抵抗低減界面活性剤水溶液の円管内流れにおける伝熱促進*

儲 仁 才^{*1}, Kyaw Naing^{*2}
熊 田 雅 弥^{*3}, 佐 藤 公 俊^{*4}

Heat Transfer Enhancement of Drag-Reducing Surfactant Solution Flow in a Circular Tube

Rencai CHU^{*5}, Kyaw Naing,
Masaya KUMADA and Kimitoshi SATO

^{*5} Research Center, Komatsu Ltd., 1200 Manda, Hiratsuka-shi, Kanagawa, 254-8567 Japan

An experiment was conducted to investigate the drag-reduction and the heat transfer characteristics in a surfactant water solution flow. It was confirmed that the percentage of the drag-reduction was more than 70% and simultaneously, the heat transfer coefficient was reduced at the same rate. In order to promote the heat transfer for the surfactant water solution flow, an enhancement method using a triangular rib was proposed. Comparing with the case without rib, it was found that the dependence of the drag-reduction and the heat transfer characteristics on Re and C was similar, but the critical Reynolds number at which the drag reduction reaches a maximum was smaller. Further, by the performance evaluation based on a constant pump power, it was verified that the compound method by the surfactant and the triangular rib is effective to improve the performance of heat exchangers.

Key Words: Drag-Reduction, Surfactant, Heat Transfer Enhancement, Forced Convection Heat Transfer, Triangular Rib

1. 序 論

熱交換器の性能向上には熱伝達率の向上と流動抵抗の軽減との両面があるが、熱伝達促進技術は、この数十年間の数多くの研究によりすでに加工限界まで近付いてきている。これに対して最近鎖状高分子あるいは界面活性剤の微量添加により水の流動抵抗が大幅に減少する現象いわゆるトムズ効果を利用した流動抵抗の軽減に関する研究が注目を浴びている。

しかし、このトムズ効果を対流伝熱面が含まれた系に応用する際に流動抵抗の低減と同等程度の熱伝達低下が多数の研究者⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾により確認されている。これに対して、著者ら⁽⁴⁾はダクト内でのCTAC水溶液流れを対象にこの歯状フェンス、デルタ翼列などを含んだ各種の乱流促進体による熱伝達の回復を試みた。稲葉ら⁽⁶⁾は螺旋状コイルを用いて界面活性剤添加水溶液管内流れにおける熱伝達を4倍ほど向上させた。岸本ら⁽⁷⁾は狭管路構造を持つミセルクィーザーを伝熱管上流側に挿入してミセル構造を崩すことにより熱伝達低下の流速範囲を小さくできることを示した。

本研究は円管内の伝熱面上流側に設置した三角形リブによる界面活性剤水溶液流れの熱伝達低下に対する抑制効果を実験的に調べ、最適なリブ形状を見出すことを目的としている。三角形リブを採用した理由は低い流動抵抗で高い熱伝達促進効果が期待できるからである⁽⁷⁾⁻⁽⁸⁾。

2. 主 要 記 号

A	: 伝熱面積 (m^2)
C	: 界面活性剤の濃度(ppm)
e	: 三角形リブの高さ (mm)
h	: 熱伝達率 (W/m^2K)
Nu	: ヌセルト数
Pr	: プラントル数
Q	: 加熱量 (W)
R	: ポンプ動力基準の性能比
Re	: レイノルズ数
T	: 温度 ($^{\circ}C$)
X	: リブを原点とした座標 (m)
λ	: 摩擦係数
θ	: リブ先端角度 (rad)

