

軸受外輪クリープによるハウジング摩耗量の予測技術

Technology for Prediction of Housing Wear due to Outer Ring Creep under Bearing Load

長 副 やよい*
Yayoi NAGASOE

和久井 茂 晴*
Shigeharu WAKUI

前 吉 雄 太*
Yuta MAEYOSHI

要 旨

自動車用変速機に用いられる軸受の外輪が回転することによって発生するハウジングの摩耗量について、予測する手法を新たに開発した。本手法では軸受外輪のクリープ挙動をシミュレートするため3D動解析を採用した。解析で求めた軸受外輪に発生する面圧、クリープ距離、および単体試験機により測定した比摩耗量から摩耗量を算出した。変速段ごとに摩耗方向が異なるため、荷重方向を考慮して摩耗量を合算した。予測した摩耗量は実機耐久試験の結果と高い相関性が得られた。精度の高い摩耗量を予測することで、設計の早い段階からハウジング摩耗を抑制する仕様の検討が可能となる。

ABSTRACT

A method for the prediction of the amount of wear occurring to the housings of automotive transmissions due to the rotation of the outer rings of the bearings has been newly developed. The method employs a 3D dynamic analysis in order to simulate the creep behavior of the outer rings of the bearings. The amount of wear to the housing is calculated based on the contact pressure and creep distance of the outer rings of the bearings determined by analysis and the specific wear rate measured in a unit wear test. Because the direction of wear differs for each shift stage, the amount of wear is totalized with consideration of the direction of load. Predictions of the amount of wear to housings display a high level of correlation with the results of durability tests. The high-accuracy prediction of the amount of housing wear makes it possible to study specifications for the control of housing wear from an early stage of the design.

1. まえがき

近年の自動車用変速機には、さらなる燃費向上技術の要求が高まり、電動化やワイドレンジ化をねらった多段多軸構造となり、レイアウトが複雑化する方向にある。さらに、軽量コンパクト化も求められ、限られた空間に密集して配置されるために隣接する軸間は短縮傾向にある。

各軸の転がり軸受は、アルミ鋳造製のケースのハウジングにかん合される (Fig. 1)。軽量コンパクト化を目的に転がり軸受の小型化やケースのハウジングの剛性を下げた場合に、軸受の外輪がハウジングに対して回転し、ハウジングのかん合部を摩耗させることがある。この摩耗をハウジング摩耗と呼び、軸の支持位置にずれが生じるため、ギヤのミスアライメントとなり異音や耐久性が懸案となる。

これまでハウジング摩耗の抑制には、外輪の面圧等の指標で対応を検討してきた。しかし、軸受径やハウジングのレイアウト等を見直してもトライアンドエラーとなる場合があり、短期開発の課題であった。

ハウジング摩耗の予測指標に対して、複雑化する構造への対応や精度向上の要求が高まっている。

摩耗の原因となる軸受外輪の回転する現象を外輪クリープと呼び、発生メカニズムや影響分析に対する研究は多数報告されているが⁽¹⁾⁻⁽³⁾、摩耗量の予測についての報告例は見当たらない。

本稿では、設計検討段階から実用に足るハウジング摩耗量の予測手法を開発したので報告する。

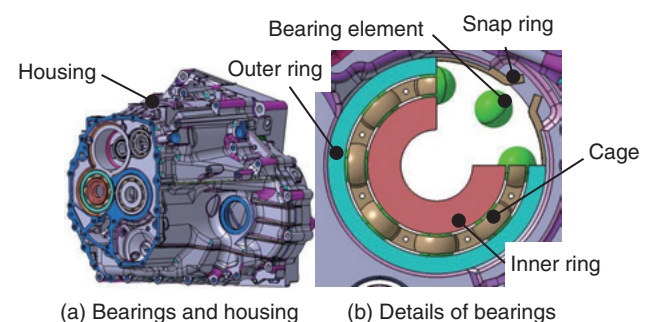


Fig. 1 Bearings

*四輪 R&D センター

2. 軸受外輪クリープによるハウジング摩耗

軸を支持する軸受の外輪は、室温ではハウジングかん合部に圧入され拘束されているが、実働時は温度が上昇し鉄とアルミの熱膨張差で隙間が生じ、外輪は周方向に拘束されなくなる。摩耗の原因となる外輪クリープは、内輪と同一方向に外輪がハウジングに対しゆっくりした速度で回転する現象である。

