

人工欠陥を用いた転がり疲れ試験方法の開発

Development of rolling contact fatigue life evaluation method using artificial defect

藤松威史*

Takeshi FUJIMATSU

Synopsis: In recent years, it is desired for bearing steel to contribute to improvement of component reliability by suppressing unexpected short-life of bearing. In order to realize a reliable product, it is an important task to clarify the relationship between the size of inclusions and the bearing life, and to know the size of inclusions that can be the origin of the short-time fracture. In this research, we aimed to develop a new method to investigate the relationship between the size of inclusions and the lifetime, and established a sophisticated rolling contact fatigue test method using artificial inclusion. In the newly developed method, a spherical inclusion whose chemical composition and size was selected in advance was artificially introduced in a test piece. Then, it was HIPed for bonding the interface between the inclusion and the matrix. Rolling contact fatigue test is conducted for its inclusion. A test result of 80 μm Al_2O_3 , bonded to matrix, is shown in this paper. Although no flaking occurred under the experimental conditions, cracks and peripheral microstructural changes due to the influence of rolling contact fatigue were observed around Al_2O_3 . From the result, the validity of the test method is confirmed.

Key words: rolling contact fatigue test; artificial defect; finite element method; crack; microstructural change

1. 緒言

世界的な地球環境保全の機運の高まりからCO₂排出量抑制に有利な風力発電の拡大や自動車電動化の流れが加速しつつあり、それらの使用状況の変化に応じて軸受の使用環境はますます過酷化すると考えられている。適正な潤滑状態が保たれた軸受使用環境のもと、鋼中の非金属介在物を応力集中源として軸受部品内部で発生したき裂が伝ばしてはく離に至る、いわゆる内部起点型はく離が起こることが知られている。このタイプのはく離による軸受寿命を改善するため、従来から非金属介在物の個数低減や小径化を基軸とする方策が採られてきた結果、既に大幅な性能向上を実現している。これは、転がり疲れに有害な氧化物系非金属介在物の形成に関わる鋼中の酸素含有量に関して、軸受鋼製品で数ppmにまで低減可能とした高清浄度鋼製造技術によるところが大きい。

一方、近年の軸受鋼に対するニーズとして長寿命化の追求だけではなく、突発的に発生する短寿命はく離を抑制して部品の信頼性向上に具体的に寄与することが望まれている。したがって、そのような製品を実現するためには介在物の大きさと寿命との関係を明確にし、短寿命はく離の起点となり得る介在物の大きさを知ることが何よりも重要な

課題となる。それに対し、介在物の大きさと寿命との関連性を示した最近の研究¹⁾においても、同程度の介在物径（極値統計法による予測最大径）に対する寿命には10倍程度の差が見られる場合があり、両者の関係性は明確となっていないのが実状である。

そこで、本研究では介在物の大きさと寿命や転がり疲れとの関係性を明確にするための手段を創出することを狙いとする取組みを行い、人工的な介在物導入手段を活用した新たな転がり疲れ試験方法を開発した。以下ではその詳細を報告する。

2. 人工的な介在物導入手段による転がり疲れ試験方法の開発の必要性

新たな転がり疲れ試験方法を開発するにあたって、メカニズムの解明を阻害している転がり疲れに特有の現象について考慮した。一つは、転がり疲れに伴うき裂は軸受内部の介在物周囲で発生し、そのまま内部でき裂の伝ばが進行するため、その過程を窺い知るのが困難なことである。もう一つは、転動体を介して高い圧縮荷重を繰り返し負荷される過程で、内部のき裂面同士が接触して磨滅し、はく離後の破面観察による起点介在物の特定が困難なことである。

* 研究・開発センター 基盤研究室 材料研究グループ長、博士（工学）

前者のき裂挙動の検証に関し、筆者らは、直径数 μm ～数十 μm の空洞を多数残存・分散させたSUJ2鋼を人工的に作製し、これらの空洞を鋼中の欠陥に見立ててはく離前に試験を中断する転がり疲れ試験を行うことで欠陥周りのき裂を数多く観察し、き裂発生挙動の解明を試みた²⁾。考案した実験ならびにシミュレーションによる空洞や介在物を想定した欠陥周囲の最大主応力解析の結果から、転がり疲れにおいて一般介在物に比べて空洞が高い有害性を持つであろうことを見出している²⁾。また、そこから介在物と母相間に隙間（空隙）がある場合に有害性が助長されるとの仮説を立て²⁾、後続研究において介在物-母相間の隙間を閉塞させるためのHIP（Hot Isostatic Pressing）加工を鋼材に施すと転がり疲れ寿命が大幅に向上することを確かめ、仮説の妥当性が高いことを示している³⁾。これらの知見から、はく離後の検証が困難な介在物-母相界面の状態が寿命の変化要因になることが明らかとなっている。したがって、介在物と寿命との関係性を精緻に検証するにあたって、転がり疲れ試験に先立ち介在物-母相界面の状態を一定の状態に揃えておくことは必須の条件と考えられる。

