

高压装置の簡易圧力評価による 潤滑油の高温高压粘度測定

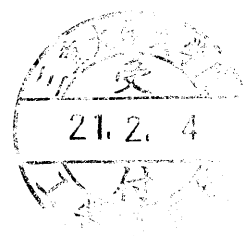
指導教員	中村 裕一	准教授
	松井 正仁	准教授
	村井 健一	技術専門員

平成20年度

三重大学大学院工学研究科物理工学専攻

ナノプロセッシング研究室

中澤 敦



目次

第 1 章	緒論	1
第 2 章	潤滑油の粘度理論および表示式	
2. 1	絶対反応速度論による粘度	3
2. 2	粘度－圧力関係式	9
第 3 章	実験装置及び実験方法	
3. 1	ダイヤモンドアンビルセル高圧装置	14
3. 2	DAC 加圧装置	20
3. 3	落球法による粘度測定	22
3. 4	高圧粘度実測値からの圧力決定法	26
3. 5	温度制御装置及び DAC 昇温方法	27
3. 6	室温における圧力－加圧ねじ回転角関係と空角決定法	31
3. 7	高圧粘度未知油の圧力決定法	33
3. 8	未知油の空加圧ねじ回転角決定法	38
3. 9	未知油の高温高圧粘度評価法	39
3. 10	実験条件及び実験番号	41
第 4 章	実験結果及び考察	
4. 1	基準圧力による圧力較正図	43
4. 2	空加圧ねじ回転角の決定	43
4. 3	高圧粘度と粘度圧力係数	44
4. 3. 1	トラクション油	44
4. 3. 2	低粘度鉍油	45
4. 3. 3	低粘度鉍油の結晶化温度の圧力変化	45
4. 3. 4	自動変速機油 (ATF)	45
4. 3. 5	高温用潤滑油 5P4E	45
4. 4	測定値の回帰曲線	46

第 5 章	結 論	87
	謝 辞	88
	参 考 文 献	89
	付 録	
付 録 1	温度制御装置の操作法	91
付 録 2	粘度算出プログラム (mcd)	92
付 録 3	Walter の式による常圧粘度算出プログラム (mcd)	93
付 録 4	HC4 の Roelands の式 (mcd)	94
付 録 5	SR4 の Roelands の式 (mcd)	95
付 録 6	実験データ WLF 回帰シート (xls)	96
付 録 7	実験データ Roelands 式回帰シート (xls)	99
付 録 8	実験詳細データ例	101
付 録 9	最高圧での圧力室の様子	105

第 1 章 緒論

歯車，転がり軸受，エンジン動弁系およびトラクションドライブなどの弾性流体潤滑（EHL）油膜はナノメートルオーダー薄膜で潤滑され，機械の性能・特性を左右するパラメータであり，最近では潤滑油の分子設計にナノテクが利用されている．EHL 状態の潤滑油分子設計にはその高圧力下の粘度，密度などが基礎物性データとなり，特に粘度-圧力特性が最も重要である．最近では自動車エンジン内のすべり軸受の熱弾性流体潤滑（TEHL）解析でも粘度-圧力特性を考慮しているものも見られる．従って，高圧下での潤滑油の粘度，密度および弾性率などの物性データは，要素材料の疲労寿命，トラクション力評価において非常に重要でありデータの構築が要望されている．また，地球環境保全の一環として自動車の省燃費化を推進するために，エンジン内摺動部における摩擦低減化技術が進められており，エンジン油，変速機油の基油には省資源化につながる長寿命化を狙いとした低粘度高粘度指数基油が多用される傾向にある．

通常の高圧粘度測定装置は，金属製の圧力容器を用いており発生圧力は BRIDGMAN，ABBOT らの極めて特殊な装置では 3 GPa で測定しているが，多くの装置で油漏れなどにより安定した発生圧力は数百 MPa 程度で高くとも 1GPa のようである．当研究室では，これまでダイヤモンドアンビルセル（DAC）という超小型で特殊な高圧装置を用い，落球法[1,2]，固化油の粘弾性応力緩和法[3]，ブリルアン散乱法[4]，光散乱光子相関法[5]により高圧粘度，密度（弾性係数）さらに体積粘性率などを 5GPa 程度まで評価してきた．圧力測定は，ルビー蛍光法[1]を用いて行ってきた．しかしながら DAC では比較的低压の 200MPa まではルビー蛍光法による圧力測定精度が悪く，この方法の習得及び測定には時間がかかり，また高精度の分光システムも必要であるため，他の簡単な方法で圧力が精度良く定まれば，低压でも金属容器高圧粘度計より容易に高圧粘度が測定できる．しかも小型アンビル型で油一滴で測定できるマイクロ計測の利点を持つ．

中村らは DAC の加圧ねじ回転角と圧力の関係を高圧粘度既知のいくつかの油で 1GPa まで求めて 1 本の線（圧力校正図）を構築し，これを用いて未知油で簡易に圧力を決定できることを示した[6]．本研究ではそれを用い，ナフテン

系油の市販のトラクション油である，サントトラック 100 (SN100) とその基油である 2,4dicyclohexyl-2-methyl-pentane (DMP)，2 種類の最新のトラクション油 (TDF3000・TDF3200)，パラフィン系油である，市販の高温用潤滑油である 5-リングポリフェニルエーテル (5P4E)，水素化分解型基油 (HC4)，溶剤精製型基油 (SR4)，2 種類のオートマチックオイル (S-ATF・ATF) について 1GPa, 150℃までの高温時高圧粘度を測定し，油種間の比較や WLF 式，Roelands 式などの有効性を検討する．

第 2 章 潤滑油の粘度理論および表示式

2. 1 絶対反応速度論による粘度

絶対反応速度論の自由体積理論[7]によると，液体内には空孔が存在し，その空孔を埋めるようにして分子が移動することにより液体の流動が発生する．そして，分子が移動する際の抵抗により粘性が発生するとしている．そこで，図 2-1 のような液体中の分子モデルを考える．

図中の 2 つの分子層は距離 λ だけ離れており，その一方が応力の作用で他方を追い越してすべるものとする．また， 1cm^2 当たりのせん断力を f とし，せん断速度を Δu とする．このとき定義より粘度は次式で表される．

$$\eta \equiv \frac{f\lambda}{\Delta u} \quad (2-1)$$

ここで，他方に対する一方の層の運動は，1 分子がある平衡状態位置から同じ層内の平衡状態位置に移動することを意味すると仮定すると，この運動が起こるには，適当な空孔を発生させる必要があり，このため他の分子を押しやるための仕事をしなければならないので，エネルギーの消費が起こる．すなわち，この運動が起こるということは，系がポテンシャルエネルギー障壁を乗り越えることと同等であると考えられ，この抵抗が粘度に寄与することになる．図 2-1 の λ は 2 つの平衡状態位置間の距離で，同じ方向の隣接分子間の距離を λ とし，近似的に λ に等しいとする．また，同じ方向と垂直な方向に隣接する分子間の距離を λ とする．これらの条件のもとに分子の流れに対するポテンシャルエネルギーの様子を図 2-2 に示す．

1 つの分子がポテンシャルエネルギーの壁をのり越えて行くとき，その分子にかかる応力は次に示す式で計算される．

$$F = f\lambda_2\lambda_3 \quad (2-2)$$

(ポテンシャルを乗り越える応力 = 単位面積あたりにかかる力 \times 有効面積)

そして，1 分子の移動の前後におけるエネルギー差は， F に移動量をかけることにより求められ，次に示す式のようになる．

$$E = F\lambda = f\lambda_2\lambda_3\lambda \quad (2-3)$$

図 2-2 の中の ε_0 は 0 K における活性化エネルギー（ポテンシャルエネルギーの壁の高さ）といわれている．これを用いて，ある分子が 1 秒間に壁を乗り越える回数を表すと次式のようになる．

$$\kappa = \frac{kT}{h} \frac{F''}{F} \exp \left[-\frac{\varepsilon_0}{kT} \right] \quad (2-4)$$

κ : 透過係数，今回は $\kappa = 1$ とする

F'' : 活性化状態に於ける分子の単位体積当たりの分配関数

F : 始めの状態に於ける分子の単位体積当たりの分配関数

次に液体の流動を起こす力が働く時（せん断）のことを考える．この時，エネルギーの壁前後で高さ $(f\lambda_2\lambda_3\lambda)/2$ がだけ変化するから，力を受けた方向（前方）へ分子が移動する回数は次式で示される．

$$\begin{aligned} \kappa f &= \frac{kT}{h} \frac{F''}{F} \exp \left[-\left\{ \varepsilon_0 - \frac{1}{2} f\lambda_2\lambda_3\lambda \right\} / kT \right] \\ &= k \exp \left[\frac{1}{2} f\lambda_2\lambda_3\lambda / kT \right] \end{aligned} \quad (2-5)$$

また，それと同時に後方へ分子が移動する回数も次式の様に示される．

$$\kappa b = k \exp \left[-\frac{1}{2} f\lambda_2\lambda_3\lambda / kT \right] \quad (2-6)$$

以上の式により，前方または後方への分子がある平衡状態位置から他の平衡状態位置へと移動する回数が求まった．これに距離 λ をかけると分子が毎秒移動する距離，即ち運動速度となり，前方へは $kf\lambda$ ，後方へは $kb\lambda$ となる．結果として応力 f が作用した結果，前方へ移動する正味の速度は $(kf - kb)\lambda$ となり，これは定義によって Δu であるので式 (2-5) および式 (2-6) により以下のように導かれる．

$$\begin{aligned}\Delta u &= \lambda k \left[\exp \left\{ \frac{1}{2} f \lambda_2 \lambda_3 \lambda / kT \right\} - \exp \left\{ -\frac{1}{2} f \lambda_2 \lambda_3 \lambda / kT \right\} \right] \\ &= 2 \lambda k \sinh \frac{f \lambda_2 \lambda_3 \lambda}{2kT}\end{aligned}\quad (2-7)$$

ここで， f は通常の液体に於いては 1 dyne/cm^2 程度であり， λ_2 ， λ_3 ，および λ もほぼ分子の大きさの 10^{-8} cm 程度であるので， $2kT \gg f \lambda_2 \lambda_3 \lambda$ となる．このことから，式 (2-7) を展開する時に第 1 項以外の項を全て省略することができる．式 (2-1) は以下の様に書き換えることができる．

$$\eta = \frac{\lambda kT}{\lambda_2 \lambda_3 \lambda^2 k} \quad (2-8)$$

この式に，式 (2-4) で得られる k を代入すると，次式が得られる．

$$\eta = \frac{\lambda h}{\lambda_2 \lambda_3 \lambda^2} \frac{F}{F''} \exp \left\{ \frac{\varepsilon_0}{kT} \right\} \quad (2-9)$$

この式において厳密ではないが $\lambda = \lambda_1$ と近似すれば，以下の式となる．

$$(2-10) \quad \eta = \frac{\lambda h}{\lambda_2 \lambda_3 \lambda_1} \frac{F}{F''} \exp \left\{ \frac{\varepsilon_0}{kT} \right\}$$

$\lambda_2 \lambda_3 \lambda_1$ は近似的に液体状態における 1 分子の占める容積であり，これを V/N_0 としてもよい．ただし V はモル容積， N_0 はアボガドロ定数である．式 (2-10)

に代入すると

$$\eta = \frac{hN_0}{V} \frac{Z}{Z''} \exp \left[\frac{\varepsilon_0}{k_B T} \right] \quad (2-11)$$

となる．ここで，はじめの状態と活性化状態の平衡定数を K とすると

$$K = \frac{Z''}{Z} \exp \left[-\frac{\varepsilon_0}{k_B T} \right] \quad (2-12)$$

であり，また，熱力学の関係式より

$$K = \exp \left[-\frac{\Delta F}{RT} \right] \quad (2-13)$$

なので，この式 (2-12) と式 (2-13) を用いて式 (2-11) を以下の式のように書くことができる．ただし， ΔF は 1mol 当たりの活性化自由エネルギーである．

$$\eta = \frac{hN_0}{V} \exp \left[\frac{\Delta F}{RT} \right] \quad (2-14)$$

さらに， ΔF は熱力学的に以下のように表される．

$$\Delta F = \Delta U - T\Delta S + P\Delta V \quad (2-15)$$

ここで， ΔU は活性化エネルギー， P は圧力， ΔV は活性化体積， ΔS は活性化エントロピーである．これを式 (2-14) に代入して，

$$\eta = \frac{hN_0}{V} \exp \left[\frac{\Delta U}{RT} \right] \exp \left[-\frac{\Delta S}{R} \right] \exp \left[\frac{P\Delta V}{RT} \right] \quad (2-16)$$

と表すことができる．

以上から，温度が上昇すると式 (2-4) により，分子が 1 秒間に壁を乗り越える回数が増大し，それにより液体の流動が活発となり，これらの現象により粘度が減少することが分かる．また，式 (2-10) からこの温度増加に伴

い，粘度が減少していくことが分かる．

また， V を液体の分子容， V_s を膨張していない固体の分子容とすると，その差 $V-V_s$ は液体中の空孔の数となり，それは液体の流動性に比例する．粘度は流動性の逆数で表されるため次のようになる．

$$\eta = \frac{C}{V-V_s} \quad (2-17)$$

ここで， C は定数を表す．上式より，空孔の数が増えれば増えるほど動ける分子の数が多くなり，流体の流動性が増加し，粘度が下がることが分かる．また，流体が高圧力状態におかれた場合，流体の分子容が縮むことになるので流動性が減少し，粘度が増加することになる．

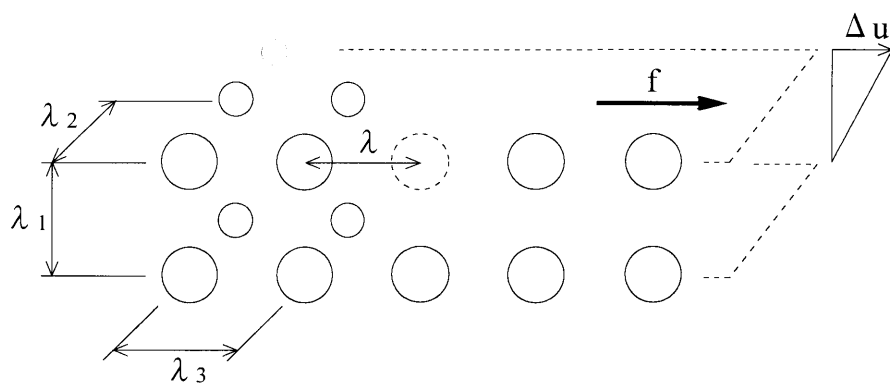


図 2-1 液体中の分子モデル

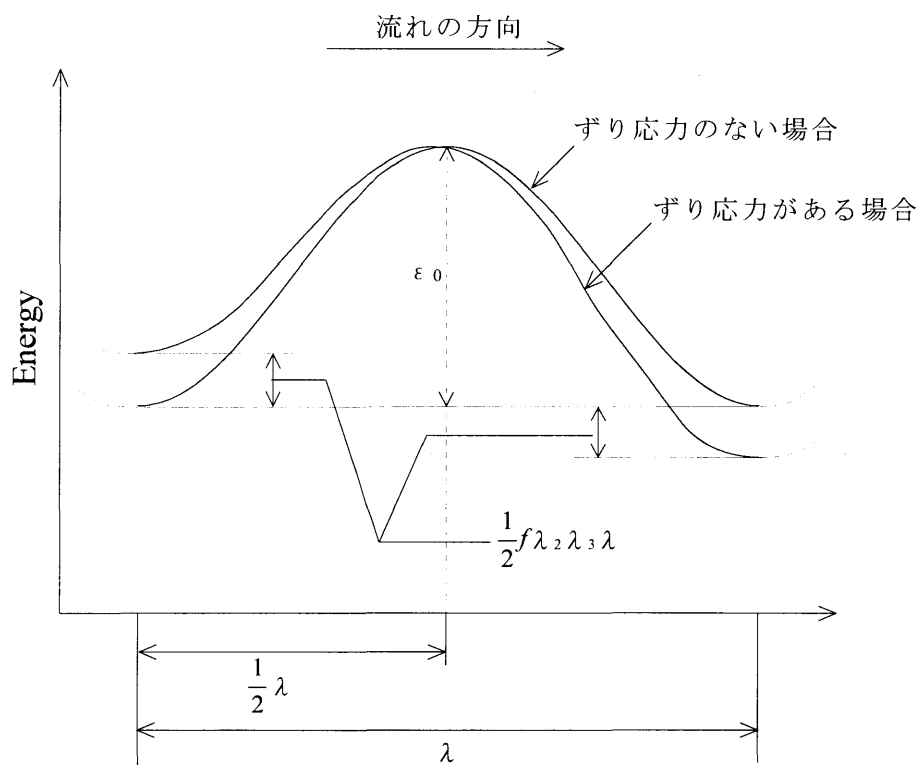


図 2-2 ずり応力がある場合と無い場合との粘性流動に対するポテンシャルエネルギー

2. 2 粘度－圧力関係式

弾性流体潤滑（EHL）理論では，潤滑油粘度の圧力による増加は圧力の指数関数として次式で近似されている（Barus の式）．

$$\eta(T \cdot P) = \eta(T, 0) \cdot \exp(\alpha(T) \cdot P) \quad (2-18)$$

ここで， $\eta(T, 0)$ は常圧における潤滑油の粘度， $\eta(T \cdot P)$ は温度 T ，圧力 P における潤滑油の粘度， $\alpha(T)$ は温度 T における粘度－圧力係数である．

So と Klaus は鉱油やポリマーおよびレジンを含む油，純炭化水素を対象とした油の α を，動粘度と密度および Walther の式における m の関数で表している．

$$\alpha = 1.216 + 4.143 (\log \nu)^{3.0627} + 2.848 \times 10^4 m^{5.1903} \times (\log \nu)^{1.5967} - 3.999 (\log \nu)^{3.0975} \cdot \rho^{0.1162} \quad (2-19)$$

ここで， ν は動粘度であり ρ は密度である．

また， α を推算する式がいくつか提案されているが，Wu and Klaus の式は 2 点の温度における動粘度から求めることができるので使いやすい．

$$\alpha = (0.1657 + 0.2332 \log \nu) \cdot m \cdot 10^{-8} \quad (2-20)$$

また Walther の式を以下に示す．

$$\log \log(\nu + k) = -m \log T + b \quad (2-21)$$

ここで， ν は油の動粘度， T は絶対温度である．また m ， b は油により決定する定数である． k は定数で ASTM（アメリカ材料試験協会規格）では $\nu \geq 1.5$ cSt のとき 0.6， $\nu < 0.7$ cSt のとき 0.75 とする．式（2-19）によると計算値は 0.07 GPa 以下の圧力範囲で，実測値と 15 % 以内の精度で一致すると述べている．Roelands らはポリマーを含まない鉱油の 25 ～ 90 °C の温度範囲，0.1 GPa 以下の圧力範囲の実測粘度をもとにして，高圧粘度と環分析値を関係づけた式を提案し

ている。

$$\log(\eta / \eta_0) = (P / 5.566 \times 10^7)^y \times \{(0.002CA + 0.003CN + 0.055) \log \eta_0 + 0.228\}$$

$$\log(y - 0.890) = 0.00855(CA + 1.5CN) - 1.930 \quad (2-22)$$

ここで，CA，CN はそれぞれ全炭素数に対する芳香族とナフテン環を構成する炭素数の比を百分率で表したものである。式（2-18）と式（2-22）の違いは油の組成により決まる y により表されている。

粘度は圧力の増加に伴い指数関数的に増加するが，高圧になるにつれて粘度増加は次第に鈍化し，また温度の上昇によっても粘度変化は小さくなる。このことを補正するために Roelands は，次式も提案している。

$$\eta = \eta_0 \exp \left[(ln(\eta_0) + 9.67) \times \left[\left(\frac{T+135}{T_0+135} \right)^{-S_0} \times (1 + 5.1 \times 10^{-9} \times P^Z) - 1 \right] \right] \quad (2-23)$$

ここで， T_0 は基準温度， S_0 ， Z は油に固有のパラメータである。（HC4 では $S_0 = 1.1679$ ， $Z = 0.5913$ ， $T_0 = 30^\circ\text{C}$ ， $\eta_0 = 27.2 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ である [8]，付録 4 参照）

また，Bridgman は液体の圧力の指数と粘度の関係は圧力軸に対して，低粘度時には上に凸，高粘度時には下に凹となり，その変曲点は複雑な分子構造をもつ液体では低圧力時に，単純な分子構造では 1.2 GPa 以上の高圧であらわれると述べている。計量研では次式に示す最も簡単にその傾向をあらわす式も提案している [9]。

$$\eta = \eta_0 \exp(aP^3 + bP^2 + cP) \quad (2-24)$$

ここで，a，b および c は液体固有の定数である。

高圧力下における潤滑油の粘度－温度関係式として Crook は式（2-18）から油膜厚さを求める熱的解析に次式を用いる。

$$\eta = \eta_0 \exp(\alpha P - \beta \Delta T) \quad (2-25)$$

ここで β は粘度－温度係数， ΔT は基準温度からの上昇温度である。

この式において村木らは粘度－温度係数 β を圧力の一次関数と仮定し，トラ

クシヨン係数の解析に用いている。

自由体積理論から潤滑油粘度 $\eta(T, P)$ をガラス転移温度と自由体積の熱膨張の圧力依存の項で与えられる安富らの式がある。式(2-26)に安富らの式を示す[10][11]。

$$\log \eta(T, P) = \log \eta_g - \frac{C_1 \cdot (T - T_g(P)) \cdot F(P)}{C_2 + (T - T_g(P)) \cdot F(P)} \quad (2-26)$$

ここで、 C_1 、 C_2 はWLF定数で、 η_g はガラス転移温度における粘度 ($\eta_g = 10^{12} \text{Pa} \cdot \text{s}$) である。 $T_g(P)$ 、 $F(P)$ はそれぞれ圧力の関数で表されるガラス転移温度と熱膨張係数で以下のように表される。

$$T_g(P) = T_g(0) + A_1 \ln(1 + A_2 P) \quad (2-27)$$

$$F(P) = 1 - B_1 \ln(1 + B_2 P) \quad (2-28)$$

この式では物理的意味の明確なガラス転移点、熱膨張係数などをパラメータとしている。しかし式(2-26)を用いるにはガラス転移温度の測定が必要なため、 $T_g(P)$ の代わりに $10^7 \text{Pa} \cdot \text{s}$ を基準粘度として $\eta = \eta_s$ になる温度を基準温度 $T_s(P)$ とした式(2-29)を用いる。

$$\log \eta(T, P) = \log \eta_s - \frac{C_1 \cdot (T - T_s(P)) \cdot F(P)}{C_2 + (T - T_s(P)) \cdot F(P)} \quad (2-29)$$

また、関係式に使われている SN50, KTF1, DOS, DOP (3. 6 参照) の係数 A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , C_1 , C_2 を表 2-1 に示す。

DOS, DOP に関して WLF 式と ASME データの比較と KTF1 に関して WLF 式と Bair のデータ比較を図 2-3, 2-4, 2-5 に示す[12][13]。

表 2-1 文献値による各試料油の係数

Lubricant	Ts(0)	A ₁	A ₂	B ₁	B ₂	C ₁	C ₂
SN50	-54.7	76.77	3.348	0.282	17.47	10.96	26.59
KTF1	-68.6	160.5	1.816	0.3024	12.64	10.94	28.97
DOS	-89.7	111.5	0.558	0.217	20.3	11.17	31.69
DOP	-55.7	246.4	0.32	0.212	25.43	11.03	27.21

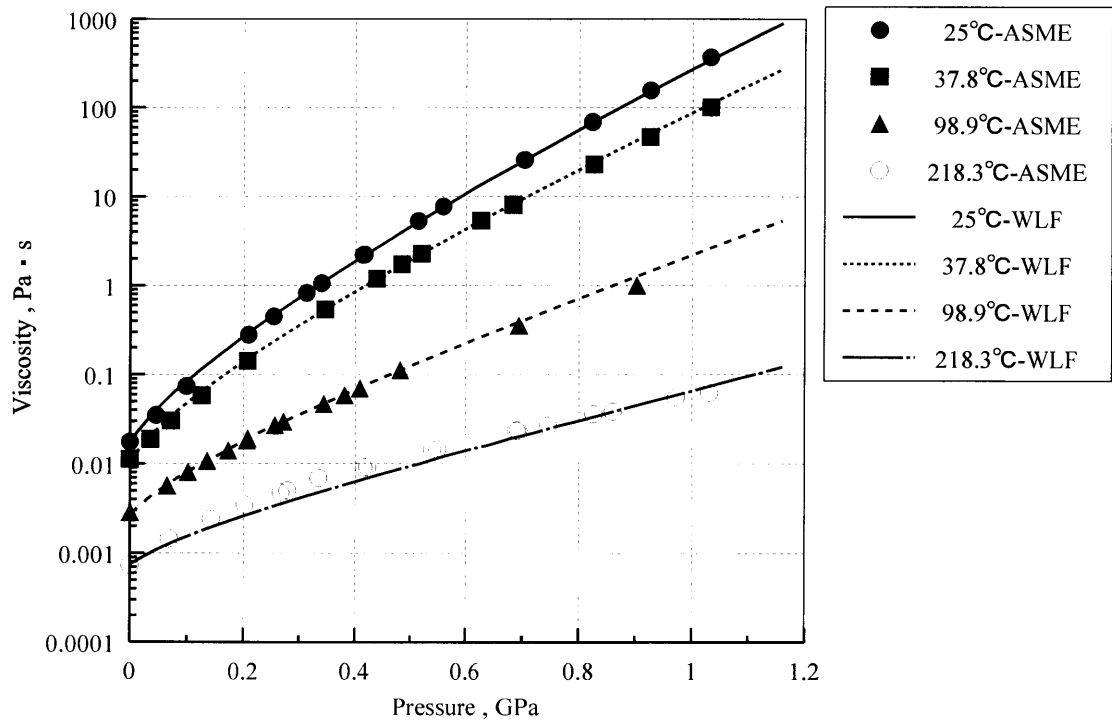


図 2-3 WLF-ASME 関係 (DOS)

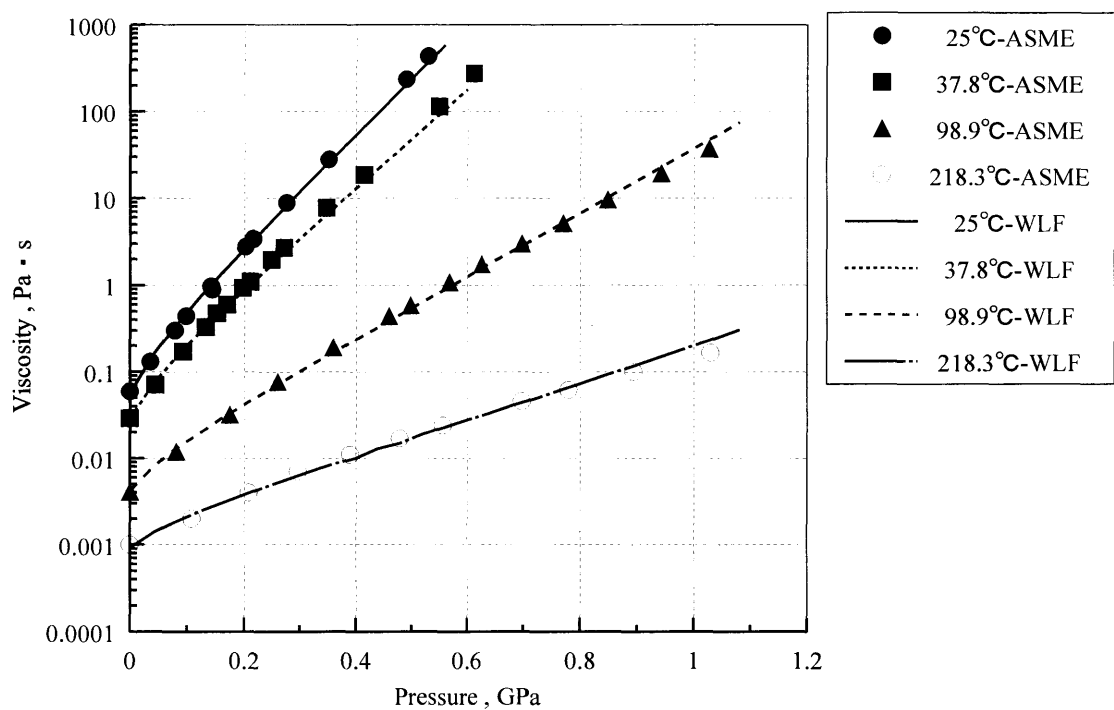


図 2-4 WLF-ASME 関係 (DOP)

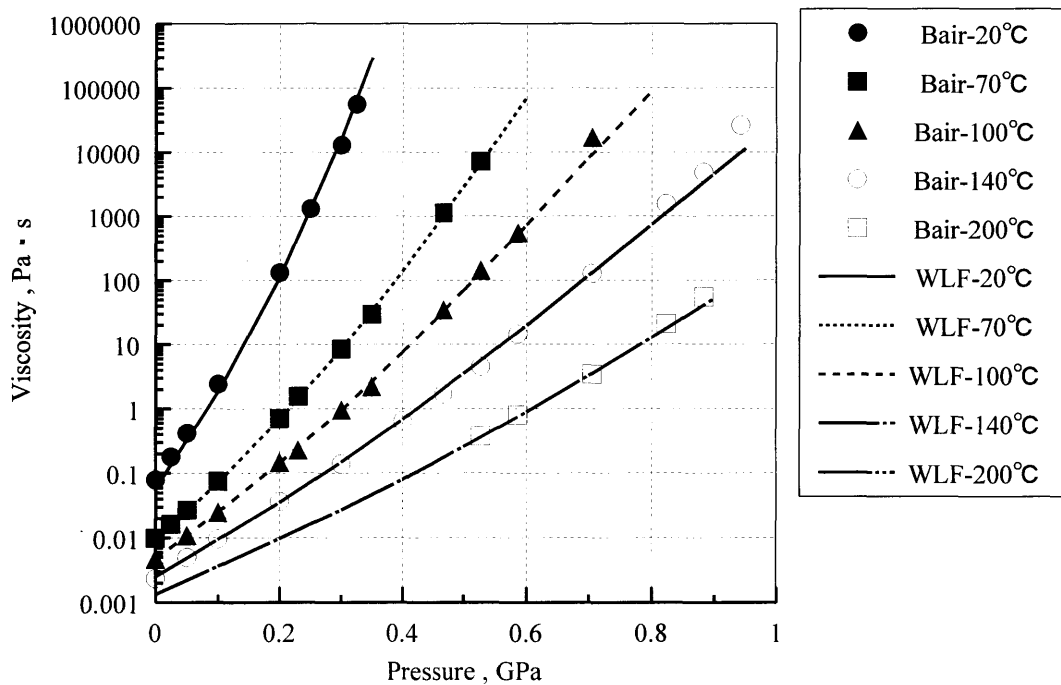


図 2-5 WLF-Bair 関係 (KTF1)

第 3 章 実験装置及び実験方法

3. 1 ダイヤモンドアンビルセル高圧装置 (DAC)

試料油の圧力発生装置として，ステンレス製のダイヤモンドアンビルセル (Diamond-anvil-cell 以下 DAC) 高圧装置 (清水製作所，□ 50) を用いた．図 3-1 に DAC (No.3) の模式図を示す．また，DAC の表面と裏面の写真をそれぞれ図 3-2，3-3 に示す．この装置は，ねじによる加圧タイプのもので対向したダイヤモンドアンビルのキュレット面で，穴のあいた金属ガスケットを圧縮して塑性変形させることにより，圧力室内に高圧力を発生させるものである．小さい圧力室のため，試料油が 1 滴ほどの少量でよいこと，ダイヤモンドが光学的に透明で，赤外線，可視光，X 線などにより種々の計測ができることなどの特徴を持つ [14]．本研究では，低圧での圧力制御のため，皿ばねを 1 つ挿入した．圧力室内には，試料油と粘度測定用の落下球 (ニッケル合金球及び銅球) を封入する．金属ガスケットは厚さ 0.9mm 程度のリン青銅板を用いた．(3. 1 0 参照) 回転ねじ角度の測定は，DAC 専用の角度目盛り付き加圧装置 (3. 2 参照) により行う．これは，最小目盛り 0.144° で高精度に回転角を読める．

以下に DAC のセット手順と注意事項を示す．DAC をセットする前に作業場のゴミをブロワーで取り除き，手をよく洗う．

1. セットの前に DAC の平行度のチェックを行う．
2. DAC の下部締め付けねじ (以下，加圧ねじ) を減圧側に回しピストンを下げる．摩擦でピストンが下がっていないときもあるので，横穴からもピストンを指で押し下げる．上下のダイヤモンドどうしが接触していないことを横穴から確認して上蓋をはずす．なお，保管時に上蓋はダイヤモンド面が上になるように DAC 本体に取り付け，置いておく．上下のダイヤモンドコレット面を一度綿棒で乾拭きし，その後，エタノール (アセトン厳禁) を綿棒に含ませる．エタノールを多く含んだ場合ではきれいに掃除しにくいため，その時はティッシュで少し拭き

- 取りその後で掃除する。綿棒は3,4回使用したら交換するようにする。この時、顕微鏡で見ながら十分きれいになるまで行う。この作業を2,3回行った後、仕上げにもう一度拭き取る。側面や台座の周りも以前の実験での接着剤やゴミを爪楊枝、綿棒などを使って十分掃除しておく。
3. 選んだガスケットをアルコールの入った容器に入れ、超音波洗浄機で洗浄する。位置調整用のセロハンテープを3つ作る。長さは、DACの側面の穴から出て後に調整しやすいものが好ましい。(作り方は後の図 3-4 を参照) この時、セロハンテープはできるだけ粘着力の強いものを使う。これら3つをガスケットに貼り付ける。(図 3-5 参照) 貼り付ける時、ガスケットに手が触れないように(手の油などがガスケットに付着するのを防ぐため)注意して、ピンセットを使用し、貼り付けを丁寧に行う。
4. ガスケットが上のダイヤモンド面に当たらないように横穴から注意しながら、上蓋ねじをゆるみのないようきつく締める。(上蓋ねじは以下同様) DACの下の加圧ねじを上蓋ダイヤモンドに軽く接するまで加圧側にゆっくり回し、顕微鏡で確認しながら、ガスケットの穴の中心がダイヤモンドの中心に正確にくるように、セロハンテープを使って移動させる。(図 3-6, 3-7 参照) 中心にきたら、いったんガスケットを挟み込み、中心を再確認して(ずれたら、再調整)加圧ねじを強く締め付る。そして、ガスケットにダイヤモンドの圧痕をつけ、シール性を向上させる。(圧力室の外径が元の 80 % 程度になるまで顕微鏡で確認しながら慎重に行う) セロハンテープを外し、その後、DACの側面の穴から測定顕微鏡で確認しながら、ダイヤモンドアンビルの台座とガスケットの4隅に瞬間接着剤をつける(図 3-8 参照)。接着剤がしっかりついたのを確認した後、硬化剤を使いしっかりと接着させる。
5. 試料油を圧力室の中に封入する前に加圧ねじをゆるめ、再加圧で軽くあて圧力室の厚さをレーザーフォーカス変位計を用いて測定しておく。
6. 加圧ねじを緩めてピストンを指で押し下げ、完全にガスケットとダイヤモンドコレット面が離れたことを十分確認してから上蓋を外す。ガスケットの表面の穴の横に試料油を太針で1滴落とす。それを細針で誘導しながら穴の中に流し込む。時間とともに気泡は浮いて出ていくが、

それでも抜けない場合は先端の平らな針金で気泡を押しつぶすようにして、気泡を押し出す。(図 3-9 参照)この時、穴にゴミなどが入らないように注意する。

7. あらかじめ選んでおいた金属球(銅球)を針でとり、ガスケット表面上の試料油で十分なじませた後、穴の中に挿入する。球が穴またはダイヤモンドのコレット面に、付着せずに落下するのを顕微鏡で確認する。上蓋のダイヤモンド面にも試料油をたらしておく。なじませるため上蓋を完全に締めて(ダイヤモンドとガスケットが当たらないように横から慎重に確認しながら)加圧ねじを圧力が加わらないように軽くしめ、密封する。最後に圧力室内に気泡などの問題が生じてないかを顕微鏡で確認し DAC のセットが完了する。屈折率 $n=1$ とおいた場合の常圧の厚さを測定し、それから常圧屈折率を決定する。保管するときは球が圧力室の中心付近にくるようにし倒立させて保管する。

DAC のセットの際に何度も細針や太針を使用するが、1回使うごとにアルコールで洗浄する。DAC、針、加圧装置などは机から不意に落とさないように机の真ん中付近に置くようにする。

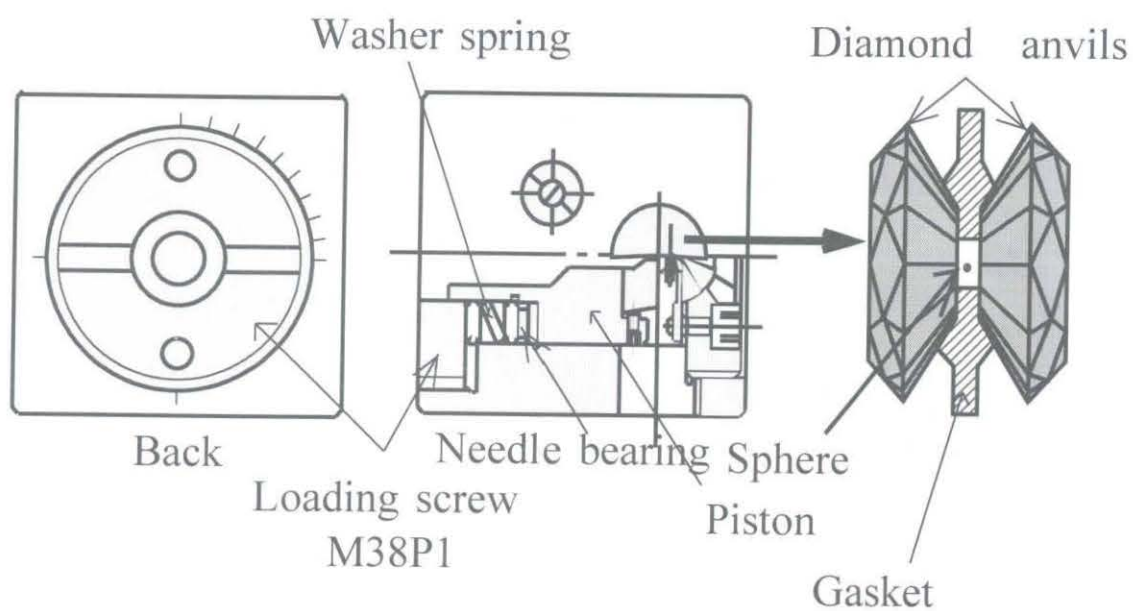


図 3-1 DAC の模式図 (No.3)



図 3-2 DAC (No.3) の表面

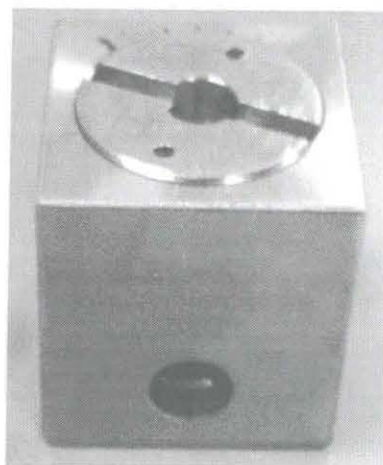
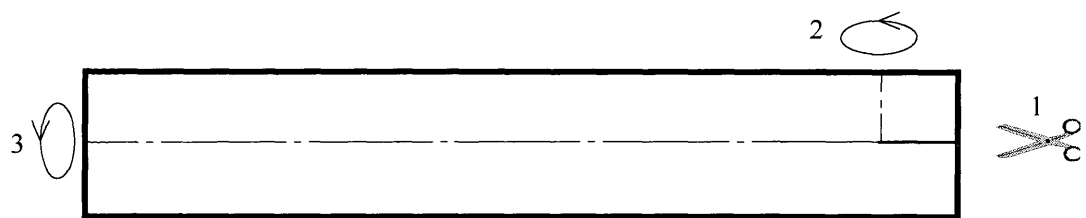


