

14-NA17

曲管を有する管楽器を対象とした大規模並列流体音シミュレーション

小林泰三（帝京大学・九州大学）

概要 サキソフーンのような曲がった管を持つ管楽器の発音状態を、オープンソースの流体ソルバーである OpenFOAM を用いて数値流体でシミュレートし、楽器の特徴量である発振周波数や吹鳴圧などの関係を求める事により、管楽器における曲管の物理的な役割を解明するのを目的として研究を行った。具体的には、曲率半径の異なる複数のモデルを計算対象とし、エアリード楽器の流体音研究での知見から、曲部にて発生する渦に注目した。生成されるデータ量は、一回の計算で数十 TB になるので、可視化等のポスト処理のボトルネックであるファイルを I/O をネットワークストリームに置き換える試みを行った。

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

(3) 参加研究者の役割分担

小林泰三（代表）九州大学・情報基盤研究開発センター：研究統括、アプリケーション運用に関わる専門知識の提供

宮川矩昌（副代表）九州大学大学院・芸術工学府：研究全体の実施

吉川茂 九州大学・芸術工学研究院：楽器音響に関わる専門知識の提供

高橋公也 九州工業大学・情報工学研究院：流体音に関する専門知識の提供

2. 研究の目的と意義

本研究課題は、オープンソースの大規模流体ソルバーである OpenFOAM を用い、サキソフーンのような曲がった管を持つ管楽器の発音状態を数値流体でシミュレートし、楽器の特徴量である発振周波数や吹鳴圧などとの関係を求める事により、管楽器における曲管の物理的な役割を解明するのが目的である。

従来の曲がった管の音響特性に関する研究は、例えば、自動車やバイクの排気管や空調設備のダクト等での騒音対策に関するものが

あり、騒音を抑えるための形状検討や吸音材の配置検討に用いられ、すでに工業的な成果を上げている。これらが対象としている音の多くは、広帯域でかつ定常的な雑音であり、音響特性評価には帯域ごとの音圧レベルが用いられ、もっぱら騒音レベルを下げることに注力されてきた。その成果は排気ダクトのみならず、広く航空機や高速鉄道の騒音低減にも活かされている。しかしこれらの騒音低減が主目的になる研究対象でも、例えば自動車のエンジン音の特徴づけなどに見られるように、近年では、低騒音化に加えてより快適な音にする快音化も次第に重要視されるようになってきている。

このような、騒音低減と快音化が求められる対象は工学分野に徐々に拡大してきており、排気ダクトと似た形状を持つ曲がった管楽器の楽音を解析する研究は、その先駆的な位置づけとして重要な役割を担う筈である。楽音は人間が心地よいと知覚される音であり、構成する各部分音の周波数とそのレベル分布、音の立ち上がりにおける非定常状態が、心地よい音の印象（音色）を決定する重要な要素である。よって、似たようなモデル形状になるにもかかわらず、従来のノイズ対策の研究が定常状態の数値解析に近いものであるのに対して過渡現象を扱わなければならない。現

状の楽器音響における曲がった管楽器の研究では、楽器が演奏可能な全ての音域に対して正確に音響特性を予測する理論ははまだ確立されていない。また、測定に関しても、直管に対する理論をもとにした測定方法が応用されてきただけで、曲管の信頼できるデータを得ることはできていない。このような状況下で、考察を進めるには、まず吹奏時の物理状態を時間発展とともに把握することが不可欠である。

以上から、曲がった管に対する快音化を実現するために、曲管部分に形成される共鳴状態と音の印象との関係を解明し、快音の定量的な評価に結び付けることが必要である。特に曲管においては、その形状がもたらす流体的な特性が音色に大きく影響を与えると予想される。本研究では、エアリード楽器の流体音研究での知見を参考にして、曲管を持つ管楽器の発音に関して圧縮性 Large Eddy Simulation (LES)を用いた数値解析を行った。特に、U字管に特徴的な流体现象として、曲管部に発生する渦に注目をした。

