

11-NA12

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

高橋 公也 (九州工業大学)

概要 本研究課題は、移動境界問題を表現するための動的メッシュのもとでの流体計算の対象として、エアリード楽器や 2 成分流体のシミュレーションを問題として選び、大規模な並列計算時の並列効率を検証することを目的とする。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、動的なメッシュ生成を含む流体計算を 2 次元から 3 次元へと展開し、それに伴い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、前年度より複雑な自由境界・移動境界問題における安定性と計算精度に関しても、評価を行うこととする。これにより、現実に大規模並列シミュレーションとして利用される中での動的メッシュ表現による流体力学計算手法全般の評価を行うことが可能となる。

1. 研究の目的と意義

本研究課題は、移動境界問題を表現するための動的メッシュのもとでの流体計算の対象として、エアリード楽器や 2 成分流体のシミュレーションを問題として選び、大規模な並列計算時の並列効率を検証することを目的とする。一般に、大規模な流体計算では、たとえ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や 2 成分流体の様な複雑な界面を持つ問題を取り扱う場合、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、複雑な構造中の流れは場所によってレイノルズ数が異なりそれに合わせたメッシュの設計が必要となる。特に、2 成分流体や流れと強い音場が共存する楽器の問題では、それらの性質を考慮したメッシュの設定が必要である。その上、界面が時々刻々変化する 2 成分流体や音孔の開閉によって音程を変化させる楽器の問題を取り扱う場合には、自由境界・移動境界問題の形で時々刻々変化する状況に対応するように、動的に非構造メッシュを変化させる必要がある。このような場合、静的な負荷分散で計算負荷を均等に分散させることが極めて難しくなってくる。

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、動的なメッシュ生成を含む流体計算を 2 次元から 3 次元へと発展させ、それに伴い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、前年度よりも複雑な自由境界・移動境界問題における安定性と計算精度に関しても、評価を行うこととする。これにより、現実の大規模並列シミュレーションにおいて利用される中での動的メッシュ表現による流体力学計算手法全般の評価を行うことが可能となる。

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。

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、メッシュ数を増やし代わりに

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、6 ないし 12 コアが搭載された計算機が一般的になりつつあり、流体力学シミュレーションも並列計算機で実行されることが多くなって来ている。しかし、移動境界問題など動的なメッシュ表現を効率的に表現・分割する方法は、確立されている訳ではない。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の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

a) エアリード楽器のシミュレーション

a-1. 移動境界解析ソルバーの開発

我々の研究のベースとなる”OpenFOAM”には、数種類の圧縮性 LES ソルバーが用意されている。その中でも、亜音速またはそれ以下の流速に対応したソルバーとして rhoPisoFoam が用意され、遷音速超音速ソルバーとして sonicFoam が用意されている。また、それぞれのソルバーの中で、LES の解析に必要なサブグリッドモデルが数種類選べるようになっている。

さらに、sonicFoam に移動境界問題を取り扱う機能(dynamicMesh)を付加した、sonicDyMFoam が用意されている。しかし、rhoPisoFoam には、それに対応するものが存在しない。そこで、我々は、sonicFoam と sonicDyMFoam の違いを調べ、類似の手順で rhoPisoFoam に dynamicMesh の機能を取り込んだ rhoPisoDyMFoam の開発を行った。

まず、プログラム内で、dynamicMesh の機能を取り込むために、ヘッダーファイル motionSolver をインクルードする。これを使う事で、dynamicMesh の各機能を使えるようになる。図 1 に rhoPisoDyMFoam のフローチャートを示す。赤の部分が、新たに付け加えられた可動メッシュを取り扱う部分である。計算ルーブの前にある最初の赤い箱の motionSolver で、メッシュの移動方法等の設定が行われる。2 番目の赤い箱の mesh.movePoints() では、各ステップに於けるメッシュの移動が行われる。

OpenFOAM の処理が行われるためには、図 2 に示すようなファイル構造が必要である。ここで、我々は、親ディレクトリーを”Case”と呼ぶ事にする。Case は、<system>、<constant>、<0>の 3 つのディレクトリーに分かれる。それぞれのディレクトリーの機能の概要は以下の通りである。

<system>: 数値計算に必要なスキーム, ソルバー, 処理法の設定する.

