

転がり疲れ試験方法の高度化

Development of the Advanced Rolling Contact Fatigue Test Method

藤松 威史*

FUJIMATSU Takeshi

1. はじめに

近年の地球環境保全の機運の高まりから、カーボンニュートラルの実現に寄与するエコプロダクトの研究・開発がこれまで以上に求められている。その背景のもと、二酸化炭素排出量抑制に有利な自動車電動化の取組みが世界的に加速している。その動力伝達部品にはさらなる小型軽量化や伝達効率向上が求められ、また駆動用モーターの高速回転への対応も必要なことから、部品に組み込まれる転がり軸受に対し、使用環境の過酷化（接触面圧の上昇、潤滑の低粘度化等）が予想される。したがって、従来にも増して軸受の寿命信頼性の向上が必要になる。また、クリーンエネルギーとして注目される風力発電は、その普及が進みつつあり、近年では発電効率向上に有利な大型風力発電機が登場してきている。エネルギーの安定供給とメンテナンス負荷軽減の観点から、風力発電機用軸受には長期間に渡る安定した稼働が求められている。ただし、軸受が大型であり、必然的にその素材となる鋼の体積が大きいことから、軸受の寿命に対して有害な比較的大きな非金属介在物（以下、介在物と略）が含まれやすいことへの配慮が必要と考えられる。

転がり軸受を構成する軌道輪と転動体はごく小さい面積で転がり接触をしており、それにより摩擦損失を抑えて滑らかな回転運動を支えることを可能にしている。その一方で、微小な接触部には数ギガパスカルに及ぶ高面圧が加わり、その影響から部品内部に高い応力（接触面圧に応じたせん断応力）が作用する。この応力が繰り返し作用することで疲労（転がり疲れ）が進行し、やがて軸受がはく離して寿命に至るとみられている。

上記した介在物は、鋼の製造過程に由来して不可避免的に生成して鋼材中に含有される。軸受作動時の内部作用応力の影響領域に介在物が存在すると、周囲に応力集中が生じ、介在物起点型のはく離¹⁾をもたらす場合がある。すなわち、このタイプのはく離のし易さには軸受用鋼の品質の影響が及ぶ。そこで軸受用鋼の製造にあたっては、高纯净度を追求し、介在物の小径化や頻度低減を図ることで寿

命に対する信頼性を高めている。今後も介在物清浄度向上は重要な課題となるが、介在物を完全に除去することは困難を極める。それを踏まえつつ、部品の高信頼性化によるエコプロダクトの実現に対し、その素材となる鋼を通じた貢献を果たしていくために、転がり疲れに及ぼす介在物の影響を従来以上に正確に把握することが求められている。すなわち、介在物起点の転がり疲れのはく離メカニズムの詳細を明らかにし、介在物と寿命の定量的な関係性を見出す必要性が生じている。その実現によって、想定よりも短期間での軸受のはく離を抑制する有効方策の見出しや、軸受の下限寿命の定量予測技術確立による部品の設計最適化への寄与が期待される。

当社は、介在物と転がり疲れの関係明確化にあたり、疲労破壊の根幹であるき裂挙動に注目し、その詳細観察に基づいた実証が不可欠と考え、そのための基盤技術として人工欠陥を活用した独自の転がり疲れ試験方法を確立し、研究の高度化を図っている。以降では、開発方法の概要とそれにより得られた知見を定量寿命予測の展望とも関連付けながら説明する。

2. 人工欠陥を用いた独自の転がり疲れ試験方法の開発背景

転がり疲れにおける内部介在物起点型のはく離は、その発生深さが転がり接触により部品内部に生じる水平方向のせん断応力（モードII型応力）の作用深さ領域内に合致することから、せん断応力が強く関与する現象とみられてきた。一方で、疲労に対する関与応力の推定にあたり、介在物周囲のき裂挙動の観察に基づく根拠には乏しく、依然として現象が明確にされているとは言い難かった。また、介在物大きさと転がり疲れ寿命には相関性が見出されているものの、その一方で同様大きさの介在物に対して寿命に大きなばらつきがあることが報告されている²⁾。同報告によれば、介在物大きさとそれがもたらす寿命の下限値には定量的な関係性が見られている。ただし、介在物が小径になるほど下限寿命に対して長寿命側にばらつき傾向が顕著に

