トルクコンバータ内部の流れの可視化*

國寄 康則**, 谷口 伸行***, 小林 敏雄†

Visualization of Internal Flow Field of Torque Converter

Yasunori KUNISAKI, Nobuyuki TANIGUCHI and Toshio KOBAYASHI

1. 緒 論

自動車用自動変速機 (AT) の動力伝達要素として広く用いられているトルクコンバータは流体継手の一種である。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, 及び反動要素であるステータの 3 つの翼列で構成されている (Fig. 1)。トルクコンバータの基本機能として①クリープ特性によるスムーズな発進, ②トルク増幅作用・連続的な変速による優れた加速性能, ③エンジンのトルク変動に起因した動力伝達系の騒音や振動を低減させるといった点が挙げられる。しかし内部に充填された作動油によって動力を伝達する方式のため伝達効率はマニュアルクラッチのような機械的伝達システムに比べれば低いものとなる。トルクコンバータ付き自動車用自動変速機 (AT 車) の燃料消費率悪化の一因である。

近年, 省資源および地球環境保護の観点から, 低燃費化や加速性能の向上が重要視されている。自動車の燃料消費率・動力性能にトルクコンバータの流体性能が影響を及ぼすことは良く知られており, トルクコンバータの

高効率化・高性能化が求められている。またパワートレインの軸方向短縮, 高機能ロックアップクラッチのダンパスペース確保のためトルクコンバータ軸方向寸法短縮 (扁平化) の要求も増加している。扁平でありながら, 尚且つ高効率・高性能なトルクコンバータを開発するために, 3 次元翼や流路の最適設計が必要となる。そのため, 2 次流れやはく離など内部流れに関する詳細な情報を取得することがトルクコンバータ設計開発者にとって非常に重要な課題となっている。

計算機の処理速度向上にともない, 内部流れを把握する手段として, CFD (Computational Fluid Dynamics: 数値流動予測) が幅広く用いられており, 有意な解析報告例^{1)~7)}も多数見受けられる。しかしながら, 設計開発における有用な検討手段として用いるには, 計算精度や信頼性の面で未だ充分といえないのが現状である。従って, 実測データ^{8), 9)}により補完・検証し CFD により取得した情報を吟味することが必要不可欠となる。実験解析的に流れ場を解明した報告例として, LDV (Laser Doppler Velocimeter: レーザドップラー流速計) によりインペラ, タービンおよびステータの内部流れ場を計測したもの^{10)~14)}, PIV (Particle Image Velocimetry: 画像処理流速計測手法) によりステータ翼列周りの流れを軸の内側より計測したもの¹⁵⁾が挙げられる。また設計手順を提唱したもの¹⁶⁾も報告されている。LDV は空間分解能・時間分解能が高く計測精度の面で最も優れた計測法である。しかしトルクコンバータ内部の流れ場を計測するためには莫大な時間が必要となる。一方 PIV は流路全域を瞬時に捕らえることが可能である。トルクコンバータは互いに隣り合う翼列が常に干渉し非定常な内部流れ場を形成している。PIV はその流れ構造を解明するためには非常に優位な流速測定手法といえる。しかしながら従来の PIV 計測報告例は 2 次元断面内のみの計測に留まっており, 3 次元的に流れの構造を捕らえてはいない。

そこで本研究では, トルクコンバータ内部の 3 次元流れ場の解明, および CFD コードの精度検証・予測誤差原因究明のための資料を取得することを目的とし, ステータ翼列周りの 3 次元流れ場に PIV を応用した実験解析を実施した。

Fig. 1 Torque converter.

* 原稿受付 2003 年 8 月 12 日

** 株式会社エクセディ 技術本部 AT 技術センター

*** 正会員 東京大学生産技術研究所

† 正会員 財団法人日本自動車研究所

2. 可視化用トルクコンバータおよび計測装置

可視化用トルクコンバータを Fig. 2 に示す。可視化用に選定したトルクコンバータは実用に供されている一般的な自動車用偏平型トルクコンバータをモデルとしている。それぞれの部品は無色透明のアクリル樹脂を NC 機

Fig. 2 Plexiglass torque converter for visualization.

Fig. 3 Torque converter for measurement in containment box.

