

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 20 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560241

研究課題名(和文) MEMS技術を利用した単気泡下の限界熱流束(CHF)の発生機構の解明

研究課題名(英文) Elucidation of Mechanism of critical heat flux for single boiling bubble condition by using Micro Electro Mechanical System technology

研究代表者

大竹 浩靖(OHTAKE, HIROYASU)

工学院大学・工学部・教授

研究者番号：40255609

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、超鏡面加工を施された電子回路用シリコンウエハー上に、MEMS技術にて微細な円孔を加工し、この一点のみから発生する制御された沸騰気泡システムをまず作り上げ、その制御された沸騰気泡による限界熱流束を実験的に検討するものである。すなわち、単純な単一気泡による限界熱流束を取り扱うことで、限界熱流束の本質を捉えるものである。

その結果、低圧条件下の沸騰で単気泡での限界熱流束に至る基本的な系での限界熱流束条件の実現に成功し、伝熱面下の二次元温度場計測と沸騰蒸気泡の高速度観測を通し、詳細な伝熱機構を検討した。また、沸騰熱伝達率の促進方法を検討し、約4倍の沸騰熱伝達率の促進の事実を得た。

研究成果の概要(英文)：In order to elucidation of mechanism of critical heat flux, the present research investigated mechanism of critical heat flux for single boiling bubble condition and enhancement of boiling heat transfer by using Micro Electro Mechanical System technology. Steady state pool boiling experiments were conducted by using a copper thin film for the test heater and pure water at some pressure conditions. The system pressure was 0.01 and 0.10 MPa, respectively. The heaters were made of a printed circuit board and a silicon wafer with sputtering copper film.

The mechanism of critical heat flux on a single boiling bubble was examined through observations at 4000 frames/s by using a high speed video camera and two dimensional temperature field measurements at 200 Hz by using an infrared thermometer. Furthermore, boiling heat transfer was enhanced by using copper film heater bonded a small chip of silicon wafer: the enhanced ratio was about four.

研究分野：工学・機械工学・伝熱工学

キーワード：熱工学 沸騰 限界熱流束 核沸騰 MEMS キャピティ 気泡 伝熱促進

1. 研究開始当初の背景

- (1) 沸騰熱伝達において、限界熱流束(Critical Heat Flux -CHF- ; 別名、バーンアウト)は、冷却限界、すなわち、熱機器の性能を決める最も重要な物理量である。その現象の本質を捉えることは重要である。
- (2) 限界熱流束の研究の歴史は深く、これまでに様々なモデル化が行われているものの、様々な条件(圧力、流速、伝熱面性状等)下の限界値を求めるモデル化に成功したとは言い難い。
- (3) MEMS 技術の発展により、一点のみから沸騰気泡を発生させることができる理想化された実験システムを作り上げることが可能となった。
- (4) 赤外線サーモグラフィおよび高速度ビデオカメラの性能の進歩により、高速かつ詳細な非接触型温度計測および気泡画像観測が可能となった。

2. 研究の目的

沸騰熱伝達はその高い熱伝達率により、ボイラー、ヒートポンプといった数々の伝熱機器に応用されてきた。沸騰熱伝達はその影響因子として、伝熱面の表面粗さ、気泡核形状等の表面状態、表面の濡れ性、熱伝導、相変化、対流、気泡挙動といった様々な物理量が存在する。そして、沸騰はそれらが複雑に影響し、それ故、その熱伝達機構は非常に複雑なものとなることが知られており、未解明な部分が多い。

この機構の解明に利用されているのが、近年のMEMS 技術である。すなわち、伝熱面上に数 μm の規則正しいキャビティを人工的に作成することで、表面形状を制御した上で沸騰熱伝達の機構を解明する手法である。

本研究の目的は、超鏡面加工を施された市販の電子回路用シリコンウェハー上に、MEMS 技術(ボッシュ加工対応 Deep RIE 等)にて微細な円孔を加工し、この一点のみから発生する制御された沸騰気泡システムをまず作り上げ、その制御された沸騰気泡による限界熱流束を実験的に検討するものである。すなわち、これまでに様々と検討されている(複雑な)合体気泡による限界熱流束でなく、単純な単一気泡による限界熱流束を取り扱うことで、限界熱流束の本質を捉えるものである。

