

トランスミッションハウジングの剛性解析技術の構築

Development of Stiffness Analysis Technology for Transmission Housing

平岡昌巳*
Masami HIRAOKA
飯島康友*
Yasutomo IJIMA

富田好一*
Kouichi TOMITA
笹原千嘉江*
Chikae SASAHARA

鈴木 覚*
Satoru SUZUKI

要 旨

ハウジング合わせ面の挙動を再現することにより、トランスミッションのハウジング剛性及び強度のシミュレーション技術を開発した。本手法では、ボルト締結、ノックピンによる位置決め、ガスケット材を含む合わせ面の挙動とデフケースなどの内部部材の剛性について非線形のモデリング手法を用いて再現した。その結果、実機における挙動の予測精度が飛躍的に向上し、テスト結果との差異が15%以内となり、台上ねじり試験におけるハウジング剛性及び強度のシミュレーションによる評価が、設計段階で可能となった。さらにこのシミュレーション技術を広く設計者に普及させるため専用の解析プリ・ポストを開発し、計算工数を1/3に短縮した。

ABSTRACT

A technique was developed for simulating the stiffness and strength of the transmission housing by reproducing the behavior of the housing contact surface. This technique uses non-linear modeling methods to reproduce bolt tightening, positioning with dowel pins, the behavior of contact surfaces with consideration to gasket material and the stiffness of inner parts such as the differential case. The predictive accuracy regarding behavior in an actual transmission increased greatly as a result, and the discrepancy with test results fell to 15% or better. This made it possible to conduct evaluation by simulating the housing stiffness and strength in bench torsion testing at the stage of design. Specialized pre- and postprocessing tools were also developed for widespread dissemination of this simulation technique among designers, shortening the calculation time and labor to the amount of one-third of what it had been.

1. まえがき

近年の自動車用トランスミッション開発において、軽量化及びコンパクト化の要求とともに開発効率向上の要求が高まっている。開発効率向上には試作ロット数削減が重要であり、そのために実機事象の高精度な予測技術が求められている。トランスミッションのハウジング構造は、前輪駆動方式の場合、一般的に左右二分割で構成され、大きな合わせ面を介し駆動反力を受ける構造となる。また、ボルトによって締結された左右のハウジングには、それぞれ異なった方向の大きな駆動反力が作用するため、合わせ面にすべりを生じ、従来の線形解析では設計段階でハウジング剛性及び強度を高い精度で予測することが困難であった。そのため、多大な工数を費やして試作機によるテストの繰り返しを行ない、仕様を熟成する必要があった。

本研究では、合わせ面を有するハウジングアセンブリ

構造において、応用性に富んだ、高精度なハウジング剛性及び強度シミュレーション技術を構築することを目的とする。さらに、設計者への普及のため、専用の解析プリ・ポストを開発する。

2. 実機における挙動把握

今回用いたオートマチックトランスミッションの主断面を Fig. 1 に示す。Fig. 2 に軸配置と前進時におけるベアリング荷重を示す。トランスミッションハウジング(以下TMハウジング)とトルクコンバータハウジング(以下TCハウジング)の締結部は、大きな合わせ面を形成し、合わせ面を介した両側のハウジングにギヤ反力に起因するベアリング荷重が異なる方向に負荷される。個々のハウジングの変形挙動はハウジング本体の変形のみではなく、合わせ面の挙動が影響していると推定される。

ハウジングの変形挙動の把握をトランスミッション台ねじり試験により、最大負荷入力状態で行なった。供試トランスミッションの諸元を Table 1 に示す。ハウジングの第一の目的が軸受けの支持剛性であることから、各ベアリングの移動量を測定した。ベアリング端部にマークを施しカメラによりトルク負荷時の軌跡を記録した(Fig. 3参照)。ベアリングの移動量の測定結果を Fig. 4 に示す。TM ハウジングの各ベアリングの移動量は、荷重方向に関わらずデファレンシャルケース(以下デフケース)支持ベアリングの荷重方向へ移動している。このことから、ハウジング全体の挙動は、TM ハウジングのデフケースの支持ベアリング荷重が支配的であることがわかった。また、合わせ面の挙動について、ベアリング荷重の最も大きいデフケース支持ベアリング周辺のTM, TCハウジング間の相対変位を測定した(Fig. 5参照)⁽¹⁾。合わせ面挙動の測定結果を Fig. 6 に示す。デフケース両側のベアリング荷重により、デフケース周辺の合わせ面にすべりが生じており、推定どおりベアリング移動量に影響していることが確認できた。

