

オイルが介在した電気接点における 導通機構に関する検討

平成 28 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 415M205

安藤 優佑

目次

第1章 序論	1
1.1. 本研究の背景と目的	1
1.2. 本論文の概要	3
参考文献	4
第2章 潤滑	5
2.1. はじめに	5
2.2. 潤滑状態	5
2.3. 潤滑剤	6
2.3.1. 潤滑剤の種類	6
2.3.2. コンタクトオイルの構成	6
2.3.3. パラフィン	7
参考文献	9
第3章 計測システム	10
3.1. はじめに	10
3.2. 従来の計測システムと実験結果	10
3.3. 今研究で構築した計測システム	11
3.4. 実験装置	13
参考文献	15
第4章 接点におけるコンタクトオイルの影響	16
4.1. はじめに	16
4.2. 評価オイルの粘度測定	16
4.3. 荷重-接触抵抗・電流-電圧特性測定	17
4.3.1. 接点試料	17
4.3.2. 荷重-接触抵抗測定方法	18
4.3.3. 測定システム	18
4.3.4. 電流-電圧測定方法	19
4.4. 測定結果	20
4.4.1. 荷重-接触抵抗特性	20

4.4.2. 電流-電圧特性	21
参考文献	29
第5章 オイルが介在した接点における導通機構	30
5.1. はじめに	30
5.2. オイル介在時の接触モデル	30
5.3. 接点の集中抵抗とオイルによる荷重支持率	31
5.3.1. 単一接点における集中抵抗	31
5.3.2. 多接点における集中抵抗	31
5.3.3. オイルによる荷重支持率	32
5.4. 非線形性の考察	34
5.4.1. オイル塗布接点の導通モデル	34
5.4.2. トンネル電流	35
5.4.3. ショットキー電流	37
参考文献	45
第6章 総括	46
謝辞	47

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。世界の自動車保有台数は年々増加傾向にあり、2014年には12億台を越えている[1]。先進国については増加率が減少しているものの、今後開発途上国の発展の影響などにより保有台数の更なる増加が見込まれる。

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。まず安全面についてである。日本の交通事故死者数は2005年の6937人から2015年には4117人と減少傾向となっているが、65歳以上の高齢者死者数の割合は約50%にまで上り、65歳以上の交通事故件数の構成率は2005年の11.2%から2015年の19.7%へと1.76倍に増加している[2]。こうして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。次に、地球環境問題との関わりがある。2014年の日本における二酸化炭素排出量について、全体の17.2%を運輸部門が占めており、その内の86%が自動車によるものとなっている[3]。このことから、地球温暖化防止のため自動車の二酸化炭素排出量減少の要求がなされている。したがって、これからの自動車は「快適」だけでなく、「安全」、「環境」がより求められていると言える。

このような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、自動車の車体中に張り巡らされている配線システムが図1.1に示すワイヤーハーネスである。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図1.2に示すコネクタから成っている。コネクタは嵌合による機械的接続により電気接続を行っているが、電気制御を行う上でコネクタ接続は非常に重要であり、もしこの接続において不具合が生じると、そのコネクタと繋がっている電装品が正常に動作しなくなってしまう、安全面に支障をきたす恐れが出てくる。このことから、コネクタの接続信頼性は重要な要素であり、近年の自動車のエレクトロニクス化により更にその重要性が増していくと考えられる。



図1.1 ワイヤーハーネス



図1.2 コネクタ

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小さくなく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[4]。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[5]。

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、荷重-接触抵抗測定と電流-電圧測定を同時に行うことで、低荷重域における電流-電圧特性の非線形性からオイル介在時の電気接点の導通機構について検討した。

1.2. 本論文の概要

本論分は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分の概要を述べている。

第2章では、潤滑状態と潤滑剤であるコンタクトオイルについて述べている。

第3章では、本研究に用いる計測システムと実験装置について述べている。

第4章では、本研究の実験方法、測定結果から接点におけるコンタクトオイルの影響について述べている。

第5章では、オイルが介在した接点における導通機構に関する検討を述べている。

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] 日本自動車工業会,「世界各国の四輪車保有台数」
http://www.jama.or.jp/world/world/world_2t1.html
- [2] 警察庁,「平成27年における交通事故の発生状況」
<http://www.npa.go.jp/toukei/index.htm#koutsuu>
- [3] 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
- [4] 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)
- [5] 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 潤滑

2.1. はじめに

機械的な駆動部などでは摩擦摩耗が発生し、それを抑制するために潤滑剤が用いられている。その中でもコネクタ接合部に使用される潤滑剤はコンタクトオイルと呼ばれている。本章では、潤滑状態及び本研究で使用したオイル等について述べる。

2.2. 潤滑状態

潤滑状態は、主に界面にある潤滑膜の厚さによって表 2.1 のような 3 つの状態に分類されている[1]。

表 2.1 潤滑状態の種類

	状態
流体潤滑	二面間に厚い潤滑膜が介在し完全に両者を分離する
混合潤滑	流体潤滑と境界潤滑とが混在しておこる
境界潤滑	潤滑膜が著しく薄く、摩擦現象が潤滑剤の粘性からは説明できない

これらの状態は、摩擦係数が接触面間に作用する荷重や接触面の相対速度、潤滑剤の粘度によって変化が異なる。この関係を図 2.1 のストライベック曲線に示す。

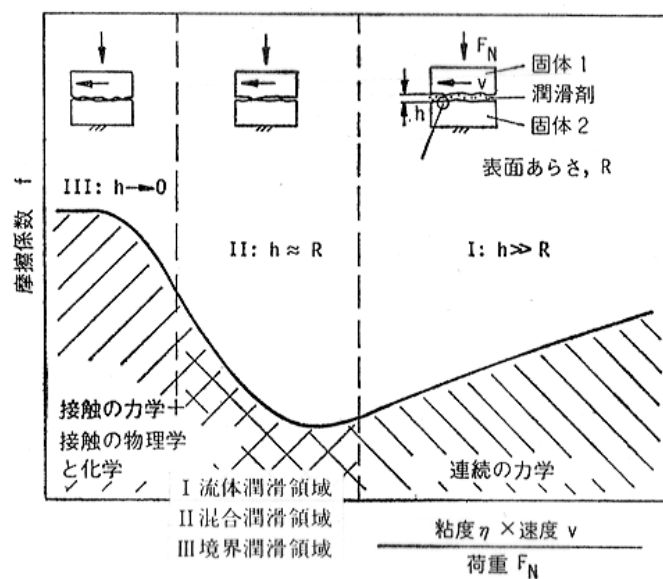


図 2.1 ストライベック曲線

(I)の流体潤滑領域では固体同士の接触がないため基本的には摩耗はおこらず、摩擦係数は0.001~0.01程度と非常に小さい値となる。この領域で、潤滑油粘度の低下や速度が低下するか、荷重が増加すると2面間に介在する潤滑油の油膜厚は薄くなり摩擦係数は小さくなる。油膜厚がある程度薄くなると流体潤滑状態は限界となり一部は表面同士の接触がおこり(II)の混合潤滑領域となる。さらに荷重が増し、速度が低下し温度の上昇により潤滑油粘度が低下すると油膜が益々薄くなり、混合潤滑状態よりも表面同士の接触面積が広がり摩擦係数は0.1~0.3程度と上昇し(III)の境界潤滑領域となる。

本実験では、オイルが介在した電気接点つまり潤滑状態の接点における導通機構を荷重-接触抵抗測定と電流-電圧測定を同時に行うことで検討した。

2.3. 潤滑剤

2.3.1. 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[2]。潤滑剤の種類と具体例を表2.2に示す。

表 2.2 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。

2.3.2. 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[3]。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2.3に示す。また、添加剤の種類と用途を表2.4に示す。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。

表 2.3 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 2.4 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

2.3.3. パラフィン

パラフィンはコンタクトオイルの基油の中でも一般的に使われているものである。図 2.2 にパラフィンの構造式を示す。パラフィンは鎖式飽和炭化水素と呼ばれており、炭素数が増加するにつれオイルの粘度も増加する。一方図 2.3 で示されるパールリームは分岐状の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パラフィンである。パールリームはオイル名であり正式な成分名は重質流動イソパラフィンと呼ばれるものである。

コンタクトオイルの粘度が高いほど、接点間における接触抵抗への影響が大きくなるといわれている[4]。本研究では接点間のオイル介在による影響を確認し、そこから導通機構を検討するため、影響が顕著に出やすく粘度の高いパラフィンであるパールリーム 18 を使用した[5]。

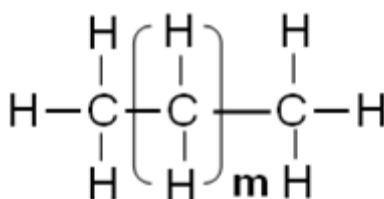


図 2.2 パラフィンの構造式

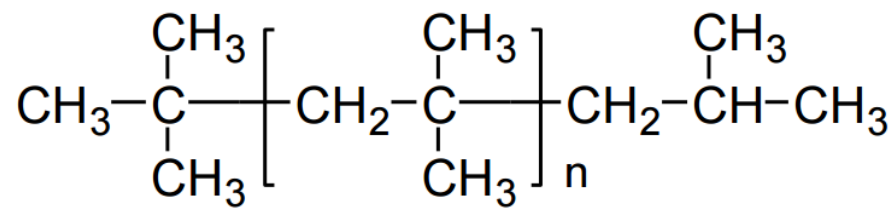


図 2.3 パールリームの構造式

参考文献

- [1] 桜井俊男,「新版 潤滑の物理化学」,幸書房,p242 (1978)
- [2] 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)
- [3] 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)
- [4] M.Murata, S.Sawada A.Shimizu, K.Iida and Y.Hattori, “Effect of Viscosity or Additive Substance of Contact Oil on Contact Resistance” IEICE Technical Report, EMD2012-73 (2012)
- [5] 日油,「技術資料」 <https://www.nof.co.jp/cosmeticlounge/material/pdf/parleam.pdf>, p.2

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あり、本研究における低荷重域での荷重-接触抵抗測定と電流-電圧測定の同時測定を行うことができない。そのため、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た。本章では、新しく構築した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]。

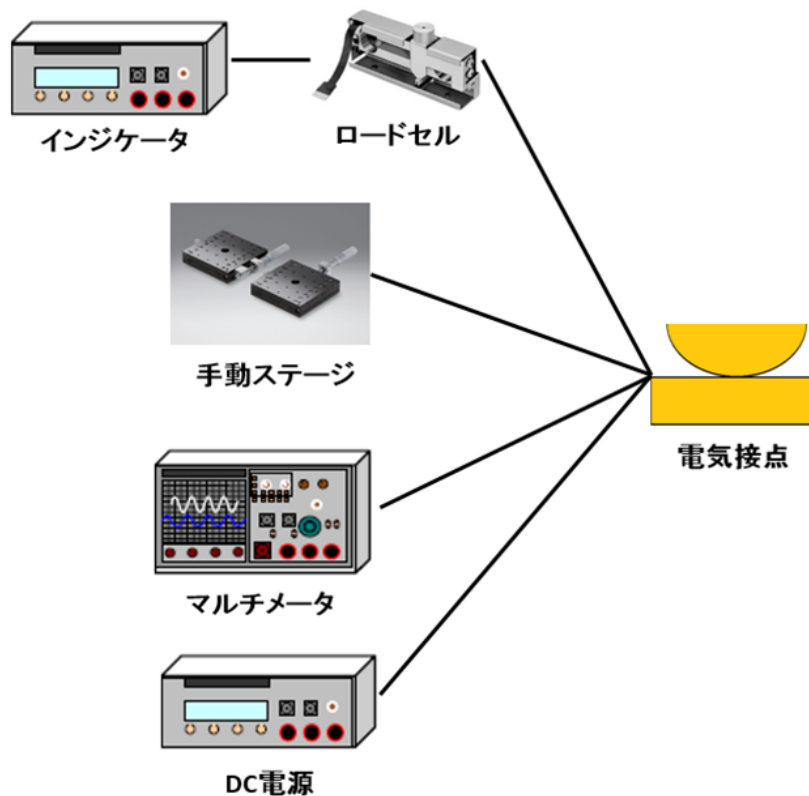


図3.1 従来の計測システム[2]

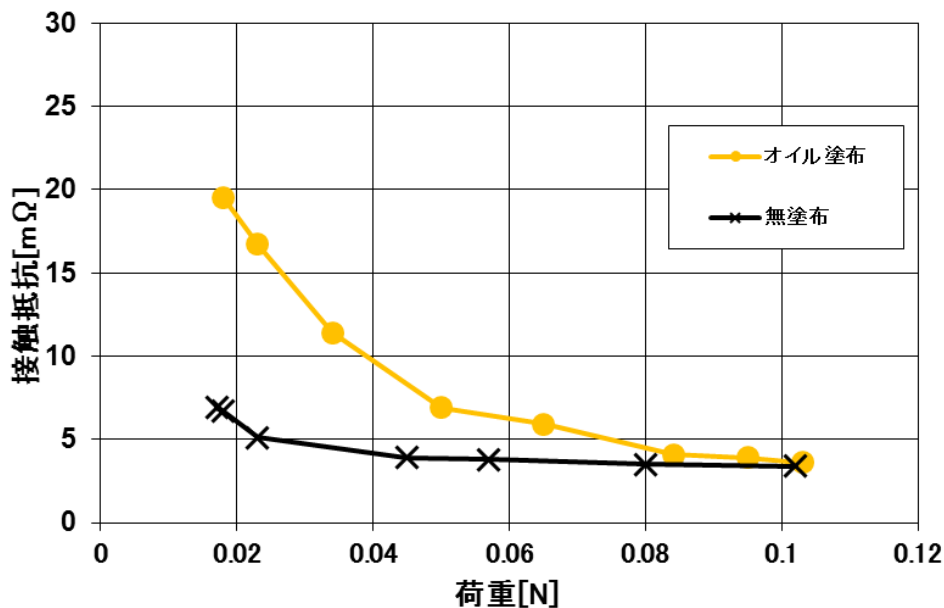


図3.2 接触抵抗に対するオイルの影響

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. 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、その接点導通のメカニズムの詳細は検討できていなかった。そのため本研究では、このオイルによる接触抵抗上昇及びその接点導通のメカニズムを検討するため、接触抵抗上昇の影響が大きい測定点において、荷重-接触抵抗測定と電流-電圧測定を同時に行う。電流-電圧測定を行うのは、接触抵抗上昇時つまりオイル介在時の接点間における導通状態を確認するためであり、単純な金属接触であれば電流-電圧特性は線形性を示すが、オイルの被膜を介して導通する場合にはトンネル電流やショットキー電流などが発生して非線形性を示す。この非線形性を確認するためには、電圧の高い測定点、つまりオイルによる接

触抵抗上昇の影響が大きいより低荷重領域での測定が求められる。

しかし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、各計測機器が独立して接続されているので荷重-接触抵抗測定と電流-電圧測定を同時に行うことができない。そのため図 3.3 のような計測システムを構築した[3]。

