

給油条件がトラクションローラの冷却効果に及ぼす影響に関する実験的検討

Experimental Study on Cooling Effect of Traction Roller on Oil Supply Conditions

東海大・工（学）*平 勇人 東海大・工（正）落合 成行

東海大・工（学）遠藤 大地 東海大・工（学）朴 峻希

Hayato Taira*, Masayuki Ochiai**

Daichi Endo*, Shunski Boku*

*Graduate School of Tokai Technology, **Tokai University

1. 緒言

近年、環境問題への意識の高まりや、ゼロエミッション規制を受けて電気自動車に対する需要が高まっている。現状の電気自動車の課題としてバッテリーのエネルギー密度の関係から内燃機関車と比較して航続距離が短いことが挙げられる⁽¹⁾。これに対し、バッテリーそのものの改良だけでなく、動力源であるモータを高速回転で運転することにより、高効率化、小型軽量化し、航続距離を増加させることが検討されている⁽²⁾。モータを高速回転で運転させる場合、モータとタイヤの回転数の差が大きくなるため、現状よりも高回転の減速機を用いる必要がある。一般的に減速機には歯車を用いられるが、歯のかみ合いにより動力伝達を行う構造上、より高速の運転環境においては歯面の摩耗および振動や騒音がより深刻なものとなる懸念がある。またこの他にも、給油された潤滑油が歯面に届き難くなる⁽³⁾ことや、攪拌抵抗の増大も生じる。これらの問題を解決する方法として、トラクションドライブ方式による減速機が注目されている。

トラクションドライブは、転動体同士の接触で生じる弾性変形域内において、内部に介在する潤滑油に高圧が加わる状態(以下、EHL)を利用した動力伝達手段である。これにより被駆動側の転動体が回転したときに、接触部の EHL 油膜に伝わるせん断力で被駆動側に動力を伝えることが可能となる。以上のような原理から、滑らかに動力を伝達することが可能なため、歯車に比べて高速化モータとの組み合わせに適していると考えられる。このトラクションドライブにおいては、動力伝達時に EHL 油膜に生じるせん断発熱により接触部温度が上昇し、最大トラクション係数が低下することが知られている⁽⁴⁾。この時の接触部温度の上昇については、ローラ表面の温度の影響が無視し得ない⁽⁵⁾⁽⁶⁾。実際にローラ表面温度とトラクション係数の同時測定から、ローラ表面温度の上昇によりトラクション係数が低下するという実験結果が報告されている⁽⁶⁾。以上を踏まえると、ローラ表面温度の上昇はトラクション係数の低下を招き、トラクション伝動が損なわれることが懸念される。

このことから、トラクションドライブにおいて、ローラ表面の冷却は極めて重要度が高いと言える。一般的な冷却方法としては、接触部に対する潤滑油の給油量を増加させることが挙げられるが、この手法には環境負荷やポンプ容量の問題がある。これに対し、宮島らは接触部に対する給油方向に着目し、給油量が一定のまま冷却効果が向上する条件について熱流体解析を用いて検討を行った⁽⁷⁾。その結果、給油方向においては、回転方向と給油方向が同じ向きである「かみ合い」潤滑と比較して、回転方向と給油方向が逆向きになる「かみ外れ」潤滑の方が冷却効果が高いことを確認している。その理由として、接触部周辺の流体挙動の違いを上げており、「かみ外れ」潤滑では、給油された潤滑油が接触部後方から当たることにより、接触部の発熱を吸収しやすくなると考察している。しかし、上記の研究においては、解析による検討にとどまっており、実機による流体挙動の可視化など、実験的な検討は行われていない。これまでに、転がり接触部周辺の流体挙動の特性について検討を行った事例はいくつか見受けられるが⁽⁸⁾⁽⁹⁾、いずれも実用的な運転環境と比較して非常に低周速であり、流体挙動と冷却の関係を実験的に検討した事例は見受けられない。

