

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月25日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560225

研究課題名（和文） 非線形溶液の衝突流沸騰を応用した微小領域冷却技術

研究課題名（英文） A study on cooling technique for mini-scale area by boiling heat transfer with impinging flow using nonlinear solutions

研究代表者

小野 直樹 (ONO NAOKI)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：20407224

研究成果の概要（和文）：

温度を上昇させると表面張力の値がある温度以上では上昇するという特異な高級アルコール水溶液（非線形溶液と呼ぶ）をミニチャンネル内の衝突流に用い、沸騰を伴う流動様式での微小領域の冷却技術に関する研究を行った。その結果、衝突流様式にただで直線流様式より1～2割ほど熱流束が高くなり、また非線形溶液を用いることでドライアウト時の熱流束（限界熱流束）は樹脂製T字流路（1辺3mmの矩形ミニチャンネル）の場合は純水と比べて2倍～2.4倍に増加した。非線形溶液の一定の効果が確認できた。

研究成果の概要（英文）：

The authors applied nonlinear high-carbon alcohol aqueous solutions, such as butanol and pentanol solutions, to boiling with impinging flow in T-shaped mini channel and compared dryout heat flux (CHF) with pure water. The geometry of the channel cross section was rectangular of 3mm x 3mm. It was found that the nonlinear aqueous solutions with impinging flow realized 2.0 to 2.4 times higher CHF than pure water. Thus, merit of the usage of those solutions was experimentally clarified.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、熱工学

キーワード：マイクロ・ナノスケール伝熱、流動沸騰、衝突流、表面張力、ミニチャンネル、マランゴニ対流、冷却

1. 研究開始当初の背景

携帯用のIT機器の普及が本格化し、さらなる性能の高度化が求められると、発熱する半導体デバイスやレーザー発光源などの局所発熱部分の冷却技術がおおきな課題にな

ることが予測されている。その課題解決の基礎としてミニチャンネルやマイクロチャンネル内部の伝熱現象や作動流体自体に関する知見の要求が増しており、従来技術よりも高性能で安全性の高い新技術が探索されて

いる。

また通常の液体では温度を上昇させると表面張力の値が次第に小さくなるのに対して、一部の高級アルコールの水溶液ではある温度以上では温度上昇に伴い、逆に表面張力値が大きくなるという特異な性質を持つことが知られている。この性質を持つ水溶液（ここでは「非線形溶液」と呼ぶ）を用いた沸騰伝熱の研究が従来から進められており、CHF（限界熱流束）の向上やドライアウト現象の抑制等が一部で確認されている。しかし、微小な局所冷却の環境であるミニチャンネルでの検討は十分なされていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、微小領域の冷却技術の新しい試みとして、上記の非線形溶液をミニチャンネル内の流動沸騰に適用することを考えた。また沸騰気泡の気液界面に大きな温度勾配を与えることが有効であることを予想し、以下を本研究の目的とした。

(1) 特異な表面張力の温度依存性の検証

特異な性質を持つブタノール水溶液やペンタノール水溶液の表面張力の測定を独自に実施し、その温度依存性を確認する。これはこの性質に関する公表データが非常に少ない事情による。また空気気泡を用いた基礎実験を行い、特殊な温度依存性によるマランゴニ対流を観察し、その作用を実証する。

(2) 非線形溶液使用の効果の検証

ミニチャンネルに非線形溶液を使用し、流動沸騰実験を実施し、その気泡挙動の観察や沸騰曲線を通じて、非線形溶液を使用することでの伝熱性能上のメリットを検証する。

(3) 衝突流様式の優位性の確認

実験系として車載用の発熱デバイスでの位置関係（発熱部が流路上面に位置する）を想定している。通常横からの直線流に対して、下から衝突させて左右に分流する流動様式の優位性を確認する。

3. 研究の方法

(1) 特異な表面張力の温度依存性の検証

図1に示すような最大気泡圧法を採用し、高温でも誤差が少なく測定できる装置を工夫して自作した。また空気気泡まわりのマランゴニ対流の観察実験には、図2のように気泡を2次元化（ヘレ・ショーセル）して観察する装置を製作した。液にトレーザ粒子を混入し、加熱面の温度を徐々に上昇させながら流れを観察する。

(2) 非線形溶液使用の効果の検証

図3に樹脂製のテストセクションを示す。

1辺が3mmの矩形の断面を持つミニチャンネルを断熱性の高いPEEK材で作製し、下部からの流れが衝突する部分に銅製加熱面を配置した。このテストセクションを流動系に組み込み、一定温度の流体が供給されるようにした。同様な形態のテストセクションを石英ガラスでも製作し、沸騰気泡の挙動観察を中心に行う実験も併せて実施した。

