電子機器パッケージまわりの流れと熱伝達の可視化*

中村 元**, 五十嵐 保**

Visualization of Flow and Heat Transfer around a Low-Profile Block, Simulating a Package of Electronic Equipment

Hajime NAKAMURA and Tamotsu IGARASHI

1. はじめに

PCをはじめとする電子機器の小型化・高性能化に伴い、発熱部品をいかに放熱するかが重要な問題となっている。部品からの放熱は伝導・対流・放射によって行われるが、このうち対流による放熱は発熱体近傍の流れ(乱れ度)に大きく依存するため、これが把握できないと適切な機器の熱設計が行えない。

著者らは、日本機械学会 RC 181, RC 202 研究プロジェクトの中で、筐体(ノート型 PC と同程度の外形寸法を持つもの)の中に加熱ブロック(CPU パッケージを模擬したもの)を置き、それをファンで空冷する実験を行った^{1),2)}。その際、筐体内の流れはスモークワイヤ法で可視化し、加熱ブロック表面の温度分布/熱伝達率分布は赤外線カメラを用いて可視化した。本稿では、これらの可視化方法や手順をできるだけ詳しく説明すると共に、得られた結果の一例を紹介したい。

2. 実験模型

Fig. 1 に実験模型を示す。筐体はアクリル製で、高さ、幅、長さはそれぞれ $H_D = 10$ mm, $W_D = 200$ mm, 235 mm である。筐体の中央部には CPU パッケージを模擬した薄型の正方形ブロック(辺長 $L = 45$ mm, 高さ $H = 2$ mm)が置かれている。この正方形ブロックは、流れを可視化する時にはアクリル製とし、熱伝達測定の際には後述する伝熱模型(Fig. 5)を用いた。筐体の下流端には上面吸込み、背面吐出しタイプの扁平ファン(GB 0535 AEB 1-8, SUNON, 35 mm × 35 mm × 6 mm)が 3 個設置されている。各ファンには定電圧直流電源により 5 V の電圧を印加し、供給電力一定の条件で作動した。なお、上記筐体は、日本機械学会 RC 181, RC 202 研究プロジェクトにおいてベンチマークモデル³⁾として用いられてきたものである。

本実験では、ブロックの伝熱促進を行うため、ブロッ

クの上流側に Fig. 1(c)に示すような障壁を設置した。障壁の形状は 2D 角柱または中央に窪みを持つ角柱(3D 角柱)であり、筐体の下方に隙間ができるように設置した。2D 角柱の高さは $H_r = 3.2 \sim 9.1$ mm の範囲で変化させた。また 3D 角柱は、両端部の高さを筐体高さと同じ 10 mm とし、中央部の高さを $H_r = 0 \sim 9.0$ mm の範囲で変化させた。つまり 3D 角柱の場合は中央部のみで隙間が形成される。また、障壁とブロックの間隔は、2D, 3D 角柱いずれの場合も、最も効果的に伝熱促進される条件($s = 5$ mm)²⁾とした。

3. スモークワイヤ法による流れの可視化

3.1 流れの可視化方法

筐体内の流れはスモークワイヤ法により可視化した。Fig. 2 に、電熱細線、光源およびカメラの位置関係を示す。電熱細線には直径 0.1 mm のコンスタンタン線を用いた。細線表面には流動パラフィンを塗布し、パルス電源(MS-405, 菅原研究所)により細線を加熱して流動パラフィンの蒸気(白煙)を発生させた。ここでは流れを得るために、パルス幅を 100 ms と長めに設定した。

Fig. 1 Schematic view of experimental model.

* 原稿受付 2005 年 1 月 5 日

** 防衛大学校システム工学群機械工学科

光源にはカメラ用のフラッシュ(auto 25 SR, SNUPAK)を用い、カメラ(FinePix 6900 Z, 富士フィルム)の露光時間(1秒)の間にフラッシュを閃光させて瞬時的な流れを撮影した。閃光のタイミングは遅延回路(RE-306, 菅原研究所)を用いて調節した。また、Fig. 2に示すように、筐体上面から見た流れを可視化するには、細線を

Fig. 2 Locations of wire, flashlights and camera for smoke-wire visualization.

