

令和 4 年 4 月 18 日現在

機関番号：17102

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22397

研究課題名（和文）格子ボルツマン法に基づく設計感度解析による流体騒音の低減技術の構築

研究課題名（英文）Adjoint sensitivity analysis based on lattice Boltzmann method for flow-induced sound problems

研究代表者

草野 和也（Kusano, Kazuya）

九州大学・工学研究院・助教

研究者番号：10879977

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、流体騒音に対する設計パラメータの感度を高精度かつ高速に評価可能な手法を構築することを目的とした。本感度解析では、低マッハ数流れから発生する流体騒音を高精度に計算するために、流体騒音の直接解法として格子ボルツマン法を用いた。また、多数の設計パラメータの感度を高速に評価するために、流体騒音の最小化問題を変分法により定式化した。本手法によって算出された感度は差分法の結果と両者が定量的に一致することを示し、定式化の妥当性を確認した。さらに、本手法を一樣流中の柱状物体から発生するエオルス音の低減を目的とした形状最適化に適用した結果、エオルス音を低減可能な新しい後縁形状が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

流体騒音はターボ機械や車両などの空力設計において重要な課題である。しかしながら、流体騒音の低減を目的とした汎用的な設計手法は確立されておらず、これまでは設計者の経験と直感に基づいて試行錯誤的に形状を変更せざるを得ず、このような方法による低騒音化には限界があった。本研究では、流体騒音に対する設計パラメータの感度を高精度かつ高速に評価可能な手法を構築した。本手法によって、実験や数値解析による試行錯誤を繰り返すことなく、従来設計を超える革新的な静音形状を創出することが可能になると期待される。さらに、これまで対処できなかった複雑な構造を有する機器に対しても流体騒音を低減できる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：The present study developed an adjoint sensitivity analysis method that enables the evaluation of the sensitivities of far-field sounds with respect to object shapes. In this method, flow-induced sounds are directly simulated based on the lattice Boltzmann equation (LBE) with an athermal model under low-Mach-number conditions. In addition, wall boundaries of complex geometries are considered using the interpolated bounce-back (IBB) condition, which also allows the adoption of arbitrary parameters that define object geometries as design variables in the sensitivity analysis. The sensitivities of far-field sounds to numerous design variables can be evaluated by solving the adjoint equation, which is derived from the LBE with the IBB condition. This study demonstrated the validity of the proposed method using several test problems. In these tests, the sensitivities evaluated by the adjoint method are compared with those evaluated by the finite difference method.

研究分野：流体工学

キーワード：数値流体力学 格子ボルツマン法 アジョイント法 流体騒音 形状最適化

1. 研究開始当初の背景

家電や車両などの機器は、居住環境の快適性の観点から、低騒音であることが求められる。このような機器の騒音の中でも、流体運動に起因して発生する騒音(流体騒音)は、固体の振動に起因する騒音に比べて、一般的に発生メカニズムが複雑であるため、対策が困難な問題である。近年では、計算機および数値解析技術の発展によって、このような機器の設計時に流体騒音を予測するとともに、その発生メカニズムを明らかにすることが可能になりつつある。しかしながら、発生メカニズムが明らかになったとしても、どのように形状を修正すれば、流体騒音の発生を抑制できるのかは自明ではない。現状では、設計者の経験と直感に基づいて試行錯誤的に形状を変更せざるを得ず、このような方法による低騒音化には限界がある。

従来設計を超える革新的な静音形状を創出するためには、数値解析を駆使した非属人的で汎用性の高い設計手法を構築する必要がある。ただし、流体騒音の静音化問題の場合、設計案の評価に大規模な非定常解析を必要とするため、進化アルゴリズムなどを用いて多数の設計案から最適形状を導き出すことは、計算コストの観点から困難である。

2. 研究の目的

本研究では、物体形状の流体騒音に対する感度を高精度かつ高速に評価可能な手法を構築することを目的とした。本手法によって、実験や数値解析による試行錯誤を繰り返すことなく、従来設計を超える革新的な静音形状を創出することが可能になると期待される。さらに、これまで対処できなかった複雑な構造を有する機器に対しても流体騒音を低減できる可能性がある。

3. 研究の方法

(1) 随伴感度解析手法

機械工学において重要な低マッハ数流れから発生する流体騒音を高精度に計算するために、流体解析には格子ボルツマン法(LBM)を用いた。LBMは低マッハ数の条件でも流れ場と音響場を連成して計算することができるため、分離解法に比べて流体騒音に対する設計パラメータの感度を高精度に評価することが可能である。また、LBMはアルゴリズムが非常に単純であるため、高速に計算を行うことができる。物体境界には Interpolated bounce-back 条件を適用することにより、複雑な形状まわりの流れ場および音響場を高精度に再現した。