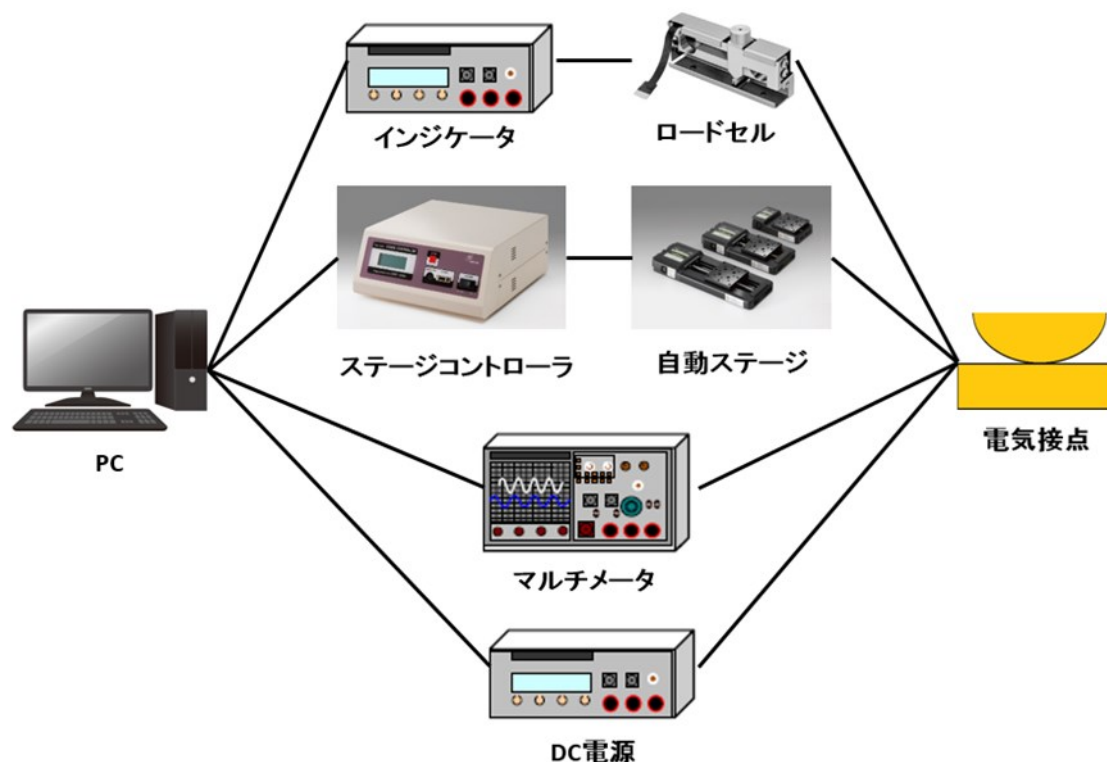


図3.3 本研究で構築した計測システム[2]

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く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 3.4 に示す。自動ステージが一定速度 v で距離 x を移動して停止し、電流値を切り替えそれぞれ電圧を測定、ステージ停止後 t 秒後に荷重を測定、荷重測定後 t' 秒後にステージが再び移動する繰り返しによるシステムである。 v , x , t , t' の設定可能範囲を表 3.1 に示す

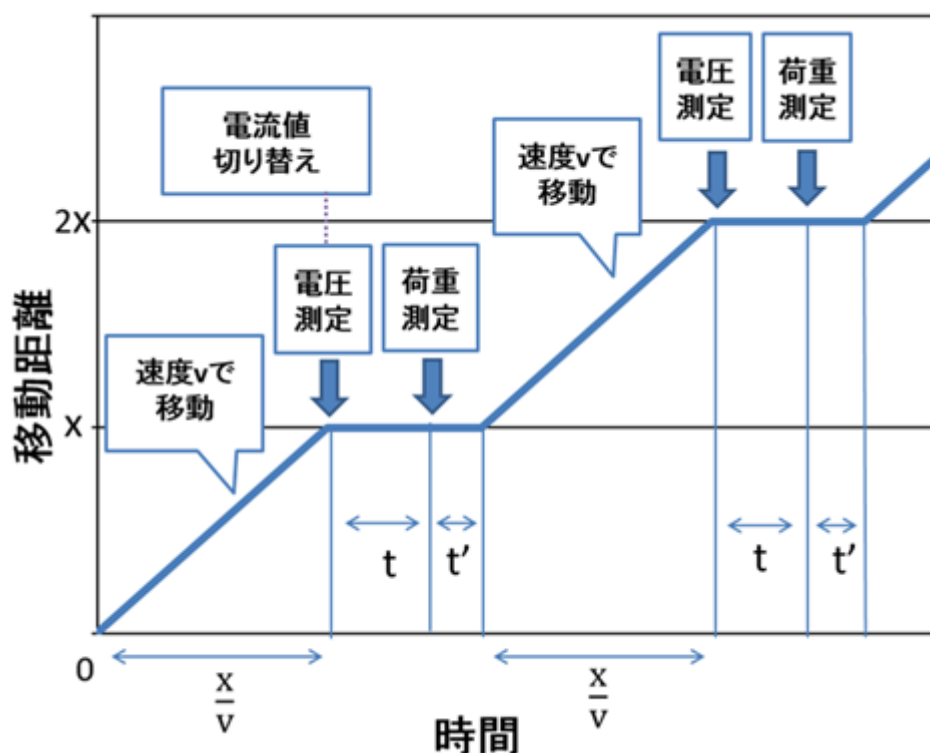


図 3.4 接点移動模式図

表 3.1 設定可能範囲

距離 x	0.008 μm ~24mm
速度 v	0.008 $\mu\text{m/s}$ ~24mm/s
停止時間 t	$\alpha \times 100\text{ms}$ ($\alpha=0,1,2,3,\dots$)
停止時間 t'	$\beta \times 100\text{ms}$ ($\beta=0,1,2,3,\dots$)

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の分解能と比べ約 1/100 である荷重 0.0001N 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、荷重-接触抵抗測定と電流-電圧測定を同時進行で行うことも可能となった。

3.4. 実験装置

荷重-接触抵抗・電流-電圧測定の実験装置を図 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 μ V、サンプリング速度は 5 回/秒である。

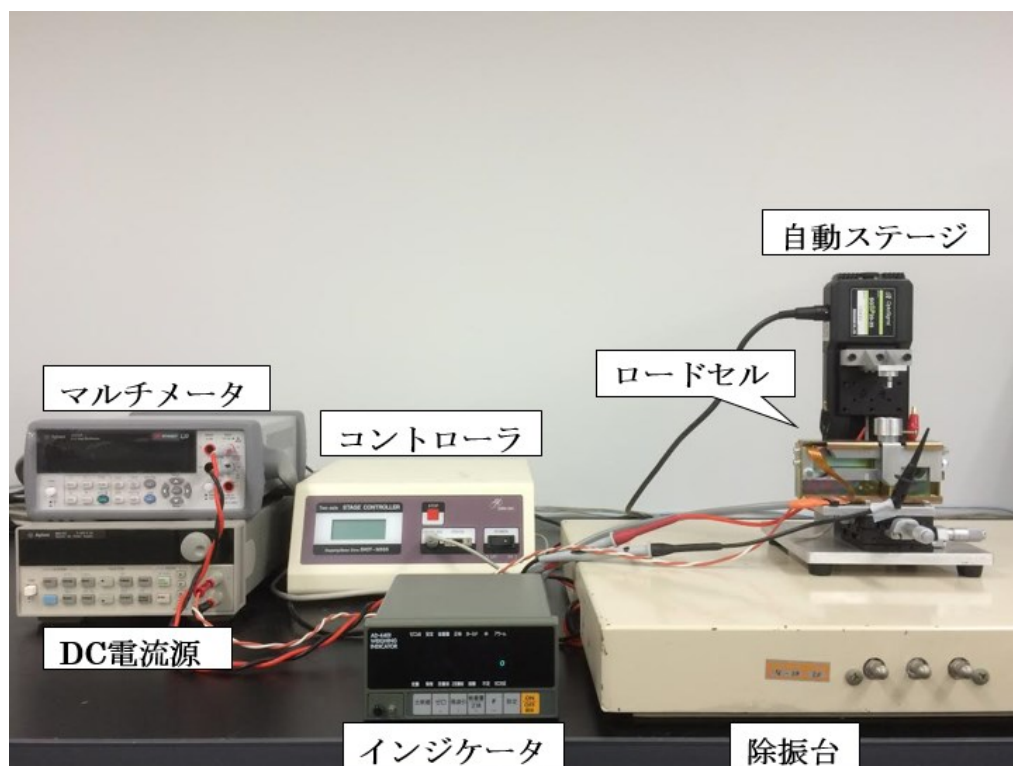


図 3.5 実験装置

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章に前述したように、コンタクトオイルを金属表面に塗布することで挿抜力低減の効果が見込まれるが、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る。そこで本研究では、荷重-接触抵抗測定と電流-電圧測定を同時に行い、低荷重域における電流-電圧特性の非線形性からオイル介在時の電気接点の導通機構について検討した。本章では、実験方法及び実験結果について述べる。

4.2. 評価オイルの粘度測定

本実験では評価オイルとして、粘度の高い流体潤滑剤であるパールリーム 18（重質流動イソパラフィン）を使用した。その粘度測定に使用した測定機を図 4.1 に示す。測定条件と測定結果は以下の通りである。

- 測定機器
 - ・ 回転式粘度計(TOKI SANGYO, RE-85R, 1062)

- 測定条件
 - ・ 温度：30°C
 - ・ ロータ：3° ×R9.7
 - ・ 回転速度：10rpm
 - ・ オイル滴下量：1ml
 - ・ 測定誤差：2%

- 測定結果
 - ・ パールリーム 18（重質流動イソパラフィン）：20.53 [P・s]

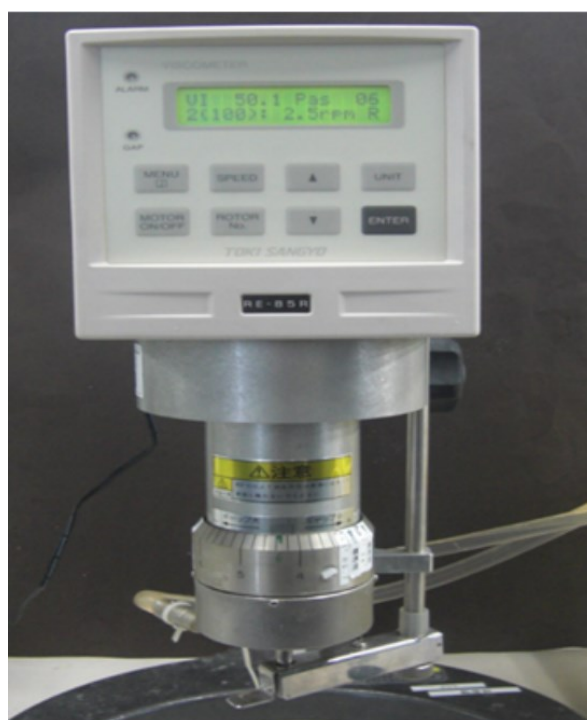


図 4.1 粘度測定機

4.3. 荷重-接触抵抗・電流-電圧測定

4.3.1. 接点試料

荷重-接触抵抗・電流-電圧特性測定 of 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。

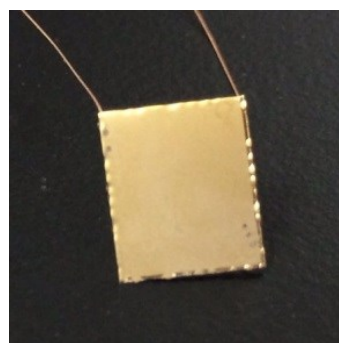


図 4.2 試料片 (左：エンボス試験片 右：平板試験片)

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、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 である。接触時の油膜への電圧の影響を抑えるため、開放端電圧は試料接触前で 20mV、試料接触後は 1V とした。

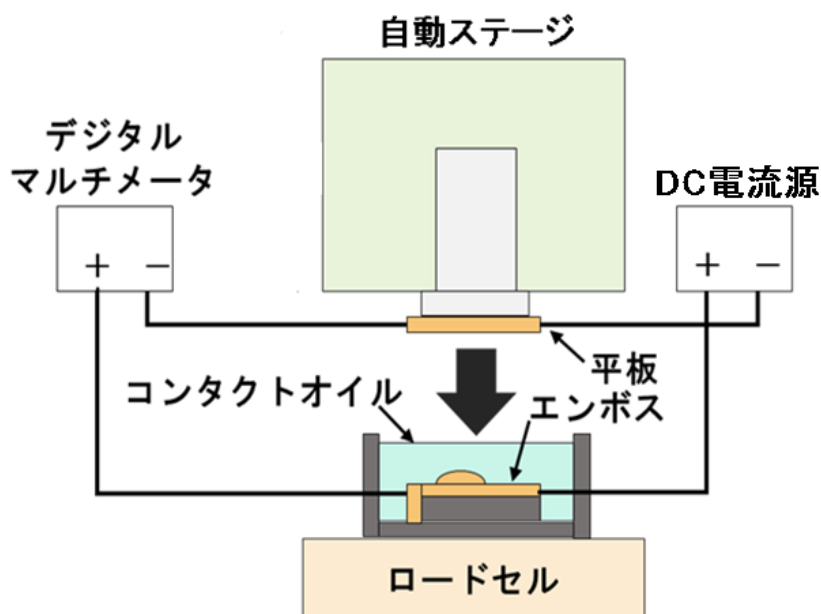


図 4.3 荷重-接触抵抗測定様式図

4.3.3. 測定システム

自動ステージを用いた接点移動の様式図を図 4.4 に示す。自動ステージが一定速度 v で距離 x を移動して停止し、電圧を測定、ステージ停止後 t 秒後に荷重を測定、荷重測定後 t' 秒後にステージが再び移動する繰り返しによる測定システムを構築した。本実験での v , x , t , t' の設定条件を表 4.1 に示す。

表 4.1 設定条件

電流	10, 400, 800, 1200, 1600, 2000 mA (切り替え時間 : 計 875 ms)
開放端電圧	20 mV (接触前), 1 V (接触後)
距離 x	0.36 μm
速度 v	0.12 $\mu\text{m/s}$
停止時間 t	3900 ms
停止時間 t'	100 ms