* 研究・開発センター 基盤研究室長

見られるようになる。その寿命差は、最大で100倍以上にも及んでいる。この現状に対し、寿命のばらつきの原因を特定し、寿命と介在物大きさの定量的関係性を明らかにしていくために、改めてき裂挙動やそれに対する関与応力を検証する必要性が生じていた。

転がり疲れは、はく離に至るまでのき裂挙動が部品内部で進行する特徴から観察が容易ではなく、はく離後の観察で起点となった介在物が発見されることも稀であるため、現象の明確化が困難となっていた。それを打破するため、部品内部の転がり疲れを可視化する手段の確立が望まれていた。その背景のもと、偶発的な観察の成功に頼るのではなく、より確実に検証ができるようにすることを狙いとして、人工欠陥を活用した独自の転がり疲れ試験方法を開発するに至った。

3. 開発した転がり疲れ試験方法の紹介

当社では2種類の転がり疲れ試験方法を開発し、活用を図っている。その方法の一つは、介在物に見立てた空洞を人工的に試験片に多数導入し、転がり疲れ試験を行う方法³⁾であり、空洞からのき裂を高頻度に観察することができる。もう一つは、さらに高度化した方法であり、事前に選定した介在物を人工的に試験片に埋設し、その介在物を対象として転がり疲れ試験を行う方法である⁴⁾。この方法により、前者の方法のみからでは推測困難な介在物周囲のき裂挙動の観察が実現される。さらに、これらの方法ではFEMシミュレーションによる応力解析の必要パラメータである「内部欠陥の物性値」ならびに「内部欠陥とその周囲との境界条件」が明らかであるため、本方法から得られた観察結果とシミュレーション結果を対比することにより、さらなる高度な検証が実現される。

3.1 人工空洞を利用した転がり疲れ試験方法³⁾

前者の方法を紹介する。この方法では、まず高炭素クロム軸受鋼SUJ2等の評価対象とする鋼材と同様の主要化学成分を有する粉末（ガスアトマイズ粉末）を用意し、それを鋼製コンテナに充填したのち、熱間等方圧プレス（Hot

Isostatic Pressing : HIP）により粉末を焼結させる。このとき、あえて完全には焼結させずに焼結体の相対密度（真密度に対する百分率）を99%程度に調整することで鋼中 介在物と比較可能な大きさレベルである数 μm ～数十 μm の空洞を多数残存させた鋼を作製する。その焼結過程の模式図をFig.1に示す。これに試験片の硬さおよびミクロ組織の調整のための一連の熱処理（SUJ2鋼であれば焼ならし、球状化焼なまし、焼入焼戻し）を施してスラスト型転がり疲れ試験片を完成させる。完成した焼結鋼製試験片に含まれる空洞の分散頻度は、通常の量産工程で造られた鋼に含有される介在物に比べて十分に多い。その特徴によって、転がり疲れ試験下での内部欠陥からのき裂の発生頻度を高め、その観察を容易にしている。また、空洞を起点としてはく離させることで、空洞大きさと寿命の関係を取得することもできる。

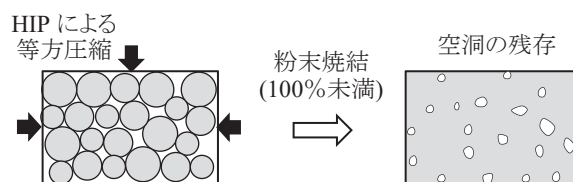


Fig.1 人工空洞の導入過程の模式図

3.2 人工埋設介在物を利用した転がり疲れ試験方法⁴⁾

後者の方法の概要を紹介する。この方法は、介在物を人工的に埋設したスラスト型転がり疲れ試験片を作製して転がり疲れ試験を行うものであり、介在物周囲のき裂挙動の直接観察や、介在物の大きさと寿命との関係検証に利用することができる。そのために、まず評価対象鋼を素材として円盤形状を有する前記試験片の粗形状加工を行い、試験片の面上に微小ドリル穴を空ける。その位置は、スラスト試験における転がり軌道上に相当する位置とする。続いて、そのドリル穴内に予め選定した粒子を投入する。後述の紹介事例では、代表的な鋼中酸化物系介在物の化学組成を模擬して人工の球形状 Al_2O_3 を埋設粒子として用いている。続く工程で、HIP法により埋設粒子と母相とを密着させる。Fig.2⁴⁾は、その埋設過程の模式図である。以降で

