解説

潤滑油の高圧物性とトライボロジー

Lubricant's Properties under High Pressure and Tribology

中村 裕一

Yuichi NAKAMURA

Physical properties of lubricants under high pressure (e.g., density, elastic constant and viscosity) are the fundamental properties for the tribological evaluation (i.e. friction and wear) of rolling bearings, gears and traction drives. This paper introduces the importance of such physical properties of lubricants under high pressure in tribology and the application of a diamond-anvil pressure cell (DAC) for tribological measurements. A falling sphere viscometry in the DAC facilitated the viscosity measurements up to 2 GPa. A photon-correlation technique with laser light scattering in the DAC enabled the viscosity estimation of solidified glassy state lubricants (viscosity is about 10^9 Pa·s) from structural relaxation. Dynamic elastic moduli were obtained from Brillouin light scattering measurements in the DAC up to 4 GPa, which enabled the evaluation of the frequency dispersion of elastic moduli with quasi-static data.

[DAC, Lubricant, High Pressure, Tribology, Viscosity, Elastic Modulus]

1. はじめに

トライボロジーの分野での潤滑油高圧物性測定の記事は多く、英米の機械学会、米国潤滑トライボロジー学会 (STLE) の論文集中に発表されており、特にオイルショックの後、トラクションドライブという油を介したころがり摩擦伝動型の省エネ無段変速機開発への期待が高まり、トライボロジー分野でも高圧力研究が最先端となった。高圧力学会では最近トライボロジー関連の研究者が少なく残念に思う。筆者はこれまで藤城 郁哉先生（三重大学名誉教授）のもとでダイヤモンドアンビルセル (DAC) を用いて粘度、音速、密度（弾性係数）を中心とする潤滑油高圧物性評価を20年近く行ってきた。本解説ではトライボロジーにおける潤滑油高圧物性の役割、位置づけおよび筆者がこれまで行ってきた球落下法、光散乱法などによる高圧物性評価法を紹介する。鍛造、圧延などの塑性加工のトライボロジーでも潤滑油高圧物性が注目されているがここでは転がり軸受、トラクションドライブなど機械要素に限定する。

2. トライボロジーとは

トライボロジーとは、ご存知の方も多いと思うが、摩擦・摩耗・潤滑に関する科学技術の学問である。言葉自体は1966年に当時としては画期的に省資源、省エネルギーを目指して誕生した [1]。その内容は有史以前の摩擦熱による火おこし、車輪の発明など古く、また日常的にも歩く、指先でものをつまむ、鉛筆を使う（黒鉛を摩耗させている）など無意識にその現象を利用している。その範囲は機械、化学を中心にあらゆる分野にまたがり、パソコンハードディスクの数十 nm の摩耗から10 m 近くの水力発電用軸受まで広範囲である。高圧力科学・技術にもまして境界領域的で横断的な学問である。最近「モノづくり」が見直されているが機械であれ装置であれそれらすべては必ず部品が相対運動（すべり、ころがり）するので摩擦・摩耗が発生する。高圧装置に関してもピストンシリンダ型、ベルト型、DACなどいずれもアンビル-圧力媒体（ガスケット）間の摩擦が重要である。トライボロジーだけでは「モノ」は作れないが「モノ」である以上必ずトライボロジーが必要なのである。日本の自動車など「モノ」の故障が少ないのはトライボロジー技術が世界のトップであるといえる。

〒514-8507 三重県津市上浜町 1515 三重大学工学部物理工学科

Department of Physics Engineering, Faculty of Engineering, Mie University, 1515 Kamihama-cho, Tsu-shi, Mie 514-8507

