

トルクコンバータのステータ翼周り流れの可視化
と計測

渡辺久志

Flow Visualization and Measurement in the Stator of Torque Converter

Hisashi Watanabe

要 旨

トルクコンバータの高性能化検討の中で、代表特性の一つである容量係数特性が、同一のキャンパーラインを有しながら、翼厚の異なるステータにより大きく変化するという現象を見い出している。そのメカニズムを明らかにするためには、内部流れ状況の把握が必要である。

そこで、トルクコンバータのステータ翼周り流れの観察を目的として、軸構成の工夫により軸中心から半径方向に向かって翼間流路を直接観察・計測できる可視化装置を開発した。さらに、翼に内蔵した反射鏡によりレーザシートを導いて、剥

離の直接観察を可能にした。また、レーザ流速計の適用により、翼周りの流速、乱れ強さ、および流出角の測定を可能にした。

その結果、翼厚により剥離状況が大きく異なり、その剥離により循環流速と流出角が変化する状況を把握した。それぞれの翼厚について、循環流量は容量係数特性とほぼ同一の特性を示したが、流出角はわずかに逆の特性を示した。これらより、翼厚による容量係数特性決定の要因は、剥離状況に起因する循環流量の変化によるものであり、流出角の影響は小さいことが明らかになった。

Abstract

A new experimental apparatus to visualize and measure the flow in the stator of a torque converter is proposed. A one-sided coaxial shaft constructed of an input shaft and an output shaft provides an open space inside the stator shaft for measurement. Through the window on the stator shaft, the flow in the stator can be directly observed. We also improved the laser sheet lighting method into the blade passage by using a mirror inside the blade.

By visualizing the flow with the laser sheet lighting method, we found that the flow around the leading edge has different separation regions along the blade

span. Furthermore, by using a laser doppler velocimeter, velocity vectors and turbulence intensities were measured in three stator blades of different thicknesses with the same camber line. The thickness of the stator blades affects the flow patterns. The outlet flow rate shows similar characteristics to the torque capacity coefficient when the stator blade thickness is altered. However, the outlet flow angle shows slight inverse characteristics to the torque capacity coefficient. We have verified that the characteristics of the flow field and the torque capacity coefficient are determined by the outlet flow rate.

キーワード

トルクコンバータ，自動変速機，ステータ，容量係数，剥離，可視化，レーザ流速計

1. まえがき

近年のオートマチックトランスミッション（自動変速機，以下AT）車の普及にともない，車両燃費や動力性能に対する要求がますます高まっており，ATのさらなる性能向上が求められている。なかでも，その主要要素であるトルクコンバータに関しては，車両のFF化やロックアップクラッチ機構の搭載により偏平化が進む一方で，高性能化，すなわち伝達効率とトルク比の向上および容量係数特性の適性化が図られている。トルクコンバータの性能向上には，内部羽根車流路内の流れを把握し，望ましい流れになるように形状を設計することが必要である。しかし，前者については，トルクコンバータがFig. 1に示されているように，ポンプ，タービンとステータから構成される閉じた循環流路を形成し，かつ，それぞれの羽根車は形状が複雑で流路の曲率が大きいため，流れの解明は容易でない。

トルクコンバータ内部流れの計測に関しては，種々の方法が試みられており，LDV（レーザ流速計）によりステータ翼間流速を計測した例¹⁾，5孔ピトー管を用いてポンプ，タービン，ステータの各出口における絶対流速および流出角を計測した例²⁾，などがあり，また，可視化に関しては，ポンプ，タービン，ステータの各翼面上の流れの様子を油点法により観察した例³⁾などがある。当所では，80年代前半よりトルクコンバータ内部流れ計測技術の開発に着手し，X型熱膜プローブによ

りステータ入口流速および流入角の計測⁴⁾，ステータ翼面圧力分布の計測⁵⁾やステータ翼断面形状からなる二次元モデル翼列周りの流れの可視化⁶⁾，タービン流路内圧力分布の計測⁷⁾などを実施してきた。しかし，その配置の複雑さゆえに実際の羽根車を対象に直接可視化および計測を行うまでには至っていなかった。

このような状況のもとで，ステータ翼周り流れの直接観察を目的として，軸構成の工夫により，軸中心から半径方向に向かって翼間流路を直接観察できる可視化装置を製作し，油膜法，タフト法などの可視化手法の適用⁸⁾と流速測定へのLDVの適用⁹⁾を実施してきた。

一方，トルクコンバータの高性能化検討の中で，ステータの翼厚さがトルクコンバータの代表的特性の一つである容量係数特性に大きな影響を与えることを見出ししている¹⁰⁾。この容量係数特性は，エンジンとの組み合わせにおいて車両の性格（動力重視，燃費重視など）を決める重要な因子であり，容量係数特性の決定メカニズム解明により，トルクコンバータ設計段階での容量係数特性適合手法に展開できる。

