jh200001-MDH

管楽器の大規模流体音響解析

髙橋　公也（九州工業大学）

概要

本研究では、管楽器の発音機構の問題を低マッハ数における流体音 (空力音) の発生機構の問題として捉え、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、発音機構の解明を目指すことを目的とする。本年度は、以下の３つの項目について解析を行った。まず、Large Eddy Simulation (LES) 解析を用い、オルガンパイプの３次元モデルや音孔の付いた管楽器の２次元モデルの解析を行った。次に、より厳密な解析が必要な場合は、Direct Numerical Simulation (DNS) を用いて、小型オルガンパイプやホルンのマウスピースの２次元モデルの解析を行った。これらに加え、管体の形状や音孔の開閉の違いが発音機構に与える影響を容易に解析できる遅延方程式モデルの基礎解析も行った。特に、3 次元 LES 解析では、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を解決し 3 次元の流体音の発生機構の解析を行った。

1　共同研究に関する情報

1.1　共同研究を実施した拠点名

名古屋大学　九州大学

1.2　共同研究分野

■超大規模数値計算系応用分野

■超大規模データ処理系応用分野

1.3　参加研究者の役割分担

高橋公也 (九州工業大学): 代表、総括

小林泰三 (九州大学): 副代表、大規模計算とプレポスト処理

服部裕司 (東北大学): DNS を用いた圧縮流体解析

高見利也 (大分大学): 大規模計算

南里豪志 (九州大学): 並列計算の効率化

大島聡史 (名古屋大学): OpenFOAM の改良開発

緑川博子 (成蹊大学): 並列計算の効率化

田畑諒也 (九州工業大学): DNS を用いた楽器の解析

伊香賀子龍 (九州工業大学): オルガンパイプの解析

住田玲 (九州工業大学): 金管楽器のマウスピースの解析

高浪彰太 (九州工業大学): 音孔の開閉の解析

2　研究の目的と意義

本研究では、管楽器の発音機構の問題を、低マッハ数における流体音 (空力音) の発生機構の問題として捉え、その大規模解析を行う。楽器の繊細な発音機構を再現するためには、流体と音を同時に再現可能な圧縮流体の高精度解析が必要であり、小型の管楽器の 3 次元モデルでも 10 億近いメッシュが必要である。本年度の研究では、これらの現状を踏まえ、管楽器の 3 次元および 2 モデルの LES 解析を行う。また、より厳密な解析が必要な場合は、DNS を用いた 2 次元モデルの解析を行う。これらに加え、管体の形状や音孔の開閉の違いが発音機構に与える影響を容易に解析できる遅延方程式モデルの基礎解析も行う。

これまでの研究で LES を用いて 2 次元から 3 次元へと解析を発展させてきたが、本研究で

はより大規模な 3 次元モデルの解析を中心に行う。その実現には大規模並列計算の高速化が必要であり、一次計算としての流体シミュレーションの高速化と同時に、実質的なボトルネックであるポスト処理の効率化が重要である。本研究ではプレポスト処理および可視化の問題を解決し 3 次元の流体音の発生機構の解析を行う。さらに、低マッハ数領域の圧縮流体の計算に必要な OpenFOAM の開発改良を行い、その成果を利用拠点に共有・提供する。また、DNS の解析では、計算の効率化、高速化の検討を行う。

流体音の発生メカニズムは高マッハ数と低マッハ数では異なる。高マッハ数の問題は航空機騒音等の問題としてよく研究されているが、流体音発生のメカニズムは完全には解決されていない。一方、低マッハ数の流体音では流体音源（エッジトーン、エオルス音）に依存してその特性が変わることが予想される。さらに、低マッハ数では、高マッハ数では不可能な高精度解析が可能であり、レイノルズ数が低い場合には 2 次元 DNS による厳密解析も可能である。本研究では、3 次元の管楽器モデルの LES 解析を主体に 2 次元 DNS 解析も交えて行い、管楽器の繊細な発音機構を低マッハ数特有の流体音の問題として明らかにする点に学問的な意義がある。

