

ベーパチャンバ設計用数値シミュレーションコード

熊本大学 小系 康志・井村 英昭・鳥居 修一
サーマルテック事業部 望月 正孝*1
フジクラタイランド 斎藤 祐士

A Numerical Simulation Code for Designing a Vapor Chamber

Dr. Y. Koito, Dr. H. Imura, Dr. S. Torii, Dr. M. Mochizuki & Dr. Y. Saito

パソコンやワークステーション，サーバ等に搭載されているMPU (microprocessor unit) の高効率冷却を目的に，新型熱拡散板として開発された“ベーパチャンバ (平板型ヒートパイプ)”について，その内部で生じている熱流動現象を解析し，現象解析に基づいた設計資料を提出するため，数値シミュレーションコードを開発した．本コードを用いることにより，任意の設計条件におけるベーパチャンバ内の熱流動特性を明らかにすることができた．また，実験結果との比較によって，本コードによるシミュレーション結果の妥当性を確認した．

A numerical simulation code is developed to analyze and design a "Vapor Chamber", which is a novel heat spreader to achieve efficient cooling of MPUs (microprocessor units) installed in personal computers, workstations, servers and so on. By using the numerical simulation code, the velocity and temperature distributions inside the vapor chamber, which are the important information on the design and improvement of the vapor chamber, are clarified on any designing condition. As the simulated results of the vapor chamber are found to be in close agreement with the authors' experimental results, the present numerical simulation code is proved to be useful.

1. ま え が き

近年，パソコンやワークステーション，サーバ等に搭載されているMPU (microprocessor unit) の高性能化が進み，これに伴ってMPUの発熱密度が増大している．今後もMPUの高性能化・高発熱密度化は進むと予想されているが，MPUはその温度を所定温度以下に抑える必要があるため，現在，高性能なMPU冷却システムの開発が重要課題となっている．

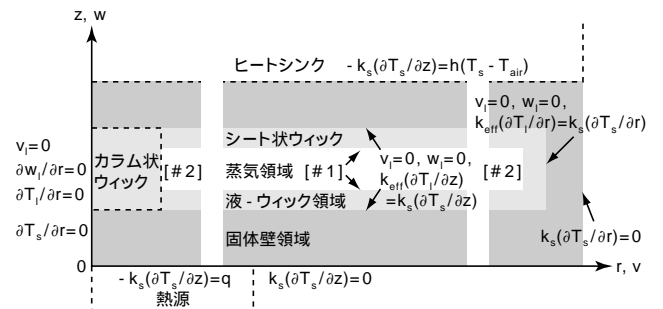
そこでわれわれは，新型熱拡散板として平板状のヒートパイプである“ベーパチャンバ”を開発し，これをヒートシンクに取り付けたMPU冷却システムを構築した．ベーパチャンバを取り付けることにより，MPUからの発熱を広く拡散させ，ヒートシンクへと伝えることができることから，効率の良い放熱が達成できる．

本研究では，ベーパチャンバ内で生じている熱流動現象を解析し，現象解析に基づいたベーパチャンバ設計資料を提出するため，ベーパチャンバ内の速度分布，温度分布等を予測する数値シミュレーションコードを開発する．また，実験結果と比較することにより，数値シミュ

レーション結果の妥当性を検証する．

2. 数値シミュレーションモデル

ベーパチャンバの数値シミュレーションモデルを図1に示した．このモデルは円盤状のヒートパイプであり，蒸気領域，液 - ウィック領域および固体壁領域の三つの領域に分けることができる．内部には作動液が封入されており，内壁にシート状のウィックが装着され，さらに作



At[#1]: $\mu_v(\partial v_r/\partial z) = \mu_l(\partial v_l/\partial z)$, $w_r = w_l = (k_v(\partial T_v/\partial z) - k_{eff}(\partial T_l/\partial z))/h_{fg}$, $T = T_{sat}$
At[#2]: $v_r = v_l = (k_v(\partial T_v/\partial r) - k_{eff}(\partial T_l/\partial r))/h_{fg}$, $\mu_v(\partial w_v/\partial r) = \mu_l(\partial w_l/\partial r)$, $T = T_{sat}$

