

高速条件での発熱が EHL 膜厚に及ぼす影響

The Effect of Heat Generation under High-speed Conditions on EHL Film Thickness.

九工大・工（学）\*松雪 将万 九工大・工（学）北島 史悠 九工大・工（学）諸藤 優志 九工大（正）西川 宏志

Shoma Matuyuki, Syu Kitajima, Masashi Morofuji, Hiroshi Nishikawa

Kyushu Institute of Technology

1. 緒言

現在進んでいる自動車の電動化により、電動モータが用いられている。低コスト化や軽量化のためにモータを高回転で運転する必要がある。それに伴い動力伝達要素も高速で運転され、摺動部で発生する発熱量が増加し、推定される膜厚よりも実際の膜厚が小さくなることが想定される。そこで本研究では、弾性流体潤滑 (EHL) 下の高速条件を模擬するものとして高粘度油を用い、速度や滑り率、接触域形状を変えた場合について、発熱が膜厚に及ぼす影響について調査した。

2. 実験装置及び実験方法

実験装置の概略図を Figure. 1 に示す。実験は、直径 19mm のボール (SUJ2) またはローラー (SUJ2) とガラス円板 (BK7) からなる点接触下、荷重 50N で実施した。ローラーは、運動方向半径  $R_x$  を一定にし、直交方向半径  $R_y$  を変化させることで接触域楕円形状の長径短径比を変えた試験片を用いた。膜厚測定は、クロム膜を蒸着したガラス円板を用い二色干渉法によって行った。試料油には、ブライトストック (BS) を用い、油温  $25 \pm 0.4^\circ\text{C}$  で実施した。また、引き込み速度  $u_e = (u_D + u_B)/2$ 、滑り率  $SRR = (u_D + u_B)/u_e \times 100$  と定義する。 $u_e, u_D$  は接触点における鋼球及び円板の表面速度である。

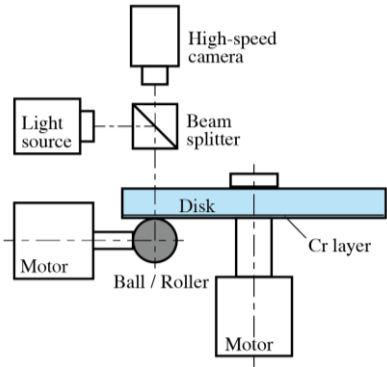


Fig. 1 Experimental equipment

3. 実験結果及び考察

3.1 弾性流体潤滑下の膜厚

点接触 EHL 下の膜厚は Hamrock-Dowson の膜厚式<sup>1)</sup> (以降 H-D 式) から求めることができる。無次元中央膜厚  $H_c$  の式を以下に示す。

$$H_c = 2.69U^{0.67}G^{0.53}W^{-0.067}\{1 - \exp(-0.73k)\} \quad (3)$$

ここで、 $H = \frac{h}{R_x}$ ,  $U = \frac{\eta_0 u}{ER_x}$ ,  $G = \alpha E$ ,  $W = w/ER_x^2$

$k = a/b \cong 1.03(R_y/R_x)^{0.64}$ ,  $a, b$  は運動方向  $x$ , それと直角方向  $y$  に対応する接触楕円の半径である。

膜厚を測定した結果を Fig. 2 に示す。純転がり条件のとき、0.2 m/s 程度までは H-D 式と実測膜厚がよく一致しているが、それ以上の速度域では、H-D 式よりも実測膜厚が低下することが分かる。潤滑油は表面と共に移動しようとするが、接触域に接近するとくさび作用によって圧力が上昇して逆流が生じ、流体にせん断が生じる。このせん断による発熱で温度が上昇し、粘度の低下、粘度圧力係数の低下が生じる。通常はこの影響は小さいが、高速条件下では逆流が激しくなるため温度上昇が大きくなる。そして、接触域内への流体の移動や圧力上昇の能力が低下し、油膜厚さが低下すると考えられる。

