

## 自動車用トルクコンバータの翼列流れの数値解析

Numerical Simulation of Torque Converter

小林 敏雄\*・谷口 伸行\*・田坂 知寛\*\*

Toshio KOBAYASHI, Nobuyuki TANIGUCHI and Tomohiro TASAKA

## 1. はじめに

トルクコンバータは自動車の自動変速機に多く使用されている流体機械であり、図1に示すような構成で、インペラによりエネルギーを与えられた作動流体は、タービンを回転させることによりエネルギーを伝え、さらに下流にあるステーターによって流れの向きを変えられ、再びインペラへ流入する。この閉流路により、作動流体を循環させる事で、エンジンよりの動力をタービン軸より取り出すターボ型動力伝達装置である。また、取り出されるトルクは、インペラとタービンの回転比により増幅比が連続的に変化するため、変速機としての機能も持ち合わせている。近年、オートマチック車の普及率の増加に伴い、燃料消費

率などに直接影響をあたえるトルクコンバータの性能向上が求められる一方で、小型横置きエンジンFF車への登載のために形状のコンパクト化も進められている。そこで、ターボ機械としての性能を左右する翼列・流路の最適設計のために、内部流れに関する詳細な情報が非常に重要となっている。

トルクコンバータは密閉された流路で構成され、機械的構造も比較的複雑であるため内部流れの計測は困難であり、おもに油点、油膜法を用いた壁面応力の可視化か、静止系であるステータ部の部分的な計測を基に、全体の流動を推測するにとどまっている。他方で数値計算においても、複雑な流路形状による強い2次流れや、循環する翼列流路での境界条件設定の問題など、他のターボ機械と比較して困難な点が多い。しかし、粘性を考慮した解析結果<sup>1),2)</sup>が少数ではあるが徐々に報告されてきており、実験的研究の不完全さを補うような有用な知見を与えている。

そこで本論では、トルクコンバータ内の流れの粘性解析における数値解析上の課題と解析結果の一例を示し、設計における有用性について述べる。

## 2. 数値解析コードの概要と計算格子

基礎式は、質量の保存則である連続の式(式1)

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (1)$$

と、インペラおよびタービンの各要素では流れが回転系にのっているため、回転を考慮した運動方程式(式2)

$$\begin{aligned} (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} + 2(\vec{\omega} \times \vec{u}) + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) \\ = -\frac{1}{\rho} \nabla p + (\nu + \nu_t) \Delta \vec{u} \end{aligned} \quad (2)$$

を用いている。左辺第2項がコリオリの力、第3項が遠心

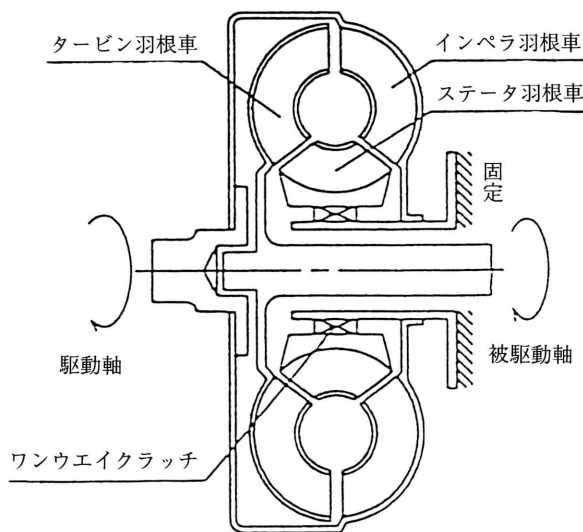


図1 トルクコンバータの概念図

\*東京大学生産技術研究所 第2部

\*\* (株)大金製作所

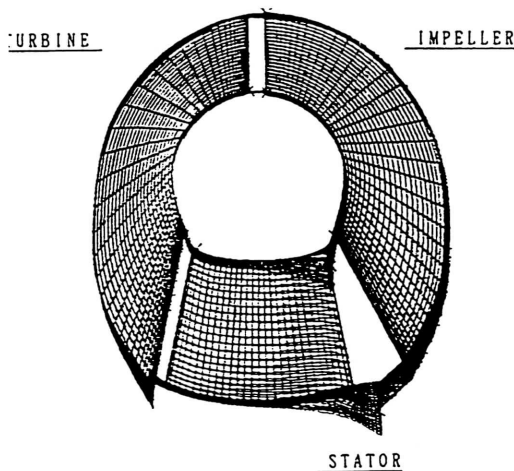


図2 計算格子

力である。乱流については、高レイノルズ数の粘性解析として、複雑な流れ場解析における最も簡便な乱流モデルである  $k-\varepsilon$  方程式モデル<sup>6)</sup> を用い、各モデル定数は、 $C_\mu=0.09$ ,  $\sigma_K=1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon=1.3$ ,  $C_1=1.44$ ,  $C_2=1.92$  を用いた。壁境界には対数速度分布に基づく壁法則を適用した。

