

介在物周囲の転がり疲れき裂挙動の三次元観察技術の開発

Development of 3-Dimensional Observation Technique for Rolling Contact Fatigue Crack Behavior Around the Non-Metallic Inclusion

眞鍋 亮太*¹ 和田 恭学*¹ 藤松 威史*²

MANABE Ryota, WADA Yoshitaka and FUJIMATSU Takeshi

1. 緒言

近年、カーボンニュートラル化社会実現の機運が世界的に高まっており、環境に有益な影響が期待され、軸受が多く使用されている電気自動車(EV)、鉄道、風力発電機(以下、風発と略す)などの各種のエコプロダクトのニーズが増している。風発用の場合であれば高所作業を伴う設備メンテナンスの負荷の軽減(メンテナンスフリー化)への寄与、EV用や鉄道用に対しては部品の長寿命化や高効率化への寄与、といった観点から軸受部品の信頼性向上を通じた貢献はこれまで以上に重視されるとみられる。

軸受の寿命を延ばすためには、素材(鋼)、部品設計、潤滑の各観点からの適正化が欠かせない。そのなかで当社が取り扱う素材(鋼)の観点からみれば、従来からの最も有効な軸受の寿命向上手段として鋼の高清浄度化が挙げられる。高清浄度化とは、鋼中に不可避免的に含有され、軸受の疲労破壊(転がり疲れによるはく離損傷)の起点となり得る非金属介在物(以下、介在物と略す)を小径化し、個数を低減させることである。ただし、工業的な観点では鋼の清浄度は既に十分なレベルに到達しており、今後の飛躍的な清浄度向上は難しいと考えられる。一方で、例えば風発分野においては発電効率に優れる大型風車の需要が増えることとみられ、それとともに軸受の大型化も進む。その場合、転がり疲れの影響を受ける部分の体積が増えることで、寿命に悪影響を及ぼす比較的大きな介在物を含有しやすくなることが予想される。

このような背景に対して、当社では、鋼の製造工程を通じて含有される介在物が軸受の転がり疲れに影響を及ぼすメカニズムをさらに深く理解するために、介在物周囲のき裂挙動を明らかにする取り組みを進めている。その狙いは、鋼の高清浄度化以外の観点からも効果的な長寿命化・高信頼性化の方策を見出すことである。当社は独自の実験手法と精度の高い三次元観察技術を組み合わせることで介在物周囲の転がり疲れき裂挙動を三次元的に詳細観察する技術

を開発しており、本報ではその技術ならびに三次元観察を通じて得られたき裂の特徴に関する知見について報告する。

2. 介在物周囲のき裂挙動の三次元観察の狙い

以下では、当社で進めている介在物の転がり疲れメカニズムの解明に関する現状を示し、それに対し、介在物周囲のき裂を三次元的に観察する狙いについて説明する。

2.1. 介在物起点の転がり疲れメカニズム解明に関する当社の現状

転がり疲れは、軸受の軌道表面直下の内部に強く作用するせん断応力によって進行する現象である。そのため、外部からの観察では疲労の進行状態の把握が難しい。それを当社では、人工欠陥を活用した独自の研究手法の開発によりブレードスルーし、介在物起点転がり疲れ(き裂の発生・伝播、はく離の挙動など)の詳細な検証を進めている。この手法にて、人工欠陥として空洞¹⁾や、周囲母相と密着あるいは隙間を伴う球形アルミナ(Al_2O_3)粒子^{2,3)}を用い、転がり疲れ試験による寿命特性の評価や、試験後の断面観察を通じたき裂挙動の確認を行ってきた。それにより、実鋼材の介在物周囲の一部に散見される隙間(鋼材の塑性加工時に形成)が転がり疲れに及ぼす影響が明らかとなってきた。また、短寿命の原因として想定されつつも、鋼中の存在頻度が低く、検証が困難な大型介在物の挙動の確認も進めている。

人工欠陥を活用した転がり疲れメカニズムに関するこれまでの研究成果として、介在物周囲に隙間があると寿命に対して有害な影響を与えること¹⁾、介在物が周囲と隙間なく密着していると有害性が低くなること^{2,4)}を見出している。これらの違いは、二次元断面観察に基づくと、介在物周囲のき裂挙動の違いに起因すると推定している。隙間を伴う介在物周囲には転がり方向に対し、概ね水平に近い角度でき裂が発生しやすい。このような角度を持つき裂は、転がり疲れの支配応力と考えられている水平方向のせん断

*1 研究・開発センター 基盤研究室 材料研究グループ

*2 研究・開発センター 部長 博士(工学)

