論 文

CONTRIBUTED PAPERS

Bluff body の抵抗減少と後流* Wake and Drag Reduction of Bluff Bodies

末 松 良 勝**・相 原 康 彦**
Yoshikatsu SUEMATSU and Yasuhiko AIHARA

Abstract

This paper describes an experimental study on the near wake behind bluff body in relation to the base drag reduction. The experiments were carried out using the models with two-dimensional blunt trailing edge and with periodically three-dimensional one. REYNOLDS number based on uniform velocity and base thickness is less than 8×10^3 .

Behind the two-dimensional bluff body, the periodic vortex shedding occurs and the static pressure reduces in the vortex formation region. In the case of the three-dimensional model, it is observed as a general tendency that the static pressure reduction and the concentration of periodic vortices are not notable. This seems to be the essential feature associated with the drag reduction of three-dimensional bluff body.

1. 序 論

抵抗減少に関する研究は、航空機をはじめ各種の交通機関においてなされており、流体力学の分野においても基本的な課題の一つである。本論文は、物体の圧力抵抗が全抵抗の中で大部分を占める bluff body に関する研究であり、空気の流れは低速である。

bluff body の抵抗を減少させるには、splitter plate と呼ばれる薄い板を wake 中に置く方法や、物体の base から jet を下流に吹き出す base bleed と呼ばれる方法などがよく知られており、これらの研究について、ROSHKO^{1),2)}, BEARMAN^{3),4)}, NASH⁵⁾, 中口⁶⁾などの実験結果が報告されている。また、後縁に厚みをもつ物体では、後縁に幅方向の歯型(凹凸)をつける方法があり、物体の後流に三次元的擾乱を加え、その結果、抵抗が著しく減少することが TANNER^{7),8)}の実験で認められた。この方法についての基礎的な研究をするために、風洞実験を行って、主に near wake の流れの状態を測定した^{11),12)}

2. 抵 抗 測 定

後縁に付ける凹凸の幅や長さが抵抗の大きさにどのように影響するかを調べるために、後部の形状を変えた各種の模型を作り、抵抗の大きさを測定した。模型の厚さは一定で 12mm であり、凹凸の幅を 12mm に保ち、長さを 12mm, 18mm, 24mm に変化させた模型と、長さを 24mm に保ち、幅を 12mm, 24mm に変化させた模型を使用して、それぞれの抵抗の大きさを、凹凸を付けない二次元模型と比較した。このときの模型平面面積はすべて一定である。全抵抗は歪ゲージを用いて測定し、平面面積を代表面積とする抵抗係数で表示した結果が第 2 図である。

この実験では、凹凸の長さを長くするほど、抵抗係数が減少しており、長さ 24mm の歯を付けた模型では、歯のない二次元模型に比べて約 30~40% の抵抗が減少している。このことから、後縁に三次元的凹凸を付けて抵抗を減少させる方法の効果が十分に確かめられ、凹凸の大きさや形状に最適なものが存在することも示唆される。

3. 物体後流の測定

3.1 実験方法 物体後方の wake 中の流れの状態を調べるために、模型を拡大して実験を行った。風洞はテストセクションに 300mm×300mm, 長さ 600mm の透明なアクリル樹脂製のダクトをもつ低速吹き出し型風洞である(第 3 図)。模型は厚さ 30mm, 幅 300mm の対称物体であり、両端の影響を防ぐ目的で、ダクトの中央に隙間なく固定した。長さは二次元模型 I, II, III では 110mm であるが、三次元性をもたせた模型 IV ではさらに長さ 60mm, 幅 30mm のブロックを 30mm 間隔でつけた。前縁は半径 5mm の円弧であり、先端から 50mm の位置までは銅板で成形し、それ以後はアクリル樹脂で作り、後部の付け替えができる。流れの可視化実験で、煙を表面に沿って境界層内に注入するために、銅板とアクリル樹脂との間に 0.5mm の二次元スリットが開けてある。定量測定で

* 昭和 56 年 6 月 11 日原稿受理

** 東京大学工学部航空学科

第1図 抵抗の測定に用いた模型

第2図 風速に対する抵抗係数

(a) 凹凸の長さを変えた場合, (b) 凹凸の幅を変えた場合

は, このスリットを埋めて滑らかに成形した模型を I, 成形しない模型を II とし, さらに境界層を乱すために直径1.5mm の tripping wire をスリット位置に張った模型を III とする. これらの二次元模型には中央部に1カ所, 三次元模型 IV には凹部と凸部の中央1カ所ずつに base pressure を測定するための静圧孔が開けられている (第4図).

