

電氣的・熱的効果によるキャビティ音制御の数値解析

大竹克也、大森康瑛、横山博史

豊橋技術科学大学

1. はじめに

鉄道の車両連結部や工業製品の部品組み合わせにおける窪み部（キャビティ）まわりの流れから発生する空力音（キャビティ音）は、単一の周波数で強い音が発生する場合があります、低減手法の確立が求められている。近年ではさらにこうした騒音が有するエネルギーを有効に活用することも期待されている。

流体制御デバイスとしてプラズマアクチュエータ¹⁾（PA）（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し生じる誘電体バリア放電を利用して気流を発生させるもの）が注目されている。PAは翼のはく離制御に有効であることが示されているがPAによるキャビティ音の制御の研究は少ない。PAは電氣的に流れを制御でき時間応答性が高いという利点があり、PAのオン・オフを時間的に切り替える間欠制御を行うことで、消費電力の削減が期待できる。しかし、適切な間欠制御の手法や音の低減機構は明らかになっていない。

キャビティ音の低減に加え、キャビティ音の持つ音響エネルギーを有効利用する方法として、熱音響ヒートポンプ現象²⁾に着目した。熱音響ヒートポンプ現象とは音響エネルギーにより熱輸送が生じる現象であり、特に狭い流路を有する多孔体や平板列（スタック）に温度こう配を発生させることができる。熱音響ヒートポンプはヒータや冷凍機として使用できるとともに、熱電対素子などにより発電も可能である。しかし、熱音響ヒートポンプ現象において空力音を用いた報告は少なく、キャビティ音など空力音を用いる場合に熱音響ヒートポンプ現象が効果的に生じる条件を明らかにすることが求められている。

本課題では、PAの適切な制御条件を明らかにすることを目的として、まずキャビティ内の音圧レベルの情報を基にフィードバック制御を行った場合について流れと音の直接計算を実施した。さらに、間欠周波数が制御効果に及ぼす影響を明らかにするため、フィードバック制御時にPAがオン・オフと切り替わった間欠周波数を参考に、種々の間欠周波数について時間的に間欠周波数を一定とした場合の制御効果を調査した。また、キャビティ流れにおいて効果的に熱音響ヒートポンプ現象が生じる条件を明らかにすることを目的とし、スタックを有するキャビティ周りの流体音響解析とスタックの熱伝導解析を連成した解析を実施し、特に主流マッハ数が熱音響ヒートポンプ現象に及ぼす影響について調査した。

2. 計算手法

2. 1. 対象とした流れ

2. 1. 1. 電氣的効果によるキャビティ音制御

図1に解析対象とするキャビティ流れおよびPA形状を示す。座標系は原点をキャビティ前縁とし、流れ方向を x 方向、鉛直方向を y 方向、スパン方向を z 方向とした。実験において強いキャビティ音が観測された条件を参考に、キャビティ長さ L は20 mm、深さ D は10 mmとした。主流速度 U_0 は30 m/s（主流マッハ数 $M \equiv U_0/c = 0.087$ ）とした。PA形状および印加電圧条件は実

験により効果的な発生音の低減効果が得られた条件³⁾を参考にし、図1に示すように、上部・下部電極対をスパン方向に間隔 $s=4\text{ mm}$ ($s/L=0.2$) にて配置し、大きさ $V_{pp}=5.4\text{ kV}$ の交流電圧（駆動周波数 4.2 kHz ）を印加した。

フィードバック制御時は、キャビティ上流側壁面 ($x=0, y=-0.5D, z=0$) における音圧レベルを評価関数とした。非制御時および十分に音が低減された PA 連続駆動時のキャビティ音の強さを参考に、評価関数の閾値を 115 dB とし、閾値以上の発生音が観測された場合に PA を駆動した。間欠周波数を時間によらず一定とした制御では、間欠周波数を $f_i=30\text{--}750\text{ Hz}$ とし、間欠周期中の PA をオンとする時間割合を表す間欠比は $R_d=0.5$ とした。