機械部品の接触状態には Fig. 1 に示すように見かけ上、面、線、点と3態ある。線・点接触でもヘルツ弾性接触により有限の面積となるが、この順に接触応力が大きくなり、最大応力が5 GPa 程度になる。この応力となる機械要素として歯車、ころがり軸受、エンジン動弁系およびトラクションドライブ変速機があげられ、通常、油潤滑され5 GPa の圧力（静水圧）がかかっているとされている。実際の接触部ではヘルツの応力分布で場所により圧力が変化し、また潤滑油がきわめて短時間（数ミリ秒以下、kHz 以上）で加圧され、常圧に戻るという過度的、動的状態では時間的にも変化し衝撃圧状態と考えられる。また滑るところには摩擦熱が発生しこの時間的、空間的変化がまた難しい。

トライボロジーでは2表面間の表面粗さに対する油膜の相対厚さが摩擦摩耗を左右するので重要である。ヘルツ接触の流体潤滑状態を弾性流体潤滑（Elasto-hydrodynamic Lubrication, 略してEHL）と呼び、これは固体表面の弾性変形と油の高圧物性（主に粘度増加）が関与する流体力学的潤滑で、高圧物性がわかっている条件では数値計算による油膜厚さとニュートンリングを利用した実測値はよく一致する。摩擦摩耗を決める速度、荷重、雰囲気などたくさん要因があり高圧下の油物性の変化は単なる1要因にすぎないが、未知で不確定な場合が多く、トライボロジストを悩ませている。

3. トライボロジーにおける潤滑油の高圧物性

油（グリース）潤滑された前述の機械要素のころがり接触部では最大5 GPa 程度（平均3 GPa）の高圧力が発生し、油の高圧物性はそれら機械の摩擦摩耗特性、特にころがり要素材料の疲労寿命、トラクション力（動力伝達力、摩擦ロス）評価に重要である。高圧物性としては粘度、密度（弾性率）および限界せん断応力（せん断強度）、屈折率、比熱、熱伝導率などがあげられるが、なかでも力学的特性が注目されている。また、高圧下で潤滑油が液体か固体かを区分する状態図のようなものが提案され、高圧密度（体積弾性係数）、粘度などにより Fig. 2 に示すような粘性域、粘弾性域、弾塑性域に区分されている [2,3,4]。

高圧物性の中で最も重要で注目され測定困難なものは粘度 η で、圧力 P (GPa) により指数的に急激に変化し、その簡単な表示式として下記の Barus

の式がよく用いられる [5]。

$$\eta = \eta_0 \exp(\alpha P) \quad (1)$$

ここで η_0 、 α はそれぞれ常圧粘度、粘度-圧力係数 (GPa^{-1}) である。式 (1) を対数粘度と圧力の関係図で書けば Fig. 3 のように直線になる。Fig. 4 にいくつかの合成油の分子構造を示すがトラクション油のような環状のナフテン系油ではほぼこの直線で表され、パラフィン系などの鎖状の油では図のよう

Fig. 1. Contact mode of machine elements.

Fig. 2. Rheological regime of a traction oil.

Fig. 3. Schematic diagram of $\ln$ viscosity-pressure relation for lubricant oils.

Traction oils	
# 7 1 4 9 (Prototype oil)	(Base oil)
DMP (2,4-dicyclohexyl-2-methylpentane)
5 P 4 E (Polyphenyl ether)
Chain-structure synthetic oils	
Silicone oil	$\text{CH}_3-\text{Si}(\text{CH}_3)_2-\text{O}-\left[\text{Si}(\text{CH}_3)_2\right]_n-\text{O}-\text{Si}(\text{CH}_3)_2-\text{CH}_3$
PAO 68 (Polyalphaolefine)	$\text{R}-\text{CH}(\text{CH}_3)-\left[\text{CH}_2-\text{CH}(\text{R})\right]_n-\text{H}$
DOP (Diocetylphthalate)

Fig. 4. Molecular structure of several oils.