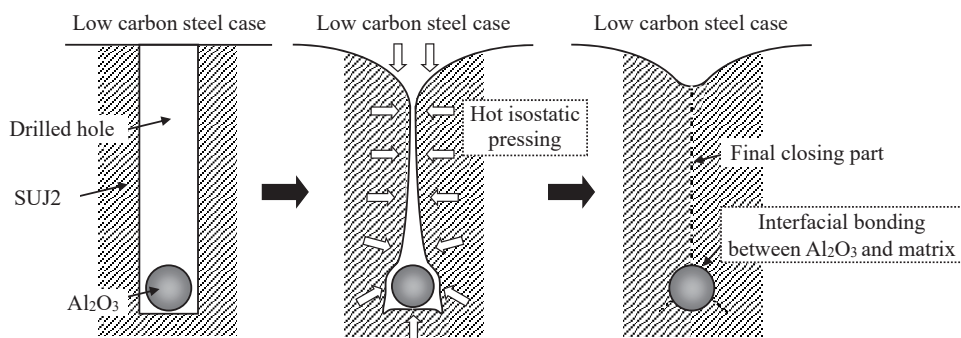


Fig.2 人工的な介在物埋設過程の模式図⁴⁾

は、上記と同じく一連の熱処理（SUJ2鋼であれば焼ならし、球状化焼なまし、焼入焼戻し）を施してスラスト型転がり疲れ試験片に再び加工する。続いて、スラスト型転がり疲れ試験の試験条件に応じたせん断応力の作用深さ領域内に介在物が配置されるようにして試験片を完成させ、転がり疲れ試験に供する。

本方法では、埋設介在物を事前に選定することにより、介在物に関する情報（大きさ、形状、位置情報、化学組成）が予め分かった状態から転がり疲れ試験を行うことが可能であり、他に類を見ない独創的な方法である。ここで、介在物の大きさについて任意に選択可能であることは、介在物の大きさと寿命の関係を明らかにするうえで特に優れた特長である。さらに、本方法では介在物と母相の界面の状態を調整することも可能である。上記の作製工程に従えば介在物は母相と隙間無く密着した状態になる。一方、試験片作製過程で引張加工を追加すれば、実鋼材で観測されることがある介在物-母相間の隙間を人工的に再現することができる。それを利用して、隙間を伴う介在物に対して転がり疲れ試験を行うことも可能となっている。

4. 活用事例の紹介、および定量寿命予測の展望

以下では転がり疲れ試験方法の高度化によって得られた主要な知見を示し、定量寿命予測の実現に向けた展望を述べる。

4.1 人工空洞を利用した転がり疲れ試験方法の活用例

人工空洞を利用した転がり疲れ試験を活用した研究事例を紹介する。Fig.3³⁾は、SUJ2と同様成分を有する空洞含有スラスト試験片に対して最大ヘルツ接触応力 P_{max} を3.95 GPaとした条件のもと、 5×10^4 サイクルの転がり疲れを付与し、空洞周囲のき裂を観察した一例である。き裂が観察されたサイクル数は、同条件のSUJ2量産鋼の寿命が通常 10^8 サイクル以上とみれば、寿命に対し極めて早期である。このような早期のき裂発生に関しては、超音波探傷法を利用した介在物からのき裂挙動の研究でも同様に報告されている^{5, 6)}。このことは、転がり疲れ寿命の大半がき裂の伝ば過程によって占められることを示唆して

