



特集技術論文

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* 大瀬勝弥* 渡邊孝司** 園田智之**

*崇城大学 **D1 ケミカル

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

Yusuke TAKEDA*, Noriaki SATONAGA*, Masaya OSE*,
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際に、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 評価等において理論値と観測値の乖離が時々確認されていたので、その結果を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: 内燃機関, 動力伝達装置, エンジンオイル, ギアオイル, 添加剤, EHL, トライボロジー

The authors have developed a new additive (SOD-1PN) as an improvement on the proprietary reduction additive (SOD-1 Plus) based on polyol esters, diesters and vegetable oil based esters. The new additive improves wear resistance and lubricity, adds a high viscosity poly alpha olefin (PAO) component that is not susceptible to shear to improve oil film retention performance, and adds sulfur and zinc components as extreme pressure agents. The lubricating film regeneration effect is enhanced. By the way, in evaluating the tribological performance under the elastohydrodynamic lubrication condition on the contact surface of the bearing, the viscosity pressure coefficient used in the theoretical evaluation method so far has been applied as a general value. However, since cases where the results were deviated from the theory were sometimes confirmed in EHL evaluation etc. it became necessary to re-verify the results. Therefore, in this report, in order to observe the high pressure physical properties of the lubricating oil, a falling ball type high pressure viscometer was developed as a trial, and the test evaluation method was verified.

KEY WORDS: internal combustion engine, power train, engine oil, gear oil, ester-based additives, EHL, tribology

1. まえがき

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際に、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 評価等において理論値と観測値の乖離が時々確認されていたので、その結果を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はヘルツ接触となる。その圧力は 300[MPa]程度の高圧で、弾性流体潤滑 (EHL) 条件となる。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]}。

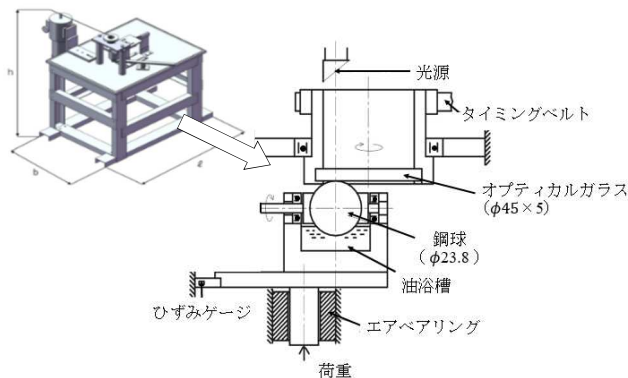


図 1 可視化装置の概要

実際の膜厚は光干渉法で求め、油膜厚さの理論値計算は Hamrock-Dowson^[4]の式(1), (2)を用いて算出する。

$$H_c = \frac{h_c}{R} = 4.31U^{0.68}G^{0.49}W^{-0.073}(1 - e^{-1.23k}) \cdots \cdots (1)$$

$$H_{\min} = \frac{h_{\min}}{R} = 3.68U^{0.68}G^{0.49}W^{-0.073}(1 - e^{-0.67k}) \cdots \cdots (2)$$

$$H = \frac{h}{R} \quad \text{無次元膜厚}$$

$$U = \frac{\eta_0 u}{ER} \quad \text{速度パラメータ}$$

$$G = \alpha E \quad \text{材料パラメータ}$$

$$W = \frac{w}{ER^2} \quad \text{荷重パラメータ}$$

η_0 : 大気圧下の粘度 [Pa・s]

u : 周速 [m/s]

E : 縦弾性係数 [Pa]

w : 荷重 [N]

α : 粘度圧力係数 [GPa⁻¹]

R : 等価曲率半径 [mm]

k : ヘルツ接触円の長径短径比 [-]

式(1), (2)の特徴は荷重パラメータの影響が極めて小さく、材料パラメータの影響が大きいことである。材料パラメータにおいて材料を変更しない限り縦弾性係数は不変であるため、粘度圧力係数 α の影響が非常に大きいことと示している。

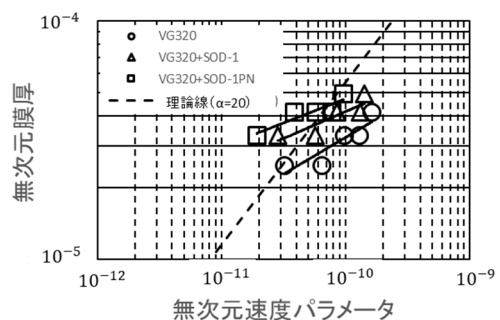


図 2 VG320(40℃)における無次元膜厚評価

図 2 はギヤ油 VG320 における新添加剤の添加前後の油膜厚さを比較したものである^[2]。基準油に対して新添加剤を添加することで油膜厚さは上昇しているが、それぞれの観測値は理論値と乖離が見られた。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]。よって高圧下における潤滑油の正確な粘度圧力係数 α を測定する。

