狭い垂直長方形流路内の沸騰熱伝達*
(通過気泡周期と熱伝達率について)門出政則*¹, 三原信一*¹Boiling Heat Transfer in a Narrow Vertical Rectangular Channel
(Relationship Between Heat Transfer Coefficient
and Period of Passing Bubble)

Masanori MONDE and Shin-ichi MIHARA

An experimental study has been made of saturated boiling heat transfer for water and R 113 in a narrow vertical rectangular channel (2 mm space, 20 mm wide, and 200 mm long) at atmospheric pressure, in which the vertical heated surface (10 mm long, 20 mm wide) is located on one side at a position 150 mm from the entrance and bubbles are forcibly passed through it at designated period of 0.033 to 1.0 sec. The experiment shows that the heat transfer coefficients are increased by the bubble passing through the heated surface for the value of thermal diffusivity, α , times period, T_b , of the passing bubble above about $6 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ ($\alpha T_b > 6 \times 10^{-9}$), while for $\alpha T_b < 6 \times 10^{-9} \text{ m}^2$, the heat transfer coefficients become independent of the period.

Key Words: Phase Change, Boiling, Enhancement of Heat Transfer, Narrow Space, Vertical Channel

1. 序

加熱面から発生する気泡が垂直流路内を通過する場合、その流動状況がバブル流やスラグ流であるとき気泡によって熱伝達が著しく促進されることがよく知られている^{(1)~(5)}。

西川ら⁽⁶⁾は、気泡による熱伝達の促進機構について理論解析を行っているが、通過気泡下に残留している薄膜の蒸発については考慮していないため、全熱伝達量に対する潜熱輸送量の割合を一定と仮定し、その割合が30%のとき実験結果と理論結果が良好な一致を示すことを報告している。

楠田ら⁽⁴⁾は、加熱面温度変化と通過気泡の関係を明確にし、それに基づいて熱伝達の促進モデルを提案し、理論解析を行っているが、気泡通過時に現れる残留液膜界面での蒸発を考慮していないため、熱伝達率の値を小さく見積もっていることが文献⁽⁴⁾で報告されている。また、前報⁽⁴⁾⁽⁵⁾では、気泡吹き込み装置の制約から強制的に吹き込まれる気泡の周期が0.5 s以上の実験しか行えなかった。そのため周期0.5 s以下について

は加熱面から自己発泡した気泡群の加熱面占有率と加熱面温度変化の関係から通過気泡による熱伝達の促進について検討を行い、水の場合周期が約0.3 s以下では、熱伝達の促進効果が徐々に飽和状態に漸近することがわかった。

本研究では、加熱面から自己発泡が生じない熱流束域(熱流束は通過気泡周期が短くなると上昇する)において、気泡通過周期を0.033 s以上の範囲まで拡張し、加熱面の定常温度変化を実測し、熱伝達率と通過気泡周期との関係を明らかにする。実験は、試験流体として水とR 113の2種類を用い大気圧の飽和条件下で行われている。

2. 実験装置と実験方法

実験装置全体図と加熱面を中心とする実験装置主要部を図1, 2に示す。実験装置は、通過気泡発生部以外は文献⁽⁵⁾と全く同一であるので、気泡発生部と加熱面の温度と熱流束の測定方法について簡単に説明する。

流路⑤を通過する気泡は、流路上流に張られた1枚のステンレス鋼はく③に直流電流をパルス状に通電することによって、一定周期で発生される。気泡発生周期は、直流電流の通電周期を周波数調整器5で調整することにより任意の値に調整できる。加熱面②上を気

* 昭和62年3月16日 東海支部第36期総会講演会において講演、原稿受付 昭和61年4月21日。

*¹ 正員、佐賀大学理工学部 (〒840 佐賀市本庄町1)。

泡が通過する周期（通過周期 T_0 ）と通電周期の同期については、ストロボの発光周期を直流電流の通電周期に同期させて観察窓⑧より気泡を照射したとき、気泡がほとんど静止して見えることから確認された。気泡の大きさは、ステンレス鋼はく③への印加電圧を調整することにより、任意に変えることができるが、本実験では、前報⁽⁵⁾の気泡の大きさと同じ程度とし、流れ方向に約 30 mm、水平方向に約 15 mm である。しかし、気泡の大きさを 30 mm にしたため、 $T_0 < 0.033$ s では気泡がつながり、環状流となるので実験できなかった。

