

高強度マルテンサイト鋼の 転がり接触疲労におけるき裂形成

梅澤 修*

1. はじめに

自動車などの駆動部品では、小型化・薄肉化に伴う高面圧下での転がり疲労損傷の抑制が重要課題となっている⁽¹⁾。すなわち、歯車や軸受のような回転する機械部品は、すべりや転がりを伴う繰返し負荷を受け、歯車ではピッチング、軸受けではフレーキングと呼ばれる転がり接触疲労(転がり疲れ)によるはく離損傷がそれらの寿命を決定する。両者は主に面圧の大小とすべり効果の有無に違いがあるが、これら転がり接触疲労では摩耗も重畳し、表面近傍に大きな圧縮応力とせん断応力が作用する。その結果、非金属介在物からの内部き裂発生、微細組織変化、表面微小き裂など、他の金属疲労現象とは異なった疲労破壊過程を示す⁽²⁾⁻⁽⁵⁾。このような駆動部品には、表面硬化して疲労強度を高めた浸炭焼入れ鋼が多用されるが、浸炭窒化、窒化や軟窒化、高周波焼入れやレーザ一焼入れといった表面硬化法も適用される。

転がり接触疲労に影響を及ぼす因子には、材料特性、表面性状、接触面形状、接触条件、潤滑油などが挙げられ、これらの因子が複雑に重畳する。トライボロジー(Tribology)として知られる研究領域であり、これまで数多くの研究が実施されてきたが、転がり接触疲労過程の理解は難しく、その損傷過程の解明には至っていない。すでに優れた書籍⁽⁶⁾⁽⁷⁾や関連する解説⁽⁸⁾⁽⁹⁾などがあり、まずはこれらを参照いただきたい。本稿では、転がり接触疲労の概要と評価法について簡潔にまとめるとともに、材料組織変化やき裂形成について紹介する。

2. 転がり接触疲労

転がり接触疲労(rolling sliding contact fatigue; RCF)では、接触表面が摩擦・摩耗し、摩擦熱の発生や表面性状変化

が生じる。さらに、接触部は一般に線接触もしくは点接触であり、局所的に高圧力が負荷される。実用環境下においては、転がり接触を伴う機械部品は、摩擦低減を目的として潤滑油と併せて使用されることが多く、潤滑油の物理的・化学的特性が疲労過程に影響する。

歯車の損傷は、歯元の損傷と歯面の損傷に大別される⁽¹⁾。歯元の損傷は、歯底部に作用する曲げ応力や衝撃に起因し、衝撃破壊や曲げ疲労破壊が生じる。歯面の損傷は、歯面間の接触に起因し、ピッチング、スコアリング、摩耗が生じる。歯車の損傷形態は歯車間の接触によって生じる相対すべり速度と負荷応力によって変化するが、近年では、高強度鋼の開発や表面硬化処理による歯元曲げ強度の向上から、高トルク・高接触面圧で使用される傾向にあり、ピッチング損傷が歯車の寿命を左右することが多い。ピッチングとは繰返し転がりすべり接触を受ける表面の疲労損傷であり、表面に生じたき裂がきっかけとなり、クレーター状に表面がはく離する現象である。図1に示すように、その剥離形態は内部起点型と表面起点型とに大別され、それぞれの損傷過程は3つの段階に区別される。ピッチング損傷初期のステージIは表面き裂発生である。き裂伝播過程のステージIIでは、き裂成長とともにき裂分岐が生じ、その破面にはストライエーションなどの疲れ損傷が観察される。ステージIIIの急速破断面にはすべりステップやディンプルが観察される。一方、軸受等

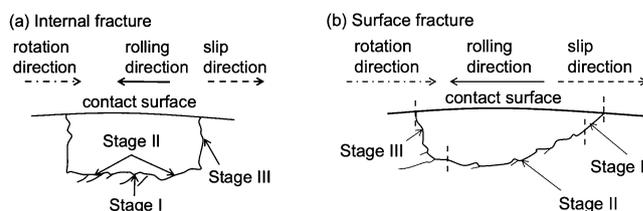


図1 剥離形態の断面模式図：(a) 内部起点型(フレーキング痕)、(b) 表面起点型(ピッチング痕)⁽⁶⁾。

* 横浜国立大学大学院工学研究院；教授(〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)
Crack Generation in Rolling-sliding Contact Fatigue for High Strength Martensitic Steels; Osamu Umezawa (Faculty of Engineering, Division of Systems Research, Yokohama National University, Yokohama)
Keywords: tribology, pitting, flaking, carburized steel, bearing steel, Hertz contact, lubrication
2024年6月24日受理[doi:10.2320/materia.63.780]

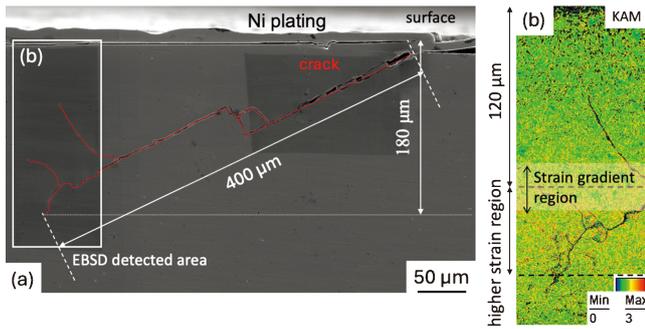


図2 SCM420浸炭焼入れ材の転がり接触疲労(すべり率-40%)後の軌道直下断面:(a)き裂,(b)き裂先端周りの結晶方位差(KAM)マップ⁽⁵⁾。(オンラインカラー)

