

放射光 X 線回折法による弾性流体潤滑下トラクションオイルの構造解析 Structural Analysis of Traction Fluids under Elasto-Hydrodynamic Lubrication by Synchrotron X-ray Diffraction

平山 朋子^a, 竹原 弘耕^a, 楠本 貴大^a, 廣沢 一郎^b, 小金澤 智之^b
Tomoko Hirayama^a, Hiroyasu Takehara^a, Kihiro Kusumoto^a, Ichiro Hirose^b, Tomoyuki Koganezawa^b

^a同志社大学, ^b(公財)高輝度光科学研究センター
^aDoshisha University, ^bJASRI

本研究では、放射光 X 線回折法を用い、トラクション伝動装置等における弾性流体潤滑(EHL)状態下での油膜の構造解析を行った。ビームライン上に小型二円筒試験機を設置し、二円筒間に形成されるおよそ 1 μm の厚みの油膜に単色 X 線を照射することによって回折像を得た。試料油にペンタフェニルエーテル型合成油を用いたところ、二円筒の接触点近傍および十分離れた位置での油膜回折像に相違はなく、試料油の高剛性特性を裏付ける結果が得られた。

キーワード： 機械工学, トライボロジー, 潤滑油, 弾性流体潤滑, 放射光 X 線回折

背景と研究目的：

機械工学技術において、要素間の摩擦およびそれに伴う摩耗の発生に関する諸問題は極めて重要な課題であり、トライボロジー分野において多くの研究が進められている。しゅう動面に潤滑油を添加すると、それまで固体間でなされていた摩擦形態は大幅に変わり、通常、摩擦は緩和される。しかし、急激な加圧条件下で潤滑油を瞬間的に固化させて動力を伝えるトロイダル型無段変速機(CVT)の開発など、機械工学における潤滑油の新たな役割も見出されつつあり、それらを背景に潤滑油の微視的挙動に関する関心も高まってきている[1]。にも関わらず、一般的な潤滑油の研究といえば摩擦係数や寿命などで表される巨視的な機械特性の測定を取り扱うものが多く、潤滑油の立体構造の観点から純粋にその役割を議論した例は極めて少ない。中でも、高圧しゅう動条件下、すなわち、弾性流体潤滑(EHL)条件下での潤滑油の構造を実験的に観察した例は、著者の調べるところ未だ見当たらない。

これまでに行われてきた潤滑油の物性研究により、一般的な機械潤滑油は数 GPa を超えると相変態すると言われている[2]。また、そのため、潤滑油を連続体流体として取り扱った場合の数値解析結果とは、形成される油膜の形状、厚みが大きく異なることが実験的に確認されている[3]。しかしながら、高圧しゅう動条件下(EHL 条件下)で実際に潤滑油が相変態を起こしているのか、また、その構造がどのようにトライボロジー特性に影響を及ぼしているのかに関しては未だ明らかでない。そこで本研究では、放射光 X 線回折法を用いて EHL 条件下にある潤滑油の構造解析を行い、その構造を同定することを目的とした。

実験：

本実験では、小型二円筒試験機を BL46XU ビームライン内に設置し、二円筒間に形成される油膜に直接 X 線を照射することで EHL 条件下にある油膜の構造解析を行った。実験の様子を図 1 に示す。本試験機の設計においては、装置がビームラインに納まるサイズとなるよう、性能を低下させない範囲で極力小型とした。また、モータが二円筒間のすきまへの X 線の入射を遮らないようプーリを介した駆動とし、荷重調整はばねによって行えるよう工夫した。Dowson-Higginson の式[4]を用いて油膜厚みを計算したところ、定格荷重(50N)、定格速度(800rpm)で得られる EHL 油膜の厚みは 1~2 μm であり、瞬間的に油膜に掛かるヘルツ圧の最大値は 2~4 GPa であった。

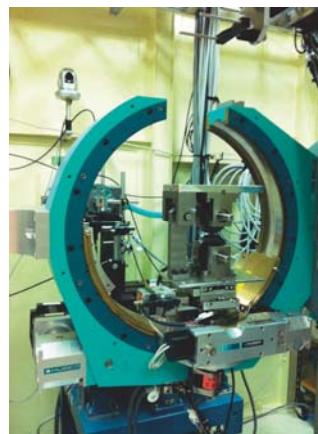


図 1. ビームライン内に設置した二円筒試験機の様子

実験においては単色 X 線を油膜に照射し、アナライザを角度方向にスキャンすることによって回折プロファイルを得た。具体的には、 $2\theta = 1 \sim 38^\circ$ 範囲を 0.5° ずつ分割して測定を行った。その際、ビーム強度は 15 keV とし、入射側スリットの大きさは $35 \times 35 \mu\text{m}^2$ とした。二円筒の材質をタングステン製とすることで、油膜以外の箇所からの散乱をカットした。なお、二円筒間の接触点近傍における油膜からの回折線の取得には、総計 12 時間程度、X 線を照射し続けた。