感度解析には随伴変数法(アジョイント法)を用いた。随伴変数法に基づき、格子ボルツマン方程式を拘束条件とする流体騒音の最小化問題を定式化した。導出された随伴方程式はLBMと同様に高速に数値計算することができる。また、随伴方程式の1度の数値解析で多数の設計パラメータの感度を算出することができる。

(2) 検証問題

本手法を一樣流中の鈍頭物体から発生するエオルス音の最小化問題に適用し、随伴解析によって評価された感度を、実際に設計変数を変化させて差分計算により評価した結果と比較した。さらに、随伴解析を用いて物体形状の最適化を実施し、流体騒音の低減技術としての本手法の有効性を検証した。

物体形状は、図1に示すように、21個の制御点を有する補間曲線で定義した。なお、流れ方向(x軸方向)に対して対称な形状とした。初期形状では、直径Dの円周上に等間隔に制御点を配置した。本最適化では、周方向位置は固定し、各点の半径方向位置を設計変数とした。設計変数を変更した2つのパターンについて形状最適化を実施した。一方は、21個の制御点の内の後縁側の5点のみを設計変数とした場合($N_{\alpha} = 5$)であり、他方は21個の全ての点を設計変数とした場合($N_{\alpha} = 21$)である。最適形状の探索には最急降下法を用いた。

目的関数は物体中心から20D離れた位置において観測される音圧レベルとした。計算条件として、主流マッハ数は0.2とした。また、初期形状において、円柱直径Dに基づくレイノルズ数は150とした。

4. 研究成果

図2は目的関数の設計変数に対する感度分布について、随伴解析と差分計算の結果を比較している。随伴解析の結果の方が感度の絶対値が全体的に小さく評価されているが、両者の感度分布は良く一致しており、勾配法を用いて形状最適化を実施する上では、十分な精度を有していると考えられる。観測時間をより長く設定することで定量的な精度も改善されると考えられる。

図3に最適化プロセスにおける音圧レベルの推移を示す。両ケースとも最適化ステップが進むにつれて、音圧レベルが減少しており、30ステップ以内に収束する傾向が確認できる。最終的に、 $N_{\alpha} = 5$ の場合は初期形状に比べて音圧レベルが2.7 dB減少し、形状の自由度の大きい $N_{\alpha} = 21$ の場合は6.3 dB減少する結果が得られた。

図4に最適化で得られた形状を初期形状と比較して示す。 $N_{\alpha} = 5$ の場合は、下流方向に向か

って突起状の形状が生成された。エオルス音を抑制する形状については、これまでに多くの研究成果が報告されているが、このような形状が得られたのは本研究が初めてである。一方、 $N_\alpha = 21$ の場合は、流れに垂直方向の長さが大きく縮小され、側面は流れ方向にほぼ平行な形状となった。

図5には揚力係数が最大となる瞬間の渦度分布を示す。いずれの形状でも、物体の後流域にカルマン渦列が形成されていることが確認される。初期形状では、物体近傍でカルマン渦が形成されており、物体の後縁付近には二次的な渦構造が確認される。一方、 $N_\alpha = 5$ の最適形状では、渦の巻き上がりがより下流側で起こっている。これは、物体近傍においては離せん断層の変動が突起によって制限されるためであると考えられる。また、渦中心付近の渦度の絶対値も初期形状に比べて最適形状の方がやや小さい。これらのことから、 $N_\alpha = 5$ の最適形状では揚力変動が小さくなり、エオルス音が低減されたと考えられる。次に、 $N_\alpha = 21$ の最適形状と初期形状の流れ場を比較する。 $N_\alpha = 21$ の最適形状では、側面の曲率が小さくなった結果、渦が放出される方向が初期形状の場合よりも流れ方向に近くなっている。その結果、物体近傍の圧力変動が低減され、エオルス音の発生が大きく低減されたと考えられる。

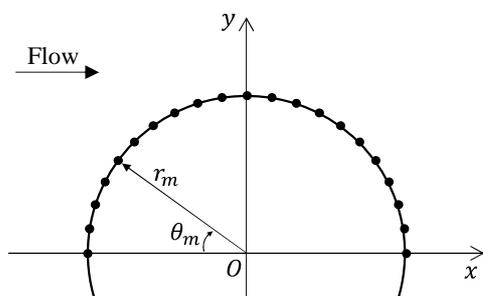


Fig. 1 Geometry definition.

