

## コンピュータチップ用小形沸騰冷却器\*

(全姿勢における冷却性能の向上)

田中 栄太郎<sup>\*1</sup>, 川口 清司<sup>\*2</sup>  
寺尾 公良<sup>\*3</sup>, 鈴木 昌彦<sup>\*1</sup>

### Boiling Refrigerant Type Compact Cooling Unit for Computer Chip (Improvement of Cooling Performance for All Posture of Chip)

Eitaro TANAKA<sup>\*4</sup>, Kiyoshi KAWAGUCHI,  
Tadayoshi TERAO and Masahiko SUZUKI

\*4 DENSO CORPORATION, 1-1 Showa-machi, Kariya-shi, Aichi, 448-8661 Japan

In recent years, calorific power of computer chip has been increasing, thus high performance cooling unit is desired. Further, it is desired that its performance does not depend on any posture of chip. We developed the cooling unit that complied with the demands. It has the boiling part that enabled to supply refrigerant to boiling part with sintering metal, and the condensation part that enabled to spread high temperature vapor of coolant without clogging.

**Key Words:** Heat Transfer, Thermo Syphon, Cooling Unit, Computer Chip, Boiling, Wick

### 1. 緒 言

近年、コンピュータの高性能化に伴い、コンピュータチップ(以下CPU)の発熱量の増大および小形化が急速に進んでいる。現在CPUの放熱には、空冷アルミニウムフィンやヒートパイプ付きフィンなどが用いられているが、これらの冷却器では対応できなくなることが予測され、より高性能な冷却器が要求されている。著者らは、この高発熱量・高発熱密度化に対応できるCPU用冷却器として、小形沸騰冷却器の開発を進めてきた。しかし、沸騰冷却器の欠点は図1に示すように発熱部が下方に位置するボトムヒートにおいてはその性能を遺憾なく発揮するが、発熱部が上方や側方に位置するいわゆるトップヒートやサイドヒートへの対応が困難であることである。従来このようなヒップヒートやサイドヒートへの対応は、内部に冷媒吸上げ能力を有するウィックを設けたヒートパイプによって実現してきた。しかしながら、ヒートパイプとは

