

落球式高圧粘度計の試作と試験評価方法

竹田雄祐* , 里永憲昭* , 渡邊孝司** , 園田智之**

*崇城大学, ** (有) D1 ケミカル

Trial Manufacture of Falling Ball Type High Pressure Viscometer and Test Evaluation Method

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

*Department of Mechanical Engineering , SOJO University Faculty of Engineering, Japan

**D1 Chemical Co., Ltd., Japan

著者らはポリオールエステル、ジエステル系と植物油系エステル化合物などを主成分とした独自の還元添加剤(SOD-1Plus)の改良品として新添加剤(SOD-1PN)を開発した。新添加剤は耐摩耗性・潤滑性を高め、せん断の影響を受けにくい高粘度ポリ α オレフィン (PAO) 成分を付加して油膜保持性能を向上させ、極圧剤として硫黄と亜鉛の成分を加えて、潤滑膜再生の効果を高めたものである。ところで、軸受の接触面における弾性流体潤滑条件下におけるトライボロジー性能を評価するうえで、これまでの理論的評価手法で用いる粘度圧力係数は一般的な値を適用してきた。しかしながら、EHL評価等においてその結果に疑問を持つケースが時々確認されていたので、その結果の再検証する必要性が生じてきた。そこで、本報において潤滑油の高圧物性を観測するために落球式高圧粘度計を試作して、試験評価方法を検証した。

キーワード：落球式粘度計, 高圧粘性, 粘度圧力係数, トライボロジー, エステル系添加剤

1. ま え が き

近年の自動車の高性能化に加えて、省資源化と環境負荷低減のため、潤滑油についてはトライボロジー性能向上の要求が一段と増してきている。これらの要求に応える手段として潤滑性能の向上、摩擦、摩耗の低減のためエステル系合成潤滑油が開発されてきた。このエステル系合成潤滑油は有機脂肪酸とアルコールを原料としているが、特にポリオールエステル系合成潤滑油^{[1],[2],[3],[4]}が自動車用として注目されている。合成潤滑油は鉱物系潤滑油と比べて、低温流動性、熱酸化安定性に優れ、高粘度で使用温度範囲が広く、潤滑性が良好で清浄、分散性や生分解性など多くの特長を有する。

著者らは各種自動車用潤滑油、産業用機器の潤滑、摩耗、摩擦性能などをより改善するため、二次的合成添加剤としてポリオールエステル (POE)、ジエステル (DST) や植物油系エステル (VOE) 化合物などを主成分とした独自に開発した還元添加剤 (SOD-1Plus) について、寿命試験機、油膜可視化装置等を用いて性能評価とそのメカニズムを究明してきた。本報告はその性能改善のメカニズムをさらに解明するため、潤滑油の高圧下における粘度変化を観測する落球式高圧粘度計を試作し、観測実験の取組を開始したので報告する。

2. 高圧粘性とは

機械において、軸受や歯車の接触面にはヘルツ接触となり非常に高圧となる。そのような高圧下における潤滑油の挙動を観察することは、潤滑油の性能改善のメカニズムを解明するためには必要不可欠である。本研究室では図 1 に示す可視化装置を用いて直接的に油膜の観測に取り組んでいる^[1,2,3]。

しかし、観測値と理論計算値には乖離があり、その一因は潤滑油の粘度圧力係数 α を、一般的な既知の値 ($\alpha=20$) を用いて算出しているためと考えている^[2]。よって潤滑油の正確な粘度圧力係数 α を測定する。

