39 円柱に衝突する2次元噴流の渦構造

北大工 望月 修^{*}、木谷 勝、新宮啓介

Vortex Structures of a Plane Jet Impinging on a Circular Cylinder

by Osamu MOCHIZUKI^{*}, Masaru KIYA^{*}, Keisuke SHINGU^{*}

A sound is generated by a plane jet impinging on a circular cylinder in the same way as the edge tone. The aim of this paper is to elucidate the relations between the generated sound and the vortex structures in the jet and near the cylinder. The vortex structures were visualized by using a rake of smoke wires, being synchronized with the generated sound. In order to obtain flow directions around the cylinder, the flow field marked by smoke was exposed to two-colored strobe lights which were radiated at different time. Positions of the vortices were obtained with respect to the phases of the generated sound. The intensity of the sound was found to be related to the size and arrangements of the vortices.

1. まえがき

2次元噴流の中心軸上に円柱をおくとエッジ音と同様の理由で決まる周波数の音が発生する。すなわち、噴流のせん断層で卷上がる渦（以下噴流渦とよぶ）が円柱近傍を通過する際に円柱から剝離する渦（以下剝離渦とよぶ）を誘起する。そのとき生じるじょう乱が上流へ伝播し、噴流渦の形成周期に影響を与え、発生音の周波数が決まる。これがいわゆるじょう乱のフィードバックによる発生音の周波数決定機構である。これに対して、発生音の強さが決まる理由についてはまだ明かでない。しかし、噴流渦の状態が音の強さに影響すると考えられるので、本研究では発生する音と円柱まわりの渦（噴流の渦および円柱から剝離する渦）の関係を調べた。

流れは音の周波数に同期して周期的であるので、音の信号をトリガーにした条件付の可視化を行って、音の一周期の間における円柱まわりの渦の挙動を調べた。瞬間的な流れ場の情報を得るために多線のスモークワイヤ法を用いた。さらに噴流中の円柱まわりの流れ場は逆流を含む複雑な流れであることが予想されるので、煙で可視化された渦の動きおよび流れの方向を正確に把握するために、発光のタイミングの異なる2色のストロボ光で2重露光する方法によって流れ場を撮影した。

条件付の可視化の結果、発生音の位相と噴流渦の位置との対応づけを行うことができた。また、発生音が強い場合および弱い場合における、円柱まわりの流れ場の比較を行った。

^{*} Department of Mechanical Engineering Hokkaido University,
Sapporo, 060 Japan

2. 実験装置および方法

図1に実験装置全体の概略および座標系と記号の定義を示す。噴出口の断面形状はアスペクト比16の長方形であり、高さ H は15mmである。噴出口の速度 U_0 は3m/sである。円柱の直径 D は30mmである。噴出口から円柱先端までの距離を x と表す。また、円柱の上流側の時間平均的よどみ点から測った角度を θ とする。

スモークワイヤーは長さ200mm、直径50 μ mのニクロム線で、円柱まわりに円柱の軸に垂直となるように15mm間隔で上流側2本、下流側4本張ってある。これらは直流電源(電圧150V)で300msの間加熱される。円柱の先端の真上170mmに位置するコンデンサーマイクロフォンで測定された発生音の信号はピーク検出器に入力される。ピーク検出器は音のピーク時に対応してパルスが発生し、そのパルスは各装置の動作開始をうながすトリガー信号となる。なお、発生音の周波数以外の信号でパルスが発生しないように、音の信号波形をバンドパスフィルターに通した後、ピーク検出器に入力した。

音の信号波形に対する各装置の作動タイミングを図2に示す。これらのタイミングはパーソナルコンピュータを用いて制御した。音の信号波形のピークに対応するパルスが検出された時間 t_1 の後、任意の時間 t_2 にスモークワイヤー加熱信号を出力する。スモークワイヤーの加熱から煙の出始めるまでの時間遅れを考慮して、時間 t_3 にストロボ1(黄色)を発光させ、時間 t_4 にストロボ2(青色)を発光させる。これら一連の動作が完了する間、カメラのシャッターは開放状態にある。流れ場は2色の光で撮影されているので、短時間($t_4 - t_3$)の煙の動きが容易に判別でき、渦の動きおよび流れの方向が写真から読み取れる。本実験では $t_4 - t_3$ は2msとした。

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup and notations.