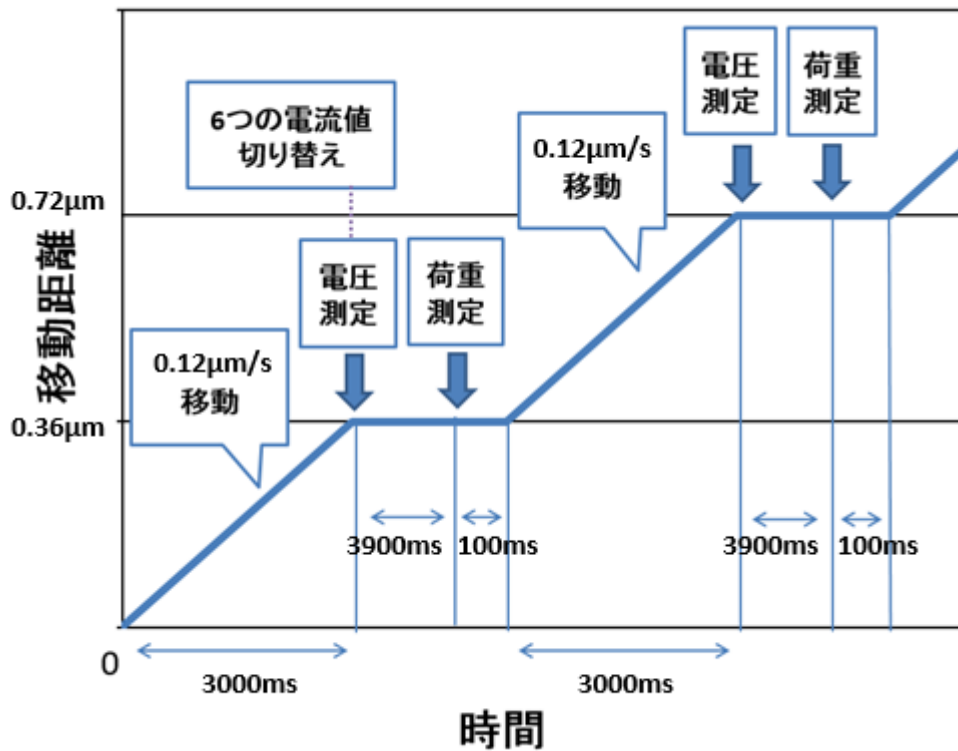


図 4.4 接点移動模式図

4.3.4. 電流-電圧測定方法

電流-電圧測定は各荷重で、表 4.1 に示す 10mA から 2000mA の範囲で測定した。電流値は、図 4.4 の接点移動模式図に示すような荷重-接触抵抗測定の際の電圧測定時に、6 段階の電流値を短時間で連続して切り替えて電圧値を測定する。切替えにかかる時間は合計で 875ms である。このように荷重-接触抵抗測定と電流-電圧測定を短時間で同時に行うことで、時間経過によるオイルの排出の影響を小さくし、また同じ試料条件において荷重-接触抵抗特性と電流-電圧特性を比較することができる。

4.4. 測定結果

4.4.1. 荷重-接触抵抗特性

電流値 10mA における無塗布とオイル塗布時の荷重-接触抵抗特性結果をそれぞれ図 4.5, 4.6 に示す。

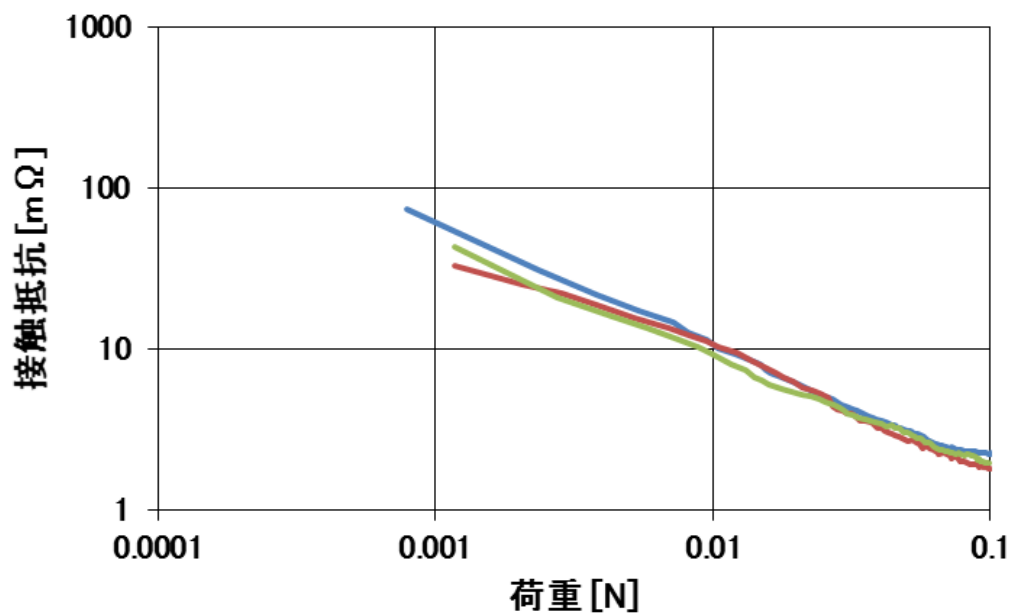


図 4.5 無塗布時の荷重-接触抵抗特性

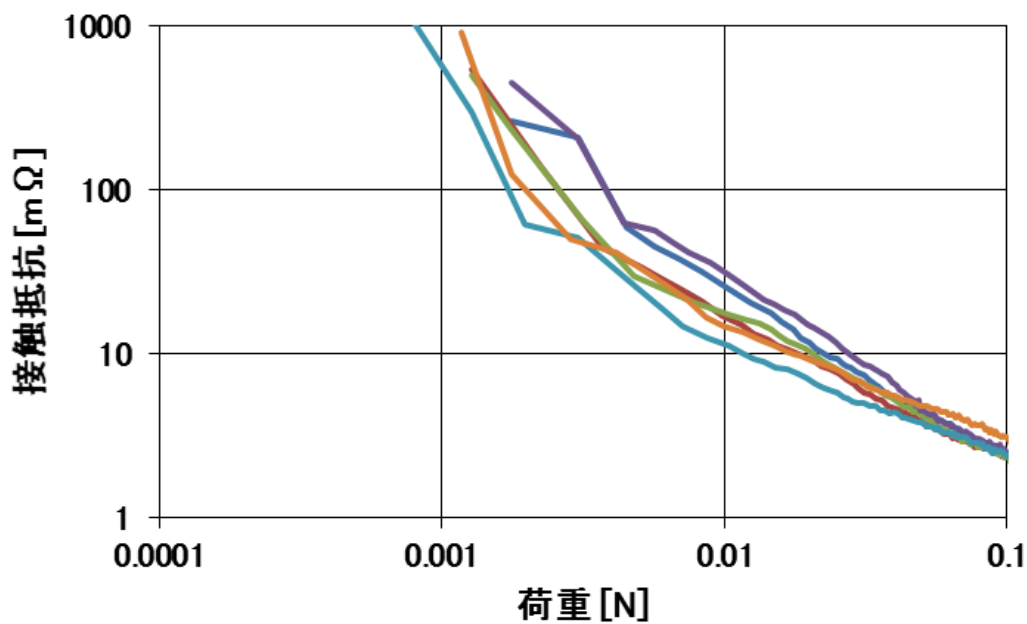


図 4.6 オイル塗布時の荷重-接触抵抗特性

また、電流値 10mA における無塗布とオイル塗布時の荷重-接触抵抗特性結果の、それぞれ平均値を算出した結果を図 4.7 に示す。

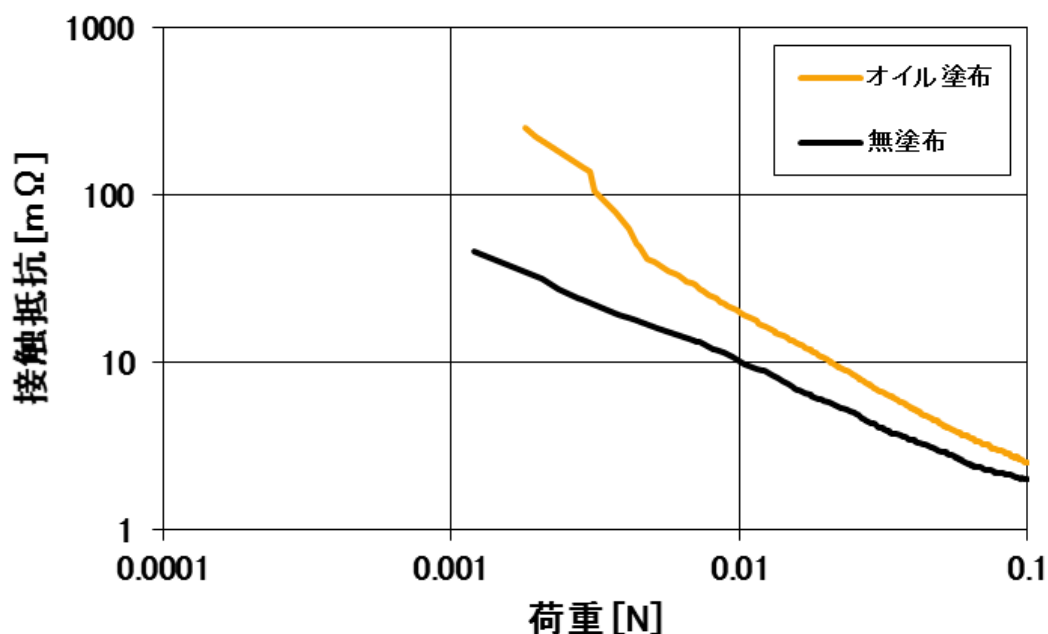
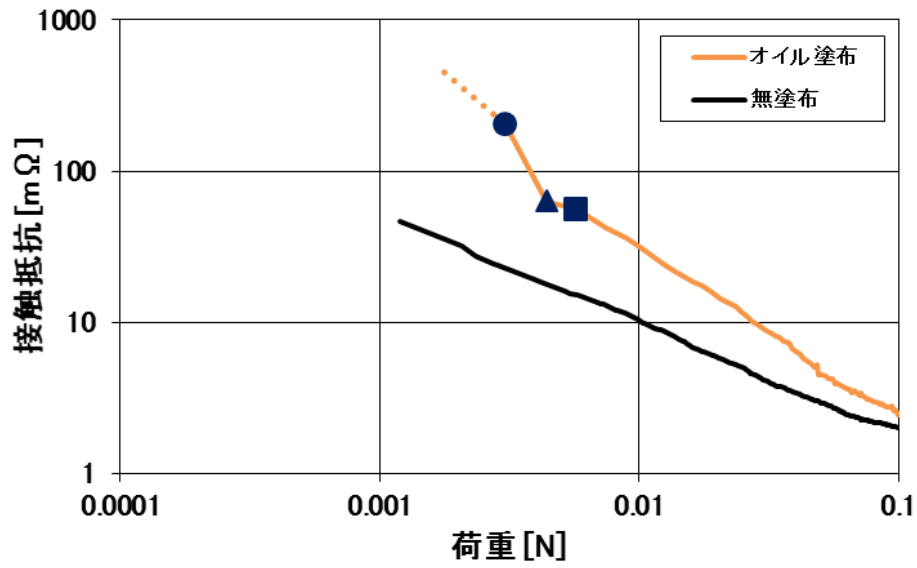


図 4.7 無塗布とオイル塗布時の荷重-接触抵抗特性平均値

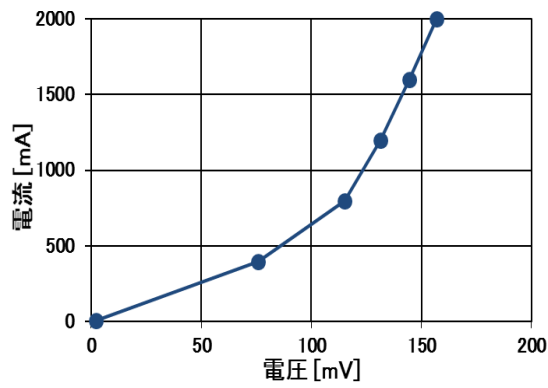
オイルを塗布した場合、0.1N 以下の領域で、無塗布の場合より接触抵抗が大きい結果が得られた。また、無塗布との接触抵抗の差は荷重が大きくなるほど小さくなる[1-2]。これは実際のコネクタの荷重が 1N 程度であることを考えると、非常に低い荷重領域における現象である[3]。

4.4.2. 電流-電圧特性

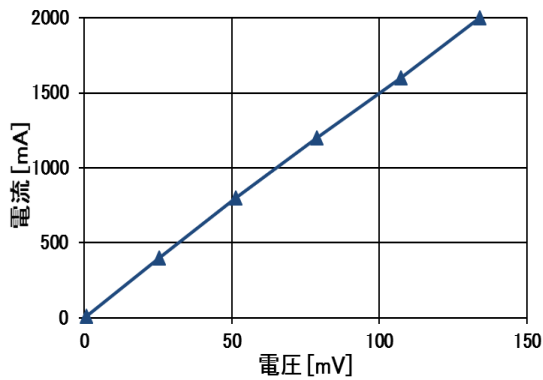
オイル塗布時の荷重-接触抵抗特性である 6 つのサンプルにおける、低荷重領域での 3 測定点の電流-電圧特性結果をそれぞれ図 4.8-13 に示す。荷重-接触抵抗特性において点線で表される測定点は、開放端電圧を切り替えるために、電流-電圧特性測定が行われていない。



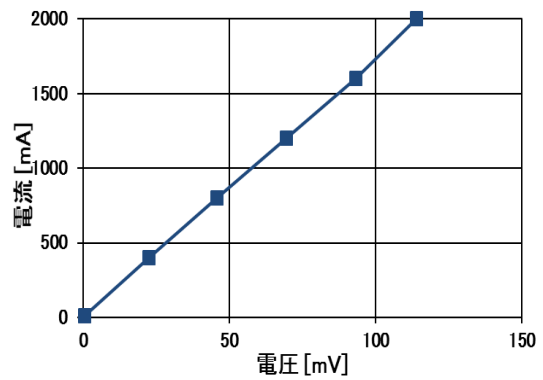
(a) 無塗布とオイル塗布時の荷重-接触抵抗特性
 (● : 0.0030 [N], ▲ : 0.0044 [N], ■ : 0.0057 [N])



(b) 0.0030 [N]

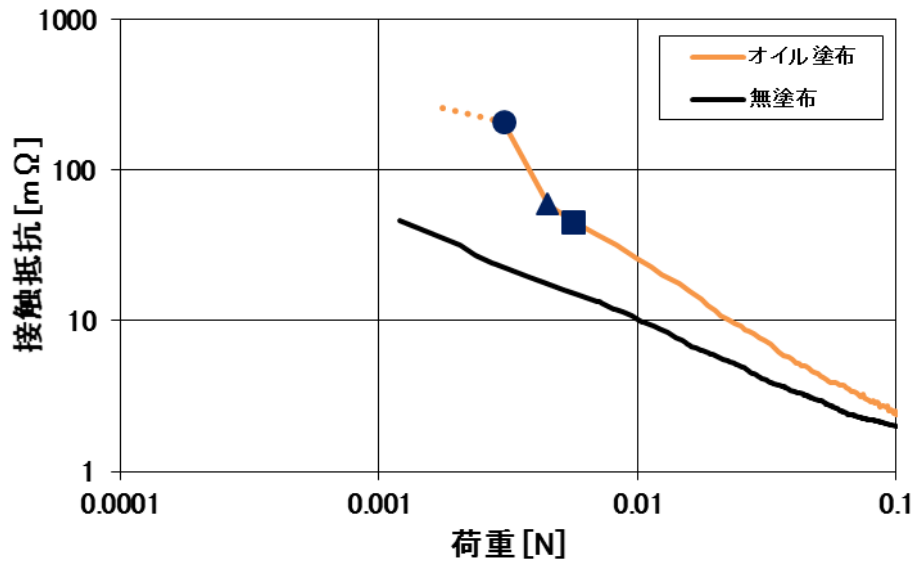


(c) 0.0044 [N]