を筐体入口の中央高さ($y=5\text{ mm}$)に設置し、両側面からフラッシュで照明した。また、側面から見た流れを可視化するには、細線を筐体入口のスパン中央位置($z=0$)に設置し、上面からフラッシュで照明した。なお、撮影は暗室内で行った。また、フラッシュの前方にはスリットを設け、筐体壁面を極力照らさないようにした。また、光を透過させる必要がない筐体壁面には黒色のペイントを塗布し、光の反射を防いだ。

3.2 流れの可視化結果

スモークワイヤ法で得られた正方形ブロックまわりの瞬時的な流れを Fig. 3(a), (b)に示す。Fig. 3(a)は筐体上面から、Fig. 3(b)は側面から撮影した写真である。これらの写真を見ると、正方形ブロック周辺では流れがほとんど乱れておらず、流れが層流であることがわかる。これは、ダクトレイノルズ数が $Re_{Dh} = u_m D_h / \nu = 1000$ (u_m : 筐体入口平均風速 = 0.8 m/s, D_h : 筐体の水力直径)と低いためである。一般に、ノート型PCのように薄型で低風速の機器の場合は筐体内のレイノルズ数が低いため、流れが層流である場合が多いと考えられる。Fig. 3(c)には、筐体下流のファン近傍での流れを示す。ファンの吸込口近傍では流れが急縮小しており、乱れもやや大きくなっている様子がわかる。

Fig. 4に、ブロックの前方に障壁を設置した場合の可視化写真を示す。Fig. 4(a), (b)が2D角柱, (c), (d)が3D角柱を設置した場合である。キャプション中の u_m の値は障壁前方における平均風速であり、熱線風速計を用いて測定した。また、 $u_m' = u_m / \beta$ (β : 開口比)は障壁と筐体底面の隙間における平均風速である。障壁を設置すると圧力損失が増加するためファンに負荷がかかり、筐

Fig. 3 Flow visualization in the channel without barrier ($u_m = 0.8\text{ m/s}$, $Re_{Dh} = 1000$).

Fig. 4 Flow visualization in the channel with setting a barrier (top view and cross-sectional view).

体内の平均風速 u_m は低下するが、障壁の隙間では平均風速 u_m' が増加する。また、障壁の後縁で流れがはく離してせん断流が発生するため、障壁の後方では流れが乱れやすくなる。2D角柱を設置した場合は、障壁の出口ではしばらく層流状態を保つが、その後、ある位置で流れが急に大きくなっている。障壁高さ H_r が大きいほど隙間風速が増加して強いせん断流が発生するため、上流側から乱れが大きくなる。例えば、 $H_r = 5.4$ mm (Fig. 4 (a)) ではブロック下流域でようやく乱れが大きくなるが、 $H_r = 8.0$ mm (Fig. 4(b)) ではブロック上流域から乱れが大きくなっている。また $H_r = 8.0$ mm の場合は、側面から撮影した写真を見ると、ブロック前縁ではく離した流れがブロック上面に再付着していることがわかる。このような流れの再付着が起こると、後述のように熱伝達が飛躍的に上昇する。3D角柱の場合は、障壁位置で流れがスパン方向 (z 方向) に急縮小し、噴流状となっ

てブロック上方を流れる。 $H_r = 0$ mm (Fig. 4(c)) の場合は、断面中央 ($z = 0$) 付近では流れが層流状態を保っているが、障壁の切断部 ($z = \pm 22.5$ mm) で流れがはく離するため、その下流であるブロック側方では乱れが大きくなっている。また、 $H_r = 7.1$ mm の場合 (Fig. 4 (d)) は隙間での平均風速が $u_m' \approx 6$ m/s と高くなり、障壁下流側で乱れが大きくなると共に、乱れの構造が小さくなっている。また、ブロック前縁ではく離した流れがブロック上面に再付着していることがわかる。

以上、スモークワイヤ法を用いた流れの可視化方法と結果を紹介したが、この方法を用いると、流れが層流であれば流線を細かいピッチでかつ鮮明に可視化することができる。なお、流れの乱れが大きくなると煙が拡散して流線が不明瞭になるものの、乱れの構造や、はく離・再付着などの現象を把握する上で極めて有力な手段となる。

4. 赤外線カメラによる熱伝達の可視化

次に、赤外線カメラを用いて加熱ブロック表面の熱伝達率分布を可視化する方法について紹介する。

4.1 伝熱模型

Fig. 5(a)に熱伝達測定用の筐体断面を、Fig. 5(b)に伝熱模型を示す。伝熱模型の表面にはFig. 5(b)に示すようにステンレス箔が接着されており、これをメインヒーターとして通電加熱した。実際には電子機器内の発熱部品は伝導・対流・放射の複合によって放熱されるが、ここでは対流による熱伝達率を測定するために、伝導による熱移動を抑制して実験を行った。すなわち、伝熱模型（正方形ブロックおよび筐体底面の一部）は熱伝導率の低いバルサ板で作成し、また、メインヒーターから模型内部への熱伝導を抑制するために、模型底部にサブヒーター（ステンレス箔）を埋め込み、双方のヒーターの温度が等しくなるようにサブヒーターの加熱を調節した。ブロック上面の温度分布は、筐体上方に設置した赤外線カメラ（TVS-8502, アビオニクス）を用いて測定した。また、筐体上壁には赤外線透過率の高いサファイアガラスを設置した。