<constant>: 計算法や時間依存しないパラメータを設定する.

<0>: 境界条件と初期時刻に於けると物理量や変動パラメータの値を指定する.

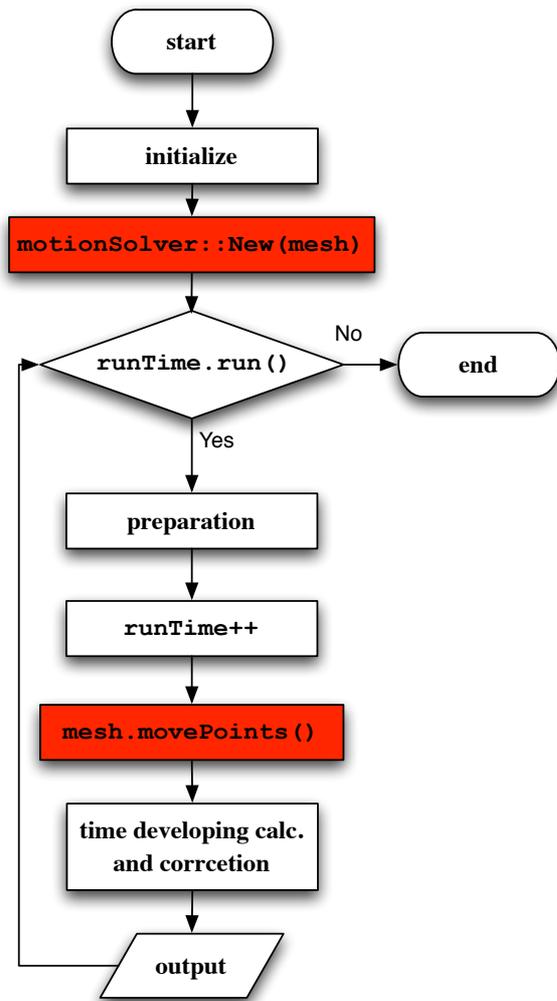


図 1 rhoPisoDyMFoam のフローチャート. 赤の部分が, rhoPisoFoam に付け加えた機能

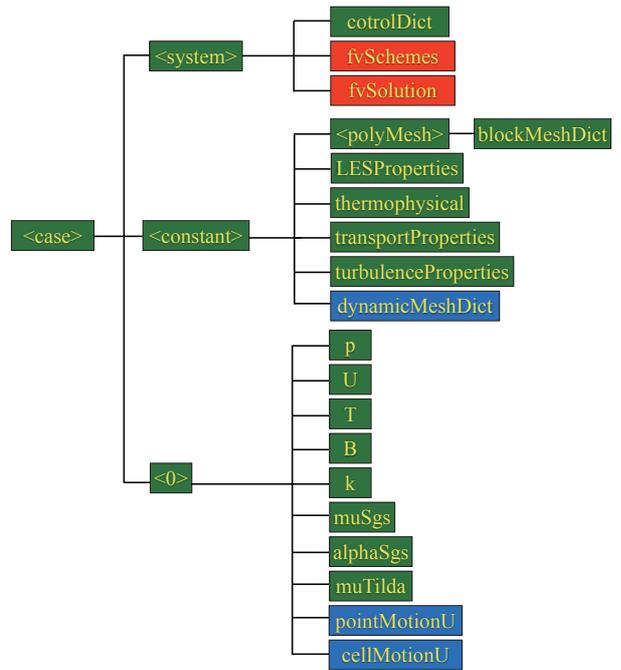


図 2 OpenFOAM の解析に必要なファイル構造

時間発展が行われると, サンプル時間毎に新たなディレクトリーが生成され, 各時刻に於ける物理量や変動パラータのファイルが生成されて行く.

rhoPisoDyMFoam の Case の構造は, rhoPisoFoam の Case と基本的に同じであるが, 幾つかの違いがある. 赤のファイルは, 書き直されたもので, 青のファイルは新たに付け加わったものである.

