

jh190031-NAJ

Investigation of Sound-Flow Interaction of Acoustic Liner using CFD/CAA Hybrid Approach

佐々木 大輔 (金沢工業大学)

ジェットエンジンの低騒音化に使用されるアコースティックライナの吸音性能を向上させ、より一層の騒音低減を図るためには、アコースティックライナの形状を最適化し、ファン騒音を抑制することが必要となるが、流入する流れがアコースティックライナの吸音に対して与える影響は完全には理解されていない。そこで、直交格子法に基づく数値流体解析により、アコースティックライナモデルに対する空力音響解析を実施し、その妥当性の検証を行った。さらに、130dB 以上の高音圧では、ライナ内に非線形性が現れることを示した。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

本共同研究は、東北大学を共同研究拠点として実施し、東北大学サイバーサイエンスセンターの計算機・設備を利用している。

(2) 共同研究分野

- 超大規模数値計算系応用分野
- 超大規模データ処理系応用分野
- 超大容量ネットワーク技術分野
- 超大規模情報システム関連研究分野

(3) 参加研究者の役割分担

本共同研究は、金沢工業大学・東北大学サイバーサイエンスセンター、英国サウサンプトン大学音響振動研究所と共同で研究を実施している。研究内容と研究機関の役割分担は以下の通りであり、解析手法の開発及び大規模解析に向けた並列化・効率化を金沢工大及び東北大の研究者らが実施し、その手法により得られた解析結果の評価を金沢工大及びサウサンプトン大学の研究者らが行う。特に、サウサンプトン大学の研究者らは、本研究の対象であるアコースティックライナの専門家であり、解析結果の検証を通して解析手法の有効性について議論する。

①空力音響解析のアルゴリズム開発 (金沢工

大, 東北大)

②解析手法の3次元化 (金沢工大, 東北大)

③2次元ライナモデルの解析及び検証 (金沢工大, サウサンプトン大学)

④3次元ライナモデルの解析 (金沢工大, サウサンプトン大学)

2. 研究の目的と意義

環境に優しい航空機開発の必要性から、ジェットエンジンに対する要求は大きく、高効率かつ低騒音を実現することが求められている。高効率化のために、ジェットエンジンのバイパス比 (ファン径) は徐々に大きくなっている一方、それによる重量増加による負荷も問題になりつつある。重量を減らすための一案としてファン部のケーシングを薄くする方法があるが、ケーシング内面にはファン騒音削減のためのアコースティックライナが取り付けられていることから、ケーシング部が薄くなると離着陸時の騒音の悪化が懸念される。そこで、アコースティックライナの形状を最適化し、ファン騒音を抑制することが必要となるが、流入する流れがアコースティックライナの吸音に対して与える影響は完全には理解されていない。流れがなく音波のみが与えられた場合、ライナの頸部における摩擦及び頸部からの吹き出しによる

混合に伴い、音エネルギーが力学的エネルギーに変換されて吸音される。流れがある場合には、流れと音の相互作用が生じるため、流れを含む解析を実施することで、流れがある場合のアコースティックライナの吸音現象を理解すること可能となる。そこで、本研究では、アコースティックライナに対して空力音響解析手法を適用し、流れのみの解析、音のみの解析との比較を通して、流れが音に対して与える影響の理解を図る。これにより、アコースティックライナの吸音原理を詳細に理解することで、航空機の離着陸時の騒音レベルを低下可能なアコースティックライナの設計が可能となる。

3. 当拠点公募型研究として実施した意義

実形状への適用を考慮した大規模な空力音響解析を直交格子法により実施するためには、大規模ベクトル計算機や超並列計算機環境による評価が必須であり、当公募型共同研究による計算機環境が必要不可欠である。特に、流れと音の伝播を解析するためにナビエ・ストーク方程式を直接解く、本研究手法では解析格子が膨大となり、解析時間が莫大となってしまう。今後、3次元化を図り、大規模な並列計算を実施するためには、効率的な入出力やデータ交換が不可欠であることから、今後の解析を実施するためにも、本枠組みは非常に有効である。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