のすべりの発生しない転がり部品では、フレーキング(スポーリング)と呼ばれる内部起点型損傷が発生する。ステージIとステージIIは表面にほぼ並行に表面下で発生・伝播するき裂であり、特徴的な疲れ損傷が観察される。図2にSCM420浸炭焼入れ材のローラピッチング試験におけるき裂形成の例(軌道面直下の周方向断面)を示す⁽⁵⁾。表面からの深さ約100~160 μmの領域ではひずみ勾配が形成され、表面直下に比べひずみ量が増大している。深さ約160 μmの領域は摺動表面下の応力分布においてせん断応力最大となる深さと推定され、き裂分岐深さに相当する深さ約120 μmの領域はひずみ勾配領域に対応し、ローラ内部ではせん断応力 τ_{yz} の応力振幅が圧縮応力 σ_z に次いで大きく、主なき裂進展作用応力の一つであることがわかる。(b)は(a)白線内部の電子線後方散乱回折(EBSD)解析結果であり、局所の結晶方位差(KAM)を図示している。き裂分岐が生じている領域は表面近傍部に比べてKAM値が高く、ひずみの導入が示唆される。このひずみ勾配形成は、残留応力測定の結果とも対応関係を示す傾向にある。

図3は人工欠陥を導入したSUJ2焼入れ材における転がり接触疲労の例である⁽¹⁰⁾。最大せん断応力範囲(約100 μm深さ)には、強塑性変形に伴う<111>変形集合組織が形成し、水平き裂はひずみ勾配領域に存在する。フレーキングでは内部介在物起点であることが多く、臨界の介在物径と応力拡大係数範囲(モードII) $\Delta K'_{II}$ との関係

$$\Delta K'_{II} = 2\tau_0 \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

から、フレーキング寿命が推定される。ここで、 τ_0 : 水平方向せん断応力振幅、 $2a$: 介在物直径である。図4はき裂形成モデルであり、ステージIIが寿命を支配している。その一方、き裂発生は、自由表面(剥離または割れた介在物界面)における局所塑性変形によるものであり、モードIき裂であることが弾塑性FEM解析により導かれた⁽¹⁰⁾。図5に示すように、ひずみ勾配領域にある旧オーステナイト粒界近傍の結晶回転や、微小き裂先端の局所塑性変形集中では、強変形やき裂面摩擦に伴う微細粒組織が認められる。

3. 転がり接触疲労試験

材料を評価するための試験には、実用機械そのものを使用

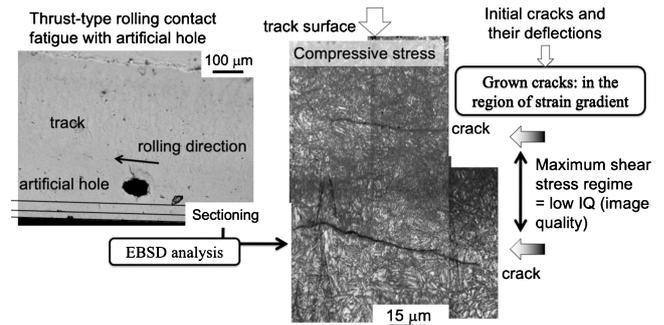


図3 人工欠陥を導入したSUJ2焼入れ材における転がり接触疲労: 軌道面と人工欠陥近傍断面のイメージオリティ(IQ)像⁽¹⁰⁾。

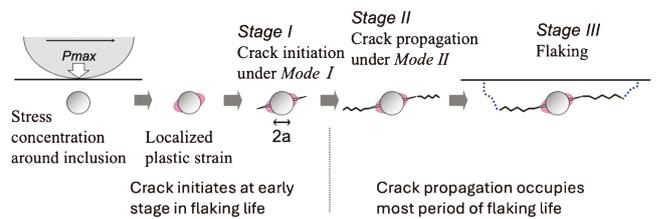


図4 フレーキングき裂形成モデル⁽¹⁰⁾。(オンラインカラー)

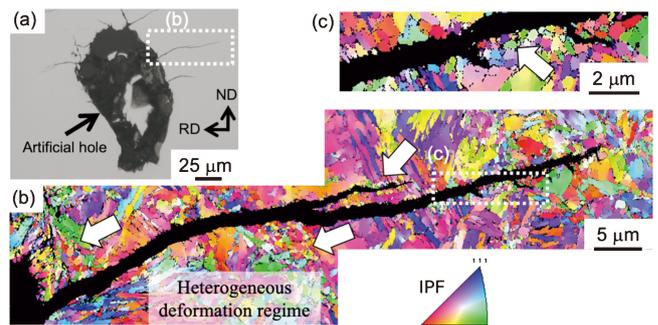


図5 転がり接触疲労により人工欠陥から形成したき裂周りのEBSD逆極点図方位マップ:(a)断面SEM像,(b)EBSD逆極点図方位マップ,(c)(b)拡大図(矢印:微細粒組織)⁽¹⁰⁾。(オンラインカラー)

する試験や、実機の一部を想定した基礎的なモデル試験まで、様々な方法がある。摩擦・摩耗特性を評価するためのモデル試験は、接触形態により点接触、線接触、面接触の3つに分類される。高面圧下での摩擦・摩耗特性を評価する場合には、高面圧条件を再現しやすい点接触試験もしくは線接触試験を選ぶことが多い。一方、面接触試験は、低面圧下で試験する場合や接触面積を一定に保ちたい場合に使用される。

