

(社) 日本鉄鋼協会 学術記念賞（西山記念賞）受賞報告 「軸受用鋼の転がり疲れ現象の解明に向けた研究概要」

平岡和彦*

Kazuhiko Hiraoka

このたびの受賞に対しまして、関係の皆様方には多くのご指導、ご協力を賜りました。ここに深くお礼を申し上げます。受賞理由となりました「軸受用鋼の転がり疲れ現象の解明」について、その研究の概要を紹介いたします。



態を呈することが知られている。はく離は曲げや捻り疲労による破壊とは異なり接触荷重による局所的な現象であり、要因の複雑さや観察に困難さが伴うために、機構が十分に解明されているとはいえない。

筆者は、これらの問題を払拭するために、実験方法の創出と応力シミュレーションの活用による疲労過程の可視化に力点を置いた転がり疲れの研究を進めてきた²⁻⁴⁾。以下にその概要を紹介する。

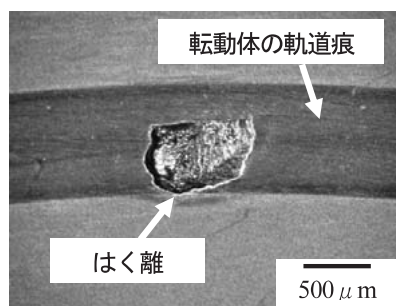


図1 転がり疲れによるはく離外観
(SUJ2 スラスト型試験)¹⁾

1. はじめに

昨今、自動車や各種産業機械の分野では効果的な環境負荷軽減を図るために、駆動系ユニットの小型軽量化設計や機構の革新が顕著に進んでおり、その主要素材である特殊鋼は、多様でかつ苛酷化する使用環境において従来と同等以上の機能を発揮することが求められている。本題である転がり疲れ特性の改善を狙った基礎的研究は、産業の高度化や社会的貢献において重要であると考えられる。しかしながら、転がり疲れは軸受や歯車の性能に関わる身近で非常に重要な問題であるにもかかわらず未だ機構解明が充分ではない状況にある。例えば、同じ分野における歯車の歯元疲労（曲げ疲労）やシャフトの疲労（捻り疲労）は、関与する応力の状態が判り易く、また疲労の過程を破面観察により知ることができるため、疲労破壊の機構やそれに基づく改善指標が明らかである。一方、転がり疲れは図1¹⁾に示すように面型の特徴的な「はく離」と称される破壊形

2. 研究の概要

転がり疲れは、破壊起点の位置により内部起点型と表面起点型とに分けられ、本研究では材料の関与が大きい内部起点型を対象としている。一方、表面起点型も昨今の使用環境の苛酷化により重視されているが⁵⁾、原理的にみて部品の表面性状や潤滑の影響を強く受ける性質があり、本研究では対象から外している。

内部起点型転がり疲れによるはく離は、一般的な使用環境下では部品表面直下の鋼中非金属介在物が応力集中源として作用して破壊起点になる。このことから鋼材の高清浄度化（非金属介在物の小径化や存在頻度の軽減）が基本的な改善策となることが既によく知られている^{2,3,4,6)}。本研究ではより効果的な長寿命化方策を創出するために、き裂挙動に対する非金属介在物の作用を明らかにすることを目指している。

* 東京支社部長 兼 自動車・産機営業部自産機CS室長，博士(工学)

一方、最近では使用環境の多様化が進んだ結果、明瞭な起点を呈さず図2⁷⁾に示すような特徴的な白色組織変化を伴って早期はく離に至る問題が顕在化している。この問題では、関与すると思われる環境要因が多く挙げられ、さらに複合的に関与している可能性があるために機構解明が難しいとされてきた。本研究では、この型のはく離について、従来の研究に多くみられた環境面からの切口による究明ではなく、材料視点に立った疲労過程の観察に重きを置き、組織変化とき裂挙動との因果関係を調査した⁷⁾。以下に非金属介在物起点型と白色組織変化型についての主な知見について紹介する。

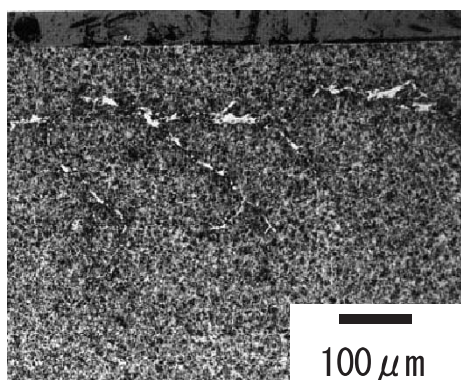


図2 SUJ2製ベアリング軌道輪に観察される白色組織変化⁷⁾

2.1 非金属介在物起点型における主な知見

実用鋼材による転がり疲れ試験では、偶発的な成功を除いて存在頻度の低い非金属介在物から生成するき裂を捉えることが非常に困難であることが経験的に知られている。また、はく離は接触荷重による圧縮場におけるせん断応力によるき裂伝ばを伴うことから破面は摩滅しており、き裂生成と伝ば過程を破面解析により知ることはほぼ不可能であるといえる。この問題を払拭するために粉末原料を用いて焼結条件を選定することにより非金属介在物に見立てた多数の空洞を導入したJIS SUJ2組成からなる試験片を作成して実験を進めた。図3⁸⁾に示すように導入した空洞から予想通り生成したき裂の観察に成功し、応力解析や検証のための実験を経て、以下の知見を得た^{3,8)}。

