

流れと音を可視化する

宇田 東樹

環境工学研究部（騒音解析 副主任研究員）



うだ とうき

はじめに

空気の「流れ」と「音」、この2つは密接な関係を持っています。本稿では、空気の乱れによって発生する音、すなわち空力音を対象として流れを計測することで音源を可視化する手法について、ご紹介します。

流れと空力音

我々が普段耳にする音は、空気の疎密が空气中を伝播してきたものです。高速鉄道の場合、音の発生源は大きく2つに分けることができます。その1つは、固体音と総称される、車輪がレールを転がりながら接触することによる転動音や振動が橋梁や支柱に伝わって発生する構造物音に代表される音です。もう1つは、車両表面の凹凸や突起物などによって空気の流れが乱されることによって発生する空力音です。こういった音の発生源（音源）を正しく捉え、適切な低騒音対策を施すことが、地道でありながら全体としての騒音低減に着実につながっていくと考えられます。そのため、音源の同定およびその強さの定量的な評価は重要な研究の1つとなっています。

固体音の発生機構は、固体が微小に振動し、その振動が空气中に放射されていくことですが、空力音の場合にはこれとは異なります。例えば、風の強い日に電線からヒューヒューと風切り音がするのは経験的によく知られていますが、これは電線に当たる風そのものによって発生している空力音です。電線は完全に静止している状態であってもそこに高速の風が吹けば、大きな風切り音が発生します。気流は人間の目には直接見えないため、なかなか直感的に理解するのが難しいのですが、空力音は物体のまわりに生じる気流の乱れによって発生する音ということになります。

こうした関係によって、流れと空力音が密接に結びつくこととなりますが、もう少し掘り下げて、流れのどのような性質によって空力音が発生しているのでしょうか？これについては、50年以上前の音響アナロジー（流体中の乱

れが音波として伝搬すると考えること）に端を発する空力音研究の歴史を紐解く必要がありますが、結論を述べますと、流れの中に含まれる渦（数学的には、「渦度」）が最も重要な役割を担っています。すなわち、流れの中に鋭く素早く変化する渦度がどの程度存在するかが、発生する空力音を決定づけています¹⁾。

さて、ここまで流れと空力音との関係について説明し、両者が密接な関係を持っていて、空力音の評価には、「流れ場（渦度場）」を捉えることが重要であるとわかりました（「場」と表記しているのは、空間的な分布を捉える必要があることを強調しています）。したがって、この流れ場を正確に測定することができれば、遠方に到達する音（空力音）を予測することができることとなります。そこで、次節以降では、この流れ場を正確に測定する技術について、ご紹介します。

流れ場の計測ツール

空気の流れは人間の目では直接捉えられないため、煙突から出る煙の流れをみて上空の気流を予測したり、雲の動きをみて天気の移り変わりを予測したりしてきました。定性的には、そういった方法で流れの方向や強さを把握することはできますが、流体計測の分野ではピトー管や熱線流速計（図1）を用いて、定量的に気流速度を計測してい

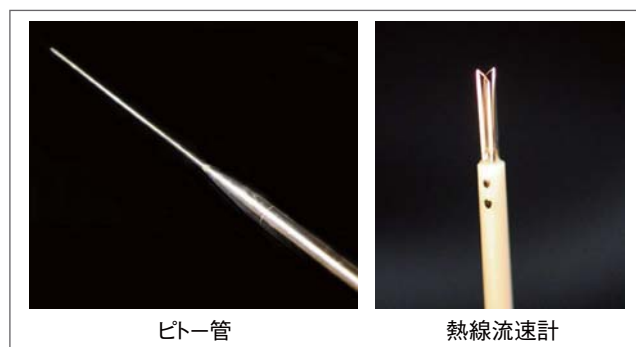


図1 風洞試験における代表的な流速測定手法

ます。特に、熱線流速計は時間分解能も高いセンサーなので、これを高度化させた渦度プローブなどを用いれば、速度・渦度を実測することが可能となります。しかしながら、これらの手法を空力音の予測に用いようとする、計測点がある単独点に限られることやセンサー自身が流れを乱して音を発してしまう

