

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 3 日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820044

研究課題名（和文）物体運動と連成させた振動平板まわりの空力音の直接計算

研究課題名（英文）Direct aeroacoustic simulation around oscillating plate coupled with object motion

研究代表者

横山 博史（Yokoyama, Hiroshi）

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：60581428

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では振動する物体まわりの流れから発生する空力音の直接計算手法を提案し、実験により計測されたリード振動分布を用いて、リード楽器からの発生音を予測した。その結果、発生音の基音のレベルがよく一致することが確認された。さらに、リード振動の波形や、リード先端とマウスピース間の流路幅が発生音に及ぼす影響を明らかにした。

平板列から発生する共鳴音に対して、平板後端を微小に振動させる制御を行い、流れ場や発生音への影響を明らかにした。平板厚みに対して15%の振動振幅であっても、共鳴音を10dB低減可能であり、隣り合う平板からの渦放出が変化し、共鳴が弱まると考察された。

研究成果の概要（英文）：The computational methods for predicting the flow and acoustic fields simultaneously around oscillating objects were proposed. In reed instruments, sound is radiated from a oscillating reed along with acoustic resonance in a tube. Based on the measured time variation of the displacement of the reed, the radiated sound was predicted by the present computational methods. As a result, the sound pressure level at the fundamental frequency was in good agreement with the measured level.

Also, the resonant sound is radiated from a flow around a cascade of flat plates. The control of the flow and sound by oscillating downstream edges of the plates was investigated using the present computational methods. Even with the small amplitude of 15% to the plate thickness, the sound pressure level at the fundamental frequency was decreased by 10 dB by changing the mode of vortex shedding from the plates.

研究分野：流体力学，空力音響学，数値流体力学，流体制御

キーワード：空力音 物体振動 共鳴 リード楽器 流れと音の直接計算 平板列 流体制御 連成解析

1. 研究開始当初の背景

空力音は空気などの流れから発生する音であるが、共鳴などをともない強い音となる。さらに、管群まわりの流れなど物体が振動することによって強い共鳴音が発生する場合もある。また、自動車の車外音が車室内に伝播する際には、窓ガラスなどの振動を通して主に伝播すると考えられる。

物体振動をとまなう流れからの音を低減あるいは、その音質を向上させるためには、流れからの音の発生や音の伝播に物体振動が及ぼす影響を明らかにすることが必要であると考えられる。そのためには、実験計測とともに数値的な予測が有効な手段であるが、振動物体まわりでの流れから発生する音を高精度に予測する手法は、いまだ確立されていない。

2. 研究の目的

本プロジェクトでは振動物体まわりの流れから発生する音を予測する手法を構築することを目的とする。実際のリード楽器を対象として、本計算手法の有効性を実証する。さらに、自動車のグリルや熱交換機などで問題となる場合がある、共鳴音の発生する平板列まわりの流れを対象として、平板後端を振動させる制御をおこない、制御効果を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) リード楽器における検証に関しては、図1に示すような体系において、計算を実施した。図2にはリード振動に関して、レーザ変

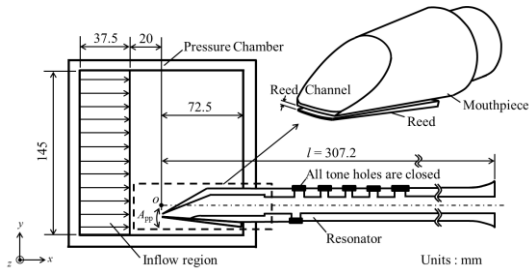


図1 リード楽器の計算体系

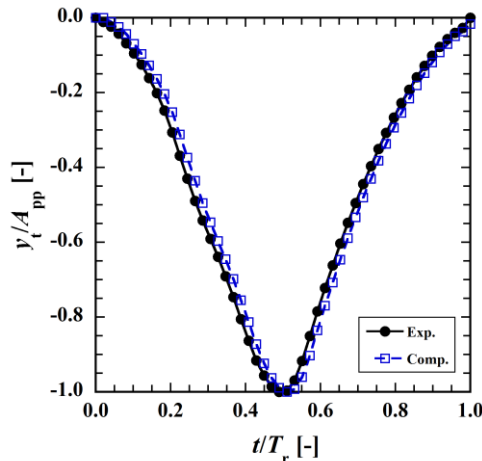


図2 リードの振動変位

位系により計測した値を示す。計算においては、この計測値をフーリエ級数によりフィッティングし、時間の関数としたものを用いる。

さらにリード振動を正弦波で与え、リードが最も下方に変位した際の、リード先端とマウスピースとの流路幅(振動のピークピーク値に相当し、以後チップクリアランスと呼ぶ)を $A_{pp} = 0.6, 1.0, 2.0 \text{ mm}$ と変化させて、チップクリアランスが発生音に及ぼす影響を明らかにした。

