

機関番号：51501
 研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20360071
 研究課題名（和文） 損傷指標の同定に基づく浸炭歯車の荷重伝達と寿命の保証法
 研究課題名（英文） A guarantee of strength and life of carburized gears based on the damage variables.
 研究代表者
 増山 知也（TOMOYA MASUYAMA）
 鶴岡工業高等専門学校・機械工学科・准教授
 研究者番号：80282094

研究成果の概要（和文）：歯車装置においては、損傷確率を評価し、信頼性を考慮に入れて寿命を推定する設計が必要である。そのため、本研究ではまず繰り返し荷重を受ける平板試験片を用いて、ひずみの蓄積を計測し、有効応力と損傷変数変化率の関係として整理した。ここでのひずみ計測には画像相関法を用いており、その精度向上のための表面塗装処理法の考案と、分解能向上のためプログラムの改良を行った。さらに、有効応力と損傷変数の関係を利用して、浸炭歯車の余寿命を推定するシミュレーション法を考案した。

研究成果の概要（英文）：Considering probability of failure and estimating fatigue life is important for design of gear and transmission. In this research, the damage variable and effective stress are calculated by change of strain by using tensile test specimens of JIS SCM415 low alloy steel. Variation of elastic strain in fatigue process is measured by the image processing method and changes of elastic moduli were computed. For higher accuracy of measurement, we developed the surface treatment method and calculation program. Furthermore, we developed a simulation method based on the damage mechanics to predict the area of crack initiation and fatigue life.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
2009年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2010年度	3,300,000	990,000	4,290,000
年度			
年度			
総計	15,200,000	4,560,000	19,760,000

研究分野：機械要素設計

科研費の分科・細目：機械工学，細目：設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：機械要素，歯車，信頼性設計，損傷力学，ひずみ

1. 研究開始当初の背景

歯車の損傷は、産業機械にあつては歯車装置の停止に伴う大きい経済的損失をもたらす。輸送機械では人命に直接関わる事故に繋がる恐れがある。したがって、そのリスク管理は極めて重要である。一方で、エネルギー消費低減の一環であるリデュース設計のため、歯車装置には一層の小型軽量化が求められている。これらに応えるためには、設計段階において、歯車の損傷確率を評価し、信頼性を考慮した寿命を推定することが不可欠である。産業の国際化と競合が進展する中で、リスク管理の観点から、歯車装置の伝達荷重と寿命の保証が求められるようになり、歯車装置の信頼性を保証する国際規格の制定も予想される状況となりつつある。この意味でも、基盤技術である歯車伝動の研究は重要性を増すものと思われる。

2. 研究の目的

機械・装置のリスク管理に不可欠な動力伝達用歯車の強度と寿命を評価し保証する方法の確立を最終目標として、本研究では、繰返し負荷を受ける歯のひずみ分布の変化を計測して損傷指標を同定し、損傷発生を予測し折損寿命を推定するシミュレーション法を提案して、その有用性を確かめることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) ひずみ計測法

繰返し負荷を受ける材料のひずみを計測するために画像相関法を用いる。本手法は試験片表面におけるひずみの分布を知ることができるため、破壊起点となった位置の局所のひずみを求めることができる。

(2) 疲労過程におけるひずみの計測

損傷の蓄積に関する基礎データを収集するため、応力状態が一樣で材料特性が均質となる平板試験片を作製し、これを用いた疲労試験を行う。平板試験片において、最終的に破断に至った箇所付近でのひずみ変化を計測する。同様のひずみ計測を、浸炭歯車の曲げ疲労試験に対しても行った。

(3) 疲労損傷の定量評価法

ひずみの変化から損傷変数を求め、有効応力と損傷変数との関係式を導出する。また、最終破断を引き起こす限界の損傷変数を見積もる。

(4) 浸炭歯車の余寿命シミュレーション
上記(3)で導かれた関係式を用い、歯車の歯元応力から損傷の蓄積を仮定して歯の余寿命を推定するシミュレーション法を考案する。

4. 研究成果

(1) ひずみ計測

画像相関法を用いて、対象試験片の変形量を定量評価し、これを微分することでひずみを計算した。ひずみの計算にあたっては変形量を高精度に求める必要があるため、計算速度と精度を両立する手法を考案した。また、変形の追跡を容易にする表面塗装処理方法を考案した。

(2) 疲労過程におけるひずみの計測

本研究稿で使用した平板試験片の材質はJIS SCM415であり、浸炭焼入れを施したものと熱処理を施していないものの2種類の試験片を使用した。図1に平板試験片による疲労試験の様子を示す。平行部の幅10 mm、長さ30 mm、厚さ1 mmである。電気油圧サーボ疲労試験機を使用し、図中の撮影領域を撮影しながら疲労試験を行った。測定したひずみの例を図2に示す。

