

# ループ型並列熱サイフォンの蒸発部および凝縮部壁面温度分布

## Wall Temperature Distributions at Evaporator and Condenser sections of Looped Parallel 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 Kunihito Matsumura\*

Fukushima National College of Technology, Department of Mechanical Engineering

\*Ibaraki University, Department of Mechanical Engineering

(2009年9月18日受理)

A looped parallel thermosyphon is newly developed to improve heat transfer defects of a conventional thermosyphon. A looped parallel thermosyphon consisted of parallel installed two conventional thermosyphons connected by two U tubes. A conventional single tube type thermosyphon was also tested to compare heat transfer characteristics with the new type. 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 this study is to clarify the uniformity about the wall temperature distributions of evaporator and condenser.

The following finding is obtained. The wall temperature distribution at the evaporator section of the looped parallel thermosyphon was more uniform than that of the conventional thermosyphon.

**Keywords:** thermosyphon, temperature distribution, evaporator, condenser, loop

### 1. 緒言

高い伝熱性能を持つヒートパイプは、コンテナと呼ばれる容器内に入れられた作動流体の沸騰・凝縮の相変化による潜熱輸送を利用したものであり、宇宙機器をはじめとして、電力機器や電子機器、あるいは寒冷地域のロードヒーティングなどに実用されている。また、ポンプ等の外部からの動力は不要なために、エネルギーの消費がなく、メンテナンスもほとんど不要である。最近、ノートパソコンの内部に設置され、MPU(Micro

Processing Unit)の冷却に広く用いられている。

ヒートパイプは、ウィック式ヒートパイプ（凝縮部から蒸発部への作動流体をウィックによる毛管力で還流するタイプ、単にヒートパイプとも呼ばれる）、熱サイフォン（重力あるいは遠心力による還流を用いたタイプ、ウィックレスヒートパイプとも呼ばれる）、自励振動ヒートパイプ（細管内に作動流体が液プラグと蒸気泡とで交互に配置され、熱が加えられて作動流体が振動して加熱部と冷却部の間を往復するタイプ）に分類される。

以上の中で、熱サイフォンは、蒸発部への液の還流は基本的に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ウィック式ヒートパイプと比べると、ウィックによる熱および流動抵抗がなく、またウィック部における発生蒸気泡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。この熱サイフォンには、開放型、密閉二相型、トップヒート型（反重力型）、クランク型、二重管型などあるが、ここでは特に密閉二相熱サイフォンを対象として、単に熱サイフォン

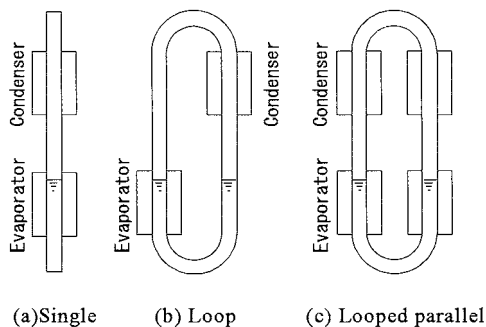


Fig. 1 Thermosyphon arrangements

と呼ぶ。熱サイフォンの基本的な形状は、Fig. 1(a)に示す鉛直な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iddiングによって伝熱限界が決まり、最大熱輸送量が高くない。

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、(b)に示すようにループ状にして気液の流動を一方向にした熱サイフオ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して、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、複数の熱サイフオンを並列に利用する場合を想定し、その熱輸送性能を向上させる手法として、Fig. 1(c)に示す熱サイフオンを新たに考案し、ループ型並列熱サイフオンと呼称した。この熱サイフオンは2つの並列した単管型熱サイフオンの両端をU字管で連結した構造である。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と、還流液が蒸発部に供給されやすくなり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オンの蒸発部と凝縮部の温度分布を実験的に調査し、ループ型並列熱サイフオンが、単管型が有する蒸発部温度不均一の問題点を解決できること、合わせて凝縮部温度分布に対する影響を明らかにすることを

