

サブクール沸騰時の気泡挙動と限界熱流束

遠藤孝博*, 神永文人**, 岡本芳三**

(平成3年8月31日受理)

Bubble Behavior and Maximum Heat Flux in a Subcooled Pool Boiling

Takahiro ENDO*, Fumito KAMINAGA** and Yoshizo OKAMOTO**

ABSTRACT—The maximum heat flux in a subcooled pool boiling was examined on a horizontal platinum wire, 0.3mm in diameter, in Freon R-113 with the subcooling range from 2.6 to 53.6K. Visual observation indicated that at the maximum heat flux conditions the width of the bubble departing from the heating surface at nearly saturated condition was close to the most dangerous wavelength for the Taylor instability and it decreased with increasing subcooling. The maximum heat flux values increased with nearly linear function of subcooling at low and intermediate subcooling region, but it was constant at high subcooling region. It was observed that a large bubble departing from the heating surface randomly accompanied many small bubbles at $\Delta T_{sub}=27.6K$. This random bubble departure provided a large variation of the liquid temperature around the heating surface. This variation indicated large scatter of heat transfer on the heating surface.

1. 序 論

自然対流状態にある垂直加熱面の除熱を核沸騰で行う場合、これまでは発生気泡を上方に導き凝縮させる方法で伝熱面の熱を除去してきた。しかし、冷却源がすぐ回りがある場合や、気泡を上方に伝えるだけのスペースが取れない場合、水平方向（伝熱面と垂直な方向）に熱移動を行う方法がある。この方法では液体をサブクール状態に保ち、気泡をその発生している伝熱面付近で凝縮させることになる。この方法は液体のサブクール度を高く

保つことによって、伝熱面の限界熱流束を高くする効果をもっている。

このような垂直伝熱面に対して水平に熱を伝える方法を実用化するには、プール条件下でのサブクール沸騰を定量的に理解しておく必要がある。これまでのサブクール状態での核沸騰の研究は強制対流条件下の研究が多く、プール条件下ではその数は少なかった。プール条件下では、サブクール状態での限界熱流束に対して、Kutateladze⁽¹⁾や、Miyasaka⁽²⁾らが飽和沸騰の式を修正した相関式を提案しており、またElkassabgi, Lienhardら⁽³⁾

*茨城大学大学院工学研究科機械工学専攻（日立市中成沢町）

Graduate Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan

**茨城大学工学部機械工学科（日立市中成沢町）

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan

は、水平円柱伝熱面において4種類の液体を用いて実験を行い、サブクール度を3つの領域に分けた相関式を提案している。最近、藤田ら^{(4),(5)}は、直径40mmの円形上向き伝熱面において水とフロンR113を用いてサブクール状態（水の場合； $\Delta T_{s,sub} = 0 \sim 60K$, R113の場合； $\Delta T_{s,sub} = 0 \sim 20K$ の範囲での実験）の核沸騰熱伝達を調べ、高熱流束域では高サブクール度の場合の伝熱面温度が飽和沸騰の場合よりも高くなる、という知見を得ている。

本研究の目的は、大気圧下における自然対流状態のサブクール核沸騰について、熱伝達や気泡挙動、及び限界熱流束に与えるサブクール度の影響を評価する方法を確立することである。本報では特に気泡の挙動と限界熱流束の相関について検討した。

記号

C_p	定圧比熱	[J/kg · K]
g	重力加速度	[m/s ²]
h	熱伝達率	[W/cm ² K]
h_{fg}	蒸発潜熱	[J/kg]
q	熱流束	[W/cm ²]
q_{max}	飽和沸騰での限界熱流束	[W/cm ²]
$q_{max,sub}$	サブクール沸騰での限界熱流束	[W/cm ²]
$q_{max,z}$	Zuberによる限界熱流束	[W/cm ²]
R	伝熱線の半径	[m]
R'	無次元半径 $R' = R \lg(\rho_l - \rho_v) / \sigma$	[1/2]
R_{eff}	$R(1 + 0.02\theta/R')$	
R_{gas}	ガス定数	[J/kg · K]
T_s	飽和温度	[K]
T_l	液温	[K]
T_w	壁面温度	[K]
$\Delta T_{s,at}$	壁面過熱度 (= $T_w - T_s$)	[K]
$\Delta T_{s,sub}$	サブクール度 (= $T_s - T_l$)	[K]
α	温度伝導率	[m ² /s]
β	体膨張係数	[K]
θ	接触角	[deg]
λ	熱伝導率	[W/m ² · K]
ν	動粘性係数	[m ² /s]
ρ_l	液体密度	[kg/m ³]
ρ_v	気体密度	[kg/m ³]
σ	表面張力	[N/m]