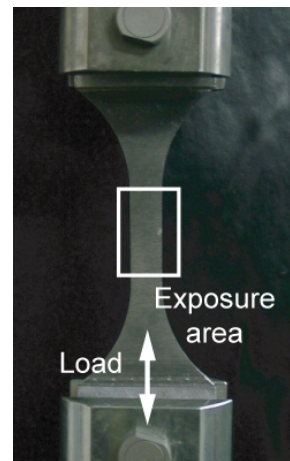


図1 疲労試験用平板試験片とひずみ計測領域

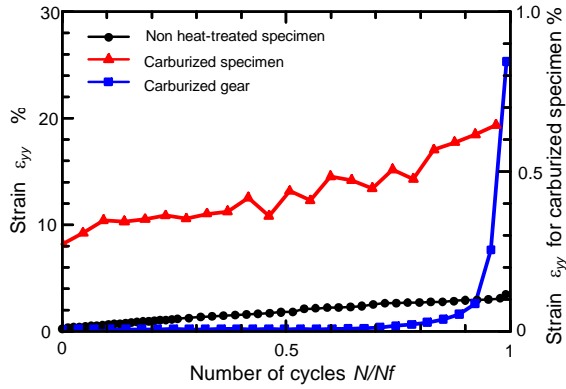


図2 疲労過程中的ひずみの変化

(3) 疲労損傷の定量評価法

①基礎式の導出 本研究では疲労損傷によってヤング率が低下することに着目し、損傷の程度を表す損傷変数 D を

$$D = 1 - \frac{E}{E_0} \quad (1)$$

と定義した。ここで、 E は損傷材のヤング率、 E_0 は非損傷材のヤング率である。損傷変数 D を式(1)のように定義すると、損傷によって拡大される応力の効果は

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1-D} \quad (2)$$

と表現できる。ここで σ は応力、 $\tilde{\sigma}$ は有効応力である。ヤング率は、疲労試験中に応力が一定とすると、ひずみの変化から求めることができる。疲労過程における D および $\tilde{\sigma}$ の変化から、図3に示す手順で損傷の蓄積率を定量化することができる。損傷蓄積曲線は次式になる。

$$D = a \ln \left(\frac{N}{N_f} \right) + b \quad (3)$$

ここで、 N は繰返し数、 N_f は破断に至った繰返し数、 a 、 b は定数である。さらに損傷蓄積曲線より材料が許容できる損傷の限界値 D_{cr} を決定する。これらが求まると、残存寿命を

