



界面活性剤を用いる抵抗低減系における熱交換器内伝熱低減の回避策に関する研究

岸本, 章

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2002-03-31

(Date of Publication)

2010-02-09

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲2575

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1002575>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博士論文

界面活性剤を用いる抵抗低減系における 熱交換器内伝熱低減の回避策に関する研究

Studies on the Methods of Preventing the Heat Transfer Reduction
in a Surfactant Drag-Reducing System

2002年1月

神戸大学大学院自然科学研究科

岸 本 章

目 次

第 1 章 序 論 -----	1
1-1 添加剤による乱流抵抗低減効果 -----	1
1-2 界面活性剤を用いる抵抗低減技術の空調システムへの応用研 究・開発状況 -----	8
1-3 伝熱低減効果とその回避策 -----	1 1
1-4 本研究の目的 -----	1 3
第 1 章における参考文献 -----	1 4
第 2 章 界面活性剤を用いる抵抗低減系における伝熱特性に対する管内 内部形状の影響 -----	1 8
2-1 緒言 -----	1 8
2-2 実験 -----	2 5
2-3 結果と考察 -----	3 1
2-3-1 伝熱管の内面構造の影響 -----	3 1
2-3-2 管壁の剪断速度と熱伝達低減効果の相関 -----	4 4
2-4 結言 -----	4 8
第 2 章の参考文献 -----	4 9
第 3 章 プラグによる界面活性剤溶液流の伝熱低下回避手法の検討 -	5 1
3-1 緒言 -----	5 1
3-2 実験 -----	5 7
3-3 結果および考察 -----	6 3
3-3-1 Plug 型ミセルスクィーザーが抵抗低減効果および伝熱低減 効果に及ぼす影響 -----	6 3
3-3-2 Plug 型ミセルスクィーザー内での壁面剪断速度と伝熱低減	

効果との相関性-----	6 8
3-4 結言-----	6 9
第 3 章の参考文献-----	7 1
第 4 章 スタティックミキサーによる界面活性剤溶液流の伝熱低下回避	
策の検討-----	7 3
4-1 緒言-----	7 3
4-2 実験-----	7 3
4-3 結果と考察-----	7 9
4-3-1 Mixer 型ミセルスクィーザーを装着した場合の流動および	
伝熱特性-----	7 9
4-3-2 ミセルスクィーザー内での壁面剪断速度と抵抗低減効果お	
よび伝熱低減効果との相関性-----	8 4
4-4 結言-----	8 7
第 4 章の参考文献-----	8 9
第 5 章 結 論-----	9 0
本論文に関連する論文・講演-----	9 3
謝 辞-----	9 5

第1章 序論

1-1 添加剤による乱流抵抗低減効果

液体に少量の添加剤を加えると、乱流域での抵抗が溶媒単体の場合に比べて小さくなる。この現象は乱流抵抗低減効果（Drag Reduction Effect, 略してDR effect）と言われ、1948年にB.A. Toms¹⁻¹⁾によって見出された。Tomsは添加剤として高分子を用い、その極めて希薄な溶液において、乱流域で80%程度の抵抗低減効果を示している。この抵抗低減効果は工業的に実用化開発され、具体的事例として、原油輸送においては添加剤に高分子材料であるポリイソブチレンを用い、輸送動力を30%程度も低減させる技術が通常のものとなっている¹⁻²⁾。高分子には、5 ppm程度の微量でも大きな効果を持つものがあり、また環境性にも優れているが、耐久性がなく、溶液をポンプで循環すると、高分子鎖がポンプの剪断力により切られるため、溶液の保有する抵抗低減効果が消失してしまうため、長期的な循環使用には適さないことが難点である。

一方で界面活性剤も棒状（紐状）の分子集合体（ミセル）を作る条件下では抵抗低減効果が発現することが知られている。詳しく述べると、界面活性剤は一般に、Fig. 1-1に示すように、一分子中に親水性の部位と親油性の部位の両方を有する分子構造を成している¹⁻³⁾。界面活性剤は水中で分子集合体（ミセル）を形成し、それは濃度と温度によって様々な形態を示す。Fig. 1-2はそれらの概念図である¹⁻³⁾。界面活性剤は臨界ミセル濃度（cmcという）において親油性の部位を内側に、親水性の部位を外側にそれぞれ配向した球状のミセルを形成し、転移濃度で球状であったミセルが棒状（紐状）のミセル

に変化する。更に、この棒状ミセルは相互に網目構造を形成する¹⁻⁴⁾。Fig. 1-3は棒状（紐状）ミセルが絡み合っって網目構造を形成している様子の電子顕微鏡写真である。この状態に剪断応力を加えると、溶液の見かけ粘度の急激な増加や顕著な粘弾性が観測される、いわゆるSIS（Shear Induced State）と呼ばれる状態となる¹⁻⁵⁾。Fig. 1-4はコーンプレート型回転粘度計とキャピラリー型粘度計で計測した界面活性剤Oleylbis(hydroxyethyl)metylammoniumchlorideとサリチル酸ナトリウムが添加された水溶液の見かけ粘度と剪断速度の関係¹⁻⁶⁾である。これより、低剪断速度域では剪断により誘起された高い粘性を示していることが分かる。このSISでのミセル構造については、未だ解明されていないが、棒状ミセルが互いに作用し合っって高次構造を成していると考えられている。また、剪断速度が高くなるにつれて低い見かけ粘度を示すようになり、水とほぼ同じ粘度を示すことが分かる。逆に剪断速度を低下させた場合は図中の矢印で示すように低剪断速度域で顕著なヒステリシスを示す。

このような界面活性剤では、棒状ミセルの網目構造が乱流渦の発生および成長を抑制し、Fig. 1-5に示すような抵抗低減効果¹⁻⁷⁾が得られるものと考えられている。特に第四級アンモニウム塩系陽イオン界面活性剤はサリチル酸イオン等の適当な陰イオンを添加すれば棒状ミセルを形成し、乱流域における顕著な抵抗低減効果を示すことが知られている。特性として、高分子と比べて、数百ppm以上とやや高濃度で抵抗低減効果が現れること、Fig. 1-5に示すように高い流量（流速）範囲では棒状ミセルによって形成された網目構造が崩壊し、抵抗低減効果が消失することも明らかにされている。ただし、界面活性剤の場合は機械的剪断を受けても抵抗低減効果は一時的に失われるものの、数秒程度で回復する特性があるため、高分子のような機械的剪断による劣化がほとんど無いことから、1980年代から多くの研究者が界面活性剤の

抵抗低減効果を利用した水系循環システムの省エネルギー技術に取り組むようになってきた。



Fig. 1-1 Structure of surfactant¹⁻³⁾

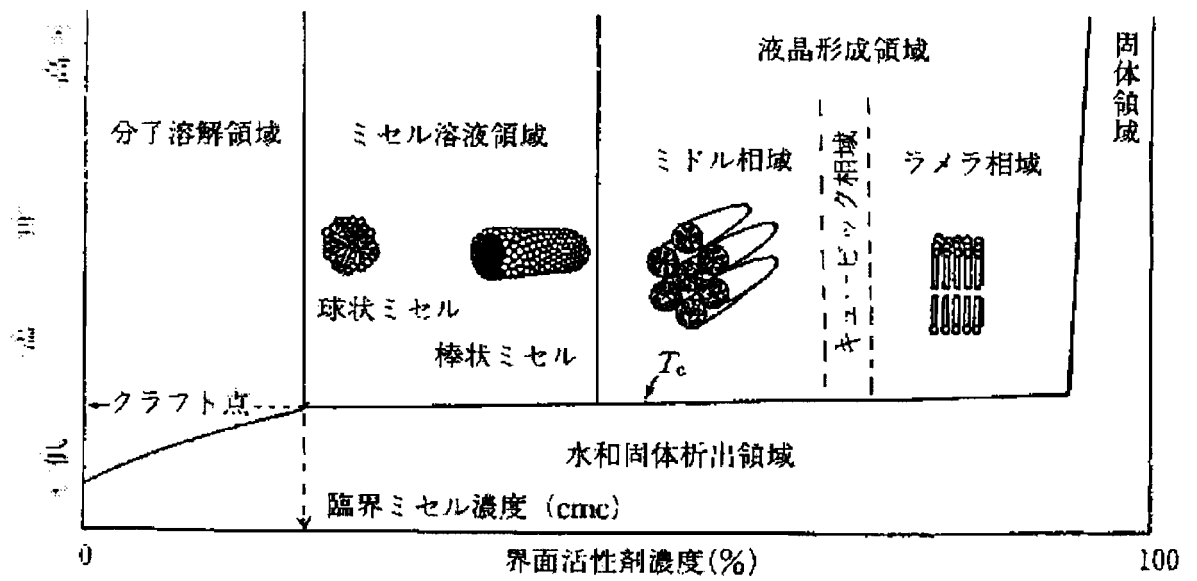


Fig. 1-2 Relationship between concentration and micelle structure of surfactants¹⁻³⁾

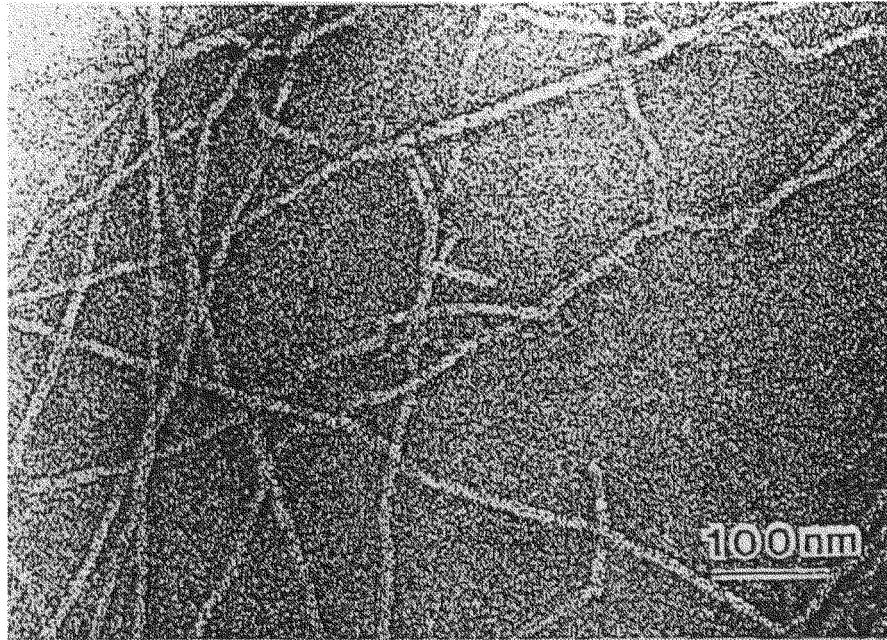


Fig. 1-3 Electron micrographs of cetyltrimethylammoniumbromide-sodium salicylate by T. Shikata et al.¹⁻⁸⁾

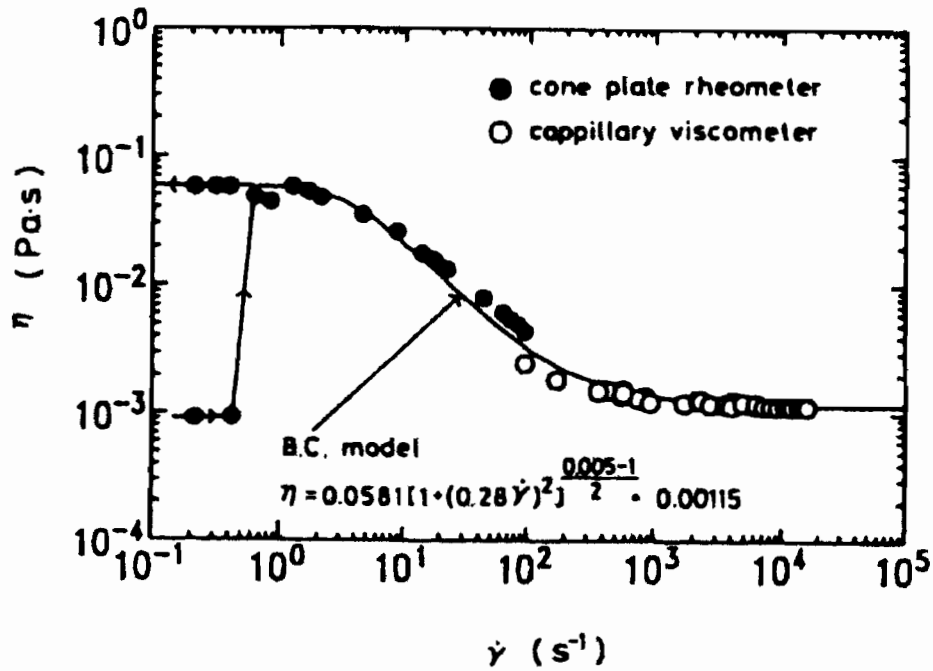


Fig. 1-4 Apparent viscosity (η) of surfactant drag-reducing system for share rate ($\dot{\gamma}$)
 (Ethoquad O/12, 200 ppm + Sodium salycilate, 120 ppm at 292 K)
 [H. Usui et al. ¹⁻⁶]

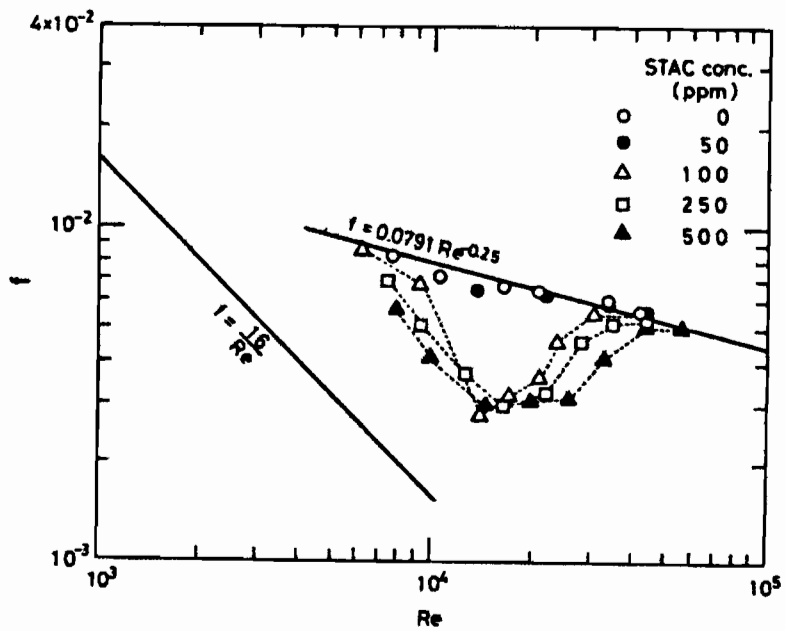


Fig. 1-5 Examples of surfactant drag-reducing effect in a pipe flow (at 303 K) [H. Usui et al.¹⁻⁷⁾


縦軸 f は摩擦係数で、流れ抵抗に起因する圧力損失を流量の 2 乗で無次元化した量。横軸 Re はレイノルズ数で、流量を管径と粘度で無次元化した量。記号は界面活性剤 STAC (Stearyltrimethylammoniumchloride の略称) とサリチル酸ナトリウムを種々の濃度で添加した場合。

1-2 界面活性剤を用いる抵抗低減技術の空調システムへの応用研究・開発状況

ヨーロッパでは、地域冷暖房システムの効率化を目的に界面活性剤を使用する試みがなされている^{1-9), 1-10)}。地域冷暖房システムとは、一カ所または数カ所の熱発生施設から、周辺地域のビルや住宅等の建物に配管を通して熱媒をポンプ輸送することで集中的に冷暖房を実施するものであり、ヨーロッパでは、主として暖房で盛んに取り入れられているシステムである。これらの研究はDortmund大学とヘキスト社の共同で推進され、摩擦低減添加剤にはHabon, ObonおよびDobonが検討された¹⁻¹⁰⁾。これらの材料は30~80℃の中高温水において抵抗低減効果を示すことが知られている。Habon, ObonおよびDobonの具体的な構造はそれぞれ、

Habon : Arquad 16-50

[$C_{16}H_{33}N(CH_3)_3Cl$; Cethyltrimethylammoniumchloride (CTAC)]

+ 3 OH-2 Naphtoate ()

Obon : Arquad S-50 [$C_{18}H_{33}N(CH_3)_3Cl$ (56%)] + 3 OH-2 Naphtoate

Dobon : Kemamine Q-2983C [$C_{22}H_{43}N(CH_3)_3Cl$] + 3 OH-2 Naphtoate

である。これまでに、フェルクリングゲン（ドイツ）¹⁻¹⁰⁾やヘアニング（デンマーク）¹⁻¹¹⁾で実証試験も行われ、直管部分の多い長距離管（管径450 mm, 管長2.4 km）にて70%の抵抗低減効果が確認されている。

また、米国ではOhio州立大学のZakin教授を中心としたグループ¹⁻⁹⁾が精力的に研究を行っており、本分野における重鎮的存在となっている。Zakin教授らの検討した摩擦低減添加剤は多数報告されているが、主な界面活性剤の名称と構造式を以下に記述する。

Arquad S-50	[C ₁₈ H ₃₃ N(CH ₃) ₃ Cl (56%)]
Arquad 18-50	[C ₁₈ H ₃₇ N(CH ₃) ₃ Cl ; Stearyltrimethylammoniumchloride (STAC)]
Arquad 12-50	[C ₁₂ H ₂₅ N(CH ₃) ₃ Cl]
Arquad 16-50	[C ₁₆ H ₃₃ N(CH ₃) ₃ Cl]
Arquad R-50	[Rapeseed-N(CH ₃) ₃ Cl]
Kemamine Q-2983C	[C ₂₂ H ₄₃ N(CH ₃) ₃ Cl]
Kemamine Q-2803C	[C ₂₂ H ₄₅ N(CH ₃) ₃ Cl]
Ethoquad O/12	[C ₁₈ H ₃₅ N(C ₂ H ₄ OH) ₂ (CH ₃)Cl]
Ethoquad 18/12	[C ₁₈ H ₃₇ N(C ₂ H ₄ OH) ₂ (CH ₃)Cl]
Ethoquad R12-75	[Rapeseed-N(C ₂ H ₄ OH) ₂ (CH ₃)Cl]

Zakin教授らは、界面活性剤水溶液の流動特性および伝熱特性等の基礎研究のみならず、クラドノ・クロチェラビ（チェコ）地域暖房システムでの実証試験¹⁻¹²⁾も検討され、ここでは、暖房時のポンプ動力が約40%削減されることを確認している。

日本国内では、神戸大学（前山口大学）薄井教授の研究グループが、抵抗低減添加剤の研究対象が現在の界面活性剤水溶液に至る以前の希薄高分子水溶液系の時期から研究を行っており、この乱流抵抗低減技術の分野において国内を代表する研究グループである。薄井教授らが検討している界面活性剤は主にライオン（株）製のものであり、研究当初はCTACやSTACに代表され、30～60℃の温度域で有効であるトリメチル系第四級アンモニウム塩系¹⁻⁷⁾¹⁻¹³⁾であった。しかし、適用温度が狭いという課題や国内でのニーズは冷房用であることに早くから注目し、低温域で溶解性を増すためにトリメチル基をビスヒドロキシエチル・メチル基に変更したEthoquad O/12を選定し、低温

域から中温域（2～60℃）にかけて有効であることを見出した^{1-6), 1-14), 1-15)}. また、第四級アンモニウム塩の疎水基の分子長、疎水性および純度が抵抗低減効果に与える影響や適用温度を詳細に明らかにしている¹⁻¹⁶⁾.

また、この界面活性剤を用いる抵抗低減系に関する研究は実用性の高さもあって、他の多数の研究機関においても、基礎研究から応用研究に至るまで幅広く検討されていることは注目すべきことである。代表的なものを示すと、基礎研究の分野では、産業技術総合研究所（旧通商産業省工業技術院機械技術研究所）では、界面活性剤としてCTACを用い、2次元チャンネル流れを用いた流動特性および伝熱特性の基礎研究を精力的に実施している¹⁻¹⁷⁾。慶応大学の前田教授と菱田教授のグループは、一部前述の産業技術総合研究所を共同で界面活性剤水溶液の流れ解析に関する研究を実施している¹⁻¹⁸⁾。岡山大学の稲葉教授のグループは冷熱搬送材料への応用を目的に、CTACおよびDodecyltrimethylammoniumchloriden等を用いた管内流動抵抗と熱伝達特性に関する研究を実施している¹⁻¹⁹⁾。また岐阜大学の熊田教授のグループは主にCTACを用いて、2次元フェンスやリブ状のプロモーターによる界面活性剤水溶液の伝熱促進に関する基礎研究を実施している¹⁻²⁰⁾。

次に応用研究の分野について代表的なものについて示す。まず、エルエスピー協同組合¹⁻²¹⁾は、1990年代前半より薄井教授（当時、山口大学）のグループおよび財団法人周南地域地場産業振興センターと共同でCTAC、STACおよびEthoquad O/12に関して、流動特性や伝熱特性のみならず、配管腐食評価や濃度管理方法といった実用化検討をも実施した。そしてEthoquad O/12をベースとする抵抗低減剤の販売を1995年より開始し、ベンチャービジネス的にビル空調システムへ導入を推進している。

また、東京電力（株）と清水建設（株）の共同研究グループ¹⁻²²⁾は、Ethoquad

O/12を用い、地域冷暖房システムへの適用を狙って、150 A配管を使用して流動特性に関するエンジニアリングデータの取得を実施している報告がある。

中国電力（株）においても1993-1994年に薄井教授（当時、山口大学）と共同でEthoquad O/12を用いて、50 A配管の模擬循環ループにチラーおよび負荷熱交換器を組み合わせた流動および伝熱評価を行い、抵抗低減効果に及ぼす溶存酸素や錆の影響を調べている¹⁻²³⁾。

また、東邦化学工業（株）は国家プロジェクト「エコエネルギー都市プロジェクト」にて、第四級アンモニウム系界面活性剤よりも環境への負荷が低いアミノオキサイド系の新規材料の研究を実施している¹⁻²⁴⁾。

更なる応用として、日立製作所と中部電力は共同にて、固／液相変化蓄熱物質スラリーの抵抗低減を目的に界面活性剤の添加による有効性を示した報告もある¹⁻²⁵⁾。

このように、界面活性剤を用いた抵抗低減技術は、省エネルギーに対して実績を挙げており、実用化の段階まで至っている。

1-3 伝熱低減効果とその回避策

前述のように界面活性剤による抵抗低減技術の空調システムでの効果は実証されてきたが、本格的な実用化に未だ至っていない課題は、熱交換器での性能低下である。つまり、抵抗低減効果は配管系においては、ポンプ動力の削減が図れ、望ましい省エネルギー技術であるが、その反面、通常の水を熱媒として使用する場合と比較して、熱伝達が大幅に低下してしまう。この現象は伝熱低減効果（Heat Transfer Reduction Effect, 略してHTR effect）と呼ばれているが、システムを構成する熱交換器の部分では致命的な問題であり、

実際に多くの研究者が実験室レベルの段階で指摘している¹⁻⁷⁾。

基本的な対処法としては、熱交換量を低下させないに足るように熱交換器の伝熱面積を増加させることが挙げられるが、熱交換器が大きくなってしまいうため、根本的な解決までには至らない。本研究の開始と同時期に、伝熱低減を回避する方法が多くの研究者により検討され始めた。現在では本研究の知見と併せて伝熱低減の回避策は以下のように大きく二つに分類される。

まず一つは、熱交換器の壁面の形状設計である。抵抗低減効果に関する研究はこれまで平滑管における圧力損失の測定が中心であり、粗面管のそれらについての報告は数報程度である (Bewersdorff and Thiel¹⁻²⁶⁾, De Guzmanら¹⁻²⁷⁾, Qiら¹⁻²⁸⁾) のが現状である。Zakinら¹⁻²⁹⁾によれば、熱交換器の壁面を粗くすれば、強力な剪断流れが発生し、熱伝達率の減少が抑制されることを示している。