そのメカニズムは展ら⁽¹⁾によると、転動体が転がりながら外輪を強く押し付けたことによる外輪表面の弾性変形に起因すると説明している。寺本ら⁽³⁾により CAE モデルと実機によるクリープ再現の確認がおこなわれ、軸受に関連する因子についてクリープへの寄与度が述べられている。

ハウジング摩耗は軸受外輪が荷重方向にハウジングの内壁に押し付けられながら、クリープによりハウジングに対し滑ることで発生する。Fig. 2 に示すようにハウジング摩耗は軸受の荷重方向に進展し、摩耗量は直径の変化量で表される。軸受の外輪は鋼材製で高い精度で研磨されているために面粗度も良く、試験終了後でも寸法や表面の状態の変化はない。一方、ハウジングはアルミ鋳造製であり、摩耗はハウジング側だけで発生する。ハウジング摩耗の進行速度は 1000 時間で数百 μm 程度のゆっくりとしたペースである。そのため、摩耗面は凝着することなく滑らかな状態にある。発生する摩耗粉は沈殿することなく油中に浮遊し、肉眼で特定はできないほど微細である。

試験中の摩耗量の推移は Fig. 3 に示すように、試験の進

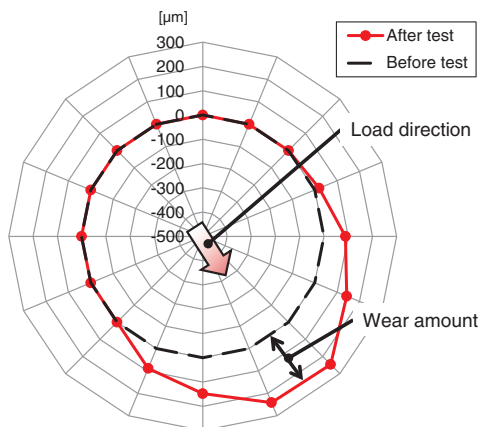


Fig. 2 Housing wear profiles

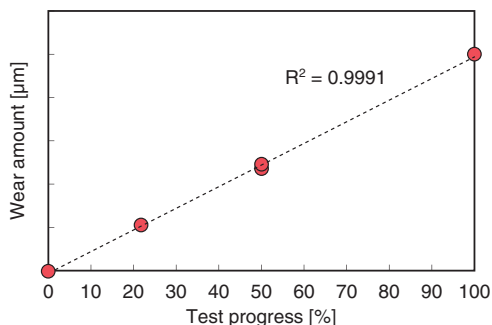


Fig. 3 Progression of housing wear in durability test

度に対して比例関係にある。このことから、ハウジング摩耗量は試験中の摩耗に関係する因子の累積量に高い相関性があると推測される。本手法では、この考えに基づき摩耗の因子を適切に累積することで、摩耗量の近似算出を試みた。

3. 開発のねらい

摩耗に関係する因子は、摩擦面の面圧とすべり距離であり、一般的に摩耗量は以下の式 (1) で表される⁽⁴⁾。

$$W = k \cdot P \cdot V \cdot t \quad (1)$$

W : 推定摩耗量

k : 比摩耗量⁽⁵⁾

P : 軸受外輪面圧

V : クリープ速度

t : クリープ時間

本稿では、以下の式 (2) に置き換える。

$$\begin{aligned} W &= k \cdot P \cdot L \\ &= k \cdot P \cdot l \cdot n \end{aligned} \quad (2)$$