(3) 衝突流様式の優位性の確認

上記(2)でのテストセクションは、同時に直線流の様式（下部からの流路がない）のものも用意し、一方向の流れの場合での実験も実施した。気泡挙動や伝熱特性の結果を、T字の衝突流の場合と比較した。

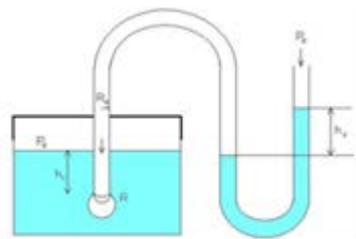


図1 最大気泡圧法による表面張力測定

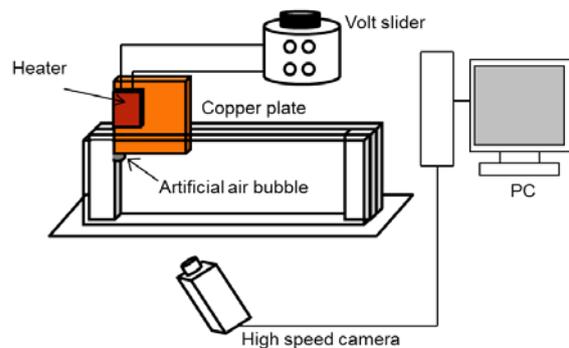


図2 気泡周りのマランゴニ対流の観察

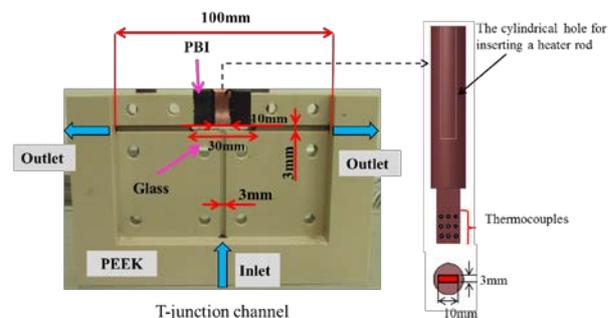


図3 樹脂製T字ミニチャンネル（衝突流）

4. 研究成果

(1) 特異な表面張力の温度依存性の検証

最大気泡圧法を応用し、加熱に伴うアルコール成分の蒸発を極力抑制した状態での表面張力の測定データを図4に示す。これはブタノール水溶液の場合であり、濃度に依存して極小点の温度が変化するが、高温では温度が上昇するにつれて表面張力が上昇する特異な性質が確認できた(図中の butanol は純ブタノールのデータで、これは温度上昇に伴い単調に減少した)。同様な性質はペンタノール水溶液でも顕著に現れた。

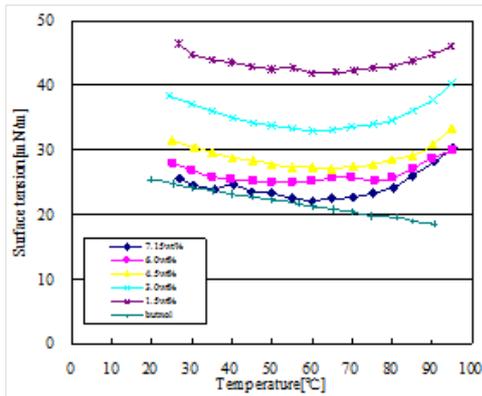


図4 ブタノール水溶液の表面張力値の温度依存性

以上のような表面張力特性を確認できたブタノール水溶液 (7.15wt%) を、図2に示す空気気泡を用いたマランゴニ対流観察の実験に使用した。その結果、図5に示すような特徴的なマランゴニ対流のパターンが観察された。気液界面の途中で対流の方向が入れ替わっている(気泡の上面が加熱されている)。熱電対を用いた測定から、方向が反転する点近傍の温度は、ほぼ50°Cであり、図4に示すように、温度域によって表面張力が大きくなる方向が異なることが大きな要因であることが結論づけられた。これから図4のような特異な温度依存性が実際のマランゴニ対流挙動にも影響を与え得ることが示せたと言える。

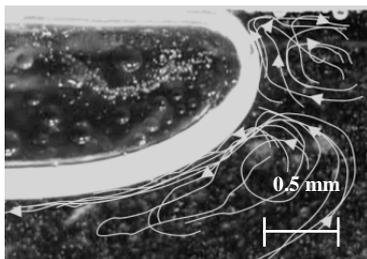


図5 ブタノール水溶液でのマランゴニ対流のパターン

(2) 非線形溶液使用の効果の検証

図3に示すような実際的なテストセクションを用いて、ブタノール水溶液およびペンタノール水溶液(ともに非線形溶液)を作動流体として用いて、衝突流を用いた沸騰伝熱実験を行った。携帯用伝熱機器を目指しているために、流量は小さく、40(ml/min)(レイノルズ数780)とし、サブクール度は20(°C)とした。純水や他の一般のアルコール水溶液の結果とともに沸騰曲線として示したグラフを図6に示す。非線形溶液であるブタノール水溶液、ペンタノール水溶液は、ここでは効果の高かった濃度(ブタノール水溶液は3(wt%)、ペンタノール水溶液は1.5(wt%))としている。

