

統計解析による潤滑油の高圧粘度の推算と各種粘度圧力温度関係式との比較

Estimation of high-pressure viscosity of lubricants by statistical analysis
and comparison of various viscosity pressure temperature equation

高圧物性ラボ [元 出光興産] (正) *金子 正人

Masato Kaneko*

* High-Pressure Property Laboratory (E-mail mk3111@outlook.jp)

1. はじめに

1959年にDowsonらが発表したReynolds方程式にもとづくEHL理論により、軸受・歯車やトラクションドライブなどのヘルツ接触面での油膜厚さと圧力分布を求めることが可能となった¹⁻³⁾。このEHL理論は、潤滑油の高圧粘度および高圧密度が関係するため、これらの高圧物性を知ることは重要である。そこで高圧粘度を推算するために、既報にて、経験式の拡張Barus粘性式⁴⁾、理論式のvan der Waals型粘性方程式⁵⁾の2式を導出した。このように、粘度圧力温度関係式が複数存在することがわかっている。

一方、近年では機械学習に代表されるような、統計手法を用いた解析が盛んに行われるようになり、理論が明確になっていなくとも予測が可能となってきた^{6,7)}。そこで、本研究では経験や理論に基づくことなく、統計解析による潤滑油の高圧物性を推算することの可能性を明確にすることを目的とし、既報^{8,9)}の高圧密度に続き、統計解析による高圧粘度の推算の可能性について検討した。

その結果、統計解析による高圧粘度の推算式として、2変数2次多項重回帰粘性式を導出した。この2変数2次多項重回帰粘性式に物理的意味はないが、EXCELの回帰分析を用いて自動計算により簡単に求められるとともに、拡張Barus粘性式やvan der Waals型粘性方程式と演繹的にも帰納的にも等価であり、いずれも内挿領域の誤差%の標準偏差が小さいことから有効性は高く、同等の推算性を示し、粘度という物性について切り口を変えて見ているに過ぎないことがわかった。なお、この重回帰式は、本報で検討した各サンプル油に類似した潤滑油の液体領域において適用可能である。

以上のように、重回帰式を用いた統計解析により、経験や理論に基づくことなく、経験式や理論式と同等の予測が可能なが検証できた。

2. 対象とするサンプル油

対象とするサンプル油は、文献4)に記載のある市販のエンジン油、変速機油、ギヤ油、冷凍機油、トラクション油、油圧油および各種基油単体のLubricant 1~16の16種類を用いた。なお、各サンプル油は、圧力範囲0~0.25GPa、温度範囲40~100℃の液体領域で測定したものである。

一例として、Lubricant 1の各圧力、温度における37個の粘度データと粘度-圧力線図をTable 1およびFigure 1に示す。

Table 1 High Pressure Viscosity of Lubricant 1

P, GPa	η , mPa·s			
	40°Cobs	60°Cobs	80°Cobs	100°Cobs
0.000	29.52	16.12	9.852	6.549
0.025	45.37	23.21	13.63	9.020
0.050	68.27	33.95	19.17	12.32
0.075	98.49	48.59	26.70	16.63
0.100	136.4	67.39	36.44	22.11
0.125	182.2	90.64	48.65	28.95
0.150	-	118.6	63.54	37.32
0.175	-	151.5	81.36	47.40
0.200	-	189.7	102.3	59.36
0.225	-	-	126.7	73.38
0.250	-	-	154.7	89.64

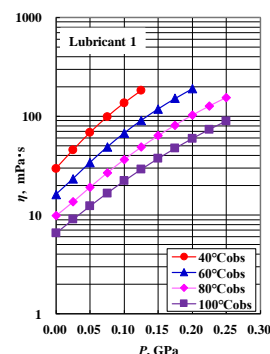


Fig. 1 Viscosity vs Pressure of Lubricant 1

3. 2変数2次多項重回帰粘性式の導出とLubricant 1の高圧粘度の推算

Lubricant 1の対数粘度は、Fig.1に示すように、圧力に対して正の2次曲線的に変化する。また、Fig.2に示すように、温度に対して負の2次曲線的に変化する。そこで、対数粘度 $\ln\eta_{pt}$ を目的変数とし、温度 T 、 T^2 と圧力 P 、 P^2 の4つを説明変数とする2変数2次多項式について重回帰分析し、式(1-1)に示す重回帰粘性式を導出した。

$$\ln\eta_{pt}=I+A_{T1}T+A_{T2}T^2+B_{P1}P+B_{P2}P^2 \quad (1-1)$$

ここで、式(1-1)は、演繹的にも帰納的にも既報^{4,5)}の各式と等価であり、粘度という物性について切り口を変えて見ているに過ぎない。なお、注意すべきことは、統計解析手法を用いた式であり、物理的意味はない。

