



## 1 緒言

快適な室内環境を整えるためには、室内の温度分布・気流分布を事前に予測した計画が重要である[1]. 室内空調をおこなうためには通常エアコンを設置するわけであるが、エアコンの性能(容量, 風量, 風向等)及び取り付け位置に関し設計の際注意すべき点が多い. 実際の部屋では、外気との温度差により壁面からの熱通過が生じ、壁が断熱であると仮定することには無理があり、壁面における伝熱量を見積もることは重要である. とくに暖房時には一般に室温と外気との温度差が大きく、伝熱量が多くなるばかりでなく、熱通過率が大きいガラス窓があると、その近辺で室内空気が冷やされ、特に寒く感じ不快となるコールドドラフトと呼ばれる現象が起こることも知られており、建物の外部との伝熱特性を詳細に知ることは極めて重要である. Hanibuchi and Hokoi[2] は、壁面の熱通過を考慮した室内の温熱環境解析を行っているが、壁面での表面熱伝達率を、定数と仮定して与えている. 壁面の熱伝導や外部への熱伝達を加味した、中空矩形物体の冷却過程を求めるとき、表面熱伝達率を空気調和衛生工学便覧[3]より選び、壁面での温度勾配を考えて数値計算を行う際は、熱伝達率を各壁面で一定として取り扱うことになる. しかし、温度分布等の室内環境を正しく計算により求める為には、壁面温度の影響により生ずる自然対流を正しく予測することが必要である. 速度場、温度場は、時間、場所により変化するため、壁面での熱伝達率を一定として扱うことが出来ず、壁を通過する熱量を正しく評価しながら計算を進める必要がある. そこで本論文では、高温中空物体の冷却過程の伝熱特性を調べるため、壁面での熱伝達率の仮定を用いずに壁面と空気との境界条件を設定した計算[4]を実行し、温度の時間推移について計算結果と実験結果の比較し、計算法の有効性を示す. さらに、数値計算結果を用いて中空矩形物体からの伝熱特性を報告する.

## 2 実験

### 2.1 実験方法

図1に示すポリスチレンボード( $\lambda=0.06$  W/(m·K))で作られた、一辺0.1 mの中空矩形物体を用意した. 壁の厚さは0.005 mである. はじめに物体壁と内部の空気は300 Kに設定してある. 263 Kに保たれた

冷凍庫内に入れて温度変化を測定した. この物体は温度測定用熱電対により空中につるされており、他の物体とは接触していない. 図1に示す様に、温度測定点は、外壁表面中心(LOC. A), 内壁表面中心(LOC. B), 矩形物体中心(LOC. C)とした. 温度測定に用いたのは、直径0.3 mmのK(クロメル-アルメル)熱電対である.

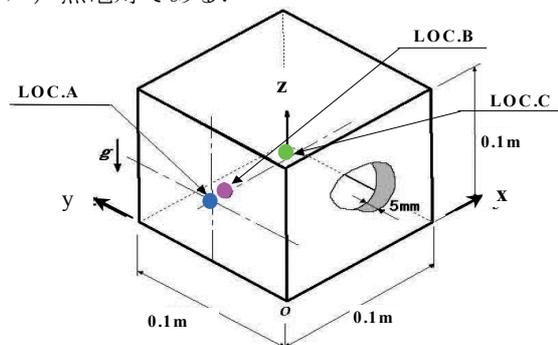


Fig. 1 Cubic shell.

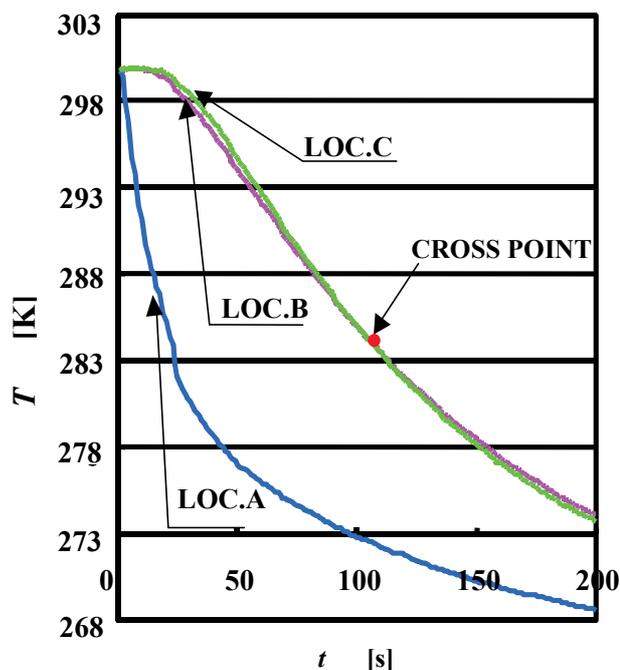


Fig. 2 Temperature variation (Exp.).

### 2.2 結果

図2は、各測定点における温度の時間推移を示している. 外壁表面中心温度は、実験開始直後から低温の外気にさらされ、大きく下がってゆく. 一方内壁表面中心温度、矩形物体中心温度は外壁表面中心温度と異なり、すぐに温度が急激に下がることなく、ほぼ一定の値を保ち、16 s程度たってから下がりをはじめており、壁面内部温度の下降にはタイムラグが存在する. 壁に熱エネルギーが蓄えられており、そのエネルギーがいわばバッファの役割をするためにこ

のような特徴を示すものと考えられる. 105 s 付近においては内壁表面中心温度と矩形物体中心温度は等しくなることがわかる(Cross Point). さらに時間が進むと内壁表面中心温度の方が, 内側矩形物体中心温度より高くなっており, 逆転現象が起こっている. 内壁表面中心温度, 矩形物体中心温度は, 実験開始後 200 s で, ほぼ 274 K まで冷却される.

### 3 数値計算

#### 3.1 基礎方程式

自然対流での気流の速度は音速に比べて十分小さいので非圧縮性流体として扱うことができる. 従って基礎方程式として連続の式(1), 及びナビエ・ストークス方程式(2)及びエネルギーの式(3)を用いる. 物体表面から放射される輻射熱を考慮するため(4)式を用いた[5].

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \left\{ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right\} = -\nabla P + \rho \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \beta g \Delta T \tag{2}$$

$$\rho C_p \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T \right\} = \lambda \nabla^2 T \tag{3}$$

$$Q_r = \sigma \varepsilon A_w (T_w^4 - T_\infty^4) \tag{4}$$

温度変化による密度変化が浮力をとおしてのみ流体の運動に影響を与えると考え, 重力項にブシネスク近似を用いた. さらに流速が小さいため, 運動エネルギーが内部エネルギーにくらべ小さいと考えた. また, 粘性による散逸も無視できると仮定した. 壁内部を熱伝導問題として解く場合は, (3)式で  $\mathbf{u} = 0$  m/s とすればよい. (1), (2)式により浮力の影響と誤差修正項を加えた圧力のポアソン方程式として,

$$\nabla^2 P = -\rho \cdot \nabla (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \rho \frac{D^m}{\Delta t} + \rho \nabla \cdot \beta g \Delta T \tag{5}$$

が求められる.  $D^m$  はタイムステップ  $m$  における  $\nabla \cdot \mathbf{u}$  を示す.  $\Delta T$  は温度差である. なお放射率  $\varepsilon$  は放射温度計 TVS-600 (日本アビオニクス製) を用いて実測し,  $\varepsilon = 0.80$  を用いた.

