

フロリナートによる高出力ICチップの液体冷却に関する実験的研究

儀間, 悟
琉球大学工学部機械システム工学科

富村, 寿夫
九州大学機能物質科学研究所

張, 興
九州大学機能物質科学研究所

藤井, 丕夫
九州大学機能物質科学研究所

<https://doi.org/10.15017/7911>

出版情報：九州大学機能物質科学研究所報告. 13 (2), pp.75-80, 1999-12-24. 九州大学機能物質科学研究所

バージョン：

権利関係：

フロリナートによる高出力ICチップの 液体冷却に関する実験的研究

儀 間 悟*・富 村 寿 夫
張 興・藤 井 丕 夫

An Experimental Study on Liquid Fluorinert Cooling of High-Power IC Chips

Satoru GIMA, Toshio TOMIMURA,
Xing ZHANG and Motoo FUJII

Fluorinert cooling of high-power IC chips using a closed type thermosyphon loop is investigated fundamentally to cope with the recent rapid rise in heat dissipation density of notebook computers. The present experimental set-up consists of evaporator and condenser sections connected by flexible tubing. The evaporator section corresponds to a high-power IC chip, and the condenser section represents a cooling plate located behind a display of notebook computers. The evaporator has the size of 50mm × 50mm × 20mm outside dimensions, and the condenser is made of a copper plate with heat transfer area of 150 × 200mm² and thickness of 1.5mm. The effects of the heat input, the filled volume of Fluorinert liquid and the inclination angle of condenser on the heat transfer characteristics of the system are studied experimentally.

1. 緒 言

デスクトップコンピュータに搭載されたCPUの発熱密度は過去5年間で1W/cm²から25W/cm²まで増加しており、高性能ワークステーションにおいては2001年までには100W/cm²に到達すると言われている⁽¹⁾。このような急速な発熱密度の増大の傾向はノート型パソコンのような小型機器においても例外ではない。現在のノート型パソコンの冷却方法としては、小型ファンやヒートパイプを用いたものがほとんどであるが、その冷却方法での冷却は限界に近づきつつあり、より冷却能力の高い新たな冷却技術を開発することが緊急の課題となっている⁽²⁾。著者らはこの課題に対処するために、ノート型パソコンに搭載されたCPUの冷却について、フロリナートを用いた間接的液体冷却に関する基礎実験を行っている^{(3), (4)}。

本報では、研究の初期段階として、CPU温度に対応するヒータ表面温度におよぼすヒータの発熱量、フロリナートの液量および放熱板の傾斜角度の影響について実験的に検討した結果を報告する。また、蒸発器内での沸騰を促進させた場合の実験も行ったので、その結果についても報告する。

記 号

F : フロリナートの液量
 Q : ヒータの発熱量
 $T_1 \sim T_4$: 温度 (Fig. 1 参照)
 T_∞ : 周囲温度

ギリシャ文字

γ : 放熱板の傾斜角度
 ΔT : 温度差 ($T - T_\infty$)