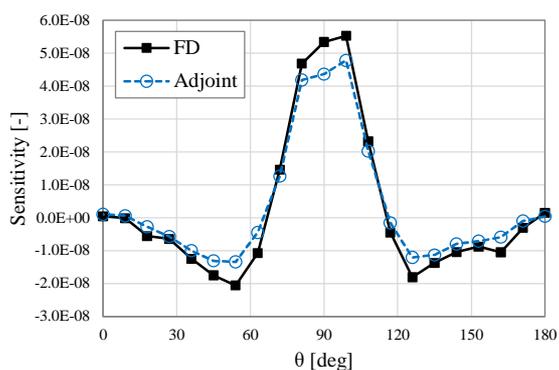


Fig. 2 Sensitivity distributions of Aeolian tone to cylinder geometry.

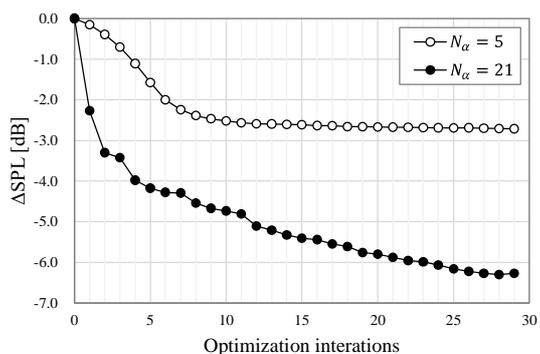


Fig. 3 Optimization convergence histories.

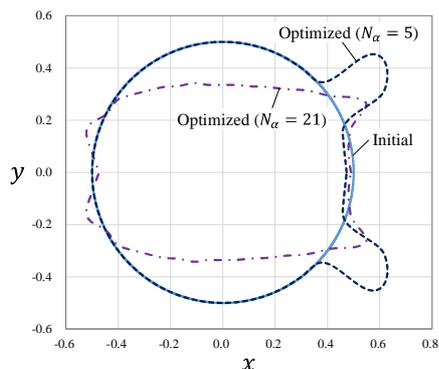
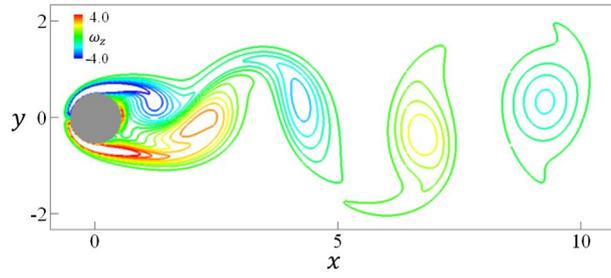
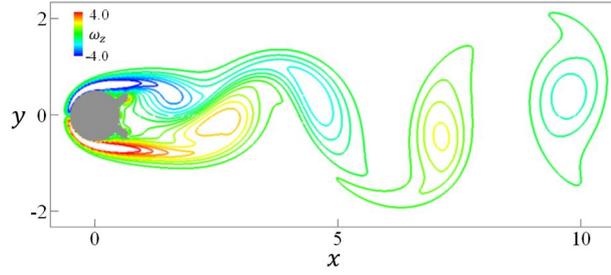


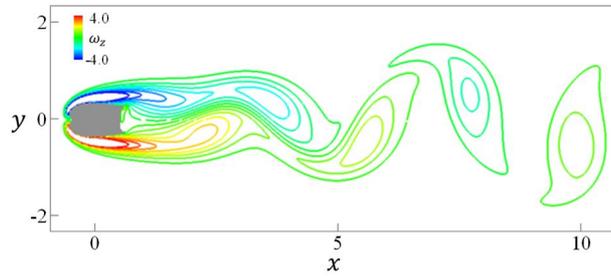
Fig. 4 Initial and Optimized shapes.



(a) Initial



(b) Optimized ($N_\alpha = 5$)



(c) Optimized ($N_\alpha = 21$)

Fig. 5 Instantaneous vorticity contours.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 草野和也
2. 発表標題 流体音響問題を対象とした格子ボルツマン方程式に基づく随伴感度解析法
3. 学会等名 日本機械学会第99期流体工学部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 草野和也
2. 発表標題 格子ボルツマン方程式に基づく随伴感度解析を用いた流体音の低減手法
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------