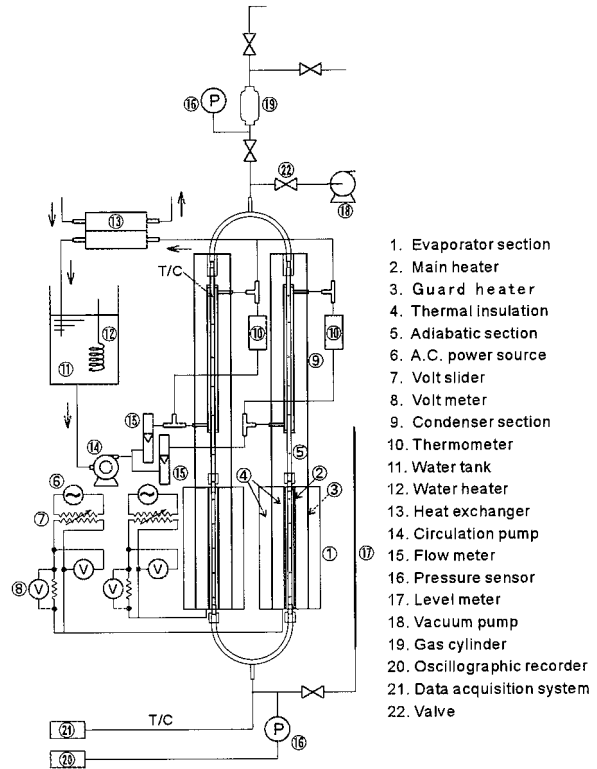


Fig. 2 Experimental apparatus

目的とした。

## 2. 実験装置および実験方法

実験装置の系統を Fig. 2 に示す。ループ型並列熱サイフオン（以降、ループ型と略称する）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。この熱サイフオンの上下には内径 7 mm で曲率半径 78 mm の U 字型バンド部を有する。比較のために用いた単管型熱サイフオンは、蒸発部、断熱部、凝縮部の直管部は全く同じで、さらにループ型と蒸気空間の体積を同じにするため、凝縮部上端にバンド部の半分の長さに対応する直管を取付けた。

温度測定にはシース径 0.5 mm の K 型熱電対を用い、左右とも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 蒸発部温度分布

蒸発部の温度分布の代表的なデータを Fig. 3-1-1 および Fig. 3-1-2 に示している。Fig. 3-1-1 はエタノール、Fig. 3-1-2 は水のデータである。図の左側(a)は単管型で、右側(b)はループ型であり、それぞれ横軸は蒸発部下端からの高さ、縦軸は段階的に増加させたそれぞれの熱流束における蒸発部壁面温度を表している。ここでループ型の熱流束は、左右それぞれの蒸発部ヒータに供給される熱量を伝熱面積で除したものである。実験条件として、作動流体(水, エタノール)、封入率(0.5, 0.9) と冷却水温度(25, 37.5, 50 °C)の条件を変えているが、何れの場合も上図と同じ結果となった。

