

12-NA09

## 移動境界問題及び連成計算の大規模流体シミュレーションと動的負荷分散の評価

高橋公也（九州工業大学）

概要 本研究課題は、九州大学の超並列計算機にインストールされているフリーの大規模解析ソフトウェア OpenFOAM をもとに大規模な並列計算における移動境界問題および連成計算を効率的に実行するソルバーを開発し、効率的な計算に必要なソルバー間負荷分散の評価を行うことを目的とする。対象として、流体音の問題として興味深いエアリード楽器を取り上げる。具体的な課題として、1) 管長の変化する楽器のシミュレーション、2) 音孔の開閉とピッチの変化の再現、3) 流体と音波の相互作用の解析、4) 遠方音場の再現の 4 つの課題に取り組んだ。課題 1 では、必要なソルバーの開発を行い、2D モデルで管長の変化に伴うピッチの変化を再現した。課題 2 では、音孔が開いた状態での音場の再現に成功し、動的に音孔を開閉する移動境界問題に取り組める段階にある。課題 3 では、数種類のアプローチを提案し、一部の方法は具体的に計算が可能であることを示した。課題 4 では、遠方音場の再現に必要な音響ソルバーの開発に成功し、流体ソルバーとの連成計算の方法を検討している段階にある。

### 1. 研究の目的と意義

本研究課題は、九州大学の超並列計算機にインストールされているフリーの大規模解析ソフトウェア OpenFOAM をもとに大規模な並列計算における移動境界問題および連成計算を効率的に実行するソルバーを開発し、効率的な計算に必要な動的メッシュを用いた時の負荷分散の評価を行うことを目的とする。対象として、流体音の問題として興味深いエアリード楽器を取り上げる。一般に、大規模な流体計算では、分散メモリ形式の並列計算機であっても、領域分割を適切に行うことによって、かなりの並列化効率が得られることが分かっている。これによって幅広い分野での応用シミュレーションが可能になりつつある。しかし、本研究で取り扱う様な複雑な形状を持つ楽器を取り扱う場合、複雑な境界条件を詳細に表現するための非構造メッシュの導入が必要となる。さらに、遠方音場の再現には、流体音源とそこから生成される音場の連成解析が必要である。楽器の複雑な境界条件のもとで時間的に変化する流体音源と音場の連成解析を効率的におこなうためには、非構造メッシュを動的に変化させる手法の開発が必要である。

本研究では、前年度の研究課題「移動境界問題

の大規模流体シミュレーションと動的負荷分散の評価」を継続発展させ、移動境界問題の計算手法を確立し、2次元から3次元へと発展させ、並列化規模を大きくした場合の負荷分散の最適化について検討して行く。さらに、流体音源から遠方音場を再現するための連成ソルバーの開発を行い、その精度を評価し、大規模並列シミュレーションにおける効率化の検証をする。

自由境界問題や移動境界問題は、理論的な観点からも長年にわたって多くの研究がされて来ているように、応用数学的にも困難な部分を含んだ難しい問題である。しかし、工学的な応用を見込んだ多くのシミュレーション分野からは、高精度化のための動的メッシュ生成や物体と流体との相互作用を記述するための移動境界問題は、非常に重要な技術的な問題であり、これらを既存のアルゴリズムや手法をベースにいかにして安定に高精度に実用化するかが要求されている。また、航空機や高速列車などの流体騒音の問題では、その遠方音場を再現するためには、流体と音場の連成解析が必要とされる。流体の運動とともに変化する音源を的確に捉え音響ソルバーへのマッピングを効率的に行うためには、動的メッシュの生成やその最適化の問題を避けて通る事は出来ない。

一方、神戸に導入されつつある理研の次世代スーパーコンピューターのように、これまでとは質の異なる大規模実行を想定することも可能になりつつある。本研究課題で行う様な大規模な流体シミュレーションの高精度化を目指す場合、メッシュ数を増やす代わりに並列実行効率を上げて処理時間を低減する事が必要不可欠である。しかし、複雑な形状に適応した非構造メッシュを並列化したときの負荷分散最適化の万能な手法はなく、それに関連したハードウェア的な安定性の問題とともに現在計算機科学の重要な問題として広く研究されている。本研究課題で扱う対象は、計算負荷自身が動的に変化して行く場合を想定しているため、単に与えられたタスクを静的に効率よく配置するだけでは不十分であり、より困難な問題である。次世代の超大規模並列計算機でシミュレーションを実行する場合の堅牢性の観点からも、時々刻々変化するタスクの状況に応じた動的な負荷分散を実現するようなシステムの構築が望まれている。このような意味においても、本研究は、計算科学と計算機科学の領域にまたがる、挑戦的な研究課題となっている。

