

# 固体間界面で一軸圧縮を受けた潤滑液の光誘起電流による評価

## 第2報：液晶材料の潤滑特性の評価

増井孝実\*，小竹茂夫\*\*，藤巻匡\*\*

### The Evaluation of Lubricant which Compressed Uniaxially at the Interface between Solids by Photo-induced Current ( ) The Evaluation of the Lubricating Property of Liquid Crystal Materials

by Takami MASUI , Shigeo KOTAKE and Tadashi FUJIMAKI

The electron is excited, when the silicon wafer is irradiated with laser beam, and the photoinduced current is generated. Metal sphere was contacted in the silicon wafer each other, and the lubricating oil were held in the interval. The film thickness of lubricating oil was evaluated by photoinduced current value which flowed there.

In this paper, liquid crystal was used as lubricating oil. In the nematic phase of 5CB, the graph of the current value showed the characteristic shape which rose in the step. This phenomenon shows that the molecular layer of liquid crystal in the real contact point does not change for hours. We observed that the nematic liquid crystal had a stable molecular layer film.

Key words : photo-induced current ,uniaxial compression ,liquid crystal ,transition probability

#### 1. 緒言

機械部品を考えると、摺動部や回転部など摩擦の関与する部分は多く、潤滑は高性能化、高精度化、長寿命化のために非常に重要な分野である。そのなかで事故、故障の原因とされるのは、焼付き、摩耗等の真実接触点における境界潤滑の挙動によるものである。近年、固体間に挿まれた数分子層の潤滑液の挙動が研究されており、長鎖状分子からなる液体は固体間の接触面において分子層膜を作ることが報告されている。この分子層膜は整数倍で安定とされ、その物性の計測、シミュレーションなどが行われている。例えば、半円筒形のレンズに潤滑油を挿み、間隔を変えながら光の透過率を測定する方法により、透過率が量子的に変化する様子が報告されている<sup>1)</sup>。

本研究では、固体間の真実接触面に挿まれた潤滑液の評価に、半導体内に生じる光誘起電流を利用した測定方法を用いた。光誘起電流とは半導体にレーザー光など、バンドギャップ以上のエネルギーの光を照射すると、価電子帯の電子が伝導帯に励起されキャリアが発生し、それが半導体内を移動することによって発生する電流である。そこにベアリング等の金属導電体を接触させた場合、ナノアンペアのオーダーの光誘起電流が最近接触部を通じて流れることから、その電流値を測定し接触状態の評価に用いた<sup>2)</sup>。

第1報ではアルカン炭化水素のn-デカンを潤滑液とし、真実接触面に挿まれた分子層膜が時間軸に沿って破断と形成を繰り返す様子が観察可能であることを報告した。また脂肪酸(ステアリン酸)を0.5wt%

\* 機械情報グループ

\*\* 三重大学工学部機械工学科

添加することにより、ある一定時間、脂肪酸分子膜が金属表面に安定して存在することも確認された。

本報においては潤滑油にネマティック液晶、スメクティック液晶材料を用い、分子方向に異方性を持つ特性が、固体間で挿まれた分子層膜に及ぼす影響について調査を行った。

## 2. 実験方法

### 2. 1 実験装置

シリコン単結晶基板 (n 型, (111) 面, 厚さ 1mm,  $\phi$  4inch) の上に、直径 11mm の高炭素クロム鋼のベアリング球を載せ、その接触面に潤滑液を滴下した試料を用意する。このシリコン基板の裏側からレーザー光 (波長 680nm, 出力 50mW) を接触部に当たるように集光させ、真実接触部に光誘起電流を発生させた。これら装置を一定温度に保つために恒温恒湿槽内に設置し、シリコンとベアリング球間に流れる光誘起電流を微小電流計にて連続測定を行った。装置概略図を図 1 に示す。

接触面の形状は、ベアリング球、シリコン基板の表面粗さはそれぞれ  $Ra=0.039\mu\text{m}$ ,  $0.003\mu\text{m}$  で、シリコン基板はベアリング球に比べ十分に平滑である。よって潤滑液は主にベアリング側の凹凸によって生じた空間内に、一軸圧縮を受けた状況で存在することが予想される。またヘルツの式によると荷重 0.26N の条件では、ベアリング球の弾性変形は  $0.04\mu\text{m}$  程度で接触する範囲は約  $\phi 42\mu\text{m}$  となる。本実験において計測される微小電流の値は、この接触範囲内に存在する複数の真実接触点を通じて流れるトンネル電流の和であると考えられる。

