

# 多孔質材を用いた空力騒音低減のメカニズムと

## 効果的な貼り付け手法に関する研究

### Reduction Mechanism of Aeroacoustic Noise by Porous Materials and Optimization

- 佐藤泰紀, 東北大院情報/流体研, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3-09, sato@dragon.ifs.tohoku.ac.jp  
服部裕司, 東北大学流体研, 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1, hattori@ifs.tohoku.ac.jp  
Yasunori Sato, GSIS, Tohoku Univ., 6-3-09, Aoba, Aramaki, Aoba, Sendai, Miyagi  
Yuji Hattori, IFS, Tohoku Univ., 2-1-1, Katahira, Aoba, Sendai, Miyagi

The application of porous materials is one of the promising approaches to reduce the aerodynamic noise generated from flows around bluff bodies. In this study, by modeling the porous material by a large number of small cylinders, the flow around the core cylinder covered by porous materials is simulated by direct numerical simulation. As a result, it is confirmed that the reduction of aerodynamic noise is possible by using porous materials. Especially, the noise is much reduced when the small cylinders are installed only one row in the radial direction. It is found that the vortex shedding is suppressed and the wake is nearly steady when the noise is reduced.

#### 1. 緒言

高速鉄道から生じる騒音は、転動音や構造物音などの機械的な騒音と、流体と物体の相互作用によって生じる空気力学的騒音(空力騒音)に大別される。空力騒音は車両速度の5~8乗に比例して大きくなることから知られているため、高速で走行する車両においては機械的な騒音に比べて空力騒音が支配的になる。特に車両屋根上にあるパンタグラフは、常に高速気流にさらされているため強い空力音源になりやすく、今後更なる車両の高速化を目指すためにはパンタグラフから出る空力騒音を低減することが必要である。これまで、空力騒音を低減する方法として形状の平滑化が進められてきたが、もはやそれのみでは不十分であり、新たな手法として多孔質材の貼り付けが提案されている。Suekiら<sup>1)</sup>は多孔質材貼り付け円柱周りの流れについての風洞試験を行い、多孔質材が空力騒音の低減に効果的であることを示した。

本研究の目的は、多孔質材貼り付けによる空力騒音低減のメカニズムを明らかにすることである。そのため、多孔質材を貼り付けた円柱周りの流れについて直接数値シミュレーションを用いて解析する。多孔質材を多数の小円柱を用いてモデル化し、空力騒音低減に対する効果を測定する。

#### 2. 解析手法

##### 2.1 問題設定

本研究では、流れは2次元圧縮性流れとする。一様流の向きをx軸の正の向きとし、円柱の中心を原点とするデカルト座標系を考える。x, y方向ともに非一様格子を使用し、格子点数は1532×1540とする。また格子幅は物体近傍で最小となるように設定し、最少格子幅は0.0095とする。円柱試験体の内径は $d_i=1.0$ 、多孔質部を含む外径は $d_o=1.8$ とする。

各物理量は円柱内径 $d_i$ 、無限遠での音速 $c_\infty$ 、無限遠での密度 $\rho_\infty$ で規格化する。一様流速を $U$ 、粘性係数を $\mu$ としてレイノルズ数を $Re \equiv \rho_\infty U d_o / \mu$ と定義する。今回は、一様流マッハ数を $M \equiv U / c_\infty$ として計算を行う。

##### 2.2 計算手法

本研究では、埋め込み境界法の一種である修正VP法<sup>2)</sup>を用いる。修正VP法は支配方程式に外力項を付加し、物体を多孔質媒体で近似する方法である。この手法は既存の方程式に組み込むこ

とが容易である上に、直交格子に物体を埋め込むため、任意の複雑形状物体を表現することが可能であるという利点を持っている。したがって支配方程式は、2次元圧縮性Navier-Stokes方程式に外力項を付加した系である。

空間離散化には6次精度コンパクト差分を用いる。時間進行は、外力項に対しては2次精度の陰解法を、それ以外の項に対しては陽解法の一つである2次精度Adams-Bashforth法を用いる。境界条件は、物体境界についてはVP法を、外部境界については無反射境界条件を課す。

##### 2.3 多孔質材のモデル化

多孔質材を貼り付けた円柱周りの流れを解析するにあたって、多孔質材をいかにしてモデル化するかが重要な問題となる。本研究では多孔質材を多数の小さい円柱で表現する方法によってモデル化を行う。