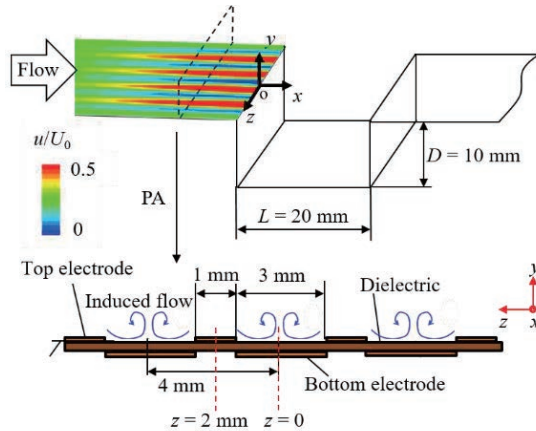


図1: キャビティ流れおよび PA 形状。

解析対象とするキャビティ流れおよび PA 形状。PA 駆動時はスパン方向に非一様な流れがキャビティに流入する。

2. 1. 2. 熱的效果によるキャビティ音制御の数値解析

図2に対象とするスタックを有するキャビティ周りの流れの体系を示す。また、スタックに関しては、下端を原点に鉛直方向に y_s 軸をとった。キャビティ長さは前述した値であり、キャビティ深さと長さの比は音響共鳴を伴う強いキャビティ音が観測された条件を参考に $D/L=2.5$ とした。キャビティ長さを基準としたレイノルズ数を $Re_L=4\times 10^4$ と一定とし、主流マッハ数 M は音響共鳴が強く発生する 0.087 と 0.26 の2条件にて計算を行った。

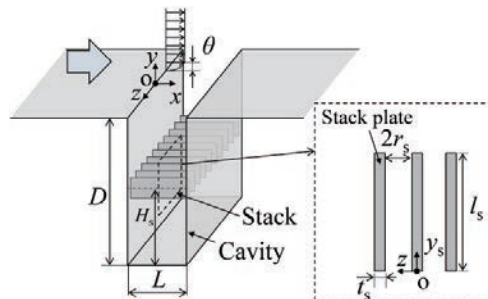


図2: スタックを有するキャビティ周りの流れ。

キャビティ内に熱音響効果を生じさせるためにスタックを設置した場合のキャビティ流れの模式図。

スタックは温度こう配を効果的に発生させるため熱伝導率の低いセラミック材の平板列を想定した。効果的に熱音響効果が発生するスタック設置位置 H_s およびスタック長さ l_s は共鳴周波数の音波の波長と関連し、ここではスタックのないキャビティ流れの共鳴周波数 1.5 kHz ($M = 0.087$), 14 kHz ($M = 0.26$) の $1/4$ 波長の長さ L_a を代表長さとした。スタックの長さ l_s/L_a 、キャビティ底部からのスタック位置 H_s/L_a は先行研究^{4),5)}を参考にそれぞれ 0.1, 0.5 程度とした。また、スタックの平板間距離は水力半径 r_s がスタック壁面近傍の熱境界層厚さ $\delta_a = (2\alpha/\omega)^{1/2}$ (α は気体の熱拡散率、 ω は音波の角周波数) と同程度となるように設定した。

2. 2. 支配方程式および離散化手法

流れと音の連成現象を再現するために 3 次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式およびエネルギー保存式を支配方程式とした。PA による制御を行う際は、方程式に運動量付加の影響を表す項を加えた。また、スタックを再現するために Volume Penalization (VP) 法⁶⁾を用いた。VP 法は運動方程式の右辺に外力項を追加し、物体部が含まれる格子点で物体の速度と温度を与えることにより物体の形状を表現する。スタック内の温度場解析については、2 次元熱伝導方程式を支配方程式とした。

