一様流中に置かれた円柱から放射される空力音源の可視化

加藤 昇志* (工学院大院), 飯田 明由 (豊橋技科大) 加藤 千幸 (東大生研), 水野 明哲 (工学院大)

Visualization of aerodynamic sound source around a circular cylinder in uniform flow

Shoji KATO, Akiyoshi IIDA, Chisachi KATO and Akisato MIZUNO

ABSTRACT

In order to understand generation mechanism of aerodynamic sound radiated from a circular cylinder, Lighthill tensor and acoustic fields are calculated with LES and PIV measurement. The result of sound propagation calculated with LES result is reasonably in agreement with the theoretical estimation. However, PIV data is slightly different from the LES result. This discrepancy is caused by assuming of the V_z component is zero in the PIV measurement.

Keywords: Aeroacoustics, Lighthill Tensor, Large Eddy Simulation, Dynamic PIV

1. 緒 論

流れの中に置かれた物体から放射される空力音の予測には Curle の理論¹⁾が広く用いられてきた。しかし、Curle の理論では、空力音と流れ場中に存在する空力音源との関係がわかりにくいという欠点があった。本研究では Lighthill テンソル²⁾を用いて空力音源の可視化を試みた。一様流中に置かれた円柱周りの流れ場を LES 解析 (CISS, FrontFlow/Blue) により計算するとともに、ダイナミック PIV を用いて計測を行った。これらのデータから円柱周りの Lighthill テンソルを求め、音源項の分布を可視化した。さらに、算出した音源項を用いて波動方程式を計算し³⁾、空力音の指向性について検討した。また、PIV 解析での実験上の制約である画角の制約や 2 次元計測が測定結果に及ぼす影響について検討を行った。

2. 解析手法

解析対象は円柱とした。レイノルズ数は $Re=4,800$ (代表長さは円柱直径) である。流れ場の解析は非定常三次元非圧縮性の Navier-Stokes 方程式を基礎方程式とする、空間・時間ともに 2 次精度の有限要素法を用いて行った。乱流モデルは LES とし、SGS モデルにはダイナミック・スマゴリンスキーモデルを使用した。格子点数は約 90 万点である。長さスケールは円柱直径を D として規格化した。スパン方向の領域長さは $4D$ とし、その両端には周期境界を設定した。なお、円柱中心を座標原点とした。ダイナミック PIV の計測データは山崎⁴⁾らのデータを使用した。実験によって得られるデータは 2 次元断面に限られることから、実験データから音場を計算する際は、2 次元のデータをスパン方向に積み重ねて 3 次元のデータを構築した。

音響解析には完全反射境界と無反射境界で構成される

有限要素法解析を用いた。音源には LES およびダイナミック PIV より算出した Lighthill テンソルを使用した。解析領域および格子点数は流れ場解析と同じものを使用した。

3. 解析結果

Fig. 1(a) に LES 解析から算出した Lighthill テンソルの分布を、Fig. 1(b) に PIV 解析から算出した Lighthill テンソルの分布を示す。なお、双方とも $St=0.2$ における分布である。LES 解析から算出した Lighthill テンソルは円柱後流 $1D \sim 2D$ 付近が最も強くなっている。音源項は円柱後流 $1D \sim 2D$ 付近に局在すると考えられる。一方、PIV 解析から算出した Lighthill テンソルは、LES 解析から算出した場合に比べて、明確な音源構造を捉えることができていないが、円柱後流 $1D$ 付近に音源項が集中する部分が観察されることから、この付近に音源が存在することを示唆している。PIV 解析の場合、円柱背後にトレーサ粒子が十分に入り込まないこともあり、数値解析ほど明確な構造が得られないと考えられる。これまで実験で空力音源項を確認した事例はあまりないことから、今後 PIV 計測の精度を向上させることにより、さらに詳細な音源構造を求めることができると期待される。

Fig. 2(a) に LES 解析から得られた音源を用いて解析した音圧分布を、Fig. 2(b) に PIV 解析から得られた音源を用いて解析した音圧分布をそれぞれ示す。LES 解析、PIV 解析ともに双極子型の指向特性を示すが、分布形状がやや異なる。また、音圧レベルを比較すると PIV 解析結果は LES 解析によるものよりも 17.3dB 小さい。この原因として PIV 解析では円柱後流 $4.2D$ までしかデータが計測できていないこと、 Z 方向成分の速度を計測していない ($V_z=0$ として解析) ことがあげられる。

(a) LES

(b) PIV

Fig. 1 Distribution of Lighthill tensor around a circular cylinder

このことを確認するため、PIV 計測解析領域内 ($X/D=1.1\sim 4.2$, $Y/D=-1.2\sim 1.2$) 内の LES 解析データを用いて音場の解析を行った。また、LES 解析データの V_z 成分を 0 とした場合についても解析を行い、PIV 解析結果と比較した。Fig.3 に円柱中心から $75D$ 離れた位置における音圧分布を示す。 V_z 成分を除いた場合、LES 解析結果と PIV 解析結果が良く一致することがわかる。この結果から円柱のカルマン渦のような 2 次元性の高い渦から放射される音の場合でも V_z 成分の寄与が大きいことがわかる。解析領域が小さいことによる影響はそれほど大きくなく、指向特性に及ぼす影響もあまり大きくない。このことは、音源近傍の流れ場の 3 成分を計測することが音響解析を行う上で重要であることを示唆している。

4. 結言

一様流中に置かれた円柱から放射される空力音について、音源の可視化を行い、以下の知見を得た。

- (1) 円柱から放射される空力音の音源は円柱後流 $1D\sim 2D$ 付近に存在し、放射される音は双極子型になる。
- (2) 円柱のような 2 次元物体の場合でも軸方向速度成分の寄与が大きいことがわかった。

(a) LES

(b) PIV

Fig. 2 Distribution of sound pressure radiated from a circular cylinder.

Fig. 3 Influence of measurement area and V_z component for acoustic simulation

参考文献

- 1) Curle, N., Proc. R. Soc., London, Ser. A, 231 (1995) 505-514
- 2) Lighthill, M. J., "Waves in fluids", Cambridge University Press (1978)
- 3) Stephane, C., et al, AIAA, 10 (2004)
- 4) 山崎展博・ほか 4 名, 第 17 回環境工学総合シンポジウム, 115, (2008)