また、解析はEXCELの回帰分析を用いて自動計算し、式(1-2)に示すように、Lubricant 1のPRC値(偏回帰係数: I , A_{T1} , A_{T2} , B_{P1} , B_{P2})を求めた。

$$\ln\eta_{pt}(\text{Lubricant 1})=24.84-0.1010T+0.0001049T^2+15.43P-17.61P^2 \quad (1-2)$$

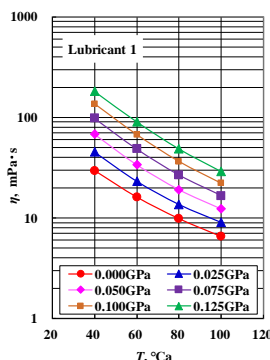


Fig. 2 Viscosity vs Temperature of Lubricant 1

Lubricant 1 について、式(1-2)から求めた高圧粘度の計算値、誤差%, 誤差%の最大値、最小値および誤差%の標準偏差を Table 2 に示す。また、実測値と計算値の粘度圧力線図の比較結果を Fig.3 に示す。

ここで、Lubricant 1 の実測値と計算値との誤差%は-12.23~11.34%の範囲にあり、誤差%の標準偏差は 4.45 と小さく、式(1-2)の有効性は高いと言える。なお、Lubricant 2~16 の実測値と計算値の粘度圧力線図を、文末の Appendixes Fig. A1 に示す。

以上のように、2 変数 2 次多項重回帰粘性式の導出により、潤滑油の高圧粘度 η_{pt} の推算ができることがわかった。なお、式(1-2)は、Fig.4 に示す $PT\eta$ の 3 次元曲面をそのまま解析したことを意味する。

4. Lubricant 1 の各粘度圧力温度関係式の比較

既報にて導出した拡張 Barus 粘性式や van der Waals 型粘性方程式の原型を式(2-1)、式(3-1)に示す。なお、各記号は、 η_{0t} (大気圧粘度)、 ρ_{0t} (大気圧密度)、 δ (圧力-温度-無次元密度-粘性係数)、 $\eta_{t=0}$ (絶対零度粘度)、 $1/B$ ($\equiv S$:粘性定数)、 C/B ($\equiv P_V$:圧力定数)である。

ここで、Lubricant 1 の PCR 値と各粘度圧力温度関係式の固有定数を Table 3 に示す。

Table 2 Calculation results of high pressure viscosity of Lubricant 1

GPa	η , mPa·s							
	40°Ccalc.	err%	60°Ccalc.	err%	80°Ccalc.	err%	100°Ccalc.	err%
0.000	32.87	11.34	16.90	4.83	9.451	-4.07	5.748	-12.23
0.025	47.81	5.37	24.58	5.91	13.75	0.86	8.361	-7.31
0.050	68.03	-0.35	34.98	3.03	19.56	2.04	11.90	-3.48
0.075	94.69	-3.86	48.69	0.21	27.23	1.99	16.56	-0.43
0.100	128.9	-5.45	66.30	-1.62	37.08	1.73	22.55	1.97
0.125	171.7	-5.74	88.31	-2.57	49.38	1.52	30.03	3.74
0.150	-	-	115.1	-2.97	64.35	1.27	39.13	4.86
0.175	-	-	146.7	-3.21	82.02	0.82	49.88	5.24
0.200	-	-	182.9	-3.60	102.3	-0.06	62.19	4.78
0.225	-	-	-	-	124.7	-1.55	75.86	3.38
0.250	-	-	-	-	148.8	-3.79	90.52	0.97
max err%		11.34		5.91		2.04		5.24
min err%		-5.74		-3.60		-4.07		-12.23
σ err%	4.45							

