半円柱周りの空力騒音と流れ構造に関する実験的研究

Experimental Study on Aerodynamic Sound and Flow Structure around a Semi-Circular Cylinder

○正 小熊 靖之 (新潟大院) 正 山縣 貴幸 (新潟大) 正 藤澤 延行 (新潟大)

Yasuyuki OGUMA, Graduate School of Science and Technology, Niigata University, Ikarashi 2-no-cho, Nishi-ku, Niigata
Takayuki YAMAGATA, Visualization Research Center, Niigata University
Nobuyuki FUJISAWA, Visualization Research Center, Niigata University

Key Words: Semi-circular cylinder, PIV, POD, Aerodynamic sound

1. 緒言

近年,自動車の低燃費化および低環境負荷の実現のため,ハイブリッド車や電気自動車の割合が増加している.そのため,空力騒音の相対的重要性は増加している.この空力騒音源の一つとしてドアミラーから放出される騒音が注目されており,車内環境の向上にはその低減が望まれている.ドアミラーのような曲率を持つ複雑な形状の物体に対して空力騒音の研究は過去になされていない. Fujita⁽¹⁾は,半円柱と角柱を組み合わせた物体において空力騒音の低下を示唆したが,その低減のメカニズムについては触れていない.一方,空力騒音の発生を考察するには,PIVによる流れ場の計測が有力な手段を提供する.過去の研究としては,対称翼からの離散周波数騒音を対象とした研究⁽²⁾,送風機翼を対象とした研究⁽³⁾,円柱の音源探査研究⁽⁴⁾が報告されている.一方,流れ場の構造を理解する統計的手法にPOD解析⁽⁵⁾がある. Oudheusden et al.⁽⁶⁾によると,角柱周りの速度場をPIV計測し,得られた速度場をPOD解析による速度場の再構成によって位相平均速度場を評価した.その結果,周期的な流れ場の場合では低次モードの速度場のみで任意の位相平均速度場を再構築できることを示した.

本研究では,半円柱周りの空力騒音の低減メカニズムの解明を目的として,半円柱ならびに円柱から放出される騒音の計測を行う.また,半円柱,円柱後流の速度場をPIVによって計測し,さらにPOD解析を導入することで流れ構造の変化と騒音特性との関係を明らかにする.

2. 実験および解析方法

2.1 実験方法

半円柱ならびに円柱後流のPIV計測は低騒音風洞と無響音室を用いて実施した.実験装置の詳細は,文献⁽²⁾に示す. Fig. 1は騒音計測およびPIV計測における計測部の概略図である.本研究では,直径 $d = 15\text{mm}$,スパン方向の長さ $l = 190\text{mm}$ の半円柱ならびに円柱を使用し,アスペクト比は12.7である.計測部の寸法は,断面が $190\text{mm} \times 190\text{mm}$,長さは 500mm であり,円柱は測定部入口の下流 250mm の位置に設置した.実験の平均流速は, $U_0 = 30\text{m/s}$ であり,レイノルズ数は $Re (= U_0 d / \nu) = 3.0 \times 10^4$ である(ν :動粘度).瞬時速度場の計測には2次元PIV法を用いた.その計測システムは,Nd:YAGレーザー($40\text{--}80\text{mJ/pulse}$),CCDカメラ($1280 \times 1024\text{pixels}$, 12bit),パルスコントローラーからなる標準システムである.トレーサーとしては風洞上流側で供給したスモーク(直径 $1\mu\text{m}$ 程度)を用いた.なお,速度場の計測範囲は,半円柱,円柱の幅方向中央部付近の後流 $52\text{mm} \times 42\text{mm}$ とした.また,CCDカメラのフレームレートは 4Hz で,600現象の計測を行った.PIV解析は直接相互相関法を用い,相関領域を50%オーバーラップ

する条件で行った.騒音計測は,半円柱,円柱中心からの距離 $r = 0.5\text{m}$ の位置にマイクロホン(測定範囲: $40\text{--}130\text{dB}$ (Flat特性),周波数範囲: $20\text{--}8,000\text{Hz}$)を設置して行った.マイクロホンの周波数特性には,Flat特性を使用し,サンプリング間隔を $100\mu\text{sec}$,サンプリング時間を 2sec として,30回繰り返し計測を行った.

