フィン列をもつ円形伝熱面のプール沸騰実験*

熊谷 哲**, 趙 鋁琪***, 広野 洋一**
Satoshi KUMAGAI, ShiGie JHO, Yoichi HIRONO

島田 了八**, 武山 斌郎**
Ryohachi SHIMADA, Toshiro TAKEYAMA

Key Words: Phase Change, Boiling Heat Transfer, Rectangular Fin Array, Optimum Dimension, Saturated Pool Boiling, R 113

1. 緒 言

沸騰熱伝達における極大熱流束点を安定に実現し、核沸騰から膜沸騰への飛躍的遷移特性を自由に制御できるとすれば、バーンアウト対策と、より高い熱流束の実現のために有効な手段となろう。著者らはこの目的のために拡大伝熱面の沸騰熱伝達への応用を考え、その熱伝達特性を種々の観点から明らかにしてきた^{(1)~(7)}。すなわち、単独平板フィンについては、表面の熱流束分布を実験により求め、対流・核・遷移・膜の各沸騰領域間の干渉の影響を明らかにする⁽²⁾とともに、この干渉を考慮した修正沸騰曲線を提案し、理論計算によりフィンの熱伝達特性を求める方法を示し、計算結果を数個の断面形状の異なる環状フィンの R 113 中の実験値と比較して、この方法の妥当性を示した⁽³⁾。さらに、この計算方法を種々の単独フィンおよびフィン列に拡張して最適形状について考察した⁽⁵⁾。その結果単位体積当たりの熱流束密度はフィン高さが 2.5 mm 付近で最大となり、また、厚さの薄いフィンをできるだけ多数植え付けることが有効であるという結果を得た。

しかし、この計算では単独フィンとの対応から得られた隣接する各沸騰領域間の干渉のみを考慮した修正沸騰曲線を用いており、フィン列として応用する場合の隣り合うフィンとの相互干渉まで考慮に入れることはできなかった。この干渉の問題は、たとえば Bondurant ら⁽⁸⁾は水平環状フィン列に関する実験から、フィン間隔 1.57 mm 以下では干渉による熱伝達の劣化が著しく、フィン列として用いるのは不相当であると結論している。著者らはその後、環状フィンの両側か

ら透明の干渉板を近づけ、気液流動の様相を観察し、その周期性の強い挙動を明らかにするとともに⁽⁶⁾、熱伝達特性へのすきまの広さの影響をフィン高さを変えて明らかにした⁽⁷⁾。すなわち、フィン列の干渉の影響は核沸騰から混合沸騰にかけて熱流束により大きく二つに分かれ、すきまが狭い場合、比較的低熱流束領域における伝熱促進と、比較的高熱流束領域における伝熱劣化の現象である。このとき、すきまが 0.25 mm の場合に伝熱促進が最も大きく、また、熱流束密度による評価では、高熱流束域でのすきまが狭いことによる熱伝達劣化の影響がフィン枚数の増加と相殺し高い有効性を示す。

以上の結果から、R 113 と銅製フィンの組合せについて、最適フィン寸法の諸元を推定することは可能であった。しかし、このフィン列の干渉に関する実験は、単独フィンに断熱の干渉板を近づけたものであり、沸騰面が狭いすきまを挟んで対向する実際のフィン列における気液流動の干渉とは、多少の違いも予想される。とくに、寸法の絶対値について不安が残る。本研究は、実際の銅製く形フィン列をもつ伝熱面のプール沸騰実験を行い、フィン列間の気液流動の干渉を先の報告⁽⁶⁾⁽⁷⁾との関連のうえで考察するもので、フィン高さ、厚さ、間隔が混合沸騰曲線に与える影響を検討し、フィン列の最適条件の諸元を探ることを目的とする。

記 号

b :	フィン厚さ	mm
h :	フィン高さ	mm
δ :	フィン間隔	mm
q_b :	根本熱流束	W/m ²
$\Delta T_{sat,b}$:	根本過熱度	K
$\dot{Q}$:	単位体積当たりの熱流束密度	W/m ³
R_i :	熱流束密度換算時の基本円柱半径	mm