という大きな問題があります。

このように、気流の速度および渦度を空間的かつ時間的に高い分解能で測定することは容易ではありません。しかし近年、高速PIV（粒子画像流速測定法）と呼ばれる測定手法により、空間的な流れを高速に取得することが可能になってきました。測定原理としては単純で、気流の中に追従性に優れた微細な煙粒子を混入させ、シート状にしたレーザー光を当てることで測定対象領域を通過する粒子を照らします。そして、この粒子像を高速度カメラなどによって撮影し、画像処理することで空間的な流れ場を1回の測定で算出するという光学的計測手法です。このレーザー光照射と高速度カメラによる撮像のサンプリングを数kHz程度に高速化したものが高速PIVと呼ばれる手法であり、非定常流れを非接触で測定することができます。ただ、この高速PIVにも、流れの中に煙粒子を混入しなければならないことや速度の分解能が熱線流速計などと比べると劣ることなどの課題もあります。とはいえ、空力音の予測に必要な流れ場を実験的に測定できる手法として、現時点では高速PIVが最も有力なツールと考えられるため、本研究ではこれを用いて空力音の実験的評価手法を開発しました。

空力音の実験的評価手法^{2,3)}

流れ場から空力音を求めるには、おおまかに以下の手順になります。

- ① PIVによって速度場を算出
- ② 得られた速度場をもとに渦度場を算出
- ③ 物体形状に依存した音響的な放射効率を算出
- ④ ①～③を掛け合わせ、空力音源を算出

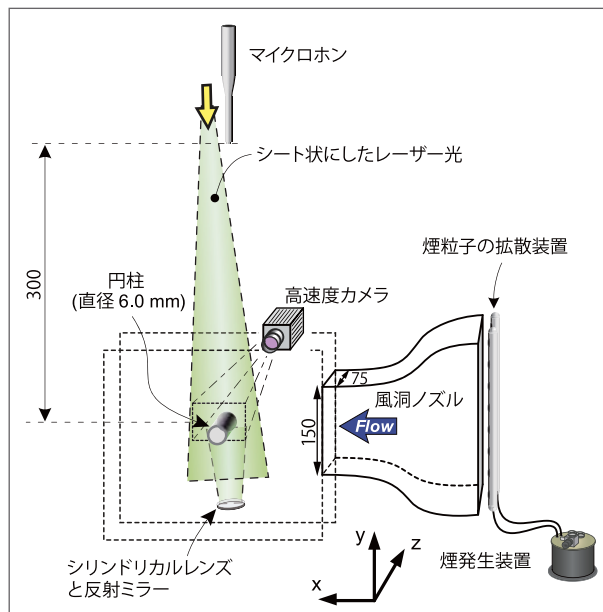


図2 高速PIVを用いた風洞実験の概略図

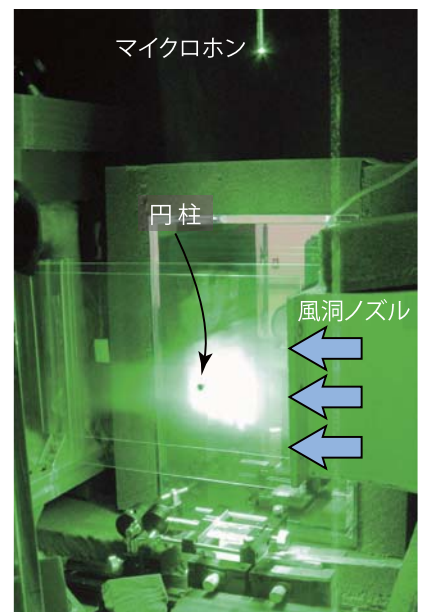


図3 実験時の様子

- ⑤ 空力音源を全領域にわたって足し合わせる
- ⑤まで行くと、遠方場に到達した空力音が算出されることになるため、これを実際にマイクロホンによって測定した音圧と比較すると、本手法の妥当性を検証することができます。一方、①～④までの段階であれば、全領域での足し合わせを実行する前段階ですので、PIVの解析格子各点における空力音源を可視化することができます。

円柱模型を用いた検証

はじめに、単純な円柱模型（直径 $D = 6.0\text{mm}$ ）によって本実験的評価手法を検証しました。検証に際して、図2および図3に示すような小型の風洞試験装置を製作し、流れと音を同時に測定しました。円柱の上方300mmの位置には、PIVによって推定した空力音との比較用にマイクロホンを1本設置してあります。測定風速は15m/sです。PIVによる流れの測定時間はわずか2秒足らずですが、この間に記録される画像枚数は合計18000枚に達します。こうして得られた画像を処理することで円柱まわりの速度分布

