周期スクイズ運動下における EHL 膜の挙動*

西川 宏 志^{*1}, 半田 孝太郎^{*2}, 手嶋 邦 治^{*3}
松田 健 次^{*1}, 兼田 楨 宏^{*1}

Behavior of EHL Films in Cyclic Squeeze Motion

Hiroshi NISHIKAWA, Koutarou HANDA, Kuniharu TESHIMA,
Kenji MATSUDA and Motohiro KANETA

The behavior of elastohydrodynamic lubrication (EHL) films formed between a steel ball and a normally vibrating optical flat is examined by means of the duochromatic optical interferometry technique. The shape of the film entrapped between the ball and flat plate forms an envelope at the end of the load applying process. The maximum height of the film, which depends on the non-Newtonian response of oils and the squeeze number, stays at a constant value during the cycle. Under conditions of short strokes and high frequency, air bubbles produced in the load removing process result in the collapse of the entrapped EHL film.

Key Words: Tribology, Machine Element, Cyclic Squeeze Motion, Elastohydrodynamic Lubrication, Non-Newtonian Fluid

1. 緒 言

機械要素の機能・性能の向上や防振・表面損傷防止を図る上において、接触面間の油膜挙動を正確に把握することは必要不可欠である。

機械要素はその動作過程において接触面に垂直方向の振動を受けることが多い。したがって、近接(スクイズ)運動あるいは繰返しスクイズ運動下での潤滑現象の解明は古くより重要な研究課題であった。弾性流体潤滑(EHL)領域におけるスクイズ問題への取組みは、1966年、Christensen⁽¹⁾が衝撃的接触過程において潤滑油が接触域内に閉じ込められるという特異な現象を理論的に予測し、それがDowson-Jones⁽²⁾らによって実証されたことに端を発している^{(3)~(7)}。しかし、繰返し、あるいは、周期的スクイズ運動下でのEHL油膜の挙動に関しては、生体関節問題などと関連して、比較的広い接触面を有する弾性係数の低い物体を対象とした、粘度の圧力による増加が顕著ではない領域での研究は盛んであるが、弾性係数の大きい物体を対象と

した場合の研究は少なく⁽⁸⁾、特に近接過程で荷重が増大し、離反過程で荷重が減少する非定常現象に関しては、その重要さにもかかわらず、理論的にも実験的にもほとんど取扱われてはいないようである。

本論文の目的は、圧力による粘度の増加が顕著である作動領域の周期スクイズ運動下におけるEHL油膜の基本的特性を二色光干渉法⁽⁹⁾を利用した油膜の直接観測によって把握することである。

2. 実験装置および方法

図1に実験装置系統図を示す。接触は、直径25.4mm(1インチ)の軸受用鋼球とオプティカルフラットで構成される点接触である。周期スクイズ運動は、固定したオプティカルフラットのクロムコーティング面(下面)に対して鋼球を加振することによって実現した。鋼球の加振は、一端を一自由度回転支持した鋼球固定用アームの他端を二重偏心カムを介して揺動させることによって与えた。接触荷重は、鋼球取付ジグ支柱にちょう付した半導体ひずみゲージにより検出し、非接触式変位計で検出した鋼球の振動変位とともにコンピュータに取込んだ。測定結果の一例を図2に示す。ここに、 S_0 は無潤滑時の振動全振幅、 W_0 は無潤滑時の最大接触荷重、 T_0 は振動周期である。

* 原稿受付 平成4年10月19日。

*¹ 正員、九州工業大学工学部 (〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1)。*² (株)日立製作所 (〒312 日立市幸町3-1-1)。*³ 九州工業大学大学院。

油膜形状の観測には二色光干渉法を用いた。すなわち、フィルタを通し赤と緑の二色光としたキセノンストロボ光によって得られるカラー干渉像を高速 VTR (200 コマ/秒) または 35 mm カメラに収録して油膜挙動を解析した。オブチカルフラットにはクラウンガラス (直径 60 mm, 厚さ 15 mm) およびサファイヤ (直径 45 mm, 厚さ 8 mm) を用いた。等価弾性係数 E' は、それぞれ、110 GPa および 295 GPa である。