2. 実験装置と実験方法

実験装置

自然対流条件下でのサブクール核沸騰現象を調べるために、発生気泡の挙動を可視化できる装置を作製した。使用液体として沸点が低く、蒸発潜熱が小さく、物性値がよく知られているフロンR-113を用いた。

実験装置の概略をFig. 1に示す。黄銅製の容器①は内側で184×184×50mmの大きさで、2枚のバイレックスガラス板ではさみ密封してある。沸騰液としてフロンR-113を封入し、沸騰伝熱面②として、直径0.3mmの白金線を用いて、黄銅製の電極に水平に支持する。これには、約37mmの間隔で0.1mmの白金線が電圧端子として取付けられている。また、白金線は毎回超音波洗浄した新しいものを用いた。液温は、容器に水平に取付けた20本のステンレスパイプ③（外径4.5mm, 肉厚0.5mm）の中に、一定温度の水を毎分21ℓの割合で流すことによって調整した。容器内の底部には温度調整とフロンR-113内に含有する非凝縮ガスの脱気のために電気ヒータ④を取付けた。容器の上部は、ガラス製の冷却器⑤を介して大気に開放される。液温は伝熱面の端部から約20mm横方向に離れた位置で、CA熱電対⑥により計測した。伝熱面温度は、白金線の電気抵抗から求める。そのため、基準抵抗⑨（0.00333Ω）を白金線と直列につなぎ、その電圧から回路に流れる電流値を求め、白金線の印加電圧から抵抗を計算し温度に換算した。温度と抵抗の関係はあらかじめ検定した。壁温測定用の電圧と、液温測定用の電圧は、リレー回路⑬により切り換えられ、精密デジタル電圧計⑩で測定され、コンピュータ⑭に記録される。

実験方法

実験は次の方法で行う。設定したサブクール度になるように、ステンレスパイプ中に流す水の温度を、Fig. 1に示す冷凍機⑥及びヒータ⑦により調整し、直流安定化電源⑧から一定電流を流し白金線を加熱する。測定は、白金線と基準抵抗の電圧、そして熱電対の起電力を精密デジタル電圧計により求める。毎秒17回の割合でサンプリングした100個のデータの平均値を計測値とし、その値から白金線の温度と熱流束、液温を求める。熱流束と温度の一組のデータが得られたらステップ上に電流値を上げ、定常に達した後、次のデータを求める。このような操作を未沸騰状態から行い、白金線が切断、あるいは膜沸騰状態になるまで行う。沸騰が開始してから

は、毎秒400コマの高速度VTR（ナック製、E-10）により水平方向から撮影を行う。光源はVTRカメラに同期したストロボの透過光、ビデオランプによる透過光、キセノンランプによる反射光、そしてビデオランプとキセノンランプによる透過光と反射光などを用いた。サブクール度が、2.6, 7.6, 17.6, 27.6, 37.6, 47.6, 53.6 (K) の場合について各々4回から5回づつ実験を行った。

