

## 下向き水平伝熱面の沸騰熱伝達の研究

時田 雄次\*・川江 信治\*\*・茂地 徹\*\*  
山田 昭\*\*・外尾 暢 皓\*\*\*A Study on the Boiling Heat Transfer  
from a Horizontal Heating Surface Facing Downward

by

Yuji TOKITA\*, Nobuji KAWAE\*\*, Tohru SHIGECHI\*\*,  
Takashi YAMADA\*\* and Nobuhiro HOKAO\*\*\*

The boiling heat transfer from a downward-facing, horizontal heating surface to saturated or subcooled water has been studied experimentally. The heating surface is one end of a copper cylinder with a diameter in 20 mm, which is heated by an electric heater wound around it. Heat flux at the heating surface may be increased up to about  $1.7 \times 10^6$  W/m<sup>2</sup>. The system pressure was changed in the range from 0.01 MPa to 0.3 MPa and the subcooling in the range from 0°C to 70°C. The experiments are performed under two conditions; (1) the heating surface is kept stationary in water and (2) the heating surface can be moved reciprocally between the vapor and the liquid at a period of 0.67 sec to 2 sec and cooled intermittently. Boiling curves are obtained for these two cases.

From the observations, it is seen that, on the downward-facing heating surface, bubbles formed beneath the heating surface can easily coalesce and form a large blanket of vapor which prevents primary bubbles from separating on the heating surface. In such a case, the boiling curves obtained become discontinuous in the nucleate boiling region and, at low heat flux, they are shifted to the film boiling region.

The burn-out heat fluxes are lower in comparison with that for an upward-facing, horizontal surface. The intermittent cooling due to the reciprocal motion of the heating surface and the pressures less than atmospheric pressure may reduce the value of burn-out heat fluxes.

## 1. まえがき

沸騰現象はその熱伝達率が著しく大きいことから蒸気ボイラ、原子炉、化学工業など広く多岐にわたって応用されている。この沸騰熱伝達率は、過熱度の関数として変化する。低熱負荷領域では、液体は自然対流によって加熱されるが、熱負荷が増すと伝熱面に気泡が活発に発生し始め、熱伝達率は急激に増大する核沸騰領域に入る。

さらに熱負荷が増大すると伝熱面に蒸気膜が形成され膜沸騰領域に移行するが、このとき伝熱面と液体は隔離された状態となって伝熱面温度は異常に上昇する。

従来からこれら沸騰熱伝達に関する研究は非常に多く、伝熱機構の全域にわたってほぼ解明されているが、伝熱が複雑かつ特殊な条件下で行われる実際の応用面では、熱伝達率およびバーンアウト熱負荷を精度よく理論的に求めたり、あるいは類似のデータから推

昭和63年9月30日受理

\*大学院海洋生産科学研究科 (Graduate School of Marine Science and Engineering)

\*\*機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

\*\*\*三菱重工業(株) (Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)

定することが困難な場合が多い。

例えば、本研究で取り上げた下向き伝熱面の場合で、圧力は大気圧以下、伝熱面が間欠的に冷却されるとききの沸騰熱伝達に関してもデータは少ない。下向き伝熱面に関しては石谷ら<sup>1)</sup>や Huplik ら<sup>2)</sup>の大気圧におけるプール沸騰の実験がある。これらによれば、伝熱面下近傍に大きな蒸気塊が停留すること、上向きに比べてバーンアウト熱負荷が低いことなどが報告されている。

低圧領域の沸騰熱伝達に関しては、西川ら<sup>3)</sup>や Ponter ら<sup>4)</sup>の実験など比較的多いが、いずれも上向き伝熱面や細線あるいは円管によるものである。これら西川らの報告の中で、特異な現象として、約200mmHg以下の低圧では核沸騰領域で核沸騰が休止する。すなわち、間欠沸騰が起こることが報じられている。伝熱面を気液間に往復動させて周期的に冷却する場合の沸騰に関しては、その実験例はほとんど見当たらない。

そこで、本研究では、一般の伝熱機器にも多く存在する伝熱面が下向きの場合について沸騰熱伝達の実験を行い、圧力、冷却水温度および冷却の周期など各種要因がどのように沸騰特性に影響するかを明らかにして、熱伝達率とバーンアウト熱負荷に関し実用上信頼できる定量的数値を求める。

## 2. 実験装置

実験装置の系統図を Fig. 1 に示す。作動流体として使用する脱気水は、タンクからテストループ内へ補給

される。テストループ内に保有された水はキャンドポンプで循環し、加熱器で所定の温度に加熱されてテストセクション（沸騰槽）に流入する。沸騰槽は $7.56 \times 10^{-3} \text{m}^3$ のステンレス容器で、使用圧力は最高0.51MPa、最低0.0061MPa程度の範囲である。

