

## 二円筒試験機による EHL 条件下トラクションオイルの構造解析 Structural Analysis of Traction Oils under Elastohydrodynamic Lubricated Condition Generated by Two-Cylinders Machine

平山朋子<sup>1,2,\*</sup>, 竹原弘耕<sup>3</sup>, 楠本貴大<sup>3</sup>, 松岡 敬<sup>1</sup>, 鈴木昭夫<sup>4</sup>, 亀卦川卓美<sup>5</sup>

<sup>1</sup>同志社大学 理工学部 〒610-0394 京田辺市多々羅都谷 1-3

<sup>2</sup>JST さきがけ 〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 K's 五番町

<sup>3</sup>同志社大学大学院 理工学研究科 〒610-0394 京田辺市多々羅都谷 1-3

<sup>4</sup>東北大学大学院 理学研究科 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3

<sup>5</sup>高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 つくば市大穂 1-1

Tomoko Hirayama<sup>1,2,\*</sup>, Yuri Eguchi<sup>3</sup>, Koichi Saeki<sup>3</sup>, Takashi Matsuoka<sup>1</sup>,  
Akio Suzuki<sup>4</sup> and Takumi Kikegawa<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Doshisha University, 1-3 Miyakodani, Tatara, Kyotanabe 610-0394, Japan

<sup>2</sup>JST Presto, 7 Goban-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 102-0076, Japan

<sup>3</sup>Graduate School of Doshisha University, 1-3 Miyakodani, Tatara, Kyotanabe 610-0394, Japan

<sup>4</sup>Graduate School of Tohoku University, 6-3 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8578, Japan

<sup>5</sup>KEK, 1-1 Oho, Tsukuba 305-0801, Japan

### 1. 緒言

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<sup>[1]</sup>。

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<sup>[2]</sup>。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<sup>[3]</sup>、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生じないという利点がある<sup>[4]</sup>。

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<sup>[5]</sup>。

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。潤滑油の分子構造挙動の調査には放射光 X 線回折法を用いることとし、トラクション係数の測定には二円筒試験機を用いた。

### 2. 試料

本研究では、試料としてペンタフェニルエーテル型合成油 (以下、S-3105)、ポリ- $\alpha$ -オレフィン (以下、PAO) およびトラクションオイル (DM2H) を用いた。

### 3. 高圧下における潤滑油の放射光 X 線回折実験

#### 3.1 サンプルセルの構成

サンプルセルの構成を図 1 に示す。圧力媒体には、圧縮による変形に耐えることができ、X 線を透過しやすいアモルファスボロンを用い、エポキシ樹脂を用いて成型した。この圧力媒体の中心部に、試料を封入したテフロン製のカプセルと圧力同定のための塩化ナトリウムの円板を埋め込んだ。

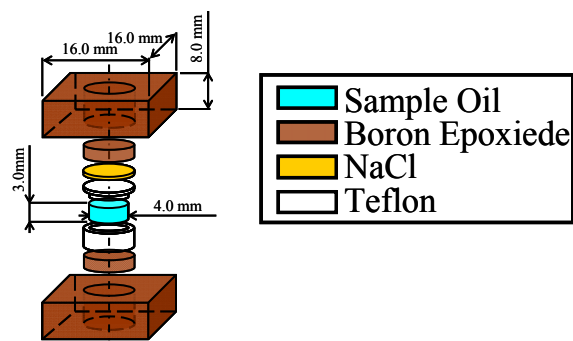


Fig. 1 Assembly of sample cell

#### 3.2 ビームライン

本研究では、KEK 内の Photon Factory Advanced Ring (PF-AR) のビームライン NE-5C と NE-7A を

用いた。NE-5C には、一段圧縮加圧方式のキュービックマルチアンビル型高温高压発生装置が設置されており、それによってサンプルセルに静水圧を付加しながら分子構造の変化を調査した。NE-7A では、研究室独自設計の二円筒試験機を持ち込んで設置し、円筒間に形成される油膜に X 線を直接照射することによって各潤滑油の分子構造の変化を調査した。