(2) 平板列における後端振動による共鳴音の制御については、以下のような体系において計算を実施した。平板列には5枚の平板があり、上から2番目(B)、4番目(D)の平板の後端を振動させた。振動周波数 f_{osc} は 3 kHz とし、これは、共鳴周波数 $f_{res} = 4.6 \text{ kHz}$ の $f_{osc}/f_{res} = 0.67$ に相当する。また、振動振幅は平板厚みに対して $A/b = 0.075, 0.15$ とし、BとDの振動の位相差を 0.0 (同位相)、 $0.25, 0.5$ (逆位相) と変化させた計算を実施した。

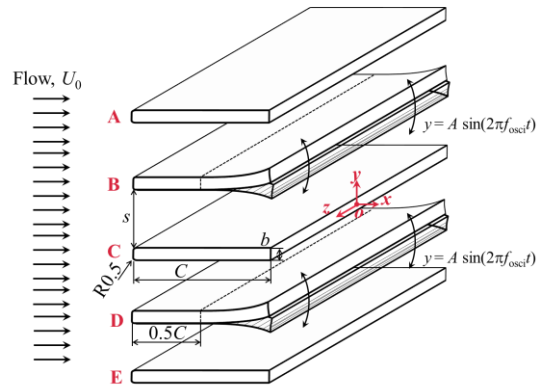


図3 平板列まわりの共鳴音の制御

(3) 支配方程式としては、圧縮性ナビエーストークス方程式に質量およびエネルギー保存則を加えたものとした。用いた計算格子は矩形格子であり、複雑な形状や物体振動まわりの流れ場や音場を再現するために、式(1)-(3)に示すように、ボリューム・ペナライゼーション(VP)項 V を右辺に課した。

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\mathbf{F}_k - \mathbf{F}_{vk}) = \mathbf{V}, \quad (1)$$

$$\mathbf{V} = - \left(\frac{1}{\phi} - 1 \right) \chi \begin{pmatrix} \partial \rho u_i / \partial x_i \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\phi = 0.25, \quad (3)$$

ここで、マスク関数 χ は、流体部では0とする。また、静止物体内部では1とするが、移動物体を取り扱う際は、物体表面近傍における、流体・物体間での急激なマスク関数の変化による非物理的な波の形成を抑制するため、物体内部では物体表面からの距離 d と格子解像度 Δ を用いて、その比の絶対値 $|d/\Delta|$ が物体表面近傍で1より小さくなる場合は、この値をマスク関数とし、物体表面から十分に離れた物体内部では1とした。

4. 研究成果

(1) リード楽器において、発生音の本シミュレーション結果と実験結果の比較を図4に示す。基音周波数250 Hz付近における音圧レベルがよく一致していることが確認できた。

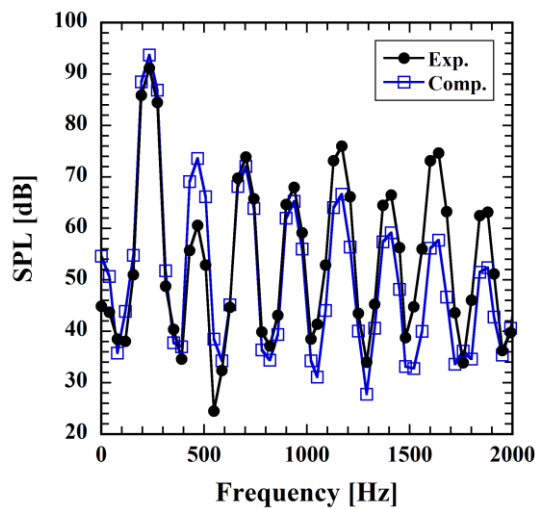


図4 リード楽器における発生音

図5にはリードの振動により形成される内部の音場を表しており、上図は、リードがマウスピースと接し流路が閉じている時、下図は流路が最も開いた時を表している。図より、管内内部では、流路閉の時に膨張が起きており、流路開の時には流量が管内に入り圧縮が起きていることがわかる。

