

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540455

研究課題名(和文) 流体音響理論を用いたエアリード楽器の解析

研究課題名(英文) Numerical analysis on flue instruments based on aerodynamic sound theory

研究代表者

高橋 公也 (Takahashi, Kin'ya)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号：70188001

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円、(間接経費) 1,110,000円

研究成果の概要(和文)：音場と流体場の相互作用の解析を行い、Howeによって提案された理論を用い音と流れの相互作用によるエネルギーの変換を数値的に評価する手法を開発した。楽器の2Dモデルに適用しHoweの評価式を数値的に計算することに成功した。この結果は、他の研究者が実験に置いてHoweの評価式を計算したものと良い一致を示し、楽器の歌口のどの部分が主な音源になっているかが明らかになった。また、圧縮流体と非圧縮流体におけるLighthillの音源分布を比較検討し、それらの間には定性的にも定量的にも違いがあることを見つけた。これは、従来の非圧縮流体を用いた近似計算では不十分であることを示唆する。

研究成果の概要(英文)：We study the interaction between the fluid field and the acoustic field in a small flue-instrument model based on Howe's energy corollary theory, which allows us to estimate the energy transfer from the acoustic field to the fluid field and vice versa. We develop a numerical method to implement the calculation of Howe's energy corollary. As a result, we find out which area near the mouth opening mainly contributes to the generation of sound: the aerodynamic sound is generated from the oscillating jet rather than vortices shed at the edge. Our result is essentially the same as the previous experimental result by Yoshikawa et al. and provides a numerical evidence to Howe's theoretical prediction. We further calculate Lighthill's sound source with the incompressible approximation and with full-compressible calculation. We find qualitative and quantitative differences between the two calculations. It indicates that the incompressible approximation usually used is insufficient.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：数理物理・物性基礎

キーワード：流体音 エアリード楽器 移動境界問題 エッジトーン 渦音理論

1. 研究開始当初の背景

流体音(空力音)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 によって行われた¹⁾。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²⁾。90年代以降の計算機と数値計算法の急速な発展により、数值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。例えば、航空機や高速列車からの流体音が作り出す騒音の問題は、その実用性の観点からも、国内外の音響、流体、機械の各分野の研究者の強い関心を集めている。

流体音源を持つエアリード楽器の発音機構の解明は、音楽音響および流体音響学の分野での古くからの課題である。エアリード楽器の特徴は、流体音の発生に必要なエッジのついた歌口と共鳴管体を持つ事である。共鳴管体は正確な音程の楽音を発音するために必要である。定常的な発振状態では、管体内音場は共鳴により極めて強くなり、音と流れの双方向の相互作用が発生し、音源となる空気流(エッジと衝突するジェット)と管体内共鳴音場が同期した状態になる。したがって、流体運動と共鳴音場の相互作用の解明が発音機構の解明の鍵となる。70年代に渦音理論を提唱したHoweは、エッジトーンやエアリード楽器の発音のメカニズムを流体音響学的な立場から説明する事を試みている²⁾。また、Coltman及びFletcherらは、実験にもとづいた半経験的な理論を展開し、等価回路理論の助けを借りて楽器の発振特性を定性的に説明する理論を構築した³⁾。90年代以降、エッジトーンやエアリード楽器の発振状態を格子Boltzmann法や有限要素法によって数值的に再現する試みが国内外の研究者によって行われ、幾つかの成功例が報告されているが、流体音響理論にもとづく音源の解析にまでは至っていない。また、近年では、Howeの理論にもとづいた流体と音場間のエネルギー交換を実験的に評価する試みも行われている^{2,4)}。

本研究者は、研究開始時に、圧縮性LES(Large Eddy Simulation)を用いてエッジトーン及び小型エアリード楽器の発振を数值的に再現することに成功していた⁵⁾。特に、2次元モデルではあるが小型エアリード楽器の数値解析により、Coltman-Fletcher理論の再現に成功したのは世界的に見ても最初の例であると思われる。また、Lighthillの理論およびPowell-Howeの渦音理論にもとづく音源の再現にも成功していた。

[参考文献]

- 1) M.J. Lighthill, Proc. Roy. Soc. London, A **211**, 564-587 (1952).
- 2) M.S. Howe, Acoustics of Fluid-Structure Interactions (Cambridge University Press, 1998).

