

障害物励起音の特性に関する実験的数値的検討

蔵居慧之, 白石裕之
大同大学大学院, 大同大学

Experimental and Numerical Study of Excited Sound from a block

by
Satoshi Kurai and Hiroyuki Shiraishi(Daido University)

ABSTRACT

Though edge tone and aeolian tone are both treated as excited sounds from blocks, they are often to be done by different approaches to numerical analyses because an edge tone only has feedback loop caused by sound waves. In experimental apparatus, however, these phenomena can be generated simultaneously. Therefore, we have constructed the new soundproof room made by sound arresting walls considering of TV studio, in order to study the transition from edge tone to aeolian tone. As a numerical approach, Finite Difference Lattice Boltzmann Method (FDLBM), which is authorized as generalized numerical analysis, is also applied for evaluating the effect of the gas species in the transition.

1. はじめに

流れが原因で発生する音には障害物励起音があり、図 1 の模式図に示す通り、障害物後方より発生するカルマン渦が原因であるエオルス音や、ノズルからの噴流がエッジに衝突し発生するエッジトーンなどが挙げられる。特に後者は音波が上流のノズルへ伝播しフィードバックループを形成し、特定の周波数を発生させると考えられているものの、音波と噴流を同時に計測、解析する必要があるため研究報告が少ない。このようにエオルス音とエッジトーンとは異なる発生機構を要するが、現実にはエオルス音発生条件において上流からの一様流れを用いる事は難しい。そのため、上流の条件については様々に配慮すべき点がある。例えば上流出口と障害物との距離もその一つで、両者の距離が小さい場合にはエッジトーンを発生させてしまうことになる。そのような原因もあり、それぞれに限定された研究報告が多く、両者を共に考慮に入れた研究報告はほとんど見られない。

そこで本研究室においては、木材と吸音材により防音室を構築し、エオルス音及びエッジトーンの実験結果をもとに両者の発生条件の相違についての知見を得ることを目的とした。その際近年音響解析で用いられる差分格子ボルツマン法 (Finite Difference Lattice Boltzmann Method, 以下 FDLBM 法¹⁾と記す) を用いた数値解析結果と実験結果との比較を行った。

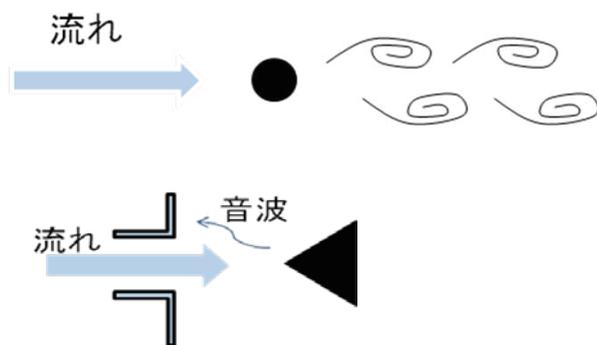


図 1 エオルス音 (上) とエッジトーン (下) の発生機構

2. 防音室の製作及び実験結果

2.1 実験システムの概略

本研究室で構築した防音室 (図 2) について説明する。本防音室設計は、共振を防止するために非正五角形であり、天井を斜めにした形状となっている。なお、防音室の骨組みは木材で、接続部は木造住宅同様の蟻継ぎ手であり、各木材の継ぎ手部にはホゾ加工を施した。

図 3 に、テレビ局スタジオの防音機構を参考にした壁構造を示す。本防音室の壁面の全体厚は 114mm で、防音室外側から合板、遮音シート、グラスウール、空気層、合板、吸音材という構造になっている。遮音シートは遮音性能や施工性に優れ、特定の周波数で共振がないことから採用し、グラスウールは機械設備などに用いられる密度 24.0kg/m³ のものを使用して二重に敷き詰めた。また、壁内部の空気層は吸音効果を高めるために 40mm 設け、室内部から見える吸音材については録音スタジオなどで使用されているスポンジタイプの吸音材を用いることとした。本図に示されるように吸音材の厚さは 51mm でくさび形状になっていることから反響音や残響を極力抑える仕組みとなっており、これらの壁構造によってかなりの防音効果が見込まれる。

