

転がり疲れ現象の可視化と軸受鋼の長寿命化技術

山陽特殊製鋼株式会社

東京支社部長（市場開拓）兼 自産機CS室長

平岡和彦

1. はじめに

近年、自動車をはじめとする各種機械産業の分野では、環境負荷軽減と機能向上との両立を図るために、駆動系ユニットの小型化設計や機構革新が進んでいる。その素材には高い材料強度が要求されることから主に特殊鋼が使用されている。その中でも中核部品であるベアリングには軸受鋼が使用されており、より苛酷化する使用環境下で従来と同等以上の耐久性が求められている。本題の「転がり疲れ」は、軸受鋼に特に重視される特性であり、その改善を目指した研究は重要性を増している。しかしながら、転がり疲れは身近で重要な問題であるにもかかわらず、破壊に至る過程が明確に示されてこなかった。同じ駆動系部品の疲労破壊、例えば、ギヤの歯元折損（曲げ疲労）やシャフトの破損（捻り疲労）は、作用する応力の状態が比較的単純であり、破壊に至る過程も破面観察により知ることができるため、機構とそれに基づいた改善指標が明示されている。それに対して、転がり疲れでは図¹⁾に示すように特徴的な「はく離」と呼ばれる面型の破壊に至ることが知られている。はく離はベアリングの軌道（レース）と転動体（ボールやローラー）との間の接触荷重による局所的で作用応力が複雑な現象であり、さらに観察の困難さも伴うために機構が明らかにされてこなかった。

筆者らは、これらの問題を解消するために、実験方

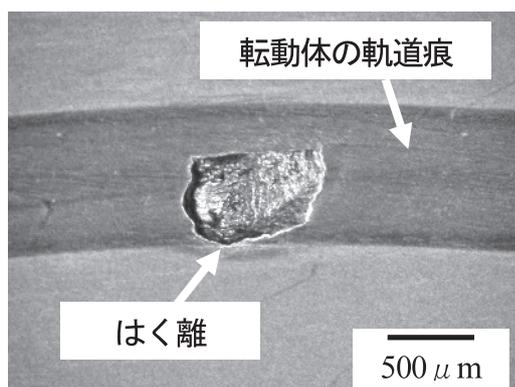


図1 転がり疲れによるはく離外観（SUJ2 スラスト型試験）¹⁾

法の考案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研究を進めてきた^{2~4)}。以下にその概要を紹介する。

2. 研究の概要

ベアリングが通常の潤滑状態で使用される場合、軌道直下に不可避に存在する非金属介在物が応力集中源として作用して起点となり、はく離に至ることは既に知られている。よって軸受鋼では、高纯净度化（非金属介在物の小径化や存在頻度の軽減）が必要であることはよく理解されており、鋼中酸素量の低減がアルミナ系非金属介在物の低減を介して重要な品質指標となることが既に知られている⁵⁾。

金属全般の疲労について村上らが提唱する $\sqrt{\text{Area}}$ パラメータモデルに基づいた考え方がよく知られ⁶⁾、実用鋼材においてもその妥当性が明確に検証されている⁷⁾。このモデルは、欠陥をき裂とみなし、その長さ(2a)とそこに作用する応力(σ)から算出される応力拡大係数幅($\Delta K=2\sigma\sqrt{\pi a}$)が、疲労き裂の伝ば速度を律するとした破壊力学に準じた考えに基づいている。このモデルからは、素地の硬さと残留応力値が同じであれば、起点となる欠陥の大きさが小さいほど疲労き裂の伝ばが遅くなり疲労強度は上がることになる。 $\sqrt{\text{Area}}$ パラメータモデルによって予測される疲労強度は材料値であり、試験形式により左右されるものではなく、特別視されがちな転がり疲れについてもこのモデルから逸脱しないものと考えられる。しかしながら、経験的にみて軸受鋼の非金属介在物検査成績の良し悪しと実際のはく離寿命との関係には曖昧な点があり、時に逆転する場合もある。筆者らは、転がり疲れにおいて非金属介在物の大きさをそのままき裂長さとしてよいかどうかについて疑問を持ち、非金属介在物からのき裂生成の観察に重きを置いて研究を進めた³⁾。

