

3円筒転がり摩擦試験機を用いたギア鋼の耐ピッティング摩耗性の評価

Evaluation of Pitting Wear Resistance of Gear Steel Using Three-Disc Rolling Tribo-Tester

東理大・工(学) *吉岡 海人 東理大・工(学) 門前 鮎人 東理大・院(学) 大橋 遼太郎

東理大・院(正) 國井 卓人 東理大・工(正) 佐藤 魁星 東理大・工(正) 佐々木 信也

Kaito Yoshioka*, Hayato Monzen*, Ryotaro Ohashi**, Takuto Kunii**, Kaisei Sato*, Shinya Sasaki*

*Tokyo University of Science, **Graduate School of Tokyo University of Science

1. 緒言

世界的に電気自動車 (Electric vehicle: EV) の普及が加速する中で、航続距離延長のため EV の軽量化が求められている。特に、モータ・インバータ・減速機が一体となった e-axleにおいて、モータの小型・高回転化の両立を達成することが電費向上に有効であることが知られている。しかしながら、モータの高回転化により、e-axle 内の減速機歯車表面における接触回数が増加するため、更なる疲労摩耗の抑制が重要であると考えられる。特に、歯面の疲労摩耗の損傷形態の一種であるピッティングの発生は、機械の動作不良などの重大な故障につながる恐れがあると考えられており、e-axle の潤滑環境におけるピッティングの発生メカニズムの解明が求められている。

一般的に潤滑油は、基油と添加剤からなり、添加剤は基油の機能を補完するために用いられる。特に接触がシビアな潤滑状態においては、摩耗防止剤ならびに極圧剤と呼ばれる反応型の潤滑油添加剤がしゅう動の過程で固体表面と化学反応を生じ、トライボフィルムと呼ばれる薄い反応膜を形成することによって、摩耗および焼付きを抑制する働きをする¹⁾。しかしながら、e-axle 用潤滑油中におけるマイクロピッティングの発生ならびに成長メカニズムに関しては提案されていない。

本研究では、マイクロピッティングの発生/成長メカニズム解明を目的に、三円筒摩擦試験機を用いて、e-axle 用潤滑油下において転がりすべり条件の接触回数を変化させた疲労試験を行い、マイクロピッティングの発生/成長過程を調査した。

2. 実験概要

2.1 転がり疲労摩擦試験

転がり疲労摩擦試験には三円筒摩擦試験機 (MPT-3000, Rtec-Instrument, US) を用いた。Figure 1 に試験形態の概略図を示す。摩擦試験形態は、中央のローラが周囲のリングと三か所で接触する摩擦試験形態である。この試験形態を用いることで、中央のローラが周囲のリングと三点で接触し、疲労摩耗の加速試験が可能となる。また、すべり率は-5%とし、転がりすべり条件で試験を行い、ローラの周速がリングの周速よりも遅い条件で試験を行った。Table 1 に試験条件を示す。また、ローラとリングの試験片には、浸炭処理をした歯車鋼を用いた。

潤滑油には市販の潤滑油 (e-TRANSAXLE FLUID TE, TOYOTA, JP) を用いた。潤滑油の動粘度を粘弾性測定装置 (MCR302, Anton Paar, AT) を用いて測定し、60°Cで 6.88 mm²/s であった。潤滑油は下部のリングに触れるように満たし、リングによるかきあげによりローラとの接触部を潤滑した。

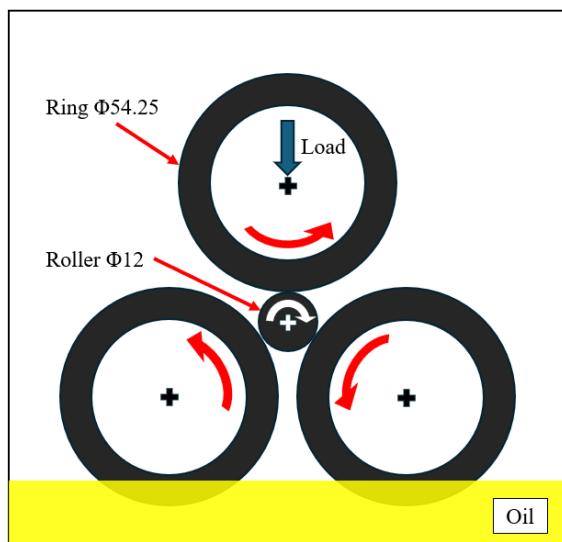


Fig. 1 Schematic diagram of triple-contact friction test

Table 1 Test conditions of MPT

Load	[N]	216
Maximum Hertzian pressure	[GPa]	1.33
Lubricant temperature	[°C]	60
Lubricant volume	[mL]	90
Entrainment speed	[m/s]	3.0
Slide-roll-ratio (SRR)	[%]	-5
Test duration	[min]	1, 5, 10, 30, 60, 90, 180
Contact cycle	[-]	1.4×10^4 – 2.6×10^6