いる。また、Fig.3のき裂は転がり方向に対して比較的浅い角度を呈し、同様特徴を持つき裂は空洞周囲に数多く観察されている。このようなき裂挙動は、一見すると水平方向せん断応力の関与を伺わせる結果である。これに関し、空洞周囲のき裂角度、き裂発生深さとFEMシミュレーションによる空洞周囲の応力解析の結果を併せて検証し、次のような知見を得ている。一つに、空洞周囲のき裂発生には、モードIIの水平せん断応力ではなく、引張主応力（モードI型応力）が関与するとみている。これは、き裂角度が転がり方向に対して水平に近く（水平から 30° 以内程度の傾斜）、それがシミュレーションによる最大引張主応力作用面の傾きと良く一致すること、および空洞周囲にき裂が発生する深さが引張主応力の分布と良く対応することに基づき導いている。さらに、応力シミュレーションによる空洞ならびに酸化物系介在物（ Al_2O_3 、 $CaO-Al_2O_3$ 、いずれも周囲母相との密着を仮定したモデルを使用）の挙動の対比から、母相と密着した酸化物系介在物の周囲に作用する引張主応力は空洞の場合に比べて非常に低いという結果³⁾（Fig.4）を元に、介在物周囲の隙間（空洞とみなせる）の有無が転がり疲れ寿命の重要関与因子であろうことを見出している。介在物と母相とを密着させるためにHIP処理を行うと転がり疲れ寿命が向上するという実験結果も得ており⁷⁾、隙間が影響を及ぼしていることが

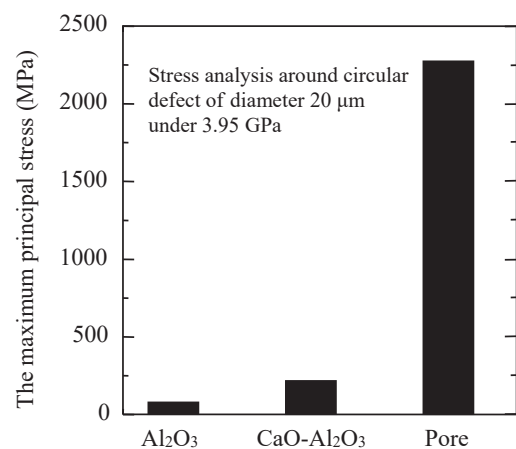


Fig.4 二次元弾塑性FEMシミュレーションによる空洞ならびに酸化物（母相と密着）の周囲の最大引張主応力の計算結果 (P_{max} : 3.95 GPa)³⁾

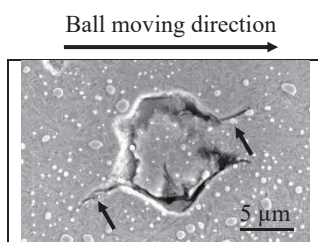


Fig.3 空洞周囲に発生した転がり疲れき裂³⁾ (P_{max} : 3.95 GPa、 5×10^4 サイクル、転動面からの空洞の深さ : 0.06 mm)

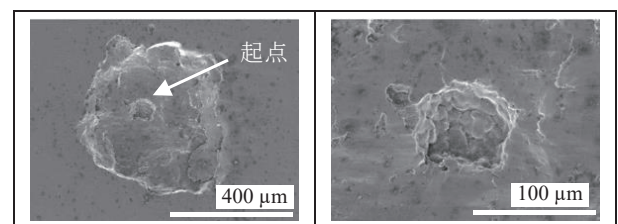


Fig.5 人工的に空洞を導入したSUJ2鋼におけるはく離例^{8, 9)} (左 : はく離の全景、右 : はく離起点となった空洞)

