

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：17104

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630070

研究課題名(和文) 気泡微細化沸騰の伝熱機構へのマイクロ液膜モデルの提案

研究課題名(英文) A Proposal of Microlayer Heat Transfer Model for Microbubble Emission Boiling

研究代表者

鶴田 隆治 (TSURUTA, TAKAHARU)

九州工業大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：30172068

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：サブクール沸騰において生じるとされる気泡微細化沸騰(MEB)の伝熱機構を解明するために、プール沸騰における限界熱流束(CHF)を予測するためのマイクロ液膜モデルを適用した理論的検討と、水平白金細線を用いた実験観察の両面からの研究を実施した。その結果、サブクール沸騰の場合にも伝熱面上の固液接触構造は飽和沸騰と変わらず、一次気泡の生成、成長過程のマイクロ液膜挙動を定式化すれば、熱流束が予測でき、高熱流束領域における実験値と良く一致することが確認できた。なお、白金細線では熱容量が十分ではなく、MEBは生じないこと、及び溶解ガスの影響が強いため生じる可能性が高いことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Focusing on the microlayer, we studied the heat transfer mechanism of the MEB in the subcooled boiling theoretically and experimentally. First, we present the theoretical estimations of bubble-formation and growing periods on the heating surface under the large subcooling and high-superheat conditions. The estimations give us the boiling curves. In the experiments using platinum wire, we have obtained the heat transfer characteristics including the CHF. However, MEB is not observed on the boiling curve. For the large subcooling, fine bubbles are observed in high heat flux region, which is considered to be dissolved gases and have no significant effect on the boiling heat transfer. The comparisons between the experimental results and the microlayer model show good agreement and indicate that the period of the primary bubbles generated on the heat transfer surface is most important in the subcooled boiling heat transfer.

研究分野：熱工学

キーワード：沸騰熱伝達 気泡微細化沸騰 ミクロ液膜モデル サブクール沸騰

1. 研究開始当初の背景

(1) 気泡微細化沸騰は、Microbubble Emission Boiling (MEB)と称され、1990年代に日本の研究者らによって見出された特異な沸騰様相である。つまり、サブクール下においては、図1に示すように、沸騰曲線上で通常の限界熱流束(CHF)を越えて熱流束が増大する現象であり、微細な気泡が伝熱面から多数放出されることを特徴としている。近年、高熱流束冷却技術への要望から注目され、サブクール領域での凝縮消滅に着目した研究が行われている。しかしながら、沸騰曲線上での極大点である CHF を越える過熱度域にも係らず、熱流束が増大することについての明確な伝熱メカニズムは未だ提唱されていない。もちろん、CHF についての結論が出ていないことも MEB の伝熱機構解明を難しくしていると考えられている。

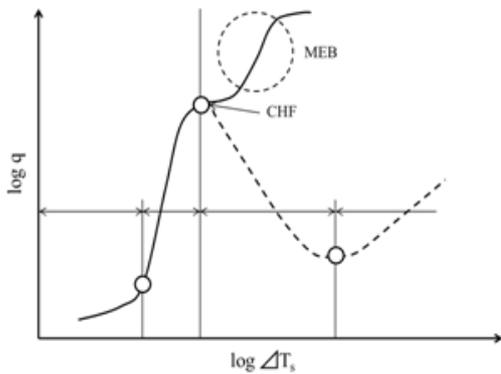


図1 沸騰曲線上の MEB 挙動

(2) 申請者らは、CHF の伝熱機構を記述するためのマイクロ液膜モデルをこれまでに提案しており、一次気泡下に形成されるマイクロ液膜の蒸発(伝熱促進)と乾燥(伝熱劣化)が熱流束に極大値を与えることを示している。三相接触境界線モデルとともに CHF の解釈を二分するモデルであるが、伝熱は線より面であり、多くの微細気泡が伝熱面から離れる MEB においてもマイクロ液膜の蒸発促進効果が伝熱面平均で高くなり、熱流束が増大することが容易に予想される。すなわち、マイクロ液膜モデルに立脚すれば、MEB の伝熱機構も記述できると判断するに至り、研究に着手した。

2. 研究の目的

CHF を超える高い熱流束をもたらす気泡微細化沸騰については、サブクール液中での気泡挙動(特に凝縮挙動)やマクロな伝熱特性についての研究は行われているものの、学術的に最も重要となる伝熱面上での熱伝達機構は明らかになっていない。そこで本研究では、CHF 近傍の熱伝達を記述するマイクロ液膜モデルに基づけば、MEB の熱伝達をも説明可能であることを明示することを目的としている。特に、気泡の離脱周期が重要であり、沸騰曲線上に新たな変極点をもたらすことを示すと同時に、実験観察を行って気泡周期と熱流

