

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：82708

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04596

研究課題名(和文) 電場付与による油浸金属部材の潤滑・除熱特性の向上とそのメカニズムの解明

研究課題名(英文) Improvement of lubrication / heat removal characteristics of oil-soaked metal members by applying an electric field and elucidation of the mechanism

研究代表者

田村 賢 (Tamura, Satoshi)

国立研究開発法人水産研究・教育機構・水産大学校・准教授

研究者番号：20367832

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：電場を付与することにより、初期温度の異なる2つの金属体間の薄い油膜における熱伝達向上について評価した。脂肪酸(ラウリン酸及びオレイン酸)及び飽和炭化水素(スクアラン)を供試油とした。金属体間の距離0.27 mmで電界強度が約 $1.2 \times 10$  V/mにて、高温体を正極とした実験条件では、ラウリン酸膜の熱伝達係数は著しく向上し、その値は無電界の場合の3.2倍となった。しかしながら、そのような向上は、分子が非極性基からなるスクアランでは観察されなかった。加熱された金属表面近傍の脂肪酸分子の熱対流、吸着、脱着によって誘起される電気対流によって熱伝達の向上が実現されたと考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

脂肪酸が含まれた油を用いて金属(高温側)-油膜-金属(低温側)となる組合せの伝熱界面を形成し、金属間に直流電圧を印加して伝熱界面部に電場をかけると、電気対流現象により熱の伝達が著しく改善されることが明らかになった。油膜を挟んだ金属間の熱伝達係数は電場の付与によって数倍向上する。この現象は、材料加工、潤滑システム、食品加工などの高度化に寄与するものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：By applying an electric field, the enhancement of the heat transfer ability in a thin oil film between two metallic bodies with different initial temperatures was evaluated. Fatty acids (lauric acid and oleic acid) and a saturated hydrocarbon (squalane) were used as test oils. In the applied experimental condition of the high-temperature body as a positive electrode with an electric field of approximately  $1.2 \times 10$  V/m in the gap distance 0.27 mm, the heat transfer of the lauric-acid film improved remarkably, with its value being 3.2 times that in the no-electric-field case. However, such improvement was not observed with squalane, whose molecules comprise a nonpolar group. It was considered that the improvement of heat transfer is realized by electroconvection, which is induced by thermal convection, adsorption, and desorption of the fatty-acid molecules near the surface of the heated metal.

研究分野：材料工学, 生産技術

キーワード：電場付与 脂肪酸 電気対流 熱伝達

## 1. 研究開始当初の背景

脂肪酸分子は極性基であるカルボキシル基を持っており、金属やセラミックスなどの材料表面への付着力は大きい。材料表面近傍での脂肪酸分子の挙動は電場の影響を受けやすいと言える。脂肪酸添加油を用いた潤滑・冷却系においては、電場付与によって潤滑(耐焼付き)特性や熱伝達特性の大幅な向上が期待できる。本研究課題の学術的な特色は、金属表面における脂肪酸分子の電場による強制的な吸着・脱離、流動によるものと仮定して、これらの素過程を解明・評価し、新たな潤滑・除熱・洗浄技術の確立に資するところにある。脂肪酸添加油の電場付与による潤滑・熱伝達特性の向上については、これまで、これと類似の現象を的確に指摘し、説明した報告例はない。

この現象の大きな利点として、簡便な機構で潤滑や熱伝達の大幅な向上が期待されることが挙げられる。産業機械の運用や金属加工プロセスにおける潤滑技術の高度化のみならず、熱交換技術の発展も期待される。以上のことから、本研究課題は、工学的に重要であり、得られる成果は、潤滑技術や伝熱技術および金属加工プロセスの新規発展に大きく貢献するものと考えられる。

研究計画段階で本現象の産業への展開として考えられていたことは以下の通りである。

### ●産業機械運用や金属加工における潤滑技術の発展

摩擦部位の電場を制御することにより、積極的に脂肪酸分子を配向・吸着させる。熱や摩擦による脂肪酸分子の金属表面からの脱離を抑制し、また、脱離箇所への脂肪酸分子の補充を促進し、金属同士の接触を抑えることで潤滑性能の向上が期待できる。船用機械を始めとする産業機械の運用や金属加工プロセスにおける潤滑性能向上技術として発展が期待される。