## 2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

### (1) 共同研究を実施した大学名と研究体制

九州大学

### (2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

### (3) 当公募型共同研究ならではの事項など

情報基盤センターに限らず一般の研究者が身近に利用するPCにおいても、16コア程度のCPUが搭載された計算機が普及しはじめ、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、メモリ分散型クラスタを利用した計算においては、特に、移動境界問題や連成解析における動的なメッシュ表現を効率的に表現・分割する方法は、確立されていない訳ではない。したがって、本研究課題で扱うような実シミュレーションコードの評価と動的な効率化手法の研究が、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動的な負荷分散の効果を評価することは、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。このような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。

## 3. 研究成果の詳細と当初計画の達成状況

### (1) 研究成果の詳細について

前年度開発した、OpenFOAM で動く移動境界用圧縮流体 LES ソルバー rhoPisoDyMFoam を用い小型エアリード楽器のシミュレーションを行い、以下に述べる4つの課題について計算方法の開発および解析を行った。

3つの課題、1) 管長の変化する楽器のシミュレーション、3) 流体と音波の相互作用の解析、4) 遠方音場の再現、に用いる2Dモデルを図1に示す。将来扱う3Dモデルは、このモデルに10mmの厚みをつけたものである。図2に解析に用いたメッシュの全体像を、表1にメッシュのパラメータを示す。課題2) 音孔の開閉とピッチの変化の再現では、右端が開き、管体に音孔を開けたモデルを用いる。研究成果の詳細を以下に示す。

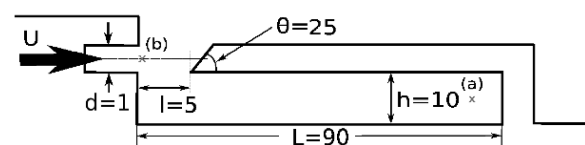


図 1 小型エアリード楽器のモデル（長さの単位は mm、角度の単位は degree）。

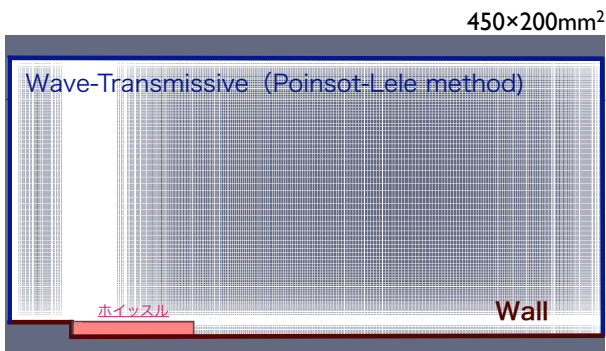


図 2 メッシュの全体図

表 1 メッシュのパラメータ

	Points	cells	faces
2D	158,762	78,492	314,856
3D	4,048,431	3,924,600	11,896,692

### 1) 管長の変化する楽器のシミュレーション

左端のノズルから一定の流速(12m/s)のジェットを注入し、0.03-0.05s の間に管体長を 90mm から 81.63mm に変化させるシミュレーションを行った。理論的には、この変化によりピッチが半音上がることが期待される。図 4 (a)に、管内の観測点 (a) (図 1) における圧力の変動を、図 4 (b)に、そのパワースペクトルを示す。圧力変動を見ると規則的で強い音波が発生していることがわかる。パワースペクトルを見ると、移動前(0-0.03 秒)と移動後(0.05-0.08 秒)で周波数が 781Hz から 826Hz に変化したのが確認できた。元の音を X とおくと、半音高い音は、

$$X^\# = X \times 2^{1/12} \quad (1)$$

となるので、X=781Hz の場合  $X^\#=827\text{Hz}$  となり、解析から求めた値 826Hz に極めて近く、予想通り半音高い値が得られた。これらの結果より、我々の開発した移動境界用圧縮流体 LES ソルバーはほぼ正確に機能していることが分かる。