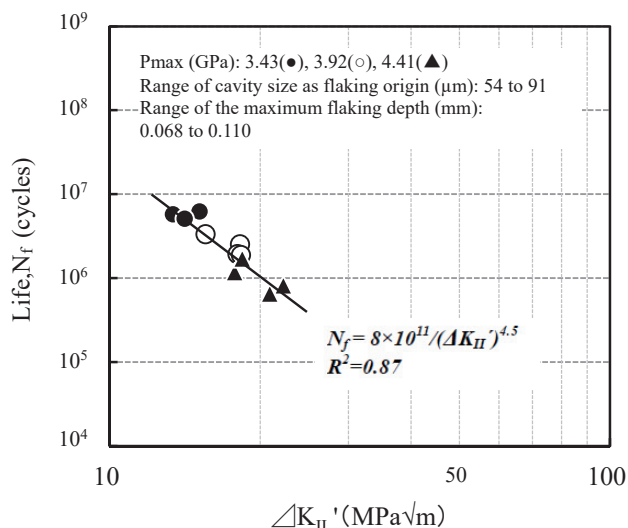


Fig. 6 空洞を起点とする転がり疲れ寿命と $\Delta K_{II}'$ との関係¹⁰⁾

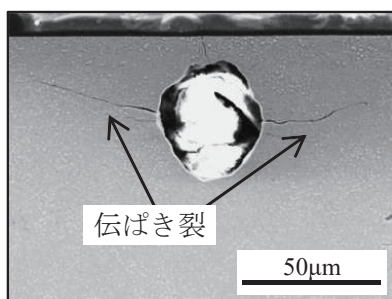


Fig. 7 直径38 μm の空洞周囲のき裂伝ばのSEM観察像¹¹⁾
(P_{max} : 3.43 GPa、 5.08×10^6 サイクル)

間接的に裏付けられている。また、この知見は介在物周りの隙間の有無が軸受寿命にばらつきを生じさせる原因である可能性を示している。

さらに、同方法で空洞を起点にはく離を生じさせ、その起点を観察することにより、スラスト試験による寿命（はく離までの繰り返しサイクル数）と起点となった空

洞の大きさとの関係の検証を行った。Fig.5^{8, 9)} は起点となった空洞の観察例である。検証の結果は、破壊力学の代表パラメータである応力拡大係数に準じた指標 ($\Delta K_{II}'$) を用いて整理した。ここで、 $\Delta K_{II}'$ は空洞の直径 $2a$ とはく離深さにおける水平せん断応力振幅 ($2\tau_0$) から $\Delta K_{II}' = 2\tau_0 \sqrt{\pi a}$ によって求める。同指標は、先行研究²⁾ において破壊力学的観点から介在物大きさと寿命との関係を検証するために利用されている。それをを用いるにあたり、転がり疲れ寿命の大半がき裂伝ば過程で占められ、その期間が水平せん断応力に支配されるとの仮定が置かれており、本検討でも同様の仮定を置いた。結果として、寿命 N_f と起点となった空洞の大きさ（直径 $2a$ 、実測で $54 \sim 91 \mu\text{m}$ ）には、 $\Delta K_{II}'$ を用いて $N_f = 8 \times 10^{11} / (\Delta K_{II}')^{4.5}$ で表される定量的な相関関係 (Fig.6¹⁰⁾) があることを見出した。この検証から、空洞の場合は欠陥の大きさと作用応力を元に転がり疲れ寿命を定量的に予測可能であることが示された。なおかつ Fig.6の寿命データのばらつきが非常に小さいことからみて、当該寿命は実質的に寿命の下限値を示しているとみられ、したがって空洞は転がり疲れに対して特に有害な影響をおよぼす欠陥とみることができる。また、き裂伝ばに関し、空洞周囲の十分に伝ばが進んだき裂を観察すると、Fig.7¹¹⁾ に例示するようにその角度は転がり方向に対して概ね水平である。このことは、想定通りき裂伝ばが水平せん断応力（モードII型応力）に支配されることを裏付けている。

4.2 人工埋設介在物を利用した転がり疲れ試験方法の活用例

人工埋設介在物を利用した転がり疲れ試験に関し、軸受の短寿命はく離に関与しうような比較的大型の介在物についての研究事例を紹介する。Fig.8、Fig.9⁴⁾ は、母相と密着状態にある直径80 μm 級の Al_2O_3 に4.0 GPaの P_{max} のもとで転がり疲れを付与し、断面観察を行った結果であ

