高濡れ性液体の沸騰伝熱現象に関する実験的研究*

福田 勝哉** 劉 秋生**
喜田 速人*** 朴 鍾徳***

Boiling Heat Transfer Phenomena in Highly Wetting Liquid

by Katsuya FUKUDA, Qiusheng LIU, Hayato KIDA and Jongdock PARK

Thermal energy conversion systems for ships on the environment in ocean are commonly limited by the space or equipment. It is very important to make more effective use of the energy systems such as heat exchangers. For the purpose of the improvement of performance for these energy systems, the utilization of boiling heat transfer is the most effective method to solve these kinds of problems. In this research, steady-state and transient subcooled pool boiling heat transfer was carried out using exponentially increasing heat inputs to a horizontal cylinder in a wetting liquid of ethanol. The photographic observations on the vapor behavior at the boiling heat transfer processes were performed using a high-speed video camera.

1. 緒言

将来の海洋活動に必要な動力源あるいはエネルギー変換機器としては、炭酸ガスをほとんど排出しないRI発電装置、燃料電池および原子力発電などが想定される。これらの機器を海洋環境で利用する場合、陸上と異なり、空間的大きさ並びに燃料の補給等に制約を受けるため、それらエネルギー変換機器は、一層高性能・高効率が望まれる。従来のエネルギー変換技術を最大限に生かすためには、高熱負荷条件下で沸騰による熱エネルギー変換を行う必要があり、その場合のエネルギー変換に関する沸騰熱伝達データベースの構築が重要な課題である。また、この問題は、エネルギー研究開発にとっても重要な研究課題である。最近の

研究^{1), 2)}によると、光触媒壁面を沸騰熱伝達壁面として用いることにより、沸騰熱伝達特性の改善が達成できると期待されている。沸騰熱伝達現象は、液体の表面張力や伝熱表面の濡れ性³⁾に大きく影響されるが、そのメカニズムはまだ明らかにされていない。光触媒壁面等種々の伝熱面を経済合理性の基にデザインしていくには、基礎を明確にしていく必要がある。本研究は、大気圧飽和状態の表面張力が、純水の1/3以下のエタノールの沸騰現象を高速度ビデオカメラ装置を用いて観察して、従来得られている研究成果^{4), 5), 6), 7)}を基礎に沸騰熱伝達現象について考察した。

2. 実験装置及び実験方法

プール沸騰実験装置の概略図をFig.1に示す。実験装置は主に沸騰容器①、補給液タンク②、白金線試験発熱体③、自己蒸気加圧器④、伝熱制御システム⑧、データ処理システム⑨⑩、高速ビデオカメラ(1000コマ/秒、シャッタースピード1/10000)⑤から構成されている。沸騰容器は、内径200mm、

*原稿受付 平成16年4月7日

**正会員 神戸大学(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

***学生会員 神戸大学(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

高さ600mmの円筒型ステンレス製圧力容器であり、試験発熱体は、直径1.0mmの商用白金線で、両端から約10mmの所に直径0.05mmの白金細線が電圧タップとしてスポット溶接されており、有効長さは31mmである。試験液体にはエタノールを用い、広範囲の系圧力、サブクール度において、発熱率を指数関数状 [$Q=Q_{in} \exp(t/\tau)$, Q : 発熱率 (W/m^3), Q_{in} : 初期発熱率 (W/m^3), t : 時間 (s), τ : 発熱率上昇周期 (s) (発熱量がe倍になる時間)] に種々の速さで上昇させ実験を行った。実験は、補給液タンクに試験液体を注入し、実験ごとに十分に脱気して行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 実験結果

時間経過曲線 Fig.2は、大気圧飽和状態において、発熱率を準定常とみなせる十分ゆっくりした速度 (周期 $\tau > 10s$) で上昇させて行った実験の時間経過曲線の代表例である。発熱率 Q が時間経過とともに指数関数状に上昇するにつれ、熱流束 q も、時間とともに上昇し、沸騰開始 (q_{in}) 後、発熱体表面温度がオーバーシュート (q_{ov}) し、限界熱流束 (q_{cr}) に至り急激に減少した。伝熱表面温

① Main Tank
② Auxiliary Tank
③ Test Heater
④ Pressurizer
⑤ High Speed Video Camera
⑥ Vacuum Pump
⑦ Sheathed Heater
⑧ Micro Heater
⑨ Current Conductor
⑩ Potential Conductor
⑪ Pressure Pump
⑫ Pressure Relief Valve
⑬ Pressure Gauge
⑭ Temperature Controller
⑮ Slide Rheostat
⑯ Observation Window
⑰ Cold Junction
⑱ Heating System
⑲ A/D Converter
⑳ Personal Computer
㉑ D/A Converter
㉒ Spiral Cooling Tube
㉓ Cooler
㉔ Condenser
㉕ Receiver

Fig.1 Experimental apparatus.