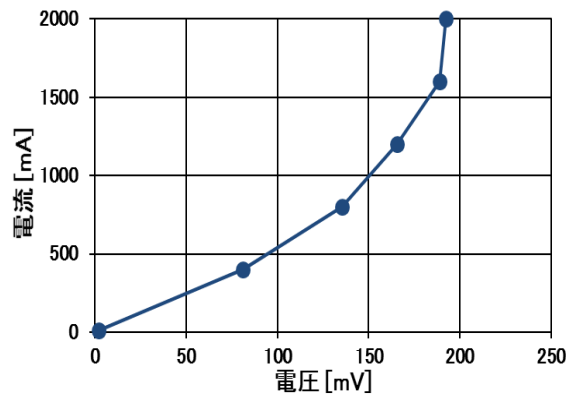


(d) 0.0057 [N]

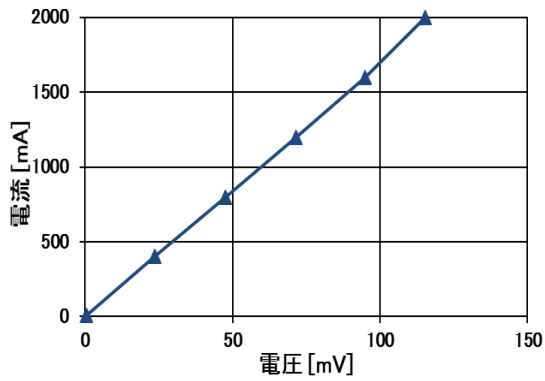
図 4.8 低荷重領域での 3 測定点の電流-電圧特性 サンプル 1



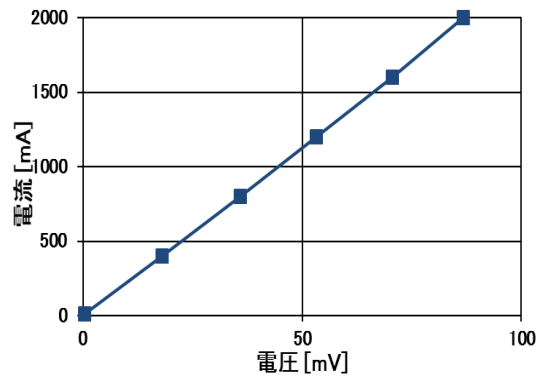
(a) 無塗布とオイル塗布時の荷重-接触抵抗特性
 (● : 0.0031 [N], ▲ : 0.0046 [N], ■ : 0.0058 [N])



(b) 0.0031 [N]

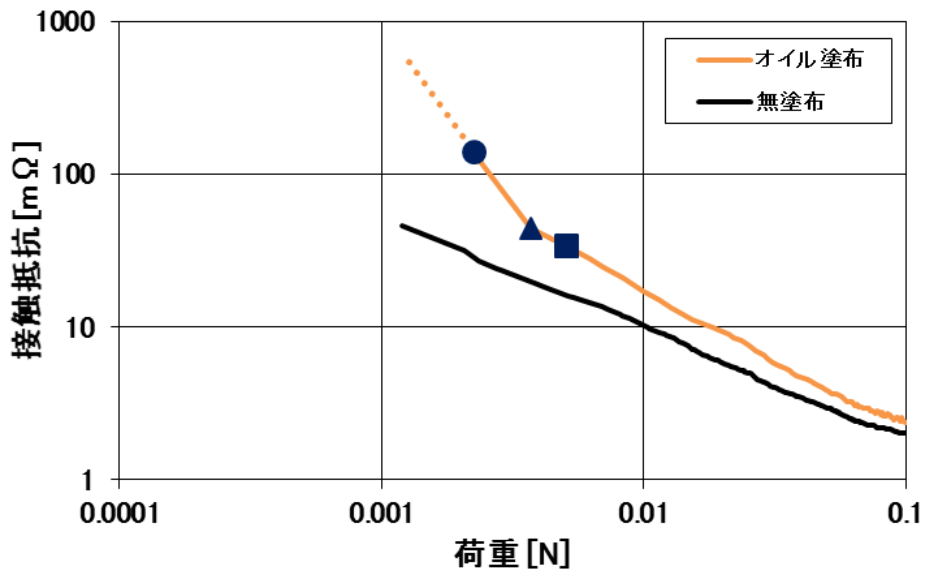


(c) 0.0046 [N]

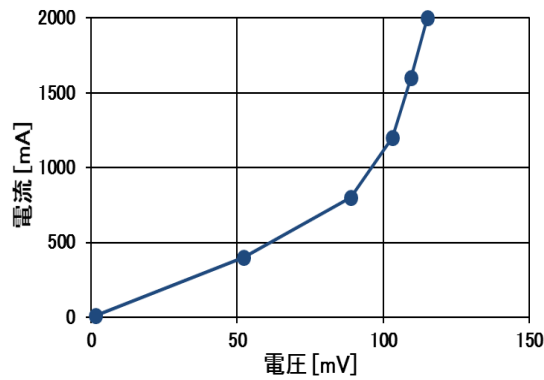


(d) 0.0058 [N]

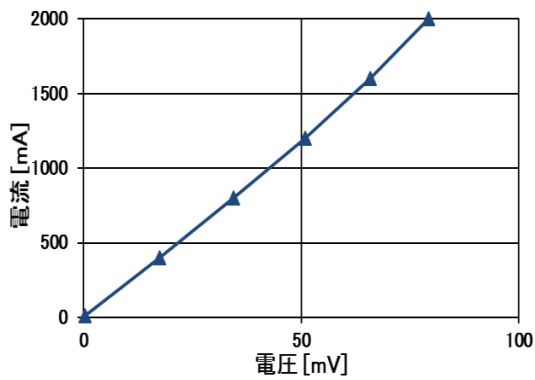
図 4.9 低荷重領域での 3 測定点の電流-電圧特性 サンプル 2



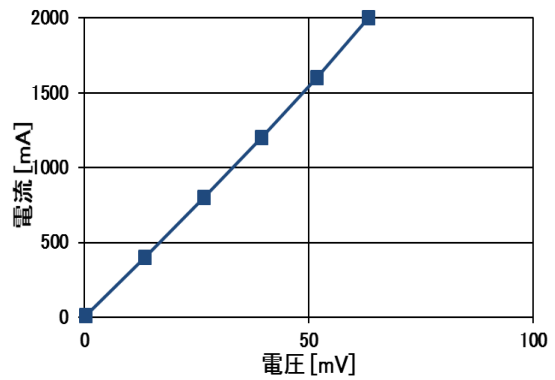
(a) 無塗布とオイル塗布時の荷重-接触抵抗特性
 (● : 0.0023 [N], ▲ : 0.0028 [N], ■ : 0.0052 [N])



(b) 0.0023 [N]

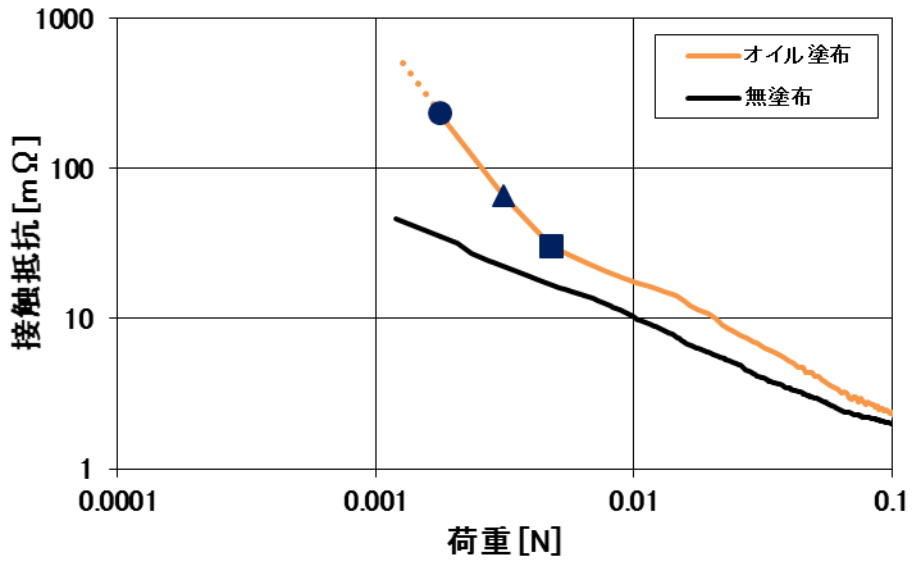


(c) 0.0028 [N]

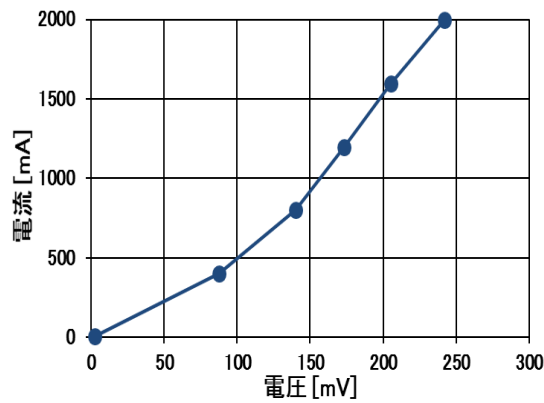


(d) 0.0052 [N]

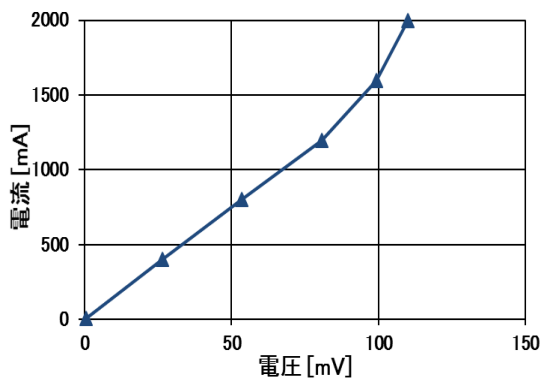
図 4.10 低荷重領域での 3 測定点の電流-電圧特性 サンプル 3



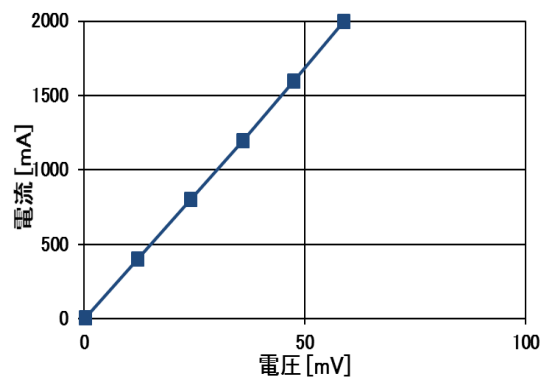
(a) 無塗布とオイル塗布時の荷重-接触抵抗特性
 (● : 0.0018 [N], ▲ : 0.0032 [N], ■ : 0.0049 [N])



(b) 0.0018 [N]

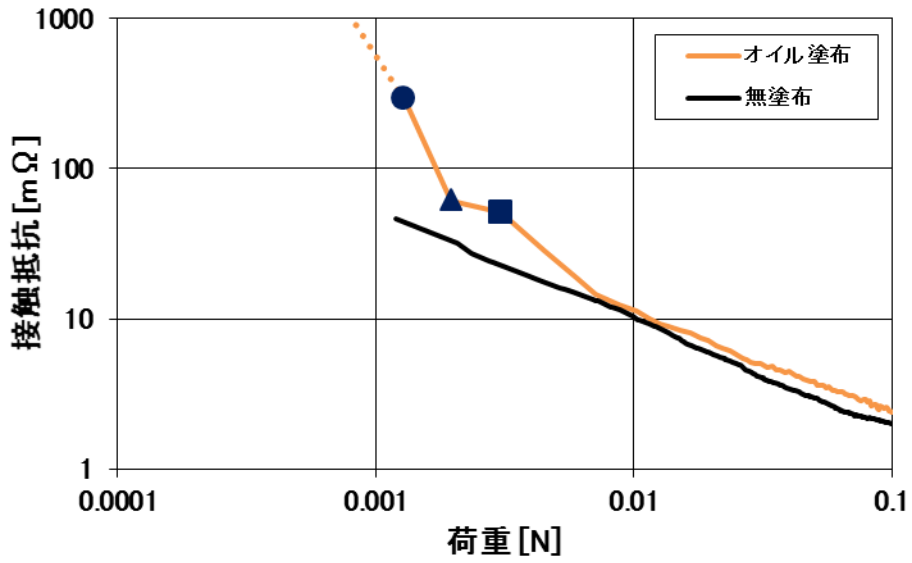


(c) 0.0032 [N]

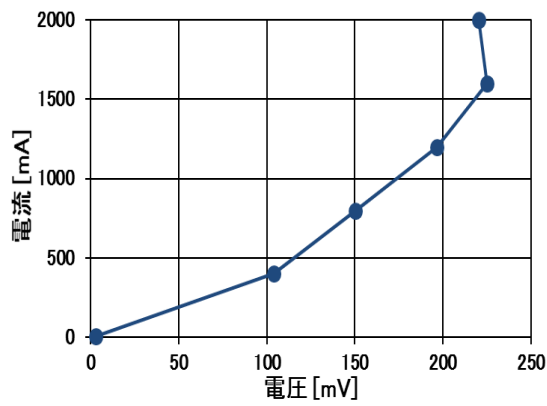


(d) 0.0049 [N]

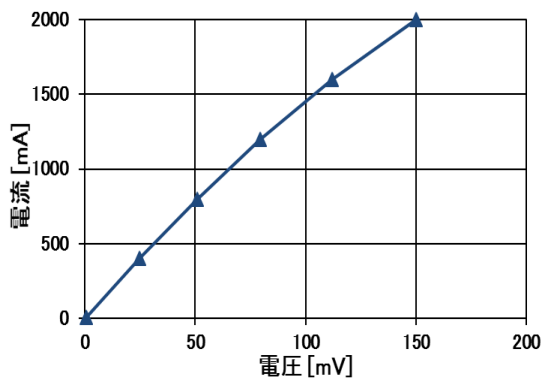
図 4.11 低荷重領域での 3 測定点の電流-電圧特性 サンプル 4



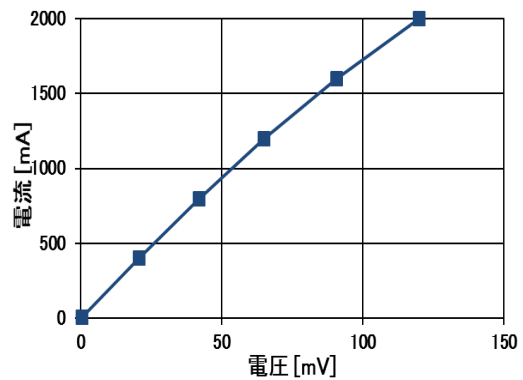
(a) 無塗布とオイル塗布時の荷重-接触抵抗特性
 (● : 0.0013 [N], ▲ : 0.0020 [N], ■ : 0.0031 [N])



