

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	数値解析を用いた高炭素マルテンサイト鋼の変態組織と内部応力評価に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	田村一輝
Author(English)	Kazuki Tamura
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第290号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:尾中 晋,木村 好里,稲邑 朋也,寺田 芳弘,中田 伸生
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第290号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

## 論文要旨

### THESIS SUMMARY

系・コース： Department of Graduate major in	材料 材料	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	( 工学 )
学生氏名： Student's Name	田村 一輝		審査員主査： Chief Examiner	尾中 晋

#### 要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters )

本論文は、軸受の破壊メカニズム解明の基礎研究として、変態組織の識別、変態内部応力の計算、測定への取り組みをまとめたもので、全5章より構成されている。

第1章「序論」では、軸受の典型的破損モードであるはく離、軸受材料であるマルテンサイト鋼の変態組織と力学特性の従来知見について説明し、特に粗大なマルテンサイト組織に隣接した旧オーステナイト粒界が組織変化を伴うはく離におけるき裂の発生サイトとなる可能性を述べている。さらに、近年の研究では、マルテンサイト組織におけるミクロスケールの変態内部応力が集束イオンビーム (Focused Ion Beam : FIB) と画像相関法 (Digital Image Correlation : DIC) を併用した手法によって評価されており、オーステナイト (fcc) からマルテンサイト (bcc) への fcc-bcc マルテンサイト変態における Bain ひずみの影響がみられることを紹介している (fcc: face centered cubic, bcc: body centered cubic)。

第2章「Rodrigues-Frank 空間を利用したマルテンサイトの変態組織識別」では、軸受材料に典型的なセメントタイトとオーステナイトが混在した高炭素クロム鋼のマルテンサイト組織に対して、後方電子散乱法 (Electron Backscatter Diffraction : EBSD) で得られた結晶方位データをもとに、回転空間の一種である Rodrigue-Frank (R-F) 空間を利用し測定点毎の結晶学的な特徴を調査した。さらに、得られた結晶方位データを Kurdjumov-Sachs (K-S) の関係を満たす理論的な方位と回転空間上で比較することによって 24 種類のマルテンサイトバリエーション番号を判定し、これが連続した領域をブロックとみなす分析手法を確立し、軸受の破損起点となり得る組織の識別を試みた。その結果、高炭素鋼に生成するマルテンサイトは微細なラスブロックと粗大なプレートブロックに大きく分けることができることを示した。さらに、粗大なプレートブロックは、その形態と存在位置により 3 種類に大きく分けることができ、特に本論文中で Type-III Coarse block (CB) と呼称するオーステナイト粒界から粒内に向かって成長した同一 Close-Packed Plane (CP) グループ内の双晶関係にあるブロック対は、軸受試験による破損起点付近の粗大マルテンサイト組織と形態的によく似た特徴を有していた。以降の章では、このような粗大マルテンサイトブロックが生み出す内部応力に注目している。

第3章「Eshelby の楕円体介在物理論を利用したマルテンサイトの変態内部応力予測」では、マルテンサイト変態で生じる原子の集団運動を様な変形として扱い、これによって生じる内部応力を弾性論に基づいて解析した。はじめに Eshelby の楕円体介在物理論を用いて、マルテンサイトの形状や配向によって変化する内部応力を数値計算によって解析した。さらにマルテンサイト内部および周囲のオーステナイト母相におけるすべり変形を考慮し、内部応力の緩和メカニズムを検討した。その結果、マルテンサイトの形状を薄板状と仮定したとき、不変面形成条件を満たす eigen ひずみでは、特定の晶癖面で弾性ひずみエネルギーが 0 となり、その晶癖面は現象論から予測されるものとほぼ一致していることを明らかにした。また、組織形状を回転楕円体(アスペクト比  $k=0.1$ )とした場合、生成相を取り囲む母相の塑性変形を考慮することで、弾性ひずみエネルギーはマルテンサイト変態に必要な駆動力の 6 割程度となり、その際の内部応力は、絶対値は異なるものの Bain ひずみの異方性が維持されることを示した。

