

重回帰分析による無次元密度圧力温度線形式の固有定数  $\varepsilon$   
および潤滑油の高圧密度の推算

Estimation of constant  $\varepsilon$  of dimensionless density-pressure-temperature linear equation  
and high-pressure density of lubricants by multiple regression analysis

高圧物性ラボ（正）\*金子 正人

Masato Kaneko\*

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

1. はじめに

潤滑油の高圧物性は、塑性加工や軸受・歯車の Elasto-Hydrodynamic Lubrication(EHL)領域<sup>1-3)</sup>における潤滑状態を知る上で重要である。著者は、既報<sup>4)</sup>にて無次元密度圧力温度線形式を導出し、高圧密度の推算に応用した。また、この式に含まれる潤滑油の固有定数である無次元密度定数  $\varepsilon$  について、各種潤滑油のデータを蓄積した。

本報では、この無次元密度定数  $\varepsilon$  を目的変数とし、潤滑油の物性や化学構造を説明変数とする重回帰分析<sup>5-8)</sup>を行い、重回帰式を作成した。その結果、実験により高圧密度測定装置を用いて高圧密度を測定せずとも、未知の潤滑油の物性や化学構造を分析するだけで、重回帰式により無次元密度定数  $\varepsilon_{mr-eq}$  を推算できる。さらに、この  $\varepsilon_{mr-eq}$  を用いて未知の潤滑油の高圧密度  $\rho_{mr-eq}$  の推算が可能となったので報告する。

2. 実験 1 および考察

2.1 無次元密度圧力温度線形式の無次元密度定数  $\varepsilon$  を目的変数とする重回帰式の作成

無次元密度圧力温度線形式を式(1)に示す。

$$(\rho_{pv}/\rho_{0t})^6 = \varepsilon PT + 1 \tag{1}$$

式(1)は、固有定数である無次元密度定数  $\varepsilon$  [GPa<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>]と、3 つの変数である無次元密度  $\rho_{pv}/\rho_{0t}$ [-]、圧力  $P$ [GPa]、温度  $T$ [K]から成り立っており、あらかじめ大気圧密度  $\rho_{0t}$  [g/cm<sup>3</sup>]を測定しておけば、各圧力  $P$ 、温度  $T$  における密度  $\rho_{pv}$  [g/cm<sup>3</sup>]を推算できる経験式である。

そこで、無次元密度圧力温度線形式が既知の潤滑油 26 種類の無次元密度定数  $\varepsilon$  を目的変数とし、文献 8)にて蓄積した物性や化学構造データを説明変数として重回帰分析を行い、重回帰式を作成した。さらに、重回帰式の有効性を確認するために、この 26 種類の潤滑油について、無次元密度定数  $\varepsilon$  と重回帰式から求めた無次元密度定数  $\varepsilon_{mr-eq}$  の比較および高圧密度の実測値  $\rho_{obs}$  と推算値  $\rho_{mr-eq}$  の比較を行った。以下に順を追って説明する。

2.2 重回帰分析用サンプル油

無次元密度圧力温度線形式が既知の潤滑油として、一連の文献 4,5,7,8)で評価した市販のエンジン油、変速機油、ギヤ油、冷凍機油、トラクション油、油圧油、各種基油単体の計 16 種類を用いた。なお、これらの主成分である基油組成は、パラフィン系鉱油、ナフテン系鉱油、および、ポリ  $\alpha$  オレフィン(PAO)、ポリアルキレングリコール(PAG) ポリビニルエーテル(PVE)等の各種合成基油である。さらに、ASME 報告<sup>9)</sup>にある化学構造が明確で、説明変数として用いる分子量、密度、屈折率、粘度、粘度指数等のデータのある Code No. 1-A, 8-C, 9-C, 10-C, 11-C, 12-C, 19-D および 56-H の 8 種類、また、文献 4,10)にて評価した MIX9、パラフィン系鉱油の P150 の合計 26 種類を重回帰分析用サンプル油として用いた。

2.3 各サンプル油の目的変数

上記 26 種の各サンプル油の目的変数である無次元密度定数  $\varepsilon$  を Table1 に示す。

Table 1 Dimensionless density constant  $\varepsilon$  of several lubricants and chemical compounds[出典:文献4)]

