

博士学位論文

電気鉄道における集電材料の  
通電摩耗機構に関する研究

平成 26 年度

(平成 27 年 1 月 13 日提出)

東北大学大学院工学研究科

ナノメカニクス専攻

山下 主税



# Wear Mechanism of Current Collecting Materials under Electric Current Flowing Condition in Electric Railway

Chikara YAMASHITA

One of the most important technologies in electric railway is to supply electric power for a vehicle stably, and the technology is called "current collection system". At present, the current collecting system that is able to accommodate a high-speed and a high-density railway such as Japanese Shinkansen adopts only a sliding contact method using an overhead contact line and a pantograph. One of the most important maintenance technologies for current collection system is a wear management of current collecting materials such as a contact wire and a contact strip. Therefore, in order to improve the reliability of equipments and to reduce maintenance cost, it is essential to reduce the wear of current collecting materials. In addition, there is a tendency to increase the collected current because of enhancement of the power of traction motors with increasing the vehicle speed, and a tendency to decrease number of pantograph for decreasing aerodynamic noise. Since such tendencies will make the use condition of current collecting materials more severe, the wear reduction measure based on wear mechanism is eagerly required.

Up to now, numerous researches and developments on wear of current collecting materials have been reported, and most of them have focused on the relationship between a wear and an arc discharge caused by contact loss. As the background of those researches, there is the strong recognition that wear modes under electric current flowing condition are classified into two types called "the mechanical wear mode" and "the electric wear mode", and the electric wear mode which increases the wear of current collecting materials significantly is caused by an arc discharge. Therefore, the conventional wear reduction measure has been mainly to suppress the contact loss by improving the dynamic interaction between an overhead contact line and a pantograph. In the field, however, it is not possible to prevent the contact loss completely even in the present vehicle speed, and then it is fully conceivable that the contact loss should increase if the vehicle speed increases much more in future.

On the other hand, according to the previous investigations on wear of contact wire in the field and several wear test results, the relationship between wear properties of contact wire and arc discharge is not a simple proportional one. This relationship indicates the existence of another electric factor besides the arc discharge which increases wear of contact wire when the contact loss occurs, and shows the possibility of another measure for reducing the electric wear of contact wire in addition to suppressing the arc discharge due to contact loss. However, no study on clarification of the generation mechanism and dominant parameters of the electric wear mode of contact wire has been reported yet.

In this study, the author focused on the wear mode of current collecting materials under electric current flowing condition, and clarified the wear mechanism and dominant parameters of wear mode by investigation of the transition phenomena between the wear modes. Also, the author verified the possibility that the wear mode which maximizes the wear rate of contact wire could be suppressed by controlling the dominant parameters of wear mode.

Outlines of the respective chapters of which constitute this study are described as follows.

Chapter 1 is the introduction. The author describes the historical background of the current collection system in the electric railway and the outline of an overhead contact line and a pantograph. In addition, the author summarizes the previous developments of current collecting materials and researches on the wear of those materials. Lastly, the author points out the issues of the previous researches and show the positioning of this study.

In Chapter 2, the author investigates the components of wear test apparatus used to classify and observe the wear modes under electric current flowing condition, and describes a newly developed linear wear test apparatus. In addition, the author describes the performance of the developed linear wear test apparatus.

In Chapter 3, the author carries out the wear tests with material combination of a hard-drawn copper contact wire and an iron-based sintered alloy contact strip by changing the electric current with four steps to clarify the influence of the electric current on wear properties. Based on the wear properties obtained from wear test results and microscopic observations, the author classifies the wear modes into three types and considers the transition condition among those wear modes.

In Chapter 4, the author carries out the wear tests with material combination of a hard-drawn copper contact wire and an iron- based sintered alloy contact strip by changing the apparent contact area of contact strip with four steps to clarify the influence of the apparent contact area on wear properties. Based on wear properties obtained from wear test results and microscopic observations, the author clarifies the phenomena that the wear mode which maximizes the wear rate of contact wire will be changed depending on the apparent contact area.

In Chapter 5, the author newly proposes the electric contact model considering the film resistance such as wear particle and oxide film to explain the wear phenomena observed in Chapter 3 and 4 theoretically, and describes the analysis method for the electric potential distribution and the temperature distribution near the contact point. From the results of analysis, the author finds several laws governing the relationship between the electric potential and temperature, and newly proposes the wear mode map which shows the transition condition between wear modes. In addition, the author identifies the dominant parameters of wear mode, and clarifies the wear mechanism of current collecting materials under electric current flowing condition.

In Chapter 6, the author classifies the material combination into eight regions by proposing correlation diagram between the material combinations and generating condition of wear modes based on the wear mode map proposed in Chapter 5. In addition, the author selects three sets of combination of current collecting materials, and predicts the wear modes and each transition condition which might be generated, and carries out wear test with those material combinations. Based on wear properties obtained from wear test results and microscopic observations, the author compares the predicted wear mode and transition condition with the measured ones and the author verifies the validity of the wear mode map. Finally, the author suggests the possibility of deductive wear mode control method by the material combination.

In Chapter 7, the author describes the main conclusions obtained in each Chapter.



# 電気鉄道における集電材料の通電摩耗機構に関する研究

## 目次

第1章 緒論.....	1
1.1 本研究の背景.....	1
1.1.1 電気鉄道と電力供給技術の歴史.....	1
1.1.2 架線—パンタグラフの概要.....	2
1.1.3 架線—パンタグラフ系の課題.....	3
1.2 集電材料の開発経緯.....	8
1.2.1 トロリ線に求められる特性.....	8
1.2.2 トロリ線材料の開発経緯.....	9
1.2.3 すり板に求められる特性.....	10
1.2.4 すり板材料の開発経緯.....	11
1.3 集電材料の摩耗に関する従来の研究.....	16
1.3.1 現地調査および対策.....	16
1.3.2 定置摩耗試験.....	17
1.3.3 摩耗の予測.....	18
1.4 本研究の目的と構成.....	26
参考文献.....	29
第2章 直動型摩耗試験機の開発.....	33
2.1 緒言.....	33
2.2 実験装置に対する認識.....	33
2.3 通電摩耗機構を解明するための試験方法.....	34
2.4 直動型摩耗試験機の開発.....	36
2.4.1 摩耗試験機の概要.....	36
2.4.2 試験片形状と摩耗率測定方法.....	36
2.5 通電しゅう動試験結果.....	43
2.5.1 接触力測定結果.....	43
2.5.2 接触電圧測定結果.....	43
2.6 結言.....	51
参考文献.....	52

第3章 集電材料の摩耗特性に及ぼす通電電流の影響 .....	53
3.1 緒言 .....	53
3.2 試験方法 .....	53
3.2.1 試験装置 .....	53
3.2.2 試験片 .....	53
3.2.3 試験条件 .....	53
3.2.4 測定項目および測定方法 .....	55
3.2.5 試験手順 .....	55
3.3 試験結果 .....	57
3.3.1 摩耗特性に及ぼす電流と接触力の影響 .....	57
3.3.2 摩耗特性に及ぼすアークの影響 .....	59
3.4 考察 .....	70
3.4.1 接点最高温度と摩耗形態遷移条件の関係 .....	70
3.4.2 ブリッジ電気量による摩耗の整理 .....	71
3.5 結言 .....	77
参考文献 .....	78
第4章 集電材料の摩耗特性に及ぼす見かけの接触面積の影響 .....	79
4.1 緒言 .....	79
4.2 試験方法 .....	79
4.2.1 試験装置 .....	79
4.2.2 試験片 .....	79
4.2.3 試験条件 .....	79
4.2.4 測定項目および測定方法 .....	80
4.2.5 試験手順 .....	81
4.3 試験結果および考察 .....	83
4.3.1 接触電圧に及ぼす見かけの接触面積と接触力の影響 .....	83
4.3.2 摩耗特性に及ぼす見かけの接触面積と接触力の影響 .....	83
4.3.3 摩耗特性に及ぼすアークの影響 .....	85
4.3.4 摩耗特性に及ぼすブリッジの影響 .....	86
4.3.5 従来の研究報告に対する考察 .....	86
4.4 結言 .....	101
参考文献 .....	102

第5章 電位分布および温度分布解析による集電材料の通電摩耗機構の解明 .....	103
5.1 緒言 .....	103
5.2 解析方法 .....	104
5.2.1 電位分布解析 .....	104
5.2.2 温度分布解析 .....	105
5.3 解析結果 .....	113
5.3.1 通電電流の影響 .....	113
5.3.2 見かけの接触面積の影響 .....	119
5.3.3 バルク温度の影響 .....	125
5.3.4 被膜抵抗の影響 .....	129
5.4 考察 .....	141
5.4.1 電位—温度放物線の定式化および摩耗形態マップの作成 .....	141
5.4.2 集電材料の通電摩耗機構に関する考察 .....	143
5.5 結言 .....	153
参考文献 .....	154
第6章 集電材料組合せによる摩耗形態制御 .....	155
6.1 緒言 .....	155
6.2 摩耗試験用材料 .....	155
6.2.1 材料組合せと摩耗形態発生条件の関係 .....	155
6.2.2 摩耗試験用材料の組合せ選定 .....	158
6.3 試験方法 .....	164
6.3.1 試験装置 .....	164
6.3.2 試験条件 .....	164
6.3.3 測定項目および測定方法 .....	165
6.3.4 試験手順 .....	165
6.4 試験結果および考察 .....	166
6.4.1 硬銅トロリ線とニッケルすり板の組合せの場合 .....	166
6.4.2 硬銅トロリ線とアルミニウムすり板の組合せの場合 .....	173
6.4.3 ニッケルトロリ線と鉄系焼結合金すり板の組合せの場合 .....	181
6.5 結言 .....	188
参考文献 .....	189
第7章 結論 .....	191



# 第 1 章

## 緒論

### 1.1 本研究の背景

#### 1.1.1 電気鉄道と電力供給技術の歴史

世界で最初の鉄道営業は、1825年にイギリスの G. Stephenson がストックトン～ダーリントンで開業した蒸気機関車ロコモーション号による蒸気鉄道であり、それまでの馬車に代わって高速・大量輸送の手段となった。ただし、蒸気機関車から排出される煤煙による問題が深刻であり、煤煙を排出しない車両が望まれていた。

煤煙を排出しない車両として、電気を用いた電動車の開発が行われた。1847年にはアメリカの M. G. Farmer が電池を用いた小型電車の運転に成功した<sup>(1,2)</sup>。しかし、当時の蓄電池の重量と容積は大きく、列車を牽引するほどの電力を供給する蓄電池の搭載は困難であった。

ドイツの E. Q. Siemens は 1861年に発電機を発明し、1866年には直流電動機を発明し、1879年にはベルリン工業博覧会に小型電気機関車を展示した。この電気機関車は電池を用いず、左右レール間の中央に第3軌条を設け、レールを用いて電力を供給する方式であった<sup>(1,2)</sup>。以降、地上設備から車両に電力を供給する技術を「集電」と呼称する。一方、アメリカの T. A. Edison は 1880年に左右のレールから集電する電気機関車を製作している<sup>(1,3)</sup>。

ドイツの Siemens 社によって 1881年にベルリンのアンハルトグロス～リヒターフェルデ間で電気機関車による旅客輸送が開業された。これが電気鉄道のはじまりである。この電気機関車の運転用電力は左右レールから直流 100V を集電する方式であったが、市街地において人畜の感電が懸念され、数年後には 2 条の電線を電柱で上部支持する「架空方式」となり、電圧は 600V に変更された。以降、架空方式の電車線を「架線」と呼ぶ。車両の集電装置は、架線の上に滑車をつけた集電器を載せて引っ張る方式であり、集電器が架線から落下する事故があった<sup>(3)</sup>。

アメリカの F. J. Sprague によって 1888年リッチモンドに市街電車が開業した。この車両には、図 1.1.1 のように架線を下から押し上げるようにトロリホイールを接触させるトロリポール集電方式が採用された<sup>(1,3)</sup>。1895年には、日本の京都電気鉄道でもトロリポール集電方式の電気鉄道が開業した。トロリポール集電方式は、架線にトロリホイールを接触させて転がす「転がり集電方式」であるため、列車の走行速度が増大すると追従性能が低下し、架線からホイールが外れやすくなるため、高速走行に適さなかった<sup>(4)</sup>。なお、転がり接触では大電流集電ができないため、トロリホイールからしゅう動式の物に変更され、現在ではトロリバスなどに使用されている<sup>(5)</sup>。

1902年には、日本の江ノ島電鉄や伊勢電気鉄道において、集電装置としてビューゲルを搭載した電車が走行した。ビューゲルは図 1.1.2 のように架線と接触する部分の幅が大きく、トロリポールで発生していた架線外れの問題は解消された。ただし、ビューゲルの構造は後述するパンタグラフを簡略化したもので、架線の高さ変化に対してパンタグラフ接触力の変化が大きく、架線に

に対するビューゲルの追従性能は十分でなかった。そのため高速走行に適さず、現在は路面電車など低速走行の車両で使用されている<sup>(4,5)</sup>。

1914年、日本の東京～横浜間で京浜線が開業した際、集電装置としてパンタグラフが採用された。採用当時のパンタグラフはローラーで架線と接触する構造であったが、パンタグラフが架線から外れる事故が発生したため、図 1.1.3 のようなすり板でしゅう動する「しゅう動集電方式」となった<sup>(4)</sup>。

近年では、「しゅう動集電方式」以外の電力供給技術として、蓄電池方式やハイブリッド方式の電車が実用化されている<sup>(6)</sup>。またアーク集電方式<sup>(7)</sup>、非接触集電方式<sup>(8)</sup>などの電力供給技術も研究・開発されている。しかしながら、高密度な列車運行や新幹線などの高速走行に対応した大電力を車両に供給する技術は、「しゅう動集電方式」以外にないのが現状である。

## 1.1.2 架線—パンタグラフの概要

### (1) 架線の概要

現在使用されている一般的な架空電車線（架線）の構造を図 1.1.4 に示す。電柱に架設した可動ブラケットにちょう架線を張り、ハンガでトロリ線を吊る方式であり、カテナリ（懸垂曲線）式電車線と呼ばれる。

1組の架線の全長は1500mが標準であり、架線を支持する電柱は約50m間隔で設置され、トロリ線を吊るハンガは5mおきに設置されている。ハンガの長さは、レール上面からトロリ線までの高さを極力一定に保つよう調節されている。トロリ線やちょう架線には張力が負荷されており、気温変動による線条伸縮に伴う張力変動を抑制するため、架線の両端には張力調整装置が設備されている。

トロリ線はレール面と水平にジグザグ偏位が設けられ、パンタグラフすり板の摩耗が局所的に集中することを避けている。

トロリ線の形状を図 1.1.5 に示す<sup>(9)</sup>。トロリ線の外形は円形であり、中央からやや上部にハンガを取り付けるための溝が2本ある。溝から上の円弧を小孤面、下の円弧を大孤面と呼び、パンタグラフのすり板は大孤面と接触する。トロリ線はパンタグラフに供給する電流が直接流れる電線であるため、高い導電率が求められ、その材質には銅もしくは銅合金が用いられることが多い。

### (2) パンタグラフの概要

図 1.1.6 に一般的なパンタグラフの構造を示す。パンタグラフを構成する部材は舟体、舟支え、枠組み、台枠の4つに分けられる。

舟体にはトロリ線と接触してしゅう動集電するすり板が取り付けられている。図 1.1.7 にすり板の代表的な形状を示す。日本におけるすり板材質として、新幹線では鉄系焼結合金、在来線では銅系焼結合金とカーボン系材料が使用されている。このすり板とトロリ線を合わせて「集電材料」と呼称する。

舟体をトロリ線に押し付ける部材として、枠組みがあり、その構成は5節リンク機構に釣り合い棒を加えたものである。また、舟体をトロリ線の高さ変動に追従させるための緩衝用部材として、舟支えがある。台枠には舟体を一定の力で架線に押し付けるための押し上げ装置があり、日本では車両が静止しているときの接触力を標準的に54Nとしている。

### 1.1.3 架線—パンタグラフ系の課題

2009 年末時点で、世界で電気鉄道を営業している国は 68 カ国であり、総営業距離約 106 万 km のうち電化されている営業距離は約 30 万 km である<sup>(10)</sup>。走行速度 200km/h を超える高速鉄道は大部分が電化されており、日本の新幹線においては電化率 100%となっている<sup>(11)</sup>。

電化区間の大部分は「しゅう動集電方式」であり、その課題は 100 年前と変わってはいない。すなわち、架線とパンタグラフが接触を維持し、電力を途切れなく車両に供給することである。架線とパンタグラフが物理的に離れる現象（以降「離線」と呼称する）は、架線の高さ変動にパンタグラフの追従特性が追いつかない時に発生するため、走行速度が速くなるほど離線は顕著になる傾向がある。

パンタグラフと接触する架線をばねとして考え、架線—パンタグラフ系の離線を低減するため、以下の対策が提案されている<sup>(12)</sup>。

- ① 電柱位置と電柱中間のばね定数の差を小さくする。具体的には、ちょう架線とトロリ線の間  
に補助ちょう架線を挿入したコンパウンド架線を構築した。
- ② 架線のばね定数を増加させる。具体的にはトロリ線の張力を増加させ、押上げ方向のばね定  
数を増加させた。
- ③ パンタグラフを軽量化する。

また、パンタグラフと接触するトロリ線を弦として考え、高速走行時のトロリ線とパンタグラフの相互作用を軽減するため、以下の対策が提案されている<sup>(12, 13)</sup>。

- ④ トロリ線の張力を増加させ、パンタグラフによる曲げ変形の波がトロリ線を伝わる速度「波  
動伝播速度」を向上させ、トロリ線波動とパンタグラフの相互作用を軽減する。波動伝播速  
度  $C$  [m/s]は次式で求まる<sup>(12)</sup>。

$$C = \sqrt{T/\rho} \quad (1.1)$$

ここで、 $T$ は張力[N]、 $\rho$ はトロリ線の線密度[kg/m]である。離線を抑えるためには、列車走行速度を波動伝播速度の 70%以下とする必要がある<sup>(12)</sup>。

- ⑤ 多数パンタグラフによる共振を防ぐため、パンタグラフ数を削減する。

このような対策を講じた結果、大規模な離線はほとんど解消された。

もうひとつの大きな課題として、架線のトロリ線やパンタグラフのすり板など集電材料の摩耗がある。集電材料であるトロリ線やすり板の寿命は摩耗によって決定されるため、設備の信頼性向上やメンテナンスにかかるコストを削減するためには、摩耗の低減が必須となる。しかしながら、車両の高速化に伴う主電動機の増強による集電電流の増加や、パンタグラフ数削減による空力騒音低減の傾向は強まっており、トロリ線やすり板などの集電材料の使用条件はより厳しくなることは明らかである。

集電材料の耐摩耗性については後述するように種々の研究が行われているが、未だ通電摩耗機構の解明に至った報告はなく、集電材料の開発は試行錯誤で行われているのが現状である。

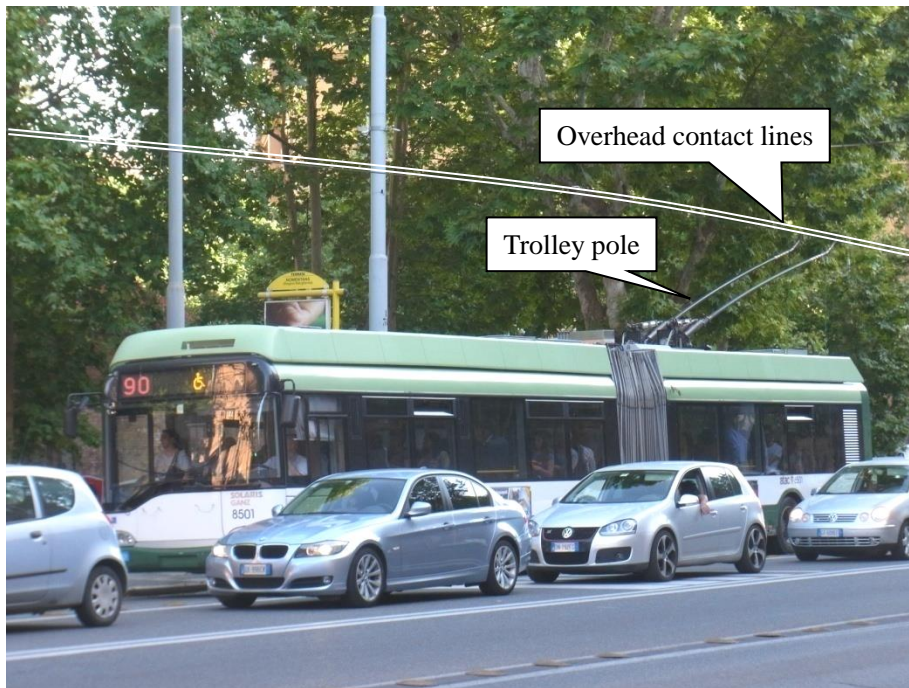


Figure 1.1.1 Overhead contact line – trolley pole system (Trolley bus)

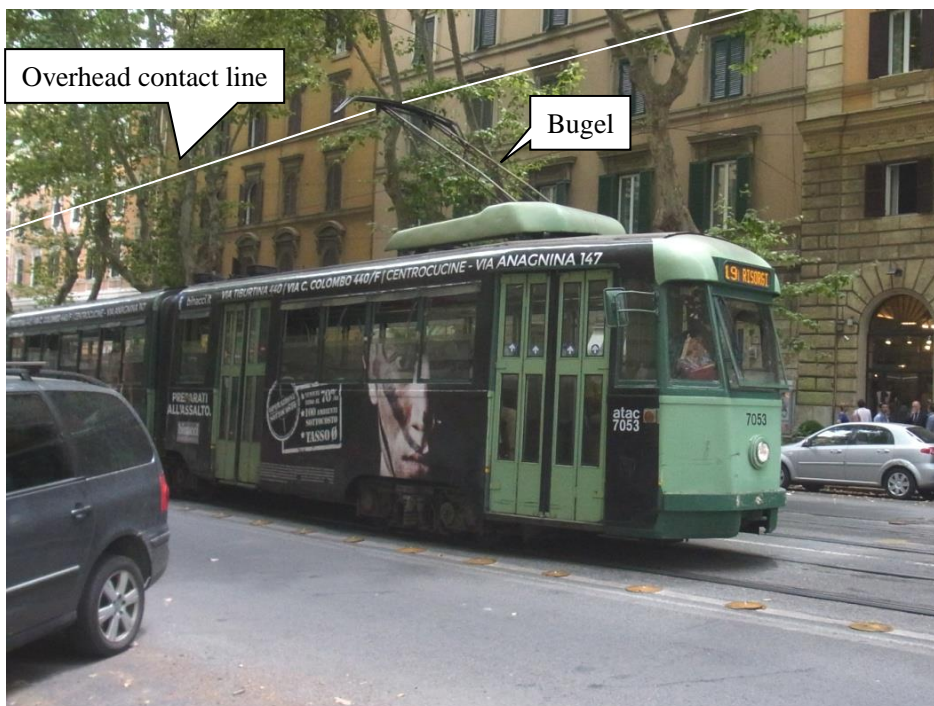


Figure 1.1.2 Overhead contact line – bugel system (Tram)



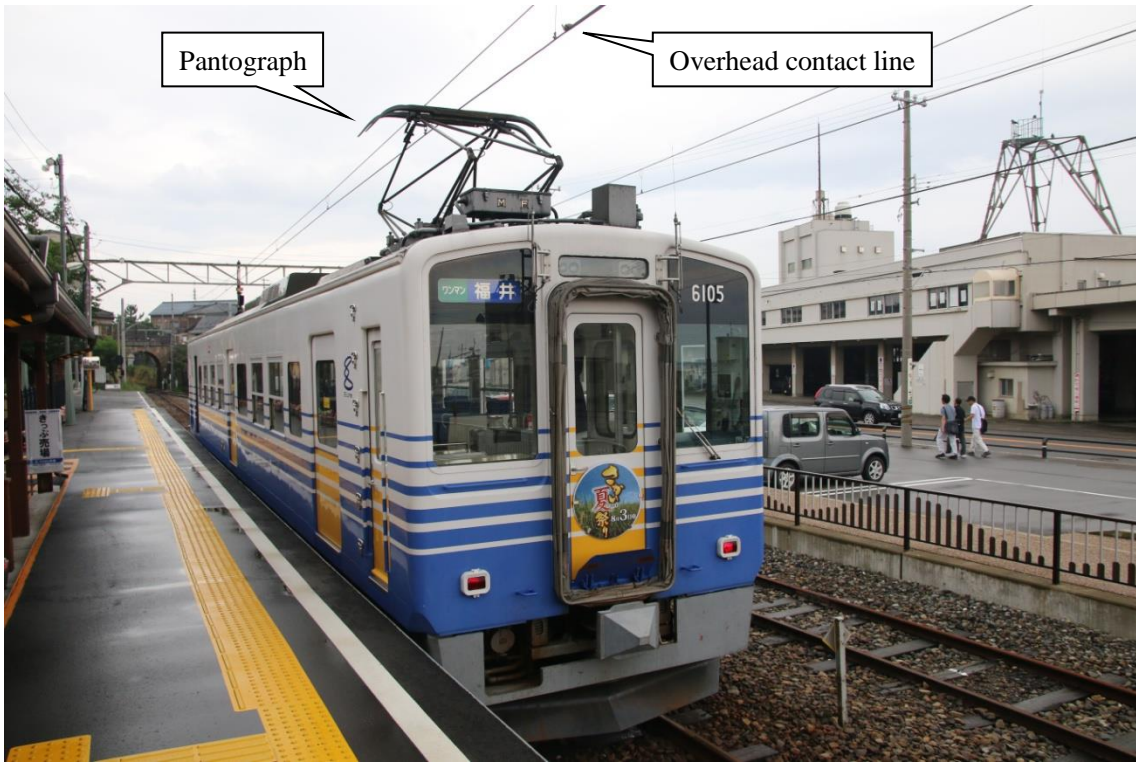


Figure 1.1.3 Overhead contact line – pantograph system (Electric railcar)

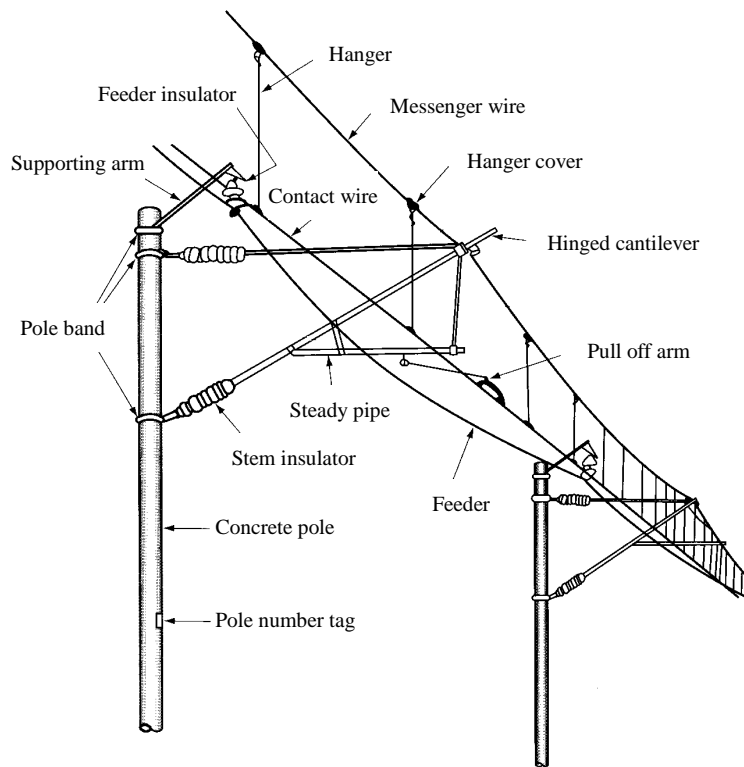
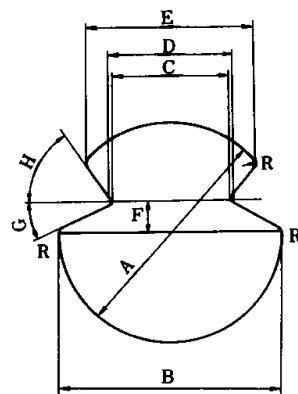


Figure 1.1.4 General structure of overhead contact line



Nominal cross-sectional area(mm <sup>2</sup> )	A	B	C	D	E	F	R	G	H
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	deg	deg
85	11.00	11.00	5.70	6.12	8.50	1.5	0.38	27	51
110	12.34	12.34	6.85	7.27	9.75	1.7	0.38	27	51
170	15.49	15.49	7.32	7.74	11.43	2.4	0.38	27	51

Figure 1.1.5 General cross-sectional shape of Japanese contact wire<sup>(9)</sup>

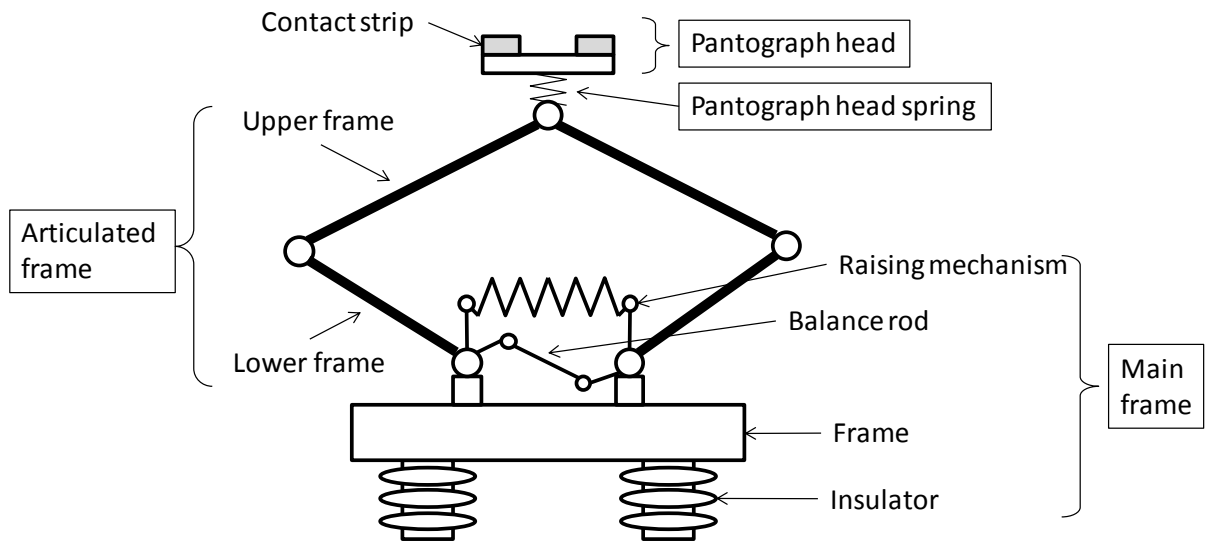


Figure 1.1.6 Mechanical diagram of conventional pantograph

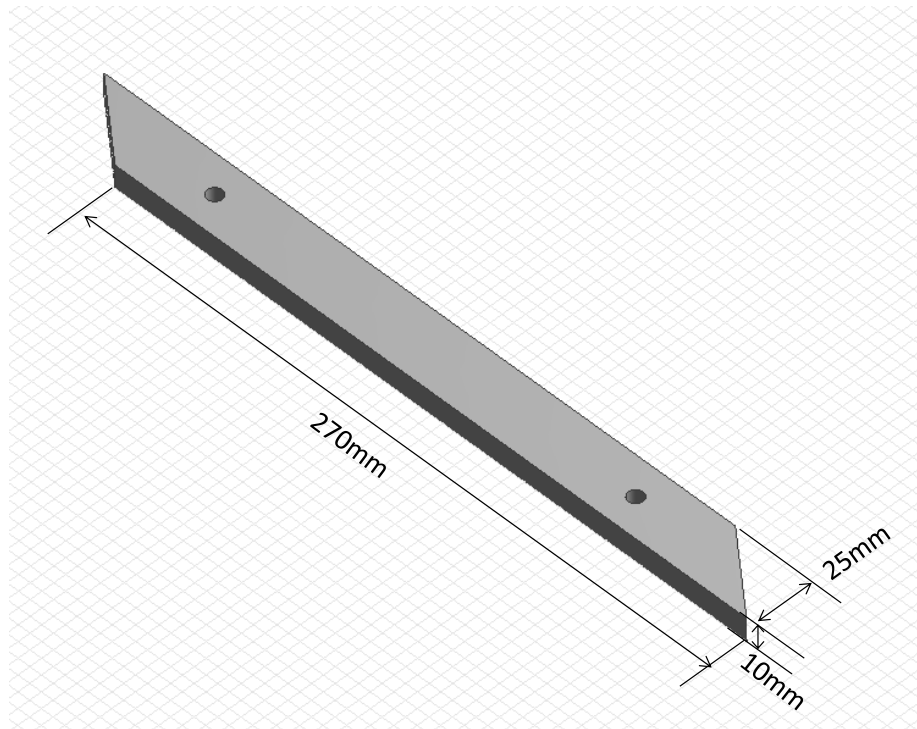


Figure 1.1.7 General shape of metal contact strip

## 1.2 集電材料の開発経緯

### 1.2.1 トロリ線に求められる特性

トロリ線に求められる特性は以下に整理される<sup>(14, 15)</sup>.

#### (1) 導電性

トロリ線はパンタグラフに供給する電流が直接流れる電線であるため、高い導電率が求められる。また、ジュール熱による温度上昇を抑制するためにも、導電率を高くする必要がある。

#### (2) 引張強度

トロリ線は張力を負荷して架設されており、1.1.3 節で述べたように離線を低減するためにはより大きな張力が必要となる。なお、式(1.1)より波動伝播速度はトロリ線の重量に反比例するため、トロリ線断面積を極端に大きくすることはできない。列車の速度向上には波動伝播速度の向上が必須であるため、トロリ線には小断面積で高張力に耐えられる引張強度を有する材質が求められる。

#### (3) 耐摩耗性

トロリ線はすり板との接触しゅう動が前提であるため、摩耗は避けられない。トロリ線には張力が負荷されており、摩耗によるトロリ線断面積の減少に伴い引張応力が増加するため、引張応力が引張強度に達しないよう、安全率を含んだ摩耗限度が設定されている。トロリ線の摩耗限度に達すると、張替えなど多大なメンテナンスコストが発生するため、摩耗の低減が求められる。

#### (4) 耐熱性

トロリ線はそれ自体の電気抵抗や、すり板との接触抵抗に電流が流れることで発熱し、温度上昇する。この温度上昇によって引張強度や耐摩耗性が損なわれないよう、また容易に溶断しないようトロリ線には耐熱性が求められる。

#### (5) 耐食性

トロリ線は様々な環境下に長期間架設されるものである。腐食による減肉や引張強度の低下は設備保安上避けるべきであり、トロリ線には耐食性が求められる。

#### (6) 耐疲労性

パンタグラフの通過によってトロリ線には曲げ応力が発生する。この曲げ応力によってトロリ線が疲労破断する可能性があるため、トロリ線には曲げ応力の許容目安値が設定されている。しかし、列車速度が増大するほど曲げ応力も増大する傾向があり、より耐疲労性を有するトロリ線が求められる。

#### (7) 低価格

トロリ線の価格はそのままメンテナンスコストに反映されるため、より安価なトロリ線が求められる。

## 1.2.2 トロリ線材料の開発経緯

### (1) 国内におけるトロリ線材料

これまでに国内で研究・開発された主なトロリ線の材料について、各種特性を表 1.2.1 に示す。これらトロリ線の開発経緯を以下に述べる。

国内で最初に使用されたものは「硬銅トロリ線」である。みぞ付硬銅トロリ線の規格は 1890 年に英国標準規格が制定されており、日本では 1927 年から図 1.1.5 に示したものと同じ寸法のトロリ線が使用されている<sup>(16)</sup>。硬銅トロリ線の断面形状を図 1.2.1(a)に示す。硬銅はタフピッチ銅または無酸素銅を冷間引き抜き加工によって加工硬化させ、引張強度と硬度を向上させた材料である。硬銅トロリ線は導電率が高いものの、引張強度が十分でなく高張力に耐えられず、高速走行には適さない。

トロリ線の摩耗を低減するため、カドミウム銅合金を用いたトロリ線が 1924 年に開発されている<sup>(16)</sup>。「カドミウム銅トロリ線」は導電率が良好であるが、環境問題から現在は生産されていない。

日本の国鉄において、暖房車が導入され集電電流が増大したことを背景に、耐熱性を向上させた「銀入り銅合金トロリ線」が開発された<sup>(16)</sup>。開発されたトロリ線は銀を 0.1~0.2% 添加したものであり、トンネル内火災時における引張特性の劣化抑制を目的として使用された。ただし、耐摩耗性は硬銅トロリ線と同程度である。

1975 年頃に、トロリ線の耐摩耗性の向上を主目的としてすずを 0.3% 添加した「すず入り銅トロリ線」が開発された<sup>(16-19)</sup>。このトロリ線は硬銅トロリ線よりも導電率が劣るものの、耐摩耗性が向上したことから、現在でも標準的に使用されている。

列車の速度向上のためには、波動伝播速度の向上が必要である。式(1.1)より波動伝播速度は張力の平方根に比例し、トロリ線の線密度に反比例するため、線密度が小さく引張強度が大きいトロリ線の開発が必要となった。そこで、1977 年より軽金属であるアルミニウムを用いたトロリ線開発が行われた<sup>(20)</sup>。ただしアルミニウムは引張強度が小さいため、鋼心と合わせた複合材とし、引張強度は鋼心に、導電性はアルミニウムに負担させる「鋼心アルミニウムトロリ線」を開発した。鋼心アルミニウムの断面形状を図 1.2.1(b)に示す。ある程度摩耗し鋼心が露出すると、耐摩耗性は比較的硬い鋼心が負担し、現地試験でもトロリ線の摩耗低減効果を確認している<sup>(14)</sup>。鋼心アルミニウムトロリ線は波動伝播速度を大きくできるため、高速走行試験では良好な結果を残したが、アルミニウムの耐腐食性が銅と比較して劣っていることや、すり板へのアルミニウム移着によってトロリ線とすり板との凝着が問題となった。また、異種金属腐食を防ぐため、トロリ線を把持する金具を銅系からアルミニウム系に変更しなければならず、金具類の初期投資が必要となった。以上の課題により本格採用には至っていない<sup>(21)</sup>。

鋼心アルミニウムの耐腐食性などの欠点を克服するため、アルミニウムの代わりに銅で鋼心を被覆する「銅覆鋼トロリ線」が開発された<sup>(22)</sup>。図 1.2.1(c)に示すように、銅覆鋼トロリ線の外形は硬銅トロリ線と同じである。これによりトロリ線支持金具は従来のものを使用でき、トロリ線以外の初期投資は必要なくなった。現在では高速鉄道用のトロリ線として新幹線で使用されている。ただし、銅覆鋼トロリ線は複合材料であるため、リサイクル性に優れないという課題がある。

導電性と引張強度、リサイクル性を兼ね備えたトロリ線を開発するため、1989 年から銅合金の調査が開始された<sup>(14)</sup>。その結果、クロム 0.3%とジルコニウム 0.1%を添加した析出強化銅合金を用いたトロリ線を開発した<sup>(23)</sup>。このトロリ線は析出強化合金(Precipitation Hardened Copper Alloy)

を略して「PHC トロリ線」と呼称される。断面積  $110\text{mm}^2$  の PHC トロリ線を張力  $19.8\text{kN}$  で架設すると式(1.1)より波動伝播速度は  $508\text{km/h}$  となり、 $350\text{km/h}$  の高速走行にも適用できる。性能面では良好なトロリ線であるが、製造工程に析出硬化するための作業が加わるため、小ロット製造が困難であることや価格が高いことが課題である。

近年では、すず入り銅トロリ線のすず添加量を  $0.35\%$  に増加させ、引張強度を向上させたトロリ線<sup>(14)</sup>や、アルミナ分散強化銅を用いて離線アーク発生時の損耗を低減させたトロリ線<sup>(24)</sup>などが開発されている。

## (2) 海外におけるトロリ線材料

ヨーロッパで使用されている主なトロリ線の材料については EN 50149 規格<sup>(25)</sup>があり、各種特性を表 1.2.2 に示す。ヨーロッパでも日本と同様、硬銅トロリ線や銀入りトロリ線、すず入り銅トロリ線を使用している。日本で使用していないが海外で使用しているトロリ線としては、マグネシウム入り銅トロリ線がある。マグネシウムを  $0.2\sim 0.5\%$  添加した銅合金であり、引張強度は高いものの導電性が低いため、集電電流が大きな線区には適していない。

中国でも高速走行用のトロリ線を開発しており、日本の PHC トロリ線と同様、クロムおよびジルコニウムの銅合金を採用している<sup>(26)</sup>。

### 1.2.3 すり板に求められる特性

すり板に求められる特性は JRIS E 6301<sup>(27)</sup> によって大まかに定められている。すり板材を開発する上で考慮すべき項目を以下に述べる<sup>(28, 29)</sup>。

#### (1) 機械的強度

列車走行時、トロリ線の高さ変動が激しい箇所や重い金具が設置されている箇所では、パンタグラフの追従が追いつかず、すり板には衝撃的な接触力が負荷される。この衝撃によってすり板が破損しないよう機械的強度が求められる。JRIS E 6301 では金属系すり板は引張強度、炭素系すり板は曲げ強度で規定されている。

#### (2) 導電性

すり板は電流を授受する電気材料であり、トロリ線と同様高い導電率が求められる。列車の停車時にパンタグラフとトロリ線は長時間同じ箇所で集電するため、接触抵抗で発生するジュール熱による温度上昇を抑制する必要がある。

#### (3) 耐熱性

トロリ線と同様、すり板自体の電気抵抗や、トロリ線との接触抵抗に電流が流れることで発熱し、温度上昇する。この温度上昇によって引張強度や耐摩耗性が損なわれないよう耐熱性が求められる。

#### (4) 耐アーク性

離線によるアーク発生時にすり板は著しく損耗する。特に冬季においてトロリ線表面に霜が発生し、連続的にアークが発生する場合があります。アークによるすり板異常摩耗を抑制する必要があります。

#### (5) 耐摩耗性

すり板はトロリ線との接触しゅう動が前提であるため、摩耗は避けられない。すり板の寿命

は摩耗によって決定されるため、メンテナンスコスト削減のためには耐摩耗性の向上が求められる。

(6) トロリ線を摩耗させない

すり板には、接触する相手材であるトロリ線を摩耗させないことが求められる。これはすり板の交換作業と比較して、トロリ線の張替えには多大な経費や時間が必要となるためである。

(7) 低価格

すり板は頻繁に交換する消耗品であるため、すり板の価格はそのままメンテナンスコストに反映される。そのため、より安価なすり板が求められる。

#### 1.2.4 すり板材料の開発経緯

国内外におけるすり板材料の変遷を図 1.2.2 に示す。これらすり板の開発経緯を以下に述べる。

(1) 国内におけるすり板材料<sup>(29-32)</sup>

パンタグラフにすり板を導入した 1920 年代、すり板材料は純銅であった。しかしながら、トロリ線とすり板が共に銅であるため著しい凝着が発生し、摩耗も激しかった。

1940 年代から銅資源節約のため、純銅に代わり「純カーボンすり板」が使用された。しかしながら、当時のカーボン材料は脆く、すり板破損が問題になった。またカーボン材料は電気抵抗が大きいので、通電時の温度上昇が激しく、トロリ線の溶断が絶えなかった。一方で、カーボン材料は金属よりも軽くパンタグラフの軽量化が見込め、かつ摩擦係数が小さくトロリ線の摩耗を低減できる利点を持つため、現在ではトロリ線に溶断対策を施して純カーボンすり板を使用し続けている区間もある。

純カーボンすり板で発生したトロリ線溶断問題を解決するため、1949 年から純カーボンすり板より導電性および機械的強度が高く、純銅すり板より潤滑性のある「銅系焼結合金すり板」の開発がすすめられた。しかし導入当初は離線アークによるすり板の著大摩耗が課題であった。その後、鉄の添加量の増加、黒鉛の添加量の減少、素地の焼結密度の向上などで耐アーク性の向上を図り、現在まで広く在来線で使われている。ただし、銅系焼結合金の主成分が銅であるため、トロリ線とすり板との凝着が大きく、グリースなどの潤滑材を併用しなければならない。

1950 年代に東海道新幹線開業計画が発足し、200km/h を超えるしゅう動集電に耐えるすり板の開発が必要となった。高速走行ではパンタグラフの離線が激しく、アークによる摩耗が相当激しいと推測され、多くの材料の中から銅系焼結合金、銅系鋳造合金、鉄系焼結合金が選定された。これらのすり板をパンタグラフに取り付け、走行試験によって評価した結果、開発目標である走行距離 5000~7000km を達成したのは「鉄系焼結合金すり板」のみであった。これ以降、新幹線では鉄系焼結合金すり板が使用されることとなる。近年では、新幹線用の鉄系焼結合金すり板の長寿命化を図るため、二硫化モリブデンを配合し潤滑性能を向上させた鉄系焼結合金すり板が開発されている<sup>(33)</sup>。

1980 年代からメンテナンスコストの削減として、トロリ線の寿命延伸が強く求められ、ヨーロッパで実績を残しているカーボンすり板の使用が検討された。前述したカーボン材料の課題である脆さおよび低導電率を、カーボン基板に金属を溶浸させることで解決したものが「メタライズド・カーボンすり板」または「カーボン系すり板」である。カーボン系すり板の使用により、ト

ロリ線摩耗の低減が実証され、現在では多くの在来線で採用されている。近年では、カーボン系すり板の機械的じん性を向上させるため、炭素繊維を編んだシートを積層したカーボンコンポジットに銅合金を溶浸したすり板が開発されている<sup>(34)</sup>。

## (2) 海外におけるすり板材料<sup>(30,31)</sup>

ヨーロッパでは、電気鉄道が開業した 1880～1920 年代ですり板に純銅が使用されていた。しかしながら前述したように、トロリ線とすり板の凝着摩耗が激しいため、1920 年代から純カーボンすり板が使用されている。すり板の機械的強度は、押出成形法で製造することにより向上している。現在では、200km/h を超える高速鉄道を含め、交流電化区間のほとんどで純カーボンすり板が使用されている。なお、ヨーロッパでは純カーボンすり板の破損を検知し、自動的に降下させる装置をパンタグラフに搭載している<sup>(35)</sup>。

1930 年代から、大電流を集電しなければならない直流区間では、純カーボンすり板でなく導電率の高いメタライズド・カーボンすり板が使用されている。



Table 1.2.1 Characteristics of Japanese contact wires

Material	Cross-sectional area (mm <sup>2</sup> )	Nominal mass per meter (kg/m)	Minimum braking load (kN)	Electric conductivity (%IACS)	Authority
Hard-drawn copper contact wire	111.1	0.988	38.2	97.5	(14)
	170	1.511	57.8	97.5	
Copper-cadmium alloy contact wire	110	—	45.2	85.0	(16)
Copper-silver alloy contact wire	110	—	40.2	97.0	
Copper-tin alloy contact wire	110.5	0.982	40.2	70.0	(14)
	169.4	1.506	58.8	70.0	
Steel reinforced aluminium contact wire	Aluminium: Steel = 152: 44	0.758	68.6	46.5	
Steel reinforced copper contact wire	Copper: Steel = 61: 50	0.935	65.1	60.0	
	Copper: Steel = 133: 37	1.473	67.7	80.0	
Precipitation hardened copper alloy contact wire (PHC contact wire)	111.1	0.991	53.0	80.0	
	170	1.516	78.5	80.0	

Note: Tensile load and the conductivity in the table is the minimum value of the specification

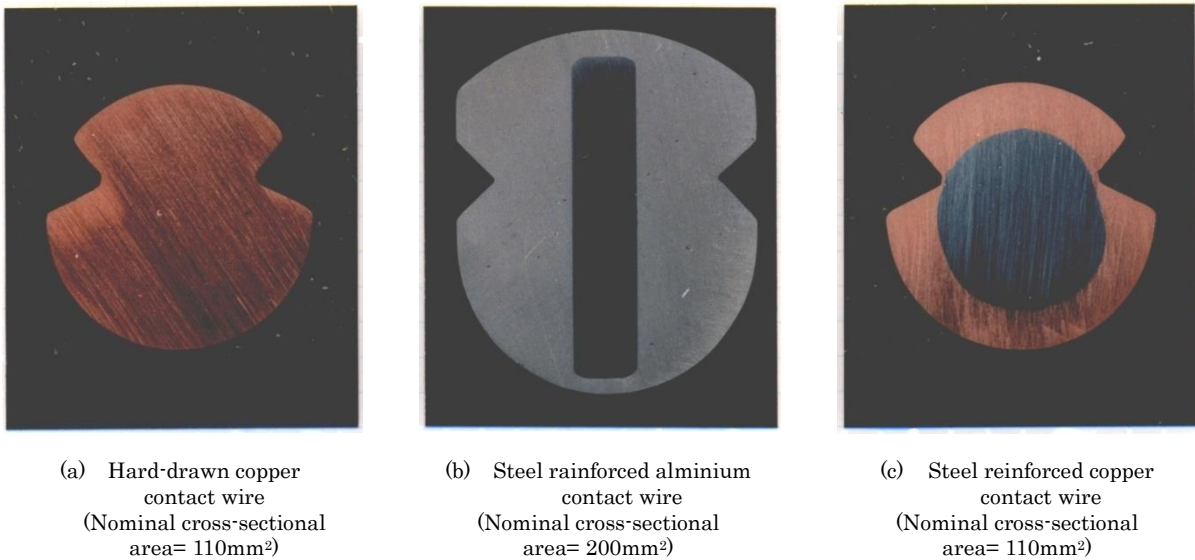


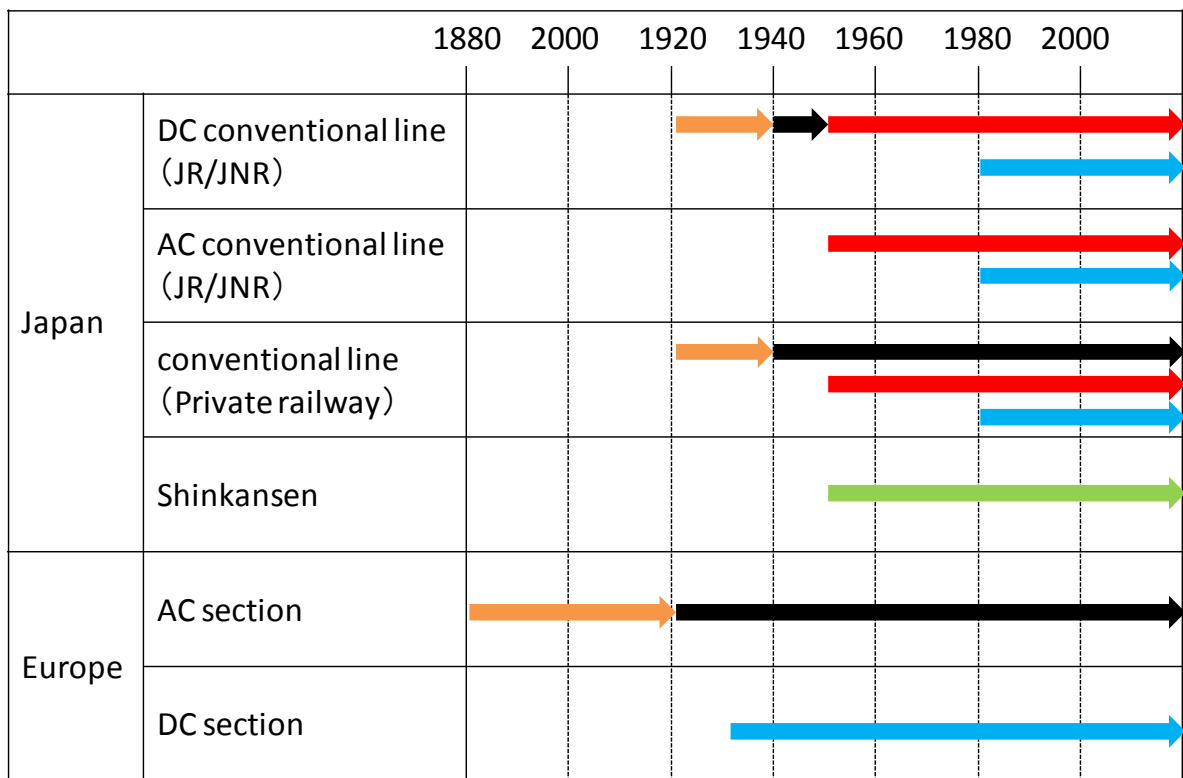
Figure 1.2.1 Cross-sectional shape of contact wire <sup>(14)</sup>

Table 1.2.2 Characteristics of European contact wires<sup>(25)</sup>

Material	Designation	Nominal cross-sectional area (mm <sup>2</sup> )	Nominal mass per meter (kg/m)	Minimum breaking load (kN)	Maximum resistivity (10 <sup>-8</sup> Ωm)
Normal strength copper	Cu-ETP	80	690-733	27.5	1.777
	Cu-FRHC	100	862-916	34.5	
	Cu-HCP	107	923-980	36.3	
	Cu-OF	120	1035-1099	38.4	
		150	1293-1374	45.1	
High strength copper and high strength copper-silver alloy	Cu-ETP	80	690-733	29.1	1.777
	Cu-FRHC	100	862-916	36.4	
	Cu-HCP	107	923-980	37.4	
	Cu-OF	120	1035-1099	41.9	
	CuAg0.1	150	1293-1374	52.4	
Normal strength copper-silver alloy	CuAg0.1	80	690-733	28.3	1.777
		100	862-916	34.9	
		107	923-980	36.3	
		120	1035-1099	40.7	
		150	1293-1374	50.9	
Copper-magnesium alloy	CuMg0.2	80	690-733	35.7	2.240
		100	862-916	43.7	
		107	923-980	45.7	
		120	1035-1099	50.1	
		150	1293-1374	61.1	
Copper-magnesium alloy	CuMg0.5	80	690-733	40.4	2.778
		100	862-916	49.5	
		107	923-980	51.9	
		120	1035-1099	57.0	
		150	1293-1374	68.4	
Copper-tin alloy	CuSn0.2	80	—	35.7	2.395
		100	865-919	43.7	
		107	926-983	44.6	
		120	1038-1103	48.9	
		150	1298-1378	61.1	
Copper-tin alloy	CuSn0.4	80	—	35.7	2.155
		100	865-919	43.7	
		107	926-983	44.6	
		120	1038-1103	48.9	
		150	1298-1378	61.1	
Copper-cadmium alloy	CuCd0.7	80	694-737	33.4	2.005
		100	868-921	41.7	
		107	928-986	44.6	
		120	1041-1106	50.1	
		150	1301-1382	62.6	
Copper-cadmium alloy	CuCd1.0	80	694-737	35.3	2.115
		100	868-921	43.2	
		107	928-986	46.2	
		120	1041-1106	51.8	
		150	1301-1382	64.7	

Table 1.2.3 Mechanical characteristics required for contact strip<sup>(27)</sup>

種類	material	Tensile strength (MPa)	Bending strength (MPa)	Charpy absorbed energy (J)	Electric resistivity ( $\mu\Omega\text{m}$ )
1	Copper-based sintered alloy	Over 120	—	Over 4.9	Over 0.4
	iron-based sintered alloy	Over 170	—	Over 9.8	Over 0.8
2	Single metal	Over 180	—	—	Over 0.2
3	Carbon	—	Over 25	—	Over 40
4	Carbon composite	—	Over 70	Over 0.3	Over 3








-  Pure copper
-  Pure carbon
-  Copper-sintered alloy
-  Iron-sintered alloy
-  Carbon composite

Figure 1.2.2 History of material transition of contact strip

## 1.3 集電材料の摩耗に関する従来の研究

集電材料の摩耗に関する研究は、次の3つに分類できる。

- (1) 実際の現場または現車で発生している問題の調査
- (2) 定置試験による摩耗現象の解明
- (3) 摩耗の予測

### 1.3.1 現地調査および対策

集電材料の摩耗に関する研究で、最もなされているものが現場における摩耗問題の把握およびその対策である。古くは1929年にI. T. Landhy<sup>(36)</sup>がアメリカの鉄道会社4社についてトロリ線摩耗状況を調査し、蒸気機関車の煤煙やトロリ線着氷が摩耗を増大させ、パンタグラフの潤滑材によって摩耗が低減することを報告している。

岩瀬<sup>(37)</sup>はトロリ線の摩耗が均一でなく、局所的に著大な摩耗が発生することを報告している。この局所摩耗箇所はトロリ線のダブルイヤー接続箇所、き電分岐の接続箇所、引き止め金具箇所、曲引き金具箇所、セクション金具箇所など重量物が設置されている箇所が該当し、これらを「硬点」と呼称している。硬点箇所ではパンタグラフの接触力変動が激しく、離線アークが頻発するため図1.3.1に示すように局所的に摩耗が進行するとしている。一方で文献(38)では、図1.3.2に示すように硬点直後で必ず離線アークが発生する箇所(ハ)において、トロリ線の摩耗が進行しないとも報告している。

藤井<sup>(39)</sup>は日本で全国的な摩耗調査を行い、列車速度が低いほど、また集電電流が大きいほどトロリ線の摩耗は大きくなることを報告している。また図1.3.3に示すようにトロリ線が摩耗し残存直径が小さくなると、トロリ線の摩耗率が増大する場合があることを明らかにした。これは、図1.1.5に示すようにトロリ線は円形をなしているため、摩耗に伴うしゅう動面幅の増加によってトロリ線摩耗率が増加することを意味する。

1985年には、上越新幹線の摩耗調査結果として、速度と電流に対するトロリ線の平均摩耗率を図1.3.4のようにマッピングした報告がある<sup>(40)</sup>。この報告では、ジュール熱やアーク熱などの熱、および摩擦力や接触力などの力から説明を試みているが、定量的説明には至っていない。

網干や長沢ら<sup>(41)</sup>は、図1.3.5に示す在来線の直流区間で発生したトロリ線の波状摩耗を調査し、その発生機構について考察している。文献(41)では図1.3.6に示すように、トロリ線の不規則な凹凸とパンタグラフのすり板間にある固形潤滑材のみが接触し、固形潤滑材が絶縁体であるため、トロリ線とすり板間に発生するアークが波状摩耗を促進する要因としている。研究の結果、カーボンすり板を採用して固形潤滑材を外すなどの対策が講じられ、以後顕著な波状摩耗は確認されなくなった。

網干ら<sup>(12, 42)</sup>は、新幹線で発生したトロリ線の波状摩耗を調査し、在来線で発生した波状摩耗とは異なり、図1.3.7に示すようにトロリ線の摩耗が進行している谷部に金属光沢があることを明らかにした。文献(42)では、パンタグラフすり板とトロリ線との相互作用を解析し、2列すり板の著大接触力による摩耗が新幹線波状摩耗の要因と特定した。研究の結果、すり板幅の拡大およびすり板1列化などの対策が講じられ、顕著な波状摩耗は確認されなくなった。

小山ら<sup>(43, 44)</sup>は、地下鉄で使用されている剛体電車線の波状摩耗について調査および数値解析を行い、パンタグラフの反共振による離線が原因であることを解明した。これにより、波状摩耗対策として切削による剛体電車線の初期凹凸低減や、パンタグラフ動特性やすり板間隔の調整などを提案している。

宮口や森本ら<sup>(45, 46)</sup>は、在来線のわたり区間で発生するトロリ線局所摩耗を調査し、パンタグラフ補助すり板に使用されているアルミニウムが、トロリ線しゅう動面に付着していることを確認した。また、わたり区間におけるトロリ線の集電電流を測定し、パンタグラフの主すり板であるカーボンすり板ではなく、アルミニウム補助すり板から主に集電していることを明らかにした。そこで、補助すり板のしゅう動部にカーボンを用いた複合補助すり板を開発するなどの対策を講じている。

清水ら<sup>(47)</sup>は、架線の繋ぎ目であるオーバーラップ箇所におけるトロリ線摩耗を調査し、図 1.3.8 に示すようにトロリ線の高さ構成によってパンタグラフの接触力変動が増大する場合があります、著大な接触力や離線アークによってトロリ線摩耗が進行することを報告している。また、トロリ線摩耗低減対策として、オーバーラップにおける高さ構成の最適化を提案している。

以上のように、現地調査はトロリ線摩耗に関するものが主である。これは、トロリ線摩耗の定点観測は可能であるが、すり板摩耗は走行後にしか観測できず、走行中の摩耗測定が困難であるためである。

### 1.3.2 定置摩耗試験

実際に現場で発生する摩耗は複雑な要因が重畳した結果であり、摩耗機構の解明や支配パラメータの特定は困難である。そこで一定の条件を与えて、特定のパラメータと摩耗との相関を調査する定置摩耗試験が実施されてきた。これまで報告されてきた様々な定置摩耗試験に共通する特徴として、「定置摩耗試験条件と実際の使用条件が解離しては価値がない」という概念がある<sup>(37)</sup>。このため、実際のしゅう動集電の条件を模擬し、実際の摩耗率との誤差を小さくするための試験機を開発してきた傾向がある。

岩瀬<sup>(37)</sup>は、トロリ線とパンタグラフの動的挙動の再現が摩耗試験の要と考え、パンタグラフ接触力変動の再現、トロリ線のジグザグ架設の再現、しゅう動速度の再現を主眼とした回転型摩耗試験機を製作した。摩耗試験結果は主にすり板の摩耗について整理されており、アークの有無によって摩耗率が大きく異なることを明らかにしている<sup>(48)</sup>。また、岩瀬はすり板の摩耗量を次式で表している<sup>(49)</sup>。

$$W = W_1 + W_2 + W_3 \quad (1.2)$$

ここで  $W_1$  はアーク放電を伴わない機械的摩耗量、 $W_2$  はアーク放電のみによる消耗量、 $W_3$  はアーク放電の影響により増大する機械的摩耗量である。このように集電の摩耗をアークの有無によって分類した概念は後々まで大きな影響を及ぼしている。

織田ら<sup>(50, 51)</sup>は、実際の使用条件の模擬として、実物トロリ線と実物パンタグラフを用いた回転型集電摩耗試験機を製作し、しゅう動速度の増加によってトロリ線摩耗が減少することを明らかにしている。この現象については、速度の増加に伴い離線が増加し、トロリ線とすり板の機械的接触頻度が減少するためと説明している。また、トロリ線の摩耗は機械的摩耗に支配され、電氣的摩耗の影響は小さいと考察している。一方で、藤井ら<sup>(52)</sup>は同試験機に注水しながら摩耗試験を

