# リコーダーからの発音に関する流れと音の直接計算

濱砂龍摩,横山博史,飯田明由

豊橋技術科学大学 機械工学系

#### 1. はじめに

われわれの研究室では、これまで流れから発生する騒音(空力騒音)に関する研究を行って おり、流れからどのように音が発生するのか、その発生音をどのように低減できるのかといっ た研究を行ってきた。楽器会社の方とお話しする機会があり、実はリコーダーやフルートとい ったエアリード楽器における発音機構も、こうした空力騒音の発生機構と共通点が多いという ことがわかってきた。そこで、われわれは、楽器の発音機構の解明や形状がどのように音に影 響を与えるかといったところに着目し、研究を始めた。世の中には様々な楽器があり、それぞ れにおいて物理現象は異なっている(詳細は文献[1]を参考にされたい)。その中で、リコーダ ーはリードのような可動部がなく、比較的単純な形状であることから、まずリコーダーを対象 として研究することとした。

楽器まわりの流れや音場を明らかにする際には、もちろん実験的手法も有用である。われわ れの研究においても粒子画像流速測定法 (PIV) による流れ場の可視化を活用し、結果を数値 計算結果と比較し、計算手法の検証を行っている。ただし、実験的に3次元の複雑形状を有す る実際の楽器内外の流れ場・音場を精度良く計測するためには課題も多い。適切に数値計算が 行えた場合、楽器内外の流れ場・音場を知ることができ、楽器形状がそうした流れ・音に及ぼ す影響も明らかにすることができる。

本数値計算の大きな問題は、必要となる計算時間である。本計算のような圧縮性計算の時間 ステップは音速に基づいたクーラン数により安定性が決まる。計算格子などによるが、現状の 0.05mm 程度が最小の計算格子幅となる場合、時間ステップは 6×10<sup>8</sup> 秒程度の計算を実施する ことになる。楽器の音の立ち上がりに 30 周期程度必要<sup>1</sup>と考えると、350 Hz の音では 0.1 秒の 実時間に相当する計算が必要となり、170 万ステップに相当する。東京大学情報基盤センター FX10 スーパーコンピュータシステム 96 ノードを用いた計算では 15 日程度の計算が必要とな る。一方、実際の楽器設計の現場や形状の最適化を考えると、より短時間(できれば1 日程度) で解析結果を得ることが望ましいと考えられる。そこで、本 HPC チャレンジを利用し、 2000-4000 ノードを利用することにより、どの程度短時間で解が得られるか検討した。さらに、 通常の計算(約1億点)より解像度を上げた計算(約6億点)や、リコーダーとともに演奏者 による音の反射効果も含んだ計算を行った。

# 2. 対象としたリコーダー・計算条件

リコーダーやパイプオルガンなどのエアリード楽器は空気の流れの通り道であるウィンドウ エイ,流れが衝突するエッジ,音響共鳴を伴う共鳴管によって構成されている。解析に用いた アルトリコーダーYRA-38BIIIを図1に示す。ウィンドウェイの断面形状には矩形やアーチ形の ものがあるが、YRA-38BIIIはアーチ形を有しており、矩形のものと比較すると複雑な形状とな る。リコーダーは音孔を開閉することで楽曲の演奏を行うが、音孔は閉じることで音の周波数 が低くなる。楽器の解析においては周波数が低いほど音の立ち上がりに時間を要すると考えら れるため,音孔をすべて閉じた状態が最も計算時間が必要となる。そのため,全音孔を閉じた 際の計算規模や計算時間の知見を得るために音孔はすべて閉じた状態で解析を行った。解析に おける座標原点はウィンドウェイ出口中央部とし,流れ方向をx,鉛直方向をy,スパン方向を zとした。ウェインドウェイ出口断面平均速度をU0とし,断面平均速度はリコーダーを実際に 吹奏する際と同程度のU0=5.6 m/sとした。境界条件として流速を与える際には、ウィンドウ ェイ入口に流速を与えウェインドウェイを通ることで流れ場を発達させた。音孔の状態や使用 したリコーダーなどは以上のものとし、本チャレンジでは、下記の3つの条件の解析を行った。

