

気泡微細化沸騰におけるボイド信号に基づく固液接触の考察*

熊谷 哲^{*1}, 兎原 剛 史^{*2}
中田 俊彦^{*1}, 泉 正 明^{*3}

Liquid-Solid Contact in Microbubble Emission Boiling through Void Signals

Satoshi KUMAGAI^{*4}, Tsuyoshi UHARA,
Toshihiko NAKATA and Masaaki IZUMI^{*4} Department of Machine Intelligence and Systems Engineering, Tohoku University,
01 Aramaki-Aoba, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 980-8579 Japan

The high heat flux in MEB far exceeding CHF should be considered a result of violent growing and collapsing behavior of coalescent bubbles in that region, which strongly introduces subcooled liquid to the heated surface. This bubble behavior generates a 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 use of a void probe set close to the surface. In high liquid subcooling conditions (S-MEB I), the void probe signal in the vicinity of the surface shows regular cyclic behavior synchronous with the pressure waveform. Under a medium subcooling condition (S-MEB II), there appear three different modes in the void signal in sequence. The one looks random and does not synchronize with the pressure waveform. The another is very systematic and similar to the signal in high liquid subcooling. The other shows a constant void fraction of a high value, indicating the surface to be covered with a thick vapor blanket. The time fraction of the second mode increases gradually with increasing the heat flux.

Key Words: Phase Change, Boiling Heat Transfer, Microbubble Emission Boiling, Void Signal, Pressure Fluctuation, Bubble Behavior

1. 緒 言

サブクール沸騰では、サブクール度や流速の条件によって、遷移沸騰の途中から伝熱面温度の増加に対し熱流束が減少せず、逆に急上昇する現象、すなわち気泡微細化沸騰（以後 MEB と略）が現れる。このとき熱流束は限界熱流束（CHF）の数倍に達する。

従来の研究で著者ら⁽¹⁾は、MEBをその様相等によって3種類に分類した。すなわち、激しい微細化沸騰 I, II (S-MEB I, S-MEB II) と静かな気泡微細化沸騰 (C-MEB) である。久保ら⁽²⁾は高速度写真による気泡挙動の観察を行い、S-MEB I では、気泡の崩壊が伝熱面に向かって生じ、その崩壊速度は大きく、慣性支配的な傾向を示し、キャビテーション気泡の崩壊と同様の特性を持つこと、および、熱流束の増加に伴いその傾向が強くなることを示した。さらに気泡微細化沸騰における伝熱面の壊食機構の検討⁽³⁾から、それが液体微小噴流により生じた可能性が大きいと結論してい

る。川端ら⁽⁴⁾は高速度ビデオカメラを用いて、伝熱面上方の圧力変動と気泡挙動の同期撮影を行い、気泡の崩壊とともに圧力が急激に上昇し、鋭いピークとなることを示した。さらに、伝熱面直上の流体温度変動の測定では、気泡崩壊直後に温度が低下することから、サブクール水の伝熱面への突入を確認した⁽⁵⁾。

一方、佐藤ら⁽⁶⁾や鈴木ら⁽⁷⁾は矩形および円管流路内に設置した伝熱面からの気泡微細化沸騰についてその発生条件を調べ、サブクール度と流速が大きい程微細化現象が激しいことなどを報告し、気泡挙動と圧力変動から著者らとはやや異なる分類を提示した。

これらの研究から S-MEB においては、気泡崩壊時の液体微小噴流の存在と、それによる伝熱面への液体の強制的な供給が予測されている。本研究では、ボイド測定用の探針電極⁽⁸⁾を用いて気泡の動きを直接捉えることにより、S-MEBにおける伝熱面上での気液交換の周期的挙動を明らかにする。さらに、圧力変動や温度変動との同期測定により、高圧発生と気泡挙動の相互関係を明らかにするとともに、S-MEB I と II の伝熱機構の違いについて考察を試みる。

2. 実験装置および方法

図1に実験装置の概略を示す。伝熱面は銅ブロック

* 原稿受付 2000 年 11 月 10 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} 東京電力(株) (〒979-0402 福島県双葉郡広野町大字下北道字二ツ沼 58)。^{*3} 正員, 宮城工業高等専門学校 (〒989-3124 名取市愛島塩手字野田山 48)。

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

①の上端面で、流れに対し幅 5mm×長さ10mm の矩形である。供試液体は比抵抗 $5 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ 以上のイオン交換水であり、水槽④内で所定のサブクール度に保たれる。このサブクール水は沸騰容器③に導かれ、幅 15mm、高さ 6mm の矩形ノズルから伝熱面に沿って供給される。サブクール度はノズル出口上流に取り付けた熱電対によって測定され、実験中は誤差 $\pm 0.5^\circ \text{C}$ の範囲内で一定に制御された。供試水の流速はノズル出口の平均流速で代表し、 1.0 m/s で一定とした。