加熱面②は、2 個の電極⑥の間に張られたステンレス鋼はく（流れ方向に 10 mm、幅 20 mm、厚さ 50 μ m）に直接直流電流を通電することによって加熱される。加熱面からの熱流束はステンレス鋼はくを通過する電流と電圧降下から算出した。

加熱面の局所表面温度 T_w はステンレス鋼はく②の裏面の中心に点溶接された C・A 熱電対（素線径 50 μ m）で検出した裏面温度をそのまま加熱面表面温度とした⁽⁴⁾。加熱面温度の変動は電磁オシログラフによって測定されている。液温 T_{sat} は、流路入口に取付けられた熱電対によって測定されている。

3. 実験結果

3・1 加熱面温度変化と通過気泡周期の関係 図 3 は、水に対する加熱面温度変化を気泡通過周期ごとに整理したものである。図 3 中の破線は、気泡を吹き

込まない時の加熱面温度を示す。また直線は、バルク温度を示す。なお、R 113 についても、図 3 と同様な結果が得られていることを記しておく。

図 3 から、温度変動の周期は、気泡通過周期 $0.5 > T_0 > 0.033$ s の範囲でも、文献⁽⁴⁾⁽⁵⁾（実験範囲は $T_0 > 0.5$ s）で得られた結果と同様に、通過気泡周期と一致していることがわかる。ただ、本実験では高速度カメラと電磁オシログラフとを同期させて温度測定を行っていないので気泡位置と温度変化の対応は得られていないが、前報⁽⁵⁾の結果から推測すると、気泡が加熱面に到達すると加熱面温度の降下が生じるものと思う。加熱面温度の平均値は、通過周期 T_0 が短くなると低くなり、バルク温度との温度差が小さくなることが図 3 からわかる。

3・2 加熱面温度の変動幅と通過気泡周期の関係

図 4 は、図 3 に示される加熱面温度変化の振幅 ΔT_w を熱流束 q_w で割った量 $\Delta T_w/q_w$ と気泡の通過周期 T_0 の関係を示す。

図 4 から、 $\Delta T_w/q_w$ の値は周期が短くなるにつれて減少し、その関係は、本実験範囲内で得られた水のデータから最小二乗法を用いて決定すると次式

$$\Delta T_w/q_w = 1.65 \times 10^{-4} T_0^{0.75}$$

で与えられる。また R 113 についても $T_0 = 0.1$ s を除いて、 $\Delta T_w/q_w$ と T_0 の関係は水の場合とほぼ同様な傾向にあることがわかる。ところで、 $q_w = 3.5 \times 10^4$ W/m²、 $T_0 = 0.1$ s のときの温度変動は、水の場合 $\Delta T_w = 1.2$ K、R 113 の場合 $\Delta T_w = 0.2$ K である。本実験の温度測定精度は、約 0.1 K であることを考えると、

図 1 実験装置全体図

図 2 実験装置の主要部

R 113 のデータについてはかなりの誤差が含まれていることに注意する必要がある。

3・3 自己発泡開始熱流束通過気泡周期の関係

図5は、一定周期で気泡が加熱面上を通過している状況下に熱流束を増加させたとき、加熱面から気泡が発生したときの熱流束 q_w と周期 T_0 の関係を示す。図5中の○印は加熱面から自己発泡した気泡に誘因されて加熱面温度の変動が現れるときの熱流束である。一方□印は沸騰曲線 $q_w - \Delta T_{\text{sat}} (= T_w - T_{\text{sat}})$ の関係において、折れ点を外そうによって決定し、その折れ点の熱流束である。なお、印Iは、熱流束を決定するさいの誤差範囲を示す。また▼印は、ストロボを用いた肉眼観察から、加熱面全面が自己発泡の合体泡で覆われるようになったときの熱流束を示す。また、▲印は、次の気泡が加熱面に到達する前に自己発泡気泡が加熱面上に初めて発生したときの熱流束を示す。そして、熱流束が、印□と▲で示される範囲にあるときは、自己発

