

マイクロピッチングに起因する歯車の部分的摩耗発生メカニズムの検証

Verification of the Partial Wear Generation Mechanism on the Gear Tooth Caused by Micropitting

トヨタ自動車（正）*安江 悠好

Yuko Yasue*

*Toyota Motor Corporation

1. はじめに

自動車の電動化に伴う歯車の損失低減、小型化のため、潤滑油低粘度化や回転速度の増加など歯面の接触状態が過酷になっている。このような状況では歯車のマイクロピッチングが懸念される。歯面にくもりとして確認されるこの現象は、部分的な数 μm ～20 μm の深い摩耗を伴いノイズを悪化させることがあり、その防止設計が重要である。

この摩耗メカニズムとしては、過酷な接触条件下において、歯面に潤滑剤由来の反応膜の生成と剥離を繰り返すことで深い摩耗になると推定される。しかしながら、この摩耗には不明な点がある。一つめは、歯面の噛合う面どうし、つまり駆動歯面のアデンダムと被動歯面のデデンダムまたは駆動歯面のデデンダムと被動歯面のアデンダムにおいては、歯面のすべり速度や接触圧力などの接触状態は理論上同じにも関わらず、必ずしもその両側に摩耗が生じるわけではなく、片側だけ深く摩耗する場合があることである。二つめは歯面の接触状態を示すパラメータとして、松本式を用いた歯面の理論摩擦係数、接触圧力およびすべり速度の積（以下 μPV ）との相関関係である。この値とマイクロピッチング分布を比較すると、マイクロピッチング発生部分の μPV の値が必ずしも歯面で最も高いわけではない。しかし、マイクロピッチングと μPV の分布は全く一致しないわけでもない。例えば一つの歯車のデデンダムやアデンダムだけに着目してマイクロピッチングの発生領域を μPV の分布と比較すれば、それらのパターンは良く一致する。つまり歯車や歯面のピッチラインの上下でその発生限界となる μPV が異なっているのではないかと考えられる。

一方で、ISO/TR では接触する歯面の算術平均粗さの平均値と、バルク温度を考慮した EHL 最小油膜厚さの比をマイクロピッチングの設計パラメータとしている。しかし、この方法においても歯車ごとに実験的な発生限界の確認が必要であり、実際に歯車の設計手法として用いるには課題がある。

そこで、これら設計パラメータの発生限界値が歯車ごとに異なる要因は、歯面の噛合い長さの影響があると考えた。つまり、歯車においてアデンダムとデデンダムの噛合い長さが異なる場合が多い。ゆえに μPV をはじめとした接触の過酷さを示すパラメータの影響の程度が歯車や、アデンダムやデデンダムによって異なるのではないかと考えた。

本検証では実験的に歯車にマイクロピッチングを発生させた。また、今回は歯面の接触状態の過酷さを示すパラメータとして、ここではまず μPV を用い、その値をアデンダムとデデンダムの噛合い長さで補正することでマイクロピッチングの発生範囲の説明ができないかを検討し、上述の考えに問題がないかを確認した。

2. 試験方法および影響パラメータの計算

2.1 試験装置および試験条件

供試品としての歯車には Table 1 に示す諸元のはすば歯車を用いた。材質は自動車用歯車に用いられる SCM420 を用い歯面は浸炭後、研削仕上げとした。歯車の運転には動力循環式の試験機を用い、駆動歯車のトルク 110Nm、回転速度 2500r/min で運転した。

予備試験よりマイクロピッチングによる摩耗が十分進行する回転回数を確認し、駆動歯車において 7000 万回の運転を行った。潤滑油は 100℃動粘度が 3.4mm²/sec の自動車向け電動トランスアクスル用フルードを用い、100℃に調整した潤滑油を 500cc/min の流量で歯車の噛合い部に供給した。

2.2 マイクロピッチングの影響パラメータおよび計算方法

本検討ではマイクロピッチングの設計パラメータとして、上述の通り松本式による摩擦係数を用いた μPV を用い、この大小とマイクロピッチング発生範囲、摩耗量を比較することでメカニズムに矛盾がないかを確認することとした。