L : 総クリープ距離

l : 転動体通過一回あたりのクリープ距離

n : 総転動体通過回数

摩耗は変速段ごとに方向が異なるので個別に算出し、最後に合算する必要がある。まずは試験のタイムチャートの項目から、変速段ごとに面圧とクリープ距離を算出したものの、比摩耗量を乗じて摩耗量に変換する。ハウジング摩耗の形状は全変速段の摩耗量が影響したものなので、各変速段の荷重方向を考慮し合算する。

例として、AとBの二つの変速段の合算方法を解説する (Fig. 4)。算出された摩耗量は軸受の中心が荷重方向に移動した距離を意味し、摩耗の形状は初期のハウジング穴と中心が移動した軸受径との差である三日月形状となる。計算では円周上の角度ごとに三日月形状の摩耗量として算出

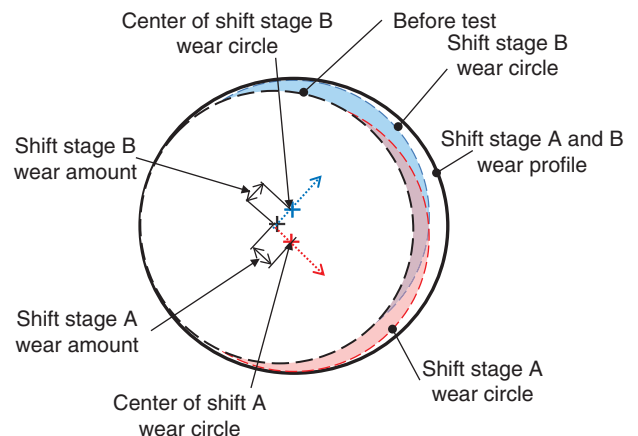


Fig. 4 Totaling housing wear profiles

する。各段の三日月形状の摩耗量を円周上の角度ごとに合算することで、AとBの二つの変速段による摩耗形状が算出される。

前述した通り、ハウジング摩耗は試験の進度に対して増加し、比例関係にあることから、関係式(2)が成立すると推察した。そこで、以下2項目の算出手法を構築する。

- (1) 外輪クリープ挙動のシミュレーション技術
- (2) ハウジング摩耗量の予測技術

4. 外輪クリープ挙動のシミュレーション技術

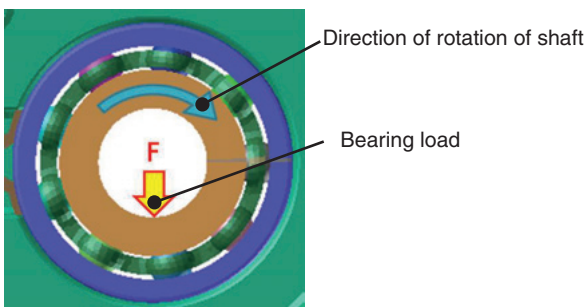
軸受のマクロな挙動と外輪の微小変形を再現するため、汎用の非線形動解析ソフトウェアを用いて解析をおこなった。ハウジングの剛性とスナップリングによるブレーキ挙動を再現するため、ハウジングの一部、外輪、内輪、転動体、保持器、スナップリングをモデル化した。Fig. 5に3D解析モデルを示す。

各部品は弾性体として定義し、転動体についてはなめらかな形状を再現するため剛体とした。

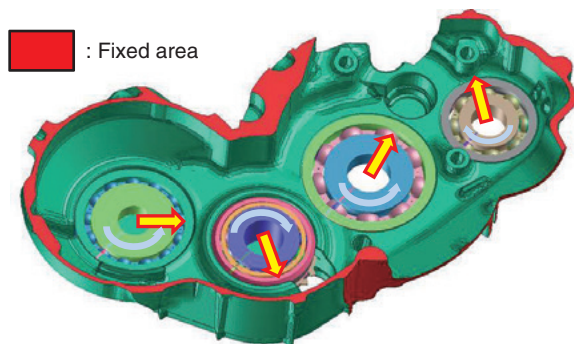
解析の境界条件は、実機状態を再現するため、ハウジング外周を完全拘束し、内輪に変速段ごとの軸受荷重を負荷し、内輪を一定の回転数で強制回転させた。また、外輪とハウジング間、およびスナップリングの摩擦係数を0.15、軸受け内部に関しては0.05を用いた。