#### 3.2 差分法

MAC 法に従い(2)と(5)式を用いて速度と圧力を計算した. 空間における近似は, 速度の対流項には, 三次精度を持つ風上差分[5]を用い, 拡散項および圧力には, 二次精度の中心差分を用いた. さらにエネ

ルギ式(3)の取り扱いについては, 対流項計算は, 一次精度の風上差分とし, 熱伝導項については二次精度の中心差分を適用した. 時間積分に関しては, (2), (3)式とも二次精度を持つクランク・ニコルソン法を用いた.

#### 3.3 初期条件

$t = 0$  s で速度  $\mathbf{u} = 0$  m/s. 圧力  $P$  については, 数値計算の場合は, 圧力差のみを扱うので,  $P = 0$  Pa とした. 中空矩形物体内部空気温度, 壁面温度を 300 K, 外部空気温度を 263 K に設定した.

#### 3.4 計算領域及び格子

本計算では表面熱伝達率を仮定しないので, 熱流出量进行评估するため, 物体の外部空間を計算領域に取り込む必要がある. 外部空間は一辺 0.3 m の立方体とし, 厚さ 0.005 m のポリスチレンで作られた一辺 0.1 m の中空矩形物体が中心に置かれている (図 3). 計算格子として不等間隔直交格子を用いている. 格子数は  $94 \times 94 \times 94$  で, 壁面内部には 4 点の格子を配置してある.

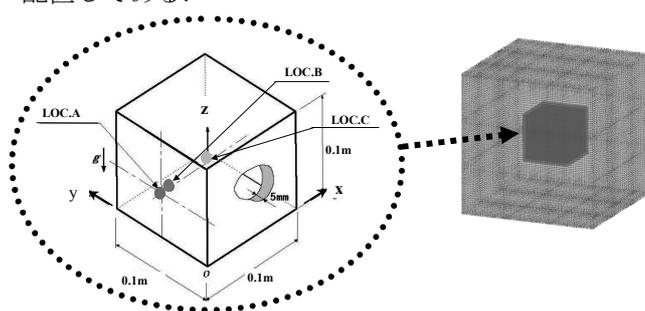


Fig. 3 Computational domain.

- : node in the wall
- ▲ : node in the air
- : node on the boundary wall
- △ : node next to the boundary wall

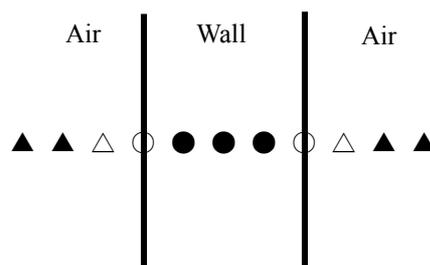


Fig. 4 Temperature boundary condition.

### 3.5 温度境界条件

壁面での温度境界条件を図4に示す。まず、壁面部のみを熱伝導方程式を解くことにより計算する。壁と空気の接触面における壁面と空気温度は一致すると仮定し、空気と接している壁面の温度 $\circ$ を求めるときは、1点隣の空気の温度 $\Delta$ を境界条件として用い、壁面境界 $\circ$ と内部 $\bullet$ の温度を求める。 $\bullet$ 及び $\circ$ の温度が決った後 $\Delta$ の温度を境界条件として矩形物体内部及び外部空気温度をエネルギー方程式(3)を解いて求める。その他の温度境界および圧力境界条件については1次外挿とした。速度境界条件については、壁面については滑りなし条件を、その他の場所については1次外挿を適用した。

### 3.6 温度変化 (実験との比較)

中空矩形物体を冷凍庫の中に突然置いたとして計算を開始した。なお、時間刻みは0.001 sである。図5に実験と対応する点の温度変化を示す。外壁表面中心(LOC.A)温度は、263 Kに冷やされた冷凍庫に入れた瞬間から著しく低下する。内壁表面中心(LOC.B)温度、及び矩形物体中心(LOC.C)温度は、すぐには温度が下がらず、11 s程度経過してから下がり始める。壁面内部2点の温度低下にはタイムラグがあることがわかる。ほぼ115 sの時点で内壁表面中心温度と矩形物体中心温度が等しくなり、さ

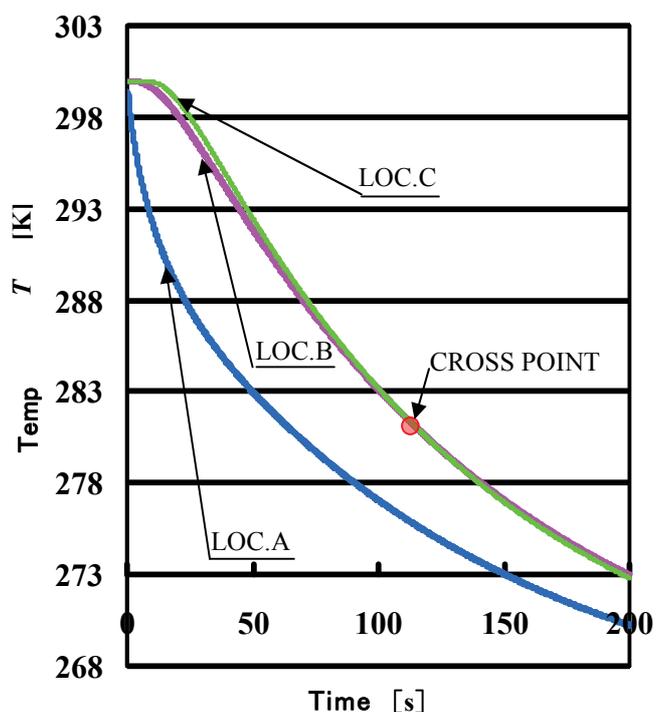


Fig. 5 Temperature variation (Comp.).

