

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04265

研究課題名(和文)トルクコンバータ内3次元非定常流のデジタルホログラフィ実験解析

研究課題名(英文) Experimental analysis of three-dimensional unsteady internal flow of torque converter by means of digital holography

研究代表者

村田 滋 (Murata, Shigeru)

京都工芸繊維大学・機械工学系・教授

研究者番号：50174298

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、自動車用トルクコンバータの性能改善のため、その内部を循環するオイルの非定常流動構造を3次元的に捉える流速分布計測法および局所渦度計測法を開発し、その性能評価を行った。流速および渦度計測のため流体中に混入する可視化トレーサー粒子の3次元的な運動を捉えるため、デジタルホログラフィに基づくビデオ計測法を構築するとともに、流速情報を用いることなく可視化トレーサーとして使用した微小透明延伸フィルムの点滅周波数から渦度を評価する手法を開発した。開発手法をトルクコンバータモデル内の流速分布計測や往復運動する平板周りの渦度計測に適用して実験的にその実用性を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動車用トルクコンバータ内部の3次元的なオイル流動は、異なる観測方向からのビデオ計測による時間平均的な流速分布でしか評価されてこなかったが、本研究課題で開発した手法によると、3つの異なる翼列それぞれにおける流速分布を同時に計測できるため、翼列の相対的な位置関係に応じて時間変動する翼列全体の3次元流動構造を理解することができる。これより、自動車の効率的な利用を可能とするトルクコンバータ設計に寄与できるとともに、時間変化を伴う様々な3次元流動現象の実験解析における活用が期待され、各種産業界の開発研究や一般の学術研究においてその有用性は極めて大きいと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this research, velocity and vorticity measurement methods have been developed for the three-dimensional unsteady oil flow in an automotive torque converter in order to improve the performance of the converter. Video measurement based on digital holography enables us to grasp the movement of tracer particles in three-dimensional space, scattered in the fluid for the velocity and vorticity measurements. Furthermore, vorticity is measured without velocity information from the twinkling frequency of small transparent stretched film used as tracer particle. The performance of the developed methods is experimentally evaluated by applying them to the velocity measurement for the flow in a model of torque converter and the vorticity measurement for the flow around a reciprocating plate.

研究分野：流体工学

キーワード：流体工学 流体計測 波動光学 デジタルホログラフィ トルクコンバータ 3次元計測

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究動機

現代は成熟した自動車社会であり、我が国の自動車メーカーは国際的な自動車供給に大きな役割を果たすとともに、国内的にも経済発展の牽引役を務めてきた。とりわけ、活動的な生活レベルを維持したい高齢者や仕事・子育ての両立に迫られている多忙な若い世代にとって、操作の煩雑なクラッチ操作を必要としない誰でも簡単に運転ができる自動変速機付自動車、いわゆる AT 車は生活に欠くことのできない必需品となっている。近年、地球温暖化に関わる国際社会の要請の高まりの中で電気自動車に注目が集まるが、ディーゼルエンジンやハイブリッド車など燃焼室をもつエンジンシステムは今後も輸送機器・建設機械・高出力動力源として豊かな社会を支える重要な中核技術であり続けるものと予想され、図 1 に示す動力伝達系において、その要素であるトルクコンバータは小型化・高性能化に向けてますます性能向上を図り続けることが求められている。