3) N.S. Fletcher & T.D. Rossing, The Physics of Musical Instruments (2nd edition), (Springer-Verlag, New York 1998).

4) A. Bambauger, Forum Acusticum Budapest 2005, 4th European Congress on Acoustics 665-670.

5) M. Miyamoto *et al.*, Proc. 20th International Symposium on Musical Acoustics, paper no. 37. (2010).

6) S. Yoshikawa, H. Tashiro, H. & Y. Sakamoto, J. Sound and Vibration, **331** 2558-2577 (2012).

7) D.H. Keefe, J. Acoust. Soc. Am. **72** 676-687; 688-699 (1982).

2. 研究の目的

エッジトーンと呼ばれる流体音(空力音)を音源とするエアリード楽器(リコーダー、フルート等)の発音機構の理論的な解析を行う。楽器の歌口(マウスピース)近傍の流体の流れ場の形成とそれが作り出す流体音源の時空間的な構造をLighthillやHoweによって構築された流体音響理論を用いて明らかにして行く。特に、(1) 3次元モデルと2次元モデルにおける流体的、音響的な違い、(2) 流体音源(Lighthillの音源)の基礎解析、(3) 歌口近傍での流体と音のエネルギー交換の評価、(4) 音孔の機能の解析、これら4つの課題について研究をおこなった。

3. 研究の方法

すべての解析において、その元になる流体計算には圧縮性LESソルバーを用いる。これにより、エアリード楽器モデルおよびエッジトーンモデルの流れ場と音場を同時に再現することが可能になる。具体的にはオープンソースのソフトウェアOpenFOAMの圧縮性LESソルバーのrhoPisoFoamを用いた。これにより解析に必要な流速、圧力等の基礎データが得られ、これらからLighthill及びHoweの理論を用いて音源分布等の必要な物理量を計算する。

また、(3) 歌口近傍での流体と音のエネルギー交換の評価の課題では、音響ソルバーを必要とする。我々は、必要な音響ソルバー(FDTD(2,4))を開発し、それを用いた。(4) 音孔の機能の解析では、音孔の移動を再現するために必要な移動境界を取り込んだソルバー(rhoPisoDyMFoam)をOpenFOAM上で開発した。

これらの研究は、高橋、高見、小林(泰三)が共同で企画立案し、九州工業大学および九州大学の大学院生を指導しながら実施した。また、必要に応じて連携研究者の青柳、西田、小林(宏充)の協力を仰いだ。

4. 研究成果

(1) 3次元楽器の解析

図1に計算に用いた2次元の楽器モデルを示す。3次元のモデルはこれに1cmの厚みを加えたものである。

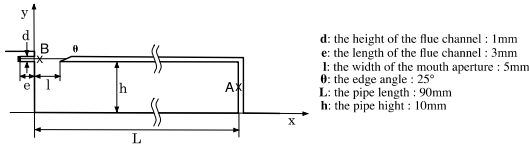
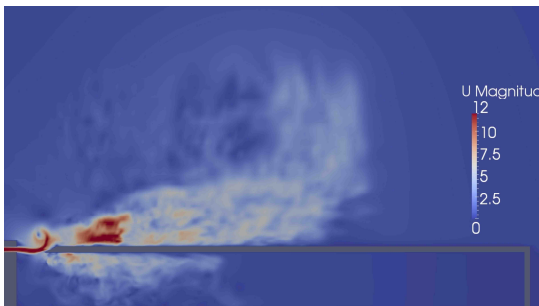


