

jh180007-MDH

エアリード楽器および音響機器における大規模音響流体解析

高橋公也（九州工業大学）

本研究では、低マッハ数における流体音（空力音）発生機構の解明に向けた大規模解析を行う。特に、エッジトーンを音源とするリコーダー、オルガンパイプ、オカリナ等のエアリード楽器の発音機構、木管楽器の音孔の開閉に伴う異音の発生機構、リード木管楽器マウスピース内音圧の発生機構、エオルス音の発生機構、バスレフスピーカーのポートノイズの発生機構等の問題を取り扱う。低マッハ数における流体音は、航空騒音等で問題となる高マッハ数の流体音と異なる特性を持つことが知られている。そこで、低マッハ数における流体音の発生メカニズムとその特性（例えば、流速と発生する音響エネルギーの関係）を明らかにするために、LES を用いた圧縮流体の高精度数値計算を行い、流体音の基礎理論に基づく解析を行う。流体音の発生メカニズムの解明には大規模な 3 次元計算を行う必要がある。それに必要な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を目指す。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。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

九州大学

(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
- 超大容量ネットワーク技術分野
- 超大規模情報システム関連研究分野

(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(帝京大学): 副代表、大規模計算とプレポスト処理
小野 謙二(九州大学): 大規模計算と可視化
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
大島 聡史(九州大学): OpenFOAM の改良開発
岩上 翔(九州工業大学): エッジトーンの基礎解析
桑原 拓也(九州工業大学): ポートノイズの音響流体解析
松田 怜(九州工業大学): オルガンパイプの流体音響解析
横山 博一(九州工業大学): エオルス音の音響流体解析
若狭 大輝(九州工業大学): 木管楽器の音孔の動的解析
小岩屋 寿晃(九州工業大学): クラリネットの解析
岡田 紘彰(九州工業大学): オカリナの解析

2. 研究の目的と意義

本研究では、低マッハ数における流体音（空力音）発生機構の大規模解析を行う。特に、エッジトーンを音源とするリコーダー、オルガンパイプ、オ

カリナ等のエアリード楽器の発音機構、木管楽器の音孔の開閉に伴う異音の発生機構、リード木管楽器マウスピース内音圧の発生機構、エオルス音の発生機構、バスレフスピーカーのポートノイズの発生機構等の問題を取り扱う。低マッハ数における流体音は、航空騒音等で問題となる高マッハ数の流体音と異なる特性を持つことが知られている。そこで、低マッハ数における流体音の発生メカニズムとその特性（例えば、流速と発生する音響エネルギーの関係）を明らかにするために、LES を用いた圧縮流体の高精度の数値計算を行い、流体音の基礎理論に基づく解析を行う。圧縮流体の解析では、流体と音を同時に再現するために、より細かなメッシュが必要であり、時間刻みも $10^{-7} \sim 10^{-8}$ s にすることが必要で、2 次元の計算でも計算機の負荷は極めて大きい。さらに、2 次元と 3 次元では流体および音の性質が異なることが知られている。そのため、流体音の発生メカニズムの解明には大規模な 3 次元計算を行う必要がある。これまでの研究で、2 次元計算に基づく基礎的な解析および一部の 3 次元解析を行ってきた。本研究ではこれまでの研究をさらに発展させ、3 次元解析に必要な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 の開発改良を行う。

具体的に取り扱う研究項目は以下の 5 項目である。

- (1) エアリード楽器の 3 次元大規模計算に基づく発音機構の解明
- (2) LES および DNS を用いたエッジトーンおよびエオルス音の厳密解析
- (3) 音孔のトポロジー変化を伴う動的解析
- (4) シングルリード木管楽器のマウスピース内の流体音響解析 (新規課題)
- (5) ポートノイズの 3 次元大規模解析

項目(3)では、音孔の開閉の問題でトポロジー変化のある動的な移動境界問題に取り組み、その問題を取り扱う規範となる方法論の確立を目指す。また、各項目の実施に必要な OpenFOAM の開発改良を適宜行い、その成果を利用拠点に共有・提供する。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

現在では比較的安価な PC においても 10 コア以上の CPU を搭載し、流体力学シミュレーションもマルチコアの計算機で実行されることが多くなって来ている。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「京」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、ポスト処理の受け皿が用意されていない事である。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はこれまで商用のコードが多く、ほとんどがブラックボックスのまま利用されていたが、最近になっ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。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

前年度は、3 次元大規模計算で必要となるプレポスト処理の手法を開発した。OpenFOAM の Function Object の機能を使い、計算の内部処理で 2 次元断面上のデータを取得し画像データを生成させる手法を確立させ、圧縮性 LES を用いた一部の 3 次元計算に用いた。具体的な成果は以下の通りである。

