自然対流中での多孔板の空力抵抗*

石塚 勝**, 宮崎 芳郎**, 佐々木 富也***

Aerodynamic Resistance of Perforated Plates in
Natural Convection

by Masaru ISHIZUKA, Yoshiro MIYAZAKI, and Tomiya SASAKI

This paper describes some experimental values of aerodynamic resistance of perforated plates in natural convection, providing basic thermal data necessary for designing electronic equipment casings.

In the conventional measuring method which measures only in the higher region of Reynolds number, there is a disadvantage that the utmost precision cannot be attained in measurement due to the values of pressure loss and velocity being unidentifiably small.

In our new method, however, it is designed to evaluate a fluid resistance coefficient depending on the air temperature elevated by the combined effect of motive power of natural convection and fluid resistance, and consequently to elucidate the influence of Reynolds number, coefficient of porosity, and thickness of plates/diameter of holes on resistance coefficient of perforated plates.

Key Words: Flow Measurement, Convective Heat Transfer, Resistance Coefficient, Perforated Plate, Natural Convection

1. 緒 言

近年電子機器は、LSIなどの電子素子の高密度実装が進み、その放熱対策が重要になってきた⁽¹⁾。さらに、電子機器がオフィスや家庭に進出したのにもない、電波障害や冷却用ファンによる騒音の問題も起きてきた。このような状況では、冷却用ファンの数の制限や通風口面積の縮小をよぎなくされ、きょう(筐)体の良好な通風設計がいつそう強く望まれる。きょう体内の流れを左右する要素の中で、通風口を形成する多孔板の存在は大きく、この流体抵抗の把握は熱設計上不可欠である。しかし、従来多孔板はおもに整流板として用いられてきたことから、その抵抗資料は比較的開口比の大きなものや、中・高レイノルズ数のものに限られ⁽²⁾、空気の流れ中のようにきわめてレイノルズ数の小さな領域のデータはほとんど見あたらない。

そこで本報では、浮力による自然対流の駆動力と流体抵抗との釣り合いより抵抗板(多孔板とスリット板)の流体抵抗を算出する方法を提案した。それにより実

用的範囲内でのデータを整理してきょう体設計の際の資料として提供することにした。

2. 主な記号

- A : 管路断面積
- A_d : 抵抗板の空間面積
- B : 比例定数
- C : 式(9)で定義された係数
- C_p : 空気の定圧比熱
- D : 管路内径
- d : 孔径(多孔板), スリット幅(スリット板)
- g : 重力の加速度
- h : 管路高さ
- K : 流体抵抗係数
- K_0 : 測定系の抵抗係数(抵抗板なし)
- l : 多孔板のピッチ
- Q : ヒータからの熱入力
- r : 管中心からの距離
- Re : レイノルズ数 $= ud/\nu$
- Re_D : レイノルズ数 $= uD/\nu$
- T : 管内空気温度
- ΔT : 温度上昇 $= T - T_\infty$
- t : 抵抗板の厚さ

* 昭和59年8月29日 第927回講演会において講演、原稿受付 昭和59年2月16日。

** 正員、(株)東芝総合研究所(〒210 川崎市川崎区浮島町4-1)。

*** 学生員、(株)東芝総合研究所。

u : 空気の管路内流速
 β : 抵抗板の開口比 $= Ad/A$
 ρ : 空気の密度
 ν : 空気の動粘性係数

添字

∞ : 管路周囲
 w : 管内壁
 c : 管路中央

3. 抵抗係数の評価法

図1のような対流モデルを考える。有限管路の下端にヒータがあり、側面は断熱され、上端に抵抗板が設置されている。温度一様な管路の定常状態を考える。エネルギー式は次式で表せる。

$$Q = \rho C_p u A \Delta T \quad \cdots \cdots (1)$$

また、管路内空気と周囲空気との密度差による駆動力と流体抵抗力との釣り合いから次式が導ける。

$$(\rho_\infty - \rho)gh = K \frac{1}{2} \rho u^2 \quad \cdots \cdots (2)$$

この式の左辺は圧力損失であり、右辺の係数 K は、通常の管内圧力損失の式⁽²⁾から求められる流体抵抗係数と同等である。いま、空気を完全ガスと考えると

$$\frac{\rho_\infty - \rho}{\rho} = \frac{\Delta T}{T_\infty} \quad \cdots \cdots (3)$$