## 4. X 線回折結果

### 4.1 回折プロファイル

主要な回折角  $2\theta=6^\circ$ での各圧力に伴う各種潤滑油の散乱 X 線強度の実験結果をそれぞれ図 2 に示す。実験データは比較のため縦軸方向に平行移動して表示している。

図 2(a)に示す S-3105 の実験結果から圧力の増加に伴い原子間距離が減少することが分かった。また、ピークの形に注目すると滑らかなピークになっている。これより、今回用いた全ての潤滑油において固体化は確認できなかつたと言える。

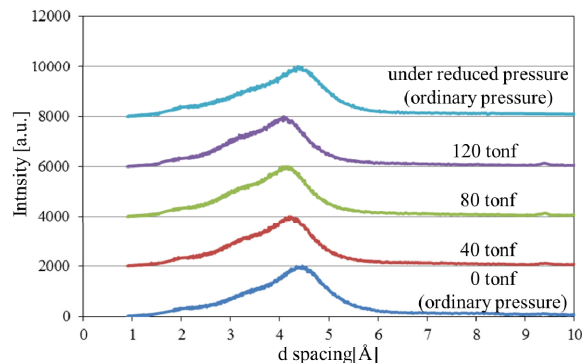
図 2(b)に示す PAO の実験結果から圧力の増加に伴い原子間距離が減少することが分かった。また、ピークが徐々にシャープになっている。先程の S-3105 と比較してもピークがシャープになっていることから徐々に固体化に向かっていると考えられる。しかし、NaCl と比較すると固体になっているとは考えられない。つまり、PAO では圧力の増加に伴い固体化に向かう傾向は見られた。

図 2(c)に示す DM2H の実験結果から圧力の増加に伴い原子間距離が減少することが分かった。そして、S-3105 と PAO と比較すると、DM2H の実験結果では 2 つのピークが見られる。これは、DM2H が長短の原子間距離を持つ分子構造を有しているということである。このことから、動力伝達する際に DM2H はこの長短の原子間距離を持つ分子が構造変化を起こすことで、分子同士が絡み合う、もしくは分子構造がより立体的になることで動力を伝達しているのではないかと考えられる。そのため、トラクション係数測定実験で最も数値が高くなったと推察できる。

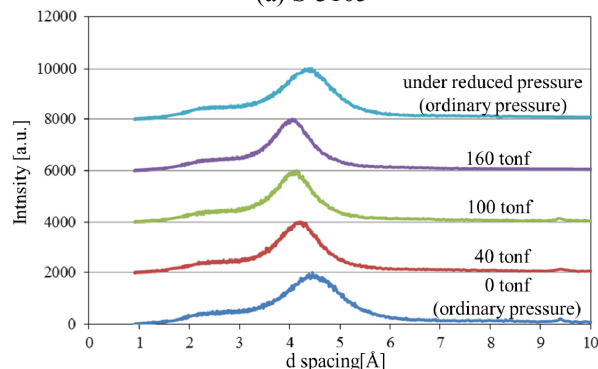
### 4.2 動径分布関数

各圧力に伴う S-3105, PAO 及び DM2H の散乱 X 線強度を各回折角度に測定した結果を用いて得られた解析結果を図 3 にそれぞれ示す。縦軸に二体分布関数  $g(r)$ 、横軸に原子間距離  $r[\text{\AA}]$ を示す（比較のため縦軸方向に平行移動を行っている）。

