

# PIV を利用した EHL 接触部周囲の油膜における圧力推定手法の検討

## Study on Pressure Estimation Method for Oil Film around the EHL Contact Part in Utilizing PIV

東海大・工（学）\*平 勇人, 東海大・工（正）落合 成行

Hayato Taira\*, Masayuki Ochiai\*\*

\*Graduate School of Tokai University, \*\*Tokai University

### 1. はじめに

現代社会では、転がり軸受やトラクションドライブのような転がり接触を利用した装置が多く存在する。これらの装置の転がり接触部は、弾性流体潤滑（以下、EHL と称す）状態となっているが、さらにその周囲では余分な潤滑油によって油膜およびキャビテーションが形成されており、EHL 接触部の潤滑状態に影響を与えていると考えられている。例えば、転がり軸受のように複数の接触部が並ぶ環境では、キャビテーションの転がり方向の長さ（以下、キャビテーション長さと呼ぶ）が変化した場合、キャビテーションと接触部が重なり油量不足になる危険性がある<sup>1)</sup>。また、運転条件によっては、油膜後部が破断するが、この場合ころがり面における潤滑油の量が極端に減少すると考えられる<sup>2)</sup>。以上より、EHL 接触部周囲の油膜形状の特性について解明する必要性が高いといえるが、既存の研究では低荷重または低周速の運転条件で実験が行われていることが多く、高荷重かつ高周速における特性については解明がなされていない。これに対して、著者らは既存の研究よりも高荷重・高周速の条件における転がり接触部を再現し、油膜の観察を行ったところ、キャビテーション長さは周速に応じて増加するだけでなく減少に転じること、油膜後部から大気が吸引されることで油膜破断が起きることが確認された<sup>3)</sup>。これらの現象は、油膜内の圧力分布と関係していると考えたが、実際の油膜内の圧力分布との関係性については確認されていなかった。

そこで本研究では、EHL 接触部周囲の油膜の圧力分布を評価する手法について検討することとした。圧力測定の手法として、まず薄膜センサや感圧塗料による圧力測定について検討した。しかし、薄膜センサによる測定の場合、二次元の圧力分布を求めることや細かい圧力の変化を捉えることが困難と考えられた。また感圧塗料の場合、液体で満たされた環境においての適用が困難である。そこで、PIV 解析により得られた流速分布の値を用いてナビエ・ストークス方程式およびポアソン方程式を解いて圧力を求める手法について検討した<sup>4)</sup>。本手法では、計算範囲内において PIV 解析結果により流速分布を求めることができれば油膜圧力の算出が可能となるため、様々な研究で適用が試みられている。著者の過去の実験<sup>3)</sup>より、EHL 接触部周囲の油膜流れは比較的整った流れであることがわかっており、また油膜厚さは薄いことから油膜厚さ方向の速度勾配は無視し得るため、この手法の適用は可能であると考えた。

本研究では、まず周速を変更した場合の EHL 接触部周囲の油膜の可視化実験を行うことで、各条件における油膜内の流速分布を求めた。次に、PIV 解析より得られた流速分布を用いて転がり接触部周囲の油膜内の圧力分布を算出し、油膜形状の変化と油膜内の圧力分布との関係性について考察した。

### 2. 実験方法

Figure 1 に本実験で用いた実験装置の概略図を示す。金属ローラの直径は 192mm で、幅方向の曲率半径は 25.4mm である。ローラ表面には、鏡面仕上げを施している。サファイアガラス製のディスクの直径は 200mm、厚さは 15mm である。ディスクとローラは接触半径が等しくなるように直交に配置されており、ディスク側の回転機構の後方にある送りねじにより押し付け、接触させることが可能である。トラクション油は、接触部上方に設置した給油ホースにより供給される。

本実験装置においてはスピンドルが大型のため、ディスクの裏側に全反射鏡を設置することで、油膜を撮影することを可能とした。また、油膜全体を可能な限り均等な光量で可視化するために、接触部に対し約 45 度の方向から白色 LED を照射するようにした。

