

# はすば歯車のピッティング損傷に影響をおよぼす非線形摩耗進展特性とその予測法

## Non-Linear Wear Propagation Property and Prediction Method having Influence on Pitting Failure of Helical Gears

日産自動車株式会社 (非) \*熊谷 幸司 (非) 劉 函林 (非) 黒河 周平

Koji Kumagai\*, Hanlin Liu\*, Syuhei Kurokawa\*\*

\*Nissan Motor Co., Ltd., \*\*Kyushu University

### 1. はじめに

動力伝達要素として自動車など産業界で広く使用される歯車は、従来から高負荷時の歯対のたわみによってトロコイド干渉が発生し、ピッティング寿命が低下することが知られている。しかし、そのピッティング発生メカニズムは十分に明らかにされていない。著者らの先行研究<sup>1)</sup>では、高負荷条件下で歯車強度実験を行った結果、相手歯車歯先のトロコイド干渉による歯丈方向の歯元えぐれだけでなく、歯側端接触を起点とした歯すじ方向のマルチディレクショナルな摩耗進展が敏感かつ複合的に作用し、その進展量に応じてピッティング寿命とピット発生位置が変化するメカニズムを明らかにした。この複雑な摩耗進展状態が影響するピッティング損傷を評価するには、歯面接触状態に応じて変化するマルチディレクショナル摩耗の進展状態を予測できるようにする必要がある。

そこで本報告では、摩耗進展およびそのピッティング損傷への影響を評価できるようにするために、歯面形状の逐次変化を考慮した摩耗進展計算法を作成した。初期の歯端部形状を含めた接触状態の違いを考慮し、接触線上の荷重分担や歯面接触応力状態に応じた摩耗進展状態の変化を評価できるようにした。

### 2. 歯面形状逐次変化を考慮した摩耗進展計算法

久保・梅沢の方法<sup>2)</sup>で同時接触線上の荷重分布を求める円筒歯車の負荷かみ合い計算法<sup>3)</sup>をベースに、歯面摩耗状態の逐次変化を考慮した摩耗進展シミュレーションを作成した<sup>4)</sup>。図1に計算フローを示す。初期の歯面接触状態とともに負荷かみ合い計算を繰り返し、歯面摩耗状態の逐次変化を得る。

本計算には、図2に模式的に示した歯面接触線上の断面を分割した簡易セルモデルを導入した。セル*i*に接触荷重  $P_i$  が作用するものとし、接触応力  $\sigma_i$  が材料の摩耗発生クライテリオン  $\sigma_c$  を超えた場合に最表面のセルが除去されることとした。

$\sigma_c = 1900 \text{ MPa}$  としたときの歯面接触応力分布と摩耗進展状態の逐次変化の計算結果を図3示す。初期は  $\sigma_c$  を超えた接触領域を起点として摩耗が進展するが、その進展に伴って接触応力が緩和され、摩耗進展量は小さくなつた。

### 3. マルチディレクショナル摩耗のピッティング寿命への影響メカニズム

#### 3.1 歯端部修整量をパラメータとした摩耗進展計算結果

図4の2仕様の歯形誤差を持つ歯車について、上記の手法を用いて摩耗進展計算をおこなつた。摩耗進展量の多かったかみ合い始め端部付近の摩耗進展量の変化をまとめたものを図5に示す。なお、 $L$  はかみ合い端部からの歯すじ方向評価位置である。図5(a)では、かみ合い端部の摩耗量が最も多かつた。また、繰り返し数の増加とともに摩耗量の変化は小さくなつた。図5(b)では、エンドリリーフの影響により、やや歯幅中央に寄つた位置での摩耗量が最も多かつた。また、繰り返し数の増加とともに接触応力が緩和され、摩耗は進展しなくなつた。いずれの場合も初期摩耗が早く、その後、接触応力が緩和されて摩耗が緩やかに進展またはストップする非線形摩耗進展特性が得られた。