・1 億点のメッシュ ( $\Delta x_{\min} = 0.06 \text{ mm}, \Delta y_{\min} = 0.05 \text{ mm}, \Delta z_{\min} = 0.15 \text{ mm}$ )

・1 億点のメッシュ +演奏者のモデル

・6 億点のメッシュ ( $\Delta x_{\min} = \Delta y_{\min} = \Delta z_{\min} = 0.05 \text{ mm}$ )

従来,解析を行っている1億点の解析に加えて,格子をより緻密にした6億点の解析を行うこ とで解析時間と予測精度の比較を行った。6億点の格子は従来の解析に用いてきた約1億点の 格子のスパン方向に3倍緻密にしており,流れ方向に対しても音孔を十分に解像できるように 音孔を最低10点以上で捉えるように格子を作製した。格子解像度の比較を行うことで実際の形 状を有したエアリード楽器の解析に必要な解析時間や規模を明らかにすることが可能となる。

また、従来の解析では、楽器だけを物体部とし、演奏者周りの音の伝播までは考慮せずに解 析を行ってきた。実際の楽器の演奏においては奏者の出した音の自分自身への聞こえ方も吹奏 感に影響を与える。そのため、本チャレンジでは、演奏者周りの音を解析するために演奏者が 楽器を吹奏する形態を考慮したモデルを作成し解析を行った。なお、計算コスト削減のため、 本計算の初期条件としては、リコーダーの内外の流れ場と音場を楽器単体の解析で発達させた 場を与えた。



第1図:解析に用いたリコーダーの全体図とウィンドウェイ出口周りの拡大図 上図がリコーダーの全体図となっており,解析は音孔をすべて閉じた状態で解析を行った。 下図がウィンドウェイ出口周りの拡大図であり,ウィンドウェイの断面形状は弧を帯びた形状。

#### 3. 流れと音の直接計算の手法

リコーダー内の流れと音は相互に作用しており、同時に解く必要がある。そのため、連続の 式・エネルギー保存式を含んだ圧縮性 Navier-Stokes 方程式を支配方程式とした。空間微係数 の評価には、高精度に流れ場・音波の挙動を捉えるため6次精度コンパクトスキーム<sup>2</sup>を用い、 時間積分には3次精度ルンゲクッタ法を用いた。また、計算効率や計算格子の容易性などの利 点から矩形格子を用いた計算を行った。矩形格子において、複雑な物体まわりの流れ場・音場 を再現するために、Volume Penalization (VP)法<sup>3</sup>を用いた。本手法は、支配方程式右辺に VP 項を付加することで物体が流れ場・音場に及ぼす影響を予測する手法であり、埋め込み境界法 の1種である。VP 法は従来多孔質媒体の数値解析を行うための手法であったが、本計算では孔 隙率を変化させることにより、多孔質の内部で速度が0に漸近するように設定して、多孔質媒 体をモデル化する。このため、空隙率の値によって壁面付近の流れの状態が異なり音響解析的 には、孔隙率の値によって壁面の反射率が変化する。本解析では、音波が壁でほぼ完全反射(反 射率:99%)する条件となるよう、孔隙率を調整し、物体内部での速度は0とした。実際の演奏 者は音波を完全反射するわけではないが、計算の安定性のために本チャレンジの演奏者の部分 の空隙率はリコーダー部と同じ値を用いている。

#### 4. 発生音の解析結果

#### 4. 1リコーダーの音の発生機構

リコーダーからの発生音はウィンドウェイから空気の流れと共鳴管の音響共鳴の相互作用に よって発生している<sup>4</sup>。ウィンドウェイから出たジェットはエッジに対して上下に振動し,共 鳴管の音響共鳴によって振動が維持される。筆者らは第3音孔以降をカットしたモデルにおい て,リコーダーの発音機構を明らかにしている。<sup>5</sup>今回は,さらにすべての音孔を有するモデル の計算において,発音機構を明らかにした。

