536.423.1:621.181.061.4

水平伝熱面における核沸騰について (第3報)⁽¹⁾

(伝熱面寸法の影響)

山 県 清⁽²⁾ 平野富士夫⁽³⁾ 西川 兼康⁽⁴⁾ 松岡 久光⁽⁵⁾

Nucleate Boiling on Horizontal Heating Surface (3rd Report)

(Effect of Dimension of Heating Surface)

by Kiyoshi YAMAGATA, Fujio HIRANO, Kaneyasu NISHIKAWA and Hisamitsu MATSUOKA

Already we pointed out that the important factor controlling the coefficient of heat transfer was the stirring effect of vapour bubbles in the heat transfer to boiling liquid. In this report we carried out the experiments with three horizontal surfaces whose diameters are 7 cm, 10 cm and 14 cm respectively, and clarified that the Nusselt number at the stage of nucleate boiling was proportional to the $1/3$ power of the number of vapour columns on a heated plate independent of the diameter of the heating surface.

$$i. e. \quad \alpha D / \lambda \propto n^{1/3}$$

where α = coefficient of heat transfer to boiling liquid.

D = diameter of heating surface.

λ = thermal conductivity of boiling liquid.

n = number of vapour columns on a heated plate.

1. 緒 言

伝熱面からの蒸発は熱負荷が低くて伝熱面の任意の数箇所から核状に蒸気泡が発生する核沸騰か、熱負荷が高くて伝熱面を蒸気膜が覆う膜沸騰かのいずれかによって起る。これらの沸騰時の熱伝達に関しては従来多くの人々によって研究せられ、自由対流の熱伝達の拡張という考から $\alpha \sim \Delta\theta$ 曲線 (α : 熱伝達係数, $\Delta\theta$: 伝熱面表面と液体との温度差) での整理方法が採用されておるが、沸騰現象の非再現性のために熱伝達係数の値ははなはだしい散乱を示し、同一の実験条件にあっても一けた近くの差異を生じておる⁽⁶⁾。また Jakob 等が採用したように $\alpha \sim q$ (q : 伝熱面熱負荷) で整理すると $\alpha \sim \Delta\theta$ 曲線よりはよほどよくまとまってくるが、やはり相当の散乱を示している。第2報⁽⁷⁾において筆者は直径 10 cm の水平伝熱面を用い蒸留水で実験を行った結果、核沸騰熱伝達に対しては、伝熱面熱負荷あるいは伝熱面表面と沸騰液体との温度差でなく、気泡のかく乱効果という流体力学的問題が熱伝達係数をおさえる大きな因子であることを確認し、気泡のかく乱効果をあらわす第一次近似として伝熱面における気泡発生点の数 n で整理すると、熱伝達係数 α の実験点がよくまとまってくることを示しておいた。本報では寸法の異なる水平伝熱面を用いた場合 $\alpha \sim n$ の関係に対していかなる影響を及ぼすものであるかを実験的に求め、 α と n との間の一般関係を確立

せんとするものである。

2. 実験の方法

水平伝熱面としては厚さ 5 mm, 直径おのおの 70 mm, 100 mm, 140 mm の黄銅円板3種を用い、沸騰液体としては蒸留水を使用した。加熱器の構造は既に⁽⁸⁾示したとき Jakob の使用したものと同様の構造で、伝熱面は平面に仕上げ、実験の始めごとに 00 番の研摩紙でみがいた後ベンゾール、蒸留水を用いて清浄にした。

熱伝達係数の測定および境界層流動状態の測定は第1報⁽⁹⁾で詳細に示したとき方法で行った。

3. 実験結果とその考察

(a) 写真記録

i. 気泡型式 既報「水の沸騰について」⁽¹⁰⁾で示したごとく、単一泡発生割合 ϵ は伝熱面熱負荷 q の増加とともに急激に減少することが直径 70 mm, 140 mm の伝熱面の場合にもみられる。これは既にのべたごとく⁽¹¹⁾蒸気泡の発生と境界層の流動状態とが密接な関係を有するためであるが、伝熱面熱負荷で整理すると、その定量的関係は寸法の異なる伝熱面に対し相異なっている。そこで今1個の気泡の分担する相当伝熱面直径 $D/\sqrt{n}$ (D : 伝熱面直径) を考えると、 $D/\sqrt{n}$ が大きいほど境界層の流動状態は乱れてくるはずである。また気泡発生点数 n が多いほど境界

層の流動状態は乱れてきて複合ほうが発生し易いことは、既に筆者等が写真記録より見た所である⁽¹²⁾。このような考から ε と $qD\sqrt{n}$ との関係プロットしてみると第1図のごとくなり、直径の異なる伝熱面についての実験点がかなりよくまとまってくるのである。

