

高橋公也(九州工業大学)

# 管楽器および音響機器の大規模流体音響解析

## [概要]

本研究では、管楽器の発音機構および音響機器の異音の問題を低マッハ数における流体音(空力音)の問題として捉え、流体と音を同時に再現可能な圧縮流体の高精度大規模解析を行い、その問題の解明を目指すことを目的とする。それを実現するために、大規模並列解析の効率化とそれに伴うプレポスト処理および可視化の問題に取り組む。さらに、低マッハ数領域の圧縮流体の計算に必要な OpenFOAM の開発改良を行う。それらの成果を利用拠点に共有・提供する。本年度は、以下の3つの項目について解析を行う:

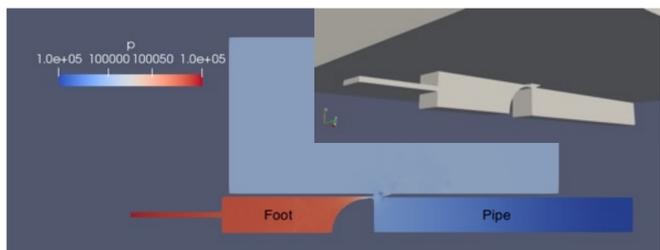
1. LESを用いた管楽器および音響機器の大規模数値解析
2. DNSを用いた2次元管楽器モデルの厳密数値解析
3. 管楽器の発音機構の遅延方程式モデルを用いた基礎解析

## [研究項目]

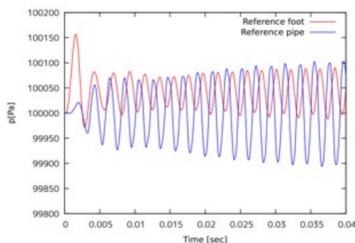
### 1. LESを用いた管楽器モデルの大規模計算解析

#### a) オルガンパイプのフットの解析

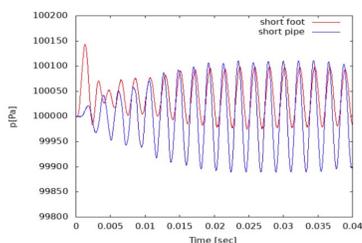
これまでの2次元モデル解析で、フットがヘルムホルツ共鳴器として働き、共鳴パイプとの相互作用で安定な発振が起きることが確認された。一昨年度から着手している3次元モデルの解析を進めフットの役割を明らかにする。



モデルと圧力分布: 定常発振状態で管体とフットの逆同期状態



標準モデルにおける管とフットの圧力振動

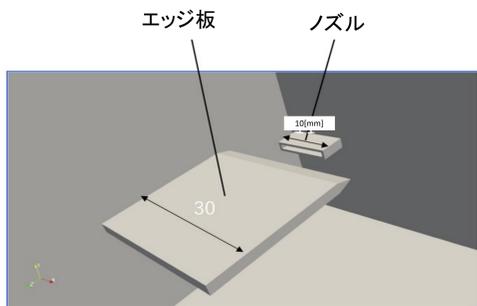


短いフットモデルにおける管とフットの圧力振動

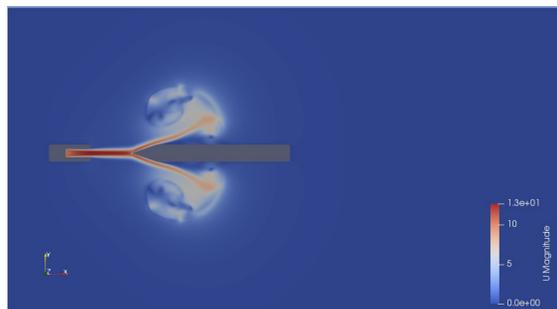
標準モデルの方が立ち上がり速い。フットと管の振動は、標準モデルではほぼ逆同期であるが、短いフットモデルではほぼ同期している。

#### c) エッジトーン解析の3次元解析

これまでのDNSを用いた2次元モデルの成果(Int. J. Aeroacoust. Vol.20 (2021) 283.)を踏まえ、LESを用いて3次元モデルの解析を行う。



3次元モデル: エッジとノズルの距離は5mm



2次元断面上の流速分布(解析途中)

