

粒子画像流速計測法を用いた流れ場測定と空力音源の予測

環境工学研究部 騒音解析

研究員 宇田東樹

1. はじめに

高速鉄道から発生する騒音は主に、転動音や構造物音、空力音などから構成される。これらのうち、空力音は列車の走行に伴って周囲に引き起こされる空気の乱れに起因する音であり、そのパワーは列車速度の6乗に比例する。そのため、列車速度の向上に対する空力音の増加率は大きい。こうした空力音の評価において、風洞試験は有効な評価手法の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などにより供試体からの放射音測定・騒音源の特定がなされ、車両部位別の最適形状決定をはじめ、空力音の低減に役立てられてきた。一方、これらの音響測定機器は、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」との直接的な関係を得にくいという側面もある。今後、さらなる空力音の低減を図るには空力音と流れ場との直接的な関係に着目し、より詳細に物理現象を把握しながら空力音の低減対策を進めていくことが重要であると考えられる。

そこで、流れ場と空力音との相関関係を把握し、流れ場から直接的に音源別の寄与度を算出することを目的に、小型風洞を用いて新たな流れ場の測定手法ならびに解析手法を開発した。本報告では、供試体として2次元円柱を使用した結果について紹介する。

2. 空力音の評価手法

本手法では、低マッハ数かつ音源の広がり音波の波長よりも小さいコンパクト近似が成り立つことを前提とし、流れ場と放射音を関連付ける予測式として、Howeの渦音理論式¹⁾をもとに、解析領域が有限である場合を考慮した次式(1)を用いる²⁾。

$$p(\mathbf{x}, t) = \frac{\rho_0 x_i}{4\pi c_0 |\mathbf{x}|^2} \int \frac{\partial}{\partial t} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{u})(\mathbf{y}, t - |\mathbf{x}|/c_0) \cdot \nabla \varphi_i(\mathbf{y}) d^3 \mathbf{y} \quad (1)$$

ここで、 p : 流れ場から算出された音圧、 ρ_0 : 空気密度、 \mathbf{x} : 観測点の位置ベクトル、 \mathbf{y} : 音源の位置ベクトル、 c_0 : 音速、 $\boldsymbol{\omega}$: 渦度ベクトル、 \mathbf{u} : 速度ベクトル、 φ_i : 物体による音響的な効果を表す項、である。これより遠方場における音圧を求めるには、速度場・渦度場の空間分布、およびそれらの時間微分の評価が必要であることがわかる。式(1)中の被積分項は、音源位置ごとの音源強度とみなすことができ、以下の式(2)にて定義する。

$$I(\mathbf{y}, t) = \frac{\partial}{\partial t} \left((\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{u})(\mathbf{y}, t - |\mathbf{x}|/c_0) \cdot \nabla \varphi_i(\mathbf{y}) \right) \quad (2)$$

供試体として2次元円柱を使用し、 y_1, y_2, y_3 座標をそれぞれ風洞の流れ方向、鉛直方向、円柱スパン方向(円柱中心が座標原点)と定義すると、式(2)は以下の式(3)の形で表せる。

$$\begin{aligned} I(\mathbf{y}, t + |\mathbf{x}|/c_0) &= \frac{\partial}{\partial t} \left((\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{u})(\mathbf{y}, t) \cdot \nabla \varphi_2 \right) \\ &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\omega_3 u_1 \frac{\partial \varphi_2}{\partial y_2} - \omega_3 u_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial y_1} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

3. 実験装置

図1に実験時の写真, 図2に実験装置の概略図を示す。小型風洞(東京大学 岡本・染矢研究室)は回流式であり, 風洞の主流速度 U_{∞} は 15.0 m/s, 乱れ度は 0.7 % である。供試体として用いる円柱は直径 D が 6.0 mm の薄肉ガラス製であり, 風洞ノズル側端に接続した2枚の亚克力端板によって円柱両端を固定した。放射音は, 円柱直上 300 mm の位置に設置した無指向性マイクロホンによって測定した。

流れ場の測定には, 2次元的速度分布を高時間分解能で得ることのできる高速 PIV を適用した。PIV においては, 気流中に「トレーサ」と呼ばれる可視化用の粒子を混入させ, レーザー照射による粒子の散乱光をカメラで記録し, それらを相関解析にかけることによって二次元面内の速度分布を一回の測定で取得する。