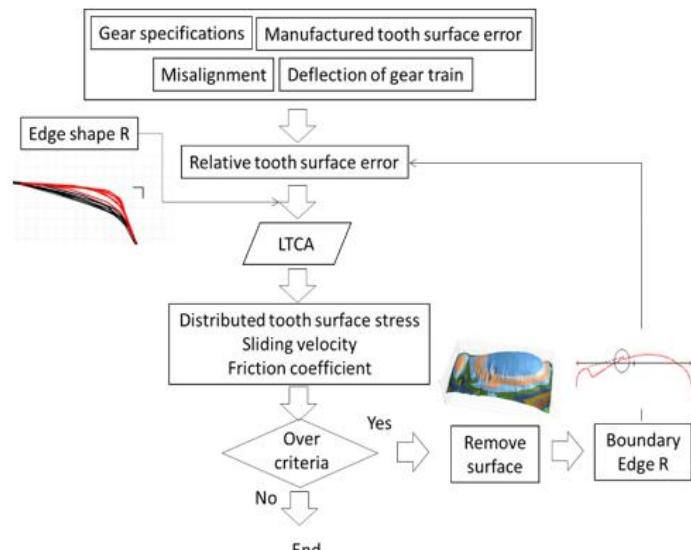


Fig. 1 Calculation flow of sequential changes of tooth contact stress and wear

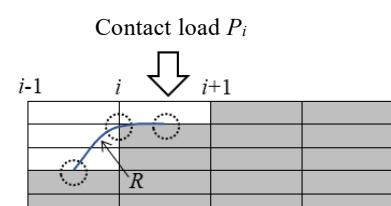


Fig. 2 wear propagation model

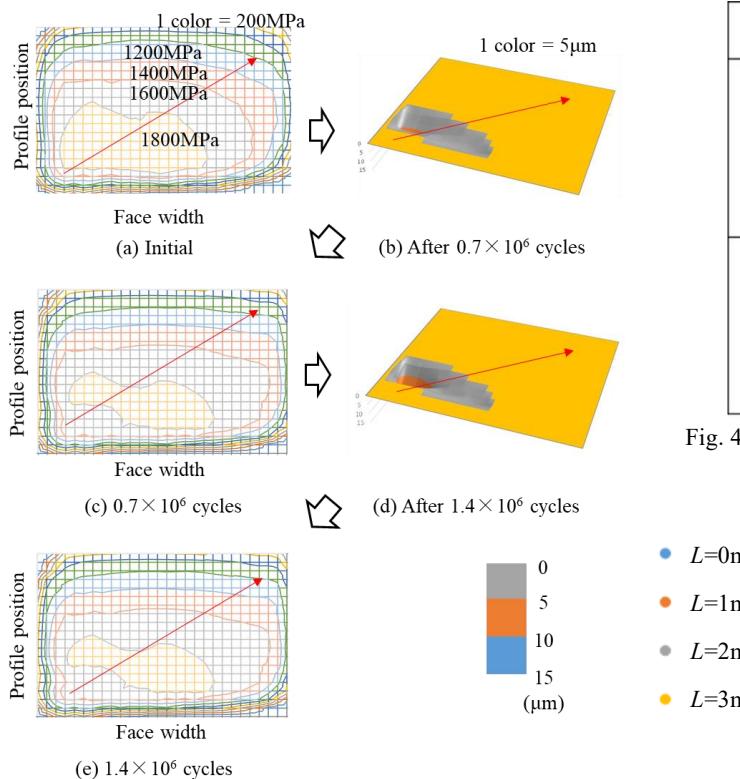


Fig. 3 Relationship between wear propagation and contact stress changes when wear criterion is 1900 MPa

### 3.2 非線形摩耗進展特性の実験検証

計算で得られた摩耗進展特性の検証のため歯車耐久実験をおこなった。実験を定期的にストップし、マイクロスコープを使って歯面摩耗状態の変化を詳しく調べた。図5と同様の方法で摩耗進展状態をまとめたものを図6に示す。計算結果と同様に摩耗量が多い初期摩耗とその後緩やかに摩耗量が変化する定常摩耗に大別できる非線形摩耗進展特性が得られた。また、図示は省略するが、その摩耗進展特性に応じてピッキング寿命とピット発生位置が変化していた。

