

管内流動抵抗低減用界面活性剤を添加した低温水の
曲がり管部における流動抵抗低減効果と熱伝達特性*稲葉英男^{*1}, 春木直人^{*2}, 堀部明彦^{*1}Flow Resistance and Heat Transfer Characteristics of Flowing Cold Water
with Flow Drag Reduction Surfactant in Curved PipesHideo INABA^{*3}, Naoto HARUKI and Akihiko HORIBE^{*3} Okayama University, Graduate School of Natural Science and Technology,
Tsushimanaka 3-1-1, Okayama, Okayama, 700-8530 Japan

This paper has dealt with the flow resistance and heat transfer characteristics of flowing cold water with flow drag reduction additive in curved pipes. A cationic surfactant was used as the flow drag reduction additive. The flow drag resistance and the local heat transfer coefficient of cold water flow in some curved pipes were measured under the constant heat flux heating wall condition. It was found that the flow drag and heat transfer reduction effect by the surfactant was depended on the angle and curved ratio of the curved pipes. The nondimensional correlative equations of flow resistance and heat transfer coefficient of cold-water flow with the surfactant in the curved pipe were derived in terms of various nondimensional parameters.

Key Words: Surfactant, Flow Drag Reduction, Curved Pipe, Convection Heat Transfer

1. 序論

水系の熱輸送媒体に各種の流動抵抗低減剤(界面活性剤又は鎖状高分子等)を添加し,発生する流動抵抗低減効果(トムズ効果)によりポンプ動力の低減や配管からの熱損失の軽減を意図した高効率な熱エネルギー輸送技術が注目されている。Usuiら⁽¹⁾は界面活性剤の添加による円管内流動抵抗低減に関する実験と数値解析の比較検討を行っている。またKawaguchiら⁽²⁾はトムズ効果による乱流抑制機構解明のため,レーザー流速計により界面活性剤添加水の矩形流路内での速度分布や乱流強度の測定結果を報告している。さらに,佐藤ら⁽³⁾は界面活性剤添加水の乱流特性の測定と乱流促進体を付した平板状熱伝達面における伝熱促進の検討を行っている。R. Smithら⁽⁴⁾も水溶性高分子添加水の円管内熱伝達特性の報告を行っている。筆者らも,これまでに流動抵抗低減剤として鎖状高分子⁽⁵⁾,界面活性剤^{(5)~(6)}及びパルプ繊維⁽⁷⁾を用いた場合の円管内流動抵抗低減と熱伝達特性に関する研究を報告している。

これらの研究は,主に円形や矩形の直管試験部の流動と熱伝達特性の解明に焦点を当てているが,流動抵抗低減効果を利用する冷暖房システム等では,直管以外にも様々な配管付属品が使用されている。特に,流動方向の変更には様々な曲率の曲がり管が用いられて

いる。このような曲がり部を有する配管における流動抵抗や熱伝達特性に関する研究としては,伊藤⁽⁸⁾,森ら^{(9)~(10)}及びJanssenら⁽¹¹⁾により,曲がり管における水などのニュートン流体の流動抵抗や熱伝達特性に関して,発生した剥離流れや2次流れの存在が大きな影響を及ぼすことが報告されている。

一方,ニュートン流体に代わり流動抵抗低減剤添加水が曲がり管内を流動する場合には,曲がり部で発生する2次流れやはく離流れなどにより,その流れ構造が直管部の場合と大きく異なり,その流動抵抗及び熱伝達特性も直管部の場合とは異なる傾向を示すものと思われる。

本論文は,流動抵抗低減剤を添加した低温水が曲がり管内を流動した場合の流動抵抗と熱伝達特性の解明を目的としたものである。本研究では,曲がり部の多い建物内配管や熱交換器内の伝熱管を対象として,比較的直径の小さな円管で様々な曲率半径比をもつ曲がり管領域における流動抵抗低減剤添加水の管内速度分布,流動圧力損失そして局所及び平均熱伝達率の実測を試みている。最終的には,流動抵抗低減剤添加水の曲がり管部の管摩擦係数と平均熱伝達率に関して,曲がり管部の曲がり角度,曲率半径比そして流速等の影響を加味した無次元実験整理式の提案を行うものである。

主な記号

C_d : DTAC 添加濃度, C_p : 比熱, d : 曲がり管内直径, De : デーン数 ($=Re \times [r/R]^{0.5}$), DTAC: 塩化ドデシルトリメチルアンモニウム, I : 電流, K : 擬塑性粘度,

* 原稿受付 1999年10月6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, 岡山大学工学部。

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

l : 試験部長さ, n : 構造粘度指数, Nu : ヌセルト数 ($= \alpha d / \kappa$), ΔP : 圧力損失, Pr' : 修正プラントル数 ($= Cp[(3n+1)/4n]^n K [8U_m/d]^{n-1} / \kappa$), Q : 熱量, R : 曲率半径, r : 曲がり管内半径, Re : レイノルズ数, Re' : 修正レイノルズ数 ($= 8^{1-n} [(3n+1)/4n]^{-n} [(\rho U_m^{2-n} d^n) / K]$), T : 温度, u : 局所流速, U_m : 平均流速, V : 電圧, x : 曲がり管入口よりの管軸長さ,

ギリシア文字 α : 熱伝達率, θ : 曲がり管部角度,
 λ : 管摩擦係数, ρ : 密度, κ : 熱伝導率

添字 1~10: 各曲がり管部角度の位置番号, c : 曲がり管, d : DTAC, i : 曲がり管入口, m : 平均, o : 曲がり管出口, s : 直管部, w : 壁面,

2. 曲がり管内における流動の特徴

Weske^(1,2) 及び Patankar^(1,3) によると, 流体が曲がり管内を流動する場合には曲がり管部にて外向きの遠心力の作用により2次流れ等が発生する. 従って, 曲がり管内に十分発達した状態で流入したニュートン流体の速度分布は, 図1に示すように水平面では最大局所流速の位置が管中心部から曲がり管部外側に移動し, 管軸に垂直な断面上では中心部の局所流速が低下したM状の特異な速度分布を示す. これに対して流動抵抗低減剤添加水が曲がり管内を流動する場合には, 前報⁽⁶⁾にて示した直円管内の速度分布の特徴(流動抵抗低減効果のある場合には, ニュートン流体の速度分布より管壁近傍の速度勾配が減少する)と同様に, 水(ニュートン流体)の速度分布とは異なる傾向を示すものと考えられる. 本研究では, 流動抵抗低減剤添加水の流動抵抗及び熱伝達の測定に先立って曲がり管試験部における速度分布の測定を行って, 曲がり管内における流動状態の把握を行った.