$$N_R = N_f - \exp \left(\frac{D + a \ln N_f - b}{a} \right) \quad (4)$$

と推定することが可能である。

疲労過程における損傷変数 D の変化の一例を図4に示す。また、(4)式に基づいて計算した浸炭歯車の余寿命を図5に示す。

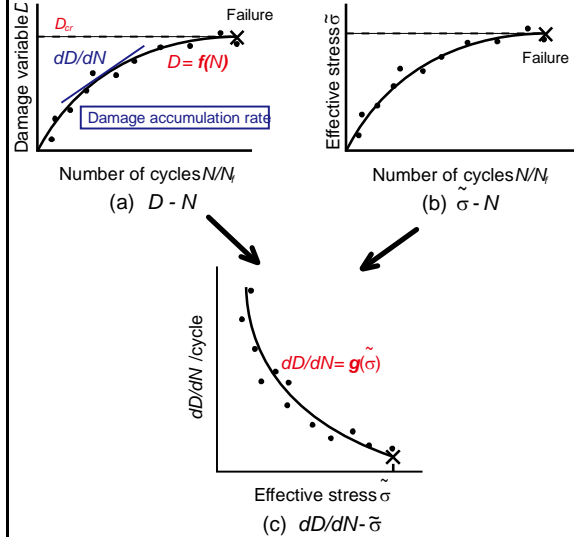


図3 損傷蓄積曲線の求め方

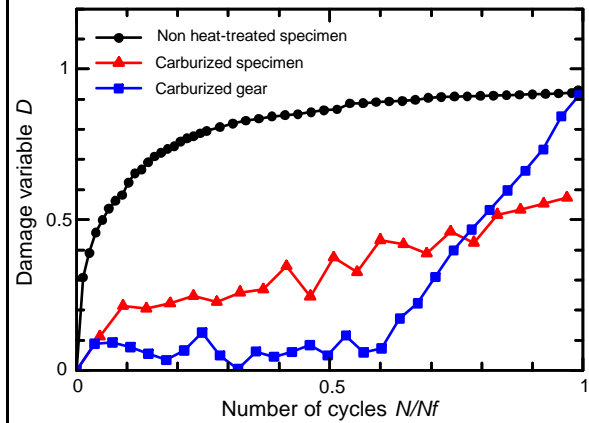


図4 疲労に伴う損傷変数の変化

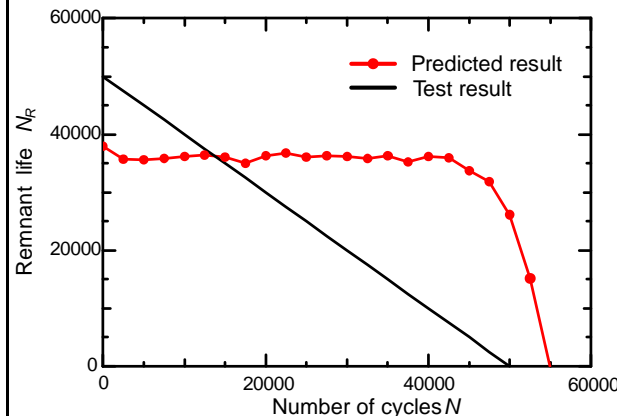


図5 損傷蓄積から推定した浸炭歯車の余寿命

(4) 浸炭歯車の余寿命シミュレーション

有限要素解析を用いて疲労損傷の蓄積やき裂の進展を推定するシミュレーション法を考案した。シミュレーションの流れを図6に示す。まず非損傷の仮想材料から図7の歯形を切り出し、要素数 6537, 節点数 13294 の有限要素モデルを作成し、歯先荷重の下で応力分布を計算する。これに硬さ分布と残留応力分布を与えたのち、各要素における有効応力を計算し、図3より求められる損傷蓄積速度 dD/dN と任意に決定した負荷繰返し数のステップの積によって、各要素において蓄積される損傷を計算する。損傷によって力学的特性は劣化するので、損傷に応じてヤング率を減少させて計算を行う。損傷 D と限界値 D_{cr} の比較で要素破壊判定を行った。破壊と判断された要素については、ヤング率を極めて小さく設定しなおし、計算を続行した。破壊した要素の連なりによってき裂進展を表現し、その長さが限界値に達したときに折損すると仮定した。以上によりき裂の進展をシミュレーションした結果を図8に示す。

また、上記シミュレーションにおいて、き裂の連なりが限界値に達した時を疲労破壊と見なして寿命の推定を行った結果を図9に示す。図には実際の歯車疲労試験の結果も合わせて示す。