Fig.2 Illustrative elapsed time trace of heat input Q , surface temperature T_s , and heat flux q .

度 T_s は、沸騰が開始した後、一旦下降するが、再び徐々に上昇し、熱流束 q が、限界熱流束に達すると急激に上昇した。

沸騰曲線 Fig.3は、Fig.2を $q-\Delta T_{sat}$ 面上で示したものである。ここで、過熱度 ΔT_{sat} は、伝熱表面温度と飽和温度の差である。熱流束は、定常自然対流熱伝達曲線⁸⁾に沿って上昇し、沸騰が開始すると、過熱度が減少し、その後定常核沸騰曲線 (ほぼc-dに相当) 上を経過し、限界熱流束点 q_{cr} に達し膜沸騰に遷移した。

Fig.4は、Fig.3に図示した沸騰曲線上の各点 ((1) ~ (5)) に対応する写真を沸騰開始点 (a) を時間基準として示したものである。沸騰挙動は以下の通りである。

(1) まず小さな気泡が現れた。

Fig.3 The relation between heat flux and superheat for the experimental run shown in Fig.2.

Fig.4 Vapor film behavior for boiling curve shown in Fig.3.

Fig.5 Comparison of typical heat transfer processes for a subcooling of 20 K at various pressures.

- (2) (1) の気泡が突然成長し、大きな気泡となり発熱体表面から離脱した。
- (3) 沸騰は急激に写真右から左へと伝播し伝熱面全面で核沸騰となり、気泡の大きさ、数はこの後さらに増加していった。
- (4) 限界熱流束点付近では気泡（蒸気膜）はさらに大きくなり発熱体表面を覆っていった。
- (5) 限界熱流束に達した後、発熱体は、蒸気膜で覆われるようになり、膜沸騰へ遷移した。

3.2 定常核沸騰現象

圧力の影響 Fig.5は、発熱率上昇周期が準定常、サブクール度20Kで、系圧力101.3kPa、297kPa及び690kPaにおける沸騰曲線を示したものである。それぞれ、過熱度は熱流束の上昇に伴い沸騰開始点までは定常自然対流熱伝達曲線8)に沿って上昇した。沸騰が開始すると核沸騰を経過し、熱流束が急激に増加、その後限界熱流束 q_{cr} 点に達し膜沸騰に遷移した。

Fig.6-1～Fig.6-3は、Fig.5に示した沸騰曲線上の各点（a）～（c）に対応する沸騰現象の写真を沸騰開始点（a₁₋₁）、（b₁₋₁）、（c₁₋₁）を時間基準として示したものである。

各圧力での沸騰開始点について比較すると、101.3kPa（a₁₋₁）及び297kPa（b₁₋₁）では急激な気

Fig.6-1 Vapor film behavior for boiling curve at a pressure of 101.3 kPa shown in Fig.5.

Fig.6-2 Vapor film behavior for boiling curve at a pressure of 297 kPa shown in Fig.5.

Fig.6-3 Vapor film behavior for boiling curve at a pressure of 690 kPa shown in Fig.5.

泡の発生が確認されたのに対し、690kPa (c1-1) ではそのようなものは見られなかった、これは 101.3kPa 及び 297kPa のときの沸騰開始過熱度が

Fig.7 Comparison of typical heat transfer processes for a subcooling of 60 K at various pressures.

690kPaに比べ高く、過熱液層も厚いためであると考え、高過熱度で発生した気泡は、発熱体近傍の液体温度が高いために、低過熱度で発生したものより過熱液層から多くの熱が供給され、急激に気泡が成長する。また、いずれの圧力においても (a1-2), (b1-2) 及び (c1-3) から分かるように、一時的に膜沸騰に移行した後、蒸気膜が崩壊し、核沸騰に移行した。

Fig.7は準定常、サブクール度60Kで、系圧力 101.3kPa、297kPa 及び 690kPa における沸騰曲線を示したものである。

Fig.8-1～Fig.8-3は、同様にFig.7に示した沸騰曲線上の各点 ((a) ～ (c)) に対応する沸騰現象の写真を沸騰開始点 (a1-1), (b1-1), (c1-1) を時間基準として示したものである。

各系圧力での沸騰開始点の写真を比較すると、101.3kPaにおける沸騰開始点では急激な気泡の発生が確認されたのに対し、279kPa 及び 690kPa ではそのような急激な気泡の発生は見られなかった。また同図で見られる気泡は前述のFig.6-1～Fig.6-3で示した発生気泡に比較して、その大きさは小さかった。これはサブクール度が大きいために発生した気泡が低サブクール度下のものに比べ成長しなかったためである。

サブクール度の影響 Fig.9は準定常、系圧力 101.3kPaで、サブクール度20K、40K 及び 60K にお

Fig.8-1 Vapor film behavior for boiling curve at a pressure of 101.3 kPa shown in Fig.7.