歯車のような転がり接触疲労を伴う機械要素は、接触二面間ですべりを伴うことがある。その際、発生しているすべりの度合いを評価するパラメータがすべり率である。一般的に転がり接触疲労の寿命評価にはローラ試験機が用いられる。この時、回転軸が同一平面上にある低速ローラの周速 v_s 、高速ローラの周速 v_t とすると、低速ローラのすべり率 σ_s は

$$\sigma_s = \frac{(v_s - v_f)}{v_s} \quad (2)$$

となる。

(1) 二円筒式ローラピッチング試験⁽⁶⁾

歯車の歯面接触を評価するためのモデル試験には、線接触試験に分類される二円筒接触試験を用いることが多い。歯車のかみ合いの進行に伴って、歯元面と歯末面ではすべりを伴い転がり接触する。歯元面ではすべり方向と転がり方向は逆であるため、すべり率は負となる。歯末面ではどちらも同じとなるためすべり率は正である。ピッチ点ではすべりは発生せず、純転がり接触となる。二円筒に速度差をつけ回転させると、低速ローラにおいてはすべり率が負となり歯元面の接触状態を再現でき、高速ローラにおいてはすべり率が正となり、歯末面の接触状態を再現できる。さらに、二円筒の回転速度を等しくすれば純転がり接触となり、ピッチ点での接触状態を再現可能である。このように、歯面接触は二円筒の接触に置き換えることが可能である。ピッチング損傷は歯車のピッチ点から歯元側に寄った歯面、すなわち、すべり率が負の領域で発生する。

二円筒式ローラピッチング試験機では、試験片を小ローラ、相手材を大ローラとして、荷重荷環境下で二つのローラを転がりすべり接触させる(図6)。ローラには焼入焼戻処理を施し、仕上げ研磨する。試験条件であるが、例えば、小ローラ回転速度 1500 rpm、大ローラ回転速度 420 rpm の場合、すべり率は -40% である。これに最大ヘルツ面圧を設定する。試験中、接触部に潤滑油(例えば、90°C、油量 2 L/min、吐出し側)から連続供給する。振動センサによりピッチング損傷を検知して試験を中断し、その転がり数を疲労寿命とする。

(2) 三円筒型マイクロピッチング試験

三円筒型マイクロピッチング試験機は、等間隔に配置された3つの大ローラと中心に配置されたピン(センターローラ)が3点で転がり接触することにより、短時間でマイクロ・マクロピッチングを発生させる。接触幅(標準は 1 mm 幅)や、大ローラと中心ピンの中心間距離が同じであれば

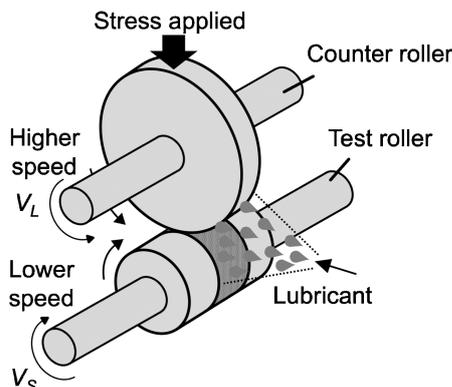


図6 二円筒式ローラピッチング機の概略図。

試験片の直径を変更することも可能である。また、試験片間のインピーダンスと位相変化、抵抗などの変化を検出できる。圧電式加速度計にピッチング発生時の振動が検出された際、試験は自動停止する。0~±200%のすべり率を再現可能で、試験を中断してセンターローラを取り外し、接触面を観察し、その後試験を再開することができる。

4. 二固体表面の接触と潤滑

(1) ヘルツ接触下の応力

歯車や軸受、車輪、レールなどの機械要素の接触部は、負荷を受けると弾性変形して接触領域を形成する。曲面を持つ部材の接触では、接触面は極めて小さく、そこでは高い圧力を生じる。接触領域が固体の表面積に比べて十分に小さいときの接触を特にヘルツ接触と呼び、このときの接触面積や弾性変形量などの接触状態・応力分布はヘルツの弾性接触理論により解析される。このとき、(1)接触する前の表面は摩擦の無い滑らかな二次曲面であること、(2)接触二固体は等質等方性弾性体であること、(3)荷重は接触領域に垂直に作用することが前提条件となっている。接触面は楕円(長半径 a および短半径 b)となる。ヘルツの弾性接触理論と応力分布については、書籍⁽⁶⁾等を参照いただきたい。

ヘルツ接触下では、内部に種々の垂直応力 σ およびせん断応力 τ が生じる。半無限連続体を仮定し、線接触下における接触表面 ($z=0$) および表面下 ($z=0.5b$) の応力分布を摩擦係数 $\mu=0$ (図7) と摩擦係数 $\mu=0.2$ (図8) の場合について示す⁽¹¹⁾。それぞれ、弾性接触幅 b で規格化したヘルツ荷重中心からの距離に対する応力変化を示している。接触表面において垂直応力 σ_y と σ_z は完全に一致し、ヘルツ荷重域 ($-b < y < b$) でのみ圧縮応力(負)となり、それ以外の領域 ($y \leq -b$, $b \leq y$) では 0 となる。また、せん断応力 τ_{yz} は全域で 0 である。一方、表面下では垂直応力は緩やかに減少するが、 τ_{yz} は大きくなり、 $z=0.5b$ でその振幅は最大となる。そのため、純転がり条件下で使用される軸受では、この深さ領域で疲労損傷が発生しやすい⁽¹²⁾。接触応力に比例する接線力(摩擦係数 $\mu=0.2$)を受けた場合には、表面における σ_y は圧縮側で $\mu=0$ の場合より大きくなり、また、引張応力(正)を生じる領域もある。すなわち、 σ_y の分布は $y=0$ に対し対称と