該当せず

5. 今年度の研究成果の詳細

申請時の計画では、CFD/CAA ハイブリッド手法を構築することで、アコースティックライナの空力音響解析を実施する予定であった。そこでは、これまで開発してきた流体解析手法によりアコースティックライナの平均流れ場を解析し、そこで得られた解に対

して音響解析を実施することで、アコースティックライナに対する空力音響解析を実施し、流れの影響を検討する予定であった。ただし、この手法では、音が流れに対して与える影響、特に音圧レベルが高い場合に顕著となる非線形現象を考えると、適切な手段ではないことから、ハイブリッド手法ではなく直接解法によりアコースティックライナの空力音響解析を実施した。

アコースティックライナに対する本解析の妥当性を検証するため、図1に示すモデルを使用した。ここでは、ヘルムホルツ共鳴器を1つ設置した **single-cell** モデルとする。図1で示すように解析領域の左側から流れと音波の流入条件を与え、解析領域の上部は非粘性壁、下部は粘性壁を設定する。流れは右側の境界面へ流出するが、この時に反射が生じないように上流と下流共にスポンジ領域を設定している。流入面より、音と流れ（マッハ数 0.088）の両方を流入させる。

本研究では直交格子法に基づく圧縮性 **BCM (Building-Cube Method)** ソルバを適用した。ソルバ内では **Navier-Stokes** 方程式を使用し、体積平均の保存量を考慮し、セル中心有限体積法を用いて空間離散化を行っている。低マッハ数でも数値粘性の少ないスキームである **SLAU** により非粘性流束を定義し、粘性流束はセル境界面での物理量の勾配を2次精度中心差分で定義している。時間積分は4次精度ルンゲクッタ陽解法とし、空間高次精度化を図るため5次精度 **WENO** を使用する。また、境界条件ではブラジウス解に基づく遠方一様流を使用し、平面波を模擬した1次波動方程式から導出される正弦波を与える。また、伝播した音波が流出境界面で反射することで計算の不安定化が予想されるため、流入境界においてスポンジ領域を与えて計算の安定化を図っている。スポンジ領域において物性値を定義し、流れ場のみを解析してから流入音と流れ場を同時に解く。