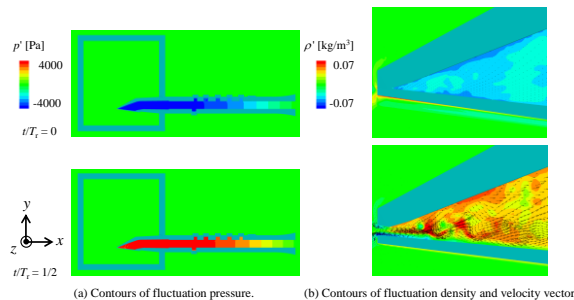


図5 リード楽器における変動圧力の等高線(左)および密度の等高線・速度ベクトル(右)
(上：流路閉，下：流路開)

図6にはリードを正弦波として振動させた際の音圧スペクトルを示す。チップクリアランス A_{pp} が大きくなるほど、音圧レベルは全周波数にわたって増大するが、 $A_{pp} = 2.0$ mmでは基音の2倍音($f/f_r = 2.0$)のレベルの増加が著しく、音質への影響が大きいと考えられる。

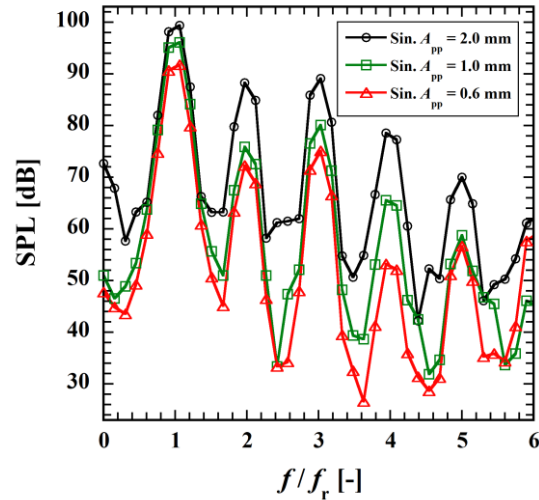


図6 チップクリアランスが発生音に及ぼす影響 (f_r は基本周波数)

(2) 平板列まわりの流れから発生する音を、圧力の等高線により図7に示す。このような音に関して、平板の後端を振動させることによる制御を行った。

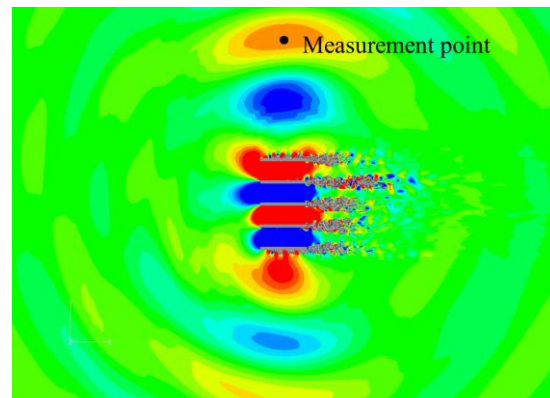


図7 平板列まわりの音圧

平板 B, D を同位相で振動させた際の制御結果を図8に示す。横軸は主流速度と板厚で無次元化された周波数であるストローハル数 St となっている。

振幅 $A/b = 0.075$ に比べ、振幅 $A/b = 0.15$ においては、共鳴周波数 $St = 0.2$ 付近の音圧レベルがより低減されていることがわかる。しかしながら、加振周波数 $St = 0.14$ において音圧レベルが上昇することがわかった。

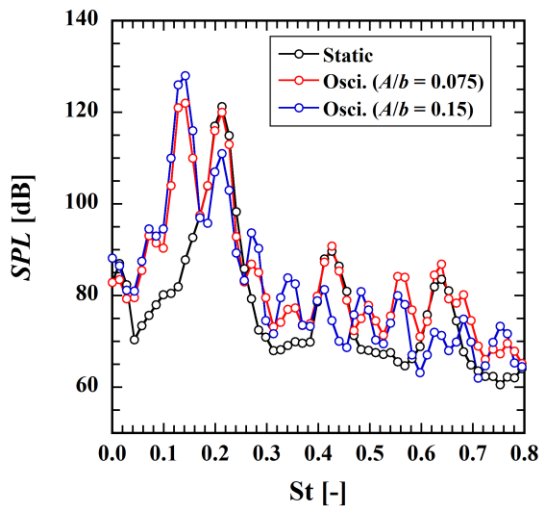


図8 音圧スペクトル(平板前縁を原点とし, $x/b = -7.5, y/b = 50$ の位置)