伝熱面上の気液状態の変化の測定には、図2 に示す探針電極を用いた。探針電極と伝熱ブロックの間に抵抗を介して10Vの直流電圧を印加し、気相と液相の電気伝導度の違いによって生じる電圧変化を、直流増幅器を通した後 FFTアナライザで測定する。探針電極はその先端のみが流体に露出しており、精密トラバース装置に取り付けられ、伝熱面に対し垂直に移動できる。伝熱面直上の流体の温度変動は、測温接点伝熱面表面にほとんど接するように（隙間 0.01 mm 以下）中央の位置に設置した線径 $25.4 \mu\text{m}$ のクロメル・アルメル熱電対によって測定する。このとき、探針電極の先端は熱電対の上流側 0.5 mm に位置する。伝熱面近傍の圧力変動は、伝熱面上方に設置した半導体圧力変換器により測定し、ハイパスフィルタを通してFFTアナライザに取り込む。圧力変換器の受圧部の直径は 5 mm であり、一次共振周波数は 60 kHz 以上である。圧力変換器の受圧面と伝熱面の距離は、ノズルからの流れを極力乱さず、かつ伝熱面に近い位置として、ノズル出口の高さと同じ 6 mm とした。

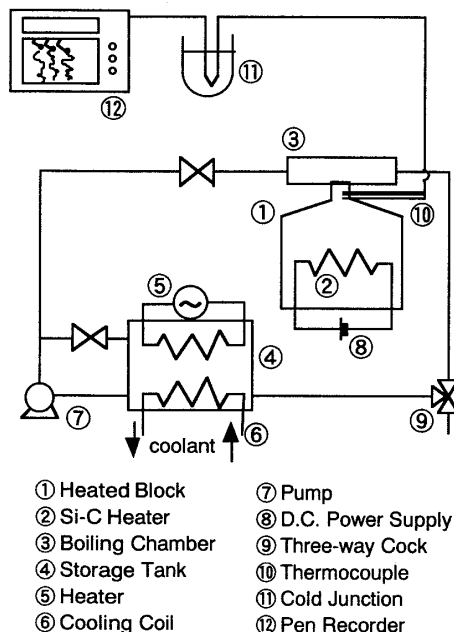


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

伝熱面は各実験開始前に #1000 の耐水紙で研磨の後、エタノール、アセトン、純水で順に洗浄し、実験ごとに伝熱面の性状を一定に保った。各実験前には2時間程度の脱気を行う。伝熱面温度は、銅ブロック上部の角柱首部に挿入した3本の直径 0.25 mm クロメル・アルメル熱電対によってこの部分での温度分布を求め、これを表面まで外挿することによって求めた。また、この首部では一次元熱伝導を仮定し、ここでの温度勾配から熱流束を求めている。実験はステップ状に熱流束を小刻みに増加させる方向で行い、各測定は熱電対の出力から、定常あるいは準定常状態であることを確認したうえで行った。1回の実験に要する時間は6～9時間である。

3. 実験結果および考察

3.1 沸騰曲線 本実験で得られた代表的な沸騰曲線を図3に示す。サブクール度 60 K では、過熱度約 20 K から核沸騰が開始し、熱流束約 10 MW/m^2 付近で CHF を迎える。その後過熱度が 20 K 程度急上昇した後、わずかな過熱度の上昇に対し熱流束が CHF をはるかに超えて上昇する気泡微細化沸騰 (S-MEB I) が発生する。

サブクール度 30 K の場合は $\Delta T_{\text{sub}} = 60 \text{ K}$ のときの半分程度の熱流束 (5.4 MW/m^2) で CHF となる。その後過熱度約 60 K まで熱流束の増加がほとんどないまま