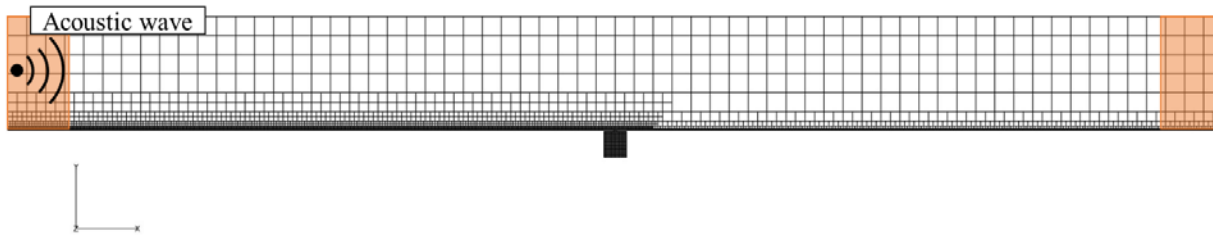


図 1 Single-cell モデルの解析領域

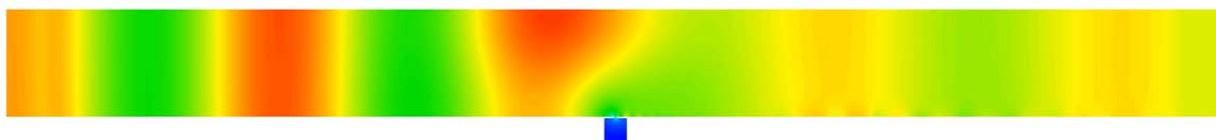


図 2 空力音響解析による圧力コンターの瞬間値

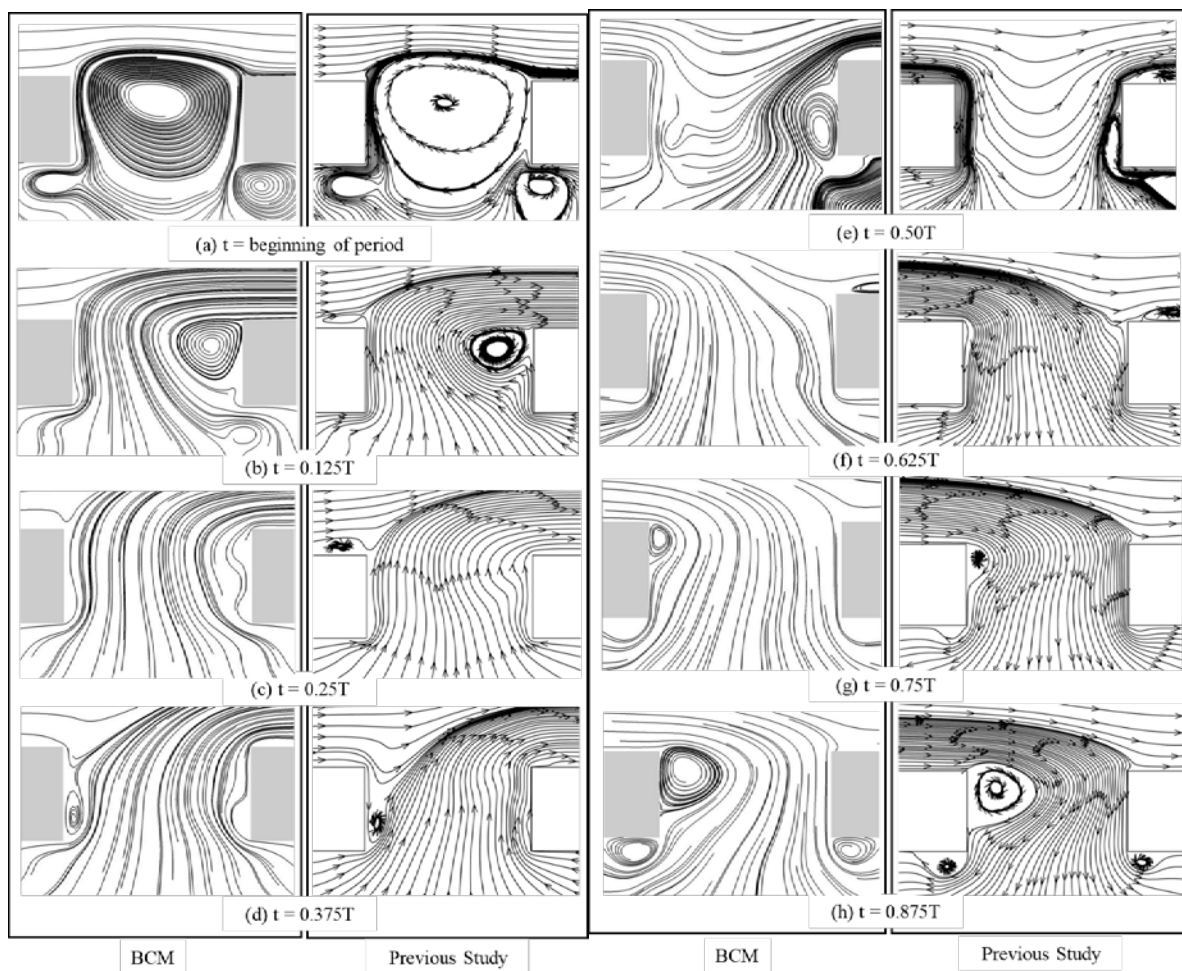


図 3 流線の比較 (瞬間値)

流入面より音圧 120dB, 575Hz の正弦波を与えて空力音響解析を実施した。図 2 は、その結果得られた圧力のコンター図である。左方より音波及び流れが流入し、右方より流出していく際の圧力の瞬間値である。中央部にあるライナを通過後に圧力の低下が確認できる。また、図 3 は、他者の空力音響解析結果との流線の時系列毎の比較であり、頸部に同様の流線が確認できることから、妥当な解析が行えていることが確認できた。

本研究では、吸音ライナの基礎的な解析を実施し、吸音ライナの理解を深めることを目的として、入射音圧が変化した場合の影響について調べた。特に、非線形となる 130dB 以上において空力音響解析により変化が確認できるか確認を行った。ここでは、キャビティ間の干渉の影響を考慮するために複数セルでの解析を実施することが妥当と考え、図 4 に示す Three-cell モデルで解析を実施した。解析ソルバや境界条件の与え方は図 1 に示す Single-cell モデルと同一であるが、入射音は周波数を 800[Hz]で固定し、音圧は 120[dB], 130[dB], 140[dB]の 3 種類の解析を行う。

