

異物混入潤滑下転がり疲れにおけるき裂挙動に関する研究

Study on the crack behavior of rolling contact fatigue under contaminated lubricant environment

山陽特殊製鋼（株） （非）\*藤岡 優馬 （非）石橋 いずみ （非）前田 尚輝 （非）藤松 威史

Yuma Fujioka, Izumi Ishibashi, Naoki Maeda, Takeshi Fujimatsu

Sanyo Special Steel Co., Ltd.

1. はじめに

カーボンニュートラル社会実現の手段の一つに、エネルギー効率向上による CO<sub>2</sub> 排出低減が挙げられる。例えば電気自動車では、高効率化のため、モーターの高速回転化や、潤滑油低粘度化が指向されている。このような変化に伴い貧潤滑化が進むと、駆動部品同士の金属接触で硬質の摩耗粉が発生し、それが軸受軌道面に噛み込まれて圧痕が形成される懸念が高まる。この圧痕を起点とする軸受の表面起点型疲労は早期に進行するため、対策が望まれる。

当該の疲労環境に関し、硬さ試験機で付与した人工圧痕を活用した従来研究では、圧痕周縁に形成される盛り上がりが高いと短寿命になると報告されている<sup>1)</sup>。また、圧痕形状と寿命との関連性を元に、鋼の硬さと残留 $\gamma$ 量を適度に高め、盛り上がり高さを抑制する長寿命化対策が提案されている<sup>2)</sup>。一方、圧痕周辺の疲労に関し、マイクロ組織との関係は詳細に調査されていない。そこで本報では、マイクロ組織の観点からの材料対策強化を狙いとして、圧痕周縁における疲労き裂の挙動とマイクロ組織との関係の調査を行い、き裂発生メカニズムを推定した。

2. 実験方法

2.1. 転がり疲れ試験方法

評価には、SUJ2 鋼と SCM420 鋼を使用し、 $\phi$  65 鍛造丸棒からスラスト型転がり疲れ試験用の外径 60mm、内径 20mm、厚さ 6mm の円盤状試験片を作製した。作製した SUJ2 製試験片は、835℃でずぶ焼入れした。SCM420 製試験片は、930℃での真空高濃度浸炭熟処理（表面炭素濃度 0.8~0.9% 狙い）を行った。この処理により、SUJ2 鋼に比べて多量の残留オーステナイト ( $\gamma$ ) が付与される。また、高濃度浸炭熟処理後に 850℃で二次焼入れを施して結晶粒を微細にした試験片も作製した。最終的に SUJ2 製試験片は 170℃、SCM420 製試験片は 180℃で焼戻した（以降は SUJ2、SCM420、SCM420 secondary QT と識別）。試験片の表面は、鏡面研磨で平均表面粗さ Ra を 0.004 $\mu$ m とした。研磨後の表面硬さは、SUJ2、SCM420、SCM420 secondary QT で各々 801HV、716HV、774HV であった。残留 $\gamma$ 量は、各々 13.8%、31.9%、26.4%であった。また結晶粒径（平均旧オーステナイト粒径から測定）は、SUJ2 と SCM420 が約 10 $\mu$ m、SCM420 secondary QT が約 3 $\mu$ m であった。

転がり疲れ試験は、実環境で想定される摩耗粉の代わりに硬質の高速度鋼粉末（870HV）を混入させた汚染潤滑油中で実施した。スラスト型転がり疲れ試験の概略図を Fig. 1<sup>3)4)</sup>に示す。摩耗粉が使用途中に混入する実環境を模して、クリーンで一定サイクル転走後（1.0 $\times$ 10<sup>4</sup> サイクル）に異物を油浴に投入した。試験条件を Table 1<sup>4)</sup>に示す通り、投入する異物（高速度鋼粉末）の量は、き裂発生過程の調査では 7mg/L、それ以外の調査時で 300mg/L とした。寿命評価（n=6~12）ははく離まで行い、それ以外の調査は疲労の経過状況を見るために 10<sup>4</sup>~10<sup>6</sup> サイクルオーダーで試験を中断した。