大気圧以上の実験では、コンデンサの冷却水量によって凝縮量をコントロールして圧力を設定し、大気圧以下の実験では真空ポンプの吸引量によって圧力をコントロールした。

容器内の水温調節は底部に取付けられた補助ヒータと加熱器によって行い、流れは底部の三つの配管を操作してプール、強制対流あるいは噴流など各種を得ることができる。

使用した発熱ブロックの詳細を Fig. 2 に示す。このブロックは、一端が直径20mmの伝熱面となっている銅ブロックと、これを包む直径70mmのステンレスの外筒から成る。銅ブロックはこれに取付けている700Wのシースヒータによって加熱され、これによって熱負荷は伝熱面で最高 $1.7 \times 10^6 \text{W/m}^2$ まで得られる。

また、銅ブロックには伝熱面温度と熱負荷を測定するための熱電対が軸方向に10mm間隔で3本、過熱監視用のが1本埋込まれており、伝熱面中心には伝熱面の乾きとぬれを検出するための双極式センサが取付けられている。伝熱面と外筒間の断熱シールには0.5mm以下の薄いステンレス鋼板を用いた。

伝熱面を往復動させる駆動装置は、駆動モータ、変

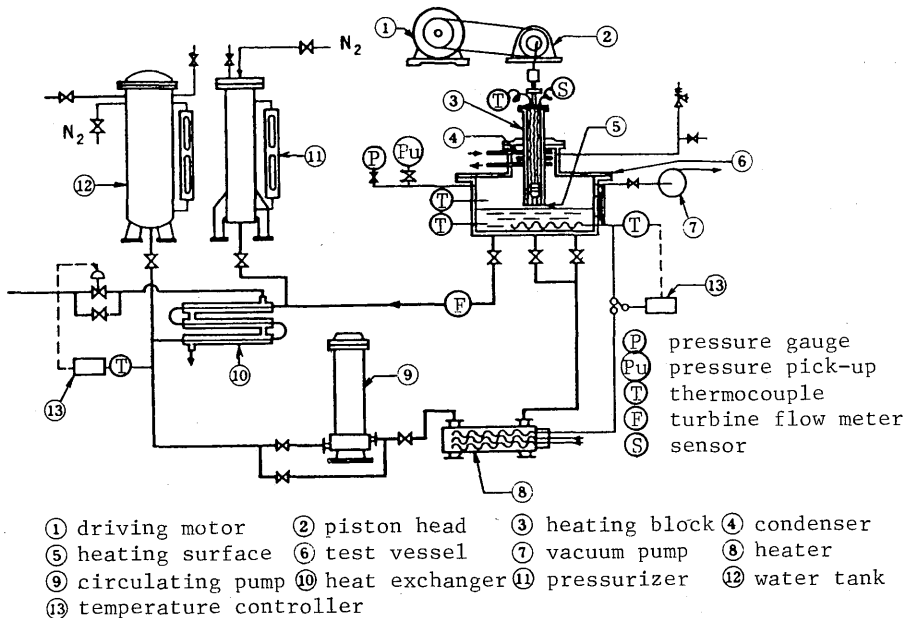


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

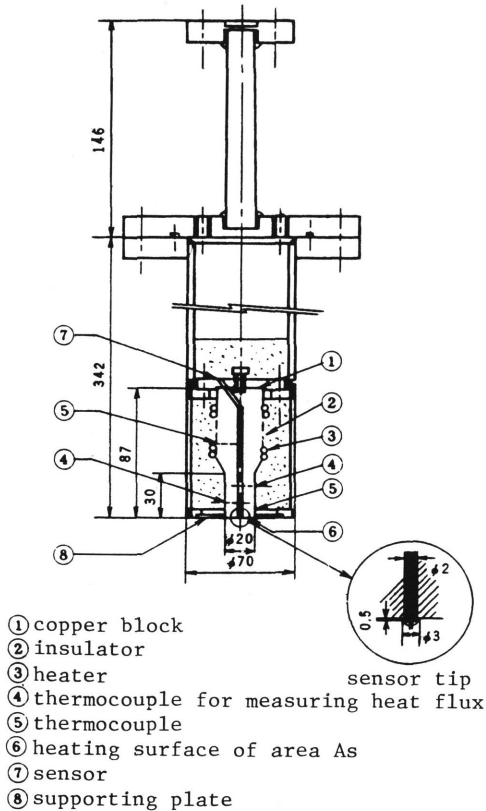


Fig. 2 Cross section through heater block

速機および発熱ブロックと直結しているピストンクランクから成っている。回転数は変速機とプーリの組合せによって30~300rpm (伝熱面の往復動周期で0.2~2 sec) の範囲でコントロールできる。