## 4. 結論

歯面接触状態の逐次変化に着目して摩耗進展計算および実験検証をおこない、初期摩耗と定常摩耗に大別できる非線形摩耗進展特性が得られた。この摩耗特性がピッキング寿命およびピット発生位置を変化させる。過酷な運転条件におけるピッキング寿命評価には従来考慮されていた最大接触応力値だけでなく、摩耗進展特性に影響する接触応力分布の考慮も重要である。

## 文献

- 1) 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.
- 2) 久保・梅澤：誤差をもつ円筒歯車の荷重伝達特性に関する研究、第1報、基礎的の考察、日本機械学会論文集、Vol. 43, No. 371 (1977), pp. 2771-2779.
- 3) 森川・西原・松本：円筒歯車のかみ合い効率予測とその向上、日本機械学会論文集C編、Vol. 78, No. 788 (2012), pp. 225-234.
- 4) 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.

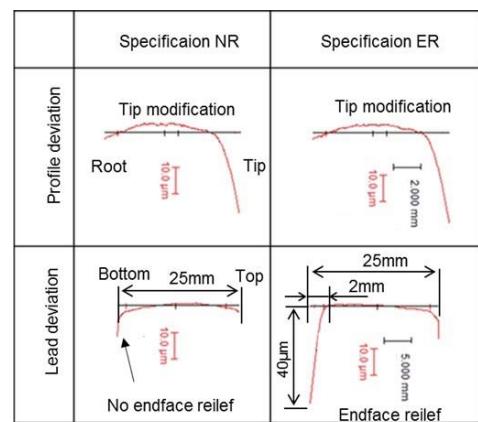
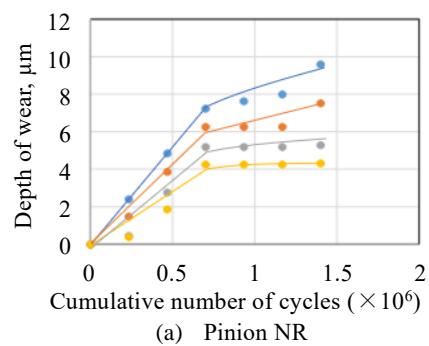
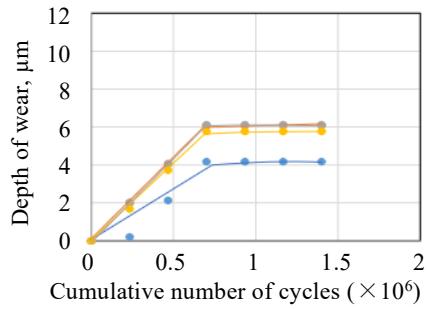


Fig. 4 Profile, lead deviations and end relief shape

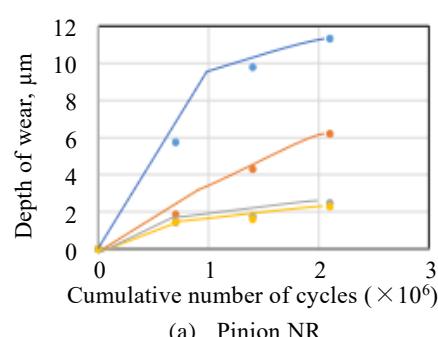


(a) Pinion NR

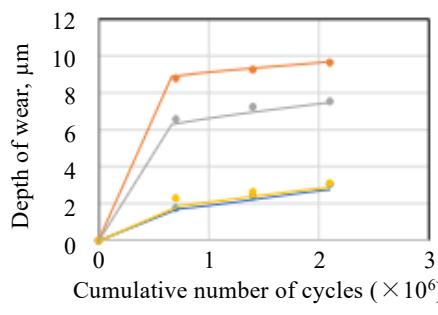


(b) Pinion ER

Fig. 5 Calculation results of depth of wear



(a) Pinion NR



(b) Pinion ER

Fig. 6 Experimental results of depth of wear