赤のファイルの fvSchemes は離散化スキームの設定を, fvSolution は代数方程式ソルバーの設定をするファイルである. 我々は, 移動境界に必要なスキームやソルバーをこれらのファイルに付け加えた.

新たに付け加わった dynamicMeshDict は, メッシュの動きを制御するファイルである. このファイルは, 図 1 のフローチャートの motionSolver で参照される. 動的境界の制御法は各種あるが, 図 2 では, 境界の速度を与える場合を示している. pointMotionU と cellMotionU は, dynamicMeshDict の命令従いメッシュを動かす時に必要なファイルである.

a-2. エアリード楽器の解析

開発した rhoPisoDyMFoam を用いて、楽器の移動境界問題の解析を行った。解析に用いたのは図 3 に示すような小型エアリード楽器である。表 1 は、その形状パラメータである。楽器の右端を動かすことで、楽器の管体長を変化させ、音高の変化を作り出す。具体的には、0-0.03 秒では、 $L=90\text{mm}$ に固定し、0.03-0.05 秒では、管長を線形に減少させ、 $L=0.05-0.08$ 秒では、 $L=81.63\text{mm}$ に固定する。このようにする事により、音高が半音上昇することが期待される。

図 4 に、解析に用いたメッシュの全体図を示す。縦横の大きさは $200\text{mm} \times 450\text{mm}$ で、楽器の前方と上部に十分広い空間を取っている。表 2 に、メッシュのパラメータを示す。

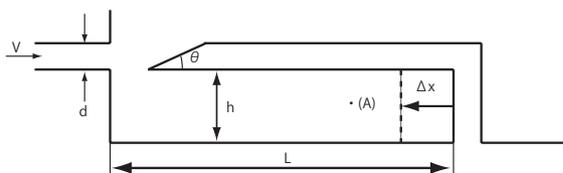


図 3 エアリード楽器の 2 次元モデル

表 1 モデルのパラメータ

pipe length “L”	Movable
nozzle height “d”	1 mm
edge angle “ θ ”	25°
mouse aperture “l”	5 mm
pipe height “h”	10 mm

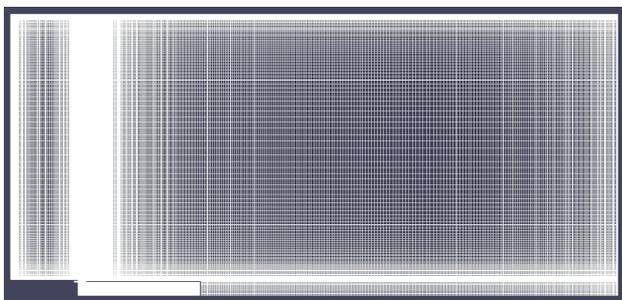


図 4 解析メッシュの全体図

表 2 メッシュのパラメータ

points	cells	faces
158,762	78,492	314,856

(a)



(b)

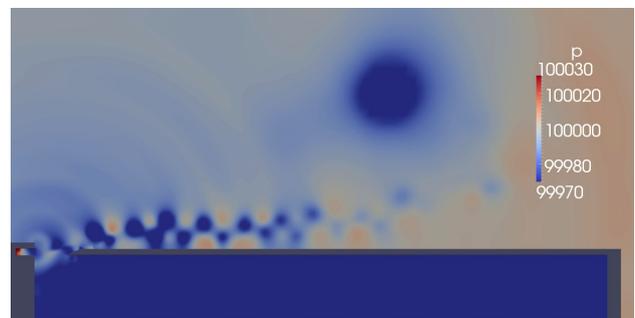


図 5 管体内の圧力分布 (a) 移動前 (b) 移動後

実際の解析では、ジェットの流れを $V=12\text{m/s}$ に固定した。これまでの解析で、この場合に最も安定な発振が得られたからである。図 5 に、移動前と移動後の圧力分布を示す。管体内部に強い負圧が発生しているのが分かる。逆の位相では、管体内部に正の強い音圧が発生する。したがって、移動前と移動後、ともに共鳴発振状態にある事が分かる。