図2にリコーダーの発音時の流れ場と音場を示す。上図には共鳴管内の圧力変動(各点の圧 力から平均圧力を差し引いたもの)と速度変動ベクトルを示し、下図にはx方向の成分を持つ 速度場を示す。時間原点 t=0 はエッジの中心位置から v 方向に-9.8 mm の位置(共鳴管の断面 中心)で圧力が最も小さくなる時間とした。ウィンドウェイ出口からのジェットのエッジに対 して上下の振動を1周期Tとし、1周期における各時間をt/Tの無次元時間で表している。速度 変動ベクトルはウィンドウェイ出口部から上下の部分で可視化しており、ウィンドウェイ出口 からのジェットによる流体力学的な変動が小さい領域を示している。この速度変動ベクトルの 値は理論式から求められた音響粒子速度とも一致しており、この速度変動ベクトルを音響粒子 の変動として見なす事ができる。時刻 t/T=8/30 においては最も大きな下向きの音響粒子速度が 確認され,下図ではジェットが下向きに偏向され始めている。 反対に t/T = 23/30 では上向きの 粒子速度が確認され、ジェットは上向きに偏向され始めている。時刻 t/T=15/30 ではジェット が偏向され共鳴管側に傾くことで共鳴管内に空気が入り共鳴管内の圧力は正圧となる。反対に t=0 ではジェットが共鳴管外側に傾くことで共鳴管内の圧力は負圧となる。このジェットの振 動による正圧(圧縮波)と負圧(膨張波)の繰り返しが音響共鳴を維持し,音響共鳴による音 響粒子の誘起がジェットを偏向させている。以上のようなジェットの振動と音響共鳴の互いの 相互作用によりリコーダーは発音していることを確認でき、本機構が3音孔カットモデルにお いて明らかにした機構と同一であることを確認することができた。



第2図:リコーダーの発音時の流れ場と音場

上図がリコーダーの圧力変動場(各点の圧力から平均圧力を差し引いたもの)とウィンドウェイ出口周りの速 度変動ベクトルの可視化画像を示す。下図がウィンドウェイ周りの流れ方向の速度成分の可視化画像を示す。

### 4.2 格子解像度が物体形状の再現性に及ぼす影響

リコーダーを解析する際の物体モデルの実物との再現性は格子の細かさに依存し、格子が細かいほど実際の物体形状を再現できる。総格子点数が1億点と6億点、2つのメッシュの物体部を比較することで格子点数を増加させた際のリコーダーの形状の再現度の違いを確認する。 解析対象としたリコーダーは、ウィンドウェイ出ロ形状がアーチ型であるため、アーチ形状を 十分に再現するためにはz方向とy方向の解像度が重要となる。6億点のメッシュは1億点の メッシュに対してz方向に3倍細かい格子解像度(dz = 0.05)を有している。

図3に解析領域のリコーダー部分(物体部)の形状を示す(左部が1億点,右部が6億点)。 各格子の比較を行うと、6億点のメッシュの方が本来の格子点も多いことから、物体部となる 格子点も多くなる。図3の右側に示す6億点のメッシュの方が隣り合う物体部の格子の間隔が 小さくなり、物体部をより再現でき、物体表面はより滑らかになっていることがわかる。以上 のことから格子解像度を高くすることにより、複雑な物体形状の再現性が高くなることを確認 することができた。

図4にウィンドウェイ出口から見たエッジの断面形状の物体部と流体部を判別した状態を示 す。リコーダー部分(物体部)と流れ場の識別には、マスク関数 $\chi$ を使用する。図4に示すよ うに $\chi$  = 1の黒色の格子点が物体部、 $\chi$  = 0の白色の格子点が流体部としマスク関数による判別 を行っている。格子による物体部として識別される形状の比較を行うと6億点のメッシュの方 が流体部と物体部の両方でより細かい解像度を持つことを確認することができた。特に、エッ ジの中央部においてアーチ形状の $\chi$ 方向変化が小さくなるため、その差が顕著である。



