



特殊鋼棒線の最近の進歩-1

軸受鋼の内部起点型転がり疲れに関する研究動向

Trend of Research on Internal-failure-type Rolling Contact Fatigue

平岡和彦
Kazuhiko Hiraoka

山陽特殊製鋼(株) 研究・開発センター
軸受・構造用鋼グループ
グループ長

1 はじめに

最近、深刻化する環境問題を背景とした機械産業の変革により、軸受鋼の技術を取巻く状況は急変してきた。軸受部品は本来、滑らかな動力伝達によって機械ユニットにおけるパワーロス軽減を図る役目があり、環境負荷軽減に寄与している。その主要素材である軸受鋼は、軸受部品の機能として最も重視される転がり疲れにおける耐久性の発揮を担っており、自ずと環境負荷軽減に貢献してきた。直近の軸受鋼に対する技術的なニーズは、環境問題の加速を背景とした自動車用をはじめとする各種機械ユニットにみられる機構の革新や、大幅な小型・軽量化の影響を強く受けている。結果として、軸受鋼には従来にはない過酷な環境において、従来と同等以上の寿命特性を発揮することが求められている。

転がり疲れは、各種転動部品に幅広く関係する身近な問題であり、これまでに長寿命化を図るために多くの研究がなされてきた¹⁾。転がり疲れによる破壊は「はく離」と称され、図1²⁾のように局所的で面型を呈する特徴的がある。また、転がり疲れは要求される寿命サイクルから、明らかに高サイクル疲労として位置付けられるが、他の高サイクル疲労である曲げ、引張ならびに捻り型の疲労と比較して、機構や改善指標に曖昧な点が多くある。その理由は、主に実験や観察による

理論構築の難しさにあるとみられる。これは転がり疲れが転動体(ボールもしくはころ)と軸受軌道との接触荷重による現象であることに理由があり、観察が困難な内部起点型になり易く、局所的で公称条件だけでは示されない複雑な応力状態が関与するからである。さらに、軸受固有のトライボロジー的要因の関与も現象の解釈を難しくしている。

このような背景の下、直近では、実験方法の工夫、先端的な観察機器の適用ならびにシミュレーションの発達により現象の可視化技術が高度化され、それに伴う新たな研究成果が見受けられる。可視化技術の進歩により、疲労の原則的な過程「き裂生成→伝ば→破壊(ここでははく離)」に照し合せた機構の説明が可能になり、新たな改善方策への糸口がみられるようになった。本報告では、このような状況の下、軸受鋼の転がり疲れによるはく離機構の解明とそれに基づく長寿命化技術に焦点を当てた研究動向を紹介したい。

2 使用環境別にみた長寿命化技術

転がり疲れによるはく離は、軸受が十分な潤滑状態の下で使用され、転動体と軌道との間に健全な油膜が形成されている場合、内部起点型となり、鋼材内部の非金属介在物が応力集中効果により起点として作用する。このような理由から、非金属介在物の低減は寿命延長をもたらすことが知られている^{1,3)}。この内部起点型の機構は軸受軌道直下のせん断応力分布の特徴により説明され、最表面ではなく表面直下にその最大点が位置することに起因している^{1,4)}。このような状況から軸受では原則として非金属介在物起点型のはく離が想定されており、軸受鋼には非金属介在物の成績が性能指標として重視される。実際上の軸受の使用環境では、この機構による疲労を受けることが基本となるが、同じ内部起点型であっても特定の環境要因が関与して、明瞭な起点を呈さずに組織変化を伴って内部き裂の生成を経てはく離に至る機構がある。