受理日 1999年10月29日

* 琉球大学工学部機械システム工学科

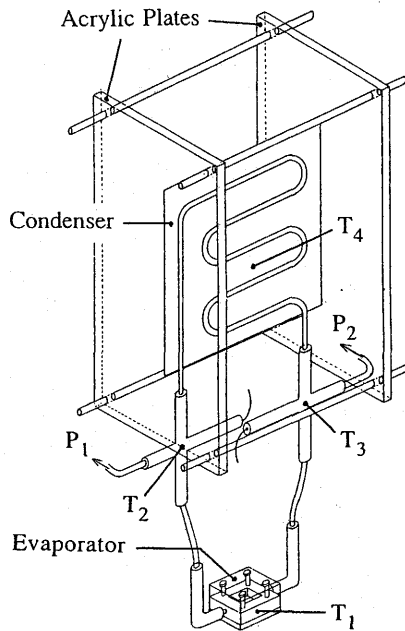


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

2. 実験装置および方法

Fig. 1に実験装置の概略を示す。実験装置はノート型パソコンのCPU部に対応する蒸発器とディスプレイ背面の放熱板に対応する凝縮器およびそれらをつなぐチューブからなり、系は閉ループを構成している。熱サイホン作用でループ内を循環するフッリナート (FC-72) が沸騰と凝縮を繰り返すことによりCPUが冷却される。凝縮器の両側端部は周囲からの空気の流入がないようにアクリル板で塞がれている。また、凝縮器以外は全てガラスウールによって断熱されている。図中に示した $T_1 \sim T_4$ の位置は温度の測定位置である。 T_1 は蒸発器最高温度となるヒータ表面中央温度、 T_2 、 T_3 はループ内のフッリナートの温度、 T_4 は凝縮器となる放熱板の中央部温度の測定位置である。温度測定には外径0.5mmのK型シース熱電対を使用した。

Fig. 2は凝縮器となる放熱板の概略である。放熱板は縦150mm、横200mm、厚さ1.5mmの銅板の片面に外径4.8mm、内径3.1mm、長さ約900mmの銅管をハンダ付けたものである。なお、放熱板の両面は黒体塗料で塗布されている。

Fig. 3に蒸発器の概略を示す。蒸発器は縦50mm、横50mm、厚さ10mmの銅板の中央部に縦20mm、横20mm、深さ8mmの穴をほり、その上面を厚さ10mmのアクリル板でネジ止めたものである。なお、銅板とアクリル板との接触面には真空用グリスを塗り、厚さ0.5mmのシリコンシートをパッキンとして挟んである。蒸発器下部には縦50mm、横50mm、厚さ4mmのヒータが両面テープ

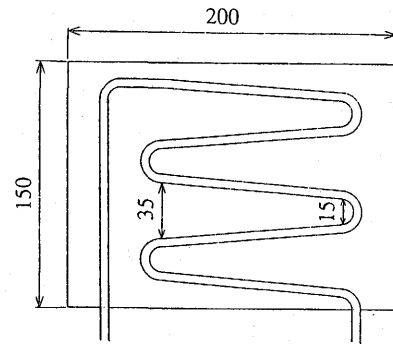


Fig. 2 Schematic of condenser section

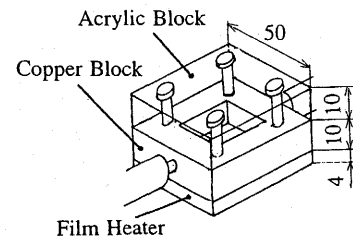


Fig. 3 Schematic of evaporator section

Table 1 Experimental conditions

F [cc]	Q [W]	γ [deg.]
6	5	0
9	2	0
		15
		45
		90
	5	0
		7
		8
12	5	0
		0

で接着されている。蒸発器の左右の側面には、フッリナートの液あるいは蒸気が蒸発器と放熱板との間を移動するための流出入口として、外径6.3mm、内径4.8mmの銅管が挿入されている。また図にはないが、蒸発器側面にループ内へフッリナートを充填するための外径3mm、内径2mmの銅管を挿入してある。充填はループ内を十分真空 (約1Torr以下) にした後に行い、充填量はビュレットにより測定される。

実験条件をTable 1に示す。フッリナートの液量 F を6, 9, 12ccの3種類に変化させた。ループ内全体の容量が約18ccであるので、その1/3, 1/2, 2/3に対応している。ヒータの発熱量 Q を2~9W、放熱板の傾斜角度 γ を 0° (鉛直) ~ 90° (水平) の範囲で変化させた。