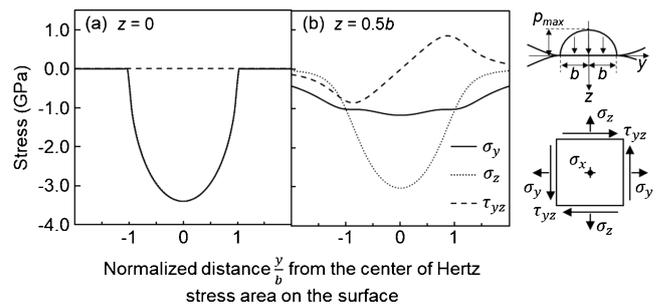


図7 応力分布解析(摩擦係数 $\mu=0$ 、最大ヘルツ荷重 $P_{\max}=3.4$ GPa) : (a) 接触表面 ($z=0$)、(b) 表面下 ($z=0.78b$)⁽¹¹⁾。

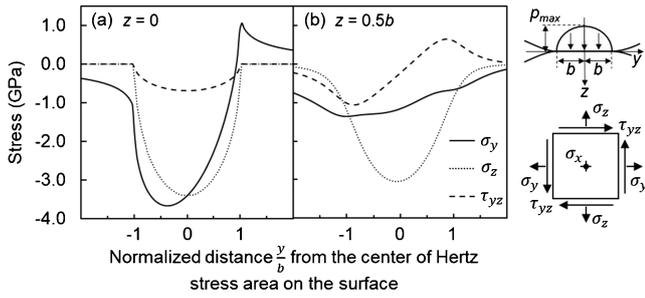


図8 応力分布解析(摩擦係数 $\mu=0.2$, 最大ヘルツ荷重 $p_{\max}=3.4$ GPa): (a) 接触表面 ($z=0$), (b) 表面下 ($z=0.78b$)⁽¹¹⁾.

はならず、両振りの挙動となる。一方、内部では摩擦の影響は比較的小さく、 τ_{yz} の振幅は $\mu=0$ の場合と同じである。

以上のように、転がり接触表面下には種々の応力が生じており、この時の主応力および主せん断応力は、モールの応力円を用いて整理できる(図9)。すなわち、主応力 σ_1, σ_2 は、

$$\sigma_1 = \frac{1}{2}(\sigma_y + \sigma_z) + \sqrt{\left(\frac{\sigma_y - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{yz}^2} \quad (3)$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_y + \sigma_z) - \sqrt{\left(\frac{\sigma_y - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{yz}^2} \quad (4)$$

であり、主せん断応力 τ_1, τ_2 は、

$$\tau_1 = \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_y - \sigma_z)^2 + 4\tau_{yz}^2} \quad (5)$$

$$\tau_2 = -\frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_y - \sigma_z)^2 + 4\tau_{yz}^2} \quad (6)$$

である。ただし、 $\sigma_1 > \sigma_2, \tau_1 > \tau_2$ とした。このとき、座標軸を反時計方向に式(7)を満たす角度 θ だけ回転した方向を法線とする面が、最大主応力の主面となる。

$$\tan 2\theta = \frac{2\tau_{yz}}{\sigma_y - \sigma_z} \quad (7)$$

ヘルツ接触表面下における主応力面は、ヘルツ荷重中心である $y=0$ で軸対称、かつ $\tau_{yz}=0$ であり(図10(a))、主応力面は傾かない。それ以外の領域では、 $\tau_{yz} \neq 0$ であり、その振幅は表面よりも内部で大きくなるため、表面深さ増加に伴い主応力面の傾きも増加する。一方、摩擦を伴うヘルツ接触下の主応力面は、対称な分布とはならない(図10(b))。主応力面は表面直下で大きく傾き、この主応力面に沿って、塑性流動や表面き裂が形成する⁽⁶⁾。

(2) 潤滑剤を介した二表面の潤滑

潤滑剤を介して二表面が接触するとき、潤滑状態は二表面間の摩擦形態を基に流体潤滑と境界潤滑に大別される。流体潤滑状態では、二表面間に十分な厚さの潤滑膜が存在し、表面同士は接触しない。流体潤滑状態における摩擦係数は比較的低く、潤滑状態は流体力学によって体系的に理解される。一方、境界潤滑状態では、二表面間の潤滑膜は比較的薄く、部分的に表面間の接触が生じて摩擦係数は増大する。

二表面間の潤滑状態を潤滑油粘度、すべり速度、荷重および摩擦係数を用いてそれらの関係性を示すストライベック曲

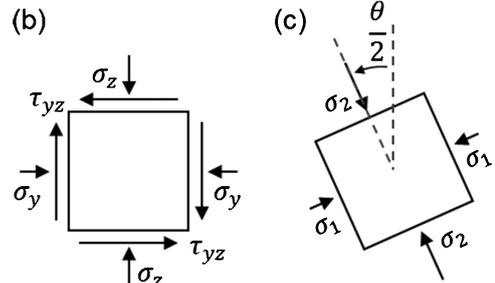
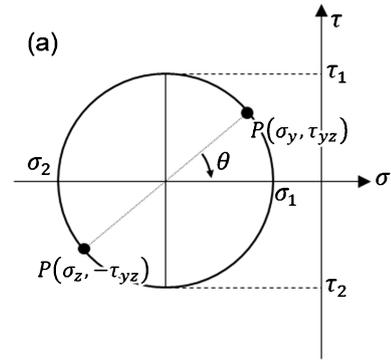


