垂直底部面をもつ二次元鈍頭物体の流動抵抗に
及ぼすブロックージ比の影響*加藤 征三**, 社河内 敏彦**
隅山 典彦***, 藤本 哲夫****The Blockage Effects of a Two-Dimensional Bluff-Based Body
on Its Aerodynamic Drag CharacteristicSeizo KATO, Toshihiko SHAKOUCHI,
Norihiko SUMIYAMA, and Tetsuo FUJIMOTO

Measurements are performed on aerodynamic drag coefficients, C_D , of a two-dimensional bluff-based body over the range of blockage ratios of the body breadth to the wind tunnel width, $d/W = 0.1 \sim 0.4$. C_D increases with an increase of d/W , exponentially at $d/W > 3.5$, being subject to the blockage constraint. A modified drag coefficient C'_D introduced by the clearance freestream velocity between the body and the tunnel side wall, U_∞' , remains a constant value, independently of blockage ratios of $d/W < 3.5$. C'_D implies the base drag coefficient without the blockage effects, C_{D0} , and the latter may be predicted by an empirical formula $C_{D0} = K^2 \cdot C_D$ and $K = U_\infty/U_\infty' = 1 - d/W - 2(\delta_b^* + \delta_w^*)/W$, where δ_b^* and δ_w^* are the boundary layer displacement thicknesses produced on the body and the tunnel wall. The drag characteristic is also discussed with the results of the pressure and velocity distributions around the body and the wake, the prevailing frequency of shed vortices, and the flow visualization.

Key Words: External Flow, Drag Coefficient, Bluff-Based Body, Blockage Effect, Wake

1. 緒 言

バスやトレーラトラックなどにみられる後端部に側端面と直角の角をもつような鈍頭物体 (Bluff-Based Body) まわりの流動特性を明らかにすることは、その圧力抵抗を低減させる方法を確立することなどに関連し重要である。

著者の一人は、先に上記鈍頭物体の圧力抵抗を減少させる方法の一つとして、後端角部近傍に円弧状のガイドベーンを設置し、主流の運動エネルギーを後流内へ積極的に導入することを試み、それによる後流制御と圧力抵抗との関係を実験的に明らかにした⁽¹⁾。この際、流体力測定は風洞の測定部壁面の影響が生じないように供試物体の流れ方向と垂直な投影面積を風洞測定部の断面積の10%以下にするとともに物体と風洞壁面との距離を微調整して、壁面における圧力こう配がない条件下で行った。すなわち、一様流中の物体の抵抗を扱ったものである。

物体の流力特性を実験的に調べる場合、通常風洞ま

たは水槽が用いられるが、この場合物体は有限の大きさをもつ流路中に設置される結果、流路側壁の影響、すなわちブロックージ比 (流路の物体に対する閉そく率) の影響を受ける。このことは、乗用車、バス、トラックなどの鈍頭物体の抵抗係数の測定において、実測値のばらつきの主因子となりうるという問題点が指摘されており⁽²⁾、このブロックージ比の影響を修正する一般的整理法が望まれている。従来、物体の流力特性に対するブロックージ比の影響については、特に最も基本的な形状である円柱については、Rosenheadら⁽³⁾、岡本ら⁽⁴⁾、桧和田ら⁽⁵⁾、鈴木ら⁽⁶⁾、Farellら⁽⁷⁾の研究が、また垂直平板については平野ら⁽⁸⁾の研究がみられ、かなりのことが明らかにされてきている。しかし、工業上、より重要な上記鈍頭物体の流力特性に対するブロックージ比の影響についての解明はまだ十分行われていない。

本研究は、供試物体として、前縁が半円形状を、後端部が側端面と直角の底部面を有する二次元鈍頭物体 (以後、物体とよぶ) を用い、流力特性に及ぼすブロックージ比の影響を明らかにしたものである。本実験では、ブロックージ比 d/W を $0.1 \sim 0.4$ (d : 物体の幅, W : 流路幅), レイノルズ数 $Re = U_\infty d / \nu$ を $(1.5 \sim 9.0) \times 10^4$ (U_∞ : 主流速度, ν : 動粘度) に変化さ

* 昭和61年11月23日 関西支部第246回講演会において講演, 原稿受付 昭和61年5月26日。

** 正員, 三重大学工学部 (〒514 津市上浜町1515)。

*** 学員, 三重大学大学院。

**** 正員, 名古屋大学工学部 (〒464 名古屋市千種区不老町)。

せ抵抗力を測定するとともに、ブロックージ比の影響を流動特性からも詳細に検討するため、物体まわりおよび物体の後流の速度と圧力分布、物体後端角部から放出される渦の卓越周波数の測定、流れの可視化実験などを行った。また、本物体の抵抗係数のブロックージ比の影響を修正する一整理法も検討した。

