気泡微細化沸騰の発生と安定性*

久保 良^{*1}, 熊谷 哲^{*2}

Occurrence and Stability of Microbubble Emission Boiling

Ryo KUBO and Satoshi KUMAGAI

Microbubble emission boiling (MEB) is the regime that occurs in the subcooled transition boiling region. This experimental investigation reveals that this phenomenon includes two regimes, i. e., the stormy and calm microbubble emission boilings. This study also shows temperature fluctuations of a heat transfer surface and pressure fluctuations in the liquid near the surface to classify MEB into the above regimes. The temperature fluctuations in either regime are smaller than those at the critical heat flux. The pressure fluctuations are larger in the stormy MEB, and smaller in the calm MEB as compared with those at the critical heat flux. The liquid subcooling and flow velocity approaching the surface are important aspects by which to generate those regimes. A number of experiments lead to the map of MEB regimes that consists of liquid subcooling and flow velocity. An oscillatory character between the two regimes appears under several conditions.

Key Words: Heat Transfer, Boiling, Bubble, Transition Microbubble, Subcooled Water, Flow Velocity, Temperature Fluctuation, Pressure Fluctuation

1. はじめに

一般に沸騰現象では、遷移沸騰領域を安定的に維持することはきわめて困難である。しかし、液体が十分にサブクールされている場合には、この領域で気泡が微細化し高熱流束を維持する現象の生じることが土屋⁽¹⁾によって報告されている。この現象は西川ら⁽²⁾の実験でもすでに示されており、その後稲田ら^{(3)~(6)}がプール沸騰実験で詳しい様相を観察している。また藤林ら⁽⁷⁾および Hirono ら⁽⁸⁾は強制対流系での伝熱面姿勢、流動形式を変えた実験を行い、微細化現象が発生しやすい組合せを示した。ちなみに球のクエンチング実験でも気泡微細化現象が発生したことを Aziz ら⁽⁹⁾が報告しており、また同様の実験において菊地ら⁽¹⁰⁾も球全面にわたる膜沸騰の崩壊によって微小気泡が発生し、周囲液体が白濁したことを記している。

なお上記の藤林らの報告では $3.4 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ もの高熱流束を記録している。この例のように気泡微細化現象は、従来一般に取扱われてきた沸騰現象と比べて非常に高い熱流束を示すにもかかわらず、その特性は

いまだ不明りょうである。そこで本実験では藤林ら⁽⁷⁾が示した微細化現象が生じやすい系、すなわち水平上向き伝熱面に対して液体を垂直上方に吸い込む流動形式を用いて、気泡微細化現象についての基礎的実験を繰返した。その結果、種々の実験で生じた気泡微細化現象は常に一様の沸騰形態を取るわけではなく、少なくとも二つの異なる形態に分けられることが明らかになった。

図1に気泡微細化現象が生じたときの典型的な沸騰曲線の2例を示す。強サブクール沸騰では、核沸騰領域は飽和沸騰の延長線上に位置するが、DNB点を超えてもすぐには膜沸騰に移移せず、気泡微細化領域に移行する。このときその沸騰曲線は気泡微細化現象が発生していない普通の沸騰曲線とは異なる。すなわち普通の沸騰では遷移沸騰領域にある伝熱面温度にもかかわらず、ここでは曲線が正の傾きを持つのが特徴である。また本報では、この気泡微細化現象を、微細化された気泡が伝熱面から射出されるときに強さによって2種類の形態に分類することにし、それぞれ激しい気泡微細化沸騰 (Stormy Microbubble Emission Boiling)、静かな気泡微細化沸騰 (Calm Microbubble Emission Boiling) という名称と呼ぶ。

本報では、この二つの気泡微細化現象がそれぞれど

* 平成2年9月23日 第68期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成3年4月18日。

^{*1} 正員、東北大学大学院 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)。

^{*2} 正員、東北大学工学部。

のような特色を持つかを示すため、また伝熱面近傍の流体の動きと伝熱面温度の非定常的变化の関係から固液接触の状況を考察するため、伝熱面の温度変動と周囲液体の圧力変動を同時に測定した。さらに、気泡微細化現象の工業上の応用も模索してサブクール度、流速によってこの現象をどの程度コントロールできるか

