

氏名	すずきともひろ 鈴木智博
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成12年2月9日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	平成4年3月 名古屋大学大学院 工学研究科 金属工学及び鉄鋼工学専攻 博士課程前期課程 修了
学位論文題目	自動車歯車用浸炭焼入れ鋼のピッチング強度
論文審査委員	主査 東北大学教授 井上 克己 東北大学教授 庄子 哲雄 東北大学教授 加藤 康司 東北大学教授 加藤 正名

論文内容要旨

第1章 緒論

歯車のピッチングは多くの要因の影響を受ける複雑な現象である。歯車のピッチングに関する従来の研究は低～中硬度材を対象とするものが多く、浸炭異常層が存在する浸炭材の実験はほとんどなされていない。また、歯元曲げ強度向上のために用いられるショットピーニングのピッチングに対する影響も不明確である。しかし、自動車用浸炭歯車は異常層が存在する状態で使用され、ショットピーニング処理が施される場合も多い。このように、自動車用浸炭歯車には高い強度と信頼性を要求されるので、ピッチングに対するこれらの影響を総合的に研究することは重要である。そこで、本研究では、浸炭鋼のピッチングに対する材料の表面性状を表す要因（材料要因）として、異常層と表面粗さ、硬化層硬さ、ショットピーニングに、運転要因として、すべり、潤滑油温度と粘度に注目して、その定量的な影響を解明する。

第2章 2円筒試験機を用いるピッチング疲労試験

一つの要因に着目した実験を可能にすることを重視して、本研究における実験法として歯面の転動疲労をモデル化した2円筒型のローラ試験を選択し、自動車用歯車のピッチングを対象としてその実験条件を設定した。すなわち、応力状態を揃えるために試験片の相対曲率半径はトランスミッション歯車歯面の相対曲率半径に合わせ、材料および熱処理には代表的な歯車材であるSCr420鋼の浸炭焼入れ焼戻しを用いた。また、すべり率や回転速度は自動車用歯車においてピッチングの発生しやすい駆動歯車の歯元側歯面における値に合わせ、これらの条件を本研究における標準的な実験条件とした。

第3章 ピッチングに対する浸炭異常層および表面粗さの影響

浸炭異常層と表面粗さに注目し、試験後の異常層の有無と表面粗さによってピッチング強度が評価できることを明確にした。すなわち、従来は不明確であったピッチングに対する異常層の影響について、本章では、異常層自体の強度が低いこと、異常層が試験後に存在する場合は試験中に摩耗消滅する場合あるいは化学研磨によってあらかじめ除去された場合と比べて強度が約30%低下することを示した。また、試験後の表面粗さからピッチング強度を推定できることを明らかにし、その推定に必要な試験後の表面粗さは試験前の性状から見積ることができることを示した。

第4章 ピッチングに対する硬化層硬さの影響

内部起点型と表面起点型それぞれのピッチング形態について、硬化層硬さに注目した。内部起点型ピッチングについては、従来の研究で硬さがピッチング強度の指標になることは知られていたが、浸炭鋼のような高硬度材を対象とした場合の適用範囲、あるいは、その定量性は不明確であった。本研究では破壊起点の硬さとせん断疲労強度の比例関係がHv450～800の範囲で成立すること、高纯净度鋼ではせん断疲労強度を硬さから τ_w [MPa] $\approx 0.94Hv$ [kgf/mm²] によって求められることを示した。一方、表面起点型ピッチングに対しては、硬さの増加に伴ってピッチング強度が低下する知見が得られた。また、これらを総合して、内部起点型と表面起点型に対する強度が両立する最適な硬化層硬さを提示した。

第5章 ピッチングに対するショットピーニングおよび圧縮残留応力の影響

第3章および第4章の結果を用いてショットピーニング材におけるピッチング試験結果から表面粗さと硬さの寄与を除くことにより、残留応力の影響を定量化した。この結果、ピッチング強度の変化 P は、粗さの変化 R 、硬さの変化 H 、圧縮残留応力の変化 S を用いて、

$$P = R^{0.44} \cdot H^{0.45} \cdot S^{0.29} \quad (1)$$

と表される。すなわち、圧縮残留応力はピッチングに対して有効であること、この式によってショットピーニングを施した場合のピッチング強度を予測できることを示した。これはショットピーニングの影響を粗さ、硬さ、残留応力という表面性状の変化に着目して定量化したものであり、従来は不明確であったピッチング強度向上のためのショットピーニング条件が明確になった。