本報では，新たな可視化手法とLDV計測により，上記ステータ翼厚さが流れに与える影響を把握し，容量係数特性決定のメカニズムを考察した結果について述べる。

2. 供試トルクコンバータの特性

供試トルクコンバータとして，Fig. 1に示す外径 $\phi 254\text{mm}$ の偏平なトーラス（ポンプ，タービン，ステータで形成される環状流路）断面形状をもつものを用いた。ポンプ，タービンおよびステータは，それぞれ，31，29，20枚の翼から構成される。このうち，ステータとしてはFig. 2に示す翼厚さが異なる3種類の翼形状を設定した。厚翼，薄翼と板翼は，キャンパーラインが共通であり，薄翼は厚翼を厚さ方向に63.5%縮小したものの，板翼は厚さ2mm一定である。また，翼幅中央での入口角度および出口角度は，それぞれ， 0° ， -49.5° である。トルクコンバータの代表特性である効率 η ，トルク比 t ，容量係数 C は以下の式(1)，(2)，(3)で定義される。

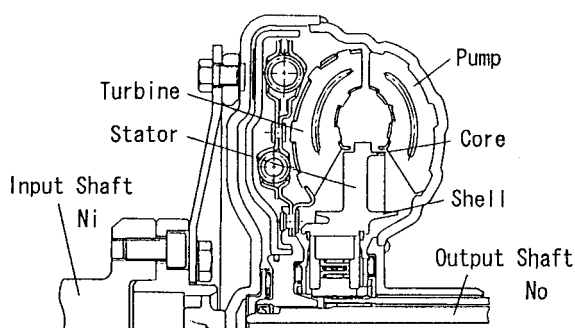


Fig. 1 Torque converter.

$$\eta = te \quad (1)$$

$$t = T_o / T_i \quad (2)$$

$$C = T_i / N_i^2 \quad (3)$$

ここに，速度比 $e = N_o / N_i$ ， N_i ， N_o ：入出力軸回転数， T_i ， T_o ：入出力軸トルク。

これらの3種類のステータを用いたトルクコンバータの特性をFig. 3に示す。Fig. 3から，効率，トルク比に比べて，翼厚さが容量係数に大きな影響を与えることがわかる。翼設計に用いられる角運動量理論（5.1参照）によれば，翼形状としては翼厚さは考慮されず入口，出口羽根角度のみで表現されるので，容量係数特性に違いは表われないことになる。そこで，このFig. 3に示された相違の要因が，流れ場における剥離現象の違いにあるとの推論をたてた。以下，可視化・計測によりその流れ場を明らかにする。

3．ステータ翼周り流れの可視化

3．1 可視化装置の開発

製作したステータ翼流れ可視化装置の可視化部の構造をFig. 4に示す。実際のトルクコンバータ（Fig. 1）では両側にそれぞれ入力軸（ポンプ軸）と出力軸（タービン軸）が対向して位置する。これらの軸を同心二重構造にして片側にまとめ，軸内側の一部に透明観察窓を設け，反射鏡を設置し，ステータ翼をシェル側から直接観察する。ただし，ステータは固定されるので，速度比はカップリングポイント以下のコンバタ領域に限定される。可視化装置駆動方法をFig. 5に示す。入力軸と出

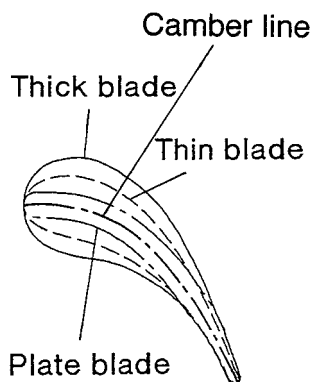
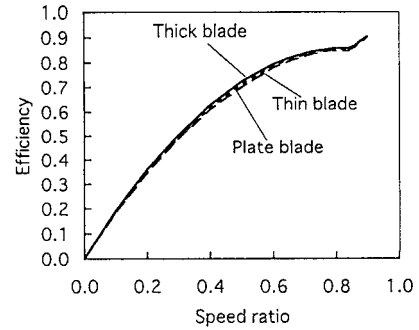
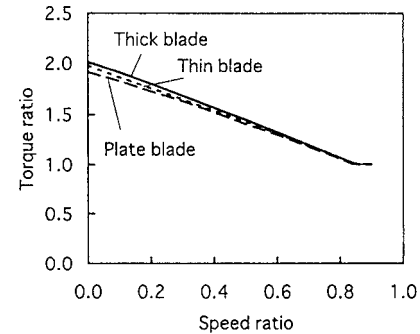


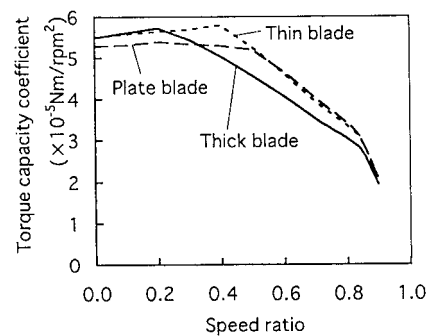
Fig. 2 Test stator blades.



(a) Efficiency



(b) Torque ratio



(c) Torque capacity coefficient

Fig. 3 Performance characteristics of the experimental torque converter.