これらの図から、単管型では蒸発部下部ほど温度が高いことがわかる。これは、下部ほど沸騰が

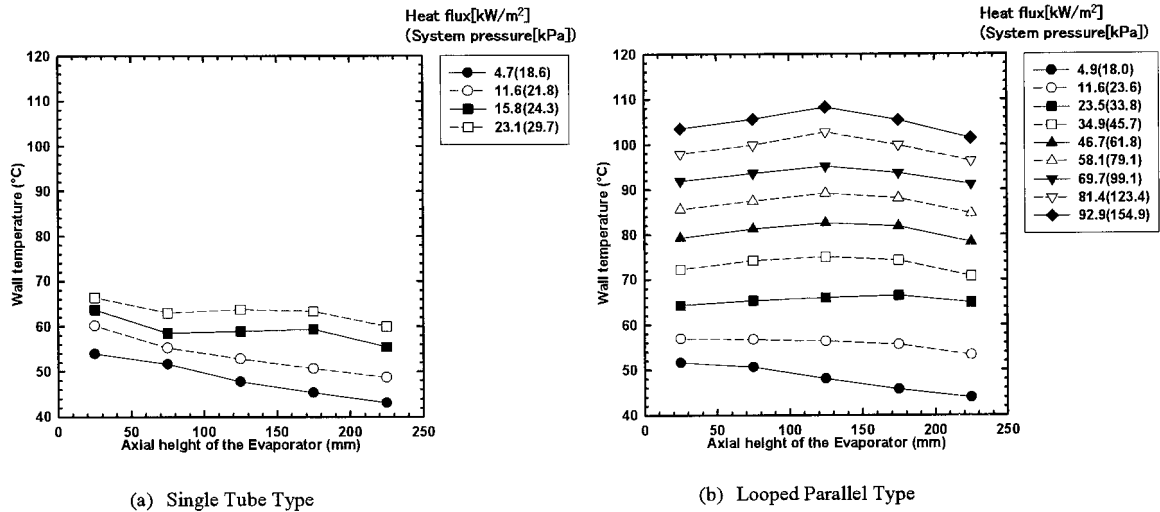


Fig. 3-1-1 Wall temperature profiles in the evaporator section (Ethanol,  $V^+=0.9$ ,  $T_f=37.5^\circ\text{C}$ )

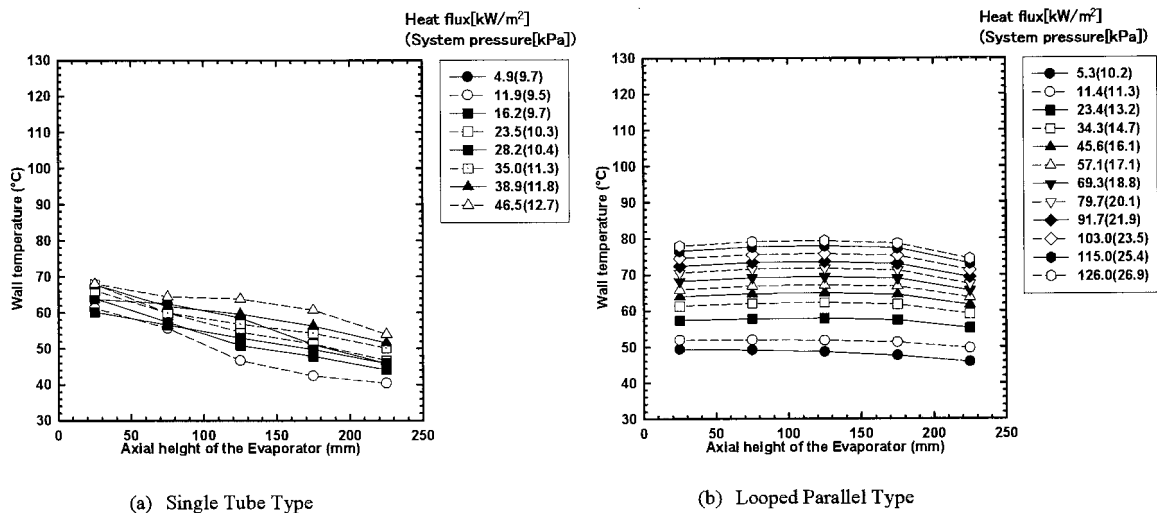


Fig. 3-1-2 Wall temperature profiles in the evaporator section (Water,  $V^+=0.9$ ,  $T_f=37.5^\circ\text{C}$ )

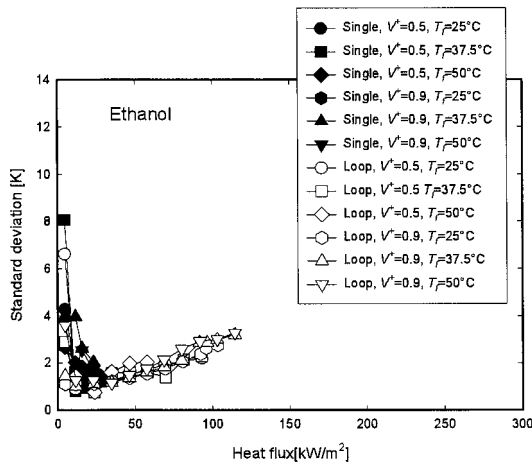


Fig. 3-1-3 Standard deviation of wall temperatures in evaporator section (Ethanol)

