



Title	転がり軸受の残留応力を考慮した疲労き裂発生・進展の実用的な評価法に関する研究
Author(s)	堤, 雅子
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/101678">https://doi.org/10.18910/101678</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka



## 論文内容の要旨

氏 名 ( 堤 雅 子 )

論文題名	転がり軸受の残留応力を考慮した疲労き裂発生・進展の実用的な評価法に関する研究
------	--

## 論文内容の要旨

機械部品の一つである転がり軸受は、浸炭熱処理により残留応力が発生する。また、転がり軸受は転動体と軌道輪が接触しながら回転をする部品であるため、主応力方向が時々刻々と変化する多軸応力下にある。このような部品では、内部の残留応力分布を工業的に利用しやすい方法で測定し、あわせて、残留応力と接触応力が重ね合わされた多軸応力下の疲労損傷を実用的かつ定量的に評価することが望まれる。本論文の目的は、転がり軸受の浸炭熱処理による残留応力分布を考慮した実用的な疲労強度評価手法を提案することである。本論文は全6章から構成される。

第1章では、まず鋼製の構造部材の強度に及ぼす残留応力の影響についての一般的な知見を概観したのちに、転がり軸受の材料熱処理と疲労強度面での課題を指摘した。続いて本研究に関連する残留応力の測定方法と推定方法、ならびに種々の疲労破壊の評価法等の先行研究をレビューし、本論文の目指す方向と全体の構成を記述した。

第2章では、浸炭した円柱試験体を題材とした数値実験および実測によって、転がり軸受の内部に発生する残留応力を測定する方法を提案した。従来のコンター法にX線回折法を組み合わせた三次元残留応力測定法（拡張コンター法と呼ぶ）を開発し、三方向の残留応力を測定し、その有効性を示した。浸炭領域である  $r=34\sim 40\text{mm}$  部分に圧縮残留応力、浸炭層から内部に入った領域  $r=31\text{mm}$  付近に引張残留応力が発生していることが明らかになった。

第3章では、残留応力の起源である固有ひずみに着目し、浸炭材料における固有ひずみ分布を、拡張コンター法で測定した残留応力分布をもとに、逆解析によって明らかにした。さらに、熱弾塑性理論に基づく考察を加えることで、大形の浸炭熱処理材における固有ひずみの生成メカニズムは、浸炭領域における炭素濃度に依存したマルテンサイト変態ひずみの勾配、非浸炭部におけるマルテンサイト変態発生の時間差、心部の冷却速度低下に伴うマルテンサイト変態率の減少により説明できることを示した。

第4章では、第3章で明らかになった固有ひずみを用いて、浸炭領域が異なる場合の内部の残留応力分布を推定する実用的な方法に取り組んだ。熱弾塑性解析を用いて、円柱部材において浸炭領域が  $6\text{mm}$  の場合の固有ひずみ分布を求めた。固有ひずみが発生する要因ごとに固有ひずみの領域を、浸炭領域と冷却速度影響領域に切り分け、それぞれに定式化した。この定式化による浸炭領域が  $4\text{mm}$ 、 $8\text{mm}$  の場合における固有ひずみ分布を用いて残留応力を推定した。これを浸炭領域  $4\text{mm}$ 、 $8\text{mm}$  として弾塑性解析した残留応力分布と比較し、両者がおおよそ一致することを示した。以上によって、固有ひずみを用いて浸炭領域の異なる部材における残留応力の推定が有効に行われたことを示した。そこでこの推定方法により、実測の浸炭領域  $6\text{mm}$  の場合の固有ひずみ分布から、浸炭領域  $4\text{mm}$ 、 $8\text{mm}$  の場合の残留応力を推定した。

第5章では、2～4章で把握可能となった軸受材料内部の三方向残留応力分布を考慮して、転がり軸受部材の破損限界を適切に予測する実用的な方法を提案した。まず、供試材である直径  $80\text{mm}$  の浸炭円柱の疲労き裂発生リスクを、半径方向の深さ位置ごとに Dang Van 評価基準によって評価した。次に破損リスクの高い深さに、破損の起点となる欠陥を想定し、再び Dang Van 評価基準によって破損が発生する欠陥上の位置および向きを評価した。最後に、疲労き裂を想定して応力拡大係数を求め、き裂の進展限界を判定し、多軸応力下で残留応力が疲労き裂の発生・進展に与える影響を示した。

