

管楽器および音響機器の大規模流体音響解析

高橋 公也 (九州工業大学)

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性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。本年度は、(1) LES を用いた管楽器および音響機器の大規模数値解析では、オルガンパイプのフットの解析、Howe のエネルギー推論を用いた小型エアリード楽器の音響エネルギー発生領域の解析、エッジトーンの 3 次元解析、木管楽器の音孔の開閉の再現、バスレフ型スピーカーのポートノイズの解析を行った。(2) DNS を用いた 2 次元管楽器モデルの厳密数値解析では、エアリード楽器、ホルンのマウスピース、ダブルリードの解析を行った。(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で、正負の遅延が入った 2 重遅延モデルの解析を行った。

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
南里豪志 (九州大学): 副代表、並列計算の効率化
服部裕司 (東北大学): DNS を用いた圧縮性流体解析
高見利也 (大分大学): 大規模計算
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
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
瓜生 海聖 (九州工業大学): バスレフポートの解析
小野又樹 (九州工業大学): エッジトーンの解析

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性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性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。

本研究では、3 次元モデルの LES 解析を主

体に2次元DNS解析も交えて行い、管楽器および音響機器の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

現在では安価なPCでも流体力学シミュレーションが実行されている。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の問題は、研究で大切な試行錯誤に直結するプレポスト処理環境が未整備なことである。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。汎用の流体計算コードとしてオープンソース系のコードが広く利用されるようになって来た。その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、本研究課題の提案に至った。

流体音の発生機構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、低レイノルズ数領域では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、管楽器および音響機器の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。

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、ポスト処理の効率化が重要である。特に3次元で顕著になるために、本研究課題では一次計算とポスト処理を連成・連携させる手法の開発を引き続き行う。H30-R2年度採択課題では、OpenFOAMのfunctionObjectを利用する方法をさらに改善して可視化の効率化にも成果が出ている。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・応用の両面で難題であるが、工学的応用分野において重要な技術的な問題である。H30-R2年度採択課題で基本的な計算法を確立できたが、本研究では、より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-R2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た。ソルバーの修正改良により、低マッハ数の圧縮性流体の厳密数値計算の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) 管楽器の圧縮性流体解析

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ている。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た。また、クラリネットとホルンのマウ

スペース内の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3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。原著論文を執筆し、R3年5月に出版された [1]。

(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性流体の解析

服部らが開発した圧縮性流体用の DNS を用いてエッジトーン、エアリード楽器、ホルンのマウスピースの解析を行い、エッジトーンの原著論文を執筆し、R3年4月に出版された [2]。

5 今年度の研究成果の詳細

(1) LES を用いた管楽器および音響機器の大規模数値解析

a) オルガンパイプのフットの解析：フットの形状を変えた数種類の3次元モデルの解析を行い、形状により発振特性が変わることを確認した [4]。フットは、ヘルムホルツ共鳴器とした機能し、ヘルムホルツ共鳴周波数 f_H と楽器

の発振周波数 f_a との関係により、安定性や位相関係が変化する。図 1(a) に、標準モデルの形状と発振状態の圧力分布を示す。図 1(b) に、管体とフットの圧力振動を示す。標準モデルでは、 $f_H \ll f_a$ で、フットと管体の振動はほぼ逆同期で振動は安定している。図 1(c) に、短いフットの結果を示す。この場合は、 $f_H \sim f_a$ であり、フットの振動は管体の振動からほぼ 90 度遅れ、振幅は標準モデルに比べ小さく少し不安定である。図には示さないが、 $f_H \gg f_a$ では、管体とフットの振動はほぼ同期し、振幅も標準モデルとほぼ同じになる。この位相関係は、強制振動理論で説明できることを示した。

