

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：25301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05830

研究課題名(和文) 流動抵抗低減効果による熱交換性能低下を防ぐ微細粗面伝熱面の開発

研究課題名(英文) The Finery Rough Heating Surface Development for Preventing Lowering of Heat Exchanger performance due to the Flow Drag Reduction Effect

研究代表者

春木 直人 (Haruki, Naoto)

岡山県立大学・情報工学部・教授

研究者番号：10311797

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：熱エネルギー輸送時の輸送エネルギーを削減する流動抵抗低減効果には、熱交換器の熱伝達特性が低下するという大きな欠点がある。このため、熱交換器の伝熱面に $\mu\cdot\text{nm}$ サイズの粗面加工を施すことによって、流動抵抗低減効果時の熱交換器の熱伝達特性を向上させるとともに、粗面化による流動抵抗の増加をできるだけ抑制するという2つの目的を満足する粗面加工のメカニズム解明を行った。その結果、粗面化による流動抵抗と熱伝達率が増加することを明らかにするとともに、粗面近傍の流れの状態を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The flow drag reduction effect of the heat transfer medium is useful for effective energy consumption system. On the other hand, there is an issue that the heat transfer characteristic of the surfactant solution is reduced in the heat exchanger. The purpose of this study is to improve the heat transfer characteristics in heat exchanger in the district heating and cooling system. In this paper, the rough heating surface have attracted much attention. And it was measured the flow resistance and heat transfer behavior in a rectangular pipe having one rough heating surface in order to promote heat transfer of the CTAB solution in the heat exchanger. As a result, it was found that the roughness surface causes disturbance of flow and breaking a rod-like micelle structure of CTAB. Therefore, the flow drag and heat transfer in the test section having rough surface increase as compared with that in the test section having smooth surface.

研究分野：伝熱工学

キーワード：流動抵抗低減効果 粗面伝熱面 界面活性剤添加水溶液 熱伝達促進

1. 研究開始当初の背景

(1) 熱輸送媒体(水,各種ブライン等)を用いた熱エネルギー輸送システムは,図1に示すように,高温(または低温)の供給側熱源の熱エネルギーを熱輸送媒体が需要部まで輸送して用いるシステムであり,地域熱供給システムや冷却水循環ライン等で使用されている。しかしながら,エネルギーの有効利用の観点からみると,「輸送のためのエネルギーが余分に必要」という根本的な問題を抱えており,エネルギーの有効利用の観点から早急に改善すべき問題である。逆に理想的な熱エネルギー輸送システムは,「できるだけ少ない輸送エネルギーにて,多くの熱エネルギーを輸送する」である。

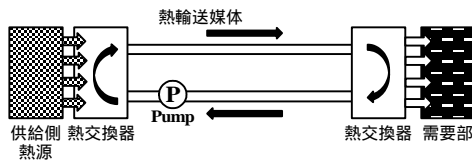


図1 熱エネルギー輸送システム

(2) 熱エネルギー輸送システムにおける上記の問題の解消のため,従来,以下の対策が検討されてきた。

1. 熱輸送媒体へ蓄熱物質を混合し,単位体積あたりの熱輸送量を増加させる。特に蓄熱物質(氷,パラフィン等)の熱輸送媒体への混合には,エマルジョン化,マイクロカプセル化等が使用されている。これにより,単位体積あたりの熱輸送量の増加とともに,蓄熱物質混合による管内壁との熱伝達向上により,熱エネルギーの授受を行う熱交換器の熱交換性能も向上する。しかしながら,蓄熱物質の混合によって輸送時の流動抵抗が増加する。また,混合した蓄熱物質の凝集による管閉塞が発生する恐れがある。