試料油としてはパラフィン系鉱油のブライトストック (BS), エチレンと α -オレフィンとのコオリゴマである炭化水素系合成油 (HC) およびタール水添油 (TN) を使用した。それらの性状を表 1 に示す。実験は無潤滑時の最大接触荷重 W_0 を 39.2 N ($\pm 3\%$) (クラウンガラスに対しては、最大ヘルツ圧 0.52 GPa, 接触円直径 0.38 mm, サファイヤに対してはそれぞれ 1.01 GPa, 0.14 mm) 一定とし、無潤滑時の振動全振幅 S_0 は 9, 12, 14, 23 μm , 振動周波数 0.5~40 Hz, 油温 20~26 $^{\circ}\text{C}$ のもとで実施した。潤滑油下では次式で定義されるスクイズ数

$$\lambda = \frac{\mu_0 \omega}{E} (a/R)^2$$

μ_0 : 大気圧下の粘度

ω : 角速度

a : 無潤滑時における最大ヘルツ接触円直径

の増加とともに最大接触荷重は増加するが、本実験範囲では、BS および HC の場合の増加倍率はオブチカルフラットによらず最大で 1.08 程度、TN 320 の場合

の増加倍率はガラス円板では $2.6 \times 10^{12} \lambda + 1.05$, サファイヤでは $9.6 \times 10^{14} \lambda + 0.93$ と表されサファイヤの倍率のほうがやや高い。

3. 実験結果および考察

3.1 油膜形状の時間変化 図 3 は周期スクイズ運動下における油膜形状の時間変化を示す干渉じま写真である。対応する中央断面での油膜プロフィールを図 4 に示す。図中に記載した時間は負荷終了時を基準値零とし、振動周期 T で除した無次元時間である。負の時間は負荷行程 (鋼球がオブチカルフラットに接近する状態) を示し、正の時間は除荷行程 (鋼球がオブチカルフラットから離反する状態) を示す。負荷開始とともに油膜の閉じ込めが発生し、閉じ込め領域は負荷行程の推移とともに増大している。この間、閉じ込め膜中心部の膜厚 (閉じ込め中心膜厚) は、一定値を保持し、閉じ込め膜形状は負荷終了時の膜形状で決定される包絡面に沿って変化している。除荷行程においては負荷行程とほぼ逆の現象を示すが、閉じ込め領域は負荷行程よりもやや狭く、最小油膜厚さは負荷行程で形成された包絡面のやや内側に位置している。しかしな

表 1 試料油性状

Oil	Viscosity, mm ² /s		Specific gravity 15/4 $^{\circ}\text{C}$	Viscosity-pressure coefficient GPa ⁻¹ , 40 $^{\circ}\text{C}$
	40 $^{\circ}\text{C}$	100 $^{\circ}\text{C}$		
Bright stock (BS)	393	30.4	0.878	17.9
Synthetic paraffinic oil	HC-20	164.5	20.27	0.8336
	HC-40	416.8	41.06	0.8389
	HC-100	1400	111.5	0.8451
	HC-600	9358	610.0	0.8485
Tar-naphtenic oil	TN22	19.8	3.7	0.974
	TN68	62.4	5.8	0.988
	TN320	291	9.9	1.005
	TN710	710	14.3	1.008

図 1 実験装置系統図

図 2 変位と荷重の関係 ($T=1$ s, $S_0=9.2$ μm , $W_0=39$ N)

がら、閉じ込め中心膜厚は負荷行程と同じ膜厚を維持している。すなわち、周期スクイズ運動下の油膜形状の時間変化は負荷行程終了時の油膜形状によって大略推測可能である。BSの場合の油膜プロファイルを図

5に示す。閉じ込め中心膜厚はTN 320の場合よりも薄いものの油膜の変動状態はTN 320と同じである。

さて、負荷および除荷行程中閉じ込め中心膜厚が一定値を保持する現象は粘性流体では考えにくい。大野

図 3 油膜形状の時間変化 (TN320, $\lambda=8.89 \times 10^{-15}$, $S_0=9.1 \mu\text{m}$, $W_0=39.2 \text{ N}$, $T=0.54 \text{ s}$)

図 4 油膜プロファイルの時間変化

(図中の番号は図 3 に対応, $\lambda=8.89 \times 10^{-15}$, $S_0=9.1 \mu\text{m}$, $W_0=39.2 \text{ N}$, $T=0.54 \text{ s}$)

図 5 油膜プロファイルの時間変化

($\lambda=8.67 \times 10^{-15}$, $S_0=9.1 \mu\text{m}$, $W_0=38.8 \text{ N}$, $T=0.29 \text{ s}$)