本研究により、これまでの楽器音響学では議論できなかった曲管の物理的な役割を解明することで、曲管を持つ管楽器の音程改善や心地良い吹奏感など性能向上や、急峻な曲げを伴うダクトの快音化に関しての知見が得られるであろう。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

先行するエアリード楽器での研究から、楽器での発音には構造の細かな渦が重要な役割を果たしている事が判っている。そのような細かな渦を数値的に再現するにはメッシュの間隔を mm 程度にまで細かくする必要がある。すると、実際の管楽器のスケールにするには 10^9 程度のメッシュ数になり、1秒の音を再現するには Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) 条件から 10^7 step オーダーの計算になる事が見積もれる。これは現在でもかなり

大規模な計算であり、生成されるデータ量も一回の計算で数十 TB になり、可視化等のポスト処理までを考慮すると、HPCI のような整った計算環境でない限り、計算の実行は困難である。

最近では、計算機の飛躍的な計算能力の向上に伴い、Computer Fluid Dynamics (CFD) の発展が著しく、流体音響学の視点から管楽器の発音解析が行われるようになってきた。Particle Image Velocimetry (PIV) などの優れた実験方法も開発され、シミュレーションを含む理論と実験の両面からの研究が進められている。今後、「京」のような大規模並列計算を行えるスパコンが、更に利用されることで、より精度のよい定量評価を製品設計段階で行い、試作にかかる費用を削減することが、一般的になるだろう。

一方で、高精度の計算になるほど、一度の計算で生成される時系列データが膨大になることが、事実上の問題になってくる。特に、管楽器の場合、3オクターブ以上にも及ぶ音高の発振に対して、それぞれ個別に解析を行い、さらには運指による各ピッチ間の音の遷移も解析する必要がある。これだけで3桁オーダーのシミュレーションが必要になり、ほかのパラメータサーベイを含めると最終的には5桁オーダーのシミュレーション本数が必要になる。このような将来の開発設計における状況を考慮すると、一つのシミュレーションとそのデータ解析を効率化しておく必要がある。つまり、メッシュを主とするパラメータの変更（プレ処理）や、一本数十 TB に及ぶ膨大なデータ解析や可視化（ポスト処理）の高度な効率化が求められる。

これらの研究を遂行する環境として当拠点公募型共同研究は効果的である。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

新規課題のためありません。

直管部の長さ	半径 r	曲率半径 R0
0.5 (m)	10 (mm)	15 (mm)

5. 今年度の研究成果の詳細

実際の楽器に見られる、曲率半径が短く、180 度折り返しのある管の形状に対する 3 次元の非構造メッシュについて検討し、スケールの小さいモデルに対して候補になるメッシュを作り、テストを行った。

本研究課題のメッシュに求められる条件は、(1) 音波の再現性や、音場ソルバーとの結果の比較を考慮すると、メッシュ構造は 6 面体構造が望ましく、(2) 流体と音場の双方の数値計算に対して計算精度と速度のバランスを保てることであり、(3) 可能な限り均等な格子を用いて、任意形状の計算部分を再現できることである。

本研究では、メッシュ生成に cfMesh を利

直管部の長さ	半径 r	曲率半径 R0
0.5 (m)	10 (mm)	15 (mm)

用した。これは、2014 年 7 月にリリースされた自動メッシャーで、6 面体構造のものを生成できる。また CAD のデータ形式である STL ファイルからメッシュの生成ができるため、管の境界に関する情報をもった STL ファイルとメッシュの作成パラメータ設定ファイルを用いて、メッシュを作成するため、任意形状に対して手順の自動化が容易であり、生成された 6 面体メッシュも、形状の再現性がよく、物理的にもリーズナブルな計算結果を出している。図 1 に作成したメッシュの概略図を、