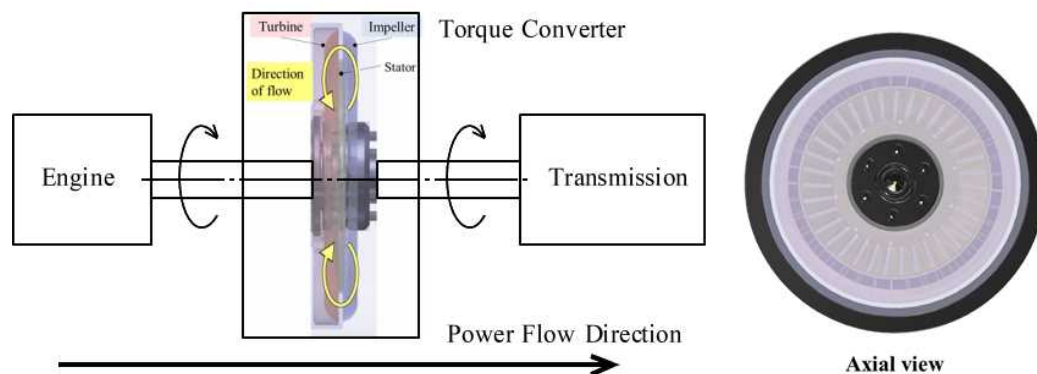


図 1 自動車用トルクコンバータ

(2) 技術背景

図 1 左図の中央に示すように、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と呼ばれる 3 つの回転翼列から成る。エンジン側に繋がるインペラとタイヤ側に繋がるタービンは自動車の運転状態に応じて回転速度が変わり、3 つの翼列は互いの相対運動状態が変化するため、循環作動流体であるオイルは複雑な 3 次元非定常流動現象を呈する。しかし、この流れ場を対象としたこれまでの観測は、点計測法であるレーザドップラ流速計による計測が中心で、動画像解析の利用も各種 PIV による 2 次元分布計測に留まっている。翼列が干渉する翼列間領域においてその流れ場がどのような周波数特性をもち、これがどのような非定常渦の 3 次元構造に関わっているか明らかになれば、トルクコンバータの高性能化への開発設計指針を得ることができる。

(3) 現状と問題点

3 次元空間における流速分布計測は、複数台の高速度カメラを用いる高価な観測システムを利用すれば実現できるが、トルクコンバータのような閉じられた容器内の流動現象を観測するには像が歪むため適していない。1 台のカメラしか使用しない単眼観測法としてデジタルホログラフィ計測が有用な手段として挙げられるが、この方法の一つの大きな問題点は測定対象領域が狭いことであり、広く観測するため大きな撮像素子を利用した場合、撮影スピードが遅くなるため、高速流動を計測することが出来なくなる。もし、広範囲で高速流動を単眼観測できる 3 次元流速測定法が実用化できれば、トルクコンバータを始めとする流体機器の性能改善に大きく貢献できるものと期待できる。

2. 研究の目的

以上の研究背景を踏まえ、本研究課題では、これまで単眼観測による 3 次元空間計測のために開発してきたデジタルホログラフィ計測法を、実用的な大きさの観測領域を測定できる高精度 3 次元流速測定法へと発展させ、これを利用した 3 次元流動解析によってトルクコンバータ内非定常流れの流動機構を明らかにすることを目的とした。また、デジタルホログラフィの観測装置を利用して、偏光特性を持つトレーサー粒子の回転そのものを計測することによって、流れの極めて狭い範囲での渦度（生成した渦の回転速度の程度）を計測できる手法の開発を目指した。

