

機関番号：17102

研究種目：若手研究 (A)

研究期間：2009～2010

課題番号：21686016

研究課題名 (和文) 高精度油膜温度計測に基づく弾性流体潤滑レオロジーモデルの再構築

研究課題名 (英文) Remodeling of Elastohydrodynamic Lubrication Rheology on the Basis of High Accuracy Temperature Measurements of Oil Film

研究代表者

八木 和行 (やぎ かずゆき)

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：50349841

研究成果の概要 (和文)：弾性流体潤滑状態において、各種潤滑油をを使用した際に出現する特異油膜形状に代表されるような、高圧・高せん断場でのレオロジー特性を明らかにすることを目的に、油膜厚さと温度の計測を行った。また、静的条件での相変化をダイヤモンドアンビルセルによって調べた。その結果、潤滑面の温度は極めて小さいことがわかった。また、静的条件における状態図との比較の結果、潤滑膜は接触域で圧力の影響のため固化を起し、特異油膜形状の発生に寄与していることを実験的に裏付けることができた。

研究成果の概要 (英文)：The purpose of this research project is to obtain better understanding of rheological characteristics of films driven in elastohydrodynamic conditions, in which high pressure high shear rate are applied to cause abnormal film shape. The temperature distributions of oil film and surfaces were measured by an infrared microscope with a high accuracy. The film thickness was measured by white light optical interferometry. In addition, a diamond anvil cell was used to make the phase diagram of lubricant under static conditions. It was found that the temperature rise was quite small in abnormal film shape even in high sliding conditions. The film thickness distribution appeared to change the shape because of solidification as a consequence of high pressure.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	15,400,000	4,620,000	20,020,000
2010年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
年度			
年度			
年度			
総計	21,300,000	6,390,000	27,690,000

研究分野：トライボロジー

科研費の分科・細目：設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：弾性流体潤滑、レオロジー、固化、弾塑性、油膜厚さ、温度

## 1. 研究開始当初の背景

数多くの機械要素の潤滑状態である弾性流体潤滑状態では、GPa オーダまで上昇する圧力や  $10^6$  /s オーダにまで達するせん断率のため、非ニュートン性流体として振舞うことが知られている。そのレオロジー的挙動は圧力、温度、そしてせん断率に敏感かつ複雑に絡み合う結果生み出されるものであるため、

トラクションの正確な予測はまだまだ困難である。事実、それを裏付けるかのように、いまだ数多くのレオロジーモデルが提案されている。その一方で、油膜厚さは、圧力、せん断率がそれほど高くない入り口部の状態によって決定されるため、ニュートン流体に基づいた理論モデルによって精度よく予測できると考えられている。このように、弾性

流体潤滑状態におけるトラクションおよび油膜厚さは、その発生場所がともに接触域であるにもかかわらず、一方は非ニュートン流体、もう一方はニュートン流体としての独立した取り扱いが可能であることが、これまでの研究によって得られた最も重要な知見かつ広く知れ渡った認識である。

しかし、最近、油膜厚さにおいても条件によっては、ニュートン流体を基礎とした理論モデルでは定性的にすら予測できない特異油膜形状が発生することがいくつか報告されている。最近、本研究代表者らはいくつかの条件において従来の理論モデルでは予測できない油膜形状を発見したが、この中でもアルコールの一種である 1-dodecanol(分子式  $C_{12}H_{26}O$ ) を潤滑油として使用した際、純転がり状態では以前より観察される油膜形状であったものが、滑りを発生させると油膜厚さのみならず、油膜形状が大きく変化することを明らかにした。この発生機構については、接触面温度は理論的見積りの結果、それほど高くなく、また、1-dodecanol の融点が実験温度に比較的近いものであることから、接触域で起こる固化現象によるものと推測している。

## 2. 研究の目的

弾性流体潤滑下では、潤滑油はニュートン流体ではなく、粘弾性、弾塑性体的な挙動を示すことがある。この中でも、弾塑性体的な挙動は、分子レベルの油膜厚さ領域から、連続体と見なせるような厚い油膜厚さ領域まで特異な現象が発見されているが、まだ現象の理解が不十分であるのが現状である。そこで、本研究では、弾塑性体領域でのレオロジー特性を、油膜温度と油膜厚さの計測より明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