### ●油冷系における除熱特性の大幅な向上

脂肪酸添加油中の高温金属に電場を付与することにより、脂肪酸分子の金属からの吸着と脱離が促進され、金属表面から熱を積極的に除去することが可能であると考えられる。また、逆に高温油から浸漬金属部品への効率的な入熱も可能であると考えられる。熱交換器の高効率化や鋼材の焼戻しなどへの応用が期待される。電場の密度を制御することにより、局所的な熱伝達特性の制御が可能であると考えられる。

### ●金属表面からの脂肪酸除去(洗浄)技術

現在、金属製品を加工する際の加工油に生分解性が高い脂肪酸または脂肪酸エステルを用いることが普及しつつある。現在、加工後の製品から脂肪酸(亜鉛や銅などを腐食させる)を除去するためには有機溶剤が用いられており、健康被害や環境中への漏洩を防ぐことが重要となっている。電場付与制御による脂肪酸分子の脱離促進を加工後の洗浄工程に適用すれば、より安全な溶剤を選択することができ、環境負荷を抑えつつ短時間で能率的な洗浄が可能になると期待される。

## 2. 研究の目的

本現象を機械類の潤滑技術や金属加工プロセスや洗浄技術へ展開するためには、どこまで潤滑・熱伝達特性が向上するのかという疑問に答える必要がある。そのためには、電場付与によって潤滑・熱伝達特性が制御(向上)できる本現象について、熱伝達実験によって得られた知見を基にメカニズム解明を目指す。

## 3. 研究の方法

### 料油について

供試油として、脂肪酸には不飽和脂肪酸としてオレイン酸、飽和脂肪酸としてラウリン酸を用いた。比較のために極性基を持たない飽和炭化水素(スクアラン)も供試した。

### 電場付与した金属試験体間の試料油膜を介した伝熱測定

油膜を挟んだ2つ1組の金属試験体に電場を付与した状態で、油膜を介した熱伝達が評価できる実験系を構築した。図1(a)に試験機の概略図、(b)に金属試験体の寸法形状を示す。蓄熱体もしくはヒートシンクとなる金属試験体にはφ24.9 mm×90 mmのステンレス(SUS304)丸棒を用いた。K型φ1 シース熱電対を試験体円柱の一端から8 mm, 30 mm, 50 mmの位置にそれぞれ取り付けた。熱電対には、予め伝熱促進剤を塗布し、熱流に対して直角になるように試験体に挿入した。この2つ1組の試験体は、互いの端面を対向させて使用する。これら試験体の端面(伝熱面)の粗さは $R_a 0.12$ であった。

測定の手順としては、まず、上部試験体をガスバーナで455 Kを超える温度まで加熱する。加熱した試験体において3点(U1~U3)での測定温度が一樣に455 Kを示すまで放置する。上部試験体の下端面(伝熱面)を下部試験体の試料油を適量盛った上端面(伝熱面)に油膜を介して接触させ、熱の伝達を開始させる。上部試験体から下部試験体への熱の伝達による温度変化を各挿

入熱電対 (U1~U3, L1~L3) にて測定し, レコーダで記録する。本研究では, 図 1 (c) に示すように, 伝熱測定時の面間距離を 0.27 mm ~ 0.33 mm とし (スペーサを用いて予め調整), 測定中には, それらの間に試験油が充填された形となる。このときの油膜にかかる圧力は 0 Pa (ゲージ圧) である。また下部試験体の初期温度は 321 K 付近に調節した。電場付与は下部試験体の支持部を絶縁加工して実施した。上下試験体に直流定電圧を 0 - 480 V の範囲で印加した。このたび用いた試料油はいずれも絶縁性が高く, 伝熱測定中に油膜を通過する電流が検出されることはなかった (検出限界 10 mA 以下)。