2. 熱輸送媒体への流動抵抗低減剤の添加による流動抵抗低減効果を用いて,輸送エネルギーを削減する。これにより,流動抵抗低減剤の微量の添加(数十~数千ppm)でも,循環系の配管にて80%の流動抵抗低減効果が数ヶ月間維持される。一方,流動抵抗と熱伝達のアナロジーのため,流動抵抗低減と同時に配管内壁との熱伝達が減少し,熱交換器の熱交換性能が低下する。このため,熱伝達促進体の熱交換器への挿入や,伝熱面表面にリップ敷設等の熱伝達促進対策も検討されているが,この方法ではせっかく低減させた流動抵抗がまた増加してしまう。

上記のように,これまでに検討された方法には何かしらの欠点が存在しており,理想的な熱エネルギー輸送システム実現にとって,残念ながら有効な解決策となっていない。

2. 研究の目的

(1) 理想的な熱エネルギー輸送システムは,流動抵抗低減効果を保持しながら熱交換器の熱伝達特性のみが向上したものである。そのため,流動抵抗低減時の熱伝達特性向上を目的とした伝熱面の新たな熱伝達促進方法として,従来のmmサイズの突起付伝熱面よりも微小($\mu \cdot \text{nm}$)サイズの粗面化に着目した。粗面化に着目した理由は以下の点である。

1. 促進体よりも微細な粗面化は,添加剤の棒状構造の破壊がなく,低減効果が保持される。
2. 微細な粗面は,粗面化による流動抵抗の増加が少ない。
3. 微細な粗面は,流動抵抗を増加させずに熱伝達のみ促進させる可能性がある。

(2) 特に,熱エネルギー輸送時の輸送エネルギーを削減する流動抵抗低減効果には,熱交換器の熱伝達特性が低下するという大きな欠点に対して,この熱交換器の伝熱面に $\mu \cdot \text{nm}$ サイズの粗面加工を施すことによって,伝熱面の熱伝達特性の増加を目指した粗面化技術は,流動抵抗低減効果をできるだけ損なわずに,流動抵抗低減効果時の熱交換器の熱伝達特性を向上させる。この粗面化を実現することで,熱エネルギー輸送システムへの流動抵抗低減効果の活用に大きく貢献することが期待される。

3. 研究の方法

(1) 図2に本研究で使用した流動抵抗と熱伝達率測定装置を示す。本測定装置は助走区間(長さ1800mm),矩形試験部,恒温槽,ポンプ,流量計により構成されており,恒温槽で温度制御された試験流体がポンプによって試験部を循環する構造となっている。

(2) この矩形試験部は,図3に示すように縦20mm,横20mm,長さ $L = 850 \text{ mm}$ の亚克力製矩形流路である。この矩形部上面にはSUS製加熱面が設置され,加熱用変圧器からの通電で得られるジュール熱による等熱流束条件での加熱が可能である。さらに,試験流体の平均流速 U_m [m/s]毎に,矩形試験部の入口から出口間における圧力損失 P [Pa]をマンメータおよび差圧発信器によって測定し,式(1)に示した管摩擦係数 λ によって流動抵抗を評価した。ここで ρ [kg/m³]は試験流体の密度である。