以上の防音室を用いて図 4 に示す実験システムを構築した。空気はコンプレッサーで圧縮し、フィルタを通して水分などを除去した上でレギュレーター、流量計を通じて音響発生装置²⁾へと流れが導かれる様になっている。なお、音響発生装置はノズル部を固定している固定モデル (図 5) とノズル幅及び出口面積を 3 種類変更可能な可変モデル (図 6) を用いている。音はマイクロホンで集音し、PC に入力しリアルタイムアナライザによって FFT 解析を行う。図 7 は本防音室以前に使用していた防音室との比較結果であり、これによって本防音室製作方法による有意な効果が示された。



図 2 防音室外観

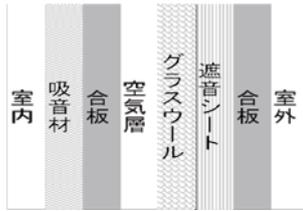
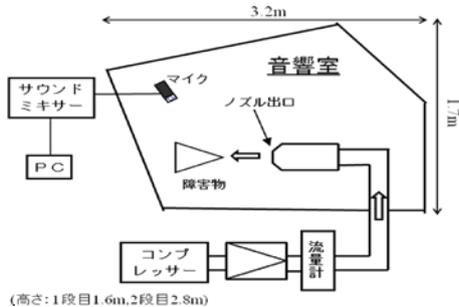


図3 防音室壁構造



(高さ:1段目1.6m,2段目2.8m)
図4 防音室の形状と実験装置概要(平面図)

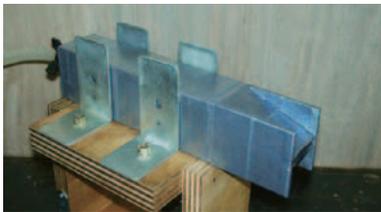


図5 音響発生装置(固定モデル)

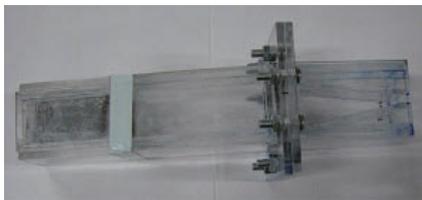


図6 音響発生装置(可変モデル):
:全体図(上), ノズル部(下)

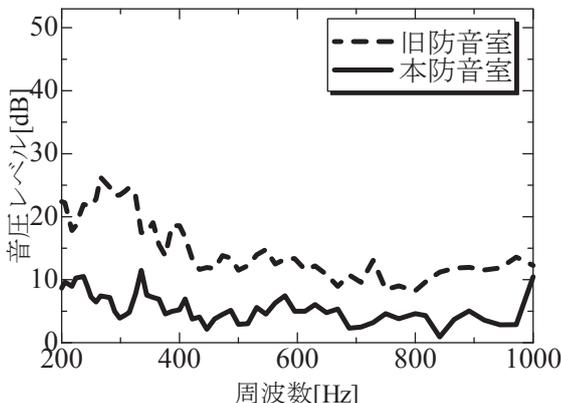


図7 防音室の結果

2.2 実験条件

今回の実験条件はノズル部固定モデルにおいてノズル流速 $U=15, 20, 25\text{m/s}$, ノズル幅 $D=0.006\text{m}$, くさび幅 $d=0.006\text{m}$ とした。またノズル部可変モデルにおける流速は 20m/s としている。ノズル-障害物間距離 L は $0.015\text{m}\sim 0.090\text{m}$ として実験を行った。また、計測位置は最も音圧レベルの高い位置、すなわちくさび頂点から流れに対して 60° , 距離は 0.5m 離れた位置とした。

2.3 実験結果

前節までに述べた実験条件での結果を図8に示した。なお、縦軸は周波数をくさび幅 d で無次元化したストローハル数 St_d としている。エッジトーン周波数は過去の研究よりノズル-障害物間距離が大きくなるほど低くなることから知られており以下の式で表すことができる³⁾。

$$f = 0.466J(U_j - 40)\left(\frac{L}{d} - 0.07\right) \quad J=1,2,3,3.8,5.4 \quad \dots(1)$$

