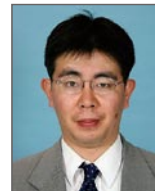


# 空力音発生を予測する

高石 武久

環境工学研究部(騒音解析 主任研究員)



たかいし たけひさ

## はじめに

新幹線のように高速で走る列車から発生する騒音は、レール―車輪間に働く接触力に起因して発生する転動音・構造物音と、車両表面の凹凸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とに、大きく分けることができます。中でも空力音は、列車速度が大きくなるにつれて急激に増大するため、今後時速300kmを超える営業運転を目指す上では、その対策がますます重要になると考えられます。

1992年に東海道新幹線に「のぞみ」が登場し、本格的な高速化の時代が幕開けして以来、低騒音風洞を用いた風洞実験などを通じて、空力音低減に向けた研究開発が精力的に進められてきました。マイクロホンを多数配列することによって音源の分布を測定するマイクロホンアレイ装置をはじめとした計測・評価手法の進歩もあり、風洞実験は空力音低減対策を立てる上で必要不可欠な手段となっていますが、こういったメカニズムによって空力音が発生しているかを実験的に捉えることは容易ではありません。

一方、近年のコンピュータ性能の著しい向上に伴い、複雑な流れの時間変化と、それに伴って発生する空力音を予測することが可能になってきました。そこで本稿では、風洞実験を補完する目的で開発を行ってきた空力音のコンピュータシミュレーションについて、いくつかの事例を交えながらご紹介したいと思います。

## 予測モデルの概要

空力音は、物体が移動することによって空気の流れが乱され、物体の後ろに時々刻々変化する渦が放出されることによって発生します。渦あるいは乱れから放射され直接伝わる音は、四重極音と呼ばれ、新幹線のように、音速に比べて十分低い速度で動く場合には、それほど大きな音にはなりません。そのかわりに、物体の近くにある渦や乱れから放射された音が、一旦物体によって回折・散乱されるこ

とによって放射される、二重極音と呼ばれる音が支配的になります。これは、放射される空力音の大きさが、渦や乱れの強さの他に、物体が近くに存在することによって増大する音響的な放射効率によって決まるからです。

空力音を予測する手法として、現在様々な方法が提案されています。最も理想的なのは、物体周りの流れから空力音が生成して伝播する過程を同時に求める方法ですが、そのためには広い範囲を高い精度で計算する必要があり、コンピュータの性能による制約を受けてしまうのが現状です。

先にも述べたように、空力音は物体の近くで時間変化する渦が、物体に散乱されることによって放射されます。そこで、鉄道総研では、このプロセスを、時間変化する流れを計算する部分と、流れから音が生成して伝播する過程を計算する部分に分けて、実験では困難な空力音の発生メカニズムを予測するコンピュータシミュレーションの開発を行ってきました。このような手法は、空力音の分離解法と呼ばれ、物体の移動速度が音速に比べて十分遅い場合に、少ない計算負荷で高い精度を得ることができるのが特長です。

流れの計算には、LES (Large Eddy Simulation) 法と呼ばれる手法を用いました。この手法では、流れが時間的に変化する際に生成される大きな渦と小さな渦の関係をモデル化することによって、空力音の原因となる渦の時々刻々の変化を計算することが可能です。流れの変化が求まったら、次に渦音理論と呼ばれる空力音の理論を応用し、空力音の生成・伝播の過程をモデル化しました。具体的には、物体による音響的な放射効率を、境界要素法と呼ばれる計算手法を応用して求め、流れの計算から求めた空気の流れベクトルとかけ合わせることによって、遠方に放射される二重極音の音源を定量的に評価する方法を提案しました。境界要素法を用いる計算手法は、遠方の観測点まで音が伝播する過程を、少ない計算負荷で精度良く求めることができる長所があり、新幹線の沿線騒音に与える影響を評価するのに適しています。