以上の背景より本研究では、既存の研究よりも大幅に高速の運転環境下において給油条件を変更した場合のローラ表面の冷却

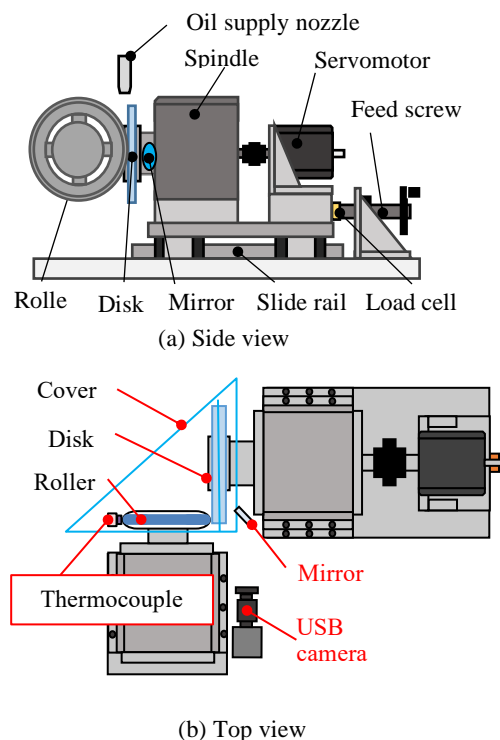


Fig.1 Experimental device

効果の違いを確認することを目的とした。ローラ表面の温度測定については、当研究室が所有する、高荷重かつ高周速の運転環境を再現できるトラクション実験装置において、ローラ表面に熱電対を当てることにより測定することとした。また、給油条件ごとの流体挙動とローラ表面温度の関係性を検討するために、接触部を可視化するためのカメラを設置して、温度測定と同時に撮影を行った。

2. 実験装置

Figure 1 に本研究で用いた実験装置の概略図を、Figure 2 に給油機構の外観写真を示す。Figure 1 中(a)は装置の側面図を、(b)は上面図を示している。ローラの直径は 192mm で、幅方向の曲率半径は 25.4mm である。ローラの材質にはクロムモリブデン鋼を使用し、表面に鏡面仕上げを施した。ディスクの直径は 200mm、厚さは 15mm であり、材質には、高強度かつ光の透過率が高いサファイアガラスを使用した。ディスクとローラはそれぞれ独立したモータ駆動機構により回転し、接触半径が等しくなるように直交に接触させている。ディスク側の回転機構はスライドレール上に設置されており、後方の送りねじにより、荷重を調整しながらディスクをローラに押し付けることが可能である。

トラクション油の給油については、Fig. 2 に示すように、ポンプと接続した配管をトレーと接続することで潤滑油を循環させている。また、配管内の途中にインバータで設置するとともに、配管の先端に異なる内径の給油ノズルを装着することで任意の給油量及び流速条件を設定することを可能とした。また、給油ノズルは、接触部上部に固定することで、接触部への直接的な給油を行っている。

本実験装置においては、高荷重条件下でも回転軸の曲げ変形が抑えられるようにスピンドル軸直径が大きく設計されている。この構造上、接触部のメニスカスを油膜面に対し垂直の方向（以下、油膜厚さ方向と称す）から直接撮影することは困難である。そこで、Fig.1(b)のようにローラ側のスピンドルの横に撮影用の USB カメラを、ディスクの裏側に全反射鏡を設置することで、接触部を撮影することを可能としている。

3. 温度測定法

Figure 3 に温度測定のレイアウトを示す。本実験装置は大型のため、転動体の接触による温度上昇が飽和するまでに非常に長い時間を要することとなる。そこで、一定時間ローラ表面の温度を測定して、その間における温度推移と温度上昇量を評価することとした。

Table 1 に温度測定条件を示す。本実験では、接触部における摺動により発熱させるために、ディスクとローラの滑り率が 10% になるように周速の値を設定した。測定時間については、上記の通り、転動体の熱容量が大きいので、接触させてから温度上昇の推移が経過時間に対して比例的となる 1 時間後まで測定することとした。

給油条件については、給油ノズルの位置、潤滑方向および給油の流速を変更した。Figure 4 に給油位置の条件を示す。給油ノズルの位置については、同図(a)の接触面から 4 mm 程ずらした状態である給油位置①と同図(b)の 2mm ずらした