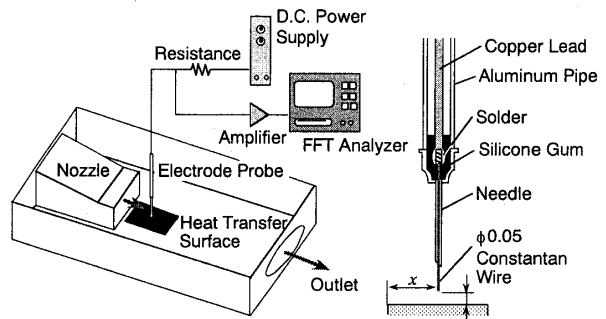


Fig. 2 Test section and void probe

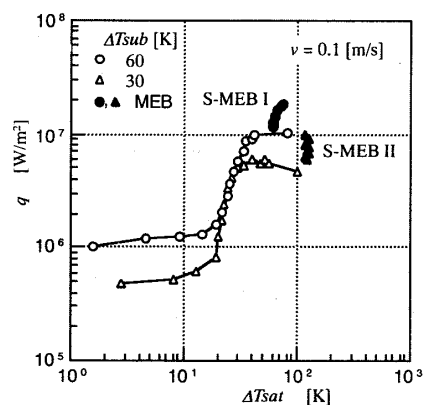


Fig. 3 Boiling curves including two types of MEB

過熱度が徐々に上昇する状況を経て過熱度が急上昇した後、熱流束が上昇してタイプ II の気泡微細化沸騰が開始する。このとき熱流束や過熱度の変動はかなり大きい。

3.2 探針電極のボイド信号

3.2.1 核沸騰 $\Delta T_{sub} = 60$ K での各沸騰域において得られた探針電極のボイド信号の波形を図 4 に示す。s は伝熱面から探針電極先端までの距離を表す。図 4(a) は核沸騰のもので、高速 VTR による観察との照合から、伝熱面上で発生した孤立気泡の生長・離脱を捉えたものである。このとき探針電極の出力は、電極先端に気泡が接した瞬間から電圧が急上昇し始め（例えば図中の点 A）、その後気泡に接している間高い電圧を維持し、気泡からはずれて液体に接した時点（図中の点 B）から電圧が降下し始める。この測定点では、気泡が成長を始めてから離脱するまでの時間は 0.16~0.40 ms であった。

図 4(b) は CHF 付近での測定結果である。時間軸は他の図に比べ 1/4 に縮めてある。この図では約 37 ms から 47 ms にかけて合体泡の生長・離脱が捉えられている。それ以外の時間における細かい振動は、一次気

泡の動きを捉えたものである。

3.2.2 S-MEB I 図 4(c) は S-MEB I ($\Delta T_{sub} = 60$ K) の比較的低熱流束における測定結果である。ここの波形は核沸騰、CHF のそれとは明らかに異なっており、気泡の挙動が大きく変化したことがわかる。すなわち、比較的小さい寿命の合体泡の規則的な生長・崩壊である。これは高速 VTR の観察からも確認された。気泡の生長開始から崩壊までの時間は 0.4~3.3 ms でや幅がある。

図 4(d) は S-MEB I の高熱流束でのもので、(c) に比べ非常に強い周期性をもって気泡が生長・崩壊しており、またその頻度が増加している。このとき気泡の生長開始から崩壊までの時間は 0.9~1.4 ms 程度である。

3.2.3 S-MEB II 図 5 (i)~(iii) に S-MEB II ($\Delta T_{sub} = 30$ K) での測定結果を示す。これらの図は全体が連続した時間での波形である。ここでは大きく分けて三つの状態が観察された。まず 0~40 ms に見られる (i) 不規則な気泡の挙動を示す状態、次に 40~74 ms に見られるような (ii) 周期性の強い状態、そして 85~119 ms に見られる (iii) 蒸気膜に覆われている状態であり、これらの状態を繰り返しながら準定常状態が保たれている。

この測定点において、5.12 秒のサンプリング時間の中でそれぞれの状態が占める割合は、(i) が 52.5 %、(ii) が 27.5 %、(iii) が 20 % であり、それぞれの状態の

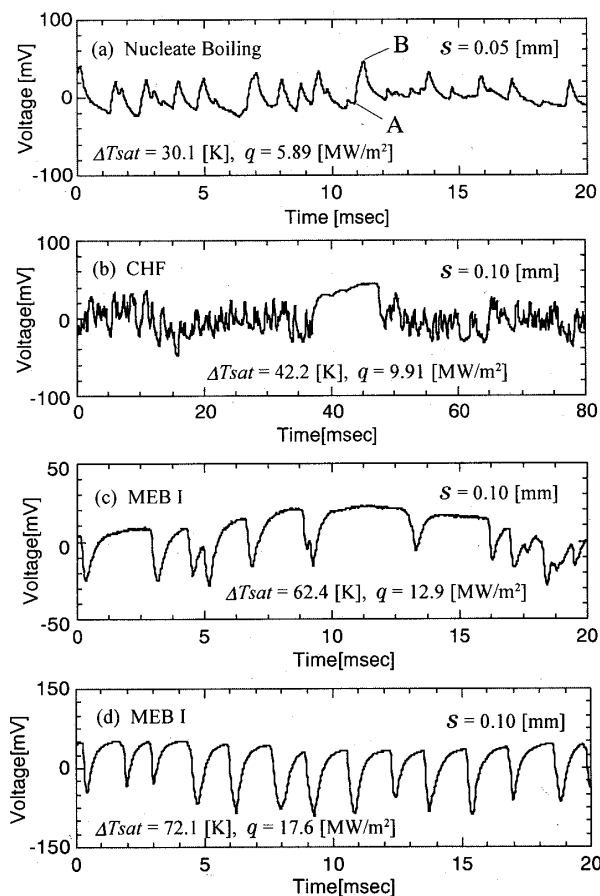


Fig. 4 Void signal of the electrode probe in each boiling regime for $\Delta T_{sub} = 60$ K including S-MEB I