テストセクションを出た水は冷却器に入り、ここで余分の熱は吸収されてテストループ内のヒートバランスが保たれる。

各部の温度 (銅ブロック, 容器内水温など) の検出にはすべてC A熱電対を使用し, 起電力はmV計で測定した。しかし, パーンアウト近傍あるいは間欠沸騰のときなど伝熱面温度に変動が伴うような場合は, D Cアンプを介して電磁オシロによって記録した。伝熱面の乾きとぬれの検出は既述のように双極式センサを用い, 伝熱面近傍の電気抵抗の変化を動ひずみ計を介して電磁オシロで記録した。容器内の圧力は, 大気圧以上の場合にはブルドン管式圧力計, 大気圧以下の場合には水銀マンオメータで測定し, 真空領域から大気圧以上にわたる大きな圧力変動がある場合は圧力ピックアップで検出して, その測定記録には上記と同様動ひずみ計と電磁オシロを用いた。

伝熱面の熱負荷は, 断面積  $A_0$  (Fig. 2の熱電対IとIIの間の平均値) の伝熱面付近熱電対IとIIの間隔  $\delta_0$

の2点にそう入した熱電対で温度差  $\Delta t_0$  を測定し,

$$q_s = \lambda_{cu} (\Delta t_0 / \delta_0) (A_0 / A_s)$$

として求めた。ここに,  $q_s$ ,  $A_s$  はそれぞれ伝熱面の熱負荷および面積,  $\lambda_{cu}$  は銅ブロックの熱伝導率である。この熱負荷は加熱用ヒースヒータの消費電力からも推定できるが, 測定には標準電力計を用いた。

沸騰槽にはのぞき窓を設け, 伝熱面近傍の気泡の挙動など沸騰の様相を観察するとともに, 窓にビデオカメラをセットしてこれら沸騰の過程を記録した。

### 3. 実験結果

#### 3. 1 沸騰の様相

沸騰の様相は, 圧力, 水温あるいは周期などによって異なるが, 共通した点は Fig. 3 に示すような伝熱面下方に常に大なり小なりの蒸気塊が存在していることである。

熱負荷を徐々に増加していくと, 自然対流領域を過ぎるころから伝熱面に小さな気泡が発生し始め, 合体して比較的大きな気泡となる。熱負荷を増すに従い, やがて Fig. 3 に示したような伝熱面を覆うほどの大きな蒸気塊が形成される。

核沸騰領域ではこの蒸気塊と伝熱面の間には常に液層が存在し, 伝熱面から発生した1次気泡の一部は上記の薄い液層を通して周囲に逃げるが, 一部は蒸気塊に吸収合体される。1次気泡を吸収した蒸気塊は成長し, やがて伝熱面周囲のフランジからはみ出して伝熱面から完全に離脱してしまうか, あるいは分裂し一部離脱して小さな蒸気塊が残ったりする。

このように蒸気塊は伝熱面で膨張, 収縮 (あるいは消滅) を繰り返す。さらに熱負荷を増加すると, 伝熱面の液層は消失し蒸気膜が面を完全に覆った状態となり, パーンアウト点に達して膜沸騰領域に移行する。