泡気泡の発生頻度が低いため、その気泡による加熱面の温度変化が温度測定位置でほとんど認知できなかった。

図5から、 $T_0 > 0.1 \text{ s}$ では通過気泡周期が大きくなるにつれて加熱面から自己発泡の生じる熱流束は上昇するが、 $T_0 < 0.1 \text{ s}$ では熱流束 $q_w = 3 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 程度でほぼ頭打ちになるようである。

3・4 時間平均局所熱伝達率の整理 本実験で測定された加熱面温度変化から時間平均熱伝達率 $\bar{h}$ を算出 [$\bar{h}$ の算出方法は文献(5)と同じである] し、それを気泡の通過周期で整理した結果を図6に示す。図6中の細線は、文献(4)の理論解析を気泡通過中加熱面上に残留する液膜厚さ $\delta^* = 50 \mu\text{m}$ と $100 \mu\text{m}$ について計算した結果を示す。また二点鎖線は、理論解析と実験結果 ($q_w = 4.5 \times 10^3 \text{ W/m}^2$) から決定された式(1)で、気泡の通過周期を大きくしていくと、通過気泡による熱除去が不十分となり、一周期中に加熱面温度が気泡を発生させるに十分な温度まで回復し、加熱面から自己発泡気泡が発生するようになる限界周期 T_0^* と熱伝達率の関係⁽⁴⁾を示す。なお、式(1)中の右辺の定数は熱流束に依存する量であると思われる。

$$\bar{h} / \sqrt{a T_0^*} / \lambda = 1.638 \quad \text{.....(1)}$$

ここで a は液体の温度伝導率、 λ は液体の熱伝導率である。なお、文献(4)の理論解析では、残留液膜界面での蒸発による熱移動は考慮されていない。ところで、文献(4)では、式(1)の解釈を加熱面上を通過する気泡による熱伝達促進効果が消滅する限界周期と熱伝達率の関係を示すものと記したが、前述のように解釈した方がよいようである。そして、本実験のように気泡を通過させることによって加熱面からの自己発泡を抑

図3 加熱面の温度変化
(水, $q_w = 9.0 \times 10^4 \text{ W/m}^2$)

図4 $\Delta T_w / q_w$ と T_0 の関係

図5 加熱面から気泡が発生したときの熱流束と周期の関係

図6 $\bar{h}\sqrt{aT_0}/\lambda$ と aT_0 の関係 図7 $\bar{h}$ と T_0 の関係

制するという状況下で行われると、熱流束の増加につれて熱伝達率は普通大きくなるので限界周期 T_0^* も式(1)から小さくなることが予想される。

次に図6中の破線は、 $\bar{h}\sqrt{aT_0}/\lambda = 2.3 \times 10^4 \sqrt{aT_0}$ の関係 ($\bar{h}$ が T_0 と独立になることを示す) を示す。図6中の一点鎖線は、水に対する等熱流束データを結んだ線で参考までに記入したものである。

