

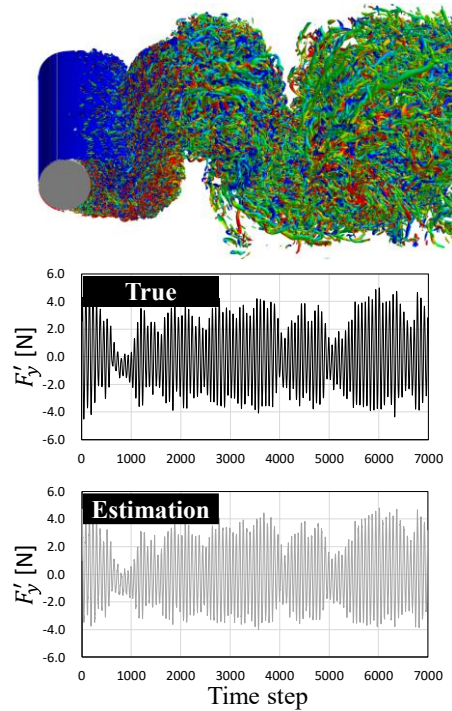
研究テーマ	複雑流動現象の音響リモートセンシングのための情報抽出技術の開発	報告書作成者	草野和也
研究従事者	草野和也		
研究目的	近年、IoT や人工知能の進展を背景に、日本では未来社会の姿として Society 5.0 が提唱されている。この構想は、フィジカル空間で取得された多様なデータをサイバー空間に集約し、AI による解析結果を実世界へ還元することで新たな価値を創出するものである。ものづくり分野では同様の考え方がデジタルツインとして展開されており、航空機エンジンや風力タービンの運用・保守の高度化への応用が期待されている。 流体機械に対してサイバーフィジカルシステムを構築する際には、流れ場内部の速度や圧力、温度といった物理量を直接計測することが理想である。しかし実際には、高温環境や高速回転部近傍など、センサ設置が困難な条件が多く存在する。また、多数のセンサ導入はコスト増大や流れ場への干渉を引き起こす可能性がある。このため、外部から取得可能なデータを用いた非侵襲的な計測手法の確立が重要となる。 特に、マイクロフォンにより取得される音響データは有望である。音響情報を活用すれば、流れ場の状態を低コストかつ非接触で把握できる可能性がある。例えば風力発電においては、放射音から風速や流体力を推定することで、発電量予測や疲労評価などへの応用が期待される。しかし、音響信号のみから複雑な流動現象を定量的に推定する技術は、現時点では十分に確立されていない。 音響リモートセンシングは工学や海洋、医療分野で広く研究されているが、流体運動のように非線形かつ高次元な現象を対象とする場合、その難易度は高い。音響信号から流体情報を推定する問題は、流れ場から音を予測する順問題に対する逆問題として位置付けられ、一般に不適切条件性を伴う。従来研究では、音響伝達行列と正則化手法を組み合わせた逆解析により、回転機械の流体力推定が試みられているが、高精度化には多数の観測点を有するマイクロホンアレイが必要とされる。 さらに、逆問題はノイズや観測点不足に対して鋭敏であり、わずかな誤差が推定結果に大きく影響する。このため、限られた観測データでも安定した推定を可能とする新たな手法が求められている。近年は、この課題に対する有力なアプローチとして、機械学習を用いたデータ駆動型手法が注目されている。 本研究では、流体音の計測データから流動情報を抽出する手法の構築を目的とし、特に低マッハ数流れにおいて音響と流体力が強く相関する点に着目した。非定常流体力の推定問題に対し、時系列データの長期依存関係の学習に優れる Temporal Convolutional Network (TCN) を適用し、音圧時系列から流体力時系列を推定する枠組みを提案した。モデルの学習および検証には、数値シミュレーションおよび航空機エンジン用軸流圧縮機の実験データを用い、その有効性を評価した。		