Test Sample	Lubricant 1	Lubricant 2	Lubricant 3	Lubricant 4	Lubricant 5	Lubricant 6	Lubricant 7	Lubricant 8	Lubricant 9
Oil Type	Engine Oil	ATF	Base Oil only	Gear Oil	Refrigeration Oil	Traction Fluid	Base Oil only	Hydraulic Fluid	Refrigeration Oil
Base Oil	MO-P	MO-P	MO-P	MO-P	MO-N	SY-N	PAO	PAO	PAG
$\varepsilon$ , GPa <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	0.01200	0.01301	0.01161	0.01154	0.01053	0.01000	0.01296	0.01141	0.01143
MO-P/Paraffinic mineral oil, MO-N/Naphthenic mineral oil, SY-N/Synthetic naphthenic oil, PAO/Poly- $\alpha$ -olefin, PAG/Polyalkyleneglycol									
Test Sample	Lubricant 10	Lubricant 11	Lubricant 12	Lubricant 13	Lubricant 14	Lubricant 15	Lubricant 16	1-A	8-C
Oil Type	Refrigeration Oil	Refrigeration Oil	Refrigeration Oil	Base Oil only	Refrigeration Oil	Base Oil only	Base Oil only	DOS	ACHC
Base Oil	PAG	PVE	PVE	DTDA	POE	AB(Soft)	AB(Hard)	-	-
$\varepsilon$ , GPa <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	0.01495	0.01380	0.01325	0.01171	0.01191	0.01095	0.01226	0.00973	0.01006
PVE/Polyvinylether, DTDA/Ditridecyl Adipate, POE/Polyolester, AB/Alkyl Benzene, DOS/Di(2-ethylhexyl)sebacate, ACHC/Alicyclic hydrocarbon									
Test Sample	9-C	10-C	11-C	12-C	19-D	56-H	MIX9	P150	
Oil Type	CSHC	ACHC	CSHC	ACHC	DOS	DOP	-	Base Oil only	
Base Oil	-	-	-	-	-	-	-	MO-P	
$\varepsilon$ , GPa <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	0.01155	0.00966	0.01462	0.00992	0.01038	0.00945	0.01284	0.01635	
CSHC/Chain saturated hydrocarbon, DOP/Di(2-ethylhexyl)phthalate, 11-C/n-Hexadecane									

## 2.4 各サンプル油の説明変数

各サンプル油の説明変数である分子量,  $^{13}\text{C}$ -NMR による構造解析による官能基(セグメント)の最小単位である各原子, すなわち 1 級から 4 級炭素, 芳香族炭素, エーテル酸素の各原子数, および 40°C, 100°C における密度, 屈折率, 40°C, 100°C における粘度, 粘度指数, 密度 0.75g/cm<sup>3</sup> と 0.95g/cm<sup>3</sup> における温度および外挿により求めた粘度 10<sup>7</sup>mm<sup>2</sup>/s における温度に対応する各サンプル油の量的データを Table 2 に示す. なお, Table 2 の P150 の説明変数は新たにデータを収集し, 他は文献 8) の値を用いた.

Table 2 Quantitative data of lubricants for multiple regression analysis [一部出典: 文献 8)]