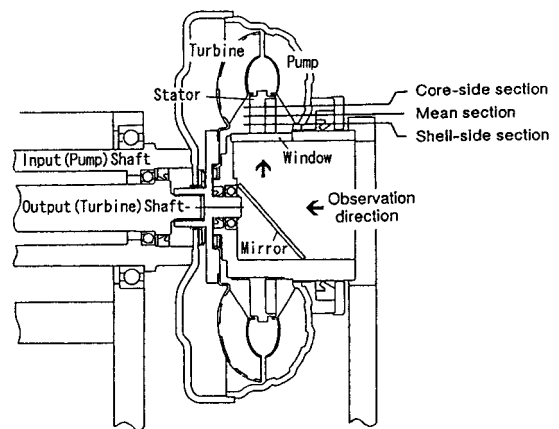


Fig. 4 Visualized torque converter for measurement of stator flow.

力軸は、無段変速機を介して動力循環を行いながら一台のモータで駆動される。可視化装置の主な仕様をTable 1に示す。可視化実験は、観察のし易さから、赤銅色で高粘度のトルクコンバ - タ油の代わりに透明度の高い低粘度の軸受油を用い、実機運転条件より低回転 (350rpm)、低温 (30℃) で行う。これは流れの相似則に沿ったもので、代表速度として循環流速 $u = 2\text{m/s}$ 、代表長さとしてステ - タ翼弦長 $c = 0.02\text{m}$ 、動粘度として $\nu = 2.5 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ とすると、今回の実験におけるレイノルズ数 $Re (= uc / \nu)$ は 2×10^4 程度であり、エンジン回転数2000rpm程度の場合に相当する。

3.2 レーザシート法の適用

Fig. 4に示す装置を用いた可視化では、翼幅方向の可視化像が全て観察され、翼幅のどの断面の流れであるかを判別できない。そこで、観察位置を特定するための新たな可視化法を導入する。従来より、流れの一断面を観察する手法としては、

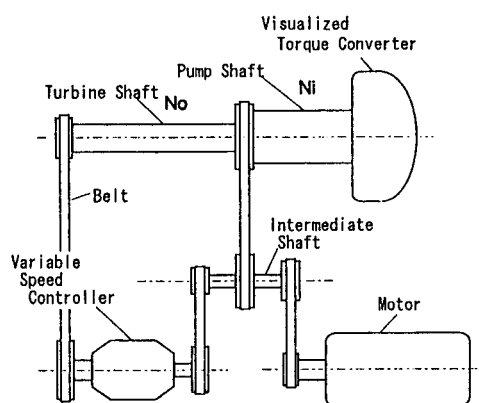


Fig. 5 Experimental apparatus.

Table 1 Experimental conditions.

Speed ratio	0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8
Pump speed	350 rpm
Stator speed	0 rpm
Oil temperature	30 degrees

薄い膜状のレーザ光を照射するレーザライトシート法 (LLS) がある。しかし、その方法をステータ翼間流れに適用するためには、トーラスの子午面に垂直方向の光のシートを実現する必要がある。そこで、Fig. 6に示すように、翼の一部を透明なアクリルに置き換えるとともに反射鏡を埋め込む構造を考案した。今回試作した可視化翼をFig. 7に示す。観察位置は埋め込む鏡の位置により決まり、翼端から翼幅の1/4, 2/4, 3/4の位置に鏡を埋め込み、各々の観察位置を、シェル側断面、中央断面およびコア側断面と呼ぶ。なお、観察位置により交換する必要から、可視化翼はカセット式とした。また、ポリスチレンなどの固体微粒子では軸受けなどでの障害が予想されたため、可視化用トレーサとしては微小気泡を注入し、羽根車の回転により攪拌する。

3.3 可視化結果

Fig. 8に速度比0.2の時の3つの断面における可視化写真を示す。観察領域は、鏡の向きと入射光

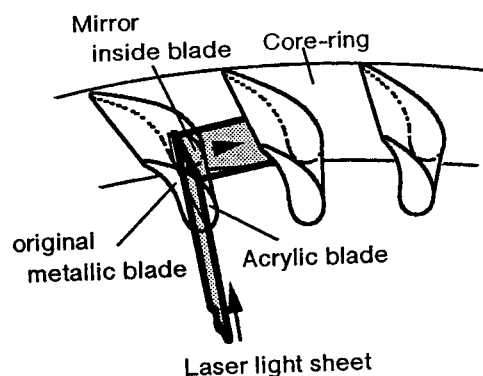


Fig. 6 Laser sheet lighting method.

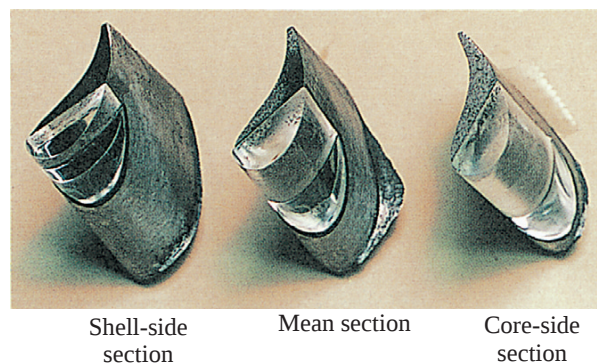


Fig. 7 Stator blade with mirror.