実験においては、図 1 に示すようなボールオンディスク型の実験装置を用いて、油膜厚さの測定を行った。本実験装置は、透過ガラスディスクおよび直径 25.4 mm の軸受用鋼球との滑り転がり接触により点接触弾性流体潤滑状態を形成させる。両試験片はそれぞれ AC サーボモータによって駆動され、任意の滑り率が設定可能である。実験中はディスク、ボールそして潤滑油をチャンバー内に保持し、温度を  $\pm 0.1$  °C の精度で制御している。本研究では、潤滑油として、アルコール、酸、アミン、塩、アルカンを用いた。表 1 に各潤滑油の融点を示す。

油膜厚さの計測においては、光干渉法を用いて行った。実験装置上部に設置している金属顕微鏡を通してハロゲンランプを光源とした白色光を入射させ、鋼球との接触面に蒸着している厚さ約 20 nm の Cr 膜と鋼球間で

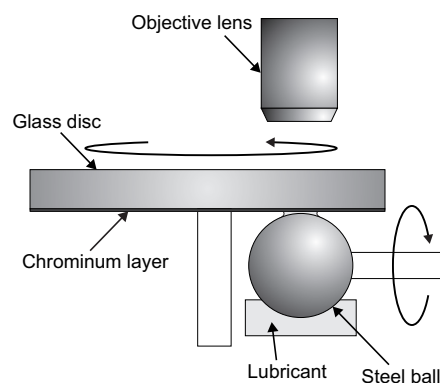


図 1 実験装置概略図

表 1 潤滑油の融点

lubricant	molecular formula	melting point
decanol	$C_{10}H_{22}O$	7 °C
benzylalcohol	$C_7H_8O$	-15 °C
ethyleneglycol	$C_2H_6O_2$	15-25 °C
glycerine	$C_3H_8O_3$	28 °C
lauric acid	$C_{12}H_{24}O_2$	44 °C
chlorotetradecane	$C_{14}H_{29}Cl$	-3 °C
dodecylamine	$C_{12}H_{27}N$	25 °C
tetradecane	$C_{14}H_{30}$	6 °C
hexadecane	$C_{16}H_{34}$	18 °C



図 2 顕微鏡型赤外放射温度計

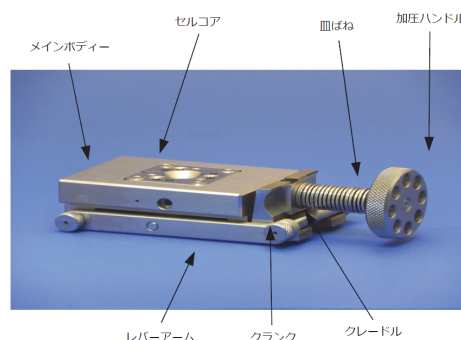


図 3 ダイヤモンドアンビルセル

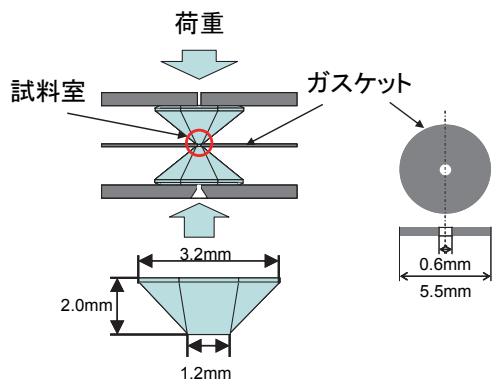
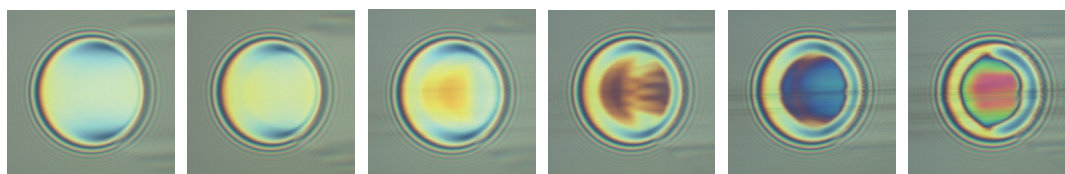