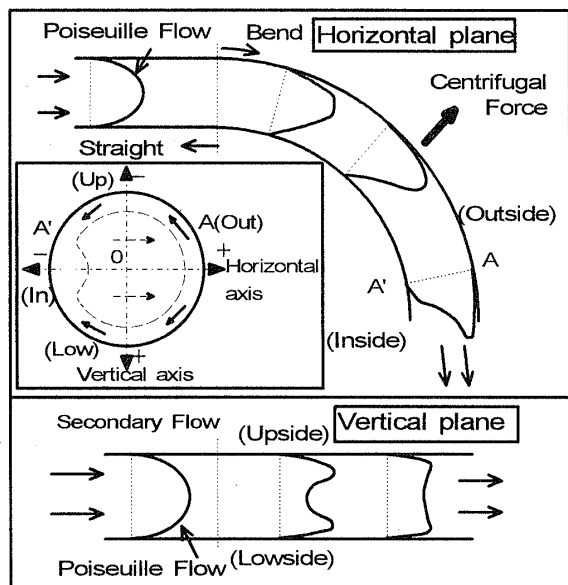


Fig. 1 The velocity profiles in the curved pipe

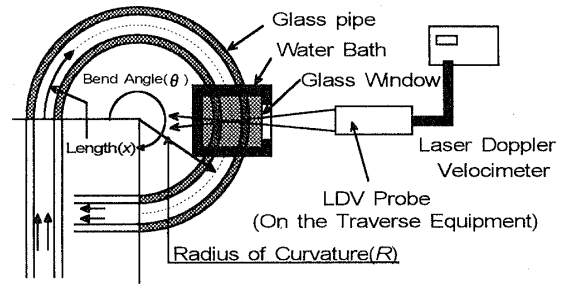


Fig. 2 Schematic diagram of Laser Doppler Velocimeter

図2は, 曲がり管内流速分布測定装置の概略を示したものである. 図2に示すように, 流速測定にはレーザードップラー流速計(LDV)を使用した. LDVは焦点距離285.00mm, 公差角11.33°そして出力10mWのHe-Neレーザーを発信して流速測定を行うものであり, さらに発信プローブを水平・垂直方向に移動可能なプローブ台に設置することによって, 0.01mmの間隔での測定が可能である. 一方, 流速分布測定用曲がり管部は, 管内直径 $d = 14.8\text{mm}$, 管外径 18mm , 曲率半径 $R = 250\text{mm}$ (曲がり管の曲率中心からガラス管中心軸までの半径距離), そして出口での曲がり管部角度 $\theta = 270^\circ$ のガラス製円管を使用した. さらに, 測定時にレーザー光がガラス製円管表面において屈折することを考慮し, 曲がり管試験部をガラス窓付きの水槽内に設置することにより, 曲がりガラス管壁での屈折の影響を避けることが可能である.

本実験で使用した流動抵抗低減剤は, 前報⁽⁶⁾と同じ界面活性剤(塩化ドデシルトリメチルアンモニウム, 以後DTAC, 及びサリチル酸ナトリウムをDTACと同質量添加)である. なお既に報告しているようにDTAC添加水は非ニュートン流体であり, その構造や物性値(粘性)は前報^(1,4)に示す通りである. 本研究でのDTAC添加水の無次元実験整理に関しては, 直管部における実験整理⁽⁶⁾と同様に, ベキ乗則近似によって定義される擬塑性粘度 K 及び構造粘度指数 n を用いて無次元実験整理を行っている.

図3及び図4は, 予め曲がり管部において流動抵抗低減効果を示すことを確認したDTAC添加水(DTAC添加濃度 $C_d = 920\text{ppm}$) 及び水の乱流速度分布を, 曲がり管部角度毎にそれぞれ管軸に水平面及び垂直面から半径比 $r/(d/2)$ と流速比 u/U_m の関係で示したものである. なお曲がり管部速度分布の測定位置は, 曲がり管部角度 $\theta = 0^\circ$ (曲がり管部入口で, 直管部の速度分布の傾向⁽⁷⁾を示す), $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 及び 260° とし, 各図において曲がり管部外側及び下側方向を+方向, 曲がり管部内側及び上側方向を-方向とした. なお層流状態の水とDTAC添加水の曲がり管部速度分布はほぼ同じ傾向を示したため, 図3及び図4

においてその測定結果は省略している。

図3に示すようにDTAC添加水の水平面での曲がり管内速度分布においては、水の曲がり管内速度分布と同様に、その最大局所速度を示す半径方向の位置が θ の増加と共に管中心部($r/(d/2)=0$)から曲がり管部外側($r/(d/2)>0$)に移動するなど、全般的には水と同様の傾向を示している。しかしながら、前報⁽⁶⁾にて示した直管部における流動抵抗低減剤添加水特有の傾向(管壁近傍におけるDTAC添加水の速度勾配が水の速度勾配より減少する)は、図3に示した水とDTAC添加水の曲がり管内速度分布を比較した結果、曲がり管部内側の管壁近傍($r/(d/2)<0$)においてのみ測定されている。このため、管全体で速度勾配が減少する直管部よりも、管の一部のみで速度勾配が減少する曲がり管部の流動抵抗低減効果は直管部の場合よりも減少すると考えられる。また、このDTAC添加水の曲がり管部内側の速度勾配の減少は、 $\theta=15^\circ$ 及び 30° に対しては直管($\theta=0^\circ$)におけるDTAC添加水の速度勾配の減少割合とほぼ同じであるが、 $\theta=90^\circ$ 、 180° 及び 260° ではDTAC添加水と水のみでの局所流速の差が縮まり、水のみでの曲がり管内速度勾配の値に近づいている。この結果、DTAC添加水の曲がり管内の流動状態は、曲がり管部角度 θ の増加に伴って直管部にて示される流動抵抗低減効果特有の流動状態から水のみでの曲がり管内における流動状態へと近づくことになる。

