

「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化 基盤研究開発プロジェクト」

プロジェクトの詳細説明 (公開)

【内部起点疲労破壊SG(委託)】

②-3) 高強度鍛造材のき裂発生・伝播メカニズム解明

((財)金属系材料研究開発センター, (独)理化学研究所, 横浜国立大学, 九州大学)

平成21年7月3日(金)

p.1/15

プロジェクト詳細説明(公開)

内部起点疲労破壊SG(委託) ②-3)

内容

公開

1. 背景
2. 研究開発の実施体制
3. 開発目標と達成状況
4. 検討内容
5. まとめ
6. 最終目標に向けた今後の取組み

p.2/15

1. 背景(軸受鋼と転動疲労)

公開

CO₂排出削減, 国内特殊鋼メーカーの世界競争力強化

技術開発動向、国際競争力状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向に適合

1. 対象

- 軸受鋼等を用いる機械構造用部材
- * 2007年国内生産統計値(日本鉄鋼連盟): 軸受鋼947千ton/年, 機械構造用合金鋼3,999千ton/年

2. アプローチ

- 軸受等の部品小型化 = 高負荷応力化

3. 開発要求事項

- 使用条件の保証 → 寿命予測式
- 鋼材・製造方法の改良 → 介在物・組織制御指針

6308型番: 636g



同一荷重条件で使用
 ・30-40%の重量削減
 ・寿命3倍を保証

6208型番: 366g



1. 背景(現状の問題点)

公開

1. 内部疲労き裂発生(一軸/曲げ疲労 = 平面ひずみ状態に近似)

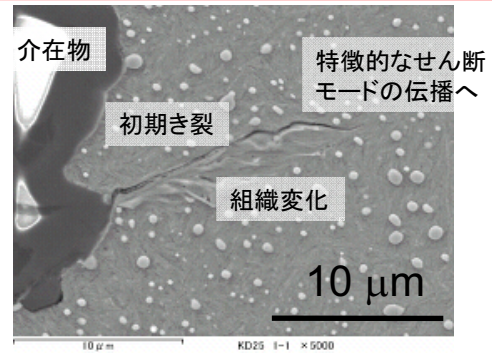
- ① 不均一変形(高サイクル疲労)にともなう内部応力場の形成
→ 転位下部組織やEBSD法からの推定(定性的)
- ② 応力場を開放する変形集中や微小き裂形成
→ 直接的な実験事実が得られていない
- ③ 限界サイズに成長した微小き裂の主き裂選択
→ 一軸/曲げ荷重条件下では ΔK_{th} 概念により整理可能
- ④ き裂伝播 → 一軸/曲げ荷重条件下では線形力学により計算可能

き裂発生過程の理解・シミュレーションは不十分

2. 転動疲労 = 複合的かつ上記技術の適用困難

- ① 強圧縮(塑性変形量大) = 低サイクル疲労?
- ② 介在物周りの応力集中と組織変化(WEA等)
→ 直接は関係しない?
- ③ 局所損傷を経た初期き裂生成
→ 限界サイズを未検出
- ④ 圧縮場のせん断モードによるき裂伝播と停留
→ 動的観察結果がなく、高精度な寿命予測困難