Fig.8-2 Vapor film behavior for boiling curve at a pressure of 297 kPa shown in Fig.7.

ける沸騰曲線を示したものである。図から分かるように、いずれのサブクール度についても過熱度が100K近傍までオーバーシュートした後、核沸騰へ移行した。また、限界熱流束はサブクール度が大きくなるにつれて大きくなった。

Fig.10は、系圧力690kPaの下で、サブクール度20K、40K及び60Kにおける沸騰曲線を示したもの

Fig.8-3 Vapor film behavior for boiling curve at a pressure of 690 kPa shown in Fig.7.

Fig.9 Comparison of typical heat transfer processes for various subcoolings at a pressure of 101.3 kPa.

である。この場合もFig.9と同じように、いずれのサブクール度についても沸騰開始過熱度は、およそ一定であった。

3.3 過渡沸騰現象

過渡沸騰熱伝達 過渡沸騰現象として、大きく分けて二種類の現象が観察された。Fig.11及びFig.13に、大気圧飽和状態、発熱率上昇周期8sにおいて得られた現象の異なる沸騰曲線をそれぞれ

Fig.10 Comparison of typical heat transfer processes for various subcoolings at a pressure of 690 kPa.

Fig.11 Typical heat transfer process as the First Group for saturated condition at atmospheric pressure with a period of 8 s.

示した。一方は、定常自然対流熱伝達曲線に沿って熱流束が増加するとともに過熱度も上昇し、初期沸騰開始後、過熱度は急減し、核沸騰を経過して、限界熱流束点に達した後、膜沸騰へ遷移するという経過をたどる第1グループ (Fig.11)、他方は、定常自然対流熱伝達曲線に沿って熱流束が増加するとともに過熱度も上昇し、沸騰開始後、核沸騰を経ず、直接膜沸騰へ遷移するという経過を

Fig.12 Vapor film behavior for boiling curve shown in Fig.11.

たどる第2グループ (Fig.13) である⁴⁾。またFig.11及びFig.13の図中の各点に対応する写真をFig.12及びFig.14に併せて示した。

Fig.12は、Fig.11上に示した沸騰曲線上の各点((1)～(11))に対応する沸騰現象の写真を沸騰開始点(1)を時間基準として示したものである。

- (1) 写真左端に小さな気泡が発生した。
- (2)～(6) 大きな気泡を伴って、沸騰は写真右方向へ伝播していった。
- (7) 沸騰は発熱体すべてに伝播し、大きな気泡が剥離した後、安定した核沸騰を続けた。
- (8) 気泡の大きさ、数が増加した。
- (9) 限界熱流束点直前の写真であるが、小さな気泡はほとんどみられず、大きな気泡が発熱体を覆っていることがわかる。
- (10) 限界熱流束に達した、発熱体は蒸気膜で覆われた。
- (11) 限界熱流束に達した後、膜沸騰へ遷移していった。

Fig.14は、同じくFig.13上に示した沸騰曲線上の各点((a)～(h))に対応する沸騰現象の写真を(a)を時間基準として示したものである。

- (a) 自然対流熱伝達状態にあり、沸騰開始直前である。気泡発生はない。
- (b) 急激に蒸気泡が発生した。カメラのフレーム間隔が1000分の1秒であることから、発生は、非常に高速であることが推測される。
- (c) その気泡は1msの間に急激に成長し、それと同時に気泡を中心に厚い蒸気膜が急激に伝播していった。
- (d) 厚い蒸気膜は発熱体全体を覆った。
- (e) テイラー不安定波が観察され、厚い蒸気膜が崩壊し始めた。
- (f) 崩壊した後の部分に薄い蒸気膜ができている。
- (g) さらに厚い蒸気膜が、浮力によって伝熱面から離脱した。
- (h) 蒸気泡の離脱した部分に蒸気膜が存在することがわかる。

Kutateladzeら⁹⁾は、大気圧下、ベンゼンを用いた実験で、同様な沸騰現象を観察し、非常に奇妙な現象であるとしてとらえている。

第1グループの沸騰挙動は、Fig.11から分かるように、非沸騰域では、定常自然対流熱伝達曲線に沿って上昇し、定常核沸騰曲線より高過熱度側までオーバーシュートした後、発熱体表面上の一点から気泡が発生し、それが沸騰を誘発するように発熱体全体に伝搬し核沸騰となった。その気泡の大きさ及び数は増加していき、ついには発熱体全体を覆い限界熱流束に至った後、膜沸騰へ遷移した。

Fig.13 Typical heat transfer process as the second group for saturated condition at atmospheric pressure with a period of 8 s.

