

密閉二相熱サイフオンの熱伝達特性に関する研究

A Study about Heat Transfer Characteristics of Closed Two-phase Thermosyphon

高橋 章・神永 文人*・松村 邦仁*

福島工業高等専門学校機械工学科

*茨城大学工学部機械工学科

Akira Takahashi, Fumito Kaminaga*, and Kunihiro Matsumura*

Fukushima National College of Technology, Department of Mechanical Engineering

*Ibaraki University, Department of Mechanical Engineering

(2009年9月18日受理)

Closed two-phase thermosyphon has a high heat transfer performance and therefore is widely used for cooling of electronic devices etc. The basic configuration of thermosyphon is called the single tube type thermosyphon, which is using a vertical or inclined straight tube. This conventional single tube type thermosyphon has the following two problems. One is that the non-uniform wall temperature exists because of less fluid mixing due to slight or no boiling at the bottom of the evaporator. The other one is small maximum heat transfer rate because of flooding, which is caused by counter current flow of steam flow and return liquid. A new type of thermosyphon, which is referred to a looped parallel thermosyphon, was developed to solve the problems. It consisted of parallel installed two conventional thermosyphons connected by two U tubes. Water and ethanol were used as the working fluid. Experiments were carried out with three different cooling temperatures, 25, 37.5, and 50 °C and two charge ratios, 0.5 and 0.9. The purpose of the present study is to examine the heat transfer characteristics of the single tube thermosyphon and the looped parallel thermosyphon.

The heat transfer characteristics on the evaporator and condenser of two types of thermosyphons were clarified.

Keywords: thermosyphon, heat transfer coefficient, evaporator, condenser, loop

1. 緒言

電子機器の冷却などに高性能伝熱デバイスである熱サイフオンが広く利用されている。熱サイフオンはヒートパイプの一種であり、円筒容器内に作動流体を封入し、その流体の蒸発と凝縮による潜熱輸送を利用するものであって、金属よりもはるかに高い伝導特性を有する。熱サイフオンでは、凝縮部から蒸発部への液の還流は重力によるものであり、ウィックによる毛管現象を利用して還流するヒートパイプと比べると、ウィックの熱および流動抵抗がなく、また発生蒸気泡によるウィックの目詰まりが無いために、高い熱輸送量を得ることができる。この熱サイフオンには、開放型、密閉二相型、トップヒート型（反重力型）、クランク型、二重管型などがあるが、ここでは特に密閉二相熱サイフオンを対象として、単に熱サイフオンと呼ぶ。

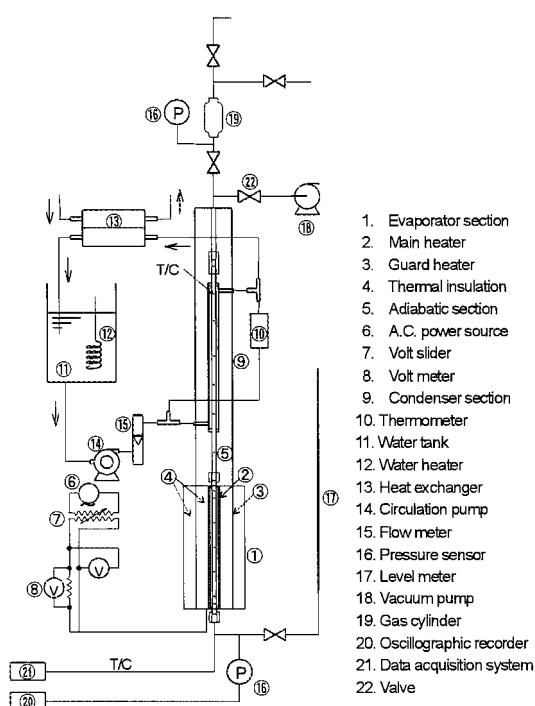
熱サイフオンの基本的な形状は、1本の直管を用いた単管型と呼ばれるものである。単管型熱サイフオンは、多くの物体を同時に冷却するために複数本並列に配置される場合もある。この単管型熱サイフオンでは、以下の2つの問題点が指摘されている。

