

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560245

研究課題名(和文)自己湿潤水溶液の沸騰伝熱特性の研究 - 限界熱流束向上と冷却デバイスへの応用 -

研究課題名(英文) A study of boiling heat transfer characteristics of self-wetting solution -Critical heat flux augmentation and application to cooling device-

研究代表者

庄司 正弘 (Shoji, Masahiro)

神奈川大学・工学部・教授

研究者番号：00011130

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：高効率な微細構造冷却デバイスのための沸騰媒体として、自己湿潤液体、特にブタノール水溶液について沸騰伝熱特性を調べた。すなわち、水平加熱細線の成果を踏まえ、ミニチャネル内強制流動沸騰、プール定常及び非定常冷却の実験、伝熱メカニズムに関連した成分の選択的蒸発や、発生気泡の合体や微細化について同時並行的に研究を行い、その総合結果として、ブタノール水溶液が極めて有効な沸騰媒体であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Boiling heat transfer of self-wetting liquid, especially butanol aqueous solution, is experimentally investigated for the development of high-performance cooling device with miniaturized structure. Namely, based on the fundamental results of horizontal heated wire, flow boiling heat transfer in mini-tube, steady and unsteady pool boiling heat transfer on a flat heated surface, and other topics such as selective evaporation of the solution components, micro-bubble emission and coalescence of bubbles relating to heat transfer mechanism are studied in parallel. As the results, it is made clear that butanol aqueous solution is a useful liquid of boiling.

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：沸騰 限界熱流束 自己湿潤液体 ブタノール水溶液 冷却デバイス マイクロミニチャネル

1. 研究開始当初の背景

近年の高集積度の電子機器部品、例えばPC素子の冷却は、空気等気体単相では限界があり、沸騰冷却(相変化)への期待が大きい。加えて、小型の高性能、高効率冷却デバイスの開発にはマイクロ・ミニチャネル等の微細流路構造が有効とされ、この方面の研究が活発である。沸騰は高い伝熱性能を有する伝熱形態であり、マイクロ冷却デバイスに有効ではあるが、細管流路に適用する場合、通常的方式では発生気泡が細管径よりも大きく、流路を閉塞して伝熱劣化や不安定流動(振動流)を引き起こす。このため微細な気泡発生が望まれる。

これらの問題を解決できる一つの方策として、所謂自己湿潤液体の利用が考えられる。特に、表面張力が非線形温度依存性を示すブタノール水溶液は、表面張力の非線形による逆マランゴニ作用による加熱面の湿潤効果が注目されるが、過去の研究は飽和濃度液の飽和沸騰伝熱特性に限られ、また応用への適用が急がれたため、必要とされる基礎事項、つまり、サブクール依存性や濃度依存性、さらには気泡に関する情報はほとんど知られていなかった。このような研究状況にあったため、自己湿潤液体の沸騰伝熱について基礎的な実験研究を始めることとした。

2. 研究の目的

高度に集積された電子機器やレーザー発光器、バイオセンサー等の機器の冷却のため、マイクロチャネル等微細流路構造に沸騰伝熱を用いた高性能な冷却熱デバイスの開発を目的として、飽和沸騰にあっても発生気泡が十分微細であり、かつ沸騰伝熱性能、特に限界熱流束(CHF)が向上するブタノール水溶液などの自己湿潤性液体の沸騰特性を、プール系における伝熱性能やサブクール特性、気泡蒸気成分の分析、気泡生成合体挙動などの同時並行実験を行ってその特性を明らかにすると共に、応用を目的とした基礎実験であるマイクロ管内流動沸騰系、並びに加熱水平平板における伝熱特性も明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

初年度は水平細線を用いたプール沸騰系において、代表的な自己湿潤液体であるブタノール水溶液について主として限界熱流束に注目した核沸騰特性に関する実験を行うと同時に、サブクールに伴う発生蒸気成分の変化を調べる実験、微細な気泡が発生する原因究明のための等温2成分系の気泡力学の基礎実験を同時並行的に行う。

次年度以降は、冷却デバイスへの応用のためマイクロ・ミニチャネルを用いた強制流動系の実験に主力を注ぎ、初年度に行うプール沸騰特性挙動との関わりを明らかにする実験研究を行う。