図 1 楽器のモデル

図 2 に 2 次元と 3 次元のジェットの流速が 12m/s のときの流速分布の比較を示す。(a) が 3 次元、(b) が 2 次元である。歌口付近でジェットが振動し楽器が発振しているのがわかる。ただし、2 次元の方が大きな渦が見られ、特に歌口近傍の共鳴管内部に大きな渦が観測される。このような渦の運動は不規則で楽器の発振を不安定化させる。このような 2 次元モデルでの強い渦の発生は 2 次元流体特有の逆エネルギーカスケードのためと考えられる。したがって、より現実の楽器に近いシミュレーションには 3 次元計算が必要である。しかし、発振周波数は 2 次元 (806Hz)、3 次元 (795Hz) とほぼ同じで、2 次元モデルでも楽器の基本的な発振現象の解析には十分であると考えられる。

(a)



(b)

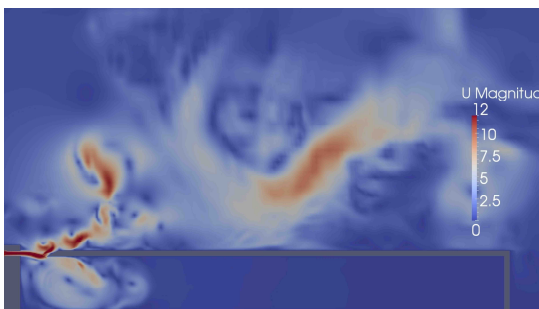


図 2 流速分布 (a) 3 次元 (b) 2 次元

(2) 流体音源の基礎解析

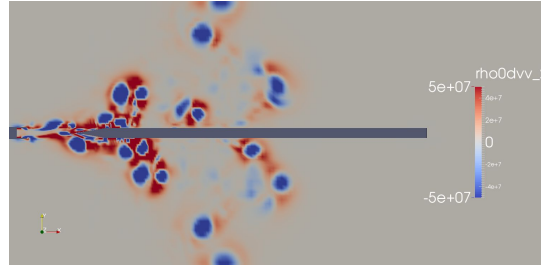
楽器の音波の発生源は、エッジトーンである。そこでより単純なエッジトーンモデル (2D) を用いて Lighthill の音源分布を調べた。Lighthill の音源は、3 つの項からなるが、その主要項である第一項

$$\frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \approx \frac{\partial^2 \rho v_i v_j}{\partial x_i \partial x_j}$$

を用いて音源分布を計算した。図 3 に、(a)

非圧縮流体近似での結果、(b) 圧縮流体での結果を示す。図を見て分かるように、ロールアップした渦の中心では負値を取り、2 つの分布に大きな違いはないが、ジェットの部分では大きな違いが現れる。一般に、Lighthill の音源の計算には非圧縮流体近似で十分であると考えられているが、我々の結果は、ジェットの場合には、非圧縮流体近似では不十分である事を示唆している。また、このような複雑な分布から音波の発生を計算し、遠方音場を正しく再現するのは、極めて困難であると予想される。

(a)



(b)

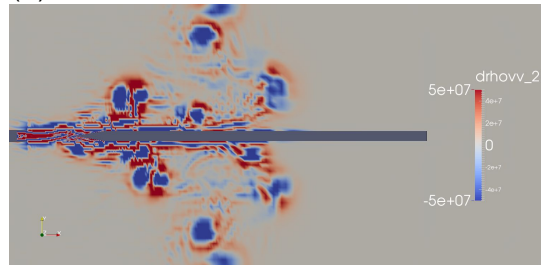


図 3 エッジトーンにおける Lighthill の音源分布 (a) 非圧縮流体近似 (b) 圧縮流体

(3) 流体と音のエネルギー交換

項目(2)で述べたように Lighthill の音源分布は極めて複雑で、その分布の時間的変化から流体音の発生を議論するのは極めて難しい。これに代わる方法が、Howe's energy corollary と呼ばれる方法である。それによれば、十分に大きな体積 V における流体エネルギーの単位時間当たりの変化は以下の式で与えられる。

$$\Pi \approx \rho_0 \iiint_V (\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{v}) \cdot \boldsymbol{u} dV$$

