536.423.1 : 532.51

核 膜 共 存 時 の 沸 騰 伝 熱*

西 川 兼 康**, 下 村 竜 太 郎**

Boiling Heat Transfer at the Coexistence
of Nucleate and Film Regions

by Kaneyasu NISHIKAWA and Ryūtarō SHIMOMURA

E. Zielinski discovered experimentally the following method that enables us to realize film boiling comparatively easily. That is, when a wire on which nucleate boiling is occurred with heating current adjusted to a rather low heat flux is pulled out of water for a short time, the surface of the wire dries up and its temperature rises, even if heat flux is kept constant, since the wire is brought to contact with air. If the wire is sunk again in water afterward, it will be heated red-hot after a few seconds and film boiling appears. He asserts that film boiling is to be realized thus with comparative easiness by cutting off temporarily the contact between heating surface and water. The authors who were interested in the experimental process of this paper carried out similar experiment and succeeded in realizing a condition where nucleate and film boiling coexist stably on the same heating surface by heating with a given heat flux. This is considered to be a kind of transition boiling and the present paper deals with the boiling phenomena at the coexistence of nucleate and film regions in saturated water, subcooled water and sodium oleate solution as well as their relation with boiling characteristic curve.

1. は し が き

沸騰伝熱には核沸騰と膜沸騰の2形式があり、この二つの形式については多くの研究がなされているが、その中間の形式である遷移沸騰については二三の研究があるにすぎず、はたしてこの形式の沸騰現象が安定に存在しうるか否かについても多くの疑問があるような現状である。しかるにこの遷移沸騰は伝熱面のバーンアウトと密接な関係があり、バーンアウト熱負荷は設計上の限度を示すものであるから、非常に重要な問題である。従来遷移沸騰を実現しえたと称する実験の加熱方法を大別すると、(i) 電気加熱と水冷却の併用装置⁽¹⁾、(ii) 蒸気加熱装置⁽²⁾⁽³⁾、の二つになり、電気加熱装置を用いると実現しえないのが常識である。

E. Zielinski⁽⁴⁾ は膜沸騰を比較的容易に実現する次のような方法を実験的に見出した。すなわち、比較的低い熱負荷に調整された加熱電流で核沸騰を行なっている針金を短時間水中から引出すと、針金が空気と接触することになるので、熱負荷を一定のままにしておいても針金の表面は乾燥して温度は上昇する。その後再び針金を水中に沈めると、数秒後に針金は赤熱し、

膜沸騰が出現した。このように加熱表面と水との接触を一時的に断することにより比較的容易に膜沸騰を実現できるというのである。著者らはこの論文の実験過程に関心をもち、同様な実験を行なったところ、一定熱負荷の加熱において、核沸騰と膜沸騰とが同一加熱表面で安定に共存する状態を実現することができた。これは一種の遷移沸騰と考えられるのであるが、本報告はいろいろな熱負荷における核膜共存時の沸騰現象およびこれと沸騰特性曲線との関連についてのべたものである。

2. 実 験 の 方 法

伝熱面としては直径 0.5 mm、長さ 90 mm の白金線を用い、伝熱面の加熱は直流電気加熱によることにした。この加熱線を試験液体をみたした高さ 20 cm、直径 15 cm のビーカーに水平に沈め、上部はゴムふたで密閉する。なお試験液体の温度を沸点あるいは所定の温度に保つために、上述のビーカーを内部観測のための窓を対向二面に有する恒温そうにそう入する。恒温そう内の水の温度は投入加熱器およびかくはん器を用いて所定の温度に保つようにしてある。

第1図は実験装置と計器類の配置および回路の概要を示したものである。伝熱面熱負荷は加熱線を通る電流と電圧を測定することにより求め、加熱線の温度

* 昭和 35 年 4 月 2 日 第 37 期通常総会講演会および昭和 37 年 10 月 22 日 九州支部・中国四国支部連合新居浜地方講演会において講演、原稿受付 昭和 38 年 1 月 21 日。

** 正員、九州大学工学部(福岡市箱崎町)。

は白金線自体を抵抗温度計として, 第1図の加熱線 R_x , 可変抵抗 R_B , マンガニン線抵抗 R_C および固定抵抗 R_A でホイートストンブリッジを組み, R_x の電気抵抗値を測定することにより求めた. なお試験液体の温度は伝熱面より約4cm上の点を銅-コンスタンタン熱電対を用いて測定することにより求めた.