流体音響解析の空間差分には 6 次精度コンパクトスキーム⁷⁾ (境界では 4 次精度)、時間積分は 3 次精度ルンゲクッタ法を用いて数値解析を行った。スタックの温度場解析には空間微分には 2 次精度の中心差分、時間積分には 1 次精度の陽解法を用いた。

本計算のような圧縮性解析の時間ステップは音速に基づくクーラン数により決まる。 $M=0.087$ の計算を例にした場合、本計算で用いた計算格子の最小格子幅は 0.008 mm であり、時間ステップは 0.8×10^{-8} s となる。流れ場が安定し、制御やスタックの有無が音圧スペクトルや温度場に及ぼす影響を調査するため計 0.1 s 程度の解析を行った。必要なステップ数は 1250 万ステップ、計算格子点数は最大で 1000 万点規模となり、16 ノードを用いて計算するために約 30 d (待ち時間は含めていない) 必要であった。

3. 計算結果

3. 1. 電氣的効果によるキャビティ音制御

3. 1. 1. フィードバック制御

図 3 に、非制御時の流れ場を初期場としてフィードバック制御を行った際の評価位置 ($x=0, y=-0.5D, z=0$) での基本周波数における音圧レベルの時間変化を示し、時間 0 は制御を始めた時間である。図より概ね周期的に PA のオン・オフが切り替わるようになった $t=27.9$ ms 以降では、間欠周波数は 50–100 Hz の範囲であり、間欠比は 0.6 程度であった。また、図 5 に示すように、遠方での音圧測定点 ($x/L=6.75, y/L=21.5, z=0$) では、非制御時に対して基本周波数の音圧レベルが平均的に約 12 dB 低減した。

図 4 に、速度こう配テンソルの第二不変量 q と低圧領域により微細および大規模な渦構造をそれぞれ可視化したものを、変動圧力の分布とともに示す。PA がオフに切り替わった直後の時刻 ($t=28.75$ ms) では、3 次元的な微細な渦構造の生成が活発な流れ場となっていることがわかる。発生音が大きくなり始めた直後の時刻 ($t=31.25$ ms) では、キャビティ音の原因となる大規模渦構造が生成されていることがわかる。このことは、大規模渦構造が生成されることにより、キャビティ音が大きくなり始めることを意味する。