Test Sample	MW	Primary carbon, n	Secondary carbon, n	Tertiary carbon, n	Quaternary carbon, n	Aromatic carbon, n	Ether oxygen, n	$\rho_{0.40}$ , g/cm <sup>3</sup>	$\rho_{0.100}$ , g/cm <sup>3</sup>	Refractive Index	$\eta_{0.40}$ , mPa·s	$\eta_{0.100}$ , mPa·s	Viscosity Index	$T_{p=0.75}$ , °C	$T_{p=0.95}$ , °C	Ts, °C
Lubricant 1	380	4.33	19.53	1.86	0.52	0.00	0.00	0.8301	0.7916	1.4643	29.52	6.546	220	164.8	-147.0	-89.63
Lubricant 2	317	3.85	14.80	2.53	0.44	0.24	0.15	0.8345	0.7952	1.4631	20.63	5.440	261	169.0	-136.3	-100.9
Lubricant 3	382	5.05	19.48	1.65	0.00	0.00	0.00	0.8198	0.7819	1.4619	16.61	3.414	127	149.6	-163.7	-76.45
Lubricant 4	473	6.50	23.35	2.40	0.23	0.00	0.00	0.8538	0.8169	1.4761	58.97	7.531	109	208.9	-116.5	-59.02
Lubricant 5	343	5.59	13.37	1.40	0.40	3.02	0.00	0.9073	0.8690	1.5041	49.09	5.192	15	286.2	-26.92	-47.39
Lubricant 6	246	3.28	8.02	4.87	1.08	0.21	0.00	0.9443	0.9042	1.5062	32.23	5.162	107	330.9	31.44	-65.19
Lubricant 7	438	4.61	24.02	1.47	0.00	0.00	0.00	0.8027	0.7646	1.4552	13.95	3.025	126	123.0	-192.0	-78.61
Lubricant 8	509	10.08	60.45	3.21	0.15	0.15	0.60	0.8308	0.7930	1.4616	37.34	6.420	155	168.3	-149.2	-72.96
Lubricant 9	1097	18.72	19.32	21.14	0.06	1.33	19.72	0.9732	0.9270	1.4477	41.13	8.551	209	330.0	70.15	-86.34
Lubricant 10	1556	26.90	27.85	29.56	0.09	1.29	28.10	0.9750	0.9290	1.4485	62.55	12.40	216	334.4	73.14	-86.91
Lubricant 11	574	9.93	15.37	7.65	0.00	0.57	7.65	0.9053	0.8609	1.4416	27.96	4.265	75	249.8	-20.40	-61.46
Lubricant 12	705	11.31	20.18	9.16	0.00	0.78	9.16	0.9259	0.8821	1.4450	64.50	7.462	90	281.1	6.990	-54.20
Lubricant 13	510	2.02	28.31	0.00	0.00	0.00	2.02	0.8962	0.8548	1.4572	23.26	4.451	149	123.0	-192.0	-72.73
Lubricant 14	754	15.51	18.45	4.94	3.82	0.00	3.87	0.9470	0.9049	1.4553	79.93	8.772	93	320.6	35.75	-53.02
Lubricant 15	342	3.98	12.38	0.58	0.19	7.00	0.00	0.8568	0.8170	1.4891	21.03	3.840	48	201.0	-100.6	-64.99
Lubricant 16	329	3.74	7.00	5.25	2.37	5.61	0.00	0.8528	0.8138	1.4868	44.82	4.547	-11	198.1	-109.3	-45.37
1-A	426	4.00	18.00	2.00	0.00	0.00	2.00	0.9016	0.8593	1.4508	10.59	2.793	153	255.3	-29.00	-89.80
8-C	348	1.00	21.00	3.00	0.00	0.00	0.00	0.8534	0.8144	1.4766	25.85	3.978	70	196.9	-98.96	-61.65
9-C	352	3.00	21.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.7890	0.7496	1.4485	6.616	1.833	116	100.2	-201.7	-89.17
10-C	348	1.00	21.00	3.00	0.00	0.00	0.00	0.8455	0.8060	1.4725	12.57	2.841	117	186.4	-122.5	-79.59
11-C	226	2.00	14.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.7597	0.7204	1.4340	2.234	0.897	104	56.73	-234.2	-112.6
12-C	432	2.00	25.00	4.00	0.00	0.00	0.00	0.8571	0.8202	1.4792	35.35	5.093	96	212.1	-107.8	-60.92
19-D	426	4.00	18.00	2.00	0.00	0.00	2.00	0.9002	0.8572	1.4518	11.13	2.897	155	254.4	-28.58	-89.35
56-H	390	4.00	10.00	2.00	0.00	6.00	2.00	0.9700	0.9263	1.4868	27.32	3.884	-20	341.9	67.51	-56.01
MIX9	364	5.43	12.47	4.98	0.37	3.23	0.00	0.9078	0.8699	1.4764	20.21	3.840	108	289.6	-26.73	-71.48
P150	390	5.80	19.31	2.51	0.00	0.00	0.00	0.8495	0.8169	1.4729	30.95	5.300	103	223.0	-145.0	-69.60

## 2.5 重回帰分析結果

各サンプル油の目的変数である無次元密度定数  $\varepsilon$  を Y とし, 上記の説明変数を X1~X16 として, 式(2)による重回帰分析を行い, PRC(偏回帰係数: a1~a16)を求めた. 各 PRC 値の結果を Table 3 に示す.

$$Y = a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 + a_5 X_5 + a_6 X_6 + a_7 X_7 + a_8 X_8 + a_9 X_9 + a_{10} X_{10} + a_{11} X_{11} + a_{12} X_{12} + a_{13} X_{13} + a_{14} X_{14} + a_{15} X_{15} + a_{16} X_{16} \quad (2)$$

Table 3 PCR value of Multiple regression analysis

	MW	Primary carbon, n	Secondary carbon, n	Tertiary carbon, n	Quaternary carbon, n	Aromatic carbon, n	Ether oxygen, n	$\rho_{0.40}$ , g/cm <sup>3</sup>	$\rho_{0.100}$ , g/cm <sup>3</sup>	Refractive Index	$\eta_{0.40}$ , mPa·s	$\eta_{0.100}$ , mPa·s	Viscosity Index	$T_{p=0.75}$ , °C	$T_{p=0.95}$ , °C	Ts, °C
Y	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>14</sub>	X <sub>15</sub>	X <sub>16</sub>
PCR	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>6</sub>	a <sub>7</sub>	a <sub>8</sub>	a <sub>9</sub>	a <sub>10</sub>	a <sub>11</sub>	a <sub>12</sub>	a <sub>13</sub>	a <sub>14</sub>	a <sub>15</sub>	a <sub>16</sub>
	-1.014E-05	5.727E-04	-9.485E-05	3.334E-04	-6.478E-04	-1.507E-04	-2.929E-04	7.717E-01	-7.605E-01	-4.436E-02	-1.381E-05	6.153E-04	-2.359E-05	1.110E-04	-1.318E-04	-6.032E-05