(1)蒸発部の壁面温度が不均一となる。

(2)フラッシングによって伝熱限界が決まり、最大熱輸送量があまり高くない。

上記(1)の理由は、蒸発部の下部においてはヘッドの関係で飽和温度が高くなるため沸騰が生じにくく、そのために壁面温度が高くなる。また気泡攪乱による作動液の混合が少ないことから、沸騰が活発で壁面温度が比較的低い蒸発部上部との間で温度差が生じることによる。

(2)の理由は、蒸気と還流液とが対向流となるため、還流液を蒸発部から上昇した蒸気が押し上



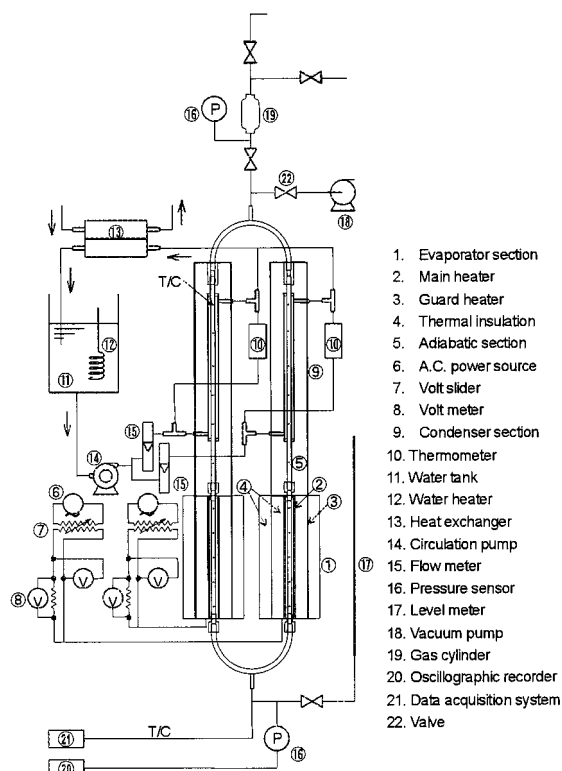
1. Evaporator section
2. Main heater
3. Guard heater
4. Thermal insulation
5. Adiabatic section
6. A.C. power source
7. Volt slider
8. Volt meter
9. Condenser section
10. Thermometer
11. Water tank
12. Water heater
13. Heat exchanger
14. Circulation pump
15. Flow meter
16. Pressure sensor
17. Level meter
18. Vacuum pump
19. Gas cylinder
20. Oscillographic recorder
21. Data acquisition system
22. Valve

Fig. 1 Experimental apparatus (Single tube type)

げて、蒸発部に供給される液量が減少するためにドライアウトしてしまうことによる。

これらの問題点を改善するためには、ループ状にして気液の流動を一方向にした熱サイフォンが排熱回収などの分野で実用化されている。しかし、コンパクトな設計を目指すと、そのライザー部とダウンカマー部の伝熱面積を活用できない欠点がある。そこで、複数の熱サイフォンを並列に利用する場合を想定して、その熱輸送性能を向上させる手法として、新しい熱サイフォンを考案し、ループ型並列熱サイフォンと呼称した。この熱サイフォンは、2つの並列した単管型熱サイフォンの両端をU字管で連結した構造になっている。そのため、一般のループ型と比べると一方向の循環とはならないが、U字管を用いていることにより、沸騰で生じた気泡によって液および蒸気が自由に振動し、この振動流によって、蒸発部の温度が均一になること、還流液が蒸発部に供給されやすくなってドライアウトしにくくなるなど、単管型の問題点を解決できる可能性があると考えた。ただし、振動流れが凝縮部の熱伝達を悪くする可能性もある。

本研究では、ループ型並列熱サイフォンの最大



1. Evaporator section
2. Main heater
3. Guard heater
4. Thermal insulation
5. Adiabatic section
6. A.C. power source
7. Volt slider
8. Volt meter
9. Condenser section
10. Thermometer
11. Water tank
12. Water heater
13. Heat exchanger
14. Circulation pump
15. Flow meter
16. Pressure sensor
17. Level meter
18. Vacuum pump
19. Gas cylinder
20. Oscillographic recorder
21. Data acquisition system
22. Valve

