

三次元数値流体計算の活用による 超偏平トルクコンバータの開発

Development of Super Sqaurshed Torque Converter by Applying Three-dimensional CFD

安部 浩也*
Hiroya ABE

丸山 徹郎*
Tetsuro MARUYAMA

坂藤 征利*
Masatoshi SAKATOU

要 旨

三次元数値流体計算による薄型トルクコンバータの内部流れ解析と、一次元角運動量理論をベースとした設計パラメータの最適化手法を構築することで、流体損失を軽減するトーラスと羽根形状を設計し、容量特性に大きな影響を及ぼすステータの仕様を最適化した。これによりトルクコンバータ性能を損なうことなく、量産では世界で最も薄型の超偏平トルクコンバータを開発した。

ABSTRACT

A method has been created to optimize design parameters using three-dimensional CFD to analyze the internal flow condition of a flat torque converter and one-dimensional angular momentum theory. This method has been used to design a torus and blade configuration which reduce flow loss and to optimize the specifications of the stator, which has a great effect on the characteristics of torque capacity factor. This has allowed development of the thinnest super sqaurshed torque converter for mass production in the world without sacrificing torque converter performance.

1. まえがき

近年、快適性と燃費向上を目的としたオートマチックトランスミッション(以下AT)の多段化、無段変速機化の動きが加速され、また衝突安全性の観点からATの軸寸法短縮のニーズも高い。これら要求に答えるには薄型かつ高性能を両立する超偏平トルクコンバータの開発が必要不可欠であった。

トルクコンバータの内部流れの解析に関し、内部圧力及びステータ周りの流れ分布の実測例報告⁽¹⁾⁽²⁾や、三次元数値流体計算を用いた特性予測結果⁽³⁾が報告されている。しかしながら超偏平トルクコンバータの開発にはトーラス断面の偏平化、ステータの薄型化により発生する性能低下の原因解析と、設計パラメータの最適化に要す開発期間の短縮が必要であった。

今回、三次元粘性数値流体計算による薄型トルクコンバータの内部流れ解析と一次元角運動量理論をベースとした設計パラメータの最適化手法を構築することで、流体損失を軽減するトーラスと羽根形状の設計、薄型ステータの

仕様を最適化した。この結果トルクコンバータ性能を損なうことなく、当社従来 2L エンジンクラス用のトルクコンバータに対し15%の軸寸法短縮、3%の伝達効率向上を達成し、世界で最も薄型の超偏平トルクコンバータを開発したので報告する。

2. 開発の課題

トルクコンバータを薄型に設計しようとする Fig.1 に示すように、トーラス断面の偏平化とステータの薄型化が主な設計制約となり、単体性能に以下のような影響を与えることが知られている。

- ① トーラス断面の偏平化による容量特性、伝達効率の低下。
 - ② ステータの薄型化にともなう山なりの容量特性の発生。
- ①は実車の燃費経済性に影響を与え、②はエンジントルク特性とトルクコンバータのトルク吸収特性のミスマッチにより、実車発進時のドライバビリティに影響を与えることがある。

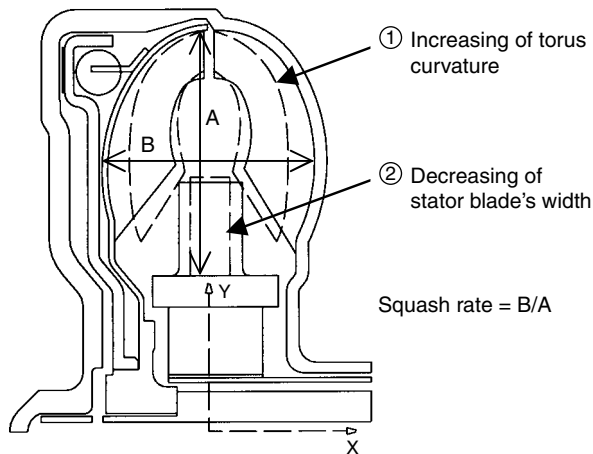


Fig.1 Restrictions on design process

3. 開発の目標

開発にあたり以上の技術的課題と AT 全体の軸寸法短縮のニーズを考慮し、以下の目標を定めた。

- ・容量特性、伝達効率を現行モデル同等以上とすること。
- ・トルクコンバータ全幅を現行モデル比 15%短縮すること。

これら目標の達成にはトーラス断面の偏平化とステータの薄型化が及ぼす単体性能の変化について、発生原因解析と定量的評価が必要であり、以下のような単体テスト、三次元粘性数値流体計算を行なった。数値流体計算ツールは離散化に有限体積法を用いる汎用コードを使用し、CFDの乱流モデルは標準 $k-\varepsilon$ モデル、解析アルゴリズムとしては SIMPLE 法を使用した。

