

トルクコンバータ羽根車内の流れの数値計算

Numerical Calculation of the Flow in a Torque Converter

正司 秀信*・石原 智男*

Hidenobu SHOJI and Tomo-o ISHIHARA

1. 緒言

現在、通常のターボ形流体機械内部の流れについては、実験的に流速分布を測定することは可能であり^{1),2)}、数値計算でも大形計算機の進歩とともに、流線法^{3),4)}あるいはマトリックス法⁵⁾による準三次元的計算法、差分法⁶⁾あるいは有限要素法^{7),8)}による三次元的計算法により、設計点における流速分布の予測が可能になってきた。数多くの実験データの蓄積および前記の数値計算手法によって、ターボ形流体機械の羽根車の合理的な設計手法が確立されつつある段階にきていると考えられる。

これに対して、トルクコンバータ羽根車内の流れを実験的に計測することは構造上の理由からきわめて困難であり、また流路や羽根形状が複雑であるため、これを数値的に計算した例もほとんど見当たらない⁹⁾。トルクコンバータでは設計点や最高効率点のみでなく、ストール点を含めて広い速度比範囲にわたっての性能を予知する必要があるため、その設計に際しては、角運動量理論に基づいた性能推定方法が用いられているのが現状である。しかしながら、トルクコンバータも本質的にはポンプ羽根車、タービン羽根車およびステータの組み合わせからなっており、設計点や最高効率点の近傍では、ターボ形流体機械における前記の計算法の適用が、ある程度可能と考えられる。そこで、本研究ではトルクコンバータ羽根車内の三次元流れを有限要素法で計算することを試みた。絶対流れを非粘性、渦なしと仮定しているため、計算結果から効率の高低を推定することはできないが、流路内の速度分布から合理的な流路形状や羽根形状に対する知見がえられるものとする。

2. 計算方法

トルクコンバータには多くの形式があるが、ここでは図1に示す構造の最も簡単な3要素1段形を対象を限定

する。絶対流れを非粘性、渦なしとして、速度ポテンシャル ϕ に関する基礎式は、 x, y, z 直交座標系で次のラプラスの式で表される。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

計算領域としては図2に示すように1個の羽根車の羽根面、シェル面およびコア面で囲まれる流路にその上流と下流の領域を加えたものを考える。境界条件としては、

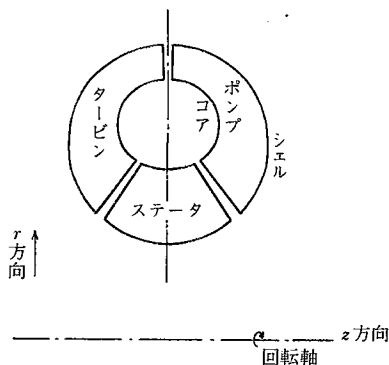


図1 3要素1段形トルクコンバータ

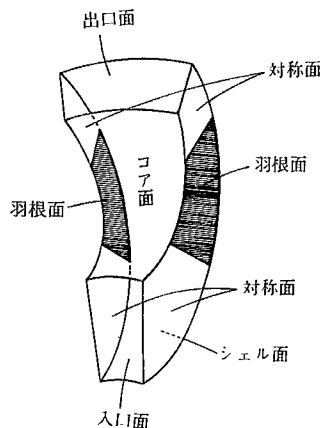


図2 計算領域

*東京大学生産技術研究所 第2部

羽根面, シェル面, コア面および入口出口面でそれぞれの面に対する法線方向の速度 $\partial\phi/\partial n$ が与えられ, また対称面では流れの周期性の条件, 羽根の後縁において圧力連続の条件が与えられる. 初めに $\partial\phi/\partial n$ の条件のみを考慮に入れて全体方程式を作り, 周期性の条件および後縁の条件はその後導入することにする. $\partial\phi/\partial n$ の条件と支配方程式を組み合わせてガラーキン形式¹⁰⁾で書くと

$$\begin{aligned} & \iiint \left(\frac{\partial\phi}{\partial x} \frac{\partial\delta\phi}{\partial x} + \frac{\partial\phi}{\partial y} \frac{\partial\delta\phi}{\partial y} + \frac{\partial\phi}{\partial z} \frac{\partial\delta\phi}{\partial z} \right) dx dy dz \\ & = \iint_{S_1} \frac{\partial\phi}{\partial n} \delta\phi dS \end{aligned} \quad (2)$$

ここに S_1 は $\partial\phi/\partial n$ の与えられる面を表す.

