

三次元数値流体計算を用いた ロックアップクラッチ作動応答性の解析

Analyzing Responsiveness of Lock-up Clutch
by Applying Three Dimensional Computational Fluid Dynamics

安部 浩也* 丸山 徹郎*
Hiroya ABE Tetsuro MARUYAMA
長谷川 幸一* 近藤 昇*
Kohichi HASEGAWA Noboru KONDOH

要 旨

トルクコンバータ内部のタービン油穴を、加速時と減速時のロックアップ作動性が両立するように正確に設定する為に、ロックアップピストンを含むトルクコンバータ全体を計算対象とした三次元数値流体計算を導入した。タービン油穴設定にともなう加速時におけるロックアップ作動遅れの原因がタービンシェル内面の圧力低下によるロックアップ締結圧力の減少であることを明らかにし、数値流体計算の活用によりロックアップ作動領域の拡大が可能になった。

ABSTRACT

Three dimensional Computational Fluid Dynamics is applied for the select of proper turbine holes with the torque converter. It has been analyzed that a lock-up delay during the accelation is caused by the decrease of lock-up operation pressure governed by the reduction of internal pressure. Consequently ,lock-up operation range has been successfully enlarged by the selection of proper turbine holes.

1. まえがき

燃費向上の観点から、オートマチックトランスミッション(以下AT)においては、トルクコンバータの伝達効率向上と共に、ロックアップクラッチ(以下LC)作動領域拡大のニーズが高く、LCをスムーズかつ確実に締結させる作動応答性向上技術が求められている。

従来より、車両減速時のLC作動応答性向上を目的に、タービン内周部に油穴を設定することで、トルクコンバータ内部で発生する旋回流をLCの油圧作動面に導く技術がある。しかし、加速時のLC作動応答性及び減速時のLC作動応答性を両立するタービン油穴の穴径、数、半径の設定は、テスト確認による部分が大きかった。これはトルクコンバータが回転する閉空間であるという構造的制約と、内部流れが極めて複雑であることから、LC作動応答性に関する体系的な要因解析ができなかったことによる。

過去において、トルクコンバータ内部圧力及び流れ分布の実測例報告¹⁾や、三次元数値流体計算による特性予測結果²⁾³⁾が報告されているものの、LC作動応答性に関して数値流体計算を用い解析した報告例は見受けられない。

今回、トルクコンバータ内部圧力の作用により発生するLCへの圧力干渉の存在に着目し、この圧力干渉を三次元数値流体計算を用い数値化することで、トルクコンバータの諸元と使用条件が及ぼすLC作動応答性への影響を明確にし、この結果タービン油穴諸元の最適化による、大幅なLC作動領域拡大に対応したトルクコンバータ開発の期間短縮が可能になったので報告する。

2. LC作動応答性へのニーズ

燃費向上の観点から、Fig.1に一例を示すLC作動領域は拡大する傾向であるが、LC作動領域拡大にともなう重要度を増したLC作動応答性向上のニーズとして、以下の2項目が挙げられる。

- ・ 加速時におけるスムーズで確実なLC作動応答性 (Fig.1の領域A部)
- ・ 減速時におけるスムーズで確実なLC作動応答性 (Fig.1の領域B部)

Fig.1に示すLC作動領域A及びB部において、トランスミッション内部の油圧制御装置からトルクコンバータへLC

作動油圧を供給後、LCの作動遅れが生じると、Fig.1の領域A部においては、エンジン回転数の上昇によるドライバビリティ及び燃費の悪化要因になり、領域B部においては、エンジンブレーキによる減速効果が減少する要因となる。