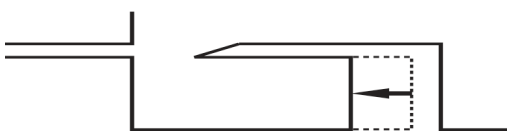


図 3 管長の変化する楽器

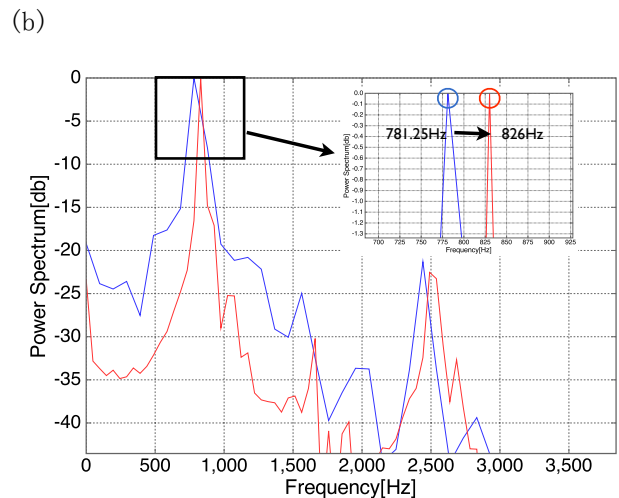
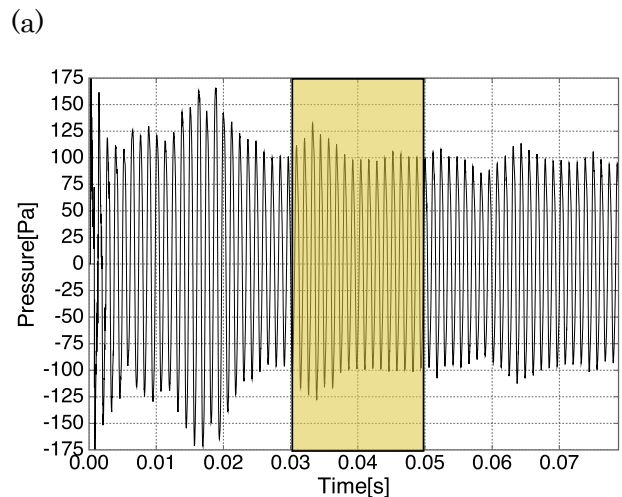


図 4 管内の圧力 (a) 圧力の時間変化 (b) 圧力のスペクトル (青：移動前，赤：異動後)

### 2) 音孔の開閉とピッチの変化の再現

音孔の開閉によるピッチの変化を調べる為に、右端を開いたモデルを用いる。図 5 (a) (b)は音孔を閉じたモデルのシミュレーションで得られた圧力分布と流速分布である。管内に強い音場が作られ、共鳴発振状態にあることが分かる。図 6 (a) (b)および図 7 (a) (b)に音孔を開けた場合の圧力分布と流速分をそれぞれ示す。図 6 は、音孔上方のパッドが近い場合、図 7 は、パッドが遠い場合である。どちらの場合も共鳴発振状態にあることが分かる。図 8 に、パッドの距離による周波数変化を示す。パッドの距離が 5mm 以上の場合には、周波数はほぼ一定値を取るが、パッドの距離が 3mm 以下になると周波数が急激に下がり音孔を閉じた場合に近づいて行くのが分かる。この結果は、楽

器の実験結果を定性的にではあるが再現している。(a)

