

熱音響ヒートポンプによる空力騒音のエネルギーハーベスト

豊橋技術科学大学 機械工学系 教授

横山 博史

1. テーマ設定の背景

共鳴管内に、スタックと呼ばれる素形材の一種であるハニカムや平板列などを設置し、スピーカにより強い音を管内に発生させることでスタック端部間に温度勾配が発生する。これは熱音響ヒートポンプと呼ばれ、多くの研究がなされてきた。一方で、工場配管内の分岐管や安全弁などは溝形状（キャビティ）となり、このキャビティを通過する気流からは強い音（空力騒音）の発生を伴う流体振動が発生する場合があります問題となる。

本研究では、図1に示すように、キャビティ内にスタックを設置し、発生する空力騒音を利用した熱音響ヒートポンプを提案し、適切なスタック材質、形状、設置位置、キャビティ流れの条件を明らかにすることを目標とした。発生した温度勾配を基に熱電素子により発電が可能となり、エネルギーハーベストに貢献するとともに、音が熱に変換することで騒音レベルの低減も実現可能である。

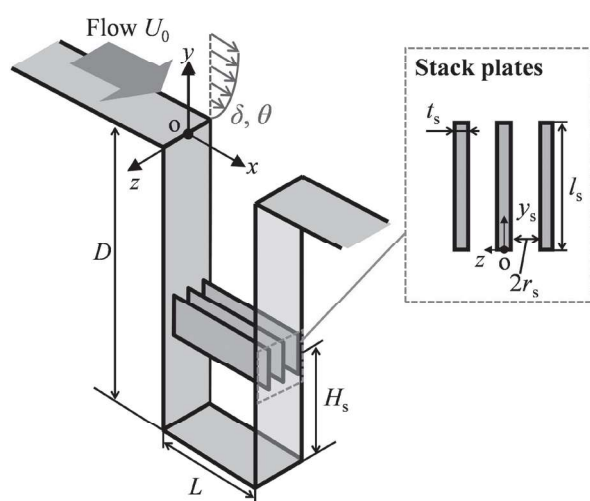


図1 スタックを有するキャビティを通る流れ

2. 素形材分野との関連性

熱音響ヒートポンプの性能向上には、セラミックやステンレスなどの素形材によって構成されるスタックの形状や設置位置の最適化が必要となる。本研究では、空力騒音を利用した熱音響ヒートポンプにおいて効果的なスタックの材質、形状、設置位置について明らかにした。特に、近年3Dプリンタを用いたセラミックなどの素形材加工技術が発達している背景を受け、既存のハニカムを用いた実験での熱音響ヒートポンプ効果の評価だけでなく、大規模流体・音響解析に基づき、より効果的なスタックの条件を提案した。本研究は、素形材分野とともに流体力学、音響工学にも関連する融合的研究となっている。本研究で得られた知見により、素形材によるエネルギーハーベストへの貢献を促進できると期待される。

3. 研究開発の成果

キャビティ流れから発生する空力騒音により駆動される熱音響ヒートポンプの効果的なスタックおよび流れの条件を明らかにするため、流体、音、スタック内部の熱伝導が連成した現象を予測可能な数値解析が実験とともに実施された¹⁾。図2には、キャビティ流れによって発生する音響共鳴により、スタック内に発生する音響振動流の速度ベクトルと圧力変動分布を示す。さらに、風洞実験を用いたキャビティ流れからの発生音（キャビティ音）の測定、スタックに形成される温度勾配の測定を行った。実験と解析の結果は、整合する結果となっており、解析精度が確認されている。

スタックの条件として、低い熱伝導率、高い空隙率、細孔の水力半径が流体の振動境界層厚さと同程度とすることで、より大きな温度勾配が生成

可能であった。スタックの設置位置は、従来の純粋な音響加振を仮定した熱音響理論による最適位置よりキャビティ底部に近い位置が適切な位置であることがわかった。キャビティを通過する気流のマッハ数（流速と音速の比）を変化させ、高いマッハ数ではスタックにより大きな温度勾配が形成されることも明らかにした。さらに、スタック内部の熱流、音響インテンシティよりエネルギー変換機構を解明した。

最新の実験データ²⁾では、キャビティ流れにセラミック材料のスタックを設置した実験において、36 K/mの温度勾配の発生を確認している。この時、キャビティ内にスタックを設置することでキャビティ底部での音圧変動が低減されることも明らかにしており、本提案手法がエネルギーハーベストおよび低騒音化に有効であることが実証された。

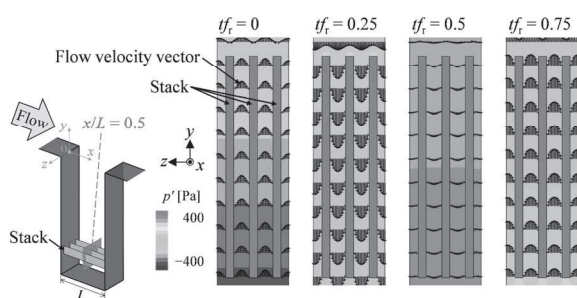


図2 予測されたスタック内部の流体・音響場

4. 訴求点

本研究において用いられた流体、音響、熱伝導が連成する現象を直接的かつ厳密に予測することが可能な解析手法は筆者が開発してきたものである。こうした解析では、流体と音響の空間スケールの違い、また流体振動と熱伝導の時間スケールの違いなどのため、大規模かつ長時間の数値解析が必要となる。このため、筆者は高精度な差分法の導入や大規模並列化に対応した解析コードを構築し、富岳などのスーパーコンピュータを利用することで、こうした解析を実現した。さらに、本解析および実験により、従来の熱音響理論では予測できなかった、空力騒音により駆動される熱音

響ヒートポンプにおける適切なスタックや流れの条件について新たな知見が明らかになった。

空力騒音は圧縮機などの流体機械、風車などのエネルギー機器、飛行機などの高速輸送機関など様々な機器で発生し、環境負荷の一つとして問題となっている。こうした機器からの空力騒音に対しても、本提案技術を用いることで騒音低減とエネルギーハーベストの両立が可能となる。

本研究成果により、空力騒音駆動の熱音響ヒートポンプに用いるスタックとしての適切な条件が明らかになり、こうした条件をもつ素形材のエネルギーハーベストに向けた新たな機能が発見された。今後のセラミックや樹脂材などの素形材技術の更なる発展により、本技術がより効果的に幅広い分野で利用可能となると期待される。

参考文献

- 1) H. Yokoyama, Y. Omori, M. Kume, M. Nishikawara, H. Yanada, Simulation of thermoacoustic heat pump effects driven by acoustic radiation in a cavity flow, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 185, 122424, 2022
- 2) H. Yokoyama, T. Minamoto, M. Kume, M. Nishikawara, H. Yanada, A thermoacoustic heat pump driven by self-sustained oscillations in a cavity flow with a stack, *Proc. International Congress on Acoustics*, 2022