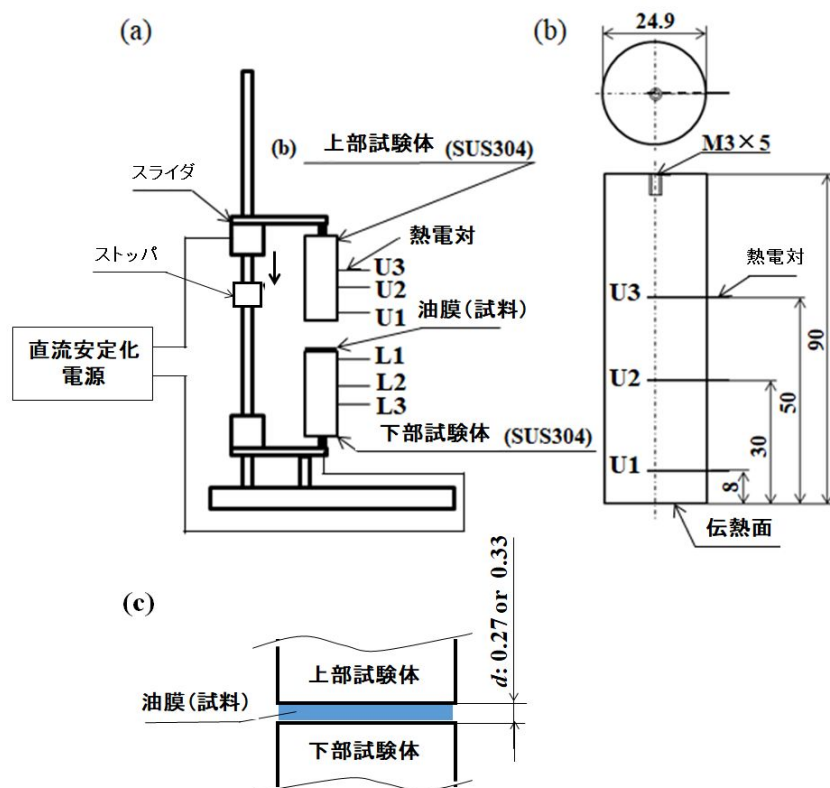


図 1 (a) 作製した熱伝達試験機の概略図, (b) 金属試験体の寸法形状, (c) 試験体に挟まれた油膜

数値計算による伝熱シミュレーションと油膜を挟んだ界面の熱伝達係数

実験条件下で得られた金属試験体各所の温度履歴を数値計算 (非定常伝熱) によって再現し, 試験体間の油膜を介した熱の受け渡し特性を評価する。油膜を挟んだ 2 つの試験体間での熱の受け渡しを支配する係数 (界面熱伝達係数とする) をフィッティングパラメータとして, 実験による温度履歴 (6 本) と計算による温度履歴 (6 本) が一致するように界面熱伝達係数を決める。試験体内部において, ある場所での, ある時間経過後の温度  $T$  を記述するための非定常熱伝導方程式は次式の通りである。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k(T) \operatorname{div}(\operatorname{grad} T)$$

$k(T)$ : 熱拡散係数

上部試験体から下部試験体への熱流束  $q$  は, 以下のように表現できる。

$$q = h(T_u - T_l)$$

$T_u$ : 上部試験体下端面温度  
 $T_l$ : 下部試験体上端面温度

ここで,  $h$  は油膜を介した熱伝達の係数であり, 上述の界面熱伝達係数である。  $h$  の温度依存性については考慮していない。試験体表面から空気中へ放出される熱流束  $q_A$  は, 以下のように表現できる。

$$q_A = h_A(T - T_A)$$

$h_A$ : 対流熱伝達係数  
 $T_A$ : 雰囲気温度

試験体支持部からの熱の逃げは無視している。試験体表面の対流熱伝達係数  $h_A$  は加熱した上部試験体の放冷実験から求めたものを用い,  $16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  とした。