束との関連を調べる。究極的な目的としては、パワーデバイス等の電子機器や新たな機能性材料開発のための高熱流束冷却技術に、MEB をより効果的かつ実現可能な技術として活用できるものとするのである。

3. 研究の方法

(1) ミクロ液膜モデルによる理論的検討：まず、マイクロ液膜モデルに基づく伝熱機構の検討を行う。高過熱度域において、一次気泡の離脱・再生成が安定に繰返される限り、マクロ液膜を介しての潜熱および顕熱輸送よりも、マイクロ液膜蒸発による潜熱輸送が支配的になると考えられるため、一次気泡の離脱周期の振る舞いを重要視した理論的検討を行う。ここで、高サブクール条件下において強い凝縮が生じる場合を想定すれば、一次気泡の成長期間がマイクロ液膜の蒸発期間と一致すると考えられ、マイクロ液膜モデルに基づいた高過熱度域の伝熱特性の予測が可能である。つまり、気泡の消滅および再形成の過程は、図2に示すような4段階に分けられ、それぞれの周期を評価して全周期 τ_d を推定し、平均熱流束の予測を行った。

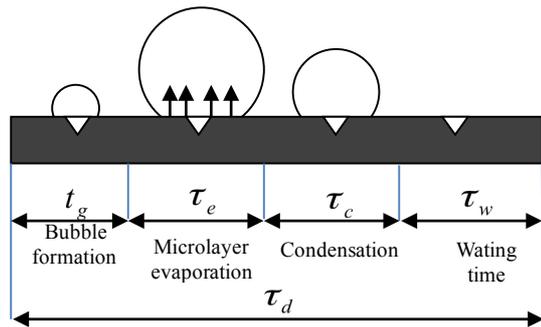
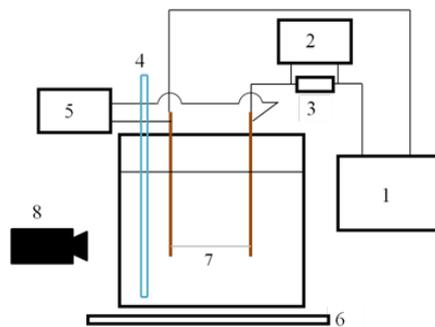


図2 一次気泡の成長消滅サイクル

(2) 水平白金細線による実験：図3に、実験装置の概略図を示す。純水中で直径が 0.3, 0.6mm の白金細線を直流電流によりジュール加熱し、細線表面の伝熱量を求め、電気抵



- 1: DC power controller
- 2: Tester
- 3: Standard resistance
- 4: Thermometer
- 5: Digital multimeter
- 6: Heater
- 7: Pt wire
- 8: High speed

図3 実験装置

抗から表面温度を決定する。サブクール度は補助ヒーターと温度調節器を用いて調節する。ハイスピードカメラを用いて、沸騰の様子を撮影した。撮影速度は8,000~10,000fpsとし、白金細線が溶断(バーンアウト)するまで実験を行った。

4. 研究成果

(1) ミクロ液膜モデルによる理論周期の推定：ミクロ液膜モデルによれば、一次気泡の全周期 τ_d は以下の式で予測できる。

$$\begin{aligned} \tau_d &= t_g + \tau_e + \tau_c + \tau_w \\ &= ca \left(\frac{\rho_v h_{fg} d}{4k_l \Delta T_s} \right)^2 + \frac{c^2 a h_{fg}^3 \rho_v d^2}{32c_{pl} k_l^2 \Delta T_s^3} + \tau_c + \tau_w \end{aligned}$$

右辺第一項は初期成長時間 t_g 、第二項はミクロ液膜の蒸発による成長時間 τ_e 、第三項は凝縮による消滅時間 τ_c 、そして第四項は次の一次気泡が発生するまでの待ち時間 τ_w である。

初期成長段階($0 \leq t \leq t_g$)では、気泡が半球状に形成されるまでの時間であり、気泡の成長式とミクロ液膜の厚みの式から求まる。具体的な値としては、過熱度20℃では42 μ sec、過熱度40度では57 μ sec程度であり、一次気泡の全周期 τ_d がおおよそ1 msec程度であるため、無視できる。

ミクロ液膜の蒸発による成長段階($t_g \leq t \leq t_g + \tau_e$)では、ミクロ液膜の蒸発支配によって気泡が半球状から切欠球状に成長する。 τ_e はミクロ液膜がすべて乾燥するまでの時間であり、第二項で表現されるが、ミクロ液膜の蒸発が気泡上部における凝縮よりも支配的と仮定し、ミクロ液膜の蒸発が終了した後、次の凝縮消滅段階に入ると考える。

