

ます やま とも や

氏名	増山知也
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成11年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)精密工学専攻
学位論文題目	表面性状に着目した浸炭歯車の曲げ強度評価
指導教官	東北大学教授 加藤正名
論文審査委員	主査 東北大学教授 加藤正名 東北大学教授 庄子哲雄 東北大学教授 渡邊忠雄 東北大学教授 井上克己

## 論文内容要旨

### 第1章 緒論

現在は環境への負荷を低減するために、歯車装置も安全でかつ軽量化への限界を追求する設計が求められている。小型軽量化と高強度化とは同義であり、材料の高強度化に対する成果は許容応力の上昇として強度設計に反映されるが、従来の強度設計法の枠組みのなかで、軽量化の限界を追求するには幾多の困難がある。

そのため、許容応力と使用応力とから設計する従来の強度設計の立場を一旦離れ、破壊に至る疲労き裂の進展に着目し、破壊の過程を逆にたどる。まず、き裂長さの測定法として電位差法を採用し、測定感度の実用的な限界を知る。また、歯元き裂進展に伴うアコースティックエミッション(AE)を計測し、材料の硬さに着目してAEの特徴を明らかにするとともにAEによるき裂生成検知の可否について検討する。以上の結果に基づき、き裂計測技術と、線形破壊力学に則った解析技術とによって、全寿命中のき裂進展過程を明確にすることができる。そして、き裂進展過程に対する解析では特徴付けることが出来ないき裂生成過程に着目する。き裂生成に影響を及ぼす表面性状の影響を定量化して表わすために歯元に人工切欠きを加工して疲労試験を行ない、切欠きによる強度の低下と強度に影響を及ぼさない限界の切欠き寸法を求める。そして、き裂生成の原因となる潜在欠陥とき裂進展に至る表面層の様子を詳細に観察する。観察結果と切欠きを持つ歯の試験結果を踏まえ、表面層に含まれる欠陥の影響を考慮に入れた新しい曲げ強度評価法を提案する。

### 第2章 歯元き裂長さ測定

浸炭歯車の曲げ強度評価に際して、歯元き裂進展の解析を行うことによって(1)き裂材に対して余寿命、強度の評価・保証を行うこと。(2)き裂発生に深くかわる表面層の影響を表現することが可能となる。そこで第2章では、歯元き裂長さの測定法として電位差法を適用した。はじめに境界要素法を用いて静電場問題として直流法に対する解析を行い、き裂長さと正規化した電位差との関係を得た。そして、歯元き裂の発生位置と傾きの影響を調べ、電位差に対して発生位置が大きく影響することと、いずれの場合も短いき裂に対する感度が低いことを明らかにした。

さらに、交流法による電位差測定実験を行い、負荷開始初期の電位差を用いて正規化した電位差が直流法に対する計算結果とほぼ一致することが知られた。それ故、歯元き裂計測に対して直流法による計算結果を測定電位差の校正曲線として用いることができる。

従って電位差法によるき裂長さ測定は、損傷を受けた歯の余寿命評価に対して有効であるが、現段階では強度評価に重要な1mm程度以下の小さいき裂の計測には精度が不十分であることが知られた。

### 第3章 浸炭歯車のき裂進展に伴うアコースティックエミッション

き裂進展に伴う情報を直接知ることで、き裂発生 の時間と場所の把握や実機運転中の故障診断に 応用できる。第3章では、浸炭歯車の曲げ疲労き裂進展に伴うアコースティックエミッション (AE) の特徴を硬さに着目して明らかにする。

浸炭歯車の AE 特性を記述する基礎資料を得るため、硬さの異なる焼入れ炭素鋼 S35C, S45C, S55C, SK3 を用いて三点曲げ疲労試験時の AE 計測を行った。その結果 AE エネルギー率は応力拡大係数幅のべき乗に比例すること、同一の応力拡大係数幅に対しては、硬さが高いほど大きいエネルギー率を取ることが知られた。