実施し、注水時にはトロリ線およびすり板の摩耗がアーク量に比例することを報告している。

河野ら<sup>(53, 54)</sup>は、トロリ線とすり板の摩耗に及ぼす離線アークの影響を調査するため、ピンオンリング型摩耗試験機を用いた摩耗試験を実施している。文献(53)では図 1.3.9 および図 1.3.10 に示すように、電流が小さい場合はピンおよびリングの摩耗率は荷重に比例するが、電流が大きい場合はピンの摩耗率は低荷重ほど増加し、リング摩耗率は低荷重ほど減少することを報告している。同文献では、アーク電流と離線時間より算出した全放電電気量と電極比摩耗量の関係を報告しており、図 1.3.11 に示すようにピンの比摩耗量は全放電電気量に比例するが、図 1.3.12 に示すように銅リングの比摩耗量は全放電電気量の増加に対して頭打ちになることも明らかにしている。また、文献(54)では通電下の摩耗特性に対するしゅう動速度の影響も調査しており、図 1.3.13 に示すようにしゅう動速度 0.2m/s 近傍で銅リングの摩耗率が極大となることを報告している。

長沢ら<sup>(55)</sup>は、Cu-Cr-Ze 銅合金トロリ線と鉄系焼結合金すり板の組合せにおいてブロックオンデイスク型摩耗試験機を用いた摩耗試験を実施し、摩耗粒子の形状が 3 種類に分類できること、トロリ線の摩耗率が接触面で発生する熱に影響を受けることを報告している。また、しゅう動集電中に接触表面に発生する摩擦熱、ジュール熱、およびアーク熱を算出し、熱と接触圧力に対するトロリ線の摩耗率を図 1.3.14 に示すようにマッピングし、3 種類の摩耗粒子が発生する領域を分別した。

D. H. He ら<sup>(56, 57)</sup>は、ピンオンディスクなどの回転型摩耗試験機では実際のトロリ線とすり板の接触状況を再現できないとし、トロリ線を直線的に配置してすり板をしゅう動させる摩耗試験機を作成し、しゅう動中の摩擦係数や接触抵抗を測定している。

### 1.3.3 摩耗の予測

現場のメンテナンス効率を向上させるため、トロリ線摩耗の定式化および予測に関する研究も行われている。

G. Bucca ら<sup>(58)</sup>は、Lim, Ashby<sup>(59)</sup>の摩耗メカニズムマップにおける無次元化荷重に電気的要素を加え、通電下の摩耗マップを作成した。また、架線とパンタグラフの挙動シミュレーションから得られる接触力を用いた摩耗予測手法を提案している。

白田ら<sup>(60)</sup>は、トロリ線の機械的な摩耗、アークによる摩耗、ジュール熱による摩耗の定式化を行い、摩耗予測式を提案している。また、新幹線の一定区間におけるパンタグラフ接触力および離線アークを測定し、それらデータを摩耗予測式に入力することで、当該区間のトロリ線摩耗を予測している。

高橋ら<sup>(61)</sup>は、現場におけるトロリ線局部摩耗箇所について、電気検測車の架線測定データを解析することでパターン学習し、将来的な局部摩耗を予測する手法を提案している。

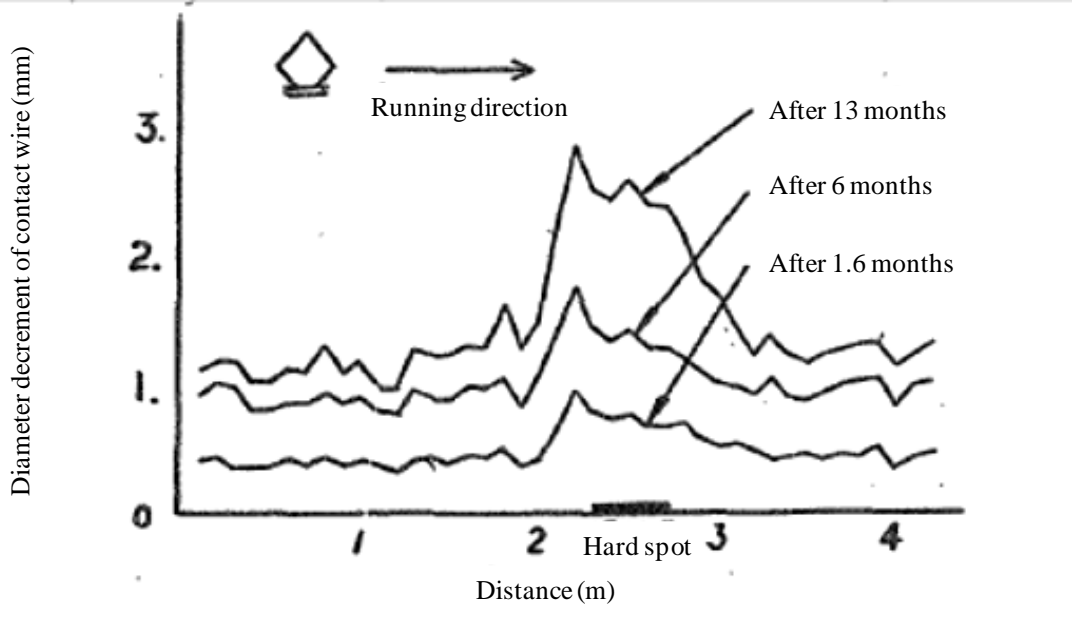


Figure 1.3.1 Wear history of contact wire at hard spot <sup>(37)</sup>

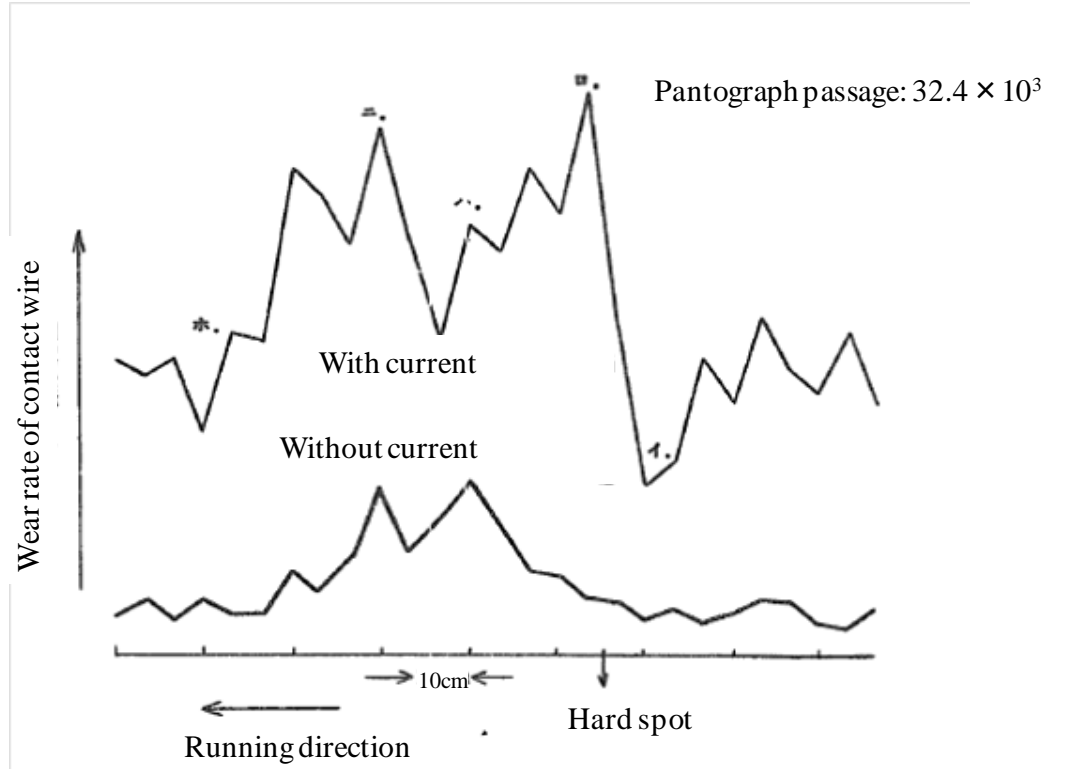


Figure 1.3.2 Wear of contact wire after hard spot <sup>(38)</sup>

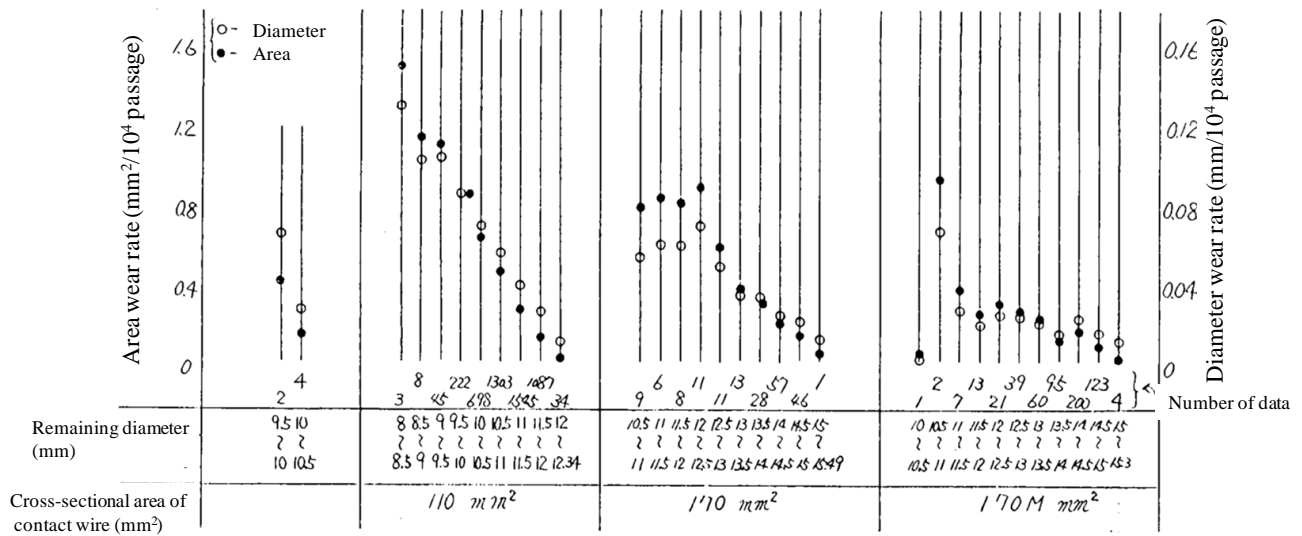


Figure 1.3.3 Wear rate of contact wire against remaining diameter <sup>(39)</sup>

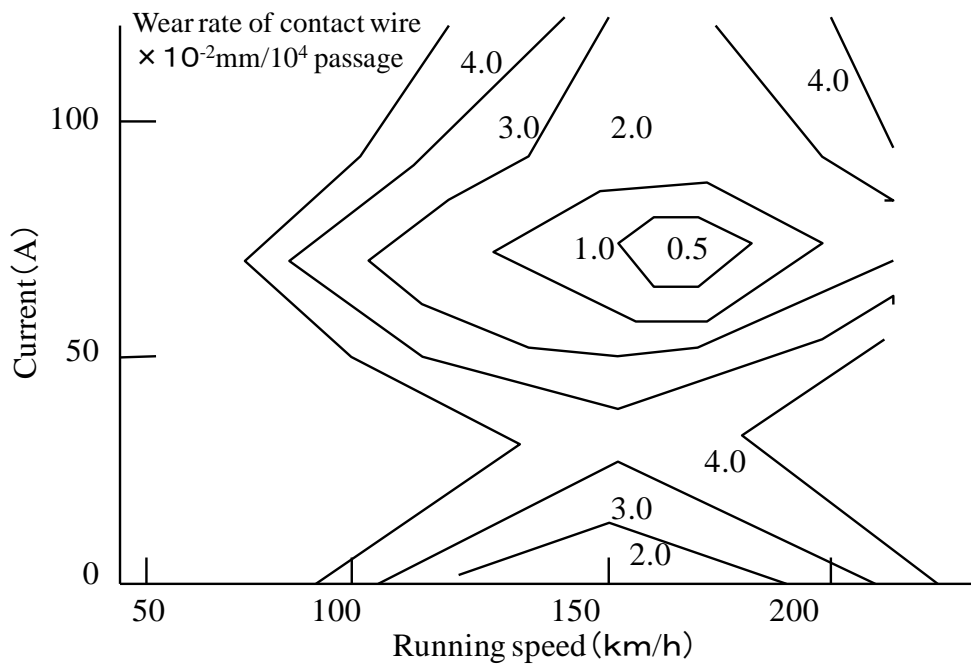


Figure 1.3.4 Influence of running speed and electric current on average wear rate of contact wire <sup>(40)</sup>



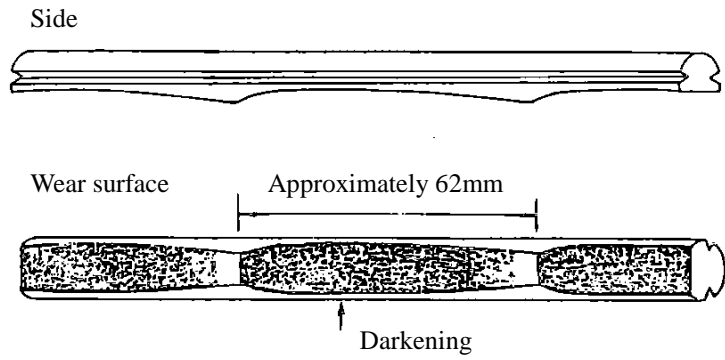


Figure 1.3.5 Undulating wear of contact wire in conventional line <sup>(41)</sup>

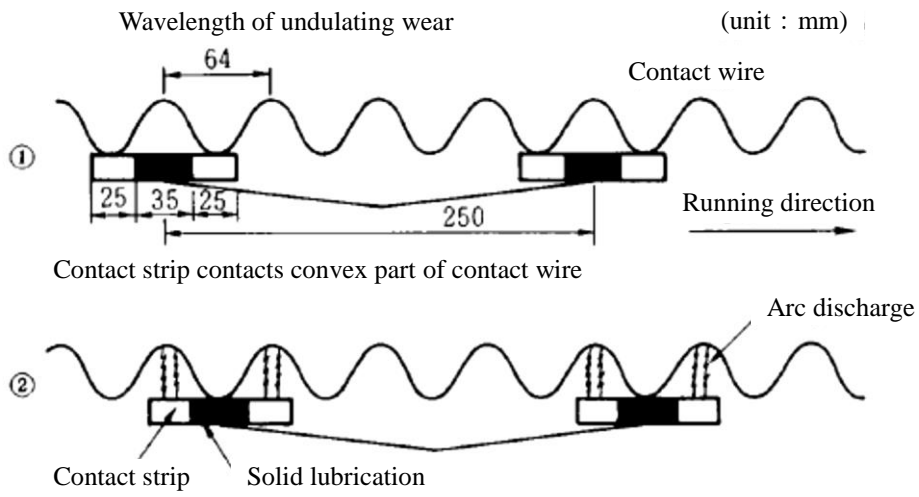


Figure 1.3.6 Relationship between undulating wear of contact wire and placement of contact strip <sup>(41)</sup>

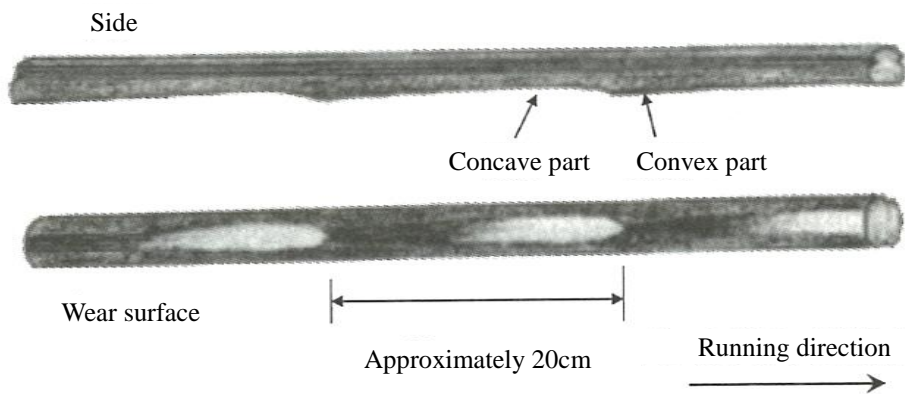


Figure 1.3.7 Undulating wear of contact wire in Shinkansen <sup>(12)</sup>

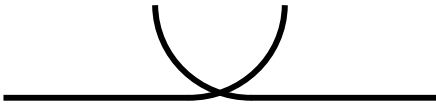



Type	Height structure	Wear	Diagram
I	Horizontal cross	good	 <p>Line A <math>\Rightarrow</math> Line B</p>
II	Pull up cross	bad	 <p>Line A <math>\Rightarrow</math> Line B</p>
III	Line B is higher than lineA.	good	 <p>Line A <math>\Rightarrow</math> Line B</p>
IV	Line B is lower than lineA.	bad	 <p>Line A <math>\Rightarrow</math> Line B</p>

Figure 1.3.8 Classification of structure of overlap<sup>(47)</sup>

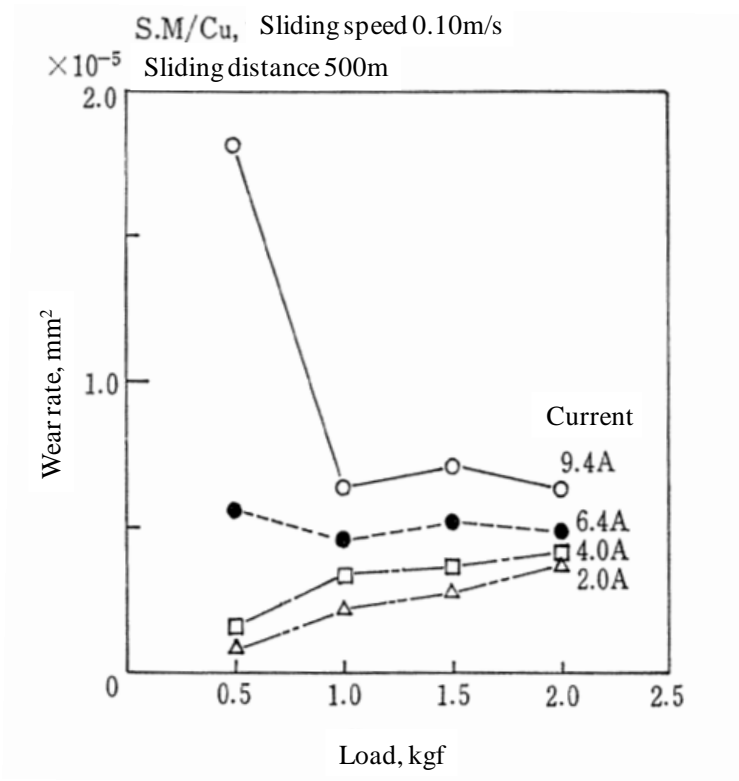


Figure 1.3.9 Relationship between wear rate of sintered alloy pin and load in each current <sup>(53)</sup>

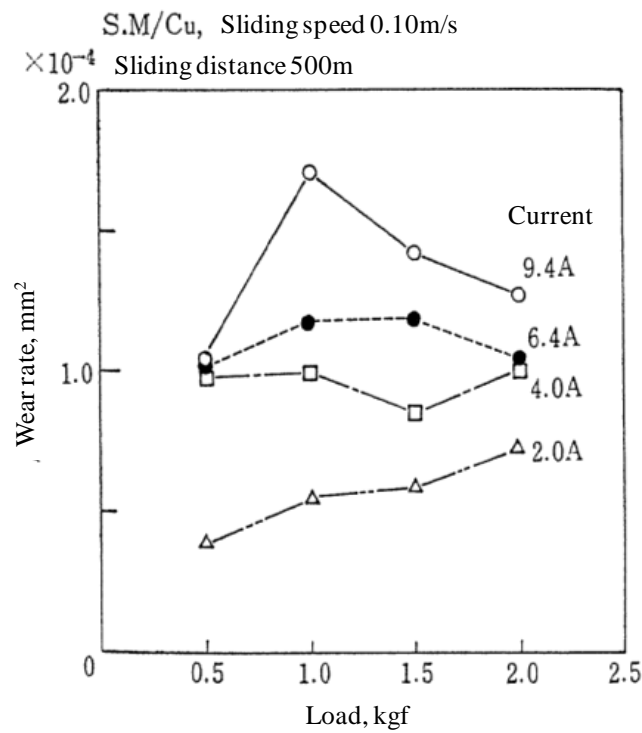


Figure 1.3.10 Relationship between wear rate of copper ring and load in each current <sup>(53)</sup>

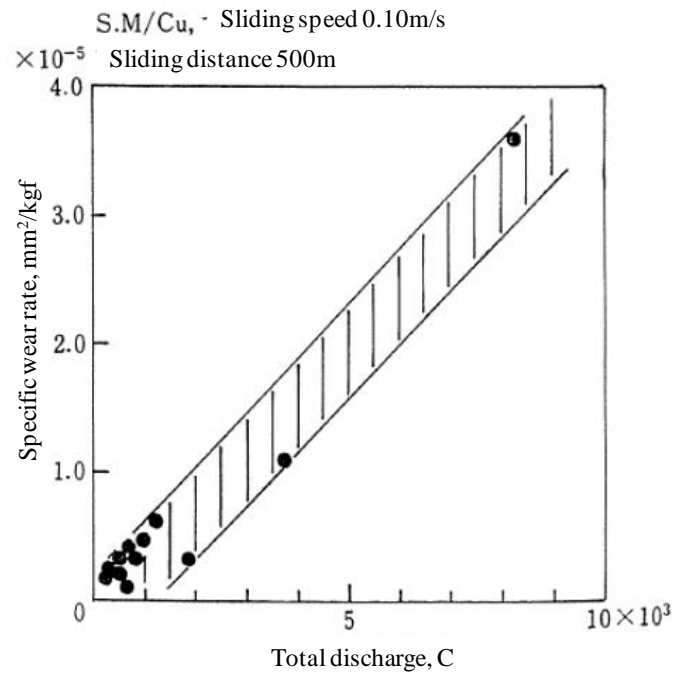


Figure 1.3.11 Relationship between specific wear amount of sintered alloy pin and total electrical quantity by discharge <sup>(53)</sup>

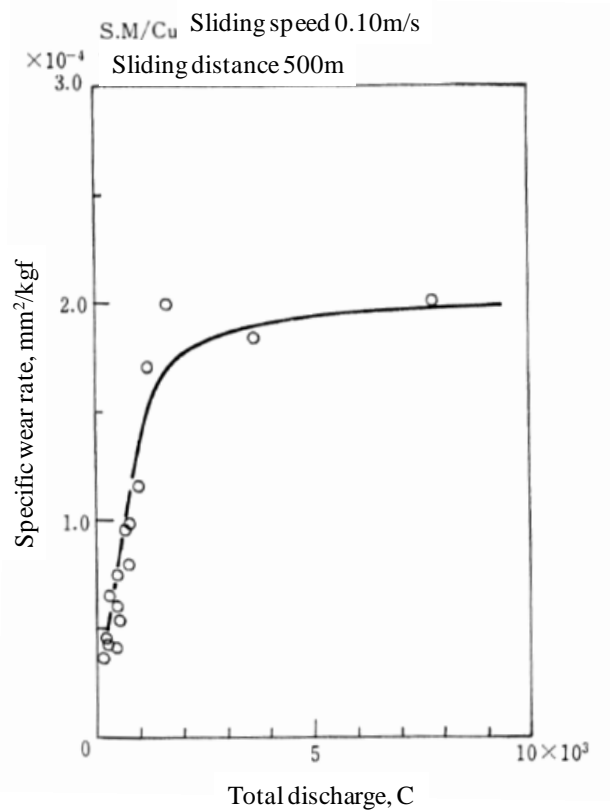


Figure 1.3.12 Relationship between specific wear amount of copper ring and total electrical quantity by discharge <sup>(53)</sup>

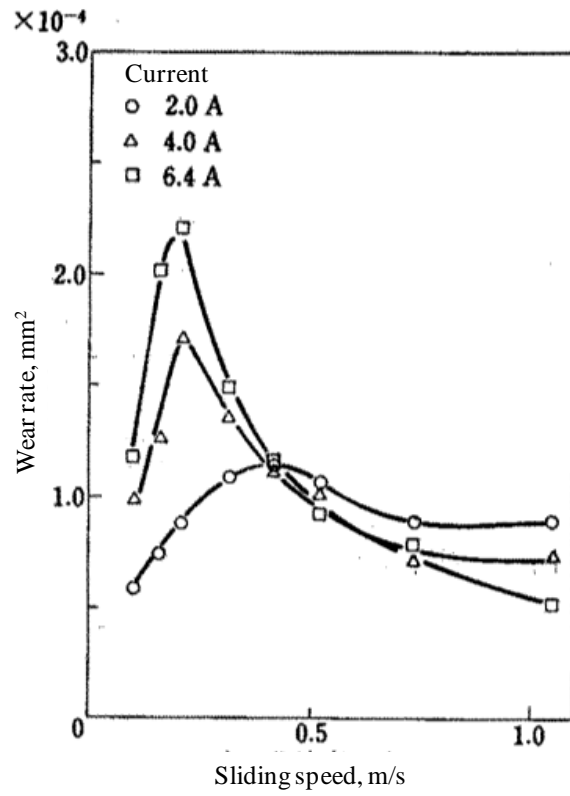


Figure 1.3.13 Relationship between wear rate of copper ring and sliding speed in each current <sup>(54)</sup>

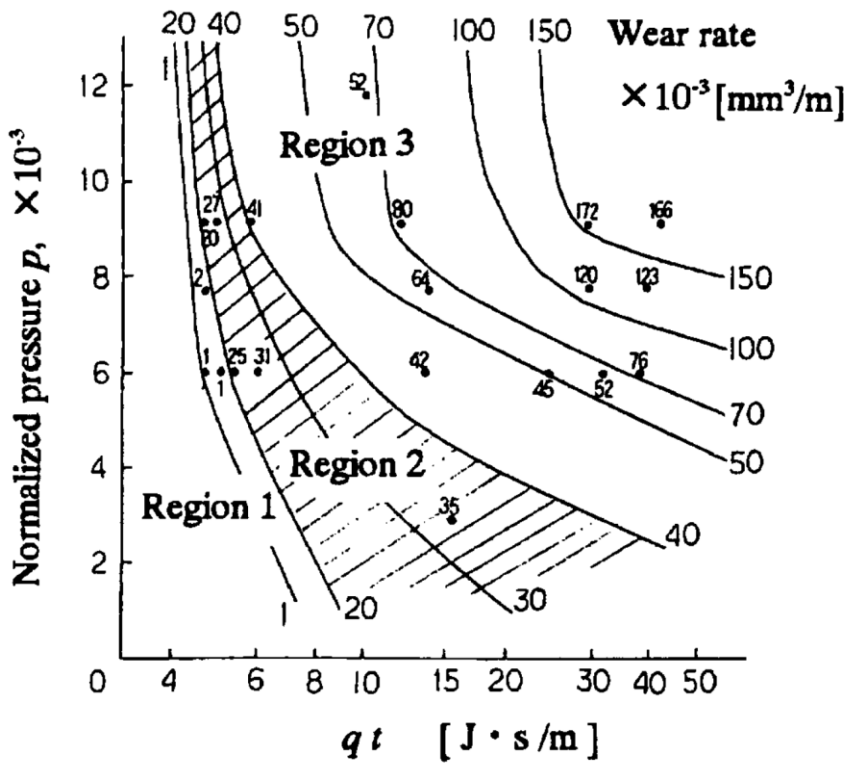


Figure 1.3.14 Wear rate map of contact wire <sup>(55)</sup>

## 1.4 本研究の目的と構成

前節まで集電材料の摩耗に関する従来の取り組みについて述べたが、そのほとんどは離線アークと摩耗の関係に着目した研究であることがわかる。その背景として、通電摩耗が大きく「機械的摩耗形態」と「電氣的摩耗形態」に分類され、特に摩耗を増大させる電氣的摩耗形態は離線アークによって発生するという概念がある。したがって、従来の摩耗対策は電車線とパンタグラフの相互作用改善による離線抑制が主流であった。しかしながら、現在の列車走行速度においても離線の完全抑制はできず、今後車両の高速化が進めば、離線はさらに増大することは十分に考えられる。

一方で、1.3 節で述べた現地調査結果や定置試験結果より、トロリ線の摩耗特性とアークの関係は単純な比例関係にないことが示されており、離線時にトロリ線の摩耗を増大させる支配パラメータはアーク以外にも存在することを示唆している。この支配パラメータの解明により、従来の離線アーク抑制以外にもトロリ線の摩耗低減対策を提案できると考える。しかしながら、トロリ線の電氣的摩耗形態の発生機構を解明した研究は未だ見当たらず、支配パラメータも特定されていない。

そこで、本研究では集電材料の耐摩耗設計指針に資するため、通電下においてジュール熱に起因する摩耗形態およびその遷移条件に着目し、通電摩耗機構を解明することを目的とする。

本研究の構成を図 1.4.1 に示し、各章の概要を以下に示す。

第 1 章は諸論であり、電気鉄道の電力供給技術の歴史的経緯を述べ、架線—パンタグラフ系の概要を述べる。また、架線—パンタグラフ系の課題である集電材料の摩耗に関して、これまでの開発経緯や研究の概要についてまとめ、本研究の位置づけを明らかにする。

第 2 章では、通電下の摩耗形態を分別・観察するための試験機要素を検討し、新たに開発した直動型摩耗試験機について述べる。また、直動型摩耗試験機の性能について述べる。

第 3 章では、集電材料の摩耗特性および摩耗形態に及ぼす通電電流の影響を把握するため、硬銅トロリ線と鉄系焼結合金すり板の組合せについて、通電電流を 4 段階変化させた摩耗試験内容について述べる。さらに、摩耗試験の結果得られた摩耗特性や摩耗面観察結果より、摩耗形態を分類し、それら摩耗形態の遷移条件について考察する。

第 4 章では、集電材料の摩耗特性および摩耗形態に及ぼす見かけの接触面積の影響を把握するため、硬銅トロリ線と鉄系焼結合金すり板の組合せについて、すり板の見かけの接触面積を 4 段階変化させた摩耗試験内容について述べる。摩耗試験の結果得られた摩耗特性や摩耗面観察結果より、見かけの接触面積によって摩耗形態が変化することを明らかにし、従来の研究報告内容について考察する。

第 5 章では、第 3 章および第 4 章で得られた摩耗現象を理論的に説明するため、酸化膜などの被膜抵抗を考慮した通電接点モデルを新たに提案し、接点近傍の電位分布および温度分布解析方

法について述べる。また、接点の電位分布および温度分布よりいくつかの法則を見出し、通電下における摩耗形態の発生条件をマッピングした摩耗形態マップについて述べる。さらに、摩耗形態を支配するパラメータを特定し、集電材料の通電摩耗機構を解明する。

第6章では、第5章で提案した摩耗形態マップに基づき、材料の組合せと摩耗形態の発生条件の相関図を作成する。また、3組の集電材料組合せを選定し、それぞれ発生し得る摩耗形態および遷移条件を予測し、実際に摩耗試験を実施する。摩耗試験の結果得られた摩耗特性や摩耗面観察結果より、摩耗形態および遷移条件の予測値と実測値を比較し、摩耗形態マップの妥当性を検証する。以て、材料組合せによる演繹的な摩耗形態制御の可能性を示す。

第7章は結論であり、本研究で得られた主な結論を示す。

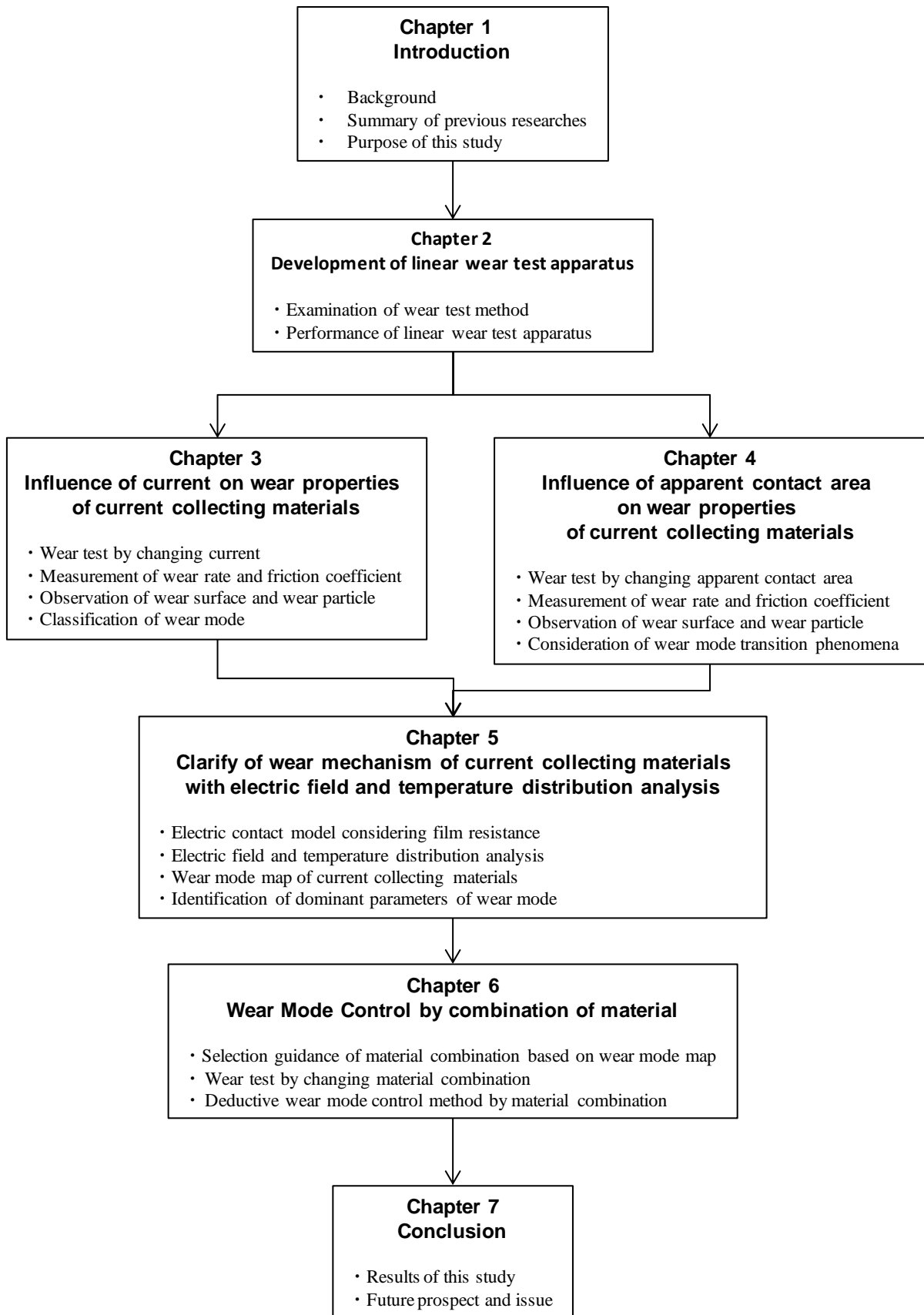


Figure 1.4.1 Structure of this study



## 参考文献

- (1) W. D. Middleton, When the Steam Railroads Electified 2<sup>nd</sup> edition, Indiana University Press, (2002) 11-35.
- (2) 大塚和之, 電気鉄道の初期事情[前], 鉄道ピクトリアル, 339 (1977) 6-8.
- (3) 大塚和之, 電気鉄道の初期事情[後], 鉄道ピクトリアル, 340 (1977) 50-57.
- (4) 東洋電機, 日本におけるパンタグラフの歴史と東洋電機 I, 東洋電機技報, 108 (2001) 2-8.
- (5) 持永芳文, 宮本昌幸, 鉄道技術 140 年のあゆみ, コロナ社, (2012) 64-82.
- (6) (社)電気学会, 鉄道車両駆動における蓄電装置応用技術, 電気学会技術報告, 1307 (2014).
- (7) 島田健夫三, 小比田正, 佐藤勇輔, アーク集電の磁気制御と隔離制御に関する基礎的検討, 鉄道総研報告, 11, 5 (1997) 13-18.
- (8) 柏木隆行, 非接触給電の技術動向と鉄道への応用, サイバネティクス, 19, 3 (2014) 36-39.
- (9) 日本工業標準調査会, みぞ付き硬銅トロリ線, JIS E 2101 (1990).
- (10) 柴川久光, 海外鉄道の電気方式, 鉄道と電気技術, 25, 5 (2014) 47-50.
- (11) 柴川久光, 電気運転統計, 鉄道と電気技術, 22, 4 (2011) 51-57.
- (12) 下前哲夫, 真鍋克士, 網干光雄, 新幹線の連続アークはどのようにして解消されたか—高速集電系の進歩を概観する—, 日本鉄道電気技術協会, (2008).
- (13) 藤井保和, 清水政利, 真鍋克士, 新幹線集電系の高速化技術の研究, 鉄道総研報告, 9, 1 (1995) 43-48.
- (14) 菅原淳, 新しいトロリ線の開発と適用, 鉄道車両と技術, 96 (2004) 46-50.
- (15) 日本鉄道電気技術協会, 電車線 鉄道技術者のための電気概論 電車線路シリーズ 2, 日本鉄道電気技術協会, (2005) 2-44.
- (16) 日本鉄道電気技術協会, 電車線技術進展のあゆみ, 日本鉄道電気技術協会, (1996) 48-56.
- (17) 土屋敬一, 三田政伸, 坂口勉, 大山一男, 鈴木望, 伴靖夫, 耐摩耗トロリ線の開発に関する研究その 1—合金トロリ線—, 鉄道技術研究所速報, 77-1011 (1977).
- (18) 土屋敬一, 藤野史朗, 尾亦善房, 安松栄作, 万葉重雄, 耐摩耗トロリ線の開発に関する研究その 2—合金トロリ線—, 鉄道技術研究所速報, 78-108 (1978).
- (19) 持永芳文・藤野史朗, 耐摩耗トロリ線の開発に関する研究その 3—錫入りトロリ線の電力特性—, 鉄道技術研究所速報, 80-89 (1980).
- (20) 藤井保和, 織田修, 大浦泰, 小比田正, 鋼心アルミニウムトロリ線の開発, 鉄道技術研究報告, 1300 (1985).
- (21) 日本鉄道電気技術協会, Q&A (電力), 鉄道と電気技術, 14, 12 (2003) 79.
- (22) 鈴木陽, 大場顕, 土屋敬一, 亀井恒男, 複合トロリ線の開発 (第 1 報), 鉄道技術研究所速報, A-86-189 (1986).
- (23) 長沢広樹, 山道哲雄, 細川浩一, 本田照一, 梶川秀樹, 析出強化型銅合金トロリ線の開発 (第二報), 三菱電線工業時報, 95, 6 (1994) 33-39.
- (24) 住友電気工業, 耐アーク性に優れたトロリ線, 電車線部材, 鉄道と電気技術, 22, 8 (2011) 96.
- (25) British Standards Institution, Copper and Copper Alloy Grooved Contact Wires, EN 50149 (2009).

- (26) 渡邊朝紀, 高速列車 ICE3 から CRH380B までの技術系譜, 鉄道車両と技術, 205 (2013) 12-28.
- (27) 日本鉄道車両工業会, 鉄道車両—パンタグラフすり板, JRIS E 6301 (2005).
- (28) 鉄道総合技術研究所, 電車線とパンタグラフ, 研友社, (1993) 195-211.
- (29) 松山晋作, パンタグラフすり板とトロリー線, 金属, 7, 2 (2000) 128-136.
- (30) 久保田喜雄, パンタグラフすり板, RRR, 71, 9 (2014) 28-31.
- (31) 久保俊一, 銅または銅鉛錫合金を溶浸した炭素製パンタグラフすり板のアーカ放電下の摩耗機構の研究, 東北大学学位論文, (1999) 7-9.
- (32) 岩瀬勝, 集電技術ア・ラ・カルト, 研友社, (1998) 38-39.
- (33) 宮平裕生, 土屋広志, 久保田喜雄, 潤滑性能を向上させた新幹線用すり板の開発, 鉄道総研報告, 28, 2 (2014) 47-52.
- (34) 土屋広志・久保俊一, C/C 複合材のパンタグラフすり板への適用, RRR, 66, 4 (2009) 10-13.
- (35) B. Landwehr, Automatische Senkeinrichtung für Stromabnehmer, Elektrische Bahnen, 100, 5 (2002) 172-177.
- (36) I. T. Landhy, Contact Wire Wear on Electric Railroads, A. I. E. E, 48, 10 (1929) 756-759.
- (37) 岩瀬勝, パンタグラフ集電と摩耗(I), 鉄道技術研究報告, 53 (1959).
- (38) 岩瀬勝, パンタグラフ集電と摩耗(III), 鉄道技術研究報告, 217 (1961).
- (39) 藤井保和, 全国在来線のトロリ線摩耗率調査, 鉄道技術研究所速報, A-85-54 (1985).
- (40) 鉄道電化協会, 架線・パンタグラフ系のしゅう動の改善に関する研究, 集電しゅう動委員会報告, N84-6 (1985) 81-88.
- (41) 網干光雄, 長沢広樹, トロリ線波状摩耗対策の開発(在来線), 鉄道総研報告, 6, 7 (1992) 37-44.
- (42) 真鍋克士, トロリ線波状摩耗の発生機構解明, 鉄道総研報告, 13, 7 (1999) 13-18.
- (43) 小山達也, 網干光雄, パンタグラフの動特性に起因した剛体電車線の波状摩耗発生機構, 日本機械学会論文集 C 編, 78, 789 (2012) 1617-1631.
- (44) 小山達也, 網干光雄, 架線・パンタグラフの境界と接点, 波状摩耗の発生機構を解明する, RRR, 71, 9 (2014) 8-11.
- (45) 宮口浩一, 石井順, 武井一男, わたり線箇所におけるトロリ線異常摩耗の考察, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, (2001) 729-732.
- (46) 森本大観, 小林英治, 大熊茂, 石井順, わたり線部分におけるトロリ線異常摩耗対策, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, (2004) 115-116.
- (47) 清水政利, 藤井保和, 新幹線オーバーラップ構成の最適化, 鉄道総研報告, 9, 9 (1995) 19-24.
- (48) 岩瀬勝, パンタグラフ集電と摩耗(II), 鉄道技術研究報告, 217 (1961).
- (49) 岩瀬勝, パンタグラフすり板の摩耗(I), 鉄道技術研究報告, 327 (1962).
- (50) 織田修, 藤井保和, 大型摩耗試験機による摩耗試験, 鉄道技術研究所速報, 81-123 (1981).
- (51) 織田修, 新幹線における集電系の摩耗についての考察, 鉄道技術研究報告, 1323 (1986).
- (52) 藤井保和, 長沢広樹, 遠藤良直, 小比田正, 集電摩耗試験機による摩耗試験, 鉄道技術研究所速報, A-86-118 (1986).
- (53) 河野彰夫, 大藪英雄, 曾田範宗, 集電用材料の摩耗に及ぼす離線アーカの影響 (第 1 報) — 荷重を変化させた場合 —, 潤滑, 27, 4 (1982) 283-287.
- (54) 河野彰夫, 大藪英雄, 曾田範宗, 集電用材料の摩耗に及ぼす離線アーカの影響 (第 2 報) —

- 速度を変化させた場合—, 潤滑, 27, 7 (1982) 527-532.
- (55) H. Nagasawa and K. Kato, Wear Mechanism of Copper Alloy Wire Sliding against Iron-base Strip under Electric Current, *Wear*, 216 (1998) 179-183.
- (56) D. H. He, R. R. Manory and N. Grady, Wear of Railway Wires against Current Collectors Materials, *Wear*, 215 (1998) 146-155.
- (57) D. H. He, R.R. Manory and H. Sinkis, A Sliding Wear Tester for Overhead Wires and Current Collectors in Light Rail Systems, *Wear*, 239 (2000) 10-20.
- (58) G. Bucca and A. Collina, A Procedure for the Wear Prediction of Collector Strip and Contact Wire in Pantograph–catenary System, *Wear*, 266 (2009) 46-59.
- (59) S. C. Lim and M. F. Ashby, Wear Mechanism Maps, *Acta metallurgica*, 35, 1 (1987) 1-24.
- (60) T. Usuda, M. Ikeda and Y. Yamashita, Prediction of Contact Wire Wear in High-speed Railways, 9<sup>th</sup> World Congress on Railway Research (2011) .
- (61) 高橋敦宏, 貴志俊英, 山本浩志, 千葉雄樹, 本橋洋介, 青柳宗之, 渡辺元雄, トロリ線摩耗予測に向けた電気検測車測定データ解析, 平成 26 年電気学会産業応用部門大会 (2014) V191-194.



## 第2章

# 直動型摩耗試験機の開発

### 2.1 緒言

電気鉄道における集電材料の摩耗には、パンタグラフ接触力、しゅう動速度、電流、材料の組合せ、見かけの接触面積など多くの要因が影響を及ぼすことが知られている。これまで、定置摩耗試験において摩耗の支配パラメータを特定するため、様々な摩耗試験機が開発されてきた。しかしながら、摩耗形態遷移現象の解明を目的とする摩耗試験機は見あたらない。

本章では、摩耗形態の遷移現象を解明するために必要な摩耗試験機要素を検討し、新たに開発した摩耗試験機について性能を調査する。

### 2.2 実験装置に対する認識

岩瀬<sup>(1,2)</sup>は、「定置摩耗試験条件と実際の使用条件が解離しては価値がない」とし、パンタグラフ接触力変動の再現、トロリ線のジグザグ架設の再現、しゅう動速度の再現を主眼とした回転型摩耗試験機を製作した。これは、実験装置で実機の摩耗条件を再現することが、通電摩耗機構の解明につながるという考え方に基づいている。しかしながら、回転型摩耗試験機を用いた摩耗試験では、すり板摩耗を再現できる場合もあるが、トロリ線摩耗は再現できないと指摘している<sup>(2)</sup>。

その理由として、以下の2つを挙げている。

- (1) すり板は試験前後の重量測定により摩耗量が求まるが、トロリ線は大きさにもよるが、トロリ線試験片の重量と比較して摩耗による重量損失が微量であるため、重量測定では精度のよい結果が得られない。また、トロリ線の残存直径など寸法測定によっても摩耗量が求まるが、 $\mu\text{m}$ オーダーの表面凹凸を無視しているため、精度としては不十分である。
- (2) トロリ線のしゅう動インターバルの観点から、回転型摩耗試験機では1分間に数百回もすり板と摩擦するのに対し、現場では1時間に数回～数十回程度しかすり板と摩擦しないという違いがある。そのため、回転型摩耗試験と現場とでは、トロリ線表面の酸化物生成状態や熱影響が全く異なる。

以上の理由により岩瀬は、トロリ線摩耗に関する回転型摩耗試験の用途は、摩耗特性の定量的評価ではなく、従来品との定性的比較とした方がよいという結論を出している<sup>(2)</sup>。

ここで、摩擦や摩耗などトライボロジーに関する実験装置に対する本研究の基本的な考え方を示す。上記岩瀬の結論や、これまで定置試験で通電摩耗機構の再現に至っていない事実を鑑みても、実機で発生するトライボロジー現象を実験装置で再現することはできないと考える。これはトライボロジー現象がシステムの応答として発生するためであり、集電材料の摩耗現象は電気鉄道固有のシステムでしか発生しないためである。

それでも実機と異なる実験装置を開発する目的は、実機で発生する摩耗現象の本質を抽出することと考える。例えば実機で発生し得る摩耗形態の把握や、それらの遷移条件の把握が実験装置本来の役割と考える。

## 2.3 通電摩耗機構を解明するための試験方法

本研究の目的は集電材料の通電摩耗機構解明であり、摩耗試験の目的は 2.2 節で述べたように摩耗形態の把握、およびそれらの遷移条件の把握である。通電摩耗機構を解明するための試験方法として検討した内容を以下に示す。

- (1) 通電下で発生し得る摩耗形態として、これまでは機械的摩耗形態と電氣的摩耗形態の 2 つに分類されてきた<sup>(3)</sup>。この摩耗形態の遷移は、すり板接触力減少に伴う離線アークに起因するとされており、摩耗形態遷移はすり板接触力と強い相関をもつと考えられる。したがって、摩耗形態遷移現象を精緻に調査するために、しゅう動時のすり板接触力変動を極力抑制し、摩耗形態の混在を抑制する。
- (2) S. C. Lim<sup>(4)</sup>が提唱するように、摩耗形態の発現には接点の温度が大きく影響するものと考えられる。通電時の接点温度が接触電圧に依存することは、R. Holm<sup>(5)</sup>によって明らかにされている。また、岩瀬<sup>(6)</sup>は、図 2.3.1 に示す実験装置を製作し、通電摩擦の結果観察される銅材表面の摩擦痕が、図 2.3.2 のように接触電圧降下の値によって変化することを報告している。以上より、通電下の摩耗形態と接触電圧は密接な関係があると考えられる。そこで、摩耗試験時における接点の温度や接触面の状態を高い精度で推定するため、トロリ線とすり板間の接触電圧を精緻に測定する。
- (3) 実機に近いトロリ線表面の酸化状態や熱影響を再現するため、複数パンタグラフが通過する時間間隔を考慮したしゅう動インターバルを設定する。
- (4) 通電下における摩耗機構の本質を理解するためには、通電によるジュール熱のみに着目することが重要と考える。そこで低速しゅう動とし、従来のような高速しゅう動による摩擦熱を抑制する。
- (5) トロリ線やすり板の摩耗量を高い精度で測定する。
- (6) トロリ線やすり板の摩耗面や摩耗粒子を精緻に観察・分析する。

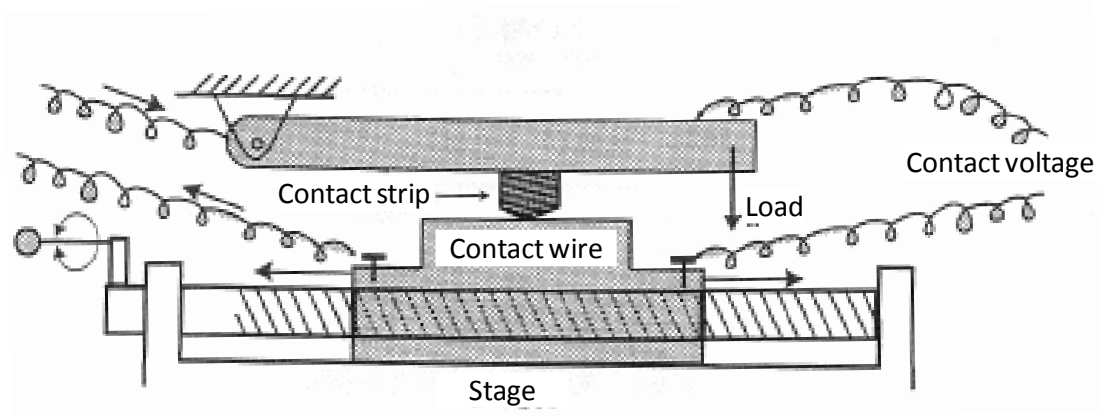


Figure 2.3.1 Experimental method for observation of wear track under current flowing <sup>(6)</sup>

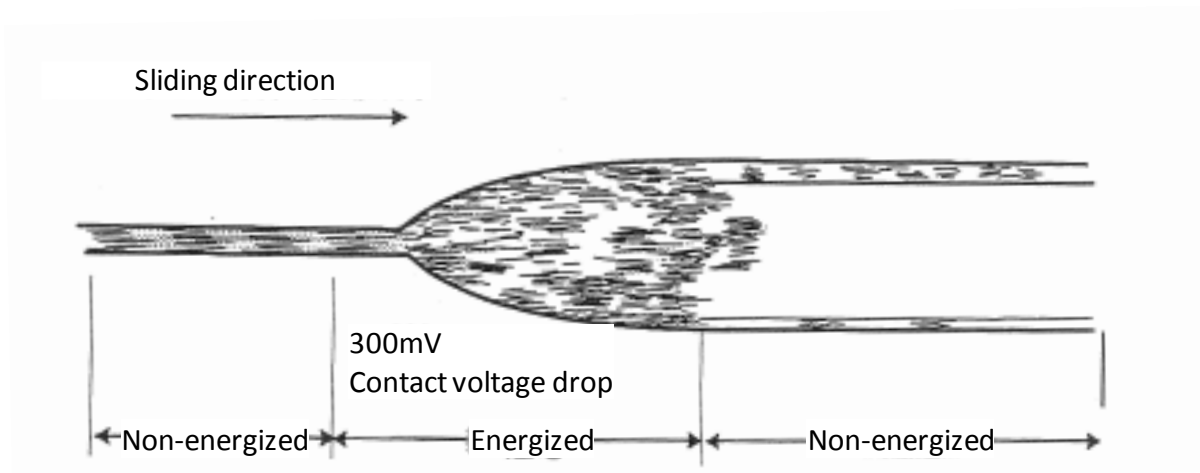


Figure 2.3.2 Wear track of Cu surface <sup>(6)</sup>

## 2.4 直動型摩耗試験機の開発

### 2.4.1 摩耗試験機の概要

2.3 節で述べた検討項目を考慮して、本研究では従来のような回転型摩耗試験機ではなく、トロリ線材を直線的に配置し、すり板をスライダーとしてしゅう動させる直動型摩耗試験機を開発した。摩耗試験機の概略図を図 2.4.1 および図 2.4.2 に示し、外観写真を図 2.4.3 に示す。

図 2.4.1 において、すり板のしゅう動方向である  $x$  方向の駆動は、電磁式のリニアアクチュエータを用いた。なお、すり板のしゅう動時摩擦力は、ロードセルで測定する。試験機に取り付けられるトロリ線の長さは最大 1300mm であり、アクチュエータの加速性能上、しゅう動速度は 1000mm/s 以下に制限される。しかしながら 2.3 節で述べたように、摩擦熱を抑制するために高速しゅう動する必要はない。また、比較的小型の試験機であるため、トロリ線の取り換えが容易となり、摩耗試験毎に試験片を保存し、摩耗面の精密な観察が可能である。

図 2.4.2 において、すり板のトロリ線押付方向である  $y$  方向の移動は、ボールねじ式リニアアクチュエータを用い、すり板をバネによってトロリ線に押し付ける。すり板を押し付けた際の接触力は図中のロードセルで測定する。摩耗試験中にトロリ線やすり板が摩耗し形状が変化すると、トロリ線とすり板が接触するまでの  $y$  方向アクチュエータの駆動距離が増加する。このため、しゅう動毎の接触力を一定に保つために、ロードセルからの値を読み取り、所定の接触力になるまでアクチュエータを駆動させる制御方式とした。なお、接触力は 0~100N まで設定できる。

トロリ線とすり板のしゅう動方向を一方向とするため、往路でトロリ線とすり板を接触させ、復路で非接触とする。この非接触時間の調節によりトロリ線のしゅう動は間欠的になり、パンタグラフの通過間隔を再現したインターバルを設定できる。

通電を伴う摩耗試験を実施する場合、3相交流 200V をシリコン整流器で直流 0~100V に変換し、基本的には直流電気鉄道と同様にトロリ線を陽極、すり板を陰極として通電する。可変抵抗器により通電電流を 0~100A の範囲で設定する。ただし、往路の接触しゅう動中は通電するが、復路では非接触となるため電流を遮断しなければアークが発生し、トロリ線およびすり板のしゅう動面が不必要に荒らされてしまう。そこで、復路動作時は電流を遮断するよう開閉器を設けてプログラム操作する。

直動型摩耗試験機の通電機構は、従来の回転型摩耗試験のようなスリップリングを必要としない。そのため、トロリ線とすり板以外の通電しゅう動部分がなく、接触電圧の測定精度の向上が期待できる。さらに、トロリ線を電流が流れる際の電圧降下が接触電圧測定精度に影響を及ぼさないよう、図 2.4.1 に示すように、トロリ線の通電端子とは反対の箇所とすり板間の電圧を測定する。

### 2.4.2 試験片形状と摩耗率測定方法

摩耗試験に供するトロリ線試験片は、実物トロリ線や金属板を使用できる。実物トロリ線を使用する場合、トロリ線の断面形状は第 1 章の図 1.1.5 に示すように円形であるため、そのままではトロリ線とすり板は面接触とはならず、摩耗に伴い見かけ接触面幅が変化し、結果として摩耗試



験中に接触面圧が変化する．そこで，摩耗試験中の見かけの接触面積を一定に保つため，図 2.4.4 のようにトロリ線の大弧面を切削し，平面を出してから試験に供する．

摩耗試験に供するすり板試験片もトロリ線と同様，実物すり板や金属板を使用できる．すり板試験片の基本寸法はトロリ線試験片の幅 15.29mm よりも小さい 10mm×10mm×10mm の試験片とする．摩耗試験時にトロリ線とすり板が面接触となるよう，摩耗試験前にすり板の全接触面にしゅう動痕が観察できるまで無通電なじみ運転を実施する．なお，無通電なじみ運転の前後にアセトンで両試験片表面を洗浄する．

摩耗試験前に実施するなじみ運転でもトロリ線やすり板は摩耗する．なじみ運転は試験片片当たりの抑制が目的であるため，なじみ運転後に試験片を試験機から取り外すことはできず，摩耗試験による摩耗量を高い精度で測定するためには，試験片を試験機に取り付けた状態で摩耗量を測定する必要がある．

すり板の幅がトロリ線の幅よりも小さいため，トロリ線表面には摩耗しない面が残る．この非摩耗面を基準面とし，図 2.4.5 に示す粗さ計を用いて摩耗試験前後のトロリ線断面プロファイルを測定することで，トロリ線の摩耗面積を算出する．なお，断面プロファイルの走査方向は図 2.4.1 の  $z$  方向である．図 2.4.6 に摩耗試験前後のトロリ線断面プロファイル測定結果例を示す．このトロリ線断面プロファイル測定を  $x$  方向に 5mm 間隔で 5 箇所実施し，摩耗面積の平均値  $A$  [mm<sup>2</sup>] を用いて，次式でトロリ線摩耗率  $W_{st}$  [mm<sup>2</sup>/N·cycle] を算出する．

$$W_{st} = \frac{A}{P \cdot N} \quad (2.1)$$

ここで， $P$  は接触力[N]， $N$  はしゅう動回数[cycle]である．粗さ計を用いるため，トロリ線表面の変化が  $\mu\text{m}$  オーダーで精緻に測定でき，摩耗率精度の向上が期待できる．