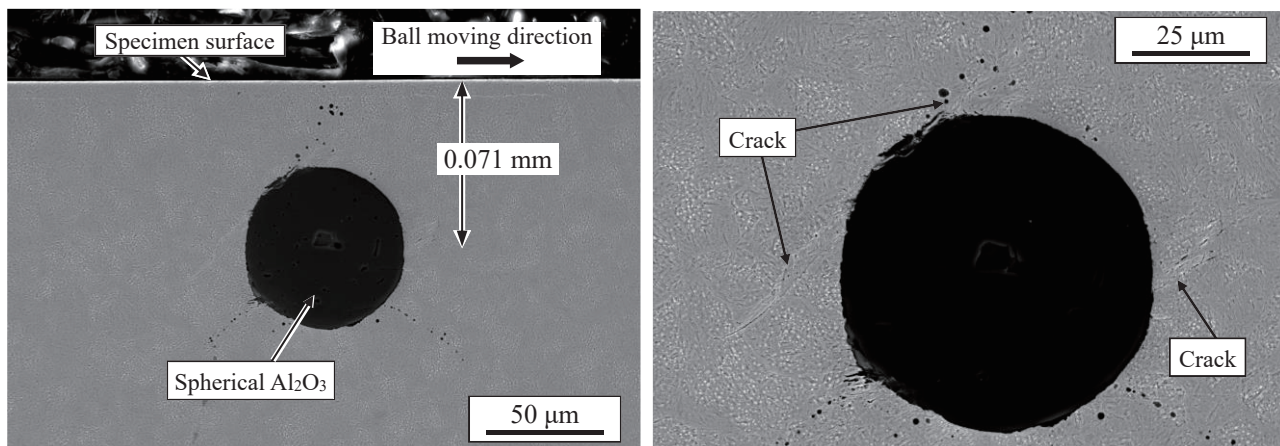


Fig. 8 人工埋設した直径80 μm 級 Al_2O_3 周囲の転がり疲れき裂状況⁴⁾
(P_{max} : 4.0 GPa、 2×10^8 サイクル)

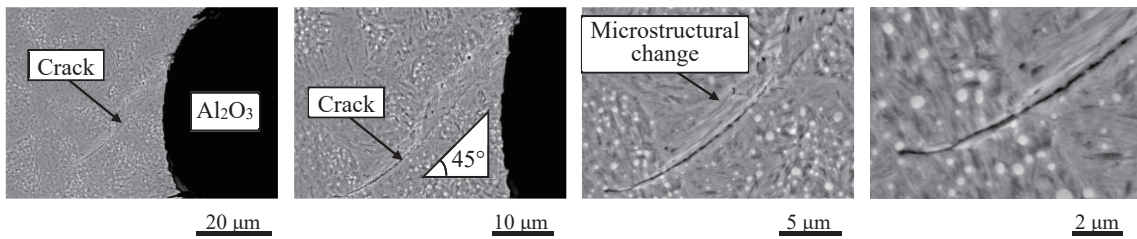


Fig.9 人工埋設した直径80 μm 級 Al_2O_3 周囲の転がり疲れき裂状況（高倍率観察）⁴⁾

る。 Al_2O_3 周囲には転がり疲れによるき裂が見られているが、その長さは最長40 μm 程度に留まり、同試験片に課した 2×10^8 サイクルもの繰り返し疲労には不釣り合いなほど短い。これはき裂が停留状態にあることを示唆するとみている。また、き裂は転がり方向に対し概ね45°の傾きを持つ。その傾き、およびき裂発生位置は、FEM応力シミュレーションによる母相と密着した Al_2O_3 周囲の最大せん断応力（水平せん断応力とは向きが異なる）の向きならびに最大応力発生位置と一致している⁴⁾。この結果は、母相と密着状態にある介在物からは最大せん断応力の作用で45°方向にき裂が生じ、その後停留する可能性が高いことを示唆する。一方、き裂周辺では組織変化の形成が観察されている（Fig.9に矢印で示す箇所）。このような組織変化は介在物周囲に40~45°の傾きを持って形成されることが報告され¹²⁾、本観察でも同様の特徴が見られる。このような高強度鋼における組織変化現象は、強ひずみ加工によって生じる結晶粒微細化現象と共通する現象と目され、き裂周辺の局所的な塑性ひずみの蓄積に起因して起こるとみられている¹³⁾。密着介在物周囲におけるおよそ45°方向のき裂は、その向きが水平せん断応力の作用角度から大きくずれており、そのために転がり疲れによる繰り返しの応力負荷に伴って供給されるエネルギーが、き裂伝ばにはなく、き裂周辺の塑性変形に優先消費されるとみている。これによりき裂の停留がもたらされ、介在物