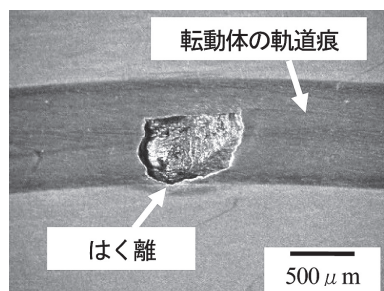


図1 転がり疲れによるはく離外観 (SUJ2 スラスト型試験)²⁾

さらに潤滑もしくは表面粗さの制約により、健全な油膜形成が阻まれることによって、軌道表面に生じる接線力の作用により表面起点型のはく離を生じる場合がある。

本報告では、材料の見地から最重視される非金属介在物に起因する内部起点型のはく離を主体に説明したい。一方、組織変化を伴う内部起点型や表面起点型の長寿命化には、原理的にみて潤滑や軸受デザインに関係する方策が有効であるが、前述のように環境問題の急変を受けて改善要求のレベルは高まっており、材料対策への期待も高まっている。それらの技術動向については、直近に行った他の報告に委ねたい^{1,4-6)}。

2.1 非金属介在物起点型転がり疲れの研究動向

金属全般の疲労に関し、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⁷⁻¹²⁾、本題の軸受鋼のような高硬度鋼の非金属介在物起点型破壊において、その妥当性が実験により明確に検証されている¹³⁾。このモデルでは、疲れ強さが、基地硬さと残留応力値が既知であることを前提にして、起点欠陥の大きさによって予測される。重要な部分として、予測される疲れ強さは材料値であって、試験方式や環境因子に左右されるものではない点に注目する必要がある。先に述べたように転がり疲れは、高サイクル疲労の中で特別視されがちであるが、このモデルに沿った基本的な考え方からは逸脱しないものと考えられる。直近の研究で明らかにされてきた非金属介在物起点型のはく離機構とそれに基づいた長寿命化方策について紹介する。

2.1.1 非金属介在物起点型のはく離の研究課題

正確な寿命予測や効果の高い長寿命化方策を目指すためには、 $\sqrt{\text{Area}}$ パラメータモデルの考え方を念頭に置き、き裂生成→伝ば→破壊に照し合せた機構の説明がなされることが不可避である。転がり疲れのき裂は、軌道に平行なせん断応力成分 ($2\tau_0$) が駆動力となって伝ばすることが、現在では支持されている^{12,14)}。実際、非金属介在物起点型とみられるのはく離の底も経験的にみて軌道に対して平行な部分があり、直近の解釈としてこの説に疑いはないものとみられる。しかしながら、伝ば挙動を左右するであろう初期欠陥の大きさは、厳密に論じられておらず、概ね非金属介在物の大きさが転がり疲れの寿命指標であろうとして扱われてきた経緯がある。例えば長尾ならびに筆者ら¹⁵⁾は、図2¹⁵⁾に示すように代表的な軸受鋼であるSUJ2を用いたスラスト型転がり疲れ試験において、極値統計法により予測される最大非金属介在物径と10%破壊寿命 (L_{10}) とを比較している。図中では軸受鋼中に存在が想定される酸化物系、硫化物系ならびに窒化物系介在物の各々の予測最大径と L_{10} との関係がプロットされており、各ヒートにおいて3種類の非金属介在物のうち最大の予測径

となったものをソリッドプロットとしている。この結果は、非金属介在物の種類にかかわらず、その小径化により長寿命化が図られることを意味している。しかしながら、この図からは同じ予測径に対して寿命は1オーダーの幅をもっている状況も読み取ることができる。この結果や経験的にみた非金属介在物成績と寿命値との関係の曖昧さを、 $\sqrt{\text{Area}}$ パラメータモデルに照し合せた場合、非金属介在物の大きさを初期欠陥の大きさとして扱って良いのかという疑問が自ずと生じる。筆者はこの疑問から、今後要求が強まるであろう正確な寿命予測やさらなる長寿命化への技術創出に向けて、き裂生成過程の明確化がこの分野の研究において重要課題であるとの考えに至った¹⁶⁾。転がり疲れには固有の現象として、非金属介在物の周囲に白色を呈する組織変化 (通称バタフライ) があることが知られている。最近の理解として、これは塑性ひずみの蓄積による強ひずみ加工に準じた現象であることがわかっている^{5,17)}。このように、転がり疲れでは、固有の問題として、非金属介在物周囲に塑性が強く関与していることを念頭に置く必要があり、き裂生成には結晶塑性の概念を踏まえた見方¹⁶⁾が必要であろうと考えられる。