PIV 測定の光源には, 高繰り返し Nd:YLF レーザーを用い, 画像の取得は風洞側方に設置した高速カメラにて行った。高速カメラの解像度は, 896×336 pixel (実距離で 0.047 mm/pixel) であり, 速度ベクトル算出の周波数は 5 kHz である。座標原点は円柱中心に設定し, 風洞下流に向かって x 軸, 鉛直上方に向かって y 軸, 円柱スパン方向に沿った方向に z 軸を設定した(それぞれ2章の添え字 1, 2, 3 に対応)。

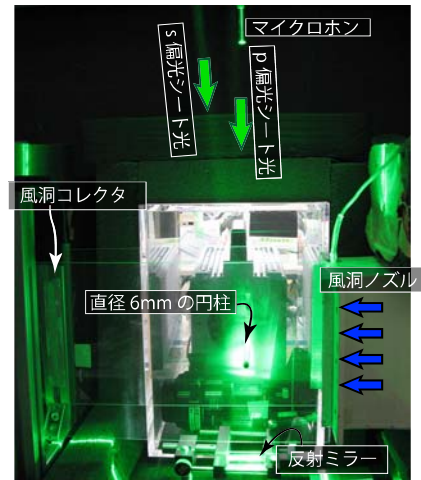


図1 測定時の様子

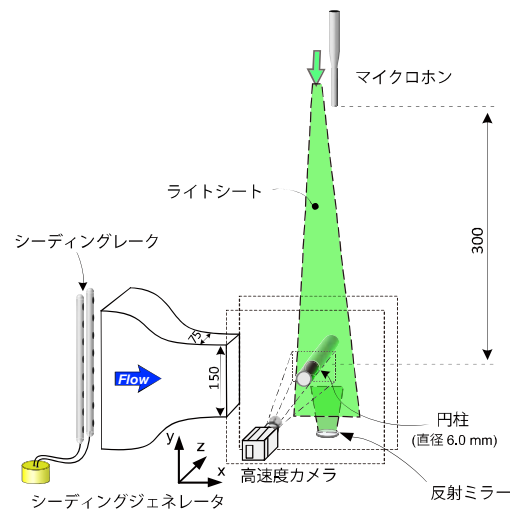


図2 実験装置の概略図

4. 測定結果と考察

4.1. PIVの解析条件

1回の測定で取得できる総画像数は 9500 組であり, 得られる全ベクトル数は $73 \times 27 = 1971$ 点である。これらのデータに対して, FFT 解析を施すと, 平均回数は 147 回となる。

4.2. 流れ場から推定される空力音源の分布

式(2)の I をここでは「音源」と呼ぶ。図3(a)は, PIV 測定結果を式(3)に適用して音源強度 I を算出し, それらを全測定領域で積分して遠方場の放射音を求めたもの(以下, 推定音圧)について, マイクロホンによる実測スペクトルと比較したものである。円柱スパン方向の積分に際しては, 二次元的な流れを想定し, 完全に同一の音源構造で分布していると仮定した。ストローハル数 $St (= fD/U_{\infty})$ は, 周波数 f を無次元化した無次元数であり, 円柱から発生するエオルス音では, 通常, 円柱直径によらず, $St = 0.2$ とほぼ一定となる。図より, 音圧ピークをとる $St = 0.2$ は実測音圧と推定音圧でよく一致しており, 本実験および解析手法で円柱のエオルス音を正確に検出できていることが確かめられる。図3(b)は, 実測音圧と推定音圧とのコヒーレンスおよび位相を示したものである。位相に関しては, PIV のサンプリング周波数に起因する誤差量も図示

