

# 電気接触現象と その表面・界面

—接触機構デバイスの基礎と応用—

玉井 輝雄 著

コロナ社

# ま え が き

電気接触とはいわゆる電気接点であって、電気回路を接続したり切り離したりするものである。大きく静止接触部、開閉接触部、摺動接触部の三つに分けられ、すべての電気機器になくてはならない機能を持っている。5 mm 立方ぐらいの小さなリレー（継電器）から大きな遮断器や、プリント基板に張り付けるテープのような微小なコネクタから大きな電線を遮断機や断路器につなぐコネクタ、マイクロモータのブラシとスリップリングから鉄道の架線とパンタグラフのすり板に至る摺動接触部など、いろいろな形状、大きさやさまざまな形の電気接触部がある。これらは信頼性を高く保つ必要があり、不良が生じては機器本体の特性が維持できないほど重要である。

電気接触部で生じる接触現象の問題の存在の指摘は非常に古く、1800年代の、オームの法則を発見したドイツのオーム（G. S. Ohm）博士や、ストックホルムのエールステッド（H. C. Ørsted）教授にさかのぼる。オームはいみじくも一つの提言をしている。それは、接触部が清浄であることが肝要で、錆びたり油で汚れてはいけなと。これは、人類が電気現象を手中に収めたそのときからついてまわってきているということである。つまり、電気の歴史とともに歩んでいる。それゆえ、電気接触の問題には華やかさはない。「電気接点は今古の問題で、いまだになにをやっているのか」と。接触部はその構造が一見単純に見られるが、そこで起きている現象は、本書で取り上げているようにたいへん複雑である。振り返って見れば、電気接触部に使われる金属材料やその接触部が関係する電気条件などはたいへん広く、さらに接触部にかかる荷重や摺動は接触部が用いられる機械に多くの場合依存している。このような不特定な状況で、周囲の環境には接触表面に悪影響を及ぼす気体で満ち満ちている。

「接触現象の研究は間口を広く取り、深く掘り下げることは犠牲にする」といわれたことがあった。接触部材料の金属材料、電気負荷条件、形状を取ってみても間口が広いので、このようなことがいわれたものと思う。浅く研究せよということでは本質を見誤ってしまう。このような非科学的思想が流布されていた時代があった。また、学会を牛耳り電気接触の世界は自分一人ということもあった。このような状況下では、この分野の学術研究の進展がずいぶん遅れたと思われる。

電気機械が進歩し接触部もその影響を強く受ける。しかし、接触問題がなくなることはなく、200年来の対応が繰り返されるのである。接触不良が出現するとその問題を解決すべく頑張るが、それが解決すると、その周辺を広く研究するが現象や法則の発見につながらない。このように考えれば、電気接触現象は科学でもなく学術問題でもないといわれそうであるが、一つひとつの現象にはその意味があり、突き詰めて究明すれば現象や法則の発見もある。これを系統的にまとめると、学問すなわちサイエンスとしての学術的大系が構築される。

この種の著作には、古くはホルム (Ragner Holm) 博士の「Electrical Contact」、最近ではスレイド (P. Slade) 博士の「Electrical Contact - Application and Fundamentals」などの大作はあるが、Slade氏は自身が筆者として、また編者として各章ごとにその道の権威を駆使して総合的にまとめたものである。電気接触現象は接触部材料、接触抵抗、放電現象、発熱、汚染気体や塵埃などの環境問題等々と非常に間口が広く、また奥がたいへん深いのが特徴である。これに対して本書では、筆者の単著としてまとめたので、筆者の専門を中心として表面科学、接触抵抗を本書の内容の柱としてとらえてまとめた。したがって、広く接触問題を勉強しようとする人々にとっては必ずしも十分とはいえないかもしれない。

本書では筆者の専門から、微弱電気条件から低電気条件までの範囲の接触部問題を中心に取り上げた。本書は10年以上前に出版される予定であったが、筆者が転職し、執筆に時間が取れない事情があり、すべての公職から離れて取

