一様流中に置かれた十字交差 2 円柱の音響特性* (第 4 報, 円柱背後の二次流れ)

稲垣 進^{*1}, 富田 幸雄^{*2}
村松 久巳^{*3}, 鈴木 昭次^{*4}

Acoustic Characteristics of Two Circular Cylinders Forming a Cross in Uniform Flow (4th Report, Secondary Flow behind Both Cylinders)

Susumu INAGAKI, Yukio TOMITA,
Hisami MURAMATSU, and Shōji SUZUKI

In the turbulent wake behind an upstream cylinder in a uniform flow, the downstream cylinder was set in the form of an intersection with the upstream cylinder. A secondary flow was found behind both cylinders. The important feature was found to be an increase of base pressure due to the formation of secondary flow patterns. The flow pattern has been verified by oil-film and tufts flow visualization. The base pressure at various spanwise stations for both cylinders was measured. Then, the relationship between the secondary flow and the base pressure was studied.

Key Words: Fluid Mechanics, Two Circular Cylinders, Cross Arrangement, Noise Reduction, Pressure Distribution, Flow Visualization

1. 緒 言

一様流の中に置かれた円柱の後流中に、上流側の円柱と十字交差するように第 2 の円柱を設置するとその発生音は大幅に低減する。前報^{(1)~(3)}までに、これらの音響特性およびその発生音の原因となる 2 円柱まわりの流れについて検討を行ってきた。その結果、発生音の低減は円柱の背圧が上昇し、はく離するうずの強さの変動率の減少によること、およびそれにともない、円柱表面の圧力変動、後流の速度変動が減少することなどを明らかにした。

そこでさらに、本報では 2 円柱を十字交差させることにより円柱のかなりの範囲にわたり背圧が単独円柱のそれより上昇することと、流れの関係を調べるため円柱背後の流れを詳細に検討した結果、円柱の下流側に円柱軸に沿う二次流れの生じていることを明らかにしている。すなわち、この円柱背後の二次流れを油膜

法、タフト法などの可視化法を用いて詳細に検討している。

2. 実 験 装 置

実験に用いた風洞は既報⁽¹⁾と同一のものである。ノズル出口と供試円柱との関係を図 1 に示す。上流側の第 1 の供試円柱はノズル出口から 100 mm の位置に流れ方向と直角に設置されており、第 2 の供試円柱は第 1 の供試円柱の下流側に設置されている。第 1、第 2 の供試円柱の長さはそれぞれ 160, 245 mm であり、直径は 20, 15, 6 mm である。材質は黄銅で、表面は滑らかに仕上げられている。円柱表面の圧力の測定は表面に圧力孔を持った直径 20 mm のアクリル樹脂の円柱を、その軸を中心に回転させて行う。円柱表面の流れは油膜法⁽⁴⁾、円柱まわりの流れはタフト法を用いて

図 1 ノズルと円柱の関係

* 昭和 62 年 10 月 2 日 北陸信越支部信越地方新潟講演会において講演, 原稿受付 昭和 61 年 12 月 23 日。

^{*1} 正員, 防衛大学校 (〒239 横須賀市走水 1-10-20)。

^{*2} 正員, 東京理科大学理工学部 (〒278 野田市山崎東亀山 2641)。

^{*3} 学生員, 東京理科大学理工学部。

^{*4} 正員, (株)荏原製作所 (〒144 東京都大田区羽田旭町 11-1)。

それぞれ可視化する。

3. 第 1 円柱近傍の流れ

3・1 $l/D_1=0.5$ の場合 図 2~4 は 2 円柱が交差する近傍の円柱表面の流れを油膜法で可視化したものである。2 円柱間の距離 l/D_1 は 0.5 で、この値は 2 円柱の直径比 D_2/D_1 が 1 のとき、2 円柱を十字交差させることによる減音効果が最も良い⁽¹⁾。添字 1, 2 はそれぞれ上流側の第 1 円柱 U, 下流側の第 2 円柱 D を表す。 D_1 は 20 mm ($D_2/D_1=1$)、気流速度 V は 20 m/s で、このときのレイノルズ数 $Re(=VD_1/\nu)$ は 2.7×10^4 である。図 2 は第 1 円柱を下流側から見た図である。右図はスケッチしたものであり、実線で示した円柱が第 1 円柱 U、破線で示した円柱が第 2 円柱 D である。図 2 中の矢印は油膜の流れ方向を示している。油膜の動きから 2 円柱の交点を中心として第 1 円柱に沿って円柱端部 (図の上下方向) に向かう流れのあることが認められる。しかしその流れは交点より約