の方向で決まり、今回は負圧面側の翼前縁付近に限られる。各断面において翼前縁の負圧面の白い部分は剥離によりトレーサの微小気泡の停留が生じている部分であり、この方法により剥離の大きさを判断できる。Fig. 9は、 $e = 0, 0.2, 0.4$ の場合の3つの断面における剥離領域のスケッチを示す。 $e = 0, 0.2$ の場合、シェル側、中央断面の剥離領域はコア側より大きく、速度比の増加とともに小さくなる。すなわち、低速度比においては、コア側に比して、シェル側から中央断面にかけて大きな剥離が存在し、速度比の増加とともに小さくなるとともに、翼幅方向の剥離の大きさが一様になる。以上より、低速度比では中央からシェル側に偏った部分に流れの主流が存在することが推察できる。より詳細な流れ場は次章で考察する。

4. ステータ翼周り流速計測

4.1 LDV (レーザ流速計) の可視化装置への適用

ステータ翼周り流れの計測に使用したLDVは、He-Neレーザ (15mW) を光源とする後方散乱型一次元流速測定システム (TSI社製) であり、3次元トラバーサにより測定点を移動させる。サンプリングボリュームの大きさは $0.1 \times 0.1 \times 1.4\text{mm}$ の楕円体である。測定断面は、可視化と同様にFig. 4に示すシェル側、中央およびコア側断面の3断面である。同一測定点において直交する速度成分を測定し流れの向きと大きさを求めた。その際、2本のレーザビームが円筒状の亚克力製観察窓で

屈折するために交差角が変化して速度値と測定点位置に影響を与えるので、これに対しては幾何光学的な補正を行った。信号処理器としては、自己相関方式のDigital Burst Correlatorを用いた。一つの測定点におけるデ - タサンプリング数は1024で、パソコンにより時間平均速度や乱れ強さを計算する。なお、可視化の場合と同様に、測定に先立ってトルクコンバータ内に微量の気泡を注入し、羽根車の回転により攪拌することによってシード (光散乱用粒子) を得た。

4.2 流速分布測定結果

Fig. 10に、時間平均速度ベクトル $\bar{U}$ と乱れ強さ $\sigma (= \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)}/2, \sigma_x, \sigma_y; x, y$ 方向速度変動の2乗平均) の分布を示す。コア側の測定では、観察窓における屈折角が大きくなり測定誤差が大きくなる場合があるので、一部データを表示していない。

$e = 0.2$ の時、いずれの翼型でも、シェル側と中央断面で、負圧面の翼前縁より下流で乱れ強さが大きいという類似した流れ場を呈している。Fig. 8, 9に示した厚翼の可視化で観察された剥離は、Fig. 10の乱れ強さの大きい領域に対応しているので、剥離を乱れ強さの大きさから判断する事ができる。厚翼と薄翼の剥離の大きさはシェル側と中央で同程度であるが、板翼ではシェル側の剥離が中央よ

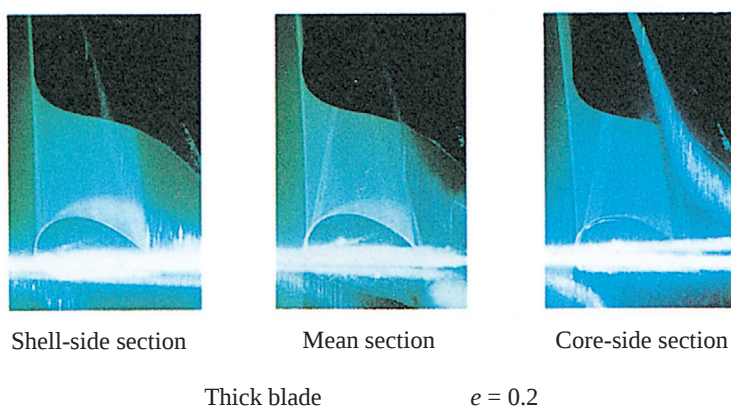


Fig. 8 Photographs using laser sheet lighting method.

— Shell-side section
 ---- Mean section
 --- Core-side section

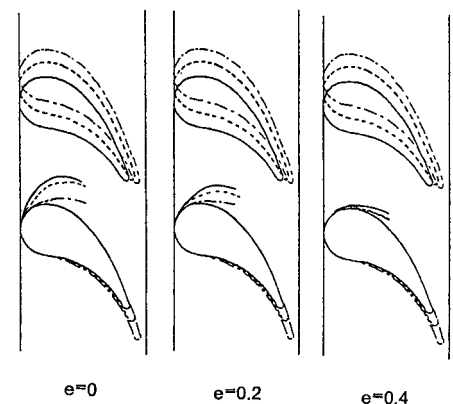


Fig. 9 Spanwise distribution of separation region.