(1) エアリード楽器の 3 次元大規模計算に基づく発音機構の解明

小型エアリード楽器の 3 次元モデル(3 千万メッシュ)の数値計算を行なった。このデータと音響ソルバー(FDTD)の結果を用いて、Howe のエネルギー推論(HEC)を用いた流体音源の解析を行うが、3 次元音響ソルバーFDTD の計算に必要な効率的な並列化は今年度の課題である。

これとは、別に本格的なフットのついたオルガンパイプの 2 次元モデルのシミュレーションを行った。図 1 に示すように、フットとは、管体に送り込む空気を一時的にためる空気溜めであり、楽器の発振を安定化させるために重要な役割をはたす。解析の結果、図 1 の圧力分布に見られるように、安定した発振状態では、フットと共鳴管の音場が逆同期状態になることを発見した。

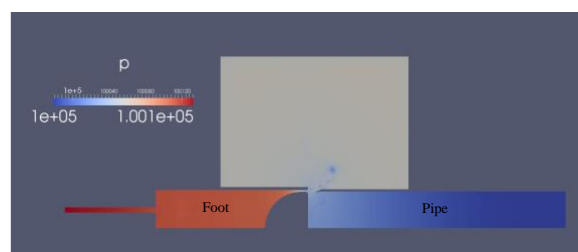


図 1 オルガンパイプの解析(圧力分布)

(2) LES および DNS を用いたエッジトーンおよびエオルス音の厳密解析

エッジトーンの解析では、2 次元の DNS の計算を行い、エッジトーンの発振を確認できた。ジェットの流れが早くなると起きるモード遷移の再現に成功した。

エオルス音の解析では、圧縮性 LES を用いた 2

次元モデルの計算法を確立した。一様流中の流体音を扱うには、2次元モデルでもメッシュ数は百万を超えるので、超並列計算は不可避である。

(3) 音孔のトポロジー変化を伴う動的解析

移動境界問題を取り扱うのに必要 OpenFOAM の rhoPimpleDymFOAM の改良を行い、音孔を閉じる解析に成功した。

音孔モデルの流体音響計算と関連した課題として、木管管楽器の音孔の位置と発振モードの関係を遅延方程式モデルを用いて解析した。音孔が2つある場合の解析を行い、最適な音孔の配置について新たな知見を得た。

(4) ポートノイズの3次元大規模解析

スピーカーの再現に必要な OpenFOAM の rhoPimpleDymFOAM の改良を行い、バスレフポートの2次元モデルの解析に成功した。

5. 今年度の研究成果の詳細

(1) エアリード楽器の3次元大規模計算に基づく発音機構の解明

前年度に引き続き、小型エアリード楽器の HEC を用いた流体音源の解析を行った。HEC の解析では、圧縮性 LES を用いた流体解析と FDTD を用いた音響解析のデータを融合させて、音源から発する音響エネルギーの評価を行った。計算の利便性のために、z 軸方向の厚みが一様な準3次元モデルを用いた。前年度計算した圧縮性 LES を用いた流体解析を見直し、より精度を上げるために、メッシュを作り直し再計算を行った。また、これまでに使用して来た FDTD のコードを書き直し、3次元計算を行ない、準3次元モデルの音響的特性は、2次元モデルとほぼ同じであることを確認した。これらの準備のもとに HEC の解析を行なった。図2の分布は、ある瞬間における HEC の音響エネルギー分布で、赤い部分が音響エネルギーの発生を、青い部分が吸収を表す。音響エネルギーの発生が起きている領域を特定するために、図に示すように、歌口近傍を複数の領域に分け、各領域での正味の音響エネルギーの発生量を計算した。具体的には、空間平均を取り、さらに、その時間平均を計算した。その結果を表1に示す。音響エネルギーの発生は、主にエッジに近いジェットの後流で起きている。一方、ノ

ズル近傍では、音響エネルギーの吸収が起きている。これは、ジェットの振動を管共鳴周波数に同期させるために使われていると考えられる。これらの結果は、これまでの2次元モデルの結果と定性的に同じであるが、吉川らによって報告されている実験による解析により近いものであると考えられる。

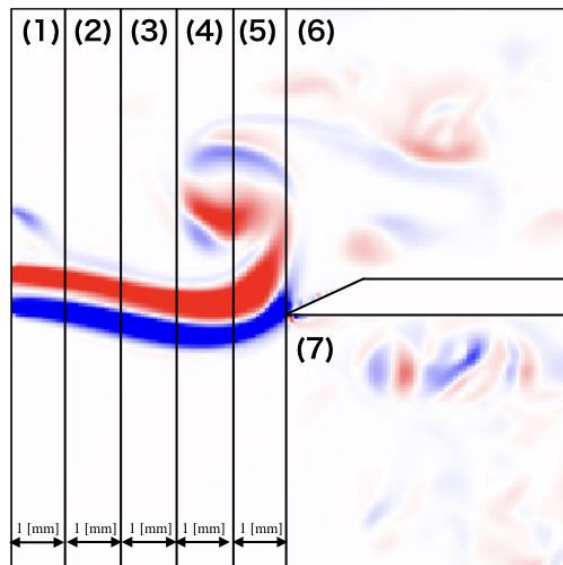


図 2 歌口近傍の HEC で求めた音響エネルギーの分布

表 1 各領域での音響エネルギー[mW/m]