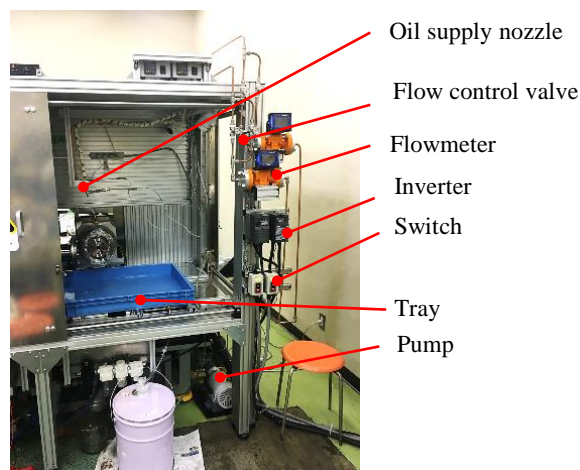


Fig. 2 Oil supply mechanism

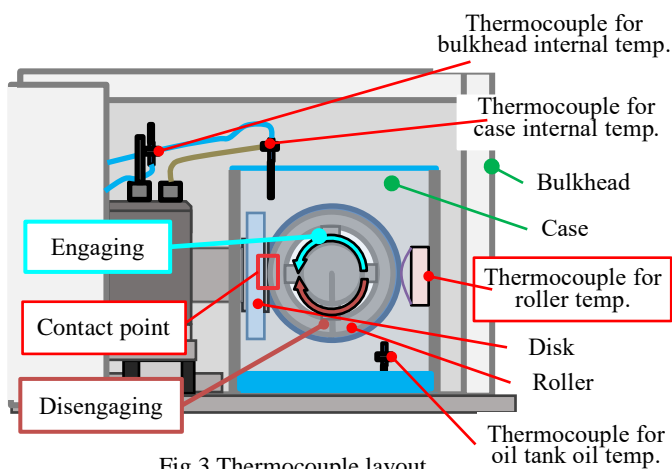
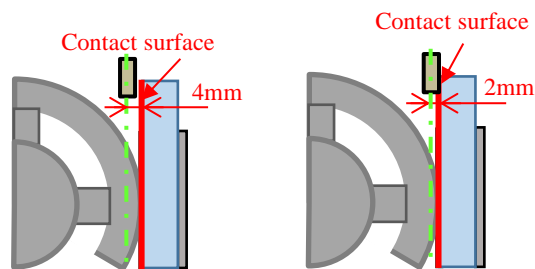


Fig.3 Thermocouple layout

Table 1 Temperature measurement conditions

Oil supply nozzle	①	②	③
Inner diameter of nozzle, mm	3.5	2.5	2.0
Oil flow velocity, m/s	0.87	1.70	2.65
Oil supply amount, L/min	0.5		
Oil temperature, °C	25		
Disk peripheral velocity, m/s	20		
Roller peripheral velocity, m/s	18		
Load, N	1000		



(a) Oil supply position ① (b) Oil supply position ②

Fig.4 Oil supply position

状態の給油位置②の二つで比較を行った。また、潤滑方向については、Fig.3 に示すように「かみ合い」と「かみ外れ」の2種類の潤滑条件で実験を行った。給油流速については、Table1 に示す通り、内径 3.5 mm、流速 0.87m/s のノズルを基準として、流速が2倍および3倍になる内径のノズルを用いることとした。上記のように、給油条件のパラメータは複数になるため、まず流速 0.87 m/s の流速の条件で、給油位置および潤滑方向を変更した場合の温度測定を行った。その後、効果的な冷却が確認された方の給油位置の条件で、流速および潤滑方向を変更した場合の温度を測定することとした。

4. 給油位置と回転方向ごとの温度測定結果

Figure 5 に給油位置と潤滑方向ごとの温度測定結果を、Figure 6 に 60 分測定後のローラ表面温度の上昇量を示す。各図の丸数字は Fig.4 の給油位置の数字と対応する。

まず Fig.5 に注目すると、給油条件ごとの温度差は接触してから 20 分の間に大きく差がついており、「かみ合い」と比較して「かみ外れ」の方が温度上昇量は大幅に低くなっている。更に給油位置による温度の違いとしては、給油位置①と比較して給油位置②の方、すなわち接触部近くに潤滑油を当てる方が、いずれの回転方向においても温度が低くなっていることがわかる。Figure 6 に示す最終的な温度上昇量を見ても、「かみ合い」、「かみ外れ」の温度上昇量には 5 度前後の差が生じるとともに、給油位置②の方が、わずかではあるがローラ表面温度が低下しているのがわかる。

Figure 7 に給油位置と回転方向ごとの接触部の可視化結果を示す。Fig. 7 において、赤枠は接触部の予想位置を、赤の矢印は転がり方向を、オレンジ線はメニスカスの形状を、青の点線は給油された潤滑油の接触部に対する最接近点を示す。