添字

cr	: 臨界値
f	: 流体
fi	: 各銅ブロックに対応する流体
i	: 各局所伝熱面 (銅ブロック) 番号

* 原稿受付 2002年1月16日。

^{*1} 正員, (株)小松製作所中央研究所(☎254-8567 平塚市万田1200)。

^{*2} 岐阜大学大学院(☎501-1193 岐阜市柳戸1-1)。

^{*3} 正員, 岐阜大学工学部。

^{*4} 正員, (独)産業技術総合研究所ものづくり先端技術研究センター(☎305-8564 つくば市並木1-2-1)。

E-mail: ninzai_chiyo@komatsu.co.jp

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

Fig. 2 Heat transfer unit

- m : 平均
s : 平滑管
w : 壁面
wi : 各銅ブロック表面
x : リブを原点とした位置

3. 実験装置と方法

図1に、貯水タンク、渦巻き吸込ポンプ、ノズル付き整流室、試験管部、拡散室、流量計からなる閉ループの本実験流路を示す。試験管部は長さ2mの助走区間⑤、189mmのテストセクション⑥と1mの下流直管部⑦により構成される。試験管は透明塩化ビニル製で、内径Dは41mmである。テストセクションは圧力分布測定ユニットと伝熱ユニットとに置き換えられる。圧力の測定には、テストセクションに間隔20mmで並べた7個の静圧測定孔とその上流・下流側に125mmの間隔で並べた12個の静圧測定孔から圧カトランスジューサーにより行った。テストセクション(長さ189mm)における圧力損失は、上流側と下流側の静圧分布からテストセクションの入口と出口まで外挿することにより求めた。また、リブ装着の場合ではリブの影響を受けない上流及び下流側の静圧分布から外挿して求めた。なお、本実験範囲ではリブの静圧分布に対する影響は400mm以内に収まることを確認した。

図2に伝熱ユニットの詳細を示す。厚さ1mmの断熱材兼シール材のシリコンシートを介した10段の18mm幅の銅製円管により構成される長さ189mmの伝熱面(銅ブロック)において熱伝達率の測定を行った。各銅ブロックの主ヒータの背面に内・外面に熱電対を取り付けた塩化ビニルパイプを介して補助ヒータを装備し、さらにガラスウール筒を配置した。実験では塩化ビニルパイプの内・外面における

Fig. 3 Shape and location of triangular rib

Fig. 4 Relationship between λ and Re

熱電対の温度差を常にゼロにするように補助ヒータを加熱して熱損失を防いだ。また、各伝熱面(面積 A_f)の温度 T_w は各銅ブロックに埋め込んだ熱電対により測定し、各伝熱面に対応する流体バルク温度 T_f は主ヒータの電流・電圧測定値から求めた加熱量 Q_f から算出し、局所熱伝達率 h_f は次式により求められ、

$$h_f = Q_f / A_f (T_w - T_f) \quad (1)$$

各ブロックの局所熱伝達率の算術平均値を平均熱伝達率 h とした。また伝熱実験では安定なミセル構造を得るため試験部入口水温は23℃に、銅ブロックの温度は28.5℃にした。

図3(a)と(b)に、三角形リブの形状とその配置をそれぞれ示した。図の e と θ はそれぞれ管内面から測ったリブ高さとしリブ先端部の角度を表す。リブ厚みは1mmで、管内面の円周方向に等間隔で配置され、2枚のフランジ(厚み10mm)により固定され、伝熱面先端からの距離は10mmである。リブ数が2~4の場合ポンプ動力基準の性能比が最適値を取るという馬淵らの結果に基づき、今回の実験ではリブ数を3と一定にし、リブ高さ e (7.3~13.6mm)とリブ先端角度 θ (15°~60°)をパラメータに実験を行った。また、抵抗低減剤として陽イオン界面活性剤の塩化セチルトリメチルアンモニウム(略称CTAC, $CH_3(CH_2)_{15} - N(CH_3)_3Cl$)と同重量の棒状ミセル構造をもたらす対イオンとしてのサリチル酸ナトリウム(NaSal)との混合水溶液^{(4),(9),(10)}を用いた。

