

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560192
 研究課題名（和文） 自発核生成気泡の合体・崩壊挙動に基づいた微細化沸騰機構の解明
 研究課題名（英文） Elucidation of the Miniaturization-Boiling Mechanism based on Coalescence and Disappearance Behavior of Spontaneous Nucleation Bubbles.
 研究代表者
 稲田 茂昭（INADA SHIGEAKI）
 群馬大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：00008517

研究成果の概要： サファイア加熱面上に水滴を衝突させ、加熱面温度を変化させて、水平方向と加熱面の裏面から顕微鏡を介して高速度ビデオ撮影を行った。このとき、固液界面において瞬時に過熱された液内での密度揺らぎによって発生する自発核生成気泡の合体・消滅挙動を捉えた。この合体・消滅の速い周期によって加熱面では気液交換作用が駆動され、液滴の微細化飛散となって現れ、加熱面上での過熱液の乾燥がくい止められることが分かった。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：自発核生成、巻込み空気、密度ゆらぎ、気泡の合体・消滅、サファイア、高速度撮影、上向きジェット流、下向きジェット流

1. 研究開始当初の背景

沸騰のメカニズムは高温面の濡れ条件が重要で、その条件をライデンフロスト温度とか最小熱流束点温度や自発核生成温度を規定して解析や整理またはメカニズムを議論することは受け入れ難いところである。熱面の温度が一定に保たれた状態で、濡れ性が悪化する（熱面に乾き部が現われる）のは、流体が熱面に供給されない流れ状況に陥ったからであって、いかにして熱面に流れ（冷たい流体の流れはより効果的）を起こさせるかが重要である。

液滴衝突沸騰系における微細化現象は、液

滴の表面から微粒な液粒子が大気中に激しく（速い速度で）飛散する現象である。そこで、この飛散速度に見合ったような流れが固液接触面で発生しているに違いないとの着想に基づいて、加熱面の裏面から顕微鏡を介して高速度で撮影した結果、自発核生成気泡の発生・合体・崩壊が熱面への流れ、熱面からの流れを誘発していることがこれまでに判明した。

図1と図2はサファイアの加熱面温度が170℃の時、そこに直径4mmの水滴（水温約20℃）を落下させた場合に発生した自発

核生成気泡を撮影したもので、衝突後の経過時間が 7 ms と 9 ms の時の様子である。熱面温度が増せば、衝突直後から気泡同士の合体・成長・収縮・崩壊が起こり、それに伴って図 3 と 4 に示したように、上向きの流れが発生する。その流れの反作用で直ちに熱面に向かう下向き流れ（マイクロジェット）が発生する。これが図 5 である。

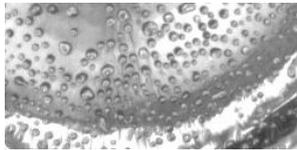


図 1 7 ms (170°C)

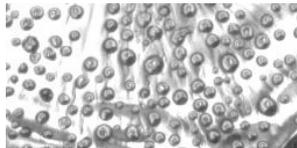


図 2 9 ms (170°C)

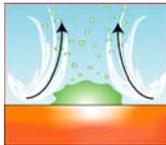


図 3



図 4

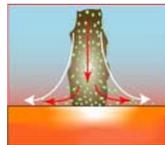


図 5

図 1～図 5 の内容は 2006 年 5 月、イタリアのスポレットでの第 6 回沸騰伝熱国際会議、および 2006 年 8 月オーストラリアのシドニーでの第 13 回伝熱会議で発表したものであるが、鮮明にとらえた高速度撮影カメラそのものの購入コストや製造元に関心が集まり、残念ながらメカニズムの指摘は得られなかった。しかし、日本の伝熱の専門家の集まりである第 43 回日本伝熱シンポジウムでの発表¹⁾では、図 1、2 の気泡は本当に自発核生成気泡なのか？図 3～図 5 のモデル図に達するに納得のいく現象写真（気泡の鮮明な合体・崩壊挙動と流体の流れ模様）を示して欲しいとの貴重な指摘を受けた。

文献 1) 品川和明、稲田茂昭、住谷広行、急速沸騰におけるマイクロバブルの発現とその挙動、第 43 回日本伝熱シンポジウム講演論文集、(2006-5)、785-786。

そこで、以下の項で記す実験を通して、自発核生成気泡の合体・崩壊挙動に基づいて、(現象写真を併記して) 微細化沸騰機構をモデル図にして解り易く評価するのが当初の背景である。