往復動がある場合は, 核沸騰領域では蒸気塊は伝熱

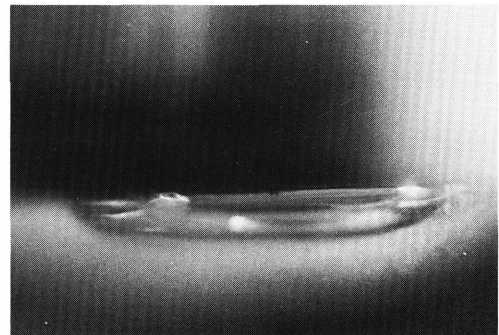


Fig. 3 Vapor blanket beneath the downward-facing heating surface

面が水面を出入りする際に乱されて大きな塊に成長しにくい。しかし、バーンアウト点に近くなると、静止伝熱面の場合と同様に大きな蒸気塊が停留するようになる。

以上に述べた伝熱面の様相を、伝熱面の中心に取付けたぬれと乾きを検出するセンサの信号とメタル温度の関係からみると、Fig. 4 のようになる。

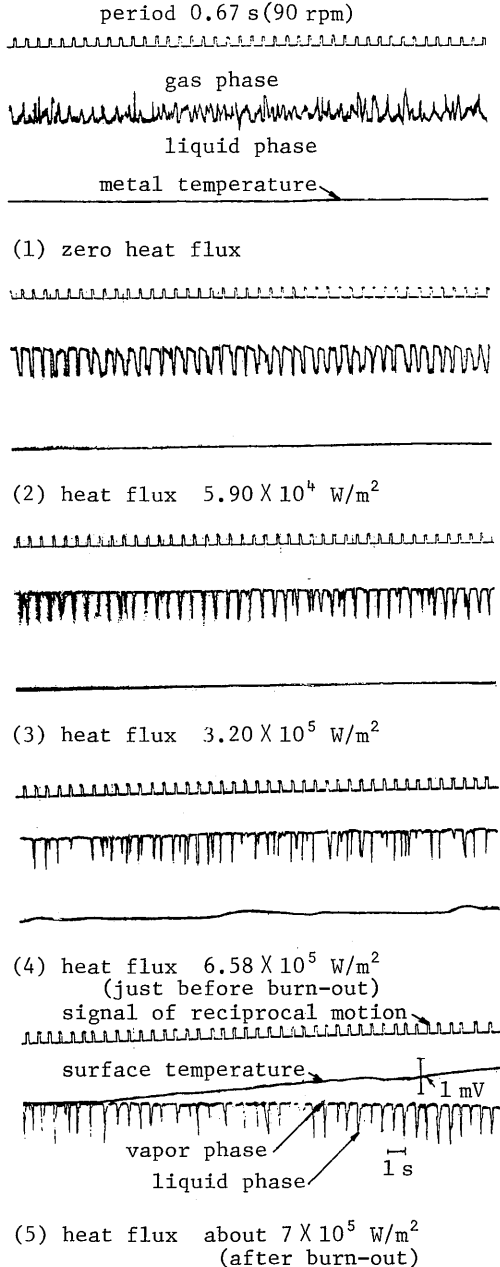


Fig. 4 Conditions of heating surface at periodical cooling

Fig. 4 の(1)は非加熱の場合で伝熱面のぬれ具合を示すものであるが、伝熱面が水面を離れる瞬間に水が完全に切れないので、信号は必ずしもステップ状ではなく鈍った波形になっている。(2)は低熱負荷の領域で気相と液相がほぼ等間隔で繰返されているのがわかる。(3)は熱負荷が $3.2 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 付近の核沸騰が盛んな領域で、気相の期間が長くなっているがメタル温度は安定している。

同じく Fig. 4 の(4)は、さらに熱負荷を増したバーンアウト点直前の状況を示すものであるが、気相の占める割合が極めて大きく、そのうえ蒸気膜が形成されるためメタル温度が一時的に上昇するなど不安定になる。(5)はバーンアウト発生後の状況を示すもので、伝熱面が水面に接触する瞬間にぬれを検出するのみでほとんど気相である(静止伝熱面の場合はぬれは全く検出されない)。伝熱面は蒸気膜に覆われるため、メタル温度は急激に上昇する。またセンサ近傍の電場が変化するために、センサの信号レベルも変動するのがこの領域の特徴である。

### 3. 2 圧力0.1MPa の場合

冷却水が飽和温度の場合の沸騰曲線を Fig. 5 に示す。バーンアウト熱負荷は、伝熱面が静止している場合が最も大きく、往復動がある場合は周期が長くなるに従い減少する。核沸騰熱伝達率は伝熱面が静止して

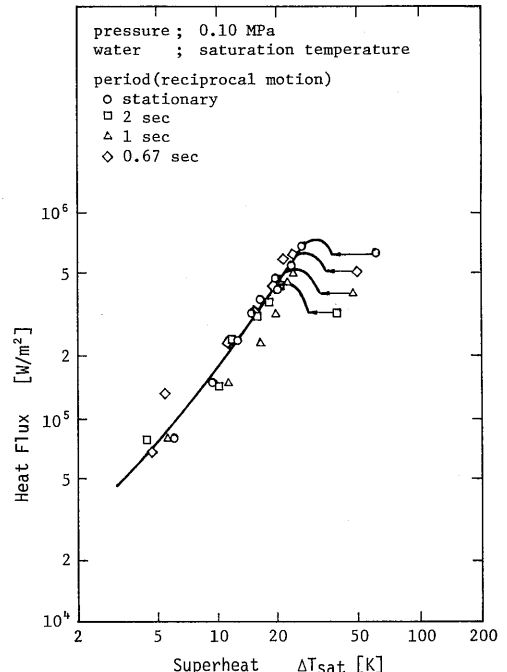


Fig. 5 Boiling curves for saturated water on a downward-facing surface (0.1MPa)