に境界パラメータをそれぞれ示す。また、作成したメッシュの全体図を図 2 に、メッシュのパラメータを表 2 に示す。

表 1：境界パラメータ

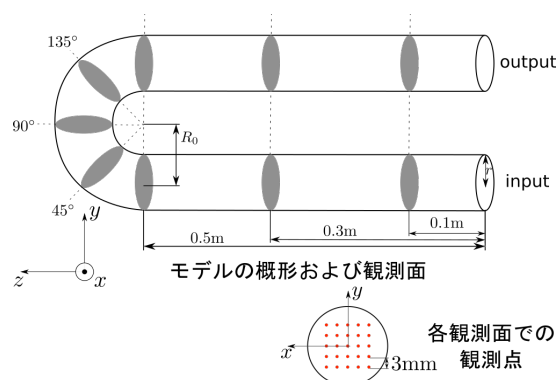


図 1：モデルの概略図と観測点

表 2：メッシュのパラメータ

points	cells	faces
2, 933, 293	2, 793, 060	8, 517, 474



図 2：作成したメッシュの全体図

このほか、他のオープンソースメッシャーや、金沢工業大学の佐々木大輔准教授 (H26 年度 JHPCN 採択課題 jh140020-NA11「次世代ペタスケール CFD のアルゴリズム研究」代表者) から Building-Cube 法 (BCM) によるメッシュ生成ツールの提供を受けて、流体と音場の双方に適した等方直交メッシュの作成を試みた。このツールを用いて、STL ファイルにより定義された形状を、等方メッシュで再現することには成功したが、OpenFOAM のメッシュ形式に変換をするため、内部流れに対応した境界定義手法を確立できず、今回は、実際の計算には用いなかった。

シミュレーションの妥当性を検証して、ガウスパルス流速を入力として与え、入力側から 0.1 m 0.3 m 離れた 2 点間の値を定点観測し、その伝播時間から算出される音速と理論

値とを比較した。結果、表 3 に示すとおり音速を再現出来ていることを確認した。

表 3：理論値とシミュレーション値

理論値	シミュレーション値
351.19	350.88

(m/s)

流体ソルバーには、OpenFOAM-2.3.1 に付属する rhoPimpleFoam を使い、乱流スキームには Large Eddy Simulation を、SGS モデルには One Equation Eddy 用いた。時間刻みを 2×10^{-7} (s) にとり、0.3 (s) まで計算した。

境界条件は管端の一方から正弦波と管壁での粘性を考慮した Hagen-Poiseuille 型の勾配をつけた定常流 U を重ね合わせた流速を与え、終端を OpenFOAM の waveTransmissive に設定し、波が透過するように設定した。

計算結果は、計算領域全体において音速、流速、渦度の可視化を行ったほか、図 1 に示すとおり、モデル内に、直管部に入出力側から 0.1, 0.3, 0.5 (m)、曲管部に 45, 90, 135 度の 9 ヶ所に観測面を設定し、各面の中心から 0.3 mm 間隔で、25 点の圧力、流速を定点観測した。図 3 図 4 図 5 に可視化した圧力、流速の絶対値、渦度の例を示す。