本研究では、有限体積法に基づく定常非圧縮流れ解析コード<sup>3)</sup>により解析を行った。そこでは、差分法と同様の BFC (境界適合座標系) 格子を用い、速度成分は物理的な射影 (共変) 成分として staggered mesh で定義される。すなわち、格子座標系に沿って変形された 6 面体セルの面上にそれを横切る速度成分が、セル中心には圧力およびスカラー量が配置される。計算アルゴリズムには SIMPLE 法を用い、対流・拡散項については Hybrid スキーム<sup>4)</sup> によった。

インペラ、タービンおよびステータの各要素に対する計算格子を図2に示した。格子分割数は、ステータ:  $45 \times 24 \times 23$ , インペラ:  $58 \times 24 \times 23$ , タービン:  $60 \times 24 \times 23$  である。各要素とも翼列の1ピッチを計算領域とし、周方向に周期条件を課した。要素の接合部では数メッシュ分のオーバーラップが取られているが、各要素の翼枚数の違いから1ピッチの角度も異なるため、円周方向の格子分割は一致していない。

### 3. 境界条件および計算法

前節に述べた解析コードと計算格子を用いて、各要素において流入・流出条件が与えられれば個々に解析が可能である。トルクコンバータ内は密閉された流路となっており、流路断面の速度計測が困難であることを考慮すれば、各要素の境界条件を接合して全領域の解析を行うことが望ましい。しかし、翼間の非定常的な干渉を厳密に解析するのは

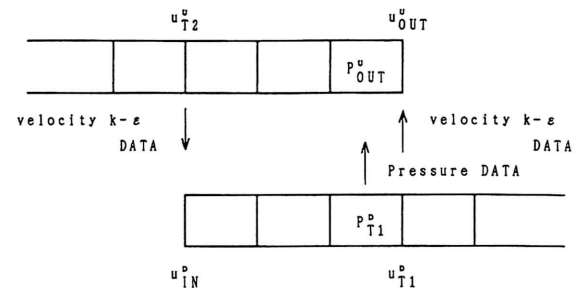


図3 オーバーラップする格子の境界条件

困難であるため、この種の翼列流れ場の解析で従来より用いられている定常干渉の仮定<sup>5)</sup>を本研究でも採用した。具体的には、格子接合部で境界条件を引き渡す際に、円周方向に流れ場を平均化する操作を行う。この条件により、各要素ごとに円周方向の周期条件を仮定した定常解析が可能となる。

本研究で用いた staggered mesh での境界条件は図3のように設定した。すなわち、流入境界  $u_{IN}^u$  の位置では、これとオーバーラップする上流側格子の  $u_{T2}^u$  での値を円周方向に平均して速度の境界条件としてあたえる。staggered mesh 配置では、この場所で定義されているのは境界面を横切る速度成分だけであり、他の成分については上流側格子上の近傍点から補間する。同様に、流出境  $u_{OUT}^u$  では、下流側格子の  $u_{T1}^u$  での値を平均して引き渡す。スカラー量の境界条件についても速度と同じ境界面で設定し、同様に近傍点からの補間を行う。

圧力については下流から上流にのみ値が引き渡される。すなわち、 $P_{T1}^u$  ( $u_{T1}^u$  とは半メッシュずれていることに注意) を円周方向に平均して  $P_{OUT}^u$  とする。流入境界条件は連続の式から自動的に決定される。上記条件を SIMPLE 法の計算手順に従って述べると、流出境では修正圧力  $P_{OUT}^u = 0$  ( $P_{OUT}^u$  を修正しない) となり、流入境界では  $u_{IN}^u = 0$  ( $u_{IN}^u$  を修正しない) により与えられる。