図3に示す4面体要素を考え, その中で ϕ を線形変化と仮定すると

$$\phi = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 z \quad (3)$$

各要素ごとに ϕ を各節点座標と節点における ϕ の値で表して, (2)式に代入すると要素マトリックスがえられる.

$$\mathbf{K} \quad \mathbf{p} = \mathbf{P} \quad (4)$$

4×4 4×4 4×1

右辺は, たとえば4面体の節点 (1, 2, 3) に囲まれた面の平均法線方向速度を V_{n1} とすると

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{pmatrix} = \frac{V_{n1} S_{123}}{3} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

ここに, S_{123} は $\Delta 123$ の面積である. 計算領域内のすべての要素について(4)式に対応する式を作り, それらを重ね合わせると全体方程式が得られる.

$$\mathbf{K} \quad \Phi = \mathbf{P} \quad (6)$$

$n \times n$ $n \times 1$ $n \times 1$

ここに n は節点数を表す.

法線方向速度は

$$\partial\phi/\partial n = 0 \quad (\text{シェル面, コア面}) \quad (7)$$

$$\partial\phi/\partial n = -\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} \quad (\text{羽根面}) \quad (8)$$

与えられる. ここに \mathbf{n} は法線ベクトル, $\boldsymbol{\omega}$ は回転ベクトル, \mathbf{r} は対応する面の重心における半径ベクトルを表す. 羽根車を通ずる流量 (循環流量) は従来の角運動量に基づく理論¹¹⁾から求めた. すなわち, 損失係数を仮定して循環流によるエネルギー損失を推定し, これを実験効率から逆算して得られるエネルギー損失と等置することによって, 循環流量を算出した. 入口と出口の流速分布を求めるには繰り返し計算によらざるをえないが, その方法については後述する.

周期性の条件は, 対称面の対応する2点を円柱座標系で表して (r, θ_1, z) , (r, θ_2, z) において, 次のよう

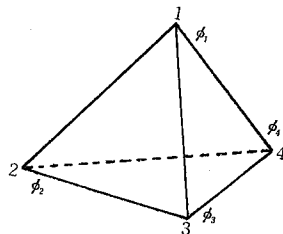


図3 4面体要素

に表される.

$$\phi(r, \theta_1, z) = \phi(r, \theta_2, z) - \Gamma \quad (9-a)$$

$$\partial\phi(r, \theta_1, z)/\partial n = \partial\phi(r, \theta_2, z)/\partial n \quad (9-b)$$

$$\theta_1 = \theta_2 + 2\pi/N \quad (9-c)$$

ここに N は羽根枚数を表す. 全体方程式に (9-a), (9-b) を導入し, さらに後縁における圧力連続の条件を対応する式に代入する.

計算はまずステータの入口と出口の流速分布を仮定して開始する. 羽根車前方後方に十分な範囲の計算領域をとり, 羽根車出口と計算領域の出口の中間においてほぼ θ 方向に流れが一樣になった断面を選び, 流速分布および循環の分布を計算し, これを次の羽根車の入口条件とする. このようにして, ポンプ羽根車, タービン羽根車と計算を進め, ほぼ前回の入口, 出口条件と変わらなくなったところで計算を終了する.

羽根形状はシェルからコアへ線形的に変化するものとし, 入力データとしては羽根枚数とシェル, コアにおける (r, θ, z) 座標のみを与え, メッシュの分割はすべて自動的に行った.

3. 計算結果および考察

計算の対象として, 図4に示す形状のトルクコンバータを選ぶ. これらの羽根は, 文献¹²⁾に従って強制渦形で設計されたものである. 速度比 (ポンプ羽根車回転数に対するタービン羽根車回転数の比) $e = 0.5$, 平均循環流速 7.2 m/sec , ポンプ羽根車の回転数 1620 rpm の場合について計算した.

三次元流れの計算結果の表示法としては, ある流れ面の流速分布を一方向から投影して描く方法が考えられるが, トルクコンバータの場合, 特にタービン羽根車の流路のように非常に複雑な形状をしている場合には, そういった表示法では流れの様子を適確にとらえることはできない. そこで, ここでは羽根面および羽根間流れ面を平面に展開して表示することにした.