図 3-3 DAC (No.3) の裏面



- 1.セロハンテープに切り込みを入れる
- 2.切り込みを入れた側の半分を折り曲げる
- 3.縦に半分に折る

図 3-4 ガスケット位置調整用セロハンテープ

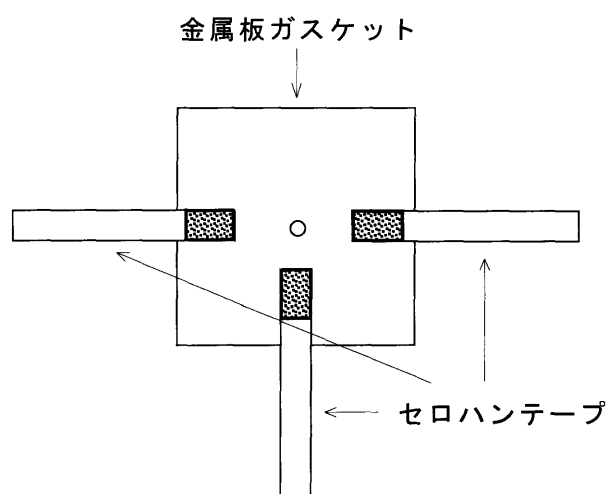


図 3-5 位置調整セロハンテープの取り付け

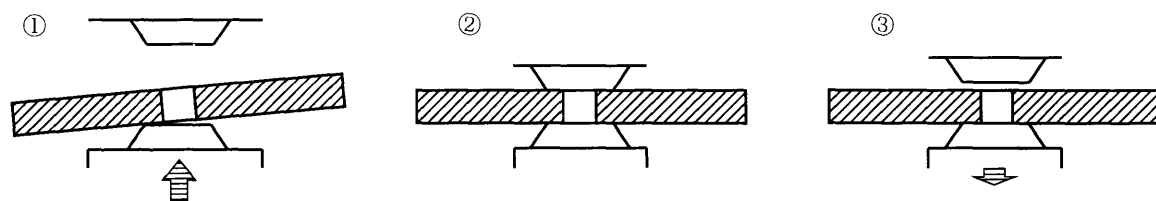


図 3-6 ガスケットの取り付け方

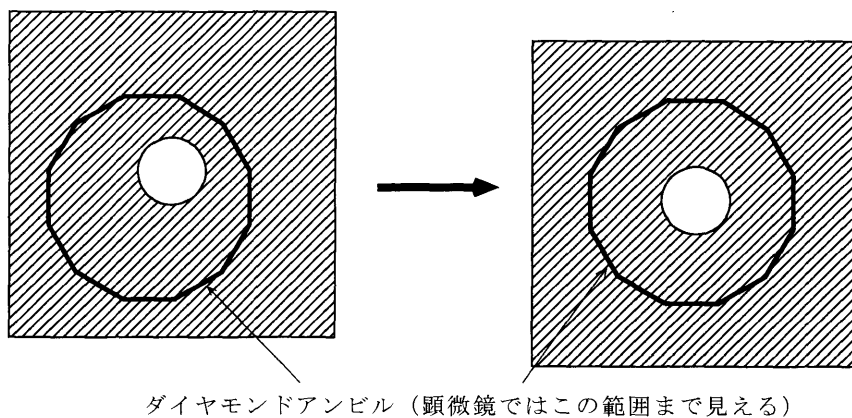
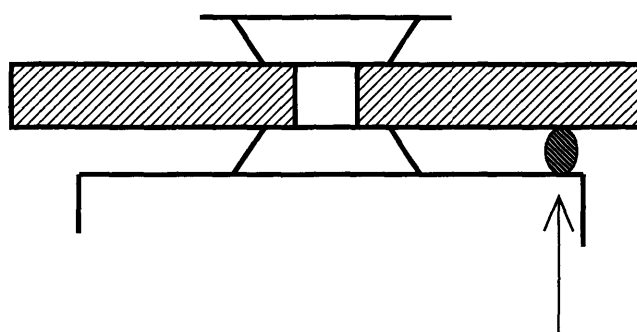


図 3-7 ガスケット穴の位置調整



DACの側面の穴から光学顕微鏡で見ながら接着剤をたらしていく。

図 3-8 接着剤の付け方

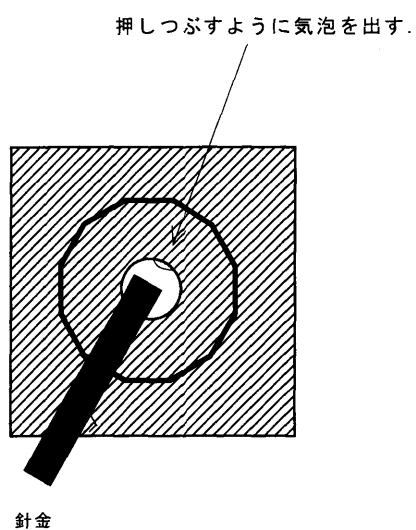


図 3-9 気泡の流入防止法

3. 2 DAC 加圧装置

DAC の加圧装置（協和製作所，WG－KY01－4 型）を図 3-10 に示す．DAC をギア・ボックスにはめ込み，つまみを回して加圧を行う．カウンタの目盛りが細かくついており，最小 0.144° まで読みとることが可能であり，精度良く加圧ねじ回転角が測定できる．50:1 に減速され加圧の際のつまみの回転力も軽く，発生圧力のコントロールも容易である．以下に簡単に測定手順を述べる．

1. ギア・ボックスの中に DAC をはめ込む．この時，あらかじめ溝の位置を確認しておき，ゆっくり DAC を近づけ，つまみを回しながら，はめ込む．
2. きっちりハマったことを確認したら，そのときのカウンタに表示されている目盛りを読みとる．
3. つまみを回して加圧を行う．この時，あまり早く回したり，無理な加圧は行わないように注意する．あらかじめ加圧する前に回したい角度を決めておき，目盛りに置き換え計算しておく．
4. 決めた目盛りまで加圧し終了したら，DAC をボックスからゆっくりとはずす．

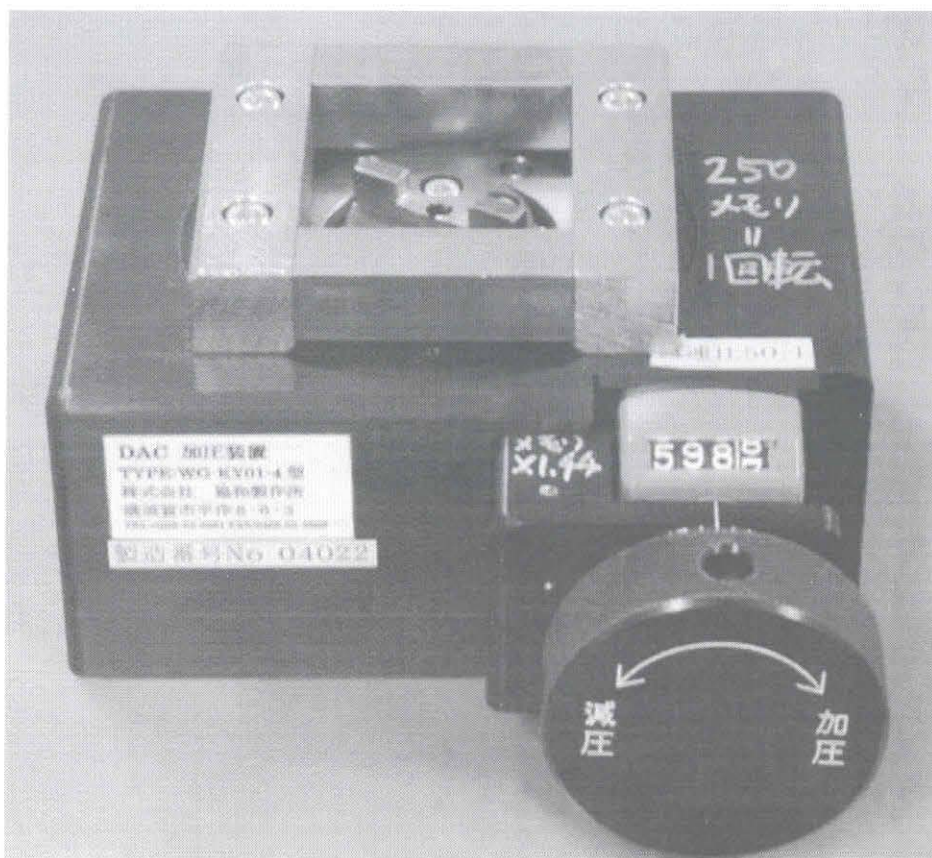


図 3-10 DAC 加圧装置

3. 3 球落下法による粘度測定

本研究室では、圧力室内に入れた落下球が一定距離を落下するのに要する時間から試料油の粘度を求める球落下法を用いた。試料油が非圧縮性 Newton 流体で無限に広がっているとき、落下球が受ける抵抗 f_1 は次式により表される。

$$f_1 = 6\pi\eta_a a v \quad (3-1)$$

ここで η_a は見かけの粘度、 a および v は球の半径及び落下速度である。この関係を Stokes の粘性抵抗法則という。また、球が重力により下に引っ張られる力 f_2 は、浮力を考慮し次式で表される。

$$f_2 = \frac{4}{3}\pi a^3 \rho_s g - \frac{4}{3}\pi a^3 \rho_L g \quad (3-2)$$

ここで ρ_s , ρ_L は球、試料油の密度、 g は重力加速度である。球が一定速度で落下しているならば $f_1 = f_2$ となり、 η_a は以下のようになる。

$$\eta_a = \frac{2ga^2(\rho_s - \rho_L)}{9v} \quad (3-3)$$

(3-3) 式が成り立つのは、レイノルズ数が 1 に比べて非常に小さい場合である [15]。また、高圧下においては、液体の密度は常圧下のそれより上昇するので、 ρ_L の値は圧力により補正した次式を使用した [16]。

$$\rho_L = \rho_0 \times \left[1 + \frac{0.00059 \times P}{1 + 0.00171 \times P} \right] \quad (3-4)$$

ここで ρ_0 は常圧下での試料油密度、 P は高圧圧力 (MPa) を表す。しかし、本実験のように有限の大きさの圧力セル内では両壁面の影響を受け、球速度は減速するため壁効果の補正が必要になる。そこで Munro らの壁補正係数 γ を用いる。壁補正係数 γ を用いた粘度 η は次式で与えられる [17]。

$$\eta = \gamma \times \eta_a \quad (0 < \gamma < 1) \quad (3-5)$$

ここで η_a は見かけの粘度である．壁補正係数 γ は，ガスケット厚さやガスケット穴直径，落下球直径の関数であり本実験では 0.8 程度であった．

粘度測定装置の光学系の模式図および全体写真を図 3-11 および図 3-12 に示す．装置は対物レンズ（Nikon M Plan 5 0.1-210/0 SLWD），接眼レンズ（Nikon CFWN 10 ×/20 目盛り付き），鏡筒（TS-I）およびビデオカメラ（SONY CCD-TR705 NTSC）で構成されている．ビデオカメラは球の落下速度の測定を精度良く撮影するため，レンズ系は 2 個のスライド式レンズホルダー（シグマ光機 Σ-41-1）を用い，ロッドスタンド（シグマ光機 Σ-32-40）を介して，工学ベンチ用キャリア（シグマ光機 Σ-07-1）に固定した．ビデオカメラは，スペーサーと薄い銅板を介して一部加工した工学ベンチ用キャリアに取り付け，それぞれを工学ベンチ（シグマ光機 Σ-06-1）上に取り付けた．工学ベンチをねじで挟み込み，支持する 2 つの自作のパーツを，一方はスペンサーを介して自作のステージに，もう一方を粗動 Z ステージ（シグマ光機 Σ-300）に取り付ける．粗動 Z ステージは自作のステージに固定する．そして，自作ステージを XY 軸精密ステージ（シグマ光機 Σ-218S-2）上に固定した．録画には DVD レコーダ（Panasonic DMR-EH50）を使用した．照明にはライトガイド（中央精機㈱ LGN-500W）およびライトガイド照明装置（中央精機㈱ SPN-100H）を使用した．DAC のホルダーである回転ステージは 3 つの偏心した円筒の組み合わせで構成されており，回転中心を任意に設定することが可能となっている．回転ステージおよび光学系はすべて H 型鋼上に固定した．

粘度測定の全体の流れは，試料油を圧力室内に封入後は加圧せず常圧状態で圧力室寸法，粘度を測定し，その後加圧を行う．加圧するたびに粘度測定装置に取付け，実際の球落下の速さを目安にし加圧を行う．昇温実験で複数の温度において粘度測定を行う場合は，例えば 40 ℃，70 ℃，100 ℃でのデータを得たいときは，40 ℃ → 70 ℃ → 100 ℃ → 70 ℃ → 40 ℃の手順で行う．測定終了後，DAC が完全に室温まで冷めるまで 1 日放置し再び圧力，圧力室寸法を測定する．

粘度測定の手順を以下に示す．

- (1) 圧力測定後，デジタル顕微鏡（Nikon OPTIPHOT-2）でガスケット穴直径を測定し，レーザフォーカス変位計で圧力室厚さ 5箇所を測定する．
- (2) セットした DAC を，回転ステージ上に固定用の金具で固定する．
- (3) ビデオカメラ，キャラクタージェネレーター（Victor 製 CG-V60），DVD ビデオレコーダー，モニター用のテレビ，照明の電源を入れ，圧力室内の様子を映し出す．そして回転ステージを回転させたときにも圧力室がビデオカメラの撮影範囲から大きくはみ出さないよう，圧力室の中心と回転ステージの回転軸とがなるべく一致し，かつ光軸に来るように粗動 Z ステージ，偏心させた円筒を調節する．
- (4) 前述したように，球が落下する時には壁の影響を受けるため，落下球はコレット面間の中央に位置しなければならない．そのため，ビデオカメラ下部に取り付けられているマイクロメーターで，コレット面のふた側，加圧ねじ側，および球にピントを合わせ，それぞれの時のマイクロメーターの値を読み取り，球のピントとコレット面のピントの距離が等しくなるよう，球を移動させたい方向に装置全体を傾ける．
- (5) キャラクタージェネレーターでタイトルを入力し，それをモニターに表示させて DVD ビデオレコーダーで 10 秒ほど録画して停止する．
- (6) タイトル画面から 1/100sec カウンター表示に変え，カウンターを作動させる．
- (7) DVD ビデオレコーダーの録画を開始し，回転ステージを回転させて球を持ち上げる．その際，球を圧力室の中心付近で落下するように調整する．球が下まで落下したら回転ステージを回転させて，再び球を落下させる．これを低粘度時では 6 回程度，高粘度時では 3 回程度繰り返す．しかし，1 目盛りの落下に数時間要する場合は，1 目盛りの落下時間でも構わない．
- (8) (5) ～ (7) を繰り返す．
- (10) パソコンの Mathcad 7 プロフェッショナルによる粘度算出プログラム（付録 2 参照）で粘度を求め，簡易圧力評価[6]により圧力を求める．

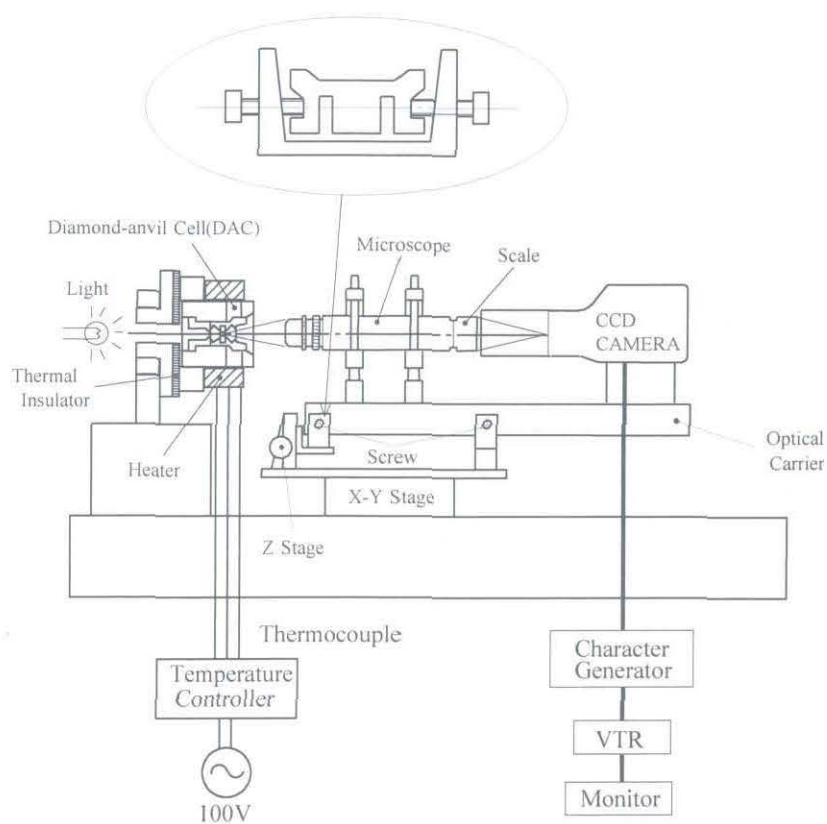


図 3-11 粘度測定装置の光学系模式図

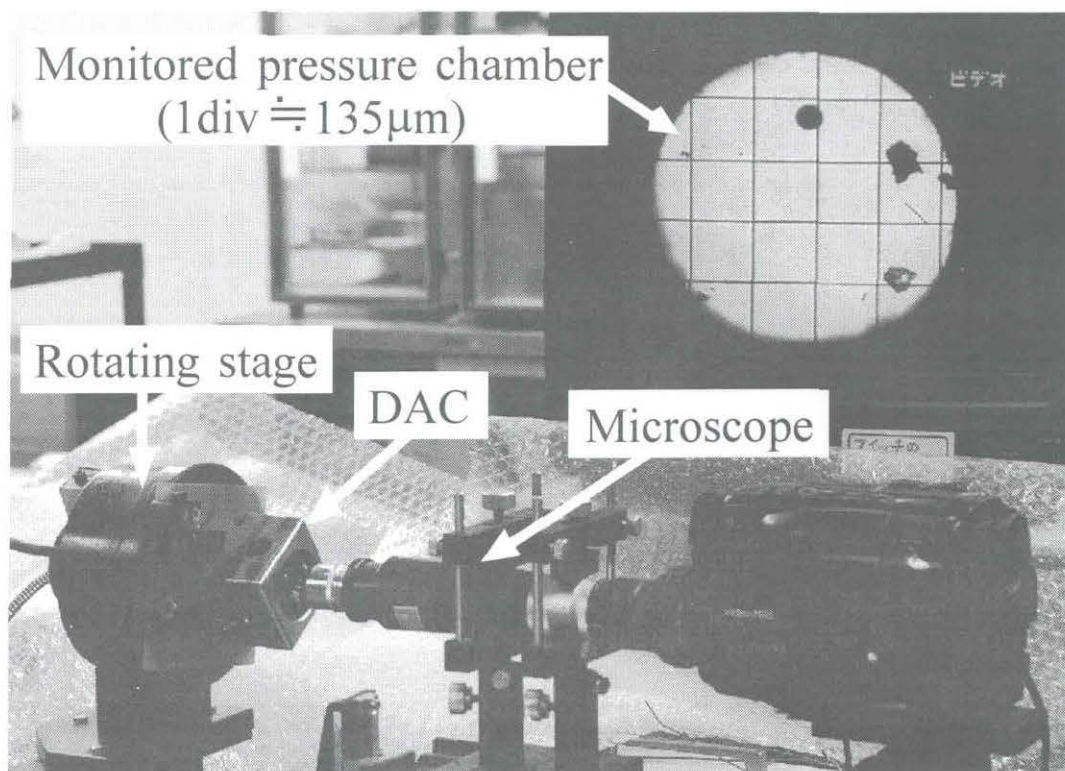


図 3-12 粘度測定装置の全体写真

3. 4 高圧粘度実測値からの圧力決定法

粘度測定から求めた粘度と測定温度から式(2-28)を用いて圧力 P を決定する。具体的には、 P の初期値を少しずつ変え測定粘度に収束した値を P とする。

3. 5 温度制御装置及び DAC 昇温方法

DAC 内の圧力室の温度感知方法は、図 3-14 のような横からダイヤモンドを挟み込むよに固定できる形にカットした銅製の薄板に、熱電対の先端部をろう付けし、この銅板を DAC 内のダイヤモンドを横から挟み込み、ガスケット上部の表面に固定し、圧力室近辺のガスケット部の温度を感知する。図 3-15 に熱電対セット時の DAC 内部の様子を示す。

DAC の昇温には、図 3-13 のような長時間の高温維持に非常に有効である温度制御装置（CHINO, SU12-1221N3W）を用いた。これは、熱電対が感知した温度に従い、出力電圧を PID 制御することで、温度を一定に保つことのできる装置である。また、無人での定値制御にプログラム温度制御も可能としている。この装置を用いることで DAC の温度制御を自動化でき、高温を維持しながら長時間の粘度測定も容易にできる。表 3-2 に出力電圧の設定値を参考に示す。DAC の昇温の様子を図 3-16 に示す。まず DAC 上蓋部に断熱用に作製したステンレス製のカバー（図 3-17, 3-18 参照）を取り付ける。そして、DAC 昇温用のバンド状のフレキシブルヒーター（大科電器株式会社, EHU 型 20 × 1500mm, 出力 150W）を断線していないかテスターで確認してから巻き付ける。さらに上から断熱用としてアルミホイルを巻き付けることにより昇温を行う。フレキシブルヒーターを DAC に巻き付ける際は、図 3-16 に示すように DAC の表面および回転ステージ上の DAC 固定金具の上からも巻き付け、ヒーターが外れないよう針金を巻いて固定し、さらにその上からアルミホイルを巻き付け、針金で固定する。

温度制御装置の使用の具体的手順を以下に示す。

1. 熱電対を温度制御装置背面の所定の端子に接続する。
2. バンドヒーターのコンセントを本体に接続し、CONTROL POWER のスイッチを入れて温度表示させる。
3. 表示された温度が、室温である 24℃ 付近を正しく表示しているかを確認する。問題がなければ、本体正面部の操作盤で各種設定を行い（設定方法は付録 1 を参照）、LOAD POWER のスイッチを入れて昇温を開始する。
4. 表示された温度が上昇することを確認し終わったら、あとは自動運転を

行うので放置しておいても良いが、事故を防ぐためや温度表示の確認のために、時間をおいて様子を見に行くことが好ましい。

5. 目標温度（SV）に到達後も、内部の試料油が目標温度に達していない可能性があるため、30分程保温して待つ。
6. 粘度測定後、再び昇温を続けるなら設定を変更する。
7. 4～6を繰り返す。
8. 降温はドライヤーを用い、4～6を繰り返す。
9. 全ての粘度測定終了後、LOAD POWERのスイッチを切り、DACを室温付近にまで冷ました後、CONTROL POWERのスイッチも切る。



図 3-13 温度制御装置

表 3-1 出力電圧の設定値

	40°C		70°C		100°C		150°C	
	cooling(L)	heating(H)	cooling(L)	heating(H)	cooling(L)	heating(H)	cooling(L)	heating(H)
Output voltage (V)	20	27	34	47	47	63	67	87

（注）表に示した値は、全ての実験の平均値とした。

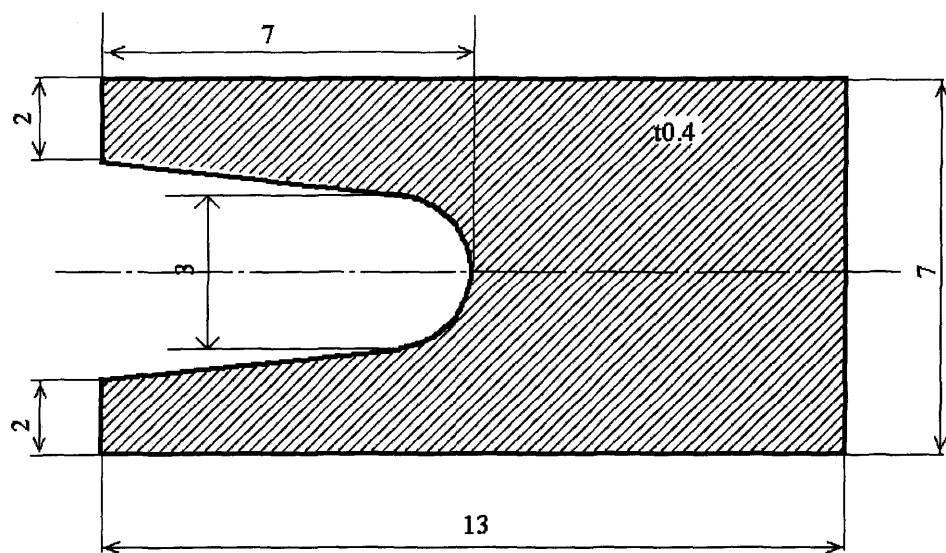


図 3-14 熱電対固定に使用する銅製の薄板

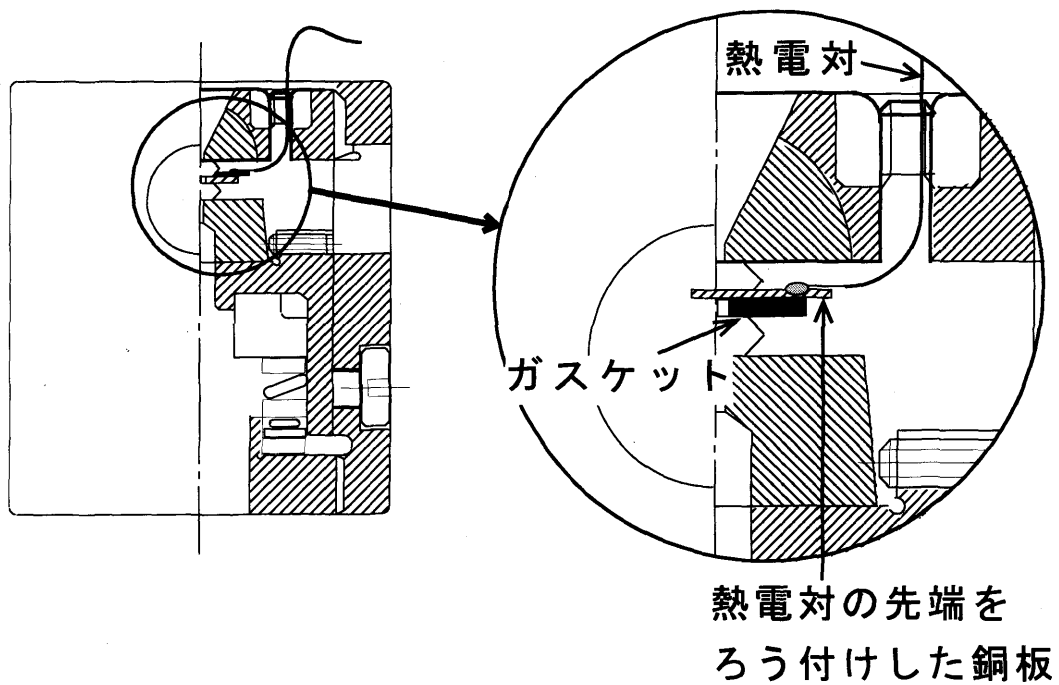


図 3-15 熱電対固定方法



図 3-16 断熱用アルミホイルを巻き付けた DAC

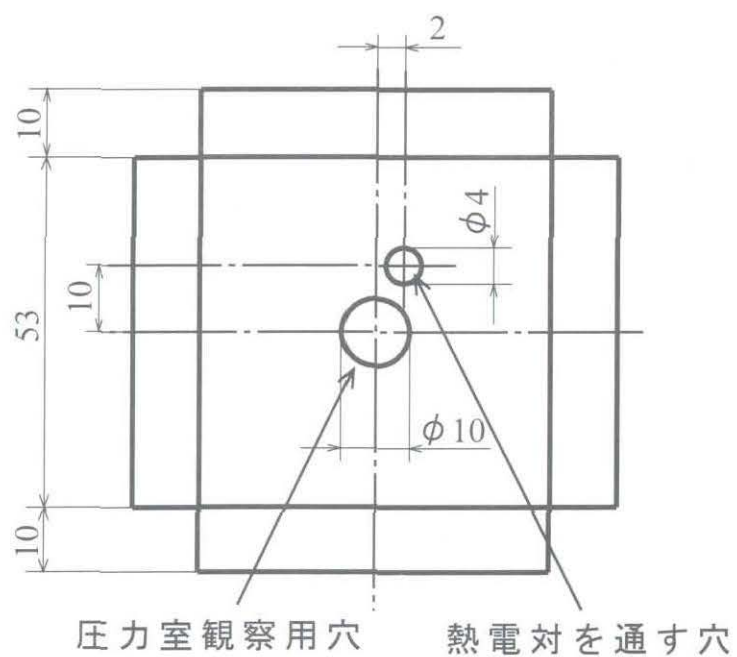


図 3-17 断熱用の DAC 上部にかぶせるステンレス製のカバー（展開図）

3. 6 室温における圧力－加圧ねじ回転角関係と校正曲線

図 3-18 に SN50 でガスケット穴寸法などと同じにして粘度測定から逆算された 3 つの実験 SN50(6)～(8)の圧力と（見かけの）加圧ねじ回転角を示す（圧力変化図）。ここで，加圧ねじ回転角は加圧を開始した点を 0 deg とする．DAC は対向したダイヤモンドで，穴のあいた金属板ガスケットを圧縮し塑性変形させるため，その塑性変形に加圧力が使われ，圧力上昇の始まる角度は個々の実験で異なるが，上昇後の曲線の形状に類似性が見られる．そこで，各曲線を横軸に外挿しそこまでを空加圧ねじ回転角，そこからを有効加圧ねじ回転角と定義されている．SN50(6)～(8)の空加圧ねじ回転角は表 3-4 に示す．有効加圧ねじ回転角を横軸に取り直し，圧力との関係を示したものが図 3-19 である．以下この方法で空加圧ねじ回転角を決め，有効加圧ねじ回転角を導出する．SN50(6)～(8)の 3 つの実験ともに図 3-19 に示すような再現性約 20MPa 程度でほぼ一本の圧力校正曲線となる．

表 3-2 SN50(6)～(8)の空加圧ねじ回転角

Exp.notation	Dead loading screw angle deg.
SN50(6)	20
SN50(7)	50
SN50(8)	25

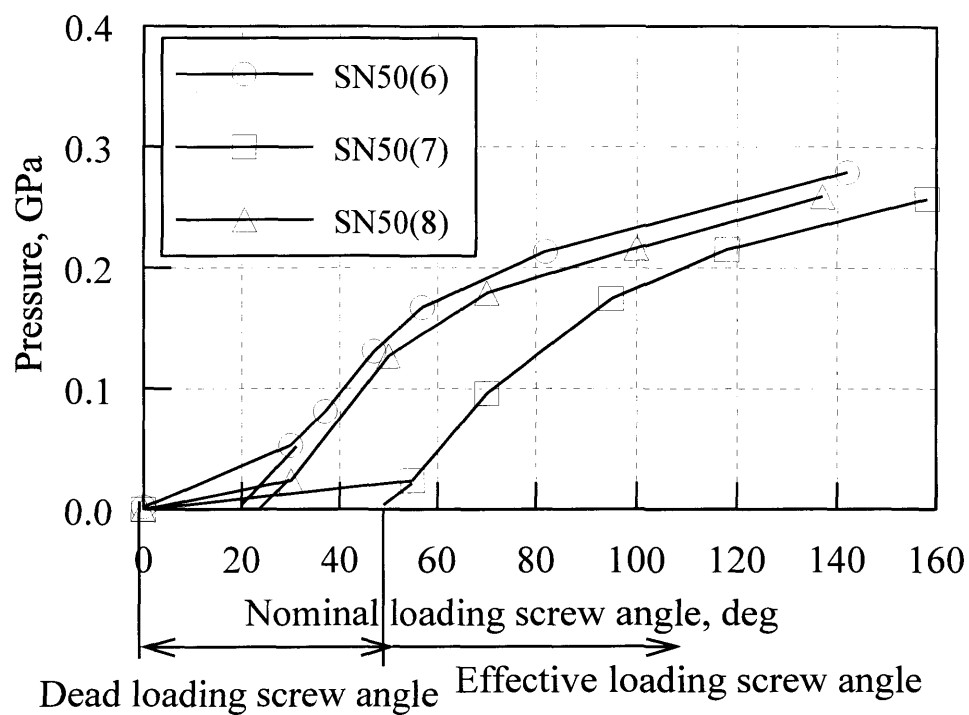


図 3-18 有効加圧ねじ回転角決定法 (ガスケット材料 ; Cu,φ0.9,t1)

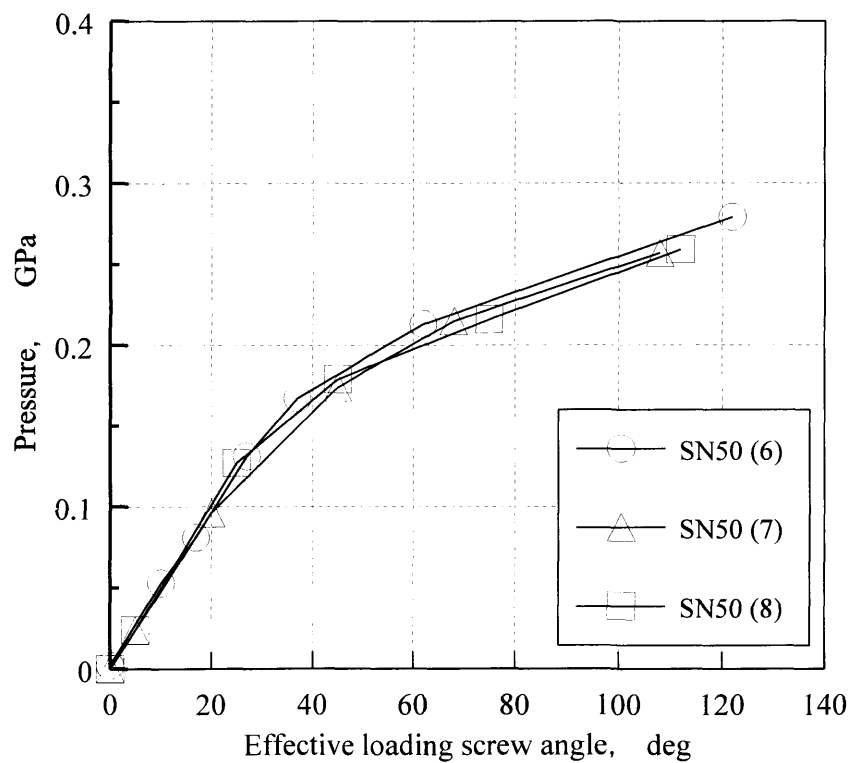


図 3-19 SN50 (6) ~ (8) の有効加圧ねじ回転角 - 圧力関係

(ガスケット材料 ; Cu,φ0.9,t1)

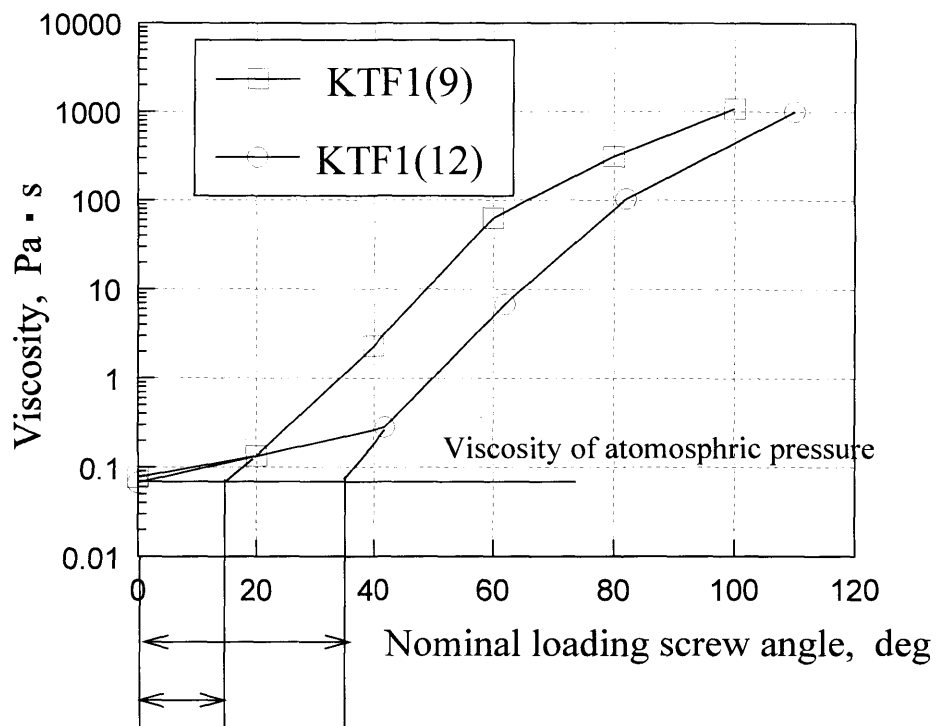
3. 7 高圧粘度未知油の圧力決定法

高圧粘度未知の油での圧力決定は、圧力未知のまま加圧と粘度測定を行いデータを図 3-20 のように対数粘度と加圧ねじ回転角のグラフ（対数粘度変化図）にプロットし常圧粘度まで外挿して空加圧ねじ回転角を決め、その後、同じ穴寸法条件の標準油の圧力較正曲線図より圧力を決定する。無段変速機用のトラクション油 KTF1 の実験結果を表 3-5、図 3-21 に示す。圧力を SN50 (10), SN50 (11) より求めたが Bair らの値と一致している。

油種が異なっても加圧ねじ回転角で圧力が決定できると考えられている理由を以下に述べる。これまで報告されている固化油高圧密度式から求められた高圧相対密度（常圧密度を基準）を図 3-22 に示す[18]。トラクション係数の比較的高い 1GPa 以下の低圧で固化するシクロヘキサン環あるいはベンゼン環を持つ分子構造の # 7149（トラクション試作油）、DMP（トラクション油／サントトラックの基油）、5P4E（ポリフェニルエーテル）、TN68（タール水添油）の 4 種類の油である。固化圧力の差異により、その圧力以上では差異が見られるが、固化圧力（0.2 ～ 0.5 GPa）まで全ての油は同一線上にのり Dowson らの式ともほぼ一致している。また、高温下で DOS、DOP、G31（パラフィン系鉱油、ASME データ）、G36（ナフテン系鉱油、ASME データ）と Dowson らの式と比較したグラフを図 3-23、3-24、3-25、3-26 に示す。こちらは温度が高くなるにつれ、Downson の式とずれている。このことから、室温では、圧力上昇に關与する潤滑油の高圧下の圧縮率はほとんど影響を受けず、ガスケット（材質、寸法）DAC キュレット径などの実験条件が同じなら、有効加圧ねじ回転角－圧力の関係は、100℃程度で 1GPa 程度まで油種によりほとんど変わらず、図 3-19 のような関係図となり 1 本の較正曲線から圧力が決定できると期待される。

表 3-3 KTF1 (9), (12) の空加圧ねじ回転角

Exp. notation	Dead loading screw angle deg.
KTF1(9)	15
KTF1(12)	33



Dead loading screw angle

図 3-20 有効加圧ねじ回転角の決定の方法

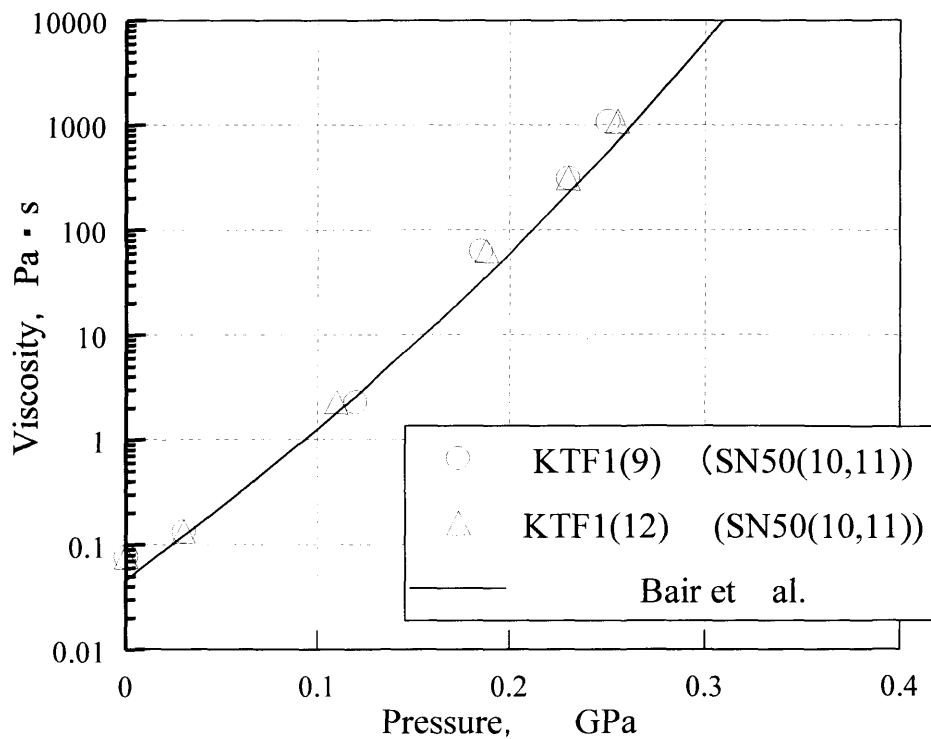


図 3-21 SN50 のマスターカーブから求めた KTF1 の文献値との比較

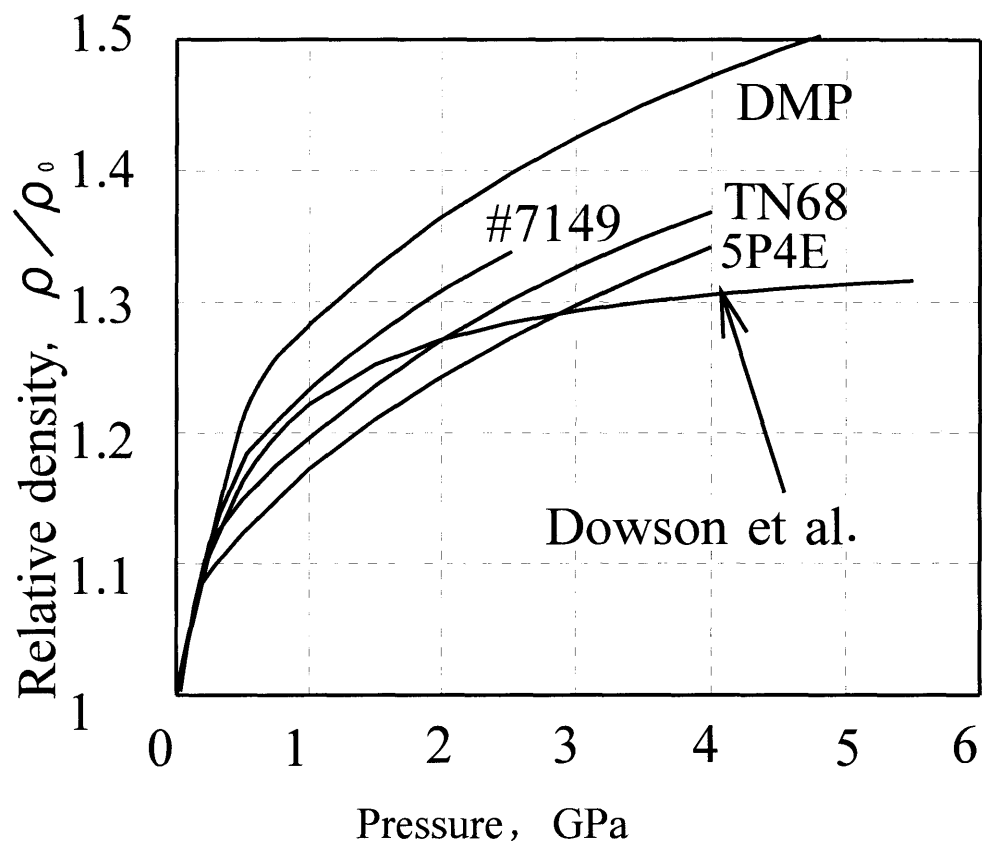


図 3-22 種々の油の圧力－相対密度関係

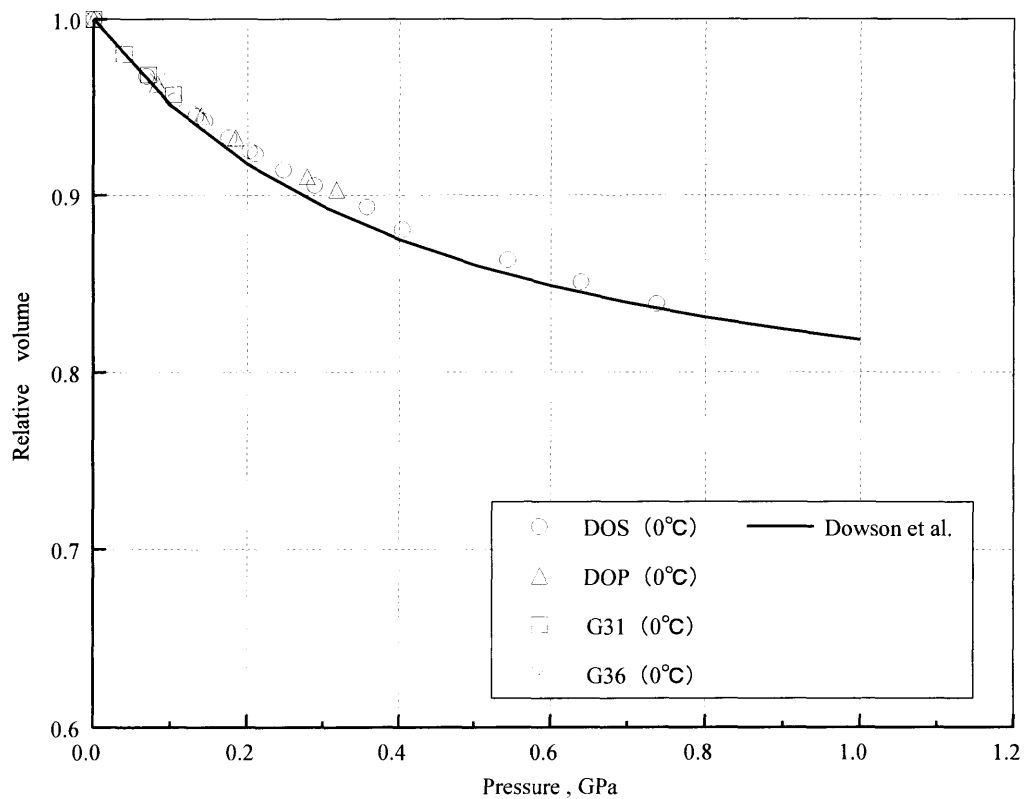


図 3-23 4つの油 (ASME の値) と Dowson らの値との比較 (0 °C)