一方、図4に示した垂直面におけるDTAC添加水の曲がり管内速度分布においても、同じ測定位置の水のみの曲がり管内速度分布と比較した場合、図3と同様に θ の増加に伴って、曲がり管部入口($\theta=0^\circ$)で測定されたDTAC添加水と水のみでの速度分布の差が減少する傾向が示されている。

図3及び図4にて示したように、曲がり管部における流動抵抗低減剤添加水の速度分布が θ の増加と共に水との速度分布と一致していく原因としては、曲がり管部入口付近では発生した2次流れの勢いが弱いため、助走区間において十分発達していた直管内流動状態が曲がり管内においても維持されることになる。一方、曲がり管部の下流側では遠心力により発生する2次流れの勢力が強いため、界面活性剤添加の効果が現れづらくなるようである。これは、流動抵抗低減効果(トムズ効果)を示す原因と言われている⁽⁶⁾DTACの棒状ミセル塊が有効に作用する乱流渦は、曲がり管入口では直管の乱流渦と同等のスケールと考えられるが、曲がり管下流においては、勢力の強い2次流れの存在のために、曲がり管内にスケールの大きな乱流渦の出現となる。この勢いの強い大きなスケールの乱流渦

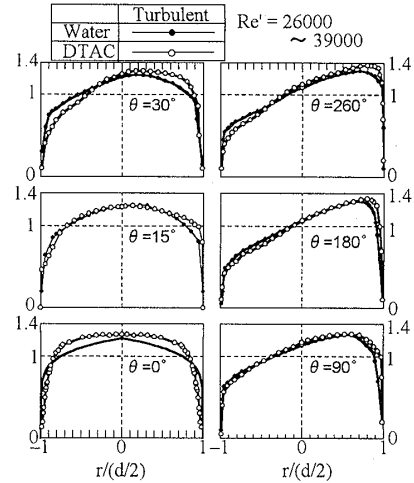


Fig.3 Velocity distribution in a curved pipe
(Horizontal plane)

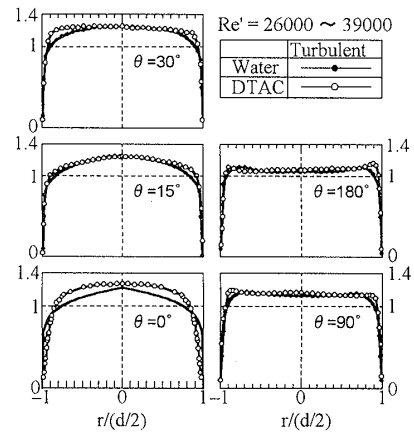


Fig.4 Velocity distribution in a curved pipe (Vertical plane)

は、相対的に長さの短い界面活性剤の棒状ミセル塊では抑制することができなくなり、結果的に曲がり管部の流動抵抗低減効果が直管の場合に比較して弱まるものと思われる。

3. 曲がり管部流動抵抗・熱伝達実験装置と実験方法

図5は、曲がり管部の流動抵抗及び熱伝達測定用実験装置の概略図を示したものである。図5に示すように実験装置は、曲がり管試験部、試験流動用ポンプ、試験水貯蔵タンクと、これらを接続する配管類から構成されている。また試験水貯蔵タンクには、温度制御装置(冷凍機、ブライントーク及びブラインポンプ)が組み込まれており、試験水を任意の温度に制御することが可能である。

本実験では、曲がり管部の曲率半径 R に対する曲がり管内半径 r の比である曲率半径比を $R/r=20, 34, 52$ 及び 92 、そして曲がり管部入口から出口までの曲がり管部角度を $\theta=45^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 及び 270° とした曲がり管部($d=17.7\text{mm}$, 肉厚 0.8mm)を使用し、各曲がり管部の直前に長さ 3.0m の助走区間を設置した。さらに、電源装置及び変圧器を介して変圧調整した電流を

ステンレス製曲がり管部に通電することにより等熱流束加熱壁条件を得た。また、各曲がり管部には、曲がり管部管壁温度の測定用T型熱電対（素線径 0.3mm, 測定精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ）が曲がり管試験部入口から計 10 地点（ $\theta = 270^\circ$ の曲がり管部の場合、曲がり管部角度 $\theta_1 \sim \theta_{10} = 0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ$ の位置）の上側, 下側, 内側及び外側の曲がり円管表面の計 40 カ所に、そして曲がり管試験部出入口に試験水温度測定用のT型熱電対（素線径 0.3mm, 測定精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ）を設置した。

一方、試験水の曲がり管部圧力損失測定のため、マンメータ（最小目盛 1.0mm）及び差圧発信器（測定精度 $\pm 1.5\%$ ）が曲がり管部の出入口の圧力タップ（穴径 2.5mm）間に接続されている。なお、曲がり管部出口に設置された圧力タップは、曲がり管部で発生する 2 次流れが圧力損失に与える影響を測定するため、曲がり管部の上, 下, 内及び外側の 4 カ所に設置した。