2.1.2 き裂生成機構解明に関する筆者らの研究

き裂生成挙動を明らかにするために藤松ならびに筆者ら¹⁸⁾は、粉末冶金手法を利用したSUJ2組成からなる独自の試験片を考案した。試験片中には非金属介在物の代わりに人工的な空洞欠陥が含有されている。それらを用いて最大接触面圧 $P_{\max} = 3.95\text{MPa}$ の条件でスラスト型転がり疲れ試験を行い、図3¹⁸⁾に示すように空洞を起点とするき裂生成の直接的な観察に成功している。実用鋼材としてのSUJ2では偶発的な成功を除き、存在頻度が低い非金属介在物からのき裂生成は観察できなかったが、考案した試験片では、多数の観察が

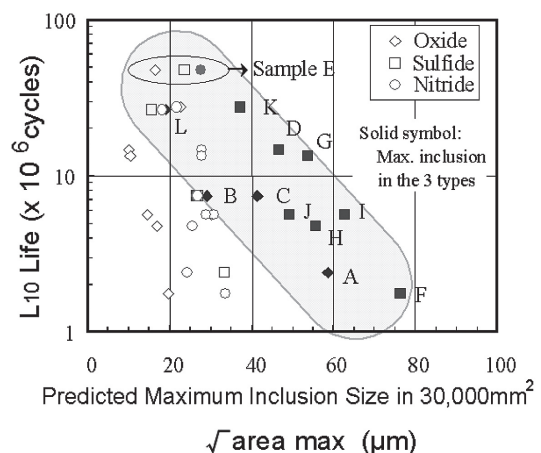


図2 検鏡極値統計法で得られた予測最大非金属介在物径と L_{10} 寿命との関係¹⁵⁾

できた。軌道からの深さに対するき裂生成の頻度分布ならびにき裂角度の観察結果と応力シミュレーション結果とを対比して、空洞からのき裂生成は、 5×10^4 サイクル未満の時期に主応力により生じているとの推定を導いた。き裂生成に要したサイクル数は、この条件で本来想定される全寿命 (10^8 サイクル程度) に対して 1/5000 程度であり、極短期間に主応力型でき裂を生成し、それを初期のき裂長さとして、その後、せん断応力 $2\tau_0$ による非常に遅い伝ば期を迎えるという機構が推定された。なお、主応力によるき裂生成は、一気に脆性破壊するのではなく、先に非金属介在物周囲にせん断応力による塑性変形の繰返しにより変形飽和組織が形成された後に、引張応力により生成するという理解である。この機構には、塑性の関与や要されるサイクル数 (5×10^4 サイクル未満) から低サイクル疲労との類似性が感じられる。筆者は、空洞周囲の塑性領域の特定を EBSD により試みたが、基地組織が高炭素鋼の低温焼戻しマルテンサイト状態であるという理由により菊池線が現出し難く、明瞭な結果は得られなかった¹⁶⁾。実用鋼としての軸受鋼では、空洞ではなく非金属介在物としてアルミナ (Al_2O_3)、チタンナイトライド (TiN)、カルシウムアルミネート ($\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$) ならびにマンガンサルファイド (MnS) が通常存在する。各々の非金属介在物が直径 $20\mu\text{m}$ の大きさで基地と密着して存在すると仮定した場合、応力シミュレーションで計算される非金属介在物周囲の最大の主応力は図4¹⁸⁾に示すように、空洞 (図中 Pore として表記) 周囲に計算される 2000MPa 以上に対して半分以下の値である。この検証からは、予測された短サイクルでの主応力によるき裂生成機構は成立たない。しかしながら、過去の研究報告の中で、古村ら¹⁹⁾が、軸受鋼の転がり疲れにおける疲労限度を検証する試みの中で、酸化物系介在物を起点とするバタフライの発生時期が、筆者らに近い $P_{\text{max}} = 3.43\text{GPa}$ の条件下で 1×10^5 サイクル未満であることを報告している。バタフライは非金属介在物起点のき裂を伴って現れることから⁵⁾、実際の非金属介在物からも先の仮説に準じたき裂生成のあることは支持されるものと考えられる。さらに Nelias ら²⁰⁾は二次