2. 実験装置と方法

図1に供試物体の形状・諸元を示す。物体は流入する流れがはく離しにくい半円形⁽¹⁾の前縁形状を、後端部に側端面と直角の角をもつ底部 (base) 面をそれぞれ有する二次元の鈍頭物体で、本体 A、およびそれと同一断面形状を有する B、C 部からなる。物体 (幅 $d=46$ mm) は、風洞測定部 (長さ $L: 3100$ mm, 高さ $H: 465$ mm, 幅 $W: 115\sim 460$ mm の範囲で可変、これによってブロックージ比を調整) の入口端から 1300 mm 後方の中央部に垂直に設置される。その際、B、C 部はそれぞれ測定部の上、下板に、A 部は 3 本のりん青銅のはり (厚さ: 1.0 mm, 幅: 15 mm, 長さ: 200 mm) を用いて測定部とは独立して設けた枠組に固定されている。B、C 部は測定部上、下板上に生じる境界層の影響を除去し物体本体まわりの流れの二次元性を確保するために設けたもので、各部はそれぞれ 0.8 mm の間げきを保って設置されている。

前記りん青銅のはりの 1 本 (中央のそれ) にはひずみゲージ (4 ゲージ法) がてん付されており、これにより物体本体が受ける流体力 D の測定を行った。ひずみゲージの出力と流体力は、本実験範囲内では良い直線関係を示した。測定される流体力は、圧力抵抗と摩擦抵抗の和であるが、そのほとんどは圧力抵抗であると

考えられる。なお、物体の上流 500 mm における断面の流れ (主流) の速度 U_∞ の分布は一樣 (物体左右の速度差: 3% 以下, 乱れ強さ: 0.5% 以下) であった。

物体まわりの流動状態を明らかにするため、上記の抵抗測定用物体とは別に製作した模型 [断面形状は同一であるが、分割されておらず ($H=465$ mm), その中心高さ ($H/2$) の位置の物体まわりに直径 0.8 mm の圧力孔 (52 個) を有する] を用い、速度分布、物体表面上の圧力分布を測定した。速度の測定には円筒形単孔ピトー管 (円筒直径 2.5 mm, 測定孔直径 0.3 mm) および熱線流速計を、圧力の測定には傾斜管マンメータを使用した。また、物体後流中に生起する渦の卓越周波数を熱線流速計と周波数分析器を用いて測定した。この際、熱線流速計のプロープ (I 形) は、物体後端より下流へ $2d$, $y=d/2$ の位置 (図1) に設置した。図2に渦放出周波数 f の一測定例を示す。この場合 150 Hz の卓越周波数が顕著に記録されているのがわかる。なお、物体・はり系の一次固有振動数は 3.11 Hz (測定値) であった。

以上の諸測定を、種々の主流速度 U_∞ [$=5\sim 30$ m/s ($Re=(1.5\sim 9.0)\times 10^4$)], ブロックージ比 d/W [$0.1\sim 0.4$, $d=46$ mm (一定)] に対して行い、抵抗および流動特性に対する d/W の影響を明らかにするための実験結果を得た。

また、物体後流領域のフローパターンを観察するため、上記物体の $1/2$ 縮尺模型 (可視化実験の場合のみ使用) を、幅 310 mm, 深さ 150 mm, 長さ 1000 mm の測定部をもつ回流水槽中の中心位置に設置 (測定部入口より 200 mm 後方) し、測定部の中心高さの面を光切断し、染料注入管 (外径: 1.0 mm, 内径: 0.8 mm) より注入した染料 (フレオレセインナトリウム水溶液) により可視化、観察し流脈線の挙動を明らかに

図1 実験装置概略 (抵抗測定用供試物体)

図2 卓越周波数

するとともに、物体後端角部より放出される渦の振動数をストップウォッチを使って測定した。本実験は、別に用意した流路壁を取付けることにより $d/W=0.1 \sim 0.4$ の範囲で行った。この Re の範囲は、風洞実験におけるそれよりかなり小さいが、後流でのフローパターンの定性的特性は、概略把握できるものと考えられる。

3. 実験結果と考察

3.1 抵抗特性 まず供試物体が受ける流体力(流動抵抗力) D に対するブロックージ比 d/W の影響について実験的な検討を加えた。

本供試物体の抵抗係数 C_D を次式で定義する。

$$C_D = D / \left(\frac{1}{2} A \rho U_\infty^2 \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 D は測定される抵抗力、 A は物体の主流方向に垂直な投影面積、 ρ は空気密度である。

