

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 30 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560168

研究課題名(和文)油膜張力の発生機構の解明

研究課題名(英文) Investigation into the cause of the Oil film tension

研究代表者

三原 雄司 (mihara, yuji)

東京都市大学・工学部・教授

研究者番号：20287858

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、しゅう動面の形状変化や剛性変化を与えずに計測できる薄膜型面圧・油膜厚さセンサの開発を行い、これらのセンサを用いたしゅう動面の挙動と、油膜の正圧から負圧に至る油膜圧力(張力)の同時計測を目的とした。また、狭い場所の油膜の計測を考慮し、複層膜型のセンサについても検討した。センサの多重化では、高い絶縁特性と1ミクロン程度の薄膜のセンサを実現するため、新しい成膜技術であるALD法についても実験を行った。最後に、試験装置を製作して油膜挙動の実験を行った。

研究成果の概要(英文)：In this research, a thin film pressure and oil film thickness sensor which can be measured without giving form change and a rigidity change of a sliding surface were developed. It aimed at the sliding surface behavior and measurement of oil film pressure (tension) from the positive pressure to negative pressure of oil-film in this research. Moreover, in order to measure the oil film in narrow place, double layer film was considered. In multiplexing of the sensor, in order to realize the sensor of a high insulating property, new film forming technology (ALD method) was experimented. Finally, test equipment was manufactured and oil-film tension was experimented.

研究分野：機械工学

キーワード：薄膜 センサ トライボロジー 流体潤滑 圧力計測 計測技術

1. 研究開始当初の背景

自動車エンジンは、熱効率向上による CO₂ 削減が求められ、排気損失、熱損失及び摩擦損失の更なる低減が求められている。これらの損失低減のために、小排気量過給機付エンジン等の開発も進められているが、高い燃焼圧力に伴うしゅう動部荷重の増加と、小型・軽量化による摩擦しゅう動面積の減少により、エンジンしゅう動部の面圧は増加し、流体潤滑から混合潤滑領域での潤滑状態が増え、片当たりなどの局所荷重も懸案事項となっている。また、このようなエンジンしゅう動部の状況においてもエンジン設計における理論解析の精度向上は重要であり、しゅう動部の潤滑状況（油膜の挙動）の実測データがわかれば、コリレーションによる解析の精度向上が実現できる。エンジンのしゅう動部の油膜の計測は、レーザー誘起蛍光法（LIF）によるピストンリングとシリンダ間や軸受試験機による軸-軸受間の油膜厚さ計測が報告されており、薄膜センサにおいては、ピストン・シリンダーやコンロッド大端部軸受及び主軸受部の油膜圧力や油膜厚さ計測が報告されている。しかしながら、エンジンしゅう動部の把握で極めて重要である局所荷重と局所油膜厚さの同時計測手法は無い。そこで薄膜型面圧・油膜厚さ同時計測センサの開発を行い、油膜挙動試験装置を製作して実験を行った。

2. 研究の目的

本研究では、しゅう動面の形状や粗さを極力変えずに、油膜張力から 1 GPa の圧力範囲でも高い応答周波数特性と高い耐久性を持つ薄膜型圧力センサの開発、および薄膜型の距離センサを開発し、これらを用いてしゅう動部二面間の挙動と、油膜の正圧から負圧、油膜張力の発生メカニズムの関係を探ることを目的とした。

3. 研究方法

(1) 計測原理

コイルに高周波交流電流を印加する事により高周波磁束を発生させる。この磁束により対向面に渦電流が発生し、コイルのインピーダンスが発生する。このインピーダンス変化を読み取ることによって、センサと対向面の距離の計測を行う事ができる。また渦電流式変位センサは対向板が導体のみで測定可

能であり、測定対象物が鉄・ニッケルなどの磁性体の場合と、アルミなどの非磁性体の場合で出力が異なるという特徴を持っている。さらに静電容量式距離センサと違い、センサ-対象面間の誘電率の変化について考えることなく、油膜厚さ計測を行うことができる。