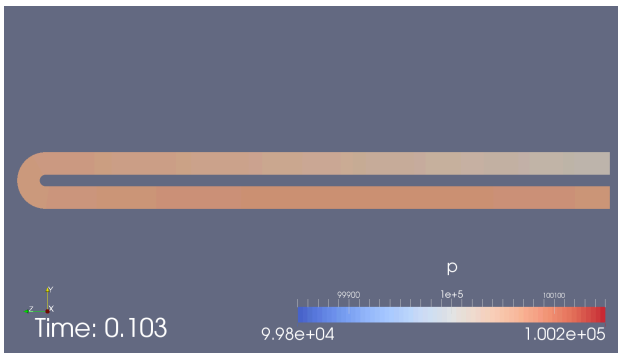


図 3：0.103 (s)での圧力

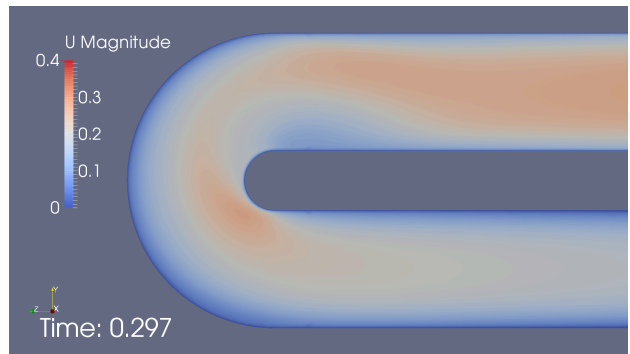
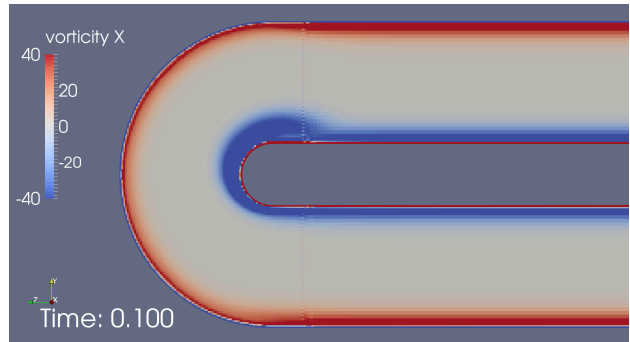
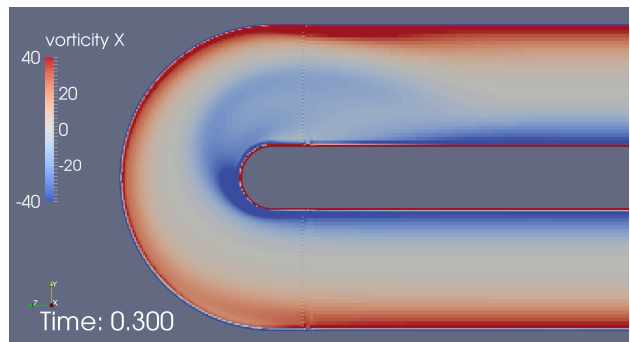


図 4：0.297 (s)での流速の絶対値



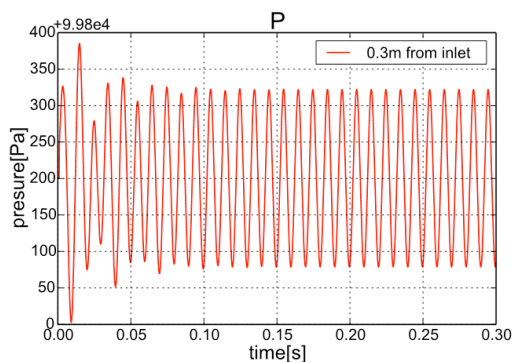
(a) 0.1 (s)



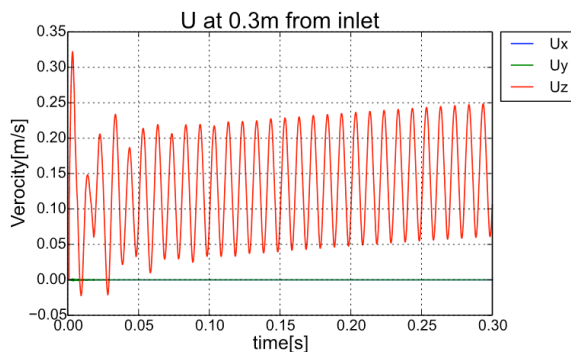
(b) 0.3 (s)

図 5：渦度の x 成分の時間発展

これらの可視化結果から、流路の変化や、境界層剥離の分布変化といった曲管を有する管内の伝搬に予想された現象が、時間発展とともに観測することができた。更に、図 6 に示すような定点観測の結果からは、圧力の振幅が定常になるまでの時間が、実際の楽器のそれと定性的にあうことから、シミュレーションの妥当性が確認出来たとともに、流速が計算時間中では、非定常状態のままであるように、定常状態になる時間に差異があることが、このシミュレーションから予想された。



(a) 音圧



(b) 流速

図 6：入力側から 0.3 m 離れた地点での音速、流速の定点観測結果

これらの成果を日本物理学会第 70 回年次大会にて「流体音響シミュレーションによる曲管の音響解析」のタイトルで発表した。今後は、今回の数値解析結果から、楽器にとって重要な音程に対する曲管の影響を調べるため、各観測点間の位相のズレを現在評価しようとしている。