白金線の加熱過程としては, 次の二つの方法を試みた. (i) E. Zielinski の方法. 核沸騰を行なっている白金線を熱負荷一定値に固定したまま水中より引上げ, 表面を乾燥させた後, 直ちに再び水中に投入し, 沸騰の様相が落ち着いたところで測定を行なう. (ii) E. A. Farber-R. L. Scoria⁽⁵⁾ の方法. 熱負荷をバーンアウト点まで漸次上昇し, 針金が焼損する前に金属の融点以下に対応する熱負荷まですみやかに低下させ, そこで熱負荷を固定して測定を行なう. 以上二つの方法で核膜共存の沸騰現象を実現させた後, 適当に熱負荷を上下させてデータをとった. また完全膜沸騰は別に白金線の両端に小さい管をつけた装置を用いて実現した. さらに, 伝熱面近傍の気泡発生の様相を露出時間 1/1 000 秒で写真撮影した.

実験の条件および範囲は次のとおりである.

試験液体: 蒸留水およびオレイン酸ソーダ水溶液.
オレイン酸ソーダ濃度: $C=10, 50$ および 150 ppm
(表面張力: $52.7, 38.3$ および 34.3 dyn/cm).
過 冷 度: $\Delta\theta_c=0, 3, 5, 7$ および 10°C .
熱 負 荷: $q=(2\sim100)\times10^4 \text{ kcal/m}^2\text{h}$.

M: 電動機, G: 発電機, H: 白金線加熱器, H₂: 底部加熱器, H₃: 投込加熱器, R_x : 加熱線, R_B : 可変抵抗器, R_C : マンガニン線抵抗, R_A : 固定抵抗, g: 検流計, R_g : 可変抵抗, A: 電流計, V: 電圧計, CA: 35 mm カメラ, I: 集光レンズ, L: 投光器, T_1, T_2, T_3 : 温度計

第1図 実験装置

第2図 水の飽和局所膜沸騰の様相

3. 実 験 結 果

3.1 沸騰の様相 第2図は飽和水の核膜共存時の沸騰（以下これを局所膜沸騰と仮称する）の外観写真の数例を示したものである。第2図（a）は局所膜沸騰の最低熱負荷に対応するものであり、第2図（d）は完全膜沸騰に移行した直後の熱負荷に対応する写真である。これらの図において、膜沸騰の部分は温度が高くなっているので、白金線は赤熱し、核沸騰の部分は暗くなっている。膜の端部は表面張力のために ろと状となり、安定な核膜共存状態では蒸気膜端は一定の場所に固定されている。

E. Zielinski の加熱方法では、熱負荷を一定にして加熱線を水中より引上げて表面を乾燥させ、赤熱状態より再び水中に投入すれば、まず全体が膜沸騰を起し、徐々に膜の部分が減退し、ある時間経過した後沸騰の様相が安定し、核沸騰と膜沸騰とが共存するようになる。この状態より熱負荷を上げれば膜沸騰の部分が増大し、熱負荷を下げれば膜沸騰の部分が減少するが、いずれの場合にも膜の成長あるいは減衰はある点で停止し、安定な核膜共存状態が実現する。

E. A. Farber-R. L. Scoria の加熱方法では、バーンアウト点より膜沸騰に移行をはじめてあまり蒸気膜が成長しないうちに、すなわち核沸騰部を残したまま

第 3 図 水の表面局所膜沸騰の様相

第 4 図 オレイン酸ソーダ水溶液の飽和局所膜沸騰の様相

ある所まで熱負荷を下げると、安定な核膜共存状態が実現できる。この加熱方法のほうが E. Zielinski の加熱方法によるよりもいくぶん低い熱負荷まで局所膜沸騰を生じるようである。