応力の作用で進展しやすい³⁾。同様のき裂は空洞周囲にも生じやすいことが分かっており¹⁾、空洞を起点とするき裂挙動との類似性が見られている。一方、周囲と密着した介在物周囲には最大せん断応力の作用で45°方向にき裂が発生し、その後は停留に至りやすいことを見出している²⁾。これらの結果から、当社では介在物周囲の隙間の軽減が、鋼の清浄度のみならず効果的な軸受の寿命信頼性向上策になり得ると考えている³⁾。

2.2. 介在物周囲のき裂の三次元観察の狙いについて

以上の通り、介在物の転がり疲れメカニズムは概ね把握ができています。また、空洞（人工的に導入し、介在物と比較可能な大きさを持つ）を起点とする場合に限れば、起点の空洞の大きさと、空洞から生じたはく離の深さにおける水平方向せん断応力（モードII型の応力）の大きさから見積もった応力拡大係数 $\Delta K_{II}'$ ($\Delta K_{II}' = 2\tau_0\sqrt{\pi a}$, 起点空洞大きさの半分 a と水平せん断応力振幅 $2\tau_0$ から算出) と寿命との間に規則的な関係性を見出している⁵⁾。応力拡大係数は、き裂先端付近の応力の度合いを表し、き裂の伝ば速度を左右するパラメータとして破壊力学分野で利用されている。得られた知見として、 $\Delta K_{II}'$ が小さいほど寿命が向上する傾向が見られている。なお、本来の破壊力学の定義では、応力拡大係数 (ΔK) は伝ばによって刻々と変化するき裂長さ（この長さの半分が本来の a ）から算出する必要があり、ここで用いたものはそれとは区別するため添え字のダッシュを付けて $\Delta K_{II}'$ として表記している。

上記の知見から、鋼中に空洞を存在させた場合、空洞は実質的にそれと等価な大きさのき裂として振る舞い、その大きさが寿命を左右することが見出される。そのき裂挙動には、空洞と物理的な性質が類似する“隙間”を伴う介在物の場合と共通する部分があることは上述の通りである。ただし、介在物起点の転がり疲れ挙動は空洞の場合ほど単純では無いことも分かっている。ここで、介在物起点

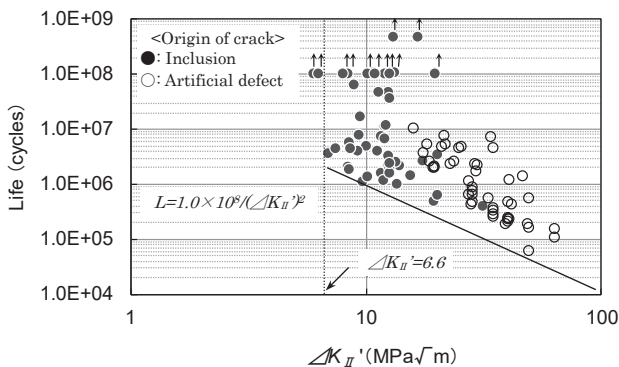


Fig.1 Relationship between $\Delta K_{II}'$ and rolling contact fatigue (RCF) life. Artificial defects in this figure are drilled holes. ⁶⁾ $\Delta K_{II}' = 2\tau_0\sqrt{\pi a}$, and “ $2\tau_0$ ” in this equation is given as the orthogonal shear stress range and “ a ” as the radius of the nonmetallic inclusion or of the drilled hole.

に関し、当社も中心的役割を担って過去に行われた検証結果を紹介する⁶⁾。検証では、鋼中の介在物もしくは試験片表面に加工したドリルホールを対象とする転がり疲れ試験が行われ、Fig. 1 に実線で示す下限寿命が見出されている。下限寿命は $\Delta K_{II}'$ が小さいほど向上し、期待される介在物小径化による長寿命作用が認められている。なお、上述の空洞に関する考察で用いた $\Delta K_{II}'$ は、この検証で提唱されたものを踏襲している。一方で、例えば介在物の大きさが同程度でも寿命には大きなばらつきがあることが見出されている。Fig. 1 に示すように、このばらつきの特徴として、同検証で見出された下限寿命に対し、長寿命となる側に生じる傾向があった。

このような寿命ばらつきの原因の一つには、上述した介在物周囲のき裂角度の影響が考えられる。また、それ以外にも“隙間”を伴う介在物のき裂挙動において、空洞の場合とは異なる特徴があることも想定される。介在物のき裂挙動の特徴をさらに深掘りすることで、軸受用鋼の長寿命化・高信頼性化に対し、介在物に固有の転がり疲れメカニズムに基づいた過不足の無い対策の立案が可能になると期待される。なお、二次元断面観察を主体とするこれまでの検証方法では、全体的なき裂の情報は得られないため、観察断面からの限られた情報からき裂挙動を推定するより他はなく、隙間を伴う介在物と空洞のき裂挙動に違いがあるか否かを詳細に知るには限界があった。これをブレイクスルーするためには、従来の二次元断面観察に迫る観察精度を保ちつつ、介在物周囲のき裂挙動を三次元的に観察することが必要と考えられる。