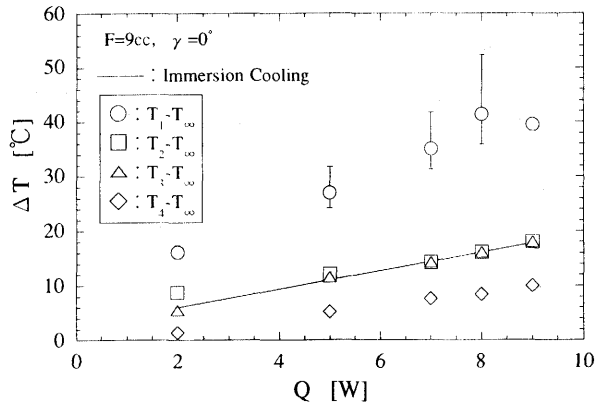


Fig. 4 Effect of heat input on temperature

実験は所定の発熱量で加熱し、定常状態を確認した後、各位置での温度 $T_1 \sim T_4$ の測定を行った。また、放熱板裏面（銅管がハンダ付けされていない面）全体の温度分布を赤外線カメラを用いて測定した。その後、蒸発器上部の断熱材を取り除き、蒸発器内部のフロリナートの沸騰と流動の様子をビデオカメラにより撮影した。

3. 実験結果および考察

3. 1 発熱量の影響

Fig. 4にフロリナートの液量 $F=9\text{cc}$ 、放熱板の傾斜角度 $\gamma=0^\circ$ （鉛直）の場合に、発熱量 Q を変化させた場合の各位置での温度 $T_1 \sim T_4$ と周囲温度 T_∞ との差 ΔT を示す。それぞれのプロット値は測定日の異なる数回の測定値の平均値である。ただし、 $Q=9\text{W}$ の場合は1回のみ測定値である。データのばらつきが比較的大きいヒータ表面温度 T_1 については、そのばらつきの範囲をエラーバーで示してある。測定結果が $Q=9\text{W}$ までしかないのは、それ以上の発熱量を加えると蒸発器内のフロリナートが全て蒸発してしまい、ヒータ温度が急激に上昇して定常状態にならなかったからである。データにばらつきはあるものの、各位置での温度 $T_1 \sim T_4$ は Q の増加とともにほぼ直線的に増加する傾向にある。ヒータ表面温度 T_1 はループ内のフロリナートの温度 T_2, T_3 に比べ、かなり高くなっており、 $Q=5\text{W}$ の場合に約 15°C の差がある。図中の実線は縦 50mm 、横 50mm の加熱された伝熱面をフロリナートの液中に水平に浸し、自然対流下で冷却される場合の伝熱面の平均温度を表す。平均温度を求める際には水平上向き加熱面からの自然対流の場合の平均熱伝達係数の整理式⁹⁾を用いた。本実験結果のヒータ表面温度 T_1 は浸漬冷却の場合の実線よりかなり高くなっており、 $Q=5\text{W}$ の場合に約 16°C の差がある。

蒸発器内部のフロリナートの様子をビデオカメラで撮影し、その画像をパソコンに取り込んだものを Fig. 5 に示す。これは $Q=5\text{W}$ 、 $F=9\text{cc}$ 、 $\gamma=0^\circ$ （鉛直）の場合の様子である。あまり鮮明な画像でないので少しわかりに

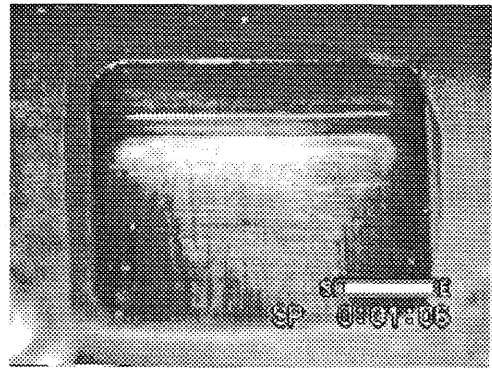
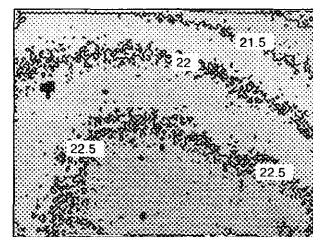
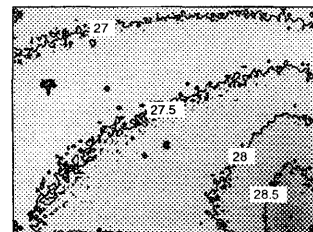