を試みた。すなわちこの二つのパラメータの組合せによって、どちらの気泡微細化現象が発生しやすくなるか、また一度発生した気泡微細化現象がどういったサブクール度、流速の条件のとき他の状態に変化しにくくなるか、すなわち安定して維持されるかを示した。

2. 実験装置および方法

実験装置を図2および図3に示す。直径15mmの円形伝熱面は銅ブロック1の端面で、電気ヒータ2により加熱される。供試液体は比抵抗 $5 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上のイオン交換水で、ヘッドタンク5と恒温槽10間の水頭差によって、入口15から沸騰容器3内に導入される。さらに供試水はバッフル16によって整流され、周囲から伝熱面に供給された後、吸込ノズル4より鉛直上方に排出される。このノズルの下流側直管部における管内平均流速を代表速度 v とした。ループにはできる限りステンレス鋼管を用いることで、スケールの伝熱面への析出を極力避けた。熱流束と伝熱面温度は、伝熱ブロック内に挿入した熱電対19によって、定常もしくは準定常状態で測定した温度分布から求めた。サブクール度は入口上流15に取付けた熱電対23によって測定された値を用い、実験中の誤差は1K以内に制御した。各実験はステップ状に熱流束を上昇させる方向で行い、正味3h程度を要した。ただし実験終了後、減少過程においても気泡微細化現象域では同一の

図1 気泡微細化沸騰曲線

1. Heated Block	8. Valve
2. Si-C Heater	9. Three-way Cock
3. Pool Vessel	10. Storage Tank
4. Sucking Nozzle	11. Pump
5. Head Tank	12. Valve
6. Heater	13. Valve
7. Cooler	14. Valve

図2 実験装置概略図

1. Heated Block	19. C-A T.C.
2. Si-C Heater	20. Cold Junction
3. Pool Vessel	21. Pen Recorder
4. Sucking Nozzle	22. Digital Voltmeter
15. Inlet	23. C-A T.C. Probe
16. Baffle	24. Pressure Transducer
17. Insulation	25. D.C. Amp.
	26. FFT Analyzer
	27. D.C. Amp.

図3 実験装置詳細図

曲線をたどることを確認している。また伝熱面周囲雰囲気気の圧力変動を銅製の導圧管を介した圧力センサ 24 によって観測し、伝熱ブロックの伝熱面の中心から 2 mm 下の $\phi 0.55$ mm のドリル孔に挿入した、 $\phi 0.5$ mm 非接地形シース熱電対(応答時間約 0.05 s)の出力値と同時に記録した。なお伝熱面は実験開始前に #1000 の耐水紙で研磨した後エタノール、アセトン、純水による洗浄を行い性状を一定にした。

3. 実験結果および考察

3.1 激しい気泡微細化現象 図 4 に激しい気泡微細化現象が発生したときの沸騰曲線を示す。いわゆる核沸騰の限界熱流束点 A を迎えた後、伝熱面温度はいったん急上昇するが、すぐには膜沸騰に遷移するに至らず、激しい気泡微細化現象が発生して伝熱面温度の上昇は止まる。この後、ヒータの入力を増加しても伝熱面温度はあまり変化せず、熱流束のみが上昇する。このとき微細化した気泡が伝熱面から流れに逆らって上流方向にすら激しく射出されると同時に、周囲液体は激しくかく乱される。なおこのとき激しい気泡微細化現象は一般の核沸騰とは異なった非常に大きな沸騰音を伴う。図 6 は図 4 中の点 B、すなわち激しい気泡微細化現象発生時の伝熱面周囲液体の圧力変動、および伝熱面下 2 mm での温度変動を同時に測定した結果である。なお熱電対および圧力変換器から出力される全電圧値に対してわずかな変動成分を計測するため、オフセット電圧(直流電圧)成分をあらかじめ削除している。図 5 に示した核沸騰の限界熱流束点 A での圧力変動と比べると、激しい気泡微細化現象が生じたときの圧力変動は大きく激しいことがわかる。それとは反対に伝熱面温度の変動は図 5 と比べて安定で小