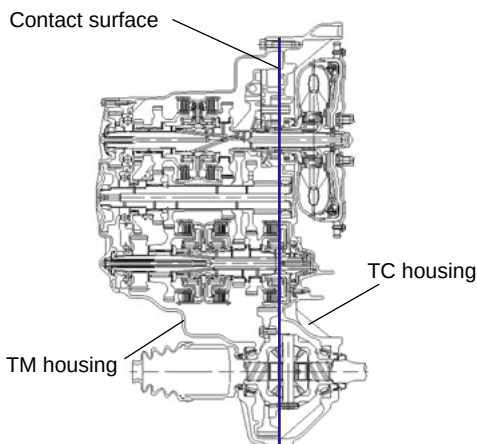


Fig. 1 Main section

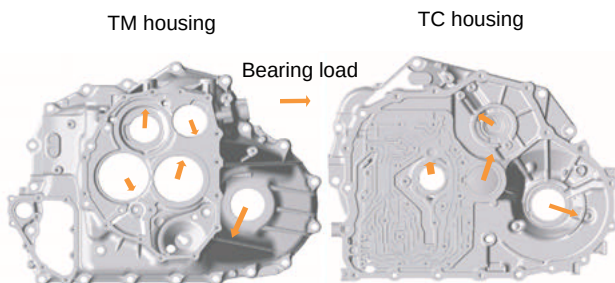


Fig. 2 Direction of bearing load

Table 1 Specification of transmission used in experiments

Type	Transmissible torque	Total gear ratio	Drive system
Type-A	196Nm	12.2	2WD

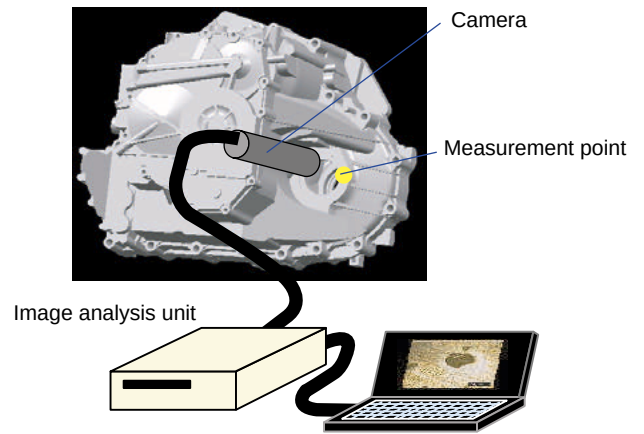


Fig. 3 Measurement method for displacement of bearing

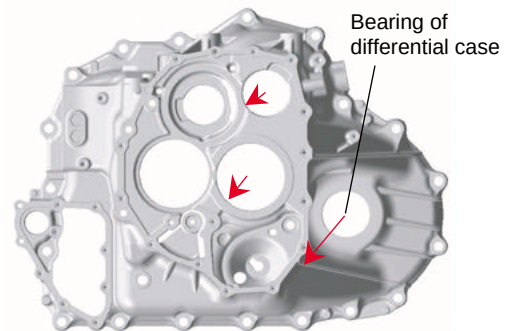


Fig. 4 Result of measurement of displacement of bearing

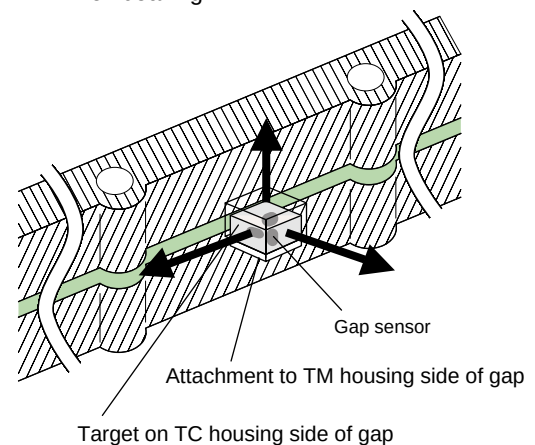


Fig. 5 Measurement method for slip behavior of housing

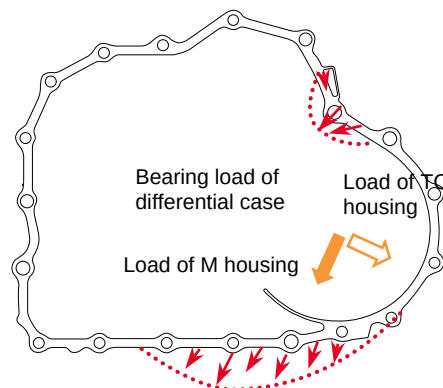


Fig. 6 Result of measurement of relative displacement of housing

3. 非線形モデリング技術の確立