曲がり管部流動抵抗実験は低温水の輸送を目的として、まず試験水（DTAC 添加水）を所定の試験部入口水温度 $T_m = 12^\circ\text{C}$ に調整し、各曲がり管部を様々な管内平均流速 U_m で流動する場合の曲がり管部出入口間の圧力損失 ΔP を測定して行った。この曲がり管部における管摩擦係数 λ_c は次式(1)によって求められる。

$$\Delta P = \lambda_c \frac{\ell}{d} \frac{1}{2} \rho U_m^2 \quad (1)$$

一方、熱伝達実験では流動抵抗実験と同様に、まず所定の温度に調節した試験流体を曲がり管試験部に流動し、さらに曲がり管部の各管壁温度が試験流体温度より $1 \sim 2^\circ\text{C}$ 程度高くなるように曲がり管部に通電する電力量を調整して行った。熱伝達実験時の曲がり管入口から下流方向の位置 x における曲がり管部の管壁温度 $T_w(x)$ は、管壁温度測定用熱電対を設置した地点（曲がり管部角度 $\theta_1 \sim \theta_{10}$ ）における上側, 下側, 内側及び外側の管壁温度の平均値 $T(\theta_1) \sim T(\theta_{10})$ から求められる。そして曲がり管部の平均管壁温度 T_{wm} は、管壁温度 $T_w(x)$ を曲がり管部長さ ℓ で積分することにより計算可能である（式(2)）。

$$T_{wm} = \frac{1}{\ell} \int_0^\ell T_w(x) dx \quad (2)$$

また、曲がり管部に加えられる熱量 Q は、曲がり管部に印可した電流 I と電圧 V の積として求められる。これにより、曲がり管部における平均熱伝達率 α は式(3)にて示される。

$$\alpha = \frac{Q}{A \cdot (T_m - T_o)} \quad (3)$$

式(3)において、 A は曲がり管部伝熱面積であり T_m は曲がり管試験部入口及び出口温度 T_i, T_o の混合平均温

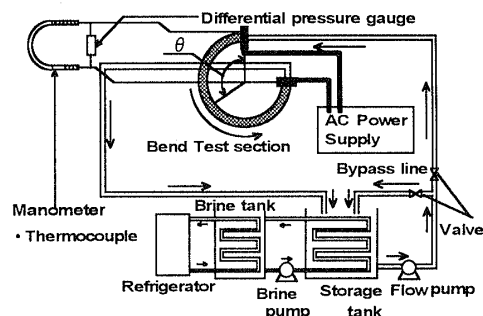


Fig. 5 Schematic diagram of experimental apparatus 度である。

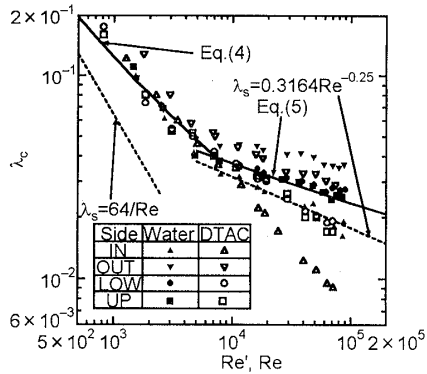
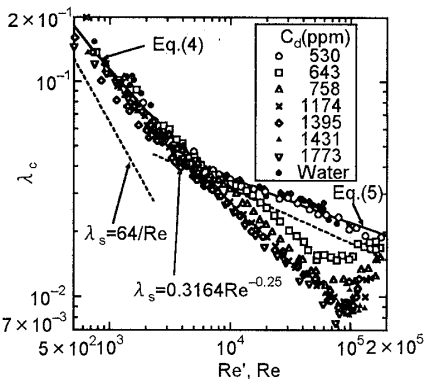
4. 曲がり管部の流動抵抗の実験結果及び考察

4.1 曲がり管試験部円周方向の影響 一般に流体が曲がり管内を流動する場合には、曲がり管部での外向きの遠心力により流体に 2 次流れ（図 1）や曲がり管内側壁面よりのはく離流れが発生する⁽¹²⁾。このため直管の場合と異なり、曲がり管断面の円周上の各位置で流動抵抗に差が生じる。図 6 は、曲率半径比 $R/r = 20$ の曲がり管部における水及び DTAC 添加水（DTAC 添加濃度 $C_d = 1300\text{ppm}$ ）の流動抵抗（測定範囲 $\theta = 0 \sim 90^\circ$ ）を、曲がり管上側（UP）、下側（LOW）、内側（IN）及び外側（OUT）の 4 点で測定された各管摩擦係数 λ_c と修正レイノルズ数 $Re' (= 8^{1-n} [(3n+1)/4n]^n [(\rho U_m^{2-n} d^n)/K])$ ⁽⁶⁾ の関係で示したものである。なお、図 6 の破線は、層流及び乱流状態での流動水のみの場合の直管部の流動抵抗値を示しており、実線は、層流及び乱流状態の流体における曲がり管部流動抵抗の実験式(4)及び(5)⁽⁸⁾を示している。

$$\text{層流: } \frac{\lambda_c}{\lambda_s} = \frac{21.5De}{(1.56 + \log De)^{5.73}}, \quad 13.5 < De < 2000 \quad (4)$$

$$\text{ただし, } \lambda_s = \text{直管の管摩擦係数, デイン数 } De = Re(r/R)^{0.5} \\ \text{乱流: } \lambda_c \sqrt{R/r} = 0.029 + 0.304 \{Re(r/R)^2\}^{0.25} \\ 0.034 < Re(r/R)^2 < 300 \quad (5)$$

図 6 に示すように、曲がり管部円周における各局所流動抵抗の値は、水のみの場合には、層流域及び乱流域において、円管上側と下側は同じ流動抵抗を示すのに対して、曲がり管外側では上, 下側での流動抵抗より大きく、曲がり管内側では逆に小さな流動抵抗を示している。この傾向は、特に乱流域において顕著に現れるようである。この外側の流動抵抗の増大は、曲がり管外側に 2 次流れ等による圧力が付加されるためであり、特に乱流域においては、流速の増加と遠心力による付加圧力の増大が大きく流動抵抗に影響を及ぼすようである。一方、DTAC 添加水の λ_c 値は、水の場合と同様に、曲がり管部上側及び下側がお互いに同じ値を示している。それに対して、曲がり管部外側では λ_c の値が大きく、そして曲がり管部内側では λ_c の値