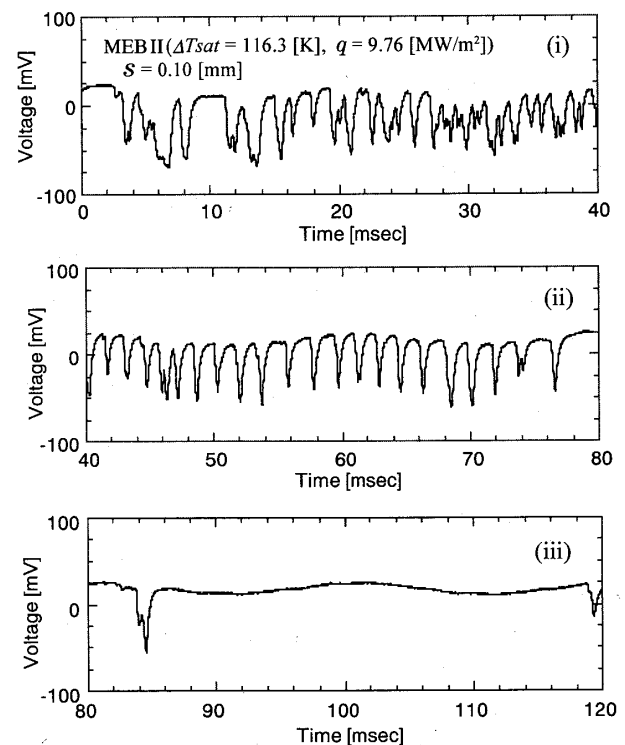


Fig. 5 Void signal of the electrode probe in S-MEB II under $\Delta T_{sub} = 30$ K

持続時間の平均は (i) 51.6 ms, (ii) 38.0 ms, (iii) 41.1 ms, それらの出現度数は (i) 52回, (ii) 37回, (iii) 25回であった. 他の条件, 例えばこれより熱流束の低い $q = 7.0 \text{ MW/m}^2$ では, (i) の状態の時間割合および持続時間が増加し, (ii) と (iii) でそれらが減少した. しかし全体としては必ずしも熱流束の増加に対して (i) でのそれらの減少と (iii) での増加は認められなかった. 一方, (ii) については熱流束の増加に伴いその時間割合および平均持続時間の増加が確認された. (ii) の占める時間割合と熱流束の関係を図 6 に示す. 実験範囲内で比例的な関係が認められる. またこのときの (ii) の状態は, $\Delta T_{\text{sub}} = 60 \text{ K}$ における高熱流束域の S-MEB I での気泡の挙動と類似したものである. 気泡の生長開始から崩壊までの時間も $0.8 \sim 1.7 \text{ ms}$ であり, 高熱流束の S-MEB I と同程度のものである. このことから, (ii) の状態における伝熱機構が S-MEB I と類似したものであると推測できる. すなわち, 加熱量の増加に対して主に (ii) の時間割合が増加することで, 伝達熱流束が上昇するものと考えられる.

3.3 ボイド信号と圧力変動の同期測定

3.3.1 $\Delta T_{\text{sub}} = 60 \text{ K}$ このサブクール条件での各沸騰領域における探針電極のボイド信号と圧力変動の同期測定結果を図 7 に示す. 図 7(a) は核沸騰のものである. 電極が捉えた孤立気泡に対応していると思われる圧力変動は見られない. 図 7(b) は CHF 域での結果で, 約 14 ms から 23 ms と 55 ms から 64 ms において電極は合体泡を捉えているが, これに対応する明らかな圧力変動は見られない. また一次気泡の挙動に対応していると思われる圧力変動も判然としない.

図 7(c) は S-MEB I における結果である. 気泡の崩壊時に圧力が急上昇していることがわかる. このとき, 電極先端が液体に接し始めたことを示す電圧の急降下開始から $0.1 \sim 0.2 \text{ ms}$ 遅れて圧力が急上昇している. これは気泡が伝熱面に向かって崩壊することによるものと考えられる. 気泡崩壊時に圧力が急増するのは, 崩壊に伴い気液界面が伝熱面に衝突することに関与したものと推測されるが, このとき伝熱面から 0.5 mm

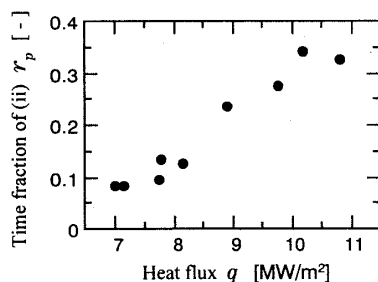


Fig. 6 Time fraction of mode (ii) vs. heat flux

上方にある電極先端が液体に接したわずか後に圧力がピークに達するということは, 伝熱面に向かう界面の動きを裏付けているものといえる. 圧力のピークは伝熱面の各位置での気泡の崩壊を表すことから, 図のように伝熱面中心で電極が捉えた気泡崩壊と圧力変動の周期が一致していることは, 伝熱面上には単一の気泡が存在することを示しており, これはVTRの観察でも確認されている.