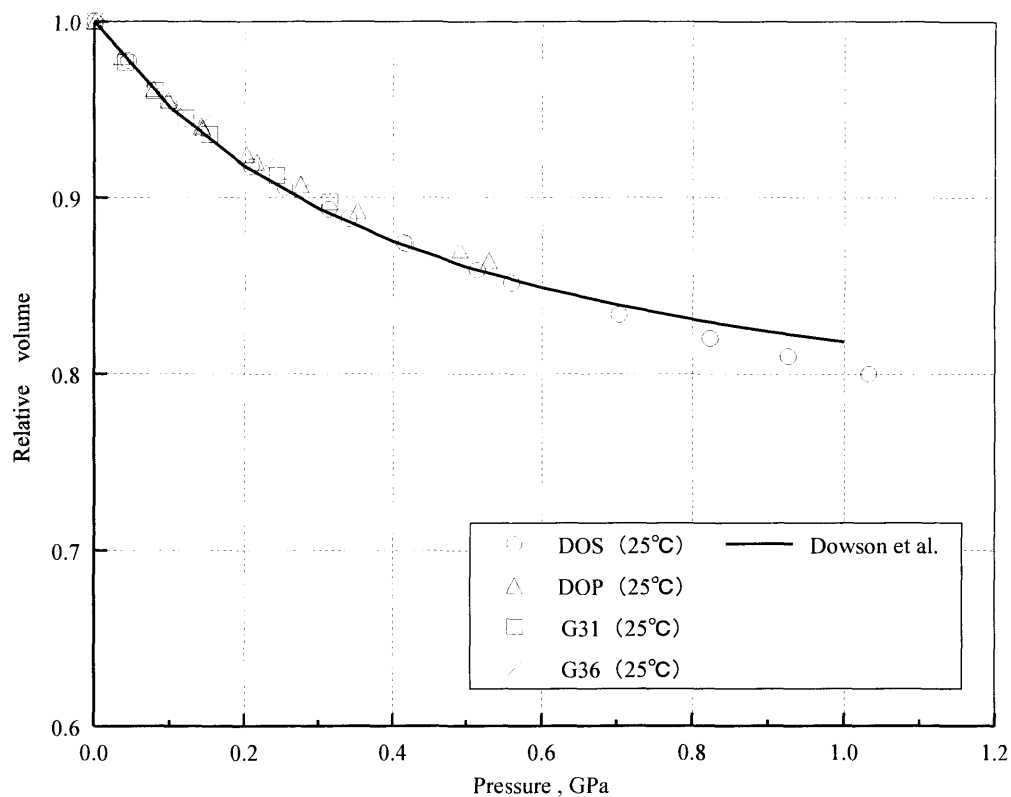


図 3-24 4つの油 (ASME の値) と Dowson らの値との比較 (25 °C)

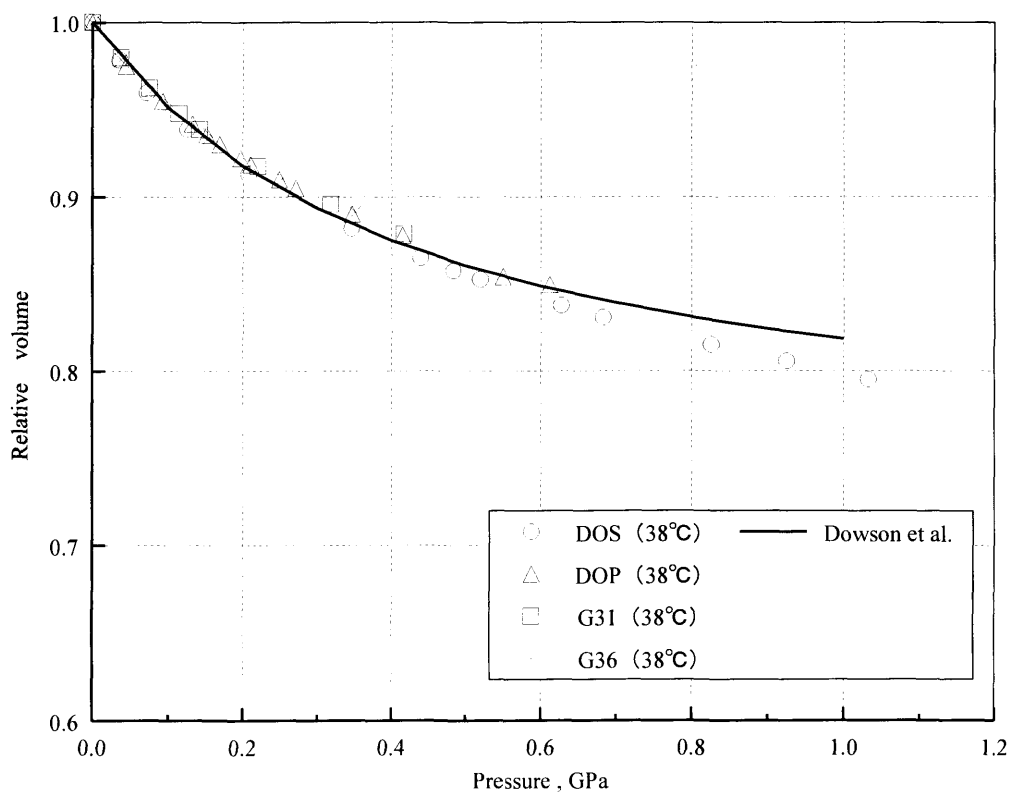


図 3-25 4つの油 (ASME の値) と Dowson らの値との比較 (38 °C)

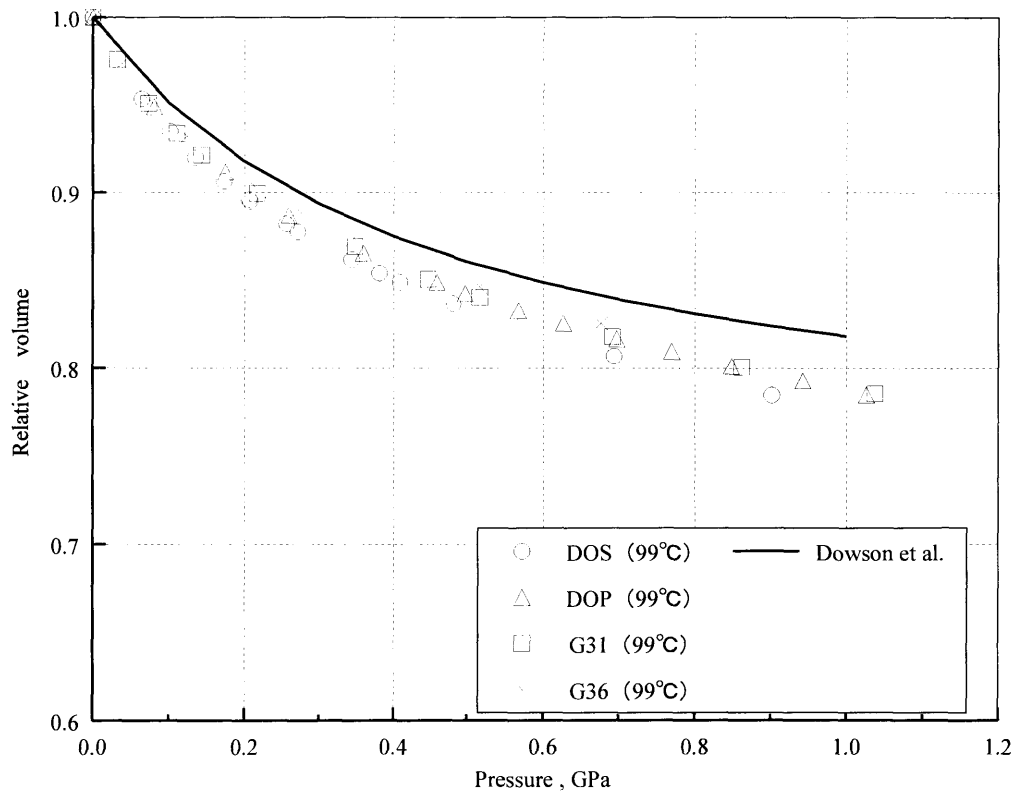


図 3-26 4つの油 (ASME の値) と Dowson らの値との比較 (99 °C)

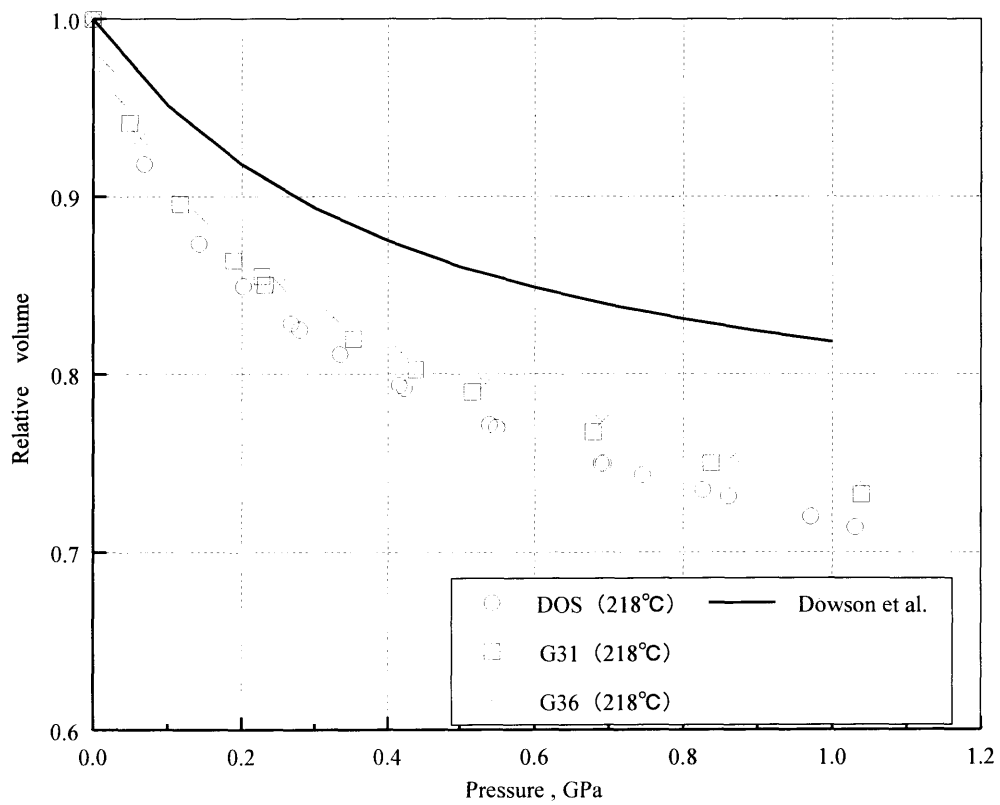


図 3-27 4つの油 (ASME の値) と Dowson らの値との比較 (218 °C)

3. 8 未知油の空加圧ねじ回転角決定法

未知油の空加圧ねじ回転角の決定には前報で提案した図 3-28 を用いる．まず実験値より対数粘度勾配を求め，その値をグラフの横軸から伸ばして交差したところをその実験（油）での空角補正角度とする．例えば，FFT-71 について見てみると，対数粘度勾配が 0.064 であるので，補正角度が +4.4deg となる．このように未知油の空加圧ねじ回転角を決定する．

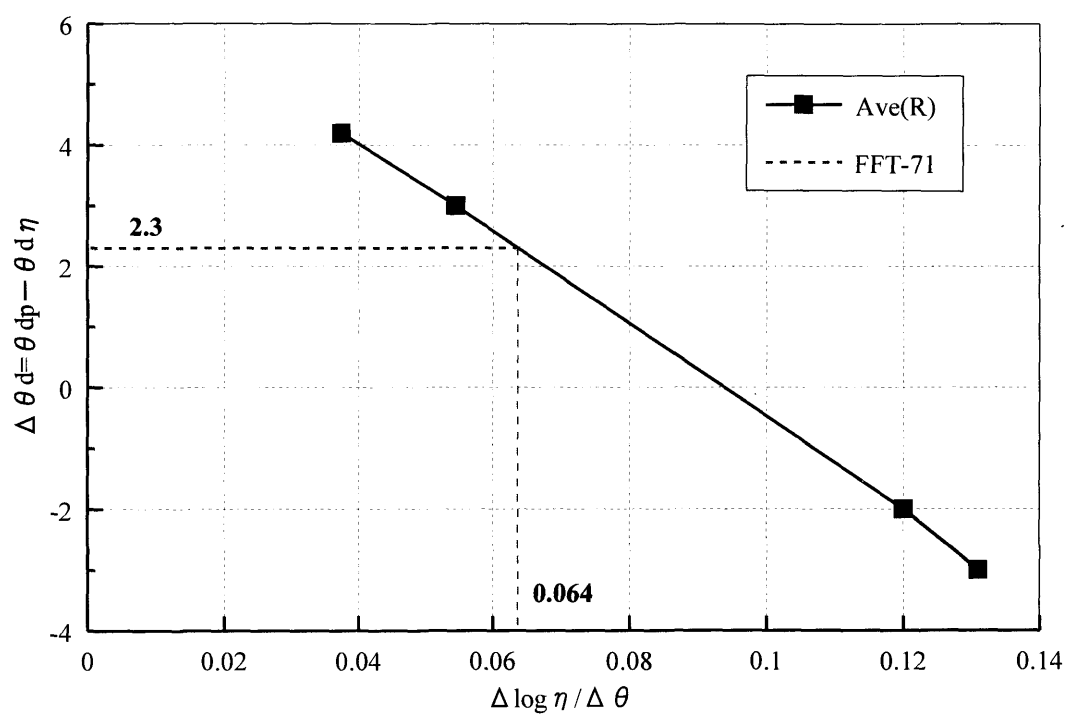


図 3-28 空角補正角度－対数粘度勾配関係

3. 9 未知油の高温高压粘度評価

未知油の高温高压粘度評価にはまず，3. 8の方法により空加圧ねじ回転角を決定する．また，図 3-29 に示す DOS，DOP，SN50，KTF1 から得た室温圧力較正図（油種に依存しない）より室温圧力を求める．昇温時の圧力は，それに鎖状分子構造の油の場合図 3-30 の昇温時圧力増加量較正図からの上昇量を加える．環状分子構造の油では圧力上昇特性が若干異なり，図 3-31 の昇温時圧力増加量較正図より求める．

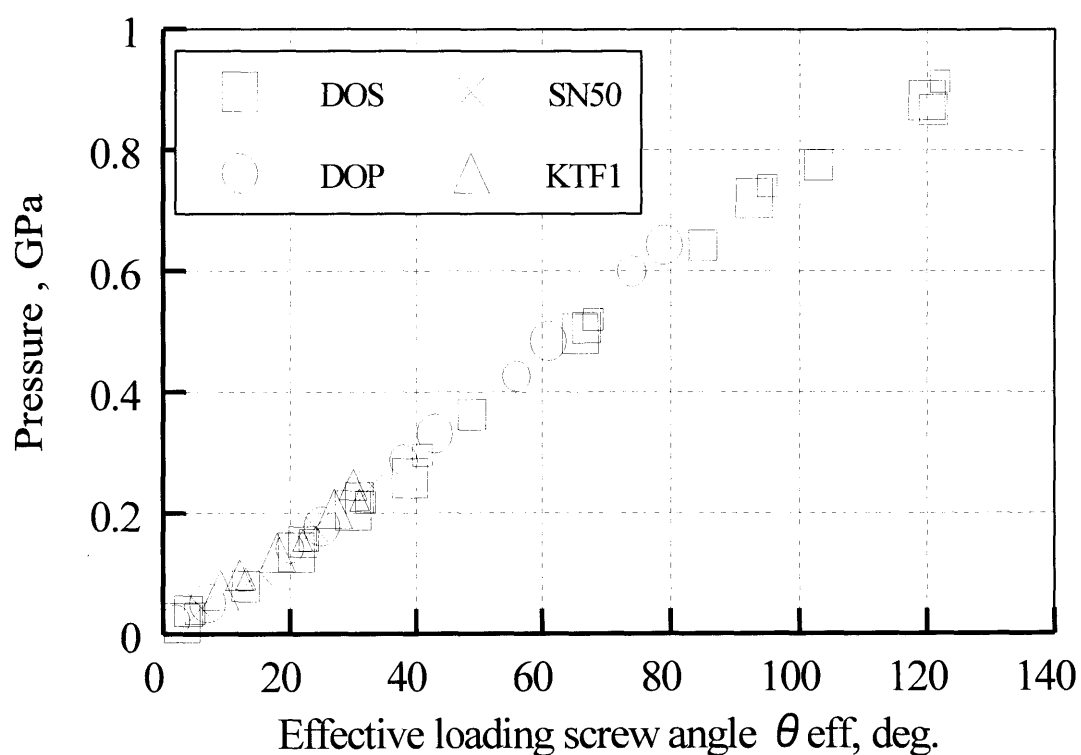


図 3-29 圧力－有効加圧ねじ回転角関係図

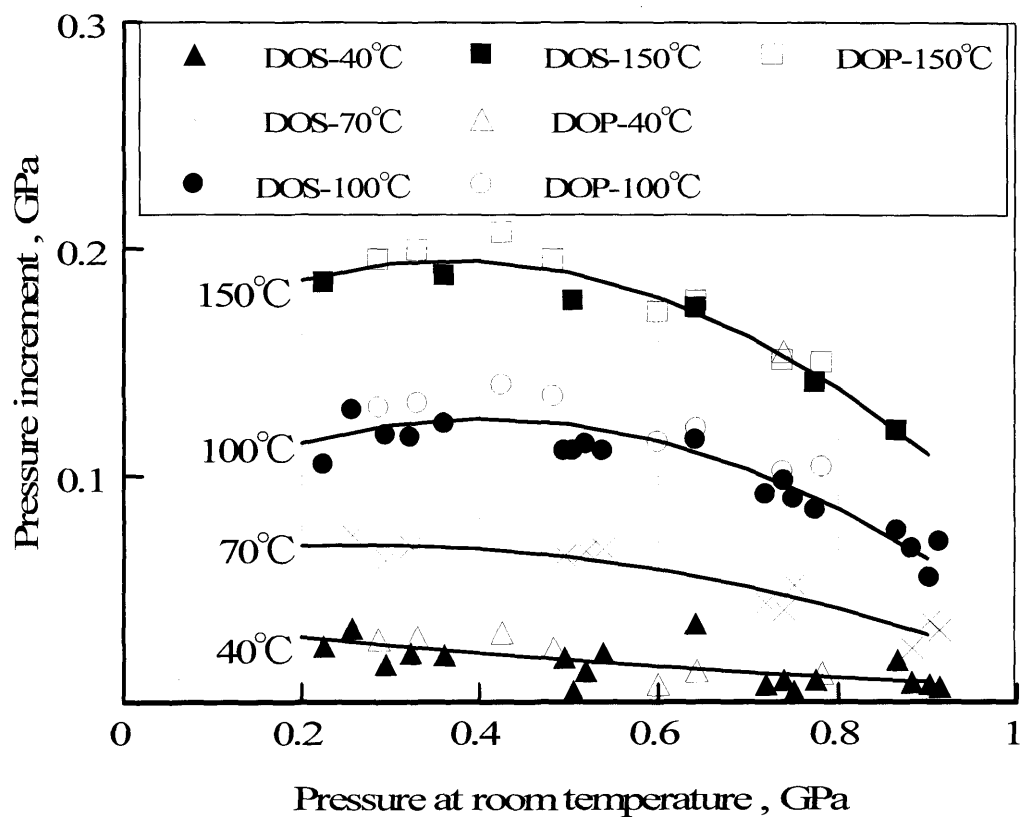


图 3-30 昇温時压力增加量較正図(鎖状分子構造油)

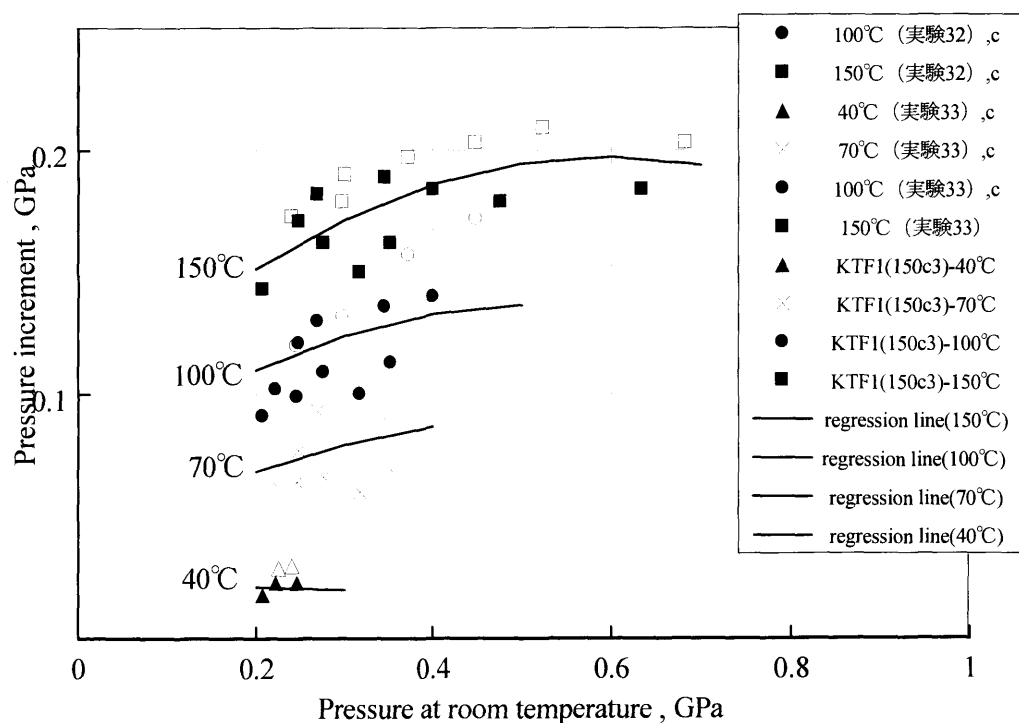


图 3-31 昇温時压力增加量較正図(環状分子構造油)

3. 1 0 実験条件及び実験番号

本研究では，測定試料として，パラフィン系油のジオチクルセバケート (DOS)，市販の高温用潤滑油である 5-リングポリフェニルエーテル (5P4E)，水素化分解型基油 (HC4)，溶剤精製型基油 (SR4)，2 種類のオートマチックオイル (S-ATF・ATF) とナフテン系油の市販のトラクション油であるサントトラック 50 (SN50)，サントトラック 100 (SN100) とその基油である 2,4dicyclohexyl-2-methylpentane (DMP)，2 種類の最新のトラクション油 (TDF3000・TDF3200) を用いた．実験 41 ～ 43 は前報の再現実験を含め，更なる高圧粘度既知油のデータ構築のために実験を行った．そして，その他の油を高圧粘度未知油として実験を行った．

表 3-2 に試料油の物性を示す．以下に用いる実験番号は表 3-3 に基づくものである．

また試料油を封入する圧力室を形成する金属板ガスケットとして，リン青銅 (PCu, $\phi 0.9$, $t 0.8$) を使用し，実験温度は通常 23 ～ 25 °C である．DAC はダイヤモンド径の大きさが $\phi 1.2$ の No.3 を用いた．

表 3-4 試料油の物性

Properties of sample oils					
Sample oil	Density, g/cm ³	Viscosity, mPa・s	Viscosity -pressure coefficient $\alpha, 1/\text{GPa}$	Refractive index at atmospheric pressure	Viscosity Index
Diocetylsebacate(DOS)	0.912(25°C)	17.6(25°C)	9.63(25°C)	1.448	
Santotrac50(SN50)	0.886(40°C)	65.6(24°C)	29.4(40°C)	1.496	
Santotrac100 (SN100)	0.929(15°C)	296(15°C)	53(24°C)	1.498(15°C)	
2,4dicyclohexyl-2-methylpentane (DMP)	0.892(20°C)	50(20°C)	33.18(40°C)	1.487(20°C)	
5-ring polyphenylether (5P4E)	1.207(20°C)	3300(20°C)	38.5(40°C)	1.631(20°C)	
Hydoroctracked oil (HC4)	0.833(15°C)	37(24°C)		1.46(24°C)	127
Solvent refined oil (SR4)	0.861(15°C)	32(24°C)		1.47(24°C)	104
Automatic transmission fluid (S-ATF)	0.86(15°C)	56.48(24°C)		1.457(24°C)	198
Automatic transmission fluid (ATF)	0.8692(15°C)	58.092(24°C)		1.476(24°C)	171
Traction oil (TDF3000)	0.9707(15°C)	70.034(24°C)		1.5104(20°C)	95
Traction oil (TDF3200)	0.9648(15°C)	55.785(24°C)		1.5079(20°C)	117

表 3-5 実験条件

No	Exp.notation	最終実験日	Sphere		High temperture
			Material	Diameter , μm	
41	DOS(150c1)	2007/05/14	Copper	83.5	○
42	SN50(150c1)	2007/06/15	Copper	87.5	○
43	SN50(150c2)	2007/07/09	Copper	83.5	○
44	SN100(1)	2007/8/30	Copper	88.5	×
45	SN100(100c1)	2007/10/1	Copper	87.4	○
46	SN100(100c2)	2007/10/26	Copper	78.6	○
47	DMP(150c1)	2007/11/20	Copper	84.1	○
48	DMP(150c2)	2008/1/28	Copper	82.8	○
49	5P4E(150c1)	2008/2/19	Copper	82.4	○
50	5P4E(150c2)	2008/3/20	Copper	86.8	○
51	HC4(150c1)	2008/4/29	Copper	80.8	○
52	HC4(150c2)	2008/6/2	Copper	84.9	○
53	SR4(150c1)	2008/6/18	Copper	85.3	○
54	SR4(150c2)	2008/7/27	Copper	84.7	○
55	S-ATF(150c1)	2008/9/3	Copper	79.3	○
56	S-ATF(150c2)	2008/10/10	Copper	83.2	○
57	ATF(150c1)	2008/11/3	Copper	76.7	○
58	TDF3000(1)	2008/11/21	Copper	83.12	×
59	TDF3000(150c1)	2008/12/5	Copper	82.94	○
60	TDF3200(150c1)	2009/01/09	Copper	84.9	○

第 4 章 実験結果及び考察

4. 1 基準圧力による圧力較正図

既知油の実験(DOS, SN50)の圧力－見かけの加圧ねじ回転角関係(圧力変化図), 粘度－見かけの加圧ねじ回転角関係(対数粘度変化図)をそれぞれ図 4-1 に示す.

空加圧ねじ回転角を常圧粘度を文献値, 実験値それぞれ基準とし, 粘度及び圧力から求めたものを表 4-1 に示す. また, 対数粘度変化図から求めた勾配(対数粘度勾配) $\Delta \log \eta / \Delta \theta$ と圧力より求めた空加圧ねじ回転角 θ_{dp} と文献値基準, 実験値基準それぞれで求めた空加圧ねじ回転角 $\theta_{d\eta}$ の間の差を空角補正角度 $\Delta \theta_d = \theta_{dp} - \theta_{d\eta}$ とする(表 4-2).

今回, 室温圧力, 高温圧力を求めるために図 3-29, 3-30, 3-31 を用いたが, 新たに前報までの実験データと今回行った既知油の実験のから, パラフィン系油圧力データを表 4-3 にまとめ, 各温度における有効加圧ねじ回転角－圧力関係を図 4-2 に, また各温度における基準圧力($7 \times \theta_{eff}$, MPa)からの圧力上昇量($\Delta P = P - 7 \times \theta_{eff}$, MPa)を図 4-4 に示す. 本実験で使用した前報で提案された室温圧力較正図は低圧での圧力予測の信頼性が低く, より精度の高い較正図を提案するために, 基準圧力を決定した. そうすることで, 基準圧力からの圧力の上昇量が低圧でも精度良く読みとることができる. また, ナフテン系油についても同様に圧力の補正を行った. 前報までの実験データをまとめた圧力データを表 4-4 にまとめ, ナフテン系油の各温度における有効加圧ねじ回転角－圧力関係を図 4-3 に, また各温度における基準圧力($7 \times \theta_{eff}$, MPa)からの圧力上昇量($\Delta P = P - 7 \times \theta_{eff}$, MPa)を図 4-5 に示す.

4. 2 空加圧ねじ回転角の決定

未知油の粘度－見かけの加圧ねじ回転角関係(対数粘度変化図)をそれぞれ図 4-6, 4-7, 4-8, 4-9, 4-10, 4-11, 4-12 に示す. (5P4E については高压粘度既知であるが, 未知油として検討した場合の整合性を確認するため, 図 4-8(f1),

(g1)に圧力－見かけの加圧ねじ回転角関係（圧力変化図）を示す．また，空加圧ねじ回転角を実験値を基準として求めた値，対数粘度勾配，そして空角補正角度を表 4-5 に示す．

未知油では， $\theta d\eta$ しか求まらないので，空角補正角度は，空角補正角度-対数粘度勾配グラフを用いて求める．（図 4-13）また，図中に各油の空角補正角度の点をプロットした．

4. 3 高圧粘度と粘度圧力係数

未知油の高温高圧粘度評価には，補正した空加圧ねじ回転角から有効加圧ねじ回転角を算出し，室温圧力較正図（図 3-29）より室温圧力（平均値）を決定する．

高温時の圧力はそれに昇温時圧力増加量較正図（図 3-30，3-31）からの上昇量を加える．各油の圧力－粘度データを表 4-8，4-9，4-10，4-11，4-12，4-13，4-14，4-15，4-16 に示す．

4. 3. 1 トラクション油

トラクション油である SN100，DMP，TDF3000，TDF3200 の粘度－圧力関係図を図 4-14，4-15 に示す．ここで SN100 と DMP については安富の式による SN50 の圧力－粘度関係も図中に示すが，SN100 は SN50 よりもやや粘度が高めになっているが，DMP は SN50 とほぼ同じ傾向を示した．また，SN100，DMP はルビー蛍光法で得られた高圧の粘度データ[13]と合わせているが，各油とも若干ばらつきはあるもののほぼ回帰線との整合性が見られる．また，TDF3000，TDF3200 は最新のトラクション試作油であるが，初期のトラクション油である KTF1 の Bair らの式による KTF1 の圧力－粘度関係も図中に示した．各油とも KTF1 に対してほぼ同じ傾向を示した．また，各油で Barus の式から圧力－粘度係数 α を求め，その圧力変化を図 4-16，4-17 に示す．SN100，DMP は安富による SN50 の α の圧力変化と比較し，TDF3000，TDF3200 は Bair らによる α の圧力変化と比較した． α は各温度とも圧力増加に伴う減少が見られ，これは多くの油と定性的に同じ挙動と言える．また，TDF3000，TDF3200 については粘

度圧力係数が室温付近で若干低めで高温ではほぼ同じことがわかった．これは低温流動性が改良されたことに起因すると考えられる．

4. 3. 2 低粘度鉱油

低粘度鉱油である HC4 と SR4 の粘度－圧力関係図を図 4-18 に示すが，実線は村木により確立された 0.6GPa，90℃までのデータを回帰した Roelands の式[8]を示し，破線はそれを 1GPa，150℃まで外挿した値であるが，ほぼ一致していることから，外挿の精度が良いことがわかる．また， α －圧力変化図を図 4-20 に示す． α は各温度とも圧力増加に伴う減少が見られた．

4. 3. 3 低粘度鉱油の結晶化温度の圧力変化

HC4 と SR4 では圧力上昇に伴う結晶化が見られたため，図 4-22 に SR4 の結晶化状態の写真，図 4-23，4-24 に圧力－温度関係を示す．昇温時（加熱する時間は約 150℃/h），結晶化は徐々に見えなくなったが，球は結晶化した温度より高い温度まで落下しなかった．球の落下を止めずに降温（除冷は冷風を当て，約 100℃/h）を行うと，昇温前の結晶化温度よりも低い温度で結晶化した．これは過冷却によるものと思われる．

4. 3. 4 自動変速機油（ATF）

自動変速機油である S-ATF，ATF の粘度－圧力関係図を図 4-19 に示す．S-ATF について，0.9GPa 付近で粘度低下が見られるが，これは実験時の圧力漏れによるものと思われる．また， α －圧力変化図を図 4-21 に示す． α は各温度とも圧力増加に伴う減少が見られた．

4. 3. 5 高温用潤滑油（5P4E）

高温用潤滑油である 5P4E の粘度－圧力関係図を図 4-25 に示す．図には安富の式から求めた粘度－圧力関係の線を示してあるが，ほぼ一致していること

がわかる．また， α －圧力変化図を図 4-26 に示す． α は各温度とも圧力増加に伴う減少が見られた．

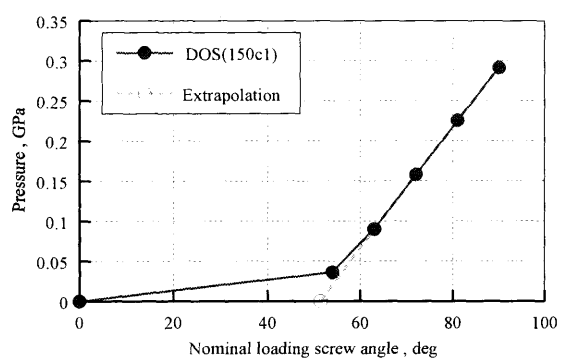
4. 4 測定値の回帰曲線

本研究では，WLF 式または Roelands 式に使われている係数を求めるプログラムを作成し，その係数表を表 4-6，4-7 に示す．さらに回帰線を実験から求めた粘度－圧力関係の図とフィッティングさせ，その妥当性を評価した．

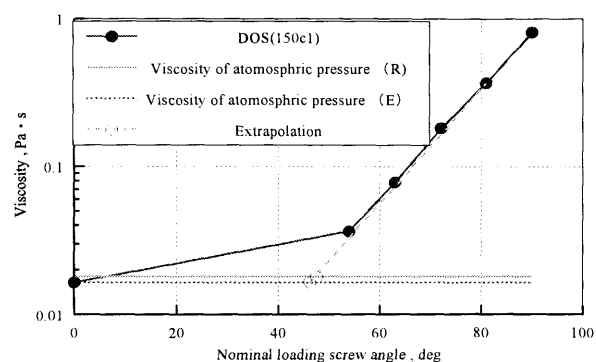
トラクション油については図 4-27，4-28，4-29，4-30 に WLF 式から回帰線を求め，粘度－圧力関係にフィッティングしたものを示す．各油とも回帰線は凹凸があり，WLF 式でほぼ回帰できた．

また S-ATF，ATF については，WLF 式と Roelands 式の両方より回帰線を求め，粘度－圧力図にフィッティングした．S-ATF の粘度－圧力図を図 4-31，4-32 に，ATF の粘度－圧力図を図 4-33，4-34 に示す．各油とも WLF 式を用いるよりも Roelands 式でほぼ回帰できていることがわかる．

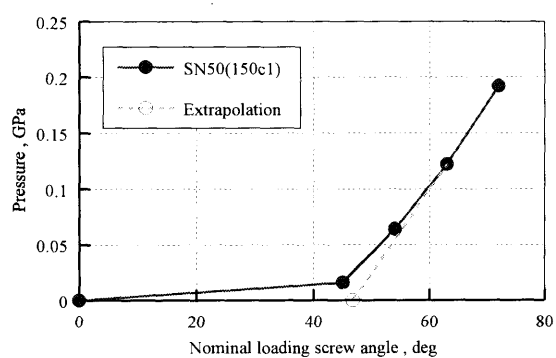
5P4E については，未知油として高温高圧粘度評価を行い WLF 式から求めた回帰線とフィッティングした結果を図 4-35 に示すが，回帰線とほぼ一致し，各較正図の有効性が確認された．



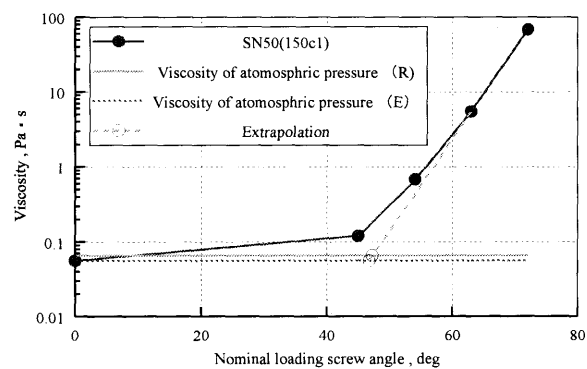
(a)



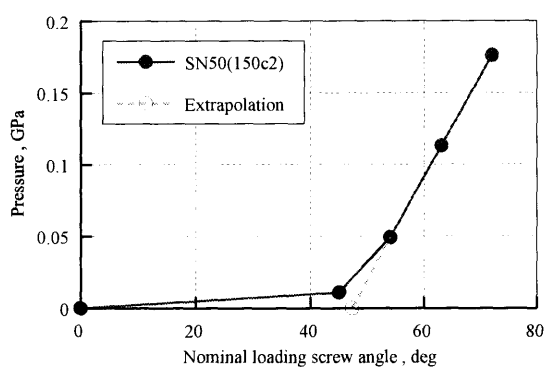
(b)



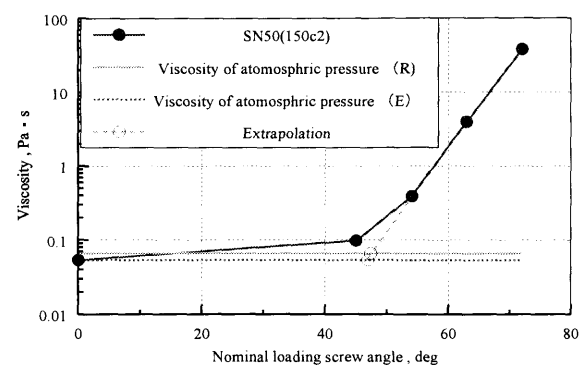
(c)



(d)



(e)



(f)