図 2 第 1 円柱上の二次流れ (下流側)

図 3 第 2 円柱上の二次流れ (上流側)

$1.3D_1$ で円柱からはく離している。図 3 は第 2 円柱を上流側から見た図であり、下図の破線で示す円柱は第 1 円柱である。2 円柱の交点付近の第 2 円柱上の油膜の流れ方向は図の左右から交点に向かっており、図の左右から交点に向かう流れのあることがわかる。その流れは交点付近で交わり、円柱の側方へ流れとなっている。この第 2 円柱の側方を示したのが図 4 である。交点付近の第 2 円柱側方への流れが第 1 円柱下流側の円柱軸 (X 軸) に沿う二次流れを生じさせていることがわかる。

図 5 は円柱上のスパン方向の圧力分布を示す。 $V=20$ m/s, $D_1=D_2=20$ mm である。図 5 の座標の原点は 2 円柱の交点としてある。図 5 には単独円柱 ($D_2/D_1=0$) の $\alpha=180^\circ$ における圧力も記入してある。 Δ 印は第 2 円柱上の $\alpha=0^\circ$ における圧力係数 $C_p=[(p-p_0)/(1/2\rho V^2)]$ を示したものである。ここに p は円柱の壁圧、 p_0 は主流の圧力、 ρ は密度である。第 2 円柱の交点 ($Y/D_1=0$) 付近は第 1 円柱の後流中にあるため自由流れ場における円柱のよどみ圧より小さくなっている。交点より少し離れた $Y/D_2=1.0$ における C_p は 1.0 となっており、自由流れ場における円柱のよどみ圧と等しくなっている。 $Y/D_2>1$ の C_p は測定していないが、自由流れ場における円柱のよどみ圧になるので $C_p=1$ と考えられる。また、図 3 より明らかなように交差による影響は $Y/D_2<1$ の範囲にとどまっている。上記の第 2 円柱の上流側における交点に向かう流れはこの交点付近の圧力差によると考えられる。しかし交点に向かう流れのため図 5 の $\circ$ 印で示した $\alpha=180^\circ$ における交点付近の圧力は単独円柱 ($D_2/D_1=0$) の圧力よりかなり上昇している。また 2 円柱間距離 l/D_1 が近い場合交点付近では第 1 円柱の $\alpha=180^\circ$ の圧力と第 2 円柱の $\alpha=0^\circ$ の圧力とはほぼ等しくなっている。

図 4 第 2 円柱上の二次流れ (側方)

第1円柱の $\alpha=180^\circ$ における圧力は2円柱が交差する交点付近では第2円柱の影響を受けて上昇するが、交点より X 方向に離れた位置では交点の圧力より低い。この圧力差のため交点から X 方向に向かって流れが生じる。第1円柱に沿う X 方向への二次流れのため、第1円柱の $\alpha=180^\circ$ における圧力は交点以外でも単独円柱の圧力とは異なったものになると考えられる。図5の第1円柱の圧力分布 ($\alpha=180^\circ$) は交点 ($X/D_1=0$) から X 方向に離れるにしたがい圧力はいったん低下するが、さらに X/D_1 が大きくなると圧力は X/D_1 の増加にしたがい上昇している。このように広い範囲にわたり第1円柱の背圧が上昇するため、第2報⁽²⁾で示したように円柱表面の圧力分布から求められる局所抗力は単独円柱の場合より低下する。またはく離するうずの強さの変動率が減少し、発生音が低減するものと考えられる。

次に、円柱表面から少し離れた位置での流れをタフト法で可視化したのが図6, 7である。図6は第1円柱上の $\alpha=180^\circ$ の位置にタフトを付けた場合である。図6(a)は $D_1=20\text{ mm}$ ($D_2/D_1=1$), $V=20\text{ m/s}$, $Re=2.7 \times 10^4$ の場合であり、図6(b)は $D_1=15\text{ mm}$ ($D_2/D_1=1$), $V=15\text{ m/s}$, $Re=1.5 \times 10^4$ の場合である。二つの Re の相異によるタフトの動きに顕著な差は認められない。また油膜法による円柱上の流れも、 $Re=1.5 \times$