いえ、グループ状のウィックではせいぜいサイドヒートへの対応が限界で、トップヒートにおいては冷却性能が低下するのが実状である。

そこで本研究では、沸騰促進機能と上方への冷媒供給機能を併せ持つ高空孔率焼結材を用いた沸騰冷却技術を開発したので報告する。

### おもな記号

$A_w$ : ウィックの断面積  $\text{m}^2$

$g$ : 重力の加速度  $\text{m}/\text{s}^2$

$h$ : 毛細管高さ  $\text{m}$

$K$ : 浸透率  $\text{m}$

$L$ : 潜熱  $\text{J}/\text{kg}$

$l_{\text{eff}}$ : ウィックの実効長  $\text{m}$

$Q$ : 热輸送量  $\text{W}$

$r_c$ : 実効細孔半径  $\text{m}$

$\Delta T$ : 冷却性能  $\text{K}$

$T_b$ : 沸騰面温度  $^{\circ}\text{C}$

$T_c$ : 凝縮面温度  $^{\circ}\text{C}$

$T_{rb}$ : 沸騰部の冷媒蒸気温度  $^{\circ}\text{C}$

$T_{rc}$ : 凝縮部の冷媒蒸気温度  $^{\circ}\text{C}$

$T_s$ : 冷却器端部の温度  $^{\circ}\text{C}$

$T_t$ : CPU 取付面温度  $^{\circ}\text{C}$

\* 原稿受付 2001年4月2日。

\*1 正員、(株)デンソー(〒448-8661 刈谷市昭和町1-1)。

\*2 正員、富山大学工学部(〒930-8555 富山市五福3190)[元:(株)デンソー]。

\*3 (株)デンソー。

E-mail: eitaro@rd.denso.co.jp

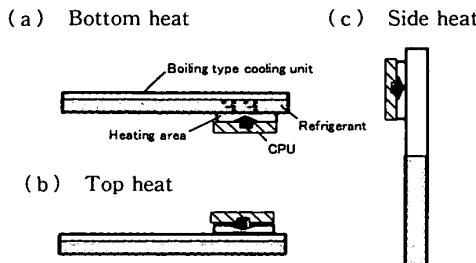


Fig. 1 Heat mode of thin type cooling unit

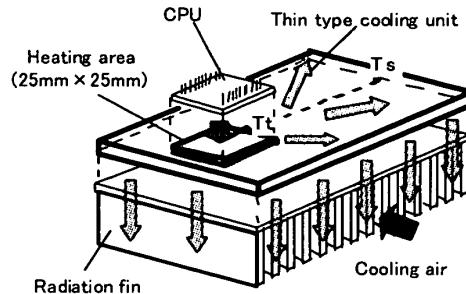


Fig. 2 Concept of thin type cooling unit

 $\epsilon$ : 空孔率 % $\eta_l$ : 作動流体の粘性係数 N·s/m<sup>2</sup> $\theta$ : 接触角 rad $\phi$ : ウィック傾斜角 rad $\rho$ : 密度 kg/m<sup>3</sup> $\rho_l$ : 作動流体の密度 kg/m<sup>3</sup> $\sigma$ : 表面張力 N/m

## 2. 供試冷却器の構造

図2に供試冷却器の概念を示す。本冷却器は、体格が $130 \times 70 \times 6\text{ mm}$ の薄形きょう体で大きさ25mm角の受熱部にはCPUが取付けられる。一方、受熱部の反対側の面には別体の空冷フィンが熱伝導グリース等を介して取付けられ、フィン間に冷却風を外部ファンにより導入することによって、大気中に放熱する。したがって本冷却器は、CPUから発生する熱を冷却フィンが取付けられる放熱面へ拡散させる機能をもち、厚さ6mmという偏平で、かつ受熱部が偏在していることが大きな特徴である。

図3に供試冷却器の構造を示す。薄形の矩形密閉きょう体は2枚の板状部材を重ね合わせた構造になっており、一方がCPU取付面、他方が冷却フィン取付面となる。CPU取付面側には70%という高空孔率を有する焼結金属を部材全面に設けてあり、反対側の冷却フィン取付面側には凝縮フィンを設けてある。上記CPU取付面部材と冷却フィン取付面部材を一体ろう付けした後、内部を真空脱気し冷媒として純水を封入している。したがって気密性に優れ長期間冷却性能を維持することが可能である。

作動について説明すると、まず毛細管機能を有する焼結金属により吸い上げられた冷媒は、CPUから発生した熱により蒸気になる。この際焼結金属は沸騰促進構造と表面積の増大効果により、高い熱伝達率を有するので小面積で大きな放熱量が期待できる。発生した蒸気は内部に設けた蒸気ガイドを通ってCPUから離れた冷却器端部(図3下部)まで輸送され、その後冷却器全体へ拡散し、凝縮フィンにおいて冷却され液冷

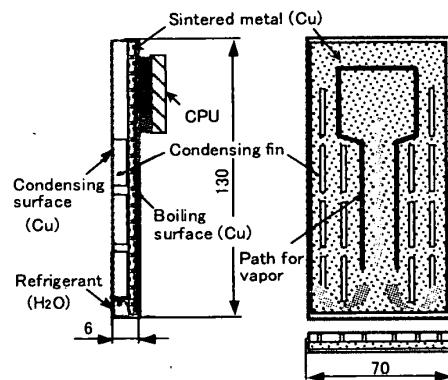


Fig. 3 Structure of thin type cooling unit

媒に戻る。このような冷媒の相変化により、熱を発熱部から冷却器端部へ拡散させる機能を有する。表1に冷却器の仕様を示す。

本研究の手順としては、まず、上記冷却器を模擬した試験装置にてウィックの熱輸送能力の向上と沸騰部過熱度・凝縮部過冷度の低減を検討する。次に、検討結果から得られた構造を試作評価し、その効果を検証する。

冷却器の目標性能としては、発熱体取付部温度 $T_t$ と冷却器端部温度 $T_s$ との温度差を冷却性能 $\Delta T$ と定義し、この $\Delta T$ がCPUの発熱量100W時に、あらゆる姿勢で5K以下とする。

