

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、音孔のついたオカリナの解析、エッジトーンの3次元解析、バスレフ型スピーカーのポートノイズの3次元解析、熱音響機関の解析を行った。(2) DNS を用いた2次元管楽器モデルの厳密数値解析では、ホルンのマウスピースと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、多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 情報基盤センター
- 九州大学 情報基盤研究開発センター

1.2 課題分野

- 大規模計算科学課題分野

1.3 共同研究分野 (HPCI 資源利用課題のみ)

- 超大規模数値計算系応用分野

1.4 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
内田 勝也 (ヤマハ株式会社): バスレフポートの解析
田畑 諒也 (ヤマハ株式会社): バスレフポートの解析
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
中原 雄樹 (九州工業大学): DNS を用いた管楽器の解析
田島 陽 (九州工業大学): 熱音響機関の解析
今古賀 藍華 (九州工業大学): オカリナの解析

2 研究の目的と意義

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ことを目的とする。このように、学際的な研究を行う点に本研究の意義がある。さらに、これまでの成果を元に、ヤマハ株式会社の技術者と協力し、バスレフ型スピーカーの異音の解析を行う。また、新たな課題と

して熱音響機器の基礎解析に着手する。このように、産業界への応用を目指す点にも本研究の意義がある。

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、流体と音を同時に扱うには CFL 条件から膨大なメッシュ数（数億）とステップ数（約 10^7 ）が必要になる。この流体計算を 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、依然として研究で大切な試行錯誤に直結する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。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。さらに、これまでの成果を元に、ヤマハ株式会社の技術者と協力し、バスレフ型スピーカーの異音の解析を行う。また、新たな課題として熱音響機器の基礎解析に着手する。このように、産業界への応用を目指す点にも本研究の意義がある。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。本研究課題では一次計算とポスト処理を連成・連携させる手法の発展開発を引き続き行う。H30-R3 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、本研究では、OpenFOAM の圧縮性 LES ソルバーを用いるが、H29-R3 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

研究課題に関連する過去の成果は、以下の通りである。

(1) 管楽器および音響機器の圧縮性流体解析 [12]
オルガンパイプ、オカリナ等および音源となるエッジトーンの 3次元モデルの解析に成功している。さらに、2次元モデルおよび 3次

元モデル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ピース内の3次元流体音響解析も行った。これに加え、バスレフ型スピーカーのポートノイズの解析を行い、ポートノイズの再現に成功した。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 [12]

圧縮性LESと音響ソルバーFDTDを組み合わせ、Howeのエネルギー推論を用いたオルガンパイプの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、原著論文でその成果を発表した。この手法は、バスレフポートの解析に応用可能である。

(3) 音孔の問題 [7]

これまで、OpenFOAMを改良し、2次元モデルを用いてトポロジー変化を伴う音孔の開閉動作を再現することに成功した。また、木管楽器の遅延方程式モデルを用いて音孔の開閉パターンと発振周波数の関係の解析を行い、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 [12]

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ってきた。エッジトーンの成果を原著論文で発表した。

5 今年度の研究成果の詳細

これまでの研究で培ってきた、FreeCADとSnappyHexMeshを組み合わせたメッシュの作成手法、 q 値を用いた渦の可視化手法等のポスト処理の手法を用いて以下の課題研究を行った。また、プレポスト処理のデータハンドリングを

効率化した。具体的には、メッシュを領域分割したまま各設定条件を変更できるようにして、メッシュのデコンポーズ回数を削減した。

(1) LESを用いた管楽器および音響機器の大規模計算解析

a) オルガンパイプのフットの解析: 前年度に引き続き3次元モデルを用い、成果公表に必要な解析データの計算を行った。これにより、フットの形状を変えた数種類のモデルの計算が終わった。フットは、ヘルムホルツ共鳴器であり、その形状を変えるとその共鳴周波数が変化する。我々は、共鳴管の音圧変動がフットを駆動していると言う仮定の元に強制振動理論を用いると、フットの形状変化に伴う管体とフットの圧力振動の位相差の変化が説明可能であるとの主張をしている。今回の計算により、この主張を立証するデータが得られた。