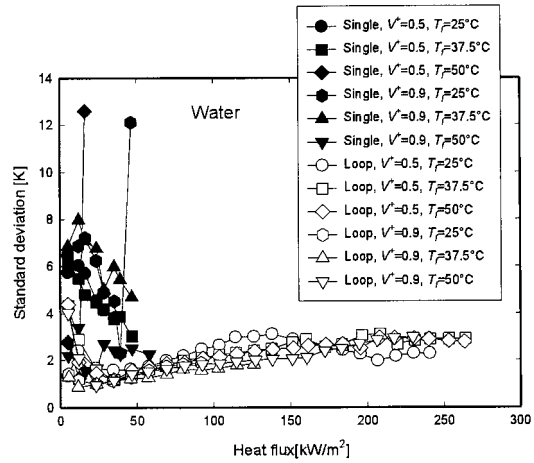


Fig. 3-1-4 Standard deviation of wall temperatures in evaporator section (Water)

生じにくく、また混合が少ないことからである。

これは神永・岡本<sup>1)</sup>、井村ら<sup>2)</sup>、橋本・神永<sup>3)</sup>の結果と同様である。これにより沸騰が生じやすく温度が高くない上部との間に大きな温度差を生じて、温度が均一とならないのが単管型の問題点となっている。ループ型では、熱流束が低い領域では単管型と類似の温度分布となっているが、これは沸騰が十分に発達していないからである。熱流束が高くなると沸騰が十分に発達してほぼ均一な温度分布となる。ループ型では、蒸発部下部における作動液の運動が拘束されないので、沸騰に伴う作動液振動の振幅が単管型の場合よりも大きく、混合が十分に行われたためにこのような結果になったと考えられる。

Fig. 3-1-3 と Fig. 3-1-4 は、それぞれエタノール、水を用いた場合の蒸発部温度分布均一度を調べるために標準偏差を表したものである。これらの図から、エタノールではあまり顕著ではないが、水ではループ型では単管型に比べて温度が均一化されることが明確に確認された。熱流束が大きくなると、飽和温度が上昇していくために冷却水との温度差が大きくなり、標準偏差も大きくなる結果となったが、特に水の高熱流束域では、標準偏差が一定値となることがわかった。

ループ型では、水、エタノールともに高さ 125 mm の位置で最も温度が高く、蒸発部の下部と上部では温度が低くなっている。これも作動液の振動によるもので、下部および上部の作動液は非加熱部分に接する機会が多くなって冷却されたことにより壁温が低くなったと考えられる。

実験で得られた熱流束は、ループ型の方がかなり高くなった。これは、単管型では蒸気と還流液とが対向流となるため、還流液を蒸気が押し上げて蒸発部がドライアウトしてしまうフラッディングによる限界が生じたためであり、ループ型では作動流体の振動によってフラッディングによる限界が抑制され、ドライアウトしにくくなったと考えられる。これにより、ループ型では、高い熱輸送量が得られることが定量的に示された。

### 3.2 凝縮部温度分布

Fig. 3-2-1 および Fig. 3-2-2 に凝縮部の温度分布の代表的なデータを示している。Fig. 3-2-1 はエタノール、Fig. 3-2-2 は水のデータである。図の左側(a)は単管型で、右側(b)はループ型であり、それぞれ横軸は凝縮部下端からの高さ、縦軸はそれぞれの熱流束における凝縮部壁面温度を表している。他の事項も蒸発部と同様である。