4. トーラス断面の偏平化の影響

4.1. 単体性能確認

設計パラメータである流路面積、羽根角度、羽根枚数、バイアス角度、羽根出入口の半径は同一で、トーラス断面の偏平率のみ異なるトルクコンバータで単体性能確認を行なった。Table 1 にはトルクコンバータの主な仕様と測定条件を、Fig.2 には単体特性の実測値を示す。なお、Table 1 に示す Type A、Type B は従来の設計手法⁽⁴⁾に基づき設計されており、Type A は現行 2L エンジンクラス用として採用されているトルクコンバータである。

Fig.2 に示すように、トーラス断面の偏平率が 84%から 75%に減少するに従い、伝達容量係数 τ 及びトルク比 K が全速度比域で低下しており、伝達効率について約 7%の低下を確認した。

4.2. 数値流体計算によるトルクコンバータ内部の流れ解析 2 方程式モデルの一つである $k-\varepsilon$ モデルを解く事で求

Table 1 Torque converter specifications and test conditions

		Type A	Type B
Hydraulic diameter (mm)		232	
Number of blades	Impeller	27	
	Turbine	23	
	Stator	15	
Squash rate (%)		84	75
Stator blade's width (mm)		13.5	
Rotation speed of input shaft (rpm)		2500	
ATF temperature (°C)		85	

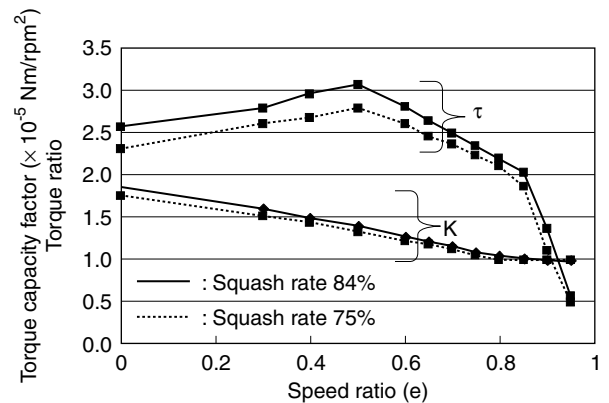


Fig.2 Influence of squash rate on torque converter performance

められる乱流エネルギー κ は、他の流体機械においては流体性能を低下させる剥離流や二次流れについて、実用上の目的に合致する精度で予測できることが知られている。そこでこの乱流エネルギー κ に着目し、偏平化にともなう特性変化の原因解析と定量的評価を行なうため、Table 1 に示す Type A と Type B のトルクコンバータについて運転頻度の高い速度比 $e=0.8$ における乱流エネルギー κ を計算した。この結果 Fig.3 の計算結果が示すように、偏平率が 84%から 75%に減少するのにもなう局所的な乱流エネルギー値の上昇を確認した。

さらに、Fig.3 に示す Type B の乱流エネルギー値が上昇している AA 断面について、流れの方向、流速を解析した。Fig.4の可視化例に示すように、乱流エネルギー値が上昇したタービンブレードの負圧側において二次流れが発生し、流速も低下していることがわかる。

またトーラス断面において、剥離、二次流れが増加する箇所を特定するため、Fig.5にオイルが循環する流路の長さ、と乱流エネルギーの関係を示す。横軸はオイルが循環する流路の全長と、ポンプ入口部から任意の場所までの距離の比を表す。Type A に対し Type B はタービン入口、タービン出口、ステータ入口及びポンプ入口で乱流エネルギーが上昇していることがわかる。