第3図:解析領域の物体部(リコーダー)の領域左図:総格子点数1億点,右図:総格子点数6億点。



第4図:エッジの物体部と流体部の判別 左図:総格子点数1億点,右図:総格子点数6億点。

# 4.3 2つのモデルの解析時間

今回の2400 ノードを用いた格子点数1億点のメッシュの解析では、24時間の計算を行うこ とで実時間の33 ミリ秒(60万ステップ)の計算が可能であることがわかった。エアリード楽 器の音の立ち上がりである基本周波数の30周期<sup>1</sup>に対しては約3分の1の解析を行うことがで きた。そのため発生音の周波数が高いソプラノリコーダーや音孔を開口した発生音の周波数が 高い条件での解析に関しては1日での解析が十分に可能であると考えられる。

6億点の解析では3600 ノードを使用し,約10時間の計算で実時間の4 ミリ秒の解析を行う ことができた。エアリード楽器の音の立ち上がりに対しては6億点メッシュで24時間計算した と仮定すると10分の1の解析を行うことができることを確認した。今回の解析において使用ノ ード数は異なるが6億点のメッシュの解析時間は1億点のメッシュと同程度の実時間の解析を 行うために約3倍の時間を要することを確認することができた。大規模 HPC チャレンジでは格 子点数6億点のメッシュで4 ミリ秒の解析を行うことができたが、十分なエアリード楽器の音 の立ち上がりまで追加の解析を行った。解析には東京大学情報基盤センターOakforest-PACSの 試験運用を80ノード利用し、解析時間14日の計算により、エアリード楽器の音の立ち上がり に対しては2分の1のまでの解析を行った。

### 4. 4 格子解像度が流れ場に与える影響

図5にリコーダーのウィンドウェイ出口周りの流れ方向速度9m/s 等値面を示す。図の右側 が6億点のメッシュ,図の左側が1億点のメッシュの速度場である。各メッシュで中央部の速 度の等値面を比較すると等値面に差は見られない。しかし,1億点のメッシュの速度の当値面 のスパン方向の両端を見ると端部分の速度が中央部に比べて波打っており壁面付近が中央部よ り加速していることがわかる。従来行ってきた解析においても壁面付近の速度分布が加速した 形となっていた。しかしz方向の格子間隔を3倍細かくすることでz方向に対しても壁面付近 の格子解像度を十分に確保でき流体部をより解像できることで加速した等値面がなくなり,等 値面が波打たなくなることがわかった。このような流れ場の変化がどのように音の発生に影響 しているかは今後明らかにしていく必要がある。



第5図:リコーダーのウィンドウェイ出口周りの流れ方向速度の9m/s等値面 左図:総格子点数1億点,右図:総格子点数6億点。

### 4.5 格子解像度が音場に与える影響

図6に格子解像度の違いが圧力変動に与える影響を示す。圧力変動の観測点はウィンドウェ イ出口上方90mm地点としている。今回の解析は実際の楽器であれば基本周波数(約350Hz) の音が発音する流速での解析であったが、圧力変動の波形から1周期から周波数を求めると基 本周波数の2倍の周波数であることがわかった。リコーダーを吹いたことがある方は誰しも経 験があると思うが、リコーダーを強奏した際に音が裏返り高い周波数の音が発生するオクター ブジャンプと呼ばれる現象がある。今回の解析上においてオクターブジャンプが2つのメッシ ュの解析ともに発生し、発生流速は同モデルの実験結果に比べて低い流速で発生する結果とな った。この違いについては、今後の検討課題である。

格子点数が6億点のメッシュに関しては1億点のメッシュの正弦波的な波形に対して短い周 期の波形も現れ始めており、さらに高次の3次の周波数成分があることを確認できた。また各 メッシュでの圧力変動を比較すると6億点のメッシュの方が1億点メッシュに比べて時間発展 したとき、圧力変動が小さくなっていることを確認した。