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^{[5],[6],[7]}。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3に試験機の概要を示す。

試験機本体は外径 80mm の円筒体であり、内部に内径 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。試験油中に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。

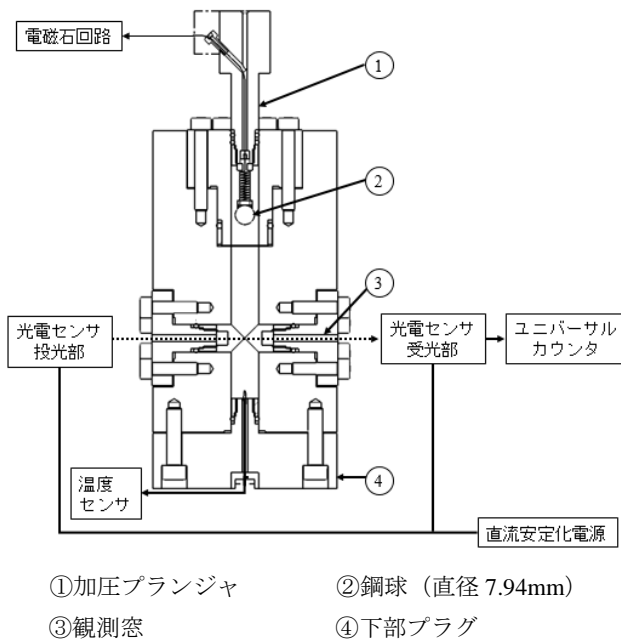


図3 落球式高圧粘度計の概要

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^{[5],[8]}。

鋼球が受ける粘性抵抗 f_1 [N]は式(3)から

$$f_1 = 3\pi\eta d v \quad \dots \dots \dots (3)$$

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]は式(4)から

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

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 は釣り合っており、 $f_1=f_2$ である。よって流体の粘度 η [Pa・s]は式(5)から

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

測定した落下時間 t [sec]より高圧粘度 η_p を式(6)で求める。

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

η_p : 圧力下での粘度[Pa・s]

d : 鋼球の直径[m]

ρ_p : 圧力下での油の密度[kg/m³],

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(7)を用い最小二乗法で粘度圧力係数 α を算出する。

$$\eta_p = \eta_0 e^{\alpha p} \quad \dots \dots \dots (7)$$

η_p : 圧力下での粘度[Pa・s]

η_0 : 大気圧下における粘度[Pa・s]

α : 粘度圧力係数[GPa⁻¹]

p : 圧力[GPa]

4. 落球式高压粘度計の設計及び製作

4.1 設計方針・目標

試作にあたって下記の設計目標を掲げた。

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10,000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压粘度計を参考として設計した。

4.2 試験機本体

落球式高压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4に示す厚肉円筒における力の関係式から設計を進めた¹⁹⁾。

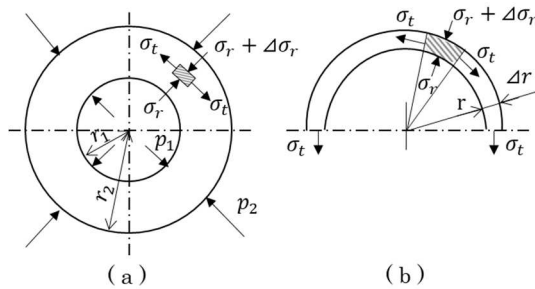


図4 内圧を受ける厚肉円筒

内圧 p_1 を受ける内径 r_1 、外径 r_2 の厚肉円筒では、図4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 は式(8)、(9)より

$$\sigma_t = \frac{p_1 r_1^2 (r_2^2 + r^2) - p_2 r_2^2 (r^2 + r_1^2)}{(r_2^2 - r_1^2) r^2} \quad \dots \dots \dots (8)$$

$$\sigma_r = -\frac{p_1 r_1^2 (r_2^2 - r^2) + p_2 r_2^2 (r^2 - r_1^2)}{(r_2^2 - r_1^2) r^2} \quad \dots \dots \dots (9)$$

内圧のみを受けるので $p_2 = 0$ となり σ_t は式(10)から

$$\sigma_t = \frac{p_1 r_1^2 (r_2^2 + r^2)}{(r_2^2 - r_1^2) r^2} = \frac{p_1 r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \frac{1}{r^2} + \frac{p_1 r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \quad \dots \dots \dots (10)$$

円筒内周面に生じる最大の引張応力 σ_{tmax} は式(11)より

$$\sigma_{tmax} = \frac{(r_2/r_1)^2 + 1}{(r_2/r_1)^2 - 1} p_1 \quad \dots \dots \dots (11)$$