3. 試験結果および理論 μPV 分布の計算結果

運転後の歯車の写真を Fig. 1 に示す。駆動歯面と被動歯面のアデンダムおよびデデンダムに赤い線で示したマイクロピッチングによるくもりが生じた。ただし、駆動歯面のアデンダムのくもりは薄かった。Figure 2 には横軸に歯丈方向長さ、縦軸に理論インボリュートからのずれ量を取り、試験前後の歯幅中央近傍の歯面形状を重ね摩耗の状態示した。同図より駆動歯面はデデンダムに 10 μm 程度の部分的な深い摩耗を生じているのに対し、アデンダムの摩耗量は少ない。被動歯面はアデンダムとデデンダムの両側に 5～8 μm 程度の比較的深い部分的摩耗が生じていた。

Figure 3 は運転前の歯面形状に基づく理論 μPV 分布の計算結果である。横軸は歯幅方向長さ、縦軸は作用線長さである。駆動歯面では歯先が同図の上側となる。また、被動歯面における μPV の分布は、上下が反対になる。

Table 1 Gear specifications

Number of teeth (Drive, Driven)	17, 25
Module	3.55
Helix angle, deg.	26
Center distance, mm	82
Surface roughness Rz, (Drive, Driven)	0.4, 0.6

4. 考察

4.1 マイクロピッチング設計上の問題

駆動歯面でマイクロピッチングの摩耗量が大きいのはデデンダムだが Fig.3 に示すように μPV は低かった。一方、アデンダムの歯面のくもりは薄く、摩耗量も小さいが高い μPV が分布し、 μPV と摩耗状態に矛盾が生じた。

被動歯面ではアデンダムとデデンダムに深い摩耗が生じており、 μPV の分布の大小と相関関係がなかった。また、駆動歯面のアデンダムの摩耗量は小さいのに対し、それに噛合う被動歯面のデデンダムは摩耗量が大きかった。これらの結果からは、歯面のマイクロピッチングや摩耗を μPV の分布から予測することは難しいと言える。

4.2 噛合い長さを考慮した設計パラメータの補正

ここでは歯面のマイクロピッチング設計における問題が生じる理由が歯車のアデンダムとデデンダムの噛合い長さの違いにあると考えた。つまり、マイクロピッチングによる摩耗が歯面に生じる摩擦の仕事率による反応膜の生成と剥離と考えれば、面積当たりに与えられる摩擦の仕事率がそれに影響するはずであり、噛合い長さの大小の影響も受けると考えた。

そこで今回は便宜的ではあるが、噛合い長さの影響を考慮するために各歯車のアデンダム、デデンダムにおいて、 μPV をそれぞれの噛合い長さで除することで噛合い長さ当たりに生じる μPV に換算した。厳密には歯先や歯元に近づくほどすべり率が高くなるが、ここではまずこの考え方の可能性を探るためこの方法を用いた。

Figure 4, Fig. 5 は、運転前後の駆動歯面および被動歯面の形状プロファイルをもとにして噛合い長さ 1mm あたりの値に換算した理論 μPV （以下、単に μPV と称す）の分布である。Figure 4 の駆動歯面では運転前には歯面の上下に μPV の値が高い部分が分布したが、運転後のアデンダムの値は小さくなった。駆動歯面のアデンダムだけ摩耗量が小さいのは、摩耗に伴い μPV が低下したと推定される。一方、デデンダムは運転後も μPV が高い為に摩耗が深くなったと推定される。Figure 5 の被動歯面では運転前後ともに μPV が高く、摩耗もそれに伴い深くなったものと推定される。

また、本歯車においては 1mm あたりの値に換算した μPV が概ね 24MPa・m/sec 以上になる部分に目視で確認できるマイクロピッチングが生じており、歯車や歯面上の部位に関わらずその発生限界となる値が確認できた。また、深い摩耗を生じるのは概ね 28MPa・m/sec 以上の部分だった。

5. おわりに

マイクロピッチングと摩耗が噛合い長さを考慮した μPV で推定できると考え、噛合い長さあたりの値に換算した μPV と、マイクロピッチングおよび摩耗量を比較し下記の結果を得た。

