

研究概要報告書【サウンド技術振興部門】

(/)

研究テーマ	強化学習による空力騒音低減のための最適化法の確立	報告書作成者	服部裕司
研究従事者	服部裕司		
研究目的	騒音を小さくすることは、静粛な生活環境が求められる現代において重要な課題である。中でも空気力学的に発生する空力騒音の低減は、さまざまな機器が高速化・高機能化する中で、より重要性が高まっている。しかしながら、空力騒音の低減法には普遍的に通用する手法がなく、研究者・技術者が個々の問題に対症療法的に対処していることが多い。これに対し、機械学習の一種である強化学習が最適化の手法として発展し、さまざまな分野で応用されている。本研究は、強化学習による空力騒音低減のための最適化法を確立することを目的とする。これにより、騒音低減のための一般的な手法を提供し、QOLの向上に貢献する。 本研究では数値シミュレーションを用いる。これは(1)強化学習を組み込むのが容易で、(2)低コストかつ効率的であるためである。強化学習は、仕組みが未知あるいは複雑な問題に対して、その状態を観測し、次の行動を選択する方策を、報酬を最大とするように最適化する。空力騒音低減のためには、騒音レベル低下を報酬とした上で、問題によって状態・行動・方策の組を設定する必要がある。この設定法として適したものを求めることが最適化法の確立である。そのために、3つの異なるタイプの代表的問題に取り組む。 ① 物体の運動最適化による空力騒音低減(制御) 流れの中の円柱の背後に運動する円柱を置くと、運動方法によって空力騒音が増減する。騒音が最小となるように運動を制御する。 ② 多孔質のパラメータ最適化による空力騒音低減(パラメータ最適化) 物体を多孔質で覆うと空力騒音が低減される。多孔質の孔隙率や厚みなどのパラメータを騒音が最小となるように最適化する。 ③ 物体形状最適化による空力騒音低減(形状最適化) 流れの中の物体の形状は空力騒音レベルを直接的かつ複雑に左右する。騒音を最小とするように形状最適化を行う。 強化学習による空力騒音低減のための最適化法を確立すれば、強化学習における状態・行動・方策・報酬の組を問題に適合させるだけで幅広い騒音問題に応用することができる。新幹線を含む高速車両の運行速度は騒音レベルで制限されているが、空力騒音を低減することにより運行速度を上げることができる。航空機の飛行ルートや夜間の離着陸の制限も、航空機の空力騒音を低減することで緩和することができ、周辺住民にとってもより静かな環境の実現につながる。エアコン、冷蔵庫、PCなどに含まれるファン騒音の低減は、われわれの生活環境をより快適にする。		

研究内容	① 物体の運動最適化による空力騒音低減(制御) 振動円柱と固定円柱を過ぎる流れ(図 1)から発生する空力音の低減を強化学習により行った。この問題はわれわれの先行研究(Hattori, Komatsu, J. Fluid Mech. Vol. 832 (2017) pp. 241-268)において、運動する物体と固定された物体を含む流れから発生する空力音問題の基本モデルとして研究したものである。先行研究では、円柱の間隔と直径の比 L/D が 2 の場合を基本として、振動円柱の振動周波数を変化させたとき、無次元化周波数 Sc が 0.14 の場合に空力音の音響パワーが最小となることを示した。しかし、L/D と Sc を同時に変化させたときの最小化は計算コストが大きいためできなかった。そのため、他の条件での音響パワー最小化が課題として残った。これに強化学習により取り組むのが本研究項目である。 強化学習の方法には Soft Actor-Critic(SAC)を用いた。音響パワーまたは音圧を最小化することが目的であるが、円柱の運動の制御の効果が遠方での音圧観測点に到達するには時間がかかり、計算コストが増大する。そのため、空力音響学における Curle の式に基づいて、円柱にはたらく揚力の和を評価指標とした。強化学習の各要素は以下の通りとした： 状態：振動位相、固定円柱および振動円柱にはたらく力の短時間平均値と標準偏差、振動数 行動：振動円柱の振動数変化 報酬：固定円柱および振動円柱にはたらく力の和の短時間平均値の対数に負符号をつけたもの 直接数値シミュレーションと強化学習を結合するため、python による強化学習プログラム側から fortran による直接数値シミュレーションコードを呼び出すコードを開発した。また、強化学習の高速化のために、MPI と OpenMP によるハイブリッド並列化を行った。 その結果、$L/D=2$ の場合には強化学習により円柱の振動周波数が $Sc=0.14$ 付近に収束することが確認できた。この過程で円柱にはたらく力の和が小さくなることも確認できた(図 2)。また、強化学習の最終状態では、音圧が先行研究と同様に小さくなることもわかった(図 3)。図 3 では、強化学習が開始される $t=800$ で音圧が大幅に小さくなることが示されている。 次に $L/D=1.3, 3$ の場合に強化学習を行った。$L/D=3$ の場合は $Sc=0.14$ 付近で力が最小となったが、$L/D=1.3$ の場合は $Sc=0.16$ 付近で力が最小となった。実際に周波数を固定して行った直接数値シミュレーションの結果、図 4 に示すように強化学習によって得られた $Sc=0.16$ の方が $Sc=0.14$ の場合よりも音圧が低下していることが確かめられた。これは強化学習の有効性を示す重要な結果である。
------	---