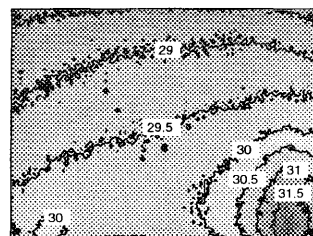
Fig. 5 State of Fluorinert in evaporator ($Q=5\text{W}$, $F=9\text{cc}$, $\gamma=0^\circ$)



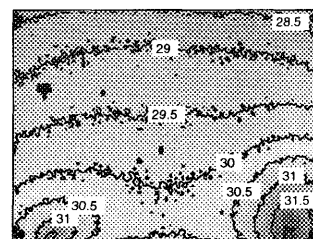
(a) $Q=2\text{W}$



(b) $Q=5\text{W}$



(c) $Q=7\text{W}$



(d) $Q=8\text{W}$

Fig. 6 Effect of heat input on back surface temperature distributions of radiation plate ($F=9\text{cc}$, $\gamma=0^\circ$)

くいが、上部の側壁面にある白い水平な線は液面を表しており、その下の白く光っている面は蒸発器の底面である。蒸発器内の側壁面の高さは8mmであるので、この場合の蒸発器内に残っている液の深さは約3mm程度であることがわかる。また、蒸発器内での沸騰がほとんど起こっていないことがわかる。Fig. 4において、ヒータ表面温度 T_1 がかなり高い温度になったのは、蒸発器内での沸騰があまり活発に行われていないことによると考えられる。

Fig. 6 (a) ~ (d) はそれぞれ $Q=2, 5, 7, 8W$ の場合に、赤外線カメラにより測定した放熱板裏面全体の温度分布である。図中の線は $0.5^\circ C$ 刻みの等温線を表している。Fig. 6 (b), (c) の $Q=5, 7W$ の場合には右下部分が高温となっている。これは、蒸発器からの蒸気が右下部分から流入し、放熱板で凝縮して左下部分から液となって出ていくような一方向流れになっていることを示していると考えられる。蒸発器内部のフロリナートの流動の様子をビデオカメラにより観察しているが、放熱板で凝縮された液のほとんどが左側から断続的に流入してくることが確認されており、上述のような流れになっていると考えられる。一方、Fig. 6 (d) の $Q=8W$ と発熱量が高くなると、左右の下部がともに高温となっている。これは、蒸発器からの蒸気が両方のチューブからそれぞれ上昇して放熱板に達し、そこで凝縮された液は再び同じチューブを下降して蒸発器に流入していくような双方向流れになっていることを示していると考えられる。このように、発熱量の違いによってループ内におけるフロリナートの流動パターンが異なることが確認された。しかし、その原因については今のところ不明である。

3. 2 液量の影響

Fig. 7 は $Q=5W, \gamma=0^\circ$ (鉛直) の場合に、フロリナートの液量 F を 6, 9, 12cc に変化させた場合の各位置での温度 $T_1 \sim T_4$ の測定結果である。データのばらつきが大きいヒータ表面温度 T_1 については、Fig. 4 の場合と同様にそのばらつきの範囲をエラーバーで示している。 $F=9cc$ の場合のヒータ表面温度 T_1 は、 $F=6, 12cc$ の場合に比べ約 10% 程度低くなっている。しかし、データのばらつきを考慮すると、あまり大きな差ではない。