理解困難

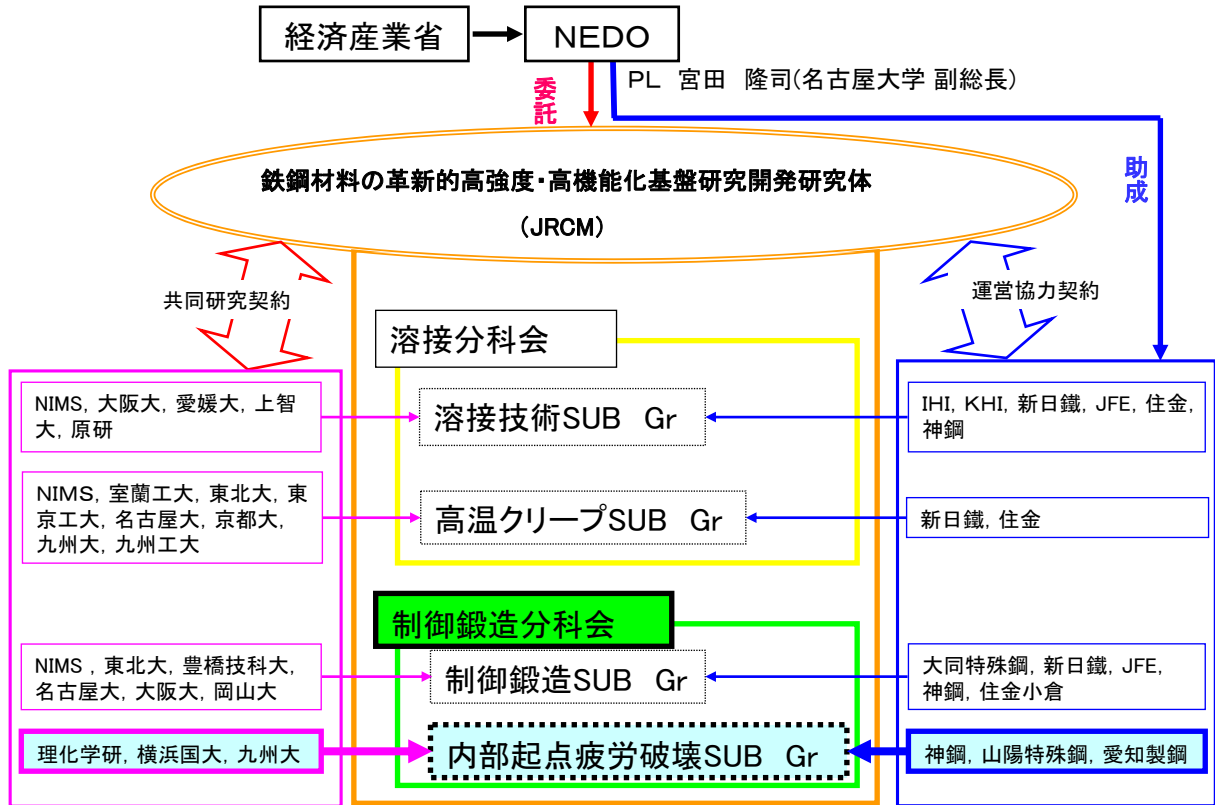


不可欠な解析技術の高度化とメカニズム解明

- 非破壊観察, 3次元高精度観察, 応力シミュレーション, き裂発生・伝播挙動
- 異なる研究分野の連携(従来にない) → 世界初・最高水準の技術の確立

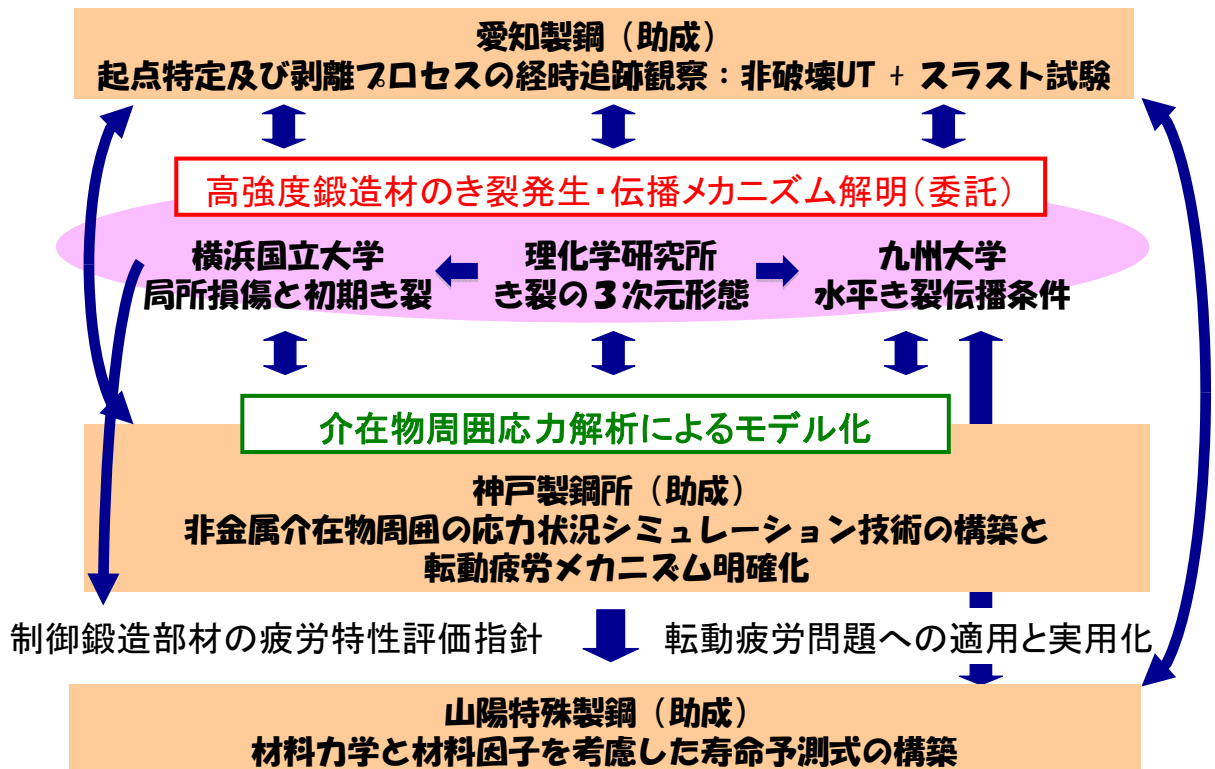
2. 研究開発の実施体制

公開



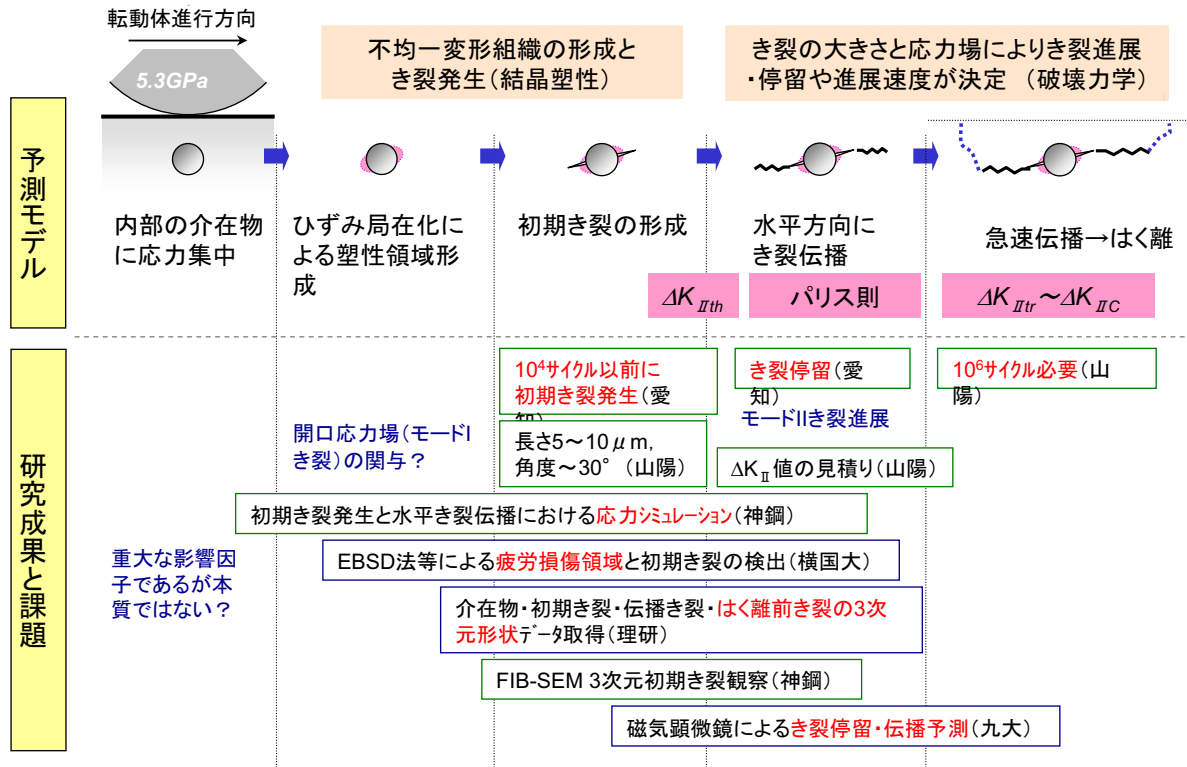
内部起点疲労破壊SubG

公開



転動疲労予測モデル

公開



3. 開発目標と達成状況

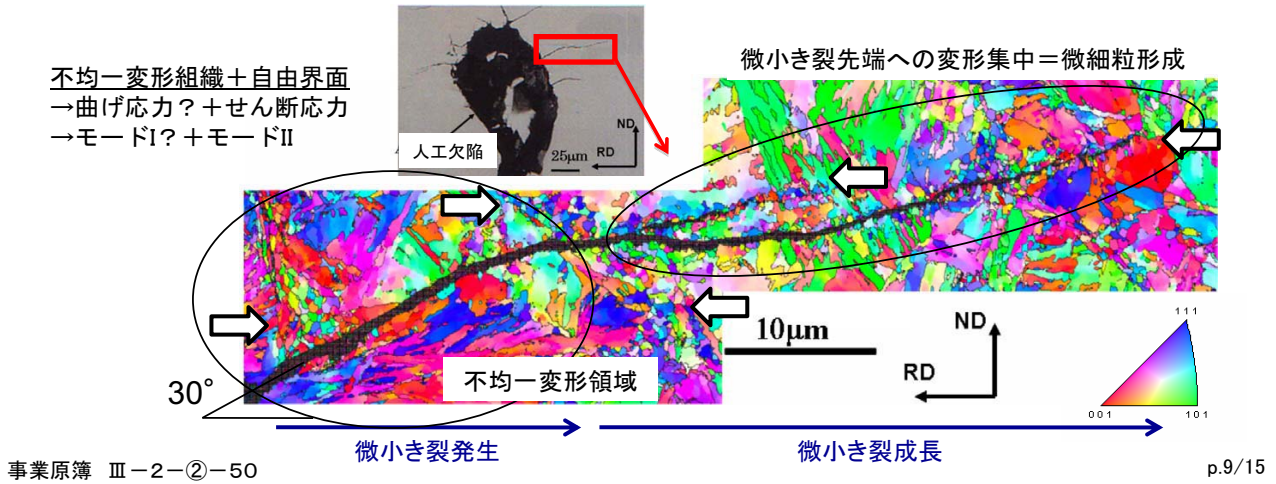
公開

| 研究開発項目 | 中間目標 | 最終目標 | 成果 | 達成状況 | 最終目標に向けた今後の取組み |
|---|---|--|---|------|---|
