

## エッジトーンの基礎問題の流体音響解析

岩上翔<sup>1</sup>, 堤元気<sup>1</sup>, 小林泰三<sup>2</sup>, 高見利也<sup>3</sup>, 高橋公也<sup>1</sup>  
 九工大院情報工<sup>1</sup>, 帝京大 九大情基セ<sup>2</sup>, 大分大工<sup>3</sup>

### 1. 序論

細くしぼられたジェットがエッジに衝突すると、ジェットは自発的な振動をはじめ、渦を発生する。このとき、運動する流体から発生する流体音のことをエッジトーンという。このエッジトーンは、リコーダー等のエアリード楽器の音源となっており、共鳴管との相互作用によって楽器としての音を作り出す。そのため、エッジトーンの音源としての性質を知ることが、楽器の発音機構を知る上で非常に重要である。

流体音の研究は、1950年代初頭の Lighthill の音響的類推論までさかのぼることができる。Lighthill は、マッハ数の亜音速から遷音速の領域では流体音源は 4 重極の性質を示し、速度の 8 乗に比例した音響エネルギーの放射がおきることを示した。このことは実験とよく一致することが確認されている。

一方、亜音速領域以下では単極または 2 重極の放射が支配的になると考えられる。さらに、単純な単極、2 重極放射では説明できない場合もあるという実験や数値解析の報告もある。

エッジトーンはジェットの振動によって発生する特殊な流体音であり、他の流体音とは異なる特徴を持つ可能性があるが、この点についての詳細な研究はなされていない。本研究では、亜音速以下の領域における 2D のエッジトーンにおける放射エネルギーや Lighthill の音源の特徴を、圧縮性 LES によるシミュレーションと実験によって考察する。

### 2. 理論

#### 2.1 Lighthill の音源

Lighthill は、圧縮性の Navie-Storks 方程式と連続の式から、近似を用いずに、流体音を記述する厳密な方程式を導きだした。その方程式は Lighthill の方程式と呼ばれ、

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c_0^2 \Delta(\rho - \rho_0) = \frac{\partial^2 \rho v_i v_j}{\partial x_i \partial x_j} + \Delta((p - p_0) - c_0^2(\rho - \rho_0)) + \frac{\partial^2 \sigma_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (1)$$

である。圧力  $p$ 、密度  $\rho$ 、速度ベクトル  $\mathbf{v}$  とし、添え字の  $i, j$  はベクトルやテンソルの  $i$  成分  $j$  成分を表す。また、 $p_0$  平均圧力、 $\rho_0$  を平均密度、 $c_0$  を音の速さとし、 $\sigma_{ij}$  を粘性応力テンソルとした。(1)式の左辺は、音波の波動方程式であるので、右辺はその音源と見なすことができ、右辺を評価することで音源の性質を知ることができる。本研究では、非圧縮流体の仮定を用い、(1)式の左辺を近似し、

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c_0^2 \Delta(\rho - \rho_0) \sim -2\rho_0 \left( \frac{\partial v_1}{\partial x_2} \frac{\partial v_2}{\partial x_1} - \frac{\partial v_1}{\partial x_1} \frac{\partial v_2}{\partial x_2} \right) \quad (2)$$

として用いる。

#### 2.2 Lighthill の音響的類推論による音エネルギーの放射傾向

流体音は単極と様々な次数の多重極放射の合成で得られる。Lighthill は、(1)式の音源項のオーダー計算を行うことにより、亜音速以上の乱流領域において、流体音は 4 重極放射の傾向が強くなり、それを反映し音エネルギーは速度の 8 乗則に従うことを示した。しかし、亜音速領域以下では単極または 2 重極放射が強くなる場合があり、放射強度はそれぞれ 4 乗則、6 乗則にしたがう。ただし、2次元の場合、べきの次数が 1 つ下がり、3 乗、5 乗、7 乗になるとの指摘もある。

### 3. 解析手法

本研究では、OpenFOAM の LES 圧縮性ソルバ rhoPisoFoam を利用して、図 1 のような 2D のエッジトーンの計算を行った。エッジ近傍の格子間隔 0.1mm とした。速度変化の傾向を見るために、吹き出し速度 12~65m/s のジェットを計算した。