以上の通り、LC作動領域拡大に対応するLC作動性向上技術には、加速時と減速時のLC作動性両立が必要となる。

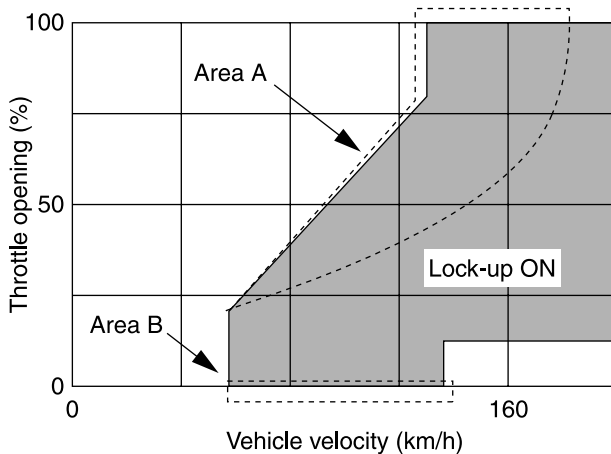


Fig.1 Operating range of lock-up clutch

3. 従来技術

3. 1. ロックアップクラッチの作動原理

Fig.2にロックアップクラッチの締結状態（以下ON）を示す。LCが締結を開始する場合、トランスミッション内部の油路切り替え手段により、オートマチックトランスミッションフルード（以下ATF）がFig.2に示すCポートから供給されることでLC締結側油圧が高まり、同時にAポートからATFが排出されることでLC解放側油圧が低下する。このときLCは締結側と解放側の油圧差（Supply pressure）により図の左方向に移動し、カバーに押し付けられることで締結を完了する。なお、トルクコンバータ内部の冷却を目的として、BポートからオイルクーラへATFが排出されている。

LC解放時（以下OFF）は、ATFがAポートから供給され、Bポート及びCポートから排出されることで、LCの解放側油圧が締結側の油圧より高まり、LCはFig.2において図の右側に移動し解除が完了する。

3. 2. タービン油穴設定上の課題

LC作動応答性向上に関し、減速時のLC作動応答性を向上させる目的で、Fig.3に示すようにタービン内周部に油穴を設定する従来技術がある。

このタービン油穴を設定した場合、以下の事象が発生することが従来より知られており、タービン油穴設定上の課題であった。

- ・ 加速時にLC作動遅れが発生する傾向となってしまう。
- ・ 加速時のLC作動遅れには、速度比（Speed ratio：タービ

ン回転数とポンプ回転数の比）に対し依存性があり、特に速度比0.8 - 0.9付近でのLC作動遅れが顕著となる。以上の事象を、単体テスト結果を用い具体的に説明する。

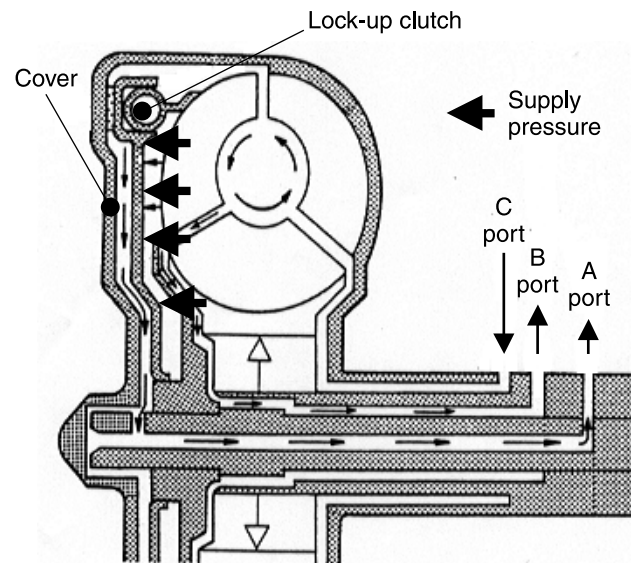


Fig.2 Operation of lock-up system

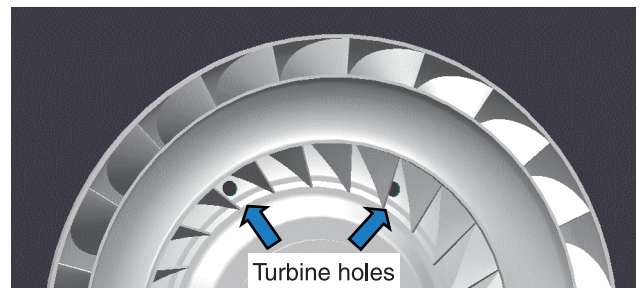


Fig.3 View of turbine holes

トルクコンバータの諸元をTable 1に、テスト条件をTable 2に、測定に用いた単体試験機をFig.4に示す。この単体試験機は外部から油圧回路を制御することによりLC締結と解放状態に切り替え可能であり、トルクコンバータに通じる各油路の圧力を任意に設定し、各油路の圧力を測定することも可能である。