図 5 に音圧が 120[dB], 130[dB], 140[dB]の時の時間平均場におけるライナ内の流線の様子を示す。図の左より上流側、中央、下流側の頸部及びキャビティを示す。120[dB]において、主流から流入してきた流れが頸部で渦を発生させていることが分かる。キャビティへの流入部において頸部の渦により引き起こされた渦が確認できるが、キャビティ内部の循環はほぼなく、キャビティ内を上下に一様に流れることが分かる。また、上流側、中央、下流側の流線を比較してもあまり大きな変化はないことが分かる。一方、130[dB]では主流から流入してきた流れが頸部で渦を発生させ、キャビティ内にも渦が生じて循環が起きていることが捉えられた。また、上流側では循環の規模が大きく、下流になるにつれて循環の規模が小さくなっていることも

確認できた。140[dB]では、全てのキャビティにおいて循環が確認できる。このことから、130[dB]以上の高音圧においては入射音圧が流れ場に与える影響が大きくなり、キャビティ内の一様性が崩れることが分かる。また、下流側より上流側の方がその影響が大きい。入射音が持つエネルギーが上流側のキャビティで渦が発生したことや境界層の粘性によってエネルギーが損失したと考えられる。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

当初予定では、2次元空力音響解析手法の確立及び検証を前期に実施し、それと並行して3次元解析に向けた並列化・効率化を実施する予定であった。しかし、解析手法の変更と妥当性検証に時間がかかったこと、2次元の解析であっても多大な計算時間が必要となったことから、本年度中に3次元解析を実施することはできなかった。その一方、2次元解析における妥当性検証の結果、他者の直接解法との比較で良い一致を示した。インピーダンスを含め実験値と比較をするためには、解析に適した後処理方法の構築が不可欠であり、それは今後の課題である。

本研究の目標の一つは、ライナ内の流れと音の干渉の影響等、吸音ライナの現象を理解することである。そのために、非線形現象が現れる高音圧を入射させた解析を複数実施し、その変化を調べた。流線の平均場を可視化した結果、130dBを超えた高音圧域では流れに対しての流入音波の影響が大きくなり、キャビティ内においても非線形性が顕著に現れることが分かった。また、キャビティを3つ配置した解析により、キャビティ間に干渉が生じることを示した。このことから、数値解析においても複数キャビティ間の干渉を考慮することの必要性が明らかとなった。

