

高圧密度計の設計製作と評価方法

西 陽希* 里永憲昭* 竹田雄祐* 渡邊孝司** 園田智之**

*崇城大学, **(有) D1 ケミカル

Design and Manufacture of High-Pressure Density Meter
and Evaluation Method

Haruki NISHI*, Noriaki SATONAGA*, Yusuke TAKEDA*,
Takashi WATANABE**, Tomoyuki SONODA**

*Department of Mechanical Engineering, SOJO University Faculty of Engineering, Japan
**D1 Chemical Co., Ltd., Japan

著者らは、これまで潤滑油を構成する成分の違いが、機械の寿命や潤滑性能に与える影響について、光干渉法や電気的接触抵抗法を用いて軸受接触面の弾性流体潤滑条件下 (*Elasto Hydrodynamic Lubrication*, 以下 *EHL* と略す) における観測を行い、光学的と電気的の 2 つの観点から潤滑油の油膜厚さの比較評価してきた。光学的観測における油膜厚さの算出には *Hamrock-Dowson* の式を適用し、導出過程における材料パラメータ G において、潤滑油の高圧下における粘度の値である粘度圧力係数 α を用いる。これまでの実験では落球式高圧粘度計を用いて、高圧下での粘度を計測して、後述する *Barus* の式から α を算出していたが、密度に関しては、圧力による変化は軽微と仮定し、大気圧下での値を用いて高圧下での密度に換算してきた。

本報告は、物性の変化についても検証することによる精度向上を目的として、高圧密度計の設計製作を行い、その評価方法について検討したことを報告する。

キーワード: EHL, トライボロジー, 高圧密度, 高圧粘度, 粘度圧力係数

1. 緒論

著者らは、実際の産業用機械や自動車などで用いられる軸受と潤滑油の接触面を再現した軸受油膜可視化装置を用いて、光学的と電気的な視点から弾性流体潤滑条件 (*EHL*) 下でのトライボロジー性能を評価している^[1]。

光学的観測において、潤滑油の油膜厚さは *Hamrock-Douson* の油膜算出式を適用しており、その導出過程である材料パラメータ G において粘度圧力係数 α が必要となる。

Hamrock-Douson の油膜算出式を以下に示す。

$$H_c = h_c/R = 4.31U^{0.68}G^{0.49}W^{-0.073}(1 - e^{-1.23\kappa}) \quad \dots \quad (1)$$

$$H_{min} = h_{min}/R = 3.68U^{0.68}G^{0.49}W^{-0.073}(1 - e^{-0.67\kappa}) \quad \dots \quad (2)$$

$$U : \text{速度パラメータ } U = \eta_0 u / (ER_x)$$

$$W : \text{荷重パラメータ } W = w / (ER_x^2)$$

$$G : \text{材料パラメータ } G = \alpha E$$

$$h_c : \text{中央膜厚 } [\mu\text{m}] \quad h_{min} : \text{最小膜厚 } [\mu\text{m}],$$

$$R : \text{等価曲率半径 } [m]$$

粘度圧力係数を一般的な値である $\alpha=20$ とすると、*EHL* 評価において理論値と観測値の剥離が時々確認されていた。そこで、落球式高圧粘度計を用いて粘度圧力係数 α の算出している。

これまで、高圧粘度を算出する際には、圧力の変化による潤滑油の密度の変化はごくわずかなものであるため、その変化を考慮せずに観測していたが、さらに高精度での高圧粘度を算出するためには、高圧下における潤滑油の密度を計測する必要があると考えに至った。

よって、高圧密度計の試作を行い、評価方法について検証したので、本報にて紹介する

2. 粘度圧力係数 α の計測

潤滑油の高圧下における物性である粘度圧力係数 α は、図 1 に示す落球式高圧粘度計を用いて計測している。

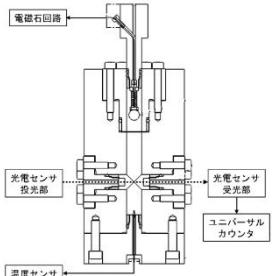


図 1. 落球式高圧粘度計の概要

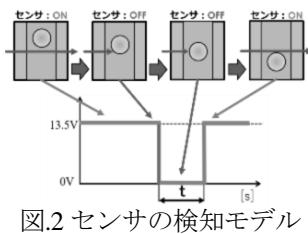


図 2 センサの検知モデル

落球式高圧粘度計は、圧力容器内に試料油を注入して加圧を行う。高圧になった内部で鋼球を落下させる。図 2 に示すように、鋼球が観測窓を通過する時間を光電センサで検出する。