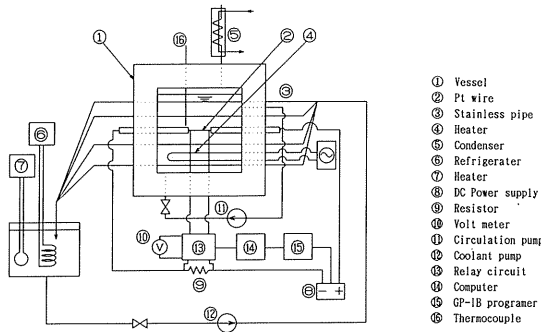


Fig. 1 Schematics of experimental apparatus

3. 実験結果と考察

沸騰様相

Photo. 1 は各サブクール度における沸騰限界直前の沸騰様相を示している。サブクール度が変化することにより沸騰様相が変化していくのがわかる。サブクール度が大きい時 ($\Delta T_{s,bb} \geq 27.6K$)、離脱気泡径は小さくほぼ球形を示し、離脱後上昇するにしたがって凝縮し気泡径がさらに小さくなる。これに対し、サブクール度が小さい時 ($\Delta T_{s,bb} \leq 17.6K$)、即ち沸騰液が飽和の状態に近い時は、気泡は球形から大きく歪んだ形で離脱し、ほぼ同じ大きさのままで形状を激しく変えながら上昇する。 $\Delta T_{s,bb} = 2.6K$ で示される2次気泡（合体した大きな気泡をさす。例を(1)の矢印で示す。）の離脱の様子を見ると、Zuberのモデルのように離脱蒸気流路間隔がテイラーの限界波長となるというより、原村, 甲藤⁽⁵⁾の示すように、離脱気泡の幅が限界波長となるモデルの方がよくあてはまる。また、離脱まじかの気泡の幅は約3mmであり、この値は、Lienhard, Wongら⁽⁷⁾による曲率を考慮した最危険波長を示す、次式から計算した値2.6mmに近い。

$$\lambda_d = \frac{2\pi\sqrt{3}}{\sqrt{\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} + \frac{1}{2R^2}}} \quad (1)$$

ただしサブクール度が大きくなると離脱時の気泡の幅は小さくなり、Taylor, Helmholtz不安定だけではサブクール沸騰における限界熱流束の予測は困難であることが分かる。

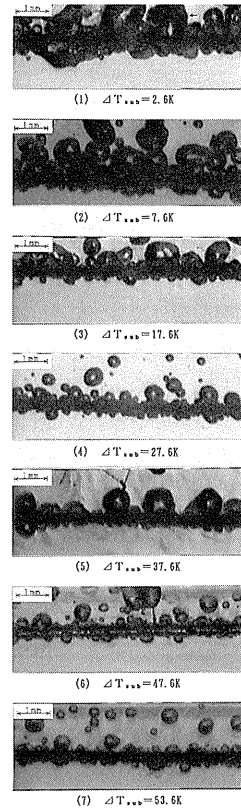


Photo. 1 Bubble behaviors at maximum heat flux

また、 $\Delta T_{s,bb} = 27.6K$ では、大きな気泡に加えて、小さな気泡が多数離脱していることが確認された。Fig. 2 のスケッチは、その際の気泡の離脱状況を示している。熱流束が高くなり、沸騰が十分に発達した伝熱面上には、蒸気塊の下部に液膜が存在している。この液膜には多数の円柱状の蒸気茎があり、蒸気塊は、この蒸気茎から噴出する蒸気を受けて成長離脱する。気泡離脱の後、液体が伝熱面上に供給され沸騰が持続する。小さな気泡の離脱は、大きな気泡が離脱した直後は液膜上部の蒸気塊が薄くなっており、蒸気茎から噴出する蒸気が慣性力でこれを突き破り蒸気塊上部に気泡を生成、離脱

するため大きな気泡の離脱に伴い小さな気泡が多数離脱することによると考えている。この気泡の離脱の様相が後述の熱伝達率の大きなばらつきにも関係すると思われるので、今後詳しく調べる必要がある。

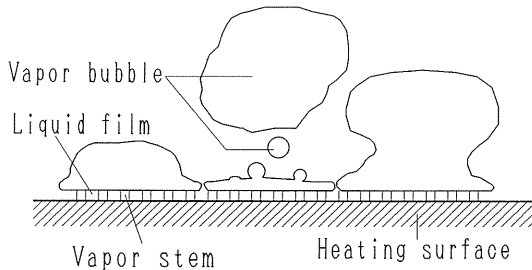


Fig. 2 Bubble formation on the heating surface in the maximum heat flux at $\Delta T_{s,bb}=27.6\text{K}$

また、今回の実験範囲では、鳥飼、秋山ら⁽⁸⁾が示した非水力学的限界機構による第2パーンアウト点の存在や、稲田ら⁽⁹⁾が観察したような気泡が離脱せず伝熱面で微細化する現象は観察されなかった。これは今回の実験が細線を用いており、両者の実験に比べ気泡が離脱しやすい条件になっていたためと思われる。

沸騰曲線

Fig. 3(1)~(7)は、縦軸に熱流束 q 、横軸に壁面過熱度 $\Delta T_{s,at}$ で整理した沸騰曲線を各サブクールごとに示したものである。図中の線は、4回あるいは5回の実験で得られた測定値を各実験ごとに線種を変えて結んだものである。各図において熱流束の低い所にある曲線は未沸騰状態を、他の高い所にある曲線は沸騰状態を示している。本図を見ると、サブクール度により沸騰曲線の傾向が変化していることがわかる。