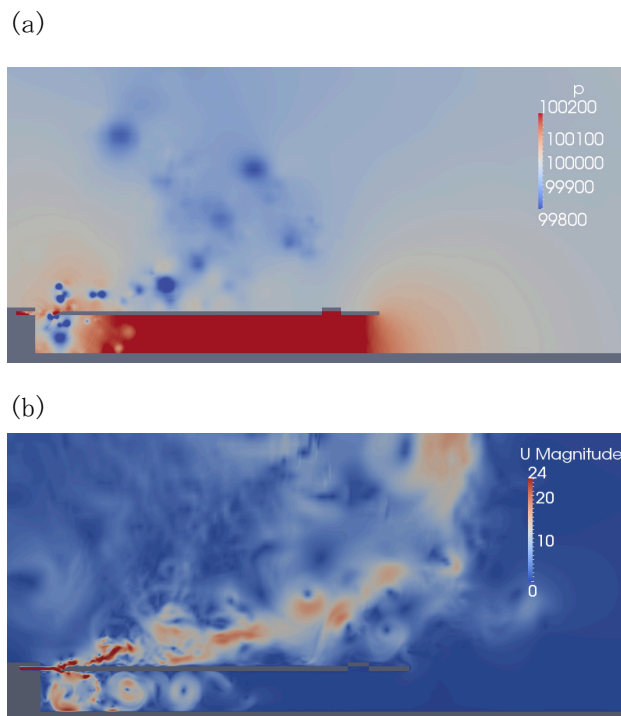


図 5 開口端を持つ楽器の音孔を閉じた場合のシミュレーション (a) 圧力 (b) 流速

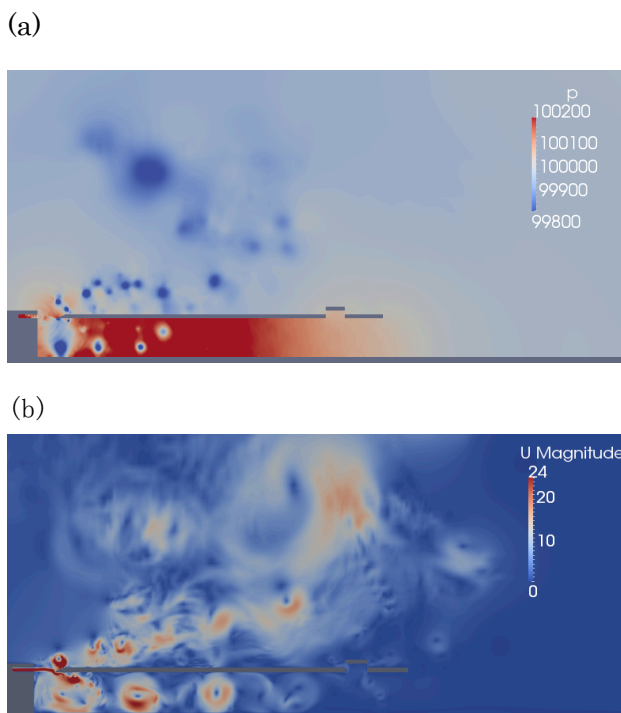


図 6 音孔を開いた楽器のシミュレーション (パッドが近い場合) (a) 圧力 (b) 流速

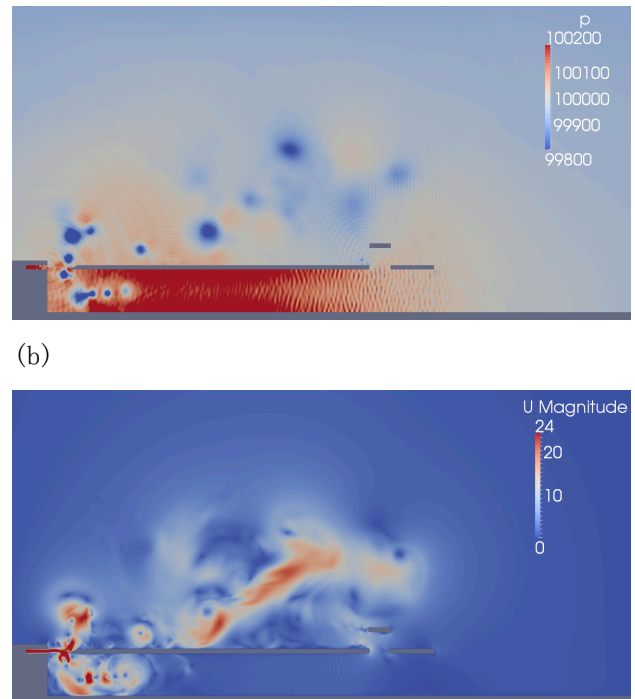


図 7 音孔を開いた楽器のシミュレーション (パッドが遠い場合) (a) 圧力 (b) 流速

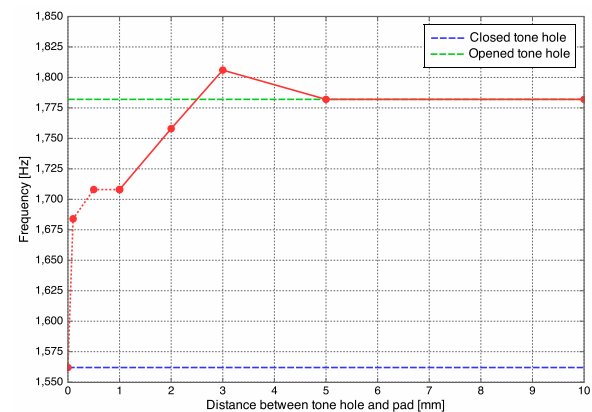


図 8 パッドの距離による周波数の変化

### 3) 流体と音波の相互作用の解析

エアリード楽器の音源は、歌口を横切るジェットから発生するエッジトーンと呼ばれる流体音である。流体音の発生のメカニズムを解析するためには流体と音の相互作用を調べる必要がある。流体と音の間のエネルギー変化は、Howe によって与えられた以下の式で評価できると考えられている。

$$\Pi = \rho_0 \int (\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{v}) \cdot \boldsymbol{u} \, d\boldsymbol{r} \quad (2)$$