図 4-1 圧力－見かけの加圧ねじ回転角関係と
粘度－見かけの加圧ねじ回転角関係

図中で記述されている文字記号 R は文献値，E は実験値である。

表 4-1 それぞれの実験における空加圧ねじ回転角

Exp. notation	Dead loading screw angle θ_d , deg		
	Extrapolated to η_0 , $\theta_{d\eta}$		Extrapolated to zero pressure θ_{dp}
	Reference value	Experimental value	
	$\theta_{d\eta}(R)$	$\theta_{d\eta}(E)$	
DOS(150c1)	47.6	46.2	51.4
SN50(150c1)	47.2	46.7	46.7
SN50(150c2)	47.4	46.9	47.3

表 4-2 それぞれの実験における対数粘度勾配及び空角補正角度

Exp. notation	Logarithm viscosity gradient		Adding amount of dead angle	
	deg		deg	
	$\Delta \log \eta / \Delta \theta$		$\Delta \theta_d = \theta_{dp} - \theta_{d\eta}$	
	Formula	Numeric value	Reference value $\Delta \theta_d(R)$	Experimental value $\Delta \theta_d(E)$
DOS(100c2)	$=2/50.4$	0.040	3.8	5.2
Average		0.040	3.8	5.2
SN50(150c1)	$=2/16.4$	0.122	-0.5	0
SN50(150c2)	$=2/17.1$	0.117	-0.1	0.4
Average		0.119	-0.3	0.2

表 4-3 パラフィン系油の圧力データ

パラフィン系油

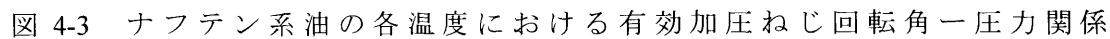
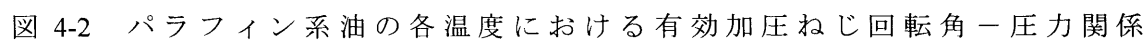
Effective loading screw angle . deg																												
angle . deg	Pressure P, MPa																											
Pressure P, MPa	Pressure P, MPa																											
0eff. deg	45	72	99	126																								
DOS(22)100C	440	650	841	957																								
angle . deg	45	72	99	126																								
70(c)	392	607	803	938																								
angle . deg	45	72	99	126																								
40(c)	345	561	756	910																								
angle . deg	0	45	72	99	126																							
24(c)	0	323	539	751	902																							
angle . deg	39	66	93	120																								
DOS(23)100C	386	607	812	950																								
angle . deg	39	66	93	120																								
70(c)	331	561	764	906																								
angle . deg	39	66	93	120																								
40(c)	290	516	728	891																								
angle . deg	0	39	66	93	120																							
24(c)	0	257	496	720	882																							
angle . deg	41	68	95	122	122																							
DOS(24)100C	413	634	838	984	980																							
angle . deg	41	68	95	122	122																							
70(c)	358	587	781	945	945																							
angle . deg	41	68	95	122	122																							
40(c)	312	534	750	920	923																							
angle . deg	0	41	68	95	122	122																						
24(c)	0	295	520	740	913	913																						
angle . deg	31	49	67	85	103	121	121																					
DOS150(c6)	410	560	683	816	916	986	982																					
angle . deg	31	49	67	85	103	121	121																					
100(c)	330	476	615	755	852	919																						
70(c)																												
angle . deg	31	49	67	85	103	121	121																					
40(c)	250	383	511	677	785	885																						
angle . deg	0	31	49	67	85	103	121	121																				
24(c)	0	225	362	506	642	775	866	864																				
angle . deg	39	57	75	93	111	129																						
DOS150(cN)	496	642	783	888	975	1044																						
angle . deg	39	57	75	93	111	129																						
100(c)	411	562	702	824	911	992																						
angle . deg	39	57	75	93	111	129																						
100(c)	411	562	702	824	911	992																						
angle . deg	39	57	75	93	111	129																						
40(c)	322	465	618	748	846	939																						
angle . deg	0	39	57	75	93	111	129																					
24(c)	0	303	446	598	732	831	924																					
angle . deg	53	71	89	107																								
PAO(26)-100C	508	650	783	892																								
angle . deg	53	71	89	107																								
70(c)	454	604	733	846																								
angle . deg	53	71	89	107																								
40(c)	410	552	697	821																								
angle . deg	0	53	71	89	107																							
24(c)	0	383	538	686	814																							
angle . deg	66	84	102																									
PAO(27)-100C	613	746	867																									
angle . deg	66	84	102																									
70(c)	558	700	817																									
angle . deg	66	84	102																									
40(c)	517	662	786																									
angle . deg	0	66	84	102																								
24(c)	0	497	648	779																								
angle . deg	0	38	56	74	92																							
DOP(34)-150(c)	482	633	772	846																								
angle . deg	38	56	74	92																								
100(c)	414	561	706	787																								
70(c)																												
angle . deg	38	56	74	92																								
40(c)	315	457	608	691																								
angle . deg	0	38	56	74	92																							
24(c)	0	287	426	600	724																							
angle . deg	0	43	61	79	97																							
DOP(35)150(c)	530	679	820	932																								
angle . deg	0	43	61	79	97																							
100(c)	460	608	754	874																								
angle . deg	0	43	61	79	97																							
40(c)	360	508	657	795																								
angle . deg	0	43	61	79	97																							
24(c)	0	331	484	643	766																							
70eff	301	427	553	679																								

P-7×0eff. MPa	P-7×0eff. MPa																											
0eff. deg	45	72	99	126																								
DOS(22)100C	125	146	148	75																								
angle . deg	45	72	99	99																								
70(c)	77	103	110	245																								
angle . deg	45	72	99	99																								
40(c)	30	57	63	217																								
angle . deg	0	45	72	99	99																							
24(c)	0	8	35	58	209																							
angle . deg	39	66	93	120																								
DOS(23)100C	113	145	161	110																								
angle . deg	39	66	93	120																								
70(c)	58	99	113	66																								
angle . deg	39	66	93	120																								
40(c)	17	64	77	51																								
angle . deg	0	39	66	93	120																							
24(c)	0	-16	34	69	42																							
angle . deg	41	68	95	122	122																							
DOS(24)100C	126	158	173	130	126																							
angle . deg	41	68	95	122	122																							
70(c)	71	111	116	91	91																							
angle . deg	41	68	95	122	122																							
40(c)	25	58	85	66	69																							
angle . deg	0	41	68	95	122	122																						
24(c)	0	8	44	75	59	59																						
angle . deg	31	49	67	85	103	121	121																					
DOS150(c6)	193	207	214	221	195	139	135																					
angle . deg	31	49	67	85	103	121	121																					
100(c)	113	133	146	160	131	72																						
70(c)																												
angle . deg	31	49	67	85	103	121	121																					
40(c)	33	40	42	82	64	38																						
angle . deg	0	31	49	67	85	103	121	121																				
24(c)	0	8	19	37	47	54	19	17																				
angle . deg	0	39	57	75	93	111	129																					
DOS150(cN)	223	243	258	237	198	141																						
angle . deg	0	39	57	75	93	111	129																					
100(c)	138	163	177	173	134	89																						
angle . deg	0	39	57	75	93	111	129																					
70(c)	138	163	177	173	134	89																						
angle . deg	0	39	57	75	93	111	129																					
40(c)	49	66	93	97	69	36																						
angle . deg	0	39	57	75	93	111	129																					
24(c)	0	30	47	73	81	54	21																					
angle . deg	53	71	89	107																								
PAO(26)-100C	137	153	160	143																								
angle . deg	53	71	89	107																								
70(c)	83	107	110	97																								
angle . deg	53	71	89	107																								
40(c)	39	56	74	72																								
angle . deg	0	53	71	89	107																							
24(c)	0	12	41	63	65																							
angle . deg	66	84	102																									
PAO(27)-100C	151	158	153																									
angle . deg	66	84	102																									
70(c)	96	112	103																									
angle . deg	66	84	102																									
40(c)	55	74	72																									
angle . deg	0	66	84	102																								
24(c)	0	35	60	65																								
angle . deg	0	38	56	74	92																							
DOP(34)-150(c)	216	241	254	202																								
angle . deg	38	56	74	92																								
100(c)	148	169	188	143																								
70(c)																												
angle . deg	38	56	74	92																								
40(c)	49	65	90	47																								
angle . deg	0	38	56	74	92																							
24(c)	0	21	34	82	80																							
angle . deg	0	43	61	79	97																							
DOP(35)150(c)	229	252	267	253																								
angle . deg	0	43	61	79	97																							
100(c)	159	181	201	195																								
angle . deg	0	43	61	79	97																							
40(c)	59	81	104	116																								
angle . deg	0	43	61	79	97																							
24(c)	0	30	57	90	87																							
70eff	301	427	553	679																								

表 4-4 ナフテン系油の圧力データ

ナフテン系油									
Effective loading screw angle . deg									
angle . deg									
Pressure P. MPa		Pressure P. MPa							
angle . deg		30	39	48					
KTF1(200c1)200									
angle . deg		30	39	48					
150(c)			451	534					
angle . deg		30	39	48					
100(c)		345	399	481					
angle . deg		30	39	48					
70(c)		310	362	435					
angle . deg		30	39	48					
40(c)		269							
angle . deg		0	30	39	48				
24(c)		0	246	269	345				
angle . deg		31	40	49					
KTF1(200c2)200									
angle . deg		31	40	49					
150(c)			438	514					
angle . deg		31	40	49					
100(c)		324	381	460					
angle . deg		31	40	49					
70(c)		285	342	421					
angle . deg		31	40	49					
40(c)		245							
angle . deg		0	31	40	49				
24(c)		0	222	276	352				
angle . deg		27	36	45	54	63	81	81	
KTF1(150c3)150(c)		350	419	467	584	655	818	818	
angle . deg		27	36	45	54	63	81(1)	81(2)	
100(c)		296	363	414	530				
angle . deg		27	36	45	54	63	81(1)	81(2)	
70(c)			325	377					
angle . deg		27	36	45	54	63	81(1)	81(2)	
40(c)		225							
angle . deg		0	27	36	45	54	63	81	81
24(c)		0	207	248	317	400	476	634	634
angle . deg		33	42	51	60	69	87	87	
SN50(150c1)150(c)			476	569	651	733	886	886	
angle . deg		33	42	51	60	69	87(1)	87(2)	
100(c)		365	427	522	609				
angle . deg		33	42	51	60	69	87(1)	87(2)	
70(c)		326	385	471					
angle . deg		33	42	51	60	69	87(1)	87(2)	
40(c)		276							
angle . deg		0	33	42	51	60	69	87	87
24(c)		0	245	297	372	448	524	683	683
angle . deg		36	45	54	63	81			
SN50(150c1)150(c)		388	466	553	634	803			
angle . deg		36	45	54	63	81			
100(c)		336	418	506	595				
angle . deg		36	45	54	63	81			
70(c)		302	380	459					
angle . deg		36	45	54	63	81			
40(c)		254							
angle . deg		0	36	45	54	63	81		
24(c)		0	225	320	399	480	626		
angle . deg		34	43						
SN50(150c2)150(c)		413	490						
angle . deg		34	43						
100(c)		362	443						
angle . deg		34	43						
70(c)		322	400						
angle . deg		34	43						
40(c)		270							
angle . deg		0	34	43					
24(c)		0	240	340					

P-7×0eff. MPa			P-7×0eff. MPa						
angle, deg		30	39	48					
KTF1(200c1)200									
angle, deg		30	39	48					
150(c)			178	198					
angle, deg		30	39	48					
100(c)		135	126	145					
angle, deg		30	39	48					
70(c)		100	89	99					
angle, deg		30	39	48					
40(c)		59							
angle, deg	0	30	39	48					
24(c)	0	36	-4	9					
angle, deg		31	40	49					
KTF1(200c2)200									
angle, deg		31	40	49					
150(c)			158	171					
angle, deg		31	40	49					
100(c)		107	101	117					
angle, deg		31	40	49					
70(c)		68	62	78					
angle, deg		31	40	49					
40(c)		28							
angle, deg	0	31	40	49					
24(c)	0	5	-4	9					
angle, deg		27	36	45	54	63	81	81	
KTF1(150c3)150(c)	161	167	152	206	214	251	251		
angle, deg		27	36	45	54	63	81(1)	81(2)	
100(c)		107	111	99	152				
angle, deg		27	36	45	54	63	81(1)	81(2)	
70(c)			73	62					
angle, deg		27	36	45	54	63	81(1)	81(2)	
40(c)		36							
angle, deg	0	27	36	45	54	63	81	81	
24(c)	0	18	-4	2	22	35	67	67	
angle, deg		33	42	51	60	69	87	87	
SN50(150c1)150(c)			182	212	231	250	277	277	
angle, deg		33	42	51	60	69	87(1)	87(2)	
100(c)		134	133	165	189				
angle, deg		33	42	51	60	69	87(1)	87(2)	
70(c)		95	91	114					
angle, deg		33	42	51	60	69	87(1)	87(2)	
40(c)		45							
angle, deg	0	33	42	51	60	69	87	87	
24(c)	0	14	3	15	28	41	74	74	
angle, deg		36	45	54	63	81			
SN50(150c1)150(c)		136	151	175	193	236			
angle, deg		36	45	54	63	81			
100(c)		84	103	128	154				
angle, deg		36	45	54	63	81			
70(c)		50	65	81					
angle, deg		36	45	54	63	81			
40(c)		2							
angle, deg	0	36	45	54	63	81			
24(c)	0	-27	5	21	39	59			
angle, deg		34	43						
SN50(150c2)150(c)		175							
angle, deg		34	43						
100(c)		124							
angle, deg		34	43						
70(c)		84							
angle, deg		34	43						
40(c)		32							
angle, deg	0	34	43						
24(c)	0	2	39						



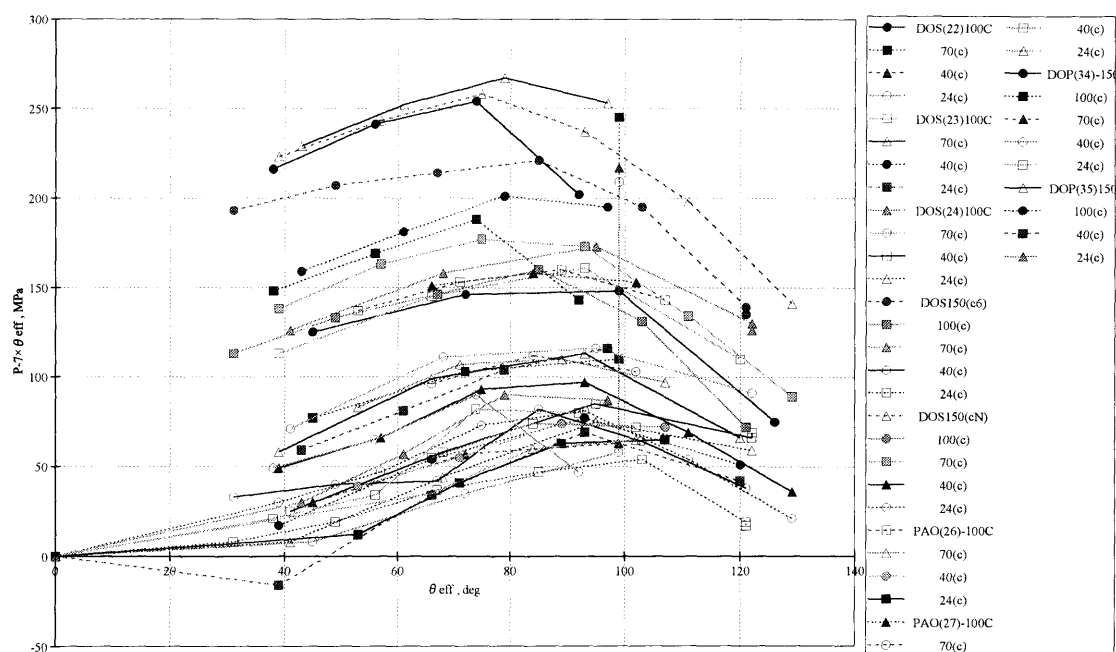


図 4-4 パラフィン系油の各温度における基準圧力 ($7 \times \theta_{\text{eff}}$, MPa) からの
圧力上昇量 ($\Delta P = P - 7 \times \theta_{\text{eff}}$, MPa)

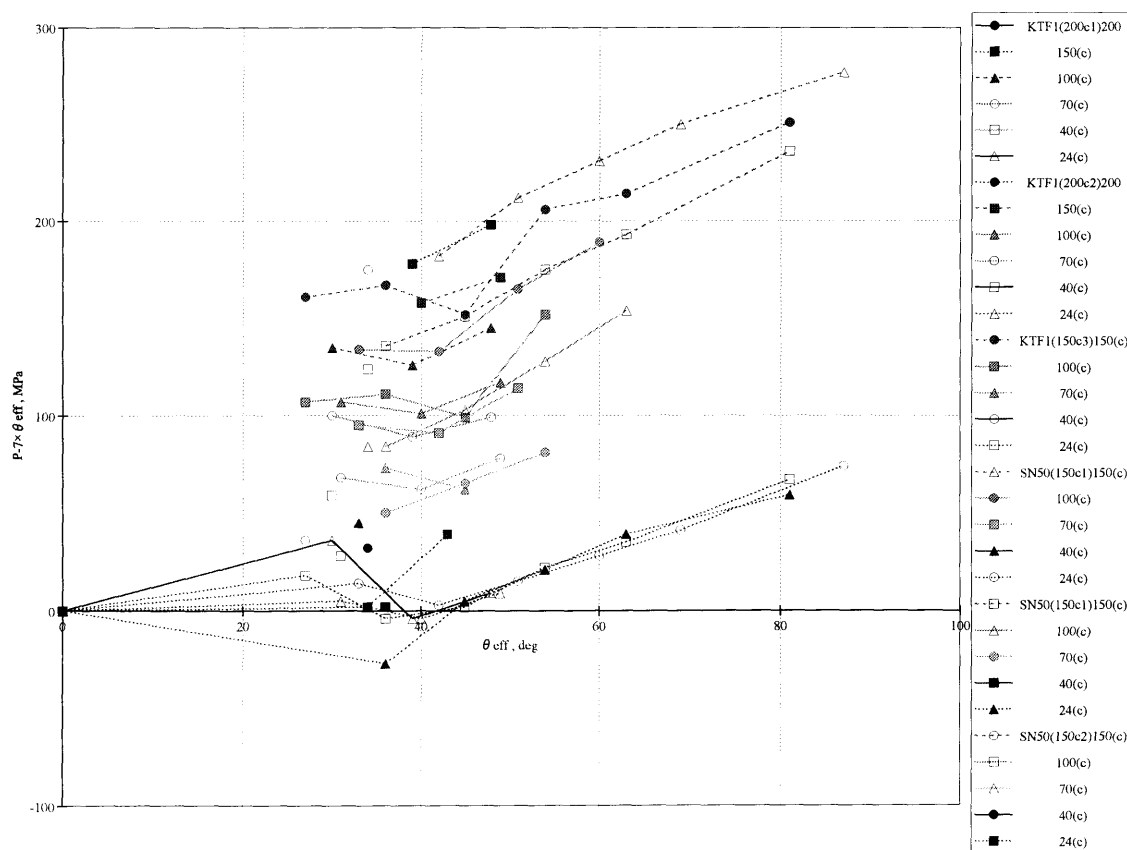
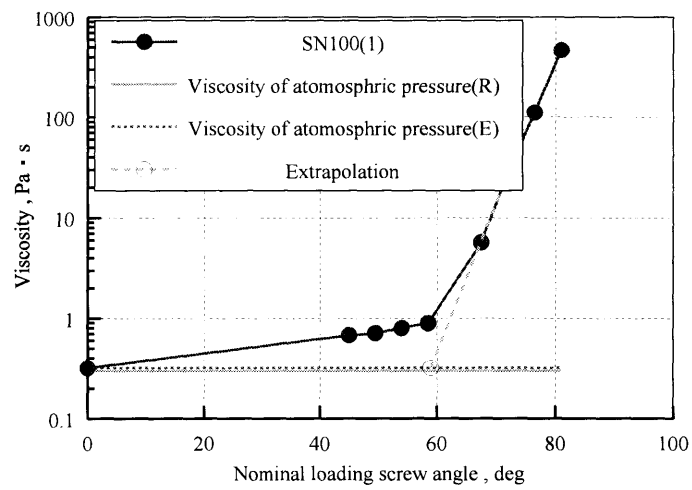
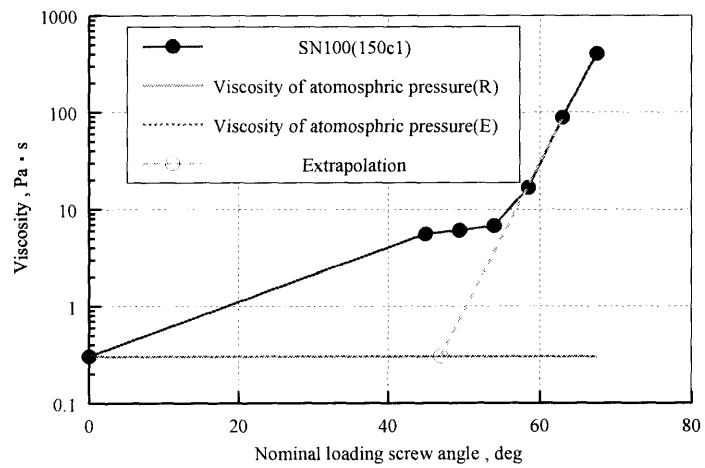


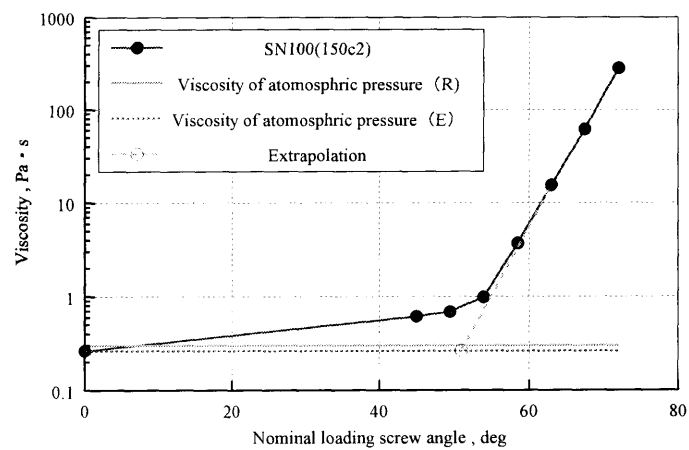
図 4-5 ナフテン系油の各温度における基準圧力 ($7 \times \theta_{\text{eff}}$, MPa) からの
圧力上昇量 ($\Delta P = P - 7 \times \theta_{\text{eff}}$, MPa)



(a)

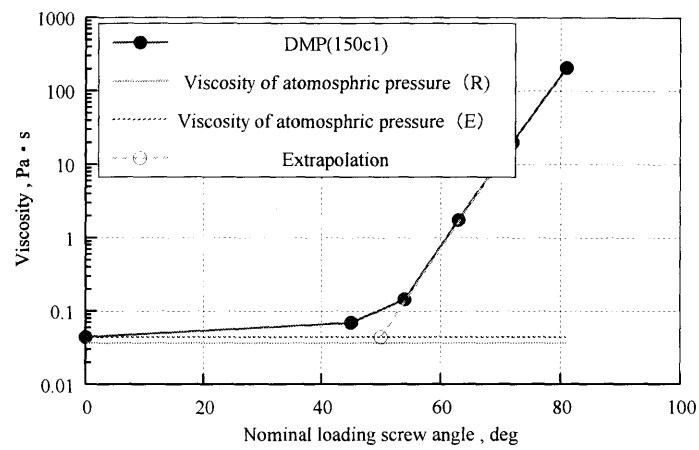


(b)

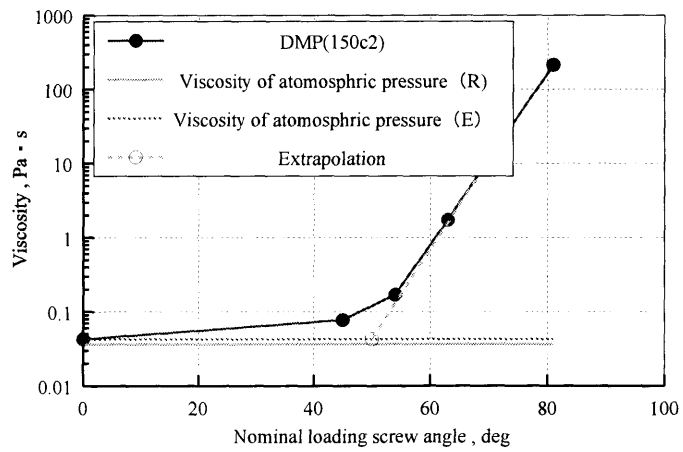


(c)

図 4-6 粘度－見かけの加圧ねじ回転角関係

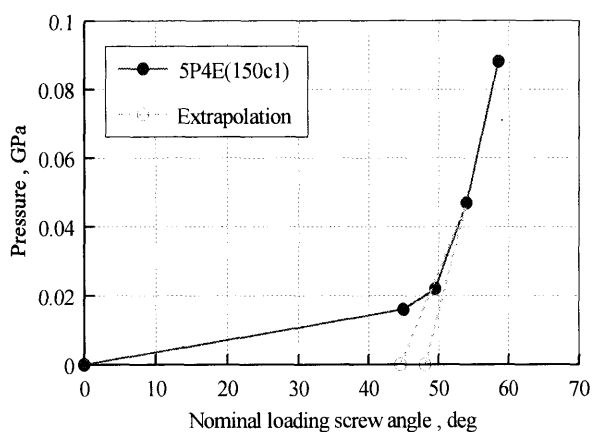


(d)

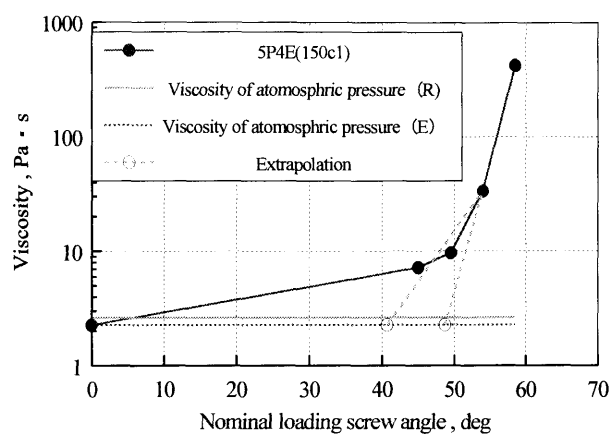


(e)

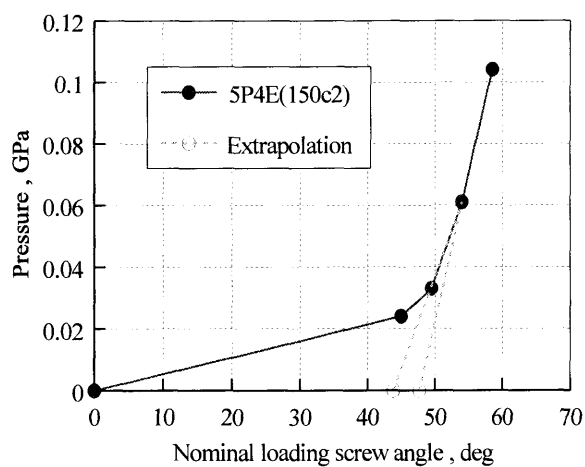
図 4-7 粘度－見かけの加圧ねじ回転角関係



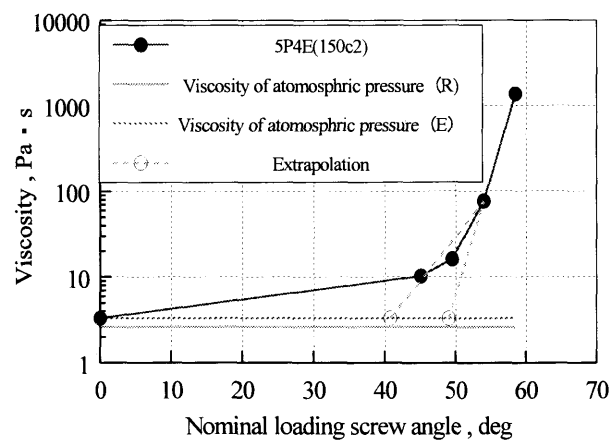
(f1)



(f2)

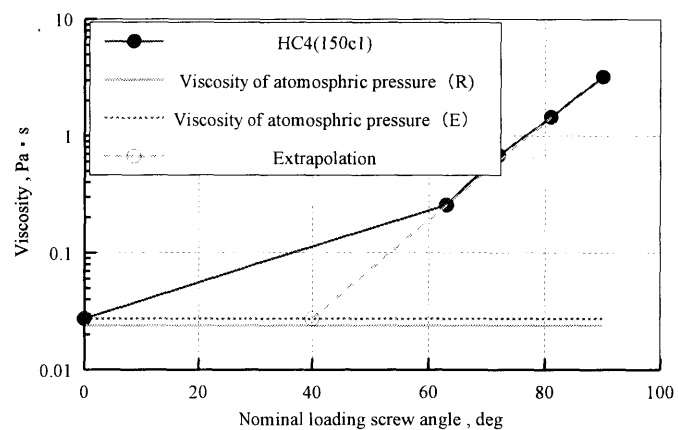


(g1)

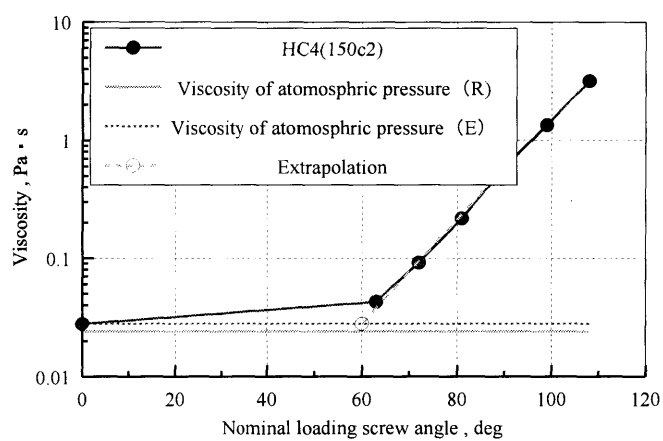


(g2)

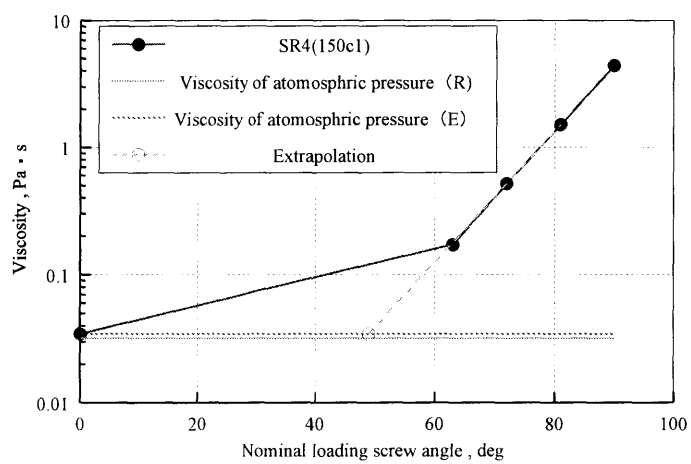
図 4-8 圧力－見かけの加圧ねじ回転角関係と
粘度－見かけの加圧ねじ回転角関係



(h)

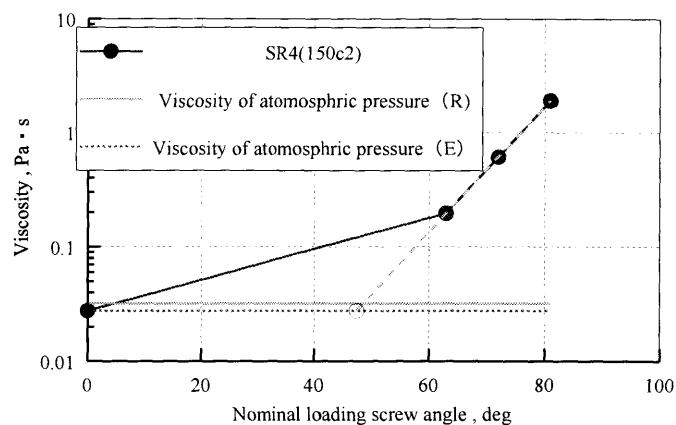


(i)

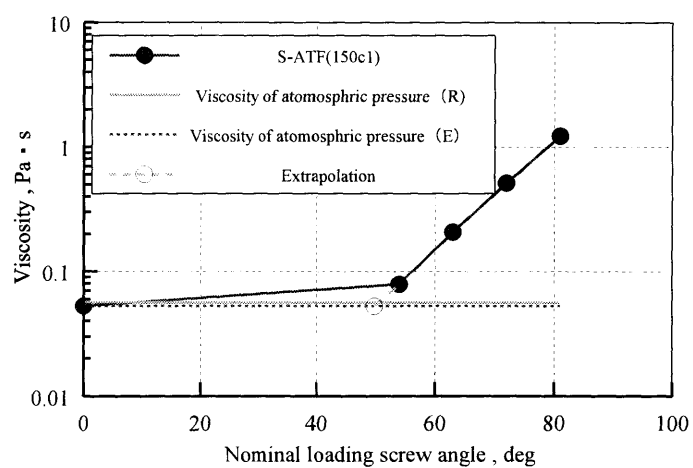


(j)

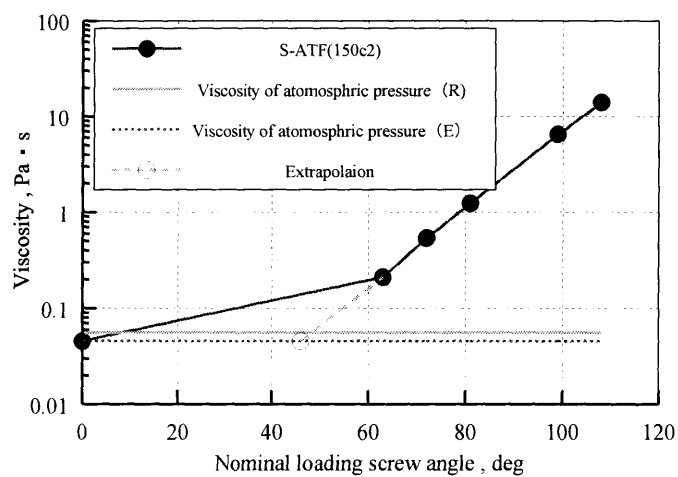
図 4-9 圧力－見かけの加圧ねじ回転角関係



(k)



(l)



(m)

図 4-10 粘度－見かけの加圧ねじ回転角関係

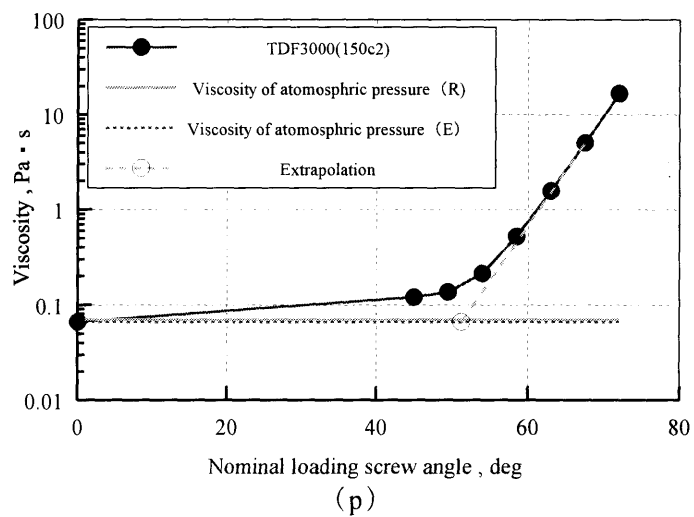
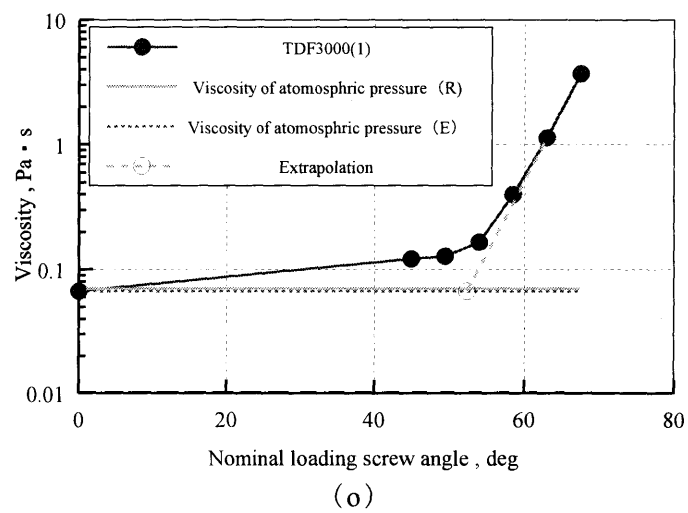
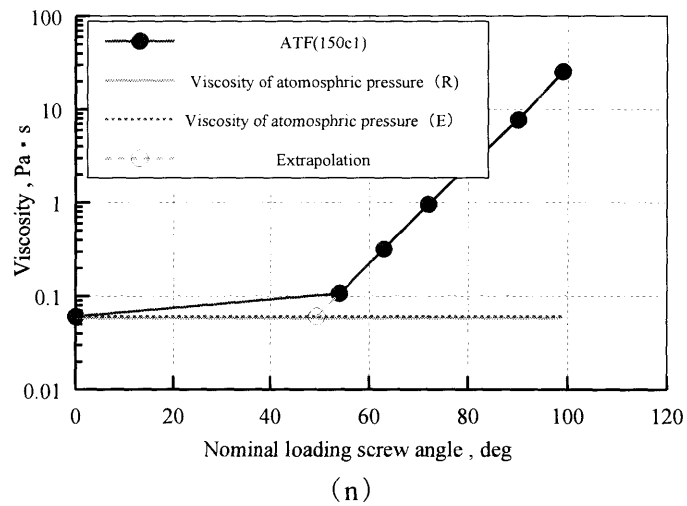
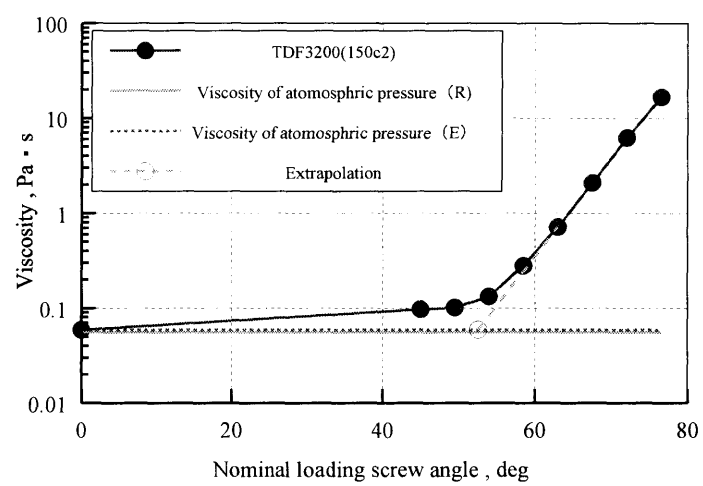


図 4-11 粘度－見かけの加圧ねじ回転角関係



(q)

図 4-12 粘度－見かけの加圧ねじ回転角関係

表 4-5 それぞれの実験における空加圧ねじ回転角，
対数粘度勾配，空角補正角度

Exp. notation	Dead loading screw angle θd , deg		Logarithm viscosity gradient		Adding amount of dead angle from Fig.4-17 , deg
	Extrapolated to $\eta 0$, $\theta d\eta$		$\Delta \log \eta / \Delta \theta$		$\Delta \theta d = \theta dp - \theta d\eta$
	Experimental value $\theta d\eta (E)$		Formula	Numeric value	Experimental value $\Delta \theta d (E)$
SN 100(1)	55	$=2/16.8$	0.119		
SN 100(150c1)	44	$=2/15.8$	0.127		
SN 100(150c2)	51	$=2/15$	0.133		
		Average	0.126		-1.6
DMP(150c1)	50	$=2/15$	0.133		
DMP(150c2)	50	$=2/15$	0.133		
		Average	0.133		-2
5P4E(150c1)	48.7	$=2/15.3$	0.131		
5P4E(150c2)	48.1	$=2/14.9$	0.134		
		Average	0.132		-2
HC4(150c1)	40	$=2/46.5$	0.043		
HC4(150c2)	60	$=2/54$	0.037		
		Average	0.040		5.3
SR4(150c1)	49	$=2/40$	0.050		
SR4(150c2)	47.5	$=2/36.7$	0.054		
		Average	0.052		4.3
S-ATF(150c1)	49.8	$=2/45.5$	0.044		
S-ATF(150c2)	46	$=2/46$	0.043		
		Average	0.044		4.95
ATF(150c1)	49.6	$=2/39.2$	0.051		
		Average	0.051		4.25
TDF3000(150c1)	52.38	$=2/18.9$	0.106		
TDF3000(150c2)	51.25	$=2/17.4$	0.115		
		Average	0.110		-0.025
TDF3200(150c1)	51.58	$=2/18.4$	0.109		
		Average	0.109		-0.15