らに時間が経過すると内壁中心温度より矩形物体中心温度の方が低くなっている。即ち、温度が交差する点(Cross Point)が認められる。200 sでは内壁中心温度及び矩形物体中心温度はほぼ273 Kである。

本計算結果の特徴は実験結果の特徴とかなり良い一致を示している。本計算方法により得られた結果を用いて、中空矩形物体内部及び外部の自然対流による流れ場、温度場の解析及び伝熱特性の考察を行うこととする。

### 4 計算結果及び考察

まず、Cross Pointでの中空矩形物体内部の様子を調べるために図6-8を示す。図6は $t=115$  sにおける $T=280.95$  Kの等温度面を斜め下方から見上げた図である。LOC.C周辺では、等温度面が全体として上方に移動しており、上向きにくぼんでいる。これは、内部壁面近傍で冷やされた空気が下の面へと向かい、集まった流れが中心へとおしやられ上昇気流

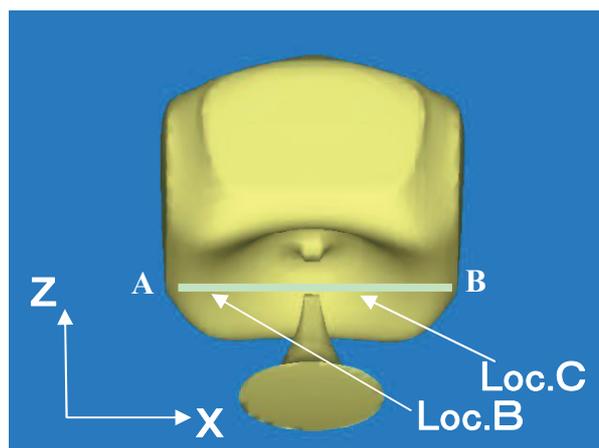


Fig. 6 Temperature contour (Cross Point:  $T=280.95$  K,  $t=115$  s).

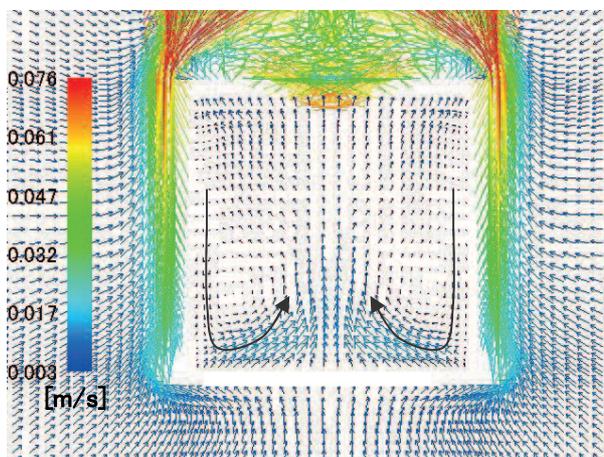


Fig. 7 Velocity vector ( $y=0.05$  m,  $t=115$  s).

が存在した結果である。このことは、図7に示す、図6と同時刻の速度ベクトル図からも見て取れる。壁面近傍では下向きの流れが生じ、中心ではその流

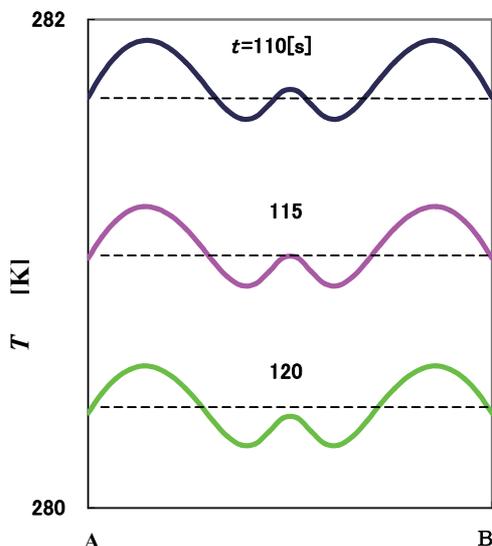


Fig. 8 Temperature distribution (A-B in Fig. 6).

れが上昇気流となって渦状の流れとなっている。図8は、図6に示すA-B間の温度分布をCross Pointが現れる前後の時刻について示したものである。LOC. BとLOC. Cの間に高温域が形成されている。t=115s以降LOC. BとLOC. Cの温度の高低が逆転していること即ちCross Pointが現れることがこの図からも読み取れる。

図9は、図7と同一断面の等温度図と速度ベクトル図である。中空矩形物体外側の様子も良くわかるように示してある。計算開始直後(t=1.6 s) 壁の部分の温度低が認められる。壁面からの熱により暖められた空気は上昇気流となっている。上面から離れる際、少々内側に曲げられてから上方に向かっている。また渦を形成しはじめていることも認められる。t=4 sの図を見ると側面を浮力により上昇してきた流れがコアンダ効果により上面の中心方向に曲げられていることがわかる。この曲げられた流れは、表面中心方向に集まって上昇気流にかわる。時間が経過すると内部の温度は低下し、上昇気流も弱くなり、速度も減少してゆく。