3. 介在物周囲のき裂挙動の三次元観察のための実験方法

3.1. 三次元観察手法の開発

精度の高い三次元観察手法を確立するために、放射光によるX線CT観察技術を活用した。物体にX線を通過させるとき、内部にその物体とはX線吸収率の異なる異物、構造、空隙、き裂などが存在した場合は物体を透過するX線の量に違いが現れる。同手法は、試料を360°回転させながら回転軸に直交するようにX線を通過させて検出器でX線の透過量を捉え、収集した全周方向のX線透過データをもとに非破壊で物体の内部構造を観察するもので、鋼内部の観察にも活用されている。特に高エネルギー、高輝度で、なおかつ平行性の高いX線を利用することで極めて解像度の高い観察像を得ることができる。大型放射光施設 SPring-8 を活用する場合、鋼試料の透過観察に対して放射光を用いることによって、直径約 0.5 mm 程度の試料サイズの制約はあるものの、最小でサブミクロン程度の空間分解能のもとで透過観察を行うことができる。

ここで転がり疲れの影響を受ける領域のサイズについて

て触れる。そのサイズは、転動体と軌道それぞれの曲率半径（軸受のサイズや形状により変化）と、作用する接触応力（最大ヘルツ接触応力）の大きさに依存する。当社で転がり疲れ特性評価に利用している森式スラスト型転がり疲れ試験（詳細は後述）では、円盤状の平板試験片と球形の転動体を転がり接触させながら試験を行い、その円形の接触部の直径は概ね 0.6 ~ 0.7 mm 程度になる。また、深さ方向にも軌道表面直下の数百 μm 程度に渡って疲労領域が形成される。このような疲労領域のサイズは、放射光 X 線 CT による観察に適したものとなっている。ただし、観察実現のためには、X 線 CT で観察可能な微小な領域内に数十 ~ 数百 μm 程度の非金属介在物とその周囲に生じた転がり疲れき裂を含むように試料を作製しなければならない。当社は、それを実現する技術として、開発済みの人工埋設介在物を利用した転がり疲れ試験方法を活用した^{2,3)}。この技術は、介在物が埋設されている位置や深さを精密に特定して微小な観察試料内に内包させるのに適している。この技術と放射光 X 線 CT 観察技術を組み合わせることにより介在物周囲の転がり疲れき裂を三次元で精細に観察する技術を確立することができた。

3.2. 人工埋設 Al_2O_3 を活用したき裂挙動の三次元観察

確立した技術を利用して、実際に介在物周囲の転がり疲れの三次元観察を行った。本報での実験には、周囲母相との間に隙間を付与した球形 Al_2O_3 を含有するスラスト型転がり疲れ試験片を準備した。その試験片を用いて転がり疲れ試験を行い、 Al_2O_3 周囲に生じたき裂を三次元で観察した。

円盤形状のスラスト型転がり疲れ試験片の母材として、量産工程で製造された高炭素クロム軸受鋼の SUJ2 を用い、焼入焼戻して硬さを 62 HRC 程度に調整した。この試験片内には人工介在物として球形 Al_2O_3 を埋設している。 Al_2O_3 を用いたのは、鋼中介在物の代表的な組成の一つであることと、鋼中で比較的良く観察される粒状の介在物（JIS 規格の JIS G 0555：鋼の非金属介在物の顕微鏡試験方法では D 系に分類される介在物）に形状が類似することによる。また、形状が比較的単純なため、き裂挙動の検証に適している。なお、球形 Al_2O_3 の大きさとして直径 250 μm および 150 μm のものを用いた。これは、鋼中の存在頻度は低いものの寿命に有害な比較的大型の介在物の挙動を検証する狙いである。これらの Al_2O_3 粒子は、後述したスラスト型転がり疲れ試験条件からみて表面下に作用する最大水平せん断応力の少なくとも 97% 以上が粒子の直径部周辺に作用する深さに埋設した。また、 Al_2O_3 の周囲には隙間を付与してある。隙間は、後述のスラスト型転がり疲れ試験における転動体の移動方向から見て Al_2O_3 の前後の位置に形成されるように、引張加工を利用して導入した。隙間を一部に形成させるのは、実鋼材中で