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	計
-30.61	-22.03	26.39	81.38	40.35	-17.52	2.02	79.98

フットのついたオルガンパイプの2次元モデルの解析では、フットの役割をより詳しく知るために、圧縮性 LES ソルバーを用いてフットの共鳴周波数と共鳴曲線を求めた。理想的なフットの結果を図3(a)に示す。フットはヘルムホルツ共鳴器として働き、図の例では、共鳴周波数は 380Hz である。一方、管共鳴が作り出す音響振動の周波数は 482Hz であり、その差は半値全幅(FWHM)程度である。この場合、強制振動の理論からフットと共鳴管の音場が逆同期状態になることが示せ、最も安定な発振が起きる(図3(b))。一方、フット体積を小さくしヘルムホルツ共鳴周波数を管共鳴周波数とほぼ同じにすると両者の間の相互作用が強くなり非線形効果のために不安定な発振が起きる(図3(c))。この研究で得られた結果は、オルガンパイプの設計に重要な知見を与えられる。

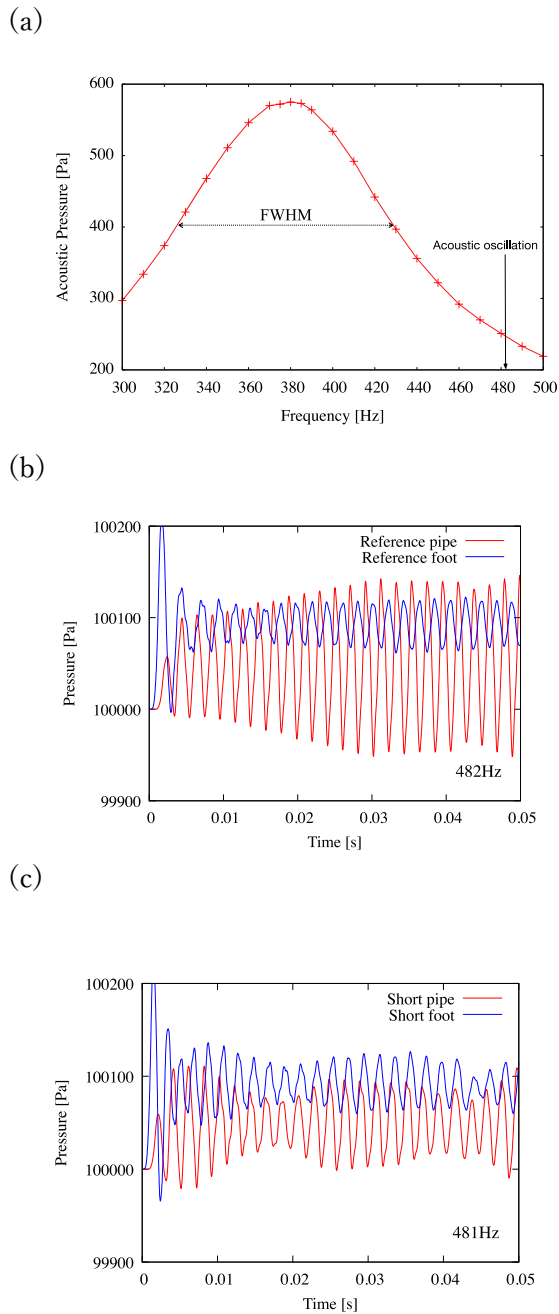


図 3 フットの役割 (a) 理想的なフットの周波数応答 (b)管体とフットの音圧(理想的なフット) (c) 管体とフットの音圧(小さなフット)

図 4 (a)に示すように、ヘルムホルツ共鳴器を共鳴管に持つオカリナの 3 次元モデル(約 1 億 6 千万メッシュ)の作成を行い、解析を行なっている。中心断面上の流速分布および圧力分布を図 4(b)(c)に示す。ジェットが振動し、強い共鳴音場が発振している様子が見られる。発振周波数は、850Hz でヘルムホルツ共鳴周波数の理論値 1000Hz よりも低い値になる。発振周波数が理論値よりも小さくなることは、理論的に説明できる。

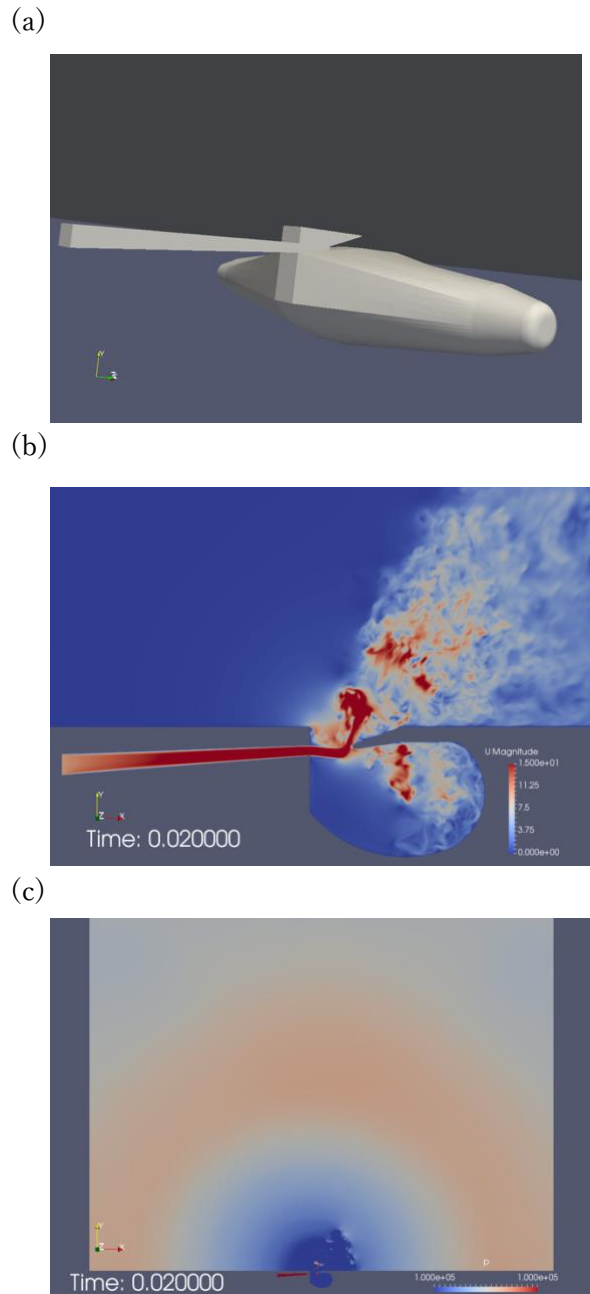


図 4 オカリナの解析 (a) モデル (b) 断面上の流速分布 (c) 断面上の圧力分布

また、当初の予定にはなかったが、LBM を用いた、エアリード楽器の同期現象の解析にも着手した。

(2) LES および DNS を用いたエッジトーンおよびエオルス音の厳密解析

前年度に引き続き、DNS を用いたエッジトーンの解析を行い、サンプル点を増やした。その結果、図 5(a)に示すように、ある流速領域でモード遷移が起きることを明確に示すことができた。この結果は Brown の実験結果と極めて良い一致を示す。

さらに、流速と音響エネルギーの解析を進めた結果、各モード毎に、音響エネルギーが流速の 5 乗に比例することを見出した(図 5(b))。これは、流体音源が双極子的であることを示す。ただし、モード遷移が起きる直前の 1 次モードでは 5 乗べきから外れ、エネルギー発生が抑制される傾向が見られる。これは、新たな発見であり、モード遷移のメカニズムを理解するための重要な手がかりを与えるものと考えられる。図には示さないが、エオルス音では、モード遷移は起きず、5 乗べきに近い音響エネルギーの増加が見られる。

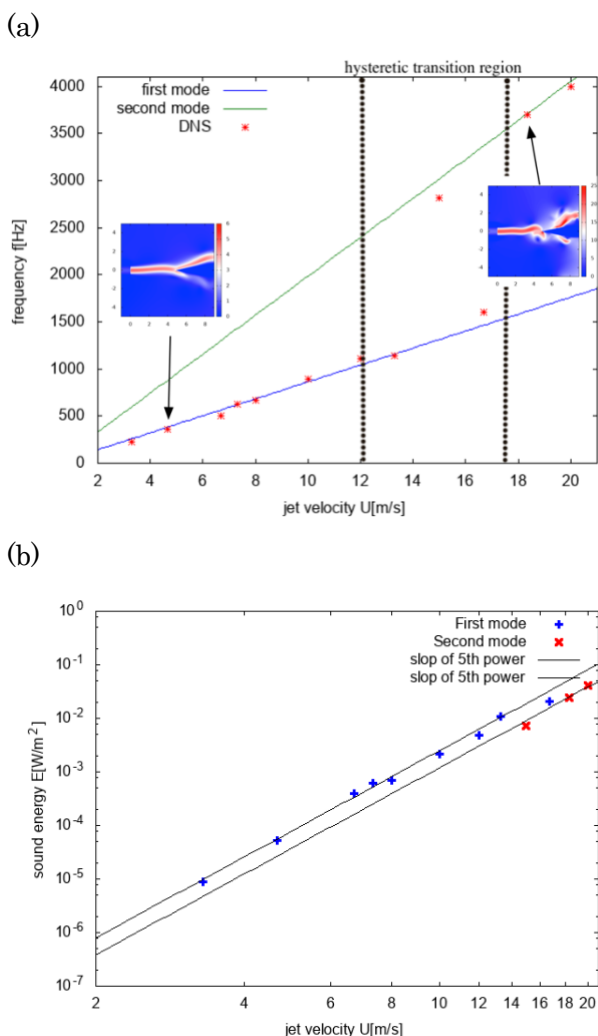


図 5 エッジトーンのモード遷移の再現 (a) 流速 vs 周波数 (b) 流速 vs 音響エネルギー

(3) 音孔のトポロジー変化を伴う動的解析

前年度の改良した移動境界用の OpenFOAM の rhoPimpleDymFOAM および mapFields を用いて音孔の開閉の解析を行った、前年度は音孔を閉じ

る状態までであったが、今年度は開-閉-開の連続動作の解析に成功した。その結果を図 5 に示す。図 6(a)の左端から周期的な流速を加える。図に示す 2 次モードでは、音孔が開いているときは、媒質の変位の腹(圧力の節)が音孔下部にくるので共鳴発振が起きないが、音孔を閉じると発振可能になる。図 6(b)は音孔下部の圧力変化を示したもので、音孔が閉まると圧力変動が大きくなり共振状態になり、開くと圧力変動が小さくなる様子が再現されている。音孔の開閉時にはトポロジーの異なるメッシュへのマッピングを行うが、この時の誤差は、 10^{-4} Pa 程度で無視できる大きさである。現在、3次元モデルを準備中である。

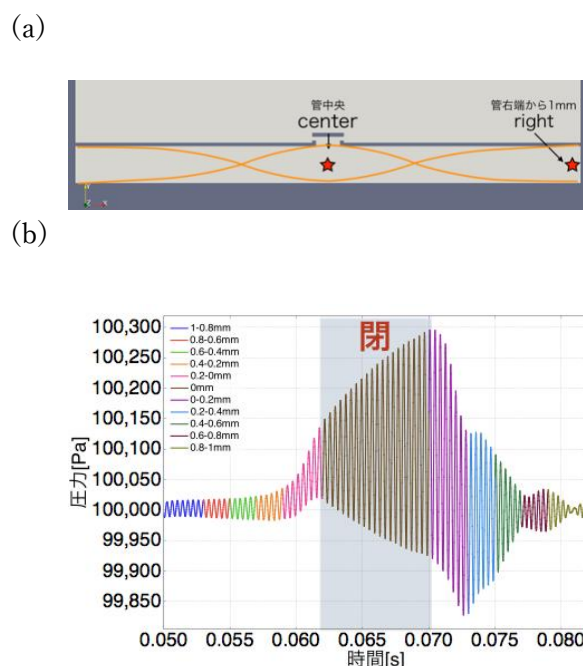
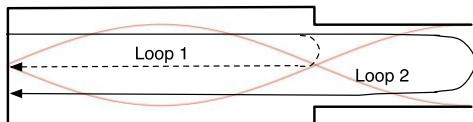


図 6 音孔モデルの解析 (a) 音孔モデル (b) 音孔下部の圧力変化

遅延方程式の理論解析では、図 7 に示すような段差のある管の発振モードの解析を行った。図 7(a)に示すように、開口部に波の腹、段差部分に節が来ると安定な発振が起きる。図 7(b)のような場合は、開口と段差の境界条件を満たす定在波はなく、発振が不安定になり高次モードの発振が起きやすくなる。結論として Loop 比が、 $Loop1/Loop2=偶数/奇数$ の時に安定な発振が起きる。一方、音孔の場合は Loop 比が奇数/奇数の時に安定化する。さらに、段差が大きくなると、Loop 比が奇数/偶数になるときに安定化する。これらのことを、理論および数値計算で示した。さ

らに解析を進めた結果、非分散極限(特異摂動極限)では、ループ比に依存した多次元写像に還元されることを見出し、多次元写像の性質から、もとの遅延方程式の分岐構造が予想できることを示した。

(a)



(b)

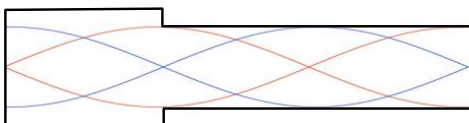
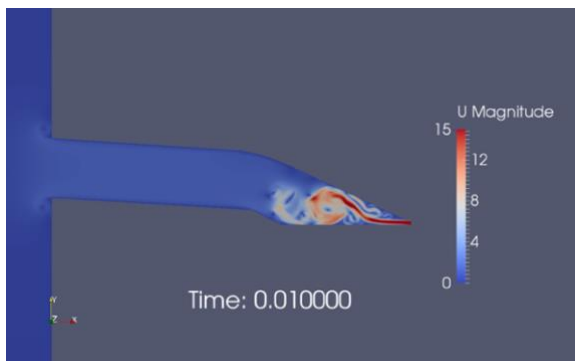


図 7 遅延方程式モデルの解析 (a) 安定な発振状態 (b) 不安定な発振状態

(4) シングルリード木管楽器のマウスピース内の流体音響解析

クラリネットのマウスピースの 2 次元モデル(約 2 百万メッシュ)と 3 次元モデル(約 1 億 5 千万メッシュ)を作成し、リードの隙間からジェットを吹き込む解析を行った。得られた流速分布を図 8 に示す。2 次元モデルの方が大きな渦が見られる。これは、2 次元流体特有の逆エネルギーカスケードのためである。流体音は渦度の変動から発生するので、2 次元と 3 次元では音の発生に違いがあると予想され、3 次元モデルの解析が重要であることがわかる。さらに、現実の発振状態を模擬するために、周期変動するジェットで駆動する解析を進め、共振状態をほぼ再現することに成功した。

(a)



(b)

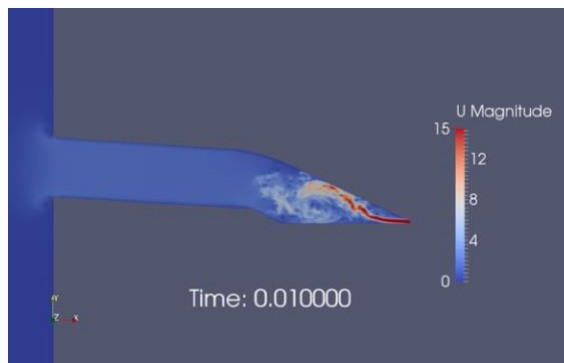
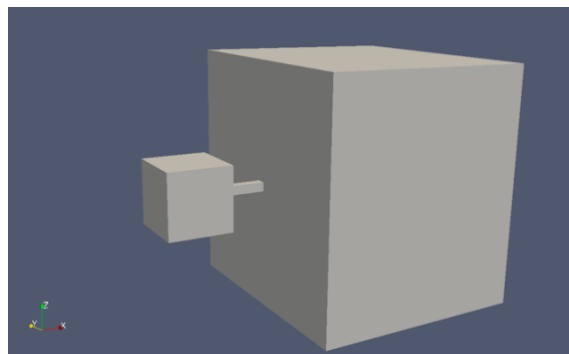


図 8 クラリネットのマウスピースの解析 (a) 2 次元モデル (b) 3 次元モデル

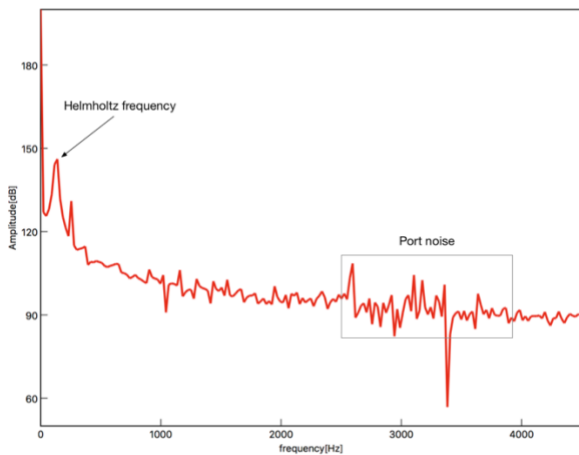
(5) ポートノイズの 3 次元大規模解析

前年度は、2 次元モデルの解析を行ったが、今年度は、3 次元解析を行うためのモデルを作成し、解析を行った。図 9(a)に 3 次元モデルを示す。手前の小さな箱がスピーカーボックス、大きな箱が外部領域、それをつなぐパイプがバスレフポートである。スピーカーから出る直接音は無視している。解析の結果、図 9(b)に示すように、3 次元モデルでは、ポート共鳴やキャビティ共鳴によって引き起こされるポートノイズの発生が確認できた。ノイズの発生は、これまでの 2 次元モデルに比べてより明確に現れる。また、ポート入り口近傍の渦の振る舞いにも 2 次元との違いが観測された。図 9(c)に示すように示すように、ポート出入り口近傍で発生した渦輪はポートを離れて直進し、やがて消滅する。これに対し、2 次元モデルでは、渦は、時間が経ってもポート出入り口近傍に滞在し続ける。このような渦の振る舞いの違いは、ポートノイズの発生に何らかの影響を与えるものと考えられる。

(a)



(b)



(c)

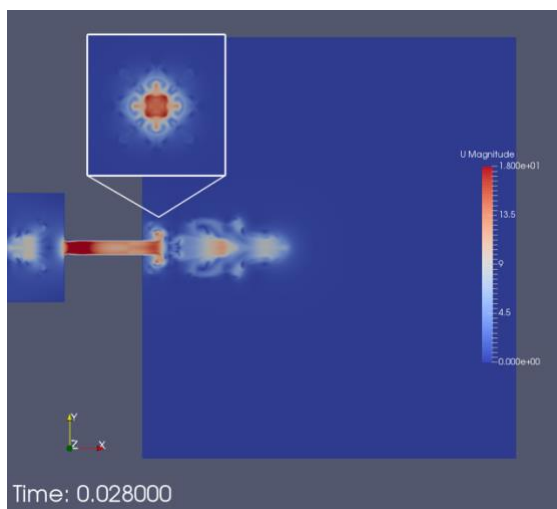


図 9 ポートノイズの解析 (a) モデル (b) 周波数分解 (c) 流速分布(挿入図は断面分布)

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

DNS 以外のテーマでは、前年度開発したプレポスト処理の技法等を発展させ、3次元解析を行うことが、今年度の目標である。音孔のテーマ以外のテーマで、3次元解析を行うことができた。各テーマにおける進捗状況と今後の展望は以下の通りである。

(1) エアリード楽器の3次元大規模計算に基づく発音機構の解明

HEC を用いた小型エアリード楽器の解析では、準3次元モデルでの解析に成功した。歌口からの音響放射を完全に再現する3次元モデルの解析が今後の課題である。現在、FDTD を用いた大規模3次元音響解析の準備段階にある。今後、FDTD 法に適した時空間タイリング手法等の導入により、計算の効率化を検討している。さらに、解析に必

要な、3次元 FDTD のノード間並列化において、分散共有メモリシステム mSMS (成蹊大学の緑川博子氏により開発) の利用を検討している。また、GPGPU の使用も検討している。GPGPU を用いた 2D 小型エアリード楽器の解析の成果発表として、[国際会議発表 1]がある。

フットのついたオルガンパイプの研究成果は、[学術論文 2]、[国際会議プロシーディングス 1]、[国内会議発表 8]で発表した。3次元解析が今後の課題である。

オカリナの解析では、形状が複雑なためにメッシュの作成に時間がかかったが、精度の高いメッシュを作成することができ、解析を進めている段階である。ヘルムホルツ共鳴器を持つオカリナ特有の発音機構を明らかにするのが今後の目標である。また、3次元の流速分布等を可視化する技法の開発も今後の課題である。粗いメッシュを用いた予備的な結果は、[国内会議発表 3]で発表済みであり、細かなメッシュの途中経過も、[国内会議発表 5, 9]で発表した。

当初の予定に無かった、LBM を用いた、エアリード楽器の同期現象の解析に着手した。予備的な成果を、[国内会議発表 12]で発表した。

(2) LES および DNS を用いたエッジトーンおよびエオルス音の厳密解析

DNS を用いたエッジトーンの解析では、サンプル点を増やした結果、実験で見られるモード遷移を再現できる解析結果が得られた。今後、発生する音響エネルギーの解析を進めモード遷移のメカニズムを明らかにする。この成果は、[国際会議プロシーディングス 2]、[国内会議発表 2, 7]で発表した。さらに、エオルス音の結果は、[国際会議プロシーディングス 3]発表した。

(3) 音孔のトポロジー変化を伴う動的解析

2次元モデルではあるが音孔の開閉を完全に再現できたことは大きな進展である。3次元モデルの解析が今後の課題であるが、動的境界条件の解析に用いる rhoPimpleMyDyMFOAM を3次元解析に用いた場合の不具合が見つかっており、これの修復が必要である。2次元解析の成果は、[国内会議発表 1, 11]で発表した。

遅延方程式のモデル解析では、段差がある管の発振モードの理論解析に成功した。さらに、遅延方程式の理論に踏み込んだ解析も行なった。今後も、基礎解析を進めていく。この成果は、[学術論

文 1, 3] で発表済みである。

(4) シングルリード木管楽器のマウスピース内の流体音響解析

3次元モデルの解析に成功し、現在、より現実的な設定のもとでの解析を行っている。今後、この解析を継続する。また、3次元の流速分布等を可視化する技法の開発も今後の課題である。これまでの成果は、[国内会議発表 4, 6, 10] で発表済みである。

(5) ポートノイズの3次元大規模解析

当初の目標であった、3次元モデルの解析に成功した。今後の目標は、3次元 FDTD の解析と組み合わせ、HEC の解析を行うことである。そのためには、3次元 FDTD の高速化の検討が必要である。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