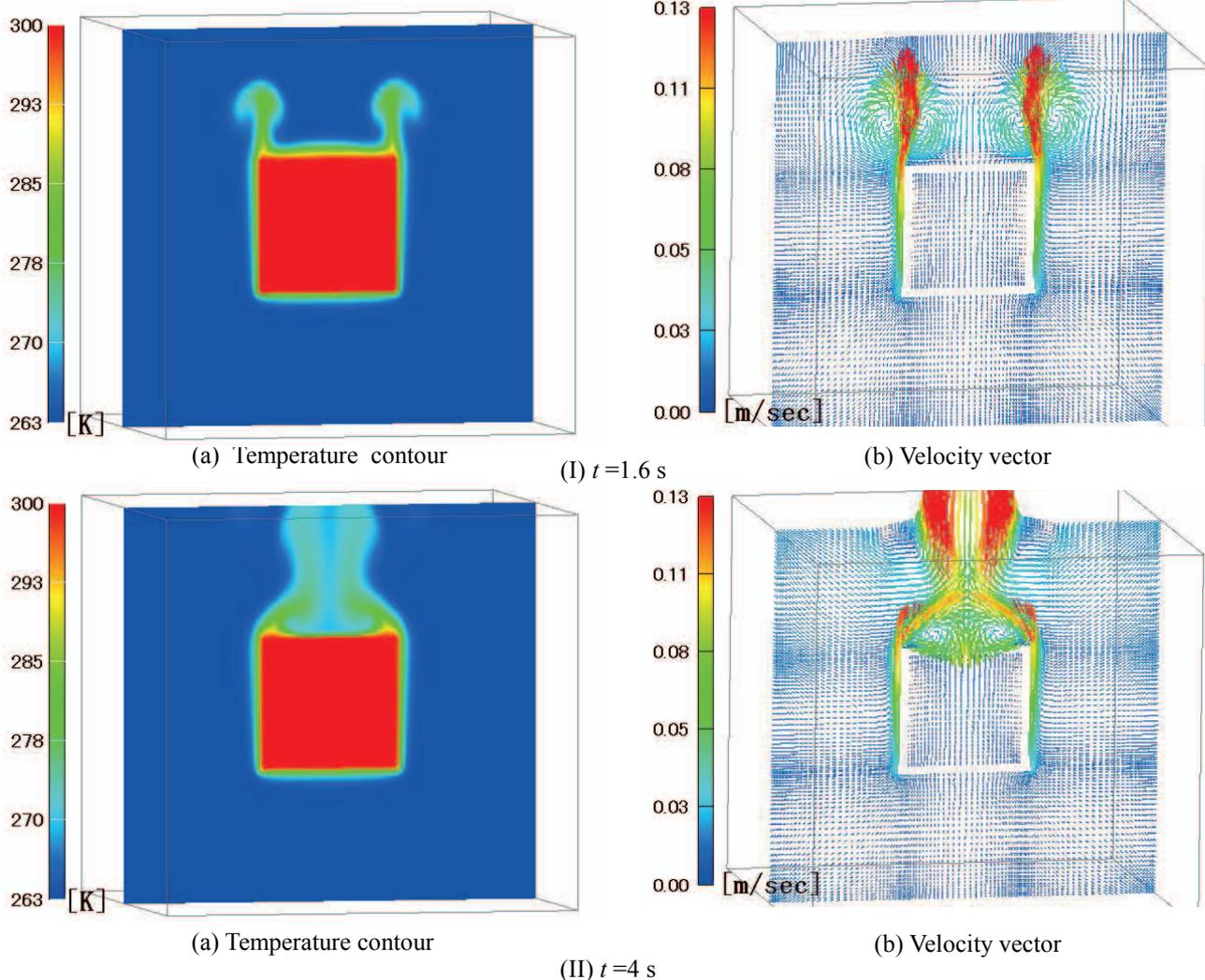
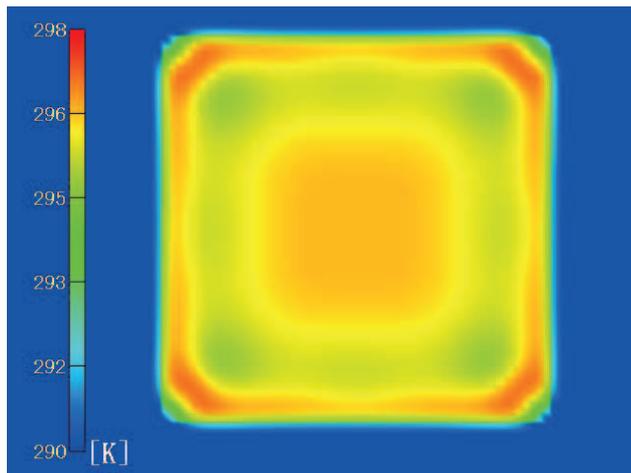
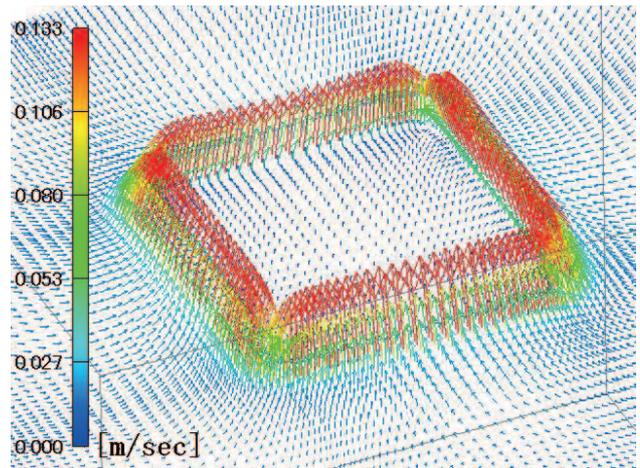


Fig. 9 Temperature contour & velocity vector ( $y=0.05$  m).

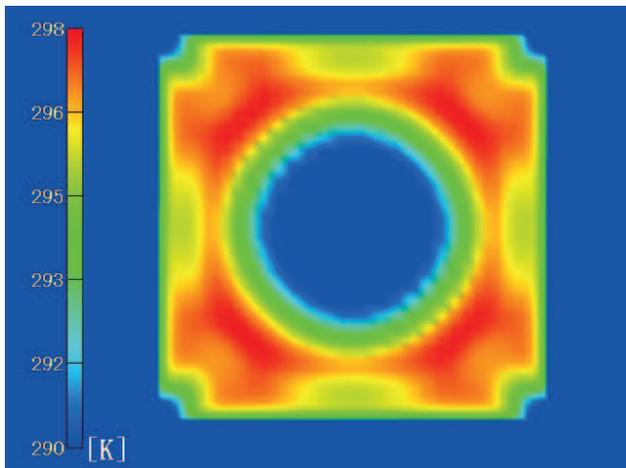


(a) Temperature contour

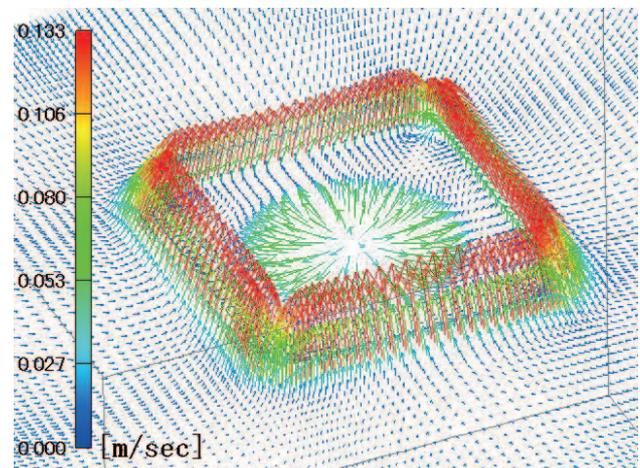


(b) Velocity vector

(I)  $t=2$  s

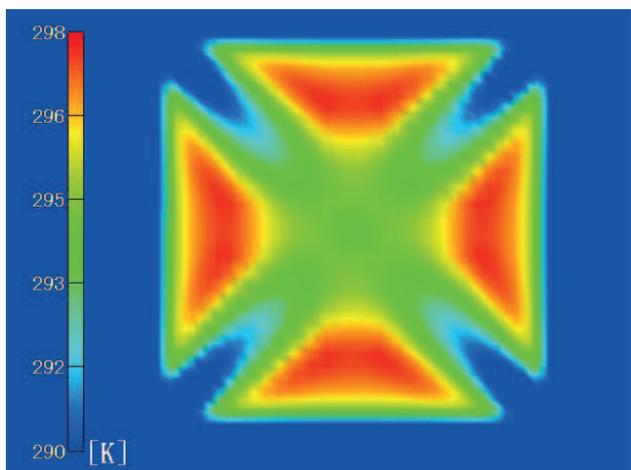


(a) Temperature contour

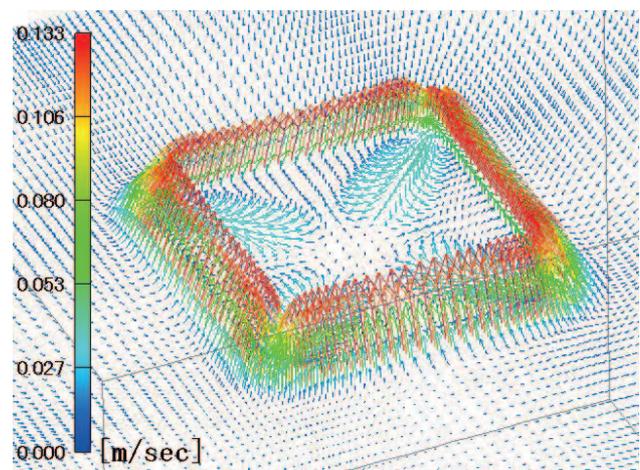


(b) Velocity vector

(II)  $t=3.4$  s



(a) Temperature contour



(b) Velocity vector

(III)  $t=7$  s

Fig. 10 Temperature contour & velocity vector (One mesh outside the top wall).