b) Howe のエネルギー推論 (HEC) 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：前年度から進めてきた解析を完成させ、原著論文等で公表した [1,3,7]。図 2 にその結果を示す。図 2(a) には、歌口近傍の HEC の積分核 Π_{gker} のある時刻の分布を示す。赤で示す $\Pi_{gker} > 0$ の領域で音響エネルギーが発生し、青で示す $\Pi_{gker} < 0$ の領域で音響エネルギーの吸収が起きる。エッジに近いジェットの後流で、強い音響エネルギーの発生が起きる。図 2(b) は、音響エネルギーの発生 (吸収) の時間変化をジェットの変位 ξ_j と比較したものである。赤の点線で示すジェット領域からの発生と黒の実線で示すエッジの上下も含めた全領域の結果を比較すると、伴に、ジェットの打ち上げ時と打ち下げ時にピークをもつが、ジェットのみの場合は打ち上げ時に、全領域では打ち下げ時にピークを持つ。これは、エッジの上下の渦からの寄与が無視できないことを意味し、本研究で明らかになった重要な点である。さらに、この課題では、Q 値を用いた可視化の技法の開発、音響ソルバーの効率化を行った。この手法は、課題 a),c),e) にも使われている。

c) エッジトーンの3次元解析：3次元モデルを

作成し解析を行った。図 3(a) に、その時のエッジ近傍の流速分布を示す。発振周波数はジェット流速に比例し、Brown の式に従うことが確認された。また、図 3(b) に示すように音波強度 (圧力振幅の 2 乗) が流速のほぼ 6 乗で増加すること (6 乗則) が確かめられた。これまで、数値計算で 6 乗則が再現されたのは数例であり、我々が行ったようなレイノルズ数が 1000 に近い領域での再現は極めて少ない。さらに、エンジトーンのフィードバック機構の解析のために、音響ソルバー FDTD を用いた解析を進めている。この解析では、エッジ付近に仮想的な双極子音源を設定し、ノズル近傍へのフィードバックを定量的に解析する予定である。

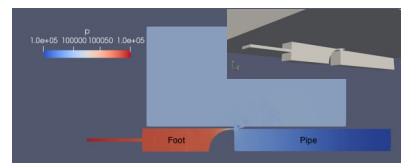
d) 木管楽器の音孔の開閉の再現: 2 の音孔を持つエアリード楽器のモデルの解析を行い、音孔を閉じる時の周波数変化を再現した [5]。図 4 (a) には、発振している状態の流速分布を示す。図 4 (b) には、2 つの音孔を同時に閉じて行く時の管内の圧力分布の変化とその時間領域ごとの周波数変化を示す。音孔を閉じるに従い、周波数が約 1500Hz から約 1100Hz に変化する様子が再現されている。

e) スピーカーのバスレフポートの 3 次元解析: 図 5(a) に示すようなバスレフ型スピーカーのモデルを作成し、LES による流体音響解析を行い、ポートノイズを再現することに成功した。詳しい機構を説明する余裕はないが、図 5(b) に示すように、ポートノイズは、低音のスピーカー駆動周波数ではなく、バスレフポートやエンクロージャーの共鳴周波数に対応する中音域で顕著になる。我々は、ポートノイズの発生機構の解明のために、Howe のエネルギー推論を用いてポート近傍の渦からの音響エネルギーの発生を定量的に評価することを目指している。そのためには、音響ソルバー (FDTD) を用いて共鳴音場を再現することが必要になる。現在、

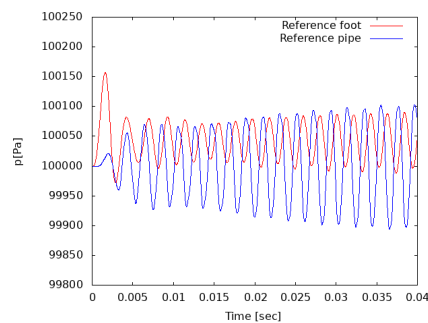
その計算を進めている。

これらの課題の解析では、遠方場のメッシュ数をどのように減らすかが重要である。我々は、これまで蜘蛛の巣メッシュ法を開発してきた。現在、この手法のさらなる改善に取り組んでいる。また、これらの課題に関連する基礎的な問題として、高速噴流から発生する流体音の解析も行った。