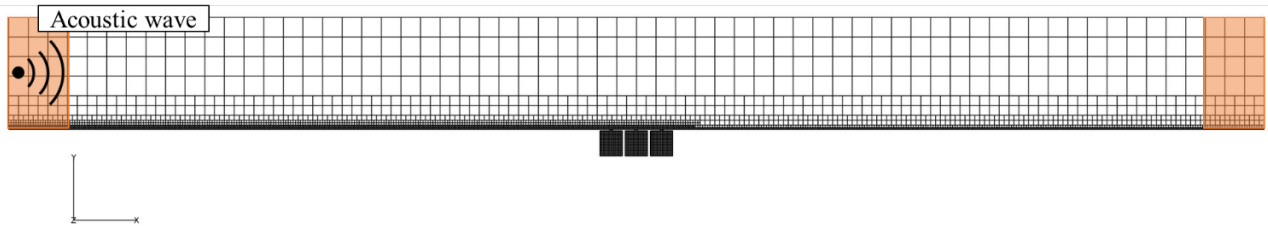
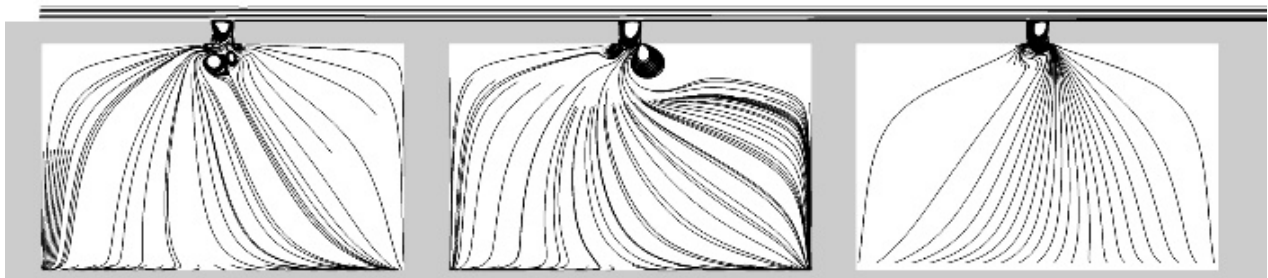
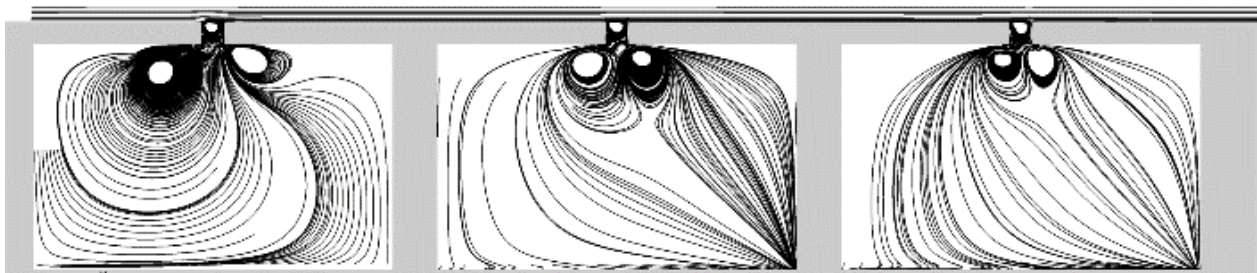


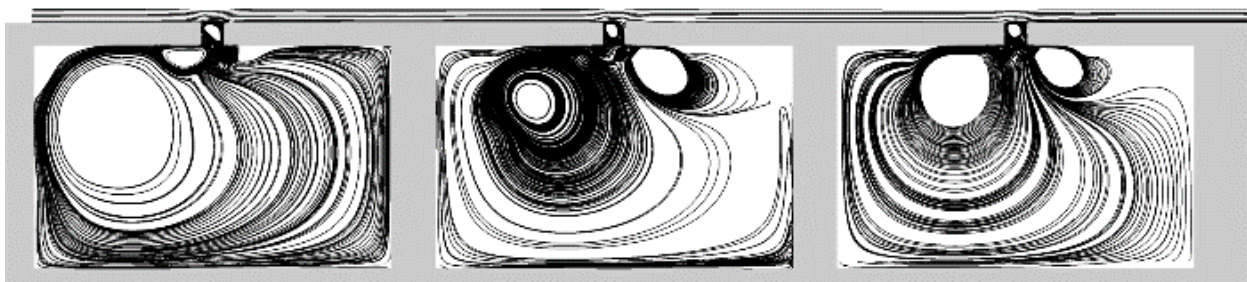
図 4 Three-cell モデルの解析領域



(a) 120dB



(b) 130dB



(c) 140dB

図 5 平均場の流線

7. 研究業績一覧（発表予定も含む）

(1) 学術論文（査読あり）

(2) 国際会議プロシーディングス（査読あり）

T. Iwafune, D. Sasaki, T. Nomura, H. Toh, T. Ishii, 'Numerical Simulation of Acoustic Liner Performance in Grazing Flow Using Cartesian-Mesh CFD', Proceedings of International Gas Turbine Congress 2019, Tokyo, Nov. 2019.

(3) 国際会議発表（査読なし）

K. Ouchi, D. Sasaki, '2D Backward Facing Step Flow Analysis using Cartesian-Mesh CFD with Immersed Boundary Method', Proceedings of 16th International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Nov. 2019.

(4) 国内会議発表（査読なし）

野村毅, 佐々木大輔, 「BCM を用いた空力音響解析による吸音ライナの吸音性能調査」, 日本機械学会北陸信越支部第 57 期総会・講演会講演論文集, 2020 年 3 月.

(5) その他（特許, プレスリリース, 著書等）