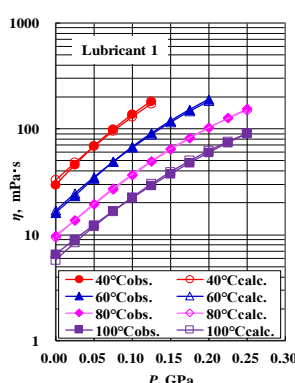


Fig.3 Comparison of viscosity between observation and calculation value by equation (1-1) of Lubricant 1

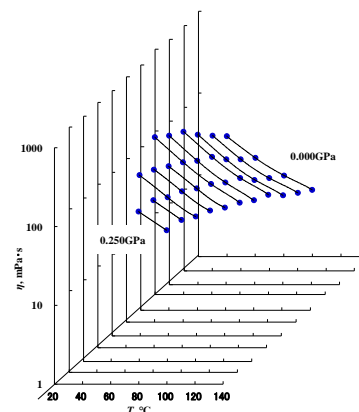


Fig.4 $PT\eta$ 3-dimensional curved surface of Lubricant 1

$$\ln(\eta_{pt}/\eta_{0t})=\delta[1/(\rho_{pt}/\rho_{0t})^3]P/T \quad (2-1)$$

$$P=(1/B)T^2/[\ln(\ln(\eta_{t=0}))-\ln(\ln(\eta_{pt}))]-C/B \quad (3-1)$$

Table 3 PCR values and Several Material-Specific Constant of Lubricant 1

Test Sample	2,2MReq.					eEq.	vdWVeq.		
	$I(=\ln\eta_{00})$ mPa·s	A_{T1} 1/K	A_{T2} 1/K ²	B_{P1} 1/GPa	B_{P2} 1/GPa ²	δ K/GPa	$\ln(\ln(\eta_{t=0}))$ mPa·s	$\eta_{t=0}$ mPa·s	P_V GPa
Lubricant 1	24.84	-1.010E-01	1.049E-04	15.43	-17.61	5596	2.661	1.641E+06	4.824E-06

2,2MReq.: 2 variable Secondary Multiple Regression equation, eEq.: extended Barus Viscosity equation

vdWVeq.: van dell Walls type Viscosity equation

4.1 2 変数 2 次多項重回帰粘性式について

Lubricant 1 について、重回帰分析で得られた式(1-2)の 2 変数 2 次多項重回帰粘性式の回帰統計、分散分析表、PCR 値の標準誤差等のデータおよび正規確率線図を Tables 4~6 および Fig.5 に示す。

重回帰決定係数 R^2 は 0.9976 であり、重回帰分析の結果の有意性を判定する F 検定に用いられる P 値 (=有意 F 値)は 2.309E-41 と限りなく 0 に近い値であり、式(1-1)の有意性は高いことを示している。また、各 PCR 値の P 値も、限りなく 0 に近い値であり、PCR 値の有意性が高いことを示している。なお、Fig.5 から、百分位数の下限付近での粘度の値は正規分布からずれが生じていることがわかる。これは低粘度側の内挿値と外挿値の分岐点に位置している値のためである。

なお、式(1-2)において、外挿領域について考察すると、同時に $T=0$, $P=0$ となる場合には、式(1-3)に示すように切片 I となり、粘度の値は η_{00} となる。

この値は、 $T=0$, $P=0$ における境界値としての絶対零度粘度を示す。一方、 $P \rightarrow \infty$ においては、説明変数 P^2 の PRC 値の B_{P2} が負の

トライボロジー会議 2024 春東京 予稿集

Table 4 Regression statistics of Lubricant 1

Multiple Regression Correlation Coefficient R	0.9988
Multiple Regression Determination Coefficient R^2	0.9976
Revision MRDC R^2	0.9973
Standard Error	0.0475
Number of Observations	37

Table 5 Analysis of variance table of Lubricant 1

Source	Degrees of Freedom	Fluctuation	Distributed	F value	P value
Regression	4	2.981E+01	7.452E+00	3301	2.309E-41
Residual error	32	7.224E-02	2.258E-03		
Total	36	2.988E+01			

Table 6 Partial regression coefficient (PRC), Standard error, t -value, F -value, 95% lower and upper edge values of Lubricant 1