Fig. 2 Experimental apparatus (Looped parallel type)

熱輸送量が単管型に比べて向上されることを示すとともに、単管型およびループ型並列熱サイフォンの蒸発部と凝縮部の熱伝達特性を実験的に調査することを目的とした。

2. 実験装置および実験方法

単管型熱サイフォン実験装置の系統を Fig. 1 に、ループ型並列熱サイフォンのそれを Fig. 2 に示す。熱サイフォンは無酸素銅製で、蒸発部、断熱部、凝縮部の内径は 7 mm、長さはそれぞれ 250、100、300 mm である。ループ型並列熱サイフォンの上下には内径 7 mm で曲率半径 78 mm の U 字型バンド部を有する。単管型熱サイフォンは、蒸発部、断熱部、凝縮部の直管部は全く同じで、さらにループ型並列熱サイフォンと蒸気空間の体積を同じにするために、凝縮部上端にバンド部の半分の長さに相当する直管を取り付けた。

温度測定にはシース径 0.5 mm の K 型熱電対を用い、蒸発部および凝縮部に各 5 箇所、断熱部には 1 箇所、壁面に完全に埋め込んで取り付けた。ループ型並列熱サイフォンは左右同じように取り付けた。

蒸発部を加熱するために、外壁にコイル状ヒー

タを巻き交流電源をスライダックで調節して所定の加熱量を得た。さらにその周りには断熱材と補償ヒータを用いて、熱損失を無視できるようにした。

凝縮部外側には内径 23 mm の SUS304 ステンレス製ジャケットを取り付け、環状部に冷却水を流して凝縮部を冷却した。冷却水はヒータと熱交換器で温度調節し、流量は 9 L/min (レイノルズ数 $Re \approx 8900$) とした。冷却水流入・流出温度はサーミスタ温度計により測定した。管内の圧力は蒸発部下端の圧力計で測定した。

実験は、熱サイフォンに作動流体を一定量注入し、ドライ型真空ポンプで熱サイフォン内を脱気

後、冷却水温度と加熱量を一定にして行った。

作動流体には水およびエタノールを使用し、封入率 V^+ (0.5, 0.9) と冷却水入口温度 T_f (25°C, 37.5°C, 50°C) および加熱量を変えて実験を行った。ここで、 V^+ は未加熱時に作動液が蒸発部を占める高さを蒸発部高さで割った値である。

3. 実験結果および考察

3.1 蒸発部熱伝達

Fig. 3-1-1 は、冷却水温度 T_f ごとに表した蒸発部熱伝達率を示したものであり、以下の特徴が示されている。

ループ型並列熱サイフォンでは、単管型に比べて最大熱輸送量が大きく、単管型の問題点を解決することができた。また、熱伝達率も大きな値が得られた。これは、U字管を用いたことにより液が自由に振動できるために蒸発部下部でも沸騰が生じやすくなったこと、および液が伝熱面に供給されやすくなったためである。

作動流体の違いについては、水の値の方がエタノールよりも高く、冷却水温度が高くなると両者の差が大きくなる。

封入率 V^+ の影響については、エタノールは顕著ではないが、水の場合は同じ熱量では $V^+=0.9$ の方が 0.5 よりも少し高い値を示した。これは、封入率が大きい方が伝熱面に作動液が多く接することができ、ドライアウトしにくくなるためであると考えられる。

冷却水温度 T_f の影響については、エタノールでは殆ど変わらないが、水の場合には T_f が高い方が熱伝達率が大きい結果となった。これは物性値の違いによるものである。

Fig. 3-1-2(a)から(d)は、蒸発部についての相関式と測定値 h_e とを比較したものである。沸騰については多くの整理式があるが、熱サイフォンの蒸発部熱伝達の整理式として、井村の式¹⁾、一般の核沸騰熱伝達整理式の中から代表的なものとして Stephan-Abdelsalam の式²⁾を用いた。横軸に示す熱伝達率は各式から計算した値を示した。(a)と(c)は単管型であり、(b)と(d)はループ型並列熱サイフォンのデータである。

ここで、横軸の値が $3000\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ より低い範囲にあるデータは、水では熱流束が $5 \times 10^4\text{W}/\text{m}^2$ 以下、エタノールでは $2.5 \times 10^4\text{W}/\text{m}^2$ 以下であり、管内で沸