(a) 図4(a)に対応

(b) 図5(a)に対応

図6 圧力分布の時間変化

- (1) $\lambda = 2.47 \times 10^{-15}$, $S_0 = 9.1 \mu\text{m}$, $W_0 = 38.6\text{N}$
- (2) $\lambda = 8.90 \times 10^{-15}$, $S_0 = 9.1 \mu\text{m}$, $W_0 = 39.8\text{N}$
- (3) $\lambda = 1.76 \times 10^{-14}$, $S_0 = 9.2 \mu\text{m}$, $W_0 = 40.2\text{N}$

図7 油膜形状に及ぼすスクイズ数 λ の影響

- (1) $S_0 = 9.1 \mu\text{m}$, $\lambda = 8.90 \times 10^{-15}$, $W_0 = 39.8\text{N}$
- (2) $S_0 = 12.3 \mu\text{m}$, $\lambda = 8.91 \times 10^{-15}$, $W_0 = 39.9\text{N}$
- (3) $S_0 = 23.1 \mu\text{m}$, $\lambda = 8.91 \times 10^{-15}$, $W_0 = 39.4\text{N}$

図8 油膜形状に及ぼす振動振幅の影響

ら⁽¹¹⁾の作成した潤滑油の状態図によれば、本実験条件下においてBSは約0.30 GPa以上で粘弾性、約1 GPa以上で弾塑性体として挙動することになる。TN 320においてはそれらに対応する圧力がそれぞれ約0.14 GPa、約0.30 GPaとなる。図6は図4(a)および図5(a)に対応する油膜形状から逆算した負荷行程における圧力分布⁽¹⁰⁾の変化を示したものである。閉じ込め膜を形成した場合の圧力分布の大部分は上記圧力を超えており、閉じ込められた流体の大部分は粘性流体的挙動をしないことがわかる。すなわち図3~5で示された閉じ込め膜の凍結原因は潤滑油の固化による流動性の低下によるものであると結論される。

3・2 閉じ込め膜の崩壊 スクイズ数 λ と負荷終了時の油膜形状との関係を図7に示す。図8は、スクイズ数を一定とし、振動振幅を増加させた場合の負荷終了時の油膜形状である。スクイズ数および振動振幅の増加は鋼球のオプティカルフラットへの接近速度の増大すなわちスクイズ膜作用の増加をもたらすため、閉じ込め中心膜厚および閉じ込め油量は増加することになる。しかし、スクイズ数のさらなる増大は、干渉像を

図9 閉じ込め油膜の崩壊を示す干渉じま写真
(BS, $\lambda = 4.39 \times 10^{-14}$, $S_0 = 9.1 \mu\text{m}$, $W_0 = 39.3\text{N}$)

同心円からゆがめ、BS, HC, TN 22では二物体間の直接接触(図9)によってもたらされると考えられる接触音が発生するようになる。図10は、負荷行程終了時の無次元中央膜厚 $H_c (= h_c/R)$ とスクイズ数との関係を示したものである。図中の黒塗プロットは非同心干渉縞の出現に対応しており、閉じ込め域内での最大膜厚を h_c と見なしてプロットした。同一スクイズ数に対する閉じ込め中心膜厚はBS, HC, TN 22よりもTN 68, TN 320, TN 710のほうが厚い。注目すべきは同心状干渉じまが維持されている場合の H_c とスクイズ数との関係も前者および後者の油種グループで相

図 10 膜厚とスクイズ数の関係 (黒塗は非同心閉じ込め膜を示す)

違し、前者のほうが後者よりも膜厚が薄く、干渉像の非同心化も前者のほうがより低いスクイズ数で発生することである。この原因は潤滑油の高圧粘度特性の相違によるものと考えられる。本実験条件下では、潤滑油分子のパッキングの度合いを示す尺度と考えられる⁽¹²⁾ 粘度の圧力係数 α と平均接触圧力 p との積 αp の値はガラス円板を用いた場合には前者の BS では 14.6, HC では 12 から 13.5, TN 22 では 24.4, 後者では 36 から 71 であり、大野ら⁽¹¹⁾ の結果から前者は粘弾性体として、後者は弾塑性体として挙動すると考えられるからである。閉じ込め膜が大気圧に開放されたときの固化膜の粘性流体化に要する時間は、弾塑性固体のほうが粘弾性固体の場合よりも長いことは実験的にも確認されている⁽¹³⁾。また、これが原因で、後述する気泡の発生も弾塑性状態下では起こり難いと考えられる。