当初の計画に加え、応用上重要な水平加熱

面上の沸騰伝熱特性について調べることとし、2年次及び最終年の3年目の主たる研究題目とした。これらの一連の実験をまとめると、以下の通りである。

初年度(2011(平成23)年)の実験

実験1: プール細線沸騰における飽和及びサブクール沸騰特性の実験

実験2: 発生蒸気内の蒸気成分の測定分析実験

実験3: 等温2成分系における気泡生成挙動に関する実験

2年目(2012(平成24)年)の実験

実験4: マイクロチャネルにおける流動沸騰特性の実験

最終3年目

実験5: 平板の定常プール沸騰の実験

実験6: 加熱平板の非定常急冷実験

4. 研究成果

上記のように研究は6種類のテーマに分け行なった。実験は多岐に渡るため、以下には、その各々について主たる実験結果(成果)を箇条書きの形で提示する。実験装置や方法などの詳細は、3編の雑誌論文、11編の国際会議並びに国内学会で発表しているため、それを参照願いたい。

(1) 実験1「プール細線沸騰における飽和及びサブクール沸騰特性の実験」の結果

細線径が $300\mu\text{m}$ の水平加熱白金線を用い、大気圧下で飽和並びにサブクール実験を行い、沸騰伝熱、特に限界熱流束CHFについて調べた。ブタノール水溶液の濃度は低濃度の0%~7.15%(常温常圧下の溶解限界)及び高濃度の90%~100%に変化させている。両者の間の濃度は溶解度の関係から得られない。

先ず、CHFの濃度による変化であるが、図1、図2に示すように、低濃度では濃度と共に上昇し、最大で純粋の3.5倍ほど高い値となり、ブタノール水溶液は沸騰媒体として優れたものであることがわかった。一方、高濃度では純粋とほぼ同等の値であり、CHFの向上はない。

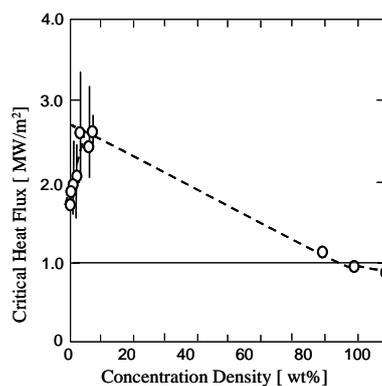


図1 CHFの濃度による変化

このCHF向上の一つの原因としては、気泡が合体し難く、その結果、気泡が微細であることが上げられる。図2は、濃度による発生気泡の様相の違いを示したものである。

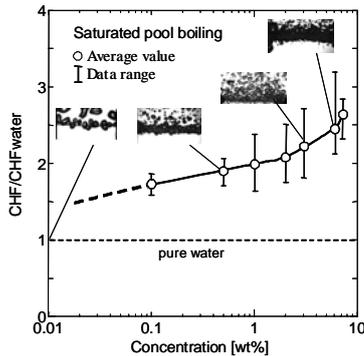


図2 低濃度におけるCHF向上

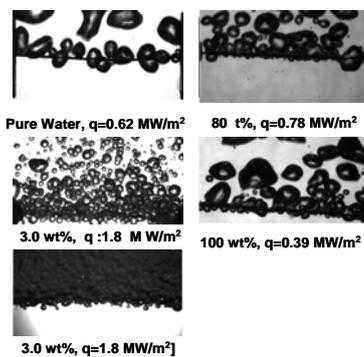


図3 濃度による発生気泡様相の変化

次に、CHFのサブクールによる変化（サブクール依存性）であるが、図4に示すように、一般的には通常の液体で見るとCHFはサブクールと共に増加するものの、低濃度では、ある濃度までいったん減少し、その後