凝縮部壁面温度については、低熱流束域の場合、単管型、ループ型ともに、下部の温度は低く、上部で高くなった。これは下部ほど凝縮液の液膜が厚いために熱伝達性能が悪く、蒸気の熱が伝わりにくいからであると考えられる。熱流束が増加すると、単管型は熱流束が大きくなるので僅かであるが、ループ型では明瞭に下部で壁温が低く、中央部で高く、最上部でわずかに低いという温度分布となる傾向がみられた。これは神永・岡本<sup>(1)</sup>の報告と同様に、最上部では蒸発部からエントレインされた液滴・液塊のために液膜が厚くなり、熱伝達が悪くなったためであると考えられる。

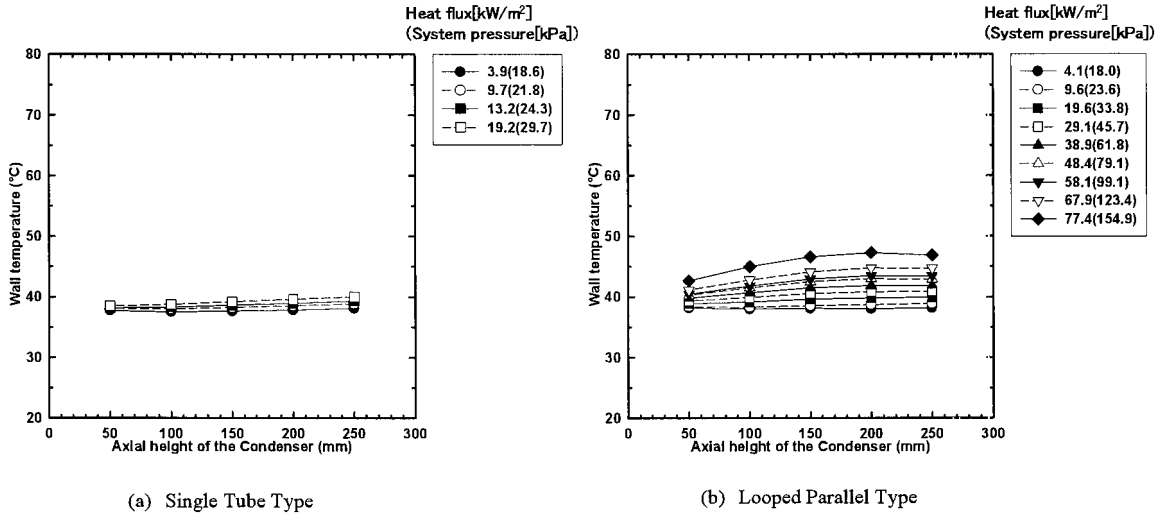


Fig. 3-2-1 Wall temperature profiles in the condenser section (Ethanol,  $V=0.9$ ,  $T_j=37.5^\circ\text{C}$ )