に上に凸となり，それを精度よく表した式も提案されている [6]。Bridgman は一般の液体に対し低粘度時には上に凸，高粘度時には凹となり，その変曲点は複雑な分子構造をもつ液体では比較的低圧力時に，単純な構造の液体では 1.2 GPa 以上の高压で現われると述べている [7, 8]。EHL，トラクションドライブでは式 (1) の α が重要となり摩擦摩耗を決める接触部の油膜厚さは α のほぼ平方根に比例する。 α の具体的な値は 40 °C のトラクション油で 30 ~ 40 GPa⁻¹，パラフィン油はその半分程度，エステル油はさらにその半分のものが多い。類似の分子構造の油同士では α は常圧粘度とともに増加する傾向がある。100 °C では 40 °C の半分程度になる。

粘度の分子レベルでの理論としてはアイリングの粘度理論がある [9]。せん断力の作用する方向へ分子が移動するには新たに空孔（自由体積）を作りそこへ移る活性化自由エネルギーが必要と考え粘度をそのエネルギーで表したもので，これを高压粘度に適用した試みもある [10]。この理論で活性化体積 ΔV^* は α とほぼ等しいと考えられている。パラフィン系など鎖状の潤滑油は分子の一部が折れ曲がって移動する（セグメント流動）と考えられその場合 ΔV^* が小さい。分子が数個単位（クラスター）での移動の可能性も考えられ，その場合 ΔV^* が大きくなる。せん断応力 S が大きい場合非ニュートン性

が現れると考えられ，その表示式としてアイリング非ニュートン粘弾性式（次式）がトラクション解析でよく用いられる [11]。

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{S}}{G} + \frac{\tau_0}{\eta} \sinh \left(\frac{S}{\tau_0} \right) \quad (2)$$

ここで G は横弾性係数， γ はせん断ひずみ， τ_0 はアイリング応力（特性応力）と呼ばれる非線形性を左右するパラメータで， S が τ_0 より非常に大きいとき非線形性が大きく，小さいときニュートン粘性に帰する。また一定体積下で時間的圧力緩和などの粘弾性解析における体積粘性率のトライボロジーの有用性についても，その試算例 [12]，トラクション解析例 [13] が報告されている。

高粘度になった油にさらに圧力を増加し続けると固化するが，多くの油では分子量分布，異性体，添加剤などで単一成分でないで結晶化しにくく，特に短時間の加圧では過加圧状態（低温での過冷却に相当）となり液体のランダム分子配列のまま固化する「ガラス状態」となる。先に述べた油の高压力学状態図には準静的測定を基礎としているが転がり軸受，トラクションドライブなどの圧力発生は極めて短時間（1ms 程度）で加圧され常圧に戻るという過渡的動的状態にある。固化圧力の目安となるガラス転移点の粘度は一般に 10¹² Pa・s であるが，Johnson によれば非常に短時間に圧縮される転がり接触状況では 10⁵ Pa・s でガラス転移すると報告している [14]。物質が液体的か固体的かを判断するパラメーターとしてデボラ数（緩和時間／圧縮時間など）が用いられるが短時間の現象では低い粘度でも固体的にふるまい，このことは Bair と Winer により誘電率の周波数増加による固化圧力低下の報告により示されている [15]。

高压密度（体積）は高压粘度を求める際必要となるが，粘度理論に自由体積を評価するのに重要となる。体積－圧力関係図の勾配から体積弾性係数が求まり，トラクション油の一例を Fig. 5 に示すが粘弾性域では急に上昇し完全に固化すると変化が緩やかになる [16]。この関係より前述の Fig. 2 の状態図が書ける。高压密度 $\rho(P)$ としてトライボロジーでは次式の Dowson らによる関係式がよく用いられる [17]。

$$\frac{\rho(P)}{\rho_0} = 1 + \frac{0.59 P}{1 + 1.7 P} \quad (3)$$

この式は、高压容器で準静的に圧縮して得られた種々の油の高压密度データから得られたもので、精度よい適用範囲は 40 °C で 0.4 GPa 程度までと考えられている。