4. 実験結果と考察

Fig. 5 Relationship between λ/λ_{cr} and Re/Re_{cr}

4.1 平滑流路

4.1.1 流動抵抗 図4に, CTAC水溶液濃度Cをパラメータとして管摩擦係数 λ を Re に対して示す。 Re の定義には水の粘性係数を用いた。図には平滑管内における摩擦係数に対応するBlasiusの相関式と最大可能な抵抗低減効果を表すVirk⁽¹¹⁾の式も並記した。図から水の場合では本実験装置による測定結果はBlasiusの式とほぼ一致する。また, CTAC水溶液における λ の Re に対する依存性として, 低 Re では λ が大幅に減少し, ある Re において最小値を取り, 平滑管内の摩擦係数まで回復していく。ここでこの Re を臨界レイノルズ数 Re_{cr} と定義し, $Re < Re_{cr}$ では抵抗低減領域と, $Re > Re_{cr}$ では抵抗回復領域と称する。さらに Re_{cr} に対応する摩擦係数を臨界摩擦係数 λ_{cr} と, λ/λ_{cr} を比摩擦係数と, Re/Re_{cr} を比レイノルズ数と定義する。

図5に, 本測定値と佐藤ら⁽⁴⁾のダクト (等価直径 $D_h=37\text{mm}$) における実験値を λ/λ_{cr} と Re/Re_{cr} で示す。流路直径が37~41mmの場合, Re/Re_{cr} が1以下では, 溶液濃度が50~500ppmの範囲で本実験結果と佐藤ら⁽⁴⁾の結果は多少ばらつくが次式により整理される。

$$\frac{\lambda}{\lambda_{cr}} = \left(\frac{Re}{Re_{cr}} \right)^{-0.87} \quad (2)$$

また, Re/Re_{cr} が1以上での摩擦抵抗の回復過程は次式により表せる。

$$\frac{\lambda}{\lambda_{cr}} = 1.06 + 2.75 \ln \left(\frac{Re}{Re_{cr}} \right) \quad (3)$$

4.1.2 熱伝達特性 図6に, Cをパラメータとした Nu と Re の関係を示す。 Nu と Re 定義には水の熱伝導率と粘性係数を用いた。図にはDittus-BoelterとGnielinski⁽¹²⁾の式も併記した。本実験での伝熱面は流体力学的には発達した領域にあるが, 熱的には温度助走区間にあたるため, 発達した流れの温度助走区間に対して提案されたGnielinskiの式と一致している。図から流動抵抗が大幅に低減される

Fig. 6 Relationship between Nu and Re Fig. 7 Relationship between Nu/Nu_{cr} and Re/Re_{cr}

同時に熱伝達率も同程度に減少し, 最大7割程度の熱伝達率低下が確認される。また, Re の増大に伴う Nu の低下傾向と摩擦抵抗の低減傾向とはほぼ一致するが, Nu_{cr} に対応する Re_{cr} は λ_{cr} に対応する Re_{cr} より若干小さい⁽³⁾。ここで, 比ヌセルト数 Nu/Nu_{cr} を定義し, 摩擦係数の場合と類似な整理を行った結果を図7に示す。図には佐藤ら⁽⁴⁾の矩形ダクトの結果も表示した。図7から直径が37~41mmの流路において Re/Re_{cr} が1以下の場合では Nu/Nu_{cr} と Re/Re_{cr} とは次式で整理される。

$$\frac{Nu}{Nu_{cr}} = \left(\frac{Re}{Re_{cr}} \right)^{0.27} \quad (4)$$

また, Re/Re_{cr} が1以上の場合すなわち熱伝達の回復領域は次式により整理できる。

$$\frac{Nu}{Nu_{cr}} = 1.03 + 6.47 \ln \left(\frac{Re}{Re_{cr}} \right) \quad (5)$$

さらに, 式(2)と式(4)における Re_{cr} の相違を無視するとレイノルズアナログと類似した次式が得られる。

$$\frac{\lambda}{\lambda_{cr}} = \left(\frac{Nu}{Nu_{cr}} \right) \left(\frac{Re}{Re_{cr}} \right)^{-1.14} \quad (6)$$