このとき小円柱の直径を $d_s$ 、径方向の個数を $N_r$ 、周方向の個数を $N_\theta$ とする。小円柱は、径方向については多孔質部を $N_r$ 個の層に分割し、それぞれの層において外側の円周に接するように設置する。また周方向についても、間隔が等しくなるように小円柱を配置するが、この際、外側から2列目の小円柱のフェーズをずらすことによって、多孔質想定部への均等な小円柱配置を試みた。この手法における多孔質貼り付け円柱のモデルをFig. 1に示す。

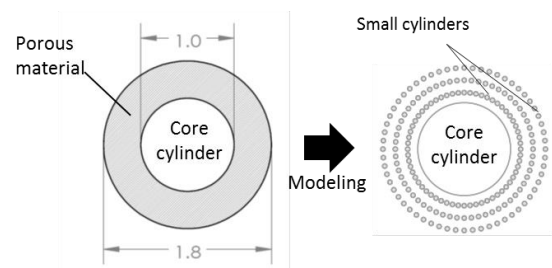


Fig. 1 多孔質材貼り付け円柱のモデル化

#### 3. 結果

##### 3.1 発生する音の定量的評価

本研究では小円柱のパラメータに関して、 $d_s = 0.03$ として解析を行う。また本研究では、円柱を解析対象とするため、円柱試験

体としての形が維持できるよう、 $N_\theta$ の範囲を  $N_\theta \geq 8$  と設定した。

まず、円柱から放出される音を定量的に評価するために、変動音圧の二乗平均平方根(rms)を求める。本研究では、rms の二乗を  $r=80, 15^\circ < \theta < 345^\circ$  の範囲で線積分した値を音響パワー  $P$  と定義する。 $N_r=1\sim 3$  のそれぞれ場合における、音響パワーの周方向本数特性を Fig. 2 に示す。Fig. 2 より、どの  $N_r$  の場合においても、音響パワーがある範囲において減少していることが分かる。つまり、 $N_\theta$  を変化させるとき、放出音が最も小さくなるような最適値が存在することが分かる。特に、 $N_r=1$  の場合、 $N_r=2, 3$  の場合と比較して放出音が非常に小さくなっている。その低減率に注目すると、最小値は最大値の 1/1000 程度となっており、非常に大きな効果が得られたことが分かる。

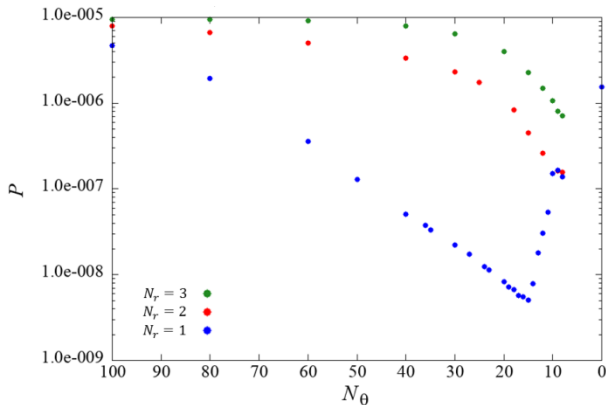


Fig. 2 音響パワーの周方向本数特性

### 3.2 音の低減メカニズム

ここでは、多孔質材を貼り付けることによってなぜ空力音が低減するのか、そのメカニズムについて議論する。そのためここからは、他と比較してより大きな低減率が得られた  $N_r=1$  の場合に着目する。

放出音が最も小さくなった  $N_\theta=15$  の場合の渦度場を Fig. 3 に示す。Fig. 3 より、空力音が小さくなったとき、カルマン渦の放出が円柱後端部から後方に離れた位置にまで引き延ばされており、後流の広い範囲が定常的になっていることが分かる。また、後流における渦度や渦放出頻度に関しても、他の場合と比べて小さいことが確認された。

続いて  $N_\theta=100, 15$  のときの、後流における  $x$  方向速度の二乗平均平方根(rms)をそれぞれ Fig. 4(a), (b) に、 $x$  方向平均速度分布をそれぞれ Fig. 5(a), (b) に示す。Fig. 4(a) より、 $N_\theta=100$  の場合、 $u$  の時間変動が大きい、つまり流れの非定常性が大きいことが分かる。また、Fig. 5(a) より、後流の位置によって速度分布に大きな差があることが分かる。それに対して、Fig. 4(b), Fig. 5(b) をみると、 $N_\theta=15$  の場合は、 $N_\theta=100$  の場合と比較して後流の乱れが小さく、後流の位置によって速度分布にほとんど差がないことが分かる。さらに、 $x=1\sim 5$  において、円柱背後の  $y=0$  では  $u$  がほとんど 0、かつ速度変動がほとんどない領域が存在している。

