

令和元年6月21日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06058

研究課題名(和文)油膜内部の放電可視化技術を用いた軸受電食の原理解明

研究課題名(英文) Principle elucidation of electrical pitting using visualization technique within lubricating oil film

研究代表者

砂原 賢治 (Sunahara, Kenji)

福岡工業大学・工学部・准教授

研究者番号：80757104

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：最も重要な成果は下記2点である。軸受電食の原理の完全解明には至っていないが、今後さらに調べ、完全解明を目指す。

(1)油膜で生じている放電現象：油膜内部で生じる放電は白い点(白点)として観察される発光時だけでなく、発光後に生じる黒い点(黒点)に変化して電流を流し続け、軸受に電食の損傷を与えていることを明らかにした。(2)洗濯板状電食痕のピッチ：電食痕のピッチがヘルツ楕円短径 $2b$ の2倍になることを確認し、チューリングパターンをヒントに洗濯板状電食痕のピッチ決定ルールの仮説を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

軸受電食とは油膜内部の放電で軸受が溶融損傷する現象と言われており、モータの故障原因になっている。軸受が電食しているモータの軸受部の電流を測定すると、通電とも言える常時連続した流れであり、放電特有の一瞬だけの流れでないことに疑問を持っていた。今回の研究成果(1)より、モータ軸受部の電流が常時流れることの説明ができるようになった。また、今回の研究成果(2)より、電食痕が洗濯板状になる理由も説明できるようになった。本研究により軸受電食の原理が少しずつ分かってきており、完全に解明できれば、最終ゴールである軸受電食の防止方法を提案でき、モータを長期間安定して運転できるようになる。

研究成果の概要(英文)：The most important achievements are the following two points. Although the principle of the electrical pitting has not been fully elucidated, we will investigate further and aim for complete elucidation.

(1) Discharge phenomenon occurring within lubricating oil film: It was clarified that the bearing could be damaged by flowing the current not only at the time of light emission observed as a white point but also after changing from the white point to a black point. (2) The pitch of washboard/Fluting (W/F) pattern caused by electrical pitting: We confirmed that the pitch of the W/F pattern is twice the minor axis,  $2b$ , of the Hertzian contact ellipse, and proposed that the rule for determining the pitch of W/F pattern using the analogy of the Turing pattern theory.

研究分野：機械設計、トライボロジー

キーワード：軸受 電食 放電 油膜 チューリングパターン 洗濯板

# 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

図1にモータに使われている典型的な軸受を示す。軸受は鋼で出来ており、外輪、玉、内輪で構成されている。潤滑は軸受に封入した潤滑油で行われており、モータ運転中には外輪と玉、玉と内輪の間にサブミクロンの厚さの油膜が形成されている。つまり外輪と内輪は電気的に絶縁されている。この油膜に絶縁破壊電圧以上の電圧が印加されると、放電という形で電流が流れる。このときに起こる損傷が軸受電食である。電食痕は図2のように、放電ピットが集合して洗濯板状に形成されることが多く(なぜ洗濯板状になるかは研究課題である)、騒音の原因になる。対策としてセラミック軸受があるが、コストが高い・納期が遅いという問題があり適用できない。産業界は有効な対策を求めている。

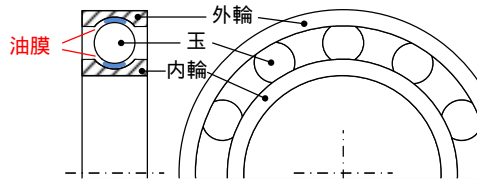


図1 玉軸受の構造

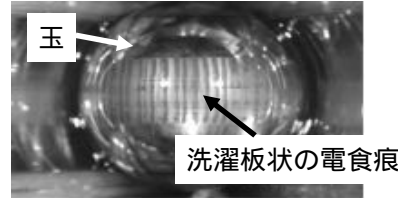


図2 軸受電食の損傷例 1mm

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、モータの故障原因の一つである軸受電食の原理を明らかにすることである。軸受が電食するとモータは騒音を発生し使えなくなる。電食が進むとモータがロック(急激な回転停止)するという深刻な状況にもなる。この軸受の電食が省エネルギーを狙い広く普及しているインバータ駆動モータで起こっている。インバータは家庭用エアコンや、鉄道車両、そして工場の生産現場など、あらゆる分野でモータを最適効率で運転させるために広く使われている。環境に優しい電気自動車や風力発電(発電機=モータ)など、インバータと組合せて使われるモータは今後さらに増えていくと予測される。本研究により軸受電食の原理が明らかになれば有効な対策に繋がり、省エネを狙うインバータ駆動モータの信頼性を高めることができる。