## 2.6 考察 1: 各サンプル油の固有定数と重回帰式から求めた固有定数の比較

各サンプル油の固有定数である無次元密度定数  $\varepsilon$  と重回帰式より求めた固有定数  $\varepsilon_{mr-eq}$  の比較結果を Figure 1 に示す. また, 各固有定数の誤差%, 誤差%の標準偏差および決定係数を Table 4 に示す. これらの誤差%の標準偏差は 6.3%であり, 決定係数は 0.8339 であり, 重回帰式の有効性は高いと言える.

## 2.7 考察 2: 各サンプル油の高圧密度の実測値と推算値の比較

一例として, Lubricant 1 の高圧密度の実測値  $\rho_{obs}$  と重回帰式より求めた無次元密度定数  $\varepsilon_{mr-eq}$  を用いて算出した推算値  $\rho_{mr-eq}$  との比較結果を Table 5 および Fig.2 に示す. Lubricant 1 の実測値と推算値の誤差%の標準偏差は 0.15%であり, 良い一致を示した.

なお, 詳細は省くが Lubricant 1 を除く残りの 25 サンプル油の高圧密度の実測値と重回帰式による推算値の誤差%の標準偏差は 0.16~0.61%の範囲にあり, 重回帰式を用いることで, 精度良く各圧力温度での高圧密度の推算が可能であることがわかった. なお, 残りの 25 サンプル油である Lubricant 2~16, 1-A, 8-C, 9-C, 10-C, 11-C, 12-C, 19-D, 56-H,

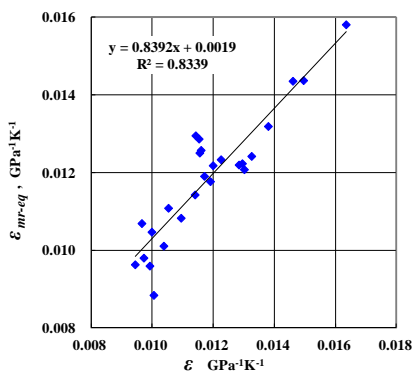


Fig.1 Comparison of  $\varepsilon$  and  $\varepsilon_{mr-eq}$

Table 4  $\varepsilon_{mr-eq}$  value and error%

Test Sample	$\varepsilon_{mr-eq}$ , GPa <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	error%
Lubricant 1	0.01217	1.4
Lubricant 2	0.01206	-7.3
Lubricant 3	0.01256	8.2
Lubricant 4	0.01285	11.3
Lubricant 5	0.01108	5.2
Lubricant 6	0.01046	4.6
Lubricant 7	0.01222	-5.7
Lubricant 8	0.01142	0.1
Lubricant 9	0.01294	13.2
Lubricant 10	0.01435	-4.0
Lubricant 11	0.01317	-4.6
Lubricant 12	0.01241	-6.4
Lubricant 13	0.01189	1.5
Lubricant 14	0.01175	-1.3
Lubricant 15	0.01081	-1.3
Lubricant 16	0.01232	0.5
1-A	0.00978	0.6
8-C	0.00882	-12.3
9-C	0.01248	8.1
10-C	0.01068	10.6
11-C	0.01434	-1.9
12-C	0.00958	-3.5
19-D	0.01009	-2.8
56-H	0.00961	1.7
MIX9	0.01219	-5.1
P150	0.01580	-3.4
max error%		13.2
min error%		-12.3
Standard deviation $\sigma$		6.3
Determination coefficient R <sup>2</sup>		0.8339

$$\varepsilon \text{ error\%} = 100 * [(\varepsilon_{mr-eq} - \varepsilon) / \varepsilon]$$

MIX9 および P150 の実測値と推算値の密度圧力線図の比較結果を、文末の Appendixes Fig. A1 に示す。

Table 5  $\rho_{obs}$ ,  $\rho_{mr-eq}$ , error% and  $\sigma_\rho$  of Lubricant 1