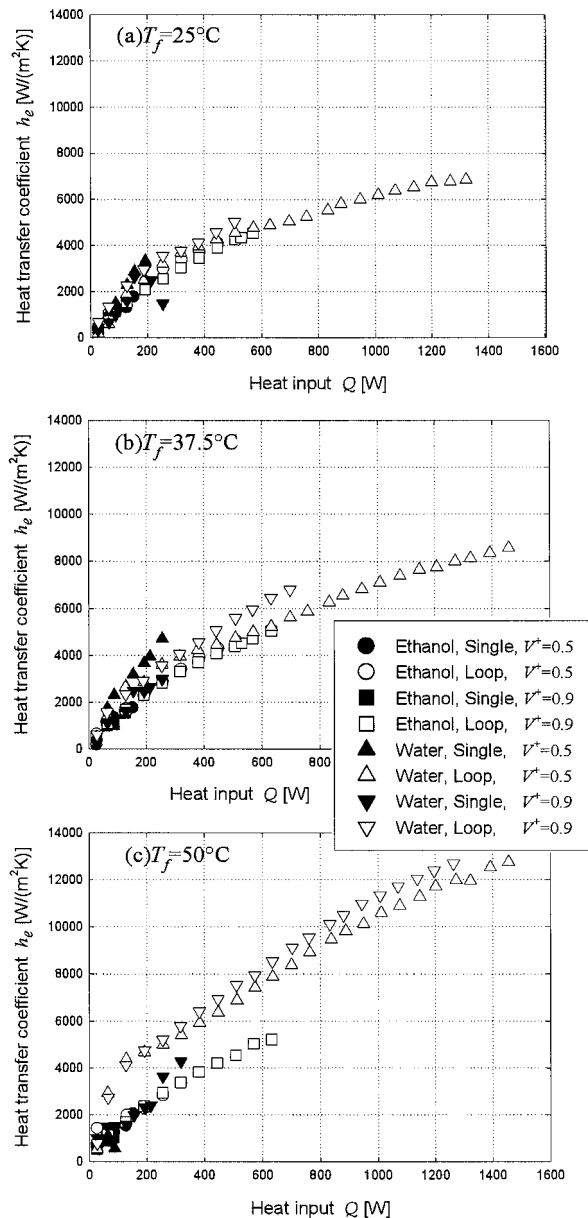
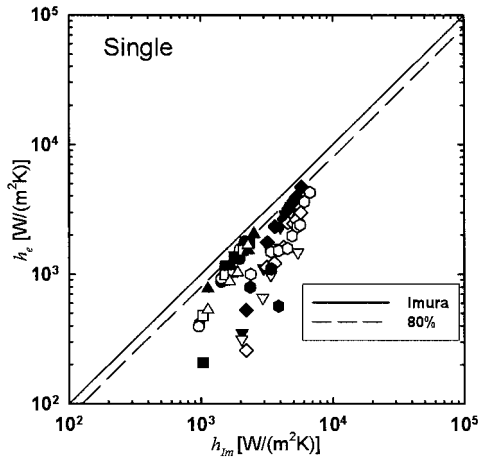


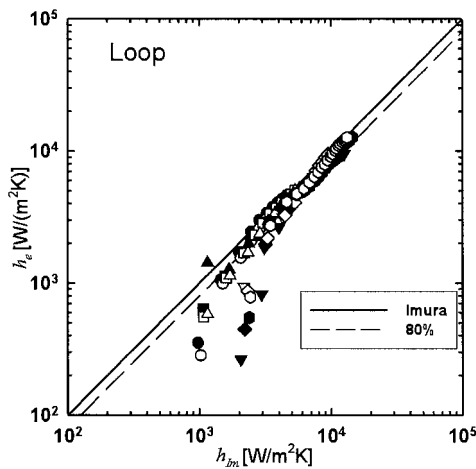
Fig. 3-1-1 Evaporation heat transfer coefficients