横弾性係数は式 (2) の粘弾性モデルのパラメータとして重要であるが、トラクションドライブでは接触部油の弾性せん断変形による見かけの微小すべり (1 % 以下) を評価するのに基礎データとなる。油の摩擦ロスや伝えられる動力の上限を決めるのが油の限界せん断応力 (せん断強さ) で、トラクション試験 (転がり摩擦試験) から求めた値は圧力にほぼ比例し、ピストンシリンダ型高压装置で可動シリンダーの抵抗力とはほぼ一致する [3]。接触域の油膜厚さの実験の評価法として、ガラス円板-鋼球間の転がり接触下でニュートンリングを利用した光干渉法がよく用いられているが、高压下の屈折率評価が必要で、高压密度とローレンツ・ローレンスの式などで近似している。

4. DAC のトライボロジーへの応用

DAC は数百 GPa まで発生できるが、トライボロジーでは 5 GPa 程度発生できれば十分である。当研究室では Fig. 6 に示すようなネジによる加圧タイプ (清水製作所, MK50) を用いている。圧力が低いことが圧力制御, 安定性, ルビー圧力スケールの精度を低下させる。この対策として, アンビルキュレット面直径を 1 mm 程度, ガスケット穴径, 厚さを 0.5 ~ 0.7 mm と大きくし, DAC 内に皿パネを組み込んで圧力制御を容易にした。皿パネは特に高温での油の熱収縮による油漏れ防止に寄与すると考えられる。圧力精度はルビーの焼なまし, 波長基準の高精度化および R_1 , R_2 の両方を含むスペクトル全体のデータ処理などで ± 10 MPa 程度にまで向上させた。当研究室では DAC を用いた落球粘度測定方式で実績を積み [4, 18], 固化油の粘弾性応力緩和法 [19], ブリルアン散乱法 [20], 光散乱光子相関法 [21] により高压粘度, 密度 (弾性係数) さらに体積粘性率などを評価してきた。以下にその中の主なものを紹介する。

4.1 高压粘度

通常の高压粘度測定装置は金属製の压力容器を用いており発生圧力は Bridgman [8], Abbot ら [22] の極めて特殊な装置では 3 GPa で測定しているが, トラ

イボロジーで用いられる高压装置は油漏れなどにより安定した圧力は数百 MPa 程度で, 高くとも 1 GPa のようである。粘度測定方式も金属球などの転落球式 (球でないものもある) のものが多いが, 毛管法 [23, 24], 水晶振動子 [25], 誘電緩和 [26], 光散乱 [21, 27] を利用した方法なども報告されている。

DAC を用いた液体の球落下高压粘度測定は Piermarini により提案され [28], 油の測定は King らによっても報告されているが [29, 30], それらは圧力室 (ガスケット穴) 直径を回転軸としているため球をその中心で落下させることが困難で精度が出ない。藤城らにより提案された円筒形圧力室の中心軸回 (回転対称軸) りの回転で高い精度が得られた [31]。圧力室に密度の大きい約 50 μ m の金球を潤滑油とともに封入し, DAC の中心軸に対し, それを瞬間的に回転させ, 球を持ち上げて重力により落下させ, 落下速度と流体力学的関係式より油の粘度を算出する。球の落下速度をビデオで録画再生することにより精度良く広範囲で粘度測定が行える。潤滑油の高压高温粘度測定例を Figs. 7 ~ 9 に示す。

Fig. 5. Bulk modulus and rheological regime under high pressure.

Fig. 6. Half sectional view of a diamond-anvil cell.

Fig. 7. Viscosity under high pressure of traction fluids.

Fig. 8. Viscosity-pressure coefficient of traction fluids.