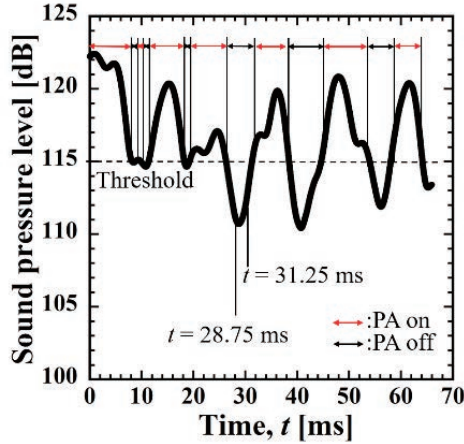


図 3: 基本周波数における音圧レベルの時間変化。

フィードバック制御時の評価位置における基本周波数の音圧レベルの時間変化を表す。閾値よりも音圧レベルが大きくなった際に PA がオンとなる。

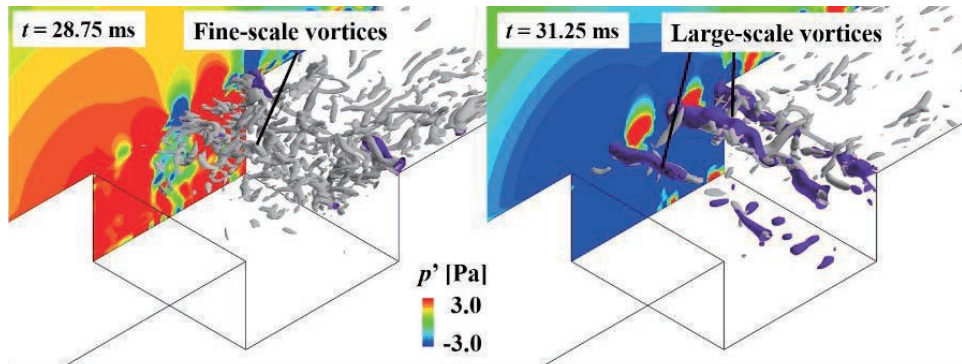


図 4: 第二不変量 $q/(U_0/L)^2 = 70$ (灰色)、低圧領域 $p' = -20$ Pa (紫色) の等値面と変動圧力分布。

PA がオフに切り替わった直後の時間 ($t = 28.75$ ms) と、発生音が大きくなり始めた直後の時間 ($t = 31.25$ ms) の渦構造と変動圧力分布を表す。

3. 1. 2. 間欠周波数が制御効果に及ぼす影響

時間的に間欠周波数を一定 (間欠比 $R_d = 0.5$) とした条件において、間欠周波数が制御効果に及ぼす影響を議論する。フィードバック制御における PA の間欠周波数を参考に、間欠周波数を $f_i = 30\text{--}750$ Hz の範囲で変化させた。図 5 には基本周波数における発生音 ($x/L = 6.75, y/L = 21.5, z = 0$) への制御効果を実験結果とともに示す。低減効果は間欠周波数により大きく変化し、実験・計算どちらの結果においても $f_i = 200$ Hz において最大の低減効果が得られ、本計算では約 16 dB 発生音が低減された。この間欠周波数はフィードバック制御時の間欠周波数に対して、2-4 倍程度の周波数に相当する。

図 6 に制御時の流入境界層内 ($x = 0, y/\theta = 1.0$) における流れの非一様性の時間変化を示す。時間 $t_f = 0$ は PA がオフになった瞬間を意味する。スパン方向の非一様性 NH は式 (1) により評価した。

$$NH = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n_z} \left(\frac{u_k - \bar{u}}{U_0} \right)^2} \quad (1)$$

ここで n_z はスパン方向の格子点数、 u_k は k 番目の格子点における流れ方向速度、上線はスパン方向の平均値を意味する。図より $f_i = 50, 200$ Hz の比較的低い間欠周波数では、PA をオンにすることで非一様性が増大し、最大値は $NH = 0.2$ となることがわかる。一方、 $f_i = 400, 750$ Hz と間欠周波数が高くなると、間欠周期中の最大の非一様性は減少する。これは PA による誘起流によって流入境界層が十分非一様になるために必要となる時間に対して、間欠周期中の PA がオンとなる時間が相対的に短くなったためと考えられる。このため、図 5 に示したように $f_i = 200$ Hz より高い間欠周波数では制御効果が小さくなったと考えられる。