図4に冷却器の放熱経路に沿った各部の目標温度変化を示す。冷却性能 $\Delta T$ を5K以下にするために、過熱度(沸騰面と冷媒蒸気温度の差)と過冷度(冷媒蒸気温度と凝縮面との温度差)の目標値をそれぞれ3, 1Kとした。

熱輸送量の目標値としては、最も厳しい姿勢であるCPUが側方に位置するサイドヒートにおいて、熱輸送量100W以上とする。

## 3. 試験装置と方法

### 3・1 沸騰部への熱輸送能力

#### 3・1・1 試験装置および方法 図5にウィックの

Table 1 Specification of thin type cooling unit

Items	Contents
Cooling performance	$\Delta T = T_t - T_s \leq 5 \text{ K}$ less
Heat load	100 W
Cooling air velocity	3 m/sec
Ambient Temperature	40 °C
Refrigerant	H <sub>2</sub> O
Size	70(W) × 130(D) × 6(H) mm

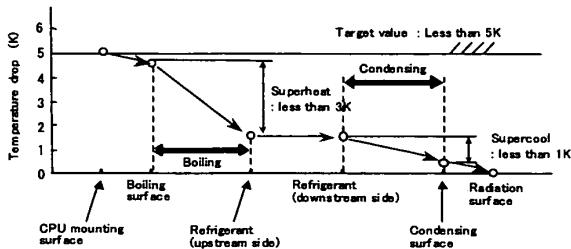


Fig. 4 Target values of temperatures in the thin type cooling unit

熱輸送量の試験装置を示す。冷媒(純水)が入った容器の上方位置にCPUを模擬した電気ヒータを設け、その間に供試ウィックを設置し、ウィックの両端は電気ヒータの加熱面および冷媒に接触するようにした。冷媒の液面からヒータ加熱面上端までの距離は、最も厳しいサイドヒートでの距離を模擬し100 mmとした。

加熱面温度はヒータ中央部のウィック側表面に熱電対を取付けて測定する。熱電対はT形熱電対を使用し、ウィックへは高熱伝導率接着剤により取付けた。冷媒供給量は冷媒を入れた容器全体をてんびんの上に置き、重量を測定することにより求める。また、ヒータ発熱量を増大していくと加熱面温度が急激に増大した点でのヒータ発熱量を熱輸送限界と定義し測定する。

**3・1・2 供試ウィックの選定** 供試ウィックとしては、毛細管高さ100 mm以上であることが要求される。毛細管による吸上げ高さは、式(1)で示すように冷媒の物性値以外に実効細孔半径の関数であることが一般的に知られている<sup>(1)</sup>。

$$h = \frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{r_c \cdot \rho_l \cdot g} \quad \dots \dots \dots (1)$$

接触角60°と仮定すると、毛細管高さ100 mm以上を達成するには実効細孔半径100 μmオーダーのウィックが必要である。

実効細孔半径10 μmオーダーのウィックを実現する手段としては、表2に示すように大きく分けて纖維状ウィックと金属ウィックがあるが、冷却器容器を形成する際のろう付け温度からウィックの耐熱温度を考慮してカーボンファイバ、グラスファイバおよび焼結金

Table 2 Test samples of wicks

Classification	Sort	Structure	Structure's diameter mm	r <sub>c</sub> mm	Capacity kg/mm <sup>2</sup>	Wettability	Heat conducting
Fiber	Cotton sheet		1x10 <sup>-5</sup>	3.0x10 <sup>-5</sup>	500	Good	Ignition point 350°C
	Carbon fiber		5x10 <sup>-6</sup>	5.0x10 <sup>-5</sup>	2000	Good and Excellent Wettability	Conductivity 1000 W/mK
	Glass fiber		5x10 <sup>-6</sup>	6.0x10 <sup>-5</sup>	2000	Excellent Wettability	Conductivity 100 W/mK
Metal	Copper wire (100 mesh)		1x10 <sup>-4</sup> ( )	* 1.2x10 <sup>-4</sup>	100	Contact angle of oxidized surface 75~95 deg	Melting point 1083°C
	Foamed metal (Void ratio 80%)		—	5.0x10 <sup>-4</sup>	10	†	†
Burned metal (Void ratio 62%)	—	—	—	* 2.0x10 <sup>-5</sup>	800	†	†

