

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 3 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06153

研究課題名(和文)音響学的フィードバック抑制に基づくプラズマアクチュエータによる空力音制御

研究課題名(英文)Control of Aerodynamic Noise with Suppression of Acoustic Feedback by Plasma Actuators

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)・准教授

研究者番号：60581428

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)： 窪み部(キャビティ)まわりのながれではキャビティ入口において発生した渦により自励振動が発生し、強い騒音(キャビティ音)が発生する場合がある。本研究ではプラズマアクチュエータ(薄い誘電体に隔てられた電極対に高周波交流高電圧を印加することで生じる誘電体バリア放電を利用して気流を発生する物)を用い、キャビティ音の制御を試みた。特に間欠的に制御を行うことで、プラズマアクチュエータの消費電力を抑制しながら効果的な制御が可能となることを示した。この研究は風洞実験と流れと音の直接数値解析を平行して実施された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

航空機、新幹線といった高速輸送機関やファンなどの流体機器においては、騒音や振動の低減が重要な課題の一つとなっている。航空機の車輪格納部や新幹線の車間部および台車部などはキャビティとよばれる窪み部を有し、窪み部入口より発生した渦により自励振動が発生し、強い騒音が発生する場合がある。そのため、これらの低減手法を確立することは社会的意義がある。

プラズマアクチュエータは、近年流体制御デバイスとして着目されているが、空力音制御への適用例は少なく、効果的な制御手法が十分にわかっていない。そのため、本研究によりプラズマアクチュエータによりキャビティ音の効果的な制御手法が解明されることは学術的意味を有す。

研究成果の概要(英文)： Aerodynamic noise can be radiated from a flow around a cavity. This is due to the self-sustained oscillations with vortex shedding from the edge of the cavity. To reduce the cavity tone, the control by a plasma actuator, which is composed of dielectric layer sandwiched by electrodes and driven by high-frequency AC voltage, was conducted. Particularly, the control effects by an intermittent control of the plasma actuator were evaluated in the wind tunnel experiments and direct numerical simulations of flow and acoustic fields.

研究分野：流体力学

キーワード：キャビティ 風洞 数値解析 空力音 制御 プラズマアクチュエータ

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

空力音は空気の流れから発生する音であり、音の強さは流速の6~8乗に比例するため、近年の高速輸送機関や流体機器の高速化に伴い、**空力騒音は大きな問題**となっている。特に図1に示すようなキャビティ流れなどでは、流体と音が相互に作用することによって生じる**流体・音響連成音**は特定の周波数において強い音が発生する場合があります、その発生機構の解明や低減手法の確立が必要である。

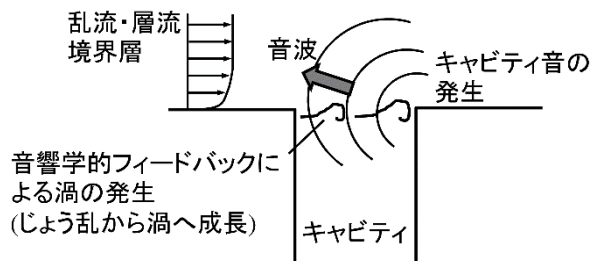


図1 キャビティ流れにおける渦や音およびPAによる制御の模式図

申請者は研究開始までの研究において、流れと音の直接数値計算を用い、キャビティまわりの自励振動機構による空力音の発生機構について明らかにしてきた。その結果、キャビティ下流側壁面に渦構造が衝突することで膨張波が発生し、音波が上流に伝播し、キャビティ前縁付近を通過する際に、音響粒子速度により前縁からはく離する流れ内に渦のもととなるじょう乱が発生すること（音響学的フィードバック）が明らかになった。