## 4. 研究成果

### 試験方法の確立 油膜を挟んだ金属 金属界面における熱伝達係数の見積もり

電場付与した熱伝達試験を行う前に本研究のために作製した実験系による実測値（電場付与無し）と数値シミュレーションによる計算値が良い一定を示すかを確認した。伝熱開始時の上下試験体の面間隔を 0.27 mm とし、その隙間に試験油を満たした場合の試験体内部各所（U1-U3, L1-L3）での温度履歴を図 2 に示す。また、3.3 に基づいた数値計算を行い、界面熱伝達係数をフィッティングパラメータとして実測値にフィットさせた計算値を図 2 に黒い実線にて重畳表示している。このフィッティング結果から、ラウリン酸層を介する試験体伝熱界面の熱伝達係数は無電場の場合、 $0.69 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ であった。表示温度域では、実測値と計算値は良い一致を示しており、この温度域では界面熱伝達係数が温度に依存せず、ほぼ一定（界面からの試験油の漏出は無し）であることが示されている。実測値と計算値の良い一致が確認できたことから、本研究で作成した伝熱シミュレーションの計算コードは本研究で作製した試験装置で熱伝達を評価するのに妥当なものであると言える。

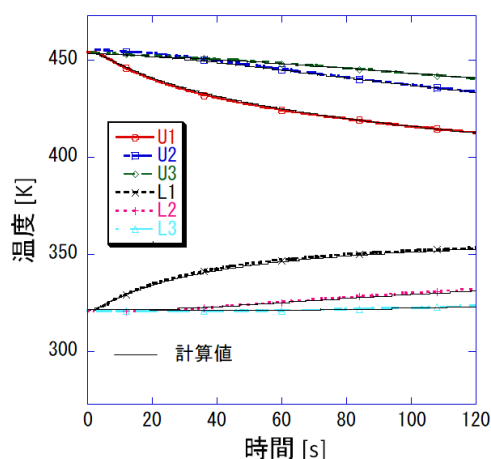


図 2 ラウリン酸層（厚さ 0.27 mm）を介した熱伝達試験における金属試験体中の温度履歴

### 電場付与時の界面熱伝達係数の増大について

上下試験体間に厚さ 0.27 mm のラウリン酸層を挟み、上部試験体側（高温側）を正極として試験体間に 310 V を印加した場合（電界強度は約  $1.2 \times 10^6 \text{ V}/\text{m}$ ）の伝熱挙動を調べた。この時の試験体内部各所（U1~U3, L1~L3）での温度履歴を図 3 に示す。同図中には、数値計算による温度履歴を実測値にフィットさせたものを黒い実線にて重畳表示している。この伝熱界面の熱伝達係数は  $2.20 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ と見積もられた。これは、電圧を印加しない場合の 3.2 倍となる。上下試験体への印加電圧の極性を入れ替えた場合（高温側が負極）、界面熱伝達係数は  $1.37 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  となり、これは電圧を印加しない状態での約 2 倍にとどまる。

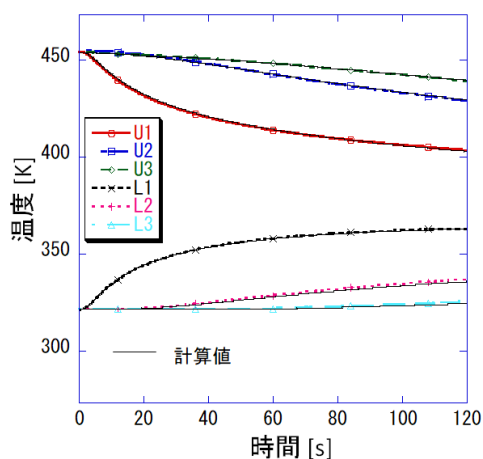


図 3 310 V の電圧を印加（高温側が陽極）したときのラウリン酸層（厚さ 0.27 mm）を介した熱伝達試験における金属試験体中の温度履歴

### 極性基を持つ脂肪酸膜と極性基を持たないスクアラン膜の電場付与時の熱伝達挙動

厚さ 0.27 mm のラウリン酸層、オレイン酸層および、スクアラン層の界面熱伝達係数を 0 ~ 480 V の電圧印加条件で測定したものを図 4 に示す。各点は 3 回測定した平均値であり、エラー

