

Studies on mechanism of rolling contact fatigue under low lambda condition and life data analysis in rolling contact fatigue testing

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/45373

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



博 士 論 文 要 旨

題名（日本語）：低ラムダ条件での転動疲労のメカニズムと転動疲労試験の寿命データの解析に関する研究

題目（英語）：Studies on mechanism of rolling contact fatigue under low lambda condition and life data analysis in rolling contact fatigue testing

金沢大学大学院自然科学研究科

システム創成科学専攻

学籍番号：1323122012

氏 名：藤田 工

主任指導教官：佐々木敏彦

提出年月：2016年1月8日

Abstract:

In this report, below studies regarding rolling contact fatigue (RCF) life are introduced.

1) Study on RCF of thrust ball bearing under low lambda condition.

Rolling contact fatigue testings of thrust ball bearing under boundary lubrication condition (low lambda condition) are conducted while changing test conditions of load, rotational speed and combination of surface roughnesses for bearing component parts. The RCF test results and measurements of surface roughnesses of before and after the tests show that the raceway surface with larger roughness promotes the surface initiated failure of the other component. In addition, they demonstrate that the behavior of change in surface roughness during rolling contact depends on the test conditions and influences RCF life accordingly. These results suggest that RCF life of rolling bearing used under low lambda conditions should be estimated considering not only analytical relationship between repeated stress in subsurface and surface roughness during RCF, but also experimental database of the running-in behavior depending on RCF conditions.

2) Study on RCF progression by using an X-ray diffraction ring analyzer

Novel approaches for evaluating the progressing degree of rolling contact fatigue (RCF) are introduced. The rolling contact surface after two-cylinder testing is evaluated by a new X-ray analyzer, which can rapidly obtain tri-axial residual stress state and orientation of crystallite from X-ray diffraction ring (Debye ring) on two-dimensional detector. The analyzer of Debye ring can obtain more information regarding accumulation of RCF, crack development and shake-down in rolling contact subsurface as compared with conventional X-ray diffraction analyzers. The new system are very useful, not only to investigate mechanism of RCF, but also to allow for quantitative estimation of the progressing degree of RCF.

3) Study on RCF life test design and result interpretation

Several methods for both RCF life test design and result interpretation are introduced. These methods generate results using random numbers followed by Weibull distribution. These methods provide techniques that are easier to intuitively understand as compared with the recent mathematical model, and they show enough flexibility to apply to almost all type of the testing. These new system will therefore eliminate the need for qualified experiences in the statistical design and result interpretation of RCF life test.

本論文では、転がり軸受の転動疲労寿命に関する以下の3つの研究をまとめた。

- I. 低ラムダ条件での転動疲労寿命の研究 (2章)
- II. X線残留応力測定法を用いた転動疲労メカニズムの研究 (3章)
- III. 転動疲労寿命試験の計画とデータの解釈に関する研究 (4章)

以下に、それぞれの研究で得られた結論を示す。

I. 低ラムダ条件での転動疲労寿命の研究

スラスト玉軸受の低ラムダ条件での寿命試験結果に基づき、低ラムダ条件で寿命を決めている要因と寿命予測の方法について考察し、以下の結論を得た。

- 1) 本報の試験条件では、ほとんどの条件で軸受の内外輪に損傷が発生したが、これは試験中の鋼球の表面粗さが内外輪よりも低下しにくく、鋼球の転動面が内外輪の軌道面を攻撃したことによるものである。
- 2) 試験前に内外輪の表面粗さに違いがあった条件間では寿命差が見られなかったが、これは鋼球の表面粗さに差がなかったことに起因している。
- 3) 回転数が小さい条件では、寿命が計算寿命よりも長くなる傾向があったが、これは回転数が小さい条件のほうが試験中の鋼球の表面粗さの低下が大きいためである。
- 4) 本報の試験条件ではフレーキングとピーリングの2つの損傷形態が見られたが、どちらの損傷形態になるかは鋼球の表面粗さが試験中にどこまで低下するかで決まる。
- 5) 損傷形態がピーリングの場合、寿命は荷重に対して鈍感になるが、これは表面粗さ同士の接触が苛酷な条件では真実接触部の面圧がシェイクダウンリミットをこえ、軸受鋼が支えることができる最大面圧をこえているためである。
- 6) ピーリングは転走跡の内径側でより多く観察されたが、これは内外輪の内径側が接線力の作用方向と転がり方向が同じであるためである。
- 7) より普遍的な低ラムダ条件での寿命予測方法の確立には、なじみによって刻一刻と変化するラムダ、表面粗さ、摩擦力を考慮に入れた内部応力の推定技術と運転条件によるなじみの挙動のデータベースが必要である。

