鉛直平面からの気泡微細化沸騰における気泡の挙動と圧力変動*

熊谷 哲^{*1}, 川端 和典^{*2}
吉川 浩行^{*1}, 島田 了八^{*3}

Bubble Motion and Pressure Fluctuation in Microbubble Emission Boiling from a Vertical Surface

Satoshi KUMAGAI, Kazunori KAWABATA,
Hiroyuki YOSHIKAWA and Ryohachi SHIMADA

High heat flux far exceeding CHF in microbubble emission boiling (MEB) should be considered a result of violent growing and collapsing behavior of coalescent bubbles in that regime, which introduces subcooled liquid to the surface to make steady solid-liquid contact even in the high surface temperature region. This bubble behavior generates a moment of high pressure in the vicinity of the surface. In this study, a measurement of the pressure fluctuation in the liquid near the surface was performed synchronously with a recording of the bubble motion by a high speed video camera. The experimental results reveal that the peak value of the pressure fluctuation corresponds to the bubble collapse. The image processing method was also applied to the video pictures to analyze the bubble motion and some information was obtained.

Key Words: Phase Change, Boiling Heat Transfer, Microbubble Emission Boiling, Bubble Motion Pressure Fluctuation, Vertical Surface, Parallel Flow

1. 緒 言

これまで三つのタイプが報告されている気泡微細化沸騰 (MEB) の機構に関して, 高熱流束を実現する S-MEB I, S-MEB II においては, 伝熱面上に形成される気泡が崩壊する際, 気泡は伝熱面に向かって収縮し崩壊するのが観察され^①, また, 崩壊時の気泡の挙動は, 熱流束の増加とともに慣性支配的な性格が強まる傾向を示す^②ことから, この気泡の動きに伴うサブクール液の伝熱面への流入が予想される. また, 従来の研究^③で測定された MEB に特徴的な伝熱面近傍の圧力変動は, 気泡の動きと密接な関係があるものと思われるが, どのような気泡挙動によって圧力がどう変動しているのかは明らかになっていない.

そこで本研究では, MEB における伝熱機構の解明を最終の目的として, 鉛直伝熱面・上向き並行流沸騰系で, 伝熱面近傍の圧力変動の測定と同期させて, ハイスピード・ビデオカメラによる気泡挙動の撮影を行い, 圧力変動と気泡の動きとの関係を明らかにする.

また, ビデオ画像のデータ処理をとおして, 気泡の挙動の把握を試みる.

2. 実験装置

用いた実験装置は基本的に前報^④と同じであり, その測定部周りの概要を図 1 に示す. すなわち, 5 mm×10 mm の鉛直伝熱面に並行に下から上へ向かって所定の温

Fig. 1 Experimental set up

* 原稿受付 1998 年 7 月 24 日.

*¹ 正員, 東北大学大学院工学研究科 (☎ 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 01).*² 東北大学大学院 [現: トヨタ自動車(株)].*³ 正員, 石巻専修大学理工学部 (☎ 986-8580 石巻市南境新水戸 1).

E-mail: kumagai@verdure.mech.tohoku.ac.jp

度、流速のサブクール水を供給する。伝熱面と同一高さに圧力変換器を設置し、その受圧面と伝熱面の距離は15 mmとした。気泡挙動の観察にはハイスピード・ビデオカメラを使用し、撮影された映像はデジタル・データとして保存、画像処理される。また、同期撮影はトリガ信号をハイスピード・ビデオカメラとFFTアナライザに入力することにより行う。なお、ハイスピード・ビデオカメラはトリガ待ちの状態において、撮影速度に対応したサンプリング時間で画像を取り込んでいるが、トリガ信号が入力されると、その後最初にサンプリングされた画像から記録を始める。すなわち、トリガ信号が入力されてから実際に画像が記録されるまでの遅れ時間は、最大でそれぞれの撮影速度における1コマ分の時間である。

記 号

- f : 圧力変動の周波数
- f_p : ピーク周波数 および 気泡崩壊周波数
- H : 気泡高さ
- P : 圧力
- q : 熱流束
- ΔT_{sat} : 伝熱面過熱度
- ΔT_{sub} : サブクール度
- v : 流速