Fig.14 Vapor film behavior for boiling curve shown in Fig.13.

第2グループの場合, Fig.13から分かるように, 定常自然対流熱伝達曲線に沿って上昇し, 定常核沸騰曲線より高過熱度側で発熱体表面上のある点から急激な沸騰が起こり, 数msで発熱体全体に伝搬し, 発熱体全体が蒸気膜で覆われ, 核沸騰を経過せず, 膜沸騰へ直接遷移した. 以上のことから沸騰現象は明らかに違うものであることがわかる. Sakurai^(4), 5), 7) 及びFukudaら⁽⁶⁾ は, 水, 液体窒素あるいはR113ではあるが, 第1グループの限界熱流束は流体力学的不安定性によって支配され, 第2グループの限界熱流束は, 不均質自発核生成によって支配されていると説明している. Fig.11及びFig.13に示した実験は, 同一発熱体を用いて同じ条件の下で注意深く実施されたものであるが, まったく異なる沸騰挙動を示した. 実験履歴が影響しているものと考えられる. すなわち, Fig.11の場合, 発熱体表面キャビティに強固な気泡核が存在しており, 不均質自発核生成の下限温度に達する前に, 気泡核からの発泡が先行したのと考えている.

4. まとめ

高濡れ性液体として, エタノールを用いて, 指数関数状熱入力に伴う沸騰現象を観察し, 以下のような結論を得た.

沸騰現象として, エタノールの場合でも二種類の現象が観察された. すなわち, 一方は自然対流熱伝達曲線に沿って熱流束が増加するとともに過熱度も上昇し, 初期沸騰開始後, 過熱度は急減し, 核沸騰を経過して, 限界熱流束点に達した後, 膜沸騰へ遷移するという経過をたどる第1グループであり, 他方は自然対流熱伝達曲線に沿って熱流束が増加するとともに過熱度も上昇し, 沸騰開始後, 核沸騰を経ず, 直接膜沸騰へ遷移するという経過をたどる第2グループである.

最後に計測制御システムの作製に当たり, 京都大学塩津研究室のご支援を賜ったことを記し, 謝意を表する.

参考文献

- 1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構平成11年度調査報告書, 光触媒壁面による沸騰熱伝達特性改善に関する

- る研究, NEDO-ITK-9908 (2000) .
- 2) T. Takamasa, T. Hazuku, N. Tamura, K. Mishima, K. Okamoto, M. Furuya, Effect of Surface Wettability Caused by Radiation Induced Surface Activation on Leidenfrost Condition, Proc. of 10th Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Seoul, Korea, NURETH-10/C00218 (2003) .
- 3) 日高澄具, 山本弘志, 高田保之, 超撥水表面における沸騰, 第40回日本伝熱シンポジウム講演論文集, D141 (2003) .
- 4) A. Sakurai, M. Shiotsu, K. Hata and K. Fukuda, Transition phenomena from non-boiling regime to film boiling on a cylinder surface in highly subcooled and pressurized water due to increasing heat inputs, ASME Paper, 95-WA/HT-17 (1995), pp. 1-11.
- 5) A. Sakurai, M. Shiotsu and K. Fukuda, Pool boiling Critical Heat Flux on a Horizontal Cylinder in Subcooled Water for Wide Ranges of Subcooling and Pressure and Its Mechanism, ASME Publication HTD-Vol.326, vol. 4, pp.93-104 (1996) .
- 6) K. Fukuda, Q. S. LIU and J. D. PARK, Transient boiling critical heat flux in a pool of freon-113 and ethanol under saturated conditions, Proc. of the 3rd International Symposium on Heat Transfer Enhancement and Energy Conservation, pp. 221-227 (2004) .
- 7) A. Sakurai, 2000, "Mechanisms of Transition to Film Boiling at CHF's in Subcooled and Pressurized Liquids due to Steady and Increasing Heat Inputs," Nuclear Engineering and Design, Vol. 197, pp. 301-356.
- 8) Y. Takeuchi, K. Hata, M. Shiotsu and A. Sakurai, 1995, A general correlation for laminar natural convection heat transfer from single horizontal cylinders in liquids and gases with all possible prandtl numbers, 1995 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, ASME HTD-Vol. 317-1, pp.259-270.
- 9) S.S. Kutateladze, V.N. Moskvicheva, G.I. Bobrovichi, N.N. Mamontova, B.P. Avksentyuk, Some peculiarities of heat transfer crisis in alkali metals boiling under free, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 16, No. 4, pp. 705-713 (1973) .