同図(a),(b)より、(a)「かみ合い」においては、給油された潤滑油が接触部後方で二股に分かれているが、(b)「かみ外れ」では、接触部後方の二股に分かれた領域に潤滑油が当たった後に給油される様子が見てとれる。

一方、同図(c),(d)より、給油位置を接触面に近づけた②の場合、(c)「かみ合い」、(d)「かみ外れ」のいずれもメニスカスが大きく形成されており、多くの潤滑油が接触部周辺に供給されていると考えられる。

これを踏まえて、Fig. 8 に給油条件ごとの潤滑油の挙動の考察図を示す。図中において、肌色の楕円は接触部を、紺色の領域はメニスカスを、青色の領域および矢印は給油された潤滑油とその挙動を、赤色の領域は接触部通過後の高温部を、赤の矢印は転がり方向を示す。

トラクションドライブにおいては、接触部を通過後のローラ表面は高温になっていると考えられる。潤滑方向ごとの冷却の違いについては、同図(a)に示すように「かみ合い」においては接触部後方の高温部に潤滑油が回り込まないため、接触部で生じた熱がローラに蓄積する。一方、(b)に示す「かみ外れ」においては、高温部に潤滑油が当たるため、潤滑油がローラ表面の熱を吸収して飛散したものと考えられる。

給油位置の影響については、同図(c)に示すように給油位置②の方が接触部近くに潤滑油が入り込むため、より発熱源の近くで吸熱を行ってから飛散することになる。このため、温度抑制が出来たものと考えられる。「かみ外れ」においては、よりすき間の狭いところまで潤滑油が侵入することで転動体の回転の影響を受けるため、転がり方向へ向けて潤滑油が戻されるものと考えられる。

以上のように、給油位置が近い方において高い冷却効果が確認されたため、次に給油位置②の条件で流速を変更した場合のローラ表面の冷却効果について検討した。

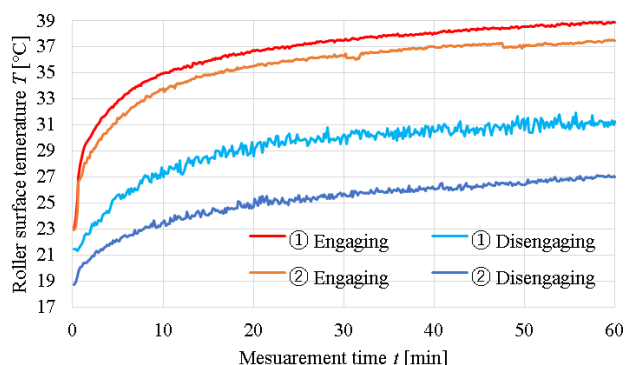


Fig.5 Temperature measurement results for each lubrication position and lubrication direction

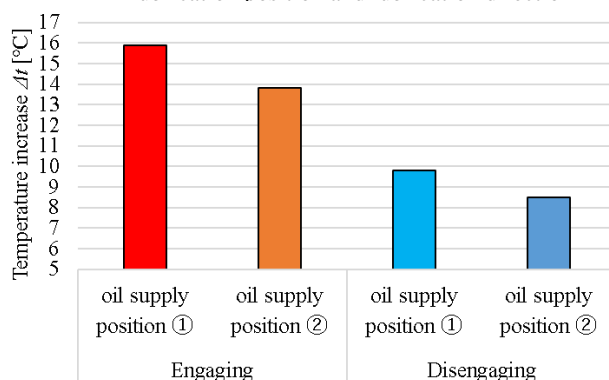
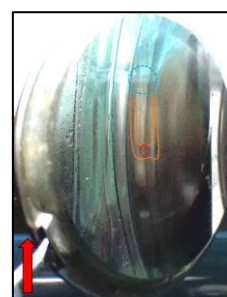


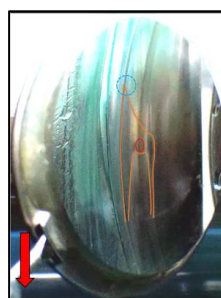
Fig.6 Amount of increase in roller surface temperature during measurement