図9 (a) モール円, (b) 垂直な主応力面に作用する主応力と主せん断応力, (c) $\theta/2$ 傾いた主応力面に作用する主応力。

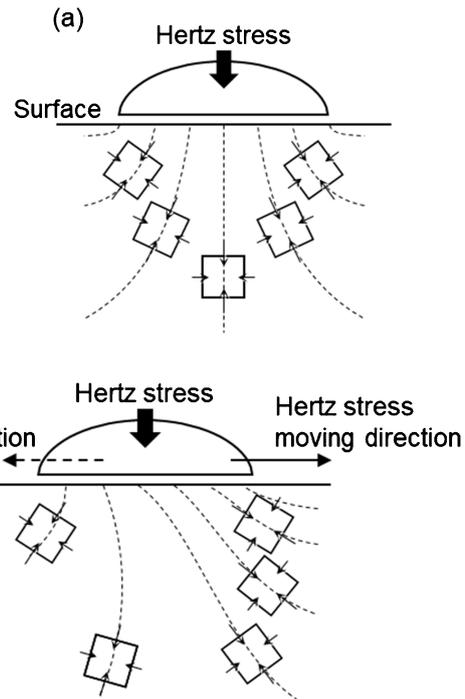


図10 主応力面の傾き: (a) ヘルツ接触, (b) 摩擦を伴う($\mu=0.2$)ヘルツ接触⁽⁶⁾。

線は、潤滑油粘度、すべり速度、荷重から算出されるハーゼイ数(軸受特性数)と摩擦係数 μ との関係を示す。ハーゼイ数の大きな領域では二表面は接触せず、潤滑状態は流体力学で整理され、ストライベック曲線上で線形の関係を示す。一方、ハーゼイ数の小さな領域では、表面接触が生じて境界潤滑状態となり、摩擦係数は増加する。また、流体潤滑と境界

潤滑の両方が生じている潤滑状態を特に混合潤滑状態と呼び、2つの潤滑状態の遷移状態として理解される。

5. 転がり接触疲労による損傷

(1) 負荷条件の影響

歯車や軸受などの回転部品では、その使用目的によって接触圧力や回転速度、すべりといった負荷条件が異なる。歯車では、速度伝達比や伝達荷重によって回転速度や荷重が変化し、軸受では、回転速度の上昇に伴って転動体の受ける遠心力が増大するため、外輪と転動体の接触圧力も大きくなる。また、歯車の歯面は、ピッチ点で純転がり接触し、それ以外ですべり接触する。これら負荷条件の疲労寿命に及ぼす影響について多くの研究報告が為されている。

接触面圧が増大するほどき裂発生が生じやすくなり、疲労寿命は減少する。すべりの度合いとすべりの方向が歯車の損傷に影響する⁽¹³⁾ため、すべり率を用いて、転がり疲労損傷におけるすべりの影響を評価する。純転がり接触(すべり率0%)の状態からすべりのある状態になるとピッチング寿命が低下する⁽⁶⁾⁽¹¹⁾。また、すべりがある場合には回転速度やすべりが大きいほどき裂進展速度も増加し⁽¹⁴⁾、回転速度が大きいほどピッチング損傷は小さく、浅くなる⁽¹³⁾。すべり率が負に増大するほど表面に負荷される摩擦力(接線力)は増加し、破壊起点は表面となり、主な損傷形態はピッチング損傷となる。そして、ピッチング損傷が増大し⁽¹⁵⁾、形成する表面き裂と接触表面のなす角度が増加する⁽⁶⁾。

(2) 内部状態変化

転がり接触疲労では材料の弾性限を超える大きな荷重が負荷されるため、負荷領域は塑性変形し、残留応力が生じ、材料内部は新たな応力状態を形成する。内部応力状態が変化したことで、それ以降の負荷による変形が生じない状態をシェイクダウン状態と呼び、シェイクダウン状態に達するための最大荷重をシェイクダウン限界と呼ぶ。点接触下の荷重とシェイクダウン状態の関係を図11(a)に示す⁽¹⁶⁾。せん断降伏強度 k と最大ヘルツ面圧 p_{max} の比を摩擦係数 μ との関係で示しており、(b)弾性領域、(c)弾性シェイクダウン領域、(d)塑性シェイクダウン領域、(e)ラチェッティング領域に分けられ、垂直荷重と表面摩擦力によって、定常状態として到達する内部状態が異なる。それぞれの領域における変形応答を図11(b)-(e)に示す⁽¹⁷⁾。負荷が弾性限を超えると、最初の負荷時に材料は塑性変形して、残留応力を生じ、その後は、弾性応答を示す(c)。さらに、繰返し負荷が弾性シェイクダウン限界を超える場合には、応力-ひずみ応答は安定したヒステリシスループを描き、塑性ひずみは蓄積しない(d)。塑性シェイクダウン限界を超える大負荷を与えた場合は、繰返し負荷に伴い連続的に塑性変形し、破断に至る(e)。表面摩擦力が増大すると、これら領域の境界は低下し、より低い垂直荷重下でも弾性・塑性シェイクダウン状態に達する。また、摩擦係数が小さい($\mu \leq 0.3$)場合には、表面下で変形が生じるが、摩擦係数が $\mu > 0.3$ の場合には、降伏点は表面に移動

