的に円管のみの値 (●印) に漸近する傾向になるものと予想される。この傾向は、コイル後流において発生した旋回流等がすぐに消滅せずに徐々に減衰するため、界面活性剤による乱流抑制効果の影響が逆に下流側で次第に大きくなり、コイルによる熱伝達の促進効果が徐々に低下したためと考えられる。

さらに、 $L_x/L = 1.00$ のワイヤーコイル挿入の場合、水の局所ヌセルト数 (×印) に対して、ODEAO 添加水の Nu_x 値 (▼印) は、50 程度低い値を示している。すなわち、ワイヤーコイルの挿入を行うことによって、水に対する ODEAO 添加水の熱伝達の低減割合は約 15% となる。

図5は、図3の流動抵抗実験と同じワイヤーコイルを挿入した状態における ODEAO 添加水の管内平均熱伝達特性の測定結果を、 $Nu/Pr^{1/3}$ と Re 数の関係で示したものである。 Nu 数は、式(4)から求められた平均熱伝達率 α_m を用いて、次式(7)によって求めた。

$$Nu = \frac{\alpha_m \cdot d}{\kappa} \quad (7)$$

なお、式(7)における ODEAO 添加水の熱伝導率 κ の値には、水の値を用いてある。

Fig. 5 Relationship between $Nu / Pr^{1/3}$ and Re

また、図中の2本の直線は、従来のニュートン流体における管内層流および乱流の平均ヌセルト数に対する Sieder & Tate の関係式(8), (9)から、熱媒体として水を用いた場合の値を示したものである。なお、式(8), (9)と実測値との標準偏差は $\pm 7.5\%$ であり、十分な実験制度を有していることを予め確認している。

$$Nu = 1.86 \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{d}{L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (8)$$

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

図5に示すように、乱流における式(9)の値より、ワイヤーコイル未挿入条件での ODEAO 添加水の $Nu / Pr^{1/3}$ の測定値(●印)は最大70%程度低下し、流動抵抗低減効果と同様に十分な熱伝達の低減効果を示している。さらに、 $Re > 60000$ では、棒状ミセルおよび紐状ミセルの破壊に伴う、熱伝達の急激な増加を示す様子も確認された。

一方、ワイヤーコイルの直円管試験部への挿入に伴い、図5の ODEAO 添加水の Nu 値は、図4で明らかになったように、いずれのワイヤーコイル長さ比の場合でも未挿入の値(●印)より増加している。さらに、コイルによる熱伝達促進効果は、測定した全ての Re 数の範囲で測定された。また、ワイヤーコイル長さ比 L_x/L の減少に伴って、同じ Re 数での ODEAO 添加水の Nu 値は低下している。特に、 $L_x/L = 0.25$ の場合では、ワイヤーコイル未挿入の区間が最も長いため、図4で示したように、この区間での旋回流等が大きく減衰し、逆に界面活性剤による乱流抑制効果が大きくなる。このために、 $L_x/L = 0.25$ のコイル挿入での平均 Nu 数は、 $L_x/L = 0.25 \sim 1.00$ の区間における局所熱伝達の低下によって、最も低い値となっている。

一方、ワイヤーコイル長さ比 $L_x/L = 1.00$ を使用した場合、図5より、水の Nu 数(×印)に対する ODEAO 添加水の Nu 値は、最大10%程度しか低下しない。これは、図4で示したように、流動抵抗と同様に、ワイヤーコイル挿入によって発生する旋回流および循環流れ等による乱流促進効果によって、界面活性剤の棒状ミセルおよび紐状ミセルによる熱伝達低減効果の影響が相対的に減少したためである。さらに、 Re 数が増加した範囲では、コイルを挿入した場合でも、水および ODEAO 添加水の Nu 数の差が小さくなっている。これは、 Re 数の増加に伴うせん断応力の増加や旋回流の増大によって ODEAO の棒状ミセルおよび紐状ミセルが切断され、低減効果そのものが消滅したためである。

