

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と トラクション係数との関係性

Relationship Between Molecular Structures of Several Kinds of Oils Under EHL Condition and Their Traction Coefficients

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

^a同志社大学, ^bJST さきがけ, ^c(公財)高輝度光科学研究センター
^aDoshisha University, ^bJST Presto, ^cJASRI

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 DM2H と呼ばれるトラクションオイルを用いたところ、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は異なり、圧力およびせん断によってトラクションオイルの分子構造が変化することが示唆された。

キーワード： 機械工学, トライボロジー, トラクションオイル, 弾性流体潤滑,
放射光 X 線回折

背景と研究目的：

近年、自動車の普及に伴う大気汚染などの地球環境問題が深刻化する中で、エネルギー削減が求められている。その中でもエンジンの摺動部分の摩擦や摩耗低減による消費エネルギーの削減が求められる。また、自動車の走行による騒音、振動も問題となっている。そのため、現在ではトラクションドライブの実用化が進められている[1]。

トラクションドライブとは、高硬度の転動体に法線力を与え、潤滑油を介して接触させる機構である。転動体同士の接触点では数 μm の油膜が形成され、各転動体に速度差を与えることにより、油膜に接線力を発生させて動力を伝達する[2]。転動体の接触面では、転動体表面は弾性変形し、また高い面圧により潤滑油の粘度が変化する。この二つの効果を取り入れることによって表面粗さに相当する油膜が形成され[3]、いわゆる弾性流体潤滑(EHL)状態となっている。これにより転動体同士が直接接触することがなく、摩耗や焼付きがほとんどないという利点がある[4]。

トラクション伝達装置などの EHL 状態下での固体間に形成される油膜では、潤滑油が瞬間的に固化すると言われている。このようなトラクション伝達装置のトラクション特性は転動体間に存在する潤滑油の分子構造に依存すると考えられている[5, 6]。

そこで、本研究では、圧力に対する各種潤滑油の分子構造挙動及び分子構造とトラクション係数との関係性について検証することとした。まず、各種潤滑油のトラクション係数を測定するために二円筒試験機を用いた。そして、静水圧下と動圧下の場合での潤滑油の分子構造挙動について注目するために、微視的構造解析が可能である放射光 X 線回折法を用いることとした。なお、X 線源には高強度である放射光を用い、実験には SPring-8 のビームライン BL46XU を使用した。X 線回折法で得た潤滑油の分子構造とトラクション係数の関係性を論じることにより、最終的に、分子構造がトラクション係数に及ぼす影響を調査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

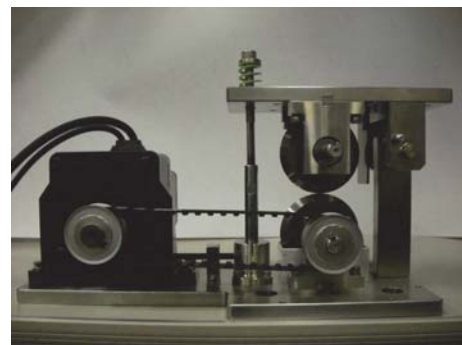


図 1. 小型二円筒試験機

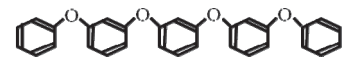
照射することで EHL 条件下にある油膜の構造解析を行った。二円筒試験機の写真を図 1 に、また、実験の様子を図 2 に示す。本試験機の設計においては、装置がビームラインに納まるサイズとなるよう、性能を低下させない範囲で極力小型とした。また、モータが二円筒間のすきまへの X 線の入射を遮らないようプーリを介した駆動とし、荷重調整はばねによって行えるよう工夫した。Dowson-Higginson の式[7]を用いて油膜厚みを計算したところ、定格荷重(50 N)、定格速度(800 rpm)で得られる EHL 油膜の厚みは 1~2 μm であり、瞬間的に油膜に掛かるヘルツ圧の最大値は 1~3 GPa であった。