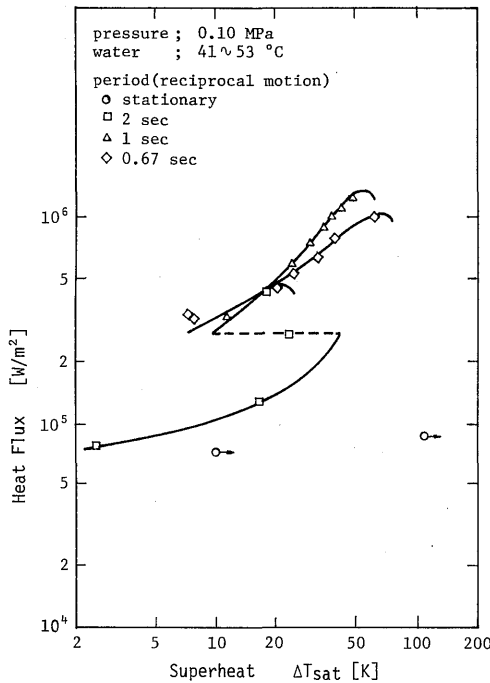


Fig. 6 Boiling curves for subcooled water on a downward-facing surface (0.1MPa)

いるか、往復動しているかにかかわらずほとんど差はない。

冷却水が飽和温度以下の場合のサブクール沸騰曲線を Fig. 6 に示す。サブクールがある場合は、静止した伝熱面では熱負荷が  $5.8 \times 10^4 \sim 15 \times 10^4 \text{ W/m}^2$  程度の低領域で、発生した気泡（径約40mm以下）が伝熱面全体を安定した状態で覆い、伝熱面温度はバーンアウト点に達したときと同様な急激な上昇を示す。伝熱面が比較的長い周期（2秒）で往復動する場合、熱負荷が  $2.3 \times 10^5 \text{ W/m}^2$  以下の領域では蒸気塊が乱されて伝熱面には部分的に液層が存在する。したがって、伝熱面温度は通常の沸騰曲線から外れた高い値で平衡状態になる。

熱負荷をさらに増して  $2.3 \times 10^5 \text{ W/m}^2$  以上になると、熱伝達率は飽和沸騰の場合より若干低下するが通常の沸騰特性を示す。このように沸騰特性曲線上、例えば熱負荷  $2.3 \times 10^5 \text{ W/m}^2$  付近に不連続な領域が存在する。この領域では、核沸騰と緩慢な合体気泡の成長およびフランジからの離脱あるいはフラッシングによる蒸気塊の急激な収縮、これらの繰返しによって生ずる間欠沸騰の現象がみられる。

伝熱面温度も気泡の成長に伴い上昇し、収縮あるいは消失と同時に急激に下降する。往復動周期が短い場合は、核沸騰熱伝達率は飽和沸騰のときに比べ低下す

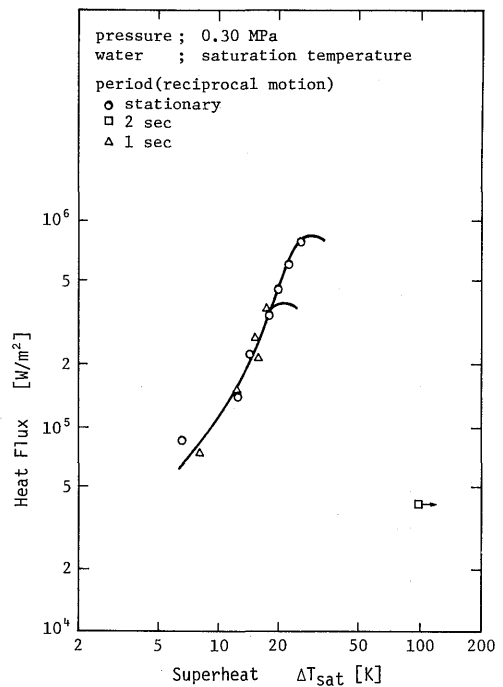


Fig. 7 Boiling curves for saturated water on a downward-facing surface (0.3MPa)

るが、バーンアウト熱負荷は増加する。

### 3. 3 圧力0.3MPaの場合

冷却水温度が飽和温度  $133^\circ\text{C}$  の場合の沸騰曲線を Fig. 7 に示す。伝熱面が静止している場合は、大気圧の沸騰特性とほとんど差は認められない。伝熱面での気泡発生は連続的に行われ、フランジからの気泡離脱も盛んである。蒸気塊の形成は比較的遅く、核沸騰の後半に現れる。

伝熱面が往復動し周期が比較的長い場合には、静止伝熱面でサブクールがあるときにみられた低熱負荷領域での膜沸騰移行の現象が生じた。周期が短くなると、この異常な温度上昇は起こらない。冷却水温度が  $80^\circ\text{C}$  前後のサブクールがある場合、Fig. 8 に示すように伝熱面が静止しているときには、大気圧の場合と同様に低熱負荷領域で膜沸騰に移行する。

