

接触抵抗に及ぼす  
オイルの成分・添加物の影響

平成 30 年度

三重大学大学院 工学研究科 電気電子工学専攻

有機エレクトロニクス研究室

学籍番号 417M205

上岡 広樹

第1章 序論	3
1.1 本研究の背景と目的	3
1.2 本論文の概要	5
参考文献	6
第2章 コンタクトオイル	7
2.1 はじめに	7
2.2 潤滑剤	7
2.2.1 潤滑剤の種類	7
2.2.2 コンタクトオイルの構成	8
2.2.3 試験オイル（パラフィン、ポリイソブテン）	9
2.2.4 添加物（ステアリン酸）	10
2.2.5 極性基分子による化学吸着	11
2.3 本研究に関連する先行研究	12
2.3.1 微摺動摩耗現象	12
2.3.2 パラフィンの微摺動摩耗抑制効果	12
参考文献	13
第3章 測定システム	14
3.1 はじめに	14
3.2 従来の計測システムと実験結果	14
3.3 従来の実験方法	15
3.4 本研究で構築した計測システム	17
3.5 実験装置	19
参考文献	20

第4章 接点におけるコンタクトオイルの影響	21
4.1 はじめに	21
4.2 評価オイルの粘度測定	21
4.3 荷重-接触抵抗測定	23
4.3.1 接点試料	23
4.3.2 荷重-接触抵抗測定方法	24
4.3.3 測定システム	25
4.4 荷重-接触抵抗特性	26
4.5 考察	36
4.5.1 オイルの粘度・添加剤の影響	37
4.5.2 混合オイルによる接触抵抗抑制	38
参考文献	39
第5章 コンタクトオイルの摩擦低減効果	40
5.1 はじめに	40
5.2 摩擦係数測定	40
5.2.1 摩擦係数測定結果	41
5.3 考察	44
5.3.1 荷重-接触抵抗測定結果との関連	46
参考文献	48
第6章 総括	49
謝辞	50

# 第1章 序論

## 1.1 本研究の背景と目的

自動車は様々な産業において輸送手段として利用され、一般家庭においては通勤や買い物・食事、遊び・行楽といった目的に利用されており、現代社会において必要な存在となっている。また、自動車の利用を楽しみの一つであると考える人もいる。自動車の大幅な普及により我々の生活が豊かになる一方で、様々な問題が発生している。日本における交通事故者数は1970年の16765人から2018年には3532人まで減少しているが、65歳以上の高齢者死者数の割合は55%を超え[1]、高齢化社会へとより一層移行している日本では自動車の安全性向上は非常に重要な事である。また、世界的に自動車の保有台数は近年において非常に増大しており、このことからより一層の安全性向上は必要であると思われる。次に、自動車と地球環境問題とのかかわりがある。日本における二酸化炭素排出量のうち自動車全体の排出の割合は約18%あり、自家用乗用車だけでも約10%をしめている[2]。こういったことから排出ガスを減らすためにハイブリッド自動車がつくられるようになり、電気自動車の開発も盛んに行われている。従って、これからの自動車は「安全」「快適」「環境」がより求められていると言える。そういった自動車に対する要求を実現するために自動車には様々な機能が搭載されている。例えば、電動パワーステアリングやパワーウインドウ、カーエアコン、エアバッグ、スマートエントリーなどがある。これらの機能は電気制御に依存しており、自動車はエレクトロニクス技術のかたまりである。エレクトロニクス技術によるそれらの機能の実現のために自動車の車体中に張り巡らされている配線システムがワイヤーハーネスである。ワイヤーハーネスと車体内のワイヤーハーネスの配置を図1.1、1.2に示す。



図1.1 ワイヤーハーネス

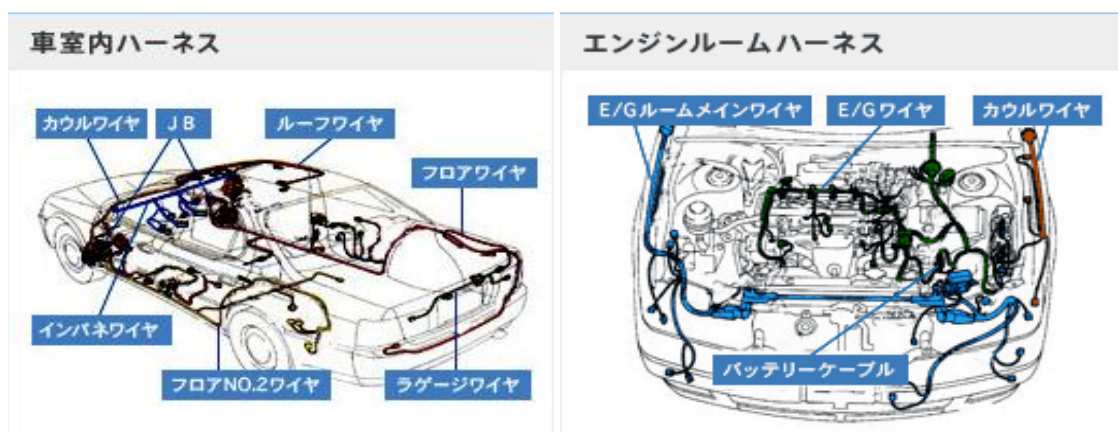


図1.2 ワイヤーハーネスの配置図

ワイヤーハーネスは主に電線とそれを束ね保護するプロテクタ、電装品へと接続するためのコネクタから成る。そして、近年の自動車においてはエレクトロニクス化により電線の総数は多いもので3000本に及び、電線の全長は2000mに及ぶ。このワイヤーハーネスの末端にあるコネクタは嵌合による機械的接続により導通が成り立っている。このコネクタ接続の不具合が起きると、そのコネクタと繋がっていた電装品は正常に動作しなくなり、もし走行中に不具合が起きれば、人命に関わる可能性もある。このことから、コネクタの接続信頼性は非常に重要な要素であり、自動車のエレクトロニクス化によりその重要性はさらに増していくと言える。

自動車のエレクトロニクス化が進むことで、自動車に使用されるコネクタの数が増加しており、コネクタの小型化が求められている。それによりコネクタの荷重も低下し、接点における微摺動摩耗現象が生じ接触抵抗を増加させる事が今後より問題になってくると予想される。また、コネクタの極数も増加しており、一極あたりの挿抜力が大きくなっていてもコネクタ全体での挿抜力が大きくなり、コネクタ挿入時に半嵌合や座屈などの接触不良を引き起こす問題が懸念される。こういった予想される問題に対して、コンタクトオイルの使用が有効であると期待されている。金属表面にコンタクトオイルを塗布することにより油膜を形成し、金属の直接接触を防ぐことで挿抜力の低減、また微摺動摩耗による接触抵抗の増加を抑制する効果が見込めるからである[3]。しかし、コンタクトオイルの主成分は炭化水素化合物であり絶縁体なので、接点間への介在の仕方によっては接触抵抗の上昇を引き起こす事が懸念される[4]。これまで我々有機エレクトロニクス研究室では、電気接点における荷重-接触抵抗測定を手動の計測システムで行うことにより、オイル介在による接触抵抗の上昇を確認した。しかし従来の計測システムには多くの課題があり、オイルが介在した電気接点における導通機構を検討することができなかった。そのため本研究では、従来の手動の計測システムに代わって新しく自動の計測システムを構築して荷重-接触抵抗測定を行うことで、接点間に介在するオイルが接触抵抗に及ぼす影響について検討した。

## 1.2 本論文の概要

本論文は5章からなる。

第1章では、序論として本研究の背景と目的及び本論文の各章の概要を述べている。

第2章では、本研究で対象としたコンタクトオイルについて述べている。

第3章では、先行研究に使用された測定システムの問題点と、それを改善した本研究の測定システムの概要を述べている。

第4章では、荷重-接触抵抗測定試験方法と結果について述べている。

第5章では、摩擦係数測定試験方法と結果、また第4章での実験結果も踏まえた検討を述べている。

第6章では、総括として本研究で得られた知見を述べている。

参考文献

- [1] 警察庁,「平成30年中の交通事故死者数について」  
<http://www.npa.go.jp/toukei/index.htm>
- [2] 国土交通省,「運輸部門における二酸化炭素排出量」  
[http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei\\_environment\\_tk\\_000007.html](http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html)
- [3] 野々川正輝,伊藤大二,齋藤寧,玉井輝雄,飯田和生,服部康弘,「微摺動摩耗現象への流動パラフィンの効果の研究」電子情報通信学会技術研究報告, EMD2008-147 (2009-3)
- [4] 唐亮,章継高,杉村公雄,永江昭文,「スズめっき用コンタクト表面塗布剤の基油と添加剤の効果」電子情報通信学会技術研究報告, EMD95-70,(1996-2)

## 第2章 コンタクトオイル

### 2.1 はじめに

摩擦摩耗は機械的な駆動部などで発生し、それを抑制するために潤滑剤が用いられてきた。例として自動車において、エンジンの性能を引き出すためには最適なエンジンオイルの使用が必要であり、摩擦摩耗と潤滑は非常に密接な関係にあるといえる。本章では本研究に関連する摩擦摩耗と潤滑について述べる。

### 2.2 潤滑剤

#### 2.2.1 潤滑剤の種類

摩擦摩耗の抑制には潤滑剤を使用することが有効である。潤滑剤は機械の種類、用途、条件に応じて多くの種類が用いられており、それらは形態から液体潤滑剤、半固体潤滑剤、固体潤滑剤の3つに分類される[1]。潤滑剤の種類と具体例を表2.1に示す。

表 2.1 潤滑剤の種類とその具体例

	例
固体潤滑剤	黒鉛、ポリテトラフルオロエチレン、二酸化モリブデン
半固体潤滑剤	グリース、コンパウンド
液体潤滑剤	潤滑油

潤滑油の基本性能としては、安定性に優れ、融点あるいは流動点が低く、引火性が低いということが挙げられる。潤滑剤の中でもコネクタ接合部に使用されるコンタクトオイルは、液体潤滑剤に分類されている。液体潤滑剤である潤滑油には、固体潤滑剤に比べて冷却性に優れ、浸透性があり、取り扱いが容易であるという特徴を持っている。



## 2.2.2 コンタクトオイルの構成

コンタクトオイルは基油とその性能を向上または改善させる各種添加剤から構成されている[2]。基油は、原油から精製される鉱油と合成油に分類されており、その種類を表 2.2 に示す。また、添加剤の種類と用途を表 2.3 に示す。

表 2.2 基油の種類

分類	種類
鉱油	パラフィン系鉱油、ナフテン系鉱油
合成油	合成炭化水素、合成エステル、ポリグリコール等

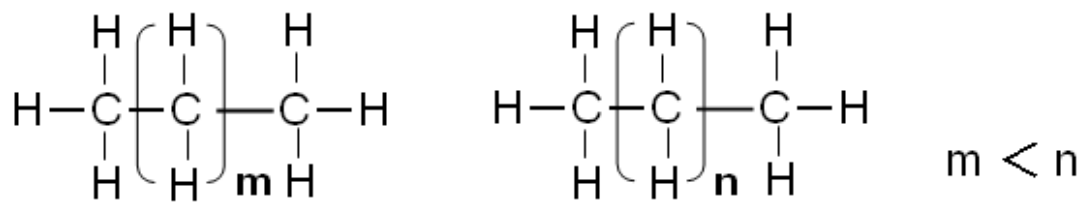
表 2.2 添加剤の種類と用途

種類	用途
酸化防止剤	油の成分の酸化を防ぎ、寿命を延ばす
極圧剤	摩擦、摩耗を低減するとともに焼付きを防ぐ
防錆剤	水の浸入を防ぎ錆びの発生を防止する
油性剤	金属表面に吸着して金属間の直接接触を妨げる
粘度指数向上剤	粘度指数を高める作用を持つ

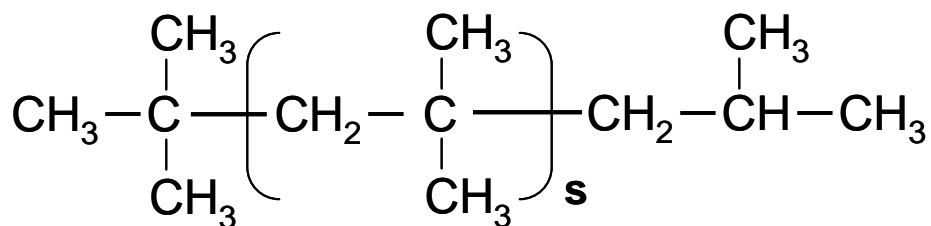
近年では、自動車技術の発展により酸化防止や摩擦防止など潤滑油に求められる性能も変化して、添加剤の技術も発展し続けている。添加剤によりコンタクトオイルの性能は大きく左右されるが、基油についてもそれぞれ異なった性能をもち添加剤が同じでも基油の違いによりコンタクトオイルの性能は異なってくる。したがって要求性能に対して基油にあった添加剤の選択が必要である。これらの基油や添加剤をそれぞれ目的に応じた配合で合成されたものがコンタクトオイルとして使用されている。製品化されているコンタクトオイルのほとんどはオイルの組成が公表されていないため、オイルの導入には様々な評価試験を繰り返して特性を確認しておくことが重要である。

### 2.2.3 試験オイル(パラフィン、ポリイソブテン)

本研究では試験オイルとして、一般的に潤滑油の基油として用いられるパラフィンを選定した。粘度の異なる3種のパラフィンを主な試験オイルとした。また、粘度の異なる2種のポリイソブテンも試験オイルとした。それらの分子構造を図2.1に示す[3]。



(a) 構造式(低、中、高粘度パラフィン)



(b) 構造式(低、高粘度ポリイソブテン)

図2.1 本研究で使用した各試験オイルの分子構造

低、中、高粘度パラフィン(ナカライテスク株式会社 流動パラフィン)は直鎖式飽和炭化水素と呼ばれ、図2.1(a)で示したように炭素数の違いがある。炭素数が増えるにつれオイルの粘度も上昇し炭素数が18を超えると固体状態となる。

一方、図2.1(b)で示されるポリイソブテン(日油株式会社 パールリーム6、パールリーム18)は分岐式飽和炭化水素であり、比較的高い粘度でも液体状態を保つオイルである。本研究では、鎖式飽和炭化水素構造のパラフィンとの分子構造の違いによる接触抵抗への影響も検討する為、粘度の異なるポリイソブテンを2種類使用した。

## 2.2.4 添加物（ステアリン酸）

本研究では添加剤としてステアリン酸を使用した。これらの添加剤は 2.2.2 で紹介したうちの、油性剤にあたり、どちらも極性基(-COOH)をもつ分子である。ステアリン酸は構造式  $C_{17}H_{35}COOH$ 、分子量 284.5、融点  $69.9^{\circ}C$  の飽和脂肪酸である。ステアリン酸の構造図を図 2.2 に示す。

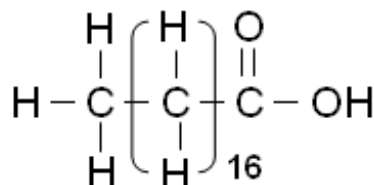


図 2.2 ステアリン酸の分子構造

2.2.2 で述べたように、コネクタの摩擦摩耗低減により効果的であるのが、極性基分子を持つ油性剤、そして極圧剤である。図 2.3 に極性基分子、極圧剤を添加させた場合の摩擦低減効果を表す。