#### b) Howeのエネルギー推論を用いた3次元小型エアリード楽器の音響エネルギー発生領域の解析

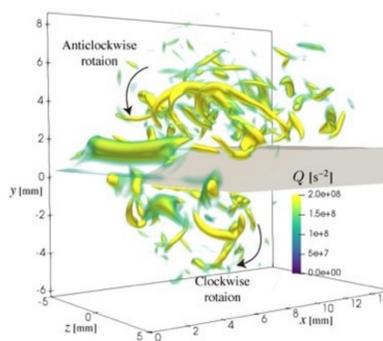
Howeのエネルギー推論(HEC)を用いた解析を行い、音響エネルギーの発生領域を特定し、発生量を定量的に評価する。

$$\text{Howeの積分} \quad \Pi_g = \rho_0 \int_V (\mathbf{v} \times \boldsymbol{\omega}) \cdot \mathbf{u} \, dV$$

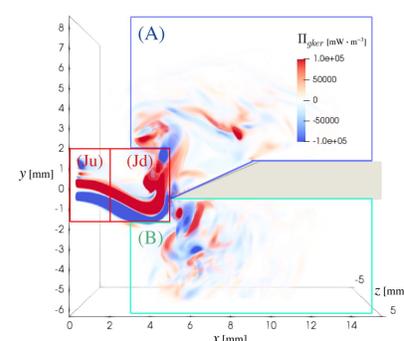
$\mathbf{v}$ : 流速       $\boldsymbol{\omega}$ : 渦度       $\mathbf{u}$ : 音響的粒子速度 (音響ソルバーで計算)

$\Pi_g > 0$ : 音の発生

$\Pi_g < 0$ : 音の吸収



歌口近くの可視化された渦管

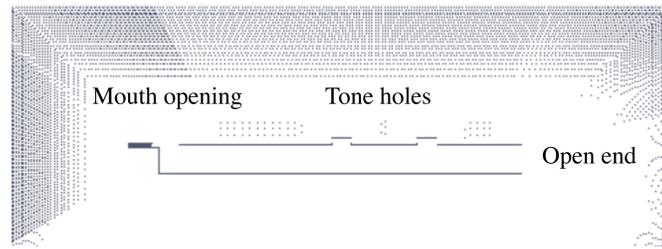


歌口近くのHoweの被積分関数の分布

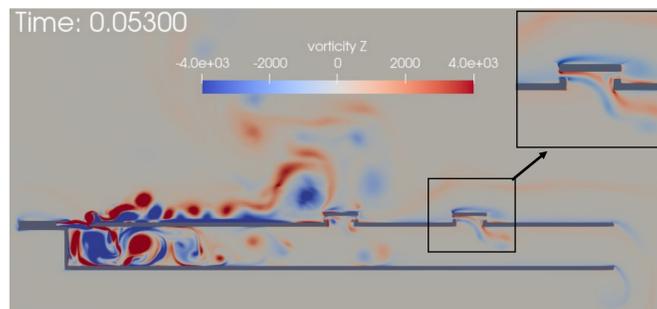
左図は、小型オルガンパイプの3次元モデルの歌口近くの渦管をQ-criterionによって可視化したものである。右図は、Howeの積分の被積分関数の分布である。赤の部分で音の発生、青の部分で音の吸収が起きている。分布は時間変動するが、時間平均をとると、ジェットの後流のJd領域で音のエネルギーが発生する(J. Acoust. Soc. Am. Vol.149 (2021) 4000)。

#### d) 木管楽器の音孔の開閉の再現

木管楽器の音孔の開閉を再現するためには、トポロジー変化を伴う移動境界問題の解析が必要である。2つの音孔を持つ2次元エアリード楽器の解析を行い、音高の動的な変化の再現を目指す。