	PRC	SE _{PCR}	t -value	P -value	下限 95%	上限 95%
I	24.84	2.390E+00	10.40	8.696E-12	19.98	29.71
A_{T1}	-1.010E-01	1.389E-02	-7.273	2.895E-08	-1.293E-01	-7.273E-02
A_{T2}	1.049E-04	2.011E-05	5.214	1.065E-05	6.389E-05	1.458E-04
B_{P1}	15.43	3.631E-01	42.50	1.007E-29	14.69	16.17
B_{P2}	-17.61	1.487E+00	-11.84	3.093E-13	-20.64	-14.58

値であることから、式(1-4)に示すよう粘度の値は収束せず発散し $-\infty$ となる。また、 $T \rightarrow \infty$ においては、説明変数 T^2 の PRC 値の A_{T2} が正の値であることから、式(1-5)に示すよう粘度の値は収束せず発散し $+\infty$ となり、推算式として全く成り立たないことがわかる。

$$\eta_{p \rightarrow 0, t=0} = I (= \eta_{00}) \quad (1-3)$$

$$\eta_{p \rightarrow \infty} = -\infty \quad (1-4)$$

$$\eta_{t \rightarrow \infty} = +\infty \quad (1-5)$$

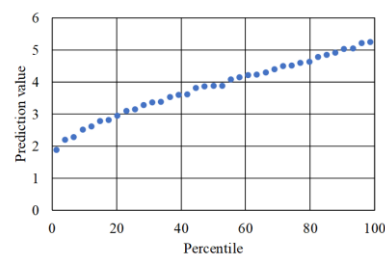


Fig. 5 Normal probability graph of Lubricant 1

4.2 拡張 Barus 粘性式について

式(2-1)の拡張 Barus 粘性式は、Fig.6 の $\ln(\eta_{pt}/\eta_{0t}) * (\rho_{pt}/\rho_{0t})^3 - P/T$ 線図に示すように、 $P=0$ のときに、式(2-2)、式(2-3)に示すように粘度比および密度比が 1 となり、式(2-1) を変形した式(2-4)の両辺が 0 になり、Fig.6 の原点を示している。また、 $T=0$ のときには、右辺が $+\infty$ となることから、粘度は $+\infty$ に発散するものと思われる。

$$\eta_{p \rightarrow 0, t}/\eta_{0t} = 1 \quad (2-2)$$

$$\rho_{p \rightarrow 0, t}/\rho_{0t} = 1 \quad (2-3)$$

$$\ln(\eta_{pt}/\eta_{0t}) * (\rho_{pt}/\rho_{0t})^3 = \delta P/T \quad (2-4)$$

また、外挿領域について考察すると、圧力 P が 0.25GPa 以上および温度 T が 40°C 以下、100°C 以上においても、式(2-1)の傾き δ の線上に値があるものと思われ、特異的な境界値はとらないことがわかる。なお、 η_{0t} (大気圧粘度)と ρ_{0t} (大気圧密度)が基準値となっていることに注意する必要がある。

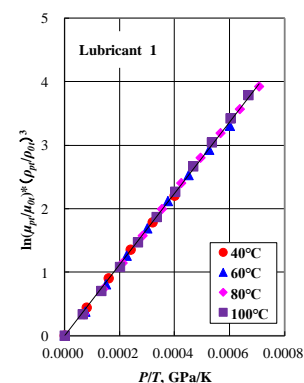


Fig.6 $\ln(\eta_{pt}/\eta_{0t}) * (\rho_{pt}/\rho_{0t})^3 - P/T$ relation for Lubricant 1 by extended Barus viscosity equation

4.3 van der Waals 型粘性方程式について

式(3-1)の van der Waals 型粘性方程式は、Fig. 7 の $\ln(\ln(\eta_{pt})) - T$ 線図および $1/A_p - P$ 線図に示すように、式(3-2)と式(3-3)からなり、式(3-2)より、van der Waals 型粘性方程式は、 $T=0$ の絶対零度に境界値(固有定数)を有しており、絶対零度で粘度は圧力に依存せず、最大粘度 $\eta_{t=0}$ を示すことがわかる。なお、Table 3 に示すように Lubricant 1 の $\eta_{t=0}$ は $1.641E+0.6[\text{mPa}\cdot\text{s}]$ である。また、式(3-3)より、 $P=0$ において $1/A_p = C$ となり、境界値(固有定数)を示すことがわかる。Lubricant 1 の値は $C = 69200[\text{K}^2]$ である。