飽和水の場合実現できた局所膜沸騰の最低熱負荷は約 $2.0 \times 10^5 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ で、伝熱面が完全に蒸気膜でおおわれはじめる熱負荷は約 $5 \times 10^5 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ であった。この最低熱負荷の場合における沸騰の様相をよく観察すると、次のようなことがいわれる。すなわち、核沸騰と膜沸騰とが共存しうするためには、膜沸騰部における気ほう柱が少なくとも三列存在する必要がある、これ以下の気ほう柱の場合には時間の経過とともに結局膜沸騰部は消滅し、伝熱面全面に核沸騰のみが実現する。したがって蒸気柱が二列以下であるような安定な蒸気膜は存在しないといえることができる。これはおそらく膜沸騰部は高温であるために、蒸気膜を通して伝熱面から沸騰液体への伝導およびふく射による伝熱のほかに、膜沸騰部より核沸騰部への針金を通しての伝導による伝熱があり、この両方の放熱量が膜沸騰部の受熱量を上回るためであろう。

第3図は3種類の過冷水についての局所膜沸騰の外観写真を示したものである。(a)、(b) および (c) はほぼ同一の熱負荷に対するものであるが、過冷度が大きいほど膜沸騰部が短くなっているのが認められる。また、(a) の場合と (c) の場合とについて検討してみると、写真ではそれほどはっきりしないが、実験時の観察では (c) の膜沸騰部にくらべて (a) の膜沸騰部の中央のあたりではやや赤熱しているのが

認められた。このことは過冷度が大きいほど安定な膜沸騰部が実現しにくいことを示しているように思われる。つぎに、第3図(d)は(a)の状態から熱負荷を増したものであるが、膜沸騰部はすでに白熱し、その端部の核沸騰に接したあたりはかなりゆるやかな温度こう配があり、徐々に暗くなって核沸騰部につらなっているのが認められた。

第4図はオレイン酸ソーダ水溶液を用いた飽和局所膜沸騰の外観写真である。これらの写真においてオレイン酸ソーダの濃度の差は上述の過冷度の差とほぼ相似た効果を示し、同一熱負荷において濃度が増すほど膜沸騰部が短くなっているのが認められる。また濃度の増加につれて赤熱の割合が増加するが、それも膜沸騰部の中央部だけでなく比較的一様に赤熱しているのが観察された。さらに核沸騰部ではオレイン酸ソーダの添加量が増すほど、気ほうの発生点数が多く、その径が小さくなっている。

3.2 膜沸騰部の伝熱面被覆割合 第5図は水の過冷度 $\Delta\theta_c$ を変えた場合について写真記録より膜沸騰部の長さ L_f の白金線の全長 L に対する割合を測定し、これと熱負荷 q との関係のプロットしたものである。また第6図はオレイン酸ソーダ水溶液に対して同様な関係を示したものである。第5図において過冷度により $L_f/L-q$ の関係が異なっているが、その原因は核沸騰部の白金線の温度はほぼ同じであるが、過冷度が大きくなるにしたがい周囲の温度の低い液体が膜になって進出しようとする蒸気をくいとめるような働き

第5図 水の膜沸騰部の割合

第6図 オレイン酸ソーダ水溶液の膜沸騰部の割合

をするためと考えられる。第 6 図では液体の温度は飽和温度であるが、表面張力の減少につれて気ほう発生点数が多くなり、そのために核沸騰部の白金線の温度は多少低くなり、その結果オレイン酸ソーダの添加量が増すほど蒸気膜の進出がおさえられる結果を示しているものと思われる。

