金網による気泡挙動制限に伴う沸騰流伝熱促進と 流動損失に関する実験的研究*

角 口 勝 彦^{*1}, 田 代 守 文^{*1}

Experimental Study on the Flow Boiling Heat Transfer Enhancement and Pressure Drop due to the Bubble Behavior Restrictd by a Screen Sheet

Katsuhiko KADOGUCHI^{*2} and Morifumi TASHIRO

^{*2} National Institute for Resources and Environment, 16-3 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki, 305-8569 Japan

A unique method, previously proposed by the author, was applied to the heat transfer augmentation in the flow boiling field. In this method a screen sheet was put on the horizontal heated surface where bubble nucleation occurred. Generated vapor bubbles were trapped between the screen and the wall, became flat and moved along the surface. This restricted bubble behavior caused the heat transfer enhancement. Three types of the screen were tested in the present experiment and the effect of the screen was investigated on the heat transfer and two-phase flow characteristics. In two cases of them, the screen was displaced upward by the bubble nucleation. Compared with the ordinary flow boiling case, heat transfer was enhanced by a factor of 1.2 to 6 within the present experimental range. By using a simple flow model, it was made clear that the effect of the height of the displaced screen was important to evaluate the increase in pressure drop.

Key Words: Boiling, Heat Transfer Enhancement, Multi-Phase Flow, Pressure Drop, Restricted Bubble Behavior, Screen Sheet

1. 緒 言

地球温暖化, エネルギー資源枯渇化等の環境問題と関連して, 産業・民生両部門の未利用熱や排熱を回収, 輸送, 貯蔵して温度域ごとに有効利用する高効率システムの構築を目指した技術開発が行われている⁽¹⁾. その際, 常温に比較的近く保有熱量およびその密度がともに小さい熱源からの熱抽出は, 熱源の低質性ゆえに付加的な外部動力の投入がエネルギー収支上許容されないなどの問題を含んでいる. そのため効率的な熱抽出法に関する要素技術開発が望まれる.

著者らは先に, そのための一つの手法として, 沸騰により生じる蒸気泡を加熱面近傍に面と平行に配した金網でトラップして偏平化させつつ, 加熱面に沿って移動させることによる伝熱促進法⁽²⁾を提案した. この気泡挙動は(1)加熱面付近の過熱液排除効果を生み出す, (2)伝熱形態を気泡の移動に伴われる薄液膜流蒸発熱伝達へと変化させる可能性がある, などにより, 条件によっては伝熱を促進させる. しかもこの場合金

網には(i)加熱面近傍の液の自由対流を抑制して核沸騰開始を早める, (ii)気泡を通過させることなく液を流通させることができ, 加熱壁面上の液不足を自然に回避できる, などの利点を生み出すことが期待される. 一方で金網の設置は, 高熱流束下では気泡を加熱面近傍に停滞させ伝熱劣化をもたらす可能性も有しているが, 定量的には明らかにされていない.

この方法と類似の沸騰系についてはいくつかの報告がある. 加熱面上を固体壁によって狭かんげきとした場合のプール沸騰時の気泡挙動と熱伝達特性については, 垂直伝熱面に関する石橋・西川⁽³⁾の研究, 甲藤・横谷⁽⁴⁾による水平上向き加熱面の場合の研究, プール中の水平環状かんげきの上下に開口部を設けた場合に関する土田・相場⁽⁵⁾の研究, 加熱面を表面加工管とした環状かんげきについての石橋ら⁽⁶⁾⁽⁷⁾の研究等がある. また多孔質体を用いて狭かんげきを形成したプール沸騰系についてはせん孔板による島田ら⁽⁸⁾の研究, 気泡が水平加熱面近傍の金網の目を変形しつつ通過して浮上する場合に関する増岡ら⁽⁹⁾の研究がある. これらの例と比較すると, 本手法では金網は気泡の流出口ではないため, 加熱面への液供給が金網という広い流入口を通して気泡の対向という障害なく行われるという利点を有すると考えられる. またこれらの研究は

* 原稿受付 1999年6月15日.

^{*1} 正員, 資源環境技術総合研究所 (〒305-8569 つくば市小野川16-3).