Sample	Lubricant 1											
$T, ^\circ\text{C}$	40			60			80			100		
$P, \text{GPa}$	$\rho_{obs}, \text{g/cm}^3$	$\rho_{mr-eq}, \text{g/cm}^3$	error%	$\rho_{obs}, \text{g/cm}^3$	$\rho_{mr-eq}, \text{g/cm}^3$	error%	$\rho_{obs}, \text{g/cm}^3$	$\rho_{mr-eq}, \text{g/cm}^3$	error%	$\rho_{obs}, \text{g/cm}^3$	$\rho_{mr-eq}, \text{g/cm}^3$	error%
0.000	0.8301	0.8301	0.00	0.8172	0.8172	0.00	0.8044	0.8044	0.00	0.7916	0.7916	0.00
0.025	0.8416	0.8425	0.10	0.8297	0.8302	0.05	0.8181	0.8178	-0.03	0.8056	0.8056	-0.01
0.050	0.8531	0.8540	0.10	0.8420	0.8421	0.01	0.8314	0.8303	-0.14	0.8193	0.8184	-0.11
0.075	0.8640	0.8648	0.09	0.8537	0.8533	-0.04	0.8438	0.8418	-0.24	0.8321	0.8303	-0.22
0.100	0.8744	0.8749	0.06	0.8646	0.8638	-0.09	0.8553	0.8526	-0.32	0.8439	0.8414	-0.30
0.125	0.8843	0.8845	0.03	0.8748	0.8737	-0.13	0.8659	0.8628	-0.36	0.8548	0.8518	-0.35
0.150	0.8936	0.8936	0.01	0.8844	0.8831	-0.14	0.8756	0.8724	-0.36	0.8648	0.8617	-0.36
0.175	0.9023	0.9023	-0.01	0.8932	0.8920	-0.13	0.8843	0.8815	-0.31	0.8738	0.8709	-0.32
0.200	0.9106	0.9106	0.00	0.9013	0.9005	-0.09	0.8921	0.8902	-0.22	0.8819	0.8798	-0.24
0.225	0.9182	0.9185	0.02	0.9088	0.9086	-0.02	0.8990	0.8984	-0.06	0.8890	0.8882	-0.09
0.250	0.9254	0.9260	0.07	0.9155	0.9163	0.09	0.9050	0.9063	0.15	0.8952	0.8962	0.11
$\sigma_\rho$	0.04			0.08			0.17			0.16		
$\sigma_\rho$	0.15											

### 3. 実験 2

#### 3.1 未知の潤滑油の無次元密度圧力温度線形式の無次元密度定数 $\varepsilon_{mr-eq}$ および 高圧密度 $\rho_{mr-eq}$ の推算

未知の潤滑油の例として、構造が明確で性状データが揃っている文献 8)にて供試油として用いたトラクション基油の DM2H<sup>(1)</sup>、ナフテン系鉱油の N60, Tricresylphosphate (TCP)および新たにパラフィン系鉱油の P500 を追加し、合計 4 種類のサンプル油を用いて検討を行った。なお、TCP はリン化合物であり、Table 6 に斜体太字で示したように、C-O-P 結合を C-O-C 結合と同等として評価した。

この未知の潤滑油 4 サンプル油について、無次元密度圧力温度線形式の無次元密度定数  $\varepsilon_{mr-eq}$  を推算するとともに、高圧密度  $\rho_{mr-eq}$  の推算を行った。これらの検討内容について、以下に順を追って説明する。

#### 3.2 未知の潤滑油の説明変数

上記 4 サンプル油について、各説明変数に対応する分子量等の量的データを Table 6 に示す。なお、Table 6 の P500 の説明変数は新たにデータを収集し、他は文献 8)の値を用いた。

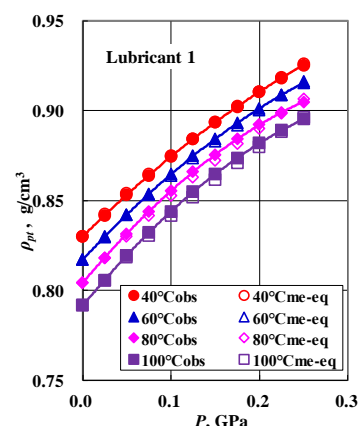


Fig.2 Comparison of  $\rho_{obs}$  and  $\rho_{mr-eq}$  of Lubricant 1

Table 6 Quantitative data of DM2H, N60, TCP and P500 [一部出典: 文献8)]