(a)



(b)



(c)

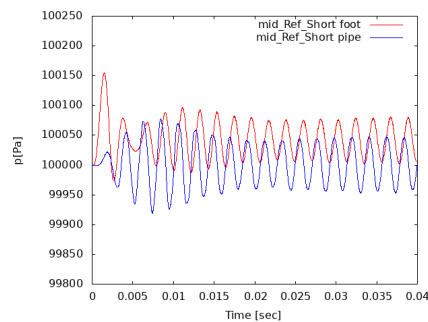


図 1 オルガンパイプの解析 [4]:(a) 標準モデルと圧力分布 (b) 管体とフットの圧力振動 (標準モデル) (c) 管体とフットの圧力振動 (短いフットモデル)

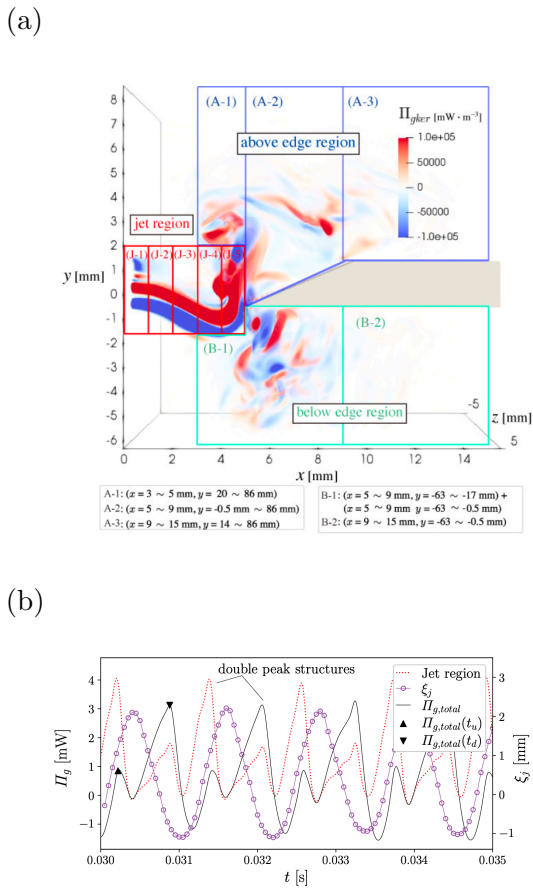


図2 HECの解析結果[1]:(a) 歌口近傍で得られたHECの積分核 Π_{gker} の分布 (b) ジェット領域と全体領域における音響エネルギー発生(吸収)の時間変化とジェットの変位 ξ_j の比較

(2) DNSを用いた2次元管楽器モデルの厳密数値解析
 小型エアリード楽器およびホルンのマウスピースの解析に加え、オーボエのダブルリードの解析を行っている。ホルンのマウスピースの解析では唇振動を模擬したモデルの解析を行っている[6]。唇を振動させその隙間を周期的に閉じるモデルの解析を行った。また、口腔の効果を考察するために、マウスピース後方に口腔を取り付けたモデルの解析も行った。具体的にを行った解析は、a)唇を固定し一定流速を与えたも