E-mail: kadoguchi@nire.go.jp

すべてプール沸騰系を対象としており、強制流動沸騰系には適用されていない。

著者らは本手法について、まず水平ヒートパイプを用いてほぼ静止液プール核沸騰と同様の場でその有効性を実験的に確認した⁽²⁾。また伝熱促進機構について検討し、金網を通した液の流通を考慮したモデルにより伝熱特性を定量的に評価した⁽¹⁰⁾。本報ではこの手法を沸騰流場に適用した場合の伝熱上の有効性と圧力損失特性について実験的に調べた結果を述べる。

2. 使用するおもな記号

a : 式(1), (2)における定数

H : 流路高さ m

h : 熱伝達係数 $W/(m^2 \cdot K)$

j : 供試部出口における体積流速 m/s

l : 流路方向の長さ m

p : 圧力 Pa

Q : 発熱量 W

q : 熱流束 W/m^2

Re : 供試部入口におけるレイノルズ数

ギリシャ文字

Δp : 供試部圧力損失 Pa

ΔT_s : 供試部入口のサブクール度 K

δ : 金網 d 15 挿入時の加熱面-金網間距離 m

δ' : 金網 d 0, d 0 h の排除高さ(計算値) m

λ : 管摩擦係数

χ_{tt} : 気液共乱流の場合のマルチネリパラメータ
添字

ent: 助走区間

ex: 出口区間

fb: 本実験における沸騰流の値

h : ヒータ

L : 液

p : 金網 d 0 h の流れ方向の穴間距離

s : 加熱領域中のサブクール状態

tb : 金網がない場合の沸騰流の値

ts : 供試部

V : 蒸気

3. 実験装置および実験方法

実験装置の概略を図1に示す。閉ループ形の装置全体はステンレス製で、セラミックウールで保温した。全長約3mの水平流路は高さ10mm、幅40mmの長方形断面を有し(図3参照)、1.4mの助走区間、0.725mの供試部①および0.9mの出口部から構成される。鉛直密閉円筒形貯液槽⑦中の作動液(水)はポンプ④に

Fig. 1 Experimental setup

Fig. 2 Test section

より循環し、電磁流量計③で体積流量を計測し予熱器②により所定の温度まで昇温した後、水平流路へと導いた。①で生じた沸騰蒸気は流出端部⑥で気液分離後、⑦中の上部に設けた冷却管⑧の外表面で凝縮させ下部の貯留液へ落下させた。また分離後の液は⑥でオーバーフローして貯留液へ落下するようにした。貯留液は予冷器⑤により所定の液温に保った。

供試部の詳細を図2に示す。底面に長さ200mmの平板形ヒータを2枚接着した下壁には、シース熱電対を軸方向の10箇所に埋設した。また上流端断面位置の上壁に絶対圧センサと熱電対を取付けた。供試部入口・出口間には圧力損失測定用の差圧計を取付けた。さらに流動様相の観察のため、ヒータに対向する上壁の2箇所およびヒータの直下流位置の上下壁に、直径20mmのポリカーボネート製窓を設けた。

本実験は供試部流路中に何も無い場合(以下NSと記す)のほか、厚さ約0.2mm、メッシュ数50のステンレス製金網で作った3種類の挿入物を設置した場合についても行った。図3はこれらの一つ(以下d15と記す)を設置した場合の供試部横断面を示している。金網は加熱面となる底面から δ (本実験では1.5mm)の間隔をもって面と平行に挿入した。

他の挿入物とその設置方法について説明する。一つ

Fig. 3 Cross-sectional view in case of d15

Fig. 4 d0 and d0h

(以下d0と記す)は幅38mm、長さ750mmの金網で、一端のみ供試部入口の底面に固定して底面上に置いた。またもう一つの金網(d0h, d0と同寸法)には図4(b)に示すように、長さ方向の40mmごとに長方形の穴(30mm×10mm)を設けた。設置方法はd0と同様とした。

供試部入口・出口の液温をシース熱電対で、その間の圧力差を差圧計で、それぞれ測定した。また供試部入口断面の絶対圧 p も圧力センサにより測定した。蒸気発生量は次のように算定した。まず供試部加熱開始前後のそれぞれの定常作動時において凝縮器における除熱量を冷却水の流量およびその温度上昇から算定した。次にこれらの差を蒸発潜熱で除して求めた。また供試部熱流束 q はこの蒸発分の加熱量と、供試部入口(液単相流)におけるサブクール分の温度上昇(本実験では1°C以下)に要する熱量の合計から算定した。