(2) 薄膜渦電流式距離センサの基本形状

薄膜渦電流式距離センサのセンサ形状を図 1(a) に示す。このセンサは、センサ部とリード部で構成されている。センサの寸法は、センサ径を可能な限り小さくすること、センサ径が大きくなる程不感帯(距離に対して電圧変化が得られない)が大きくなる傾向が見られることなどの理由から、直径 5mm の平面コイル形状とした。また、線幅に関しては、抵抗値が 3 以下になるように線幅と線間隔を設定した。薄膜渦電流式距離センサのセンサ形状を図 1(b) に示す。基盤表面に、電氣的絶縁を取るための絶縁膜がある。その上にセンサ及びリード膜、リード膜との電氣的接触を防ぐための中間絶縁膜、リード膜、一番上に保護膜を成膜した。の中間絶縁膜は、センサ中心部のリード線と重なる部分のみ絶縁膜は成膜しておらず、センサ膜とリード膜が電氣的に直接接触するような構造とした。

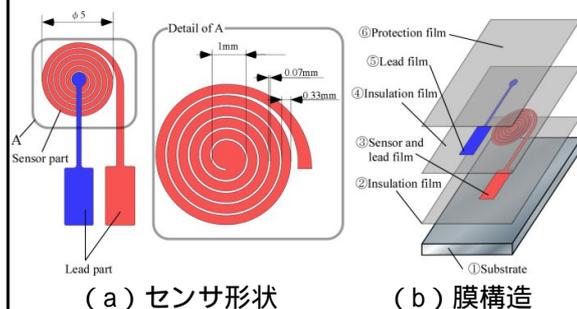


図 1 薄膜渦電流式距離センサの基本形状

(3) 検定方法

検定方法は薄膜渦電流式距離センサと計測ターゲットとを対向させ、ターゲットをマイクロメータで変位させる方法をとった。この様子を図 2 に示す。センサを成膜したテス

トピース等を検定器に載せ、その対向面は、実際にエンジンに使用される材料(SCM 材料など)でできた対向板を対向面とした。対向板からは、センサを外部に出力するためのリード線が配線してあり、このリード線を高周波発振回路に接続した。この状態からセンサの最表面にある保護膜点を 0 点とし、対向板をセンサから離れた時の高周波発振回路に接続したオシロスコープやデジタルマルチメーターを用いて読み取り記録した。

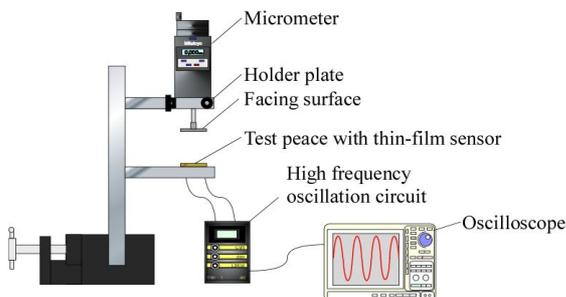


図2 検定装置

(4) 出力特性確認

薄膜渦電流式距離センサと市販されているセンサとの比較を行った結果を図3示す。市販センサの感度が $5\text{mV}/\mu\text{m}$ 、初期の薄膜距離センサ(a)に示す $1.8\text{mV}/\mu\text{m}$ 、膜構成等を改良した結果、薄膜距離センサ(b) $6\text{mV}/\mu\text{m}$ となり、市販センサの出力の 1.2 倍の感度となった。

