

電動車用駆動ユニットの歯車技術

Gear Technology for Power Transmission Unit of Electric Vehicles

日産自動車株式会社 (非) *熊谷 幸司 (非) 高木 一央 (非) 内藤 佑太 (非) 劉 函林

Koji Kumagai*, Kazuhiro Takaki*, Yuta Naito*, Hanlin Liu*

*Nissan Motor Co., Ltd.

1. はじめに

自動車用トランスミッションの主要部品として使用される歯車は、動力伝達効率が98~99.5%程度の高効率な機械要素であることが知られている。さらに、自動車の電動化に伴って動力伝達効率向上ニーズは一段と高まっており、従来は見過ごされてきた0.1ポイント程度の効率向上も必要とされるようになってきた。図1に電動車開発における航続距離向上目標とそのアイテム例を示す。歯車のかみ合い効率向上アイテムも大きな割合を占めておりそのニーズが高いことがわかる。歯車のかみ合い効率向上策はいくつかあるが、ここでは歯面の表面粗さを改善する方法や歯車諸元を工夫したかみ合い効率向上のアプローチを紹介する。

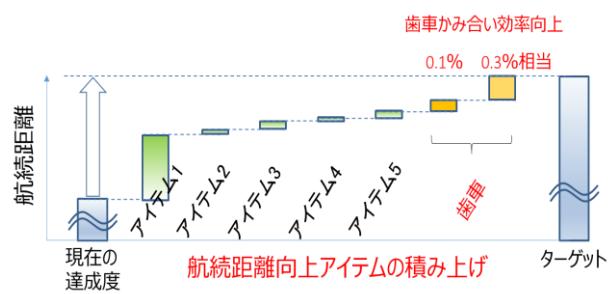


Fig. 1 Position of items of gear mesh efficiency improvement in electric vehicle development

2. 歯面表面粗さ改善によるかみ合い効率向上

自動車用歯車の大量生産にも対応した歯面鏡面化工法が開発されている¹⁾。歯面の潤滑状態を改善することでかみ合い損失を低減できる。図2はかみ合い効率の実験結果である²⁾。最大高さ粗さ Rz の改善による効果は低回転ほど高く、従来の歯面仕上げ相当 $2.2\mu\text{m}$ から鏡面仕上げ相当 $1.3\mu\text{m}$ に改善した場合、入力回転数 1000min^{-1} ではかみ合い効率は約0.6ポイント向上した。図3は図2の横軸を D 値で整理し直したものである。なお、 D 値は Rz の和と油膜厚さ h_0 の比として $D = (Rz_1 + Rz_2) / h_0$ で表される。自動車の使用環境を想定した本実験下では、歯車対の表面粗さの和は油膜厚さよりも大きいため混合潤滑状態であると推測でき、歯面鏡面化による潤滑状態の改善効果が確認できた。