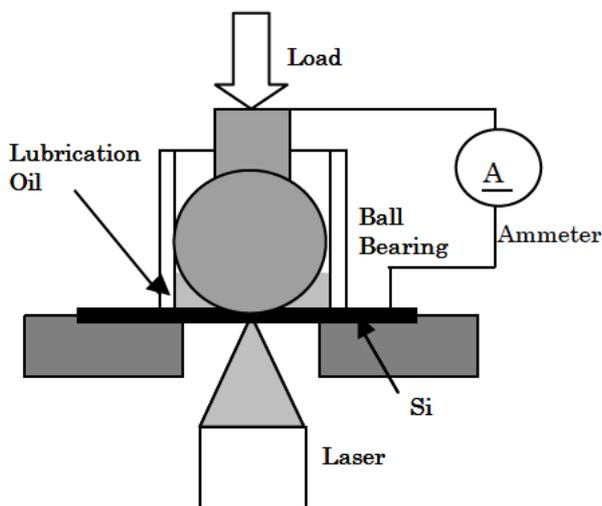


図 1 実験装置概略

### 2. 2 実験方法

潤滑液としてシアノビフェニル系液晶の、ネマティック相を持つ 4-ペンチル-4'-シアノビフェニル (5CB) と、スメクティック A 相とネマティック相を持つ 4-オクチル-4'-シアノビフェニル (8CB) を用いた。これら液晶を接触面に 0.05ml 滴下し、試験荷重はベアリングの自重を含め 0.26N, 測定時間を 50ksec とした。5CB は常圧下では 295.7K~308.2K の温度にてネマティック相が発現するため、測定温度はアイソトロピック相状態を含む 293K~313K の範囲で行った。また、8CB は 294.2K~306.2K でスメクティック A 相が、306.2K~313.2K でネマティック相が発現するため、294K~315K の温度範囲で測定を行った。

## 3. 結果と考察

### 3. 1 5CB における光誘起電流の変化

ネマティック相を示す温度の 298K, アイソトロピック相を示す温度の 313K, それぞれの光誘起電流の変化を図 2 に示す。

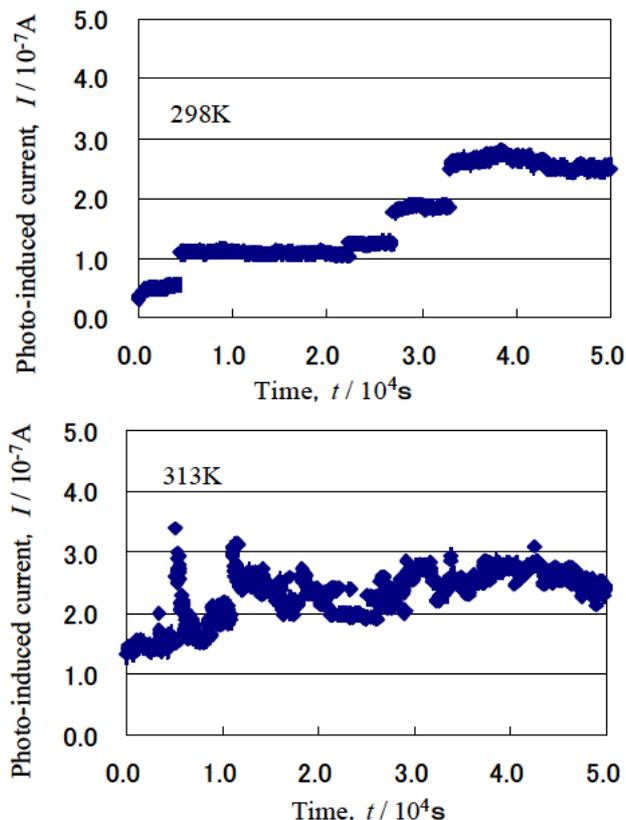


図 2 5CB の光誘起電流の時間変化 (0.26N)

298K のグラフでは、電流値がある時間、一定に保たれ、急激に電流値が上昇した後に、また一定に

保たれるという右上りの階段形状になる。このような階段形状のグラフはネマティック相で特徴的である。このことから粘性が *n*-デカンに比べ高く、また液晶分子が規則性・異方性を持っていることから分子層膜が形成されやすいことが予想される。また 5ksec~20ksec の間、電流値が安定することから層状に積み重なった分子膜の分子間の結合力も強く破壊されにくいものと考えられる。*n*-デカンに脂肪酸を添加した時のような分子膜による初期の面間保持に近い特性が現れるため表面保護の効果が高い。313K では等方性液体となり粘性も下がるため、このような特徴的な変化は現れず、*n*-デカンの結果と同じく、短時間で細かく上下し、分子層が破断・形成を活発に繰り返している様子が見られる。