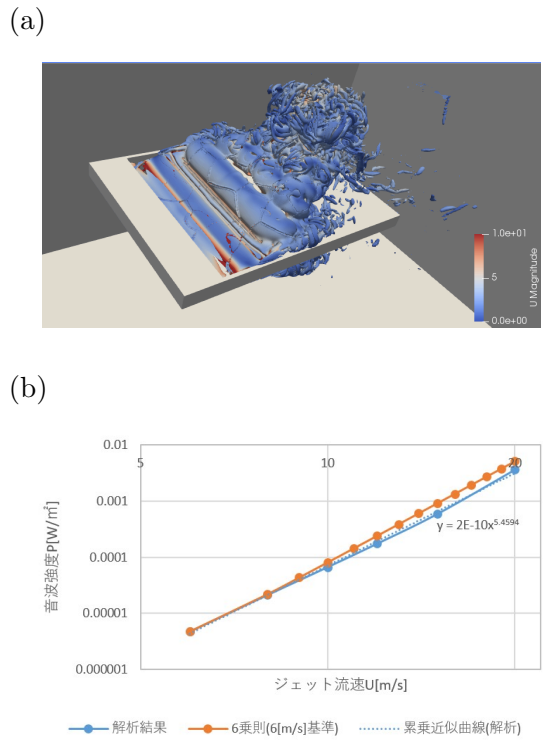
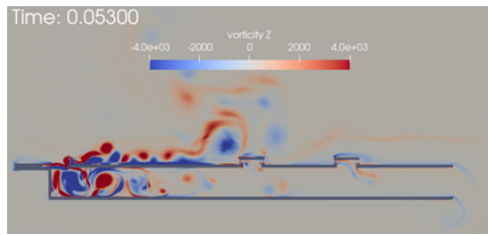


図3 エッジトーンの解析結果:(a) エッジ近傍の流速分布 (b) ジェットの流速と音波強度の関係

の、b) それに周期的な流速を与えたもの、c) 唇を振動させ一定流速を与えたもの、d) それに口腔を取り付けたモデルで行ったもの、計4種類である。振動の周期はマウスピースのヘルムホルツ共鳴周波数としている。モデル a) では、減衰振動が見られたが、モデル b)-d) では周期的な音波の放射が見られた。図6(a)に、唇の後方に口腔を配置したモデルのマウスピース近傍の流速分布を示す。流速分布を見るとマウスピースのカップ内と口腔内に渦が発生している。図6(b)にカップ内の圧力振動の結果を示す。唇を固定し周期的な流速を加えたモデルでは、振幅は大きいほぼ正弦波である。唇を振動させるモデルでは、振幅は小さくなり若干ではあるが正弦波的でなくなる。口腔を取り付けたモデルでは、振幅は小さくなるが、その

(a)



(b)

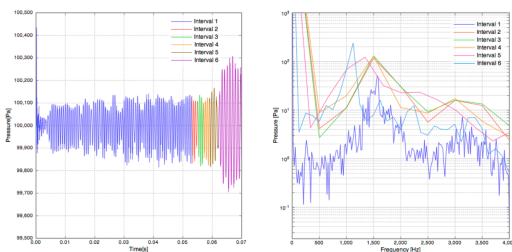


図4 音孔の解析結果 [5]:(a)2つの音孔を持つエアリード楽器と流速分布 (b) 音孔を閉じて行く時の振動の変化 (左: 圧力波形、右: 周波数変化)

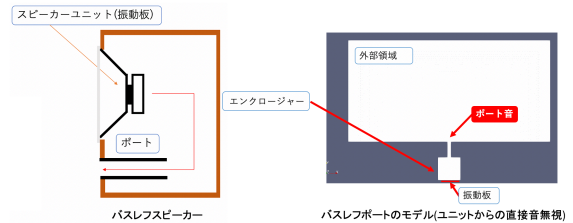
波形は正弦波とは異なり、現実のマウスピースのバジングと呼ばれる演奏音に近いものが得られる。

図には示さないが、ダブルリードの解析では、リードの振動を模擬したモデルの解析を行った。また、小型エアリード楽器の解析では、Lighthillの音源の解析を行った。

(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

管楽器の内部の凹凸を模擬した、正負の遅延を持つ2重遅延系の解析を行っている。本年度は、非線形写像をロジスティック写像にしたときの解析を行った。吹鳴圧に相当する分岐パラメーター μ の小さい領域で、2つの不動点の交代分岐と我々が発見した”Anomalous bifurcation process”の協同的現象により、2

(a)



(b)