は隙間が介在物周囲の一部に見られることが多いためである。試験片の作製方法は別報³⁾で詳しく紹介しているため、ここでは詳細な説明は省略する。

スラスト型転がり疲れ試験は、転動体に直径 9.525 mm の鋼球を用い、最大ヘルツ接触応力 P_{max} が 4.5 GPa となるようにして行った。潤滑は油浴潤滑で行い、潤滑油の粘度グレードは VG68 である。また、 Al_2O_3 埋設部の直上に転動体の軌道の中央が配置されるようにした。試験の停止サイクル数は 1,500 サイクル、および 50,000 サイクルとした。これらは転がり疲れ寿命に対して極早期もしくは比較的早期の段階である。それらの試験片から三次元観察用の試料として、スラスト型転がり疲れ試験の軌道と内部の Al_2O_3 を含むように円相当径で直径 0.5 mm 以下程度、長さが 13 mm 程度の微小棒状試料を作製した。

放射光 X 線 CT による上記試料中の介在物とその周囲のき裂の三次元観察には、SPRING-8 のビームライン BL24XU を利用した。観察は、X 線のビームエネルギーを 37 keV、露光時間を 0.2 s として行い、撮影される透過像の画像サイズは 2048 × 2048 ピクセル、空間分解能は 0.65 μm である。取得した透過像は二次元断面像として再構築し、さらにその画像を元にして画像解析ソフト（Thermo Fisher 社 Avizo ver.2021.1）を用いて三次元画像を作成した。これにより、 Al_2O_3 とその周囲の隙間ならびにき裂を立体的に可視化した。また、三次元画像の精度の確認のため、介在物とその周辺の二次元断面観察も併せて行った。断面観察は、鏡面状態に加工したのちナイターで腐食してミクロ組織を現出させた状態で行った。

4. 介在物周囲のき裂挙動の三次元観察結果および考察

以下では、隙間を伴う球形 Al_2O_3 からの転がり疲れき裂挙動について疲労サイクル数の異なる 2 つの観察事例を示す。併せて、過去に当社で実施した空洞欠陥に関するき裂挙動を対比することにより、介在物から生じるき裂の特徴について検証した。

4.1. き裂発生段階付近（1,500 サイクル時点）における Al_2O_3 周囲の三次元き裂挙動

最初の事例では、き裂発生段階付近での観察を行うことを狙い、周囲に隙間を伴う直径 250 μm 級の Al_2O_3 に対し、1,500 サイクルの転がり疲れを付与したのち、上述の方法で観察用試料を調整し、放射光 X 線 CT による三次元観察を行った。Fig. 2 に、 Al_2O_3 とその周囲の隙間ならびにき裂の三次元画像を示す。画像中で Al_2O_3 は灰色、周囲の隙間は黒、き裂は黄色にそれぞれ色分けして示した。Fig. 2 において介在物周囲には隙間が見られ、試験片作製時の意図通りに転がり方向に対して介在物の前後