(b) 0.0013 [N]

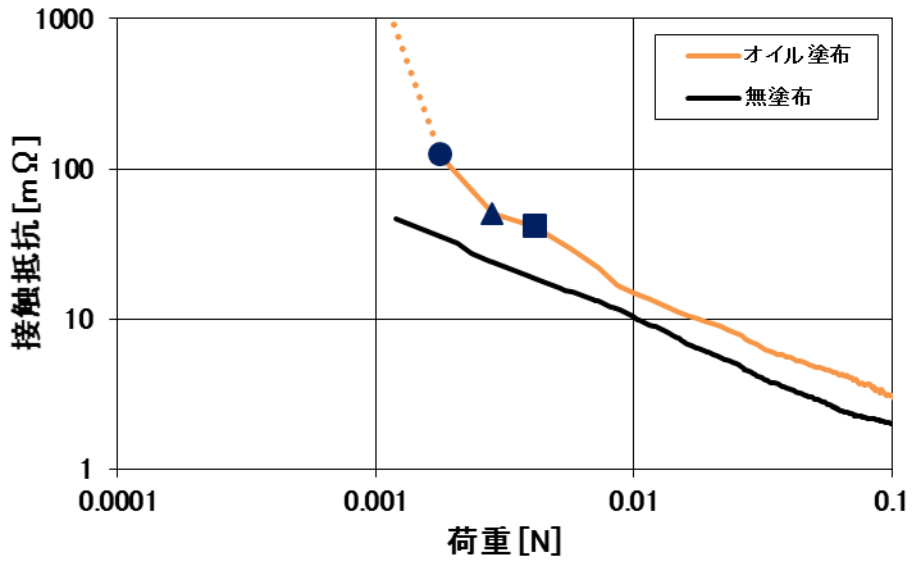


(c) 0.0020 [N]

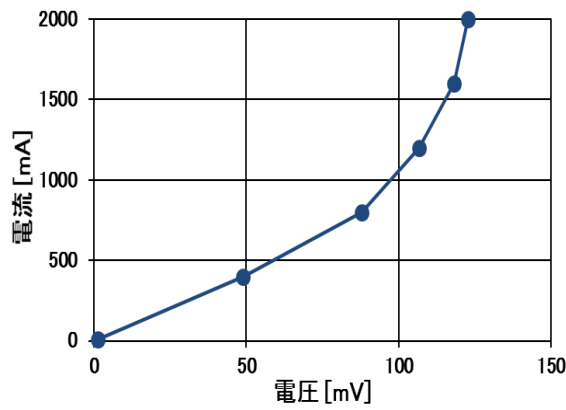


(d) 0.0031 [N]

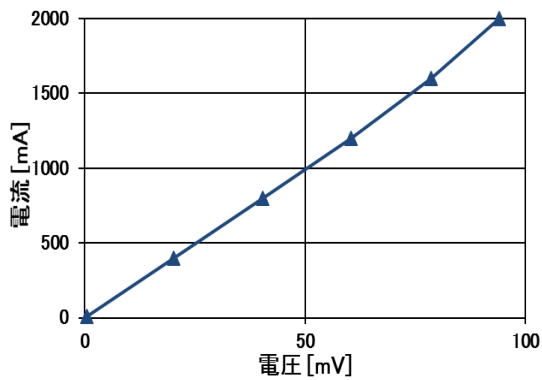
図 4.12 低荷重領域での 3 測定点の電流-電圧特性 サンプル 5



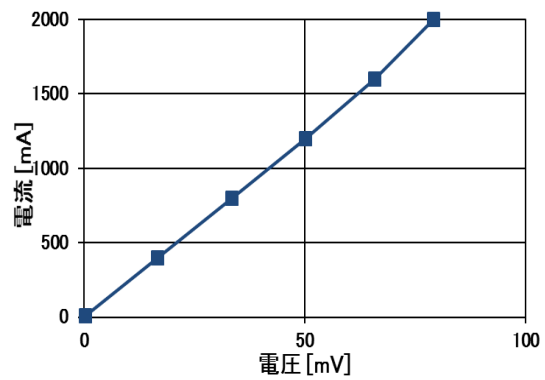
(a) 無塗布とオイル塗布時の荷重-接触抵抗特性
 (● : 0.0018 [N], ▲ : 0.0029 [N], ■ : 0.0042 [N])



(b) 0.0018 [N]



(c) 0.0029 [N]



(d) 0.0042 [N]

図 4.13 低荷重領域での 3 測定点の電流-電圧特性 サンプル 6

電流-電圧測定の最小荷重測定点である(b)では電流-電圧特性に非線形性がみられ、電圧が高くなるにつれ電流値が急増している。測定点(c),(d)では電流-電圧特性は主に線形性を示した。また、測定点(d)よりも大きい荷重での測定も線形性を示した。実験結果から、およそ荷重 0.003N 以下で電圧値 90mV 以上において電流-電圧特性にて非線形性が確認された。

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] M.Murata, S.Sawada A.Shimizu, K.Iida and Y.Hattori, “Effect of Viscosity or Additive Substance of Contact Oil on Contact Resistance” IEICE Technical Report, EMD2012-73 (2012)
- [3] 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5章 オイルが介在した接点における導通機構

5.1. はじめに

第4章に前述したように、荷重-接触抵抗特性において、低荷重領域ではオイルの影響により接触抵抗が上昇し、その時の電流-電圧特性において非線形性が確認された。本章では、荷重-接触抵抗特性の接触抵抗上昇と、電流-電圧特性の非線形性からオイル介在時の接点の導通メカニズムについて検討した。

5.2. オイル介在時の接触モデル

図4.8-13の電流-電圧特性において、オイルの影響により接触抵抗が上昇している測定点(c),(d)では、電流-電圧特性は主に線形性を示している。これはオームの法則に則するため、接点接触面は金属接触をしていると考えられる。本研究でのオイル介在時の接触モデルの想定図を図5.1に示す。

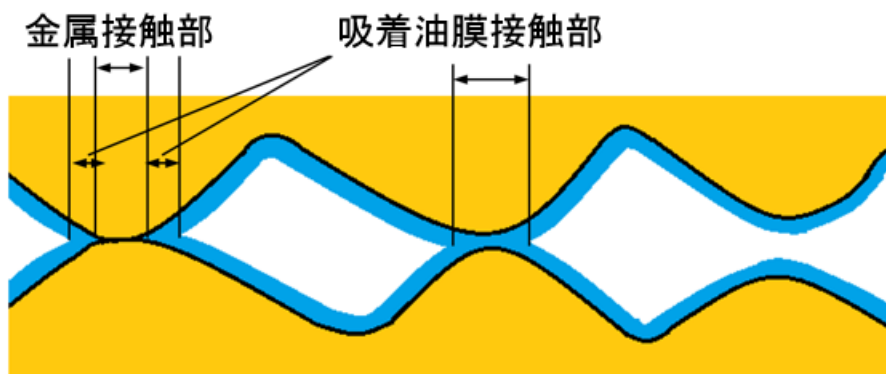


図 5.1 オイル介在時の接触モデル

コネクタにおける電気接点の接触状態に関しては、接点の表面にある汚れや酸化物、表面の凹凸などの影響により、見かけの接触面に対して電氣的な通電を担う微小な接触点が集合していると考えられている。

上下両面の接触部は金属接触部、吸着油膜接触部、流動性をもつ潤滑油によって満たされた部分により構成される。この吸着油膜は、いわゆる流体潤滑膜とは異なり、油膜が固体表面に吸着し流動性を失った半固体的な挙動をする。吸着油膜接触部に荷重支持能力が生じ、垂直荷重は金属接触部とその周辺の吸着油膜接触部で支持されることになる[1]。油種と平面粗さで決まる金属接触部の荷重分担率を α とすると、接触部の全荷重 F は式(1)で表される。

$$F = \alpha F + (1 - \alpha)F \dots \dots (1)$$

ここで、第1項は金属接触での荷重支持、第2項は吸着油膜接触による荷重支持を表している[2]。

すなわち、接点部分のオイルの介在により金属接触部による荷重支持部分が減少することで金属接触面積が減少し、接触抵抗が上昇するものと考えられる。

5.3. 接点の集中抵抗とオイルによる荷重支持率

5.3.1. 単一接点における集中抵抗

導電体表面を接触させて電気を通ずると、そこには電気抵抗が発生する。この抵抗は接触抵抗といわれている。コネクタにおける電気接点の接触状態に関しては、接点の表面にある汚れや酸化物、表面の凹凸などが存在する。したがって、平坦と思われる表面同士を接触させても、図5.1に示したように、見かけ上の接触面全体が均一に接触することはない。見かけの接触面内の数少ない高い凸部同士で接触が生ずる。したがって、真に接触している部分は見かけの接触面全体から見ると非常に小さい部分で生じている。このため接触境界部を流れる電流は真の接触部に絞り込まれる。結果として外部回路には電気抵抗となって現れる。この抵抗は集中抵抗といわれる[3]。

単一接点での電流集中による集中抵抗の理論解 R_k は式(2)で表される[4]。

$$R_k = \frac{\rho}{2a} \dots\dots (2)$$

ここで、 ρ は接点材料の抵抗率、 a は真の接触面を円形としたときのその半径である。

5.3.2. 多接点における集中抵抗

電気接点は、表面粗さや汚れなどの非導電物質の影響等により機械的接触で得られる見かけの接触面の中に、電氣的通電を担う真実接触面が存在すると Holm は提案している。図5.2に見かけの接触面積の半径 r の中に半径 a の微小接点が存在する場合のモデル図を示す。

図5.2に示すような真実接触面が複数存在する場合の集中抵抗の近似式は、見かけの面積の集中抵抗と各スポットにおける集中抵抗の和として式(3)が、Holmにより提案された[5]。

$$R_k = \frac{\rho}{2r} + \frac{\rho}{2na} \dots\dots (3)$$

ここで、 r は見かけの接触面の半径、 n は真実接触面の数、 a は真実接触面の半径である。第1項は見かけの面積に対する集中抵抗で、第2項が各真実接触面における集中抵抗成分である。

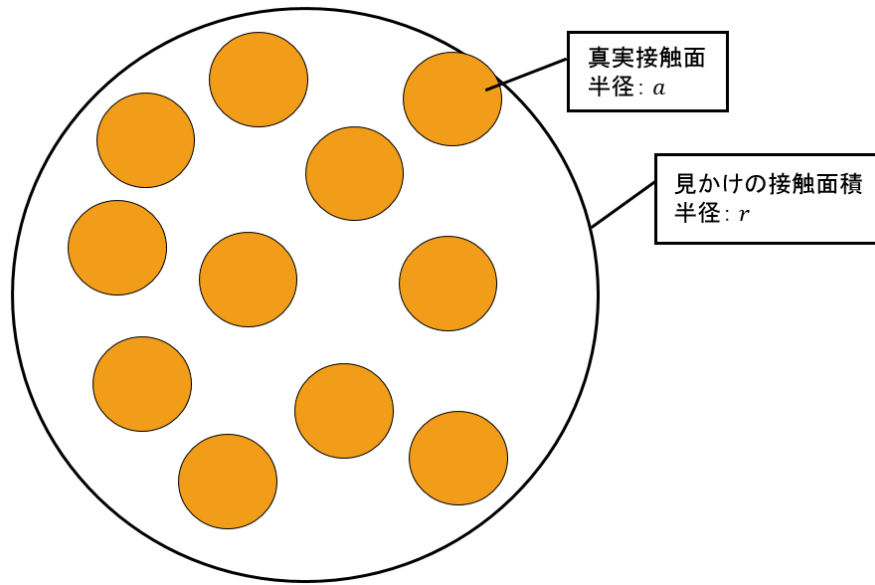


図 5.2 見かけの接触面と真実接触面モデル

5.3.3. オイルによる荷重支持率

オイル介在により金属接触面積（真実接触面積）の半径が $a \rightarrow a'$ へ減少した際、円形の真実接触部が均等に分布するときの集中抵抗を考える。模式図を図 5.3 に示す。このとき 5.3.2.節で述べた Holm の多接点理論より、オイル無塗布での接触抵抗 R_d は式(4)で表される。

$$R_d = \frac{\rho}{2r} + \frac{\rho}{2na} = \frac{\rho}{2r} + \frac{\rho l^2}{2\pi r^2 a}, (n = \frac{\pi r^2}{l^2}) \dots\dots (4)$$

ここで r は見かけの接触半径、 l は真実接触点の間隔である。

一方、オイル介在時の接触抵抗 R_w は式(5)で表される。

$$R_w = \frac{\rho}{2r} + \frac{\rho}{2na'} = \frac{\rho}{2r} + \frac{\rho l^2}{2\pi r^2 a'} \dots\dots (5)$$

低荷重領域において r が小さいときは、第二項が優勢となるため式(6)のように表せる。

$$R_d \approx \frac{\rho}{2na}, R_w \approx \frac{\rho}{2na'} \dots\dots (6)$$

よってオイル無塗布での接触抵抗 R_d とオイル介在時の接触抵抗 R_w の関係は式(7)となる。

$$R_d : R_w = \frac{1}{a} : \frac{1}{a'} \dots\dots (7)$$

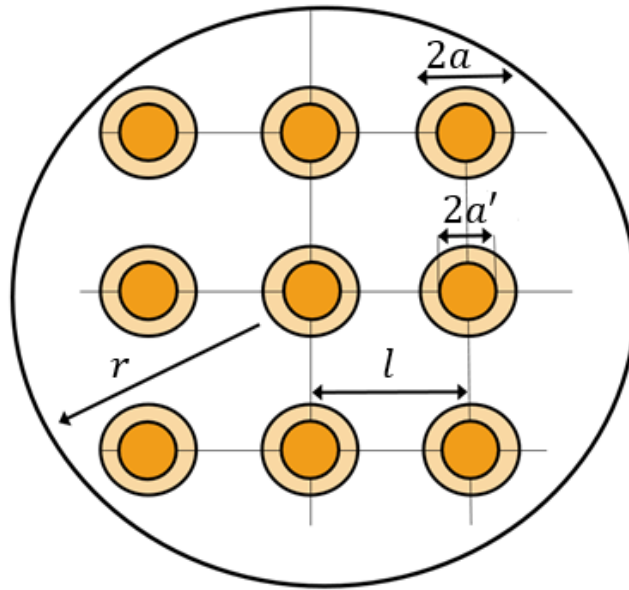


図 5.3 オイル介在時での円形真実接触部が均等に分布する模式図

以上より、式(7)を図 3.9(a)の荷重-接触抵抗特性に適応させて考察する。荷重 0.0030N、0.0044N、0.0057N における電流値 10mA での無塗布とオイル塗布の抵抗値の比と、その結果から算出するオイルによる荷重支持率を表 5.1 に示す。このオイルによる荷重支持率は、オイル介在による金属接触面積の減少率と同等である。