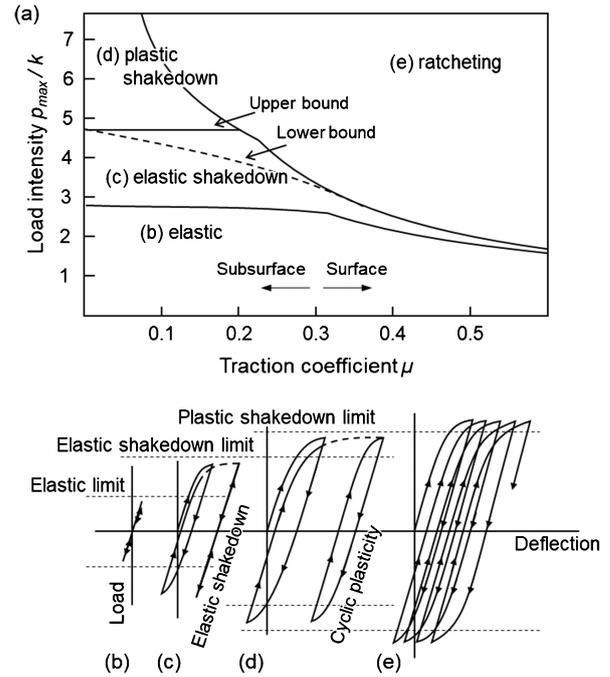


図11 ヘルツ接触におけるシェイクダウン状態領域図 (a) と各領域での繰返し応答: (b)弾性, (c)弾性シェイクダウン, (d)塑性シェイクダウン, (e)ラチェッティング⁽¹¹⁾。

する。荷重が材料の弾性限を超えているとき、負荷領域は最初にシェイクダウン状態に達する。そして、次の負荷時には、周辺の領域が変形する。そのため、材料表面もしくは表面下が一様にシェイクダウン状態に達するには、 10^3 回~ 10^6 回程程度の繰返し回数を要する⁽¹⁸⁾。したがって、繰返し負荷に伴い徐々に材料表面および内部の状態は変化し、ある一定の繰返し負荷後に安定なシェイクダウン状態に到達すると推測される。

(3) 表面下組織

疲労破壊過程は、き裂発生段階とき裂伝播段階とに大別され、高強度材料の一軸疲労ではき裂発生段階が寿命の大部分を占める。しかし、軸受鋼の転がり接触疲労においては、き裂発生が比較的早期に起こり、き裂成長が疲労寿命の大半を占める⁽¹⁹⁾。したがって、き裂成長を抑制するべく様々な方法で圧縮残留応力を付与し、疲労寿命を向上させる⁽²⁰⁾⁻⁽²³⁾。しかし、転がり接触表面直下ではマルテンサイト組織の回復・再結晶が生じて結晶粒は微細化し⁽²⁴⁾、残留オーステナイトは加工誘起マルテンサイト変態する⁽²¹⁾⁽²²⁾。鉄道レールのように低面圧下で長期にわたって繰返し負荷を受ける場合には、転がり接触表面直下の組織は微細化し、 $\langle 111 \rangle$ 集合組織を呈する⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾。この組織変態は転がり接触疲労損傷の前駆段階として知られており、表面を研磨して除去することで損傷を抑制できる。また、歯車のような高面圧かつすべりがある場合の転がり接触では、接触表面直下に塑性流動が形成し、ピッチングき裂は塑性流動に沿って発生・成長する⁽⁶⁾。

(4) 内部組織変化

表面直下だけでなく、せん断応力が最大となる内部においても、損傷が蓄積し、疲労破壊に影響する⁽⁸⁾。せん断応力が最大となる表面深さの領域では表面直下に比べひずみ量が増大し、ひずみ勾配が形成され、き裂の分岐が生じる⁽⁵⁾。また、転がり接触表面下の非金属介在物は、応力集中源として働き、き裂発生を早め、疲労破壊を加速することから、高纯净度鋼が要求される⁽²⁷⁾。

転がり接触疲労過程において、局所的塑性ひずみ蓄積による結晶粒の超微細化に起因した白色型組織変化が生じ、ホワイトバンド(WB)やバタフライ、ホワイトエッチングエリア(WEA)と呼ばれる組織が形成する。白色型組織変化を伴う疲労破壊では、疲労寿命が通常の20%以下に減少する⁽²⁸⁾ため、その抑制が求められている。WEAはマルテンサイト組織の一部が超微細フェライト粒を形成して生じる⁽²⁹⁾。転位が再配列する過程で固溶炭素はセメントイトとして析出し、WEA周辺にはセメントイトが形成される⁽³⁰⁾。WEAはき裂周りに生じやすく、WEAを伴うき裂はホワイトエッチングクラック(WEC)と呼ばれる。WEAやWECの生成要因やこれらの現象の関係性は特定されていない。局所的な加工誘起変態や摩擦に伴う組織変態⁽²⁹⁾、水素浸入⁽³¹⁾がWEA生成要因として提示されている。水素は潤滑油中の炭化水素由来し、転がり接触疲労過程で摩耗部やき裂先端などの新生面から鋼内部へ浸入すると考えられる。

(5) 圧縮残留応力

疲労試験前の試料表面および内部には、浸炭焼入れ処理により圧縮残留応力が付与されており、転がり数の増加に伴ってその残留応力値が小さくなり、潤滑油の粘度や添加剤等の違いにより接線力が高い順で進行する傾向にある⁽³²⁾⁽³³⁾。この変化は、繰返し負荷に伴う表面下組織の回復・再結晶に起因すると考えられる。一方、内部の残留応力状態は、表面と比べてその変化が小さい。したがって、表面と内部の残留応力値の差は、転がり数増加に伴って減少する傾向を示す。これより、圧縮残留応力の変化は表面で顕著であり、表面の圧縮残留応力解放がき裂成長挙動や疲労寿命に影響していると考えられる。