$r_2 - r_1 = t$ (板厚) とおけば式(12)に示すように

$$t = r_1 \left(\sqrt{\frac{\sigma_{tmax} + p_1}{\sigma_{tmax} - p_1}} - 1 \right) \quad \dots \dots \dots (12)$$

となる。

(4)

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_t 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300[MPa]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10,000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5のS-N曲線の灰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。

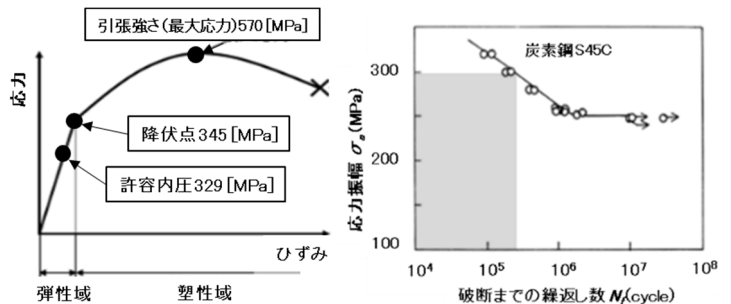


図5 応力ひずみ線図 及び S-N 曲線

4.3 気密性設計

落球式高压粘度計の製作において最も考慮すべき点は、内部試験油を高压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製バックアップリングなど特殊材料を用いたシール構造¹⁹⁾であった、今回は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、プランジャのそれぞれと本体の接続は、はめあい公差H7/h7の精度にて設計し、本体の組付部の穴加工後の精度を測定し、はめあい隙間0となるように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てはめあい部のシール性の向上を図っている。観測窓プラグとプランジャ部の詳細を図6に示す。

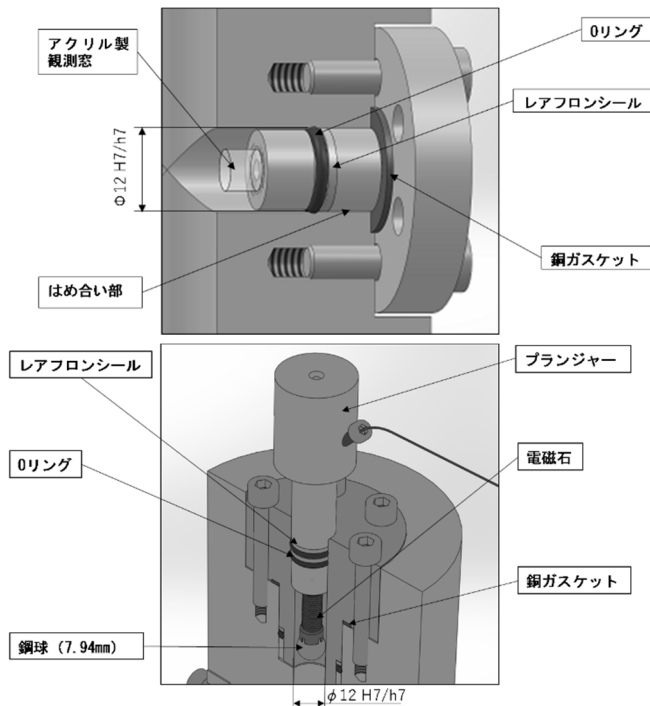


図6 プラグ組付部シール構造

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、Oリングとレアフロンスीलを2段階化して気密性も高めている。

観測窓先端にはアクリル窓を設け、光電センサの光軸が透過している。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エポキシ系金属接着剤（硬化後の抗張力 300MPa）を用いて設置している。

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、試料油にはエンジン油 5W-30 とギヤ油 VG320 を用いた。また、測定は圧力範囲 43～300[MPa]で行った。その結果を表 1, 2 に示す。

5W-30 の圧力下における粘度変化を図 7 に示す。圧力の上昇に伴い粘度も指数関数的に高くなったが、255[MPa]以上の高圧域では粘度増加は鈍化した。粘度圧力係数 α は $\alpha=18.9$ となった。

VG320 の圧力下における粘度変化を図 8 に示す。VG320 において、試験圧力は 300[MPa]まで加圧し試験機から油漏れは発生していない。しかしながら、204[MPa]以上の圧力下では測定子が落下しない現象が発生したため、観測範囲から粘度圧力係数を算出すると $\alpha=19.7$ であった。

表 1 高圧試験結果 5W-30 (20℃)

荷重[N]	圧力[GPa]	落下時間 [s]	加圧下での粘度 [Pa・s]
51	0.043	0.076	0.46
102	0.087	0.137	0.82
153	0.130	0.329	1.97
204	0.173	0.601	3.59
255	0.217	1.077	6.42
306	0.260	2.762	16.45
353	0.300	3.964	23.56