2.2 転がり摩擦試験後の表面形状観察

光学顕微鏡 (VHX-8000, KEYENCE, JP) ならびに白色干渉計 (SMT-5000, Rtec-Instrument, US) を用いて、転がり疲労摩擦試験後のローラ表面画像を取得した。ローラ試験片の表面画像は各 4 か所ずつ測定した。表面粗さならびにマイクロピッキング深さは、画像解析ソフトウェア (MountainsMap, Digital Surf, FR) を用いて計測した。また、接触回数変化に伴う損傷領域の変化を調査するため、MountainsMap を用いて白色干渉計で取得したローラ表面画像に対して二値化を行い、しゅう動面全域に占める損傷面積割合 (Damaged Area Percentage : DAP) を算出した。その際、深さが約 1 μm であるクラックとそれよりも深いマイクロピッキングを区別できるよう、表面からの深さ 1.5 μm を基準にしきい値を設定した。

2.3 転がり摩擦試験後の摩擦面の断面形状観察

摩擦試験後のローラをワイヤ放電加工機 (AG400L, Sodick, JP) で切断し、樹脂で包埋して断面を研磨した後に走査型電子顕微鏡 (TM3030Plus, Hitachi High-Tech, JP) を用い、摩擦面のクラックとマイクロピッキングを観察した。

2.4 摩擦表面に生成したトライボフィルムの評価

X 線光電子分光分析装置 (KRATOS Nova, SHIMADZU, JP) を用い、Narrow スキャンを実施し、摩擦後表面におけるトライボフィルムの生成を確認した。また、トライボフィルムに含まれる各元素の割合を算出した。

3. 実験結果

3.1 ローラ表面観察結果

Figure 2 に、光学顕微鏡により取得された摩擦試験後のローラ表面画像を示す。摩擦試験前は、摺動方向に沿った研磨痕が観察された。この研磨痕は、 1.4×10^5 回までに除去され、平滑化していく様子が確認された。これは、なじみの進行を示している。接触回数 4.3×10^5 回においては、表面に青色の膜が観察された。また、 8.6×10^5 回以降では、マイクロピッキングと考えられる黒色の穴が複数確認され、接触回数 2.6×10^6 回では黒色の穴径が拡大し、表面全体が変色し荒れている様子が観察された。

3.2 画像解析による損傷評価

Figure 3 に接触回数に対する DAP の変化を示す。 4.3×10^5 回までは損傷面積割合が極めて小さいものの、 8.6×10^5 回以降で損傷面積割合が増加することが確認されたため、本実験の表面損傷は疲労摩耗に由来するものであると考えられる。Figure 4 に接触回数に対するマイクロピッキング深さの変化を示す。この結果から、マイクロピッキングの深さも接触回数とともに増加していくことが確認された。しかしながら、損傷面積割合の増加傾向とは異なり、 2.6×10^6 回において、マイクロピッキング深さは線形に増加せずに一定の値に近づいていく傾向が確認された。摩耗を評価するパラメータとして、算術平均粗さに着目し、接触回数との関係を調べた。Figure 5 より、 1.4×10^5 回までは表面粗さは減少し、 1.4×10^5 回から 2.6×10^6 回にかけては表面粗さが増加することが確認された。初期における表面粗さの低下は、トライボフィルムの生成やなじみが進行したためであると考えられる。また、 8.6×10^5 回以降において表面粗さが線形的に増加したのは、マイクロピッキングの発生面積率が徐々に増加したためであると考えられる。

3.3 ローラ断面観察結果

Figure 6(a)(b)に、接触回数 2.6×10^6 回におけるローラ断面画像を示す。Figure 6(a)から、ローラ試験片断面に、約 20° の角度を持つクラックの発生が確認された。クラックの先端部は、内部で平行となった後に、表面方向に伸びていることがわかる。Fig. 6(b)から、表面が欠けて穴状になっているものが確認された。これは、Fig. 6(a)のクラックが進展し、クラック上部もしくは先端部が脱離することで、マイクロピッキングが起こったものと考えられる。