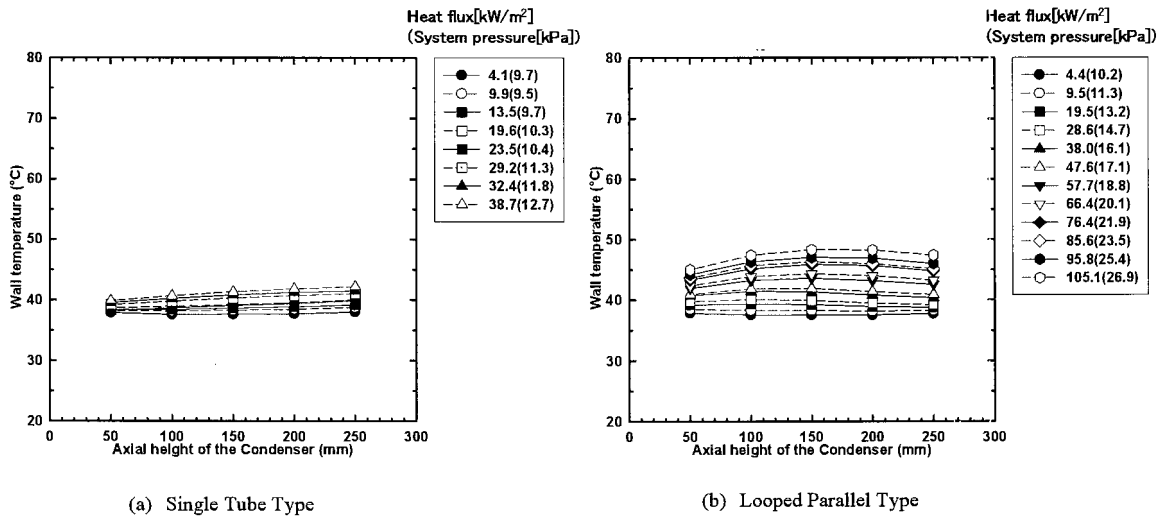


Fig. 3-2-2 Wall temperature profiles in the condenser section (Water,  $V=0.9$ ,  $T_j=37.5^\circ\text{C}$ )

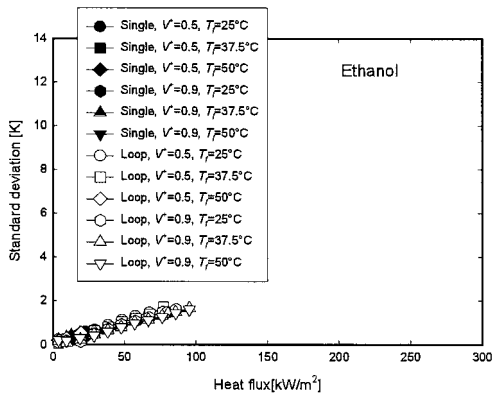


Fig. 3-2-3 Standard deviation of wall temperatures in condenser section (Ethanol)

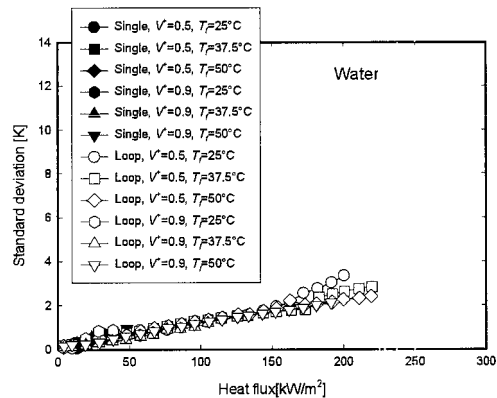


Fig. 3-2-4 Standard deviation of wall temperatures in condenser section (Water)

Fig. 3-2-3とFig. 3-2-4は、それぞれエタノール、水を用いた場合の凝縮部温度分布均一度を調べるために標準偏差を表したものである。これらの図から明らかなように、単管型では蒸発部のような温度の大きなバラつきは生じない。またループ型も単管型と同様に大きなバラつきは生じない。しかし、熱流束が大きくなると飽和温度が上昇していくために冷却水との温度差が大きくなり、標準偏差も大きくなる結果となった。

#### 4. 結論

新しく考案したループ型並列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温度分布について従来の熱サイフオン(単管型)と比較し、以下の知見を得た。

- (1) 蒸発部壁面温度分布は、単管型に比べてループ型並列熱サイフオンの場合にほぼ均一となった。また、最大熱輸送量はループ型並列熱サイフオンが単管型よりも大きな値が得られた。これにより単管型熱サイフオンの問題

点を解決することを定量的に明らかにした。

- (2) 凝縮部温度分布は、単管型、ループ型並列熱サイフオン共に凝縮液膜の厚い下部で温度が低くなる。さらに、ループ型並列熱サイフオンでは、最上部で蒸発部からエントレインされた液滴・液塊のために液膜が厚くなり、熱伝達が悪くなったために壁面温度が低くなる。

#### 文献

- 1) 神永文人、岡本芳三：熱サイフオン形ヒートパイプの熱伝達特性に関する研究(第1報 加熱部の熱伝達特性)、日本機械学会論文集 B 編、58-552、(1992) pp.2543-2549
- 2) 井村英昭、斎藤祐士、勝間田芳和：二相ループ形熱サイフオンにおける流動と熱伝達、日本冷凍協会論文集、5-1、(1988) pp. 63-72
- 3) 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