2次元レーザー変位計を用いて摩耗試験前後のすり板表面を走査し，図 4.2.7 に示すような 3次元形状を測定することで，すり板の摩耗体積  $V$  [mm<sup>3</sup>] を算出する．すり板比摩耗量  $W_{ss}$  [mm<sup>3</sup>/N·m] は，次式で算出する．

$$W_{ss} = \frac{V}{P \cdot L_f \cdot N} \quad (2.2)$$

ここで， $L_f$  は往路のしゅう動距離[m]である．

以上を踏まえ，直動型摩耗試験機を用いた摩耗試験の手順を図 2.4.8 に示す．

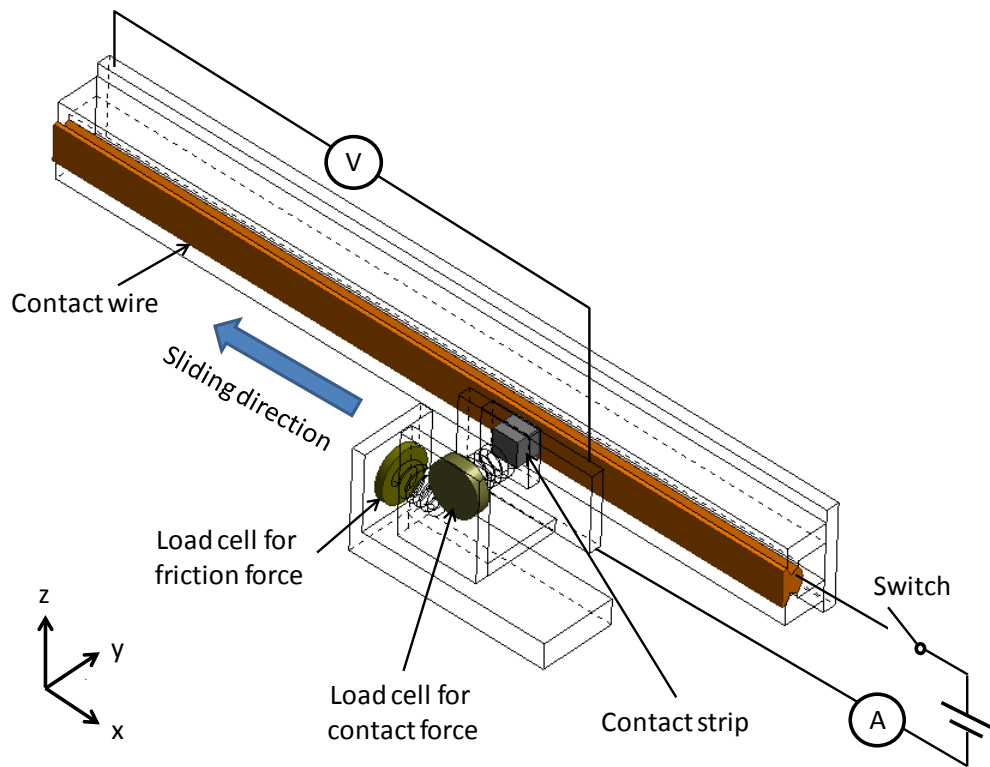


Figure 2.4.1 Schematic diagram of linear wear test apparatus

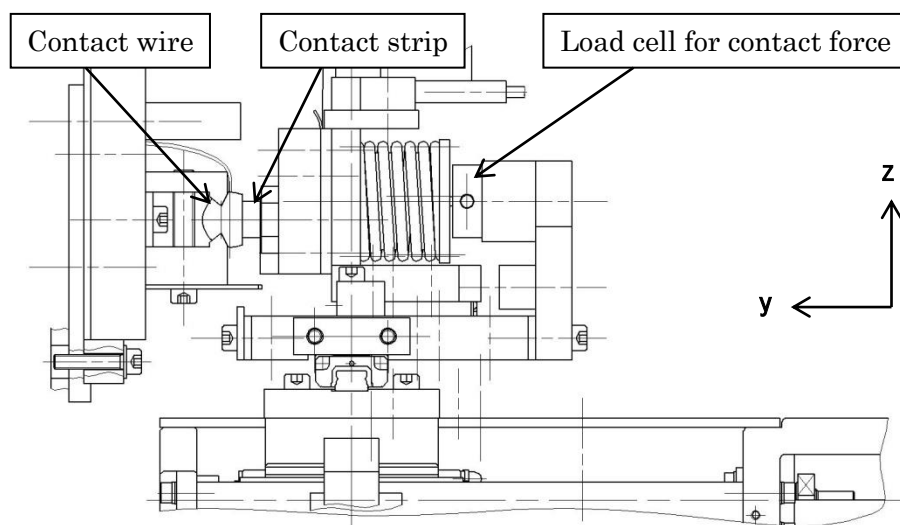


Figure 2.4.2 Detail of contact strip pressing mechanism

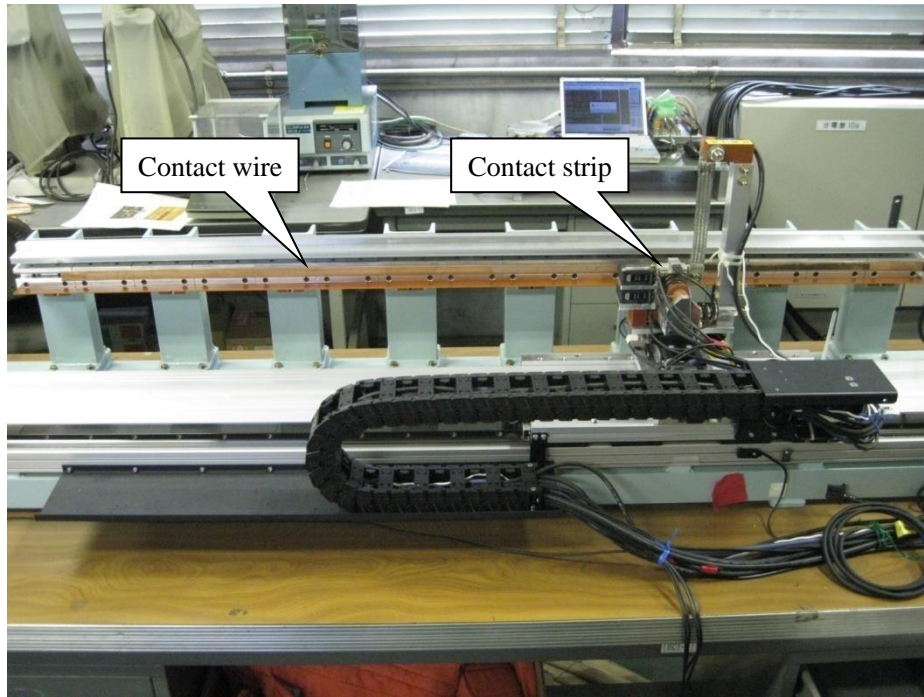


Figure 2.4.3 Appearance picture of linear wear test apparatus

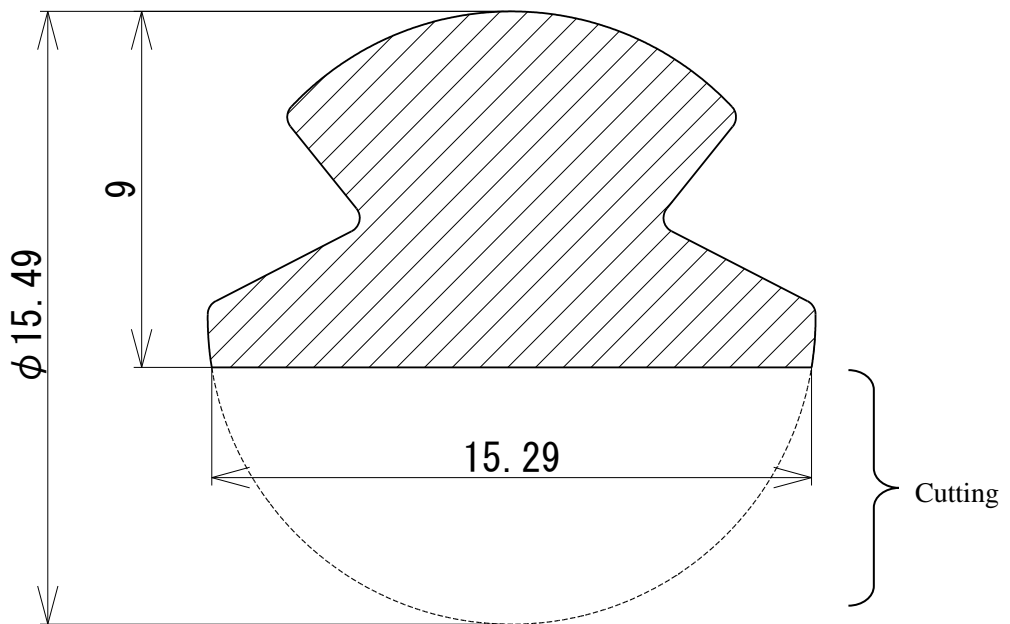


Figure 2.4.4 Wear test specimen of contact wire (GT110)

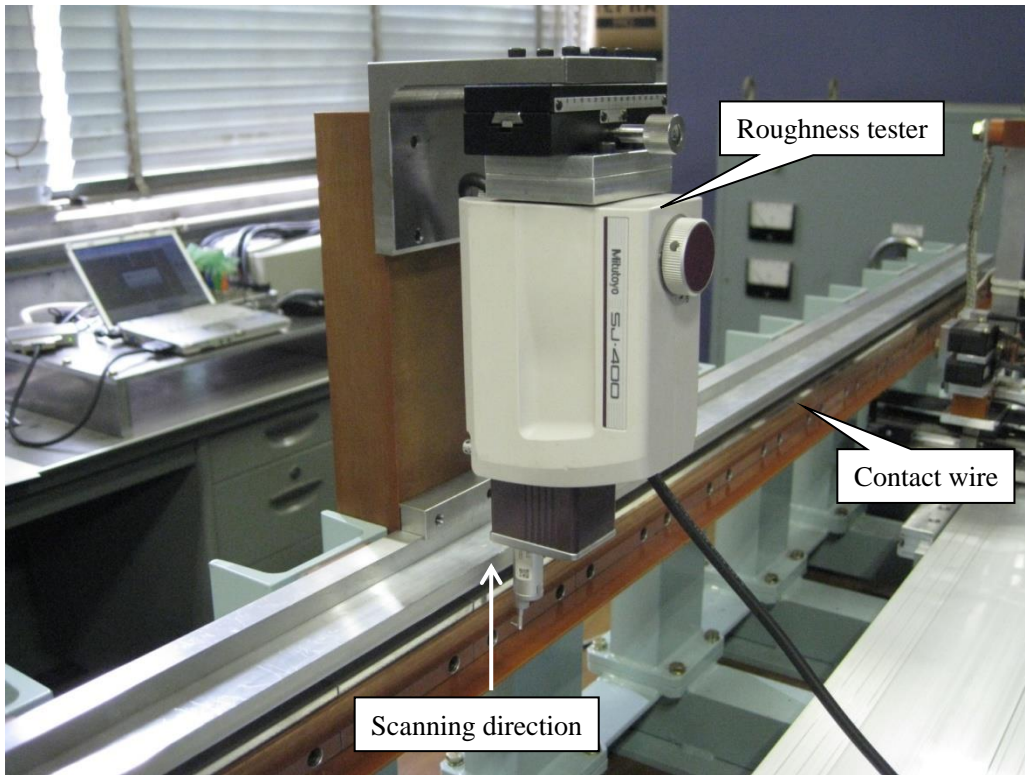


Figure 2.4.5 Measurement situation of cross-section profile of contact wire by using roughness tester

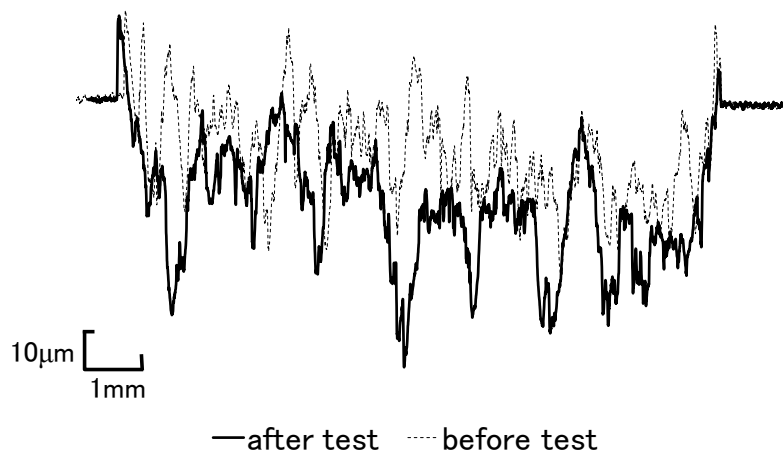


Figure 2.4.6 Cross-section profile example of contact wire before and after wear test

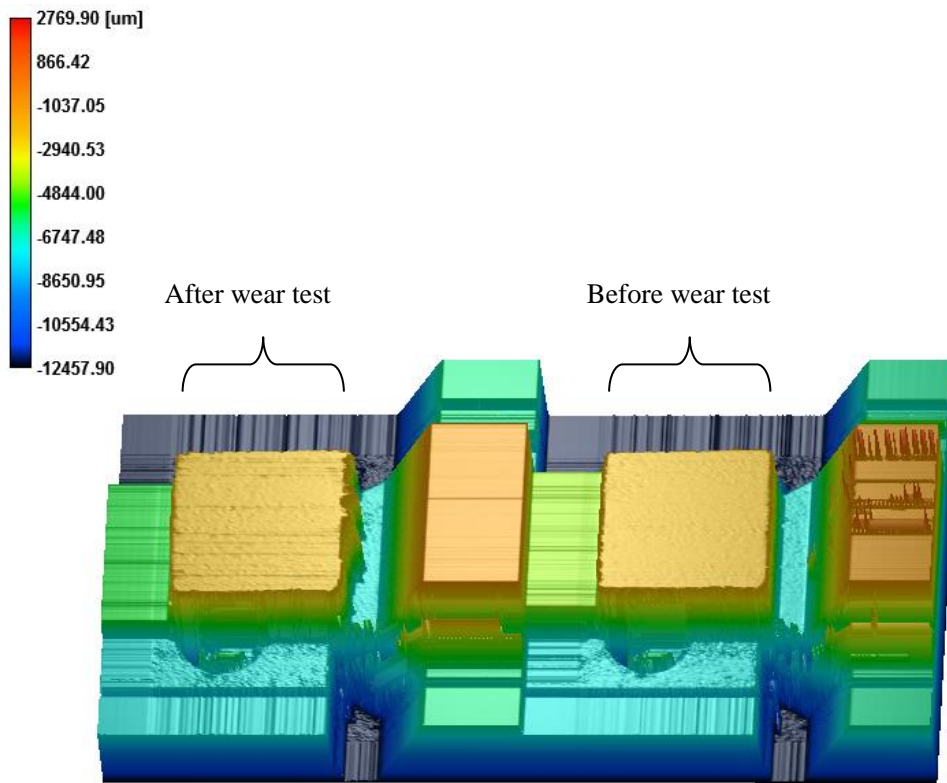


Figure 2.4.7 Three dimensional shape example of contact strip before and after wear test

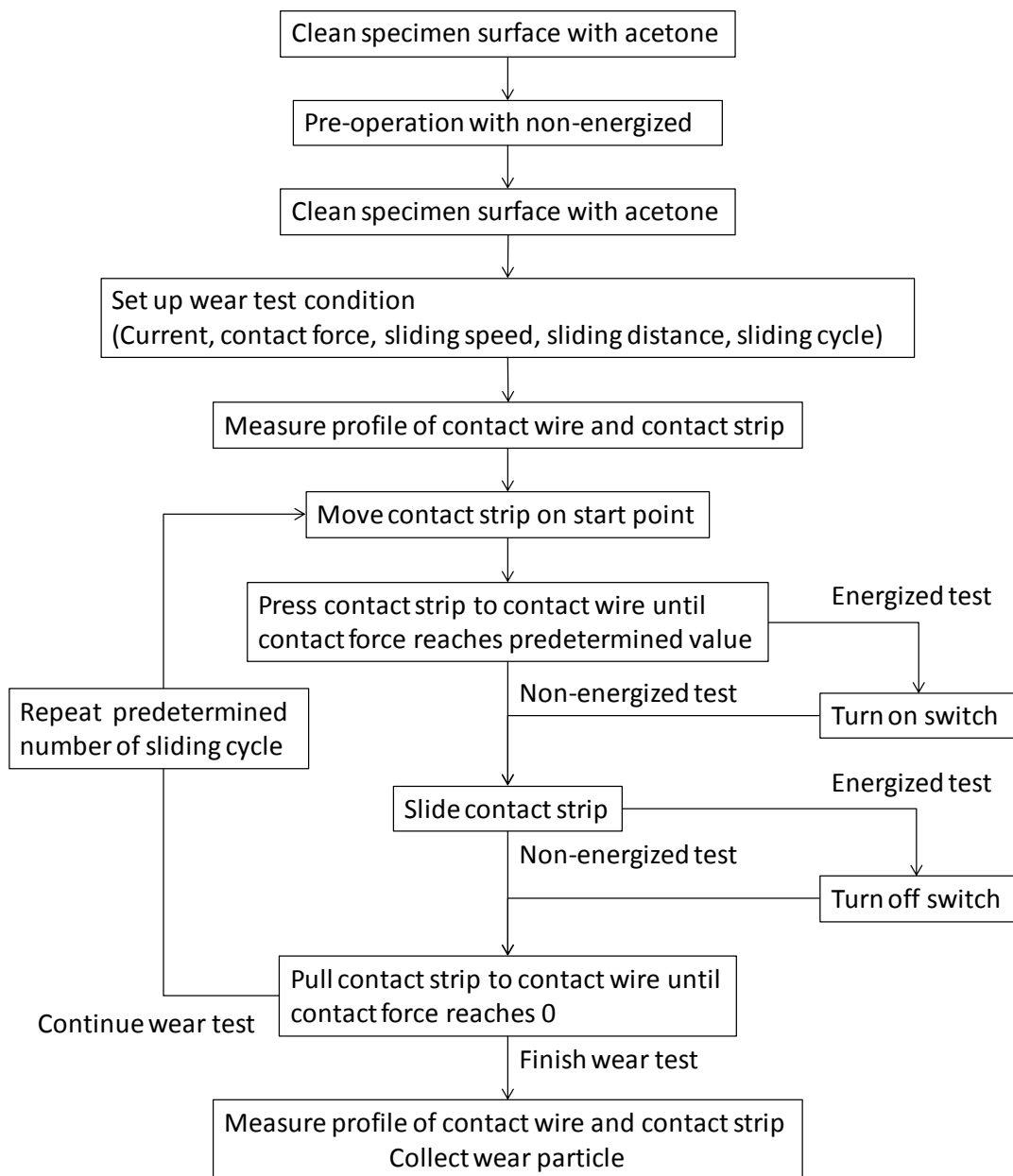


Figure 2.4.8 Flowchart of wear test procedure

## 2.5 通電しゅう動試験結果

開発した直動型摩耗試験機の性能を把握するため、通電しゅう動試験を実施した。試験に供したトロリ線およびすり板の、試験片種別および物性値を表 2.5.1 に示す。トロリ線試験片としては JIS E2101「みぞ付き硬銅トロリ線」の公称断面積  $170\text{mm}^2$ (GT-170)を用い、すり板は新幹線で一般的に使用されている鉄系焼結合金(TF5A)を用いた。また、通電しゅう動試験条件を表 2.5.2 に示す。

摩耗試験中に測定する項目は、しゅう動速度、接触力、摩擦力、電流、接触電圧である。測定波形例を図 2.5.1 に示す。このうち 2.3 節で検討した①接触力変動の抑制、②接触電圧の測定精度について、以下に述べる。

### 2.5.1 接触力測定結果

設定する接触力としゅう動速度を変化させ、 $10\text{kHz}$  のサンプリング周波数でしゅう動中の接触力を測定した。接触力測定波形から、接触力変動の度合いを示す標準偏差  $\sigma_c$  を算出した結果を図 2.5.2 に示す。なお参考として、すり板をしゅう動させない静止時（しゅう動速度： $0\text{mm/s}$ ）の測定値も図 2.5.2 に示す。この図より、静止時においても接触力変動が存在し、試験機の微小な振動や測定系のノイズによるものと考えられる。しゅう動速度  $20\text{mm/s}$  における標準偏差値は静止時と同等であるが、しゅう動速度が増加するほど接触力標準偏差は増加することがわかる。特に、しゅう動速度  $1000\text{mm/s}$  の平均接触力が  $10\text{N}$  未満の場合、標準偏差が急激に増加していることがわかる。以上より、しゅう動速度が増加するほど、また接触力が減少するほど、トロリ線表面の微小な凹凸に対するすり板押付け機構の追随性が低下することがわかる。

接触力の平均値に対する  $3\sigma_c$  の比を図 2.5.3 に示す。 $3\sigma_c$  は統計的な接触力の最大変動値と考えてよい。しゅう動速度  $20\text{mm/s}$  における統計的最大変動値の比は静止時と同等であるが、しゅう動速度が増加するほど統計的最大変動値の比は増加することがわかる。特に、しゅう動速度  $1000\text{mm/s}$  の設定接触力が  $6\text{N}$  未満の場合、統計的最大変動値が平均値の  $100\%$  以上になっている。接触力の変動幅が平均値以上であることは、統計的最小接触力（=平均接触力- $3\sigma_c$ ）が  $0\text{N}$  以下になること、すなわち離線が発生することを意味する。

従来の摩耗試験機では、静止時に数十  $\text{N}$  の接触力を与えてもなお、しゅう動時の接触力変動が大きく、離線が発生していた。一方、本摩耗試験機ではしゅう動速度  $200\text{mm/s}$  以下における接触力標準偏差は非常に小さく、統計的最大変動値をとっても  $1\text{N}$  未満であり、接触力変動は十分に小さいといえ、摩耗形態混在の抑制が期待できる。

### 2.5.2 接触電圧測定結果

すり板の接触力  $50\text{N}$ 、通電電流  $100\text{A}$  の条件において、静止時およびしゅう動速度  $200\text{mm/s}$  における電流波形と接触電圧波形例を図 2.5.4 に示す。なお、サンプリング周波数は  $10\text{kHz}$  である。図 2.5.4 (a)より、静止時の電流波形および接触電圧波形はシリコン整流器で整流されたリップル波形であり、測定結果に対するノイズの影響はほとんどみられない。一方で図 2.5.4(b)より、しゅう動中の電流波形は静止時と同様であるが、接触電圧波形は大きく変動していることがわかる。2.4.1 節で述べたように、直動型摩耗試験機ではトロリ線とすり板以外の通電しゅう動部分はなく、図



2.5.4(b)の接触電圧変動はしゅう動中の微小な接触力変動や接点数の変化が反映されたものと考えられる。

設定する接触力としゅう動速度を変化させ、10kHzのサンプリング周波数でしゅう動中の接触電圧を測定した。図2.5.5に平均接触電圧と接触力およびしゅう動速度の関係を示す。この図より、接触力の減少に伴い平均接触電圧は増加するが、平均接触電圧に対する速度の影響はあまりみられないことがわかる。

図2.5.6に接触電圧標準偏差 $\sigma_e$ と接触力およびしゅう動速度の関係を示す。また、平均接触電圧と $3\sigma_e$ より統計的的最大接触電圧を算出したものを図2.5.7に示す。図2.5.6において、しゅう動速度0mm/sにおける接触電圧標準偏差は、図2.5.4(a)のリップル波形によるものである。図2.5.6および図2.5.7より、しゅう動速度の増加および接触力の減少に伴い、接触電圧の変動は増加することがわかる。

図2.5.8にアーク発生率としゅう動速度および接触力の関係を示す。ここでアーク発生率とは、アークが発生した総合時間としゅう動に要した総合時間の比である。一般に銅系材料のアーク発生時に生じる電極間電圧は最小で約13Vであり<sup>(7)</sup>、ここでは接触電圧が10V以上になった場合をアーク発生とみなした。なお、サンプリング周波数は10kHzである。図2.5.8より、しゅう動速度20mm/sでは全接触力条件でアークが発生せず、しゅう動速度200mm/sにおいてもアーク発生率は1%未満と非常に小さく、トロリ線とすり板の接触は維持されている。この図からも、接触力の変動は小さいことがわかる。しかしながら、しゅう動速度1000mm/sでは接触力10Nでアークが発生し、接触力の減少に伴いアークは顕著になる。

2.5.1節では、接触力の統計的的最大変動値から、しゅう動速度1000mm/sかつ接触力6N未満で統計的的最小接触力が0Nとなり離線が発生するとしたが、しゅう動速度1000mm/sの通電しゅう動試験においてアークは10Nで発生している。これは、接触力が0Nになる前にアークが発生することを示すものである。図2.5.9に接点の接触からアーク発生までの過程を示す<sup>(8)</sup>。この図より、接点の開離に伴い接点間の接触電圧 $V_c$ が上昇し、接点温度が材料の沸点に達する条件でアークが発生することがわかる。また、文献(8)ではトロリ線の主成分である銅、およびすり板の主成分である鉄の沸点に達する接触電圧を、それぞれ0.888Vおよび0.943Vとしている。図2.5.7より、統計的的最大接触電圧が0.943V以上となる条件は、しゅう動速度20mm/sでは存在せず、しゅう動速度200mm/sでは2.4Nしゅう動速度1000mm/sでは8.2N以下となっており、図2.5.8においてアークが発生する条件とほぼ一致する。

以上より、アーク発生条件と接触電圧の相関は良好であり、接触電圧の測定精度は十分であると考えられる。接触電圧を精緻に測定することで、摩耗試験中の接点温度を精緻に把握することができる。



Table 2.5.1 Sort and physical properties of wear test specimens

Specimen	Sort	component	Mass density g/mm <sup>3</sup>	Hardness MPa	Electric resistivity μΩm	Melting point K
Contact wire	GT170	Cu(99.9%)	$8.91 \times 10^{-3}$	895	$1.77 \times 10^{-2}$	1334
Contact strip	TF5A	Fe(78.6%), Cr(16.5%), S(0.9%)	$7.10 \times 10^{-3}$	960	0.40	1646

Table 2.5.2 Energized sliding test conditions

Contct force, N	2~80			
Sliding speed, mm/s	0	20	200	1000
Sliding distance, mm	0	50	250	1000
Voltage, V	DC 100			
Current, A	100			

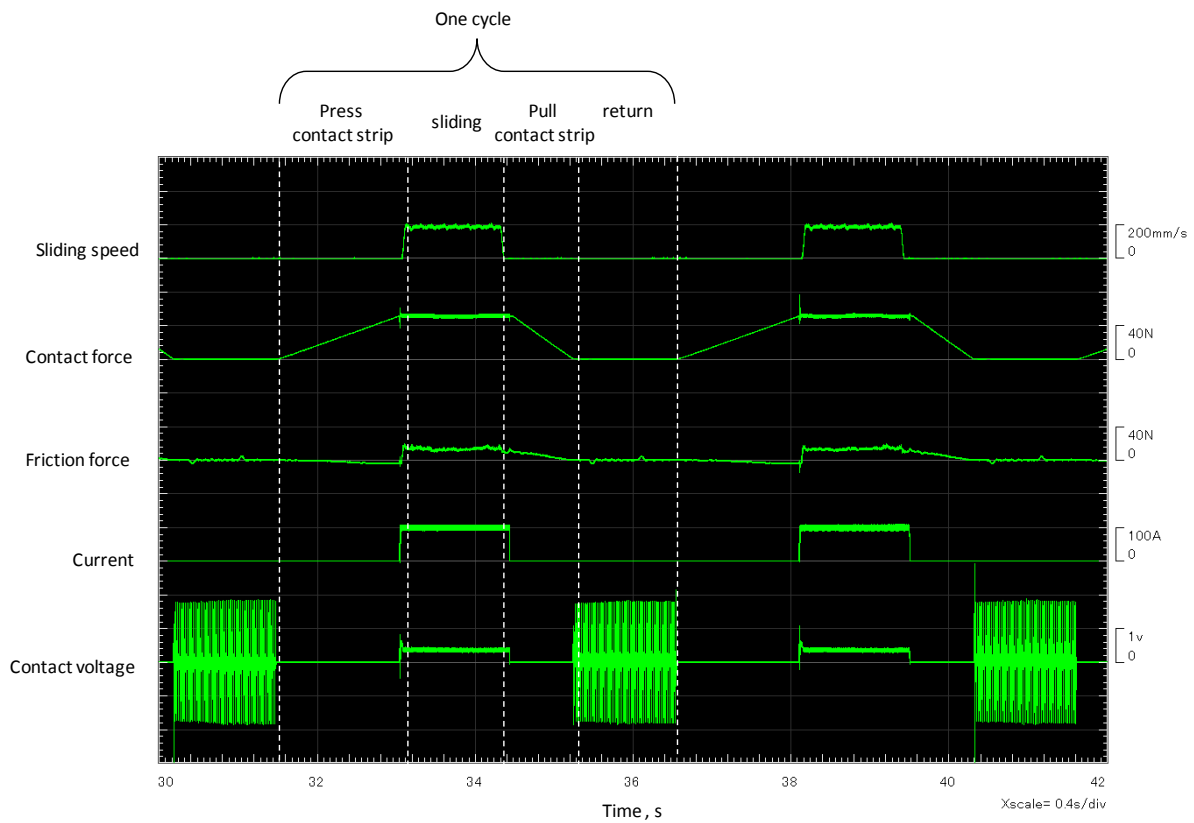


Figure 2.5.1 Measured waveform example (Contact force: 50N, sliding speed: 200mm/s, current: 100A)

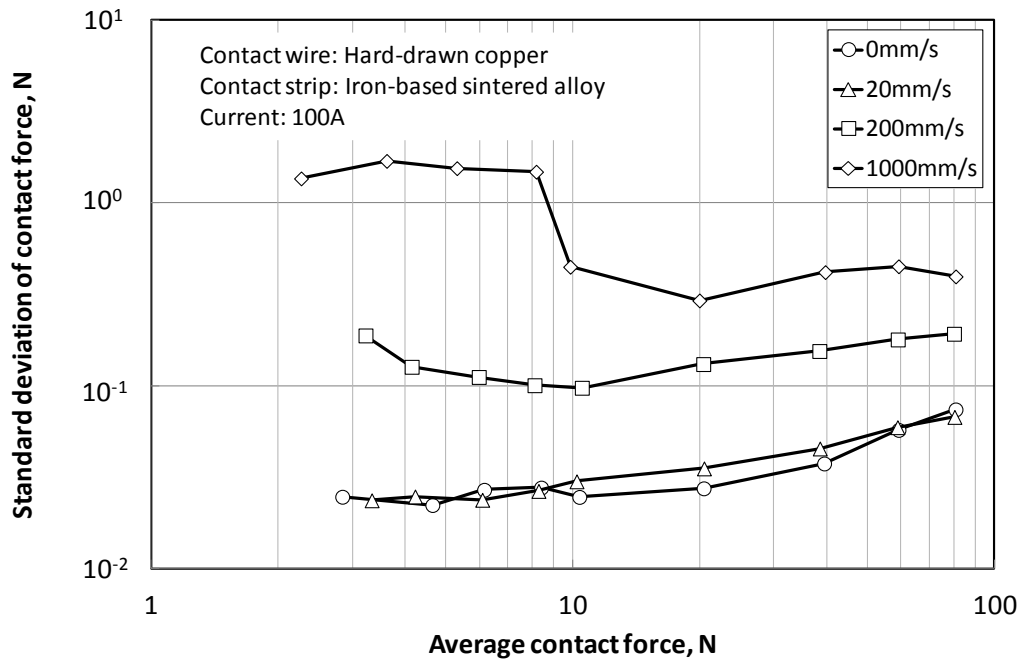


Figure 2.5.2 Influence of contact force and sliding speed on standard deviation of contact force

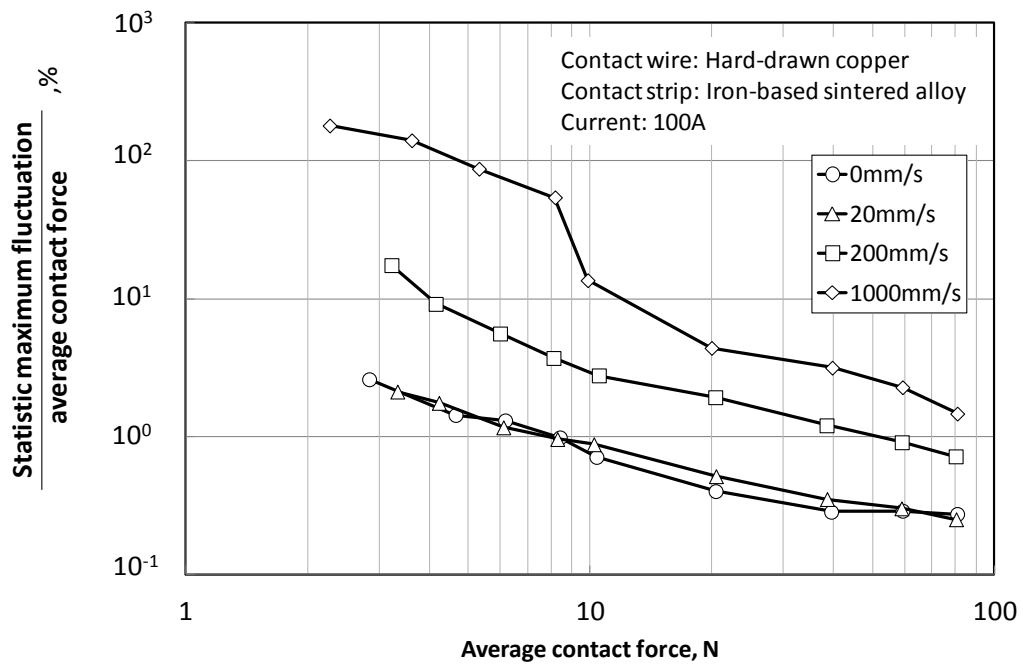
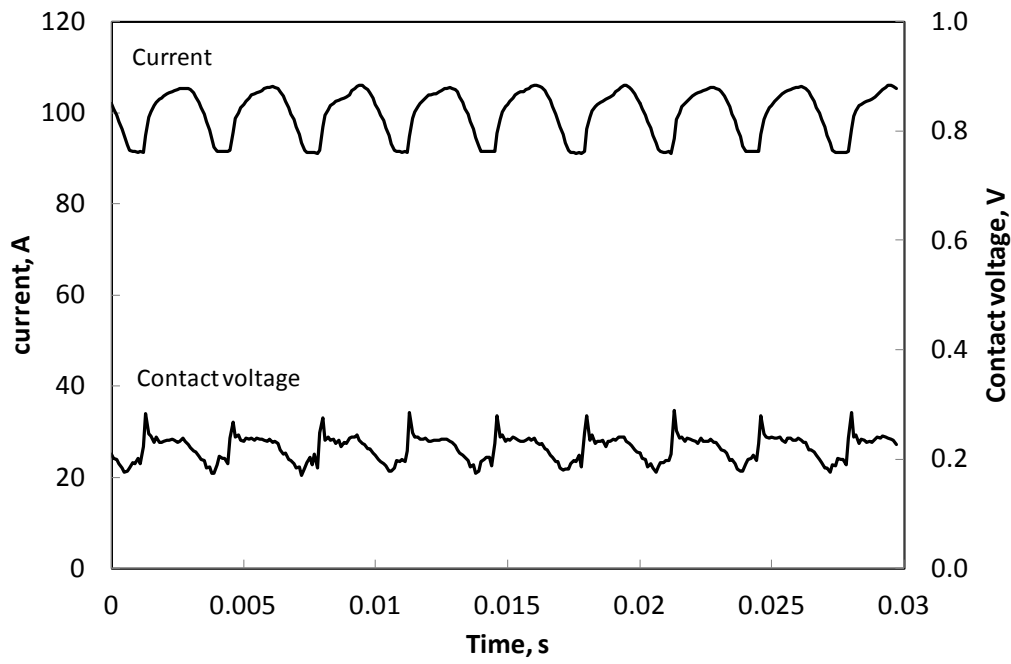
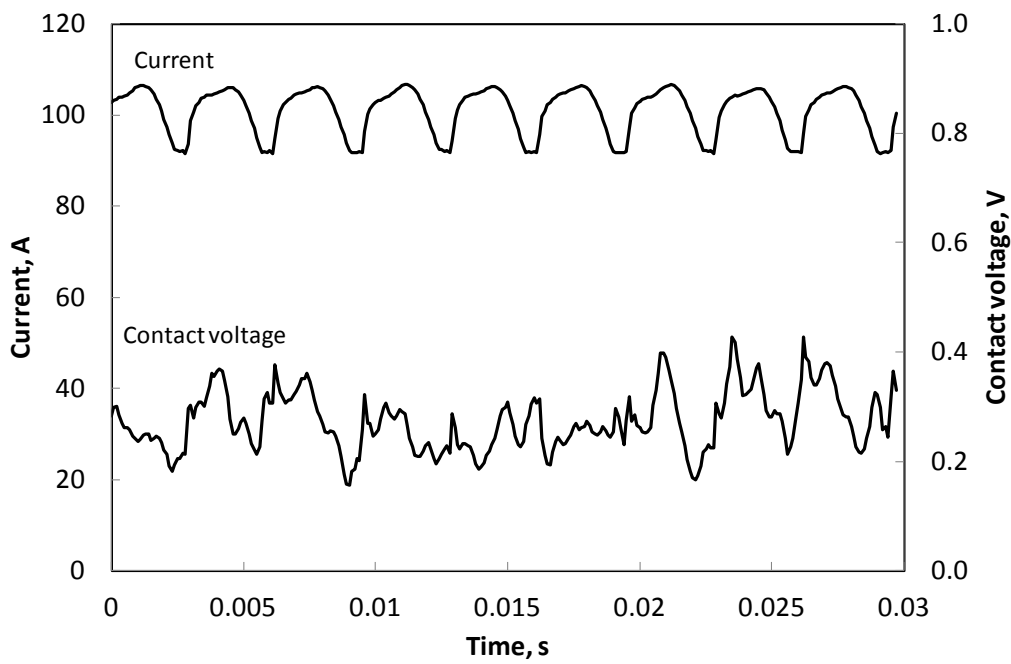


Figure 2.5.3 Ratio of statistic maximum fluctuation of contact force for average contact force



(a) Static state (Sliding speed: 0mm/s)



(b) Sliding state (Sliding speed: 200mm/s)

Figure 2.5.4 Measured waveform of current and contact voltage (Contact force: 50N, current: 100A)

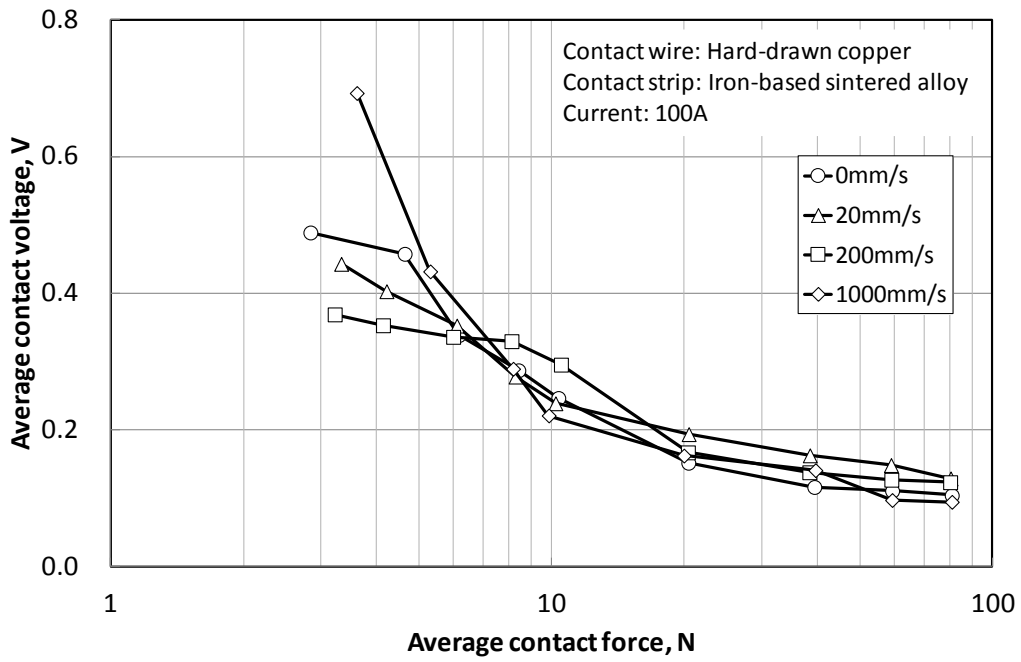


Figure 2.5.5 Influence of contact force and sliding speed on average contact voltage

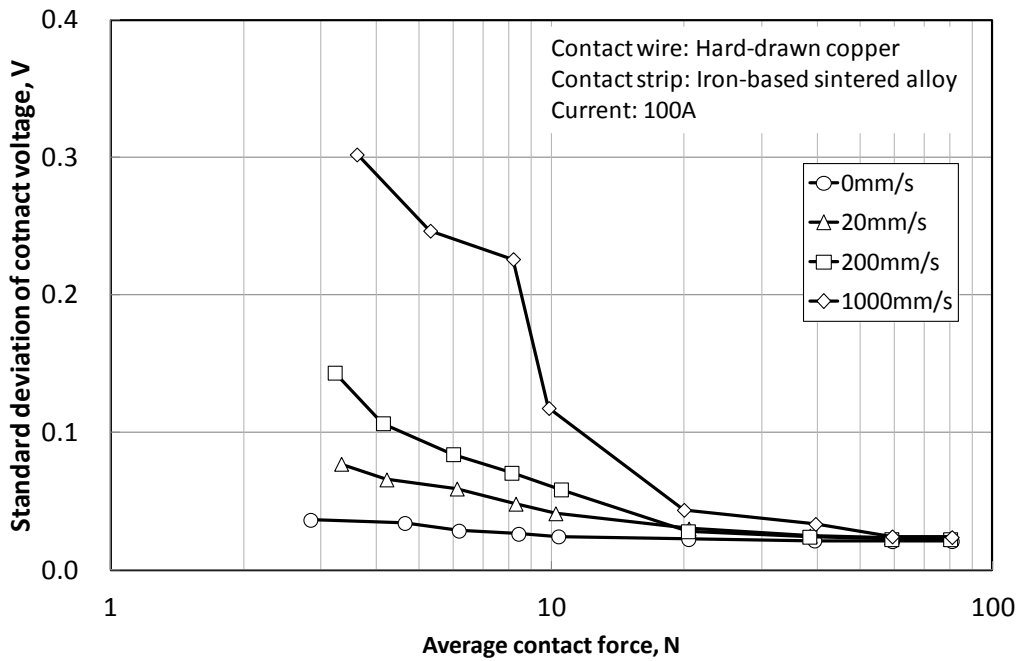


Figure 2.5.6 Influence of contact force and sliding speed on standard deviation of contact voltage

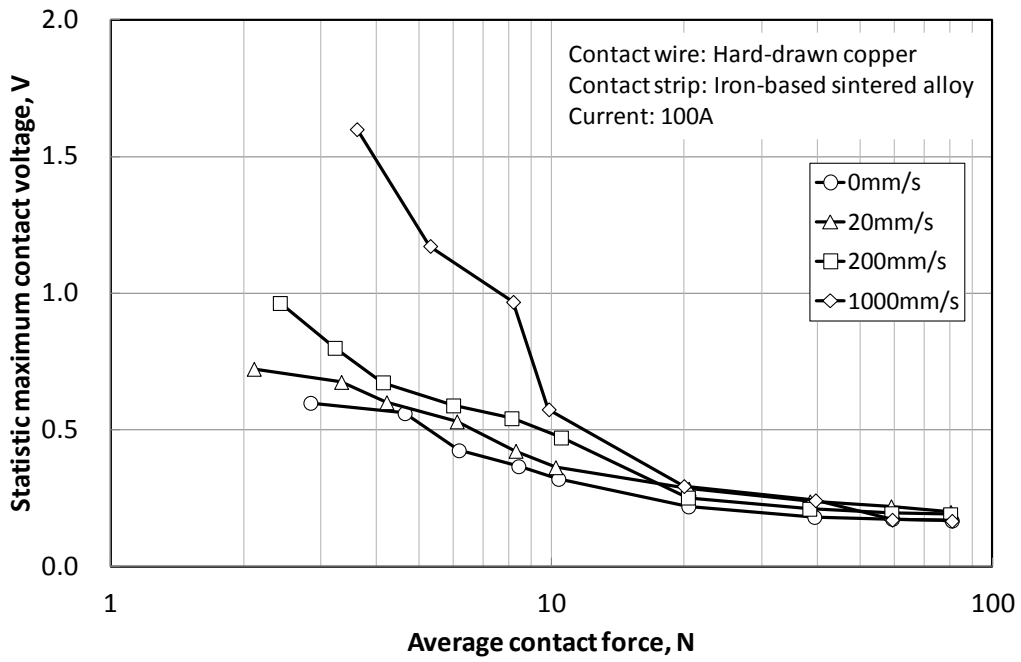


Figure 2.5.7 Statistic maximum contact voltage in each sliding speed

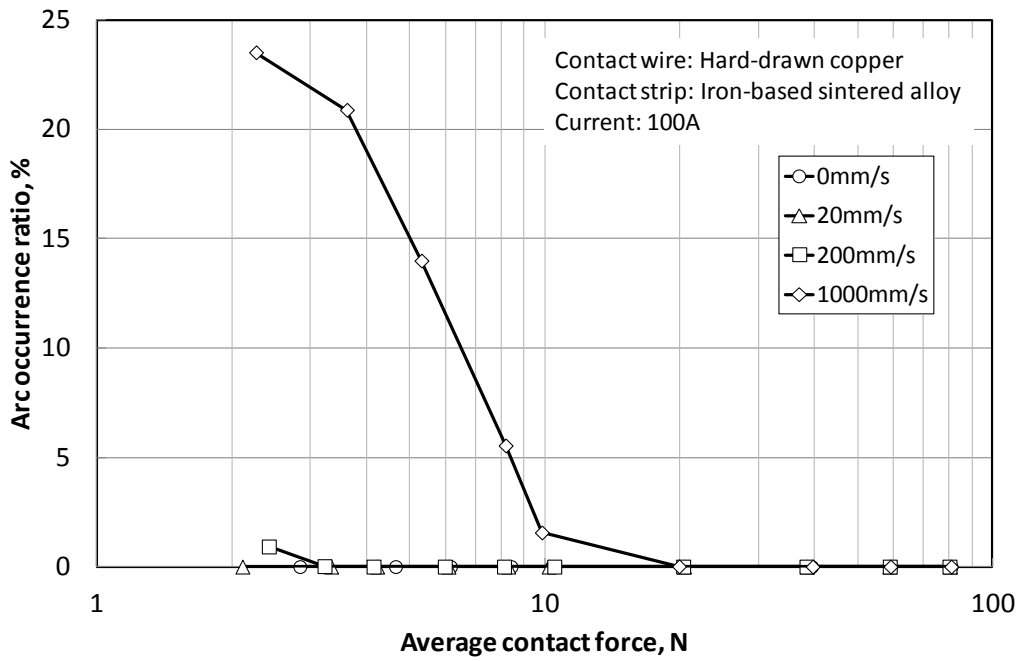


Figure 2.5.8 Influence of contact force and sliding speed on arc occurrence ratio

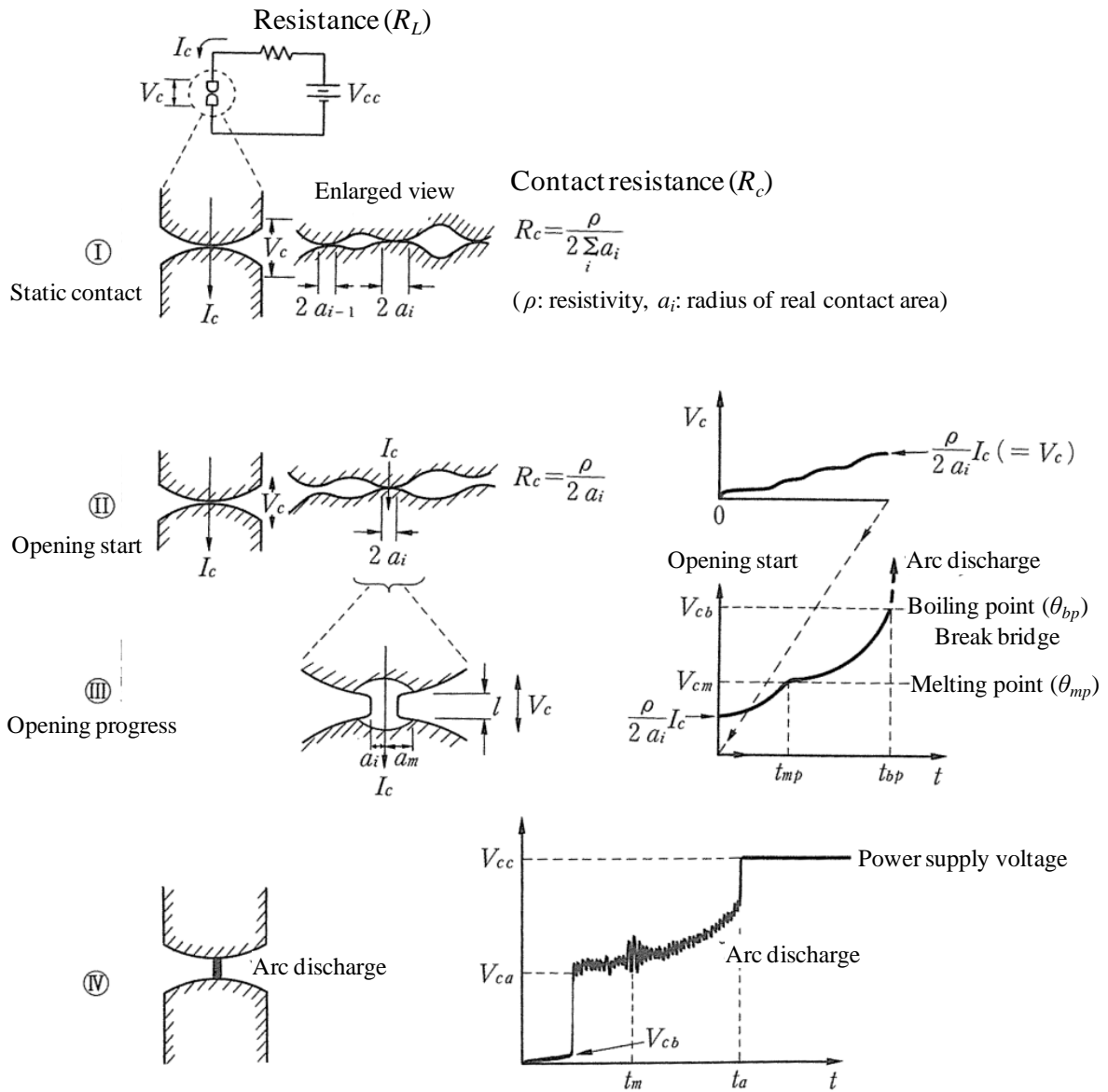


Figure 2.5.9 Opening contact <sup>(8)</sup>

## 2.6 結言

集電材料の通電摩耗機構を解明するために、摩耗形態の遷移現象に着目し、摩耗形態を観察するための試験方法を検討した。その結果、従来のようなトロリ線を円盤とする回転摩耗試験機ではなく、トロリ線を現場と同様直線的に配置して間欠しゅう動する直動型摩耗試験機を開発した。また、開発した試験機を用いて通電しゅう動試験を実施し、その性能を検証した。

得られた具体的な結論は以下のとおりである。

- (1) 新たに開発した直動摩耗試験機を用いることで、接触力の変動値を 1N 未満に抑制することができ、大きな接触力条件で離線することはなかった。これにより、摩耗形態混在の抑制が期待できる。
- (2) 統計的最大接触電圧が材料の沸点に達する条件とアークの発生条件はほぼ一致し、接触電圧の測定精度は良好であることを確認した。
- (3) 直動摩耗試験機を用いることで、摩耗条件を極力一定に保ち、かつ接点温度を精緻に把握した摩耗試験が初めて実施可能となった。

## 参考文献

- (1) 岩瀬勝, パンタグラフ集電と摩耗( I ), 鉄道技術研究報告, 53 (1959).
- (2) 岩瀬勝, 集電技術ア・ラ・カルト, 研友社 (1998) 20-25.
- (3) 岩瀬勝, パンタグラフ集電と摩耗(III), 鉄道技術研究報告, 217 (1961).
- (4) S. C. Lim and M. F. Ashby, Wear Mechanism Maps, Acta metallurgica, 35, 1 (1987) 1-24.
- (5) R. Holm, Electric Contacts Theory and Applications, Springer (1967) 60-64.
- (6) 岩瀬勝, パンタグラフすり板の摩耗( I ), 鉄道技術研究報告, 327 (1962).
- (7) 鳳誠三郎, 電気接点および開閉接触子, 金原出版, (1962) 197.
- (8) 高木相, 電気接点のアーカ放電現象, コロナ社, (1995) 2-5.



## 第 3 章

# 集電材料の摩耗特性に及ぼす通電電流の影響

### 3.1 緒言

集電材料の摩耗はこれまで経験的に機械的摩耗と電氣的摩耗に大別されてきた<sup>(1)</sup>。機械的摩耗は主としてトロリ線とすり板の凝着摩耗に起因するとされ、電氣的摩耗はトロリ線とすり板の離線時に発生するアークに起因するとされている<sup>(2, 3)</sup>。寺岡<sup>(4)</sup>や河野<sup>(5)</sup>らは、接触力が小さい条件において、アーク損耗により集電材料の摩耗率は著大になると報告している。また、長沢・網干<sup>(6)</sup>らはアーク損耗の観点から、トロリ線波状摩耗の抑制対策を提案している。このように、離線アークと著大摩耗を関連付ける報告がある一方で、岩瀬<sup>(1)</sup>、河野<sup>(2)</sup>、木村<sup>(7)</sup>らは現場測定および定置試験において、離線アーク多発箇所におけるトロリ線摩耗は非常に小さくなることを報告している。以上のことから、実機で起こる通電摩耗現象はアーク損耗だけで説明しきれず、未だ解明されていないといえる。

本研究では通電摩耗機構を解明するため摩耗形態の遷移機構に着目し、第 2 章では摩耗形態を観察するための直動型摩耗試験機を開発した。

本章では、通電下における集電材料の摩耗形態、特に電氣的摩耗形態およびその遷移条件を明らかにするため、最も摩耗に対する影響が強いとされる電流を変化させた摩耗試験を実施する。

### 3.2 試験方法

#### 3.2.1 試験装置

試験に用いた装置は、第 2 章で開発した直動型摩耗試験機である。

#### 3.2.2 試験片

摩耗試験に供したトロリ線とすり板は、第 2 章と同一の硬銅トロリ線および鉄系焼結合金すり板である。試験片の種別および物性値を表 3.2.1 に示す。本章で鉄系焼結合金すり板を選定した理由は、成分分析による移着物の判別を容易にするためである。

#### 3.2.3 試験条件

本試験の試験条件を表 3.2.2 に示す。電流を 4 段階設定し、各電流について接触力を変化させて摩耗試験を実施した。試験条件の設定理由を以下に述べる。

### (1) 見かけの接触面積

見かけの接触面積は第 2 章 2.4.2 節で述べたように、すり板試験片形状から  $10\text{mm}\times 10\text{mm} = 100\text{mm}^2$  である。

### (2) 接触力

接触力については、現場のパンタグラフ接触面圧を考慮して設定した。現場のパンタグラフは第 1 章の図 1.1.6 に示すように 2 列のすり板でトロリ線に接触している。一般的なすり板幅は  $40\text{mm}$  であり、2 列で  $80\text{mm}$  となる<sup>(8)</sup>。トロリ線のしゅう動面幅は平均  $4\text{mm}$  とされており<sup>(8,9)</sup>、現場の平均見かけの接触面積は  $80\text{mm}\times 4\text{mm} = 320\text{mm}^2$  と算出される。日本におけるパンタグラフの静押付力は一般的に  $54\text{N}$  であるが、高速走行時にはパンタグラフ舟体に揚力が発生し、接触力は  $200\text{N}$  近くになる。以上より、現場のパンタグラフの接触面圧を  $0.63\text{MPa}$  と試算した。この接触面圧を考慮して、摩耗試験の接触力設定条件を  $2\sim 80\text{N}$  とした。これは接触面圧にして  $0.02\sim 0.80\text{MPa}$  である。

### (3) しゅう動速度

しゅう動速度については、アーク発生率の観点から設定した。第 2 章 2.5 節で述べたように、直動型摩耗試験機のしゅう動速度は  $1000\text{mm/s}$  以下の低速しゅう動であるが、しゅう動速度が増加するほどアーク発生率も増加する。摩耗試験では摩耗形態の混在を抑制するため、接触力が大きい条件でのアーク発生率を抑制する必要がある。この点から速度  $1000\text{mm/s}$  は本摩耗試験条件としては不適当と考える。一方で、アークが全く発生しなければ、アークによる摩耗形態も観察できないため、接触力が小さい条件ではアークが発生する必要がある。以上を考慮し、しゅう動速度を  $200\text{mm/s}$  に設定した。

### (4) しゅう動インターバル

現場において車両に複数のパンタグラフが装備されている場合、トロリ線の定点をパンタグラフが通過するインターバルは数秒であり、摩耗試験のしゅう動インターバルを約 5 秒に設定した。

### (5) しゅう動回数

しゅう動回数については、トロリ線の摩耗量測定精度および試験時間を考慮して設定した。第 2 章 2.4.2 節で述べたように、トロリ線の摩耗量は定点における断面プロファイルの測定によって求めるため、しゅう動回数が多いほど摩耗量が増加し、測定精度は向上する。試験機への試験片取付けや無通電なじみ運転の時間、しゅう動インターバルを考慮すると、1 日で可能なしゅう動回数は 3000 回程度となる。ただし、アーク発生などで試験片の摩耗が急激に促進される場合は、3000 回未滿で試験を停止する。

### (6) しゅう動距離

しゅう動距離については、すり板の摩耗量測定精度を考慮して設定した。第 2 章 2.4.2 節で述べたように、すり板の摩耗量は摩耗試験前後の体積差測定によって求めるため、総しゅう動距離が多いほど摩耗量が増加し、測定精度は向上する。しゅう動速度を  $200\text{mm/s}$ 、しゅう動インターバ

ルを約 5 秒としたため、総しゅう動距離を長くできるよう、1 サイクルのしゅう動距離を 250mm とした。

#### (7) 通電電圧

第 2 章 2.4.1 節で述べたように、直動型摩耗試験機に通電する場合、3 相交流 200V をシリコン整流器で直流 0~100V に変換する。一般に銅系材料のアーク発生時に生じる電極間電圧は最小で約 13V であったため<sup>(10)</sup>、摩耗試験時に離線した場合にアークが発生するよう電源電圧を 100V とした。

現場の直流区間における通電方向はトロリ線が陽極、すり板が陰極であり、摩耗試験でも現場の通電方向に準じた。

#### (8) 通電電流

第 2 章 2.4.1 節で述べたように、直動型摩耗試験機に通電する場合、最大で 100A まで設定できる。摩耗試験では、集電材料の摩耗特性に及ぼす電流の影響を調査するため、通電電流を 0, 50, 80, 100A の 4 段階とした。

### 3.2.4 測定項目および測定方法

#### (1) 試験前

摩耗試験前、すなわち無通電なじみ運転後に、粗さ計を用いてトロリ線断面プロファイルを測定し、2 次元レーザー変位計ですり板の 3 次元形状を測定する。

#### (2) 試験中

摩耗試験中の測定項目はしゅう動速度、接触力、摩擦力、電流、接触電圧であり、測定方法は第 2 章と同一である。

#### (3) 試験後

摩耗試験後に、粗さ計を用いてトロリ線断面プロファイルを測定し、2 次元レーザー変位計ですり板の 3 次元形状を測定する。これによりトロリ線およびすり板の摩耗率を算出する。

また、直動型摩耗試験機からトロリ線およびすり板を取り外し、摩耗粒子を採取する。それらを走査型電子顕微鏡(SEM : Scanning electron microscope)を用いて観察し、X 線マイクロアナライザ(EPMA : Electron probe X-ray microanalyzer)を用いて元素分布像を撮影する。

### 3.2.5 試験手順

摩耗試験手順は、第 2 章 2.4 節で述べたものと同一である。

Table 3.2.1 Sort and physical properties of wear test specimens

Specimen	Sort	component	Mass density, g/mm <sup>3</sup>	Hardness, MPa	Electric resistivity, μΩm	Melting point, K
Contact wire	GT170	Cu(99.9%)	8.91×10 <sup>-3</sup>	895	1.77×10 <sup>-2</sup>	1334
Contact strip	TF5A	Fe(78.6%), Cr(16.5%), S(0.9%)	7.10×10 <sup>-3</sup>	960	0.40	1646

Table 3.2.2 Wear test conditions

Apparent contact area, mm <sup>2</sup>	100			
Contact force, N	2~80			
Sliding speed, mm/s	200			
Friction interval, sec	Approximately 5.0			
Sliding cycle	3000			
Sliding distance, mm	250			
Voltage, V	DC 100			
Current, A	0	50	80	100

## 3.3 試験結果

### 3.3.1 摩耗特性に及ぼす電流と接触力の影響

無通電および3段階の電流を通電した場合のトロリ線摩耗率、すり板比摩耗量および摩擦係数と接触力の関係を図3.3.1～図3.3.3に示す。これらの図より、硬銅トロリ線と鉄系焼結合金すり板の摩耗特性に及ぼす接触力と電流の影響を以下のように整理する。

#### 3.3.1.1 無通電の場合

図3.3.1～図3.3.3より、無通電条件(=0A)の場合はトロリ線摩耗率やすり板比摩耗量、および摩擦係数は接触力に依存せず、ほぼ一定の値を保つことがわかる。なお、トロリ線摩耗率の平均値は $6.8 \times 10^{-7} \text{mm}^2/\text{N} \cdot \text{cycle}$ であり、笹田<sup>(11)</sup>が実施したCuとFeの組合せにおける摩耗試験結果とほぼ一致した。なお文献(11)において、CuとFeの組合せでは凝着摩耗となり、さらに凝着摩耗でもシビア摩耗とマイルド摩耗に分類でき、摩耗率はシビア摩耗の場合に $1 \times 10^{-6} \text{mm}^2/\text{N}$ 、マイルド摩耗の場合には $3 \times 10^{-9} \text{mm}^2/\text{N}$ となる。

無通電条件におけるトロリ線とすり板の摩耗面、および摩耗粒子の観察結果より、摩耗面および摩耗粒子は接触力条件によらず同様の様相を呈することがわかった。摩耗面と摩耗粒子の典型的な走査電子顕微鏡(SEM)写真および成分分析(EPMA)写真を図3.3.4に示す。なお成分分析は、硬銅トロリ線の主成分であるCu、鉄系焼結合金すり板の主成分であるFeについて実施した。

図3.3.4(a)より、トロリ線の摩耗面にはしゅう動方向にせん断された痕が確認できる。EPMA写真より、トロリ線表面から検出された成分は主にCuであり、トロリ線の主成分である。また、すり板の主成分であるFeも多少検出され、すり板から微小なFe粒子が移着していることがわかる。

図3.3.4(b)より、すり板の摩耗面にもトロリ線と同様、しゅう動方向にせん断された痕が確認できる。EPMA写真より、すり板表面から検出された成分は主にFeであり、すり板の主成分である。また、トロリ線の主成分であるCuも多少検出され、トロリ線とすり板間で相互に移着していることがわかる。

図3.3.4(c)より、摩耗粒子は塊状の形状をしており、その主成分はCuであり、多少Feが混在している。摩耗粒子のサイズは数十 $\mu\text{m}$ オーダーであり、笹田<sup>(11)</sup>が報告しているように、シビア摩耗で発生する摩耗粒子の特徴と一致する。

以上のことから、無通電における硬銅トロリ線と鉄系焼結合金すり板の摩耗形態を、凝着摩耗による機械的摩耗形態とし、摩耗粒子の生成過程は図3.3.5に示すような移着成長モデル<sup>(11)</sup>になると考える。

#### 3.3.1.2 通電の場合

図3.3.1～図3.3.3より、通電した場合のトロリ線摩耗率やすり板比摩耗量、および摩擦係数は無通電条件のように一定とならず、接触力や電流の条件によって以下の3つに分類できる。

##### (1) 接触力10N以上の条件

図3.3.1～図3.3.3より、通電かつ接触力10N以上の条件において、トロリ線摩耗率やすり板比

摩耗量，および摩擦係数の値は無通電時と同等であり，電流および接触力に依存しないことがわかる。

この条件におけるトリ線とすり板の典型的な摩耗面および摩耗粒子の SEM 写真および EPMA 写真を図 3.3.6 に示す。トリ線およびすり板摩耗面にはしゅう動方向にせん断された痕が確認でき，摩耗粒子は塊状の形状をしている。なお，摩耗面には溶融した痕は確認されなかった。成分分析結果より，トリ線とすり板間で相互に移着しており，摩耗粒子も Cu と Fe の混合物であることがわかる。

これらの特徴は無通電時と同一であり，通電下であっても十分な接触力が負荷された条件では摩耗特性に対する通電の影響はなく，機械的摩耗形態となることがわかった。

## (2) 接触力 6~10N の条件

図 3.3.1 より，通電かつ接触力 6~10N の条件において，トリ線摩耗率に極大値が存在し，無通電時のトリ線摩耗率と比較して 1 桁大きい値を示すことがわかる。なお，トリ線摩耗率が最大となる接触力条件は電流によって増加し，50A では 5.6N，80A では 8.2N，100A では 9.3N であった。