3.4 ローラ表面元素割合の測定結果

Figure 7(a)(b)に、XPS により取得したリンとカルシウムの濃度割合の変化を示す。しゅう動初期からリン、カルシウム由来のトライボフィルムの存在が確認された。上田らは、ジアルキルジチオリン酸亜鉛添加油中で、転がり摩擦試験を行った結果、表面反応膜の生成により摩耗が抑制され、ピッキングの発生が顕著に表れるこことを報告している⁽²⁾。今回の実験の系においてもトライボフィルムの生成が摺動初期におけるすべり摩耗を低減し、ピッキングの発生を促進したものと考えられる。

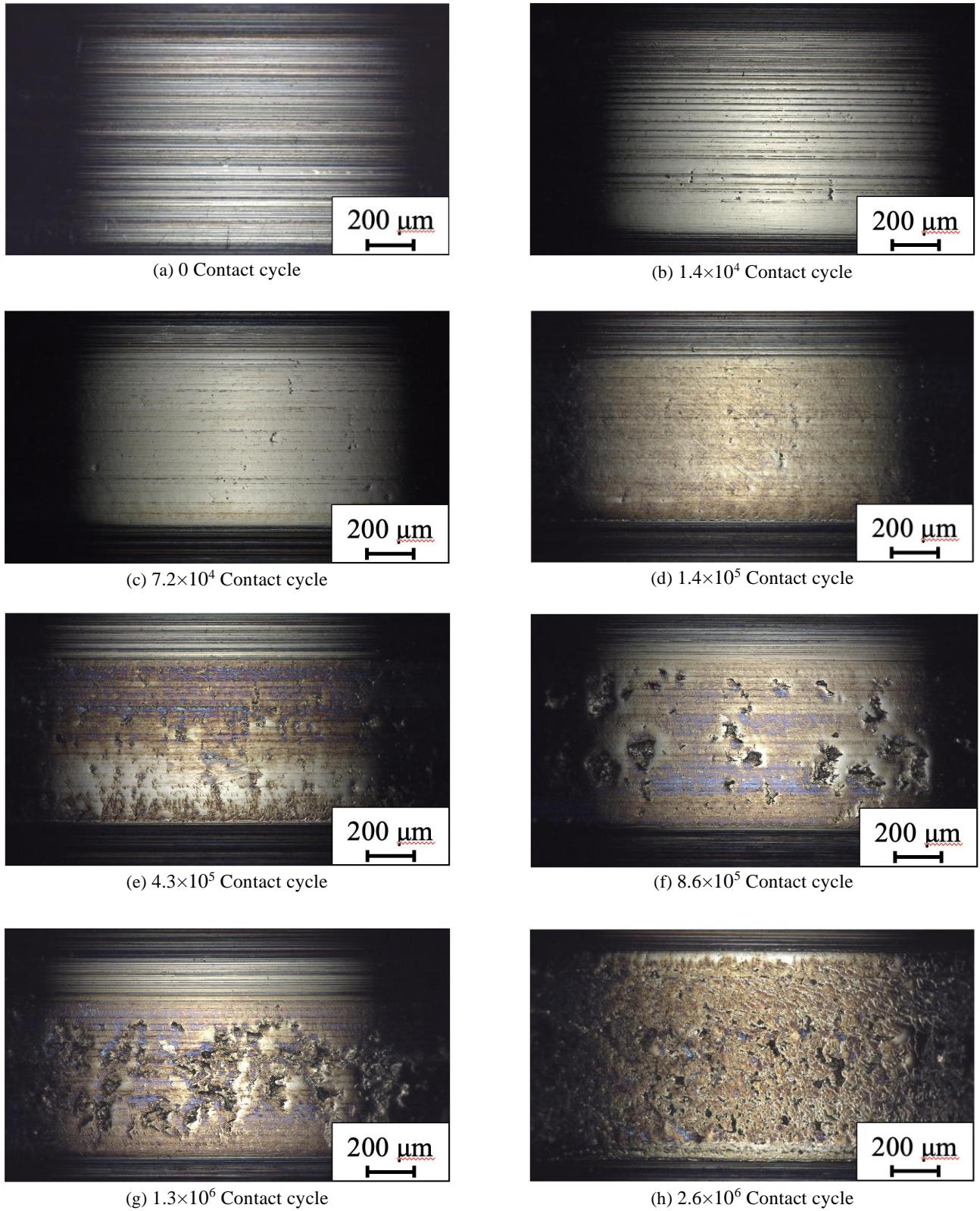


Fig. 2 Optical microscope images of sliding surfaces

4. 考察

Figure 8(a)に、本実験の摩擦力の作用方向を示す。本実験のすべり率は-5%であり、ローラの周速がリングの周速よりも低いため、ローラ表面には回転方向と同方向に摩擦力が働く。Figure 6 (a) (b)から、摩擦力の方向と反対方向にクラックの進展が観察されたため、摩擦力が表面の微細な損傷に対して作用し、開口部を広げることでクラックの進展を促したものと考えられる。Figure 5より、接触回数43万回から表面粗さが増加しているため、クラックが進展する起点となった微細な溝は43万回付近で生じたと推察される。上田らは、表面に働く摩擦力が大きいほどクラックが進

展する角度も大きくなると報告している⁽³⁾。本実験では約20°の角度を持つクラックが多く観察されたが、今回の実験条件によって発生した摩擦力に起因すると考えられる。Holloxらは、転がりすべり接触によって深さ方向に残留引張応力が発生し、この引張応力によってクラックが表面と平行に進展すると報告している⁽⁴⁾。本実験においても、クラックが表面と平行方向に進展する様子が確認され、引張応力がクラックの進展に寄与していると考えられる。Figure 8(b)に本実験結果より得られたマイクロピッティング発生メカニズムを示す。Rycerzらは、Fig. 8(b)の破線で示すように、分岐したクラックが表面に到達することで破片が脱離し、マイクロピッティングを形成すると報告している⁽⁵⁾。よって、以上の過程を経てクラックは進展し、母材から剥離した部分の一部が欠落することでマイクロピッティングに至ったものと考えられる。