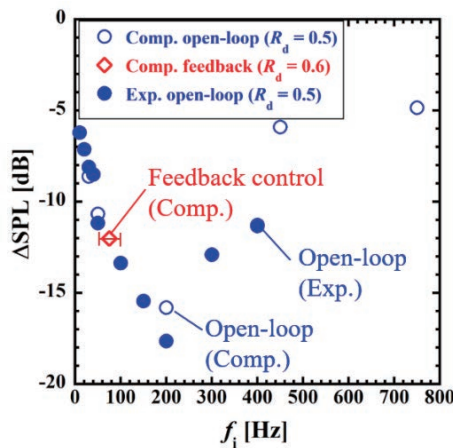


図 5: 発生音への制御効果。

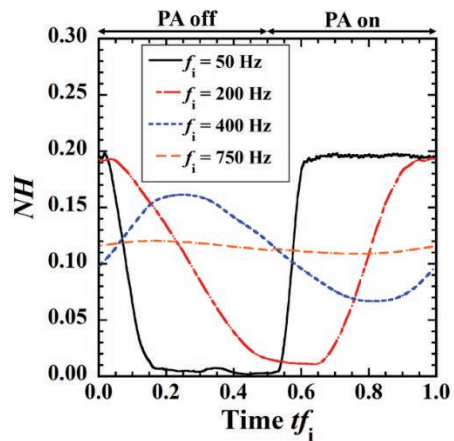
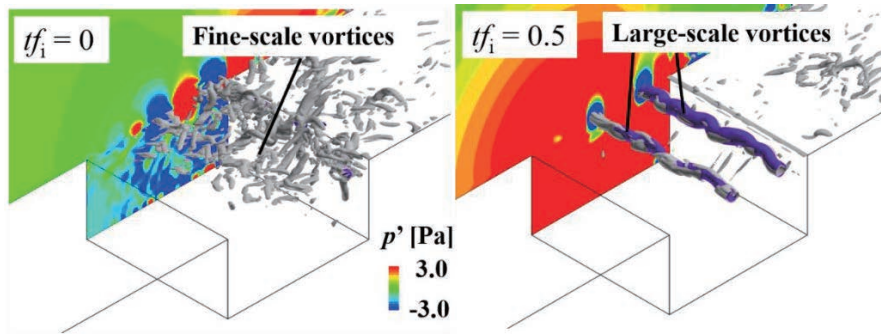


図 6: 流入境界層の非一様性の時間変化。

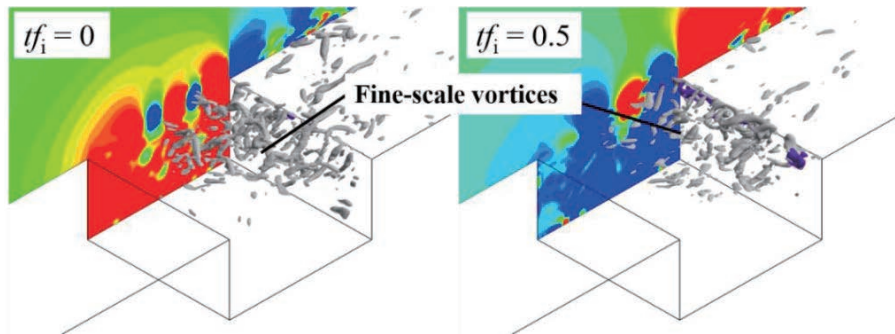
図 5 は発生音への制御効果を示しており、縦軸の 0 は非制御時の基本周波数と同じ音圧レベルを意味する。図 6 は各間欠周波数でのキャビティに流入する境界層内のスパン方向の非一様性を示している。

3. 1. 3. PA オン・オフによる流れ場の変化

図 7 に制御時での渦構造および変動圧力の等高線を示す。速度こう配テンソルの第二不変量 q の等値面により微細な渦構造を、低圧領域によりキャビティ音の原因となる大規模渦構造を抽出している。図 7 (a) において、低い間欠周波数 $f_i = 50$ Hz では、PA がオンからオフへ切り替わる時間 $t f_i = 0$ では大規模渦構造がみられず、三次元的な微細な渦構造が活発に生成される流れ場となっている。一方、時間 $t f_i = 0.5$ では大規模渦構造が現れており、PA のオン・オフの切り替えに対しキャビティ音の原因となる渦構造も抑制・再形成されることがわかる。図 7 (b) より、効果的な間欠周波数 $f_i = 200$ Hz では大規模渦構造の生成は常に抑制された状態となることがわかる。これは、PA がオフとなっている時間が、自励振動が再び増幅するために必要な時間に比べ相対的に短いためと考察された。



(a) $f_i = 50$ Hz



(b) $f_i = 200$ Hz

図 7: 第二不変量 $q/(U_0/L)^2 = 70$ (灰色)、低圧領域 $p' = -20$ Pa (紫色) の等値面と変動圧力分布。

渦構造と変動圧力分布。(a) は効果的な間欠周波数より低い間欠周波数 $f_i = 50$ Hz、(b) は効果的な間欠周波数 $f_i = 200$ Hz での結果をそれぞれ示す。キャビティ音の原因となる大規模渦構造を抑制できているかが発生音の低減に関連する。