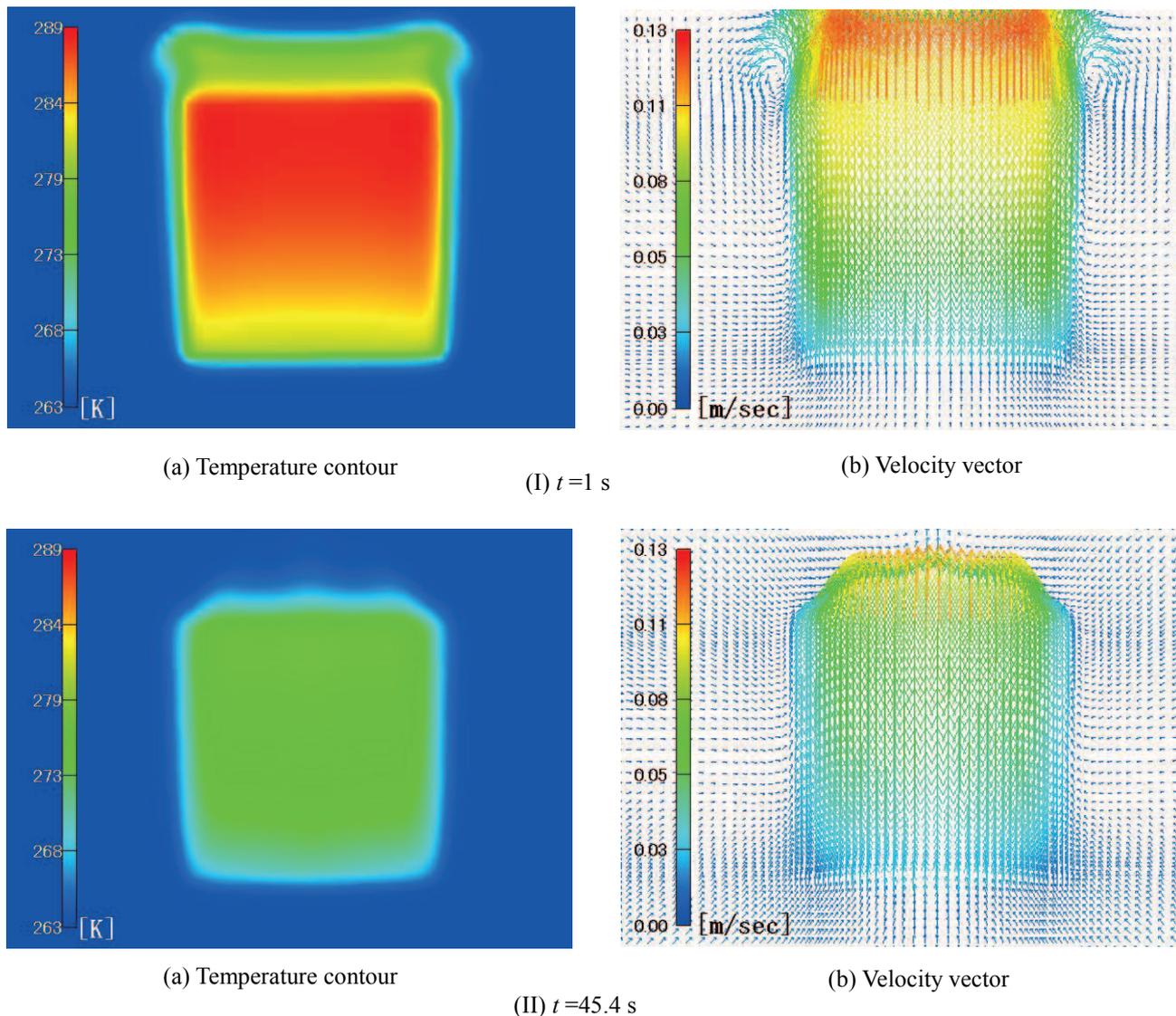
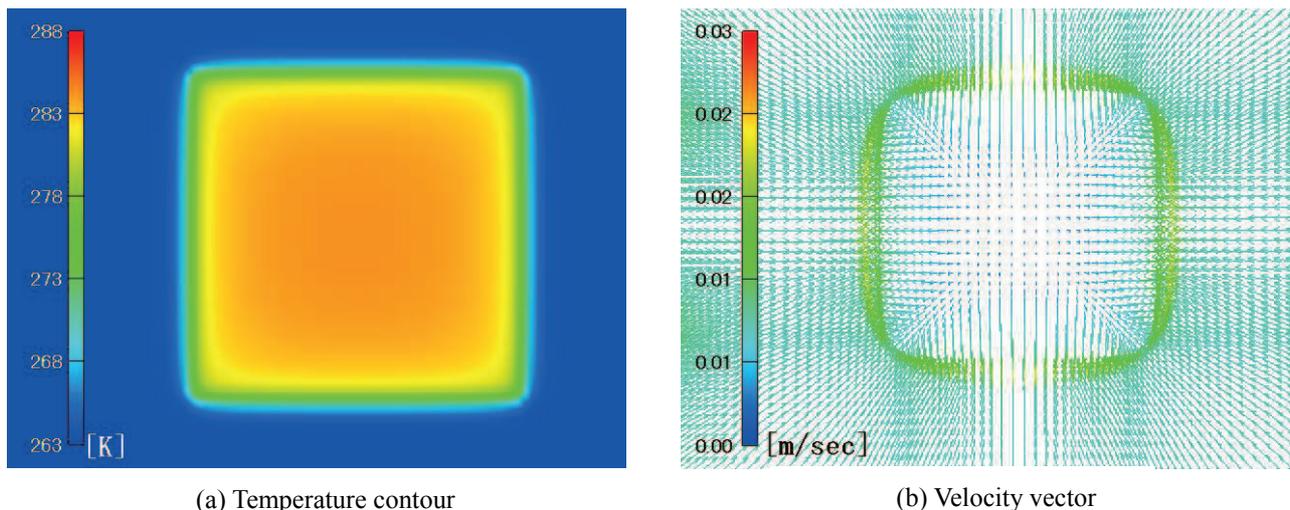


Fig. 11 Temperature contour & velocity vector (One mesh outside the side wall).

