

トランスミッション用外歯車のかみあいミスアライメント予測技術の研究

Prediction of Mesh Misalignment of External Gear for Transmission

館 野 義 和*
Yoshikazu TATENO

古 居 芳 臣*
Yoshiomi FURUI

法 田 和 宏*
Kazuhiro NORITA

要 旨

トランスミッション用外歯車のかみあい解析精度向上のため、歯車のかみあいミスアライメントに着目した。実機における歯車は、複数の部品で支持されている。歯車支持部品間の接触部に適正なばねを与えることで、実用に見合った精度と計算時間を有するミスアライメント机上予測技術を線形解析により構築した。本稿手法によるミスアライメントを歯車かみあい解析に適用することで、歯車歯面の接触状態や破損予測に対して、実態と良好な相関が得られることを確認した。また、ミスアライメントの影響因子と寄与についても分析が可能となり、改善が効率的におこなえるようになった。

ABSTRACT

To increase the accuracy of meshing analysis of the external gear of the transmission, attention was focused on mesh misalignment of the gear. A gear in an actual vehicle is supported by a number of parts. An appropriate fitting stiffness was assigned to the point of contact between the gear and each support part, and a misalignment theoretical prediction technology having feasible accuracy and calculation times was constructed using linear analysis. By applying misalignment created using the method described in this paper to gear mesh analysis, it was confirmed that there was good correlation with the actual status of gear tooth flank contact and damage prediction. Also, analysis on the misalignment effect factors and their role in misalignment was possible as well, which made efficient reduction of misalignment possible.

1. まえがき

近年、自動車用トランスミッションにはCO₂削減、燃費向上のための軽量化が求められている。一方では、エンジンの高トルク化、SUV(スポーツユーティリティビークル)に代表される高重量な車両の開発ニーズの高まりから、歯車をはじめとする動力伝達部品への負荷は高くなっている。

このため、歯車を支持する軸、軸受、歯車箱などは負荷によって弾性変形を生じる⁽¹⁾。加えて歯車支持部品間にはすきまが存在するため、歯車対は正規のかみあい状態から異なった状態で運転される。歯車はこのような条件下で十分な強度を持つ必要がある。従って、歯車の強度設計には、かみあい状態を考慮する必要がある。かみあい状態を考慮した歯車強度設計手法は、既に提案されている⁽²⁾。

しかし、従来設計段階でおこなわれていた軸剛性の計算のみでは、他の要因が考慮されず、歯車対のかみあい状態に

ついて、実機に見合った計算精度が得られていなかった。また実機運転状態における歯面の接触状態を観察する手法もあるが、実機完成後でないと確認が取れず定量的な判断も困難であった。

そこで、本稿では設計段階で歯車対のかみあい状態について軸以外の要因(軸受、歯車箱、歯車支持部品間のすきま)も考慮し、実用的な計算時間と精度で予測することを可能としたので報告する。

2. 従来の予測技術とその課題

歯車対のかみあい状態で、有効歯幅端における軸の作用線方向の相対的なずれ量を Al_1 、 Al_2 とし、その差をミスアライメントと呼び AL とする(Fig. 1)。

$$AL = Al_1 - Al_2 \quad (1)$$

従来、設計段階でミスアライメントの予測は、軸剛性のみを考慮した「シャフトたわみ計算プログラム」によりおこなわれていた。しかし、歯車は複数部品により支持されており、部品間にはすきまも存在する(Fig. 2)。したがって、軸剛性のみでは、ミスアライメントを精度よく予測することは困難であり⁽³⁾、また、他の要因の影響が把握できないた