粘度圧力係数 α は計測した鋼球の落下速度から、ストークスの粘性抵抗法則により近似的に絶対粘度を求めている。

軸受が受ける粘性抵抗 $f_1 [N]$ は式 (3) より

$$f_1 = 3\pi\eta dv \quad \dots \quad (3)$$

η : 流体の粘度 [$Pa \cdot s$] d : 鋼球の直径 [m]

v : 鋼球の落下速度 [m/s]

鋼球は重力によって自由落下しているが、同時に試料油中を落下する際に浮力の影響を受ける。したがって浮力の補正を行い、鋼球が重力によって引っ張られる力 $f_2 [N]$ は式 (4) から求められる。

$$f_2 = \frac{\pi}{6} d^3 g (\rho_0 - \rho) \quad \dots \quad (4)$$

ρ_0 : 鋼球の密度 [kg/m^3] ρ : 流体の密度 [kg/m^3]

g : 重力加速度 [m/s^2]

流体の密度 ρ は大気圧下において浮秤を用いて密度を計測して算出しておらず、鋼球が一定速度で落下していると考えると、粘性抵抗 f_1 と重力により引っ張られる力 f_2 は釣り合っているため $f_1 = f_2$ となる。

よって流体の粘度 $\eta [Pa \cdot s]$ は式 (5) から得られる。

$$\eta = \frac{d^2(\rho_0 - \rho)g}{18v} \quad \dots \quad (5)$$

高圧粘度 η_p は計測した落下時間 $t [s]$ より式 (6) から求められる。

$$\eta_p = \frac{d(\rho_0 - \rho_p)g}{18} \cdot f_w \cdot t \quad \dots \quad (6)$$

η_p : 壓力下の粘度 [$Pa \cdot s$] d : 鋼球直径 [mm]

ρ_p : 壓力下での油の密度 [kg/m^3]

f_w : 計測における補正係数 [-]

この時、圧力下での油の密度 ρ_p は Dowson の式 (圧力 $P < 0.4 GPa$) を用いて式 (7) から算出している。

$$\rho_p/\rho = 1 + \left(\frac{0.58p}{1 + 1.68p} \right) \quad \dots \quad (7)$$

粘度圧力係数 α は油温一定の下、各圧力で実測した高圧粘度の値から Barus の式を用いて最小二乗法で算出することができる。

$$\eta_p = \eta_0 \exp(\alpha p) \quad \dots \quad (8)$$

η_p : 大気圧下における粘度 [$Pa \cdot s$] p : 圧力 [GPa]

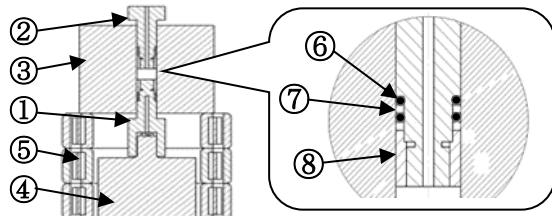
α : 粘度圧力係数 [GPa^{-1}]

式 (7) の通り、落球式高圧粘度計では、圧力下の油の密度を Dowson の式により理論値を換算して用いているため、高圧密度計により高圧下での油の密度の実測値を計測した場合の粘度圧力係数 α との違いを比較評価し、その値を用いての軸受け接触面の光学的観測において、理論値が実測値に近づくのかについても検証する。

3.高圧密度計の概要及び計測原理

3-1 高圧密度計の概要

潤滑油の高圧密度については、図3に示す高圧密度計を用いて計測できる。計測原理は、試験機内部に一定量の試料油を注入する。上側プランジャで密閉して加圧する。質量は一定であるため、圧力によって変化した体積から高圧密度を算出する。高圧密度計の概要を図3に示す。



①下側プランジャ ②上側プランジャ ③圧力容器
④ロードセル ⑤保持台 ⑥Oリング
⑦バックアップリング ⑧プランジャキャップ

図3.高圧密度計（左）と詳細図（右）

3-2 設計要件

高圧密度計の設計方針は以下のとおりである。
①最大使用圧力は300[MPa]とする。
②一般的に入手可能な部品と素材を使用する。
③汎用旋盤、フライス盤で製作可能であること。