第6章 ピッチングに対するすべりに関係する因子の影響

回転速度やすべり率を変えた実験から、すべりによるピッチング形態の違いを明らかにした。すなわち、すべりの無い場合は内部起点型ピッチングを示し、すべりを与えた場合は表面起点型を示すことを明らかにした。さらに、すべりを伴う歯車の主たる損傷形態である表面起点型ピッチングについては、実験条件を工夫することによって温度や材料の硬さ、組織等の変化の影響を分離して、純粋なすべりの影響のみを解析することに初めて成功した。この結果、すべりに関する因子のうち、すべり率がピッチング強度と相関が高いことを明らかにし、ピッチング寿命が表面突起の接触頻度 N_{asp} によって予測できることを示した。

第7章 ピッチングに対する潤滑油の温度と粘度の影響

本章では潤滑油温度と粘度に注目した。焼戻し温度までであれば潤滑油温度は材料の硬さ、組織等に影響しないことを示し、潤滑油温度を変えた場合のピッチング強度は潤滑油の動粘度で整理できることを明らかにした。さらに、潤滑油動粘度が約5cSt以上であればピッチング強度に影響しないこと、それ以下になると表面に発生したき裂の開口量を増大させて、ピッチング強度を低下させることを明らかにした。自動車用歯車の通常の使用条件であれば潤滑油動粘度が5cSt以下になることは考えにくい。従って、本章の実験結果から潤滑油の温度と粘度の変化が自動車用歯車のピッチング強度を低下させることはないことが明らかになった。

第8章 ピッチング損傷の発生と歯車の強度設計法

第3章から第7章のローラ試験結果で得られた異常層が存在する浸炭鋼のピッチングに対する要因解析の結果を総合し、内部起点型および表面起点型ピッチングの損傷形態の特徴と発生条件を明示し、損傷形態ごとに、ピッチングに影響する多くの要因の解析に基づく寿命予測式を導いた。すなわち、内部起点型ピッチングはせん断応力 τ_{zz} とせん断疲労強度 τ_w の比が最大となる位置で発生し、その予測寿命 N_{pi} は、

$$N_{pi} = 1.0 \times 10^7 \cdot \{ (\tau_{yz} / \tau_w)_{MAX} \}^{-12} \quad (2)$$

と表される。また、表面起点型ピッチングの寿命は、すべり、異常層、表面粗さ、硬さ、残留応力の影響を受け、その予測寿命 N_{ps} はHertz応力 p_{max} 、表面突起の接触頻度 N_{asp} 、粗さの変化 R 、硬さの変化 H 、圧縮残留応力の変化 S を用いて、

$$N_{ps} = C \cdot p_{max}^{-8.1} / N_{asp} \cdot R^{3.7} \cdot H^{3.7} \cdot S^{2.4} \\ | C = 4.6 \times 10^{33} (\text{異常層あり}), C = 4.1 \times 10^{34} (\text{異常層なし}) \quad (3)$$