2.2 POD解析

流れ場の特徴的な構造を抽出する方法の一つとして,POD解析がある.本研究では時間で離散化した瞬時速度場から固有ベクトルを求めるSnapshot PODを用いた^{(5),(6)}.このSnapshot PODは,各時刻の速度場に対して相関行列を計算し,この相関行列から固有値,固有ベクトルを算出する.次に得られた固有ベクトルから固有関数を求めることで流れ場の特徴的な構造を抽出した.また,固有値から各モードの寄与率を求めた.

3. 結果および考察

3.1 騒音特性

円柱ならびに半円柱の空力騒音計測で得られたスペクトル分布をFig. 2に示す.半円柱では $f = 402\text{Hz}$,円柱では $f = 370\text{Hz}$ にそれぞれ騒音のピークが見られる.また,半円柱の方が円柱よりも 10dB 程度音圧レベルが低いことがわかる.これらの騒音ピーク値の周波数から得られるストローハル数 $St (= fD/U_0)$ は,半円柱では 0.2 ,円柱では 0.19 である(f :周波数).なお,円柱においてはカルマン渦の発振周波数から算出した過去の実験結果⁽¹⁾とよく一致する.

Fig.1 Experimental setup

Fig. 2 Sound spectrum distributions

このことから、騒音のピーク値はカルマン渦の放出に伴い発生する騒音であり、半円柱においても同様であると考えられる。

3.2 半円柱、円柱周りのPOD解析結果

Fig. 3は、半円柱および円柱後流の瞬時速度場 600 セットから求めた 0 次を含めた 2 次モードまでの合成速度の POD 固有関数分布である。上段が円柱、下段が半円柱の結果を示し、図中にエネルギーの寄与率が記されている。この寄与率は、1 次モードでは半円柱、円柱共に 30%以上を占めており、2 次モードでは若干小さくなるが 1 次モードとほぼ同程度の寄与率であり、1 次と 2 次モードをあわせると約 60%の寄与率を占める。また、半円柱では、円柱と同様なエネルギーの寄与率が得られた。

時間平均速度場に対応する 0 次モードの解析結果によると、半円柱と円柱の流れ場の違いは、後流の逆流領域の広がり認められる。すなわち、半円柱では、両端から発するはく離せん断層の厚さが下流方向に急激に増大し、速度勾配の低下を示唆する。このことは、 $x/d = 1$ 付近の断面内速度分布に明瞭に認められる。一方、POD の 1 次と 2 次モードを見ると、半円柱の場合には、はく離せん断層付近で速度変動の減少が認められ、0 次モードの変化に対応した

変化が見られる。また、半円柱の後流には、円柱の場合と同様の組織構造が形成されるが、これらの構造は上流側へ移動する。このように半円柱後流には、はく離せん断層の速度勾配の低下と速度変動の減少が発生するが、これらは空力騒音特性の変化をもたらすことが期待される。一般に、円柱の騒音の発生機構は、流れのはく離点の変動ならびにはく離せん断層における渦の変動によって発生すると考えられている。本研究の POD 解析結果から得られたはく離せん断層での速度変動の減少効果は、空力騒音の発生原因である渦変動の低下に直接対応する。このことは、半円柱による空力騒音の低減メカニズムは、はく離せん断層の特性の変化によることを示唆する。一方、POD の 1 次と 2 次モードに見られるように、半円柱では、円柱と類似の組織構造が形成されるが、いずれのモードにおいても組織構造の発生位置が上流側へ移動しており、発生する大規模渦の周期が短いことがわかる。これは、カルマン渦の発生周波数の増大に対応しており、Fig.2 の空力騒音のスペクトル解析結果とも良く対応する。このように、半円柱後流の速度場の POD 解析結果によると、はく離せん断層や後流の組織構造が変化するため、離散周波数騒音が低下すると考えられる。

4. 結言

本研究では、半円柱周りの空力騒音の低減メカニズムの解明を目的として、半円柱ならびに円柱から放出される騒音の計測および速度場の評価を行った。その結果、半円柱では、音圧レベルの低下と渦発生周波数の増加が確認された。

参考文献

- (1) Fujita, H., Fluid Dyn. Res., **42**(2010), 015002.
- (2) Tomimatsu, S., Fujisawa, N., J. Vis., **5-4**(2002), 381.
- (3) Nashimoto, A., et al., J. Vis., **11-4** (2008), 365.
- (4) Oguma, Y., et al., J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., **118** (2013), 1.
- (5) Zhou, X., Hitt, D. L., J. Turbulence, **5** (2004), 1.
- (6) Oudheusden, B. W. Van., et al., Exp. Fluids, **39**(2005), 86.

Fig. 3 Eigen-functions of velocity: top semi-circular cylinder, bottom circular cylinder.