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

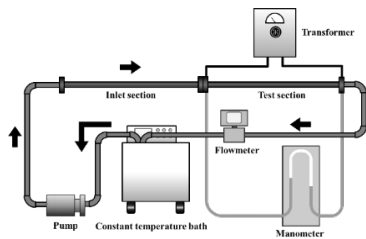


図2 実験装置概略図

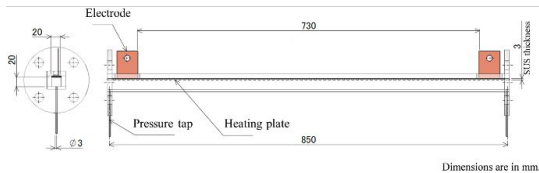


図3 粗面加熱面試験部概略図

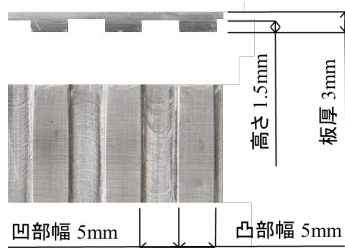


図4 粗面加熱面試験部詳細図

SUS製加熱面には、厚さ3 mm、幅20 mm、加熱区間長さ $l=730$ mmの平滑SUS304板を使用した。さらに図4に示すように、粗面加工の第一段階として、高さ $k=1.5$ mm、凹幅 $b=5$ mm、凸幅 $w=5$ mm、ピッチ比 $(b+w)/k=6.67$ となる溝加工を粗面加熱面として矩形流路側面に施した。この加熱面には、試験部入口側の加熱開始点から $x=25, 40, 60, 90, 150, 250, 350, 450, 710$ mm地点の矩形流路内壁に壁面温度測定用のK型熱電対(素線径0.1 mm, 測定精度 ± 0.1)が設置されている。そして、各壁面温度 T_x と試験流体温度 T_w [], SUS製加熱面に印加した発熱量 q [W/m²]より、加熱面の局所熱伝達率 $h_x=q/(T_x-T_w)$ が求められた。なお、各測定点における試験流体温度 T_w []は、入口と出口の流体温度(T_{in}, T_{out})から線形補間した値である。さらに、粗面加工時には、溝部($x=30, 49, 69, 89, 150, 248, 350, 448, 705$ mm)にも熱電対を設置した。なお、壁面温度は各測定位置にて2本の熱電対で温度測定を行い、実験結果の整理の際にはこれらの測定値の平均をとった。熱伝達実験では、局所熱伝達率 h_x より平均熱伝達率 h_m [W/(m²·K)]を算出して、最終的にヌセルト数 Nu として評価を行った。

(3) なお、本実験で使用した流動抵抗低減剤は、既に研究代表者によって水に添加して流動抵抗低減効果を示すことが確認されている陽イオン性界面活性剤CTAB(臭化セチルトリメチルアンモニウム, 和光純薬工業株式

会社製)に、CTABの棒状ミセル形成促進のための対イオン(サリチル酸ナトリウム(和光純薬工業株式会社製))をCTABと同量添加したものを使用した。また、添加時の各種熱物性値についても従来の研究で明らかにした値を用いた。

4. 研究成果

(1) 図5に、矩形試験部における水およびCTAB水溶液($C_{CTAB}=100$ ppm, $T_{in}=20$)の管摩擦係数 λ の測定結果を平滑面および粗面毎に示す。なお、図中の実線はニュートン流体が直円管内を十分発達した層流および乱流状態で流動する際の流動抵抗に関する理論式および実験式である。まず平滑面試験部の場合、CTAB水溶液の流動抵抗は $Re > 2300$ の乱流域において水(実験式)の値よりも低減しており、その最大低減率は DR_{max} 80%であった。これは、CTABの棒状ミセルによって乱流渦が抑制されたためと考えられる。また、 $Re > 20000$ において、高いせん断応力の負荷によるCTABの棒状ミセル破壊現象によって、流動抵抗低減効果が消失する傾向も確認された。

(2) 一方、粗面試験部における水およびCTAB水溶液の流動抵抗は、測定されたすべての速度範囲において、どちらも平滑面の流動抵抗の値よりも増加しており、粗面化に伴う流動抵抗の増加が確認された。さらに粗面試験部におけるCTAB水溶液の流動抵抗低減効果に関しては、定性的には平滑面と同様に発現しているが、最大低減率が DR_{max} 45%となり、平滑面のとときと比べて DR_{max} が大幅に低下している。さらに、平滑面の場合よりも流動抵抗低減効果の範囲が狭くなっていることが確認された。