一般的に、空力音は物体近傍における渦の非定常な時間変動が原因で生じる。円柱周りに小円柱を設置することで、後流における速度の時間変動が非常に小さくなった、つまり渦の不安定な挙動が抑制されることによって後流が安定化したため、結果として空力音が大きく低減したと考えられる。

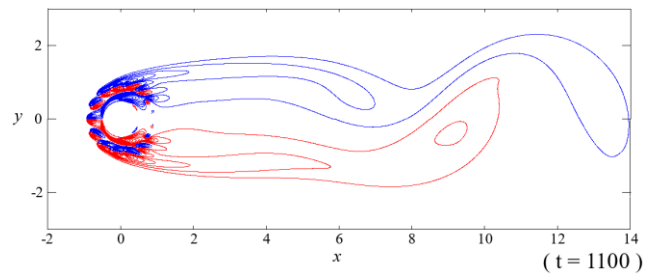


Fig. 3 渦度場 ( $N_r = 1, N_\theta = 15$ )

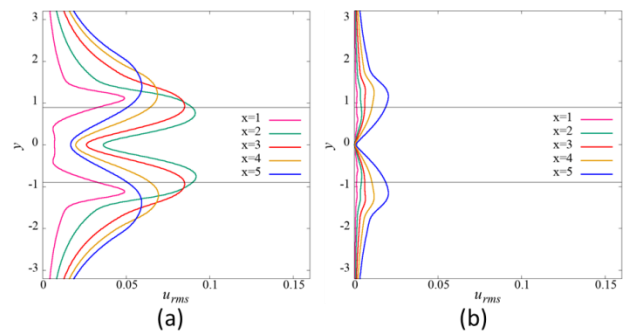


Fig. 4 後流速度の二乗平均平方根

## 4. 今後の研究課題・研究計画

### 4.1 小円柱モデルと連続体モデルとの関係性

先に述べたように、多孔質材をプログラム上で厳密に表現することは非常に困難である。そのため、様々なモデル化を検討しつつ、その整合性を確認することが重要であるといえる。本研究では多孔質材のモデル化手法として、小円柱モデルを用いた。一方、そのほかのモデル化手法として多孔質材の浸透率を変化させることにより多孔質材を表現する、連続体モデルが挙げられる。連続体モデルに関しては実際に解析を行い、小円柱モデルと同様に空力音の低減が確認できた。またその傾向も定性的には同様であった。今後はこれらのモデル化の低減率について定量的な整合性を確認する必要があると考える。

### 4.2 先行研究との比較

今回は DNS によって解析を行ったため、問題設定を二次元、低レイノルズ数流れとした。しかしながら、実際のパンタグラフは三次元であり、レイノルズ数の値も大きい。今後、より現実の事象に近づけるためには、問題設定を三次元、高レイノルズ数流れに拡張する必要があると考える。それに伴い、先行研究との定量的な比較も可能になると考える。

## 5. 結言

多孔質材を多数の小円柱を用いてモデル化し、多孔質材を貼り付けた円柱周りの流れについて直接数値シミュレーションを用いて解析した。多孔質材を貼り付けることによって、円柱からの放出音が低減されることが確認できた。これは、後方へ排出されるカルマン渦の渦度が小さくなる、つまり多孔質材によって渦の排出が抑制されたためであると考えられる。渦の発生が抑制されるメカニズムとして、後流に速度が 0 に近く、定常的な領域が広がるためである、ということが分かった。

今後の課題としては、様々なモデル化を検討しつつ、それらの整合性を確認していくこと、また、問題の設定を 3 次元や高レイ

ノルズ数流れに拡張することで、より現実の現象に近づけていく  
ことなどが挙げられる。

#### 参考文献

- (1) T. Sueki et al., “Application of porous material to reduce aerodynamic sound from bluff bodies,” *Fluid Dyn. Res.* 42 (2010) 015004
- (2) R. Komatsu, W. Iwakami and Y. Hattori, “Direct numerical simulation of aeroacoustic sound by volume penalization method,” *Comput. Fluids.* 130 (2016) 24-36.