* 昭和 59 年 5 月 31 日 第 21 回日本伝熱シンポジウムにおいて講演、原稿受付 昭和 59 年 9 月 27 日。

** 正員、東北大学工学部 (〒980 仙台市荒巻字青葉)。

*** 東北大学大学院。

D : フィン付き伝熱面直径 mm
添 字
crit: 極大熱流束点における値

2. 実験装置ならびに方法

供試伝熱面はその一例を図1に示すもので、フィン高さ h については、1 mm から 10 mm まで、フィン厚さ b は、0.2 mm から 1.5 mm まで、フィン間隔 δ は、0.28 mm から 2 mm までの12種の小さく細かく薄いフィン列であり、その各寸法を表1に示す。いずれも放電加工により銅ブロックから切り出したもので、基準面は直径 10 mm の円形平面である。これを図2に示す実験装置の沸騰容器内に取り付け、供試液体 R 113 に対し、大気圧下の飽和プール沸騰実験をおこなった。R 113 は各実験ごとに新しいものを用い、測定開始前に十分脱気している。伝熱面温度は銅ブロック円柱部中心線上に埋め込まれた3本の熱電対の指示温度を根本基準面まで外挿し、伝熱量はその温度こう配

図1 供試フィン付き伝熱面

図2 実験装置

から求めた。測定は十分定常を待って行った。また、伝熱面の姿勢の影響を調べるために、図1のように水平面にフィンを高さ方向に垂直に立てた垂直フィン列と、これを90°回転させ、鉛直面にフィン面も鉛直になるようにフィンを立てた縦形フィン列の両方について実験を行った。

3. 沸騰の様相

図3は垂直フィン列と縦形フィン列の沸騰の様相を示したものである。フィン厚さ 0.2 mm、高さ 10 mm、間隔 0.28 mm の場合で、実験を行った中では最も間隔が狭く、厚さが薄く、高さが高いフィン列のものである。熱流束の低い左側の写真ではフィン根本付近で気泡が発生し、フィンとフィンの間を上昇してフィン列の上で合体し、大きな塊となって伝熱面から離脱するのが観察される。中列は高熱流束の混合沸騰領域の写真であるが、ここでは激しい核沸騰の行われる領域がフィン高さの中間部に移り、とくに垂直フィン列では気泡塊がすきま内にも充満して光が通らず、その部分が黒く見える。根本付近は安定な膜沸騰に覆われ、気液界面の形がなめらかなためフィン列の形が判別できる。伝熱面の上に形成される合体泡は熱流束に応じて大きくなるが、フィン列では普通平面に比べその形が複雑である。この写真の領域は極大熱流束の70~80%に相当するものであるが、下段の縦形フィン列を見ると明らかのように、この高熱流束においてもフィン先端では沸騰が行われておらず、薄くてフィン高さの高いこのフィンの伝熱面全体が有効には機能していないことを示している。全面膜沸騰の右側の写真では沸騰の様相も穏やかで、形成される合体気泡も小さくなめらかになる。

4. 実験結果および考察

4.1 伝熱面姿勢の影響 図4はフィン高さ 5 mm で、薄く間隔の狭い伝熱面における縦形フィン列と垂直フィン列の実験結果を比較したもので、伝熱面の姿勢による影響を示した一例である。図4中の実線は修正沸騰曲線を用いて計算により求めた、同じフィン列に対する混合沸騰曲線で、フィン列の干渉がない

表1 伝熱面寸法 (mm)

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
D	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
h	0	1	2	5	10	2	2	2	2	2	2	2
b	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	0.5	1.0	1.5
δ	0	0.28	0.28	0.28	0.28	0.5	1.0	2.0	0.28	0.5	0.5	0.5

場合に相当する。この曲線に比べ、実験値は核沸騰低熱流束域で熱伝達促進効果が大きく現れ、かなりの高熱流束が得られるのに対し、高熱流束域では根本過熱度の上昇に対する熱流束増加の傾きが緩やかで、計算値と交差してかなり低い熱流束で極大値となり、熱伝達劣化の傾向が見られる。垂直フィン列、縦形フィン列いずれにも見られるこの現象は、フィン列間の気液流動の干渉によるもので、干渉板を近づけた実験結果⁽⁷⁾と傾向が一致する。全面膜沸騰領域はこの場合計算値とほぼ一致している。縦形フィン列と垂直フィン列では、熱流束に多少の差が見られ、前者のほうが対流から全面膜沸騰まで全般にわたり若干高い値となる。これは縦形のほうが気液の整然とした流動により、伝熱面への流体の供給が比較的円滑に行われやすいため、伝熱面の姿勢の影響が現れたものである。この傾向は他の寸法のフィン列についても同じである。