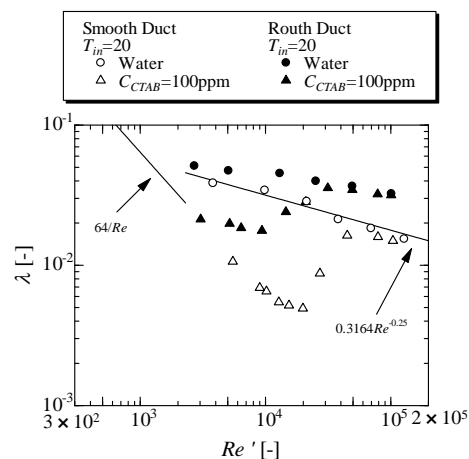
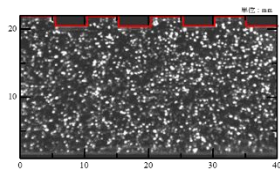


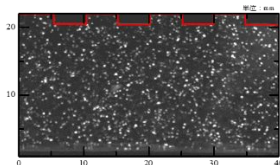
図5 CTAB水溶液の Re' 数と管摩擦係数の関係

(3) この原因を確認するため、水およびCATB水溶液に可視化用のトレーサ粒子(日本カノマックス製ORGASOL 0457 密度:1.03 g/cc, 平均粒径:48~52 μ m)を添加して、本研究費で購入した高速度カメラ(ディテクト製, HAS-01, フレームレート50~3000 fps)

を用いて粗面近傍の流れの観察を行った．図6に流動抵抗低減効果が発現している $Re' = 5000$ 付近での水および CTAB 水溶液の流動状態を示す．静止画ではわかりにくいですが，図6(a)の水の場合では，主流部の乱れにより粗面凹部への水の流入，流出によって粗面近傍に渦が発生する様子が観察された．この結果，粗面が障害物となることで全体の流動抵抗が増加したものと考えられる．一方 CTAB 水溶液の場合（図6(b)）では，主流部の層流化に伴い水の場合よりも粗面凹部への CTAB 水溶液の流入，流出は少ないものの，粗面近傍に渦の発生が観察された．このことから，粗面の凹部への CTAB 水溶液の流入，流出や渦によって平滑面での場合よりも棒状ミセルに負荷されるせん断応力が増大したため，最大低減率の低下と低減効果範囲の低下につながったものと考えられる．また，低減効果が消失し始めた $Re' = 15000$ の CTAB 水溶液の流動状態を高速カメラによって確認したところ，粗面凹部への流体が激しく流入や流出を行い，定性的には主流部と同様の不規則な乱れを持った流れとなっていることを確認した．



(a) Water



(b) CTAB solution

図6 粗面試験部における水およびCTAB水溶液の流動状態

(4) 図7に，図5と同じ条件で測定した水および CTAB 水溶液の熱伝達特性 ($Nu/Pr^{1/3}$) の測定結果を，平滑面および粗面毎に示す．なお，図中の実線はニュートン流体が直円管内を十分発達した層流および乱流状態で流動する際の熱伝達に関する実験式である．

図7に示すように，層流域における水の熱伝達特性は，平滑面と粗面のどちらの場合でもほぼ同じ値を示しており，粗面化の影響は確認されなかった．一方，乱流の状態になると，粗面試験部での水の熱伝達は平滑面の場合と比べて大きくなる傾向を示しており，最大約 55%の増加が確認された．これは，粗面壁によって粗面近傍での流体の乱れが生じ，温度境界層が破壊されたためと考えられる．

次に CTAB 水溶液の場合では，層流域にお

いて粗面試験部における $Nu/Pr^{1/3}$ が，水よりも低い値を示している．高速度カメラによる $Re=1000$ での CTAB 水溶液の粗面凹部の観察では，CTAB 水溶液での凹部への流体の流入が水の場合よりも少なくなっていた．これは乱流渦を抑制する CTAB の棒状ミセルによって粗面凹部への流体の流入が抑制されて凹部には流体が滞留し，粗面試験部での層流域の熱伝達が低くなったと考えられる．一方で，乱流状態の CTAB 水溶液の熱伝達は，粗面試験部での $Nu/Pr^{1/3}$ が平滑面での値よりも大きくなる傾向を示し，最大約 100%向上している．これは図6で示したように，粗面によって粗面壁近傍で大きなせん断応力が作用し，界面活性剤が破壊されたためと考えられる．