Table 1 Torque converter specifications

Hydraulic diameter 232 (mm)	Turbine holes		
	Diameter (mm)	Number	Pitch diameter (mm)
With turbine holes	5	5	130
Without turbine holes	None		

Table 2 Test conditions for response time measurement

Rotation speed of input shaft (rpm)	2 850
Speed ratio	0.85 - 0.95
ATF temperature (°C)	85
Supply pressure (kPa)	150

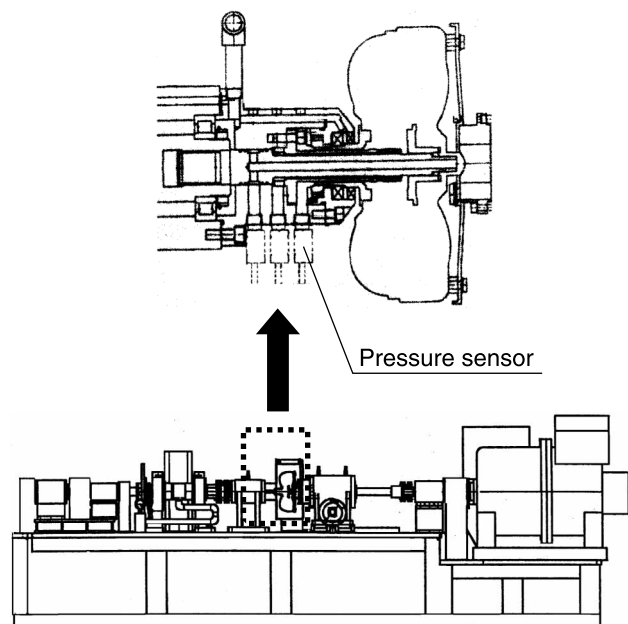


Fig.4 View of torque converter tester

単体試験機を用いての、タービン油穴がある場合とない場合の加速状態におけるLC応答時間をFig.5に示す。図5の横軸はLCを締結させる直前のトルクコンバータの速度比を示し、縦軸はLC作動油圧の供給からLCが締結を開始するまでの時間を示す。

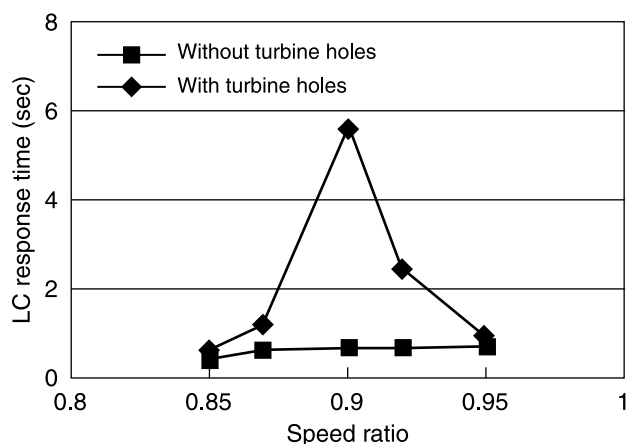


Fig.5 Influence of turbine holes

Fig.5に示すようにタービン穴の設定にともない、加速状態においてLC作動遅れが発生しており、速度比0.9付近でのLC作動遅れが顕著である。

さらにこのLC作動遅れは、トランスミッション内部の油圧制御装置からトルクコンバータへ供給されるLC作動油圧が一定の場合でも、トルクコンバータの諸元及び使用条件によって変化することが同様の単体テストからわかっている。また、トルクコンバータが回転する閉空間であるという構造的制約と内部流れが極めて複雑であることから、LC作動応答性に関する要因解析は極めて困難であった。