さいものとなっている。これは激しく射出された微細化気泡によって周囲液体がかくはんされ、その結果固液接触が伝熱面全体で促進されて伝熱面温度が一様化したものと思われる。実際、高サブクール度での激しい気泡微細化現象は、伝熱面に針でついたような無数の壊食こんをもたらす。この特色はキャビテーション気泡の崩壊時に、近くの固体壁にみられるもの⁽¹¹⁾と類似している。したがって激しい気泡微細化現象がキャビテーション気泡の成長崩壊と類似の機構を持つならば、伝熱面近くで気泡塊が崩壊し、その結果生じた液体マイクロジェットによって伝熱面に液体が供給されるという機構を想像することも可能であろう。一方、比較的低サブクール度では上記の壊食こんをみることはできず、その最大到達熱流束も小さい。このことから、もし気泡微細化現象が上記の機構を持つと仮定するならば、伝熱面近くの気泡塊の崩壊をもたらすのに、サブクール液体による凝縮効果が大きな影響を持つものと考えられる。

3.2 静かな気泡微細化現象

図 7 に静かな気泡

図 4 激しい気泡微細化現象時の沸騰曲線

図 5 CHF 時(図 4 中点 A)の圧力および温度変動

図 6 激しい気泡微細化沸騰時(図 4 中点 B)の圧力および温度変動

微細化現象が発生したときの沸騰曲線の例を示す。激しい気泡微細化現象が生じたときと同様に、核沸騰の限界熱流束点を過ぎた後、伝熱面温度の上昇は遷移沸騰領域でいったん止まり、沸騰曲線はわずかに正の傾きを持つ。サブクール度および流速によってはここで激しい気泡微細化現象が発生することもあるが、静かな気泡微細化現象が発生しやすい低サブクール度の場合、大きな熱流束の上昇は得られない。その後、伝熱面温度を上昇させると、伝熱面上に限界熱流束時の最大気泡径より小さいスラグ状の気泡塊を形成する。伝熱面過熱度が 110°C 以上になると、この気泡塊が薄く押しつぶされるような形で静かな気泡微細化現象が発生する。静かな気泡微細化現象は比較的広範囲の伝熱面過熱度で緩やかな熱流束の上昇を示す。

図8は、図7で示される静かな気泡微細化現象が生じたときの、図7中点Cでの圧力および温度の変動である。なお図5, 6と同様にオフセット電圧はあらかじめカットしてある。どちらの変動も激しい気泡微細化現象のもの(図6)と比べるとかなり小さいことがわかる。このとき射出された微細気泡の運動は、激しい気泡微細化現象のそれとは対照的で、主流に逆らったり、広範囲の液体との激しい混合は呈さず、そのまま主流上を移動する。いくつかの実験条件では、水の熱力学的過熱限界温度⁽¹²⁾を 50 K 以上も超えた伝熱面過熱度でのデータが見受けられる。ヘッドタンクと沸騰容器との位置水頭は小さなものであり、かつ上記のように気泡の射出スピードも小さいことを考慮すると、過熱限界温度が大きく変わるような圧力変化は生じないと思われる。したがって静かな気泡微細化現象において蒸気膜の斉時的崩壊による固液接触サイクルが存在する可能性はきわめて小さいものと考えられ

る⁽¹³⁾。さらに伝熱面の直径は 15 mm までの小さいものであったので、伝熱面端部を特異点とする伝ば型固液接触モードを形成する条件にあるといえる。またサブクール度が大きい場合、伝ばの崩壊様式において極小熱流束点温度は過熱限界温度を大きく超えるという報告⁽¹³⁾があることを考慮すると、このことが静かな気泡微細化現象の発生に関連している可能性がある。なおこのときの沸騰音は「シュー」といった管路の空気漏れを小さくしたようなものであった。

3.3 二つの気泡微細化現象の形態領域図 以上を示した二つの気泡微細化現象は実験条件によって発生状況が異なる。図9は種々のサブクール度および流速で、熱流束をおよそ 10^7 W/m^2 まで上昇させたときに、いずれの気泡微細化現象が生じたかを示した沸騰形態領域図である。黒は激しい気泡微細化現象、白は静かな気泡微細化現象、 Δ は気泡微細化現象が生じていないことを示す。また、 $\bigcirc$ ●●はある特定の時間においていずれかの気泡微細化状態が安定して生じていることを示し(すなわち●は遷移沸騰の前半に激しい気泡微細化現象が安定して生じた後、ある熱流束でその最大値に達し、その後遷移して後半に静かな気泡微細化現象が安定して生じていることを示している)、■は激しい気泡微細化現象と静かな気泡微細化現象の間で周期的に往復変動していることを示している。全体的な傾向としては、流速、サブクール度ともに大のときには激しい気泡微細化現象が支配的となり、逆に低流速、低サブクール度では静かな気泡微細化現象が優勢となる。すなわち伝熱面へ十分な液体供給が行われる流速で、また蒸気膜を凝縮作用によって薄くし、固液接触を促すようなサブクール度で激しい気泡微細化現象が生じやすく、逆に、固液接触を十分促進できないような条件では静かな気泡微細化現象が支配的に