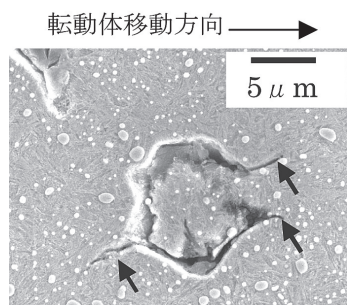


図3 5×10^4 サイクル時点の空洞起点のき裂生成 (矢印はき裂を表す)¹⁸⁾

硬化型の軸受鋼 M50 を用いた $P_{\text{max}} = 3.5\text{GPa}$ のツインディスク型転がり疲れ試験において、この材料に固有の粗大炭化物を起点とするき裂生成を超音波探傷により観察しており、その生成時期が 1×10^5 サイクルまでであり全寿命に対する極初期にあることを指摘している。これらの知見を基に、筆者らは、非金属介在物と基地との間に物理的な隙間が存在する場合に空洞と等価な作用となり、非金属介在物であっても空洞の実験で予測した主応力による早期のき裂生成機構があることを仮説とした。

筆者の共同研究者である橋本²¹⁾ならびに常陰ら²²⁾は、この仮説を検証するために、SUJ2 を供試材として非金属介在物と基地との密着性改善を非金属介在物の改質や熱間静水圧プレス (HIP) の付与によって図り、寿命の変化を調べた。図5は橋本ら²¹⁾によるSUJ2にHIPを付与した $P_{\text{max}} = 5.3\text{GPa}$ のスラスト型寿命試験の結果である。同じヒートのSUJ2がHIPの付与により明らかに長寿命化していることがわかる。この結果は先に述べた仮説を強く裏付けており、さらに非金

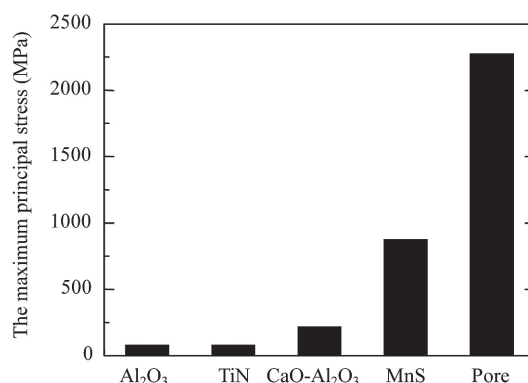


図4 基地との密着を前提とした各種非金属介在物ならびに空洞周囲に計算される最大の主応力値¹⁸⁾
(各々直径 $20\mu\text{m}$ として深さ 0.12mm に存在するとして計算)