凝縮による気泡の消滅段階($t_g + \tau_e \leq t \leq t_g + \tau_e + \tau_c$)に対しては、凝縮界面での熱伝達率を推定することにより定式化は可能であるが、今回は強サブクール下を想定し、無限大の凝縮速度、つまり $\tau_c = 0$ とみなすことができる。

さらに、次の一次気泡が発生するまでの待ち時間 τ_w についても、高過熱度域であることを理由に無視できる場合を考えることにした。

以上、サブクール条件下のCHFを越える高加熱度域において生じるMEBでは、一次気泡の凝縮は非常に急速であり、また爆発的に次の気泡が生じることを考えれば、凝縮消滅時間と待ち時間の割合も小さいと予想している。したがって本研究では、ミクロ液膜の蒸発成長期間 τ_e のみを考え、熱流束を推定することにした。

過熱度と τ_e の関係を、実験結果と比較して図4に示す。MEB近傍の高サブクール度、高熱流束域における白金細線0.3mmの実験結果と理論値が非常に近い値となっており、本研究における気泡周期の考え方が正しいことが裏付けられた。

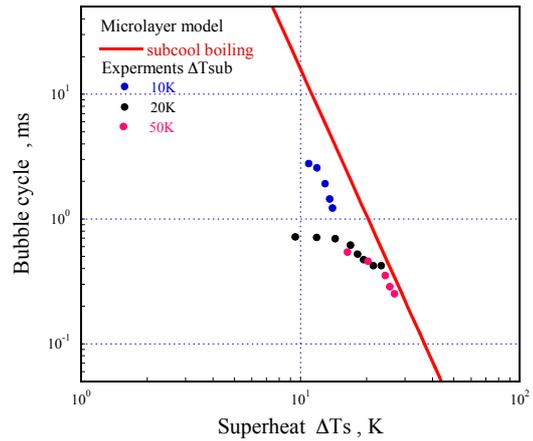


図4 気泡周期と加熱度の関係

(2) 実験による沸騰曲線：図5に実験で得られた沸騰曲線を示す。0.3mmではサブクール度が高くなるにつれて、バーンアウト点は上昇した。しかし、平板伝熱面での沸騰のように過熱度の急上昇を確認することは出来なかった。なお、0.6mmの細線では電源装置の容量ではバーンアウトまで到達までは至らなかったが0.3mmと似た傾向となった。しかし、0.6mmの場合も過熱度の急上昇は見られなかった。このことから白金細線を用いた実験でMEBの変局点を確認することは難しいと判断された。その要因としては、細線と平板における熱容量の差が影響するものと推測する。つまり、伝熱面上に一次気泡が発生し、短時間で凝縮する場合に、細線では急速な熱移動によって温度低下が生じる可能性が高いが、平板の場合は熱容量が大きいため温度変動が小さいということがその判断理由である。

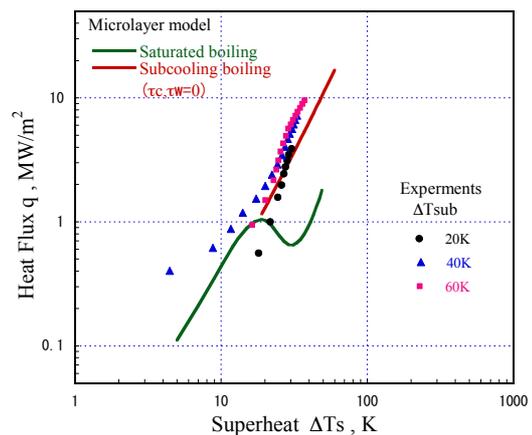


図5 沸騰曲線の実験と理論との比較

(3) ミクロ液膜モデルとの比較：図5には、沸騰曲線上での理論との比較を示している。ミクロ液膜モデルによれば、ミクロ液膜が蒸発する際の面平均熱流束は以下の式で与えら

れる。

$$\bar{q} = \frac{\pi c_1}{16d^2} (\Delta T_s)^2 \left(\frac{d}{2} - \frac{c_2 (\Delta T_s)^3 \tau_d}{d} \right)$$

マイクロ液膜の蒸発による伝熱促進と乾燥による局所ドライアウトがもたらす伝熱劣化の効果をあらわすもので、通常の沸騰系では両効果により熱流束に最大値が生じる。この最大値を CHF 点と考えている。なお、 τ_d が前述の一次気泡の離脱周期を示しており、その周期が長くなるほど乾燥による伝熱劣化が進み、面平均熱流束は減少することを表している。逆に離脱周期は早くなると、熱流束は増大する。なお、式中の c_1 、 c_2 は、以下に示す物性値の関数である。