3. 研究の方法

(1) 多重露光デジタルホログラフィ流速測定法

トルクコンバータ内部の流動は、回転速度 300RPM で回転する翼列の周速度を基に評価すると

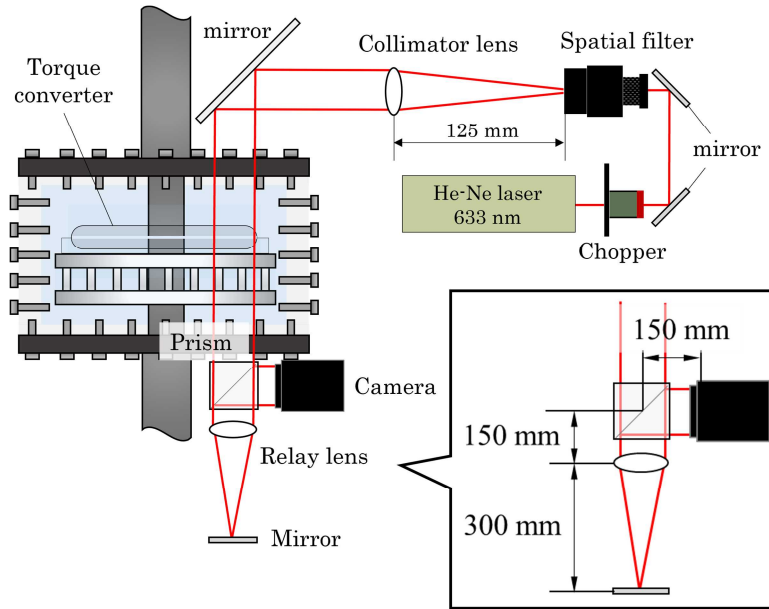


図2 トルクコンバータモデル内流動の観測光学系

最大流速 3.8(m/s)にも達し、デジタル画像中でトレーサー粒子の運動を精度良く評価するには1秒間に少なくとも3万枚近くの画像を記録する撮影装置が必要となる。本研究課題では、廉価な高速度カメラを念頭におき、1枚の画像に異なる複数時刻の観測対象を重ねて記録する多重露光を利用して高速流動の時間変化を記録した。この手法は動画像解析で流速分布を測定する粒子画像流速測定法の技術としては古典的であり、流速の大きさと流れ角は分かるものの、流速ベクトルの向きが特定できないが、ここでの測定対象は翼列の回転方向に流れ方向が拘束されて自明であると考え、多重露光法を採用した。図2が本研究課題で構築した観測光学系である。レーザー装置から出たレーザー光を機械式オプティカル・チョッパーで明滅させ、これをトルクコンバータモデル試験装置に誘導し、その先に設置したレンズ無し高速度カメラでホログラムパターンの時間変化を記録した。このホログラムには作動流体であるオイルに混入したトレーサー粒子が記録されており、これを計算機で解析するとトレーサー粒子の3次元位置が測定でき、従ってその時間変化から流速を求めることができる。

(2) 延伸フィルムトレーサーによる局所渦度測定法

空間分解能高く局所的な渦度を得るため、回転角により照射光の偏光特性が変換される延伸フィルムをトレーサー粒子として用いた2次元局所渦度計測手法を提案した。図3のように、ペットボトルなどに巻かれたPETフィルムからトレーサー粒子を切り出し、この延伸フィルムトレーサーに光束拡大したレーザー光を背面から照射する。そして、その透過光を偏光板を通してホログラム観測すると、延伸フィルムトレーサーが1回転するたびに透過光は4回明滅するため、ホログラム再生像において検出される延伸フィルムトレーサーの光強度値の時間変化から回転速度を算出し、トレーサー粒子位置周りの流体の渦度を得ることができる。さらに、カメラ前面の偏光板を既知回転速度で回転させて観測する周波数バイアス法を適用し、時計回りか反時計回りか回転の向きを判別できるよう性能向上を図った。

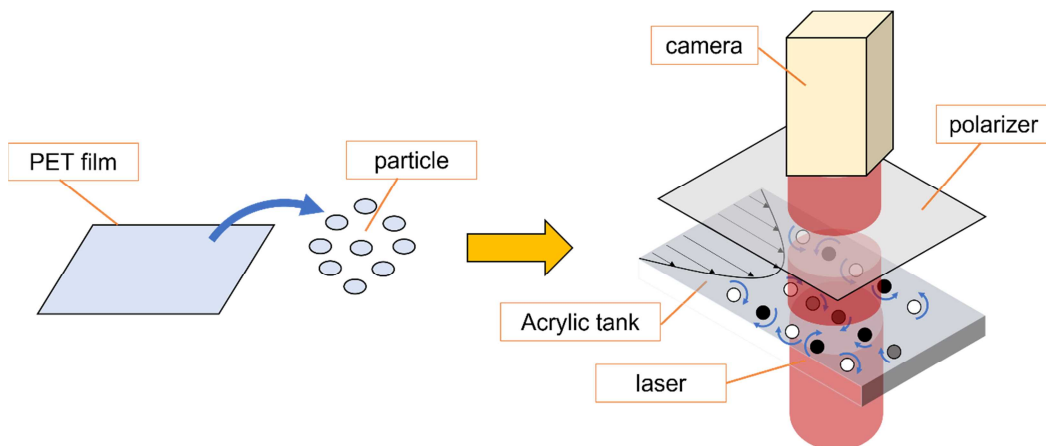


図3 延伸PETフィルムを用いた局所渦度計測法の概念

(3) 性能評価の方法

数値シミュレーションでは、上述の開発手法(1)～(2)に対して、微小トレーサー粒子の数値モデルを構築し、実験で使用する観測パラメータを与えて数値ホログラムを作成して、そのホログラムを開発手法で解析した結果に対して誤差評価を行うことで、測定性能を定量的に調査した。また、観測実験では、開発手法(1)に対しては、ステータは固定翼列とし、インペラおよびタービンは回転速度 100, 200, 300RPM で同じ回転速度で回転させ、回転軸に平行に入射した光束拡大レーザー光を照明として、レンズを外したビデオカメラでトレーサー粒子のホログラム記録を行った。ビデオカメラのフレームレートに対して、レーザー光はオプティカル・チョッパーを用いて3倍の周波数で明滅させ、1枚のデジタル画像に3重露光像が記録されるように設定した。一方、開発手法(2)に対しては、水平面で往復運動する平板周りの流れの渦度計測を行い、回転方向の異なる流れ場に対して、正負の渦度分布が適切に計測できるか検討し、その実用性評価を行った。