3.3 材質の影響 図 11 は TN 320 を用いて、ほぼ同一のスクイズ数 λ に対する負荷終了時の油膜プロフィールをガラス円板とサファイヤ円板に対して示したものである。サファイヤを用いた場合の等価弾性係数のほうがガラス円板のそれと比較して大きいことに起因して、ヘルツ接触円直径はサファイヤのほうがガラスの場合よりも小さく、最大ヘルツ圧はサファイヤのほうが大きい。その結果、サファイヤを用いた場合の閉じ込め膜領域はガラス円板の場合よりも狭いものの、閉じ込め中央膜厚および最小膜厚は厚いため、閉じ込め容積はガラス円板を用いた場合よりも大きい。この事実は同心状の干渉しまを呈する安定閉じ込

図 11 油膜プロフィールに及ぼす弾性係数の影響 (サファイア: $\lambda=7.00 \times 10^{-15}$, $W_0=40.0$ N, $T=0.58$ s, $S_0=9.1$ μ m, ガラス: $\lambda=6.86 \times 10^{-15}$, $W_0=39.0$ N, $T=0.10$ s, $S_0=9.4$ μ m)

め膜を維持するためには、サファイヤ円板を用いた場合のほうがガラス円板を用いた場合よりも多量の潤滑油を必要とすることを意味する。すなわち、同心状干渉しま崩壊の下限界値に対応するスクイズ数の値 λ_c は、同一荷重下では、サファイヤ円板を用いた場合のほうがガラス円板を用いた場合よりも油種によらず低いことを示唆する。図 12 はこの推測を裏付けている。

図 13 は図 11 の油膜プロフィールから有限要素法を用いて算定された両接触面各々の弾性変形状態を示したものである。弾性係数の低いガラス円板を用いた場合には、サファイヤ円板を用いた場合とは異なり、鋼球は自身も変形して閉じ込め域を形成するもののガラス円板の変形に追従して円板内に深く陥没している。しかしながら、オプティカルフラットとしてサファイヤを使用した場合の干渉しまの時間変動の傾向はガラス円板を使用した場合と同様であった。

図 12 接触域内最大膜厚に及ぼすスクイズ数の影響($S_0=9\text{ }\mu\text{m}$, 黒塗は非同心閉じ込め膜を示す)

図 13 接触面の弾性変形状態
(サファイア: $\lambda=7.00\times 10^{-15}$, $W_0=40.0\text{ N}$, $T=0.58\text{ s}$, $S_0=9.1\text{ }\mu\text{m}$, ガラス: $\lambda=6.86\times 10^{-15}$, $W_0=39.0\text{ N}$, $T=0.10\text{ s}$, $S_0=9.4\text{ }\mu\text{m}$)

図 14 油膜形状に及ぼす振動振幅の影響

3・4 閉じ込め膜の崩壊機構 図 14 は、スクイズ数一定で振動振幅を変えた場合の負荷過程終了時の油膜プロファイルを示したものである。振動振幅の増加が同心状干渉しまの乱れ（閉じ込め膜の崩壊）に対応するスクイズ数 λ の下限界値 λ_c の増加をもたらすことがわかる。

図 15 は周期スクイズ運動下における気泡の形成と消滅の様子を示す写真である。気泡の観察を容易にするため、ガラス円板に蒸着したクロム膜を除去して撮影されたものが併示されている。図から気泡は除荷行程で形成され、成長することがわかる。また、負荷行程では気泡の形成・成長はないものの、除荷行程で形成された気泡は負荷行程に入ってもしばらく残存した後に消滅することがわかる。

図 16 は、BS を用いて得られた負荷行程での干渉しま写真であり、スクイズ数の気泡残留に及ぼす影響を

示している。ただし、干渉像の鮮明度をあげるために 35 mm カメラで撮影したものであるため、連続写真ではない。隣合った写真は同じ行程位置に対応している。スクイズ数 λ が小さい図 16(a) の場合には、気泡消滅が λ が大きい場合よりもより早い時期に起こり、一周期間にわたり同心状の干渉しまを維持しているが、気泡が遅くまで残留した λ の大きい場合には〔図 16(b)〕、干渉像は非同心円状となり、鋼球とガラス円板は接触状態になっている。すなわち、 λ が大きいと気泡は残留しやすくなり、その残留気泡が同心干渉像の非同心化あるいは油膜の崩壊をもたらすといえる。