図7 静かな気泡微細化現象時の沸騰曲線

図8 静かな気泡微細化沸騰時(図7中点C)の圧力および温度変動

図 10 激しい気泡微細化現象と静かな気泡微細化現象間に生じる周期的往復変動時 (図 9 中点 D) の圧力および温度の変動

なる。

■は二つの気泡微細化現象間での往復変動が生じる領域であるが、このときの圧力変動および伝熱面下 2 mm での温度の変動成分の例 (図 9 中点 D) を図 5, 6, 8 と同様に図 10 に示す。ただし、温度の変動については急激な変化の様子を示すために微分波形を示した。図 10 から、激しい気泡微細化沸騰の様相を持つ現象と静かな気泡微細化沸騰の様相を持つ現象が 2~6 s 程度の間隔で交互に生じているのがわかる。激しい気泡微細化現象の様相から静かな気泡微細化現象の様相になると伝熱面温度は急激に上昇し、逆に静かな気泡微細化現象の様相から激しい気泡微細化現象の様相に移移すると伝熱面温度は急降下する。ヒータの入力を

図 11 激しい気泡微細化現象と静かな気泡微細化現象間に生じる周期的往復変動時 (図 9 中点 D) の温度の変動

図 12 激しい気泡微細化現象と静かな気泡微細化現象間に生じる周期的往復変動時 (図 9 中点 D) の沸騰曲線

増加させていくとこの間隔は短くなっていき、最終的には膜沸騰に移る。図 11 は上記の温度変動を図 10 とは異なる瞬間において表示したものである。図 11 のような温度変化を周期的に示すことから、温度 T_1 および T_2 を準定常状態とみなして求めた沸騰曲線が図 12 である。参考のため各気泡微細化現象が安定して生じる他の実験条件で得られた、激しい気泡微細化現象と静かな気泡微細化現象の沸騰曲線を、図 12 中に実線で示す。これらと比較するとそれぞれ同一の傾向を持つことから、この往復変動はその沸騰様相と同様に、激しい気泡微細化現象と静かな気泡微細化現象が交互に生じているものと考えて差し支えないであろう。

4. ま と め

水平上向き伝熱面に対し、周囲からサブクール水を供給し、垂直上方に吸い込む流動形式を用いた強制対

流沸騰の実験を行い、気泡微細化現象が二つの形態を持つことを明らかにした。気泡微細化現象がいずれの形態を呈するかはサブクール度および流速に大きく依存し、また、条件によっては両者の間で往復する変動が生じることが、圧力および温度の変動を同時測定した結果などから明らかになった。

終わりに臨み、本研究に対し適切なお助言を与えてくださった石巻専修大学理工学部 武山斌郎教授、実験装置の作成にご協力いただいた本学機械工学科工場伊東憲男技官に謝意を表す。

文 献

- (1) 土屋, 第7回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1970),

93.
 (2) 西川・ほか3名, 機論, 34-257, (1968), 134.
 (3) 稲田・ほか3名, 機論, 47-417, B (1981), 852.
 (4) 稲田・ほか3名, 機論, 47-422, B (1981), 2021.
 (5) 稲田・ほか2名, 機論, 47-422, B (1981), 2030.
 (6) 稲田・ほか3名, 機論, 47-423, B (1981), 2199.
 (7) 藤林・ほか2名, 機論, 51-463, B (1985), 919.
 (8) Hirono, Y., ほか3名, *JSME Int. J.*, 30-266 (1987), 1282.
 (9) Aziz, S., ほか2名, *Proc. 8th Int. Heat Transf. Conf.*, 5 (1986), 2149.
 (10) 菊地・ほか2名, 機論, 54-506, B (1988), 2830.
 (11) 例えば, Tomita, Y. and Shima, A., *J. Fluid Mech.*, 169 (1986), 535.
 (12) Lienhard, J. H., *Chem. Eng. Sci.*, 31-9 (1976), 847.
 (13) 西尾・坂口, 機論, 53-490, B (1987), 1781.