図3に、抵抗係数とブロックージ比との関係を示す(図中、○、◇、●印)。図3にみられるように、 C_D は d/W とともに増加し、その増加率は d/W が大きいほど大きくなっている。本結果は Re が $(4.5 \sim 7.5) \times 10^4$ の範囲であるが、 $d/W=0.4$ の場合を除き C_D は Re にあまり依存しないことがわかる。図3には参考のために円柱に対する結果⁽⁴⁾も示したが、供試物体の C_D は円柱のそれよりかなり小さい。円柱の場合 C_D は $d/W \leq 0.05$ で一定値になり、ブロックージ比の影響をほとんど受けなくなるものと考えられる。

図3中の△、◇、▲印の結果は抵抗係数を算出する際、主流速度 U_∞ の代わりに物体と測定部側壁間の速度 U_w (本実験ではこれを前縁より $x/d=4.26$ 、物体・

側壁間の中央の位置で測定した。これは物体上に生ずる境界層外縁の速度にほぼ等しい)を用いて求めたもの(これを修正抵抗係数 C'_D と記す)である。ブロックージ比が $d/W=0.1 \sim 0.35$ の範囲では、ほぼ一定値 ($C'_D=0.55$) を示すことが知れる。この U_w は測定位置によって多少変化するが、 U_w を用いることによって $d/W < 0.35$ においては、ブロックージ比によらず C_D を整理できうることを示している。さらに $d/W \rightarrow 0$ 、すなわちブロックージ比の影響がなくなった極限では、 $U_w = U_\infty$ になることを考えれば、 d/W の影響がない場合の基準抵抗係数 C_{D0} は、 U_w を導入して求めた修正抵抗係数 C'_D に近いものと思われる。 $d/W < 0.1$ の詳細については今後検討を加えていくが、おそらく破線で示したような傾向をとるものと考えられる。

図4に、 C_D と Re との関係を示す。 C_D は概して Re の影響を強く受けないが、 $d/W \leq 0.3$ では C_D が Re の増加とともに減少するのに対し、 $d/W=0.4$ では逆に増加している。これは、 $d/W \leq 0.3$ では、 Re の増加とともに物体および風洞側壁面上の境界層排除厚さが減少して流路の有効面積が増加するため、平均流速が減少することになる。その結果 C_D が減少するものと思われる。また、 $d/W=0.4$ の場合には、その流動形態が $d/W \leq 0.3$ の場合とは3.2.1項で述べるように本質的に異なることなどに起因するものと考えられる。

3.2 流動特性 上記のブロックージ比の影響を供試物体まわりの流動特性から検討を加えるため、圧力分布、速度分布、後流中の渦の卓越周波数などの測定、およびフローパターンの可視化を試みた。

3.2.1 圧力分布 図5に供試物体まわりの圧力分布の測定例 ($Re=6.0 \times 10^4$, $d/W=0.1$ および 0.4) を示す。図5中の破線および実線の矢印は、それぞれ

図3 抵抗係数に及ぼすブロックージ比の影響

図4 抵抗係数に及ぼすレイノルズ数の影響

正および負の圧力の大きさを圧力係数 $C_p = (P - P_s) / (\rho U^2 / 2)$ (P : 圧力, P_s : 測定部内静圧) で示したものである。圧力分布は、中心線に対して対称であったので、図 5 の上半に $d/W=0.1$ の場合の結果を、下半に $d/W=0.4$ の場合のそれを示す。物体に沿う圧力は、物体前縁のよどみ点付近で正圧であるが、下流にいくと負の圧力となり負圧が最大となる。その後負圧量は減少するが、半円前縁と側面接合部から約 $d/2$ 下流の物体側端面ではほぼ一定の負圧量になる。これは摩擦損失が極めて小さいことを示している。ブロックージ比が大きくなる（物体と測定部側壁の間げきが小さくなる）と、物体近くの流れが加速されて流速が大きくなる結果、負の圧力値が全体に大きくなっている。このことは、物体底部面における圧力においても同様で、 d/W が大きいほど、負圧量は大きく、圧力抵抗が増大することがわかる。 $Re = (1.5 \sim 9.0) \times 10^4$ に変化した場合においても同様の測定を行ったが類似の

図 5 物体まわりの圧力分布

図 6 底部面圧力係数とレイノルズ数との関係

図 7 底部面圧力係数とブロックージ比との関係

 図 8 後流内の圧力分布 ($Re = 6.0 \times 10^4$)