それぞれの引き渡される境界上の値は隣接する計算格子上で各反復ステップごとに再計算され、それに応じて境界条件も更新される。本研究では、定常解析コードによる計算を効率よく進めるために、境界条件の更新は SIMPLE 法において10~20反復ステップごとに行った。

ところで、上記の方法で境界条件を接合すると、SIMPLE 法の各反復ステップで連続の式が正確に満たされた場合、流路を循環する総流量は初期条件から一定値を保つことになり、任意に仮定した初期流量に対しては流路を循環すると不当な圧力降下 (または上昇) を生じてしまう可能性がある。そこで本研究では、インペラ部でのトルクを基準として流路を循環する総流量を決定した。その理由と

研究速報  
 としては、全流路圧力損失の正確な評価が困難であるのに対して、インペラ部トルクが性能試験で正確に計測されており、かつ、ステータでの整流作用のためにインペラ部流れが運転条件（おもにタービン／インペラ回転数比）によって大きく変化しないと推定されることによる。具体的には、インペラ部トルクの計算値をモニターし、収束計算の過程において総流量をステータ流入境界で調整して、トルク計算値を計測値と適当な誤差範囲で一致させた。

4. 解析結果と考察

上記の解析手法に基づき、実用に供されている自動車用トルクコンバータをモデルとして数値解析を行った結果を以下に示す。解析を行ったトルクコンバータの仕様および運転条件を表1にまとめた。これは、小型乗用車に登載されるもので、実車走行時の運転条件をシミュレートしている。流路平均半径およびステータ入口部での平均流速によるレイノルズ数は約 $4.8 \times 10^4$ となる。

表1 仕様・運転条件

羽根枚数:	インペラ 29枚
	タービン 31枚
	ステータ 16枚
インペラ回転数:	2000rpm
速度比:	0.7
	(タービン回転数/インペラ回転数)
代表速度:	8.0m/s
代表長さ:	0.110m

図4～6は、トルクコンバータ内部流れ場を翼面近傍（負圧面側および正圧面側）の速度ベクトル図と等圧力線で示している。本解析の速度比（=0.7）では、全体的に滑らかに流れているが、しかし、部分的に2次流れや剥離が見られる。