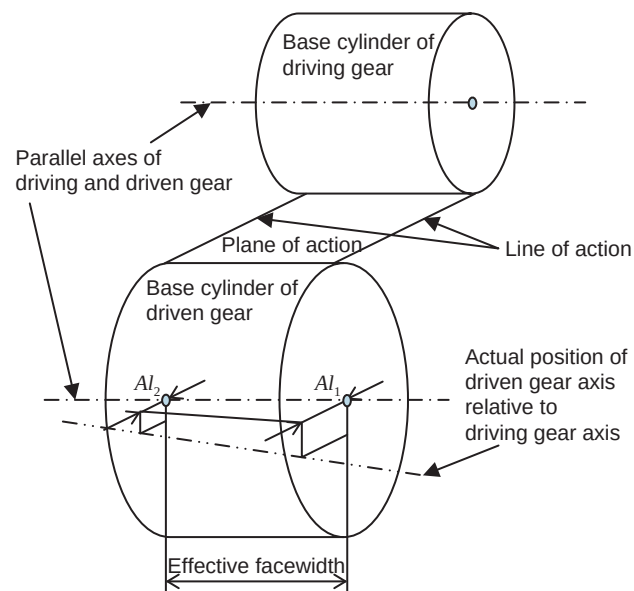


Fig. 1 Definition of mesh misalignment

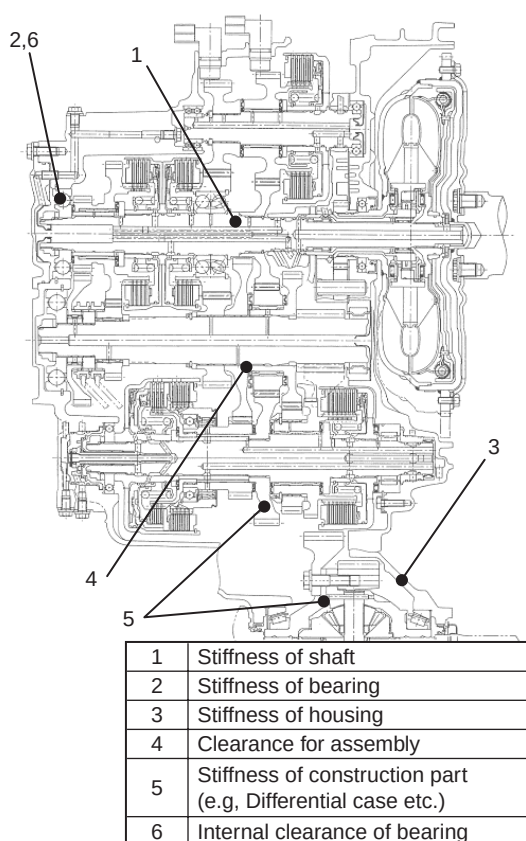


Fig. 2 Factor of mesh misalignment

め、ミスアライメントの根本的な原因の分析や改善には多くの試験を要するという課題があった。

3. ミスアライメント予測技術構築

ミスアライメント予測技術構築にあたり、実機での歯車、軸、軸受の変位を測定し解析結果の実機相関を検証した。

3.1. 実機における各部変位測定

歯車、軸、軸受の変位をトランスミッション台上ねじり試験機により測定をした。スティックの影響を排除するために、吸収側を固定せずパウダブレーキの適用により極低回転を与えて測定した。測定装置構成を Fig. 3 に示す。対象部品の変位測定には、レーザ変位計、リニアゲージ、渦電流式のギャップセンサを用いた。また、歯車箱については、形状最適化技術⁽⁴⁾により歯車の支持剛性に影響を及ぼさず、測定の妨げになる部分を排除した実機等剛性歯車箱を作成採用した [Fig. 4(a)]。なお、歯車の変位測定位置の一例を Fig. 4(b) に示す。