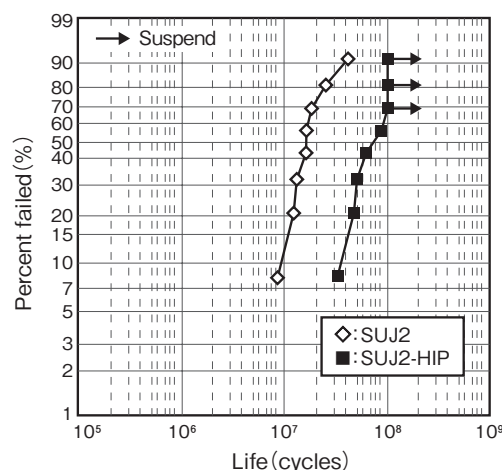


図5 HIP 付与によるはく離寿命の変化²¹⁾

下限(図中点線)が予測されそうなが見出せつつある。低 $\angle K_{II'}$ 領域におけるばらつきは、先に推定した主応力型き裂の長さのバリエーションにより生じているものと考えられ、それらは結晶塑性の視点で影響を及ぼすであろう非金属介在物と基地との隙間の状態、非金属介在物の物性値の違いならびに基地の結晶方位により生じているものと推定される。従って、この実験で得られる下限線は、 $\sqrt{\text{Area}}$ パラメータに基づく非金属介在物の大きさを軸とした予測に、結晶塑性の視点からのき裂生成機構が考慮された最悪の寿命予測線であるといえる。工業的な視点では、非金属介在物性状から最悪寿命が予測されることが重要であり、その点において有意義な予測が可能であろうことが見え始めた。なお現状、高 $\angle K_{II'}$ の領域は、大径非金属介在物の存在頻度の低さを補う方法として人工ドリル穴によるデータ(Artificial defectsと表記)で代用しており、また10MPa $\sqrt{\text{m}}$ 以下の領域は $\angle K_{II'}$ スレッショールド値の検討に必要なデータが不足している。現在、さらなるデータの充実に図るべく実験が継続されている。

現状プロジェクト活動の総括的な成果として、以上の結果を集約し図8^{23,25)}に示す非金属介在物起点型のはく離機構を既に呈示した。軌道直下の非金属介在物への応力集中に始まり、塑性領域の形成を経て主応力型でき裂生成し、それを初期欠陥の大きさとしてはく離寿命が支配されていることを示している。

3 おわりに

軸受鋼に重視される非金属介在物起点型のはく離は、その機構が明確に示されていなかったが、直近の可視化技術の進歩により、き裂生成→伝ば→破壊に照し合せた説明がなされてきた。それに基づき、正確な寿命予測や新たな長寿命化技術が創出されてきた状況がうかがえる。特に正確な寿命予測は、新しい軸受鋼の検査法や軸受設計に反映され、避けられない軸受の使用環境過酷化に対し、的確な軸受鋼の供給が行えることにつながる。これは、昨今最重視される環境負荷軽

減に対して、軸受鋼が貢献するシナリオとして期待が大きく、さらに鋼材一般に水平展開されるべき重要な技術でもある。

参考文献

- 1) 平岡和彦：第188・189回西山記念技術講座テキスト，日本鉄鋼協会編，(2006)，131.
- 2) 山陽特殊製鋼社内データ
- 3) 上杉年一：鉄と鋼，74 (1988)，1889.
- 4) 平岡和彦：月刊トライボロジー，16, 4 (2002)，50.
- 5) 平岡和彦：鉄と鋼，94 (2008)，636.
- 6) 平岡和彦，常陰典正：Snayo Technical Report, 16 (12009)，45.
- 7) 村上敬宜：金属疲労「微小欠陥と介在物の影響」，養賢堂，(1992)
- 8) 村上敬宜，児玉昭太郎，小沼静代：日本機械学会論文集，A編，54-499 (1988)，688.
- 9) 村上敬宜，宇宿尚史：日本機械学会論文集，A編，55-510 (1989)，213.
- 10) 村上敬宜，上村裕次郎，夏目喜孝，宮川進：日本機械学会論文集，A編，56-525 (1990)，1074.
- 11) 鳥山寿之，村上敬宜：材料，42, 481 (1993)，1160.
- 12) 村上敬宜：Snayo Technical Report, 1 (1994)，3.
- 13) 林亮二，濱田兼彰，小林一博，佐藤紀男：Sanyo Technical Report, 2, 1 (1995)，22.
- 14) G.Lundberg and A.Parmgren：Acta. Polytechnica, Mech.Engr.Series.1：3 (1947)
- 15) 長尾実佐樹，平岡和彦，雲丹亀泰和：Snayo Technical Report, 12 (2000)，38.
- 16) 平岡和彦：兵庫県立大学学位論文，(2008)，21.
- 17) 梅本実：Snayo Technical Report, 11 (2004)，13.
- 18) 藤松威史，平岡和彦，山本厚之：鉄と鋼，94 (2008)，13.
- 19) 古村恭三郎，村上保夫，阿部力：NSK Technical Journal, (1993) 656, 15.
- 20) D.Nelias, M.L.Dumont, F.Champiot, A.Vincent,