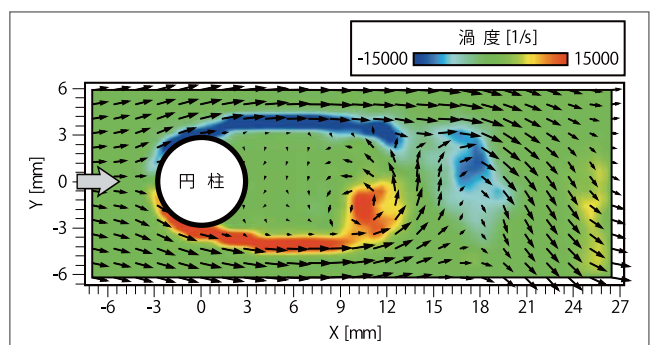


図4 円柱まわりの速度ベクトルおよび渦度分布（瞬時）
（ベクトル表示：x方向3つおき、y方向2つおき）

(図4のベクトル表示)を求めることができます。

この速度分布をもとに渦度分布(図4のカラーコンター表示)を計算し、前節③の音響的な放射効率を考慮したうえで、周波数分析した結果、最終的に図5に示すような空力音源を可視化した結果が得られます。ここでは、異なる3つの周波数について結果を表示しています(周波数は流速と円柱直径を用いて無次元化)。これより、円柱の表面近くに上下2つの強い音源が認められ、その強度が周波数に依存していないことがわかります。また、円柱の下流領域では、様相が少し異なり、円柱からの風切り音が卓越する無次元周波数0.2のときに最も強く双子状の音源が観測されることがわかります。これらの結果は、本稿の冒頭で述べました電線からの風切り音の詳細な発生箇所を実験的に示すものと考えられます。

さらに、前節の⑤に相当する全領域にわたって空力音

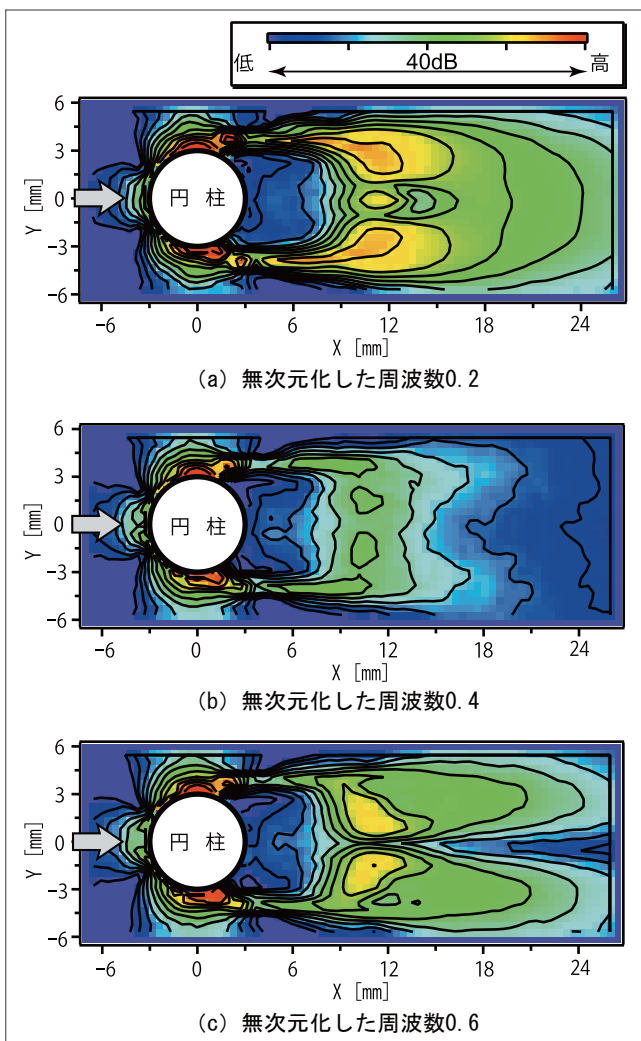


図5 円柱まわりの空力音源の強さ

源の足し合わせを実行しました(図6)。流れ場計測のみによって求めた推定音圧は図中に赤線で示し、マイクロホンによって測定した実測音圧は青線で示してあります。これより、流れ場のみの測定によって推定した音圧が実測音圧と良好に一致している様子がわかります。PIVの測定精度の限界もあるため、細かい分布まで完全に捉えるまでには至りませんが、流れ場のみの測定によって空力音源を特定し、発生する放射音を実験的に予測できることが確かめられました。