3.2. ミスアライメント解析モデル概要

ミスアライメント解析モデルの概要を Fig. 5 に示す。

各部品は形状、材料特性(ヤング率、ポアソン比)を定義する。部品間の接触ばねは個別に定義をおこなう。トランス

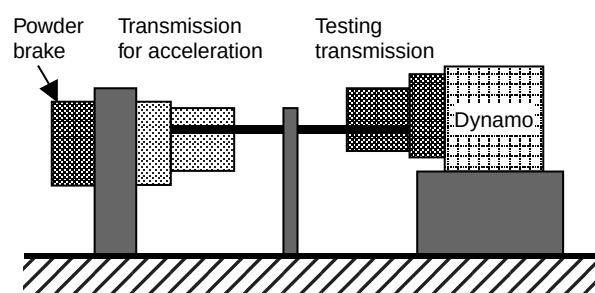


Fig. 3 Structure of testing equipment

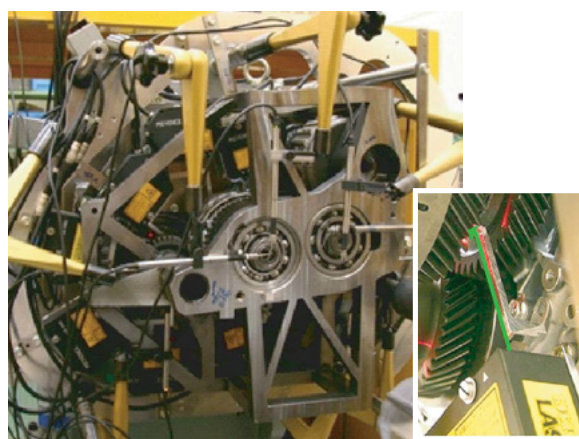


Fig. 4(a) Appearance of testing equipment

ミッション1台分のモデルを作成し、線形解析によりこれらを連成しミスアライメントを算出する。

3.3. 接触ばね定義

ミスアライメント解析モデルにおいて部品間に定義される接触ばねは、径方向、軸方向、傾きについて各々に定義しなければならない(Fig. 5)。この接触ばねについて、部位によらず一律の値を用いた場合、従来の予測手法同様、測定結果と計算結果には相関が得られない(Fig. 6)。そこで、複数

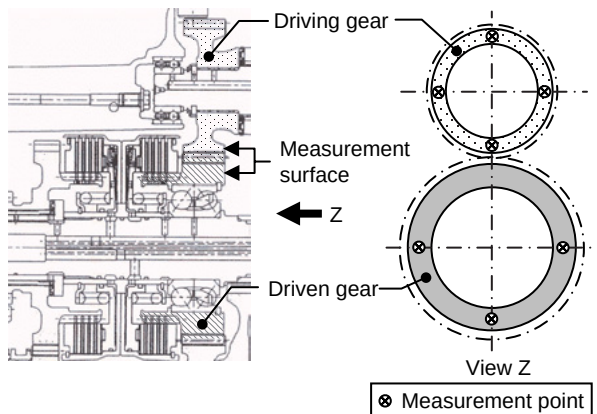


Fig. 4(b) Measurement point of gear displacement

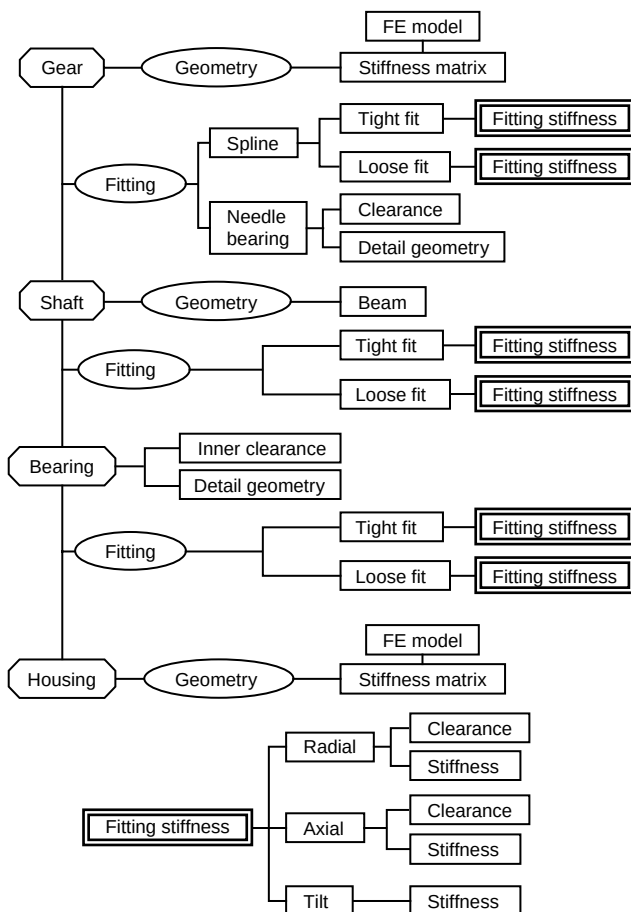


Fig. 5 Outline of mesh misalignment analysis model

のトランスミッション骨格にて、歯車や歯車支持部品の変位量について測定結果と接触解析を比較し、実機相関を得るために適正な接触ばねを Fig. 7 にみられる部品構成要素ごとに定義した。