3 当拠点公募型研究として実施した意義

現在では比較的安価な PC でも流体力学シミュレーションが可能になってきている。しかし、膨大なステップ数を必要とする過渡現象の流体計算を 3 次元で詳細に行うには、基盤センターや「富岳」の様な大規模システムを利用せざるを得ない。その場合の計算科学側から見える問題は、総合環境としてのプレ・ポスト処理環境にある。したがって、本研究課題で扱うような大規模一次計算とポスト処理を連成・連携させる手法の研究が、まさに必要とされている。広く利用されている汎用のオープンソース系の流体計算コードを利用し大規模並列化を行った時のポスト処理までを含めた総合的な計算効率を評価することは、次世代の超並列計算機を用いた時の計算科学側が要求する実質的な計算効率を知る上でも重要である。しかし、実際に大規模な並列実行を実施し、その性能を評価するためには、大規模計算機のリソースを一定期間占有して調整し、あるいは、性能測定を実施する必要がある。その目的で一般に利用できる計算機システムはほとんどないため、当拠点公募型研究として実施する意義がある。

当拠点公募型研究として行う必要がある具体的な項目は、以下のとおりである。大規模並列計算を行うためには、その高速化が必要であり、一次計算としての流体シミュレーションの高速化と同時に、実質的なボトルネックであるポスト処理の効率化が重要である。H30-R1 年度採択課題での研究開発では、OpenFOAM の functionObject を利用する方法でポスト処理のデータマージ部分の効率化に成功している。本研究課題では、一次計算とポスト処理を連成・連携させる手法の検討・開発を引き続き行う。また、音孔の問題で扱うトポロジー変化を伴う移動境界問題は、理論的応用的な観点からも難しい問題であるが、工学的応用を見込んだ多くのシミュレーション分野において重要な技術的な問題である。本研究では、この問題を既存のアルゴリズムや手法をベースに安定かつ高精度に実用化する手法の確立を目指す。本研究では、OpenFOAM の圧縮性 LES ソルバーを用いるが、H29-R1 年度採択課題での研究で、低マッハ数領域の厳密な数値計算では精度が不十分であり幾つか不具合が見つかっている。ソ

ルバーの修正改良により、低マッハ数の圧縮流体の数値計算手法が確立されることが期待される。

4　前年度までに得られた研究成果の概要

(1) 管楽器の圧縮流体解析

小型エアリード楽器の２次元モデルを用いてエアリード楽器の発振の再現に成功し、エアリード楽器の基本特性の再現 (ジェットの流速と発振周波数の再現) に成功した。オルガンパイプ、オカリナ等の３次元モデルの解析にも成功した。さらに、２次元モデルを用いてオルガンパイプのフットの役割を明らかにし、３次元解析の準備を行なった。また、クラリネットマウスピース内の３次元流体音響解析も行った。これに関連し FreeCAD と SnappyHexMesh を組みわせることによりほぼ任意形状のメッシュを扱えるようになった。

(2) Howe のエネルギー推論

圧縮性 LES と音響ソルバー FDTD を組みわせ、Howe のエネルギー推論を用いた２次元モデルの解析を行い、音響的エネルギーが歌口のジェットの下流部分で主に発生していることを明らかにした。この結果は、先行研究の Howe のエネルギー推論の実験的評価や Howe の理論予測とも一致する。

(3) 音孔の問題

楽器の音孔の開閉の問題を扱うために、OpenFOAM の低マッハ数の圧縮性 LES ソルバーを移動境界問題が扱えるように改良し、２次元モデルを用いてトポロジー変化を伴う音孔の完全な開閉を再現することに成功した。この成果は、シングルリード楽器のリード振動や金管楽器の唇の振動の解析に応用可能である。また、木管楽器の遅延方程式モデルを用いて音孔の開閉と発振周波数の解析を行い、クラリネットのレジスターホールの機能の説明に成功した。