ここで、 $\boldsymbol{v}$  は流体の速度、 $\boldsymbol{\omega}$  は渦度、 $\boldsymbol{u}$  は音波の粒

子速度である。したがって、この式を計算する為には圧縮流体の速度場から音波の粒子速度を分離する必要があるが、数値計算に向けた適切な分離法はまだ確立されていない。ここでは、図 9 に示すような近似的な方法を用いる。まず、左上の図に示すように、圧縮流体ソルバーを用いジェットで駆動した楽器のシミュレーションを行い。管の右端で音場のデータを採取する。次に、左下の図に示すように、そのデータを元に右端を音響的に駆動し管内の音場のみを再現する。これにより、歌口近傍の流体の速度  $v$  および音波の粒子速度  $u$  が近似的に求まる。これらのデータから Howe の評価式(2)は計算可能である。

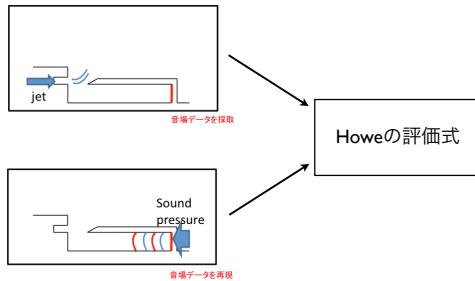


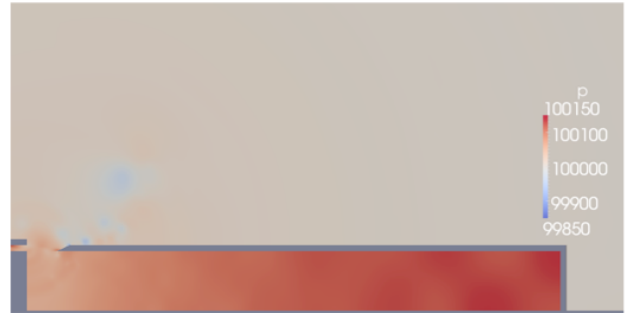
図 9 Howe の評価式の計算方法

音場の再現には圧縮流体ソルバーをそのまま使う方法と音場の再現に特化したソルバーを使う 2 つの方法が考えられる。また、音場を駆動する方法（音源）も、圧力駆動、流速駆動、駆動端を振動させる方法（仮想スピーカー）などが考えられる。さらに進んだ方法としては、Lighthill の音源を数値的に求め Lighthill の方程式を用いて音場を再現する方法等も考えられる。

ここでは、最も容易な圧縮流体ソルバーを用い流速駆動により音場を再現した場合を示す。図 10 (a)(b)は、ジェットによって駆動されている楽器の圧力場と流速場を示す。図 11 (a)(b)は、このデータを元に管の右端を流速駆動して再現された音場である。圧力場を見ると強い音場が再現され、流速場を見るとジェットがないにも関わらず歌口近傍に比較的大きな流速場（音響的な粒子速度）があることがわかる。特に、エッジ近傍には強い流速が見られるが、詳細な解析によると音場がエッジに衝突することにより流体的な速度場に変化

し渦度を持っていることが分かる。したがって、再現された場は完全な音場ではなく近似的なものである。

(a)



(b)



図 10 ジェットで駆動された楽器のシミュレーション (a) 圧力 (b) 流速

(a)



(b)



図 11 圧縮流体 LES ソルバーで再現された音場 (a) 圧力 (b) 流速



図 1 2 は、上記の方法によって再現された圧縮流体の流速と音場の粒子速度を使って計算した Howe の評価式(2)の歌口近傍の分布を示す。図中の矢印は、再現された音場を表す。ジェットに沿って強い分布が見られ、そこで流体からの音波の発生および音波から流体への変化が起きていることが分かり、先行研究の近似理論による予測や、近年行われている Howe の評価式の実験データを用いた評価結果と定性的には一致する。しかし、時間平均で見ると、音の発生よりも吸収の方が勝り、音が生み出されていない結果が得られた。ところが、同様の計算をより形状が簡単な流体騒音のモデルシステムで計算すると、音波が正しく再現された。これは、楽器の歌口付近の形状が複雑なために、本来音場にはない渦などの発生により、正しく音場が再現されていないためと考えられる。