2.2. 圧痕形状の調査

異物投入後の 300 サイクル転走により形成された比較的初期の圧痕について、形状を確認した。評価には、走査型白色干渉顕微鏡（Contour GT-I Elite, Bruker 製）を用い、転動体移動方向に平行な方向の圧痕の形状プロファイルを取得し、圧痕の盛り上がり高さを評価した。

2.3. 圧痕周辺のマイクロ組織の調査

圧痕周縁の疲労き裂発生箇所の特徴を知るため、代表して SUJ2 におけるき裂をデジタルマイクロスコープ（DM）で観察した。また、3D 測定機能を有する SEM で圧痕の三次元形状を取得し、き裂発生箇所の特徴と対比した。さらに、同調査で表面き裂周辺に見られた波状のしわ模様とき裂発生との関連を、しわ模様が鮮明に観察された SCM420

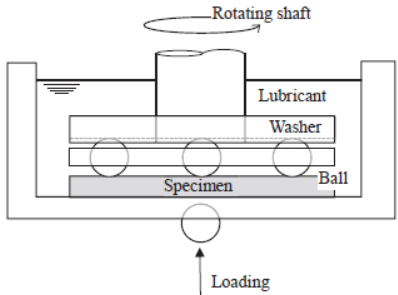


Fig. 1 Schematic diagram of thrust-type RCF test.<sup>3) 4)</sup>

TABLE 1 Conditions of thrust-type RCF test<sup>4)</sup>

Contact stress	Maximum Hertzian contact pressure, P <sub>max</sub> : 5.2 GPa
Loading speed	1,800 cycles/min
Ball	SUJ2 3/8 in. (3balls)
Lubricant	VG10 up to 10 <sup>4</sup> cycles Contaminated VG10 by steel particle after 10 <sup>4</sup> cycles Steel particle: 870HV in hardness, 100-150 $\mu$ m in diameter made of high-speed steel ・ Investigation of the generation process of surface cracks: 7 mg/L ・ Other investigations: 300 mg/L

secondary QT の試験片を用いて調べた。調査は、圧痕周辺のき裂としわ模様の DM 観察、および上記同様の SEM によるしわ模様の三次元評価により行った。また、SCM420 のしわ部、微小き裂の軌道平行断面の組織観察を FIB-SIM と TEM で行った。疲労による結晶状態の変化を調べるため、代表して SUJ2 を用い、発生直後とみられるき裂の周辺ならびに圧痕から離れた箇所（元の結晶状態に近い箇所）の結晶粒を TEM-ASTAR 法で評価した。ASTAR 法は、TEM と組み合わせて最小で数ナノメートルオーダーの微細な結晶の方位やひずみの情報を取得する手法である。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1. 転がり疲れ寿命

いずれの試験片も、はく離は圧痕を起点とする表面起点型で発生し、起点位置は従来研究と同様に転動体の移動方向からみて圧痕の後方側であった<sup>5)</sup>。各試験片の平均寿命 ( $L_{50}$  寿命) は、残留  $\gamma$  量の多い SCM420 で  $3.5 \times 10^6$  サイクルで、SUJ2 ( $0.9 \times 10^6$  サイクル) に比べ長寿命となった。さらに結晶粒が微細な SCM420 secondary QT は最良寿命 ( $5.1 \times 10^6$  サイクル) を示した。

#### 3.2. 圧痕形状の特徴

圧痕形状は不定形を呈した。圧痕周縁の盛り上がりは高さ  $0.6 \sim 0.7 \mu\text{m}$  と比較的軽微であり、鋼種間の差異も無かった。今回使用した高速度鋼粉末は可塑性を有するため、軌道部に噛み込まれた際に粉末が扁平に変形して、その形状が転写されることで、圧痕が不定形状となり、かつ周辺の盛り上がりが軽微になったとみられる。

