

10-NA04

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 音程変化が可能な楽器のモデルや液滴の運動など、境界の移動や構造物との相互作用を伴う問題、あるいは、一般に自由境界問題と呼ばれる対象は、理学・工学・計算工学にまたがる問題として重要である。本研究課題では、このような流体シミュレーションを実施するにあたっての計算効率に注目し、今後の大規模並列化の可能性を検証することを目的とする。本研究課題の計画のうち、小規模の並列計算は実施できており、計算結果の検証もほぼ完了しているため、今後はより大規模な計算機環境において、並列効率の評価を進めて行くこととする。

1. 研究の目的と意義

本研究課題は、エアリード楽器のシミュレーションを問題として選び、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を対象として、大規模な並列計算時の並列効率を検証することが目的である。大規模な流体計算では、たとえば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が、実際的な問題を扱おうとすると、詳細な物体形状を表現するための非構造メッシュの導入により空間的な不均一が生じる場合や、レイノルズ数が場所によって異なるような複雑な現象を扱う場合には、計算負荷を均等に分散させることが難しくなって来る。さらに高精度な計算を目指す時、あるいは、物体と流体との相互作用を表現しようとする時には、動的なメッシュ生成の機能を含めて一般的に自由境界・移動境界問題の形で、時々刻々変化する状況で数値計算を進めることが必要となるため、静的な負荷分散を行うだけでは効率的な並列計算は不可能となる。この研究では、いくつかのアルゴリズムで動的なメッシュ生成を含む流体計算を実施し、並列計算における計算効率に注目して解析を行う。

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、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、非常に重要な技術として、既存のアルゴリズムや手法をいかにして安定に高精度計算に利用するかが要求されている。このような状況に加えて、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「超」大規模実行を想定することも可能になりつつある。本研究課題は、流体シミュレーションが更なる大規模化と高精度化を目指す場合に避けて通れない並列実行効率に関して、現実的な問題を対象として評価することとしており、次世代のシミュレーション技術の構築のために重要である。

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、4ないし8コアが搭載された並列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、手元の数個のコアで実行される並列計算と、神戸に建設されつつある理研の次世代計算機のように数十万コアを持つ計算機とでは、並列化効率についての要求水準が全く異なるため、単純に同じプログラムを高並列に実行しただけでは、ほとんど使い物にならないのが現状である。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ため、次世代の並列計算機上での利用を見越して性能評価をしておくことが望まれている。本研究課題で扱うような実シミュレーションコードの大規模化に向けた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。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、本研究課題の実施により、大規模並列化へ向けた検証を行うこととする。

流体計算に限らず大規模なシミュレーション研究は、並列化手法やハードウェア的な安定性の問題などとも関係して計算機科学の問題として広く研究されているが、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おり、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る。このような観点からも、本研究は意義のある研究である。

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

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

ある程度大規模な計算機を、一定期間占有に近い状態で利用できることが、一般の利用者としてはありがたいことである。また、シンポジウム等において情報基盤センターなどの計算機科学の専門家と意見交換が出来ることも重要である。

3. 研究成果の詳細

まず、本研究課題の中で我々が実施している計算

モデルと計算結果について概要を解説する。研究対象は、エアリード楽器の発音に関わるシミュレーションと、二成分流体のダイナミクスの二つのテーマに渡る。これらを解説した後に、性能評価の観点からの研究の現状を述べる。

A エアリード楽器の発音機構

エッジトーンと呼ばれる流体音を音源とする管楽器をエアリード楽器と言う。エアリード楽器の発音機構の解明は音楽音響の重要な課題ではあるが、流体音源の取り扱いの難しさから未解決の問題である。音源となるエッジトーンは、エッジに衝突してほぼ周期的に振動するジェットから発生する音で、楽器では管体の歌口部分で作り出される。しかし、エッジトーンの解析だけでは、明確な音程を持つ楽器の発振音を理解することはできない。楽器の明確な音程は、共鳴管体によって作り出される。実際、管体内部の音圧は共鳴により 140 ~ 160dB と極めて高くなり、その高い音圧は、エッジトーンを作り出すジェットの運動を共鳴管体の周波数へと同期させ周期的に変動させる。この過程を詳しく理解するためには、流体と音の相互作用の問題を取り扱う必要がある。したがって、数値的な解析を行う場合には、航空機や高速列車等の流体騒音の問題でのように、流れと音を分離して解く連成解析的な手法は有効とは言えず、圧縮流体を音場も含めた状態で大規模な数値解析が必要となる。