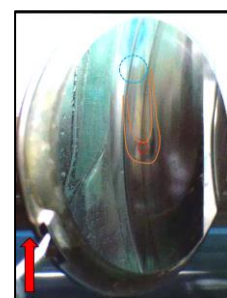
(a) Engaging, Position ①



(b) Disengaging, Position ①



(c) Engaging, Position ②



(d) Disengaging, Position ②

Fig. 7 Visualization Results

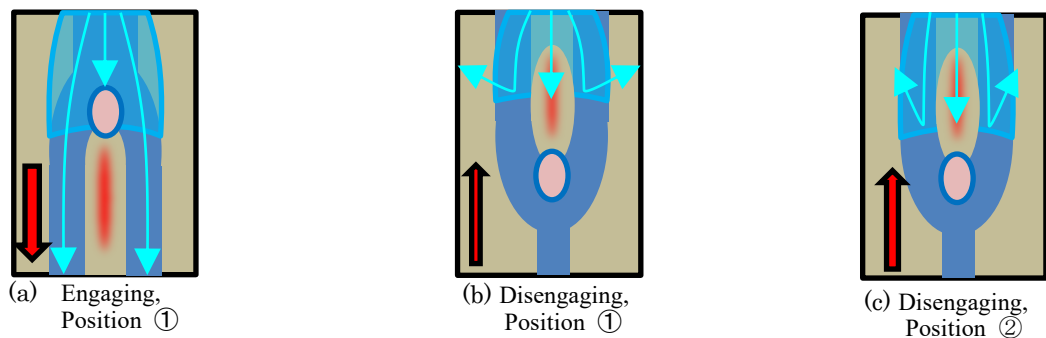


Fig.8 Lubricating oil behavior for each lubricating conditions

5. 給油流速と回転方向ごとの温度測定結果

Figure 9 に流速を変えた際の各潤滑条件における 60 分後の温度上昇量を示す．同図より，「かみ合い」において流速を増加させた場合，若干上昇傾向にあるのに対し，「かみ外れ」においては，流速を増加させた場合，温度上昇量が低下しているのがわかる．この理由について，以下のように考察した．

Figure 10 に流速と潤滑方向ごとの可視化結果を示す．同図(b)を見ると，Fig. 7(d)と比較して潤滑油の接触部への接近点が近づいていることがわかる．このことから Fig.8(c)で示したように，給油された潤滑油が接触部に近づいたことでローラ表面との温度差が大きくなり，吸熱効率が上がったのではないかと考えられる．一方，Fig.10(b), (d)を比較すると，流速が増加しても潤滑油の接近点が近づいていないことがわかる．これは，接触点に向けてローラ・ディスク間のすき間が次第に狭くなり，油が入り難くなるためではないかと考えられる．

以上より，給油位置や給油方向，給油流速の変更によりローラ表面の冷却効果が変化することが確認された．

6. 結言

本研究ではトラクションドライブの性能において悪影響を及ぼすと考えられるローラ表面の温度上昇を抑制するために，接触部への給油条件を変更することで冷却効果を向上可能か検討した．さらに接触部周囲の油膜流れの可視化を実施し，その理由について考察した．得られた知見を以下に示す．

- 1) 給油方向が「かみ外れ」の条件において，運転中のローラ表面温度上昇が著しく抑制されることが確認された．これは「かみ外れ」潤滑では，接触部を通過して高温になったローラ表面に給油された油が直接当たることによってローラ表面の熱が潤滑油に吸熱されるとともに，その後の油の飛散によってローラの外部に熱が移動するためと考えられる．
- 2) 給油位置を接触部に近づけることにより，ローラ表面の冷却効果が高まることが確認された．これは発熱源である接触部に近い位置で給油されるため，ローラ表面との温度差が開き，吸熱効率が上がることによると考えられる．
- 3) 「かみ外れ」潤滑において，給油流速が上がると冷却効果が向上することが確認された．これは，