り組もうとしたとき、すでに遅し、執筆へのエネルギーが減退し始めたのであった。しかし、定年直前にIEEE（アメリカ電子電気学会）からHolm Scientific Achievement Awardを受賞（2010年）したので、この際、準備した資料をまとめなければと、コロナ社の皆様にたいへんなご迷惑をおかけしながら、やっとの思いでここに形となることができた。本書の特徴は、広く接触現象全体を網羅することなく、筆者が推し進めた研究を中心にまとめたものである。

読者の皆様方が本書を手にとっていただき、少しでもお役に立てればと望む次第である。間違いなどがあればご指摘をいただければ幸甚である。

本書の企画立案から今日に至るまで、終始お世話になりましたコロナ社の方々ならびに、電子情報通信学会をはじめとする諸学会、研究会、国際会議、Holm会議、筆者が代表を務める継電器・コンタクトテクノロジー研究会を支える賛助会の皆様や毎回の研究会でご講演いただく諸氏に心身より御礼申し上げます。最後に、本書をまとめるにあたり強く後ろから押してくれた妻富子にも感謝いたします。

2019年3月 千葉県柏にて

玉井 輝雄

# 目 次

## 1. 電気接触現象とその解明に尽力した人々

1.1 歴史に見る電気接触現象	1
1.1.1 ガルバニーの発見	1
1.1.2 オームの接触抵抗の発見	4
1.2 ラグナー・ホルムの業績と生涯	7
1.2.1 若き時代のホルム	7
1.2.2 高等学校教師の時代	9
1.2.3 ジーメンスでの研究生生活	10
1.2.4 スウェーデンでの電気接触現象の研究所	12
1.3 アメリカ時代のホルム	13
1.4 ま と め	15
引用・参考文献	15

## 2. 接触表面の性質

2.1 表面の構造	16
2.1.1 表面の原子に作用する力	16
2.1.2 表面の原子配列と構成	20
2.2 固体表面と気体分子との作用	23
2.3 表面汚染	25
2.3.1 乾食現象	27
2.3.2 湿食現象	34
2.3.3 表面汚染の実例	35
2.4 合金の酸化	43
2.5 ま と め	45
引用・参考文献	45

### 3. 金属表面どうしの接触

3.1 電氣的接触部	47
3.2 集中抵抗	49
3.3 まとめ	65
引用・参考文献	66

### 4. 接触部の導電機構

4.1 エネルギーバンド構造から見た接触部の導電機構	67
4.1.1 金属表面のエネルギー状態	67
4.1.2 同種金属どうしの接触	68
4.1.3 異なる金属の接触	69
4.1.4 皮膜が介在する接触部の導電機構	70
4.2 厚い皮膜が介在する場合の接触	77
4.2.1 半導体と金属との接触	77
4.2.2 接触境界部に半導体が介在する場合	79
4.2.3 厚いCuの酸化物のような絶縁体で覆われた半導体膜の場合	80
4.2.4 非対称形接触部	81
4.3 ショットキー電流	82
4.4 まとめ	87
引用・参考文献	87

### 5. 接触境界部の発熱現象

5.1 微小な真の接触部金属への熱の影響	89
5.2 接触境界部での発熱の評価	93
5.3 通電中の接触面の観察	101
5.4 まとめ	108
引用・参考文献	108

## 6. 接触抵抗の印加電気条件依存性

6.1 低接触抵抗が回復する現象	110
6.2 接触抵抗に与える電気的作用	114
6.2.1 薄膜の導電機構が接触抵抗に作用する場合	114
6.2.2 ジュール熱による接触部の破壊	115
6.2.3 接触部皮膜の電氣的破壊の実例	118
6.3 ま と め	129
引用・参考文献	129

## 7. 接触部皮膜の機械的特性と低接触抵抗の回復

7.1 垂直荷重による接触抵抗値の低下について	134
7.2 摺動による接触抵抗値の低下について	136
7.3 実測による検証	138
7.3.1 垂直荷重の効果	139
7.3.2 水平摺動変異の効果	141
7.4 ま と め	146
引用・参考文献	146