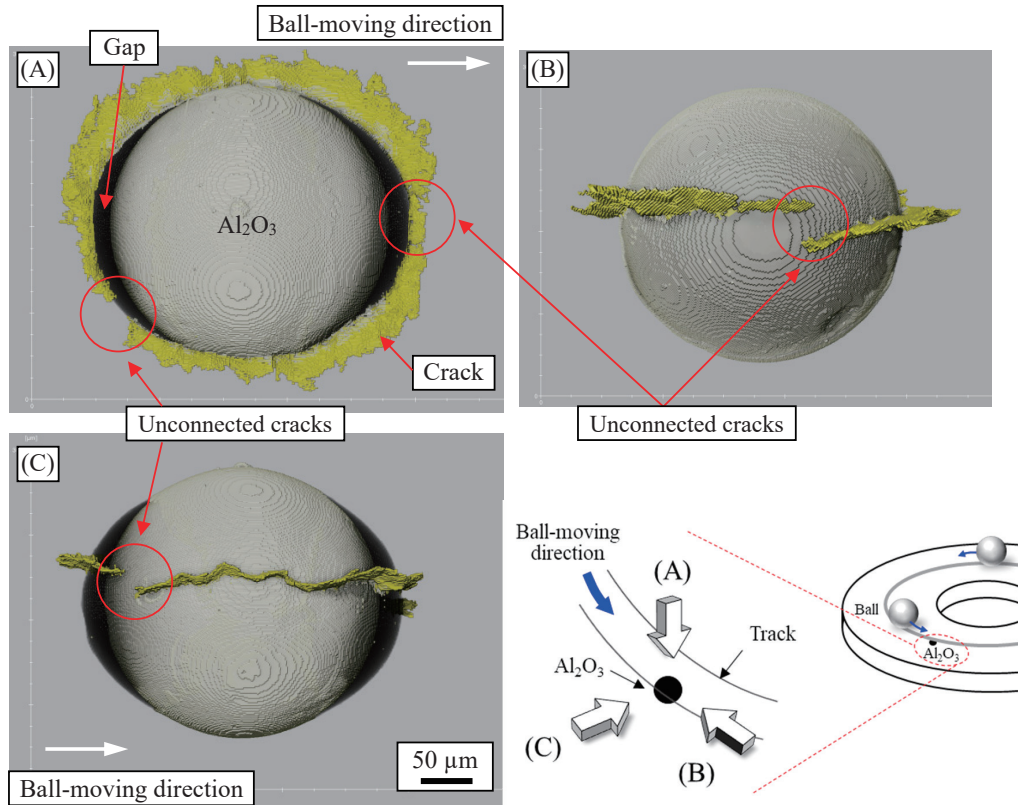


Fig.2 3-dimensional CT images around the artificially-introduced spherical Al_2O_3 accompanied with gaps and fatigue cracks in SUJ2 specimen after RCF test. Diameter of the Al_2O_3 is around 250 μm . RCF test was interrupted at 1,500 cycles under P_{max} of 4.5 GPa. (A) Observation from the top of the track and (B) perpendicular to the ball-moving direction, and (C) from outside of the track

の位置に形成されていた。また、それ以外の箇所は介在物と周囲の母相が隙間無く密着していることを確認した。また、Fig. 2 (A)～(C)より、 Al_2O_3 周囲の隙間の有無に関わらず、ほぼ全周に渡って水平に近い角度のき裂が生じていること、Fig. 2 (B), (C)より、き裂は介在物の最大径付近から発生していることが観察された。

筆者ら¹⁾は、空洞を転がり接触応力を受ける軌道直下に配置した場合のCAE 応力解析を行っている。空洞の最大径周囲には高い引張主応力（モードⅠ型の応力）が作用すると推定され、その応力作用面の向き（軌道面に対して浅い角度を持つ）と、転がり疲れの極早期に見られる空洞周囲のき裂角度の特徴が一致することから、き裂の発生に対して引張応力が関わると指摘している。また、 Al_2O_3 について周囲母相と密着している場合は、CAE 応力解析と実験による検証から、転がり方向に対して45°方向（水平せん断応力ではなく、最大せん断応力の作用方向）にき裂が生成しやすいと報告している²⁾。本実験における周囲の一部に隙間を伴う Al_2O_3 周囲の転がり疲れき裂挙動には、空洞の場合と共通する特徴が見られる。これは Al_2O_3 周囲の隙間が空洞と同様の欠陥として作用することで、空洞と類似した機構で周囲のき裂が生成することを示唆する。また、三次元画像を詳細に見ると Al_2O_3 周囲のほぼ全周に見

られるき裂は、互いに連結していない2つの独立したき裂から構成されていることが分かった。このとき、き裂が途切れている箇所付近のき裂は周囲に比べて短くなっており、き裂長さが一様ではない様子が見られた。一方、空洞の場合は、転がり疲れに伴う引張の主応力は空洞周囲の全周に渡って均等に作用すると推定されている⁷⁾。この推定された挙動と対応するように、空洞周囲のき裂面の直接観察例 (Fig. 3¹⁾) において、 P_{max} が3.95 GPaの条件下で50,000 サイクルの途中止めのスラスト型転がり疲れ試験を行ったのちの転がり疲れ初期のき裂は、空洞周囲に概ね均等な長さで形成されていることが見出せている。

以上に示した三次元観察による情報を考慮すると、空洞ならびに隙間を伴う Al_2O_3 から生じるき裂の挙動は総じて類似性がありつつも、細部に違いがあると考えられる。空洞とのき裂挙動の違いについては、後述事例でさらに疲労サイクルが進行した段階での観察による知見を加えて考察を行う。

続いて、Fig. 2の三次元画像で見られた特徴を二次元断面観察により確認した。Fig. 4は、Fig. 2の観察試料について、軌道に平行な方向の垂直断面における Al_2O_3 中心付近を研磨・腐食して、き裂を直接観察した結果である。三次元観察から推定された通り、 Al_2O_3 の最大断面付近の周囲母相から概ね水平方向にき裂が発生している。なお、

直接観察で見られたき裂の長さは、三次元画像から予想されるものよりも長くなっていた。これは、観察されたき裂先端の開口幅が小さくなっていったことから、本測定条件における放射光X線CTの空間分解能(0.65 μm)を下回り、一部が捉え難くなったものとみられる。このことは、き裂の開口幅が空間分解能より小さい場合や、き裂が発生したのちに何らかの理由で閉口気味になるような場合は、き裂を三次元的に観察することは難しいことを示している。こ