5. 結言

三円筒摩擦試験機を用い、e-axle用潤滑油下において、転がりすべり摩擦面におけるマイクロピッティングの発生メカニズムを調査した結果、以下の知見を得た。

- (1) ローラ試験片の摩擦後の断面画像から、クラックは約20°の角度を持って進展し始め、表面と平行になったのちに表面へと向かう方向に進展する様子が確認された。このことから、マイクロピッティングは、クラックが進展した後に、表面の一部がはく離することで、発生したものと推察される。
- (2) クラックの進展には表面に作用する摩擦力が関与していると考えられ、引張応力が開口部を広げる働きをすると推察される。
- (3) 接触回数増加に伴い、マイクロピッティングは増加することが確認された。一方、マイクロピッティング深さは、一定値に近づいていく傾向が確認された。これは、クラックの進展挙動に起因と考えられる。

文献

- 1) 佐々木・志摩・野口・平山・地引・足立・三宅：はじめてのトライボロジー 初版、講談社 (2013) pp 68-70.
- 2) Mao, U., Hugh, S., Amir, K., In-situ observation of the effect of the ZDDP tribofilm growth on micropitting, Tribology International, Vol. 138, (2019), pp. 342-352.
- 3) Mao, U., Benjamin, W., Hugh, S., Amir, K., The effect of friction on micropitting, Wear, (2022), pp. 488-489
- 4) 柴田・吉田・相原・似内・対馬：転がり疲れに及ぼす各種要因の影響 トライボロジスト, 第39巻, 第8号, (1994), pp. 698-708.
- 5) Pawel, R., Andrew, O., and Amir, K., Propagation of surface initiated rolling contact fatigue cracks in bearing steel, International Journal of Fatigue, Vol. 97, (2017), pp. 29-38.