表 5.1 電流値 10mA での無塗布とオイル塗布の抵抗値比とオイルによる荷重支持率

荷重[N]	抵抗値比[mΩ] 無塗布:オイル塗布	オイルによる 荷重支持率[%]
0.0030	23 : 203	98
0.0044	18 : 63	91
0.0057	15 : 56	92

ここから本実験結果のような非線形性がみられる低荷重領域では、荷重の過半がオイルにより支持されていると推定される。荷重が大きくなると見かけ接触面 r も大きくなり(4),(5)式の第 1 項が無視できなくなって集中抵抗の差が小さくなる。

5.4. 非線形性の考察

5.4.1. オイル塗布接点の導通モデル

オイル塗布接点の導通モデルを図 5.4 に示す。5.3.3.節で述べたように、低荷重領域におけるオイル塗布接点では、荷重の過半がオイルに支持されている。そのため、低荷重領域におけるオイル塗布接点では、金属接触と薄い絶縁体となるオイルによる並列回路構造となり、電圧が大きくなると薄い絶縁皮膜部に電流が流れ非線形性が表れると考えられる。その薄い絶縁皮膜部に生ずる電位障壁のエネルギーバンドモデルを図 5.5 に示す。この障壁を電子は 2 種類の方法で通過する。その 1 つはトンネル効果 (Tunnel effect) で、電子は皮膜中を貫通してゆく場合である。他はショットキー効果 (Schottky effect) で、電子が熱エネルギーによって電位障壁を乗り越えて流れる場合である。ショットキー電流の温度依存性は前者に比して非常に大きく、温度が高いほど後者が優勢となる。常温で数 nm 程度の薄い皮膜の場合はトンネル電流が支配的で、数 10nm 程度以上の厚い皮膜の場合はショットキー電流が支配的になるといわれている。

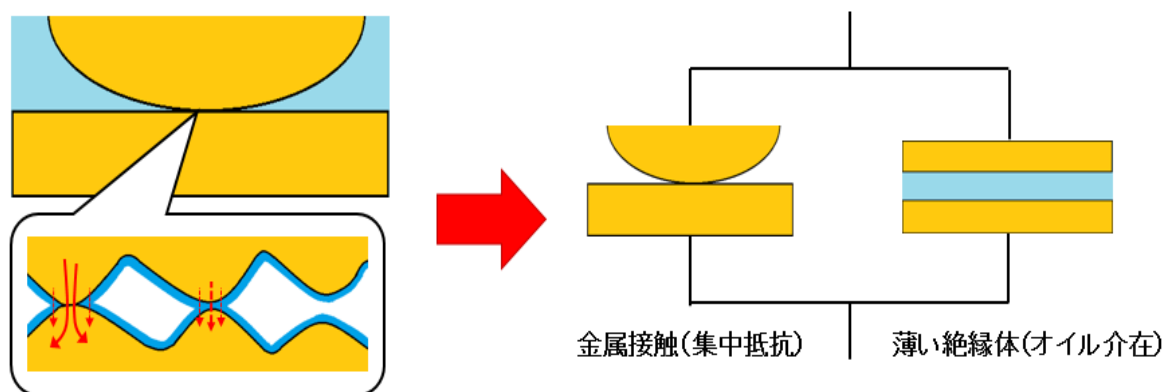


図 5.4 オイル塗布接点の導通モデル

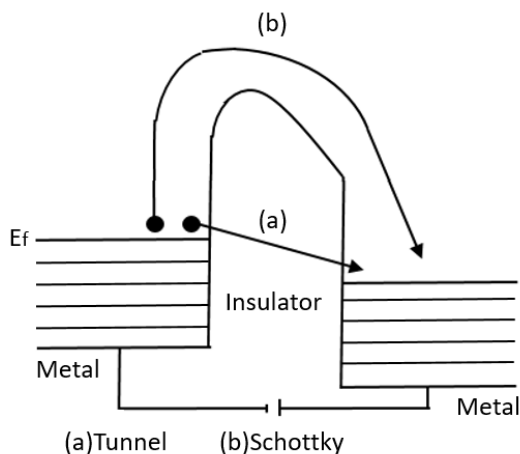


図 5.5 Tunnel effect と Schottky effect を示す薄膜の導電機構

5.4.2. トンネル電流

5.4.1 節で述べた、薄い絶縁体となるオイルに流れる電流がトンネル電流の場合を考察した。

皮膜の厚さが数 nm のように薄くなると、電子はその波動性のために皮膜貫通する。これがトンネル効果であり、その電流を Simmons は以下の式で提案している[6]。

$$I = \left(\frac{eA}{2\pi\hbar d^2} \right) \left[\phi e^{-H\phi^{\frac{1}{2}}} - \{(\phi + eV)e^{-H(\phi+eV)^{\frac{1}{2}}}\} \right] \dots\dots (8)$$

$$H = \left(\frac{4\pi d}{h} \right) \sqrt{2m} \dots\dots (9)$$

ここで、 e は電子電荷、 A はトンネル電流が流れる面積（オイルの皮膜面積）、 V は電極間電圧、 \hbar はプランク定数、 m は電子の有効質量、 d は電極間距離（皮膜厚）、 ϕ は障壁高さである。トンネル電流の電圧依存性は電極間電圧の大きさに対して変化する。

このとき、式(8)を以下のように変形して

$$I = \left(\frac{eA}{2\pi\hbar d^2} \right) \{ \phi - (\phi + eV)B \} e^{-H\phi^{\frac{1}{2}}} \dots\dots (10)$$

$$B = \frac{e^{-H(\phi+eV)^{\frac{1}{2}}}}{e^{-H\phi^{\frac{1}{2}}}} = e^{-H(\phi+eV)^{\frac{1}{2}} + H\phi^{\frac{1}{2}}} \dots\dots (11)$$

$eV \ll \phi$ の場合

$$\lim_{V \rightarrow 0} \left\{ -H(\phi + eV)^{\frac{1}{2}} + H\phi^{\frac{1}{2}} \right\} = \frac{\{H^2\phi - H^2(\phi+eV)\}}{\{H(\phi+eV)^{\frac{1}{2}} + H\phi^{\frac{1}{2}}\}} = \frac{-HeV}{2\phi^{\frac{1}{2}}} \dots\dots (12)$$

よって

$$I = \left(\frac{eA}{2\pi\hbar d^2} \right) \left\{ \phi - (\phi + eV) e^{\frac{-HeV}{2\phi^{\frac{1}{2}}}} \right\} e^{-H\phi^{\frac{1}{2}}} \dots\dots (13)$$

$\frac{-HeV}{2\phi^{\frac{1}{2}}} \ll 1$ から $e^{\frac{-HeV}{2\phi^{\frac{1}{2}}}} = 1 - \frac{-HeV}{2\phi^{\frac{1}{2}}}$ と近似できるので

$$\begin{aligned} I &= \left(\frac{eA}{2\pi\hbar d^2} \right) \left\{ \phi - (\phi + eV) \left(1 - \frac{-HeV}{2\phi^{\frac{1}{2}}} \right) \right\} e^{-H\phi^{\frac{1}{2}}} \\ &= \left(\frac{eA}{2\pi\hbar d^2} \right) eV \left(\frac{H\phi^{\frac{1}{2}}}{2} - 1 \right) e^{-H\phi^{\frac{1}{2}}} \dots\dots (14) \end{aligned}$$

$\frac{H\phi^{\frac{1}{2}}}{2} \gg 1$ より

$$I = \left(\frac{eA}{2\pi\hbar d^2} \right) eV \left(\frac{H\phi^{\frac{1}{2}}}{2} \right) e^{-H\phi^{\frac{1}{2}}} \\ = \frac{e^2 A}{h^2 d} (2m\phi)^{\frac{1}{2}} \exp\left\{-\frac{4\pi d}{h} (2m\phi)^{\frac{1}{2}}\right\} V \dots \dots (15)$$

このとき式(16)のように R をおくと、 R は接点間材料と構造で決まる定数の抵抗値とみなせる。

$$\frac{1}{R} = \frac{I}{V} = \frac{e^2 A}{h^2 d} (2m\phi)^{\frac{1}{2}} \exp\left\{-\frac{4\pi d}{h} (2m\phi)^{\frac{1}{2}}\right\} \dots \dots (16)$$

本実験における電極間電圧は小さいため、薄いオイルの絶縁皮膜に流れるトンネル電流は式(16)に対応する。したがって皮膜に流れるトンネル電流は線形であるため、本実験で得られた電流-電圧特性の非線形部分を担う電流ではないと考えられる。

また、金属接触面全体にオイルの薄膜が介在する場合を考える。図 4.7 の荷重-接触抵抗特性から荷重 0.003N の無塗布の接触抵抗は 23mΩ、接点材料は金めつきされた銅合金 KLF-5 なので抵抗率を 50nΩ・m とすると、式(6)から金属接触面積(真実接触面積)は $3.7 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ と算出される。この金属接触面全体にオイルの薄膜が均一に介在するとき、式(16)からなる抵抗 R と膜厚 d の関係は図 5.6 のようになる。

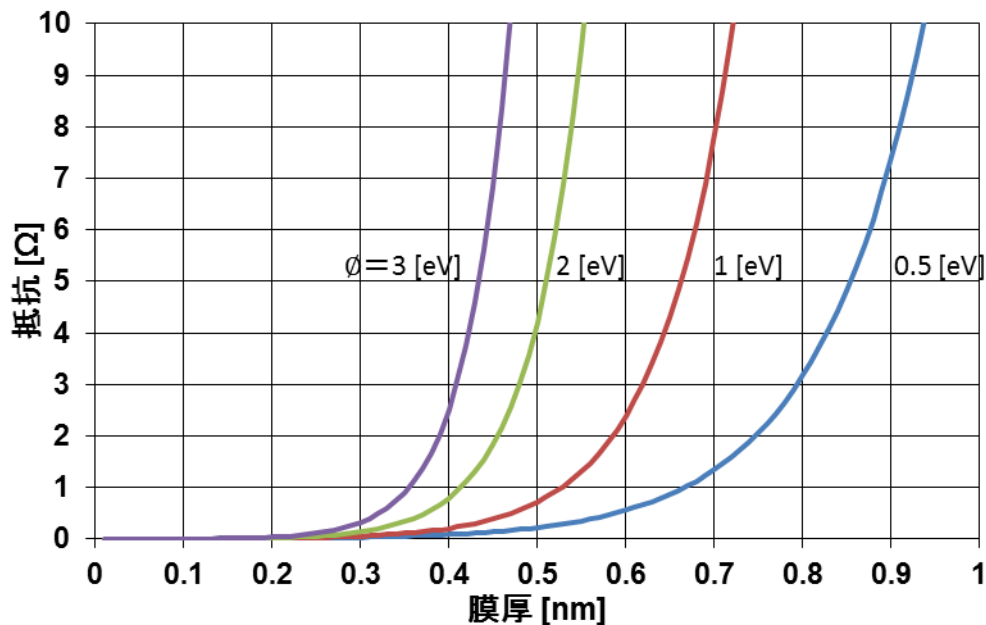


図 5.6 抵抗 R と膜厚 d の関係

パールリーム 18 は炭素数が 72 であるイソパラフィンを主成分とするパラフィン混合物であり、側鎖側を除いた部分の大きさは炭素原子が 30 個連なっている程度のものである。通常の炭素間の結合距離は 0.15nm 程度なので、これだけから推定すると分子の

大きさは 3nm 程度になる[7]。図 5.6 の抵抗 R と膜厚 d の関係からわかるように、オイルの膜厚が 1nm 以上になると抵抗 R は非常に大きくなる。そのため、本実験においてオイル介在による接触抵抗上昇時に観測された電流値に与えるトンネル電流の影響は、非常に小さいと考えられる。つまり、本実験においてオイル介在による接触抵抗上昇時に流れるオーミックな電流は、金属接触によるものと考えられる。

5.4.3. ショットキー電流

5.4.1 節で述べた、薄い絶縁体となるオイルに流れる電流がショットキー電流の場合を考察した。

ショットキー電流は金属中の電子が熱エネルギーを受けて励起し、図 5.5 に示す電位の障壁を乗り越えて流れる電流である。電極間電圧の増大に対して障壁の高さは減少する。このショットキー電流は次式で与えられる[8]。

$$I = (1 - r)AT^2S \exp\left(-\frac{\phi}{KT}\right) \exp\left\{\left(\frac{e^3}{\epsilon d}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{V^{\frac{1}{2}}}{KT}\right\} \dots\dots (19)$$

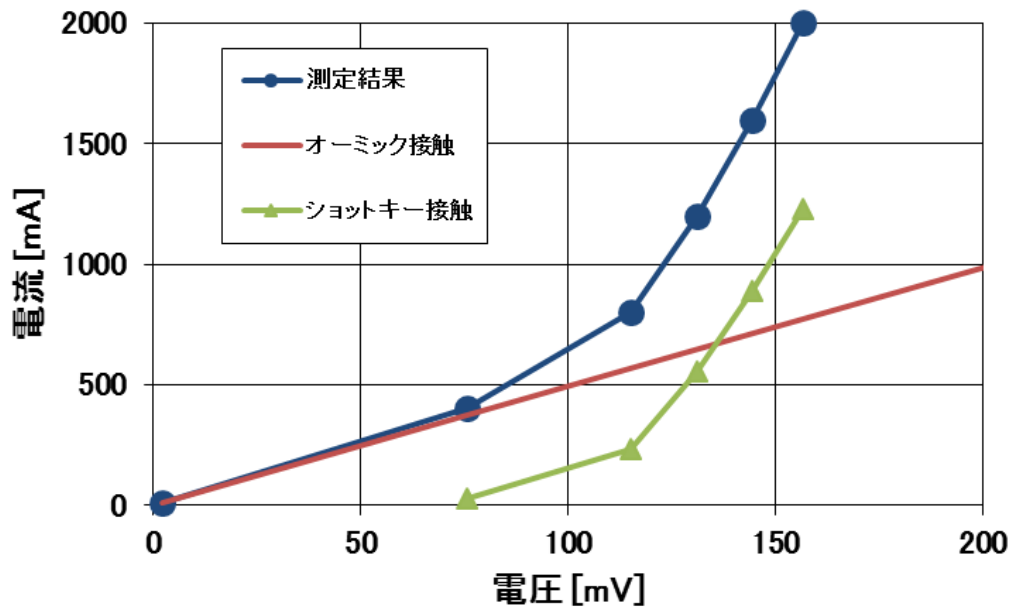
ここで A はリチャードソンの定数、 r は障壁による電子の反射の割合、 S はショットキー電流が流れる面積（オイルの被膜面積）、 K はボルツマン定数、 ϕ は障壁高さ、 T は絶対温度、 e は電子電荷、 ϵ は皮膜の誘電率、 d は金属間の被膜の厚さ、 V は電極間電圧である。