り大きい。一方，コア側では，剥離領域は観察されない。乱れ強さが翼入口に比べ出口で大きくなっているのは，剥離によって生じた乱れが下流に拡散しているためである。流出角は，負圧面の剥離から大きな影響を受ける。その剥離の形態は2種類に分けられる。第1は，厚翼のシェル側に見られるように前縁から後縁にかけて剥離が連続す

る状態であり，流出角を羽根出口角より増加させる（角度の符号考慮）。第2は，板翼のシェル側に見られるように後縁付近で剥離が翼面に再付着する状態であり，流出角を羽根出口角より減少させる。すなわち，翼厚さの違いにより発生する異なった剥離形態により流出角が支配されている。

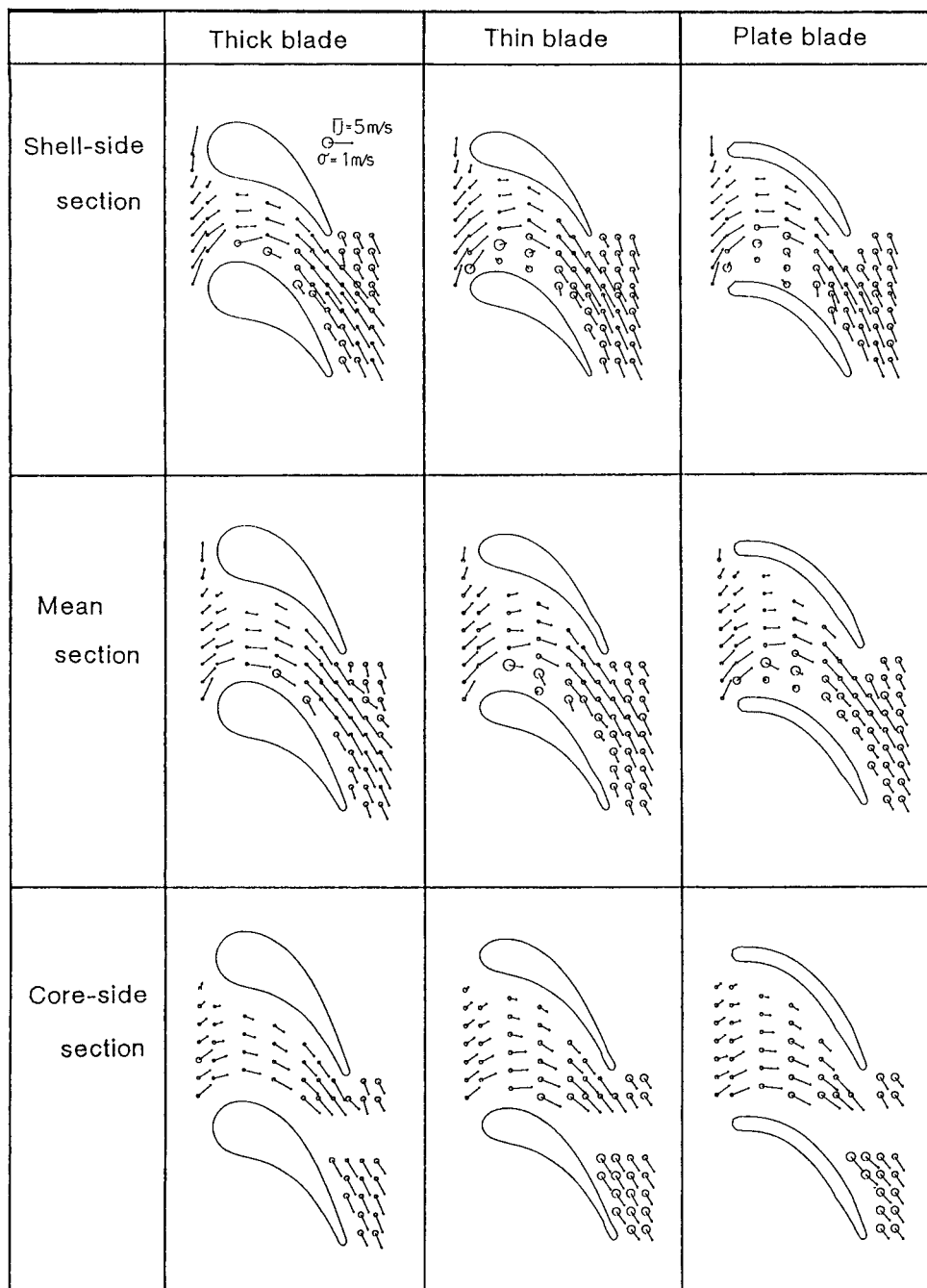


Fig. 10 Distribution of velocity vector and turbulence intensity, $e=0.2$

5. 容量係数特性と流れのメカニズム

5. 1 容量係数特性の考え方

第2章で容量係数特性は翼厚さにより大きく変化することを述べた。角運動量の法則によれば、羽根車が流体に与えるトルクは

$$T = \rho Q \Delta(r \cdot v_u) \quad (4)$$

で表わされる。ここに、 ρ : 流体の密度、 Q : 流体の体積流量、 $\Delta(r \cdot v_u)$: 翼出口と入口における絶対速度のモーメント $r \cdot v_u$ の差、 v_u : 流体の絶対速度の周方向成分。これを容量係数の式(3)の入力軸トルク T_i にあてはめると、出口角はポンプ翼に沿うとして、入口角はステータの流出角に相当するので、

$$\begin{aligned} T_i &= \rho Q [r_p^2 \omega_p - c (r_p \tan \alpha_p - r_s \tan \alpha_s)] \\ &= \rho A [c r_p^2 \omega_p - c^2 (r_p \tan \alpha_p - r_s \tan \alpha_s)] \end{aligned} \quad (5)$$