実測したベアリング移動量について、従来の線形手法による計算との整合性比較結果を Fig. 7 に示す。大きく異なるポイントが存在し、十分な予測精度を有していないことがわかる。それらのポイントは、Fig. 8に示すように測定拘束基準面から合わせ面を介した反対側に位置し、合わせ面挙動の影響を受けている箇所と推定される。したがって、前述の実機における挙動把握の測定結果からもわかるように、合わせ面の挙動及びデフケースからの荷重入力を忠実に再現することが精度向上の重要な要素と考えられる。それらの実機挙動を忠実に再現するために、非線形手法を導入した。モデリングを行なった項目についてFig. 9に示し、以下詳細に述べる。

3.1. 合わせ面挙動の再現

合わせ面のすべり挙動は、ボルト締結によって締め付け

部直下と中間部に面圧差を生じ、さらにその面圧により生じる摩擦力を上回るせん断外力が負荷された場合、発生すると考えられる。せん断外力は、ハウジングにおいて荷重が負荷されるベアリングからリブや壁面によって締結フランジ部へ伝達されるため、形状によってもそのすべり挙動は影響される。また、ハウジング間に設定される位置決め用のノックピンやボルト自体もすべり挙動を拘束すると考えられる。すなわち、合わせ面の挙動を忠実に再現するには、締結による面圧分布、合わせ面のすべり挙動、ハウジングの荷重伝達経路を忠実に再現することが重要となる。面圧分布を再現するために、ハウジングをそれぞれ別々のモデルとし、その間を圧縮テストにより求めたガスケット材の特性を考慮し、軟らかい接触特性を用いて面接触要素でつないだ(Fig. 10参照)。ボルト締結は、ハウジングのボルト座面部とネジ部を多点拘束によりモデル化し、軸力を負荷した。面圧分布の精度検証は、単体のテストピースで行なった。テストピースと検証結果を Fig. 11 に示す。ガスケット材の