また、後者のはく離起点介在物の特定に関し、寿命データを得るにははく離を生じさせなければならないが、はく離後の破面解析からは起点介在物の情報が得難く、介在物と寿命との因果関係の把握が妨げられている。その打破のため、精密超音波探傷（UT）技術を用いて鋼中の介在物位置を事前に特定し、その介在物を対象として転がり疲れ試験を行い、試験中のUTのエコー像の経時変化観察に基づき介在物周りのき裂挙動の検証を行った事例が報告されている^{4) 5)}。ただし、この方法によっても、介在物-母相間の界面状態（隙間の有無）を事前に把握することは困難とみられる。また、軸受の短寿命はく離をもたらすのは比較的大型の介在物と推定され、そのような介在物が限られた評価数量の転がり疲れ試験片内のごく小さい応力負荷体積中に存在する可能性が低いことも考慮する必要があった。

これらの状況を総合的に考慮し、介在物大きさと寿命や転がり疲れとの関係を調査するにあたって、化学組成が既知であり、大きさが予め判明している介在物を人工的な手段により試験片に導入し、さらに介在物-母相間の界面状態を一定の状態に揃えてから、転がり疲れ試験を行う方法が最適であるとの発想に至った。この方法が実現できれば、起点となる介在物が一つに定まるため、はく離寿命と介在物の大きさを一対一に対応させることが可能になる。なお、人工的な介在物を利用した転がり疲れの研究例としてA. Grabulovらの報告⁶⁾がある。彼らは、SAE 52100鋼中に球形 Al_2O_3 を人工的に導入して転がり疲れ試験を行い、 Al_2O_3 周囲に形成されたバタフライ（転がり疲れに伴う組織変化）の観察に成功している。ただし、その試験片作製方法の詳細は開示されてはいなかった。そこで当社では、独自に人工的な介在物導入手段を考案し、その介在物を対

象として転がり疲れ試験を行う一連の方法の開発に取り組んだ。その狙いは、対象介在物の大きさ、組成、形状、介在物-母相間の界面状態、および介在物の位置情報といった通常であれば全てを事前特定することが困難な寿命関与因子について、明らかにした状態から転がり疲れ試験を行うことを可能とするものである。それにより、介在物大きさと寿命との関係性について精緻な検証ができるようになる。すなわち、介在物位置情報が予め判明しているため、介在物周囲の転がり疲れ挙動の観察を確実に遂行できるようになる。すなわち、寿命データや介在物周囲の観察結果に基づいて、転がり疲れ挙動やそのメカニズムを従来に無い高いレベルで検証することができる。なお、本報では鋼中の実介在物に見立てて人工球形 Al_2O_3 を活用して実験を行った。これは、鋼中介在物に近い成分からなる工業的に製造された粒子を用いることにより、化学組成や形状を一定とした条件のもとで介在物の転がり疲れ挙動を調べるためである。また、 Al_2O_3 以外についても本方法と相性の良いものについては利用可能と考えている。

3. 実試験による開発した転がり疲れ試験方法の妥当性検証

3.1 介在物を導入したスラスト試験片の作製

開発した転がり疲れ試験方法の一連のフローをFig. 1に示す。以降では、このフローに沿って説明を行う。まず、スラスト試験片の作製とスラスト試験片上のドリルホール加工（Fig. 1の工程①～③）について説明する。本報ではTable 1の化学成分を有するSUJ2の $\phi 65$ 圧延材を供試材として使用した。この鋼材に865℃で1h保持後に空冷す