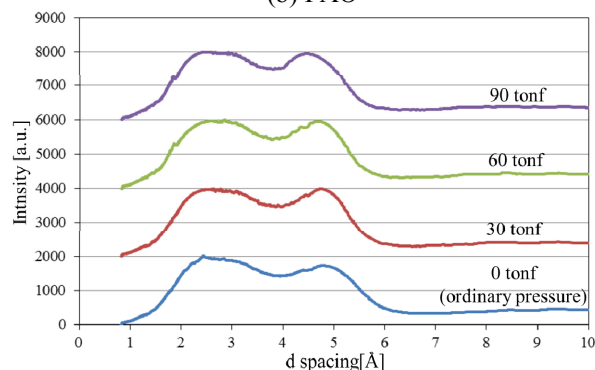
図 3 に示す(a)は第一近接と呼ばれる部分であり、隣り合う原子の距離、つまり原子間距離を示している。(b)は第二近接と呼ばれる部分であり、隣り合う原子のさらに隣の原子間距離を示している。今回の S-3105 の構造はベンゼン環が酸素原子で結合している。過去の研究から C-H 結合は 1.1  $\text{\AA}$ 、C-C 結合は 1.54  $\text{\AA}$ 、C=C 結合は 1.34  $\text{\AA}$ 、C-O 結合は



(a) S-3105



(b) PAO



(c) DM2H

Fig. 2 Scattering intensity profiles at  $2\theta=6^\circ$

1.43  $\text{\AA}$  であることが知られている。図 3(a)に示す第一近接(a)での原子間距離は、0 tonf (常圧) の状態で 1.36  $\text{\AA}$ 、40 tonf で 1.36  $\text{\AA}$ 、80 tonf で 1.34  $\text{\AA}$ 、120 tonf で 1.32  $\text{\AA}$ 、除荷の状態では 1.32  $\text{\AA}$  であった。第二近接(b)での原子間距離は、0 tonf の状態で 2.38  $\text{\AA}$ 、40 tonf で 2.36  $\text{\AA}$ 、80 tonf で 2.36  $\text{\AA}$ 、120 tonf で 2.36  $\text{\AA}$ 、除荷の状態では 2.44  $\text{\AA}$  であった。図 2 より、静水圧下での実験結果では、圧力が増加すると原子間距離が減少する傾向になり、また除荷すると原子間距離が増加する傾向である。解析結果では、第一近接(a)の原子間距離は圧力が増加すると徐々にではあるが原子間距離は減少している。これは実験結果と一致している。しかし、除荷時には原子間距離は元に戻らず、加圧された状態と同様の原子間距離を示している。これまでの研究においても、除荷時であってもすぐには原子間距離が元の状態に戻らないとい

う現象は幾度か見受けられており、それは圧力に対する構造変化のヒステリシスと捉えてきた<sup>(23)</sup>。今回も同様の現象が生じたと考えられる。一方、第二近接(b)の原子間距離は圧力増加に伴い減少するものの、除荷すると原子間距離は最初の状態より増加している。この理由は定かではないが、ここに示す原子間距離とは隣り合う原子のさらに先にある原子との距離であり、隣り合う原子よりも移動に伴う自由度が高いと考えられ、そのため一時的な原子間距離の増加に繋がったのではないかと考える。次に縦軸の二体分布関数  $g(r)$  の単位面積当たりの原子密度に注目する。第一近接では 0 tonf, 40 tonf, 80 tonf, 120 tonf においてそれぞれ 1.056, 1.072, 1.084, 1.114 であり、除荷の状態では 1.064 であった。これより、圧力が増加すると原子密度は増加していることが分かる。これは、圧力がかかることで原子の配向性、配列がより規則的になっていると考えられる。これは、図 3(b), 図 3(c)でも同様に傾向が見られた。

次に図の 5~7 Å (C の範囲) において、S-3105 と PAO でははっきりとしたピークが見られないが、DM2H ではピークが見られる。これは、DM2H は S-3105 と PAO と違い、遠い原子間距離においても原子の数密度が増しているということである。つまり、DM2H は圧力の増加に対して、原子の配向性、配列がより規則的になっていると考えられる。静圧実験からは DM2H は長短の原子間距離を持つ分子構造を有しており、さらに解析結果からも遠い原子間距離から原子の配向性、配列が規則的になっていることから、遠い距離から構造化を起こすことで動力を伝達していると考えられる。そのため、DM2H はトラクション係数が他の二種類の潤滑油と比較して高くなったと推察できる。

なお、NE-7A で行った二円筒試験機における油膜からの回折線の取得は、油膜の薄さに対して放射光強度が十分でなく、残念ながら有意なデータの取得が困難であったことを付記する。