沸騰部の曲線を見ると、 $\Delta T_{s,bb} \leq 17.6\text{K}$ では、各実験ごとに多少ばらつきはあるが、沸騰曲線は、 $q = C \Delta T_{s,at}^n$ となる関係にあり、勾配は $\Delta T_{s,bb} = 2.6\text{K}$ で約4、 $\Delta T_{s,bb} = 7.6\text{K}$ で約3、 $\Delta T_{s,bb} = 17.6\text{K}$ で約2.5となっている。 $\Delta T_{s,bb} = 27.6\text{K}$ では、各実験ごとに沸騰曲線は大きくばらつく。これは低熱流束においては発泡点密度の影響を受け、また高熱流束では、沸騰様相で記述したように大きな気泡に加えて小さな気泡が多数離脱している現象に関連していると推察される。 $\Delta T_{s,bb} = 37.6\text{K}$ では、低熱流束域において、ばらつきが大きい。沸騰開始直後から発泡点が多ければ、壁面温度が急激に下

がるため沸騰曲線は図の左側にシフトし、発泡点が少なければ壁面温度はあまり下がらず図の右側にシフトしており、発泡開始点付近の発泡核の個数が熱伝達に大きな影響を与えているためである。しかし高熱流束域になり沸騰が十分に発達すると各実験による差は、ほぼなくなってくる。 $\Delta T_{s,bb} \geq 47.6\text{K}$ では、各実験ごとによる差があまりなくなり沸騰曲線は左上にシフトする。

$\Delta T_{s,bb} = 27.6\text{K}$ 以外では、沸騰が十分に発達している高熱流束域では、沸騰曲線は1本にまとまっていき、サブクール度による違いもなくなってくる。また、今回の実験では、最大熱流束のばらつきと沸騰曲線とは明確な相関は見られなかった。

熱伝達率

Fig. 4(1)~(7)は壁面過熱度と熱伝達率の関係を示したものである。縦軸に熱伝達率 h 横軸に壁面過熱度 $\Delta T_{s,at}$ を示す。本図によると $\Delta T_{s,bb} \leq 17.6\text{K}$ の場合、壁面温度が増加すると熱伝達率も増加する傾向にあるが、 $\Delta T_{s,bb} = 27.6\text{K}$ では、熱伝達率があまり変化しないものが見られる。 $\Delta T_{s,bb} \geq 37.6\text{K}$ では、低熱流束域で熱伝達率が高く、しばらく熱伝達率が下降し、それから熱伝達率が上昇している。 $\Delta T_{s,bb} \geq 27.6\text{K}$ では、気泡が発泡点で離脱せず伝熱面上を横に移動し、他の気泡と合体した後離脱する現象が観察された。この気泡の横移動により液の攪乱が起こり、壁面温度を下げるため、熱伝達率が上がると考えられる。この横移動効果は、サブクール度が高くなるにつれ熱伝達に与える影響が大きくなり、また高熱流束域にまでおよぶ。その結果高サブクール度では熱流束が低い場合でも熱伝達率が高く、熱伝達率が良好な状態が長く続いている。沸騰が十分に発達してしまうと横移動効果はなくなるが、これが図中において熱伝達率が最も悪くなっている所に相当している。

限界熱流束と相関式との比較

Fig. 5に、限界熱流束とサブクール度 $\Delta T_{s,bb}$ の関係を示す。縦軸は、各サブクールでの最大熱流束の値を $\Delta T_{s,bb} = 0\text{K}$ に外そうし、求めた熱流束 ($32.0\text{W}/\text{cm}^2$)で割った値である。図中の線はTable 1に示した、各研究者の相関式から計算した予測値を示している。 $\Delta T_{s,bb} \leq 37.6\text{K}$ の場合、限界熱流束は $\Delta T_{s,bb}$ とともに増加していく傾向にある、これはどの相関式についても一致し、かつ大きな差も見られない。しかし、