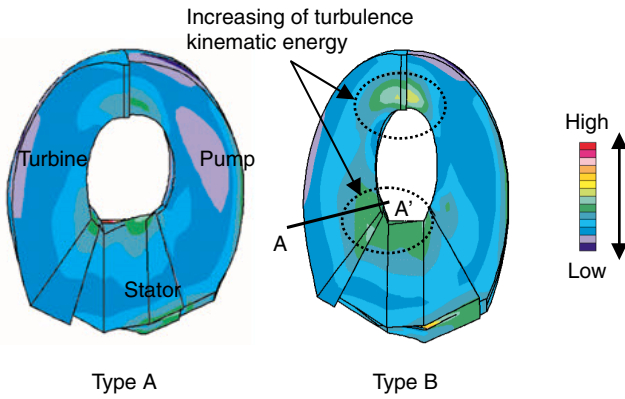


Fig.3 Calculation results of turbulence kinematic energy

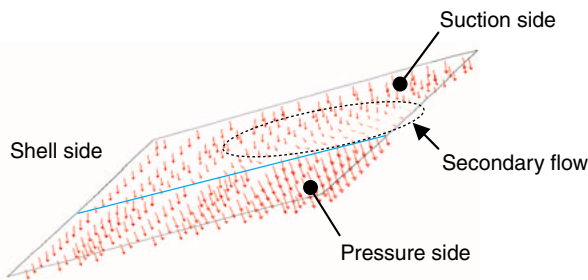


Fig.4 Flow visualization at section AA'

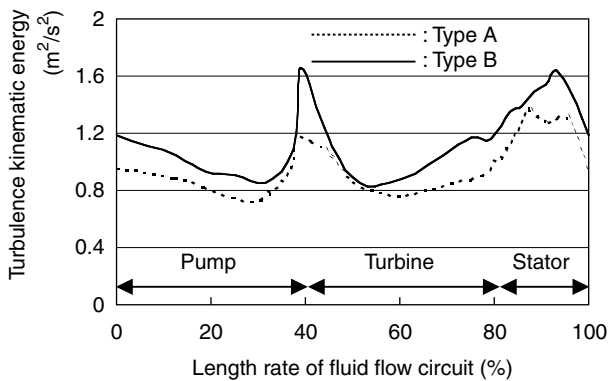


Fig.5 Relationship between turbulence energy and length rate of fluid flow circuit

以上の単体テストと数値計算によりトーラス断面の偏平化による容量特性、伝達効率の低下原因は、偏平トーラス断面の各ブレードの入口部周辺で発生する二次流れや剥離現象であり、乱流エネルギー κ の値により流体損失の定量的評価が可能であることを確認した。

5. ステータ薄型化の影響

5.1. 単体性能確認

Table 1 に示す Type A をベースに、ステータの翼幅のみを変化させて単体テストを行なった。トルクコンバータ

仕様及びテスト条件を Table 2 に示す。Type C のステータはType A のステータに対し羽根枚数が同一で、翼幅は軸方向に 2 mm 短縮しており、翼形状は翼幅の短縮率と同率で相似形に縮小している。Fig.6にトルクコンバータ特性の実測値を示す。ステータの翼幅が短縮した影響で、速度比 0.5 を中心に容量係数が増加、伝達効率が減少していることがわかる。

Table 2 Torque converter specifications and test conditions

	Type A	Type C
Hydraulic diameter (mm)	232	
Squash rate (%)	84	
Stator blade's width (mm)	13.5	11.5
Rotation speed of input shaft (rpm)	2500	
ATF temperature (°C)	85	

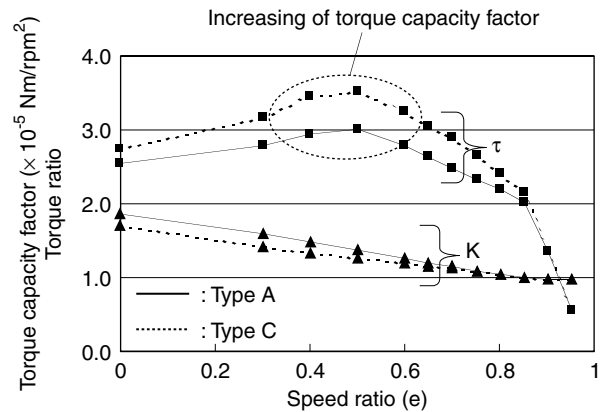


Fig. 6 Influence of decreasing of stator blade's width on torque converter performance

5.2. 数値流体計算によるステータ周りの流れ解析

前述の4.2.で用いた三次元数値流体計算を使用し、Table 2 に示す Type A と Type C について、容量変化のもっとも大きい速度比 0.5 におけるステータ周りの流れ解析を行なった。数値計算手法は前述の 4.2. と同様の手法である。ステータ周りの計算結果について、Fig.7 に示すようにステータのシェルとコアの中央にあたる一平面を取り出し、