## 8. 表面を覆う汚染皮膜の厚さの測定

8.1 皮膜の厚さの計測	148
8.1.1 秤量法	148
8.1.2 電解還元法	149
8.1.3 光による方法	149
8.1.4 皮膜のスパッタによる方法	150
8.2 酸化皮膜の成長に対するエリプソメトリ	150
8.3 電界還元法による層状皮膜の組織別の厚さの測定	157
8.4 秤量法による皮膜の評価	161
8.5 ま と め	163
引用・参考文献	163

## 9. 接触面に対する湿度の影響

9.1	表面に作用する吸着水膜	167
9.2	清浄な Cu 面の酸化物の成長に及ぼす湿度の影響	169
9.3	酸化皮膜の表面への H <sub>2</sub> O の影響	170
9.4	STM 像がとらえる Cu 表面の H <sub>2</sub> O 吸着による変化	171
9.5	静接触抵抗や摺動接触抵抗に及ぼす加湿の影響	173
9.6	ま と め	175
	引用・参考文献	175

## 10. 低温下の接触抵抗特性

10.1	低温下における集中抵抗の特性	178
10.2	超電導を応用した真の接触面積の評価	186
10.3	ま と め	190
	引用・参考文献	190

## 11. めっき表面の接触現象

11.1	めっき層の性質とめっき面の汚染	193
11.2	Au めっき層の性質とめっき表面の汚染	194
11.3	Sn めっき表面の接触特性	205
11.4	機能性を持たせためっき面	209
11.5	ま と め	211
	引用・参考文献	212

## 12. 真の接触境界部を介しての摩擦と接触抵抗の関係

12.1	真の接触面を介しての摩擦係数と接触抵抗の関係	215
12.1.1	接触抵抗の真の接触面依存性	215
12.1.2	摩擦係数の真の接触面依存性	216

12.1.3	単一の真の接触面での接触抵抗と摩擦係数との関係	217
12.1.4	複数の接触面を通しての接触抵抗と摩擦係数の関係	218
12.2	接触抵抗と摩擦係数の関係の検証	220
12.3	実際の接触抵抗と摩擦係数の関係	221
12.4	ま と め	225
	引用・参考文献	225

### 13. シリコン汚染と接触障害

13.1	シリコン汚染による接触障害とシリコンの種類（重合度）	227
13.2	シリコンの分解過程	229
13.3	シリコンの高温分解の静的生成とその接触抵抗への影響	232
13.4	シリコン蒸気の吸着と吸着膜厚	236
13.5	開閉接触部や摺動接触部に及ぼすシリコン蒸気の動的影響	238
13.5.1	接触抵抗特性に及ぼすシリコン蒸気濃度の影響	238
13.5.2	シリコン雰囲気中における接触抵抗特性に及ぼす開閉頻度の影響	241
13.5.3	接触抵抗に及ぼす電気負荷条件の影響	242
13.5.4	接触痕跡における特徴	244
13.5.5	フィールドデータと接触不良の発生限界 1.6 W ラインの相関性について	246
13.6	ま と め	247
	引用・参考文献	248

付	録	250
---	---	-----

索	引	253
---	---	-----

# 1. 電気接触現象とその解明に尽力した人々

電気接触現象がいつのころから認識され、それがどのような不都合を引き起こしたか、さらに科学技術史上のどのような人々がこの問題に関係し、どのように解決したかを知ることは興味深いことである。電気接触はすべての電気や電気機器の応用に関係している基本であるので、本章では、その歴史を取り上げ、ついで、接触現象とその応用の大家、ラグナー・ホルム (Ragnar Holm) 博士の生涯を中心に、この問題に概括的に説明することを試みた。

接触現象は、電気の黎明期に電気現象を研究する研究者の実験装置の接触不良による不具合でその問題の存在が認識され、電気の応用の歴史とともに電気機器の不具合として大きな問題となって、現在にまで至っている。この間、電気接触の現象の問題は接触抵抗の解明という観点からここ 100 年でたいへん進んできている。ここで、ホルム博士の業績は特筆に値する。その原点は、オームの法則を発見したミュンヘン工科大学のオーム (Georg Simon Ohm) 教授にある。