図4 セル部分の構造

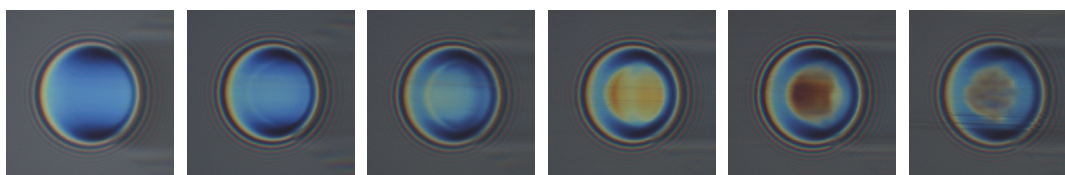
起こる干渉縞をデジタルカメラで撮影した。温度計測については、InSbの検出素子を  $320 \times 256$  持つ赤外放射温度計を用いて行った。図

2 に赤外放射温度計の写真を示す。この赤外素子の検出波長域は  $1 \mu\text{m}$  から  $5 \mu\text{m}$  である。また、この赤外放射温度計には、顕微レンズが取り付けられており、空間分解能約  $6 \mu\text{m}$  で測定可能なものである。

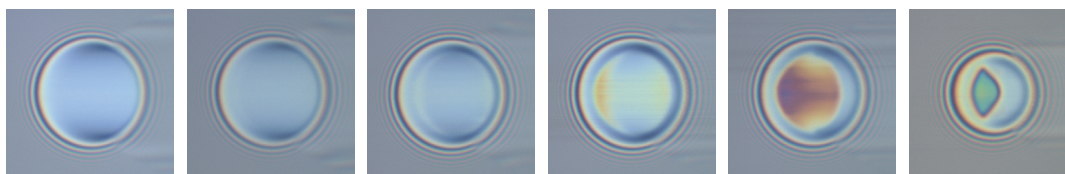
潤滑油の静的条件における、相変化の観察には、ダイヤモンドアンビルセルを用いた。図3に実験装置の写真、図4にセル部分の模式図を示す。この装置は、直径  $0.6 \text{ mm}$  の穴が設けられたガスケットに潤滑油を満たして対向した二つのダイヤモンドを圧縮させることにより、潤滑油内に高圧力を発生させるものである。圧力の同定には、潤滑油内に混入させたルビー片の蛍光スペクトルの圧力依存性を利用し、Raman分光法によって測定を行った。そして、顕微鏡により、ガスケット内に封入された潤滑油のようすを観察した。



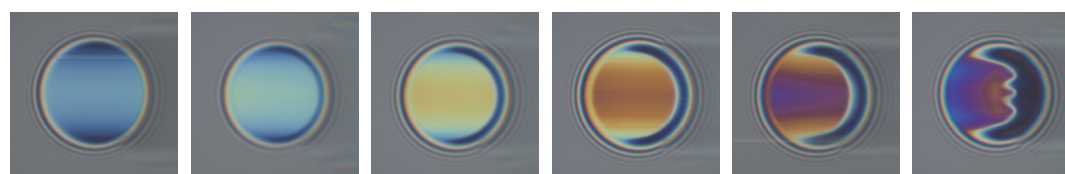
(a) lauric acid  $u_m=2.5 \text{ m/s}$ ,  $p_{hmax}=0.52 \text{ GPa}$ ,  $T=52 \text{ }^\circ\text{C}$



(b) chlorotetradecane  $u_m=4.0 \text{ m/s}$ ,  $p_{hmax}=0.52 \text{ GPa}$ ,  $T=20 \text{ }^\circ\text{C}$



(c) dodecylamine  $u_m=4.5 \text{ m/s}$ ,  $p_{hmax}=0.52 \text{ GPa}$ ,  $T=29 \text{ }^\circ\text{C}$



(d) n-hexadecane  $u_m=4.5 \text{ m/s}$ ,  $p_{hmax}=0.52 \text{ GPa}$ ,  $T=20 \text{ }^\circ\text{C}$