第 1 図 単一ほう発生割合

ii. 温度境界層の流動状態 直径 100 mm の伝熱面について行った第2報⁽¹³⁾において、伝熱面熱負荷 15 000 kcal/m²h 以上は温度境界層の乱れが大きく気ほうのかく乱効果が大局を支配する強制対流域であることをのべたが、直径 70 mm の伝熱面については伝熱面熱負荷 22 000 kcal/m²h 以上、直径 140 mm の伝熱面については伝熱面熱負荷 11 000 kcal/m²h 以上で

(a) 直径 7 cm, 伝熱面熱負荷 26 792 kcal/m²h, 気ほう発生点数 12

(b) 直径 10 cm, 伝熱面熱負荷 15 316 kcal/m²h, 気ほう発生点数 19

(c) 直径 14 cm, 伝熱面熱負荷 11 163 kcal/m²h, 気ほう発生点数 4

第 2 図 温度境界層流動状態の写真

乱れの大きくなってくることが写真記録よりみられる (第2図参照)。これは流体力学によれば流動状態の乱れは Reynolds 数に依存するものであるから、直径大なる水平伝熱面ほど伝熱面熱負荷が低くて境界層が流れてくるのであろう。しかして Nusselt 数と境界層の流動状態の写真記録を比較してみると、だいたい $Nu \approx 350$ ($Nu = \alpha D / \lambda$, λ : 液体の熱伝導率) の所から流動状態の乱れが大きくなることが伝熱面直径のいかにかかわらず観測される。

(b) 熱伝達係数

i. $\alpha \sim \Delta\theta$ あるいは $\alpha \sim q$ での整理法 まず従来の整理法に従って $\alpha \sim \Delta\theta$ あるいは $\alpha \sim q$ で筆者等の実験結果を整理すると第3図、第4図のごとくなる。

第 3 図 熱伝達係数と伝熱面表面と液体の温度差との関係

これらの図には Jakob 等の実験結果⁽¹⁴⁾をもプロットしてある。 $\alpha \sim \Delta\theta$ 図をみると実験点の散乱ははなはだしいが、水についての従来の測定⁽¹⁵⁾の散乱の範囲内にはある。 $\alpha \sim q$ 図は $\alpha \sim \Delta\theta$ 図に比べるとよほど実験点の散乱度が小さくなっている。この二つの整理法に対し Fritz⁽¹⁶⁾は、沸騰水への熱伝達においては $\Delta\theta$ が小さく約 10°C 程度で、しかも $\Delta\theta$ の僅かの変化に対して α が大きく変化するため $\alpha \sim \Delta\theta$ 関係の実験的決定が困難となるに反し、伝熱面熱負荷 q は初めから与えられておることが多く、しかも α の q による変化は $\Delta\theta$ による変化に比べてはるかに小さいこと等をあげて $\alpha \sim q$ での整理法を推奨している。しかし第4図にみるごとく $\alpha \sim q$ での整理法といえども未だ不満足で実験点は相当の散乱を示している。このような散乱

第 4 図 熱伝達係数と伝熱面熱負荷との関係

が生ずるのは核沸騰が気ほうの発生という界面現象を含んでおるため普通の相変換を伴わない伝熱現象にくらべて伝熱面の性状に大きく影響されるため、すなわち外的条件を同一にしても伝熱面表面の粗度あるいは汚損度により α および $\Delta\theta$ が変化してくるためと考えられる。しかして $\alpha \sim \Delta\theta$ 図では伝熱面表面の性状の影響が α と $\Delta\theta$ の両方にしかも逆にきいてくるので一層散乱をはなはだしくするに対し、 $\alpha \sim q$ でまとめると α だけが変動するのでよほど実験点のまとまりがよくなってくるのである。

なお、第4図に示した実線は Fritz⁽¹⁷⁾が多くの人々の実験点の平均曲線を求め、水平伝熱面から 100°C の沸騰水への熱伝達に対し実際に適用できる式として与えた $\alpha = 1.48 q^{0.75}$ (α, q の単位はそれぞれ kcal/m²h °C, kcal/m²h である。)を示したものである。Fritz は

Jacob 等の実験点がこの曲線より大きな傾斜をもち α の値が小さいのは数日の連続運転による吸着ガスを含み伝熱面表面および液体における状態の実験点をとったためであり、他の実験はこのガスの除去が完全でないため α の値が大きくなっておるのであ