液量を変えた場合の放熱板裏面の温度分布を Fig. 8 (a) ~ (c) に示す。Fig. 8 (b), (c) の $F=9, 12cc$ の場合の分布は右下部分が高温となっているが、Fig. 8 (a) の $F=6cc$ の場合には左右の下部が高温となっている。蒸発器内部の様子を見ると、 $F=6cc$ の場合には蒸発器内に残されているフロリナートの液量が $F=9, 12cc$ の場合に比べ約 1/3 程度に少なくなっていた。Fig. 6 (d) で示した $Q=8W$ の場合にも蒸発器内の液量が少ない状態であったため、このような場合には Fig. 6 (d) あるいは Fig. 8 (a) に見られる左右の下部が高温となるような温度分布になると考えられる。

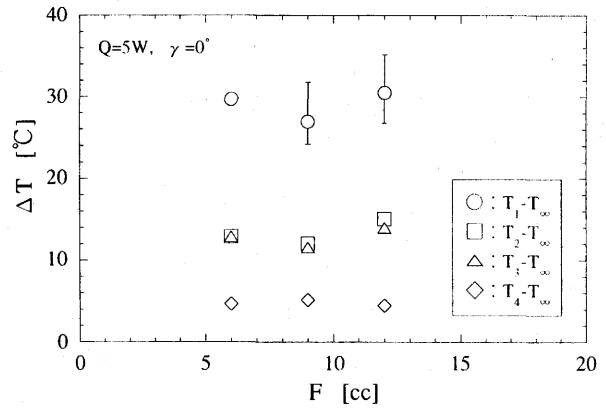
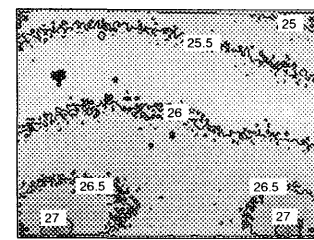
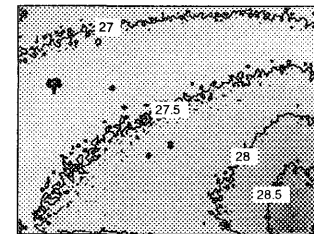


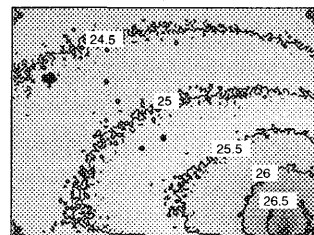
Fig. 7 Effect of filled volume of Fluorinert liquid on temperature



(a) $F=6cc$



(b) $F=9cc$



(c) $F=12cc$

Fig. 8 Effect of filled volume of Fluorinert liquid on back surface temperature distributions of radiation plate ($Q=5W, \gamma=0^\circ$)

3. 3 傾斜角度の影響

Fig. 9 に $Q=5W, F=9cc$ の場合に、放熱板の傾斜角度 γ を 0° (鉛直), $15^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ (水平) に変化させた場合の各位置での温度 $T_1 \sim T_4$ の測定結果を示す。データのばらつきが比較的大きい T_1 と T_3 については、そのばらつきの範囲をエラーバーで示している。 $\gamma=90^\circ$ (水平) の場合には放熱板を完全に水平に設置するのが難しく、少しで

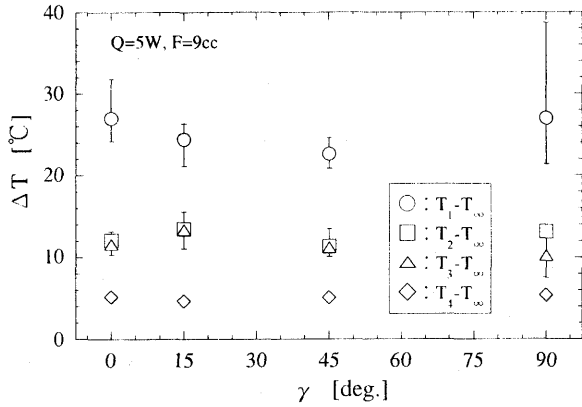
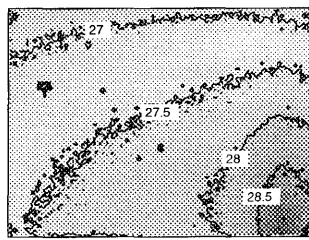
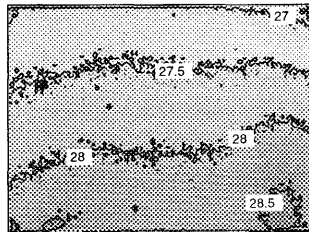