3.3.2 $\Delta T_{\text{sub}} = 30 \text{ K}$ 図 8 (i)~(iii) は S-MEB II における結果である. 図の(i) は前節の S-MEB II の項で示した (i) 不規則な気泡挙動を示す状態にあたる. 小さな圧力のピークが見られ, やや鋭い波形を示すところもあるが, 気泡の挙動を示す電極信号との対応は明確ではない. 電極信号, 圧力変動ともに, 熱流束の増加に対しては変動の周期が短くなる傾向を示した.

図の(ii) は (ii) の気泡挙動に周期性があるところでの測定結果である. 電極が気泡を捉えた直後に圧力が急

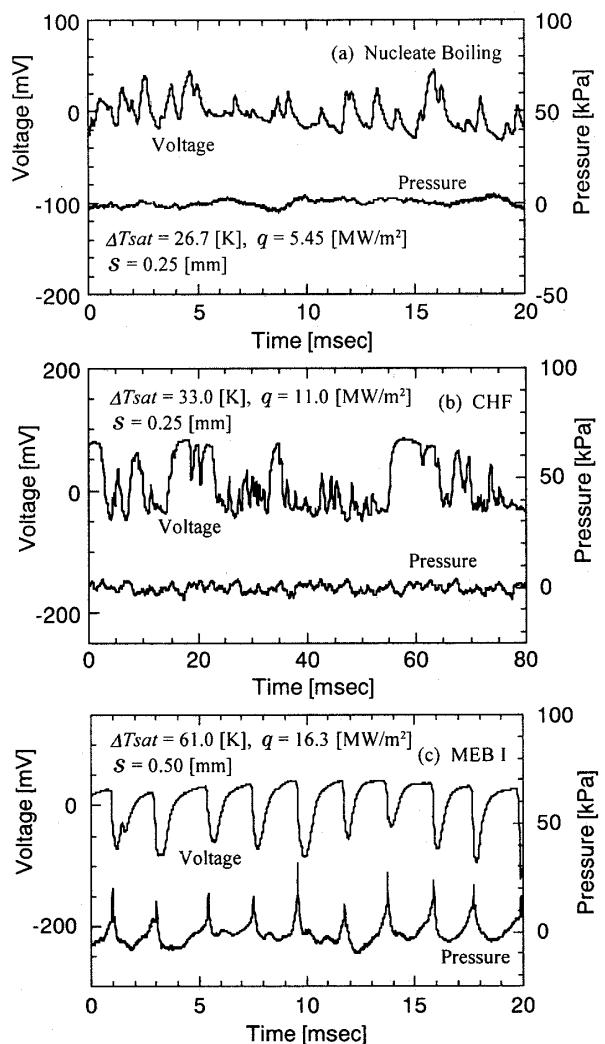


Fig. 7 Simultaneous void signal and pressure fluctuation in each boiling regime including S-MEB I under $\Delta T_{\text{sub}} = 60 \text{ K}$

上昇しており、 $\Delta T_{sub} = 60$ KにおけるS-MEB Iでの結果と非常によく似た傾向を示している。

図の(iii)は(iii)蒸気膜に覆われた状態(10 ms以降)での測定結果である。このときの圧力変動は鋭いピークが消え、全体の変動幅も小さい。

3.4 ボイド信号と温度変動の同期測定 S-MEB Iでのボイド信号と伝熱面直上の流体の温度変動の同期測定結果を図9に示す。電極が捉えた気泡の生長・崩壊と伝熱面上の流体の温度変動は同期しており、気泡の崩壊時に温度が降下することから、このときサブクール液体が伝熱面に供給されていることがわかる。この条件での伝熱面直上の流体の平均温度は87.7℃、変動幅は約38℃である。なお、図で0 Kは平均温度に相当する。これより低熱流束でも傾向は同様であり、平均温度もあまり違いはないが、変動幅は小さい($q = 13.0$ MW/m²で約28℃)。これは、高熱流束では気泡の崩壊がより多くの、また伝熱面から離れたより

低温のサブクール水を引き込むことを示している。

図10(i)~(iii)は、S-MEB IIでの結果である。図の(i)は3.2.3節で分類した(i)不規則な気泡挙動を示す期間でのもので、気泡の生長・崩壊にあわせて伝熱面上の温度も不規則に上昇、下降している。この条件で(i)

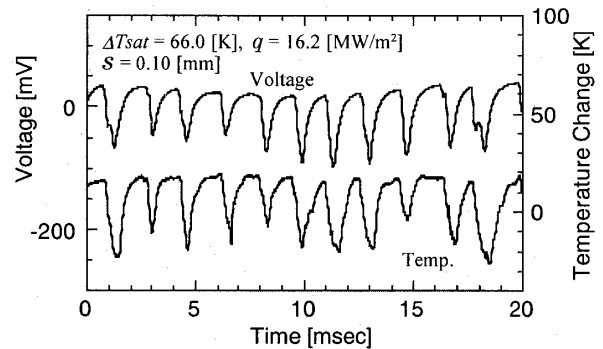


Fig. 9 Simultaneous void signal and temperature fluctuation in S-MEB I ($\Delta T_{sub} = 60$ K)