Table 1 Experimental conditions for symbols used in Fig. 3-1-2

● Ethanol, $V^*=0.5, T_f=25^\circ\text{C}$	▼ Water, $V^*=0.5, T_f=25^\circ\text{C}$
○ Ethanol, $V^*=0.9, T_f=25^\circ\text{C}$	▽ Water, $V^*=0.9, T_f=25^\circ\text{C}$
■ Ethanol, $V^*=0.5, T_f=37.5^\circ\text{C}$	◆ Water, $V^*=0.5, T_f=37.5^\circ\text{C}$
□ Ethanol, $V^*=0.9, T_f=37.5^\circ\text{C}$	◇ Water, $V^*=0.9, T_f=37.5^\circ\text{C}$
▲ Ethanol, $V^*=0.5, T_f=50^\circ\text{C}$	● Water, $V^*=0.5, T_f=50^\circ\text{C}$
△ Ethanol, $V^*=0.9, T_f=50^\circ\text{C}$	○ Water, $V^*=0.9, T_f=50^\circ\text{C}$



(a) Using Imura's correlation (Single)

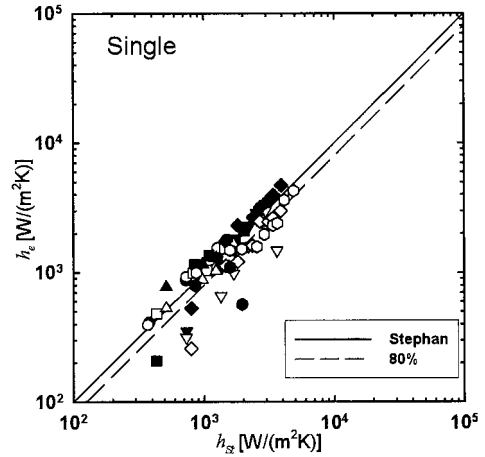


(b) Using Imura's correlation (Loop)

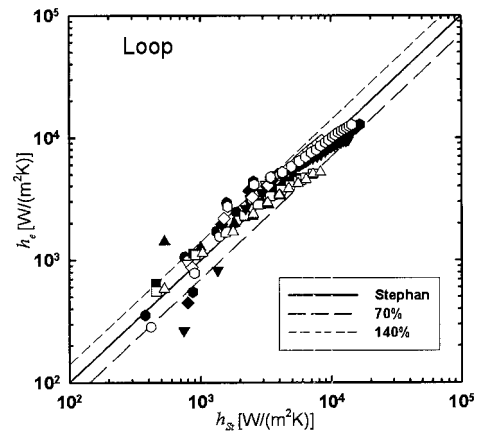
Fig. 3-1-2 Comparisons of evaporation heat transfer coefficients between measured and predicted for the thermosyphons

騰が十分に発達していない領域のデータと考えられる。

(a)の単管型では、水のデータが井村の整理式から少し離れた結果となったが、(b)のループ型並列熱サイフォンは20%以内の誤差で実験値を予測できることがわかった。また、(c)と(d)から、一般の核沸騰熱



(c) Using Stephan's correlation (Single)



(d) Using Stephan's correlation (Loop)

Fig. 3-1-2 (Continued)

伝達整理式の Stephan-Abdelsalam の式でもかなり良く予測できることがわかった。

3.2 凝縮部熱伝達

Fig. 3-2-1(a)から(c)は各冷却水温度に対して測定された凝縮部平均熱伝達率 h_c を示す。図中の実線と破線は、実験の温度データ(飽和温度 T_{sat})を基に Nusselt の膜状凝縮の理論式³⁾から求めた値である。飽和温度に対する封入率の影響は小さかったので、式内の物性値は、水とエタノールそれぞれの最大加熱量が得られた実験条件で示された温度で計算した。