Table 1 に実験条件を示す。本実験では潤滑油として KTF-1 を使用し、中空ガラス粒子を混合させることで油膜流れの可視化および PIV 解析を行った。Table 1 に示す KTF-1 の粘度、密度、動粘度、圧力粘性係数は、給油条件である油温 40℃における値である。本実験では、周速条件の変更による油膜内の流速分布の変化を確認するために、純転がりの状態で転動体の周速を 0.1 m/s から 1.6m/s まで 0.1 m/s ずつ増加させて可視化および PIV 解析を行った。

本実験において、EHL 接触部周囲の油膜は薄く、かつ両転動体が回転しているため、油膜厚さ方向の流体の速度勾配は無視し得ると考えられる。すなわち、油膜内の流れは二次元的であると扱えるため、ナビエ・ストークス方程式は以下

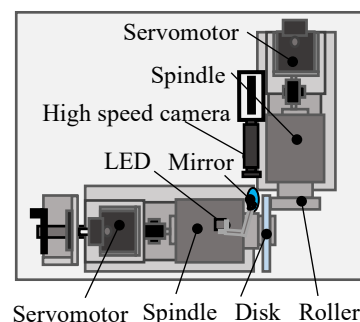


Fig. 1 Schematic of experimental device equipment

Table 1 Experimental condition

Viscosity $\mu$ , Pa · s	0.034
Density $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	945
Kinematic Viscosity $\nu$ , mm <sup>2</sup> /s	36.1
Pressure Viscosity Exponent $\alpha$ , GPa <sup>-1</sup>	25.9
Peripheral speed $V$ , m/s	0.1~1.6
Pressure $W$ , N	1000

のようになる。

$$\left(\frac{\partial P}{\partial y}\right)_{i,j} = \rho \left\{ g + v \left( \frac{v_{i+1,j} - 2v_{i,j} + v_{i-1,j}}{\Delta X^2} + \frac{v_{i,j+1} - 2v_{i,j} + v_{i,j-1}}{\Delta Y^2} \right) - \frac{u_{i,j}(v_{i+1,j} - v_{i-1,j})}{2\Delta X} - \frac{v_{i,j}(v_{i,j+1} - v_{i,j-1})}{2\Delta Y} \right\} \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_{i,j} = \rho \left\{ v \left( \frac{u_{i+1,j} - 2u_{i,j} + u_{i-1,j}}{\Delta X^2} + \frac{u_{i,j+1} - 2u_{i,j} + u_{i,j-1}}{\Delta Y^2} \right) - \frac{u_{i,j}(u_{i+1,j} - u_{i-1,j})}{2\Delta X} - \frac{v_{i,j}(u_{i,j+1} - u_{i,j-1})}{2\Delta Y} \right\} \quad (2)$$

なお、(2)式において、潤滑油は転がり方向に重力が加わるため、外力として重力 $g$ を考慮している。また、圧力 $P$ に関するポアソン方程式は、以下のように表される。

$$P_{i,j} = \frac{1}{4}(P_{i+1,j} + P_{i-1,j} + P_{i,j+1} + P_{i,j-1}) + \frac{\Delta X}{8} \left\{ \left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_{i-1,j} - \left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_{i+1,j} \right\} + \frac{\Delta Y}{8} \left\{ \left(\frac{\partial P}{\partial y}\right)_{i-1,j} - \left(\frac{\partial P}{\partial y}\right)_{i+1,j} \right\} \quad (3)$$

式(3)における $\partial P/\partial x$  および  $\partial P/\partial y$  には、式(1), (2)で得られた値をそれぞれ代入する。本計算では、ヤコビ法を用いた反復計算により圧力を算出している。

今回の計算で用いる油膜の領域内において、キャビテーションの前部に EHL 接触部が存在すると考えられるが、接触部前方の領域との圧力は連続的であると仮定し、その値を代入することとした。また、油膜内で形成されるキャビテーションは気体性と考えられることから、大気圧の値 (100 kPa) で固定することとした。