4.1. 面圧分布の検証

シミュレーションの外輪面圧の精度を検証するために、



(a) Concentrated nodal load and speed of rotation

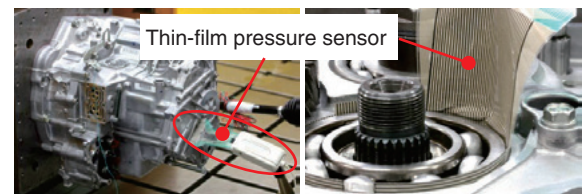


(b) Displacement boundary conditions

Fig. 5 3D-analysis model

実機での外輪とハウジング間に生じる面圧の測定をおこなった。測定は薄膜動面圧センサ(厚さ0.1 mm, 56×56 mm)をハウジングと軸受外輪の間に挟み測定した。ハウジング径はセンサ厚さを考慮し拡大した。荷重方向にセンサを配置し、残りの部分は同じ厚みのダミーシートを挟み入れた(Fig. 6)。

Fig. 7に薄膜動面圧センサによる測定結果と動解析での面圧の計算結果を示す。通常、ハウジング剛性が均一で



(a) Test equipment

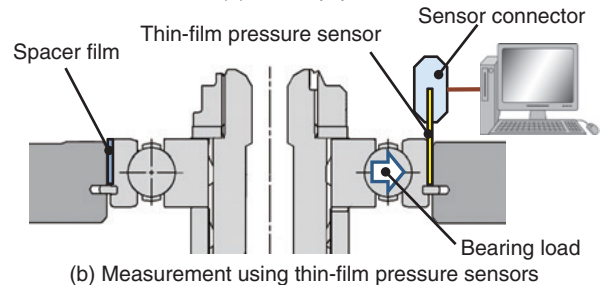
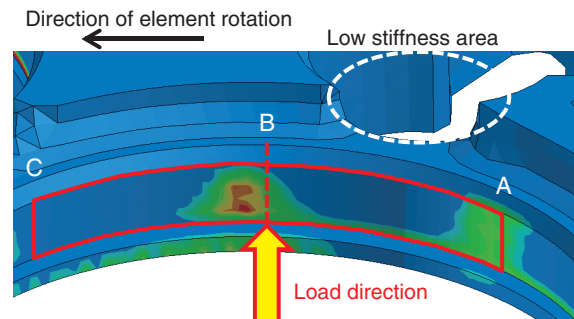


Fig. 6 Schematic of test equipment



(a) Area for measurements

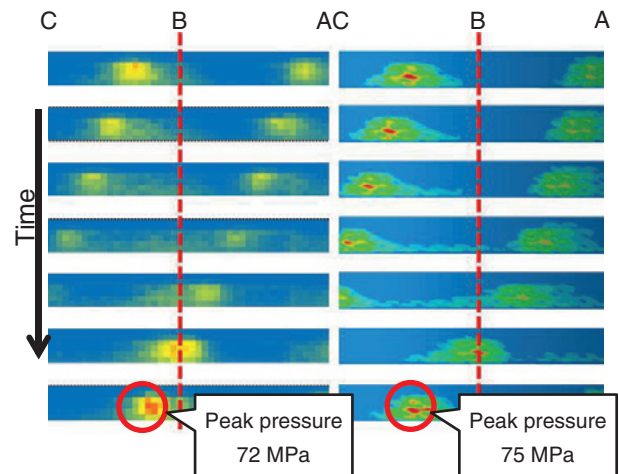


Fig. 7 Comparison of contact pressure

あれば、転動体の最大面圧の方向と軸受荷重方向は一致するが、この例は荷重方向のハウジング剛性が低く、方向にずれが生じていることが実測された。周辺のハウジング形状を忠実に 3D モデル化し、転動体を動的に転動させることで、最大面圧について方向のずれと絶対値がシミュレーションで再現可能となった。