図5 直鎖系潤滑油を用いた際の特異油膜形状の出現



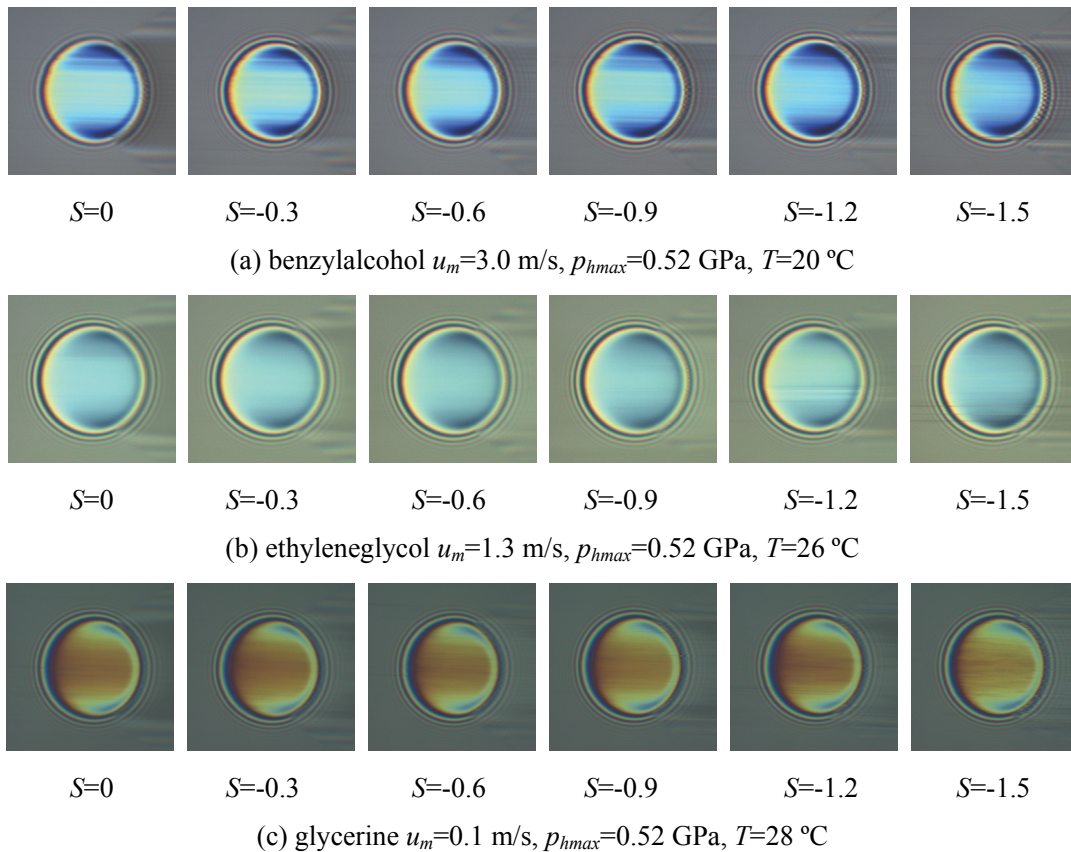


図 6 直鎖系潤滑油でない場合の油膜形状

#### 4. 研究成果

図 5 に直鎖系潤滑油を使用した際の滑り率を変化させた際の干渉縞を示す。この際、パラメータとした滑り率  $S$  は、以下の式で与えられる。

$$S = \frac{u_b + u_d}{u_m} \quad (1)$$

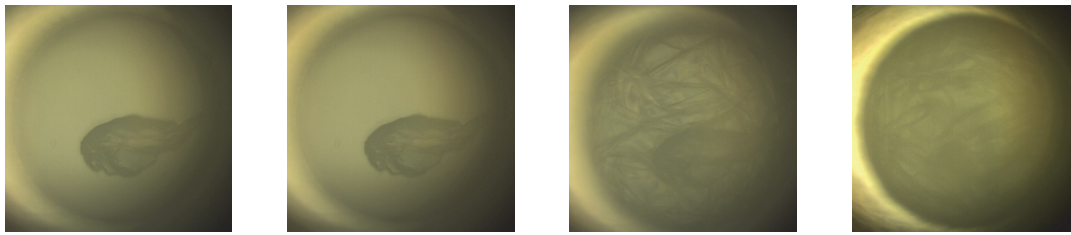
ここで、 $u_b$  はボール回転速度、 $u_d$  はディスク回転速度、 $u_m=(u_b+u_d)/2$  は引込み速度である。また、純転がりの際の中心油膜厚さはおおむね 100 nm から 200 nm になるように周囲温度および引込み速度  $u_m$  を設定した。酸、アミン、塩、そして無極性油である *n*-hexadecane においても、純転がり状態では、通常油膜形状であるが、滑り率の増加とともに油膜が増加し、1-dodecanol を潤滑油に使用した際に観察されたものと類似の特異油膜形状が出現するようすがみられた。このことから、特異油膜形状の出現と、潤滑油の分子の末端にある極性の有無および種類は関係ないことが明らかとなった。温度測定結果については、温度測定の際にはディスクを赤外透過材料であるサファイアに取替えて行ったが、潤滑面