が導けるから、式(2)と式(3)より管路内速度 u を求めて、さらに式(1)に代入して整理すると次式を得る。

$$K = 2gh\Delta T^3 / T_\infty (Q/\rho C_p A)^2 \quad \cdots \cdots (4)$$

式(4)の中で、 ρ と C_p は温度の関数であるから、 K は T , T_∞ , Q を測定すれば求まることになる。しかし、いまこれで求められる K の値は測定系全体のものであるから、抵抗板を取付けない系の抵抗係数を K_0 とすれば、抵抗板自身の抵抗係数 K は、

$$K = K(\text{系全体}) - K_0 \quad \cdots \cdots (5)$$

として求められる。

図1 対流モデル

こうすることにより、微小な圧力損失やきわめて遅い速度 u を測定せずに抵抗係数 K を求めることができる。実際は温度 T を管内測定平均として求める

4. 実験

4.1 実験装置 図1のモデルに似せるべく製作したのが図2の装置である。二重管路の内管の下端にうずまき状のヒータ(図3に示す。電気抵抗値 $= 31.5 \Omega$)を配置し、内管の上端に評価すべき抵抗板を置く。内壁の断熱を確実にするため、内管の外側にリボンヒータ (70.8Ω) を一様に巻きつけた。管はともに塩化ビニル製である。管内には上・中・下段に各3点(壁、壁近傍、管中央)ずつ熱電対(銅・コンスタンタン)を取付けた。またこのほかに、トラバース用と他点測定のためシース形熱電対(径1.6 mm, 長さ0.4 m, 銅・コンスタンタン)を1本用意した。壁には、熱伝導性エポキシとカプトンテープで接着した。うず巻ヒータの形状と管高さ h は、管内温度分布が一様になるように試行錯誤で決めた。その結果、ヒータは図3に示す形に、高さは $h = 5.7D$ とした。

図2 装置概略図

図3 熱入力用ヒータ

4.2 実験の手順 上端に抵抗板を設置してから、下端のヒータに入力する。管内流速は電力入力値により変化させた。その上限と下限は、温度上昇 ΔT を

$$5 < \Delta T [\text{K}] < 80 \dots\dots\dots (5)$$

の範囲に限定することできめた。これは実用的見地から選んだものである。そして、管中央温度 T_c と壁面温度 T_w を温度計でモニタしながら、次式を満足するべくリボンヒータの電気入力値を調節した。

$$\frac{T_c - T_w}{T_c} \leq 2\% \dots\dots\dots (6)$$

これは測定時間と実用性とのかねあいで決めた。

また、ヒータ入力 Q の中で、下方に放射によって漏れる量と抵抗板の穴以外の面から対流により漏れる量の合計は計算によって、そのオーダが入力値 Q の1%以内を見積もれたため、それらは考慮しないことにした。

4.3 抵抗板の形状 今回、測定に用いた多孔板とスリット板の形状を図4と図5に示す。多孔板は孔模様が平行形とちどり形の2種を用意し、さらに開口比を変えたものと厚さを変えたものを取りそろえた。スリット板は3種用意した。その種類を多孔板は表1に、スリット板は表2にそれぞれ示す。どちらも塩化ビニル板にて製作した。

図4 多孔板

図5 スリット板

5. 実験結果と考察

5.1 管内温度分布 図6にリボンヒータに入力した場合としない場合の管内温度分布を示している。入力のない場合は、 T_w が T_c にくらべかなり低く、管内一様化を乱しているが、入力すると、きわめて良い一様分布が得られた。入力のない場合は、冷たい壁近傍で上昇してきた空気は冷やされて下降し、さらに暖められて上昇するという局所的対流循環運動があると考えられるが、壁を暖めると、管中央と同様に一様上昇が得られるためであろう。また温度分布から上下

表1 多孔板の種類

Plate No.	d (mm)	l/d Ratio	t/d Ratio	β Ratio	Perforation pattern
P1 P2 P3 P4	4.0	1.25 1.50 1.75 2.0	0.5	0.58 0.40 0.30 0.23	Hexagonal
P5 P6 P7 P8	5.0	1.20 1.40 1.60 1.80	0.2	0.63 0.46 0.35 0.28	
P9 P10	4.0	1.50	0.25 0.50	0.34	
P11	2.0	2.0	0.50	0.21	
P12 P13	8.0	1.50	0.125 0.50	0.29	Square
P14 P15 P16 P17 P18 P19	4.0	3.0	0.25 0.50 0.75 1.0 1.5 2.0	0.10	
P20 P21 P22 P23 P24	6.0	2.0	0.16 0.33 0.67 1.00 1.33	0.18	