4. 研究成果

(1) 多重露光デジタルホログラフィ流速測定法

数値シミュレーションおよび観測実験を通して、3重露光ホログラムを用いることを前提に計測アルゴリズムを構築した。まず、数値シミュレーションでは、立方体内流れのCFD解析結果を真値とした計測性能評価を行った。数値的に作成した3重露光ホログラムを波動光学基礎式に基づき解析し、記録されたトレーサー粒子群の空間分布を再生したところ、観測面内(x-y平面)の粒子移動量のRMS誤差はx軸方向に0.0019 mm、y軸方向に0.0015 mmが得られ、それぞれ1画素サイズである0.0048 mmの半分以下の誤差となった。また、観測面に垂直な奥行き方向(z方向)の粒子移動量のRMS誤差は0.01 mmとなり、奥行き方向の空間分解能に相当する0.01 mmと同等の誤差で検出できることを示した。

次に、観測実験では、基礎性能試験として噴流を多重露光デジタルホログラフィ法、2次元PIVの2種類の方法で計測し、それぞれの計測結果を比較することで、移動量や標準偏差の傾向が一致する流れ場が得られることを確認した。また、トルクコンバータ内部流れの流速測定では、トルクコンバータモデル全体において翼列の回転運動に対応する周方向成分が顕著な流速ベクトル分布を得た。これを異なる奥行き位置(z座標)ごとに流速ベクトルを整理し、インペラ流路部、タービン流路部に相当する奥行き範囲ごとに速度ベクトルを取り纏めると図4の流速分布が求まった。トルクコンバータの半径方向速度成分(図の横軸方向成分)で比較すると、タービン流路部に相当する範囲では符号が負に、トルクコンバータのインペラ流路部

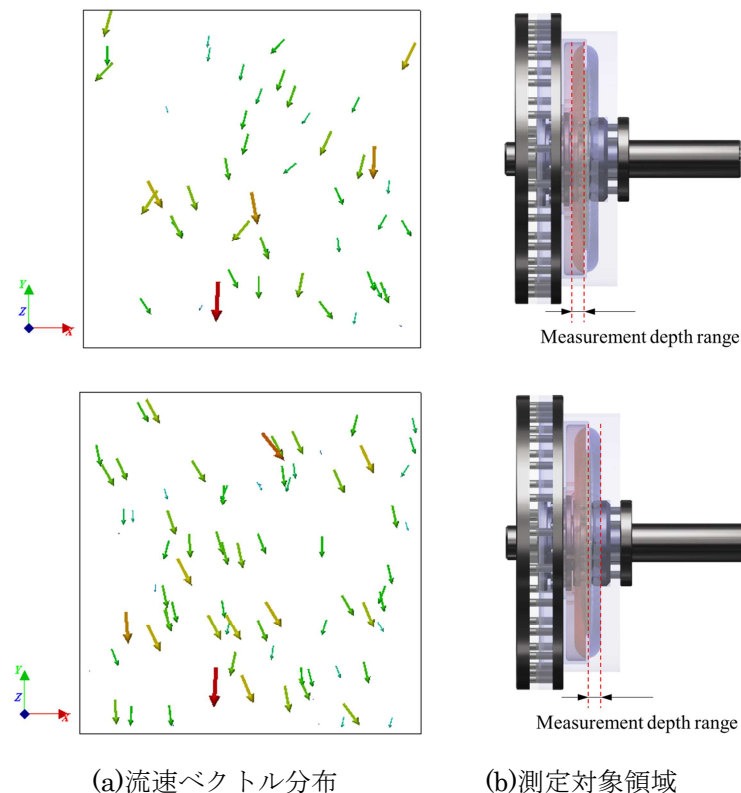


図4 奥行き位置が異なる翼列内流速分布の同時計測結果

(上段：タービン側，下段：インペラ側)

((a)において右が外周側，左が回転軸側，上から下向きが翼列の回転方向)

に相当する範囲では符号が正になるベクトルが多数得られた。図1に示したように、タービン流路部では半径方向の中心から外側に向かって、インペラ流路部では半径方向の外側から中心に向かって流れるため、それぞれトルクコンバータの基本的な循環流れと一致する速度ベクトル場が得られていることがわかり、多重露光デジタルホログラフィ流速測定法の有用性を示している。

なお、内部を循環するオイルの温度調節などの工夫を行い、より明瞭なホログラム画像を撮影することができれば、多重露光デジタルホログラフィ流速測定法により、トルクコンバータ内部流動のさらなる理解が進むものと期待される。