3. 2. 熱的効果によるキャビティ音制御

3. 2. 1. スタックが音場に及ぼす影響

図 8 にスタックあり・なしの条件についてキャビティ底部 ($x/L = 0.5, y/D = -1.0$) での音圧レベルを示す。周波数 f はキャビティ長さ L および主流速度 U_0 を基準としたストローハル数 $St \equiv fL/U_0$ で表され、共鳴周波数 f_r の無次元周波数は $St_r \equiv f_r L/U_0$ となる。低マッハ数 $M = 0.087$ では、スタックを設置することにより共鳴周波数が $St_r = 1.04$ から $St_r = 1.46$ に変化した。また、スタックの設置により共鳴周波数での音圧レベルは 7 dB 低減された。一方、高マッハ数 $M = 0.26$ においては基本周波数の変化は見られず、スタックあり・なしの両条件で、 $St_r = 1.04$ において共鳴音が発生した。スタックなしの条件に比べてスタックありの条件での音圧レベルは 3 dB 低減された。マッハ数が低い場合スタックが共鳴状態へ及ぼす影響が強まると考えられる。

3. 2. 2. スタックの温度分布

図 9 に予測されたスタックの温度分布を示す。横軸の y_s 方向位置はスタック長さ l_s で無次元化し、縦軸はスタック上端部の温度 T_t を基準としスタック長さ l_s で正規化している。スタック端部間の平均的溫度こう配を評価すると、低マッハ数 $M = 0.087$ においては 0.048 K/m とわずかな溫度こう配であったが、高マッハ数 $M = 0.26$ ではより大きな溫度こう配 9.6 K/m を得た。低マッ

ハ数において温度こう配が低かった原因の1つとして、共鳴周波数が増えたことにより音波の波長とスタック設置位置の関係が変化することが考えられる。また、本結果より高いマッハ数では熱音響ヒートポンプ効果がより効果的に発生することを確認した。