なお、図4中の矢印は、実験において熱流束を上昇あるいは下降させていく場合の、現象の飛躍的遷移の方向を示すものである。

4・2 混合沸騰曲線への諸因子の影響 フィン列

の性能は、その高さ h と厚さ b および間隔 δ に支配される。図5~7はそれぞれの因子をパラメータとして得られた実験結果を系統的にまとめたもので、(b)および(c)はそれぞれ垂直および縦形フィン列についての沸騰曲線の実験点であり、(a)にそれらに対応する理論計算で得た値を示してある。計算値と実験値が定量的に一致しているとはいえないが、各実験点に現れている低熱流束での伝熱促進と高熱流束での劣化を加味するならば、各パラメータに関し定性的には両者はかなり良い一致を示しているといえる。

すなわち、図5はフィン高さを変化させたものであるが、高さが高くなるにつれて熱流束は単調に増加する。とくに、熱流束の高い領域でのこの差が大きくなり、高いフィンでは緩やかな右上がりのこう配が長い範囲にわたって持続し、また、膜沸騰領域においても高さによる差が大きいのも理論計算の傾向と一致する。高いフィンでは熱流束が高いだけでなく、混合沸騰から全面膜沸騰への温度の飛躍的上昇の割合も低いフィンに比べると小さく、パーンアウト対策上有利な性格といえる。

$\Delta T_{\text{sat}} b = 9 \text{ K},$
 $q_b = 7.5 \times 10^5 \text{ W/m}^2$

$\Delta T_{\text{sat}} b = 30.8 \text{ K},$
 $q_b = 1.4 \times 10^6 \text{ W/m}^2$

$\Delta T_{\text{sat}} b = 143.9 \text{ K},$
 $q_b = 8.66 \times 10^5 \text{ W/m}^2$

(a) 垂直フィン列

$\Delta T_{\text{sat}} b = 9.5 \text{ K},$
 $q_b = 6.81 \times 10^5 \text{ W/m}^2$

$\Delta T_{\text{sat}} b = 34.5 \text{ K},$
 $q_b = 1.61 \times 10^6 \text{ W/m}^2$

$\Delta T_{\text{sat}} b = 230 \text{ K},$
 $q_b = 1.32 \times 10^6 \text{ W/m}^2$

(b) 縦形フィン列

図3 フィン列における各領域の沸騰の様相 ($h=10 \text{ mm}$, $b=0.2 \text{ mm}$, $\delta=0.28 \text{ mm}$)

図4 垂直フィン列と縦形フィン列の比較

図6は、フィン間隔をパラメータにしたもので、ここに取り上げたフィン高さ $h=2\text{ mm}$ は熱流束密度が最大となることが予想される近傍のフィン列である。計算値を示した図6(a)を見ると、間隔が狭くなるにつれ熱流束が増加しているが、これは主にフィン枚数の増加による伝熱面積の増大に因るところが大きい。したがって間隔が狭くなるにつれ曲線が全体的に熱流束の高いほうへ平行移動する。これに対し実験値のほうは、沸騰開始位置などの変化を見ると、間隔が狭くなるにつれて曲線が低過熱度側へ移行しているといえる。もちろん伝熱面積の増加に因るところもあるが、これは主に核沸騰低熱流束における伝熱促進の効果によるもので、フィン列の干渉の現れである。この干渉による伝熱促進は本実験範囲では、狭いほど大きな

図5 混合沸騰曲線へのフィン高さの影響

図6 混合沸騰へのフィン間隔の影響

っている。実験可能であった最小すきま 0.28 mm は先の断熱干渉板を近づけた実験⁽⁷⁾で最大の伝熱促進を示したすきま 0.25 mm とほぼ同程度である。ただし、この狭い間隔では高熱流束域での伝熱劣化が著しく、熱流束が最大となるのは間隔が 0.5 mm の場合である。