4.2 ワイヤーコイルピッチの影響

筆者ら⁽⁷⁾によるワイヤーコイルを用いた水の熱伝達促進に関する実験結果で示したように、低流速域ではワイヤーコイルによる流れの剥離や旋回流の勢いは弱い、流速の増加に伴って、ワイヤーコイルによる流れの剥離や旋回流の勢いが強くなる。そして、剥離した流れが剥離地点から下流側で円管壁に再付着し、さらにコイルに沿う旋回流によって管中央の流れと管壁近くを流れる流体の乱流混合が促進される。この場合、ワイヤーコイルピッチが短い場合には、再付着前に次のコイル部に到達するため、流れは再付着せずにコイル上端部を滑るように流動し、乱流促進効果は小さくなる。このため、あるコイルピッチ長さ以上になれば、流れの再付着現象が発生して流動抵抗と熱伝達が促進するが、コイルピッチの増大は、逆に一定長さでの剥離回数を減少させる。その結果、コイルピッチの増加に伴って、促進された流動抵抗および熱伝達の値は、あるコイルピッチ値にて最大値を示した後、減少する傾向を示す。

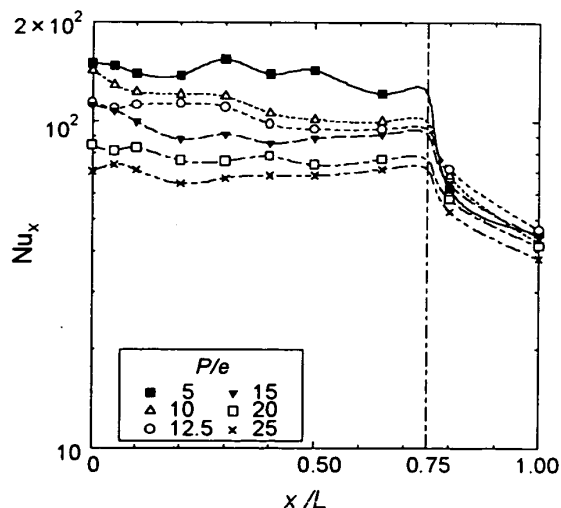
Fig. 6 Relationship between Nu_x and x/L

図6は、 $Re = 10000$ において、ワイヤーコイルピッチ比 $P/e = 5, 10, 12.5, 15, 20$ および 25 (コイル素線径 $e = 4.0\text{mm}$, コイル長さ比 $L_x/L = 0.75$) のワイヤーコイルを用いた場合の ODEAO 添加水の局所ヌセルト数 Nu_x を示したものである。図6より、定性的な傾向は図4と同じであるが、コイルの挿入領域 ($L_x/L = 0 \sim 0.75$) では、 P/e 値の増加に伴って局所 Nu_x は減少している。この結果、本実験でのコイルピッチ比 P/e の変化の範囲は、コイルピッチ比 P/e の増加と共に熱伝達促進効果が既に低下する領域であると考えられる。

図7および図8は、図6と同じワイヤーコイル ($P/e = 5, 10, 12.5, 15, 20$ および 25) を用いた場合の ODEAO 添加水の流動抵抗と平均熱伝達特性をそれぞれ示したものである。なお、その他の実験条件は図6と同じである。図7および図8に示すように、ワイヤーコイルピッチ比を変化させた場合でも、ODEAO 添加水の管摩擦係数 λ および平均熱伝達率 $Nu / Pr^{1/3}$ の定性的な傾