この式を電圧 V と電流 I に着目して書き直すと次のような式になる。

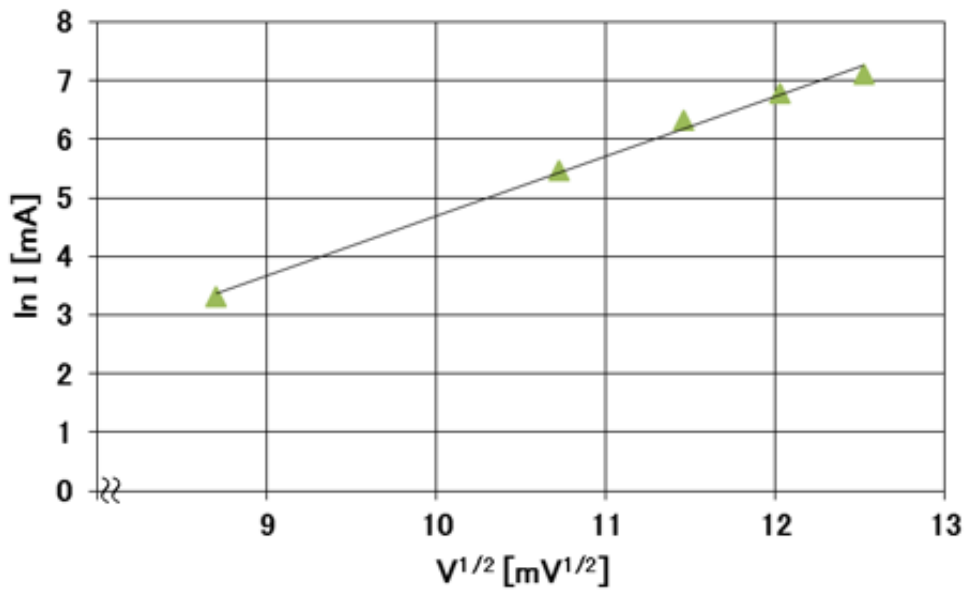
$$\ln I = mV^{\frac{1}{2}} + n \dots\dots (20)$$

このとき m 、 n は定数である。この式から $\ln I$ と $V^{\frac{1}{2}}$ に比例関係が成り立つとき、ショットキー電流が生じていると考えられる[9]。

ここで、本実験で得られた 6 つのサンプル図 4.8-13(b)の非線形性がみられる電流-電圧特性について、それぞれ図 5.7-12(a)のように測定結果からオーミック接触（金属接触）で流れた電流分を引いたものをショットキー電流と考える。このオーミック接触の電流は、電流 10mA の測定点からオームの法則 $V = RI$ に則り算出した。この算出したショットキー電流を $\ln I$ と $V^{\frac{1}{2}}$ の関係に変換したものをそれぞれ図 5.7-12(b)に示す。図 5.7-12(b)から、本実験結果から算出した $\ln I$ と $V^{\frac{1}{2}}$ の関係にも比例関係が成り立っていることがわかる。つまり、本実験において非線形性を生み出した、薄い絶縁体となるオイルに流れる電流は、ショットキー電流である可能性が示唆された。