3.3 沸騰特性曲線 第 7 図は熱負荷 q および熱伝達係数 α と伝熱面と液体との温度差 $\Delta\theta$ との関係を飽和水の場合についてプロットしたものである。この図からわかるごとく、局所膜沸騰時には $q-\Delta\theta$ 曲線は一調増加の傾向にあるにもかかわらず、 $\alpha-\Delta\theta$ 曲線は一調減少の傾向にある。しかも $\Delta\theta$ の増大とともに α が増大しはじめる熱負荷はほぼバーンアウト熱負荷に等しく、この熱負荷において伝熱面が完全に蒸気膜でおおわれる。第 7 図の点線は著者がさきに⁽⁶⁾安定膜沸騰の実験においてえた結果であるが、 $\Delta\theta \approx 900^\circ\text{C}$ 以下では本実験の平均線との間に差異がある。この実験では加熱線の両端にがい管を取付けて実験を行なっているので、低熱負荷でも核膜共存の状態は実現せず、全体が膜沸騰を行っていた。本実験の局所膜沸騰実現時にはこのがい管を用いていないので、その差があらわれたものと思われる。すなわち、がい管が加熱線の両端にあると、その部分は高温となりやすく、がい管部に膜沸騰起動力が存在することになり、膜沸騰が局所的にでも発生しうる熱負荷では直ちに全体が膜沸騰になり、加熱線全体の平均温度は同一熱負荷では局所膜沸騰の場合より高くなるのである。以上の理由により本実験においても完全膜沸騰を実現する場合には白金線の両端にがい管をとりつけたのである。

第 7 図 飽和水の熱伝達係数および熱負荷

第 8 図および第 9 図はそれぞれ過冷度およびオレイン酸ソーダの添加量をパラメータとして熱負荷 q と伝熱面と液体との温度差 $\Delta\theta$ との関係をプロットしたものである。第 8 図において核沸騰部、完全膜沸騰部および局所膜沸騰部にそれぞれ過冷度の影響があらわれている。すなわち、核沸騰部では過冷度が増すほど熱伝達は悪くなり、局所膜沸騰および完全膜沸騰ではかえって熱伝達がよくなることを示している。これは核沸騰部では過冷度が増すほど気ほうによる熱の除去がしだいに期待できなくなるのに対し、膜沸騰部では液温の低下のほうが熱除去に対して大きな影響をもつようになるからであろう。つぎに第 9 図において核沸騰部および局所膜沸騰部ではオレイン酸ソーダの添加量が増加するにつれて熱伝達はよくなるが、完全膜沸騰部ではその影響がほとんどあらわれていないことが示されている。オレイン酸ソーダを添加することは、他の物性値を変化させずに表面張力のみを低下させることであるから、核沸騰および膜沸騰における効果は従来の実験より予測されるところである。したがって局所膜

第 8 図 水の沸騰特性曲線

第 9 図 オレイン酸ソーダ水溶液の沸騰特性曲線

沸騰部におけるオレイン酸ソーダ添加による熱伝達の変化は核沸騰部の効果のみによるものと考えられる。

4. 実験結果の考察

まず飽和水の沸騰の場合について考えてみる。第7図において、ABCは核沸騰域、EFGは局所膜沸騰域、GHは安定膜沸騰域で、IJGの点線は針金の両端にがいしをつけて実現した安定膜沸騰域である。この図と第5図の飽和水の線とを比較すると、次のような関係があることが気付かれる。

$$\overline{BF}/\overline{BJ} \equiv L_f/L \quad \dots\dots\dots(1)$$

さて、局所膜沸騰において膜沸騰部は赤く、核沸騰部は暗くなっている、明らかに各部の温度が異なっていることが観察される。そこで(1)式の関係が近似的に成立することを考慮に入れて針金の温度分布を第10図のごとく仮定すれば、加熱線の発生熱量に関して次式が成立する。

$$IR_0(1+\kappa\Delta\theta)L = IR_0(1+\kappa_f\Delta\theta_f)L_f + IR_0(1+\kappa_n\Delta\theta_n)L_n$$