Fig. 6 The difference of λ_c at the circumferential positionFig. 7 Relationship between λ_c and Re' or Re
($R/r = 34$, $\theta = 0^\circ \sim 270^\circ$)

は小さくなっているが、直管部と同様^{(5)~(7)}に乱流域において流動抵抗低減効果を示す添加濃度であるため、同じ測定位置での各局所流動抵抗の値は水のみ流動抵抗より小さな値となっている。

このような曲がり管部における流動抵抗の評価法として、伊藤⁽⁸⁾は円周上の上側、下側、内側及び外側の4点における局所流動抵抗の平均値を使用している。本研究においても、伊藤の流動抵抗の整理法によってデータをまとめている。

4.2 各パラメータ毎の流動抵抗低減効果

4.2.1 界面活性剤添加濃度の影響

図7は、曲がり管部 ($R/r = 34$) における水及びDTAC添加水の管摩擦係数 λ_c 。(測定区間 $\theta = 0 \sim 270^\circ$) と修正レイノルズ数 Re' の関係を、DTAC添加濃度 C_d をパラメータにして示したものである。図7に示すように、 $Re' < 5000$ の領域におけるDTAC添加水の λ_c は、いずれのDTAC濃度 C_d の場合でも水のみ曲がり管の層流実験式(4)と一致している。一方、 $Re' > 5000$ の領域では、 $C_d = 530$ ppmの λ_c は水の値と一致し、流動抵抗低減効果を示していないのに対して、 $C_d \geq 643$ ppmでの λ_c の値は乱流実験式(5)よりも低下する傾向にあり、曲がり管部でも流動抵抗低減効果が存在することになる。この場合、直管部にて測定された添加濃度の変化等に対する定性的な傾向 (C_d の増加に伴い λ_c の値は減少し、そして

Re' 数がある限界値以上では、 λ_c が増加し、最終的に水の値に近づき、流動抵抗低減効果が消失する等⁽⁶⁾と類似した傾向を示している。しかしながら、 $C_d > 1000$ ppmにおいては、DTAC添加濃度の増加にかかわらずほぼ同じ λ_c の値を示し、かつ、層流実験式(4)の延長線上に一致する。このように曲がり管部においてある濃度以上にDTACを添加した場合、流動抵抗低減効果の発生要因であるDTACの棒状ミセル塊の大きさ、またはその数が増加して乱流渦の消滅や抑制が最大限機能し、層流実験式(4)の延長線上に一致するまで層流化が行われる。

4.2.2 各測定区間における流動抵抗の変化

図8は、曲率半径比 $R/r = 20$ の曲がり管部において、DTAC添加水の管摩擦係数 λ_c と修正レイノルズ数 Re' の関係を、測定区間をパラメータにして示したものである。なお、図8での測定区間の角度範囲は $\theta = 0^\circ \sim 45^\circ$, $0^\circ \sim 90^\circ$, $0^\circ \sim 180^\circ$, $0^\circ \sim 270^\circ$ であり、DTAC添加濃度は、図7より十分流動抵抗低減効果が現れる濃度である $C_d = 1300$ ppmとした。また、図8には併せて直管部 ($d = 16$ mm, $l = 2.0$ m) における測定結果⁽⁶⁾も示してある。

図8に示すように、曲がり管部におけるDTAC添加水の各管摩擦係数の値は、すべての測定範囲において直管の場合より大きな λ_c の値を示しており、曲がり管部での流動抵抗低減効果は直管部の低減効果よりも弱まることを示している。さらに、測定区間の増加に伴ってDTAC添加水の λ_c 値も増加を示していることより、低減効果の消失傾向は増大している。これは、曲がり管部での測定区間の増加によって2次流れや内側壁よりのはく離流れによる影響が相対的に強まり、DTACの棒状ミセル塊によって抑制できない大きなスケールの乱流渦の生成量が増大したためと考えられる。また本測定結果は、先述した速度分布の結果から予測された低減効果の傾向と一致している。

4.2.3 曲率半径比の影響

図9は、曲がり管部の曲率半径比の増減がDTAC添加水の流動抵抗低減効果に与える影響を示したものである。実験に使用した曲がり管部は測定区間の角度範囲を $\theta = 0^\circ \sim 270^\circ$ とし、曲率半径比をそれぞれ $R/r = 20, 34, 52$ 及び 92 の4種類とした。また、DTAC添加濃度は 1500 ppmである。なお図9にも直管 ($d = 16$ mm, $l = 2.0$ m) で測定されたDTAC添加水の流動抵抗を示す。

図9に示すように、直管部の流動抵抗と比較して、曲がり管部におけるDTAC添加水の流動抵抗低減効果は、 $R/r = 20 \sim 52$ の曲率半径比での λ_c の値が直管部での λ_c 値より大きな値を示し、乱流実験式(5)に近い

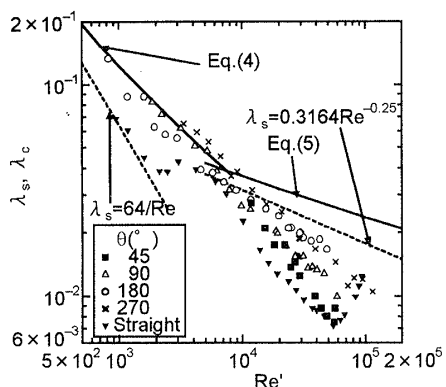


Fig. 8 Relationship between λ_c or λ_s and Re' as a function of measured length ($R/r = 20$)