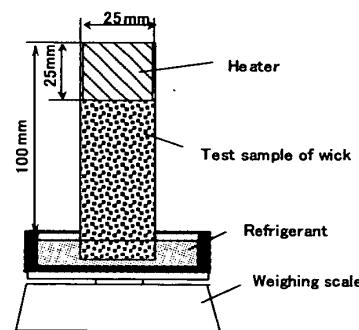


Fig. 5 Apparatus for measurement of wick's capacity

属が有望である。なお、表2中の焼結金属の空孔率などは文献値<sup>(2)(3)</sup>による。

今回供試ウィックとして、カーボンファイバ、グラスファイバおよび空孔率40%の銅の焼結金属を選定した。

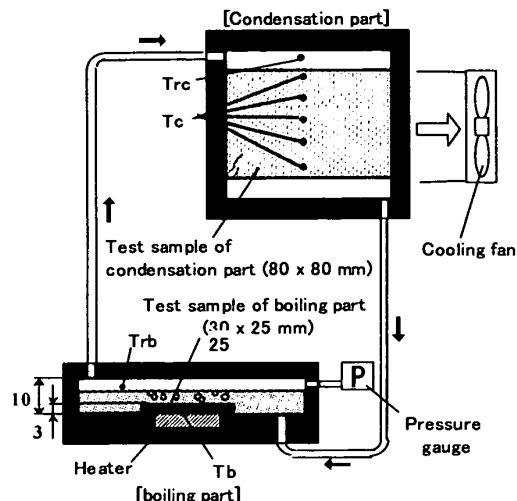
### 3・2 沸騰部過熱度・凝縮部過冷度の低減

#### 3・2・1 沸騰部過熱度・凝縮部過冷度試験装置

図6に沸騰部過熱度と凝縮部過冷度の測定、および凝縮部における液冷媒挙動を観察する試験装置を示す。沸騰部と凝縮部から構成され、おのおのを配管で結合し、内部に冷媒として純水を封入した。沸騰部は加熱用の電気ヒータにより加熱する。試験装置内の冷媒封入量は、冷却器内を模擬し、沸騰面がわずかに冷媒に覆われるような位置に冷媒液面がくるように調整した。

熱電対により沸騰部供試品のヒータ取付面温度T<sub>b</sub>(供試品中央部)と沸騰部内蒸気温度T<sub>rb</sub>を測定する。沸騰部供試品のヒータ取付面温度と冷媒蒸気温度の差からヒータ取付面と沸騰面間での熱伝導による温度差分(計算により算出)を引いた値を沸騰部過熱度とした。さらに透明アクリル製の可視化観察用の窓を設けてある。

一方、凝縮部には凝縮部表面温度T<sub>c</sub>、凝縮部蒸気温度T<sub>rc</sub>測定用の熱電対、さらに透明アクリル製の可視化観察用の窓を設けてある。また、内部には圧力計が

Fig. 6 Apparatus for measurement of  $T_c$  and  $T_b$ 

設けられており、冷媒圧力から飽和蒸気温度を求める。

また、装置の周り(空気との熱交換部以外)は断熱材で覆い、外部との熱移動を極力遮断した。

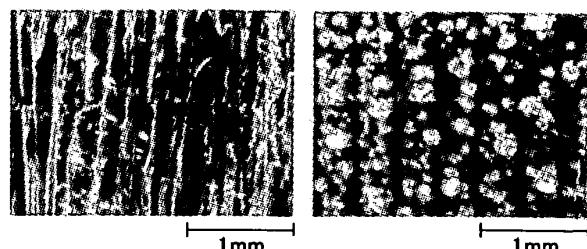
### 3・2・2 沸騰部過熱度の測定 上記試験装置の沸騰部に構造の異なる沸騰部供試品を取り付け、各構造における沸騰部過熱度を測定する。