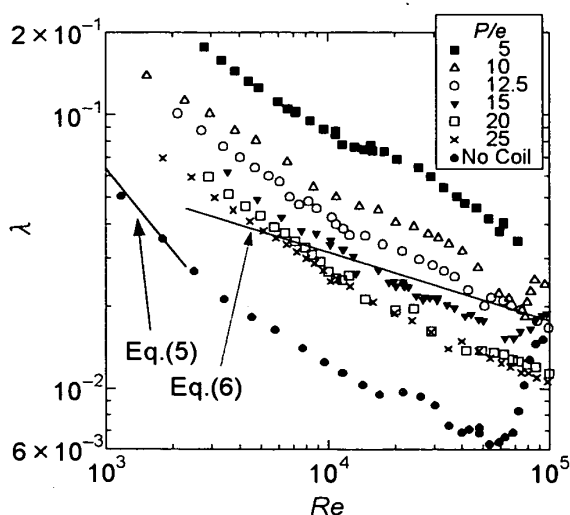


Fig. 7 Relationship between λ and Re of ODEAO solution

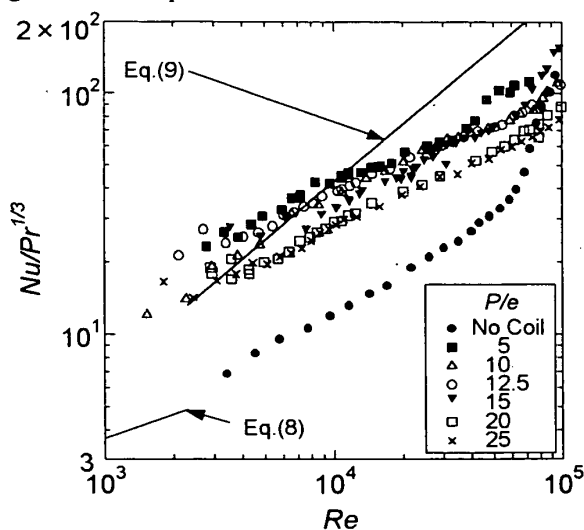


Fig. 8 Relationship between $Nu / Pr^{1/3}$ and Re

向は、図3および図4と同じであるが、同じ Re 数において、コイルピッチ比 P/e の増加と共に Nu の値は減少している。この原因としては、図7および図8での測定条件のうち、コイル素線径は一定のため、コイルピッチ比の増大によって試験管内におけるコイルの巻数が減少して、それに伴うコイルによる流れの剥離および再付着の回数の減少が、大きく影響したためである。

4・3 ワイヤーコイル素線径の影響

図9は、 $Re = 10000$ において、ワイヤーコイル長さ比 $L_x/L = 0.75$, コイルピッチ長さ $P = 40\text{mm}$ を一定 (コイル巻き数を一定) とし、コイル素線径比 e/d_i をパラメーターにした場合の ODEAO 添加水の局所ヌセルト数 Nu_x を示したものである。図9に示すように、ODEAO 添加水の局所ヌセルト数 Nu_x は、コイル挿入区間においては $e/d_i = 0.128$ の場合が最も低い値である。さらに、素線径比が増加した場合には局所ヌセルト数 Nu_x が増加する傾向を示し、 $e/d_i = 0.192$ にて Nu_x が最大値を示している。これは、 e/d_i の増加に伴って、コイルを通過する場合の流れが大きく剥離してから再付着するため、熱伝達の促進が大きくなったためである。

しかしながら、さらに e/d_i の増加した場合には、 Nu_x の値は逆に低下する傾向を示している。図9では、コイルピッチ長さは一定であるため、ワイヤーコイル素線径の増加に伴ってコイルピッチ比 P/e が減少、つまり、コイルの巻き線間の隙間が狭くなっている。その結果 $e/d_i = 0.256 \sim 0.321$ の範囲では、4.2節で述べたように、コイルピッチ比 P/e が小さい場合で発生する流動様式 (コイルによって剥離した流れが管内壁面に再付着する前に次のコイルの巻き線に到達する) の領域になっていると考えられる。このため、 $e/d_i =$