$$\ln(\ln(\eta_{pt})) = \ln(\ln(\eta_{t=0})) - A_p T^2 \quad (3-2)$$

$$1/A_p = BP + C \quad (3-3)$$

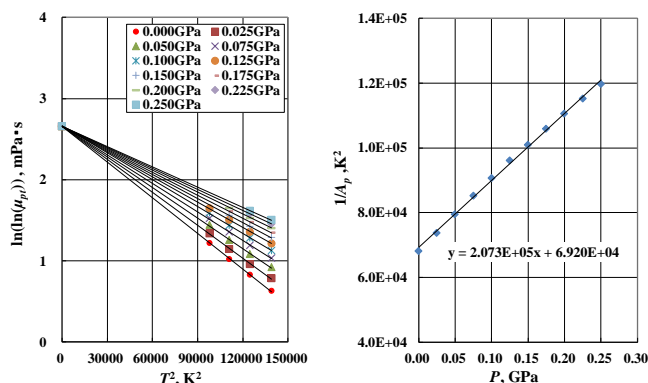


Fig.7 Viscosity vs Temperature relation and $1/A_p$ vs Pressure relation of Lubricant 1

5. 考察

5.1 内挿領域における推算値の比較

各推算式の内挿領域における推算値の比較として、2 変数 2 次多項重回帰粘性式の Table 2 と同様に、拡張 Barus 粘性式および van der Waals 型粘性方程式の各温度における粘度の計算値と実測値とのおよび誤差%の標準偏差を Tables 7,8 に示す。この結果、3 つの推算式の計算値と実測値は良く一致し、いずれも内挿領域の誤差%の標準偏差が小さいことから有効性は高いことがわかった。したがって、2 変数 2 次多項重回帰粘性式は、物理的意味はないが、粘度という物性について切り口を変えて見ているに過ぎず、経験式や理論式と同等の推算性を示すことがわかった。

5.2 外挿高圧領域の推算値の比較

Lubricant 1 について、40°Cにおける各推算式の外挿高圧領域における推算値と実測値の比較結果を Fig.8 に示す。●の実測値部分では 5.1 節で述べたように各推算値は良い一致を示すが、各推算式の外挿高圧領域における推算値は大きく異なっている。なお、外挿高圧領域のほとんどは、凝固点やガラス転移点¹⁰⁾を越えた固体領域にあることから、液体領域で導出された各推算式が成り立たないことは明らかである。そのため、高圧固体領域における拡張

Table 7 Calculation viscosities of Lubricant 1 by extended Barus equation

GPa	η , mPa·s							
	40°Ccalc.	err%	60°Ccalc.	err%	80°Ccalc.	err%	100°Ccalc.	err%
0.000	29.52	0.00	16.12	0.00	9.852	0.00	6.549	0.00
0.025	45.32	-0.11	24.08	3.74	14.36	5.34	9.353	3.68
0.050	67.24	-1.51	34.74	2.33	20.19	5.32	12.91	4.78
0.075	96.88	-1.63	48.69	0.21	27.58	3.31	17.35	4.32
0.100	136.2	-0.14	66.60	-1.18	36.80	0.99	22.79	3.08
0.125	187.3	2.82	89.28	-1.49	48.20	-0.91	29.43	1.64
0.150	-	-	117.7	-0.72	62.22	-2.08	37.47	0.39
0.175	-	-	153.2	1.10	79.42	-2.38	47.20	-0.41
0.200	-	-	197.2	3.96	100.6	-1.72	59.02	-0.57
0.225	-	-	-	-	126.7	-0.02	73.43	0.07
0.250	-	-	-	-	159.1	2.87	91.12	1.65
max err%		2.82		3.96		5.34		4.78
min err%		-1.63		-1.49		-2.38		-0.57
σ err%					2.22			