いま、白金線の電気抵抗の温度係数が核沸騰部と膜沸騰部とで等しいと仮定すれば、上式は次のごとく書直される。

$$\Delta\theta = \Delta\theta_f(L_f/L) + \Delta\theta_n(L_n/L) \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 I ：白金線を通れる電流、 R_0 ：100℃における白金線の単位長さあたりの電気抵抗、 κ ：白金線の電気抵抗の温度係数、 $\Delta\theta$ ：伝熱面と液体との温度差の針金全長にわたっての平均値、 $\Delta\theta_n$ および $\Delta\theta_f$ ：核沸騰部および膜沸騰部における伝熱面と液体との温度差、 L ：針金の全長、 L_n および L_f ：核沸騰部および膜沸騰部の針金の長さ、である。(2)式の関係は(1)式と同一の関係をあらわしている。第7図における $q-\Delta\theta$ 曲線上の×印点はこの図における等熱負荷線上の核沸騰および完全膜沸騰の温度差をそれぞれ $\Delta\theta_n$ および $\Delta\theta_f$ とし、第5図よりその熱負荷に対する L_f/L の値を用いて、(2)式より $\Delta\theta$ の値を求めた点である。

つぎに、針金全体の平均熱伝達係数 α は(2)式を用いて次のごとくかけられる。

第10図 加熱線の温度分布の仮定

$$\alpha = \frac{q}{\Delta\theta} = \frac{q}{\Delta\theta_f \frac{L_f}{L} + \Delta\theta_n \frac{L_n}{L}}$$

$$\therefore \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\alpha_f} \frac{L_f}{L} + \frac{1}{\alpha_n} \frac{L_n}{L} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ただし、

$$\alpha_f \equiv q/\Delta\theta_f \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\alpha_n \equiv q/\Delta\theta_n \quad \dots\dots\dots(5)$$

第7図の $\alpha-\Delta\theta$ 曲線上の×印点は(3)式を用いて計算した α の値である。(3)式は核沸騰部の熱抵抗と膜沸騰部の熱抵抗が並列にはいつている場合の熱抵抗の式であり、核膜共存時の熱伝達の機構を定性的に説明するものと思われる。ここで注意すべきは、 α_f および α_n は(4)式および(5)式に対するものであることである。すなわち、核沸騰部も膜沸騰部も同一熱負荷と考えた場合の見掛けの熱伝達係数を α_n および α_f として用いていることである。実際には膜沸騰部と核沸騰部とは温度が異なるため、それぞれの部の電気抵抗値、したがって熱負荷は異なっているはずである。したがって、(3)式は物理的にはあまり意味のある式ではなく、単に形式的に成立する式と考えたほうが妥当かもしれない。しかしともかく(2)式および(3)式を用いて計算した値は、第7図にみるごとく実験結果と非常によく一致する。

以上の考えを過冷度や表面張力の異なる液体に拡張適用してみる。核沸騰および膜沸騰の熱伝達係数に対しては一般に次式が成立する。

西川の式⁽⁷⁾：

$$\alpha_n = 8.0 \left[\frac{1}{M^2 P} \frac{c_p \gamma'^2 \lambda^2}{\sigma r \gamma''} \right]^{1/3} q^{2/3} \quad \dots\dots\dots(6)$$

Bromley の式⁽⁸⁾：

$$\alpha_f = A \left[\frac{\lambda'' \gamma'' (\gamma' - \gamma'') r}{R^4 q \mu''} \right]^{1/3} \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここに、 c_p ：液体の比熱、 λ および λ'' ：液体および蒸気の熱伝導率、 σ ：液体の表面張力、 r ：蒸発熱、 γ' および γ'' ：液体および蒸気の比重、 q ：熱負荷、 R ：伝熱面の代表寸法、 μ'' ：蒸気の粘性係数、 $M=900 \text{ m}^{-1}$ 、 $P=1.699 \text{ kcal/h}$ 、 A ：定数、である。過冷度や表面張力の異なる液体の実験結果を1本の曲線にまとめるためには、 α_n および α_f をそれぞれ(6)式および(7)式を用いて飽和水の場合に換算した値を(3)式に適用すればよいように思われる。いま、 q =一定としてこの換算値を求めると次のようになる。