特に、本章ではこれらの偉人について多くの紙面を割くこととする。

## 1.1 歴史に見る電気接触現象

### 1.1.1 ガルバニーの発見

電気といえば雷、摩擦帯電などしかない時代の 1791 年にイタリアのボローニア (Bologna) 大学医学部の外科教授のガルバニー (Luigi Aloysio Galvani; 1737 ~ 1798) がカエルの足をピンセットでつまんだときから、人類の電気との関わりが身近に始まったといえる。確かに、それ以前でも摩擦電気を発電さ

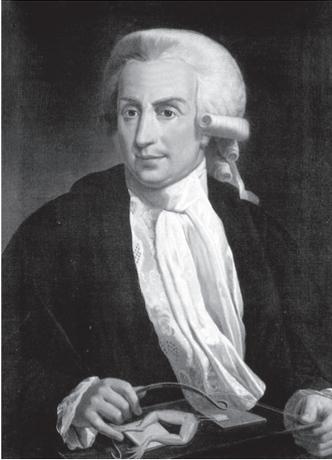


図 1.1 ルイージ・ガルバニー (Luigi Aloysio Galvani : 1737 年 9 月 9 日 ~ 1798 年 12 月 4 日) (イタリアのボローニャ出身, ボローニャ大学医学部外科教授。医師, 物理学者<sup>1)</sup>)

せ、放電現象を体感することが可能であった。ガルバニーの肖像を図 1.1 に示す<sup>1)†</sup>。

ガルバニーは、ピンセットでカエルの足をつまんだときにカエルの足が、図 1.2<sup>1)</sup>に示すように、びくびく動くことを見つけたのである。当時、電気ウナギや電気ナマズが発電し、体内の細胞にその原因があることがわかっていた。そこで、ガルバニー教授は直感的にカエルの足が電気を発生しているとしたのである。これで、ガルバニーは電気の世界からその名が消えたのである。確かに、微小な電流を測定するのに、最近まで彼の名を冠したガルバノメータなるものがあつた。しかしそのくらいである。

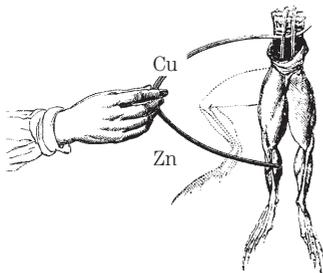


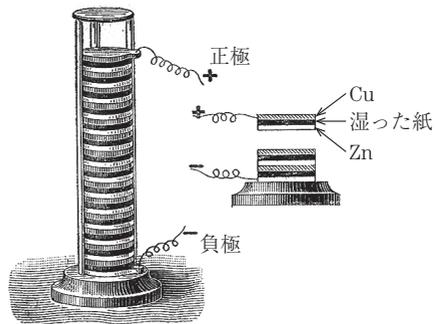
図 1.2 ガルバニーの実験 (Cu と Zn からなるピンセットで触れるとカエルの足が動いた<sup>1)</sup>)

† 肩付きの数字は、章末の引用・参考文献を表す。

このカエルの足の現象に対して、同じくイタリアのパビア（Pavia）大学物理学教授のヴォルタ（Alessandro Volta；1745～1827，**図 1.3**）はカエルの足をつまんだピンセット側に原因があると唱えた。ここで、このピンセットは一方の足が Cu 製で、他方が Zn 製であった<sup>2)</sup>。すなわち、異種金属の接触で、接触電位が生じていたのである。これはピンセットの防食のためであったのか。この発見は電池の実現へと導いた。すなわち、ヴォルタの電池であって、単位電池を積み重ねたものが**図 1.4**に示すヴォルタの電堆である。電池の発明によって、人類は机の上で容易に電気を発生させることができるようになったのである<sup>2)</sup>。



**図 1.3** アレッサンドロ・ジュゼッペ・アントニオ・アナスタージオ・ヴォルタ伯爵（Il Conte Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta；1745年2月18日～1827年3月5日）〔イタリアの自然哲学者（物理学者）<sup>1), 2)</sup>〕