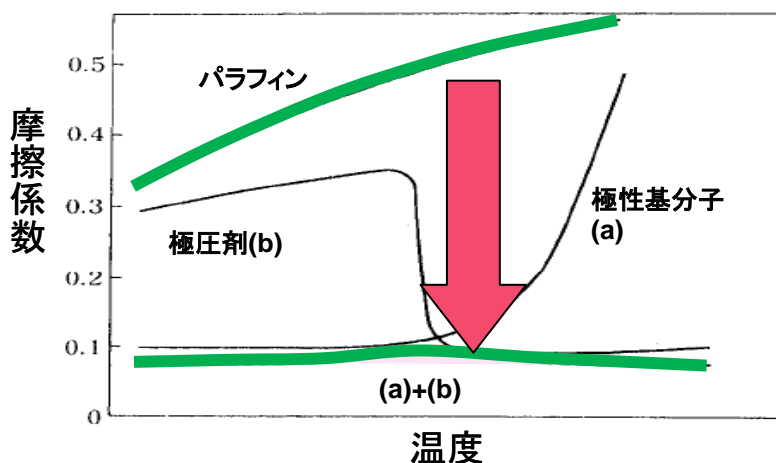


図 2.3 極性基分子、極圧剤添加による摩擦低減効果

図 2.2 からわかるように、パラフィンのみには比べ添加剤を加えたオイルは摩擦が大幅に低減している。極性基分子は  $130^{\circ}C$  程度までで効果があり、それ以上の高温では極圧剤が効果的である。本研究では室温  $20^{\circ}C$  で実験を行い、また基油のパラフィンに溶かすことから融点の高くないステアリン酸を使用した。

## 2.2.5 極性基分子による化学吸着

2.2.4 ではパラフィンに極性基分子を添加することでの摩擦摩耗低減への有効性を述べた。ここでは摩擦摩耗低減効果のメカニズムについて述べる。

摩擦摩耗低減を実現しているのが化学吸着と呼ばれる化学反応である。化学吸着とは極性基をもった分子が金属表面の鏡像電荷とクーロン力によって吸着することである。この共有結合による結びつきは非常に強く、それにより強い吸着膜が形成される。その吸着膜は耐摩耗性膜と呼ばれ境界潤滑膜の役割を果たす。ステアリン酸による耐摩耗性膜では鉄に対して、摩擦は約 1/10~1/20、摩耗は約 1/20000 の減少効果があることがわかっている[4]。図 2.4 に化学吸着の様子を示す。

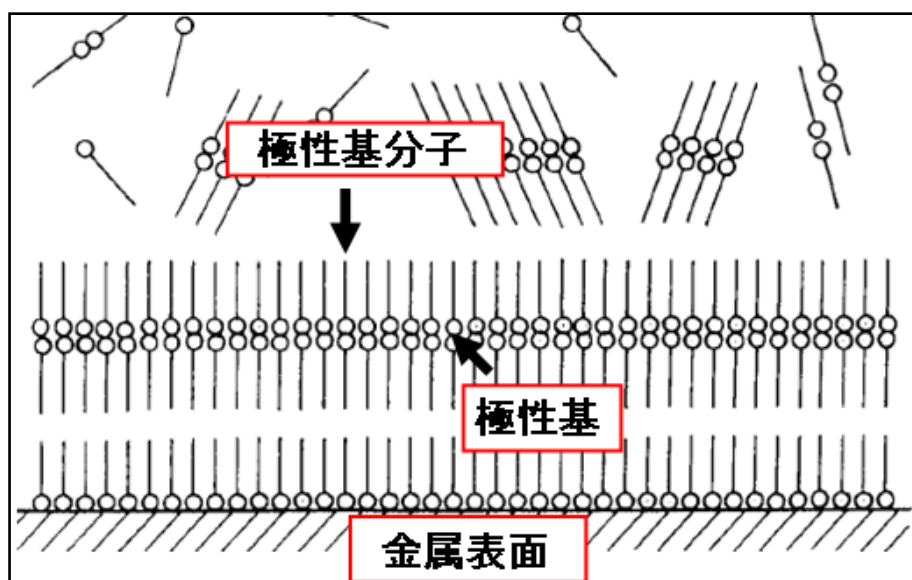


図 2.4 化学吸着の様子

## 2.3 本研究に関連する先行研究

### 2.3.1 微摺動摩耗現象

コネクタの接点不良の原因の代表的な一つとして微摺動摩耗現象というものがある[5]。これは接触荷重の大きさに影響を受ける。第1章で前述したように自動車のエレクトロニクス化によりコネクタ数の増加と共に車内空間確保のために、今後コネクタの軽量化、小型化がより求められる。したがって、コネクタは今後、より低い接触荷重のものが求められ、それにより微摺動摩耗現象がより重要な要素となると考えられる。微摺動摩耗現象は別名フレッティングコロージョンと呼ばれ、自動車のコネクタで主に使用される錫メッキを用いたコネクタにおいて顕著に見られる。微摺動摩耗現象は振動などの外乱により数マイクロまたは数十マイクロのオーダーでコネクタ接触部が擦れあうことでコネクタ表面のメッキが摩耗し摩耗粉という非常に小さな粒子となり、それが酸化することで起こる現象である。酸化錫は錫より抵抗率が高いため、それが接点間に介在することで接触抵抗の上昇を引き起こし、電氣的な接触不良の原因となる。

### 2.3.2 パラフィンの微摺動摩耗抑制効果

微摺動摩耗による接触抵抗の変動に対してコンタクトオイルは非常に有効に作用し、接触抵抗の増加を抑制する[6]。微摺動摩耗試験機を用いた時の微摺動回数に対する接触抵抗の変化についてコンタクトオイルの基油であるパラフィン塗布の有無による違いの一例を図 2.5 に示す[7]。

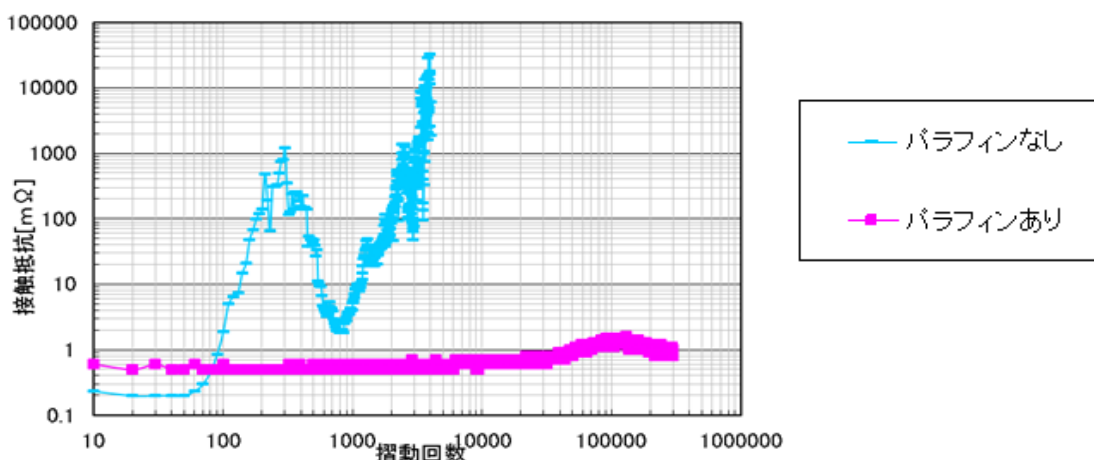


図 2.5 摺動回数対接触抵抗

#### 参考文献

- [1] 村木正芳「図解トライボロジー 摩擦の科学と潤滑技術」日刊工業新聞社, p125 (2007)
- [2] 出光興産 潤滑油部潤滑技術二課,「絵とき 工業潤滑剤 基礎のきそ」,日刊工業新聞社, p39 (2011)
- [3] 日油,「技術資料」<https://www.nof.co.jp/cosmeticlounge/material/pdf/parleam.pdf>, p.2
- [4] 桜井俊男,広中清一郎,「トライボロジー」,共立出版,p59,(1984)
- [5] 伊藤哲也,松島政人,高田憲作,服部康弘,「自動車用コネクタ接点の微摺動特性について」 S E I テクニカルレビュー, No.171, P75-79(2007)
- [6] 野々川正輝,伊藤大二,齋藤寧,玉井輝雄,飯田和生,服部康弘,「微摺動摩耗現象への流動パラフィンの効果の研究」電子情報通信学会技術研究報告, EMD2008-147 (2009-3)
- [7] 三浦陽介,伊藤大二,齋藤寧,玉井輝雄,飯田和生,伊藤哲也,服部康弘,「微摺動摩耗現象に対する流動パラフィンの効果について」 電子情報通信学会技術研究報告, EMD2009-139 (2010-3)

## 第3章 計測システム

### 3.1. はじめに

これまで我々有機エレクトロニクス研究室では、電気接点における荷重-接触抵抗測定を手動の計測システムによって行ってきた。しかし従来の計測システムには多くの課題が存在していた。特に低荷重域での荷重-接触抵抗測定において人依存性が大きく測定精度が悪い点が特に大きな問題として挙げられた。そのため、従来の手動計測システムに代わって自動計測システムを構築した。本章では、それら自動計測システムと実験装置について述べる。

### 3.2. 従来の計測システムと実験結果

従来の研究では、図 3.1 の計測システムを用いて加重と測定を繰り返し行うことによって、金めっき接点間におけるオイルの荷重に対する接触抵抗の測定を行い、図 3.2 に示すように、オイル塗布の影響により無塗布時よりも接触抵抗が高くなるという結果を得た[1]。

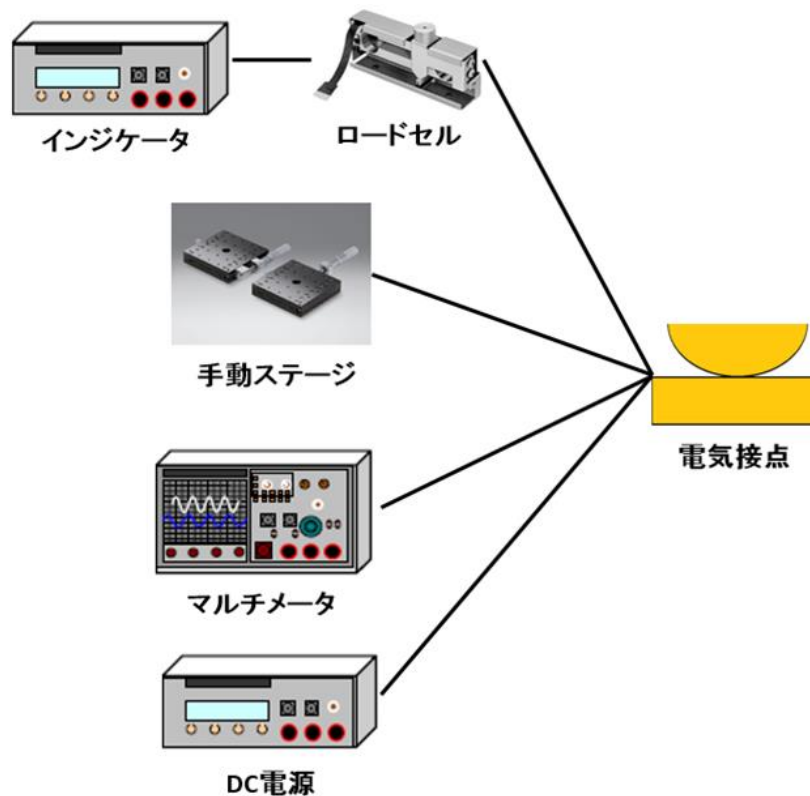


図3.1 従来の計測システム[2]

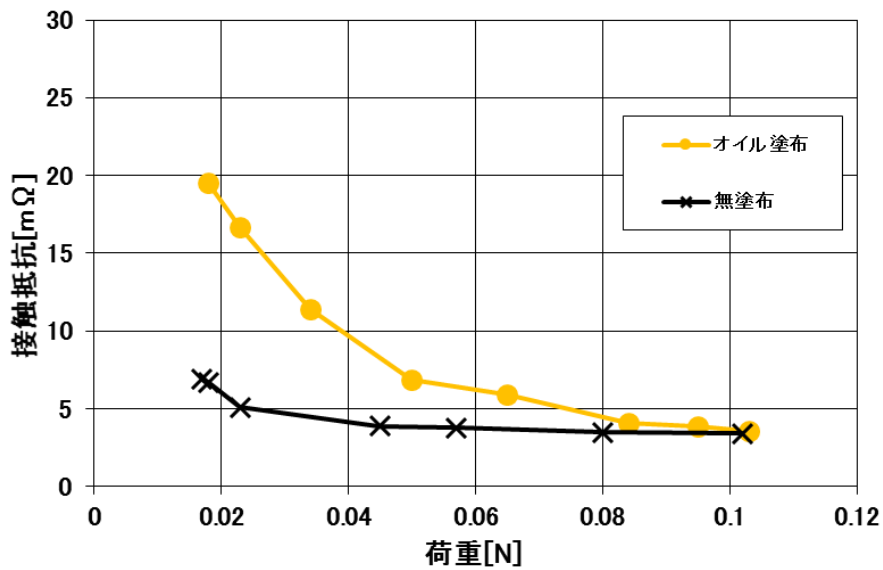


図3.2 接触抵抗に対するオイルの影響

この計測システムは、荷重を測定するロードセル及びウェイング・インジケータ、電圧を測定するデジタルマルチメータ、電流を印加する定電流源、そして接点移動により荷重を加える手動リニアステージがそれぞれ電気接点と独立して接続されている。そのため実験者の技量とタイミングによって測定結果のばらつきが出てしまう。特に手動リニアステージを用いて荷重を加えているので、荷重を加えていく速度を細かく制御できず、各サンプルによって負荷速度に違いができ、負荷速度に対する接点領域でのオイルの排出速度、それに伴う接触抵抗への影響を考慮できない。また、オイルが接触抵抗に与える影響が大きいとされる低荷重領域の測定に限度があるなどの課題があった。



### 3.3. 従来の実験方法

従来の F-R 試験の実験試料は毎回新品の接点試料を使用していた。しかし、本研究を行うため十分な予備実験を行ったところ、毎回新品試料を用いる実験方法では、試料差による影響が大きく、オイルが接触抵抗に与える影響を正確に測定できていないことが明らかになった。図 3.3 に、同じ試料を用いて荷重-接触抵抗測定試験を 10 回連続行った結果の典型例を示す。

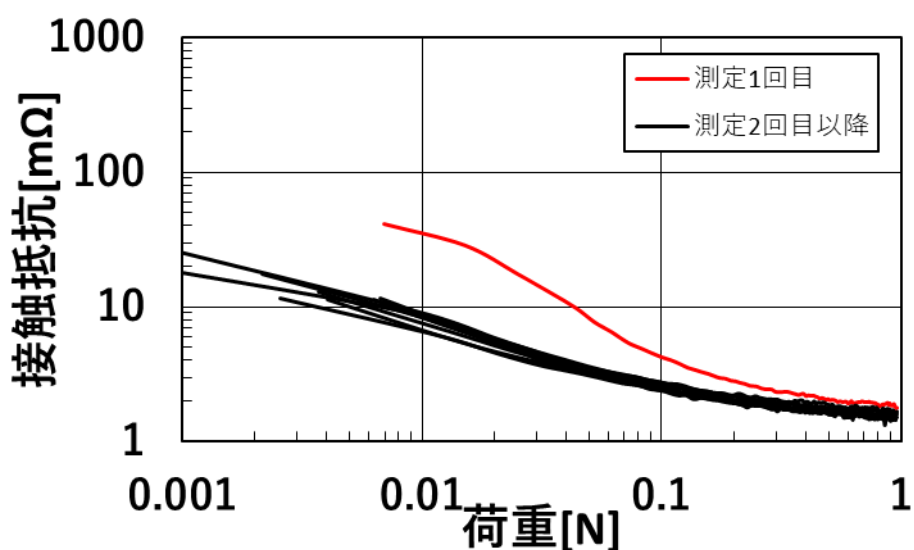


図 3.3 10 回連続 無塗布 F-R 測定結果 典型例

図 3.3 に示すように、測定 1 回目の F-R 特性は測定 2 回目以降の F-R 特性とは大きく異なっている。更に 2 回目以降の測定結果では非常に高い再現性が確認できる。また、接点試料の個体差によって F-R 特性が大きく異なることも予備実験によって明らかとなった。従来の実験方法では、再現性の悪い測定 1 回目の測定結果を別の新品試料を用いたオイル塗布試料と比較していたため、従来の実験結果は接点間に介在するオイルが接触抵抗に及ぼす影響を正しく測定できていなかった可能性がある。

