

主 論 文 の 要 約

論文題目 物体周りの流れ場によって発生する空力騒音
と透過音に関する研究

氏 名 奥津 泰彦

論文内容の要約

本研究では、自動車の車体表面を透過する空力騒音の発生・伝播メカニズムを解明することを目的として、波数-周波数領域で剥離・再付着を伴う流れ場中の圧力変動を分析した。また、透過音の発生に対する考察を行うため、パネルの曲げ波についても波数空間での検討を行った。

第1章では、本研究の背景と研究目的、自動車の空力騒音に関する先行研究例について述べている。空力騒音に関する研究は、航空機、高速旅客鉄道、流体機械など多くの工学製品で問題となるため、数多く取り組まれている。航空機の脚から発生する騒音、新幹線のパンタグラフから発生する騒音、あるいは、遠心圧縮機の動静翼干渉騒音などがその例である。これらの空力騒音に関する問題は、物体周囲の非定常な流れ場から発生した音波が遠方へ伝播し、環境問題となることである。このような遠距離場へ伝播する空力騒音に関しては、Lighthillの音響学的類推にはじまる各種の空力音響理論に基づいた理論解析解を用いた騒音予測やCFDによる計算予測が行われている。また、実機や模型を用いたマイクロホンによる騒音計測も行われている。このように、空力騒音に関しては、多くの研究が行われているにも関わらず、自動車の渦音に起因した空力騒音に関しては、明確な騒音予測手法は構築されておらず、騒音低減策も過去の開発で蓄積した経験則に依存しているのが実状である。この要因は、騒音評価位置の違いにある。先に述べた、航空機、高速鉄道、流体機械では、遠距離場での騒音レベルが重要となるが、自動車の場合は、車室内の乗員の耳位置での騒音レベルが重要である。すなわち、ガラスやボデーパネルなどを透過する騒音の評価が求められる。この透過音は、ガラスやボデーパネルが振動することで放射されるが、こ

の振動の加振源は、ガラスやボデーパネル表面近傍の非定常な流れ場である。このような場合は、先ほどの遠距離場に対して近距離場と呼ばれている。近距離場では、非圧縮条件を満たす速度変動に関係する圧力変動が卓越している。しかし、自動車の車室内騒音では、音響コインシデンス効果による透過損失の低下が生じることが知られている。したがって、自動車のようにフロントピラーやドアミラーによって気流が大きく剥離する場合、剥離剪断層と車体表面の距離が十分大きければ、圧縮性の圧力変動が物体表面を加振する可能性もある。よって、ガラスやボデーパネルを加振する物理量として、非圧縮条件を満たす速度変動に関係する非圧縮性の圧力変動と、密度変動を伴う圧縮性の圧力変動の2つを本研究では考慮する。

第2章では、断面辺長比1の角柱と音の波長に比べて十分大きな平板によって構成される基礎模型を対象として、騒音計測および流れ場の可視実験と数値解析を行った結果について述べている。騒音計測は、名古屋大学の無響風洞にて実施した。また、数値解析は格子ボルツマン法(LBM)に基づく商用の汎用流体解析ソルバ PowerFLOW を用いて実施した。これにより、物体近傍に音の波長よりも大きな平板が存在することで、音源のコンパクト性が成立しなくなり、非コンパクトな音源と見なすべきであることを確認した。特に高周波数帯域における平板表面の圧力変動には、非圧縮条件を満たす速度変動に関係する非圧縮性の圧力変動と、密度変動を伴う圧縮性の圧力変動の両方が観察された。また、角柱-平板間距離が変化することで高周波数帯域での音圧レベルが St 数によって大きく変化することが実験的に確認された。

第3章では、応用問題として自動車の実機を対象とした風洞実験と実機を詳細に模擬した解析モデルによる数値解析により、サイドガラス周りの流れ場と車室内透過音を分析した結果を述べている。風洞実験による流れ場と騒音の計測は、三菱自動車工業株式会社所有の実車風洞で実施した。数値解析は、前述の基礎模型を対象とした研究で用いたソルバ PowerFLOW で行った。基礎模型の検討結果と同じく、サイドガラス表面上の圧力変動は、ドアミラーの近くを除き、高周波数帯域では圧縮性による圧力変動が分布していた。また、ドアミラー後流域で圧力変動の時空相関スペクトルとして波数-周波数スペクトル分析を行い、波数空間で圧力変動の分析を行った。圧力変動に関する波数-周波数スペクトル分析については、実験結果に基づいた Corcos のモデル式が有名である。しかし、Corcos のモデル式では、乱流境界層による圧力変動を