ここで、 \boldsymbol{v} , $\boldsymbol{\omega}$, \boldsymbol{u} は、流体の流速、渦度、音響的粒子速度である。この式は、体積内の流体的なエネルギーが音場との相互作用により変化する様子を表している。したがって、 $\dot{g} = -\Pi$ とすれば、これは音波の発生を表す。さらに、 \dot{g} の積分核 g_{ker} は局所的な音の発生を表すと考えられる。

g_{ker} 及び \dot{g} を計算するためには、音響的粒子速度 \boldsymbol{u} を流体の流速 \boldsymbol{v} から分離して求める必要がある。しかし、圧縮性 LES によって求まるのは、音響的な粒子速度が流体の流速に含まれたものである。我々は、

Bamberger⁴⁾及び吉川ら⁶⁾の実験においてもいられたスピーカを用いて擬似的な音場を再現する方法を参考に、図4に示すような音響的粒子速度 u を数値的に再現する方法を提案する。

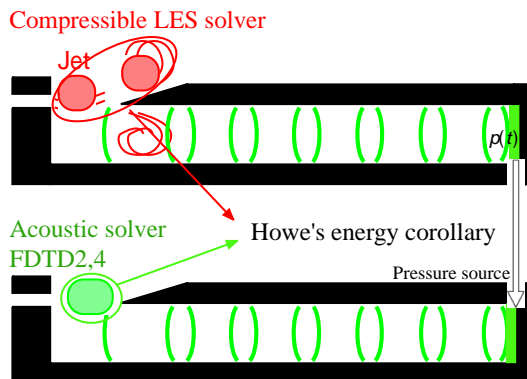


図4 Howe's energy corollaryの計算法

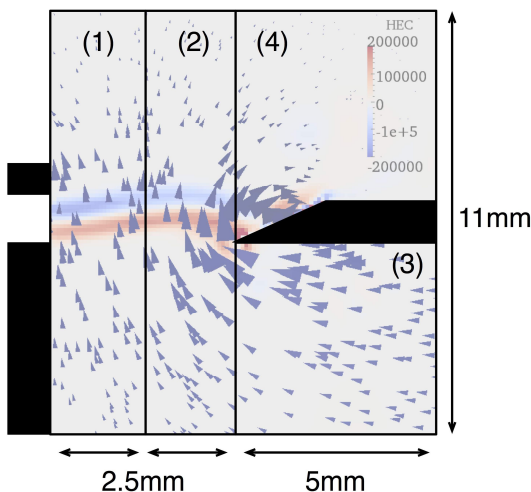


図5 歌口付近の積分核 g_{ker} の分布と音響的粒子速度(矢印)

まず、圧縮性 LES を用いて流体場と音場を同時に再現する。このとき、楽器の右端の流体的な運動はほぼゼロで、音場が支配的になる。そこで、右端での圧力変化 $p(t)$ を観測しこれを音場の圧力変化と見なす。次に、音響ソルバー-FDTD(2,4)を用いて右端に音源がある場合の共鳴音場を再現する。パラメータを工夫し、圧縮性 LES で得られた右端の圧力変化 $p(t)$ を再現できるようにする。

これにより、圧縮性 LES により v , ω が、音響ソルバーにより u が求まる。図5に、2D モデル楽器の歌口近傍で求めた積分核 g_{ker} の分布と音響的粒子速度 u (矢印)を示す。赤の部分は音が発生している部分、青の部分は音が吸収されている部分である。ジェットにそった部分で、音の発生と吸収が同時に起こっている事がわかる。

歌口のどの部分から音波が発生している

かを詳細に見るために、図5に示すように4つの領域に分け、それぞれの領域における g の時間平均

$$E_a = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \Pi_g(t) dt$$

を求めた。その結果を表1に示す。音の発生は主にジェットが大きく振動する領域(2)で起こっている事が分かる。一方、エッジの上方の領域(4)では音のエネルギーの吸収が起きている。これは、ジェットがエッジに衝突することで発生した渦は、音の発生よりも吸収に寄与していることを示唆している。この結果は、Howe による理論的な予測²⁾及び吉川らの実験結果⁶⁾と一致する。