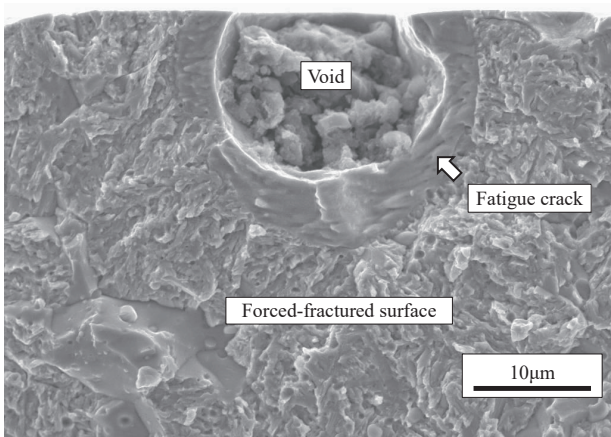


Fig.3 Scanning electron micrograph of the surface of the nearly-horizontal fatigue crack around the void at 80 μm in depth from the surface of track after RCF test-interrupted specimen at 50,000 cycles under P_{max} of 3.95 GPa.¹⁾ Specimen was forced-fractured after RCF test for this observation. Overrolling direction is left to right.

のような三次元観察の分解能による制約はあるものの、非破壊で微小領域内に存在するき裂の全体像を掴む方法として本手法は非常に優れている。

4.2. き裂発生段階以降(50,000サイクル時点)における Al_2O_3 周囲の三次元き裂挙動

上述の1,500サイクル時点(き裂発生段階付近)に対し、き裂が伝ばする段階でのき裂挙動を知るために、隙間

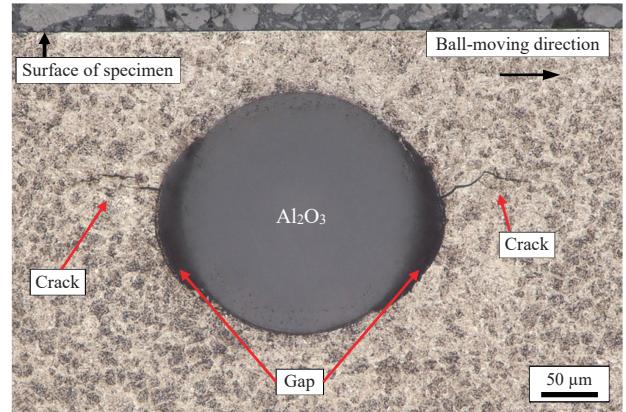


Fig.4 Digital microscopic image around the artificially-introduced Al_2O_3 in a cross-section 60 μm away from the center of Al_2O_3 perpendicular to the track. Diameter of the Al_2O_3 is around 250 μm. RCF test was interrupted at 1,500 cycles under P_{max} of 4.5 GPa.

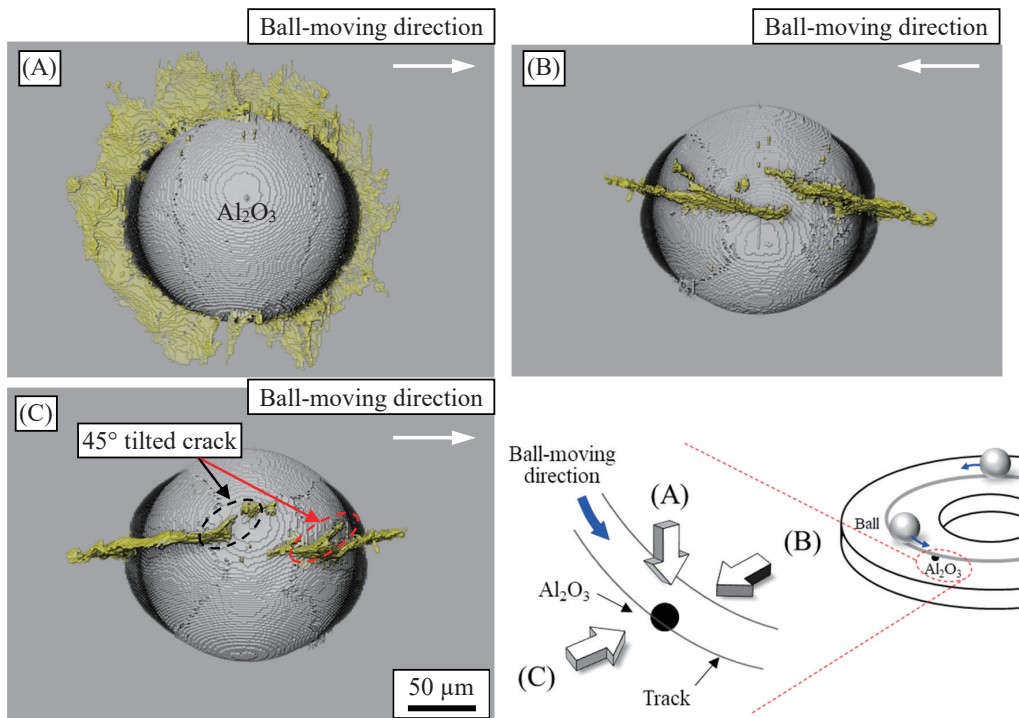


Fig.5 3-dimensional CT images around the artificially-introduced spherical Al_2O_3 accompanied with gaps and fatigue cracks in SUJ2 specimen after RCF test. Diameter of the Al_2O_3 is around 150 μm. RCF test was interrupted at 50,000 cycles under P_{max} of 4.5 GPa. (A) Observation from the top of the track and (B) from inside of the track, and (C) from outside of the track