ここで、 f はエッジトーン周波数、 J はエッジトーンの特徴を表す周波数ジャンプのStageを表している。また、 U_j はノズル噴流速度である。

本実験においても $L=40\text{mm}$ 未満では式(1)に示す様な傾向が見られた。しかしながら、 $L=60\text{mm}$ 以上においては St_d が約 0.1 で安定している。エオルス音の St_d は円柱が約 0.2 , 角柱(迎え角 $\alpha=45^\circ$)は約 0.14^4 というように定まった値を取るとの事から、今回のくさび実験結果についても $L=60\text{mm}$ 以上ではエオルス音が卓越していると考えられる。

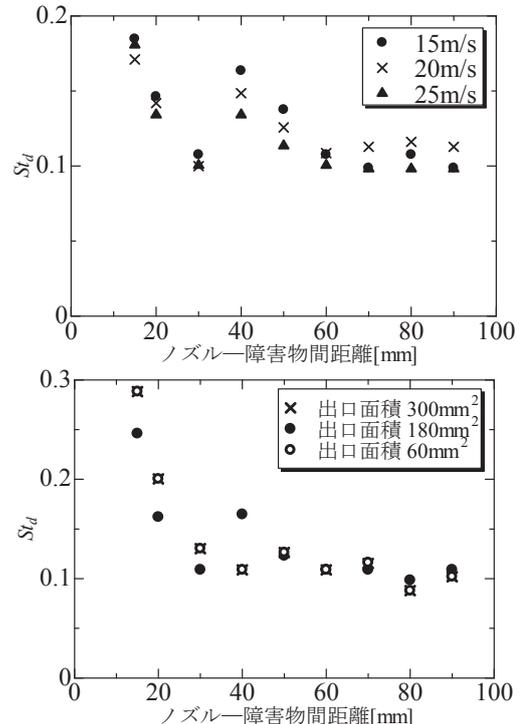


図8 ノズル-障害物間距離と St_d の関係:
ノズル部固定モデル(上), ノズル部可変モデル(下)

3. エオルス音とエッジトーンとの発生条件の比較

3.1 数値解析の方法と条件

前章の実験結果において、流速変化の他にノズル幅を含めたすべての実験ケースについてエッジトーン卓越からエオルス音卓越への遷移条件が同じであることが示された。これに関して、エッジトーンにおいてはエオルス音とは異なり近距離場ゆへの擬似音波が作用していると考えられる。

その場合に音波のパワーは距離の 2 乗に反比例する一方で擬似音波は距離の 4 乗に反比例する．そのため、その作用はごく近傍に限られることになり、これがノズル—障害物間距離が離れた場合にエッジトーンが減衰する理由と考えられる．両者のパワーが等しくなる点は r を音波発生位置からの距離、 f を周波数、 a を音速として

$$r = \frac{a}{2\pi f} \quad \dots(2)$$

となる⁴⁾．

また、エッジトーンにおいて J を Stage 数、 p を位相差、 T_1 をノズルから障害物までの擾乱の伝播時間、 T_2 を障害物からノズルまでの擾乱の伝播時間とすると、

$$f = \frac{J+p}{T_1+T_2} \quad \dots(3)$$

であり、 $T_1 \gg T_2$ であることから f は音速の影響が極めて小さい⁵⁾．これと式(2)より、周波数 f が音速 a と正の相関のある事が推察される．これを確かめるための一手法として、数値流体解析において気体種による影響について検討することとした．

数値解析には数値解析ソフトウェア ACE-Flow (アメリカ社製)を用いた．ACE-flow は近年流体音響解析などでよく用いられる FDLBM 法による流体音響解析ソフトウェアである．