そこで、我々は別の方法として、音響ソルバーを用いて、音場を再現する方法を検討している。図 1 3 は、音響ソルバーを用い楽器の右端を圧力駆動した結果である。若干不安定ではあるが管体内に強い音場が再現されていることが分かる。ここで再現された音場がなぜ不安定になるかの検証が今後必要になる。より正確な音場の再現するためには、次の項目で述べる Lighthill の理論に基づいて音場を再現する方法があるが、数値的に実行することは容易ではない。

さらに、純理論的に流体の圧縮成分の流速を予測しそれを音響的粒子速度と定義する方法もある。まず、圧縮成分のスカラーポテンシャルを  $\psi$  とする。これは、圧縮流体の流速  $v$  とすると、以下の式を解く事で得られる。

$$\Delta\psi = \text{div}v \quad (3)$$

これより、音響的粒子速度  $u$  は、

$$u = \text{grad}\psi \quad (4)$$

となる。この方法は、理論的には最も正確な方法であるが、微分及び積分を数回繰り返すので数値的に十分な精度を得るのが難しいという弱点がある。今後はこれらの方法を比較検討し Howe の評価式のより正確な再現を目指す。

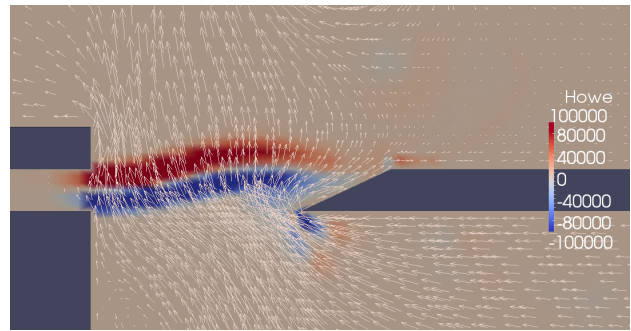


図 12 Howe の評価式の計算結果

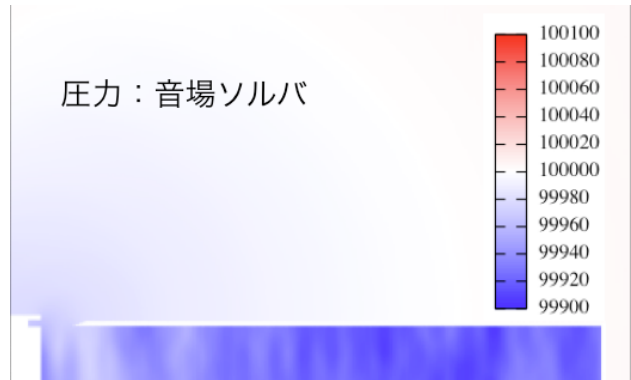


図 13 音響ソルバーで再現された音場（圧力）

#### 4) 遠方音場の再現

Lighthill の理論よると流体音源から出る音波の方程式は、

$$\text{音波の波動方程式} = \text{Lighthill の波源} \quad (5)$$

の形で書かれる。したがって、図 1 4 に示すような手順で、Lighthill の波源を計算し音響ソルバーにその波源を組み込めば、原理的には音場を再現することが可能である。しかし、実際には流体音源の分布は極めて複雑なため、再現された音場の精度の検証が必要である。音響ソルバーを構築に成功し、Lighthill の音源を取り込む方法の検討段階にある。また、遠方の音場の再現には、波動方程式を直接解かず Green 関数を用いる方法が有効である。この方法についても現在検討中である。



図 14 遠距離音場の再現方法

## (2) 当初計画の達成状況について

各研究項目に於ける、当初の研究計画と達成状況は以下の通りである。

### 1) 管長の変化する楽器のシミュレーション

**研究計画：**圧縮流体用 LES で機能する移動境界ソルバーを用い管体長の変化する 3 次元のエアリード楽器のシミュレーションを行い、ピッチの変化が再現可能か確認する。楽器の複雑な境界条件の変化を表現するためには動的な非構造メッシュが必要となる。動的な非構造メッシュの並列化の効率を上げるにはどのような負荷分散が必要かを検討する。