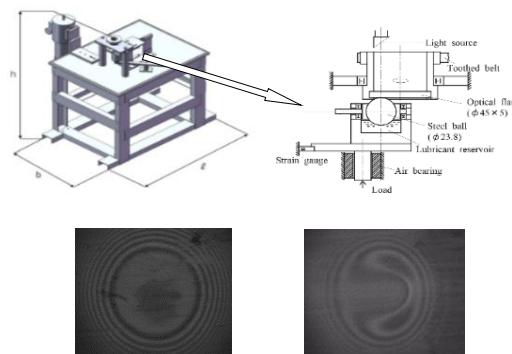


図 1 可視化装置概要

3. 高圧粘度測定原理

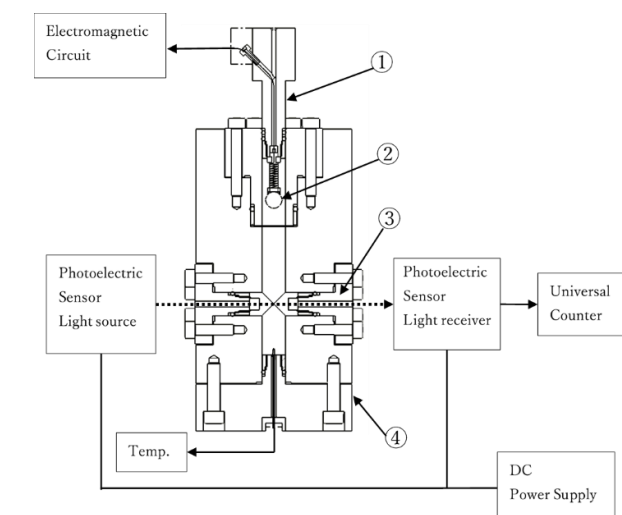
3.1 試験機概要及び計測原理

試験油の高圧粘性を測定するためには、一般的に落球式高圧粘度計を用いることが多い^[4,5,6,7,8]。落球式高圧粘度計の原理は加圧した試験油中に鋼球を落下させ、その落下速度から粘性抵抗を測定するものである。図2に試験機の概要を示す。

試験機本体は外形 80mm の円筒体であり、内部に 12mm の試験路と、その側面に観測窓を一對設けている。

試験手順は、試験機内部に試験油 15 ml を充填し、プランジヤを万能引張圧縮試験機にて加圧し試験油圧力を上昇させる。その後、プランジヤの先端に電磁石で保持されている直径 7.94mm の鋼球を落下させる。

試験機側面に設けた観測窓には、赤外 LED を光源とし応答時間 1ms 以下の投受光型光電センサを設けユニバーサルカウンタに接続している。試験油中を鋼球が落下することにより、光電センサの光軸が遮光される。この遮光時間と鋼球の直径から落下速度を算出する。



- ①加圧プランジヤ（電磁石搭載） ②鋼球（直径 7.94mm）
③観測窓 ④下部プラグ（熱電対搭載）

図2 落球式高圧粘度計の概要

3.2 粘度圧力係数 α の算出

粘度圧力係数 α は、落球式高圧粘度計にて測定した落下速度時間から下記の式より算出する。

高圧試験油中における鋼球の落下速度は小さく一定であるため、ストークスの粘性抵抗法則より近似的に絶対粘度を求めることができる^[4]。

鋼球が受ける粘性抵抗 f_1 [N] は

$$f_1 = 3\pi\eta dv \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで η : 流体の粘度 [Pa·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、同時に試験油中を落下する際に浮力の影響を受ける。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

$$f_2 = \frac{\pi}{6} d^3 \rho g - \frac{\pi}{6} d^3 \rho_0 g \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで ρ_0 : 鋼球の密度 [kg/m³] ρ : 流体の密度 [kg/m³]

g : 重力加速度 [m/s²]

鋼球が一定速度で落下していると考え、粘性抵抗 f_1 と重力により引っ張られる力 f_2 はつり合っており、 $f_1 = f_2$ である。よって流体の粘度 η [Pa·s] は

$$\eta = \frac{d^2(\rho_0 - \rho)g}{18v} \quad \dots \dots \dots (3)$$

測定した落下時間 t より高圧粘度 η_p を算出する

$$\eta_p = \frac{d(\rho_0 - \rho)g}{18} \cdot f_w \cdot t \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここで η_p : 圧力下での粘度 [Pa·s] d : 鋼球の直径 [mm]

ρ_0 : 鋼球の密度 [g/cm³]

ρ_p : 圧力下での油の密度 [g/cm³],

f_w : 測定における補正係数 [-]