単管型とループ型並列熱サイフォンでは以下の相違がある。

Q が小さい領域では、単管型は T_f が高くなるにつれて Nusselt の理論値に近くなるが、ループ型

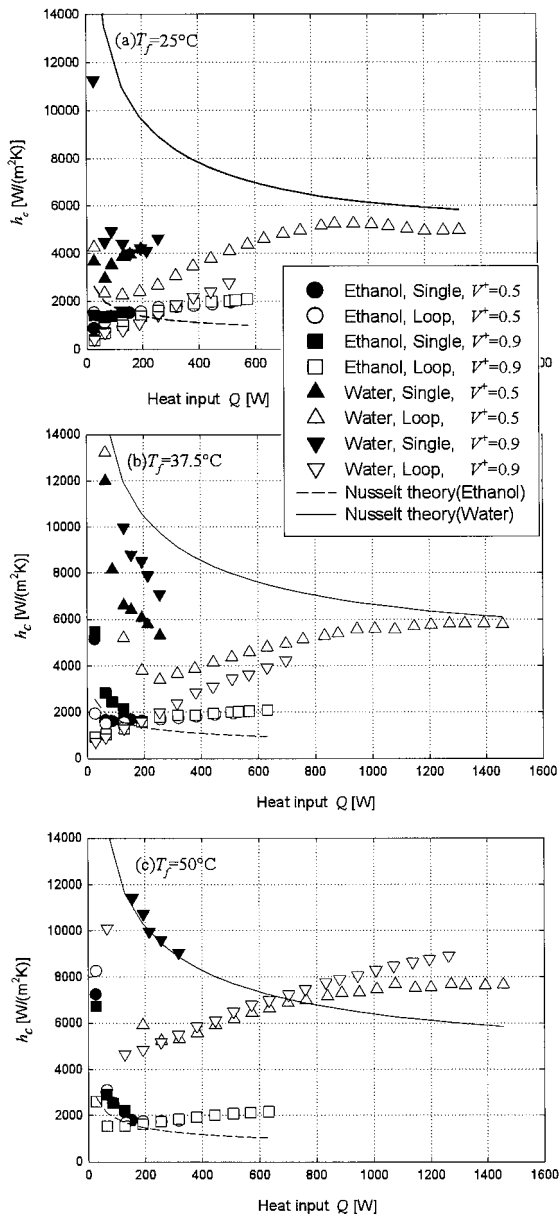
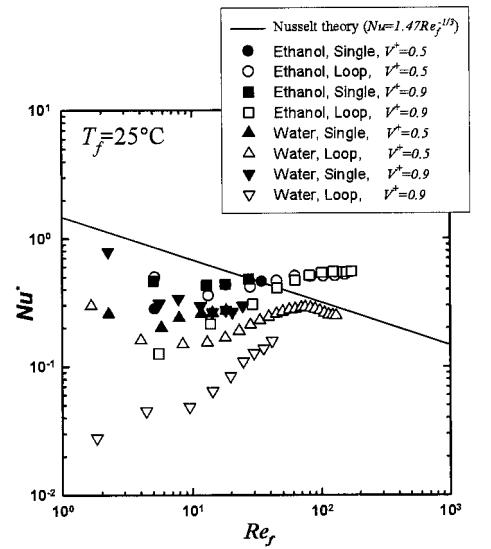


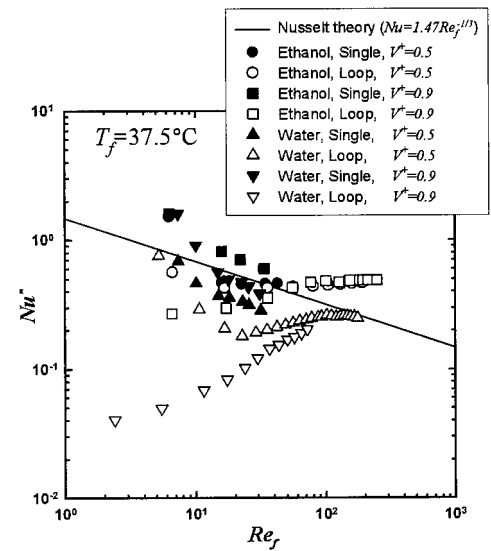
Fig. 3-2-1 Condensation heat transfer coefficients

は単管型に比べて熱伝達率がかなり小さい。これは、ループ型はU字管振動により凝縮部まで液がキャリーオーバーされることが多く、そのため熱伝達率が低くなったと考えられる。この凝縮伝熱の劣化現象は、これまでの単管型熱サイフンの研究⁴⁾でも検討されており、エタノールが水に比べて劣化の割合が小さいことも今回と同じ傾向である。