## 3. 研究の方法

(1) 油膜で生じている放電現象: 図3に実験装置を示す。ガラスディスク下面にコーティングしたITO膜(液晶パネルに使われる透明導電膜)により、電流を流しながら接触面の観察を可能にしている。この装置を用い、油膜で生じている放電現象を詳細に調べた。

(2) 洗濯板状電食痕のピッチ: 図4に実験装置の模式図を示す。まず装置Aは、二円筒式の実験装置で、軸方向に平坦なフラットローラと、軸方向に曲面加工しているクラウンローラで構成され、電流はクラウンローラからフラットローラに流れる。装置Bは、a、b、cの3個の軸受内輪で1個のボールを挟む構造となっており、bとcの内輪に電圧を印加するとボールを経由して電流が流れる。この2種類の装置で洗濯板状電食痕を形成し、ピッチ決定ルールを調べた。

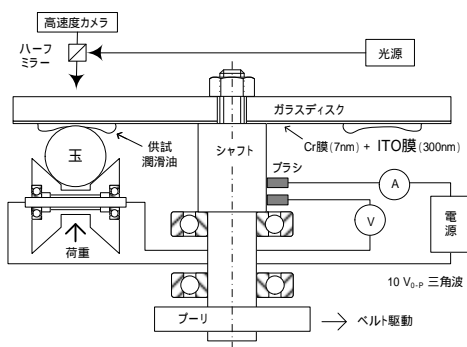


図3 油膜内部の放電可視化装置

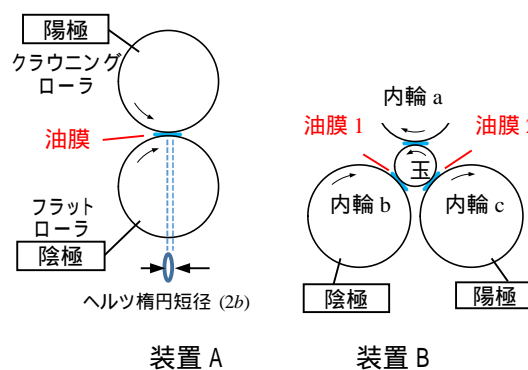


図4 洗濯板状電食痕の形成実験装置

## 4. 研究成果

(1) 洗濯板状電食痕の形成メカニズム(学会発表): 油膜内部の放電可視化装置(図3、油膜1枚)では希頻度でしか放電が見られない。実際の軸受(図1)では油膜は2枚あり、2枚同時に放電できるかに疑問がある。今回、極端な例として油膜3枚だと放電できないだろうと予測し、図4の装置Aと装置Bを直列に繋いで実験した。その結果、油膜3枚で洗濯板状電食痕が形成された。油膜3枚でも放電していることに驚くと共に、形成された洗濯板状電食痕がスイッチ的作用をし、電流を切り替えることが分かった。これは、軸受で言えば2枚の油膜が相互に影響し合い電流の切り替わりをして洗濯板状電食痕を形成していく可能性を示唆している。

(2) 洗濯板状電食痕のピッチ決定ルール(学会発表 ): 洗濯板状電食痕のピッチがヘルツ楕円短径  $2b$  の2倍になることを、装置 A と装置 B を使って、速度と荷重を変化させて調べた。図 5 に洗濯板状電食痕のピッチに及ぼす回転速度と荷重の影響を示す。洗濯板状電食痕のピッチは、ばらつきがあるため図 5 にはエラーバーで表示している。この実験では、洗濯板状電食痕は成長途中であり、完全に成長するとエラーバーの下限に収束すると考えている。つまり、洗濯板状電食痕のピッチは、ヘルツ楕円短径  $2b$  の2倍になる。

チューリング<sup>1)</sup> はシマウマなどの生物の体表面にある縞が形成されるメカニズムを、細胞間に働く 近距離と 遠距離の2つの化学的な相互作用によるものと説明している。この考え方をヒントに、洗濯板状電食痕が形成される2つの作用の仮説(図6)を提案した。