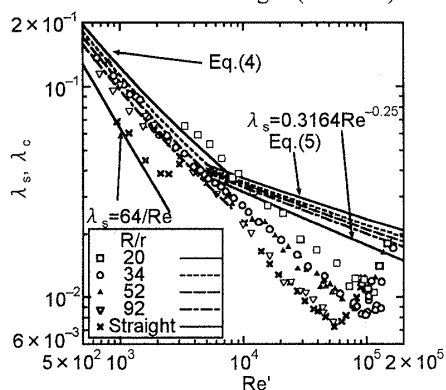


Fig. 9 Relationship between λ_c or λ_s and Re' as a function of curvature ratio ($\theta = 0^\circ \sim 270^\circ$)

ていることから、各曲率半径比において流動抵抗低減効果が喪失していることがわかる。しかしながら、曲率半径比の増加によって DTAC 添加水の λ_c の値は小さくなり、最終的に曲率半径比 $R/r = 92$ においては直管の場合の λ_s 値とほぼ一致し、曲がり管部での流動抵抗低減効果が直管部と同程度となる。この原因としては、曲率半径比の増加によって曲がり管部での遠心力や内側壁からのはく離流れの勢いが低下するために、DTAC の棒状ミセル塊による乱流渦の抑制が可能な水準の乱流状態になることが推察される。

曲がり管部における DTAC 添加水の流動抵抗低減効果に関して、 λ_c の実測データを最小自乗法により、修正レイノルズ数 Re' より求められるディーン数 $De (=Re' \times (r/R)^{0.5})$ 、曲率半径比 R/r 、及び測定範囲を示す曲がり管出口角度 θ (rad) の関数として実験整理式 (6) を平均偏差 9.7% で誘導した。なお、DTAC 添加濃度に関しては、十分に流動抵抗低減効果が発生する濃度以上 ($C_d > 1000$ ppm) としている。

$$\lambda_c = 6.01 \times \left(\frac{R}{r}\right)^{-0.519} \theta^{0.132} De^{-0.498} \quad (6)$$

適用範囲： $R/r = 20 \sim 92$, $\theta = \pi/4 \sim 3\pi/4$
 $Re' = 10^4 \sim 8 \times 10^4$

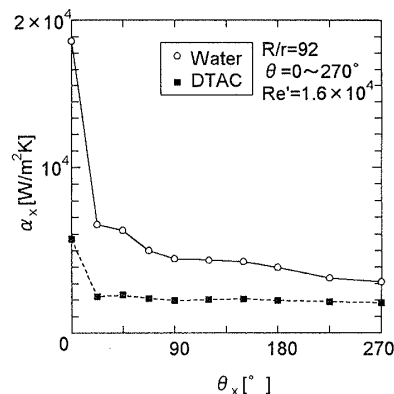


Fig. 10 Relationship between local α_x and θ_x

5. 曲がり管部の熱伝達率の実験結果及び考察

5.1 曲がり管部の局所熱伝達率 曲がり管部における DTAC 添加水の熱伝達特性を把握するために、曲がり管部における上側、下側、内側及び外側の平均値としての局所熱伝達率の測定を行った。図 10 は、曲がり管試験部（曲率半径比 $R/r = 92$ 及び測定区間角度 $\theta = 0^\circ \sim 270^\circ$ ）で測定した水及び DTAC 添加水（DTAC 添加濃度 $C_d = 1600$ ppm）の曲がり管部角度 θ_x における局所熱伝達率 α_x を示したものである。図 10 より、DTAC 添加水の局所熱伝達率 α_x の値は、曲がり管部全体にわたって水のみ α_x の値よりも小さな値を示すことから、曲がり管部においても DTAC 添加水に熱伝達の低減効果があることが判明した。また、 θ_x の増加に伴う α_x の低下の傾向は、水の場合よりも DTAC 添加水の方がより小さな θ_x の値で終了し、 $\theta_x = 45^\circ$ 以降では α_x の値はわずかに減少する傾向である。

5.2 曲がり管部円周方向の熱伝達率 前述の曲がり管内の流動抵抗のように、発生する 2 次流れやはく離流れなどにより曲がり管部の円周方向の局所熱伝達率の値にも差異が生じる。図 11 は、曲がり管試験部（曲率半径比 $R/r = 20$ 、測定区間角度 $\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$ ）において、円周方向の上側、下側、内側及び外側の 4 カ所で測定された DTAC 添加水 ($C_d = 1300$ ppm) 及び水のみ α_x の局所熱伝達率の値を、修正レイノルズ数と局所ヌセルト数 Nu_c 及び修正プラントル数 $Pr' (= Cp[(3n+1)/4n]^n K[8U_m/d]^{n-1}/\kappa)$ (6) の関係で示したものである。なお、図 11 に示した波線は、従来より報告されている直管部の発達した層流の熱伝達に関する実験式 ($Nu_s = 1.86[Re \cdot Pr \cdot d/\ell]^{1/3} [\mu/\mu_w]^{0.14}$)、及び乱流の熱伝達に関する実験式 ($Nu_s = 0.027Re^{0.8} Pr^{1/3} [\mu/\mu_w]^{0.14}$) の値であり、図 11 の実線は、曲がり管部での発達した層流の熱伝達の実験式 (7) (11)、及び乱流の熱伝達の実験式 (8) (15) を示している。

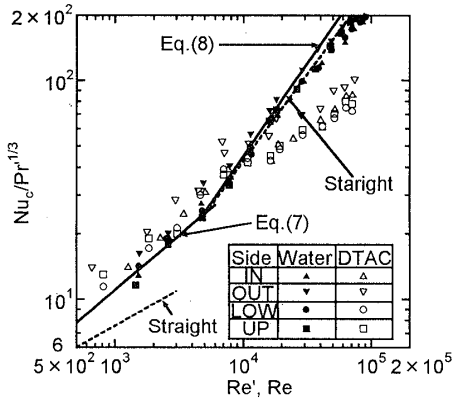


Fig. 11 Relationship between local $Nu_c/Pr^{1/3}$ and Re' or Re

層流: $Nu_c = \left[\frac{0.32 + 3(r/R)}{0.86 - 0.8(r/R)} \right] \times Re^{0.5} Pr^{1/3} \left(\frac{d}{l} \right)^{0.14 + 0.84 \frac{r}{R}} \quad (7)$