もう一つは、機械的な剪断を界面活性剤溶液に印加する方法である。具体的には熱交換器の入口にミセル構造破壊装置を装着し、熱交換器内でミセル構造が破壊させられた溶液を流動させることで伝熱低減効果および抵抗低減効果を消失させ、溶液が熱交換器内を通過し、配管系に戻れば、自然にミセル構造を形成して抵抗低減効果を回復させるといった環境を作り出すものである。Liら¹⁻³⁰⁾によれば、ミセル構造を破壊させるものとして、熱交換器の上流側に細かなメッシュを取り付けたところ、下流側で熱伝達率の低減が回避された。

いずれの方法も、界面活性剤溶液に剪断を印加することにより、棒状ミセル構造に影響を与えるものであるが、使用する界面活性剤の種類や濃度が、適用を想定しているシステムによって異なるため、汎用的な熱交換器の設計指針を取得する必要があるが次の段階として生じてくるのは明らかである。

1-4 本研究の目的

上述を鑑み、本研究では界面活性剤として、空調システムの冷房および暖房のいずれの温度域においても顕著な抵抗低減効果を発現することで知られているOleyldi(hydroxyethyl)methylammoniumchloride (商品名: Ethoquad O/12) とサリチル酸ナトリウムを、それぞれ第四級アンモニウム塩系陽イオン界面活性剤および対イオン形成化合物として選定し、その伝熱低減効果を回避する手法の開発に関する基礎検討とそれを基にした熱交換器設計のための指針提案を行うことを目的とした。

本論文は本第1章を含め、全5章から構成される。第2章では、界面活性剤溶液の伝熱特性に与える熱交換器内伝熱管の内部形状の影響を明らかにし、伝熱低減効果が発現しない伝熱管内部形状および流動条件を明らかにし、熱交換器設計のための指針を提案した。次に第3章では、熱交換器の入口に狭路構造を有する「プラグ型ミセルスクィーザー」を考案し、それを装着した場合の剪断印加による伝熱低下の回避の可能性を検討し、熱交換器設計のための指針を提案した。また、第4章では、工業および産業分野において、混合、攪拌、伝熱促進等を目的に実用化されている捻り平板(スタティックミキサー)を熱交換器の入口に装着し、界面活性剤溶液に旋回による剪断を印加することで伝熱低下を回避する可能性を検討すると共に、第3章で検討したプラグ型ミセルスクィーザーと効果の比較を行った。最後に第5章にて本研究で得られた知見を総括した。

第 1 章における参考文献

- 1-1 Toms, B. A., "Some Observations on the Flow of Linear Polymer Solutions Through Straight Tubes at Large Reynolds Numbers," *Proc. First Int. Congr. on Rheology*, North Holland, Amsterdam, **2**, 135-142 (1949)
- 1-2 Hoyt, J. W., "The Effect of Additives on Fluid Friction," *Trans. ASME, J. Basic Engineering*, **94**, 2, 258-285 (1972)
- 1-3 日本化学会編, "現代界面コロイド化学の基礎-講義と測定マニュアル," 丸善, (1997)
- 1-4 Shikata, T., H. Hirata and T. Kotaka, "Micelle Formation of Detergent Molecules in Aqueous Media," *Langmuir*, **4**, 354-359 (1988)
- 1-5 Ohlendorf, D., W. Interhal and H. Hoffmann, "Surfactant Systems for Drag Reduction: Physico-Chemical Properties and Rheological Behavior," *Rheol. Acta*, **25**, 468-486 (1986)
- 1-6 薄井洋基, 酒井理恵子, 伊藤貴康, 佐伯隆, "陽イオン界面活性剤水溶液の管内流動とレオロジー," 化学工学論文集, **22** (1), 221-225 (1996)
- 1-7 Usui, H. and T. Saeki, "Drag Reduction and Heat Transfer Reduction by Cationic Surfactants," *J. Chem. Eng. of Japan*, **26**, 103-109 (1993)
- 1-8 Shikata, T., Y. Sakaiguchi, H. Uragami, A. Tamura and H. Hirata, "Enormously Elongated Cationic Surfactant Micelle Formed in CTBA-Aromatic Additive Systems," *J. Colloid and Interface Sci.*, **119** (1), 291-293 (1987)
- 1-9 Chou, L. -C., R. N. Christensen and J. L. Zakin, "The Influence of Chemical Composition of Quaternary Ammonium Salt Cationic Surfactants

- on Their Drag Reducing Effectiveness,” *Drag Reduction in Fluid Flows*, R. H. J. Sellin and R. T. Moses, ed., 141–148, Ellis Horwood Pub., Chichester, England (1989)
- 1-10 Steiff, A., W. Althaus, M. Weber and P. Weinspach, “Application of Drag Reducing Additives in District Heating Systems – Present State of Investigations,” *Drag Reduction in Fluid Flows*, R. H. J. Sellin and R. T. Moses, ed., 247–254, Ellis Horwood Pub., Chichester, England (1989)
- 1-11 Frankhanel, M., M. Icking, W. Athaus, A. Steiff and P. M. Weinspach, “Application of Drag Reducing Additives in District Heating Systems,” *Fernwarme International–FWI*, **19 (2)**, 117 (1990)
- 1-12 Pollert, J., J. L. Zakin, J. Myska and P. Kratochvil, “Use of Friction Reducing Additives in District Heating System Field Test at Klapno–Krocelavy, Czech Republic,” *Proc. 85th Int. District Heating and Cooling Assoc.*, Seattle, Washington, 85, 141–156 (1994)
- 1-13 薄井洋基, 佐伯隆, 高木恒雄, 徳原慶二, “抗力減少用界面活性剤を添加した冷暖房システムの熱媒輸送動力の評価法と実用化のための諸問題の検討, 化学工学論文集, **21 (2)**, 248–255 (1995)
- 1-14 薄井洋基, 佐伯隆, 伊藤貴康, “界面活性剤水溶液の円管内乱流伝熱,” 化学工学会秋季大会講演論文集, D112, (1995)
- 1-15 Usui, H., T. Itoh and T. Saeki, “On Pipe Diameter Effects in Surfactant Drag-reducing Pipe Flows,” *Rheol. Acta*, **37**, 122–128(1998)
- 1-16 薄井洋基, “乱流抵抗減少効果に及ぼす界面活性剤の分子構造の影響,” 化学工学会秋季大会講演論文集, I113 (1996),
- 1-17 川口靖夫, 俵谷佳里, 田中誠, “CTAC: NaSal/W界面活性剤ミセル溶液

- の粘性率の測定(溶液温度・壁面の影響),” 機械技術研究所所報, **49 (4)**,
12-21 (1995)
- 1-18 黒瀬剛秀, 台坂恒, 前田昌信, “界面活性剤溶液噴流中での運動量および物質移動,” 第34回日本伝熱シンポジウム講演論文集, A212 (1997)
- 1-19 稲葉英男, 春木直人, “冷熱エネルギー輸送用界面活性剤添加低温水の管内流動抵抗と熱伝達特性,” 日本機械学会論文集, B編, **63 (608)**,
1336-1343 (1997)
- 1-20 佐藤公俊, 三松順次, 熊田雅弥, “界面活性剤添加による抵抗低減と伝熱促進,” 第34回日本伝熱シンポジウム, A144 (1997)
- 1-21 エルエスピー協同組合ホームページ,
<http://www.joho-yamaguchi.or.jp/lsp/>
- 1-22 鎌倉賢司, 八塩彰, 三原一伸, 熊谷智正, 牧野士郎, 櫻井翰, “熱搬送動力削減のための配管摩擦抵抗低減技術に関する研究,” 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, D-18 (1996), 名古屋
- 1-23 山田和浩, “熱媒輸送動力費低減に関する実用化検証試験,” 中国電力技研時報, 第89号, 15-25 (1997)
- 1-24 特開平10-298585, “水系熱搬送媒体の配管内摩擦抵抗の低減方法”
- 1-25 Imanari, M., M. Yanadori, M. Hiramatsu and T. Kasuga, “Friction Factor Reduction by Addition of a Surfactant in the Transport of a Water/Particle Slurry in a Pipe,” *JSME International Journal, Series B*, **40 (3)** 402-408 (1997)
- 1-26 Bewersdorff, H.W. and H. Thiel, “Turbulent Structure of Dilute Polymer and Surfactant Solutions in Artificially Roughened pipes,” *Applied Scientific Research*, **50**, 347-368 (1993)

- 1-27 De Guzman, M. R., T. Saeki, H. Usui and T. Nishimura, "Surfactant Drag Reduction in Internally-Grooved Rough Tubes," *J. Chem. Eng. of Japan*, **32 (4)**, 402-408 (1999)
- 1-28 Qi, Y., Y. Kawaguchi, Z. Lin, M. Erwing, R. N. Christensen and J. L. Zakin, "Enhancing Heat Transfer in Drag Reducing Surfactant Solutions," Proc. 11th European Drag Reduction Working Meeting, 42, Prague (1999)
- 1-29 Zakin, J. L. and R. N. Christensen, "Reduction of Pumping Energy Losses in District Heating and Cooling Systems," Final Report, Dep. of Energy Project (1992)
- 1-30 Li, P. W., H. Daisaka, Y. Kawaguchi, A. Yabe, K. Hishida and M. Maeda, "Turbulence Structure of Drag Reducing Surfactant Solution in Two Dimensional Channel with Additional Heat Transfer Enhancement Method," *Proc. 5th ASME/JSME Joint Thermal Engineering Conference*, AJTE99-6446, 1-8 (1999)

第2章 界面活性剤を用いる抵抗低減系における伝熱特性に対する管内内部形状の影響

2-1 緒言

粘弾性を示す界面活性剤水溶液は、顕著な抵抗低減効果を示し、これを地域冷暖房システムにおける冷温水搬送に適用して搬送動力を削減させる研究が多く成されている^{2-1), 2-2)}。代表的な抵抗低減効果の一例²⁻³⁾をFig. 1-5に示したが、ここで、レイノルズ数 Re を改めて説明すると、配管の直径 d [m]、流速 u [m/s]、媒体の密度 ρ [kg/m³]および粘度 μ [Pa·s]を用いて、以下の式にて算出され、流れの乱れ度合いを示す値である。

$$Re = \frac{du\rho}{\mu} \quad (2-1)$$

この時、界面活性剤水溶液の粘度については水の値を代用するのが一般的である。何故なら界面活性剤の粘度はFig. 1-4から分かるように強い非ニュートン性を示し、 Re を定義する場合にどの粘度値を用いるかを決定することが困難であるためと、もう一つは抵抗低減の効果を同一流量における水と直接比較し易いためである。本論文においてもこれに従うものとする。

また、配管の長さ l [m]の区間での流動抵抗は圧力損失 ΔP [Pa]となって現れ、壁面での剪断応力 τ_w [Pa]は動圧 $\rho u^2/2$ に比例するので次の関係式が成り立つ。

$$\frac{\pi}{4} d^2 \Delta P = \tau_w \pi dl = f \left(\rho \frac{u^2}{2} \right) \pi dl \quad (2-2)$$

ここで、比例定数 f [-]は摩擦係数と呼ばれ、流れの抵抗度合いを表す数値として用いられる。この式を変形すると、

$$f = \frac{\tau_w}{(1/2)\rho u^2} = \frac{1}{4} \frac{d}{l} \frac{\Delta P}{(1/2)\rho u^2} \quad (2-3)$$

となる。

一般に管径一定の円管内をニュートン流体が流れる場合、 f と Re の関係は、次式で示される。

$$f = 0.0791Re^{-0.25} \quad (2-4)$$

$$f = \frac{16}{Re} \quad (2-5)$$

Eq. 2-4はBlasiusの式と呼ばれる乱流域での実験式であり、Eq. 2-5はHagen-Poiseuilleの式から誘導される層流域での理論式である。

また、界面活性剤水溶液の抵抗低減効果を示す値として以下の式で算出される抵抗低減率 $DR[\%]$ が用いられる。

$$DR = \frac{(f_w - f_s)}{f_w} \times 100 \quad (2-6)$$

f_s : 界面活性剤水溶液の摩擦係数 [-]

f_w : 水（溶媒）の摩擦係数 [-]

界面活性剤水溶液は流動摩擦抵抗を低減させると同時に伝熱性能も低下させる特徴を持つ。Fig. 2-1 に界面活性剤水溶液の伝熱特性の一例を示す²⁻³⁾。ここで、 Nu とは熱伝達の度合いを表す無次元数であり、伝熱特性を考察する際に用いられ、以下の式により算出される。

$$Nu = \frac{hd}{\lambda} \quad (2-7)$$

h : 媒体の熱伝達率 [W/m²·K]

λ : 媒体の熱伝導度 [W/m·K]

また、 Pr はプラントル数で、以下の式より求められる。

$$Pr = \frac{C\mu}{\lambda} \quad (2-8)$$

C : 媒体の比熱 [J/kg·K]

一般に、気体または液体 ($Pr = 0.6 \sim 200$) が平滑管内を乱流で流動する時、 Re 、 Nu および Pr は以下の関係式で示される。

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (2-9)$$

この式は、Dittus-Boelter の式と呼ばれる実験式である。

界面活性剤水溶液の抵抗低減率と同様に、界面活性剤水溶液の伝熱低減効果を示す値として以下の式で算出される伝熱低減率 HTR [%] が用いられる。

$$HTR = \frac{(h_w - h_s)}{h_w} \times 100 \quad (2-10)$$

ここで、

h_s : 界面活性剤水溶液の熱伝達率 [W/m²·K]

h_w : 水 (溶媒) の熱伝達率 [W/m²·K]

である。

Fig. 2-1から分かるように、界面活性剤水溶液の伝熱特性は水と比較して大幅に低減する。地域冷暖房システムの熱媒への適用を考えた場合、熱媒輸送配管では抵抗低減による輸送動力の低減効果と伝熱性能低下による保温効果の向上効果の両方が達成されることになる。一方冷凍機等の熱交換器では、管内側を流動する界面活性剤水溶液を管外側の冷媒 (水またはフロン) の気

化反応により冷却することになるが、管外側の熱伝達率は管内側のそれと同等以上であるため、管内側の界面活性剤水溶液の伝熱低下により、総括伝熱係数が50%以上低減することが予想される。その結果、冷房能力の大幅な低減や冷媒温度の過剰低下に伴う冷凍機停止等のシステムの致命的な問題が発生すると考えられる。

このような界面活性剤水溶液の抵抗低減効果および伝熱低減効果は使用する円管のサイズや流速によって大きく異なり、水のようなニュートン流体のモデルを適合させることはできない。薄井ら²⁻⁴⁾は界面活性剤のレオロジー特性を考慮した円管での抵抗低減のモデルを示し、実験では困難な大口径管での流速と抵抗低減量との予測式を提案している。しかし、界面活性剤水溶液の伝熱特性に関しては、Fig. 2-2 に示すように抵抗低減量よりも伝熱低減量の方が大きくなると言われており、運動量輸送と熱輸送のアナロジーが成り立たない²⁻³⁾。抵抗低減系の伝熱特性をモデル化した例として、水科らは Damping factor モデルにより、希薄高分子水溶液の管内流動時の伝熱特性を提案し、Polyethyleneoxide 水溶液の実験結果と良く一致することを示している²⁻⁵⁾。

このように、抵抗低減系の平滑管における流動特性および伝熱特性は明らかにされつつあるが、伝熱促進を目的に開発されている粗面管については、殆ど知見はなく、予測式提案までに至っていないのが現状である。もし、粗面管における界面活性剤水溶液の流動特性および伝熱特性に関する知見が得られ、ニュートン流体と同様に抵抗低減系流体でも伝熱促進効果が働き、伝熱低下の問題を回避できる熱交換器設計が可能となれば、地域冷暖房システムにおける抵抗低減添加剤の実用化に大きく貢献できるものと考えられる。

本論文では、地域冷暖房システムにおける冷凍機で実際に使用されている

伝熱管を用いて，基礎的な伝熱特性を評価した．検討した伝熱管は円管で管内面が平滑のものと螺旋状に溝加工があるものの2種類である．管内面の形状による界面活性剤水溶液の伝熱性能を評価し，冷凍機において伝熱性能の低下を防ぐための管内面形状に対する指針を得ることを研究目的とした．

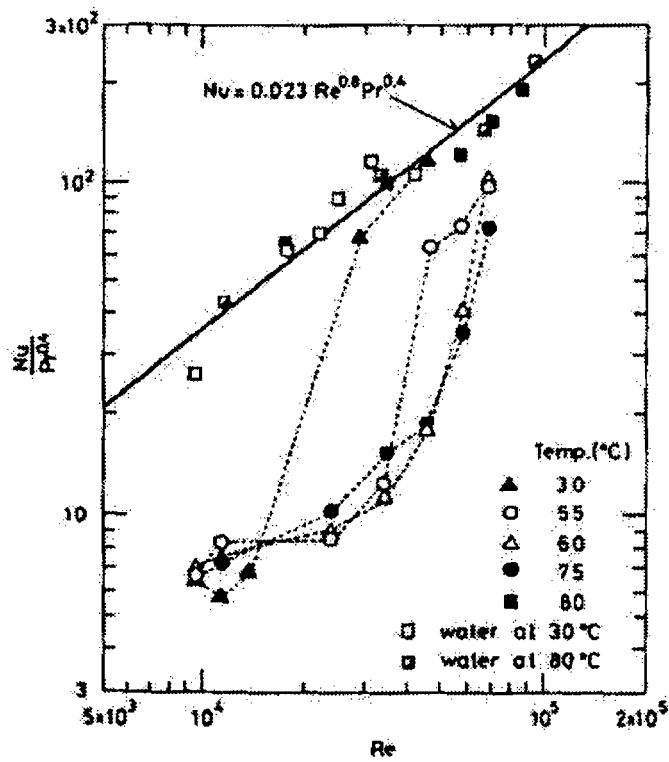


Fig. 2-1 Heat transfer characteristics of surfactant drag-reducing system
 (250 ppm STAC + Sodium salicylate)
 [H. Usui et al.²⁻³⁾]

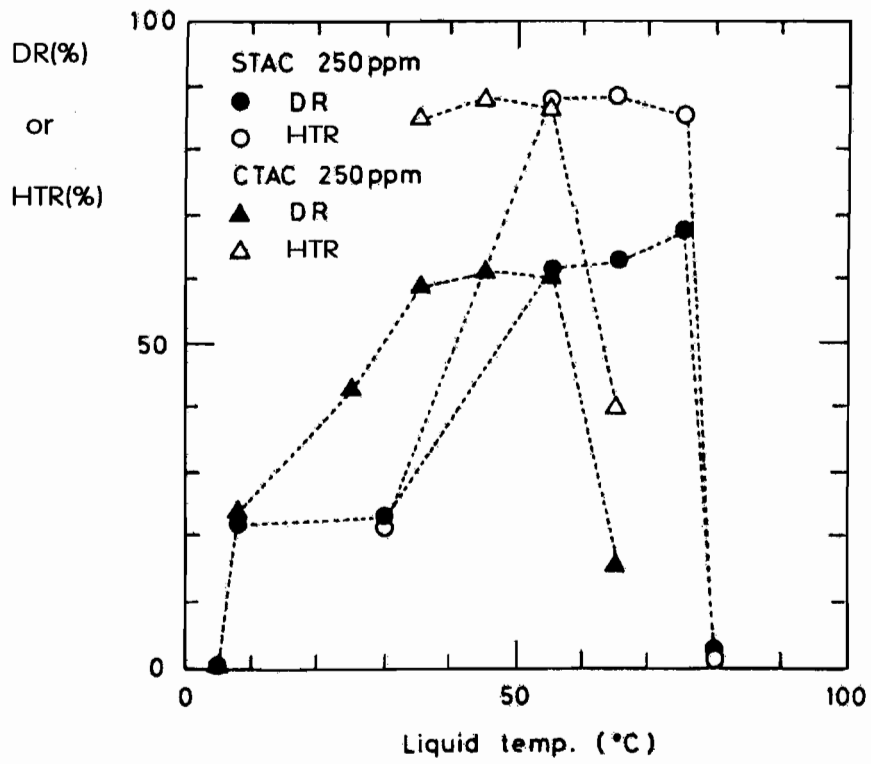


Fig. 2-2 Comparison of DR with HTR [H. Usui et al.²⁻³⁾]

2-2 実験

本論文で使用した界面活性剤および対イオン形成化合物は、それぞれ

界面活性剤：

【物質名】 Oleylbis(hydroxyethyl)methylammoniumchloride

【化学式】 $C_{18}H_{35}N(CH_2CH_2OH)_2CH_3 Cl$

【商品名】 Ethoquad O/12 (ライオンアクゾ社)

対イオン形成化合物：

【物質名】 Sodium salicylate (和名：サリチル酸ナトリウム)

【化学式】 $C_6H_4(COO^-Na^+)(OH)$

である。Chou ら²⁻¹⁾は、アルキルトリメチルアンモニウム塩系界面活性剤 ($R-N(CH_3)_3Cl$) とアルキルビスヒドロキシエチルメチルアンモニウム塩系界面活性剤 ($R-N(C_2H_4OH)_2(CH_3)Cl$) の抵抗低減効果を比較した。その結果、前者は 303 K (30°C) より以下の低温では抵抗低減効果を示さないのに比べ、後者は 275 K (2°C) の低温まで顕著な抵抗低減効果を表すことを明らかにした。本論文における研究では冷房における抵抗低減添加剤の適用を想定しているため、アルキルビスヒドロキシエチルメチルアンモニウム塩系界面活性剤で低温での効果が確認されている前記の Ethoquad O/12-サリチル酸ナトリウム系界面活性剤^{2-1), 2-6)}を供試材料に選定した。

また、界面活性剤と対イオン形成化合物の混合割合についても研究がなされ、Fig. 2-3 に示すように、モル比で 1 : 1.5 (重量比に換算すると、5 : 3) で最も抵抗低減効果が発現すると報告されている²⁻¹⁾。よって、以下の実験においてもこの混合比率により実施した。

Fig.2-4に伝熱管の管内熱伝達率を計測するために用いた装置を示す。冷凍

機内蒸発器で熱媒が伝熱管外部より冷却されることを想定して、伝熱管をこれより管径の大きいステンレス製の1½インチ管内に挿入し、その両端を密封することで二重管に加工し、これを熱交換器とした。

今回使用した伝熱管は、管内面の形状が平滑のものと、螺旋状に溝加工が施されたもの2種類の合計3種類である。管内面の詳細な仕様を Fig.2-5 および Table 2-1 に示す、2種類の螺旋状溝加工管の主な違いは、溝のピッチ数である。

この二重管式熱交換器の伝熱管内部に熱媒を、伝熱管とステンレス管の間に生ずる環状部分に実ガス吸収式冷凍機内蒸発器の伝熱管外部温度と同じ 277 K の冷水をそれぞれ流通させ、伝熱管の管壁温度が一定の条件で熱媒と冷水間で熱交換を行わせる。この際伝熱管壁温度を、伝熱管に等間隔で密着装着した T 型熱電対で計測した。また、二重管式熱交換器の入口側と出口側にそれぞれ熱媒温度を計測できるように、白金測温抵抗体を入口側および出口側にそれぞれ 2 本ずつ挿入設置した。これらの熱電対および白金測温抵抗体は予め、氷水槽を用い、水銀標準温度計にて校正したものを用いた。

一般に、円管を伝熱管とする場合の熱交換量 Q は以下の式で示される。

$$Q = hA\Delta T_m \quad (2-11)$$

ここで、

A :	伝熱面積	[m ²]
h :	熱媒の熱伝達率	[W/m ² K]
Q :	交換熱量	[W]