(2) 延伸フィルムトレーサーによる局所渦度測定法

まず、直線偏光が延伸フィルムと偏光板を透過してカメラに記録される光強度値の変化式を導出し、数値シミュレーションによって延伸フィルムが1回転で4回明滅することを確認した。また、延伸フィルムの性能実験を行い、数値シミュレーションと同様にフィルムが1回転で4回明滅することを示した。次に、延伸フィルムを基にしたトレーサー粒子の観測時に偏光板を回転させることで明滅周波数にバイアスをかける実験を行い、トレーサー粒子の回転方向が判別可能であることを実証した。さらに、往復運動する平板周りの液体流れに対して提案渦度測定法を適用し、トレーサー粒子の明滅観測を行った。図5は、平板の運動方向が異なる2つの流れ場に対して求めた渦度分布を比較している。いずれの図においても、 $x=0$ の上部の黒い四角形は平板端部を示している。平板が左から右へと移動する場合は、液体は右から左へと平板を迂回して流動し、その結果、液体には時計回りの回転が生じることになる。これを渦度表示すると、図5(a)のように負の渦度の分布が得られることになり、逆に運動するときには図5(b)のように正の渦度分布が生じることになる。これより、開発した延伸フィルムトレーサーによる局所渦度測定法の実現性を示すことができた。

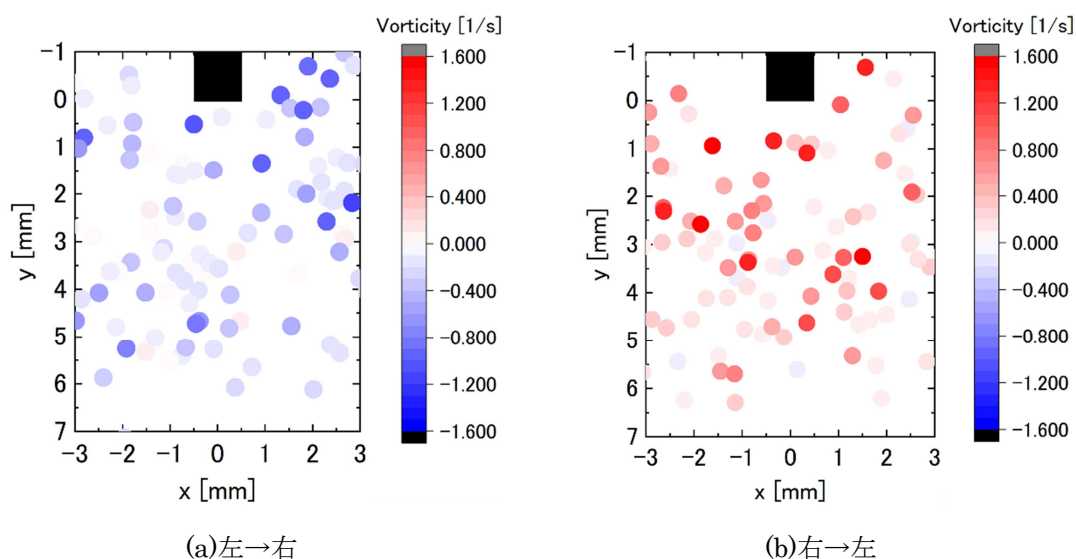


図5 往復運動する平板周りの渦度計測結果

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 0件）

1. 発表者名 木村彰吾, 村田滋, 田中洋介
2. 発表標題 数値シミュレーションによる多重露光デジタルホログラフィの性能評価
3. 学会等名 日本実験力学会 2022年度年次講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 工藤優陽, 村田滋, 田中洋介
2. 発表標題 延伸フィルムトレーサーを用いた局所渦度計測法の開発
3. 学会等名 可視化情報学会 第50回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村彰吾, 村田滋, 田中洋介
2. 発表標題 多重露光デジタルホログラフィによるトルクコンバータ内流速計測
3. 学会等名 可視化情報学会 第49回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 工藤優陽, 村田滋, 田中洋介, 福永巧
2. 発表標題 微小体延伸フィルムによる2次元渦度分布測定法
3. 学会等名 日本実験力学会 2021年度年次講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福永巧, 村田滋, 工藤優陽, 田中洋介
2. 発表標題 微小体偏光フィルムのトレーサ粒子としての性能評価
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第96期定時総会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福永巧, 村田滋, 田中洋介
2. 発表標題 微小体フィルムの偏光特性を用いた高空間解像度を有する渦度計測
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2020
4. 発表年 2020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
---------	---------