具体的には、(1)電気回路用銅プリント基板およびスパッタリングにより(2)シリコンウェハー上に施された銅薄膜、(3)石英ガラス基板上に施された銅薄膜を伝熱面とし、そこにMEMS 技術により人工キャビティを作製し、純水を用いたプール沸騰実験を行うことを通して、沸騰熱伝達、特に限界熱流束の機構を解明することを目的とした。また、大気圧(0.1MPa)および低圧(0.01MPa)の条件下で、それぞれ実験的な検討を行うことで沸騰熱伝達機構に及ぼす圧力の影響を検討した。さらに、低圧条件で劣化する沸騰熱伝達率に対し、小さな蒸気泡の発生を誘起を通して、

その沸騰熱伝達の促進方法も検討した。

3. 研究の方法

実験装置系統図を Fig.1 に示す。本実験装置は、伝熱面、水槽、蛇管型凝縮器、真空ポンプ、直流電源、計測機器から構成されている。この伝熱面は、市販の電気回路用プリント基板、銅スパッタリングを施した、表面粗さの極めて小さい(ナノオーダー)市販のシリコンウェハー、プリント基板に所定の寸法(3mm 四方、5mm 四方、7.5mm 四方、10mm 四方)のシリコンウェハーを導電性の銀ペーストにより塗布したものの3種類である。プリント基板の場合、テスト部は銅箔となる。シリコンウェハーの場合も、テスト部は、あらかじめダイシングマシンを用いて、25mm 四方に加工した後そこにスパッタされた銅となる。これらはパターンマスクを用意し、MEMS 技術を用いた等方性ウェットエッチングにより、7.5mm 四方、あるいは幅2.0mm、長さ3.0mm の加熱面を形成させる。シリコンウェハーはその後、前述のプリント基板製銅箔上に導電性の銀ペーストを用いて接着させることで、後述するように銅箔部を通電加熱する。また、伝熱面下部にあたるプリント基板には、あらかじめ $\phi 4\text{mm}$ の穴をあけておき、赤外線放射温度計による伝熱面裏面の二次元温度場計測を可能とした。

実験手順は、以下の通りである。まず、実験水槽内を真空ポンプにより真空に近い状態にする。その後、試験水(市販の純水)を実験水槽に導き、低圧沸騰を利用して試験液の脱気を行う。実験水槽内の液用電気ヒータへの出力と蛇管型凝縮器への冷却水温度と流量を制御することにより、実験条件の圧力である0.01MPa(低圧実験)あるいは0.10MPa(大気圧実験)それぞれの飽和水状態を維持する。所定の飽和条件を達成した後、伝熱面は、(1)電気回路用銅プリント基板およびスパッタリングにより(2)シリコンウェハー上に施された銅薄膜、(3)石英ガラス基板上に施された銅薄膜であり、この銅薄膜部を定電流電源により直接通電加熱させる。なお、沸騰熱伝達の促進の実験のため、プリント基板に所定の寸法(3mm 四方、5mm 四方、7.5mm 四方、10mm 四方)のシリコンウェハーを導電性の銀ペーストにより塗布した伝熱面による実験も行った。この場合には、下部の銅薄膜を定電流電源により直接通電加熱させた。これらの直接通電加熱を通して、自然対流熱伝達、核沸騰熱伝達および限界熱流束を実現させる。伝熱面熱量(平均熱流束)はジュール発熱量(=電圧 \times 電流)から求め、伝熱面(空間平均)温度は電流と電圧の計測値(電気抵抗値)とあらかじめ得られた銅薄膜伝熱面の温度と電気抵抗値の較正直線(較正実験には、恒温水槽を利用)から求めた。この計測を伝熱面の焼損(バーンアウト: 限界熱流束)まで繰り返す。限界熱流束の値は、この焼損の直前とした。併せて高速度ビデオカメラにて