近距離作用: (a)平面上で生じる放電で1個の放電ピットが形成される。(b)放電ピット周辺は溶融生成物で盛り上がり突起形状になっており電界集中して放電を誘発し凹形状が進行する。逆に、(c)突起部が相手材に押し潰されてフラットになる場合もある。

遠距離作用: 接触部(放電可能部)は楕円短径の長さの中で最も放電しやすい場所で放電する。電食痕は白縞部が凹、黒縞部が凸となっている。電界集中箇所が多くある凹形状の白縞部で放電し、フラットな凸形状の黒縞部では放電しない。(a)対向面が白縞の場合は白縞に放電する。(b)自材が右に移動し、対向面の黒縞の割合が多くなると、電界集中箇所が多くある白縞部に優先的に放電する。(c)自材がさらに右に移動する際、黒縞部では放電をせず(フラットな面の黒縞部では電界集中箇所が少なく、放電距離が近いにも関わらず放電しにくい)次の白縞部で放電する。(a)~(c)が繰り返され、黒縞部がヘルツ楕円短径だけ残る。よって、ピッチがヘルツ楕円短径  $2b$  の2倍になる。

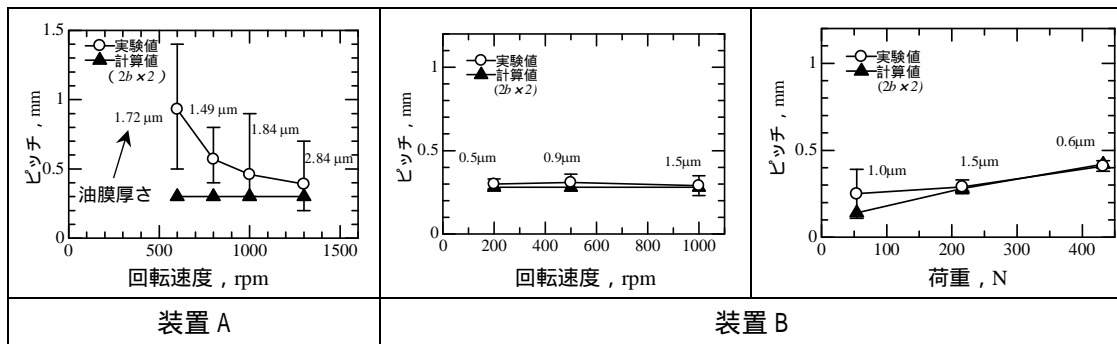


図5 洗濯板状電食痕のピッチに及ぼす回転速度と荷重の影響

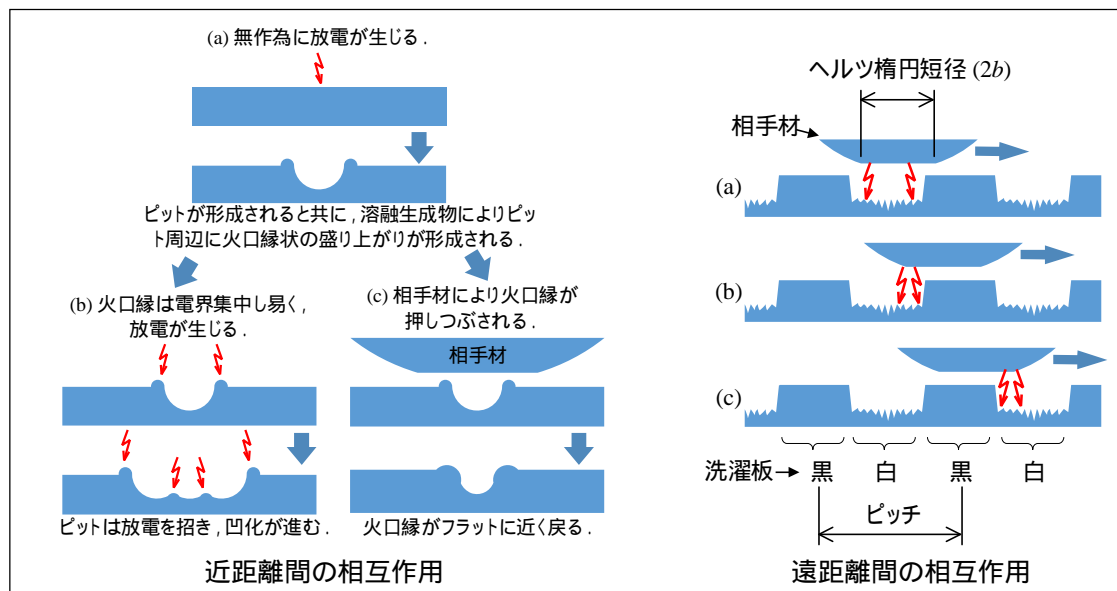


図6 洗濯板状電食痕の形成時に働く相互作用の仮説

(3) 油膜で生じている放電現象(雑誌論文 ): 油膜内部の放電可視化装置(図3)を用い、油膜で生じる放電現象を詳細に調べた。これまでは白い発光(以下、白点)の数が多いと放電が多い、すなわち電食し易いと評価するに留まっていた。しかし、白点によって生じる放電痕は黒い点(以下、黒点)となる場合があり、黒点で電流が流れ続けたりすることが分かってきた。図7に、今回得られた油膜放電時の電流波形と高速度カメラ画像を示す。従来の観察では、典型的な放電、つまり白点が現れ電流が流れるというパターンしか考えてなかった。黒点がヘルツ円の中にある限り電流が流れ続けるパターン あったり、次の黒点にバトンタッチして

長時間電流が流れるパターン があることが分かった。研究代表者は、軸受が電食しているモータの軸受部の電流を測定すると、通電とも言える常時連続した流れであり、放電特有の一瞬だけの流れではないことに疑問を持っていた。今回のパターン の発見により、その説明ができるようになった。軸受が電食するとき電流が連続して流れる理由は、黒点がヘルツ円の中でバトンタッチするためである。

