

研究概要報告書【サウンド技術振興部門】

(/)

研究題目	複雑形状物体および運動変形する物体を含む流れから発生する空力騒音の直接数値シミュレーション法の確立	報告書作成者	服部裕司
研究従事者	服部裕司		
研究目的	回転翼をもつ機器に代表される複雑形状物体および運動変形する物体を含む流れから発生する空力騒音の直接数値シミュレーション法を確立することが本研究の目的である。 回転する翼をもつ機器は、家庭用の扇風機、パソコン用のファンからヘリコプターや風車まで幅広く存在する。これらの機器の多くは騒音を発生する。機器の高機能化・高速化に伴って騒音が増大するのに対し、生活環境の静粛化の要求レベルは上がり、騒音低減は重要な課題である。これらの機器の騒音のうち、空気の流れと回転翼や機器本体の干渉による空力騒音が大きな比率を占める。空力騒音低減のためには、騒音発生メカニズムを正確に捉える技術が必要である。本研究は実験観測に比べて精度とコストの面で有利な数値シミュレーション法によりその技術を確立するものである。 本研究では、空力騒音をコンピュータによる数値解析の解として直接得る直接数値シミュレーション法を確立する。直接数値シミュレーションは実験と比較して(1)雑音がなく高精度である、(2)騒音源を特定するためのデータが容易に得られるという著しい長所がある。しかしながら、回転翼を含む機器の場合、一般に幾何形状が複雑であるのみならず時間変化する。これまでの空力騒音の直接数値シミュレーション法で複雑な幾何形状に対応できるものは確立されていなかった。 これに対し、最近われわれは埋め込み境界法を応用することにより、原理的には回転翼を含む機器にも応用可能な騒音の直接数値シミュレーション法を開発した。埋め込み境界法では複雑形状物体や運動変形する物体をマスク関数により効率的に扱うことができる。しかし、現時点ではその応用は基礎的な問題に限られている。 そこで、本研究では次の2つの方法により、実用機器の空力騒音の解析を行うことができる手法を確立する： (1) 連続型埋め込み境界法による空力騒音の直接数値シミュレーション法の応用 風車の2次元モデルとして、流れの中に運動物体(振動する円柱)と固定部(固定された円柱)がある場合に発生する空力音を連続型埋め込み境界法により解析し、空力音の特性を明らかにする。これにより、本手法の応用可能性を実証する。 (2) 離散型埋め込み境界法による空力騒音の直接数値シミュレーション法の開発 流れは非粘性とし物体表面上の境界層を無視する近似を行う。離散型埋め込み境界法を応用して流れの支配方程式(圧縮性オイラー方程式)を高精度で数値的に解く方法を開発し、その精度を検証する。		

研究内容	(1) 連続型埋め込み境界法による空力騒音の直接数値シミュレーション法の応用 風車の2次元モデルとして、流れの中に運動物体(振動する円柱)と固定部(固定された円柱)がある場合に発生する空力音を連続型埋め込み境界法により解析した(図1)。連続型埋め込み境界法の長所を活かし、固定された直交格子空間中において振動円柱と固定円柱をマスク関数で表現した。振動する円柱を回転翼に、固定された円柱を支柱に対応させると風車の2次元モデルと見ることができる。図2、図3に計算例(渦度分布、音圧分布)を示す。振動円柱から放出された渦が固定円柱と干渉し、後流に放出される様子が捉えられている。また、音波伝播の様子も正確に捉えられている。 振動円柱の振動周波数と円柱の間隔をパラメータとして計算とデータ解析を行った結果、これらのパラメータの値によって、発生する空力音のパワーが大きく変動することがわかった(図4)。このパワーの大きさは、(i) 振動円柱からの渦放出周波数が円柱の振動と同期するかどうか、(ii) 2個の円柱にはたらく力の位相差によって決まる。すなわち、渦放出周波数が固定円柱に対する自然なカルマン渦の周波数より小さい値にロックインする場合には空力音のパワーは小さくなる。また、2円柱にはたらく力が逆位相に近い場合にもパワーは小さくなる。この結果は、新しい騒音低減技術につながるものである。 (2) 離散型埋め込み境界法による空力騒音の直接数値シミュレーション法の開発 Chaudhuri ら(2011)の離散型埋め込み境界法を用いた衝撃波捕獲スキームを、2次元の空力音解析手法に適用し、数値解法の妥当性を検証した。空力音解析のために、Perfectly Matched Layer 法により外部境界における音波の反射を取り除き、格子間隔が2のべき乗で変化する非一様格子により広い計算領域を確保した。はじめに、数値解法で用いる非一様格子の妥当性を検証するため、非一様格子を用いて1次元線形音波の伝播の解析を行い、理論値と比較した。次に、粘性流れと非粘性流れにおける空力音解析における妥当性を検証するため、円柱から発生するエオルス音、振動する角柱から発生するエオルス音、円柱を通過する渦対から発生する渦音、トンネル微気圧波の解析(図5, 6)を行い、境界適合格子による計算結果や空力音響学の式による予測と比較を行った。その結果、いずれにおいても精度よく音波が捉えられることが示され、離散型埋め込み境界法による空力騒音の直接数値シミュレーション法を確立することができた。
------	--