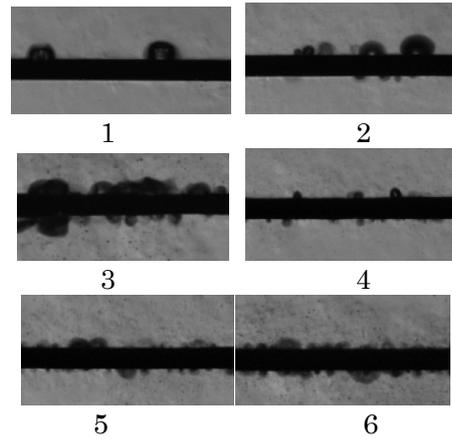
$$c_1 = \frac{16k_l^2}{c\alpha\rho_v h_{fg}}, c_2 = \frac{4c_{pl}k_l^2}{c^2 d h_{fg}^3 \rho_v^2}, c = 0.64 \text{Pr}$$

白金細線を用いた実験では、サブクール度が増加するにつれて限界熱流束点は向上するが、MEB に移行する変局点を確認することは難しい。高サブクール度、高熱流束域で確認される微小気泡は溶存ガスの可能性が高く、MEB におけるマイクロバブルとは関連しない可能性が高い。

(5) 気泡挙動の観察結果：ハイスピードカメラで撮影した画像を図6に示す。熱流束が上がるにつれて、発泡点密度が増大し、サブクール度が上がるにつれて、凝縮の影響で気泡径が小さくなっている。また、伝熱面上に発生する気泡の他に、伝熱面を離れても存在する微小な気泡が確認できる。さらにバーンアウトの瞬間を撮影した図7では、細線の上方に霧状に見える微細気泡が確認できる。伝熱面をかなり離れており、サブクールされた状態にあって、それでも消滅していないことから、これらの微細気泡は溶存ガスの可能性が高いと考えられる。脱気を十分に行って実験を試みたが、高熱流束域になると溶存ガスをなくすることは難しい結果となった。また、逆に脱気しないでおきおなった実験では、より多くの微細気泡が確認されたことから、気泡微細化沸騰において見られる放出気泡の実態は溶存ガスの可能性が高いと考えられる。

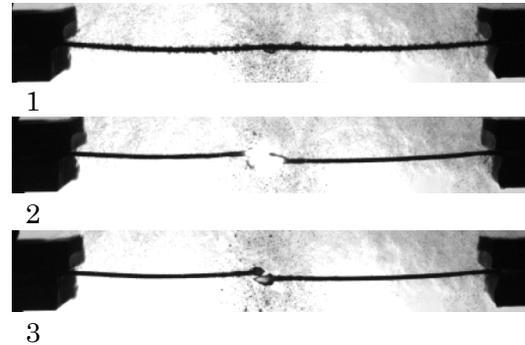
(6) まとめ：

サブクール沸騰における気泡微細化沸騰の伝熱機構について、マイクロ液膜モデルによる伝熱面の固液接触構造を重要視した検討を行い、一次気泡の離脱周期 τ_d の影響を評価した。その結果は白金細線による実験値に近い値を示すことから、マイクロ液膜モデルによる伝熱機構の記述が可能と言える。なお、白金細線を用いた実験では、サブクール度とともに限界熱流束は増加するが、MEB に移行する沸騰曲線上の変局点は確認されなかった。また、高サブクール度、高熱流束域で確認される微



1~3: $\Delta T_{sub}=40\text{K}$, 1: $q=2.2\text{MW/m}^2$,
2: $q=4.0\text{MW/m}^2$, 3: $q=7.7\text{MW/m}^2$
4~6: $\Delta T_{sub}=60\text{K}$, 1: $q=4.0\text{MW/m}^2$,
2: $q=6.3\text{MW/m}^2$, 3: $q=9.2\text{MW/m}^2$

図6 沸騰気泡の挙動



1~3: $\Delta T_{sub}=60\text{K}$, $q=9.6\text{MW/m}^2$, $30\mu\text{s}$

図7 バーンアウト時の微細気泡

小気泡は溶存ガスである可能性が高く、MEB における特異な伝熱特性に直接影響するかの検証が今後必要である。

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 0 件)

〔学会発表〕(計 3 件)

- ① Ken Kishihara, Takaharu Tsuruta, Hirofumi Tanigawa, Study on Microbubble Emission Boiling Based on Microlayer Model, The First Pacific Thermal Engineering Conference, March 16, 2016, Hawaii (USA)
- ② 岸原謙, 鶴田隆治, 谷川洋文, 白金細線を用いた気泡微細化沸騰の実験検証, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2015, 2015年10月24日, 大阪大学吹田キャンパス (大阪府)
- ③ 岸原謙, 鶴田隆治, ミクロ液膜モデルに基づく気泡微細化沸騰の伝熱機構の検討, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2014, 2014年11月8日, 芝浦工業大学豊洲キャンパス (東京都)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鶴田 隆治 (TSURUTA TAKAHARU)
九州工業大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：30172068

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし