

jh170021

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、低いマッハ数における流体音の問題を取り扱う。特に、エッジトーンを音源とするリコーダーやフルート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、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に注目する。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、Lighthill や Howe によって定式化された流体音の基礎理論に基づく解析を行う。そのためには、LES を用いた 3 次元解析や DNS を用いた解析が必要であり、それにとりまう、大規模並列解析の効率化とそれに伴うとプレポスト処理および可視化の問題を解決する。

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、北海道大学

(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

岩上 翔(九州工業大学): エッジトーンの基礎解析

立石 修平(九州工業大学): オルガンパイプの音響流体解析

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): 流体音響エネルギー発生解析

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

2. 研究の目的と意義

目的: 非定常な流体の運動から発生する音を流体音（または空力音）と言う。本研究で注目するのは、低いマッハ数における流体音の問題である。特に、エッジトーンを音源とするリコーダーやフルート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、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、Lighthill の理論等の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、空間刻み、時間刻みをより細かくする必要がある。したがって、2 次元の計算でも計算機の負荷は極めて大きい。しかしながら、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おり、流体音の発生メカニズムのより正確な解明には大規模な 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はほぼ終わっている。そこで、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メカニズムの解析を行う。具体的に取り扱う研究項目は以下の 4 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) 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。

意義：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よく研究されているが、低マッハ数での研究はあまり多くない。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厳密解析が可能であり、極めてレイノルズ数が低い場合には 2 次元 DNS による解析も可能である。本研究では 3 次元 LES の解析を主体に DNS の解析も交えて流体音の厳密解析を行い、エアリード楽器の発音機構等の低マッハ数特有の流体音の特徴を明らかにする。この点に学問的な意義がある。

それを実現するためには、大規模並列計算の高速化が必要であり、その実行に必要な一次計算とポスト処理を連成・連携させる手法の開発を行う。この点に新規性がある。さらに、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、理論的および応用的な観点からも難しい問題であり、安定で高精度な手法の確立とその実用化が強く望まれている。

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で利用されていたが、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、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

これまでの研究で主に OpenFOAM の 2 次元圧縮性 LES を用いて以下の項目について明らかにした。

(1) エアリード楽器の解析

2 次元小型エアリード楽器のモデルを用いてエアリード楽器の発振の再現に成功し、さらに、エアリード楽器の基本特性の再現(ジェットの流れと発振周波数の再現)に成功した。また、粗いメッシュではあるが 3 次元モデルの解析にも成功している。楽器の基本特性の再現に成功

したのは世界的にも初めてである。

(2) Howe のエネルギー推論

圧縮性 LES と音響ソルバー FDTD を組み合わせ、Howe のエネルギー推論を用いた 2 次元モデルの解析に成功し、音響的なエネルギーが唄口のジェットのエッジに近い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 のエネルギー推論をもちいた実験的評価や Howe の理論的な予測とも一致する。

(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 ソルバーで移動境界問題が扱えるように改良した。これにより、音孔上部のパットを動的に移動させることに成功した。現在、音孔の完全な開閉を行うために必要な、トポロジー変化を伴うメッシュの切り替え時に発生する問題について解析を進めている。開発したソルバーを用いると振動する固体から発生する音波の再現が可能であり、スピーカー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を説明することに成功した。

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、フットはヘルムホルツ共鳴器の役割を果たし、その周波数を適切に調整すると、図 3 に示すように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。この結果は、学術論文 3 に示すように、英文論文誌に投稿し査読過程にある。

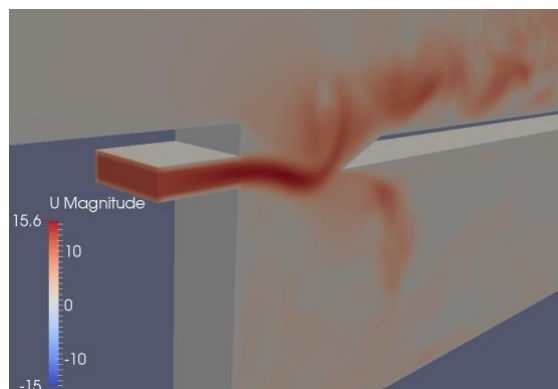


図 1 3次元小型エアリード楽器の解析結果

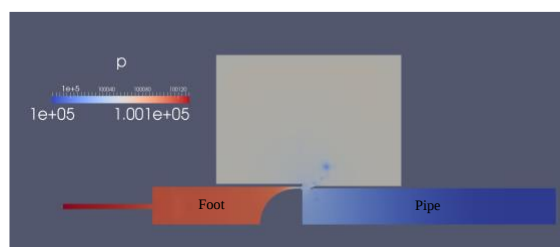


図 2 オルガンパイプの解析結果

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

小型エアリード楽器の LES の計算に必要な 3 次元モデルを作成し計算を行った。そのメッシュ数は 3 千万を超える。数値計算の結果を図 1 に示す。全ての 1 次データerを出力することは不可なので内部処理をした 2 次データerを出力する方法を開発し動作確認をした。現在、Howe のエネルギー推論に必要な 3 次元音響ソルバー FDTD の並列化の問題を検討中である。

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。フットとは、図 2 に示すような管体

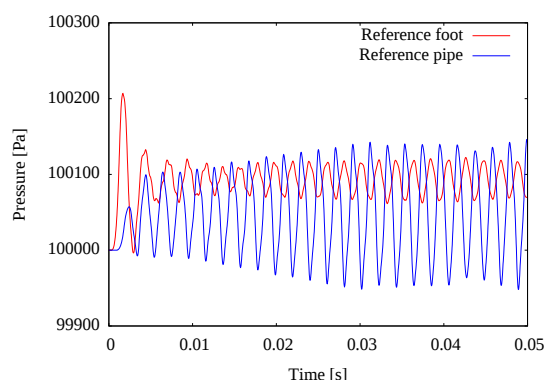


図 3 フットと共鳴管の音圧変化

(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。図 4

にその結果を示す。ジェットの流れが早くなるに従い、発生している音圧が強くなり、波長が短くなる。 $U=3.3\text{m/s}$ と $U=6.7\text{m/s}$ では、ジェットの波形より基準振動モードであることがわかるが、 $U=13.7\text{m/s}$ では、ジェットの波形より倍モードの発振が起きていると考えられる。圧力場が上下反対称になっていることから、2重極的な発振が起きていることがわかる。さらに、長時間の DNS 解析を行うことで、ジェットの速度と音圧の関係を定量的に議論できることが可能になる。さらに、Lighthill の音響的類推理論に用いて流体音発生メカニズムの厳密な解析を行うことも可能であると考えられる。

図には示さないが、LES の計算の計算を行うと、流速が上昇しても倍モードの発振は起きない。このことから、LES は高レイノルズ数領域でも計算が破綻することはないが、その精度には問題があることが分かった。今後、LES の精度を考える上で、重要な成果が得られたと考えられる。

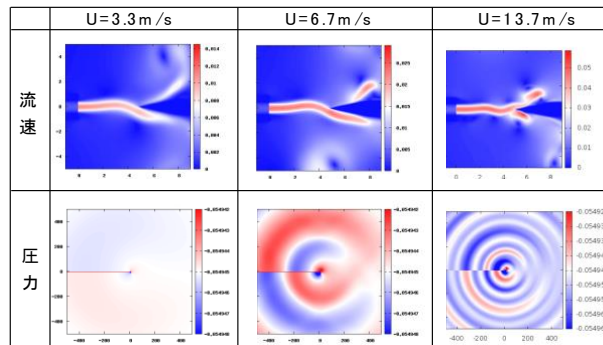
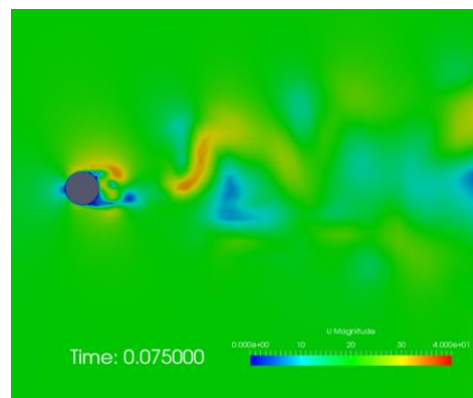


図 4 DNS を用いたエッジトーンの計算

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。その結果を図 2 に示す。速度分布を見ると、円柱の後方に交互にカルマン渦が発生していることがわかる。圧力分布を見るとほぼ上下反対称になっているので 2 重極的な発振が起きていることがわかる。今後、低レイノルズ数領域の計算を行い DNS との比較を行う予定である。

(a)



(b)

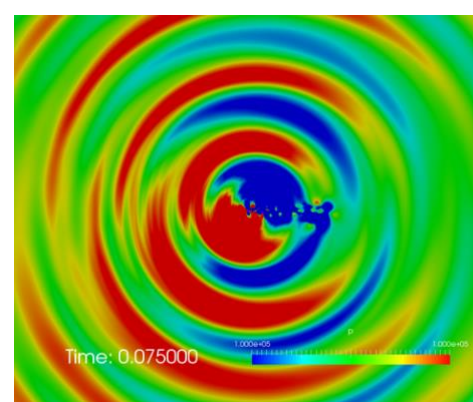


図 5 LES を用いたエオルス音の計算
(a) 流速分布 (b) 圧力分布

(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な OpenFOAM の rhoPimpleDymFOAM のバグの修正を行い、音孔を閉じる解析に成功した。解析に用いたモデルを図 6 に示す。左端から周期的な流速 U を与え、共鳴音場を作る。基音の圧力分布は、中央の音孔部分で節になる。計算の結果を図 7 に示す。図 7(a) に示すように、音孔下部の圧力は、音孔が閉じる寸前に急速に上昇しているが、音孔が閉じた後は定常的な振動に変化する。音孔が閉じる瞬間には、メッシュのトポロジーが変化するが、圧力波形はスムーズに変化している。図 7(b)、(c) に音孔が閉じる直前と直後の流速分布を示すが、ほぼ同じ分布となり、音孔の開閉の計算に成功していることがわかる。現在、3 次元モデルの作成を行っている。

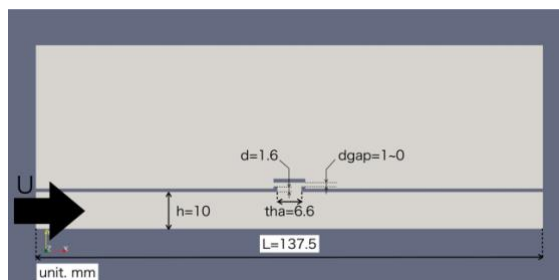
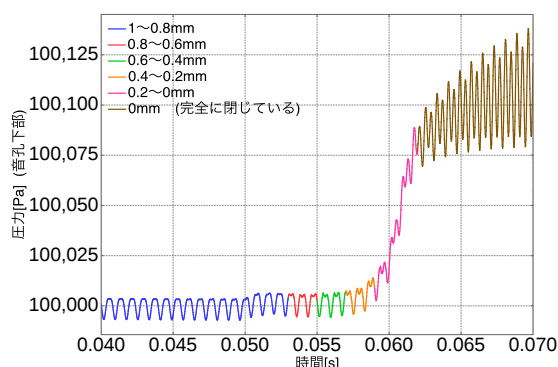
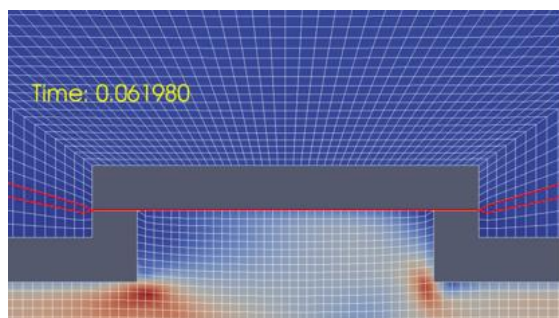


図 6 音孔のモデル

(a)



(b)



(c)

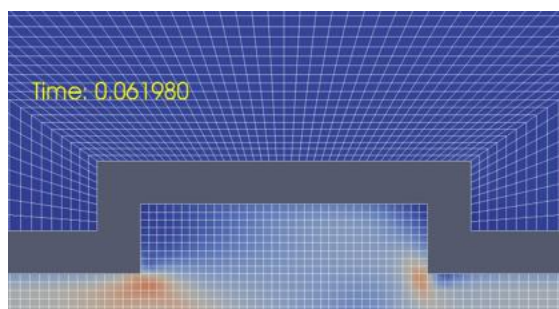


図 7 音孔のモデルの計算結果 (a) 音孔下部の圧力変化 (b) 流速分布：閉じる直前 (c) 流速分布：閉じた直後

音孔モデルの流体音響数値計算と関連した課題として、木管楽器の音孔の位置と発振周波数の関係を遅延方程式モデルを用いて解析した。図 8 に 2 つの音孔がある円筒パイプのモデルを

示す。これは、最も簡単なクラリネットのモデルである。左端から入射した音波は右端の開口端や 2 つの音孔で反射して戻って来るので、3 つのループを持つ遅延系と見なせる。左端に音波を作り出すリードバルブを取り付けると楽器を発振させることができる。リードバルブは非線形振動子であり、遅延ループとの相互作用により発振するので、この系の発振特性は極めて複雑である。ループ $Loopf$ を固定し、 $Loop1$ と $Loop2$ を変えた時の発振モードを図 9 に示す。3 つのループの比が整数になるときが重要である。それを、

$$Loop1: Loop2: Loopf = m_1: m_2: m_f \quad (1)$$

とすると、奇数比の場合は、その近傍で m_f 次のモードが発振するが、それ以外の場合は、そのループ比の近傍で高次モードの発振が起きる。一般に、3 つのループが、関係式

$$n_1 Loop1 + n_2 Loop2 + n_f Loopf = 0 \quad (2)$$

満たす直線で、奇数比の点を含めない場合は、その直線に沿って高次モードの発振が起きる。特に、 $Loop1 + Loop2 = Loopf$ となる場合、すなわち図 9 で -1 の傾きを持つ対角線の場合には極めて強い高次モードの発振が起きる。この成果は、学術論文 1, 2 で発表済みである。

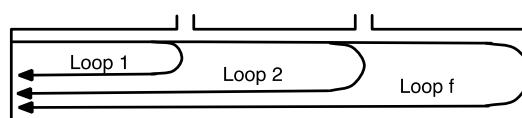


図 8 2 つの音孔がついた閉管

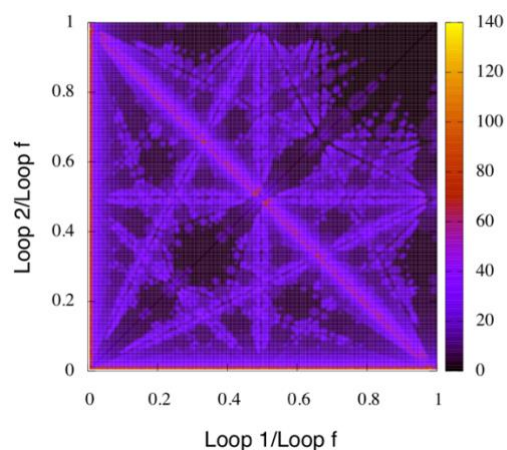


図 9 遅延方程式の解析で得られた発振モード

(4) ポートノイズの 3 次元大規模解析

OpenFOAM の rhoPimpleDymFOAM のバグの修正を行った。図 10 はバスレフポートをモデル化したヘルムホルツ共鳴器である。スピーカーを模擬するために左端の固体面の一部を振動させて、共鳴音場を再現することに成功した。音響ソルバー FDTD においても同様な音場が再現されているので、これらから Howe のエネルギー推論を使って、音場の生成を評価することが可能になった。

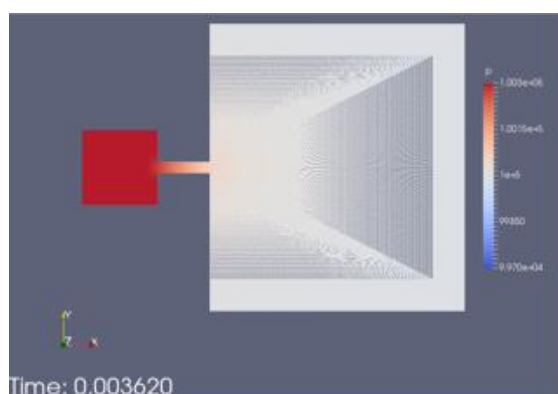


図 10 バスレフポートのモデル

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

今年度は、主に 2 次元モデルの解析を中心に行ってきた。次年度以降は、DNS を除く課題で 3 次元計算を目指す。圧縮流体の DNS では、空間的な陰解法を用いるために現状ではメモリー共有型でないと効率的な並列化が不可能であり、1 ノードでの計算に限られ、超大規模計算ができない。そこで、当面は 2 次元計算を行うが、メモリー分散型での陰解法の効率的な並列化については検討を続ける。

管楽器の発振状態を流体計算で再現するためには、ミリ単位の渦の再現が必要であり、メッシュのサイズの最低値は 0.1 ミリ以下になる。そのため、数十センチの大きさを持つ小型楽器の 3 次元モデルであっても数億のメッシュになる。このような計算を本格的に行うには、2018 年 1 月から稼働した九大のサブシステム IT0-A 規模の計算機が必要になる。そこで、今年度は、次年度以降の本格的な 3 次元計算に向

けての 2 次元モデルを用いた各課題の下準備を主に行った。IT0-A が稼働後には、3 次元計算の試行的な研究も行った。次年度の課題ではあるが、1 億 2 千万のメッシュを持つクラリネットマウスピースのモデルの試行的な計算には成功している。3 次元計算の結果をそのまま出力すると 100TB を超えてしまう。そのようなデータを全て出力することは非現実的であり、たとえできたとしても、画像化等のポスト処理を行うことは困難である。そこで、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ことに成功した。これにより、次年度以降の本格的な 3 次元計算の目処がついた。各課題の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

Howe のエネルギー推論の計算には、LES による流体計算と FDTD による音場の計算が必要である。対象となる小型エアリード楽器の LES による計算には成功しているが、音場計算に必要な FDTD は自前のコードのために、3 次元計算に必要な効率的な並列化の手法を開発する必要がある。現在、OpenMP を用いた並列化について検討している段階にある。また、可能であれば OpenMPI を用いた並列化についても今後検討する。

フットを持つオルガンパイプは比較的大きな楽器であるので、単純に 3 次元化すると数 10 億のメッシュになる。現在、メッシュ数の低減について検討している。また、ヘルムホルツ共鳴器を持つオカリナの計算についても検討を進めている。

(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、最も重要な目標であった DNS を用いたエッジトーンの再現に成功した。特に、ジェットの流れが比較的早い領域で DNS の計算が可能になったことは大きな収穫で