### 3.4. 本研究で構築した計測システム

図 3.2 の実験結果からオイル塗布による接触抵抗上昇の考察として、低荷重では電気接点間にオイルの被膜が存在して接触抵抗が上昇し、荷重が増えるにつれ接点間のオイルが排出されていき接触抵抗が無塗布時と変わらなくなるとしていたが、従来の計測システムでは 3.2 節で述べたような課題があり、低荷重領域の測定に限度があり精密さも不足している。また、自動計測システムを構築するにあたり十分な予備実験を行ったことによって、より良い再現性を得る実験方法も構築できた。4 章に実験方法の詳細を記載する。

本節では自動計測システムについて記述する[3]。

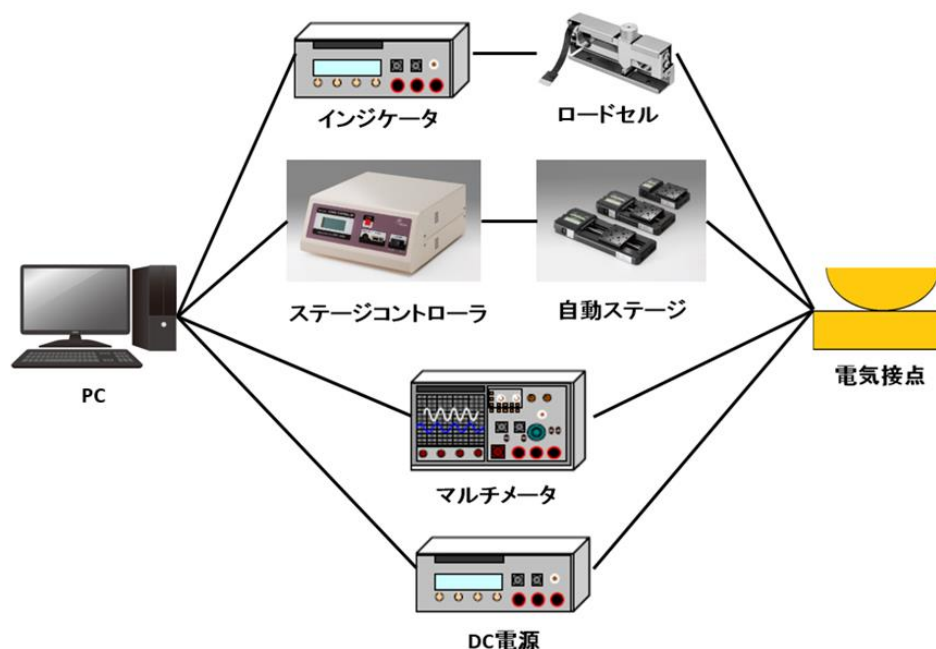


図3.4 本研究で構築した計測システム

まず、実験者の匙加減で荷重負荷を行っていた手動リニアステージから、プログラムによって動作する自動ステージに移行した。この自動ステージはステージコントローラによって制御されるステッピングモータ駆動ステージである。そして従来まで独立していた各計測機器をPCに繋げプログラムによって同期し制御した。制御プログラムにあたってはExcelマクロとシグマ光機株式会社の制御ソフトウェア「SGEMCS」を用いて制御を行っている。この新しい計測システムによって実現した接点移動の模式図を図3.5に示す。

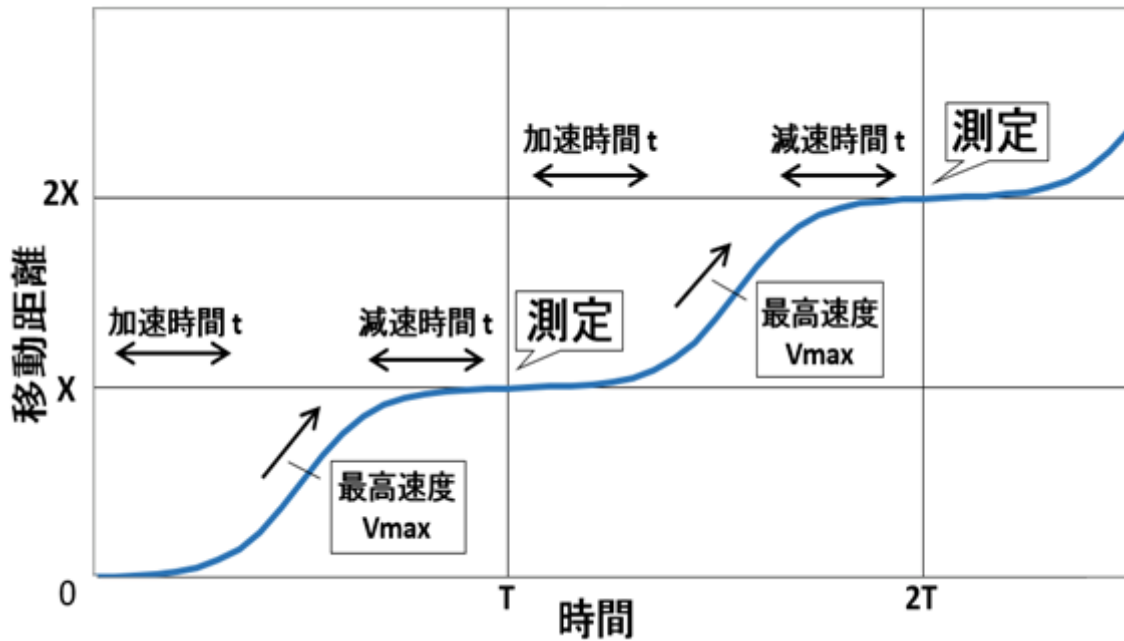


図 3.5 接点移動模式図

自動ステージの速度制御にはS字制御法を用いた。ステージを緩やかに減速・停止させることによって、接触点以外の試料片部分間でのオイル排出過程による荷重値の増加の影響を排除すると共に、モータのオーバーシュートを防止するための制御である。この計測システムによって、課題であった低荷重領域の測定も、従来の手動リニアステージでは安定して測定が出来ていなかった約 0.01N からの測定が可能となった。また、すべての測定をプログラムで自動制御しているため、各サンプルや測定条件において精密さが向上し、実験データの再現性と信頼性が大きく向上した。

### 3.5. 実験装置

荷重・接触抵抗の実験装置を図 3.5 に示す。使用機器は以下の通りである。外部からの振動を避けるため除振台を使用した。また、測定時のノイズを減らすため、ツイストペアケーブル、シールドケーブルを使用した[4]。

- 使用機器
  - ・ DC 電源 (Agilent 6612C)
  - ・ ロードセル (AND LC4001-G120)
  - ・ ウェイニング・インジケータ (AND AD-4401)
  - ・ デジタルマルチメータ (Agilent 34410A)
  - ・ 自動ステージ (OptoSigma SGSP20-35)
  - ・ ステージコントローラ (OptoSigma SHOT-302GS)

本研究における測定機器の条件として、荷重を測定するロードセル及びウェイニング・インジケータの分解能は 10mg(約 0.0001N)、サンプリング速度は 20 回/秒であり、電圧を測定するデジタルマルチメータの分解能は 0.1 $\mu$ V、サンプリング速度は 5 回/秒である。

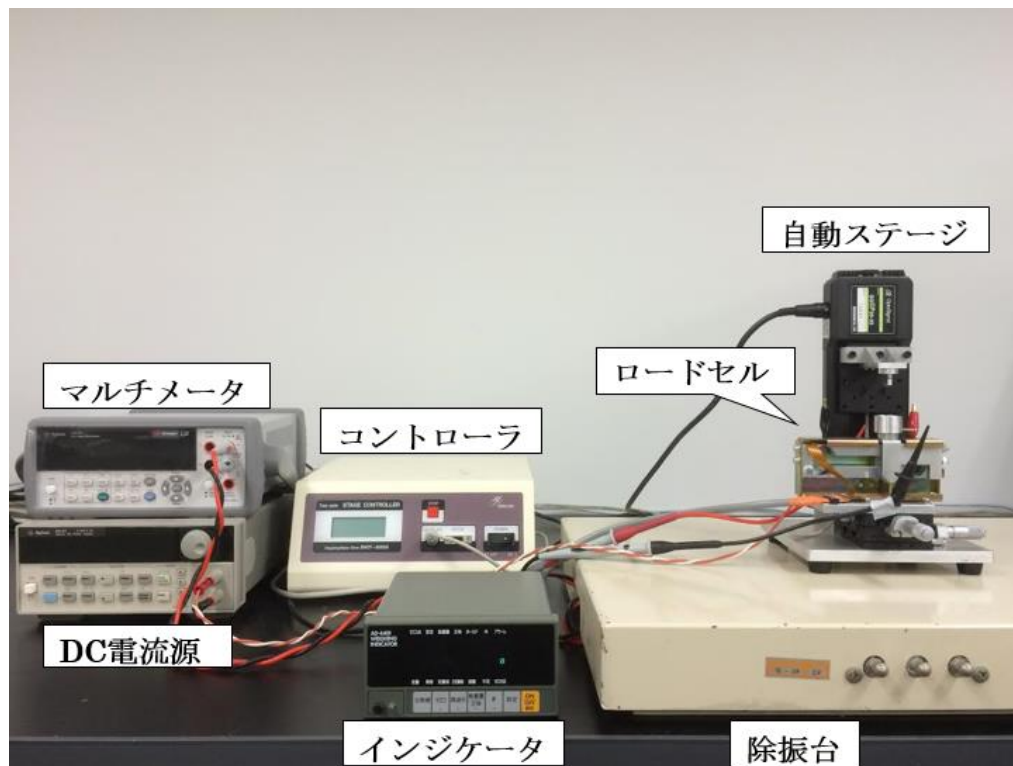


図 3.6 実験装置

#### 参考文献

- [1] 寺岡史貴, 飯田和生, 澤田滋, 「コンタクトオイルの粘度・成分が接触抵抗に及ぼす影響」, 電子情報通信学会技術研究報告, EMD2013-151 (2014)
- [2] シグマ光機, 「製品情報」 <http://www.global-optosigma.com/jp/>
- [3] 安藤優佑, 飯田和生, 澤田滋, 清水敦, 「電気接点での接触抵抗に及ぼすコンタクトオイルの影響」, 電子情報通信学会技術研究報告, EMD2014-116 (2015)
- [4] 安藤優佑, 飯田和生, 澤田滋, 清水敦, 「オイルが介在した接点における導通機構に関する検討」, 電子情報通信学会技術研究報告, EMD2015-103 (2016)

## 第4章 接点におけるコンタクトオイルの影響

### 4.1. はじめに

第1章でも前述したようにコンタクトオイルは摩擦摩耗低減に有効である反面、本来絶縁体であるため接点間での介在の仕方によっては接触抵抗に影響を及ぼすことが懸念されている。コンタクトオイルを塗布することで、ある荷重下においては接点間の油膜厚が厚くなり接触抵抗の大幅な上昇を引き起こす可能性がある。このことからコンタクトオイルの接触抵抗に及ぼす影響を調査するために、荷重-接触抵抗特性試験を行った。コンタクトオイルの成分、コンタクトオイルへの添加物がどのように接触抵抗に関係しているのかを調査した。

### 4.2. 評価オイルの粘度測定

粘度測定に使用した測定機を図4.1に示す。測定条件は以下の通りである。測定結果を表4.1に示す。

- 測定機器
  - ・回転式粘度計(TOKI SANGYO, RE-85R, 1062)
  
- 測定条件
  - ・温度：20°C
  - ・ロータ：1° 34'×R24
  - ・回転速度：100,50,20rpm
  - ・オイル滴下量：1.1ml
  - ・測定誤差：フルスケールの±2%
  - ・フルスケール：100rpm時 129.6mPa・s  
50rpm時 259.3mPa・s  
20rpm時 648.2mPa・s



図 4.1 粘度測定機 RE-85R

表 4.1 各評価オイルの粘度測定結果

グループ	オイル名	混合割合	粘度[mPa・s]
単体パラフィン	低粘度パラフィン	—	6.2
	中粘度パラフィン	—	205.2
	高粘度パラフィン	—	308.4
添加オイル	高粘度パラフィン +ステアリン酸	0.25wt%添加	305.2
混合オイル	低粘度パラフィン +高粘度ポリイソブテン	35 : 65	307.2
	低粘度ポリイソブテン +高粘度ポリイソブテン	54 : 46	303.8

表 4.1 中の高粘度パラフィン以下の 4 種類の試験オイルは、意図して同等の粘度とした。それらの粘度測定結果には若干のばらつきがあるが、粘度測定器の測定誤差内であるため、今後この 4 種類の試験オイルについて議論を進める際には同じ粘度として扱う。

## 4.3 荷重-接触抵抗測定

### 4.3.1 接点試料

荷重-接触抵抗・電流-電圧特性測定のための接点試料片を図 4.2 に示す。酸化被膜の影響をなくし、接触抵抗へのオイルの影響をより明確に評価するため、試料には厚さ  $0.4\mu\text{m}$  の銅合金上に金めっきされた平板試験片及びエンボス試験片を用いた。試料片と電源及びデジタルマルチメータを、プローブを通して結線するため、試料片にはそれぞれ 2 か所に導線がスポット溶接されている。試験片はアセトンで 10 分間超音波洗浄したのち、それぞれ接着剤で試験機に固定した。接触荷重に対してオイルの表面張力が影響を与えないように試験片はオイルに完全に浸かった状態で測定を行った。

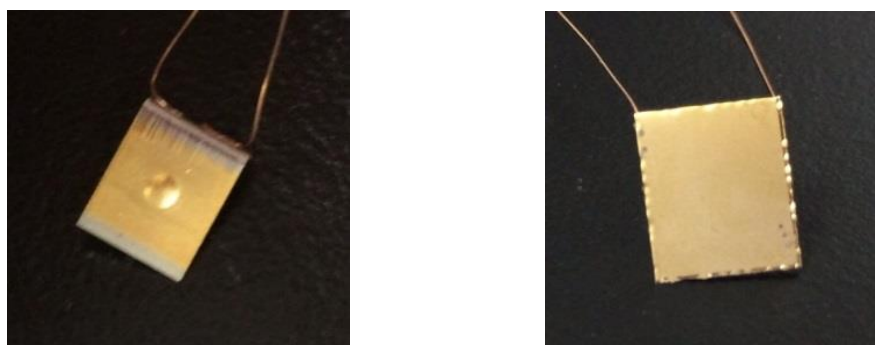


図 4.2 試料片 (左：エンボス試験片 右：平板試験片)



### 4.3.2 荷重-接触抵抗測定方法

図 4.3 に荷重-接触抵抗測定の様式図を示す。自動ステージを用い平板を下げてエンボスに荷重を加えていき、ロードセル及びウェイング・インジケータで荷重を測定、定電流源及びデジタルマルチメータを用いて 4 端子法で接触抵抗を測定した。電流値は 10mA とした。その他詳しい測定条件は表 4.2 に示す。

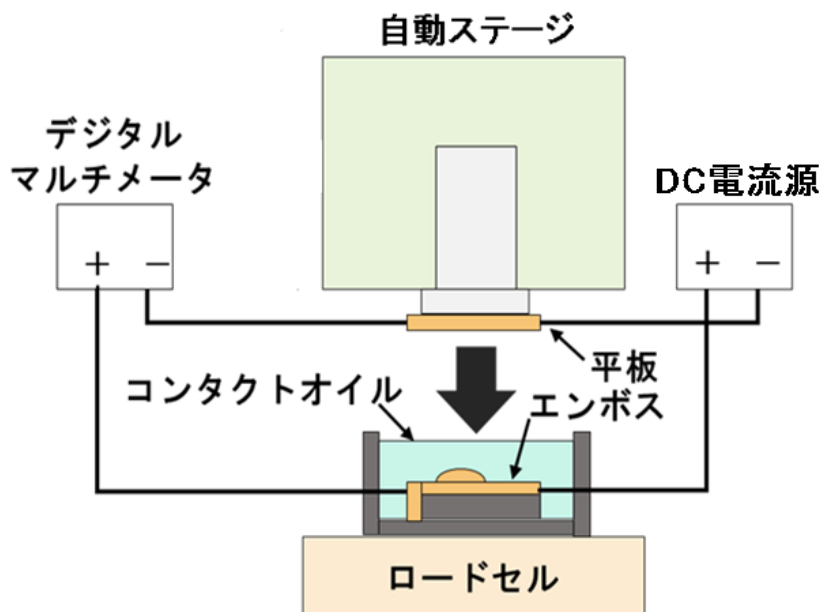


図 4.3 荷重-接触抵抗測定様式図

3.3 節で述べたように、先行研究では測定毎に新品試料を使用していたが、新品試料の測定 1 回目の結果はほとんどの場合再現性が取れないことが明らかとなった。本研究では試料差による F-R 特性のばらつきを無視する為、同じ試料を用いて繰り返し測定を行う中で無塗布試験とオイル塗布試験を行い、その接触抵抗の差をオイルが接触抵抗に与えた影響とみなした。同じ試料を用いて繰り返し F-R 試験を行っても F-R 特性が測定回数によって変化しないことは十分に予備実験を行い確認した。実際の F-R 試験手順を図 4.4 に示す。