Fig. 4 Measurement region on stator.

械により加工製作している。入射レーザ光の散乱、屈折の影響を最小限に抑えるため、アクリル樹脂（屈折率：1.49）と作動油（屈折率：1.4815）の屈折率をおおむね一致させている。またレーザ計測におけるトルクコンバータ曲面での反射の影響を最小限とするため、同種の作動油を充填したアクリル樹脂製の容器内部にトルクコンバータを設置し計測を実施した。トルクコンバータ、及び外部容器の断面図を Fig. 3 に示す。またステータ流路部の計測領域を Fig. 4 に示す。ステータ翼先端を基点として回転軸方向を X 軸、半径方向を Y 軸、接線方向を Z 軸と計測領域の座標系を定義した。計測領域はステータ翼間の 1 流路分を包括できるように設定した。計測領域のサイズは X 軸方向に長さ $L=27.0$ [mm]（ステータ翼先端を基点として上流側 6.0 [mm] 断面から下流側 21.0 [mm] 断面）、Y 軸方向に幅 $W=32.0$ [mm] Z 軸方向に高さ $H=46.5$ [mm]（ステータ翼先端を基点として +Y 方向に 24.5 [mm] -Y 方向に 22.0 [mm]）である。

計測時の運転条件は入力回転速度 400 [rpm]、速度比は 0.05, 0.3, 0.8 の 3 ケースであり、アイドリング状態（ストール）、加速状態、及び定常走行状態を想定した条件を選定した。計測はすべて定常運転下で実施した。

デザインパス上の流路平均半径、一次元解析によるインペラ出口部での子午線流速 (1.17 [m/s])、および作動油の動粘性（温度：20.4 [°C]）にもとづく代表的なレイノルズ数 Re は、約 7100 と見積もることができる。

3. 計測方法および計測システム

3.1 PIV 計測原理

PIV は流れ場に外乱を与えることなく流れ場全域を瞬時に計測する流速測定法である¹⁷⁾。複雑かつ非定常な流れの空間構造を定量的に捕らえられる特徴から流体機械の研究において多くの優位性が提唱されている。

Plexiglass stator

本研究では、PIV で最も多用される画像解析アルゴリズムである相互相関法（濃度相関法）を適用した¹⁸⁾。PIV 計測原理に関して記述する。

最初に流れ場にレーザ光を反射させるために微細なトレーサ粒子を混入する。トレーサ粒子で可視化された流れ場画像は濃淡分布をもち、この濃淡分布が流体の運動とともに移流する。微少時間差を持つ粒子画像を CCD カメラによって撮影する。第 1 時刻の画像中に小さな検査領域を設定する。設定した微小領域中の濃度分布の移流先が判れば、その微小領域中の流体塊の平均的な速度ベクトルが求められる。すなわち、濃度相関法とは微少時間差をもつ 2 枚の画像間での、局所的な濃度分布の類似性を濃度の相互相関によって求め、そのピーク位置から微小領域の流体の移動量を決定する手法である。

Fig. 5 に示すように、時刻 T と時刻 $T + \Delta t$ の 2 時刻間の画像中に微小な検査領域（Interrogation region）を設定し、それぞれの検査領域での輝度分布を $f(x, y)$, $g(x, y)$ 、その平均値を $f_{mean}(x, y)$, $g_{mean}(x, y)$ とするとき、相互相関係数 $r(p, q)$ は式(1)で表記される。

$$r(p, q) = \frac{\int (f(x, y) - f_{mean}(x, y))(g(x, y) - g_{mean}(x, y)) d\nu}{\sqrt{\int (f(x, y) - f_{mean}(x, y))^2 d\nu} \sqrt{\int (g(x, y) - g_{mean}(x, y))^2 d\nu}} \quad (1)$$

そして、相互相関係数の最も大きい場所、すなわち濃度分布が最も類似する場所 $q(x, y)$ が検査領域 $p(x, y)$ の移動先となる。この手順を画像全域で実施することにより多点同時計測が可能となる。

