



渦運動解析に基づく 空力騒音の減音対策

北海道大学工学部
助教授 工学博士

望月 修

1. はじめに

「空力騒音」という言葉を聞いてすぐ「あのことだ」と想像できる人は少ないかも知れない。「騒音」という言葉はわかるにしても、「空力」などという言葉が付いているためである。しかし、空力騒音を「風の音」と言いかえれば、「ひゅーひゅー」、「びゅーびゅー」という様な音を連想できる。実は、これらの擬声語は、風の強い日に木の枝、バルコニーの手すり柵、送電線などから発生する音を表現したものである。もちろん、窓のすき間風の音というのものもある。つまり、風が物体（木の枝、送電線、建物等）に吹き付けると音が出るのである。普通、これらから出る音は騒音と呼ばれる不快な音であるが、フルート、パイプオルガンなどでは「風の音」を利用して心地よい音を作っている。

ヘアドライヤーに使われている軸流送風機の音、ジェットエンジン音、走行中の自動車から出る風切り音、新幹線のパンタグラフ騒音などもすべて「風の音」、すなわち空力騒音である。これらは、専門的に言えば、はく離せん断層中の渦と物体の相互干渉によって生ずる音である。これらの騒音レベルを低減しようとするれば、渦と物体の干渉を調べ、その性質を明らかにする必要がある。これは、従来の低減対策のアプローチ {たとえば音源となる部分（流れ場）を覆うというような対策（いわばマクロ的な音源の扱い）}とは異なり、ミクロ的な音源探査をするという立場からのアプローチである。つまり、流体工学の立場から空力騒音を扱おうとするの

である。

2. 円柱から発生する音

円柱まわりの流れを考えよう。円柱は手すり柵の棒、送電線、木の枝、煙突、車のアンテナなどの代表と考えられる。もちろん、実際には円柱が単独で存在することは少なく、手すり柵のように多くの円柱が接近して並んで存在したり、木の枝のように円柱がある角度で交差して存在する状況もある。取り合えず、1本の直径Dの円柱が流速Uの流れの中にあるとしよう。この円柱から発生する音の周波数fはカルマン渦列の周波数として

$$f = S_t U / D \quad (1)$$

によって見積もることができる。ここに、 S_t は定数（ストローハル数）である。したがって、円柱から発生する音の周波数はUに比例して高くなる。すなわち風速が増せば経験的に「ひゅー」から「びゅー」の表現になる。また、円柱から十分離れた観測位置における音の強さIは

$$I \sim U^6 / r^2 \sim (\overline{dp'/dt})^2 A / r^2 \sim (\overline{dL/dt})^2 / r^2 \quad (2)$$

である。ここに、rは円柱から観測位置までの距離、 p' は円柱表面の圧力変動、 $A (=l_s \cdot l_c \cdot l_s)$ および l_c はそれぞれスパン方向および周方向の相関長さ)は相関面積、Lは揚力（流れに対して直角方向の力）、tは時間である。式(2)から、音の強さはUの6乗に比例しており、風速のちょっとした増減による「風の音」の強さの変化は擬声語のイントネーションで表現されることになる。式(2)は、円柱表面上のある点およびその周辺における圧力変動が相関をもつ必要がある

ことを示している。円柱から発生する音の低減には、式(2)から、1) 揚力変動を小さくする、2) 相関面積あるいはスパン方向相関長さを小さくするなどの方策をとれば良いことがわかる。

円柱の揚力変動は渦放出によって生じる。したがって、音の周波数は渦放出周波数と同じである。式(1)におけるストローハル数 S_l はレイノルズ数 $Re = UD/\nu$ 、 ν は空気動粘性係数 (20°C 、1気圧において $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) によって若干異なるが、 $Re \leq 2 \times 10^5$ (臨界レイノルズ数) では $S_l = 0.2 \pm 0.01$ として良い。 Re がそれ以上になると S_l の変化は複雑である。