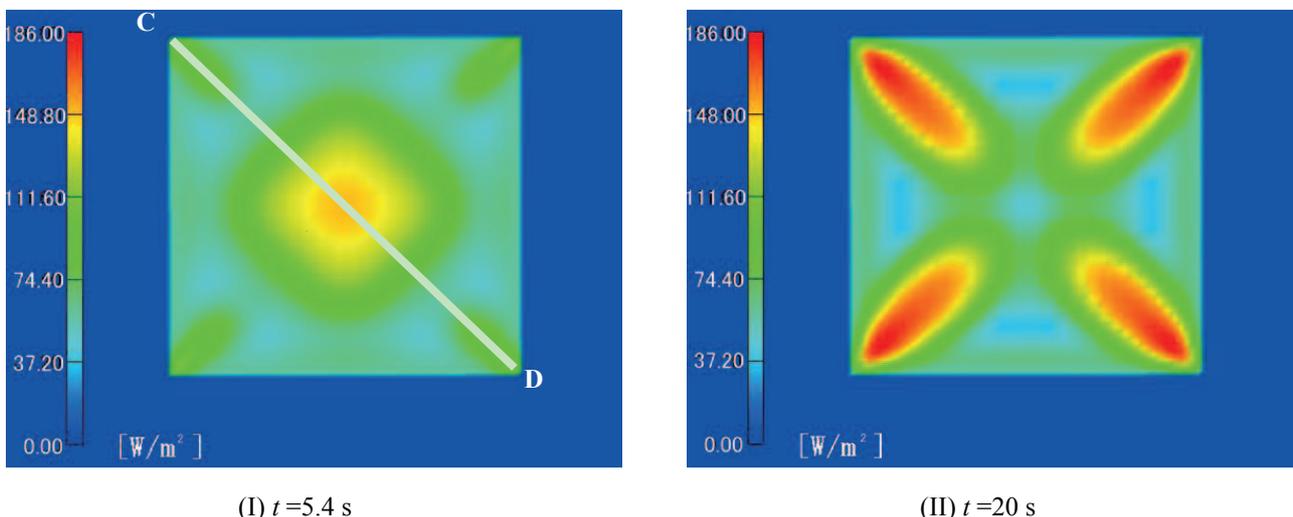
中空矩形物体上壁での1格子外側の面の等温度図と速度ベクトルの時間推移を示したのが図10である。計算開始後  $t=2$  s で、すでに上面の4ヶ所の縁から上昇流が発生している。このベクトルの方向を見ると、少々内側にかたむいている。そのため上壁の縁の内側に温度の高い領域が形成されているものと考えられる。 $t=3.4$  s の図をみると、中心部に円形の温度の低下した領域が形成されている。ベクトルの方向から考えてかなり突発的に上方に向かう流れが生じたために、比較的少量の熱が移動したものと思われる。その後は  $t=7$  s の図に示す様に、上壁四隅から中心に向かう流れが認められ、その部分の流れによって熱を奪われる為、温度が周囲より低くなっている。この特徴は、かなり時間経過するまで変わらない。

図11は、側壁の1格子外側の面について、計算開始後1sと45.4sでの、等温度図と速度ベクトル図である。1s後にはすでに壁端面が冷やされていることがわかる。さらに下壁に近い領域で温度が低下している。側壁に沿って上昇する流れが形成されており、境界層が薄く伝熱量が多くなるものと考えられる。流れの速度は上方ほど大きくなっている。 $t=45.4$  s の図では温度は全体に低下しておりほぼ一様となっている。流れの速度も小さくなっている。

図12は下壁の1格子外側の面での等温度図及び速度ベクトル図である。 $t=2$  s のデータを示す。壁端面の温度が低くなっている。その他の部分はほぼ一様に冷却されていることがわかる。流れの速度は下壁中心で最大となっているが全体的に小さい。時間が推移しても、この特徴はあまりかわらない。



(a) Temperature contour (b) Velocity vector  
 Fig. 12 Temperature contour & velocity vector (One mesh outside the bottom wall,  $t=2$  s).



(I)  $t=5.4$  s (II)  $t=20$  s  
 Fig. 13 Heat flux contour (top wall).

中空矩形物体の伝熱特性を調べるため、壁内部での壁面垂直方向の熱流束を、

$$Q = \lambda_w \frac{\partial T}{\partial n} \tag{6}$$

より求める。温度境界条件が1次精度である為、温度勾配は壁外面上の点と1格子内側の点の値を用いて差分により求めている。上壁の等熱流束図を図13に示す。 $t=5.4$  sにおいて、中心付近での値が大きくなっている。上壁の等温度図(図10)における $t=3.4$  sで認められる突発的な気流上昇に伴って、熱流束が大きくなっているものと考えられる。上面四隅から入ってくる流れにより、温度が低下する部分の熱流束が大きくなり、 $t=20$  sでははっきりと四隅での放熱量が大きくなる。この状態がかなり長い間続くことが認められる。

図14にC-D間(図13参照)の熱流束分布の時間

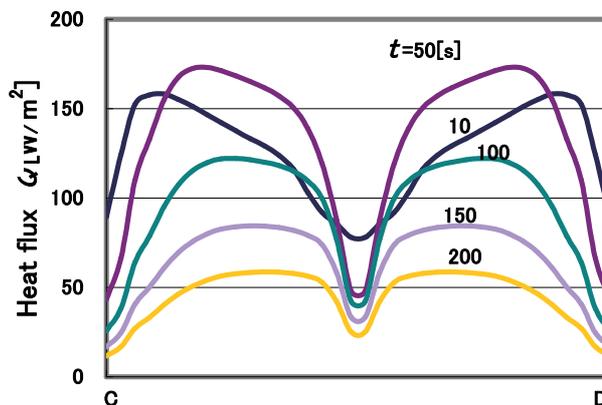


Fig. 14 Time variation of heat flux (C-D in Fig. 13).