図 17 は、気泡の残留と油膜形成との関係を示したものである。縦軸は負荷行程における気泡消滅から負荷終了時までの時間 t_b と負荷開始から負荷終了時までの時間 t_L との比 t_b/t_L である（図 2 参照）。したがって、 t_b/t_L が小さいほど、気泡が負荷行程の終了近くまで残留することを示す。図 17 中に示した黒塗プロットは、同心状干渉しまが非同心化し油膜の安定維持が困難となった状態を示している。 λ が増加すると振動振

幅の小さい条件において t_B/t_L が低下している。すなわち、スクイズ運動下における安定油膜の崩壊は残留気泡によって油膜圧力の発生が阻害されることによって起こると考えられ、振動振幅が小さく、スクイズ数が

大きいほど相対的に気泡が残留しやすく、安定油膜の形成を阻害すると結論される。

4. 結 言

EHL 条件下における周期スクイズ運動下の油膜挙動を直接観察し、その特性を論ずるとともに、材質の影響を検討した。得られた主な結論は以下のようにまとめられる。

(1) 周期スクイズ運動下の EHL 油膜の形状は、大略、負荷終了時の油膜形状を包絡面として時間的に

(a) 干渉像

(b) クロム膜はく離

図 15 スクイズ運動に伴う気泡の形成・消滅 (BS, $\lambda=8.97 \times 10^{-15}$, $W_0=40.0$ N, $T=0.27$ s, $S_0=9.2$ mm)

(a) $\lambda=8.42 \times 10^{-15}$, $W_0=39.3$ N, (b) $\lambda=4.58 \times 10^{-14}$, $W_0=39.6$ N, $T=0.30$ s, $S_0=9.3$ μ m

$T=0.057$ s, $S_0=9.4$ μ m

図 16 気泡残留に及ぼすスクイズ数 λ の影響 (BS)

図 17 油膜形状に及ぼす残留気泡の影響
(黒塗は非同心閉じ込め膜を示す)

変化する。特に接触中央の最大閉じ込め膜厚は計測精度の範囲内で一周期中一定である。

(2) 上記現象は潤滑油が接触圧力下で粘弾性あるいは弾塑性固体として挙動することに起因するためと考えられる。

(3) 振動振幅が小さく、スクイズ数が大きい場合には、除荷行程で発生した気泡が残留し、負荷行程での油膜圧力の発生を阻害するため、油膜厚さの減少または油膜の崩壊が引き起こされる。

(4) 接触物体の弾性係数が変化してもスクイズEHL膜の挙動に関しては大きい相違は認められない。

(5) しかし、接触両物体の変形状態は大きく相違し、安定油膜の崩壊をもたらすスクイズ数の下限界値も相違する。

最後に試料を提供していただいた、日本精工(株)トライボロジ研究所、新日鐵化学(株)トライボセンター、出光興産(株)営業研究所の各位に謝意を表する。

文 献

- (1) Christensen, H., *Proc. R. Soc., Ser. A*, 291 (1966), 520.
- (2) Dowson, D. and Jones, D. A., *Nature*, 214 (1967), 947.
- (3) Westlake, F. J. and Cameron, A., *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 182, 3G (1967-68), 75.
- (4) Herrebrugh, K., *Trans. ASME, J. Lubr. Tech.*, 92 (1970), 292.
- (5) Paul, G. P. and Cameron, A., *Proc. R. Soc., Ser. A*, 331 (1972), 171.
- (6) Lee, K. M. and Cheng, H. S., *Trans. ASME, J. Lubr. Tech.*, 95 (1973), 308.
- (7) 和田・築地原, 機論, 45-397, C (1979), 1018.
- (8) Ren, H., Zhu, D. and Wen, S. Z., *Tribol. Int.*, 24-4 (1991), 225.
- (9) Foord, C. A., Wedeven, L. D., Westlake, F. J. and Cameron, A., *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 184-1, (1969-70), 487.
- (10) 桑野・大野・武藤, 佐賀大学理工学部集報, 12 (1984), 103.
- (11) 大野・服部・桑野・平野, 潤滑, 33-12 (1988), 922.
- (12) 山本・橋本, トライボロジスト, 35-7 (1990), 493.
- (13) Kaneta, M., Kanzaki, Y., Kameishi, K. and Nishikawa, H., *Proc. Japan Int. Tribology Conf. Nagoya*, (1990), 1695.