Barus 固体粘性式や van der Waals 型固体粘性方程式の構築が必要と考えられる。

5.3 外挿低温および高温領域の推算値の比較

0.125GPa における各推算式の外挿低温および高温領域における推算値と実測値の比較結果を Fig.9 に示す。●の実測値部分の推算値は良い一致を示すが、各推算式の外挿低温領域における推算値は大きく異なっている。この領域も凝固点やガラス転移点を越えた固体領域にあり、液体領域で導出された各推算式が全く成り立たないことがわかった。なお、低温固体領域についても、拡張 Barus 固体粘性式や van der Waals 型固体粘度方程式の構築が必要と考えられる。

一方、外挿高温領域は液体領域にあり、拡張 Barus 粘性式および van der Waals 型粘性方程式の推算値はほぼ同等の値を示すのに対して、2 変数 2 次多項重回帰粘性式の推算値は増加する傾向を示した。

5.4 各推算式の特徴

各推算式の特徴として、固有定数の数、基準となる粘度および密度、絶対零度での収束性(η_{p0}/η_{00})、外挿領域における最大粘度(境界値)、粘度と PT との物理的關係、導出のために必要な最小サンプル数、導出のためのグラフの数、導出のし易さ、推算のし易さについて纏めると Table 9 のようになる。

ここで、外挿領域における最大粘度 η_{\max} を比較すると、拡張 Barus 粘性式は、4.2.2 項の式(2-4)により絶対零度において無限大となり発散してしまうのに対して、2 変数 2 次多項重回帰粘性式と van der Waals 型粘性方程式は絶対零度で収束し境界値をとる。なお、最大粘度は外挿低温領域の境界値であり、実用的な値ではないことを付け加えておく。

また、導出性、推算性について比較すると、拡張 Barus 粘性式は、大気圧粘度、大気圧密度を基準としており、推算式を作る上で、必要な最小サンプル数が多く導出性に劣る、また、目的とする温度での推算を行う場合、その温度での大気圧粘度、大気圧密度を予め求めておく必要があり推算性にも劣る。一方、2 変数 2 次多項重回帰粘性式は、統計解析のため自動計算が可能であるため、導出性に優れ、van der Waals 型粘性方程式と同様に、式そのものに粘度データが内蔵されているため推算性にも優れることがわかった。

6. 結論

本研究において、新たに統計解析手法を用い、回帰式の 2 変数 2 次多項重回帰粘性式を導出し、潤滑油の高圧粘度の推算に応用するとともに、既報の経験式である拡張 Barus 粘性式および理論式である van der Waals 型粘性方程式との比較検討をした結果、

- (1) 2 変数 2 次多項重回帰粘性式は、統計解析のため自動計算が可能であるため、導出性に優れ、van der Waals 型粘性方程式と同様に、式そのものに粘度データが内蔵されているため推算性にも優れることがわかった。
- (2) 2 変数 2 次多項重回帰粘性式は演繹的にも帰納的にも既報の各式と等価であり、粘度という物性について切り口を変えて見ているに過ぎない。なお、注意すべきことは、統計解析手法を用いた式であり、物理的意味はない。
- (3) 潤滑油の高圧粘度を推算する上で、比較検討した 3 式の内挿領域における誤差%の標準偏差は小さく、有効性は高く、同等であった。なお、これらの推算式は、凝固点やガラス転移点を越えない液体領域のみで成立するものであり、外挿領域には活用できないことがわかった。

文献

トライボロジー会議 2024 春東京 予稿集

Table 8 Calculation viscosities of Lubricant 1 by van der Waals Viscosity equation

GPa	η , mPa·s							
	40°Ccalc.	err%	60°Ccalc.	err%	80°Ccalc.	err%	100°Ccalc.	err%
0.000	32.11	8.77	17.78	10.28	10.59	7.53	6.78	3.47
0.025	46.02	1.44	24.99	7.64	14.53	6.58	9.04	0.18
0.050	64.88	-4.97	34.70	2.21	19.78	3.20	12.02	-2.46
0.075	89.94	-8.68	47.59	-2.05	26.71	0.05	15.92	-4.26
0.100	122.65	-10.05	64.42	-4.41	35.72	-1.97	20.96	-5.23
0.125	164.64	-9.63	86.08	-5.03	47.30	-2.77	27.39	-5.38
0.150	-	-	113.54	-4.26	61.98	-2.45	35.53	-4.79
0.175	-	-	147.90	-2.39	80.39	-1.19	45.72	-3.54
0.200	-	-	190.37	0.34	103.20	0.85	58.34	-1.72
0.225	-	-	-	-	131.16	3.52	73.83	0.61
0.250	-	-	-	-	165.09	6.71	92.66	3.36
max err%		8.77		10.28		7.53		3.47
min err%		-10.05		-5.03		-2.77		-5.38
σ err%	5.09							