実験条件の詳細を表1に示す。作動流体には水を用いた。質量流束は250~600 kg/(m²・s)の範囲であった。金網を設置しない場合(NS)の流動様式は観察によるとほとんどの実験点でスラグ流と判断された。すなわち本実験範囲は比較的低熱流束下で使用される低質廃熱回収用機器の動作条件に対応したものとなっている。実験は閉ループ内を適宜脱気して減圧下で行い、供試部の入口圧力 p および流入水流量を一定に保ちつつ、加熱量 Q_h を増加させて行った。

Table 1 Experimental conditions

Fluid	Water		
Test section condition	・ d15, d0, d0h (with screen #50) ・ NS (no screen)		
j_L [m/s]	0.26	0.42	0.60
j_V [m/s]	0.35-2.0	0.20-2.5	0.25-3.0
Re_L [-]	11800, 19400, 27000		
p [kPa]	52 ~ 60		
Q_h [W]	200 ~ 1000		
ΔT_s [K]	< 1		

Fig. 5 Bubble movement under the screen

4. 実験結果と考察

4.1 流動様相 図5(a)~(f)はd15, d0およびd0hのそれぞれの金網装着時における蒸気-液二相流動状態を、供試部上壁の観察窓を通してやや斜めから撮影したものである。流れの方向は右向きである。観察窓は加熱開始点から30cm下流にある2番めのもので(図2参照)、金網越しに見える下壁は加熱されている。各写真の流れの流動条件は図5中に示した。d15の場合[図5(a), (b)]金網越しに曲線が見られる。常時頻繁に見られるこの曲線は、変形しつ

つ右方向に通過した。これは偏平気泡と液との界面を示していると判断できる。すなわちプール沸騰系と同様に⁽²⁾、底面で生じた蒸気泡は金網-加熱面間の高さ $\delta(=1.5\text{mm})$ の空間内で偏平化して、液流とともに加熱面に沿って流れていることがわかる。

一方d0の場合[図5(c), (d)], 金網は常時上下に振動していた。これは金網が上流側の端を除いて加熱面に密着・固定されていないため、底面上での周期的な発泡に伴い、蒸気泡により金網が上向きに頻繁に押し上げられていたことを意味している。この点を除けば図5(c)に示すように、気泡の流動は低液流量の場合($j_L=0.26\text{ m/s}$)にはd15と同様であった。すなわちこの場合でもやはり蒸気泡は金網にトラップされ、加熱面に沿って下流へと流れていくことがわかる。ただし j_L が大の場合には偏平気泡と液の界面は本実験範囲内ではほとんど観察されず、まれに小気泡が金網-底面間を流れていくのが観察されるのみであった[図5(d), $j_L=0.42\text{ m/s}$ でも同様]。またこの場合、金網より上の上壁内面付近を流れる蒸気泡が頻繁に観察され、その流れは通常の気液二相流におけるプラグ流・スラグ流等と同様であった。すなわち液流量が大きい場合、蒸気泡により浮上した金網は液流の衝突により押し下げられ、その結果蒸気泡の大部分は流路の側壁方向に排除されて金網側部から漏れ出しているものと考えられる。

図5(e)および図5(f)には、d0hの場合について金網と長方形穴との境界部における流動様相を示した。d0hの場合もd0と同様に、金網は振動してい

た。またd0hでは金網-加熱面間を移動してきた偏平気泡が、穴部で金網の下から流出して浮上した。またd0hではd0の場合と異なり、金網下の偏平気泡は本実験範囲のどの j_L の場合にも頻繁に観察された。

4・2 熱伝達特性 図6は熱伝達係数 h_{fb} の実験値を示している。記号の意味は図6中の表に示すとおりである。図6中にはプール沸騰の場合で $\delta=0.9\text{ mm}$ のかんげきをもって金網を設置した場合のデータ⁽²⁾も◆で示した。すべての本実験点では供試部出口におけるクオリティが極めて低く、伝熱は強制対流よりも沸騰支配であると判断した。このような条件下ではプール沸騰の場合と同様の熱伝達評価が可能である⁽¹¹⁾ため、図6中には西川・藤田⁽¹²⁾の整理式による算定値も実線で示した。