パンタグラフ舟体模型への適用

応用例として、高速鉄道における最も代表的な空力音源の1つであるパンタグラフの1/10スケールの縮尺模型に本手法を適用しました。風洞ノズルの制約により、ここではパンタグラフの舟体まわりの空力音源を算出することに

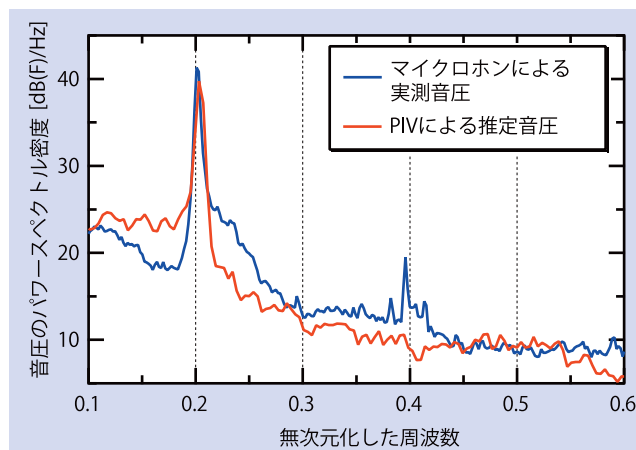


図6 PIVを用いて算出した推定音圧とマイクロホンによって測定した実測音圧との比較

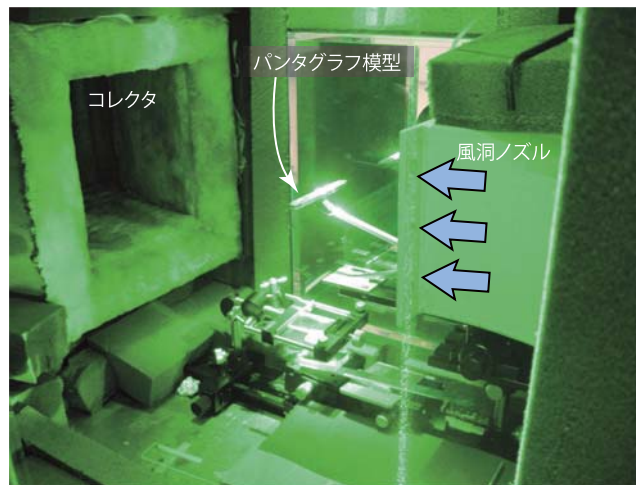


図7 パンタグラフ模型を用いた測定の様子

しました。実験時の様子は図7に示します。

舟体から放射される空力音の寄与は、舟支えとの干渉が大きいパンタグラフ中心の領域と舟体単独の寄与が大きい領域とに分けることができます。図8には、これらの領域における (a) 時間平均の速度ベクトルおよび渦度の分布、(b) 空力音源の強さ、をそれぞれ示します。いずれも周波数は660Hz (模型縮尺の換算なし) です。図8 (a) より、パンタグラフ中心においては、舟体上部の流れが舟支えに沿って下から巻き上がる流れと接合し、大きな渦構造を作り出していることがわかります。一方、図8 (b) の空力音源の強さをみると、必ずしも渦の巻き込みが大きい部分が音源になっているのではなく、舟体の角部など渦構造としては小さいながらも渦度の時間変化の激しい部分が音源となっているとわかります。これらの結果は、舟体角部などのエッジ部分を改良すると空力音を低減できる可能性があることを示唆しています。

おわりに

空力音を流れの計測によって可視化し、定量的に音源を

求める新しい実験的評価手法についてご紹介しました。この手法の特長は、流れ場を実験的に測定することで空力音源を求められることと、流れと音を密接に関連づけた詳細な解析が可能となることです。今後は、本手法の利便性を高め、実験結果をみながら効率的に風洞試験を進めることや、低騒音対策の設計指針提示などといった、より応用的な活用に結びつけていくことを考えています。