### 3. 2 8CB における光誘起電流の変化

スメクティック A 相を示す 301K, ネマティック相の 305K, アイソトロピック相の 315K の、それぞれの温度での光誘起電流の変化を図 3 に示す。

スメクティック A 相とネマティック相共に電流変化は 5CB と同様に階段形状を示した。この 2 つの液晶の相による違いはあまり無く、スメクティック A 相はネマティック相に比べ水平部の上下動が若干少なく、その分、分子層膜が安定して存在することが観られる。スメクティック層は分子方向が揃いさらにそれが層状に形成されるために、分子の拘束力がさらに強く面間保持力が高まり、圧力を受けても接触面の間隔に変化が少ないと考える。

### 3. 3 分子層膜の遷移確率について

ネマティック相の 5CB は *n*-デカンに比べ、電流値の変化が少なく水平部が多く安定していた。しかし、図 4 に示すように、*n*-デカンでも時間スケールを伸ばして電流の変化を見た場合、階段状の変化が増加と減少方向にランダムに起こっており、同様の電流値一定の水平部は確認できる。この電流値一定の保持時間は液体の種類に大きく依存し、*n*-デカンでは 120sec 程であるのに対し、5CB のネマティック相では 5ksec~20ksec と 2 桁程大きくなる。これは液晶が分子間の相互作用の強い液体であり、強調現象により分子層がより安定化するためである。この一定の電流値を保つ保持時間の逆数である遷移確率を計算するとポアソン分布に従うことが分かっており、それはこの遷移が稀にしか起こらないことを意味している<sup>3)</sup>。また、T.Becker らは固体間の接触面において長鎖状分子からなる液体は層数の整数倍

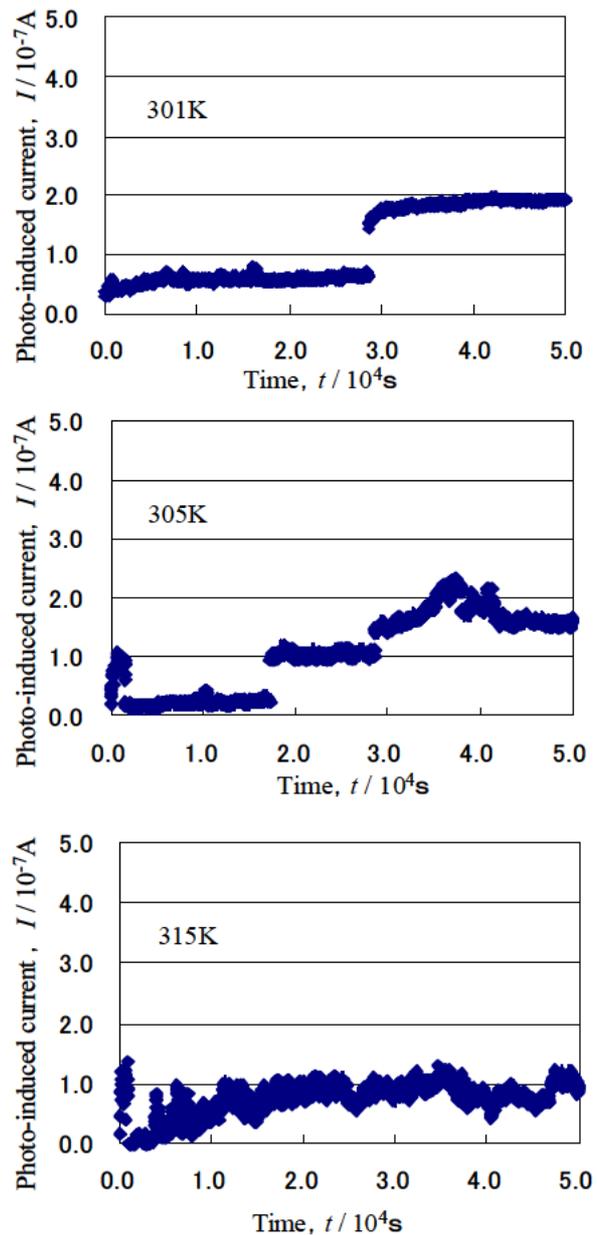


図 3 8CB の光誘起電流の時間変化 (0.26N)