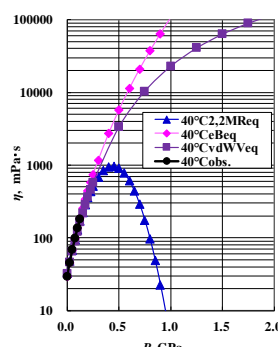


Fig.8 Extrapolated values of High Pressure range of several equation

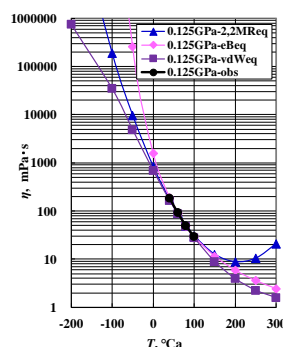


Fig.9 Extrapolated values of Low & High Temperature range of several equation

Table 9 Characteristics of several equations

Equation	2.2MR eq.	eBeq.	vdWVeq.
Eq.type	Regression eq.	experimental eq.	theoretical eq.
Number of constant term	5	1	3
Standard Viscosity and Density	—	η_{01}, ρ_{01}	$\eta_{1=0}$
Absolutely zero Convergence (η_{p0}/η_{00})	Yes $(I+B_{p1}P+B_{p2}P^2)/I$	No	Yes 1
η_{\max} , mPa·s	1.081E+11	∞	1.641E+06
Physical relation	Unrelated	Unclear	$\eta \propto P/T$
Number of minimum data for derivation	5	8	4
	$\eta_{p11}, \eta_{p22}, \eta_{p33}, \eta_{p44}, \eta_{p55}$	$\eta_{01}, \eta_{02}, \eta_{p11}, \eta_{p22}, \rho_{01}, \rho_{02}, \rho_{p11}, \rho_{p22}$	$\eta_{p11}, \eta_{p12}, \eta_{p21}, \eta_{p22}$
Number of graph for derivation	9	1	2
	T, T^2, P, P^2 Residual	$\ln(\eta_{p1}/\eta_{01})^2 / (\rho_{p1}/\rho_{01})^3 - P/T$	Isobaric $\ln(\ln(\eta_{p1})) - T^2$
	T, T^2, P, P^2 Obs.		
	Normal probability		$1/A_p - P$
Ease of derivation	Good(Automatic calculation)	Bad	Good
Ease of estimation	Good	Bad	Good

- 1)Dowson D. , Higginson G.R., "A Numerical Solution to Erasto-hydrodynamic Problem", JMES, Vol. 1, No. 1(1959), pp. 6-15.
- 2)Dowson D., Higginson G.R., "The Effect of material properties on the lubrication of elastic rollers", JMES, Vol. 2, No. 3 (1960), pp. 188-194.
- 3)Dowson D., Higginson G.R. & Whitaker A.V., "Erasto-hydrodynamic Lubrication, A Survey of Isothermal Solutions", JMES, Vol. 4, No. 2 (1962), pp. 121-126.
- 4)金子：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,62,10(2017) 654.
- 5)金子：潤滑油の高圧物性(第5報)-ファンデルワールス型粘性方程式の導出-トライボロジスト, 66,6 (2021) 452.
- 6)鷲津：トライボロジー分野におけるデータ科学の活用と今後の展望,トライボロジスト, 67, 12(2022) 815.
- 7)金子：トライボロジー・ナウ・トライボエピソード-潤滑油の高圧物性 (第5報),トライボロジスト, 67,11(2022) 786.
- 8)金子：統計解析による潤滑油の高圧密度の推算と各種密度圧力温度関係式との比較,日本トライボロジー学会トライボロジー会議 2022 春東京, 予稿集, F33(2022).
- 9)金子：潤滑油の高圧物性(第9報)- 統計解析による潤滑油の高圧密度の推算と各種密度圧力温度関係式との比較,トライボロジスト, 68,7 (2023) 471.
- 10)藤城,中村,松広：高圧力下における潤滑油の粘度測定,日本機械学会論文集 C 編, 51,468(1985) 2000.