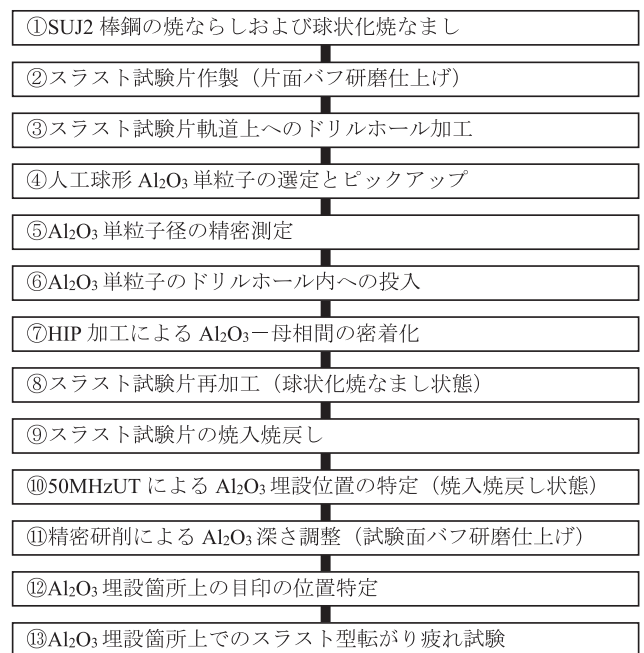


Fig.1 Flow chart of the newly developed rolling contact fatigue test.

Table 1 Chemical composition of the steel (mass%).

Steel	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Al	O	N
SUJ2	1.00	0.26	0.36	0.015	0.006	0.06	1.41	0.019	0.0005	0.0094

る焼ならし、および最高点加熱温度を800℃とし、その温度で保持後に徐冷を行う球状化焼なましを施した。そこから、外径φ60、内径φ20、厚さ8mmで片面をバフ研磨仕上げたスラスト試験片を作製した。その後、Fig. 2の要領でスラスト試験片のバフ研磨面側の軌道相当位置に先端直径0.20mmのマイクロドリルで深さ1mmの単穴のドリルホール加工を施した。このドリルホールの深さは、後述するHIP加工時の介在物-母相間の確実な密着化、ならびにHIP加工中のSUJ2製試験片とその周囲を包んだ低炭素鋼ケース間での炭素の固相内拡散による影響層の確実な除去を考慮した。

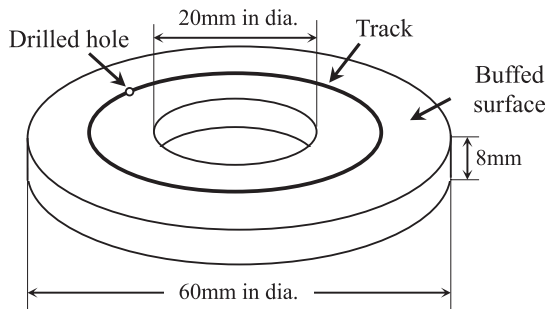
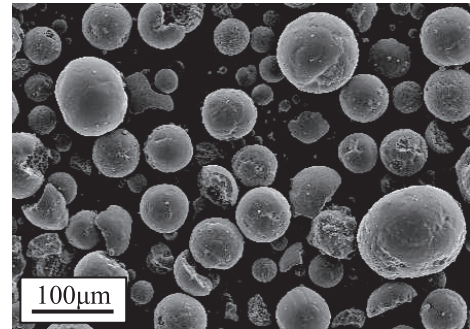
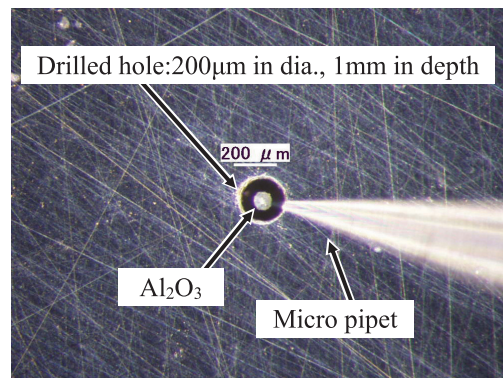


Fig. 2 Position of a drilled hole on the thrust type specimen.

続いて、実介在物に見立てた人工球形 Al_2O_3 単粒子の選定とピックアップ、粒子径の測定、およびドリルホールへの投入 (Fig. 1の工程④~⑥) の工程を説明する。Fig. 3に今回使用した人工球形 Al_2O_3 の写真を示した。一部に破碎した粒子も混在しているが、球形を保った単粒子を選定して使用した。単粒子をドリルホール内へ投入するにあたり、単粒子の精密操作を自在に行える制御装置とCCDカメラ付きの実体顕微鏡 (最大倍率56倍) とを組み合わせた簡易なシステムを構築した。単粒子のピックアップとリリースは、精密操作を行う装置に接続した先端部内径φ10 μm のマイクロピペットにより行った。このシステムを用い、プレパレート上に少量置いた人工球形 Al_2O_3 粒子のなかから任意の単粒子をピペットでピックアップし、そのままスラスト試験片上のドリルホールの位置にピペット先端を移動させたときの保持状況をFig. 4に例示した。このとき、スラスト試験片上のドリルホールの縁の高さとピペット先端に保持した Al_2O_3 単粒子の最大直径部の高さを揃え、その高さにフォーカスを合わせて写真を撮影することにより、ドリルホール径を基準に Al_2O_3 径が精密に測定できる。この方法にて測定したFig. 4の Al_2O_3 直径は79 μm

であった。写真撮影後、ピペット先端から Al_2O_3 をリリースしてドリルホール内へ投入した。

Fig. 3 Artificially produced spherical Al_2O_3 particles.Fig. 4 Al_2O_3 particle held by micro pipet.