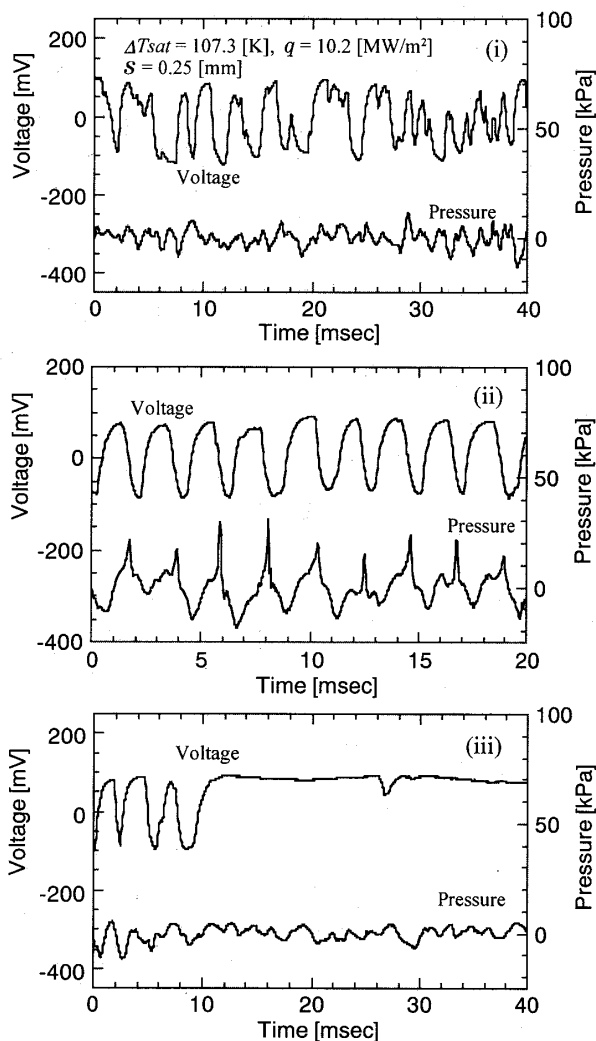


Fig. 8 Simultaneous void signal and pressure fluctuation in each of three modes of S-MEB II ($\Delta T_{sub} = 30$ K)

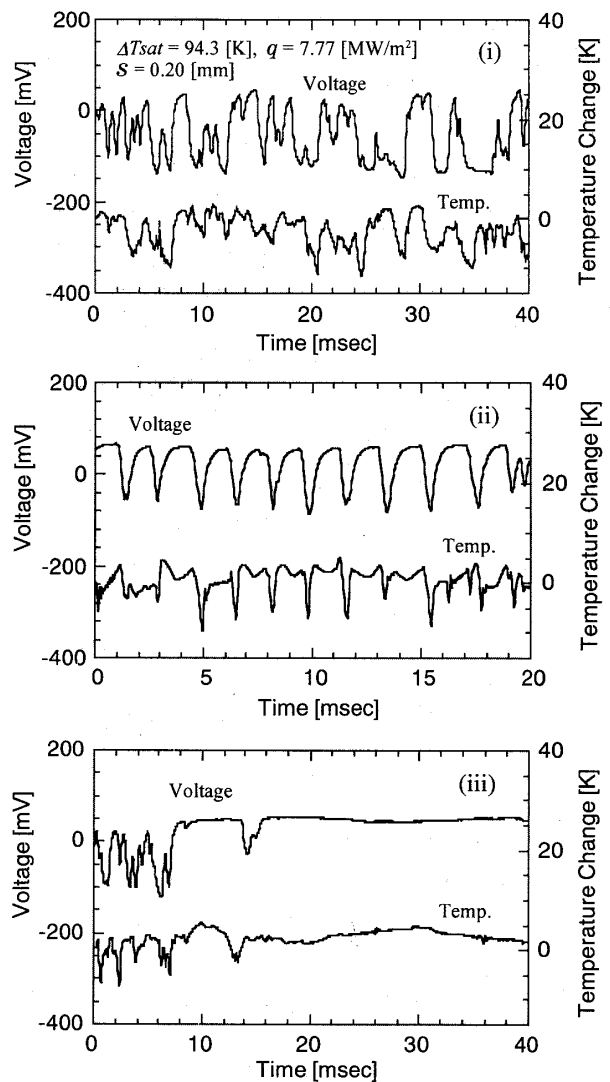


Fig. 10 Simultaneous void signal and temperature fluctuation in each of three modes of S-MEB II ($\Delta T_{sub} = 30$ K)