図1 ベーパチャンバの数値シミュレーションモデル
Numerical simulation model of the vapor chamber

*1 開発部長

動液の還流を確実にするため、中心にカラム状のウイックが設置されている。下方の熱源からペーパーチャンバ下面の一部に対して熱流束が供給され、ペーパーチャンバ上面はヒートシンクによって冷却される。ここでは簡単化のため、以下の仮定をおいた。

- a) ペーパーチャンバ内は定常状態である。
- b) 蒸気の流れは層流である。
- c) ウイックは等方性であり、液で十分満たされている。
- d) 蒸気 - 液界面においてのみ蒸気は凝縮し、液は蒸発する。
- e) 物性値の温度依存性は無視できる。

以上の仮定の下、次式の支配方程式、すなわち、蒸気領域、液 - ウイック領域、固体壁領域に対する連続の式、運動量の式およびエネルギー式が与えられる。

蒸気領域に対して；

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_v) + \frac{\partial w_v}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\begin{aligned} & v \left(v_v \frac{\partial v_v}{\partial r} + w_v \frac{\partial v_v}{\partial z} \right) = \\ & = - \frac{\partial p_v}{\partial r} + \mu_v \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_v}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_v}{\partial z^2} \right\} \quad \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & v \left(v_v \frac{\partial w_v}{\partial r} + w_v \frac{\partial w_v}{\partial z} \right) = \\ & = - \frac{\partial p_v}{\partial z} + \mu_v \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w_v}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 w_v}{\partial z^2} \right\} \quad \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & v c_{p,v} \left(v_v \frac{\partial T_v}{\partial r} + w_v \frac{\partial T_v}{\partial z} \right) = \\ & = k_v \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_v}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_v}{\partial z^2} \right\} \quad \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

液 - ウイック領域に対して；

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_l) + \frac{\partial w_l}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\begin{aligned} & l \left(v_l \frac{\partial v_l}{\partial r} + w_l \frac{\partial v_l}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p_l}{\partial r} \\ & + \mu_l \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_l}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_l}{\partial z^2} \right\} - \frac{\mu_l w_l}{K} \quad \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

$$l \left(v_l \frac{\partial w_l}{\partial r} + w_l \frac{\partial w_l}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p_l}{\partial z}$$

$$+ \mu_l \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w_l}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 w_l}{\partial z^2} \right\} - \frac{\mu_l w_l}{K} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$l c_{p,l} \left(v_l \frac{\partial T_l}{\partial r} + w_l \frac{\partial T_l}{\partial z} \right)$$

$$= \frac{k_{eff}}{r} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_l}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_l}{\partial z^2} \right\} \quad \dots\dots\dots(8)$$

固体壁領域に対して；

$$k_s \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \right\} = 0 \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここで、 v は半径方向速度、 w は軸方向速度、 p は圧力、 T は温度、 r は半径方向座標、 z は軸方向座標、 ρ は密度、 μ は粘度、 c_p は比熱、 k は熱伝導度、 ϵ は空隙率、 K は透過率である。また、添え字 v, l, s はそれぞれ蒸気領域、液 - ウイック領域、固体壁領域を表す。式 (5) ~ (8) は速度に細孔速度を用いることにより導出した。また、 k_{eff} は液 - ウイック領域における有効熱伝導度である。

境界条件を図1に併示した。ここで、 h は熱伝達係数、 h_{fg} は蒸発・凝縮潜熱、 q は熱源からペーパーチャンバに供給される熱流束、 T_{air} は冷却空気温度である。また、蒸気 - 液界面の温度は、ペーパーチャンバ内の圧力に対応する飽和温度 T_{sat} とした。

式 (1) ~ (9) の支配方程式は、図1に示した境界条件の下、コントロールボリューム法によって離散化し、“SIMPLE” アルゴリズムによって解を得た。計算は、反復による v, w, p, T の変化 ($[v^m - v^{m-1}] / v^{m-1} [w^m - w^{m-1}] / w^{m-1} [p^m - p^{m-1}] / p^{m-1} [T^m - T^{m-1}] / T^{m-1}$ 、ここで m は反復数である。) が 10^{-5} 以下となるまで繰り返した。