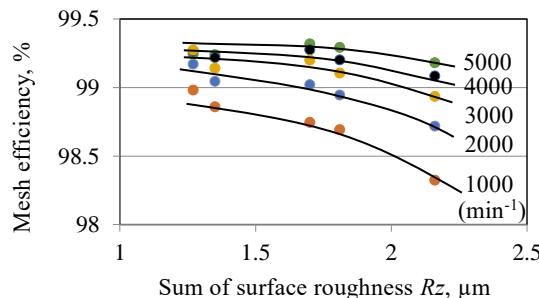


Fig. 2 Mesh efficiency measurement results

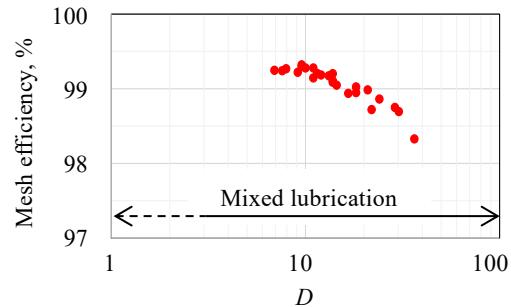


Fig. 3 Confirmation of the lubrication state with D value

3. 歯車諸元の工夫によるかみ合い効率向上

歯車のかみ合い範囲のすべり速度の総和を低減する歯車諸元の選択によってもかみ合い効率を向上できる。歯車のかみ合い状態の模式図を図4に示す。図中に歯車対の作用線上のかみ合い範囲とすべり速度分布の関係を合わせて示す。ピッチ点から離れた領域ほどすべりが大きくなり、かみ合い損失の増大を招く。これをかみ合い長さを変えずに青色の範囲から赤色で示した方向にかみ合い範囲を移動させることによってすべり速度の総和を低減することができる。かみ合い効率の計算結果を図5に示す³⁾。横軸は近寄りかみ合い率 ε_1 と遠のきかみ合い率 ε_2 の比である。 $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ を1に近づけるほどすべりの大きい範囲を避けられるため、かみ合い効率を向上できる。ここでは、0.1~0.15ポイントのかみ合い効率向上効果があった。

4. 摩耗との相互作用による歯面ピッティング損傷

上記の効率向上を狙った場合、歯面強度に相反影響を及ぼすことがある。図4のかみ合い範囲を赤色の領域に近づけた場合、かみ合い範囲の端部がピニオンの基礎円に近づくため歯面相対曲率半径が小さくなり接触応力の増大を招く。また、高負荷運転条件下において、歯対のたわみによって相手歯先のトロコイド干渉による歯丈方向の歯元えぐれが生じやすくなる。さらに、著者らの調査の結果、歯すじ方向も含めたマルチディレクショナル摩耗との相互作用

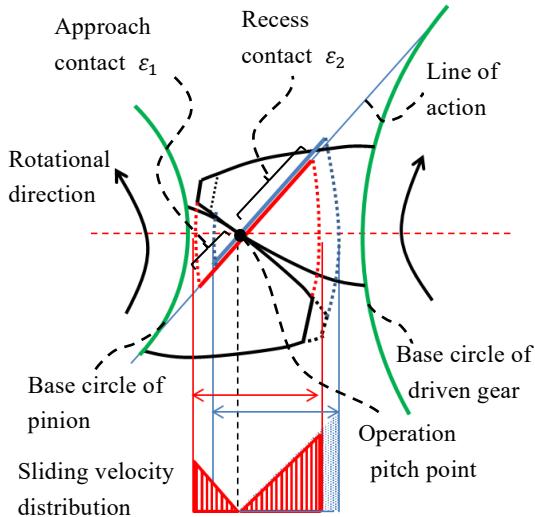


Fig. 4 Schematic of sliding velocity distribution of cylindrical gear pair for a relatively high gear ratio

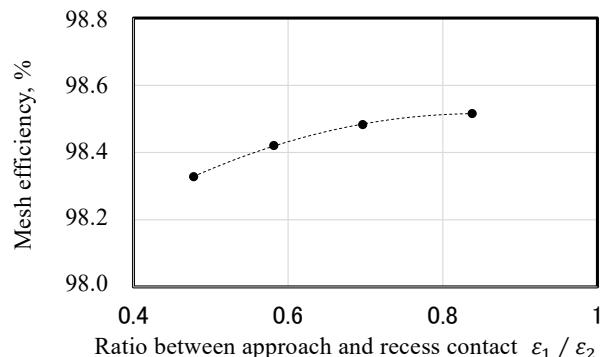


Fig. 5 Calculation results for mesh efficiency according to the contact ratio between approach contact ε_1 and recess contact ε_2