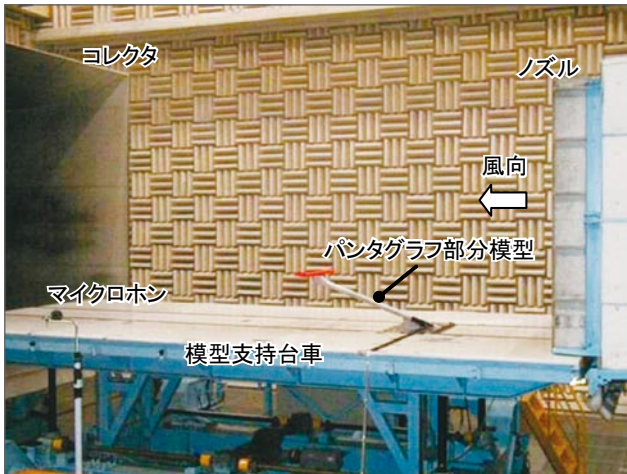


図1 パンタグラフ部分模型を用いた風洞実験の様子

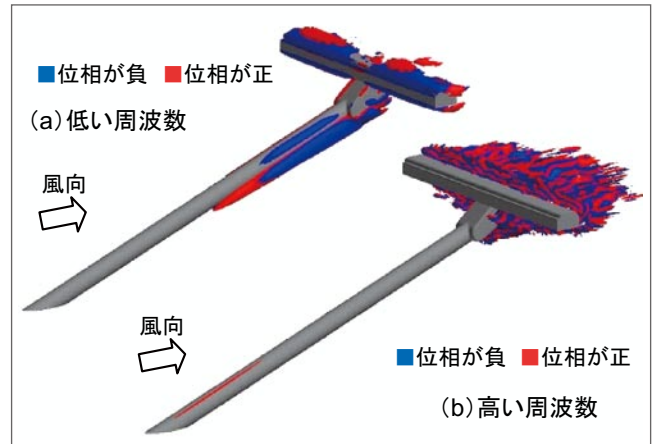


図3 パンタグラフ部分模型周りの空力音源の空間分布(等値面)

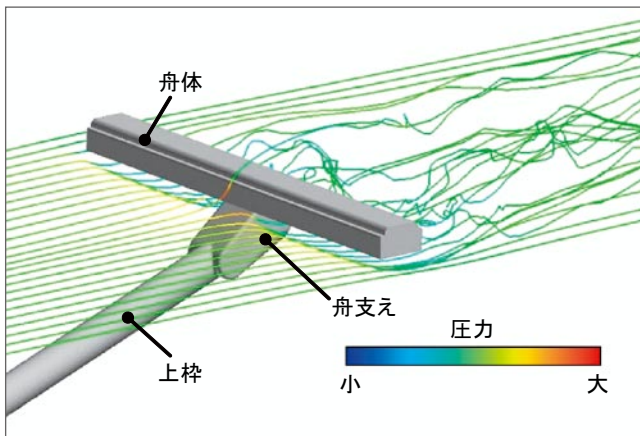


図2 パンタグラフ部分模型周りの流れの様子

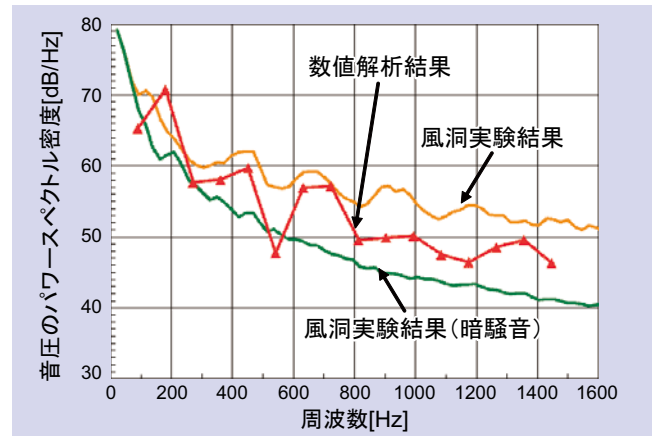


図4 パンタグラフ部分模型から放射される空力音の周波数解析

### パンタグラフ部分模型から発生する空力音の予測<sup>1)</sup>

空力音の予測例として、新幹線の主要な音源の一つであるパンタグラフから発生する空力音について、解析を行いました。解析に用いたのは、現在新幹線で広く用いられている、シングルアーム方式と呼ばれるタイプのパンタグラフで、簡単のため、上枠と呼ばれる部分よりも上の部分を再現した部分模型を用いました。