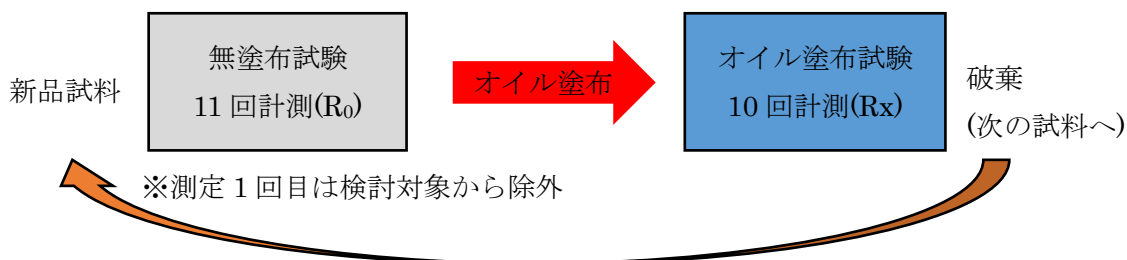


図 4.4 F-R 試験工程

### 4.3.3 測定システム

自動ステージを用いた接点移動の模式図を図 4.5 に示す。加速時間  $t$  で停止状態から最高速度  $V_{max}$  まで徐々に加速し、その後同時間  $t$  で徐々に減速し停止後、抵抗測定を行う繰り返しによる測定システムを構築した。一回の移動での移動距離を  $X$ 、移動時間を  $T$  と設定した。これら  $t$ 、 $V_{max}$ 、 $X$ 、 $T$  の設定条件を表 4.2 に示す[1]。

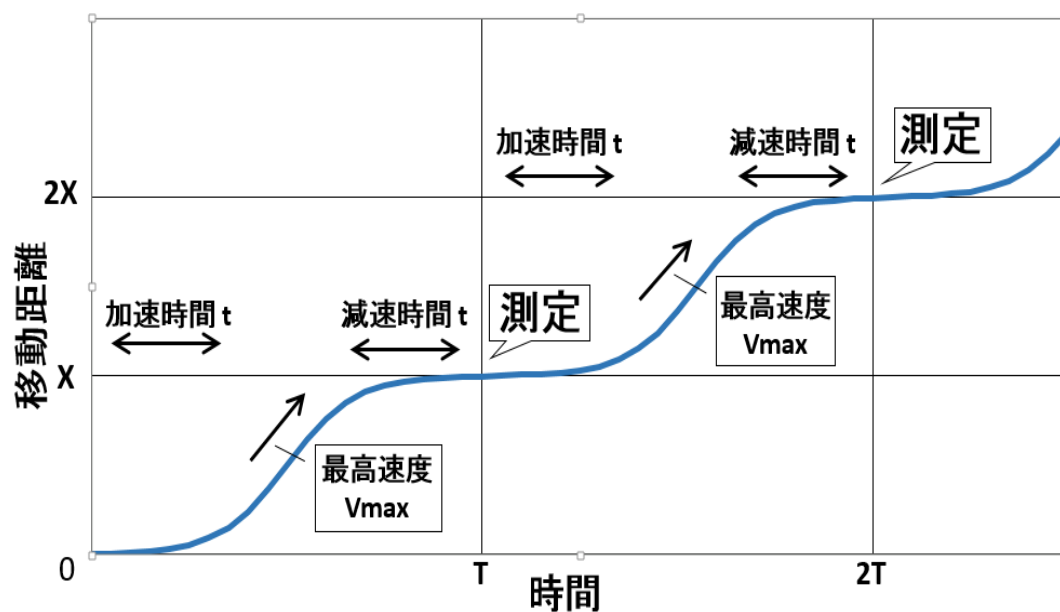


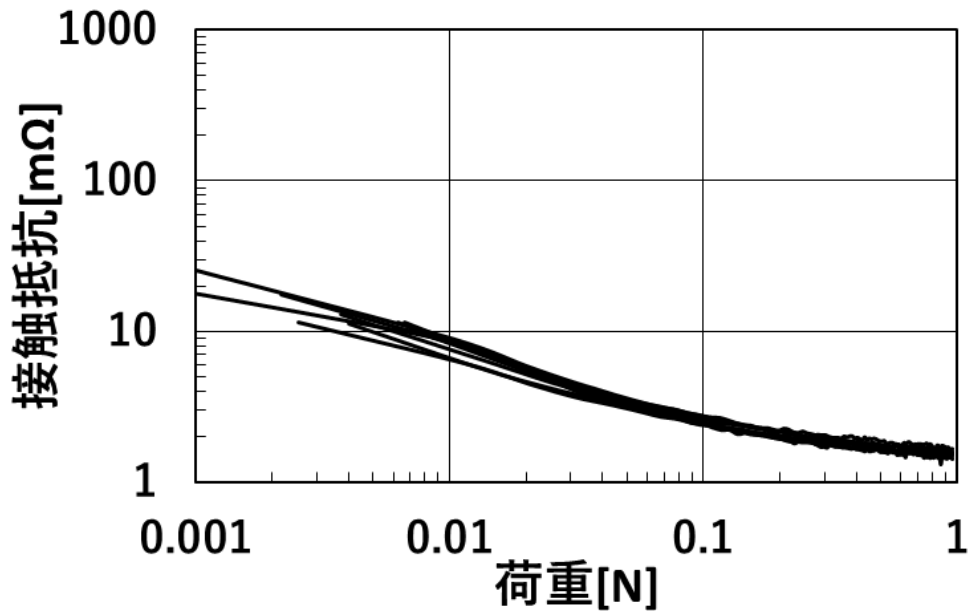
図 4.5 接点移動模式図

表 4.2 測定条件

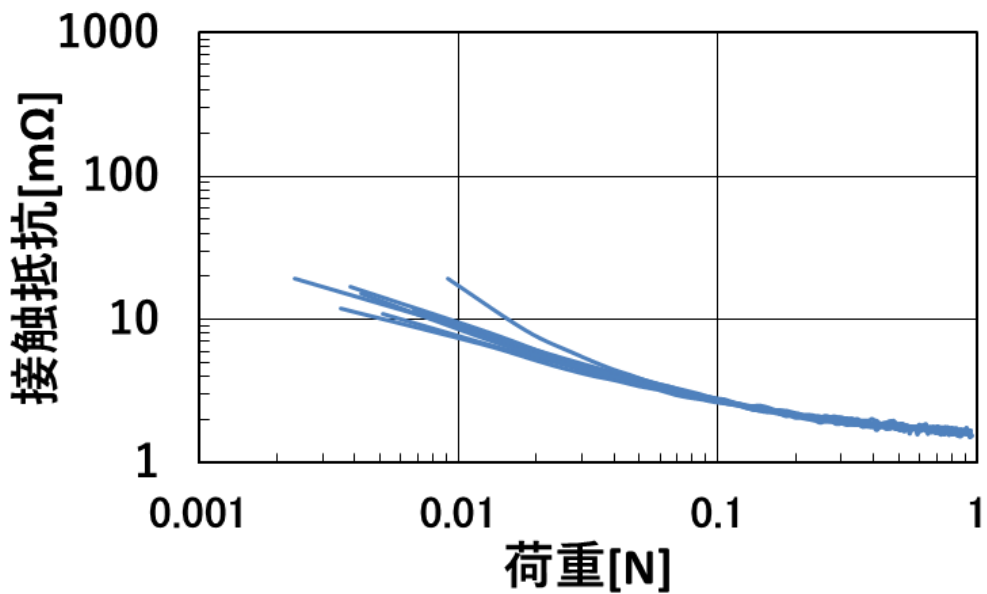
電流	10mA
開放端電圧	20mV
移動距離 $X$	$2.5 \mu\text{m}$
移動時間 $T$	62ms
加減速時間 $t$	22ms
最高速度 $V_{max}$	$62.5 \mu\text{m/s}$
速度制御法	S 字制御
最大到達荷重	1N
測定温度(室温)	$20^{\circ}\text{C}$