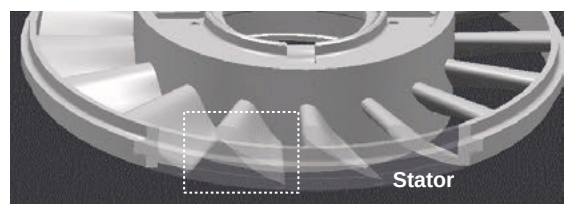


Fig.7 Visualization area

乱流エネルギーと速度ベクトルを表示したものがそれぞれ Fig.8 と Fig.9 である。

Fig.8 と Fig.9 から、Type A に比べ Type C のステータサクシオン面での乱流エネルギーは大きく増加しており、

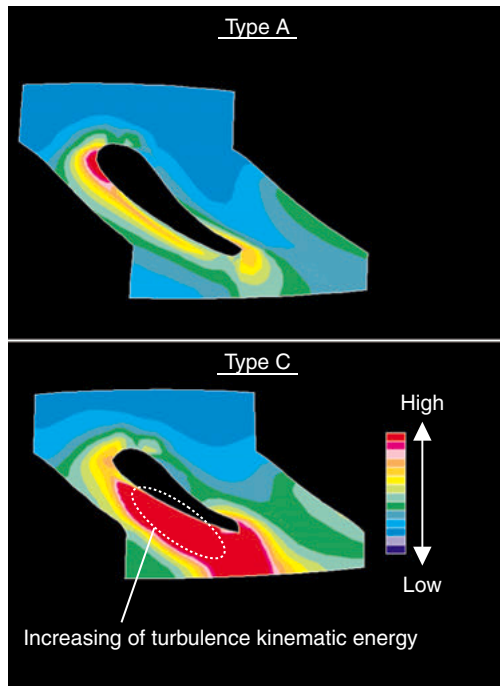


Fig.8 Calculation results of turbulence kinematic energy

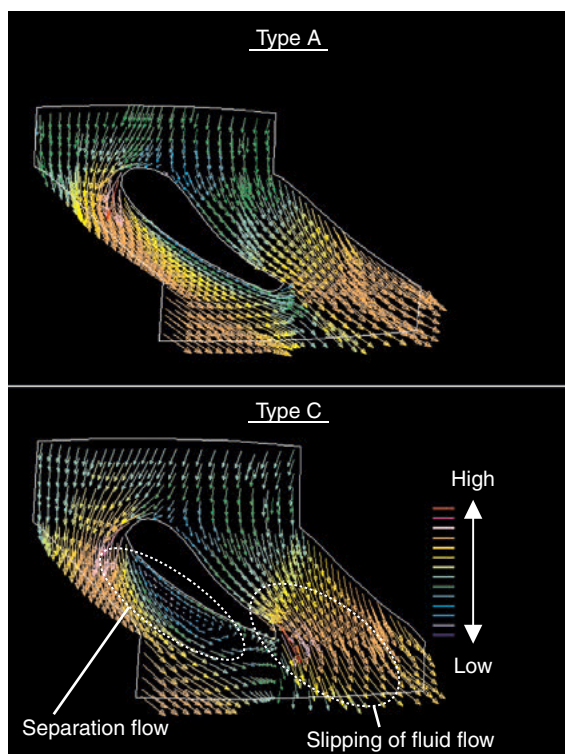


Fig.9 Calculation results of fluid velocity

Type C のステータサクシオン側では剥離現象が発生していることがわかる。さらに Type C のステータから流出されるオイル流がステータの設計出口角度に対し、ズレを生じて流出していることを確認した。一次元角運動量理論⁽⁴⁾からも、このステータ流出角度の変化がポンプに対し回転負荷を与え、結果的に伝達効率を低下させていることは明らかである。

以上の単体テストと数値解析により、ステータの薄型化に伴う山なりの容量特性の発生と伝達効率の低下は、ステータのサクシオン面で発生する剥離現象に誘発される流出角度の変化が主な原因であることを確認した。

さらに、トルクコンバータの各種設計パラメータを短時間で最適に設定する為に以下の手法を取り入れた。

6. 設計パラメータの最適化手法

実際にトルクコンバータを設計する際は、流路径、流路面積、羽根角度、バイアス角度、羽根枚数の膨大な設計パラメータの組み合わせについての検証が必要となる。計算格子生成、計算時間を考慮すると、全ての設計パラメータを三次元数値流体計算を用い検証するためには膨大な開発期間を要するため、偏平化の際に発生する内部流れの変化を反映した予測手法が必要不可欠であった。そこで一次元角運動量理論をベースとし、従来より弊社にて設計段階で活用されている簡易性能予測手法⁽⁵⁾⁽⁶⁾の更なる精度向上を図った。