図 3.3.3 より，通電かつ接触力 6~10N の条件において，摩擦係数にも極大値が存在することがわかる。この摩擦係数が極大となる条件は，トリ線摩耗率が極大となる条件と一致している。

トリ線摩耗率と摩擦係数が極大となる条件において，トリ線とすり板の摩耗面および摩耗粒子を観察した結果，いずれの条件でも無通電時と異なる様相を呈することがわかった。摩耗面と摩耗粒子の典型的な SEM 写真および EPMA 写真を図 3.3.7 に示す。

図 3.3.7(a)より，トリ線摩耗面には溶融したクレーターが確認できる。成分分析より，溶融している金属はトリ線主成分の Cu であり，トリ線が溶融したことがわかる。

図 3.3.7(b)より，すり板摩耗面には厚い Cu の移着物が堆積し，移着物の端にはロール状の摩耗粒子が確認できる。なお，すり板摩耗面において，溶融した Fe は確認できなかった。

図 3.3.7(c)より，摩耗粒子の形状は長沢<sup>(9)</sup>や笹田<sup>(11)</sup>も報告しているロール状であり，その主成分は Cu である。摩耗粒子のサイズは百  $\mu\text{m}$  オーダーであり，笹田らが報告している摩耗粒子サイズと同等である。笹田<sup>(11)</sup>によると，ロール状の摩耗粒子は無通電摩耗試験でも珍しくなく，扁平な摩耗粒子が摩擦面間に挟まれたまま転がることで形成される。したがって図 3.3.7(c)の摩耗粒子は，溶融したトリ線がすり板表面に移着し伸され，そのまますり板がしゅう動することでロール状になったと推測される。

以上のことから，通電かつ接触力 6~10N の条件における摩耗特性は明らかに凝着摩耗とは異なり，トリ線のみが溶融していることから，本研究では以後この形態を「トリ線溶融摩耗形態」と呼称する。

## (3) 接触力 6N 未満の条件

図 3.3.2 より，通電かつ接触力 6N 未満の条件では，接触力の減少に伴いすり板比摩耗量が著しく増加し，無通電時よりも 1 桁大きい値となる。なお，電流の増加に伴いすり板比摩耗量は増加する傾向がある。

一方で図 3.3.1 より，通電かつ接触力 6N 未満の条件では，接触力の減少に伴いトリ線摩耗率

は減少する。通電電流 80A 以上かつ接触力 3N 近傍の条件では、トロリ線摩耗率が無通電時と同等になる。このように、通電下のトロリ線摩耗率が極大値をもち、接触力が小さい条件では摩耗率が減少する傾向は、第 1 章図 1.3.10 に示す河野の報告<sup>(2)</sup>と同様である。

図 3.3.3 より、すり板比摩耗量が著しく増大しトロリ線摩耗率が減少する条件では、摩擦係数が無通電時より小さくなる。

通電かつ接触力 6N 未満の条件において、トロリ線とすり板の典型的な摩耗面および摩耗粒子の SEM 写真および EPMA 写真を図 3.3.8 に示す。

図 3.3.8(b)より、すり板摩耗面には熔融した金属が確認できる。成分分析より、熔融している金属はすり板主成分の Fe であり、すり板が熔融したことがわかる。

図 3.3.8(a)より、トロリ線摩耗面には熔融した Fe が移着していることがわかる。なお、トロリ線熔融摩耗形態とは異なり、トロリ線摩耗面において、熔融した Cu は確認できなかった。

図 3.3.8(c)より、摩耗粒子は数百 μm オーダーの剥片であり、その主成分は Fe である。摩耗粒子には熔融痕が確認できるため、熔融したすり板がトロリ線表面に移着し伸され、トロリ線表面から脱落したものと推測される。

以上のことから、通電かつ接触力 6~10N の条件における摩耗特性は明らかに凝着摩耗やトロリ線熔融摩耗形態とは異なり、すり板のみが熔融していることから、本研究では以後この形態を「すり板熔融摩耗形態」と呼称する。

### 3.3.2 摩耗特性に及ぼすアークの影響

摩耗試験時の接触電圧を測定し、しゅう動中に接触電圧が 10V 以上になった場合をアーク発生とする。図 3.3.9 に 3 段階の電流を通電した場合の接触力とアーク発生率の関係を示す。この図より、接触力の減少および電流の増加に伴い、アーク発生率は増加することがわかる。ただし、アーク発生率は最大でも 0.5% 以下と非常に小さい。図 3.3.10 に摩耗試験中のアーク発生状況を示す。摩耗試験中に発生するアークは微小である。

これまでに、トロリ線やすり板の摩耗に及ぼすアークの影響として、全放電電気量で摩耗率を整理する手法が提案されている<sup>(2)</sup>。全放電電気量[C]は次式で計算できる。

$$\begin{aligned} \text{全放電電気量[C]} &= \text{通電電流[A]} \times \text{総しゅう動時間[s]} \\ &\times \text{アーク発生率[\%]} \end{aligned} \quad (3.1)$$

トロリ線の摩耗率およびすり板の比摩耗量と、全放電電気量の関係を図 3.3.11, 図 3.3.12 に示す。

図 3.3.11 より、トロリ線摩耗率と全放電電気量との明確な相関は確認できない。通電電流 100A の条件を見ると、全放電電気量の増加に伴いトロリ線摩耗率は減少している。これは、第 1 章 1.3 節で述べた岩瀬の報告<sup>(1)</sup>「常にアークにさらされている箇所は非常に小さいという事実」に合致する。また、全放電電気量が 0C、すなわちアークが発生せずとも、トロリ線摩耗率は大きく変動しており、トロリ線の摩耗はアーク以外の電氣的因子に影響を受けることがわかる。

図 3.3.12 より、全放電電気量の増加に伴いすり板比摩耗量も増加する傾向にある。しかしながら、電流 80A の条件では全放電電気量が小さいにもかかわらず、すり板比摩耗量が大きく、すり板の摩耗もアーク以外の電氣的因子に影響を受けることがわかる。

従来は経験的に機械的摩耗と電氣的摩耗に分類されていたものが，本試験によって電流の影響を受ける摩耗形態をトロリ線溶融摩耗形態およびすり板溶融摩耗形態という 2 つに分類できた．また，これまでアークが発生するとトロリ線の摩耗は増加すると考えられてきたが，本試験によりアークが発生するような条件ではすり板のみが溶融し，トロリ線の摩耗は非常に小さくなることを明らかにした．次節では，これら摩耗形態の遷移条件について考察する．



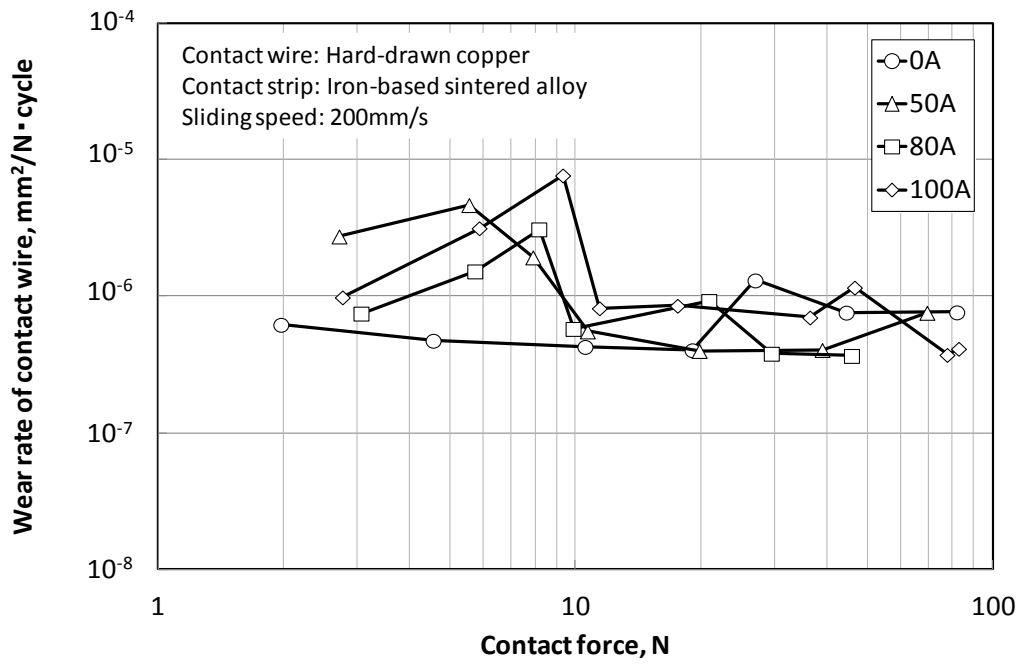


Figure 3.3.1 Relationship between wear rate of contact wire and contact force in each current

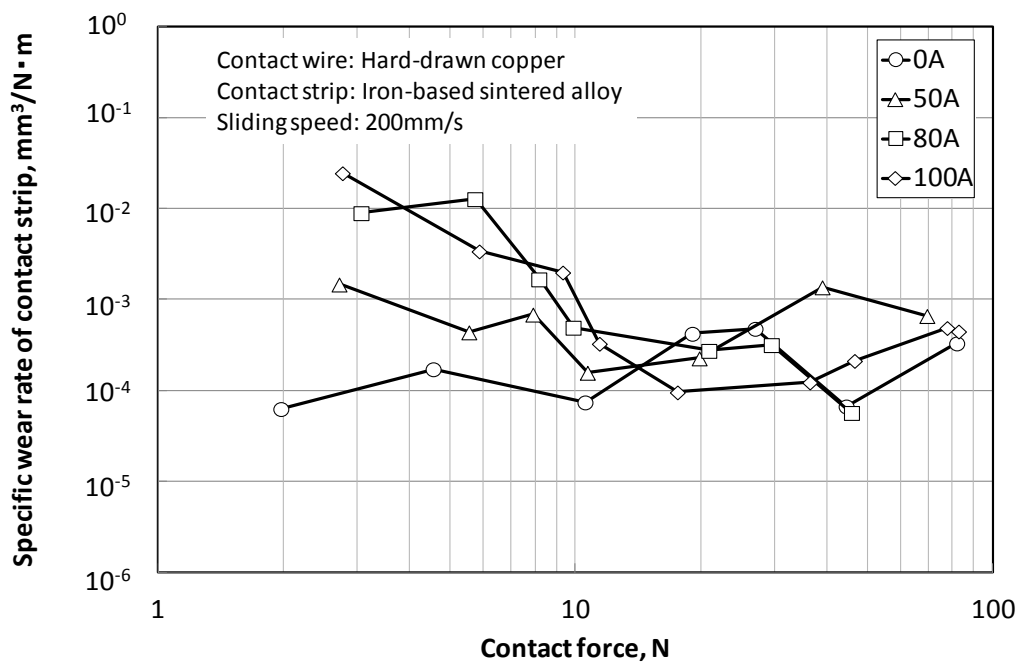


Figure 3.3.2 Relationship between specific wear rate of contact strip and contact force in each current

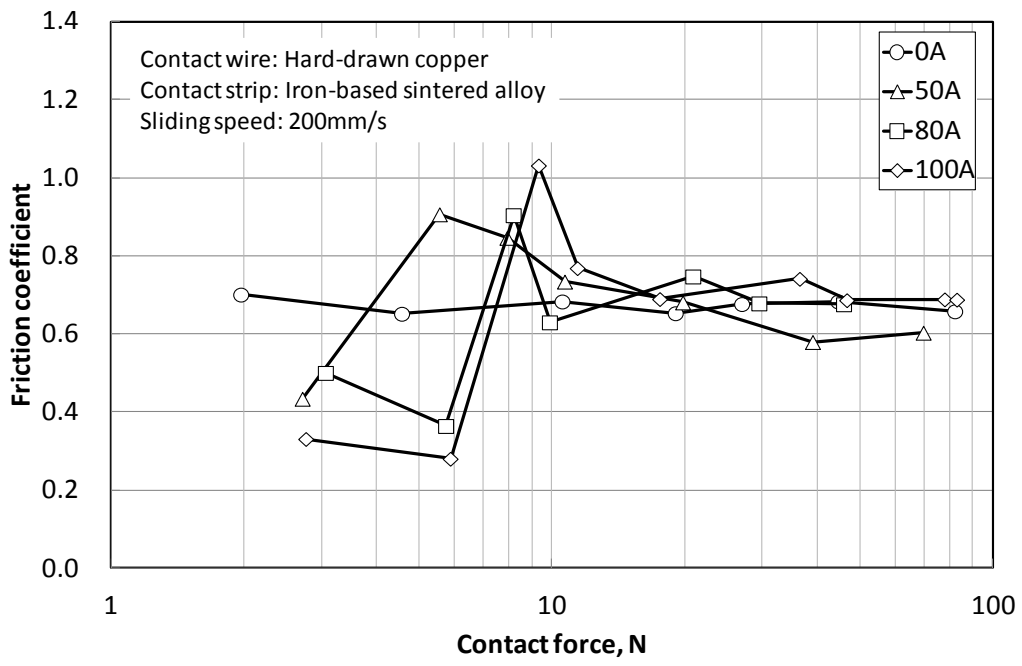
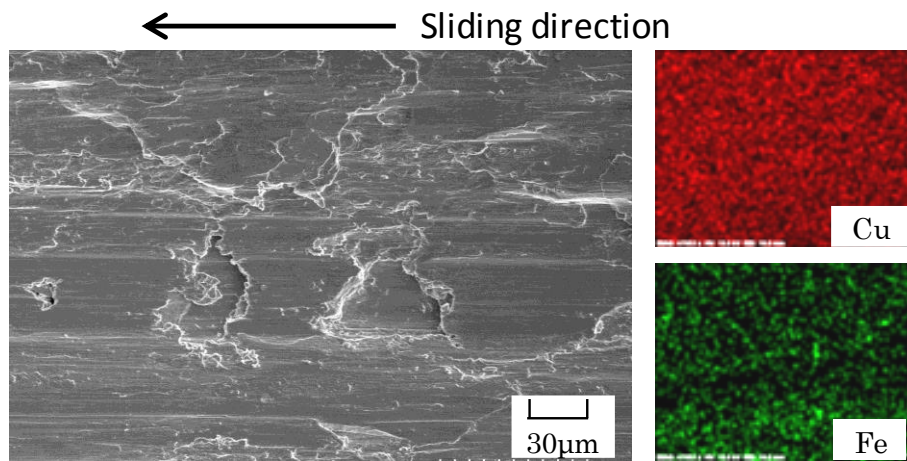
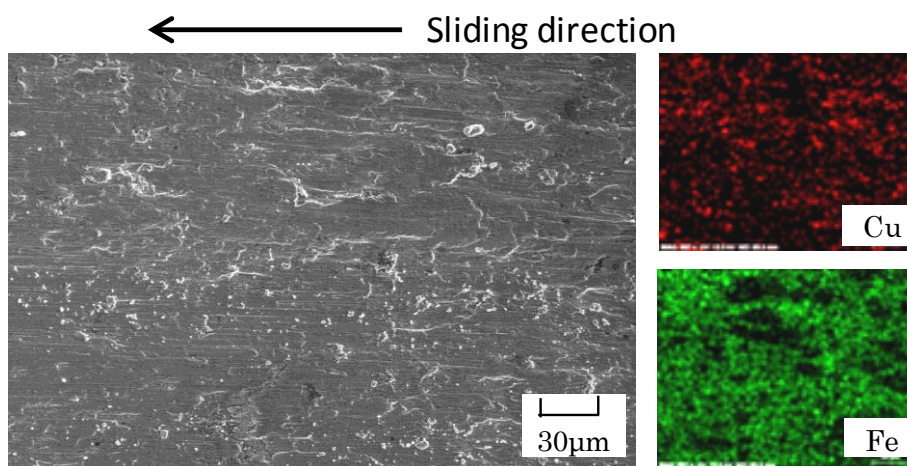


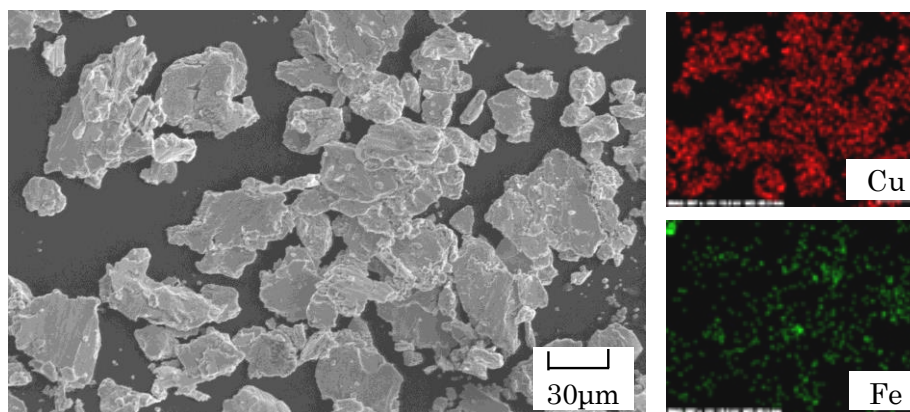
Figure 3.3.3 Relationship between friction coefficient and contact force in each current



(a) Wear surface of contact wire



(b) Wear surface of contact strip



(c) Wear particle

Figure 3.3.4 SEM-EPMA pictures of wear surface and wear particle  
 (Contact force: 27 N, sliding speed: 200mm/s, current: 0A)  
 Arrows in this figure show the sliding direction of the contact strip.

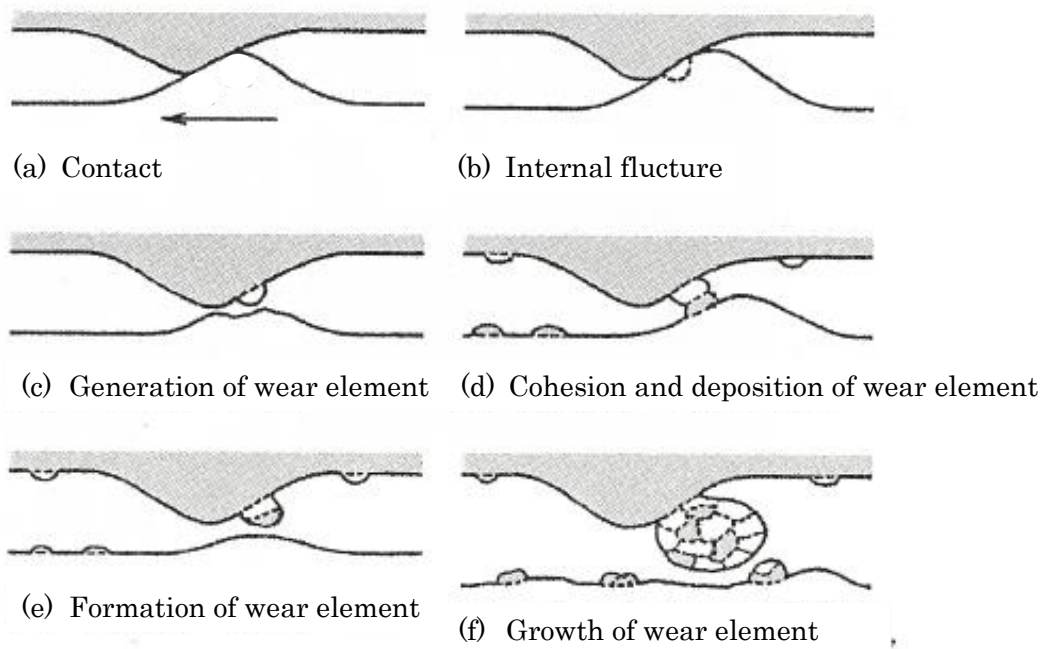
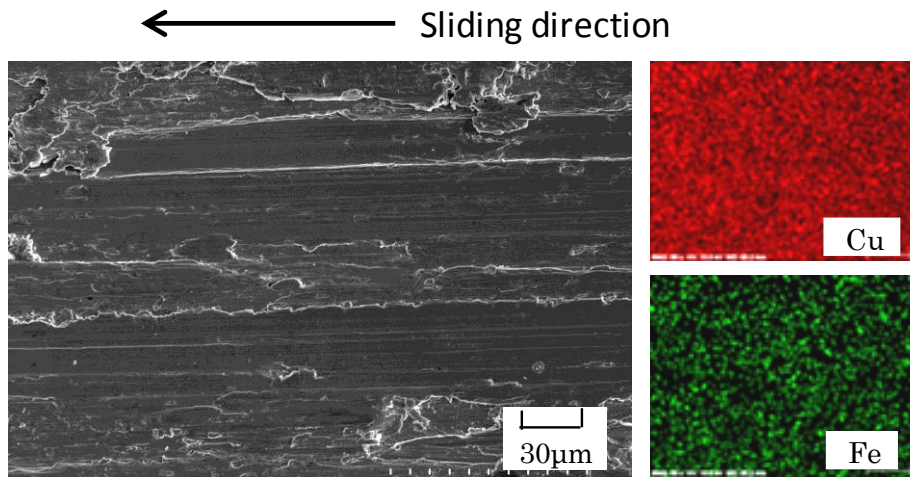
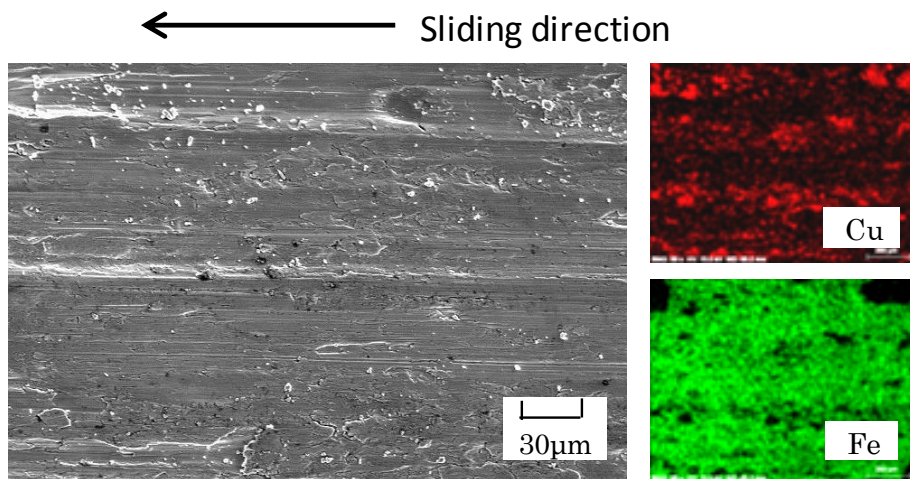


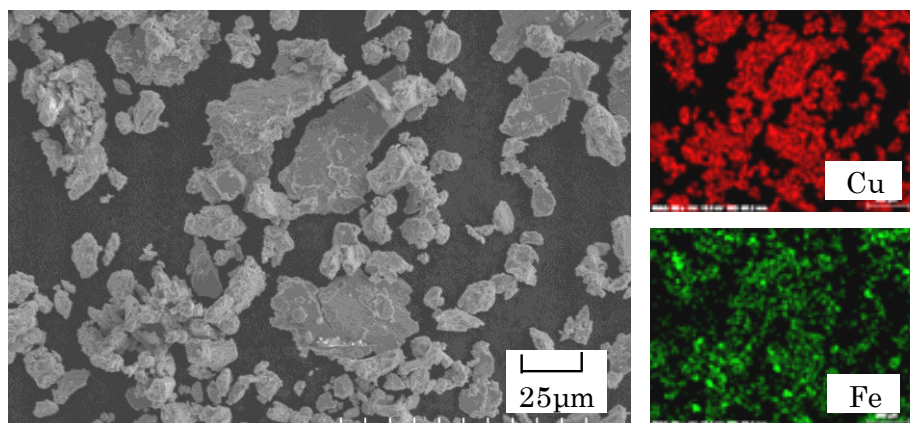
Figure 3.3.5 Growth model of wear particle <sup>(11)</sup>



(a) Wear surface of contact wire



(b) Wear surface of contact strip



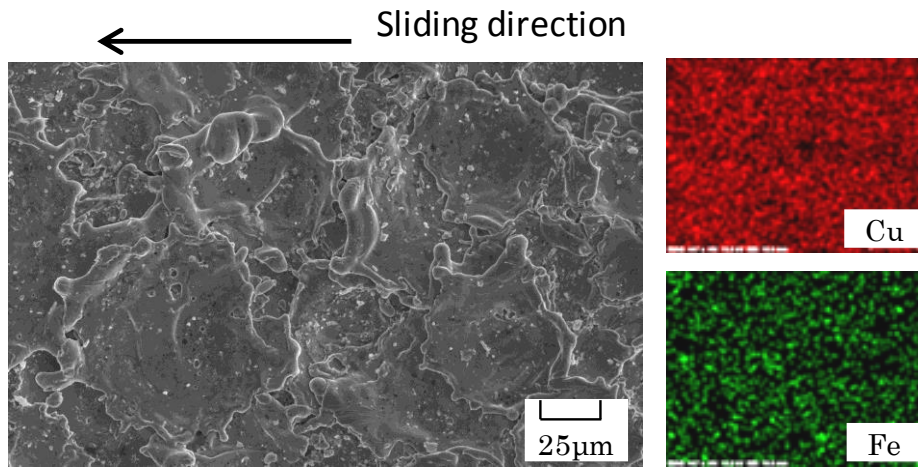
(c) Wear particle

Figure 3.3.6 SEM-EPMA pictures of wear surface and wear particle

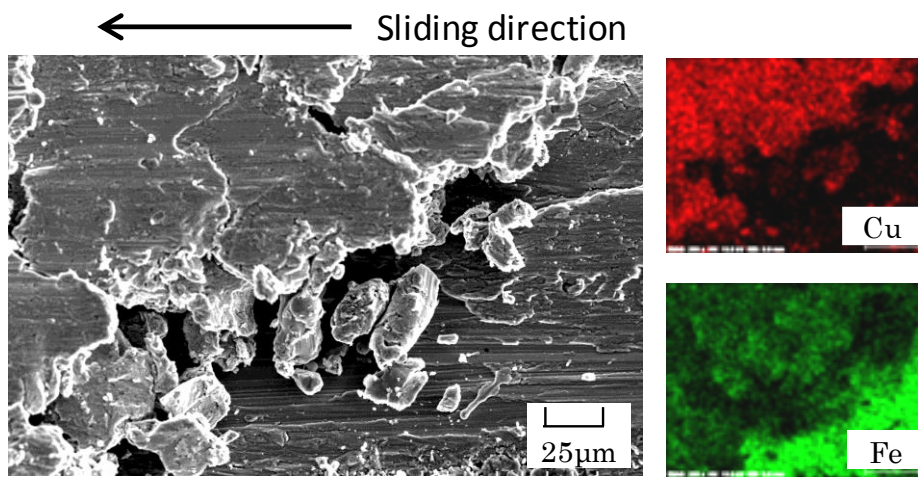
(Contact force: 46 N, sliding speed: 200mm/s, current: 80A)

Arrows in this figure show the sliding direction of the contact strip.

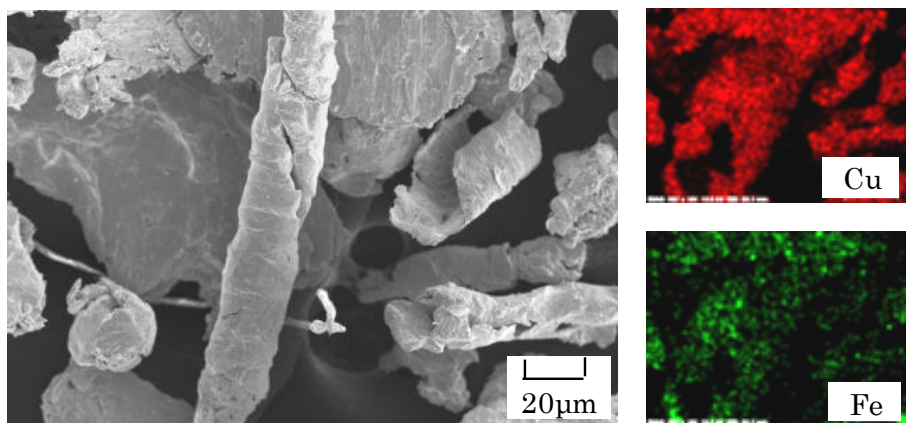




(a) Wear surface of contact wire



(b) Wear surface of contact strip

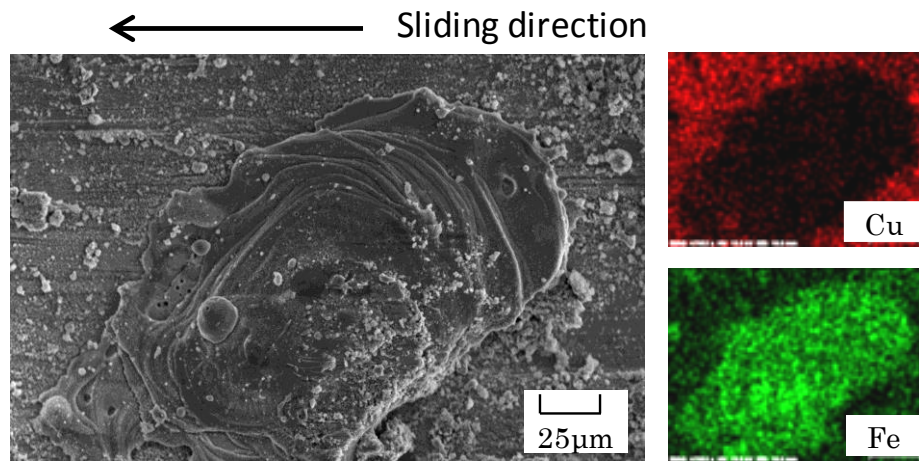


(c) Wear particle

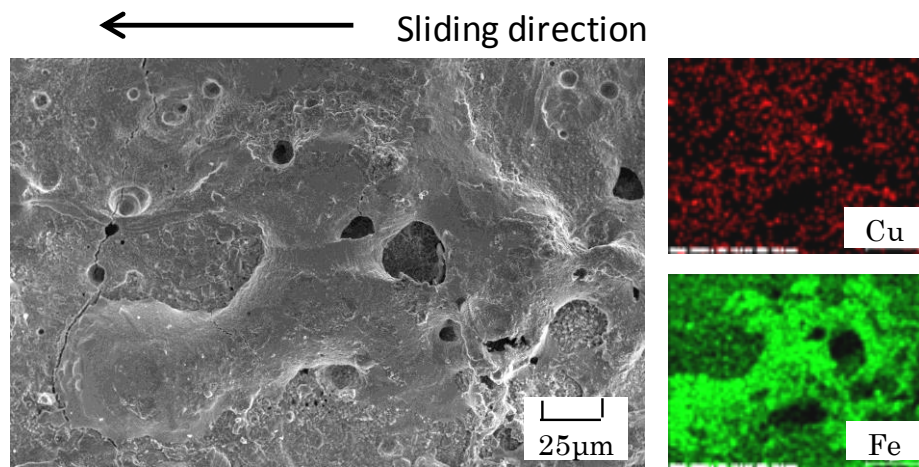
Figure 3.3.7 SEM-EPMA pictures of wear surface and wear particle

(Contact force: 9.3 N, sliding speed: 200mm/s, current: 100A)

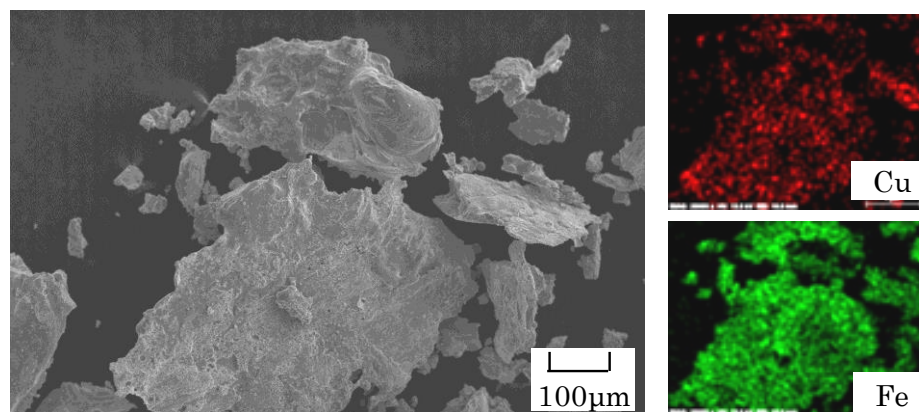
Arrows in this figure show the sliding direction of the contact strip.



(a) Wear surface of contact wire



(b) Wear surface of contact strip



(c) Wear particle

Figure 3.3.8 SEM-EPMA pictures of wear surface and wear particle  
 (Contact force: 2.7 N, sliding speed: 200mm/s, current: 100A)  
 Arrows in this figure show the sliding direction of the contact strip.

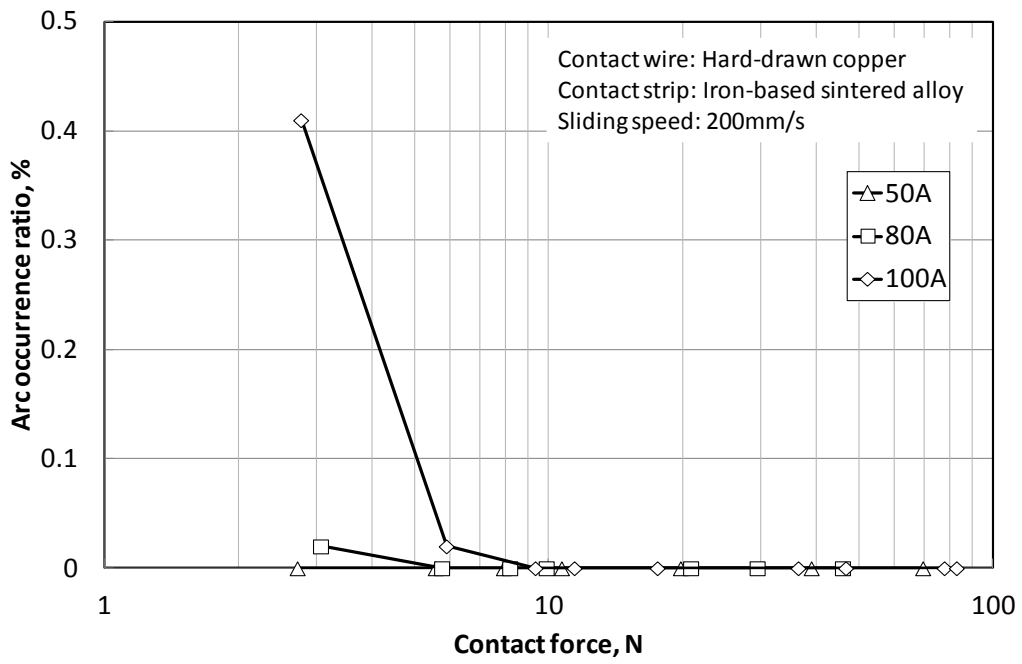


Figure 3.3.9 Relationship between arc occurrence ratio and contact force in each current

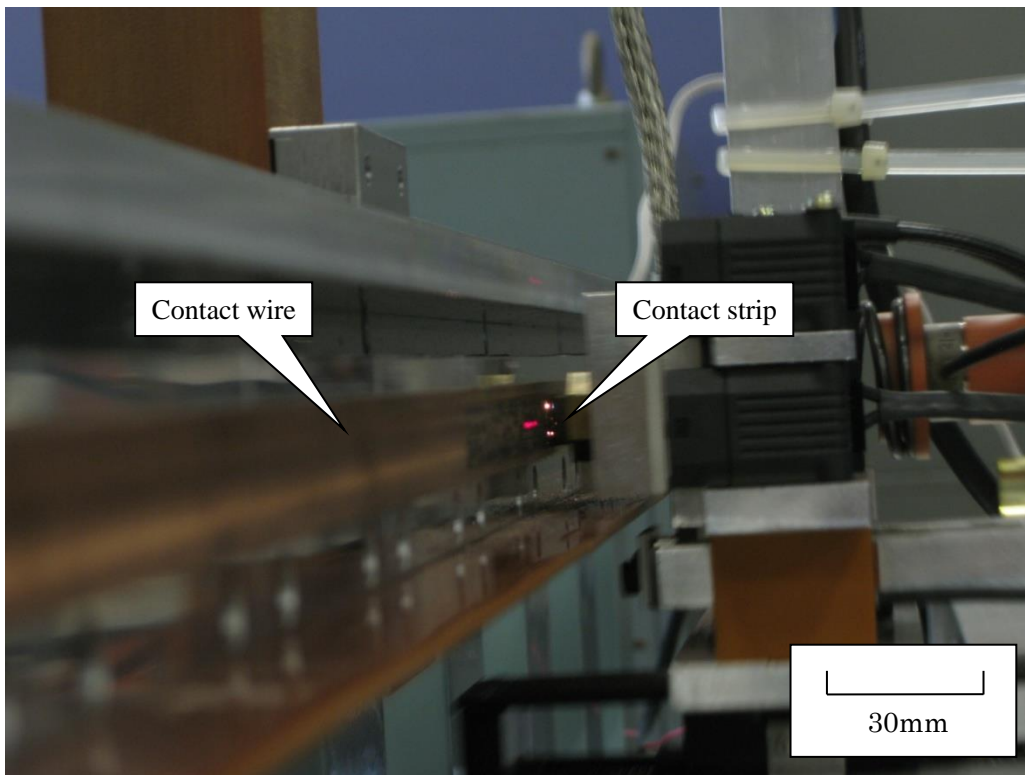


Figure 3.3.10 Situation of arc discharge between contact wire and contact strip  
 (Contact force: 2.7 N, sliding speed: 200mm/s, current: 100A)



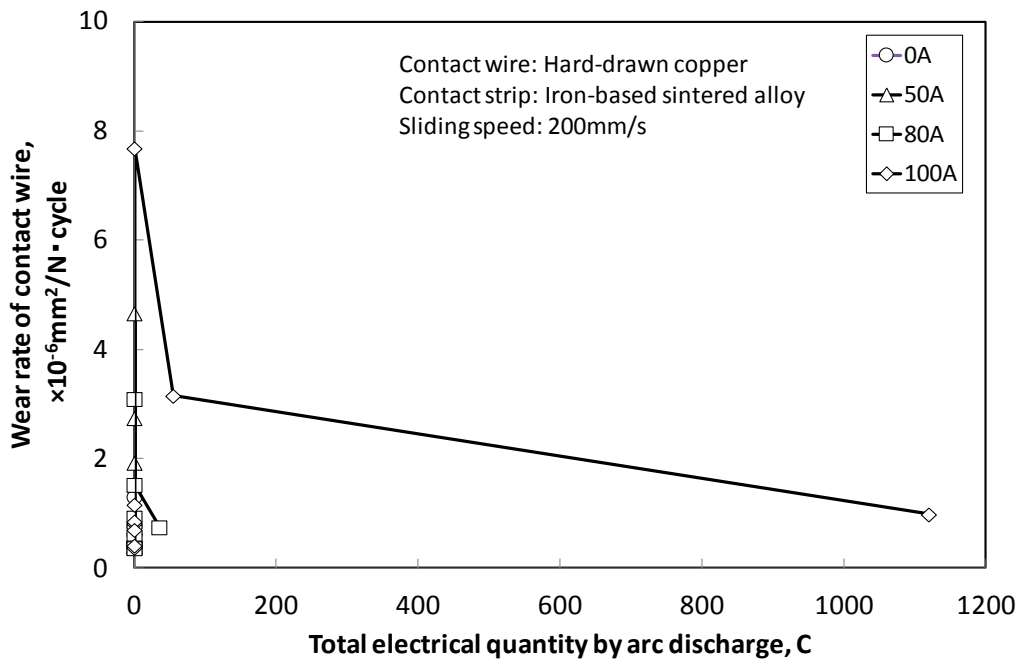


Figure 3.3.11 Relationship between wear rate of contact wire and total electrical quantity by arc discharge in each current

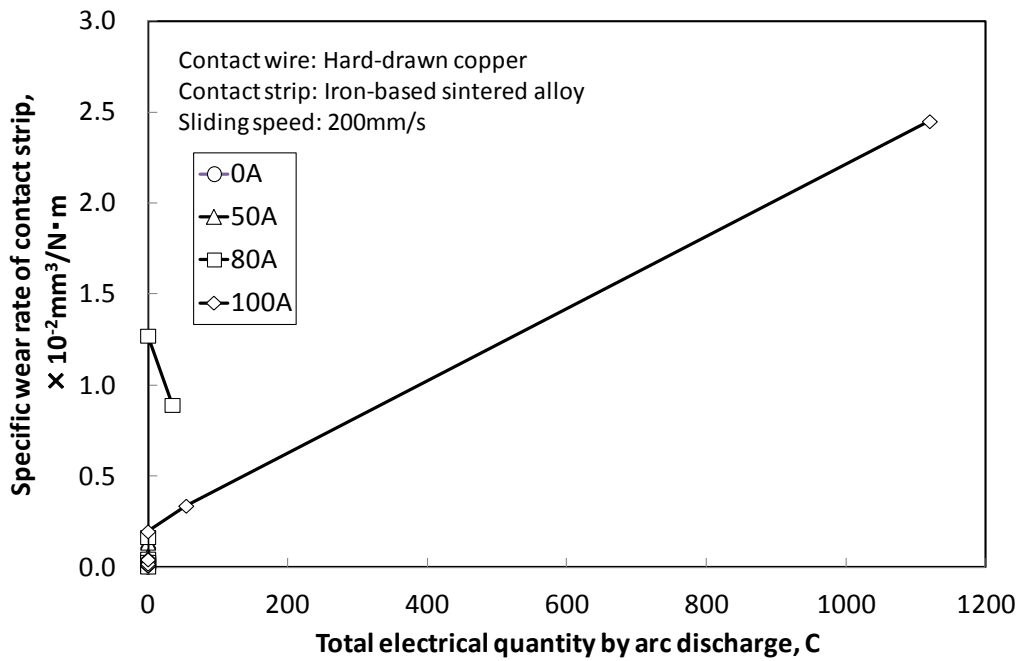


Figure 3.3.12 Relationship between specific wear rate of contact strip and total electrical quantity by arc discharge in each current

## 3.4 考察

3.3 節で明らかとなった各摩耗形態の特徴を以下に示す。

- (1) 機械的摩耗形態においては、通電下であってもトロリ線およびすり板は溶融せず、摩耗面にはしゅう動方向のせん断痕が観察できる。
- (2) トロリ線溶融摩耗形態においてはトロリ線のみが溶融し、トロリ線表面にクレーターが観察できる。一方ですり板は溶融しない。
- (3) すり板溶融摩耗形態においてはすり板のみが溶融し、トロリ線は溶融しない。

これらのことから、摩耗形態の遷移現象には集電材料の溶融が関わっていると考え、通電による接点温度の上昇と摩耗形態遷移条件の相関について考察する。

### 3.4.1 接点最高温度と摩耗形態遷移条件の関係

微小な接点の温度を直接測定することは困難であるが、R. Holm<sup>(12)</sup>によってジュール熱による温度上昇値を推定する理論「 $\varphi$ - $\theta$ 理論」が提案されている。図 3.4.1 に電気接点开離モデルと  $\varphi$ - $\theta$  関係図<sup>(13)</sup>を示す。同図(a)(b)のように接点の開離、すなわち接触力の減少に伴い接点の数や半径が減少する。そのため、電流の集中によるジュール発熱量も増加する。さらに開離が進行すると、同図(c)に示すように接点が溶融し溶融金属橋絡(=ブリッジ)が発生する。このブリッジが破壊されてもなお電氣的に電極間を接続するため、アークが発生する。図 3.4.1(c)より、接点近傍の等温面と等電位面が一致していることから、接触電圧  $V_c$ [V]を用いて接点の最高温度  $T_{max}$ [K]を次式で推定できる<sup>(13)</sup>。

$$T_{max} = \left( \frac{V_c^2}{4L} + T_0^2 \right)^{1/2} \quad (3.2)$$

ここで、 $L$ はローレンツ数(= $2.4 \times 10^{-8}[(K/V)^2]$ )、 $T_0$ は両部材のバルク温度(=室温)[K]である。第2章で述べたように、直動型摩耗試験機はトロリ線とすり板間の接触電圧を精緻に測定でき、また低速しゅう動とすることで摩擦熱の影響を小さくしているため、式(3.2)によって通電による接点の最高温度を求めるられる。

通電時の電氣的発熱やそれに伴う接点温度上昇は、非常に短時間で発生する現象であり、接触電圧の平均値よりも最大値で評価するべきと考える。そこで、接触電圧の平均値+ $3\sigma_c$ ( $\sigma_c$ : 標準偏差)を「統計的的最大接触電圧」として式(3.2)の接点最高温度推定に用いる  $V_c$  パラメータとした。通電電流 50, 80, 100A に対する、統計的的最大接触電圧と接触力の関係を図 3.4.2 に示す。この図より、接触力の減少および通電電流の増加に伴い統計的的最大接触電圧が増加することがわかる。

図 3.4.2 で得られたデータと式(3.2)を用いて算出した接点最高温度について、横軸を接触力、縦軸を電流として整理したコンター図を図 3.4.3 に示す。同図には 3.3 節で得られた 3 つの摩耗形態をプロットし、トロリ線融点 1334K とすり板融点 1646K を破線で示してある。摩擦熱の影響は無視できるとし、0A における接点温度は 300K と仮定した。図 3.4.3 より、機械的摩耗形態からトロリ線溶融摩耗形態に遷移する条件は、接点温度がトロリ線の融点 1334K に達する条件にほぼ一致し、またトロリ線溶融摩耗形態からすり板溶融摩耗形態に遷移する条件は、接点温度がすり板の融点 1646K に達する条件にほぼ一致することがわかる。

トロリ線が最も摩耗するトロリ線溶融摩耗形態は、トロリ線のみが溶融する条件で発生しており、アークを含めすり板の融点以上となる条件では、トロリ線の摩耗は小さい。このことから、トロリ線の電氣的著大摩耗の主要因は従来考えられているアーク損耗ではなく、トロリ線接点の溶融に伴うブリッジであることが初めて明らかとなった。なお、トロリ線のみが溶融する接触力条件は、各電流条件において数 N という小さい範囲であり、接触力変動の小さい直動型摩耗試験機だからこそ確認できたといえる。

### 3.4.2 ブリッジ電氣量による摩耗の整理

3.3 節の摩耗試験結果では、従来のようにアークの放電電氣量でトロリ線およびすり板の摩耗率が整理できないことを示した。一方で 3.4.1 節の考察より、アーク以外にも集電材料の摩耗特性に及ぼす電氣的な要因として、ブリッジの存在を示した。

摩耗試験において、ブリッジとアークの発生率を比較するため、図 3.3.9 で最もアーク発生率が大きい条件（接触力：2.7N，電流：100A）について、接触電圧値をヒストグラムにしたものを図 3.4.4 に示す。なお式(3.2)より、トロリ線の融点 1334K とすり板融点 1646K に達する接触電圧条件を、それぞれ 0.42V および 0.51V と算出し、図 3.4.4 に破線で示した。この図より、アークの発生頻度よりもトロリ線やすり板の溶融頻度が十分上回り、ブリッジが摩耗を支配していると考えられる。

そこで、トロリ線およびすり板の摩耗率をブリッジの観点から整理する。摩耗試験時の接触電圧波形より、しゅう動中に接触電圧が 0.42V 以上になった場合を Cu ブリッジ発生、および 0.51V 以上になった場合を Fe ブリッジ発生とした。3 段階の電流を通電した場合の接触力と、各ブリッジ発生率の関係を図 3.4.5 および図 3.4.6 に示す。

河野ら<sup>(2)</sup>は、アーク発生時に流れる電氣量を全放電電氣量としていたが、ここではブリッジに流れる電氣量をブリッジ電氣量[C]として次式で表す。

$$\begin{aligned} \text{ブリッジ電氣量[C]} &= \text{通電電流[A]} \times \text{総しゅう動時間[s]} \\ &\quad \times \text{ブリッジ発生率[\%]} \end{aligned} \tag{3.3}$$

各摩耗形態におけるトロリ線摩耗率と Cu ブリッジ電氣量の関係を図 3.4.7 に示す。この図よりトロリ線溶融摩耗形態において、トロリ線摩耗率と Cu ブリッジ電氣量は比例関係にあるが、すり板溶融摩耗形態においては、トロリ線摩耗率と Cu ブリッジ電氣量の相関がないことがわかる。これは 3.3 節で述べたように、すり板溶融摩耗形態ではトロリ線表面の溶融が観察されず、接触電圧が 0.42V 以上であっても実際は Cu ブリッジが発生しないためであり、すり板の溶融によってトロリ線のブリッジが抑制できることを示唆するものである。第 5 章では、トロリ線ブリッジの発生機構について取り組み、第 6 章ではトロリ線の著大摩耗の抑制対策について提案する。

各摩耗形態におけるすり板比摩耗量と Fe ブリッジ電氣量の関係を図 3.4.8 に示す。この図より、すり板比摩耗量と Fe ブリッジ電氣量は良好な比例関係にあり、直動型摩耗試験機におけるすり板摩耗はアークよりもブリッジが支配的であることが明らかとなった。河野ら<sup>(2)</sup>が報告したアークとすり板比摩耗量の関係は、アーク発生率が数十%と非常に大きな摩耗試験によるものであった。岩瀬<sup>(4)</sup>も、室内実験においてアーク発生が非常に激しい場合のみ、有効なすり板摩耗データが取得できると報告している。確かにアーク発生率が数十%の条件では、摩耗の支配因子はアークと

考えられるため、従来のようにアークで摩耗を整理することも妥当と考える。しかしながら、近年では第 1 章に述べたように架線—パンタグラフ系の改良が進み、現場の離線率は非常に小さくなっており、アークによる整理以外にもブリッジによる整理が必要と考える。

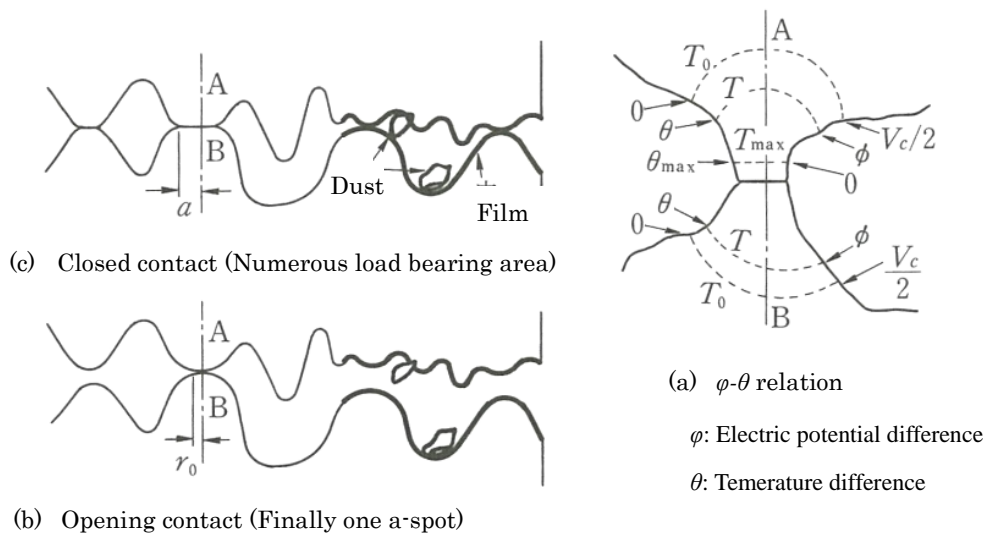


Figure 3.4.1 Opening contact model and  $\phi$ - $\theta$  relation <sup>(13)</sup>

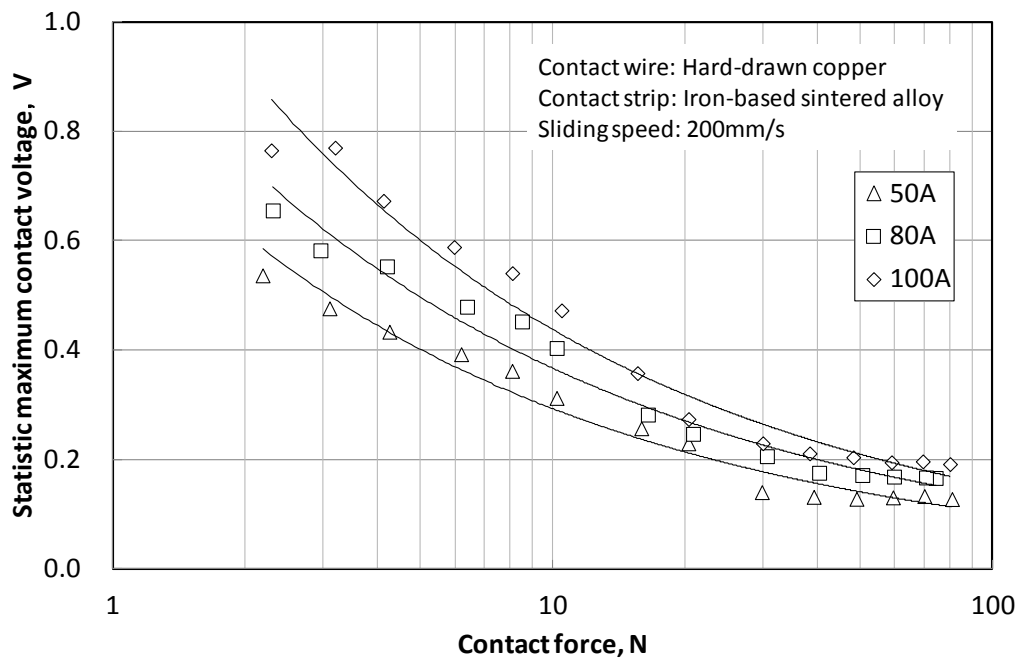


Figure 3.4.2 Relationship between statistic maximum contact voltage and contact force in each current

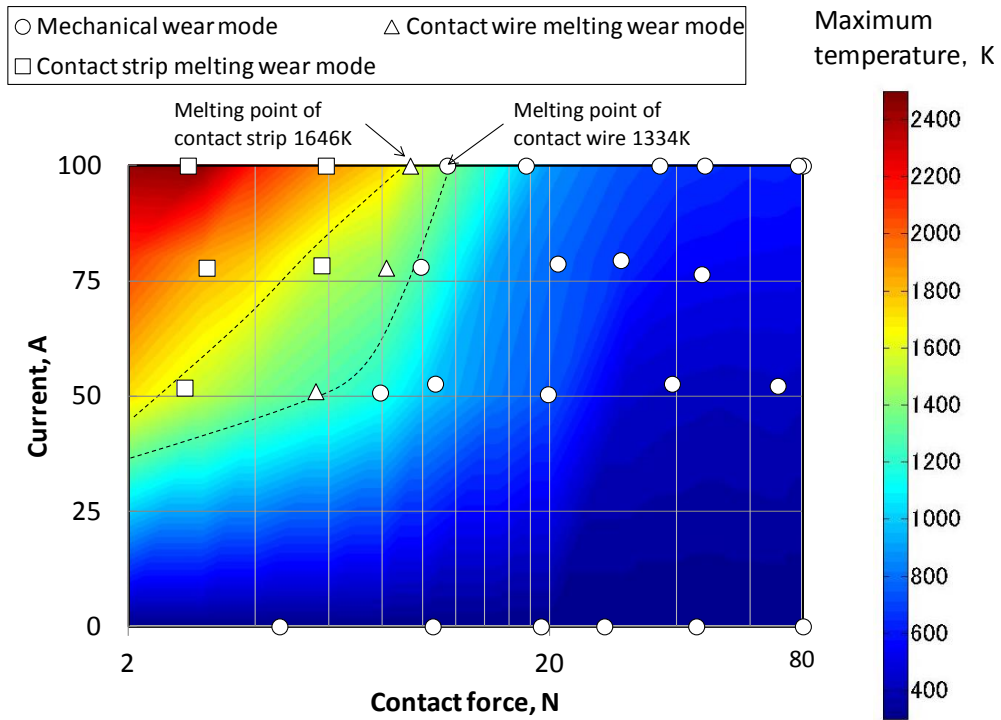


Figure 3.4.3 Correlation between wear mode and maximum contact temperature

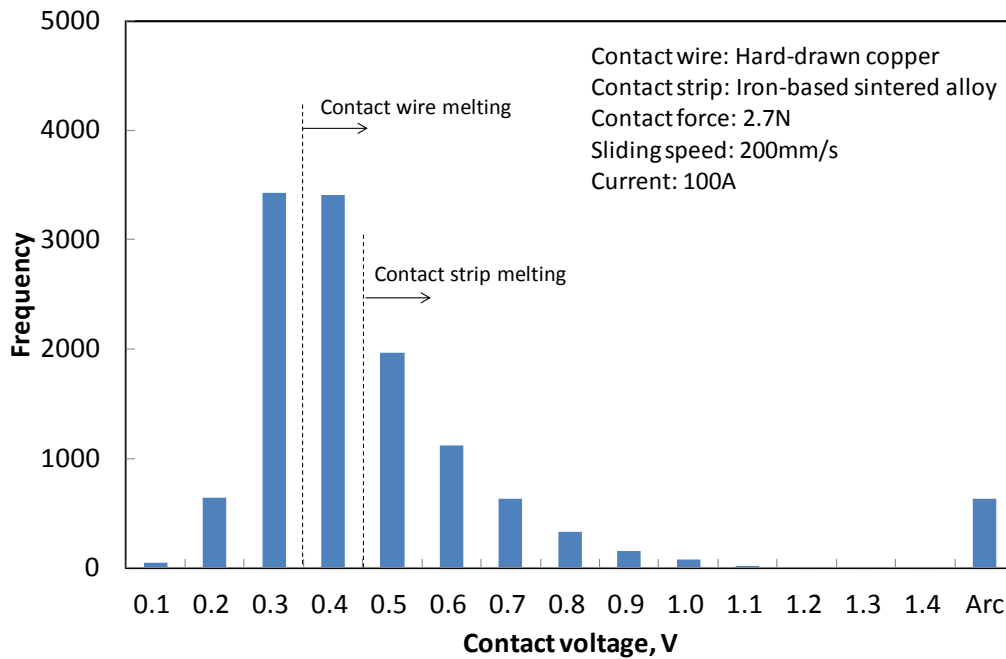


Figure 3.4.4 Histogram of contact voltage  
 (Contact force: 2.7 N, sliding speed: 200mm/s, current: 100A)

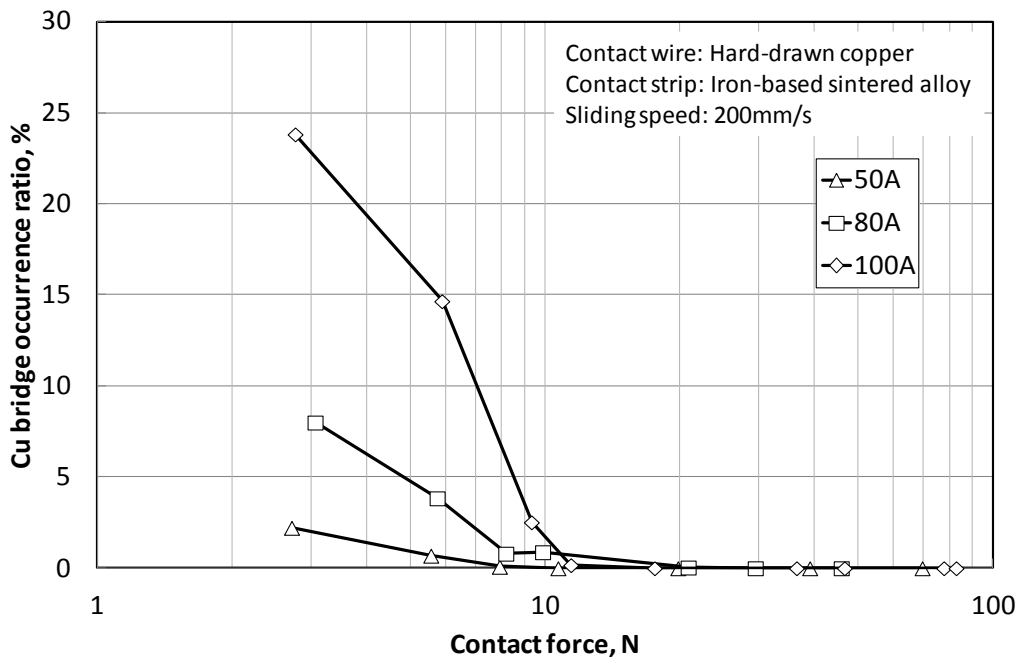


Figure 3.4.5 Relationship between Cu bridge occurrence ratio and contact force in each current

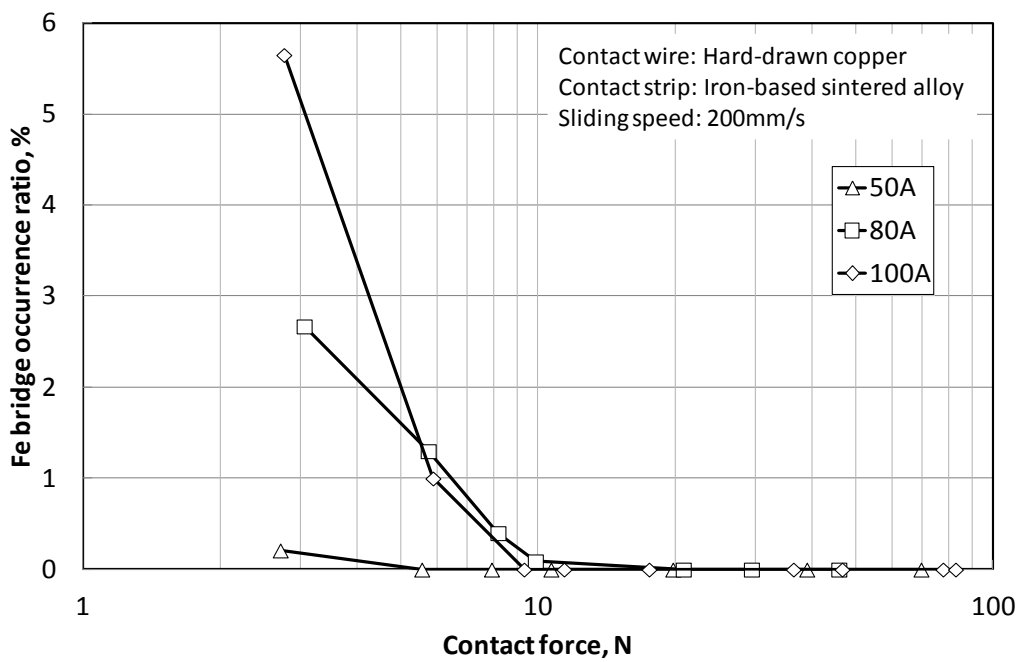


Figure 3.4.6 Relationship between Fe bridge occurrence ratio and contact force in each current





## 3.5 結言

通電下における集電材料の摩耗形態を明らかにするべく、硬銅トロリ線と鉄系焼結合金すり板の組合せについて、直動型摩耗試験機を用いて摩耗試験を実施した。その結果、通電下における摩耗形態が大きく3つに分類できることを明らかにした。また、接触電圧より接点最高温度を推定し、接点最高温度と集電材料の融点から摩耗形態遷移条件について考察し、ブリッジ発生が摩耗形態の遷移を支配することを明らかにした。

得られた具体的な結論は以下のとおりである。

- (1) 接点最高温度が硬銅トロリ線および鉄系焼結合金すり板の融点未満である場合、トロリ線およびすり板は溶融せずに機械的摩耗形態となった。この摩耗形態における摩擦・摩耗特性は無通電時と同等になり、摩擦係数や摩耗率は電流や接触力に依存しなかった。
- (2) 接点最高温度が硬銅トロリ線の融点以上、鉄系焼結合金すり板の融点未満である場合、トロリ線のみが溶融するトロリ線溶融摩耗形態となった。この摩耗形態において、トロリ線摩耗率と摩擦係数は著しく増加し、トロリ線摩耗率はCuブリッジ電気量に比例した。
- (3) 接点最高温度が鉄系焼結合金すり板の融点以上である場合、すり板のみが溶融するすり板溶融摩耗形態となった。この摩耗形態において、すり板板比摩耗量は著しく増加し、Feブリッジ電気量に比例した。一方で、すり板溶融摩耗形態ではアークも発生するが、トロリ線の溶融は観察されず、トロリ線摩耗率は減少した。
- (4) 離線発生時にトロリ線著大摩耗が発生する主要因は、従来考えられているアーク損耗ではなく、トロリ線接点の溶融に伴うブリッジである。

## 参考文献

- (1) 岩瀬勝, パンタグラフ集電と摩耗(Ⅲ), 鉄道技術研究報告, 217 (1961).
- (2) 河野彰夫, 大藪英雄, 曾田範宗, 集電用材料の摩耗に及ぼす離線アークの影響 (第1報) —荷重を変化させた場合—, 潤滑, 27, 4 (1982) 283-287.
- (3) 河野彰夫, 大藪英雄, 曾田範宗, 集電用材料の摩耗に及ぼす離線アークの影響 (第2報) —速度を変化させた場合—, 潤滑, 27, 7 (1982) 527-532.
- (4) 寺岡利雄, パンタグラフすり板の摩耗, 潤滑, 22, 1 (1977) 11-16.
- (5) 河野彰夫, 大藪英雄, 曾田範宗, 集電用材料の摩耗におよぼす通電の影響, 潤滑, 26, 8 (1981) 562-567.
- (6) 長沢広樹, 網干光雄, 在来線低速区間におけるトロリ線波状摩耗, 鉄道総研報告, 2, 4 (1988) 46.
- (7) 木村喜生, 三科博司, 大森達夫, 通電が集電材料の摩耗に与える影響, トライボロジスト, 52, 10 (2007) 737-743.
- (8) 久保俊一, 銅または銅鉛錫合金を溶浸した炭素製パンタグラフすり板のアーク放電下の摩耗機構の研究, 東北大学学位論文, (1999) 47-50.
- (9) 長沢広樹, Cr-Zr系銅合金トロリ線の通電下の摩耗特性の研究, 東北大学学位論文, (1996) 30-37.
- (10) 鳳誠三郎, 電気接点および開閉接触子, 金原出版, (1962) 197.
- (11) 笹田直, 摩耗, 養賢堂, (2008).
- (12) R. Holm, Electric Contacts Theory and Applications, Springer (1967) 60-64.
- (13) 高木相, 電気接点のアーク放電現象, コロナ社, (1995) 56-58.
- (14) 岩瀬勝, 集電技術ア・ラ・カルト, 研友社, (1998) 20-25.