#### 3.3. き裂の発生箇所とその周辺の状態変化の確認

Fig. 2<sup>4)</sup>に示すように、表面き裂は、転動体の移動方向からみて圧痕の後方側に見られた。圧痕の三次元形状 (Fig. 3<sup>4)</sup>) と照らし合わせると、き裂は曲線状を成した圧痕の傾斜面において発生し、その位置は軌道面高さより低い位置であり、従来研究で見られるような圧痕周縁の盛り上がり部からは生じていなかった。また、疲労に伴うき裂周辺の表面状態の変化として、Fig. 4<sup>4)</sup>に示すような転動体移動方向に周期性をもった微小凹凸を伴う波状のしわ模様が見られた。しわ模様は、き裂発生前から圧痕周縁に観察され、また、Fig. 4(A)<sup>4)</sup>のようにしわ模様に沿ったき裂形成が見られる状況から、き裂発生の前駆段階としてしわが形成されている可能性が示された。

#### 3.4. しわ部およびき裂の断面ミクロ組織観察に基づくき裂発生メカニズムの推定

き裂発生メカニズムを詳細に知る手掛かりとして、しわ部とき裂の軌道平行断面における組織を観察した。

Fig. 5<sup>4)</sup>にしわ部の断面観察結果を示す。Fig. 5(A)<sup>4)</sup>に示すように、疲労き裂の発生段階における入込み、突出しに似た表面凹凸が認められた。突出し部には局所的に塑性流動が生じた領域 (赤矢印で示す)、入込み部には境界状のコントラスト (黄色矢印で示す) が見られた。塑性流動の発生には、圧痕周辺の微小すべりが関与したとみられる。

Fig. 6<sup>4)</sup>に微小き裂の断面観察結果を示す。その様相はしわ部断面と類似し、き裂は局所的な塑性流動領域 (黄色矢印で示す) と変形が少ない領域の境界で発生していた。この挙動から、き裂がしわ部を前駆段階として発生することが強く推定された。微小き裂は、表面に対し約  $30^\circ$  傾斜し、転がり接触下の最大せん断応力の作用方向 ( $45^\circ$ ) とはズレがみられた。このようなき裂の発生およびき裂の向きには、圧痕周辺の微小すべりに伴う表面の接線力 (引張) とせん断応力との合成応力の関与が推測された。

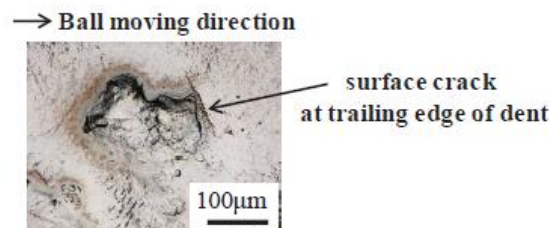
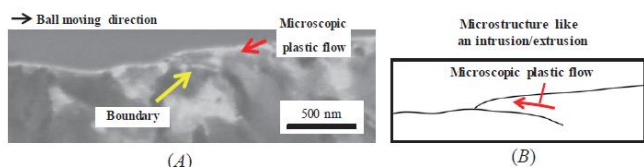


Fig. 2 Digital microscopic image of surface crack at trailing edge of dent observed in SUJ2. RCF test was interrupted at  $0.5 \times 10^6$  cycles.<sup>4)</sup>

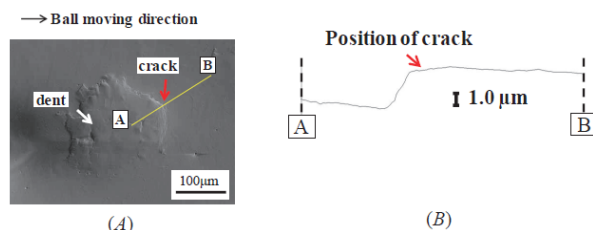


Fig. 3 (A) Scanning electron micrograph of a crack-generated dent observed in SUJ2; (B) its 3D cross-sectional profile. RCF test was interrupted at  $0.5 \times 10^6$  cycles.<sup>4)</sup>