2. 研究の目的

- (1) 飽和温度 (100°C) の液滴を加熱面に衝突させ、加熱面温度を変化させて図 1、2 と同様な撮影を行い、キャビティ (加熱面

の傷) から発生する気泡でもなく、液滴に含まれたガス気泡でもないこと、更に加熱面温度が 100°C に近い温度から自発核生成気泡が発生することを示す。

- (2) 現有の毎秒 10 万コマの高速度ビデオカメラでは、撮影速度が遅いため、それ以上のコマ速度で気泡の生成・合体・崩壊挙動を鮮明にとらえる。同時に液滴衝突時に奪われる熱面からの熱流束を測定。
- (3) 顕微鏡のより焦点深度の長い対物レンズを購入し、更に拡大した画像をとらえて、液滴内部の流動模様を自発核生成気泡の動きから撮影し、顕微鏡画像解析にてマイクロジェット流を定量する。
- (4) 液滴の微細化沸騰発生時に液滴の表面から飛散する液微粒子について、粒子径と流速の空間分布を調べ、加熱面 (固液接触面) での気泡の合体・崩壊挙動との関連性を明らかにする。

3. 研究の方法

- (1) 飽和温度 (100°C) の液滴を加熱面に衝突させ、加熱面温度を変化させて図 1、2 と同様な撮影を行い、キャビティ (加熱面の傷) から発生する気泡でもなく、液滴に含まれたガス気泡でもないこと、更に加熱面温度が 100°C に近い温度から自発核生成気泡が発生することを示す。各実験の開始前には液滴用の精製水は温調付きの投げ込みヒーターで沸騰させ、十分脱気させてから、使用する。加熱面である透明サファイアは 400°C 程度まで加熱を繰り返し使用できるが、そこに冷たい液滴を頻繁に衝突させるため熱応力疲労を受けてクラックが入り使用不可となる (サファイアの耐時間は、400°C 以上で水滴落下 50～60 回)。
- (2) 現有の毎秒 10 万コマの高速度ビデオカメラでは、撮影速度が遅いため、毎秒 15 万コマで気泡の生成・合体・崩壊挙動を鮮明にとらえる。(フォトロン社製 FASTCAM-SA1 デモ機)
- (3) 顕微鏡のより焦点深度の長い対物レンズを購入し、更に拡大した画像をとらえて、液滴内部の流動模様を水平方向から、また自発核生成気泡の動きを透明サファイア加熱面の裏面から同時撮影し、顕微鏡画像解析にてマイクロジェット流を定量する。

図 6 に背面方向および水平方向から液滴衝突時の沸騰現象を高速度カメラで撮影するための実験装置を示す。加熱面には直径 30mm 高さ 8mm の人工透明サファイアを使用し、その両端面はレンズ状に磨かれている。ヒータの埋

め込まれた銅ブロックにサファイアをはめ込み水平に保持した。加熱面温度は変圧器の電圧を変えることにより調整した。加熱面温度は加熱面表面 2 箇所にて K 型熱電対をセラミック系接着剤で固定して測定した。初期加熱面温度 T_{wi} は非加熱の 28°C から 320°C の範囲で実験を行った。液滴には充分脱気した蒸留水を使用し、ノズルから常時滴下してシャッターで受け止めてある。実験時のみシャッターを移動させ単一液滴を加熱面中心に衝突させる。滴下ノズル周りに一定温度の水を流し、液滴温度 T_l を 18°C に保った。液滴直径は 3.8mm、液滴の落下高さは 65mm に設定した。両方向からの撮影は顕微鏡を介してハイスピードカメラによって撮影を行った。