図5は羽根表面の流れを半径の方向が常に同一方向になるように展開して, 相対流速分布を描いたものである. それらによるとステータ以外ではシェル面よりコア面側

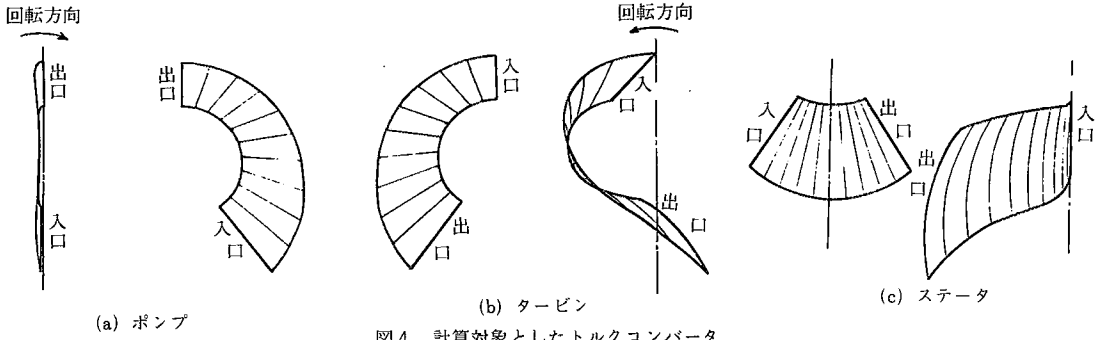


図4 計算対象としたトルクコンバータ

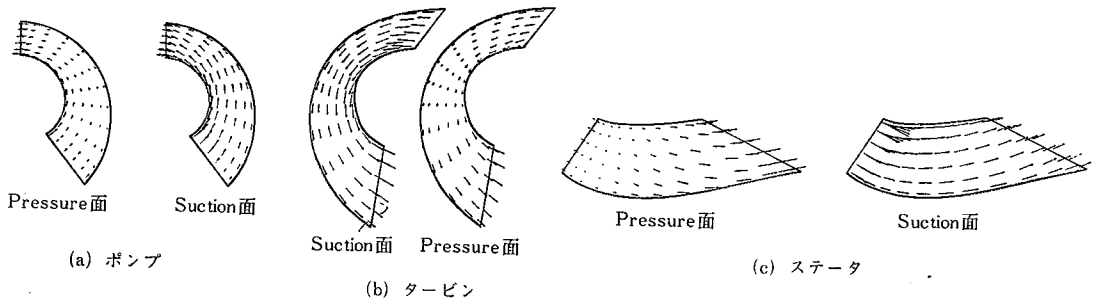


図5 羽根表面の流れ ($\epsilon = 0.5$)