表2 スリット板の種類

Plate No.	d (mm)	l/d Ratio	Number of slits	t (mm)	β Ratio
S1	6.0	2.0	7	1.0	0.45
S2	3.0	2.0	13	1.0	0.48
S3	2.0	2.0	19	1.0	0.48

図6 管内温度分布

方向の一様性も確かめられた。

5.2 測定系の抵抗係数 上端から抵抗板を取り除いた時の測定系の抵抗係数 K_0 を管内レイノルズ数 Re_D の関数として実験的に求めたのが図7である。図7より、その関係は以下のように求められた。

$$K_0 = 2300 / Re_D \quad \dots\dots\dots (7)$$

係数2300は系固有の値であって、入口損失、ヒータ損失、壁面摩擦損失などから決まる。ただし Re_D の中の速度 u は式(1)から求めた値を用いている。また実験範囲は $Re_D < 2000$ であるから、管内は層流である。以下速度 u はすべて式(1)より求めた値を使う。

5.3 抵抗係数 K とレイノルズ数 Re の関係 図8に多孔板(スリット板も含む)の抵抗係数 K と代表寸法として孔径またはスリット幅 d を用いたレイノルズ数 Re との関係を示す。各々の多孔板は B を比例定数とすると

$$K = B / Re^{0.65} \quad \dots\dots\dots (8)$$

が得られる。各々の多孔板について、式(5)の範囲で Re を変えたものである。どの多孔板も同一の傾向を示している。

5.4 抵抗係数 K と開口比 β の関係 図9には、抵抗係数 K と開口比 β の関係を、厚み比 $t/d = 0.5$ 、レイノルズ数 $Re = 12 \sim 82$ の領域でのデータを中心に

図7 測定系の抵抗係数

図8 抵抗係数 K とレイノルズ数 Re との関係

まとめた。レイノルズ数の範囲は実用的には十分である。その結果を Collar の式⁽³⁾にあてはめると、多孔板に関して

$$K = C \frac{1-\beta}{\beta^2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式(9)の係数 C は、以下のように整理できる。

$$C = \begin{cases} 2.5 & (Re < 60) \\ 1.5 & (Re \geq 60) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (10)$$

スリット板に関しては、 $C = 1.5$ が妥当である。しかし、 $\beta < 0.2$ になると、実験値と式(9)との差は大きくなるが、実用上は考えなくてよいであろう。また、 $0.2 < \beta < 0.4$ の範囲は、抵抗係数 K が大きく変化するので実用上多孔板の β の選び方には注意を要する。

5.5 抵抗係数 K と厚み比 t/d の関係 多孔板の抵抗係数 K と厚み比 t/d の関係については従来からデータが少なく、中・高レイノルズ数でもいまだに整理されていない⁽²⁾。本実験で得られたデータをまとめたのが図10である。たて軸には、抵抗係数 K と $t/d = 0.5$ の時の K の値 $K_{0.5}$ との比 $K/K_{0.5}$ を示す。横軸は厚み比 t/d である。これは図9が $t/d = 0.5$ を中心にまとめられているので、関連をつけやすくするためである。すると次の直線関係が得られた。

$$K/K_{0.5} = 0.33t/d + 0.82 \quad \dots\dots\dots (11)$$

図9 抵抗係数 K と開口比 β との関係

図10 抵抗係数 K と厚み比 t/a の関係

図 11 従来データとの比較

5.6 従来のデータとの比較 従来は比較的高いレイノルズ数でのデータが得られている⁽²⁾。このデータの代表的なもの和本データとを比較することにする。これは、レイノルズ数の影響を観察するため、その傾向から本評価法の信頼性を検討しようとするものである。比較データは新津が得た $Re=7000$ のものの⁽²⁾である。本データは $Re=24\sim54$ の範囲である。さらに、図 8 で研究上の資料として広範囲な Re の関係を示したが、電子機器の中の流れでは、 $Re=24\sim54$ が低レイノルズ数の代表と考えてよい。比較を図 11 に示す。 C の値を見ると

$$\begin{cases} C=2.5(24 \leq Re \leq 54) \\ C=2.0(Re=7000) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (12)$$