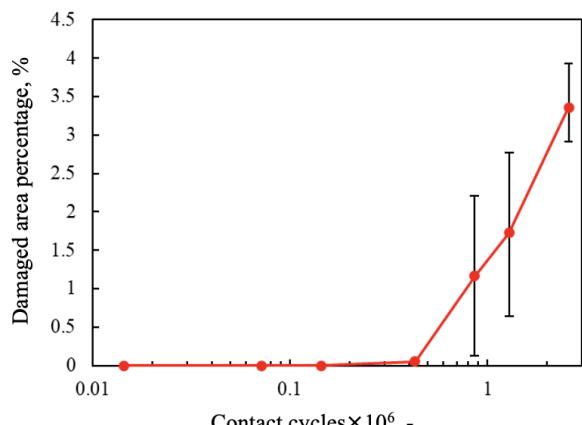


Fig. 3 Development of DAP

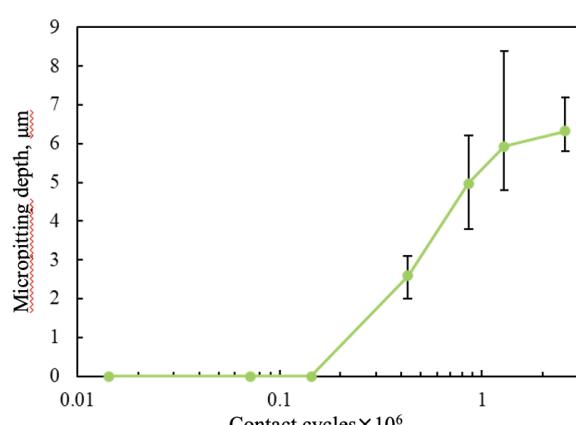


Fig. 4 Development of micropitting depth

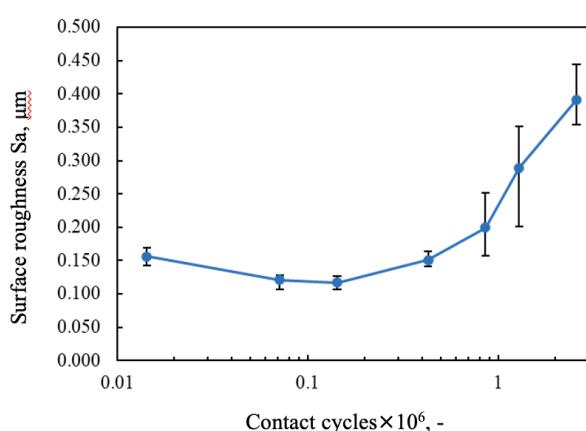


Fig. 5 Development of surface roughness

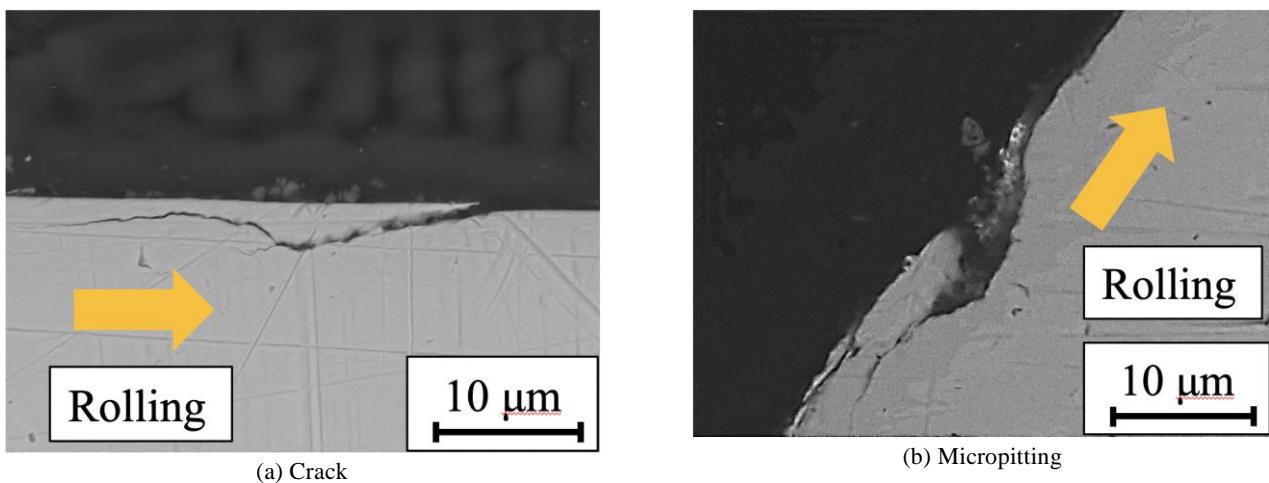