このため、LC作動領域拡大に対応したトルクコンバータの開発工数は膨大であり、トルクコンバータ開発の期間短縮には、LC作動応答性に関する体系的な要因解析と、トルクコンバータの設計段階で活用できるLC作動遅れの予測手法構築が必要であった。

4. 単体テストによるトルクコンバータ内部圧力変化の確認

まず、トランスミッション内部の油圧制御装置からトルクコンバータへ供給されるLC作動油圧を一定にした場合でも、加速状態において特定の速度比でLC作動遅れが顕著になることに着目し、以下のような単体テストにより各速度比ごとのトルクコンバータの内部圧力変化を確認した。

4. 1. テスト方法

Fig.4に示す単体試験機を用い、速度比の違いにより変化する各ポートの圧力変化を測定した。テストに使用したトルクコンバータはTable 1に示すテスト品と同一である。Table 3はテスト条件を示し、Fig.6は各速度比におけるBポートとCポートの圧力変化を示す。なお、トルクコンバータ内部で発生する旋回流の影響による内部圧力変化のみを測定する目的で、LCの締結側と解放側の油圧差(Supply pressure)を0とした。

Table 3 Test conditions for oil pressure measurement

Rotation speed of input shaft (rpm)	1 850
Speed ratio	0.40 - 0.95
ATF temperature (°C)	85
Supply pressure (kPa)	0

4. 2. テスト結果

Fig.6に示すように、速度比の増加にともないタービュンシェル内面につながるBポート圧は減少しており、また速度比0.85-0.95付近において、この圧力低下は最大となっている。またこの圧力低下領域は前述のFig.5に示すLC作動遅れの発生する領域とよく一致する。

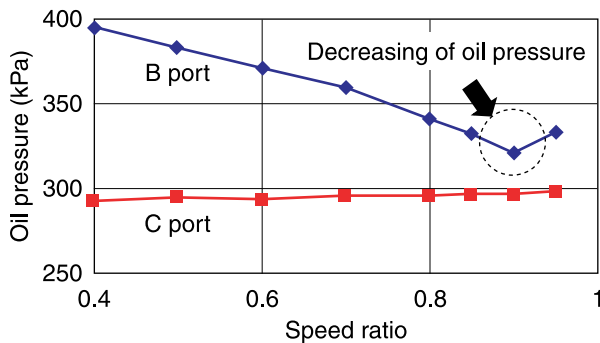
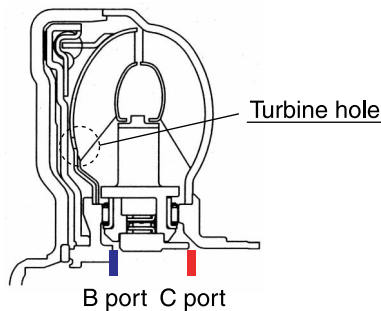


Fig.6 Relationship between speed ratio and oil pressure

以上の単体テスト結果から、タービンスェル内面の圧力低下により、LCを解放側に移動させる推力(以下OFF側推力)の増加することが、タービン油穴設定にともなうLC作動遅れの要因であると考えた。Fig.7に、トランスミッション内部の油圧制御装置から供給されるLC作動油圧によって発生するON側推力と、タービンスェル内面の圧力低下により発生するOFF側推力の方向を示す。

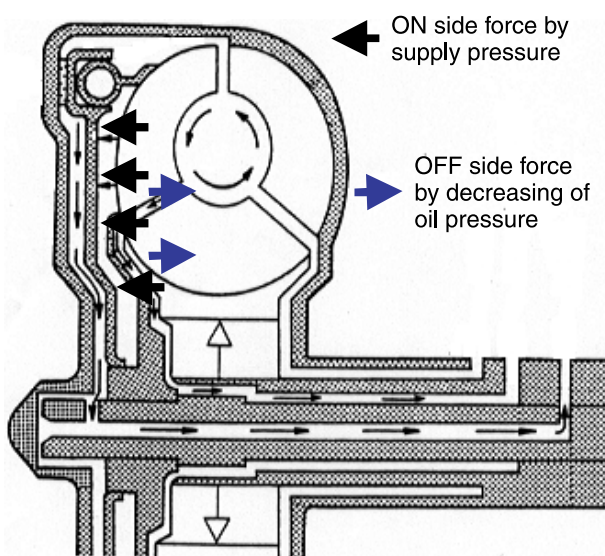


Fig.7 Factors of lock-up response time

5. 三次元数値流体計算によるLC作動遅れのメカニズム解析

さらに、タービン油穴設定にともなうLC作動遅れのメカニズム解明と、LCへのOFF側推力の数値化によるLC作動遅れ予測の可能性を検証するため、以下の項目について三次元数値流体計算を試みた。