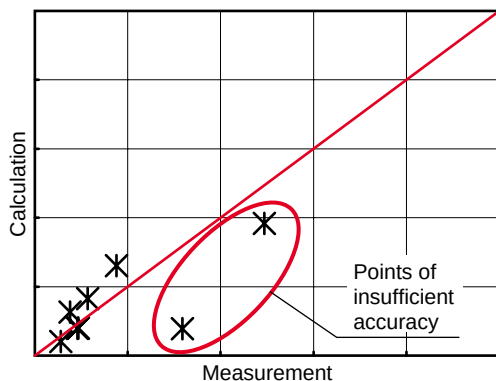


Fig. 7 Comparison of bearing displacement with linear method

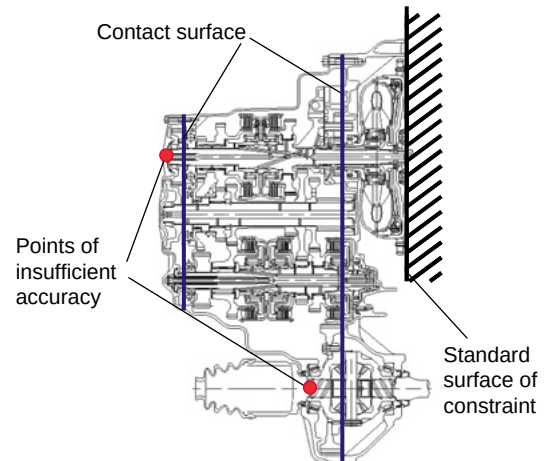


Fig. 8 Point of insufficient accuracy

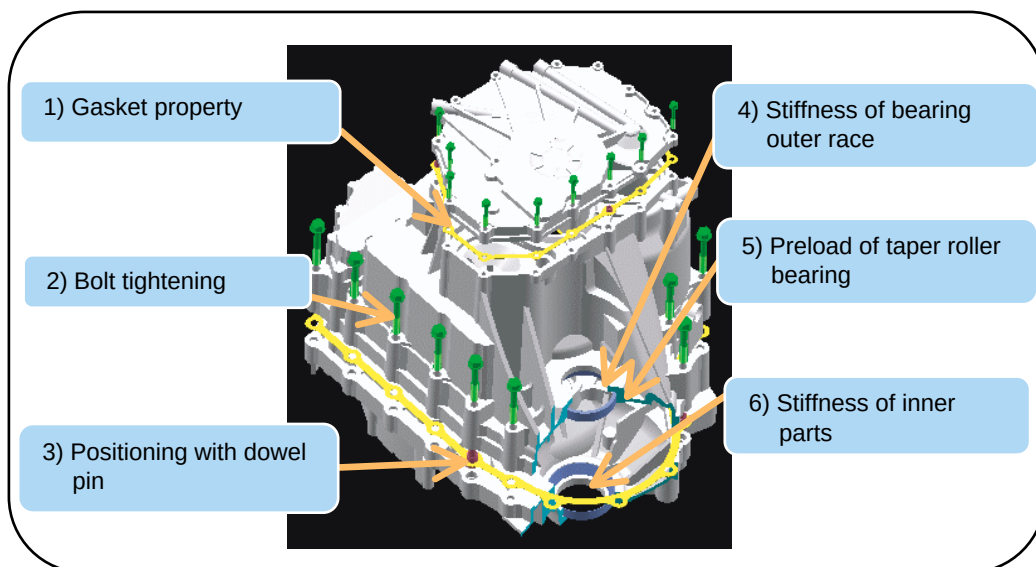


Fig. 9 Items reflected in FE model

特性は軟らかい接触特性を用いることにより、面圧分布を再現することができることがわかった。次に合わせ面のすべり挙動を再現するために以下のモデリングを行なった。ガスケット材のすべり摩擦係数を実測し、ばらつきの中央値を用いて摩擦係数を設定した。ノックピンによる位置決