**図 1.4** ヴォルタの電池を直列にしたヴォルタの電堆

これを契機に、特にヨーロッパでは電気の性質の解明に花が咲いた。当時、このような研究を行うことをガルバニズム（Galvanism）と呼んでいた。このような時代において、コペンハーゲン（Copenhagen）大学教授のエールステッド（Hans Christian Ørsted；1777～1851）は、このヴォルタの電池を電線で

#### 4 1. 電気接触現象とその解明に尽力した人々

短絡することにより電線の周囲に方位磁石の針を動かす作用のあることを1820年の冬学期に見いだした。学生のための演示実験では何度も失敗したといわれている。電線部の接触が問題としてあったのか。つまり、現代風にいえば電流と磁界の関係である。エールステッドの電流と磁界の関係が明らかになると、この実験がヨーロッパ中に広まった。このとき、電流や電圧、磁界の概念はなかった。エールステッドの肖像を図1.5に、エールステッドの実験装置を図1.6に示す<sup>3)</sup>。

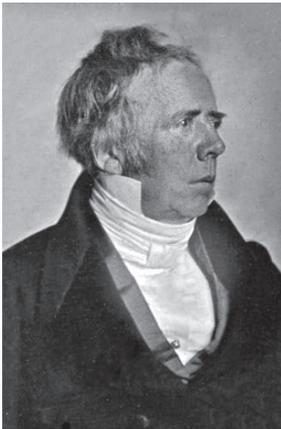


図1.5 ハンス・クリスチャン・エールステッド (Hans Christian Ørsted; 1777年8月14日～1851年3月9日) (デンマーク・コペンハーゲン大学教授。物理学者、化学者<sup>3)</sup>)

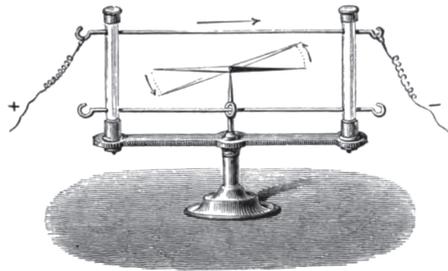


図1.6 エールステッドの実験装置 (電流を電線に流すことにより方位磁石が触れる。)

#### 1.1.2 オームの接触抵抗の発見

ドイツのババイア地方、ニュールンベルグから列車で30分ほどの小都市、エアランゲン (Erlangen) に錠前師の長男として生まれたゲオルグ・ジーモン・オーム (Georg Simon Ohm; 1789～1854) は当時、実課学校すなわち、今流にいうと中学校の技術科か工業高校の教師をしていた。CuとZnを接触

させた異種金属の接触で生じる接触電位差によるヴォルタの電池の電極を用いて、種々の金属で、その太さや長さを変えた導電体をつないだ。そして、導電体の下に方位磁石を置き、その触れ角がどのように変化するかを調べた。ここで、オームの肖像を図 1.7 に、改良の末の最終的な実験装置の概要を図 1.8 に示す<sup>2),4)</sup>。



図 1.7 ゲオルグ・ジモン・オーム (Georg Simon Ohm; 1789 年 3 月 16 日～1854 年 7 月 6 日) (ドイツの物理学者<sup>2),4)</sup>。初めて接触抵抗に触れた論文を記載した。)

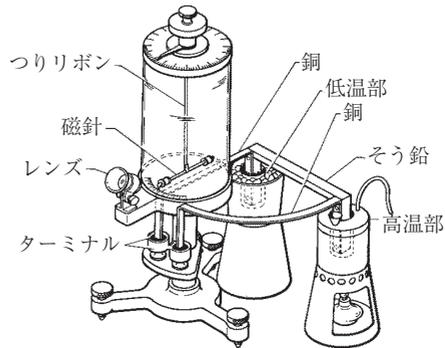


図 1.8 オームの法則を見いだした実験装置

現代的にいうと、1.5 V の単一乾電池を電線で短絡して、電線の下に置いた方位磁石の触れ角を読み取るといった実験であった。この実験の最中に、Cu 電線の接続部が古くて錆びたり油で汚れたりしていると、方位磁石の触れ角に再現性がなくなり、その値が非常にばらつくことに気がついた。そして、実験に際しては、つねに接続部は清浄しておかなければならないと結論づけている。現在の接触問題そのものである。この事実は、1827 年 5 月リーマン書店 (Riemann) から出版された「Die galvanische Kette, mathematisch schbearbeitet (電気回路の数学的研究)」に記載されている。すなわち、接触問題が報告され