4.2. 外輪クリープ距離の算出

上述の 3D 動解析を用いて荷重方向の外輪外周上の円周方向変位を算出した結果を Fig. 8 に示す。外輪は転動体進行方向に対して同方向に進むが、一時的に逆方向に進む。この挙動を解説したのが Fig. 9 である。

- (a) 転動体が通過する前は、外輪表面では転動体進行方向の前方は円周方向ひずみが増加するため、最大面圧の観測点は転動体進行方向に対して同方向に進む。
- (b) 転動体が近づくと、固着点の影響により観測点は逆方向に進む。

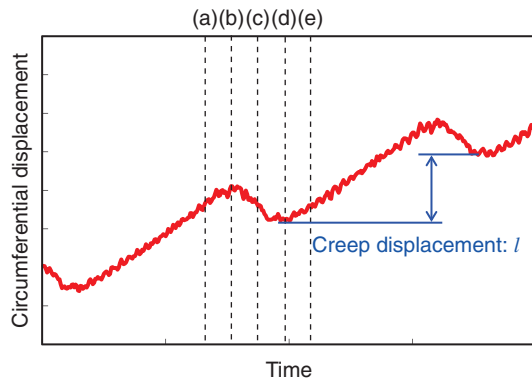


Fig. 8 Circumferential displacement at evaluation point

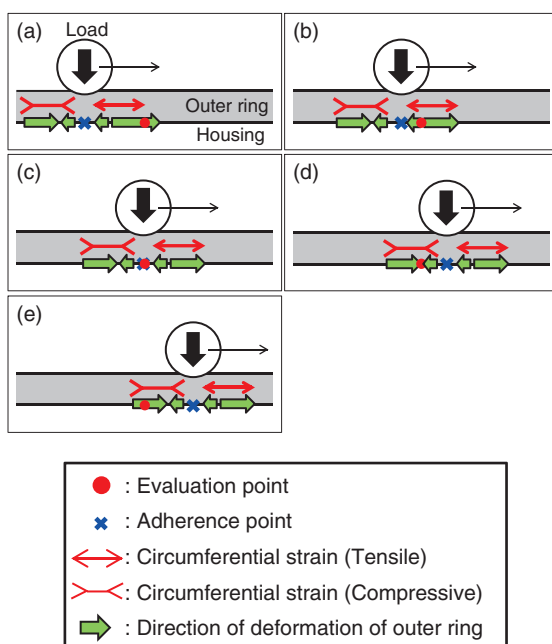


Fig. 9 Behavior of outer ring and ball

- (c) 転動体が真上にある時は、観測点はハウジングと固着し、逆方向に進む⁽²⁾。
- (d) 転動体が離れると、固着点の影響により観測点は同方向に進む。
- (e) 転動体が通過した後は、外輪表面では転動体進行方向の後方は円周方向ひずみが減少するため、観測点は同方向に進む。その後 (a) に戻る。

本計算では、転動体が一回通過することで発生するクリープ距離を l とした。これに総転動体通過回数 n を乗ずることで、総クリープ距離 L を算出できる。

また、総転動体通過回数は、試験の時系列データの軸回転数、エンジントルク、変則段等を基に算出した。

4.3. 外輪クリープ速度の検証

微小変位を直接測定することは難しいため、外輪クリープ速度を測定してシミュレーションの精度を確認した。

Fig. 10 に実機状態での外輪クリープ速度の測定の様子を示す。ハウジングに穴をあけて軸受の一部を目視できるようにし、軸受外輪に目印を加工して外輪クリープ速度を測定した。