図 6 (a) に、管体内の観測点 (A) (図 3) における圧力の変動とそのパワースペクトルを示す。極めて規則的な圧力変動が観測され、音波が発生している事が分かる。ただし、周波数の上昇が半音程度なので、この図からは、境界移動によって周波数の変化が起きているかははっきりしない。そこで、移動前 (0-0.03 秒) と移動後 (0-0.08 秒) のそれぞれのパワースペクトルを調べた。図 6 (b) に示すように、移動前の周波数が 781Hz 、移動後の周波数が 826Hz である。

元の音 X から半音高い音は、

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

となるので、 $X=781\text{Hz}$ とおくと、 $X^\#=827\text{Hz}$ 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 rhoPisoDyMFoam はほぼ正確に機能していることが分かる。

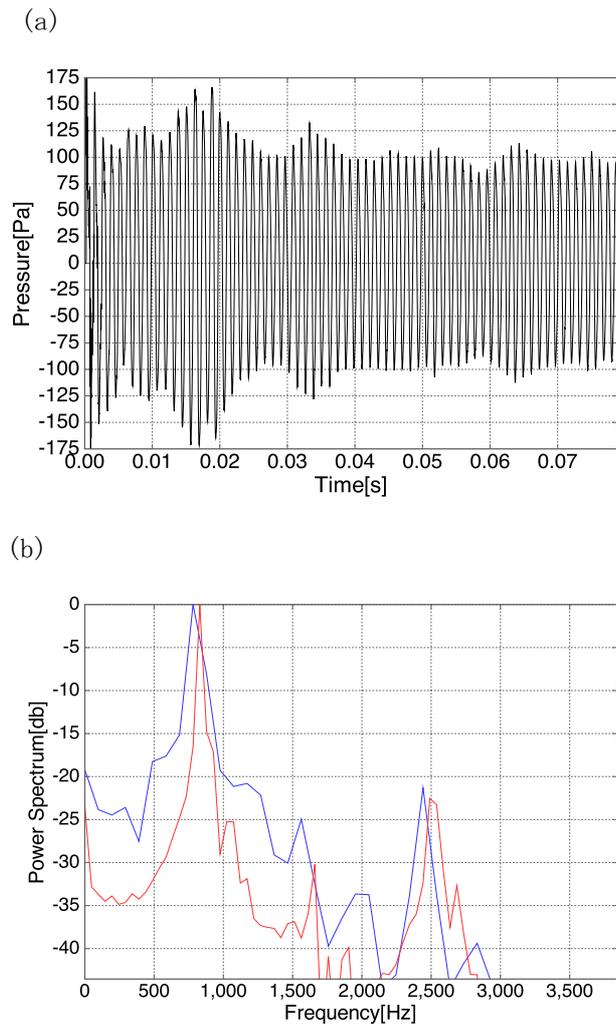


図 6 観測点 A の圧力 (a) 圧力の時間変化 (b) 圧力のスペクトル (青：移動前，赤：異動後)

次年度以降、音孔の開閉による音高の変化の再現に取り組む予定である。今年度は、その準備として、楽器の右端を開口端とし、さらに音孔を開けた 2 次元及び 3 次元モデルの解析を行い、音孔が開いた状態でも共鳴発振状態の再現が可能かをチェックした。