- ・ タービン油穴設定にともなうOFF側推力の変化
- ・ 各速度比におけるOFF側推力の変化

5. 1. 計算手法の概要

LCへのOFF側推力を数値化するには、Navier-Stokesの回転座標系方程式を解くことでLCの締結側と解放側の圧力分布を把握し、LCに発生する推力を計算する必要がある。しかしながら、従来の計算手法²⁾³⁾は、トルクコンバータの特性予測を目的に、計算対象をポンプ、タービン、ステータのみとし、かつトルクコンバータを回転する閉空間としてモデル化している為、LCへのOFF側推力を把握できなかった。

そこで本計算手法では以下の2つの手法を導入することでLCへのOFF側推力の計算を可能にした。Fig.8に本計算手法に用いる計算格子の例と、2つの手法の反映箇所を示す。

- ① LC周辺及びATFの流入出部に対する計算格子の生成 (Fig.8のA部)
- ② 実機に近いATF流入出の再現と数値計算の収束性を考慮しての、ATFの流入・流出条件の付加 (Fig.8のB部)

計算ツールには、離散化に有限体積法を用いる汎用流れ解析コードStar-CDを用い、乱流モデルには標準 $k-\epsilon$ モデル⁴⁾、解析アルゴリズムとしてSIMPLE法⁵⁾を使用した。

なおLCへのOFF側推力は、Fig.8の例に示す計算格子を作成後、計算結果であるトルクコンバータ内部圧力のうちFig.9に示すLC締結側と解放側の圧力分布を抽出することで計算される。

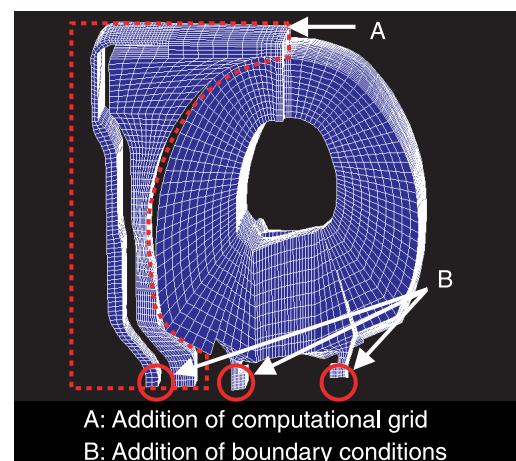


Fig.8 Sample of computational grid

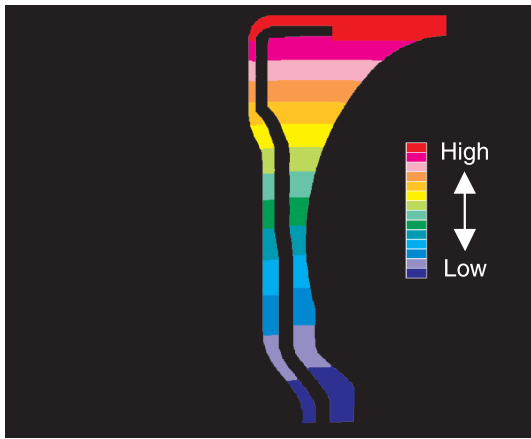


Fig. 9 Pressure distribution around LC

5.2. 計算結果

5.2.1. タービン油穴設定によるOFF側推力の変化

Table 1に示すタービン油穴無しとタービン油穴有りのモデルを作成し、LC作動遅れの差が顕著な速度比0.90についての内部圧力を計算した。結果をFig.10とFig.11に示す。またそれぞれのLCへのOFF側推力の計算結果をTable 4に示す。