Fig. 9. Viscosity under high pressure of mineral oils. (PS100H, PS150, PH150: paraffinic, NS100: naphthenic)

Fig. 7のサントラック 50 とトラクション試作油 (#7149, SI38) では 1.4 GPa, 10^5 Pa·s までの粘度が得られ [4], トラクション油であれば高压粘度特性の油種による差異はあまりないが, 若干 SI38 が高温で高粘度である。粘度-圧力係数 α の特性をみると (Fig. 8) 圧力により若干上がり気味だがほぼ一定と考えてよく 155 °C の α は 50 °C の半分以下である。Fig. 9 は種々の鉱油の 2 GPa までの高压粘度であるがパラフィン系 (PS150, PH150, PS100H), ナフテン系 (SN100) の相違で特性が若干異なることがわかる [18]。

落体法であると測定上限は 10^5 Pa·s 程度であり, このとき 1 週間程度の測定時間を要し, これが圧力上限を高温でも 2 GPa に制限してきた。そこでレーザ光散乱と光子相関法により短時間で固化油の粘度である 10^9 Pa·s まで測定可能な手法を確立したので以下に紹介する [21]。高粘度液体では弾性散乱光の周波数スペクトルにおいて, 入射光振動数を中心とした分子スケールでの局所的構造緩和に関係するマウンテン線とよばれる非常に狭い線幅をもつ。その周波数スペクトルのフーリエ変換である 2 次の自己相関関数 $G_2(\tau)$ は, 相関時間 τ と平均構造緩和時間 $\langle \tau \rangle$ を用いて次式となる。

$$G_2(\tau) = B + C \exp\left(\frac{-\tau}{\langle \tau \rangle / 2}\right) \quad (4)$$

ここで B , C は実験係数である。Maxwell 粘弾性モデルの場合, 粘度 η はせん断緩和時間 $\tau_s \approx \langle \tau \rangle$ を仮定した場合, 横弾性係数 G により次式で表される。

$$\eta = G \tau_s \approx G \langle \tau \rangle \quad (5)$$

しかしながら τ_s と $\langle \tau \rangle$ の関係は解明されていない。ある状態で τ_s , $\langle \tau \rangle$ とも既知で, それを基準量 τ_{sr} , $\langle \tau \rangle_r$ とすると求めたい量 τ_s は, 移動因子 S_f (測定値 $\langle \tau \rangle$) により次式で表される。

$$\tau_s = S_f \cdot \tau_{sr}, \quad S_f = \langle \tau \rangle / \langle \tau \rangle_r \quad (6)$$

得られた τ_s を式 (5) のように G を乗じて粘度が求まるが, G が 10^9 Pa 程度であるので求まる粘度も 10^9 Pa·s と高い。Fig. 10 に高压光散乱実験より得られた DOP の相関関数を示すが, ほぼ指数関数的に減少している。相関関数からの緩和時間 τ_s を式 (5) および式 (6) の両方から求め, G は超音波法による文献値を用い [32], 得られた粘度を Fig. 11 に既存値とともに示す。データはばらつきをもつが, 落

体法による最高粘度より4桁以上大きい粘度データが得られ、圧力も2倍近く高く、測定時間も1時間程度と極めて短い。式(5)による値と式(6)による値を比較すると数十倍の差異があり、 τ_s と $\langle \tau \rangle$ とはオーダー的に異なると考えられる。 $\langle \tau \rangle$ は誘電緩和の時間、体積粘性率による緩和時間の可能性が考えられ式(5)の簡単な仮定は成り立たず、式(6)のように基準粘度からの相対粘度のように求めれば落体法の粘度と整合性を持つ。

Fig. 10. Photon-correlation function of light scattering data for DOP.

Fig. 11. Obtained viscosity-pressure data from photon-correlation functions for DOP.