油温一定の下、各圧力の高圧粘度から Barus の式を用い最小二乗法で粘度圧力係数 α を算出する。

$$\eta_p = \eta_0 e^{\alpha p} \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここで α : 粘度圧力係数 [GPa⁻¹]

p : 圧力 [GPa]（万能引張圧縮試験機の荷重）

η_0 : 大気圧下における粘度 [Pa·s]

η_p : 圧力下での粘度 [Pa·s]

4. 落球式高圧粘度計の設計及び製作

4.1 設計方針・目標

落球式高圧粘度計の試作にあたって下記設計目標を掲げた。

- ①試験圧力は 300 [MPa] とする。
本研究室が所有する可視化装置の、油膜観測部におけるヘルツ接触圧 300 [MPa] と同一条件とするため。
- ②試験機使用回数は 1000 回以下とする。
- ③一般的に入手可能な部品と素材のみを使用する。
- ④大学保有する工作機械（汎用旋盤、汎用フライス盤）で製作可能であること。

試作にあたっては、佐賀大学工学部馬渡研究室所有の落球式高圧粘度計を参考とし設計した。

4.2 試験機本体

落球式高圧粘度計の容器本体には、試験において内部が高圧 300[MPa]になる。そのため試験機本体には高い耐圧性が求められる。そのため図 3 に示す厚肉円筒における力の関係式から設計を進めた⁹⁾。

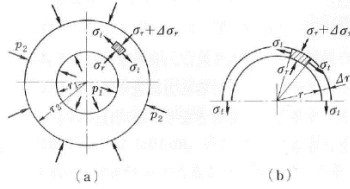


図3 内圧を受ける厚肉円筒

内圧 p_1 を受ける内径 r_1 、外径 r_2 の厚肉円筒では、図 5 に示すように、任意の半径 r の位置に微小な部分に作用する円周方向応力 σ_t と半径方向応力 σ_r は

$$\sigma_t = \frac{p_1 r_1^2 (r_2^2 + r^2) - p_2 r_2^2 (r^2 + r_1^2)}{(r_2^2 - r_1^2) r^2} \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$\sigma_r = -\frac{p_1 r_1^2 (r_2^2 - r^2) + p_2 r_2^2 (r^2 - r_1^2)}{(r_2^2 - r_1^2) r^2} \quad \dots \dots \dots (7)$$

内圧のみを受けるので $p_2 = 0$ となり

$$\sigma_t = \frac{p_1 r_1^2 (r_2^2 + r^2)}{(r_2^2 - r_1^2) r^2} = \frac{p_1 r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \frac{1}{r^2} + \frac{p_1 r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \quad \dots \dots \dots (8)$$

円筒内周面に生じる最大の引張応力 σ_{tmax} は

$$\sigma_{tmax} = \frac{(r_2/r_1)^2 + 1}{(r_2/r_1)^2 - 1} p_1 \quad \dots \dots \dots (9)$$

$r_2 - r_1 = t$ (板厚) とおけば

$$t = r_1 \left(\sqrt{\frac{\sigma_{tmax} + p_1}{\sigma_{tmax} - p_1}} - 1 \right) \quad \dots \dots \dots (10)$$

となる。

試験機本体の材料を S45C (引張強さ 570[MPa]、降伏点 345[MPa]) とし、外径 80[mm]、内径 12[mm]、厚み 34[mm] の場合、許容応力 σ_c を降伏点の 345[MPa] としたとき、許容内圧 p_1 は 329[MPa] となり、実験での最大加圧力 300MPa を満たす。

一般的な設計では材料の引張り強さ(最大応力)を基準に、安全率を 3~4 とし許容応力を考慮するが、今回の試験機の使用回数は 1000 回以下と考えている。ゆえに降伏点を許容応力として許容内圧の算出している。また、図 4 の S-N 曲線の赤色にて示した範囲内であり強度上問題はないと考えている。