沸騰部供試品として、沸騰核の形成、表面積の拡大効果、冷媒の浸透しやすさ、蒸気の抜けやすさおよび高い熱伝導性を狙い、以下の4種類の沸騰部供試品を用意した。材質はすべて銅である。図7に各沸騰部供試品の拡大写真を示す。図7(a)は無く材表面にサンドペーパー(80番)を用いて粗面加工したサンプル。図7(b)は表面の0.2 mm幅で深さ0.3 mmのグループ構造に厚さ100 μmのめっき層を施したサンプル。図7(c)は50~150 μmの不定形粒子を空孔率20~30%になるように溶射したサンプル。図7(d)は50~150 μmの不定形粒子を空孔率70%になるように焼結したサンプルである。

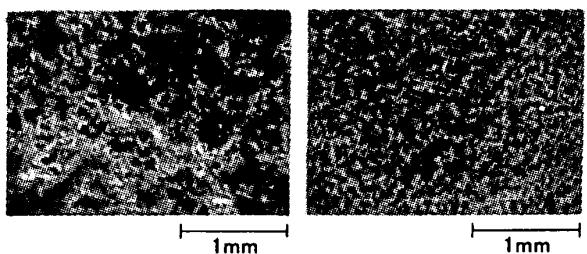
### 3・2・3 凝縮部過冷度の測定 凝縮部も同様に、構造の異なる凝縮フィン供試品を取り付け、各構造における凝縮部過冷度を上記試験装置にて測定する。

凝縮部過冷度を低減するためには、フィン構造による凝縮面積の拡大が簡易かつ効果的であるが、凝縮面積を拡大するためにフィンピッチをつめすぎると、液づまりが発生し凝縮部過冷度が悪化する。逆に、液づまりしないようにフィンピッチを広げると凝縮面積が不足する。

そこで本研究では、フィンなし、フィンピッチ2, 5 mmの三つの凝縮部供試品を用意し、凝縮部過冷度の目標値1 K以下を達成するのに必要なフィンピッチ



(a) Pure metal with rough surface using sandpaper  
(b) Plated metal with groove  
Groove width: 0.2 mm  
Thickness of plating: 100 μm



(c) Thermal sprayed metal  
Diameter of particle:  
50~150 μm  
Void ratio: 20~30%  
(d) Sintered metal  
Diameter of particle:  
50~150 μm  
Void ratio: 70%

Fig. 7 Surface of test piece at boiling parts

を検討する。また、1~5 mmの異なるフィンピッチをもつ凝縮部供試品にて液づまり発生の有無を確認する。また、フィン高さは試作品に合せていずれも4 mmとする。

**3・3 試作品の冷却性能測定** 最後に検討した結果を反映させた試作品を実際に作成し、冷却性能を測定する。図2を用いて測定方法を説明する。冷却器の受熱部に加熱用電気ヒーターを取り付け冷却器を加熱する。試作品の凝縮部側面には、フィンピッチ5.4 mm、フィン高さ45 mmの放熱フィンを取り付け冷却風速3 m/s、外気温度25°Cにて冷却性能 $\Delta T$ を測定する。

## 4. 試験結果

**4・1 沸騰部への熱輸送量** ウィック断面積と熱輸送限界との関係を調べた結果を図8に示す。各供試ウィックとも毛細管高さ100 mm以上は得られたが、冷却器内での収容可能断面積120 mm<sup>2</sup>では熱輸送量100 W以上を得られなかった。収容可能断面積内で100 W以上の熱輸送量を得るために、空孔率40%の焼結金属に対して熱輸送量を1.5倍に増大する必要がある。