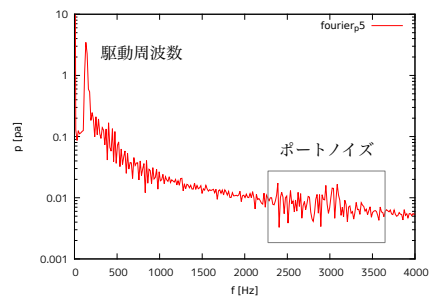
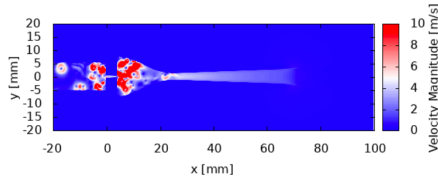


図5 ポートノイズの解析結果:(a) バスレフ型スピーカーモデルの概念図 (b) 周波数スペクトル

つの不動点が不安定化し解が発散することで、アトラクターが消失する現象を発見した。さらに、その原理を明らかにした。この成果をまとめた原著論文を投稿した。図7は、数値計算によって得られた分岐図である。2つの遅延時間の比 t_1/t_2 を、 $t_1/t_2 \sim 1/3, 1/2, 2/3$ とした3つの分岐図を重ね書きしている。記号“◆”は、交代分岐点で、その近傍でアトラクターが消失している。アトラクター消失領域の両端の縦の線は、解の発散をあらわす。挿入した図は、 μ が矢印の値を取る時の振動解を表す。この解析の他に、正負の遅延を持つ3重遅延系の予備的な解析を行った。

(a)



(b)

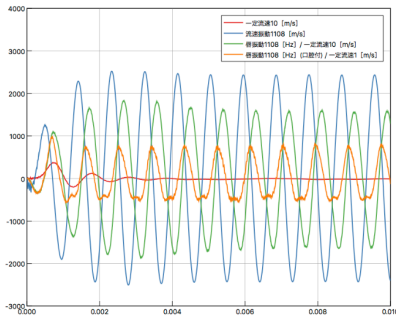


図 6 ホルンの解析結果 [6]:(a) マウスピース + 口腔モデルの流速分布 (b) マウスピースカップ内の圧力振動

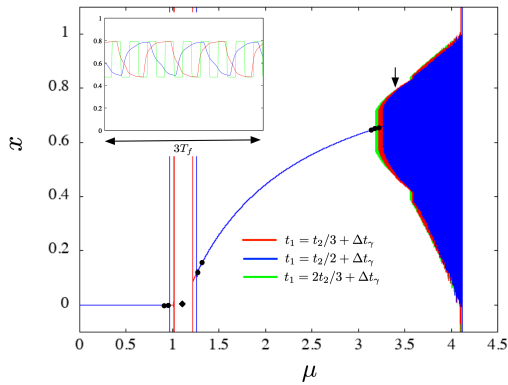


図 7 遅延方程式の分岐図

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 を用いた管楽器および音響機器の大規模数値解析

この項目の進捗状況は 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。

課題 a) では、3次元オルガンパイプモデルの解析を行い、フットの役割が明らかになった。現在原著論文執筆のために必要な追加計算を行っている段階である。したがって、ほぼ予定通り解析が進んでいるので、達成度は 95% である。今後の課題は、原著論文を完成させること、フットが音響エネルギーの生成の安定化にどのような役割を果たしているかを明らかにすることである。

課題 b) では、研究成果を原著論文として音響系のトップジャーナル J.Acoust.Soc.Am. に発表した [1]。また、2件の国際会議での発表は invited paper であった。よって、達成度は 100% である。この後の課題は、この課題で確立した Howe のエネルギー推論の方法を、課題 e) の解析に提要すること、この課題で開発した Q 値を用いた可視化の技法を他の課題に応用することである。

課題 c) では、3次元エッジトーンモデルの解析に成功し、音響強度が 6 乗則に従うことを確認した。したがって、エッジトーンのフィードバック機構の解析の準備ができたと言え、達成率は、85% である。今後の課題は、エッジトーンのフィードバック機構の解析のために、音響ソルバー FDTD を用いた解析を進めることである。また、比較のためにジェット振動は再現されるが音波の発生しない、非圧縮性流体の解析を進めることである。