研究のポイント	空力騒音の直接数値シミュレーションには、実験と比較して(1)雑音がなく高精度である、(2)騒音源を特定するためのデータが容易に得られるという著しい長所がある。しかしながら、回転翼を含む機器の場合、一般に幾何形状が複雑であるのみならず時間変化する。これまでの空力騒音の直接数値シミュレーション法で複雑な幾何形状に対応できるものは確立されていなかった。本研究は、連続型埋め込み境界法と離散型埋め込み境界法の 2 種類の埋め込み境界法により、複雑かつ一般に時間変化する幾何形状に対応できる空力騒音の直接数値シミュレーション法を確立した点で画期的なものである。また、離散型埋め込み境界法により非粘性流れへの適用も可能となり、応用範囲を広げることに成功した。
研究結果	回転翼をもつ機器に代表される複雑形状物体および運動変形する物体を含む流れから発生する空力騒音の直接数値シミュレーション法を確立することができた。 まず、われわれが開発した連続型埋め込み境界法による空力騒音の直接数値シミュレーション法を風車の 2 次元モデルにおける空力音研究に適用し、空力音の特性を明らかにするとともに、空力音低減のための物理的メカニズムを発見することができた。次に、離散型埋め込み境界法による空力騒音の直接数値シミュレーション法を開発した。精度検証により空力音が高い精度で直接得られることを示すことができた。
今後の課題	連続型埋め込み境界法による空力騒音の直接数値シミュレーション法の課題としては、適用が現時点では粘性流れに限られていること、計算資源の制約から高いレイノルズ数の計算が困難であることが挙げられる。現在、より高いレイノルズ数流れの 3 次元計算に取り組んでおり、計算機性能の向上とともに適用範囲は広がるものと期待される。より応用範囲を拡大するためには、乱流モデルと埋め込み境界法による空力騒音の直接数値シミュレーション法の開発が必要と考えられる。 離散型埋め込み境界法による空力騒音の直接数値シミュレーション法の開発により、非粘性流れへの適用が可能となった。今後さまざまな問題に対して応用研究を行うことにより、本手法の有効性を示していきたい。

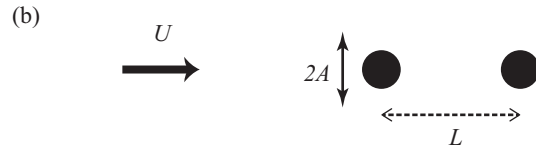


図 1. 振動円柱と固定円柱をすぎる流れ. 問題設定

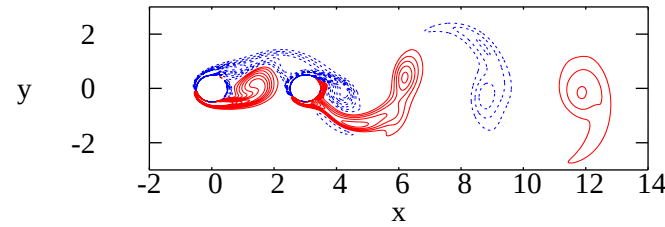


図 2. 振動円柱と固定円柱をすぎる流れ. 渦放出.

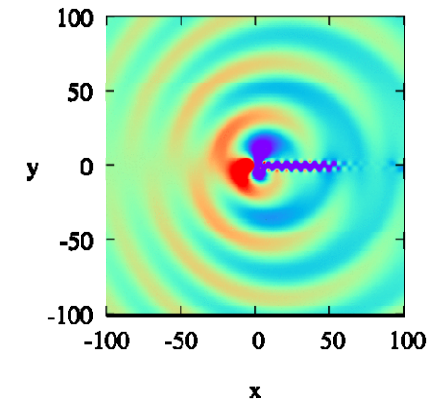


図 3. 振動円柱と固定円柱をすぎる流れ. 音の伝播.

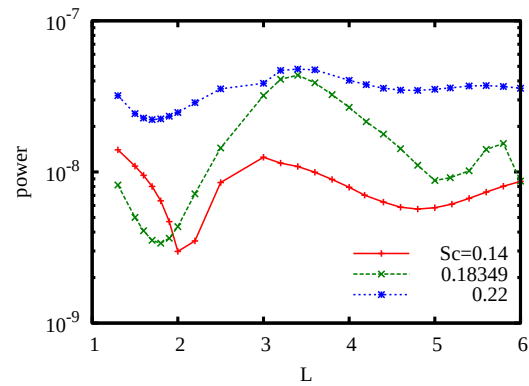


図 4. 振動円柱と固定円柱をすぎる流れ. 音響パワー
の円柱間隔依存性.

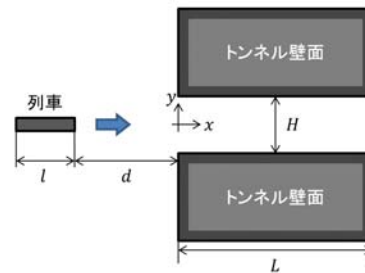
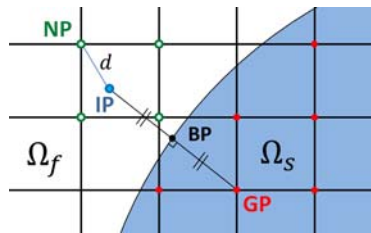


図 5. (上)離散型埋め込み境界法. (下)トンネル微気
圧波の問題設定.

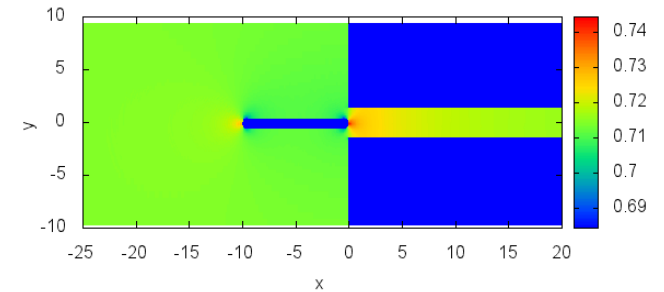


図 6. トンネル微気圧波の直接数値シミュレーション.