| 高強度鍛造材のき裂発生・伝播メカニズム解明 | 鉄鋼材料での疲労初期き裂の3次元観察基礎技術の確立 | 限界き裂長さに及ぼす非金属介在物と応力の影響を明確化 | マルテンサイト鋼において、電子線後方散乱回折法による疲労損傷評価基礎技術、介在物の高速・自動切削法による3次元構造観察技術、磁場顕微鏡による疲労き裂先端の検出技術を開発し、疲労初期き裂の3次元観察技術の基礎を確立 論文4件投稿済み | ◎ | 初期き裂起点となる介在物状態を明確にし、剥離に至るまでの過程を検証して、最終目標を達成できる見込み |
| <p><達成状況> 年度末における研究成果が</p> <p>◎ 中間目標を超過達成していると予想される。</p> <p>○ 中間目標達成可能と予想される。</p> <p>△ 中間目標未達となることが懸念されるが、来年度早期での挽回が可能。</p> <p>× 中間目標未達となることが懸念され、来年度早期での挽回も困難。</p> | | | | | |
| | <p>a. 電子線後方散乱回折法の活用による疲労損傷評価技術</p> <p>b. 疲労初期き裂の3次元観察技術</p> <p>c. 疲労き裂周辺の3次元磁気測定によるき裂進展評価技術</p> | <p>a. 疲労損傷評価における介在物による応力集中の影響抽出</p> <p>b. 初期き裂形成に及ぼす介在物組成の影響明確化</p> <p>c. き裂の伝播・停留に及ぼす介在物や応力の影響抽出とモデル化</p> | <p>a. ひずみ勾配の可視化と組織変化の検出に成功し、き裂形成がひずみ勾配領域であることを発見</p> <p>b. フラットバイトと槽円振動切削を組み込んだ3次元内部構造顕微鏡を構築し、鉄系材料内部の介在物・き裂の3次元形状をサブミクロン精度で自動観察する手法を世界で初めて実現</p> <p>c. 磁場顕微鏡観察において、応力拡大係数と磁場の相関性を発見 構造物の疲労劣化診断の新技術開発に成功</p> | | <p>a. 介在物周りの変形組織や介在物の剥離・割れと初期き裂形成との関係を抽出</p> <p>b. 介在物組成分析と高精度形態観察結果を基に各種介在物およびき裂の定量的評価パラメータを導出し、画像処理に基づく定量評価データベースを構築</p> <p>c. 磁場顕微鏡の高速データ処理により転動疲労き裂の停留・伝播状態を解析し、その力学要因解明とモデル化</p> |

4. 検討内容

鉄鋼材料での疲労初期き裂の3次元観察基礎技術の確立

- a. 電子線後方散乱回折法の活用による疲労損傷評価
 - 強塑性変形条件下における局所損傷を経たき裂形成の理解が可能に
- b. 精密高速切削による3次元形態観察
 - 介在物のはく離・割れ、初期き裂の形態が初めて明らかに
- c. 磁場顕微鏡による動的なき裂進展・応力拡大係数の検出
 - 伝播・停留の力学的研究が可能に