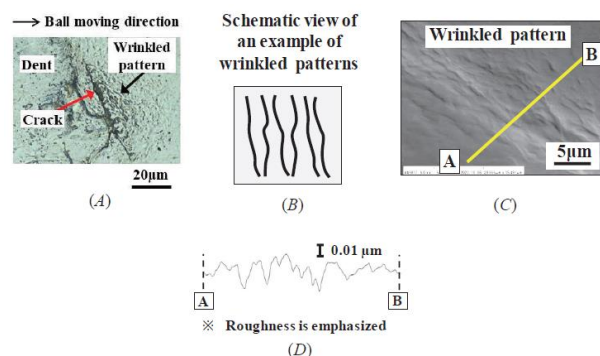


Fig. 4 (A) Appearance of a surface crack observed in SCM420 secondary QT. RCF test was interrupted at  $2.0 \times 10^4$  cycles. (B) Schematic view of an example of wrinkled patterns. (C) Scanning electron micrograph of wrinkle pattern away from a crack and (D) its 3D profile. RCF test was interrupted at  $1.0 \times 10^6$  cycles.<sup>4)</sup>

Fig. 5 (A) Cross-sectional FIB-SIM image of wrinkle observed in SCM420 and (B) its schematic diagram. RCF test was interrupted at  $1.12 \times 10^4$  cycles.<sup>4)</sup>

Fig. 7<sup>4)</sup>は、圧痕周囲き裂近傍の結晶状態の TEM-ASTAR 観察結果である。圧痕の前方側 (Fig. 7(D)<sup>4)</sup>) と異なり、後方側は大きな塑性変形を伴い (Fig. 7(E)<sup>4)</sup>)、圧痕周縁から離れた箇所の結晶粒 (Fig. 7(B)<sup>4)</sup>) と比べて扁平で微細に変化していた。つまりマルテンサイトの下部構造が微細化するほどの強烈な塑性変形が生じていることが分かった。この圧痕周辺の微視的で局在化した塑性変形は、表面ではしわ状の凹凸として観察され、凹凸には周期性がある。このような周期的な凹凸を伴う金属の微視的変形として、固執すべり帯 (PSB) が知られる。固執すべり帯は、繰返し負荷により材料表面近傍に形成され、そこでは局所的なすべり変形を通じ、壁状の転位組織が周期的に配列した構造 (転位壁) に変化している<sup>6)7)</sup>。この転位壁は  $1.4\mu\text{m}$  程度の間隔で形成するとされる<sup>7)</sup>。これは本研究におけるしわ状模様の間隔 (約  $0.5\mu\text{m}\sim 1.2\mu\text{m}$ ) とオーダーが近く、本報のしわ状模様の形成にもすべり変形が関与したとみられる。

以上の観察結果から、転がり疲れを受ける圧痕周囲には固執すべり帯に類似したしわ状の凹凸が発生し、それに繰返し応力集中が作用して疲労き裂が発生するメカニズムが推定された。このようなき裂挙動には、材料のミクロスコピックな塑性応答の違いが関与する可能性が高く、表面硬さや残留  $\gamma$  量の観点からは説明できない結晶粒微細化材 (二次焼入れ材) の長寿命化の一因として考えている。本報ではデータを割愛するが、結晶粒微細化材は、他の供試材よりもき裂発生頻度が低減しており<sup>4)8)</sup>、圧痕起点型転がり疲れ寿命の改善に有利な特長が確認されている。

#### 4. 結言

本報で、軌道上圧痕の周縁で発生する転がり疲れき裂挙動とミクロ組織の変形との関係を調べ、以下の知見を得た。

- (1) 汚染油浴潤滑下で形成させた圧痕周囲の転がり疲れき裂は、従来研究のような圧痕周囲の盛り上がり部ではなく、圧痕肩部付近の軌道面よりも低い傾斜面で発生した。
- (2) 圧痕周辺には転動体移動方向に周期性を持つ、微細な凹凸を伴う波状のしわが形成された。しわの断面にはミクロ的な塑性流動や、入込み・突出しに類似した変形が見られ、き裂の前駆段階と推定された。
- (3) き裂は微視的塑性流動領域と変形の小さい領域の境界部 (入込み状部分) で発生した。このことから、微視的塑性に抵抗しうるミクロ組織制御が長寿命化対策になる可能性があり、本報では結晶粒微細化に有効性が認められた。
- (4) 圧痕周縁の局在化した塑性変形部 (しわ状の表面凹凸) への応力集中でき裂が発生するメカニズムが推定された。