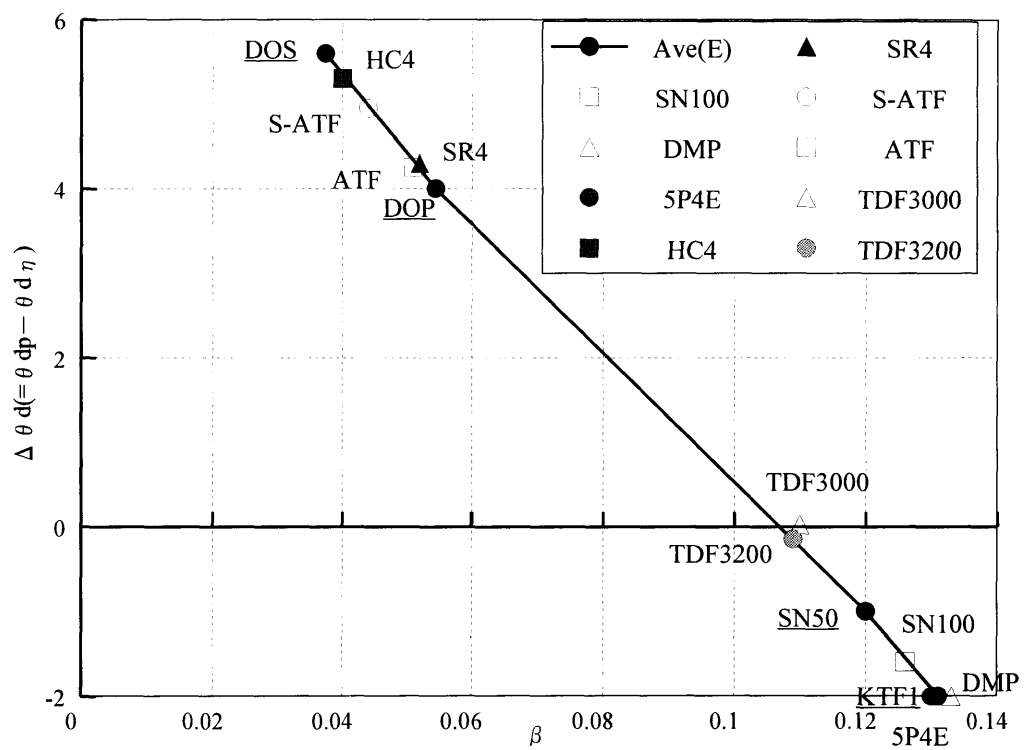
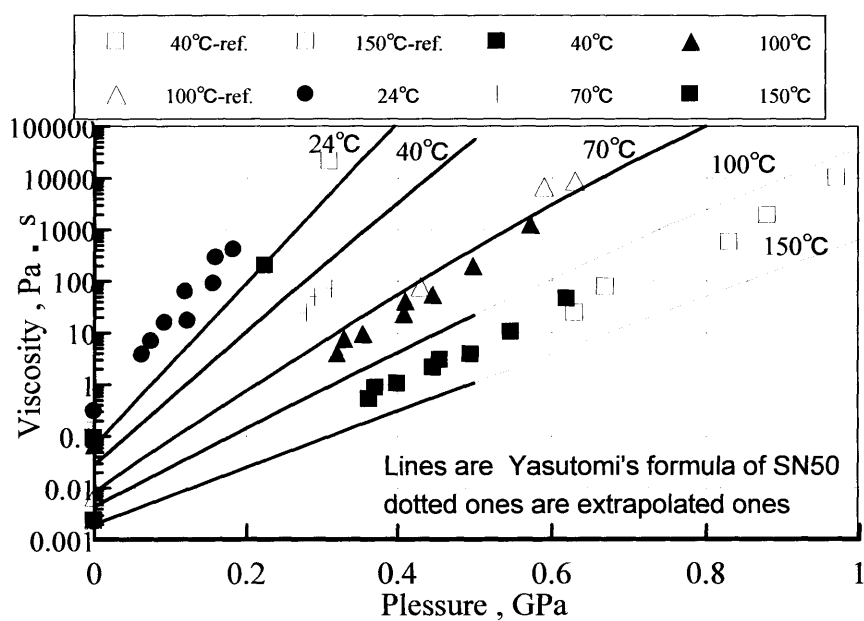
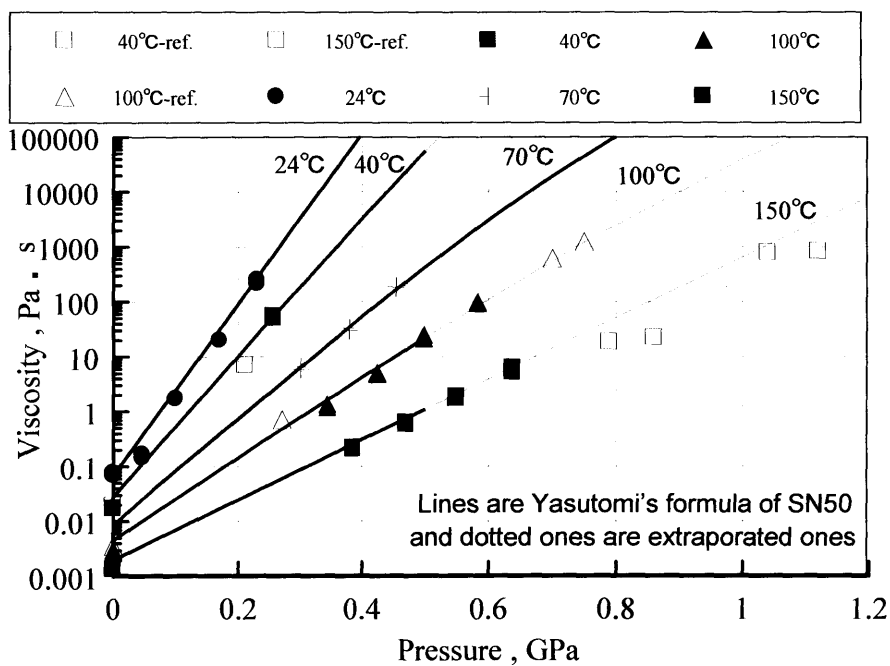


图 4-13 空角補正角度—対数粘度勾配關係図

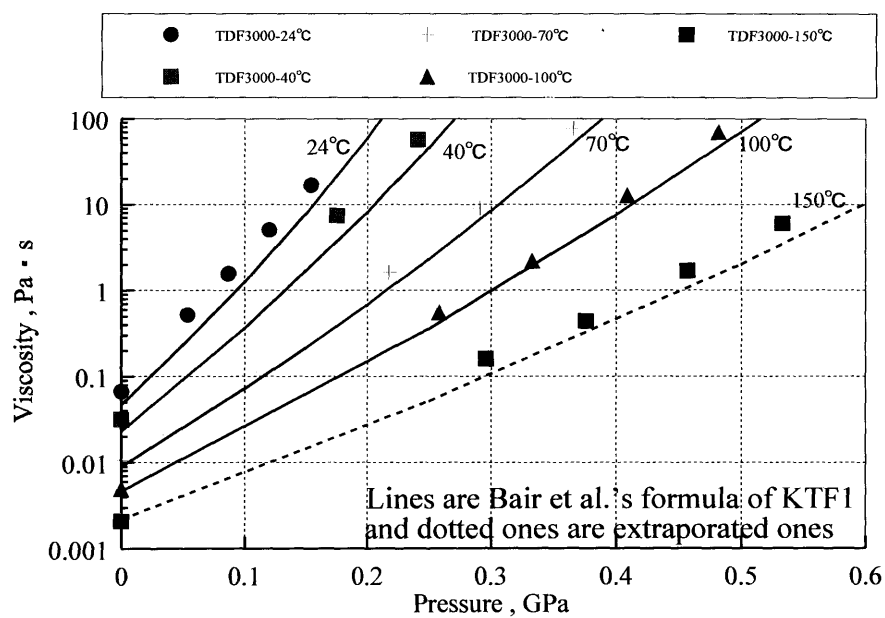


(a) SN100

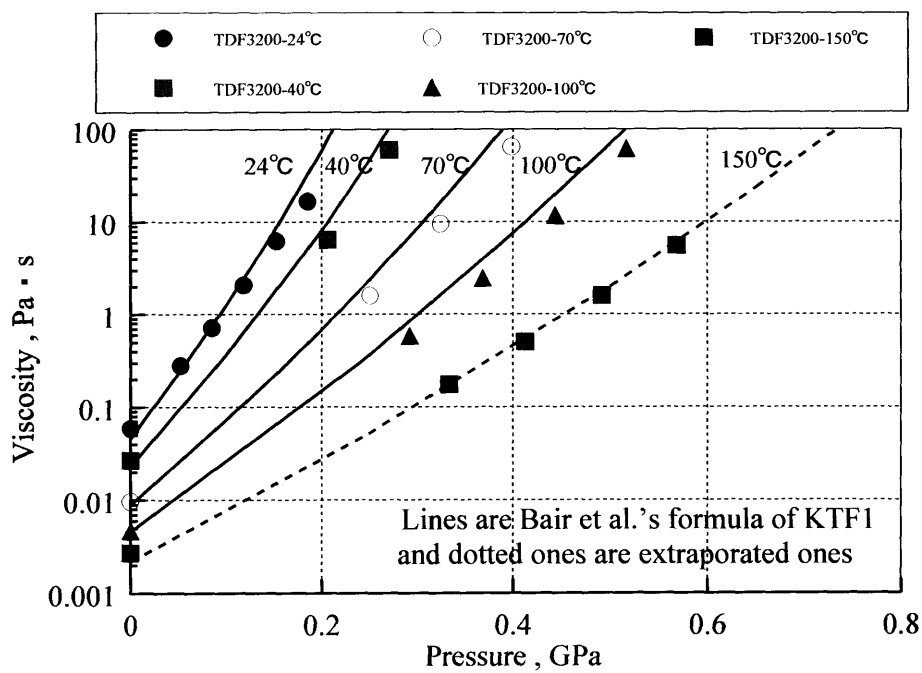


(b) DMP

図 4-14 粘度－圧力関係

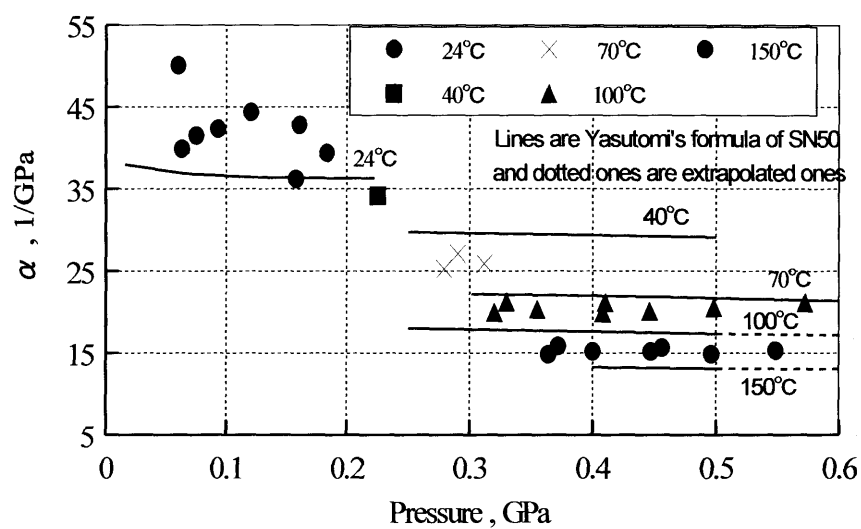


(c) TDF3000

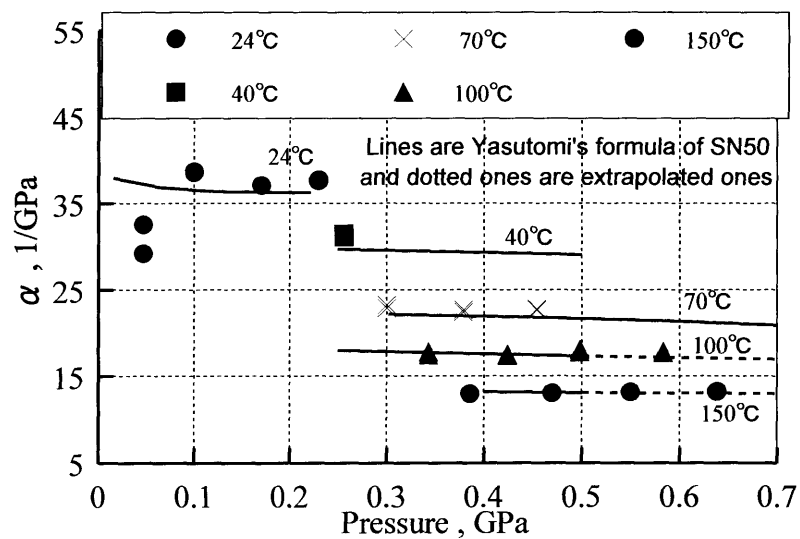


(d) TDF3200

图 4-15 粘度 - 压力關係

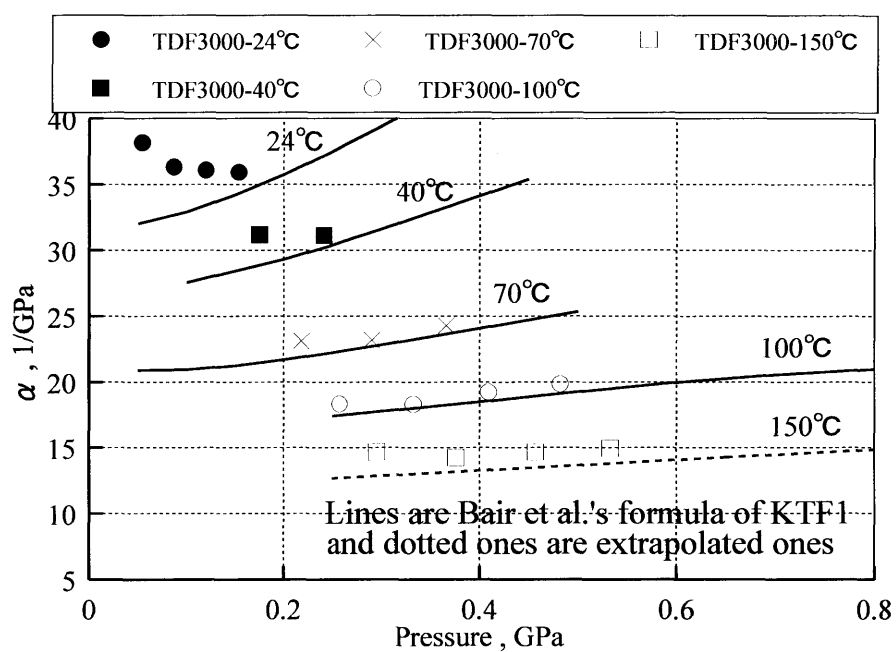


(a) SN100

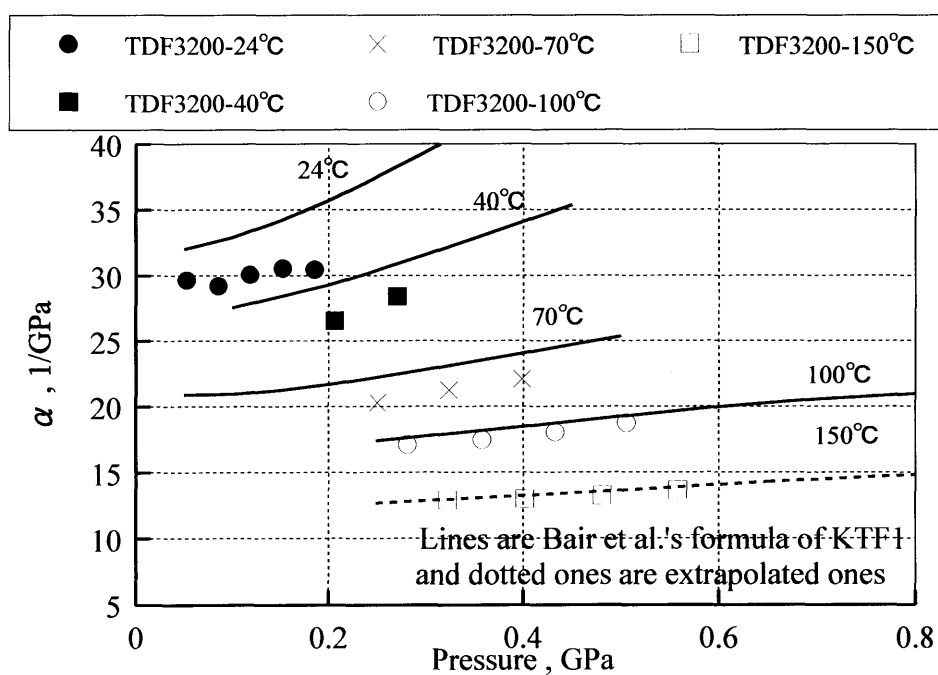


(b) DMP

图 4-16 压力-粘度系数 α

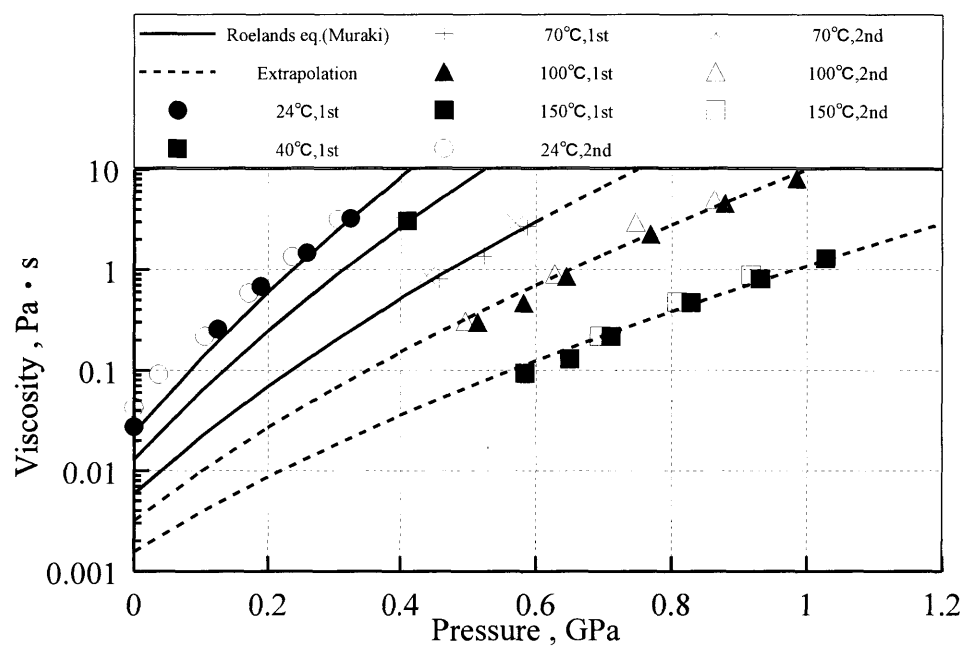


(c) TDF3000

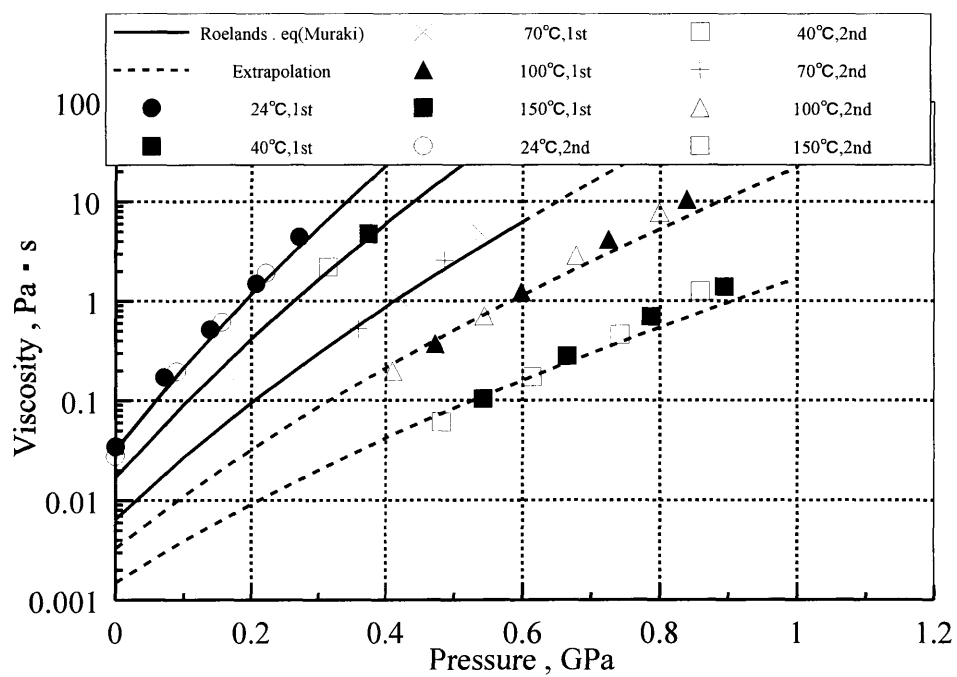


(d) TDF3200

图 4-17 压力-粘度系数 α

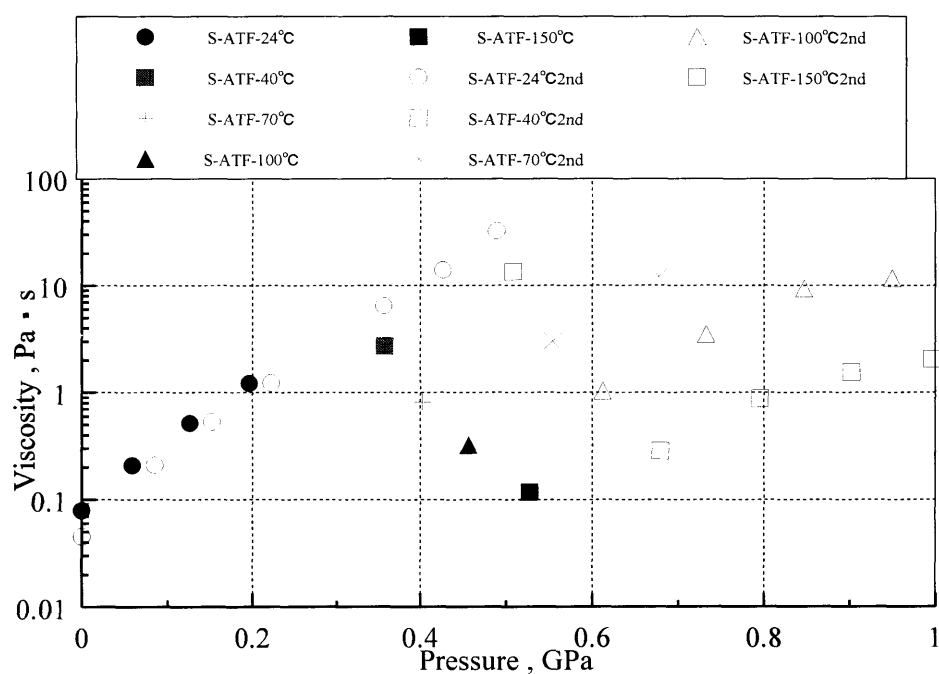


(a) HC4

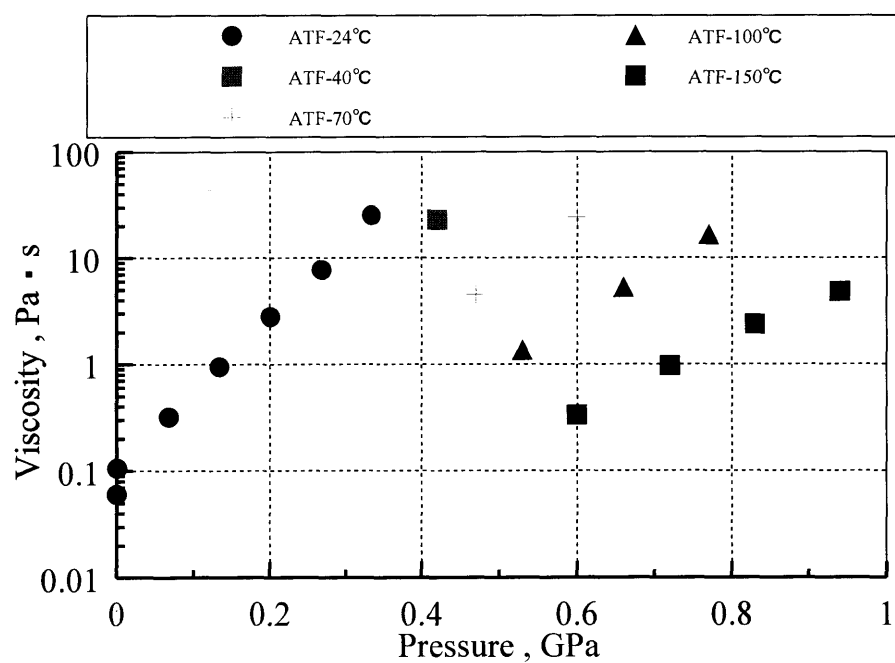


(b) SR4

图 4-18 粘度—压力關係

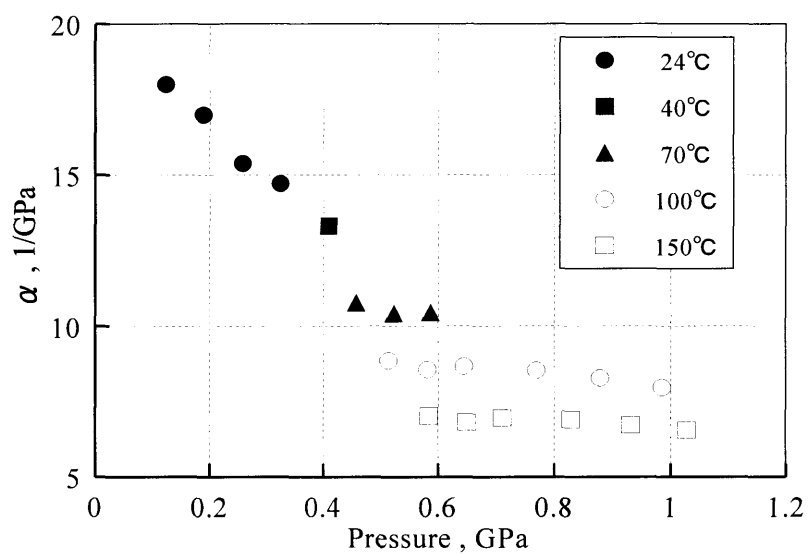


(c) S-ATF

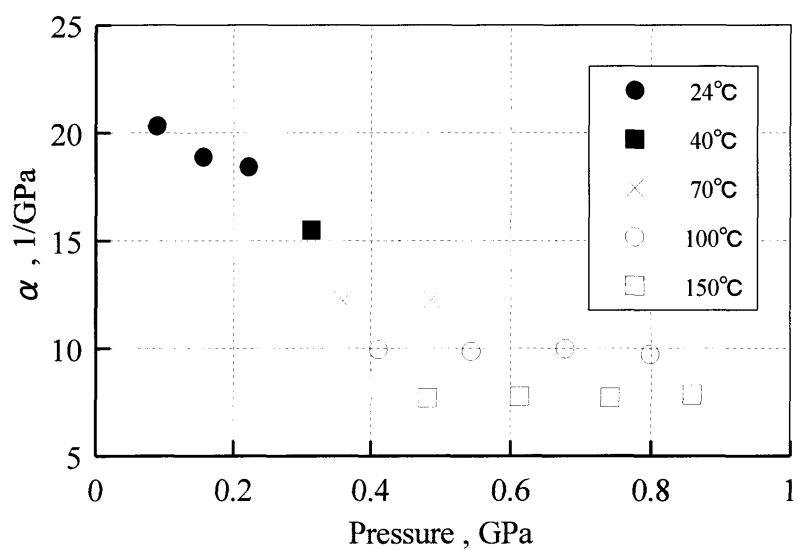


(d) ATF

図 4-19 粘度－圧力関係

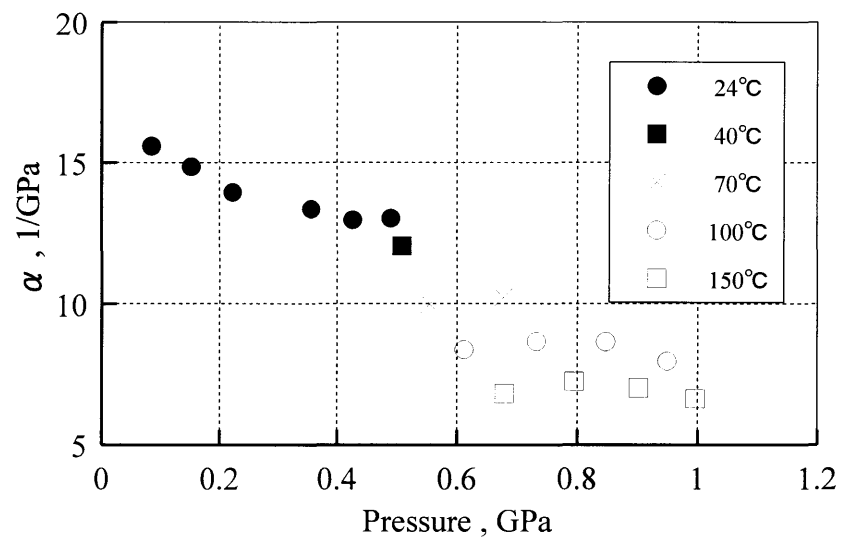


(a) HC4

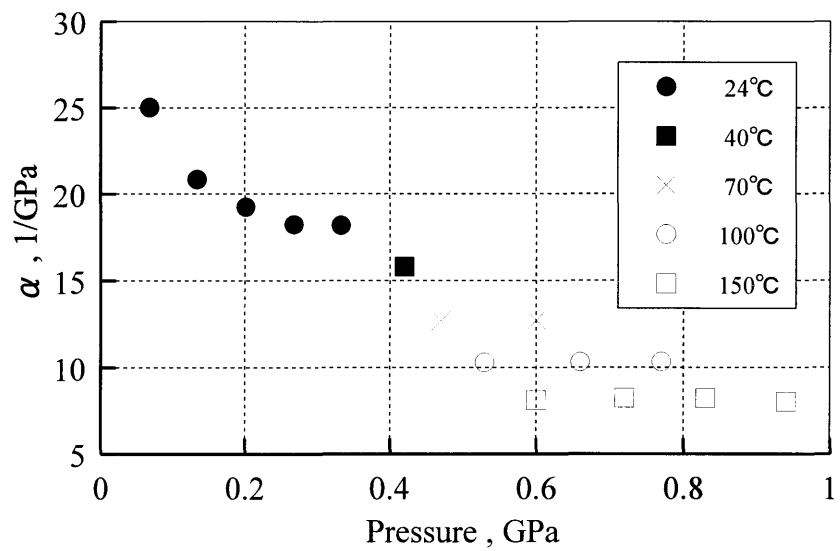


(b) SR4

图 4-20 压力-粘度系数 α



(c) S-ATF



(d) ATF

图 4-21 压力-粘度系数 α

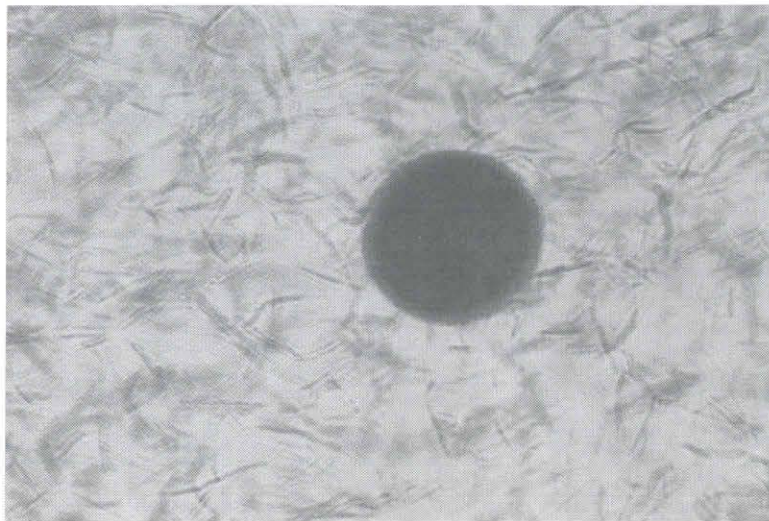


図 4-22 SR4 の結晶化状態 (24 °C, 0.289GPa)

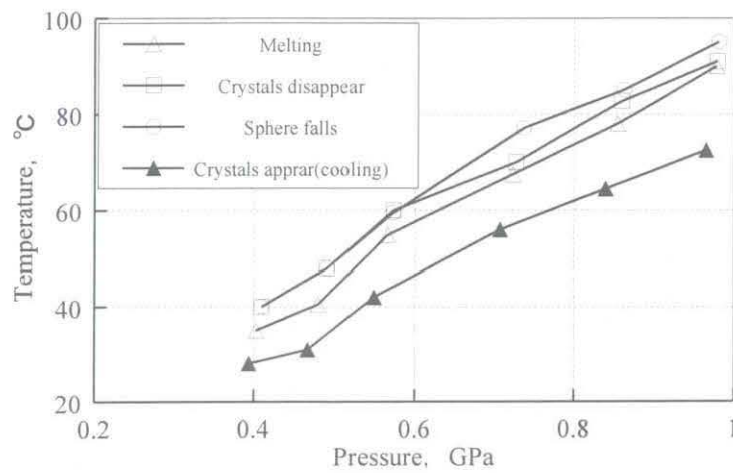


図 4-23 HC4 の結晶化温度の圧力変化

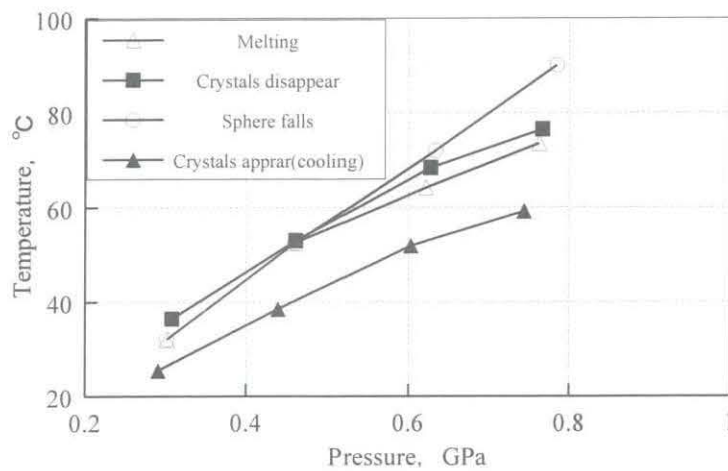


図 4-24 SR4 の結晶化温度の圧力変化

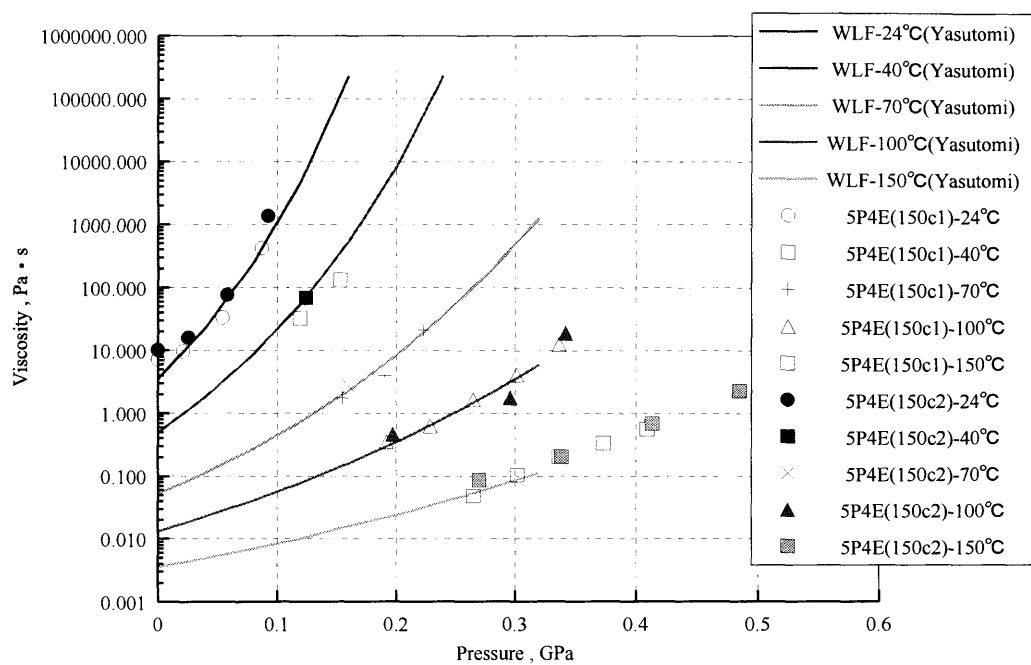


図 4-25 5P4E の粘度－圧力関係

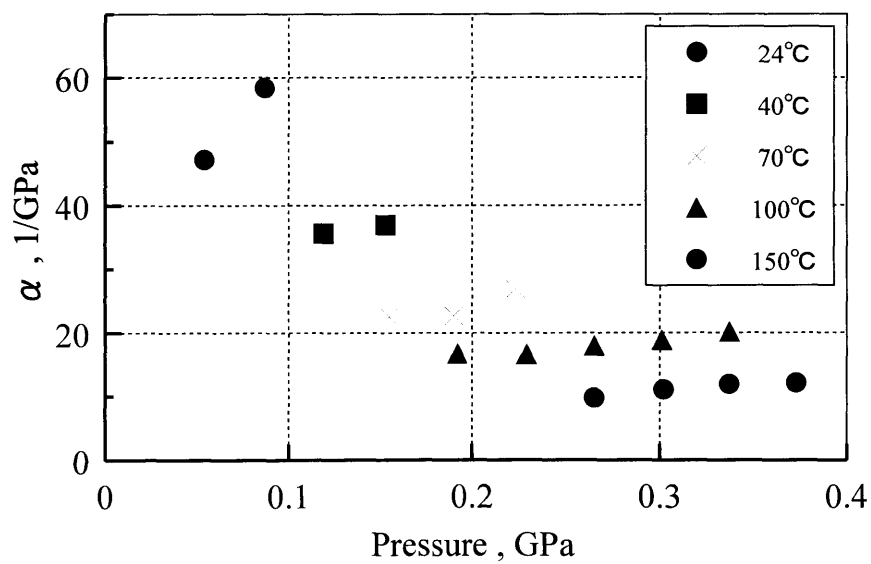


図 4-26 5P4E の圧力－粘度係数 α

表 4-6 各試料油の WLF 定数

Lubricant	A1/C	A2/1/GPa	B1	B2/1/GPa	C2/C	C1	T _{g0} /C
SN100(150c2)	510.3	0.336	0.355	10.66	11.11	29.65	-38.1
SN100(150c3)	97.5	2.219	0.349	12.14	11.11	29.65	-38.1
DMP	69.5	5.541	0.333	9.74	11.30	32.19	-71.0
5P4E(150c1)	162.7	1.637	36.586	0.02	11.34	35.11	-24.5
5P4E(150c2)	49.7	7.618	56.978	0.02	11.34	35.11	-24.5
S-ATF	88.6	1.111	0.296	8.65	11.13	39.38	-89.0
ATF	958.6	0.132	0.167	34.19	11.24	40.81	-88.2
TDF3000	156.5	2.290	0.781	10.96	11.18	33.24	-65.7
TDF3200	1187.1	0.131	0.276	24.06	10.54	19.72	-46.7

表 4-7 各試料油の Roelands 定数

Lubricant	TR0	MuRo/Pas	So	Z
HC4(Reference)	30	0.0189	1.0629	0.6183
SR4(Reference)	30	0.0246	1.1652	0.6486
S-ATF	24	0.0557	0.9100	0.5289
ATF	24	0.0581	1.0900	0.6403

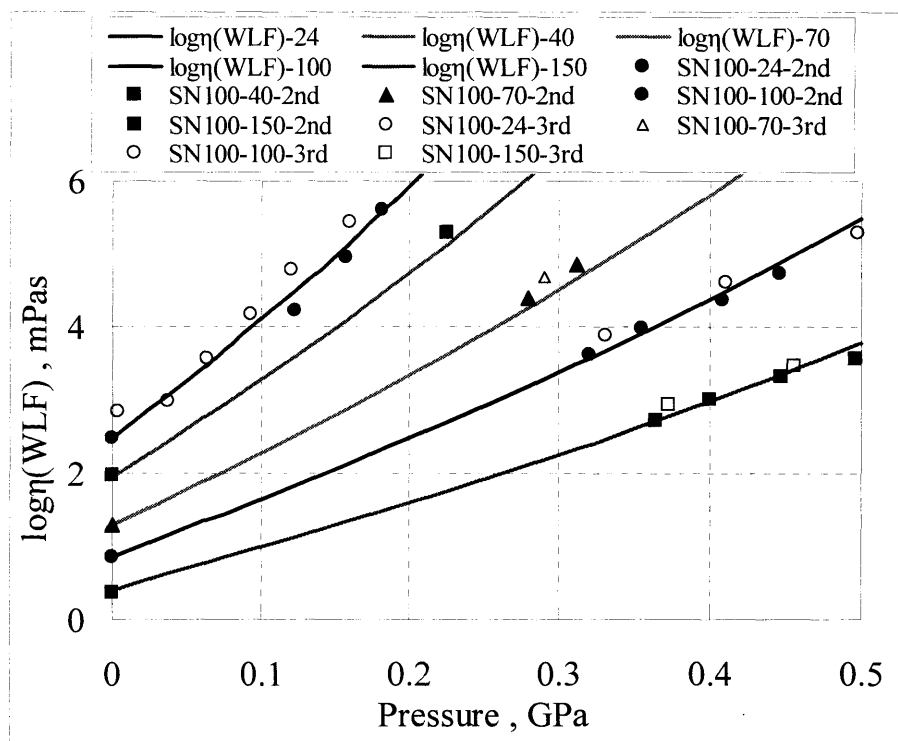


図 4-27 WLF 粘度－圧力関係 (SN100)