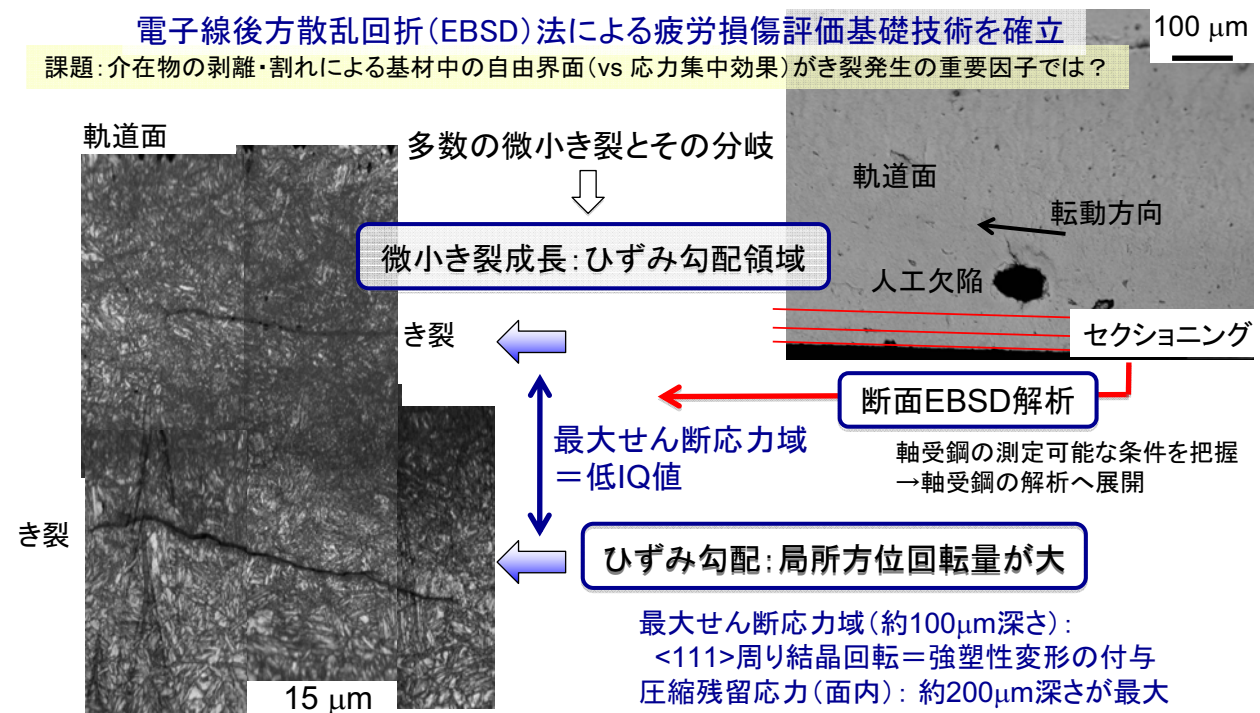


ひずみ勾配とき裂形成

「転動疲労き裂はひずみ勾配領域に形成し、最大せん断応力域でないことを実証したのは、世界初」

電子線後方散乱回折(EBSD)法による疲労損傷評価基礎技術を確立

課題: 介在物のはく離・割れによる基材中の自由界面(vs 応力集中効果)がき裂発生の重要因子では?

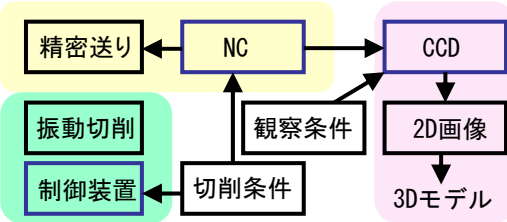
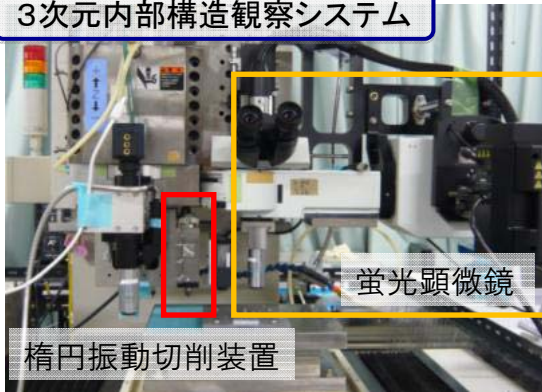


介在物と初期き裂の3次元形態

公開

「精密切削による鉄系材料内介在物の高速自動観察手法の確立は、世界初」

3次元内部構造観察システム

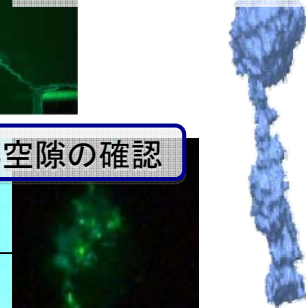
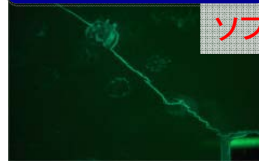