3. 実験 法

実験装置の詳細を図2に示した。ペーパーチャンバをヒートシンクに取り付け、このヒートシンクを風洞内に設置し送風機により空冷して、ペーパーチャンバ下面に接触させた熱源を冷却するものである。熱源にはヒータを用いた。

実験では、ヒータ熱流束、冷却空気温度等を所定値に設定した後、ヒータと接しているペーパーチャンバ下面の中心温度、図3に示した各位置でのペーパーチャンバ上面温度を測定した。なお、各位置での温度はK型熱電対を用い

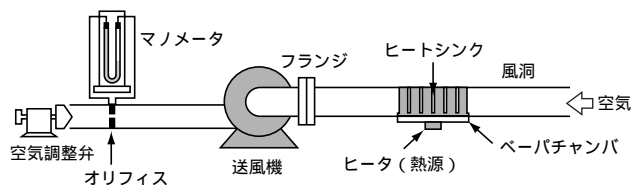


図2 実験装置図
Schematic diagram of the experimental apparatus

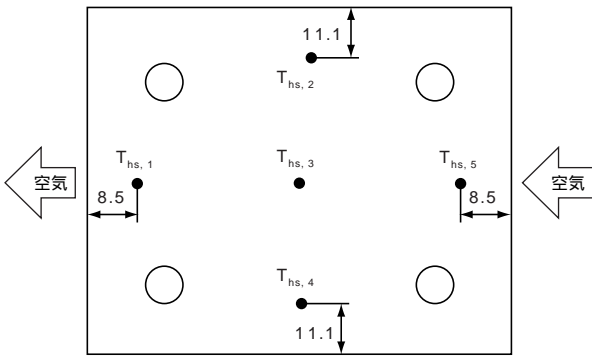


図3 ペーパーチャンバ上面における温度測定位置
Measuring points of the temperatures
at the top of the vapor chamber



て、冷却空気流速はオリフィスおよびマノメータを用いて測定した。

4. 数値シミュレーション結果

本シミュレーションでは、図4に示したペーパーチャンバを対象とし、これを表1に示したように数値モデル化した。図4のペーパーチャンバは、作動液として水を封入した平板状(76.2mm×88.9mm)の密閉銅製容器であり、内部にはウイックが設置されている。ウイックは銅粒焼結体(粒子寸法100~200メッシュ、空隙率40%)であり、シート状(厚さ0.5mm)およびカラム状(直径8.5mm)の焼結体が設置されている。また、数値シミュレーションモデルにおいて、ペーパーチャンバの半径は、その上面の面積(=下面の面積)が図4に示したペーパーチャンバと等しくなるように、一方、熱源の半径は、その上面の面積が実験に用いたヒータと等しくなるように決定した。

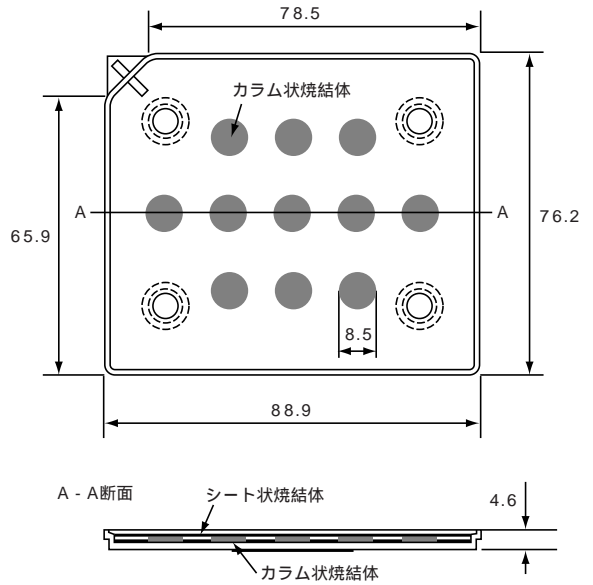


図4 ペーパーチャンバの写真(上側)および詳細図(下側)
Photograph (upper) and details (lower)
of the vapor chamber