第6章では、各章の結論を総括し、本研究の成果と今後の実用化に向けた取り組み方法を示した。

以上の研究を通じて、転がり軸受に用いられる浸炭熱処理材料内部の残留応力分布とその発生メカニズムを明らかにし、さらに内部残留応力分布と転がり接触応力を考慮して疲労強度を評価する実用的な方法を示した。これらの研究成果は今後、産業用の転がり要素における軽量化や信頼性向上を達成し、これらを通じて生産エネルギー低減にも大きく貢献するものと考えられる。



## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( 堤 雅 子 )			
論文審査担当者		(職)	氏 名
	主 査	教授	麻 寧緒
	副 査	教授	大沢 直樹
	副 査	准教授	辰巳 晃
	副 査	教授	後藤 浩二 (九州大学・大学院工学研究院)

## 論文審査の結果の要旨

機械部品の一つである転がり軸受は、浸炭熱処理により残留応力が発生する。また、転がり軸受は転動体と軌道輪が接触しながら回転をする部品であるため、主応力方向が時々刻々と変化する多軸応力下にある。このような部品では、内部の残留応力分布を工業的に利用しやすい方法で測定し、あわせて、残留応力と接触応力が重ね合わされた多軸応力下の疲労損傷を実用的かつ定量的に評価することが望まれる。本論文の目的は、転がり軸受の浸炭熱処理による残留応力分布を考慮した実用的な疲労強度評価手法を提案していることである。本論文は全6章から構成されている。

第1章では、まず鋼製の構造部材の強度に及ぼす残留応力の影響についての一般的な知見を概観したのちに、転がり軸受の材料熱処理と疲労強度面での課題を指摘している。続いて本研究に関連する残留応力の測定方法と推定方法、ならびに種々の疲労破壊の評価法等の先行研究をレビューし、本論文の目指す方向と全体の構成を記述している。

第2章では、浸炭した円柱試験体を題材とした数値実験および実測によって、転がり軸受の内部に発生する残留応力を測定する方法を提案している。従来のコンター法にX線回折法を組み合わせた三次元残留応力測定法(拡張コンター法と呼ぶ)を開発し、三方向の残留応力を測定し、その有効性を示している。浸炭領域に圧縮残留応力、浸炭層から内部に入った領域付近に引張残留応力が発生することを明らかにしている。

第3章では、残留応力の起源である固有ひずみに着目し、浸炭材料における固有ひずみ分布を、拡張コンター法で測定した残留応力分布をもとに、逆解析によって明らかにしている。さらに、熱弾塑性理論に基づく考察を加えることで、大形の浸炭熱処理材における固有ひずみの生成メカニズムは、浸炭領域における炭素濃度に依存したマルテンサイト変態ひずみの勾配、非浸炭部におけるマルテンサイト変態発生の時間差、心部の冷却速度低下に伴うマルテンサイト変態率の減少により説明できることを示している。

第4章では、第3章で明らかになった固有ひずみを用いて、浸炭領域が異なる場合の内部の残留応力分布を推定する実用的な方法に取り組んでいる。熱弾塑性解析を用いて浸炭した円柱部材の固有ひずみ分布を求め、発生する要因ごとに固有ひずみを浸炭領域と冷却速度影響領域に切り分け、それぞれに定式化している。この定式化による固有ひずみ分布を用いて推定した残留応力を浸炭領域の異なる条件で熱弾塑性解析した残留応力と比較し、両者がおおよそ一致することを示している。以上によって、固有ひずみを用いて浸炭領域の異なる部材における残留応力分布を推定する手法の有効性を検証している。

第5章では、2～4章で把握した軸受材料内部の三方向残留応力分布を考慮して、転がり軸受部材の破損限界を適切に予測する実用的な方法を提案している。まず、供試材である直径80mmの浸炭円柱の疲労き裂発生リスクを、半径方向の深さ位置ごとにDang Van 評価基準によって評価している。次に破損リスクの高い深さに、破損の起点となる欠陥を想定し、再びDang Van 評価基準によって破損が発生する欠陥上の位置および向きを予測している。最後に、疲労き裂を想定して応力拡大係数を求め、き裂の進展限界を判定し、多軸応力下で残留応力が疲労き裂の発生と進展リスクに与える影響を示している。

第6章では、各章の結論を総括し、本研究成果を実用化するための取り組み方法を示している。

以上のように、本論文は、転がり軸受に用いられる浸炭熱処理材料内部の残留応力分布とその発生メカニズムを明らかにし、さらに内部残留応力分布と転がり接触応力を考慮して疲労強度を評価する実用的な方法を示しており、産業界において転がり部品の信頼性向上により構造の軽量化や生産エネルギー低減にも大きく貢献するものと考えられる。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。