# 第 4 章

## 集電材料の摩耗特性に及ぼす 見かけの接触面積の影響

### 4.1 緒言

第 3 章では、第 2 章で開発した直動型摩耗試験機による摩耗試験の結果、通電下における摩耗形態は大きく 3 つに分類できることを明らかにした。また、接触力と電流の変化によって接点最高温度が変化し、接点最高温度が集電材料の融点に達する条件で摩耗形態が遷移することを明らかにした。

電気鉄道の現場調査において、様々な要因が摩耗に影響を及ぼすことが知られている。藤井<sup>(1)</sup>による全国的な摩耗調査の結果、摩耗によるトロリ線残存直径の減少に伴い、トロリ線の摩耗率が増大することを明らかにしている。トロリ線の断形状は円形であり、残存直径の減少はトロリ線のしゅう動面幅の増加を意味する。すなわち、トロリ線とすり板との見かけの接触面積が摩耗率に影響を及ぼしていることを意味する。見かけの接触面積はトロリ線やすり板の形状・寸法を決定するための重要な要素であるが、集電材料の摩耗特性と見かけの接触面積の関係に関する実験的報告はほとんど見当たらない。

そこで本章では、第 3 章の結果を踏まえ、通電下における集電材料の摩耗特性に及ぼす見かけの接触面積の影響を明らかにするため、すり板接触面積を 4 段階変化させた摩耗試験を実施する。

### 4.2 試験方法

#### 4.2.1 試験装置

試験に用いた装置は、第 2 章で開発した直動型摩耗試験機である。

#### 4.2.2 試験片

摩耗試験に供したトロリ線とすり板は、第 3 章と同一の硬銅トロリ線および鉄系焼結合金すり板である。試験片の種別および物性値を表 4.2.1 に示す。本章で鉄系焼結合金すり板を選定した理由は、第 3 章と同様、成分分析による移着物の判別を容易にするためである。

#### 4.2.3 試験条件

本試験の試験条件を表 4.2.2 に示す。見かけの接触面積を 4 段階設定し、通電下で接触力を変化させて摩耗試験を実施した。試験条件の設定理由を以下に述べる。

#### (1) 見かけの接触面積

藤井<sup>(4)</sup>の摩耗調査では、トロリ線のしゅう動面幅が変化することで見かけの接触面積が変化した。しかしながら、第2章2.4.2節で述べたように直動型摩耗試験機では、トロリ線の摩耗を測定するため、トロリ線しゅう動面幅をすり板のしゅう動幅よりも大きくする必要がある。そこで、本章ではすり板の接触面積を変化させることで見かけの接触面積を変化させた。

すり板の接触面積については、摩耗試験の精度の観点から設定した。すり板の接触面積が大きいほど、すり板の全面がトロリ線と接触することは困難になり、再現性が失われる。また、片当たりをなくすための無通電なじみ運転の時間も長くなり、非効率である。そこで、すり板の接触面積を9mm<sup>2</sup>、50mm<sup>2</sup>、70mm<sup>2</sup>、100mm<sup>2</sup>の4段階に設定し、見かけの接触面積を1桁変化させた。すり板試験片の形状を図4.2.1に示す。

#### (2) 接触力

接触力の設定理由については第3章と同一であり、2~80Nとした。

#### (3) しゅう動速度

しゅう動速度の設定理由については第3章と同一であり、200mm/sとした。

#### (4) しゅう動インターバル

しゅう動インターバルの設定理由については第3章と同一であり、約5秒とした。

#### (5) しゅう動回数

しゅう動回数の設定理由については第3章と同一であり、3000回とした。ただし、アーク発生などですり板の摩耗が急激に促進される場合は、3000回未満で試験を停止する。

#### (6) しゅう動距離

しゅう動距離の設定理由については第3章と同一であり、1サイクルのしゅう動距離を250mmとした。

#### (7) 通電電圧

通電電圧および通電方向の設定理由については第3章と同一であり、電源電圧を100V、通電方向はトロリ線を陽極、すり板を陰極とした。

#### (8) 通電電流

第3章の摩耗試験の結果、摩耗特性に対する通電の影響が最も大きい電流条件は、100Aであった。摩耗形態の遷移現象把握を容易にするため、本章では通電電流を100Aとする。

### 4.2.4 測定項目および測定方法

#### (1) 試験前

第3章と同様、摩耗試験前に粗さ計を用いてトロリ線断面プロファイルを測定し、2次元レー

ザー変位計ですり板の3次元形状を測定する。

#### (2) 試験中

摩耗試験中の測定項目はしゅう動速度，接触力，摩擦力，電流，接触電圧であり，測定方法は第2章と同一である。

#### (3) 試験後

第3章と同様，摩耗試験後に粗さ計を用いたトロリ線断面プロファイルを測定し，2次元レーザー変位計ですり板の3次元形状を測定する。これによりトロリ線およびすり板の摩耗率を算出する。

また，直動型摩耗試験機からトロリ線およびすり板を取り外し，摩耗粒子を採取する。それらを走査型電子顕微鏡(SEM : Scanning electron microscope)を用いて観察し，X線マイクロアナライザ(EPMA : Electron probe X-ray microanalyzer)を用いて元素分布像を撮影する。

#### 4.2.5 試験手順

摩耗試験手順は，第2章で述べたものと同一である。

Table 4.2.1 Sort and physical properties of wear test specimens

Specimen	Sort	component	Mass density g/mm <sup>3</sup>	Hardness MPa	Electric resistivity μΩm	Melting point K
Contact wire	GT170	Cu(99.9%)	$8.91 \times 10^{-3}$	895	$1.77 \times 10^{-2}$	1334
Contact strip	TF5A	Fe(78.6%), Cr(16.5%), S(0.9%)	$7.10 \times 10^{-3}$	960	0.40	1646

Table 4.2.2 Wear test conditions

Apparent contact area, mm <sup>2</sup>	9	50	70	100
Contact force, N	2~80			
Sliding speed, mm/s	200			
Friction interval, sec	Approximately 5.0			
Sliding cycle	3000			
Sliding distance, mm	250			
Voltage, V	DC 100			
Current, A	100			

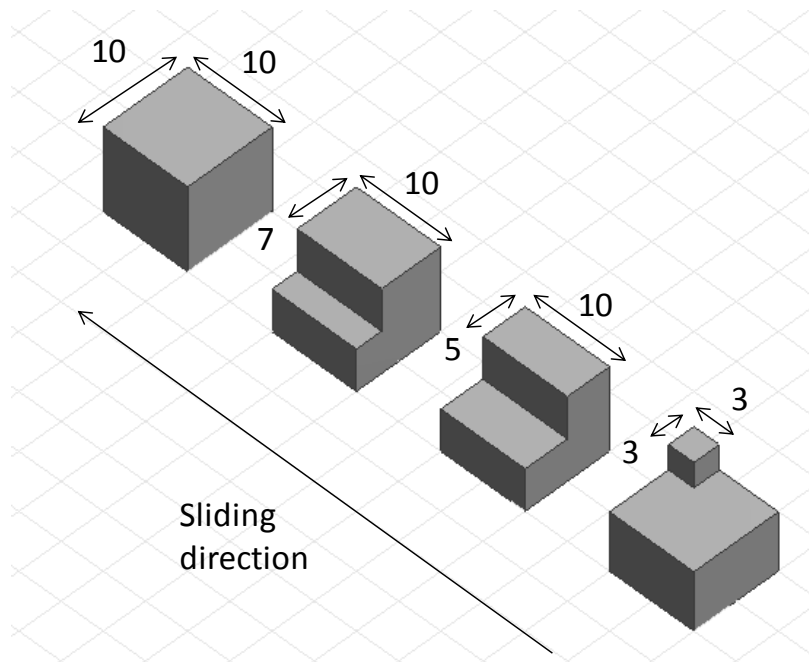


Figure 4.2.1 Four types of shape of contact strip

## 4.3 試験結果および考察

### 4.3.1 接触電圧に及ぼす見かけの接触面積と接触力の影響

見かけの接触面積を4段階変化させた場合の統計的最大接触電圧と接触力の関係を図4.3.1に示す。ここで統計的最大接触電圧とは、第3章3.4.1節でも述べたように、通電しゅう動時に測定したトロリ線とすり板間の接触電圧波形について、平均値+3 $\sigma_e$ ( $\sigma_e$ :標準偏差)としたものである。なお、同図の右縦軸には次式に示す $\varphi$ - $\theta$ 理論<sup>(2)</sup>より求めた接点最高温度 $T_{max}$ [K]、およびトロリ線の融点1334Kとすり板の融点1646Kを破線で示してある。

$$T_{max} = \left( \frac{V_c^2}{4L} + T_0^2 \right)^{1/2} \quad (4.1)$$

ここで、 $L$ はローレンツ数(= $2.4 \times 10^{-8}[(K/V)^2]$ )、 $V_c$ は統計的最大接触電圧[V]、 $T_0$ はバルク温度(室温)[K]である。

図4.3.1より、統計的最大接触電圧は見かけの接触面積に依存せず、接触力に依存することがわかる。これは真実接触面積が一般に見かけの接触面積に依存せず接触力と硬さに依存すること、また接触抵抗が真実接触面積に依存することからも妥当な結果と考える。式(4.1)より、接点の最高温度が接触電圧のみに依存するのであれば、図4.3.1の結果より接点最高温度は見かけの接触面積に依存しないことになる。

### 4.3.2 摩耗特性に及ぼす見かけの接触面積と接触力の影響

第3章3.3節において、集電材料の摩耗特性および表面観察結果より、硬銅トロリ線と鉄系焼結合金すり板の通電摩耗形態を以下の3つに分類した。

- ① 機械的摩耗形態：摩耗率や摩擦係数等の摩耗特性は電流や接触力に依存せず、ほぼ一定の値となる。トロリ線およびすり板表面に熔融痕はなく、すべり方向にせん断された痕が観察できる。摩耗粒子は塊状となる。
- ② トロリ線熔融摩耗形態：トロリ線の摩耗率および摩擦係数は極大となる。トロリ線表面のみが熔融し、熔融した銅がすり板表面に移着する。摩耗粒子はロール状となる。
- ③ すり板熔融摩耗形態：すり板比摩耗量は接触力の減少に伴い著しく増加するが、トロリ線の摩耗率および摩擦係数は減少する。すり板表面が熔融し、熔融した鉄がトロリ線表面に移着するが、トロリ線表面は熔融しない。摩耗粒子は比較的大きな剥片となる。

見かけの接触面積を4段階変化させた場合のトロリ線摩耗率やすり板比摩耗量、および摩擦係数と接触力の関係を図4.3.2～図4.3.4に示す。これらの図より、硬銅トロリ線と鉄系焼結合金すり板の摩耗特性および摩耗形態に及ぼす見かけの接触面積の影響を以下に述べる。

#### 4.3.2.1 見かけの接触面積 70mm<sup>2</sup> 以上の場合

通電かつ見かけの接触面積が70mm<sup>2</sup>以上の場合、接触力条件によって3つの摩耗形態が発生することがわかった。

#### (1) 接触力 10N 以上の条件

図 4.3.2～図 4.3.4 より，見かけの接触面積  $70\text{mm}^2$  以上かつ接触力 10N 以上の条件において，トロリ線摩耗率やすり板比摩耗量，および摩擦係数の値は見かけの接触面積および接触力に依存せず，ほぼ一定の値となることがわかる。

接触力 10N 以上におけるトロリ線とすり板の摩耗面および摩耗粒子の，典型的な SEM 写真および EPMA 写真を図 4.3.5 に示す。なお，成分分析は硬銅トロリ線の主成分である Cu，鉄系焼結合金すり板の主成分である Fe について実施した。図 4.3.5 より，トロリ線およびすり板表面に熔融痕はなく，すべり方向にせん断された痕が確認できる。また，摩耗粒子は Cu と Fe が混合した塊状である。

以上の傾向は上述した機械的摩耗形態の特徴と一致する。

#### (2) 接触力 10N 近傍の条件

図 4.3.2 および図 4.3.4 より，見かけの接触面積  $70\text{mm}^2$  以上かつ接触力 10N 近傍の条件において，トロリ線摩耗率および摩擦係数に極大値が存在することがわかる。

トロリ線摩耗率と摩擦係数が極大となった条件において，摩耗面および摩耗粒子の観察を実施した結果，見かけの接触面積  $70\text{mm}^2$  と  $100\text{mm}^2$  では同様の様相を呈した。典型的な SEM 写真および EPMA 写真を図 4.3.6 に示す。トロリ線表面の Cu が熔融しており，すり板表面に厚い Cu の移着物が堆積し，摩耗粒子はロール状である。なお，すり板表面の Fe に熔融痕は確認できなかった。

以上の傾向は上述したトロリ線熔融摩耗形態の特徴と一致する。

#### (3) 接触力 7N 以下の条件

図 4.3.3 より，見かけの接触面積  $70\text{mm}^2$  以上かつ接触力 7N 以下の条件では，接触力の減少に伴いすり板比摩耗量が著しく増加する。なお，すり板比摩耗量に対する見かけの接触面積の影響は見られない。一方で図 4.3.2 および図 4.3.4 より，接触力 7N 以下の条件では，トロリ線摩耗率および摩擦係数は減少する。

接触力 7N 以下の条件において，トロリ線とすり板の摩耗面および摩耗粒子の典型的な SEM 写真および EPMA 写真を図 4.3.7 に示す。すり板表面の Fe が熔融しており，トロリ線表面に熔融した Fe が移着し，摩耗粒子は比較的大きな剥片である。なお，トロリ線表面の Cu に熔融痕は確認できなかった。

以上の傾向は上述したすり板熔融摩耗形態の特徴と一致する。

### 4.3.2.2 見かけの接触面積 $50\text{mm}^2$ 以下の場合

通電かつ見かけの接触面積が  $50\text{mm}^2$  以下の場合，4.3.2.1 節とは異なり，接触力条件によって発生する摩耗形態は 2 つであることがわかった。

#### (1) 接触力 10N 以上の条件

図 4.3.2～図 4.3.4 より，見かけの接触面積  $50\text{mm}^2$  以下かつ接触力 10N 以上の条件において，トロリ線摩耗率やすり板比摩耗量，および摩擦係数の値は見かけの接触面積および接触力に依存せず，ほぼ一定の値となることがわかる。



接触力 10N 以上におけるトリ線とすり板の摩表面および摩耗粒子を SEM および EPMA で観察・分析した結果、図 4.3.5 と同様の様相を呈した。

以上より、接触力 10N 以上の十分な接触力が負荷された条件では、摩耗特性に対する見かけの接触面積の影響は見られず、機械的摩耗形態となることがわかった。機械的摩耗形態におけるトリ線摩耗率、すり板比摩耗量、摩擦係数の平均値と見かけの接触面積の関係を図 4.3.8～図 4.3.10 に示す。これらの図からも、摩耗特性に対する見かけの接触面積の影響は見られない。

ここで、トリ線摩耗率やすり板比摩耗量が見かけの接触面積に依存しないことは、見かけの接触面積が小さいほど摩耗深さが増加することを意味する。

## (2) 接触力 10N 近傍の条件

図 4.3.2 および図 4.3.4 より、見かけの接触面積  $50\text{mm}^2$  以下かつ接触力 10N 近傍の条件では、トリ線摩耗率および摩擦係数が極大とならず、機械的摩耗形態における値と同等であることがわかる。同条件において摩耗面および摩耗粒子を観察した結果、図 4.3.11 に示すようにトリ線表面に Cu の熔融痕は観察されず、機械的摩耗形態と同様の様相であることがわかった。

## (3) 接触力 7N 以下の条件

図 4.3.3 より、見かけの接触面積  $50\text{mm}^2$  以下かつ接触力 7N 以下の条件では、接触力の減少に伴いすり板比摩耗量が著しく増加する。なお、すり板比摩耗量に対する見かけの接触面積の影響は見られない。一方で図 4.3.2 および図 4.3.4 より、接触力 7N 以下の条件では、トリ線摩耗率および摩擦係数は減少する。

接触力 7N 以下におけるトリ線とすり板の摩表面および摩耗粒子を SEM および EPMA で観察・分析した結果、図 4.3.7 と同様の様相を呈した。

以上より、接触力 7N 以下の接触力が小さい条件では、摩耗特性に対する見かけの接触面積の影響は見られず、すり板熔融摩耗形態となることがわかった。

ここまでの試験結果に基づき、横軸を接触力、縦軸を見かけの接触面積として整理した摩耗形態の発生条件および図 4.3.1 で得られた接点最高温度のコンター図を図 4.3.12 に示す。この図より、接点最高温度がすり板融点  $1646\text{K}$  に達する条件では、見かけの接触面積によらずすり板が熔融し、すり板熔融摩耗形態となり、接点最高温度が見かけの接触面積に依存しないことは実験的にも明らかである。一方、接点最高温度がトリ線融点  $1334\text{K}$  に達する条件では、見かけの接触面積  $70\text{mm}^2$  以上でトリ線熔融摩耗形態、見かけの接触面積  $50\text{mm}^2$  以下では機械的摩耗形態となり、トリ線の温度は接点最高温度とは異なること、またトリ線の温度のみ見かけの接触面積の影響を受けることが初めて明らかとなった。

### 4.3.3 摩耗特性に及ぼすアークの影響

摩耗試験時の接触電圧波形より、しゅう動中に接触電圧が 10V 以上になった場合をアーク発生とし、見かけの接触面積を 4 段階変化させた場合の接触力とアーク発生率の関係を図 4.3.13 に示す。この図より、接触力の減少に伴いアーク発生率は増加することがわかる。また、見かけの接触面積が小さいほどアーク発生率は小さくなる傾向がある。

第3章 3.3.2 節と同様，式(4.2)で算出したアーク全放電電気量[C]とトリ線線の摩耗率およびすり板の比摩耗量の関係を図 4.3.14，図 4.3.15 に示す。

$$\begin{aligned} \text{全放電電気量[C]} &= \text{通電電流[A]} \times \text{総しゅう動時間[s]} \\ &\times \text{アーク発生率[\%]} \end{aligned} \quad (4.2)$$

図 4.3.14 より，トリ線線摩耗率と全放電電気量との明確な相関は確認できない。一方で図 4.3.15 より，全放電電気量とすり板比摩耗量は比例関係にあるが，その傾きは見かけの接触面積によって異なり，摩耗特性をアークで整理することは困難である。

#### 4.3.4 摩耗特性に及ぼすブリッジの影響

摩耗試験時の接触電圧波形より，しゅう動中に接触電圧が 0.42V 以上になった場合を Cu ブリッジ発生，および 0.51V 以上になった場合を Fe ブリッジ発生とする。見かけの接触面積を 4 段階変化させた場合の，接触力と各ブリッジ発生率の関係を図 4.3.16 および図 4.3.17 に示す。

第3章 3.4.2 節と同様，式(4.3)で算出したブリッジ電気量[C]と，各摩耗形態におけるトリ線線の摩耗率およびすり板の比摩耗量との関係を図 4.3.18，図 4.3.19 に示す。

$$\begin{aligned} \text{ブリッジ電気量[C]} &= \text{通電電流[A]} \times \text{総しゅう動時間[s]} \\ &\times \text{ブリッジ発生率[\%]} \end{aligned} \quad (4.3)$$

図 4.3.18 より，トリ線線溶融摩耗形態において，Cu ブリッジ電気量の増加に伴いトリ線線摩耗率は増加する傾向にあり，実際にトリ線線表面が溶融する条件では Cu ブリッジ電気量でトリ線線摩耗率を整理できる。しかしながら，機械的摩耗形態やすり板溶融摩耗形態でも接触電圧は 0.42V 以上になっており，トリ線線溶融に必要な条件は接触電圧以外にも存在することがわかる。このトリ線線溶融機構を解明し，支配パラメータを特定することで，接触電圧によらずトリ線線のブリッジを抑制する耐摩耗設計指針が提案できると考える。第5章では，トリ線線ブリッジの発生機構について取り組み，第6章ではトリ線線溶融の抑制対策について提案する。

図 4.3.19 より，Fe ブリッジ電気量の増加に伴いすり板比摩耗量は増加する傾向にあり，見かけの接触面積を変化させた場合でも，すり板摩耗はアークよりもブリッジが支配的であることが明らかとなった。

#### 4.3.5 従来の研究報告に対する考察

##### 4.3.5.1 現場のトリ線線しゅう動面幅と摩耗率の関係に対する考察

藤井<sup>(1)</sup>によって報告された，トリ線線残存直径とトリ線線摩耗率の関係を図 4.3.20 に示す。文献(1)ではトリ線線の残存直径の減少率を「径摩耗率」と呼称し，トリ線線の断面積の減少率に対する「面積摩耗率」と区別している。現場調査した全箇所のうち，トリ線線しゅう動面幅の増加に伴いトリ線線径摩耗率が増加する箇所が 45%，トリ線線のしゅう動面幅の増加に伴いトリ線線径摩耗率が減少する箇所が 65%であることも報告している。

一方で本章の試験結果より，すり板摩耗に対する見かけの接触面積の影響はなく，トリ線線摩耗のみが見かけの接触面積の影響を受けることが明らかとなった。さらにトリ線線摩耗のなかで

も、十分な接触力が負荷された条件やアークが発生する条件では見かけの接触面積の影響はなく、接触力 10N 近傍の条件のみが見かけの接触面積の影響を受けることも明らかとなった。以上の結果に基づき、現場のトロリ線しゅう動面幅と径摩耗率の関係について以下のように考察する。

- (1) パンタグラフの接触力が十分に負荷された条件では、見かけの接触面積によらず摩耗形態は機械的摩耗形態となり、図 4.3.8 に示すようにトロリ線の摩耗率は変化しない。すなわちトロリ線しゅう動面幅が増加し、見かけの接触面積が増加しても、トロリ線の摩耗面積は変化しない。摩耗面積が変化しないため、トロリ線しゅう動面幅の増加に伴い摩耗深さは減少し、結果として径摩耗率が減少することになる。
- (2) パンタグラフの接触力が十分に負荷されない条件では、見かけの接触面積の増加に伴い摩耗形態が変化する可能性がある。トロリ線しゅう動面幅が小さい状態では見かけの接触面積が小さくなり、機械的摩耗形態となる。一方、トロリ線しゅう動面幅の増加に伴い見かけの接触面積も増加し、トロリ線表面が熔融するトロリ線熔融摩耗形態に遷移する可能性がある。摩耗形態がトロリ線熔融摩耗形態になると、トロリ線摩耗率、すなわちトロリ線の摩耗面積が著しく増大する。そのため、トロリ線しゅう動面幅の増加に伴い摩耗深さも増加し、結果として径摩耗率が増加することになる。

藤井<sup>(1)</sup>の報告には、トロリ線摩耗調査箇所におけるパンタグラフ接触力に関する記述はないが、見かけの接触面積と摩耗形態の関係に着目することで、図 4.3.20 は上記(2)のような現象が発生したものと考えられる。

#### 4.3.5.2 定置試験条件に対する考察

定置摩耗試験に関して、長沢<sup>(3)</sup>や久保<sup>(4)</sup>は、通電時の電流を見かけの接触面積で除した電流密度の値を現場の値と近似させることで、実際の通電環境の模擬を試みている。一方で、岩瀬<sup>(5)</sup>はトロリ線とすり板が離線したときに発生するアークスポットは見かけの接触面積よりもはるかに小さな真実接触点で起こっており、電流密度ではなくアーク発生率をもって実際の摩耗を模擬することを提案している。

本章の試験結果より、集電材料の通電時摩耗形態を支配するパラメータの一つとして接触電圧があり、図 4.3.1 に示すように接触電圧は見かけの接触面積に依存しないことを明らかにしている。また、アーク発生率が 1%未満と小さい条件においては、第 3 章 3.4.2 節および図 4.3.19 に示すように摩耗はブリッジ電氣量に支配されることを明らかにしている。

以上のことから、定置摩耗試験ではアーク放電電氣量およびブリッジ電氣量を用いて実際の通電環境を模擬することが必要と考える。

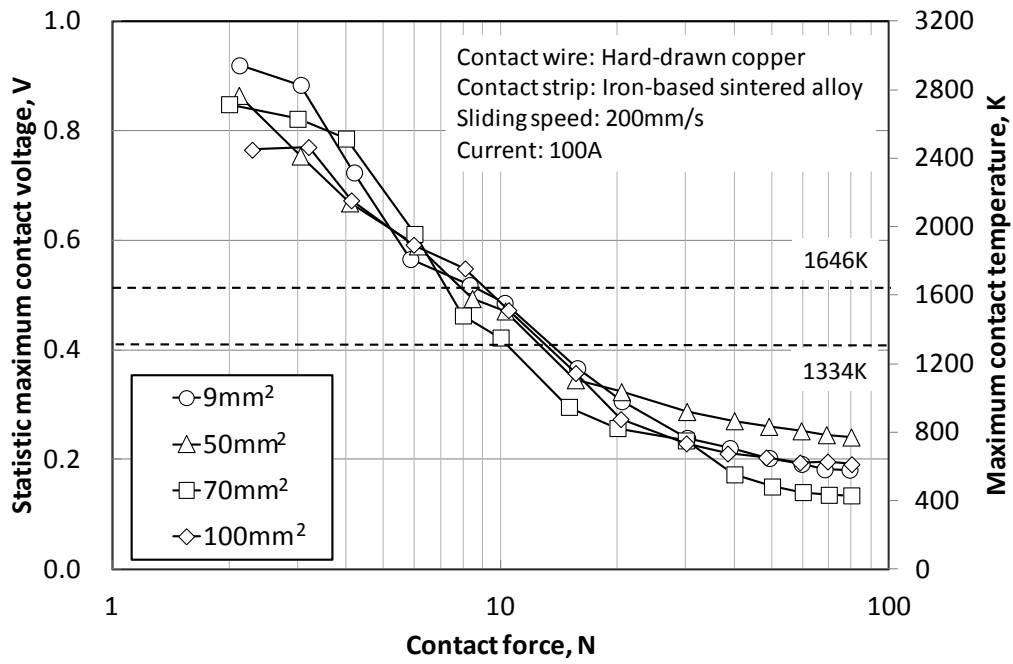


Figure 4.3.1 Relationship between statistic maximum contact voltage and contact force in each apparent contact area

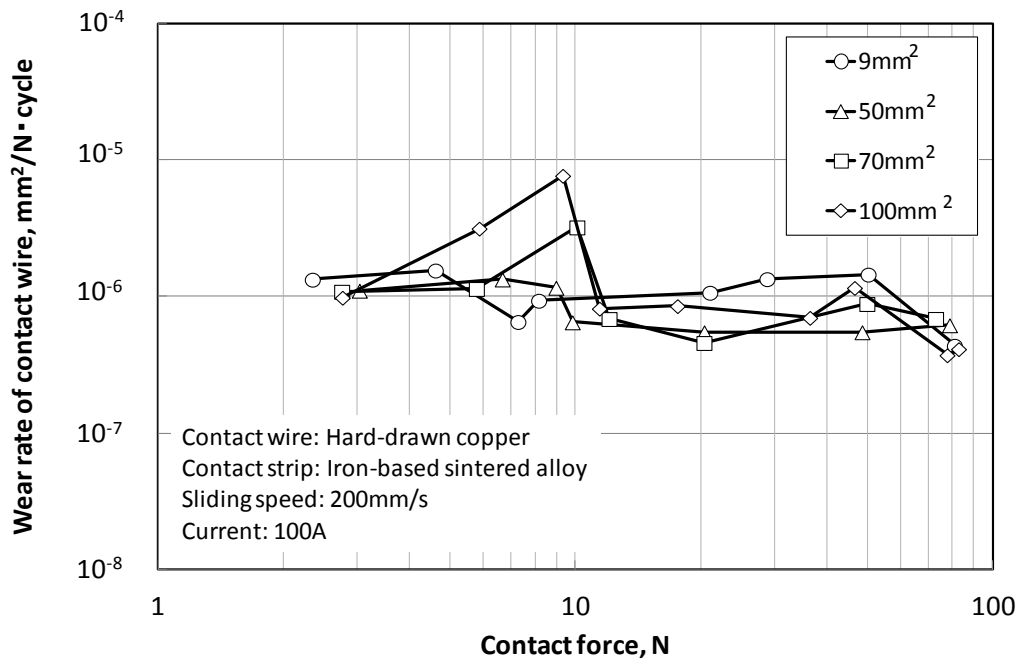


Figure 4.3.2 Relationship between wear rate of contact wire and contact force in each apparent contact area

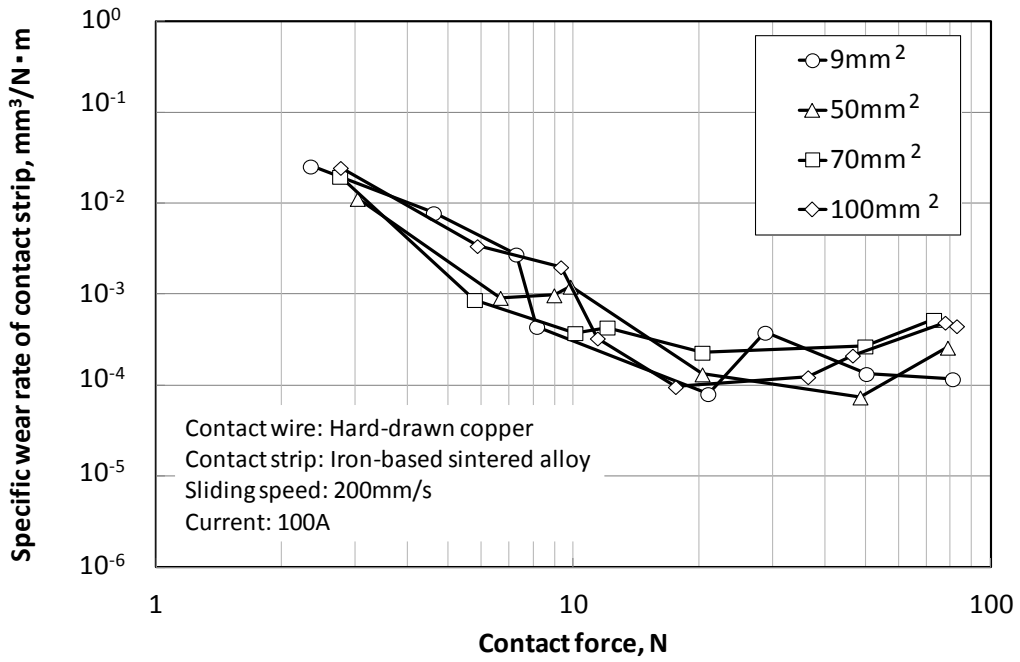


Figure 4.3.3 Relationship between specific wear rate of contact strip and contact force in each apparent contact area

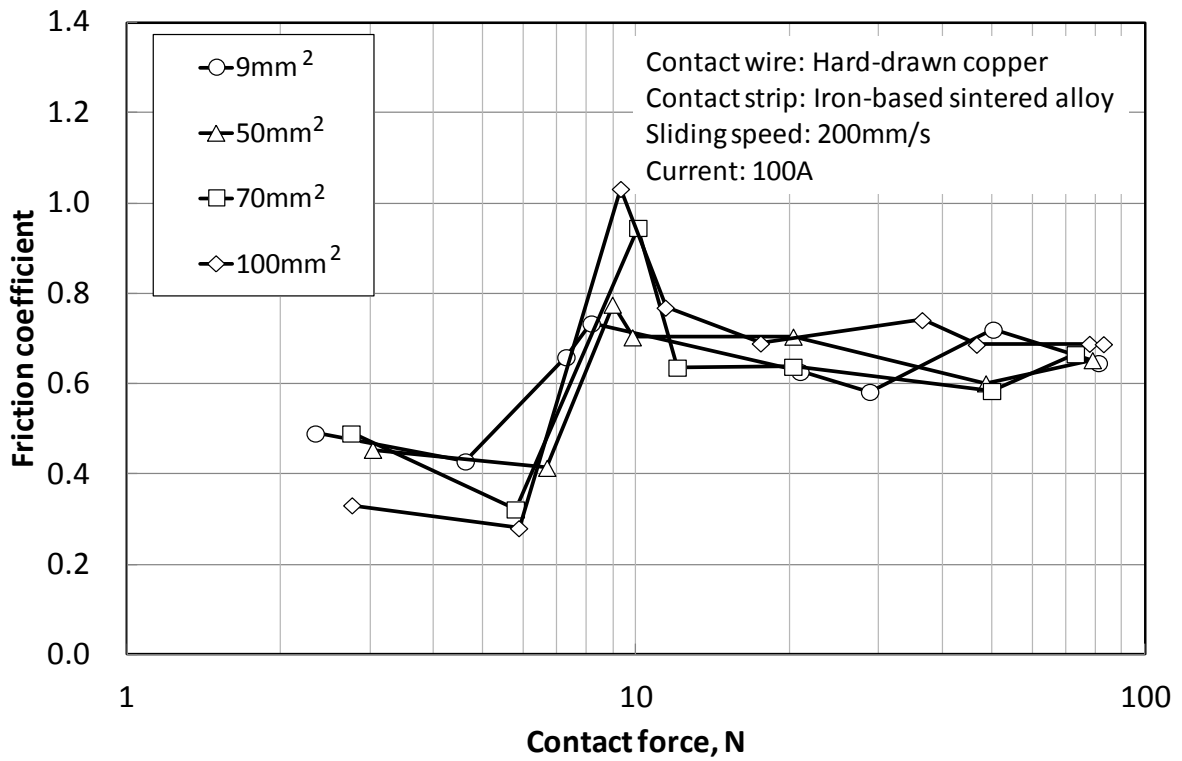
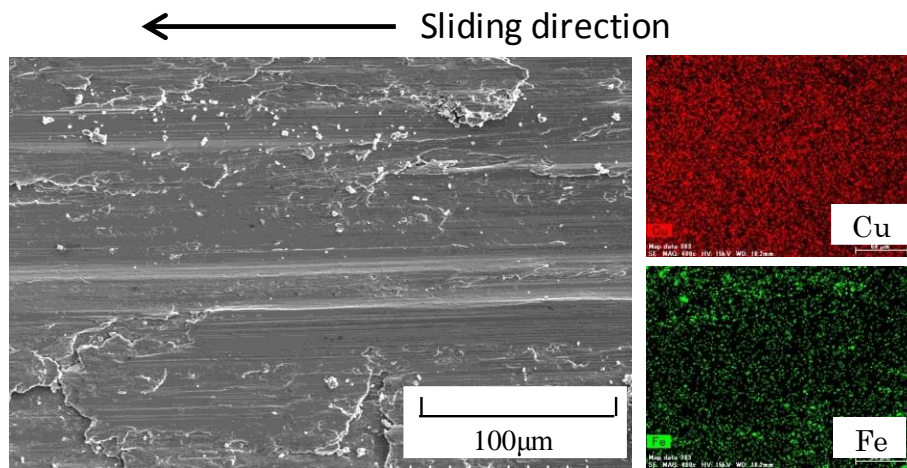
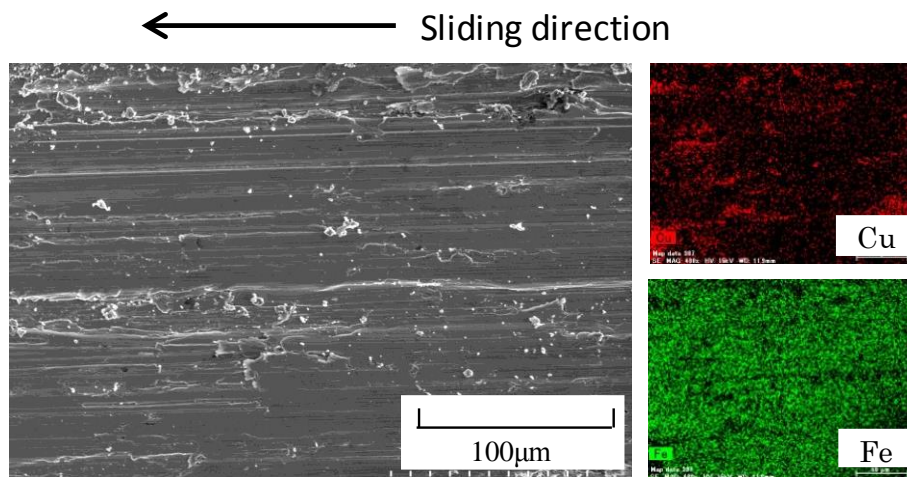


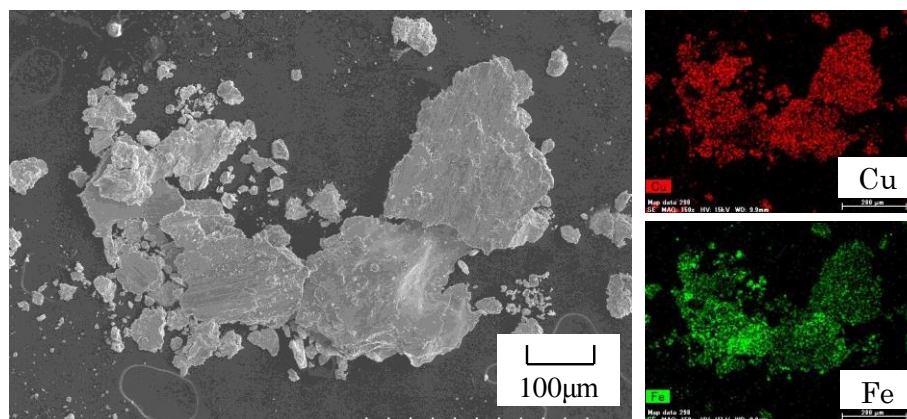
Figure 4.3.4 Relationship between friction coefficient and contact force in each apparent contact area



(a) Wear surface of contact wire



(b) Wear surface of contact strip

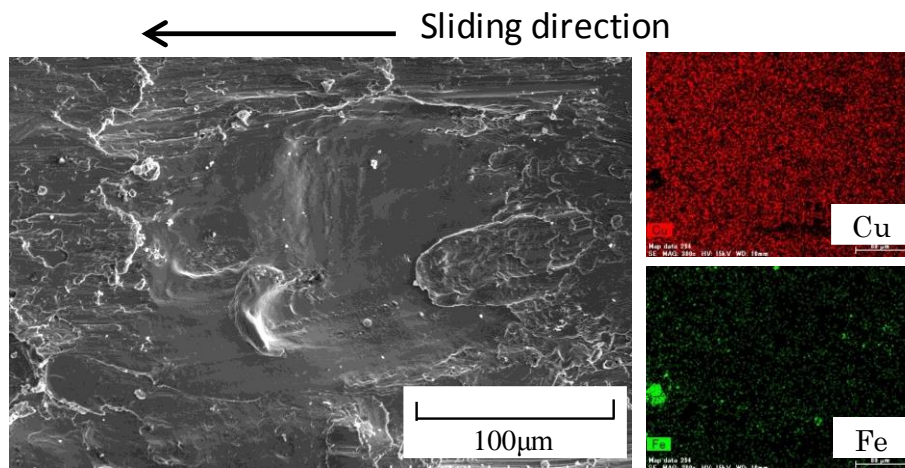


(c) Wear particle

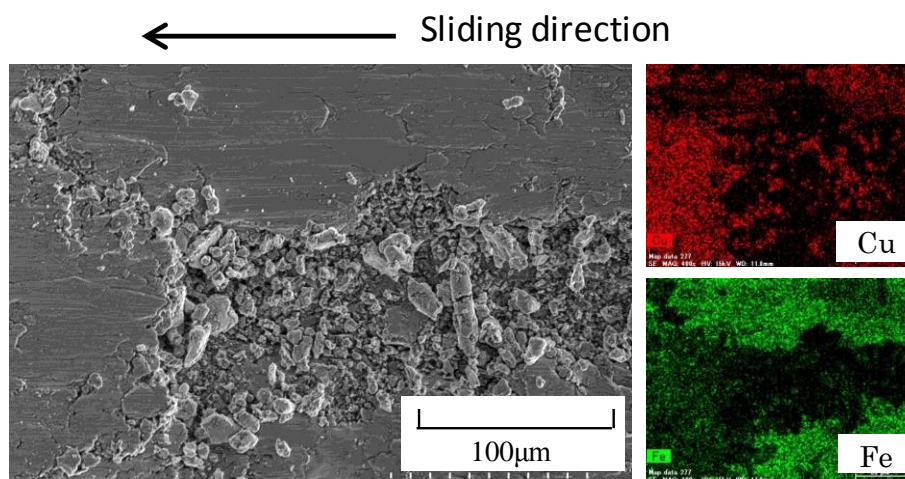
Figure 4.3.5 SEM-EPMA pictures of wear surface and wear particle  
 (Contact force: 49N, sliding speed: 200mm/s, current: 100A, apparent contact area: 70mm<sup>2</sup>)

Arrows in this figure show the sliding direction of the contact strip.

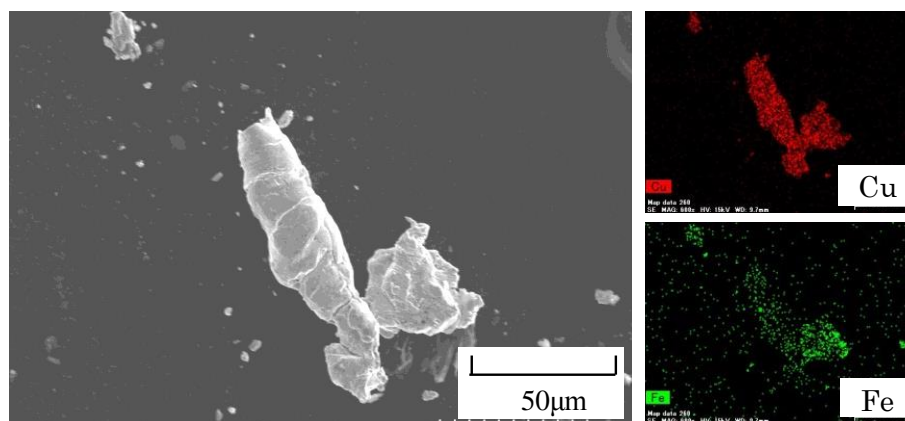




(a) Wear surface of contact wire

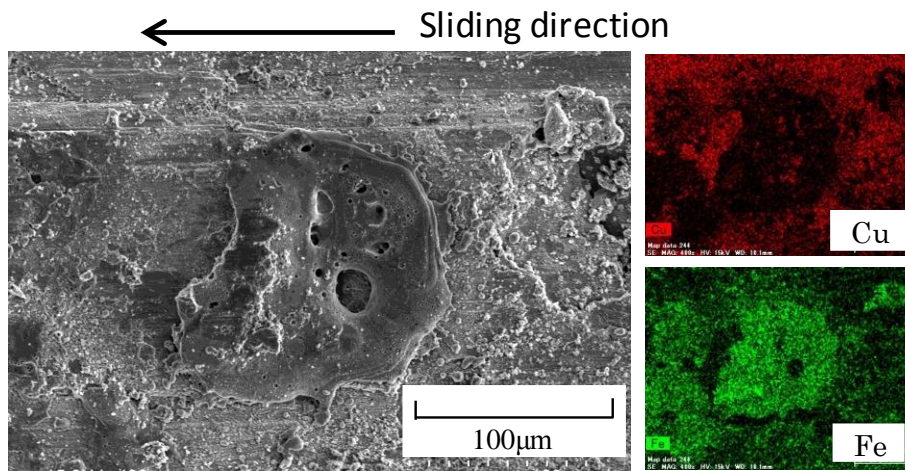


(b) Wear surface of contact strip

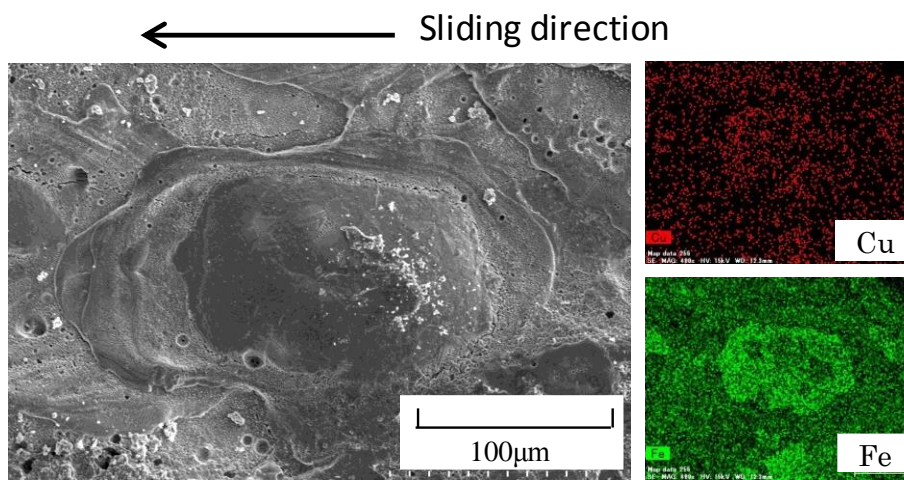


(c) Wear particle

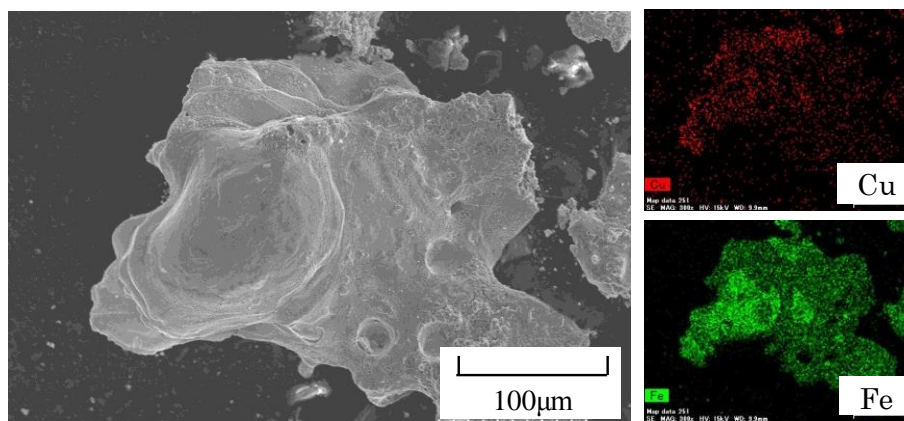
Figure 4.3.6 SEM-EPMA pictures of wear surface and wear particle  
 (Contact force: 10N, sliding speed: 200mm/s, current: 100A, apparent contact area: 70mm<sup>2</sup>)  
 Arrows in this figure show the sliding direction of the contact strip.



(a) Wear surface of contact wire



(b) Wear surface of contact strip



(c) Wear particle

Figure 4.3.7 SEM-EPMA pictures of wear surface and wear particle  
 (Contact force: 2.7N, sliding speed: 200mm/s, current: 100A, apparent contact area: 70mm<sup>2</sup>)

Arrows in this figure show the sliding direction of the contact strip.



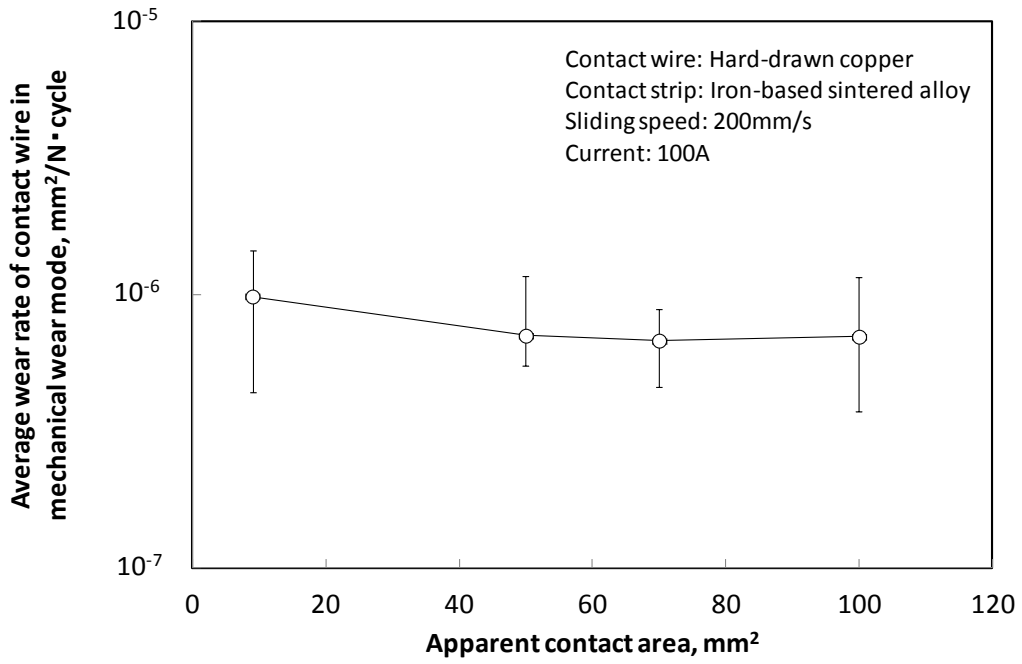


Figure 4.3.8 Relationship between average wear rate of contact wire and apparent contact area in mechanical wear mode

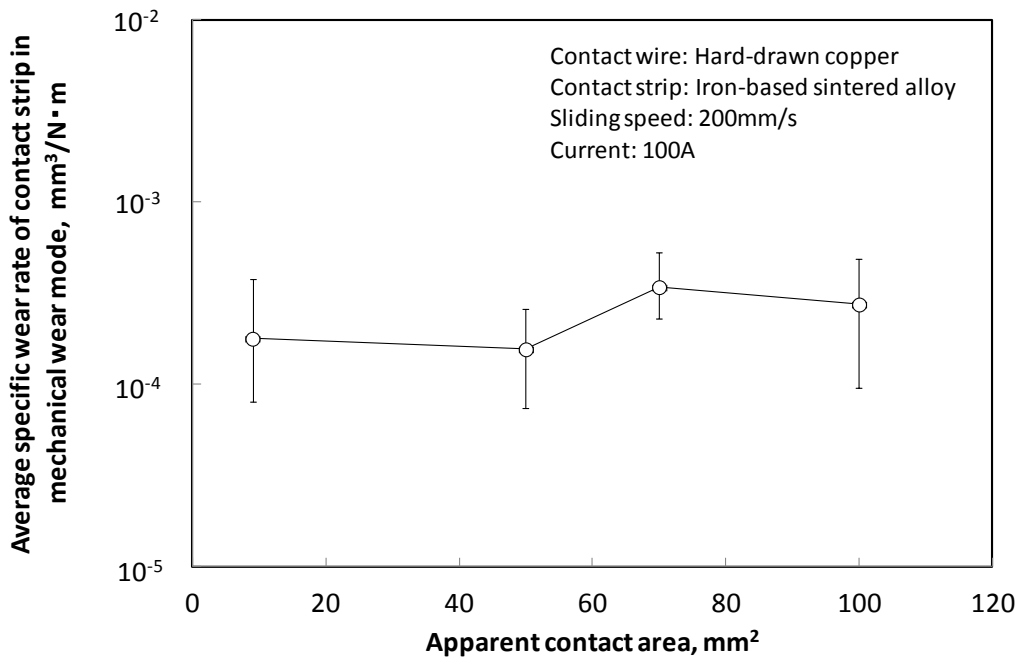


Figure 4.3.9 Relationship between average specific wear rate of contact strip and apparent contact area in mechanical wear mode

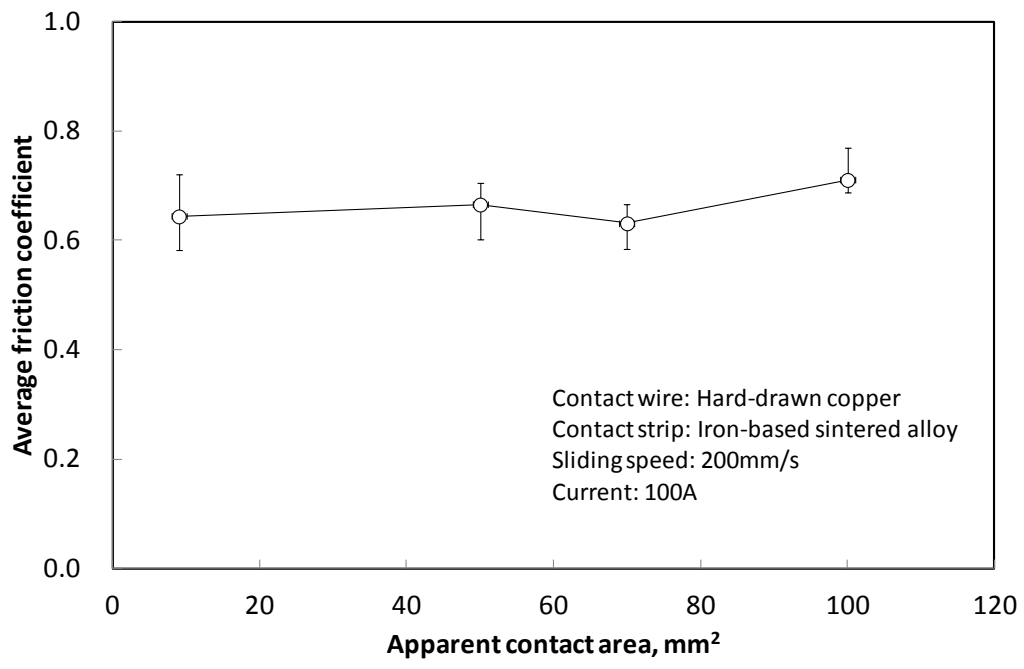
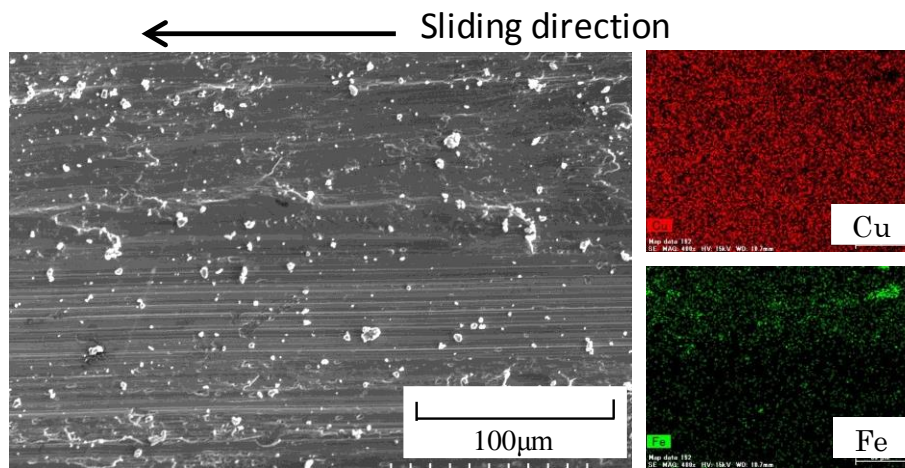
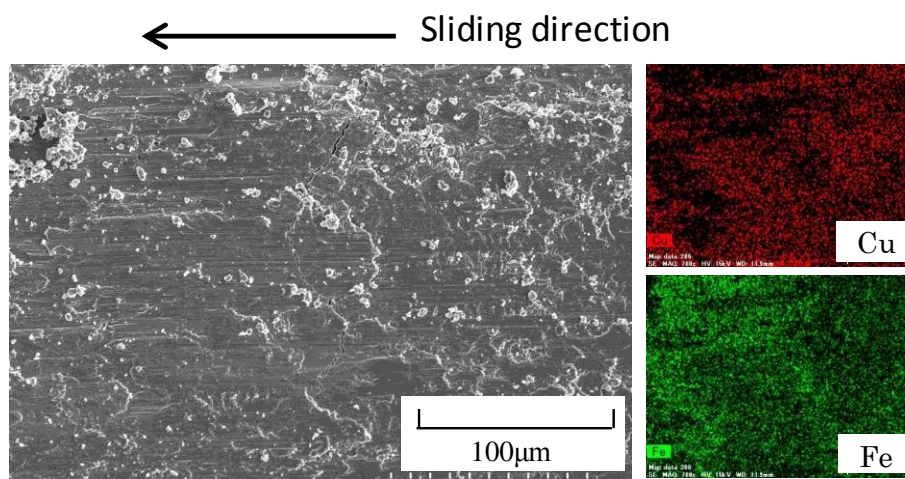


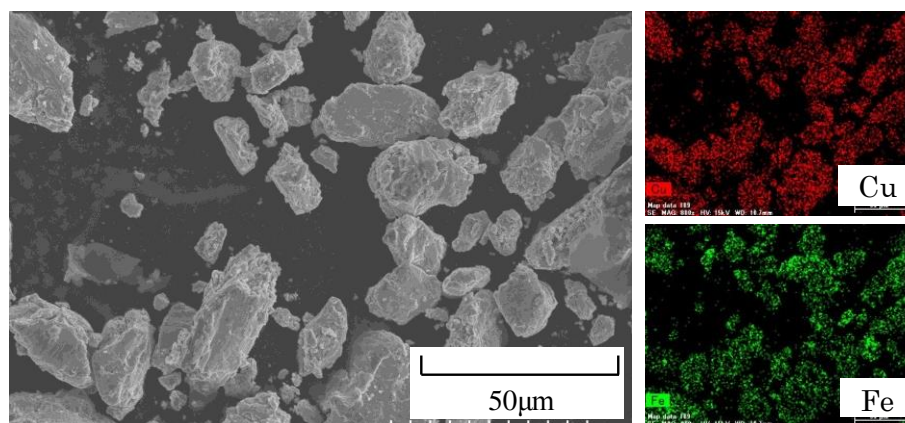
Figure 4.3.10 Relationship between average friction coefficient and apparent contact area in mechanical wear mode



(a) Wear surface of contact wire



(b) Wear surface of contact strip



(c) Wear particle

Figure 4.3.11 SEM-EPMA pictures of wear surface and wear particle  
 (Contact force: 9.8N, sliding speed: 200mm/s, current: 100A, apparent contact area: 50mm<sup>2</sup>)

Arrows in this figure show the sliding direction of the contact strip.