から (iii) 全体を通しての平均温度は 95.4°C 、変動幅は (i) で約 14°C である。図の (ii) は分類 (ii) の周期性をもった気泡挙動時の結果である。気泡の生長開始とともに伝熱面直上の温度が急上昇し、崩壊時に急激に低下しており、サブクール液体の流入を表していることは、S-MEB I の高熱流束での結果と同様であるが、変動幅は約 14°C で、S-MEB I に比べサブクール度が低い分小さい。(iii) は蒸気膜に覆われた状態であり、7 ms で電極が蒸気膜を捉えたのと同時に伝熱面直上の温度が上昇し、その後はほぼ一定の高い温度がある期間維持された。

3.5 伝熱面上の離れた位置でのボイド信号の同期測定

3.5.1 $\Delta T_{\text{sub}} = 60\text{ K}$ 長さ 10 mm の伝熱面の中心 ($x = 5\text{ mm}$) とそこから 2.5 mm 下流の位置での探針電極信号の同期測定を行った。結果を図 11 に示す。図 11 (a) は S-MEB I の低熱流束での結果である。ここでは二つの位置での信号波形で気泡の生長・崩壊を示す時間がそれぞれ全く異なっており、それぞれの場所で独立に気泡が生長・崩壊しているのがわかる。したがってこのとき伝熱面上には 2 個以上の気泡が存在していると考えられる。

図 11 (b) は S-MEB I の高熱流束での結果である。ここでは伝熱面の二つの位置での波形がほぼ同期しており、同一の気泡の生長・崩壊を離れた 2 点で同時に捉

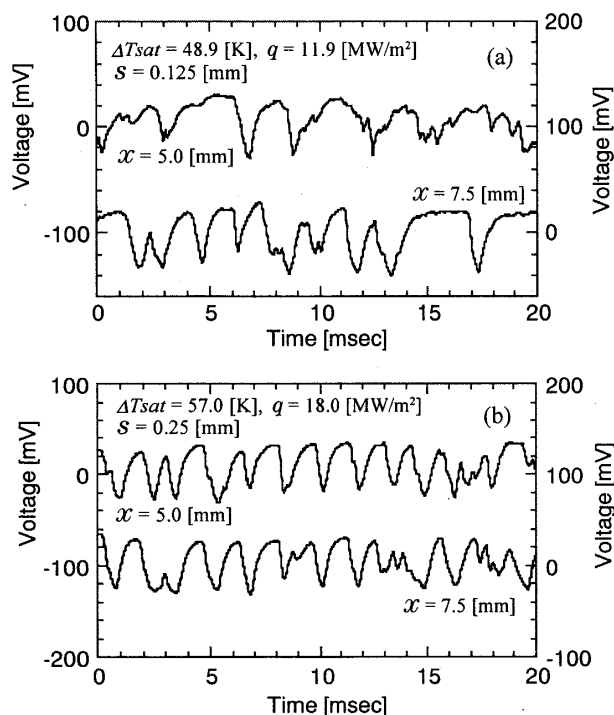


Fig. 11 Void signals measured synchronously at two different positions on the surface in S-MEB I ($\Delta T_{\text{sub}} = 60\text{ K}$)

えたものと考えられる。すなわち、低熱流束に比べ気泡の規模が大きくなっていることを示している。3.3 節に示した同程度の熱流束の S-MEB I での圧力変動との同期測定結果を併せると、S-MEB I の高熱流束では伝熱面上にただ一つの気泡が存在する時間が支配的であるといえる。

3.5.1 $\Delta T_{\text{sub}} = 30\text{ K}$ S-MEB II において、長さ 10 mm の伝熱面上流端から 2 mm と 7 mm の位置での探針電極の信号を同期測定した結果を図 12 に示す。これは S-MEB II の低熱流束での結果であり、3.2.2 節で分類した三つの期間に対応する。図の (i) は分類 (i) 不規則な気泡挙動を示す期間で、伝熱面の離れた二ヶ所で別々の気泡が不規則に生長・崩壊を繰り返しており、伝熱面に二つ以上の気泡が空間的にも不規則に存在しているものと推測される。図の (ii) は分類 (ii) の周期的な気泡挙動を示す状態が上流側で発生したときの結果である。この熱流束では (ii) の状態が、ある期間に