図 7 に、3 次元モデルの解析で得られた。圧力分布を示す。強い圧力分布が、歌口と音孔の間に見られ、右端の開口端までは達していない。したがって、音孔が開くことにより、音波の波長が短くなり、発振周波数が上昇することが確認できた。次年度以降、音孔の開閉を可能とするアルゴリズムを開発して行く予定である。



図 7 音孔をつけた 3 次元モデルでの圧力分布

エアリード楽器の解析では、音波と流体の相互作用の解析が重要になる。強い音場の中でのジェットの流れを解析する為に、図 8 に示すような単純なジェットに強い音場を加えたシミュレーションを行った。音源は底面にあり、そこから垂直方向に正弦波を発生させる。周期的な音場の影響を受け、ジェットが波打つのが確認できた。

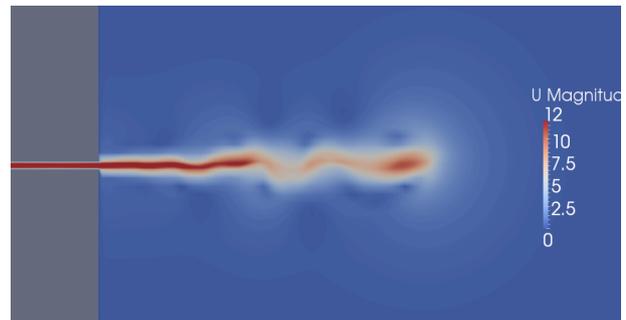


図 8 強い音場の影響を受けたジェット

a-3. 並列化効率

本格的な移動境界問題の解析には、3 次元モデルを用いる。そのためには、大規模な並列計算が必要となる。その準備段階として、移動境界を持たない 3 次元モデルの計算をした。図 9 は、rhoPisoFoam を用いて計算した 3 次元オカリナモデル (図 10) の並列化効率である。計算環境は、以下に示す通りである。

PRIMERGY RX200 S6, Xeon X5670 2.93GHz,
mpiicc v12.0.0, InfiniBand,
OpenFOAM 1.7.1, rhoPisoFoam, scotch auto

図 9 より、並列化効率は、20-30%に留まるが、計算速度は、864 コアまでほぼ線形に増加しているの、十分に並列化の効果が現れている。

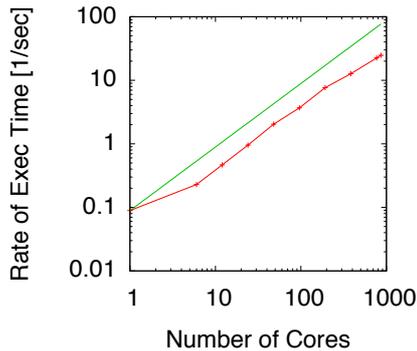


図 9 並列化効率

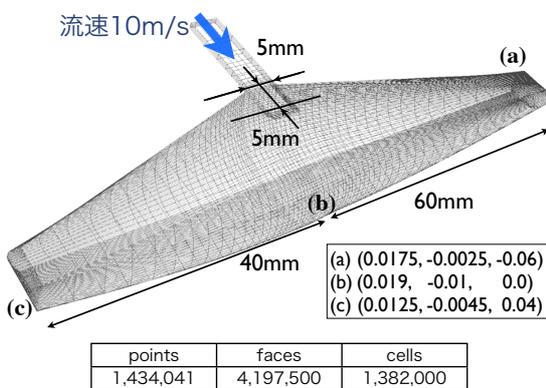


図 10 オカリナのモデル

b) 2成分流体のシミュレーション

昨年度、液滴問題の 2 次元モデルを、動的メッシュを用いた界面追跡法で計算する事に成功した。また、2 次元では、ある程度の並列化効率も得られた。今年度は、その成果をもとに 3 次元モデルに動的なメッシュ法を適用したが、現在十分な精度の結果が得られていない。3 次元では、液滴の振る舞いが複雑になる為、最適な動的メッシュの生成が難しくなるためと考えられる。

(2) 当初計画の達成状況について

当初の計画と達成状況は以下の通りである。

a) エアリード楽器のシミュレーション

[当初の計画]