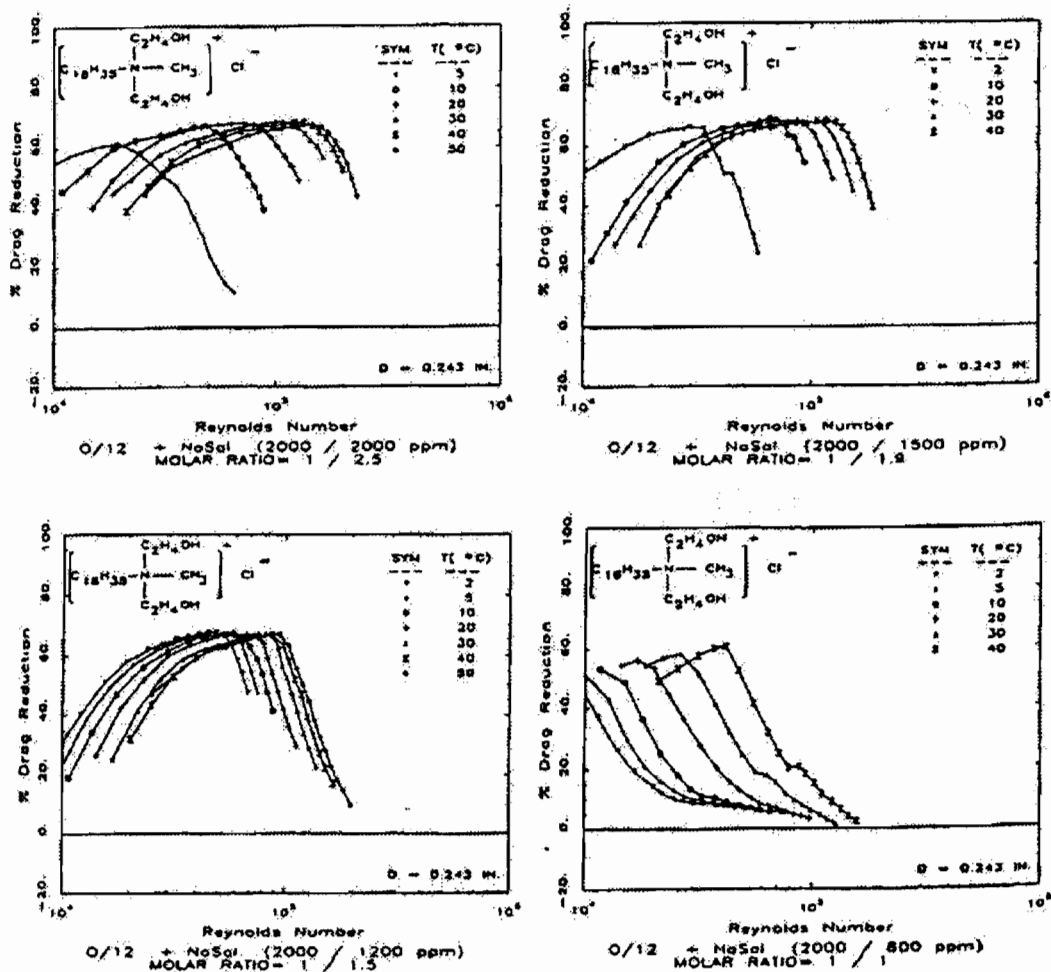


Fig. 2-3 Effect of molar ratio of quaternary ammonium salt to sodium salicylate [Chou et al.²⁻¹]

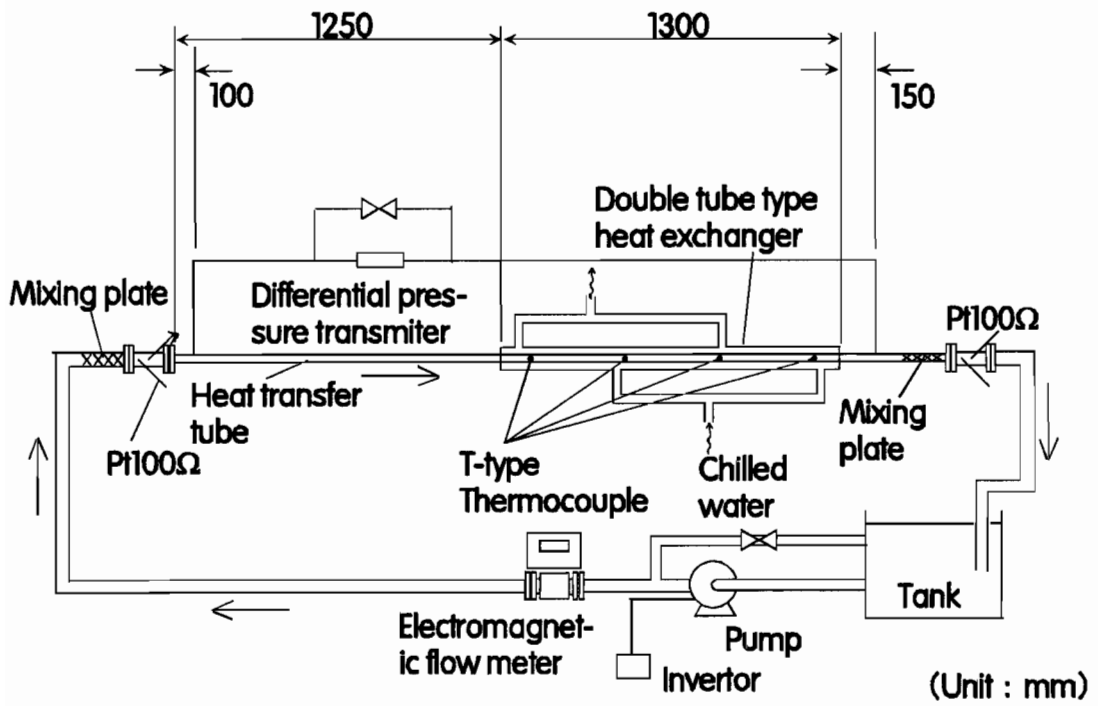


Fig. 2-4 Experimental apparatus

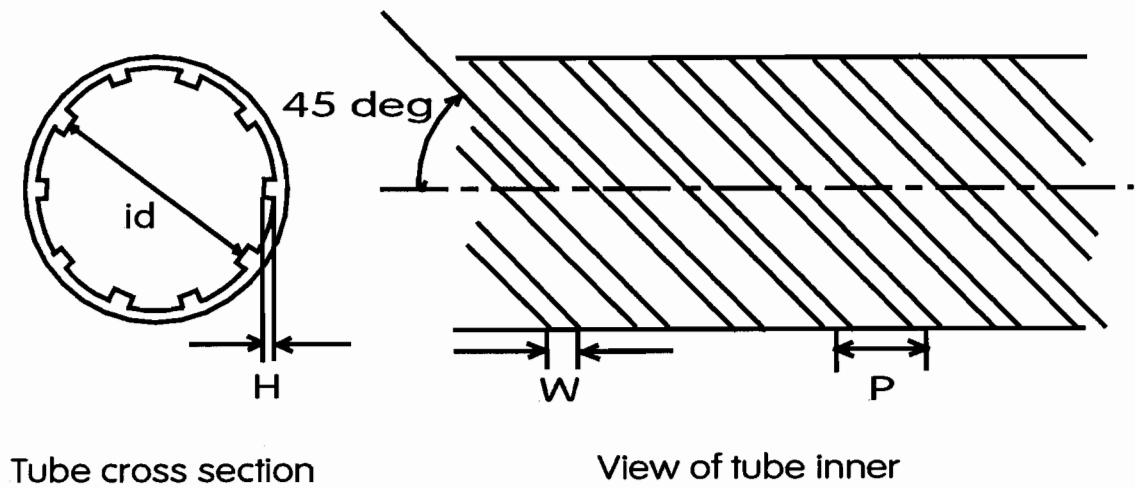


Fig. 2-5 Illustration of heat transfer tube

Table 2-1 Size of test tube.

Tube	Number of grooves for the tube cross section	id [mm]	H [mm]	W [mm]	P [mm]
Smooth	—	14	—	—	—
R 10	10	14.6	0.38-0.42	1.14	4.24
R 20	20	14.36	0.5	1.24	2.20

ΔT_m : Eq. 2-13 より得られる熱媒温度と伝熱管

壁面温度の対数平均温度差 [K]

熱媒交換熱量 Q は,

$$Q = C (T_i - T_o)M \quad (2-11)$$

ここで,

C : 熱媒の比熱 [J/kgK]

M : 熱媒の重量流量 [kg/s]

T_i : 熱媒の熱交換器入口温度 [K]

T_o : 熱媒の熱交換器出口温度 [K]

また, ΔT_m は

$$\Delta T_m = \frac{(T_i - T_w) - (T_o - T_w)}{\ln \frac{(T_i - T_w)}{(T_o - T_w)}} \quad (2-12)$$

ここで,

T_w : 伝熱管の壁温温度 [K]

より求められ, A は計算により求められるので, Eq. 2-11 より求める熱媒の h が実測により得られる.

熱交換させる時の温度条件は, 管内側熱媒 (供試媒体) 入口温度 T_i を 285.0 ± 0.1 K に, ジャケット冷水入口温度を 277.0 ± 0.1 K に制御した.

また, 伝熱管内を流通する熱媒の圧力損失は, 二重管熱交換器の伝熱管の入口部および出口部にそれぞれ水平方向に直径約 2 mm の測定孔を設け, ベローズ式差圧トランスミッタ (長野計器社製, KH-52 型) を接続することに

より計測した。この圧力損失値より、Eq. 2-3 を用いることで摩擦係数 f を算出した。

熱媒の循環には多段式渦巻きポンプ（IWAKI 社製，LP-025A）を使用し、インバータ（富士電機社製，FVR-C9S）を用いて流量を調整した。伝熱管を流通する熱媒の流量は循環ライン内に設置した電磁流量計（山武ハネウエル社製，KIX-10A）を用いて計測した。

本装置の熱媒循環部分の配管は全てウレタン製の保温材で覆い、放熱ロスによる温度計測誤差を可能な限り防いだ。

温度、圧力損失および流量データは、データロガー（江藤電気社製，THERMODAC-E）で集積し、RS-232C ケーブルを介してデータロガーと接続されたパソコンにて表示および記録した。

供試した熱媒は、上水を精水器（日本錬水製，C-2P）で電導度が約 $10 \mu\text{S/cm}$ 以下になるように、ろ過精製したイオン交換水と、イオン交換水に陽イオン界面活性剤である Oleyldi(hydroxyethyl)methylammoniumchloride（商品名：Ethoquad O/12（ライオンアクゾ社製））とサリチル酸ナトリウム（和光純薬社製，特級試薬）を溶解させたもの（以下，界面活性剤水溶液と記す）を用いた。濃度は、陽イオン界面活性剤を 1000 ppm ，サリチル酸ナトリウムを 600 ppm （モル比で $1:1.5$ ）にそれぞれ調製した。

2-3 結果と考察

2-3-1 伝熱管の内面構造の影響

Fig.2-6(a)および(b)に平滑管を伝熱管とし、イオン交換水と界面活性剤水溶

液をそれぞれ熱媒として計測した，流速と単位長さ当たりの圧力損失および流速と管内熱伝達率の関係をそれぞれ示す．平滑管において界面活性剤水溶液の圧力損失は，イオン交換水のそれと比較して，流速が 0.4 m/s から 2.5 m/s の広い範囲において低い値を示している．つまり，界面活性剤水溶液において棒状ミセルが効果的に抵抗低減効果（Drag Reduction Effect）を示していることが分かる．

一方，界面活性剤水溶液の熱伝達率をイオン交換水のそれと比較すると，流速が 0.2 m/s から 3.0 m/s の範囲において，界面活性剤水溶液の方がイオン交換水より低い値を示している，これは抵抗低減効果に伴って発現する伝熱低減効果を示している．抵抗低減効果を示す流速範囲と伝熱低下効果を示すそれとを比較すると，伝熱低下を示す流速範囲の方が広いことが分かる．この原因については現状理論的に考察できておらず，あくまで想像の域を超えないが，今回の実験装置では特に流速が大きい 2-3 m/s の範囲において，管中心部分の界面活性剤水溶液流は管壁部分のそれと比較して熱輸送が起これにくい状況になっており，結果として伝熱低減効果は発生するが抵抗低減効果は生じないといった現象が観察されたものと思われる．また，管内熱伝達率低減効果は抵抗低減効果よりも大きいことが観察されている．これは界面活性剤による抵抗低減系においては運動量輸送と熱輸送のアナロジーが成り立たない²⁻³⁾ことが原因と考えられる．実際の地域冷暖房システムで使用されている冷凍機内伝熱管での熱媒の流速範囲は，1-2 m/s である．一般に冷凍機内伝熱管の管外側は，水またはフロンの気化反応が起こっており，この気化熱により管内の熱媒を冷却している．この管外側の熱伝達率は，5000-10000 W/(m²·K)程度であり，管内側の熱媒の熱伝達率と同程度か，これより大きい値である．よって，管内側の熱媒の伝熱低下は冷凍機能力の低下

に大きく影響するものである。これより、平滑管を伝熱管として、界面活性剤水溶液を熱媒とすると、冷凍機的能力は低下してしまうことが予想される。

次に内面加工管 R10 を伝熱管とし、イオン交換水と界面活性剤水溶液をそれぞれ熱媒として計測した、流速と単位長さ当たりの圧力損失および流速と管内熱伝達率の関係を Fig.2-7(a)および(b)にそれぞれ示す。まず界面活性剤水溶液の圧力損失をイオン交換水のそれと比較すると、流速 1.0 m/s から 1.8 m/s において、界面活性剤水溶液の抵抗低減効果が確認できる。この抵抗低減効果が発現している流速範囲は、平滑管の場合より狭くなっている。これは、R10 の内面の螺旋状溝により、熱媒に剪断応力が印加され、抵抗低減効果が消失したものと考えられる。しかし、熱伝達率を見てみると平滑管の場合と同様に、0.3 m/s から 2.4 m/s と今回計測したほぼ全ての流速域において、界面活性剤水溶液の熱伝達率はイオン交換水のそれより低い値となっている。これも抵抗低減効果の結果と同様に R10 の内面の螺旋状溝の熱媒への剪断印加が原因と考えられる。このように R10 を伝熱管に使用した場合、平滑管の時と同様に、界面活性剤水溶液を熱媒として使用すると、冷凍機的能力は低下してしまうことが予想される。

最後に内面加工管 R20 を伝熱管とし、イオン交換水と界面活性剤水溶液をそれぞれ熱媒として計測した、流速と単位長さ当たりの圧力損失および流速と管内熱伝達率の関係を Fig.2-8(a)および(b)にそれぞれ示す。R20 における界面活性剤水溶液とイオン交換水の圧力損失は、先の平滑管および R10 の場合から比べると、界面活性剤水溶液の抵抗効果が発現されている流速範囲は 0.8 - 1.5 m/s と狭い。これは R20 の内面の螺旋状溝が、抵抗低減効果を発現させにくくしているものと考えられる。また、R10 の場合と比較しても明らかのように、内面の螺旋状溝のピッチが小さいほど、抵抗低減効果が発現し

にくくなることもこの結果より分かる。

一方、R20の熱伝達率を見てみると、圧力損失の場合と同様に、界面活性剤水溶液の熱伝達率がイオン交換水のそれより低下している流速の範囲は小さいことが分かった。イオン交換水より伝熱低下が観察されている流速範囲は、0.2 - 1.5 m/s であり、それ以上の流速域では、イオン交換水の値とほぼ同じであることが明らかになった。これより、R20を冷凍機の熱媒伝熱管として使用し、界面活性剤水溶液を熱媒とした場合、冷凍機内伝熱管の設計流速である1-2 m/sにおいて、比較的小さい流速域では、冷凍機能力は低下してしまうことが予想されるが、1.5 m/s以上の流速ではイオン交換水の熱伝達率と同じであるため、冷凍機能力は低下しないことが考えられる。

次に3種類の管で得られた流動特性および伝熱特性をそれぞれ Re と f の関係および Re と Nu の関係で標記し直したものをそれぞれFig. 2-9~2-11に示す。平滑管における Re と f の関係 (Fig. 2-9a) より、界面活性剤水溶液の f は、層流域においてニュートン流体の理論式 $f=16/Re$ よりかなり大きな値を示している。これは界面活性剤水溶液の Re の算出に水の粘度の値を代用したためであり、実際の管壁近傍での見かけ粘度は水のそれより大きな値を示しているものと考えられる。粗面管における界面活性剤水溶液の f および Nu は、Fig. 2-10とFig. 2-11に見られるようにR10およびR20とも平滑管より大きな値を示しており、界面活性剤水溶液においても水と同様に溝により乱流効果が高められたものと考えられる。

また、Fig. 2-9~2-11より、抵抗低減率 DR [%]および伝熱低減率 HTR [%]を算出し、まとめたものをFig. 2-12およびFig. 2-13にそれぞれ示す。これより、いずれの伝熱管においても、 DR に比べて HTR の方が大きな値を示しており、従来の研究結果Fig. 2-2と同じ現象が観察されていることが分かつ

た。HTR は、平滑管と比較して粗面管の方が高 Re 域で小さい値になっており、これは溝により、管壁近傍での乱れが促進され、ミセルの高次構造が崩されることにより、伝熱低減効果が弱められたためと考えられる。

このように、伝熱管の内面形状によって界面活性剤水溶液の抵抗低減効果および伝熱低減効果は大きく変化することが明らかになった。螺旋状溝のピッチが小さいほど、つまり内面の形状が複雑なほど、抵抗低減効果は発現しにくく、伝熱低下も起こりにくいことが分かった。Bewersdorff and Thiel²⁻⁷⁾ および De Guzman ら²⁻⁸⁾ は、本研究と同様な溝付内面加工管を用いて界面活性剤水溶液の抵抗低減特性を調べている。両者の研究結果によると、溝付内面加工管を用いた場合、平滑管を用いた場合と比較して抵抗低減効果量が少なくなり、また抵抗低減効果が発現する流速範囲が狭まることを明らかにしている。これらの結果は本研究で得られた知見と同じである。しかし、両者の研究結果では溝のピッチが小さくなると抵抗低減効果量は小さくならないことも示しており、単に溝のピッチを小さくすれば（溝の数を増やせば）界面活性剤水溶液の抵抗低減効果を減少させられる訳ではないと考えられる。また、Guzman らは平滑管での抵抗低減効果と伝熱低減効果の関係に関する知見に基づき、溝付内面加工管での抵抗低減効果の結果から伝熱低減効果の予測を行っている。それによると溝付内面加工管を用いると、実際の冷凍機内での流速域で伝熱低減を回避できる可能性を示唆している。本研究では内面加工管における界面活性剤水溶液の伝熱低減効果を実測により評価し、伝熱低減が回避される可能性を示すことができた。今回の知見は界面活性剤による抵抗低減系の実用化において極めて有用な知見と成り得ると考えられる。

今後、螺旋状溝のピッチおよび深さの異なる伝熱管を使用して、同様の実験を行い、伝熱管内面形状と界面活性剤水溶液の粘弾性および伝熱低減効果

発現現象との関係を明らかにすることで、冷凍機能力が低下しない理想時なシステム設計が行える指針が得られるものと考えられる。

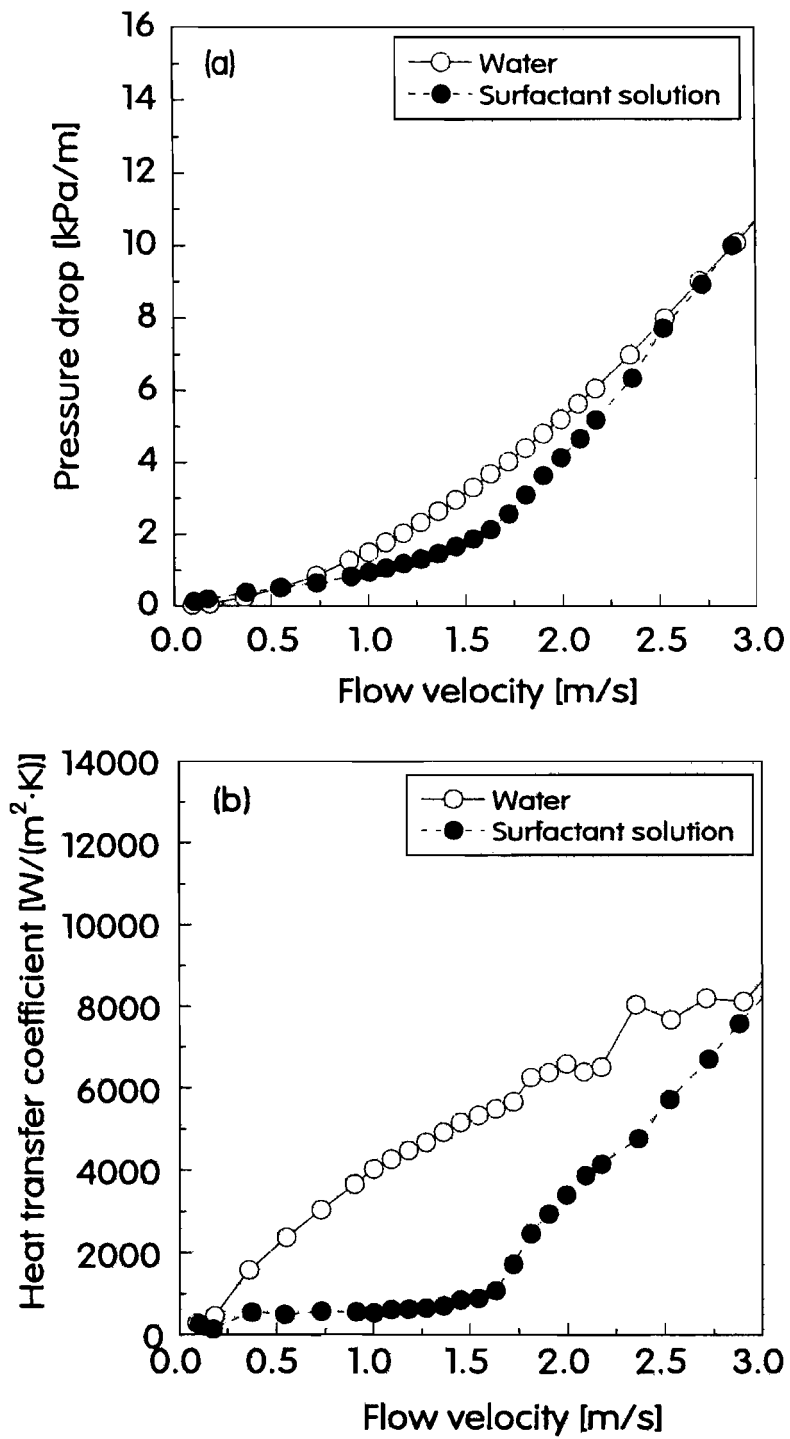


Fig. 2-6 Relationship between the velocity and the pressure drop (a), and heat transfer coefficient (b) in the smooth tube