研究内容	本研究では、音圧時系列から非定常流体力の時系列を推定するため、時系列データの長期依存関係を学習可能な Temporal Convolutional Network (TCN) を用いた。TCN は一次元畳み込みにより特徴量を抽出するモデルであり、因果的畳み込みにより未来情報に依存しない推定が可能である。また、残差接続を導入することで深層化に伴う学習不安定性を抑制できるため、本研究のような時系列回帰問題に適している。 まず数値解析による基礎検証を行った。対象は一樣流中の柱状物体から発生するエオルス音であり、遠方場で観測された音圧から物体に作用する揚力および抗力の時間変動を推定した。レイノルズ数は 150 とし、二次元流れとして格子ボルツマン法により流れ場と音響場を計算した。エオルス音はダイポール音であり、揚力に対応するリフトダイポール音と抗力に対応するドラッグダイポール音に分類される。揚力はカルマン渦放出と同一周波数で振動し、抗力はその 2 倍の周波数成分を持つ。また、それぞれ異なる指向性を有するため、観測点は流れに垂直方向および上流方向に配置し、各成分を効果的に取得した。 観測音と推定対象の組み合わせを変えた 4 ケースを検証した。まず、対応する音響成分から直接的に流体力を推定する場合には、いずれも振幅・位相ともに高精度で再現され、適切な観測配置により音響データから流体力を高精度に推定できることが示された。一方、対応しない成分を推定する場合には精度が低下した。特に、リフト音から抗力を推定する場合には周期性や振幅傾向が概ね再現されたが、ドラッグ音から揚力を推定する場合には大きな誤差が生じた。 この差異は、音響信号に含まれる周波数特性および位相情報に起因する。揚力は基本周波数で振動するのに対し、抗力は 2 倍周波数成分を持つ。リフトダイポール音には渦の回転方向に対応した位相情報が含まれており、これが抗力変動の推定に寄与する。一方、ドラッグダイポール音では周波数倍化により位相情報が失われ、異なる渦放出過程が同一波形として観測されるため、揚力を一意に復元することが困難となる。したがって、入力信号に必要な位相情報が含まれているかどうかは推定精度を支配する重要な要因である。 次に、実験データを用いた検証を行った。低速軸流圧縮機試験装置において、上流側で音圧を計測するとともに、軸トルクの時間変動を同時計測した。さらに回転数および流量を変化させ、多様な運転条件のデータを取得した。性能特性としては、流量低下に伴い圧力上昇が二段階で低下し、部分スパン旋回失速(マイルド失速)から全スパン旋回失速(ディープ失速)へと遷移する挙動が確認された。 音圧信号の解析から、失速発生時には振幅が大きく増大し、流動状態の識別が可能であることが示された。TCN により音圧から推定した軸トルクは、非失速時には振幅を過小評価する傾向があったが、マイルド失速では変動傾向を部分的に捉え、ディープ失速では顕著な低周波トルク変動を良好に再現した。この傾向は複数の回転数条件において共通して確認された。 以上より、強い非定常性を伴う流れ場では音響信号に流体力の情報がより明確に現れるため、高精度な推定が可能となる一方、変動が小さい状態では再現性に課題が残ることが明らかとなった。
------	--