変速段を固定して内輪を 5500 rpm で回転させた時の外輪クリープ速度とシミュレーションの計算結果を Fig. 11 に示す。

実測による外輪クリープ速度は、シミュレーションによる速度とほぼ同等の結果となった。

以上のことから、今回用いた外輪クリープ挙動のシミュレーション技術は、実働状態の面圧とクリープ距離を予測できる手法であることが確認された。

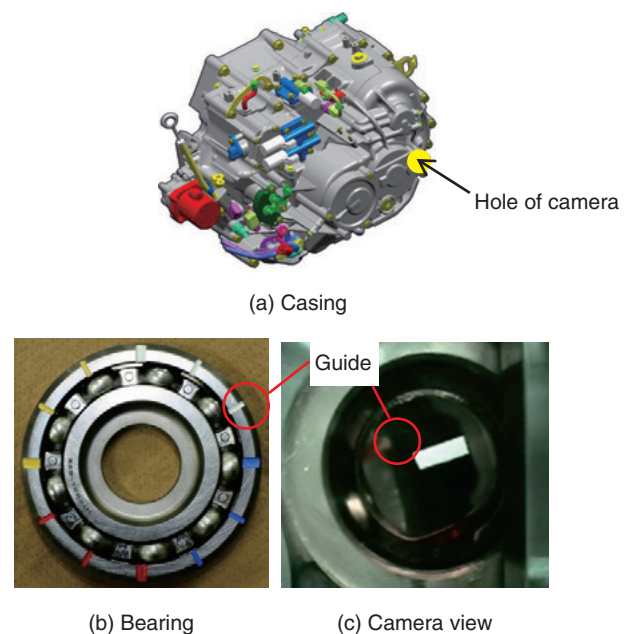


Fig. 10 Measurement of creep speed in bearing outer ring

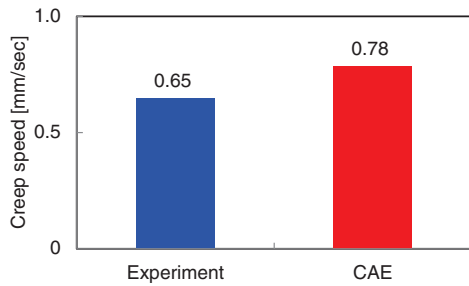


Fig. 11 Comparison of creep speed

5. ハウジング摩耗量の予測技術

5.1. 比摩耗量の計測

ハウジング摩耗における比摩耗量を求めるために、実機環境を模擬したピンオンディスク型の単体摩耗試験をおこなった。株式会社レスカ製摩擦摩耗試験機 (FPR-2300) を用いて、直径 80 mm の水平に回転するディスク状試験片の上端面にピン試験片を押し付け、滑り試験をおこなった。ピン試験片の先端は直径 1.1 mm の円柱形状とした。実機相当の環境で試験をおこなうために、潤滑環境を油温 80℃ の Honda 純正オートマチックトランスミッションフルード (ATF) 中とし、接触条件を摩擦速度 0.4, 1.0, 1.5 mm/sec, 面圧 51.6 MPa (負荷荷重 5000 g) とした。試験片の材質は、ピンをハウジング用アルミ材、ディスクを軸受材質の高炭素クロム鋼 (SUJ2) とした。ディスクと軸受の面性状を同等とするために、ディスクの面粗度 R_z を 0.5 μm とした。

試験ではピンの摩耗量を経時測定し、摩耗量と摩擦距離の関係をグラフ化した。摩耗量が摩擦距離に対して直線的に増加する領域での単位摩擦距離、面圧あたりの摩耗量を比摩耗量 (mm^2/N) として算出した。試験を各摩擦速度で 3 回ずつ実施し、算出した比摩耗量の平均値をその摩擦速度での代表値とした。

Fig. 12 に比摩耗量と摩擦速度の関係を示す。比摩耗量は摩擦速度の低下に伴い増加している。これは、摩擦速度が低下するにつれ、固体同士の接触部が多くなったためと考えられる。摩耗は固体同士の接触部において起こる現象であり、摩耗量は接触部が多い方が増加する。また、潤滑下にお