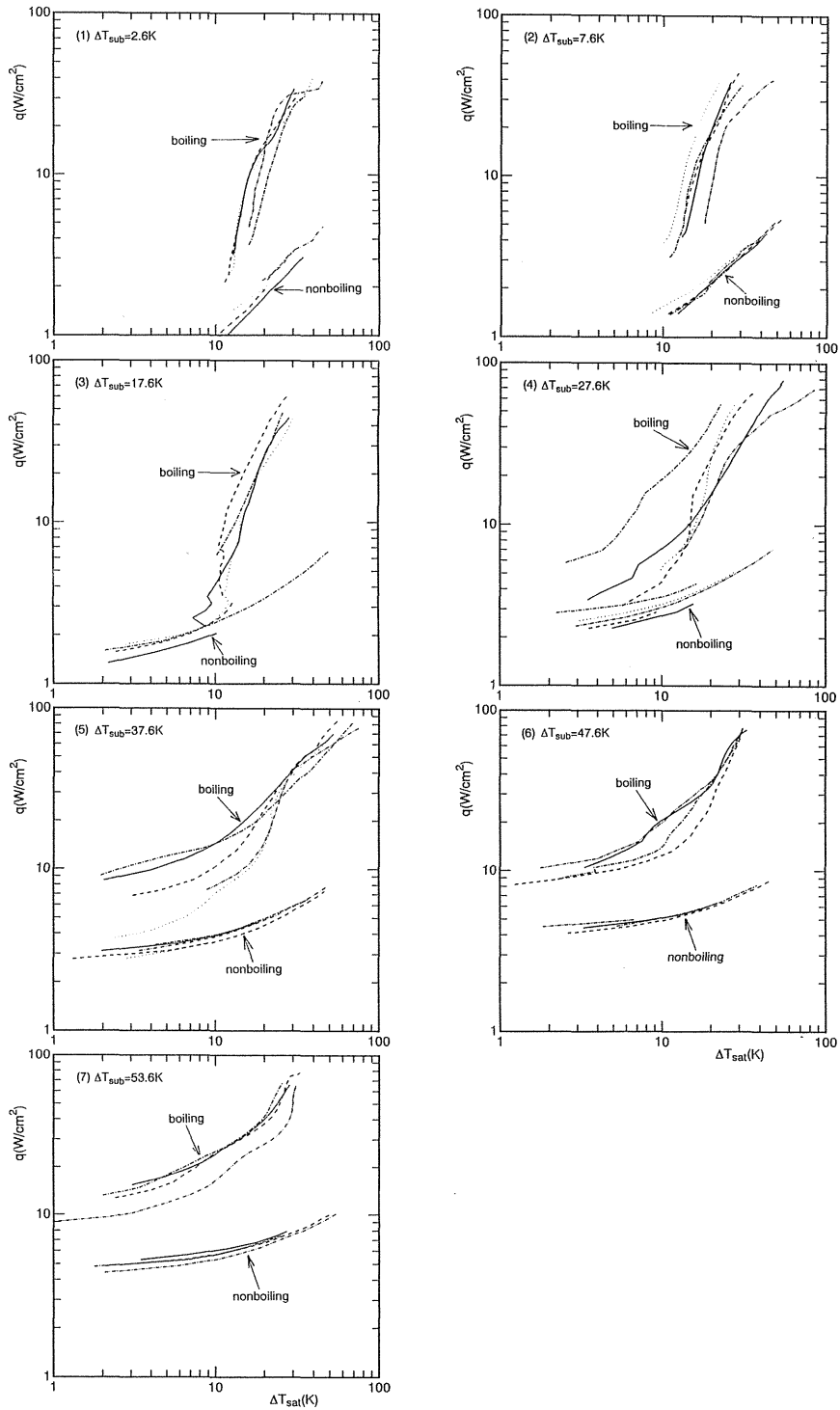


Fig. 3 Relation of heat flux to wall superheat

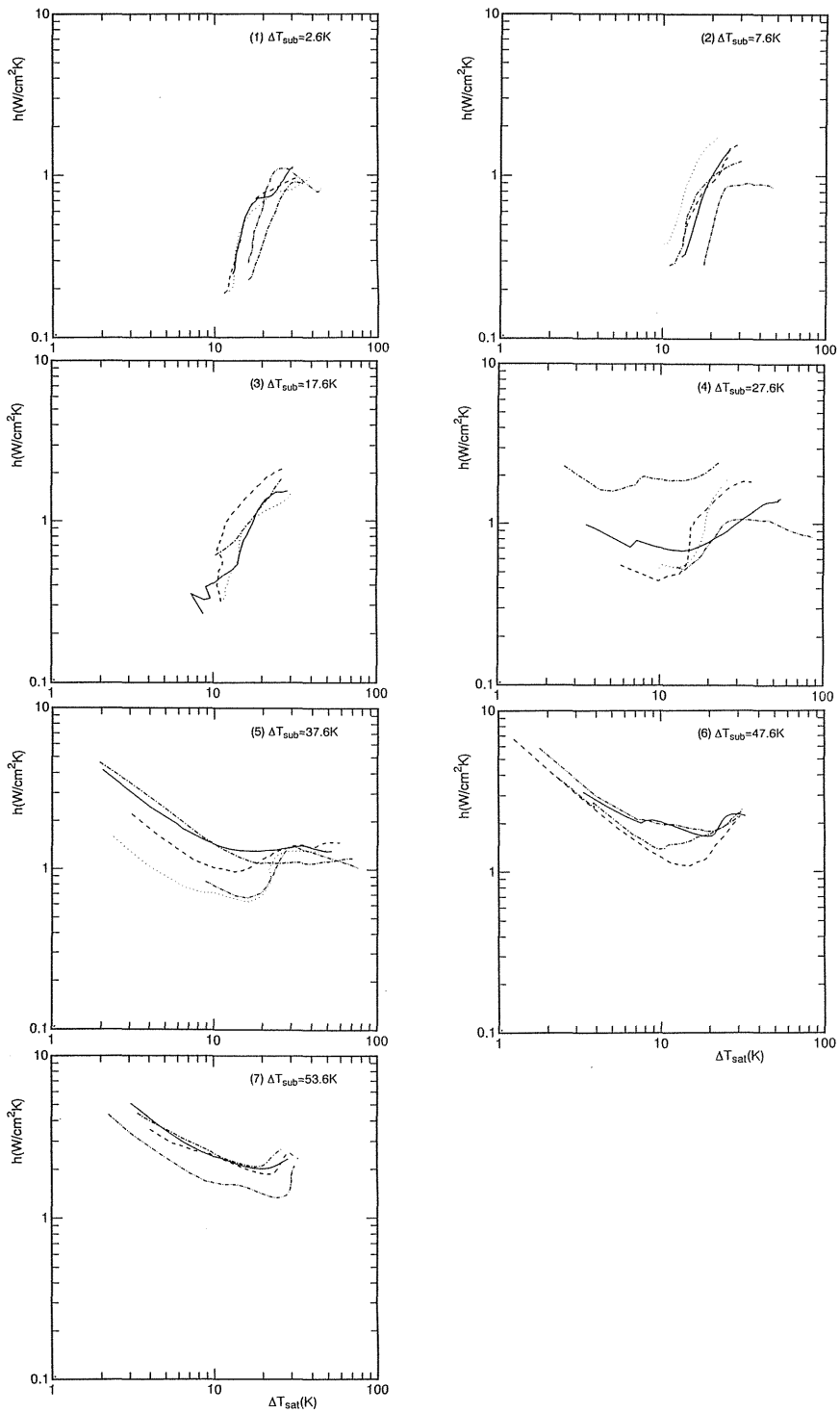


Fig. 4 Relation of heat transfer to wall superheat

$\Delta T_{sub} \geq 37.6K$ の場合、限界熱流束は ΔT_{sub} の増加にあまり影響を受けず、ばらつきはあるが、ほぼ一定の値をとることが分かる。これは、限界熱流束は高サブクール度 ($\Delta T_{sub} \geq 33K$) においては、液温の影響を受けないとするElkassabgi, Lienhardら⁽³⁾の示した結果と一致する。 $\Delta T_{sub} = 27.6K$ の場合に、限界熱流束のばらつきが大きい結果が示されているが、Fig. 6 に示す、限界熱流束時における熱伝達率とサブクール度の関係や、Fig. 7 に示す、壁面温度とサブクール度の関係においても、 $\Delta T_{sub} = 27.6K$ の場合、熱流束、壁面温度、熱伝達すべてにおいて、ばらつきが大きくなっていることがわかる。これは沸騰様相の項で述べた、大きな気泡にともなって発生する小さな気泡のため、気泡離脱に伴い伝熱面に供給される進入液の温度のばらつきが大きくなるため熱流束、壁面温度にばらつきが生じるものと考えられる。