3.3.1. 径方向接触ばね定義

径方向接触ばねの一例とし、軸受と歯車箱間の接触ばねの定義について過程を以下に記す。線形解析において、軸受荷重は、歯車箱の軸受穴中心ノードに付加される。中心ノードと軸受穴は剛体バーで接続される。このため、歯車箱の軸受穴は、軸受荷重方向に圧縮を受けると同時に、反対側で引っ張りを受ける。接触解析では、円筒に軸受荷重を付加するため、歯車箱の軸受穴には荷重方向の圧縮力が

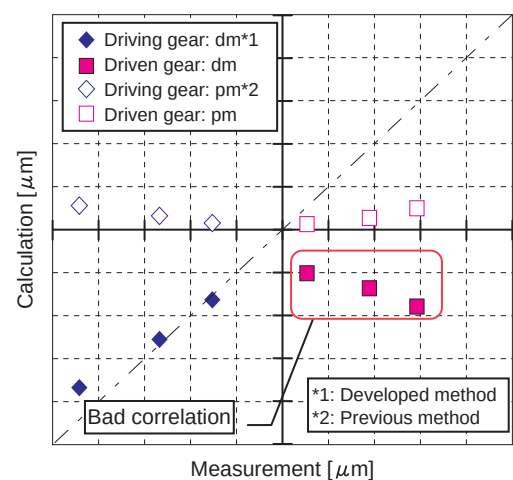


Fig. 6 Correlation of mesh misalignment

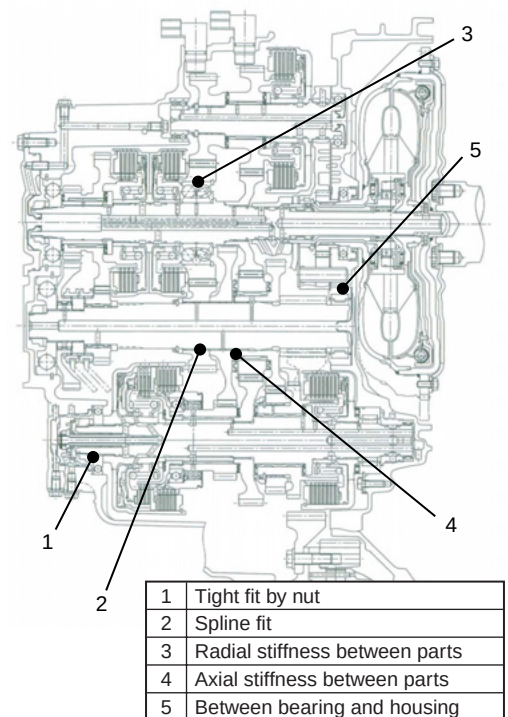


Fig. 7 Stiffness item definition

働くが反対方向に引っ張り力は生じない(Fig. 8)。軸受と歯車箱間の径方向接触ばねについては、軸受中心ノードの移動量の差($L_n - L_l$)で軸受荷重 F_{brg} を除したものを接触ばね K とする。また、 F_{brg} と軸受外径部の歯車箱軸受穴接触面積 A (軸受外径 $\times\pi\times$ 軸受接触幅)の比を P とする。

$$K = \frac{F_{brg}}{L_n - L_l} \quad (2)$$

$$P = \frac{F_{brg}}{A} \quad (3)$$

K と P の相関関係を複数のトランスミッション骨格で求めた(Fig. 9)。ほぼ線形関係が得られることから、軸受と歯車箱間の接触ばねは、上記関係により求められた線形式(4)により定義するものとした。

$$K = aP + b \quad (4)$$

3.4. 歯車断面形状

歯車断面形状について、使用ソフトでは、歯車を軸モデルとして作成する方法と、FEMモデルとして、その剛性マトリクスを取り込む方法がある。歯車の端面変位について、両者による解析結果と実測とを比較し、より実機相関の高い FEM モデルを取り込む方法を採用した(Fig. 10)。