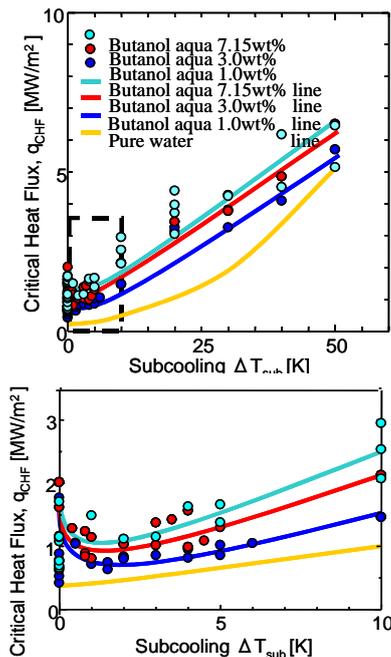


図4 CHFのサブクール依存性（下図は低濃度域の拡大）

上昇に転じるという特異性が見られる。この結果も、発生気泡の様相変化と密接に関連している。

(2) 実験2「発生蒸気内の蒸気成分の測定分析実験」の結果

図3に見るような発生気泡の様相の違いは、水溶液成分（水成分、ブタノール成分）が選択的に蒸発している可能性が考えられる。そこで、ガスクロマトグラフィによって、実験の前後での成分濃度を測定した。その結果が図5であり、飽和沸騰では成分割合に変化がないものの、サブクール下では違いがみられること、つまり選択的蒸発が起こっていることが明らかとなった。

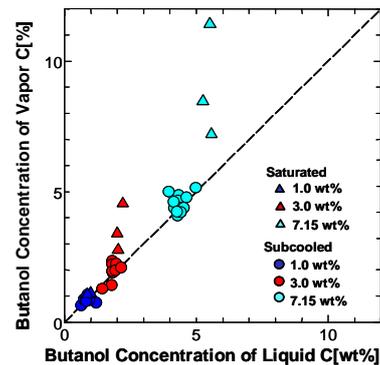


図5 実験前後の濃度変化（水溶液成分の選択的蒸発）

(3) 実験3「等温2成分系における気泡生成挙動に関する実験」の結果

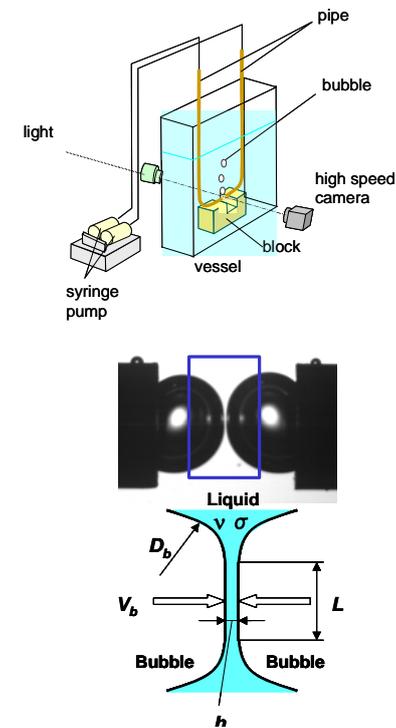


図6 気泡の合体に関する基礎研究のための実験系と計測事項（下図）

ブタノール水溶液の沸騰では、発生1次気泡が合体し難く、気泡が微細であり、これが伝熱特性やCHFに関係していると考えられる。

そこで、気泡合体のメカニズムを探るため、図6のような実験装置を用い、常温において対向する2個の気泡を発生、衝突させ気泡合体の様子を観察した。なお、基礎研究であるため、気泡は実験と観察が容易な空気泡である(蒸気泡ではない)。実験では、気泡の成長速度を変化させ、図6の下図に示すような気泡接触長を測定した。その結果を整理したのが図7である。図7で横軸は次元解析から得られた気泡の成長速度(気泡の衝突速度)の無次元数である。

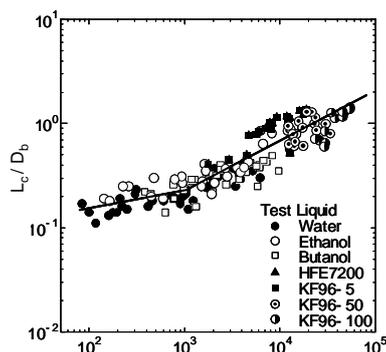


図7 気泡の接触と合体に関する無次元整理

なお、気泡合体のメカニズムは複雑であり、本研究では解明するに至らなかった。しかし、研究を担当した大学院生の諸隈崇幸君が研究機関を横浜国立大学に換え、宇高義郎教授の下で本研究を引き継ぎ継続して問題解決に取り組んでいる。