第3図 風洞およびダクト

A: 模型, B: 煙の導入パイプ

第4図 定量測定に用いた模型

模型 I, II, III は二次元模型で模型 II の両面には煙出口のためのスリットが付けてあり模型 III には tripping wire が付けてある. 模型 IV は三次元模型.

第5図 模型後流の流れ (XZ 面)
(a) 模型II, (b) 模型IVの凹部, (c) 模型IVの凸部

第6図 模型後流の流れ (XY 面)
(a) 模型II, (b) 模型IV

第7図 風速に対する base pressure coefficient
● Model II, △ Model IV 凹, ▲ Model IV 凸

第8図 静圧分布, 中央線上
模型IVの凹部は $X = -60\text{mm}$ の位置が模型の後縁になる. $U_\infty = 2\text{m/sec}$

● Model II, △ Model IV 凹, ▲ Model IV 凸

第9図 平均風速および乱れの分布
(a) 模型Ⅱ, (b) 模型Ⅳの凹部, (c) 模型Ⅳの凸部

実験は、流れの可視化実験、base pressure と静圧分布の測定、平均風速と乱れの分布の測定などを行った。可視化実験では、模型内から流したケロシン蒸気にストロボスコープで照明して写真撮影を行い、静圧の測定には静圧管を、風速の測定には熱線プローブをトラバース装置に固定して下流側から挿入して行った。三次元模型の後流は複雑であり、静圧孔に動圧が加わることが心配されたので、ほとんど影響を受けない中央線上だけを測定して、二次元の場合と比較した。

3.2 流れの可視化 二次元模型では、境界層が後縁で剥離した後、孤立渦に取り込まれて渦列が形成される様子が観察される。渦は幅方向に連続であり、ダクト壁の影響を受けない中央付近では二次元性を保ったまま下流に流れている。一方、凹凸を後縁に付けた模型では、凹部と凸部での渦発生位置にずれがあるために、幅方向には不連続であり、むしろ半周期前後に向かい側から発生した渦につながるような傾向がある。また、二次元性を失った渦には、中心の静圧が低い部分に周辺からの空気が流入するために、径方向の圧力勾配と回転速度との平衡が崩れて、渦が拡散していくのが写真で観察された (第5図、第6図)。

3.3 後縁の三次元性による影響 模型の後縁に凹

凸を付けた影響は、第7図の base pressure の上昇に明らかに現われており、抵抗の減少に効果的であることがわかる。また、後流の静圧分布を調べたところ (第8図)、base pressure よりも静圧が低い部分 (静圧の谷) が存在しており、この影響により、base pressure の値が左右されるものと思われる。

物体後流の風速分布を測定した結果 (第9図) と比較すると、二次元模型では、静圧の谷の位置に近い $x=30\text{mm}$ では、死水領域外側から空気が流れ始めてお

第10図 風速に対する base pressure coefficient
○ Model I, ● Model II, □ Model III

第11図 静圧分布, 中央線上
 $U_{\infty} \approx 2\text{m/sec}$, ○ Model I, ● Model II, □ Model III

(a)

(b)

第12図 静圧分布の等圧線図
(a) 模型 II, (b) 模型 III

第13図 平均風速および乱れの分布
(a) 模型Ⅰ, (b) 模型Ⅱ, (c) 模型Ⅲ

り、同時に後縁の厚みにあたる $x = \pm 15 \text{ mm}$ の位置付近に存在する乱れのピークが最大に達している。さらに、 $x = 60 \text{ mm}$ の位置までに流れの攪乱がすすみ、平均風速は一樣流に近づき、乱れが平均化していくのがわかる。一方、三次元模型では、平均風速の回復がおそく、死水領域が下流まで長く残っている。風速の回復に際しては、外側の減速される領域が、二次元の場合に比較して狭く、また乱れのピークは徐々に増大して $x = 60 \text{ mm}$ で最大となる。これは、静圧の谷が顕著に低くないために、死水領域内に外側から剝離した流れが巻き込まれにくいためであると思われる。