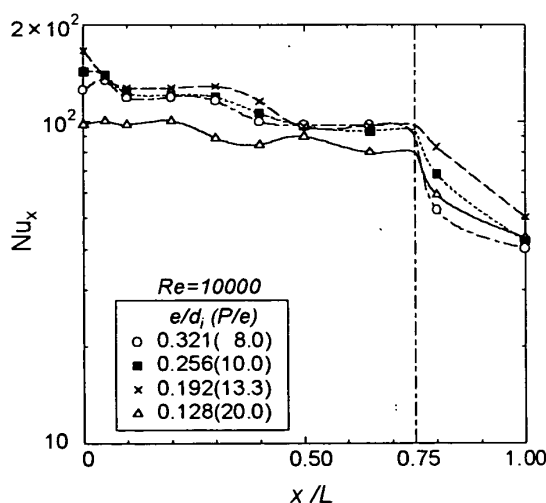


Fig. 9 Relationship between Nu_x and x/L

0.256~0.321 ($P/e = 10.0 \sim 8.0$) のコイル挿入の場合には、再付着による熱伝達促進効果が相対的に低下することになる。

また $P = 40 \text{ mm}$ の場合の Nu_x が最大値を示すコイルピッチ比は $P/e = 13.3$ であり、図6 ($e = 4.0 \text{ mm}$) での最大値 ($P/e = 5.0$ 以下と予測) と異なっている。これは、試験部でのコイル巻き数が一定であるため、素線径の増加によって剥離流れの再付着までの距離が長くなったことを意味している。

図10および図11は、一定のコイルピッチ長さ ($P = 40 \text{ mm}$) の場合において、ワイヤーコイル素線径比を $e/d_i = 0.128, 0.192, 0.256$ および 0.321 としたワイヤーコイルをそれぞれ試験部に挿入した場合の ODEAO 添加水 (ODEAO 添加濃度 $C_o = 1500 \text{ ppm}$, 水温 $T_o = 15^\circ\text{C}$) の流動抵抗および熱伝達特性を示している。なおワイヤーコイル長さは一定 ($L_x/L = 0.75$) である。

図10および図11より、ODEAO 添加水の管摩擦係数 λ と熱伝達の値 $Nu/Pr^{1/3}$ の値は、ワイヤーコイル素線径比が $e/d_i = 0.128$ から 0.192 へと増加するに従っ

て、全ての Re 数の測定範囲において増加する傾向を示している。これは、コイル素線径の増加に伴って、発生した剥離流れや旋回流れの勢いが相対的に増加したためと考えられる。さらに、コイル素線径比を $e/d_i = 0.256$ から 0.321 へと増加すると、 $Nu/Pr^{1/3}$ の値は逆に低下する傾向にある。この場合、図9で考察したように、コイルピッチ比 P/e が小さくなるため、ワイヤーコイル表面からの剥離流れが管壁面に再付着する前に次のコイル位置に達したため、相対的に熱伝達促進効果が低下することによる。

5. 無次元実験整理式

第4章に示した実験結果より、以下に示した無次元実験整理式の検討を行った。本実験では、筆者らによる前報⁽⁷⁾と同様に、挿入コイルが挿入された伝熱面を粗面と仮定して、従来の粗面の熱伝達を表す実験整理法による整理を行っている。前報の無次元実験整理式においては、コイルピッチ比 $P/e = 10$ を適用条件の境界としている。これは、 $P/e \geq 10$ では、コイルによる乱流促進効果の主要因が流れの剥離・再付着から旋回流に変化することにより、 $P/e \leq 10$ の範囲において、コイルの存在を粗面と仮定した実験整理を行っている。

本実験では、流動抵抗低減効果の原因である ODEAO の棒状ミセルおよび紐状ミセルは、旋回流が促進効果の主要因となった領域においても、コイル近傍では部分的に破壊され、乱流促進効果に影響することが予測される。このため、コイルによる伝熱面の表面形状の変化を考慮することが可能なように、旋回流が促進効果の主要因である領域 ($P/e \geq 10$) においても表面を粗面と扱っている。

図12は、従来から提案されている⁽⁹⁾粗面の熱伝達係数を表す無次元熱伝達量 G_c と粗面レイノルズ数 Re^* の関係によって、ODEAO 添加水の実験結果を示したものである。この場合、粗面の代表長さである粗度には、ワイヤーコイル素線径 e を粗面の代表長さとすることによって、無次元熱伝達量 G_c と粗面レイノルズ数 Re^* を、それぞれ次式(10)および式(11)で求めた。

$$G_c = \left(\frac{\lambda/4}{2St} - 1 \right) / \sqrt{\frac{\lambda/4}{2} + A_c} \quad (10)$$

$$Re^* = \left(\frac{e}{d_i} \right) Re \sqrt{\frac{\lambda/4}{2}} \quad (11)$$

ここで、 St はスタントン数 ($= Nu/(Re \cdot Pr)$) であり、 Nu 数と Re 数の計算には、式(1)で定義される水力直径 d_h を代表長さとするここと、ワイヤーコイルピッチの影響を評価している。さらに、 A_c は G_c と同様にワイヤーコイルを粗面とすることによって、式(12)で定義さ