乱流: $Nu_c = 0.021 Re^{0.85} Pr^{0.4} \left(\frac{r}{R} \right)^{0.1} \quad (8)$

図 11 に示すように、定性的には水及び DTAC 添加水のいずれの局所ヌセルト数の値は、曲がり管内側 (IN)、上側 (UP)・下側 (LOW) がほぼ同じ値を示すのに対し、流動抵抗の場合 (図 6) と同様に外側 (OUT) が大きな値を示している。この曲がり管外側壁の大きな熱伝達率は、曲がり管外側壁での 2 次流れや内部はく離流れの存在により、局所的な熱伝達が増大するためである (11) ~ (15)。

5.3 各パラメータ毎の曲がり管平均熱伝達率

5.3.1 界面活性剤添加濃度の影響 熱伝達実験では、曲がり管管壁温度を上側、下側、内側及び外側の 4ヶ所の平均温度を用いて式(2)によって計算し、さらにその値を用いて式(3)により平均熱伝達率 α の値を求めている。図 12 は、図 7 と同じ曲がり管部において、DTAC 添加濃度をパラメータにして測定した DTAC 添加水及び水の平均熱伝達を示したものである。図 12 に示すように、 $Re' < 5000$ の領域では、DTAC 添加水の平均熱伝達の値は、水と同様に層流実験式(7)とほぼ一致している。一方 $Re' > 5000$ の領域においては、図 8 の流動抵抗低減効果と比較して、同じ添加濃度 ($C_d > 643$ ppm) 及び Re' 数の実験条件において乱流実験式(8)より DTAC 添加水の $Nu/Pr^{1/3}$ の値が減少し、乱流の抑制による熱伝達の低減効果を示す。さらに、 Re' 数が限界値以上になると熱伝達低減効果の喪失がみられ、水のみ乱流式 (8) に一致するまで熱伝達の増加となる。また、ある添加濃度以上 ($C_d > 1000$ ppm) では平均熱伝達の値は濃度依存性がなくなることも判明した。

5.3.2 測定区間における熱伝達 図 13 は、図 8 と同様に 4 つの測定区間 ($\theta = 0^\circ \sim 45^\circ$, $0^\circ \sim 90^\circ$, $0^\circ \sim 180^\circ$ 及び $0^\circ \sim 270^\circ$) の曲がり管部において測定された DTAC 添加水の測定区間の各平均熱伝達の

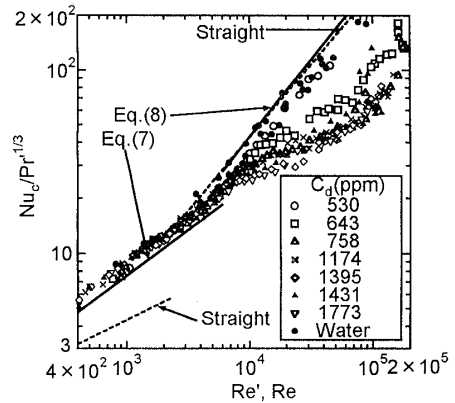


Fig. 12 Relationship between $Nu_c/Pr^{1/3}$ and Re' ($R/r = 34$, $\theta = 0^\circ \sim 270^\circ$)

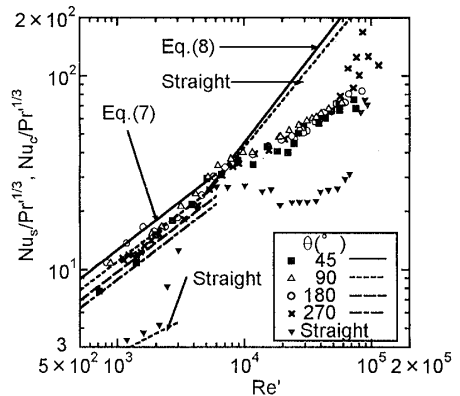


Fig. 13 Relationship between $Nu_c/Pr^{1/3}$ or $Nu_s/Pr^{1/3}$ and Re' as a function of measured length ($R/r = 20$)

値 ($Nu_c/Pr^{1/3}$) と修正レイノルズ数 (Re') の関係を示している。なお、実験条件は流動抵抗の測定 (図 8) と同じであり、また図 13 には直管部 ($d = 16$ mm, $l = 2.0$ m) における DTAC 添加水の平均熱伝達も示す。

図 13 から、曲がり管部における DTAC 添加水の平均熱伝達は、各測定区間において直管部の場合より最大 2 倍程度高い値を示している。これは、流動抵抗と同様に曲がり管部において主に 2 次流れによるスケールの大きな乱流渦が発生し、直管部よりも DTAC の棒状ミセル塊による乱流抑制機構が低下したためであると考えられる。また、流動抵抗のように θ の増加 (測定区間の増加) に伴って λ_c の値が増加する傾向は定性的には熱伝達の場合にも確認されるが、その傾向は図 8 で示した流動抵抗の変化よりも弱まる傾向にある。この原因としては、通常、直管において報告される界面活性剤による流動抵抗低減率よりも熱伝達の低減効果が大きい傾向 (16) が曲がり管部でも存在する事が考えられる。本実験では、 $\theta = 0^\circ \sim 45^\circ$ の測定区間において、既に曲がり管部の平均熱伝達は最も低減した場合となる層流の実験式(7)の延長線上に存在する結果となっており、測定区間の違いによる大きな差は見られなかった。

