

論文の内容の要旨

高速 PIV を用いた流れ場と空力音の実験的解析

氏 名 宇 田 東 樹

1. 序 論

高速鉄道から発生する騒音は主に、転動音や構造物音などの固体音および列車の走行に伴った気流の非定常な乱れによる空力音によって構成される。これらの騒音は、その発生機構の違いから列車速度に対する増加率が異なり、固体音は列車速度の2～3乗、空力音は6乗に比例して、そのパワーが増加する。このため、高速鉄道における空力音の寄与度は高く、厳しい環境基準を満たしながら、さらなる速度向上を図っていくには、空力音の低減が不可欠である。

こうした空力音の評価には、実際に走行している列車で騒音を測定する現車試験のほか、風洞試験が非常に有効なツールの1つであり、無指向性マイクロホンやアレイ式マイクロホンを用いて放射音のスペクトル解析・騒音源の特定がなされてきた。しかしながら、これらの音響測定機器は、遠方場において観測される放射音の評価には有効であるが、その性質上、空力音の発生源である流れ場そのものと放射音との直接的な関係が得られにくく、抜本的な騒音低減対策を打ち出しにくいという問題がある。特に、高度に低騒音化の進められた日本の高速鉄道において、さらなる空力音の低減を図るためには、流れと音の直接的な相関関係を把握し、音源とそれによる遠方場音圧への寄与を見極めることが重要であると考えられる。そのためには、実験的に測定した流れ場をもとに空力音源を正確に求める実験的評価手法の確立が必要であり、本論文の前半部分でこれについて論じる。また、本論文の後半部分では、空力音源の三次元的構造を捉えるための測定手法を開発し、音源構造に関する考察を深めるとともに、一般的な問題へ適用した結果について示す。

2. 空 力 音 の 理 論

流れ場から音波がメカニズムについて、本研究では Powell や Howe が提唱した渦音理論 [1][2] に基づくものを用いた。この渦音理論による音源および遠方場音圧の表現は、流れ場中に分布する空力音源が渦度によって明確に記述される形となっている。したがって、空力音源と流れ場が直接的に関連づけられた物理的にも妥当な形であり、音源構造に関する知見や低騒音化へ向けての設計指針が得られやすいと考えられる。この Howe の渦音理論式によれば、遠方場音圧を評価するには流れ場中の渦度の空間分布ならびにその時間微分を求めればよく、粒子画像流速計測法 (PIV) を用いた空力音に関する実験的研究例がいくつか報告されている [3][4]。しかしながら、これらの先行研究はいずれも流れ場中の音源を直接的に評価し、遠方場音圧を求めたものではない。これは、実験的手法としてのハードルのほか、Howe の渦音理論式をそのまま用いようとした場合、渦度そのものによって発生する四重極音源の分布する広い領域を測定対象として確保しなければならないからに他ならない。

そこで、本研究では Howe の渦音理論式をそのまま適用することはせず、低マッハ数の仮

定の下、四重極音の影響を排除し、二重極音のみを対象とした定式化[5]を採用した。こうすることで従来問題とされてきた測定領域の条件を緩和し、比較的狭い測定領域でも空力音源と遠方場音圧を適切に評価することが可能となる。

3. 円柱まわりの流れ場と空力音の解析（単断面）

流れ場情報のみを利用して実験的に空力音を予測することが可能かどうかを検証し、空力音の発生メカニズムに関する知見を得るために、小型風洞において二次元円柱供試体を対象とした実験装置を構築した。流れ場中に存在する空力音源を評価するには、渦度の時空間分布を取得する必要があるため、本実験では時間方向に 5kHz の分解能をもつ高速 PIV を採用した。また、実測音圧との比較ならびに流れと音の相関関係を把握するため、無指向性のマイクロホン を 1 本設置し、流れ場との同期測定を行なった。

はじめに、供試体の円柱から明確なエオルス音が放出されているかどうかを実測音圧のスペクトル解析によって確認した。つぎに、高速 PIV によって測定した流れ場から渦度場を算出し、PIV 解析格子の各点ごとに音源項を求めた。その結果、円柱近傍には強い音源領域が 2 つ存在し、1 つははく離点近傍、もう 1 つは円柱後流のカルマン渦が巻き込む領域に分布することが実験的に確かめられた。さらに、はく離点近傍の音源は周波数依存性が小さい一方、円柱後流の音源は強い周波数依存性があり、これら 2 つの音源構造が異なる性質を有していることも示された。最後に、上記音源項の空間積分として表される遠方場の推定音圧と実測した音圧のスペクトルを比較したところ、支配的な空力音源であるエオルス音周波数および音圧レベルが実測結果と良好に一致することが確かめられた。より高周波数の成分についても、実測音圧と推定音圧が概ね一致し、流れ場情報のみをもとにした本実験的評価手法が妥当であることが示された。