10^4 の場合、交点から約 $1.3 D_1$ で流れは円柱からはく離しており、 $Re=2.7 \times 10^4$ の場合と同じである。図7は $D_1=20\text{ mm}$ ($D_2/D_1=1$), $Re=2.7 \times 10^4$ の場合である。図7(a), (b)は第2円柱中心軸を通る X 軸に平行な面に設けたタフトグリットによる可視化した流れを示したものである。図7(a)は斜め下流側から見た図であり、図7(b)は下流側から見た図である。図に見られるように、2円柱が交差する位置から第1円柱に沿って円柱端部に向かう二次流れが認められる。しかもこの二次流れは第1円柱の $\alpha=180^\circ$ 付近であり、円柱軸より Y 方向に $0.5 D_1$ (第1円柱の両側) の位置のタフトは第1円柱に沿う流れがあることを示していない。図7(c)は第2円柱上の $\alpha=90^\circ$ の位置にタフトを付けた場合である。図7(c)の第1円柱の $\alpha=180^\circ$ の位置にあるタフトは第1円柱に沿って X 方向に流れがあることを示しておりその両側のタフトはその中央のタフトのほうに傾いている。

以上のタフトの動き、油膜の状態をもとにして l/D_1

図5 圧力分布 ($Re=2.7 \times 10^4$)

(a) $Re=2.7 \times 10^4$ (b) $Re=1.5 \times 10^4$

図6 第1円柱近傍の二次流れ

(a)

(b)

(c)

図7 第1円柱近傍の二次流れ ($Re=2.7 \times 10^4$)

$=0.5$ の場合における第1円柱に沿う二次流れをモデル化したのが図8である。第2円柱を中心として流れは軸対称であるので第2円柱上部の流れのみを示している。図8に見られるように、二次流れは2円柱の交点から第1円柱に沿って流れるが、まもなく第1円柱から離れ、しだいに主流方向に向きを変える。

第2円柱を一方の側壁に接して設けた場合は、第1円柱の中央で十字交差させた場合とは円柱まわりの流れの特性は異なると考えられるが、このような設置方法でも十分な減音効果が得られる⁽²⁾。したがって、第2円柱を一方の側壁に接して設けた場合でも円柱背後に円柱軸に沿う流れがあるものと考えられる。その流れを示したのが図9である。図9(a)はタフトを第1円柱の $\alpha=180^\circ$ の位置に付けた場合であり、円柱の側方から見た図である。図9(b)は油膜法によって第1

円柱の下流側の流れを示したものである。両図とも $D_1=20\text{ mm}$ ($D_2/D_1=1$), $Re=2.7\times 10^4$ の場合である。図6のタフトに比べて、図9(a)のタフトは第1円柱の上方まで傾いていることがわかる。図9(b)の油膜による円柱上の流れを見ると、円柱下方の第2円柱近くでは第1円柱側方への流れは側壁の影響を受けて図2の場合より広がっている。X方向における第1円柱からの流れのはく離は交点から約 $3.1D_1$ となっている。図9(c)はアスペクト比 L/D_1 を大きくした場合の流れとして、 $D_1=6\text{ mm}$ ($D_2/D_1=1$), $Re=8.1\times 10^3$ としたときの第1円柱の下流側の油膜法による流れのようすである。第1円柱からの流れのはく離は交点から約 $5D_1$ となっている。

3.2 $l/D_1=0$ の場合 2円柱間距離 l/D_1 が零の場合は、2円柱の直径比 D_2/D_1 が1である組合せにおいて減音効果はわずかに落ちる⁽¹⁾が設置しやすい構造

図8 モデル化した二次流れ

図10 第1円柱上の二次流れ (下流側)

図9 第2円柱を側壁に接した場合

図11 第2円柱上の二次流れ (上流側)

である。図10～12は2円柱が交差する近傍の円柱表面の流れを油膜法で可視化したもので、 $D_1=20\text{ mm}$ ($D_2/D_1=1$), $Re=2.7\times 10^4$ の場合である。図10は第1円柱を下流側から見た図である。 $l/D_1=0.5$ (図2) の場合に比べて、2円柱が接しているため交点を中心として流れが四方へ広がっており、複雑な模様となっている。図10の中央の円は2円柱の接点である。Zdravkovich⁽⁵⁾は $Re=6.0\times 10^4$ の場合について同様の図を示しており、交点近傍の二次流れについても説明している。 $l/D_1=0.5$ の場合と同様に交点を中心とした X 方向に向かう流れが認められる。その流れは交点より約 $1.5D_1$ で第1円柱からはく離しており、 $l/D_1=0.5$ の場合よりはく離する位置が X 方向に長くなっている。図11は第2円柱を上流側から見た図である。2円柱の交点付近の第2円柱上の油膜の流れ方向は図の左右から交点に向かっていくが、 $l/D_1=0.5$ の場合と異なり2円柱の接点近くまで流れが届いている。その流れは交点付近で交わり、円柱の側方へ流れとなっていることは $l/D_1=0.5$ の場合と同様であるが、側方への流れの幅は狭く鋭い形状を成している。第2円柱の側方を示したのが図12である。交点付近の第2円柱側