浸炭歯車の曲げ疲労き裂進展に伴う AE 計測実験では、クラックゲージを用いたき裂生成の検知以前に、大エネルギーの AE が測定された。その後のき裂進展の間には大きいエネルギーを持つ AE の発生頻度が下がり、き裂長さが 3mm を超えて最終破壊に近づくとき再び大エネルギーの AE が測定された。このような浸炭歯車の AE 特性を、き裂先端の硬さと応力拡大係数幅をパラメータとして、炭素鋼試験により得られた AE の基本特性を利用してシミュレートしたところよく一致した。

き裂進展の初期の AE を計測した後は、電位差法を用いてき裂長さを知ることができるので、破壊力学的解析と合わせてき裂進展速度や、き裂進展下限界応力を予測することができ、余寿命評価やき裂材としての強度を知ることができる。

#### 第4章 人工切欠きを持つ歯の強度

前章までに歯元き裂計測の特徴を長さの計測および進展情報の計測の観点から明らかにした。き裂に対する計測技術と、線形破壊力学に則った解析技術によって、全寿命中のき裂進展過程の挙動を明確にすることができる。次に明らかにすべき点は、き裂生成に関わる表面層の影響である。表面層の特性として最も注目すべき因子は機械加工による表面傷や母材に含まれる介在物、空孔などの潜在欠陥の大きさであると考えられている。一般の高強度材では繰り返し負荷を受けたときに表面層の潜在欠陥からき裂が生成し、進展すると考えて良い。

本章では、浸炭歯の欠陥材としての挙動を定量的に明らかにするために、潜在欠陥を人工欠陥で模して表現し、歯元に人工切欠きを加工して疲労試験を行い、切欠きを持つ歯の強度と強度を低下させない限界の切欠き寸法を知る実験を行った。

人工切欠きはその深さによって2通りの加工法を採用した。50 $\mu\text{m}$  から 200 $\mu\text{m}$  の深さとなる切欠きはワイヤカット放電加工によって作製し、50 $\mu\text{m}$  より短い切欠きは FIB (Focused Ion Beam) 加工により作製した。これらの加工法を採用することで、浸炭材のような高強度材に対して適用できる任意の大きさの人工微小切欠きを作製することに初めて成功した。

35 $\mu\text{m}$  程度の切り欠きを持つ歯は、切欠きの無い歯の疲労強度より小さい応力レベルで折損し、切り欠きが大きくなるほど強度が低下する。折損した歯について破壊の起点に注目すると、19 $\mu\text{m}$  より小さい切欠きを持つ歯はすべて切欠き以外の部分から折損し、20 $\mu\text{m}$  より大きい切欠きを持つ歯はすべて切欠きを起点に折損している。従って、本試験歯車において強度に影響を及ぼさない限界の切欠き深さ  $a_{nth}$  は 20 $\mu\text{m}$  であることが知られた。

本章で明らかにした切欠き深さと強度との関係は、損傷を有する歯車を安全に継続運転する為のデータとして有用である。深さ 10 $\mu\text{m}$  のオーダの微小切欠きが浸炭歯車の強度を明らかに低下させることが知られたことから、強度に及ぼす影響が同寸法のき裂と人工微小切欠きとで同等と仮定すると、AE や電位差法では検出が不可能な微小き裂の存在が大きく強度に影響を及ぼすことがわかった。

#### 第5章 浸炭表面層の観察

高硬度材では、硬さと欠陥に依存して疲労強度が決定されることから、歯元表面層には第4章で求められた限界切欠き深さと等価な潜在欠陥が存在していると考えられる。本章では浸炭歯車のき裂生成にかかわる表面潜在欠陥の特徴を明らかにする。

まず、浸炭表面層の EPMA (Electron Probe Micro Analyzer) 分析を行い、浸炭異常層の最表面部には Cr と Mn が酸化物となって析出していることを確認した。それよりやや深部の粒界では Si が偏析していることが知られた。また、内部の浸炭硬化層部分には Mn 系の介在物が存在することを認めた。