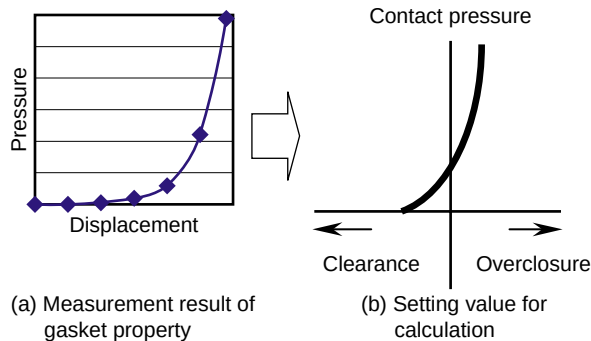


Fig. 10 Softened contact property of gasket

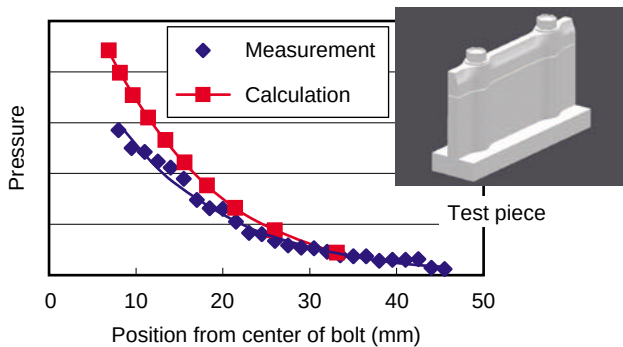


Fig. 11 Comparison of pressure in test piece

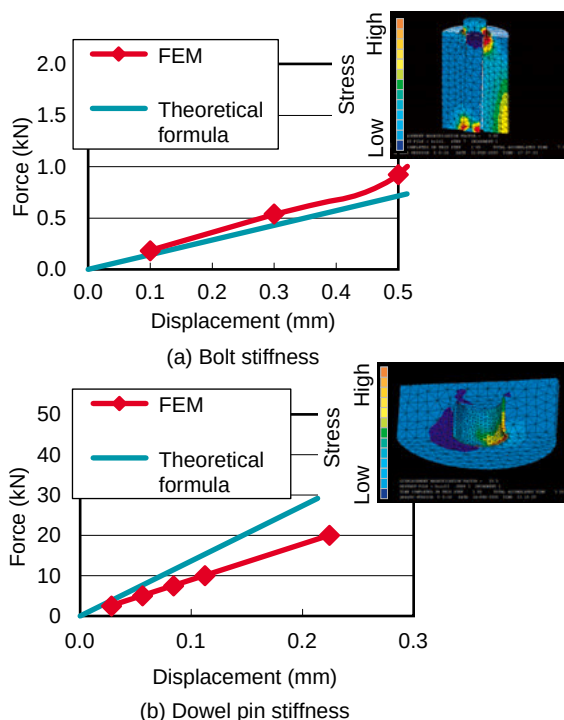


Fig. 12 Verification of stiffness of spring element

めについては、ガタを有する非線形スプリング要素を設定し、ボルトの曲げ剛性は、線形スプリング要素でモデル化した。スプリング要素のバネ定数は、梁の曲げ理論式で算出した。その妥当性を非線形接触 FEM 解析で確認した(Fig. 12 参照)。

3.2. デフケースからの荷重入力形態の再現

デフケースからの荷重入力については、ベアリング部のアウターレース部を実形状でモデル化し、ハウジングとの間を面接触要素でつなぐことにより、ハウジングへの荷重入力形態を再現した。ベアリングがテーパーローラタイプの場合は、プリロードを考慮した。また、デフケース自体をビーム要素でモデル化し、計算時間の増加を抑えつつ、内部部材による剛性を考慮可能とした(Fig. 13 参照)。Fig. 14 に全体のメッシュモデルを示す。

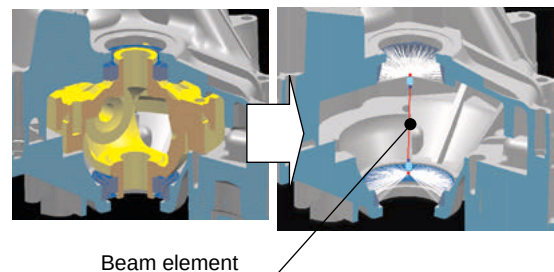


Fig. 13 Modeling of stiffness of differential case

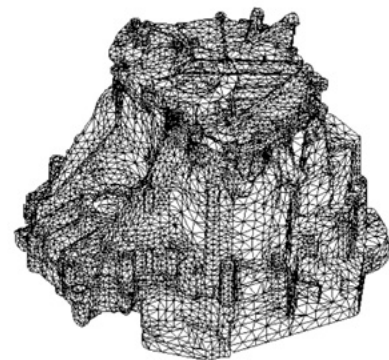


Fig. 14 FE model of transmission housing

4. シミュレーション解析精度の向上

非線形モデリング手法と従来の線形手法とのシミュレーション結果の違いを Fig. 15 に示す。非線形モデリングでは、合わせ面の挙動や内部部品の剛性が再現されたことにより、ハウジング全体の変形量が大きく変化した。また、デフケースからの荷重入力形態を再現することにより、ベアリング近傍において、荷重方向と反対側に引張応力が生じるといった実機と異なる応力状態が改善された。このシミュ

レーション結果と、台上ねじり試験における実測値との整合性検証を行なった。合わせ面のボルト締結による面圧分布の整合性比較結果は、Fig. 16に示すようにボルト締め付け部直下と、締め付けの中間部とも良い一致が得られた。次に、合わせ面のすべり挙動について、トルク負荷時の実測値を Fig. 17 に示す。摩擦現象に起因する非線形履歴を示しており、ガスケット材のすべり特性は、実機ハウジングの合わせ面において、摩擦理論によるモデリングで再現可能であることが確認できた。合わせ面のすべり挙動の整合性結果は、Fig. 18に示すように実測値とシミュレーション結果は良い一致が得られた。ハウジングを伝達してきたせん断外力と合わせ面の摩擦力とのバランスによって生じるすべりを十分再現していることから、合わせ面挙動の再現性が確認できた。ベアリング移動量の整合性結果を