を伴う直径 150 μm 級の Al_2O_3 に対して 50,000 サイクルの転がり疲れ試験を実施したのち、同様の要領で観察用試料を作製して放射光 X 線 CT による三次元観察を行った。上述のように、1,500 サイクルの時点で既にき裂の発生が見られたため、50,000 サイクル時点のき裂は伝ば段階にあると推定される。Fig. 5 に Al_2O_3 周囲のき裂の三次元画像を示す。画像の色分けは Fig. 2 と同様にして行った。Fig. 5 より、介在物周囲の隙間は、Fig. 2 の場合と同様の位置に観察される。一方、Fig. 2 (1,500 サイクル時点で途中止め) との違いとして、Fig. 5 (50,000 サイクル時点で途中止め) では Al_2O_3 周辺に隙間が有る部分の水平き裂がより長く伝ばしているように見受けられた。これは、両試料で Al_2O_3 径が異なるため、 Al_2O_3 の大きさに対するき裂の相対的な長さを両試料で比較した場合の特徴である。一方、試料作製段階で Al_2O_3 と周囲母相が隙間なく密着している箇所 (転がり方向からみて Al_2O_3 の左右の箇所) においては、Fig. 5 の三次元画像で水平き裂は観察されなかった。代わりに、Fig. 5(C) に 2 つの矢印で示すように、その密着部近くの概ね水平のき裂とつながるように、転がり方向に対しておよそ 45° 方向にき裂が生じている様子が認められた。なお、この事例でも前例と同じく Al_2O_3 周囲のき裂は、互いに連続していない 2 つのき裂から成る様子が確認された。Fig. 6 には、 Al_2O_3 と周囲母相が密着した箇所付近におけるき裂の角度を確認するための二次元断面観察の結果を示す。観察の対象は Fig. 5(C) に黒矢印で示したき裂である。その結果、Fig. 6 に示した通りに概ね 45° 方向のき裂の生成が確認され、また、そのき裂と連なるように水平のき裂が観察されており、三次元画像が示す通りのき裂挙動が見られた。 45° 方向のき裂は、上述のように密着した介在物周囲において最大せん断応力の作用で生じやすいことが既に明らかとなっており、その場合

と同様の応力作用によって生成したものと推定している。

以上の通り、転がり方向からみて Al_2O_3 の前後に隙間を伴う場合、転がり疲れき裂は Al_2O_3 全周に渡って連続したき裂として生じるのではなく、互いに連結していない 2 つのき裂として生じる傾向があった。また、転がり疲れの進行に伴い、 Al_2O_3 周囲と母相との界面状態の違いに応じて、き裂挙動 (き裂の角度) が変化することが示唆された。観察事例に基づくと、 Al_2O_3 周囲に隙間がある箇所ではき裂は水平に近い角度で進展しており、これは空洞の場合と共通する特徴であった。一方で、 Al_2O_3 が周囲母相と密着した箇所では、 45° 方向のき裂が生じて進展していた。また、限定的な観察例ではあるものの、それらの異なる角度を有するき裂は三次元的に見れば連続したき裂となることが見出された。

4.3. 三次元観察に基づく隙間を伴う介在物周囲のき裂挙動の推定

本報の三次元観察結果から、一部に隙間を伴う Al_2O_3 周囲の転がり疲れき裂は、転がり疲れ初期における空洞の場合に類似したき裂挙動を経て、空洞周囲に生じるき裂 (はく離をもたらす有害な水平き裂) の特徴と、密着介在物周囲に生じるき裂 (停留に至りやすく有害性の低い 45° き裂) の特徴を併せ持った状態になる場合があることが分かった。寿命に対して有害なき裂と、有害性の低いき裂の特徴が共存すると、寿命に対する有害性が軽減されて寿命が長くなる可能性があると考えられる。これが上述したように介在物を起点とする寿命が経験的に得られる下限寿命値に対して長寿命側にばらつく理由の一つとして推定される。なお、鋼材中の介在物が周囲と隙間無く密着している場合には、既に報告しているように、寿命に対する有害性は特に低くなり²⁾、はく離しない場合が起こり得るようになる。