- 1) き裂生成は、はく離に至る全寿命の初期段階に認められ、実用上き裂伝ば過程が寿命を強く支配している。
- 2) 応力拡大係数幅の考え方に基づき伝ばを支配する初期欠陥の大きさに対し、非金属介在物の大きさが従来の知見通り大きく影響し、その小径化が長寿命化方策の基軸となる。
- 3) 非金属介在物の組成やマトリックスとの界面の状態は、非金属介在物周囲の応力状態に強く影響し、き裂生成直後のき裂長さに影響を与え、後続の伝ばへの影響を介して寿命に変化をもたらす。

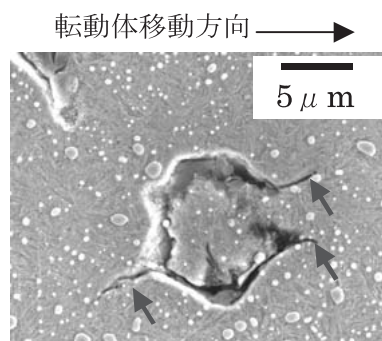


図3 5×10^4 サイクル時点の空洞起点のき裂生成 (矢印はき裂を表す)⁸⁾

2.2 白色組織変化型における主な知見

白色組織変化自体の正体を明らかにすることだけではなく、このタイプにおけるき裂生成と伝ば過程の提示ならびにはく離と白色組織変化との因果関係を明確にすることに力点を置いた研究に取り組んだ。水素チャージ試験片を用いた疲労過程の経時的な観察と透過電子顕微鏡観察による結晶塑性学的な見方の付与によって以下の知見を得た^{3,7,9,10,11)}。

- 1) 白色組織変化の先駆現象として、ブロック界面に内部構造としてアモルファス状を呈し数ミクロン程度の長さからなる図4¹¹⁾に示すような針状の組織変化を示す段階がある。その連結による大型内部き裂の形成が早期はく離の直接的な原因であるとみられた。
- 2) 針状組織の生成は、水素が塑性歪みを局在化させる効果によるものと推定した。
- 3) 前述の大型内部き裂に沿ってナノ結晶化した白色組織変化が形成されており、その形態や生成位置の特徴は応力シミュレーションにより説明された。

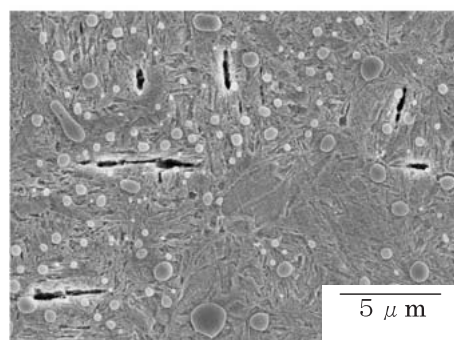


図4 水素チャージ試験片の試験過程で認められた針状組織変化¹¹⁾

3. おわりに

解明が難しいといわれてきた転がり疲れの機構について、実験・検証方法の工夫により、き裂生成と伝ばに基づいた可視化を進めてきた経緯を紹介した。この研究により得られた知見が、新たな研究課題につながり、軸受や歯車の飛躍的な高機能化に結びつくことを強く期待している。

参考文献

- 1) 山陽特殊製鋼社内データ
- 2) 平岡和彦:第188・189回西山記念技術講座テキスト,(2006),131.
- 3) 平岡和彦:兵庫県立大学学位論文,(2008).
- 4) 平岡和彦:ふえらむ,15,10(2010),264.
- 5) 月刊トライボロジー,16,4(2002),50.
- 6) 上杉年一:鉄と鋼,74,(1988),1889.
- 7) 平岡和彦:Sanyo Technical Report, Vol.15(2008),43.
- 8) 藤松威史,平岡和彦,山本厚之:鉄と鋼,94,(2008),13.
- 9) 平岡和彦:鉄と鋼,94,(2008),636.
- 10) 平岡和彦,常陰典正:Sanyo Technical Report, Vol.16(2009),45.
- 11) 平岡和彦,藤松威史,常陰典正,山本厚之:トライボロジー,52(2007),888.