OpenFOAM での計算結果をポスト処理する際にボトルネックになっているファイル I/O をネットワークストリームで置き換える試みを、H26 年度 JHPCN 採択課題である「科学技術計算における効率の良い複数拠点利用とそれを実現するユーザ駆動型・拠点協調フレームワークの開発と検証」(課題番号 14-MD03) と共同で行い、試験環境での疎通テストまでを行うことができた。その成果を PANACM2015 にて発表した。HPCI, JHPCN の環境への展開は今後の課題である。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

研究計画段階で予定していた項目である、サキソフンのような曲管を持つ管楽器内部の流体音状況を再現することは、概ね実施できた。ただ、大規模計算を実行するために必要なメッシュの生成方法を確立することに想定外に時間がかかってしまった。単純な U 字管の内部流れを流体音として扱えるメッシュを生成するのに半年近くの日数を要したことから、流体音研究の数値計算環境がまだ整備されていないことが判る。中間報告を行った 11 月の時点で当初の予定よりも数ヶ月遅れていたが、その間、九州大学拠点を利用した大規模計算を行うための OpenFOAM 計算環境の整備を進め、最新版である OpenFOAM-2.3.1 と、7 月にリリースされたばかりである cfMesh などのユーティリティ群の導入とテストを終え、12 月から一斉に計算を行うことにより、一通りの成果を上げることができた。12 月以降に予定していた BCM によるメッシュの OpenFOAM への適用など、メッシュ生成に関する課題は、本研究課題が終了した H27 年度以降も引き続き進めている。

また、大量に生成される計算結果を効率よくポスト処理をする課題は、H26 年度 JHPCN 採択課題 14-MD03 「科学技術計算における効率の良い複数拠点利用とそれを実現するユーザ駆動型・拠点協調フレームワークの開発と検証」 實本英之助教代表 (東京工業大学) とも連携して進めており、OpenFOAM-2.3.1 を対象にして新たに通信クラスを設計・実装して疎通テストを実施することができた。

今後は基盤センターでの大規模検証と、実際のセンターサービスとして一般利用者の利用を想定した負荷テストとユーザ利用のインターフェースの整理が課題である。基盤センターでの大規模検証では、現在発生している再現性に乏しい実行時間の大きな変動の原因究明と対策を施すことと、センターの

利用規約との整合性を詰める作業が必要である。この問題に関しては、RIST との打ち合わせを開始しており、「京」での利用を視野に入れて今後の設計・実装に反映させる体制を整えている。また、アプリケーションとポスト処理連携に関しては、PANACM 2015 の発表に対して、in situ visualization への展開について、関心を寄せられた。可視化に関しては、研究対象と研究内容、さらには研究段階によって可視化の内容が変化するために、一般的なフレームワークとして定義するのが困難であるが、今後の研究展開として予定しているアプリケーションとポスト処理連携から連成計算に進む途中の段階で課題設定をする予定である。さらに、OpenFOAM アプリケーションにおいても、スケラビリティとロバスト性を改善するために JHPCN 採択課題 14-MD03 で開発したフレームワークを利用する予定である。これらも基盤センターや「京」でサービスとして提供可能な品質の実現を目指す。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文 4 件

T. Kobayashi, T. Akamura, Y. Nagao, T. Iwasaki, K. Nakano, K. Takahashi, M. Aoyagi, “Interaction between compressible fluid and sound in a flue instrument”, Fluid Dyn. Res. 46 061411, 2014

K. Takahashi, K. Goya, and S. Goya, “Mode Selection Rules for Two-Delay Systems: Dynamical Explanation for the Function of the Register Hole on the Clarinet”, J. Phys. Soc. Jpn. 83, 124003 (2014).

受賞 : Award JPSJ Papers of Editor’s Choice

招待論文 : K. Takahashi, “The Function of the Register Hole of the Clarinet and Two-delay Models”, AAPPS(Association of Asia Pacific Physical Societies) Bulletin Vol.25 No.1 42-44 (2015)

S. Yoshikawa and K. Kajiwara, “Cross fingerings and associated intonation anomaly in the shakuhachi”, Acoust. Sci. & Tech., to be published.