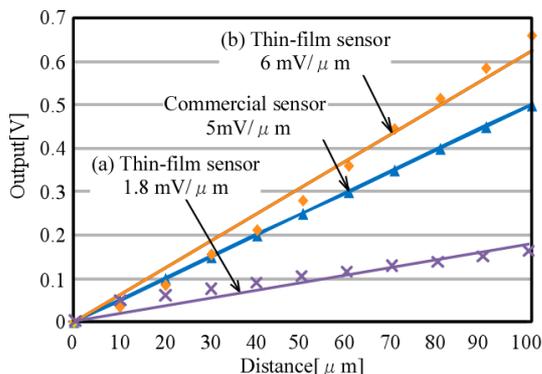


図3 渦電流式距離センサの出力結果

(5) エンジンを用いた検証実験に向けて

これまでに製作した薄膜渦電流式距離センサは試験片上での作製に留まっていた為、実際の部品でもセンサが製作可能かなどの

確認を行った。結果、製作する上で特殊な作業工程はあるが、製作することが可能であることが分かった。図4に実際に滑り軸受に形成した薄膜渦電流式距離センサを示す。

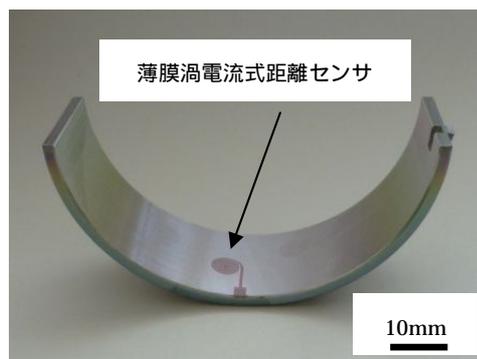


図4 滑り軸受に形成した薄膜距離センサ

(6) 原子層堆積法とは

化学蒸着法の1つである原子層堆積法(以降 ALD 法)による、トリメチルアルミニウム(以降 TMA)と H_2O の反応で、 Al_2O_3 膜を成膜する過程を図5に示す。

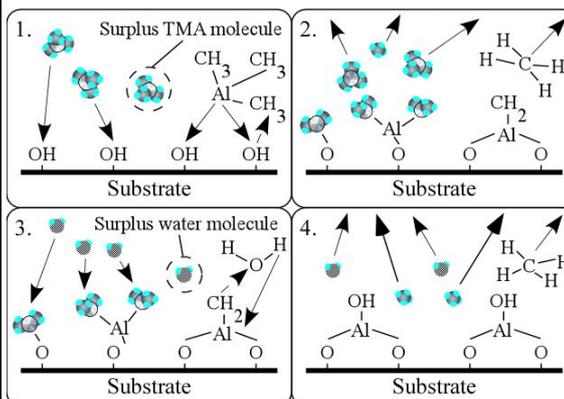


図5 ALD法の成膜原理

原料となる TMA を真空容器内に導入し、TMA は基盤表面に吸着していく。原料分子が基盤表面全域に吸着するのに十分な時間をもって導入を停止。

N_2 などの不活性ガスを導入し、図5図中、過程 1. の余剰な TMA を排気する。

すでに基盤に吸着した TMA と反応させるため H_2O を導入する。導入された H_2O は吸着している TMA と反応し Al_2O_3 となる。表面に吸着した TMA が H_2O と全て反応す

ると系統内の化学反応は自己停止機構をもって終了する。

不活性ガスを導入し余剰となった物質および原料を排気する。

これらを 1 サイクルとして繰り返すことで、基盤上にモノレイヤ、すなわち膜分子 1 つ分の厚さで薄膜を積層することができる。

(7) 成膜検証結果

図 6 に検証結果を示す。縦軸に成膜温度、横軸にエッチング強さを示す。鋼系テストピースでは、200 におけるエッチング強度 800W での結果に相違があるものの、概ね青枠の領域の成膜条件における結果では剥離は見られなかった。また、アルミ系テストピースでは、エッチングを行わない場合を除いて、すべての領域で絶縁膜の付着を確認した。絶縁抵抗値の確認では、膜厚が $0.6\mu\text{m}$ の時点で絶縁抵抗値が 200M を満たすことを確認した。

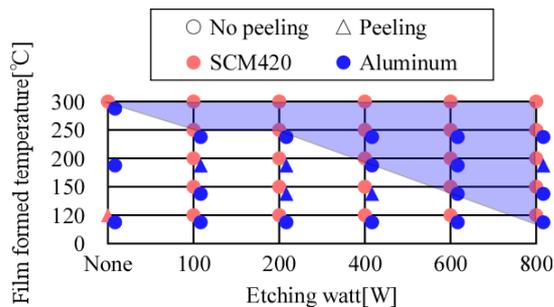


図 6 成膜検証実験の付着強度検証結果

(8) プル式逆スクイズ油膜挙動試験

本実験では、油膜張力という特殊な雰囲気であるため、これを測定するための市販の圧力センサは少なく、 P_g (ゲージ圧) < 0 の範囲でその出力を保証している物はほとんどないため、理論上、油膜圧力と油膜張力の両方に対して出力をするダイヤフラム式圧力センサを自作し、これを用いて圧力校正をするとともに、薄膜渦電流式距離センサを用いて確認を行った。また同時に加速度センサを取り付け、温度(粘度)、加速度を把握しながらの試験を行った。