図4のインペラに流入する速度分布に於いては、インペラ回転の影響により、シェル側よりコア側の回転方向の速度成分が大きくなっている。これは、シェル、コアの半径

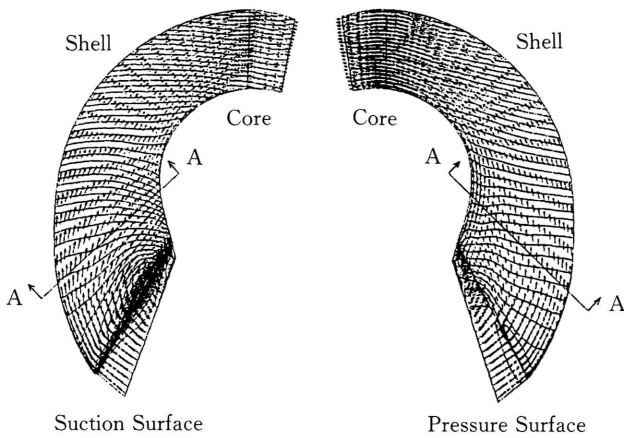


図4 インペラ速度ベクトル, 等圧力線図

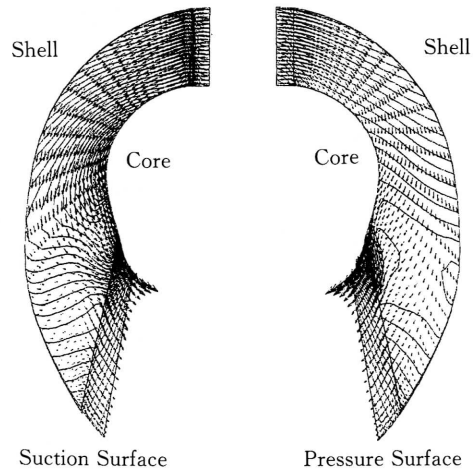


図5 タービン速度ベクトル, 等圧力線図

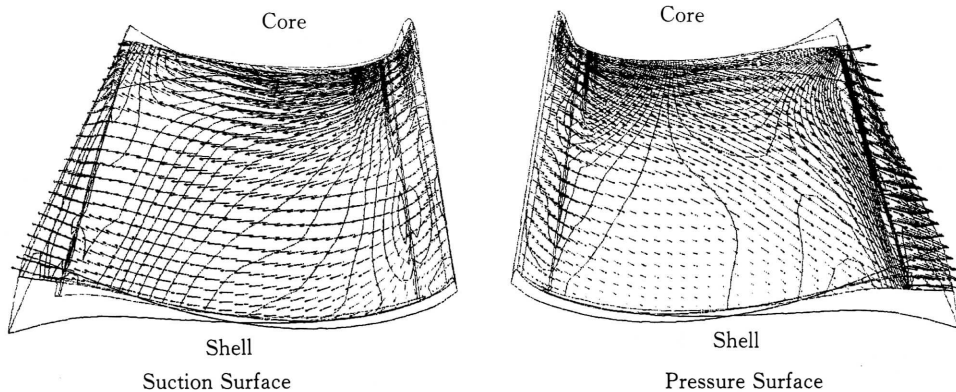


図6 ステータ速度ベクトル, 等圧力線図

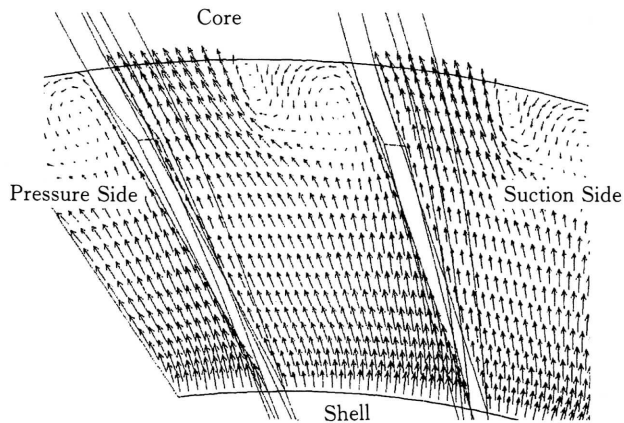


図7 インペラ断面内の2次流れ(図4の断面)

差によるものだと考えられ、この事より、流入が一様でないことがわかる。さらに、インペラ入口付近の負圧側では、圧力が下がり、剥離が起こっていることがわかる。このことは、インペラへ流入角の影響によるものと考えられる。圧力分布においては、軸回転半径方向への等圧線が見られ、半径が大きくなるにつれて、等圧線の間隔が狭くなっている。

図5のタービンの速度分布では、後半部では大きく減速して剥離を生じており、回転による遠心力の影響であるものと考えられる。それゆえ、次の要素であるステータに流入する速度分布は一様分布から大きく外れていることがわかる。その結果、静翼であるステータ部流れにも3次元性を生じている(図6)。

図7は、インペラ入口部分より主流方向に1/4の場所での流路断面を下流側から表示している。ここでは、大きく2次流れを起こしており、この流れは、辻田ら<sup>2)</sup>の解析とも定性的には一致している。

これらの解析結果に対して、トルクコンバータ設計への有効性の観点から以下のように考察する。

1) 境界条件に定常干渉の仮定を用いることで、トルクコンバータ内の粘性解析が定性的に妥当な解析結果が得られる。本数値計算はEWS上で実行可能(CPU約30時間/収束誤差1%程度)で実用的な計算規模と考える。

2) 本解析結果により得られるベクトル分布からトルクコンバータ内の3次元流動を容易に把握することができる。これらの定性的な情報は、計測、可視化手法の限られるトルクコンバータの流れ場設計において有用と思われる。

3) トルク比などの定量的予測に関して計測値との相違を生じており十分とは言えない。解析誤差の要因としては、境界条件の仮定、乱流モデルの他、格子分割の影響も検討すべきと思われる。(1994年11月16日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) 安部 他, 自動車技術会講演前刷 902, 1-293 (1990)
- 2) 辻田 他, 機論 B59-564, 160 (1993)
- 3) 谷口 他, ターボ機誌 20-5, 295 (1992)
- 4) S. V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere* (1980) (水谷, 香月訳, 森北出版)
- 5) 鹿野芳雄, 他, 機論 B53-496 (1987)
- 6) 大宮司, 他, 数値流体力学(第11章 乱流解析法(II) 現象論モデル), 237-241, 東大出版会 (1992)