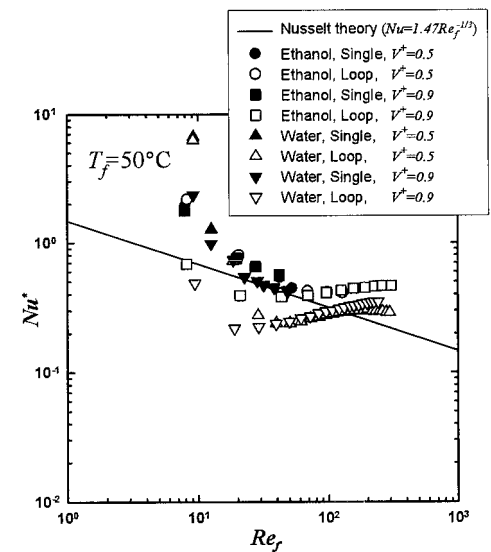
Q が大きい領域においては、ループ型は、熱伝達率が大きくなっていく。これは、加熱量の増大に伴って、管内の圧力が大きくなり、気液密度比 (ρ_v/ρ_L) が大きくなって、キャリーオーバーされにくくなることが考えられる。それから、蒸気



(a) $T_f = 25^\circ\text{C}$



(b) $T_f = 37.5^\circ\text{C}$



(c) $T_f = 50^\circ\text{C}$

Fig. 3-2-2 Nu^* versus Re_f

流の振動により生じた液膜表面の波も理由と考えられるが、詳細は今後調べる必要がある。

Fig. 3-2-2 に膜レイノルズ数 Re_f と凝縮数 Nu^* の関係を表す。ここで、膜レイノルズ数 Re_f は、ヒータ 1 本あたりの熱量 Q と内径 d 、潜熱 h_{fg} 、粘性係数 μ を用いて(1)式で表される。凝縮数 Nu^* は、凝縮熱伝達率 h_c 、動粘性係数 ν 、熱伝導率 λ を用いて(2)式で表される。

$$Re_f = \frac{4Q}{\pi d h_{fg} \mu} \quad (1)$$

$$Nu^* = \frac{h_c (\nu^2 / g)^{1/3}}{\lambda} \quad (2)$$

Fig. 3-2-2(a)の△印に代表されるように、実験値は、膜レイノルズ数が 100 ぐらいから Nusselt の理論値と合うようになる。また、冷却水温度が上がると熱伝達性能が向上するのは、物性値の影響である。

4. 結論

単管型とループ型並列熱サイフオンの2つの密閉二相熱サイフオンの伝熱特性を調べるために、作動流体に水とエタノールを用い、封入率と冷却水温度を変えて実験を行った。主に蒸発部および凝縮部熱伝達特性について調査し、以下の知見を得た。

- (1) ループ型並列熱サイフオンは、単管型よりも大きな最大熱輸送量を得ることができ、蒸発部熱伝達率も高い値が得られた。

- (2) 蒸発熱伝達率について、水の方がエタノールよりも高い値となった。封入率が大きい方が高い熱伝達率となった。冷却水温度の高い方が高い熱伝達率となった。

- (3) 凝縮熱伝達率については、低熱流束域で、ループ型並列熱サイフオンの値が蒸発部の作動液がキャリーオーバーされることにより、かなり低い値となった。高熱流束になると気液密度比が大きくなってキャリーオーバーされにくくなったために、値が大きくなったと考えられるが、今後、詳細な調査が必要である。

文 献

- 1) 井村英昭、楠田久男、緒方淳一、宮崎輝昭、阪本則秋：二相密閉形熱サイフオン内における熱伝達、日本機械学会論文集 B 編、45-393、(1979) pp.712-722
- 2) K. Stephan and M. Abdelsalam : *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 23-1 (1980) pp.73-87.
- 3) Nusselt, W. : *Die oberflächenkondensation des dampfes*, Zeitschr., Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 60-27 (1916) p.541.
- 4) 橋本宏之、神永文人：熱サイフオン形ヒートパイプの冷却部熱伝達特性に関する研究(伝熱劣化に対するエントレインメントの影響)、日本機械学会論文集 B 編、66-652、(2000) pp.3159-3165