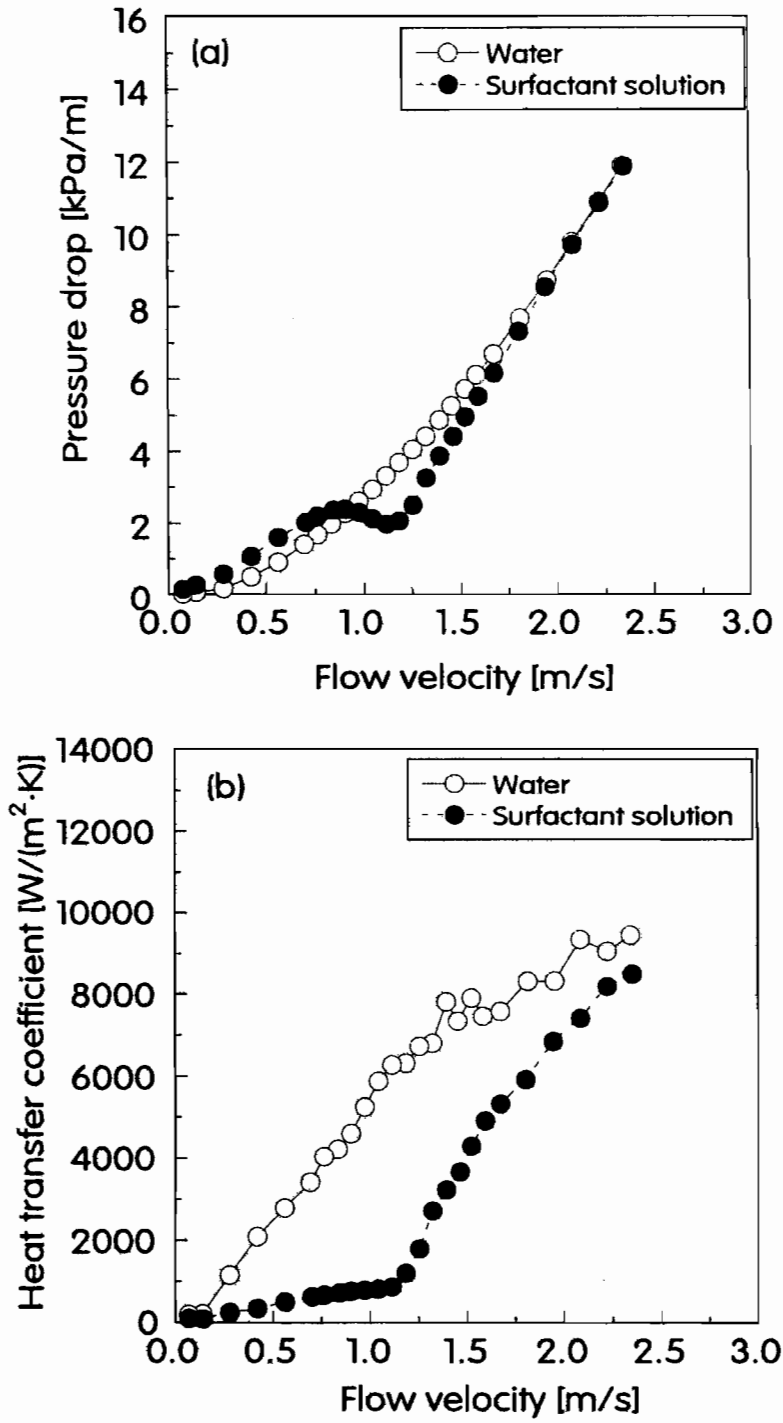


Fig. 2-7 Relationship between the velocity and the pressure drop (a), and heat transfer coefficient (b) in the grooved tube, R10

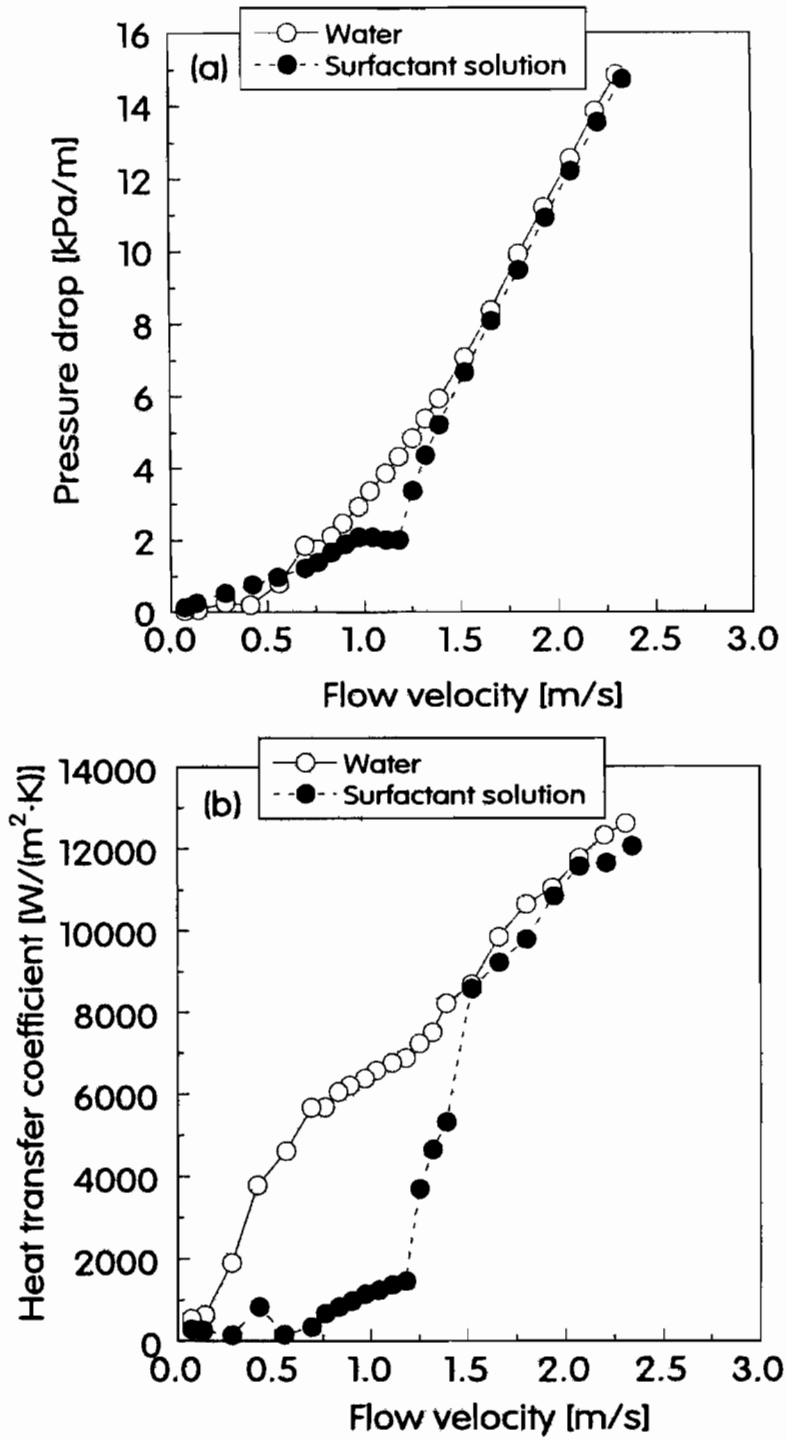


Fig. 2-8 Relationship between the velocity and the pressure drop (a), and heat transfer coefficient (b) in the grooved tube, R20

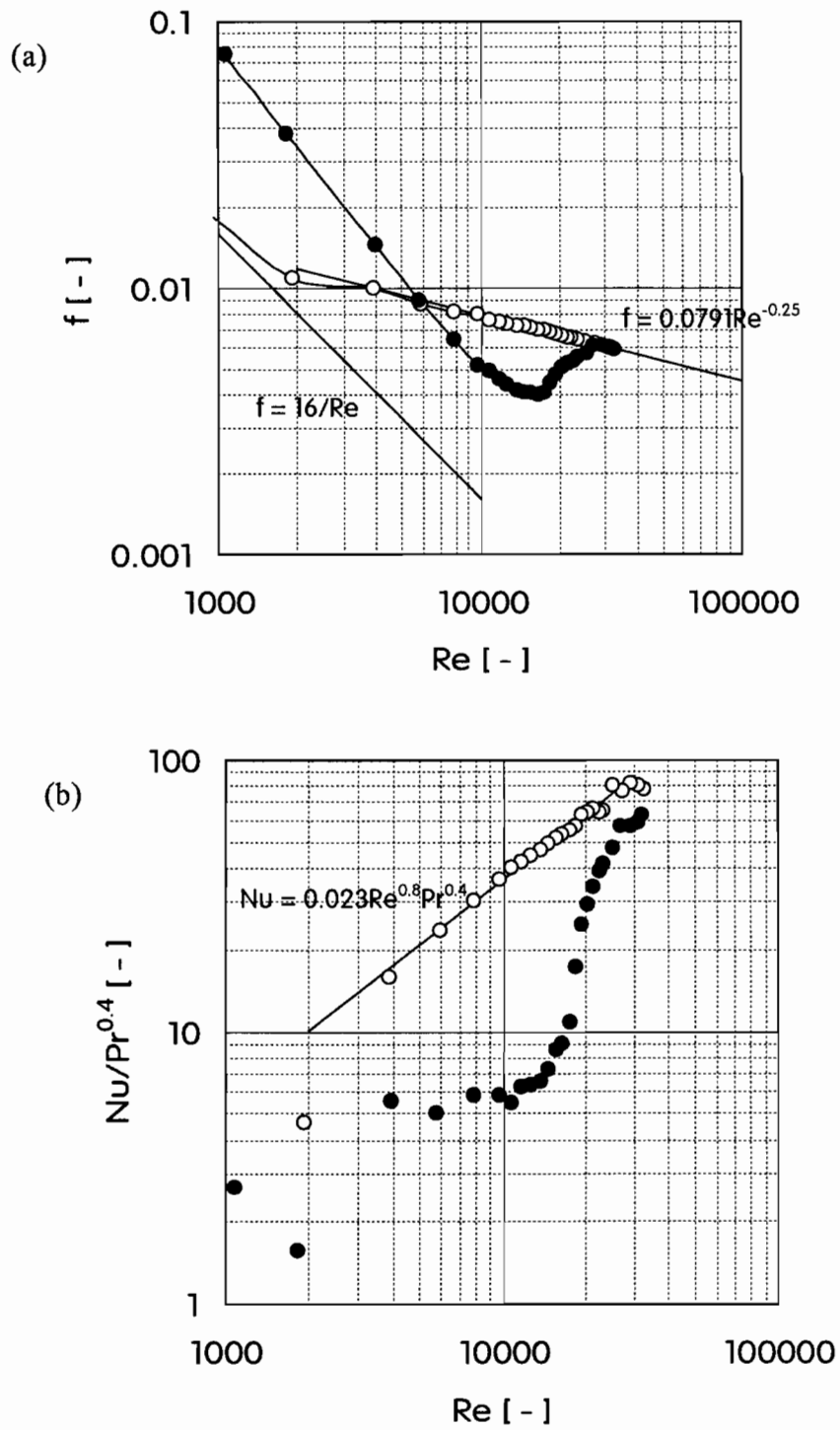


Fig. 2-9 Relationship between Re and f (a), and $Nu/Pr^{0.4}$ (b) in the smooth tube
 (○: Water, ●: Surfactant solution)

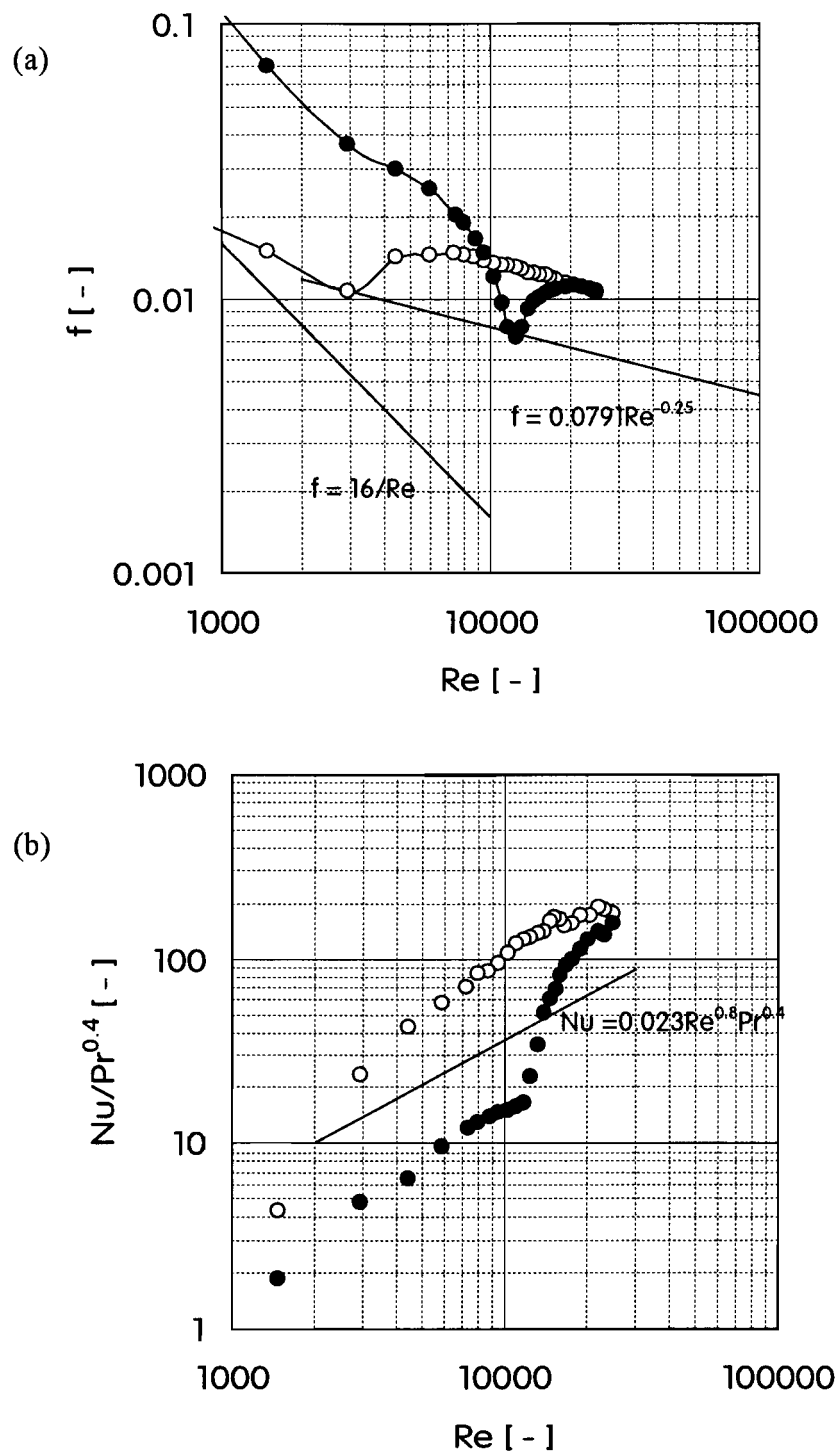


Fig. 2-10 Relationship between Re and f (a), and $Nu/Pr^{0.4}$ (b) in the grooved tube, R10 (○: Water, ●: Surfactant solution)

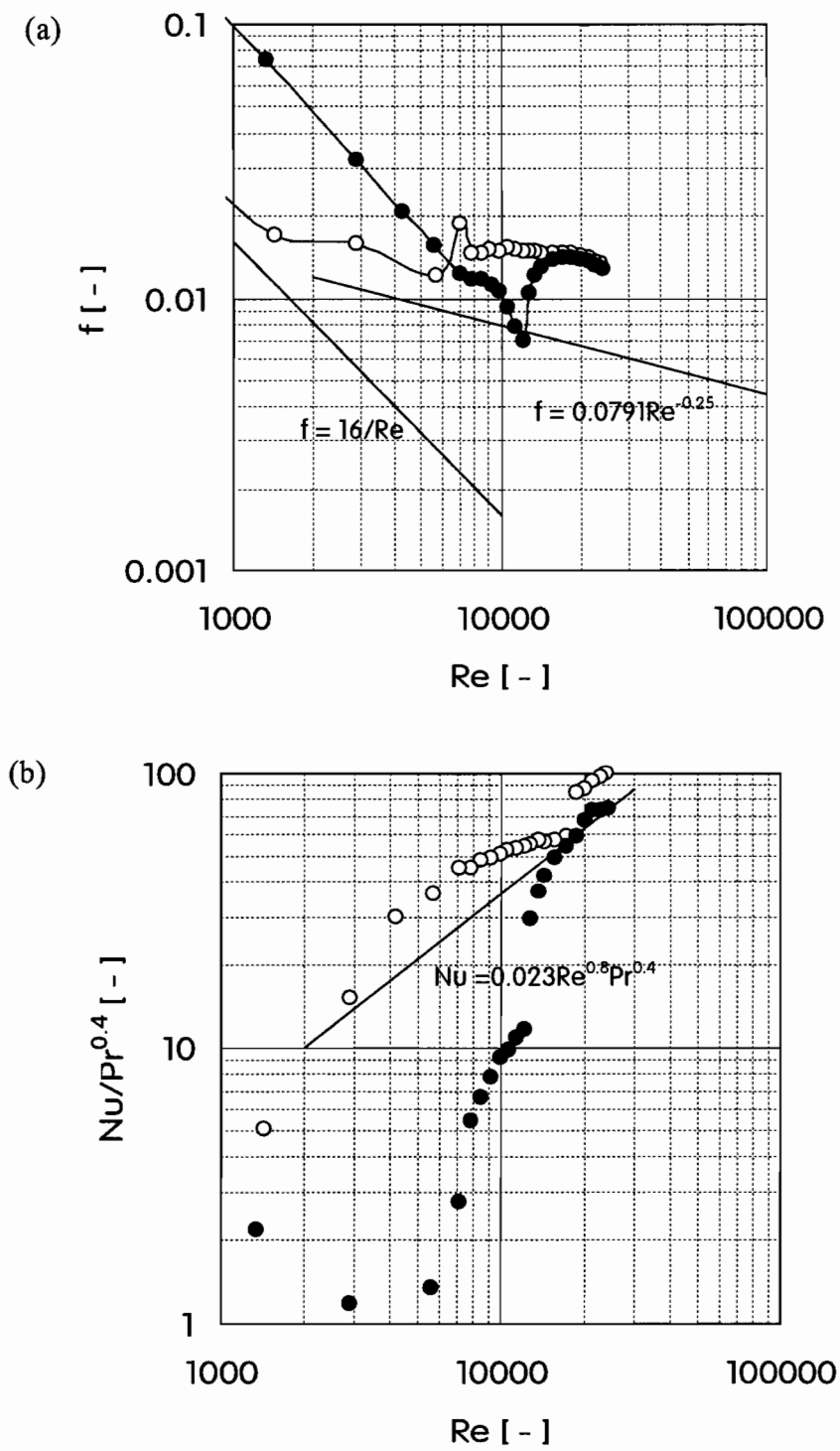


Fig. 2-11 Relationship between Re and f (a), and $Nu/Pr^{0.4}$ (b) in the grooved tube, R20 (○: Water, ●: Surfactant solution)

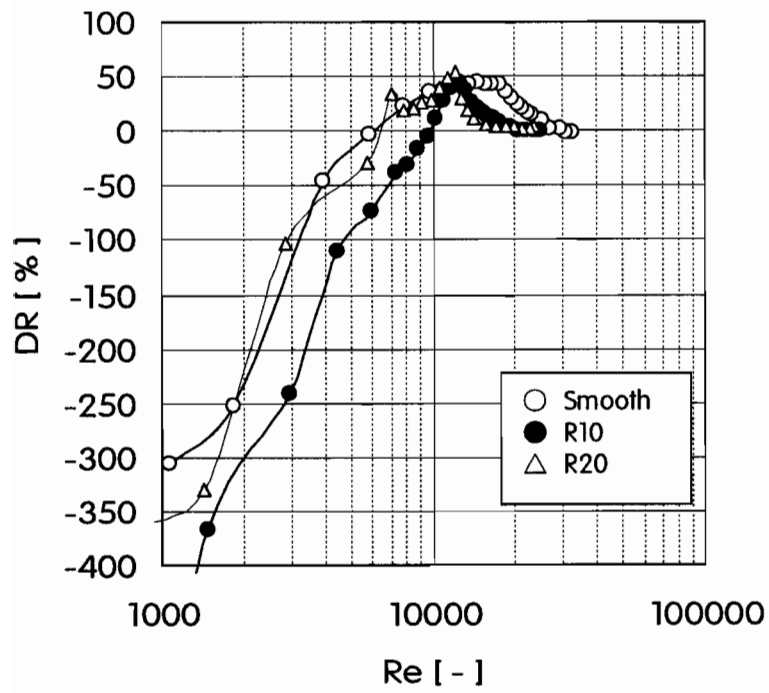


Fig. 2-12 Effect of roughness in the tube for DR

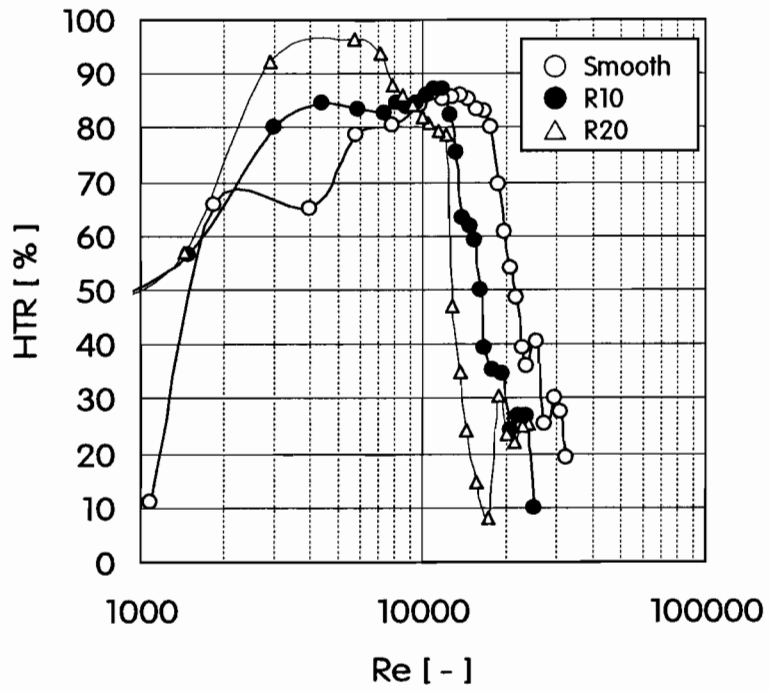


Fig. 2-13 Effect of roughness in the tube for HTR

2-3-2 管壁の剪断速度と熱伝達低減効果の相関

Fig.2-6～2-8 で示されるとおり，界面活性剤水溶液の抵抗低減効果および伝熱低減効果は管内流速と相関性がないことが分かった．Gasljevic-Matthy²⁻⁹⁾は抵抗低減効果を管内流速と関連づけて整理したが，Usuiら²⁻¹⁰⁾は抵抗低減効果を管壁での剪断応力および剪断速度で相関させた．本研究において，管壁の加工形状により抵抗低減効果および伝熱低減効果が大きく変化したことを考えると，ミセルの高次構造は粗面管の管壁部分で特に破壊されているものと予想される．これより本研究においても，伝熱低減効果が管壁での剪断速度によって相関がとれるのではないかと考え，評価を行った．この際，剪断速度の算出には，まず圧力損失の実測値から管壁部の剪断応力を算出し、その値と水の粘性値を使用して壁面での剪断速度を求めた．水の粘性値を用いた理由として，剪断速度が高い壁近傍では界面活性剤水溶液の見かけ粘度は水のそれとほぼ同じと考えられるためである．Fig.2-14 に伝熱低減率と壁面での剪断速度の関係を示す．

Fig.2-14 に示すように，この関係は今回供試した伝熱管においては良く相関がとれており，異なった粗面管においても平滑管と同様に伝熱低減効果を管壁での剪断速度で整理することが可能であることが分かる．実際の冷凍機伝熱管においては，使用される管内面形状が制限されるが，界面活性剤水溶液を熱媒に用いるシステムにおいて，更に数種類の粗面管を評価することによって，冷凍機内での伝熱低下を防止することができる最適な伝熱管内面形状を選択できるものと考えられる．

伝熱管内面形状設計の一例として，従来の粗面管での流動特性の研究例を用いて，界面活性剤水溶液の伝熱低下回避に有効な溝の高さ H [m]とピッチ P

[m]の関係を求めることとした。Webb ら²⁻¹¹⁾は、管軸と垂直且つ等間隔で管内に設けられたリブ加工管 (Fig. 2-15) の摩擦係数について、次の関係式を提案している。

$$\sqrt{2/f} + 2.5 \ln \frac{2H}{d} + 3.75 = 0.95 \left(\frac{P}{H} \right)^{0.53} \quad (2-14)$$

ただし、

$$\left(\frac{H}{d} \right) Re \sqrt{\frac{f}{2}} > 35 \quad (2-15)$$

Fig. 2-14より、伝熱低減効果が発現しない管壁剪断速度を 20000 s^{-1} とし、また粘性に水の 283 K での粘性値 $0.0013 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ を用いると、 τ_w は 26.0 Pa と算出される。