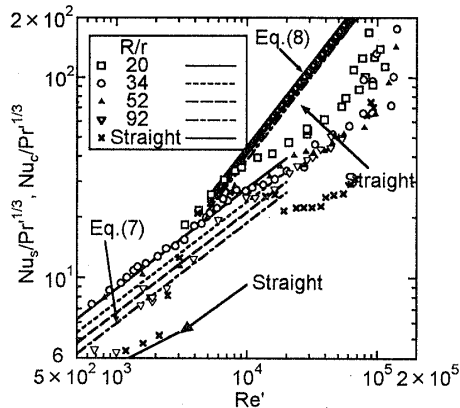


Fig. 14 Relationship between $Nu_c/Pr^{1/3}$ or $Nu_s/Pr^{1/3}$ and Re' as a function of curvature ratio ($\theta = 0^\circ \sim 270^\circ$)

5.3.3 曲率半径比の影響 図14は、曲がり管部の曲率半径比 R/r の変化がDTAC添加水の平均熱伝達低減効果に与える影響を示したものである。なお、実験条件は図9に示した流動抵抗と同じであり、図14には直管部 ($d=16\text{mm}$, $l=2.0\text{m}$) におけるDTAC添加水の測定結果も示している。

図14に示すように、 $Re' < 5000$ の領域では曲率半径比の増加に伴ってDTAC添加水の各測定値は低下する傾向を示している。これは、曲率半径比の増加によって曲がり管内の流れ状態が直管部の状態に近づき、2次流れ等による曲がり管特有の熱伝達促進効果が減少したためと考えられる。一方 $Re' > 5000$ の領域では、曲がり管部の曲率半径比の増加によってDTAC添加水の平均熱伝達の値は低下し、界面活性剤による熱伝達の抑止効果が現れる傾向にある。

図10～図14に示した曲がり管部におけるDTAC添加水の平均熱伝達に関して、平均ヌセルト数 Nu_c を、修正プラントル数 Pr' 、ディーン数 De 、曲率半径比 R/r 及び曲がり管の出口角度 θ (rad) の関数として、最小自乗法により平均偏差士15.0%以内で式(9)を誘導した。なお、流動抵抗に関する実験式と同様に、DTAC添加濃度に関しては、最大の熱伝達低減効果を示す添加濃度以上 ($C_d > 1000\text{ppm}$) とする。

$$\frac{Nu_c}{Pr'^{1/3}} = 2.03 \left(\frac{R}{r}\right)^{-0.076} \theta^{0.125} De^{0.381} \quad (9)$$

適用範囲: $R/r = 20 \sim 92$, $\theta = \pi/4 \sim 3\pi/4$

$$Re' = 10^4 \sim 8 \times 10^4$$

6. 結論

界面活性剤による曲がり管部での流動抵抗及び熱伝達低減効果の検討を目的として、界面活性剤 (DTAC) 添加水の曲がり管部における流動抵抗及び平均熱伝達の測定を行い、以下の結果を得た。

1. 曲がり管内における界面活性剤添加水の速度分布

の測定より、直管の場合に比較して、曲がり管壁面近傍での速度勾配が曲がり管下流に向かうに従って水のみ速度勾配に近づき、流動抵抗低減効果が減少することが判明した。

2. 曲がり管内流特有の流れである2次流れや曲がり管内側近傍のはく離流れ等の存在により、比較的大きな乱流渦の生成が界面活性剤の棒状ミセル塊による抑止効果を阻害することが推測された。

3. 様々な曲率半径比と測定区間を有する曲がり管内をDTAC添加水が流動する場合の流動抵抗の測定を行った。その結果、曲がり管部の流動抵抗低減効果は、曲率半径比の低下及び曲がり管下流部に向かうに従って直管の場合よりも減少することを明らかにした。さらに曲率半径比及び曲がり管角度の関数にして、曲がり管部の流動抵抗に関する実験整理式の導出を行った。

4. 曲がり管部におけるDTAC添加水の平均熱伝達に関する測定を行い、曲率半径比及び測定区間の変化が熱伝達低減効果に与える影響を検討し、熱伝達低減効果を示す領域での無次元熱伝達率であるヌセルト数を、曲率半径比、ディーン数、曲がり管角度及び修正プラントル数の関数としての実験整理式の提案を行った。

参考文献

- (1) Usui, H., Itoh, T. and Seki, T., *FED-Vol. 237, Fluid Eng. Div. Conf. ASME*, 2, (1996), 159
- (2) Kawaguchi, Y., Tawarayama, Y. and Yabe, A., *FED-Vol. 237 Fluid Eng. Div. Conf. ASME*, 2, (1996), 47
- (3) 佐藤・三松, 熊田, *Thermal. Sci. Eng.* 7-1, (1999), 41
- (4) Smith, R. and Edwards, M. F., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 24 (1981), 1059
- (5) 稲葉・尾崎・春木・浅野, 機論, 61-589, B, (1995), 3304
- (6) 稲葉・春木, 機論, 63-589, B, (1997), 1336
- (7) 稲葉・春木・堀部・尾崎, 機論, 64-621, B, (1998), 1462
- (8) 伊藤, 東北大学高速力学研究所報告, 14-137, (1959), 137
- (9) 森・中山, 機論, 30-216, (1964), 977
- (10) 森・中山, 機論, 31-230, (1965), 1521
- (11) Janssen, L. A. and Hoogendoorn, C. J., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 21, (1978), 1197
- (12) Weske, J. R., *J. Appl. Mech.* 15-4, (1948), 344
- (13) Patankar, S. V., Prapat, V. S. and Spalding, D. B., *J. Fluid Mech.* 67-3, (1975), 583
- (14) 稲葉・春木, 熱物性, 10, (1996), 48
- (15) Rogers, G. F. C. and Mayhew, Y. R., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 7, (1964), 1207
- (16) Rohsenow, W. M., Hartnett, J. P. and Ganiog, E. N., *Handbook of Heat Transfer Applications*, (19), 2-28,