**達成状況：**2 次元モデルを用いて管長の変化にとともなうピッチの変化の再現に成功している。3 次元モデルを用いて並列化の効率や負荷分散の必要性を検討している段階である。

### 2) 音孔の開閉とピッチの変化の再現

**研究計画：**楽器の音孔が開いている場合の 3 次元シミュレーションを行い、所望の音が発振するか確認する。さらに、音孔開閉（境界条件のトポロジ的な変化）を再現可能なソルバーの開発の検討を行う。

**達成状況：**2D モデルを用い音孔が開閉される事でピッチの変化が起きることを確認した。音孔の開閉を移動境界問題として解くことは、期間中に達成できなかった。

### 3) 流体と音波の相互作用の解析

**研究計画：**Howe の評価式を用い音波と流体のエネルギー変換の評価を行う。そのためには、音波と流体を分離する必要があるが、数値データからそれを行うのは不可能である。流体的に静止した状態で、音源（スピーカー）により管体内に共鳴音場を作り出し、発振状態の音場を近似的に求める。これと発振状態の流体の流れ場の情報から Howe の評価式の評価を行う。

**達成状況：**2D モデルを用い、音場を流れ場から近似的に分離して再現することに成功し、Howe の評価式の計算を行った。具体的には、圧縮流体 LES ソルバーに流速駆動する音源を用いることでこの問題を解決した。ただし、厳密な評価に必要な計

算精度は得られていないと考えられる。

## 4) 遠方音場の再現

**研究計画：**遠方音場の再現のために、流体と音波の連成解析を行う。流体ソルバーで Lighthill の音源を計算し、それを音波ソルバーにマッピングすることで、遠方音場の再現が可能となる。音響ソルバーを開発し、圧縮流体 LES との連成計算を行う手法の開発を目指す。流体の運動とともに変化する音源を効率的に音響ソルバーにマッピングするためには、音源解析ミドルの導入が必要と考えられる。音源領域の変化に伴う計算負荷がどの程度になるかを試算し、計算精度と負荷分散を制御するアルゴリズムや実装法について検討する。

**達成状況：**音場の再現に必要な音響ソルバーの開発し、簡単な音源を用いると音場が再現できることを確認した。

## 4. 今後の展望

平成 24 年度は、本格的な 3 次元計算の準備段階となる 2 次元計算を用いた計算法の整備に費やされた。今後、本格的な 3 次元計算を行い、その効率化について検討を行っていく。各課題の今後の展望は以下の通りである。

### 1) 管長の変化する楽器のシミュレーション

移動境界用のソルバーを用いての 3 次元モデルの計算は比較的容易である。問題は、計算の効率化にある。3 次元モデルでの並列化の効率や負荷分散の必要性を検討していく。

### 2) 音孔の開閉とピッチの変化の再現

トポロジー変化を伴う移動境界問題を厳密に扱う方法はまだ確立されていない。そこで、2 次元モデルを用い、移動境界用圧縮流体 LES ソルバーを改善し、音孔の開閉（境界条件のトポロジ的な変化）を出来るだけ厳密な扱う方法を開発する。さらに、3D シミュレーションを行った場合の効率化や負荷分散の必要性についても検討する。

### 3) 流体と音波の相互作用の解析

音響ソルバーを用いて音場し、Howe の評価式をより精密に解く方法を確立する。また、前章で述べた別の方法との比較検討を行い、どの方法が精度

とコストの面で優れているかを検討する。さらに、3Dシミュレーションを行った場合の効率化の方法についても検討する。

#### 4) 遠方音場の再現

複雑な空間分布を持つ Lighthill の音源を音響ソルバーに受け渡すには、極めて精度の高いマッピング法の開発が必要である。マッピング法を検討開発し、そのときの負荷と効率について検討する。

### 5. 研究成果リスト

#### (1) 学術論文 (投稿中のものは「投稿中」と明記)

1. M. Miyamoto, Y. Ito, T. Iwasaki, T. Akamura, K. Takahashi, T. Takami, T. Kobayashi, A. Nishida and M. Aoyagi, “Numerical study on acoustic oscillations of 2D and 3D flue organ pipe like instruments with compressible LES”, Acta Acustica united with Acustica, Vol. 99, 154-171 (2013).

#### (2) 国際会議プロシーディングス

1. K. Takahashi, T. Iwasaki, T. Akamura, Y. Nagao, K. Nakano, T. Kobayashi, T. Takami, A. Nishida, M. Aoyagi, “Effective techniques and crucial problems of numerical study on flue instruments”, 21<sup>st</sup> International congress on acoustic(ICA2013), 2-7 June, 2013, Montreal, Canada, to appear in **Proceedings of Meetings on Acoustics (POMA)**.