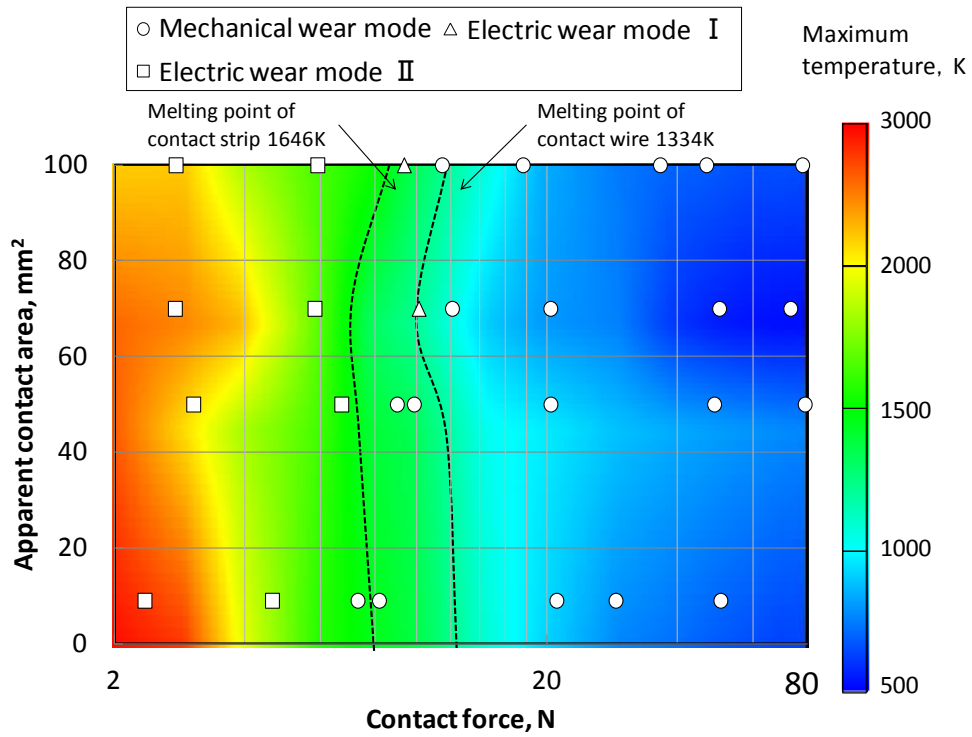


Fig. 4.3.12 Correlation between wear mode and maximum contact temperature

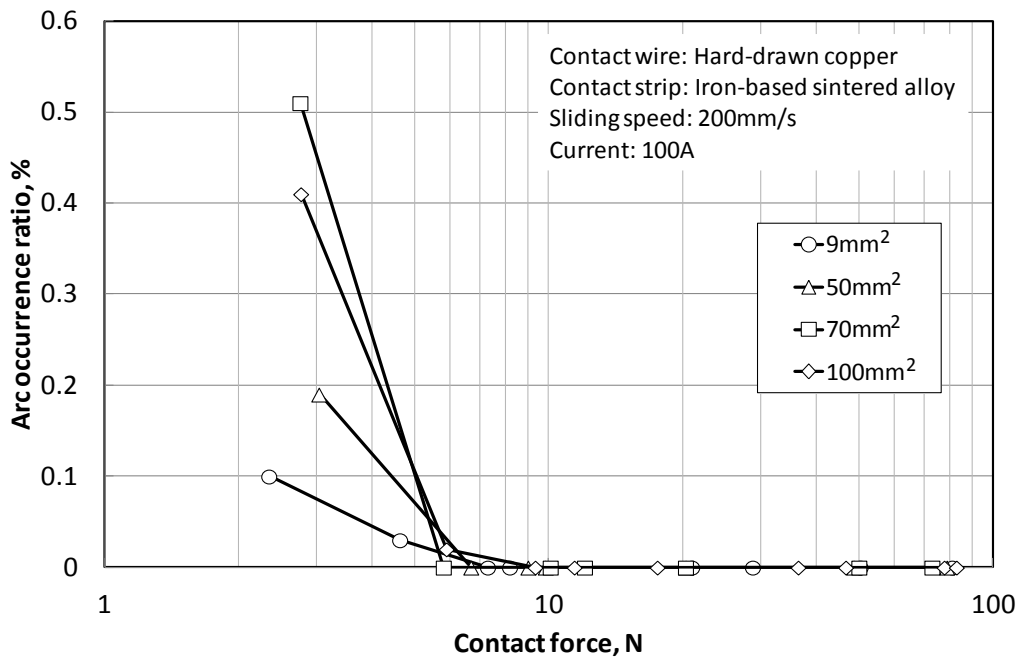


Figure 4.3.13 Relationship between arc occurrence ratio and contact force in each apparent contact area

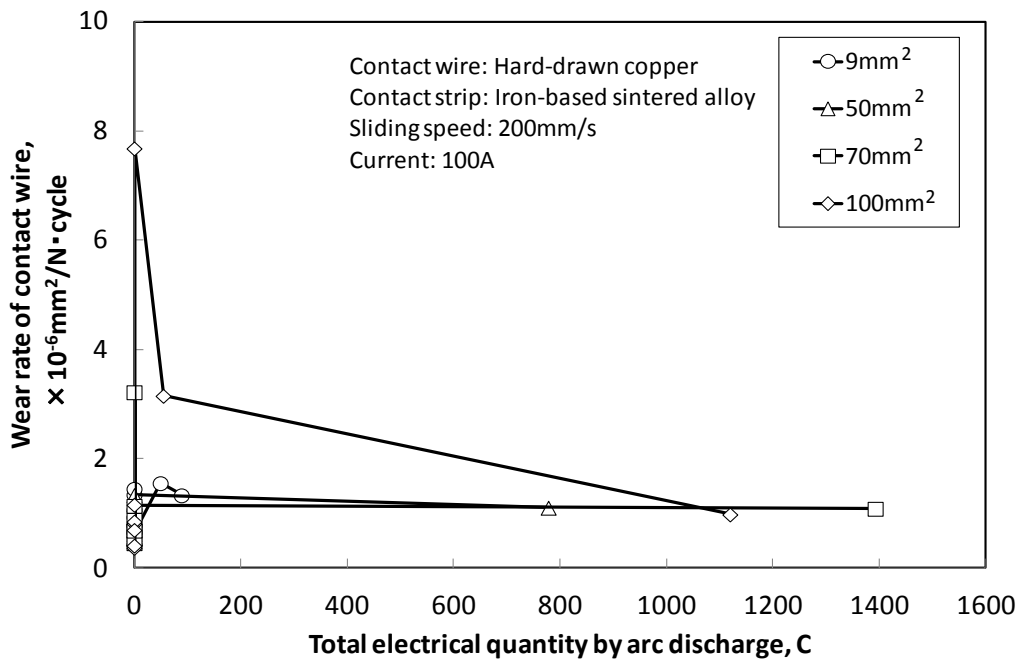


Figure 4.3.14 Relationship between wear rate of contact wire and total electrical quantity by arc discharge in each apparent contact area

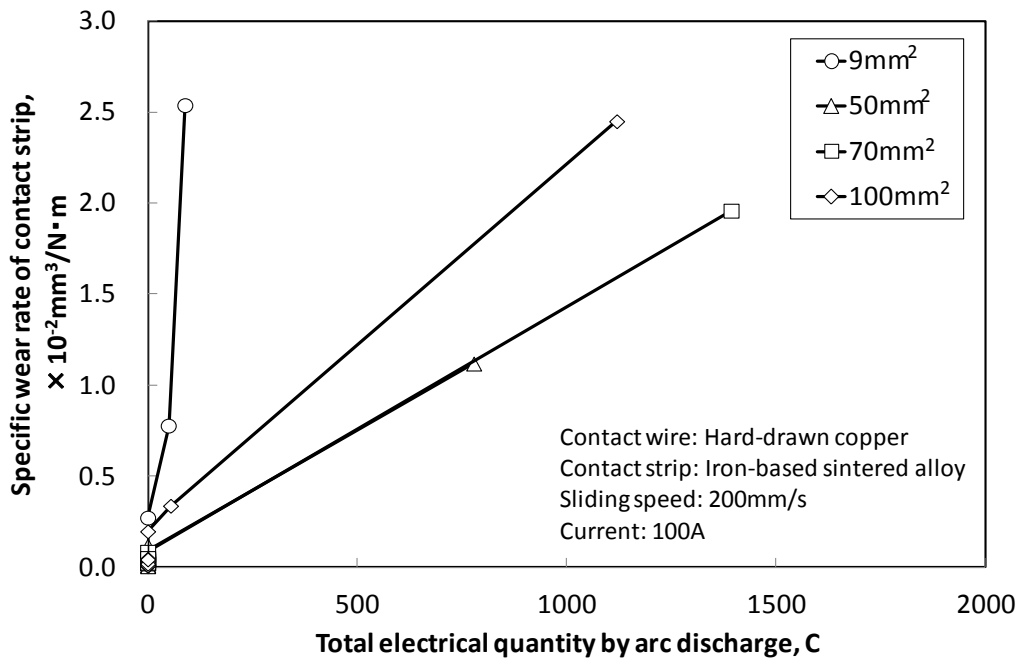


Figure 4.3.15 Relationship between specific wear rate of contact strip and total electrical quantity by arc discharge in each apparent contact area

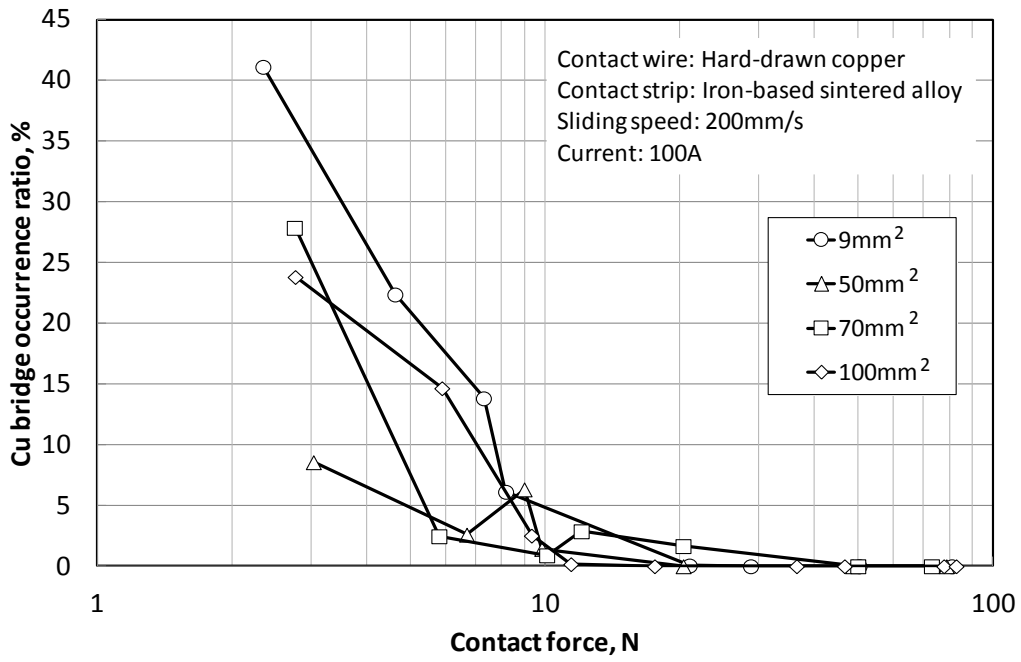


Figure 4.3.16 Relationship between Cu bridge occurrence ratio and contact force in each apparent contact area

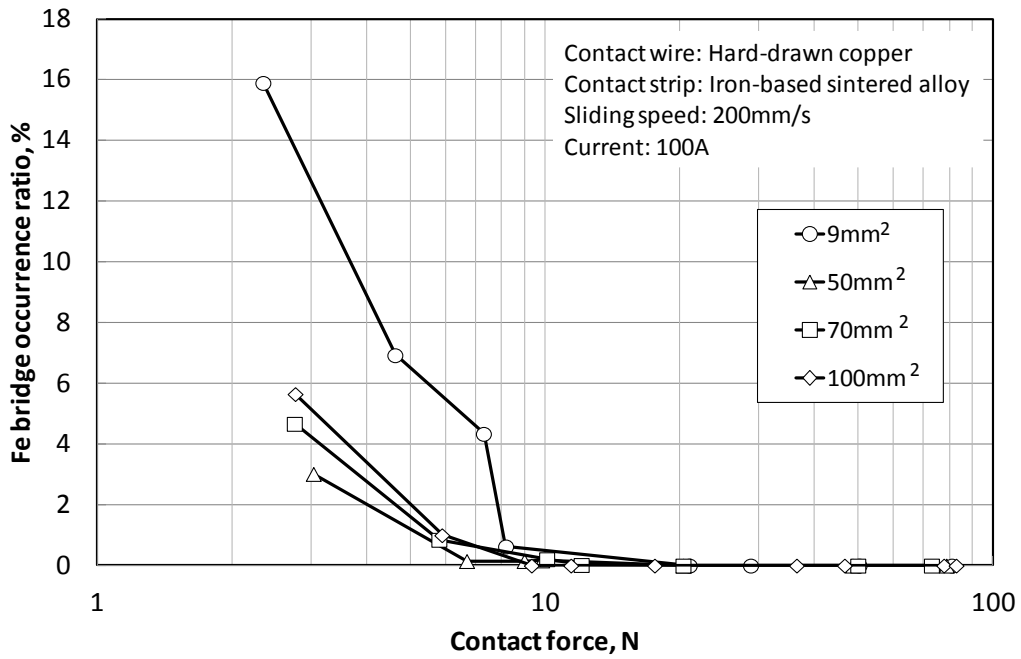


Figure 4.3.17 Relationship between Fe bridge occurrence ratio and contact force in each apparent contact area

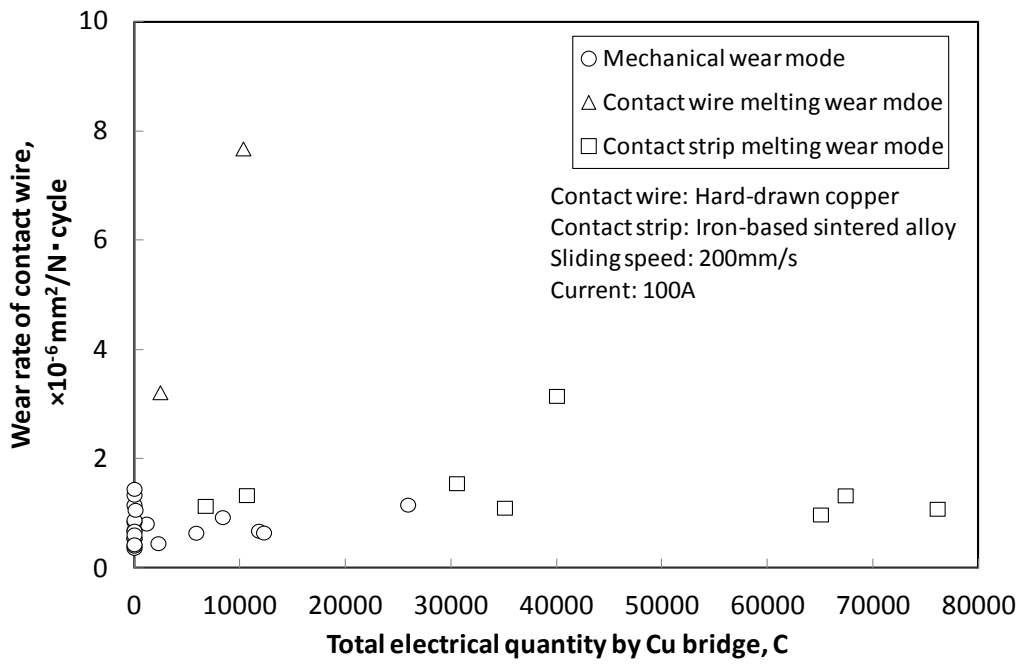


Figure 4.3.18 Relationship between wear rate of contact wire and total electrical quantity by Cu bridge in each wear mode

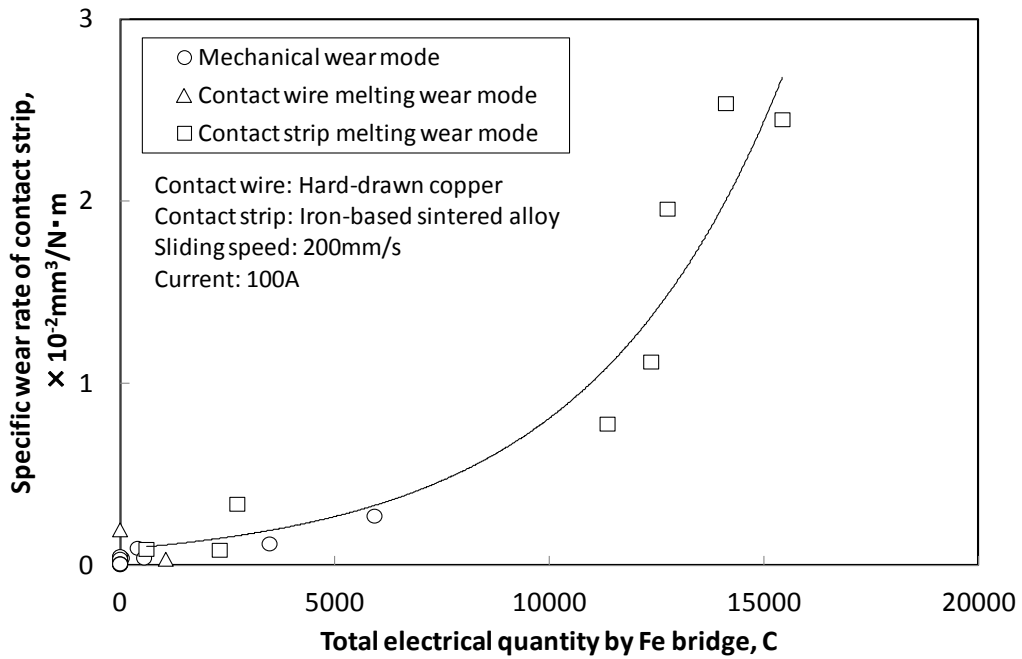


Figure 4.3.19 Relationship between specific wear rate of contact strip and total electrical quantity by Fe bridge in each wear mode

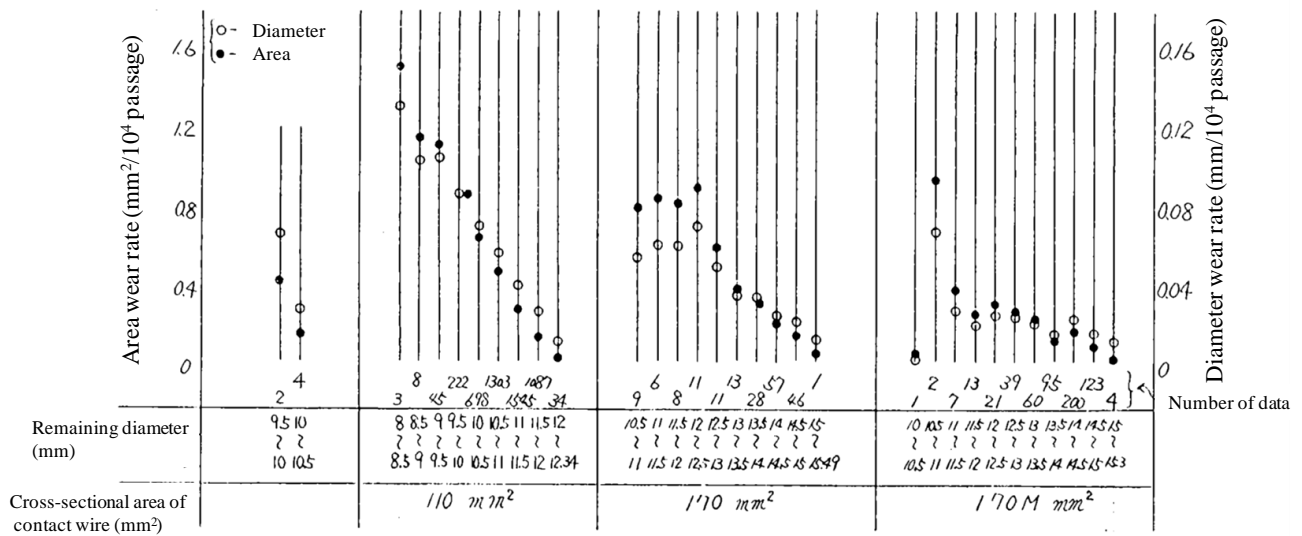


Figure 4.3.20 Wear rate of contact wire against remaining diameter <sup>(1)</sup>



## 4.4 結言

集電材料の摩耗特性に及ぼす見かけの接触面積の影響を明らかにするべく、硬銅トロリ線と鉄系焼結合金すり板の組合せについて、見かけの接触面積を4段階変化させた摩耗試験を実施した。得られた具体的な結論は以下のとおりである。

- (1) 接触力が10N以上の条件では、見かけの接触面積によらず接点最高温度が硬銅トロリ線および鉄系焼結合金すり板の融点未満となり、トロリ線およびすり板は熔融せず機械的摩耗形態となった。トロリ線摩耗率やすり板比摩耗量、摩耗係数は見かけの接触面積に依存せず一定の値となった。
- (2) 接触力10N近傍の条件では、見かけの接触面積によらず接点最高温度が硬銅トロリ線の融点以上、鉄系焼結合金すり板の融点未満となった。しかしながら、見かけの接触面積によってトロリ線表面の熔融状態は変化し、摩耗形態も変化した。

接触力10N近傍かつ見かけの接触面積が $70\text{mm}^2$ 以上の条件では、トロリ線表面が熔融し、トロリ線熔融摩耗形態となり、トロリ線摩耗率および摩擦係数が極大となった。この条件におけるトロリ線摩耗率はCuブリッジ電気量の増加に伴い増加した。

接触力10N近傍かつ見かけの接触面積が $50\text{mm}^2$ 以下の条件では、トロリ線表面が熔融せず、機械的摩耗形態となった。この条件におけるトロリ線摩耗率および摩擦係数は極大とならず、接触力10N以上の値と同等となった。

このことより、トロリ線ブリッジの支配パラメータは、接触電圧すなわち接点最高温度以外にも存在することを明らかにした。

- (3) 接触力が7N以下の条件では、見かけの接触面積によらず接点最高温度が鉄系焼結合金すり板の融点以上となり、すり板表面が熔融するすり板熔融摩耗形態となった。接触力の減少に伴いすり板比摩耗量が著しく増大し、すり板比摩耗量はFeブリッジ電気量に比例した。なお、この条件におけるすり板比摩耗量は見かけの接触面積に依存しなかった。

## 参考文献

- (1) 藤井保和, 全国在来線のトロリ線摩耗率調査, 鉄道技術研究所速報, A-85-54 (1985).
- (2) 高木相, 電気接点のアーカ放電現象, コロナ社, (1995) 56-58.
- (3) 長沢広樹, Cr-Zr 系銅合金トロリ線の通電下の摩耗特性の研究, 東北大学学位論文, (1996) 27-35.
- (4) 久保俊一, 銅または銅鉛錫合金を溶浸した炭素製パンタグラフすり板のアーカ放電下の摩耗機構の研究, 東北大学学位論文, (1999) 47-50.
- (5) 岩瀬勝, パンタグラフ集電と摩耗(Ⅲ), 鉄道技術研究報告, 217 (1961) 12-14.

## 第 5 章

# 電位分布および温度分布解析による 集電材料の通電摩耗機構の解明

### 5.1 緒言

これまで集電材料の通電摩耗機構を解明するため、様々な定置試験結果が報告されてきた。そのほとんどは摩耗特性と離線アークの相関に関するものであり、結果として提案される摩耗対策のほとんどは離線抑制を目的としていた。

集電材料の摩耗を定量的な式で表した報告として、長沢<sup>(1)</sup> は Cr-Zr 系銅合金トロリ線に対するすり板の組合せを変更した摩耗試験結果より、接触面に発生する熱を算出することで、摩耗率と熱の相関をマッピングしている。また、電気鉄道以外の集電材料として、柳田ら<sup>(2)</sup> は発電機・電動機のブラシとスリップリングの摩耗について、ブリッジ破壊とアーク放電蒸発に着目し、ブリッジ転移量とアーク蒸発速度を定式化することで、ブラシの電氣的摩耗量を算出している。しかしながら、摩耗低減に対する定量的な対策は提案されていない。

本研究では集電材料の通電摩耗機構の解明を主目的とし、第 3 章および第 4 章において硬銅トロリ線と鉄系焼結合金すり板の組合せについて摩耗試験を実施してきた。得られた結果は以下に整理される。

- (1) 通電下の摩耗形態は機械的摩耗形態・トロリ線熔融摩耗形態・すり板熔融摩耗形態の 3 種類に分類され、摩耗形態の遷移条件は材料の熔融条件とほぼ一致する。
- (2) 離線発生時にトロリ線著大摩耗が発生する主要因は、従来考えられているアーク損耗ではなく、トロリ線接点の熔融に伴うブリッジである。
- (3) 融点が 1646K である鉄系焼結合金すり板が熔融するすり板熔融摩耗形態において、融点が 1334K である硬銅トロリ線は熔融しない。
- (4) 接点最高温度が銅の融点 1334K に達する条件において、見かけの接触面積  $50\text{m}^2$  以下では、接触電圧によらず硬銅トロリ線は熔融しない。

以上のことから、集電材料の通電摩耗機構を解明するためには、アークではなくその前のブリッジの発生機構に着目することが重要であり、接点最高温度のみならず、接点近傍の温度分布を把握する必要があると考える。しかし、トロリ線とすり板などの異種金属接点の温度分布に関する文献はほとんどなく、さらに温度分布と摩耗形態の関係に関する文献は見当たらない。

そこで本章では、通電接点に対する電位分布および温度分布解析手法を新たに提案し、硬銅トロリ線と鉄系焼結合金すり板の通電条件下の摩耗機構を明らかにする。また解析結果を定式化することで、摩耗形態の遷移条件をマッピングし、摩耗形態の支配パラメータを特定する。

## 5.2 解析方法

### 5.2.1 電位分布解析

#### 5.2.1.1 解析モデル

硬銅トロリ線および鉄系焼結合金すり板の接点近傍における温度分布を解析するため、電極内の電位分布を解析する必要がある。解析対象はトロリ線とすり板の異種金属接点であるが、本章ではさらに表面の酸化膜や摩耗粒子などの介在物も解析対象とした。これは、一般的な解析対象が介在物のない清浄な接触であるのに対し、本章の目的である摩耗現象を解明するためには、摩耗試験時の接触状態を模擬することが必要と考えたためである。

そこで、図 5.2.1 に示すように介在物を被膜抵抗とした円柱形状の電極モデルを作成し、中心軸上に半径  $a$  の接点を設定した。ここで、トロリ線およびすり板の電極半径を  $D$  とする。図 5.2.1 のモデル円周方向の電位は一律であり、計算負荷を軽減するため円周方向に分割した 1 ピースについて図 5.2.2 に示す上下左右方向に格子メッシュを設定した。各電極モデルの格子メッシュ数は  $30 \times 30$  とした。中心要素の求めたい電位  $\varphi_0$  に対して、上下左右の電位を反時計回りに  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  とし、それぞれの要素を繋ぐ抵抗を  $R_1, R_2, R_3, R_4$  とした。図 5.2.2 より、中心要素の電位  $\varphi_0$  はキルヒホッフの法則に従い、電流に関する連立方程式を解くことで求めることができる。

$$\varphi_0 = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right)^{-1} \left( \frac{\varphi_1}{R_1} + \frac{\varphi_2}{R_2} + \frac{\varphi_3}{R_3} + \frac{\varphi_4}{R_4} \right) \quad (5.1)$$

各抵抗は、図 5.2.3 に示すように円柱モデルを円周方向に分割した要素形状より、以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{\rho dz}{A_1} = \frac{2\rho dz}{(2rdr + dr^2)d\omega} \\ R_2 &= \frac{\rho dr}{A_2} = \frac{\rho dr}{rd\omega dz} \\ R_3 &= \frac{\rho dz}{A_3} = \frac{2\rho dz}{(2rdr + dr^2)d\omega} \\ R_4 &= \frac{\rho dr}{A_4} = \frac{\rho dr}{(r + dr)d\omega dz} \end{aligned} \quad (5.2)$$

解析モデルの物性値を表 5.2.1 に示す。トロリ線材は硬銅、すり板材は鉄系焼結合金である。被膜抵抗の電気抵抗率  $\rho_{d1}, \rho_{d2}$  は、トロリ線およびすり板の電気抵抗率  $\rho_1, \rho_2$  に対して次式を仮定した。

$$\rho_{d1} = f_1 \rho_1, \quad \rho_{d2} = f_2 \rho_2 \quad (5.3)$$

ここで、 $f_1, f_2$  は被膜抵抗における抵抗増分を考慮した抵抗係数である。なお、 $f_1 = f_2 = 1$  は被膜抵抗がない状態であり、抵抗係数が増加するほど接触表面に高抵抗の被膜が存在することを意味する。

境界条件として、トロリ線上端面における電位を接触電圧  $V_c$ 、すり板下端面における電位を  $0V$  とし、全ての要素について式(5.1)が成立するよう収束計算を行い、各要素における電位変化が  $1 \times 10^{-6}V$  未満となった時を計算終了とした。

### 5.2.1.2 解析精度

解析精度の検証として、接点半径  $a$  と各介在物層の厚さ  $d_1, d_2$  を変化させ、解析で得られた接触抵抗値と式(5.4)<sup>(3)</sup>より得られる理論接触抵抗  $R_t$  との比較を行った。

$$\begin{aligned}
 R_t &= R_b + R_c + R_f \\
 R_b &= \frac{(\rho_1 + \rho_2)l}{\pi D^2} \\
 R_c &= \frac{\rho_1 + \rho_2}{4a} \left\{ 1 - 1.41571 \left(\frac{a}{D}\right) + 0.06322 \left(\frac{a}{D}\right)^2 + 0.15261 \left(\frac{a}{D}\right)^3 \right. \\
 &\quad \left. + 0.19998 \left(\frac{a}{D}\right)^4 \right\} \\
 R_f &= \frac{\rho_{d1}d_1 + \rho_{d2}d_2}{\pi a^2}
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

ここで、 $R_b$  は電極バルクの電気抵抗[ $\mu\Omega$ ]、 $l$  は円柱長さ[m]、 $R_c$  は接点近傍の集中抵抗[ $\mu\Omega$ ]、 $R_f$  は介在物層の被膜抵抗[ $\mu\Omega$ ]である。

まず、被膜抵抗が存在しない場合( $f_1=f_2=1$ )における解析精度を確認する。電極半径  $D=300\mu\text{m}$  とし、接点半径  $a$  を  $20\sim 300\mu\text{m}$  と変化させた場合の接触抵抗解析値と理論値の比較を図 5.2.4 に示す。解析値と理論値はほぼ一致しており、その誤差は  $a/D$  が 0.3 以上であれば 3.0%未満である。

次に、接点半径  $a=100\mu\text{m}$  ( $a/D=1/3$ )とし、被膜抵抗を考慮した場合の解析精度を確認する。被膜抵抗の抵抗係数を仮に  $f_1=f_2=100$  とし、被膜抵抗厚さ  $d$  を  $0.5\sim 50\mu\text{m}$  と変化させた場合の接触抵抗解析値と理論値の比較を図 5.2.5 に示す。被膜抵抗の厚さ  $d$  が  $10\mu\text{m}$  以下であれば解析値と理論値の誤差は 5.0%未満となり、被膜抵抗を考慮した電位分布解析も十分な精度を有する。

## 5.2.2 温度分布解析

過去、柳田ら<sup>(2)</sup> や Utsumi<sup>(4)</sup>によって、通電接点の非定常熱伝導計算式が提案されているが、非定常の式に定常式である  $\varphi$ - $\theta$  理論<sup>(5,6)</sup>を代入していることや、提案されている式の定常解が  $\varphi$ - $\theta$  理論と一致しないなどの課題があると考えられる。そこで本節では、材料特性の温度依存性を考慮した熱伝導方程式を新たに提案することで、電極内の温度分布を解析する。

ここで、実際のトロリ線とすり板はしゅう動接点であり、接点の移動を模擬するためには非定常熱伝導解析をするべきであるが、接点の移動時間に対して温度上昇は十分に短い時間で定常状態に達するため、本節では定常熱伝導解析とする。

### 5.2.2.1 解析モデル

まず、最もシンプルな 1 次元座標系のモデルに対し、定常熱伝導方程式を導出し、その後図 5.2.2 に示す 2 次元円柱座標系の熱伝導方程式に展開する。

図 5.2.6 に示す 1 次元熱伝導モデルにおいて、ジュール熱を与えられた時の定常熱伝導方程式は次式で表される。

$$\lambda \left( \frac{d\theta}{dx} \Big|_{x+1} - \frac{d\theta}{dx} \Big|_{x-1} \right) + \frac{I(\Phi_{x-1} + \Phi_{x+1})}{dA} = 0 \tag{5.5}$$

ここで、 $\theta$  は温度[K]、 $\lambda$  は熱伝導率[J/msK]、 $I$  は電流[A]、 $\Phi$  は電位差[V]、 $dA$  は要素断面積[m<sup>2</sup>]で

ある。さらに、式(5.6)で与えられる電流  $I$  を式(5.5)に代入することにより、式(5.7)が得られる。

$$I = \frac{d\Phi}{dR} = \frac{d\Phi dA}{\rho dx} \quad (5.6)$$

$$\left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x+1} - \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x-1} + \frac{(\Phi_{x-1} + \Phi_{x+1})d\Phi}{\lambda \rho dx} = 0 \quad (5.7)$$

ここで、 $\rho$ は電気抵抗率[ $\Omega\text{m}$ ]である。式(5.7)の左辺第3項の分母に熱伝導率と電気抵抗率の温度依存性を扱う Wiedemann-Franz の法則<sup>(5)</sup>より、式(5.8)を適用する。

$$\lambda \rho = L\theta \quad (5.8)$$

ここで、 $L$  はローレンツ数 ( $=2.4 \times 10^{-8}$  [V/K]<sup>2</sup>)である。式(5.8)を式(5.7)に代入し、両辺を積分すると次の1次元差分方程式を得る。

$$\theta_x = \left\{ \frac{1}{2} \left( \theta_{x+1}^2 + \theta_{x-1}^2 + \frac{\Phi_{x+1}^2 + \Phi_{x-1}^2}{L} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5.9)$$

なお、接点温度を推定する一般的な理論である  $\varphi$ - $\theta$  理論の前提<sup>(5,6)</sup>を挙げると、

(1) 両電極の材料が同じであり、電極末端から接触表面までの電圧降下 $\Phi$ は接触電圧の半分である。

すなわち、 $\Phi_{x-1} = \Phi_{x+1} = V_c/2$ である。

(2) 両電極のバルク温度は同じであり、 $\theta_{x-1} = \theta_{x+1} = T_0$ である。一般的には  $T_0=300\text{K}$  である。

これらの条件を式(5.9)に代入すると、

$$\theta_x = \left( \frac{V_c}{4L} + T_0^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.10)$$

となる。この式は  $\varphi$ - $\theta$  理論式<sup>(5,6)</sup>そのものであり、式(5.9)を用いることで、 $\varphi$ - $\theta$  理論と整合する通電時の温度分布を解析することが可能になる。また、 $\varphi$ - $\theta$  理論では算出できない異種金属接点における温度分布、両電極のバルク温度が異なる場合や被膜抵抗が存在する場合の温度分布も解析可能となり、トロリ線とすり板の接点における温度上昇解析が可能となる。

次に、式(5.9)を図5.2.2の2次元円柱座標系に展開すると、中央要素の温度は次式で算出できる。

$$\theta_0 = \left\{ \frac{1}{4} \left( \theta_1^2 + \theta_2^2 + \theta_3^2 + \theta_4^2 + \frac{\Delta r}{2r} (\theta_4^2 - \theta_2^2) + \frac{\Phi_1^2 + \Phi_2^2 + \Phi_3^2 + \Phi_4^2}{L} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5.11)$$

5.2.1 節で作成した電位分布解析モデルの解析結果に基づき、全ての要素について式(5.11)が成立するよう収束計算を行い、各要素の温度変化が  $1 \times 10^{-6}\text{K}$  未満となった時を計算終了とした。なお、接触境界や被膜抵抗の境界では熱伝導率の違いを考慮しなければならない。そこで被膜抵抗の熱伝導率 $\lambda_{d1}, \lambda_{d2}$ は、熱伝導率と電気抵抗率が式(5.8)に従うことを考慮して、トロリ線およびすり板の熱伝導率 $\lambda_1, \lambda_2$ に対して次式を仮定した。

$$\lambda_{d1} = \frac{\lambda_1}{f_1}, \quad \lambda_{d2} = \frac{\lambda_2}{f_2} \quad (5.12)$$

### 5.2.2.2 解析精度

解析精度の検証として、電極半径  $D=300\mu\text{m}$ 、被膜抵抗厚さ  $d_1=d_2=10\mu\text{m}$ 、接触電圧  $V_c$  を  $0.4\text{V}$  とし、接点半径  $a$  と被膜抵抗係数  $f_1, f_2$  を変化させ電位分布および温度分布を解析し、解析で得られた電極内最高温度と式(5.10)より算出される理論最高温度との比較を行った。なお、トロリ線およびすり板の末端温度、すなわちバルク温度は  $300\text{K}$  とした。解析例として、表 5.2.1 の硬銅トロリ線と鉄系焼結合金すり板の組合せにおいて、被膜抵抗の存在しない清浄な接触とした場合の、電位分布および温度分布の解析結果を図 5.2.7 に示す。これらの図に示すように、トロリ線とすり板は異種金属接点であるため、電極内部の電位分布および温度分布は上下非対称になることがわかる。

接触電圧  $0.4\text{V}$  に対して、被膜抵抗が存在しない場合 ( $f_1=f_2=1$ )、被膜抵抗が存在する場合 ( $f_1=f_2=100$ )、および接点半径と電極半径の比  $a/D=0.3, 0.6$  の場合について電極内最高温度の解析結果を図 5.2.8 に示す。この図より、被膜抵抗の有無や接点半径によらず、解析値と理論値はほぼ一致しており、その誤差は  $3.0\%$  未満となった。

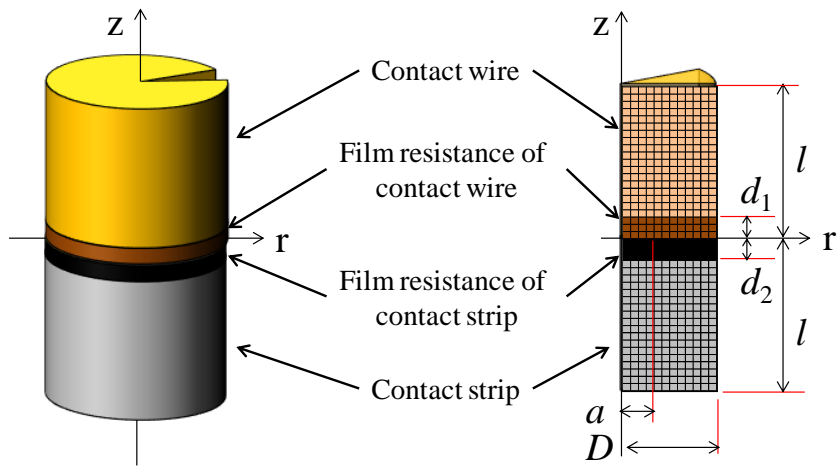


Figure 5.2.1 Schematic diagram of analysis model with film resistance

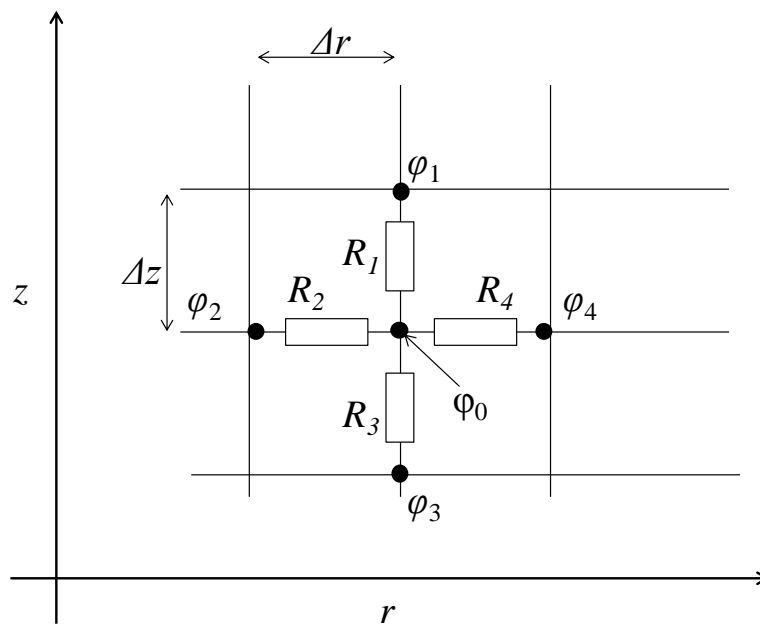


Figure 5.2.2 Schematic diagram of electric connection



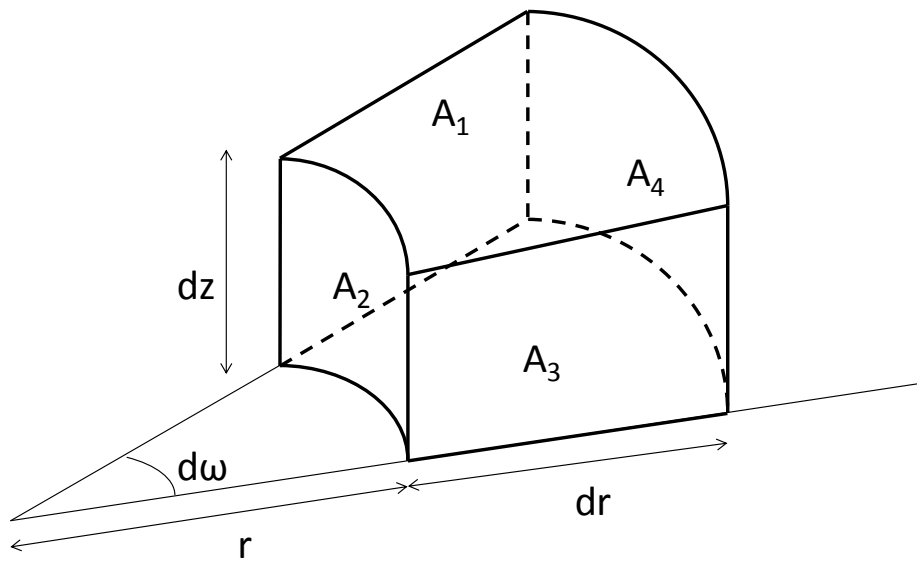


Figure 5.2.3 Size of analysis element

Table 5.2.1 Physical properties of electrodes

Electrode	Contact wire	Contact strip
Material	Hard-drawn copper	Iron-based sintered alloy
Electric resistivity, $\mu\Omega\text{m}$	$1.77 \times 10^{-2}$	0.40
Heat conductivity, $\text{J/msK}$	373	25.3
Melting point, K	1334	1646
Film resistance factor	1~100	1~100

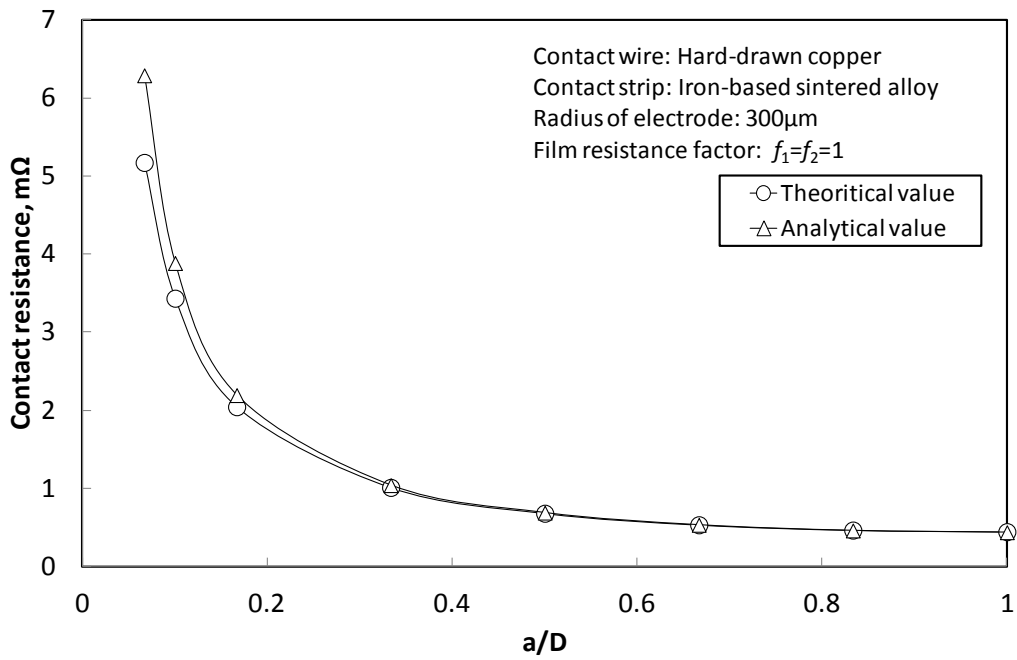


Figure 5.2.4 Comparison of theoretical value with analytical value of contact resistance obtained by changing radius of contact spot

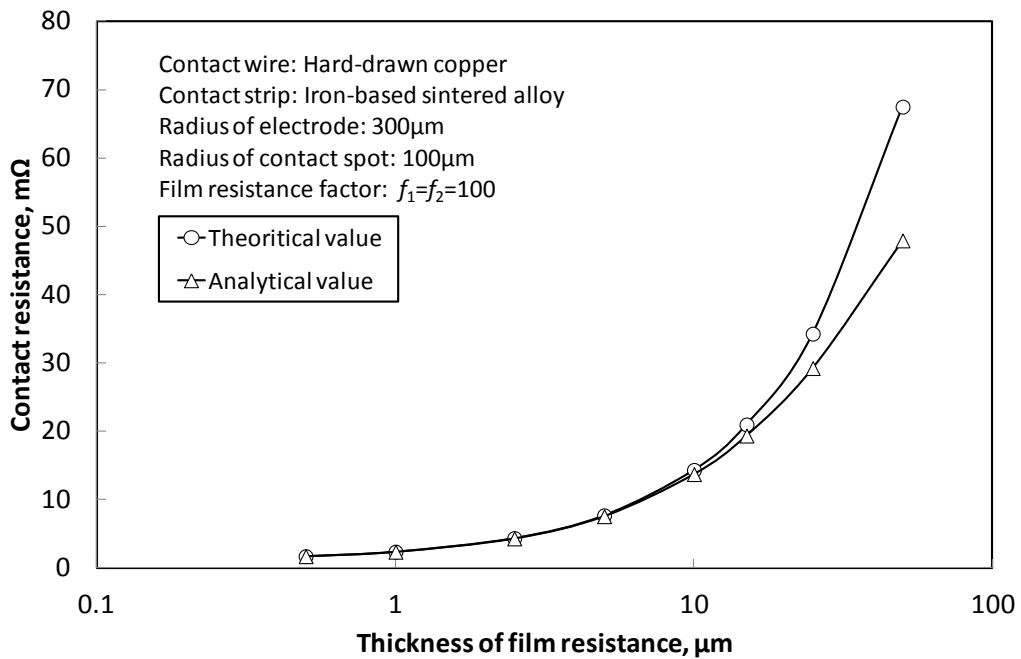


Figure 5.2.5 Comparison of theoretical value with analytical value of contact resistance obtained by changing thickness of film resistance

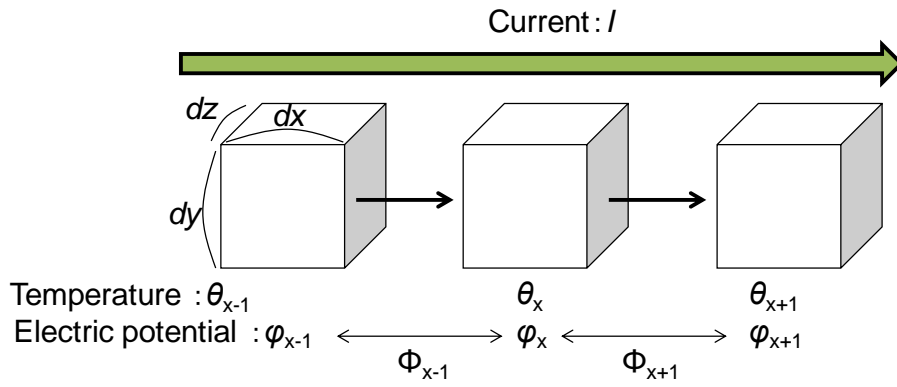
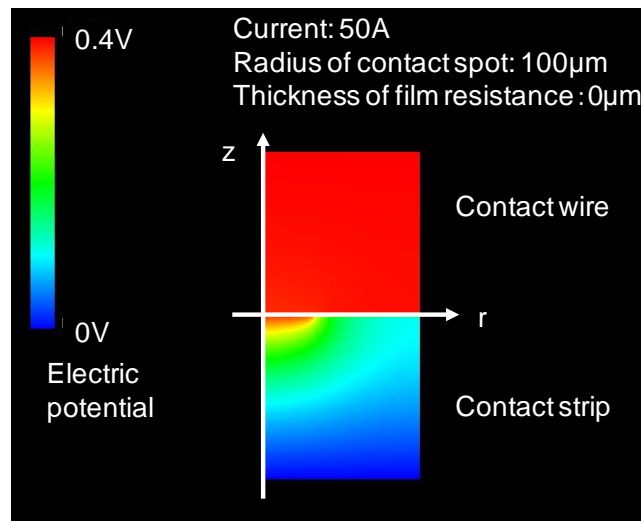
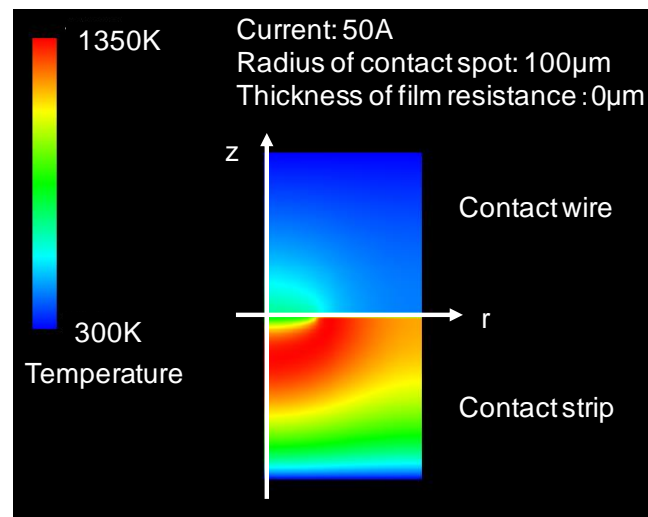


Figure 5.2.6 One-dimensional heat conduction analysis model



(a) Electric potential distribution



(b) Temperature distribution

Figure 5.2.7 Analysis result (Contact voltage: 0.4V)

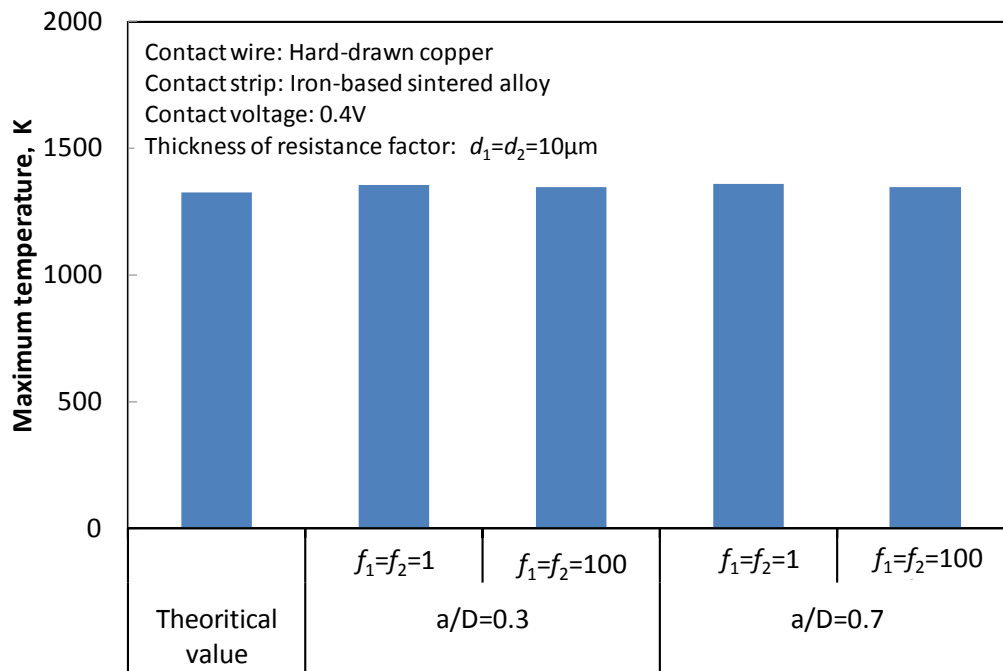


Figure 5.2.8 Comparison of theoretical value with analytical value of maximum temperature

## 5.3 解析結果

### 5.3.1 通電電流の影響

本節では最もシンプルな条件として、接触表面に被膜抵抗が存在せず、通電電流を変化させた場合の電極内電位分布と温度分布の関係を明らかにする。

$a/D=0.3$  としたまま接点半径を  $10\sim 100\mu\text{m}$  で変化させ、通電電流を第3章の実験条件である 50, 80, 100A とし、電位分布解析を用いて解析した接触電圧を図 5.3.1 に示す。この図より、接点半径の減少および通電電流の増加に伴い、接触電圧が増加することがわかる。なお、設定した条件における接触電圧は  $0.05\sim 1.0\text{V}$  となり、その範囲は第3章図 3.4.2 に示した統計的接触電圧を包括する。

上記の条件に対して温度分布解析を実施した。なお、境界条件として、トロリ線およびすり板のバルク温度は  $300\text{K}$  とした。解析例として、各電流に対して接点半径を  $20\mu\text{m}$  とした場合の電位分布および温度分布解析結果を図 5.3.2～図 5.3.4 に示す。これらの図より、電流の増加に伴い電極内の最高温度も増加することがわかる。また、いずれの電流条件においてもトロリ線内の電圧降下は小さく、すり板の接点近傍における電圧降下が大部分を占めることがわかる。電圧降下に対応して、温度上昇もすり板側の接点近傍が最も高温となることがわかる。

図 5.3.2～図 5.3.4 より、トロリ線とすり板の電極内電位分布と温度分布が相似の関係であるため、 $z$  軸上の電位と温度の関係を用いて電極内の状態を評価する。電流 50A, 80A, 100A に対して接点半径を変化させた場合の、電位と温度の関係を図 5.3.5～図 5.3.7 に示す。これらの図より、電極内の温度は電位に対して放物線状になり、全体の最高温度 $\theta_{max}$ は接触電圧の中間値となる位置、例えば接触電圧が  $0.4\text{V}$  の場合は  $0.2\text{V}$  となる位置で発生することがわかる。Holm<sup>(5)</sup>は同種金属接点の電位と温度の関係は放物線になり、接触電圧の中間箇所ですべての最高温度が発生すると報告している。以上より、電位と温度の放物線状の関係は異種金属にも適用でき、電極材料の組合せに依存しないといえる。以降では、この放物線を「電位—温度放物線」と呼称する。

図 5.3.5～図 5.3.7 には、トロリ線とすり板の接触境界を破線で示してある。いずれの接触境界も放物線の頂点より右側、すなわち高電位側にずれていることがわかる。これは、表 5.2.1 に示すようにすり板の電気抵抗率がトロリ線より大きく、全体の電圧降下に占めるすり板電極内の電圧降下の割合が大きいためである。また、電流の増加に伴い電位—温度放物線が変化しても、トロリ線とすり板の接触境界などの位置は相似となることから、電極内の電圧降下分担比は電流の影響を受けないことがわかる。

図 5.3.5～図 5.3.7 におけるトロリ線およびすり板の最高温度と接触電圧の関係を図 5.3.8 に示す。同図には式(5.10)で算出される  $\varphi-\theta$  理論値を併記してある。この図より、通電電流や接点半径を変化させても、最高温度は接触電圧に依存することがわかる。そこで以降では、接触電圧を解析の入力パラメータとする。また、すり板の最高温度は  $\varphi-\theta$  理論値とほぼ一致し、異種金属接点においても全体の最高温度と接触電圧の関係は  $\varphi-\theta$  理論に従うことがわかる。一方で、トロリ線の最高温度は  $\varphi-\theta$  理論値より小さくなる。この最高温度の差は電位—温度放物線において、接触境界が放物線の頂点から右側にずれることで生じる。

図 5.3.8 より，被膜抵抗が存在しない清浄な接触においては，接触電圧が 0.52V に達する条件ですり板が溶融するが，トロリ線は溶融しない．これは第 3 章および第 4 章における摩耗試験で確認されたすり板溶融摩耗形態の特徴と一致する．しかしながら，図 5.3.8 ではトロリ線が溶融する条件は接触電圧が 1.0V 以上の条件であり，トロリ線のみが溶融することはない．すなわち，清浄な接触においては，トロリ線溶融摩耗形態は発生しないことになる．また，図 5.3.8 では接触電圧が 1.0V 以上であればトロリ線は溶融するが，第 3 章および第 4 章における摩耗試験ではアークが発生する条件，すなわち接触電圧が 10V 以上になる条件であってもトロリ線表面の溶融は確認できなかった．以上より，摩耗試験で確認された現象は，清浄な接触とは異なる状態で起こったと考えられる．

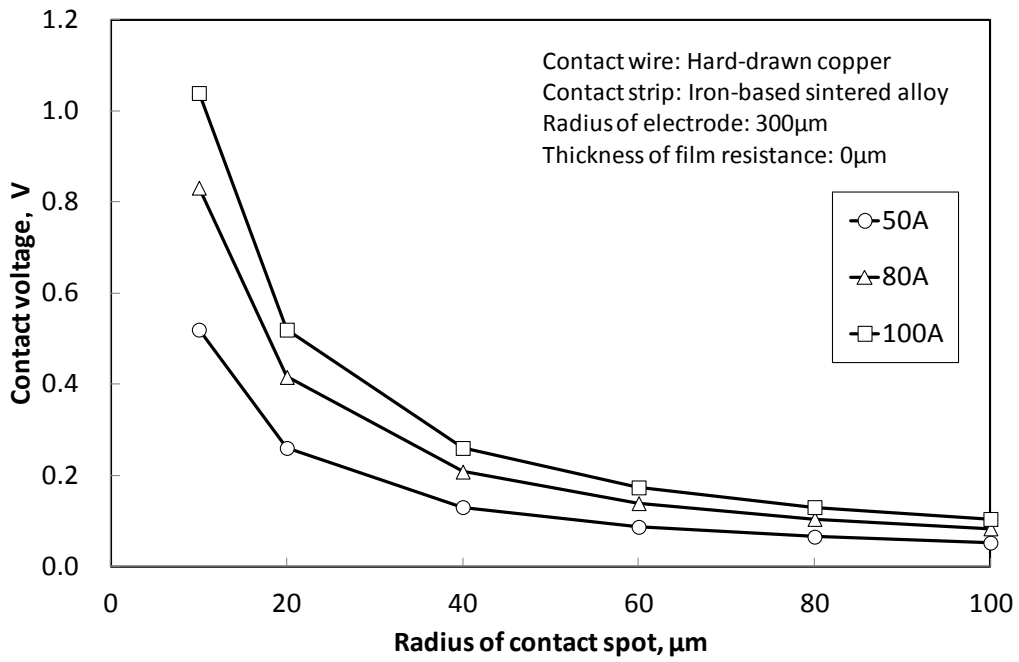
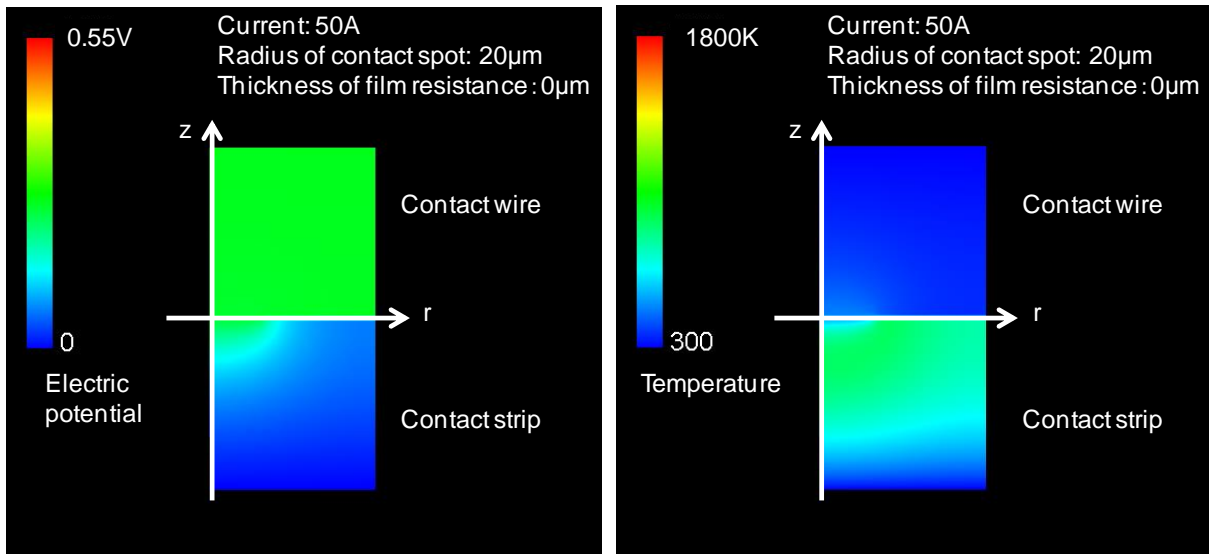


