

電気自動車用トランスミッション歯車の摩耗進展量 制御に基づくピッチング限界寿命向上に関する研究

熊谷, 幸司

<https://hdl.handle.net/2324/4475118>

出版情報 : Kyushu University, 2020, 博士 (工学), 課程博士

バージョン :

権利関係 : Public access to the fulltext file is restricted for unavoidable reason (3)

氏 名 : 熊谷 幸司

論 文 名 : 電気自動車用トランスミッション歯車の摩耗進展量制御に基づく
ピッチング限界寿命向上に関する研究

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 約

地球環境保護の観点から CO₂ 排出量の大幅な削減が求められている。自動車の場合、CO₂ 削減の一方策に環境対応車の普及が挙げられ、特に電気自動車(EV)の開発加速が急務である。EV では 1 回の充電で走行できる航続距離の確保が主要課題の一つであり、モーター駆動力を効率良くタイヤに伝達することが求められる。歯車はその動力伝達機構の要素部品としての役割を担っており、EV に求められるコンパクト性、高効率な動力伝達、静粛性を低価格で満たすことができる。歯車は、98%~99.5%程度の高い動力伝達効率を有する機械要素であることが知られているが、上記のような航続距離確保のため、従来は見過ごされてきたような 0.1 ポイント程度の更なる損失低減も必要とされるようになってきた。

歯車のかみ合い損失低減方策はいくつかあり、一例として歯車諸元の工夫によるアプローチがある。自動車の最終減速段に用いられるはずば歯車対の場合、作用線上のかみ合い範囲を小歯車の歯元側に近づける諸元とすることによって、歯対のすべり速度の総和を減らしてかみ合い損失を低減することができる。しかし、かみ合い範囲が小歯車の基礎円に近づくため、歯対の相対曲率半径の減少が接触応力の増大を招き、歯車損傷を助長する懸念がある。

従来、歯車の研究は高強度化や低騒音低振動化に関するものが多くなされてきたが、上記のように EV 用歯車ではそれに加えてかみ合い損失低減のニーズも高まっている。しかし、これらのかみ合い性能を高次元で実現できるように限界設計をした場合、これまでは顕在化していなかった未知のメカニズムによる歯面損傷が現れるようになってきた。特に高負荷条件下における歯面のえぐれや歯面形状変化が要因と考えられるものが目立つようになってきたが、その発生メカニズムや歯車寿命への影響は十分に明らかになっていないとは言えず、限界設計の障害となっている。

そこで本研究は、かみ合い性能の高次元化を目指した場合の歯面損傷の発生メカニズムおよび歯車寿命への影響を明らかにし、歯面強度向上の指針を示すことを目的とする。

そのために歯車強度試験を実施し、高負荷時の歯面形状変化によるピッチング損傷への影響を調べた。その結果から、歯形方向だけでなく歯すじ方向のマルチディレクショナル摩耗が相互作用してピッチング寿命およびその発生位置を変化させるメカニズムを明らかにした。なお、本研究では、歯元えぐれおよび摩擦仕事による歯面摩耗が、歯対のかみ合いの繰返しによって歯形方向だけでなく歯すじ方向にも拡がっていく状態をマルチディレクショナル摩耗と呼ぶこととする。

また、摩耗進展状態を再現するシミュレーターを開発し、合わせて実機検証することによって、その摩耗進展特性が非線形性を有することを示した。さらには、その非線形摩耗進展特性を積極的にコントロールすることによってピッチング限界寿命向上を達成できる新たな視点を提案した。

上記内容を体系的にまとめた本論文は緒論と結論を含む 6 つの章から構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的および本論文の構成について述べた。

第2章では、歯車諸元を工夫してかみ合い効率向上を目指した場合に相反すると考えられる歯面強度への影響を明らかにするため、歯車強度試験をおこなって歯面損傷状態の特徴を調べた。高精度歯車測定機および顕微鏡を用いて試験後の歯面損傷状態を詳細に観察した結果、高負荷条件下における歯面のピッチング損傷およびピット発生位置には、従来想定されていた歯形方向のトロコイド干渉だけでなく、歯すじ方向のマルチディレクショナル摩耗が敏感かつ複合的に影響をおよぼすことがわかった。本メカニズムではピッチング寿命には摩耗が介在していること、また、トロコイド干渉を緩和するための歯先修整だけでなく、歯すじ方向の摩耗特性を決める歯幅側端部修整の導入が重要となる。これらの歯面修整および摩耗現象を導入することによってピッチング寿命およびピット発生位置をコントロールできる可能性がある。

第3章では、2章で示した歯面損傷メカニズムを評価できるようにするため、歯面接触状態の逐次変化を考慮した摩耗進展シミュレーターを構築した。本計算法ではエッジ接触による接触応力増大を考慮しながら歯面形状逐次変化の繰返し計算ができるように、簡便なセルモデルを導入した。また、摩耗発生クライテリオンを設定し、歯面に作用する負荷がそのクライテリオンを超過した場合に歯面表面が徐々に摩耗していくようにした。本計算法を用いて摩耗進展量を評価した結果、歯側端部の修整形状違いによってマルチディレクショナル摩耗特性が変化してピッチング寿命およびピット発生位置の変化が導かれることを示した。また、接触応力状態の変化に応じて、いわゆる初期摩耗と定常摩耗のような非線形性が現れることを示した。

第4章では、歯車強度試験を実施して歯面接触状態に応じた摩耗進展量の変化およびその非線形特性の検証をおこなった。ここでは定期的に実験をストップして歯形誤差形状を測定し、繰返しかみ合い回数の増加に伴う歯面形状の変化を調べた。その結果、3章と同様に、歯側端部修整形状の違いおよび接触応力状態に応じて、マルチディレクショナル摩耗の非線形進展特性が変化し、ピッチング寿命やピット発生位置も変わることを実証した。また、本実験結果の考察から、新たなピッチング限界寿命向上案を示した。摩耗発生が避けられないような高負荷条件下においては、従来はネガティブ因子と捉えられていた摩耗をコントロールし、緩やかに進展させることによってピットのき裂進展が抑制できる。

第5章では、これまでの摩耗進展計算と実験検証結果を踏まえ、摩耗進展とピットのせめぎ合い現象を活用することによってピッチング限界寿命を向上させる指針をまとめた。更なる寿命向上のためには歯形方向および歯すじ方向の端部リリース量を適切に設定する必要がある。歯端部修整と通常歯面全体修整を組み合わせることで初期の歯面接触応力分布を適切に設定し、摩耗を緩やかに進展させた場合にはき裂成長の抑制効果が継続する。以上の結果を得るためには、ピッチング寿命は従来の最大接触応力値によるものではなく、歯面上の接触応力分布による評価法の導入が重要となる。

第6章では、本論文の総合的なまとめと、本研究の今後の展望について述べた。