- ・介在物含有試験片の多断面・高速観察
- ・疲労試験片内の初期疲労き裂観察

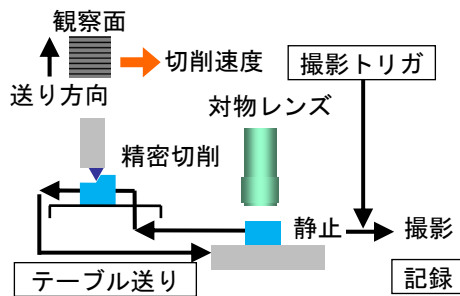
き裂を明確識別

介在物の3次元構造

ソフトウェア公開 1件 (V-CAT)



介在物内部空隙の確認



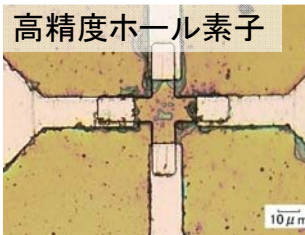
磁場顕微鏡によるき裂進展検出

公開

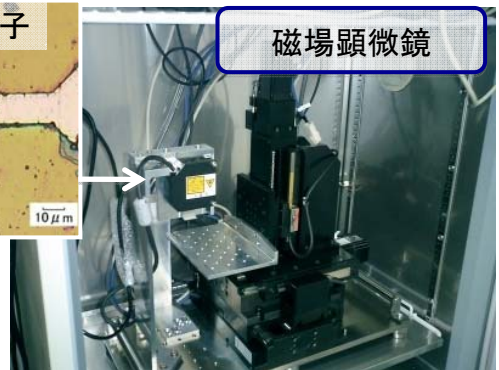
「磁場顕微鏡による疲労き裂先端の動的評価手法の確立は、世界初・最高水準」

<磁場観察システム>

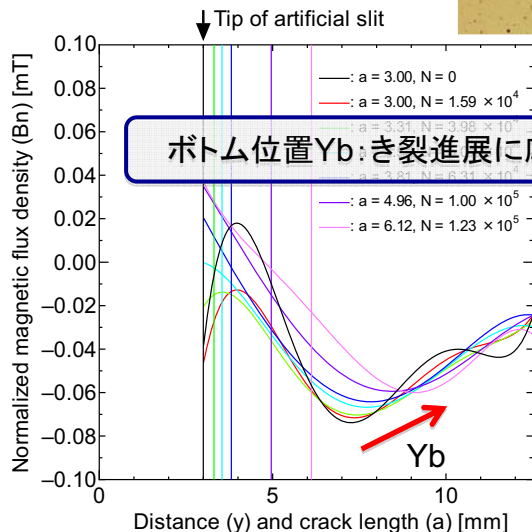
- き裂先端の塑性域拡大を検出
- 繰返し数毎の磁場分離
- 室温大気中・高精度・高分解能 (X線法の2000倍)



磁場顕微鏡



(高精度ステージ, 恒温環境, 防磁環境, 位置制御, データ分割)



磁場の定量化: Yb- ΔK 曲線の確立

応力拡大係数範囲 ΔK との相関性
→Activeなき裂の観察データから
応力拡大係数を見積る

5. まとめ

公開

中間目標「鉄鋼材料での疲労初期き裂の3次元観察基礎技術の確立」を達成

- a. 電子線後方散乱回折(EBSD)法による疲労損傷評価基礎技術
→汎用性(疲労損傷一般)／競合技術(100倍空間分解能 vs X線回折法)
■マルテンサイト鋼の転動疲労材においてひずみ勾配の可視化と組織変化の検出に成功
■き裂形成がひずみ勾配領域であることを**発見**
- b. 介在物の高速・自動切削法による3次元構造観察技術 **世界初**
→汎用性(3次元・高速欠陥検出)／競合技術(50倍高速 vs シリアルセクションング)
■フラットバイトによる高速切削を実現
■1辺1mmの立方体空間をサブミクロン精度
■切削-蛍光染色観察の自動システムを構築
- c. 磁場顕微法による疲労き裂先端の検出技術 **世界初**
→汎用性(き裂伝播一般)／競合技術(2000倍高速 vs X線応力測定)
■き裂観察から応力拡大係数を見積もる技術(従来不可能)の開発
■3次元磁場顕微観察において、応力拡大係数と磁場の相関性を**発見**