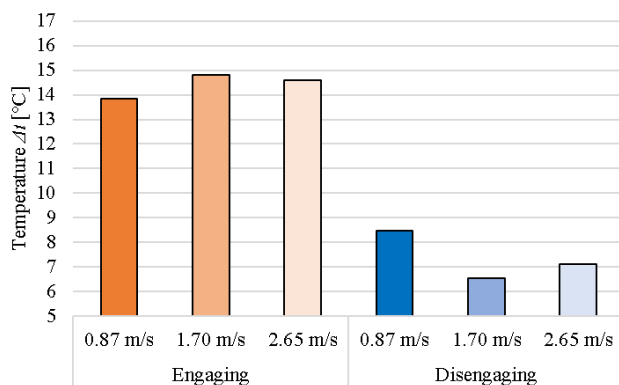


Fig.9 Amount of increase in roller surface temperature during measurement

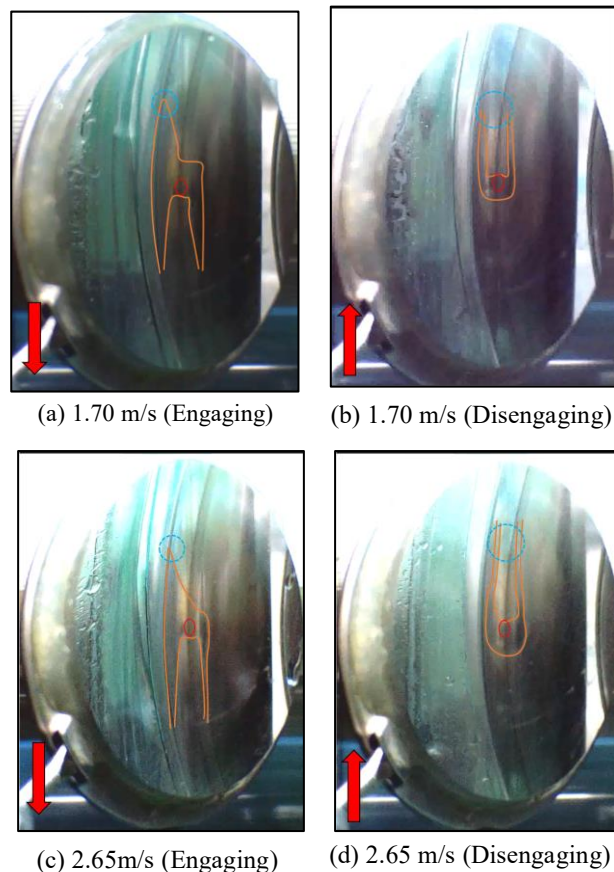


Fig.10 Visualization Results

給油流速の上昇と共に接触部近くまで給油された油が侵入するようになり、温度差が大きくなるためと考えられる。しかし、ローラ・ディスク間のすき間の関係上、給油流速を更に上げても接触部にそれ以上近づけることが難しくなり、流速上昇による冷却効果には限界もあると考えられる。

謝辞

本研究は、2021 年度の自動車用動力伝達技術研究組合 (TRAMI) の委託/共同研究により実施したものです。ここに謝意を申し上げます。また、本研究を進めるにあたり、潤滑油および潤滑油の諸元を提供して下さった出光興産株式会社に感謝申し上げます。

文献

- 1) 寺谷：自動車(EV, PHEV)の 25 年後，九州大学学位論文,電学誌，134,2 (2014)68 - 71.
- 2) 板垣：電気自動車駆動用モータの高速化に資するトラクションドライブ技術，トライボジスト，65，3，(2020) 132-139.
- 3) 鈴木・堺・酒井・原：高速回転歯車の潤滑に関する考察(第 1 報)―歯面における潤滑油の挙動と気流の関係―，自動車技術会，2022 年春季大会学術講演会公演予稿集.
- 4) 佐野：トラクションドライブ式 CVT の動力伝達接触部温度推定技術，トライボロジスト，59，11 (2014) 701-707.
- 5) 佐野：トラクション係数推定に関わる温度とレオロジーモデルの解釈，日本機械学会論文集，82，844，(2016) 1-13.
- 6) H. Itagaki, H. Hashiguchi, M. Kita & H. Nishii : Development of a High-Power Traction Tester and Measurement of Traction Curves, Tribology online, 11, 6, (2016) 661-674.
- 7) 宮島・落合・板垣浩文・大濱和正：トラクションドライブにおける熱流体解析を用いた潤滑油の給油方法の違いによる冷却効果の検証，トライボロジー会議 2021 秋 松江 予稿集
- 8) 野木：再流動を考慮した油量不足状態の点接触 EHL 解析，トライボロジスト，59，4 (2014) 239.
- 9) J.Pemberton, & A.Cameron: A Mechanism of Fluid Replenishment in Elastohydrodynamic contacts, Wear, 37, (1976), 185.