3. 実験結果および考察

3.1 圧力変動と気泡挙動 図2は、本実験で得られた鉛直伝熱面での沸騰曲線の一例である。S-MEBは、発生する伝熱面過熱度領域によって二つのタイプに分けられる。一つは核沸騰にすぐ続くようなかたち

Fig. 2 Boiling curves of three types of MEB

で、伝熱面過熱度 ΔT_{sat} が 50 K 前後から始まる S-MEB I, 他は CHF からかなりの温度飛躍の後、 ΔT_{sat} が 100 K を超えたあたりで CHF より熱流束が低下したところから始まる S-MEB II である。どちらのタイプが生じるかは供試水のサブクール度と流速に支配され、一般に高サブクール、高流速でタイプ I, 低サブクール、低流速でタイプ II が生じやすい⁽⁴⁾。本報のような並行流の系では、およそ $\Delta T_{sub} \geq 50$ K でタイプ I, 50 K $> \Delta T_{sub} \geq 25$ K でタイプ II が発生する。流速は鉛直伝熱面の場合 $v \geq 0.1$ m/s が必要である。C-MEB は S-MEB II と同程度の ΔT_{sat} から始まるが、その後の熱流束の増加割合は小さい。 $\Delta T_{sub}=20$ K 前後で発生する。

図3に、鉛直伝熱面において、 $\Delta T_{sub}=60$ K, $v = 0.1$ m/s でタイプ I の S-MEB が発生した条件での圧力変動波形を示す。測定位置は図2の沸騰曲線に示してあり、(a) は核沸騰, (b) は発達した S-MEB I の状態にある。S-MEB I における圧力変動は核沸騰のものよりはるかに大きく、鋭いピークを持つ周期的な波形であることがわかる。圧力は最小値をとった後上昇し始めるが、あるところで急激に、ほぼ垂直に上昇する。これはとくに図3(b)の0~6 ms 付近までの最初の三つのピークおよび約14 ms 以降のピークに顕著に見ることができる。

このときの圧力変動の測定に同期させて、高速ビデオにより気泡挙動を撮影した結果が図4である。1コマ目の写真の中で白帯は伝熱面の位置を示しており、サブクール水は下から上に向かって流れている。圧力のグラフの中の番号と写真の番号は対応している。これによると、伝熱面のほぼ全体を覆っていた気泡は圧力

Fig. 3 Pressure fluctuation in nucleate boiling and S-MEB I

の上昇とともに体積が減少し、伝熱面に向かって崩壊している(10, 11コマ)。その後は気泡が崩壊した位置あたりから次の気泡が生成し、成長していく。また気泡の成長期間(12~20コマ)において圧力は減少している。気泡の崩壊から成長にかけては(10~13コマ)ははっきりとした気泡の輪郭が消え、伝熱面中央には白くぼんやりした部分が現れる。この部分は徐々に体積を減少させてきた気泡があるときから急速に崩壊し、無数の微細な気泡になって噴き出したものであると考えられる。気泡が崩壊する際の気泡体積の減少速度はきわめて速く、このことから、伝熱面近傍の流体は気泡界面の移動にともない高速液流となって伝熱面に向かうことになる。

現在のところCHFは、合体泡下の薄液膜が、合体泡が離脱するまでにちょうど消耗されるときに起こるとい説⁽⁶⁾が有力である。気泡微細化沸騰がCHFを上回る熱流束を維持するためには、このときに形成される薄液膜よりも多くの液体が、何らかのかたちで伝熱面に供給されなければならないが、それを可能にしているのが、気泡の崩壊に伴う伝熱面へのサブクール液の

Fig. 4 Bubble behavior corresponding to pressure waveform in S-MEB I (13,500 flame/sec)

突入であろうと推察できる。なお、このサブクール度では伝熱面上に気泡は基本的に1個であったが、この写真の上流側に見られるように、希に伝熱面の周辺部にも小さめの気泡が発生することがある。

図2の $\Delta T_{\text{sub}} = 30 \text{ K}$, $v = 0.1 \text{ m/s}$ でタイプIIのS-MEBが発生したときの沸騰曲線中の、点(c)における圧力変動の典型的なものを図5に示す。S-MEB IIでは伝熱面温度、熱流束ともかなり大きく変動するが、ここに示したものは比較的安定しているときのものである。タイプIIの圧力変動もタイプIのものと類似して、鋭いピークをもつ波形が周期的に繰り返されるが、変動の周期は短くなっている。同期撮影した結果を見ると、タイプIIではタイプIのように伝熱面中央付近に1個の気泡が存在する場合よりも、伝熱面中央より下流側と上流側の2箇所に発生する場合が多く、それらが別個に成長、崩壊を繰り返すのが観察され、それと呼応して圧力が変動した。したがって、図5において圧力の変動周期が短くなるのは、伝熱面上に発生する気泡の数が増えることによると考えられる。