## 4.4 測定結果

実験によって得られた F-R 特性を図 4.6 に示す。横軸は荷重を示し、縦軸は接触抵抗を示す。

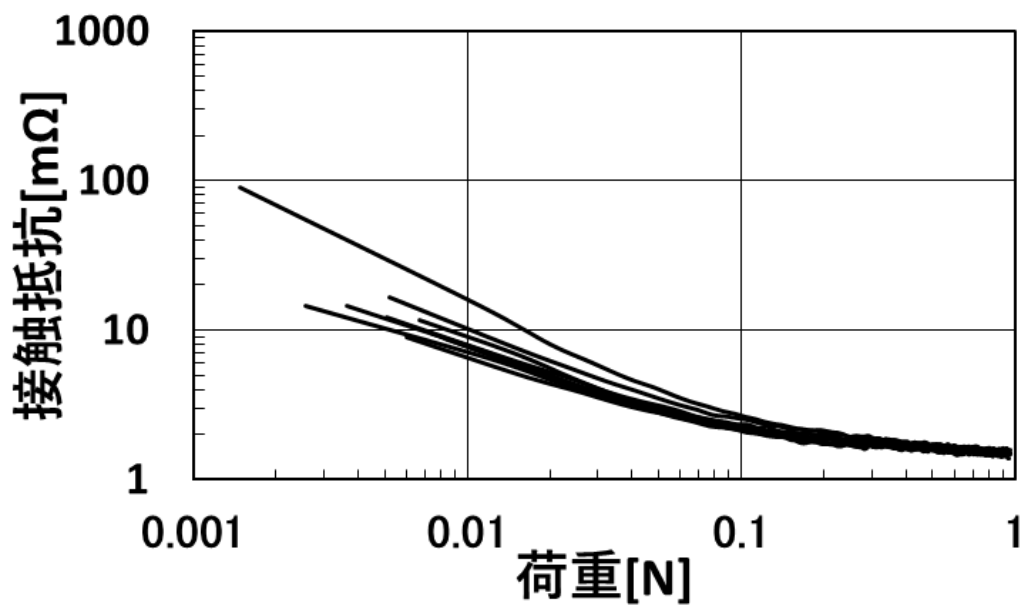


(a) 無塗布

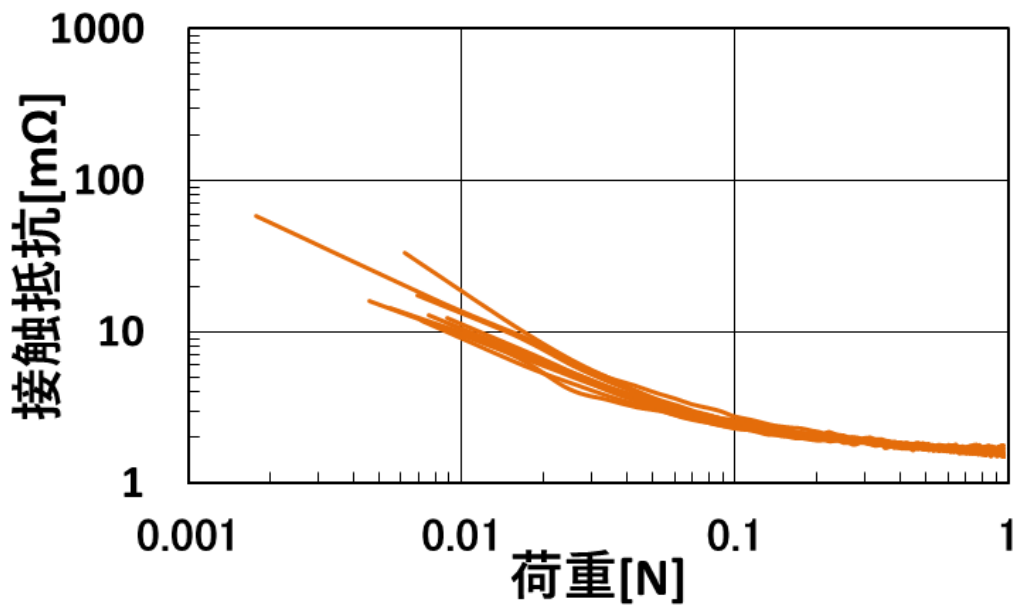


(a) 低粘度パラフィン

図 4.6 金めつき接点における F-R 特性

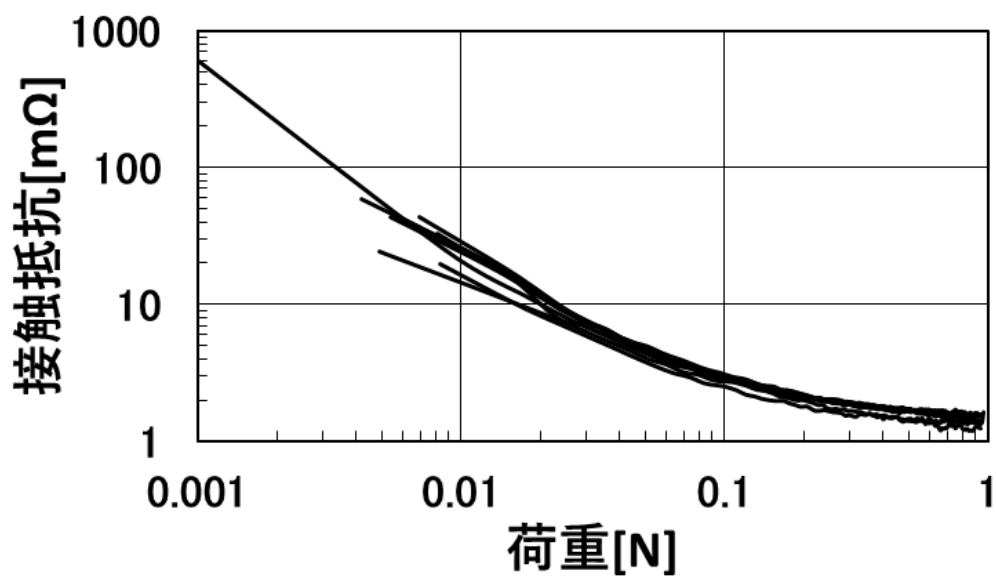


(b) 無塗布

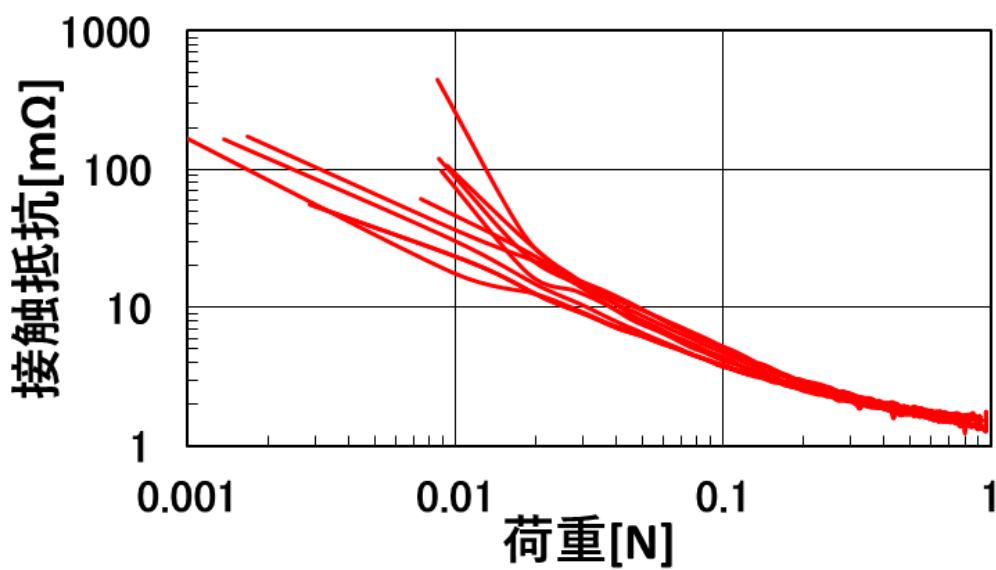


(b) 中粘度パラフィン

図 4.6 金めっき接点における F-R 特性

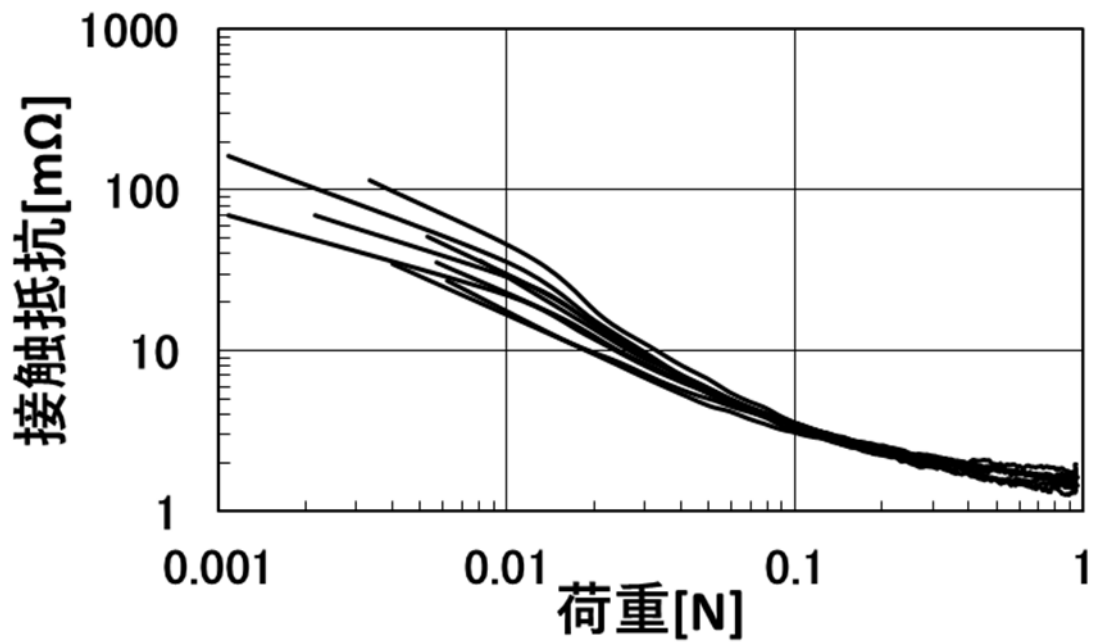


(c) 無塗布

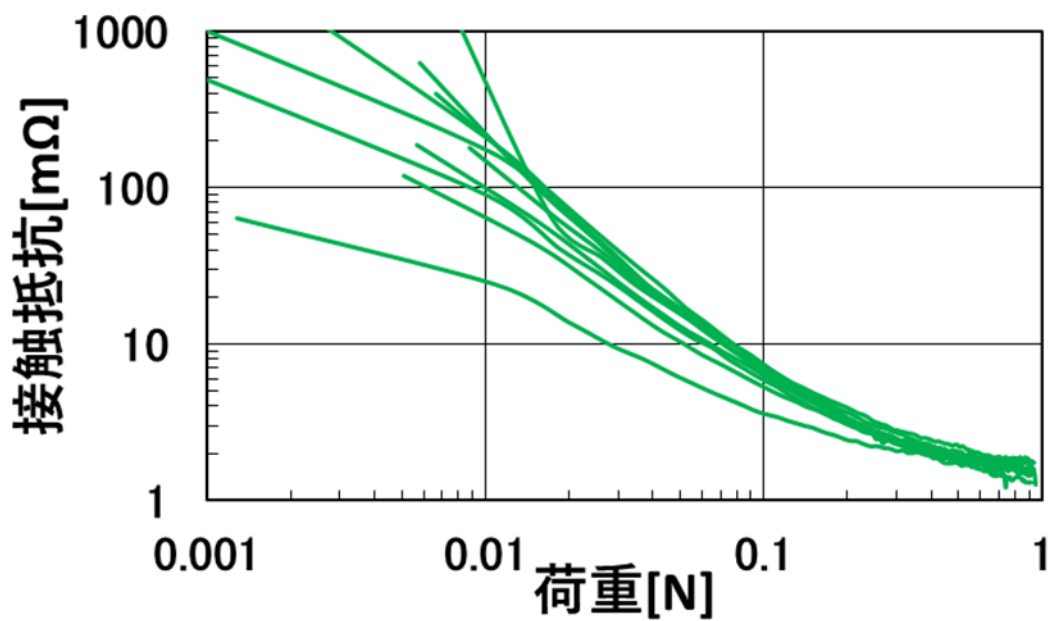


(c) 高粘度パラフィン

図 4.6 金めつき接点における F-R 特性

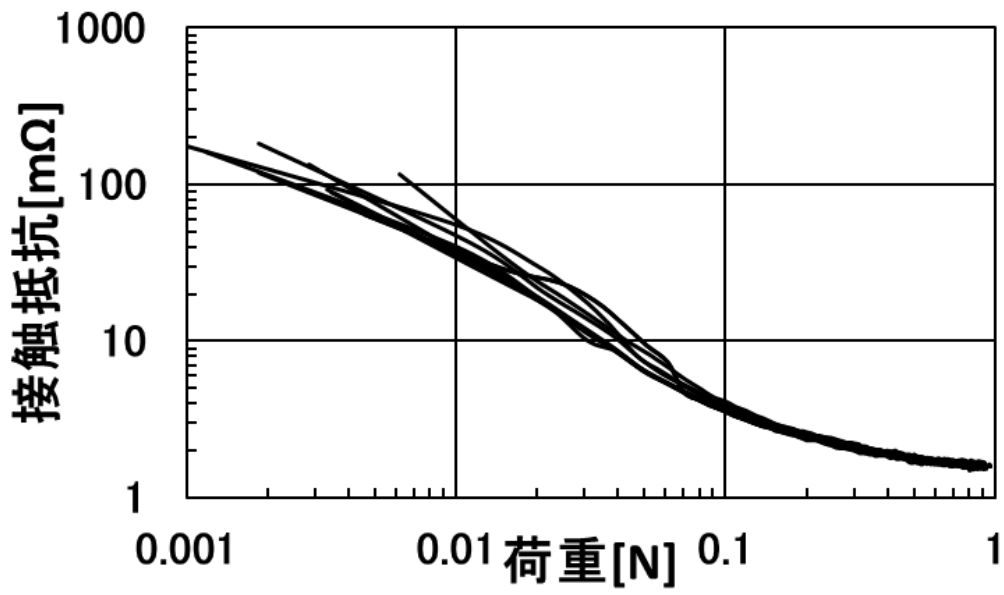


(d) 無塗布

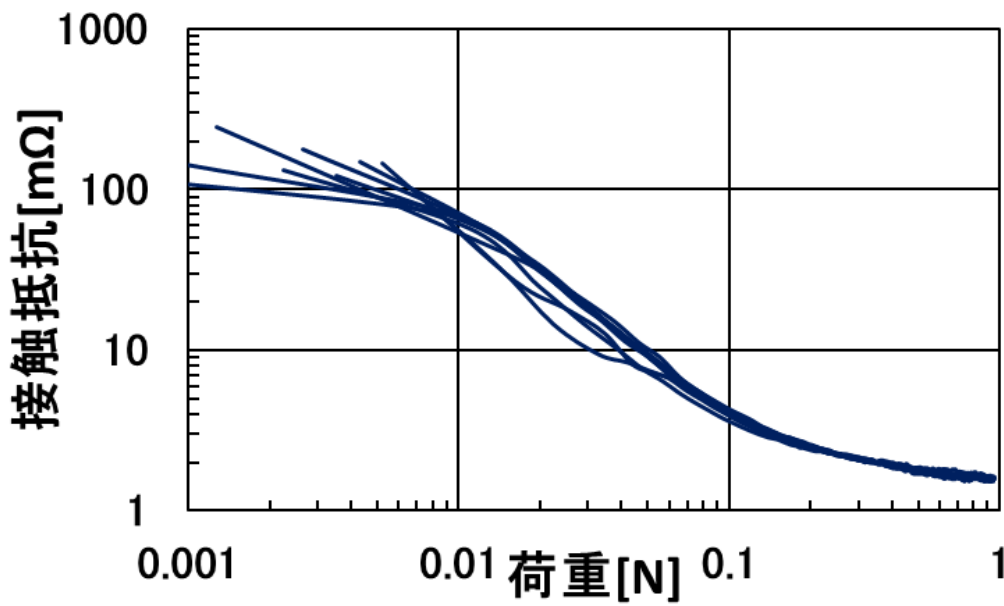


(d) 高粘度パラフィン+ステアリン酸 0.25wt%添加

図 4.6 金めっき接点における F-R 特性

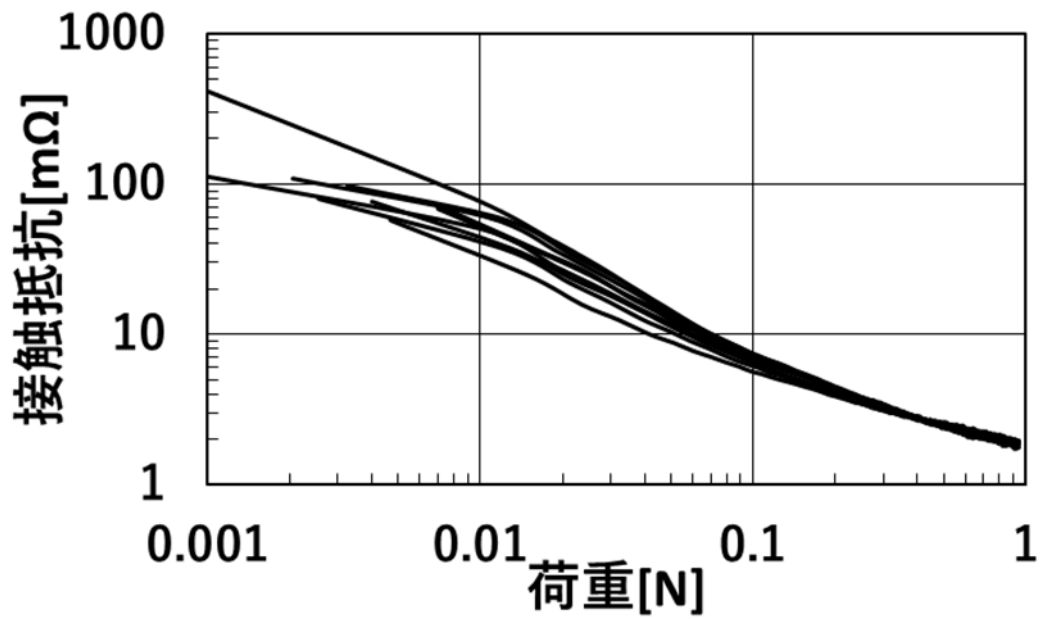


(e) 無塗布

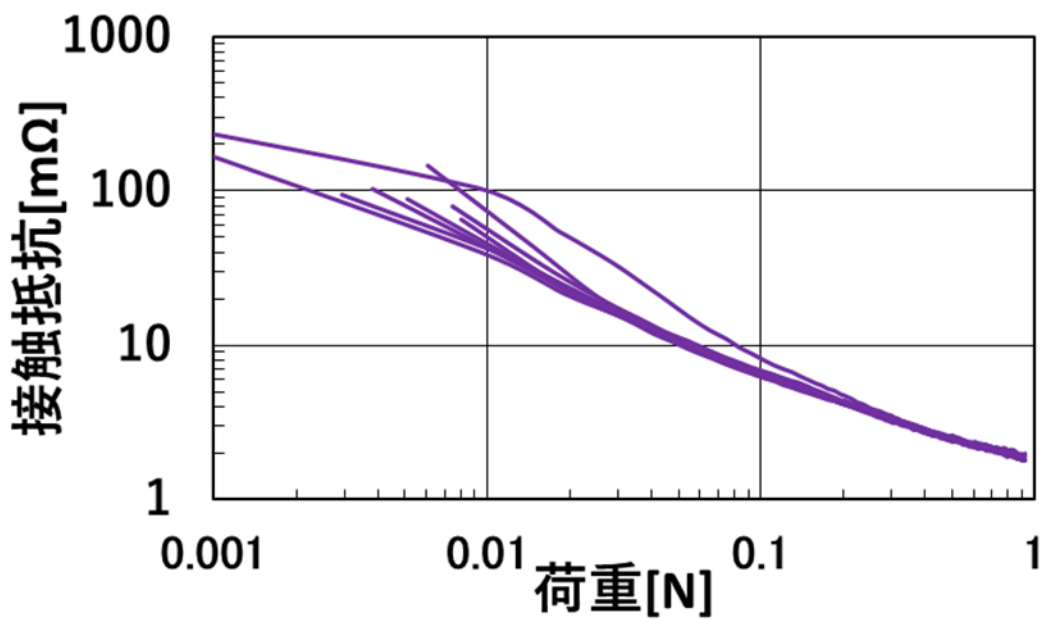


(e) 低粘度パラフィン+高粘度ポリイソブテン

図 4.6 金めつき接点における F-R 特性



(f) 無塗布

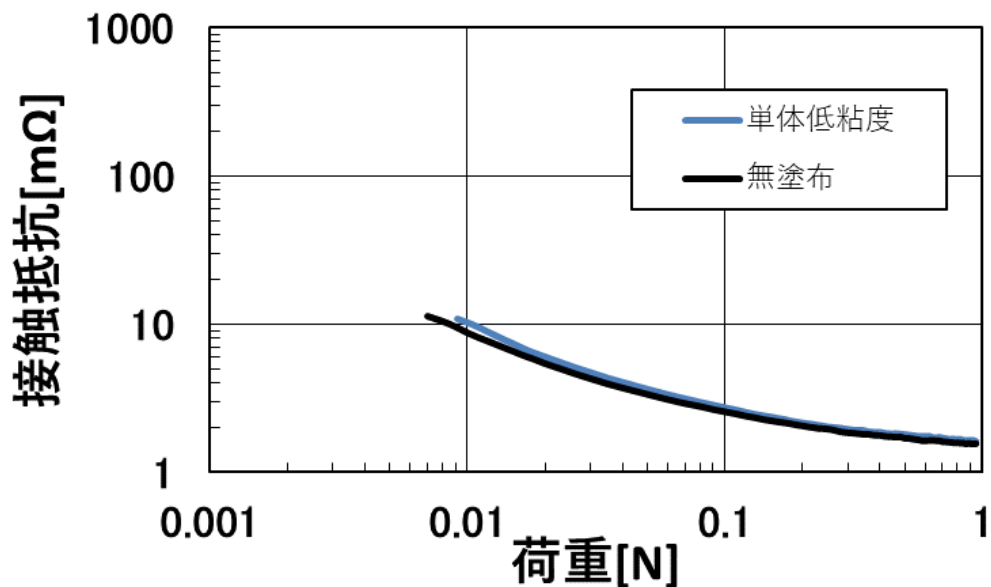


(f) 低粘度ポリイソブテン+高粘度ポリイソブテン

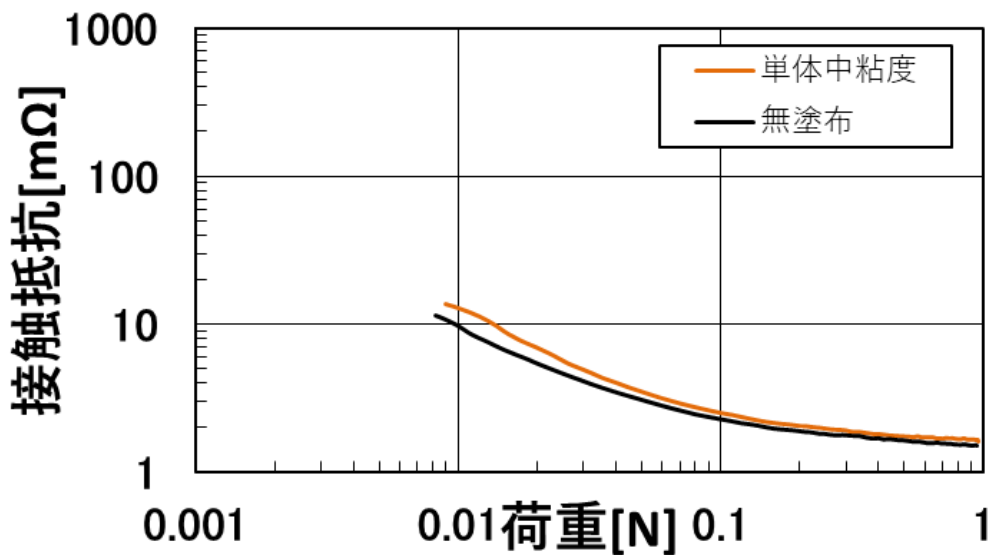
図 4.6 金めっき接点における F-R 特性



次に図 3.5 に示した F·R 測定結果をそれぞれ同条件毎に相乗平均し、同試料での無塗布試験とオイル塗布試験を比較した F·R 特性を図 4.7 に示す。

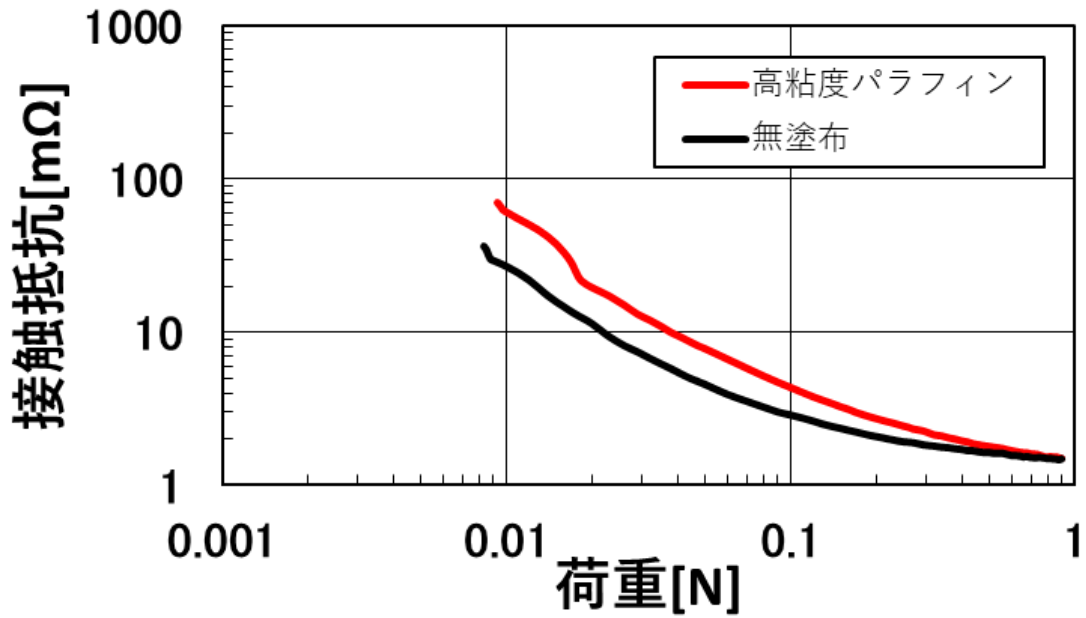


(a) 低粘度パラフィン

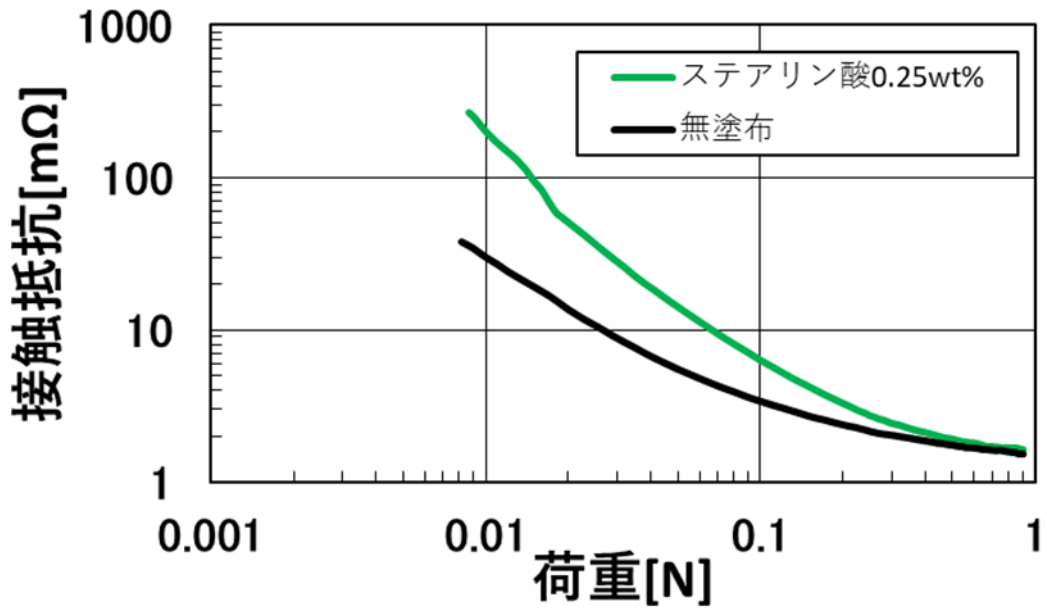


(b) 中粘度パラフィン

図 4.7 金めつき接点における F·R 特性(相乗平均)