従来の線形手法と合わせて Fig. 19 に示す。合わせ面挙動が再現できたことにより、ベアリング移動量の実測値との差異が15%以内となり、従来の線形手法に対し精度向上が確認できた。

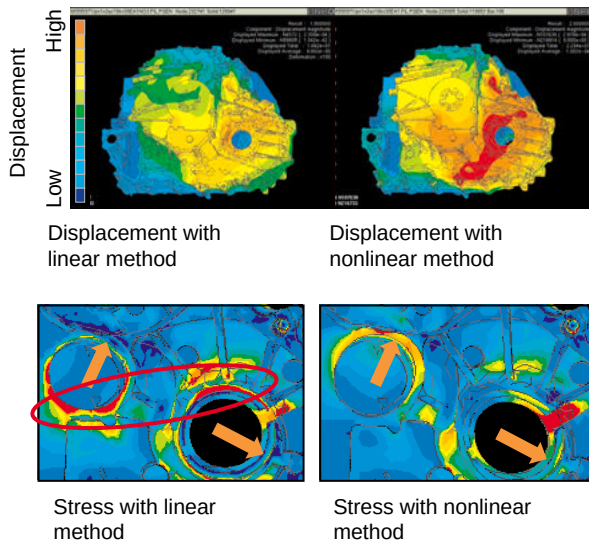


Fig. 15 Comparison of calculation methods

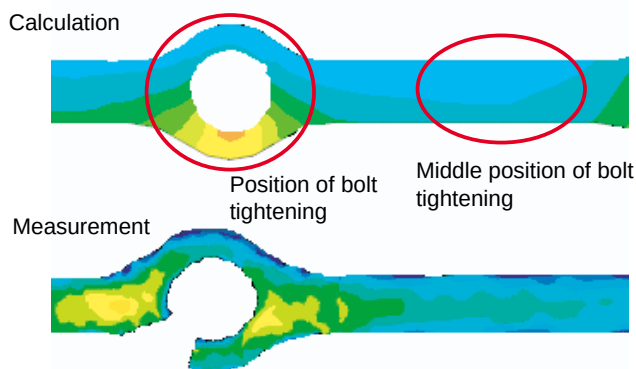


Fig. 16 Comparison of pressure in transmission housing

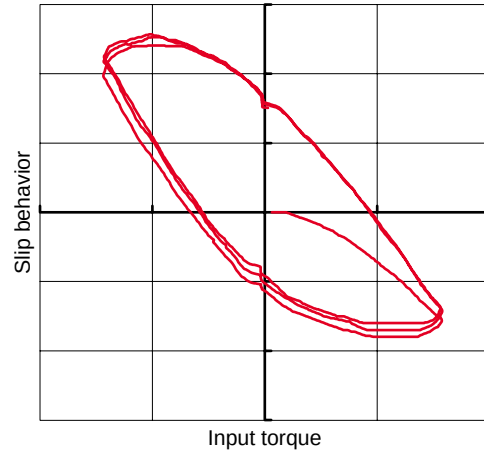


Fig. 17 Result of measurement of slip behavior

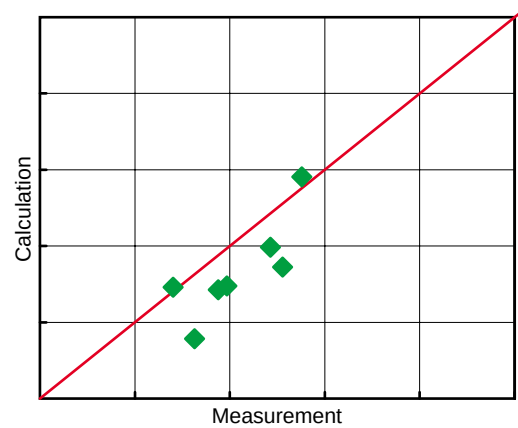


Fig. 18 Comparison of slip behavior

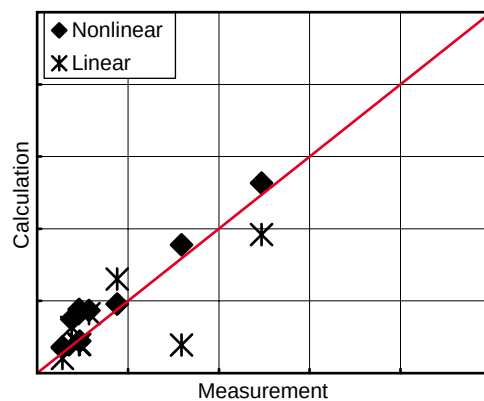


Fig. 19 Comparison of bearing displacement

5. 応用性検証

本シミュレーション技術の応用性を確認するため、ハウジング形状や荷重入力経路、負荷トルクの異なる他の機種について実測値との整合性検証を行なった。比較した対象機種の諸元を Table 2 に示す。ベアリング移動量の整合性結果を Fig. 20 に示す。また、強度についても、同様の整合性検証を行なった(Fig. 21 参照)。