熱輸送量を制限する要因は四つあり、ウィックの毛細管力による冷媒輸送能力、対向する蒸気流による冷媒の飛散、沸騰部での気泡の発生、蒸気流速の音速限

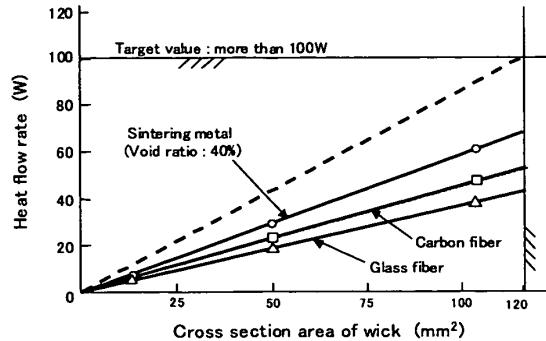
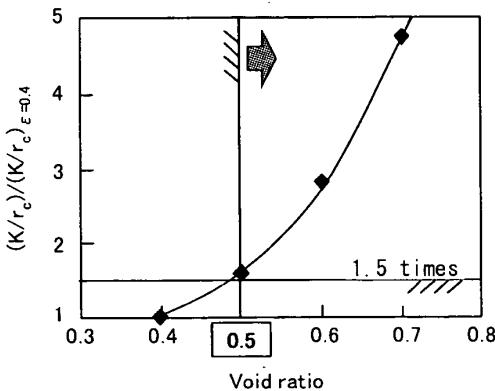


Fig. 8 Heat flow rate of wicks

Fig. 9 Relation between  $K/r_c$  and void ratio

界である。本研究の薄形冷却器は作動温度が20~100°C程度であり、低温作動ヒートポンプの分野に入り、毛細管限界により熱輸送量が制限される。毛細管限界は、式(2)で示すように四つの因子で構成される<sup>(4)</sup>。

$$Q = \frac{\rho_i \cdot \sigma \cdot L}{\eta_i} \cdot \frac{K}{r_c} \cdot \frac{A_w}{l_{eff}} \left( 2 - \frac{\rho_i \cdot g \cdot r_c \cdot l_{eff}}{\sigma} \cdot \sin \phi \right) \quad \dots \dots \dots (2)$$

第1項は冷媒の物性値でメリット数と称され、冷媒の選定の目安である。第2項は冷媒の通りやすさを示し、ウィックの特性で決まる。 $K/r_c$ を大きくすれば効果大である。ここで $K$ は浸透率、 $r_c$ は実効細孔半径である。第3項はウィックの形状因子で、ウィックの断面積と熱輸送量が比例し、ウィックの断面積を拡大できれば、熱輸送量が増大できる。第4項は姿勢による重力の影響因子で $\sin \phi = 1$ となるサイドヒート姿勢が最も厳しい。

以上のことから、冷媒が同じであれば、熱輸送量を増大させるためにはウィックの断面積を拡大させるか $K/r_c$ を大きくすればよいが、ウィックの断面積拡大に関しては、体格の制約があるので困難である。そこで、 $K/r_c$ について検討する。

$K/r_c$ を目標値である1.5以上にするために、浸透

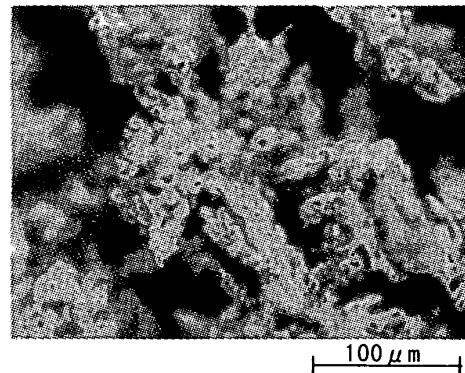


Fig. 10 Surface of sintering metal (void ratio 70%)

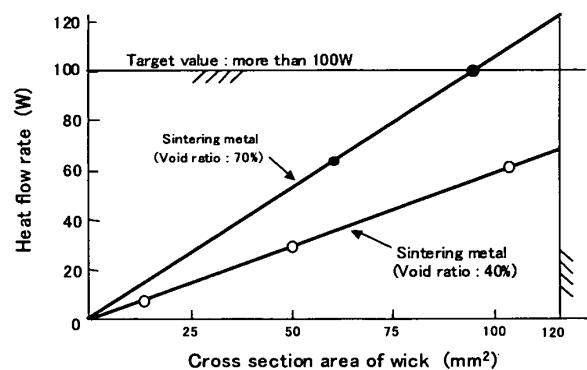


Fig. 11 Heat flow rate of sintering metals

率 $K$ について調査した。浸透率 $K$ と空孔率 $\epsilon$ 、浸透率 $K$ と実効細孔半径 $r_c$ の関係は

$$K \propto \epsilon^3 / (1 - \epsilon)^2 \quad \dots \dots \dots (3)^{(5)}$$

$$K \propto r_c^2 \quad \dots \dots \dots (4)^{(5)}$$

であってこれらより浸透率 $K$ と実効細孔半径 $r_c$ の比 $K/r_c$ と空孔率 $\epsilon$ の関係は、 $\epsilon$ と $r_c$ は互いに独立の関係にあるとすれば、

$$K/r_c \propto \{\epsilon^3 / (1 - \epsilon)^2\}^{0.5} \quad \dots \dots \dots (5)$$