バーの両端は最大値と最小値を表している。ラウリン酸は上部試験体(高温側)を正極とした場合、310 Vまで印加電圧の増加と共に界面熱伝達係数が増大し、410 V以上の印加電圧においては、界面熱伝達係数が低下する。上部試験体を負極とした場合は410 Vまで印加電圧の増加と共に界面熱伝達係数が増大し、480 Vで低下傾向が見られた。界面熱伝達係数は410 Vのとき最大になったが、無電場下のその約2.4倍にとどまる。本実験条件(試験体材質、油種などの組み合わせ)においては、高温側を正極としたほうが高温側を負極とした場合と比べて界面熱伝達係数の増大率が大きくなることが示された。

オレイン酸層の無電場下の界面熱伝達係数は  $0.85 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  と、ラウリン酸よりも高い値を示す。印加電圧増加とともに熱伝達の向上が見られるのは、ラウリン酸の場合と同様であるが、電圧が高い領域で印加電圧増加と共に界面熱伝達係数が低下傾向に転じるという挙動は480 Vまでには見られなかった。上部試験体を正極とした場合、310V以上の印加電圧において、最大の界面熱伝達係数  $1.90 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  を示した。これは電圧を印加しない状態での値の2.2倍である。高温側を負極とした場合でも、印加電圧の増加とともに界面熱伝達係数が増大し、最も高くなる480 Vにおいては、電圧を印加しない状態での値の約2倍程度となる。ラウリン酸での実験結果と同様に、高温側を正極としたほうが界面熱伝達係数の増大率は大きくなることが確認できる。

飽和炭化水素であるスクアランは、電圧を印加しない状態での界面熱伝達係数は  $0.51 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  程度と供試油中、最も低い値であった。界面油膜に480 Vまでの電圧を印加しても界面熱伝達係数の増大は見られなかった。電場付与による油膜の熱伝達向上を実現するには、極性基を持つ分子が含まれている必要があると言える。

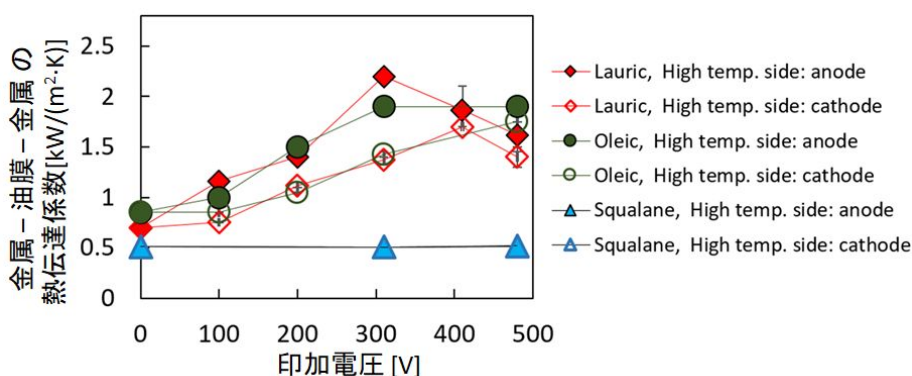


図4 厚さ 0.27 mm の脂肪酸膜および、飽和炭化水素油膜の界面熱伝達係数と印加電圧の関係

電場付与による油膜の熱伝達が向上する現象は、電場によって電極(試験体)に引き寄せられた脂肪酸分子がチャージインジェクションを起こし、脂肪酸膜内で電気対流が発生したことが原因であると考えられる。本実験条件では、電場を付与することにより界面熱伝達係数が最大3.2倍増大した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田村賢, 田村征博
2. 発表標題 電場印加による脂肪酸層の熱伝達向上
3. 学会等名 TOKAI ENGINEERING COMPLEX 2020東海支部第70期総会講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田村賢
2. 発表標題 電場印加による2金属体界面における脂肪酸膜の熱伝達向上
3. 学会等名 日本機械学会九州支部 第74期総会・講演会講演論文集
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	佐々木 千鶴  (Sasaki Chizuru)  (50452652)	徳島大学・大学院社会産業理工学研究部(生物資源産業学域)・准教授    (16101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------