

Study on the effect of surface impedance to reduce aerodynamic sound from a circular cylinder

(円柱周りの流れによる空気力学的騒音への表面インピーダンスの効果に関する研究)

Yahathugoda, Bandarage Indika Chaminda Dilruk

本論文は、円柱周りの低マッハ数流れに置かれた物体の表面有限インピーダンスを持つことにより生じる空気力学的騒音効果の解析的予測、数値シミュレーション、及び風洞実験について述べる。ここに、表面インピーダンスは、流れ場に正弦的な振動を仮定した上で、物体境界面上での複素圧力振幅／複素法線速度の比、と定義する。従来から、空気力学的騒音の音源領域における表面の音響的な特性の改変により、その物体から発生する騒音のレベルを低減できると言われていた。

この論文では最初に、コンパクトなグリーン関数を用いた上で、物体表面における圧力変動の低減をもたらす理想的表面インピーダンス分布の数学的な導出を述べる。

次いで、表面上の有限インピーダンス効果について、Smagorinsky Subgrid-Scaleモデルを用い、2つのアプローチに関するラージ・エディ・シミュレーションを行う。また、方程式の解法は、一般化座標上で同位置グリッドの2次精度の差分法を用いる。さらに時間進行には部分(fractional)ステップ法を用い、対流項に関して2次精度のAdams-Bashforth法を、拡散項に関してCrank-Nicholsonを、それぞれ適用する。空間座標の離散化においては2次精度の中央差分が用いられる。さらに空間座標上の平均化には、陽的6次フィルターが用いられる。

有限な表面インピーダンスの境界条件に関する数値シミュレーションモデルとしては、最初Helmholtz共鳴器分布を持つマイクロ構造の配列モデルが、次には多孔質表面とその背後空間を持つ殻構造のモデルが、それぞれ導入された。このような有限インピーダンスの導入により、物体表面上の圧力変動の低減が生じ、その結果、放射音の遠距離場の音圧レベルが減少した。数値計算ではレイノルズ数は3000~6000を仮定し、これは直径10[mm]の円柱について、速度5~10[m/s]に相当し、このときのカルマン渦周波数は88~176[Hz]である。境界条件の表面インピーダンスの分布に関しては次の3つの条件が想定された；1) 剛壁（無限大インピーダンス）、2) 900[kg/m²s]の値を持つ一様インピーダンス、3) 最小値として700[kg/m²s]を持ち、可変且つ最適インピーダンス分布。シミュレーションの結果に依れば、3番目の条件は1番目の条件に比べて遠距離音場において約5[dB]の音圧低減を、2番目の条件は同じく約2[dB]の低減を、それぞれ生じた。

このようにシミュレーションにおいて境界条件として指定したインピーダンスの値を検証するために、音響管／2マイクロフォン法を用いて、シミュレーションにおけると同様な幾何学的形状を持つ多孔性表面材の音響インピーダンスの計測を行った。この測定結果は、Helmholtz共鳴器から予測された値とかなりの程度に近いことを示した。

上に述べた有限インピーダンスを物体表面に導入することによる放射音場のシミュレーションにおける低減を実験的に検証するために、上に述べた3つの円柱モデルについて、無響室に設けられた風洞での実験を行った。このときの風洞モデルは、直径10[mm]／スパン長200[mm]を持ち、厚さ0.25[mm]のパイプを外円筒とし、直径8[mm]の内円筒との間に背後空間を持つ二重円筒の殻構造とした。外円筒の表面上で法線速度を誘起するために、一様インピーダンスと最適インピーダンスのモデルには、レーザーボーリング法を用いて微少な孔の配列を設けた。最適インピーダンス分布

モデルでは直径50,55,60,65[μm]の孔をインピーダンス分布に応じ、且つ直径の10倍のピッチを以て表面上に配置し、一様インピーダンス分布モデルでは60[μm]の孔を一様に配置した。

数値シミュレーションと風洞実験結果はほぼ一致し、この検証結果は、最適インピーダンス分布を導入することにより、コンパクトな物体から発生する空気力学騒音を低減できるという結論を、支持するものである。