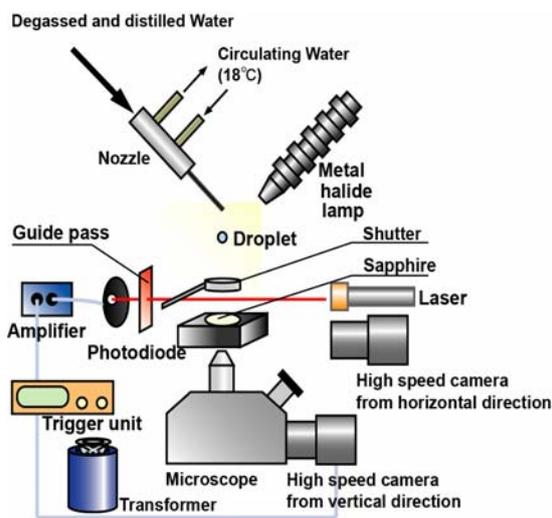


図 6 実験装置の概略

4. 研究成果

図 7 に背面方向から撮影した巻き込み空気泡の画像を示す。画像は液滴が着地してから 0.2ms 後のものである。

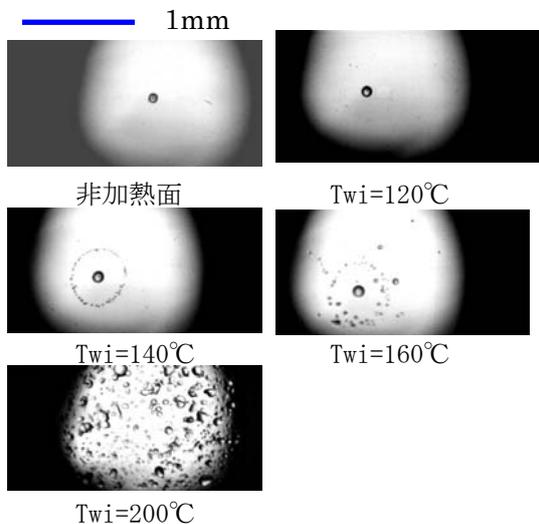


図 7 巻き込み空気の挙動
壁面が非加熱の場合には、巻き込み空気泡は中央に 1 個生成し、その大きさは変化しない。加熱面温度が 100°C の場合でも、非加熱の場合とほぼ同様であったが時間が経過すると多少膨張した。これは空気泡が加熱されたからである。しかし加熱面温度が 140°C では中央に生成した空気泡から放射状に微小空気泡が射出して中央の空気泡周りにリングを形成する。中央の気泡の膨張が緩慢であるのに対して、これらのリング状の微小な気泡は膨張速度が速いことから中央の気泡は浮力で加熱面から十分離れた液滴内に浮上し、リング状の微小気泡は加熱面近傍に残存していることが考えられる。加熱面温度が 160°C の場合には、リング状の微小気泡は個々に加熱され、歪んだ形で徐々に膨張する。しかし、この加熱面温度域では、巻き込み空気泡の他に蒸気泡の発生が認められる。加熱面温度 200°C の場合には、加熱面全面が蒸気泡の発生によって占有され、その蒸気泡は個々に速い周期で生成と消滅を繰り返す。繰り返す発生する気泡の場所は限定されず、ランダムである。高速度カメラに写し出された動画からは、巻き込み空気泡は蒸気泡と異なって消滅しないため、蒸気泡の発生・消滅には影響を及ぼさないことが判明した。

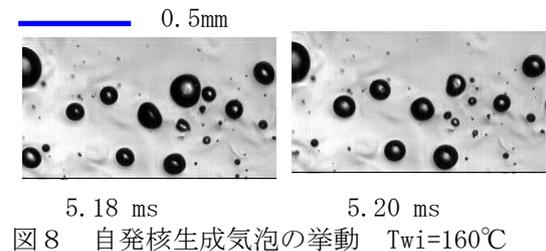


図 8 自発核生成気泡の挙動 $T_{wi}=160^\circ\text{C}$

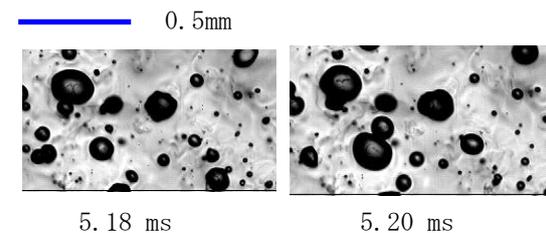


図 9 自発核生成気泡の挙動 $T_{wi}=180^\circ\text{C}$

図 8、9 に加熱面温度 160°C と 180°C における気泡の生成挙動を示す。撮影条件はコマ速度 50000fps、シャッター速度 1/270000s で行った。加熱壁面に接した過熱液内（灰色面状に見える）で発生する大小の蒸気泡が観察されるが、0.02ms 後の画像では消滅している気泡もあれば新たに生成した気泡もある。気泡の発生位置付近は温度むらのような白く揺れ動く、しわ模様が観察される。これは顕微鏡内蔵の光が液滴に対して上から平行光として入射している状態で、下からは対物レンズを介し

て収光してカメラで捉えているため、過熱液の密度ゆらぎがシュリーレン像として観察されているからである。加熱面温度 180℃の場合の方が 160℃の場合よりも過熱液の密度ゆらぎの揺れは激しく、そのゆらぎ場からの気泡の発生は急増している。この 180℃の温度域では発生した気泡同士の合体は認められないが気泡は個々に成長し、最大直径に達した後は一旦、収縮し、瞬時に消滅する。気泡の発生位置は全くランダムである。