3.2 PIV 計測システム

計測装置の概略を Fig. 6 に示す。また、計測装置の概要を Fig. 7 に示す。装置は同軸上に配置されたアクリル製可視化用トルクコンバータ、入力要素インペラを駆動する入力用ダイナモ、および出力要素タービンのトルクを吸収する出力用ダイナモにより構成されている。計測システムは、流れ場を照射する光源として Twin Nd:YAG パルスレーザ（出力：15[mJ/pulse]、波長：532[nm]、パルス幅 ΔT ：6[ns]、サンプリング周波数：15

[Hz]、レーザライトシート厚さ：約 2.0[mm]）、粒子画像の撮影に CCD 相関カメラ（PIVCAM 10-30, 1016 × 1008[pixel]、階調 8[bit]）、レーザとカメラを同期させるシンクロナイザ、および機器の制御・画像処理を実施するホストコンピュータ（CPU：Pentium II 450[MHz]、RAM：1[GB]、HD：20[GB]）とで構成されている。CCD カメラによって撮影された粒子画像は画像処理ボードでデジタル化され、画像処理するために EWS へ転送される。処理状況はモニタ上に表示される。

可視化に用いたトレーサ粒子は、材質：架橋型ポリメチルメタアクリレート、平均粒径：50[μm]、比重：0.9 である。対象流体は作動油（比重：0.8895）である。作動油とトレーサ粒子の比重はおおむね一致しており、流れに対するトレーサ粒子の追従性に関して問題はない。また、対象流体（作動油）の温度は 20.4 ± 0.5 [℃] に制御し計測を実施した。

本計測システム設定における画像分解能は 0.05[mm/pixel] である。粒子画像の撮影はパルス間隔 Δt を 50[ns] に設定し実施した。相関値算出の際に設定した検査領域は 32×32 [pixel] である。よって本計測条件での空間解像度は 1.6×1.6 [mm] に相当する。検査領域に含まれるトレーサ粒子の数は約 30 個程度で、速度ベクトルの算出の際にはサブピクセル補間を用いた。計測された速度

Fig. 6 Schematic of experimental setup.

Fig. 5 Principal of particle image velocimetry (PIV).

Fig. 7 Schematic of experimental setup.

ベクトルに含まれる過誤ベクトルは、速度ヒストグラム処理により除去している。

3.3 3次元流れ場計測手法

本計測では時間平均3次元データを取得するために、上記の2次元計測システムを用いて、主流の流れを示すX-Z断面と2次流れを表わすY-Z断面の直交する2方向断面の計測を実施した。Fig. 8に各方向断面計測時のレーザ照射方向を示す。またX-Z断面の計測の際は半径方向(Y方向)に、Y-Z断面の計測の際は流れ方向(X方向)にレーザを移動させて計測対象領域全域を走査し各断面の計測を実施した(Fig. 9)。計測断面の移動間隔は1.0[mm]でレーザヘッドをトラバース装置に取り付けることによって制御した。各断面において、それぞれ200回の瞬時速度分布の計測結果から時間平均速

Fig. 8 Method of three-dimensional flow field measurement (Two orthogonal planes).

Fig. 9 Laser scanning for two measurement planes.

Fig. 10 Profile of secondary flow velocity vectors at three speed ratio.

度分布を算出した。その後、直交する2断面方向の2次元PIVデータを用い、CT技術を適応することにより時間平均された3次元速度場を再構築した。

4. 計測結果と考察

4.1 ステータ翼列周りの2次流れベクトル線図

Fig. 10に各速度比における、2次流れを表わすベクトル線図を示す。ここで示した断面図は上流側から見たものである。また、断面の位置は各速度比において顕著な差異の見られた断面(ステータ翼の前縁から3.0[mm]下流側の断面)のみを示してあり、本報ではこの断面について考察する。

最初に各速度比における2次流れベクトル線図に関して検討する。速度比0.05ではコア側正圧部に大きな渦が時間平均計測結果より確認できる。また、負圧部ではシェル側ではなく離が生じている。また速度比0.3では流路の全域に速度比0.05と同方向の大きな渦が確認できるが、それに対して、速度比0.8では明らかな渦の存在は確認できず、一様に正圧部から負圧部へ流れていることがわかる。本報では示していない他断面の計測結果より、考察の対象とした断面より上流側でもおおむね同様な特徴を確認している。下流側では、速度比0.05および速度比0.3においてステータ翼中央部、流路断面全域で発生していた渦は徐々に消失していることがわかる。