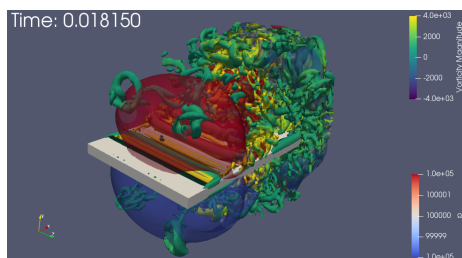
b) 音孔のついたオカリナ: オカリナは、ヘルムホルツ共鳴を利用した、エアジェット管楽器である。音孔のある3次元モデルの解析を行い、音孔を開くとヘルムホルツ共鳴周波数が変化し、それに伴い演奏音の周波数が変化することを確認した。

c) エッジトーンの3次元解析[4,9,10]: 前年度に引き続き、エアジェット楽器の音源となるエッジトーンの3次元モデルの解析を行い、エッジトーンの基本特性の再現に成功した。図1(a)では、音源となる渦と音圧の関係を見るために、渦の分布を可視化する q 値と圧力分布 p を重ね書きしている。さらに、エッジトーンの振動を維持するために必要なフィードバック機構の解析のために、圧縮性流体と非圧縮性流体の計算結果を比較した。図1(b)に示すように、ノズル出口の上下に観測点を設定し、音圧差を測ることで、フィードバック強度を推定した。図1(c)に示すように、フィードバックの主要な部分は流体的なものであるが、音響的

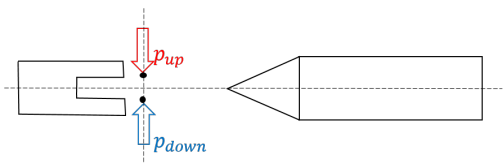
フィードバックの寄与も無視できない。特に、音響的なフィードバックは流速の上昇と共に重要になっていく。

d) スピーカーのバスレフポートの3次元解析[6]:

(a)



(b)



(c)

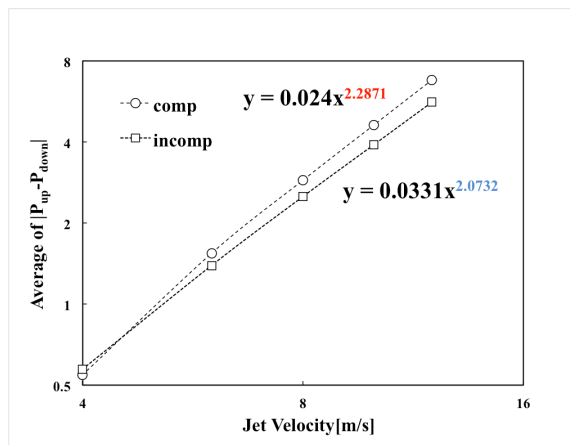


図1 エッジトーンの解析:(a) 圧縮性 LES で再現された q 値と音圧分布 (b) ノズル出口近傍の観測点 p_{up} と p_{down} (c) p_{up} と p_{down} における圧力差の流速変化

前年度に引き続き、ポートノイズの解析を行った。今年度は、圧縮性 LES による流体音

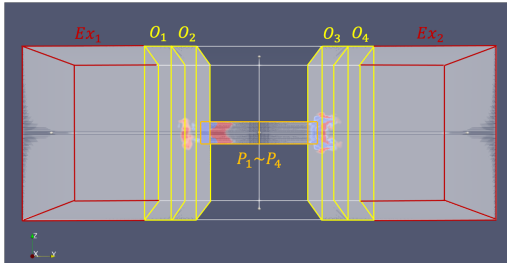
響解析と FDTD による音響解析を組み合わせ、Howe のエネルギー推論 (HEC) を用いて、ポート近傍で音響エネルギーが流体エネルギーに変化する様子を調べた。図 2(a) に、ポート近傍における Howe の積分核 Π_{gker} のある瞬間の分布を示す。 Π_{gker} の正值 (赤) の部分で音が発生し、負値 (青) の部分で音が吸収され流体的なエネルギーに変化している。図 2(b) は、(a) に示す領域ごとの Π_{gker} の積分値 Π_g の時間変化を示している。各領域での音響エネルギーの発生と吸収は極めて複雑であるが、ポート近傍全体としては負値をとるので、音響エネルギーがノイズの発生源となる流体渦に変化していると考えられる。HEC を実行するには、流体データと音響データ間の整合性を得るために、位相合わせ等を行う必要があるが、オルガンパイプの HEC の解析で行ってきた手法を改良発展させて実行した。また、ヤマハ (株) のメンバーによって、より製品を意識した形状や寸法での実験・数値計算が実施されている。3D フルモデルだけではなく 1/4 カットモデルや 2D 軸対称モデルの数値計算を構築できた他、ポートからの放射音のみを観察することが可能な実験環境も整い (図 3)、ノイズや高調波歪の詳細な分析が可能となった。

e) 熱音響機関の解析[5]: 試験管型熱音響エンジンの 2 次元および 3 次元モデルの解析を行い、過渡状態における熱流体音の発生を再現するのに成功した。ただし、定常発振状態の再現には至っていない。熱音響機器の解析では、両端に温度差のある細管の解析が必要であるが、安定な発振状態を作り出す条件等を吟味し、解析にどのようにして組み込むか等の試行錯誤を重ねている。