これは臨界点以下の Re 領域では摩擦抵抗の低減度合いと熱伝達の低下度合いとはほぼ一対一の関係を持つことを意味している。

4.2 リブ装着流路

4.2.1 流動抵抗 図8にCTAC添加時の λ と Re の関係の一例を, パラメータCに対して示す。 Re 定義には平滑流路と同じように水の粘性係数を用い

 Fig. 8 Relationship between λ and Re

 Fig. 9 Relationship between λ and Re with triangular rib

図には水の場合の実験結果およびBlasiusの相関式も並記した。水の場合では同条件での平滑流路より λ はおおよそ2倍程度増大し、 Re が大きいほど λ の増加が高くなる。CTAC添加時の結果を考察すると、平滑流路の場合と同じように Re に対して抵抗低減領域、回復領域と乱流領域と分けられ、抵抗低減領域において Re と C が大きいほど抵抗低減効果は顕著になるが、平滑流路の場合より λ の低減効果は若干低目で λ の Re に対する変化はなだらかになり、また低い溶液濃度 C において抵抗低減効果が飽和する。ちなみに $C=500\text{ppm}$ では6割程度の抵抗低減効果が得られている。

図9に $C=200\text{ppm}$ での λ と Re の関係をリブ寸法に対して示す。装着されたリブの形状抵抗が大きいほど λ の Re に対する変化は小さくなる傾向が見られる。また、リブが高いほどリブ角度が大きいほど λ が大きくなるが、 $e=10.5\text{mm}$ のリブだけに注目すると 30° リブのほうは 60° リブの場合に比べ、 λ は半分以下になっている。

図10にリブ寸法の Re_{cr} に及ぼす影響を示す。図には平滑流路の結果も並記した。平滑流路の場合と同じように C が高いほど Re_{cr} が大きくなる傾向がみられるが、リブ装着により Re_{cr} が全体的に下がっており、リブが高いほど Re_{cr} が小さくなる傾向であり、 60° リブより形状抵抗の小さい 30° リブのほうが比較的大きな Re_{cr} を持ち、その極限值は平滑流路の場合の Re_{cr} となる。

4.2.2 熱伝達特性 図11に図8と対応した

 Fig. 10 Dependence of Re_{cr} on C

 Fig. 11 Relationship between Nu_m and Re

 Fig. 12 Relationship between Nu_m and Re with triangular rib

Nu_m の C と Re に対する関係を示す。 Nu_m と Re の定義には平滑流路と同じように水の物性値を用いた。図には水の結果、Gnielinski⁽¹²⁾の整理式とDittus-Boelterの式も併記した。図から Nu_m の Re に対する依存性はリブ無しの場合と類似し、 Re の増加に従い熱伝達特性は熱伝達低下領域、遷移領域と乱流領域に大別される。また平滑流路の場合と同じく C が大きいほど熱伝達低下領域は広くなり、 C が200ppm以上になると摩擦抵抗と対応し熱伝達低下が飽和する傾向が見られるが、平滑流路の場合より熱伝達低下領域での Re に対する Nu_m の変化が若干急になるとともに熱伝達低下率も65%と小さくなっている。

図12に100ppmCTAC添加時 Nu_m と Re の関係をリブ寸法に対して示す。リブが高くなるほど、またリブ角度が大きいほど熱伝達率が高くなるが、流動抵抗の場合と違い流れに対する投影面積に比例しない。例えば、 60° リブの結果に注目すると、リブが高いほど Nu_m が高くなり Nu_m の Re に対する変化がより急になるとともに熱伝達低下率が小さくなる傾向が示

Fig. 13 Distribution of local Nusselt number

されるが、 30° リブの場合はリブ高さの増加にともなう上述の変化が目立たなくなっている。これは摩擦抵抗の増加はリブの形状抵抗に大きく左右されるのに対して、熱伝達率の増加は主にリブからの吹き降ろし流れによる再付着およびこれに伴う壁面近傍流れの加速ならびに乱れとによる相乗効果およびリブ間の加速効果に支配されている⁽⁷⁾⁻⁽⁸⁾からと考えられる。ちなみに、リブ装着により熱伝達低下率が60%以下にとどまる。