この簡易性能予測法の中ではトルクコンバータ内部の損失は衝突損失と摩擦損失に分別され、トーラス断面の偏平化による二次流れ、剥離など流路内損失は摩擦損失 L_f として定義され、以下の式(1)で表現されている。式(1)の γ は比重量、 Q は循環流量、 h は損失ヘッドを表す。

$$L_f = \gamma \cdot Q \cdot h \quad (1)$$

さらに h は

$$h = \sum_{i=1}^3 h_i \quad (2)$$

$$h_i = \zeta_i \cdot \left[\frac{1}{2g} \right] \cdot \left\{ \frac{C}{\cos(\alpha_{i2})} \right\} \quad (3)$$

に分解される。

ここで、 ζ_i は損失係数、 g は重力加速度、 C は循環流速、 α は羽根角度、添え字 1・2・3 はそれぞれポンプ、タービン、ステータを示す。

ここで従来、過去のテストデータをもとに定義されていた損失係数 ζ_i に着目し、設計したトーラス断面ごとに三次元数値流体計算を行ない、計算結果であるポンプ発生トルク、タービン発生トルクをもとに ζ_i を補正するようにした。本手法を組み込みこんだ設計手順を Fig.10 に示す。

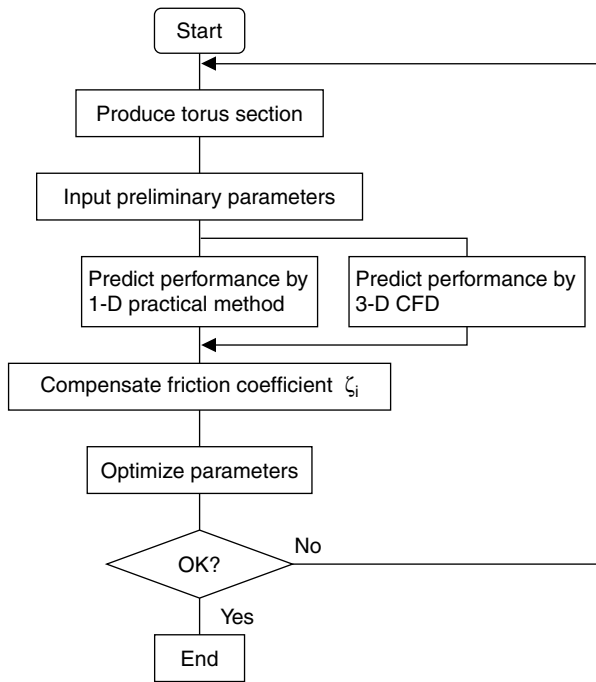


Fig.10 Summary of design process

7. 適用事例

解析から得た知見と Fig.10 に示す設計手順を用い開発された超偏平トルクコンバータについて述べる。Fig.11 に示す今回開発した超偏平トルクコンバータの偏平率は単体性能とトルクコンバータ全幅短縮目標を考慮し 65%とした。



Fig.11 Side view of developed torque converter

7.1. トーラス断面と羽根形状の設計

流体損失を軽減する目的で、ポンプとタービンの羽根角度、バイアス角度、羽根枚数、及び流路面積を最適化した。その効果度について、前述の Fig.5 で示した現行 2L エンジンクラスに採用されている Type A との乱流エネルギー値の対比を Fig.12 に示す。なお計算条件は Fig.5 と同様である。Fig.12 から明らかなように、新設計のトーラス断面

での乱流エネルギー値は現行モデルに対し流路全域にわたり減少しており、流体損失が軽減されていることがわかる。

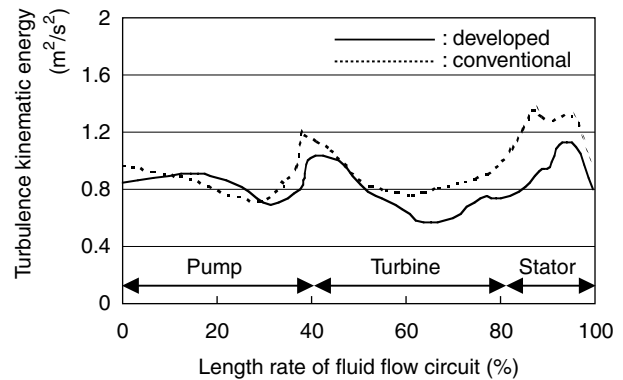


Fig.12 Relationship between turbulence energy and length rate of fluid flow circuit