図 7 はフィン厚さによる変化である。フィン高さは図 6 と同じ 2 mm で、間隔は図 6 で最大熱流束を示した 0.5 mm の場合である。計算値の図 7 (a) でも、厚さによる熱流束の変化は他の因子に比べて大きくはないが、実験でもこの傾向は同じである。それでも高熱流束領域で多少の違いが現れ、本実験範囲では薄いほど高い熱流束を示す。この実験条件では、間隔が狭いために、気液流動が比較的円滑に行われやすい縦形フィン列のほうがフィン面での熱伝達の寄与が大きく、

フィンを薄くし、枚数を増加させたための伝熱面積の増大による熱流束差が垂直フィン列より大きく現れる。各パラメータに対する全体的な傾向は垂直フィン列も縦形フィン列も同じである。

4・3 極大熱流束点に対する諸因子の影響 図 8~10 は混合沸騰曲線から極大熱流束点を取り出し、横軸にそれぞれの因子をとってまとめたものである。図 8~10 の上段は極大熱流束値、下段はその点における根本過熱度で、とくに後者はバーンアウト対策上、その制御のしやすさの一つの目安となる。図 8 はフィン高さの影響で、垂直フィン列および縦形フィン列の値を計算値と比較している。極大熱流束はフィン高さが高くなるに従って単調に増加するが、とくに高さ 2 mm までの増加割合が大きい。曲線の形は三者ほとんど同じであるが、実験値は計算値よりもかなり低い値

図 7 混合沸騰曲線へのフィン高さの影響

図 8 極大点への高さの影響

図 9 極大点への間隔の影響

図 10 極大点への厚さの影響

となる。これはすきま内を埋める気泡塊により気液交換が損なわれるためであり、比較的気液流動の円滑な縦形フィン列のほうが垂直フィン列よりも多少高い熱流束となる。このときの根本過熱度もフィン高さが大きいほど高い温度になる。曲線の形は実験値と計算値でかなり異なり、フィン高さ2 mm 以下ではフィンなしの普通平面より低い過熱度で遷移してしまう。これは極めて狭い間隔 $\delta = 0.28$ mm のフィン列の根本付近に気泡がたまりやすく、むしろ膜沸騰が促進されることを示している。フィン高さが高い場合にも低い過熱度から根本付近は膜沸騰に支配され、沸騰曲線の傾きが緩やかになるが、先端まで蒸気膜に覆われるためにはかなり高い根本過熱度を要し、図8の結果となったものである。実験は高さ1 mm までであるが、さらに高さが低くなると、いずれはフィンのない伝熱面に

近づくものと考えられる。

図9は極大点へのフィン間隔の影響である。極大熱流束を示した上段では、間隔0.5 mm 以上で3本の曲線は傾向が良く一致し、間隔が狭くなるにつれ増大するが、実験値のほうは間隔0.5 mm で最大値となり、これより狭くなると気液の交換が損なわれるための影響が強く、熱流束は低下する。極大点の根本過熱度を表した下段の曲線も、実験値は間隔0.5 mm で最大値をもつ形となる。1 mm 以上の間隔では実験値と計算値はほぼ一致しているが、0.5 mm では実験値はフィン列の干渉を考えていない理論値よりも高くなり、バーアウト制御のうえで大きな利点といえる。さきに行った、等厚環状フィンの両側から干渉板を近づけた実験⁽⁷⁾では、干渉板とのすきまが0.25 mm の場合に核沸騰低熱流束域で最も熱伝達促進が大きく、また、高熱流束域では干渉による熱流束の低下がそれほどひどくないことから、間隔0.25 mm を推奨値として挙

(a) 垂直フィン列

(b) 縦形フィン列

図11 熱流束密度へのフィン高さの影響

図12 最適フィン列の熱流束密度

$\Delta T_{sat} b = 25.5 \text{ K}$,
 $q_b = 9.63 \times 10^5 \text{ W/m}^2$

$\Delta T_{sat} b = 24.1 \text{ K}$,
 $q_b = 8.82 \times 10^5 \text{ W/m}^2$

図13 最適フィン列の沸騰の様相

げたが、ここではそのちょうど2倍の間隔が最適であるという結果が得られたことになる。これは、断熱の干渉板と熱伝達を伴う沸騰フィン列との違いによるものであるが、極大熱流束に関しその絶対値の差は25%である。