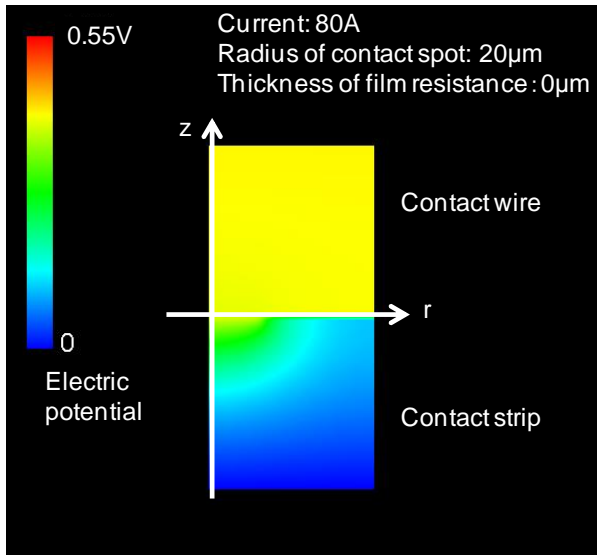
Figure 5.3.1 Relationship between radius of contact spot and contact voltage in each current



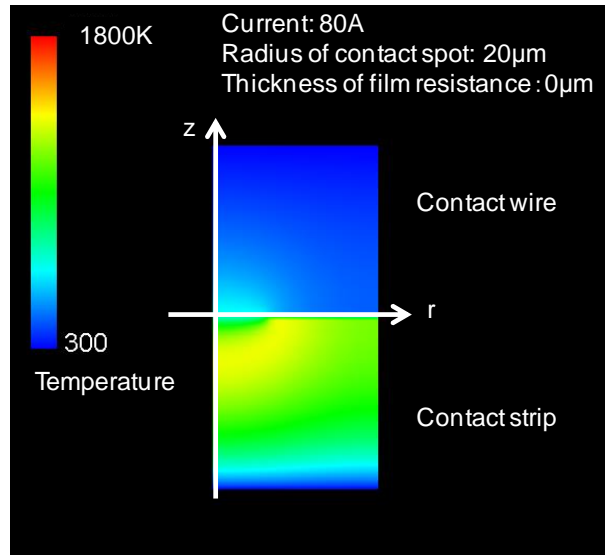
(a) Electric potential distribution

(b) Temperature distribution

Figure 5.3.2 Analysis result (Current: 50A)

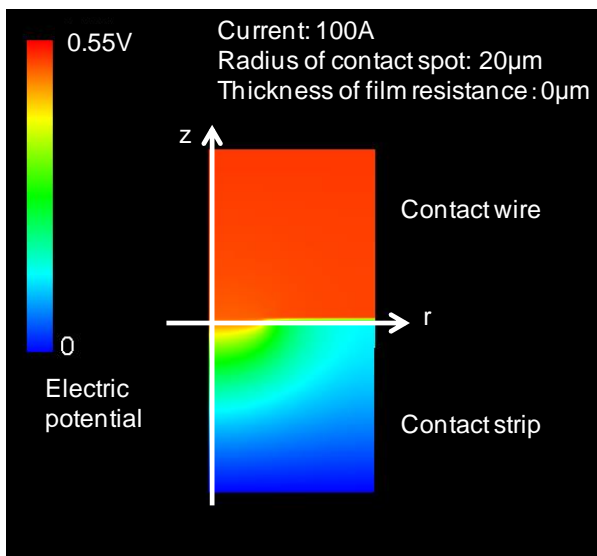


(a) Electric potential distribution

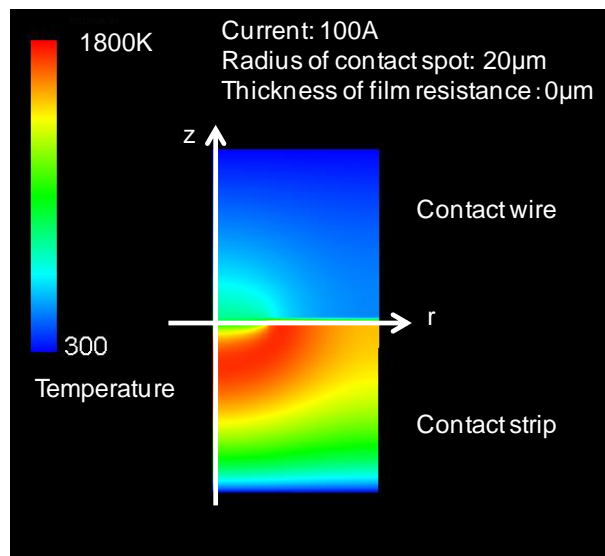


(b) Temperature distribution

Figure 5.3.3 Analysis result (Current: 80A)



(a) Electric potential distribution



(b) Temperature distribution

Figure 5.3.4 Analysis result (Current: 100A)



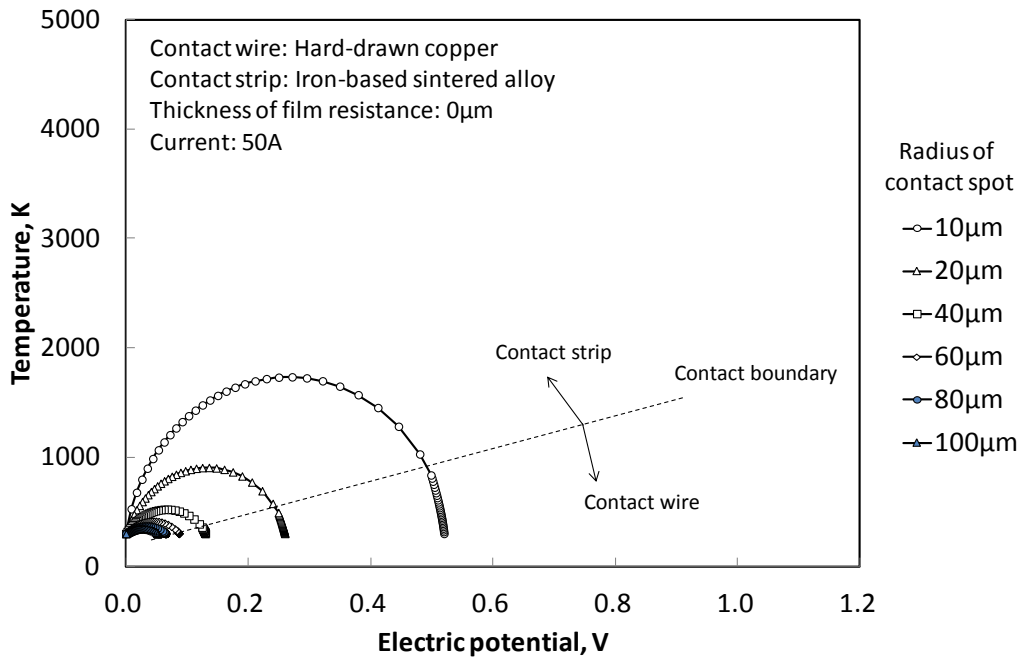


Figure 5.3.5 Relationship between electric potential and temperature in each radius of contact spot (Current: 50A)

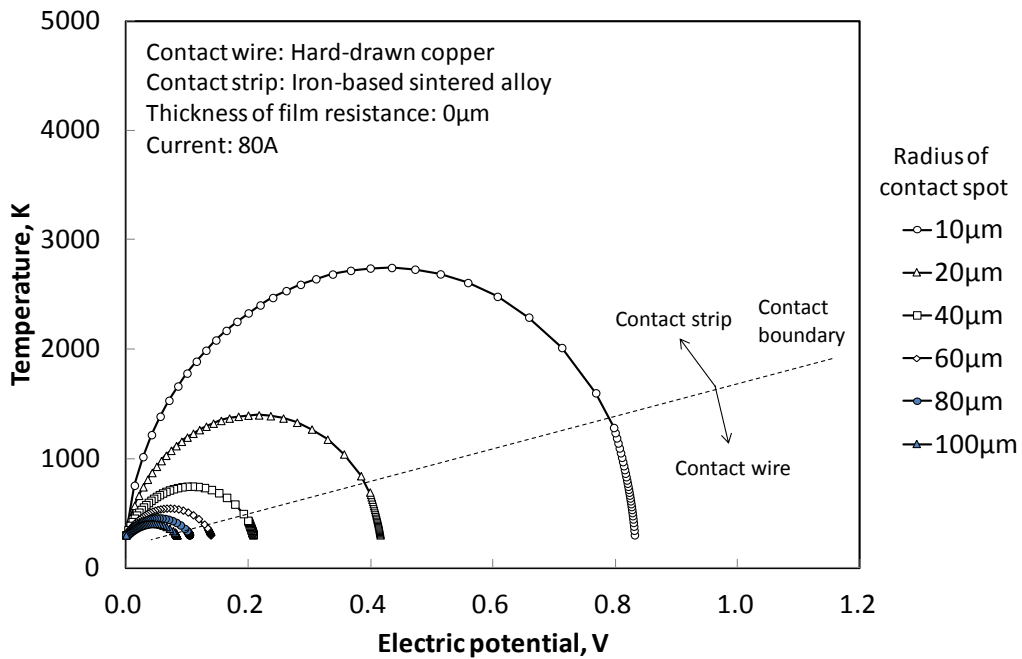


Figure 5.3.6 Relationship between electric potential and temperature in each radius of contact spot (Current: 80A)

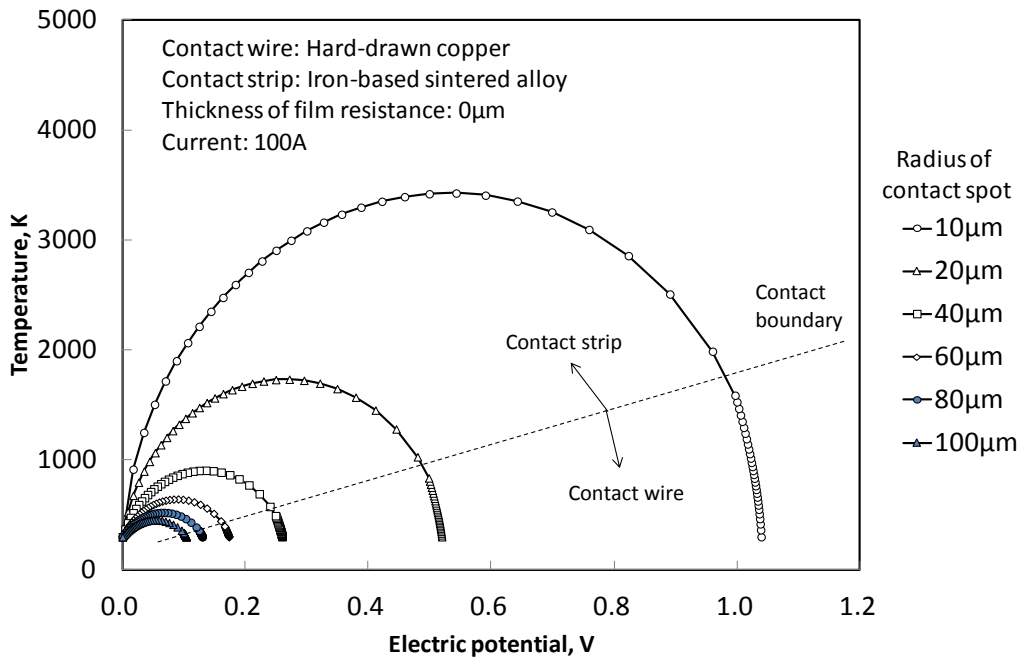


Figure 5.3.7 Relationship between electric potential and temperature in each radius of contact spot (Current: 100A)

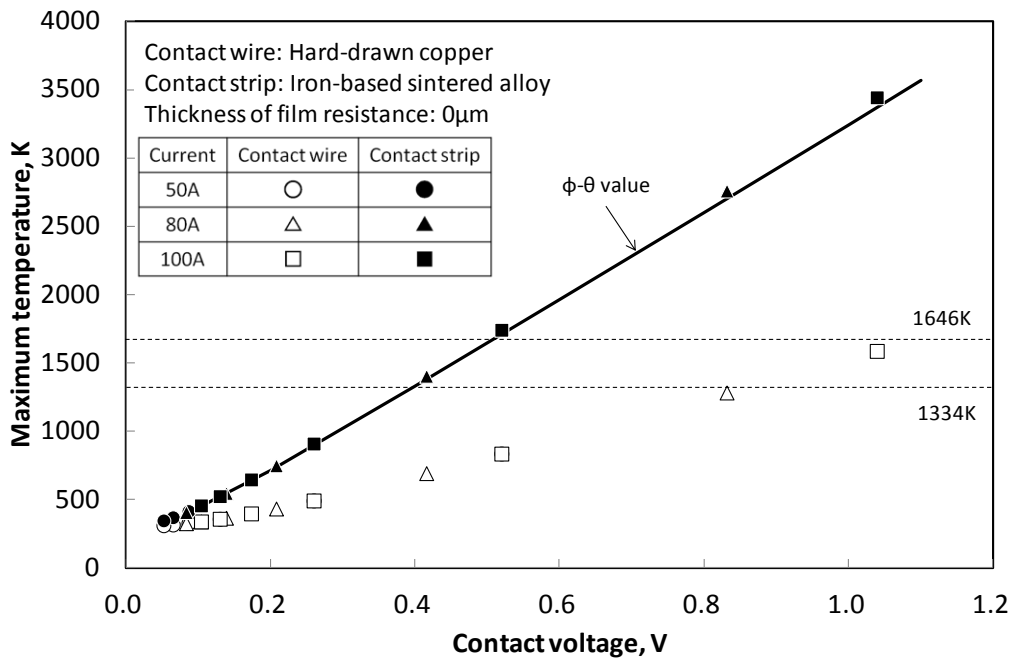


Figure 5.3.8 Relationship between contact voltage and maximum temperature of respective electrodes

### 5.3.2 見かけの接触面積の影響

本節では、接触表面に被膜抵抗が存在せず、見かけの接触面積を変化させた場合の電極内電位分布と温度分布の関係を明らかにする。

通電電流を 100A、見かけの接触面積を第 4 章の実験条件に近い  $10\text{mm}^2$ 、 $50\text{mm}^2$ 、 $70\text{mm}^2$ 、 $100\text{mm}^2$  とて電極半径  $D$  を算出し、接点半径を  $10\sim 300\mu\text{m}$  で変化させ、式(5.4)の接触抵抗理論式を用いて算出した接触電圧を図 5.3.9 に示す。また、見かけの接触面積  $10\text{mm}^2$  時の接触電圧を基準とし、各見かけの接触面積における接触電圧と基準値の差を図 5.3.10 に示す。これらの図より、見かけの接触面積の増加に伴い接触電圧の差は増加するが、その差は接点半径  $300\mu\text{m}$  においても 2% 未満であり、接触電圧に対する見かけの接触面積の影響は非常に小さいことがわかる。

次に、電位分布および温度分布解析でも見かけの接触面積の影響を調査した。第 4 章の実験ではすり板の接触面は方形であったが、本節では円形の接触面とし解析モデルの電極半径  $D$  を算出した。見かけの接触面積の変化範囲に対応するため、図 5.3.1 の解析モデルにおける  $r$  方向のメッシュ数を 100 個とした。このため、1 つの要素サイズは各見かけの接触面積条件で異なる。そこで図 5.3.11 より、いずれの見かけの接触面積においても接点半径が同等になるよう接点とする要素数を決定し、接点半径を約  $280\mu\text{m}$  とした。なお、境界条件は 5.3.1 節と同様、トロリ線およびすり板のバルク温度を  $300\text{K}$  とした。

接触電圧を  $0.45\text{V}$  として、各見かけの接触面積に対する電位分布および温度分布解析結果を図 5.3.12～図 5.3.14 に示す。なお、解析モデルに対して接点が小さいため、解析結果図には解析モデル  $r$  方向のメッシュ数 30 個までを表示してある。図 5.3.12～図 5.3.14 より、見かけの接触面積が小さいほど温度変化が解析モデル全体に広がり、見かけの接触面積が大きいと温度変化は接点近傍に限られることがわかる。

図 5.3.12～図 5.3.15 に対して、 $z$  軸上の電位—温度放物線を図 5.3.16 に示す。この図より、同一接触電圧に対する電位—温度放物線は、見かけの接触面積に依存しないことがわかる。また、トロリ線とすり板の接触境界も見かけの接触面積に依存しないことがわかる。

図 5.3.16 の各見かけの接触面積におけるトロリ線およびすり板の最高温度を図 5.3.17 に示す。同図には、接触電圧  $0.45\text{V}$  に対して式(5.10)を用いて算出される理論最高温度を破線で示してある。この図より、見かけの接触面積が変化してもトロリ線とすり板の最高温度は変化せず、すり板最高温度は  $\varphi\text{-}\theta$  理論値とほぼ一致することがわかる。図 5.3.17 より、被膜抵抗が存在しない清浄な接触においては、見かけの接触面積が変化してもトロリ線最高温度は変化せず、接触電圧  $0.45\text{V}$  においてもトロリ線融点  $1334\text{K}$  に達することはなく、第 4 章で確認されたトロリ線熔融現象は再現できなかった。

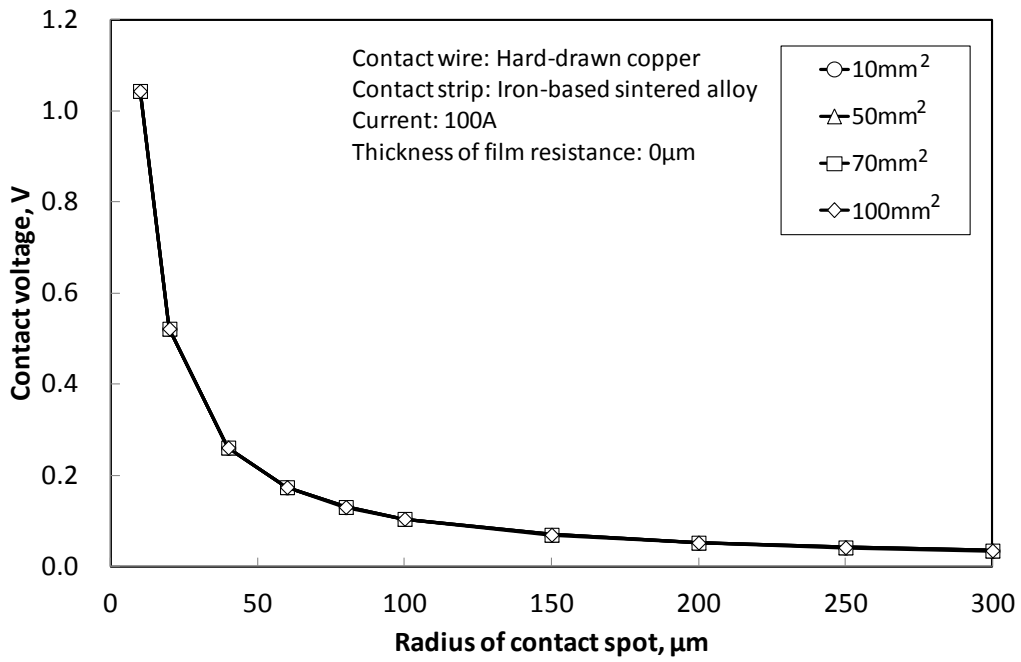


Figure 5.3.9 Relationship between radius of contact spot and contact voltage in each apparent contact area

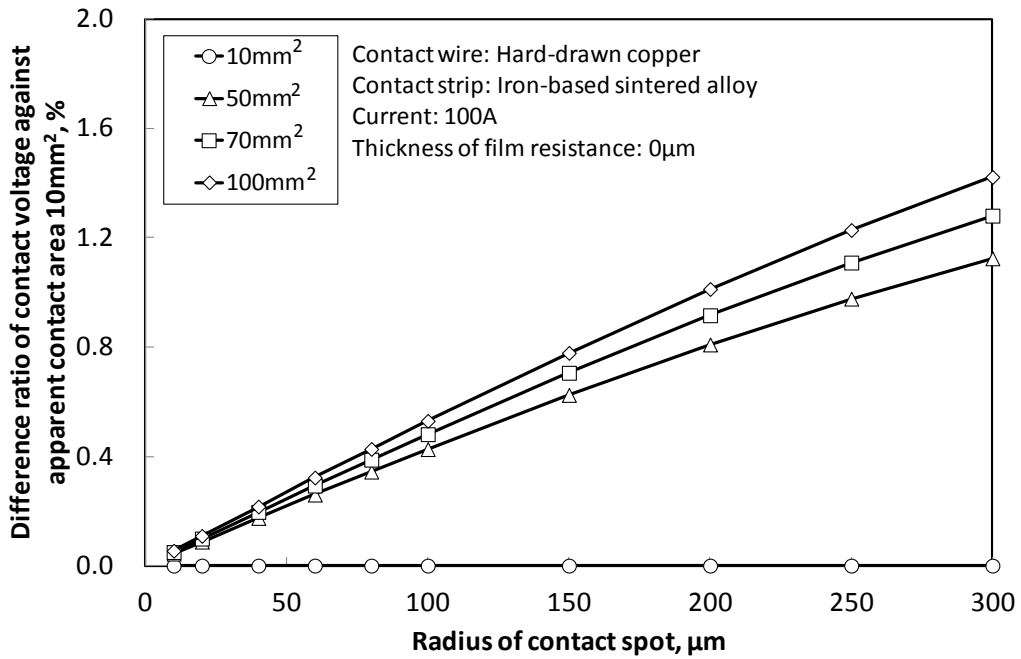
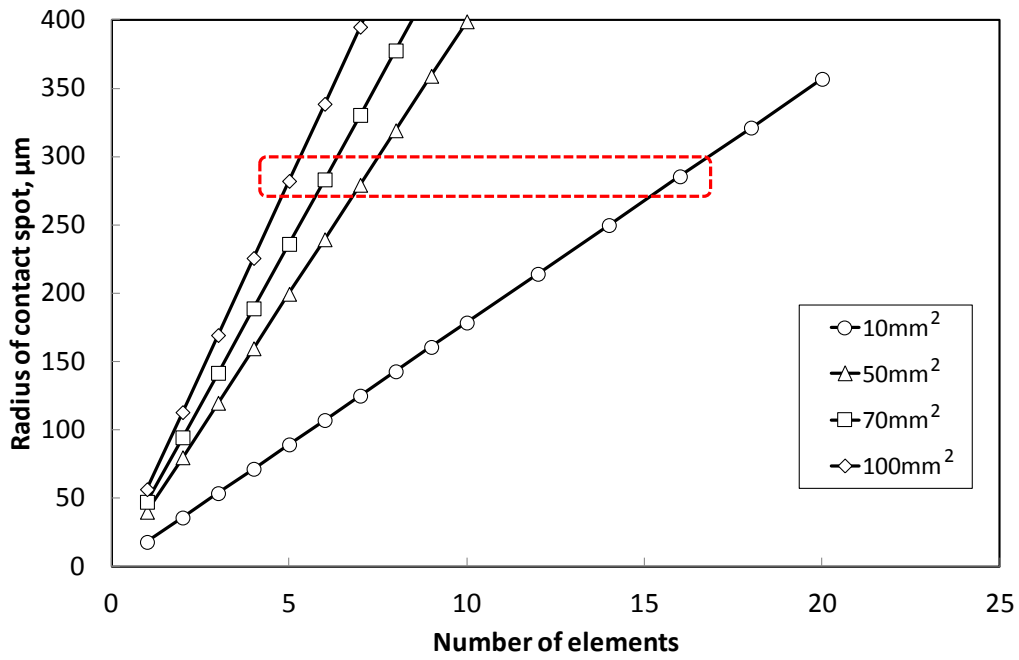
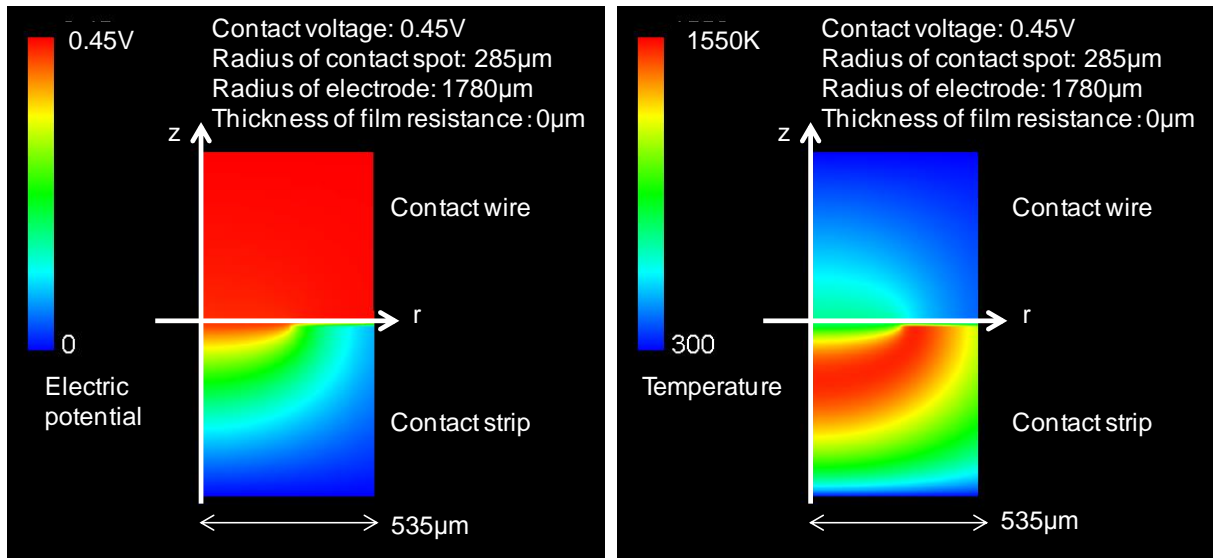


Figure 5.3.10 Difference ratio of contact voltage against apparent contact area



Number of element	Element size, $\mu\text{m}$				Radius of contact spot, $\mu\text{m}$			
	10mm <sup>2</sup>	50mm <sup>2</sup>	70mm <sup>2</sup>	100mm <sup>2</sup>	10mm <sup>2</sup>	50mm <sup>2</sup>	70mm <sup>2</sup>	100mm <sup>2</sup>
1	1784	3989	4720	5642	17.8	39.9	47.2	56.4
2	1784	3989	4720	5642	35.7	79.8	94.4	112.8
3	1784	3989	4720	5642	53.5	119.7	141.6	169.3
4	1784	3989	4720	5642	71.4	159.6	188.8	225.7
5	1784	3989	4720	5642	89.2	199.5	236.0	282.1
6	1784	3989	4720	5642	107.0	239.4	283.2	338.5
7	1784	3989	4720	5642	124.9	279.3	330.4	394.9
8	1784	3989	4720	5642	142.7	319.2	377.6	451.4
9	1784	3989	4720	5642	160.6	359.0	424.8	507.8
10	1784	3989	4720	5642	178.4	398.9	472.0	564.2
12	1784	3989	4720	5642	214.1	478.7	566.4	677.0
14	1784	3989	4720	5642	249.8	558.5	660.8	789.9
16	1784	3989	4720	5642	285.5	638.3	755.3	902.7
18	1784	3989	4720	5642	321.1	718.1	849.7	1015.5
20	1784	3989	4720	5642	356.8	797.9	944.1	1128.4

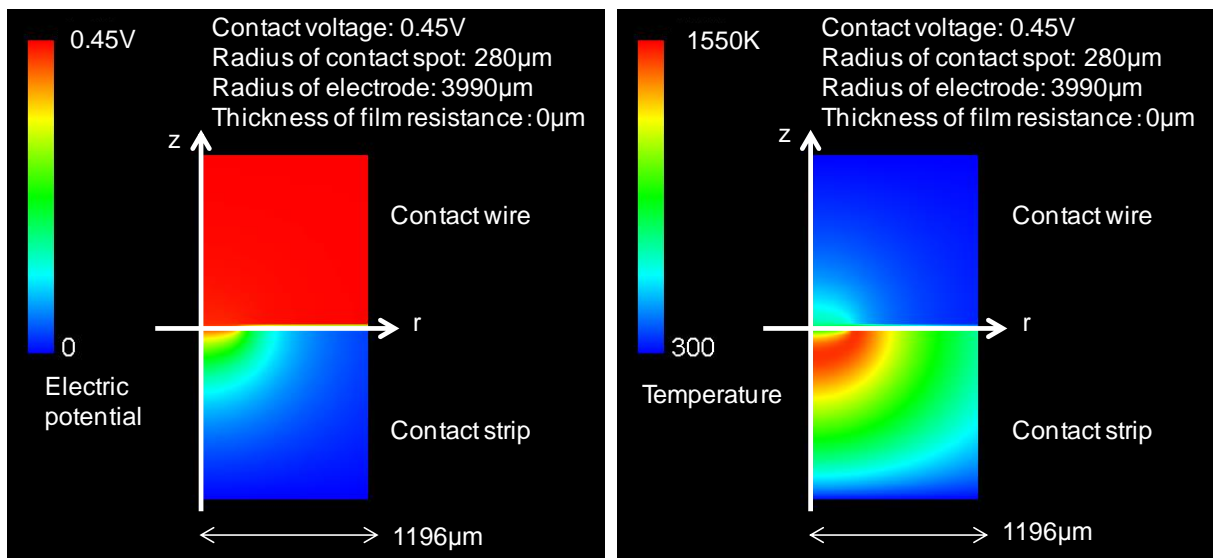
Figure 5.3.11 Number of elements required for radius of contact spot in analysis model



(a) Electric potential distribution

(b) Temperature distribution

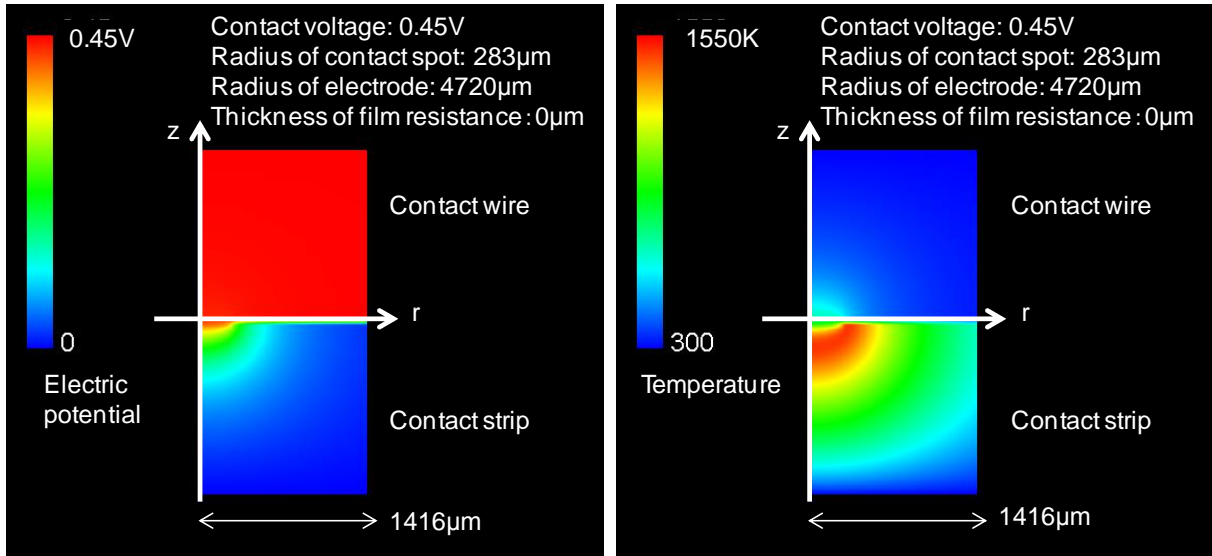
Figure 5.3.12 Analysis result (Apparent contact area: 10mm<sup>2</sup>)



(a) Electric potential distribution

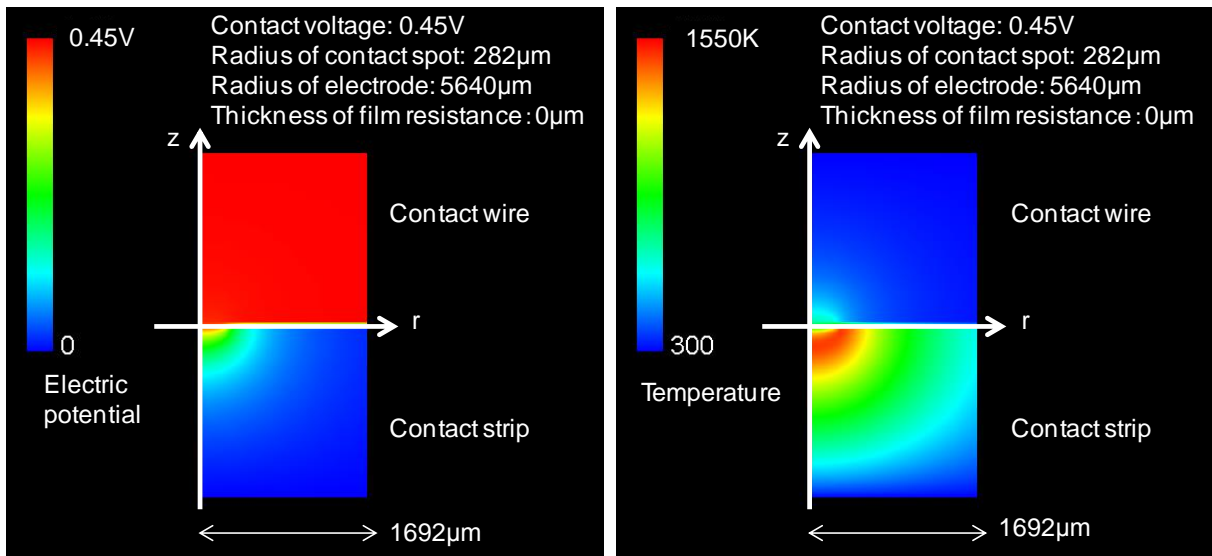
(b) Temperature distribution

Figure 5.3.13 Analysis result (Apparent contact area: 50mm<sup>2</sup>)



(a) Electric potential distribution (b) Temperature distribution

Figure 5.3.14 Analysis result (Apparent contact area: 70mm<sup>2</sup>)



(a) Electric potential distribution (b) Temperature distribution

Figure 5.3.15 Analysis result (Apparent contact area: 100mm<sup>2</sup>)

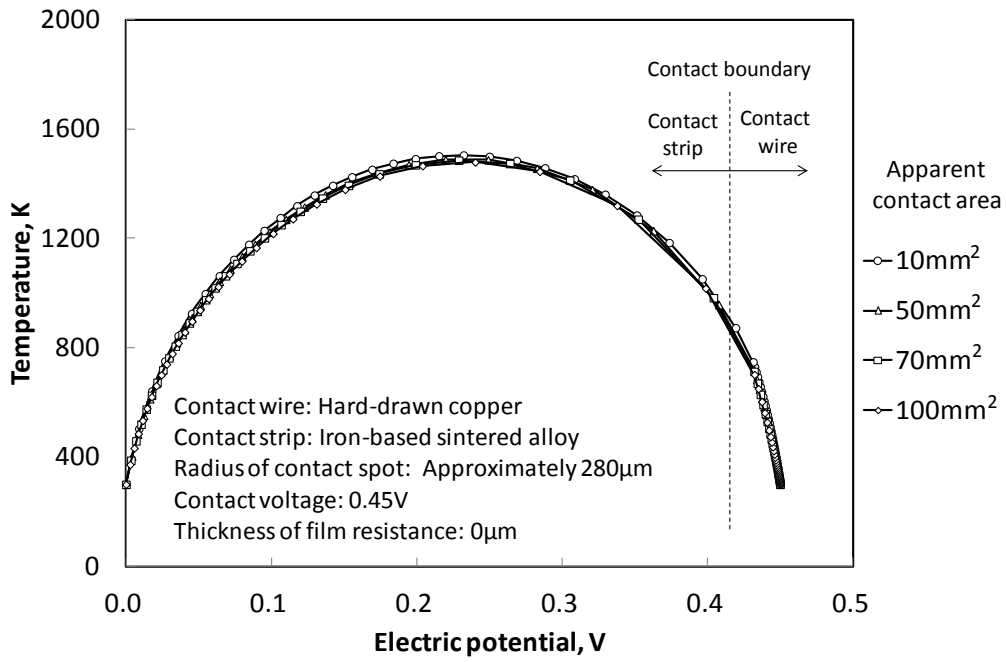


Figure 5.3.16 Relationship between electric potential and temperature in each apparent contact area (Contact voltage: 0.45V)

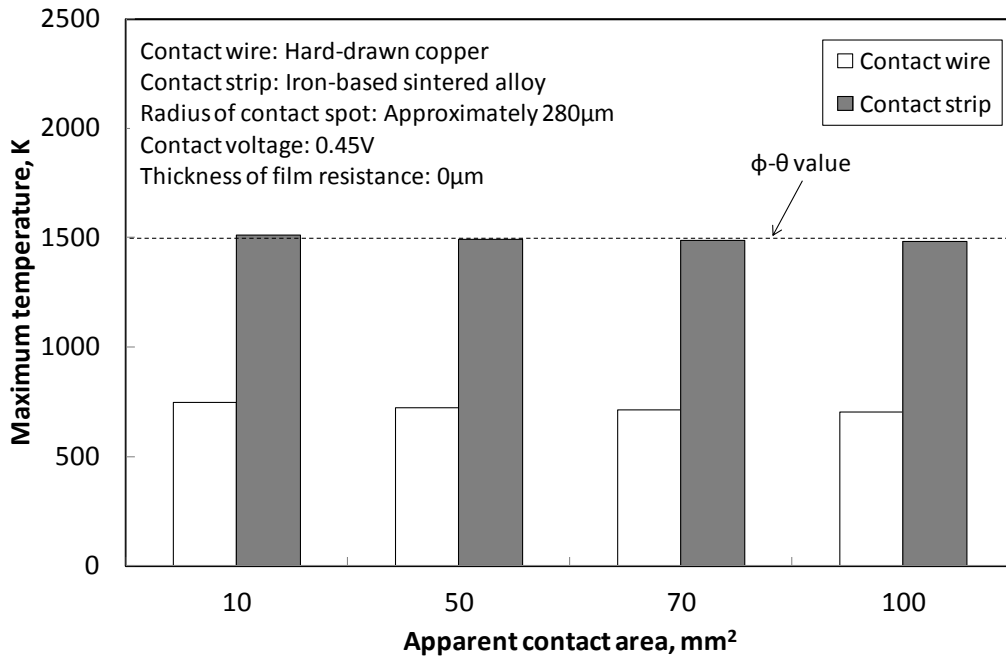


Figure 5.3.17 Maximum temperature comparison of respective electrodes in each apparent contact area



### 5.3.3 バルク温度の影響

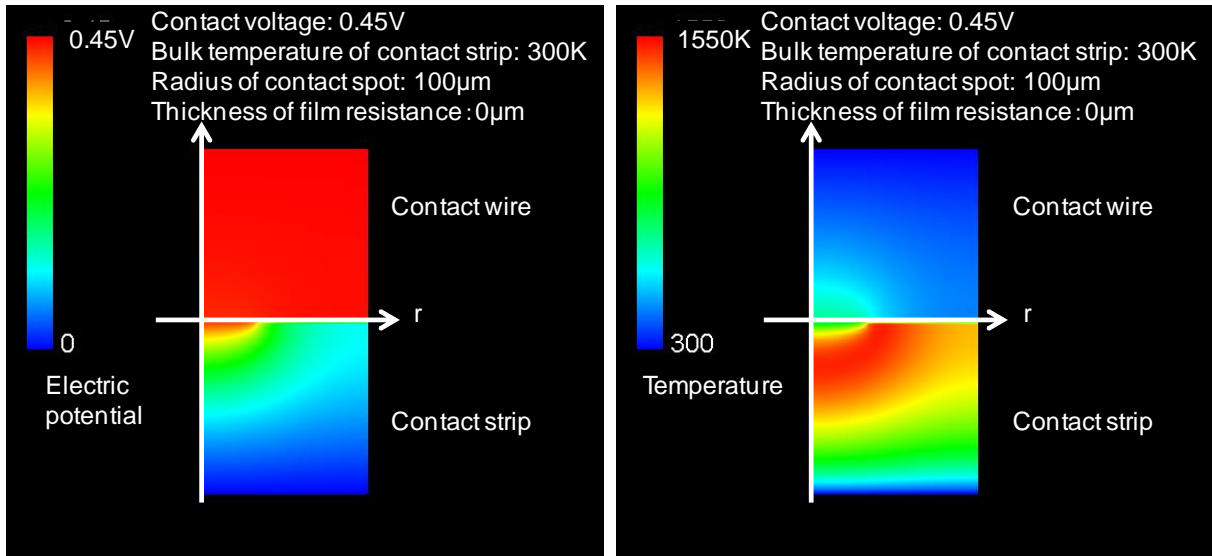
前節までの温度分布解析結果や  $\varphi$ - $\theta$  理論である式(5.10)は、トロリ線およびすり板の末端温度、すなわちバルク温度が 300K であることを境界条件としている。しかしながら、実際のトロリ線とすり板のしゅう動インターバルには差があるため、両者のバルク温度には差がある。岩瀬ら<sup>(7)</sup>は実際に走行中のすり板温度を測定し、すり板接触表面から 2mm の距離では 160°C、5mm では 80°Cになると報告している。そこで本節では、電極内電位分布と温度分布に及ぼすすり板バルク温度の影響を明らかにする。

解析条件として接点半径を 100 $\mu$ m、電極半径を 300 $\mu$ m、接触電圧  $V_c=0.45$ V とし、すり板のバルク温度を 300~500K の間で変化させて電位分布および温度分布解析を実施した。なお、被膜抵抗は存在しないものとする。解析結果例としてすり板バルク温度を 300K、400K、500K と 3 段階変化させた場合の、電位分布および温度分布解析結果を図 5.3.18~図 5.3.20 に示す。すり板バルク温度の上昇に伴いすり板末端の温度は上昇しているものの、接点近傍の温度分布は変化していないことがわかる。

図 5.3.18~図 5.3.20 に対して、z 軸上の電位-温度放物線を図 5.3.21 に示す。この図より、すり板末端である電位 0V 近傍における温度は、すり板バルク温度に影響を受けるものの、接触境界における温度や、電極内最高温度はほぼ変化しないことがわかる。

図 5.3.21 の各すり板バルク温度におけるトロリ線およびすり板の最高温度を図 5.3.22 に示す。同図には、接触電圧 0.45V に対して式(5.10)を用いて算出される  $\varphi$ - $\theta$  理論値を併記してある。この図より、すり板バルク温度が変化してもトロリ線とすり板の最高温度の変化は非常に小さいことがわかる。

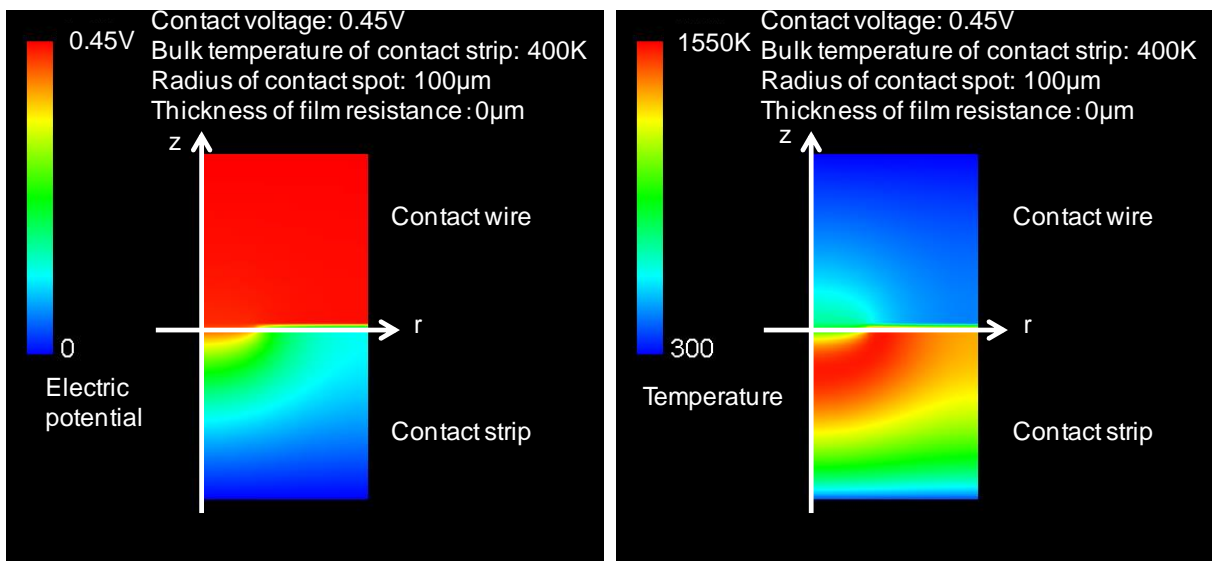
以上より、トロリ線およびすり板の最高温度に対するすり板バルク温度の影響は無視できることがわかった。



(a) Electric potential distribution

(b) Temperature distribution

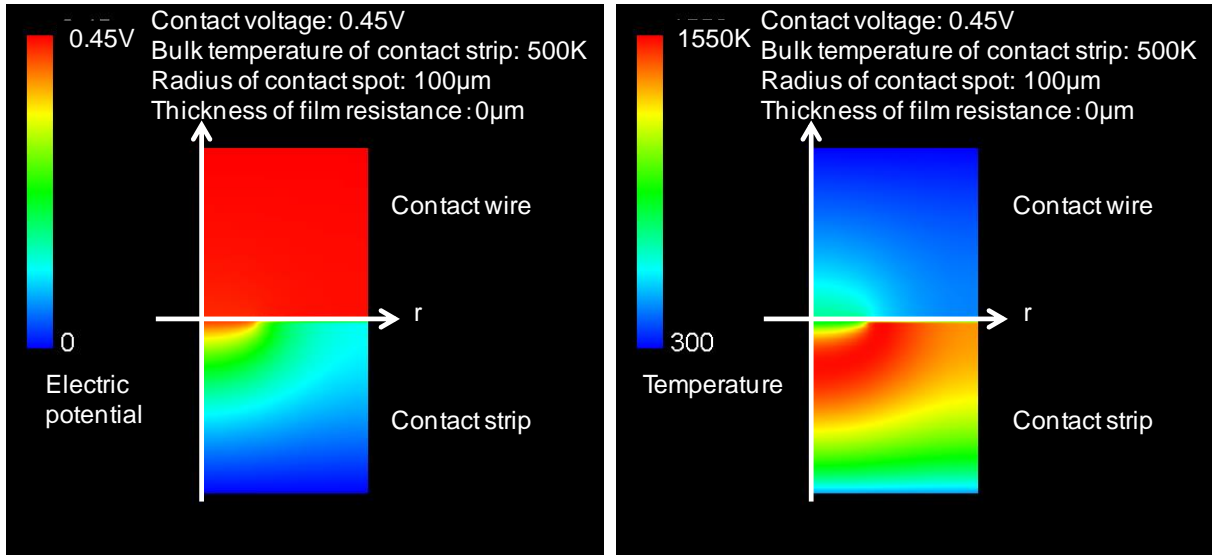
Figure 5.3.18 Analysis result (Bulk temperature of contact strip: 300K)



(a) Electric potential distribution

(b) Temperature distribution

Figure 5.3.19 Analysis result (Bulk temperature of contact strip: 400K)



(a) Electric potential distribution

(b) Temperature distribution

Figure 5.3.20 Analysis result (Bulk temperature of contact strip: 500K)

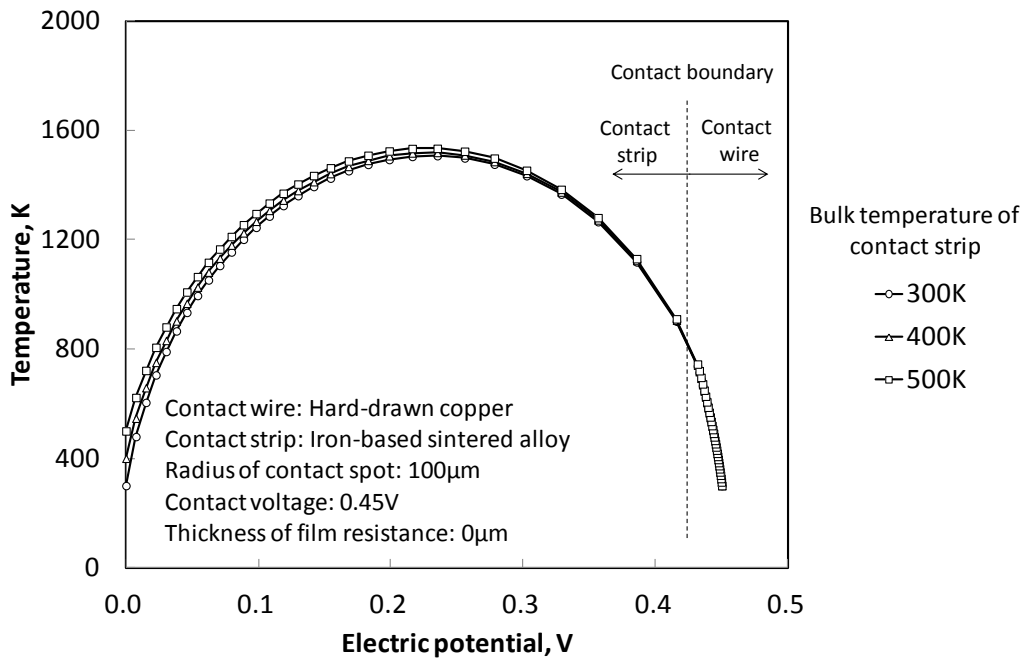


Figure 5.3.21 Relationship between electric potential and temperature in each bulk temperature of contact strip

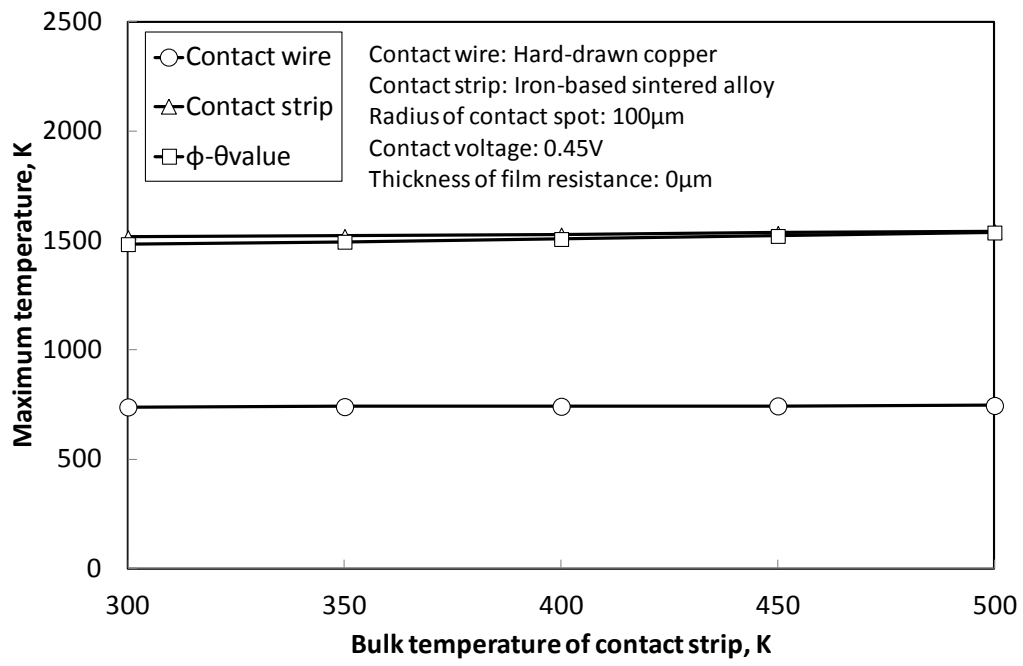


Figure 5.3.22 Relationship between bulk temperature of contact strip and maximum temperature of respective electrodes

### 5.3.4 被膜抵抗の影響

前節までは、トロリ線とすり板の接触表面に被膜抵抗が存在しない清浄な接触について解析を実施してきた。しかしながら、清浄な接触においては電流や見かけの接触面積の変化によらず、トロリ線のみが溶融する状態は発生せず、第3章および第4章で確認されたトロリ線溶融摩耗形態を模擬することはできなかった。そこで本節では、被膜抵抗が電極内電位分布と温度分布に及ぼす影響を明らかにする。

#### 5.3.4.1 トロリ線表面にのみ被膜抵抗が存在する場合

トロリ線の表面に存在する被膜抵抗が電位分布および温度分布に及ぼす影響を解析するため、解析モデルとして接点半径  $a=100\mu\text{m}$ 、電極半径  $D=300\mu\text{m}$ 、トロリ線被膜厚さ  $d_1=10\mu\text{m}$  を想定した。なお、すり板表面の被膜抵抗は存在しないものとし、 $d_2=0\mu\text{m}$  とした。境界条件として、トロリ線およびすり板のバルク温度を  $300\text{K}$ 、接触電圧  $V_c$  を  $0.45\text{V}$  とし、トロリ線被膜の抵抗係数  $f_1$  を  $1, 10, 100, 1000$  と4段階変化させて解析を実施した。

各抵抗係数における電位分布および温度分布解析結果を図 5.3.23～図 5.3.26 に示す。これらの図より、トロリ線表面の被膜抵抗の増加に伴い、トロリ線被膜内の電圧降下や温度が増加していることがわかる。一方で、トロリ線表面の被膜抵抗の増加に伴い、すり板内の電圧降下や温度は減少することがわかる。

図 5.3.23～図 5.3.26 に対して、 $z$  軸上の電位—温度放物線を図 5.3.27～図 5.3.30 に示す。これらの図より、電位—温度放物線の曲線は抵抗係数によって大きく変化しないことがわかる。ただし、抵抗係数  $f_1$  の増加に伴いトロリ線とすり板の接触境界が放物線の左側に移動することが分かる。

図 5.3.27～図 5.3.30 に対して、トロリ線とすり板における電圧降下を図 5.3.31 に示す。この図より、抵抗係数  $f_1$  の増加に伴いトロリ線被膜抵抗が増加し、トロリ線内の電圧降下が増加することがわかる。

また図 5.3.27～図 5.3.30 より、抵抗係数  $f_1$  に対するトロリ線とすり板の最高温度を図 5.3.32 に示す。同図には、接触電圧  $0.45\text{V}$  に対して式(5.10)を用いて算出される  $\varphi-\theta$  理論値、およびトロリ線とすり板の融点を併記してある。この図より、抵抗係数  $f_1$  の増加に伴いトロリ線の最高温度が増加し、 $f_1$  が  $100$  以上の条件ではトロリ線最高温度がトロリ線融点を超えることがわかる。なお、接触電圧  $0.45\text{V}$  の条件におけるすり板最高温度はすり板融点  $1646\text{K}$  未満であり、トロリ線の被膜抵抗を考慮することではじめてトロリ線のみが溶融する状態を模擬することができた。

図 5.3.32 では、 $f_1=1000$  の条件でトロリ線最高温度がすり板最高温度を上回ることがわかる。これは、 $f_1=1000$  の条件では図 5.3.30 に示すように、電位—温度放物線における接触境界が放物線の頂点よりも左側に移動したためである。なお、電極内最高温度はどのような条件においても  $\varphi-\theta$  理論値を逸脱することはなかった。

#### 5.3.4.2 トロリ線およびすり板表面に被膜抵抗が存在する場合

トロリ線およびすり板の表面に存在する被膜抵抗が電位分布および温度分布に及ぼす影響を解析するため、解析モデルを接点半径  $a=100\mu\text{m}$ 、電極半径  $D=300\mu\text{m}$  とし、トロリ線およびすり板の被膜厚さとして  $d_1=d_2=10\mu\text{m}$  を想定した。境界条件として、トロリ線およびすり板のバルク温度を  $300\text{K}$ 、接触電圧  $V_c$  を  $0.6\text{V}$ 、トロリ線被膜の抵抗係数  $f_1=100$  とし、すり板被膜の抵抗係数  $f_2$  を

1, 10, 100, 1000 と 4 段階変化させて解析を実施した。ここで、接触電圧を 0.6V とした理由は、式(5.10)式による電極内最高温度がすり板の融点を十分に超える値を設定した。

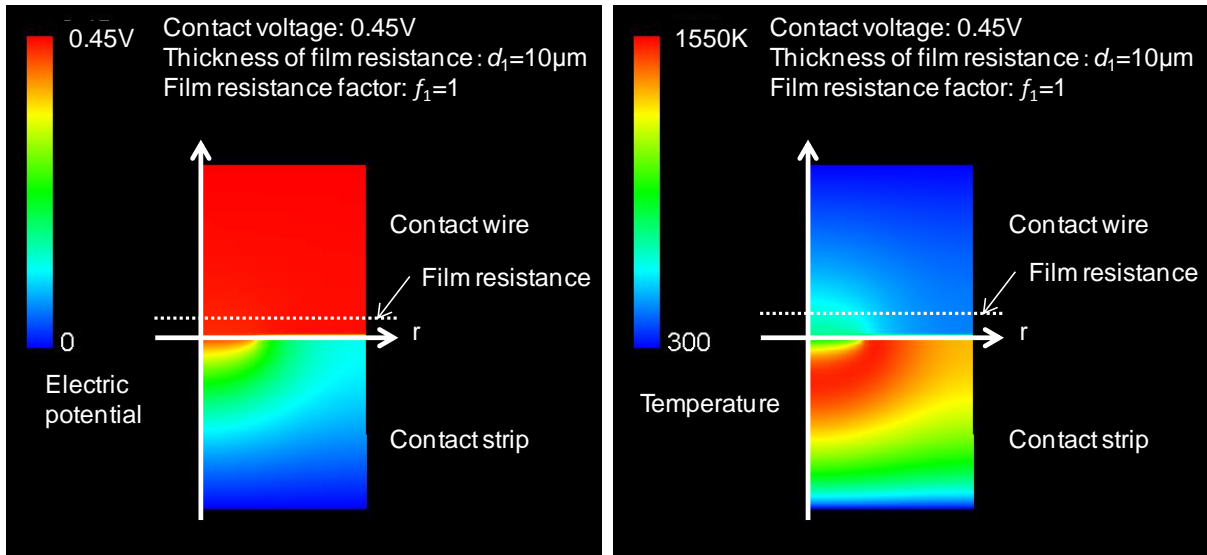
各抵抗係数における電位分布および温度分布解析結果を図 5.3.33～図 5.3.36 に示す。これらの図より、すり板表面の被膜抵抗の増加に伴い、すり板被膜内の電圧降下や温度が増加していることがわかる。一方で、すり板表面の被膜抵抗の増加に伴い、トロリ線内の電圧降下や温度は減少することがわかる。

図 5.3.33～図 5.3.36 に対して、z 軸上の電位—温度放物線を図 5.3.37～図 5.3.40 に示す。これらの図より、電位—温度放物線の曲線は 5.3.4.1 節と同様、すり板被膜の抵抗係数によっても大きく変化しないことがわかる。ただし、抵抗係数  $f_2$  の増加に伴いトロリ線とすり板の接触境界が放物線の右側に移動することが分かる。

図 5.3.37～図 5.3.40 に対して、トロリ線とすり板における電圧降下を図 5.3.41 に示す。この図より、抵抗係数  $f_2$  の増加に伴いすり板内の電圧降下が増加し、トロリ線内の電圧降下が減少することがわかる。

また図 5.3.37～図 5.3.40 に対して、抵抗係数  $f_2$  に対するトロリ線とすり板の最高温度を図 5.3.42 に示す。同図には、式(5.10)を用いて算出される最高温度、およびトロリ線とすり板の融点を併記してある。この図より、抵抗係数  $f_2$  の増加に伴いトロリ線の最高温度が減少し、 $f_2$  が 100 以上の条件では、トロリ線被膜の抵抗係数  $f_1$  が 100 であっても、トロリ線最高温度がトロリ線融点未満となることがわかる。

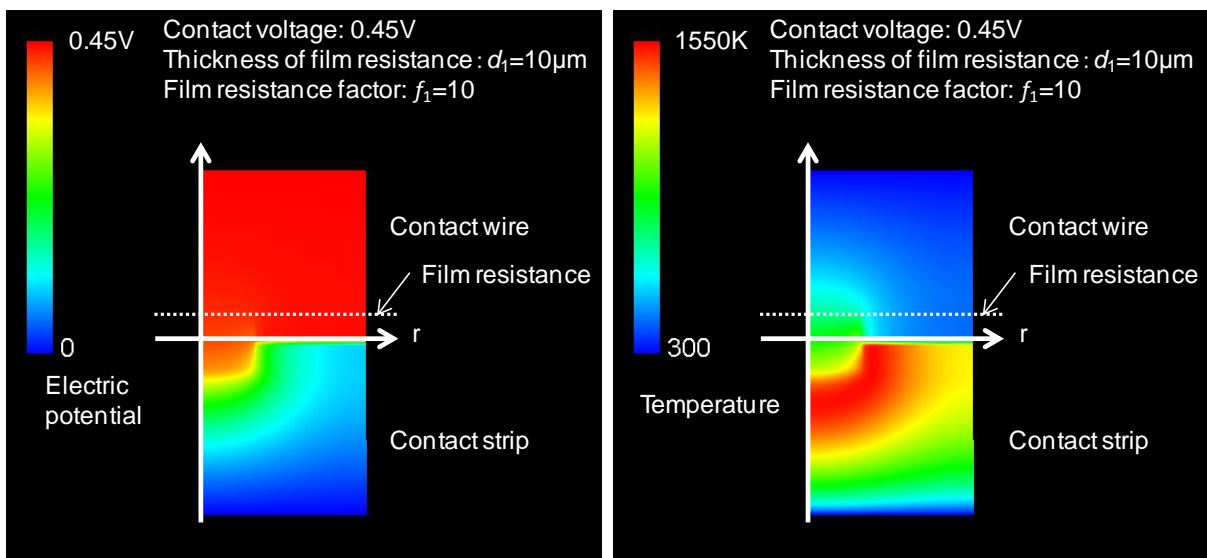
なお、電極内最高温度であるすり板最高温度はどのような条件においても  $\varphi$ - $\theta$  理論値を逸脱することはなく、すり板の融点以上となった。これにより、すり板は溶融するがトロリ線は溶融しないという、第 3 章および第 4 章ので確認されたすり板溶融摩耗形態を模擬することができた。