また、き裂生成直後の表面層を電子顕微鏡 (SEM) により詳細に観察し、析出物周辺や粒界に添った形でき裂が多数個生成していることを認めた。

さらに EPMA 分析結果と SEM 観察結果とを踏まえて、浸炭による表面異常層内の酸化物・粒界などが応力集中源になってき裂が生成、進展するモデルを提案した。

本章で明らかにした浸炭表面層に存在する欠陥の特徴と、欠陥を起点として多数の微小き裂が生成していることを踏まえて浸炭歯車の強度評価を行うことが必要である。

## 第 6 章 表面性状に着目した強度評価

限界切欠き深さを基準にした強度評価式を提案するに当たって、浸炭により表面異常層が存在するという特性を考慮し、新たに電解研磨により異常層を除去した歯車について限界切欠き深さを求める実験を行なった。その結果、浸炭のみ、浸炭後 10 $\mu$ m 研磨、20 $\mu$ m 研磨の各歯車についてそれぞれ限界切欠き深さ 22, 14, 6 $\mu$ m が得られ、異常層を完全に除去した歯車においても限界切欠き深さが存在することが知られた。

人工切欠き歯の試験結果と第 5 章で行った表面層の観察結果とを踏まえて、表面異常層の特質を考慮に入れ、浸炭による異常層が存在する場合と存在しない場合に分けて、材料の硬さと欠陥寸法をパラメータとし、負荷応力比と残留応力の影響も考慮した強度評価式を提案した。異常層が存在する場合には異常層厚さ、存在しない場合には介在物寸法を欠陥寸法として採用する。異常層が存在する場合の強度評価式をこれまでに得られている疲労試験結果に適用し、誤差が  $\pm 15\%$  程度であることが知られた。

## 第 7 章 結論

第 7 章は結論であり、本研究で得られた結果をまとめて示した。

## 審査結果の要旨

現在は、環境への負荷を低減するために、歯車装置も安全でかつ軽量化への限界を追求する設計が求められている。軽量化と高強度化とは同義であり、材料の高強度化に対する成果は許容応力の向上として強度設計に反映される。しかし、従来の強度設計法の枠組みのなかで、軽量化の限界を追求するには幾多の困難がある。

本論文は、新しい強度評価法を提案することを目的として、浸炭表面層の材料特性と破壊に至るき裂の生成ならびに強度との関連を明らかにしたもので、全編7章よりなる。

第1章は緒論であり、本論文の背景、目的、構成が述べられている。

第2章では、電位差法による歯元き裂長さの計測について述べている。境界要素法による電場解析と交流電位差法による測定実験とを行い、電位差法は比較的長いき裂に対して十分な精度で適用できることを明らかにし、損傷を受けた歯の余寿命評価に有効であることを示している。

第3章では、浸炭歯車の曲げ疲労き裂進展に関する情報としてアコースティックエミッション(AE)の計測実験を行っている。き裂が浸炭硬化層を通過する際と最終破断に至る際に高レベルのAE発生があるという浸炭歯車のAEの特徴を硬さと応力拡大係数をパラメータとして記述しているが、これは優れた成果である。

第4章では、浸炭歯の表面層に存在する潜在欠陥の強度に及ぼす影響を明らかにするために、歯元に人工切欠きを加工して疲労試験を行っている。ワイヤカット加工や集束イオンビーム加工を用いることにより任意の長さの微小な切欠きを作成することに成功し、切欠きの深さと強度との関係を調べ、強度を低下させない限界の切欠き深さを決定している。この限界深さは強度に及ぼす表面層潜在欠陥の影響を定量化する指標として有用であり、優れた着想に基づく成果である。

第5章では、き裂生成にかかわる表面潜在欠陥の特徴を明らかにするために、浸炭表面層を丁寧に観察し、浸炭異常層内ではCrやMnの酸化物が存在し、Siが粒界に析出していることを示している。また、それらの欠陥を基点として多数の微小き裂が生成する過程を明らかにしている。

第6章では、異常層を除去した歯車について限界切欠き深さを求める実験を行ない、第5章で行った観察結果をも踏まえて、限界切欠き深さと潜在欠陥との対応関係を明らかにし、浸炭歯車の表面性状に着目した新しい強度評価法を提案している。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、浸炭歯車の曲げ疲労強度について、破壊にいたるき裂の生成と進展との状況を詳細に観察し、き裂生成の起点となる表面層の欠陥が強度に及ぼす影響を定量化したものであり、機械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。