続いて、HIP加工により Al_2O_3 と母相のSUJ2との密着化 (Fig. 1の工程⑦) を図った。まず、 Al_2O_3 の抜け止めを施して、低炭素鋼製のケースにスラスト試験片を収め、スラスト試験片の内径穴部に芯金を入れてからケースを密閉し、ケース内部を真空脱気した後、147MPaで1170℃-5h保持後に徐冷するHIP加工を行なって Al_2O_3 と母相とを密着させた。この過程では、別途行った断面観察結果に基づき、Fig. 5に示すようにスラスト試験片表面側から優先して閉塞が始まり、 Al_2O_3 がドリルホールの方に押し止められながら閉塞が進み、最終的に Al_2O_3 と母相の界面が密着化すると推定している。この工程を経由させることで、介在物-母相界面に隙間の無い状態を意図的に作りだし、転がり疲れに及ぼす隙間の影響を除外している。なお、詳細については次項で説明するが、ドリルホールの最終閉塞部には数 μm 程度の大きさの微小なSi系酸化物が点在して観察された。これらは真空脱気後にもドリルホールの壁面

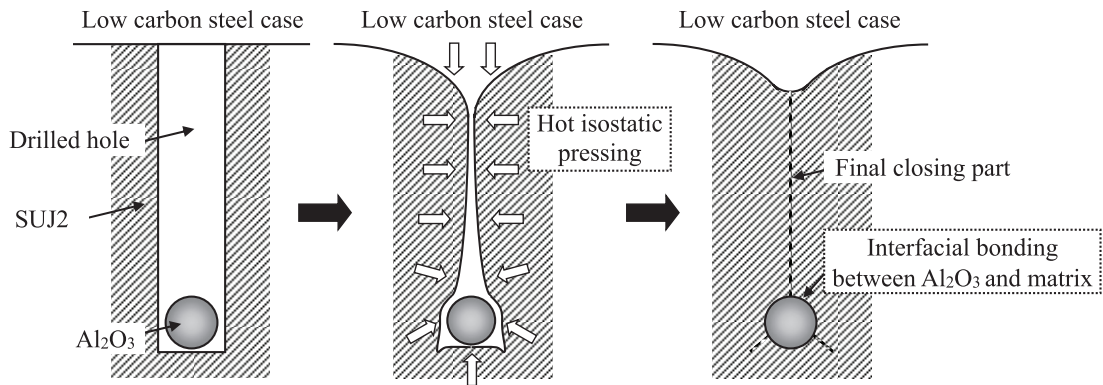


Fig.5 Estimated interfacial bonding process between Al₂O₃ and matrix (SUJ2) during HIP.

等に吸着残存していた微量の酸素と、酸素との親和性が高い母材中のSiとが結合して生成したものとみられた。

HIP加工の後、焼ならしと球状化焼なましを施してから、SUJ2部分をスラスト試験片形状（外径φ56×内径φ20×厚さ4.8mm）に再加工し（Fig. 1の工程⑧）、焼入焼戻し（835℃ -0.5h、油冷→180℃ -1.5h、空冷）を行って62HRC程度の硬さに調整した（Fig. 1の工程⑨）。続いて、熱処理時の酸化スケールを平面研削で除去後、スラスト試験片中のAl₂O₃の位置情報を50MHzUTにより特定した（Fig. 1の工程⑩）。Fig. 6は、50MHzUTで検出した79μm Al₂O₃からのエコー像であり、この時点の検出深さはスラスト試験片表面から1.35mmの深さであった。この深さ情報を頼りに、研削とバフ研磨仕上げによって後述のスラスト試験条件下における高せん断応力深さ域内にAl₂O₃が配置されるように調整した（Fig. 1の工程⑪）。転がり疲れ試験の実施要領は次項にて説明する。

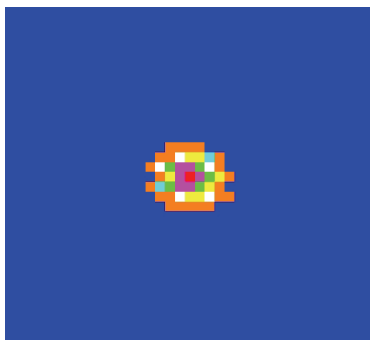


Fig.6 Spherical Al₂O₃ with 79μm in diameter detected by 50MHz UT.