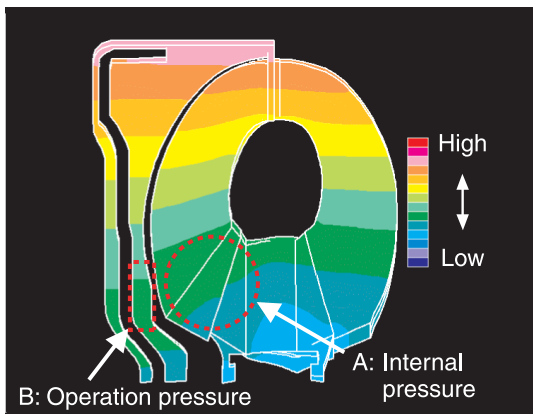


Fig.10 Pressure distribution of type without turbine holes

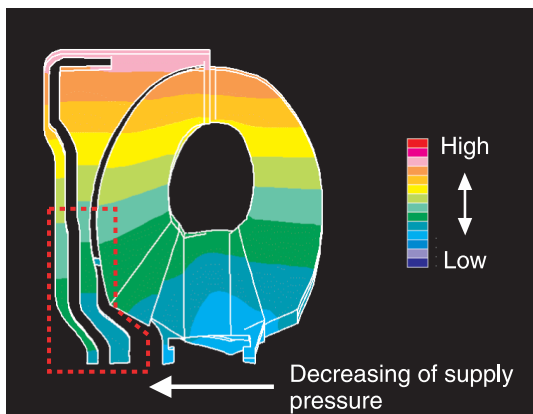


Fig.11 Pressure distribution of type with turbine holes

Table 4 Calculation results of LC OFF side force

Without turbine holes	156.4 N
With turbine holes	960.0 N

計算結果より、タービン油穴がある場合のOFF側推力がタービン油穴がない場合に対し約6.1倍となっていることから、タービン油穴の設定にともないOFF側推力が増加し、LC作動遅れが発生することが明らかである。また、Fig.10とFig.11の圧力分布計算結果より、加速時においてFig.10のA部(タービンシェル内面の圧力)がFig.10のB部(LC締結側圧力)より低いため、タービン油穴の設置にともないLC締結側の圧力が低下し、OFF側推力が増加してしまうことがわかる。

5.2.2. 各速度比におけるLCへのOFF側推力の変化

Fig.6の単体テストと同条件において、タービン油穴がある場合の、各速度比におけるLCピストンへのOFF側推力の計算結果をFig.12に、またこのときのBポートとCポートの油圧についての計算結果と実測値の比較をFig.13に示す。

Fig.12に示すように、同一入力回転数の場合、速度比が0.9付近においてLCへのOFF側推力は最大となっており、前述のFig.4に示す単体テストにおいてLC作動遅れが顕著となる速度比0.9と一致する。

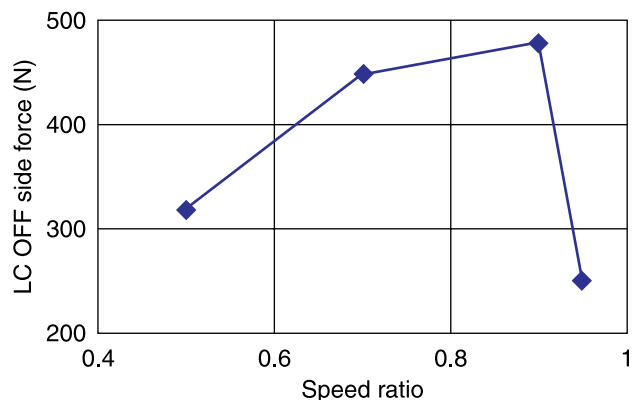


Fig.12 Relationship between OFF side force and speed ratio

さらに、Fig.13に示すように、BポートとCポートの油圧についての計算結果と実測値が良好な一致を示していることから、本計算手法は妥当であり、LCへのOFF側推力の数値化によりLC作動遅れ発生の予測が可能であることを確認した。