るが、実際の運転状態では Jakob 等の行ったような純粹の一定条件下での連続状態が起っておるかどうかは疑問に思われるのでいろいろな人々の実験値の平均曲線を与える $\alpha = 1.48 q^{0.75}$ をとるのが合目的的であるとのべておる。しかし沸騰液体の熱伝達はガスを完全に除去した状態においても伝熱面表面の粗度によって大きく影響されるほか、気ほう発生点跡に液体中の僅かの溶解塩類によって生じた円環状の着垢はん点のための伝熱面表面の汚損度によって α が大きく変化しうるのであって、異なった実験者による実験点の散乱の原因を伝熱

面表面および液体のガス吸着の差異のみに帰することは疑問であり、またこのような表面の性状の影響を追求することが実際に必要でもある。

ii. $\alpha \sim n$ での整理法 既に筆者が提案した $\alpha \sim n$ で実験点をプロットしてみると第5図のごとくなる。この三つの各群の実験点のずれは明らかに伝熱面の寸法差によるものであるから、 $Nu \sim n$ でプロットし直してみると第6図のごとく伝熱面の直径いかにかわらずすべての実験点が一つの線にまとまってくるのである。しかしてこれは既報「核沸騰熱伝達に関する理論的考察」⁽¹⁸⁾において導いた式、

$$Nu = K^* \left(Pr \frac{gH}{\nu^2} nd_0^2 \frac{w}{U_m} \right)^{1/3}$$

より予測される所である。ここに Pr : Prandtl 数, H : 伝熱面上の水位, ν : 液体の運動粘性係数, g : 重力の

第 5 図 熱伝達係数と気ほう発生点数との関係

第 6 図 Nusselt 数と気ほう発生点数との関係

加速度, d_0 : 伝熱面離脱時の気ほう直径 (球に換算した), w : Jakob の気ほう発生に関する定数 = (伝熱面離脱時の気ほう直径) $\times$ (気ほう発生の頻度), U_m : 平均気ほう上昇速度, K^* : 定数である。なおこの図における実験点の僅かのずれは 1 個の気ほうのかく乱効果をすべて等しいとして全体の気ほうかく乱効果を気ほう発生点数 n で近似したことによると考えられ, すなわち主として d_0 と w の変化によるものと考えられる。この点に関しては更に研究を進める必要がある。

さて気ほう発生点数 n で熱伝達係数を整理すると, $\alpha \sim \Delta\theta$, $\alpha \sim q$ の整理法に比べて実験点のまとまりははるかによいのであるが, 実際問題としてはこの n の値をあらかじめ知ることは現在のところ不可能である。気ほう発生点数 n , 厳密に言えば気ほうのかく乱効果は伝熱面熱負荷, 伝熱面表面の粗度, 伝熱面の汚損度, 液体の性質等により変化するものと考えられ, この間の定量的関係を明らかにすることは今後に残された問題であるが, 今 q と n との関係をみてみると第 7 図のごとく $n \sim qD$ で整理すると直径の異なる伝熱面についての実験点が入れ交ってくる。しかし第 7 図の実験点の散乱については界面現象の見地より研究を進める必要がある。

iii. 従来の実験結果の検討 従来伝熱面寸法の沸騰熱伝達に及ぼす影響については, 水平円筒につき Cryder および Gilliland⁽¹⁹⁾ が純次元解析により導いた式によれば直径が大なるほど α が大きくなり, また Linden および Montillon⁽²⁰⁾ によれば直径が大きくなるほど α が小さくなっており。さらに King⁽²¹⁾ はこの二つの反対の結論を確かめるため実験を行い, 直径の影響はないという結論に達した。また Jakob⁽²²⁾ は核沸騰熱伝達の無次元表示式を導く際に気ほうの発生しておる近傍の液体の流動状態が第一義的に熱伝達にきいてくるという考から伝熱面寸法の影響を考慮して

おらず, Fritz⁽²³⁾ は大きな醸造皿についての Kaiser の実験結果と直径 100 mm の水平伝熱面についての Jakob の実験結果との比較から伝熱面の寸法は核沸騰熱伝達に何らの影響も及ぼさないと推論してい

第 7 図 伝熱面直径の異なる伝熱面における気ほう発生点数と伝熱面熱負荷の関係

る。しかしいずれにしても伝熱面寸法の影響は伝熱面熱負荷が一つのパラメータとしてあらわれてくるような熱伝達係数の表示式では大きくないと考えられ, 伝熱面表面の性状あるいは筆者が既に注意した沸騰液体の熱伝達係数測定の際の実験容器の側壁からの熱放散の影響⁽²⁴⁾が従来のごとき伝熱面の性状に対する考慮の不十分な実験においては伝熱面寸法の影響を凌駕する可能性は十分あるのであるから, 界面現象の見地よ