沸騰蒸気泡を撮影 (収録速度は、4000 fps) し、気泡挙動を記録する。また、伝熱面がシリコンウェハーおよび石英ガラスの場合、同時に赤外線放射温度計を利用し、伝熱面裏面より二次元温度場を取得する。収録速度は最大200Hzである。

実験後、高速度ビデオカメラの映像から気泡挙動の圧力依存性およびキャビティを含む表面形状が気泡挙動に及ぼす影響、また赤外線放射温度計の画像から圧力変動や表面形状が伝熱面局所温度に及ぼす影響を考察する。

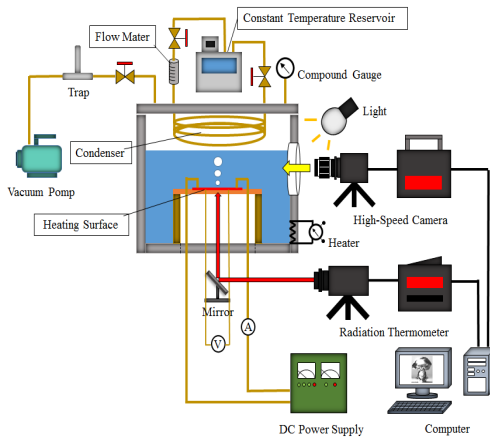


Fig.1 Experimental Apparatus

4. 研究成果

(1) 人工キャビティを用いた実験

Fig.2 に大気圧 (実験系圧力 0.10MPa) 下および低圧 (実験系圧力 0.01MPa) 下での沸騰曲線を示す。Fig.2(A)が大気圧下、Fig.2(B)が低圧下の各沸騰曲線である。プリント基板の加熱面の寸法は 7.5mm 四方であり、シリコンウェハーを塗布した場合その寸法は 10mm 四方である。

Fig.2 より、プリント基板製伝熱面の場合、核沸騰開始後の沸騰曲線の勾配は限界熱流束に至るまで Rohsenow の核沸騰相関式が与える値の勾配とよく一致していること、また限界熱流束は Kutateladze の式が与える値とほぼ同等の値となっていることがわかる。また、Figs.2(A)、(B)を比較すると伝熱面材料やキャビティの有無を問わず、全体を通して圧力の低下に伴い沸騰熱伝達は低下していることがわかる。

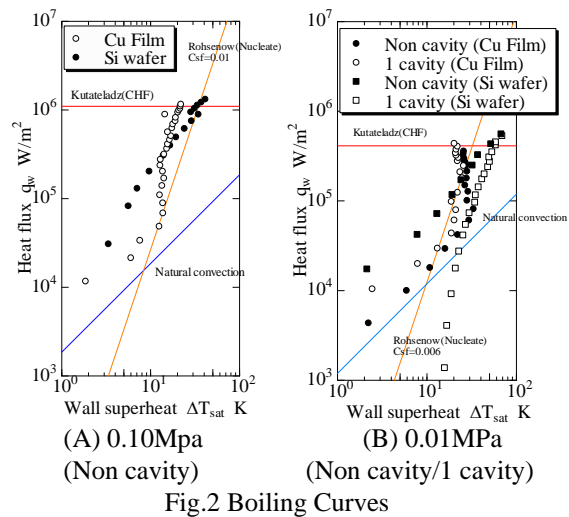
また、人工キャビティが沸騰熱伝達に及ぼす影響を検討するため、Fig.2(B)内に、MEMS 技術 (銅薄膜伝熱面では等方性ウェットエッチング、シリコンウェハー伝熱面ではボッシュ加工対応 Deep RIE によるドライエッチング) より加工した人工キャビティ付きの伝熱面を用いた低圧下での沸騰曲線を併記した。キャビティ付銅箔伝熱面の場合には、沸騰開始温度が低下している。これは、人工キャビティが発泡点となり、沸騰開始が低温度化したものと考えられる。なお、高過熱度領域では、人工キャビティ以外からの沸騰蒸気泡の発生も認められ、熱流束がキャビティの有無