表1 音のエネルギー発生

region	1	2	3	4	total
E_a [mV/m]	-1.5	42.2	2.2	-4.9	38.0

(4) 音孔の機能の解析

ここでは、2つのモデルを用いて音孔の機能の解析を行った。まず、図6に示す開口端を持つ楽器にパットの付いた音孔を1つ取り付けたモデルを用い、パットと音孔間の距離と発振周波数の関係を調べた。その結果を図7に示す。

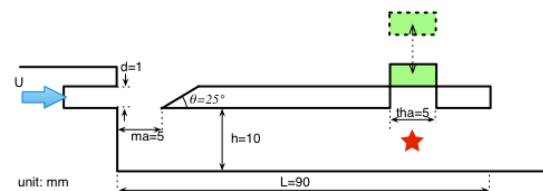


図6 音孔の付いた楽器モデル(2D)

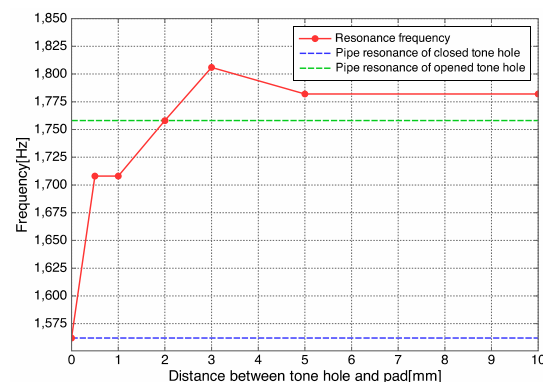


図7 パットの距離と周波数

図7に示すように、パットと音孔間の距離が2mm以上になるとほぼ所望の発振周波数が得られることが分かった。一方、それ以下では、パットを閉じた時の周波数に急激に近づくのが分かった。これらの結果は、Keefe の実験結果⁷⁾を定性的にはあるがよく再現し

ている。

音孔の機能をより正確に調べるために図8に示すようなKeefeによって提案された実験モデル⁷⁾の数値計算を行った。左端から流速駆動し音波を発生させ、音孔に対して対称、反対称な定在波が発生する条件での音場の安定性を調べた。

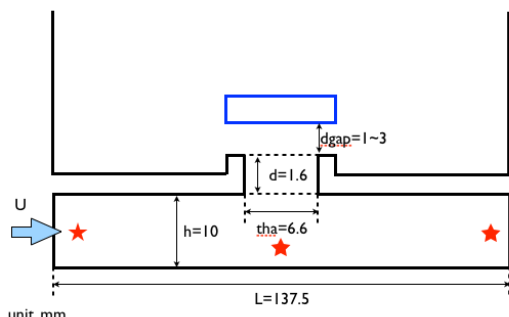


図8 Keefeのモデル(3D)

(a)



(b)

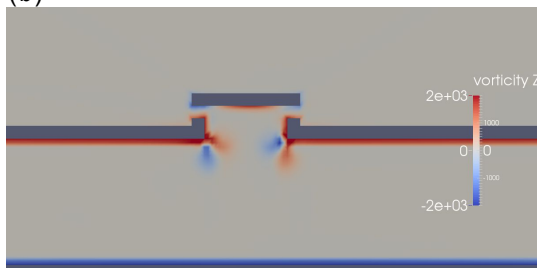


図9 Keefeのモデルの計算結果 (a) 圧力分布
(b) 渦度分布

図9は反対称な音場が発生している時の(a)圧力分布及び(b)渦度分布である。図9(a)に示すように安定な音場が発生していることが分かる。しかし、図9(b)に示すように音孔とパッドの近くから渦が発生しているのが見て取れる。このような渦の発生は、音場の不安定化や、異音の原因になると考えられる。なお、対称な場合は、音孔部分に音圧の腹がくるので、音孔での境界条件(開口端条件)と合わないため弱く不安定な音場が観測された。

ここでは、主にパッドを固定した場合の計算を行ったが、時間領域での音孔の機能を調べるためには、パッドが動く(移動境界)シミュレーションが必要になる。この方向の将来の研究に必要な、移動境界ソルバー(rhoPisoDyMFoam)を開発し OpenFOAM に組み