伝熱面が比較的長い周期で往復動する場合は、飽和沸騰の静止伝熱面の場合と比較して核沸騰熱伝達率は著しく低下し、バーンアウト熱負荷も減少する。

### 3. 4 圧力0.01MPaの場合

冷却水温度が飽和温度  $46^\circ\text{C}$  の場合の沸騰曲線を Fig. 9 に示す。沸騰特性は大気圧の場合と比較すると、得られた曲線から判断する限りでは、核沸騰熱伝達率が幾分小さい程度であり差異はないが、低圧の場合には低熱負荷領域で間欠沸騰が起こっている。しかし、

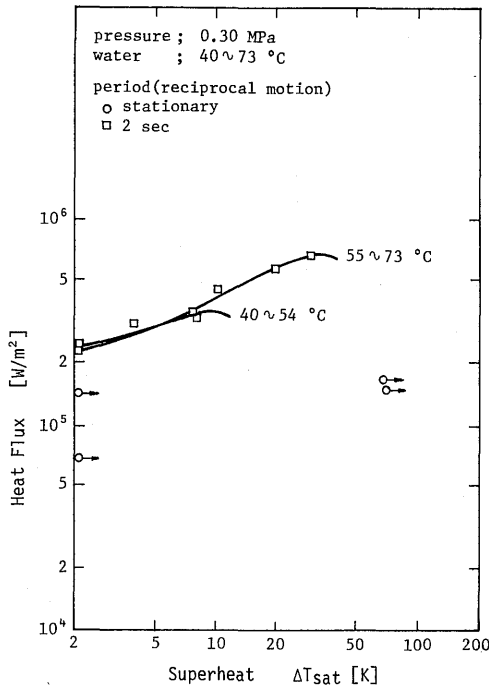


Fig. 8 Boiling curves for subcooled water on a downward-facing surface (0.3MPa)

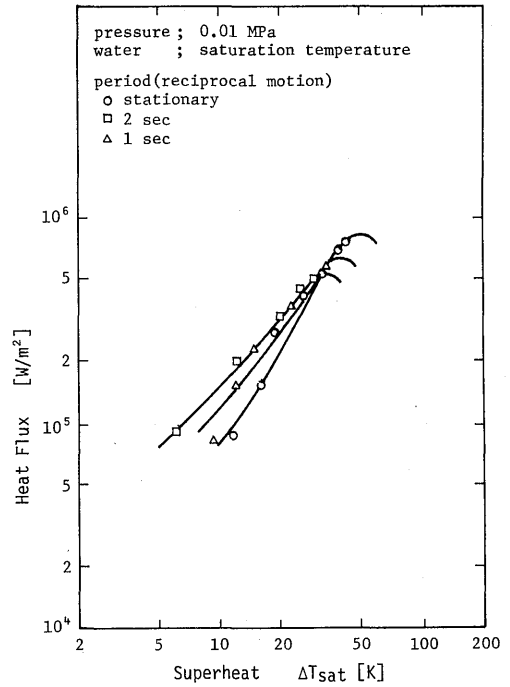


Fig. 9 Boiling curves for saturated water on a downward-facing surface (0.01MPa)

伝熱面温度の変動はほとんど認められない。

サブクールがある場合の沸騰曲線を Fig. 10 に示す。伝熱面が静止しており、冷却水温が飽和温度に近い場合には熱負荷  $10^5 \text{ W/m}^2$  以下の領域で間欠沸騰の現象がみられる。サブクール温度が大きいときは膜沸騰に移行してしまうが、この領域では冷却水の温度の影響は極めて微妙であって、わずかな温度変動でも沸騰の様相が異なってくる。

### 3. 5 圧力0.05MPaの場合

飽和沸騰とサブクール沸騰それぞれの特性曲線を Fig. 11 および Fig. 12 に示す。冷却水温、往復動周期の影響など大気圧あるいは0.01MPaの場合と特に変わったことはなく、いずれの条件に対しても沸騰特性は上記圧力と同じ傾向を示している。

## 4. 考 察

下向きの伝熱面が静止および往復動しているときの、沸騰伝熱特性についての実験結果をまとめると Table 1 のようになる。表中の(1)については、圧力が高いほど発生気泡の径が小さくなり、気泡発生ひん度が増大するために、核沸騰領域の熱伝達率は増加する。しかしバーンアウト点付近では、伝熱面下方に停留している蒸気塊がいずれの条件の場合にも巨大化し、伝熱面からの気泡の離脱を妨げるなど影響が大きいため、パー