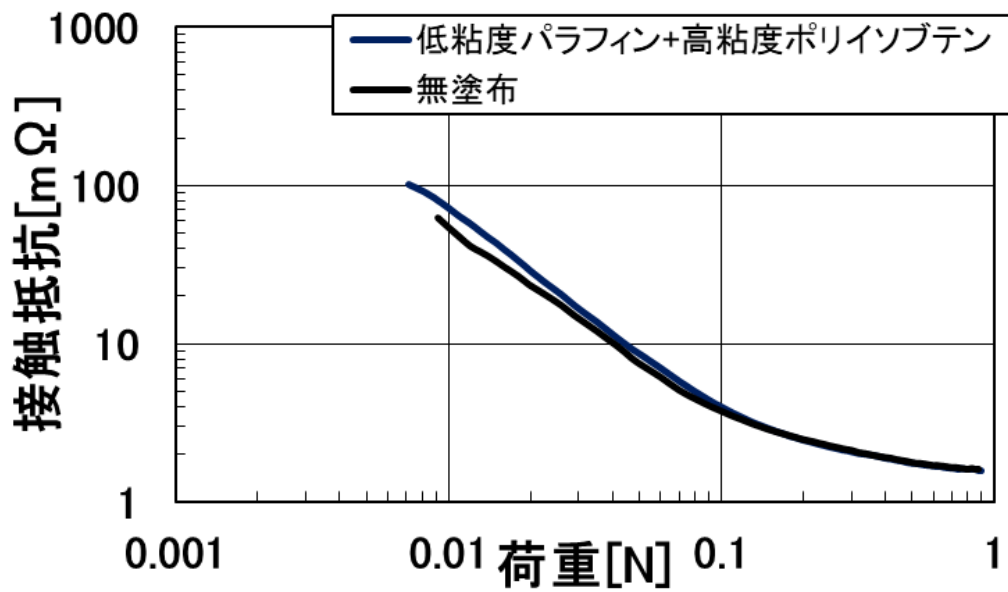


(c) 高粘度パラフィン

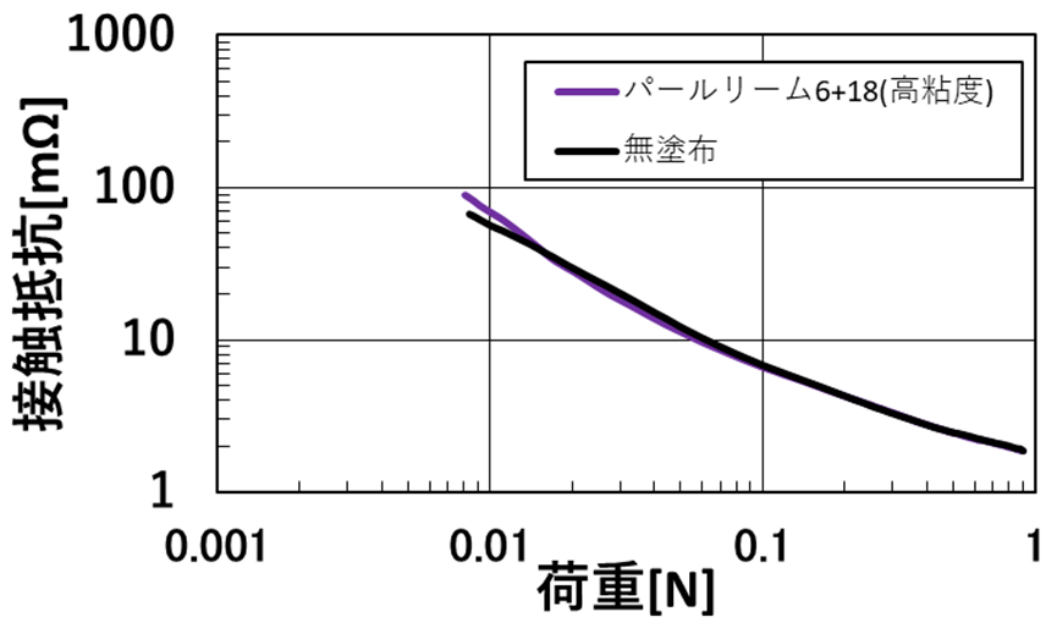


(d) 高粘度パラフィン+ステアリン酸 0.25wt%添加

図 4.7 金めっき接点における F·R 特性(相乗平均)



(e) 低粘度パラフィン+高粘度ポリイソブテン



(f) 低粘度ポリイソブテン+高粘度ポリイソブテン

図 4.7 金めっき接点における F·R 特性(相乗平均)

図 4.7 に示した結果より、各オイルの F-R 特性を比較する。まず、比較結果を見やすくするため、各オイルの F-R 特性(相乗平均)において、無塗布試料とオイル塗布試料の接触抵抗の比  $R_x/R_0$  を荷重 0.01N 時と 0.1N 時についてグラフ化した。それぞれを図 4.8、図 4.9 に示す。

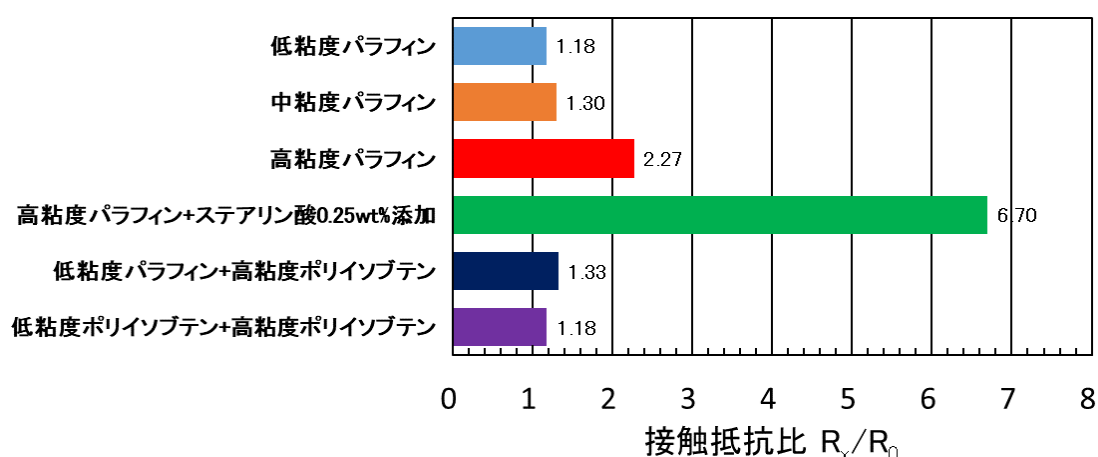


図 4.8 0.01N 時における無塗布試料とオイル塗布試料の接触抵抗比

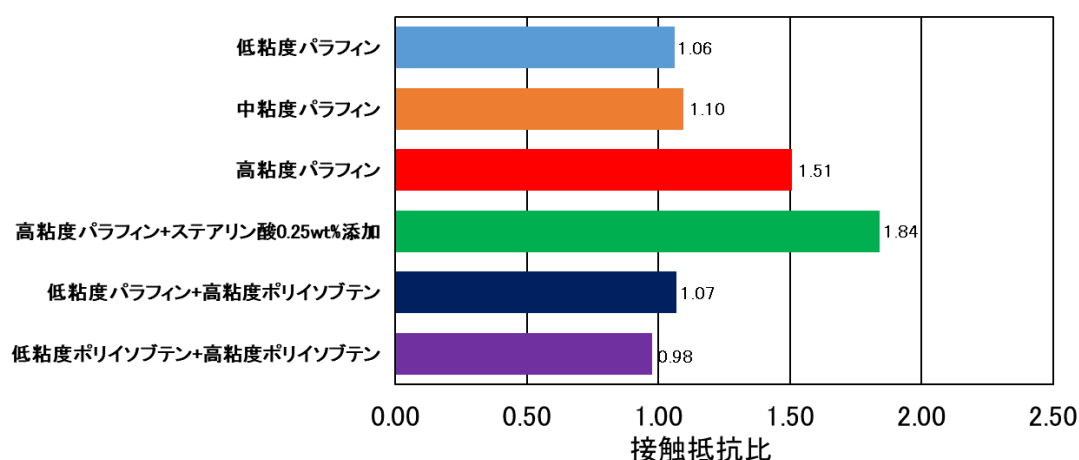


図 4.9 0.1N 時における無塗布試料とオイル塗布試料の接触抵抗差

以上の結果より、0.01N 時点では高粘度パラフィン塗布試料、ステアリン酸添加オイル塗布試料で、顕著な接触抵抗の上昇が確認できた。それ以外の試料でも、18%から33%の接触抵抗上昇が確認できた。また、荷重が大きくなるにつれて無塗布試料とオイル塗布試料の差はなくなっていき、0.1N 時点では 0.01N 時点で顕著に接触抵抗の上昇が確認できた 2 試料でも接触抵抗比は 2 以下となり、接触抵抗値にして数  $m\Omega$  以下の差となった。他の試料においても接触抵抗の上昇率は数%であり、オイルの影響は排除されたと考える。次節にて各オイルの成分や粘度といった観点から詳細に比較し考察を行う。

## 4.5 考察

F-R 測定の実験結果より、各オイル塗布試料の F-R 特性が得られた。その結果、0.01N のような低荷重領域ではオイルの種類によって接触抵抗比に差が見られたが、0.1N まで荷重を上げると接触抵抗の差は数  $m\Omega$ 、または無視できる程度まで少なくなった。接触抵抗比に差が生じた原因を検討するため、荷重 0.01N、0.1N における粘度-接触抵抗比特性グラフを作製した。粘度-接触抵抗比特性グラフを図 4.10、図 4.11 に示す。