近年、図2に示す**プラズマアクチュエータ (PA)**と呼ばれる流体制御デバイスが盛んに研究されている。本デバイスは誘電体が電極間に挟まれた構造であり、数 kV、数 kHz の高電圧・高周波の交流電圧を与えることで、プラズマが発生し、電離によって生じた正イオンが周囲分子に衝突し、運動量が発生する。電圧の正負によって電離状態が非対称になることで、図2に示すような時間平均した際に、一定方向の流れが誘起されることがわかっている。PAは、1)比較的小型で単純構造であることから設置が容易であること、2)動作応答性が良く数 kHz の空力音の制御に使用可能、3)駆動部がなくメンテナンスが容易などの理由から、翼や円柱周りの流れのはく離制御などについて研究が進められている。しかしながら、空力音の制御に対しての適切な制御手法については十分に解明されていなかった。

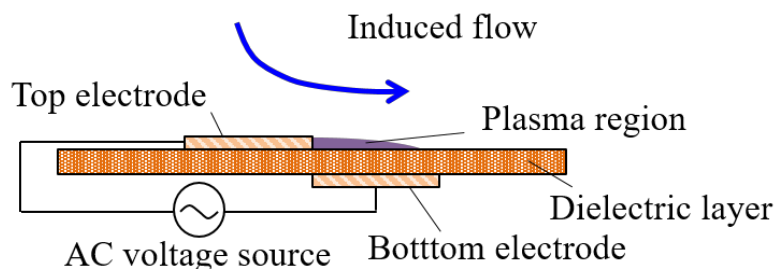


図2 プラズマアクチュエータ(PA)概略図

2. 研究の目的

本研究では、層流境界層中のキャビティ音を対象として、流体制御デバイスである DBD プラズマアクチュエータを用いてキャビティ音の適切な制御手法を明らかにすることを目的として、風洞実験的において制御を試み、さらに圧縮性 Navier-Stokes 方程式に基づいた流れと音の直接計算も実施し制御による流れ場・音場の変化を明らかにした。特に PA 駆動

での音圧スペクトルを算出し、図7に制御（連続駆動）時・非制御時での音圧スペクトルを実験値と比較したものを示す。非制御時には基本周波数（2500 Hz）においてピーク性のキャビティ音が発生しており、周波数および音圧レベルは実験値と概ね一致している。実験・計算どちらの結果においても PA 制御によってキャビティ音の音圧レベルが周囲の周波数の音圧レベルと同程度まで低減されていることがわかる。

図6には連続駆動時および間欠駆動時での PA 消費電力とキャビティ音制御効果の関係を示す。図中の St_i は間欠駆動時の間欠周波数を主流速度とキャビティ長さで無次元化したものである。連続駆動に比べ間欠駆動時の多くのデータは左下に位置しており、これは消費電力をより抑えつつ高い制御効果が得られていることがわかる。また、図7には間欠周波数が制御効果に及ぼす影響を示す。図より $St_i = 0.13$ で最も大きな制御効果となることがわかる。効果的な間欠周波数はキャビティ形状に依存しており、発生するキャビティ音の鋭さなどに関連することも本研究でわかっている。