今回、冷凍機の伝熱管を設計するものとし、実際の冷凍機伝熱管でよく用いられる $d = 0.014 \text{ m}$ 、設計流速を $u = 2 \text{ m/s}$ と仮定すると、Eq. 2-3, Eq. 2-14 およびEq. 2-15より、以下の P と H の関係式が求められる。

$$P = H(28.55 + 2.63 \ln H)^{1/0.53} \quad (2-16)$$

ただし、

$$H > 8.92 \times 10^{-4} \text{ [m]}$$

Eq. 2-16は、界面活性剤水溶液を熱媒に用いる場合、伝熱低下が発生しない H と P の設計指針の一例を示すデータとなり、例えば、 $H = 1 \text{ mm}$ の時、 $P = 83 \text{ mm}$ 、また、 $H = 1.5 \text{ mm}$ の時、 $P = 149 \text{ mm}$ となる。今後これらの設計指針の有効性を実験により確認していくことが課題となる。

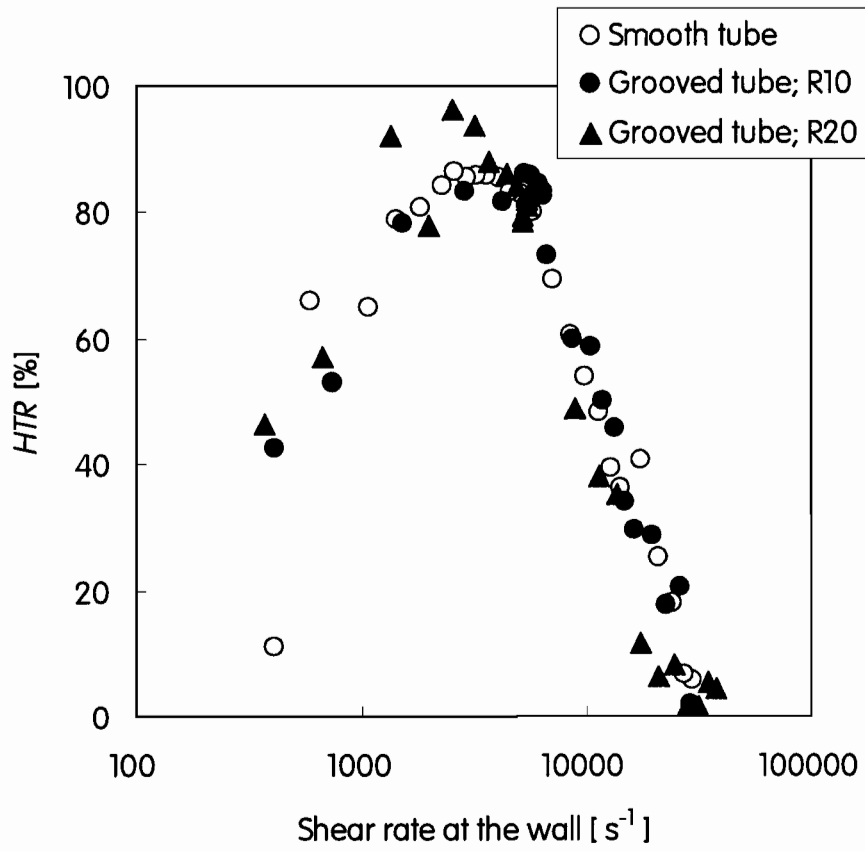


Fig. 2-14 Correlation of percentage heat transfer reduction by the wall shear rate

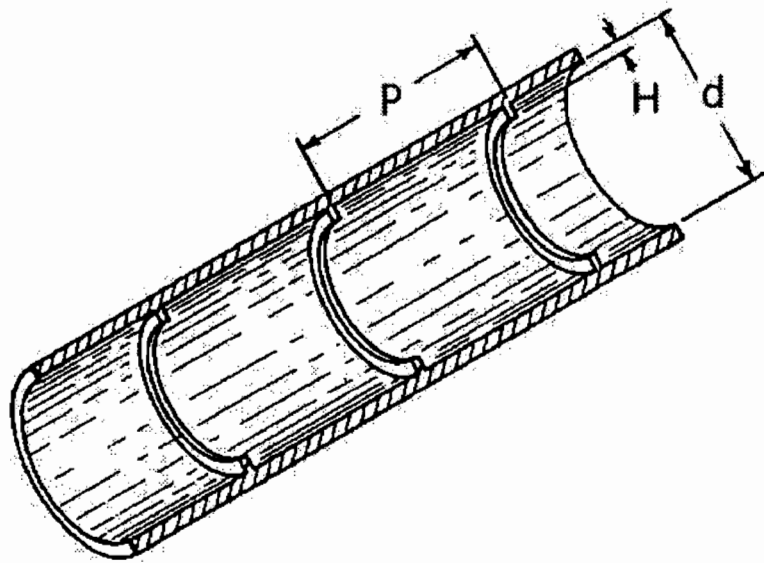


Fig. 2-15 Illustration of repeated rib roughness tube studied by Webb at al²⁻¹¹⁾

2-4 結言

界面活性剤水溶液の抵抗低減効果および伝熱減少効果に関し，地域冷暖房システムにおいて冷凍機内伝熱管として実際に使用されている平滑管と2種類の管内螺旋状溝管を用い基礎実験を行った，その結果以下の知見が得られた。

1. 平滑管を用いた場合，顕著な抵抗低減効果および伝熱減少効果が確認された。冷凍機での使用を想定すると，界面活性剤水溶液を熱媒とするとかなりの冷凍機能力低下が予想される。
2. 管内螺旋溝管を用いた場合，平滑管ほど抵抗低減効果および伝熱減少効果が発現する流速範囲は大きくない。
3. 管内螺旋溝管で溝のピッチが小さいほど，抵抗低減効果および伝熱減少効果が発現する流速範囲は狭い。今回供試した最も溝ピッチが小さい伝熱管では，実際にシステムで使用されている流速範囲で，従来の水を熱媒とした時とほぼ同じ伝熱特性が得られることが明らかになった。
4. 管内螺旋溝管における伝熱低減効果は管壁面上の剪断速度と相関がある。

第 2 章の参考文献

- 2-1 Chou, L. -C., R. N. Christensen and J. L. Zakin, "The Influence of Chemical Composition of Quaternary Ammonium Salt Cationic Surfactants on Their Drag Reducing Effectiveness," *Drag Reduction in Fluid Flows*, R. H. J. Sellin and R. T. Moses, ed., p.141-148, Ellis Horwood Pub., Chichester, England(1989)
- 2-2 Steiff, A., W. Althaus, M. Weber and P. Weinspach, "Application of Drag Reducing Additives in District Heating Systems – Present State of Investigations," *Drag Reduction in Fluid Flows*, R. H. J. Sellin and R. T. Moses, ed., p.247-254, Ellis Horwood Pub., Chichester, England (1989)
- 2-3 Usui, H. and T. Saeki, "Drag Reduction and Heat Transfer Reduction by Cationic Surfactants," *J. Chem. Eng. of Japan*, **26**, 103-109 (1993)
- 2-4 Usui, H., T. Itoh and T. Saeki, "On Pipe Diameter Effects in Surfactant Drag-reducing Pipe Flows," *Rheol. Acta*, **37**, 122-128 (1998)
- 2-5 Mizushima, T., H. Usui and T. Yamamoto, "Turbulent Heat Transfer of Viscoelastic Fluids Flow in Pipe," *Letters in Heat and Mass Transfer*, **2**, 19-26, (1975)
- 2-6 薄井洋基, 酒井理恵子, 伊藤貴康, 佐伯隆, "陽イオン界面活性剤水溶液の管内流動とレオロジー," *化学工学論文集*, **22 (1)**, 221-225 (1996)
- 2-7 Bewersdorff, H.W. and H. Thiel, "Turbulent Structure of Dilute Polymer and Surfactant Solutions in Artificially Roughened pipes," *Applied Scientific Research*, **50**, 347-368 (1993)
- 2-8 De Guzman, M. R., T. Saeki, H. Usui and T. Nishimura, "Surfactant Drag

- Reduction in Internally-Grooved Rough Tubes,” *J. Chem. Eng. of Japan*, **32 (4)**, 402–408 (1999)
- 2-9 Gasljevic, K. and E. F Matthys ; “On the Diameter Effect for Turbulent Flow of Drag-reducing Surfactant Solution,” *FED Vol. 231, Developments and applications of non-newtonian flows*. ASME MD-Vol. 66, 237–243(1995)
- 2-10 薄井洋基, 佐伯隆, 高木恒雄, 徳原慶二, “抗力減少用界面活性剤を添加した冷暖房システムの熱媒輸送動力の評価法と実用化のための諸問題の検討, 化学工学論文集, **21 (2)**, 248–255 (1995)
- 2-11 Webb, R. L., E. R. G. Eckert and R. J. Goldstein, “Heat Transfer and Friction in Tubes with Repeated-Rib Roughness,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, **14**, 601–617 (1971)

第 3 章 プラグによる界面活性剤溶液流の伝熱低下回避手法の検討

3-1 緒言

棒状ミセル構造を有する界面活性剤水溶液は、顕著な抵抗低減効果を示し、これを地域冷暖房システムにおける冷温水搬送に適用して搬送動力を削減させる研究が多く成されている³⁻¹⁾。界面活性剤水溶液は流動摩擦抵抗を低減させると同時に伝熱性能も低下させる特徴を持つ。地域冷暖房システムの熱媒への適用を考えた場合、熱媒輸送配管では抵抗低減による輸送動力の削減効果と伝熱性能低下による保温効果の向上効果の両方が達成されることになるが、一方冷凍機や室内機等の熱交換器では伝熱性能低下により、従来の水を熱媒として利用する場合に設計された熱交換器での運転条件では、熱交換量が大幅に低下してしまうといった問題が発生すると予想される。

前章では、地域冷暖房システムにおける冷凍機で実際に使用されている伝熱管を用いて、基礎的な伝熱特性を評価した。その際に検討した伝熱管は円管で管内面が平滑のものと螺旋状に溝加工があるものの2種類であるが、螺旋状溝加工管を用いると、平滑管を用いた場合に比べて抵抗低減効果および伝熱性能低減効果が発現する流速の範囲が小さくなることを確認した。また、界面活性剤水溶液の伝熱性能低減効果は、管内面の壁面剪断速度と相関があることも示唆している。

第 1 章で述べたが、界面活性剤水溶液の伝熱低下を回避するもう一つの手法として、機械的な剪断を界面活性剤水溶液に印加する方法が有効ではないかと思われる。界面活性剤水溶液の抵抗低減効果は、ある臨界レイノルズ数

を境にそれ以上のレイノルズ数になると顕著に減少し、水と同じ摩擦係数値を示す(第1章の Fig. 1-4 参照)。これは、高レイノルズ数域では壁面剪断応力が大きくなり、棒状ミセルの高次構造が崩されるため³⁻²⁾と考えられており、言い換えれば、ある一定量以上の剪断印加場においては、界面活性剤水溶液の抵抗低減効果およびそれと同時に発生する伝熱低減効果は消滅するものと考えられる。故に、熱交換器の入口にミセル構造破壊装置を装着し、熱交換器内でミセル構造が破壊させられた溶液を流動させることで伝熱低減効果および抵抗低減効果を消失させ、溶液が熱交換器内を通過し、配管系に戻れば、自然にミセル構造を形成して抵抗低減効果を回復させるといった環境を作り出すことができれば熱交換器内での伝熱低下を回避できるものと期待できる。同じ概念により、Liら³⁻³⁾は、ミセル構造を破壊させるものとして、熱交換器の上流側に細かなメッシュを取り付け、下流側の熱交換器内部で熱伝達率の低減が回避されたことを示している。

今回、界面活性剤水溶液の伝熱特性低下回避方法として、機械的な剪断を印加する手法を検討することとした。具体的には、急激な縮小そして拡大流れを引き起こすオリフィス形状の狭路管からなる剪断印加装置(Plug型ミセルスクィーザーと名付けた。)を伝熱管の上流側に装着する方法を新規に提案し、その伝熱低減の回避に対する有効性を評価するものである。この研究に先立って、Usuiらは積極的にミセルの高次構造を破壊する手法として超音波照射法を試みている³⁻⁴⁾。その評価装置を Fig. 3-1 に、また超音波照射装置の写真および断面図をおよび Fig. 3-2 および Fig. 3-3 にそれぞれ示す。この研究では、圧力損失計測部位の上流に超音波照射装置を設置し、超音波照射後の界面活性剤水溶液の流動特性を評価することでミセルの高次構造の破壊度合いを見積もっている。界面活性剤および対イオン形成化合物として

Ethoquad O/12 およびサリチル酸ナトリウムをそれぞれ用いて、超音波を照射した場合、照射せずに超音波装置内を通過させた場合および超音波装置を設置せず、機械的剪断力の影響を受けない従来の循環装置を流動させた場合の3ケースの流動特性結果を Fig. 3-4 に示す。この結果、機械的剪断を受けない場合を除いて、他の2ケースでは摩擦係数はほぼ一致した値を示し、抵抗低減効果は減少することが明らかとなった。つまり、当初の目論見とは異なり、超音波の有無に係わらず、超音波装置内の縮小および拡大流路によるエネルギーよりミセル高次構造の破壊が進行し、圧力損失計測部分において、抵抗低減効果が発揮されなかったものと考えられる。以上のことより、本研究を発案するに至った。

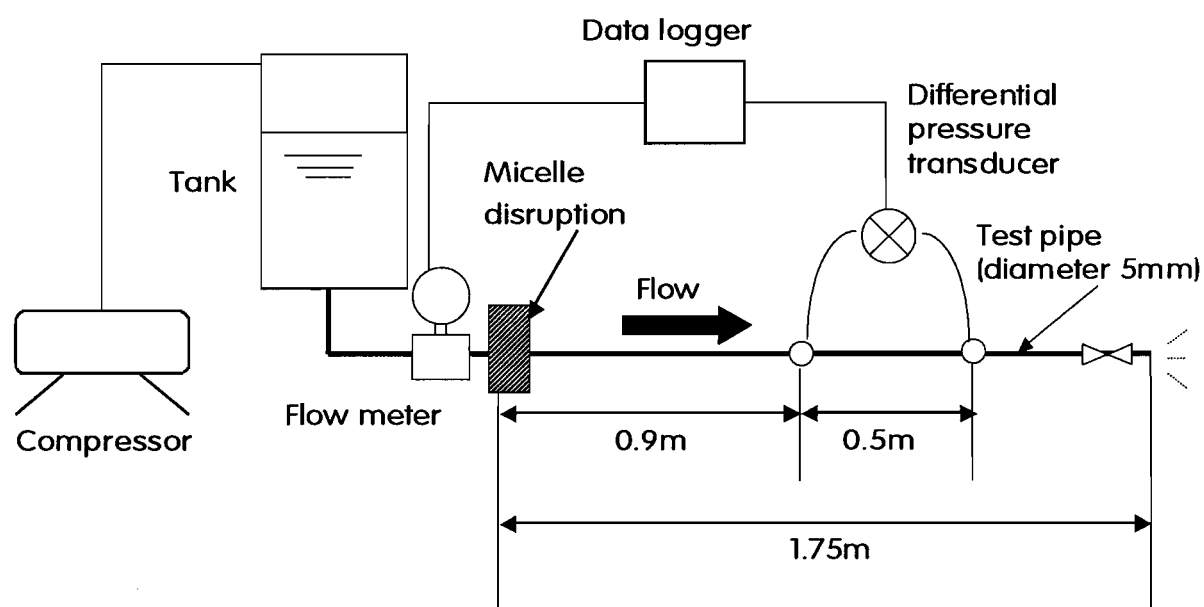


Fig. 3-1 Experimental apparatus of the once through system with a micelle disruption section

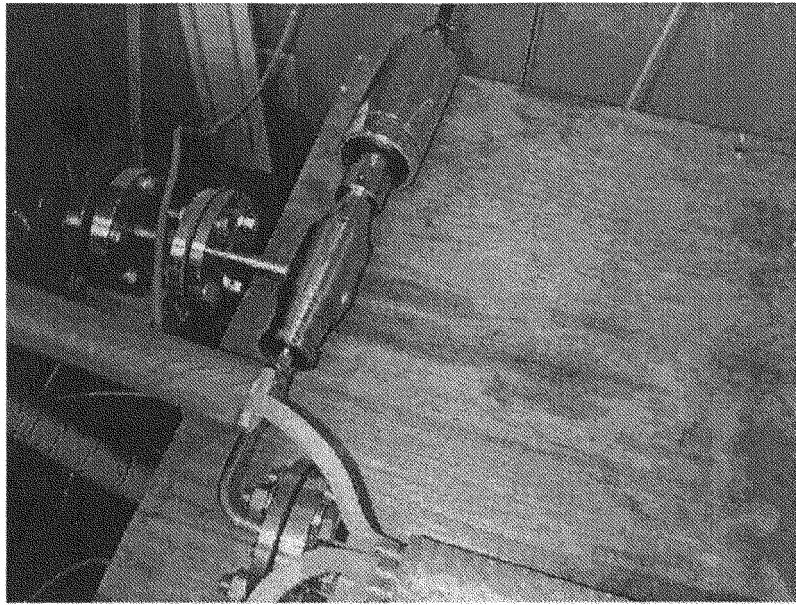


Fig. 3-2 Photograph of the ultrasonic wave generator

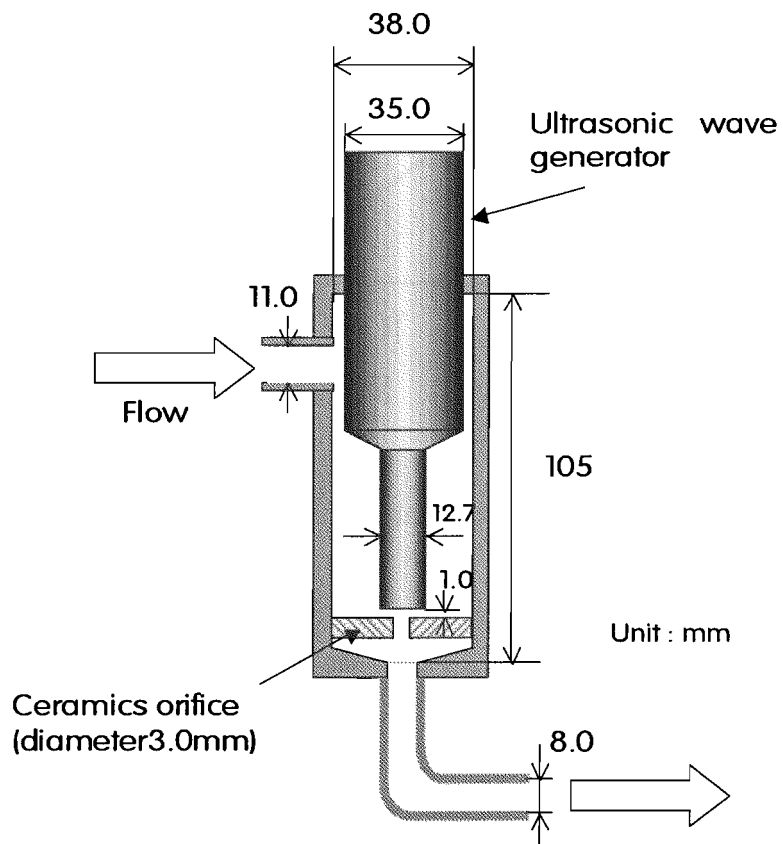


Fig. 3-3 Ultrasonic wave generator

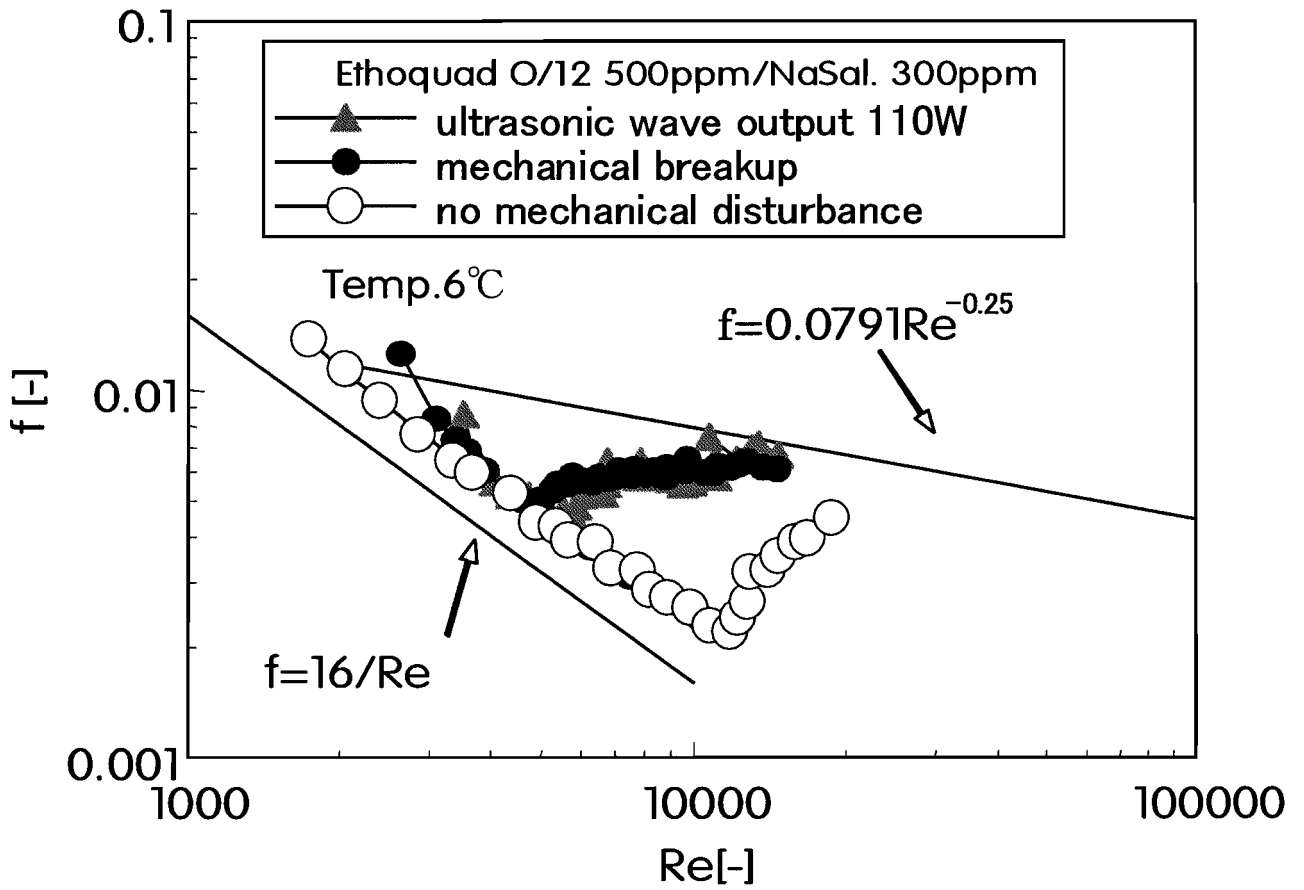


Fig. 3-4 Effect of micelle structure breakup by ultrasonic or mechanical disturbance on drag reduction in a pipe flow

3-2 実験

Fig. 3-5に流動／伝熱特性評価装置を示す。主な構成は前章で使用した装置とほぼ同じであるが、伝熱管（材質：銅，外径：16 mm，内径：14 mm，形状：内側および外側とも平滑）を伝熱管より管径の大きい（1½インチ）ステンレス管内に挿入し，その両端を密封することで二重管に加工し，これを熱交換器とした。

この二重管式熱交換器の伝熱管内部に，283 K に温度調整した熱媒を，伝熱管とステンレス管の間に生ずる環状部分に277 K の冷水をそれぞれ流通させ，伝熱管の管壁温度を一定条件にして熱媒と冷水間で熱交換を行わせた。この際，伝熱管の管壁温度を伝熱管の外側に等間隔で密着装着したT型熱電対（外径：1 mm，シース型，JIS 0.75 級）にて計測した。今回使用した伝熱管は銅管であるので，伝熱管内面の平均温度 T_w は T 型熱電対で測定した温度の算術平均値とした。また，二重管式熱交換器の入口側と出口側にそれぞれ白金測温抵抗体（外径：1.6 mm，JIS A 級）を挿入し，熱交換によって変化する熱媒の温度を計測した。これらの熱電対および測温抵抗体は予め氷水槽を用い水銀標準温度計にて校正したものを用いた。