図6は、図2の $\Delta T_{\text{sub}} = 20 \text{ K}$, $v = 0.1 \text{ m/s}$ でC-MEBが発生したときの沸騰曲線中の(d)における圧力変動である。このときの圧力変動は核沸騰より大きいものの、S-MEB IやIIと比較すると小さく、また波形も鋭いピークを呈さない。沸騰の様相は多数の小さな気泡が伝熱面全体を覆い、それぞれが成長・崩壊を繰り返しており、これらの気泡群の厚さはS-MEB IIよりもさらに減少し、伝熱面に向かって薄く押し付けられたように見える。このようにC-MEBでは一つひとつの気泡

Fig. 5 Pressure fluctuation in S-MEB II (at point (c) in Fig. 2)

Fig. 6 Pressure fluctuation in C-MEB (at point (d) in Fig. 2)

が小さく、伝熱面に広く分布しているので、伝熱面上方で計測される圧力変動は、これらの気泡の影響が重なり合って、複雑な形となる。このため気泡挙動と圧力の変動波形とを対応させることは困難であった。

3.2 圧力変動の周波数特性 図7はそれぞれのMEBにおける圧力変動の1/3オクターブ中心周波数分布を、熱流束に対して三次元表示したものである。また、圧力レベルの高いところの位置がわかりやすいように、等高線による表示も図中に加えてある。図7(a)はタイプIのMEBが発生した条件での周波数特性であ

Fig. 7 Frequency characteristics of pressure fluctuation in each heat flux

る。核沸騰域では2000 Hz付近になだらかなピークがあり、また核沸騰の高熱流束では30~40 Hzにもピークが存在する。30~40 Hzのピークは合体泡の離脱に伴うものと考えられ、これが現れるとすぐにCHFを迎える。なお、これら二つのピークは他の条件の核沸騰高熱流束でも現れる。タイプIのMEBが発生すると、周波数分布は700 Hz付近にピークを持つようになる。久保ら⁽¹⁾はマイクロホンを用いた音圧の測定で、MEBが二つの卓越周波数を持つことを示している。一つは630~1250 Hzで、他は10000~16000 Hzでのピークであり、これらのピークはサブクール度や熱流束と密接な関係があるとしている。本実験の圧力変動での700 Hz付近のピークは彼らの第1のピークに対応すると思われる。しかし、圧力変動では2番目のピークは明確には現れなかった。図7(b)はタイプIIにおける周波数特性である。このタイプのMEBが発生すると、周波数分布はタイプIの場合よりやや高い、約900 Hzにピークを持つようになり、そのピーク値は熱流束の増加とともに大きくなる。図7(c)はC-MEBにおける周波数特性である。全体をとおして圧力レベルは低い。図7(a)に比べると、核沸騰では低い熱流束から合体泡の挙動に対応するピークが現れる。C-MEBが発生するとS-MEB IやIIよりも高い2000 Hz付近にピークが移動する。周波数分布の形状もS-MEB IやIIと比較するとなだらかになる。

S-MEB Iに対し、ビデオ撮影より得られた映像から、ある時間内に崩壊する気泡の数をカウントして気泡の崩壊周波数を求め、圧力変動のピーク周波数と比較した。これを熱流束に対してプロットしたのが図8であ

Fig. 8 Peak frequency of power spectrum and bubble collapsing frequency in S-MEB I ($\Delta T_{\text{sub}}=60 \text{ K}$)

Fig. 9 Contours of image processed result

る。両者はほぼ一致しているといえる。図には、先に著者ら⁹⁾が行った、同じ鉛直伝熱面での MEB の実験で得られた $\Delta T_{\text{sub}}=60$ K のデータも、併せて載せてある。彼らのものとも一致している。また、熱流束の増加に伴いずれの周波数も高くなっており、このことは熱流束が増加すると気泡の成長、崩壊のサイクルが速くなることを示している。