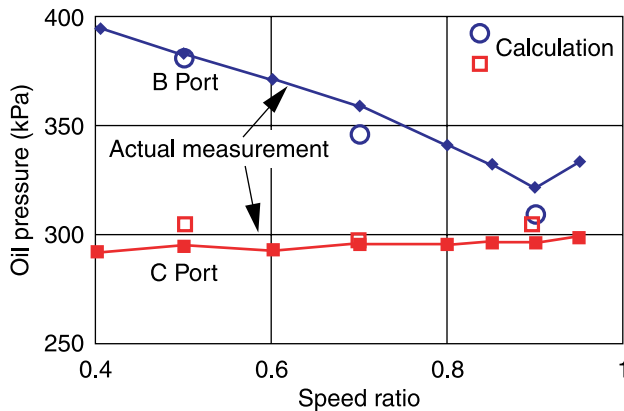


Fig.13 Comparison of oil pressure between actual measurement and calculation

6. 適用例

本数値流体計算の活用によるタービン油穴諸元設定の適用例を以下に示す。Table 5に単体試験機を用いた確認テスト条件を、またFig.14にテスト結果を示す。Table 5に示す速度比1.1はトルクコンバータの減速運転状態を示している。

Table 5 Torque converter specification and test conditions

Torque converter specification (Hydraulic diameter: mm)	232
Rotation speed of output shaft (rpm)	1 500 – 2 000
Speed ratio	1.1
ATF temperature (°C)	85

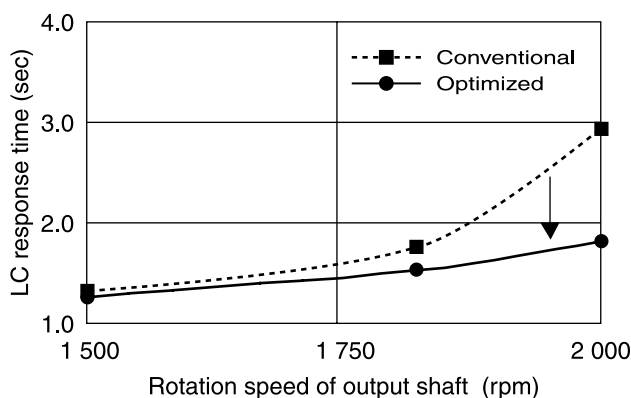


Fig.14 Effect of turbine holes optimization

Fig.14に示すように、タービン油穴諸元の最適化にともないLC作動応答性は大幅に向上しており、前述のTable 1に示す確認モードにおいて加速時のLC作動遅れが発生しないことも確認した。

この適用の例から本数値流体計算は、加速時のLC作動性と減速時のLC作動応答性を両立するタービン油穴諸元の設定に有効であることを確認した。

7. まとめ

LCを含むトルクコンバータ全体を計算対象とする三次元数値流体計算の導入によって、以下の内容が明らかになり、LC作動領域拡大に対応したトルクコンバータの開発期間短縮が可能となった。

- ① タービンスェル内面の圧力低下による、LCを解放側に移動させるOFF側推力の増加が、タービン油穴設定にともなうLC作動遅れの要因である。
- ② LCへのOFF側推力を数値化することで、トルクコンバータの使用条件、諸元により変化するLC作動遅れの予測が可能である。
- ③ 本数値流体計算は、加速時のLC作動応答性と減速時のLC応答性を両立するタービン油穴諸元の設定に有効である。

8. 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 (1996)
- 2) Marco, C., Sceenadh, J. F.: Fluid Flow in an Automotive Torque Converter: Comparison of Numerical Results with Measurements, SAE Paper, 950673 (1995)
- 3) Kubo, M., Ejiri, E.: A Loss Analysis Design Approach to Improving Torque Converter performance, SAE Paper, 981100 (1998)
- 4) Launder, B. E., Spalding, D. B., Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 3 (1974), 269-289
- 5) Patankar, S. V., Spalding, D. B., Int. J. Heat Mass Transf., 15 (1972), 1787-1806

■ 著 者 ■



安部 浩也



丸山 徹郎



長谷川 幸一



近藤 昇