7.2. ステータの最適化

薄型ステータのサクション面で発生する剥離現象にともなう流体のスリップを抑圧するため、Fig.13 のようにステータの羽根枚数、出入口角度、翼形状を新規に設計した。ステータの最適化により Fig.14 に示すように流体のスリップ現象は抑制され、フラットな容量特性を実現した。

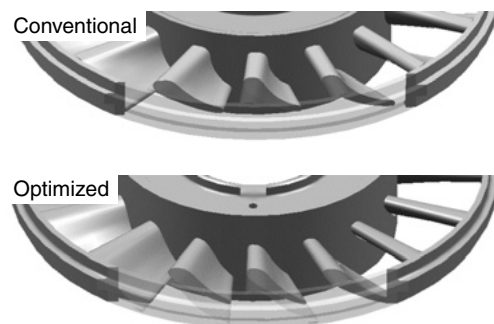


Fig.13 Comparison between conventional and optimized stator blades

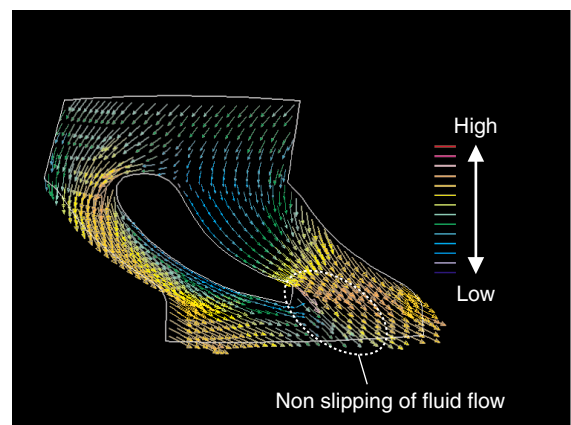


Fig.14 Calculation results of flow velocity around optimized stator

またトルクコンバータ特性実測の結果、本トルクコンバータの容量特性が現行モデルと同等であり、伝達効率も3%向上していることを確認した。

8. まとめ

単体テストと三次元数値流体計算により以下の内容が明らかになり、さらに一次元角運動量理論をベースとした設計パラメータの最適化手法を構築することで、トルクコンバータ性能を損なうことなく当社従来 2L エンジンクラス用のトルクコンバータに対し15%の軸寸法短縮を達成した。

- ① トーラス断面の偏平化による容量特性、伝達効率の低下原因は偏平トーラス内部で発生する二次流れや剥離現象であり、乱流エネルギー κ の値による定量的な評価が可能である。
- ② ステータの薄型化にともなう山なりの容量特性の発生と伝達効率の低下は、ステータのサクシオン面で発生する剥離現象に誘発される流出角度の変化が主な原因である。

最後に本トルクコンバータを共同開発していただいた(株)ユタカ技研の北嶋晃氏、斉藤潔氏及び関係者の方々、また(株)エフ・シー・シーの坪井彰氏、河村悟志氏及び関係者の方々に深く感謝の意を表します。

9. 参考文献

- (1) Klaus,B., Ronald,D.F., et.al.: The Flow Field Inside an Automotive Torque Converter: Laser Velocimeter Measurements, SAE Paper 960721
- (2) Watanabe,H., Kurahashi,T.: Flow Visualization and Measurement of Torque Converter Stator Blades Using a Laser Sheet Lighting Method and a Laser Doppler Velocimeter, SAE Paper 970680
- (3) Marco,C., Sreenadh,J.: Fluid Flow In an Automotive Torque Converter: Comparison of Numerical Results with Measurements, SAE Paper 950673
- (4) 石原智男ほか:流体伝動装置の設計, 東京, オーム社, p.29-37 (1967)
- (5) Abe,H., Miyoi,N., et.al.: Practical Simulation Method by Compensating the Outlet Flow Angle of a Stator, FISITA, p.16 (1996)
- (6) 安部浩也ほか:トルクコンバータにおけるステータ翼列流出角修正による簡易性能予測法, 自動車技術会, 学術講演会前刷集, No951, p.121-124 (1995)

■ 著 者 ■



安部 浩也



丸山 徹郎



坂藤 征利