表1 数値シミュレーションモデルの仕様
Specification of the numerical simulation model

チャンバ材質	銅
シート状およびカラム状ウイックの材質	銅粒焼結体(空隙率40%)
作動液	水
ペーパーチャンバの高さ(mm)	4.6
ペーパーチャンバの有効長(mm)	46.5
蒸気領域の高さ(mm)	1.1
蒸気領域の有効長(mm)	45.0
シート状ウイックの厚さ(mm)	0.5
カラム状ウイックの有効長(mm)	4.3
熱源の有効長(mm)	13.8

液 - ウイック領域における有効熱伝導度 k_{eff} は、ウイックに銅粒焼結体を採用していることから、球状粒子の焼結体ウイックに対して提出されている、次式の矢木・国井の式¹⁾を用いて算定した。

$$k_{eff} = k_l \left\{ + \frac{1 - \dots}{+ (2/3 \phi k_l / k_s)} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 k_l および k_s は、それぞれ液 - ウイック領域における液相および固相の熱伝導度であり、

$$i = \frac{2 + (1 - \dots) \dots}{\ln \{ \dots \} - \dots} \dots\dots (11)$$

$i=1, 2$
 $\theta_1=54.74^\circ, \theta_2=22.33^\circ, \dots = k_s/k_l$

である。また、熱伝達係数 h は実験結果から算定し、グリッドサイズに関する事前の検討結果から、ペーパーチャンバ内に467(半径方向)×48(軸方向)のグリッドを設けた。

図5に $q=24W/cm^2, T_{air}=25$ におけるペーパーチャンバ

内の速度分布および温度分布を示した。なお、図中の破線は蒸気領域と液 - ウイック領域、もしくは液 - ウイック領域と固体壁領域との境界を示す。また、液 - ウイック領域における液の速度は、蒸気領域における蒸気の数値と比較して極めて小さいので、図中には現れていない。液 - ウイック領域および固体壁領域において、熱源に近い部分では温度勾配が大きくなるが、ペーパーチャンバ上面の温度はほぼ均一になっており、熱源の熱がヒートシ

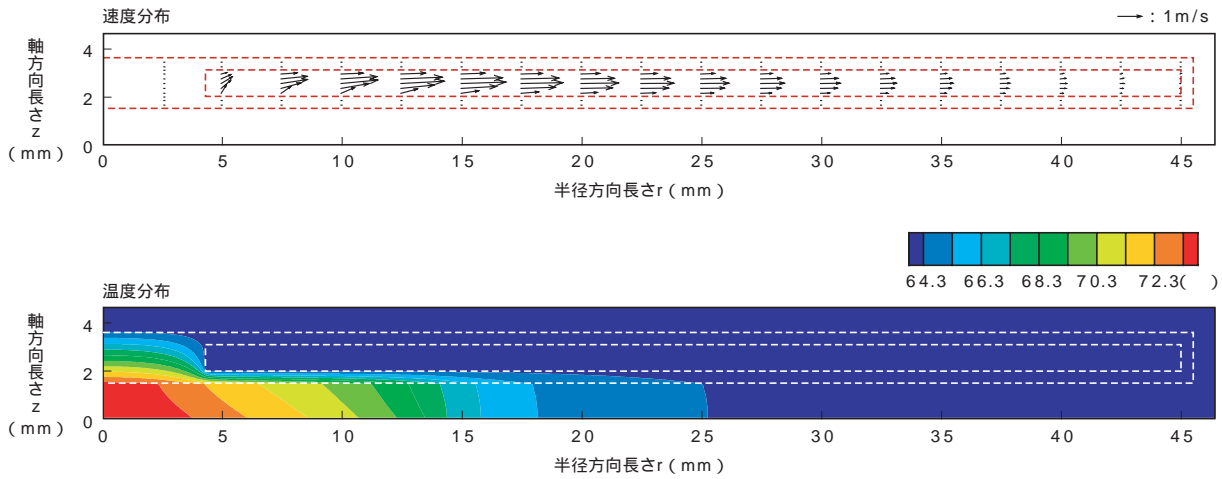


図 5 ベーパチャンバ内の速度分布および温度分布 ($q=24W/cm^2$, $T_{air}=25$)
Velocity and temperature distribution inside the vapor chamber ($q=24W/cm^2$, $T_{air}=25$)