図1は、比較・検証のため、滋賀県米原市にある鉄道総研の大型低騒音風洞において行った風洞実験の様子を示したものです。時速300kmで送風を行い、舟体の上方5mに設置した無指向性マイクロホンを用いて、放射音を測定しました。

図2は、コンピュータシミュレーションを用いて、パンタグラフ部分模型周りの流れの様子を計算した結果です。流れを表す線の色は、その場所における圧力の大小を示し

ています。舟体の上下面と舟支えの両側面で剥がれた流れがこれらの背後に巻き込み、強い変動が生じていることがわかりました。

図3は、流れの計算結果から求めた速度ベクトルと境界要素法で求めた音響的な放射効率とを掛け合わせて求めた、空力音源(二重極音源)の空間分布を示したものです。低い周波数では、舟体の上下面、舟支えの下面、上枠の下面など、流れが上下方向に大きく剥がれていた箇所に音源が分布しています。一方で、高い周波数の場合、舟体や舟支えの下流側に音源が分布していることがわかります。これらの箇所では、模型の表面で剥がれた比較的規模の大きな渦が、下流に流される途中で次第に小さな渦になり、その結果、周期の短い高い周波数の空力音が放射されていると考えられます。

図4は、パンタグラフ部分模型から上方に放射される空

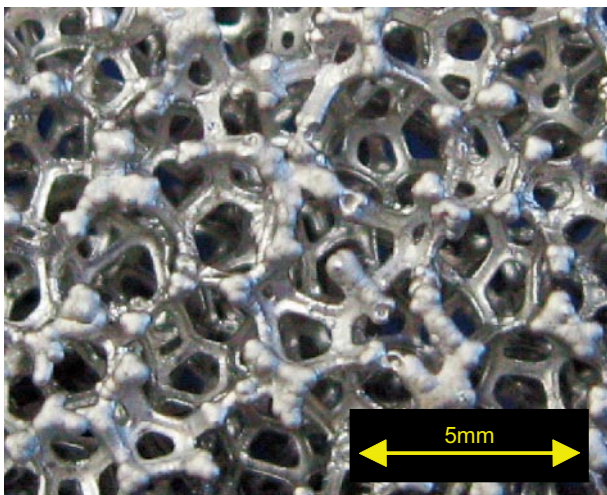


図5 連続気泡の多孔質材

力音のシミュレーション結果と、風洞実験結果を比較した結果です。絶対量を評価するには十分な精度とは言えませんが、全体的な傾向は捉えられていることがわかります。このことから、風洞実験を補完し、空力音発生メカニズムを明らかにするという目標は、概ね達成できたと考えられます。

### 多孔質材貼付による空力音低減効果の予測<sup>2)</sup>

パンタグラフのように機能上の制約から平滑化が困難な形状の表面に、図5に示すような連続気泡の多孔質材を貼付することで、空力音を大幅に低減できることがこれまでの研究開発からわかってきました。しかしながら、風洞実験を中心とした開発だけでは、空力音の低減原理を明確にすることが困難だったため、こういった部位にどのように貼付するのが良いかは、手探りで試行錯誤を繰り返すしかありませんでした。そこで、計算モデルを用いて、多孔質材を貼付した円柱から放射される空力音のコンピュータシミュレーションを試みました。

多孔質材の複雑な構造の間を通り抜ける空気の流れを、シミュレーションで忠実に再現することは困難です。そこで、多孔質材を通過することによって流れが持つ運動量が損なわれると仮定して、流体の運動方程式に損失項を加え、LES法による流れの計算を行うことにしました。解析事例として、直径 $\phi 25\text{mm}$ の円柱の外周に、厚さ10mmの多孔質材を貼付した場合の空力音の予測を行うことにしました。中心の $\phi 25\text{mm}$ の円柱の表面では、流速0のすべりなしの境界条件を与えました。厚さ10mmの多孔質領域内においては、各点における流速の2乗に比例した運動量の損失が発生すると仮定しました。また、多孔質領域の外側