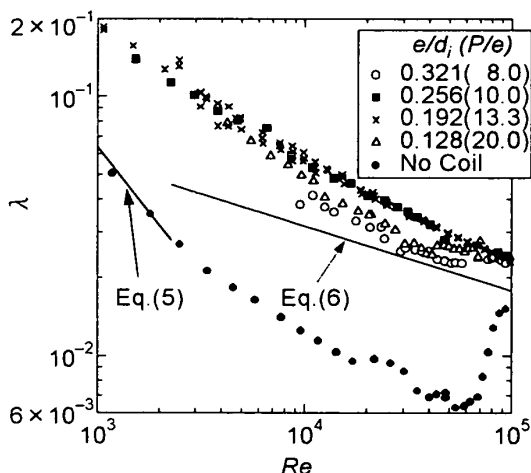


Fig. 10 Relationship between λ and Re

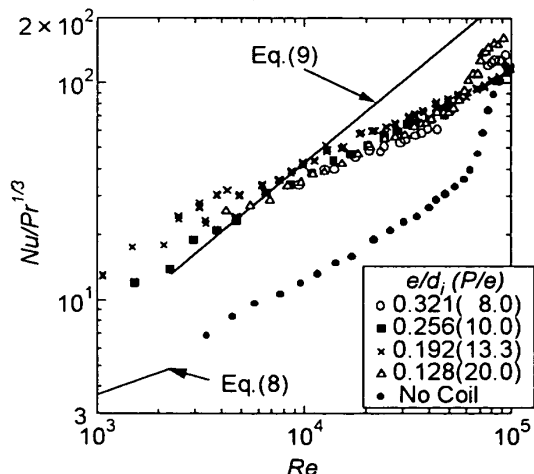
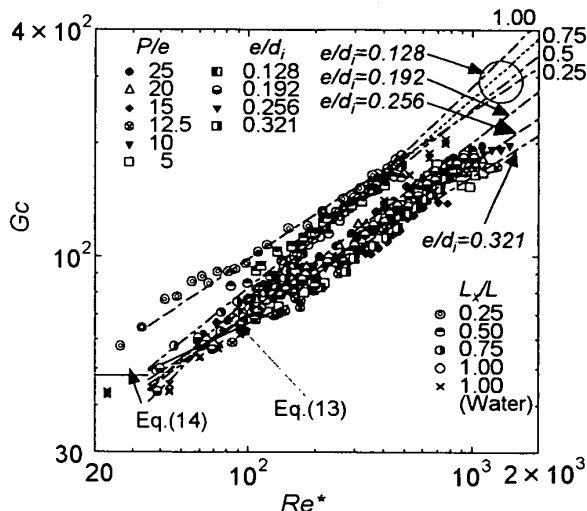


Fig. 11 Relationship between $Nu/Pr^{1/3}$ and Re

Fig. 12 Relationship between Re^* and G_c

れる無次元流動抵抗量である。

$$A_c = \sqrt{\frac{2}{\lambda/4} + 2.5 \ln\left(\frac{2e}{d_h}\right)} + 3.75 \quad (12)$$

また、図12中において式(13)および式(14)で示された直線は、筆者ら⁽⁷⁾によって提案されていたワイヤーコイルを乱流促進体として用いた場合の水の Re^* と G_c に関する無次元実験整理式を示したものである。

$$G_c = 18.2 Re^{*0.280} \quad (13)$$

$$Re^* \geq 35, P/e = 2.5 \sim 10$$

$$G_c = 48.0 \quad (14)$$

$$Re^* < 35, P/e = 2.5 \sim 10$$

図12に示すように、標準ワイヤーコイル (ワイヤーコイルピッチ比 $P/e = 10$ 、長さ比 $L_x/L = 1.00$ および素線径比 $e/d_i = 0.128$) を挿入状態での水の G_c 値は、式(13)および式(14)に対して、著者ら⁽⁷⁾での測定範囲条件 ($Re^* = 7 \sim 100$ ($Re = 400 \sim 6000$)) では $\pm 11.0\%$ 以内で一致しており、著者らの測定データ⁽⁷⁾ との本実験値の整合性は十分である。