のように整理される。すると、 Re が極端に違うにもかかわらず、 C の値に大きな差がないことがわかる。さらに、式(9)は本来高レイノルズ数域のデータを整理するのに使われたが、低レイノルズ数域のデータをも整理できることがわかる。さて本評価法の信頼性については、絶対比較できるデータがないため明確に述べることはできないが、開口比 β に関する傾向から判断して妥当なものと考えることができよう。またこのことから抵抗係数 K と厚み比 t/d の関係を示す式(11)も本実験よりも高いレイノルズ数域で適用の可能性がある。なお、本データでの開口比 β は、各々多孔板の

図 12 管内流速とヒータ入力

孔数が違うので、次式で求めた。

$$\beta = A_a/A = \text{孔数} \times \text{孔面積} / \text{管断面積} \quad \dots\dots\dots (13)$$

5.7 管内流速 u 参考に、本測定中の管内流速 u [式(1)より求めた] とヒータ入力 Q との関係を図 12 に示しておく。多孔板は 3 種で、 $u=0.26$ m/s 程度までを示す。これは一般に電子機器の中ではせいぜい $u=0.2$ m/s 程度と言われている⁽¹⁾からである。速度 u とヒータ入力 Q との関係は、式(1)と式(8)からもわかるとおり

$$u = BQ^{1/2.35} \quad \dots\dots\dots (14)$$

の関係を示している。 B は比例定数。

6. 結 言

対流空気駆動力と流体抵抗との釣り合いから、自然対流中の多孔板とスリット板の空力抵抗の特性を求めた。特に抵抗係数 K とレイノルズ数 Re や開口比 β との関係のほかに、多孔板では厚み比 t/d の影響を示した。また従来の高レイノルズ数でのデータとも比較した。その結果、抵抗係数 K への影響は開口比 β が最も大きい、その関係は従来データと大きく変わらないことが判明し、レイノルズ数 Re の影響は β ほどは大きくないことがわかった。さらに厚み比 t/d との関係では直線関係が得られた。また従来データとの比較から本評価法の妥当性も得られたので今後は金網のデータも本方法により得る考えである。

文 献

- (1) 例えば、伊藤・ほか 2 名、電子機器の熱対策設計、(昭 56), 97, 日刊工業新聞社。
- (2) 日本機械学会編、技術資料・管路ダクトの流体抵抗、(昭 54), 110, 日本機械学会。
- (3) Collar, A. R., *Rep. Memo.* 1867, (1939)。

討 論

〔質問〕 山田英巳〔山口大学工学部〕

(1) C の値は、図 9 および図 11 に関する文章よりレイノルズ数の関数となっているように思われるが、本文中では $Re=60$ を境として二つの C の値が示されているだけである。なぜ $Re=60$ というところに境界があるのか。又この数値は実験されたすべての孔の条件(厚み比, 平行形多孔板, ちどり形多孔板, スリット形多孔板)に対して成り立っているのか。

(2) $Re \approx 6000$ の場合について門ら(付1)(付2)は厚み比 l/d がおよそ 0.7 のとき抵抗係数が最小となることを示している。一方、図 10 のプロットの条件を見ると $\beta=0.1 \sim 0.29$, $Re=7 \sim 33$ とあるが、 β および Re のこれらの範囲では図 8, 9 より K の値がかなり大きく変化している。このような β と Re の種々の条件を含む K の結果を t/d に対して一律に 1 本の傾向として表している点に問題はないか。

(付1) 門・ほか2名, 機論, 50-455, B (昭59), 1808.

(付2) 門・ほか2名, 機論, 50-455, B (昭59), 1812.

〔回答〕 (1) 本実験に実用的なデータを得るという観点から行われたもので、その結果をできるだけ簡便に表したいと考えている。本実験のデータをすべてプロットした場合、図 9 で、厳密な意味では $C=1.5$ と 2.5 の間に収まるが、実用的な意味では $C=1.5$ と $C=2.5$ の 2 群に分かれ、その境界、 $Re < 53$ と $Re > 68$ の群に対し便宜上 $Re=60$ とした。しかしその値に対しての詳しい考察はしていない。またスリット板に対しては、代表長さをスリット幅としたため、多少多孔板とは異なる所がある関係でレイノルズ数に関しては参考データとした。

(2) ご指摘のように、 t/d の影響を 1 本の傾向で表すのは問題があると言える。よって式(11)を一般的なものとは考えていないが、簡便にまとめるという意味で一例を示した。レイノルズ数が小さい場合の t/d の影響は、今後も最重要課題として取りくむ必要があると考えている。