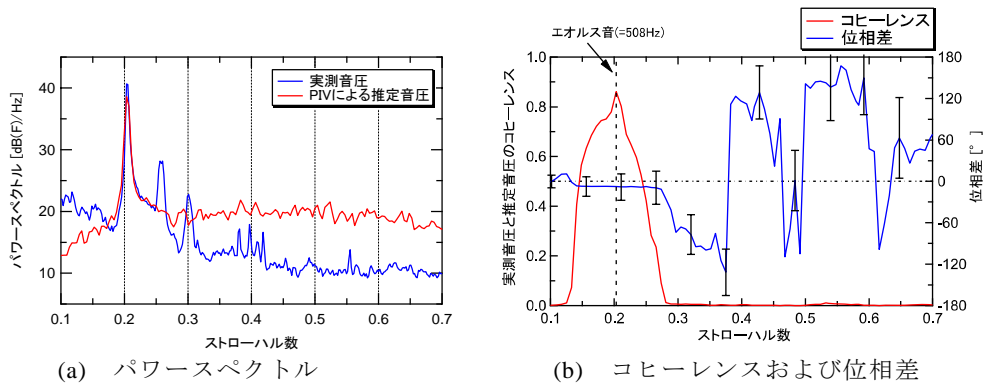


図3 PIVによる流れ場測定から推定した音圧と実測音圧との比較

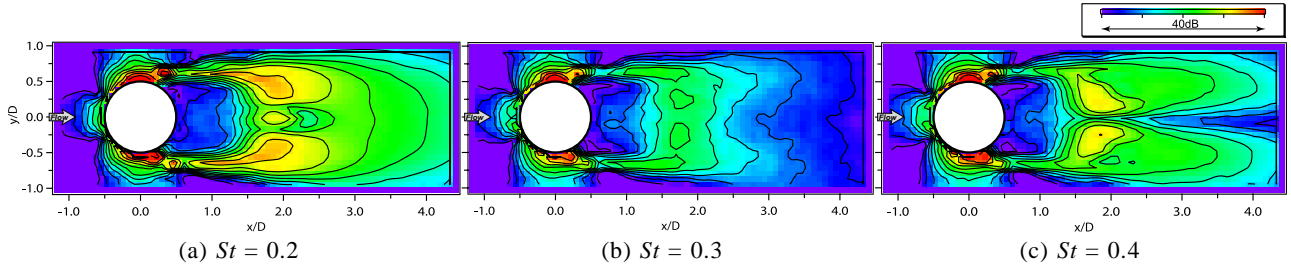


図4 PIV測定結果から推定した音源のパワースペクトル分布

した。コヒーレンス値は $St = 0.2$ において高くなっており、推定音圧がマイクロホンによる実測音圧と強い相関関係にあることがわかる。 $St = 0.2$ における位相差は、 $\pm 20^\circ$ 程度の誤差を含むものの、0に近い値となっており、ほぼ同位相であるといえる。

図4は、音源項 I のパワースペクトルを PIV 測定結果から求め、異なるストローハル数 0.2, 0.3, 0.4 に対して、4 dB 刻みのコンターマップで表したものである。円柱の両はく離点近傍に強い音源が認められ、その強度がストローハル数（周波数）に依存していないことがわかる。 $x/D > 1.5$ の円柱下流域においては、(a)のケースのみカルマン渦の構造と合致した顕著な音源が観測されている。図5は、マイクロホンによる実測音圧と推定音圧とのコヒーレンスおよび位相差を格子点ごとに計算し、コンターマップとして示したものである。コヒーレンス値は円柱後流で特に大きく、位相差についても規則的な分布となっており、実測音圧との強い相関性が示唆されている。

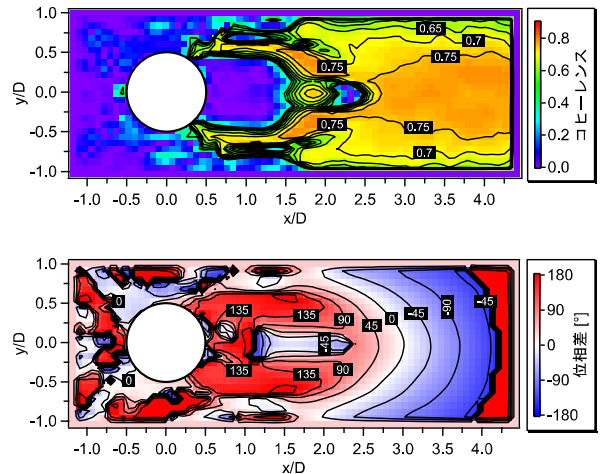


図5 流れ場から推定した音源と実測音圧とのコヒーレンス（上）および位相差（下） ($St = 0.2$)