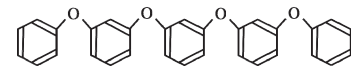


図 2. ペンタフェニルエーテル型合成油

本研究において、試料油はペンタフェニルエーテル型合成油(S-3105)とした。その構造式を図 2 に示す。本試料油は高剛性油として知られており、主に油圧機器において多く使用されている。

結果および考察：

実験では、二円筒の接触点近傍および十分離れた位置での油膜構造を調査した。二円筒の接触点近傍の油膜には高圧とせん断が掛かっており(EHL 条件下)、そこから十分離れた位置での油膜には圧力、せん断ともに作用していないと考えられる。実験で得られた構造因子プロファイルを図 3 に示す。これより、EHL 条件下にある油膜の構造は圧力が作用していない場にある油膜の構造と類似しており、本試料油の場合、圧力およびせん断が作用しても油膜の分子構造は大きく変化しないことが分かった。これは試料油の高剛性特性を裏付ける結果であると言える。

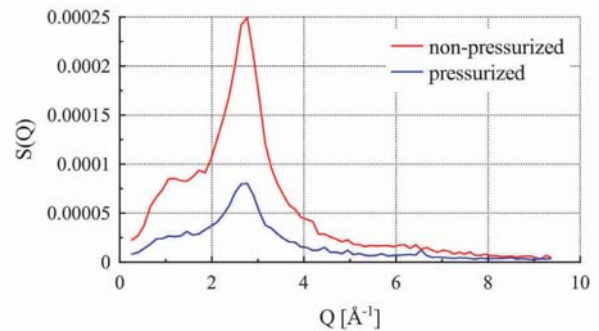


図 3. 得られた構造因子プロファイル

同二円筒試験機で測定した各種試料油のトラクション曲線を図 4 に示す。二円筒への荷重を 100 N とし、片方の円筒の速度を徐々に低下させることで二円筒間にすべりを与え、その状態でのトルク値よりトラクション曲線を得た。図 4 において、DM2H は一般的なトラクションオイルであり、PAO は機械全般に使用される合成ベースオイルの一種である。これより、トラクション係数の値は $\text{DM2H} > \text{PAO} > \text{S-3105}$ であることが見て取れる。図 3 の構造因子プロファイルからも、S-3105 は圧力、せん断の影響を受けにくく、すなわち、構造変化や配高性の向上が見込み難いと言える。その結果、EHL 下においても相変態が生じにくく、低いトラクション係数値を示したと推察できる。

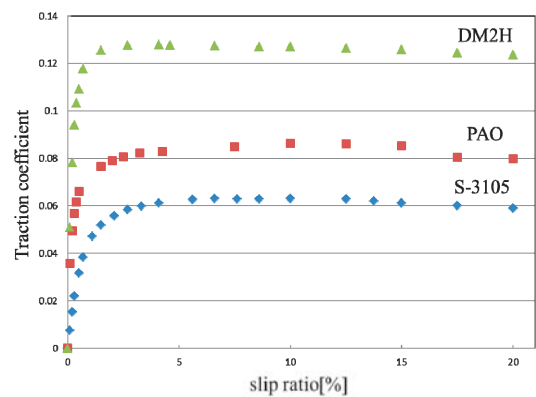


図 4. 各種試料油のトラクション曲線

今後の課題：

二円筒間に形成された極めて薄い油膜からの回折信号を得られたことは大きな一歩であったが、得られた構造因子プロファイルに大きな変化が見られなかった。これは選定した試料油の特性であると考えられるものの、次回は大きな変化が期待できる試料油を用意し、比較を行うことによって慎重に判断していく必要がある。

なお、申請では 2 種類の試料油での実験を想定していたが、光軸調整および各測定に多くの時間を要したため、S-3105 のみの測定しか行うことができなかった。上述の通り、トラクションオイルである DM2H のほうが大きな変化が期待できることから、次回はそれらの試料油を用いて実験を進める予定である。

謝辞：

本研究の一部は、文部科学省 科学研究費(若手研究 A, No. 22686019)の助成によって行われた。
ここに謝意を記す。

参考文献：

- [1] 鷺津仁志 他、日本トライボロジー学会予稿集秋鳥取、465, (2004).
- [2] 大野信義、トライボロジスト、**46** (5), 349, (2001).
- [3] K. Yagi et al., *Tribology Online*, **1**, 5, (2008).
- [4] D. Dowson, *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers*, **182** (3A), 151, (1967-68).