(9) ダイヤフラム式圧力センサ

ダイヤフラム式圧力センサは図 7 のように SUS304 製の外径 70[mm], 受圧部径 10[mm], 受圧部厚さ 0.5[mm] であり, 受圧部背面に市販の圧力変換用ゲージを貼り付けた。

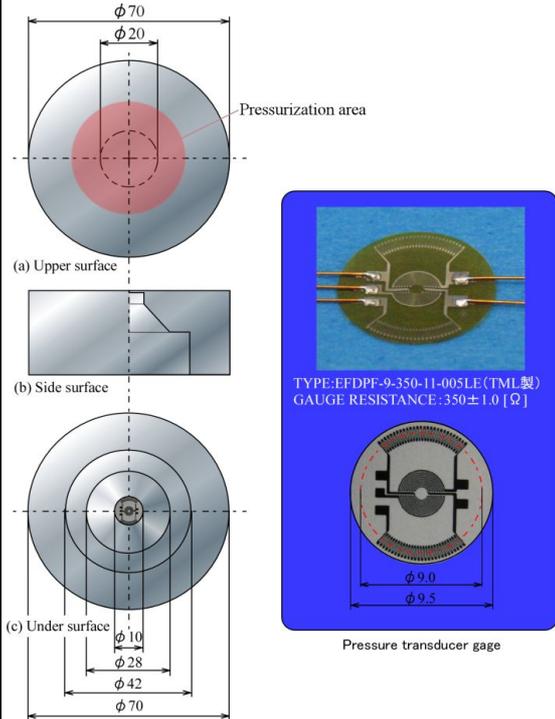


図 7 ダイヤフラム式圧力センサ

(10) 薄膜センサ

図 8 に薄膜圧力センサ形状, また, 薄膜渦電流式距離センサは 3 章(2)の図 1 に示す。薄膜渦電流式距離センサ及び薄膜圧力センサは, ダイヤフラム式圧力センサの受圧部に近くかつ母材の変形影響が無い位置が好ましく, 図 9 に示すように 20mm 上に薄膜圧力センサの感知部がくるように形成した。