4.2 温度分布の測定

赤外線カメラを使用する利点は、何といたっても面の温度分布が得られることである。熱電対を用いて同様な情報を得ようとすると、膨大な数の熱電対が必要になるばかりでなく、熱電対への熱損失の影響も避けられない。しかし、注意しなければならないのは、赤外線カメラで

測定しているのは温度ではなく、ある波長帯域における赤外線の放射エネルギーであるということである。そのため、温度を求めるためには被測定面の放射率（赤外線カメラの検出波長帯域における分光放射率）がわかっているなければならない。また、周囲の熱源からの放射が乱反射して赤外線カメラに入射すると、正確な温度が得られなくなる。

これらの問題を回避する最も簡単方法は、被測定面に黒の艶消しペイントを塗布するなどして放射率を1に近づけることである。そうすれば放射率が既知になると同時に周囲からの乱反射の影響も受けにくくなる。ただし、表面の放射率を完全に1にすることはできないので、精度良く測定したければ、熱電対などの温度と比較するなどして表面の放射率を正確に把握しておく必要がある。また、乱反射の影響を小さくするためには、温度が一樣で放射率が1に近い壁面で周囲を囲んだり、赤外線の発生源（人体や赤外線カメラ自身も含む）からの放射がカメラに入射しないように、それらの位置関係に十分な注意を払う必要がある。

さらに、ガラス窓を介して温度測定を行うと、ガラスにより赤外線が吸収・反射される。本実験では、事前にサファイアガラスを介したときの測定温度を黒体炉で校正しておいた。また、赤外線カメラ自身から放射される赤外線が窓ガラス表面で反射するため、これが赤外線カメラに入射しないように、カメラをFig. 5(a)のように垂直線から15度傾けて設置した。

4.3 ブロック上面の温度分布

通常、赤外線カメラで測定した温度分布は画像ファイルとして出力されるが、後で演算処理を行うためには温度の数値データに変換しておく必要がある。著者らは、温度画像ファイルのデータフォーマットを基に、自作したプログラムで数値データへの変換を行った。なお、バッドピクセルがいくつか存在していたため、これらのデータを除去して数値データを作成した。

得られたブロック上面の温度分布をFig. 6に示す。等高線中に記された数値は、壁面温度 T_w と筐体入口空気温度 T_0 の差 $T_w - T_0$ を表している。また、キャプション中の $\dot{q}_m$ の値はメインヒーターの単位面積当たりの発熱量である。本実験では、温度差 $T_w - T_0$ が10~15℃程度になるように $\dot{q}_m$ の値を調節して測定を行ったため、冷却効果の高い条件ほど $\dot{q}_m$ の値が大きくなっている。

障壁を設置しない場合（Fig. 6(a)）は、可視化写真（Fig. 3）からもわかるように筐体内の流れがスパン方向にほぼ一樣であるため、これと対応して温度分布もスパン方向にほぼ一樣になっている。また、ブロック上方の流れは層流であるため、温度境界層の発達に伴って温度が下流方向に徐々に上昇している。これに対し、障壁を設置した場合（Fig. 6(b)-(f)）は複雑な温度分布を示している。例えば、ブロック上面に流れが再付着する場合（Fig. 6(c), (f)）は、再付着点で温度が極小になっている。

Fig. 5 Test model for heat transfer measurement.

Fig. 6 Contours of temperature difference $T_w - T_0$ (°C) on the top face of block. Fig. 7 Contours of heat transfer coefficient h (W/m²K) on the top face of block.

4.4 熱伝達率の算出

熱伝達率 h は、壁面温度 T_w 、入口空気温度 T_0 および対流熱流束 $\dot{q}_{cv}$ を用いて次式で表すことができる。

$$h = \frac{\dot{q}_{cv}}{T_w - T_0} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\dot{q}_{cv} = \dot{q}_{in} - \dot{q}_{cd} - \dot{q}_{rad} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで $\dot{q}_{cd}$ 、 $\dot{q}_{rad}$ はそれぞれメインヒーターからの熱伝導、熱放射による熱損失である。本実験ではサブヒーターを用いて熱伝導損失を抑制しているため、 $\dot{q}_{cd} = 0$ として計算を行った。また放射熱流束 $\dot{q}_{rad}$ はサファイアガラスの透過率 τ_{sap} と反射率 ρ_{sap} を考慮し、以下の式を用いて算出した。

$$\dot{q}_{rad} = \frac{\sigma(T_w^4 - T_0^4)}{1/\epsilon_w + 2/(1 + \tau_{sap} - \rho_{sap}) - 1} \quad \dots\dots\dots (3)$$