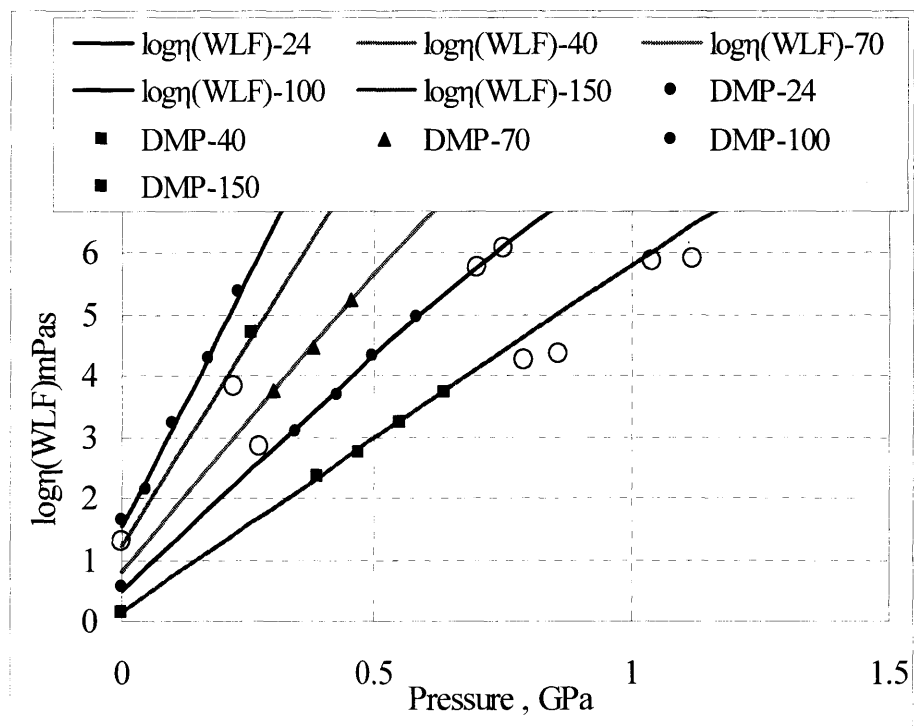


図 4-28 WLF 粘度－圧力関係 (DMP)

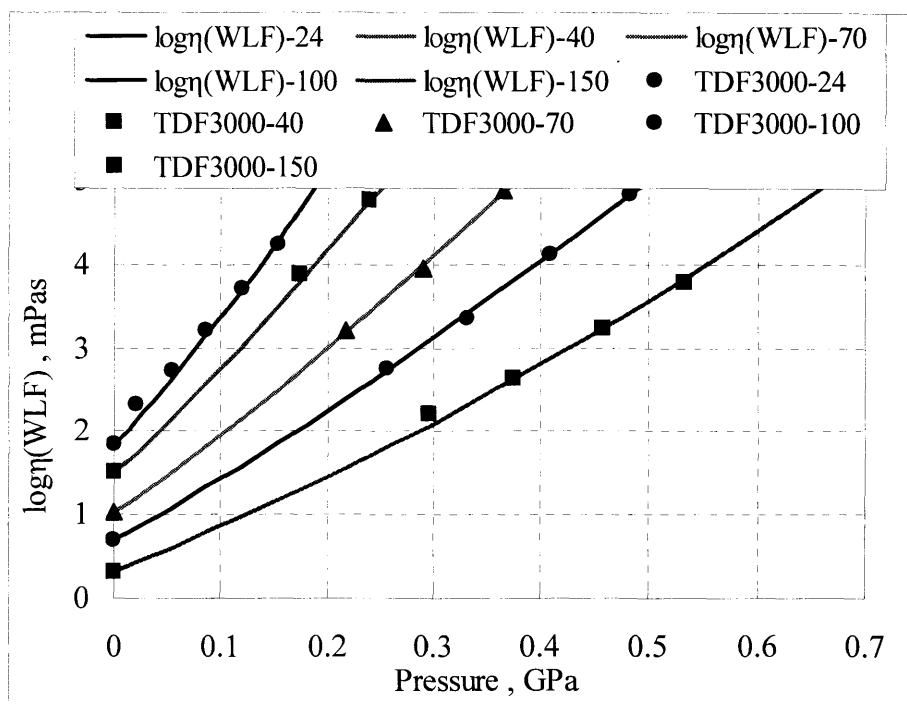


图 4-29 WLF 粘度—压力關係 (TDF3000)

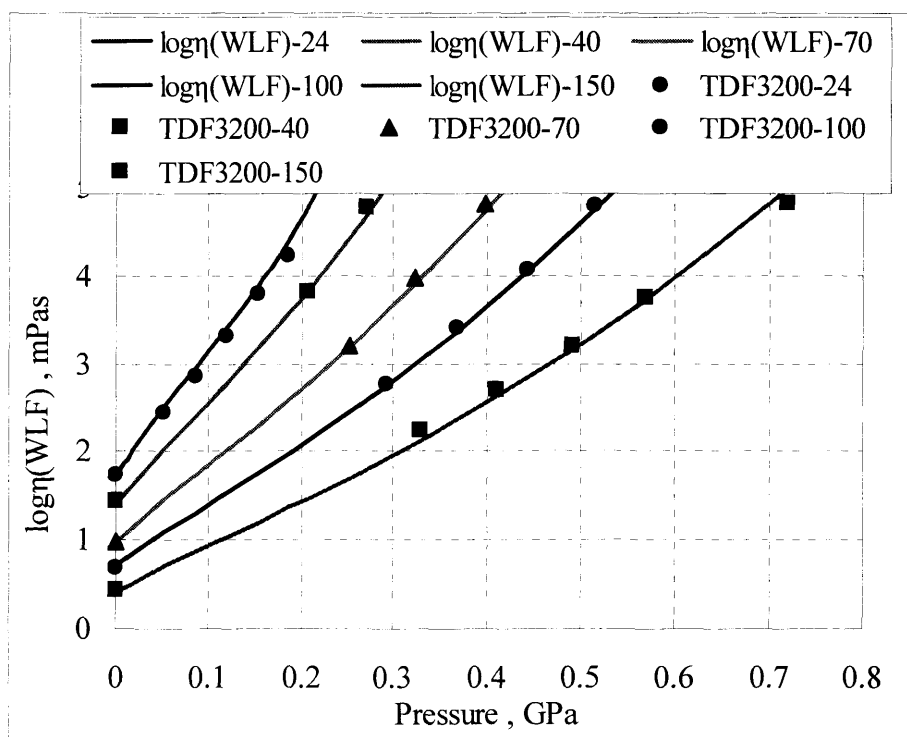


图 4-30 WLF 粘度—压力關係 (TDF3200)

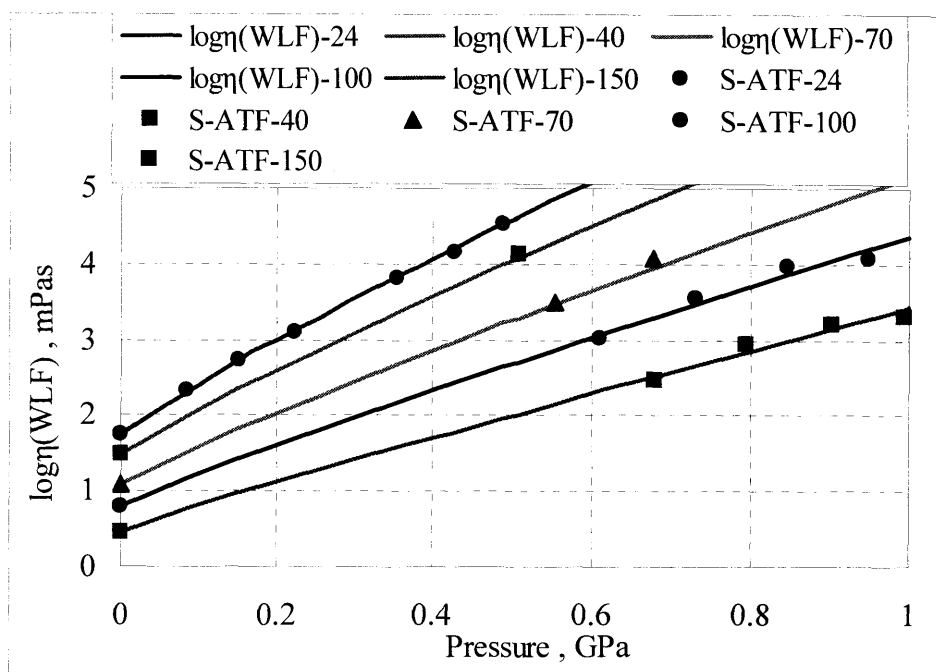


図 4-31 WLF 粘度－圧力関係 (S-ATF)

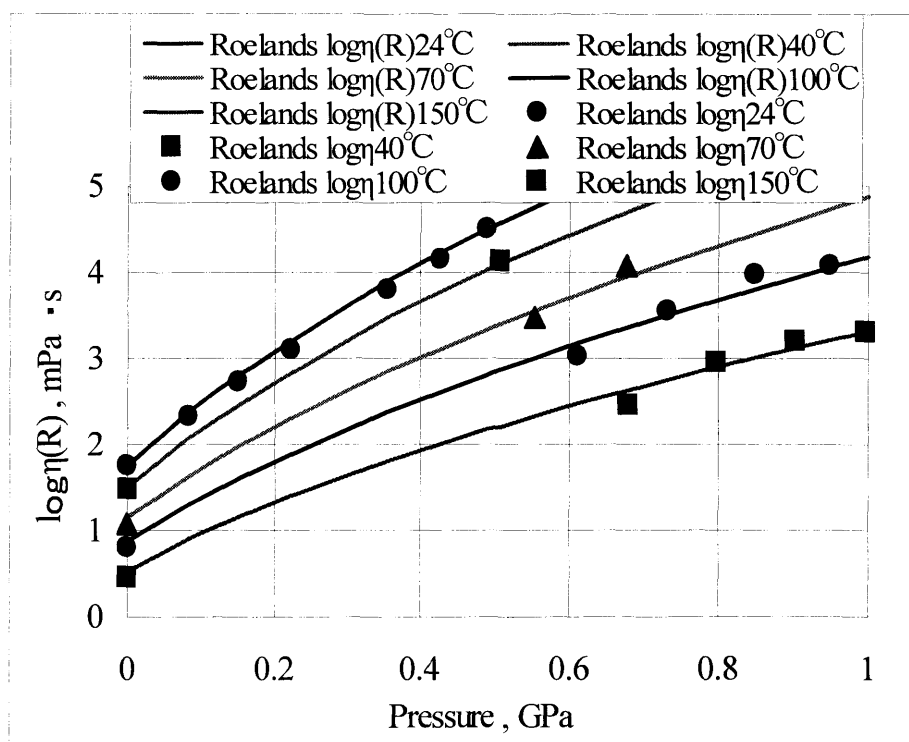


図 4-32 Roelands 粘度－圧力関係 (S-ATF)

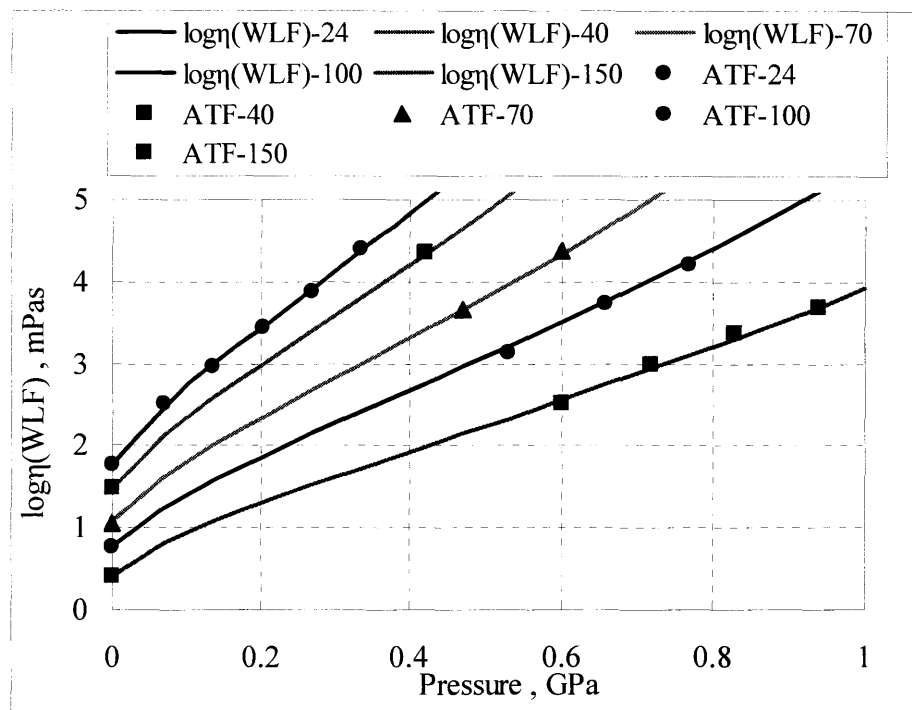


图 4-33 WLF 粘度－压力關係 (ATF)

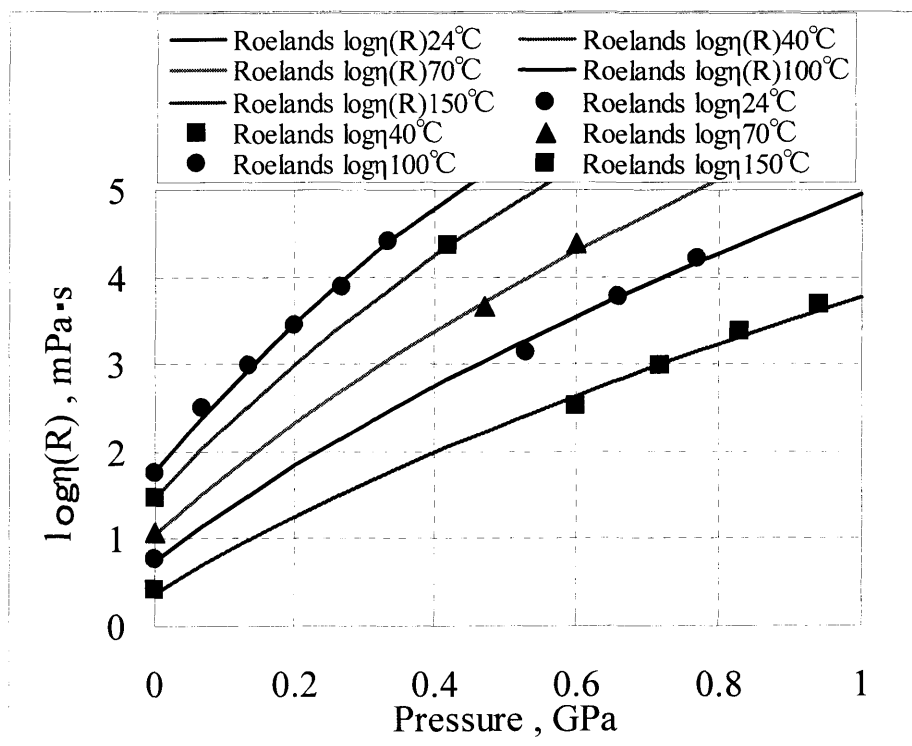


图 4-34 Roelands 粘度－压力關係 (ATF)

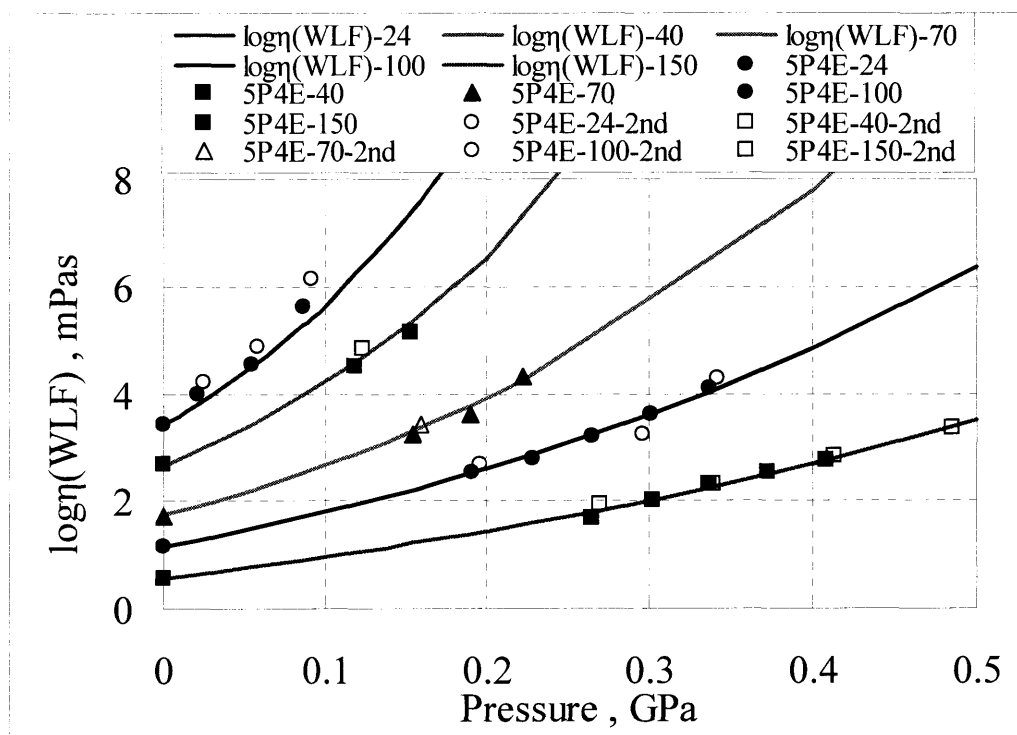


図 4-35 WLF 粘度－圧力関係 (5P4E)

表 4-8 圧力-粘度データ (SN100)

SN100(1)						Viscosity of atomosphric pressure(Pa · s)					
24℃						24℃					
Nominal loading screw angle , deg						58.5	67.5	72	76.5	81	0.300479
Effective angle , deg						3.5	12.5	17	21.5	26	0.091257
Pressure , GPa						0.02	0.08	0.125	0.16	0.18	0.19271
Viscosity , Pa · s						0.889463	5.674	27.32	111.1	465.7	100℃
α , 1/GPa						54.26	36.73	36.08	36.96	40.81	0.06953
SN100(150c2)											
24℃											
Nominal loading screw angle , deg						45	49.5	54	58.5	63	67.5
Effective angle , deg						4	8.5	13	17.5	22	26.5
Pressure , GPa						0.033	0.06	0.075	0.123	0.157	0.183
Viscosity , Pa · s						5.562	6.054	6.752	16.76	88.2	404
α , 1/GPa						88.43	50.05	41.50	32.69	36.19	39.36
40℃											
Pressure increment , GPa											0.005
Pressure , GPa										0	0.225
Viscosity , Pa · s										0.091257	196.6
α , 1/GPa											34.11
70℃											
Pressure increment , GPa											0.05
Pressure , GPa										0	0.279
Viscosity , Pa · s										0.19271	24.34
α , 1/GPa											25.25
100℃											
Pressure increment , GPa											0.091
Pressure , GPa										0	0.32
Viscosity , Pa · s										0.06953	4.115
α , 1/GPa											19.95
150℃											
Pressure increment , GPa											0.135
Pressure , GPa										0	0.364
Viscosity , Pa · s										0.00235	0.516581
α , 1/GPa											14.82
SN100(150c3)											
24℃											
Nominal loading screw angle , deg						49.5	54	58.5	63	67.5	72
Effective angle , deg						0.5	5	9.5	14	18.5	23
Pressure , GPa						0.003	0.037	0.063	0.093	0.12	0.16
Viscosity , Pa · s						0.687108	0.989228	3.708	15.39	61.55	282.4
α , 1/GPa						275.70	32.20	39.89	42.32	44.35	42.79
40℃											
Pressure increment , GPa											
Pressure , GPa											
Viscosity , Pa · s											
α , 1/GPa											
70℃											
Pressure increment , GPa											0.053
Pressure , GPa										0	0.29
Viscosity , Pa · s										0.19271	49.63
α , 1/GPa											27.08
100℃											
Pressure increment , GPa											0.093
Pressure , GPa										0	0.33
Viscosity , Pa · s										0.06953	7.697
α , 1/GPa											21.24
150℃											
Pressure increment , GPa											0.135
Pressure , GPa										0	0.372
Viscosity , Pa · s										0.00235	0.851778
α , 1/GPa											15.84

Viscosity of atomosphric pressure(Pa · s)	
24°C	0.300479
40°C	0.091257
70°C	0.19271
100°C	0.06953
150°C	0.00235

表 4-9 圧力-粘度データ (DMP)

Viscosity of atmospheric pressure (Pa · s)

24°C	0.036421
40°C	0.017097
70°C	0.00613
100°C	0.003014
150°C	0.001353

DMP(150c1)							
24°C							
Nominal loading screw angle, deg	54	63	72	81	90	99	108
Effective angle, deg	6	15	24	33	42	51	60
Pressure, GPa	0.047	0.1	0.17	0.23	0.311	0.377	0.444
Viscosity, Pa · s	0.143806	1.741	19.89	250.2			
α , 1/GPa	29.22	38.67	37.08	38.41			
40°C							
Pressure increment, GPa				0.012			
Pressure, GPa			0	0.256			
Viscosity, Pa · s			0.017097	49.79			
α , 1/GPa				31.16			
70°C							
Pressure increment, GPa				0.056	0.068	0.077	
Pressure, GPa			0	0.3	0.379	0.454	
Viscosity, Pa · s			0.00613	5.918	30.14	179.8	
α , 1/GPa				22.91	22.43	22.66	
100°C							
Pressure increment, GPa				0.099	0.113	0.121	0.139
Pressure, GPa			0	0.343	0.424	0.498	0.583
Viscosity, Pa · s			0.003014	1.209	4.843	21.3	93.81
α , 1/GPa				17.48	17.41	17.80	17.75
150°C							
Pressure increment, GPa				0.142	0.159	0.173	0.194
Pressure, GPa			0	0.386	0.47	0.55	0.638
Viscosity, Pa · s			0.001353	0.21902	0.570335	1.705	5.168
α , 1/GPa				13.18	12.86	12.98	12.93
DMP(150c2)							
24°C							
Nominal loading screw angle, deg	54	63	72	81	90	99	108
Effective angle, deg	6	15	24	33	42	51	60
Pressure, GPa	0.047	0.1	0.17	0.23	0.311	0.377	0.444
Viscosity, Pa · s	0.168125	1.724	19.87	213.2			
α , 1/GPa	32.54	38.57	37.07	37.72			
40°C							
Pressure increment, GPa				0.012			
Pressure, GPa			0	0.256			
Viscosity, Pa · s			0.017097	54.04			
α , 1/GPa				31.48			
70°C							
Pressure increment, GPa				0.056	0.068	0.077	
Pressure, GPa			0	0.3	0.379	0.454	
Viscosity, Pa · s			0.00613	6.615	33.53	192	
α , 1/GPa				23.28	22.71	22.80	
100°C							
Pressure increment, GPa				0.099	0.113	0.121	0.139
Pressure, GPa			0	0.343	0.424	0.498	0.583
Viscosity, Pa · s			0.003014	1.352	5.085	24.83	98.6
α , 1/GPa				17.80	17.53	18.11	17.83
150°C							
Pressure increment, GPa				0.142	0.159	0.173	0.194
Pressure, GPa			0	0.386	0.47	0.55	0.638
Viscosity, Pa · s			0.001353	0.20217	0.627073	1.871	6.248
α , 1/GPa				12.97	13.06	13.15	13.23

表 4-10 圧力－粘度データ (TDF3000)

					Viscosity of atomosphric pressure(Pa · s)				
					24℃	0.070034			
					40℃	0.031494			
					70℃	0.010538			
					100℃	0.004915			
					150℃	0.002073			
TDF3000(1)									
24℃									
Nominal loading screw angle , deg	54	58.5	63	67.5					
Effective angle , deg	3.2	7.7	12.2	16.7					
Pressure , GPa	0.024	0.057	0.09	0.124					
Viscosity , Pa · s	0.16556	0.39747	1.131	3.695					
α , 1/GPa	37.80	31.28	31.43	32.36					
TDF3000(150c2)									
24℃									
Nominal loading screw angle , deg	54	58.5	63	67.5	72	81	90	99	
Effective angle , deg	2.75	7.25	11.75	16.25	20.75	29.75	38.75	47.75	
Pressure , GPa	0.02	0.054	0.087	0.12	0.154	0.22015	0.28675	0.35335	
Viscosity , Pa · s	0.212786	0.521148	1.564	5.034	16.76				
α , 1/GPa	55.57	37.17	35.70	35.62	35.57				
40℃									
Pressure increment , GPa					0.021	0.02085			
Pressure , GPa				0	0.175	0.241			
Viscosity , Pa · s				0.031494	7.375	57.06			
α , 1/GPa					29.98	31.13			
70℃									
Pressure increment , GPa					0.064	0.07085	0.07925		
Pressure , GPa				0	0.218	0.291	0.366		
Viscosity , Pa · s				0.010538	1.629	9.02	76.66		
α , 1/GPa					23.12	23.2	24.3		
100℃									
Pressure increment , GPa					0.104	0.11285	0.12225	0.12865	
Pressure , GPa				0	0.258	0.333	0.409	0.482	
Viscosity , Pa · s				0.004915	0.557356	2.187	12.81	69.8	
α , 1/GPa					18.34	18.31	19.23	19.84	
150℃									
Pressure increment , GPa					0.142	0.15585	0.17025	0.17965	
Pressure , GPa				0	0.296	0.38	0.457	0.533	
Viscosity , Pa · s				0.002073	0.159792	0.437679	1.685	5.964	
α , 1/GPa					14.68	14.24	14.66	14.94	

Viscosity of atomosphric pressure(Pa · s)

24°C	0.070034
40°C	0.031494
70°C	0.010538
100°C	0.004915
150°C	0.002073

表 4-11 圧力-粘度データ (TDF3200)

Viscosity of atmospheric pressure(Pa · s)

24°C	0.055785
40°C	0.026844
70°C	0.009726
100°C	0.004743
150°C	0.002709

TDF3200(150c1)										
24°C										
Nominal loading screw angle , deg	54	58.5	63	67.5	72	76.5	85.5	94.5	103.5	121.5
Effective angle , deg	1.13	5.63	10.13	14.63	19.13	23.63	32.63	41.63	50.63	68.63
Pressure , GPa	0.0184	0.0524	0.0854	0.1184	0.1524	0.1854	0.241	0.308	0.375	0.507
Viscosity , Pa · s	0.132313	0.278947	0.713785	2.074	6.197	16.66				
α , 1/GPa	43.93	29.66	29.20	30.07	30.54	30.44				
40°C										
Pressure increment , GPa						0.021	0.02			
Pressure , GPa					0	0.2064	0.2714			
Viscosity , Pa · s					0.026844	6.425	59.85			
α , 1/GPa						26.54	28.41			
70°C										
Pressure increment , GPa						0.066	0.073	0.08		
Pressure , GPa					0	0.2514	0.3244	0.3984		
Viscosity , Pa · s					0.009726	1.595	9.517	64.64		
α , 1/GPa						20.29	21.23	22.09		
100°C										
Pressure increment , GPa						0.107	0.117	0.125	0.131	
Pressure , GPa					0	0.2924	0.3684	0.4434	0.5164	
Viscosity , Pa · s					0.004743	0.586745	2.463	11.66	61.78	
α , 1/GPa						16.48	16.97	17.61	18.35	
150°C										
Pressure increment , GPa						0.148	0.161	0.173	0.183	0.212
Pressure , GPa					0	0.33	0.4124	0.4914	0.5684	0.7194
Viscosity , Pa · s					0.002709	0.174537	0.50312	1.593	5.52	67.32
α , 1/GPa						12.49	12.67	12.98	13.41	14.07

表 4-12 圧力－粘度データ (HC4)

24°C	0.024
40°C	0.013
70°C	0.005838
100°C	0.003167
150°C	0.001553

HC4(150c1)						150°C					0.00153				
24°C															
Nominal loading screw angle , deg	63	72	81	90	99	108	117	126	135	144					
Effective angle , deg	18	27	36	45	54	63	72	90	108	126					
Pressure , GPa	0.124	0.189	0.258	0.324	0.4	0.466	0.533	0.666	0.799	0.932					
Viscosity , Pa · s	0.255548	0.679189	1.453	3.226											
α , 1/GPa	17.99	16.97	15.38	14.71											
40°C															
Pressure increment , GPa					0.01										
Pressure , GPa				0	0.41										
Viscosity , Pa · s				0.013	3.041										
α , 1/GPa					13.30										
70°C															
Pressure increment , GPa					0.057	0.057	0.054								
Pressure , GPa				0	0.457	0.523	0.587								
Viscosity , Pa · s				0.005838	0.801329	1.359	2.687								
α , 1/GPa					10.77	10.42	10.45								
100°C															
Pressure increment , GPa					0.114	0.116	0.112	0.103	0.08	0.053					
Pressure , GPa				0	0.514	0.582	0.645	0.769	0.879	0.985					
Viscosity , Pa · s				0.003167	0.299134	0.4621	0.851639	2.248	4.587	8.096					
α , 1/GPa					8.85	8.56	8.67	8.54	8.28	7.97					
150°C															
Pressure increment , GPa					0.184	0.184	0.178	0.163	0.133	0.096					
Pressure , GPa				0	0.584	0.65	0.711	0.829	0.932	1.028					
Viscosity , Pa · s				0.001553	0.092911	0.129387	0.215485	0.465955	0.805395	1.283					
α , 1/GPa					7.03	6.82	6.96	6.90	6.72	6.55					
HC4(150c2)															
24°C															
Nominal loading screw angle , deg	72	81	90	99	108	117	135	153	171						
Effective angle , deg	6.4	15.4	24.4	33.4	42.4	51.4	69.4	87.4	105.4						
Pressure , GPa	0.036	0.105	0.171	0.236	0.305	0.38	0.514	0.647	0.78						
Viscosity , Pa · s	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024										
α , 1/GPa	25.03	16.85	16.13	15.22	14.59										
40°C															
Pressure increment , GPa															
Pressure , GPa															
Viscosity , Pa · s															
α , 1/GPa															
70°C															
Pressure increment , GPa						0.059	0.056								
Pressure , GPa					0	0.439	0.57								
Viscosity , Pa · s					0.005838	0	0								
α , 1/GPa						11.07	10.9								
100°C															
Pressure increment , GPa						0.116	0.114	0.1	0.083						
Pressure , GPa					0	0.496	0.628	0.747	0.863						
Viscosity , Pa · s					0.003167	0	0	0	0						
α , 1/GPa						9.2	9.01	9.16	8.53						
150°C															
Pressure increment , GPa							0.18	0.161	0.138						
Pressure , GPa					0		0.694	0.808	0.918						
Viscosity , Pa · s					0.001553		0.216933	0.474567	0.878408						
α , 1/GPa							7.14	7.1	6.92						

表 4-13 圧力-粘度データ (SR4)

24°C	0.032
40°C	0.017
70°C	0.006487
100°C	0.003281
150°C	0.001481

SR4(150c1)					100°C	0.003281		
24°C					150°C	0.001481		
Nominal loading screw angle , deg	63	72	81	90	99	117	135	153
Effective angle , deg	9.6	18.6	27.6	36.6	45.6	63.6	81.6	99.6
Pressure , GPa	0.071	0.139	0.207	0.271	0.337	0.471	0.604	0.737
Viscosity , Pa · s	0.170484	0.513252	1.495	4.39				
α , 1/GPa	23.56	19.96	18.57	18.16				
40°C								
Pressure increment , GPa					0.037			
Pressure , GPa				0	0.374			
Viscosity , Pa · s				0.017	4.733			
α , 1/GPa					15.05			
70°C								
Pressure increment , GPa					0.082	0.069		
Pressure , GPa				0	0.419	0.54		
Viscosity , Pa · s				0.006487	1.079	4.768		
α , 1/GPa					12.21	12.22		
100°C								
Pressure increment , GPa					0.136	0.127	0.121	0.102
Pressure , GPa				0	0.473	0.598	0.725	0.839
Viscosity , Pa · s				0.003281	0.370211	1.23	4.158	10.48
α , 1/GPa					9.99	9.91	9.85	9.62
150°C								
Pressure increment , GPa					0.203	0.199	0.183	0.157
Pressure , GPa				0	0.543	0.665	0.787	0.894
Viscosity , Pa · s				0.001481	0.103386	0.278587	0.692293	1.382
α , 1/GPa					7.82	7.88	7.81	7.65
SR4(150c2)								
24°C								
Nominal loading screw angle , deg	63	72	81	90	108	126	144	
Effective angle , deg	11.4	20.4	29.4	38.4	56.4	74.4	92.4	
Pressure , GPa	0.089	0.156	0.222	0.284	0.417	0.551	0.684	
Viscosity , Pa · s	0.195283	0.608125	1.908					
α , 1/GPa	20.32	18.88	18.41					
40°C								
Pressure increment , GPa				0.03				
Pressure , GPa			0	0.314				
Viscosity , Pa · s			0.017	2.2				
α , 1/GPa				15.49				
70°C								
Pressure increment , GPa				0.075	0.07			
Pressure , GPa			0	0.359	0.487			
Viscosity , Pa · s			0.006487	0.523431	2.553			
α , 1/GPa				12.23	12.27			
100°C								
Pressure increment , GPa				0.127	0.127	0.127	0.115	
Pressure , GPa			0	0.411	0.544	0.678	0.799	
Viscosity , Pa · s			0.003281	0.195576	0.702453	2.864	7.725	
α , 1/GPa				9.95	9.86	9.99	9.72	
150°C								
Pressure increment , GPa				0.198	0.196	0.189	0.175	
Pressure , GPa			0	0.482	0.613	0.742	0.859	
Viscosity , Pa · s			0.001481	0.060515	0.172028	0.45662	1.248	
α , 1/GPa				7.7	7.76	7.72	7.84	

表 4-14 圧力－粘度データ (S-ATF)

Viscosity of atomosphric pressure(Pa・s)

24℃	0.055709
40℃	0.02972
70℃	0.012008
100℃	0.006161
150℃	0.002784

S-ATF(150c1)					100℃					0.006161					
24℃					150℃					0.002784					
Nominal loading screw angle , deg	63	72	81	99											
Effective angle , deg	8.25	17.25	26.25	44.25											
Pressure , GPa	0.059	0.126	0.196	0.327											
Viscosity , Pa · s	0.2078	0.514777	1.218												
α , 1/GPa	23.25	18.08	16.02												
40℃															
Pressure increment , GPa				0.03											
Pressure , GPa			0	0.357											
Viscosity , Pa · s			0.02972	2.73											
α , 1/GPa				12.66											
70℃															
Pressure increment , GPa				0.075											
Pressure , GPa			0	0.402											
Viscosity , Pa · s			0.012008	0.812891											
α , 1/GPa				10.49											
100℃															
Pressure increment , GPa				0.129											
Pressure , GPa			0	0.456											
Viscosity , Pa · s			0.006161	0.323566											
α , 1/GPa				8.69											
150℃															
Pressure increment , GPa				0.2											
Pressure , GPa			0	0.527											
Viscosity , Pa · s			0.002784	0.117519											
α , 1/GPa				7.10											
S-ATF(150c2)															
24℃															
Nominal loading screw angle , deg	63	72	81	99	108	117	135	153	171						
Effective angle , deg	11.63	20.63	29.63	47.63	56.63	65.63	83.63	101.63	119.63						
Pressure , GPa	0.085	0.152	0.222	0.356	0.426	0.489	0.619	0.752	0.885						
Viscosity , Pa · s	0.209505	0.532247	1.231	6.454	13.95	32.45									
α , 1/GPa	15.58	14.85	13.94	13.35	12.97	13.02									
40℃															
Pressure increment , GPa						0.022									
Pressure , GPa					0	0.508									
Viscosity , Pa · s					0.02972	13.5									
α , 1/GPa						12.04									
70℃															
Pressure increment , GPa						0.068	0.58								
Pressure , GPa					0	0.554	0.677								
Viscosity , Pa · s					0.012008	3.018	12.13								
α , 1/GPa						9.98	10.22								
100℃															
Pressure increment , GPa						0.126	0.113	0.095	0.064						
Pressure , GPa					0	0.612	0.732	0.847	0.949						
Viscosity , Pa · s					0.006161	1.036	3.496	9.34	11.71						
α , 1/GPa						8.37	8.66	8.65	7.96						
150℃															
Pressure increment , GPa						0.194	0.176	0.15	0.111						
Pressure , GPa					0	0.679	0.795	0.902	0.996						
Viscosity , Pa · s					0.002784	0.285746	0.880083	1.545	2.046						
α , 1/GPa						6.82	7.24	7.01	6.63						

表 4-15 圧力-粘度データ(ATF)

ATF(150c1)										
24°C										
Nominal loading screw angle, deg	54	63	72	81	90	99	108	126	144	162
Effective angle, deg	0.15	9.15	18.15	27.15	36.15	45.15	54.15	72.15	90.15	108.15
Pressure, GPa	0.001	0.068	0.134	0.201	0.268	0.334	0.401	0.534	0.667	0.8
Viscosity, Pa · s	0.106416	0.318073	0.947772	2.778	7.687	25.18				
α , 1/GPa		25.00	20.84	19.24	18.23	18.18				
40°C										
Pressure increment, GPa							0.019			
Pressure, GPa						0	0.42			
Viscosity, Pa · s						0.029892	22.81			
α , 1/GPa							15.8			
70°C										
Pressure increment, GPa							0.069	0.066		
Pressure, GPa						0	0.47	0.6		
Viscosity, Pa · s						0.011582	4.525	24.09		
α , 1/GPa							12.7	12.73		
100°C										
Pressure increment, GPa							0.129	0.126	0.103	
Pressure, GPa						0	0.53	0.66	0.77	
Viscosity, Pa · s						0.005809	1.355	5.284	16.53	
α , 1/GPa							10.29	10.32	10.33	
150°C										
Pressure increment, GPa							0.199	0.186	0.163	0.14
Pressure, GPa						0	0.6	0.72	0.83	0.94
Viscosity, Pa · s						0.002578	0.332353	0.965006	2.374	4.782
α , 1/GPa							8.1	8.23	8.22	8.01

Viscosity of atmospheric pressure(Pa · s)	
24°C	0.058092
40°C	0.029892
70°C	0.011582
100°C	0.005809
150°C	0.002578

表 4-16 圧力－粘度データ (5P4E)

Viscosity of atomosphric pressure(Pa・s)

24℃	2.622
40℃	0.466481
70℃	0.053706
100℃	0.01407
150℃	0.003682

5P4E(150c1)未知油							
24℃							
Nominal loading screw angle , deg	49.5	54	58.5	63	67.5	72	76.5
Effective angle , deg	2.8	7.3	11.8	16.3	20.8	25.3	29.8
Pressure , GPa	0.021	0.054	0.087	0.121	0.154	0.187	0.221
Viscosity , Pa・s	9.61	33.42	420.6				
α , 1/GPa	61.85	47.13	58.36				
40℃							
Pressure increment , GPa			0.032	0.032			
Pressure , GPa		0	0.119	0.153			
Viscosity , Pa・s		0.466481	32.29	131.8			
α , 1/GPa			35.61	36.89			
70℃							
Pressure increment , GPa			0.068	0.068	0.068		
Pressure , GPa		0	0.155	0.19	0.223		
Viscosity , Pa・s		0.053706	1.762	3.981	21.28		
α , 1/GPa			22.52	22.66	26.83		
100℃							
Pressure increment , GPa			0.105	0.108	0.11	0.113	0.115
Pressure , GPa		0	0.192	0.229	0.265	0.301	0.337
Viscosity , Pa・s		0.01407	0.352897	0.633495	1.654	4.133	12.6
α , 1/GPa			16.78	16.63	17.99	18.88	20.17
150℃							
Pressure increment , GPa			0.117	0.181	0.182	0.185	0.187
Pressure , GPa		0	0.265	0.302	0.337	0.373	0.409
Viscosity , Pa・s		0.003682	0.048394	0.104295	0.204241	0.336317	0.562091
α , 1/GPa			9.72	11.07	11.92	12.10	12.29
5P4E(150c2)未知油							
24℃							
Nominal loading screw angle , deg	49.5	54	58.5	67.5	76.5	85.5	
Effective angle , deg	3.4	7.9	12.4	21.4	30.4	39.4	
Pressure , GPa	0.025	0.058	0.092	0.158	0.225	0.292	
Viscosity , Pa・s	16.12	76	1355				
α , 1/GPa	72.64	58.05	67.91				
40℃							
Pressure increment , GPa			0.032				
Pressure , GPa		0	0.124				
Viscosity , Pa・s		0.466481	68.74				
α , 1/GPa			40.27				
70℃							
Pressure increment , GPa			0.068				
Pressure , GPa		0	0.16				
Viscosity , Pa・s		0.053706	2.682				
α , 1/GPa			24.44				
100℃							
Pressure increment , GPa			0.105	0.11	0.115		
Pressure , GPa		0	0.197	0.268	0.34		
Viscosity , Pa・s		0.01407	0.465086	1.79	19.05		
α , 1/GPa			17.76	16.37	21.08		
150℃							
Pressure increment , GPa			0.177	0.182	0.187	0.193	
Pressure , GPa		0	0.27	0.34	0.412	0.485	
Viscosity , Pa・s		0.003682	0.086938	0.204962	0.691028	2.279	
α , 1/GPa			11.71	11.86	12.67	13.25	

第 5 章 結 論

簡便な潤滑油の高圧粘度測定のために当研究室で確立した高圧装置の簡易圧力評価法を用いて，低粘度エンジン油基油，トラクション試作油などの高圧粘度を 1GPa，150℃まで測定した．結果を下記にまとめる．

(1) 市販のトラクション油ではルビー蛍光法で得られた既存高圧粘度データとの整合性が見られ，低圧のデータが拡充できた．新開発の CVT トラクション試作油では粘度圧力係数が室温付近で若干低めで高温ではほぼ同じことがわかった．これは低温流動性が改良されたことに起因すると考えられる．

(2) 高粘度指数の低粘度エンジン油基油，ATF 油では鉱油基油のものより水素化精製，合成油の方が，粘度圧力係数が室温付近で若干低めで，高温では差異は少なく，低温流動性が良好なことに起因すると考えられる．また，鉱油基油のものでは低粘度（10Pas 程度）で結晶化がみられ，結晶化温度と圧力の関係図を作成した．

(3) 圧力-対数粘度グラフ特性は低粘度エンジン油基油，ATF 油ではいずれの油，温度で上に凸形状で Roelands の式でほぼ回帰でき，外挿線も高圧粘度予測に有効であることを示した．トラクション油では凹凸があり WLF 式でほぼ回帰できた．

謝 辞

最後に、本研究を遂行するにあたり始終懇切丁寧なご指導を賜った中村裕一准教授、松井正仁准教授に深く感謝いたします。そして、数多くのご協力をいただいたナノプロセッシング研究室・村井健一技術専門員に心からお礼申し上げます。さらに、実験に際し数多くのご協力いただいた伊藤貴司氏、田中祐介氏、岩崎辰哉氏、清水亮太氏ならびにナノプロセッシング研究室諸氏に心からお礼申し上げます。

参考文献

- (1) Y. Nakamura, I. Fujishiro & H. Tsubo : Evaluation of Viscosity for Synthetic raction Oils by DAC and Traction Characteristics, Macro/Micro/Meso Mechanical Properties of Materials, Proc. IMMM'97 (1998), p505.
- (2) Y. Nakamura, I. Fujishiro & S. Nomura : Evaluation of Viscosity and Phas Transition on Mineral Oils up to 1.9 GPa and 150 °C by DAC, Proc. of Joint AIRAPT-16&HPCJ-38 Int. Conf. Kyoto, 7 (1998), p1204.
- (3) 藤城郁哉・中村裕一・榊井克修：応力緩和による潤滑油の高圧力粘弾性測定法,日本機械学会論文集 (C編), 55, 510 (1989), p424.
- (4) 中村裕一・西部潔・濱坂修・藤城郁哉・黒崎靖：潤滑油の高圧力レーザー光散乱測定と力学特性評価(第3報),日本機械学会論文集 (C編), 64, 623 (1998), p2647.
- (5) 中村裕一・角田正幸・松井達哉・藤城郁哉：潤滑油の高圧力レーザー光散乱測定と力学特性評価 (第4報), 日本機械学会論文集 (C編), 65, 635 (1999), p2886.
- (6) 伊藤貴司：DAC高温高圧粘度測定装置の簡易圧力評価, 平成18年度修士論文 (三重大学工学部) (2006)
- (7) アイリング：絶対反応速度論 (下), 吉岡書店, (1964), p.496.
- (8) 村木正芳：高粘度指数鉱油の粘度-圧力-温度特性と EHL トラクション, 日本機械学会論文集 (C編), 69,685 (2003-9), p.2484-2485
- (9) 通商産業省工業技術院編, 特別研究報告集, 日本産業技術振興協会, (1983), p.177.
- (10) S.Yasutomi,他2名, Trans.ASME,J.Trib,106 (1984), p291.
- (11) 安富 清治郎：潤滑油のレオロジー, 潤滑, 32, 6, (1987), p.394.
- (12) Scott Bair・Jacek Jarzynski・Ward O. Winer : The temperature, pressure and time dependence of lubricant viscosity ,Tribology International 34 (2001), p461-468.
- (13) 中村裕一・三田 和之・松保 英紀：2GPa,200 °Cまでのトラクション油の高圧粘度測定, トライボロジスト, 50, 4 (2005), p354-359
- (14) 中村 裕一：高圧粘度とトラクション特性, トライボロジスト, 46, 5, (2001), p.369.