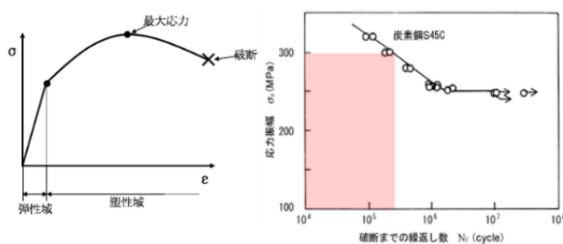


図4 応力ひずみ線図 及び S-N 曲線

4.3 気密性設計

落球式高圧粘度計の製作において最も考慮すべき点は内部試験油を高圧圧縮することによる試験油の油漏れである。

試験機本体には試験油の温度を測定するための下部プラグ、落下時間を測定するための観測窓、試験油を加圧するためのプランジャがあり、いずれも組付部からの油漏れが懸念される。参考とした佐賀大学製の試験機では組付部にベリリウム性バックアップリングなど特殊材料を用いたシール構造⁶⁾となっていたが、本学において材料入手、加工に困難であった。

そのため設計方針として掲げていたように一般的に入手可能な市販品を用いてシールする方法を検討した。

下部プラグ、観測窓プラグ、プランジャそれぞれと本体の接続は、はめあい公差 H7/h7 精度にて設計し、本体の組付部の穴加工後の精度を測定し、はめあい公差 0 となるようプラグは擦り合わせ加工を行っている。

また、各プラグにはフランジを設け、高強度ボルトによって締結することで、組付部のはめあい部に傾きや偏荷重が掛からないよう留意している。

本体とフランジ部接続面には油圧配管等に使用される銅ガasketを、はめあい部先端には O リングとレアフロン製バックアップリングを組付けはめあい部のシール性の向上を図っている。図 5 に詳細を示す。

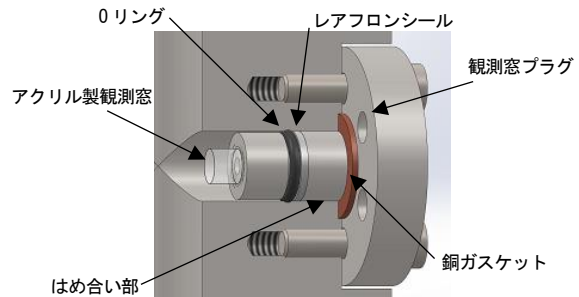


図5 プラグ組付部シール構造

プランジャについては、筒内圧力を加圧するとともに、先端に電磁石を設け、測定子となる鋼球の保持、落下を行えるようにしている。他のプラグと異なり摺動性も必要となるため、圧力容器との隙間は 0.03mm とし、O リングとレアフロン製バックアップリングを交互に用いて気密性も高めている。

また、プランジャには試験機内部から気抜用穴を加工している。測定時には気抜き後に油粘土を詰め込み最終密閉する。また電磁石の配線孔はエポキシ樹脂にて固定している。

観測窓先端にはアクリル窓を設定し、光電センサの光軸が透過している。今後は観測窓の素材を強度と透過率を考慮してサファイアガラスに交換予定である。

試験油の温度を測定するため下部プラグ部には熱電対を設定している。気密性保持の為、熱電対設置穴はタップ加工を行い自動車板金用の金属パテ(硬化後の抗張力 300MPa)を流して密閉している。

5. 測定試験

試作した落球式高圧粘度計の性能評価試験を行った。試験条件は試験油温 20℃とし、試料油には 5W-30 を用いた。また、測定は圧力範囲 0.043[MPa]～0.303[MPa]で行った。その結果を図 6 に示す。