4.2 ブリルアン散乱による弾性係数

Fig. 12に2.2 GPaにおける合成油である5P4Eの90度ブリルアン散乱スペクトルの一例を示す[20]。

このスペクトルの縦波、横波モードは先に述べたようにアモルファス固化油からのものである。結晶固体では横波モードは2個観測されるが油のアモルファスは等方体と考えられ1個である。横波は飽和炭化水素では観測できず5P4Eのベンゼン環の π 電子雲および酸素による分極率の高い分子構造となんらかの関係があると考えられる。このようなブリルアン散乱スペクトルから音速が、音速から弾性係数が求まる。その際、高圧力下での密度は熱力学関係式(比熱比=1として断熱圧縮時のもの)からの値を用いる。高圧横弾性係数 G をFig. 13に示すが、0.3 GPa付近で勾配が急に緩やかになっておりこの圧力はガラス転移点と考えられる。同じブリルアン散乱法で金属圧力容器を用いたBezotらの値[33]と一致し、本データはその数十倍の圧力まで達している。大野らの準静的な値[16]と0.9 GPa付近ではほぼ一致しているが、それより低い圧力では小さくなり0.3 GPa付近以下で0である。これはブリルアン散乱による弾性係数が10 GHz以上の高い周波数領域のもので油の粘弾性挙動による G の周波数分散と考えられる。kHzの G は準静的なものより若干大きめである。Fig. 14にブリルアン散乱による体積弾性係数を静的なデータとともに示すが G 同様0.3

Sample : 5P4E Data no. : 1214-7
FSR : 26.4(GHz) Pressure : 2.2(GPa)
P.M.Volt : 930(V) Accumulation time : 300(s)
R:Rayleigh signal Intensity of laser:165(mW)
B_L:Brillouin signal of longitudinal mode
B_T:Brillouin signal of transverse mode

Fig. 12. Brillouin scattering spectrum for 5P4E. (2 sets of R, B_L, B_T are denoted by subscript 1 and 2, respectively.)

Fig. 13. Shear modulus dispersion under high pressure.

Fig. 14. Bulk modulus dispersion under high pressure and rough estimation from BEL viscoelastic model.

GPa 以下で準静的なものは小さな値となる [16]。準静的な値では 0.3 GPa 付近が遷移域（分散域）であるが、超音波測定（MHz）のものは 0.1 GPa と低い圧力へシフトしている。これらは潤滑油の粘弾性挙動が起因する周波数分散と考えられ、準静的データに三要素 BEL 粘弾性モデルを適用した計算値を

線で示す [12]。このモデルで分散がいちおう説明できると考えられるが、BEL 理論のパラメータである高圧下の体積粘性率は仮定に基づいており、その測定法は確立されていない。

5. おわりに

本稿ではトライボロジーにおける潤滑油高圧物性の役割、位置づけを解説し、筆者の DAC を用いた 4 GPa 程度までの球落下、光子相関法による粘度評価、ブリルアン散乱による弾性係数の評価を紹介した。トライボロジーは広範囲で筆者の浅く少ない知識、経験だけでは紹介し切れない。トライボロジーは実用的ニーズが高く、技術者、研究者はあらゆる条件で摩擦、摩耗を制御する技術（試行錯誤のノウハウ）を求められる場合が多く、摩擦、摩耗の本質（科学）の研究が少ないようである。現象が複雑怪奇で物理学者はこの分野を避けてきたという話しも聞いたことがある。原子分子レベルでの実験と計算がナノトライボロジーとして注目されているが、それらと巨視的現象を結び付ける研究が期待される。21 世紀には新しい機械が発明されると思うが、それに付随して新しいトライボロジーの分野も開拓されるだろう。この解説を読まれて高圧研究者にトライボロジーに関心をもって頂ければ幸いである。