結果を得た。

図 6 に物体底部面の中心における圧力 P_b の圧力係数 C_{pb} とレイノルズ数 Re との関係を示す。ブロックージ比が小さい場合 ($d/W=0.1, 0.2$), C_{pb} は Re にあまり依存しないが、 d/W が 0.4 と大きくなると Re の影響を強く受け、 $Re > 4 \times 10^4$ になると負圧は著しく増大するようになる。これは後に示す後流中の圧力分布および流れの可視化実験からもわかるように、 $d/W=0.4$ の場合には、後流の流動状態が非対称になるなど

ブロッケージ比の影響を著しく強く受けることによる。

底部面圧力係数 C_{pb} とブロッケージ比 d/W の関係 ($Re=6.0 \times 10^4$) を図 7 に示す。 C_{pb} は d/W が増加すると減少し、 d/W の影響を強く受けるが、とくに $d/W > 0.3$ になると顕著であることがわかる。

図 8 に、後流内の全圧力分布の変化の様子を圧力係数 C_{pt} を用いて示す。 $d/W=0.1, 0.2$ の場合 [図 8 (a)], その分布形は中心線に対して対称であったので、それぞれ半分の領域の結果を示す。また、図 8 中の破線は $C_p=0$ の位置を結んだものであり、後流領域とみなしうるものである。一方、 $d/W=0.4$ の場合 [図 8 (b)], 全圧力分布は非対称であり、後流領域も著しく広がり大きく偏流していることがわかる。いずれも後流領域 (破線で囲まれた部分) 内での全圧は、 d/W が大きくなるとともに減少すること、またその長さ (後流領域の下流方向への長さ) l/d は、 $d/W=0.1, 0.2, 0.4$ に対して、それぞれ 1.78, 2.26, 6.9 であり、 d/W の増加とともに急激に大きくなることがわかる。

3.2.2 速度分布 図 9 に、 $d/W=0.1, 0.2, 0.4$ の各場合における物体と測定部側壁との間の速度分布

図 9 物体・側壁面の速度分布

図 10 境界層排除厚さに及ぼす d/W の影響

(物体前縁から $x/d=4.26$ の位置; $Re=6.0 \times 10^4$) を示す。速度の最大値は、 d/W の増加 (物体と側壁との間の距離の減少) とともに大きくなること、また流れが加速される結果側壁面上の境界層厚さが薄くなることなどがわかる。境界層外側の主流領域における分布形は、比較的平らな形となっていることもわかる。

上記速度分布の測定結果をもとに算出した境界層排除厚さ δ_w^* (側壁面上)、 δ_b^* (物体面上) と d/W との関係を図 10 に示す。境界層排除厚さ δ^* は、

$$\delta^* = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{u}{u_b}\right) dy \quad (2)$$

で算出した。 δ は境界層厚さ、 u は速度、 u_b は境界層外端速度である。図から概算されるように、 δ_w^* および δ_b^* の値は、 d/W の増加とともに物体・側壁間の距離が小さくなり流速が大きくなるため減少すること、またその割合は δ_w^* のほうが顕著であることがわかる。また、図 10 中には U_∞/U_∞ の d/W による変化も示してある。 U_∞/U_∞ は d/W の増加とともにほぼ直線的に増加することがわかる。この速度比は境界層排除厚さを考えると次式で表される。

$$\frac{U_\infty}{U_\infty} = 1 - \frac{d}{W} - 2 \frac{\delta_w^* + \delta_b^*}{W} = K \quad (3)$$

U_∞ , δ_w^* , δ_b^* は Re が一定であっても距離 x に依存するので、 x 方向に積分平均化した値をとるべきであるが、図 10 から各因子の影響度合いが類推できる。すなわち U_∞/U_∞ に対しては d/W が主因子であり、境界層の影響因子 $2(\delta_w^* + \delta_b^*)/W$ は相対的に小さいことが知れるが、 Re が小さく、 d/W が大きいほど、後者の因子が

(a) $d/W=0.10$

(b) $d/W=0.20$

(c) $d/W=0.40$

図 11 後流領域の可視化写真 ($Re=300$)

図 12 後端渦の卓越周波数とブロックージ比との関係

効いてくるようになる。

3・2・3 物体後流の流動様式 物体後端の角からはく離れた流れがブロックージ比によってどのように影響されるかを明らかにするため、 $Re=300\sim700$ の流について可視化実験（作動流体：水、物体：前記物体の1/2縮尺模型）を行った。