(4) 実験4「マイクロチャネルにおける流動沸騰特性の実験」の主要な結果

実際の応用を考えた場合、管内の強制流動沸騰が重要であり、実験(1)で得られた細線の結果が、管内流でも成り立っているか否か確かめることは必要である。そこで、内径が1mmのミニチャネルを用いた流動沸騰の実験を行った。その結果が図8であり、少なくとも高質量流量では純粋の場合より高いCHFが得られること、したがってブタノール

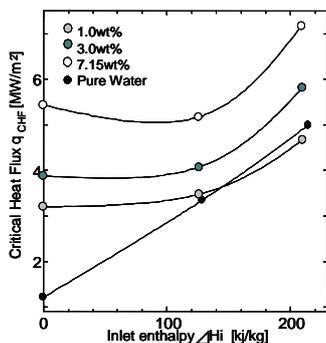


図8 ミニチャネル内流動沸騰における限界熱流束

ル水溶液が有効な沸騰媒体であることがわかった。なお、高流量下ではCHFが管出口ではなく、管入口近傍あるいは管中央で発生することがあった(所謂上流限界熱流束)。

(5) 実験5「平板の定常プール沸騰の実験」の主要な結果

沸騰の応用上、加熱平面上の沸騰電熱特性も必要不可欠である。そこで、直径30mmの銅製水平加熱面でプール飽和及びサブクールフットyの実験を行った。図9は結果のひとつであり、濃度によるCHFの値の変化を示している。5%ほどの中間の濃度でCHFが純水より高くなるものの、全体的に見れば純粋の場合と大差なく、細線で見られたような大きなCHF向上は認められなかった。これは気泡の離脱に伴う加熱面への液の流入が細線と平板では異なること、時間的、空間的に液濃度の均一保持は難しいことなどが影響しているためと考えられる。

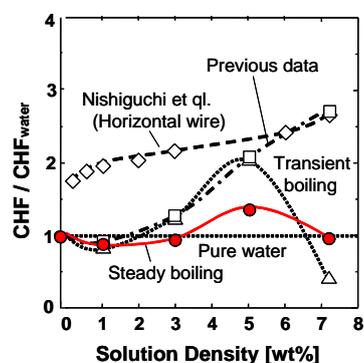


図9 加熱水平面(定常沸騰)のCHFの濃度による変化(図2と対比、参照)

(6) 実験6「加熱平板の非定常急冷実験」の主要な結果

沸騰媒体の利用は、高温物体の冷却(急速冷却、クエンチ)にも用いられる。したがって、ブタノール水溶液を用いた場合の冷却特性を知っておくことが必要になる。そこで、直径30mmの銅製面を300°Cの高温に加熱しておき、各種濃度のブタノール水溶液に浸漬して非定常伝熱特性を調べた。

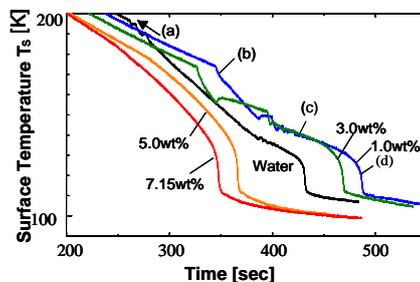


図10 非定常冷却の冷却曲線

図10は得られた冷却曲線であり、図11は、それから計算される沸騰特性(沸騰曲線)である。ブタノール水溶液は高い伝熱特性を持

つため冷却が早く、しかも興味深いことに冷却曲線に二つの急却点（クエンチ点）が、従って沸騰曲線に二つの極大熱流束点が現れることが発見された。これは、水溶液の先ずはブタノール成分が、次に水成分が選択的に蒸発するためと考えられる。ただし、加熱面の初期温度をより高温（500℃）とした場合、膜沸騰で水の蒸発が選択的に起こり、それが遷移沸騰のみならず核沸騰にまで及び、図10あるいは図11の結果とは違ったものになる。今後更なる研究が必要である。