管楽器は、音孔の開閉パターンを変化させる事により音程を変化させる。したがって、管楽器による楽曲演奏を再現するためには、音孔の開閉をシミュレートする必要がある。これは大規模流体計算における移動境界問題である。本プロジェクトでは、問題を単純化し、音孔の開閉の代わりに管体の長さを変える事で音程の変化の再現を目指している。現在、本格的な移動境界問題の実装の準備段階にある。以下、これまでの準備段階で得られた成果を報告する。

モデルと計算法

エアリード楽器の解析には、流体の運動とそれから発する音波を同時に解析する必要がある。流体

の運動ではその流速は高々数十 m/s であるが、音波の位相速度は約 340m/s と一桁大きい。位相速度が大きな音波の再現には、一般の流体のシミュレーションに比べてより小さな時間刻みが必要である。一方で、音波の波長は 1 万Hzにおいても 34mm 程度であるのに対し、流体運動で発生する渦のスケールはそれよりも遥かに小さい。したがって、流体の細部の構造を正確に再現するには、音波の解析に使われるメッシュよりもより細かなメッシュが要求される。そこで、メッシュ数と計算時間を節約するために、図1に示すように楽器のサイズをできるだけ小さくし、その全長を 9mm とした。図1には二次元モデルを表示しているが、三次元解析では、紙面に垂直な方向に 10mm の厚みを持たせ固定壁で挟んだモデルを用いる。

解析に用いた数値スキームは、OpenCFD社が開発したフリーのソフトウェア OpenFOAM の圧縮性 LES (Large Eddy Simulation) ソルバーである。LES では、DNS (Direct Numerical Simulation) に比べ比較的粗いメッシュを使うので、計算時間の短縮が可能である。メッシュよりも大きな渦等の流体構造に対しては直接解析し、メッシュよりも小さな渦には SGS (サブグリッドスケール) モデルと呼ばれる統計的な平均化処理を用いて近似する。そのため、エッジ近傍の流れ等の精度に若干の問題があるが、長時間のシミュレーションに対して極めて安定である。OpenFOAM の圧縮性 LES ソルバーには、数種類の SGS モデルが用意されているが、我々は oneEgeddy を主に用いた。

図2に示すように、二次元モデルのメッシュは、500×250mm とし、音場の伝搬が再生できるような十分に広いものを用いた。破線で示した左右と上部の壁は透過壁に設定し、それ以外の壁は固定壁である。透過壁の処理は、Poinso-Lele 法を用いる。表1にメッシュのパラメーターを示す。三次元モデルでは、紙面に垂直な方向に 10mm の厚みを持たせ 50 分割し、固定壁で挟んだメッシュを用いる。

二次元モデルでは、0.1s までの時間発展の解析を行うが、三次元モデルは、計算時間の都合で、0.03s までとした。時間刻みは、音波の位相速度の

速さを考慮して、 $\Delta t = 1.0 \times 10^{-7}$ s とした。二次元モデルでは特に並列化を行わなかったが、三次元モデルでは、6 並列で計算を行った、正確な性能評価はまだ出来ていないが、5～6 並列が最も並列化の効率が良いようである。音圧(大気圧からの圧力変位)又は密度揺らぎの観測点は、図1に示した点(a)である。この点は、管体内部にあり右側の管壁から 10mm で管体の中心軸上にある。実際の演奏音は楽器の外部で聞くが、楽器の内部の方が安定した音圧波形が得られるので観測点を楽器内部に選んだ。