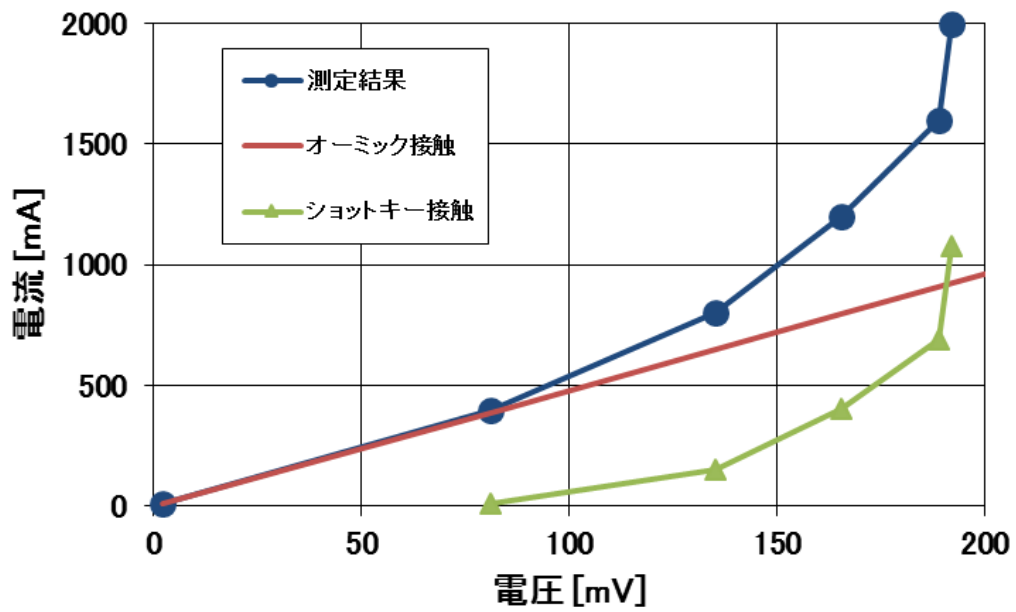


(a) オーミック接触電流とショットキー接触電流

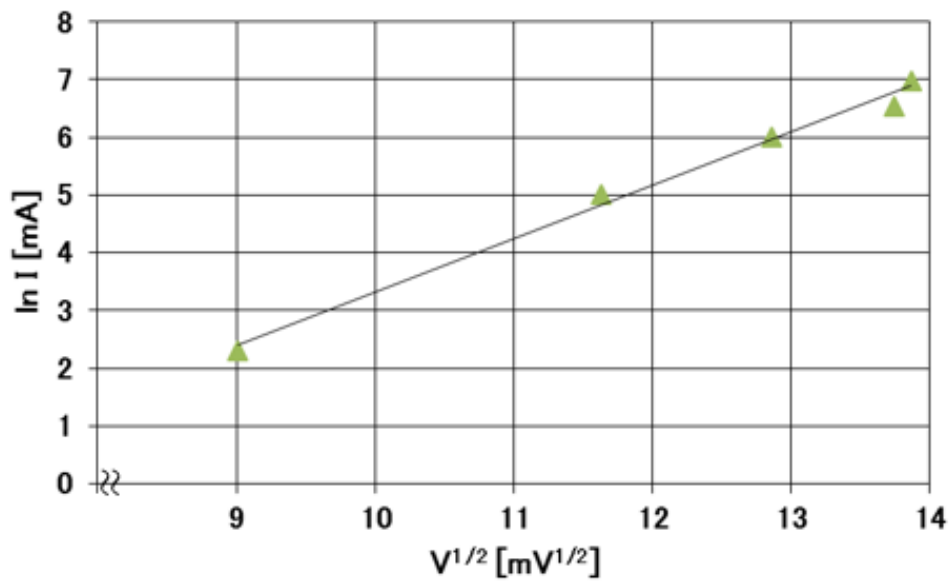


(b) $\ln I$ と $V^{1/2}$ の関係

図 5.7 ショットキー電流の $\ln I$ と $V^{1/2}$ の関係 サンプル 1

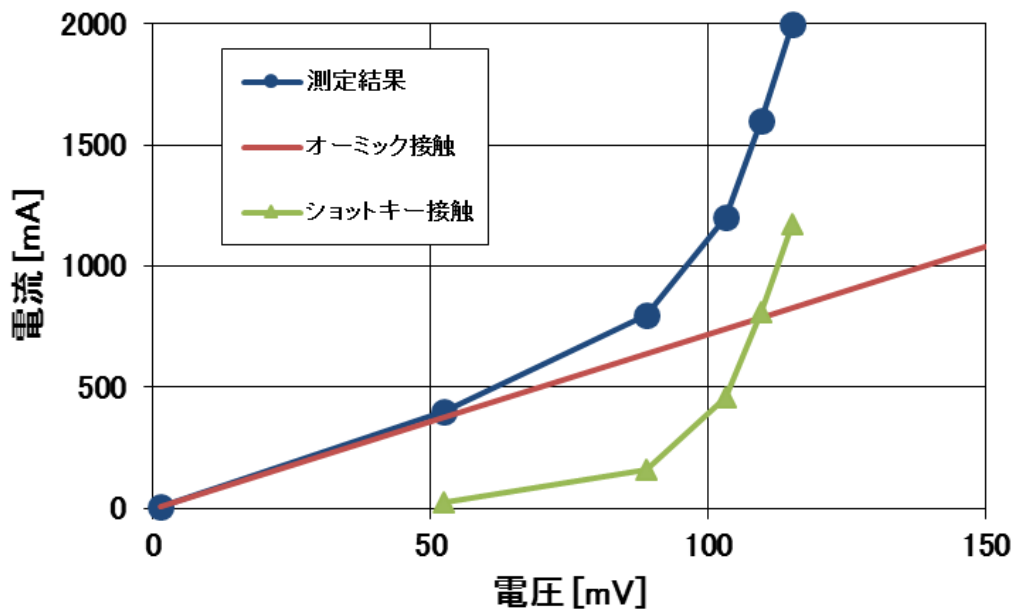


(a) オーミック接触電流とショットキー接触電流

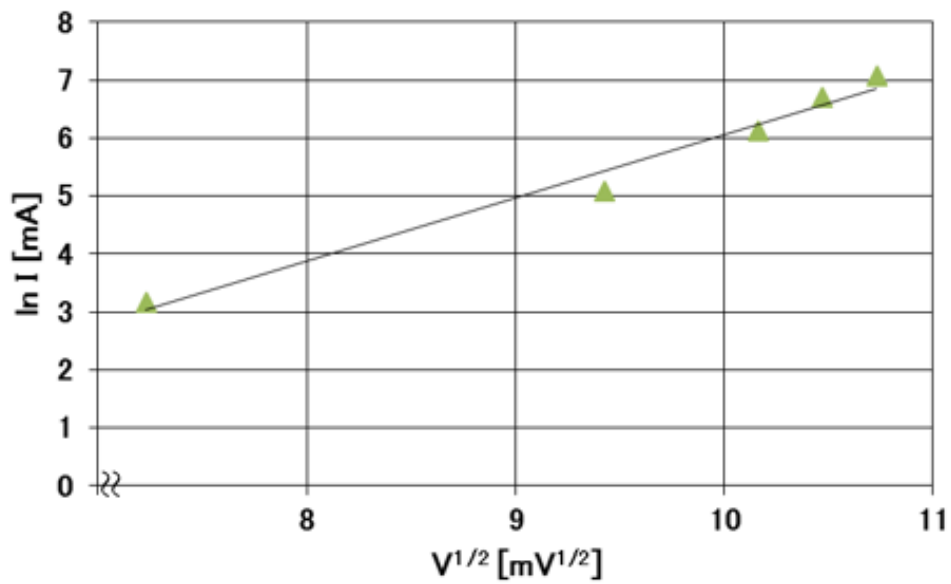


(b) $\ln I$ と $V^{1/2}$ の関係

図 5.8 ショットキー電流の $\ln I$ と $V^{1/2}$ の関係 サンプル 2

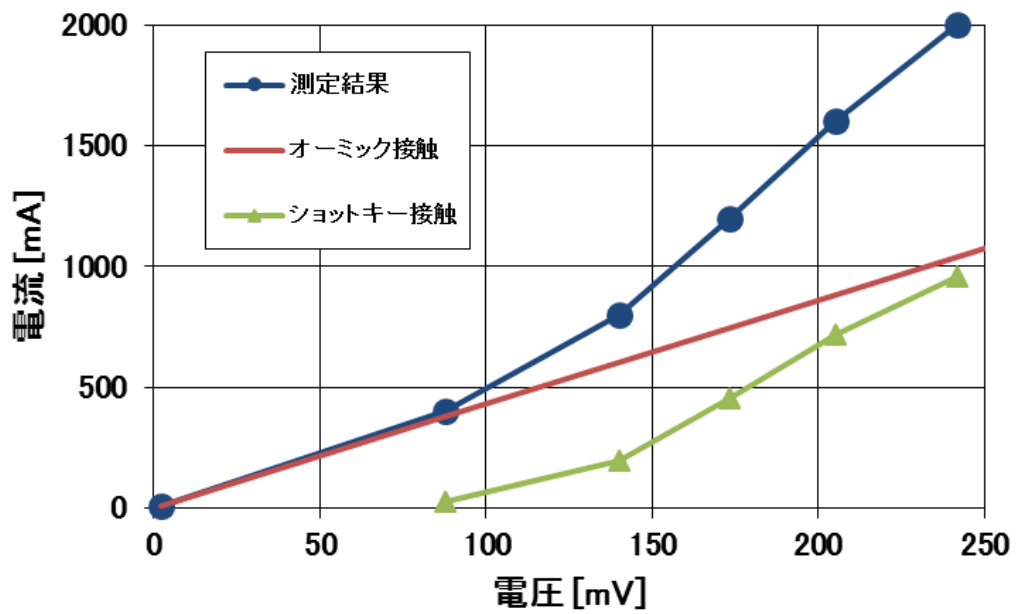


(a) オーミック接触電流とショットキー接触電流

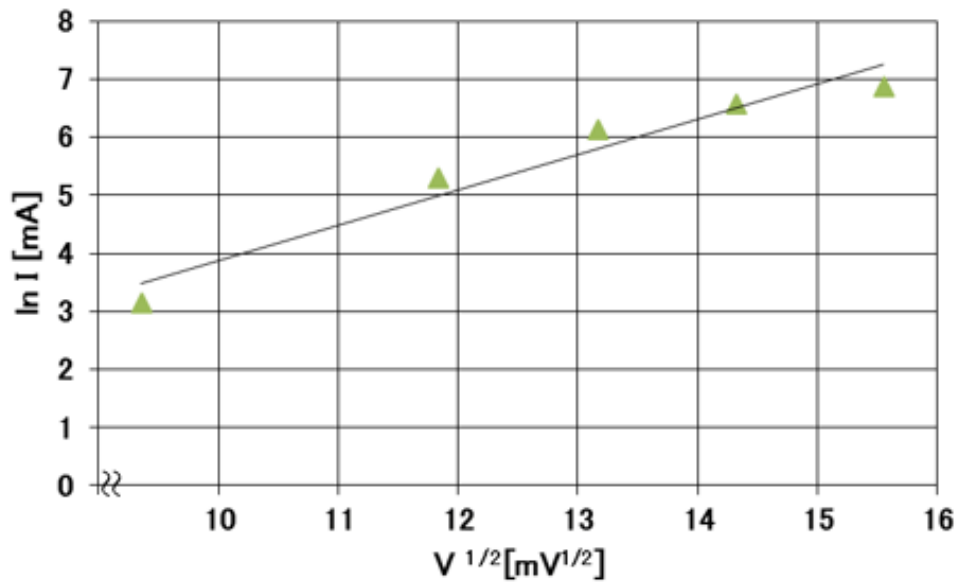


(b) $\ln I$ と $V^{1/2}$ の関係

図 5.9 ショットキー電流の $\ln I$ と $V^{1/2}$ の関係 サンプル 3

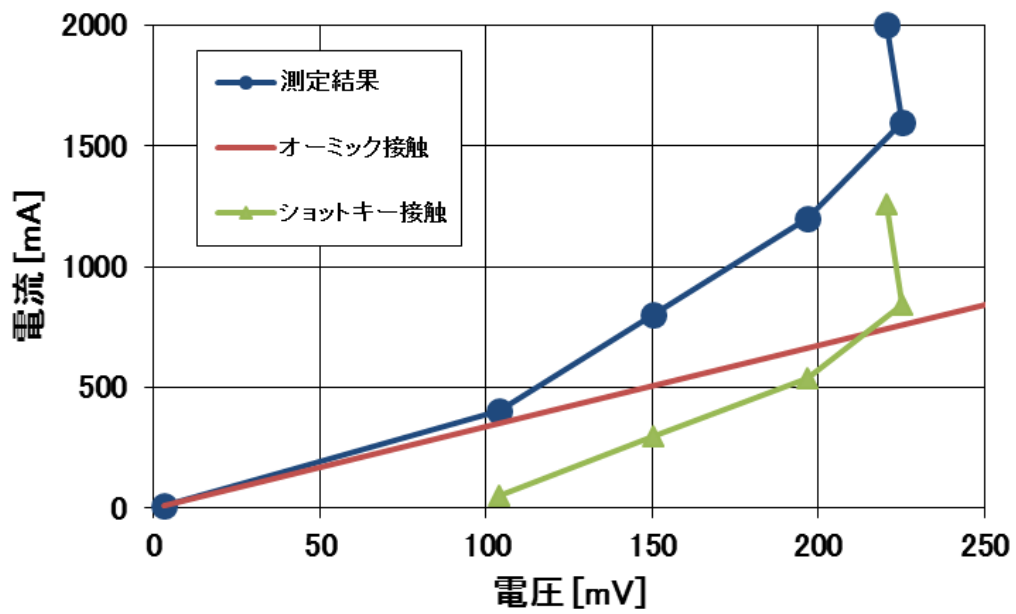


(a) オーミック接触電流とショットキー接触電流

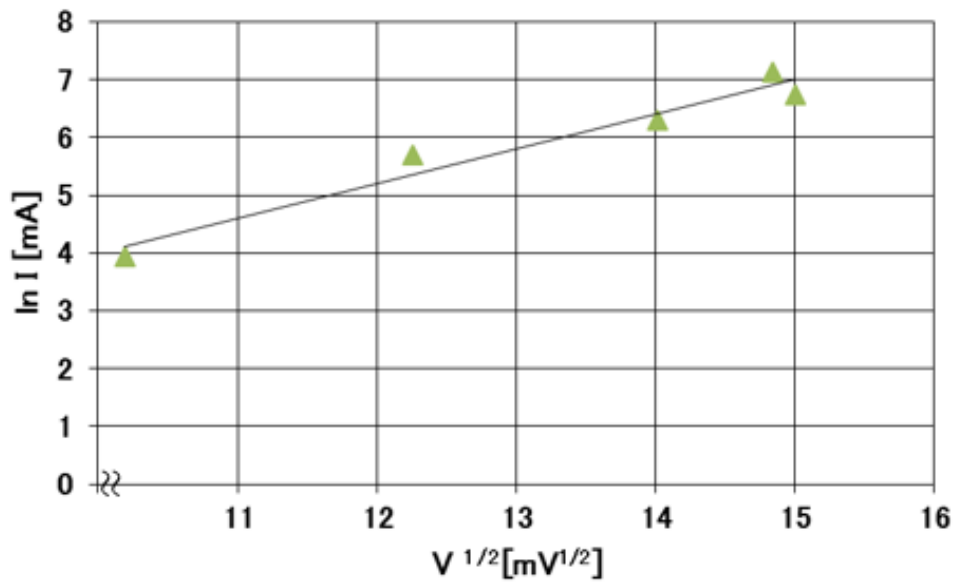


(b) $\ln I$ と $V^{1/2}$ の関係

図 5.10 ショットキー電流の $\ln I$ と $V^{1/2}$ の関係 サンプル 4

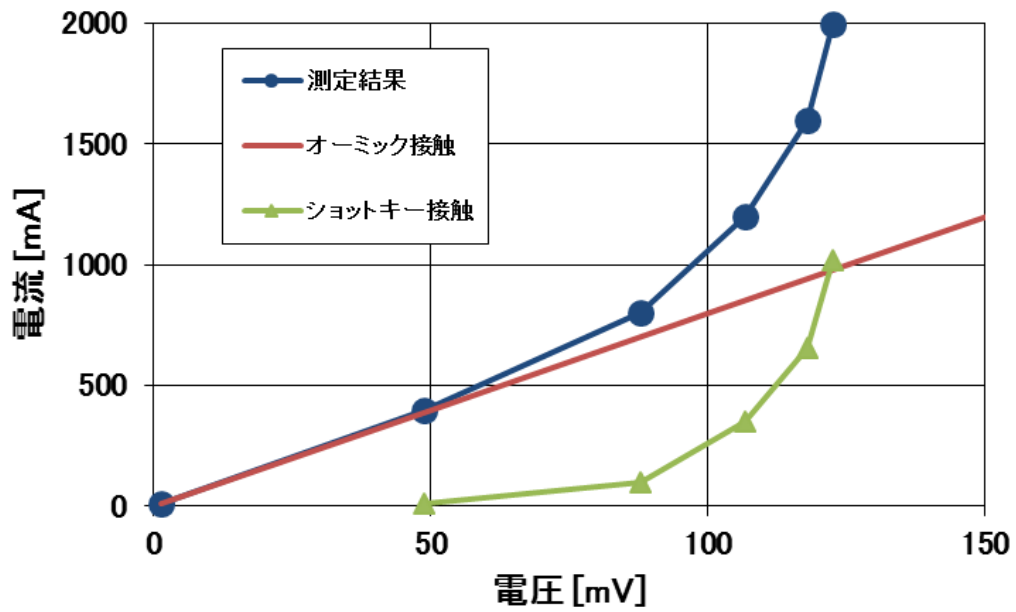


(a) オーミック接触電流とショットキー接触電流

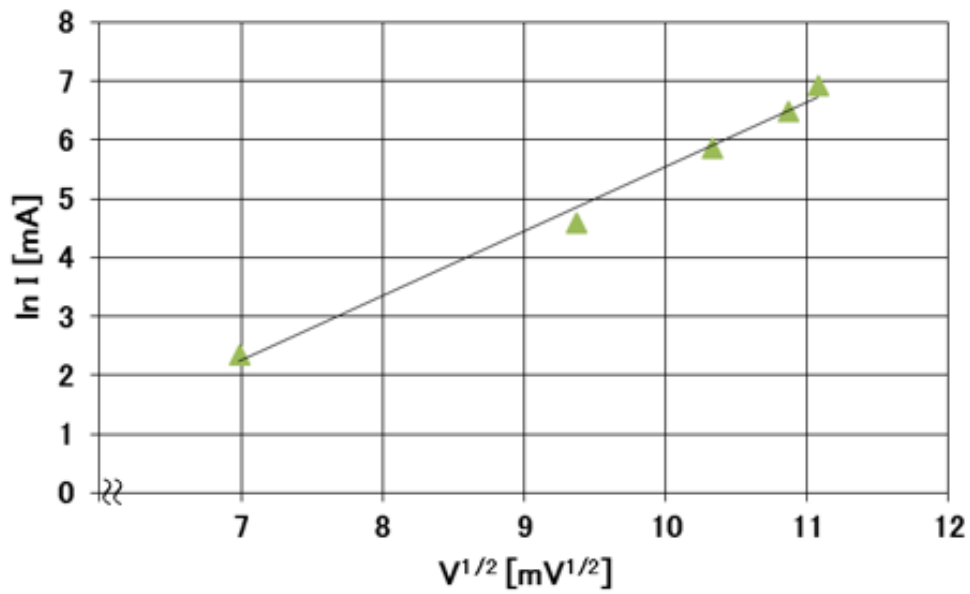


(b) $\ln I$ と $V^{1/2}$ の関係

図 5.11 ショットキー電流の $\ln I$ と $V^{1/2}$ の関係 サンプル 5



(a) オーミック接触電流とショットキー接触電流



(b) $\ln I$ と $V^{1/2}$ の関係

図 5.12 ショットキー電流の $\ln I$ と $V^{1/2}$ の関係 サンプル 6

また、図 5.7-12(b)に示す直線の傾きを式(20)の傾き m と比較する。式(19)から傾き m は次のように与えられる。

$$m = \left(\frac{e^3}{\epsilon d}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{KT} \dots\dots (21)$$

ここでパラフィンの誘電率を 2.1、 $T=300$ [K]とすると傾き m と皮膜厚 d の関係は図 5.13 のようになる。

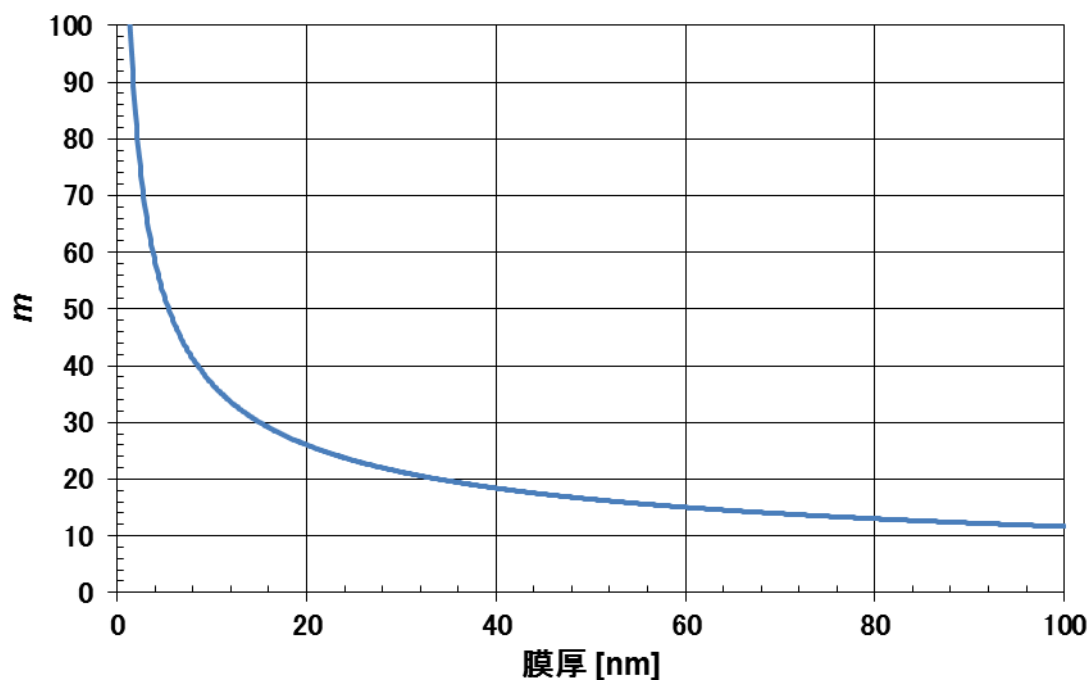


図 5.13 傾き m と皮膜厚 d の関係

このとき図 5.13 から、図 5.7-12(b)に示す直線の傾きと対応する皮膜厚を表 5.2 にまとめる。

表 5.2 各サンプルにおけるショットキー電流の $\ln I$ と $V^{\frac{1}{2}}$ の傾と皮膜厚

サンプルNo	1	2	3	4	5	6
傾	32.2	29.3	34.6	19.3	19.0	34.7
皮膜厚[nm]	13.1	29.3	11.3	36.4	37.6	11.2

数 10nm 程度以上の厚さの皮膜の場合はショットキー電流が支配的になるということ を考えると、表 5.2 の皮膜厚は検討され得る値である。

参考文献

- [1] 加藤仁,丸井悦男,小林明彦,千田進幸,「境界潤滑における摩擦特性に及ぼす潤滑油の影響について」,日本機械学会論文集 C 編,50 卷,p.546 (1984)
- [2] 水野万亀雄,「境界潤滑における金属の摩耗と摩擦」,精密機械,28 卷,pp.12-13 (1962)
- [3] 玉井輝雄,「電気接触現象」,エレクトロニクス実装学会誌,Vol.3, No.3, p.257 (2000)
- [4] 谷井琢也,高野陸男,三木康生,「電気接点の集中抵抗について」,電学誌,Vol.89-1, No.964, p.153, (1969)
- [5] R.Holm, “Constriction resistance of an assembly of elongated A-spots”, ICEC, pp.16-18 (1970)
- [6] T.J.Coutts, “Electrical Conduction in Thin Metal Films”, Elsevier Scientific Publ, (1974)
- [7] 安達洋,加藤達幸,鈴木和郎「走査形トンネル顕微鏡を用いた流動パラフィンの電気伝導特性の測定」,電気学会論文誌, Vol.108, No.11, p.500 (1988)
- [8] 玉井輝雄,土屋輝雄,「接点皮膜の導電特性と電氣的破壊の機構」,電気学会論文誌, Vol.93, No.6, p.240 (1973)
- [9] 玉井輝雄,「接触境界部に介在する汚染皮膜の電氣的破壊による低接触抵抗の回復とそのメカニズム」,電気情報通信学会技術研究報告, EMD2003-95(2004)

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、潤滑状態、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-接触抵抗測定と電流-電圧測定を同時に行い、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1N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. 電流-電圧特性より、およそ荷重0.003N以下、電圧値90mV以上で非線形性が確認された。

第5章では、荷重-接触抵抗特性の接触抵抗上昇と、電流-電圧特性の非線形性からオイル介在時の電気接点の導通機構について検討を行った。以下にその結果を要約する。

1. 荷重は金属接触部とその周辺の吸着油膜接触部で支持され、金属接触部による荷重分担が減少することで金属接触面積が減少し、接触抵抗が上昇すると考えられる。
2. 非線形性がみられる低荷重領域では、荷重の過半がオイルにより支持されていることが考えられる。
3. 低荷重領域におけるオイル塗布接点では、金属接触と薄い絶縁体となるオイルの並列回路構造となり、電圧が大きくなると薄い絶縁体部分に電流が流れ非線形性が表れると考えられる。
4. 本研究において非線形性を生み出した薄い絶縁体となるオイルに流れる電流は、トンネル電流ではなくショットキー電流である可能性が示唆された。

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。

また日頃から有意義な御意見、御教示を頂いた株式会社オートネットワーク技術研究所 澤田滋氏並びに清水敦氏に厚く御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり、数多くの御助力を賜りました、同大学技術専門員 堀田克則氏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。

2017年4月
安藤 優佑