伝熱特性を評価する値として，熱伝達率を用いた。その計算式を以下に示す。

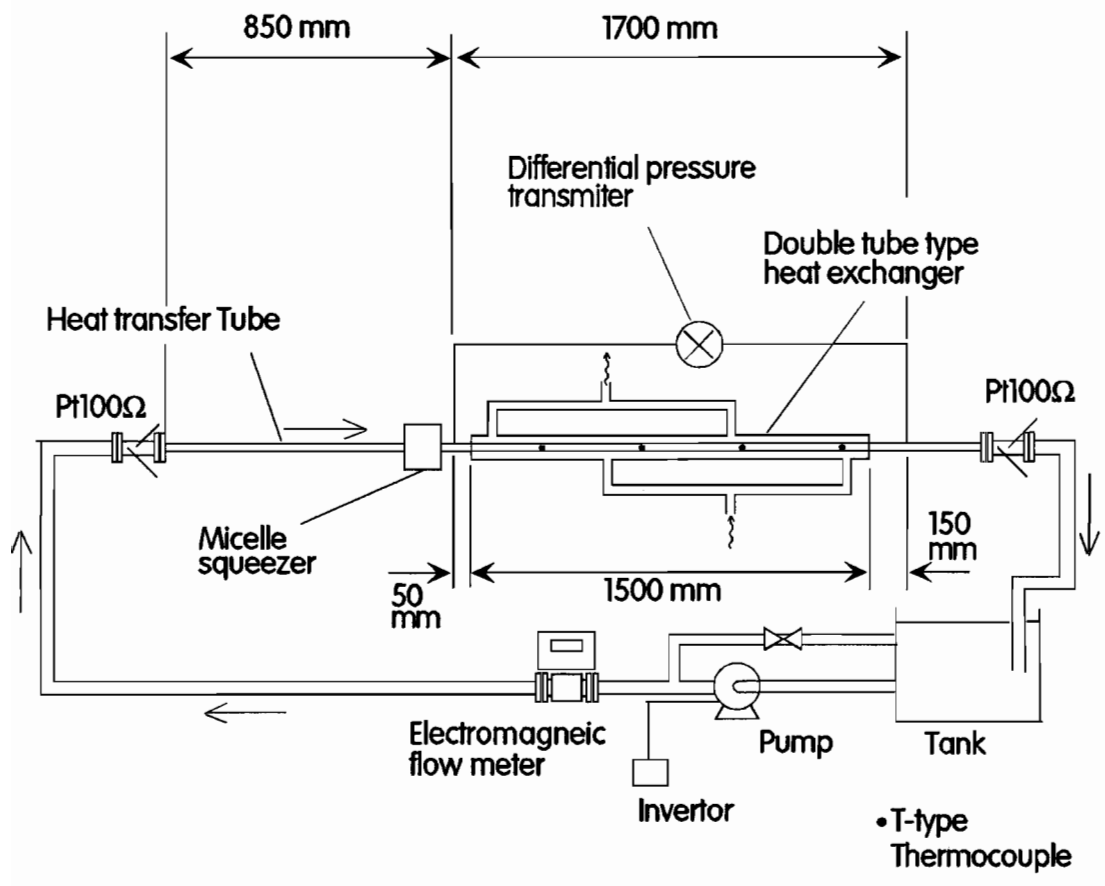


Fig. 3-5 Experimental apparatus

$$Q = h_i A \Delta T_m \quad (3-1)$$

ここで、

Q : 交換熱量 [W]

h_i : 熱伝達率 [W/(m²·K)]

A : 伝熱面積 [m²]

ΔT_m : Eq. 3-3 より得られる熱媒温度と伝熱管内面温度の対数平均温度差 [K]

ここで、 Q および ΔT_m は以下の式によりそれぞれ算出した。

$$Q = C (T_i - T_o) M \quad (3-2)$$

ここで、

C : 熱媒の比熱 [J/(kg·K)]

T_i : 熱媒の熱交換器入口温度 [K]

T_o : 熱媒の熱交換器出口温度 [K]

M : 熱媒の質量流量 [kg/s]

$$\Delta T_m = \frac{(T_i - T_w) - (T_o - T_w)}{\ln \frac{(T_i - T_w)}{(T_o - T_w)}} \quad (3-3)$$

ここで、

T_w : 伝熱管の管壁温度 [K]

熱交換器内を流通する熱媒の圧力損失 ΔP [Pa] は熱交換器の入口部および出口部にそれぞれ水平方向に直径約 2 mm の測定孔を設け、ベローズ式差圧ト

ランスミッタ（長野計器，KH-52）を接続することにより計測した．得られた ΔP より，次式を用いて摩擦係数 f を算出した．

$$f = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta P}{\rho u^2} \right) \left(\frac{d}{l} \right) \quad (3-4)$$

ここで，

ρ :	媒体の密度	[kg/m ³]
u :	流速	[m/s]
d :	管内径	[m]
l :	圧力損失計測距離	[m]

である．

また，循環には多段式渦巻きポンプ（IWAKI，DPL-025A）を用い，ポンプの流量制御にはインバータ（富士電気，DPS-1）を用いた．熱媒の流量計測には電磁流量計（山武，KIX-10A）を使用した．得られた熱媒の温度，圧力損失および流量のデータはデータロガー（江藤電気，THERMODAC-E）により集積および記録した．

次に Plug 型ミセルスクィーザーの構造を Fig. 3-6 にまた外観写真を Fig. 3-7 にそれぞれ示す．熱交換器の上流側に，伝熱管の内径よりも小さい（内径：10 mm，8 mm および 6 mm）銅管を伝熱管の管軸に沿って固定した．これにより熱媒は熱交換器に流入する前に狭い管路を通過し，その時に剪断が印加され，ミセル構造が崩される．

今回使用した界面活性剤水溶液は，前章と同様でイオン交換水に Oleyldi(hydroxyethyl)methylammoniumchloride（商品名：Ethoquad O/12，ライオンアクゾ社製）とサリチル酸ナトリウム（和光純薬社製，特級試薬）をそ

れぞれ 500 ppm と 300 ppm の濃度で溶解させたものである.

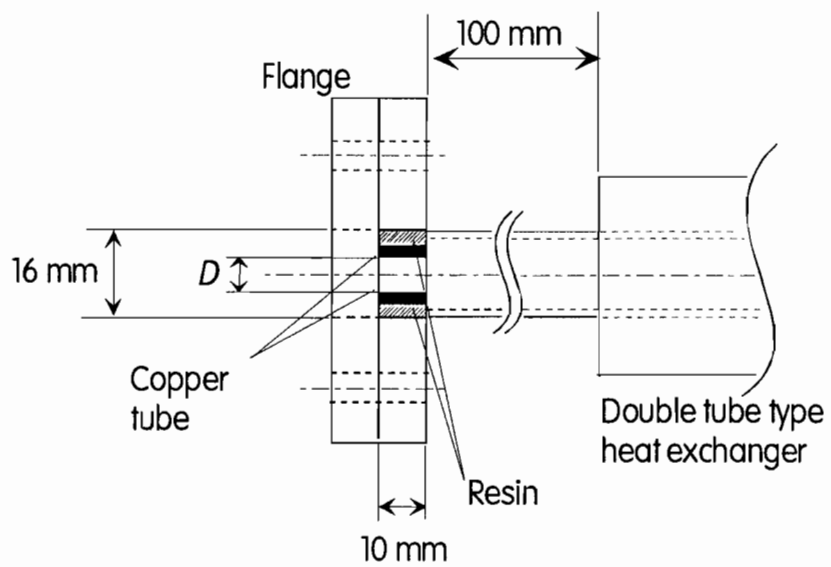


Fig. 3-6 Schematic diagram of plug-type micelle squeezer

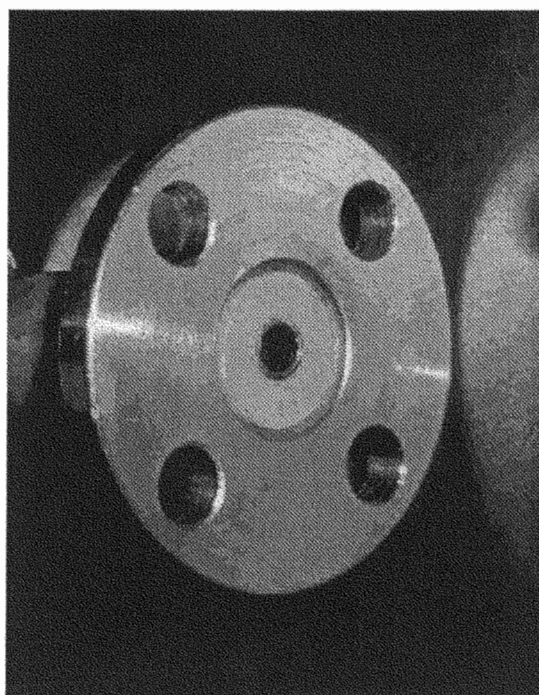


Fig. 3-7 Photograph of plug-type micelle squeezer

3-3 結果および考察

3-3-1 Plug 型ミセルスクィーザーが抵抗低減効果および伝熱低減効果に及ぼす影響

Fig. 3-8 と Fig. 3-9 に径 (D) の異なる 2 種類の Plug 型ミセルスクィーザーを装着して得られた Re 数と摩擦係数 f の関係と Re 数と $Nu/Pr^{0.4}$ の関係をそれぞれ示す。いずれのグラフにもブランクデータとして、ミセルスクィーザーを装着していない場合の水および界面活性剤水溶液の結果も記載した。Fig. 3-8 より、界面活性剤水溶液の抵抗低減効果は Plug 型ミセルスクィーザーを装着することによって、装着しない場合と比較して、発現する Re 数の範囲が狭まり、また抵抗低減量も小さくなっていることが分かる。またその現象は Plug 型の D が小さくなるにつれ、段階的に発生することが分かった。

これらの摩擦係数の結果に追随して、Fig. 3-9 に示すように、界面活性剤水溶液の伝熱特性も Plug 型ミセルスクィーザーを装着することによって、装着しない場合よりも、伝熱低減効果が発現する Re 数の範囲は縮小し、また伝熱低減量も小さくなっていることが分かる。またこの傾向は、抵抗低減効果のそれと同様に D が小さくなるにつれ、顕著になることが分かった。以上に示される D と抵抗低減効果および伝熱低減効果の関係は、いずれも D が小さいほど、界面活性剤水溶液に印加する剪断力が大きくなり、棒状ミセルのネットワークが崩され、抵抗低減効果および伝熱低減効果が発現しにくくなっているものと考えられる。

次に Plug 型ミセルスクィーザーを装着した場合と未装着の場合の流速と抵抗低減率および伝熱低減率を Fig. 3-10 および Fig. 3-11 にそれぞれ示す。

ここでの流速とは、伝熱管内部での平均流速のことである。

Fig. 3-10によると、ミセルスクィーザー未装着の場合、流速が0.6~1.6 m/sの範囲で約80%の抵抗低減効果が発現し、流速が1.6 m/s以上ではほぼ直線的に抵抗低減効果が減少していくのが分かる。これは流速が大きくなるほど界面活性剤水溶液により大きな剪断応力が印加され、抵抗低減効果が消失していくためと考えられる。一方 Plug 型ミセルスクィーザーを装着した場合、抵抗低減効果が約80%発現する流速の範囲が小さくなり、流速が大きくなると劇的に抵抗低減効果が消失することが観察された。この傾向は Plug 型ミセルスクィーザーの径が小さいほど顕著であった。

Fig. 3-11 に示される流速と伝熱低減効果の関係を見ると、ミセルスクィーザー未装着の場合、流速が0.5~1.6 m/sの範囲で伝熱低減効果が80~90%以上発現するが、流速が1.6 m/s以上では、伝熱低減効果が急激に減少することが分かった。また Plug 型ミセルスクィーザーを装着した場合、伝熱低減効果が発現する流速の範囲が狭まり、この傾向は Plug 型ミセルスクィーザーの径が小さいほど明確である。これらの現象は Fig. 3-10 に示される抵抗低減効果でのそれらと同様である。よって、Plug 型ミセルスクィーザーの径が小さいほど界面活性剤水溶液により大きな剪断力が印加されるため、抵抗低減効果および伝熱低減効果が発現しにくくなっているものと考えられる。

一般に地域冷暖房システムやビル空調システムで実際に使用される冷凍機内での熱媒の流速範囲は、1~2 m/s である。界面活性剤水溶液を熱媒に用いた時、Plug 型ミセルスクィーザー未装着の場合は、この流速範囲で80%以上熱伝達率が低下し、冷凍機能力が大きく低下してしまうと考えられる。一方 Plug 型ミセルスクィーザーを装着した場合には、 $D=8\text{ mm}$ の場合、流速が1~2 m/s であれば実質上伝熱低下は回避できるので冷凍機能力の低下を防止

できるものと予想される。

また、実冷凍機における熱交換器（蒸発器）内伝熱管のパス長さ（入口から出口までの長さ）は約 6～10 m 程度であり、熱媒の流速を 2 m/s とすると熱交換器内の通過時間は、約 3～5 秒となる。Yamauchi³⁻⁵⁾らによると、Ethoquad O/12-サリチル酸ナトリウム系における 279 K でのミセルの形成時間（緩和時間）は約 7 秒程度であることが確かめられている。これを基に考えると、熱交換器の入口部分に装着した Plug 型ミセルスクィーザーによって破壊された棒状ミセル構造は、熱交換器出口に達するまでに再形成されないことが予想される。

よって、Plug 型ミセルスクィーザーを用いることにより、熱交換器内にミセル構造が破壊させられた溶液を流動させることで伝熱低減効果および抵抗低減効果を消失させ、配管系に戻れば、自然にミセル構造を形成して抵抗低減効果を回復させるといった環境を作り出すことが可能となると考えられる。

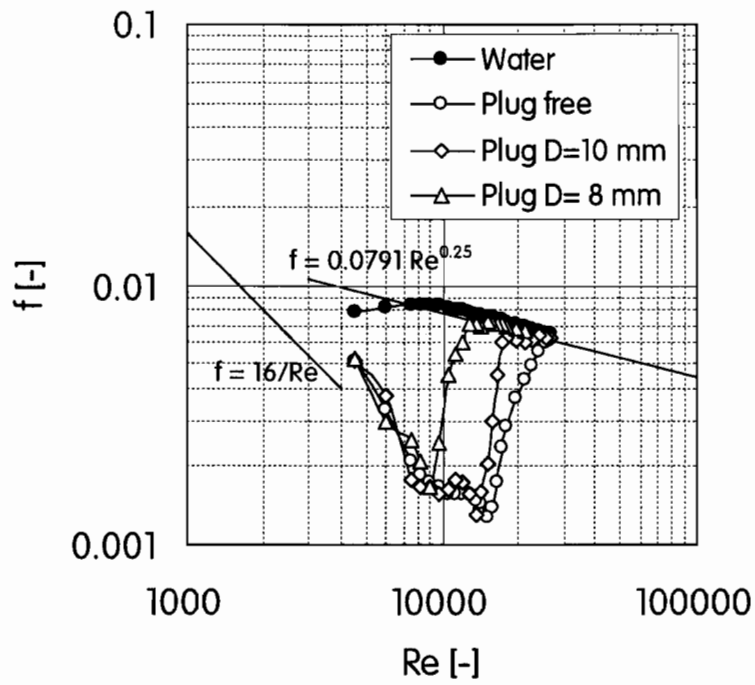


Fig. 3-8 Results of friction factor in the case of plug-type micelle squeezers

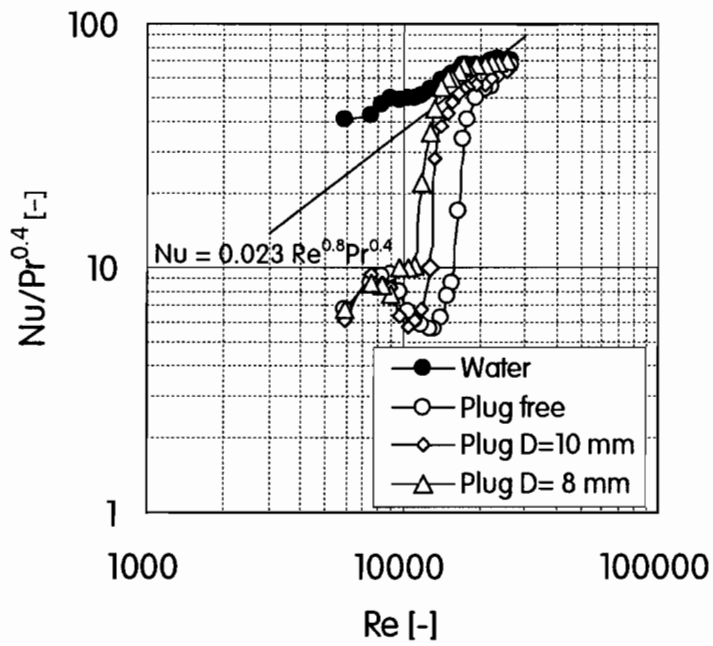


Fig. 3-9 Results of heat transfer coefficient in the case of plug-type micelle squeezers

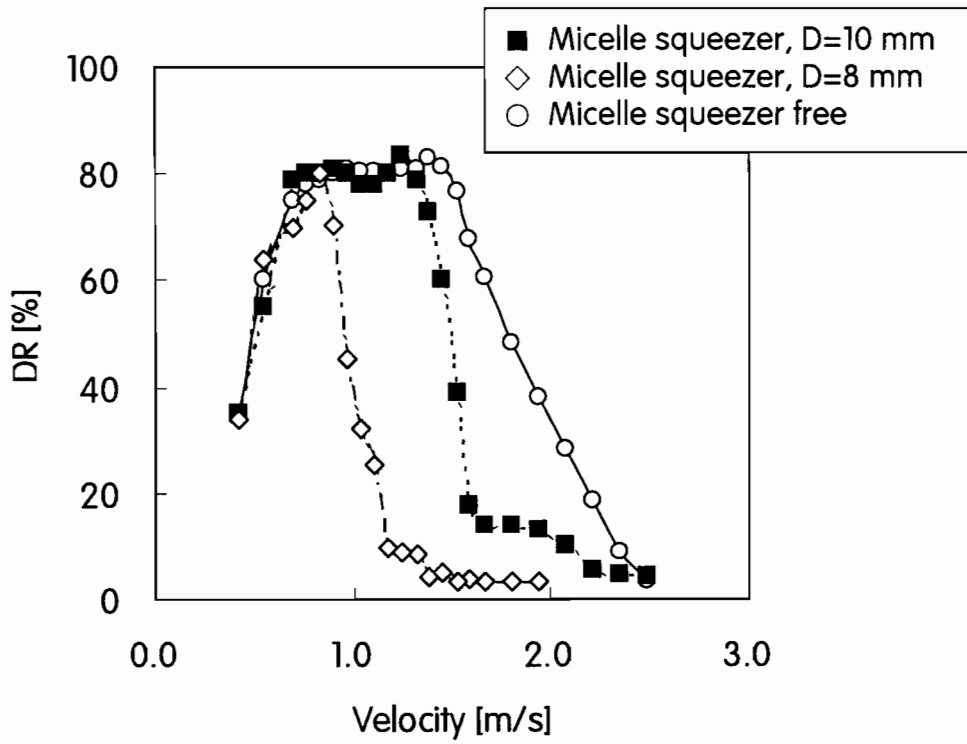


Fig. 3-10 Effect of the micelle squeezer for drag reduction

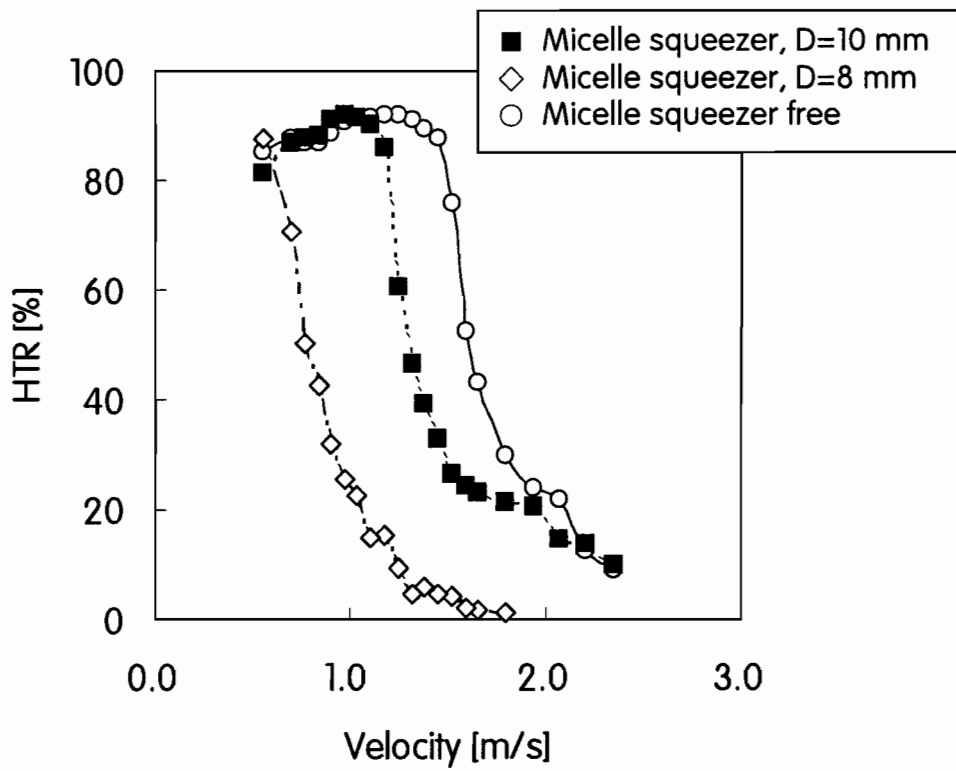


Fig. 3-11 Effect of the micelle squeezer for heat transfer reduction

3-3-2 Plug 型ミセルスクイザー内での壁面剪断速度と伝熱低減効果との相関性

薄井らは、抵抗低減効果を管壁での剪断応力および剪断速度で良く相関できること示唆した³⁻⁶⁾。しかしミセルスクイザーのように管路の縮小拡大を伴う流れについては、流れの予測が簡単でないため、明確な評価基準を設けることは困難である。本研究ではニュートン流体に対する縮小拡大流れのエネルギー損失 F [J/kg] を次式で計算し、評価値とすることとした。

$$F = F_1 + F_2 = K_c \frac{u_m}{2} + \frac{(u_m - u)^2}{2} \quad (3-6)$$

ここで、

F_1 :	縮小流れの損失	[J/kg]
F_2 :	拡大流れの損失	[J/kg]
u :	伝熱管内での熱媒の流速	[m/s]
u_m :	ミセルスクイザー内での熱媒の流速	[m/s]

K_c は縮小摩擦係数であり、Plug 型ミセルスクイザーの径が 8 mm および 10 mm の場合それぞれ 0.33 および 0.25 とした。また拡大摩擦係数はいずれの場合も 1 とした³⁻⁷⁾。Fig. 3-12 に Plug 型ミセルスクイザーの径が異なる場合の F と伝熱低減効果 HTR の関係をそれぞれ示す。これより、Plug 型ミセルスクイザーの径に係わらず伝熱低減効果と F は良く相関することが確認できた。これより縮小拡大流れの損失を用いることで、Plug 型ミセルスクイザー系での伝熱低減効果を見積もることが可能となる。実際の冷凍機において、径の小さい Plug 型ミセルスクイザーの装着はそれ自身による圧力損失