3.2 スラスト型転がり疲れ試験の実施要領

スラスト型転がり疲れ試験の実施にあたり、Al₂O₃埋設箇所直上を転動体を通るように軌道を配置した。本方法により作製した試験片において、ドリルホールの最終閉塞部に微小なSi系酸化物粒子が散見されることを述べたが、これらはFig. 5のプロセスを辿ることで必然的に介在物の直上方向に形成される。これを利用し、バフ研磨仕上げされたスラスト試験片上に表出したSi系酸化物粒子群の位置

を光学顕微鏡観察により特定し、これを軌道の精密配置時の目印とした（Fig. 1の工程⑫）。Fig. 7はその観察事例であり、点線で囲んだ箇所に粒子群が見られる。これらの粒子個々の大きさは数μm程度に過ぎないので、はく離寿命には関与しないと考える良い。なお、光学顕微鏡観察のみでは微小な粒子群を発見するのは困難なため、事前の50MHzUTによるAl₂O₃埋設位置特定の際に大まかな位置の目安を付けておくようにした。

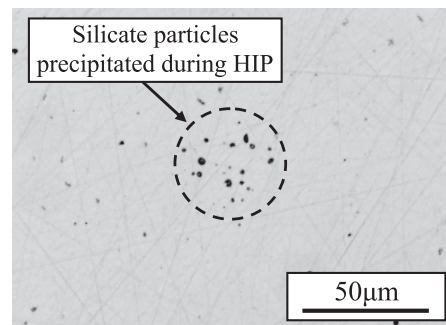


Fig.7 Optical micrograph of silicate particles observed on the buffed surface of the thrust type specimen.

続いて、埋設した直径79μmのAl₂O₃単粒子を対象とするスラスト型転がり疲れ試験を行った（Fig. 1の工程⑬）。試験片の配置に関し、上板にSUJ2製単式スラスト軸受のレース（型番51305）を使用し、下板をAl₂O₃埋設スラスト試験片とし、上板と下板の間に転動体として直径3/8インチのSUJ2製鋼球3個を120°ピッチで等分配置した。続いて転動体とスラスト試験片の接触部に4.0GPaの最大ヘルツ接触応力が加わるように荷重を付与し、負荷サイクル速度を1800サイクル/min、潤滑をISO VG68油浴への浸漬方式とし、Al₂O₃埋設箇所上を転動体の軌道が通るように調整したのちスラスト型転がり疲れ試験を常温で実施した。この際、スラスト試験片内部のAl₂O₃は、本条件下でせん断応力が最大となる0.09mm深さ付近に配置されるように調整した。

3.3 Al₂O₃周囲の転がり疲れ挙動に関する考察

スラスト型転がり疲れ試験において、一般的な試験打ち切りの目安となる 1×10^8 サイクルを超えて、 2×10^8 サイクル到達後もはく離を生じなかったため、その段階で試験を中断した。試験後のAl₂O₃周囲の転がり疲れ挙動を確認するため、断面観察を実施した。Fig.8に示す要領により、軌道接線方向断面のAl₂O₃埋設位置近傍での研磨と光学顕微鏡観察を繰り返しながら、介在物の最大径付近まで追込みを行った。Fig.9に転がり疲れ試験後のAl₂O₃の断面写真を示す。Fig.9 (a) の写真から判断して、スラスト試験片表面から0.071mmの深さでAl₂O₃径が最大となっており、ほぼ狙いとする深さ付近にAl₂O₃を配置することができていた。この深さでは、本試験条件下の水平せん断応力の最大値の99%程度が作用し、はく離は生じていないものの

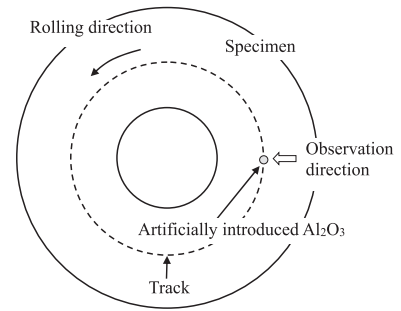


Fig.8 Cross-sectional observation direction of thrust type specimen.