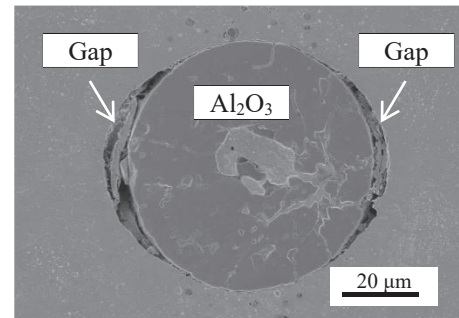


Fig.10 直径68 μm の Al_2O_3 周囲に人工的に形成させた隙間のSEM観察像¹¹⁾

の有害性を大きく減じると推定している。このような特徴的な角度のき裂発生とその後のき裂停留（周辺の組織変化を伴う）の様子は、母相と密着した様々な大きさの Al_2O_3 において同様に確認されている。これらの独自の知見から、従来から言われてきた介在物の小径化のみならず、介在物と母相を隙間なく密着させることが寿命改善の強力な手段となりうること、長寿命化のキーが密着介在物に特有のき裂挙動にあることが見出せる。

さらに同方法の応用例として、介在物-母相間に隙間を伴う場合の転がり疲れ挙動についても検討した事例を紹介する。Fig.10¹¹⁾は人工的に埋設 Al_2O_3 周囲に隙間（空洞）を生じさせた例である。この事例と同様にして周囲に隙間を形成させた201 μm の Al_2O_3 について、それを起点

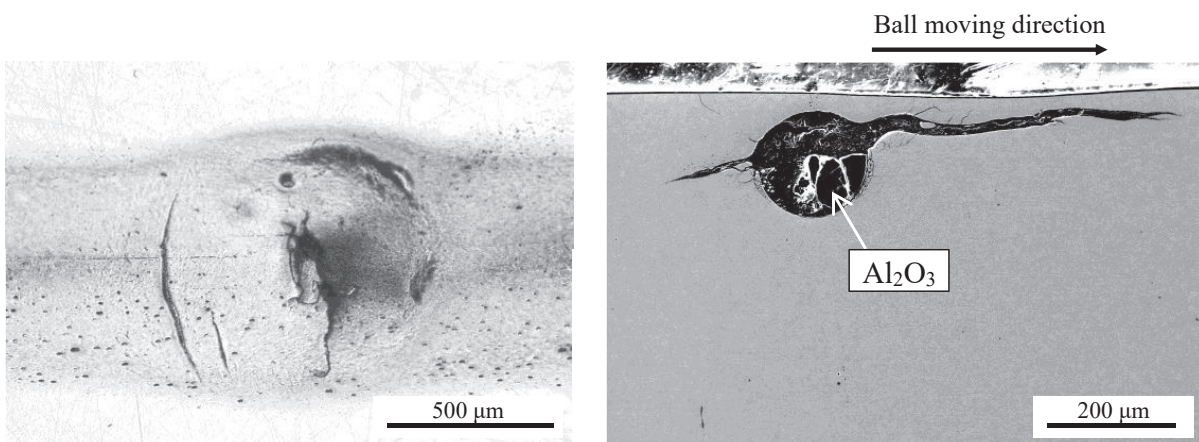


Fig.11 周囲に隙間を形成させた直径201 μm の Al_2O_3 からのはく離の観察結果¹¹⁾
 (左：スラスト試験片上の軌道の観察結果、右：軌道下断面のSEM観察像、
 P_{max} : 4.5 GPa、 1.74×10^6 サイクルではく離)

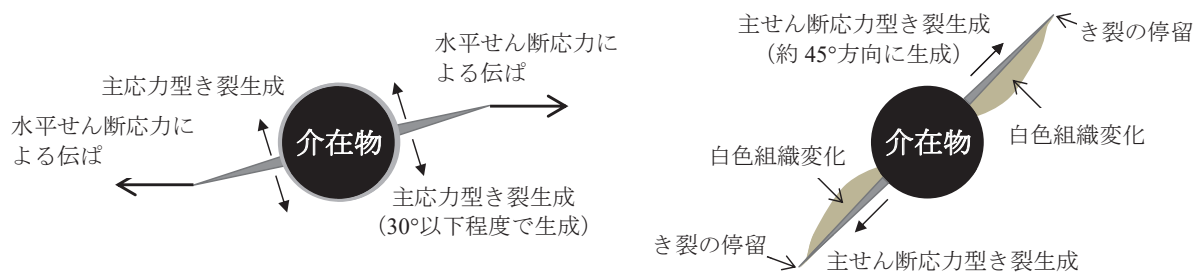


Fig.12 推定された転がり疲れき裂モデル
(左：隙間を伴う介在物、右：母相と密着した介在物、転動体移動方向は左から右)