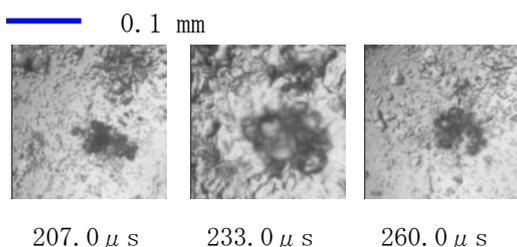


図 10 自発核生成気泡の挙動 Twi=280℃

図 10 に加熱面温度 280℃による気泡の生成過程を示す。撮影条件は 150000fps、シャッター速度 1/2700000s で行った。同じ程度の直径をもつ微小気泡が周期的に斑点のように生成するキャビア状気泡が観察された。また、加熱面上の過熱液内部に常に黒く映し出される部分が現れた。これらの斑点状の気泡の同時生成と黒い部分は 280℃以上の加熱面温度域にならないと現れない現象であり、これらは自発核生成が原因となり発生していると考えられる。背面方向からの映像では黒い部分の面積が増加と減少を繰り返す、面積が増加の様相を示す寸前になると画面が明るくなり、次のコマでは微小気泡が孤立して密に生成した。この気泡が自発核生成を要因として生成する気泡と考えられる。これらの気泡は個々に発生、成長そして局所的に合体し、それらが 1 個の合体泡として成長、収縮、消滅し、瞬時に微小孤立泡の斑点状の密な生成を繰り返す。黒く映し出される理由として、その部分は気泡が密であること、その部分から上流の液滴側に光を遮る強い流体の流れ（上向きジェット流）が生じ、その流れに追従して逆に下向きジェット流が加熱面に向かって流れ込む状況下に置かれているからである。自発核生成による気泡は生成、成長、合体、射出、黒く映る窪みに流れ込んでいくという周期性のある形態をとった。

この周期性を捉えるため、下方撮影と同期させた水平方向からの撮影により、気泡群が上下に振動しながら上昇していくのが撮影された。図 11 に縦軸に気泡群の加熱面からの高さ、横軸に液滴が着地してからの経過時間を示す。プロットに青くマークした時点でキャビア状気泡が一斉に生成し、下向きジェット流が生じ、加熱面上では気液交換作用が駆

動され、過熱液の乾燥がくい止められていると考えられる。

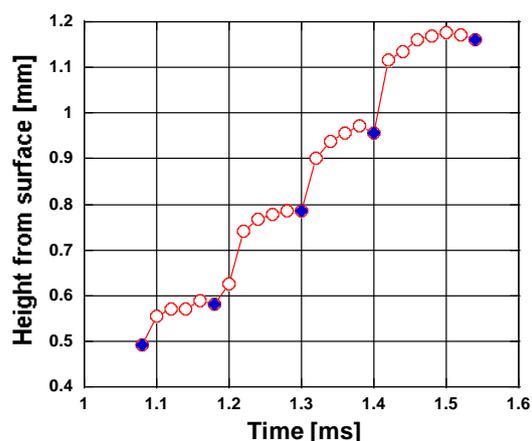


図 11 加熱面から射出した気泡の液中振動浮上状況 Twi=280℃

結論

1. 加熱面が非加熱の状態でも巻き込み空気泡が生成されるが、それによる自発核生成気泡への影響は無視できる。
2. 加熱面温度が 160℃の状態から、過熱液内で生ずる密度ゆらぎが可視化できた。
3. 自発核生成による気泡の成長・合体消滅に起因して、液滴内部の過熱液部分に周期的な上向きの流れと下向きの流れが交互に生じていることが分かった。

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中川西 学、川島久宜、前原義行、熊倉寛、稲田茂昭、着霜を伴う水平円柱周りの過渡温度熱伝達、日本冷凍空調学会論文集、Vol. 25, No. 2, 79-86, 2008、査読有
- ②中川西 学、稲田茂昭、上野祐輔、川島久宜、低温プラズマを利用したオゾン含有氷の創製、日本冷凍空調学会論文集、Vol. 25, No. 2, 79-86, 159-166, 2008、査読有
- ③ Manabu NAKAGAWASAI, Shigeaki INADA, Hisanobu KAWASHIMA, Shigeaki MATSUOKA, Yusuke UENO and Tatsuya HOSHI, The Development of Advanced Composite Material with Metal Adhered by an Ionic Bond to the Surface of a Woody Biomass, Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 40, No. 13, 1319-1327, 2007、査読有