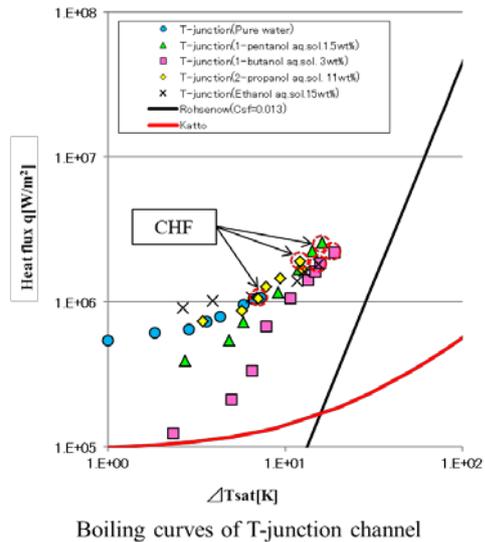


図6 樹脂製T字流路での沸騰曲線

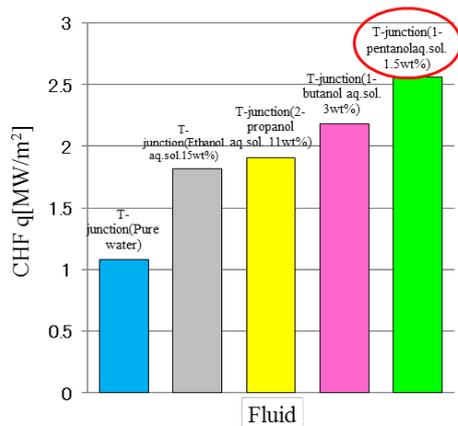


図7 アルコール水溶液の使用による限界熱流束(CHF)の向上

図6から分かるように、ブタノール水溶液、ペンタノール水溶液は、低過熱度の状態では

純水よりも熱流束が低いが、ドライアウトは純水より大きな過熱度まで発生せず、限界熱流束は結果的に純水の2倍以上まで上昇することが分かった。

図7に限界熱流束（ドライアウト熱流束）の値を各溶液について比較したものを示す。図4のような特異な表面張力温度依存性を示さない通常のアルコール水溶液であるエタノール水溶液やプロパノール水溶液でも純水に比べてCHFが増加しており、これについては濃度差起因のマランゴニ対流も寄与していることを示唆している。しかしそれらよりもブタノール水溶液やペンタノール水溶液のCHFが大きく増加している点については、濃度差起因のマランゴニ対流のみではなく、特異な表面張力温度依存性による温度差マランゴニ効果が、気液界面で働いたためではないかと考察している。

樹脂製のミニチャンネルと同時にガラス製のミニチャンネルでも同様な実験を実施して気泡挙動や加熱面上の液膜挙動を観察したところ、非線形溶液では沸騰気泡の微細化が進み、また液膜の伸長現象も見られるなどの特徴があった。これらの現象およびCHF上昇の詳細なメカニズムについては現在も研究を進めているが、実験的には非線形溶液のCHF向上に対する一定の効果は実証できたと考えている。

(3) 衝突流様式の優位性の確認

研究のもう一つの新しい着眼点である衝突流の効果について、樹脂製ミニチャンネルの場合についての実験結果を図8に示す。図中の“T字”のデータは衝突流のデータである。単相流の場合の衝突流による対流熱伝達の向上は広く知られていることであるが、今回のアルコール水溶液を用いた流動沸騰の場合でも、衝突流の効果は確かに維持されていることがわかる。いずれのアルコール水溶液の場合でもその効果が純水の場合よりも顕著になることが興味深い点である。