となり、図9に示される。

目標の熱輸送量を確保するためには、空孔率は50%以上必要であることがわかる。銅の球形粒子では均一粒径で、点接触の場合でも空孔率は50%以下にしかならないので、不定形粒子で検討することにした。その結果、図10に示すような70%という高空孔率を有する焼結金属を得ることができた。この焼結金属を用いて熱輸送量を測定した結果を図11に示すが、空孔率40%の焼結金属と比較して熱輸送量を1.5倍にすることができた。

**4・2 沸騰部過熱度の低減** 外気温度25°C、冷媒圧力0.06~0.07 MPaにて発熱量を変え沸騰部過熱度を測定した結果を図12に示す。横軸に熱流束、縦軸に過熱度をとる。熱流束は、与えた発熱量を供試品表面積で除した値とした。沸騰部の過熱度を3K以下

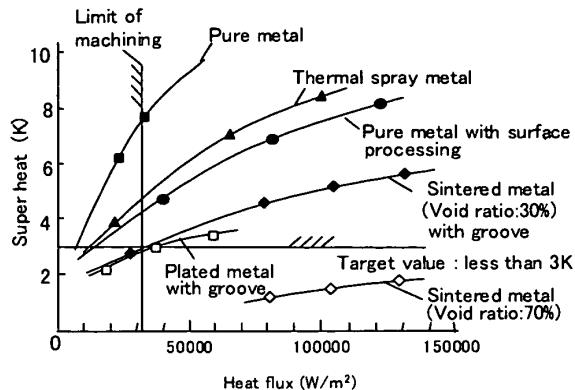


Fig. 12 Relation between superheat and heat flux in test sample

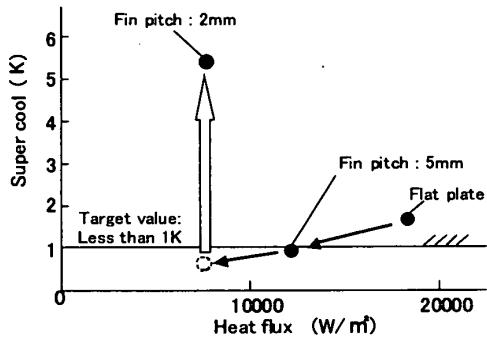


Fig. 13 Observation of behavior of condensation

にするには、空孔率 30% の焼結材とめっき材では例えば溝幅 0.2 mm の細溝加工等が必要である。一方、空孔率 70% の焼結金属では細溝の加工が不要で、先に検討した冷媒を供給するウィックと一体化が可能であり、沸騰部にこの焼結金属を採用する。

**4・3 凝縮部過冷度の低減** 図 13 に外気温度 25°C、冷媒圧力 0.06~0.07 MPa において、先に述べた 3 種の凝縮部供試品の過冷度を熱流束で整理した結果を示す。沸騰部に加えた熱量がすべて凝縮部にて放熱すると仮定し、熱量を凝縮部表面積で除した値を熱流束とした。フィンなしでは凝縮面積が足らず目標過冷度 1 K を達成できないが、フィンピッチ 5 mm において目標過冷度を達成した。さらに凝縮面積を大きくしたフィンピッチ 2 mm の供試品では大幅に過冷度が悪化しておりフィン間で液づまりが発生している可能性がある。