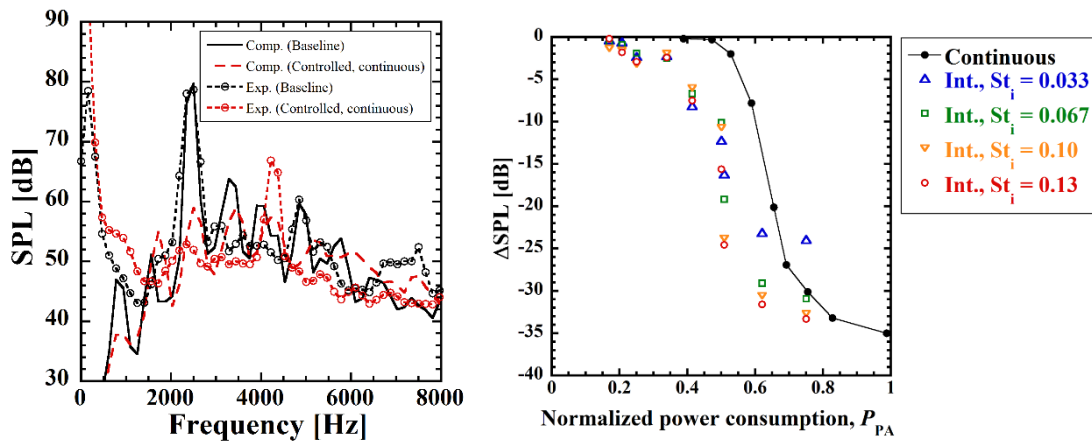


図5 非制御時・制御時の音圧スペクトル 図6 PA消費電力と音圧制御効果の関係

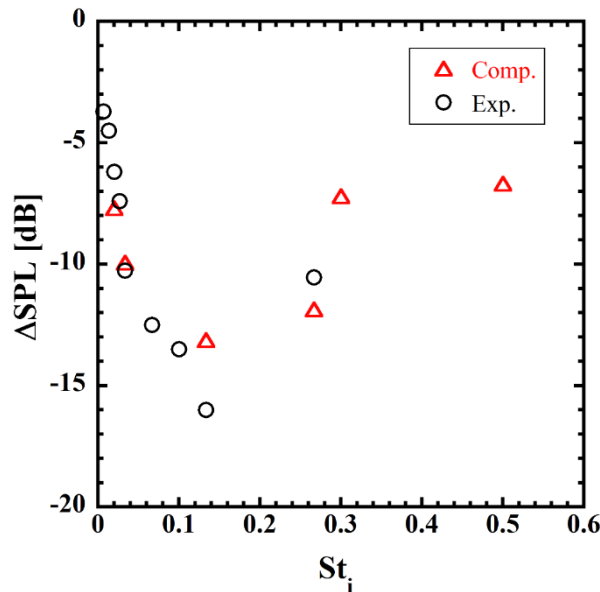


図7 間欠周波数が音圧制御効果に及ぼす影響

4. 2 流れ場における制御効果

図 8 には数値解析により予測された流れ場と音場を表している。図中の紫で表された領域は低圧領域でありキャビティ音の原因となる二次元的な渦構造を表している。灰色で示された領域はより微細な渦構造を示している。青から赤で色付けされた等高線は圧力の強さを表しており、青は膨張波、赤は圧縮波を表している。

図 8(a)より非制御時には紫色で示された渦構造が明瞭に表れており、強い膨張波、圧縮波が発生していることがわかる。図 8(b),(d)より間欠周波数 $St_i = 0.033, 0.50$ における制御時には音源となる二次元的渦構造がやや弱まっていることがわかる。さらに図 8(c)より $St_i = 0.133$ における制御時には二次元的渦構造はほぼ見られないことがわかる。この結果は前述の音圧の低減効果の間欠周波数への依存結果と一致している。