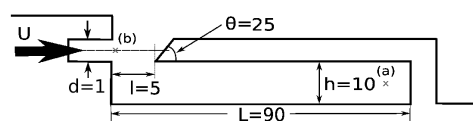


図1 二次元モデル

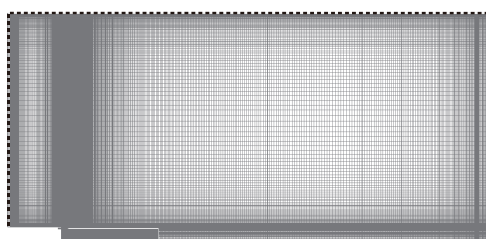


図2 二次元モデルのメッシュの全体図

表1 二次元メッシュのパラメーター

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

数値解析

楽器の解析を行う前に、その精度保証に必要な幾つかの予備的な解析を行った。まず、5. 成果リストの(2)国際会議プロシーディングス2、及び、(4)国内会議発表2,3に示すように、二次元及び三次元のエッジトーンモデル(共鳴管体の無いモデル)の数値計算を行い、ジェットの流れに対する発振周波数の関係を調べ、二次元三次元のどちらの場合も Brown が実験より求めた半経験的理論式

$$f = 0.466j(100U - 40)(1/(100l) - 0.07)$$

にほぼ一致する結果を得た。ここで、 U はジェッ

トの流速, l はノズルとエッジの距離を表す. j は発振音の次数を表し, $j=1, 0, 2, 3, 3, 8, 5, 4$ となる.

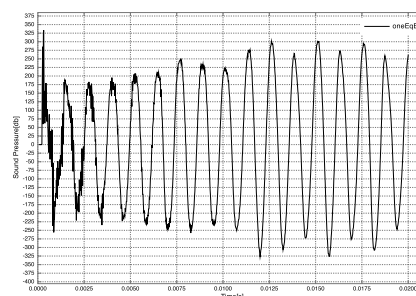
次に, 二次元モデルではあるが, フランジの付いた開口端反射の計算を行い, ほぼ理論通りの結果が得られた (5. 成果リスト, (2) 国際会議プロシーディングス 1, (4) 国内会議発表 4). 音波の重要な特性である開口端反射を調べる事は, 圧縮性流体のシミュレーターである LES によって音波が正確に再現できるかという事の重要なチェックになる. 管体共鳴を利用する楽器のシミュレーションでは, 開口端反射が理論通り再現されないと, 音波を管体内に閉じ込める事が不可能になるため, 特に重要である.

最後に, OpenFOAM の圧縮性 LES ソルバーに用意されている 4 つの SGS モデルの比較を行った (5. 成果リスト, (4) 国内会議発表 4). 図 3 に, 二次元モデルでジェット流速を $V=12\text{m/s}$ に取り 0.02s まで計算したときの発振音波の時間変化を比較したものを示す. 各モデルともほぼ同じ周期の発振が起きている事が分かる. 各モデルにおける波形やその振幅について, 音源となる流体が乱流領域にあるために環境に対して不安定であり, 計算法による違いが現れるのは当然である. このような場合には統計的な一致が見られれば十分である事を考慮すれば, 許容範囲にあると考えられる. 我々は, これらの SGS モデルの中でも発振振幅が大きく比較的安定していて, チュートリアル の例題にもある OneEqeddy を採用することにした.

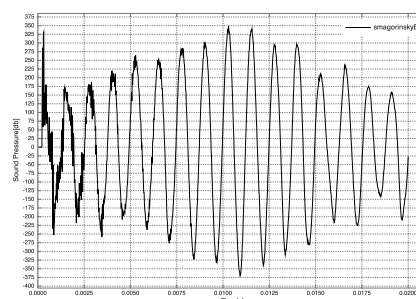
図 4 に OneEqeddy モデルを用いて $V=12\text{m/s}$ に取り 0.1s まで計算した音圧波形とそのパワースペクトルを示す. 図 4(a) に示すように, 若干の振幅の揺らぎはあるが 80 周期以上に渡り極めて安定な発振が見られる. 図 4(b) のパワースペクトルを見ると, 805.7Hz の所に明確な基音のピークが見られ, その 3 倍音, 5 倍音の位置にもブロードなピークが見られる. この基音の振動数は, 理論値 913.1Hz に比べると 107.4Hz 低い. しかし, ジェットの流速を上げて行くと, 徐々に理論値に近づいて行く. また, 流速が 24m/s を越えると 3 倍音のピークが優勢になり, 発振波形もほぼ 3 倍音の