4. 円柱まわりの流れ場と空力音の解析（二断面）

複雑形状を取り扱わなければならない実用問題においては、供試体による放射音が三次元的な流動場および音源構造によって影響を受けることが少なくない。しかしながら、こうした三次元的な流れ場を全測定体積にわたって高精度に測定し、実験的に空力音を解析することは極めて困難である。そこで本研究では、空力音源のスパン方向構造を実験的に抽出する手法として二断面の同時測定システムを構築した。二断面の分離にあたっては、レーザビームを 2 つに分割し、それぞれに相異なる偏光特性をもたせることによって測定対象とする断面を選択的に取り出す手法とした。

空力音の評価において、音源のスパン方向相関長に関する知見を得ることは重要である。そこで、二次元円柱に対する二断面の同時測定結果をもとに、二断面間の音源のコヒーレンス分布を計算した結果、空力音源が円柱後流のカルマン渦の巻き込む部分で最大値をとり、その強い音源構造がスパン方向に 3D 程度維持されていることが明らかとなった。この円柱スパン方向に分布する強い相関構造が遠方場における空力音に強く寄与していると考えられる。さらに、コヒーレンスの算出とともに得られるスパン方向の位相特性まで考慮して遠方場音圧を推定する解析手法を考案した。これは、ある断面に関する空力音源の分布とスパン方向の位相特性を合わせて取り扱う手法であり、スパン方向に空力音源の強さと位相が変化するケースであっても適用可能である。

5. パンタグラフ舟体近傍の流れ場と空力音の解析

前章までで確立された空力音源の実験的評価手法を、より実用的な問題としてパンタグラフ模型の舟体部分に適用した。二次元円柱の場合には、音源項算出で必要となる音響的なパラメータは解析的に求めることができたが、複雑形状の場合には何らかの数値解析的手法を用いて決定しなければならない。ここでは、境界要素法を用いて音響パラメータを決定し、これと実験的に求められた流れ場とを連成させることによって空力音源を推定した。その結果、舟体まわりの代表的な音源位置を実験的に抽出することが可能であることが示された。

6. 結 論

流れと音の直接的な関係を把握し、空力音の低騒音化へつなげていくため、高速 PIV によって得られる流れ場の情報のみを利用して空力音を予測する実験的評価手法を開発した。また、流れ場および音源構造の三次元的性質を考慮するために、二断面の同時測定手法を構築し、スパン方向の音源構造に関する解析を行なった。主な結果を以下にまとめる。

- ・Howe の渦音理論式をもとに散乱音源のみを対象とした式に適用することで、従来問題とされていた測定領域の制限が緩和され、既存の高速 PIV 技術によって空力音源を評価することが十分に可能であることを初めて示した。
- ・円柱まわりの空力音源は、主に両はく離点近傍およびカルマン渦の巻き込む領域に分布し、それらの音源構造の周波数依存性が異なることを明らかにした。
- ・本研究で開発した空力音の評価手法をもとに、円柱から発生する放射音を実験的に推定したところ、その周波数および騒音レベルが実測音圧と良好に一致する結果を得た。
- ・二断面の同時測定より、本実験系においては、円柱のスパン方向に関する音源の相関構造は、カルマン渦の巻き込む領域において最大値 $3D$ 程度に達することが明らかとなった。

参 考 文 献

- [1] Powell, A., Theory of vortex sound, Journal of the Acoustical Society of America, vol.36 (1964), pp.177-195.
- [2] Howe, M.S., J. Fluid Mech., vol.71 (1975), pp.625-673.
- [3] Henning, A., Kaepernick, K., Ehrenfried, K., Koop, L. and Dillman, A., Exp. in Fluids, vol.45 (2008), pp. 1073-1085.
- [4] Lorenzoni, V., Moore, P., Scarano, F. and Tuinstra, M., 15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (30th AIAA Aeroacoustics Conference), 2009.
- [5] Takaiishi, T., Ikeda, M. and Kato, C., Journal of the Acoustical Society of America, vol.116 (2004), pp.1427-1435.