4.2 ステータ翼列周りの子午線流速分布図

次に、子午面流速分布図について考察する。Fig. 11に各速度比における、子午面流速分布図を示す。ここで示した断面図は上流側から見たものである。また、断面の位置は各速度比において顕著な差異の見られた断面(ステータ翼の先端から3.0[mm]下流側の断面)のみを示してあり、本報ではこの断面について考察する。

速度比0.05ではコア側正圧部を中心に正圧部全域で逆流領域が時間平均計測結果より確認できる。また、局所的な逆流領域がシェル側負圧部に存在する。速度比0.3ではコア側正圧部にのみ逆流領域が確認できる。しかし、速度比0.8において逆流領域は確認できない。また、速度比0.05においてコア側の負圧部で流速の大きい領域、およびシェル側では比較的流速の小さい領域が確認できる。速度比0.3ではシェル側からコア側全域にかけての負圧部で流速の大きい領域が確認できる。速度比0.8においてはコア側で流速が大きく壁面の境界層を

Fig. 11 Meridional flow velocity distribution at three speed ratio.

Fig. 12 Stream lines at three speed ratio.

除いてはおおむね一様に流れていることが確認できる。

4.3 流線図

Fig. 12 に各速度比における流線図を示す。ここでは、ステータ翼先端形状の最適設計を行なう上で、興味深いと考えられるステータ翼前縁から 3.0[mm] 上流側の地点を始点とした流線を示している。

各速度比ともに流線の始点近傍では、タービン出口部における流出角度の影響により、シェル側へ若干傾斜した流れ場を形成している。これに起因して翼間の流路に、Fig. 10 において示した渦が生成したのと考えられる。次にコア側とシェル側付近の各速度比における流れ方

の比較を行なう。速度比 0.05 において、コア側ではおおむね翼形状に沿った流れ方をしているのに対して、シェル側ではステータ翼から流れがはく離していることがわかる。また Fig. 10 の 2 次流れベクトル線図でみられたはく離流れ、および Fig. 6 でみられたシェル側負圧部の低流速領域は上記のような流れ方に起因しているものと考えられる。速度比 0.3 に関しても、同様な傾向を示していることがわかる。速度比 0.8 に関しては、滑らかな流れ場を形成していることがわかる。速度比 0.8 における流入角度は速度比 0.05 および速度比 0.3 とは逆の流入角を示していることがわかる。

5. 結 論

本研究により、トルクコンバータ内部の流れ場(ステータ翼列周りの流れ場)を3次元的に実験解析することができた。その実験解析結果より以下のことが明らかとなった。

- (1) トルクコンバータ内部流路全域における流れ場を詳細に捉えるため、2次元PIVで直交する2断面の2次元PIV計測結果を用い、CT技術を適応することによって3次元流れ場を再構築することができた。
- (2) ここで紹介した解析結果(下記参照)は、ステータ翼列周りの3次元流れ場を把握し、流体性能を改善するために役立てることができる。
- (3) ステータ流路中央部の渦発生の要因は流入条件によるものと考えられる。またこの渦はCFDで再現することは困難なものである。
- (4) ステータ翼前縁から下流側3.0[mm]のY-Z断面において、速度比0.05の運転状態ではコア側正圧部およびコアからシェルの中間部分よりシェル側にかけの負圧部に、速度比0.3ではコア側正圧部において逆流領域が存在し、速度比0.8では逆流領域が存在しないことがわかった。
- (5) 低速度比ではコア側負圧部に3次元はく離渦が発生しているが、高速度比では発生していない。これは、シェル側へ傾斜した流入に起因していると判断される。
- (6) 低速度比においてコア側ではおおむね翼形状に沿った流れ方をしているのに対して、シェル側では流れがはく離していることがわかった。一方、高速度比ではコア側・シェル側ともに滑らかな流れ場を形成していることがわかった。

上記のようにPIV計測によって得られた流れ場データはCFD解析結果の直接的な検証評価にも有効といえる。今後は、これらの比較検証によって、トルクコンバータの流れ設計の観点からCFD精度向上に向けての検討が期待される。