1. K. Takahashi, T. Kobayashi, 'Mode Selection Rules for a Two-Delay System with Positive and Negative Feedback Loops' *J. Phys. Soc. Jpn.* **87**, 044001 (2018).
2. S. Tateishi, S. Iwagami, G. Tsutsumi, T. Kobayashi, T. Takami, K. Takahashi, 'Role of the foot chamber in sounding mechanism of a flue organ pipe', *Acoust.Sci.& Tech.* **40**, 29-39 (2019).
3. K. Takahashi, T. Kobayashi, 'Mode Selection Rules and Bifurcation Diagrams for Two-Delay Systems: Underlying Mechanism Controlled by Embedded Multi-Dimensional Maps', submitted to *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 024002 (2019).

(2) 国際会議プロシーディングス

1. S. Tateishi, S. Iwagami, G. Tsutsumi, T. Kobayashi, T. Takami, K. Takahashi, 'Numerical Study on a Flue Organ Pipe with Compressible LES Focusing on the Role of the Foot Chamber', *Proceedings of the fifteenth International Conference on Flow Dynamics*, (2018) pp.804-805.
2. S. Iwagami, T. Kobayashi, K. Takahashi, Y. Hattori, 'Mode Jump of Edge Tone Captured by Direct Numerical Simulation', *Proceedings of the fifteenth International Conference on Flow Dynamics*, (2018) pp.806-807.
3. H. Yokoyama, S. Iwagami, T. Kobayashi, K.

Takahashi, Y. Hattori, 'Numerical Study on Aeolian Tone with Compressible LES', *Proceedings of the eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, (2018), pp.10-11.

(3) 国際会議発表

1. R. Tabata, T. Kobayashi, 'Numerical Simulation of a Flue Instrument with Finite-Difference Lattice Boltzmann Method using GPGPU', SC18 (ACM Student Research Competition), Dallas, Nov. 2018.

(4) 国内会議発表

1. 若狭大輝, 小林泰三, 松田秀隆, 高見利也, 高橋公也, 「木管楽器の音孔と移動境界 IV」, 9aM301-4, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018 年 9 月, 同志社大学.
2. 岩上翔, 小林泰三, 服部裕司, 高橋公也, 「DNS を用いたエッジトーンの解析」, 12aPS-107, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018 年 9 月, 同志社大学.
3. 岡田紘彰, 岩上翔, 小林泰三, 高橋公也, 「オカリナの流体音響解析」, 12aPS-108, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018 年 9 月, 同志社大学.
4. 小岩屋寿晃, 岩上翔, 小林泰三, 高橋公也, 「シングルリード木管楽器のマウスピース内の流体音響解析」, 12aPS-109, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018 年 9 月, 同志社大学.
5. 岡田紘彰, 岩上翔, 小林泰三, 高橋公也, 「オカリナの流体音響解析」, 音楽音響研究会資料 37 巻 9 号 pp. 65-70 (2019).
6. 小岩屋寿晃, 岩上翔, 小林泰三, 高橋公也, 「シングルリード木管楽器のマウスピース内の流体音響解析」 音楽音響研究会資料 37 巻 9 号 pp. 35-40 (2019).
7. 岩上翔, 小林泰三, 服部裕司, 高橋公也, 「DNS を用いたエッジトーンの解析」, 15a108-6, 日本物理学会第 74 回年次大会, 2019 年 3 月, 九州大学.
8. 立石修平, 岩上翔, 堤元気, 小林泰三, 高見利也, 高橋公也, 「圧縮性 LES を用いた 2 次元オルガンパイプのフットの役割の解析」, 15a108-9, 日本物理学会第 74 回年次大会, 2019 年 3 月, 九州大学.
9. 岡田紘彰, 岩上翔, 小林泰三, 高橋公也, 「オ

カリナの流体音響解析 2」, 16pS-PS-37, 日本物理学会第 74 回年次大会, 2019 年 3 月, 九州大学.

10. 小岩屋寿晃, 岩上翔, 小林泰三, 高橋公也, 「シングルリード木管楽器のマウスピース内の流体音響解析 II」, 16pS-PS-38, 日本物理学会第 74 回年次大会, 2019 年 3 月, 九州大学.

11. 小林泰三, 若狭大輝, 松田秀隆, 高見利也, 高橋公也, 「木管楽器の音孔と移動境界 V」, 16pS-PS-39, 日本物理学会第 74 回年次大会, 2019 年 3 月, 九州大学.

12. 田畑諒也, 小林泰三, 高橋公也, 「エアリード楽器の同期現象の数値解析」, 16pS-PS-40, 日本物理学会第 74 回年次大会, 2019 年 3 月, 九州大学.

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

なし