表 2 高圧試験結果 VG320 (20℃)

荷重[N]	圧力[GPa]	落下時間 [s]	加圧下での粘度 [Pa・s]
51	0.043	0.286	1.71
102	0.087	1.034	6.17
153	0.130	3.118	18.54
204	0.173	6.763	40.14

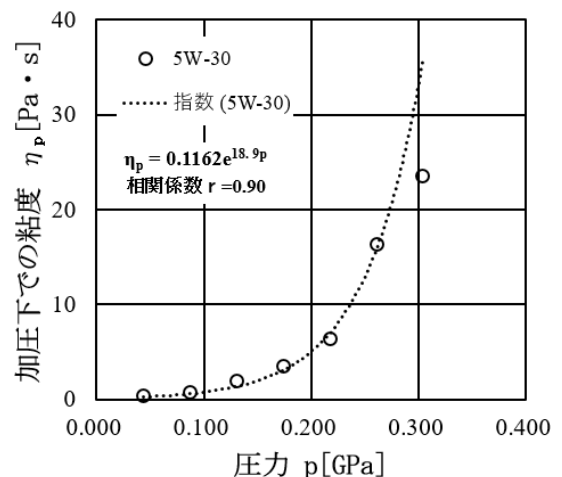


図7 圧力下での粘度変化 5W-30

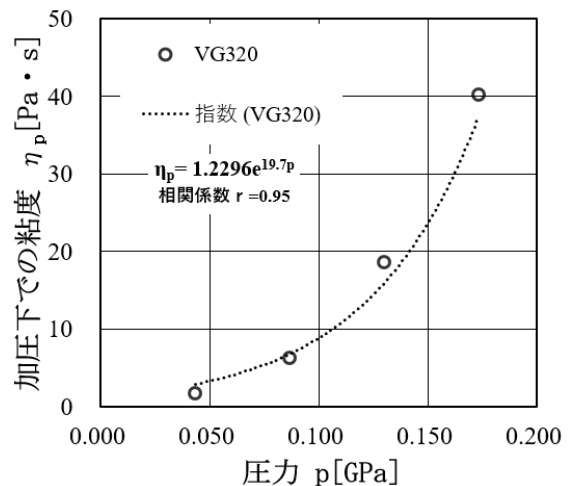


図8 圧力下での粘度変化 VG320

6. 結論

- 1) 試作した落球式高圧粘度計は、20℃の 5W-30 と VG320 において、破損・油漏れなく試験内圧 300[MPa]を達成することができた。
- 2) 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。
- 3) 粘度圧力係数はエンジン油 5W-30 で $\alpha=18.9$ 、ギヤ油 VG320 で $\alpha=19.7$ であった。

7. あとがき

圧力と粘度の関係が既知である試料油を用いて、落球式高圧粘度計の個体差を確認し、粘度圧力係数の測定精度を高めていきたい。

謝 辞

落球式高圧粘度計の製作に当たり、実機の紹介、設計・製作時の助言を頂いた佐賀大学馬渡俊文准教授と、製作指導頂いた崇城大学ものづくり創造センター職員の方々に対して謝辞を表す。

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-1PN) 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-1PN) 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, pp.75-80(2018)
- [4] 佐々木信也ほか: 数値解析と表面分析によるトライボロジーの解明と制御, テクノシステム, pp.81-92 (2018)
- [5] 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, pp.561-571, 56, 4 (2013)

- [6] 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, pp.112-113(2007)
- [7] 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, pp.1023-1028(1992)
- [8] 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, pp.654-666(2017)
- [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, pp.127-129(1993)

著者紹介



竹田 雄祐 (たけだ ゆうすけ)
崇城大学 (旧熊本工業大学) 工学部機械工学科助教。2008 年久留米工業大学大学院工学研究科修士課程修了。2008 年平田機工(株)入社。2018 年より現職。



里永 憲昭 (さとなが のりあき)
崇城大学工学部機械工学科教授。2009 年三重大学大学院生物資源学研究科博士後期課程修了。1990 年昭和電工(株)入社。2014 年より准教授, 教授。現在に至る。博士 (学術)



大瀬 勝弥 (おおせ まさや)
2019 年崇城大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程 1 年生。



渡邊 孝司 (わたなべ たかし)
有限会社 D1 ケミカル (最高顧問)
1969 年関東学院大学工学部 2 部機械工学科卒。久留米工業大学名誉教授。瀋陽大学客員教授。自動車技術会フェロー。2014 年より現職。博士(工学)



園田 智之 (そのだ ともゆき)
有限会社 D1 ケミカル 代表取締役
(〒812-0897 福岡県福岡市博多区半道橋 1-3-45) (TEL 092-292-4439)
1998 年に福岡県自動車整備振興会教育部の協力のもと「SOD-1」を開発。