に及ぼす影響は消失し、同一の沸騰曲線となった。

Si ウェハー製伝熱面の場合、人工キャビティ無の場合は、沸騰曲線の勾配は Rohsenow の核沸騰相関式の計算値よりも緩やかとなった。これは、シリコンウェハー表面がナノオーダーの粗さのためキャビティとなり得ず、自然対流熱伝達に類似した熱伝達機構となったからだと考えられる。

Fig.3(A)、(B)に示す高速度ビデオカメラによる沸騰蒸気泡の挙動画像をさらに考察すると、低圧下では離脱気泡径が大きくなることで伝熱面表面全体が蒸気泡に覆われること、またシリコンウェハー製伝熱面のような平滑面を伝熱面にすると気泡核の減少により蒸気泡が発生しにくくなり、潜熱による熱伝達量が抑えられることにより熱伝達が沸騰熱伝達よりも低下することが推察される。

また、Fig.3(C)、(D)に示すように、シリコンウェハー製伝熱面の場合、伝熱面端部のプリント基板からの蒸気泡の発生を確認した。シリコンウェハー製伝熱面端部には、加熱用プリント基板 (銅薄膜) との間にサブミリオ



(A) 0.01MPa at ONB (Cu Film) (B) 0.01MPa at CHF (Cu Film)
(C) 0.01MPa at ONB (Si wafer) (D) 0.01MPa at CHF (Si wafer)
Fig.3 Behaviors of Bubble

ーダーの空隙が多数存在すると考えられ、この空隙が気泡核となり、蒸気泡が発生したと考えられる。これにより対流が促進され、限界熱流束は Kutateladze の式が与える値よりも若干高い値となったと考えられる。後述するが、この実験事実を核沸騰熱伝達の促進法に応用した。

(2) 単気泡による限界熱流束

Fig.4 に示すように、低圧（実験系圧力 0.01MPa）下、人工キャビティ無しのプリント基板製伝熱面において、単気泡での限界熱流束を確認できた。これは、加工工程が最も少ない加熱部であり理想上の平滑面に近い表面性状が得られたこと、大気圧条件に比べ発生蒸気泡の直径が大きいことによるものと考えられる。なお、銅薄膜表面の走査型電子顕微鏡（SEM）による観察によると、最大 1 μ m 程度の傷が認められ、これが沸騰核（キャビティ）になったものと考えられる。

Fig.4 は、CHF 直前における、単気泡が成長してから離脱までの様子を示す。脚注に単気泡の発生からの経過時間を併記した。なお、伝熱面の有効加熱面積は 2.0 \times 3.0mm である。Fig.4 より、加熱面寸法の数倍の直径を持つ単気泡が離脱後、離脱気泡底部に加熱面と同等の直径を持つ筒状の気泡が生成、上部の離脱気泡と合体し即座に離脱する現象を確認した。なお、直径の大きい気泡が生成され、次の直径の大きい気泡が生成されるまでの時間は 0.11 秒（周期 9.1Hz）であった。

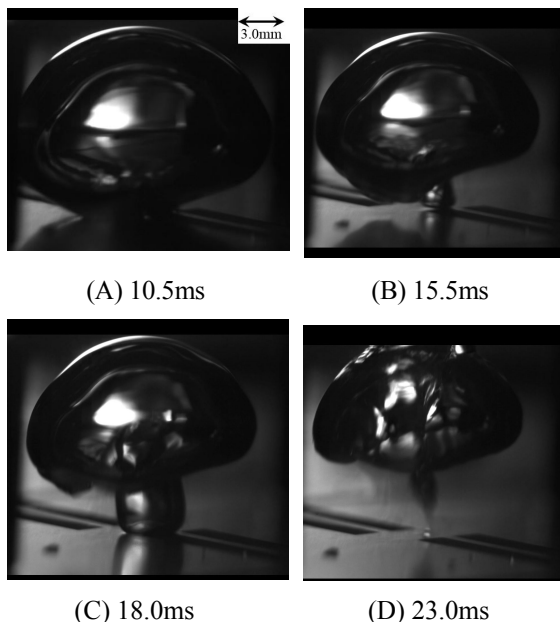


Fig.4 Images of Bubble near CHF (0.01MPa)