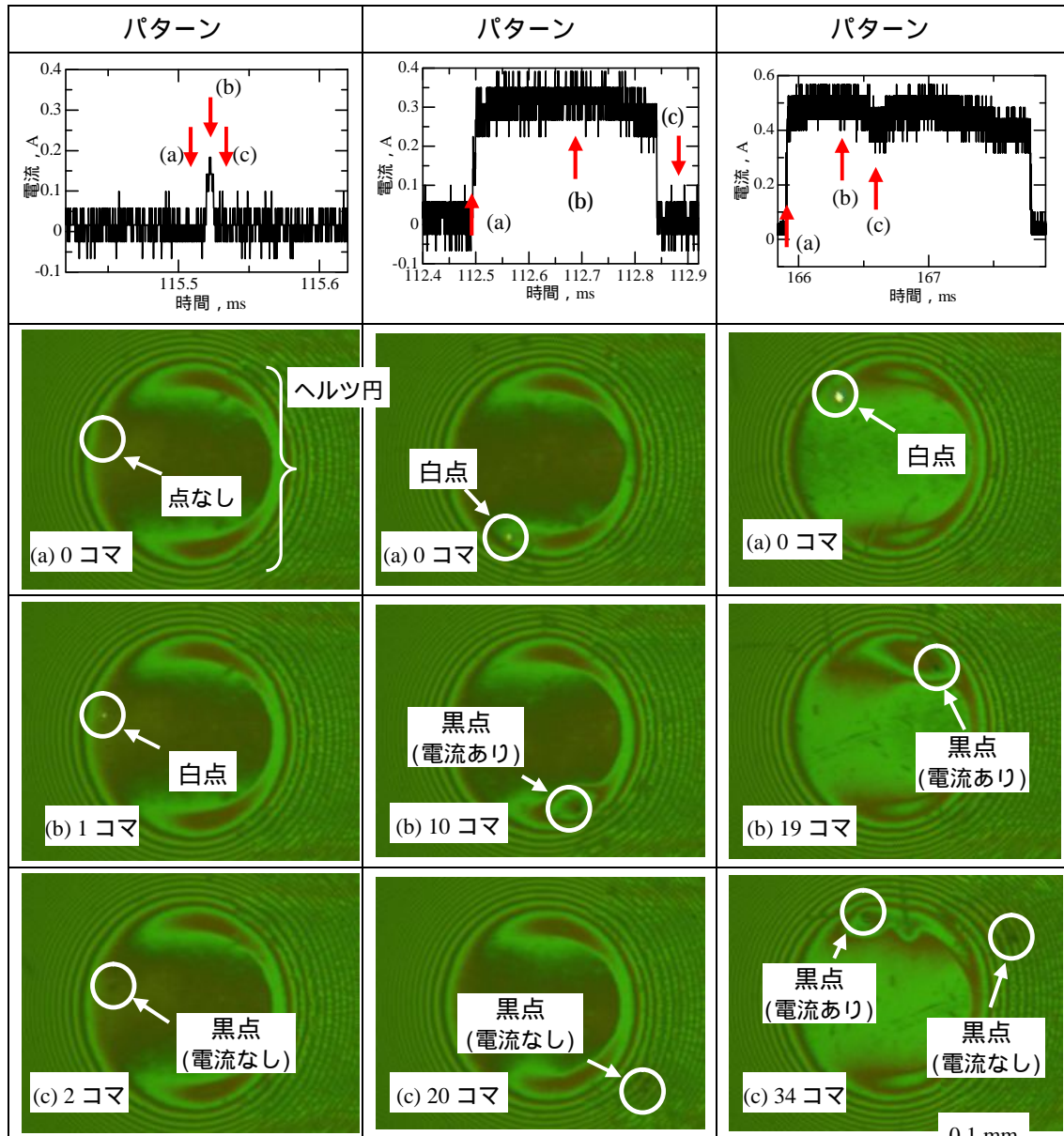


図7 油膜放電時の電流波形と高速度カメラ画像 (20  $\mu$ s/コマ)

(4) 洗濯板状電食痕の数理モデル (学会発表) : 洗濯板状電食痕の形成を簡単な数理モデルで再現し、パターンがチューリング不安定性により生じている可能性を論じた。今後、実機の実験により数理モデルでの予測を実証すると共に、時空間を連続にとったモデルでチューリング不安定性について詳細な解析を行う。

(5) 洗濯板状電食痕の形成に及ぼす潤滑領域の影響 (雑誌論文、学会発表) : 装置Aを用いて、洗濯板状電食痕の形成し易さと潤滑領域の関係を調べた。その結果、PE領域(高压粘度-弾性体領域、転がり軸受の潤滑領域)で形成され易く、IR領域(等粘度-剛体領域、すべり軸受の潤滑領域)では形成され難い、という傾向があることが分かった。

< 引用文献 >

1) A. M. Turing: The Chemical Basis of Morphogenesis, Philos. Trans. of Royal Soc. of Lond. Ser. B, Vol. 237, No. 641 (1952) 37-72.

[雑誌論文](計 2件)

砂原賢治、北崎訓、山口裕、油膜で生じている放電現象の解析、福岡工業大学研究所所報、

査読無し、(2017) pp.9-12.

砂原賢治、洗濯板状電食痕の形成、福岡工業大学研究所所報、査読無し、(2016) pp.47-48.

[学会発表](計 6件)

田中龍太郎、砂原賢治、北崎訓、山口裕、山本正治、石田雄二、佐々木巖、西川宏志、松田健次、外部スイッチング電源による洗濯板状電食痕の形成、トライボロジー会議春東京(2018) B22

山下大輝、砂原賢治、北崎訓、山口裕、山本正治、石田雄二、佐々木巖、西川宏志、松田健次、洗濯板状電食痕の形成～ごく初期における放電箇所の特定制定～、トライボロジー会議春東京(2018) B23