課題 d) では、2 の音孔を持つエアリード楽器のモデルの解析を行い、音孔を閉じる時の周波数変化を再現した。ただし、音孔を開く時の解析は行っていない。したがって、達成率は、90% である。今後の課題は、音孔を開く時の解

析を行うことである。

課題 e) では、バスレフ型スピーカーのモデルを作成し、ポートノイズの再現に成功した。現在、Howe のエネルギー推論の解析に必要な、音響ソルバー FDTD による共鳴音場の再現の解析を進めている。FDTD 解析の準備状況を考慮すると達成率は、80% である。今後の課題は、Howe のエネルギー推論を用いてポートノイズ発生機構の詳細を明らかにすることである。

(2) DNS を用いた 2 次元管楽器モデルの厳密数値解析

エアリード楽器の解析、唇振動を取り入れたホルンのマウスピース解析は、予定通り進んでいる。さらに、当初の予定になかった、オーボエのリードの解析が行えた。一方で、DNS の並列計算の効率化については、検討の結果、現状の計算規模ではメモリー共有の 1 ノード計算で十分であるとの結論に至った。ただし、計算規模が大きくなったときは検討が必要である。これらを考慮し、達成度は、95% である。

今後の課題は、オーボエリードの解析で、リード振動をより正確に模擬できる解析をおこなうこと、マウスピースの解析では擬似 3 次元モデル (軸対称モデル) の可能性について検討することである。

(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

正負の遅延を持つ 2 重遅延系の非線形写像をロジスティック写像にしたときの解析を行い原著論文を投稿した。さらに、正負の遅延を持つ 3 重遅延系の予備的な解析が終わった段階にある。3 重遅延系の解析の進み具合を考慮すると、達成度は 90% である。

今後の課題は、3 重遅延系の解析を進め、多数の音孔を持つ管楽器のモード選択則を解明することである。

7 研究業績一覧 (発表予定も含む)

学術論文 (査読あり)

- [1] R. Tabata, R. Matsuda, T. Koiwaya, S. Iwagami, H. Midorikawa, T. Kobayashi, K. Takahashi, “Three-dimensional numerical analysis of acoustic energy absorption and generation in an air-jet instrument based on Howe’s energy corollary”, *Journal of the Acoustical Society of America* **149** (2021) 4000-4012.
- [2] 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*. **20**(2021) 283-316.

国際会議プロシーディングス (査読あり)

- [3] K. Takahashi, R. Tabata¹, S. Iwagami¹, S. Ikoga, R. Sumita, S. Takanami, T. Kobayashi, Y. Hattori, “Numerical study on sounding mechanism of air-jet instruments with compressible fluid simulation”, *Proceedings of the Eighteenth International Conference of Flow Dynamics, Sendai*, (2021) pp.637-639, invited paper.
- [4] S. Ikoga, R. Tabata, S. Iwagami, T. Kobayashi and K. Takahashi, “Numerical analysis of three-dimensional model of flue organ pipe”, *Proceedings of the Eighteenth International Conference of Flow Dynamics, Sendai*, (2021) pp.642-643.
- [5] S. Takanami, T. Kobayashi and K. Taka-

hashi, “Numerical study of note transition with fingering on a woodwind instrument”, Proceedings of the Eighteenth International Conference of Flow Dynamics, Sendai, (2021) pp.640-641.

- [6] R. Sumita, R. Tabata, T. Kobayashi, K. Takahashi, Y. Hattori, “Numerical Study of a French Horn Mouthpiece with Compressible Direct Numerical Simulation”, Proceedings of the thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2021) pp.175-177.

国際会議発表（査読なし）

- [7] R. Tabata, H. Midorikawa, T. Kobayashi, K. Takahashi, “Three-dimensional numerical analysis of acoustic energy transfer in air-jet instrument”, The 180th Meeting of the Acoustical Society of America, invited paper.

国内会議発表（査読なし）

公開したライブラリ等

その他（特許，プレス発表，著書等）