込んだ。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計18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 Dynamic Research, to be published, 査読あり

K. Takahashi, T. Iwasaki, T. Akamura, Y. Nagao, K. Nakano, T. Kobayashi, T. Takami, A. Nishida, M. Aoyagi, Effective techniques and crucial problems of numerical study on flue instruments, Proc. Meetings on Acoustics, Vol.19, 035021 (2013) DOI 10.1121/1.4799959, 査読あり

T. Akamura, Y. Nagao, T. Iwasaki, K. Nakano, K. Takahashi, T. Kobayashi, T. Takami, A. Nishida, M. Aoyagi, Numerical analysis of the interaction between fluid flow and acoustic field at the mouth-opening of a flue instrument, Proc. Meetings on Acoustics, Vol.19, 035023 (2013) DOI 10.1121/1.4799957, 査読あり

T. Iwasaki, T. Kobayashi, K. Takahashi, T. Takami, A. Nishida, M. Aoyagi, Numerical study on the function of tone holes of a recorder like instrument from the viewpoint of the aerodynamic sound theory, Proc. Meetings on Acoustics, Vol.19, 035024 (2013) DOI 10.1121/1.4801053, 査読あり

K. Takahashi, S. Goya, K. Goya, C. Susaki, Numerical reproducibility of time-dependent motions of spatial waves in air-columns of wind instruments, Proc. Meetings on Acoustics, Vol.19, 035063 (2013) DOI 10.1121/1.4799955, 査読あり

M. Miyamoto, Y. Ito, T. Iwasaki, T. Akamura, K. Takahashi, T. Takami, T. Kobayashi, A. Nishida, M. Aoyagi, Numerical Study on Acoustic Oscillations of 2D and 3D Flue Organ Pipe Like Instruments with Compressible LES, ACTA ACUSTICA UNITED WITH ACUSTICA Vol.99, 154-171 (2013); DOI 10.3813/AAA.918599, 査読あり

K. Takahashi, M. Miyamoto, Y. Ito, T. Takami, T. Kobayashi, A. Nishida, M. Aoyagi, Numerical Study on Air-Reed Instruments With LES, ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference, Paper No. AJK2011-08011, pp.2135-2145 DOI 10.1115/AJK2011-08011, 査読あり

(学会発表)(計15件)

高橋公也、非線形物理学から見た管楽器

の発音機構、第6回レーザーのカオス・ノイズダイナミクスとその応用専門委員会、2013年9月24日、石垣市、招待講演

T. Kobayashi, T. Akamura, Y. Nagao, T. Iwasaki, K. Nakano, K. Takahashi, M. Aoyagi, Interaction between compressible fluid and sound in a flue instrument, IUTAM Symposium on Vortex Dynamics: Formation, Structure and Function, 2013年3月10~14日, 九州大学

K. Takahashi, M. Miyamoto, Y. Ito, T. Iwasaki, T. Takami, T. Kobayashi, A. Nishida, M. Aoyagi, Study on aerodynamic sound of small air-reed instruments, Dynamics Days Europe 2011, 2011年9月15日, Oldenburg, Germany

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 公也 (TAKAHASHI, Kin'ya)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号：70188001

(2) 研究分担者

高見 利也 (TAKAMI, Toshiya)

九州大学・情報基盤研究開発センター・

准教授

研究者番号：10270472

小林 泰三 (KOBAYASHI, Taizo)

九州大学・情報基盤研究開発センター・]

学術研究員

研究者番号：10270472

(平成25年度は辞退)

(3) 連携研究者

青柳 睦 (AOYAGI, Mutsumi)

九州大学・情報基盤研究開発センター・教授

研究者番号：00260026

西田 晃 (NISHIDA, Akira)

九州大学・情報基盤研究開発センター・

学術研究員

研究者番号：60302808

小林 宏充 (KOBAYASHI, Hiromichi)

慶応大学・法学部・教授

研究者番号：60317336