計算条件は実験と同一とし、圧力変動が規則的な変動を示している 0.01s から 0.06s の値を FFT 解析により処理を行った．

また、本研究の計算格子は図 9 に示すようにノズル障害物近傍を細かくしており、総格子点数は約 5 万点である．

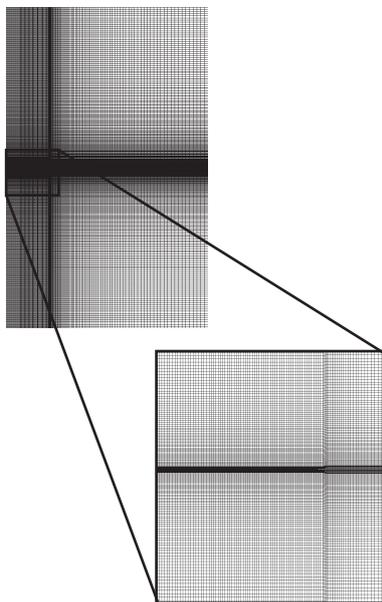


図 9 本研究で用いた計算格子及び拡大図

3.2 FDLBM 法における気体種と比熱比の数値モデル
一般的な FDLBM 法において、比熱比 γ は粒子運動の自由度より次式で表される．

$$\gamma = \frac{D+2}{D} \quad \dots(4)$$

しかしながら、式(4)では γ は次元のみの依存であり、これ以外の γ を持つ流体を扱えない．そこで田村ら¹⁾は粒子に内部自由度を持たせるために、並進エネルギーの他に回転エネルギーを導入した粒子分布を提案している．これにより比熱比の異なる流体での解析が可能となった．

本研究ではこの手法を利用し、比熱比、密度及び粘度を変換することによって気体種として空気の他に実験の困難なヘリウムの場合を設定した．なお、ヘリウムの場合には比熱比、密度、粘度がそれぞれ 5/3、0.1785kg/m³、1.96×10⁻⁵Pas となる．また、流速 U は 20m/s で統一している．

3.3 解析結果 (気体種の影響)

図 10 には周波数 f を流速とノズル—障害物間距離 L で無次元化した St_L 数⁵⁾を用いて結果を示す．前章とは異なり、ストローハル数における無次元化の対象が異なることに注意されたい．なお、これは式(1)で示した Stage 数 1~4 に対応して 0.5、1.0、1.5、2.0 程度の値を取ることが知られている⁵⁾．

まず空気については、 $L=40\text{mm}$ 、 50mm で Stage1 でのピークが見られ、 $L=70\text{mm}$ では Stage2 にピークが確認でき、 L の増大に伴って Stage の遷移が見られる．しかしながら、 $L=60\text{mm}$ 以遠のピークは顕著ではなく、エッジトーンとしての特性は微弱であることが分かる．このことは、 $L=60\text{mm}$ 以遠ではエオルス音が卓越するという図 8 で示された実験結果と一致するものである．

次にヘリウムについては、図 10 において $L=40\text{mm}$ では Stage1 にピークが見られ、 $L=70$ 、 80mm では Stage2 にピークが見られる．このように、ここで見られる Stage 遷移の様子は、空気の場合との差異が見られないことが分かる．ただし、ヘリウムにおける Stage2 の兆候は本図(d)及び(e)からも分かる様に空気に比べて顕著であり、これは図 7 と同様の実験をヘリウムで行った場合、エッジトーンの影響を除くには長い距離が必要であることを示している．

本図(f)と(g)はそれぞれ $L=120\text{mm}$ 及び $L=200\text{mm}$ における結果を示す．この結果より、空気においては $L=120\text{mm}$ でピークが見られなくなるのに対し、ヘリウムにおいてはまだピークが残っているのが確認できる．なお、ヘリウムにおいても $L=200\text{mm}$ ではピークが見られなくなった．これよりヘリウムにおいてもノズル—障害物間距離を大きくすることにより、空気の場合よりもエオルス音が卓越することが確認できた．

これらの結果より、空気とヘリウムにおいてエッジトーンの Stage1 から Stage2 への遷移は変わりはないと言える．しかし、エッジトーンよりもエオルス音がするという距離条件については音速と正の相関があるという 3.1 節におけるオーダー評価と同様の傾向が確認できた．

3.4 解析結果 (音源の調査)

図 11~図 13 に気体種を空気とした場合の圧力分布図を示す．なお、圧力分布図の値は、圧力値を基準圧力で引くことにより変動を求め、これを圧力基準値により無次元化したものである．