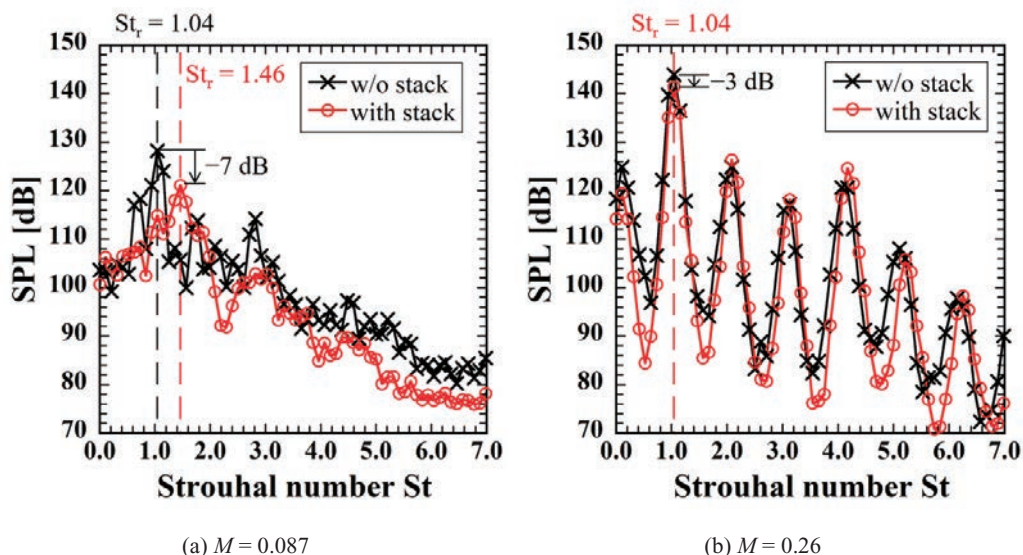


図 8: キャビティ底部 ($x/L=0.5, y/D=-1.0$) における音圧スペクトル。

左図が低マッハ数 $M = 0.087$ での音圧スペクトル、右図が高マッハ数 $M = 0.26$ での音圧スペクトル。

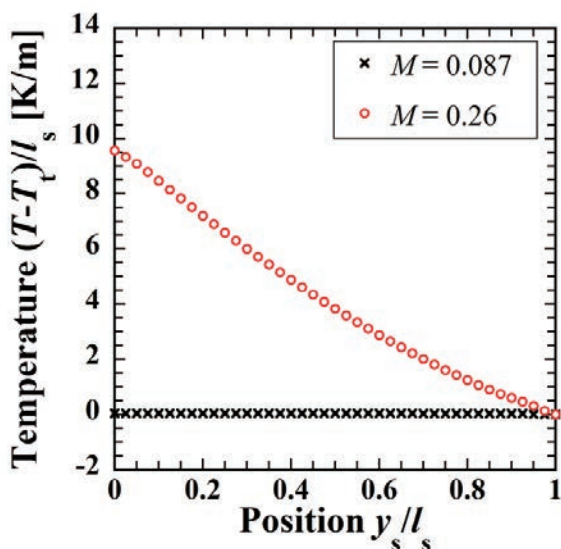


図 9: スタックの温度分布。

各条件でのスタックの温度分布。縦軸のスタック温度は、スタック上端部の温度 T_t との差をスタック長さ l_s で除したもの。

4. おわりに

本研究ではキャビティ周囲の流れから発生する空力音であるキャビティ音を対象として、プラズマアクチュエータを用いた電気的効果を用いた制御および細管流路を有するスタックをキャビティ内部に挿入し熱音響効果を利用した制御に関して数値解析を実施し、以下の知見を得た。

1. プラズマアクチュエータをフィードバック制御における間欠周波数の 2 から 4 倍の適切な周波数で間欠駆動することにより効果的に空力音を低減することが可能である。
2. 適切な間欠周波数で制御を行った場合、プラズマアクチュエータにより流入境界層の非一様性が高くなり、かつ音源となる大規模渦構造が常に抑制された。
3. スタックを挿入した場合、マッハ数に依らず発生音は低減した。特にマッハ数を大きくすることで、熱音響ヒートポンプ効果が効果的に発生し、スタック端部間により高い温度こう配が発生した。

謝 辞

本研究成果は「若手・女性利用者推薦」制度の支援を受け実施されました。本課題では、流体、音響、電気的効果および熱的効果が連成した解析であり長い計算時間が必要となり、本課題で与えて頂いた計算リソースにより研究を大きく前進させることができました。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) M. L. Post et al., “Separation Control on High Angle of Attack Airfoil Using Plasma Actuators”, AIAA J., **42** (11), pp. 2177-2184, 2004.
- 2) P. Merkli, H. Thomann, “Thermoacoustic effects in a resonance tube”, J. Fluid Mech. **70** (1), pp.161–177, 1975.
- 3) I. Tanimoto et al., “Effects of electrode arrangement of plasma actuators on noise control in cavity flow”, Proc. Inter-Noise 17, pp. 4541-4550, 2017.
- 4) J. Wheatley et al., “Experiments with an intrinsically irreversible acoustic engine”, Phys. Rev. Letters, **50**, pp.499–502, 1983.
- 5) Y. Kishino et al., Effects of stack position on thermoacoustic heat pump in a rectangular resonator, Proc. 26th International Congress on Sound and Vibration, 2019.
- 6) Q. Liu, O. V. Vasilyev, “A Brinkman penalization method for compressible flows in complex geometries”, J. Comput. Phys., **227**, pp.946–966, 2007.
- 7) S. K. Lele, “Compact finite difference schemes with spectral-like resolution,” J. Comput. Phys. **103** (1) pp.16–42, 1992.