3.2 滑り率の影響

実際の機械要素では、滑りがある条件下で使われることが多い。そこで滑り率を変えて実験を行った。

速度 1 m/s での縦軸膜厚、横軸滑り率の関係を Fig. 3

Table 1 Lubricant properties @25°C

Oil	Pressure Viscosity Coefficient $\text{GPa}^{-1}$	Atmospheric Viscosity $\text{Pa} \cdot \text{s}$	Atmospheric Density $\text{kg/m}^3$
BS	19	0.925	880

Table 2 Material properties

	modulus of longitudinal $\text{GPa}$	thermal conductivity $\text{W/(m} \cdot \text{K)}$
Glass(BK7)	80	1.1
SUJ2	207	46

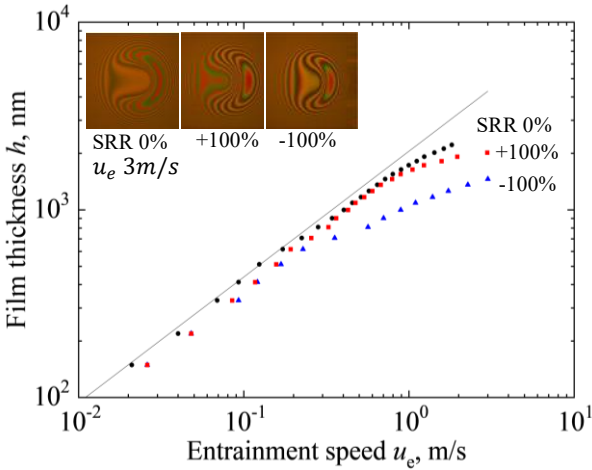


Fig. 2 Relationship of  $h_c$  and  $u_e$

に示す。また、Fig. 3 上部の直線は H-D 式で求めた値である。純転がり条件 (SRR 0 %) よりも滑りが存在する場合の膜厚低下が大きくなっていることがわかる。また、Fig. 2, 3 より SRR が正の場合、すなわち低熱伝導率面 (Glass Disk) が高熱伝導率面 (SUJ2 Ball) より速いときより SRR が負の場合の方が、膜厚が大きく減少している。これは、接触域入口のせん断発熱、ボールと円板の速度差によるせん断発熱に加えて、接触域内のせん断発熱によって粘性くさび作用<sup>2)</sup>が発生するからと考えられる。SUJ2 とガラス円板の組み合わせで、二面間に滑りがある場合には、低熱伝導率面の温度が上昇するため Glass(ディスク)側の潤滑油の粘度が低下する。温度が低く潤滑油粘度が高い側、つまり熱伝導率が高い SUJ2(ボール)側の速度が接触域出口の流量に大きく影響を与えるため、ボールが速いと膜厚が減少する。

### 3.3 楕円接触下でのせん断発熱の影響

歯車などの実際の機械要素では、円ではなく楕円接触や線接触となる場合が多い。そこで、接触域の長径短径比、1:1 (ボール)、2:1、4:1、8:1 で調査した。また、Fig. 3 より、粘性くさびの影響がでない、純転がり (SRR 0 %) で調査した。Figure. 4 に速度 1 m/s での各試験片の干渉像、Fig. 5 にそれぞれの楕円率での H-D 式と実測膜厚のグラフを示す。どの接触域でも 0.2 m/s 程度までは H-D 式と実測膜厚がよく一致しているが、それ以上の速度域では、H-D 式よりも実測膜厚が低下していることが分かる。これは、3.1 で記した接触域入口でのせん断発熱の影響によると考えられる。

Figure. 6 は、各接触域形状の膜厚を H-D 式で求めた値で除した値、すなわち正規化したグラフを示す。速度上昇に伴う膜厚低下の割合は各形状で同様である。つまり入口でのせん断発熱による H-D 式からの膜厚低下を表現する係数は、接触域形状によらず共通となる。