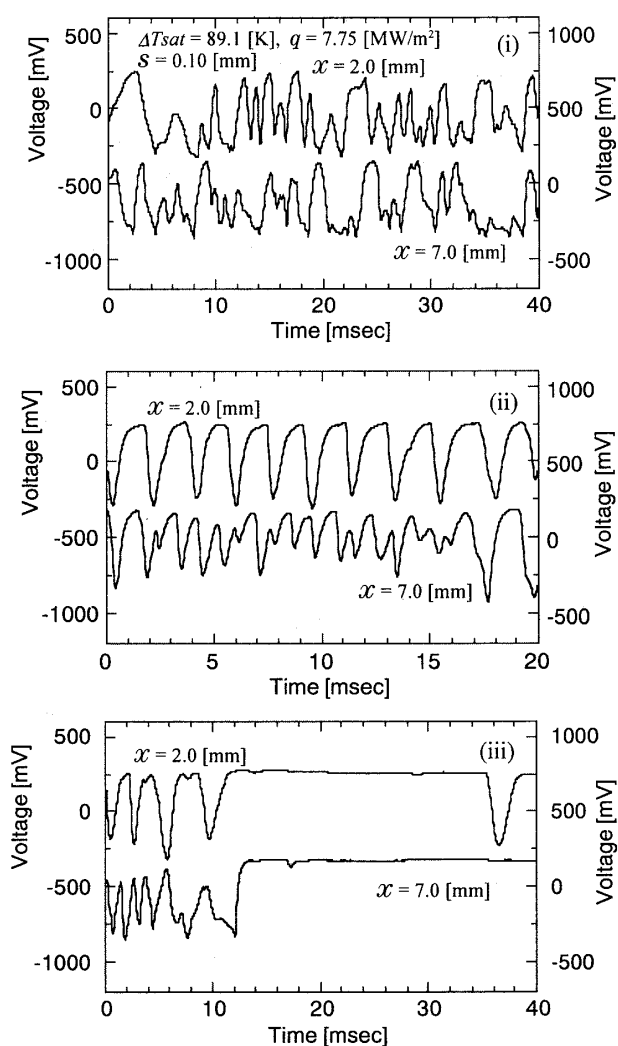


Fig. 12 Void signals measured synchronously at two different positions on the surface in S-MEB II ($\Delta T_{\text{sub}} = 30\text{ K}$)

は上流側に、別の期間には下流側に発生するという傾向を示し、上流側と下流側で同期することはほとんどなかった。図において、上流側で気泡は周期的に生長・崩壊を繰り返しているが、下流側では上流側より短い周期で生長・崩壊しており、二つの電極は別々の気泡挙動を捉えている。ここでは周期的な挙動を示す気泡が伝熱面の大きさに比べて小さく、伝熱面に局所的に存在している状態にあるといえる。図の (iii) は分類 (iii) の蒸気膜に覆われたときのもので、ほぼ同時期に伝熱面の離れた二ヶ所が蒸気膜を検出していることから、伝熱面のかかなりの領域がこの蒸気膜に覆われているのがわかる。

高熱流束になると、上流側と下流側がともに (i) の状態になることは少なく、どちらか一方が (i) の状態であるとき他方は (ii) の周期的な気泡挙動の状態であることが多かった。さらに、上流側、下流側ともに (ii) の状態の期間が存在し、このとき両位置で周期が一致していることから、気泡が伝熱面の大きさと同程度まで成長しているものと考えられる。

4. 結 言

水平伝熱面に並行にサブクール水を供給する系で発生する気泡微細化沸騰について、探針電極による伝熱面近傍の気泡挙動の測定、およびそれと圧力変動、ならびに伝熱面直上の流体の温度変動との同期測定を行い、以下の結果を得た。

(1) S-MEBでは探針電極が示す気泡の崩壊時に伝熱面直上の流体温度が低下することから、このとき伝熱面へのサブクール液体の流入と固液接触があると考えられる。

(2) 熱流束の増加とともに気泡の生長・崩壊は周期性を強め、またその周期は短くなる。

(3) S-MEB I では熱流束の増加に伴い伝熱面上で生長・崩壊する気泡の規模が大きくなり、高熱流束域では伝熱面上に気泡が一つになる時間が支配的になる。

(4) S-MEB II ではある時間間隔で三つの状態が繰り返される。すなわち、(i) 不規則な気泡挙動を示す状態、(ii) 周期的な気泡挙動を示す状態、(iii) 蒸気膜に覆われた状態である。このうち、(ii) の状態は S-MEB I と非常によく似ている。

文 献

- (1) 熊谷・久保・川崎, 機論, **64**-627, B(1998), 3808-3813.
- (2) 熊谷・久保, 機論, **65**-629, B(1999), 296-300.
- (3) 久保・熊谷・梅原, 機論, **65**-633, B(1999), 1731-1736.
- (4) 熊谷・川端・吉川・島田, 機論, **65**-632, B(1999), 1383-1388.
- (5) Kumagai, S., Kawabata, T., Katagiri, T. and Shimada, R., Proc. 11th Int. Heat Transfer Conf., **2**(1998), 279-284.
- (6) 佐藤・石丸・鈴木・鳥飼, 第34回日本伝熱シンポジウム講論, **1**(1997-5), 279-280.
- (7) 鈴木・鳥飼・佐藤・石丸・田中, **65**-637, B(1999), 3097-3104.
- (8) 飯田・小林, 機論, **34**-263, B(1968), 1247-1254.