(3) 二次元温度場計測

Fig.6 および Fig.7 には、本研究の目的の一つである、『高速かつ詳細な加熱面下の二次元温度場計測と沸騰蒸気泡の高速度観測による、“限界熱流束”直前の温度変動測定結果とそれに対応する沸騰気泡挙動の観測』を通した

詳細な伝熱機構の検討結果を示す。

Fig.5 には銅薄膜のスパッタリングを施した Si ウェハの大気圧（実験系圧力 0.10MPa）下での沸騰曲線を、Fig.6 に CHF 直前（Fig.4 内、赤丸条件）の温度変動を気泡生成部の距離（0mm(center)、0.5mm、1.0mm、1.5mm）をパラメータとして示す。なお、この温度計測（温度画像録画）時の収録速度は 180.5Hz であった。また、放射温度計による温度計測は 4 秒間行っており、その範囲内で最も高い温度を記録した約 1.72 秒の時点を含む 0.3 秒間を当該図の時間範囲とした。伝熱面は、シリコンウェハ表面にスパッタ装置を利用して作製した銅薄膜である。

Fig.6 より、伝熱面局所温度は、約 6 の範囲で変動していることがわかる。周期は約 0.1 秒（10Hz）であり、これは合体気泡の離脱周期と同じである。1 サイクル中の気泡発生位置（0mm:center）の温度変動を詳細に見てみると、時間 1.64~1.67 秒間 0.7 の温度上昇、1.67~1.70 秒間 1.5 の温度降下、1.70~1.715 秒間 5.3 の急激な温度上昇、1.715~1.74 秒間 5.1 の急冷期間、1.74~1.775 秒間 0.3 の徐冷期間が確認できる。この温度変化は、それぞれ液体の過熱期間（気泡待ち時間）による温度上昇、マイクロ液膜蒸発期間による温度降下、合体気泡成長による温度上昇、合体気泡の離脱後の液体浸入による急冷期間と考えられる。なお、最後の徐冷期間は液体の再加熱が影響しているものと考えられる。すなわち、急激な温度上昇後、極大温度をとる。つまり、温度の極大値が存在するか、あるいは、十分な急冷期間があるかが、CHF 発生条件と考えられる。なお、位置の影響を検討すると、気泡発生位置から離れるとともに、温度変動量は低下し、1.5mm 位置で約 4 となる。

また、急冷開始時間の位置の影響を見ると、第 1 冷却期間では 0mm 位置より 1.5mm 位置は冷却開始が遅れるのに対し、第 2 冷却期間は 1.5mm 位置より開始し、その後 0mm 位置が冷却開始となることからわかる。第 1 冷却期間では気泡成長に伴い、外側にマイクロ蒸発が広がるに対し、第 2 冷却期間では外側より液が浸入するためと考えられる。

Fig.7 に、温度変動と各期間開始時の蒸気泡の観察画像を示す。なお、Fig.7 のデータは、

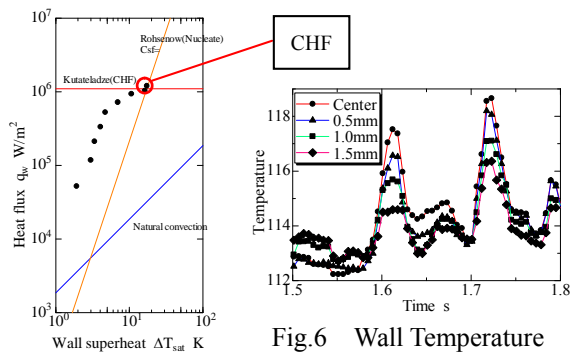


Fig.5 Boiling Curves

Fig.6 Wall Temperature Fluctuation near CHF (0.10MPa)