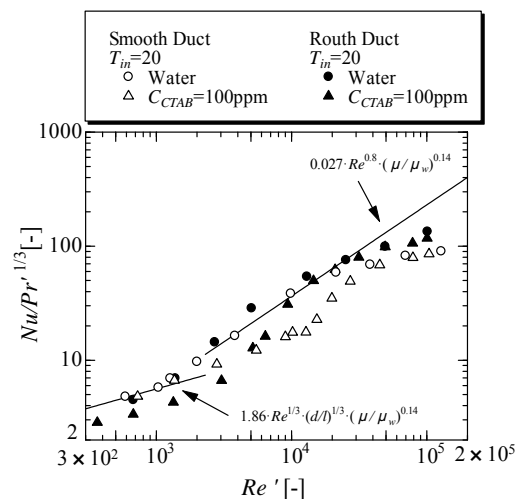


図7 CTAB水溶液の Re' 数と熱伝達特性 $Nu/Pr^{1/3}$ の関係

(5) 図8は，平滑面と粗面(凸部および凹部)における CTAB 水溶液の流動抵抗低減時 ($Re' = 5000$) と消失時 ($Re' = 15000$) での局所熱伝達率を示したものである．図7で示していた $Re' = 15000$ において CTAB 水溶液の平均熱伝達率が増加するのは，主に粗面の凸部における局所熱伝達率が増加したためであることが確認された．一方，流動抵抗・熱伝達低減時 ($Re' = 5000$) での CTAB 水溶液の局所熱伝達率は， $Re' = 15000$ の場合ほど凸凹部で明確な差を示していない．これは，流動抵抗低減効果による流れの層流化によって，凸部での乱れが減少し，乱れの少ない凹部の局所熱伝達率に近づいたためと考えられる．

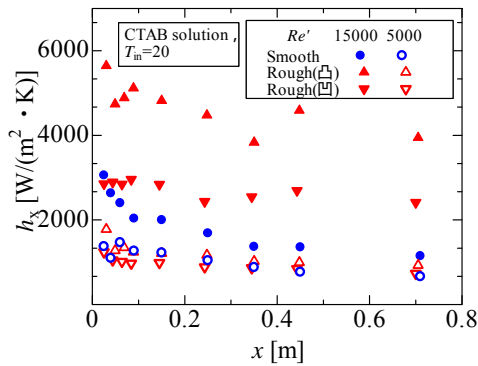


図8 位置 x でのCTAB水溶液の局所熱伝達率 h_x

(6) しかしながら，平成 29 年度には研究代表者の所属機関の異動があり，これまでに作製した実験装置に変わる新たな実験装置の作成を，新たな所属先において行った．その結果，実験装置は完成することができた．しかしながら，当初の研究予定であった新たな形状値での粗面試験部の実験については，十分な精度での測定まで行うことは困難であった．そのため，今後も研究を継続する必要がある．

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計3件)

春木直人，堀部明彦，山田寛，山本啓太，川口暢，0 以下における界面活性剤添加ブラインの流動抵抗・熱伝達特性に関する研究，第37回日本熱物性シンポジウム，2016年11月28日-30日，岡山

春木直人，堀部明彦，山田寛，界面活性剤添加水溶液の流動抵抗と熱伝達特性に及ぼす加熱面性状の効果，第38回日本熱物性シンポジウム，2017年11月7日-9日，つくば

山口直史，春木直人，島崎康弘，熱エネルギー輸送用界面活性剤および対イオン添加水溶液の渦減衰効果，日本機械学会中国四国学生会第48回学生員卒業研究発表講演会，2018年3月6日，徳島

6. 研究組織

(1)研究代表者

春木 直人 (HARUKI NAOTO)

岡山県立大学・情報工学部・教授

研究者番号：10311797