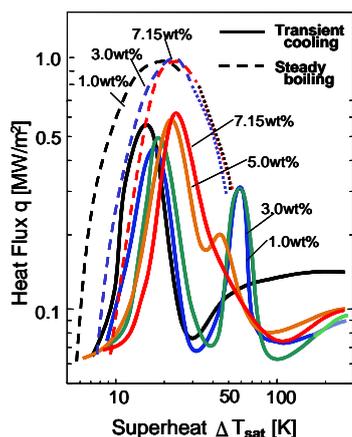


図11 非定常冷却の沸騰曲線。
(図10の結果から算出)

以上、6種の実験の結果を総合すると、ブタノール水溶液は高い限界熱流束が得られること、気泡が微細であることなどから、微細構造の冷却デバイスへの応用上、大変有効な沸騰媒体であると言える。ただし、水平加熱面のような場合、伝熱特性は純水と大差のないこともあり、注意が必要である。なお、課題の幾つかについては、今後さらなる研究が必要である。

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)

〔雑誌論文〕(計3件)

①庄司正弘、「沸騰の研究」、機械の研究、養賢堂、査読有り、第64巻、第10号、2013年、809-815頁、ISSN0368-5713.

②西口昇太郎、庄司正弘、「ブタノール水溶液の限界熱流束」 Thermal Science and Engineering, 査読有り, Vol.20, No.1, 2012, pp.1-6, ISSN0918-9963..

③庄司正弘、「沸騰研究の50年」、日本伝熱学会誌「伝熱」、査読有り、51巻、214号、2012年、21-29頁、ISSN1344-8692.

〔学会発表〕(計11件)

①庄司正弘(他3名)、「各種液体の限界熱流束に関する実験的研究」、第51回日本伝熱シンポジウム 講演論文集 Vol.2, A212、2014

年5月22日、アクトシティ浜松コンベンションセンター。

②庄司正弘(他2名)、「ブタノール水溶液の沸騰伝熱特性」、熱工学コンファレンス2013 講演論文集 OS-9, No..G-131、2013年10月19日、弘前大学。

③庄司正弘、「ブタノール水溶液の沸騰熱伝達」、機械学会年次大会 講演論文集 G061021、2013年9月9日、岡山コンベンションセンター。

④Masahiro Shoji，“CHF on a horizontal wire”, Pre-seminar of ICNMM2013, June 16, 2013, Sapporo, Hokkaido University, Bild.-1, Faculty of Eng.

⑤庄司正弘(他2名)、「水平加熱極細線上の限界熱流束」、第50回日本伝熱シンポジウム 講演論文集 Vol.1, E112、2013年5月31日、仙台ウェスティンホテル。

⑥庄司正弘(他1名)、「水平加熱極細線CHFの細線径依存性」、熱工学コンファレンス2012 講演論文集 OS-15、2012年11月17日、熊本大学。

⑦庄司正弘(他2名)、「ブタノール水溶液を用いた加熱面の急冷における沸騰伝熱特性」、第49回日本伝熱シンポジウム 講演論文集 A124、2012年5月31日、富山国際会議場。

⑧西口昇太郎(発表者)、庄司正弘、「ブタノール水溶液の沸騰挙動に関する研究」、第49回日本伝熱シンポジウム 講演論文集 SP11、2012年5月30日、富山国際会議場。

⑨諸隈崇幸(発表者) 庄司正弘他1名、「対向2気泡の合体に関する研究」、第49回日本伝熱シンポジウム 講演論文集 A231、2012年5月30日、富山国際会議場。

⑩庄司正弘(他3名)、「ブタノール水溶液の沸騰における発生気泡内蒸気成分の測定」、第49回日本伝熱シンポジウム 講演論文集 A123、2012年5月30日、富山国際会議場。

⑪Masahiro Shoji，“Butanol Aqueous Solution as a Useful Liquid of Boiling –Various Aspects of Boiling-”, Keynote paper in Proc. of ISHTEC2012: 4th International Symposium on Heat Transfer and Energy Conservation, pp.6-14, January 6-9, 2012, South China University of Technology, Guangzhou China.

〔図書〕(計0件)

〔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〕
ホームページ等
(なし)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

庄司 正弘 (Shoji Masahiro)

神奈川大学・工学部・教授

研究者番号：00011130

(2) 研究分担者

(なし) ()

研究者番号：

(3) 連携研究者

(なし) ()

研究者番号：