Al₂O₃に対して十分な転がり疲れが付与されたとみなせる。さらに詳細観察したところ、Fig.9 (b) において球形Al₂O₃の周囲の母相側に複数のき裂が観察され、これは転

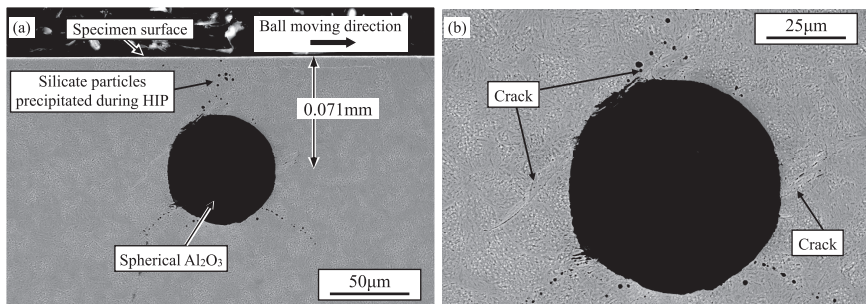


Fig.9 Scanning electron micrographs of (a) Al₂O₃ and (b) cracks initiated from the Al₂O₃ at the cross section perpendicular to the raceway. Specimen was etched with nital. Rolling contact fatigue test was interrupted at 2×10^8 cycles. Ball moving direction was from left to right.

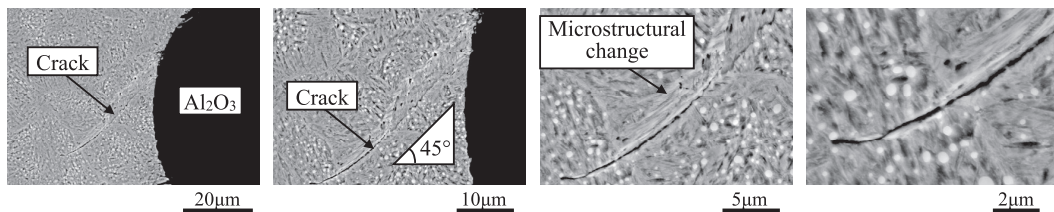


Fig.10 Scanning electron micrographs of the left side of Al₂O₃.

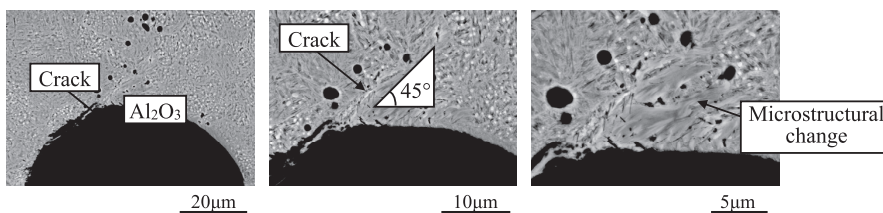


Fig.11 Scanning electron micrographs of the top of Al₂O₃.

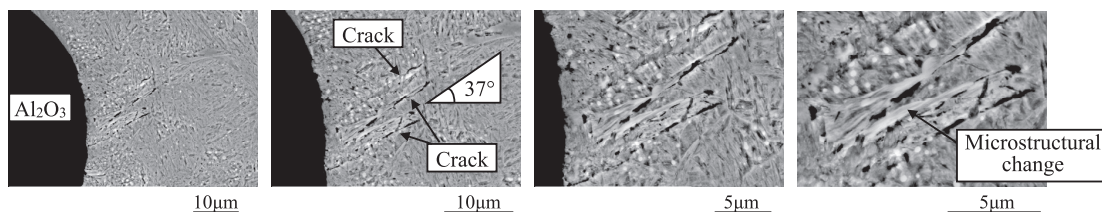


Fig.12 Scanning electron micrographs of the right side of Al₂O₃.

がり疲れにより発生したき裂と考えられる。そのき裂は、最も長いものでも40 μ m程度と極短い状態に留まっていた。この試験片に2 \times 10⁸サイクルもの高サイクルの転がり疲れを付与したことを考慮すると、事実上Al₂O₃周囲のき裂は停留しているとみなして良いように思われる。なお、き裂周辺には白色組織変化を伴っており、介在物を起点として形成されるいわゆるバタフライとみられる。また、き裂の傾きは、Fig.10~Fig.12に示す通り、軌道面に対して45°もしくは37°の角度であった。これはP. C. Becker⁷⁾が介在物周囲に生成したバタフライの転動面に対する傾きとして示した40~45°の角度に概ね合致した。

以上に示した試験後の観察結果から、予め選定した介在物を人工的に導入し、それを対象として転がり疲れ試験を行うこと、ならびに事前に把握していた介在物位置情報を元に試験後に介在物埋設箇所周辺のき裂や組織変化等の転がり疲れ挙動を確実に観察することが、本試験方法によって実現可能であることを確認した。今後、この方法を活用してさらにデータ蓄積を進めることにより、介在物大きさと寿命や転がり疲れとの関係性のさらなる明確化が大いに期待できると考えている。