実験においては単色 X 線を油膜に照射し、アナライザ (2θ) 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、1~38° の間の角度を 0.5° 刻みにスキャンした。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。

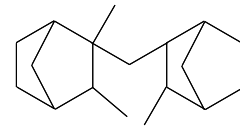
本研究において、試料油は、高剛性油 S-3105 とトラクションオイル DM2H とした。特に DM2H は、最も性能が良いトラクションオイルとして知られており、CVT おいて多く使用されている実績を持つ。なお、各試料油の構造式を図 3 に示す。



図 2. SPring-8 内 BL46XU での回折実験の様子



高剛性油 S-3105



トラクションオイル DM2H

図 3. 試料油の構造式

結果および考察：

S-3105 と DM2H での二円筒試験機を用いた EHL 条件下における放射光 X 線回折実験の結果を示す。なお、実験における二円筒試験機内での X 線照射位置を図 4 に示す。右上図の赤い点は S-3105 を用いたときの、右下図の青い点は DM2H を用いたときの照射位置である。本来、DM2H においても二円筒直下の位置($x=0 \text{ mm}$)での回折情報を得たかったが、DM2H においては、形成される油膜が薄く、円筒直下に X 線の光が通すのが困難であった。そのために光が十分に通り、かつ潤滑油の構造変化の影響が残存すると考えられる $x=-0.3 \text{ mm}$ の位置で測定を行った。

図 5 に、二円筒直下($x=0 \text{ mm}$)および油膜の出口方向に 0.5 mm 移動させた点で測定した S-3105 の X 線回折プロファイルを示す。図より、最大のピークを取る原子間距離はどちらも 2.27 Å であった。 $x=0 \text{ mm}$ と -0.5 mm の実験データを比較すると、ピークの原子間距離に変化見られなかった。つまり円筒直下での S-3105 の固体化は見られなかったと言える。これは S-3105 が高粘度で高剛性であるために、垂直荷重及びせん断に耐性があるためである。トラクション係数測定実験からも

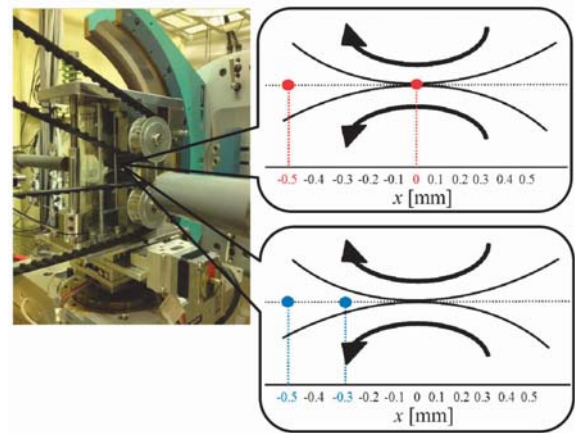


図 4. 実験における X 線照射位置

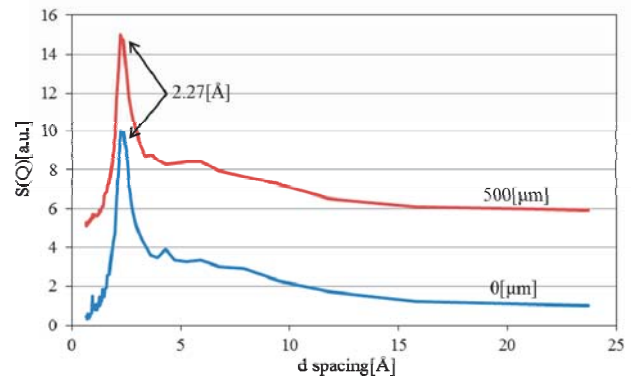


図 5. S-3105 の X 線回折プロファイル

S-3105 はばね荷重が増加してもトラクション係数にあまり大きな変化は見られなかった。つまり、S-3105 は垂直荷重及びせん断の条件が厳しい場面で非常に安定した動力伝達ができるのではないかと考えられる。