(1) 表面沸騰の場合

$$\alpha_{n0} = \alpha_n \left(\frac{c_{p0} \gamma_0'^2 \lambda_0^2}{c_p \gamma'^2 \lambda^2} \right) \left(\frac{\sigma r \gamma''}{\sigma_0 r_0 \gamma_0''} \right)^{1/3} \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_0} \right) \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$\alpha_{f0} = \alpha_f \left[\frac{\lambda_0'^3 \gamma_0'' (\gamma_0' - \gamma_0'') r_0}{\lambda_0''^3 \gamma_0'' (\gamma_0' - \gamma_0'') r} \right]^{1/3} \left(\frac{\mu_0''}{\mu_0'} \right)^{1/3} \quad \dots\dots\dots(9)$$

(2) 表面張力の異なる場合

$$\alpha_{n0} = \alpha_n (\sigma/\sigma_0)^{1/3} \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$\alpha_{f0} = \alpha_f \quad \dots\dots\dots(11)$$

ここに添字“0”は飽和水に対する値であり、 $\Delta\theta$ および $\Delta\theta_0$ はそれぞれ伝熱面温度と液温との差および伝熱面温度と飽和温度との差である。(8)式における $(\Delta\theta_0/\Delta\theta)$ は表面沸騰における対流起動力の補正項である⁽⁹⁾。そこで(8)、(9)式および(3)式あるいは(10)、(11)式および(3)式を用いて飽和水の場合に換算した熱伝達係数 α_0 を求め(このとき L_f/L は飽和水のものを用いる)、この α_0 と $\Delta\theta$ (測定値)との関係をプロットすると、第 11 図のごとくなり、すべての局所膜沸騰の実験点が 1 本の曲線にまとめられる。したがって飽和水についてのべた局所膜沸騰における機構の説明は、一般にあてはまると考えてよいであろう。

5. 従来の研究結果の検討

既にのべたごとく著者らの実験結果によると、第 12

第 11 図 核膜共存域における熱伝達の整理

第 12 図 沸騰特性曲線の説明

図に示したごとく、ほぼバーンアウト熱負荷に対応する膜沸騰の点までは、すなわち PB 間では q は $\Delta\theta$ とともに増大するが、それに対応する α は $\Delta\theta$ とともに減少する。この沸騰特性曲線上の区間 PB は核沸騰と膜沸騰とが共存する範囲である。抜山⁽¹⁰⁾の実験(直径 0.14 mm の白金線)をプロットしてみても第 13 図のごとくなり、第 7 図と同様な結果がえられる。

したがって抜山の実験における膜沸騰域のデータは正確には局所膜沸騰域のデータであると思われる。このように考えてくると、核沸騰、遷移沸騰および膜沸騰を区別するのに q - $\Delta\theta$ 曲線における極大点および極小点を境界点と考えるのが妥当であるように思われる。すなわち、第 12 図において α - $\Delta\theta$ 曲線における AB 区間には二つの異なった沸騰の様相が存在することがわかる。すなわち、AP 間は q も α も $\Delta\theta$ とともに減少するが、PB 間では q は $\Delta\theta$ とともに増大するの α は $\Delta\theta$ とともに減少する。本実験では AP 間を実現することはできなかったが、この区間は本実験のごとく q を制御して $\Delta\theta$ を追従させるのではなく、 $\Delta\theta$ を制御して q を追従させる加熱方法を用いれば実現できるものと考えられ、この領域が Zuber⁽¹¹⁾の述べている流体力学的不安定に起因する遷移沸騰域であろう。

6. む す び

白金線を用いて沸騰の実験を行ない、核沸騰と膜沸騰とが定常的に共存する状態を実現することができ、その場合の沸騰の様相をはあくするとともに、この領域では熱負荷は温度差とともに増大するが、熱伝達係数は温度差とともに減少することを見出した。このような核膜共存の沸騰現象は伝熱面と液体との接触を一時的にしゃ断することによって容易に実現しうるものであり、実際問題としても蒸発管内における気水混合

第 13 図 抜山の実験結果

体のピストン流の場合やボイラ管壁よりスケールが離脱した場合などにおいて十分その発生が考えられる。

最後に本研究にご指導を賜った九州大学 山県清教授に厚くお礼申し上げますとともに、熱心に実験に協力された瀬戸 淳、立石又二、許斐儀彦、堀 潤二、新村 亮、岡本年郎、江副和憲、小山 彰、里木虎人の諸君に深く感謝の意を表する。なお本研究費の一部は昭和 37 年度文部省科学研究費(各個研究 52 326)によることを記して謝意を表したい。

文 献

- (1) M.E. Ellion, *Calif. Inst. Technol., Jet Propul.*

Lab., Mem., 20-28 (1954).