6. 最終目標に向けた今後の取組み

公開

最終目標「限界き裂長さに及ぼす非金属介在物と応力の影響を明確化」達成に向けて

【課題】

初期き裂起点となる介在物状態を明確にし、剥離に至るまでの過程を検証

- き裂発生的重要因子を抽出(不均一変形組織の形成, 介在物の剥離・割れ)
- 介在物およびき裂の定量的評価パラメータ導出とデータベース構築
- 転動疲労き裂における停留・伝播の力学要因とモデル化

【解決の道筋】

各種介在物起点き裂による検証

- ひずみ勾配に着目したマルチスケール分析と介在物周りの精緻な観察**
→介在物界面における初期き裂発生を観察データ取得
- 各種介在物の切削条件探索、高分解能・ハイスループット観察・定量化法確立**
→画像処理・解析技術に基づいた介在物・き裂形態の数量化高精度モデル作成
- 物理的に最小化した近接センサーと高速データ処理による広領域・3次元観察**
→開発技術(磁場顕微法)により転動疲労き裂の力学的評価を達成する見込み

研究計画の展開

公開

| 研究開発項目 | 19年度 | 20年度 | 21年度 | 22年度 | 23年度 |
|--|--|-------------------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| (助成) 転動疲労中の剥離プロセスの非破壊的経時変化観察技術高度化と剥離プロセス概況把握 | 酸化物系介在物を疲労き裂起点とした、剥離プロセスの経時的概況把握 | | | MnS、TiN系介在物を起点とした疲労き裂確認 | 全介在物(酸化物、MnS、TiN)に関する剥離プロセス概況把握 |
| (委託) 高強度鋼の局所的疲労損傷分布評価技術確立と影響因子の明確化 | 局所的疲労損傷分布評価の基礎技術検証 | マルテンサイト鋼人工欠陥材における転動疲労損傷評価への適用 | 転動疲労損傷評価への適用 各機関からの依頼分析 | 介在物周りの応力重量状態の検討 | 転動疲労損傷に及ぼす組織要因の抽出とき裂発生機構のモデル化 |
| (委託) 高強度鋼の初期き裂形態3次元観察および介在物組成評価技術の確立 | 鉄鋼材料内介在物観察に向けた切削条件・観察手法の開発 | | 楕円振動切削装置による切削条件最適化 | 介在物組成の分析と介在物および周辺き裂の観察 | き裂及び介在物の定量的評価パラメータの導出とデータベースの構築 |
| (助成) 非金属介在物周囲の応力状況シミュレーション技術の構築と転動疲労メカニズム明確化 | 応力シミュレーション基本モデル構築 | FIB-SEMによる高分解能3次元観察技術 | | 介在物組成情報を含む観察データの取得 | 応力シミュレーション活用による転動疲労機構解明 |
| | | 初期き裂形態に及ぼす酸化物系介在物の要因抽出 | | MnS、TiN系介在物の応力シミュレーション | |
| (委託) 高強度鋼の初期き裂進展状況評価技術確立と影響因子明確化 | き裂評価方法の新規開発 | 3次元測定システムの高精度化 | き裂先端の高領域可視化システム構築と空間分解能の向上 | 転動疲労対応システム構築とき裂進展状態の観察 | き裂進展挙動あるいは停留に及ぼす種々要因の抽出とモデル化 |
| (助成) 材料力学と材料因子を考慮した寿命予測式の構築 | 酸化物系介在物起点における寿命予測式立案を目的としたサンプル試作と寿命試験の実施 | | | 介在物と初期き裂長さとの関係を明確化し、寿命予測精度の向上を図る | 全介在物(酸化物、MnS、TiN)に関する寿命予測式の完成とその検証 |