(4) DNS を用いた低マッハ数の圧縮流体解析

服部らが開発した圧縮性 DNS を用いてエッジトーンのモード遷移を再現することに成功した。それをもとに、エアリード楽器モデルの解析の準備を行なった。

5　今年度の研究成果の詳細

(1) LES を用いた管楽器モデルの大規模数値解析

以下の 4 項目の解析を行っている。

a) オルガンパイプのフットの解析

計算精度を上げるために、前年度作成したものよりもより細かなメッシュ数が１億６千５百万のモデルを作成した。その結果、図 1 のように、標準的なフットを持つモデルでは、フットと管体で逆同期の振動が見られた。それは、図 2(a) の圧力振動のグラフからも確認できる。さらに、フットの直方体部分を半分にした短いフットのモデルの計算も行った。図 2(b) を見ると、フットの振動が、管体の振動よりも少し遅れた状態で振動している。これまでの研究によりフットはヘルムホルツ共鳴器の機能があることがわかっている。今後、フットと管体の振動の位相差をこの観点から解析していく。

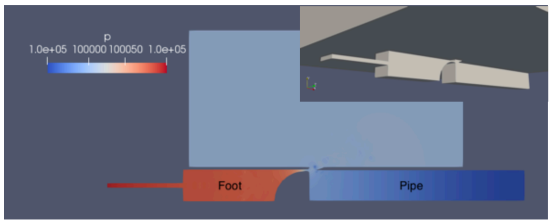
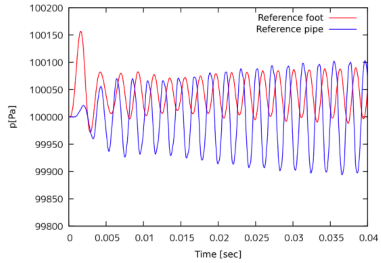


図 1　フットの付いたオルガンパイプ と圧力分布

b) 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 のエネルギー推論を用いて、エアリード楽器の音響エネルギーの発生領域の特定を行っ

(a)



(b)

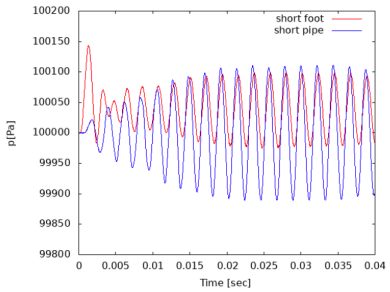


図 2　オルガンパイプのパイプとフットの圧力振動　(a) 通常のフット　(b) 短いフット

た。Howe のエネルギー推論では、以下の積分を行い音波の発生領域を特定する。

$$\Pi_g = \int_V \rho_0(\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{\omega}) \cdot \boldsymbol{u}\, dV \qquad (1)$$

ここで、$\boldsymbol{v}$ と $\boldsymbol{\omega}$ は流体の流速と渦度であるが、$\boldsymbol{u}$ は音響的粒子速度である。我々の解析では、$\boldsymbol{v}$ と $\boldsymbol{\omega}$ は圧縮性 LES を用いた解析で求め、$\boldsymbol{u}$ は音響ソルバー (FDTD) を用いて近似的に共鳴音場を求める手法を用いた。解析に用いたのは、図 3 に示す小型エアリード楽器モデルである。図 4(a) は、Q 値を用いて歌口のエッジ近傍の渦を可視化したものである。複雑ではあるが規則性のある渦構造が見られる。図 4(b) は、歌口近傍の式 (1) の積分核の分布のスナップショットである。赤の部分で音の発生が、青の部分で音の吸収が起きている。音波の発生はジェットの後流の J-4 領域で、音波の吸収はエッジ上方の A-2 領域で起きている。現在、この成果をまとめた原著論文を投稿中である。