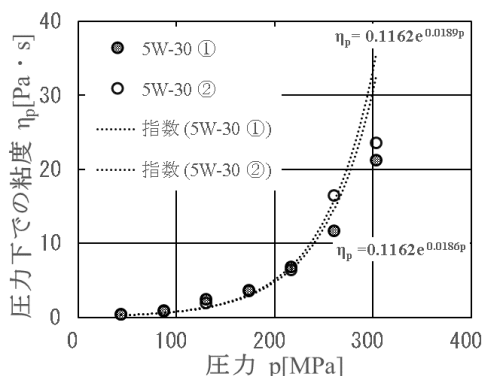


図 6 圧力下での粘度変化

5W-30 における粘度圧力係数 α は $\alpha=18.7$ であった。

実験では、圧力が高くなるにつれて粘度も指数関数的に高くなり、高圧になるにつれて粘度増加は鈍化した。その原因としては試験油の温度が 20℃であったため、高圧下において試料油が結晶化している可能性があると考えられる。そのため、今後 40℃での試験を行っていく必要性があると考えられる。

高圧粘度試験の 20℃で行った実験結果より求めた α 値を、著者がこれまで取り組んできた可視化実験における軸受接触面に形成される油膜厚さの理論値に代入し、実測値と比較したグラフを図 7 に示す。5W-30 の理論線と実験値 (○) の値はほぼ等しくなった。

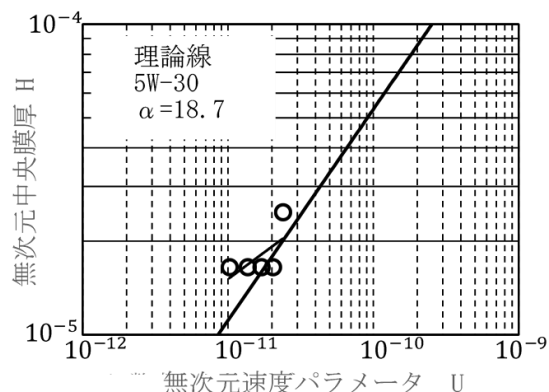


図 7 無次元中央膜厚と無次元速度パラメーターの関係 (20℃)

6. 結論

試作した落球式高圧粘度計を用いて、試験油の粘度圧力係数 α を算出することが可能となった。算出した α を用いることで、潤滑面に形成される油膜厚さの理論値と実測値の差も近いものとなり当初の設計目標を達成している。

7. あとがき

試験運用中に熱電対の芯線と被覆の間に高圧になった試験油が入り込み油漏れを繰り返した。現状は板金パテの流し込み方で対応しているが、自動車用水温センサの流用等も検討し、安全性の向上と汎用性を高めていきたいと考えている。

参考文献

- [1] 里永憲昭, 渡邊孝司, 竹川秀男: 潤滑油の新還元添加剤による自動車と産業装置における合成油寿命延長の考察, 日本トライボロジー学会メンテナンス・トライボロジー研究会, 創立 30 周年記念シンポジウム予稿集, Paper, p5 (2017)
- [2] 城戸祥成, 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-IPN) の挙動と高圧粘性に関わる考察, 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, Paper, pp.95-100 (2018)
- [3] 竹田雄祐, 里永憲昭, 渡邊孝司, 園田智之: 転がり軸受の損傷に与える自動車と産業機械における潤滑油新還元添加剤 (SOD-IPN) の寿命効果に対する考察, 第 17 回評価・診断に関するシンポジウム, 講演論文集, 116, Paper, pp75-80(2018)
- [4] T. Mawatari, T. Harada, M. Yano, H. Shiomi, S. Obara, N. Ohno : Rolling Bearing Performance and Film Formation Behavior of Four Multiply-Alkylated Cyclopentane (MAC) Base Greases for Space Applications Tribology Transactions, pp561-571, 56, 4 (2013)
- [5] 村木正芳: 「図解トライボロジー-摩擦の化学と潤滑技術」, 日刊工業新聞社, pp112-113(2007)
- [6] 大野信義: 実験装置開発-悪戦苦闘の日々-, “トライボロジスト” 第 58 巻 第 5 号, pp337-340(2013)
- [7] 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 巻 第 10 号, pp654-666(2017)
- [8] 倉野恭充, 吉田清: 落球式高圧粘度計の試作と性能評価 計測自動制御学会論文集, Vol.28, No.9, pp1023-1028(1992)
- [9] 堀野正俊: 「機械工学入門シリーズ材料力学入門」, オーム社, pp127-129(1993)