方への流れが第1円柱の下流側の円柱軸に沿う二次流れを生じさせている。

図13は円柱上の X 方向の圧力分布である。 $D_1=20\text{ mm}$ ($D_2/D_1=1$), $V=20\text{ m/s}$ である。第1円柱の $\alpha=180^\circ$ における圧力は、交点付近では油膜法による図10に見られるように流れが複雑であるため上下の変化があるが、 X/D_1 が大きくなると圧力はいったん低下するが、さらに X/D_1 が大きくなると圧力は、 X/D_1 の増加にしたがい上昇する。これは $l/D_1=0.5$ の場合と同様である。しかし $X/D_1=2$ 付近の圧力の低下量は $l/D_1=0.5$ の場合に比べて大きくなっている。

図14は第1円柱上の $\alpha=180^\circ$ の位置にタフトを付けた場合である。 $D_1=20\text{ mm}$ ($D_2/D_1=1$), $Re=2.7\times 10^4$ である。2円柱の交点を境として円柱端部に向かう流れが認められる。 $l/D_1=0.5$ の場合 (図6) より流れがはっきりしている。図15は第2円柱を一方の側壁に接して設けた場合である。 $D_1=20\text{ mm}$ ($D_2/D_1=1$), $Re=2.7\times 10^4$ である。図15(a)はタフトを第1円柱の $\alpha=180^\circ$ の位置に付けた場合である。図9(a)のタフトに比べて円柱上方まで傾いていることがわかる。図15(b)は油膜法によって第1円柱の下流側の流れを示

図12 第2円柱上の二次流れ (側方)

図13 圧力分布 ($Re=2.7\times 10^4$)

図14 第1円柱近傍の二次流れ

図15 第2円柱を側壁に接した場合

図 16 第 2 円柱背後の流れ

したものである。X 方向における第 1 円柱からの流れのはく離は交点から約 $3.1D_1$ となっており、 $l/D_1=0.5$ (図 9 (b)) と同じである。

4. 第 2 円柱近傍の流れ

第 2 円柱下流側の流れを示したのが図 16 であり、タフトは $\alpha=180^\circ$ の位置に付けてある。 $D_1=20$ mm ($D_2/D_1=1$), $l/D_1=0.5$, $Re=2.7 \times 10^4$ の場合である。交点付近の流れを見ると、第 1 円柱背後のタフトは主流方向に向いているが、その両側のタフトは第 2 円柱端部方向に傾いており、この方向に流れがあることがわかる。これは図 5 の第 2 円柱の $\alpha=180^\circ$ における圧力も交点より Y 方向に離れるといったん低下し、さらに Y/D_2 が増えると圧力も増加していることと対応している。この傾向は第 1 円柱の $\alpha=180^\circ$ における圧力と同一であり、その値もほぼ同じである。図 16 の第 2 円柱側方のタフトを見るとタフトは交点に向かって傾いており、この方向の流れがあることを示している。図 1 に示すように、本実験装置では第 2 円柱端部が側壁のない自由端となっている。そこで、第 2 円柱側方の一様流と静止領域の境界付近の流れを調べるために示したのが図 17 で、油膜法で可視化したものである。図 17 (a) は円柱を X 軸方向から見た図であり、図 17 (b) は円柱の下流側から見た図である。図 17 の左方が第 2 円柱の交点である。図に見られるように、一様流と静止領域の境のせん断層で交点に向かう流れが認められる。第 2 円柱側方の $\alpha=180^\circ$ における圧力は一様流と静止領域の境において差が生じており、圧力の低い一様流内側へ向かう流れが生じることになる。以上のように、第 2 円柱の下流側では 2 円柱の交点から円柱端部に向かう流れと円柱端部から交点に向かう流れがあることがわかる。この二次流れのため第 1 円柱と同様に第 2 円柱の背圧も上昇することになる。 $l/D_1=0$ の場合も同様である。