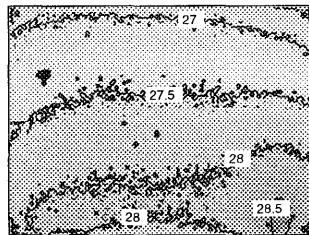
Fig. 9 Effect of inclination angle of radiation plate on temperature



(a) $\gamma = 0^\circ$ (vertical orientation)



(b) $\gamma = 15^\circ$



(c) $\gamma = 45^\circ$

Fig. 10 Effect of inclination angle of radiation plate on back surface temperature distributions of radiation plate ($Q=5W, F=9cc$)

も水平からずれるとヒータ温度に大きく影響をおよぼすため、データのばらつきが大きくなっている。ヒータ表面温度 T_1 をみると、 $\gamma = 0^\circ$ (鉛直) の場合に比べ、 $\gamma = 15^\circ, 45^\circ$ と少し傾けた方が約 15% 程度低くなっている。

Fig. 10 (a) ~ (c) は放熱板の傾斜角度を変えた場合の放熱板裏面の温度分布である。ただし、 $\gamma = 90^\circ$ (水平) の場合には実験装置の都合上、測定することが出来なかつ

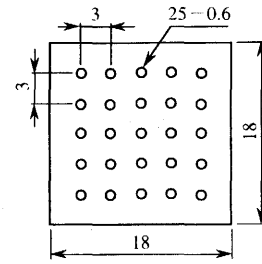


Fig. 11 Schematic of copper plate

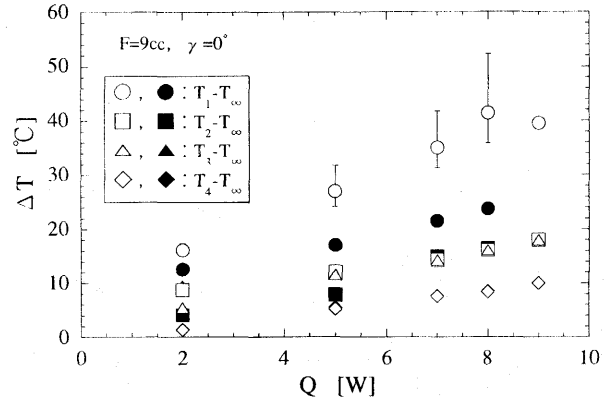


Fig. 12 Effect of copper plate on temperature

た。Fig. 10 (a) の $\gamma = 0^\circ$ (鉛直) の場合に比べ、Fig. 10 (b), (c) の $\gamma = 15^\circ, 45^\circ$ と放熱板を少し傾けた場合の温度分布は左右対称に近い分布になっており、左右の下部が高温となっている。ただし、Fig. 6 (d), Fig. 8 (a) の場合と異なり、蒸発器内には Fig. 10 (a) の $\gamma = 0^\circ$ (鉛直) の場合と同様に液が十分残っていた。 $\gamma = 15^\circ, 45^\circ$ の場合の T_1 が $\gamma = 0^\circ$ (鉛直) の場合より低くなっていることより、ループ内での流れを一方向流れよりも双方向流れとした方がヒータ表面温度を低くすることができると思われるが、この結論に達するまでにはさらなる追加実験が必要であると思われる。