増大のため現実性はないが、ミセルスクィーザーの内部形状を長さをパラメーターに最適化を行えば、界面活性剤水溶液を熱媒としたシステムにおいて、冷凍機内での伝熱低下を防止できる熱交換器が設計可能となる。

3-4 結言

本研究により以下の知見が得られた。

1. 界面活性剤水溶液を狭路構造から成る Plug 型ミセルスクィーザーに通過させることによって、熱交換器内で低下する伝熱性能を向上させられる。
2. 特に $D=8$ mm の Plug 型ミセルスクィーザーを用いると流速を 1~2 m/s の実用的な熱交換器内流速範囲で伝熱低下を効果的に防止できる。
3. Plug 型ミセルスクィーザーを用いた場合の伝熱低減効果は Plug 型ミセルスクィーザーでの縮小拡大流れ損失と相関する。

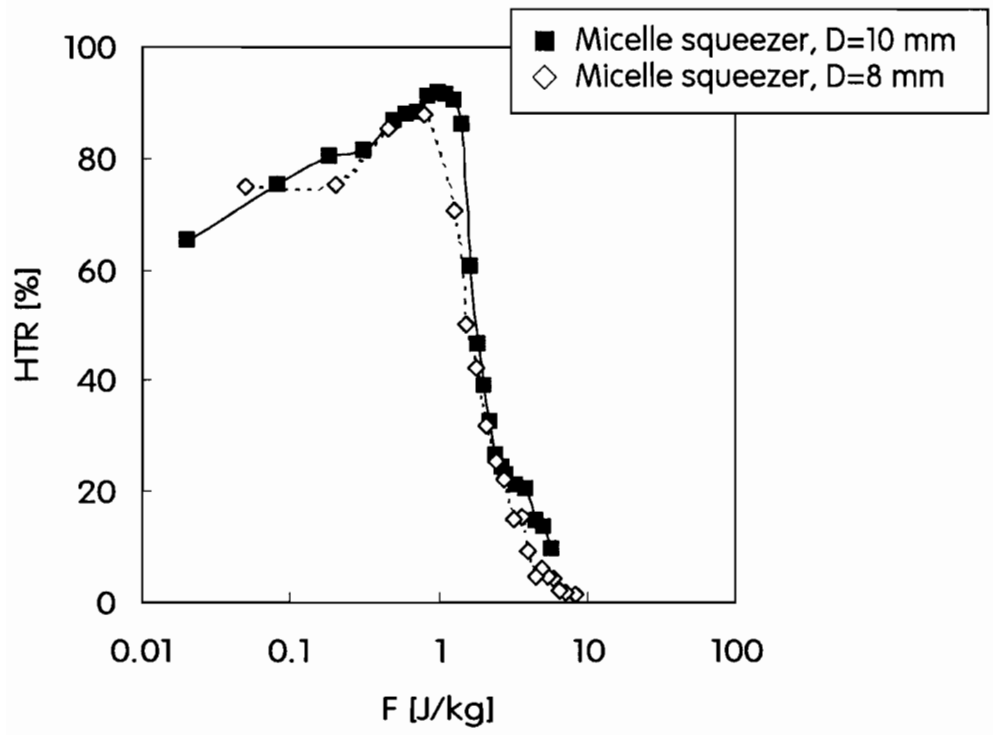


Fig. 3-12 Relationship between HTR and F

第 3 章の参考文献

- 3-1 Chou, L. C., Christensen, R. N. and Zakin, J. L., The Influence of Chemical Composition of Quaternary Ammonium Salt Cationic Surfactants on Their Drag Reducing Effectiveness, *Drag Reduction in Fluid Flows*, Sellin, R. H. J. and Moses, R. T., ed., 141-148, Ellis Horwood Pub., Chichester, England (1989).
- 3-2 Usui, H. and Saeki, T., Drag Reduction and Heat Transfer Reduction by Cationic Surfactants, *J. Chem. Eng. of Japan*, **26** (1993), 103-109.
- 3-3 Li, P. W., H. Daisaka, Y. Kawaguchi, A. Yabe, K. Hishida and M. Maeda, "Turbulence Structure of Drag Reducing Surfactant Solution in Two Dimensional Channel with Additional Heat Transfer Enhancement method," *Proc. 5th ASME/JSME Joint Thermal Engineering Conference*, AJTE99-6446, 1-8 (1999)
- 3-4 Usui, H., T. Okunishi, A. Kishimoto and H. Suzuki, "Heat Transfer Augmentation by Micelle Squeezer in a Surfactant Drag-reducing Pipe Flow," *Proc. 6th World Congress of Chemical Engineering*, Sep. 23-27, Melbourne, Australia (2001)
- 3-5 Yamauchi, M., K. Yoshida, H. Usui, H. Suzuki and K. Tokuhara, "A Study of Cationic Surfactants as Drag Reducing Additives," *Proc. 1999 AIChE National Meeting*, No. 128d, Nov. 1-5, Dallas (1999)
- 3-6 薄井洋基, 佐伯隆, 高木恒雄, 徳原慶二, "抗力減少用界面活性剤を添加した冷暖房システムの熱媒輸送動力の評価法と実用化のための諸問題の検討, 化学工学論文集, **21 (2)**, 248-255 (1995)

3-7 日本機械学会編，管路・ダクトの流体抵抗，(1998)，第4章，丸善

第 4 章 スタティックミキサーによる界面活性剤溶液流の伝熱低下回避策の検討

4-1 緒言

界面活性剤が形成する棒状ミセルの抵抗低減効果を利用して、地域冷暖房システムやビル空調システムの冷温水搬送動力を削減させる開発検討が広く行われている⁴⁻¹⁾。しかし、実用化への課題の一つとして、流動抵抗低減効果と同時に伝熱性能低減効果も発現するため、熱輸送管部では保温効果が図れるが、熱交換器部では、伝熱性能の低下による熱交換能力ダウンが引き起こされてしまうことが挙げられる。

前章までに、内面粗面管を用いることによる伝熱低下回避の検討および狭路管を用いた局所縮小拡大流れによるミセル構造破壊による伝熱低減防止に関する検討を行った。それらの結果、界面活性剤水溶液流に対して壁面剪断力および局所的エネルギーを印加することは、伝熱低減回避に極めて有用な可能性があることを明らかにした。今回、更なる棒状ミセルの高次構造の破壊による伝熱特性低下防止方法の探索を目的に、ミセルの高次構造を崩すスクィーザーにおいて、工業および産業分野において、攪拌、混合および伝熱促進を目的に実用化されている「捻り平板（スタティックミキサー）」を伝熱管の上流側に装着する方法の基礎検討を行った。

4-2 実験

Fig. 4-1 に伝熱／流動特性評価装置を示す。装置の概略は前章とほぼ同じ

であり、伝熱管（材質：Cu，外径：16 mm，内径：14 mm，形状：内側および外側とも平滑）を伝熱管より管径の大きい SUS（呼び径：40 A）管内に挿入し、その両端を密封することで二重管に加工し、これを熱交換器とした。

この二重管式熱交換器の伝熱管内部に 283 K (10°C) に温度調整した熱媒を、伝熱管と SUS 管の間に生ずる環状部分に 277 K (4°C) の冷水をそれぞれ流通させ、伝熱管の管壁温度一定条件下で熱媒と冷水間で熱交換を行わせた。この際、伝熱管の管壁温度を、伝熱管の外側に等ピッチで T 型熱電対（1 φ、シース型、JIS 0.75 級）を密着させて計測した。また、二重管式熱交換器の入口側と出口側にそれぞれ白金測温抵抗体（1.6 φ、JIS A 級）を挿入し、熱交換によって変化する熱媒の温度を計測した。これらの熱電対および測温抵抗体は予め、氷水槽を用い、水銀標準温度計にて校正したものを用いた。

伝熱特性を評価する値として、熱伝達率を用いた。その計算式は Eq. 3-1 と同じである。

熱交換器内を流通する熱媒の圧力損失は熱交換器の入口部および出口部にそれぞれ水平方向に直径約 2 mm の測定孔を設け、ベローズ式差圧トランスミッタを接続することにより計測した。

熱伝達率および圧力損失の測定はいずれの場合も、熱媒が後述のミセルスクリーザーを通過した後の下流にて計測を行い、ミセルスクリーザーが熱媒に印加する剪断の効果を評価するものとした。

今回供試したミセルスクリーザーは、捻り平板が伝熱管の管軸方向に沿って挿入された「スタティックミキサー」型（以下、Mixer 型とする。）である。比較のため、前章で検討した伝熱管の内径よりも小さい内径が伝熱管の管軸方向に沿って有する「穴あきプラグ」型（以下、Plug 型とする。）の評価も実施した。

Mixer型は厚さ約0.8 mmの塩ビ板より構成され、180°捻り当たりの長さ L_m が30および60 mmの2種類を用いた。また、Plug型の穴径 D は6, 8および10 mmの3種類ものをそれぞれ用いた。Mixer型の詳細をFig. 4-2に示す。Mixer型およびPlug型の装着場所はFig. 4-3に示すように、熱交換器の入口の上流350 mmの位置にMixer型およびPlug型の下流側の末端が位置するように固定した。(Plug型の装着位置は装置の都合上前章の位置と異なる。)

使用した界面活性剤はこれまでと同じであるOleyldi(hydroxyethyl)methyl-ammoniumchloride (商品名：Ethoquad O/12, ライオンアクゾ社製) であり、対イオン形成化合物はサリチル酸ナトリウム (和光純薬社製, 特級試薬) である。これらをそれぞれ500 ppmと300 ppmの濃度で水道水に溶解させたものを用いた。

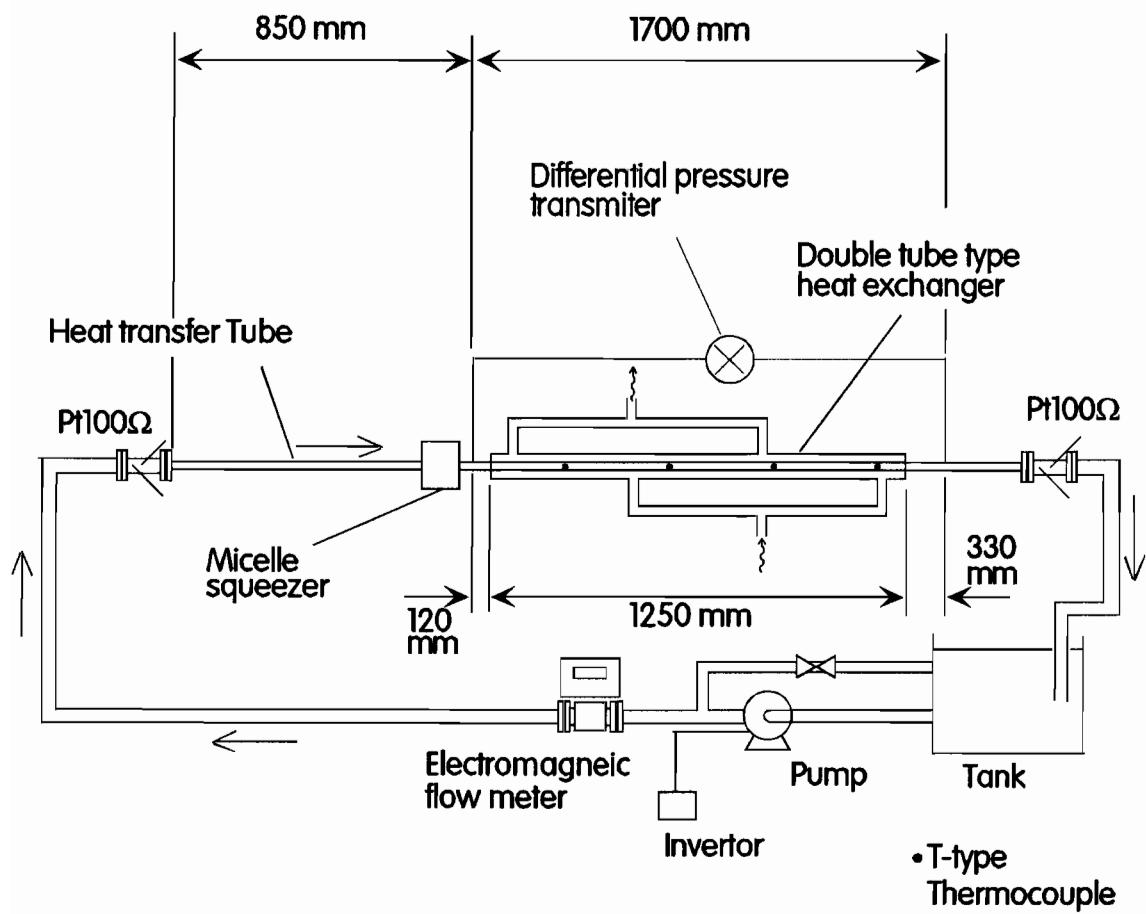


Fig. 4-1 Experimental apparatus

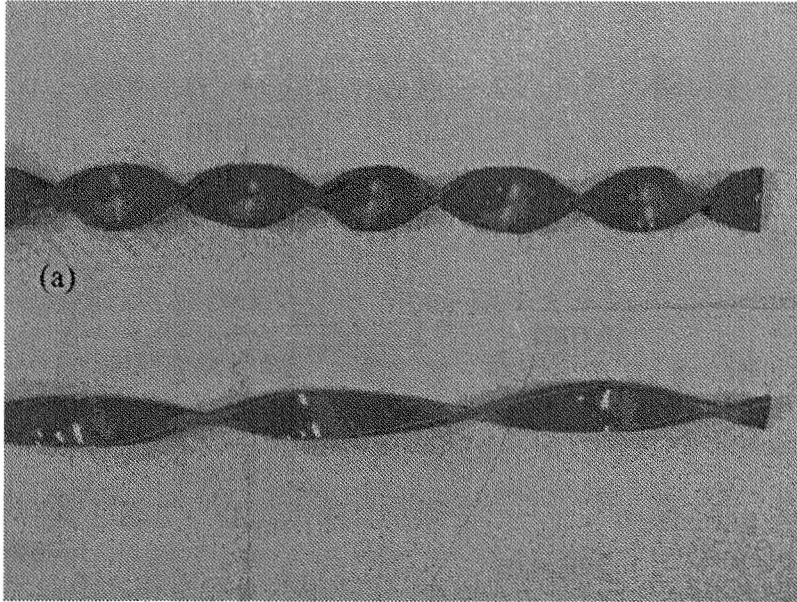


Fig. 4-2 Mixer-type micelle squeezer

(a): $L_m = 30$ mm, (b): $L_m = 60$ mm

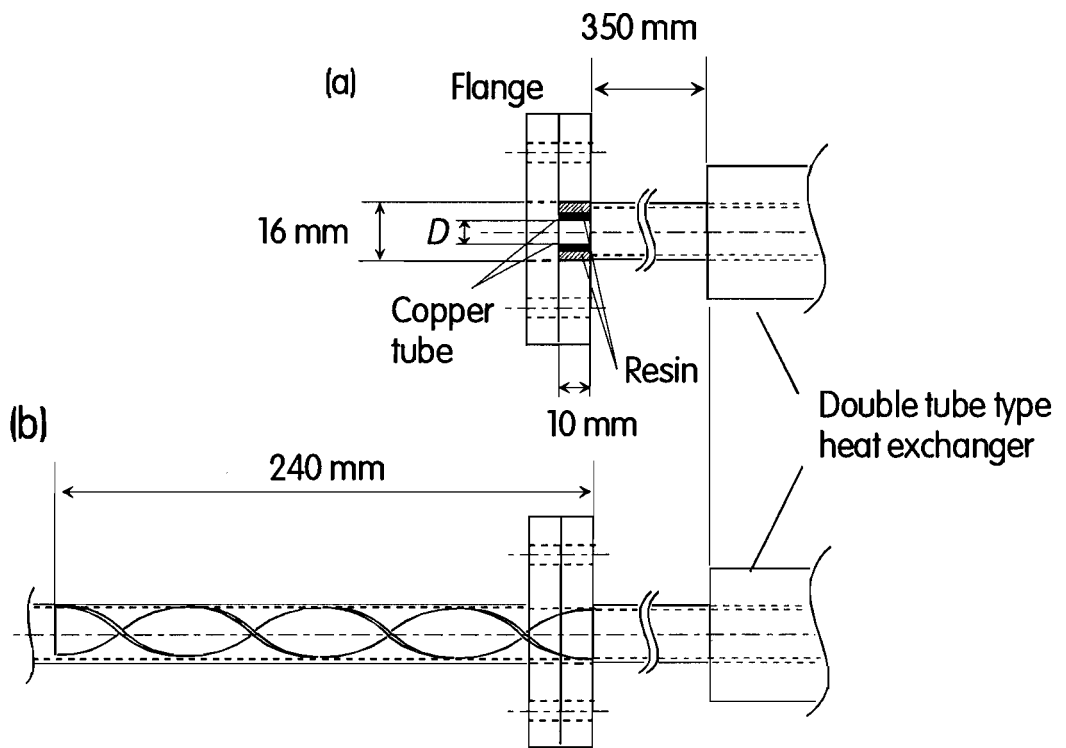


Fig. 4-3 Set positions of the micelle squeezers

(a): Plug type, (b): Mixer type

4-3 結果と考察

4-3-1 Mixer 型ミセルスクィーザーを装着した場合の流動および伝熱特性

Fig. 4-4 および Fig. 4-5 に 2 種類の Mixer 型ミセルスクィーザーを装着して得られた Re と摩擦係数 f の関係と Re 数と $Nu / Pr^{0.4}$ の関係をそれぞれ示す。いずれのグラフにもブランクデータとして、ミセルスクィーザーを装着していない場合の水および界面活性剤水溶液の結果も記載した。Fig. 4-4 より、界面活性剤水溶液の抵抗低減効果は Mixer 型ミセルスクィーザーを装着することによって、装着しない場合と比較して、発現する Re 数の範囲が狭まり、また抵抗低減量も小さくなっていることが分かる。またその現象は Mixer 型の L_m が大きいほど顕著に発現することが分かった。一方、Fig. 4-5 に示すように、界面活性剤水溶液の伝熱特性は Mixer 型ミセルスクィーザーを装着することによって、装着しない場合よりも、伝熱低減効果が発現する Re 数の範囲は縮小し、また伝熱低減量も小さくなっていることが分かる。しかし、この傾向は抵抗低減効果のそれに比べ顕著なものではなく、また Mixer 型の L_m が異なっても伝熱低減効果に差異は殆ど観察されない。このような Mixer 型装着における抵抗低減効果と伝熱低減効果に相関性がない現象の解明は今後の研究とするが、Mixer により界面活性剤水溶液に与えられる旋回流が管内の物質移動および熱移動に特異な影響を及ぼしているものと考えられる。

また、今回 Mixer 型ミセルスクィーザーとの比較のために、前章で検討した Plug 型ミセルスクィーザーを今回の評価装置に装着して流動特性および伝熱特性を計測した。それらの結果を Fig. 4-6 および Fig. 4-7 にそれぞれ示す。

次に Mixer 型ミセルスクィーザーの Re と抵抗低減率および伝熱低減率の関係をそれぞれ Fig. 4-8 および Fig. 4-9 に示す。それぞれの図には Plug 型ミセルスクィーザーの結果も併せて示している。これらより、いずれの場合においても、 DR に比べて HTR の方が大きな値を示しており、従来の研究結果 Fig. 2-3 と同じ現象が観察されていることが分かった。また、Mixer 型および Plug 型に係わらず、ミセルスクィーザーを用いることで、 DR および HTR とも高 Re 域での値が小さくなり、 DR および HTR が発現する Re 範囲が低い値にシフトすることが分かった。これは界面活性剤水溶液が高 Re 域でミセルスクィーザーを通過する場合、より大きな剪断力が界面活性剤水溶液に印加し、ミセルの高次構造が崩されるものと考えられる。

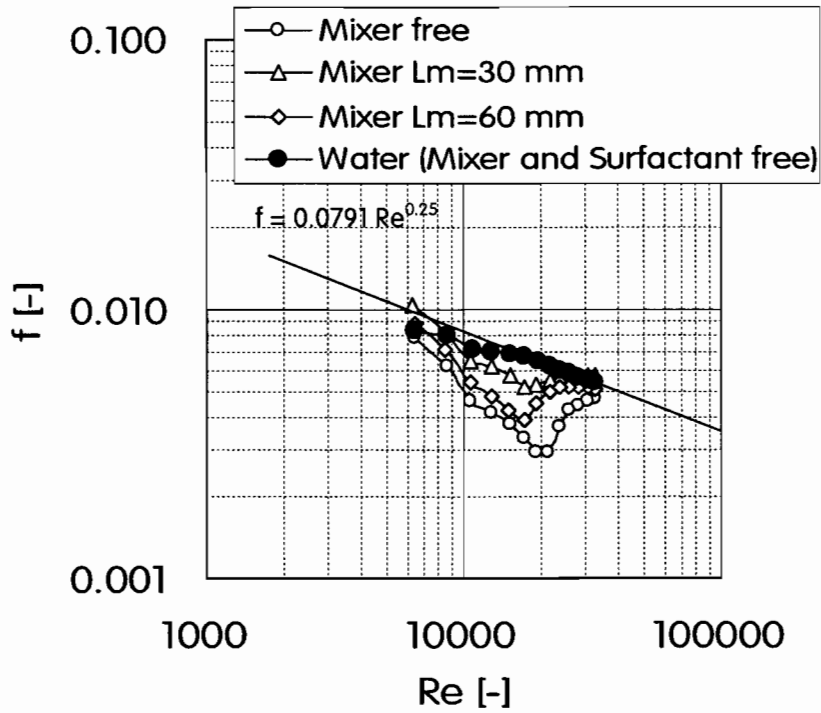


Fig. 4-4 Results of friction factor in the case of Mixer-type micelle squeezers

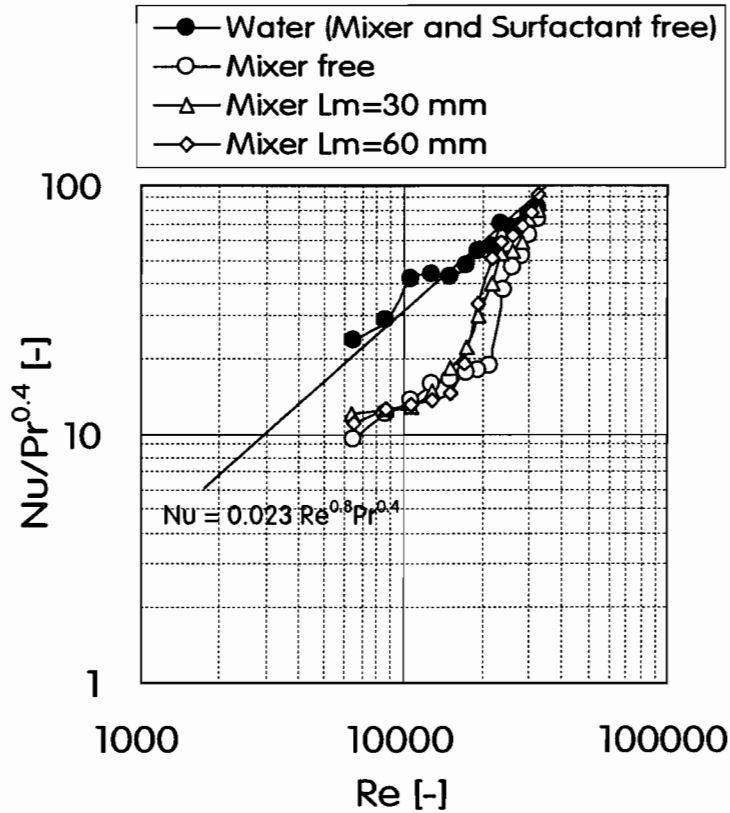


Fig. 4-5 Results of heat transfer coefficient in the case of Mixer-type micelle squeezers