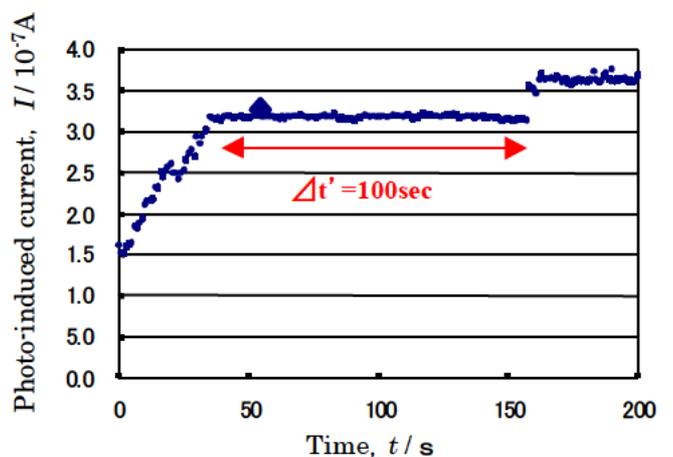


図 4 *n*-デカンの光誘起電流変化 (303K,0.69N)

で安定となる分子層膜を作ることを実験的に示している<sup>2)</sup>。このことから、ある分子層数から別の分子層数への変化はまれにしか起こらないため、真実接触面の液体分子を流れる電流が階段状に変化するものとする。この保持時間の逆数の遷移確率は、固体間真実接触界面に存在する境界潤滑状態の液体分子層の遷移確率を意味し、小さいほど安定な分子層であることを示唆している。

5CB の各温度での測定結果から境界潤滑状態の分子層膜の遷移確率を求め、図5にその結果を示す。

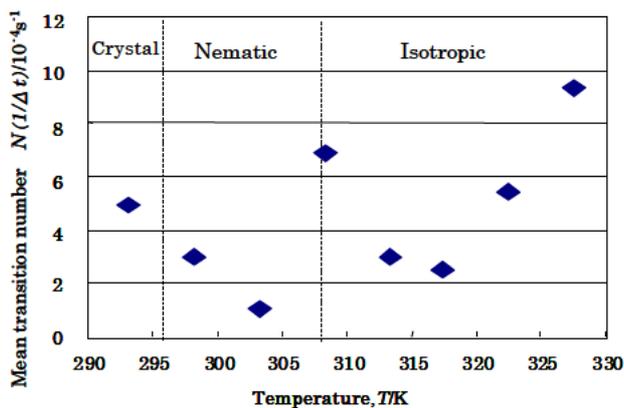


図5 5CB 液晶の分子膜の遷移確率

ネマティック相の温度域で遷移確率が下がり、その両側で確率が上がる特徴的な形状である。これは液晶状態にある分子層膜はより安定して存在することを示している。アイソトロピック相では他の液体同様、温度上昇と共に粘度が下がり遷移確率は上がっている。

このことから遷移確率を求めることにより境界潤滑における分子層膜の安定性の定量的評価に応用できるものとする。

#### 4. 結言

シアノビフェニル系の液晶材料、5CB、8CBについて、光誘起電流を用いて境界摩擦状態での潤滑油特性を調査した。アルカン系炭化水素材料に比べ、ネマティック相、スメクティック A 相の温度域で長時間、分子層膜が安定して存在し、アルカンに脂肪酸を添加した時のような挙動を示すことがわかった。このことは分子方向が異方性を持ち相互作用が強い液体であるため、強調現象により分子層が安定化することによるものである。また、電流値が一定に保持される時間の逆数である遷移確率を求めることにより、分子層膜の安定性が定量的に評価でき、耐久性予測にも応用可能と考える。

#### 参考文献

- 1) T. Becker et al.: "Nanofluidics: Viscous Dissipation In layered liquid Films". Physical Review Letters, 91(16), p166104 (2003)
- 2) 小竹茂夫ほか: "光誘起電流による半導体/金属界面の真実接触点の評価", 日本機械学会論文集, 65C-632 (1999) 1677
- 3) 藤巻 匡ほか: "固体間界面で一軸圧縮を受けた液晶および潤滑油の光誘起電流による評価", 日本機械学会東海支部第54期講演会 (2005)