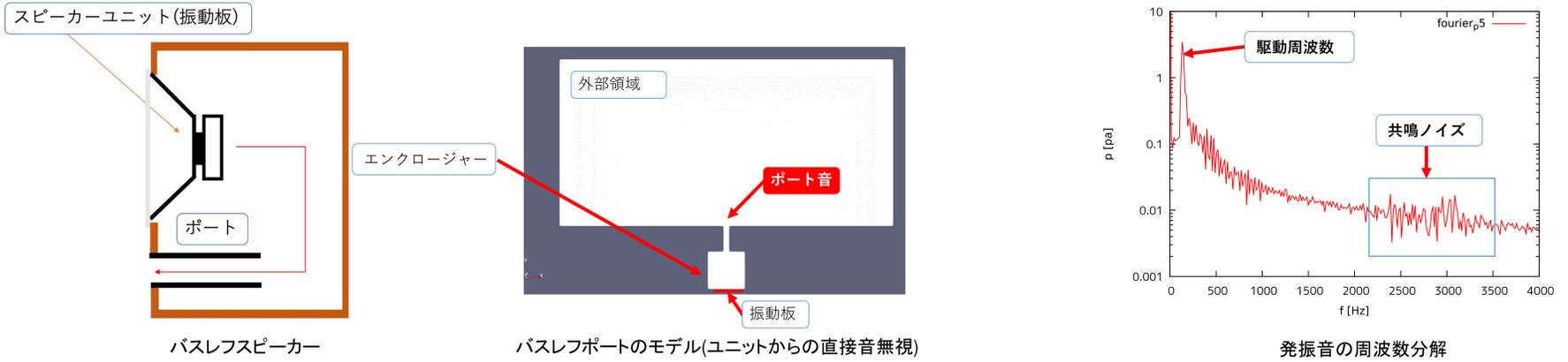
モデルのメッシュ



音孔が開いた状態の発振状態(渦度)

### e) スピーカーのバスレフポートの3次元解析

バスレフスピーカーのポートノイズの発生機構の詳細を Howe のエネルギー推論等を用いて明らかにする。



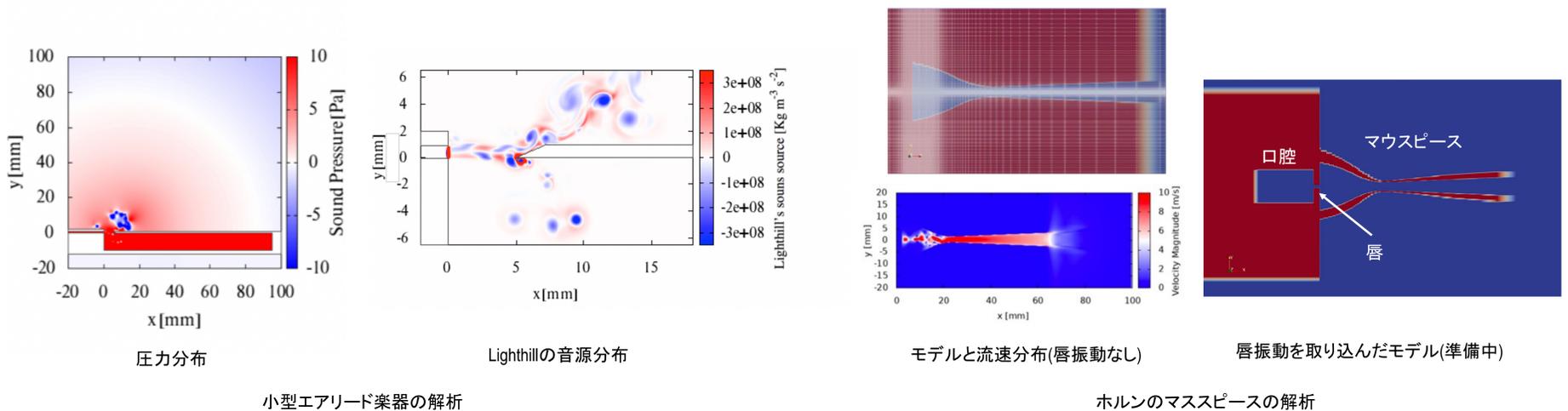
#### ポートノイズの発生機構

1) エンクロージャーとポートがヘルムホルツ共鳴器を構成する。共鳴周波数より少し高い音でスピーカユニットを駆動するポートから出る音とユニットからの直接音が同位相になり、その付近の周波数帯の音が強化される。2) ポートの出口のエッジ付近で音が流体の渦に変化する。3) 渦から広帯域の流体音(流体ノイズ)が発生する。4) 流体ノイズがポートやエンクロージャーと共鳴し、その帯域が強調された異音が発生する。