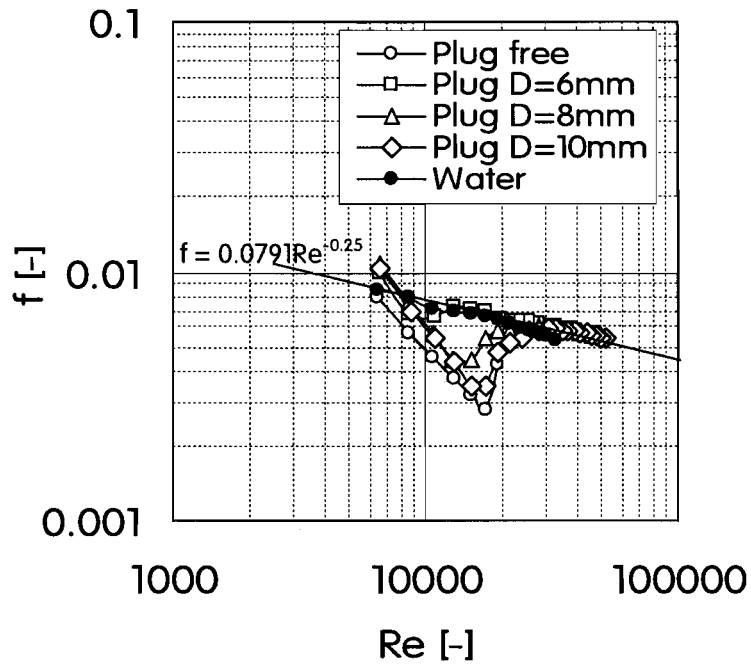


Fig. 4-6 Results of friction factor in the case of Plug-type micelle squeezers

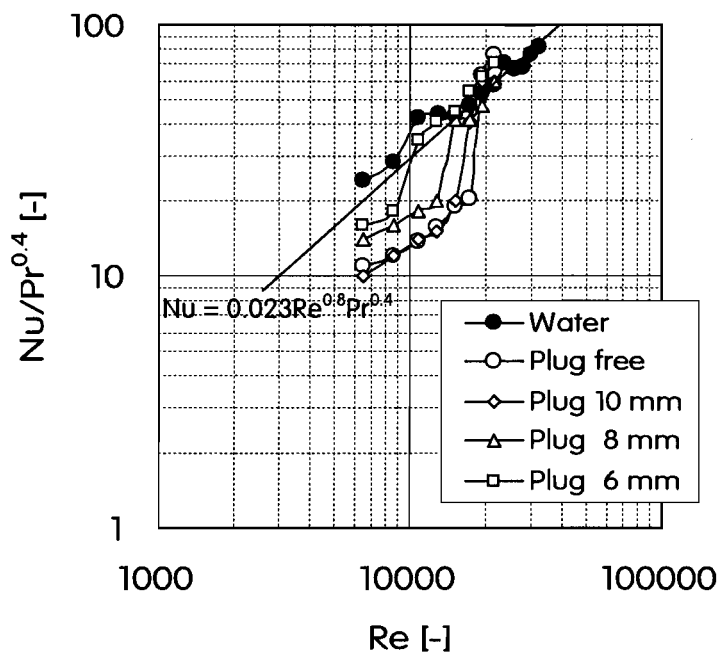


Fig. 4-7 Results of heat transfer coefficient in the case of Plug-type micelle squeezers

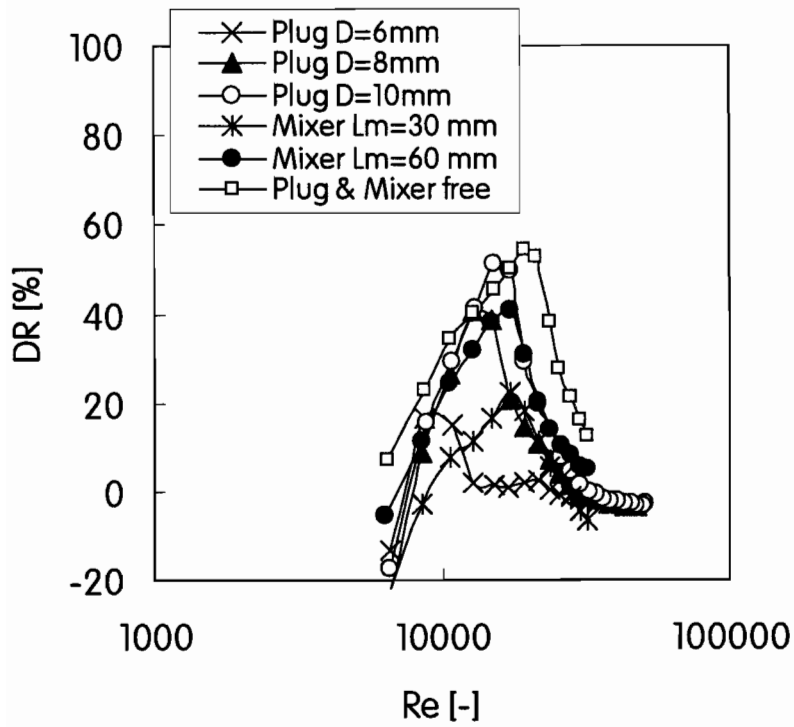


Fig. 4-8 Effects of micelle squeezers on drag reduction

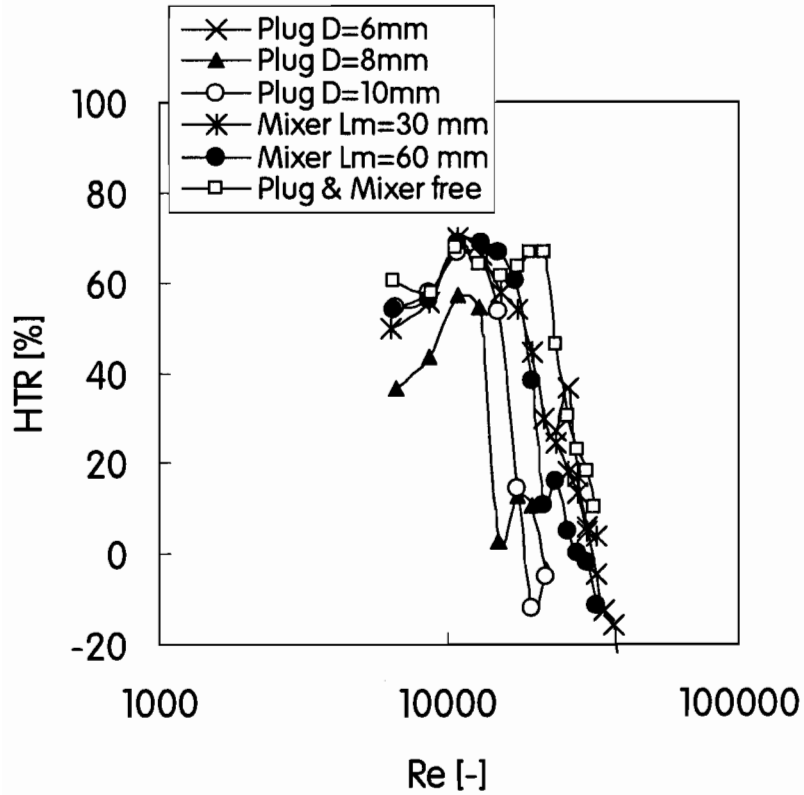


Fig. 4-9 Effects of micelle squeezers on heat transfer reduction

4-3-2 ミセルスクィーザー内での壁面剪断速度と抵抗低減効果および伝熱低減効果との相関性

第3章では、ミセルスクィーザーを用いた場合の抵抗低減効果をミセルスクィーザーの縮小拡大流れのエネルギー損失で整理し、これらは良く相関することを示した。今回の Mixer 型ミセルスクィーザーにおいても、抵抗低減効果および伝熱低減効果がそれ自身のエネルギー損失と相関性があるか否かの評価を行うこととした。

Mixer 型ミセルスクィーザーのエネルギー損失は、実測により求めた。つまり、熱交換器内の圧力損失算出に伴う差圧計測において、上流側と下流側それぞれの圧力測定孔の間に Mixer 型ミセルスクィーザーを挿入し、所定の流量の水を流通させた場合の圧力損失値から Mixer 型ミセルスクィーザーを挿入せず同流量の水を流通させた場合の圧力損失値を差し引いた値を Mixer 型ミセルスクィーザーそのもののエネルギー損失に起因する圧力損失とし、この値を熱媒の密度で割ることによりエネルギー損失を算出した。

一方、Plug 型ミセルスクィーザーのエネルギー損失は第3章と同じく Eq. 3-6 で得られるニュートン流体の縮小拡大流れのエネルギー損失値を用いた。ここで、縮小摩擦係数は Plug 型ミセルスクィーザーの径が 6 mm, 8 mm および 10 mm の場合それぞれ 0.48, 0.33 および 0.25 とした。また拡大摩擦係数はいずれの場合も 1 とした⁴⁻²⁾。

Fig. 4-10 に Plug 型および Mixer 型ミセルスクィーザーのエネルギー損失と DR [%] の関係を示す。これより、Plug 型ミセルスクィーザーで径が異なる場合および Mixer 型ミセルスクィーザーで捻りピッチが異なる場合とも、DR [%] は全てエネルギー損失値 3~10 J/kg の範囲内にピークを有する曲線に

統括されることが分かった。これより抵抗低減効果はミセルスクィーザーのエネルギー損失で整理できることを見出した。

一方, Fig. 4-11 に Plug 型および Mixer 型ミセルスクィーザーのエネルギー損失と HTR [%] の関係を示す。こちらの場合も DR [%] の結果と同様に, Plug 型ミセルスクィーザーで径が異なる場合および Mixer 型ミセルスクィーザーで捻りピッチが異なる場合とも, HTR [%] は全てエネルギー損失値 3~10 J/kg の範囲内にピークを有する曲線に集結されることが明らかとなった。これより伝熱低減効果も抵抗低減効果と同様にミセルスクィーザーのエネルギー損失と概ね相関することが分かった。これよりミセルスクィーザーが界面活性剤水溶液流に与えるエネルギー損失値を用いることで, Plug 型および Mixer 型ミセルスクィーザー系での伝熱低減効果を見積もることが可能となることが分かった。

これらの知見に基づくと, 伝熱低減効果が最大になり, その後棒状ミセルの高次構造が破壊され始める条件は, ミセルスクィーザーの形態に関係なく, $F=7\sim 10$ J/kg で評価されることが分かる。これらのエネルギー損失値のどの程度が棒状ミセル高次構造の破壊に寄与するのかは, 現時点で定量していないが, 伝熱低減回避のための評価基準として工業的に有用な知見と成り得ると思われる。

具体的に実冷凍機で伝熱低下を回避するためには, 10 J/kg 以上のエネルギー損失を有するミセルスクィーザーを装着すればほぼ実用上問題ないと予想される。一例として, 伝熱管の管径を 14 mm, 管内流速を 2 m/s と仮定し, Plug 型ミセルスクィーザーを用いるとすると, Plug 通過時の流速は 6 m/s

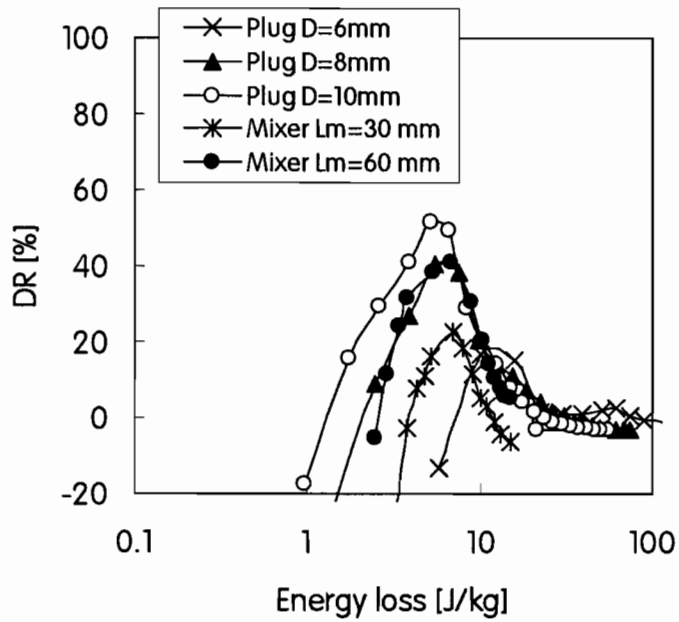


Fig. 4-10 Correlation of micelle squeezer effectiveness by using the energy loss for

DR

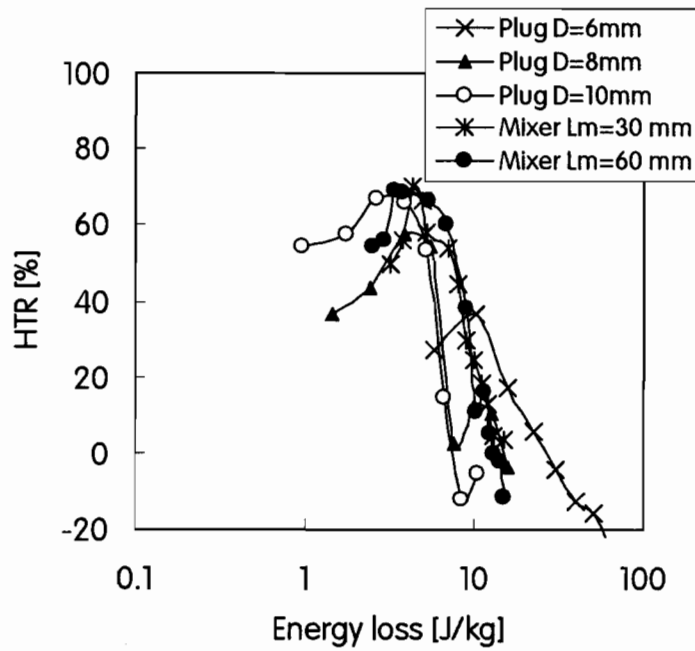


Fig. 4-11 Correlation of micelle squeezer effectiveness by using the energy loss for

HTR

以上必要となる. この場合 Plug 径は伝熱管の管径の 0.6 倍以下, つまり 8.4 mm 以下に調整すれば良いことになる.

実際の冷凍機において, 径の小さい Plug 型ミセルスクィーザーの装着および極めて捻りピッチの小さい Mixer 型ミセルスクィーザーはそれ自身による圧力損失増大のため現実性はないが, ミセルスクィーザーの内部形状や長さをパラメーターに更なる最適化を行えば, 界面活性剤水溶液を熱媒としたシステムにおいて, 冷凍機内での伝熱低下を防止できる熱交換器が設計可能となると期待される.

4-4 結言

本研究により以下の知見が得られた.

1. 界面活性剤水溶液を Plug 型または Mixer 型ミセルスクィーザーに通過させることによって, 熱交換器内で低下する伝熱性能を向上させられる.
2. Plug 型ミセルスクィーザーは, Plug 径が小さいほど抵抗低減効果および伝熱低減効果を回避する効果が大きい.
3. Mixer 型ミセルスクィーザーは, 捻りピッチにより抵抗低減効果が変化することが分かった. しかし, 伝熱低減効果に対しては捻りピッチによる差異は観察されなかった.
4. Plug 型および Mixer 型ミセルスクィーザーのいずれの場合においても,

抵抗低減効果および伝熱低減効果はミセルスクィーザーでのエネルギー損失と相関する。

5. 実冷凍機で一般的な管径 14 mm, 管内流速 2 m/s の条件において, Plug 型ミセルスクィーザーを用いるとすると, Plug 径を伝熱管の管径の 0.6 倍以下つまり 8.4 mm 以下に設計すれば伝熱低減を回避できることが分かった。

第 4 章の参考文献

- 4-1 Chou, L. C., Christensen, R. N. and Zakin, J. L., The Influence of Chemical Composition of Quaternary Ammonium Salt Cationic Surfactants on Their Drag Reducing Effectiveness, *Drag Reduction in Fluid Flows*, Sellin, R. H. J. and Moses, R. T., ed., 141-148, Ellis Horwood Pub., Chichester, England (1989).
- 4-2 日本機械学会編, 管路・ダクトの流体抵抗, (1998), 第 4 章, 丸善.

第 5 章 結 論

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

1. 界面活性剤水溶液の抵抗低減効果および伝熱減少効果に関し、地域冷暖房システムにおいて冷凍機内伝熱管として実際に使用されている平滑管と 2 種類の管内螺旋状溝管を用い基礎実験を行った、平滑管を用いた場合、顕著な抵抗低減効果および伝熱減少効果が確認された。冷凍機での使用を想定すると、界面活性剤水溶液を熱媒とするとかなりの冷凍機能力低下が予想される。
2. 管内螺旋溝管を用いた場合、平滑管ほど抵抗低減効果および伝熱減少効果が発現する流速範囲は大きくない。
3. 管内螺旋溝管で溝のピッチが小さいほど、抵抗低減効果および伝熱減少効果が発現する流速範囲は狭い。今回供試した最も溝ピッチが小さい伝熱管では、実際にシステムで使用されている流速範囲で、従来の水を熱媒とした時とほぼ同じ伝熱特性が得られることが明らかになった。
4. 管内螺旋溝管における伝熱低減効果は管壁面上の剪断速度と相関がある。
5. 界面活性剤水溶液を狭路構造を有する Plug 型ミセルスクィーザーに通過させることによって、熱交換器内で低下する伝熱性能を向上させられる。

6. Plug 型ミセルスクイザーは、Plug 径が小さいほど抵抗低減効果および伝熱低減効果を回避する効果大きい。
7. 特に Plug 径 8 mm のミセルスクイザーを用いると流速を 1~2 m/s の実用的な熱交換器内流速範囲で伝熱低下を効果的に防止できる。
8. Plug 型ミセルスクイザーを用いた場合の伝熱低減効果はミセルスクイザーでの縮小拡大流れ損失と相関する。
9. 界面活性剤水溶液を Mixer 型ミセルスクイザーに通過させることによって、熱交換器内で低下する伝熱性能を向上させられる。
10. Mixer 型ミセルスクイザーは、捻りピッチにより抵抗低減効果が変わることが分かった。しかし、伝熱低減効果に対しては捻りピッチによる差異は観察されなかった。
11. Plug 型および Mixer 型ミセルスクイザーのいずれの場合においても、抵抗低減効果および伝熱低減効果はミセルスクイザーでのエネルギー損失と相関する。
12. 実冷凍機で一般的な管径 14 mm、管内流速 2 m/s の条件において、Plug 型ミセルスクイザーを用いるとすると、Plug 径を伝熱管の管径の 0.6 倍以下つまり 8.4 mm 以下に設計すれば伝熱低減を回避できることが分かった。

以上，実験的検証により界面活性剤を用いる抵抗低減系における熱交換器内伝熱低下の回避策について工学的価値のある知見が得られた．しかし，今回の本論文においては，検討した伝熱低下回避策に関して現象解明のための理論的考察が充分でなかった．特に，第2章においては管内螺旋溝付管の溝が界面活性剤水溶液流の管内速度分布に与える影響およびそれに基づいた流動・伝熱特性のモデル化検討，第3章においては Plug 型ミセルスクィーザー部分での縮小・拡大エネルギー損失が界面活性剤水溶液流に及ぼす効果の定量的検討と考察，第4章においては Mixer 型ミセルスクィーザーによる界面活性剤水溶液流の流れ解析およびそれに基づいた流動・伝熱特性のモデル化検討，に関してそれぞれ今後検討を要する．

本論文に関連する論文・講演

(論文)

- [1] 岸本章, 鈴木洋, 薄井洋基 ; 界面活性剤による抵抗低減系における伝熱特性に対する円管内部形状の影響, 化学工学論文集, 第 27 卷, 第 3 号, 347-351 (2001)
- [2] 岸本章, 奥西孝浩, 鈴木洋, 薄井洋基 ; ミセルスクィーザー挿入による界面活性剤溶液流の熱伝達促進, 日本機械学会論文集 B 編, 第 68 卷, 第 666 号 (2002), 掲載予定
- [3] Kishimoto, A., T. Okunishi, H. Suzuki and H. Usui,; Heat Transfer Augmentation in a Surfactant Drag-Reducing System with an Insertion of a Micelle Squeezer, submitted to JSME International Journal (2001)
- [4] 岸本章, 奥西孝浩, 鈴木洋, 薄井洋基 ; ミセルスクィーザー挿入による界面活性剤抵抗低減系における熱交換器内伝熱低下回避, 化学工学論文集, 投稿中

(国際会議での発表)

- [1] Kishimoto, A., H. Usui and H. Suzuki; Influences of the Inner-Surface Conditions of Circular Tubes on the Heat Transfer in a Surfactant Drag-reducing System, Proc. 1999 AIChE National Meeting, No. 128m, Nov. 1-5, Dallas (1999).
- [2] Kishimoto, A., T. Okunishi,, H. Suzuki and H. Usui; Heat Transfer Augmentation in a Surfactant Solution Flow with an Insertion of a Micelle Squeezer, Proc. the 4th JSME-KSME Thermal Engineering Conference, No.

F308, Oct. 1-6, Kobe, Japan (2000).

- [3] Usui, H., T. Okunishi, A. Kishimoto and H. Suzuki, Heat Transfer Augmentation by Micelle Squeezer in a Surfactant Drag-reducing Pipe Flow, Proc. 6th World Congress of Chemical Engineering, Sep. 23-27, Melbourne, Australia (2001)

(講演)

- [1] 岸本章, 奥西孝浩, 鈴木洋, 薄井洋基 ; ミセルスクィーザー挿入による界面活性剤溶液流の熱伝達促進, 第 37 回日本伝熱シンポジウム, No. F146, 2000 年 5 月 29-31 日, 神戸
- [2] 薄井洋基, 鈴木洋, 岸本章, 奥西孝浩, 鎌田俊光 ; 界面活性剤ミセル破壊と乱流抵抗低減効果, 化学工学会第 66 年会, No. A105, 2001 年 4 月 2-4 日, 東広島
- [3] 岸本章, 鈴木洋, 薄井洋基 ; ミセルスクィーザーによる界面活性剤水溶液流の熱伝達促進, 2001 年度日本機械学会熱工学講演会, No. A102, 2001 年 11 月 3-4 日, 岡山

以上

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、また本論文を作成するにあたり、終始多大なるご指導を賜った神戸大学工学部 薄井洋基 教授に対し、心から御礼申し上げます。

本論文をまとめるにあたって、神戸大学工学部 片岡邦夫 教授、中山昭彦 教授にはご多忙にもかかわらず、適切なご助言を賜りましたことを厚く御礼申し上げます。

また、本研究に関するご指導とご助言、励ましをいただきました神戸大学大学院自然科学研究科 鈴木洋 助教授に対し、感謝の意を表します。

本研究の推進および本論文作成に関して、ご承認を賜り、また、本研究に対して終始様々な面でご指導およびご助言を頂きました、大阪ガス株式会社 専務取締役 松村雄次 博士、大阪ガス株式会社 取締役 開発研究部長 中芝明雄 氏、大阪ガス株式会社 理事 兵庫事業本部 設備営業部長 西田章一 氏、大阪ガス株式会社 開発研究部 エネルギー技術研究センター 所長 嘉数隆敬 博士に厚く御礼申し上げます。

本研究を推進するにあたり、日々様々な面でご指導頂きました、大阪ガス株式会社 開発研究部 エネルギー技術研究センターグループリーダー 佐々木博一 博士、大阪ガス株式会社 開発研究部 大気浄化プロジェクト 吉川正晃 氏、滋賀県立大学工学部 講師 徳満勝久 博士に心より御礼申し上げます。

本研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託研究「平成10年-平成11年新規産業創造型提案公募事業」により、神戸大学、株式会社大林組、ライオン株式会社と共同で実施いたしました。関係者各位に御礼申し上げます。

また、共同研究者として共に実験を行い、幅広くご協力頂きました、大阪ガス株式会社 梅原猛 氏，神戸大学大学院 奥西孝浩 氏，鎌田俊光 氏に深く感謝の意を表します。

以上、多くの方々のご指導とご協力により本研究が成就されたことを深く心に刻むとともに、あらためて深甚なる敬意の意を表します。

最後に、陰ながら日々支援していただいた友人，家族，妻に感謝いたします。

2002 年 1 月

岸本 章