# 索 引

<b>【あ】</b>	<b>【か】</b>	<b>【く】</b>
圧縮変形 134	開閉頻度 241	クライオスタット 183
アーミントン 14	カエルの足 2	クラッド 55
アモルファス 232	化学吸着 23,25	クリーブ 198
アレニウス 31	化合物皮膜 148	グリーンウッド 59
アレニウス関係 153	加速率 155	<b>【け】</b>
アントラー 201,204	加熱温度 234	結晶成長点 21
<b>【い】</b>	ガルバニ— 1,2	<b>【こ】</b>
異種金属の接触 3	カルバニ—形表面汚染 196	合金の酸化 43
異種金属の接触部 74,76	ガルバニズム 3	コネクタ 87,209,214
<b>【う】</b>	ガルバニ—腐食 42	コヒーラ 115
ヴィーデマン・フランツ・ローレンツの法則 89,91,94	還元電位 149	コーラー効果 116,118
ウィリアムソン 131	還元反応 34	混合状態 189
ヴォルタ 3	環 状 230	コンタクトオイル 198
ヴォルタの電池 3	環状シロキサン 237,239	<b>【さ】</b>
<b>【え】</b>	乾 食 25,35,37	再結晶温度 122
液体ヘリウム 183	乾食現象 27,165	細 孔 41,192
エネルギーバンド 68	<b>【き】</b>	再構成構造 19
エリプソメトリ 36,39,149,150	機械的破壊 134	最小集中抵抗値 185
エールステッド 4	機構デバイス 214	最表面 18,28
エレクトログラフ 201	吸着シリコン皮膜 241	鎖 状 230
エレクトログラフィ法 194	吸着水膜 26,38,165,167	鎖状シリコン分子 244
<b>【お】</b>	吸着皮膜 29	澤田滋 62
オイル 192,197	境界抵抗 11,48,67	酸化アルミニウム 132
オージェ電子 150	境界電力 1.6 W 243	酸化皮膜 166
オーバレイ 192	凝 着 19,214,216	酸化皮膜 SnO <sub>2</sub> 208,209
オーム 4	—の生じている真の接触点 137	酸化物 26
オーム性接触 69,79	金 192	<b>【し】</b>
オームの法則 6	キンク 20	仕事関数 67
温度依存性 178	金属間化合物 Sn-Ni 209	湿 食 26,37
	金属結合部 214	湿食現象 34,165
	金属転移 92	ジメチルポリシロキサン 227
	金属表面 28	