第4章「マイクロ穿孔法によるマルテンサイトの変態内部応力測定」では、焼き入れままの高炭素クロム鋼のマルテンサイト組織を題材として、既存の穿孔法を参考に微視スケールの内部応力を測定可能とするマイクロ穿孔法の確立を試みた。2章で示す R-F 空間を利用した手法で識別した粗大ブロックにマイクロ穿孔法を適用し、穿孔加工前の主応力の大きさとその主軸が推定可能なことを示した。さらに、マイクロ穿孔法で得られた内部応力を結晶方位から推定されるマルテンサイト変態時の Bain ひずみの方向と比較したところ、 $[001]_M$  (c 軸) は最大主応力軸に、 $[100]_M$  (a 軸) は最小主応力軸に比較的近い方向をそれぞれ示しており、IF 鋼および低炭

素鋼中のラスマルテンサイトにおける内部応力の特徴と一致していることが示された。さらに、マイクロ穿孔法で得られた焼入れままの高炭素マルテンサイト鋼の残留応力は数百 MPa のオーダーであり、c 軸が旧オーステナイト粒界面に垂直なマルテンサイトブロックが旧オーステナイト粒界で会合する時、モード I の応力が働くき裂発生の優先サイトとなる可能性が示唆された。

第 5 章「結論」では、本論文の各章の結果について総括した。本論文では、詳細な方位の取り扱いによる軸受鋼の複雑な階層的組織の識別、粗大プレート組織の変態内部応力計算、測定に取り組み、粗大プレート組織は変態内部応力の観点からき裂発生サイトになり得ることを示した。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)  
Doctoral Program

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	材料 材料	系 コース	申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	田村 一輝		審査員主査： Chief Examiner	尾中 晋	

要旨（英文 300 語程度）

Thesis Summary (approx.300 English Words)

Bearings are made of high-strength martensitic steel to support rotation under high loads. However, premature spalling associated with microstructural evolution has recently emerged as a critical issue in some applications. Rolling fatigue tests have revealed that cracks often initiate at prior austenite grain boundaries near the coarse martensitic microstructures. Additionally, micro-scale transformation-induced internal stresses have garnered attention as a microstructural factor influencing mechanical properties of martensitic steels. This thesis, consisting of five chapters, investigated micro-scale transformation-induced internal stresses in martensite as part of fundamental research into the fracture mechanisms of bearing steels. The crystallographic orientation of a high-carbon chromium steel, comprising martensite, retained austenite, and undissolved cementite, was analyzed using Electron Backscatter Diffraction. The crystallographic characteristics of martensite were then explored within Rodrigues-Frank space. Coarse plate-like martensite block pairs in twin relationship within the same Close-Packed Plane group, referred to in this paper as Type-III Coarse block, were identified. These features were found to morphologically resemble the coarse martensitic microstructures observed at crack initiation sites during rolling fatigue tests. To further investigate, calculations and experiments were conducted to reveal the internal stresses formed within the coarse martensitic blocks. The collective motion of atoms during martensitic transformation was modeled as uniform deformation, and the resulting internal stresses were analyzed using elastic theory based on Eshelby's inclusion problem. The analysis demonstrated that that elastic strain energy generated during martensitic transformation could be significantly reduced by lattice-invariant deformation in both the martensite and the surrounding austenite matrix. As a results, anisotropic internal stresses remained, sharing the same principal axes as Bain lattice distortion. Furthermore, a novel micro-scale hole-drilling method was developed to experimentally measure internal stresses at the microscopic scale, drawing upon existing hole drilling techniques. The experimental measurements revealed internal stresses consistent with the theoretical calculations. These findings suggest that coarse plate-like martensitic microstructures are potential crack initiation sites due to transformation-induced internal stresses.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学リサーチポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).