にはく離が生じた事例をFig.11¹¹⁾に示す。母相と密着した介在物周囲に発生する45°き裂が停留しやすいとみられることは対照的に、隙間を伴う介在物の周囲から発生したき裂は転がり方向に対して30°以下程度の浅い角度を呈しつつ、概ね水平に伝ばしてはく離にまで至っている。そのき裂の角度やき裂が概ね水平方向に伝ばする特徴は、上述した空洞周囲のき裂挙動と共通性が見られる。この結果から、介在物周囲に隙間が存在する場合、空洞に類似した転がり疲れき裂挙動をもたらし、それを通じて寿命に対して悪影響を及ぼしていることが伺える。

本方法で得られた介在物周囲の隙間有無によるき裂挙動の変化をもとに、転がり疲れき裂モデルをFig.12のように推定している^{10, 14)}。き裂モデルは2つに大別されるとみており、一方は隙間を伴う介在物周囲で起こりうる主応力型（モードI型）のき裂生成であり、寿命に対する有害性が高いと考えている。もう一方は密着介在物周囲における主せん断応力型（モードII型）のき裂生成であり、前者に比べて寿命への有害性が低いと考えている。今後、本方法を活用して隙間を伴う介在物の大きさとそれを起点とする寿命のデータを収集し、介在物と寿命の下限値との定量的関係性を明らかにすることにより、顧客における軸受部品の設計最適化に資する定量寿命予測技術の実現が期待できる。

5. おわりに

カーボンニュートラル実現に向けた各種産業分野の大変革期を迎え、当社主力製品の軸受鋼においても、より効率的で環境負荷を軽減可能なエコプロダクトの実現に対するいっそうの寄与が求められている。そのために軸受の主要破損原因の一つである介在物起点はく離のメカニズムを正確に知ることを狙いとする転がり疲れ試験方法の高度化を進めてきた。既に、開発した方法を転がり疲れ現象の可視化のための強力な基盤技術として活用することで、介在物のき裂挙動や、介在物大きさと寿命との関係に関する重要な成果が得られている。今後も本手法の活用を進め、これまで成し得なかった定量寿命予測技術の確立を目指して研

究を推進していく。

参考文献

- 1) 曾田範宗：軸受，岩波書店，(1964)，157-159.
- 2) 常陰典正，平岡和彦：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2回シンポジウム講演予稿集，(2012)，119-120.
- 3) 藤松威史，平岡和彦，山本厚之：鉄と鋼，94(2008)1，13-20.
- 4) 藤松威史：山陽特殊製鋼技報，25(2018)1，31-37.
- 5) D.Nelias, M.L.Dumont, F.Champiot, A.Vincent, D. Girodin, R.Fougeres and L.Flamand: Transactions of the ASME Journal of Tribology, 121(1999), 240.
- 6) 宇田川毅志，管 勝徳，松田 剛，西川友章：CAMP-ISIJ, 21(2008), 1398.
- 7) 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.
- 8) T. Fujimatsu, T. Nakamizo, M. Nakasaki, N. Tsunekage: ASTM Spec Tech Publ, 1580(2015), 147.
- 9) 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(2016)1，47-61.
- 10) 藤松威史，眞鍋亮太：山陽特殊製鋼技報，26(2019)1，41-50.
- 11) T. Fujimatsu : Bearing steel Technologies:12th Volume, Progress in Bearing Steel Metallurgical Testing and Quality Assurance, ed.J. M. Beswick、STP1623 (West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020), 103-130.
- 12) P. C. Becker: Metals Technology, 8(1981), 234-243.
- 13) 平岡和彦：鉄と鋼，94(2008)12，636-643.
- 14) 平岡和彦：大阪大学工業会誌 Techno Net，(一社)大阪大学工業会，565(2014)，11-12.