図 11 は障害物励起音の圧力分布図であり、時刻 3.09×10^{-2} [s] の結果を示している．なお、左側は $L=40\text{mm}$ 、右側は $L=120\text{mm}$ での結果であり、図中上方の○印は圧力の測定位置である．まず $L=40\text{mm}$ においては、強い圧力変動がノズル—障害物間にあることが分かり、それが遠方の測定位置にまで伝播しているのが分かる．次に、 $L=120\text{mm}$ においては $L=40\text{mm}$ で確認できたノズル—障害物間の強い圧力変動は見られず、障害物後方のみ強い圧力変動が確認できる．

図 12 は図 11 の結果をノズル及び障害物近傍で拡大したものである．まず $L=40\text{mm}$ においては、ノズル—障害物間で生じた圧力変動がノズル近傍の上方に及んでいる．これが、フィードバックループによるエッジトーンの特性を表していると考えられる．次に $L=120\text{mm}$ においては、障

害物近傍の圧力変動は確認できるもののノズル出口近傍での圧力変動は見られず、エッジトーンの特徴が見られない。

図 13 には気体種を空気とヘリウムとした場合の $L=120\text{mm}$ における障害物励起音の圧力分布図を示す。空気の場合と比較すると、ヘリウムにおいては障害物後方の圧力変動値が小さくなっており、エオルス音の影響が弱いことが分かる。これが、距離の増大によってエッジトーン卓越からエオルス音卓越とならなかった原因と考えられる。