メッシュ数を1億点から6億点へと格子点を増加させることでリコーダーの物体部と流れ場 に関しては、解像度を上げることができた。しかし、音場に関してはオクターブジャンプを実 験より低い断面平均速度で発生させ、6億点のメッシュではさらに高い周波数の成分が現れる 結果となり、1億点のメッシュでの問題点を解決するには至っていない。そのため、今後、計 算結果をより細かく・様々な視点から分析し、計算モデルの改良を行っていく予定である。



第6図:格子解像度の違いが圧力変動に与える影響(観測点:ウィンドウェイ出口上方 90 mm) クラフ横軸は流れと音の発達過程である10 ミリ秒 をオフセットし記す。

## 4.6 演奏者による反射を考慮した発生音の解析

図7に演奏者が楽器を吹奏した際の音場を可視化した画像を示す。図7下図の演奏者による 反射なしの可視化画像では、リコーダーから全体にかけて音波が広がっているのに対して、上 図の演奏者が付加されたモデルの周りでは音波が反射しており演奏者の後ろ側の音圧の変動が 小さくなることを確認した。本解析において演奏者モデル表面では音波が完全反射となるよう に境界条件を与えたが、VP 法であれば空隙率を変更し、反射率を変更することも可能である。 そのため、今後実際の演奏者に近い反射率をもたせ解析を行うことも検討していきたい。また 本解析では、リコーダーに加えて演奏者の反射を考慮した計算において流れ場が発達した状態 の流れ場・音場を初期条件として与え、安定した解析を行うことができた。そのため発達した 状態の流れ場を初期の流れ場として用いることで、例えば各音孔の開閉状態の異なる計算モデ ルにおける解析の初期の流れ場の発達のコストを無くすことも期待できる。

図8に演奏者の耳の位置での圧力変動を示す。時刻t=0において、リコーダーのみを物体部 として発達した流れ場・音場を初期条件として、境界条件として演奏者を与えたため特異な圧 力波が発生しているが時間発展とともに安定化していく。演奏者有りと演奏者無しモデルを比 較すると圧力変動の位相がずれていることがわかる。これは演奏者が境界条件として与えられ ることで音波が回折し、耳の位置に到達する音波の位相が変わったことが考えられる。



第7図:リコーダーと演奏者の周りの音場



第8図:演奏者の耳の位置での圧力変動

クラフ横軸の原点は4.1節と同様に共鳴管内に膨張波が発生するタイミングとした。

# 5. まとめ

1. 格子点数1億点規模の解析を本チャレンジにおいて 2400 ノードを用い24 時間解析を行うこ とで、基本周波数10周期程度の計算を実施できた。これは本楽器において必要となる計算の3 分の1程度であり、われわれの通常100ノードを用いた計算では5日間かかる。また、2400ノ ードを用いることで、より高い基本周波数の計算であれば1日での解析が可能であると考えら れる。

2. 通常われわれが計算を実施する1億点の格子をx 方向に2倍, z 方向に3倍程度細かくした計算(6億点)を実施し、物体をより厳密に再現できることがわかったが、実験とモードが異なるなどの問題もあり、今後さらに検討が必要である。

3. 人による音の反射を考慮した計算を実施し、演奏者周りでは音が反射し、演奏者の耳付近の 圧力変動の位相が遅れることを明らかにした。 [1] N・H・フレッチャー, T・D・ロッシング:岸憲史,久保田秀美,吉川茂『楽器の物理学』, 丸善出版株式会社, 2012

[2] S. K. Lele., "Compact finite difference schemes with spectral-like resolution", J. Comput. Phys., 103, pp.16-42, 1992.

[3] P. Angot, CH Bruneau, and P. Frabrie, "A penalization method to take into account obstacles in viscous flows," Numer. Math., 81, pp.497–520, 1999.

[4] B.Fabre, et al. "Aeroacoustics of musical instruments." Annual review of fluid mechanics 44 (2012): 1-25.

[5] Yokoyama, H., Miki, A., Onitsuka, H., and Iida, A., "Direct numerical simulation of fluid-acoustic interactions in a recorder with tone holes" J. Acoust. Soc. Am., **138** (2), pp.858-873, 2015.