(2) DNS を用いた 2 次元管楽器モデルの厳密解析 [2,3,8]

ホルンのマウスピースおよびオーボエのリー

(a)



(b)

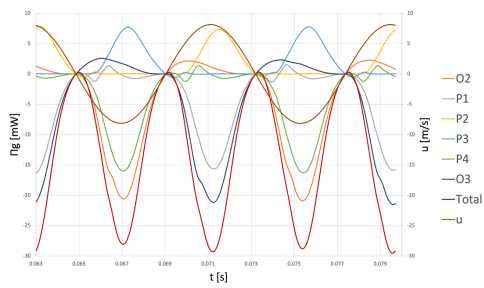


図2 バスレフポートの HEC による解析 (a) Π_{gker} の分布と積分領域 (b) 各積分領域における Π_g の変化

ドを単体で吹鳴したときの発振状態の解析を行い、豊かな倍音を作り出すには、口腔の存在が重要であるとの結論を得た。例として、オーボエリードの解析結果を示す。図4は、オーボエリードに口腔を取り付けたモデルである。リードの開閉を簡易的に再現するために、リードの先端1 mmの部分周期的に開閉し、一様流を口腔左端から加えた。図5に解析結果を示す。リードの円錐管の共鳴周波数である2514Hzと演奏音に近い880Hzで駆動した結果を示している。ただし、(a)の圧力分布は、2514Hzのものである。圧力分布を見ると、ほぼ球面波が放出されている。しかし、(b)の放射音の圧力振動を見ると、正弦波動的な振動でなく、倍音成分を含んだ振動になっている。特に、880Hzの場合には、強い倍音成分の影響が見て取れる。

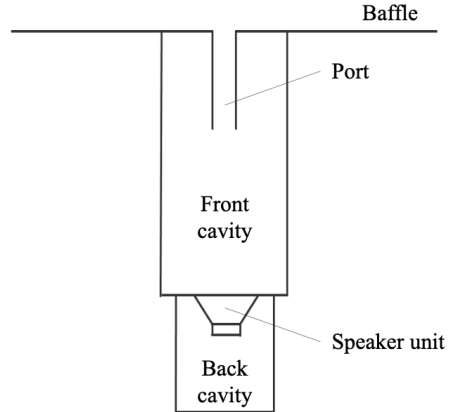


図3 バスレフポートの実験機

(c)の周波数スペクトルを見ると、6次までの倍音成分が明確に見られる。特に、880Hzの場合には、2倍音の成分が基音の成分よりも大きい。このような周波数スペクトルは、現実の演奏音のスペクトルとよく一致する。試しに、リードを振動させず、周期的な流速で駆動した場合には、音圧波形はほぼ正弦関数となり倍音成分はほぼ見られない。したがって、オーボエの演奏音における豊富な倍音成分は、リード振動が作り出していると、推察される。

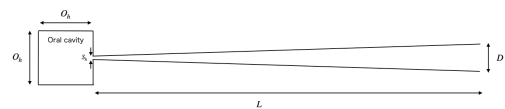
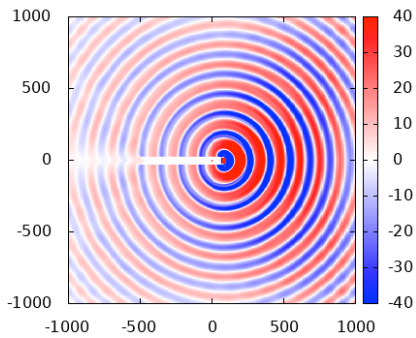


図4 オーボエリード + 口腔: $O_h = 10\text{mm}$, $S_h = 1\text{mm}$, $L = 71\text{mm}$, $D = 5\text{mm}$

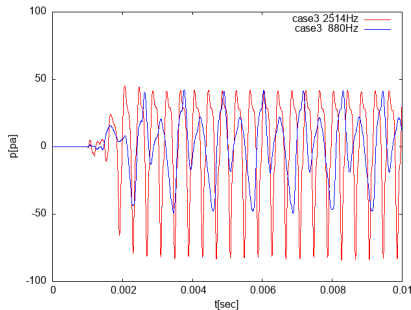
(3) 管楽器の発音機構の遅延方程式モデルを用いた基礎解析 [1,11]