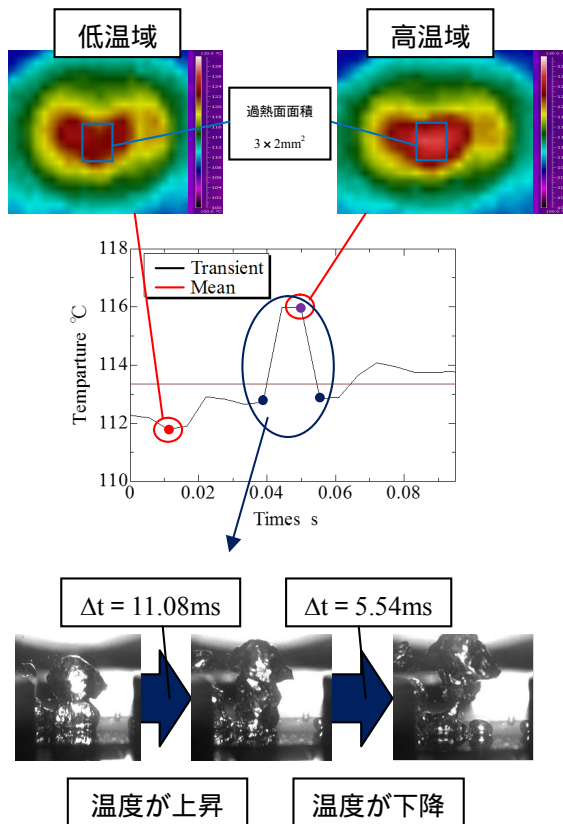


Fig.7 Bubble Behaviors and Temperature Fluctuation

Fig.6の横軸 (Time s) の0秒からの結果である。また、Fig.7中に、赤外線放射温度計による温度計測結果 (画像) も併せて示し、伝熱面領域も明記した。Fig.7に示すように、急激な温度上昇開始時 (38.78ms) に、伝熱面上に大きな蒸気泡、すなわち合体気泡が確認できる。この12.92ms後 (51.70ms) に、観察動画より合体気泡の離脱が確認され、加熱面上の残留気泡の外側より加熱面上に液体が侵入、すなわち液供給が行われるものと考えられる。温度計測時間55.40ms時には、離脱した合体気泡の上昇が認められている。なお、観察動画より、蒸気泡が生成後、外側に向かって成長することが確認でき、前述の第1冷却期間の開始時間のずれが説明できる。

(4) 核沸騰熱伝達促進

Fig.2の沸騰曲線より低圧下では核熱伝達率が低下することがわかる。これはFig.3に示す、低圧下では離脱気泡径が増加することが原因である。これが室温付近の低圧水を冷却媒体液として利用することを妨げている。一方、Fig.3より低圧下でも、シリコンウェハを接着した伝熱面の場合、その周囲部から比較的小径の気泡が生成されることが確認された。

そこで前述したように、加熱面周囲からの発泡を利用した核沸騰熱伝達促進を検討するため、3mm四方、5mm四方および7.5mm四方のSiウェハを、加熱面である銅薄膜(プ

リント基板)に貼り付けた伝熱面を試験面とする一連の実験を行った。なお、加熱面である銅薄膜の寸法は7.5mm四方である。試験圧力はいずれも0.01MPaである。Fig.8に、これらの実験結果である沸騰曲線を示す。また、Table 1には、各実験条件の沸騰開始の過熱度 (ONB) および熱伝達率 (熱流束 $3 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 時) さらに ONB 時および CHF 直前の垂直 (V)・水平方向 (H) の離脱気泡径を示す。

Table 1より、加熱部よりも小さい寸法のシリコンウェハを接着することで、シリコンウェハ周囲から直径の小さい蒸気泡が発生し、離脱気泡径が減少することがわかる。特に、5mm四方および7.5mm四方のシリコンウェハの場合に、この離脱気泡径の減少効果は顕著である。この効果、すなわち蒸気泡の微細化とそれに伴う液の攪拌効果により、通常の伝熱面 (Non Si 条件) の4倍以上の核沸騰熱伝達の伝熱促進が得られた。