はほとんど温度の上昇を確認できなかった。

図 6 に直鎖系潤滑油でない benzylalcohol, ethyleneglycol, glycerine を潤滑油に使用した際の油膜形状を示す。図に示すとおり、滑り率が増加しても形状および油膜厚さは変化せず、同様の形状を保っていることがわかる。これら潤滑油における温度上昇もほとんど確認できなかった。温度上昇が見られなかった点は、油膜形状、厚さが滑り率によってほとんど変化していない点からもうかがうことができる。

図 7 に 1-dodecanol の場合のダイヤモンドアンビルセルでの昇圧時の相変化のようす、図 8 にその際の Raman shift の変化のようすを示す。圧力が上昇し、160 MPa に達すると、1-dodecanol が結晶化を起しているようすがわかる。また、その際の Raman shift を見ると、相変化が起こった際にスペクトルが局所的なものに変化している。このことから、少なくとも、静的な条件においては、1-dodecanol は動的な条件よりも小さい 160 MPa で固化を起していることが明らかとなった。

以上のとおり、動的な条件における実験によって得られた温度と、静的な条件において得られた相変化のようすから、特異油膜形状は潤滑油の結晶化によって起こっていることを有力な説として提案することができた。



(a) 加圧前 (b) 160 MPa (c) 160 MPa 一分経過後 (d) 250 MPa

図7 ダイヤモンドアンビルセルでの 1-dodecanol の相変化の様子 (温度 55 °C)

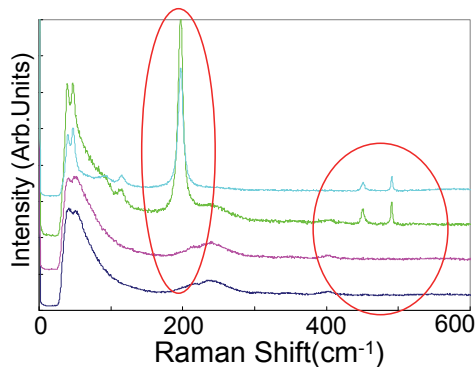


図8 Raman shift の変化のようす

本研究で得られた結果を要約すると以下のようになる。

- [1] 直鎖状分子かつ極性が一価の場合、末端の種類によらず特異油膜形状が出現した。
- [2] 無極性分子のアルカンでも特異油膜形状が出現した。
- [3] 二価、三価およびベンゼン環を有するアルコールでは特異油膜形状は出現しなかった。
- [4] 潤滑面の温度上昇は極めて小さかった。
- [5] 潤滑面の圧力および温度条件における静的な条件では、特異油膜形状が出現した潤滑油は結晶化していた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- [1] 八木和行, 様々な潤滑剤での EHL —アルコール—, トライボロジスト, 査読有, Vol.56, No.1, 2011, pp.30-36.

[学会発表] (計 4 件)

- [1] 井上耕介, 八木和行, 杉村丈一, 弾性流体潤滑条件における特異油膜形状の直接観察, 日本機械学会長崎講演会, 2009 年 10 月 10 日, 長崎, pp.177-178.
- [2] 井上耕介, 八木和行, 杉村丈一, 低粘度弾性流体潤滑における油膜挙動, 日

本機械学会九州支部講演会, 2010 年 3 月 15 日, 熊本, pp.25-26.

- [3] 井上耕介, 八木和行, 杉村丈一, 弾性流体潤滑下における油膜形状と潤滑油の分子構造との関係, トライボロジー会議 東京, 2010 年 5 月 17 日, 東京, pp.183-184.

- [4] Kazuyuki Yagi, Kosuke Inoue, Joichi Sugimura and Philippe Vergne, Relationship between elastohydrodynamic film shape and lubricant molecular structure, The 37th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, 2010 年 9 月 8 日, Leeds (United Kingdom)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

八木 和行 (YAGI KAZUYUKI)

九州大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 50349841