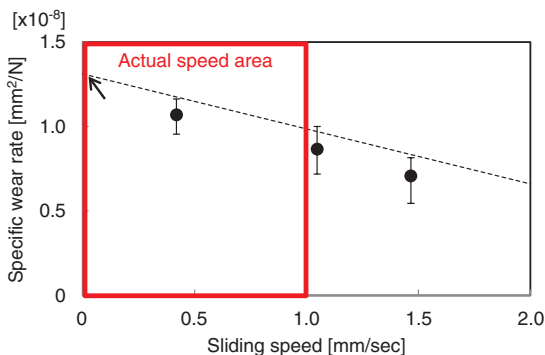


Fig. 12 Specific wear rate in relation to sliding speed

Table 1 Specifications of transmissions

Type	Bearing type
A	Ball
B	Ball
C	Double row angular contact ball
D	Ball
E	Ball
F	Ball
G	Four-point contact ball

ける固体同士のしゅう動では、速度が低いほど潤滑膜が形成されにくくなり、固体同士の接触部は増加する⁽⁵⁾。

実際の外輪クリープ速度は 1.0 mm/sec 以下であり、Fig. 12 の摩擦速度 1.0 mm/sec 以下の領域が実機相当の速度域である。各速度での比摩耗量の最大値を結んだ直線と縦軸との切片の値を実機相当の速度域での比摩耗量の最大値とし (Fig. 12 中の矢印で指した値: $1.3 \times 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{N}$)、摩耗量予測で用いることとした。

5.2. ハウジング摩耗の予測精度

本シミュレーション技術の汎用性を確認するため、耐久試験中に発生するハウジング摩耗量を実測値と CAE 予測値で比較した。比較には、変速方式の異なる変速機を用いた。比較した各変速機の軸受の種類を Table 1 に示す。

Fig. 13 に Type-B の軸受の結果を示す。変速段ごとに軸受の荷重方向が異なる場合でも、本手法を用いることで、

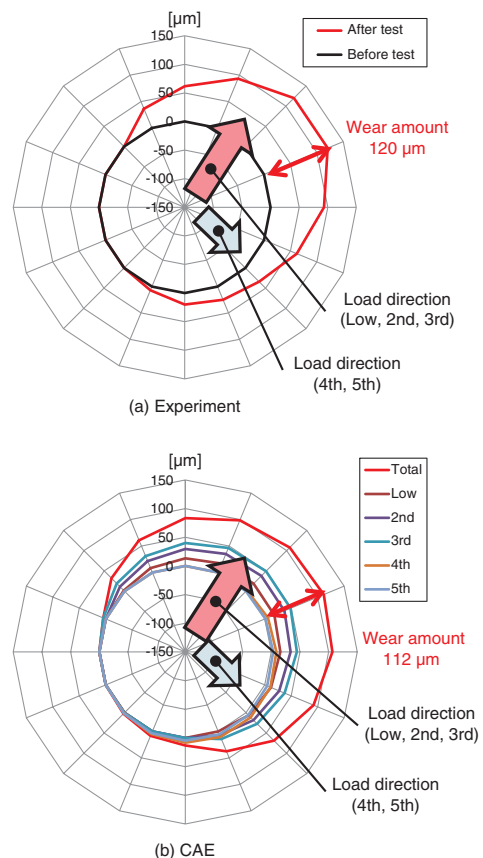


Fig. 13 Housing wear profiles

最大摩耗量、摩耗方向および摩耗形状に関して、実測と同等の結果になった。

また、Fig. 14 にその他の変速機を含めた実測値と CAE 予測値をプロットした。変速機や軸受の種類によらず、実測値と CAE 予測値は高い相関性が得られた。