損傷に着目した歯車の信頼性評価法は、歯車関連国際会議でも注目され、一層実用的な評価方法として確立することが期待されている。

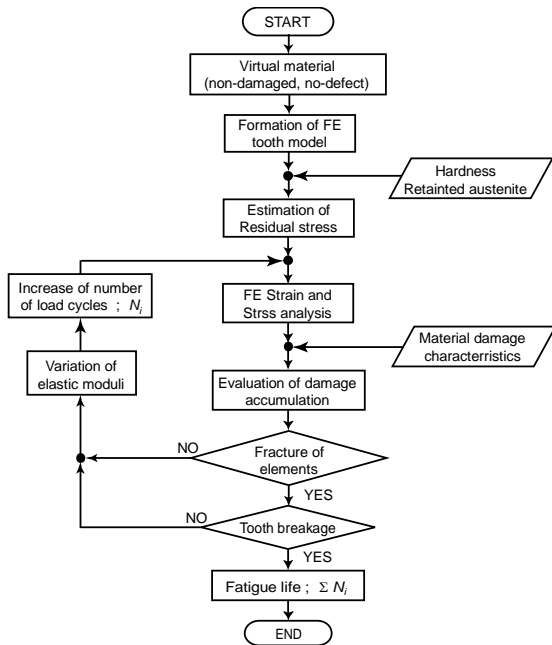


図6 有限要素法を利用した浸炭歯車余寿命推定シミュレーションの流れ

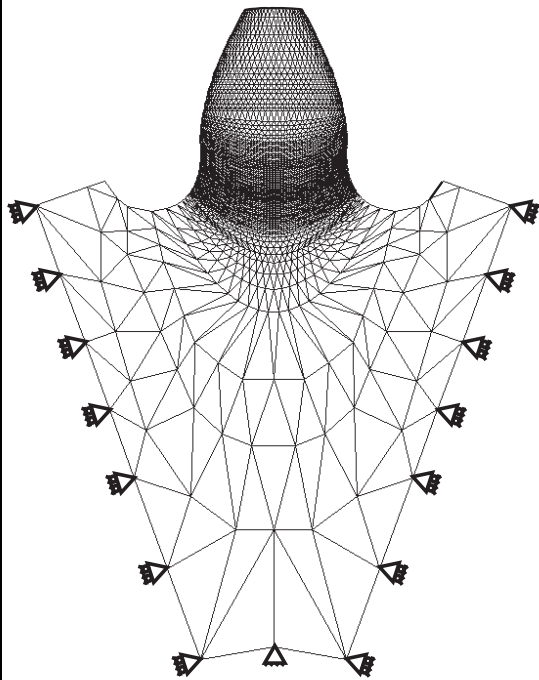


図7 有限要素モデル

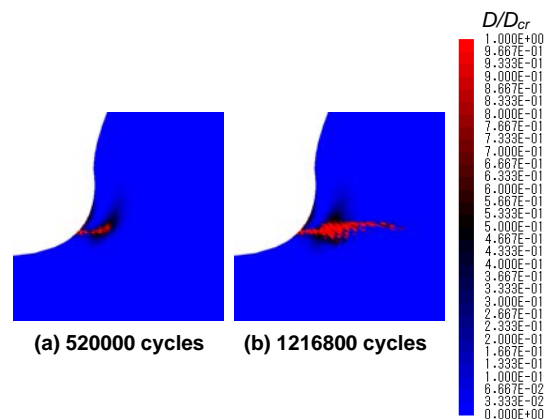


図8 歯元き裂進展シミュレーション結果

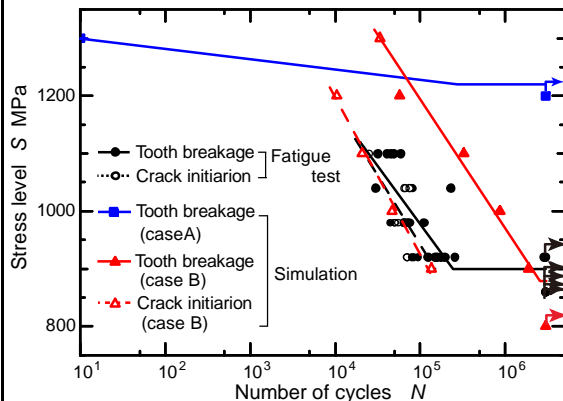


図9 浸炭歯車寿命シミュレーション結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

1.

Estimation of fatigue life of carburized gear tooth based on damage mechanics, T. Masuyama, R. Tamura, K. Inoue, M. Yamanaka, Y. Narita
International Conference on Gears 2010, VDI-Berichte Nr. 2108, (2010), 831-842.
査読無

2.

Estimation of Fatigue Life of Carburized Gear Tooth Based on Strain Measurement by Image Processing and Damage Mechanics Tomoya Masuyama, Takuya Ikeda, Ryo Tamura, Yukihito Narita, Katsumi Inoue
Proceedings of the JSME International Conference on Motion and Power Transmissions - MPT2009-Sendai -, No. 09-203, (2009), 344-349.
査読無

[学会発表] (計7件)

1.

発表者：佐藤 健夫
表題：画像相関法によるサブピクセル精度の変形計測
学会名：日本機械学会東北学生会第41回卒業研究発表講演会
発表年月日：2011年3月3日
発表場所：岩手大学

2.

発表者：井上 克己
表題：VIRTUAL ENGINEERING IN THE STRENGTH DESIGN OF POWER TRANSMISSION GEARS
学会名：TMCE 2010 Symposium
発表年月日：2010年4月14日
発表場所：Università Politecnica Delle Marche

3.

発表者：田村 諒
表題：損傷力学に基づく浸炭歯車の疲労寿命の推定
学会名：日本機械学会東北支部 第45期総会講演会
発表年月日：2010年3月12日
発表場所：東北大学

4.

発表者：佐藤 健夫
表題：画像相関法によるひずみ計測における処理速度の向上
学会名：日本機械学会東北支部第45期秋期講演会
発表年月日：2009年9月26日
発表場所：福島大学

5.

発表者：成田 幸仁
表題：損傷力学と画像ひずみ計測に基づく疲労寿命の推定
学会名：日本機械学会2008年度年次大会
発表年月日：2008年8月4日
発表場所：横浜国立大学

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

H20→H21

井上 克己 (INOUE KATSUMI)
研究者番号：90005554

H22

増山 知也 (MASUYAMA TOMOYA)
研究者番号：80282094
(H20→H21：研究分担者)

(2) 研究分担者

山中 将 (YAMANAKA MASASHI)
研究者番号：20292229

成田 幸仁 (NARITA YUKIHITO)
研究者番号：90431519

H21

巖 祥仁 (Sang In EOM)
研究者番号：20551576

(3) 連携研究者

なし