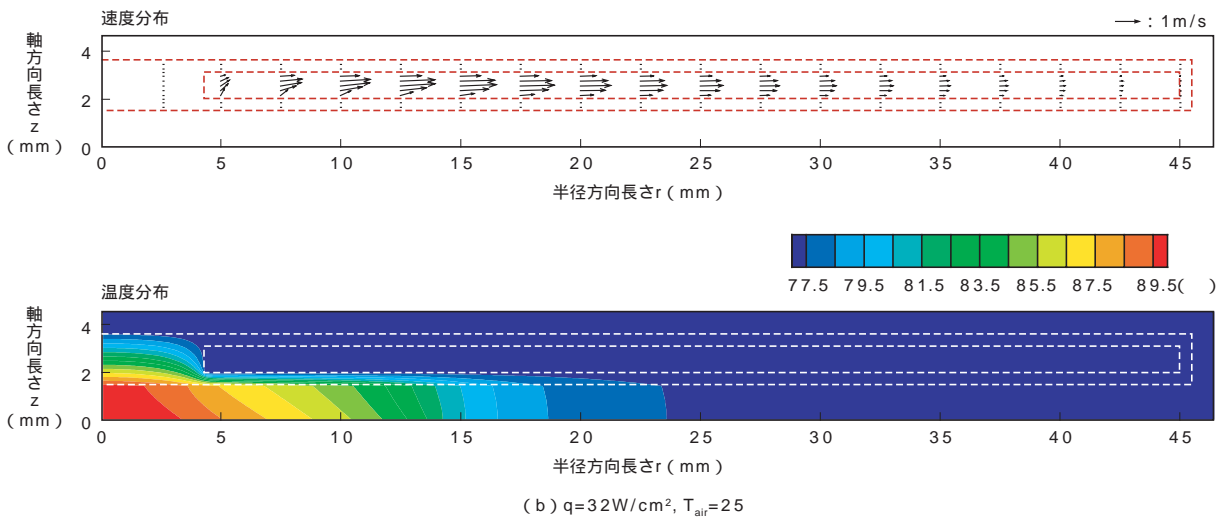
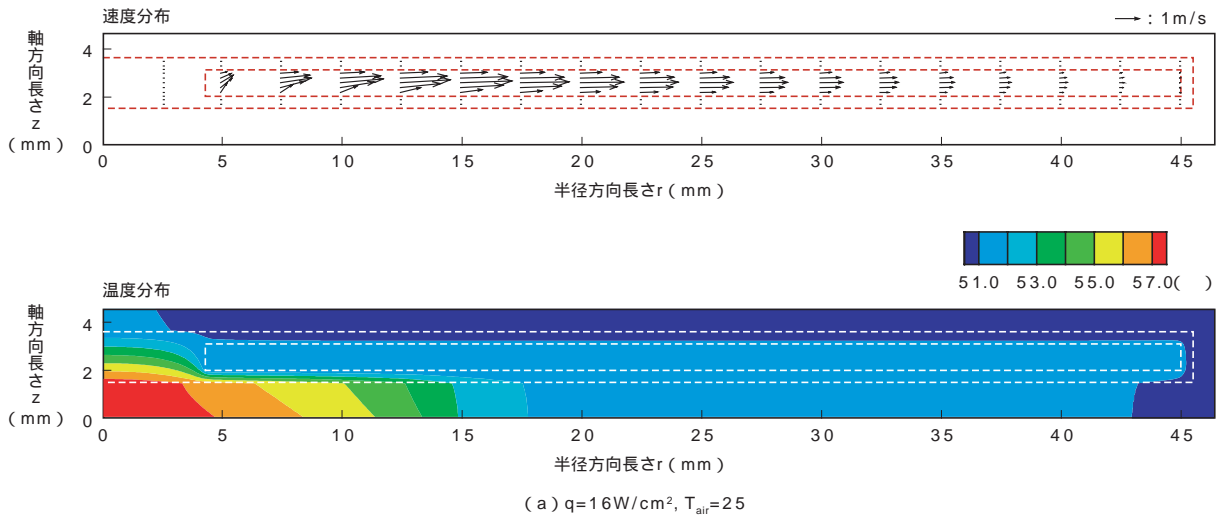