ある。これにより、エアリード楽器の演奏に使われる比較的流速が早い領域でのエッジトーンの性質を明らかにできると考えられる。今後長時間の解析を行うことで、ジェットの数値と音圧の関係性を定量的に議論することが可能になり、さらに、**Lighthill** の音響的類推理論に用いて流体音発生メカニズムの厳密な解析を行うことも可能であると考えられる。また、DNS を用いた 2 次元小型エアリード楽器の再現も可能であると考えられる。

エオルス音の計算を正確に行うためには、中心の円柱に対し、千倍程度の大きさを持つメッシュを用意する必要がある。これは、一様流中の音波を減衰させるためである。今年度は、2 次元モデルの LES の計算に成功した。今後は、低レイノルズ数領域における DNS の計算と比較し、LES の精度について検討する。また、3 次元計算の可能性についても検討する。

(3) 音孔のトポロジー変化を伴う動的解析

OpenFOAM の rhoPimpleDymFOAM のバグの修正を行い、音孔を閉じる解析に成功した。今後は、3 次元モデル解析を行い、音孔の開閉に伴う渦と異音の発生の問題について検討する。

多重遅延系の計算では、3 つの遅延を持つ系の解析に成功している。今後は多重遅延系の解析を行う予定である。それに伴う並列処理について検討する。

(4) ポートノイズの 3 次元大規模解析

OpenFOAM の rhoPimpleDymFOAM のバグの修正を行い、ヘルムホルツ共鳴器の計算に成功した。今後は、3 次元モデルの解析を行う予定である。また、ポートノイズ発生メカニズムの解明のために Howe のエネルギー推論の計算を行う予定である。そのためには、FDTD を用いた音場の計算が必要である。エアリード楽器でも Howe のエネルギー推論の計算を行うので、その問題と合わせて、3 次元計算に必要な FDTD の効率的な並列化の手法を開発する。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

1. K. Takahashi, T. Kobayashi, ‘Mode Selection Rule for Three-Delay System’, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 124005 (2017)
2. 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)
3. 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’, submitted to Acoust. Sci. & Tech.

(2) 国際会議プロシーディングス

1. S. Iwagami, T. Kobayashi, K. Takahashi, Y. Hattori, ‘Fundamental Mechanism of Fluid-Acoustic Interaction in Edge Tone’, Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2017), pp. 10–11.

(3) 国際会議発表

(4) 国内会議発表

1. 高橋公也, 小林泰三, 「2 重遅延系の非適合条件近傍のモード選択則とファレイ数列」 23pJ24-2, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大学
2. 高橋公也, 小林泰三, 「非分散極限における 2 重遅延系のモード選択則」 23pJ24-1, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大学
3. 小林泰三, 若狭大輝, 岩上翔, 高見利也, 高橋公也, 「木管楽器の音孔と移動境界 III」, 24aPS-79, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大学
4. 横山博一, 小林泰三, 高見利也, 高橋公也, 「圧縮性 LES を用いたエオルス音の流体音響解析」 24aPS-78, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大学
5. 桑原拓也, 松清一樹, 岩上翔, 小林泰三, 高

見利也, 高橋公也, 「バスレフポーツピーカーのポートノイズの流体音解析 II」 24aPS-77, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大学

6. 岩上翔, 小林泰三, 高見利也, 服部裕司, 高橋公也, 「エッジトーンの基礎問題の流体音響解析 III」 24aPS-76, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大学

7. 立石修平, 堤元気, 小林泰三, 高見利也, 高橋公也, 「オルガンパイプの発音機構におけるバックチャンバーの役割」 23pJ25-5, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大学

8. 岩上翔, 小林泰三, 服部裕司, 高橋公也, 「エッジトーンの DNS を用いた解析」 第 5 回 非線形の捉え方, 2018 年 3 月, FIS セミナーハウス 大分県由布市

(5) その他（特許, プレス発表, 著書等）

1. 高橋公也, 「管楽器の数理」 数理科学 No. 651, 研究室の窓 pp. 69-76