## 2. DNSを用いた2次元管楽器モデルの厳密数値解析

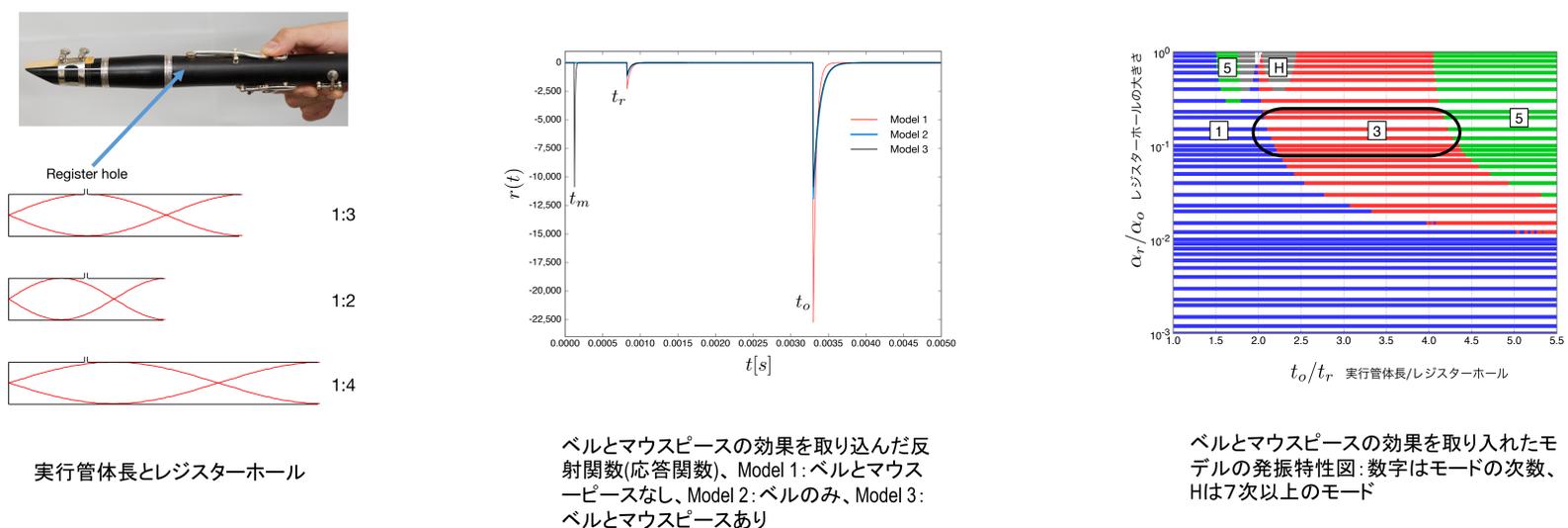
解析対象: 小型エアリード楽器、金管楽器のマウスピース

これまでの音源となるエッジトーンの成果を踏まえ、小型エアリード楽器およびホルンのマウスピースの発音機構の解析を行う。ホルンのマウスピースの解析では、唇の振動を模擬したモデルの解析を行う。



## 3. 管楽器の発音機構の遅延方程式モデルを用いた基礎解析

一昨年度から進めている3倍音を出すのに使われるクラリネットのレジスターホールの機能の解析を進め、より現実の管体に近いモデルの解析を行う。



実行管体長とレジスターホール

ベルとマウスピースの効果を取り込んだ反射関数(応答関数)、Model 1:ベルとマウスピースなし、Model 2:ベルのみ、Model 3:ベルとマウスピースあり

ベルとマウスピースの効果を取り入れたモデルの発振特性図: 数字はモードの次数、Hは7次以上のモード

#### 共同研究者:

小林泰三(九州大学、副代表)、南里豪志(九州大学、副代表)、服部裕司(東北大学)、高見利也(大分大学)、大島聡史(名古屋大学)、緑川博子(成蹊大学)、伊香賀子龍(九州工業大学)、住田玲(九州工業大学)、高浪彰太(九州工業大学)、瓜生海聖(九州工業大学)、小野又樹(九州工業大学)