他方で、本実験結果に改めて注目すると、玉軸受部品の基本静定格荷重に近い最大ヘルツ接触応力のもとで長期間にわたる転がり疲れを付与したにも関わらず、80 μ m級のAl₂O₃を起点としたはく離は生じなかった。本方法でのHIP加工条件は、鋼中の隙間の閉塞に対して十分な程度の温度、圧力を付与しているため、人工的に埋設したAl₂O₃と周囲の母相とは必然的に隙間の無い密着状態になる。筆者らの従来研究から、HIP加工によるAl₂O₃周囲の隙間の閉塞が転がり疲れ寿命の向上に有効なことは既に判明している³⁾。したがって、母相と密着したAl₂O₃からはく離に至るようなき裂伝ばが見られていないという実験結果は、周囲に隙間を伴わない介在物の転がり疲れに対する有害性が低いことを改めて強く裏付けるものである。

以降では、Al₂O₃周囲のき裂発生挙動について考察した。Al₂O₃周囲に発生したき裂は転動面に対して45°に近い角度を有し、この角度は転動体が直上を通過する際に作用する主せん断応力の向きと一致する。そこで、Al₂O₃周辺においても同様の主せん断応力が作用しているのかを確認するため、二次元平面ひずみモデルによるFEM解析により検証した。解析コードにはMSC MARCを使用した。解析モデルや母相、Al₂O₃を想定した物性値については筆者らの既報告⁸⁾のものを流用し、それらをFig.13、Fig.14、およびTable 2に示す。モデルにおいて転動体は剛体、マトリクスは弾塑性体として取り扱った。モデルには転動体を介して実験とほぼ同じ3.95GPaの最大ヘルツ接触応力が加わるように荷重を付与した。Al₂O₃を模擬したモデルの直径は20 μ mとし、配置深さは表面から0.12mmであり、Al₂O₃と母相の界面を密着状態とするため、両者の接点を

一体化して取り扱った。なお、モデルと実験ではAl₂O₃の径や表面からの深さに相違はあるが、共に断面形状は円形であり、いずれのAl₂O₃配置深さにおいても最大値の95%以上の水平せん断応力が作用するため、このモデルによる検証に支障は無いと判断した。解析の結果、転動体がAl₂O₃直上に位置したときにAl₂O₃-母相界面に作用するせん断応力が最大となった。また、Fig.15の通り、せん断応力の高い領域はAl₂O₃-母相界面上に対称的な位置関係で4ヵ所存在し、応力の向きはいずれも転動面に対して45°方向であった。これをFig.10~Fig.12のき裂挙動と対照すると、実際のき裂角度は37°もしくは45°であることから、FEM解析によるせん断応力の方向と良く合致した。また、き裂発生位置に関しても、Fig.9 (b) でAl₂O₃の左側に見られたき裂の発生位置は、Fig.15でAl₂O₃-母相界面の接線方向に発生する高せん断応力位置と良く合致した。これらの実験ならびに解析の結果の対比から、球形(断面形状は円形)のAl₂O₃周囲のき裂生成には45°方向の主せん断応力が関与した可能性が高いと考えられる。このように今回開発した方法は、転がり疲れを付与する介在物の組成・形状、および介在物-母相界面の状態を予め定めた状態で試験を行うことから、それらの条件をFEM解析に

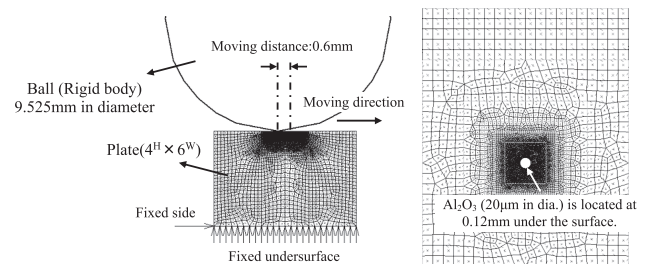


Fig.13 Plane strain model for two dimensional stress analysis. Left side is the whole model. Right side is the detail of the model around the inclusions.⁸⁾

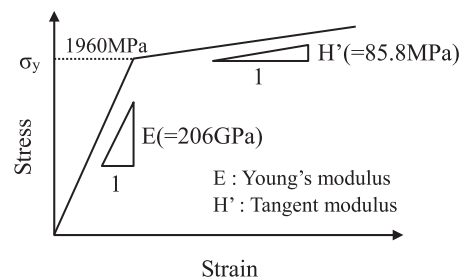


Fig.14 Stress-strain curve of matrix (SUJ2).⁸⁾

Table 2 Physical properties of matrix and Al₂O₃.