さらに、Fig.8より、加熱部 (銅薄膜) と同サイズである7.5mm四方のシリコンウェハを接着させた場合には、20%強の限界熱流束の向上が確認でき、限界熱流束の向上化、すなわち伝熱促進を認められた。

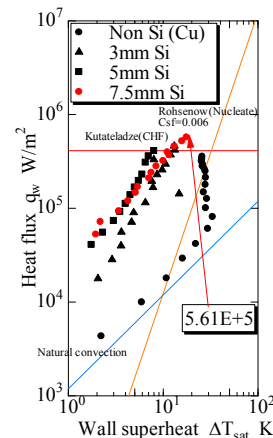


Fig.8 Boiling Curves

Table 1 Experimental Results (ΔT_{ONB} , CHF, Bubble Diameter)

		Non Si	3mm Si	5mm Si	7.5mm Si	
Wall superheat (K) of ONB		26.1	10.6	6.11	6.32	
Heat transfer coefficient (W/m² · K)		1.152 × 10 ⁴	2.844 × 10 ⁴	4.910 × 10 ⁴	4.612 × 10 ⁴	
Bubble diameter (mm)	ONB	V	13.24	12.81	3.131	3.426
		H	20.41	13.27	3.438	3.612
	CHF	V	11.32	14.61	9.785	7.663
		H	17.28	16.08	11.68	7.861

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8件)

(1) 大竹 浩靖、沸騰熱伝達の機構とその促進法の圧力依存性に関する研究【招待講演】、日本混相流学会 第16回オーガナイズド混相流フォーラム(OMF2012)『化学反応場としての混相流』、平成24年12月8日、道後温泉(愛媛県・松山)。

(2) 小田 奎(大竹 浩靖) 低圧低沸騰水における沸騰熱伝達の機構とその促進、日本伝熱学会 第50回日本伝熱シンポジウム、平成25年5月29日、ウェスティンホテル仙台(宮城県・仙台)。

(3) 小田 奎(大竹 浩靖) Boiling Heat Transfer Mechanism and Enhancement of Boiling Heat Transfer of Water under Low Pressure and Low Boiling Temperature、The 24th Int'l Symposium on Transport Phenomena、平成25年11月4日、山口東京理科大学(山口県・山陽小野田市)。

(4) 小田 奎(大竹 浩靖) MEMS技術を用いた沸騰熱伝達機構の圧力依存性、日本伝熱学会 第51回日本伝熱シンポジウム、平成26年5月21日、アクトシティ浜松コンgresセンター(静岡県・浜松)。

(5) 小田 奎(大竹 浩靖) Effect of Pressure on Boiling Heat Transfer Mechanism by Using MEMS Technology、22nd Int'l Conference on Nuclear Engineering、平成26年7月8日、プラハ(チェコ共和国)。

(6) 大竹 浩靖、Boiling Heat Transfer Characteristics and Film Boiling Collapse Temperature through the Two-Dimensional Temperature Field Measurement15th Int'l Heat Transfer Conference、平成26年8月15日、京都国際会館(京都府・京都)。

(7) 小田 奎(大竹 浩靖) MEMS技術を用いた沸騰熱伝達機構の圧力依存性(第二報)、日本機械学会 熱工学コンファレンス2014、平成26年11月8日、芝浦工業大学(東京都・江東区豊洲)。

(8) 小田 奎(大竹 浩靖) MEMS技術を用いた沸騰熱伝達の機構とその促進、日本伝熱学会 第52回日本伝熱シンポジウム、平成27年6月3日、福岡国際会議場(福岡県・博多)。

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)
取得状況(計0件)

〔その他〕
ホームページ等
研究・スタッフ紹介 伝熱工学研究室
http://www.mech.kogakuin.ac.jp/me/reserch/detail_heattransfer.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者
大竹 浩靖(OHTAKE HIROYASU)
工学院大学・工学部・教授
研究者番号: 40255609
(2) 研究分担者 なし
(3) 連携研究者 なし