図6から、 aT_0 の値が約 $6 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 以下では、 $\bar{h}\sqrt{aT_0}/\lambda$ の値は各熱流束に対して図6中の破線で示されるように1本の直線で与えられるようになることがわかる。そして、この範囲 $aT_0 < 6 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ では、通過気泡による熱伝達の促進効果が飽和した状態、すなわち熱伝達率がある極大値に達したものと考えられる。ところで、図6中の破線の物理的意味について考察すると、この破線は、気泡通過中に加熱面上に形成される液膜の界面での蒸発と通過後流入するバルク液による熱除去によって加熱面は冷却され、加熱面温度は下降するが、周期が小さくなるにつれて加熱面温度の変動幅は徐々に小さくなり(図4)、さらに気泡の通過周期をある限界周期以下にすると、もはや加熱面の温度は変化せず、ほとんど一定に保たれるという状況を示す。一方、 $aT_0 > 6 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ の範囲では、熱伝達の通過気泡による促進効果は、熱流束によって異なり、熱流束が大きくなるにつれて、そのこう配が破線のこう配に漸近する傾向から、促進効果は熱流束の増加につれて早く飽和状態に達する傾向がある。また、ある周期で気泡が通過している状況下に熱流束を上昇すると、熱伝達率は上昇するが、熱流束の上昇にともない加熱面温度の回復も早くなるために加熱面から自己発泡が生じるようになると思われる。ところで、一点鎖線で示される曲線は、理論計算から得られた細線が式(1)に漸近しているように、 aT_0 が大きくなるにつれ

て横軸に平行な直線に漸近するものと思われる。しかし、図6の $\bar{h}\sqrt{aT_0^*}/\lambda > 1.638$ において、一点鎖線が横軸に平行になっていないのは、理論計算では蒸発による熱移動を考慮していないためであろう。

3.5 熱伝達促進に及ぼす自己発泡気泡と通過気泡の影響 図7は、水の熱伝達率を周期 T_0 で整理した結果である。図7中の●印は前報⁽⁵⁾の結果を再録したもので、自己発泡発生状況下での熱伝達率を示す。なお、自己発泡気泡の周期については気泡単体の周期ではなくて気泡占有率⁽⁵⁾の周期である。また図7中の破線は、図6中の破線を水の場合について計算した結果である。また、図7中の二点鎖線は式(1)である。

図7から、 $T_0 > 0.1 \text{ s}$ では同一周期に対する熱伝達率 $\bar{h}$ は、熱流束の増加につれて上昇しているが、 $T_0 < 0.1 \text{ s}$ では $q_w = 1.3 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ の $\bar{h}$ データを除くと熱伝達率 $\bar{h}$ は熱流束に関係なくほとんど同一値になっていることがわかる。さらに、 $q_w > 3.5 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ では、自己発泡時の熱伝達率 $\bar{h}$ と通過気泡時の熱伝達率 $\bar{h}$ がほぼ一致しているという結果から、この状況下では、両者の熱伝達機構に強い相似性が存在しているものと思われる。

4. 結 論

狭い垂直長方形流路内に取付けられた加熱面上を気泡が周期 $T_0 = 0.033 \sim 1.0 \text{ s}$ で強制的に通過させられる状況下で、加熱面からの自己発泡が抑制される熱流束域での熱伝達率を実測し、次の結果を得た。

(1) 温度伝導率と周期との積 $aT_0 > 6 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ の範囲では、熱伝達は通過気泡によって促進されると同時に、そのときの熱伝達率は熱流束が大きいくほど大きくなる。

(2) $aT_0 < 6 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ の範囲では、熱伝達率は通

過気泡の周期や熱流束に支配されず、図 6 中の破線で与えられるようになる。

終わりに、本研究を行うにあたり終始有益なご助言をいただいた佐賀大学 楠田久男学長および上原春男教授に感謝する。また、実験装置の製作および実験に積極的に協力された佐賀大学大学院生 小野芳幸君および卒論生 野間格君・吉田俊則君に感謝する。本研究は、昭和 60 年度特定研究によるものでここに記し

て感謝する。

文 献

- (1) 石橋・西川, 機論, 33-245 (昭 42), 121.
- (2) 石橋, 機論, 34-257 (昭 43), 150.
- (3) 石橋, 機論, 34-260 (昭 43), 743.
- (4) 楠田・ほか 3 名, 機論, 46-408, B (昭 55), 1555.
- (5) 門出・ほか 3 名, 機論, 52-474, B (昭 61), 835.
- (6) 西川・ほか 2 名, 機論, 34-264 (昭 43), 1455.