- (15) 松 弘 智：昭和 59 年度修士論文（三重大学工学部）（1985）.
- (16) 藤城ら：機械学会論文集， 53-494，（1987）， p.2121.
- (17) R.G.Munro・S.Block・G.J.Piermarini，“ Wall Effects in a Diamond-Anvil Pressure-Cell Falling-Sphere Viscometer， ” J.Appl. Phys.， Vol.50， No.5，（1979）， p.3180.
- (18) 中村・黒崎・大野：潤滑油の高圧レーザー光散乱測定と力学特性評価（第 5 報），日本機械学会論文集（C 編）， 68， 673，（2002）.
- (19) ASME Research Publication：Pressure-Viscosity Report， Vol.I & II，（1953） Am. Soc. Mech. Engrs., New York.
- (20) 中村裕一・伊藤貴司・松井正仁：ダイヤモンドアンビルセル高圧装置の簡易圧力評価法の確立と潤滑油の高圧粘度測定，トライボロジスト， 53， 5，（2008）， p332-338

付録 1 温度制御装置の操作法

DAC 昇温において，温度制御が自動化できる温度制御装置（CHINO, SU12-1221N3W）を用いた．今回，使用に関しての設定事項は，目標温度 SV と出力電圧 OUTPUT LIMIT である．他の項目について変更する必要はない．設定方法を以下に示す．

- (1) CONTROL POWER のスイッチを入れる．
- (2) 操作盤の MODE ボタンを 1 回押し，設定モードに切り替える．MODE ボタンを押す毎に，設定モード⇔動作表示モードのように切り替わる．
- (3) SELECT ボタンを 1 回押しして SV の設定項目を表示させ，> ボタンで SV の変更したい桁へカーソルを動かし，∧，∨ ボタンで数値を変え，最後に ENT を押す．
- (4) 次に SELECT ボタンを 4 回押しして OUTPUT LIMIT の設定項目を表示させ最小値 L と最大値 H を (3) 同様に変更する．表示される単位は % だが，実際は出力電圧の単位 V とみなしてよく，設定範囲は 0 % ～ 105 % である．ここでは，H のみを最大の 105% に設定し，ENT を押す．
- (5) MODE ボタンを 2 回押しして動作表示モードに変え，LOAD POWER のスイッチを入れて昇温を開始する．
- (6) 目標温度に近づいたら，もう一度 MODE ボタンと SELECT ボタンで OUTPUT LIMIT の設定項目を表示させ，L と H を設定し直す．これは，目標温度達成後の圧力室内の温度変動を抑えるためである．設定値は目標温度により異なり，その都度様子を見ながら温度変動がなるべく小さくなるよう調整する．目安として，L が約 50 % ～ 60 % に対し，H が約 70 % ～ 100 % である．
- (7) 昇温が終了したら LOAD POWER の電源を切り，実験終了後に CONTROL POWER の電源を切る．

球落下法 黄緑色：各実験で変更 ピンク：各セッティングで変更 黄色：油で変更

実験番号(油名など)=TDF3000

PMA:=0

圧力(MPa)

$n_0 := 1.510$

常圧屈折率1.45

トラクション油1.5

$$A := \frac{82.94}{2}$$

球半径(μm)

∞

$$REF1 := \frac{(n_0)^2 - 1}{(n_0)^2 + 2} + \frac{0.00059PMA}{1 + 0.00171PMA} \cdot \frac{(n_0)^2 - 1}{(n_0)^2 + 2}$$

$$L1 := \frac{462.7}{2}$$

圧力室厚さ/2(μm)

屈折率1の時

$$REF := \frac{\sqrt{2 \cdot REF1 + 1}}{\sqrt{1 - REF1}}$$

$$R := \frac{794.444}{2}$$

ガスケット穴半径(μm)

$L := REF1$

REF=1.51

高圧屈折率

T:=273+24

温度(K)

常圧粘度(mPas)

V0:=70.034

常温試料油密度(g/cm3)

L=349.338

圧力室厚さ/2(μm)

ROLO1=0.9707

KTF1のみ0.96

$$AL := \frac{A}{L}$$

AL=0.119

ROS:=8.92

球密度(g/cm3)

$$ROLO := ROLO1 \cdot \frac{1}{1 + 6.61210^{-4} \cdot (T - 297)}$$

$$ROL := ROLO \left(1 + 0.00059 \frac{PMA}{1 + 0.00171PMA} \right)$$

高圧試料油密度

ROL=0.971

(g/cm3)

ROLO=0.971

SEC:=0.33

(s)

落下時間

DIV:=120

(μm)

$$V := \frac{DIV}{SEC}$$

V=363.636

(μm/s)

$$GAL1 := (1 - 1.695AL + 2.719AL^2 - 4.359AL^3 + 2.195AL^4 + 0.140AL^5)$$

$$GAL2 := \exp(-2.719AL^2)$$

$$GAL := GAL1 \cdot GAL2$$

$$AAL := 1.197 - 1.344AL + 0.313AL^2$$

$$LGAL := 1 - AL - GAL$$

$$GMA := LGAL \left[1 - \exp \left[-AAL \cdot \left(\frac{R}{L} - 1 \right) \right] \right] + GAL$$

GMA=0.81

$$VISa := \frac{(ROS - ROL) \cdot 9.812 \cdot A^2}{9 \cdot V}$$

VISa=81.957

見かけの粘度

$$VIS := GMA \cdot VISa$$

VIS=66.384

(mPas)

$$ALPHA := \frac{\ln \left(\frac{VIS}{V0} \right)}{PMA \cdot 10^{-3}}$$

ALPHA=

1/GPa

付録3 Walter の式による常圧粘度算出プログラム

(Walter (TDF3000) 24-150-rsg 完成)

WALTERSG MCD

MathCAD基本命令 「:」式、変数定義 「:=」数値 「;」レンジ変数範囲
「@」グラフ 「&」積分 日本語は入力しなくてよい

[K]

$$TL := 40 + 273$$

$$TH := 100 + 273$$

各温度動粘度入力 cSt

$$NUL := 32.86$$

$$NUH := 5.371$$

24Cの比重データ入力(水の密度で割る)

$$SG24 := 0.9707$$

$$ROL := \frac{SG24}{1 + 8 \cdot 10^{-4} \cdot (TL - 273 - 24)}$$

$$ROH := \frac{SG24}{1 + 8 \cdot 10^{-4} \cdot (TH - 273 - 24)}$$

$$ROL = 0.958$$

$$ROH = 0.915$$

$$k := 0.7$$

$$A := \frac{\log(\log((NUH) + k)) - \log(\log((NUL) + k))}{\log(TL) - \log(TH)}$$

$$A = 3.802$$

$$B := (\log(\log((NUL) + k))) + A \cdot \log(TL)$$

$$B = 9.672$$

$$SG(t) := (ROL - ROH) \cdot \frac{t - TL}{TL - TH} + ROH$$

$$thc := \begin{bmatrix} 24 \\ 40 \\ 70 \\ 100 \\ 150 \end{bmatrix} \quad \text{求めたい温度 (K)} \quad th := thc + 273 \quad th = \begin{bmatrix} 297 \\ 313 \\ 343 \\ 373 \\ 423 \end{bmatrix} \quad SG(th) = \begin{bmatrix} 0.97 \\ 0.958 \\ 0.937 \\ 0.915 \\ 0.879 \end{bmatrix} \quad [g/cm^3]$$

$$j := 0..4 \quad U_{1j} := 10^{B - A \cdot \log(th_j)} \quad U_j := 10^{U_{1j}} - k \quad vis0_j := U_j \cdot SG(th_j)$$

$$[m^2/s]$$

$$[mpa \cdot s]$$

thc _j	vis0 _j
24	70.034
40	31.494
70	10.538
100	4.915
150	2.073

$$SG(th) = \begin{bmatrix} 0.97 \\ 0.958 \\ 0.937 \\ 0.915 \\ 0.879 \end{bmatrix}$$

付録 4 HC4 の Roelands の式

HC4, Roelands 村木 O 3 論文係数 HC-2

$s_0 := 1.0629$

$vis0R := 0.0189$

$z := 0.6183$

$T_0 := 30$

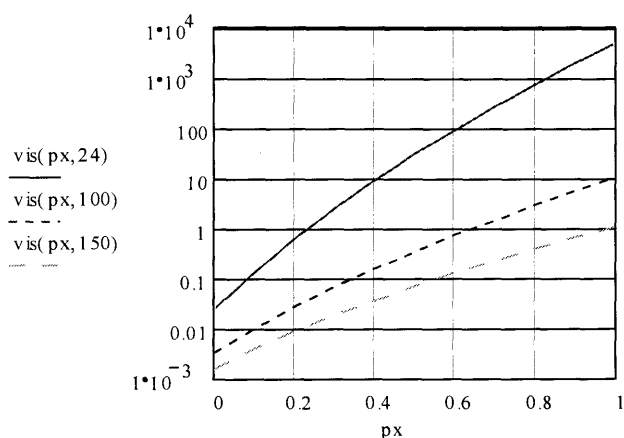
$T := 30$

$px := 0, 0.1..1$

$$alphasp(px, T) := (\ln(vis0R) + 9.67) \cdot \left[\left(\frac{T + 135}{T_0 + 135} \right)^{-s_0} \cdot (1 + 5.1 \cdot px)^z - 1 \right]$$

$$vis(px, T) := vis0R \cdot \exp(alphasp(px, T))$$

Pas



px	vis(px, 24)	vis(px, 100)
0	0.024	3.16710^{-3}
0.1	0.133	9.86510^{-3}
0.2	0.6	0.027
0.3	2.358	0.066
0.4	8.36	0.152
0.5	27.395	0.333
0.6	84.241	0.698
0.7	245.731	1.416
0.8	685.429	2.787
0.9	1.83910^3	5.347
1	4.77210^3	10.033

vis (圧力 (GPa), 温度 (°C)) Pa·s

$$vis(0.1485, 24) = 0.282$$

$$vis(0.033, 24) = 0.043$$

$$vis(0.0755, 24) = 0.089$$

px	vis(px, 40)	vis(px, 70)	vis(px, 150)
0	0.013	5.83810^{-3}	1.53310^{-3}
0.1	0.063	0.022	3.86710^{-3}
0.2	0.247	0.069	8.70310^{-3}
0.3	0.85	0.195	0.018
0.4	2.667	0.513	0.036
0.5	7.789	1.269	0.068
0.6	21.481	2.991	0.124
0.7	56.485	6.771	0.221
0.8	142.65	14.816	0.384
0.9	347.9	31.475	0.653
1	822.929	65.162	1.09

付録5 SR4 の Roelands の式

SR4, Roelands 村木 O 3 論文係数SR-1

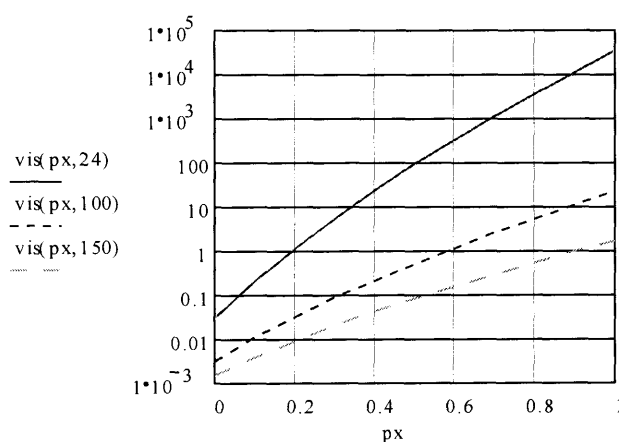
$s_0 := 1.1652$ $\text{vis}0R := 0.0246$ $z := 0.6486$ $T_0 := 30$
 $T := 30$

$px := 0, 0.1..1$

$$\text{alphasp}(px, T) := (\ln(\text{vis}0R) + 9.67) \cdot \left[\left(\frac{T + 135}{T_0 + 135} \right)^{-s_0} \cdot (1 + 5.1 \cdot px)^z - 1 \right]$$

Pas

$\text{vis}(px, T) := \text{vis}0R \cdot \exp(\text{alphasp}(px, T))$



px	vis(px, 24)	vis(px, 100)
0	0.032	$3.281 \cdot 10^{-3}$
0.1	0.216	0.011
0.2	1.17	0.032
0.3	5.482	0.086
0.4	23.102	0.213
0.5	89.614	0.504
0.6	325.094	1.142
0.7	$1.115 \cdot 10^3$	2.496
0.8	$3.649 \cdot 10^3$	5.293
0.9	$1.146 \cdot 10^4$	10.937
1	$3.469 \cdot 10^4$	22.086

vis(圧力(GPa), 温度(°C))Pa.s

$\text{vis}(0.1485, 24) = 0.5$

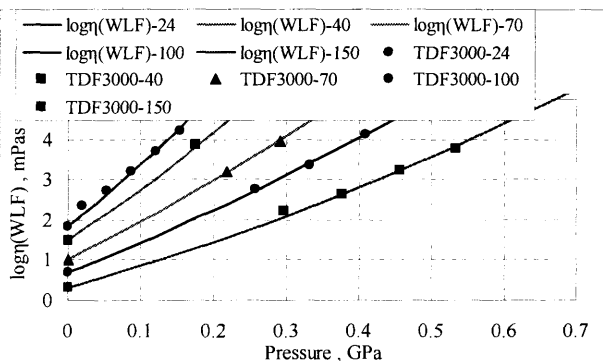
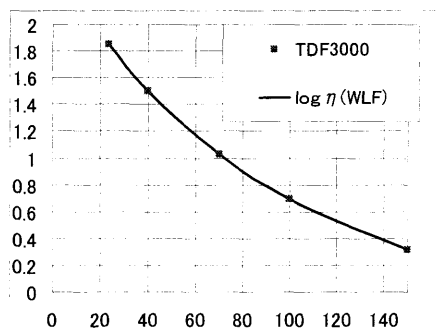
$\text{vis}(0.033, 24) = 0.062$

$\text{vis}(0.0755, 24) = 0.139$

px	vis(px, 40)	vis(px, 70)	vis(px, 150)
0	0.017	$6.487 \cdot 10^{-3}$	$1.481 \cdot 10^{-3}$
0.1	0.091	0.027	$3.896 \cdot 10^{-3}$
0.2	0.414	0.094	$9.172 \cdot 10^{-3}$
0.3	1.648	0.297	0.02
0.4	5.964	0.867	0.042
0.5	20.048	2.376	0.083
0.6	63.467	6.194	0.159
0.7	191.137	15.494	0.296
0.8	551.679	37.412	0.54
0.9	$1.535 \cdot 10^3$	87.609	0.965
1	$4.134 \cdot 10^3$	199.714	1.691

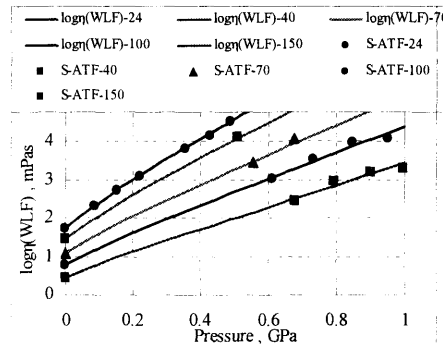
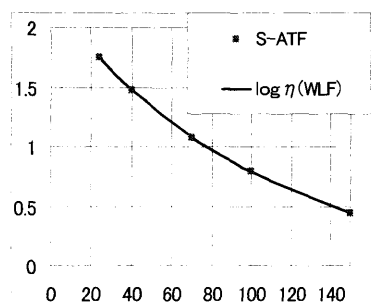
付録6 実験データ WLF 回帰シート (TDF3000)

	Mug/Pas		A1/C	A2/1/GPa	B1	B2/1/GPa	C1	C2/C	Tgo/C		
TDF3000	10 ⁻⁷		134.36	0.899	0.092	101.743	11.18	33.24	-65.712959		
	TDF3000		156.524867	2.29036956	0.78125481	10.9634581		5.25752299	1.90796415		
			Bridgman								
$\eta(\text{exp})/\eta(\text{WLF})$			in Pa.s	$\log \eta(\text{exp})$	$\log \eta(\text{WLF})$			$\eta(\text{WLF, Pas})$			
error	T, C	p/GPa	$\eta(\text{exp})$	mPas	mPas	square error	重み		T-TS(0)	F(p)	
0.1	0.9993705	24	0	0.070034	1.84530893	1.84558241	7.4789E-08	0.07007811	89.7129589	1	
-0.1	1.00118584	40	0	0.031494	1.49822782	1.49771313	2.6492E-07	0.0314567	105.712959	1	
0.1	0.99933252	70	0	0.010538	1.02275819	1.02304818	8.4089E-08	0.01054504	135.712959	1	
0	0.99997438	100	0	0.004915	0.69152352	0.69153465	1.2384E-10	0.00491513	165.712959	1	
0	1.00007798	150	0	0.002073	0.3165993	0.31656544	1.1469E-09	0.00207284	215.712959	1	
						4.2506E-07					
100	0	24	0	#NUM!	1.84558241	#NUM!		1	70.0781145	89.7129589	1
	Mug/Pas	Tgo/C	A1/C	A2/1/GPa	B1	B2/1/GPa	C2/C	C1			
							11	23.28			
TDF3000			69.03	6.59124	0.0708	94.18	23.28	11			
i-pro-alcol	0	-165	134.36	0.89924	0.0925	101.743	26	11			
DOS	10 ⁻⁷	-89.7	111.5	0.558	0.217	25.3	31.69	11.17			
SN50	10 ⁻⁷	-54.7	76.77	3.348	0.282	17.47	26.59	10.96			
TDF3000	10 ⁻⁷	-65.712959	79.3	4.39014	0.53439	4.554	33.236	11.175			
							11.18	33.24	-65.71		
	TDF3000		156.524867	2.29036956	0.78125481	10.9634581		5.25752299	1.90796415		
			Bridgman								
$\eta(\text{exp})/\eta(\text{WLF})$			in Pa.s	$\log \eta(\text{exp})$	$\log \eta(\text{WLF})$			$\eta(\text{WLF, Pas})$			
error	T, C	p/GPa	$\eta(\text{exp})$	mPas	mPas	square error	重み		T-TS(p)	F(p)	
0.1	0.9993705	24	0	0.070034	1.84530893	1.84558241		0.07007811	89.7129589	1	70.034
-58.1	1.58142329	24	0.02	0.212786	2.32794305	2.12889492		0.13455348	83.0390087	0.95342292	212.786
-21.2	1.21239535	24	0.054	0.521148	2.71696108	2.63331681	0.00699636	0.42984988	72.8422025	0.88251409	521.148
-10.7	1.10727898	24	0.087	1.564	3.19423675	3.14997969	0.00195869	1.4124715	64.0599374	0.82166156	1564
-2.3	1.02293194	24	0.12	5.034	3.70191321	3.69206647	9.6958E-05	4.92114854	56.1540278	0.76703548	5034
11	0.89005075	24	0.154	16.76	4.22427401	4.27485924	0.00255887	18.8303869	48.757352	0.71604685	16760
#DIV/0!											
-0.1	1.00118584	40	0	0.031494	1.49822782	1.49771313	2.6492E-07	0.0314567	105.712959	1	31.494
-19.5	1.19487561	40	0.175	7.375	3.86776203	3.79043933	0.0059788	6.17219061	60.5111455	0.68682346	7375
0	0.98016276	40	0.241	57.06	4.75633177	4.76503357	7.5721E-05	58.2148216	48.4778823	0.60417795	57060
#DIV/0!											
0.1	0.99933252	70	0	0.010538	1.02275819	1.02304818	8.4089E-08	0.01054504	135.712959	1	10.538
-8.1	1.08116961	70	0.218	1.629	3.21192108	3.17802726	0.00114879	1.50670162	82.4673221	0.63155136	1629
7.6	0.92436859	70	0.291	9.02	3.95520654	3.98936136	0.00116655	9.75801227	70.4410866	0.54910666	9020
-8.7	1.08716105	70	0.366	76.66	4.88456882	4.84827493	0.00131725	70.5139317	59.7332385	0.47586951	76660
#DIV/0!											
0	0.99997438	100	0	0.004915	0.69152352	0.69153465	1.2384E-10	0.00491513	165.712959	1	4.915
-3	1.02971773	100	0.258	0.557356	2.74613268	2.73341449	1.6175E-04	0.54127067	105.653026	0.58481014	557.356
14.8	0.85248689	100	0.333	2.187	3.33984878	3.40916108	0.00480419	2.56543536	94.2676512	0.50686499	2187
3.3	0.96661518	100	0.409	12.81	4.10754913	4.12229552	2.1746E-04	13.25243	84.1889227	0.43800419	12810
-4.5	1.04517033	100	0.482	69.8	4.84385542	4.82466835	3.6814E-04	66.7833733	75.5823791	0.37929246	69800
#DIV/0!											
0	1.00007798	150	0	0.002073	0.3165993	0.31656544	1.1469E-09	0.00207284	215.712959	1	2.073
-37.8	1.37788973	150	0.296	0.159792	2.20355503	2.06434057	0.01938067	0.11596864	149.68045	0.54389925	159.792
-4.9	1.04858271	150	0.376	0.437679	2.64115571	2.62055302	4.2447E-04	0.41740055	138.408842	0.46682118	437.679
-0.7	1.00724154	150	0.457	1.685	3.22659991	3.22346628	9.8196E-06	1.67288574	128.425891	0.39868158	1685
10.8	0.89223086	150	0.533	5.964	3.77553764	3.8250604	0.0024525	6.68436869	120.079786	0.34179454	5964
						0.04911734					



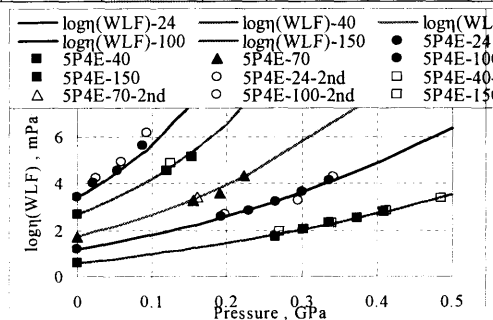
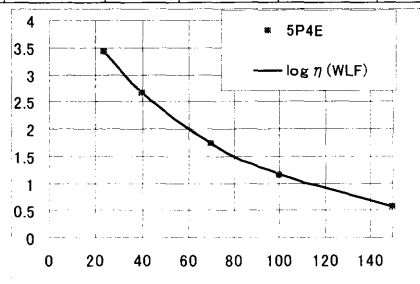
(S-ATF)

		Mug/Pas		A1/C	A2/1/GPa	B1	B2/1/GPa	C1	C2/C	Tgo/C		
	S-ATF	10 ⁻⁷		134.36	0.899	0.092	101.743	11.13	39.38	-89.046774		
	S-ATF			156.524867	2.29036956	0.78125481	10.9634581		5.25752299	1.90796415		
				Bridgman								
	η (exp) / η (WLF)			in Pa.s	$\log \eta$ (exp)	$\log \eta$ (WLF)			η (WLF, Pas)			
	error	T. C	p/GPa	η (exp)	mPas	mPas	square err	重み		T-TS(0)	F(p)	
0	0.99962636	24	0	0.055709	1.74592536	1.74608766	2.6341E-08	1	0.05572982	113.046774	1	
0	1.00026436	40	0	0.02972	1.47304881	1.47293401	1.3178E-08	1	0.02971215	129.046774	1	
0	0.9999304	70	0	0.012008	1.07947068	1.07950091	9.1382E-10	1	0.01200884	159.046774	1	
-0.1	1.00055951	100	0	0.006161	0.78965121	0.78940829	5.9011E-08	1	0.00615756	189.046774	1	
0	0.99960861	150	0	0.002784	0.44466923	0.44483924	2.8904E-08	1	0.00278509	239.046774	1	
							1.2835E-07					
100	0	24	0	#NUM!	1.74608766	#NUM!		1	55.7298228	113.046774	1	
		Mug/Pas	Tgo/C	A1/C	A2/1/GPa	B1	B2/1/GPa	C2/C	C1			
								11	23.28			
	S-ATF			69.03	6.59124	0.0708	94.18	23.28	11			
	i-pro-alcol	0	-165	134.36	0.89924	0.0925	101.743	26	11			
	DOS	10 ⁻⁷	-89.7	111.5	0.558	0.217	25.3	31.69	11.17			
	SN50	10 ⁻⁷	-54.7	76.77	3.348	0.282	17.47	26.59	10.96			
	S-ATF	10 ⁻⁷	-89.046774	88.58	1.11127	0.29643	8.648	39.382	11.129			
								11.13	39.38	-89.046774		
	S-ATF			156.524867	2.29036956	0.78125481	10.9634581		5.25752299	1.90796415		
				Bridgman								
	η (exp) / η (WLF)			in Pa.s	$\log \eta$ (exp)	$\log \eta$ (WLF)			η (WLF, Pas)			
	error	T. C	p/GPa	η (exp)	mPas	mPas	square err	重み		T-TS(p)	F(p)	
0	0.99962636	24	0	0.055709	1.74592536	1.74608766	2.6341E-08	1	0.05572982	113.046774	1	55.709
-411.9	5.11875865	24	0.085	1.055709	2.32119439	2.31437957	4.6442E-05	1	0.20624317	105.051744	0.83665997	209.505
-293.5	3.93520674	24	0.152	2.055709	2.72611322	2.71799408	6.592E-05	1	0.52238907	99.2219415	0.75125036	532.247
-132.9	2.32896215	24	0.222	3.055709	3.09025805	3.11794956	0.00076682	1	1.31204752	93.5150633	0.68237929	1231
42.1	0.57861844	24	0.356	4.055709	3.80982896	3.84567452	0.0012849	1	7.00929792	83.5206144	0.5833028	6454
68.9	0.31079585	24	0.426	5.055709	4.14457421	4.21130686	0.00445325	1	16.2669774	78.716094	0.54228157	13950
82.3	0.17746805	24	0.489	6.055709	4.5112147	4.53304482	4.7655E-04	1	34.1228126	74.604139	0.50966521	32450
-27012.5	271.125122	40	0	8.055709	1.47304881	1.47293401	1.3178E-08	1	0.02971215	129.046774	1	29.72
24.8	0.75209664	40	0.508	9.055709	4.13033377	4.08064881	0.0024686	1	12.0406189	89.4005831	0.50049374	13500
-91963.1	920.631203	70	0	11.055709	1.07947068	1.07950091	9.1382E-10	1	0.01200884	159.046774	1	12.008
-306.7	4.06746587	70	0.554	12.055709	3.47971924	3.47186884	6.1629E-05	1	2.96393612	116.552693	0.47939792	3018
-47.5	1.47517435	70	0.677	13.055709	4.0838608	3.94695711	0.01874262	1	8.850282	109.35898	0.42941175	12130
-244407.9	2445.07917	100	0	15.055709	0.78965121	0.78940829	5.9011E-08	1	0.00615756	189.046774	1	6.161
-1276.9	13.7692526	100	0.612	16.055709	3.01535976	3.06671912	0.00263778	1	1.16605523	143.087652	0.45477486	1036
-472.4	5.72390896	100	0.732	17.055709	3.54357142	3.47417706	0.00481558	1	2.97973101	136.322091	0.40952539	3496
-148.5	2.48542813	100	0.847	18.055709	3.97034688	3.86121334	0.01191013	1	7.26462727	130.289985	0.37181289	9340
-19.8	1.19776389	100	0.949	19.055709	4.0685569	4.2016539	0.01771481	1	15.9094035	125.263243	0.34195898	11710
-755915.4	7560.15372	150	0	21.055709	0.44466923	0.44483924	2.8904E-08	1	0.00278509	239.046774	1	2.784
-6705.2	68.0517467	150	0.68	22.055709	2.45598016	2.51068175	0.00299226	1	0.32410203	189.190619	0.42829195	285.746
-3233.2	33.3322115	150	0.795	23.055709	2.94452363	2.83991435	0.0109431	1	0.69169455	182.966788	0.38827404	880.083
-1611.1	17.1108402	150	0.902	24.055709	3.18892848	3.14794683	0.0016795	1	1.40587538	177.544106	0.35534281	1545
-852.1	9.52115511	150	0.996	25.055709	3.31090563	3.42021706	0.01194899	1	2.6315829	173.03964	0.32915342	2046
							0.09300901					



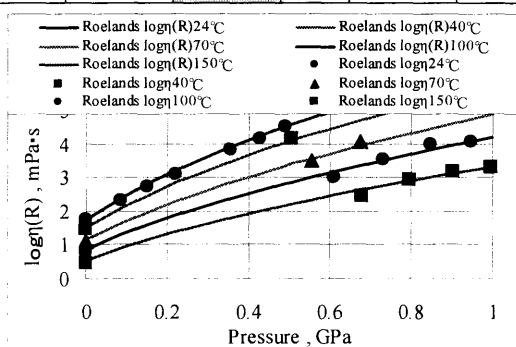
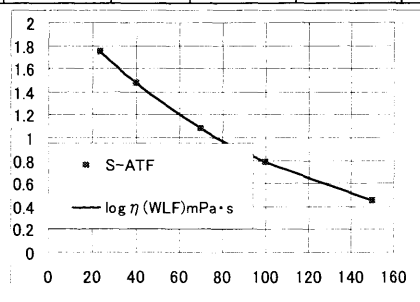
(5P4E)

		Mug/Pas		A1/C	A2/1/GPa	B1	B2/1/GPa	C1	C2/C	Tgo/C		
	5P4E	10 ⁻⁷		134.36	0.899	0.092	101.743	11.34	35.11	-24.489895		
	5P4E			156.524867	2.29036956	0.78125481	10.9634581		5.25752299	1.90796415		
				Bridgman								
	$\eta(\text{exp})/\eta(\text{WLF})$			in Pa.s	$\log \eta(\text{exp})$	$\log \eta(\text{WLF})$			$\eta(\text{WLF, Pas})$			
	error	T, C	p/GPa	$\eta(\text{exp})$	mPas	mPas	square error	重み		T-TS(0)	F(p)	
1.1	0.98920349	24	0	2.622	3.41863269	3.42334705	2.2225E-05		2.65061742	48.4898945	1	
-2.4	1.02428528	40	0	0.466481	2.66883396	2.65841303	1.086E-04	1	0.45542097	64.4898945	1	
0.7	0.99261165	70	0	0.053706	1.73002281	1.73324344	1.0373E-05		0.05410575	94.4898945	1	
1.7	0.98266618	100	0	0.01407	1.1482941	1.15588809	5.7669E-05	1	0.01431819	124.489895	1	
-1.2	1.01198786	150	0	0.003682	0.56608378	0.56090848	2.6784E-05	1	0.00363838	174.489895	1	
							2.2565E-04					
100	0	24	0	#NUM!		3.42334705	#NUM!	1	2650.61742	48.4898945	1	
		Mug/Pas	Tgo/C	A1/C	A2/1/GPa	B1	B2/1/GPa	C2/C	C1			
								11	23.28			
	5P4E			69.03	6.59124	0.0708	94.18	23.28	11			
	i-pro-alc	0	-165	134.36	0.89924	0.0925	101.743	26	11			
	DOS	10 ⁻⁷	-89.7	111.5	0.558	0.217	25.3	31.69	11.17			
	SN50	10 ⁻⁷	-54.7	76.77	3.348	0.282	17.47	26.59	10.96			
	5P4E	10 ⁻⁷	-24.489895	162.7	1.63711	36.58571	0.021	35.107	11.338			
								11.34	35.11	-24.489895		
	5P4E			156.524867	2.29036956	0.78125481	10.9634581		5.25752299	1.90796415		
				Bridgman								
	$\eta(\text{exp})/\eta(\text{WLF})$			in Pa.s	$\log \eta(\text{exp})$	$\log \eta(\text{WLF})$			$\eta(\text{WLF, Pas})$			
	error	T, C	p/GPa	$\eta(\text{exp})$	mPas	mPas	square error	重み		T-TS(p)	F(p)	
1.1	0.98920349	24	0	2.622	3.41863269	3.42334705		1	2.65061742	48.4898945	1	2622
-50.5	1.50495876	24	0.021	9.61	3.98272339	3.80519879		1	6.38555705	42.9903705	0.98355943	9810
-9.2	1.09212798	24	0.054	33.42	4.52400645	4.48573291	0.00146486	1	30.6008094	34.7071642	0.95773916	33420
-118.6	2.185974	24	0.087	420.6	5.62386927	5.28422428	0.11535872	1	192.40851	26.8253116	0.93193711	420600
	#DIV/0!											
-2.4	1.02428528	40	0	0.466481	2.66883396	2.65841303	1.086E-04	1	0.45542097	64.4898945	1	466.481
13.8	0.86179177	40	0.119	32.29	4.50906805	4.5736657	0.00417286	1	37.4684477	35.5304852	0.9069343	32290
	0.64420032	40	0.153	131.8	5.11991541	5.31089447	0.036473	1	204.594745	28.1221727	0.88038753	131800
	#DIV/0!											
0.7	0.99261165	70	0	0.053706	1.73002281	1.73324344	1.0373E-05	0	0.05410575	94.4898945	1	53.706
11.8	0.88253554	70	0.155	1.762	3.2460059	3.3004125	0.00296008	1	1.99715833	57.6967189	0.87882655	1762
31.1	0.68859861	70	0.19	3.981	3.59999218	3.76202604	0.02625497	1	5.78130705	50.4259099	0.85152026	3981
-21.7	1.2167686	70	0.223	21.28	4.32797162	4.24276363	0.0072604	1	17.4889457	43.8559495	0.82579298	21280
	#DIV/0!											
1.7	0.98266618	100	0	0.01407	1.1482941	1.15588809	5.7669E-05	0	0.01431819	124.489895	1	14.07
-6.1	1.0612425	100	0.192	0.352897	2.54764797	2.52183333	6.664E-04	1	0.33253191	80.0200884	0.84996051	352.897
12.7	0.87259522	100	0.229	0.633495	2.80174319	2.86093036	0.00350312	1	0.72598953	72.6894001	0.82111723	633.495
0.2	0.99820054	100	0.265	1.654	3.21853551	3.21931771	6.1184E-07	1	1.65698168	65.8604753	0.79307531	1654
-2	1.01976431	100	0.301	4.133	3.61626541	3.6077656	7.2247E-05	1	4.05289727	59.3066681	0.76505487	4133
-13.1	1.18103122	100	0.337	12.6	4.10037055	4.02810917	0.00522171	1	10.6686426	53.0066671	0.73705587	12600
	#DIV/0!											
-1.2	1.01198786	150	0	0.003682	0.56608378	0.56090848	2.6784E-05	1	0.00363838	174.489895	1	3.682
22.6	0.77369891	150	0.265	0.048394	1.68479152	1.79621954	0.0124162	1	0.06254888	115.860475	0.79307531	48.394
0.5	0.99474645	150	0.302	0.104295	2.01826349	2.02055109	5.2331E-06	1	0.10484581	109.128334	0.76427683	104.295
-15.7	1.1567324	150	0.337	0.204241	2.31014293	2.24691003	0.0039984	1	0.1765672	103.006667	0.73705587	204.241
-7.6	1.07615014	150	0.373	0.336317	2.52674882	2.49487595	0.00101588	1	0.31251866	96.9415447	0.70907827	336.317
2.1	0.97920897	150	0.409	0.562091	2.74980663	2.75893125	8.3259E-05	1	0.57402559	91.0944152	0.68112206	562.091
							0.22113137					



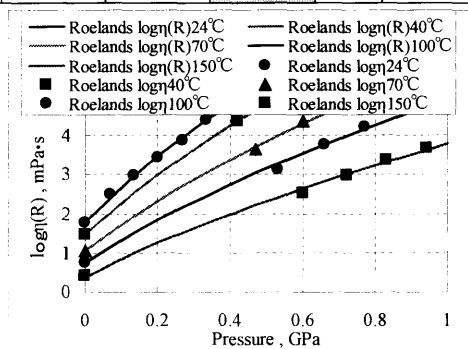
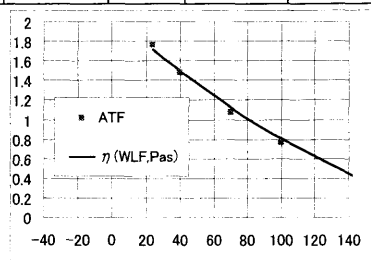
付録7 実験データ Roelands 式回帰シート (S-ATF)