となる。ここに、 A : 流路面積、 c : 循環流速: 流体の絶対流速の子午面成分、 Q : 循環流量 = cA 、 r_p 、 r_s : ポンプ、ステータの出口半径、 α_p 、 α_s : ポンプ、ステータの出口羽根角度、 ω_p : ポンプ回転角速度。本報告では、前章で流出角を測定できたので、 α_s としてステータ出口羽根角度の代わりに流出角を採用する。ここで、ステータの翼厚さの影響を考える場合には、式(5)における変数は、循環流速 c とステータ流出角 α_s の2つになり、式(5)は

$$T_i = f(c, \alpha_s) \quad (6)$$

となる。式(5)より c と α_s に対する感度を求めると、

$$\partial T_i / \partial c > 0, \partial T_i / \partial \alpha_s > 0 \quad (7)$$

となり、循環流速 c およびステータ流出角 α_s (符号考慮) が大きいほど入力軸トルクは大きくなるので、その結果として容量係数も大きくなる。

5. 2 循環流量と流出角の翼幅方向分布

Fig. 10の中央断面のデータと同様な方法で測定したシェル側、コア側断面における流速と流出角のデータから、各断面上における循環流量と流出角を求める。各断面上におけるステータ出口での断面上循環流量 q_x [m²/s] を次式で定義する。

$$q_x = (\text{循環流速の翼ピッチ方向の平均値}) \times (\text{翼ピッチ}) \quad (8)$$

同様に断面上周方向 (翼ピッチ方向) 流量 q_y を定義し、断面上流出角 α'_s を次式で定義する。

$$\alpha'_s = \arctan (q_y / q_x) \quad (9)$$

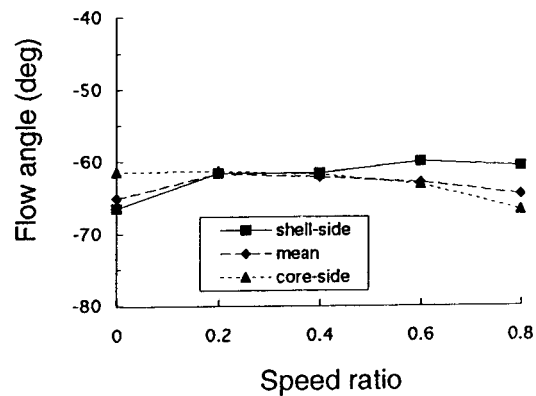
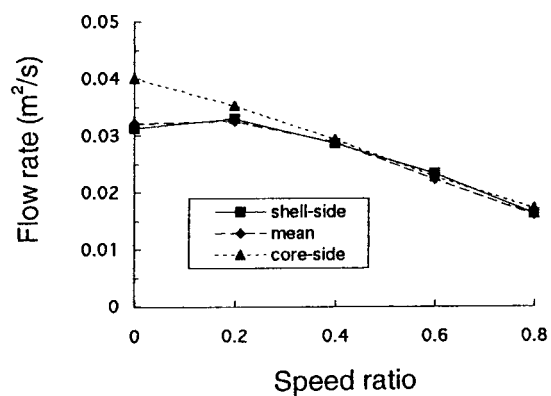
Fig. 11に、3つの翼形状について、シェル側、中央およびコア側の断面上循環流量および断面上流出角の速度比に対する変化を示す。各断面における循環流速と流出角の速度比に対する相対関係は、いずれの翼でも同じ傾向を示す。断面上循環流量は速度比の増加とともに同じ値になるが、厚翼、薄翼、板翼の順に同じになる速度比 (折点速度比と呼ぶ) がそれぞれ $e = 0.2, 0.4, 0.6$ と変化する。コア側では、板翼の $e = 0$ を除いて速度比に対し直線的に減少する。一方、シェル側および中央断面では、厚翼、薄翼、板翼の順に $e = 0$ からそれぞれ $e = 0.2, 0.4, 0.6$ まで平坦な分布を示し一定である。この部分では、Fig. 9の可視化結果およびFig. 10の流速分布測定結果より、負圧面に剥離領域が存在している。一方、コア側には剥離領域はいずれの速度比でも観察されない。

次に、断面上流出角については、コア側では速度比に対する変化が小さく、さらに翼形状による差も小さい。シェル側と中央断面では、 $e = 0$ から速度比の増加とともに増加し、ある速度比でコア側と一致する、その速度比は、厚翼、薄翼、板翼についてそれぞれ $e = 0.2, 0.4, 0.6$ である。これらの速度比は、先に述べた断面上循環流量が一致する折点速度比と対応している。