次に、図4のストローハル数 0.2 における結果および図5から、音源位置と遠方場での音波のキャンセリングについて考察する。図5から、実測音圧と推定音圧とのコヒーレンスは、円柱の下流領域で強いことがわかるが、音源のパワースペクトル解析結果である図4(a)では、円柱の両はく離点近傍に最も強い音源が観測されていた。この違いは、図4および図5の両者ともに、PIV 解析の各格子点単独での評価であり、そこでは測定断面内での空間的な音波のキャンセリングが考慮されないためと考えられる。これを検証するため、円柱の両はく離点近傍に着目し、図6に示すような区分領域 (A0, A1, B0, B1, C) に分けて、それぞれを空間的に積分した結果の遠方

場音圧を比較した。これより，図5の実測音圧とのコヒーレンス分布では，円柱の剥離点近傍領域 B0 および領域 B1 は顕著なコヒーレンス値は示さなかったにもかかわらず，近傍領域を積分した結果のスペクトルでは $St = 0.2$ で B0, B1 とともに同程度の強いピークが出るようになることが確かめられる。一方，図4では，円柱のはく離点近傍に周波数依存性の小さい広帯域の空力音が音源として分布することが示されていた。これらより，遠方場においては音波が空間的にキャンセルする成分が存在し，結果的に円柱のエオルス音に相当する $St = 0.2$ の空力音がピークとして観測されると考えられる。この現象は，空間的に音波が打ち消し合った結果，残った成分が遠方場において音として観測されるという空力音の発生を実験的に示すものである。

5. まとめ

空力音の発生メカニズムに関する知見を実験的に得るために，小型風洞において，高速 PIV による流れ場測定およびマイクロホンによる放射音測定を同時に行う実験システムを構築し，両者の相関関係について調べた。

PIV 測定によって得られた流れ場から推定した空力音が，円柱のエオルス音発生周波数において，実測音圧と強い相関関係にあり，流れ場から発生する空力音を本手法により適切に評価できていることが確かめられた。音源位置については，円柱後流および円柱のはく離点近傍に強い音源が認められた。特に円柱のはく離点近傍については，周波数依存性の小さい広帯域成分が認められたが，必ずしもこれが遠方場において寄与度の大きい音源となるのではなく，流れ場から求めた空間的なパワースペクトル解析およびマイクロホンとのコヒーレンス分布の両者を活用することが有効であるとわかった。

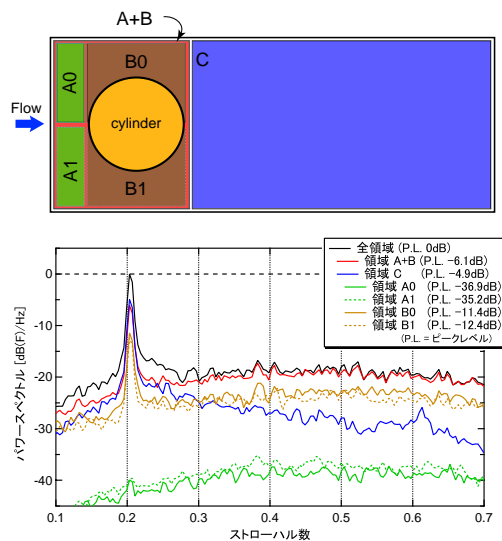
今後は，流れ場の測定結果をもとに詳細な音源構造を予測する本手法を，パンタグラフ部材等に適用し，空力音の発生源について解析を行う予定である。

謝辞

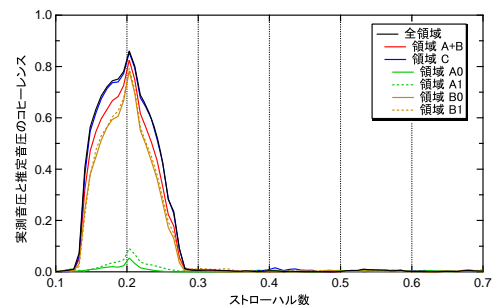
本研究は，豊橋技術科学大学 飯田教授および東京大学 岡本教授・染矢准教授との共同で実施した。関係各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Howe, M.S., "Theory of Vortex Sound," (1998), Cambridge University Press.
- 2) Takaishi, T., Ikeda, M., and Kato, C., "Method of evaluating dipole sound source in a finite computational domain," Journal of the Acoustical Society of America, Vol.116, No.3(2004), pp.1427-1435.



(a) 推定音圧の積分領域別パワースペクトル



(b) 推定音圧の積分領域別コヒーレンス

図6 区分した積分領域の概略図と区分領域別の推定音圧およびコヒーレンス