図 11 に、 $Re=300$ の結果($d/W=0.1, 0.2, 0.4$)を示す。図 11(a)にみられるように、物体後流中にはカルマン渦が観察される。後流の流動状態は、ブロックージ比の影響を強く受け、 d/W の増加とともに渦の間隔が小さくなることがわかる。また、 $d/W=0.4$ になると、後流は偏流し下側の壁に付着しているのが認められるが、カルマン渦は規則的に生じし後流の側壁への付着が不安定になったり、切換わったりすることはなかった。このことは Re が大きく異なる前記の場合($Re=6.0\times10^4$ の場合の後流の圧力分布の測定結果)においても生じた。

図 12 にストローハル数 $St(=fd/U_\infty)$ とブロックージ比との関係を示す。 St は、 d/W の影響をより強く受け、その増大とともに増加する。図 12 には、 $Re=6.0\times10^4$ の結果（風洞、熱線流速計、周波数分析器を使用した実験）も併せ記入した。この場合（図 12 中△印）も前記と同様の傾向を示すことが知れる。図 12 中の▲印は、 St を算出する際、主流速度 U_∞ の代わりに、 C_D の計算に用いた物体・測定部側壁間の速度 U_w を使った結果である。図 12 にみられるように、 U_w を使って求めた St の分布は d/W に依存せず、ほぼ一定値をとること、すなわち渦発生振動数 f は、 U_w に比例してほぼ直線的に変化すること ($f \propto U_w$) がわかる。また、 U_w を導入した場合、 $d/W \geq 0.35$ で C_D が偏流する後流の影響を受ける（図 3）のに対し、 St はその影響をあまり受けないことがわかる。

3・3 修正抵抗係数 3・2 節までにおいて、供試鈍頭物体の流力特性に対するブロックージ比 d/W の影

響を実験的に明らかにした。これらの結果をもとに、実用的に重要な d/W の影響を受けない基準抵抗係数 C_{D0} を、修正抵抗係数 C_D (3・1 節参照) を用いて求めると次式となる。すなわち、本実験範囲 [$Re=(4.5\sim7.5)\times10^4$, $d/W=0.1\sim0.35$] 内では、

$$C_{D0} = K^2 \cdot C_D \quad (4)$$

である [K は式 (3) 参照]。この整理式によって、垂直底部面をもつ二次元鈍頭物体の抵抗係数がある程度評価することができるものと思われる。

4. 結 論

半円形状の前縁を有し後端部に垂直底部面をもつ二次元鈍頭物体について、その流力特性に及ぼすブロックージ比 d/W の影響を、抵抗力、圧力分布、速度分布、物体後端角部から放出される渦の卓越周波数の測定、および流れの可視化観察などをもとに実験的に検討した。結果は、以下のように要約できる。

- (1) 物体へ衝突する主流速度 U_∞ を用いた抵抗係数 C_D [式 (1)] は、ブロックージ比 d/W の増加とともに増加し、とくに $d/W \geq 0.35$ でその影響が著しい。
- (2) 物体・側壁間速度 U_w を用いた修正抵抗係数 C_D を用いれば、 $d/W \leq 0.35$ に対して d/W によらず整理でき、ほぼ一定値をとる。
- (3) ブロックージ比の影響がない基準抵抗係数 C_{D0} は U_w を導入した整理式 (4) でほぼ表すことができる。
- (4) $d/W \geq 0.35$ では、底部面下流の流れが偏流して側壁面に付着する流動形態となり、圧力抵抗が著しく増大する。
- (5) d/W の増大とともに U_w が増大し、物体および側壁面上の境界層厚さが減少する。底部面の負圧量も増大する。
- (6) 物体後端角部からの渦放出周波数 f は、 U_w に比例してほぼ直線的に変化する。

文 献

- (1) 加藤・ほか 2 名, 機論, 52-480, B (昭 61), 2913.
- (2) 農沢・ほか 2 名, 自動車技術, 39-11 (昭 60), 1292.
- (3) Rosenhead, L. and Schwabe, M., *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 129 (1930), 115.
- (4) 岡本・竹内, 機論, 41-341 (昭 50), 181.
- (5) 桧和田・ほか 3 名, 機論, 42-360 (昭 51), 2481.
- (6) 鈴木・平野, 機論, 44-385 (昭 53), 3044.
- (7) Farell, ほか 3 名, *Trans. ASME, Ser. I*, 99-3 (1977), 470.
- (8) 平野・ほか 2 名, 機論, 49-447, B (昭 58), 2363.