推移を示す。上壁付近での流れ、特に四隅から中心方向に向かう流れが顕著なるため、 $t=50$  sの時の方

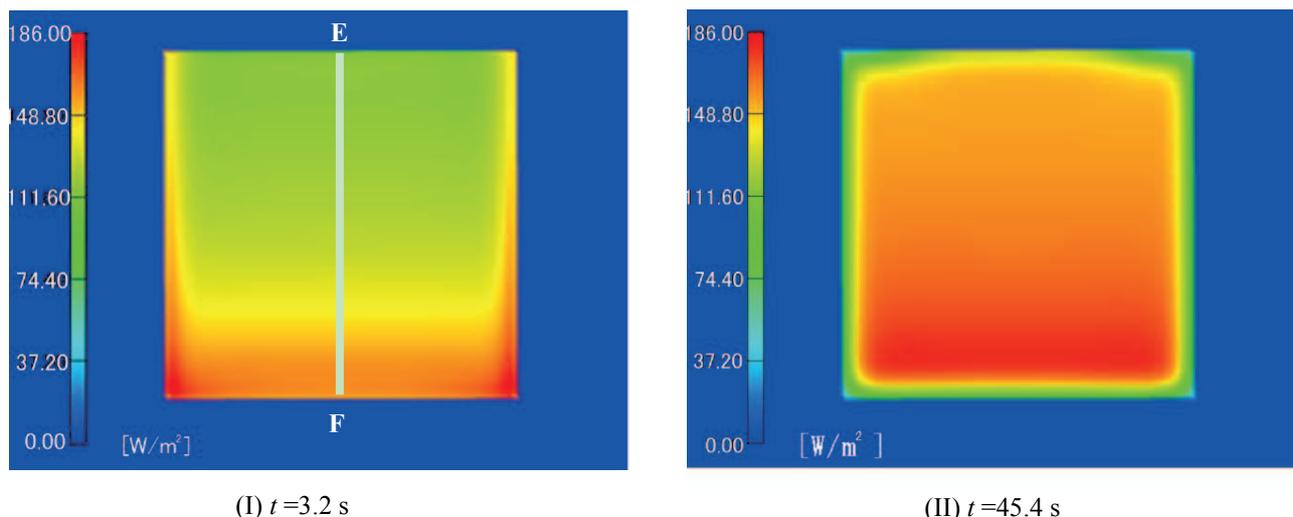


Fig. 15 Heat flux contour (side wall).

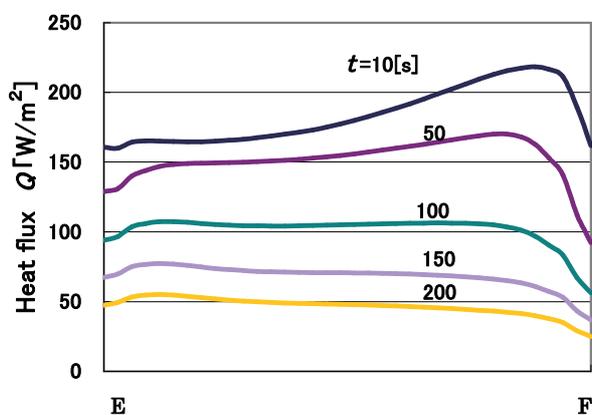


Fig. 16 Time variation of heat flux distribution (E-F in Fig 15).

が  $t=10$  s 時より、熱流束は全体的に大きくなっている。それ以降は時間経過と共に減少する。熱流束分布の最大値が現れる場所は、時間経過とともに中心方向へ移って行く。これは四隅に近い所から冷やされてゆくことに対応すると考えられる。上壁中心部での熱流束は小さい。四隅からの流れが、中心部に到達する前に上方に向きをかえるため、中心付近では強い流れが生じていないためと考えられる。

図 15 に側面の等熱流束図を示す。計算開始直後 ( $t=3.2$  s) 側壁下部の熱流束が大きいことがわかる。下部では、側面に沿う自然対流による流れの速度は上部に比べ小さいが (図 11)、境界層が薄いため熱が伝わりやすくなっているものと考えられる。縁の部分ではより上部まで熱流束の大きい部分がのびている。 $t=45.4$  s の図を見ると、面上部の熱流束も増加しているが、やはり面下部における熱流束の方がより大きいことが認められる。縁の部分はすでに冷却されているので熱流束は小さくなっている。E-F 間 (図 15 参照) の熱流束分布の時間推移を図 16 に示す。計算開始後しばらくは下部の熱流束が上部より大きいことが確認できる。 $t=100$  s 程度経過すると

上部と下部の値はほとんど等しくなり、その後は上部のほうが大きくなる。下部が先に冷却された結果である。

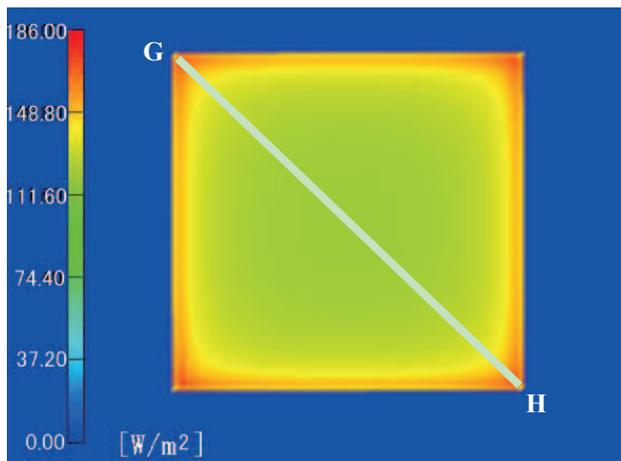
下壁における熱流束の図を図 17, 18 に示す。図 17 において、 $t=3.2$  s においては、底面の縁近傍の熱流束が中心部より大きくなっているが、 $t=45.4$  s では、中心部の方が大きい値を示す。このことは、図 18 でも確かめられる。 $t=10$  s では縁のすぐ内側で最大値をとり、中心部に向かって減少している。 $t=50$  s 経過時点では、一定値をとる領域が広がり、その後は中心部の方が周辺部より大きくなる。

図 19 に各壁における熱流束の面平均値  $Q_{mean}$  の時間推移を示す。計算開始直後はどの面でも自然対流による流れが発達していないので、その値は小さく、しばらく時間が経過してピークをむかえ、その後は減少する。上壁において  $t=3\sim 4$  s あたりで突発的な流れが発生することがわかったが、それに対応して、熱流束値の傾きにわずかながら変化が認められる。 $t=98$  s 付近までは、熱流束は側壁、下壁、上壁の順に大きい、それ以降は上壁と下壁の大きさが逆転している。側面からの熱流束が 1 番大きいことが特徴的である。

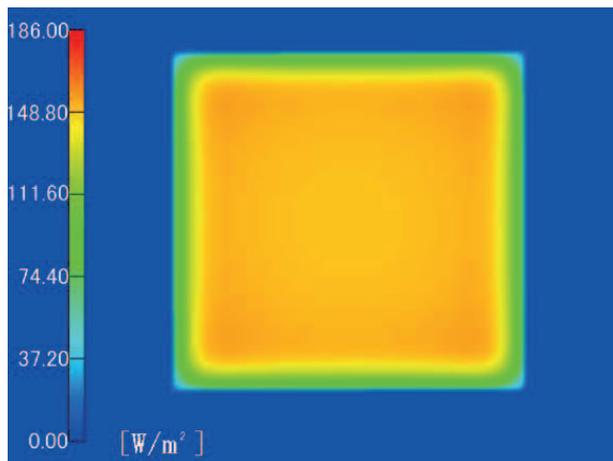
壁外面から外気への表面熱伝達率  $\alpha$  を通常用いられる方法、

$$\alpha = \lambda_{air} \frac{\partial T}{\partial n} \bigg/ (T_{out} - T_{wout}) \quad (7)$$

で定義し、その面平均値  $\alpha_{mean}$  の時間推移を図 20 に示す。温度勾配は壁外面と 1 格子空気側の点の値を用いて差分により求める。 $T_{out}=263$  K ( $T_{wout}$  は壁外面の温度) である。計算開始直後は  $T_{out}-T_{wout}$  の値が非常に小さいため  $\alpha$  が極端に大きくなる値をとる。そこでこの領域を除いて考察することにする。上壁



$t=3.2$  s



$t=45.4$  s

Fig. 17 Heat flux contour (bottom wall).