金網を挿入しないNSの場合のデータ(白抜き)は上記の判断どおり、ばらつきはあるものの実線付近にあり、また j_L の影響(強制対流効果)は見られない。一方、金網挿入時のデータはどの場合もNSのデータより大きな h_{fb} の値を示しており、本手法における特徴的な気泡の挙動により伝熱促進効果が生じたことがわかる。またこれらd15, d0およびd0hの場合には、 j_L の増加に伴い熱伝達の向上がおおむねより顕著になる傾向が見られる。これは液流速の増加とともに偏平気泡の移動速度が増加して、強制対流伝熱的效果が生じるためと考えられる。

図7は金網挿入時の熱伝達係数の増加割合を横軸をマルチネリパラメータ X_{tt} として表したものである。ここで h_{tp} には図6の実線で示した値を用いた。どの金網の場合も X_{tt} の増加、すなわち j_L, q の減少とともに熱伝達がより向上する傾向にある。このことは本伝熱促進法が低熱流束域でより有効であることを示している。また金網の種類による伝熱向上効果の差異は、

Fig. 6 Heat transfer coefficient

Fig. 7 Heat transfer enhancement

Fig. 8 Friction factor in liquid flow case

Fig. 9 Pressure drop in two-phase flow case

本実験範囲内では顕著には見られない。

4.3 流動損失特性 図8は液(水)単相流の場合の供試部における管摩擦損失特性を調べた結果である。金網の有無にかかわらず、横軸の Re_L は断面平均速度と長方形管の等価直径を用いて算定した。また図8中には平滑管内乱流に関する Blasius の式による算定値も実線で示した。

NS のデータはほぼ Blasius の式と一致した。一方 d15 の場合には λ が大幅に増加し、d0 および d0h の場合には λ の増加割合は d15 に比べてかなり減少した。これらの値は単相流における伝熱促進用の種々の性状の伝熱面または突起等を設置した伝熱面⁽¹³⁾の場合と同等程度の値であった。d15 の場合、底面付近の低流動エネルギー流体と主流部の流体との間の流動エネルギー交換が金網により大きく妨げられることが大幅な圧力損失の増大につながったものと考えられる。

(a) Case of d0

(b) Case of d0h

Fig. 10 Estimation of lifted height of the screen

図9は d15, d0 および d0h について沸騰流の場合の圧力損失の増加率を示している。ここで金網なしの場合の気液二相流の圧力損失 Δp_{fb} は Chisholm の式⁽¹⁴⁾を用いて算定した。d15 では挿入物自体の流動抵抗が大であるため、圧力損失 Δp_{fb} は大きく増加した。これに対し d0h ではどの j_L の場合も Δp_{fb} の増加率は d15 と比較して減少した。一方 d0 では、 $j_L = 0.42, 0.60$ m/s の場合には d0h と同等またはやや大きめ程度の Δp_{fb} の増加率であるが、 $j_L = 0.26$ m/s の場合には Δp_{fb} が大きく増加し d15 の場合以上となった。すなわち 4.1 節で示した流動様相から、d0 では金網-加熱面間に扁平気泡がとどまりつつ流動している場合 ($j_L = 0.26$ m/s) には、金網がある程度高く持ち上げられた状態になっており、d15 の状況に近づくものと考えられる。また j_L が大きくなると気泡は金網側面から漏れ出すため、金網が浮き上がる高さは強制的に穴から気泡を流出させる構造の d0h の場合と同様に低くなっているものと考えられる。

4.4 金網浮上高さの影響 以上の考察から、d0, d0h の場合の二相流時の流動損失増加の要因の一つとして、気泡による金網の浮上高さ(以下 δ' と記す)が考えられる。図10(a), (b)はこの高さを算定するためのモデルを示している。上方に浮き上がった金網には、流れ方向に上流側からは液流の運動量が、下流側からは蒸気の流出に伴う上流向きの運動量が、それぞれ作用しているとする。d0 では図10(a)の沸騰領域全体(長さ $l_h - l_s$)を、d0h では図10(b)の穴間の金網(長さ l_p)を、それぞれ検査領域として、これらの運動量が釣り合うとし、さらに金網に衝突する液の流速を j_L に比例すると仮定して aj_L と表すと、d0, d0h のそれぞれについて次式が得られる。

$$\rho_L (aj_L)^2 = \rho_V (j_V H / \delta')^2 \quad (\text{d0}) \dots\dots\dots (1)$$