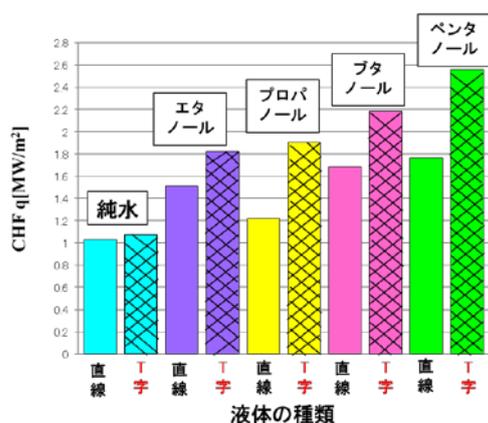


図8 CHFに対する衝突流の効果

以上のように非線形溶液をミニチャンネル内での衝突流を伴う流動沸騰に使用し、CHFが2~2.4倍に向上するという一定のメリットがあることを明らかにしたが、5倍以上といった革新的な向上には至ってはいない。今後の発展のためには、まず沸騰気泡の気液界面での流れや温度・濃度の詳細な分布に関する知見が必要であろう。それらからCHF上昇のメカニズムを解明し、その効果を大きく引き出す流動系や実験条件を考案することが必要であろう。そうすればCHFの飛躍的な向上と実用化の可能性もあり得ると考えている。

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)

[雑誌論文] (計1件)

① N. Ono, T. Kaneko, S. Nishiguchi and M. Shoji, “Measurement of Temperature Dependence of Surface Tension of Alcohol Aqueous Solutions by Maximum Bubble Pressure Method”, Journal of Thermal Science and Technology (JSME), Vol. 4(2009), No. 2, p284-293. (査読あり)

[学会発表] (計14件)

① Yuki Kumagai, Minoru Otsuka, Keigo Yonemura and Naoki Ono, “Dryout of Boiling with Impinging Flow in T-shaped Mini Channel with High-carbon Alcohol Aqueous Solutions”, Eighth International Conference on Flow Dynamics (Nov. 9-11, 2011, Hotel Metropolitan Sendai, Japan) (査読なし)

②河合健太朗、江田佑樹、新井里枝、小野直樹、“気泡周りにおけるアルコール水溶液のマランゴニ対流の観察”、日本機械学会熱工学コンファレンス2011(2011年10月29日、静岡大学) (査読なし)

③Koichi Obara, Tomohiro Ueno, Yasuhiro Nomura and Naoki Ono, “Application of butanol aqueous solution to boiling with impinging flow in mini channel”, Fourth International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale (September 4, 2011, Fukuoka, Japan), Proceeding, htffm-iv-035(USB Memory) (査読あり)

④大塚実、濱岡敦、熊谷雄貴、國末一志、小野直樹、“高級アルコール水溶液を用いた微細T字ガラス管内の衝突流沸騰におけるドラ

アウト特性”、第48回日本伝熱シンポジウム(2011年6月1日、岡山コンベンションセンター) (査読なし)

⑤Yuki Eda, Kentaro Kawai and Naoki Ono, “Observation of Marangoni Flow near The Artificial Air Bubble on Heated Surface in Using Alcohol Aqueous Solution”, Seventh International Conference on Flow Dynamics (Nov. 1-3, 2010, Sendai International Hotel, Japan) (査読なし)

⑥遠原晃一、上野智弘、野村泰裕、小野直樹, “非線形ブタノール水溶液のミニチャンネル内衝突流沸騰への適用”、日本機械学会熱工学コンファレンス2010(2010年10月30日、長岡技術科学大学) (査読なし)

⑦ Naoki Ono, Atsushi Hamaoka and Yuta Otsubo, “Fluid motion and heat transfer of boiling with impinging flow in a mini-tube with nonlinear thermocapillary solutions”, The 14th International Heat Transfer Conference(IHTC-14) (August 11, 2010, Omni Shoreham Hotel (Washington DC, USA)), Proceedings CDROM, Paper No. 22498 (査読あり)

⑧ 小野直樹、大坪雄太、大曲啓明、遠原晃一、 “非線形ブタノール水溶液のミニチャンネル内衝突流沸騰への適用” 第47回日本伝熱シンポジウム (2010年5月28日、札幌コンベンションセンター) (査読なし)

⑨金子高広、小野直樹、西口昇太郎、庄司正弘、 “非線形溶液の局所加熱時の微細管内流動沸騰現象”、第46回日本伝熱シンポジウム (2009年6月2日、京都大学) (査読なし)
その他5件

[図書] (計1件)

① Naoki Ono, Atsushi Hamaoka, Yuki Eda and Koichi Obara, Intech (online publishing), Book title: “Evaporation, Condensation and Heat transfer (ISBN 978-953-307-583-9)” (2011), Chapter title: “High-Carbon Alcohol Aqueous Solutions and Their Application to Flow Boiling in Various Mini-Tube Systems” (p465-486) を執筆 (査読あり)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称 :

発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計0件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

[その他]

ホームページ (研究室のサイト)
http://www.meo.shibaura-it.ac.jp/lab_ono.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小野 直樹 (ONO NAOKI)
芝浦工業大学・工学部・教授
研究者番号 : 20407224

他はなし。