2. K. Takahashi, S. Goya, K. Goya, C. Susaki, ” Numerical reproducibility of time-dependent motions of spatial waves in air-columns of wind instruments”, 21<sup>st</sup> International congress on acoustic(ICA2013), 2-7 June, 2013, Montreal, Canada, to appear in **Proceedings of Meetings on Acoustics (POMA)**.

3. T. Akamura, Y. Nagao, T. Iwasaki, K. Nakano, K. Takahashi, T. Kobayashi, T. Takami, A. Nishida, M. Aoyagi, “Numerical analysis of the interaction between fluid flow and acoustic

field at the mouth-opening of a flue instrument”, 21<sup>st</sup> International congress on acoustic(ICA2013), 2-7 June, 2013, Montreal, Canada, to appear in **Proceedings of Meetings on Acoustics (POMA)**.

4. T. Iwasaki, T. Kobayashi, K. Takahashi, T. Takami, A. Nishida, M. Aoyagi, “Numerical study on the function of tone holes of a recorder like instrument from the viewpoint of the aerodynamic sound theory”, 21<sup>st</sup> International congress on acoustic(ICA2013), 2-7 June, 2013, Montreal, Canada, to appear in **Proceedings of Meetings on Acoustics (POMA)**.

#### (3) 国際会議発表

1. T. Kobayashi, T. Akamura, Y. Nagao, T. Iwasaki, K. Nakano, K. Takahashi and M. Aoyagi, ” Interaction between compressible fluid and sound in a flue instrument”, IUTAM Symposium on Vortex Dynamics: Formation, Structure and Function, March 10-14, 2013, Fukuoka, Japan.

#### (4) 国内会議発表

1. 赤村高宏, 長尾友樹, 高橋公也, 小林泰三, 青柳睦, エアリード楽器の歌口付近における音と流体の相互作用 II, 日本物理学会講演概要集 68 巻 1 号第 2 分冊 2013 年第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 26-29 日, 広島大学, p. 384.

2. 合屋佳奈, 合屋沙耶, 高橋公也, クラリネットのレジスターホールの機能のモデル解析 2, 音楽音響研究会資料 Vol. 31, No. 4, 7-12 (2012).

3. 合屋沙耶, 合屋佳奈, 高橋公也, 管楽器の管内波形の再現, 音楽音響研究会資料 Vol. 31, No. 4, 13-18 (2012).

4. 赤村高宏, 長尾友樹, 高橋公也, 小林泰三, 青柳睦, エアリード楽器の歌口付近における音と流体の相互作用, 音楽音響研究会資料 Vol. 31, No. 4, 25-30 (2012).

5. 岩崎拓也, 小林泰三, 高橋公也, 高見利也, 西田晃, 青柳睦, エアリード楽器の音孔に関する流



体音数値解析, 音楽音響研究会資料 Vol. 31, No. 4, 31-36 (2012).

6. 合屋沙耶, 合屋佳奈, 高橋公也, 三木晃, 鬼束博文, 管楽器の管体内部の音波の再現, 日本物理学会講演概要集 67 巻 2 号第 2 分冊 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 18-21 日, 横浜国立大学, p. 248.

7. 長尾友樹, 赤村高宏, 高橋公也, 小林泰三, 青睦, エアリード楽器の歌口付近における音と流体の相互作用, 日本物理学会講演概要集 67 巻 2 号第 2 分冊 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 18-21 日, 横浜国立大学, p. 255.

8. 小林泰三, 岩崎拓也, 高橋公也, 高見利也, 西晃, 青柳睦, 流体音に於ける移動境界問題 III, 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 18-21 日, 横浜国立大学.

9. 高橋公也, 宮本真孝, 伊藤泰典, 岩崎拓也, 高見利也, 小林泰三, 西田晃, 青柳睦, 三次元エアリード楽器の流体音源と発振特性, RIMS 研究集会「オイラー方程式の数理解析: カルマン渦列と非定常渦運動 100 年」, 数理解析研究所講究録 1776, 100-114 (2012).

#### (5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

1. 高橋公也, 管楽器の発音メカニズムとシミュレーション, 第 8 回サイエンス・カフェ@九工大情報工学部, 2012 年 6 月 1 日.

2. 高橋公也, 管楽器はどうして鳴るか -なぜ音が出るの?- , 飯塚日新館中学校, 2012 年 7 月 5 日, 理科の特別授業.

3. 高橋公也, オルガンの音の出るしくみ, 明治学園中学校「楽器の物理学実習」, 2012 年 7 月 11 日, アルモニーサンク北九州ソレイユホール.