1) 3 次元のエアリード楽器のシミュレーションを行い、楽器の振る舞いを再現可能か確認する。また、その場合の並列化の効率を上げるためにはどのような負荷分散が必要かを検討する。

2) 管楽器の音程を変える最も簡単な方法として、本研究では管体長を変化させるモデルの解析をおこない、移動境界問題に付随する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。

3) 将来行う音孔の開閉により音程を変えるシミュレーションの準備段階として楽器の音孔が開いている場合の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、音孔を閉じた場合と開いた場合の並列化の効率の違いを調べ、音孔の開閉を行う事で計算効率がどのように変化するかを推測する。

[達成状況]

1) (1) 研究成果の詳細について、a-3 節で述べたように 3 次元オカリナモデルを用いて 1000 コア弱まで計算スピードが線形に増加していく事を確認した。

2) a-1, a-2 節で述べたように、OpenFOAM の亜音速圧縮流体 LES ソルバー rhoPisoFoam を改良し、移動境界問題を取り扱える rhoPisoDyMFoam を作成した。また、このソルバーを管長の変化するエアリード楽器の解析に用い、音高の変化を正しく再現できることを確認した。

3) a-2 節で述べたように、音孔を開けた 2 次元および 3 次元エアリード楽器のモデルの計算を行い、運指（音孔の開閉）にあった高さの音が発振することを確認した。

4) 当初の課題にはないが、a-2 節で述べたように、ジェットに音波を当てたシミュレーションを行い、音波と流体の相互作用の解析の準備を行った。

b) 2成分流体のシミュレーション

[当初の計画]

動的メッシュを用いた 3 次元シミュレーションを行い、グリセリン液中に落とした磁性流体液滴の

複雑な振る舞いを再現する。この時の並列化効率について評価を行い、動的な負荷分散機能を導入することが必要か、あるいは、従来どおりの静的な並列化手法でも十分な性能が得られるのかに関して、評価する。

[達成状況]

(1) 研究成果の詳細について、b) 節でも述べたように、3次元モデルの計算では、液滴が複雑な振る舞いをするために、現状の計算ツールでは、有効な動的メッシュを生成する事が出来なかった。

4. 今後の展望

それぞれの課題の今後の展望は以下の通りである。

a) エアリード楽器のシミュレーション

1) 3-2 節で取り扱った管長の変化するエアリード楽器の 3次元モデルを用い、移動境界問題の並列計算効率の向上を目指す。

2) 計算精度を確保する為の Adaptive Mesh Refinement (AMR) と負荷分散を実現する分割メッシュ生成ツールとの連携が必要であるが、OpenFOAMでも標準ツールとして扱われている scotch などを利用しつつ、系全体の負荷状況をモニターしながら負荷分散に偏りが生じてきた場合には改めて分割メッシュを生成しなおす機構の検討を行う。

3) 動的メッシュを用いて音孔の開閉が再現できるスキームの開発を行い、その並列化効率について検討する。

4) 音と流体のエネルギー遷移の評価を与える Howe の理論式を、数値計算上で実現する方法を開発し、音と流体の相互作用を評価する。

5) 流体ソルバーと音響ソルバーを連成させ、遠方音場の再現が可能なスキームを開発する。具体的には Lighthill の音源を流体ソルバーで計算し、それを効率的に音響ソルバーに受け渡す方法を検討する。

b) 2成分流体のシミュレーション

動的メッシュを用いた 3次元モデルの計算を行ったが、現在十分な精度の計算が出来ていない。3次元で動的メッシュを取り扱う際の問題点を洗い出し、高精度で大規模な計算を行い、負荷分散についても評価できるような方法を検討する。

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”, 「投稿中」

(2) 国際会議プロシーディングス

1) K. Takahashi, M. Miyamoto, Y. Ito, T. Takami, T. Kobayashi, A. Nishida and M. Aoyagi, “NUMERICAL STUDY ON AIR-REED INSTRUMENTS WITH LES”, Proceedings of ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, AJK2011-08011, July 24th-29th, Hamamatsu, Japan.