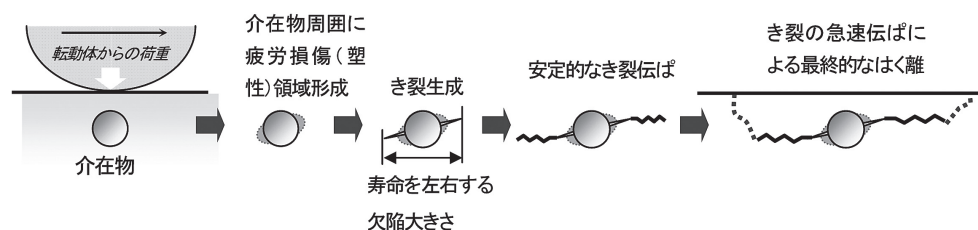


図8 NEDOプロジェクトで提唱された非金属介在物からの転がり疲れによるはく離機構^{23,25)}

属介在物と基地との密着性改善が新たな長寿命化方策になることを示している。

2.1.3 非金属介在物起点型はく離の全体的な機構

直近、軸受鋼を主体とする非金属介在物起点型転がり疲れの問題が、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 主導の産学連携プロジェクト (研究予定期間：平成 19～23 年度) に採り上げられ、研究を大きく前進させている。このプロジェクトでは、前述の筆者らの研究も含めた最新知見やオリジナルの研究活動を踏まえた基盤的研究が推進されており、その活動概要²³⁾や成果の一部が開示されている。重要な成果として、宇田川ら²⁴⁾の行った独自の試験方法によって、筆者らが重要視して仮説として挙げた非金属介在物からのき裂生成、さらに伝ばならびにはく離に至る過程が、経時的に直接観察されている。彼らは、供試材を SUJ2 として超音波探傷により軌道直下で起点として作用するであろう非金属介在物を予め特定し、 $P_{max} = 5.3 \text{ GPa}$ のスラスト型転がり疲れ試験を実施し、はく離までの過程を非破壊で超音波探傷のエコー像変化により追跡している。図 6²³⁾にその結果を示す。 1×10^4 サイクル時点でのエコー像拡大から、その時点までにき裂生成時期があることが明らかであり、最終的に 2.3×10^6 サイクルで急速に伝ばしてはく離に至る過程が示されている。この観察により、非金属介在物起点のはく離が、全寿命の極初期にき裂生成した後、寿命の大半を伝ばが占め、最終的に急速伝ばしてはく離に至るという機構を呈することがほぼ実証されたといえよう。図 6²³⁾において 1×10^4 サイクル以降は伝ば過程に入っているがエコー像の縮小が認められる。これは、試験中の圧縮残留応力によるき裂の閉口によるものであり、き裂が縮小しているわけではない。

筆者ら²⁵⁾は、プロジェクトにおいて得られる観察結果を基にはく離機構をモデル化し、それに基づき寿命予測技術を見出すことを担っている。寿命全体がほぼ伝ばにより占められているという性質に基づき、せん断型の応力拡大係数幅と寿命との関係把握を基軸とした実験を進めてきた。一般論として、初期のき裂長さを ($2a$) とした場合、安定領域の伝ば速