図12より、 $d_i = 0.0156m$ の円管における ODEAO 添加水の無次元熱伝達量 G_c と粗面レイノルズ数 Re^* の関係を整理した結果、以下に示す無次元実験整理式(15)が導出された。なお、式(15)と実測値との誤差 (%) の標準偏差は 12.5% であり、適用条件の Re 数は、流動抵抗低減効果が確認された範囲とした。

$$G_c = 19 \cdot \left(\frac{e}{d_i}\right)^{0.70} \cdot \left(\frac{L_x}{L}\right)^{-0.81} \times Re^{*N} \quad (15)$$

$$N = 0.26 \cdot \left(\frac{e}{d_i}\right)^{-0.39} \cdot \left(\frac{L_x}{L}\right)^{0.28}$$

適応条件：

$$Re^* = 35 \sim 1000 (Re = 2300 \sim 60000), P/e = 5 \sim 25, \\ e/d_i = 0.128 \sim 0.321, L_x/L = 0.25 \sim 1.00, d_i = 0.0156m$$

6. 結論

界面活性剤を熱輸送媒体に添加する流動抵抗低減効果を利用したエネルギー輸送システムにおいては、流動抵抗の低減と同時に熱伝達が低減する。熱交換器における熱伝達率を増大するために、熱伝達促進体 (ワイヤーコイル) を直円管試験部に挿入した場合の流動抵抗および熱伝達特性を把握するため、ODEAO 添加水による実験を行い、以下の結論を得た。

1. ワイヤーコイルの挿入によって、流動抵抗低減効果を有する ODEAO 添加水の熱伝達を促進できることが判明した。
2. ワイヤーコイルによる旋回流、流れの剥離および再付着の発生、および高せん断速度域における ODEAO 界面活性剤の棒状ミセル (紐状ミセル) の破壊によって、ODEAO 界面活性剤添加による流動抵抗低減効果を減少させることができる。
3. ワイヤーコイル長さ L_x 、ピッチ P および素線径 e をパラメーターとした ODEAO 添加水の流動抵抗および熱伝達率の測定結果から、各パラメーターの効果を定量的に明らかにすることができた。さらに、 $Re \leq 6.0 \times 10^4$ の範囲において円管内直径に対するワイヤーコイル素線径比 $e/d_i = 0.192$ で極大のヌセルト数を示す結果を得た。
4. ワイヤーコイル挿入条件を粗面状態として扱うことにより、ODEAO 添加水の熱伝達に関する無次元実験整理式を導出した。

本研究費の一部は、NEDO エコ・エネルギー都市プロジェクト「高密度熱輸送に利用する界面活性剤の研究開発」における研究経費を利用しており、ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 稲葉・尾崎・春木・浅野, 機論, 61-589. B. (1995), 3304
- (2) 稲葉・春木, 機論, 63-589. B. (1997), 1336
- (3) 稲葉・春木・堀部, 機論, 66-647. B. (2000), 1818
- (4) Li, P.W., Daisaka, H., Kawaguchi, Y., Yabe, A., Hishida, K. and Maeda, M., 2nd Eng. Foundation Conf. on Turbulent Heat Transfer, 2. (1998), 21
- (5) 佐藤・三松, 熊田, Thermal. Sci. Eng. 7-1. (1999), 41
- (6) M. R. de Guzman, T. Saeki, H. Usui and T. Nishimura., J Chem. Eng. Japan, 32-4. (1999), 402
- (7) 稲葉・尾崎・金岡, 機論, 60-569. B. (1994), 240
- (8) 稲葉・春木, 熱物性, 10, (1996), 48
- (9) Han, J. C., Glicksman, L. R. and Rohsenow, W. M., Int. J. Heat Mass Transfer, 21. (1978), 1143