σ はステファン・ボルツマン定数、 ϵ_w は被測定面の全放射率である。

熱伝達率の誤差の主な原因には、1) 温度測定誤差、2) 放射熱流束の誤差、3) 模型内部への熱伝導、4) ステンレス箔内の熱伝導が考えられるが、これらを経験した結果、局所熱伝達率の誤差は $\pm 5\%$ であった^{1), 2)}。

4.5 ブロック上面の熱伝達率分布

赤外線カメラで測定した温度分布 (Fig. 6) を、式(1)~(3)を用いて熱伝達率分布に変換した。結果を Fig. 7 に示す。本実験ではステンレス箔に通電して模型表面を加

熱したため、等熱流束加熱の条件での熱伝達率分布が得られている。(一般に、等熱流束加熱の方が等温加熱の場合より熱伝達率が高めになる。例えば、平行平板間の流れの場合、流れが層流であれば等熱流束加熱の方が熱伝達率が20%程度高くなる。ただし、流れの乱れが大きくなるとその差は小さくなる。)

障壁の無い時 (Fig. 7(a)) には、ブロック上面に層流境界層が形成されるため熱伝達率は全体的に低く、流れ方向に徐々に低下する。それに対し、障壁を設置すると、隙間風速 u_m' の増加および流れの乱れが促進されるために熱伝達率が上昇する。特に、流れがブロック上面で再付着する場合 (Fig. 7(c), (f)) には、再付着点で熱伝達率が極大値を示すと共に、ブロック全体で大きく熱伝達率が上昇している。特に3D角柱を設置した場合 (Fig. 7(f)) はこの傾向が顕著に見られる。しかも3D角柱の場合は再付着点が上流側に形成されるため、再付着点前方の低熱伝達域が狭くなり、効果的に伝熱促進されていることがわかる。

以上のように、赤外線カメラと Fig. 5 のような伝熱模型を用いると、対流による熱伝達率分布を可視化することが可能である。なお、熱伝達率分布は加熱面表面近傍の流れを直接反映しているので、熱伝達率分布を可視化することで、例えば、流れのはく離、再付着などの現象を把握することも可能となる。

5. おわりに

本稿では、ノート型PCと同程度の寸法を持つ薄型筐体内の流れと熱伝達を可視化する方法の一例を紹介した。最近ではCFDコードの普及に伴い、このような小型で低風速の電子機器の熱設計にはCFD解析が用いられることが多くなった。しかし、より良い機器の熱設計に結びつけるためには「本当に正しく計算できているのか？」を検証することが不可欠であり、そのためにも、実験的に流れを可視化・測定するテクニックが以前にも増して重要になると思う。

謝 辞

本研究を行うにあたり、日本機械学会計算力学部門 RC 181, RC 202 研究プロジェクトから支援をいただいた。ここに謝辞を呈する。

参 考 文 献

- 1) Nakamura, H., Igarashi, T.: Forced convection heat transfer from a low-profile block simulating a package of electronic equipment, ASME J. Heat transfer, Vol. 126 (2004) pp. 463 - 470.
- 2) 中村元, 五十嵐保: 低風速筐体内に置かれた薄型ブロックの伝熱促進, 日本機械学会論文集(B), Vol. 71, No. 702 (2005) pp. 581 - 589.
- 3) Nakayama, W.: An approach to fast thermal design of compact electronic systems: A JSME project, Proc. InterPACK, Hawaii (2001), Paper No. IPACK 2001 - 15532.

口絵7 高さ 10 mm の筐体内に置かれた薄型ブロック（高さ 2 mm，一辺 45 mm）まわりの流れ
 筐体内の流れをスモークワイヤ法で可視化したもの。ブロックが存在しても流れは層流である（左図）が、ブロック前方に障壁（3D角柱， $H_r=7.1$ mm）を設置すると、隙間で流れが加速すると同時に障壁後方で乱流化する。右図の例では、ブロック前縁ではなく離れた流れがブロック上面に再付着している。

口絵8 赤外線カメラで測定したブロック上面の熱伝達率分布（単位 $\text{W/m}^2\text{K}$ ）
 流れが層流であれば、左図のようにブロック上面の熱伝達率は低く下流方向に低下する。一方、ブロック前方に障壁（3D角柱， $H_r=7.1$ mm）を設置した場合、空冷ファンに与える電力が一定であっても、右図のように熱伝達率が顕著に増加した。

（口絵7，8 防衛大学校 システム工学群 機械工学科 中村 元）
 （本文 100 頁参照）