研究のポイント	空力騒音の低減は、さまざまな工学機器が高速化・高機能化する時代において重要な課題の一つである。低減のための制御変数は、たとえば物体形状を最適化する場合には形状変更の制御点とすることが多いが、その数は一般に大きく多自由度の最適化問題となり、最適化を達成することは困難である。アジョイント法はこれを回避することができるが、アジョイント法が有効であるのは流れが乱れていない場合に限られる。そのため、多自由度の最適化問題で、乱れた流れを含むものに対する有効な方法が必要とされている。 本研究はこれを強化学習により解決しようとするものである。強化学習は乱れた流れにおいてもロバストに適用可能であり、多自由度の問題にも原理的には適用可能である。空力騒音低減に対し、強化学習の有効性を示すことが本研究の主な目的である。これが達成されれば、運動制御・パラメータ最適化・形状最適化などのさまざまな方法で空力騒音低減を強化学習で行う道を拓くことになる。
研究結果	強化学習と直接数値シミュレーションを結合することにより、振動円柱と固定円柱を過ぎる流れから発生する空力音を低減するように振動円柱の運動を制御することに成功した。この問題は、運動する物体と固定された物体を含む流れにおける空力騒音発生モデルとなるものであり、ヘリコプタ(回転翼と機体)、風車(回転翼と支柱)などの重要な問題を考えるための基礎を与えるものである。 まず、先行研究で最適な振動円柱の周波数が得られている場合($L/D=2$)について、同じ周波数が強化学習によって求められるかどうかを調べ、周波数が先行研究で得られた $Sc=0.14$ に一致することを確認した。次に、先行研究では最適な周波数が得られていない場合($L/D=1.3, 3$)について強化学習による最適化を行った。$L/D=3$ の場合は先行研究で調べた値と同じ $Sc=0.14$ を得たが、$L/D=1.3$ の場合は $Sc=0.16$ を得た。後者の場合には、実際に音が $Sc=0.14$ の場合よりも格段に小さくなり、強化学習の有効性を確立することができた。
今後の課題	今回の研究では、振動円柱の運動のみを制御対象としたが、円柱の間隔や円柱の直径などを変数に含めると低減効果はさらに大きくなると期待される。強化学習は複数の制御変数を有する問題に向いている。複数の変数をもつ多自由度の空力音低減問題への適用が今後の課題の一つである。 また、当初の研究計画に挙げた②多孔質のパラメータ最適化による空力騒音低減(パラメータ最適化)と③物体形状最適化による空力騒音低減(形状最適化)も今後の課題である。予算と時間の都合上、2025 年度の研究ではこの二つの問題において成果を挙げることはできなかったが、強化学習と直接数値シミュレーションの結合により、空力音低減問題が解くため手法を確立し、最適化法としての有効性を確認できたので、これらの問題への適用は円滑に行えるものとする。今後取り組んでいきたい。

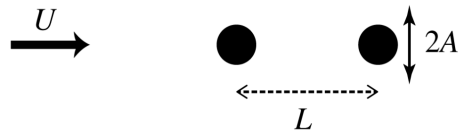


図 1. 振動円柱と固定円柱をすぎる流れ. 問題設定

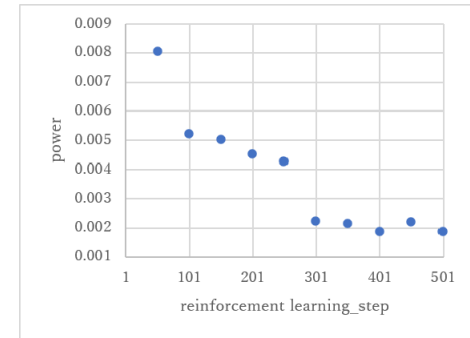
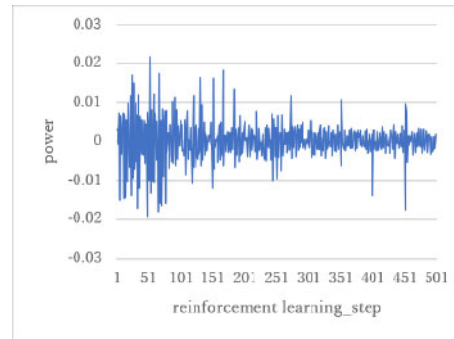


図 2. 強化学習による学習過程. (左) 円柱にはたらく力の和の短時間平均, (右) 力の 2 乗平均.

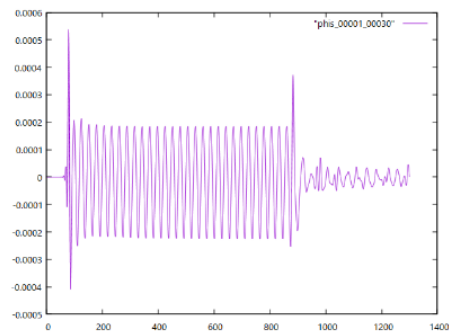


図 3. 最終状態における音圧の時間変化

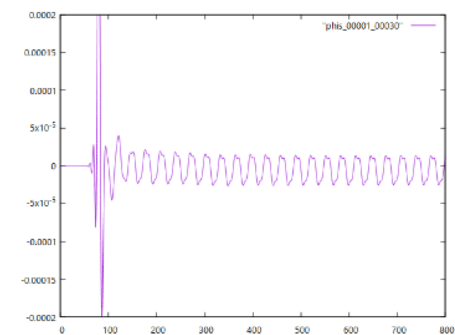
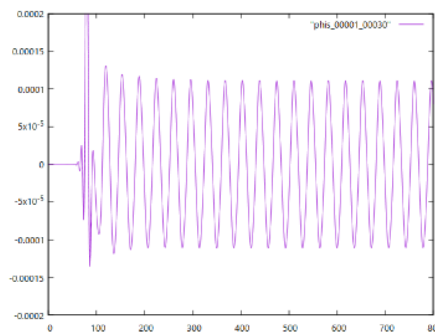


図 4. $L/D=1.3$ の場合の音圧の時間変化. (左) $Sc=0.14$, (右) $Sc=0.16$