図10はフィン厚さの影響をまとめたものである。厚さ0.2~1.5 mmという実験範囲では、厚さが薄くなるにつれて極大熱流束も、また、そのときの根本過熱度も高くなる。とくに、厚さ0.2 mmのところでの増加割合が大きく、薄いフィンが有効であるのがわかる。フィン列の干渉を考えない場合、理論的にはできるだけ薄いフィンをしてできるだけ狭い間隔で多数植えるのがよい⁽⁶⁾、という結果が得られているが、一方、間隔を0.5 mmと固定した場合、同じ理論計算によると厚さ0.1 mm以下では逆に熱流束が低下するという結果も得られている。これは、薄いフィンではフィン1枚当たりの伝達熱量が減少し、しかも間隔が固定されていると、薄いフィンを用いてもフィン枚数はあまり増加しないことによるものである。0.2 mmの厚さが最適であるかどうかは、正確にはさらに薄いフィンを用いた実験により確かめる必要があるが、厚さが零の極限はフィンなしの普通平面であることも併せて、ここでは推奨厚さとして0.2 mmを挙げることにする。

5. 熱流束密度と最適フィン形状

4章において、高熱流束を得るためにはフィン高さは高いほどよいという結果が得られた。しかし、狭い間隔でフィンを植える場合、根本近くは気液流動が円滑に行われず熱伝達が劣化し、また、高くて薄いフィンでは先端近くは温度が下がってしまい、図3の写真のようにフィン面の大部分の領域で沸騰を生じないということが起こり得る。したがって低すぎるフィンは蒸気膜の中に埋もれてしまい、高すぎるフィンは無駄な部分が多くなることから、フィン高さにも最適値が存在することになる。その評価の基準として、フィン付き管群の理論計算⁽⁶⁾において用いたと同じ単位体積当たりの熱流束密度を導入する。すなわち、本実験で用いたフィン列を直径12.5 mmの円柱表面に軸と平行に取付け、千鳥配列で密に並べた場合の熱流束密度、すなわち、フィン付き管群からの全伝熱量を、フィン列間のすきまを含むフィン付き管群の全占有体積で割った値を本実験結果(図5)から求めてみると図11となる。ここで円柱の曲率の影響は無視している。縦形フィン列、垂直フィン列両者まったく同じ傾向となり、実験範囲では高さが低くなるにつれて熱流束密

度が増加する。高さ1 mmの実験値は2 mmのものと途中までほぼ一致しているが、極大点の根本過熱度は4章で述べたように普通平面の遷移過熱度よりも低く、バーンアウト制御の観点からは望ましくない。したがって最適フィン高さは2 mmとなる。高さが10 mmでは高熱流束域でフィンなしの普通平面よりも低い熱流束密度しか得られない。

4章および本章の結果を総合すると、高熱流束密度を実現するための最適フィンの諸元としては、高さ2 mm、厚さ0.2 mm、間隔0.5 mmが推奨値として挙げられる。このときの熱流束密度を計算値といっしょに普通平面のデータと比較したのが図12である。高熱流束密度の実現およびバーンアウト制御の二つの目的に対し、縦形、垂直両フィン列ともかなりの効果があることがわかる。

図13はこの最適寸法のフィン列における沸騰の様相で、極大熱流束点付近のものである。この場合には図3の中列のものとは異なり、フィン先端まで激しい沸騰が行われているのがわかる。このことは、フィン面全体が高熱流束の沸騰熱伝達を行うことが、最大熱流束密度を実現するための必要条件であることを示している。

6. 結 論

より高い熱流束密度の実現とバーンアウト対策を目的として、フィン列を沸騰熱伝達に応用する場合の最適諸元を得るため、等厚フィン列を水平上向き面および垂直面に取付けた伝熱面の熱伝達特性について、フィン高さ、間隔、厚さを変えた実験を行い、それらの有効性を検討して以下の結論を得た。

(1) 伝熱面の姿勢については、垂直面にフィン列を縦に取付けた縦形フィン列のほうが、水平面に垂直に立てた垂直フィン列よりも気液流動が円滑に行われ、熱流束および極大点の根本過熱度ともに高い値となる場合が多い。