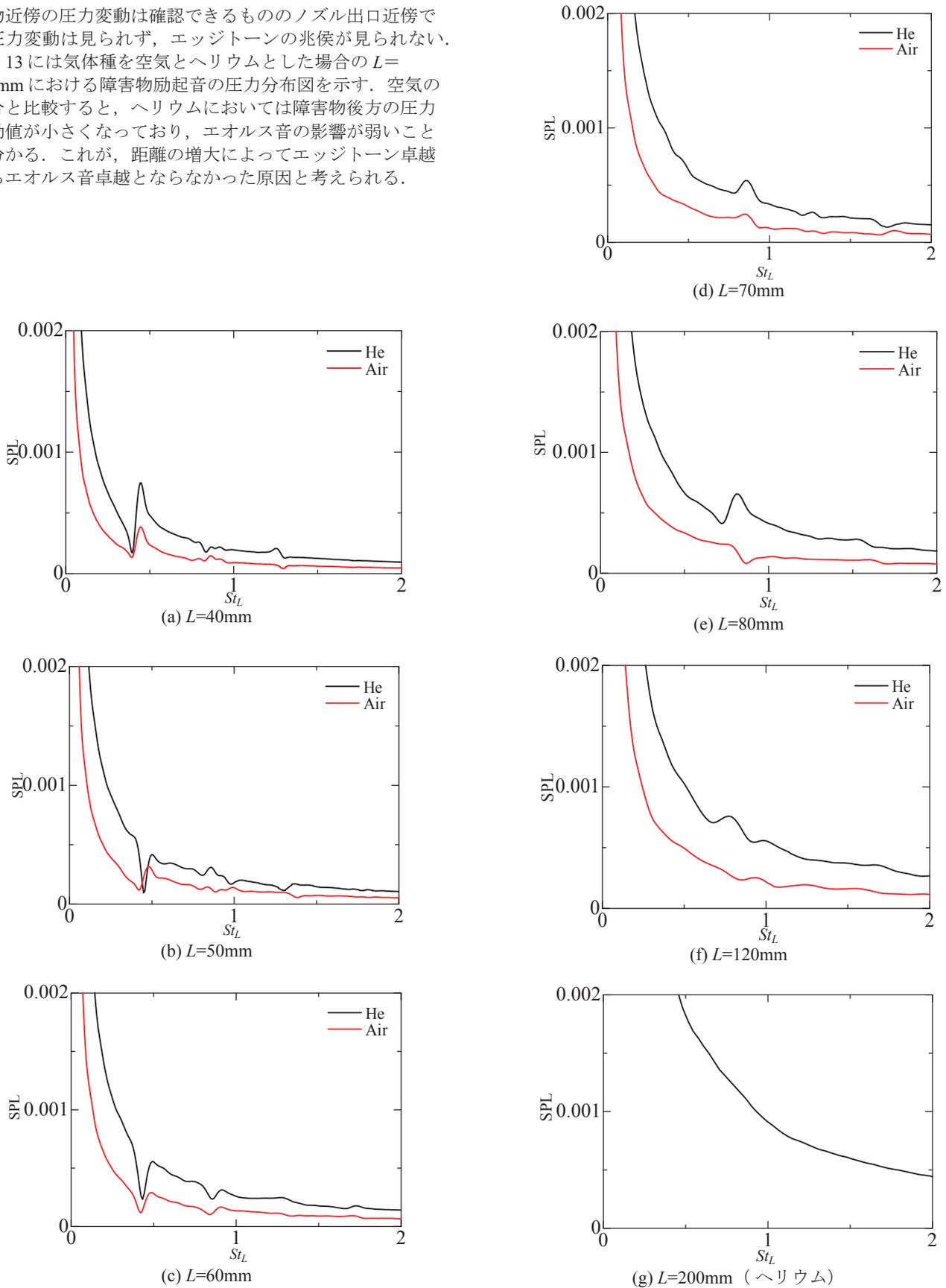


図 10 障害物励起音の周波数特性

4. まとめ

障害物励起音に関して、ノズル—障害物間距離 L によるエッジトーン卓越からエオルス音への卓越条件について実験と数値解析を用いて考察した。

まず実験においては、くさび幅で無次元化したストローハル数 St_d による整理から、 $L=60\text{mm}\sim 70\text{mm}$ 以遠においてエオルス音が卓越している事が判明した。なお、流れ条件の相違に関わらず距離の差異は見られなかった。

次に、その理由を調べるため、FDLBM 法による数値流体解析(Ace-flow)によって音速との関連性を調べた。対象は空気と実験困難なヘリウムであり、両者の解析結果の比較を行った。その結果、ノズル—障害物間距離で無次元化したストローハル数 St_L による整理から、Stage 遷移の距離条件は同一であることが判明した。また本結果においては、エオルス音卓越の距離条件が音速と正の相関があるというオーダー評価と同様の傾向が確認できた。

最後に、圧力分布図により音源の位置の特定を行った。その結果、障害物後方の圧力変動がエオルス音源を示す一方で、エオルス音が卓越する場合にはノズル出口近傍に圧力変動をもつというエッジトーン発生機構も確認できた。

参考文献

- 1) 田村明紀, 薦原道久: 格子ボルツマン非熱流体モデルの空力音シミュレーションへの適用性, 第 21 回数値流体力学シンポジウム, A4-2, pp.1-7.
- 2) 大藪一憲, 白石裕之: 離散渦法を用いたエオルス音に関する音響解析手法の検討, 第 40 回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2008 講演論文集, pp.185-188.
- 3) G.B.Brown, Proc.Phys.Soc(London), The vortex motion causing edge tones, 49(1937), pp.493-507.
- 4) 吉川茂, 和田仁: 音源の流体音響学, コロナ社, p.56, p.77.
- 5) 野々村拓, 村中洋子, 藤井孝蔵: エッジトーンの発生機構における幾何学パラメータの影響の解析, 第 19 回数値流体力学シンポジウム, C9-5, pp.1-8.

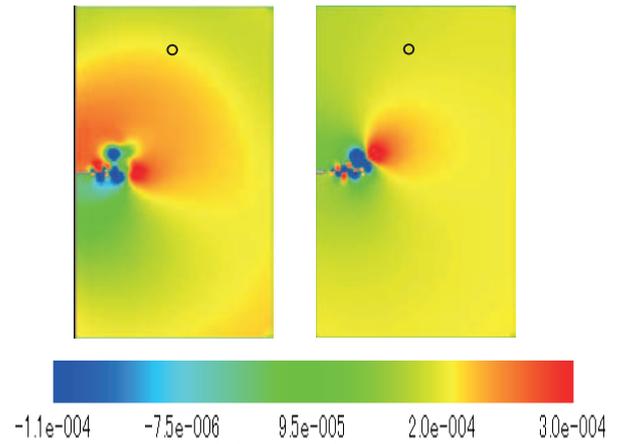


図 11 障害物励起音の圧力分布図:
 $L=40\text{mm}$ (左), 120mm (右)