Table 1 Equations of maximum heat flux on subcooling condition

Authors	Equations
Elkassabgi, Lienhard ⁽³⁾	low subcooling region: $\frac{q_{max,sub}}{q_{max}} = 1 + 4.28 Ja / Pe^{1/4}$ $Ja = \rho_l C_p \Delta T_{sub} / \rho_v h_{fg}$ $Pe = \frac{\alpha}{\alpha} [\rho_l (\rho_l - \rho_v)]^{1/4} \rho_v^{1/2}$ moderate subcooling region: $Nu = 28 + \frac{1.50 Ra^{1/4}}{(\beta \Delta T_{sub})^{7/8}}$ $Nu = \frac{q_{max,sub} (2R_{eff}) \lambda \Delta T_{sub}}{g \beta \Delta T_{sub} (2R_{eff})^2}$ $Ra = \frac{g \beta \Delta T_{sub} (2R_{eff})^3}{\alpha \nu}$ highly subcooling region: $\frac{q_{max,sub}}{q_{max}} = 0.01 + 0.0047 \exp(-1.11 \times 10^{-6} \chi)$ $\chi = \frac{R (R_{gas} T_{sat})^{1/2}}{\alpha}$
Ivey, Morris ⁽¹⁰⁾	$\frac{q_{max,sub}}{q_{max}} = 1 + 0.1 \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{1/4} Ja$
Miyasaka ⁽²⁾	$\frac{q_{max,sub}}{q_{max}} = 1 + 0.112 \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0.8} \left(\frac{Cp \Delta T_{sub}}{h_{fg}} \right)^{1.33}$ $= 1 + 0.112 \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0.33} Ja^{1.33}$
Kutateladze ⁽¹⁾	$\frac{q_{max,sub}}{q_{max}} = 1 + 0.065 \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0.8} \frac{Cp \Delta T_{sub}}{h_{fg}}$ $= 1 + 0.065 \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0.2} Ja$

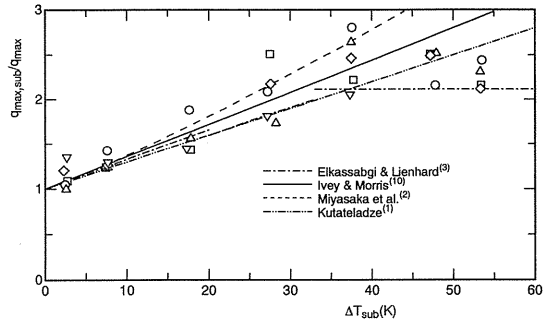


Fig. 5 Relation of maximum heat flux to subcooling

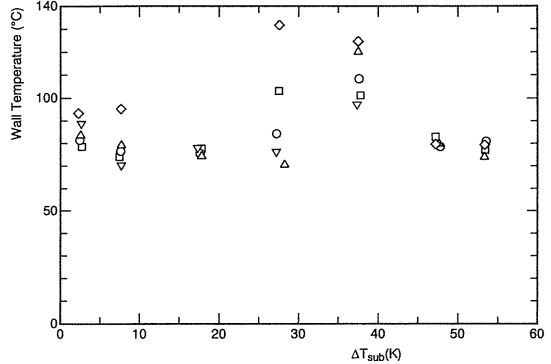


Fig. 6 Heating surface temperature at maximum heat flux to subcooling

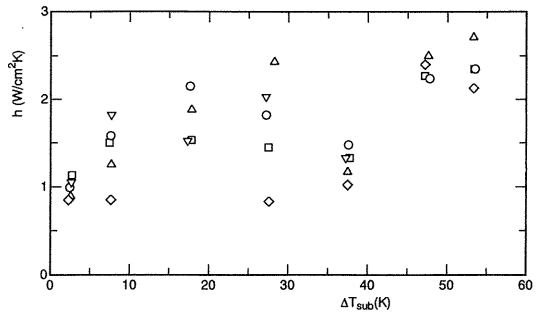


Fig. 7 Heat Transfer coefficient at maximum heat flux to subcooling

線径による比較

Fig. 8は、縦軸に測定された飽和温度における限界熱流束を次に示すZuberの式による最大熱流束値で割ったものを、横軸に伝熱面の無次元半径R'を取り線径の効果を示した図である。

$$q_{max,z} = \frac{\pi}{24} \rho_g^{1/2} h_{fg} \{g \sigma (\rho_l - \rho_v)\}^{1/4} \quad (2)$$

図中の白抜き記号は測定値、黒塗り記号はElkassabgi, Lienhardら⁽³⁾のフロンR-113における実験データである。破線と鎖線は、Table 2に示す、各研究者の相関式から計算した予測値を示している。Lienhard, 甲藤らの相関式は実験値と定性的な傾向は同じだが、絶対値は相違が大きくなっていることが分かる。データのある0.1<R'<0.8の範囲では、この関係は、図中の実線で示すように、以下の式で近似できることがわかった。

$$q_{max}/q_{max,z} = -0.84R' + 1.74 \quad (3)$$

Table 2 Equations of maximum heat flux relating to wire radius

Authors	Equations
Elkassabgi, Lienhard ⁽³⁾	$\frac{q_{max}}{q_{max,z}} = 0.89 + 2.27 \exp(-3.44 \times R')$
Haramura, Katto ⁽⁶⁾	$\frac{q_{max}}{q_{max,z}} = \left(\frac{3}{R'}\right)^{1/26} \left\{1 + \frac{1}{2} \frac{1}{(R')^2}\right\}^{1/32}$