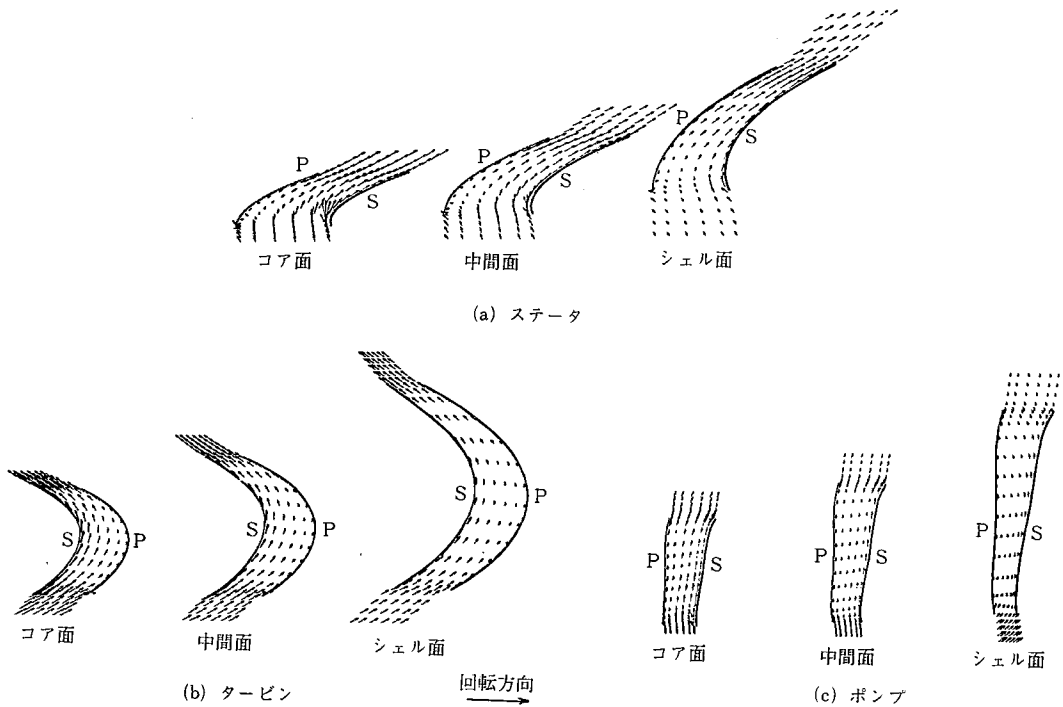


図6 翼間流速分布 ($\epsilon = 0.5$)

の方が流速が速く、ポンプ羽根車およびタービン羽根車では、回転による効果により流路内に回転方向と逆向きの渦を生じて流面の軸対称性を崩していることなどがわかる。

図6は羽根間流れをコア面、シェル面およびその中央の面において回転方向が常に同一の方向になるように展開して表示したものである。羽根間流れにおいても回転の影響による渦が、ポンプ羽根車のシェル面などでは、はっきり観察される。 $e = 0.5$ はほぼ設計点であるので、各羽根車の平均流れ面において無衝突流入になるように設計してある。計算結果もほとんど無衝突流入に近づいているが各流れ面ごとに相対流入角には差があり、ポンプ羽根車の入口付近でその差は特に著しい。このことは平均流れで見積った衝突速度とはかなり違った衝突速度が生じている可能性のあることを意味している。本計算法をくり返し用いることによって、ある基準点において入口部での衝突速度を非常に小さくする羽根形状を見出すことが可能となる。

4. 結 語

絶対流れを非粘性、渦なし流れとして、トルクコンバータ内の三次元流れを計算する方法を示した。粘性の影響に対する配慮がなされていないため、本計算法によって得られる結果から、直接的に効率の高低を論じることはできないが、今後、数多くのトルクコンバータについて計算を行うことにより、計算で求まる流速分布と実験的に求まる効率との関係が明らかにされれば、現在の設計手法を改良することができると考える。

(1980年6月30日受理)

参 考 文 献

- 1) Howard, J. H. G. and Kittmer, C. W., "Measured Passage Velocities in a Radial Impeller with Shrouded and Unshrouded Configurations", J. of Engg. for Power, 207 (1975)
- 2) Eckardt, D., "Detailed Flow Investigations within a High-Speed Centrifugal Compressor Impeller", J. of Fluids Engg., 390 (1976)
- 3) Katsanis, T., "Use of Arbitrary Quasi-Orthogonals for Calculating Flow Distribution in a Turbomachine", J. of Engg. for Power, 197 (1966)
- 4) 中瀬, 妹尾, "ターボ機械の羽根車内の流れ(第2報, 翼間流れを考慮した回転流面の決定法)", 機論, 38-308, 800(昭47)
- 5) Marsh, H., "A Digital Computer Program for the Through-Flow Fluid Mechanics in an Arbitrary Turbomachine, Using a Matrix Method", A. R. C. R&M, No. 3509, 1968
- 6) Rae, W. J., "Calculations of Three-Dimensional Transonic Compressor Flowfields by a Relaxation Method", AIAA Paper, No. 77-199, (1977)
- 7) Nagafuji, T. and Morii, H., "A Flow Study in Francis Turbine Runner", IAHR Symposium, 1980 Tokyo, 583 (1980)
- 8) Laskaris, T. E., "Finite-Element Analysis of Three-Dimensional Potential Flow in Turbo-machines", AIAA Journal, 16-7 (1978)
- 9) Mercure, R. A., Review of the Automotive Torque Converter, SAE TPS 790046
- 10) Connor, J. J. and Brebbia, C. A., "Finite Element Techniques for Fluid Flow", Butterworth & Co. (1976)
- 11) Ishihara, T., "A Study of Hydraulic Torque Converters", Report of the Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 5-7 (1955)
- 12) Jandasek, V. J., The Design of a Single Stage Three-Element Torque Converter", Design Practice Practice-Passenger Car Automatic Transmissions -Part 1, SAE, 154 (1962)

- 1) Howard, J. H. G. and Kittmer, C. W., "Measured Passage Velocities in a Radial Impeller with