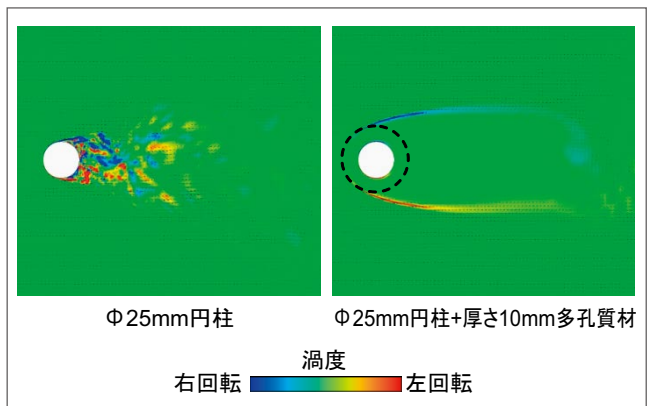


図6 多孔質モデルを用いた流れ場の計算結果

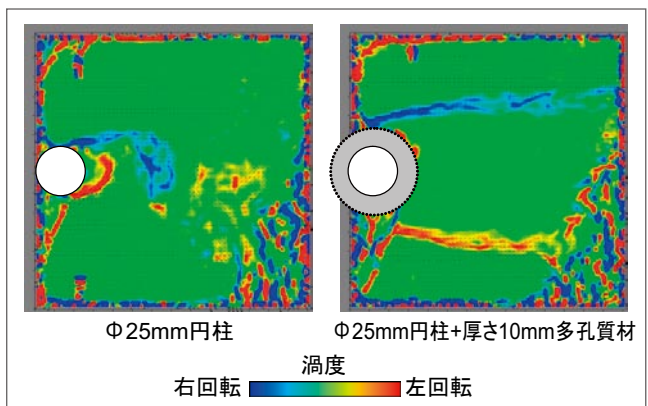


図7 PIVを用いた流れ場の測定結果

では、運動量損失がない従来通りの流れとして扱うことにしました。

図6は、多孔質モデルを用いてコンピュータシミュレーションによって求めた流れの様子を示しています。 $\phi 25\text{mm}$ の円柱の場合(左図)、円柱の背後に大小様々な渦が放出されているのがわかります。また、これらの時間経過を調べると、円柱の両側面から互いに逆回転の渦が、下流に向かって交互に放出されることがわかりました。一方、 $\phi 25\text{mm}$ の円柱に厚さ10mmの多孔質材を貼付した場合(右図)、物体の背後に流れが遅い領域が広がり、渦の巻き込む位置が下流側となりました。また、これらの時間経過を調べると、物体の近くの渦は、ほとんど時間変動しないことがわかりました。図7は、粒子画像流速計測法(PIV)と呼ばれる、レーザシートを用いて流速を計測する装置を使用して、流れ場を測定した実験結果です。多孔質材の有無による流れ場の違いの特徴は、図6に示したコンピュータシミュレーションによる結果と一致しており、多孔質のモデル化が妥当であることがわかりました。

図8は、 $\phi 25\text{mm}$ の円柱に厚さ10mmの多孔質材を貼

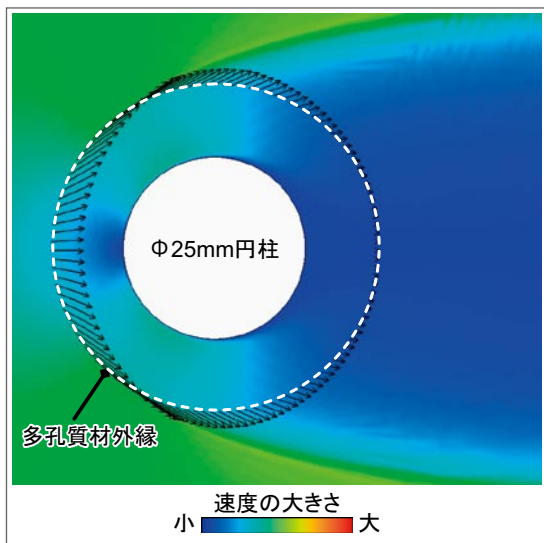


図8 Φ25円柱+厚さ10mm多孔質材  
近傍流れの計算結果

付した場合の、物体近傍の流れの計算結果を表示したものです。図の中央の白抜き部分は中心のφ25mm円柱を、白い点線は、厚さ10mmの多孔質材の外縁を示しています。また、図の色は速度の大きさを、矢印は多孔質材の外縁における速度ベクトルを表しています。物体正面で多孔質領域に吸い込まれた流れが、多孔質内を通過し、側面より下流において再び外側に吐き出されていることがわかります。これらのことから、多孔質内を通過する流れによって、