- |             |               |               |           |              |              |
|-------------|---------------|---------------|-----------|--------------|--------------|
| シャルピン抵抗     | 64            | 線膨張係数         | 180       |              |              |
| 集中抵抗        | 11,48,178     |               |           | <b>【と】</b>   |              |
| 摺動痕跡        | 194           | <b>【そ】</b>    |           | ドブローイ        | 70           |
| 摺動スイッチ      | 214           | 走査トンネル電子顕微鏡   | 171       | トムソン係数       | 92           |
| 摺動変位        | 137           |               |           | トムソン効果       | 92           |
| ジュール熱       | 89,91,93      | <b>【た】</b>    |           | ドルード         | 150          |
| シュレーディンガー   | 71            | 第1マイクロアーク領域   | 243       | トンネル導電       | 70           |
| ——の波動方程式    | 71            |               |           | ——とショットキー導電と |              |
| 潤滑剤         | 203           | 対数則           | 33        | の分離          | 85           |
| 消光角         | 150           | 第2マイクロアーク領域   | 243       | <b>【な】</b>   |              |
| 常電導領域       | 187           | 楕円体の接触部       | 51        | ナノコンタクト      | 64           |
| ジョセフソン素子    | 177           | 楕円偏光          | 151       | 軟化温度         | 90,91,122    |
| ショットキー      | 11            | 谷井            | 53        | 軟化電圧         | 91,122       |
| ショットキーダイオード | 79            | ダングリングボンド     | 19,21,237 | <b>【ね】</b>   |              |
| ショットキー電流    | 82            | 弾性変形          | 134       | 熱収縮          | 179,183      |
| ショットキー導電    | 70            | 弾性変形領域        | 208       | 熱電気効果        | 92           |
| ショーベルト      | 13            | 単分子膜          | 237       | 熱電子流         | 70           |
| シリコーン       | 227           | <b>【ち】</b>    |           | 熱軟化          | 108,123      |
| シリコーンオイル    | 226           | 柱状筋理状結晶       | 205       | <b>【は】</b>   |              |
| シリコーン汚染     | 226           | 超電導           | 178       | パウデン         | 16,47        |
| シリコーンゴム     | 226           | ——の破壊         | 187       | 破壊現象         | 123          |
| シリコーン蒸気     | 227           | 超電導現象         | 57,186    | 破壊電圧         | 125          |
| シリコーン蒸気濃度   | 234           | 超電導コイル        | 177       | 薄膜の導電機構      | 114          |
| シリコーン蒸気雰囲気  | 241           | 超電導状態         | 184       | 発生限界1.6Wライン  | 246          |
| シリコーン生成物    | 246           | 直線則           | 32        | 半結晶位置        | 21           |
| 真空マイクロ天秤    | 149           | <b>【つ】</b>    |           | <b>【ひ】</b>   |              |
| 新生面         | 19            | ツェナー          | 125       | 微細化構造        | 21           |
| 真の接触面       | 179,216,218   | ツェナー形の絶縁破壊    | 125       | 微摺動接触        | 209          |
| <b>【す】</b>  |               | <b>【て】</b>    |           | 微摺動摩擦        | 209          |
| 水平摺動変位の効果   | 141           | 抵抗温度係数        | 90,181    | 非線形抵抗        | 73           |
| ステアリン酸      | 220,224       | 低接触抵抗が回復      | 118,131   | 皮膜           |              |
| ステアリン酸分子    | 24            | 低接触抵抗を回復するのに要 |           | ——の厚さ        | 234          |
| スリップリング     | 214           | する垂直荷重        | 136       | ——の機械的除去に対する |              |
| <b>【せ】</b>  |               | テーパー          | 47        | 垂直荷重の効果      | 141          |
| 整流性         | 79            | 電位障壁          | 67,75     | ——の機械的除去に対する |              |
| 接触抵抗        | 11,48,178,234 | 電界還元法         | 149,157   | 水平摺動変位と垂直荷重  |              |
| 接触デバイス      | 87            | 電解質溶液         | 196       | ——の硬度        | 144          |
| 接触電位        | 3             | 電気負荷条件        | 242       | ——の成長機構      | 153          |
| 接触電位差       | 69            | 電話交換機         | 112       | ——の緻密性       | 30           |
| 接触部破壊電圧     | 125           |               |           | ——の破壊除去      | 142,145      |
| 接触部温度       | 122           |               |           | 皮膜抵抗         | 11,48,67,178 |
| 接触面の観察      | 101           |               |           |              |              |
| 接触問題        | 5             |               |           |              |              |
| せん断         | 217           |               |           |              |              |

皮膜破壊 139  
 皮膜表面 28  
 表面粗さ 198  
 表面エネルギー 19  
 表面緩和 19  
 表面構造 19  
 表面層 55  
 表面層抵抗 57  
 秤量法 148,161  
 ピンホール 41

**【ふ】**

ファラデー定数 149  
 ファンデルワールス力 18,23  
 フィック 31  
 フェルミレベル 67  
 フォームファクタ 54  
 複合汚染 42  
 腐食生成物 193  
 沸騰 108  
 物理吸着 23,25  
 プラントルの応用関数 53  
 ブリッジ領域 243  
 フリッティング 115  
 プロウ 204  
 フレッシング 209