Fig. 2 Timing of various instruments with respect to a signal peak of the generated sound.

Fig. 3 Instantaneous flow fields (a-d) at various phases of the generated sound in the case of high sound pressure level.

Fig. 4 Instantaneous flow fields (a-d) at various phases of the generated sound in the case of low sound pressure level.

3. 実験結果および考察

発生音の周波数は x_0/H の増加とともに減少し、音圧レベルは $x_0/H \approx 5$ に円柱をおいたときもっとも大きい⁽¹⁾。この位置はポテンシャルコアの消失するところでもある。この位置で、円柱まわりの流れ場の可視化を行った。発生音の周期は 40ms である。その半周期の間の流れ場の変化を図 3 に示す。写真の a ~ d は撮影時における音の波形の位相に対応するもので、それぞれの時間間隔は 5ms である。発生音の位相の変化にしたがって円柱先端に達する流脈線の曲がり方が変化する。それは円柱前方で中心軸に対して非対称に並んだ渦の配置の変化に対応する。それらの渦の移動を調べると、噴流渦は円柱の前方 ($\theta = \pm 30^\circ \sim 40^\circ$) では減速され、 $\theta = \pm 90^\circ$ 付近を通過するときには加速されている。加速された噴流渦は円柱からの剝離渦とともに渦対を形成し、その渦対は $\theta \approx \pm 150^\circ$ の方向に進む。円柱後方では、円柱前方に比べ流れは乱れており、また中心軸付近には円柱後端から 2D 下流までの範囲で逆流域が存在する。さらに、円柱後方の噴流の広がりを中心軸に対して上下で非対称となる位相が存在する。

音の強弱に対応した流れ場の違いを比較するために、薄い尾板付きの円柱に対する渦構造の可視化を行った。この場合の円柱位置は先の場合 (図 3) と同じであるが、尾板を円柱後端に取り付けたことによって、発生する音の強さは弱くなる⁽¹⁾。尾板 (厚さ 1.5mm) の長さ l が 2D 以上あれば、発生音の強さの減少に効果があることがわかっている⁽¹⁾。ただし、音の周波数は薄板の長さによって変化しない。この結果を考慮して、以下の実験は $l = 4D$ の薄板を円柱の後端に取り付けて行った。

可視化の結果を図 4 に示す。円柱先端位置に到達する流脈線の曲がり方が尾板のない場合に比べて小さい。これは音の強さが弱まったことと対応する。円柱後方の噴流の広がりも位相に関係なく中心軸に対して上下ではほぼ対称に広がる。これは、尾板が存在するため、中心軸に対して上下に存在する渦対 (噴流渦と剝離渦の組合せ) が干渉し合わないからであろう。

3. あとがき

円柱に衝突する 2 次元噴流の渦構造および円柱から剝離する渦と発生音の関係を条件付の可視化および 2 色のストロボを用いた 2 重露光による撮影手法を用いて実験的に調べた。主な結果を要約すれば次のとおりである。

- (1) 発生音の位相の変化と噴流渦の配置の変化との対応を明らかにした。
- (2) 噴流の渦は円柱の先端近くで減速、円柱からの剝離渦と渦対を形成するさいに加速を受ける。
- (3) 円柱後方の中心軸付近には、円柱の後端から円柱直径の約 2 倍下流までの範囲に逆流域が存在する。
- (4) 発生音の弱い場合には円柱後方において噴流の広がりを中心軸に対してほぼ対称となる。

参考文献

- (1) 望月・ほか 2 名、第 18 回乱流シンポジウム講演論文集、昭和 61 年 7 月、259-263。