図 6 ベーパチャンバ内の速度分布および温度分布に及ぼす熱流束 q の影響
Effect of q on the velocity and temperature distributions inside the vapor chamber

ンクに均一に拡散していることがわかる。ベーパチャンバ内では、作動液が熱源からの熱を受け取り蒸発し、蒸気は広がりながら上面に向かって流れる。上面では蒸気

が凝縮し、凝縮液はウイックにより下部へと還流されるが、この一連のプロセスにおいて、熱源の熱を広く拡散させヒートシンクへと伝えることから、前述した効率の

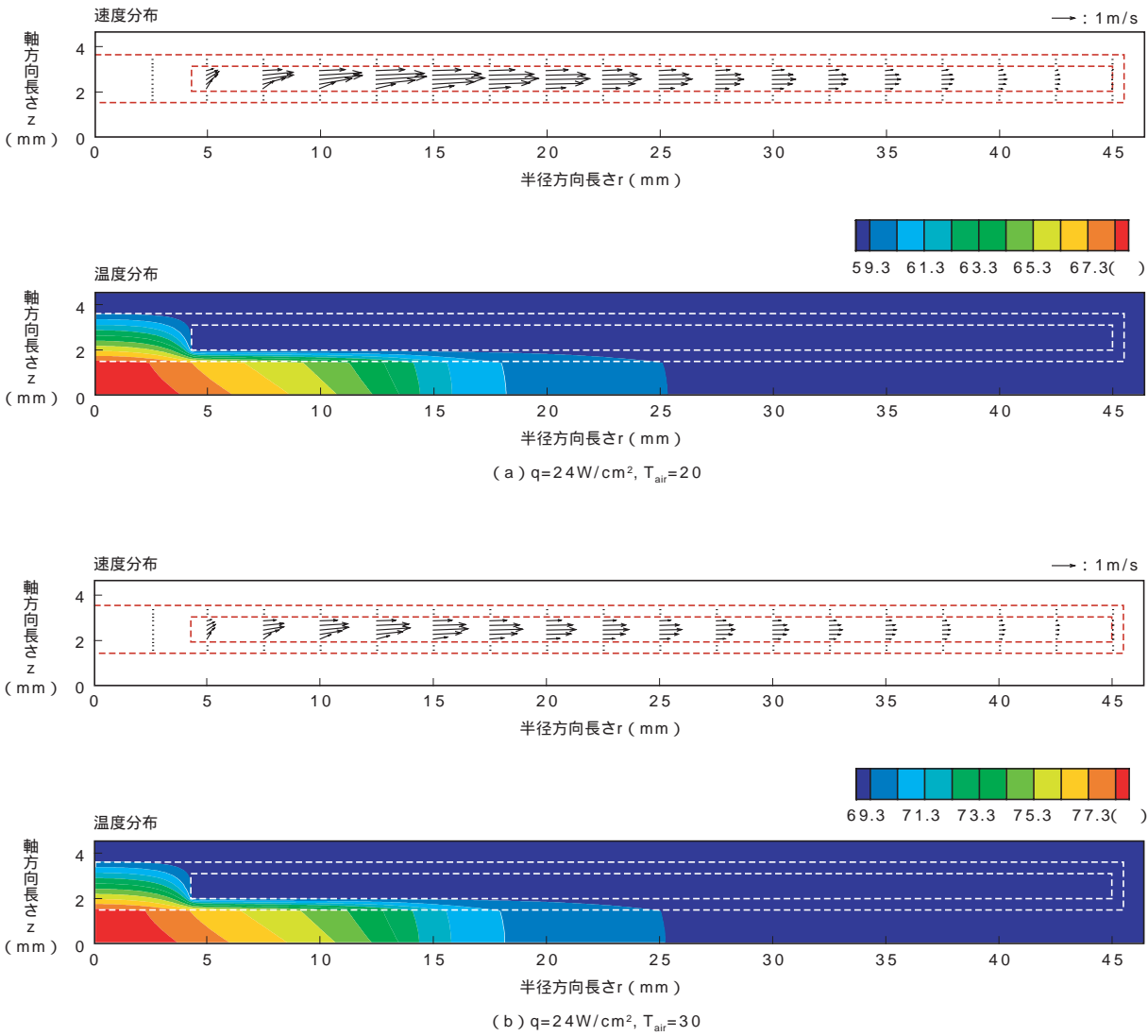


図7 ペーパーチャンバ内の速度分布および温度分布に及ぼす冷却空気温度 T_{air} の影響
Effect of T_{air} on the velocity and temperature distributions inside the vapor chamber