〔学会発表〕（計 9 件）

- ①Shigeaki INADA, Hisanobu, KAWASHIMA,

- Kazuaki SHINAGAWA, Suhaimi ILLIA
Manabu NAKAGAWASAI and Kohei HAYASAKA,
Elucidation of Miniaturization Boiling
Mechanism in the Droplet Collision
Boiling
System, The Seventh KSME-JSME Thermal
and Fluids Engineering Conference, CD-ROM
Proceedings A211, 2008.10.13-16, 札幌
- ② Hisanobu KAWASHIMA, Yuki KATAGAI, Manabu NAKAGAWASAI, Shigeaki INADA, Masaharu KAMEDA, Radial Motion of a Spherical Vapor/Gas Bubble by Sudden Pressure Reduction, The Seventh KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, CD-ROM Proceedings E312, 2008.10.13-16, 札幌
- ③ Manabu NAKAGAWASAI, Shigeaki INADA and Hisanobu KAWASHIMA, Expression of Active Oxygen from Wood Biomass that Metal was Absorbed, The Seventh KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, CD-ROM Proceedings H334, 2008.10.13-16, 札幌
- ④ 石毛忠弘、中川西 学、川島久宜、森田淳一、山中 孟、稲田茂昭、液滴の加熱面衝突時に示す自発核生成気泡の挙動、日本機械学会関東支部ブロック合同講演会-2008 おやま、2008.9.19-20、小山市
- ⑤ 石毛忠弘、ヘルミシャ、川島久宜、中川西学、稲田茂昭、加熱面に衝突する液滴内での発生気泡の挙動、日本伝熱学会、第45回日本伝熱シンポジウム、2008.5.21-23、つくば市
- ⑥ 品川和明、スハイミ イリアス、川島久宜、内山 茂、高橋義光、稲田茂昭、加熱面に衝突する液滴の飛散挙動に関する研究、日本伝熱学会、第45回日本伝熱シンポジウム、2007.5.22-24、長崎市
- ⑦ 石毛忠弘、川島久宜、稲田茂昭、液滴の加熱面衝突時に示す巻き込み空気及び自発核生成気泡の挙動、日本伝熱学会、第45回日本伝熱シンポジウム、2007.5.22-24、長崎市
- ⑧ Shigeaki INADA, Manabu NAKAGAWASAI, Yoshinori OHNO, Ryuta SHOJI, Hisanobu KAWASHIMA, Addition of the Antibacterial to the Plastic Surface by Plasma Treatment, International Conference on Thermal Treatment Technologies, 2008.5.12-16, モントリオール、カナダ
- ⑨ Manabu NAKAGAWASAI, Shigeaki INADA and Hisanobu KAWASHIMA, Dehalogenation Caused By Using Wood Powder That Contains Sodium By Plasma Treatment, Interna-

tional Conference on Thermal Treatment Technologies, 2008.5.12-16, モントリオール、カナダ

〔産業財産権〕

○出願状況 (計2件)

①

名称：プラスチック成形体および中空糸膜ろ過材への銀担持方法とそれらの銀担体

発明者：稲田茂昭、中川西 学、庄司龍太

権利者：群馬大学

種類：特許

番号：特願 2008-111618

出願年月日：2008年4月22日

国内外の別：国内

②

名称：木質バイオマスへの金属担持方法及び木質バイオマスの金属担体、銀イオン水の製造方法、ナトリウムイオン水の製造方法

発明者：稲田茂昭、中川西 学

権利者：群馬大学

種類：特許

番号：特願 2007-278122

出願年月日：2007年10月25日

国内外の別：国内

○取得状況 (計2件)

①

名称：長尺細管の低温プラズマ殺菌方法及び殺菌装置

発明者：稲田茂昭

権利者：群馬大学

種類：特許

番号：特許第4119984号

取得年月日：2008年5月9日

国内外の別：国内

②

名称：表面改質繊維材料、表面改質繊維製品並びに低温プラズマを用いた表面改質繊維材料の製造方法および製造装置

発明者：稲田茂昭、小澤康男

権利者：小澤康男、群馬大学

種類：特許

番号：特許第3938704号

取得年月日：2007年4月6日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

稲田 茂昭 (INADA SHIGEAKI)

群馬大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00008517

(2)研究分担者

無し

()