と表される。さらに、このローラ試験による寿命予測式を用いて歯面のピッチング寿命を計算し（図1）、動力伝達用歯車の新しいピッチング寿命予測法を提示した。

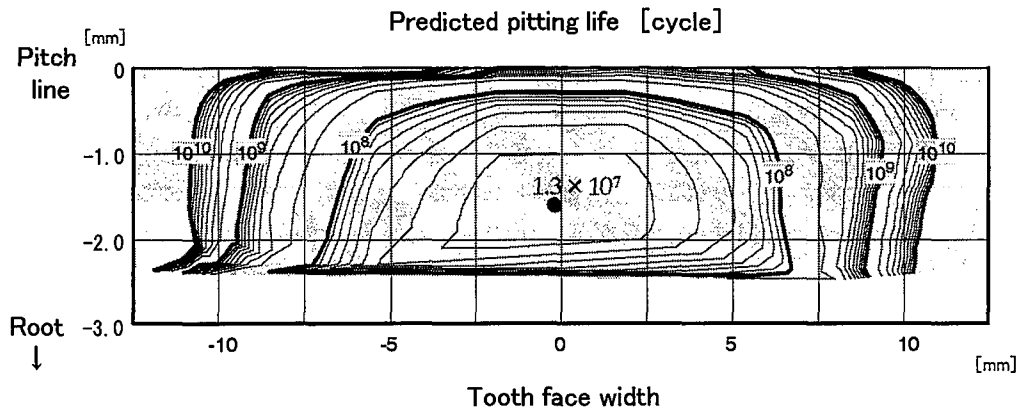


図1 ローラ試験による寿命予測式から推定した自動車用歯車歯面上の表面起点型ピッチングの予測寿命分布

第9章 結論

本研究では、歯車試験と対応づくように実験条件を設定してローラ試験を実施し、浸炭鋼のピッチングに対する材料および運転条件の要因とその定量的な影響を解明した。さらに、得られた成果を総合して、ピッチング損傷形態ごとに寿命予測式を導き、これを用いた歯車のピッチング寿命予測法を提示した。すなわち、従来の研究では不明確であった浸炭異常層やショットピーニングの影響を考慮して、自動車用浸炭歯車のピッチング寿命の予測を可能にした。この寿命予測によって、従来は経験的に行われていた浸炭歯車のピッチング強度設計や高強度化のためのショットピーニング条件の決定が普遍性の高い定量的な手法に進展し、初期設計段階からピッチングに対する強度を確保することが可能になる。すなわち、本研究の成果は自動車用浸炭歯車のピッチングに対して最適設計・高強度化の指針を明確に示すものであり、小型軽量化と負荷容量向上の要求を両立させ、かつ信頼性の高い歯車の設計を可能とするものである。

審査結果の要旨

自動車用変速機の小型軽量化には歯車の高強度化が不可欠であり、このために浸炭焼入れとショットピーニングを施すことが多い。この場合ピッチング損傷が問題となるが、表面性状と潤滑等の条件が複雑に影響し合うので、その強度評価には未解明な点が多い。本論文は、損傷が問題となる歯車を模したローラ試験に基づいて要因解析を行い、ピッチング強度に対する表面性状とすべりや潤滑油粘度の影響を定量化したものであり、全編9章からなる。

第1章は緒論であり、本研究の背景と目的および論文の構成について述べている。

第2章では、要因解析が容易な2円筒ローラ試験機の構成と、歯面の相対曲率を基にした試験片形状の決定について詳述し、歯面間のすべりを考慮した標準的な実験条件下でピッチング寿命がヘルツ応力に比例することを確認している。

第3章では、浸炭異常層が試験後まで残存する場合のピッチング強度が摩耗により途中で消滅する場合や始めに除去する場合より約30%低下することを示すとともに、試験後の粗さから強度を推定できることを明らかにし、推定に必要な粗さが試験前の性状から見積もれることを例示している。これらは有用な知見である。

第4章では、内部起点型ピッチングでは硬さが増すほど高強度となりビッカース硬さ800までの範囲で硬さから強度を推定できることを示している。また、表面起点型では硬さが増すと強度が低下することを明らかにし、これに基づいて強度が両立する最適な硬化層硬さを提示している。これは重要な成果である。

第5章では、前二章の結果を用いてショットピーニング材の試験結果から粗さと硬さの寄与を除くことにより、圧縮残留応力の有効性を定量化している。また、ピッチング強度を実験式表示して強度向上の指針を示している。これは歯車強度設計の上で有用な成果である。

第6章では、すべり率とピッチング強度の相関が高いことを明らかにし、ピッチング寿命が表面突起の接触頻度によって予測できることを示している。これは重要な知見である。

第7章では、潤滑油の動粘度が5cSt以上であればピッチング強度は低下しないことを示し、自動車用歯車の通常の潤滑状態は強度に影響しないことを明らかにしている。

第8章では、得られた結果を総合して損傷形態ごとにピッチング寿命予測式に纏め上げている。これに基づき歯車の新しい寿命予測法を提示している点は自動車用浸炭歯車を設計する上で有用である。

第9章は結論である。

以上要するに本論文は、浸炭鋼のピッチング強度に対する材料要因および運転条件の影響を定量的に解明し、自動車用浸炭歯車の高強度化の指針を明確にしたものであり、機械工学および歯車工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。