遅延方程式モデルの解析では、音孔や管体の凹凸を考慮した正負の遅延があるモデルの解析を進めた。特に、logistic 写像を組み込んだ場合には、2つの固定点が交代分岐点近傍で同時に不安定化して、解が発散することを発見し、こ

(a)



(b)



(c)

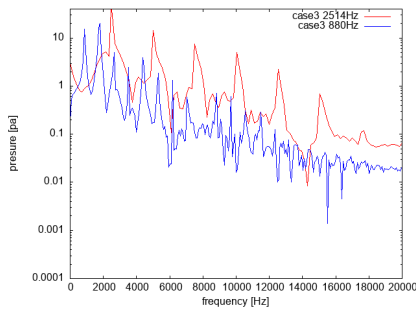


図5 オーボエリードの結果 (a) 圧力分布 ($\omega_H = 2514\text{Hz}$) (b) 放射波の圧力変動 ($\omega_H = 2514, 880\text{Hz}$) (c) パワースペクトル

の成果を原著論文で公表した。

6 今年度の進捗状況と今後の展望

今年度の直接の研究成果ではないが、日本音響編集の書籍「音楽音響」の分担執筆をした

[12]。担当したエアリード(エアジェット)楽器の項目では、これまでのJHPCNのプロジェクトで得られた成果が盛り込まれている。

本年度の全体としての達成度は、90%程度と判断される。各項目の進捗状況と今後の展望は以下の通りである。

(1) LESを用いた管楽器および音響機器の大規模計算解析

a) オルガンパイプのフットの解析: この項目では、成果公表に必要なデータを揃えることができた。今後の予定は、Forum Acusticum2023等で成果を公表することである。この項目の達成度は90%である。

b) 音孔のついたオカリナ: 音孔の開閉によるピッチの変化を再現することに成功した。今後の課題は、音響ソルバーを用いたヘルムホルツ共鳴器の解析の可能性について検討することである。この項目の達成度は80%である。

c) エッジトーンの3次元解析: エッジトーンのフィードバック機構の解析で十分な成果が得られ、その一部をICA2022等で公表した[4,9,11]。今後の課題は、これらの成果をまとめ原著論文や国際会議で公表することである。この課題の達成度は100%である。

d) スピーカーのバスレフポートの3次元解析: バスレフポートの解析では、HECを用いてポート近傍での音響場から流体場へのエネルギー遷移を評価することに成功し、その一部をICA2022で公表した[6]。今後の課題は、詳細な成果を国際会議等に公表することである。また、ヤマハ(株)のメンバーによって、より現実的なバスレフポート形状を想定した実験・数値計算環境が構築された。両者の比較において良好な結果が得られており、詳細な結果については、Inter-noise 2023にて発表予定である。次年度以降はデータ数を増やした解析・精度検証を継続する予定である。こ

れらより、この項目の達成度は 100% である。
e) 熱音響機関の解析: 試験管型熱音響のモデルを用いて、過渡的な音波の発生の再現に成功し、その成果の一部を ICA2022 で公表した [5]。今後の課題は、定常的な音波の発生を実現するための解析手法の開発である。この課題の達成度は 80% である。

今年度の項目にはないが、昨年度までの‘音孔の問題’の成果を ICA2022 で公表した [7]。全体として見ると、項目 a)-e) の全体の達成度は 90% 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

ホルンのマウスピースの問題では、前年度から引き続き口腔の効果についての詳細な解析を進め、その成果を ICA2022 で発表した [3]。オーボエリードの問題では、ホルンのマウスピースの研究成果を応用し、リード振動を模擬したモデルの作成に成功し、その成果を ICA2022 および AFI2022 で発表した [2,8]。特に、ホルンのマウスピースとオーボエのリードの解析の成果は、口腔の発音機構へ効果について、新たな指針を与えたと考えられる。