図からわかるように良い整合性が得られ、トランスミッションのハウジング剛性及び強度のシミュレーションとして十分な応用性を有することが確認できた。ここで、内部部材の剛性の影響について考察する。ベアリング移動量について、各機種における内部部材の剛性の有無によるシミュレーション結果と実測値の比較結果を Fig. 22 に示す。図中、内部部材の剛性を考慮していないシミュレーション結果を見ると、右側のタイプほどベアリング移動量が大きくなり、入力トルク負荷に対しハウジング剛性が低いと考えられる。右側の3タイプ(Type-F, B, E)において内部部材の剛性のないシミュレーション結果と実測値は、明確な差異があるが、内部部材の剛性を考慮することで良い一致が得られた。ハウジング剛性が低いと考えられる機種ほど内部部材の剛性の影響が顕著に表れ、それらを考慮することが実測値との整合性確保のために必要であることが確認できた。剛性を考慮した内部部材としては、前述のデフケースのほかに3箇所のベアリングで支持されているシャフトも必要であることがわかった。

Table 2 Specification of transmission used in comparison

Type	Transmissible torque	Total gear ratio	Drive system
Type-A	196Nm	12.2	2WD
Type-B	196Nm	12.0	4WD
Type-C	315Nm	12.1	4WD
Type-D	196Nm	11.7	2WD
Type-E	196Nm	15.5	2WD
Type-F	196Nm	14.4	2WD