実用上の軸受鋼の転がり疲れ試験において、はく離に至らない試験途中の軌道直下をセクションングして観察する場合があるが、存在頻度の低い非金属介在物

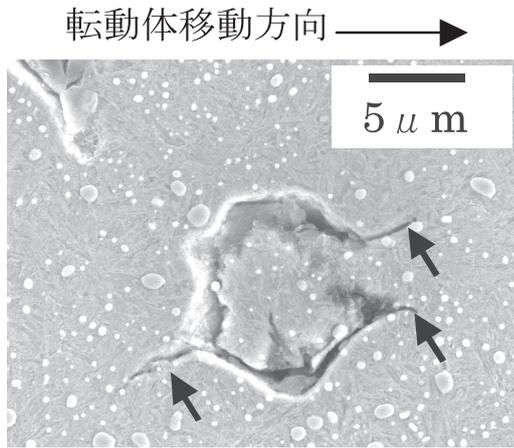


図2 5 × 10⁴ サイクル時点の空洞起点のき裂生成 (矢印はき裂を表す)³⁾

から生成するき裂を直接観察することは偶発的な成功を除き不可能である。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、はく離底の破面は摩滅しており、起点となった非金属介在物を特定し、き裂生成-伝ばの過程を観察により知ることはほぼ不可能である。この問題を払拭するために筆者らは、代表的な軸受鋼である JIS SUJ2 組成からなる金属粉末を原料とし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試験片を考案して実験を進め、図 2³⁾ に示すように導入した空洞から生成したき裂の観察に成功した。この方法によって多くの観察結果が得られ、き裂生成の時期と軌道からの深さに対するき裂生成の頻度、角度ならびに長さについて系統的に解析を進めることができた。なお、空洞と非金属介在物とは物性が異なるため、等価には扱えないが、応力シミュレーションにより補完してモデル化し、その妥当性を実験で検証した。目的としたはく離過程の提示とそれに基づく新たな改善方策について、得られた知見は以下の通りである^{3,8)}。

- 1) 人工的に導入した空洞が起点となる場合、き裂生成は両縁に作用する主応力により生じ、全寿命に対し 1/1000 未満の極初期段階に起こっている。
- 2) 実際の非金属介在物においてもマトリックスとの

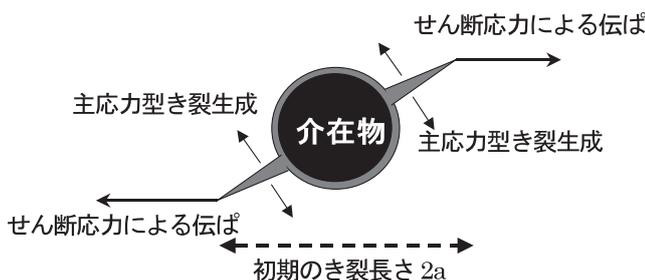


図3 主応力型き裂生成と伝ばの模式図

間に隙間を生じている場合には有害性が最悪となり、空洞と等価なき裂生成があることが応力シミュレーションによって予測された。(図 3 にき裂生成と伝ば過程を模式化)

- 3) 上記予測の検証のために、通常の軸受鋼に対して熱間静水圧プレス (HIP) を付与することにより非金属介在物とマトリックスとの密着性を向上させるテストを実施。図 4⁹⁾ に示す通り大幅な寿命改善が確認できており、予測が裏付けられた。また非金属介在物とマトリックスとの密着性向上は、新たな寿命改善への方策でもある。

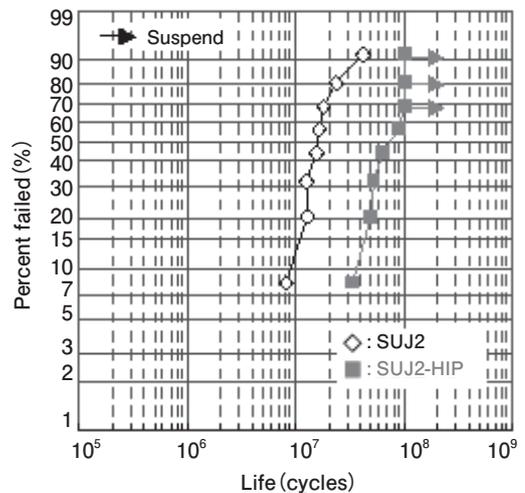


図4 HIP 付与によるはく離寿命の変化⁹⁾

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、き裂生成と伝ば過程を可視化し、それに基づき見出した改善方策について紹介した。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、機械産業の高度化に寄与することを強く期待している。

<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) 上杉年一：鉄と鋼, 74, (1988), 1889.
- 6) 村上敬宜：金属疲労「微小欠陥と介在物の影響」, 養賢堂, (1992)
- 7) 林 亮二, 濱田兼彰, 小林一博, 佐藤紀男：Sanyo Technical Report, 2.1 (1995), 22.
- 8) 藤松威史, 平岡和彦, 山本厚之：鉄と鋼, 94, (2008), 13.
- 9) 橋本和弥, 藤松威史, 常陰典正, 平岡和彦, 木田勝之：CAMP-ISIJ, 22, (2009), 1297.