(2) フィンの高さが高くなるにつれて熱流束は増加し、また、極大点の根本過熱度も高くなることから、高いフィンはバーンアウト対策上有効である。

(3) しかし、フィン高さが高すぎると先端では沸騰が起こらず、熱伝達の面からは無駄な部分が増えることになる。

(4) フィン間隔は0.5 mmの場合に熱伝達促進効果が最も大きく、高い熱流束が得られる。

(5) フィンの厚さは薄いほど熱流束が増加するが、0.2 mmより薄いフィンでは逆に低下するものと推察できる。

(6) 管群の沸騰熱伝達におけるフィン列の最適利用とその限界を熱流束密度の観点にたって考察すると、フィン高さ 2 mm, 間隔 0.5 mm, 厚さ 0.2 mm が推奨値として挙げられる。

なお、ここで最適利用の基準とした熱流束密度は常に判断の基準になるものではなく、目的・状況に応じてふさわしいものをその都度用意する必要がある、これによって最適諸元も変わるものである。

おわりに、本研究で用いた伝熱面は、豊田工業大学海野紘治助教授のご厚意により製作できたものであり、深く感謝いたします。また、実験装置の製作を担当した東北大学工学部機械工学科工場、とくに板垣和

夫、梅津 忠技官に感謝する。

なお、本研究は昭和 58 年度文部省科学研究助成費、No.58040020 の援助を受けて行われたものである。

文 献

- (1) 武山・ほか 2 名, 機論, 37-296 (昭 46), 750.
- (2) 大内・武山, 機論, 44-377 (昭 53), 154.
- (3) 熊谷・ほか 2 名, 機論, 49-448, B (昭 58), 2847.
- (4) 熊谷・ほか 4 名, 機論, 文献(3)の 2856 ページ.
- (5) 趙・ほか 4 名, 機論, 50-458, B (昭 59), 2409.
- (6) 熊谷・ほか 3 名, 機論, 50-456, B (昭 59), 1920.
- (7) 熊谷・ほか 4 名, 機論, 50-459, B (昭 59), 2632.
- (8) Bondurant, D. L. and Westwater, J. W., *Proc. Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.*, 67-113 (1972), 30.

討 論

〔質問〕 西 尾 茂 文〔東京大学生産技術研究所〕
興味深い現象を取扱われていることに敬意を表する。

(1) 結論(2)で高いフィンはバーンアウト対策上有効と述べられている。しかし、例えば図 5 (b)を例とすると、確かに h の増大とともに CHF 点の過熱度は増大しているが、CHF 発生後の到達過熱度はほぼ h に依存していないように思える。いわゆるバーンアウト対策としては、この到達温度を制御する方法つまり CHF の増加率より膜沸騰熱伝達の増加率がかなり大きい現象が望ましいと思えるが、いかがか。

(2) 熱流束密度によるフィン効果比較の工学的意味は何か。

(3) 貴実験では直径 10 mm の伝熱面を使用しておられるが、このような直径の小さい伝熱面上に立てられたフィン間の気液流動に対しフィン間側面からの液流入、気泡流出の影響はないであろうか。すなわち、本結果は円管表面上に立てられた縦フィンに適用できるか。

〔回答〕 (1) バーンアウト対策としては、CHF 点に至るまでの熱流束と過熱度の上昇の過程を制御しやすいものにする、および、ご指摘のよう

に CHF 発生後の到達過熱度を低く抑えることの二とおりが考えられる。前者については実験から、明らかに高いフィンが有効である。後者についても、図 5 (b)には到達温度を明示していないが、 $h=1$ mm と $h=10$ mm では 100 K 以上の差があり、本実験範囲では高いフィンのほうが有効である。これは、 h による CHF 値の増加割合が膜沸騰の熱流束の増加割合より小さいためである。これらの効果により、CHF 発生時の飛躍的温度上昇の幅は、高いフィンほど小さくて済む。

(2) 同じ熱量をフィン付き管群から液体へ伝える場合、熱流束密度が大きいことは熱交換器全体の大きさが小さくて済むことを意味し、材料的にも構造的にもフィンを用いる効果の大きさの比較基準となり得る。

(3) 本実験の縦形フィン列における気液流動は、全体的にフィン溝に沿ったものであるため、長い鉛直管の場合上のほうは蒸気が充満して、フィン面が有効な伝熱面とならないことが考えられる。この場合には、適当な長さを一区切りとして、そこまでに集まった蒸気をフィンの外へ排除する工夫を取り入れることにより、本結果が適用できると考える。