今後の課題は以下の通りである。DNS を用いたホルンのマウスピースの解析では、円筒座標系を用いて軸対象モデルを作成し、擬似的な 3 次元計算を行い、2 次元計算との違いを考察することである。オーボエのダブルリードの解析では、振動する 2 枚のリード片の動きをより正確に再現するモデルを開発し、簡易モデルとの違いを明らかにすることである。さらに、DNS を用いて、d) 熱音響機関の解析の項目で行った試験管型熱音響の解析が行えるか検討する。これらを総合すると、この項目の達成度は 85% 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

logistic 写像を取り込んだ正負の遅延を持つ 2 重遅延系の成果を、原著論文で公表した [1]。さらに、数理解析研究所の研究会で発表した [11]。発表内容は、数理解析研究所講究録で公表される予定である。今後の課題は、invite されている International Congress on Industrial and Applied Mathematics 2023 の minisymposia で研究成果を発表することである。さらに、音孔や管体の凹凸を模擬した、正負の遅延を持つ 3 重遅延モデルのモード選択則の解析を進めることである。この項目の達成度は、95% 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] K.Takahashi, T. Kobayashi, ‘Two-Delay System Including the Logistic Map: Disappearance of Attractors Owing to Anomalous Bifurcation Process’, The Journal of Physical Society Japan 91, 104007, October, 2022

国際会議プロシーディングス（査読あり）

[2] Y. Nakahara, R. Sumita, R. Tabata, S. Iwagami, T. Nanri, T. Kobayashi, Y. Hattori, K. Takahashi ‘Numerical Study on Wind Instruments with Compressible Direct Numerical Simulation’, Proceedings of the Twenty-second International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, pp.163-164, November 9-11, 2022.

[3] R. Sumita, R. Tabata, S. Iwagami, Yuki Nakahara, T. Nanri, T. Kobayashi, Y. Hattori, K. Takahashi ‘Numerical study of a French horn mouthpiece accompanied by vibrating lips and an oral cavity

- with compressible direct numerical simulation', Proceedings of the 24th International Congress on Acoustics, ABS-0100, October 24-28, 2022.
- [4] T. Onomata, S. Iwagami, R. Tabata, T. Ohno, T. Nanri, T. Kobayashi, K. Takahashi, 'Numerical study of the feedback mechanism of the edge tone', Proceedings of the 24th International Congress on Acoustics, ABS-0251, October 24-28, 2022.
- [5] Y. Tashima, T. Ohno, T. Nanri, T. Kobayashi, K. Takahashi, 'Compressible fluid analysis on basic properties of a thermoacoustic equipment', Proceedings of the 24th International Congress on Acoustics, ABS-0250, October 24-28, 2022.
- [6] K. Uryuu, R. Tabata, T. Ohno, T. Nanri, T. Kobayashi, K. Takahashi, 'Aeroacoustic analysis of port noise by using a three-dimensional numerical model of a bass reflex speaker system', Proceedings of the 24th International Congress on Acoustics, ABS-0192, October 24-28, 2022.
- [7] S. Takanami, R. Tabata, S. Iwagami, T. Ohno, T. Nanri, T. Kobayashi, K. Takahashi, 'Numerical approach for aerodynamics around two tone holes of woodwind instruments', Proceedings of the 24th International Congress on Acoustics, ABS-0259, October 24-28, 2022.
- [8] Y. Nakahara, R. Sumita, R. Tabata, S. Iwagami, T. Nanri, T. Kobayashi, Y. Hattori, K. Takahashi, 'Aeroacoustic analysis of oboe reeds with compressible direct numerical simulation', Proceedings of the 24th International Congress on Acoustics, ABS-0249, October 24-28, 2022.
- 国内会議発表 (査読なし)**
- [9] 小野又樹, 岩上翔, 田畑諒也, 大野泰治郎, 小林泰三, 高橋公也, '3次元圧縮性 LES を用いたエッジトーンの再現とそのフィードバック機構の考察' 第 36 回数値流体力学シンポジウム 2022 年 12 月 14 日~2022 年 12 月 16 日
- [10] 小野又樹, 岩上翔, 田畑諒也, 大野泰治郎, 小林泰三, 高橋公也, 'LES を用いたエッジトーンの 3 次元流体音響解析' 第 128 回日本物理学会九州支部例会 2022 年 12 月 03 日
- [11] 高橋公也, 小林泰三, '多重遅延系のモード選択則と管楽器モデル' 2022 年度 RIMS 共同研究 (公開型) 「時間遅れ系と数理学: 理論と応用の新たな展開に向けて」, 2022 年 11 月 16 日~2022 年 11 月 18 日
- 公開したライブラリ等**
- その他 (特許, プレス発表, 著書等)**
- [12] 日本音響学会編: 亀川 徹, 足立 整治, 西口 磯春, 松谷 晃宏, 高橋 公也, 若槻 尚斗, 星野 悦子, 谷口 高士, 山本 由紀子, 三浦 雅展, 大田 健紘, 丸井 淳史 著, 音響学講座 9 「音楽音響」, コロナ社, 2023 年 03 月 06 日, ISBN: 978-4-339-01369-6