

2013B1843

BL46XU

## 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, 竹原 弘耕, 楠本 貴大  
Tomoko Hirayama, Hiroyasu Takehara, Kihiro Kusumoto

同志社大学  
Doshisha University

本研究では、放射光 X 線回折法を用いて、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 1  $\mu\text{m}$  オーダ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は大きな課題の一つである。さらに、自動車の走行に伴う騒音、振動も問題となっている。そのため、近年、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  $\mu\text{m}$  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。本試験機的设计においては、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、定格速度で得られる EHL 油膜の厚みは 1~2  $\mu\text{m}$  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。

実験においては単色 X 線を油膜に照射し、検出器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。その際、X 線エネルギーは 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、試料油には、ペンタフェニルエーテル型高剛性油 S-3105 (化学式:  $\text{C}_{30}\text{H}_{22}\text{O}_4$ ) とトラクションオイル DM2H (化学式:  $\text{C}_{18}\text{H}_{30}$ ) を用いた。その化学構造式を図 2 に示す。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 (Continuously Variable Transmission) において多く使用されている実績を持つ。

**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。二円筒試験機の構造および回折プロファイル取得位置の詳細は[8]を参照されたい。実験において、二円筒の周速を 10.26 m/s とし、法線力を 70 N とした。なお、文献[8]と同様、二円筒が接触する中央の位置 (二円筒直下) を  $x=0 \mu\text{m}$  とし、潤滑油の流入側を +、流出側を - とする。二円筒が弾性変形して油膜を形成する領域の幅は  $x$  方向に 178  $\mu\text{m}$  であり、その領域での油膜厚さは約 1.5  $\mu\text{m}$ 、最大ヘルツ圧は 2.5 GPa と計算される。その弾性変形域の外の領域では、圧力はほぼ大気圧となっている。

図 3 に、二円筒直下 ( $x=0 \mu\text{m}$ ) および油膜の出口方向に 500  $\mu\text{m}$  移動させた点 ( $x=500 \mu\text{m}$ ) で測定した S-3105 の X 線散乱 (回折) プロファイルより得られた二体構造関数を示す。グラフでは、縦軸に構造因子  $S(Q)$ 、横軸に原子間距離  $d[\text{\AA}]$  を示している。図より、最大のピークを取る原子間距離はどちらも 2.27  $\text{\AA}$  であった。 $x=0 \mu\text{m}$  と  $x=500 \mu\text{m}$  の実験データを比較すると、ピークの原子間距離に変化は見られなかった。 $x=500 \mu\text{m}$  の位置では圧力が解放され、潤滑油も元の状態に戻っている可能性が高い。円筒直下での回折プロファイルが  $x=500 \mu\text{m}$  位置でのものとほぼ同じであったことから、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 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を行うことができると考えられる。

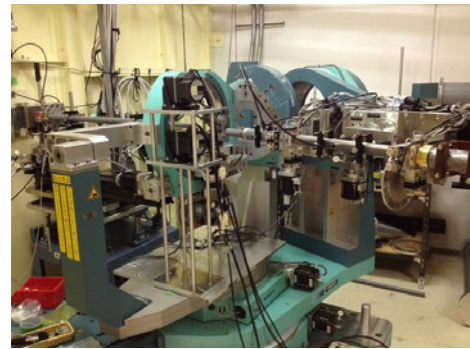
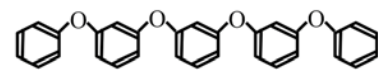
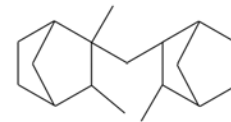


図 1. SPring-8 内 BL46XU での回折実験の様子



(a) S-3105



(b) DM2H

図 2. 試料油の化学構造式

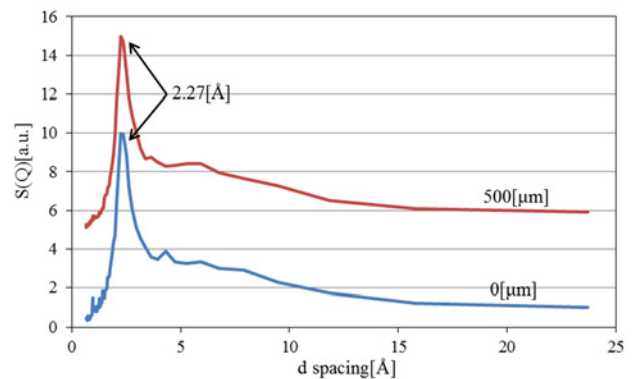


図 3. S-3105 の二体構造関数

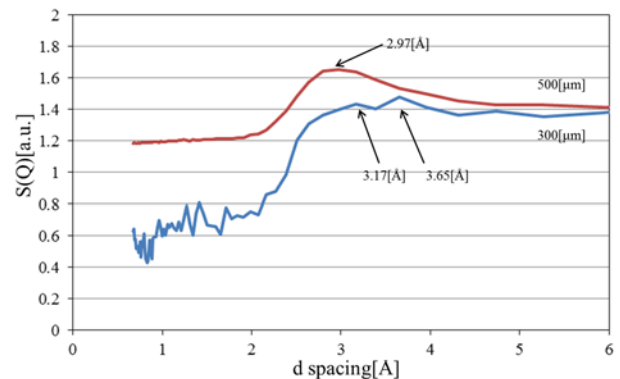


図 4. DM2H の二体構造関数

図4に、油膜の出口方向に300 μm および 500 μm 移動させた点 (x=300 μm および x=500 μm) で測定した DM2H の X 線散乱 (回折) プロファイルより得られた二体構造関数を示す。DM2H の実験においては、円筒直下に X 線を通すのは困難であった。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=300 μm の位置で測定を行った。図4より、x=300 μm と x=500 μm のプロファイルには明らかな差異が見られる。x=300 μm の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。一方、x=500 μm の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 300 μm 移動させた点よりも 500 μm 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と言える。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=300 μm 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こしていることが示唆されたと言える。

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5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5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3の二体構造関数からも、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4の二体構造関数より、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。

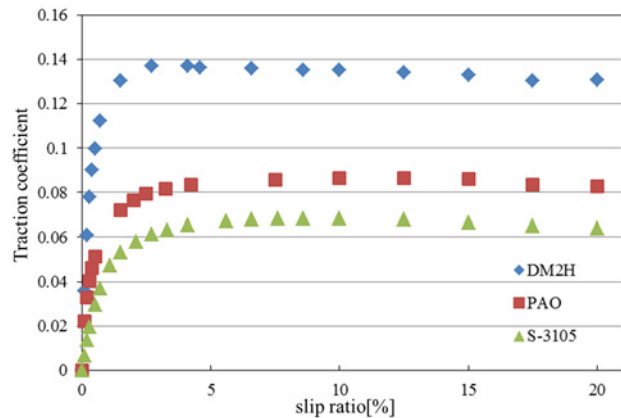


図5. 各種試料油のトラクション曲線

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).  
 [8] 平山朋子他, SPring-8/SACLA 利用成果集, **11**(5), 316 (2023).