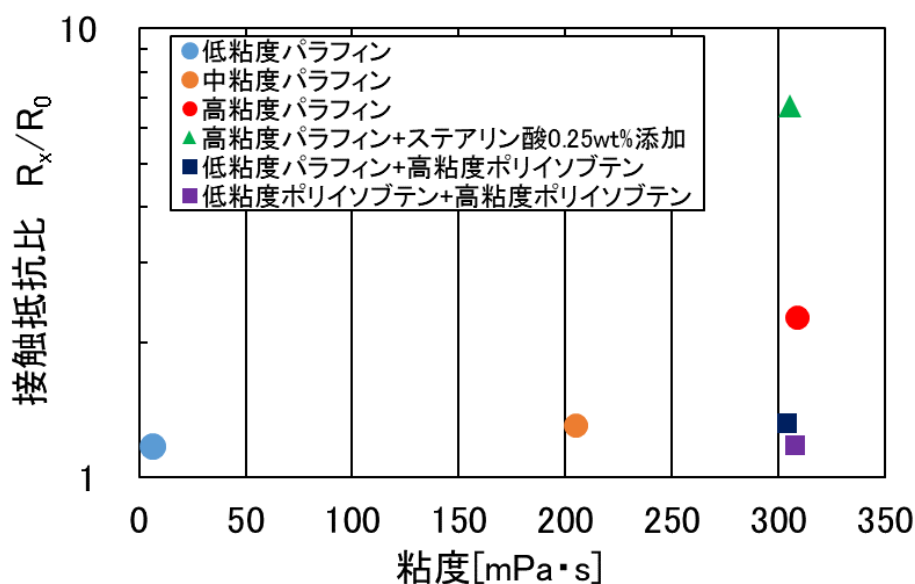


図 4.10 粘度-接触抵抗比特性(荷重：0.01N)

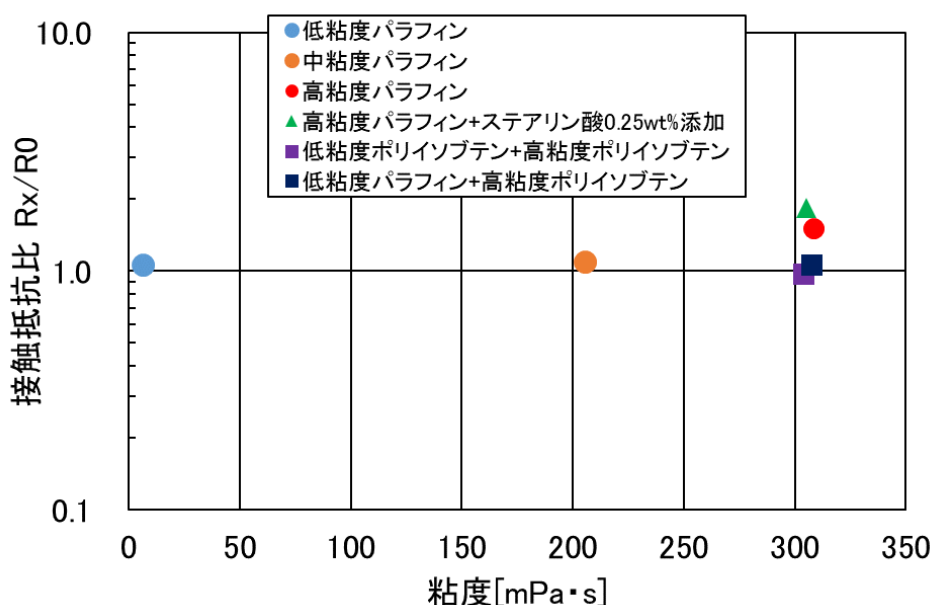


図 4.11 粘度-接触抵抗比特性(荷重：0.1N)

### 4.5.1 オイルの粘度・添加剤の影響

3種類の単体パラフィン塗布試料の粘度-接触抵抗特性では、その粘度が上がるにつれ接触抵抗差も上昇している。これは粘度が高いほど荷重を加え金属を接触させた時に接点間から排出されていくオイルの速度が遅くなり、接点間での油膜厚が大きくなるためと考えられる。

高粘度パラフィンにステアリン酸を 0.25wt% 添加した試料では、粘度は添加前と同じにも関わらず、接触抵抗比は添加前試料よりも上昇した。これは2章でも述べたように極性基分子であるステアリン酸が金属表面に吸着し、ステアリン酸自身の絶縁性によって[1]接触抵抗上昇につながったと考えられる。また、ステアリン酸が金属表面に吸着したことによってオイルの排出が妨げられ、更に油膜厚が大きくなり接触抵抗の増加を招いたとも考えられる。上記のイメージ図を以下の図 4.12 に示す。

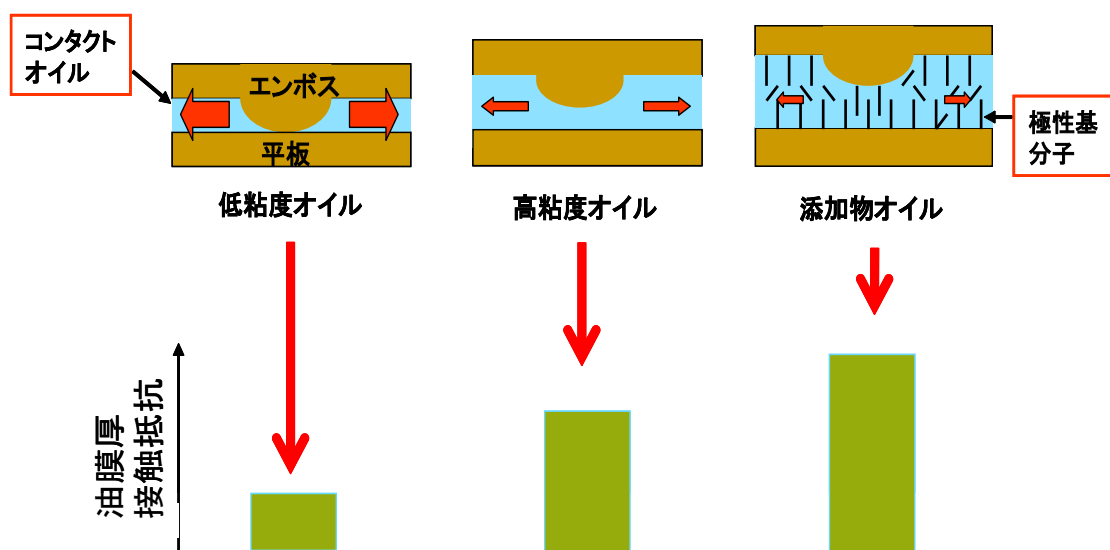


図 4.12 金めつき接点におけるオイル排出の様子

## 4.5.2 混合オイルによる接触抵抗抑制

4.5.1 で述べたように、パラフィン単体の粘度-接触抵抗特性からオイルの粘度が上がれば接点間の油膜厚が上昇し、接触抵抗も増加すると考えた。しかし図 4.9 に示した 2 種類の混合オイル(低粘度パラフィン+高粘度ポリイソブテン、低粘度ポリイソブテン+高粘度ポリイソブテン)の場合、無塗布試料との接触抵抗比は同粘度の単体パラフィンに対して接触抵抗は低くなるという結果となった。これはマランゴニ効果の影響と考えている[3]。マランゴニ効果とは温度差、濃度差などにより流体表面の表面張力に勾配が生じることで対流が生じることである。本研究の場合、高分子と低分子を混ぜたオイルを間に挟んだ金属同士を摩擦または接触させた場合、接点間では高分子成分よりも低分子成分のオイルが金属表面に残りやすい現象を生む。マランゴニ効果のイメージ図を図 4.13 に示す。

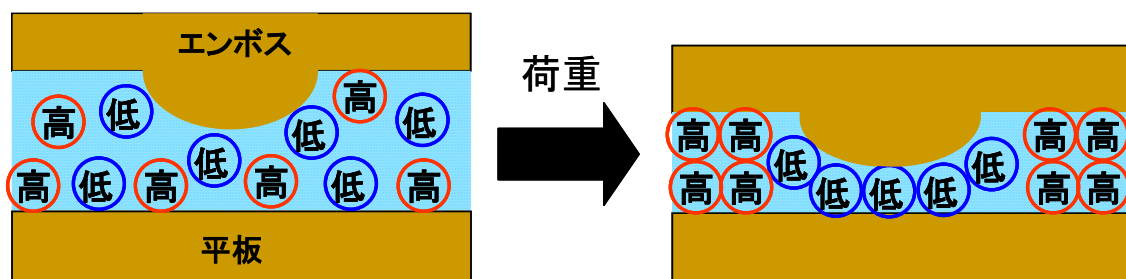


図 4.13 マランゴニ効果

図 4.13 に示すように、接触面には低分子成分が集中し金属接点間の油膜厚は薄くなると考えられる。以上より油膜厚は同粘度のオイルであっても低分子が含まれている混合オイルの方が薄くなるため、混合オイル塗布時の接触抵抗は粘度の等しい単体パラフィン塗布試料に対し低くなったと考えられる。

参考文献

- [1] 上岡広樹,青木裕介,飯田和生「接触抵抗に及ぼすオイルの粘度の影響」, 電子情報通信学会技術研究報告, EMD2017-65 (2018)
- [2] T. Tamai, “Effect of The Oil Film Thickness on Corrosion Inhibition of Contact Surface in View of Contact Resistance Characteristics –On the Stearic Acid Coating”, IEICE TRANS. ELECTRON.,VOL.E76-C,NO.2, pp.318-325(1993)
- [3] T. Watanabe, Y. Hosomi, “Effect of Molecular Structure of Oil on the Film Thickness during Rolling”, Tribology Online, 4, 1(2009)



## 第5章 コンタクトオイルの摩擦低減効果

### 5.1 はじめに

序論でも述べたようにコネクタに使用するオイルの主な目的は摩擦・摩耗の低減である。摩耗低減に関しては2章の「本研究に関する先行研究」で述べたようにコンタクトオイルの効果が確認されている。本章では「摩擦」に関してのコンタクトオイルの効果を第3章のF-R測定で使用したオイルを用い、摩擦係数測定を行うことで検討した。摩擦係数測定には本研究で構築した摩擦試験機を使用した。

### 5.2 摩擦係数測定

摩擦試験機を図5.1に示す。



図 5.1 摩擦係数測定機

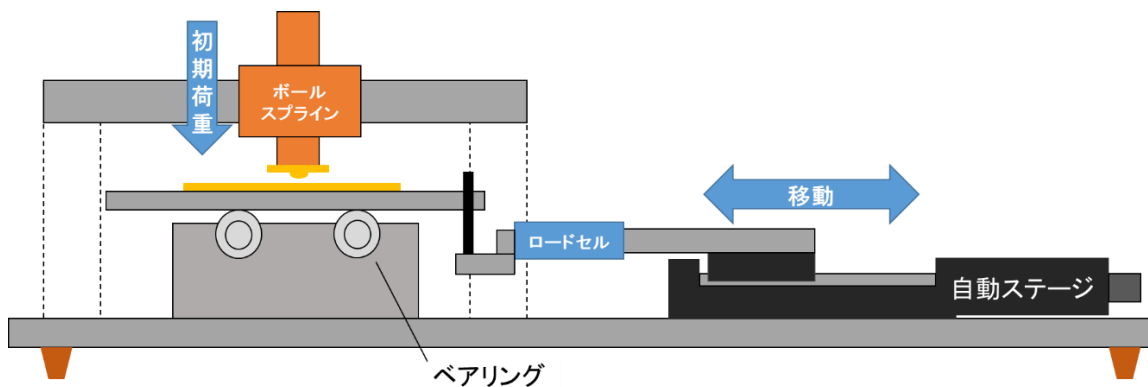


図 5.2 摩擦係数測定器 模式図

自動ステージで試料を固定した冶具を移動させ、ステージ先端に取り付けられたロードセルで引張力を測定する。垂直荷重量はボールスプライン軸の重量によって制御される。初期荷重をかけず自動ステージを移動させた時にロードセルで計測される力を無負荷引張力とすると、

$$\text{摩擦係数} = (\text{引張力} - \text{無負荷引張力}) / \text{荷重量} \quad (1)$$

として摩擦係数を求めることが出来る。計測した無負荷引張力を図 5.3 に示す。

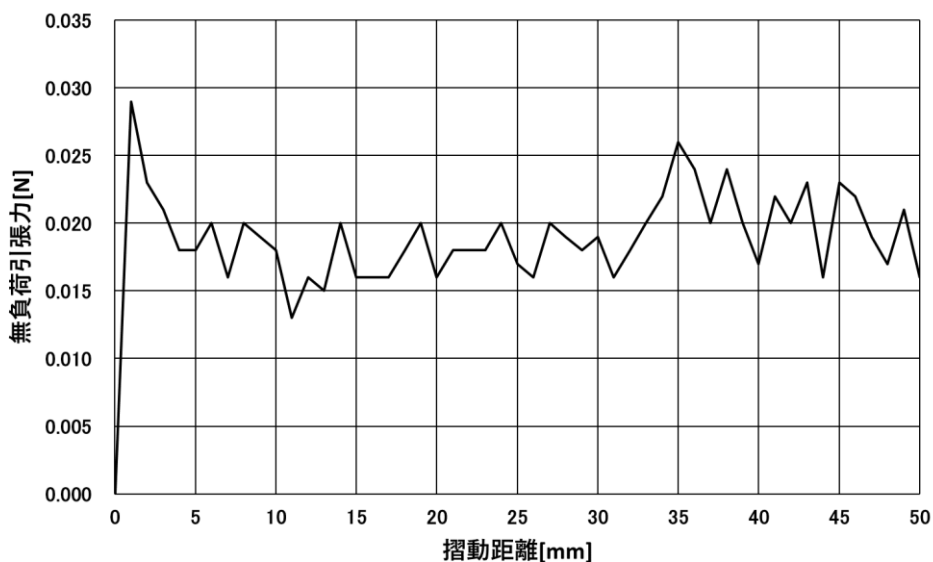


図 5.3 無負荷引張力

本論文に掲載する摩擦係数測定結果は、図 5.3 の可動抵抗を式(1)に代入して導出した摩擦係数である。

- 測定機器

- ・ 摩擦係数測定機 : 自作
 

自動ステージ	COMS	PM80B-50X
ロードセル	UNIPULSE	USM-1N
ロードセルモニタ	UNIPULSE	FS10
モータードライバ	COMS	CP-D7
ポジションコントローラ	COMS	CP-700
制御・計測ソフト	UNIPULSE	FS10softwaer
	COMS	CP-700TOOL

- 試料

- ・ 平板試験片 (銅合金 : 金めつき  $0.4\mu\text{m}$ )
- ・ エンボス試験片 (銅合金 : 金めつき  $0.4\mu\text{m}$ )

F-R 試験に用いた試験オイルと同じものを用いた。

各試験オイルの粘度を表 5.1 に示す。

- 測定条件

- ・ 摺動速度 : 10mm/s
- ・ 摺動距離 : 50mm
- ・ 荷重 : 0.3N

表 5.1 使用した試験オイルとその粘度

グループ	オイル	混合割合	粘度[mPa・s]
単体パラフィン	低粘度パラフィン	—	6.2
	中粘度パラフィン	—	205.2
	高粘度パラフィン	—	308.4
添加オイル	高粘度パラフィン +ステアリン酸	0.25wt%添加	305.2
混合オイル	低粘度パラフィン +高粘度ポリイソブテン	35 : 65	307.2
	低粘度ポリイソブテン +高粘度ポリイソブテン	54 : 46	303.8

## 5.2.1 摩擦係数測定結果

図 5.4、図 5.5 に摩擦係数測定の結果を示す。図 5.4 は無塗布試験と単体パラフィン塗布試験を比較したもの、図 5.5 は粘度が同等である 4 種のオイル塗布試験を比較したものである。