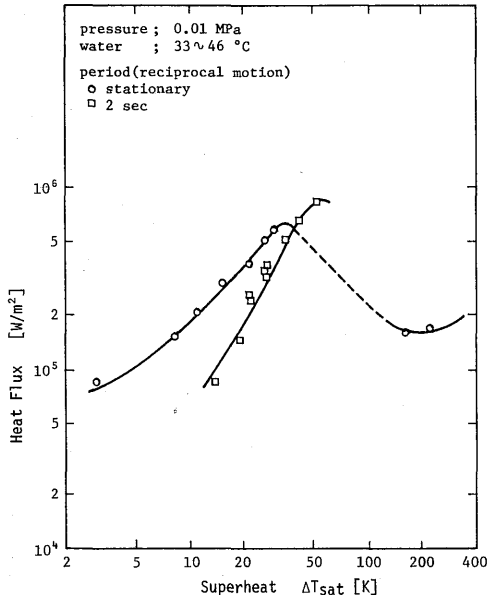


Fig. 10 Boiling curves for subcooled water on a downward-facing surface (0.01MPa)

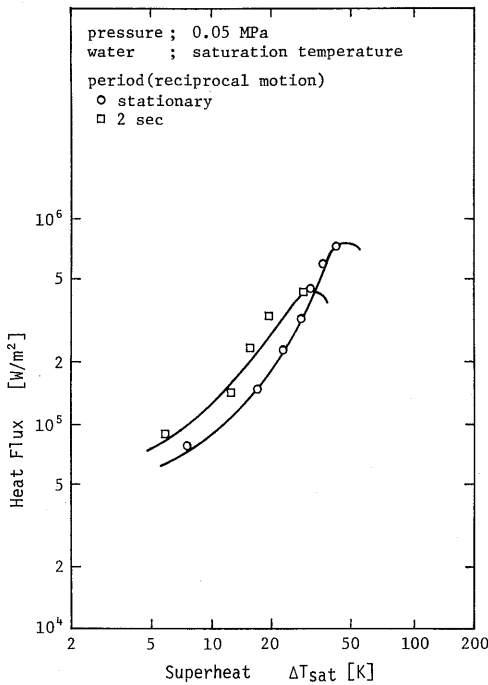


Fig. 11 Boiling curves for saturated water on a downward-facing surface (0.05MPa)

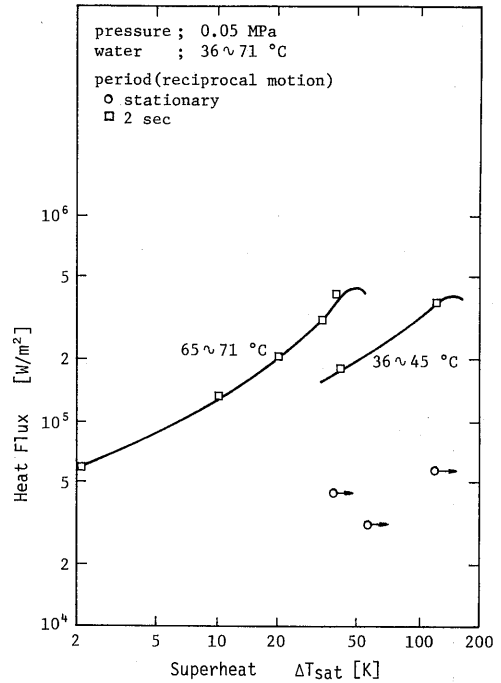


Fig. 12 Boiling curves for subcooled water on a downward-facing surface (0.05MPa)

Table 1 Effects of pressure, water temperature and period of reciprocal motion on the characteristics of boiling heat transfer from a downward-facing heating surface

項目		要因	圧力	水温	周期
静止	(1) 飽和沸騰 熱負荷	バーンアウト	影響は少ない	——	——
	核沸騰 熱伝達率		圧力が高い程増加する	——	——
伝熱面	(2) サブクール沸騰 熱負荷	バーンアウト	圧力に関係なく小さい	水温が高いと増加する	——
	核沸騰 熱伝達率		低熱負荷領域で膜沸騰に移行する	水温が高くなると間欠沸騰が起る	——
往復動	(3) 飽和沸騰 熱負荷	バーンアウト	影響は少ない	——	周期が短い程増加する
	核沸騰 熱伝達率		圧力が高い程わずかに増加する	——	影響は少ない
伝熱面	(4) サブクール沸騰 熱負荷	バーンアウト	圧力が低い(負圧)と減少する	水温が低いと増加する	周期が長くなると減少する
	核沸騰 熱伝達率		圧力が高い程減少する	水温が低いと減少する	周期が短い程増加する