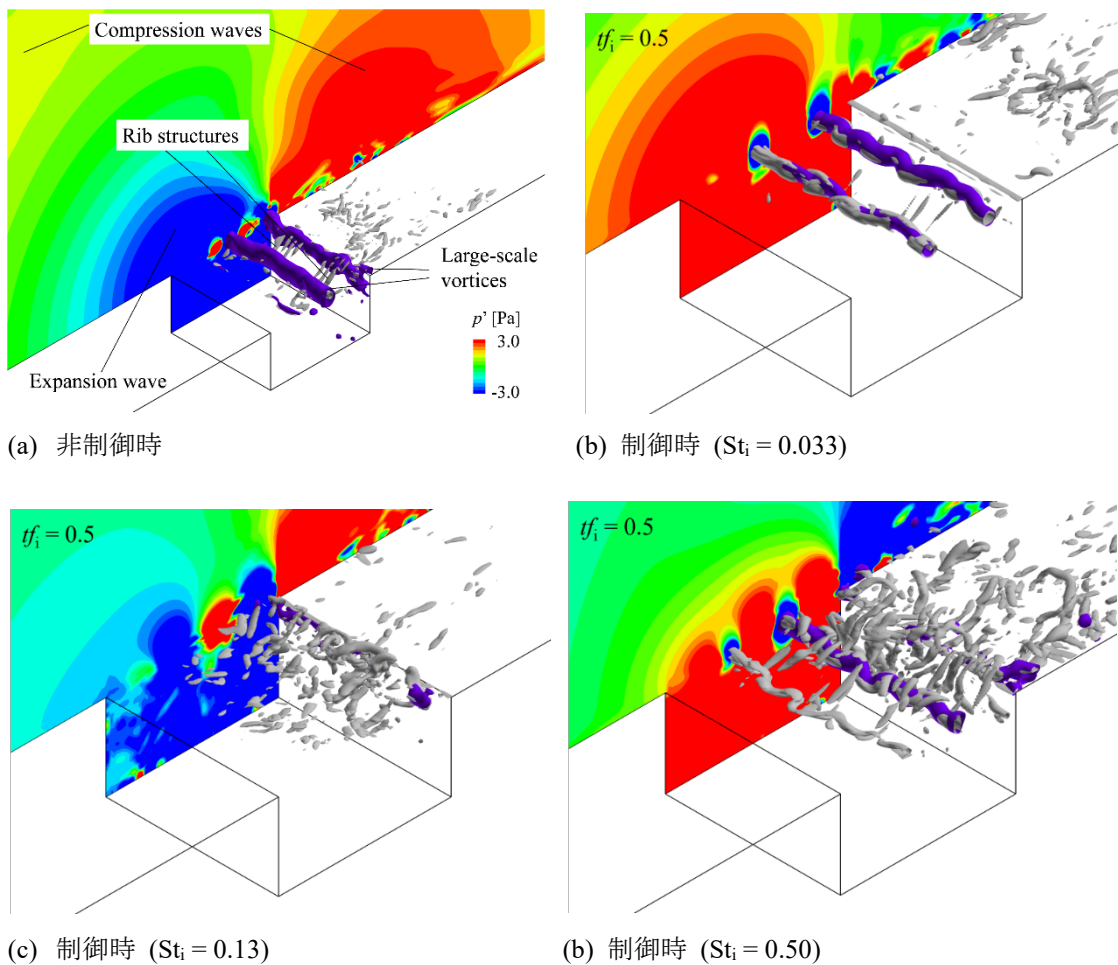


図 8 数値解析により予測された流れ場と音圧

4. 3 結果に関する総括

本研究により PA の消費電力を抑制しつつ効果的に発生音を低減可能な制御手法を提案し、実証することができた。効果的な間欠周波数が存在することがわかり、数値解析を用いて流れ場や音場から発生音が低減されるメカニズムを考察した。さらに、本研究によりキャビティ形状を変化させた際には効果的な間欠周波数が変化することもわかった。現在は、このことを考慮し、キャビティ周囲の音圧データを入力値としたフィードバック制御についても数値解析により実施し、発生音の低減を確認している。本研究は高速輸送機関や流体関連機器の低騒音化に向けた取り組みに直接的・間接的に貢献すると期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Saya Sato, Hiroshi Yokoyama, Akiyoshi Iida	4. 巻 9
2. 論文標題 Control of Flow around an Oscillating Plate for Lift Enhancement by Plasma Actuators	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app9040776	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Hiroshi Yokoyama, Akiyoshi Iida	4. 巻 66
2. 論文標題 Reduction of tonal sound from cascade of flat plates by controlling thickness ratio of neighboring plates	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Noise Control Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 375-387
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3397/1/376632	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yuuya Tanaka, Hiroshi Yokoyama, Akiyoshi Iida	4. 巻 431
2. 論文標題 Forced-oscillation control of sound radiated from the flow around a cascade of flat plates	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Sound and Vibration	6. 最初と最後の頁 248-264
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jsv.2018.06.013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 宮本孟宜, 横山博史, 飯田明由	4. 巻 84
2. 論文標題 折れ部を有する曲面の端部から発生するフィードバック音のプラズマアクチュエータを用いた制御	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.18-00121	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hiroshi Yokoyama, Isamu Tanimoto, Akiyoshi Iida	4. 巻 7
2. 論文標題 Experimental Tests and Aeroacoustic Simulations of the Control of Cavity Tone by Plasma Actuators	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 790 ~ 790
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app7080790	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yokoyama Hiroshi, Adachi Ryo, Minato Taiki, Iida Akiyoshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Experimental and Numerical Investigations on Control Methods of Cavity Tone by Blowing Jet in an Upstream Boundary Layer	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems	6. 最初と最後の頁 13-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4271/2017-01-1786	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Miyamoto Takenori, Yokoyama Hiroshi, Iida Akiyoshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Suppression of Aerodynamic Tonal Noise from an Automobile Bonnet Using a Plasma Actuator	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems	6. 最初と最後の頁 22-30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4271/2017-01-1825	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 横山 博史、宮澤 真史、飯田 明由	4. 巻 48
2. 論文標題 折れ部を上流に有する曲面端部まわりの流れにおける コヒーレンス解析によるフィードバック音発生機構の解明	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 自動車技術会論文集	6. 最初と最後の頁 485 ~ 490