良い放熱が達成される。蒸気領域における蒸気の数値については、軸方向成分よりも半径方向成分の方が大きく、また、 $r=14.1\text{mm}$ 、 $z=2.7\text{mm}$ において最大値 1.88m/s となる。

図6および図7にそれぞれ、ペーパーチャンバ内の速度分布、温度分布に及ぼす q および T_{air} の影響を示した。計算条件に関わらず、液 - ウィック領域および固体壁領域において、熱源に近い部分では温度勾配が大きくなるが、ペーパーチャンバ上面の温度はほぼ均一になっていることがわかる。 $q=16 \sim 32\text{W/cm}^2$ 、 $T_{\text{air}}=20 \sim 30$ の範囲においては、 q または T_{air} が減少するにつれ、蒸気領域における蒸気の数値が増加しているが、これは温度の低下に伴って蒸気の数値が減少し、気液界面における蒸発速度が増加するためである。

5. 実験結果との比較

数値シミュレーション結果の妥当性を検証するため、ペーパーチャンバ上面の平均温度 T_t および熱源と接しているペーパーチャンバ下面の中心温度 T_b について、数値シ

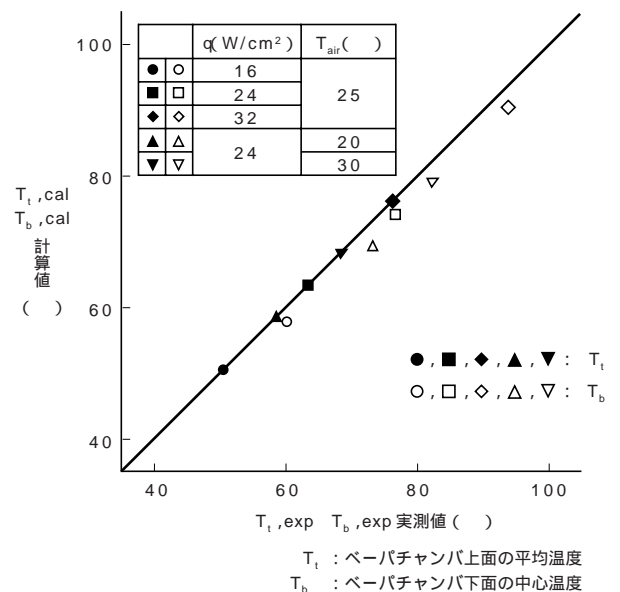


図8 数値シミュレーション結果と実験結果との比較
Comparison between the numerical simulation results and the experimental results

シミュレーション結果と実験結果を図8において比較した。熱伝達係数 h を実験結果から算定しているため、 $\langle T_{t,cal} \rangle$ と $\langle T_{t,exp} \rangle$ は一致し、また、 $T_{b,cal}$ と $T_{b,exp}$ が良く相関していることから、本数値シミュレーションコードの妥当性が確認された。

6.むすび

新型熱拡散板として開発された“ペーパーチャンバ”について、その内部で生じている熱流動現象を解析し、現象解析に基づいた設計資料を提出するため、数値シミュレーションコードを開発した。蒸気領域、液-ウィック領域、固体壁領域から構成されるペーパーチャンバの数値

シミュレーションモデルを構築し、それぞれの領域における連続の式、運動量の式およびエネルギー式を数値解析した。

ペーパーチャンバ内における速度分布および温度分布が可視化され、熱流動現象に及ぼす諸因子の影響を明らかにすることができた。また、数値シミュレーション結果が実験結果と良く一致したことから、本数値シミュレーションコードの妥当性が確認された。

参 考 文 献

- 1) 日本ヒートパイプ協会編：実用ヒートパイプ，第2版，pp.30-31，2001，日刊工業新聞社