(2) 国際会議プロシーディングス 1 件

S. Yoshikawa and K. Kajiwara, “Acoustics of cross fingerings in the shakuhachi”, 7th Forum Acusticum 2014, Invited Paper, MUSICAL ACOUSTICS - MUSICAL TOOLS, CD-ROM, 7th - 12th September 2014, Krakow

(3) 国際会議発表 6 件

T. Kobayashi, Y. Morie, H. Jitsumoto, T. Takami, M. Aoyagi, “A New Bottleneck in Large-Scale Numerical Simulations of Transient Phenomena, and Cooperation Between Simulations and the Post-Processes”, 3.17 MS: High Performance Computing and Related Topics I, 1st. Pan-American Congress on Computational Mechanics (PANACM2015), Buenos Aires, Argentina, 27-29 April, 2015

S. Iwagami*, G. Tsutsumi, K. Nakano, T. Kobayashi, T. Takami, K. Takahashi, “Numerical Analysis on the Lighthill Sound Sources of Oscillating Jet”, Contributed Session on Advanced Methods in Computational Fluid Dynamics II, 1st. Pan-American Congress on Computational Mechanics (PANACM2015), Buenos Aires, Argentina, 27-29 April, 2015

T. Kobayashi, T. Iwasaki, K. Takahashi, T. Takami, M. Aoyagi, “A numerical simulation for a tone hole of flue musical instrument”, XXXIV Dynamics Days Europe, P2-5, 8-12 September 2014, University of Bayreuth,

Germany

T. Takami, M. Shimokawa, T. Kobayashi,
“Temporal parallel approach to nonlinear
problems with multiple time-scales”, XXXIV
Dynamics Days Europe, P2-5, 8-12
September 2014, University of Bayreuth,
Germany

K. Takahashi, T. Kobayashi, T. Akamura, Y.
Nagao, T. Iwasaki, K. Nakano, M. Aoyagi,
“Evaluation of acoustic energy generation
and absorption in a flue instrument with
Howe's energy corollary”, XXXIV Dynamics
Days Europe, P2-5, 8-12 September 2014,
University of Bayreuth, Germany

S. Yoshikawa and K. Kajiura, “Acoustics of cross
fingerings in the shakuhachi”, 7th Forum Acusticum
2014, Invited Paper, MUSICAL ACOUSTICS -
MUSICAL TOOLS, 7th - 12th September 2014,
Krakow

(4) 国内会議発表 5 件

招待講演：高橋公也「クラリネットのレジス
ターキーと二重遅延モデル」 JPSJ フレンドシ
ップミーティング 2015 年日本物理学会
年次大会 早稲田大学 3月22日 201
5年

岩上翔，堤元気，中野健一郎，小林泰三，高
橋公也，「エッジトーンにおける流体音源の
数値的評価」，21aPS-20，日本物理学会 第 70
回年次大会，2015 年 3 月，早稲田大学

堤元気，岩上翔，中野健一郎，小林泰三，高
橋公也，「エアリード楽器でのジェットの安
定性解析」，21aPS-21，日本物理学会 第 70
回年次大会，2015 年 3 月，早稲田大学

宮川矩昌，小林泰三，高橋公也，吉川茂，「流
体音響シミュレーションによる曲管の音響解
析」，21aPS-22，日本物理学会 第 70 回年次
大会，2015 年 3 月，早稲田大学

實本英之，小林泰三，松本正晴，滝澤真一郎，
三浦信一，中島研吾，複数拠点利用を実現す
るユーザ駆動型・拠点協調フレームワーク，
電子情報通信学会技術研究報告
CPSY2014-20 (SWoPP'14), Vol.114, No.155,
pp155-159, 2014 July

(5) その他（特許，プレス発表，著書等）

新聞発表：高橋公也 「クラリネットの小さ
い音孔 2 重遅延モデルで機能解明」 科学
新聞（第 3515 号、2 ページ） 12月12日
2014年