図9には、振動する平板B後流における速度スペクトルを示す。非制御時には、共鳴周波数においてカルマン渦列によるパワーのピークが見られるが、 $A/b = 0.15$ では加振周波数において、パワーが増大し、加振周波数へのロック現象が見られた。

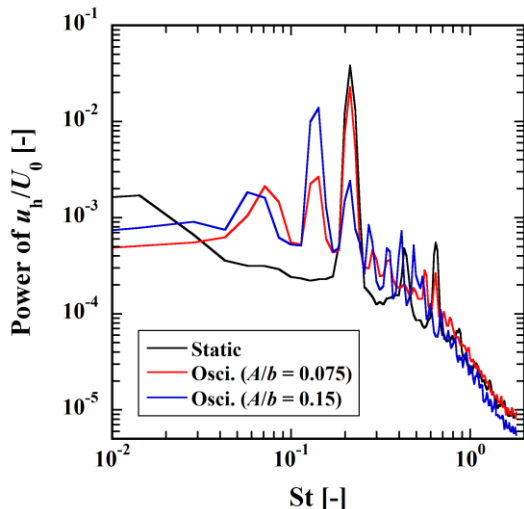


図9 音圧スペクトル(平板前縁を原点とし, $x/b = -7.5, y/b = 50$ の位置)

また、平板B, Dの振動の位相差 ϕ を変化させた結果、 $\phi = 0.25$ では上下一方向に強い音場が伝播することがわかった。位相差 $\phi = 0.5$ では、加振周波数における音圧レベルが大きくなる結果を得ている。

(3) 本プロジェクトにより、振動物体まわりの流れ場および音場を予測する手法を構築することができた。実験値との比較も行い、精度検証もなされ、良好な結果を得た。さらに、楽器や自動車グリルや熱交換器などで問題となる平板列を対象として、その

開発において有効な知見を得ることができた。ただし、平板列においては、共鳴音の低減には成功したが、加振周波数における音が増大する問題があったため、今後は、3次元的な振動により制御することなど、さらに本研究を発展させることを検討している。

本研究課題の知見は、積極的に公表していき、実際のものづくりに役立つものとなることを期待している。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計10件)

① Hiroshi Yokoyama, Akira Miki, Hirofumi Onitsuka, and Akiyoshi Iida, Direct numerical simulation of fluid-acoustic interactions in a recorder with tone holes, *J. Acoust. Soc. Am.*, **138**, 858 (2015). 査読有り. DOI: [10.1121/1.4926902](https://doi.org/10.1121/1.4926902)

[学会発表] (計21件)

① Hiroshi Yokoyama, Katsuya Kitamiya, Hiroki Yamamoto, and Akiyoshi Iida, Effects of distance between plates on flows around a cascade of flat plates with acoustic resonance, AIAA-2014-3197, アメリカ(アトランタ), 20th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2014年6月20日発表

[図書] (計1件)

① 横山博史他, 日本音響学会編, コロナ社, 音響キーワードブック, 2016 (2ページ担当)

[その他]

ホームページ等

(1) 研究室ホームページ

<http://ec.me.tut.ac.jp>

(2) Researchmap

<http://researchmap.jp/h-yokoyama/>

(3) 大学教員紹介ページ

<https://www.tut.ac.jp/university/faculty/me/666.html>

(4) Scopus

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=51563039800>

(5) Researchgate

https://www.researchgate.net/profile/Hiroshi_Yokoyama4

(6) Google Scholar

<https://scholar.google.com/citations?hl=en&user=bLpGKsMAAAAJ>

(7) Orcid

<http://orcid.org/0000-0003-1857-665X?lang=en>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横山博史 (YOKOYAMA, Hiroshi)

豊橋技術科学大学・工学系研究科・助教

研究者番号: 60581428