Test Sample	MW	Primary carbon, n	Secondary carbon, n	Tertiary carbon, n	Quaternary carbon, n	Aromatic carbon, n	Ether oxygen, n	$\rho_{0.40}, \text{g/cm}^3$	$\rho_{0.100}, \text{g/cm}^3$	Refractive Index	$\eta_{0.40}, \text{mPa}\cdot\text{s}$	$\eta_{0.100}, \text{mPa}\cdot\text{s}$	Viscosity Index	$T_{p=0.75}, ^\circ\text{C}$	$T_{p=0.95}, ^\circ\text{C}$	$T_s, ^\circ\text{C}$
DM2H	258	3.00	7.00	7.00	2.00	0.00	0.00	0.8962	0.8548	1.5112	26.13	4.210	87	252.0	-37.98	-64.00
N60	249	4.58	9.08	1.07	0.45	2.05	0.00	0.8932	0.8533	1.4958	8.624	1.942	9	255.3	-45.22	-72.26
TCP	368	3.00	0.00	0.00	0.00	18.00	<b>3.00</b>	1.1585	1.1106	1.5574	25.08	4.076	3	551.3	300.7	-60.56
P500	513	7.37	26.39	2.54	0.00	0.00	0.00	0.8569	0.8240	1.4769	93.98	11.16	105	235.0	-129.8	-58.52

#### 3.3 無次元密度定数 $\varepsilon_{mr-eq}$ の推算

上記 4 サンプル油について、2.5 節の Table 3 に示す PRC(偏回帰係数)と 3.2 節の Table 6 に示す量的データを、式(2)の重回帰式に代入し、固有定数である無次元密度定数  $\varepsilon_{mr-eq}$  を推算した。また、Table 7 に  $\varepsilon_{mr-eq}$  と、文献 4)の無次元密度圧力温度線形式から求めた 4 サンプル油の無次元密度定数  $\varepsilon$  を併記するとともに誤差%を求めた。なお、Fig.3 に 4 サンプル油の  $\varepsilon$  と  $\varepsilon_{mr-eq}$  の比較結果を Fig.1 のデータと共に併記する。

この結果、DM2H, N60 および P150 の誤差%は±10%前後で、Table 4 の誤差%と同等の範囲内にあったが、TCP の誤差%は著しく大きい傾向にあることがわかった。そこで、この誤差%の大きさが、高圧密度の実測値  $\rho_{obs}$  と重回帰式から求めた推算値  $\rho_{mr-eq}$  に対して、どの程度影響するか次節で検討した。

#### 3.4 未知の潤滑油の高圧密度の実測値および推算値の比較

以下の式(3)より、未知の潤滑油として上げた 4 サンプル油の高圧密度の推算値  $\rho_{mr-eq}$  を求め、実測値  $\rho_{obs}$  と比較した。結果を Fig. 4 に示す。

$$\rho_{mr-eq} = \rho_0 t \times (\varepsilon_{mr-eq} P T + 1)^{1/6} \quad (3)$$

Table 7  $\varepsilon$  and  $\varepsilon_{mr-eq}$  value and error% of DM2H, N60, TCP and P500

Test Sample	$\varepsilon, \text{GPa}^{-1}\text{K}^{-1}$	$\varepsilon_{mr-eq}, \text{GPa}^{-1}\text{K}^{-1}$	error%
DM2H	0.01171	0.01096	-6.4
N60	0.01116	0.01250	12.0
TCP	0.00821	0.00197	-76.0
P500	0.01436	0.01627	13.3

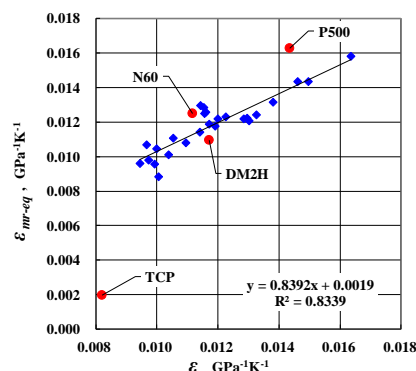


Fig.3 Comparison  $\varepsilon$  of and  $\varepsilon_{mr-eq}$  value of DM2H, N60, TCP and P500

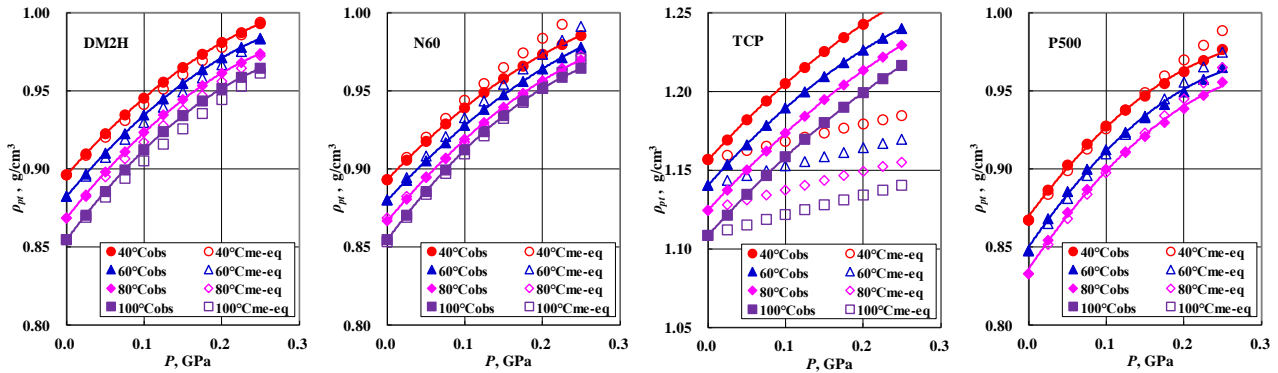


Fig. 4 Comparison of  $\rho_{obs}$  and  $\rho_{mr-eq}$  of DM2H, N60, TCP and P500