### 3. 実験結果

Figure 3 に PIV 解析結果を、Fig. 4 に圧力分布の算出結果を示す。Figure 3 において、寒色は低速の領域を、暖色は高速の領域を示す。また Fig.4 において縦軸は転がり方向の位置を、横軸は幅方向の距離を示す。各図の青枠の領域は EHL 接触部の境界を、赤枠はキャビテーションが存在する領域を示している。まず Fig.3 に示す PIV 解析結果を見ると、周速条件が高速になると油膜全体の流速は増加するが、キャビテーション後方では著しく低速になるなど、同じ油膜内での流速違いが顕著になることがわかる。一方、Fig.4 に示す圧力分布を見ると、油膜の前半分の領域は大気圧よりも高压となり油膜の後半分は低压となることがわかる。これは、EHL 接触部前後のすきま形状変化の影響と考えられる。次に、キャビテーション周囲の圧力に注目すると、高周速条件において、特に低压になっているのがわかる。以前の著者らの研究より、同実験装置において、周速が約 1.0 m/s 以上の条件においては、周速の増加とともにキャビテーションが縮小することが確認されているが、今回の圧力推定結果から、その理由は次のように考察される。周速の増加により油膜後部が低压になると、油膜後部全体の流体が EHL 接触部直後の領域に向けて引き寄せられる。これに対して、EHL 接触部直後では気体性キャビテーションが形成されており、1.0 m/s まで気体の析出量の増加によりキャビテーションが増大する。しかし、周速が 1.0 m/s を超えると気体の析出量が最大になり、キャビテーションの成長は止まる。一方、油膜後部は周速の増加とともに引き続き圧力が低下するため、油膜後部の流体が全体的に引き寄せられ、キャビテーションも縮小したと考えられる。更に油膜後部両脇部に注目すると、油膜の境界付近は低压になっている。この領域は、油膜破断時に大気が入り込んだ領域と重なる。このことから、油膜の破断は、周速の増加により油膜後部両脇部の圧力が低下して油膜外の大気が吸い込まれるようになるために発生するものと考えられる。

### 4. 結言

本研究では、EHL 接触部周囲の油膜形状の変化と圧力関係について考察するために、PIV 解析結果を利用した圧力推定法を新たに提案し、油膜内の圧力分布を評価した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 圧力推定の結果より、油膜後部で周速の増加とともに全体的に圧力が低下することが確認された。このことから高周速条件では、油膜後部全体の流体が引き寄せられて、キャビテーションも縮小したと考えられる。
- 2) 油膜後部における大気の吸引および破断は、油膜後部両脇部が最も低压になることで発生したと考えられる。

### 文献

- 1) 大津健史: 弾性流体潤滑におけるキャビテーションに関する研究, 九州大学学位論文, (2012).
- 2) Fadi Ali, Ivan Křupka, & Martin Hartl: Enhancing the parameters of starved EHL point conjunctions by artificially induced replenishment, Tribology international, 66, (2013), 134-142.
- 3) 平勇人・落合成行: 高荷重下のトラクションドライブにおける周速の増加によるキャビテーションの変化および油膜破断の観察, トライボロジスト, 64, 9(2019) 562.
- 4) 岸本学, 松島栄次, 北條勝彦: 画像情報を用いた流れ場の数値処理に関する基礎的研究, 可視化情報, 16, 2, (1996) 35.

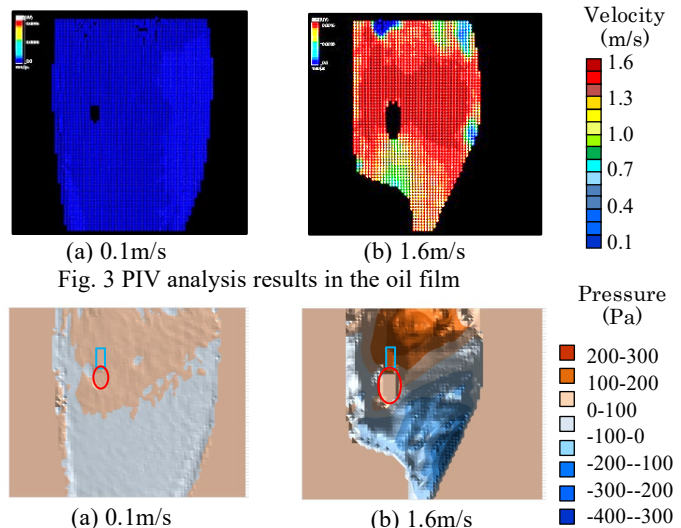


Fig. 4 Calculation results of pressure distributions in the oil film for each peripheral velocity