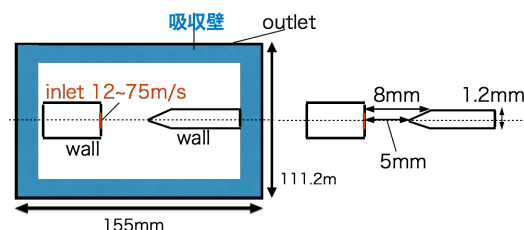


図 1 2D エッジトーンのモデル図

### 4. 計算結果

#### 4.1 シミュレーション結果

序論でも述べたように、エッジトーンは自発的な振動をする。図 2 に示すようシミュレーションでも自発的な振動が見られた。これは、吹き出し速度 15m/s における速度分布である。

また、本研究では遠方場での音の性質も見ていく。そのシミュレーション結果を図 3 に示す。少し見づらいが、渦の部分意外では上下反対称の圧力変動が見られ、2 重極放射が支配的である。

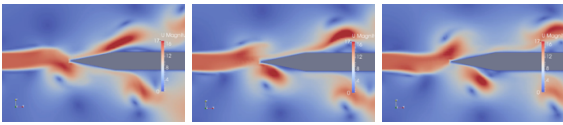


図2 エッジトーンのシミュレーション

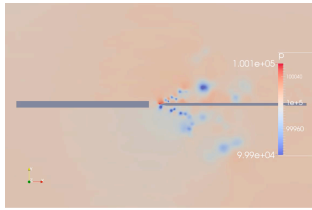


図3 遠方での圧力変動

## 5. 考察

### 5.1 遠方場での音のエネルギーの実験とシミュレーション結果の比較

遠方場での音エネルギーを評価するために、その点の圧力変動の周波数分解を行い、基音、倍音それぞれの値からエネルギー換算し、空間的なサンプル平均を計算した。その結果を図5に示す。ジェットの流れとともに発生する音響エネルギーは、成長領域、停滞領域(速度2乗則)、乱流領域(速度7乗則)の3つの領域に分けることができる。

ヤマハ(株)から提供された遠方場の音の実験データを同様な方法で解析した結果を図6に示す。実際、実験においても3つの領域が存在することが確かめられた。本研究で確認された停滞領域の現象は、注目に値する。なぜなら、停滞領域で見られる2乗則は、Lighthillの示した8乗則、6乗則、4乗則(2次元ではそれぞれ7乗則、5乗則、3乗則)から外れたものであり、エッジトーン特有の結果であり、ジェットの振動特異性を反映していると考えられる。

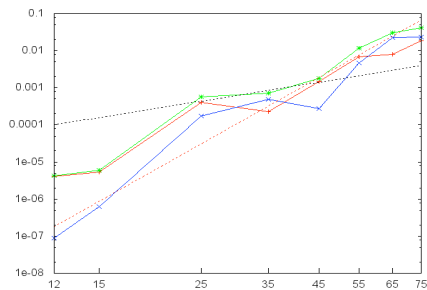


図5 速度による音エネルギーの変化(Simulation)

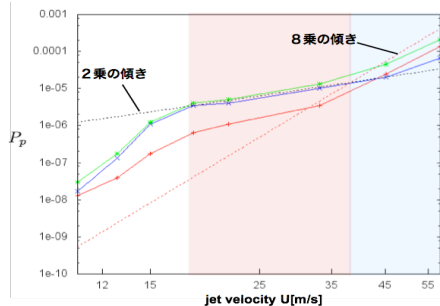


図6 速度による音エネルギーの変化(実験)

### 5.2 Lighthill 音源 による音波の再現

Lighthillの音源から遠方音場再現するためにエッジ近傍のLighthill音源を周波数分解し、基音、倍音の成分の分布に分けそれらから発生する音場を計算した。2次元波動方程式のGreen関数はハンケル関数であるが、遠方においては、振幅が距離のルートに反比例する正弦関数で近似することができる。その結果を図7にしめす。音場は2重極放射による分布と見なせ、図3と定性的に一致している。

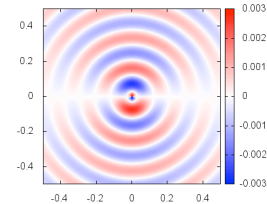


図7 Lighthill 音源 による音波

## 6.まとめ

音エネルギーの変化において実験とシミュレーションが一致し、エッジトーン特有の2乗則領域があることが確認できた。また、このシミュレーションからLighthillの音源を導き、音波を再現し、定性的に一致した。今後の課題は、Lighthill音源と3つの領域の関係についてより詳細に調べていくことである。