上西健太、砂原賢治、北崎訓、山口裕、山本正治、石田雄二、佐々木巖、西川宏志、松田健次、洗濯板状電食痕のピッチ決定ルールの考察～チューリングパターンとの類似性～、トライボロジー会議春東京(2018) B24

K. Sunahara, S Kitazaki, Y. Yamaguti, M. Yamamoto, Y. Ishida, I. Sasaki, H. Nishikawa, K. Matsuda, Pitch of Washboard/Fluting Pattern due to Electrical Pitting, The 9th Advanced Forum on Tribology, Kitakyushu (2018).

山口裕、北崎訓、砂原賢治、軸受における洗濯板状電食痕の数理モデル、応用数理学会2017年度年会(2017) pp.339-340

K. Sunahara, S Kitazaki, Y. Yamaguti, Y. Ishida, I. Sasaki, H. Nishikawa, K. Matsuda, Effect of Lubrication Regime on Washboard/Fluting Pattern Formation due to Electrical Pitting, Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Leeds (2016).

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：松田 健次

ローマ字氏名：Matsuda Kenji

所属研究機関名：九州工業大学

部局名：大学院工学研究院

職名：教授

研究者番号(8桁)：40229480

### (2)研究分担者

研究分担者氏名：西川 宏志

ローマ字氏名：Nishikawa Hiroshi

所属研究機関名：九州工業大学

部局名：大学院工学研究院

職名：助教

研究者番号(8桁)：40208161

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。