りみて不十分な実験結果から伝熱面寸法の影響を見出すことは危険であり不可能である。

4. 結 言

水平伝熱面の核沸騰熱伝達に対しては従来の整理法の中では熱伝達係数 α を伝熱面熱負荷 q で整理する方法が実験点のまとまりは比較的良好であるが、既に筆者が提案した気ほう発生点数 n で整理する場合には $Nu \sim n$ で整理すると伝熱面の寸法にかかわらず実験点がよくまとまってくる。しかして気ほう発生点数 n が何によって決定されるかについては、今後界面現象の見地より研究を進める考であるが、伝熱面表面の粗度の影響、伝熱面の着垢の影響、液体の表面張力、起ほう性の影響をまず明らかにする必要がある。

最後に加熱器の製作その他に助力をうけた樋口慎男君に感謝の意を表する。また本研究は文部省自然科学研究費の補助をうけて行ったものである。

注：—

- (1) 昭和 27 年 3 月 7 日 九州支部総会講演会において講演、原稿受付 昭和 27 年 4 月 28 日。
- (2)(3)(4)(5) 正員、九州大学。
- (6)(15) たとえば工業物理化学(第1輯)昭 23—1, 51 ページ参照。
- (7)(11)(12)(13) 山県, 平野, 西川, 松岡: 機械学会論文集, 18 巻 67 号 (昭 27) 53 ページ。
- (8)(10) 山県, 平野, 西川, 松岡: 機械学会論文集, 17 巻 62 号 (昭 26) 163 ページ。
- (9) 山県, 平野, 西川, 松岡: 機械学会論文集, 18 巻 67 号 (昭 27) 47 ページ。
- (14) M. Jacob u. W. Linke: Forschung, Bd. 4(1933), S. 75.
- (16)(17)(23) W. Fritz: V.D.I. Verfahrenstechnik, Nr. 5, (1937) S. 149.
- (18) 平野, 西川: 長崎大幸田地方臨時大会講演会 (昭 26—11—19)。
- (19) D.S. Cryder & E.R. Gilliland: Refrig. Engg., Vol. 25, (1933) p. 78.
- (20) C. M. Linden & G.H. Montillon: Trans. Am. Inst. Chem. Engr., Vol. 24, (1930) p. 120.
- (21) W.J. King: Refrig. Engg., Vol. 25, (1933) p. 84.
- (22) M. Jakob: Mech. Engg., Vol. 58, (1936) p. 648.
- (24) 西川, 谷, 柴田, 日高: 機械学会論文集, 18 巻 72 号 (昭 27) 27 ページ。

536.423.1:621.181.016.4

水平伝熱面における核沸騰について (第4報)⁽¹⁾

(表面張力の影響)

山県 清⁽²⁾ 平野富士夫⁽³⁾ 西川 兼康⁽⁴⁾ 松岡 久光⁽⁵⁾

Nucleate Boiling on Horizontal Heating Surface (4th Report) (Effect of Surface Tension of Liquids)

by Kiyoshi YAMAGATA, Fujio HIRANO, Kaneyasu NISHIKAWA and Hisamitsu MATSUOKA

We investigated the effect of surface tension of liquids on the heat transfer in nucleate boiling by means of addition of surface active agents (saponin and sodium oleate) in distilled water.

And we obtained the following relations independent of the addition of surface active agents ;

$$\alpha(\sigma/\gamma)^{-1/2} \propto n^{1/3} \quad \Delta\theta \propto n^{-1/6} q^{2/3}$$

where α =coefficient of heat transfer. σ =surface tension of liquid. γ =specific weight of liquid.
 n =number of vapour columns.

$\Delta\theta$ =the temperature difference between the surface of heating surface and boiling liquid.

q =heat flux.

1. 緒 言

第3報⁽⁶⁾において筆者等は核沸騰熱伝達に対しては伝熱面における気ほう発生点数が熱伝達係数をおさえる大きな因子であることに注目し、伝熱面寸法のいかんにかかわらず $Nu \sim n$ ($Nu = \alpha D / \lambda$, α : 熱伝達係数, D : 水平伝熱面直径, λ : 液体の熱伝導率, n : 気ほう発生点数) で整理すると実験点がよくまとまることを見出した。前報までは液体としてすべて蒸留水を用い、

伝熱面は清浄にした新鮮な面についてのみ実験を行い主として流体力学的観点から研究を進めてきたのであるが、この気ほう発生点数 n , 厳密に言えば気ほうのかく乱効果は伝熱面熱負荷あるいは伝熱面表面温度のほか、伝熱面表面の粗度および汚損度、伝熱面の材質、液体の性質等によって変化すると考えられ、界面現象の見地から研究を行う必要のあることを既に指摘しておいた。本報告はこの中液体の性質、なかんずく水に