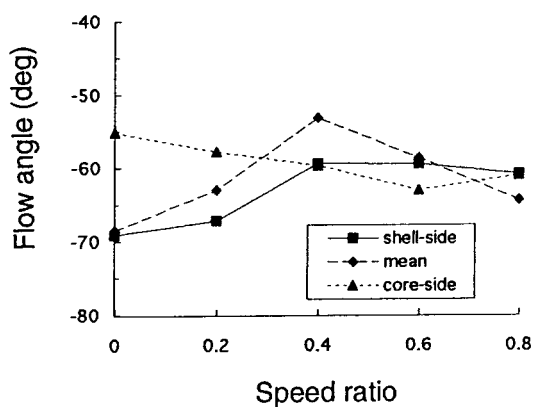
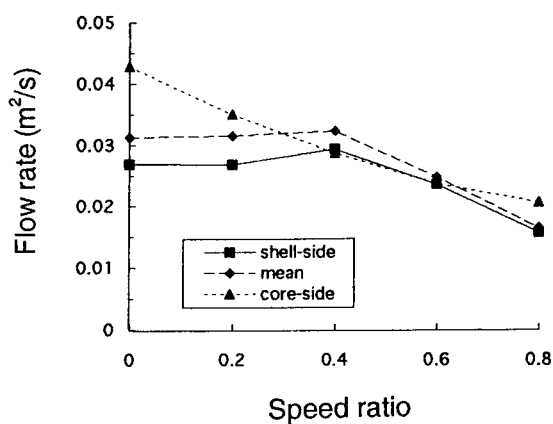
この状況を先の断面上循環流量および流出角の両者を合わせて考察する。コア側では、負圧面の剥離が速度比に係わらず小さいので、実効流路が絞られることもなくスムーズに流れるため、断面上流出角は一定で断面上循環流量は入出力軸差回転に対応する速度比に対し直線的に減少する。一方、シェル側と中央において断面上循環流量が平坦でかつ断面上流出角が増加する部分は、負圧面の剥離の存在およびその大きさの減少により発現するということである。剥離は $e = 0$ で最大であり、速度比の増加とともに折点速度比まで減少する。このとき剥離により実効流路が絞られるので、剥離が大きいほど断面上流出角は小さくなり剥離の減少とともに増加する。このとき、断面上循環流量はほぼ一定に保たれる。

5. 3 循環流量、流出角の翼厚による変化

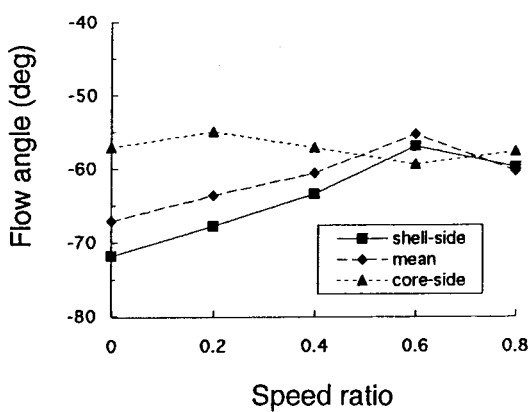
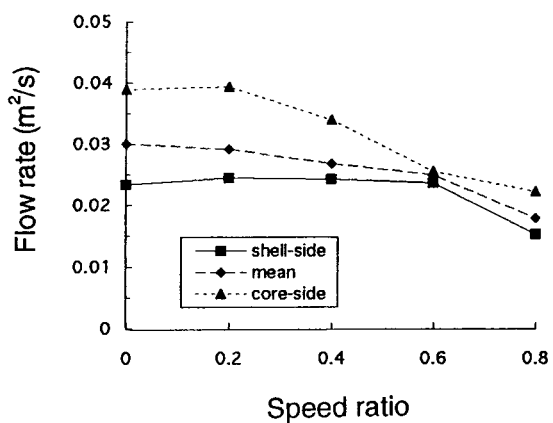
ここでは前節で求めた、3断面における断面上循環流量の積分により、全翼幅の半分にあたるシェル側 -



(a) Thick blade



(b) Thin blade



(c) Plate blade

Flow rate

Flow angle

Fig. 11 Spanwise distributions of outlet flow rate and flow angle.

コア側間の循環流量，流出角を求める。その方法は，
 先ず3断面の循環流量をシェル側 - コア側間で積分し
 循環流量 Q_x を求める。同様に，周方向流量をシェル
 側 - コア側間で積分して周方向流量 Q_y を求める。そ
 して，シェル側 - コア側間の流出角 α'_s を次式で算出
 する。

$$\alpha'_s = \arctan(Q_y/Q_x) \quad (10)$$

Fig. 12に3種の翼形状の循環流量，流出角を示
 す。Fig. 12より循環流量の特性がFig. 3に示した
 容量係数の特性と極めて類似していることに気付く。
 平坦な部分と右下がりの傾向および各速度比
 における翼厚による相対関係がほとんど同一であ
 る。一方，流出角は，速度比に対して多少右上が
 りの傾向を示し，式(7)と容量係数特性から予想

される特性とは逆の結果を示す。ただし，各速度
 比における翼厚ごとの相対的大小関係はFig. 3の
 容量係数特性における相対関係と同じである。

以上より，流出角は，循環流量とは逆の特性を
 示すが，容量係数特性には反映されないもので，そ
 の影響度合は循環流量より小さいと考えられる。
 したがって，翼厚による容量係数特性変化は循環
 流量により決定されることがわかる。

6. まとめ

トルクコンバータ内部を直接可視化できる装置
 を開発し，新しい可視化法およびLDVによる流
 速計測技術の適用により，ステータ翼厚が流れに
 与える影響を調べ，容量係数特性変化のメカニズ
 ムを流れの面から明らかにした。得られた結果を
 以下に要約する。