- (2) J.W. Westwater & J.G. Santangelo, *Indust. Engng. Chem.*, 47 (1955), 1605.
 (3) P.J. Berenson, *M.I.T., Techn. Rep.*, 17 (1960).
 (4) E. Zielinski, *Combustion*, 29-12 (1958), 47.
 (5) E.A. Farber & R.L. Scoria, *Trans. ASME*, 70 (1948), 369.
 (6) 西川, 機械学会論文集, 26-165 (昭 35-5), 726.
 (7) 西川, 機械学会論文集, 22-120 (昭 31-8), 557.
 (8) L.A. Bromley, *Chem. Engng. Progr.*, 46 (1950), 221.
 (9) 西川・楠田, 本論文集 1388 ページ.
 (10) 披山, 機械学会誌, 37-206 (昭 9-6), 367.
 (11) N. Zuber & M. Tribus, *Calif. Univ., Report*, 58-5, (1958).

536.423.1 : 536.252

自由対流表面沸騰の研究*

西川 兼 康**, 楠 田 久 男***

Heat Transfer in Surface Boiling under Free Convection

by Kaneyasu NISHIKAWA and Hisao KUSUDA

Through an experiment of nucleate boiling under free convection in subcooled water, we came to the following conclusions :

(1) The effective stirring length of bubbles in surface boiling is reasonably estimated to be one-third of their condensing height which is decided identically with the degree of subcooling of bulk water.

(2) Correlation of heat transfer in surface boiling by using $\Delta\theta_s$ instead of $\Delta\theta$ corresponds to the replacing of H_s by $H_{s,}$ where

$\Delta\theta_s$ =temperature difference between heating surface and saturated liquid,

$\Delta\theta$ =temperature difference between heating surface and bulk liquid,

H_s =effective stirring length of bubbles in saturated boiling,

$H_{s,}$ =effective stirring length of bubbles in surface boiling.

From these conclusions, we derived an extension of author's correlating equation of nucleate boiling transfer, and confirmed that it fairly agreed with the experimental results in surface boiling.

1. は し が き

沸騰熱伝達の特徴は気ほうの発生に際して液体にじょう乱を与えるため熱伝達がきわめて良好なことである。表面沸騰では液温が低いため発生した気ほうがまた冷却されて凝縮消滅することもあり、このとき再び液体にじょう乱を与え、このために飽和沸騰より大きな熱伝達係数がえられるといわれている。しかし従来の表面沸騰の実験はすべて強制対流の場合であり、こ

の場合には流速に関係しない沸騰のみに支配される因子と対流だけに支配される因子との総合効果が熱伝達を規制するのである。したがって強制対流沸騰の実験結果から表面沸騰は飽和沸騰より熱伝達が良好であると結論することはしょうそうであると思われる。事実、著者の1人が自由対流沸騰の熱伝達係数を測定する場合における容器の側壁からの熱損失の影響を調べた実験結果⁽¹⁾によると、熱損失が大きくて液温が飽和温度以下になると、飽和温度の場合より小さい熱伝達係数の値がえられている。

第1図に示すように、自由対流表面沸騰においても飽和沸騰の場合と同様に、気ほうの発生および凝縮が

* 昭和34年4月2日 第36期通常総会講演会および昭和36年9月26日 第696回講演会において講演、原稿受付 昭和38年2月2日。

** 正員、九州大学工学部。

*** 正員、九州大学工業教員養成所(福岡市箱崎町)。