II. X線残留応力測定法を用いた転動疲労メカニズムの研究

低ラムダ条件で転動させた円筒試験片を、近年開発された新しいX線残留応力測定装置を用いて分析し、得られた結果に基づいて転動疲労の進行について考察した。損傷形態がピーリング（数10～数100 μm の微小き裂と微小はく離の集合）のときの転動疲労は以下の順に進行する。

- 1) 低ラムダ条件で転動させた軌道面では、初期の負荷（ $10^3 \sim 10^4$ 回）で軸受鋼の降伏応力に近い残留応力が形成する
- 2) その後軌道面では、残留応力が負荷回数に対して増加しにくくなり、ほぼ一定に推移するが、それとは別に結晶配向が始まる。
- 3) 結晶配向が進行した後、ピーリングが徐々に発生するが、き裂の発生と進展にともない応力は緩和する

III. 転動疲労寿命試験の計画とデータの解釈に関する研究

転動疲労寿命試験の計画とデータの解釈を専門的な知識がなくても統計的根拠に基づいて進めることができる方法について研究した。以下に結論を示す。

- 1) 打切り試験の計画とデータの解釈は、乱数シミュレーションあるいは順序統計量の分布（ベータ分布）を用いて進めることができる。ベータ分布を使って得られる、打切り寿命と試験個数の関係は以下である。

$$T_{i+1} = F^{-1}(B^{-1}(0.01C, i, N - i + 1)) = \gamma + \alpha \cdot \sqrt[e]{\ln \left[\frac{1}{1 - B^{-1}(0.01C, i, N - i + 1)} \right]}$$

T_{i+1} : 打切り寿命 ($i=0$: 未破損時の打切り寿命, $i=1, 2, \dots, N-1$: $1, 2, \dots, N-1$ 個破損時の

打切り寿命), $F^{-1}(x)$: ワイブル分布の累積分布関数の逆関数

$\beta^{-1}(0.01C, i, N-i+1)$: ベータ分布の累積分布関数の逆関数

C : 信頼水準, N : 試験個数, e : ワイブルスロープ, α : 尺度母数, γ : 位置母数

3) 加速試験の計画とデータの解釈は、乱数シミュレーションあるいは以下の式を使って進めることができる。

$$10\% \text{ 寿命 : } L_{10R} = \left[1 + \frac{1}{0.007474 \{ \text{Ln}(9.106) + \text{Ln}(1.051 - 0.01C) + \text{Ln}N \}^{3.151}} \right]^{1/e}$$

$$50\% \text{ 寿命 : } L_{50R} = \left[1 + \frac{1}{0.009349 \{ \text{Ln}(36.74) + \text{Ln}(1.051 - 0.01C) + \text{Ln}N \}^{3.108}} \right]^{1/e}$$

$$63.2\% \text{ 寿命 : } L_{63.2R} = \left[1 + \frac{1}{0.01068 \{ \text{Ln}(41.48) + \text{Ln}(1.051 - 0.01C) + \text{Ln}N \}^{3.059}} \right]^{1/e}$$

N : 試験個数, e : ワイブルスロープ, C : 信頼水準

ただし、この式の適用可能範囲は $N \leq 50$, $0.5 \leq e \leq 10$, $80 \leq C \leq 99$ とする。

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

低ラムダ条件での転動疲労のメカニズムと転動疲労試験の寿命データの解析に関する研究

2. 論文提出者 (1) 所 属 システム創成科学 専攻

(2) 氏 名 ^{ふり} ^{がな} ^{ふじた} ^{たくみ}
藤田 工

3. 審査結果の要旨（600～650 字）

当該学位論文に関し、平成 28 年 1 月 29 日に第 1 回学位論文審査会を開催し、提出された学位論文及び関連資料について詳細に検討した。同日に口頭発表の後、第 2 回学位論文審査会を開催し慎重に協議した結果、以下の通り判定した。

本研究は、軸受の転がり接触疲労損傷に関して、まず、寿命試験法及び試験結果の解釈方法に関する理論的研究を行い、試験効率と評価結果の信頼性を維持する新しい方法を開発している。また、軸受の寿命試験において重要となる有意差有り判定するための必要寿命比を求める理論を新開発し、その適用に関する詳細な検討を行った。また、スラスト玉軸受の寿命試験を基にした寿命予測方法を開発した。さらに、二円筒試験を行った試料に対して二次元 X 線検出器を適用した新しい X 線応力測定法を適用して分析し、デバイリングの二次元データから得られる結晶状態の解析及び三軸残留応力の解析を行い、転がり疲労との関係を解明した。

以上のように、本論文は軸受の転動疲労に関して新しい知見を見出すことに貢献するものであり関連する分野に貢献したと判断できるので、博士（工学）の学位に値すると判定した。

4. 審査結果 (1) 判 定 (いずれかに○印) 合格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博士（工学）