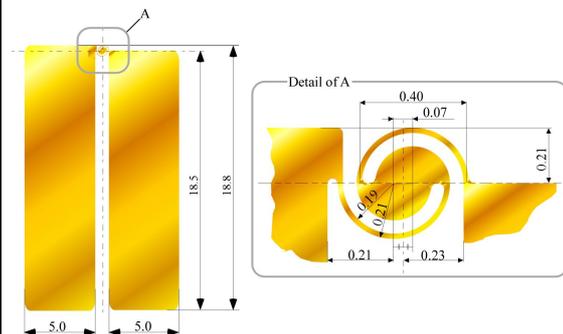


図 8 薄膜圧力センサリード部及び感知部形状

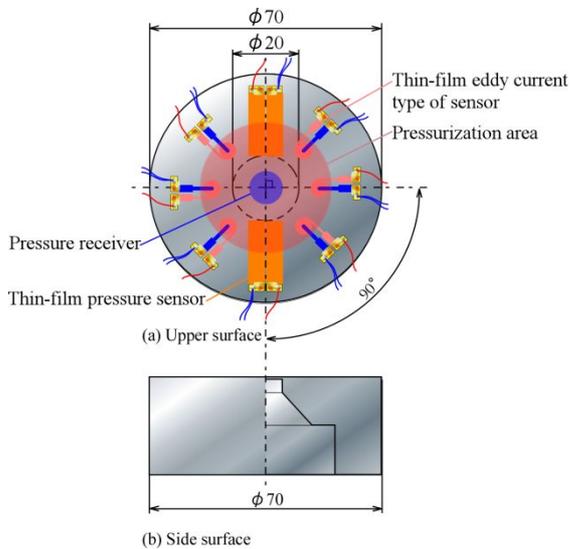


図9 薄膜距離センサ及び圧力センサレイアウト

(11) プル式逆スクイズ油膜挙動試験方法

図10に油膜張力を発生させる実験装置を示す。前述の薄膜渦電流式距離センサ及び薄膜圧力センサを形成したダイヤフラム式圧力センサ()を割出し盤()にて固定し、ダイヤフラム式圧力センサ上にオイル()を塗布し、対向ピース(() SUS304製)を密着させ、これに引張り力 F (-)を加えることによって油膜張力を発生させる。この対向ピースには荷重 (F)を測定するためにロードセル(LUR-A-500NSA, 共和電業製)を取り付けている。また、対向ピースを引き上げた際の速度(引き上げ速度)を把握するため、加速度センサ()を取り付けている。さらに引き上げた際の移動距離を市販のギャップセンサにより計測を行う()。なお、発生する油膜張力が場所によりできる限り均一になるように、対向ピースとダイヤフラム式圧力センサの接触面の平行出しにはプレスケール(極超低圧用プレスケール, 富士写真フィルム製)を用い、面が均一に接触するように調節した。オイル温度(粘度)把握のために、オイルへの温度影響が考えられる箇所に極薄熱伝対()を取り付け、実験時のオイル温度(粘度)の把握を行った。

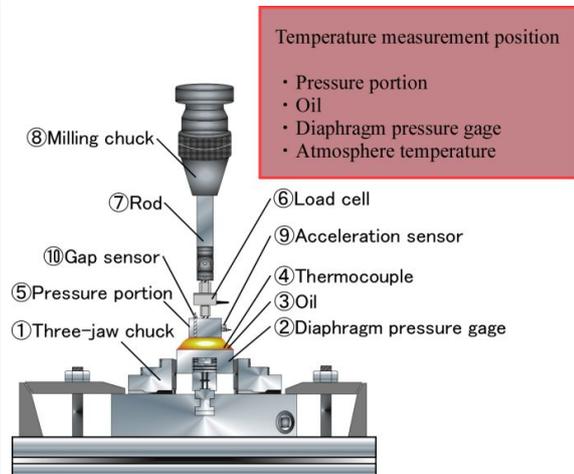


図10 プル式逆スクイズ油膜挙動試験装置

(12) 引き上げ試験結果

図11にプル式逆スクイズ油膜挙動試験結果を示す。横軸に時間[sec], 縦軸に上から G センサの出力(引き上げ速度)[mm/s], ロードセルの出力(引き上げ荷重より求めた面圧[MPa]), ダイヤフラム式圧力センサの出力[V], 薄膜圧力センサの出力[MPa]であり、試験条件はオイル 06FE0(0W-20), 雰囲気温度 12, オイル温度 13 である。対向ピースが油膜を介したダイヤフラム式圧力センサから離れ始める点(図11, A点)では G センサ, ロードセル, ダイヤフラム式圧力センサ, 薄膜圧力センサの立ち上がり位置は一致していることが確認できた。薄膜距離センサに関しては出力を得るに至らなかった為、図に記載はない。ロードセルの出力は、引張り方向の出力を示しており、ロードセルから求められる面圧値は約 -1.3 [kPa] であり、油膜による負圧が発生していることが確認できる。つまり、ピストン部の面圧計測時に使用しているオイル(06FE0(0W-20))においても油膜による負圧を確認することができた。また、ロードセル出力とダイヤフラム式圧力センサの出力に相関性があることも確認できた。薄膜圧力センサからの出力(部分的な圧力)に関しては、実験を行った雰囲気温度とオイルの温度に差があるために、温度感度による出力が混在している可能性があ

る.よって,薄膜圧力センサの出力に関しては,実験環境温度とオイルの温度を同一にして実験を行うか,圧力による出力と温度による出力との分離する必要がある.