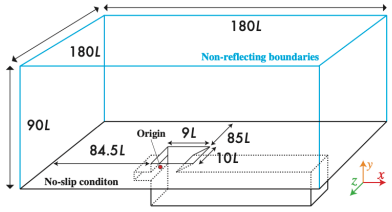


図 3　小型エアリード楽器モデル

c) 本管楽器の音孔の開閉を再現

2 つ音孔を取り付けた管楽器の 2 次元簡易モデル (Keefe の音孔実験器) の解析を行い、音孔の開閉に伴うピッチの変化の解析に成功した。さらに、より現実的なエアリード楽器に 2 つの音孔を取り付けた 2 次元モデル (図 5) を作成した。今後、このモデルの解析を行う。

d) 金管楽器のマウスピース内の流体音響解析

前年度は円筒と円錐を組み合わせた簡易モデルの解析を行ったが、本年度は現実の形状に近い 3 次元モデルのメッシュの作成を行った (図 6)。金管楽器のマウスピースは、ヘルムホルツ共鳴器として機能する。そこで、唇を模した狭いスリットから一定流速を加え、その時の減衰振動から共鳴周波数を特定した。図 7(a),(b) は、その時の圧力分布と流速分布である。

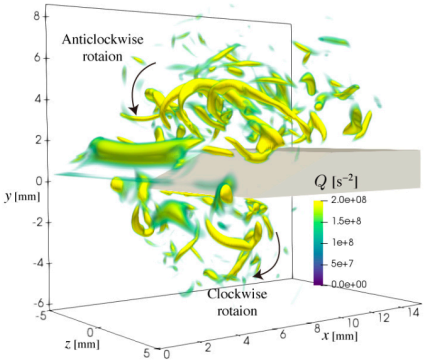
(2) DNS を用いた 2 次元管楽器モデルの厳密数値解析

前年度までのエッジトーンの成果を原著論文にまとめ発表した [1]。本年度の具体的な研究課題の成果は以下のとおりである。

a) 小型エアリード楽器の解析 [2]

HEC の解析で用いた小型エアリード楽器の 2 次元モデルの解析を行った。図 8 (a), (b) は、10m/s のジェット速度を与えて定常的な発振状態を再現したときの圧力分布および歌口近傍

(a)



(b)

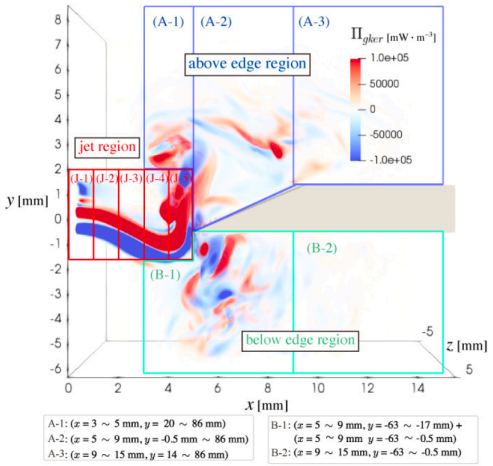


図 4　小型エアリード楽器の解析 (a) エッジ近傍の渦管　(b) 歌口近傍の HEC 積分核 (式 (1)) の分布

の流速分布である。圧力分布を見ると、管体内に強い共鳴状態が再現されていることが確認できる。また、流速分布をみるとジェットが振動している様子が見られる。図 9 は、歌口近傍の Lighthill の音源の第一項を再現したものである。ジェットの上端と下端で正負の領域が交互に入れ替わっている様子がみられる。ジェットが正の傾きのとき、上端で負、下端で正となり、負の傾きの時はその逆になる。また、渦の