- ・多孔質領域外縁における周方向の流速が、渦を弱める
- ・多孔質領域外縁における半径方向の流速が、渦の間隔を広げる
- ・円柱と異なり、物体の近くの渦度が時間的にほとんど変化しない

といった特徴的な流れ場が形成されることがわかりました。

次に、流れの計算結果と、境界要素法を用いて求めた円柱による音響的な放射効率をかけ合わせて、空力音源（二重極音源）の評価を行いました。図9は、その空間分布を示したものです。φ25mm円柱の場合（左図）には、図6で渦度が時間的に変化していた付近で、円柱の長手方向に沿って強い音源が分布しています。一方、厚さ10mmの多孔質材を貼付すると（右図）、音源が消滅していることがわかります。これは、空力音の発生要因となる物体近くの時間変化する渦が弱くなったためと考えられます。

図10は、側方2mの測定点における、各模型から放射される空力音のシミュレーション結果と風洞実験結果を比較したものです。多孔質材を貼付することによって放射音が大幅に低下する様子を、捉えることができました。

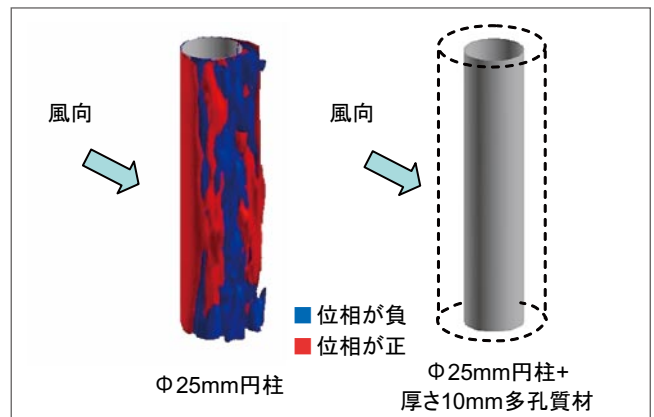


図9 多孔質模型周りの空力音源の空間分布（等値面）

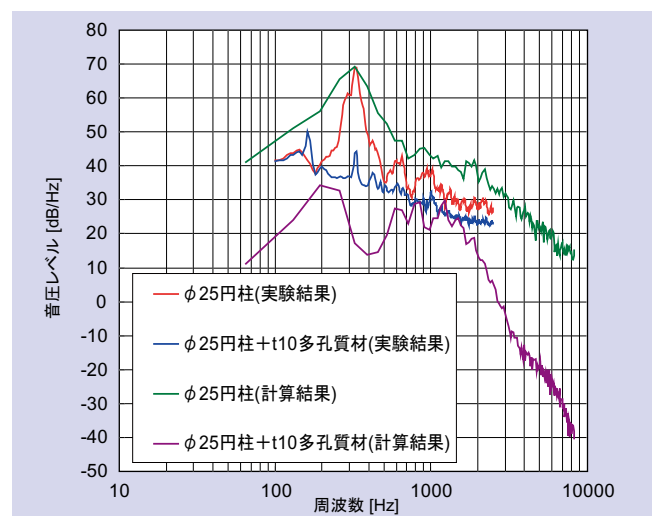


図10 多孔質模型から放射される空力音の周波数解析

## おわりに

コンピュータシミュレーションによる空力音の予測手法について、予測モデルの概要と、パンタグラフ部分模型および多孔質模型を用いた計算結果をご紹介します。実験では捉える事が難しい空力音の発生メカニズムを明らかにする上で、シミュレーションが有効な手段であることをおわかりいただけたかと思います。今後は、計算アルゴリズムの並列化などを通じて、より複雑な問題の結果が短い時間で得られるよう、改良を進めていきたいと考えています。

RRR

## 文献

- 1) 高石武久, 佐川明朗: 高周波数域まで予測可能な空力音数値解析手法, 鉄道総研報告, Vol.23, No.7, pp.11-16, 2009
- 2) 高石武久, 末木健之: 多孔質材を貼付した円柱の空力音低減に関する数値解析, 第29回流力騒音シンポジウム概要集