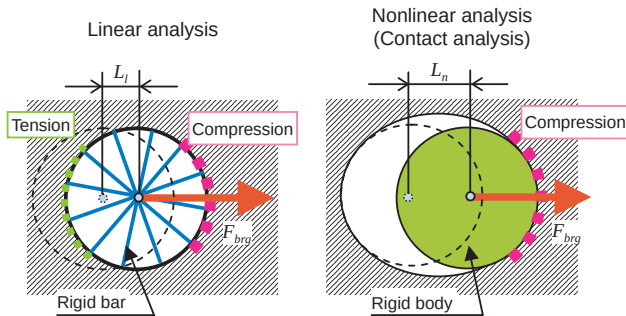


Fig. 8 Comparison of linear analysis and nonlinear analysis

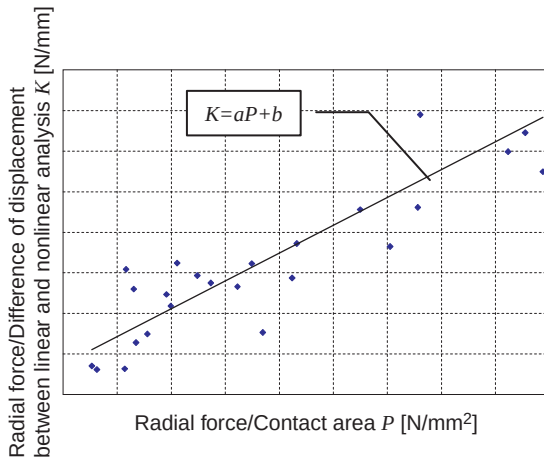


Fig. 9 Definition of stiffness between bearing and housing

3.5. ミスアライメント解析予測精度

従来のミスアライメント予測技術(シャフトたわみ計算)と上述の境界条件定義を反映した構築予測技術について、実測との相関比較をおこなった。軸の剛性のみしか考慮されない従来予測技術に対して、歯車自身の剛性や、支持部品の剛性を考慮した構築技術は、実測との相関が大幅に改善され、ミスアライメントの設計検討精度が格段に向上した(Fig. 11)。

3.6. ミスアライメント解析時間

ミスアライメントを算出する手法として、非線形解析も考えられるが、大規模モデルとなり、操作性や計算時間(収束性)の問題から、日常の設計、開発ツールとしての使用は困難である⁽⁵⁾。トランスミッション1台分のミスアライメント算出工数の比較を Fig. 12 に示す。従来手法のモデリング時間、計算時間をそれぞれ基準として、線形解析と非線形解析(推定値)について比較した。本研究では、線形解析に

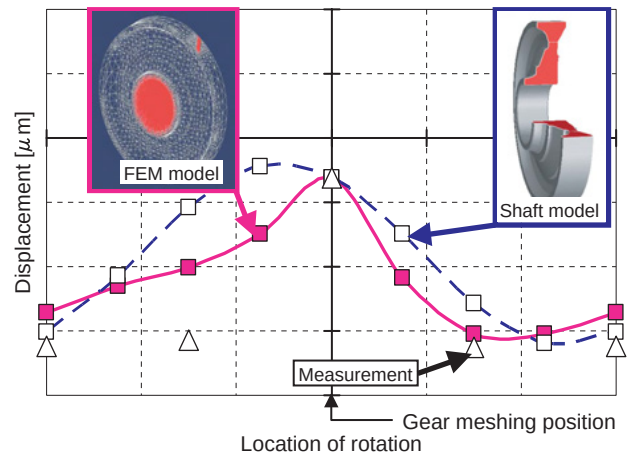


Fig. 10 Displacement of gear rim

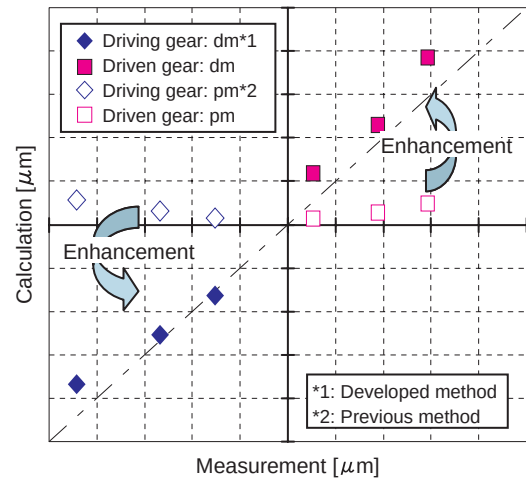


Fig. 11 Comparison of correlation for mesh misalignment

よりミスアライメント予測技術を構築した。

従来手法に対し、開発手法はアセンブリ解析となるため、モデリング及び計算時間は増加するものの、アセンブリ状態の解析が数十分で可能であり、さまざまな条件の計算が必要な日常の設計、開発においても十分な実用性があることが確認できた。