波形に変化する. この様なジェットの流速の上昇に伴う発振波の変化は, Coltman-Fletcher の理論から予想されるが, 理論との良い一致を示す (5. 成果リスト, (1) 学术论文 1, (2) 国際会議プロシーディングス 2, (4) 国内会議発表 1, 3, 4).

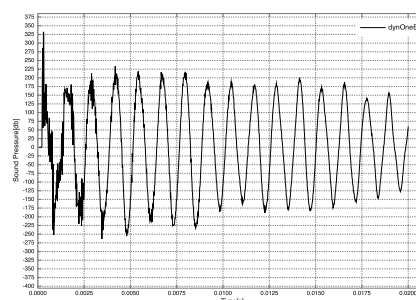
(a)



(b)



(c)



(d)

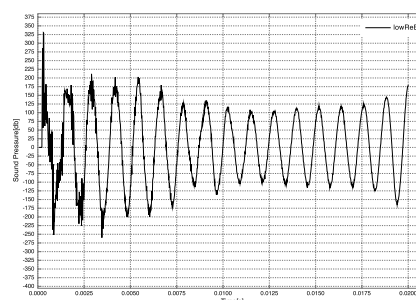


図 3 発振音波のサブグリットモデルによる違い

(a) OneEqeddy (b) Smagorinsky (c) dynOneEddy
(d) lowReOneEqEddy

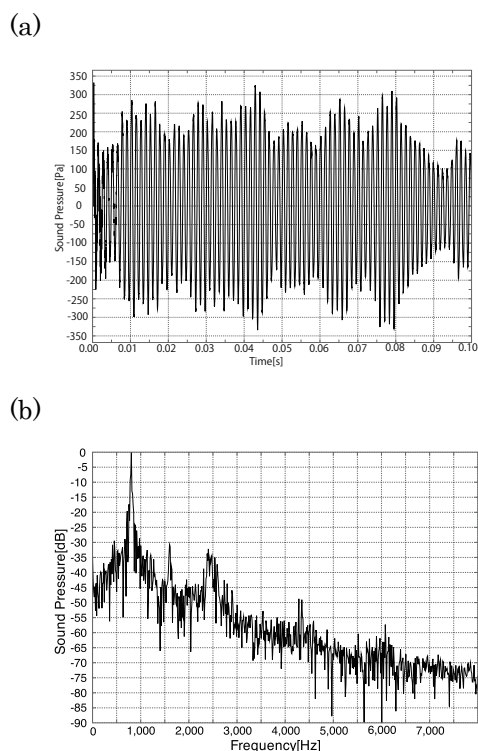


図4 二次元モデルの音圧波形

(a) 音圧波形 (b) パワースペクトル

図5に二次元モデルの計算で得られた、流速と音圧の空間分布を示す。図6は三次元モデルで得られた流速と音圧の空間分布である。ジェットの流れはともに $V=12\text{m/s}$ である。ジェットの流速分布を見ると、ジェットが歌口（楽器の開口）の部分で周期的に振動している事が見て取れる。しかし、二次元モデルの方が、ジェットがエッジに衝突してできる渦が強く、長時間安定に存在する。そのため、二次元モデルでは、歌口近傍の楽器内部に大きなローターが発生する。また、楽器外部にも強い渦列が形成されている。これは、一般に二次元流体では、三次元流体よりも渦度が安定化される事を反映したものである。

音圧分布を見ると、二次元三次元モデルでともに楽器内部に強い音圧が発生し、共鳴発振状態にある事が分かる。三次元モデルの発振周波数を調べると、 781.3Hz となり、二次元モデルに比べると 24.4Hz 小さい。これは、二次元と三次元での歌口近傍のジェットの影響等の違いで説明可能であると考えられる。