転がり接触表面に働く応力は、転がり方向の残留応力解放に伴い変化する⁽³³⁾。試験前および試験開始直後において、転がり接触表面に圧縮残留応力が付与され、垂直応力 σ_y が全ヘルツ荷重域で負値であるとき、転がり接触疲労初期のき裂発生・成長は、せん断応力 τ_{yz} に起因するモードIIが支配的であると考えられる。その後、残留応力値が上昇する転がり接触疲労後期では、ヘルツ荷重域の端部において $\sigma_y=0$ に応力値が増加する。この時、表面に形成していたき裂は、転がり方向に開口し易くなる。さらに、開口したき裂には、後述のように、潤滑油が流入してき裂成長が加速すると考えられる。すなわち、転がり接触疲労初期では、モードIIき裂の発生と成長とが生じるが、転がり接触疲労後期では、モードIとモードIIの混合によるき裂形成が提示されている。

6. 潤滑油の作用

(1) トライボフィルム

接触している金属表面で起こる反応には腐食や酸化のほか、摩擦によるトライボ化学反応がある。これは摩擦を駆動力とし、接触表面で化学反応を起こすことで、ナノメートルスケールの潤滑被膜であるトライボフィルムを形成する。使用した潤滑油や添加剤によってトライボフィルムの特性⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾や分布⁽³²⁾⁽³³⁾は異なるものの、アモルファス構造を有し、Fe, Zn, Caなどの金属元素とリン酸との化合物や酸化鉄が主な構成物である⁽³⁴⁾⁽³⁶⁾。トライボフィルム中の元素分布は不均一であり、長鎖状と短鎖状のリン酸化合物による層状構造⁽³⁷⁾や、材料表面近傍のS偏析⁽²⁴⁾⁽³⁴⁾が報告されている。

転がり接触過程で金属表面に形成したトライボフィルムは表面損傷や疲労寿命に影響する⁽⁶⁾⁽³⁴⁾⁻⁽³⁶⁾⁽³⁸⁾⁻⁽⁴¹⁾。トライボフィルムが形成した転がり数は 1.0×10^4 回から 1.0×10^5 回の間であり、接線力挙動が変化した段階と一致する⁽³²⁾⁽³³⁾⁽⁴²⁾。つまり、トライボフィルムの形成は、試料表面の摩耗や表面直下の金属組織変化に起因した接線力の変化と密接な関係にあると考えられる。トライボフィルム分布は、低寿命の試料で不均一⁽³⁶⁾、長寿命の試料で一様⁽³³⁾な傾向にあり、接線力や疲労寿命に及ぼすトライボフィルム分布の影響は大きいと考えられる。トライボフィルム形成は、摩擦熱や潤滑油中の化学成分起因⁽⁴³⁾⁻⁽⁴⁵⁾や、表面下の結晶粒径の影響⁽⁴⁶⁾⁻⁽⁴⁸⁾などの報告があるが、未解明である。

(2) き裂内部への潤滑油流入

表面き裂内部での油圧発生機構が提案され⁽⁴⁹⁾、実験やシミュレーションに基づき議論されている⁽³³⁾⁽⁵⁰⁾⁻⁽⁵²⁾。すべり率が負の領域では、ヘルツ荷重の近寄り側において引張応力場、遠退き側において圧縮応力場が生じる(図8)。そのため、接触表面に形成したき裂は、ヘルツ荷重が近づくと引張応力により開口し、接触領域を通り過ぎる過程で圧縮応力により閉口する。このとき、開口したき裂に潤滑油が流入し(図12(a))、き裂面に開口応力が働く(くさび効果、図12(b))。さらに、き裂の閉口に伴い潤滑油がき裂内部に閉じ込められて、き裂内に大きな油圧を生じる(閉込め効果、図12(c))。

ピッチングき裂周辺のSTEM-EDS分析例を図13に示す⁽³³⁾。き裂面に形成した化合物はアモルファスであり、主

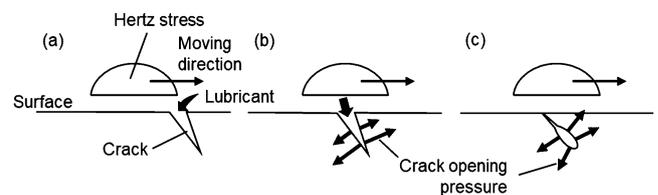


図12 負のすべり率での転がり接触疲労における (a) き裂内部への潤滑油流入、(b) くさび効果、(c) 閉込め効果⁽⁴⁹⁾。

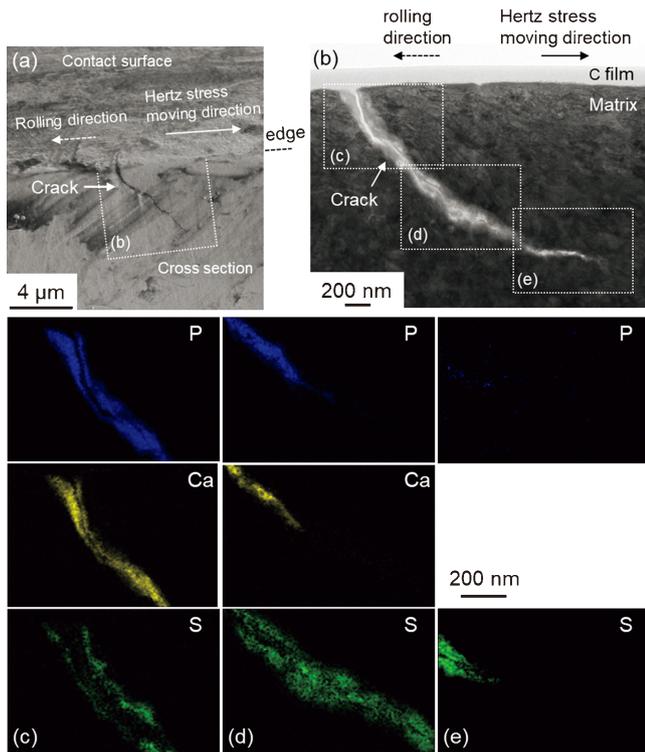


図13 SCM420浸炭焼入れ材に転がり接触疲労(8.2×10⁵回)で形成した表面き裂断面のSTEM-EDS分析：(a) 接触表面下断面解析位置，(b) STEM像，(c)-(e) P, Ca, S元素マップ図⁽³³⁾。(オンラインカラー)