圧力容器の許容内圧の計算には、厚肉円筒胴の内圧に対する最小板厚の式(9),(10)を用いる。

最小板厚

$$t = ID(\sqrt{Z-1})/2 \quad \dots \quad (9)$$

$$Z = (\sigma_a \eta + p) / (\sigma_a - p) \quad \dots \quad (10)$$

OD :外径[mm]

t :厚み[mm]

σ_a :許容引張応力[MPa]

ID :内径[mm]

p :内圧[MPa]

η :溶接継手効率

圧力容器の材料には、S45Cを用いた。各寸法は $OD = 80mm$, $ID = 12mm$, $t = 34mm$ である。

一般的な設計では、材料の引張強さを基準に安全率を3~4程度として許容応力を考慮するが、今回の計測装置の使用は短時間である。そこで、許容応力を降伏点345MPaとして考えた(図4)。溶接継手効率 η を1とすると、許容内圧 p は式(9), (10)から329MPaとなる。図5に示すS-N曲線における灰色の範囲での使用であれば問題ないと考えられ、最大使用圧力300MPaを満たす。

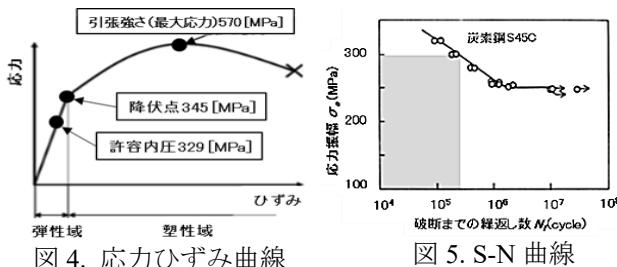


図4. 応力ひずみ曲線

また、加圧をしていくと、プランジャの気抜き穴から油漏れが起きるため、油粘度を詰ることで加圧時における資料油の漏れ対策としている。

設計方針から設計要件は以下のとおりとした。

材料 : S45C	引張り強さ	570MPa
降伏点		345MPa
実操作範囲		0~300MPa
実験重量		0~3462 kg
試料油使用料		2mL

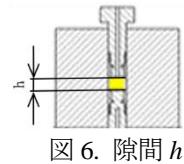
3-3 ストロークについて

高圧密度計では、上下2本のプランジャを使用する。図6に示すようにプランジャ間の隙間 h が狭くなる時に、圧力容器の内圧が大きくなることから、それらを考慮して強度計算が必要となる。

高圧密度計の最大使用圧力は300MPaであることから、

$$300MPa > \text{荷重} F[N] / \text{側面積} A[mm^2]$$

$$300MPa > 33929.2 / (12\pi h)$$



よって、最大荷重時の隙間 h は3mm以上となる。

4.高圧密度の算出

高圧密度計で求める値は体積となる。原理としては、2mLの試料油を圧力容器内に注入し、大気圧化で試験機内の空気を取り除き、上側プランジャを、万能引張り圧縮試験機を用いて加圧する。

上側プランジャの加圧ストロークから、加圧された試料油の体積を算出する。

圧力下の密度を求める際には、大気圧下での密度が必要となる。そこで、浮秤を用いて、試料油の比重を計測して密度を算出する。

質量 M は、大気圧下での密度を求める式(11)を用いて算出する。

$$\rho_{ot} = \frac{M}{V} \quad \dots \quad (11)$$

ρ_{ot} :大気圧下の密度[kg/m^3]

M :質量[kg] V :体積[m^3]

体積はプランジャの直径12mmと試料油の高さ Δh ($h-h'$)より求める。ここで求めた体積と計測した大気圧下の密度から質量を求める。

圧力が変化して体積が変わっても質量は変化しないため、式(12)の質量保存の法則が適用できる。

$$M = \rho_{ot}V = \rho_{pt}V' \quad \dots \quad (12)$$

よって式(13)から圧力下の密度を求めることができる。

$$\rho_{ot} = \frac{M}{V'} \quad \dots (13)$$

ρ_{pt} : 圧力下の密度 [kg/m^3]

V' : 圧力下の体積 [m^3]