実測値  $\rho_{obs}$  に対して、重回帰式から得られた推算値  $\rho_{mr-eq}$  の誤差%の標準偏差は、各 0.27, 0.42, 1.92, 0.53% であり、TCP の誤差%は 1.92% と大きいことがわかった。この原因として TCP の量的データの C-O-P 結合を C-O-C 結合と同等として評価したためと思われる。これは説明変数として C-O-P 結合と C-O-C 結合は同等でないことを示しており、C-O-P 結合の説明変数を新たに追加する必要があると思われる、今後の課題とする。

以上のように、未知の潤滑油について、実験により高压密度測定装置を用いて高压密度を測定せずとも、物性や化学構造を精度よく分析することで、2.5 節の Table 3 に示す PRC(偏回帰係数)を用いて、重回帰式(2)から無次元密度圧力温度線形式の固有定数である無次元密度定数  $\varepsilon_{mr-eq}$  が求められ、さらに高压密度  $\rho_{mr-eq}$  の推算が可能であることがわかった。

### 3.5 重回帰式の適用範囲

未知の潤滑油の重回帰式による無次元密度定数  $\varepsilon_{mr-eq}$  および高压密度  $\rho_{mr-eq}$  の推算は、本報で検討した圧力、温度の測定範囲で、各サンプル油に類似した粘性液体に適用可能と考えられる。

## 4. 結言

無次元密度圧力温度線形式が既知の潤滑油 26 種のサンプル油について、重回帰分析を行い以下の結果を得た。

- (1) 無次元密度圧力温度線形式の固有定数である無次元密度定数  $\varepsilon$  を目的変数とし、潤滑油の物性や化学構造を説明変数とする重回帰分析により、PRC(偏回帰係数)を求め、重回帰式を作成した。
- (2) 無次元密度定数  $\varepsilon$  に対して、重回帰式より求めた無次元密度定数  $\varepsilon_{mr-eq}$  の誤差%の標準偏差は 6.3% であり、決定係数は 0.8339 であり、重回帰式の有効性は高いと言える。
- (3) 未知の潤滑油について、実験により高压密度測定装置を用いて高压密度を測定せずとも、物性や化学構造を分析するだけで、PRC(偏回帰係数)を用いて、重回帰式から無次元密度定数  $\varepsilon_{mr-eq}$  の推算が可能となった。なお、TCP については、C-O-P 結合の説明変数を新たに追加する必要があると思われる、今後の課題とする。
- (4) 推算した無次元密度定数  $\varepsilon_{mr-eq}$  を用いて、無次元密度圧力温度線形式から高压密度  $\rho_{mr-eq}$  の推算が可能となった。

## 文献

- 1) D.Dowson, G.R.Higginson : A Numerical Solution to Erasto-hydrodynamic Problem, 1, 1(1959)6.
- 2) D.Dowson, G.R.Higginson : The Effect of material properties on the lubrication of elastic rollers, 2, 3(1960)188.
- 3) D.Dowson, G.R.Higginson & A.V.Whitaker: Erasto-hydrodynamic Lubrication: A Survey of Isothermal Solutions, JMES, 4, 2(1962)121.
- 4) 金子正人: 潤滑油の高压物性(第 6 報)-無次元密度の圧力温度線形式の導出と高压密度の推算-トライボロジスト, 66, 11 (2021) 864.
- 5) 金子正人: 潤滑油の高压物性(第 3 報)-化学構造を説明変数とする重回帰分析による各種高压物性の推算-, トライボロジスト, 63, 10(2018)706.
- 6) 金子正人: 重回帰分析による潤滑油高压物性推算に関する研究の最新動向-トライボロジスト, 66, 2(2021)133.
- 7) 金子正人: 潤滑油の高压物性(第 8 報)-重回帰分析によるファンデルワールス型液体状態方程式の固有定数および潤滑油の高压密度の推算-, トライボロジスト, 67, 10(2022)718.
- 8) 金子正人: 潤滑油の高压物性(第 10 報)-重回帰分析によるファンデルワールス型粘性方程式の固有定数および潤滑油の高压粘度の推算-, トライボロジスト, 69, 1(2024) 56.
- 9) ASME Research Publication: Pressure Viscosity Report Vol.1 & Vol.2, ASME(1953).
- 10) 金子正人: 潤滑油の高压物性(第 4 報)-液体の状態方程式の提案と高压密度の推算-, トライボロジスト, 65, 1 (2020) 45.
- 11) 畑一志・坪内俊之, ハーフトロイダル CVT 車用トラクション油の開発 表面科学 Vol. 24, No. 6, pp. 351-358, 2003.