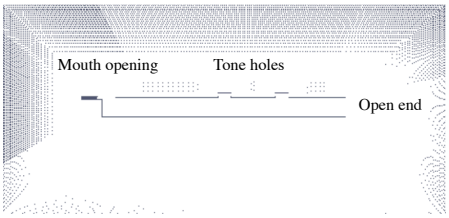


図 5　2 つの音孔を持つエアリード楽器のメッシュ

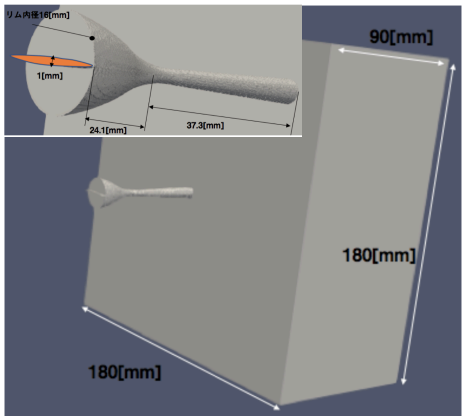


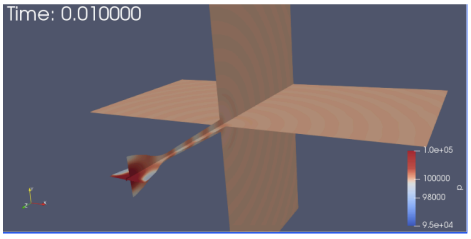
図 6　ホルンのマウスピースの 3D モデル

中心では負となりその周りでは正となる。このように Lighthill の音源は流れの形状によって変化する。Lighthill の音源の揺らぎの標準偏差を調べるとエッジの近くで大きくなることがわかった。これは、エッジ近くで流体音 (空力音) が発生していることを意味する。この結果は、LES の解析で行った Howe のエネルギー推論 (HEC) の結果と定性的に一致する。

b) ホルンのマウスピースの解析 [3)]

ホルンのマウスピースの 2 D モデルを制作し (図 10(a))、DNS による数値解析を行った。ホルンのマウスピースは、単体ではヘルムホルツ共鳴器となることが知られている。唇を模した細いスリットから一定流速のジェットを流入させ、その減衰振動を調べることで、共鳴周波数を推定した。図 10(b) はそのときのマウスピース内の圧力変動である。次に、唇を振動させる

(a)



(b)

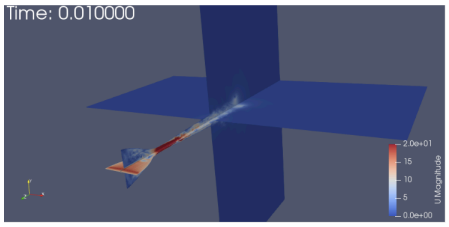


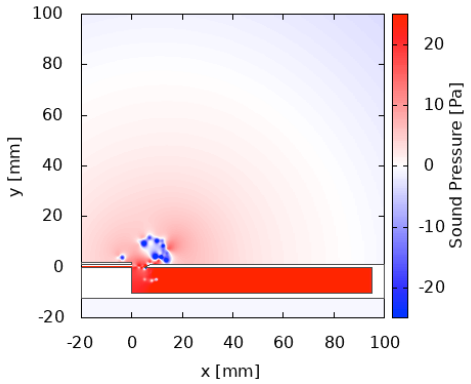
図 7　ホルンのマウスピースに一定流速を与えた解析　(a) 圧力分布　(b) 流速分布

代わりに、求まった共鳴周波数で変動する流速を与え共鳴状態を再現した。図 11 (a),(b) は、そのときの流速分布と圧力分布である。共鳴状態が再現され、開口部から球面波が放出されている様子が再現されている。

(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

遅延方程式モデルに組み込まれた音源となる写像系を変化させた時の発振機構の解析を行った。遅延方程式モデルでは、開口端、音孔、管の段差は、正または負の遅延で表現される (図 12)。簡単のために、正負の 2 つの遅延 (開口端と段差) があるモデルに対し、楽器モデルに最適な写像や分岐理論で用いられるロジスティック写像等を組み込んで発振構造を調べた [4]。その結果、ロジスティック写像では、パラメーターのある領域で系が不安定になり解が発散することが明らかになった。現在、その成果を原著論文にまとめている。

(a)



(b)