図 6 に、油膜の出口方向に 0.3 mm および 0.5 mm 移動させた点で測定した DM2H の X 線回折プロファイルを示す。油膜の出口方向に 0.3 mm 移動させた点で得られた最大のピークでの原子間距離は 3.17 Å, 3.65 Å であった。油膜の出口方向に 0.5 mm 移動させた点で得られた最大のピークでの原子間距離は 2.97 Å であった。この結果から、円筒直下から油膜の出口方向に 0.3 mm 移動させた点よりも 0.5 mm 移動させた点の方が原子間距離は短い。つまり、垂直荷重及びせん断が小さい点で原子間距離が短くなっている。静水圧下実験結果から圧力が増加すると原子間距離が減少することが分かっており、これは矛盾している。しかし、 $x=-0.3$ mm のグラフをよく見ると 2.97 Å でピークが最大になり始め、さらに 3.17 Å, 3.65 Å にピークが見られていると読み取れる。このことから、遠い原子間距離で原子の配向性、配列がより規則的になってピークが見られたと考えられ、やはり DM2H は遠い原子間距離から構造化を起していると言える。

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 7 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。なお、図 7 において、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 $DM2H > PAO > S-3105$ であることが見て取れる。図 5 の回折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、構造変化や配向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。一方、図 6 のプロファイルより、DM2H は圧力とせん断によって分子構造が配向しやすいと言える。この特性がトラクション測定時に現れ、高いトラクション係数を発揮したと考えられる。

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] 鄧鋼 他、日本機械学会論文集 C, **65** (635), 2880, (1999).
- [2] 日本機械学会、トラクションドライブ調査研究分科会・成果報告書, **97**, (1985).
- [3] 村木正芳、第 34 回トライボロジー入門講座配布資料, **51**, (2003).
- [4] 山本 雄二、兼田 楨宏、トライボロジー, 理工学社, 東京, (1998).
- [5] 坪内 俊之、畑 一志、トライボロジスト, **41** (5), 395, (1996).
- [6] Y. Tamai et al., *J. Japan Petrol. Institute*, **25** (3), 127, (1982).
- [7] D. Dowson, *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers*, **182** (3A), 151, (1967-68).

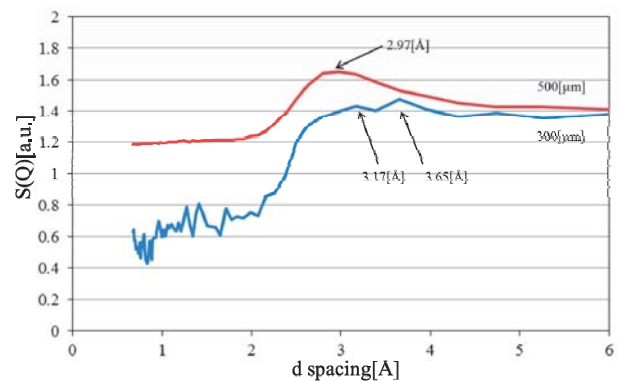


図 6. DM2H の X 線回折プロファイル

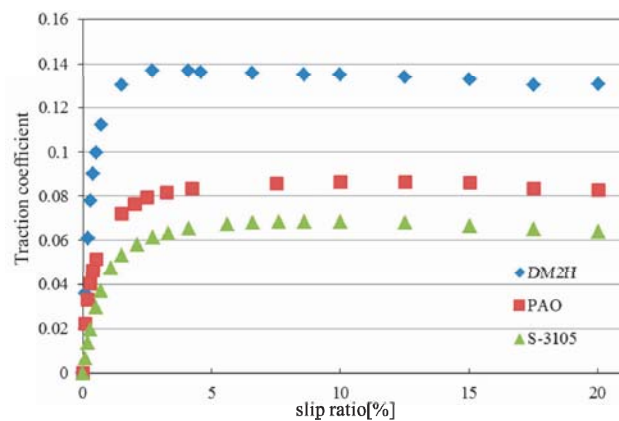


図 7. 各種試料油のトラクション係数