そこで、図 14 に示すようにフィン間での液づまりの状況を観察したところ、確かにフィン間隔 4 mm 以下では液づまりが発生することがわかった。

今回の条件においては、フィンを設けると過冷度は低下するが、フィン間隔が 4 mm 以下になるとフィン間に液がつまり、性能は逆に低下することがわかった。

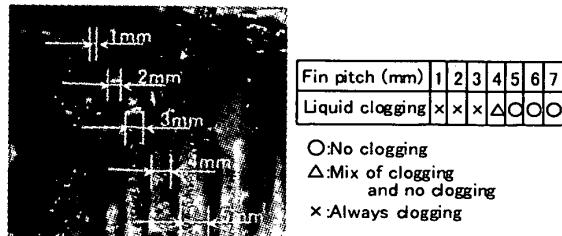
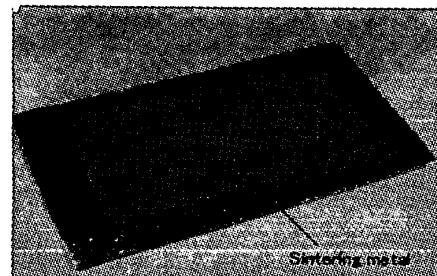
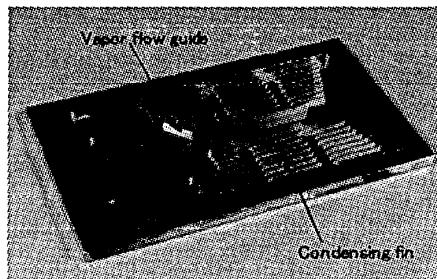


Fig. 14 Relation between super cool and heat flux



(a) Boiling part



(b) Condensation part

Fig. 15 Parts of thin type cooling unit

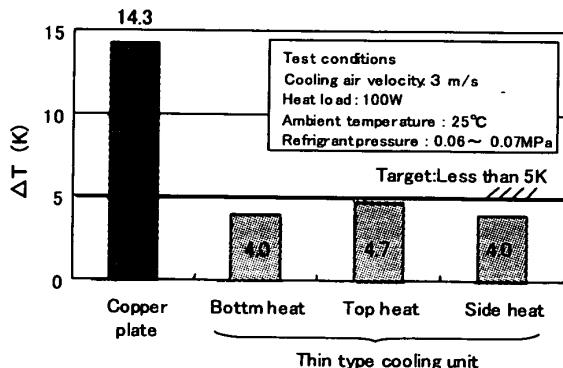


Fig. 16 Cooling performance for each chip posture

## 5. 供試冷却器の冷却性能評価結果

以上の検討結果から得た構造を実際に試作した。図 15 に試作品の CPU 取付面部材と冷却フィン取付面部材を示す。焼結金属ウィックは銅製で空孔率は 70%，厚さは 2 mm である。また、凝縮フィンはフィン間隔

5 mm, フィン高さ 4 mm(凝縮面積 8 500 mm<sup>2</sup>)である。

図 16 に試作品の冷却性能  $\Delta T$  の評価結果を示す。熱伝導率の大きい銅無く製の熱拡散板と比較し、本研究のウィック方式ではすべての姿勢で、熱輸送量 100 W 時に発熱部と冷却部温度差 5 K 以下を満足する高い冷却性能を有していることがわかる。

## 6. 結 言

(1) 沸騰部構造として、高空孔率焼結金属が高い冷媒供給性能と高熱伝達性能を両立できることを見いたした。

(2) 凝縮部構造として、液づまりせずに伝熱面積

を確保できるフィンピッチを見いたした。

(3) 上記の沸騰部構造と凝縮部構造により、あらゆるチップ姿勢に対応可能なコンピュータチップ用沸騰冷却技術を確立した。

## 文 献

- (1) Tien, C. L. and Sun, K. H., *Int J. Heat Mass Trans.*, **14** (1971), 1853-1855.
- (2) 大串哲朗・村上政明, 第 22 回応用物理学会関係連合講演会講演予稿集, (1975), 450.
- (3) Freeggens, R. A., *Proc. 4th Intersoc. Energy Convers. Eng. Conf.*, Washington D. C., (1969), 888-897.
- (4) Cotter, T. P., Report LA-3246-MS, Los Alamos Sci. Lab. (1965).
- (5) Shishido, L., Oishi, I. and Ohtani, S., *J. Chem. Eng. Jpn.*, **17**(1984), 179.