

研究概要報告書

( 1/3 )

研究題目	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	報告書作成者	高橋 公也
研究従事者	高見利也、小林泰三、西田晃、青柳睦		
研究目的	<p>リコーダー、フルート、パイプオルガンなどのエアリード楽器は、空気のジェット振動が作り出すエッジトーンと呼ばれる流体音(空力音)を音源とする楽器であり、その発音機構の解明は音楽音響分野の重要な課題の1つである。本研究の目的は、近年流体計算で注目を集めている LES (Large Eddy Simulation) を用い、エアリード楽器の発音機構を流体音の立場から明らかにすることである。</p> <p>流体音は流体の揺らぎから発生する音で、その音源の定式化は、1950 年代にジェット機による騒音の問題を取り扱う過程で Lighthill によって見出された。その後、Powell-Howe の理論をへて現在では流体音の主要な音源は、渦の運動(渦音)に起因すると考えられている。90 年代以降の計算機と計算スキームの急速な発展により、数値的に流体音源を再現することが可能になり、具体的な問題へのアプローチが可能になってきている。</p> <p>研究内容の項目で述べるように、エアリード楽器では、管体内部の音圧が極めて高いために、流体音源と発生した音圧との相互作用を無視できない。そのため、流れと音を同時に解析する必要がある。これまでの研究で<sup>1,2)</sup>、我々は、圧縮性 LES を用いてエアリード楽器の発振の再現に成功している。これらの成果を元に、研究内容の項目で述べるテーマについて研究を行い、楽器の流体音源の分布や流体と音の相互作用を明らかにし、楽器の発音機構の解明を行っていく。本研究の成果は、より良い楽器の設計を行うために重要な指針を与えるものと期待される。</p> <p>1) 宮本真孝、高見利也、小林泰三、西田晃、青柳睦、高橋公也、“圧縮性 LES を用いた小型エアリード楽器の数値解析”, 音楽音響研究会資料 Vol. 28, No.7 (2009) pp.7-12.                  2) T. Kobayashi, T. Takami, M. Miyamoto, K. Takahashi, A. Nishida, M. Aoyagi, “3D Calculation with Compressible LES for Sound Vibration of Ocarina”, Proceedings Open Source CFD International Conference 2009 (CD-ROM), November 12-13th, Barcelona, Spain.</p>		

研究内容	<p>九州大学情報基盤研究開発センターの青柳・高見研究室と協力し以下の項目について研究を行なった。</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. 圧縮性 LES を用いて流れと音を同時に計算し、小型エアリード楽器(説明書参照)の発振を再現する。通常、音のエネルギーは流体のエネルギーに比べ十分に小さいが、楽器の管体内部では音圧が 160dB と極めて強いため、管体内の音波が音源であるジェット運動に影響を与える。そのため、相互作用の解析が可能な流れと音の同時計算が必要である。</li><li>2. 計算結果から、Lighthill の音源項を計算し、流体音源の分布を明らかにする。特に、Powell-Howe の渦音理論の検証のために、ジェットの渦度がどのように音源と関連しているかを明らかにする。</li><li>3. 音楽音響の理論で提唱されている、2つの発音機構(流量的駆動、運動量的駆動:説明書参照)の違いを流体音の立場から見直し、どちらの駆動法が優位に働くかを統計的な手法を用いて明らかにする。具体的には流量的駆動、運動量的駆動の音源分布と管体内音圧の相関関数を計算し、どちらが主な音源かを特定する。</li><li>4. 共鳴管体を持たないエッジトーンの場合を計算し、共鳴管体のある楽器との違いを明らかにする。単なるエッジトーンではジェットの流速に比例する周波数での発振が起きるが、共鳴管体がある場合には、管体共鳴周波数での強い発振が起きる。2つの場合を比較することで、音から流れへのフィードバックの機構を明らかにし、共鳴管体の役割を明らかにする。</li><li>5. より簡単なエッジトーンの場合で、Lighthill の理論から求まる音源分布と Powell-Howe の渦音理論から求まる音源分布を計算し、2つの理論の違いを明らかにし、どちらの理論が遠方音場の再現に必要な音と流れ場の連成解析(分離解法)に適しているかを検討する。</li></ol>
------	--