周辺にある円柱 (円柱とみなせる物体) まわりの流れの Re を見積ると、例えば風速 10 m/s における手すり柵、送電線、木の枝などは $10^4 \sim 10^5$ であり、時速 $200 \sim 300 \text{ km/h}$ で走行する高速列車のパンタグラフでは $10^5 \sim 10^6$ 程度である。したがって、高速列車のような特殊な例を除けば、身の回りにはある円柱まわりの流れの Re は 10^5 以下であり、ほとんどの場合 $S_l = 0.2$ を採用しても良いことがわかる。

揚力は表面圧力分布と関係する。円周方向に近接した2点間の表面圧力変動の相関は高い。したがって、式(2)の相関面積 A はスパン方向の相関長さ l_s に強く依存する。 l_s は渦が放出される際の2次元性の程度を表す指標である。 $Re = 10^4 \sim 10^5$ では $l_s = 3D$ 程度である。 l_s は Re が増加すると、また、気流の乱れが強くなると短くなる。

l_s を短くできれば渦放出音の減音が期待できる。 $Re = 2 \times 10^5$ において、円柱表面上のはく離点に

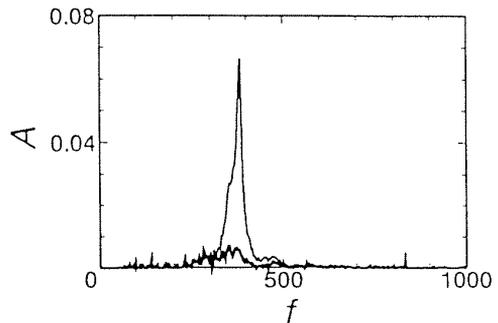


図1. 2D間隔で2Dの長さの粗さ要素をはく離点に張り付けた際の渦放出音の減音。 f : 周波数、 A : 音の振幅。
(細線: 粗さ要素なし、太線: 粗さ要素あり)

2Dの長さの粗さ要素を2Dの間隔でスパン方向に張り付けたときの渦放出音の減音効果を図1に示す。細線および太線で示されたスペクトルはそれぞれ粗さ要素を付けないときとそれを付けたときのものである。ピークを示す周波数の音が 20 dB (A) 程度減音されており、 l_s の短縮が減音に有効であることを示している。

3. 研究の今後

煙突や車についているアンテナのように円柱の一方に端面がある場合、先端に行くほど細くなる場合、円柱直径が途中で変化する場合、また、送電線のようにそれ自身が振動できる円柱などでは、どのような音が出るのであろう？ また、2つ円柱が種々の配置をとるとき、円柱からの音はどうなるのであろう？ これらに対して、物体からはく離れた渦の構造変化に関する研究

から、ある程度の推定はできる。ただし、直接これらの音を測定したという例はほとんど無い。

著者は、これまで噴流と円柱の干渉による空力的自励音を対象として、図2の流れの可視化写真に見られる噴流中の大規模渦と発生音との関係について調べてきた。現在、直列に配置された2円柱から発生する音と流れ場との関連について調べている。工学的には複数の円柱がさまざまな配置をとっており、それらの周辺の流れは複雑である。この様な複雑な流れから発生する音の減音または制御に関する研究は始まったばかりである。

末筆ながら、本研究の遂行に助成いただいたサウンド技術振興財団に深く感謝致します。

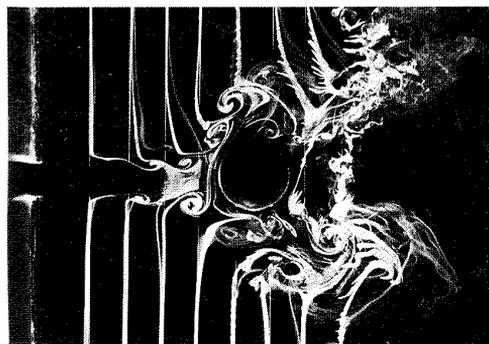


図2. 衝突噴流の可視化写真(2色露光法)。写真左端にある噴出口から流れ出た噴流が写真中央の円柱に衝突した際の渦の分布および運動(明るく写った渦がごく短い時間に薄暗く写った渦の位置へ変形しながら移動)を示している。このとき、遠距離場では2重極音源の自励音が観測される。