によって、敏感かつ複合的にピッティング寿命に影響をおよぼすことがわかった⁴⁾。図6に摩耗とピッティングの相互作用メカニズムを示す。摩耗進展状態に応じて、歯幅端部でピットが発生することもあれば、歯幅中央に寄った位置に発生することもある。図7(a)は歯丈方向の歯元えぐれによって生じた肩部からき裂が成長して早期にピットが発生した例である。図7(b)はマルチディレクショナル摩耗が歯幅端部のピットの起点となるき裂の成長を抑制し、ピットが歯幅中央に寄った位置で発生した例である。過酷な運転条件におけるはすば歯車のピッティング寿命とピット発生位置は、マルチディレクショナル摩耗との相互作用の影響を受ける。歯車の効率と強度の両立のためには、これらのメカニズムの深い理解と高精度な予測手法の構築が重要となる。

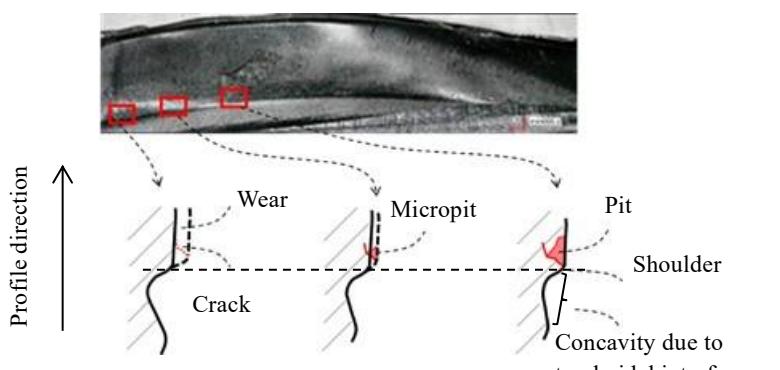


Fig. 6 Schematic diagram of mechanism assumption of interacting between multidirectional wear and pitting

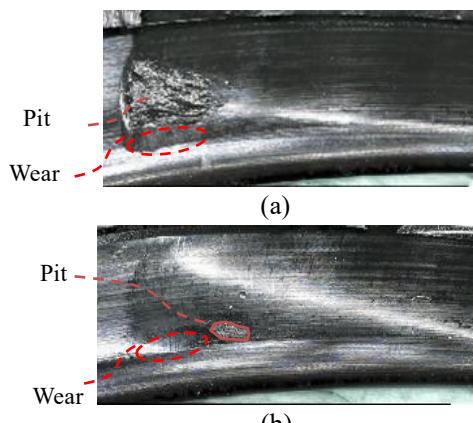


Fig. 7 Photograph of a tooth surface

5. おわりに

世界的な自動車の電動化の流れは疑う余地のない状況になっている。エネルギーの更なる効率的な利用のため、摩擦や摩耗といったトライボロジーに関連する要素技術の進化は欠かせない。ここで取り上げたような新技術適用や従来の使用環境を超えた場合に起きる未知の難課題を克服した先に、更なる性能の高次元バランスが達成できる。また、ここで紹介しきれない歯面コーティングや表面性状向上、潤滑方法などの革新も高性能化を支える技術といえる。

文献

- 都山司：ポリッシュ研削，JSME P-SCD380 研究成果報告書 (2016) 64.
- K. Kumagai, K. Morikawa & K. Takaki: A STUDY ON MESH FRICTION LOSS REDUCTION OF CYCLINDRICAL GEARS UNDER MIXED LUBRICATION CONDITION, Proceedings of MPT2017 (2017), 07-02.
- K. Kumagai, Y. Naito & S. Kurokawa: Pitting failure of helical gears induced by trochoidal interference and multidirectional, interacting wear, Transactions of the JAMDSM, Vol. 14, No. 4 (2020), DOI: 10.1299/transjsme.20-00109.
- K. Kumagai, H. Liu & S. Kurokawa; Non-Linear Wear Propagation Property and Prediction Method Having Influencing Pitting Failure of Helical Gears, Tribology Online, Vol. 17, No. 1 (2022) 44-53, DOI: 10.2474/trol.17.44.