これにより、外輪に発生する面圧、外輪クリープ距離の累積により摩耗量が予測できることを明らかにした。

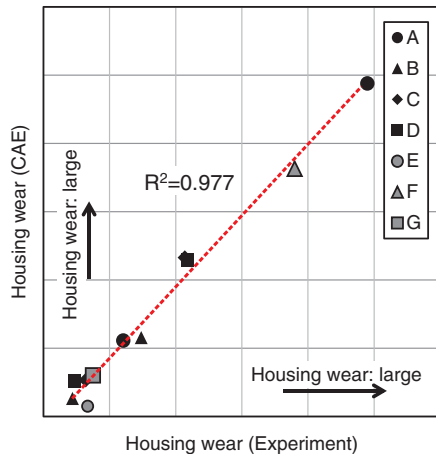


Fig. 14 Comparison of correlation between CAE predictions and measurements of housing wear

6. 機種開発への適用

本手法により開発中の変速機のハウジングに生じる摩耗量を予測し、軸受仕様を変更した事例を紹介する。

Fig. 15 に示すような本手法を用いた予測結果において、

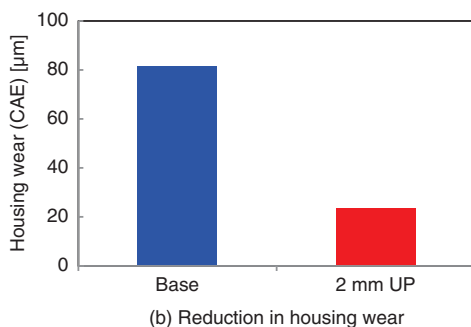
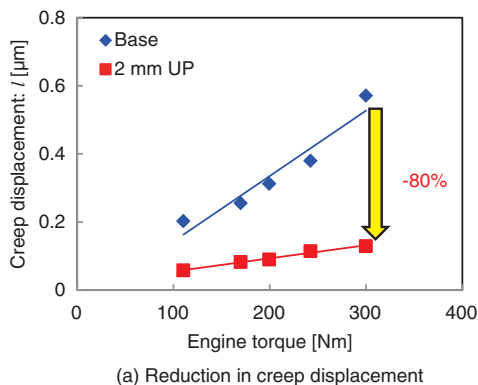


Fig. 15 Results of study of proposed measure

ハウジング摩耗が懸案となった。対策として軸受外輪肉厚を 2 mm 増やすことで、外輪クリープ距離を 80% 低減できることが予測でき、3D 動解析を用いた机上での仕様の検討が可能となった。

7. まとめ

自動車用変速機に用いられる軸受の外輪が回転することによって発生するハウジングの摩耗量を予測する手法を構築した。

- (1) 軸受のマクロな挙動と外輪の微小変形を再現するため 3D 動解析を用いた。これにより、外輪クリープ挙動の再現が可能となった。
- (2) 軸受外輪に発生する面圧、クリープ距離、および比摩耗量を用いたハウジング摩耗量の予測技術を構築した。

さまざまな変速機の軸受に対して本手法を適用した結果、最大摩耗量と摩耗方向、摩耗形状について高い実機相関性を持つ予測結果を得ることができた。

これにより、ハウジング摩耗を抑制する設計検討ができ、早期に仕様の熟成が可能となった。

参考文献

- (1) 展建軍, 坂尻義晃, 武村浩道, 湯川謹次: 軸受外輪クリープの発生メカニズム, NSK Technical Journal, No.680, p.13-18(2006)
- (2) 丹羽健: 転がり軸受のクリープメカニズム, 日本トライボロジー学会 トライボロジー会議予稿集, p.253-254(2012)
- (3) 寺本貴之, 佐藤穰: 軸受荷重負荷下のボールベアリングの外輪クリープに対する予測手法の確立, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.142-14, p.15-20(2014)
- (4) 笹田直: 摩耗式と摩耗遷移, 摩耗, 養賢堂, p.32(2008)
- (5) 村木正芳: 境界潤滑, 図解 トライボロジー 摩擦の科学と潤滑技術, 日刊工業新聞社, p.63-80(2007)

著者



長副やよい



和久井茂晴



前吉雄太