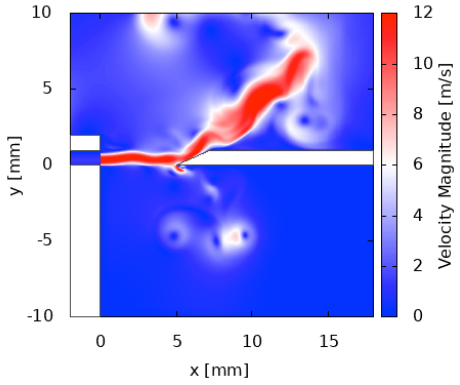


図 8　2 次元小型エアリード楽器の解析　(a) 圧力分布　(b) 流速分布

6　今年度の進捗状況と今後の展望

全体としての進捗状況は、90% 程度と判断される。各項目における進捗状況と今後の展望は以下のとおりである。

(1)LES を用いた管楽器モデルの大規模数値解析

この項目の進捗状況はは 90% と考えられる。各小項目の進捗状況は以下の通りである。a) オルガンパイプのフットの解析: 前年度よりも細かなメッシュの 3 次元モデルの解析に成功し、フットの形状を変えたモデルの解析に成功

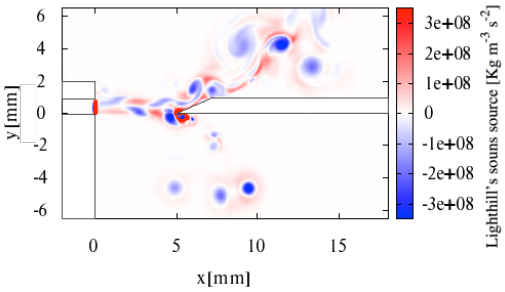
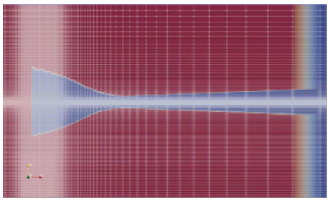


図 9　2 次元小型エアリード楽器の Lighthill の音源

(a)



(b)

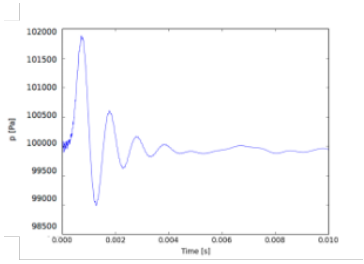
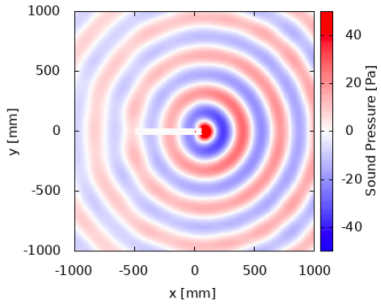


図 10　ホルンのマウスピースの 2 次元モデルの解析　(a) モデルのメッシュ　(b) 一様流を加えたときの圧力の減衰振動

した。達成度は 95% と考えられる。b) 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: 当初の目的である Howe のエネルギー推論を用いて音響エネルギーの発生領域の特定を行った。また、この解析に必要な、音響ソルバーの効率化を行った。Q 値を用いた渦管の可視化を行った。成果をまとめた原著論文を投稿中である。達成度はほぼ 100% である。c) 木

(a)



(b)

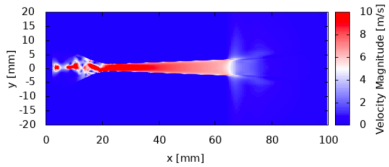
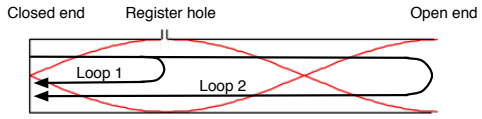


図 11　2 次元小型エアリード楽器の解析
(a) 圧力分布　(b) 流速分布

管楽器の音孔の開閉を再現: 2 次元簡易モデル (Keefe の音孔実験器) を用いて、2 つの音孔の開閉に伴うピッチの変化の解析に成功した。さらに、現実的なエアリード楽器に 2 つの音孔を取り付けた 2 次元モデルの解析に着手した。達成度は 90% である。d) 金管楽器のマウスピース内の流体音響解析: より現実に近い 3 次元モデル形状に合わせたメッシュの作成を行い、予備的な計算を行った。達成度は 80% である。ポスト処理連携は、3 次元での一次計算とポスト処理の関係の整理を進めた。達成度は 70% である。