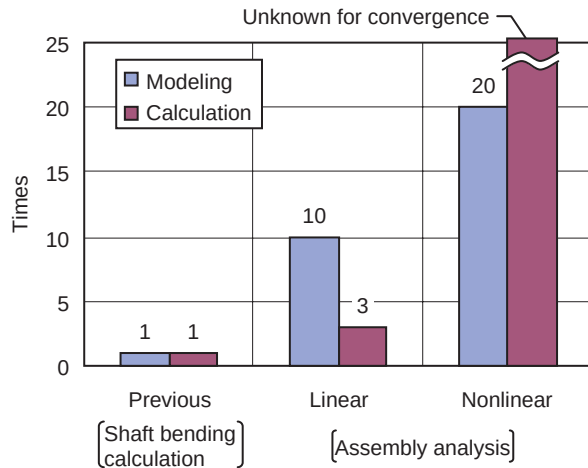


Fig. 12 Required time comparison for prediction of mesh misalignment

4. 実機試験適合性検証

ミスアライメントや歯形を考慮して歯車がかみあった時の歯面上の荷重分布を計算できるかみあい解析ツール「GRANPLI」⁽²⁾を使って歯車のかみあい状態を解析し、開発技術の実機試験への適合性を検証した。

4.1. 強度試験適合性

トランスミッション Type-A の開発において、変速用歯車に歯面損傷(Pitting)が発生した。歯面を観察するとかみあいに偏りが見られた。

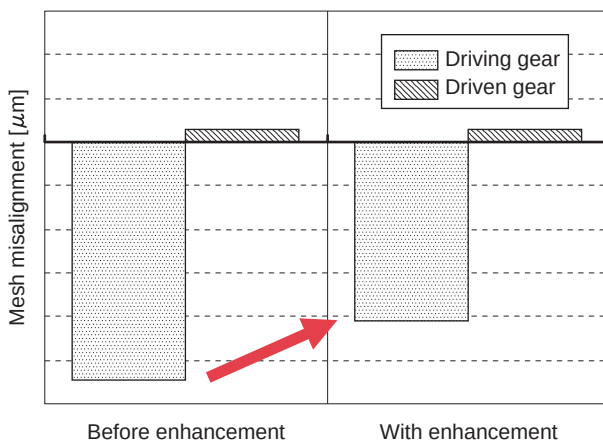


Fig. 13 Contribution rate of mesh misalignment (Driving gear and driven gear)

駆動、従動では、駆動歯車の寄与が大きく (Fig. 13)、これに占める要因について寄与を分析したところ、クリアランスと歯車の剛性(断面形状)で大半を占めることがわかった (Fig. 14)。クリアランスは、加工、組み立ての関係により変更が困難なことから、歯車の剛性変更 (Fig. 15) により、ミスアライメントを改善し、歯面損傷が改善された (Fig. 16)。