5. 結 言

一様流中に置かれた円柱の後流中に第 2 の円柱を十

(a) X 軸方向側

(b) 下流側

図 17 第 2 円柱の一様流の境界付近の流れ

字交差するように設置したときの、円柱近傍の流れについて実験的検討を行い以下の事柄を得た。

(1) 2 円柱を十字交差させることにより、第 1 円柱の下流側には円柱軸に沿って 2 円柱の交点から円柱端部に向かう流れが生じる。

(2) 本実験装置では第 2 円柱端部が側壁のない自由端となっているため、一様流と静止領域の境から交点に向かって円柱軸に沿う流れが第 2 円柱の下流側に生じる。交点近くでは第 1 円柱と同様に交点から円柱端部に向かう流れが生じる。

(3) 円柱下流側の円柱軸に沿う二次流れが生じ、両円柱の背圧は交点から離れた位置においても単独の円柱の背圧に比べて上昇する。

おわりに、本実験に協力していただいた東京理科大学院生 根岸仁君に謝意を表する。

文 献

- (1) 富田・ほか 3 名, 機論, 51-468, B (昭 60), 2571.
- (2) 富田・ほか 2 名, 機論, 52-480, B (昭 61), 2837.
- (3) 稲垣・ほか 3 名, 機論, 52-483, B (昭 61), 3693.
- (4) 浅沼, 流れの可視化ハンドブック, (昭 52), 100, 朝倉書店.
- (5) Zdravkovich, M. M., *J. Fluid Mech.*, 128 (1983), 231.

討 論

〔質問〕 鈴木 雅宏・田村 尚敬

〔北海道大学工学部〕

(1) 上流側円柱はその両端が風洞壁に付着しており、下流側のそれは自由端を持つものとなっている。なぜ、このような特殊な実験装置を用いているのか、その理由をお聞かせ願いたい。また、供試円柱のアスペクト比が8程度と小さいこと、端板を用いていないことなどが、結言の(2)、(3)に大きく影響していると思われる。

(2) $l/D_1=0.5$ の場合の圧力分布および油膜法による可視化は、文献(2)ですでに発表済みと思われるし、 $l/D_1=0$ の場合については、山田ら(付1)による詳細な測定がある。本論文であえて再度取り上げた理由は、どこにあるのか。

〔回答〕 (1) 本研究の目的は流れの中に置かれた円柱からの発生音の制御と流れとの関係を調べることにある。したがって、可能なかぎり暗騒音の少ない小形風洞を使用し、かつ音響的共鳴、反射などをできるだけ少なくしようとしたため本装置のような構造、大きさとなっている。アスペクト比については本文中に述べたように、下流側円柱を一方の側壁に接して設けた場合であるが、 $L/D_1 \approx 27$ の場合も他の場合と同様に円柱背後に交点から円柱端部に向かう二次流れが生じている。端板については、それを用いることにより他の騒音が発生し取扱いが困難になる。そこで音響

測定と同じ条件で流れの観測をする必要があるので端板を用いなかった。さらに上述の L/D_1 の場合、山田らの文献(付1)にみられるように円柱背後には交点から端部に向かう二次流れが生じており、背圧も単独円柱の場合に比べて上昇しており、端板の影響はほとんどないものと考えられる。以上により結言(2)、(3)は変更する必要はないと思う。

(2) 既報⁽²⁾の油膜法による写真は、はく離点を検討するために提示した。したがって、円柱背後の円柱表面の流れのようすは明らかではない。そこで本報では流れのようすを明示するために油膜の写真にスケッチを加えて示した。また、2円柱の交点から円柱端部へ向かう二次流れを明らかにするため、円柱表面上の流れを油膜法、円柱近くの空間上の流れをタフト法と両面から検討することにした。圧力分布については、既報⁽²⁾では背圧の円柱軸方向の変化は示していない。また、この円柱軸方向の背圧分布は二次流れと対比して検討する必要があるためここで示した。 $l/D_1=0$ の場合についての山田らの文献(付1)では二次流れが存在する場合の背圧と単独円柱の背圧がどのように相違するかが明らかではない。なお、本報は上記文献(付1)が機論に掲載される以前に投稿したものである。

(付1) 山田・ほか3名, 機論, 53-486, B (昭62), 333.