Fig. 6 Cross sectional images of the roller at 2.6×10^6 contact cycle

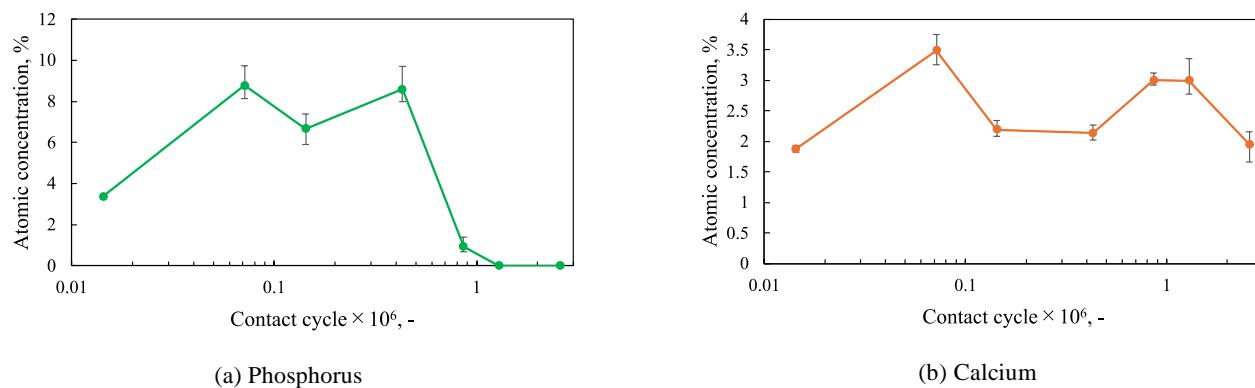


Fig. 7 Development of atomic concentration

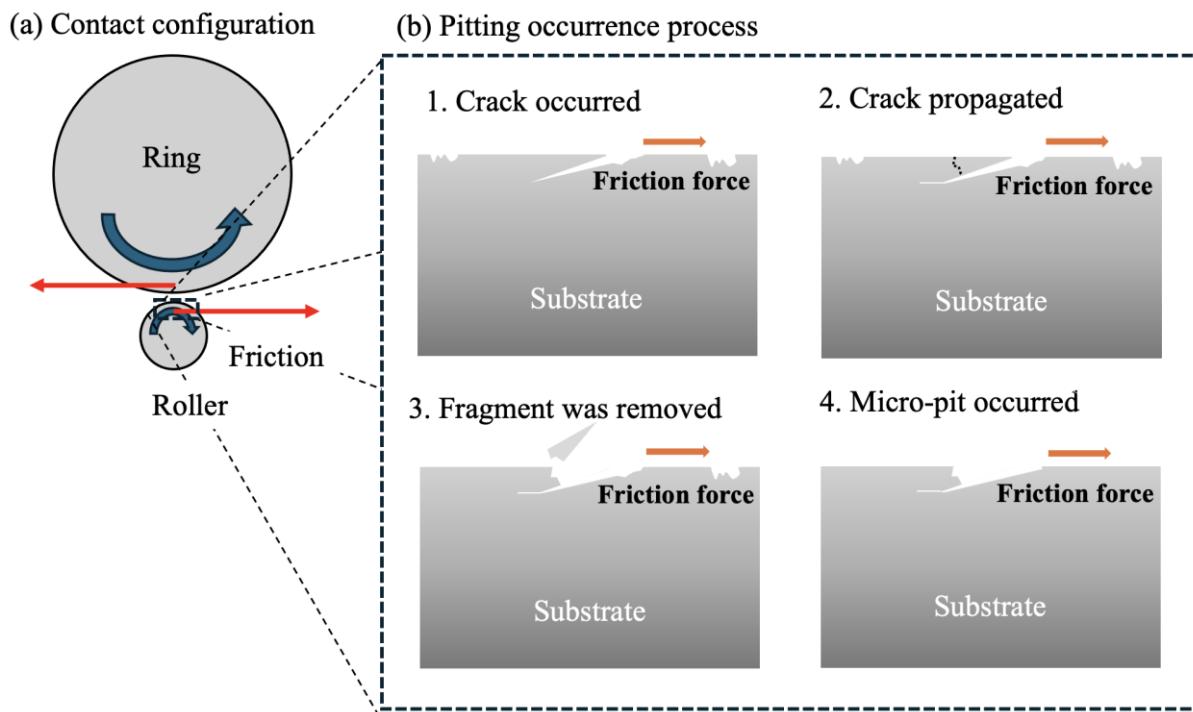


Fig. 8 Schematic images of crack propagation