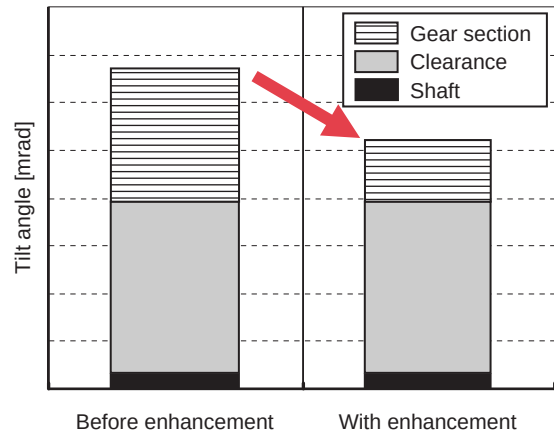


Fig. 14 Contribution rate of driving gear tilt

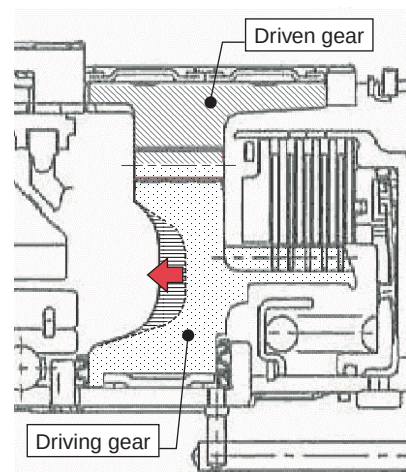


Fig. 15 Enhanced driving gear

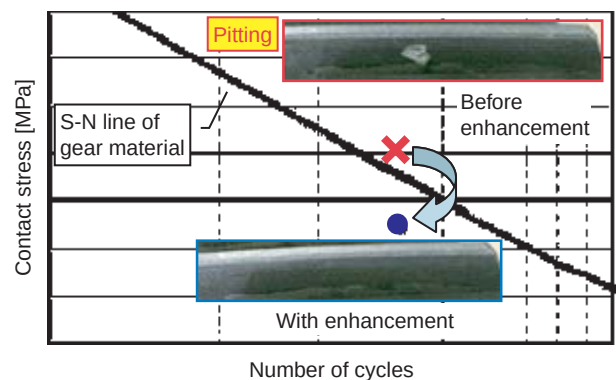


Fig. 16 Enhancement of gear flank damage

4.2. 歯あたり試験適合性

トランスミッションの歯車の機能は、エンジンの出力を駆動輪に伝達することにあるが、商品性の観点からかみあいの時の振動騒音が可能な限り小さいことが要求される、そのためには円滑なかみあいが必要となる。歯面のかみあい状態を試験で確認するのが歯あたり試験である。従来予測技術(シャフトたわみ計算)と構築予測技術それぞれにより求められたミスアライメントを「GRANPLI」に適用し計算された歯面のかみあい状態を、実機歯あたり試験結果と比較した。構築技術によるミスアライメントを「GRANPLI」に適用することにより、従来技術に対して高い実機適合性を得た(Fig. 17)。

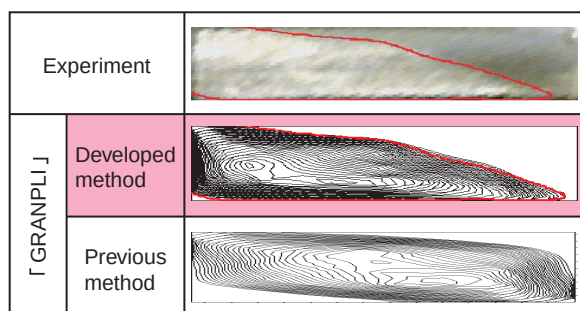


Fig. 17 Comparison of tooth contact patterns

5. まとめ

歯車のかみあいに影響を及ぼすミスアライメントの予測技術として、

- (1) 従来予測手法に対して高い実機相関を持つ結果を得る手法を構築した。
- (2) 線形解析を適用することで実用に見合った計算時間で結果が得られた。

また、実機適合性検証により以下のことが確認された。

- (3) かみあい解析「GRANPLI」に、構築技術によるミスアライメントを適用することにより、歯車強度や歯あたり検討の設計予測精度の向上が図れる。
- (4) 寄与分析により、ミスアライメントに対する効率的な対策手法の検討に十分な予測精度を有する。

参考文献

- (1) 小森雅晴, 久保愛三: はすば歯車の諸元・歯面形状精度・支持剛性の統合最適設計法, 日本機械学会論文集(C編), 69 巻 685 号, p.265-272(2003)
- (2) 卯月千秋, 平岡昌巳, 中田雅之, 館野義和, 水野孝樹: トランスミッション用外接はすば歯車の歯元曲げ応力予測技術の実用化, Honda R&D Technical Review, Vol.13, No.1, p.81-90

- (3) Pears, J., Curtis, S., Roberts, S.: Investigation of Methods to Predict Parallel and Epicyclic Gear Transmission Error, SAE Technical Papers 2005-01-1818(2005)
- (4) 緒方友治, 鈴木寛, 飯島康友: トランスミッションハウジングの軽量化のための最適化手法, Honda R&D Technical Review, Vol.16, No.2, p.103-108
- (5) 梶田伸一: 軸受性能のコンピューターシミュレーション技術, NSK Technical Journal, No.673, p.31-35(2002)

■ 著 者 ■



館野義和



古居芳臣



法田和宏