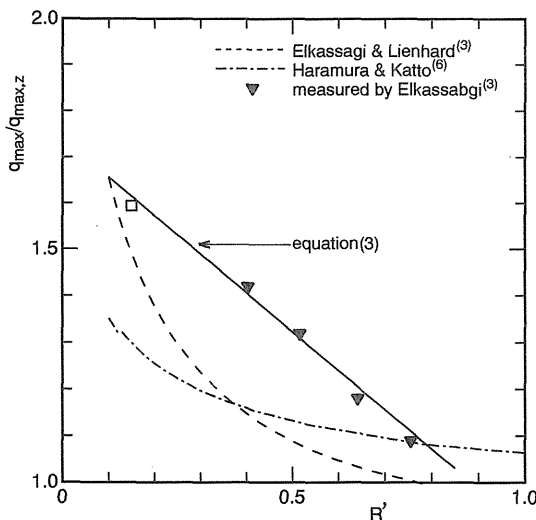


Fig. 8 Relation between maximum heat flux and dimensionless cylinder radius

4. まとめ

- 1) 限界熱流束については、サブクール度が37.6K以下の場合サブクール度が増加するにしたがって限界熱流束は増加するが、サブクール度が47.6K以上ではサブクール度の増加によらないとするElkassabgi, Lienhardの相関式とよく一致する。
- 2) 限界熱流束における離脱気泡径は、サブクール度の増加にともない球形に近くなる。また、 $\Delta T_{sub} = 27.6K$ では、大きな離脱気泡に交じって、小さな気泡が離脱する特異な現象が観察された。これが熱伝達に影響を与えると同時に、データに大きなばらつきを与えている。
- 3) $q_{max}/q_{max,z}$ とR'との関係は、 $0.1 < R' < 0.8$ の範囲では、以下の式で表わすことができる。

$$\frac{q_{max}}{q_{max,z}} = -0.84R' + 1.74$$

5. 参考文献

- (1) S.S.Kutateladze, "Hydrodynamic Theory of Changes in the Boiling Process Under Free Convection Condition," Izy. Akad. Nauk. SSSR, Otd. Tekh. Nauk., No.4 (1951), p.529
- (2) Miyasaka et al., "Critical Heat Flux and Subcooled Nucleate Boiling in Transient Region between a Two-Dimensional water and a heated Surface," J.Chemical Engineering of Japan, Vol.13, No.1, (1980), pp.29-35
- (3) Y.Elkassabgi, J.H.Lienhard, "Influences of Subcooling on Burnout of Horizontal Cylindrical Heaters," (1988) J.Heat Transfer Vol.110, No.2, (1988), pp.479-486
- (4) 藤田ら"サブクール液のプール核沸騰熱伝達"第23回日本伝熱シンポジウム講演論文集 B112, (1986), pp.160-162
- (5) 藤田ら"サブクール液のプール核沸騰熱伝達(第2報)"第23回日本伝熱シンポジウム講演論文集 C132, (1987), pp.344-346
- (6) 原村, 甲藤ら"限界熱流束に対する新しい流体力学的モデル"日本機械学会論文集(B編)49巻445号(昭58), pp.1919-1927

- (7) J.H.Lienhard, P.T.Y.Wong, "The Dominant Unstable Wavelength and Minimum Heat flux During Film Boiling on a Horizontal Cylinder, " J.Heat Transfer Vol.86, No. 2, (1964), pp.220-226
- (8) 鳥飼, 秋山ら "第二バーンアウト点に関する考察" 日本機械学会論文集 (B編) 35巻257号, (昭44), pp. 2273-2277
- (9) 稲田ら "サブクール沸騰特性曲線の研究" 日本機械学会論文集 (B編) 47巻417号, (昭56), pp.852-861
- (10) H.J.Ivey, D.J.Morris "Critical Heat Flux of Saturation and Subcooled Pool Boiling in Water at Atmospheric Pressure" Heat Transfer Conference Vol. 3, (1966), pp.129-142