研究概要報告書

( 3 / 3 )

<p>研究のポイント</p>	<p>本研究の主なポイントとして、1)圧縮性流体のシミュレーション(LES)を用い音と流体を同時に計算することで、エアリード楽器の発振状態を正確に再現することが可能になった点、2)Lighthill の理論を用いて楽器の音源分布を正確に計算できるようになった点、3)エッジトーンとの比較により発振状態の楽器の特徴が明らかになった点などがある。本研究の成果は、流体音が関係する航空機、高速列車、風力発電などの騒音問題に応用可能であると考えられる。</p>
<p>研究結果</p>	<p>OpenCFD 社の提供するフリーのソフトウェアOpenFOAM の圧縮性 LES ソルバーを用いて流れと音を同時に計算し、2次元エッジトーンや2次元小型エアリード楽器の発振の再現に成功した。エッジトーンでは3次元の計算も行った。</p> <p>2次元楽器では、楽器の基本的な発振特性（ジェットの流れと発振周波数の関係）の再現に成功した（説明書：図1）。次に、計算結果から、Lighthill の理論を用いて、流体音源の分布を計算し、渦度の強い領域（ジェットやジェットがエッジと衝突して出来る渦）に強い音源があることを確認した（図4、5）。強い音源領域に置いた観測点における音源強度と管体内部の音圧の相互相関を取り、音源と音の同期を調べた。その結果、ジェットの音源の方が、管体内の渦の音源よりも良く同期している事が分かった。これは、音楽音響の理論で提唱されている2つの発音機構、流量的駆動、運動量的駆動のうち、ジェットを音源とする流量的駆動の方が、管体内の渦を音源とする運動量的駆動よりも支配的であることを示していて、これまでの半経験的な理論予測と一致する。</p> <p>次に、エッジトーンの計算を行い、楽器の場合と比較した。エッジトーンの場合には、強い音場が存在しないため、エッジの後方に規則的な渦が形成され、渦から発生する音源も重要な働きをする事が分かった。さらに、エッジトーンの場合で、Lighthill の理論から求まる音源分布と Powell-Howe の渦音理論から求まる音源分布を比較した（図6、7）。その結果、2つの音源は定性的にも定量的にも違いがある事が分かった。検討の結果、理論的な取り扱いが容易な Lighthill の音源の方が、遠方音場再生に必要な連成解析（分離解法）に適しているとの結論に至った。</p>
<p>今後の課題</p>	<p>本研究では、主に2次元のモデルを用いた計算を行ったが、今後は、より現実的な3次元モデルの計算を行っていく予定である。計算を効率的に行うには、並列化が必要である。効率的に並列化が可能なアルゴリズムを開発する。</p> <p>遠方の音場を再現するためには、連成解析が必要になる。流体ソルバーで計算した音源分布を音波ソルバーにマッピングする手法を開発し、遠方音場の再現を目指す。</p> <p>楽器の音高の変化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（移動境界問題）。音高の開閉を可能とするアルゴリズムを開発し、楽音の再生を目指す。</p>