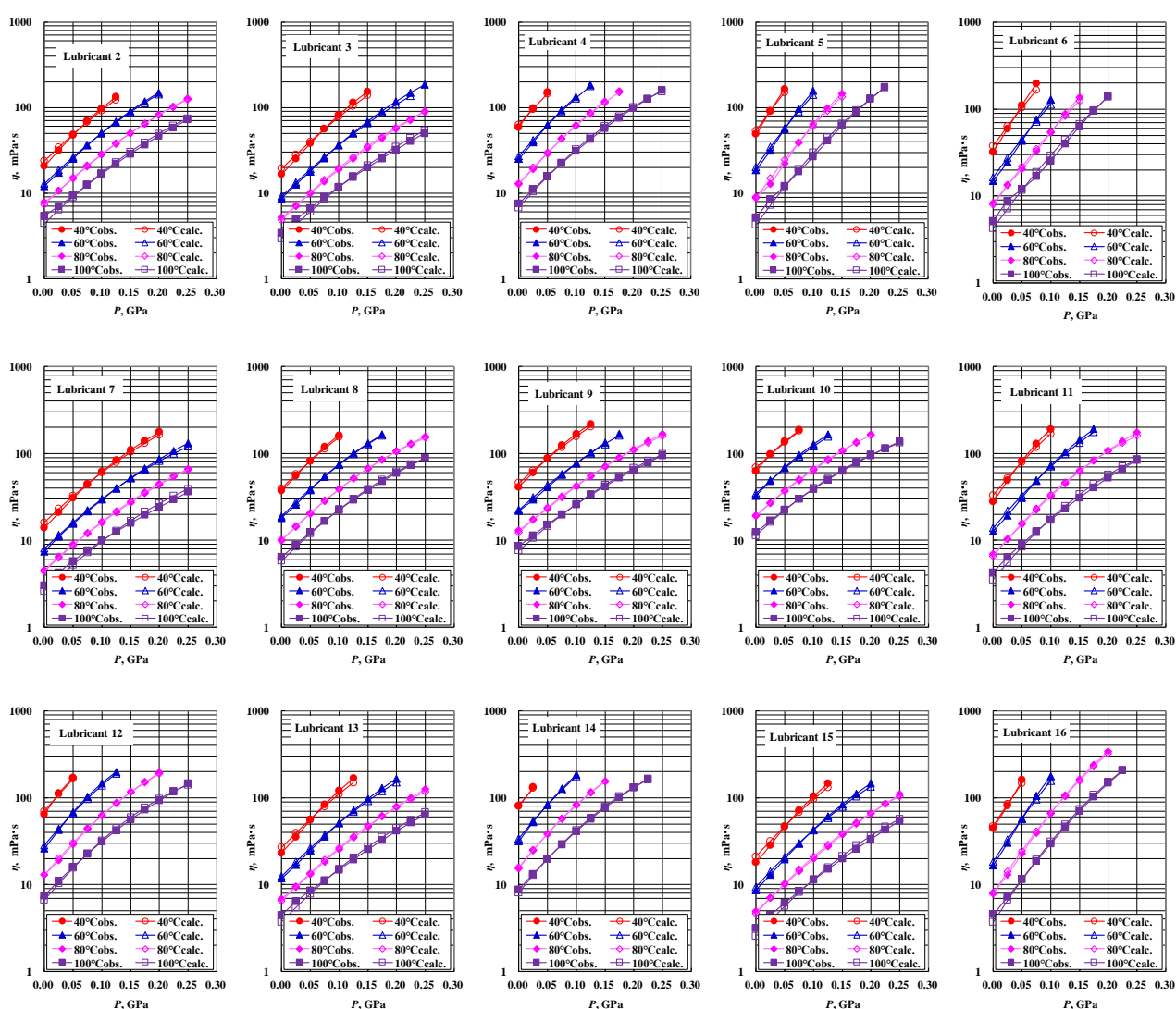


Fig. A1 Comparison of viscosity between observation and calculation value by equation (1-1) of Lubricant 2~16