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.11351/jsaeronbun.48.485	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 楠本 誠、横山 博史、飯田 明由	4. 巻 83
2. 論文標題 プラズマアクチュエータによる平板列から発生する空力騒音の制御	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.16-00364	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroshi Yokoyama, Katsutake Minowa, Kohei Orito, Masahito Nishikawara, Hideki Yanada	4. 巻 -
2. 論文標題 Compressible Simulation of Flow and Sound around a Small Axial-Flow Fan with Flow through Casing Slits	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JOURNAL OF FLUIDS ENGINEERING-TRANSACTIONS OF THE ASME	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Keisuke Otsuka, Hiroshi Yokoyama, Katsuya Otake
2. 発表標題 CONTROL OF FLOW AND SOUND OVER A CAVITY BY INTERMITTENTLY DRIVEN PLASMA ACTUATOR
3. 学会等名 International Congress on Sound and Vibration (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大塚圭祐, 横山博史, 大竹克也
2. 発表標題 間欠駆動プラズマアクチュエーキャビティ音制御
3. 学会等名 日本流体力学会中部支部講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横山博史
2. 発表標題 上流に折れ部を有する曲面の端部から発生するフィードバック音
3. 学会等名 日本騒音制御工学会 空力騒音分科会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Yokoyama, Isamu Tanimoto, Akiyoshi Iida
2. 発表標題 Experimental and Computational Investigation of Cavity Tone Controlled by Streamwise Plasma Actuators
3. 学会等名 The 6th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows ICJWSF 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Isamu TANIMOTO, Hiroshi YOKOYAMA, Akiyoshi IIDA
2. 発表標題 Effects of electrode arrangement of plasma actuators on noise control in cavity flow
3. 学会等名 Inter-Noise 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroshi Yokoyama, Ryo Adachi, Taiki Minato, Akiyoshi Iida
2. 発表標題 Experimental and Numerical Investigations on Control Methods of Cavity Tone by Blowing Jet in an Upstream Boundary Layer
3. 学会等名 SAE 2017 Noise and Vibration Conference and Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takenori Miyamoto, Hiroshi Yokoyama, Akiyoshi Iida
2. 発表標題 Suppression of Aerodynamic Tonal Noise from an Automobile Bonnet Using a Plasma Actuator
3. 学会等名 SAE 2017 Noise and Vibration Conference and Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroshi Yokoyama
2. 発表標題 Control of aerodynamic noise radiating from cavity flows by introducing longitudinal vortices
3. 学会等名 the 2nd World Congress on Momentum, Heat and Mass Transfer (MHMT'17) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 横山博史, 他共著者多数	4. 発行年 2018年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 721
3. 書名 遮音・吸音材料の開発、評価と騒音低減技術	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究室ホームページ http://ec.me.tut.ac.jp/ 大学教員紹介ページ https://www.tut.ac.jp/university/faculty/me/666.html Researchmap https://researchmap.jp/h-yokoyama/ 研究室ホームページ http://ec.me.tut.ac.jp 大学教員別ホームページ https://www.tut.ac.jp/university/faculty/me/666.html Researchmap個人ページ https://researchmap.jp/h-yokoyama/ ResearchGate個人ページ https://www.researchgate.net/profile/Hiroshi_Yokoyama4 Google Scholar個人ページ https://scholar.google.com/citations?hl=en&user=bLpGksMAAAAJ</p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----