	Matrix	Al ₂ O ₃
Young's modulus, E (GPa)	206	387
Tangent modulus, H' (MPa)	85.8	-
Poisson ratio	0.30	0.25
Hardness (HV)	700	~1900
Yield strength (MPa)	1960(=σ _Y)	3·σ _Y

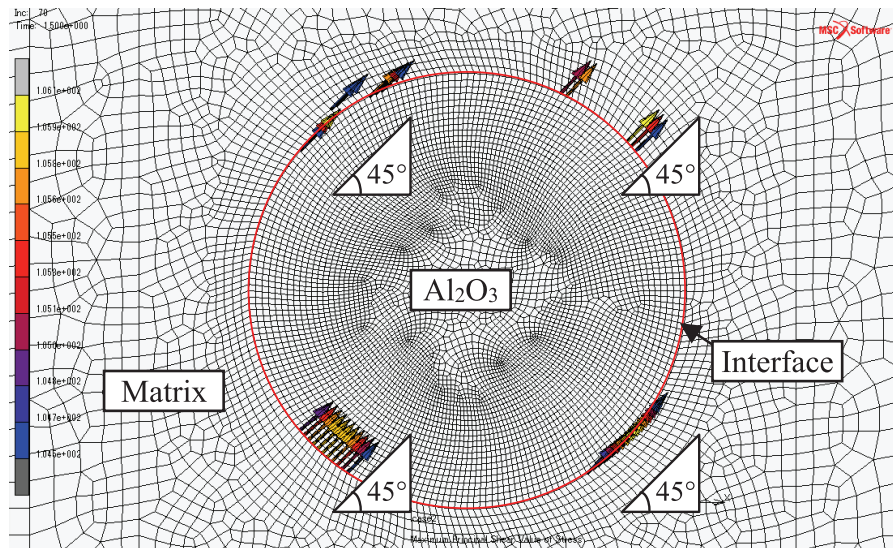


Fig.15 Vector of the maximum principal shear stress at interface between around Al_2O_3 and matrix. Ball is located at just above the Al_2O_3 . Shear stress value range is from 1024MPa to 1040MPa.

反映させることが容易であり、この観点からも従来以上に高度な検証が期待できる。

4. 結言

介在物大きさと寿命や転がり疲れとの関係性を明確にするための手段を得ることを狙いとして、新たな転がり疲れ試験方法を開発した。開発した方法は、予め組成や大きさを選定した介在物を試験片に埋設し、介在物と母相の界面を密着状態にしたのち、その介在物を対象として転がり疲れ試験を行うものである。これにより、はく離寿命と介在物大きさとの一対一の対応関係を見ることや、はく離、未はく離の状態を問わず、試験後に介在物埋設箇所周辺の転がり疲れ挙動を確実に観察することが可能となる。

本方法の実例として、母相と密着した $80\mu\text{m}$ 級 Al_2O_3 の試験結果を示した。今回の実験条件下でははく離は生じていないが、断面観察において転がり疲れの影響による Al_2O_3 周囲のき裂や白色組織変化を観察できており、試験方法の妥当性を確認できた。

今後、本方法を活用してさまざまな大きさの介在物に対する寿命や転がり疲れ挙動の調査・検証を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 長尾実佐樹, 平岡和彦, 雲丹亀泰和 :山陽特殊製鋼技報, 12 (2005), 38-45.
- 2) 藤松威史, 平岡和彦, 山本厚之:鉄と鋼, 94, 1

(2008), 13-20.

- 3) K. Hashimoto, T. Fujimatsu, N. Tsunekage, K. Hiraoka, K. Kida and E. C. Santos: Mater. Design, 32, 10 (2011), 4980-4985.
- 4) 宇田川毅志、菅勝徳、西川友章、藤崎和弘、山下典理男、横田秀夫:愛知製鋼技報, 27 (2010), 12-18.
- 5) 宇田川毅志、菅勝徳、小塚巧、西川友章:愛知製鋼技報, 30 (2013), 29-36.
- 6) A. Grabulov, R. Petrov and H. W. Zandbergen: International Journal of Fatigue, 32 (2010), 576-583.
- 7) P. C. Becker : Metals Technology, 8 (1981), 234-243.
- 8) 藤松威史, 長尾実佐樹, 中崎盛彦, 平岡和彦:山陽特殊製鋼技報, 13, 1 (2006), 62-65.

著者



藤松 威史