本報で紹介した放射光 X 線 CT を用いた三次元観察方法の開発により、二次元観察のみでは把握が難しいき裂の全体像が掴めたことで、隙間を伴った介在物周囲のき裂挙動に関する固有の特徴をさらに詳細に明らかにすることができた。なお、この観察方法は、分解能の問題から開口幅の小さなき裂が明瞭に見えない場合がある点には注意を要し、二次元観察と組合せた調査を行うことによって不足する情報を補うことができる。開発した方法を活用しながら、介在物周囲の隙間の状況と介在物のき裂挙動との関係を三次元的に捉える取り組みを行い、疲労の原理をさらに追及することで、軸受の長寿命化やはく離抑制のニーズに対して費用対効果を踏まえた介在物周囲の隙間軽減方法の提案や、それを活用した商品開発につながることを期待される。

5. 結言

従来、軸受の介在物起点転がり疲れ現象は、疲労過程

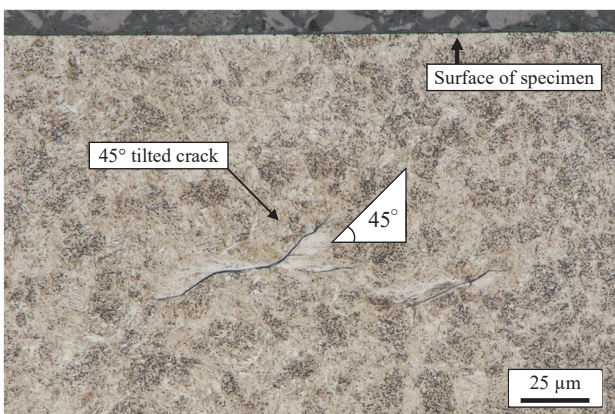


Fig.6 Digital microscopic image of the fatigue cracks initiated from the artificially embedded Al_2O_3 in a cross-section 110 μm away from the center of Al_2O_3 perpendicular to the track. 45° tilted-crack in this figure is indicated in Fig. 5(C) by black arrow. Ball-moving direction on the surface is left to right.

の直接観察が困難なために詳細な機構解明が阻まれてきた。当社はそれをブレイクスルーする技術として人工介在物埋設手法を保有し、それを活用した疲労試験と二次元観察を通じて現象解明に迫る知見を見出してきた。さらに、その方法と組み合わせて実現した本報紹介の放射光 X 線 CT を活用した三次元観察技術により、寿命に対して有害性が高いとみている周囲に隙間を伴った介在物に特有のき裂挙動の特徴をさらに明確にすることができた。

得られた主要な知見として、周囲の一部に隙間を伴う介在物からは転がり疲れに伴って寿命に対して有害性の高い水平方向のき裂と、有害性が比較的低いとみられる 45° 方向のき裂が生じ、それらのき裂が連結して共存している場合があることを見出した。このような複合的なき裂挙動は、実際の鋼中の介在物周囲においても生じる可能性があり、これを通じて介在物起点の寿命が長くなる場合があることが推定された。なお、介在物の形態として鋼中には粒状介在物以外に、粒子が分散した形状も存在しており、そのような介在物、および周囲の転がり疲れき裂の状態を捉える方法としても本報の三次元観察技術は利用できる。鋼の高清浄度化のみに頼らない効果的な軸受の長寿命化方策として想定する介在物周囲の隙間状態の制御に関し、効果的で実現性の高い方策を見出していくために今後も本手法を活用していく予定である。

謝辞

本報で示した放射光を利用した CT 観察の結果は、大型放射光施設 SPring-8 の兵庫県 ID ビームライン BL24XU (課題番号 2022A3254, 2022B3254) の利用成果であり、観察を実施して頂いた公益財団法人ひょうご科学技術協会放射光研究センターの漆原良昌氏に謹んで感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 藤松威史, 平岡和彦, 山本厚之: 鉄と鋼, 94, 1 (2008), 13-20.
- 2) 藤松威史: 山陽特殊製鋼技報, 25, 1 (2018), 31-37.
- 3) T. Fujimatsu: Bearing Steel Technologies: 12th Volume, Progress in Bearing Steel Metallurgical Testing and Quality Assurance, ed. J. Beswick (West Conshohocken, PA) : ASTM International, (2020), 103-130.
- 4) 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.
- 5) 藤松威史, 中溝利尚, 中崎盛彦, 常陰典正: 山陽特殊製鋼技報, 23, 1 (2016), 47-61.
- 6) 常陰典正, 平岡和彦: 第 2 回シンポジウム講演予稿集 (2012), 119-120.

7) 藤松威史: ふえらむ 20, 5 (2015), 195-201.