3. 4 銅プレートの影響

蒸発器内部での沸騰を促進させるために、Fig. 11 に示す、縦 18mm、横 18mm、厚さ 1.5mm の銅板に直径 0.6mm の穴を 3mm 間隔ごとに基盤目配列であけた銅プレートを製作し、それを蒸発器内に挿入した。その際、銅プレートと蒸発器底面との接触を良くするために銅プレートをスプリングで押さえつけた。

Fig. 12 に蒸発器内に銅プレートがある場合とない場合の各位置での温度 $T_1 \sim T_4$ の測定結果の比較を示す。黒塗りの記号が銅プレートを挿入した場合の結果である。 $T_2 \sim T_4$ は銅プレートを挿入したことによる影響はほとんどないが、ヒータ表面温度 T_1 は銅プレートを挿入し沸騰が促進されたことにより、約 20~40% 程度低下した。

銅プレートを蒸発器内に挿入した場合の蒸発器内の沸

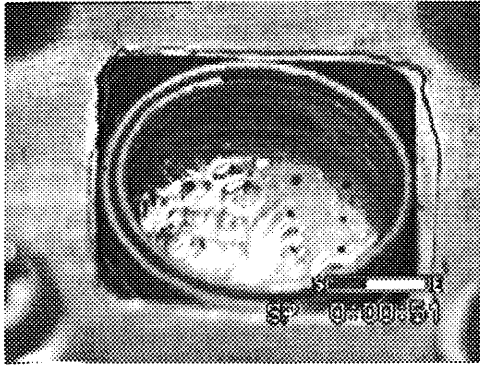


Fig. 13 State of Fluorinert boiling in evaporator
($Q=5W$, $F=9cc$, $\gamma=0^\circ$)

騰の様子を Fig. 13 に示す。銅プレートを挿入したことにより、蒸発器内での沸騰は活発になった。しかし、沸騰は銅プレートの左半分で偏って起こっており、銅プレートの全ての穴から沸騰しているわけではない。これは、銅プレートと蒸発器底面との接触に問題があると考えられる。今後、銅プレートを使わずに、蒸発器底面に直接穴をあけて実験を行う必要がある。そうすることにより、ヒータ表面温度 T_s はさらに低下する可能性がある。

4. 結 言

フロリナートを用いたCPUの間接液冷に関して、基礎的な実験を行い、CPU温度に対応するヒータ表面温度におよぼす発熱量、フロリナートの液量および放熱板の傾斜角度の影響について実験的に検討した。以下に主な結果を列挙する。

- (1) 発熱量の増加とともに各位置での温度はほぼ直線的に増加する。
- (2) ヒータ表面温度におよぼすフロリナートの液量の影響はあまり大きくないことがわかった。
- (3) 放熱板を鉛直にした場合のヒータ表面温度に比べ、傾斜角度を 15° 、 45° と少し傾けた場合の方が約 15% 程度低下した。
- (4) 蒸発器内に穴をあけた銅プレートを挿入したことにより、沸騰が促進され、ヒータ表面温度が約 20~40% 程度低下した。

おわりに、琉球大学工学部 長田孝志 教授から有益なご助言を頂き、琉球大学工学部 親川兼勇 教授からは赤外線カメラの使用に便宜をはかって頂いた。また、公益信託宇流麻学術研究助成基金からは助成金の援助を頂いた。ここに記して謝意を表します。

文 献

- (1) Ramaswamy, C., Joshi, Y., Nakayama, W. and Johnson, W. I., *Proceedings of 11th IHTC*, Vol. 2 (1998), 127.
- (2) 望月正孝, 益子耕一, 後藤和彦, 斎藤祐士, 高宮明弘, 第 34 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1997), 241.
- (3) Gima, S., Tomimura, T., Zhang, X. and Fujii, M., *Advances in Electronic Packaging 1999*, EEP-26.2 (1999), 1479.
- (4) 儀間 悟, 富村寿夫, 張 興, 藤井丕夫, 日本機械学会熱工学講演会講演論文集, (1999), 37.
- (5) Fujii, T. and Imura, H., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 15 (1972), 755.