図 1

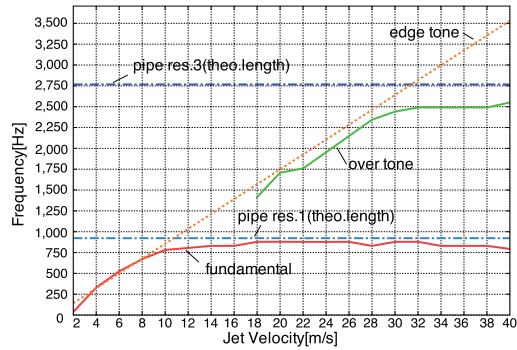


図 2

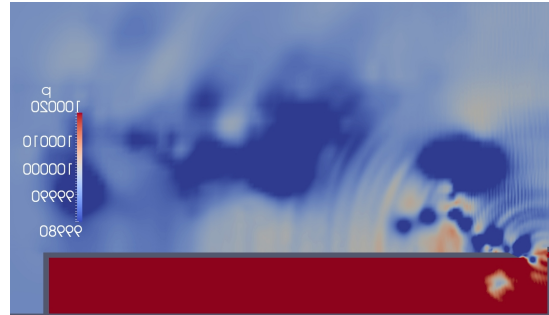


図 3

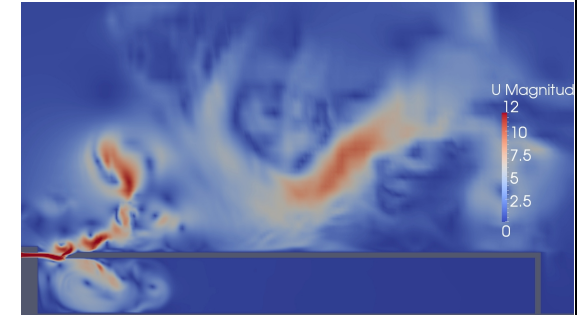


図 4

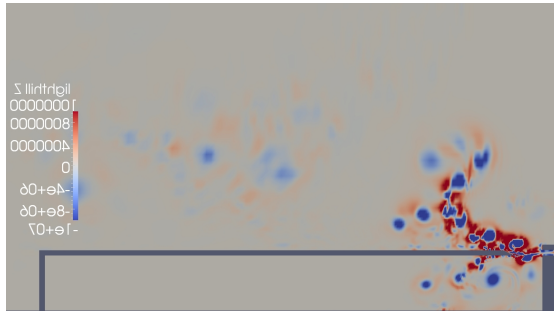


図 5

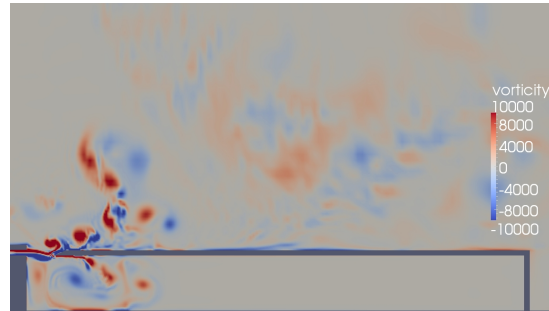


図 6

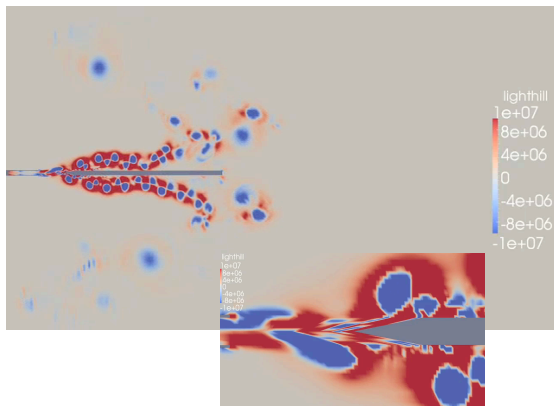
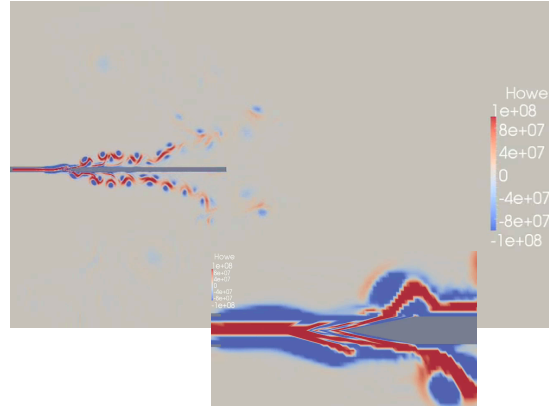


図 7



数値計算の結果

- 図 1 エアリード楽器の発振特性
- 図 2 圧力分布 (エアリード楽器)
- 図 3 流速分布 (エアリード楽器)
- 図 4 渦度分布 (エアリード楽器)
- 図 5 Lighthill の音源 (エアリード楽器)
- 図 6 Lighthill の音源 (エッジトーン)
- 図 7 Howe の渦音源 (エッジトーン)

(注：フローチャート図，ブロック図，構成図，写真，データ表，グラフ等 研究内容の補足説明にご使用下さい。)