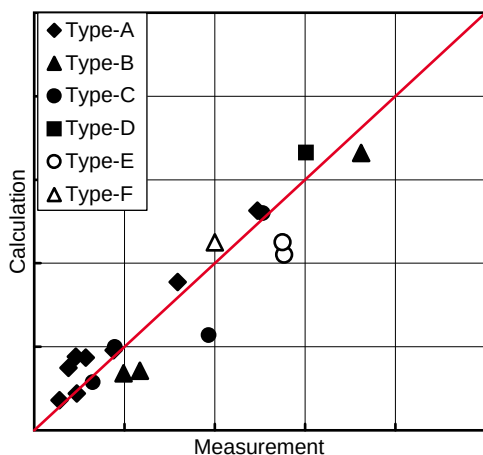


Fig. 20 Comparison of bearing displacement

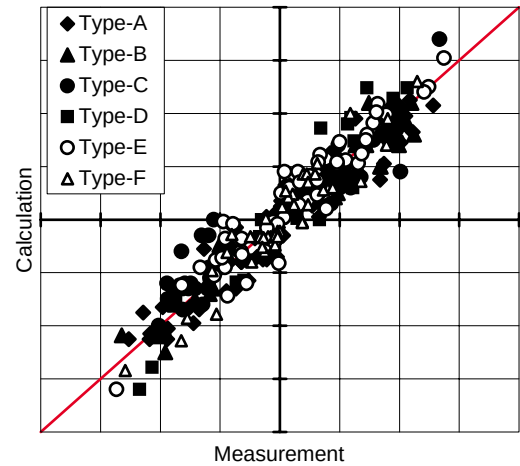


Fig. 21 Comparison of stress

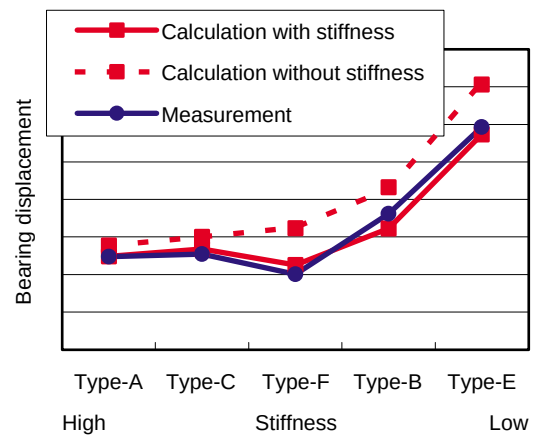


Fig. 22 Influence of stiffness of inner parts

6. 設計ツールの開発

6.1. シミュレーションツールの開発

これまでに開発してきたシミュレーションを設計段階で広く使用するために、3D CAD システム上で稼動する専用の解析プリ・ポストツールを開発し、接触部とボルト締結部の定義を自動化した。その結果、計算工数が1/3に短縮され、十分な実用性を確保できた(Fig. 23 参照)。

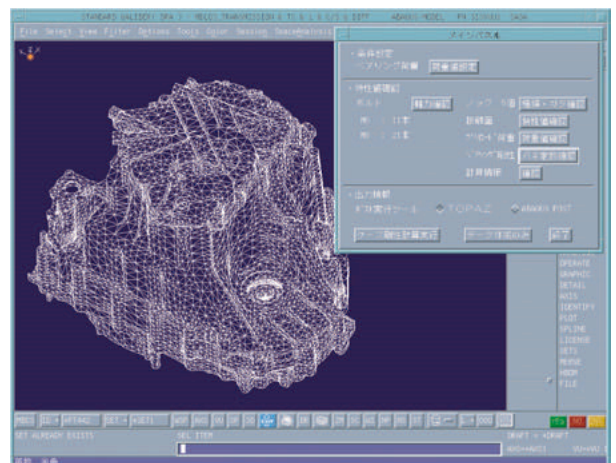


Fig. 23 Simulation tool

6.2. 適用事例

本ツールの適用事例として、大型横置オートマチックトランスミッションでのハウジング形状検討例を紹介する。TM ハウジングの形状を変更し、剛性及び強度を向上させた効果が、設計段階で定量的に評価できるようになった (Fig. 24 参照)。

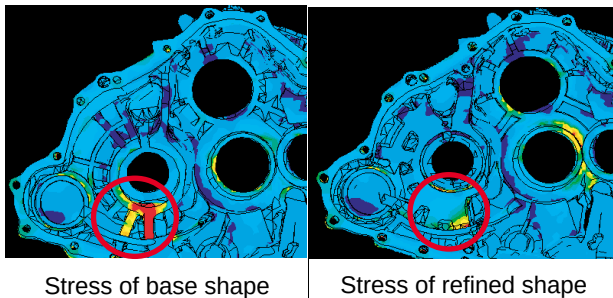


Fig. 24 Application example

7. まとめ

合わせ面を有するハウジングアセンブリ構造において、実機における挙動の検証から以下の要素について非線形モデリング手法を用いて再現することにより、応用性に富んだ、高精度なハウジング剛性及び強度のシミュレーション技術が構築できた。その結果、シミュレーション結果とテスト結果との差異が15%以内となり、台上ねじり試験でのハウジング剛性及び強度の評価が設計段階で可能となった。

- (1) 合わせ面挙動の再現として、ガスケット材の特性、ボルト締結、ノックピンによる位置決め
- (2) デフケースからの荷重入力 of 再現として、デフケースの内部部材としての剛性、ベアリングアウターレース剛性、テーパローラーベアリングのプリロード

また、広く設計者に普及させるために、本シミュレーション専用の解析プリ・ポストのツールを開発し、計算工数を1/3に短縮し、実用化をはかった。

8. 謝辞

本研究のシミュレーションツール作成にあたり、様々な機能構築、運用に多大なご協力を頂いた日本システム技術社の関係者の方々に深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 櫻原 一雄ほか：鋼板製オイルパンにおける液状ガスケットのシール性解析, HONDA R&D Technical Review Vol.10, p.106-112 (1998)

■ 著 者 ■



平岡昌巳



富田好一



鈴木 覚



飯島康友



笹原千嘉江