以上の結果から、二次元模型では死水領域内へ、外側の剝離した流れが巻き込まれて、周期的に発生する KÁRMÁN 渦を形成するが、この際に巻き込まれる位置が渦の発生点となり、静圧が低下する。これに対して三次元模型では、凹部と凸部の風速回復の割合が異なり、幅方向への空気の流動がおこるために、渦に巻き込まれるべき位置の静圧が低下しない。このために、外側の流れが巻き込まれるのがおくれ、死水領域内の風速回復が遅くなる。また、渦に形成される位置までに、剝離した境界層の渦度が散乱するため、二次元的渦には成長せず、渦は下流にいくと崩壊する。渦の発生位置を物体から遠ざけて渦に取り込まれる渦度を減らし、base pressure を上昇させる現象は、splitter plate を置いて渦の発生をおくらせた実験と類似していると考えられる。

3.4 境界層の乱れの影響 三次元的擾乱を加えた効果を二次元の場合と比較するために、剝離する前の境界層に tripping wire などて乱れを加えた実験を行って比較した。後縁での境界層の速度分布を調べたところ、模型Ⅰと模型Ⅱは最大乱れが 1.8% と 7.0% で層流型の速度分布であったが、模型Ⅲは最大乱れが 22% で乱流型の速度分布であった。

base pressure が最も高い値になるのは、乱れを小さくするように成形した模型Ⅰであるが、次に高い値を示すのは、模型Ⅱよりもむしろ境界層を乱流にした模型Ⅲである(第10図)。静圧分布の測定では、模型の後方に明確な静圧の谷が存在し、その位置は乱れを大きくしたもののほど模型に近づいている(第11図、第12図)。

後流の風速分布の測定では(第13図)、乱流で後縁から剝離する模型Ⅲが、平均風速の回復が最も早く、乱れのレベルも全体的に高い。また、shear が強い場所には乱れのピークが存在し、これが最大になる位置は、模型Ⅰで $x = 35 \text{ mm}$ であるが、境界層の乱れが大きな模型ほど上流に移動し、模型Ⅱでは $x = 25 \text{ mm}$ 、模型Ⅲでは $x = 15 \text{ mm}$ となる。この位置は、第11図に示された静圧が最低となる位置に近接しており、孤

第14図 渦の周波数分布

(a) 模型Ⅱ, (b) 模型Ⅲ, (c) 模型Ⅳ, 1目盛は 1 Hz, $U_\infty = 0.6 \text{ m/sec}$

立渦の発生点に一致していると考えられる。

以上のように、剝離する前の境界層を乱す効果は、渦の発生位置を上流に移動させて base pressure の値を多少変化させるが、基本的な流れのパターンは一定で、三次元的擾乱を加えた場合のような渦の崩壊には至らないと考えられる。このことは、模型後流で測定した渦のスペクトル分析(第14図)からも確かめられる。模型Ⅱで 6 Hz 付近にあるラインスペクトルは、模型Ⅲでは 4.8 Hz 付近に下がるが、周波数が低下するだけで渦の構造には変化がみられない。しかし、三次元模型ではスペクトルの山が二カ所に分裂して、もはや KÁRMÁN 渦とは構造が異なっている。

一般に、bluff body では剝離領域の存在が避けられず、流れが U_s の速度をもって剝離すると考えると、死水領域との不連続面に単位時間あたり $U_s^2/2$ の渦度が片側の面から放出される。この渦度は、物体近傍で粘性による散乱や、対面から発生する逆向きの渦度と打ち消し合いにより、全体の η 倍が孤立渦に巻き込まれるとすると次式が成り立つ。

$$\frac{1}{2} U_s^2 \eta = n \Gamma$$

n : 渦の発生周波数

Γ ・渦の circulation

安定した KÁRMÁN 渦列は流体に誘導速度を与え、流体の失う運動量が物体の抵抗に等しいことから、 U_s や η の値を小さくすることが抵抗減少につながる。splitter plate は渦の発生を妨げて、発生位置を下流に遠ざけることによって η の値を小さくする。同様に、後縁に凹凸を付けた物体でも、静圧が低い部分をなくして流れの巻き込みの位置を遠ざける結果、 η を小さくする。一方、tripping wire を付けて境界層を乱流にした模型では、渦の発生位置が上流に近づくにもかかわらず base pressure の値が上昇する。これは乱れによる擾乱によって渦度が散乱するために、 η の値を小さくするものと思われる。