な構成元素はトライボフィルムと同様にPやCa, Sである。これらの元素分布は非一様であり，Sはき裂先端および母材と化合物の境界部に偏析し，PとCaは，き裂面に沿って分布する⁽²⁴⁾⁽⁵³⁾。PとCaの分布はほぼ一致しており，これらはき裂面間の摩擦を駆動力に化合物を形成する⁽²⁴⁾⁽⁵³⁾。SはFe新生面との反応性が高く，き裂先端においてFeSを形成する⁽²⁴⁾⁽⁴⁴⁾⁽⁵³⁾。き裂内部に流入した潤滑油は，くさび効果によってモードIのき裂成長を促進し，き裂面に生じたPやCaの化合物はき裂面間の摩擦係数を低下して，モードIIのき裂成長を促進する⁽⁵²⁾。一方，この表面き裂は数μm程度の大きさであり，接触楕円と比べ小さい。このような場合，ヘルツ荷重の通過に伴いき裂は先端から閉口する⁽²⁴⁾ため，き裂内部に侵入した潤滑油は吐き出され，潤滑油の閉じ込めによるき裂成長は生じないと考えられる⁽⁵⁰⁾。

7. 転がり接触表面に形成したき裂の成長

前述の検討を踏まえ，転がり接触疲労の初期と後期に大別してピッチングき裂の発生および成長過程について整理してみる(図14)。転がり接触疲労初期のピッチングき裂は，転がり接触表面との為す角度が比較的小さく(20~30°)，多くの場合，それらは表面直下の塑性流動に沿って形成する⁽¹⁹⁾⁽⁵⁰⁾⁽⁵⁴⁾⁻⁽⁵⁶⁾。また，仮想き裂進展解析によると，摩擦係数 $\mu=0.05$ の条件下でせん断応力に起因して形成するピッチングき裂は，転がり接触表面と20~30°程度の角度を為して

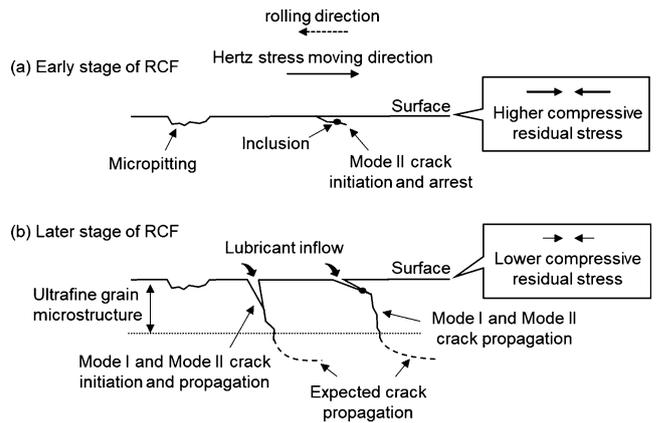


図14 転がり接触表面のき裂成長モデル⁽³³⁾。

形成する⁽⁵⁷⁾⁽⁵⁸⁾。さらに，転がり接触表面近傍には圧縮応力が付与されているため，せん断応力に起因して発生したモードIIき裂は開口せず，き裂面間の摩擦によって成長が妨げられる⁽⁵⁷⁾。これらの報告に基づけば，転がり接触疲労過程で形成したモードIIき裂は転がり接触表面と比較的低角度をなし，閉口して停滞する。すなわち，き裂は表面下で発生し，塑性流動に沿って成長した後，停滞，もしくは微小はく離してピットを形成する。

一方，転がり接触疲労後期では，圧縮残留応力の解放が進み，転がり接触表面下の内部応力は等方に近づく。転がり接触表面に形成するき裂角度は，主応力面によって決定されるとの仮説が提案されており⁽¹⁶⁾，実際に形成したき裂角度と算出された主応力面の角度は精度よく一致する⁽⁵⁾。すなわち，転がり接触疲労の進行に伴って主応力面の為す角度が増加し，形成するき裂角度は低角度から高角度に変化する。さらに，圧縮残留応力下で停滞していたモードIIき裂は，圧縮応力の解放に伴ってき裂面間に働く摩擦力が低下し，き裂成長しやすくなると考えられる。この時，き裂は転がり接触表面と比較的高い角度をなす。同時に，き裂内部に潤滑油が侵入しやすくなるため，上述のように油圧作用によるモードIおよびモードIIき裂の成長が促進され，モードIとモードIIの混合モードが支配的となる⁽³³⁾。

8. おわりに

転がり接触疲労の概要と評価法，材料組織変化やき裂形成について，研究室学生とともに取り組んだ検討内容を整理した。長年にわたり，産業界や機械およびトライボロジー分野の技術者・研究者らが中心となって転がり接触疲労の課題に取り組まれている中，2007年NEDOプログラム「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発」や2012年から継続している産学公連携プログラム「表面硬化部材の疲労損傷研究部会」を通じて，関係各位から軸受鋼や浸炭焼入れ鋼の転がり接触疲労と表面硬化処理を学ぶ機会をいただいた。その後，2022年に文部科学省データ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト「極限環境対応構造材料研究拠点」における耐疲労表面硬化材料課題，さらには日本熱処理技術協