3.3 画像解析による気泡挙動の考察 ハイスピード・ビデオカメラを用いた同期撮影で得られた画像は、縦 128×横 128 の画素で構成されており、1 画素は明るさが 0 (黒) から 255 (白) まで 256 階調のグレースケールで表される。図 9 は各沸騰領域のそれぞれ 200 コマの画像データを記録し、それをもとに画像処理を行ったものである。すなわち、200 コマ分の画像のグレースケールの平均値と変動値の分布であり、平均値はそれぞれの MEB における典型的な気泡の形を表し、変動値は明⇄暗 (白⇄黒) の変化が激しい部分を表すといえる。図 9 (a) の核沸騰の場合、平均値の画像からは孤立気泡の輪郭がよくわかる。図 9 (b) の CHF では、平均値の画像には核沸騰とは異なる伝熱面全体に薄く広がった気泡が見られる。変動値の画像は、伝熱面が

Fig. 10 Comparison of pressure fluctuation (P), bubble height (H) and image processed bubble area

ら離脱する合体泡が、伝熱面に沿って上方へ移動するにしたがい、体積を増しながら離脱していく様子を表している。図 9 (c), (d) の S-MEB I, S-MEB II はともに伝熱面から垂直方向へ気泡が射出されることが確認できる。とくに変動値の画像から、伝熱面から射出された微細気泡は、CHF の場合のようにサブクール水の流動方向に添って流されるといったことはなく、伝熱面に垂直方向に強く噴き出しているのがわかる。また、S-MEB II では主流のサブクール度が高くないため気泡が大きく成長することから、伝熱面から離れた位置でも平均値や変動値が大きい。これに対し、図 9 (e) の C-MEB の場合、サブクール度はさらに小さいにもかかわらず大気泡になりやすく、平均値は伝熱面に薄く押しつぶされたような気泡の特徴を表している。変動値からは、伝熱面から射出された微細気泡が主流に添って流れていく様子がわかる。これより、気泡の射出の様子が S-MEB I と S-MEB II では共通点が多く、C-MEB では大きく異なることが確認された。

画像上で気泡が存在する場所は白く見えることから、グレースケールに敷居値を設けて白と黒の 2 値化を行い、1 コマについて白である画素の和をとり、これを近似的にそのコマにおける気泡の大きさと見なし、時間変化を求めた。S-MEB I について圧力変動波形、気泡高さの変動とこの気泡の大きさととの比較を図 10 に示す。画像処理による気泡量と画面上での実測による気泡高さと圧力変動を比較すると、同期撮影で見れたように、圧力が急上昇しピークに達するとき、気泡高さは減少し崩壊に至る。しかも気泡高さが減少するにし

たがい傾きが急になり、崩壊の速度が大きくなることがわかる。画像処理による気泡量は、大きい気泡が安定して伝熱面上に存在するとき光が透過しやすく、図の 9 ミリ秒、12 ミリ秒で見られるように気泡高さが高いにもかかわらず白度が低下してしまうなど、実際の気泡体積を正確に表しているとはいいがたいが、全体としての傾向は画面上での実測による気泡高さと、とくに気泡が崩壊するところではよく一致しており、画像処理を用いた気泡の崩壊挙動の計測の可能性が示されているといえる。撮影における照明などの改善を行えば、より信頼性の高い評価が可能になろう。

4. まとめ

気泡微細化沸騰について、ハイスピード・ビデオカメラによる気泡挙動と圧力変動の同期測定の結果、S-MEB I では気泡の崩壊とともに圧力値が急激に増加し、鋭いピークになることが明らかになった。気泡崩壊にともなう伝熱面へのサブクール液の流入が高熱流束を可能にするものと思われる。S-MEB II でも S-MEB I と同様に鋭いピークをもつ周期的圧力変動波形が現れるが、その周期は S-MEB I よりも短い。また、画像処理による気泡挙動の評価の可能性が示された。

文 献

- (1) 久保・島田・熊谷, 機論, **59**-557 B (1993), 183-190
- (2) 熊谷・久保, 機論, **65**-629 B (1999), 296-300
- (3) 熊谷・川崎, 機論, **65**-631 B (1999), 1055-1060
- (4) 熊谷・久保・川崎, 機論, **64**-627 B (1998), 3808-3813
- (5) 原村・甲藤, 機論, **49**-445 B (1983), 1919-1927