図13に $Re=2.5 \times 10^4$ での流れ方向における局所ヌセルト数分布を示す。リブ高さ $e=10.5\text{mm}$ で、図(a)と(b)はそれぞれリブ角度 $\theta=60^\circ$ と $\theta=30^\circ$ の場合の結果である。図には平滑流路の場合の実験結果も並記した。まず図(a)に注目して考察する。平滑流路の場合ではCTAC添加により伝熱面先端からの距離に伴い熱伝達率が低下する傾向は水の場合より比較的急勾配になっており、すなわち伝熱面下流になるほどCTAC添加による熱伝達の低下度合いは大きくなる。リブ装着時ではリブ間の流体加速効果のため二次元乱流促進体の場合に促進体直後で生じる熱伝達率の著しい低下領域(再循環領域)は特に存在しない。また平滑流路における局所熱伝達率と比較してリブからの距離 $X=60\text{mm}$ 前後で局所熱伝達促進率は最大値を取り、その以降の下流側において基本的にはリブからの距離の増大に従いリブによる熱伝達促進効果が小さくなる。そのためリブから60mm以降の下流側において平滑流路の場合と比べて熱伝達率の降

Fig. 14 Dependence of performance ratio on C

下は若干急になっている傾向が見られる。

次に図(b)について説明する。図(a)の 60° リブの場合と同じようにリブ直後において再循環領域が特に存在せず、リブからの距離 $X=45\text{mm}$ 前後で局所熱伝達促進率は最大値を取り、それ以降ではリブからの距離の増加に従う促進効果の低下傾向は 60° リブの場合より顕著である。

以上に述べた 60° リブと 30° リブの局所熱伝達特性から、以下のような見解が得られる。リブ角度が大きいほど全体的に高い熱伝達促進率を得られると同時に、再付着効果による最大局所熱伝達促進率が下流側にシフトする。また、 30° リブによる促進効果の持続性は 60° リブより弱く、特に伝熱面下流側においてリブの促進効果は完全になくなることが分かった。これはリブ角度をパラメータとしてリブ間隔を適当に設けることによる平均熱伝達率のさらなる向上が期待できることを意味している。

4.2.3 性能評価 前述のようにリブにより熱伝達が促進されると同時に流動抵抗も大幅に増加するため、この種の促進方法の有効性が問われる。本研究ではポンプ動力($\lambda^{1/3} Re$ に比例)条件で熱伝達促進に関する性能評価を行った。すなわち式(7)で示すようにCTAC添加でリブ装着時の全伝熱面平均ヌセルト数を Nu_m 、水の場合の平滑流路における全伝熱面平均ヌセルト数を Nu_s とし、両者の比をポンプ動力基準性能比 R と称する。

$$R = Nu_m / Nu_s \quad (7)$$

この性能比 R を用い、それぞれのリブに対して性能評価を行った結果、 30° リブは 60° リブより高い性能比を持つことが明らかになり、 30° リブの装着と50ppmのCTAC添加により本実験 Re 範囲において R は常に1を超える。また、 60° のリブではリブが高いほど R が大きくなり、しだいに飽和する傾向が見られる。 30° リブでは本実験のリブ寸法範囲において最適リブ高さ($e=12.1\text{mm}$)が存在し、この最適リブの R と $\lambda^{1/3} Re$ との関係を図14に C に対して示す。水の場合では R は最大1.9にも達し、ポンプ動力の増大に従い低下していく。CTAC添加の場合では R と $\lambda^{1/3} Re$ との関係は摩擦抵抗の場合と類似した特性を示し、すな

Fig. 15 Dependence of performance ratio on distance x from rib

わち性能低下領域、回復領域と乱流領域に区別できる。 C が小さいほど性能低下領域の $\lambda^{1/3}$ Re 範囲は狭くなるとともに R の低下幅は小さくなる。ちなみに $C=50\text{ppm}$ の場合では本実験 Re 範囲において R が常に1を超える結果が得られた。