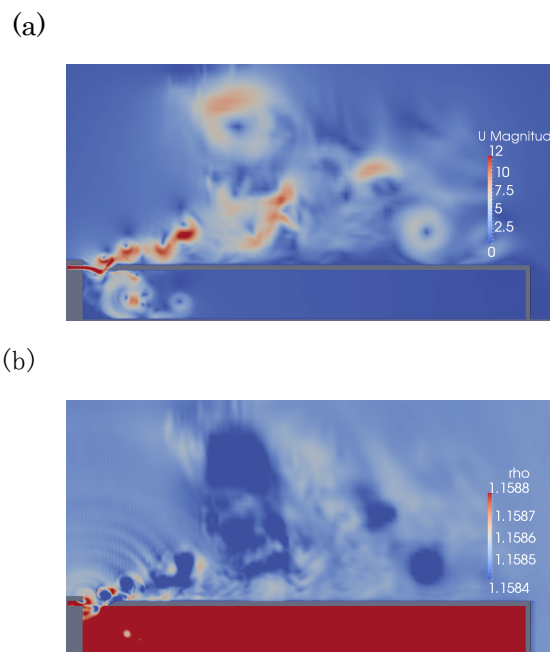


図5 発振状態の二次元モデル

(a) 流速分布 (b) 音圧分布

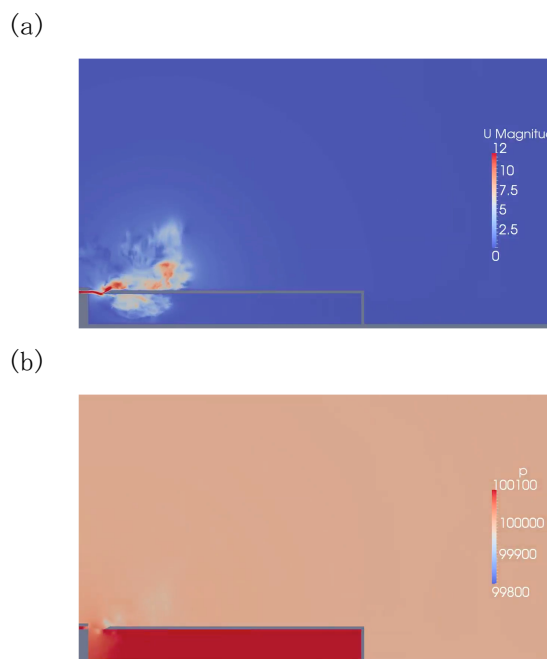


図6 発振状態の三次元モデル

(a) 流速分布 (b) 音圧分布

結論

圧縮性 LES を用い、二次元三次元のエッジトーン及びエアリード楽器のモデルの計算を行い、音波を発振させる事に成功した。特に、ジェットの流速変化に伴う発振特性の変化を再現することに成

功し、実験に基づく半経験的理論予測と一致したことは重要である。また、二次元モデルではあるがパイプの開口端反射も圧縮性 LES を用いることで再現可能であり理論と良い一致を示す。さらに、Lighthill によって構築された流体音響理論を用いて流体音源の計算にも成功している(5. 成果リスト(3) 国際会議発表以外の全ての論文)。これにより流体と音の相互作用の解析に着手できる段階に来ている。また、流体解析で求めた音源分布を音響ソルバーに組み込む事(ハイブリッド解析)で、流体解析では不可能な遠方での音場の再現を行う事も可能であると考えられる。したがって、圧縮性 LES は、流体音源を持つエアリード楽器の解析を進める上で極めて重要な道具であると考えられる。

B 二成分流体の運動

雨粒など空気中の液滴、水中の気泡、比重の異なる液体の界面の運動など、二成分流体として表現されるダイナミクスは、身近に非常に多くある。本研究課題では、このうち、液体中の混ざらない液滴の運動を題材として、界面補足法によるシミュレーション結果についての計算結果を述べる。