- (1) ステータ翼厚は効率，トルク比に比して，
 容量係数特性に大きな影響を与える。
- (2) 低速度比域において，負圧面でシェル側か
 ら中央部分にかけて存在する大きな剥離を直接確
 認できた。
- (3) 翼厚が小さくなるにつれて，剥離のシェル
 側への偏りが増加する。
- (4) 低速度比において，シェル側，中央および
 コア側断面上での循環流量，流出角は差があるが，
 翼厚ごとに異なるある速度比以上で同一になる。
 また，各断面の上記2者の値の速度比に対する相
 対的な大小関係は，翼厚にかかわらず同じであ
 る。
- (5) 上記低速度比における差は，負圧面の剥離
 状況の差に起因する。
- (6) 各翼厚ごとの循環流量，流出角を上記各断
 面上の循環流量，流出角から演算すると，循環流
 量は容量係数特性と極めて類似した特性を示した
 が，流出角はわずかに逆の特性を示した。
- (7) 以上より，翼厚による容量係数特性変化は，
 負圧面の剥離の差に起因する。そして，その剥離
 は循環流量および流出角を変化させる。このうち，
 循環流量が容量係数特性を決定する。

謝辞

本研究に際し，倉橋哲郎氏，吉田一徳氏および
 小澤忠夫氏の協力を頂いた。

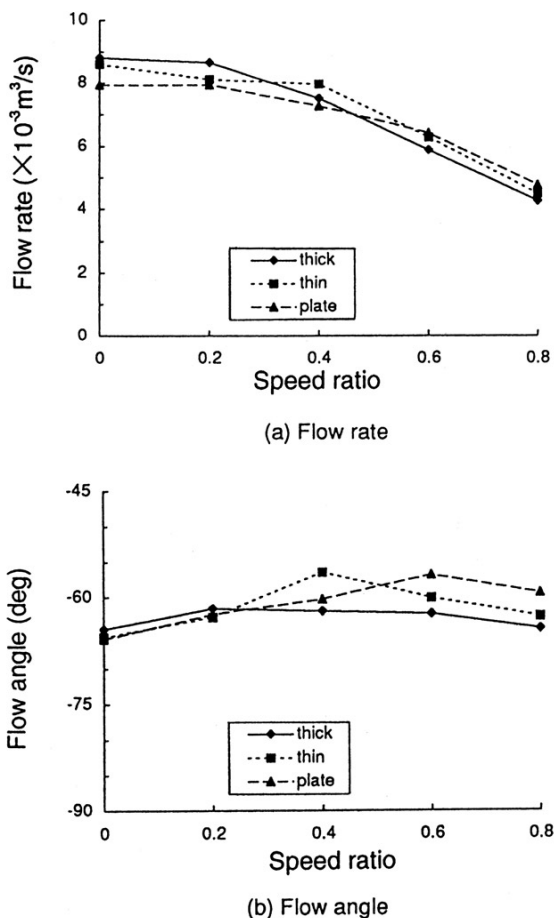


Fig.12 Distribution of outlet flow rate and flow angle
 in various thickness blades.

参考文献

- 1) Bahr, H. M., et al. : "Laser Velocimeter Measurements in the Stator of a Torque Converter", SAE Tech.Pap. Ser., No.901769(1990)
- 2) 久保賢明, ほか3名 : "トルクコンバータ内部流れ計測による性能予測法の改善", 自動車技術会学術講演会前刷集, 912(1991), 3.169
- 3) Numazawa, A., et al. : "An Experimental Analysis of Fluid Flow in a Torque Converter", SAE Tech.Pap. Ser., No.830571(1983)
- 4) 山田正俊, ほか3名 : "トルクコンバータ内部流れの解析 第1報 ステータ入口流速の測定", 昭和59年春季油空圧講演論文集, 73(1984)
- 5) 渡辺久志, ほか4名 : "トルクコンバータ内部流れの解析 第3報, ステータ翼周りの流れ計測", 平成4年春季油空圧講演論文集, 145(1992)
- 6) 山田正俊, ほか2名 : "トルクコンバータ・ステータの翼面流れ", 油圧と空気圧, 8-6(1997), 1 06
- 7) 山田正俊, ほか3名 : "トルクコンバータ・タービン流路内圧力分布の測定", 日本機械学会論文集(B編), 64-617(1998), 136
- 8) 渡辺久志, ほか3名 : "トルクコンバータのステータ翼周り流れの可視化と計測", 自動車技術会論文集, 26-4(1995), 136
- 9) Watanabe, H, et al. : "Flow Visualization and Measurement in the Stator of a Torque Converter", JSAE Rev. 17(1996), 25
- 10) Watanabe, H, et al. : "Flow Visualization and measurement of Torque Converter Stator Blades using a Laser Sheet Lighting Method and a Laser Doppler Velocimeter", SAE Tech. Pap. Ser., No.970680(1997)

著者紹介



渡辺久志 Hisashi Watanabe

生年：1952年。

所属：流体・トライボ研究室。

分野：流体動力伝達に関する研究・開発。

学会等：日本機械学会，自動車技術会会員。