	Mug/Pas		A1/C	A2/1/GPa	B1	B2/1/GPa	C1	C2/C	Tgo/C	
S-ATF	10 ⁻⁷		134.36	0.899	0.092	101.743	11.13	39.46	-89.178727	
S-ATF			156.524867	2.29036956	0.78125481	10.9634581		5.25752299	1.90796415	
			Bridgman							
$\eta(\text{exp})/\eta(\text{WLF})$			in Pa.s	$\log \eta(\text{exp})$	$\log \eta(\text{WLF})$			$\eta(\text{WLF, Pas})$		
error	T, C	p/GPa	$\eta(\text{exp})$	mPas	mPas	square error	重み	T-TS (0)	F(p)	
0.99994181	24	0	0.055709	1.74592536	1.74595063	6.3859E-10		0.05571224	113.178727	1
0.00025803	40	0	0.02972	1.47304881	1.47293676		1	0.02971233	129.178727	1
0.99974262	70	0	0.012008	1.07947068	1.07958248	1.2498E-08		0.01201109	159.178727	1
0.00045122	100	0	0.006161	0.78965121	0.78945529	3.8383E-08	1	0.00615822	189.178727	1
0.99983028	150	0	0.002784	0.44466923	0.44474295	5.4339E-09	1	0.00278447	239.178727	1
						5.6954E-08				
100	0	24	0	#NUM!	1.74595063	#NUM!	1	55.7122417	113.178727	1
	TR O	MuRo/Pas	So	Z						
S-ATF	24	0.055709	0.91	0.52885						
PA04	30	0.02	1.05	0.57						
		0.001								
			Bridgman							
$\eta(\text{exp})/\eta(\text{WLF})$			in Pa.s	$\log \eta(\text{exp})$	$\log \eta(\text{R})$			$\eta(\text{R, Pas})$		
error	T, C	p/GPa	$\eta(\text{exp})$	mPas	mPas	square error	重み	So, Tの項	Z, Pの項	
96.8	0.03190801	24	0	0.055709	1.74592536	1.74592536	0	0.055709	1	1
9.4	0.90638846	24	0.085	0.209505	2.32119439	2.36388002	0.00182206	0.23114262	1	1.20979241
13.8	0.86231293	24	0.152	0.532247	2.72611322	2.79044833	0.00413901	0.61723185	1	1.35461014
21.7	0.78304691	24	0.222	1.231	3.09025805	3.19647027	0.01128104	1.57206418	1	1.49245249
17.4	0.82615141	24	0.356	6.454	3.80982896	3.89276932	0.0068791	7.81212736	1	1.72884241
16.8	0.83166147	24	0.426	13.95	4.14457421	4.22462762	0.00640855	16.7736518	1	1.84150659
-0.6	1.00618892	24	0.489	32.45	4.5112147	4.50853517	7.1799E-06	32.2504048	1	1.93789173
6.2	0.93849887	40	0	0.02972	1.47304881	1.50061505	7.599E-04	0.03166759	0.91671842	1
-4.9	1.04936909	40	0.508	13.5	4.13033377	4.1094055	4.3799E-04	12.8648729	0.91671842	1.96613184
12.9	0.87057334	70	0	0.012008	1.07947068	1.13966532	0.00362339	0.01379321	0.79417785	1
16.2	0.83838511	70	0.554	3.018	3.47971924	3.55627568	0.00586089	3.59977769	0.79417785	2.03305161
-34.9	1.34868526	70	0.677	12.13	4.0838608	3.95395019	0.01687677	8.99394425	0.79417785	2.20304935
16.3	0.83657572	100	0	0.006161	0.78965121	0.86714596	0.00600544	0.00736455	0.70165894	1
30.1	0.69874445	100	0.612	1.036	3.01535976	3.17104138	0.02423677	1.48265936	0.70165894	2.11473044
-9.8	1.09771193	100	0.732	3.496	3.54357142	3.50308304	0.00163931	3.18480641	0.70165894	2.27538744
-47.1	1.47088666	100	0.847	9.34	3.97034688	3.80276767	0.02808279	6.34991142	0.70165894	2.42038863
-3	1.02986641	100	0.949	11.71	4.0685569	4.055776	1.6335E-04	11.3704067	0.70165894	2.54280568
18.9	0.811394	150	0	0.002784	0.44466923	0.53543744	0.00823887	0.00343113	0.58904562	1
32.6	0.67382259	150	0.679	0.285746	2.45598016	2.62743459	0.02939662	0.42406711	0.58904562	2.20571682
-13.9	1.13938594	150	0.795	0.880083	2.94452363	2.88785278	0.00321159	0.77241869	0.58904562	2.35580813
-18.4	1.18395894	150	0.902	1.545	3.18892848	3.11559184	0.00537826	1.3049439	0.58904562	2.48706491
-0.9	1.00864659	150	0.996	2.046	3.31090563	3.30716661	1.398E-05	2.02846073	0.58904562	2.5974785
							0.16446285			

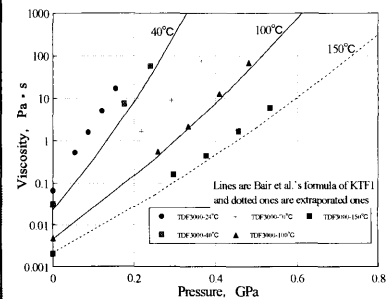


(ATF)

		Mug/Pas		A1/C	A2/1/GPa	B1	B2/1/GPa	C1	C2/C	Tgo/C	
ATF		10 ⁻⁷		134.36	0.899	0.092	101.743	13.71	149.42	-204.28581	
		ATF		156.524867	2.29036956	0.78125481	10.9634581		5.25752299	1.90796415	
				Bridgman							
η (exp)/ η (WLF)				in Pa.s	$\log \eta$ (exp)	$\log \eta$ (WLF)			η (WLF, Pas)		
error	T, C	p/GPa		η (exp)	mPas	mPas	square error	重み		T-TS (0)	F (p)
-12.2	1.1216654	24	0	0.058092	1.76411633	1.71425301	0.00248635		0.05179085	228.285813	1
4.1	0.95874884	40	0	0.029892	1.47555497	1.49385012		1	0.03117813	244.285813	1
13.2	0.86760862	70	0	0.011582	1.06378356	1.1254597	0.00380395		0.01334934	274.285813	1
9.2	0.90847926	100	0	0.005809	0.76410138	0.80578636	0.00173764	1	0.0063942	304.285813	1
-13.2	1.13153271	150	0	0.002578	0.41128291	0.3576158	0.00288016	1	0.00227833	354.285813	1
							0.0109081				
100	0	24	0	#NUM!	1.71425301	#NUM!		1	51.7908461	228.285813	1
		TR O	MuRo/Pas	So	Z						
ATF	24	0.058092		1.09	0.64025						
PA04	30	0.02		1.05	0.57						
		0.001									
				Bridgman							
η (exp)/ η (WLF)				in Pa.s	$\log \eta$ (exp)	$\log \eta$ (R)			η (R, Pas)		
error	T, C	p/GPa		η (exp)	mPas	mPas	square error	重み		So, Tの項	Z, Pの項
96.7	0.0329298	24	0	0.058092	1.76411633	1.76411633	0	1	0.058092		1
-30.6	1.30622881	24	0.068	0.318073	2.50252681	2.38650755	0.01346047	1	0.24350481	1	1.21000168
-9.5	1.09548833	24	0.134	0.947772	2.97670387	2.93709612	0.00156877	1	0.86515938	1	1.39577636
2.9	0.97061319	24	0.201	2.778	3.44373224	3.45668605	1.678E-04	1	2.86210822	1	1.57109175
12.9	0.87146742	24	0.268	7.687	3.88575688	3.94550573	0.00356993	1	8.82075434	1	1.73602491
0.4	0.99617323	24	0.334	25.18	4.40105573	4.40272086	2.7727E-06	1	25.2767282	1	1.89029436
-1.5	1.0151777	40	0	0.029892	1.47555497	1.4690129	4.2799E-05	1	0.02944509	0.90042884	1
-0.8	1.00811018	40	0.42	22.81	4.35812529	4.35461729	1.2306E-05	1	22.6264951	0.90042884	2.08130126
-4.4	1.04447047	70	0	0.011582	1.06378356	1.04488739	3.5707E-04	1	0.01108887	0.7573242	1
12	0.87986209	70	0.47	4.525	3.65561858	3.71120398	0.00308974	1	5.14285144	0.7573242	2.18792547
-19.3	1.19347813	70	0.6	24.09	4.3818368	4.30502233	0.00590046	1	20.1847016	0.7573242	2.45248969
-7.3	1.0732353	100	0	0.005809	0.76410138	0.73340643	0.00094218	1	0.00541261	0.65222708	1
27.2	0.72796818	100	0.53	1.355	3.1319393	3.2698269	0.01901299	1	1.86134509	0.65222708	2.31214473
0.4	0.99617968	100	0.66	5.824	3.76522137	3.76688369	2.7633E-06	1	5.8463349	0.65222708	2.56928288
-12.7	1.12652248	100	0.77	16.53	4.21827285	4.16653299	0.00267701	1	14.6734755	0.65222708	2.77603004
		150	0	0.002578	0.41128291	0.36566903	0.00208063	1	0.00232097	0.52814841	1
23.7	0.76269921	150	0.6	0.332353	2.5215996	2.63924631	0.01384075	1	0.43575894	0.52814841	2.45248969
3.6	0.96429067	150	0.72	0.965006	2.98453001	3.00032205	2.4939E-04	2	1.00074182	0.52814841	2.68316528
-14.5	1.14522297	150	0.83	2.374	3.37548072	3.31659066	0.00346804	1	2.07295877	0.52814841	2.88521555
-14.5	1.14483336	150	0.94	4.782	3.67960957	3.6208673	0.00345066	1	4.17702712	0.52814841	3.07960466
							0.07389651				

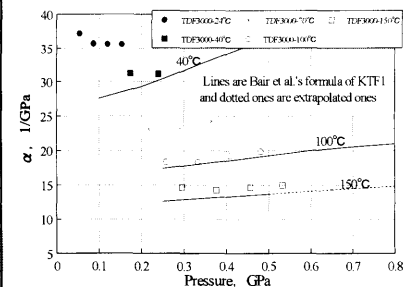


実験58未知油	空角: 51.25°	ガスケット: PCu, $\Phi 0.9$, t0.8	球: Cu, $\Phi 82.94$	油: TDF3000	屈折率逆算値: 1.510										
日付	11/26	11/26	11/26	11/26	11/26	11/26	11/26	11/26	11/26	11/26	11/26	11/26	11/26	11/26	11/26
測定温度 (°C)	24	24	24	24	24	24	24	24	40	70	100	150	100	70	40
見かけの加圧角 (°)	0	45	49.5	54	58.5	63	67.5	72	72	72	72	72	72	72	72
有効加圧角 (°)	0	0	0	2.75	7.25	11.75	16.25	20.75	20.75	20.75	20.75	20.75	20.75	20.75	20.75
角度の増分 (°)	0	45	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
目盛りの増分	0	31.25	3.125	3.125	3.125	3.125	3.125	3.125	3.125	3.125	3.125	3.125	3.125	3.125	3.125
等価円筒直径 (μm)	794.444	797.277	796.054	796.444	794.554	791.600	789.498	788.276	791.660	791.660	791.660	791.660	791.660	791.660	791.660
1目盛 (μm)	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
落下時間 (s)	0.33	0.6	0.68	1.06	2.6	7.82	25.18	84.07	36.15	8.67	2.89	0.8	2.8	8.2	37.18
常圧粘度 (Pa·s) R	0.070034	0.070034	0.070034	0.070034	0.070034	0.070034	0.070034	0.070034	0.031494	0.010538	0.004915	0.002073	0.004915	0.010538	0.031494
常圧粘度 (Pa·s) E	0.066384	0.066384	0.066384	0.066384	0.066384	0.066384	0.066384	0.066384							
粘度 (mPa·s)	66.384	120.57	136.6	212.786	521.148	1564	5034	16760	7171	1723	575.271	159.792	557.356	1629	7375
粘度 (Pa·s)	0.066384	0.12057	0.1366	0.212786	0.521148	1.564	5.034	16.76	7.171	1.723	0.575271	0.159792	0.557356	1.629	7.375
N=1 厚さ (μm)	462.7	457.7	457.1	454.5	450.3	444.8	444.1	436.4	435.3	435.3	435.3	435.3	435.3	435.3	435.3
屈折率	1.51	1.51	1.51	1.517	1.528	1.537	1.546	1.554	1.560	1.568	1.575	1.582	1.575	1.568	1.56
実際の厚さ (μm)	698.7	691.1	690.2	689.5	688.1	683.7	686.6	678.2	679.1	682.6	685.6	688.6	685.6	682.6	679.1
推定圧力 (GPa)	0	0	0	0.02	0.054	0.087	0.12	0.154				0.296	0.258	0.218	0.175
圧力-粘度係数 (1/GPa) R					55.57	37.17	35.70	35.62	35.57				14.68	18.34	23.12
圧力-粘度係数 (1/GPa) E					58.24	38.16	36.32	36.07	35.92						

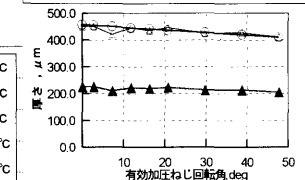
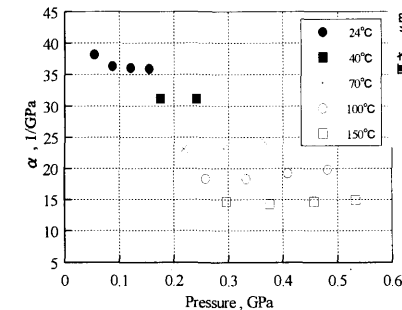
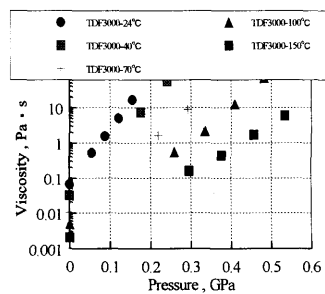
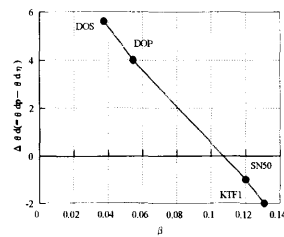
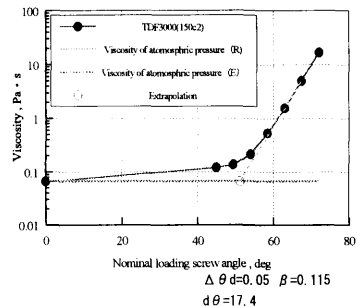


TDF3000

日付	12/2	12/2	12/2	12/2	12/2	12/2	12/2	12/4	12/4	12/4	12/4	12/4	12/4	12/5	12/4
測定温度 (°C)	40	70	100	150	100	70	40	70	100	150	100	70	100	150	100
見かけの加圧角 (°)	81	81	81	81	81	81	81	90	90	90	90	90	99	99	99
有効加圧角 (°)	29.75	29.75	29.75	29.75	29.75	29.75	29.75	38.75	38.75	38.75	38.75	38.75	47.75	47.75	47.75
角度の増分 (°)	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
目盛りの増分	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25
等価円筒直径 (μm)	789.608	789.608	789.608	789.608	789.608	789.608	789.608	789.942	789.942	789.942	789.942	789.942	787.108	787.108	787.108
1目盛 (μm)	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
落下時間 (s)		46.95	11.81	2.2	11.03	45.59	288.89	69.4	8.5	64.87	389		30.2	354.78	
常圧粘度 (mPa·s) R	0.031494	0.010538	0.004915	0.002073	0.004915	0.010538	0.031494	0.010538	0.004915	0.002073	0.004915	0.010538	0.004915	0.002073	0.004915
常圧粘度 (mPa·s) E															
粘度 (mPa·s)		9289	2341	437.679	2187	9020	57060		12810	1685	12810	76660		5964	69800
粘度 (Pa·s)		9.289	2.341	0.437679	2.187	9.02	57.06		12.81	1.685	12.81	76.66		5.964	69.8
N=1 厚さ (μm)	426.4	426.4	426.4	426.4	426.4	426.4	426.4	417.0	417.0	417.0	417.0	417.0	409.2	409.2	409.2
屈折率		1.581	1.588	1.594	1.588	1.581	1.572		1.599	1.605	1.599	1.593		1.613	1.608
実際の厚さ (μm)	0.0	674.1	677.1	679.7	679.7	674.1	670.3	0.0	666.8	669.3	666.8	664.3	0.0	660.0	658.0
推定圧力 (GPa)				0.376	0.333	0.291	0.241		0.457	0.409	0.366		0.533	0.482	
圧力-粘度係数 (1/GPa) R				14.24	18.31	23.20	31.13		14.66	19.23	24.30		14.94	19.84	
圧力-粘度係数 (1/GPa) E															

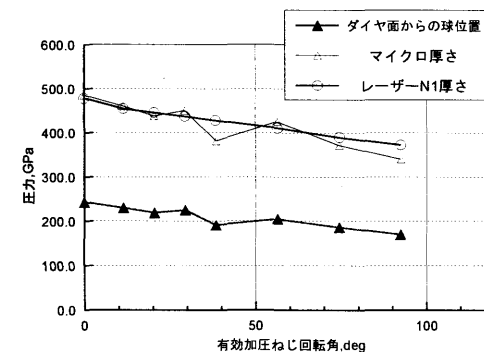


▲ ダイヤ面からの球位置 — レーザ-NI厚
△ マイクロ厚さ



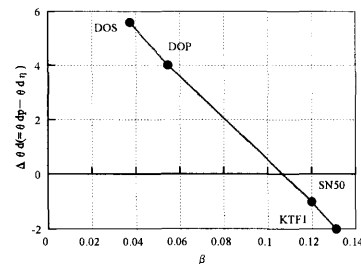
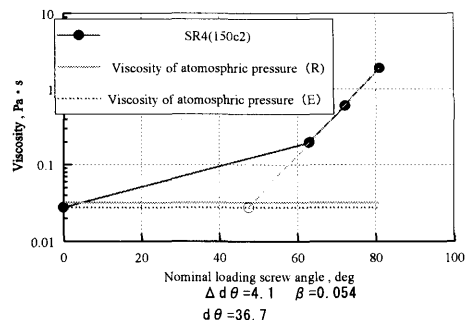
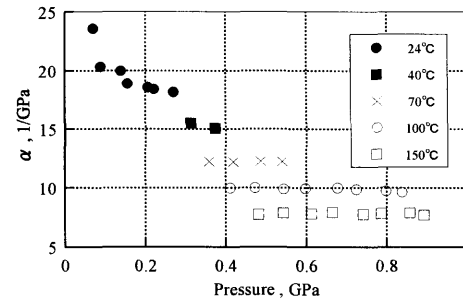
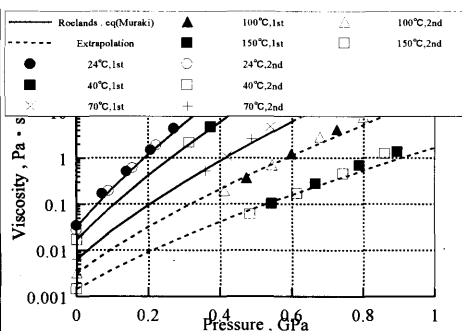
47.5±4.1

実験54未知油	空角: 51.6°		ガスケット: PCu, Φ0.9, t0.8		球: Cu, Φ84.65		油: SR4		屈折率逆算値: 1.474	
日付	7/11	7/11	7/11	7/11	7/11	7/11	7/11	7/11	7/11	7/24
測定温度 (°C)	24	24	24	24	40	70	100	150	100	70
見かけの加圧角 (°)	0	63	72	81	90	90	90	90	90	90
有効加圧角 (°)	0	11.4	20.4	29.4	38.4	38.4	38.4	38.4	38.4	38.4
角度の増分 (°)	0	63	9	9	9	9	9	9	9	9
目盛りの増分	0	43.75	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25
等価円筒直径 (μm)	811.388	801.444	797.221	794.055	794.943	794.943	794.943	794.943	794.943	794.943
1目盛 (μm)	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
落下時間 (s)	0.13	0.93	2.91	9.17	12.2	2.53	0.93	0.29	0.94	2.52
常圧粘度 (mPa·s) R	32	32	32	32	17	6.487	3.281	1.481	3.281	6.487
常圧粘度 (mPa·s) E	27.589	27.589	27.589	27.589	27.589	27.589	27.589	27.589	27.589	27.589
粘度 (mPa·s)	27.589	195.283	608.125	1908	2530	525.508	193.495	60.515	195.576	523.431
粘度 (Pa·s)	0.027589	0.195283	0.608125	1.908	2.53	0.525508	0.193495	0.060515	0.195576	0.523431
N=1 厚さ (μm)	478.0	454.7	445.8	436.9	426.6	426.6	426.6	426.6	426.6	426.6
屈折率	1.474	1.499	1.515	1.528	1.542	1.549	1.555	1.563	1.555	1.549
実際の厚さ (μm)	704.6	681.6	675.4	667.6	657.8	660.8	663.4	666.8	663.4	660.8
推定圧力 (GPa)	0	0.089	0.156	0.222	0.222	0.222	0.222	0.482	0.411	0.359
圧力-粘度係数 (1/GPa) R		20.32	18.88	18.41				7.70	9.95	12.23
圧力-粘度係数 (1/GPa) E		21.99	19.83	19.08						



SR4 (150c2)

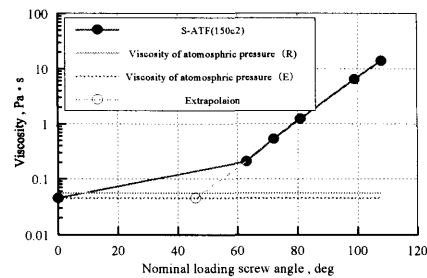
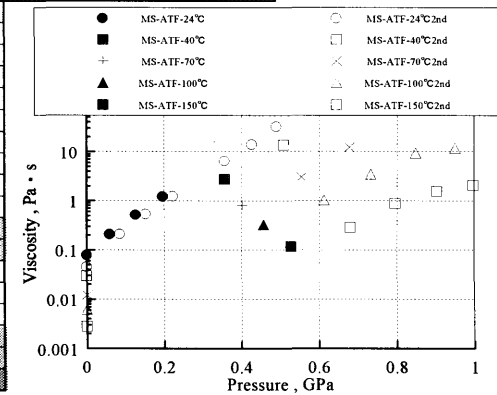
日付	7/24				7/25	6/18	6/18	6/18	6/18	6/18	6/18
測定温度 (°C)	70	100	150	100	70	100	150	100	100	150	100
見かけの加圧角 (°)	108	108	108	108	108	126	126	126	144	144	144
有効加圧角 (°)	56.4	56.4	56.4	56.4	56.4	74.4	74.4	74.4	92.4	92.4	92.4
角度の増分 (°)	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
目盛りの増分	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
等価円筒直径 (μm)	794.888	794.888	794.888	794.888	794.888	796.051	796.051	796.051	801.106	801.106	801.106
1目盛 (μm)	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
落下時間 (s)	17.04	3.62	0.83	3.4	12.38	13.79	2.22	13.97	47.09	6.11	37.96
常圧粘度 (mPa·s) R	6.487	3.281	1.481	3.281	6.487	3.281	1.481	3.281	3.281	1.481	3.281
常圧粘度 (mPa·s) E											
粘度 (mPa·s)	3514	747.906	172.028	702.453	2553	2827	456.62	2864	9583	1248	7725
粘度 (Pa·s)	3.514	0.747906	0.172028	0.702453	2.553	2.827	0.45662	2.864	9.583	1.248	7.725
N=1 厚さ (μm)	409.4	409.4	409.4	409.4	409.4	390.0	390.0	390.0	371.4	371.4	371.4
屈折率	1.564	1.569	1.575	1.569	1.564	1.581	1.585	1.581	1.589	1.593	1.589
実際の厚さ (μm)	640.3	642.3	644.8	642.3	640.3	616.6	618.2	616.6	590.2	591.6	590.2
推定圧力 (GPa)	0.613	0.544	0.613	0.544	0.487	0.742	0.678	0.742	0.859	0.799	0.799
圧力-粘度係数 (1/GPa) R				7.76	9.86	12.27		7.72	9.98		7.84

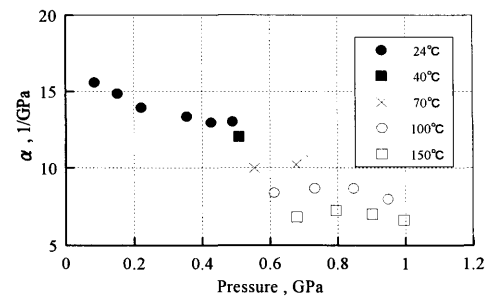
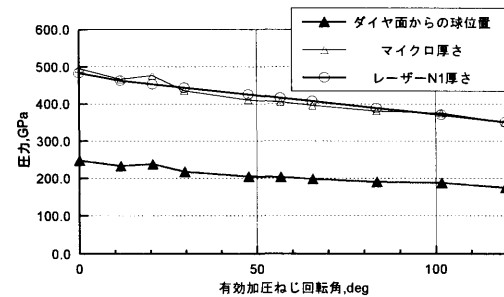


実験55未知油	空角：51.37°		ガスケット：PCu, Φ0.9, t0.8		球：Cu, Φ83.2		油：モービ		屈折率逆算値:1.457						
日付	9/8														
測定温度 (°C)	24	24	24	24	24	24	24	40	70	100	150	100	70	40	24
見かけの加圧角 (°)	0	63	72	81	99	108	117	117	117	117	117	117	117	117	117
有効加圧角 (°)	0	11.63	20.63	29.63	47.63	56.63	65.63	65.63	65.63	65.63	65.63	65.63	65.63	65.63	65.63
角度の増分 (°)	0	63	9	9	18	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
目盛りの増分	0	43.75	6.25	6.25	12.5	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25
等価円筒直径 (μm)	806.938	797.329	792.829	788.718	787.270	786.600	786.994	786.440	786.440	786.440	786.440	786.440	786.440	786.440	786.440
1目盛 (μm)	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
落下時間 (s)	0.22	1.03	2.63	6.11	32.3	70.11	165.17	60.05	14.18	4.78	1.43	5.2	15.18	68.07	171.25
常圧粘度 (mPa・s) R	55.709	55.709	55.709	55.709	55.709	55.709	55.709	29.72	12.008	6.161	2.784	6.161	12.008	29.72	55.709
常圧粘度 (mPa・s) E	45.186	45.186	45.186	45.186	45.186	45.186	45.186								
粘度 (mPa・s)	45.186	209.505	532.247	1231	6454	13950	32450	11910	2819	952.002	285.746	1036	3018	13500	33930
粘度 (Pa・s)	0.045186	0.209505	0.532247	1.231	6.454	13.95	32.45	11.91	2.819	0.952002	0.285746	1.036	3.018	13.5	33.93
N=1 厚さ (μm)	483.0	462.1	452.5	443.4	425.4	415.8	407.3	406.0	406.0	406.0	406.0	406.0	406.0	406.0	406.0
屈折率	1.457	1.48	1.495	1.508	1.528	1.536	1.543	1.545	1.549	1.554	1.559	1.554	1.549	1.545	1.543
実際の厚さ (μm)	703.7	683.9	676.5	668.6	650.0	638.7	628.5	627.3	628.9	630.9	633.0	630.9	628.9	627.3	626.5
推定圧力 (GPa)	0	0.085	0.152	0.222	0.356	0.426	0.489				0.679	0.612	0.554	0.508	0.489
圧力-粘度係数 (1/GPa)R		15.58	14.85	13.94	13.35	12.97	13.02				6.82	8.37	9.98	12.04	13.11
圧力-粘度係数 (1/GPa)E		18.06	16.23	14.99	13.94	13.46	13.46								

[illegible]

MS-ATF (150c2)

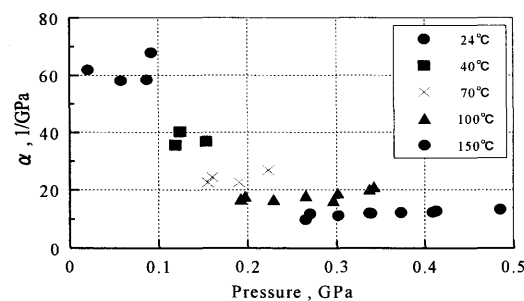
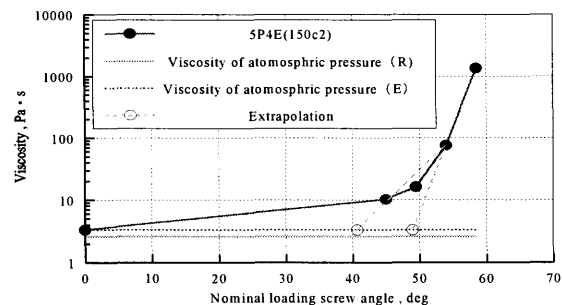
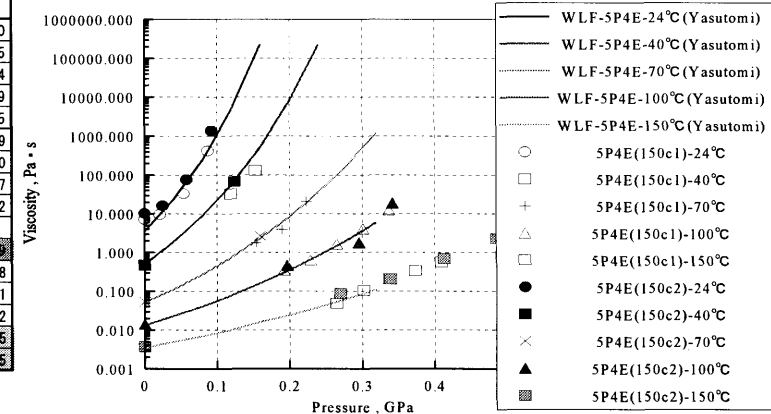

$$\Delta d\theta = 5.37 \quad \beta = 0.04$$

$$d\theta = 46$$


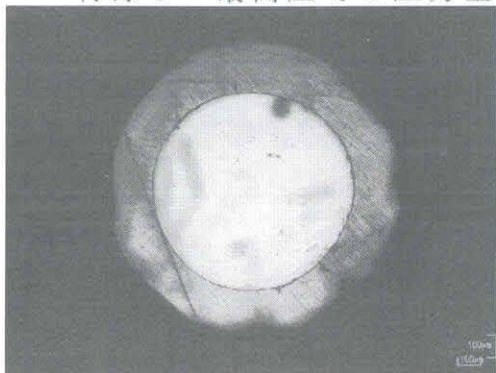
実験50未知油	空角: 46.1°		ガスケット: PCu, Φ0.9, t0.8		球: Cu, Φ86.79		油: 5P4E		屈折率逆算値: 1.629				
日付	2/28	2/29	2/29	3/3	3/3	3/16	3/16	3/16	3/16	3/16	3/16	3/16	3/16
測定温度 (°C)	24	24	24	24	24	40	70	100	150	100	70	40	24
見かけの加圧角 (°)	0	45	49.5	54	58.5	58.5	58.5	58.5	58.5	58.5	58.5	58.5	58.5
有効加圧角 (°)	0	0	3.4	7.9	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4
角度の増分 (°)	0	45	4.5	4.5	4.5								4.5
目盛りの増分	0	31.25	3.125	3.125	3.125								3.125
等価円筒直径 (μm)	830.555	830.332	828.610	826.666	824.444	826.165	826.165	826.165	826.165	826.165	826.165	826.165	826.165
1目盛 (μm)	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
落下時間 (s)	15.59	48.16	76.08	359.55	6435.82	356.71	13.5	2.26	0.41	2.2	12.72	326.33	9993.48
常圧粘度 (mPa・s) R	2622	2622	2622	2622	2622	466.481	53.706	14.07	3.682	14.07	53.706	466.481	2622
常圧粘度 (mPa・s) E	3317	3317	3317	3317	3317								
粘度 (mPa・s)	3317	10220	16120	76000	1355000	75140	2775	477.758	86.938	465.086	2682	68740	2103000
N=1 厚さ (μm)	433.9	429.2	427.4	424.6	418.7	416.5	416.5	416.5	416.5	416.5	416.5	416.5	416.5
屈折率	1.629	1.64	1.644	1.655	1.671	1.678	1.691	1.704	1.725	1.704	1.69	1.677	1.672
実際の厚さ (μm)	706.8	703.9	702.6	702.7	699.6	698.9	704.3	709.7	718.5	709.7	703.9	698.5	696.4
推定圧力 (GPa)	0	0	0.025	0.058	0.092	0.124	0.16	0.197	0.27	0.197	0.16	0.124	0.092
圧力-粘度係数 (1/GPa)		16.68	72.64	58.05	67.91	40.98	24.66	17.89	11.71	17.76	24.44	40.27	72.69

実験50							
日付	2/13	2/13	2/13	3/18	3/18	3/18	3/20
測定温度 (°C)	100	150	100	100	150	100	150
見かけの加圧角 (°)	67.5	67.5	67.5	76.5	76.5	76.5	85.5
有効加圧角 (°)	21.4	21.4	21.4	30.4	30.4	30.4	39.4
角度の増分 (°)	9		9	9		9	9
目盛りの増分	6.25		6.25	6.25		6.25	6.25
等価円筒直径 (μm)	822.277	822.277	822.277	820.550	820.550	820.550	819.499
1目盛 (μm)	120	120	120	120	120	120	120
落下時間 (s)	9.31	0.97	8.5	114.69	3.28	90.78	10.87
常圧粘度 (mPa・s) R	14.07	3.682	14.07	14.07	3.682	14.07	3.682
常圧粘度 (mPa・s) E							
粘度 (mPa・s)	1860	204.962	1790	24080	691.028	19050	2279
N=1 厚さ (μm)	410.7	410.7	410.7	406.4	406.4	406.4	394.8
屈折率	1.719	1.737	1.719	1.739	1.751	1.737	1.761
実際の厚さ (μm)	706.0	713.4	706.0	706.7	711.6	705.9	695.2
推定圧力 (GPa)	0.296	0.339	0.296	0.342	0.413	0.342	0.485
圧力-粘度係数 (1/GPa)	16.68	11.86	16.37	21.77	12.67	21.08	13.25

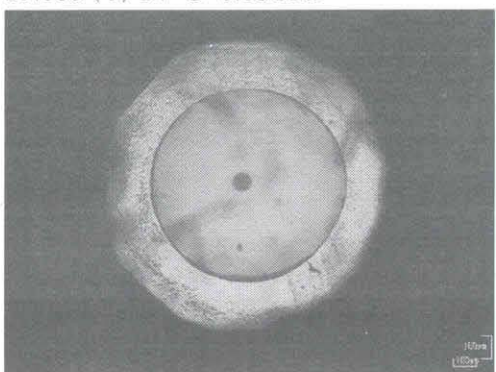
5P4E (150c2)



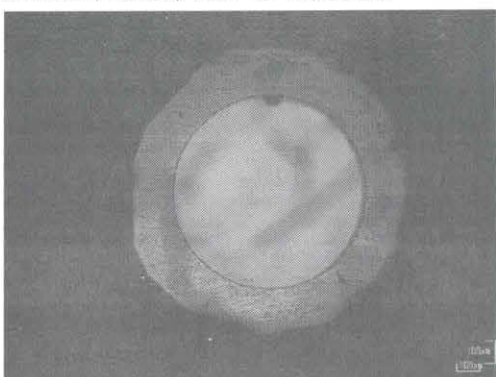
付録9 最高圧での圧力室の様子



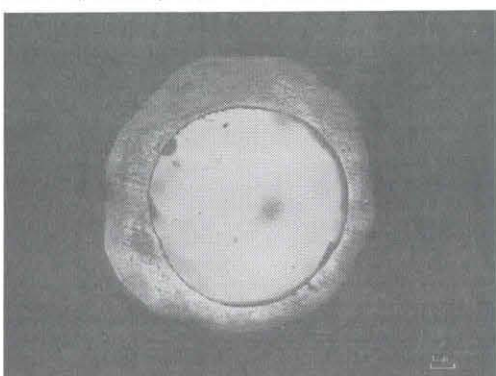
SN100 (1) 24 °C 0.18GPa



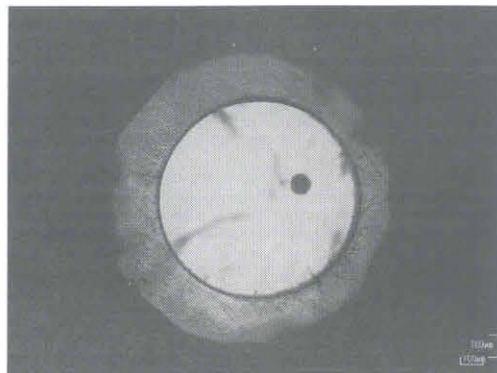
SN100 (150c3) 150 °C 0.62GPa



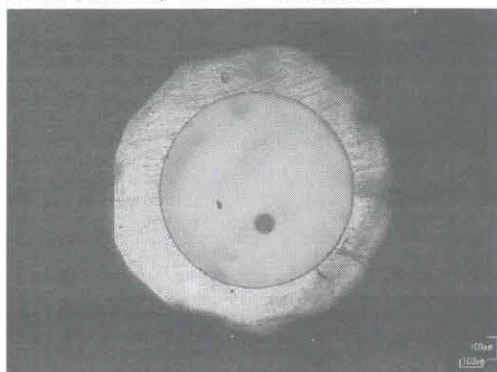
DMP (150c2) 150 °C 0.638GPa



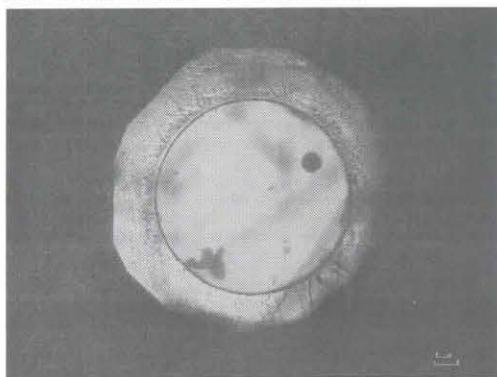
5P4E (150c1) 150 °C 0.501GPa



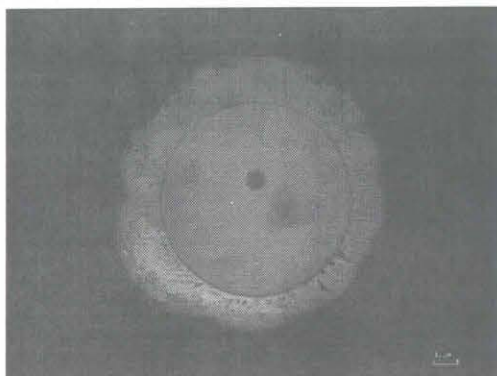
SN100 (150c2) 150 °C 0.496GPa



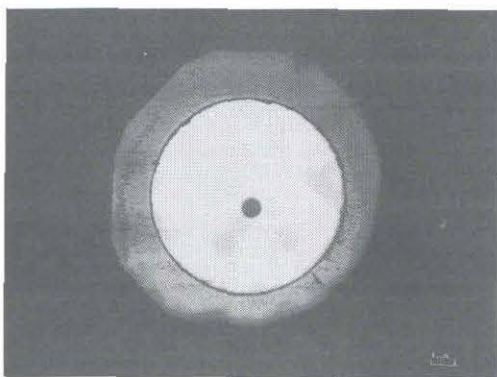
DMP (150c1) 150 °C 0.638GPa



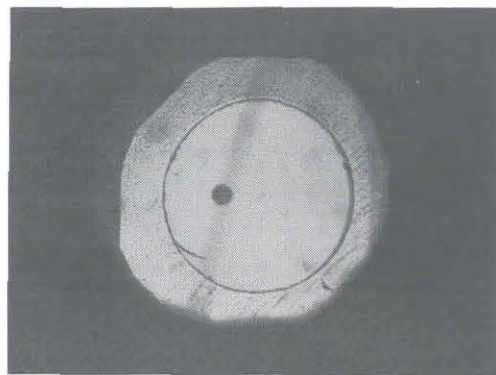
5P4E (150c1) 150 °C 0.423GPa



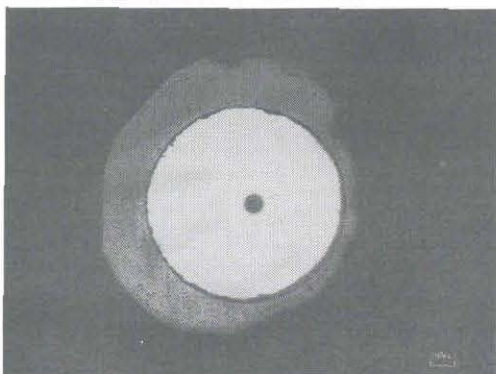
HC4 (150c1) 150 °C 1.028GPa



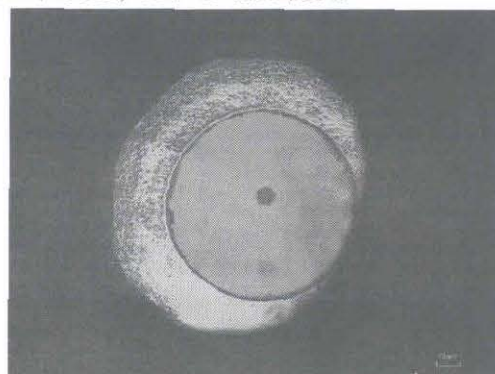
HC4 (150c2) 150 °C 0.918GPa



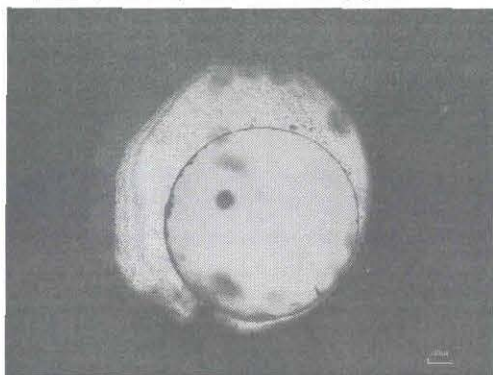
SR4 (150c1) 150 °C 0.894GPa



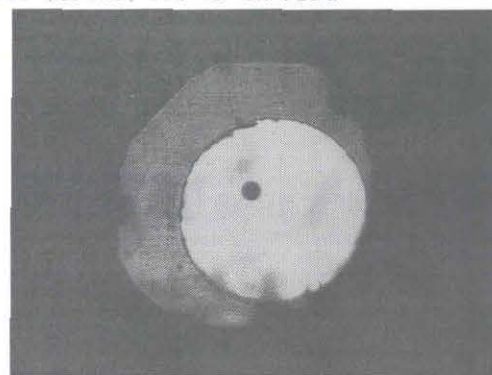
S-ATF (150c2) 150 °C 0.996GPa



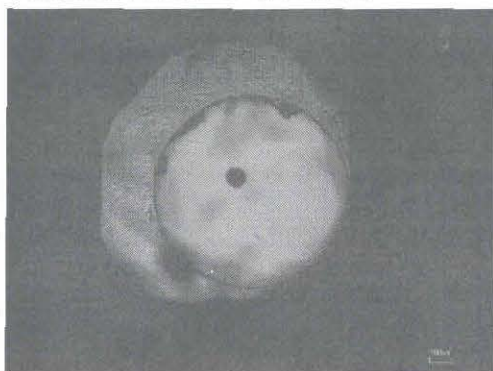
ATF (150c1) 150 °C 0.94GPa



TDF3000 (1) 24 °C 0.124GPa



TDF3000 (150c2) 0.533GPa



TDF3200 (150c1) 150 °C 0.719GPa