参 考 文 献

- 1) Kobayashi, T. Et al: Three Dimensional Flow Simulation in a Torque Converter, Technical Paper of JSAE, No. 9531525 (1995).
- 2) Ejiri, E. and Kubo, M: Flow and Loss Analysis of a Torque Converter Pump in the Higher Speed Ratio Range(in Japanese with English summary), JSME, B 64, 623 (1998) pp 151-156.
- 3) R, R. By. Et al: Navier-Stokes Analysis of the Pump Flow

- Field of an Automotive Torque Converter, ASME JOURNAL OF FLUID ENGINEERING, Vol. 117, March (1995) pp. 116-122.
- 4) Cigarini, M. and Jonnavithula, S: Fluid Flow in an Automotive Torque Converter : Comparison of Numerical Results with Measurement, SAE TECHNICAL PAPER SERIES, No. 950673 (1995).
- 5) Shin, S. Et al: Numerical Investigation of the Pump Flow in an Automotive Torque Converter, Proceedings of SAE, No. 1999-01-1056 (1999).
- 6) Lee, C. Et al: Three Dimensional Flow Field Simulation to Estimate Performance of a Torque Converter, Proceedings of SAE, No. 2000-01-1146 (2000).
- 7) Shin, S: Effect of Scroll Angle on Performance of Automotive Torque Converter, Proceedings of SAE, No. 2000-01-1158 (2000).
- 8) Kunisaki, Y. Et al: PIV Measurement on the Flow Field around a Stator Cascade of Automotive Torque Converter, Proceedings of SAE, No. 2001-01-0868 (2001).
- 9) Kunisaki, Y. Et al: A Study on Internal Flow Field of Automotive Torque Converter-Three Dimensional Flow Analysis around a Stator Cascade of Automotive Torque Converter by using PIV and CT Techniques-JSAE Review, 22 (2001) pp 559-564.
- 10) Kubo, M. and Ejiri, E: Internal Flow Measurements in an Automotive Torque Converter Using Laser Doppler Velocimetry (in Japanese with English summary), JSME, B 64, 626 (1998) pp 58-64.
- 11) H, M. Bahr. Et al: Laser Velocimeter Measurements in the Stator of a Torque Converter, SAE paper, No. 901769 (1990).
- 12) Brun, K. and Flack, R. D: Laser Velocimetry Measurements in the Turbine of an Automotive Torque Converter Part 1-Average Measurements, ASME Gas Turbine Conference and ASME Transactions, JOURNAL OF TURBOMACHINERY (1995) pp. 1-11.
- 13) Brun, K. and Flack, R. D: Laser Velocimetry Measurements in the Turbine of an Automotive Torque Converter Part 2-Unsteady Measurements, ASME Gas Turbine Conference and Transactions of ASME, JOURNAL of TURBOMACHINERY (1995) pp. 1-11.
- 14) Y. Dong. Et al: Steady and Unsteady Flow Field at Pump and Turbine Exits of a Torque Converter, Transactions of ASME, Vol. 120 (1998) pp. 538-548.
- 15) Watanabe, H. Et al: Flow Visualization and Measurement of Torque Converter Stator Blades a Laser Sheet Lighting Method and a Laser Doppler Velocimeter, Proceeding of SAE, No. 970680 (1997).
- 16) Shieh, T: Torque Converter Analytical Program for Blade Design Process, Proceedings of SAE, No. 200-01-1145 (2000).
- 17) Adrian, R. J: Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics, Ann Rev. Fluid Mech, Vol. 23 (1991) pp 261-304.
- 18) Hu, H. Et al: Evaluation of the Cross Correlation Method by Using PIV Standard Images, Journal of Visualization, Vol. 1, No. 1 (1998) pp. 87-94.

口絵5 ステータ計測領域とアクリル製ステータ

口絵6 計測システム

X - Z plane for measurement

Y - Z plane for measurement

口絵7 計測断面

(a) Speed ratio 0.05

(b) Speed ratio 0.3

(c) Speed ratio 0.8

口絵8 計測結果 (流線)

(口絵5, 6, 7, 8 株式会社エクセディ 國壽康則)

(本文 214 頁参照)