4. 結 論

剝離を伴う bluff body では、base pressure が低くなるために抵抗が大きく、後流に周期的な KÁRMÁN 渦を発生する^{9),10)}。二次元 bluff body の near wake には、外側から剝離した流れが巻き込まれて孤立渦の発生位置となる静圧の谷が存在し、このために base pressure が低くなると思われる。この静圧の谷をなくし、base pressure を上昇させるためには、物体近傍で渦を崩す要因を加えて渦の発生を妨げる方法が必要であり、後縁に凹凸を付けた物体から発生する三次元的擾乱が有効である。三次元的擾乱は幅方向に一続きになろうとする渦を分断する働きをもち、この結果、渦中央の静圧の低い部分に周辺からの空気の流入が生じて、渦の平衡を崩す。したがって、三次元的模型では後流に著しく静圧の低い場所をもたず、base pressure が高くなる。

一方、二次元的擾乱を加えるために tripping wire を付けて境界層を乱流にした模型では、near wake に乱れを加えるが、KÁRMÁN 渦を崩壊させるには至らない。また、渦に巻き込まれる位置に近いものほど、

base pressure の低下が著しいのが一般的であるが、境界層が乱流の模型ではこれがあてはまらない。これは、死水領域に沿う流れの乱れの発達が速く、渦度が散乱するために、孤立渦に取り込まれる渦度の割合が減少するのが原因であろうと思われる。

参 考 文 献

- 1) ROUSHKO, A.: On the Drag and Shedding Frequency of Two-dimensional Bluff Bodies, NACA, TN 3169 (1954).
- 2) ROUSHKO, A.: On the Wake and Drag of Bluff Bodies, J. Aeron. Sci. (Feb. 1955), pp. 124-132.
- 3) BEARMAN, P. W.: Investigation of the Flow behind a Two-dimensional Model with a Blunt Trailing Edge and Fitted with Splitter Plates, J. Fluid Mech., Vol. 21, Part 2 (1965), pp. 241-255.
- 4) BEARMAN, P. W.: The Effect of Base Bleed on the Flow behind a Two-dimensional Model with a Blunt Trailing Edge, Aeron. Quart., Vol. XVIII (Aug., 1967), pp. 207-224.
- 5) NASH, J. F.: A Review of Research on Two-Dimensional Base Flow, R and M, No. 3323 (Mar., 1962).
- 6) 中口 博: Bluff Body の空力特性と後流, 日本航空宇宙学会誌, 第20巻, 第226号 (1972), pp. 618-622.
- 7) TANNER, M.: A Method for Reducing the Base Drag of Wings with Blunt Trailing Edge, Aeron. Quart., Vol. 23, Part 1 (Feb., 1972), pp. 15-23.
- 8) SCHLICHTING, H.: Recent Progress in Boundary-Layer Research, AIAA J., Vol. 12, No. 4 (Apr., 1974), pp. 427-440.
- 9) CALVERT, J. R.: Experiment on the Low-speed Flow Past Cones, J. Fluid Mech., Vol. 27, Part 2 (1967), pp. 273-289.
- 10) GERRARD, J. H.: The Mechanics of the Formation Region of Vortices behind Bluff Bodies, J. Fluid Mech., Vol. 25, Part 2 (1966), pp. 401-413.
- 11) 末松良勝, 相原康彦: 物体の抵抗減少と後流, 第17回飛行機シンポジウム講演集 (1979).
- 12) 末松良勝: 物体の抵抗と後流, 昭和55年度東京大学工学系研究科航空学専門課程修士論文 (1981).