- (1) 上記 μPV の大小と、マイクロピッチングおよび摩耗の程度に相関関係を確認した。また、マイクロピッチングの発生限界となる値を確認した。
- (2) 本手法により、噛合う歯面の片方のみ摩耗が生じる理由が説明できた。
- (3) 噛合い長さあたりに換算した μPV を用いマイクロピッチング防止設計と摩耗の推定が期待できる。

文献

- 1) ISO/TR 15144-1 Calculation of micropitting load capacity of cylindrical spur and helical gears, ISO (2010).
- 2) 安江 悠好, 弘嶋 誠司, 林田 泰, 松本 将, 歯面の摩擦力を考慮した動力伝達用歯車のマイクロピッチング発生機構の検証, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 828 (2015)
- 3) 松本将, 豊田展光, 混合潤滑状態にある転がり-すべり接触面の摩擦係数推定式 (第 2 報), トライボロジスト, Vol. 58, No. 9 (2013), pp. 676-684.
- 4) 本宮 潤一, 高速回転時の噛み合い摩擦およびスカuffing 摩耗に関する技術動向, Vol. 70, No. 2(2025) pp. 83-88

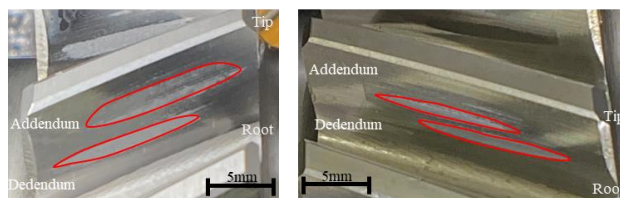


Fig. 1 Gear tooth surface after test

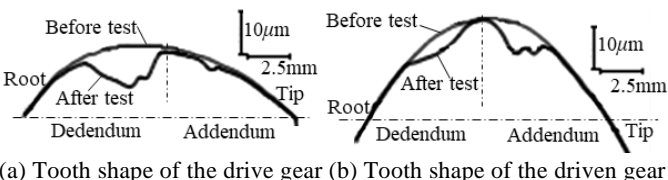


Fig. 2 Gear tooth shapes before and after test

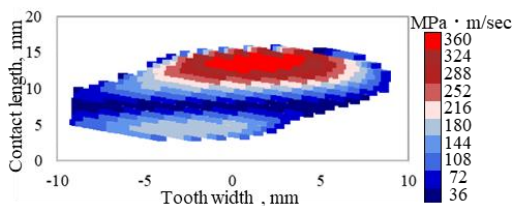


Fig. 3 μPV distribution on the gear tooth surface

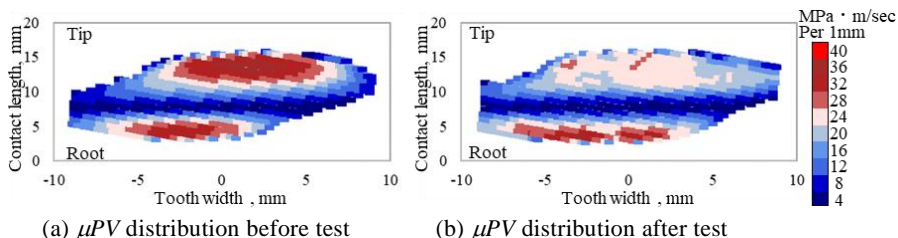


Fig. 4 Revised μPV distribution on the drive gear tooth surface

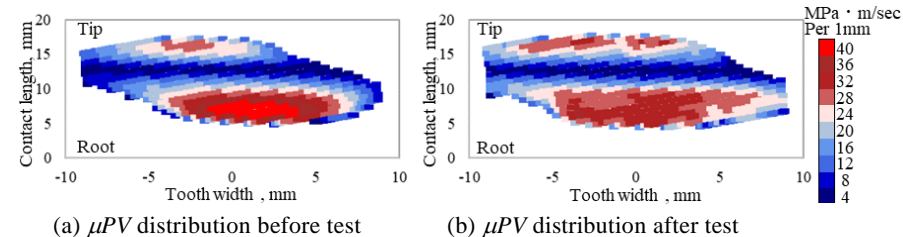


Fig. 5 Revised μPV distribution on the driven gear tooth surface