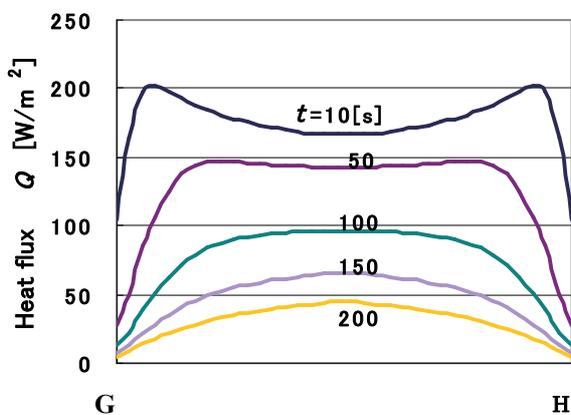


Fig. 18 Time variation of heat flux distribution (G-H in Fig. 17).

に注目すると、 $t=3\sim 4$  sにおいて、大きな変化がみられる。これは、図 10 で示した突発的な流れの発生に対応しているものと考えられる。発生表面熱伝達率は流れの影響が大きいと考えられ、図 19 における熱流束より変化が顕著になっている。平均熱伝達率で整理しても大きさは側壁、下壁、上壁の順で側面が最大値をとる。上面はピークとなるのが  $t=100$  s を超えてからで、その後は減少中は小さい。一方側面、下面は減少を続ける。

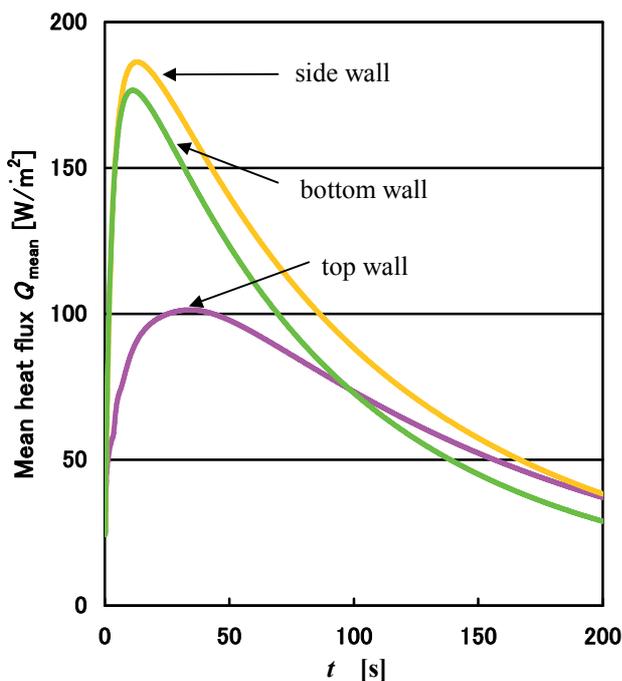


Fig. 19 Time variation of mean heat flux.

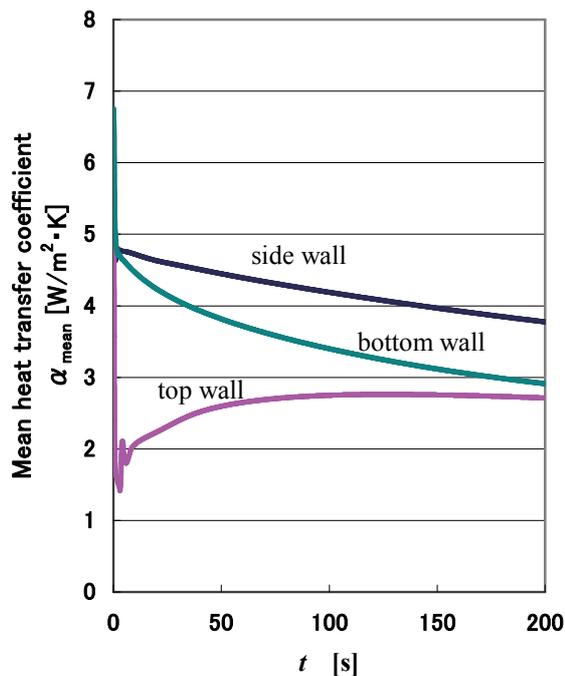


Fig. 20 Time variation of mean heat transfer coefficient.

## 5 まとめ

高温に保たれた中空矩形物体の冷却時の伝熱特性を調べるため、まず実験を行った。ポリスチレン中空矩形物体を冷凍庫に入れ、温度変化を測定した。

さらに実験結果と比較を行うため数値計算を実行した。矩形内部と外部の流体をナビエ・ストークス方程式、エネルギー方程式を差分法で解くと同時に、壁の部分に熱伝導方程式を適用して、差分法で解くことにより速度場、温度場を求めた。エネルギー方程式を解く際、表面熱伝達率の値を使用せず、図4に示す温度境界条件を用いた。温度変化が実験値と比較的良く一致することがわかり、本方法の有効性が確かめられた。

実験と数値計算から、与えられた条件下では、当初矩形物体中心温度の方が、内壁表面中心の温度より高いが、ある時点で等しくなり、その後逆転することがわかった。内側側面により冷却された空気が下降流となり、底面に沿って中心に集まり、中心軸付近で上昇気流となることによる。壁内の熱流束は、側壁、下壁、上壁の順となった。側壁でも下部の熱流束が大きい。外壁に沿う自然対流の流速は上部ほ

ど大きい。境界層が薄い。下部の熱流束が大きくなるものと考えられる。上壁では四隅からの流れの影響が大きく、流れが通過する部分の熱流束が大きくなるが、平面全体としては側壁、下壁より小さく、表面熱伝達率で比較してもやはり側壁の値がもっとも大きくなった。

## 参考文献

- [1] 村上周三, CFDによる建築・都市の環境設計工学 (2006), 83-98, 東京大学出版会.
- [2] Hanibuchi, H. and Hokoi, S., "A study on the numerical prediction of heat load and room temperature field", *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, (1996) 31-32.
- [3] 空気調和衛生工学会, 空気調和衛生工学便覧 空調編 (1981), 44.
- [4] Okura, M. and Ono, K., "Simulation of natural convection inside and outside a non-adiabatic hollow cube", *Report of the Research Institute of Science and Technology*, Nihon University, No. 484 (2004).
- [5] Kawamura, T. and Kuwahara, K., "Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness", *AIAA Paper*, 84-0340 (1984).