## 4. 結言

本研究では、速度や滑り率、接触域形状を変えたときのせん断発熱が膜厚に及ぼす影響を調査した。

- ・純転がり条件でも高速であるほど、接触域入口での潤滑油の逆流によってせん断発熱が生じ、H-D 式で求めた推定値より油膜が薄くなる。
- ・滑り条件下では接触域入口のせん断発熱に加えて、摺動面の熱伝導率の差が大きい場合、接触域内での粘性くさび作用により膜厚が低下する場合がある。
- ・高速条件での引き込み速度  $u_e$  に対する膜厚低下の割合は接触域形状によらない。

## 5. 謝辞

本研究の一部は、2024 年度の自動車用動力伝達研究組合 (TRAMI) の委託研究により実施したものです。

## 6. 文献

- 1) Hamrock, B.J. and Dowson, D., *Ball Bearing Lubrication*, John Wiley & Sons (1981).
- 2) Cameron A., The viscosity wedge, ASLE Trans, 1 (1958), pp. 248-253.

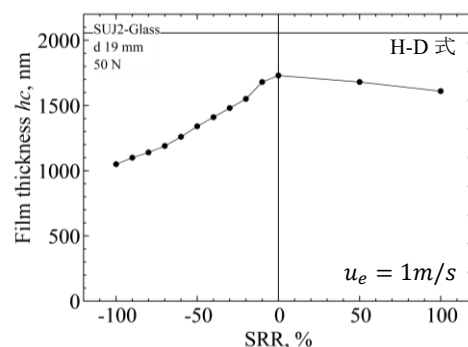


Fig. 3 Relationship of  $h_c$  and SRR

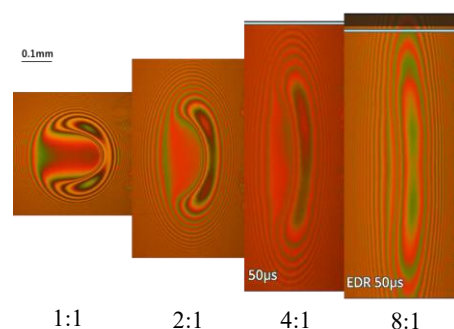


Fig. 4 Interference images ( $u_e = 1 \text{ m/s}$ )

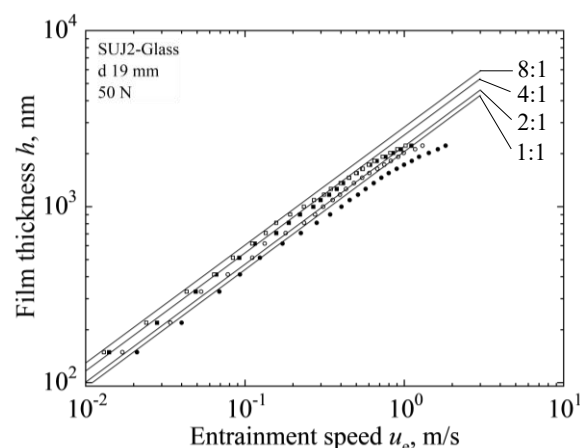


Fig. 5 Film thickness for each roller

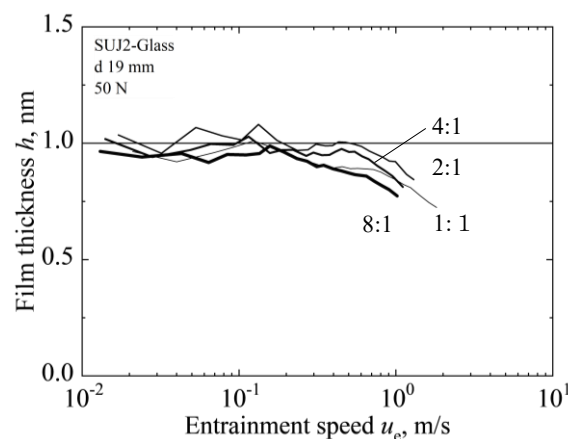


Fig. 6 Effect of contact shape