#### 文献

- 1) 戸田・三上・星野：微小圧こんのころがり寿命に及ぼす影響，トライボロジスト，38, 6 (1993) 526-532.
- 2) 戸田・三上・星野：転動疲労寿命に及ぼす圧こん縁の盛り上がりと残留オーステナイトの影響，日本金属学会誌，58, 12 (1994) 1473-1478.
- 3) 平岡・桂・山縣・小池：異物混入潤滑下における表面硬化鋼の転動疲労特性，山陽特殊製鋼技報，9, 1 (2002) 35-42.
- 4) Y. Fujioka, I. Ishibashi, N. Maeda, T. Fujimatsu: Detailed Analysis of the Crack Behavior around the Surface Dent under Rolling Contact Fatigue, Bearing and Transmission Steels Technology, ed. J. Beswick (West Conshohocken, PA: ASTM International, 2024), 457-488, <https://doi.org/10.1520/STP164920230012>.
- 5) C. Vieillard, Y. Kadin, G. E. Morales-Espejel, and A. Gabelli: An Experimental and Theoretical Study of Surface Rolling Contact Fatigue Damage Progression in Hybrid Bearings with Artificial Dents, Wear 364-365 (2016) 211-223.
- 6) 嶋田・近藤・北村：疲労転位組織形成の臨界膜厚に対する離散転位動力学解析，日本機械学会論文集 (A 編)，78, 793 (2012-9) 1242-1249.
- 7) 兼子・橋本：ECCI 法による銅単結晶の疲労転位構造の観察，日本金属学会誌，66, 12 (2002) 1297-1303.
- 8) 藤岡・石橋・前田・藤松：転がり疲れによる表面圧痕周囲のき裂挙動の詳細解析，山陽特殊製鋼技報，31, 1 (2024) 29-47.

© ASTM International in each of the figure/table captions

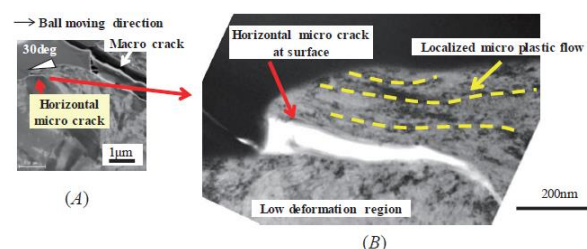


Fig. 6 (A) Cross-sectional FIB-SIM image of microcrack observed in SCM420 and (B) its transmission electron microscopic image. RCF test was interrupted at  $1.0 \times 10^5$  cycles.<sup>4)</sup>

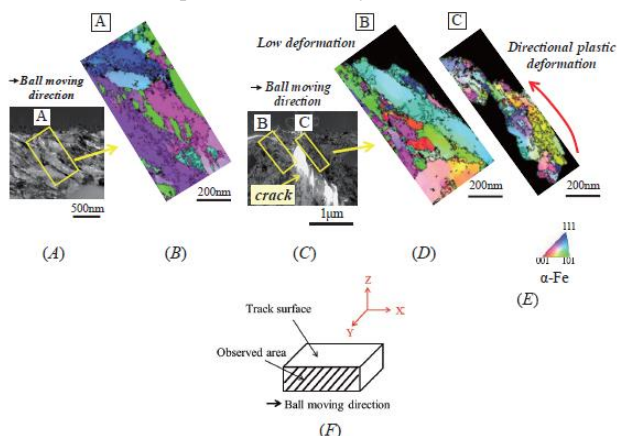


Fig. 7 (A) Cross-sectional TEM image of uncracked surface away from dent on the track observed in SUJ2 and (B) its inverse pole figure (IPF) map. (C) Cross-sectional TEM image near the surface crack observed in SUJ2 and its IPF map of (D) left side and (E) right side of the surface crack. RCF test was interrupted at  $1.03 \times 10^4$  cycles. Ball moving direction is left to right. (F) IPF map was observed from the Y direction in this figure.<sup>4)</sup>