

氏名	國寄 康則
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	博甲第994号
学位授与の日付	令和3年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科 設計工学専攻
学位論文題目	自動車用トルクコンバータ内部循環流れの周波数特性および 空間構造の研究
審査委員	(主査)教授 村田 滋 教授 森西晃嗣 准教授 北川石英 准教授 田中洋介

論文内容の要旨

トルクコンバータは、自動変速機付き自動車（AT車）の動力伝達要素として幅広く用いられている流体継手の一種である。自動車用トルクコンバータは、入力要素であるインペラ、出力要素であるタービン、反動要素であるステータの三つの翼列で構成されており、その内部に充填されている作動流体が各翼列を循環することで動力を伝達する。一般的なターボ機械と異なり、トルクコンバータでは各翼列を繰り返し流れる循環流れとなるが、駆動系の騒音や振動に関与するトルクコンバータ内部循環流れの周波数特性や空間周波数を把握することは、設計指針の決定や製品品質の観点から極めて重要である。高性能なトルクコンバータの開発における翼形状や流路の設計段階で、本質的に有効となる設計指標を見極めるため、本研究では、トルクコンバータの内部循環流れの実験解析に粒子画像流速測定法(PIV)を用い、非定常流れ場の周波数特性および空間構造を解明することを目的としている。

本論文は9章で構成されており、先ず第1章ではトルクコンバータの内部循環流れに関する研究の現状を実験解析および数値解析の観点で整理し、これより本論文テーマの意義および目的を述べている。

第2章では、定常運転の条件下において、直交する2つの観測方向をもつ2次元PIV解析結果を再構成することで、大局的な内部循環流れを時間平均3次元流れ場として捉えて、翼列間に生じる3次元渦構造を示している。

次に、第3章から第5章は定常運転条件下における2次元非定常流れ場をPIV計測によって捉えた結果について解析している。第3章では2次元非定常流れ場の流速成分の周波数特性について、第4章は渦度成分の振幅強度の変動について、第5章は翼の揚力に関与する渦度の空間積分である循環量の理論的検討に関して記述している。循環流路における特徴断面の周波数特性をFFT解析、ウェーブレット変換を利用して、各翼列の翼通過周波数が互いに影響を及ぼし合う非線形性を有した周波数特性となっていること等を明らかにしている。

第6章では、定常運転条件下で、特徴断面のベクトル場、渦度場の2次元空間構造を多次元時系列分析手法である動的モード分解(DMD)を用いて解析し、翼通過周波数との関連性を定量的に評価するとともに、流れ場の変動周波数とその周波数における流れ場の空間構造を明らかにし

ている。特に、インペラ流路部とタービン流路部において、回転方向に正の渦構造と負の渦構造が交互に発生する特徴的空间構造を初めて見出している。さらに、第7章では、車両の加速や減速を想定した過渡運転条件に対して、PIV解析による時系列計測結果に固有直交分解(POD)を適用し、過渡状態における流れ場の構造変化は翼列回転速度比の変化量に依存することを示している。また、第8章では定常運転条件下、デジタルホログラフィ技術を適用した3次元瞬時流れ場の計測方法に関して記述し、数値的検証を通じてその基本性能を評価している。

以上より、トルクコンバータの振動や騒音の原因となる3次元非定常性を有したトルクコンバータの内部循環流れの周波数特性と空間構造を明らかにし、定量的に分析評価できたと第9章で結論付けている。

論文審査の結果の要旨

トルクコンバータは販売総数の約98%を占める自動変速機付き自動車(AT車)の動力伝達要素の一つであり、トルク増幅機能、連続的変速機能、動力伝達系の振動減衰機能を有するため、エンジンと自動変速機の間に配置してエンジン自動車で幅広く利用されている。地球温暖化抑止やSDGs達成の取り組みの一つとして、近年の自動車産業ではエンジン自動車から電気自動車へのシフトが進められているが、トルクコンバータはトルク増幅機能を活かして今後も利用され続けるものと考えられ、その性能向上への技術開発はその重要性を増している。このような社会情勢の下、小型化・高性能化を目指したトルクコンバータの設計の際に有効となる設計指標を得るために、本論文では、トルクコンバータ内の3つの翼列間を循環流動する作動流体に対して、その非定常流れ場の周波数特性および空間構造を解明することを目的として研究成果が纏められている。

この研究の特徴は、先ず、3つの翼列間を循環流動する作動流体の流動機構を3次元的構造として捉えるため、複雑な翼列流路形状と作動流体の循環流路系を実機に近い条件で実現した透明なトルクコンバータモデルを作製し、複数方向からの観測画像を利用した動画像解析によって3次元空間流動解析を可能にしたことが挙げられる。観測画像のひずみを抑制するため、屈折率マッチングを実現する作動流体を選択して観測精度を十分に向上させることで、これまでにない精細な観測実験を実施している。次に、得られた動画像解析結果に対して、ウェーブレット変換、固有直交分解(POD)、さらに、動的モード分解(DMD)といった、多岐にわたる解析手法を駆使することで、未知であった自動車用トルクコンバータ内部循環流れの変動周波数とその周波数における流れ場の空間構造を高次の翼通過周波数域まで定量的に評価している。これらの研究成果は、①騒音や共振に関わる振動特性を把握することで、その発生原因や発生箇所(作動流体部、摩擦材部、機械部等)を特定することができる、②流れ場と周波数特性を関連付けることで翼や流路形状の形状設計の着目部位が定まる、といったトルクコンバータ設計における寄与が極めて大きいと判断できる。

以上のように申請者の研究では、動画像解析によって取得した非定常流速分布情報を基にして、様々な解析手法を駆使することにより、トルクコンバータの内部循環流れの周波数特性および空間構造についてこれまでになかった知見を得ており、工学的に意義のある成果を上げ高く評価できる。

本論文の内容は、査読制度の確立した学術雑誌に掲載された和文論文2編、英文論文2編、合計4編の学術論文を基礎としており、いずれの学術論文も申請者が筆頭著者となっている。

【学術論文】

1. 國寄康則, 村田滋, 田中洋介, 武田朋也, トルクコンバータ内部流れ場の実験解析 – 翼列間流れへのウェーブレット変換の適用 –, 可視化情報学会論文集, 39巻, 5号, pp. 11-18, (2019). (<https://doi.org/10.3154/tvsj.39.11>)
2. Yasunori Kunisaki, Shigeru Murata, Yohsuke Tanaka, Internal Flow Structure of Torque Converter Analyzed with Dynamic Mode Decomposition under Steady Driving Condition, International Journal of Automotive Engineering, Vol. 11, No. 3, pp.108 - 115, (2020). (https://doi.org/10.20485/jsaejae.11.3_108)
3. Yasunori Kunisaki, Shigeru Murata, Yohsuke Tanaka, Analysis of the Internal Flow Structure of Torque Converter Using Proper Orthogonal Decomposition under Transient Driving Conditions, International Journal of Automotive Engineering, Vol. 11, No. 4, pp.169 - 176, (2020). (https://doi.org/10.20485/jsaejae.11.4_169)
4. 國寄康則, 村田滋, 田中洋介, トルクコンバータ内部循環流れの非線形性, 実験力学, 20巻, 4号, pp. 281-287, (2020). (<https://doi.org/10.11395/jsem.20.281>)