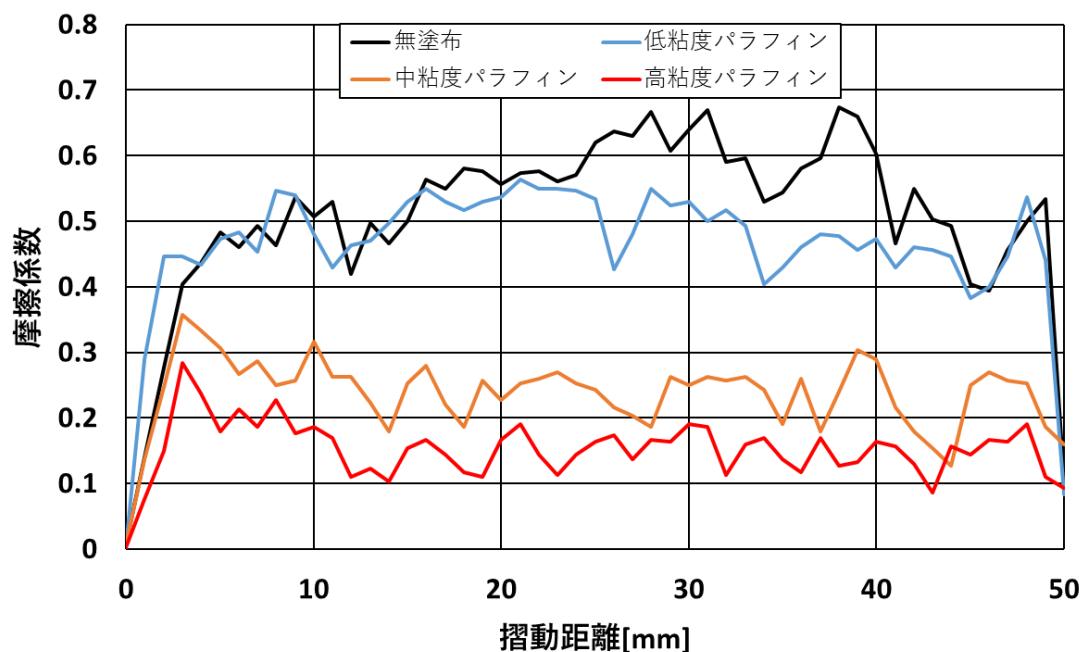


図 5.4 各種単体パラフィン塗布による摩擦係数

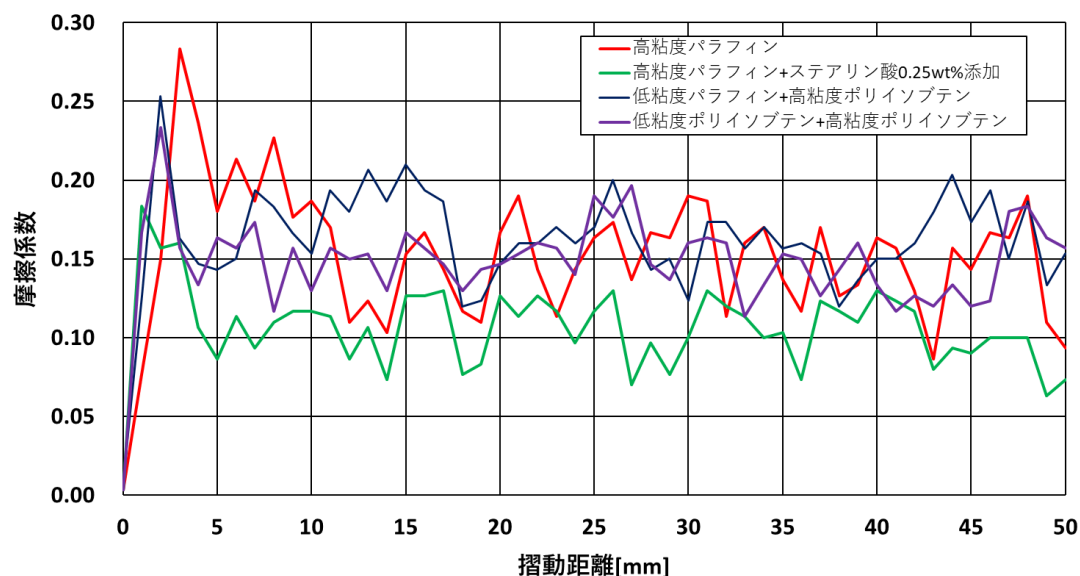


図 5.5 各種高粘度オイル塗布による摩擦係数

両図から分かるように、オイルを塗布した結果は塗布しなかった場合に比べ全て摩擦係数が下がる結果となった。図 5.4 では最も粘度の高い高粘度パラフィンが最も低い摩擦係数を示し、最も粘度の低い低粘度パラフィンが最も高い摩擦係数を示した。また無塗布試料の場合、摺動距離 10mm 時点から 40mm 時点にかけて摩擦係数が上昇する領域が存在するが、オイルを塗布した場合はそのような領域は見られなかった。

図 5.5 では高粘度パラフィンと混合オイル 2 種にはそれほど摩擦係数の差があるとは認められないが、ステアリン酸添加オイルは摺動領域全域で他の 3 種に比べやや低い摩擦係数を示した。

### 5.3 考察

図 5.4、図 5.5 の摩擦係数測定結果をコンタクトオイルの粘度、コンタクトオイルへの添加物の観点から比較するために、無塗布、各試験オイルの摩擦係数測定開始から終了までの摩擦係数の平均をとり、粘度-摩擦係数特性にまとめた。図 5.6 に粘度-摩擦係数特性を示し、表 5.2 に各試料の平均摩擦係数と粘度の一覧を示す。

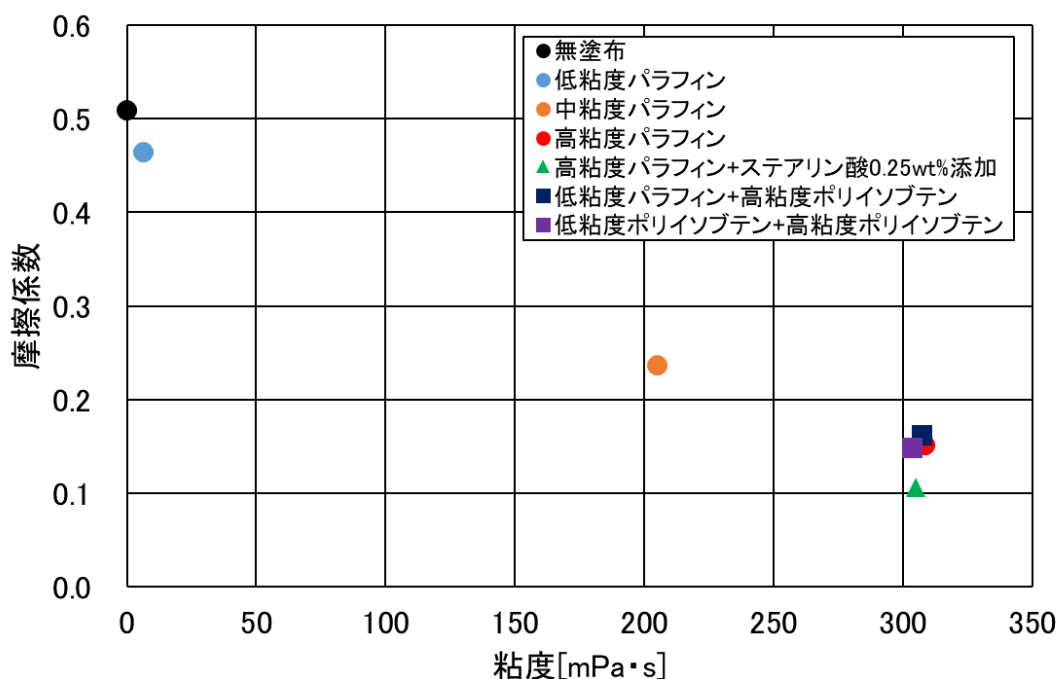


図 5.6 粘度-摩擦係数特性

表 5.2 各試料の平均摩擦係数と粘度

グループ	オイル	混合割合	平均摩擦係数	粘度[mPa・s]
無塗布	—	—	0.509	—
単体 パラフィン	低粘度パラフィン	—	0.464	6.2
	中粘度パラフィン	—	0.236	205.2
	高粘度パラフィン	—	0.152	308.4
添加オイル	高粘度パラフィン +ステアリン酸	0.25wt% 添加	0.106	305.2
混合オイル	低粘度パラフィン +高粘度ポリイソブテン	35 : 65	0.162	307.2
	低粘度ポリイソブテン +高粘度ポリイソブテン	54 : 46	0.148	303.8

図 5.6 から無塗布に対してオイルを塗布した場合は摩擦係数が下がり、オイルの粘度が上がるにつれ摩擦係数は下がっていつているのがわかる。これはオイル塗布により摩擦接点における金属同士の凝着力が抑制されているためだと考えられる。一般的に摩擦力は

$$\text{摩擦力} = \text{凝着項} + \text{掘り起こし項} \quad (2)$$

と表わされる[1]。摩擦力は主に上記の 2 項の影響から発生するとされている。

- ・ 凝着項：凝着部をせん断する力
- ・ 掘り起こし項：移動する前方にある物体を押しのけるための力

摩擦力に影響する 2 項とコンタクトオイルの粘度には以下の関係がある。

表 5.3 凝着項と掘り起こし項の粘度との関係

	低粘度	高粘度
凝着項	高	低
掘り起こし項	低	高

図 5.6 からコンタクトオイルの粘度が高いほど摩擦係数は下がると述べたが、表 5.3 から凝着項が下がるのに対し高粘度では掘り起こし項が上がっている。しかし、凝着項と掘り起こし項を比べた際、摩擦力に影響を与えるのは凝着項の方がはるかに大きいとされている。以上よりコンタクトオイルの粘度が高いほど掘り起こし項は上昇するが、それ以上に摩擦力に与える凝着項の力が抑えられたため結果として摩擦係数が下がったと考える。

また図 5.6 の高粘度パラフィンと、高粘度パラフィン+ステアリン酸 0.25wt%添加の結果において、二つのオイルの粘度が同じであるのに対して、ステアリン酸を添加した試料では摩擦係数が小さくなっているのが見てとれる。これは 2 章でも述べた極性基の化学吸着により摩擦接点間に対摩耗性膜が形成されたため、摩擦係数の低下につながったと考える。

一方、高粘度パラフィンと同じ粘度を有する混合オイル 2 種の示す摩擦係数は高粘度パラフィンと差異が認められなかった。これは第 4 章で接触抵抗差として示されたマランゴニ効果が摩擦係数には影響しないということを表している。

### 5.3.1 F-R 測定結果との関連

図 5.7 に平均摩擦係数-接触抵抗比特性グラフを示す。

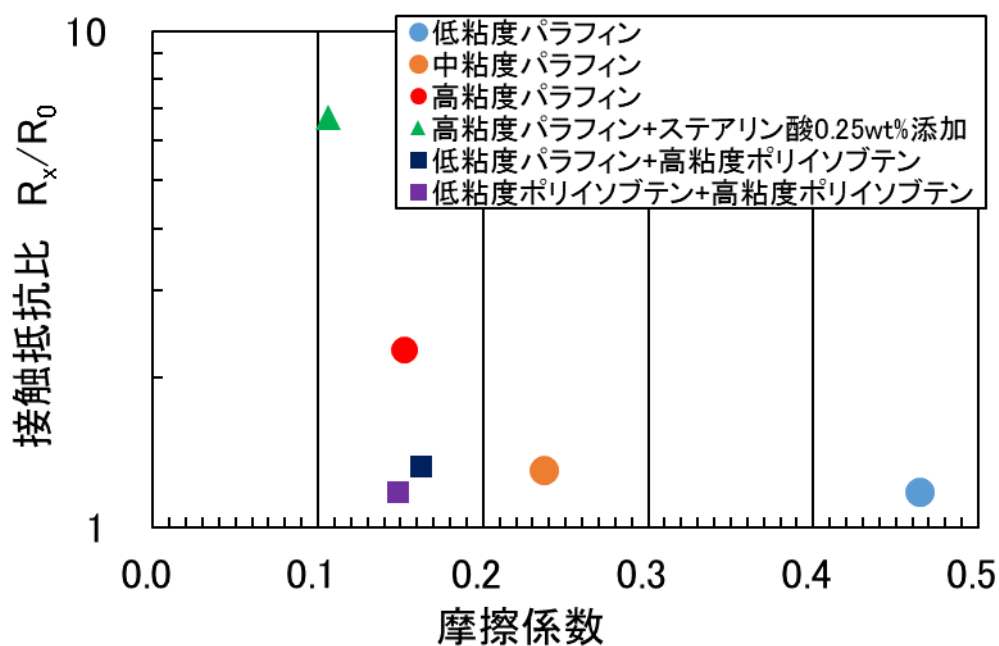


図 5.7 平均摩擦係数-接触抵抗比特性

5.2.2 で述べたように粘度の高いオイルやオイルに添加物を添加することで摩擦係数は減少した。このことから粘度の高いオイルにステアリン酸のような油性剤添加物を添加することが摩擦低減に対して有効であると言える。しかし、第 3 章の F・R 測定結果より混合オイルを除き、低荷重領域において高粘度パラフィンやステアリン酸添加オイルでは接触抵抗の増加が確認できた。

一方、低分子成分を含む高粘度な混合オイルは粘度なりの摩擦低減効果と接触抵抗への悪影響の小ささを併せ持ち、コンタクトオイルとして優秀なものであると言える。

本研究では摩擦係数の測定は荷重 0.3N で行った。F・R 測定結果より、荷重があがるにつれオイルが接触抵抗へ及ぼす影響は小さくなっていき、0.1N 以上ではほとんど影響がなくなったことと、実際のコネクタ接点荷重は 10N 程度であることを考慮すると、接点間にオイルが介在することによる接触抵抗増加の影響は極めて少ない。そのため、コンタクトオイルの本来の目的である摩擦低減効果が大きなオイルがコンタクトオイルとして最も優れていると考えることが出来る。



参考文献

- [1] 田中久一郎,「摩擦のおはなし」,日本規格協会,おはなし科学・技術シリーズ,p.56  
(1985)

## 第6章 総括

第1章では、序論として背景、自動車のエレクトロニクス化の進行とそれに伴うコネクタ接続信頼性の重要性を述べた。そして、本研究の目的と本論文の各章の概説を述べた。

第2章では、コネクタに使用される潤滑剤であるコンタクトオイル、そして本研究に使用するパラフィン、ポリイソブテンについて述べた。

第3章では、従来の手動の計測システムに代わって新しく構築した自動の計測システムと実験装置について述べた。

第4章では、荷重-接触抵抗測定を行い、金めっき接点におけるコンタクトオイルの影響の評価を行った。以下にその結果を要約する。

1. 荷重-接触抵抗特性より、0.1N以下の低荷重領域におけるオイル塗布接点では無塗布より接触抵抗が大きくなることが確認された。また、無塗布との差は荷重が増えるにつれ小さくなった。これは実際のコネクタの荷重が10N程度であることを考えると、非常に低荷重領域における現象である。
2. ステアリン酸添加オイル塗布接点では、無塗布接点との接触抵抗差の増加量が最も大きい。高い絶縁性を持つステアリン酸が接点表面に吸着したことによって接触抵抗に与える影響が大きくなったと考えられる。
3. 低粘度成分と高粘度成分を混ぜて作製した混合オイル塗布接点の接触抵抗は、同じ粘度の単体パラフィン塗布接点の接触抵抗と比べて接触抵抗の増加量は少ない。これはマランゴニ効果の影響と考えられる。

第5章では、摩擦係数測定機を用いて、無塗布接点と各オイル塗布接点の摩擦係数を測定した。以下にその結果を要約する。

1. 全てのオイル塗布接点で摩擦抵抗の低減が確認でき、オイルの粘度が高い程、摩擦低減効果が大きいことが確認できた。
2. 混合オイル塗布接点は同じ粘度の単体パラフィン塗布接点と摩擦係数が同等であり、摩擦係数測定試験においては混合オイルのマランゴニ効果の影響は確認できなかった。
3. ステアリン酸添加オイル塗布接点は、他の同じ粘度であるオイルに比べて低い摩擦係数を示した。F-R試験結果同様、摩擦表面にステアリン酸が吸着し耐摩耗膜を形成したためと考えられる。
4. 実際のコネクタにおける接点荷重も考慮すると、接点間にオイルが介在した場合の接触抵抗への影響は極めて少ないため、摩擦係数低減効果の高いステアリン酸添加オイルが最もコンタクトオイルとして優れていると言える。

## 謝辞

本研究の遂行にあたり、終始適切な御指導、御鞭撻を賜り、本論文の細部から公私に至るまでご指導いただきました三重大学教授工学博士 飯田和生先生に心から御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり、数多くの御助力を賜りました、同大学准教授 青木裕介先生に心からお礼申し上げます。

最後に、研究を遂行する上で数多くのご協力を頂きました本学工学部電気電子工学科有機エレクトロニクス研究室の学生一同に御礼を申し上げます。

2019年2月

上岡 広樹