## 5. 結論

本研究では、トラクション係数測定実験および放射光 X 線回折法を用いた潤滑油分子の構造解析を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) トラクション係数は S-3105 < PAO < DM2H の順に高くなった。
- (2) 静水圧下実験において、高圧下で各種潤滑油の固体化は確認できなかった。
- (3) 静水圧下実験解析結果から圧力増加に伴って、各種潤滑油は原子の配向性、配列が規則的になることが分かった。またその中でも、DM2H は他の潤滑油と比較して、より規則性が増す傾向にあった。

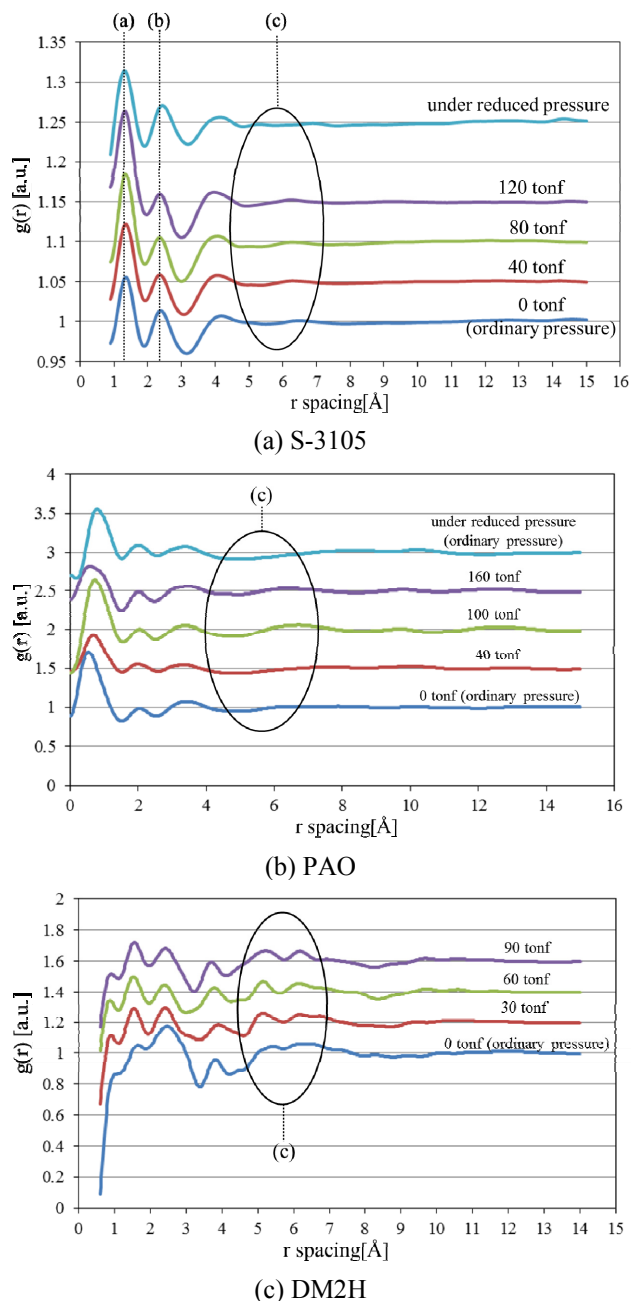


Fig. 3 Pair distribution functions

## 謝辞

動径分布関数の算出において、日本原子力研究開発機構 服部高典博士に多大なるご教示を賜った。ここに感謝の意を示す。

## 参考文献

- [1] 鄧鋼ら, 機論 C, 65-635 (1999) 2880.
- [2] トラクションドライブ調査研究分科会(1985) 97.
- [3] 村木正芳, トライボロジー講座資料 (2003) 51.
- [4] 山本雄二ら, トライボロジー, 理工学社 (1998).
- [5] 坪内俊之ら, トライボロジスト 41-5, (1996) 395.

\* thirayam@mail.doshisha.ac.jp