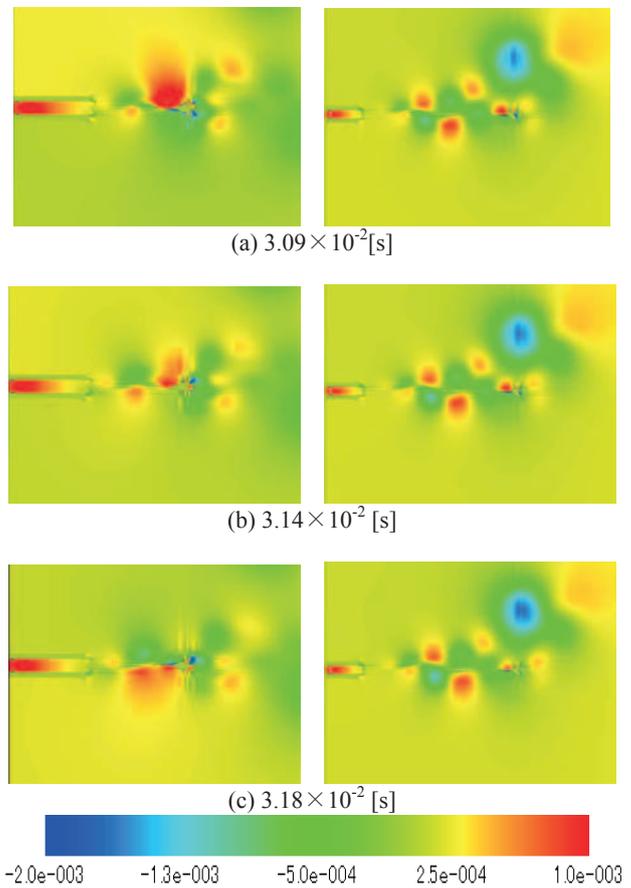


図 12 障害物励起音の圧力分布近傍図:
 $L=40\text{mm}$ (左), 120mm (右)

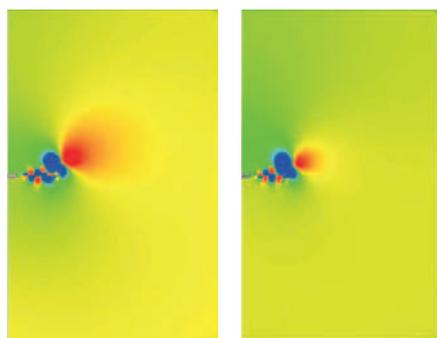
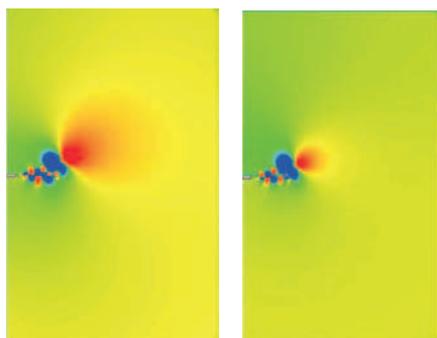
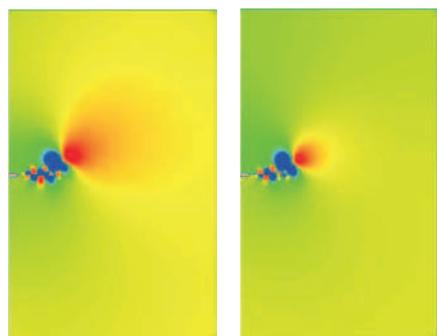
(a) 3.09×10^{-2} [s](b) 3.14×10^{-2} [s](c) 3.18×10^{-2} [s]

図 13 障害物励起音の圧力分布図:
空気 (左), ヘリウム (右)