計算手法

二成分流体の計算には、大きく分けて界面補足法と界面追跡法という二種類の計算手法がある。液滴の運動を計算する場合に、液滴の形状が大きく変形しない場合には、界面追跡法により計算することが可能で、比較的精度の高い計算が出来る。今回のように液滴が分裂する運動を対象とする時には、界面のトポロジーも含めて大きく変化するために界面追跡法によるシミュレーションは難しいため、ここでは界面補足法による計算を実施した。界面補足法によるシミュレーションでは、一般に界面を表現するための動的メッシュを導入せず、基本的に空間固定のメッシュ表現を採用する。ただし、物理量の異なる液体を表現するために、スカラー場を導入し、その数値により物理量を補完近似することで二成分流体を表現する。

結果

OpenFOAM-1.6 の二成分流体ソルバー interFoam

による数値計算により、グリセリン溶液中に落とした磁性流体の液滴のシミュレーションを行った。実験では、グリセリンの濃度を調整することにより、液滴がきれいな二分割を繰り返す様子が観察されるが、この現象を三次元の二成分流体計算で定性的に再現することに成功した(5. 成果リスト(3) 国際会議発表 1)。界面張力、比重、粘性などのパラメータはできるだけ実験で利用した物質の値に一致させており、定量的にもほぼ問題なく再現できているものと考えられる。

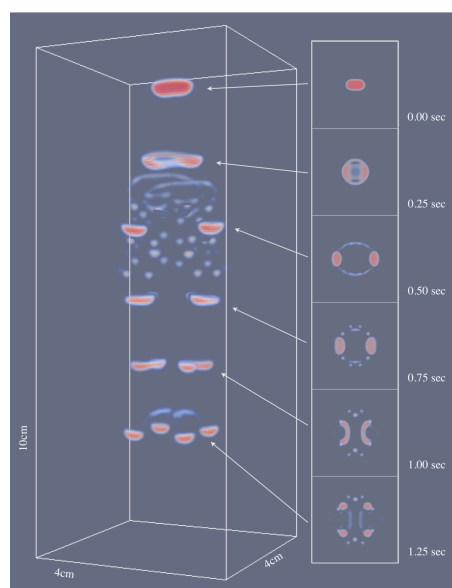


図7 液滴の運動

4. これまでの進捗状況と今後の展望

これまでの進捗状況

移動境界問題の最も簡単な例として平板スピーカーのシミュレーションを行った。図8(a)に示すように、平板を振動させ音波を発生させる。図8(b)に、厚さ1mm、幅60mmの板を周波数4687.5Hzで振動させたとき発生した音波を示す。

二成分流体の計算においてこれまで実施してきた計算の範囲内では、メッシュの細分化を実施せずに並列化性能を評価してきた。今回の評価に利用している OpenFOAM-1.6 においても、界面の形状や界面までの距離に応じてメッシュを高精度化する仕組みが導入されているため、この機能を利用する方向で準備を進めている。

今後の展望

管楽器の音程を変える方法として、音孔を開閉する方法と管体長を変化させる方法がある。本研究では、より簡単な管体長を変化させるモデルの解析を計画している(図9)。本格的な楽器ではないが、図9の様な管体長を変化させるリコーダータイプの楽器が存在する。正しく音程を変化させるには、どのようにメッシュを変化させれば良いか。また、メッシュの変化に伴う計算負荷はどの程度になるか。特に、並列計算上で移動境界問題を扱う時の問題点は何か。などの問題を扱って行く。

評価を進めて行く予定である。その際に、動的な負荷分散最適化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、評価する予定である。