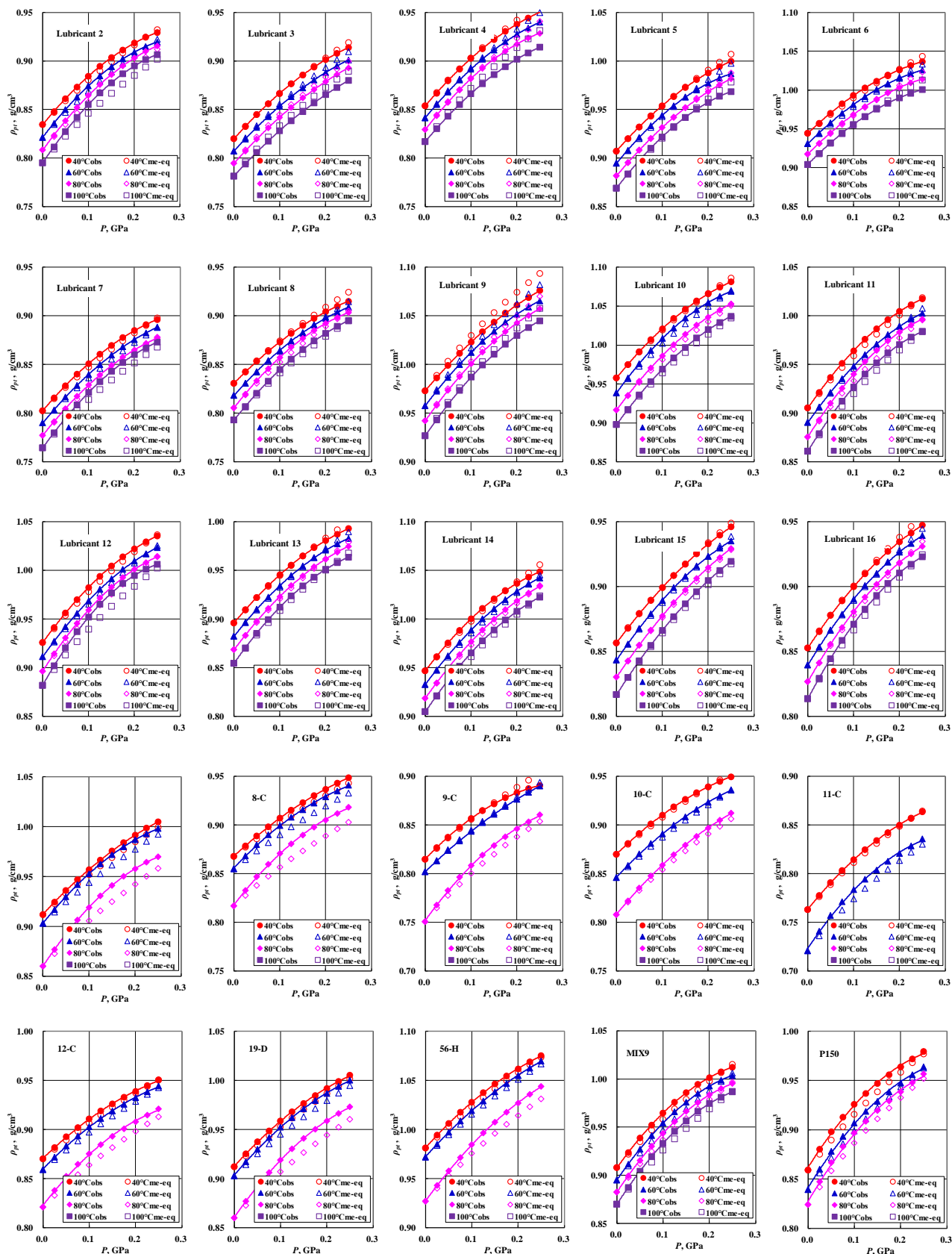


Fig. A1 Comparison of  $\rho_{obs}$  and  $\rho_{mr-eq}$  of Lubricant 2~16, 1-A, 8-C, 9-C, 10-C, 11-C, 12-C, 19-D, 56-H, MIX9 and P150