対象としており、渦度-エントロピー波による圧力変動のみを考慮している。したがって、剥離・再付着を伴い、圧縮性による圧力変動の寄与も考慮する自動車周りの流れ場に対して Corcos モデルを用いることは適切とは言い難い。そこで、本研究では、数値解析の結果から得られた圧力変動のクロススペクトルを計算し、そのクロススペクトルに対して空間-波数フーリエ変換を施すことで、波数-周波数スペクトルを求めた。2次元の波数-周波数スペクトル分析結果から、ドアミラー後流域の音場が拡散音場に近い状態であるとわかった。この結果に基づき、実車風洞実験によりサイドガラス表面の圧力変動と車室内側の透過音（近接騒音）から求めた透過損失が、5kHz 以上の周波数帯域では、ランダム入射の質量則と概ね定量的に一致することを確認した。このことから、高周波数帯域では、ドアミラー近くの非圧縮性の流体力学的な圧力変動の影響が大きい領域を除けば、音響透過損失に基づいて透過音を予測できると考えられた。また、1次元の波数-周波数スペクトル分析結果から、ドアミラー後方の剥離領域内では、明瞭な渦度-エントロピー波による圧力変動が見られなかったが、ドアミラー端部に形成される剥離せん断層を含む領域では、渦度-エントロピー波による非常に高いレベルの圧力変動を明瞭に確認することができた。この結果から、渦度-エントロピー波の速度を見積もることが可能であることもわかった。

第4章では、自動車の実機を対象とした研究結果から、波数-周波数スペクトル分析手法が物体近くの流れ場の分析に有用であると考えられたため、本分析手法を用いて、上述の角柱と平板によって構成された基礎模型周りの流れ場を詳細に分析した結果を述べている。また、透過音を考察するため、平板（厚さ 0.5mm のアルミ板）下面側に透過音計測用の箱を設置して、無響風洞での透過音計測を行った。それら結果、波数-周波数スペクトル分析の結果から、渦度-エントロピー波の伝播方向とその速度がわかるだけでなく、ドップラー効果も確認することができた。また、透過音を考えるため、パネルの曲げ波についても、渦度-エントロピー波や線形の音波と同様に波数空間で理論解析による考察を行った。まず、渦度-エントロピー波、音波、曲げ波の波数-周波数特性をグラフ化し、供試模型では、音波と曲げ波の共振すなわち音響コインシデンス効果が 10kHz までの周波数範囲では発生しないことがわかった。その一方で、渦度-エントロピー波と曲げ波の共振（対流コインシデンス効果）が 80Hz 付近で発生することがわかった。実際に透過音の計測結果で 80Hz 付近の大きな音圧レ

パネルのピークが存在することがわかり，理論解析の妥当性が確認できた．また，パネルの曲げ波が効率的に音を放射する波数成分は，音の波数円と放射球に基づく理論解析の結果から， $k = \omega/a$ 以下の波数成分であることが考えられた．そこで，波数-周波数スペクトル分析結果から，波数ベクトルの絶対値が $k = \omega/a$ 以下の波数成分の圧力変動を算出したところ，角柱-平板間距離の変化による透過音の大小関係と定性的に一致することがわかった．

第5章では，これまでの研究結果をまとめて本研究の結言を述べている．自動車の車体表面を透過する空力騒音の発生・伝播メカニズムを解明する目的に対し，渦度-エントロピー波，音波およびパネルの曲げ波をいずれも波数空間で考察することで透過現象のメカニズムを分析し，定性的な結論を示すことができた．特に流れ場の分析には，波数-周波数スペクトル分析手法が有用であった．本研究により，剥離・再付着を伴う流れ場がパネルを加振し，パネルが音を放射するメカニズムを定性的に解明することができた．