2) Y. Ito, T. Kobayashi, K. Takahashi, T. Takami, A. Nishida and M. Aoyagi, “Reproduction of Transitions among Notes on an Air-reed Musical Instrument with Compressible LES Combined with Moving Boundary Technique”, Proceedings Open Source CFD International Conference 2011 (CD-ROM), November 3rd & 4th, Paris-Chantilly, France.

(3) 国際会議発表

1) K. Takahashi, M. Miyamoto, Y. Ito, T. Iwasaki, T. Takami, T. Kobayashi, A. Nishida and M. Aoyagi, “Study on aerodynamic sound of small air-reed instruments”, Dynamics Days Europe 2011, September 12th-16th, Oldenburg, Germany.

2) T. Takami, M. Shimokawa, H. Fujisaki and T. Kobayashi, “Coffee Patterns Generated by Slow Dynamics”, Dynamics Days Europe 2011, 12th-16th September, Oldenburg, Germany.

(4) 国内会議発表

1) 高橋公也, 宮本真孝, 伊藤泰典, 高見利也, 小林泰三, 西田晃, 青柳睦, ” 2次元および3次元モデルを用いたエッジトーンの数値解析”, 数理解析研講究録 1749 「オイラー方程式の数理:力学と変分原理 250 年」 RIMS 研究集会報告集 1749 (2011) pp. 121-136.

2) 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, 青柳睦美, “3 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: カルマン渦列と非定常 渦運
動 100 年」2011 年 7 月 20 日～22 日 京都大学 RIMS
研究集会報告集 1776 (2012) pp. 100-114.

3) 合屋佳奈, 合屋沙耶, 西山裕樹, 高橋公也, “ク
ラリネットのレジスターホールの機能: 2 重遅延モデ
ルを用いた解釈”, 日本物理学会講演概要集 66 卷
2 号第 2 分冊 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 21
日～24 日, 富山大学, p. 263

4) 小林泰三, 伊藤泰典, 高見利也, 宮本真孝, 高橋
公也, 西田晃, 青柳睦, “流体音に於ける移動境界問
題: 音源としての移動境界”, 日本物理学会講演概要
集 66 卷 2 号第 2 分冊 2011 年秋季大会, 2011
年 9 月 21 日～24 日富山大学 p. 264

5) 高見利也, 下川倫子, 藤崎弘士, 小林泰三, “遅
いダイナミクスにより生成される表面パターン”, 日
本物理学会講演概要集 66 卷 2 号第 2 分冊 2011
年秋季大会, 2011 年 9 月 21 日～24 日富山大学
p. 264

6) 合屋沙耶, 西山裕樹, 合屋佳奈, 高橋公也, “シ
ューマツハモデルを用いたクラリネットのシミュレ
ーターの最適解探索” 音楽音響研究会資料 Vol. 30,
No. 6 (2011) pp. 1-6.

7) 合屋佳奈, 西山裕樹, 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” 音楽音響研究会資料 Vol. 30, No. 6 (2011)
pp. 7-12.

8) 小林泰三, 伊藤康典, 岩崎拓也, 赤村高宏, 高橋
公也, 高見利也, 西田晃, 青柳睦, “流体音に於け
る移動境界問題 II”, 日本物理学会講演概要集 6
7 卷 1 号, 第 2 分冊, 2012 年 03 月 24 日～27 日, 関西
学院大学, p339.

9) 下川倫子, 高見利也, 藤崎弘士, 小林泰三, “粘
性流体中を落下する滴の分離と変形”, 日本物理学会
講演概要集 67 卷 1 号, 第 2 分冊, 2012 年 03 月 24
日～27 日, 関西学院大学, p338.

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

理科の特別授業:

高橋公也 “オルガンの音の出るしくみ”, 明治学