参考文献

- [1] 木村好次, 岡部平八郎: トライボロジー概論, (養賢堂, 1988) pp.1-8.
- [2] 大野信義, 服部信祐, 桑野則行, 平野富士夫: 潤滑, **33-12**, 922 (1988).
- [3] C.R. Evans, K.L. Johnson: Proc. Instrn. Mech. Eng., **200-C5**, 313 (1986).
- [4] Y. Nakamura, I. Fujishiro, H. Tsubo: Proc. IMMM'97, 505 (1998).
- [5] C. Barus: Am. J. Sci. **45**, 87 (1893).
- [6] C.J.A. Roelands, J.C. Vlugter, H.I. Waterman: Trans. ASME, J. Trib. Tech., **85**, 601 (1963).
- [7] P.W. Bridgman: Proc. Am. Acad. Arts. Sci., **61**, 57 (1926).
- [8] P.W. Bridgman: Proc. Am. Acad. Arts. Sci., **77**, 117 (1947).
- [9] S. Glasstone, J. Laidler, H. Eyring: *The Theory of Rate Processes* (McGraw-Hill, 1941) p.480.
- [10] S. Yasutomi, S. Bair, W.O. Winer: Trans. ASME, J. Trib., **106**, 291 (1984).
- [11] K. L. Johnson, J. L. Tevaarwerk: Proc. Roy. Soc. Lond., **A356**-1685, 215 (1977).

- [12] 中村裕一, 竹内寧一: トライボロジスト, **45-3**, 262 (2000).
- [13] 吉村成彦, 梅本昇, 中原綱光: トライボロジスト, **43-10**, 881 (1998).
- [14] K.L. Johnson: Proc. 5th Leed-Lyon Symp. on Tribology, 155 (1978).
- [15] S. Bair, W.O. Winer: Trans. ASME, J. Lub. Tech., **102**, 229 (1980).
- [16] 大野信義, 砂川賢治, 隈本哲郎, 平野富士夫: トライボロジー会議予稿集, 7 (1997-11).
- [17] D. Dowson & G.R. Higginson, A.V. Whitaker: J. Mech. Engg. Sci., **4-2**, 121 (1962).
- [18] Y. Nakamura, I. Fujishiro, S. Nomura: Proc. of Joint AIRAPT-16&HPCJ-38 Int. Conf. Kyoto, 7, 1204 (1998).
- [19] 藤城郁哉, 中村裕一, 榊井克修: 日本機械学会論文集(C編), **55-510**, 424 (1989).
- [20] 中村裕一, 西部潔, 濱坂修, 藤城郁哉, 黒崎靖: 日本機械学会論文集(C編), **64-623**, 2647 (1998).
- [21] 中村裕一, 角田正幸, 松井達哉, 藤城郁哉: 日本機械学会論文集 (C編), **65-635**, 2886 (1999).
- [22] L.H. Abbot, D.H. Newhall, V.A. Zilberstein, J.F. Dill: ASLE Trans., **24**, 125 (1980).
- [23] J.D. Novak, W.O. Winer: Trans. ASME, J. Lub. Tech., **90**, 580 (1968).
- [24] J. Jakobsen, D.M. Sanborn, W.O. Winer: Trans. ASME, J. Lub. Tech., **96**, 410 (1974).
- [25] R.G. Jr. Rein, T.T. Charnig, C.M. Sliepcevich, W. Ewbank: ASLE Trans. **18-2**, 123 (1975).
- [26] 益子正文, 鈴木章二, 花井志生, 岡部平八郎: トライボロジスト, **42-4**, 286 (1997).
- [27] J.F. Dill, P.W. Drake, T.A. Litovitz: ASLE Trans., **18-3**, 202 (1975).
- [28] G.J. Piermarini, R.A. Forman, S. Block: Rev. Sci. Instrum., **49-8**, 1061 (1978).
- [29] H.E. King, Jr, E. Herbolzheimer, R.L. Cook: J. Appl. Phys., **71-5** 2071 (1992).
- [30] C.A. Herbst, H. E. King, Jr. Z. Gao, D. Ou-Yang: J. Appl. Phys., **72-3**, 838 (1992).
- [31] 藤城郁哉, 中村裕一, 松広智: 日本機械学会論文集(C編), **51-468**, 2000 (1985).
- [32] G. Harrison: *The Dynamic Properties of Supercooled Liquids* (Academic Press, 1976) p.141.
- [33] P. Bezot, C. H. Bezot, D. Berthe, G. Daimaz, P. Vergne: Trans. ASME, J. Trib., **108**, 579 (1986).

[2001年3月27日受理]