5. 高圧密度の計測

計測条件

本計測では、試料油としてエンジン油 5W-30 を使用した。計測条件は、試料油温度を 40°C と 60°C とし、圧力は 0.043GPa から 0.281GPa の範囲として、各温度と圧力ごとに 3 回ずつ計測した。

計測結果

エンジン油 5W-30 の 40°C と 60°C の高圧密度計測結果を図 7 と図 8 に示す。それぞれの試料油温度において、大気圧下から加圧することで密度が上昇する傾向を確認した。

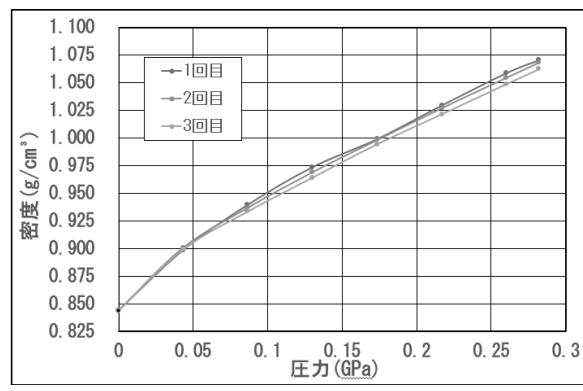


図 7 実験結果 (40°C)

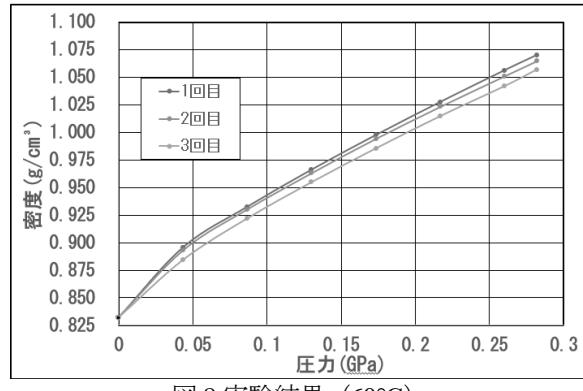


図 8 実験結果 (60°C)

図 7 と図 8 のグラフを比較すると、大気圧下の密度と同様に圧力下でも温度依存性が見られる。

6. 結論

1. 高圧密度計の試作を行い、油温 40°C と 60°C の状態の計測を行うことに成功した。
2. 計測結果から大気圧下での密度と比べ、圧力をかけていくほど密度は大きくなることが明らかとなった。また、油温が上昇するにつれて密度は小さくなる傾向が認められた。

7. 今後の展望と課題について

今回の高圧密度計の試作機における課題を下記に示す。

課題 1：圧力容器の筒長が短い。

計測を行う際に、容器の筒長が短いことから気抜き時に、プランジャーが勢いよく試料油を圧縮することで、試料油まで漏るため、次機では圧力容器の筒長などを見直す必要がある。

課題 2：より高温で計測をできるよう改良する。

今回の計測では、試料油の温度は 40°C と 60°C としたが、さらに高温での計測においては、気抜き穴に詰めている油粘土が熱により柔らかくなり、そこから油漏れが発生する。この事実から、気抜き穴の密閉が十分に可能で、より耐熱効果の高い材質を選定する必要がある。

これらの課題を解決して、各種潤滑油の高圧密度について検証を重ねていくことで、落球式高圧粘度計の計測結果の精度を高め、より正確な粘度圧力係数の導出を目指したいと考えている。

参考文献

- [1] 城戸洋成, 里永憲昭, 竹田雄祐, 渡邊孝司, 園田智之; 弾性流体潤滑 条件下における新還元添加剤 (SOD-1) の挙動と高圧粘性に関する考察, 平成 30 年度日本設備管理学会秋季研究発表大会, 論文集, B2.3, pp.95-100(2018)
- [2] 竹田雄祐, 里永憲昭, 大瀬勝弥, 渡邊孝司, 園田智之: 落球式高圧粘度計の試作と試験評価方法, 日本設備管理学会誌 第 31 卷 4 号, pp.91-96 (2020)
- [3] 大野信義: 高面圧下における宇宙用潤滑油のレオロジーとトライボロジーの特性, “トライボロジスト”第 57 卷 第 2 号 pp.41-49 (2012)
- [4] 金子正人: 潤滑油の高圧物性 (第 1 報) 粘度の圧力、温度、密度関係式の導出, “トライボロジスト”第 62 卷 第 10 号 pp.46-58 (2017)