なお、本研究は、鉄道総研と豊橋技術科学大学 飯田教授および東京大学 岡本教授・染矢准教授との共同により実施されたものです。ここに記して感謝の意を表します。

RRR

文献

- 1) 吉川茂 編：音源の流体音響学，コロナ社，2007
- 2) 山崎展博ほか：流れ場の時系列解析に基づく空力騒音の実験的評価法，日本機械学会論文集B編，第75巻755号，pp.1436-1445，2009
- 3) 宇田東樹ほか：風洞試験における流れ場の非定常測定と音源構造の推定，鉄道総研報告，Vol.24，No.9，pp.17-22，2010

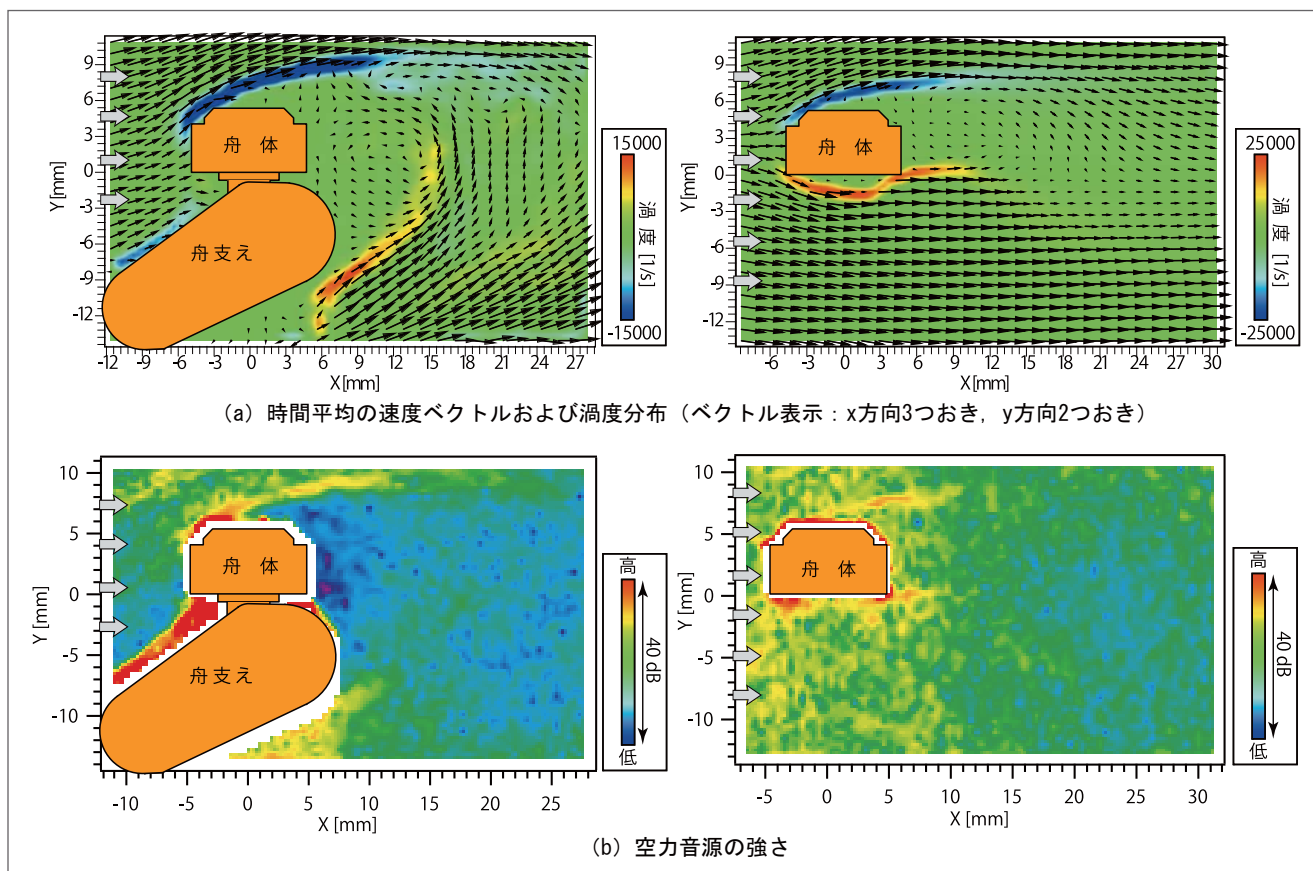


図8 パンタグラフ中心(左)および舟体だけの部分(右)の比較