度 da/dn はパリズ則²⁶⁾に従い、せん断型の応力拡大係数幅を ΔK_{II} とした場合 $\Delta K_{II} = 2\tau_0\sqrt{\pi a}$ を介して $da/dn = c(2\tau_0\sqrt{\pi a})^m$ (c, m は定数) となる。すなわち、一般論として初期のき裂長さが安定期の伝ば速度を支配している、転がり疲れでは、初期のき裂長さが伝ば寿命とほぼ等しい全寿命を支配しているということが予想された。しかしながら、筆者らの予測では、伝ばを支配する初期き裂長さは、非金属介在物の大きさに主応力型で生じたき裂長さを加える必要があるが、その値は初期の状態においては未知である。実験においては、真の応力拡大係数幅に準じる値として、超音波探傷で特定した非金属介在物の大きさを $2a$ とした応力拡大係数幅 $\Delta K_{II}'$ を採用し、その値と寿命との関係を調べている。せん断応力の値は、公称値ではなく超音波探傷により予め特定した起点として作用するであろう非金属介在物の位置 (軌道からの深さ) で計算した値を採用している。実験の途中段階として開示した $\Delta K_{II}'$ と寿命との関係を図 7²⁵⁾ に示す。 $\Delta K_{II}'$ が大きくなるにつれ寿命値は下がる傾向を示すものの、特に低 $\Delta K_{II}'$ 領域 ($15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以下) では、無限寿命 (図中上向き矢印付きプロット) も含めて 2 オーダー以上の寿命差が認められる。しかしながら $\Delta K_{II}'$ に対するばらつきの

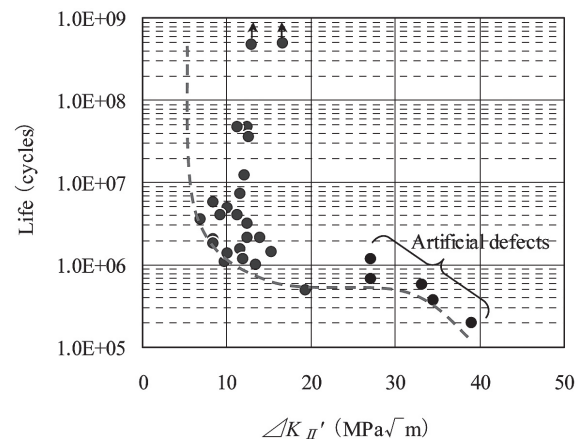


図7 非金属介在物大きさから算出したせん断応力拡大係数幅と寿命との関係²⁵⁾

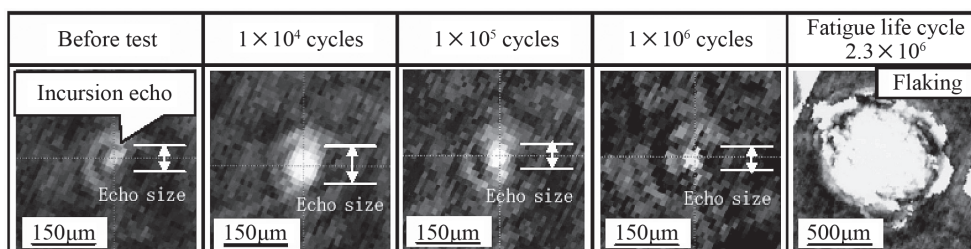


図6 超音波探傷エコー像の変化によりとらえられた非金属介在物からのき裂生成と伝ば²⁴⁾

- D.Girodin, R.fougeres and L.Flamand : Transactions of the ASME Journal of Tribology, 121 (1999) , 240.
- 21) 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.
- 22) N.Tsunekage, K.Hashimoto, T.Fujimatsu and K.Hiraoka : Journal of International, Vol.7, No.2, Paper ID JAI102612.
- 23) 梅澤修 : (財) 金属系材料研究開発センター編集・発行 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第1回シンポジウム講演予稿集, (2009) , 103.
- 24) 宇田川毅志, 菅勝徳, 松田剛, 西川友章 : CAMP-ISIJ, 21 (2008) , 1398.
- 25) 平岡和彦, 常陰典正 : (財) 金属系材料研究開発センター編集・発行 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第1回シンポジウム講演予稿集, (2009) , 117.
- 26) 例えば 砂田久吉 : 演習・材料強度学入門, 大河出版, (1990) , 124.
- (2010年2月12日受付)