ンアウト熱負荷に差は生じない。

Table 1の(2)については、気泡の成長の途中、気液境界面で蒸気膜から液体への熱伝達があり、サブクール温度差が大きいと伝熱面から伝達される熱量とバランスして蒸気膜はそれ以上成長しなくなる。このときの熱負荷を試算する。蒸気膜から液体への伝熱は自然対流であるから、水平伝熱面に関する次式<sup>5)</sup>から熱伝達率を算出する。

$$Nu = 0.27(GrPr)^{0.25}$$

蒸気膜温度を100°C、冷却水温度40°Cの場合熱伝達率は721W/(m<sup>2</sup>・K)、したがって気液境界面の熱負荷は10<sup>4</sup>W/m<sup>2</sup>となる。完全に平衡状態に達したデータがないために厳密な比較はできないが、温度異常上昇が起る領域に入る。

サブクール温度差が小さい場合には上記のバランスが崩れやすく、蒸気膜がある程度成長すると崩壊して核沸騰に戻るといったいわゆる間欠沸騰の現象がみられる。

Table 1の(3)については、伝熱面温度変動の振幅は往復動周期によって変化し、長いほど伝熱面温度は過熱されやすい。

Table 1(4)のサブクーリングがある場合は境界層が厚く、しかも冷却水に接触するたびに新しい境界層が

形成されるから、ある期間対流熱伝達が占めるため平均の熱伝達率は飽和沸騰の場合より低くなる。しかし伝熱面がぬれている時間が長くなり、冷却効果が持続するためバーンアウト熱負荷は増大する。周期に関しては、2秒程度になると伝熱面が乾いている時間が長く過熱されやすくなって、バーンアウト熱負荷は減少するが、短い周期では影響は現れていない。

一方、往復動によって境界層が乱されるから、上述の対流熱伝達率が増加する。したがって、より多くの乱れを促す短い周期のほうが、熱伝達がよくなる。圧力が低いと発生する気泡の径が大きく、気泡の離脱を妨げる巨大な蒸気塊を形成しやすい。

伝熱面が冷却水に換触してから沸騰が始まるためには、境界層の温度が飽和温度まで上昇する（過熱層の形成）必要がある。したがって、一定冷却水温度に対して飽和温度が高いほど1サイクル中に占める沸騰熱伝達の割合が少なくなるから、熱伝達率は圧力の増加に伴い低下する。

## 5. むすび

伝熱面が下向きで、プール沸騰および伝熱面が気液間を往復動して間欠的に冷却される場合の沸騰、さらに圧力が大気圧以下になったときの沸騰、それぞれの沸騰特性曲線を実験的に求め、沸騰の様相を観察し、特異な特性を示すことがわかった。

すなわち、

- (1) 伝熱面が下向きの場合、伝熱面から発生した気泡が合体して蒸気塊を形成し、伝熱面下方近傍に停留して1次気泡の発生、成長および離脱に影響を及ぼす。
- (2) 蒸気塊の存在が、核沸騰を休止させるため、沸騰曲線が不連続になったり、低熱負荷領域で膜沸騰に移行してしまうことがある。
- (3) 上向き伝熱面の場合に比べて、バーンアウト熱負

荷は一般に低くなる。

- (4) 間欠冷却は、伝熱面が液面に接触する際に物理的な乱れが加わり、熱伝達率、バーンアウト熱負荷を増加させることもあるが、熱的には周期が長くなった場合に水切れの現象が現れ、バーンアウト熱負荷の低下を招くこともある。
- (5) 圧力が大気圧以下の場合には、発生する気泡が大きいため蒸気塊の影響を受けやすくバーンアウト熱負荷の低下を促進することになる。

今後、さらに検討を要する問題点としては、下向き伝熱面の場合には、気泡の離脱が伝熱面の形状寸法の影響を大きく受けると予想されるので、伝熱面およびフランジの径を要因として考慮せねばならない。また、蒸気塊の停留を防ぐ一つの方法として伝熱面に平行な流れを作る場合、必要最小の流速はどの程度かなど検討しておく必要がある。

初めに述べたように、沸騰伝熱の現象は多くの工業用機器類に應用されているが、中には伝熱面あるいは冷却面が下向きの場合も少なくない。このような機器類の設計の場合、本研究で得られた下向き伝熱面の沸騰伝熱特性の特異性を十分考慮する必要がある。

## 参 考 文 献

- 1) Ishigai S., Inoue K., Kiwaki Z., and Inai T.; Proceedings of the 1961-62 International Heat Transfer Conference, Boulder, Colo., (1962), 224.
- 2) Huplik V.; Journal of Heat Transfer, Trans. ASME, Series C, Vol. 94, No.11 (1972), 403.
- 3) Nishikawa K., Fujita Y., Nawata Y. and Hirahaya K.; Memoirs of the Faculty of Engineering Kyushu University, Vol. 30, No. 2 (1970).
- 4) Ponter A. B. and Haigh C. P.; Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 12, (1969), 413.
- 5) 甲藤好郎; 伝熱概論, 養賢堂 (昭44), 174.