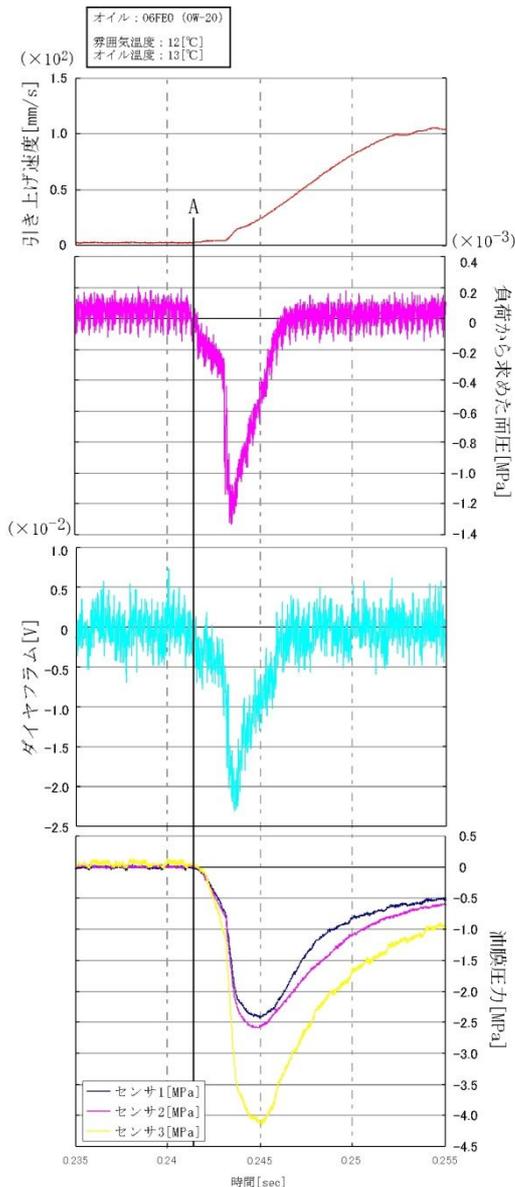


図 11 引き上げ試験結果

4. 研究成果

- (1)油膜厚さの計測(しゅう動部の二面間距離)を可能とする薄膜センサとして,薄膜渦電流式距離センサの開発を行った.
- (2)薄膜渦電流式距離センサが試験片だけではなく,エンジン等のしゅう動部への適応の可能性を確認するため,実際の滑り軸受しゅう動面に形成できることを実際に製作して確認した.

- (3)原子層堆積法を用いることで,絶縁膜の薄膜化を行うことができ,多層構造である薄膜渦電流式距離センサの更なる薄膜化が期待できることを確認した.
- (4)ロードセル,ダイヤフラム式圧力センサ,薄膜圧力センサの出力から,供試オイル(06FE0(0W-20))においても油膜による負圧を発生することが確認できた.
- (5)2面間の引き上げ速度,面圧変化と局所の油膜圧力(張力)の時間的な相関を確認することができた.局所での油膜厚さ(2面間距離)との相関も含めた研究により,引き上げ速度,オイル粘度,負圧の関係が理論解析における油膜パラメータの設定の一助となると考えられる.

5. 主な発表論文等

[学会発表](計15件)

石井大二郎,三原雄司;しゅう動部の表面温度を計測する薄膜温度センサの開発,2015年度年次大会,北海道大学,一般講演発表予定 査読なし

三浦宏太,三原雄司;油膜を計測する薄膜型センサの開発,機械学会,2015年度年次大会北海道大学,一般講演発表予定 査読なし

Kouta Miura, Kunihiko Kobayashi, Naoki Yamakawa, Mitsuru Saruwatari, Yuji Mihara; Measurement of oil film pressure in piston pin-boss by thin-film pressure sensor,SAE 2015 Powertrains, Fuels & Lubricants International Meeting, Power Train Tribology, 2015-01-2040 (講演予定) 査読あり

6. 研究組織

(1)研究代表者

三原 雄司(MIHARA,Yuji)

東京都市大学 工学部 機械工学科・教授

研究者番号:20287858