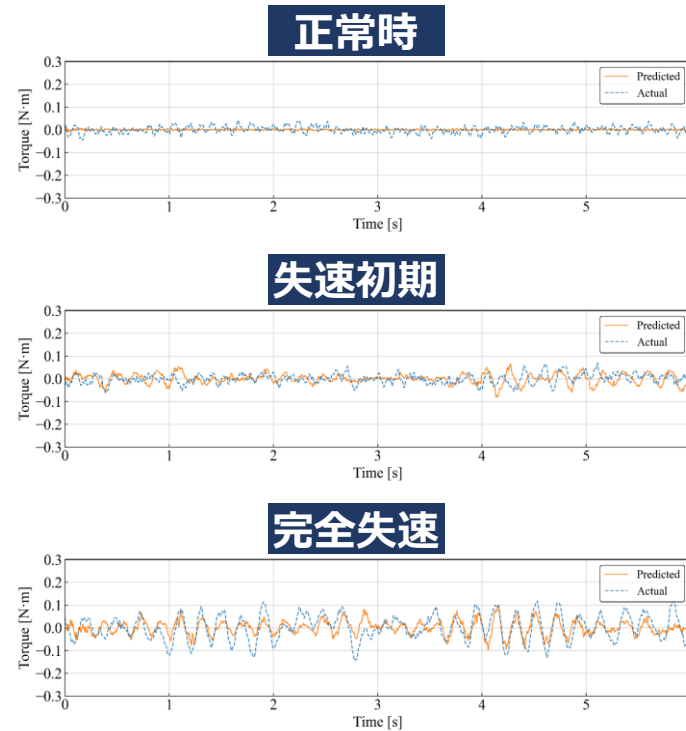
研究のポイント	本研究の主眼は、流体機械から放射される音響信号を活用し、内部の非定常流体力を非接触・非侵襲的に推定する新しい計測・解析手法を構築した点にある。従来、流れ場内部の速度や圧力などの物理量はセンサによる直接計測が基本であったが、高温環境や高速回転部近傍などでは設置が困難であり、さらに多数センサの配置はコスト増大や流れの擾乱を招く問題があった。また、音響逆問題は観測点不足やノイズの影響により不安定となりやすく、従来の物理モデルベース手法では高精度化のために大規模なマイクロフォンアレイが必要とされていた。本研究では、低マッハ数流れにおいて音響と流体力が強く相関するという理論的背景に基づき、機械学習を用いたデータ駆動型アプローチを採用した。特に、長期的な時間依存関係を扱える時間畳み込みネットワーク(TCN)を適用し、音圧時系列から流体力時系列を直接推定する枠組みを提案した点が特徴である。さらに、音の指向性や位相情報が推定精度に与える影響を体系的に検証し、観測点配置と情報含有量の重要性を明確化した。これにより、限られた観測条件でも有効な推定が可能となる、新しい音響リモートセンシング技術の基盤が提示された。
研究結果	提案手法の有効性は、数値解析および実験の両面から検証された。数値検証では、円柱まわりのエオルス音を対象とし、遠方音圧から揚力および抗力の時間変動を推定した。その結果、音の指向性に対応した適切な観測点配置を行うことで、振幅および位相の両面において真値と良好に一致する高精度な再現が得られた。一方で、入力信号と直接対応しない流体力成分の推定では精度が低下し、特に位相情報が欠落する場合には推定が困難となることが明らかとなった。この結果は、音響信号に含まれる周波数特性および位相情報が推定性能を支配する重要因子であることを示している。さらに実験検証では、軸流圧縮機試験装置を用い、音圧から軸トルク変動の推定を試みた。その結果、旋回失速の進行に伴って推定精度が向上し、特にディープ失速時には顕著な低周波トルク変動を定性的に良好に再現できた(p.7の結果)。一方、非失速時およびマイルド失速時の比較的小さな変動については振幅の過小評価などが見られ、再現性に課題が残った。以上より、本手法は強い非定常現象に対して特に有効であり、音響データに流体力情報が十分含まれる条件下で高精度な推定が可能であることが示された。
今後の課題	今後の課題としては、まず非失速時のような低振幅・低信号強度条件における推定精度の向上が挙げられる。現状では、強い非定常性を伴うディープ失速時には良好な再現が得られる一方で、微小な流体力変動の推定には限界がある。このため、特徴量抽出手法の高度化やノイズ低減技術の導入が重要となる。また、観測点数の制約を踏まえつつ、複数マイクロフォンによる多点計測の活用により、空間情報を補完することも有効と考えられる。さらに、TCN以外の機械学習モデルとの比較検討を通じて、より高精度かつ汎用性の高い推定手法の確立が求められる。加えて、実機への適用を見据えたロバスト性の向上や、異なる流体機械・流動条件への展開も重要な課題である。これらの取り組みにより、本手法の適用範囲を拡張し、デジタルツインや運転監視への実用展開を目指す必要がある。

数値検証では、後流の三次元性が顕著となるレイノルズ数条件 ($Re = 67,000$) において、少数点で観測されたエオルス音の信号から、流体力の複雑な時間変動を TCN モデルにより高精度に復元できることを確認した(左図)。さらに、観測点の配置が推定精度に及ぼす影響を明らかにした。

実験検証では、低速軸流圧縮機試験装置を対象として、音響信号から軸トルクの時間変動を推定することを試みた。その結果、失速の有無に応じた軸トルク変動の変化を概ね再現できることを確認した(右図)。一方で、ノイズの影響により、正常運転時における微小なトルク変動の再現には課題が残ることが明らかとなった。



数値検証:円柱の流体力推定



実験検証:軸流圧縮機のトルク推定