図13から分かるようにリブによる熱伝達向上には限界がある。そこで、リブからの距離 X の R に対する影響を見積もるため、流れ方向の流動抵抗を線形であることを仮定したうえ各銅ブロックまでに限定した性能比 R_x を求めて図15に示す。図15の実験条件は図13と同様で、図(a)と(b)にはそれぞれ 60° リブと 30° リブの結果を示す。図(a)から水の場合では X の増大に従い R_x はほぼ単調に低下し、CTAC添加によりこの低下は比較的急になる傾向が見られる。また、最大 R_x はリブ直後で現れ、水の場合では2.1に、CTAC添加の場合では1.43に達する。さらに $X < 100\text{mm}$ では $C=200\text{ppm}$ まで $R_x > 1$ に維持される。次は図(b)を考察する。図(a)と違いリブ直後では R_x は X の増加に従い上昇し、 $X=30\text{mm}$ 前後で最大値($C=50\text{ppm}$ では $R_x=1.4$)を取り、その後単調に減少する。これはリブによる伝熱面先端部の加速効果は 30° リブのほうが 60° リブより弱くてそこでの熱伝達促進率が比較的に小さいためと考えられる。ちなみに、図(a)と同じ $X < 100\text{mm}$ では $C=200\text{ppm}$ まで $R_x > 1$ に維持される。以上の結果は伝熱面長さ方向に最適な間隔でリブを配置することにより高濃度CTAC添加の場合でも必要な Re 範囲において $R > 1$

の維持が可能であることを示唆する。

5. 結論

本研究では、界面活性剤(CTAC)の添加と三角形リブの装着によりポンプ動力の低減効果および熱伝達率の向上効果を同時に活かし、最適で高性能な熱交換器の開発をターゲットとして実験研究を行った。その結果は以下のようになる。

1, 平滑流路の場合、流動抵抗と熱伝達率はCTAC添加によりともに7割以上減小することが確認でき、また直径 $37\sim 41\text{mm}$ の流路に対して抵抗低減領域では比摩擦係数と比ヌセルト数との間に類似則を示唆するような結果が得られた。

2, リブ装着流路の場合では、平滑流路より抵抗低減領域のレイノルズ数範囲は狭くなり、すなわち抵抗低減効果はCTAC濃度に対して飽和する。

3, ポンプ動力を基準とした性能評価では最大性能比に対応する最適なりぶ寸法($e=12.1\text{mm}$, $\theta=30^\circ$)が存在し、この最大性能比は水の場合では1.9に達し、CTAC添加の場合では1.5に達している。またCTAC濃度が低くなるに従い、性能比が1を超えるレイノルズ数の範囲は広くなり、CTAC濃度が 50ppm の場合では本実験 Re 範囲において性能比は常に1を超える結果が得られた。なお、リブ寸法とリブ間隔の最適化により高濃度CTAC添加の場合でもリブ装着による熱交換器の高性能化が可能であることが示唆される。

最後に、本研究は文部科学省科学研究費の補助により遂行したものであり、ここに感謝の意を表す次第である。

参考文献

- (1) 稲葉・ほか3名, 機論(B), 61-589(1995), 3304-3310.
- (2) K. Gasljevic and E. F. Matthys, J. Heat Transfer, 119 (1997), 80-88.
- (3) Y. Kawaguchi et al., Proceeding of 2th International Symposium on Turbulence Heat and Mass Transfer (1997).
- (4) 佐藤・ほか2名, 機論(B), 65-630(1999), 721-726.
- (5) 稲葉・ほか6名, 第37回日本伝熱シンポジウム講演論文集(2000), 549-550.
- (6) 岸本・ほか3名, 第37回日本伝熱シンポジウム講演論文集(2000), 259-260.
- (7) 馬淵・ほか3名, 機論(B), 53-487(1987), 1009-1015.
- (8) 馬淵・ほか3名, 機論(B), 53-487(1987), 1016-1023.
- (9) Y. Kawaguchi et al., Proceeding of 11th Symposium on Turbulent Shear Flows (1997), 49-54.
- (10) Li・ほか5名, 第34回日本伝熱シンポジウム講演論文集(1998), 691-692.
- (11) P. S. Virk, AIChE Journal, 21-4(1975), 625-656.
- (12) V. Gnielinski, Int. Chem. Eng., 16-2 (1976), 359-368.