**【へ】**

ベイルビー 21  
 偏光板 150

**【ほ】**

放物線則 33  
 飽和吸着膜 237

保科 62  
 ポテンシャルバリア 114  
 ポリッシ 22  
 ホルム 1,48,59  
 ホルムアルデヒド 230  
 ホルム会議 14

**【ま】**

マイクロアーク放電領域 243  
 マイクロモータ 238  
 マイクロリレー 238  
 マイスナー効果 49,177  
 マクスウェル 7,11  
 摩擦係数 145,216,220,222  
 摩擦力 214  
 マティーセン 179,184  
 摩擦 134  
 摩擦痕跡 201  
 摩擦指数 201  
 摩擦体積 137  
 摩擦粉末 209  
 摩擦率 142

**【み】**

見掛けの接触面 218

**【む】**

無酸素銅 194

**【め】**

めっき 55

**【も】**

モートン・アントレー 193

**【よ】**

溶融 108  
 溶融温度 91,108  
 溶融電圧 91

**【ら】**

ラグナー・ホルム 8  
 ラプラスの方程式 50

**【り】**

リードスイッチ 112  
 リフロー 193,209  
 硫安 42  
 硫化銀 105  
 硫化水素 39  
 硫化皮膜の成長 156  
 硫化物 26  
 臨界温度 186  
 臨界磁界 186

**【る】**

ルテニウム 112  
 ルブリカント 192,197

**【れ】**

レナード・ジョーンズ 17,23

**【ろ】**

ローレンツ定数 94,117

**【わ】**

ワルター・ショットキー 78

**【A】**

A fritting 125  
 Ag<sub>2</sub>S 105  
 Ag<sub>2</sub>S 皮膜 102,132,154  
 Au 192  
 Au めっき接触 223

**【C】**

Cu<sub>2</sub>O 158,168  
 Cu<sub>2</sub>S 皮膜 81  
 CuO 158  
 Cu 試料面の接触抵抗と摩擦係数 221

**【D】**

D<sub>4</sub> 分子 231

**【F】**

fretting 209

**【H】**

H<sub>2</sub>O 170

H <sub>2</sub> O 分子	165	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	42	STM	171
H <sub>2</sub> S	39	Ni <sub>3</sub> Sn <sub>4</sub>	210	<b>【X】</b>	
	<b>【I】</b>		<b>【P】</b>	XPS	150
I <sup>-1</sup> 特性	106	pin hole	192	<b>【Z】</b>	
	<b>【L】</b>	porous	192		
Laplace の方程式	50	prow	142	Zn の摩擦係数と接触抵抗の 関係	222
lone electron	237		<b>【S】</b>	<b>【数字】</b>	
	<b>【M】</b>	SiO <sub>2</sub>	229	1.6 W ライン	244
MEMS	113	SiO <sub>2</sub> 皮膜の成長と加熱時間	233	<b>【ギリシャ】</b>	
	<b>【N】</b>	Sn-Ni 合金層	199	ψ-Δ 特性	159
Nb	184	SnO <sub>2</sub> 皮膜	209		
		Sn めっき	205,207		

— 著者略歴 —

1964年 工学院大学電子工学科卒業  
1979年 東京大学工学博士  
1983年 兵庫教育大学大学院助教授  
1987年 兵庫教育大学大学院教授  
2007年 兵庫教育大学名誉教授  
2007年 三重大学大学院客員教授  
2007年 住友電装株式会社オートネットワーク研究所顧問  
2011年 エルコンテックコンサルティング代表  
現在に至る

電気接触現象とその表面・界面 — 接触機構デバイスの基礎と応用 —

Electrical Contact Phenomena and their Surface and Interface

— Fundamentals and Applications of Electromechanical Contact Devices —

© Terutaka Tamai 2019

2019年5月23日 初版第1刷発行



検印省略

著者 玉井輝雄  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来真也  
印刷所 萩原印刷株式会社  
製本所 牧製本印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00920-0 C3054 Printed in Japan

(大井)



**JCOPY** <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。