Fig. 11 Effect of displacement of the screen on pressure drop

$$\rho_L (aj_L)^2 = \rho_V u_v^2 \quad (d0h) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに式(2)の u_v は $d0h$ の穴部から水平方向に流出する蒸気の流速で、沸騰領域では均一に蒸気が発生していると仮定して次式から求めた。

$$u_v = j_v \left(\frac{H}{\delta'} \right) \left(\frac{l_p}{l_h - l_s} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(1)および式(2)と式(3)より、最終的に $d0$, $d0h$ のそれぞれに対して次式が得られる。

$$\frac{\delta'}{H} = \left(\frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0.5} \frac{j_v}{aj_L} \quad (d0) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\delta'}{H} = \left(\frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0.5} \frac{j_v}{aj_L} \left(\frac{l_p}{l_h - l_s} \right) \quad (d0h) \quad \dots\dots\dots (5)$$

図11は試みに $a=1$ として式(4), (5)を用いて算定した δ' と圧力損失増加率の関係を示している。金網側部よりの気泡漏えいがあり、したがって図10のモデルと異なる流動となっている $j_L=0.42, 0.60$ m/s の場合の $d0$ のデータを除くと、 δ' とともに圧力損失も増加する傾向が見られる。なお図11中には参考までに、この関係を示す整理式も実線で示した。このように $d0$, $d0h$ の場合には金網浮上高さが沸騰流時の圧力損失に強い影響を及ぼしていることがわかる。

5. 結 論

本研究では著者らが先にプール沸騰系において試みた、金網を用いて気泡挙動を制限する方法を沸騰流の場に適用し、伝熱促進効果と流動特性について3種類の金網製挿入物を用いて実験的に調べた。おもな成果は以下のとおりである。

(1) プール沸騰系と同様に、沸騰流の場合でも金網により蒸気泡を偏平化させ、加熱面に沿う方向に流動させることができる。ただし気泡の流路・流出口を明確化していない挿入物 $d0$ では、大液流量時に気泡の金網-加熱面間からの漏えいが生じることがある。

(2) 熱伝達は本手法により、どの挿入物を設置した場合も、通常の沸騰伝熱支配下の沸騰流と比較して本実験範囲内では向上する。

(3) 金網の存在により圧力損失は液単相流、沸騰流のどちらの場合でも増大する。ただし沸騰流の場合、金網を加熱面上に密着・固定せずにかんげきを設けることなく置き、かつ偏平蒸気泡を確実にかつ頻繁に金網-加熱面間から除去するよう工夫すると($d0h$)、その増加を小さく止めることができる。また本手法の実用に向けてはこの圧力損失のさらなる低減が必要であると考えられる。

(4) 沸騰流下での圧力損失増大に関し、発泡に伴い金網が加熱面上方へと浮き上がる場合($d0$, $d0h$)の浮上高さを簡易モデルにより算定した。その結果、圧力損失は浮上高さとともに増大することが明らかになった。

文 献

- (1) 西村隆夫・小俣富男・荻須吉洋, エコ・エネ都市システム, (1995), 55, (財)省エネルギーセンター。
- (2) Kadoguchi, K., Yamamoto, T. and Tashiro, M., *Proc. Exp. Heat Trans., Fluid Mech. Thermodyn.* 1997, 4 (1997), 1941-1948.
- (3) Ishibashi, E. and Nishikawa, K., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 12-8 (1969), 863-894.
- (4) 甲藤好郎・横谷定雄, 機論, 32-238 (1966), 948-958.
- (5) 土田一・相場眞也, 機論, 59-568, B (1993), 3899-3905.
- (6) 石橋英一・劉振華・三重野純, 機論, 57-543, B (1991), 3891-3895.
- (7) 石橋英一・ほか3名, 機論, 59-557, B (1993), 198-203.
- (8) 島田了八・ほか4名, 機論, 55-515, B (1989), 2035-2040.
- (9) 増岡隆士・ほか3名, 機論, No. 948-2 (1994-7), 242-245.
- (10) Kadoguchi, K., Yamamoto, T. and Tashiro, M., *Proc. 11th Int. Heat Transf. Conf.*, 5 (1998), 278-283.
- (11) 日本機械学会, 伝熱ハンドブック, (1993), 196.
- (12) Nishikawa, K. and Fujita, Y., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 20-3 (1977), 233-245.
- (13) Bergles, A. E., *Progress in Heat and Mass Transfer*, 1 (1969), 331, Pergamon Press.
- (14) 日本機械学会, 管路・ダクトの流体抵抗, (1979), 181, 丸善。