この項目の今後の展望は、以下のとおりである。a) の課題については、3 次元モデルの計算で得られた現象を物理学的な視点から解析し、フットの役割を明確にするのが今後の課題である。b) の課題はほぼ終了した。この研究で

(a)



(b)

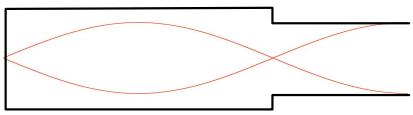


図 12　管楽器の 2 重遅延モデル　(a) 音孔がある場合　(b) 段差がある場合 (正負の遅延)

行った可視化の手法を発展させ、他の課題にも適用していく。また、この研究で用いた HEC の手法をバスレフスピーカーの解析等に応用していく。c) の課題では、現実的なエアリード楽器の解析を進め、音孔の開閉に伴うピッチの変化を再現するのが今後の課題である。さらに、(3) の課題である遅延方程式モデルの解析から得られた知見を元に発振条件とその安定性の検討を行う。d) の課題では、3 次元モデルの解析を進めホルンのマウスピースの機能を明らかにするのが今後の課題である。また、DNS の 2 次元の結果との比較検討を行い LES の精度検証を行う。

(2)DNS を用いた 2 次元管楽器モデルの厳密数値解析

この項目の進捗状況はほぼ 95% である。エッジトーンの解析が終わり、原著を発表した [1](100%)。2 次元エアリード楽器モデルの解析を行いその成果を国際会議で発表した [2](90%) さらに、当初の計画にないホルンのマウスピースの解析に着手し、その途中成果を国際会議で発表した [3](100%)。

今後の展望は、小型エアリード楽器及びホルンのマウスピースの解析を進め、その結果を用いて Lighthill の音源の厳密な解析を行い、流体音の発生過程の解析を進めることである。さらに、DNS の計算の効率化について検討する。

(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

現実の管体を考慮した正負の遅延の入ったモデルの解析を行い、その成果を口頭発表した [4]。さらに、音源となる遅延方程式モデルに組み込まれた写像系を変化させた時の発振機構の解析を行った。その成果を原著論文にまとめている段階にある。達成度はほぼ 80% である。

今後の展望は、非線形写像 (音源) と発振モード (音の高さと音色) の関係の詳細を明らかにするための基礎解析を進めることである。

7　研究業績一覧（発表予定も含む）

学術論文 （査読あり）

1) S. Iwagami, R. Tabata, T. Kobayashi, Y. Hattori, K. Takahashi, “Numerical Study on Edge Tone with Compressible Direct Numerical Simulation: Sound Intensity and Jet Motion”, International Journal of Aeroacoustics, First published 24 Mar 2021 (34 pages).

国際会議プロシーディングス　（査読あり）

2) R. Tabata, S. Iwagami, T. Kobayashi, K. Takahashi, Y. Hattori, “Numerical Analysis of Air-jet Instrument’s Sound Sources by Compressible Direct Numerical Simulation”, Proceedings of 17th International Conference on Flow Dynamics, Oct. 2020, pp.472-473.

3) R. Sumita, R. Tabata, T. Kobayashi, K. Takahashi, Y. Hattori, “Numerical study of a French Horn Mouthpiece with Compressible Direct Numerical Simulation ”,Proceedings of 20th International Symposium on Advanced Fluid Information, Oct. 2020,

pp.169-170.

国際会議発表　（査読なし）

国内会議発表　（査読なし）

4) 高橋公也, “正負の遅延を持つ２重遅延系のモード選択則”, シンポジウム「複雑系数理: 物理・化学・生物・情報 と カオス」2021 年 3 月 27-28 日奈良女子大学主催　(招待公演).

公開したライブラリ等

その他（特許，プレス発表，著書等）