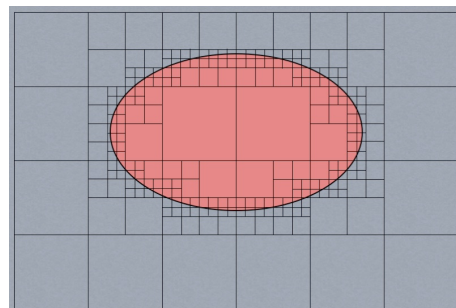


図10 界面のメッシュ表現

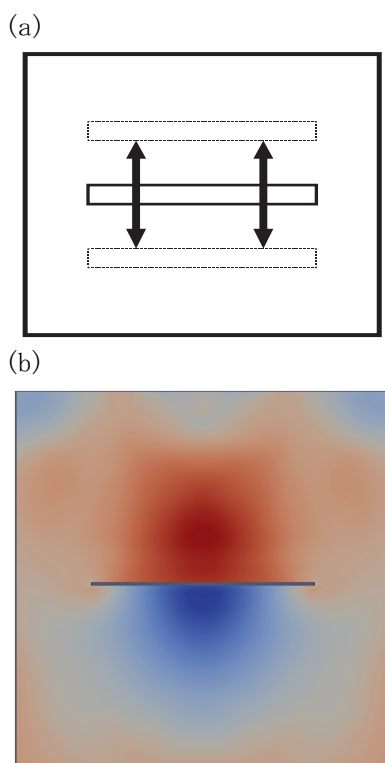


図8 平板スピーカー

(a) モデル図 (b) 発生した音場

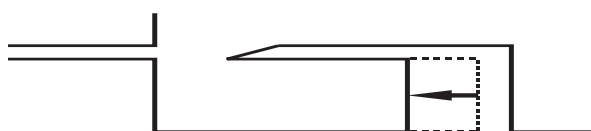


図9 音程変化が可能な楽器モデル

二成分流体計算における動的メッシュ表現(図10)の利用時の並列化効率については、これから詳しく

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, K. Takahashi, T. Takami, T. Kobayashi, A. Nishida, M. Aoyagi, "Numerical study on sound vibration of an air-reed instrument with compressible LES", preprint

<http://arxiv.org/abs/1005.3413>.

(2) 国際会議プロシーディングス

1. M. Miyamoto, Y. Ito, K. Takahashi, T. Takami, T. Kobayashi, A. Nishida and M. Aoyagi, "Applicability of compressible LES to reproduction of sound vibration of an air-reed instrument" Proceedings of International Symposium on Music Acoustics 2010, Sydney and Katoomba (CD-ROM), paper no 37 (6pages) (2010).

2. K. Takahashi, M. Miyamoto, Y. Ito, T. Takami, T. Kobayashi, A. Nishida and M. Aoyagi, "Numerical analysis on 2D and 3D edge tones in terms of aerodynamic sound theory", Proceeding of International Congress on Acoustics 2010 Sydney (CD-ROM), paper no 621 (8pages) (2010).

(3) 国際会議発表

1. T. Takami, M. Shimokawa, H. Fujisaki, and T. Kobayashi, "Deformation and Separation Dynamics of a Coffee Droplet in Milk", Dynamics Days Asia Pacific (Jul.

2010, Sydney).

(4) 国内会議発表

1. 高橋公也, 宮本真孝, 高見利也, 小林泰三, 西田晃, 青柳睦「エアリード楽器の発音機構: 流体と音の相互作用の解析」数理解析研講究録, Vol. 1697 (「オイラー方程式の数理: 渦運動と音波 150 年」RIMS 研究集会報告集), pp. 31-45 (2010).
2. 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「二次元および三次元モデルを用いたエッジトーンの数値解析」RIMS研究集会“オイラー方程式の数理: 力学と変分原理250年” 2010年7月13日.
3. 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, 「LES を用いたエッジトーンおよびエアリード楽器の数値解析」可視化情報 Vol. 30, Suppl. No. 2 97-98 (2010).
4. 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「圧縮性LESを用いたエアリード楽器の発音機構の数値解析」数理解析研講究録, Vol. 1719 (「数値解析と数値計算アルゴリズムの最近の展開」RIMS 研究集会報告集), pp. 26-36, (2010).
5. 高橋公也, 招待講演「圧縮性 LES を用いたエアリード楽器の発音機構の数値解析」, サウンド財団研究助成講演会 (2011 年 1 月 31 日).

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)