(a) Electric potential distribution

(b) Temperature distribution

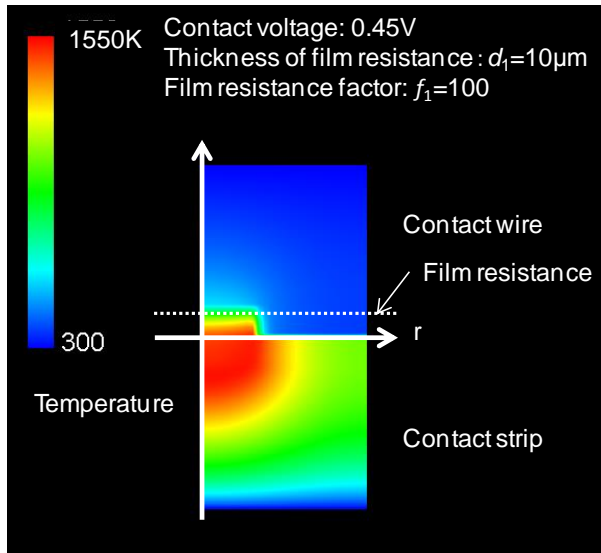
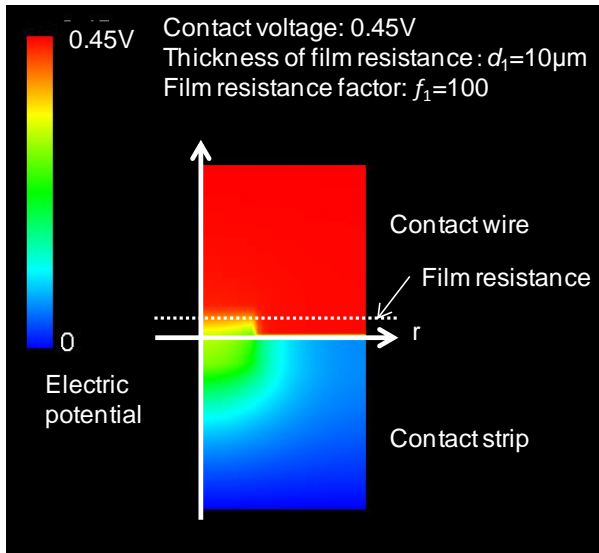
Figure 5.3.23 Analysis result (Film resistance factor:  $f_1=1$ )



(a) Electric potential distribution

(b) Temperature distribution

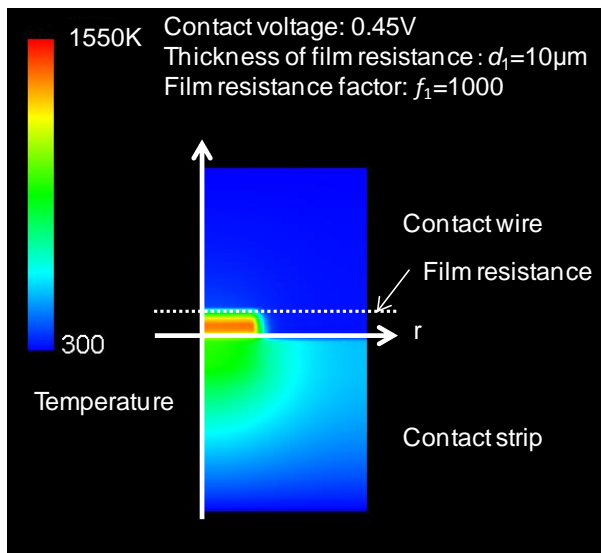
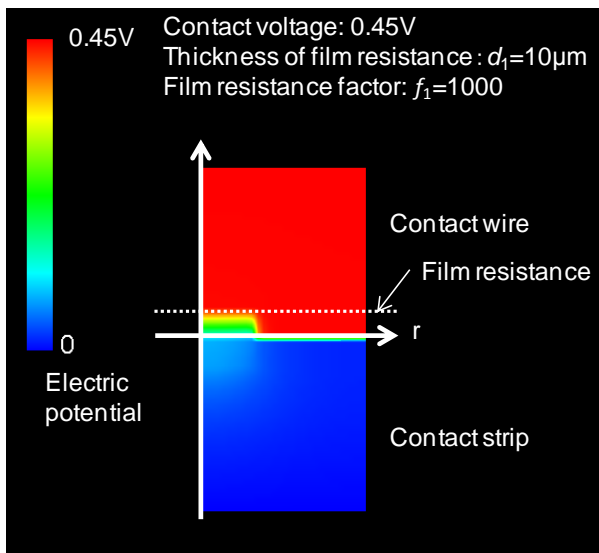
Figure 5.3.24 Analysis result (Film resistance factor:  $f_1=10$ )



(a) Electric potential distribution

(b) Temperature distribution

Figure 5.3.25 Analysis result (Film resistance factor:  $f_1=100$ )



(a) Electric potential distribution

(b) Temperature distribution

Figure 5.3.26 Analysis result (Film resistance factor:  $f_1=1000$ )



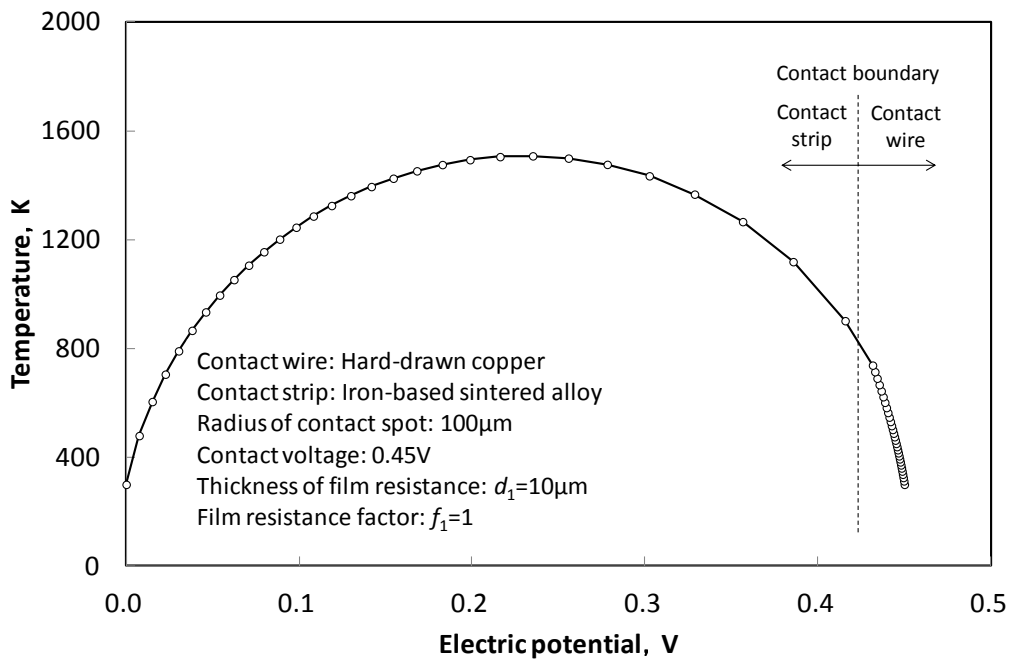


Figure 5.3.27 Relationship between electric potential and temperature (Film resistance factor:  $f_1=1$ )

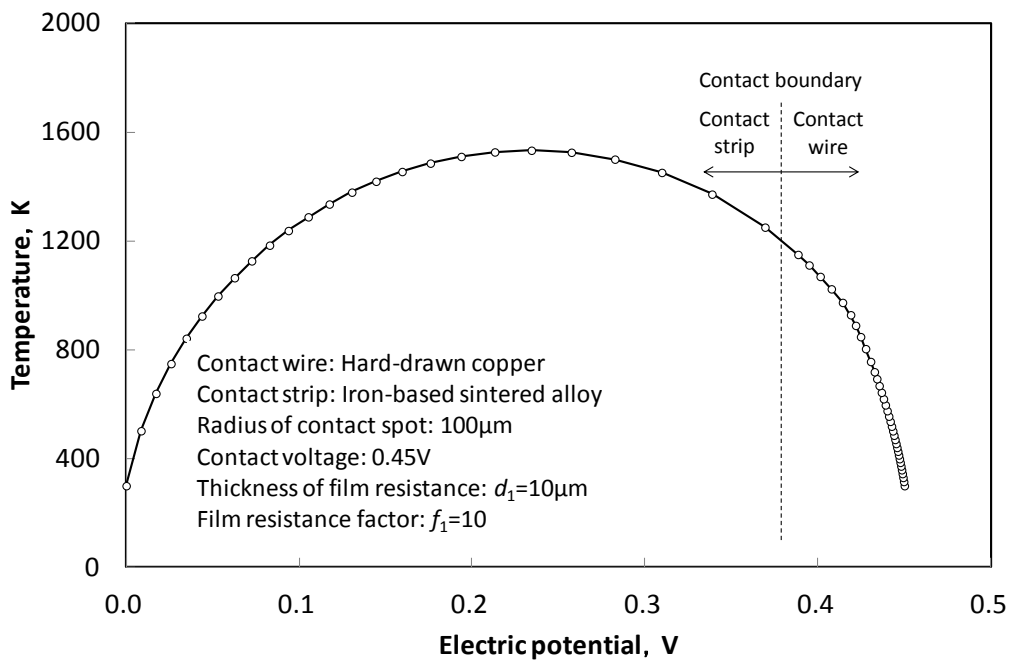


Figure 5.3.28 Relationship between electric potential and temperature (Film resistance factor:  $f_1=10$ )

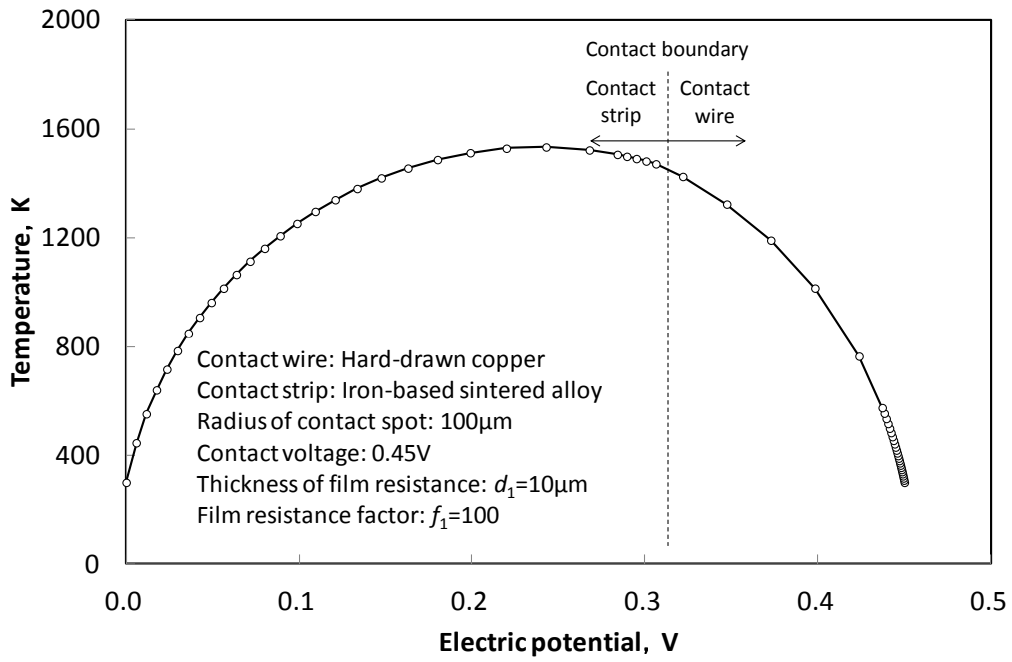


Figure 5.3.29 Relationship between electric potential and temperature (Film resistance factor:  $f_1=100$ )

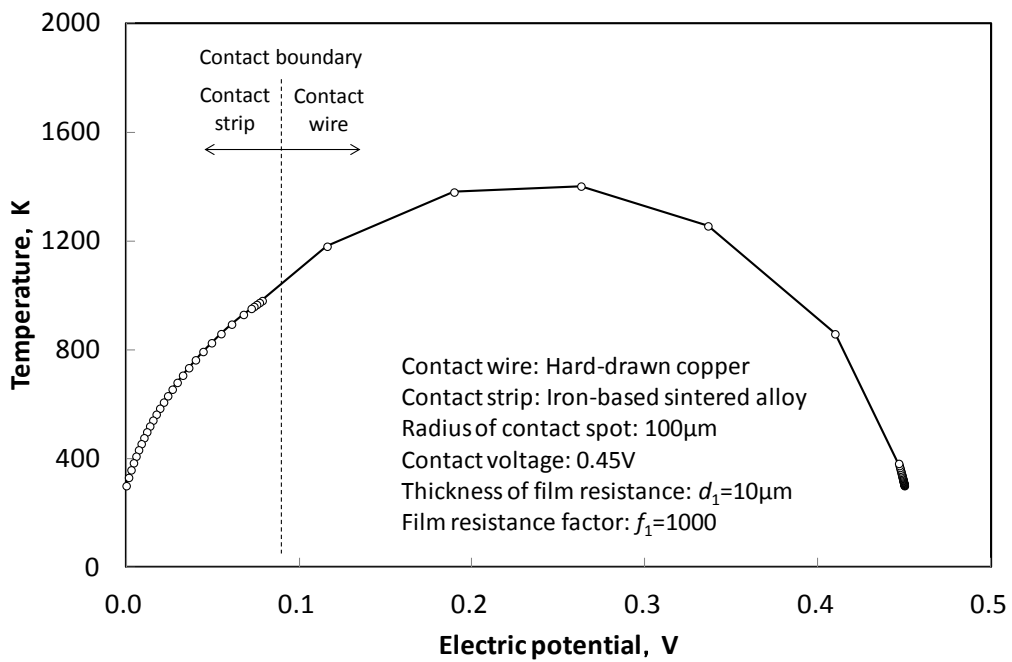


Figure 5.3.30 Relationship between electric potential and temperature (Film resistance factor:  $f_1=1000$ )

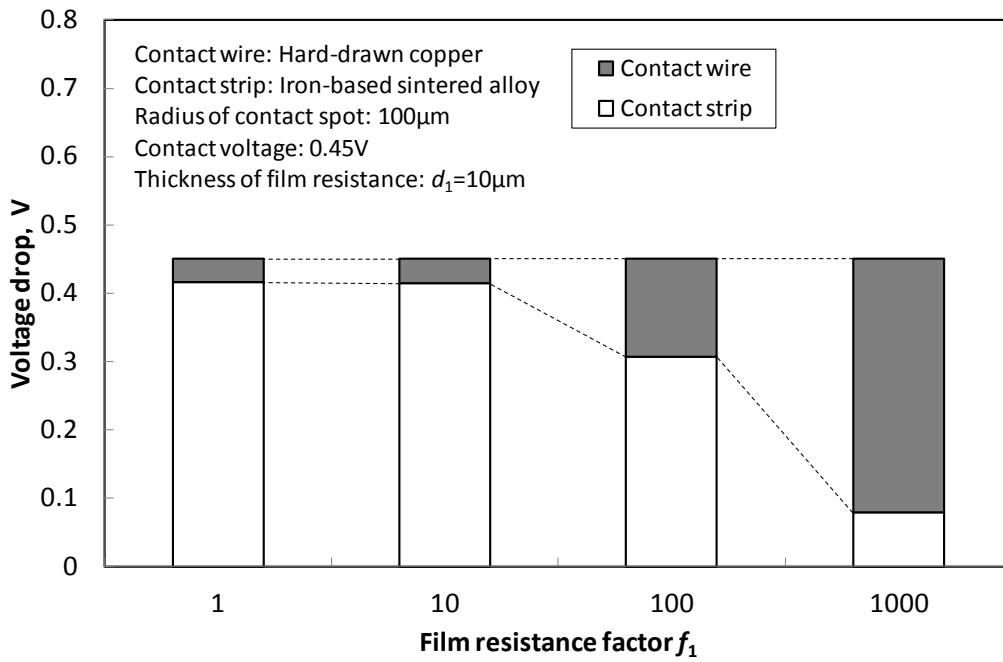


Figure 5.3.31 Relationship between film resistance factor  $f_1$  of contact wire and voltage drop of respective electrodes

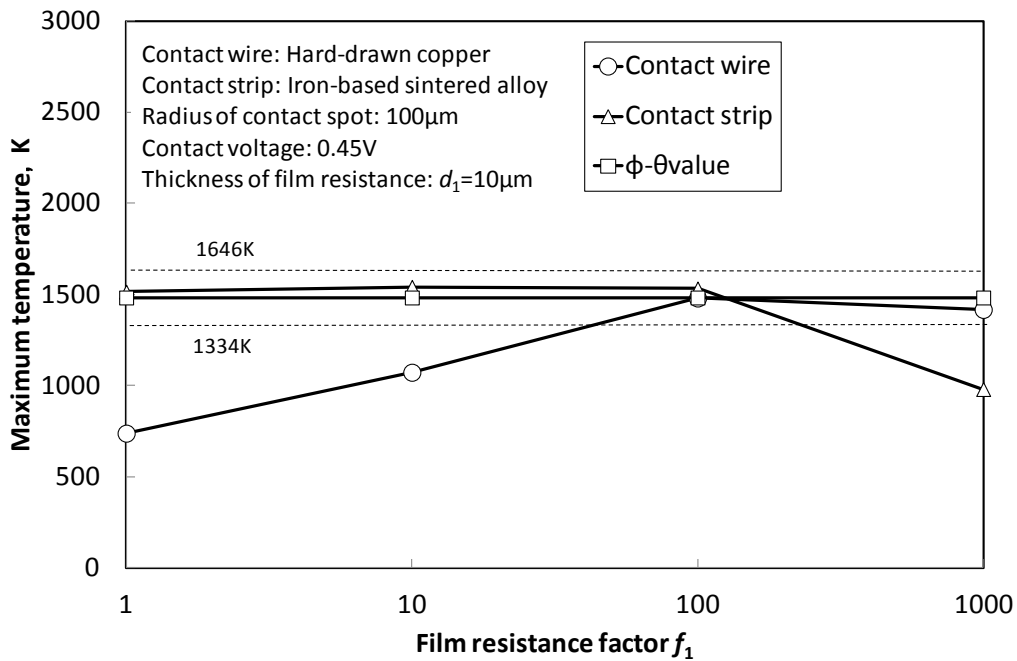
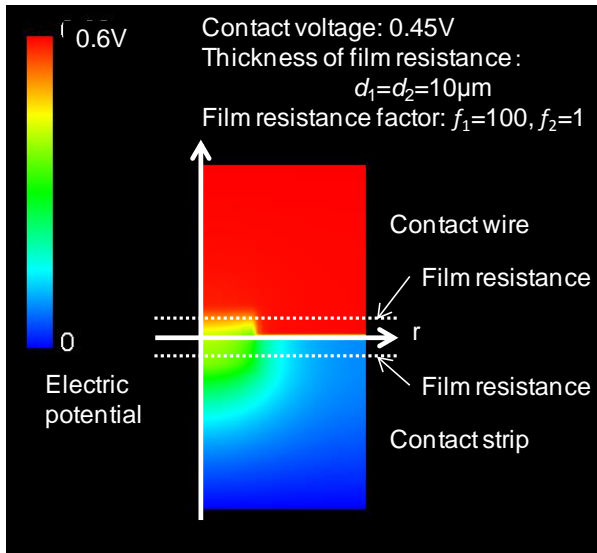
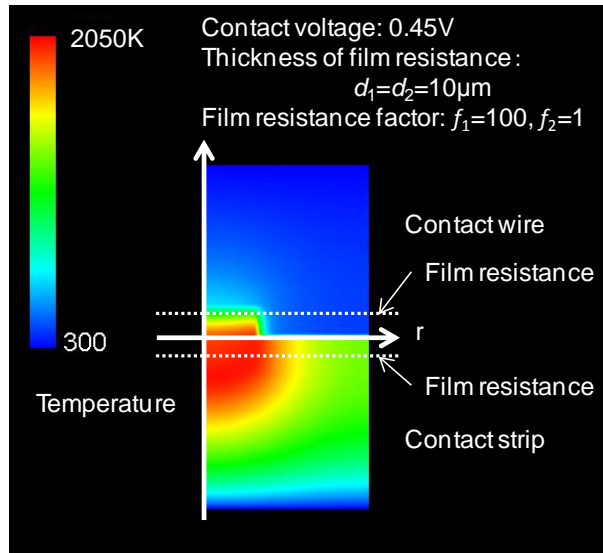


Figure 5.3.32 Relationship between film resistance factor  $f_1$  of contact wire and maximum temperature of respective electrodes

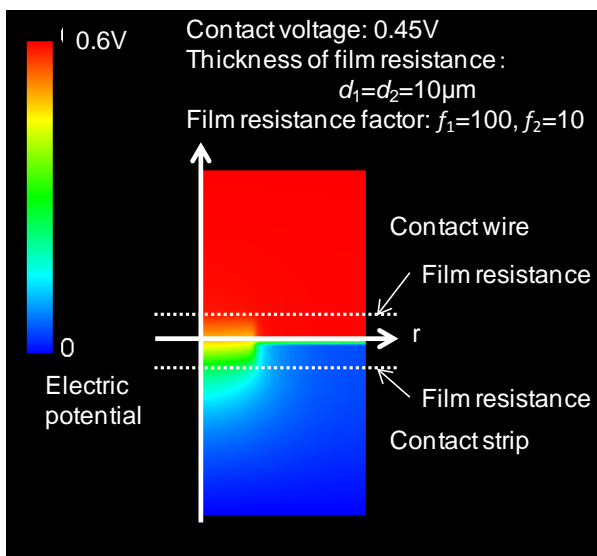


(a) Electric potential distribution

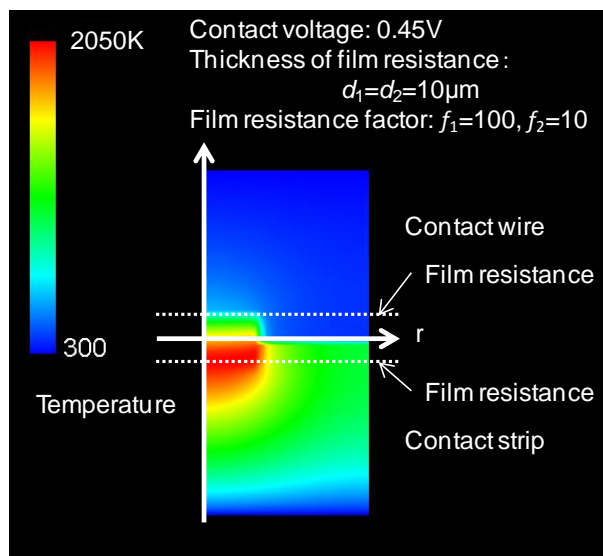


(b) Temperature distribution

Figure 5.3.33 Analysis result (Film resistance factor:  $f_1=100, f_2=1$ )

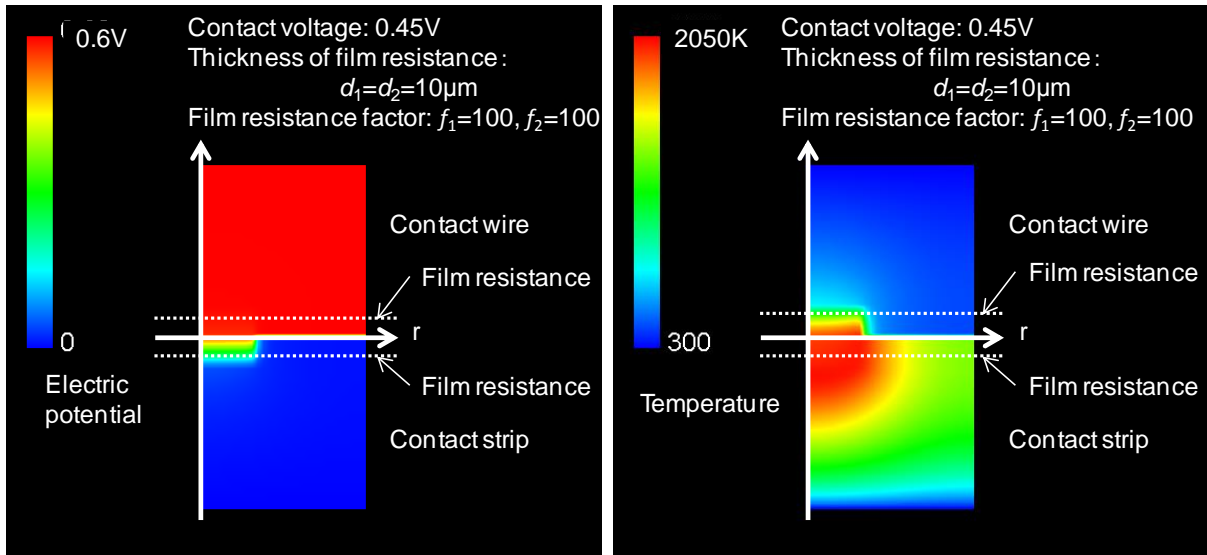


(a) Electric potential distribution



(b) Temperature distribution

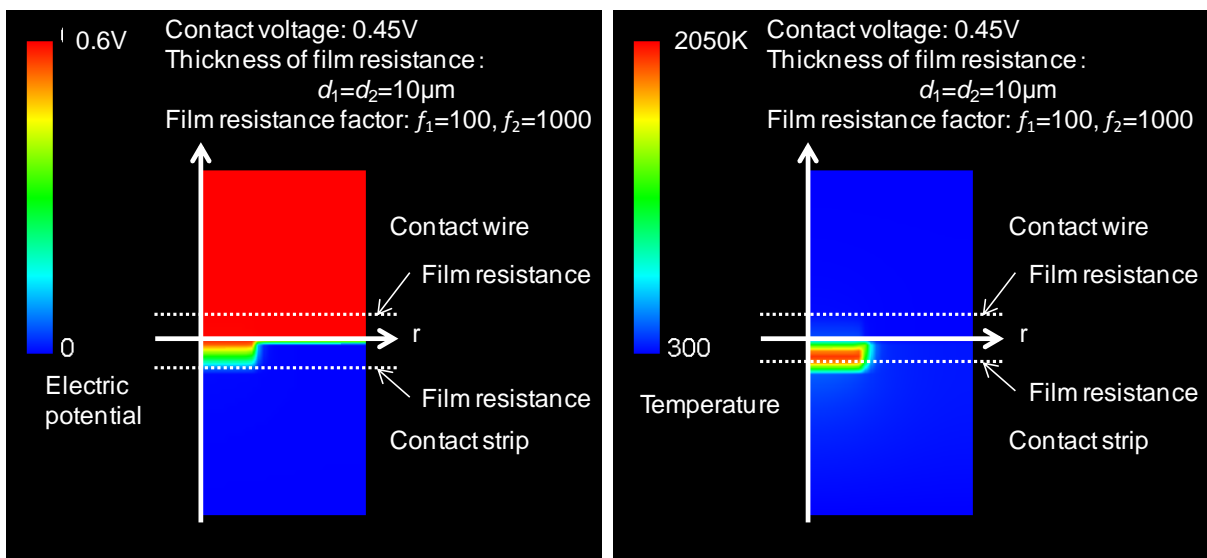
Figure 5.3.34 Analysis result (Film resistance factor:  $f_1=100, f_2=10$ )



(a) Electric potential distribution

(b) Temperature distribution

Figure 5.3.35 Analysis result (Film resistance factor:  $f_1=100, f_2=100$ )



(a) Electric potential distribution

(b) Temperature distribution

Figure 5.3.36 Analysis result (Film resistance factor:  $f_1=100, f_2=1000$ )

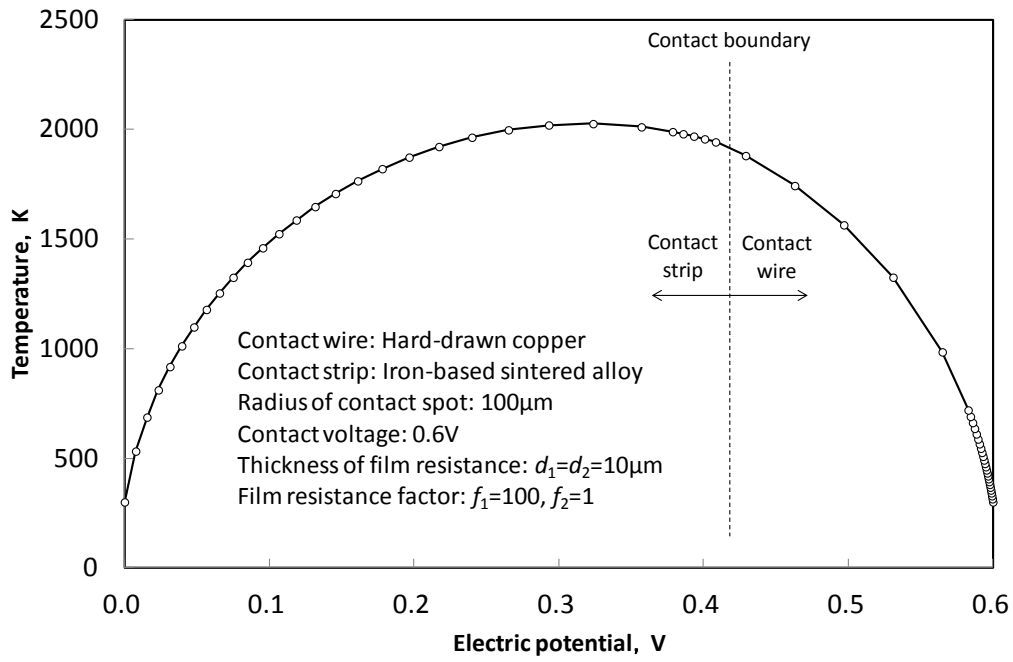


Figure 5.3.37 Relationship between electric potential and temperature (Film resistance factor:  $f_1=100, f_2=1$ )

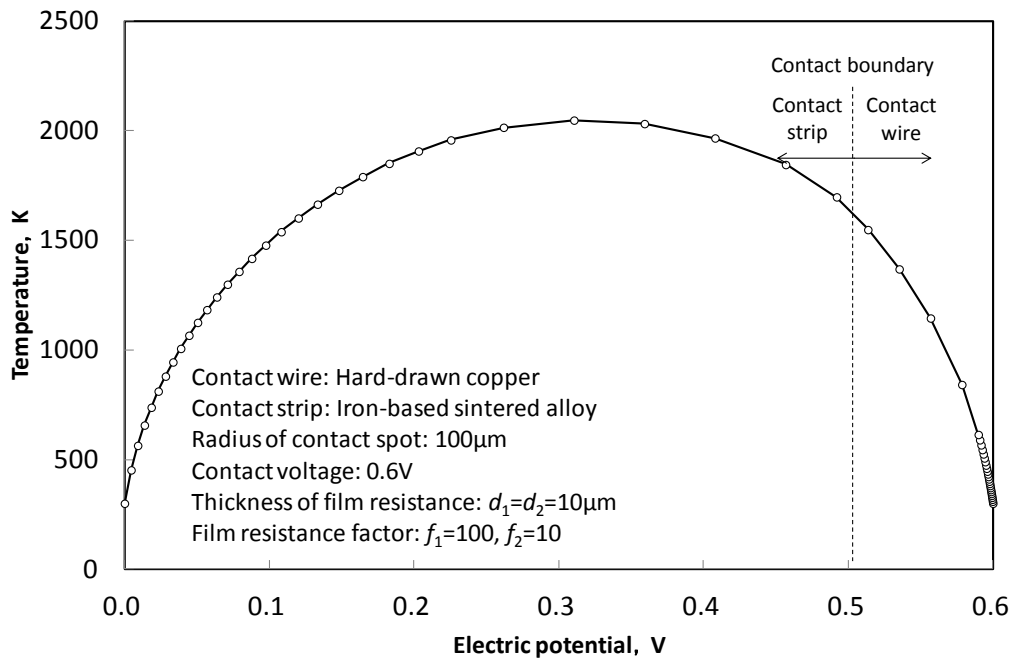


Figure 5.3.38 Relationship between electric potential and temperature  
(Film resistance factor:  $f_1=100, f_2=10$ )

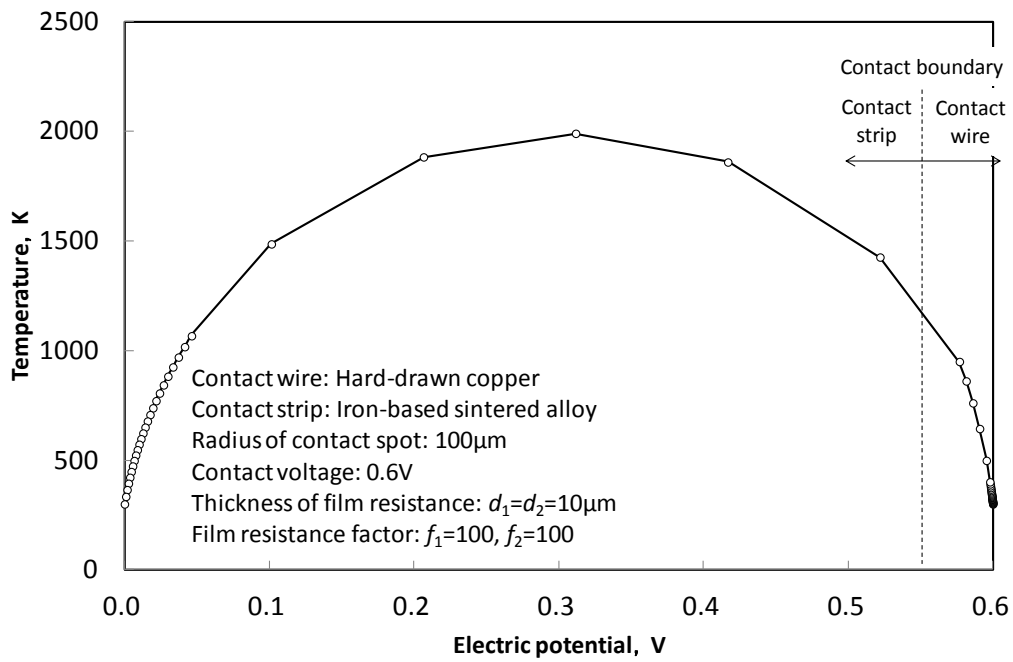


Figure 5.3.39 Relationship between electric potential and temperature  
(Film resistance factor:  $f_1=100, f_2=100$ )

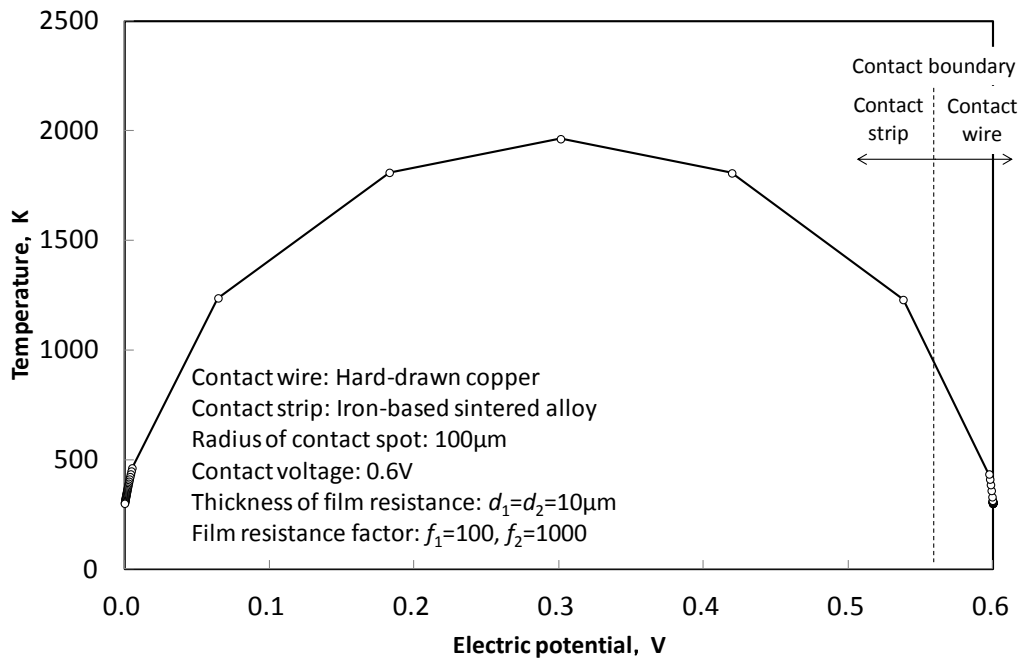


Figure 5.3.40 Relationship between electric potential and temperature  
(Film resistance factor:  $f_1=100, f_2=1000$ )

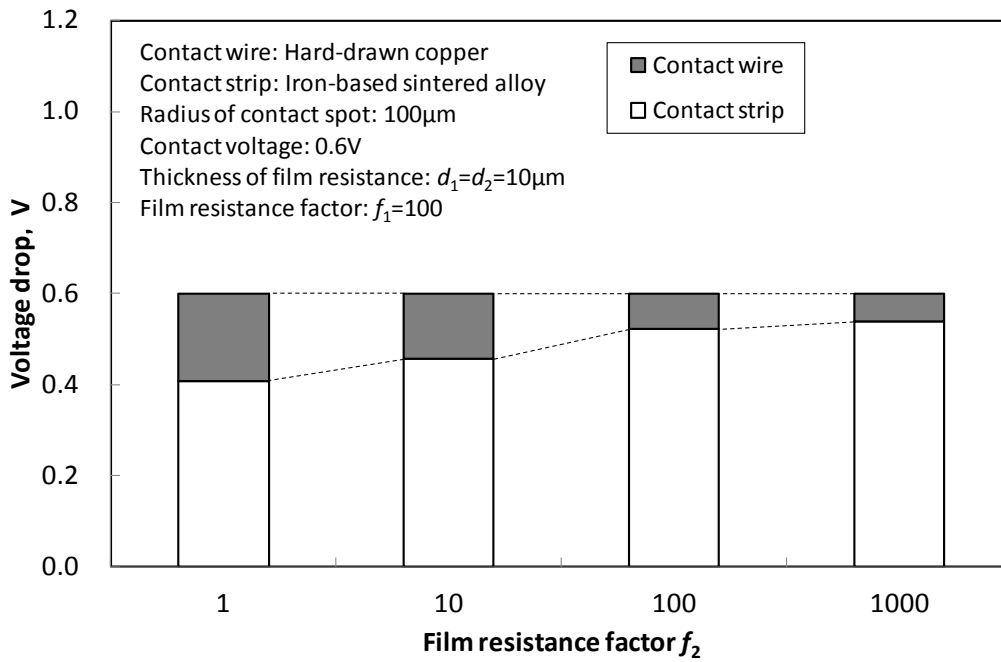


Figure 5.3.41 Relationship between film resistance factor  $f_2$  of contact wire and voltage drop of respective electrodes

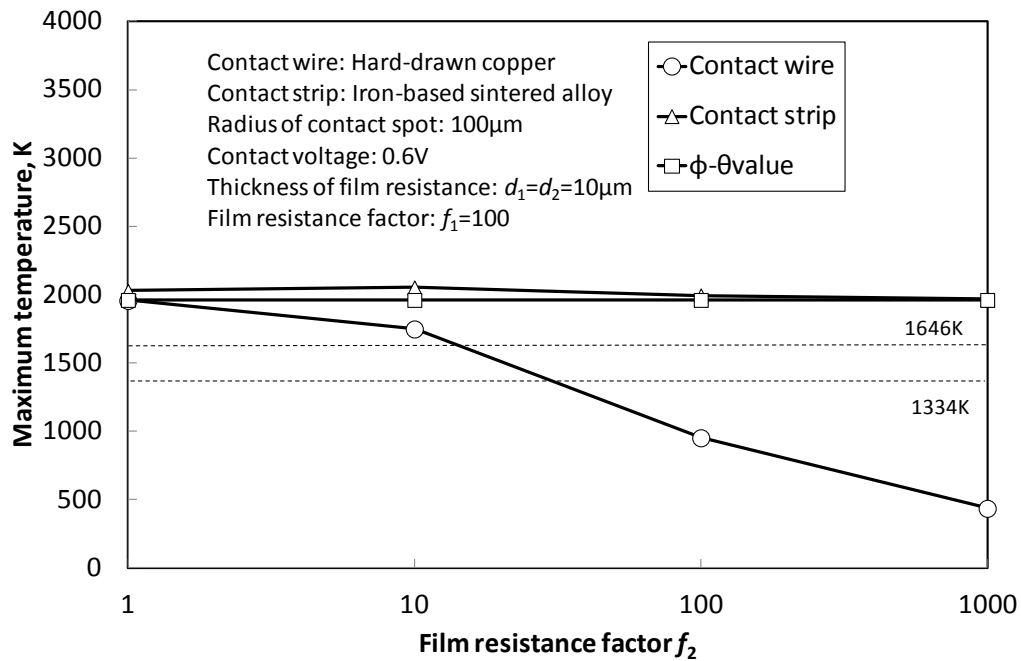


Figure 5.3.42 Relationship between film resistance factor  $f_2$  of contact wire and maximum temperature of respective electrodes



## 5.4 考察

5.3 節で得られた電位分布および温度分布解析結果を以下のとおり整理する。

- (1) 電極内の電位と温度は放物線状の関係となる（電位—温度放物線）。
- (2) 電位—温度放物線の曲線は接触電圧のみに依存し、電極材料の組合せ、見かけの接触面積、バルク温度、および被膜抵抗に依存しない。
- (3) 電極内の最高温度は接触電圧の中間値  $V_c/2$  で発生し、その値は  $\varphi$ - $\theta$  理論に従う。
- (4) トロリ線とすり板内の電圧降下および最高温度は被膜抵抗によって変化する。

以上の結果を定式化し、集電材料の通電摩耗機構について考察する。

### 5.4.1 電位—温度放物線の定式化および摩耗形態マップの作成

5.3 節より、種々の要因がトロリ線やすり板の電位分布および温度分布に影響を及ぼすが、それらの影響は  $z$  軸の電位—温度放物線で表すことができた。そこで、電位—温度放物線を定式化するため、1次元直交座標系の式(5.9)を再掲する。

$$\theta_x = \left\{ \frac{1}{2} \left( \theta_{x+1}^2 + \theta_{x-1}^2 + \frac{\Phi_{x+1}^2 + \Phi_{x-1}^2}{L} \right) \right\}^{\frac{1}{2}}$$

5.3.3 節より、電位—温度放物線に及ぼすバルク温度の影響は無視できるため、境界条件であるトロリ線およびすり板のバルク温度を 300K とする。また、電位が  $V_c/2$  となる点において電極内最高温度  $\theta_{max}$  となることから、式(5.13)が導かれる。

$$\theta_{max} = \left\{ 300^2 + \frac{1}{L} \left( \frac{V_c}{2} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5.13)$$

次に、電位—温度放物線内の任意の電位  $\varphi$  における温度  $\theta$  は次式で表すことができる。

$$\theta = \left\{ \theta_{max}^2 - \frac{1}{L} \left( \frac{V_c}{2} - \varphi \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (5.14)$$

式(5.13)を式(5.14)に代入し、式(5.15)を導く。

$$\theta = \left[ \frac{V_c^2}{L} \left\{ \left( \frac{\varphi}{V_c} \right) - \left( \frac{\varphi}{V_c} \right)^2 \right\} + 300^2 \right]^{1/2} \quad (5.15)$$

式(5.15)により、任意の接触電圧における電位—温度放物線の、任意の電位に対する温度を算出することができる。また、式(5.15)中の  $\varphi/V_c$  を用いることで、図 5.4.1 に示すように様々な接触電圧  $V_c$  に対する電極内温度分布をひとつの横軸で整理することができる。

すり板末端の電位を 0V としているため、接触境界における電位  $\varphi_c$  はすり板内の電圧降下に等しい。この  $\varphi_c$  と接触電圧  $V_c$  の比、すなわちトロリ線とすり板の接触境界における  $\varphi_c/V_c$  を  $\alpha$  とし、これを「接触境界係数」と呼称する。 $\alpha$  は集中抵抗式と被膜抵抗式より式(5.16)で表される。

$$\alpha = \frac{\phi_c}{V_c} = \frac{\frac{\rho_2}{4a} + \frac{f_2 \rho_2 d_2}{\pi a^2}}{\frac{\rho_1 + \rho_2}{4a} + \frac{f_1 \rho_1 d_1 + f_2 \rho_2 d_2}{\pi a^2}} \quad (5.16)$$

電極材料の組合せが決定すると、材料の電気抵抗率は決定しているため、 $\alpha$  は被膜抵抗に左右されると考えてよい。両表面の被膜抵抗係数 $f_1$ と $f_2$ に対する $\alpha$ の関係を図 5.4.2 に示す。なお、被膜厚さは $d_1 = d_2 = 10\mu\text{m}$ とした。この式(5.16)および図 5.4.2 より、すり板被膜抵抗の増加により $\alpha$ は増加し、トロリ線被膜抵抗の増加により $\alpha$ は減少することがわかる。

接触境界における温度 $\theta_c$ は式(5.16)を式(5.15)に代入することで求まる。

$$\theta_c = \left[ \frac{V_c^2}{L} \{ \alpha - \alpha^2 \} + 300^2 \right]^{1/2} \quad (5.17)$$

接触境界が電位—温度放物線の頂点からどちらにずれるかによって、トロリ線とすり板の最高温度は以下のように決定される。

$\alpha > 0.5$  の場合（接触境界が電位—温度放物線の右側）

トロリ線最高温度・・・式(5.17)

すり板最高温度・・・式(5.13)

$\alpha = 0.5$  の場合

トロリ線最高温度＝すり板の最高温度・・・式(5.13)

$\alpha < 0.5$  の場合（接触境界が電位—温度放物線の左側）

トロリ線最高温度・・・式(5.13)

すり板最高温度・・・式(5.17)

図 5.4.2 でマッピングした $\alpha$ に対して、接触電圧を 0.3V, 0.45V, 0.6V と変化させた場合の、トロリ線およびすり板の最高温度を図 5.4.3～図 5.4.5 に示す。なお、図にはトロリ線の融点 1334K およびすり板の融点 1646K を破線で示してある。図 5.4.3 より、接触電圧が 0.3V の場合は式(5.13)で算出される最高温度が 1013K であり、トロリ線およびすり板の被膜抵抗係数がどのように変化しても電極が融点することはない。図 5.4.4 より、接触電圧が 0.45V の場合は式(5.13)で算出される最高温度が 1483K であり、すり板の被膜抵抗係数 $f_2$ がどのように変化してもすり板融点に達することはない。ただし、トロリ線の被膜抵抗係数 $f_1$ が大きく、かつすり板被膜抵抗係数 $f_2$ が小さい条件では、トロリ線の最高温度がトロリ線融点に達することがわかる。図 5.4.5 より、接触電圧 0.6V の場合は式(5.13)で算出される最高温度が 1960K であり、ほとんどの被膜抵抗係数の範囲ですり板が溶融することがわかる。一方、トロリ線最高温度もトロリ線融点に達するが、その範囲は図 5.4.4 とあまり変化はない。

接触境界係数 $\alpha$ を横軸に、接触電圧 $V_c$ を縦軸とし、トロリ線およびすり板の最高温度をマッピングすると、図 5.4.6 のようになる。なお、 $V_c = 0V$  の条件におけるトロリ線およびすり板の最高温度は 300K としている。両図には、トロリ線の融点 1334K およびすり板の融点 1646K を破線で示してある。図 5.4.6 に基づいて、トロリ線およびすり板の溶融条件をひとつの図にまとめたものが図 5.4.7 である。

第 3 章および第 4 章の試験結果より、材料の溶融が摩耗形態の遷移現象の要因であることは明らかであり、図 5.4.7 に示すトロリ線またはすり板の溶融条件から通電下の摩耗形態を以下の 4 種

類に分類する。

- (1) トロリ線とすり板，どちらも溶融しない領域は機械的摩耗形態となる。図 5.4.7 で注目すべき点は  $\alpha$  が大きい条件，すなわちすり板の被膜抵抗が大きい条件では，接触電圧が 0.4V 以上に達しても，トロリ線が溶融せず機械的摩耗形態となることである。
- (2) 接触電圧が 0.4~0.5V かつ  $\alpha$  が比較的小さい領域，すなわちトロリ線の被膜抵抗が大きい領域では，硬銅トロリ線と鉄系焼結合金すり板の融点には差があるためトロリ線のみが溶融する。この領域では Cu ブリッジが発生し，トロリ線溶融摩耗形態となる。
- (3) 接触電圧が 0.5V 以上かつ  $\alpha$  が大きい領域では，すり板のみが溶融する。この領域では Fe ブリッジが発生し，すり板溶融摩耗形態となる。
- (4) 接触電圧が 0.5V 以上かつ  $\alpha$  が比較的小さい領域では，どちらも溶融する領域が存在する。この領域では Cu と Fe が混合したブリッジが発生するため，混合溶融摩耗形態と呼称する。

硬銅トロリ線と鉄系焼結合金すり板の組合せについて，被膜抵抗のない清浄な接触における接触境界係数  $\alpha_0$  は，式(5.16)より，

$$\alpha_0 = \frac{\rho_2}{\rho_1 + \rho_2} = \frac{0.4 \times 10^{-6}}{1.77 \times 10^{-8} + 0.4 \times 10^{-6}} \approx 0.96 \quad (5.18)$$

となる。図 5.4.7 には  $\alpha_0=0.96$  の条件を縦破線で示してある。この図より， $\alpha_0=0.96$  の条件では接触電圧が増加してもトロリ線が溶融せず，機械的摩耗形態とすり板溶融摩耗形態のみが現れる。すなわちトロリ線表面に被膜抵抗が存在しなければ，トロリ線は溶融しないことになる。

以上より，図 5.4.7 は摩耗形態の遷移条件を表すものであるため，これを「摩耗形態マップ」と呼称する。

## 5.4.2 集電材料の通電摩耗機構に関する考察

5.3 節および 5.4.1 節に基づいて，第 3 章および第 4 章の摩耗試験で確認された摩耗現象を説明し，通電摩耗機構について考察する。

### 5.4.2.1 第 3 章の摩耗現象

第 3 章で得られた図 3.4.3 (摩耗形態と接点最高温度の相関関係) のコンターを統計的最大接触電圧に変換した図を図 5.4.8 に示す。図 5.4.8 および図 5.4.7 を用いて第 3 章で確認された摩耗形態の発生機構を説明する。

#### (1) 機械的摩耗形態の発生機構

図 5.4.7 より，接触電圧が小さく電極内の最高温度が両電極の融点に達しない条件では，接触境界係数  $\alpha$  がどのような値であっても，すなわち被膜抵抗の有無によらずトロリ線およびすり板が溶融することはない。したがって，図 5.4.8 において接触電圧が 0.41V 未満の条件では，機械的摩耗形態になったと考える。

## (2) トロリ線溶融摩耗形態の発生機構

図 5.4.7 において接触電圧が 0.41V 以上、0.51V 未満の条件では、被膜の存在によらずすり板が溶融することはない。一方で、トロリ線の溶融は以下のように場合分けできる。

- (a) トロリ線の表面に被膜抵抗が存在しない場合、すなわち  $\alpha = \alpha_0 \doteq 0.96$  の場合はトロリ線表面が溶融することはない。
- (b) トロリ線の表面に被膜抵抗が存在し、かつ電気抵抗が大きい場合、すなわち  $\alpha$  が小さい場合はトロリ線表面の温度が上昇し、被膜を含むトロリ線が溶融する。

しゅう動しない静接点ならば摩耗粒子や酸化膜などを除去した通電試験も可能であるが、通電しながらしゅう動する摩耗試験ではそれらの存在を無視することはできず上記(b)の状態となり、図 5.4.8 において接触電圧が 0.41V 以上、0.51V 未満の条件では、トロリ線のみが溶融するトロリ線溶融摩耗形態になったと考える。さらに、トロリ線表面が溶融することで表面の酸化が促進され、トロリ線表面の被膜抵抗が増加することで溶融体積も増加し、トロリ線の摩耗が著しく増大したものと考える。

## (3) すり板溶融摩耗形態の発生機構

図 5.4.8 において接触電圧が 0.51V 以上の場合、トロリ線やすり板の溶融は図 5.4.7 によって以下のように場合分けできる。

- (a) トロリ線およびすり板の表面に被膜抵抗が存在しない場合、すなわち  $\alpha = \alpha_0 \doteq 0.96$  の場合、トロリ線は溶融せず、すり板のみが溶融する。
- (b)  $\alpha < 0.3$  となる場合、すなわちトロリ線の表面に厚い酸化膜が存在し、かつすり板表面に酸化膜などが存在しない場合、トロリ線のみが溶融し、すり板は溶融しない。
- (c)  $0.3 < \alpha < 0.9$  となる場合、トロリ線およびすり板が溶融する。
- (d)  $\alpha > 0.9$  の場合、すなわちすり板の表面に厚い酸化膜が存在する場合、すり板のみが溶融し、トロリ線は溶融しない。

接触電圧が大きい条件では、図 5.4.5(b)に示すようにほとんどの  $\alpha$  の範囲ですり板が溶融するため、すり板表面に酸化膜が存在しないことは考えられず、上記(a),(b)の状態は考えられない。そのため、上記(c)および(d)の状態となると考えらる。

接触電圧が 0.51V 近傍の場合はすり板表面の溶融体積も小さく、被膜抵抗も小さくなると考えられ上記(c)の状態となり、混合溶融摩耗形態となる。この形態ではトロリ線も溶融するが、トロリ線溶融摩耗形態ほど大きな摩耗率にはならないと推測できる。

さらに接触電圧が増加し、電極内最高温度が上昇すると、すり板表面の溶融体積が大きくなり被膜抵抗も大きくなると考えられ上記(d)の状態となり、すり板溶融摩耗形態となる。この状態ではすり板表面が溶融することで酸化が促進されるため、すり板の摩耗が著しく増大したものと考える。一方でトロリ線は溶融せず、トロリ線摩耗率は小さくなる。

以上、第 3 章において接点最高温度のみでは説明できなかった、すり板溶融摩耗形態においてトロリ線が溶融しない現象について、被膜抵抗を考慮した摩耗形態マップを用いることで説明可能となった。

#### 5.4.2.2 第4章の摩耗現象

第4章では、接触力 10N 近傍の接点最高温度がトロリ線の融点に達する条件において、見かけの接触面積によってトロリ線の溶融状態が変化した。

5.3 節の解析結果より、接触電圧に対する見かけの接触面積の影響はほとんどなく、電位-温度放物線の曲線に対する見かけの接触面積の影響もほとんどないため、電極内最高温度が見かけの接触面積によって変化することはない。そこで、電極内温度分布に影響を及ぼす被膜抵抗に着目して考察を進める。

見かけの接触面積の変化が被膜抵抗に及ぼす影響として、被膜厚さの変化が考えられる。第4章で得られた図 4.3.8 (機械的摩耗形態における平均トロリ線摩耗率と見かけの接触面積の関係) を図 5.4.9 に再掲する。この平均摩耗率をすり板幅  $B[\text{mm}]$  で除し、接触力 10N を乗じることで、平均トロリ線摩耗深さ  $d_{st} [\text{mm}/\text{cycle}]$  を算出する。

$$d_{st} = \frac{W_{st}}{B} \times 10 \quad (5.19)$$

図 5.4.9 および式(5.19)より算出した、機械的摩耗形態における平均トロリ線摩耗深さと見かけの接触面積の関係を図 5.4.10 に示す。この図より、見かけの接触面積の減少に伴い、摩耗深さが増加することがわかる。見かけの接触面積  $70\text{mm}^2$  と  $50\text{mm}^2$  の平均摩耗深さの差は  $1\text{nm}$  程度であるが、真実接触面が見かけの接触面積より小さいことを考慮すると、真実接触点における摩耗深さの違いは数  $\text{nm}$  になると考えられる。

トロリ線表面の被膜には有限の厚さがあるため、見かけの接触面積の減少に伴い摩耗深さが増加することで、トロリ線表面の被膜が除去または厚さが減少し、式(5.16)より  $\alpha$  が増加することが十分考えられる。見かけの接触面積  $50\text{mm}^2$  以下ではトロリ線表面の被膜抵抗が減少した結果、接触力 10N 近傍において清浄な接触状態の  $\alpha_0=0.96$  に近くなり、トロリ線が溶融せず機械的摩耗形態になったと考える。

なお、図 5.4.7 より清浄な接触状態であっても、接触電圧が  $0.51\text{V}$  以上になるとすり板は溶融するため、すり板の摩耗特性に対する見かけの接触面積の影響は小さかったものとする。

以上より、第3章および第4章で確認された摩耗現象について摩耗形態マップを用いて説明できることから、摩耗形態遷移現象の支配パラメータを①接触電圧、②融点、③接触境界係数  $\alpha$  (材料の電気抵抗率および被膜抵抗) に絞ることができる。このうち、②と③に関しては材料特性が主であり、任意の材料組合せについても摩耗形態マップを作成することができ、演繹的に摩耗形態の推測が可能と考える。さらに  $\alpha$  や融点の設定によっては、接触電圧によらずトロリ線溶融摩耗形態を抑制すること、すなわち摩耗形態の制御により摩耗を低減することが可能と考える。

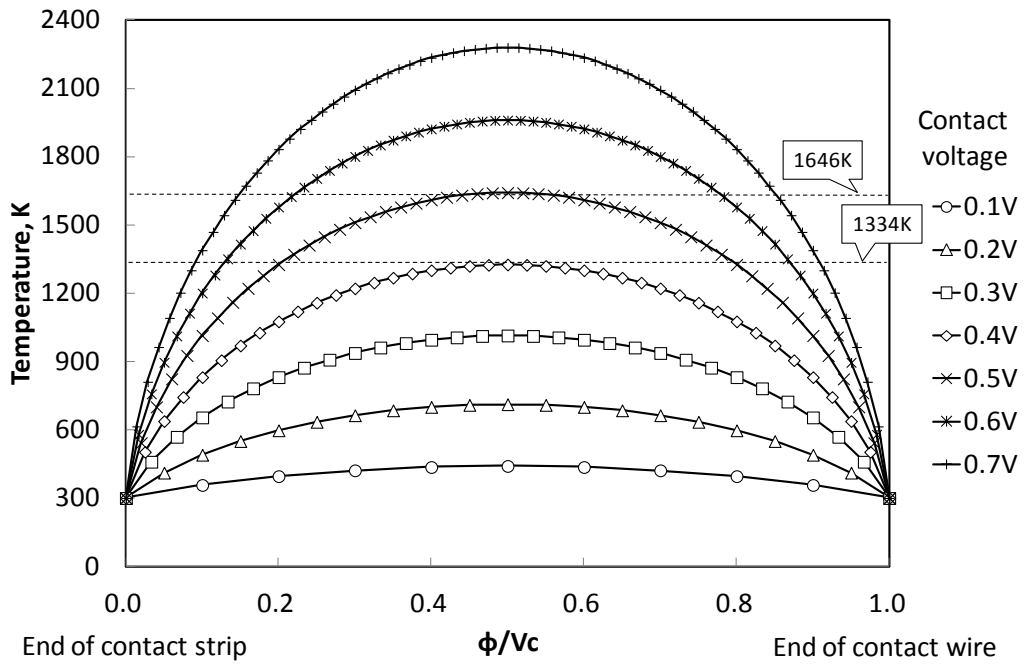


Figure 5.4.1 Electric potential-temperature curve organized by  $\phi/V_c$  in each contact voltage

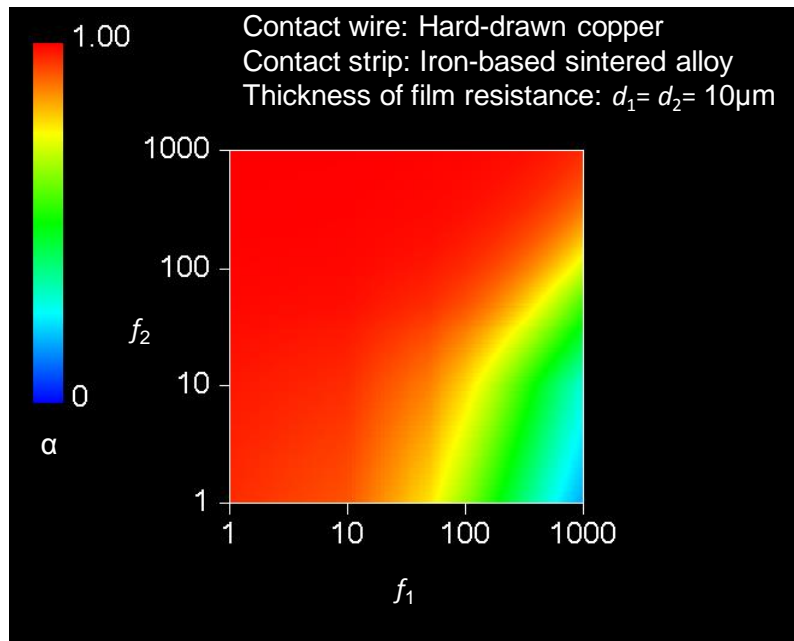
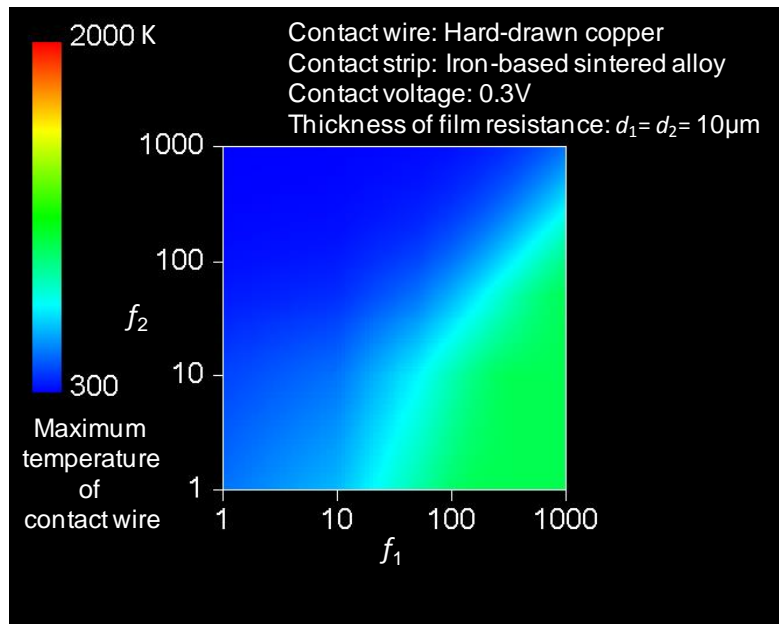
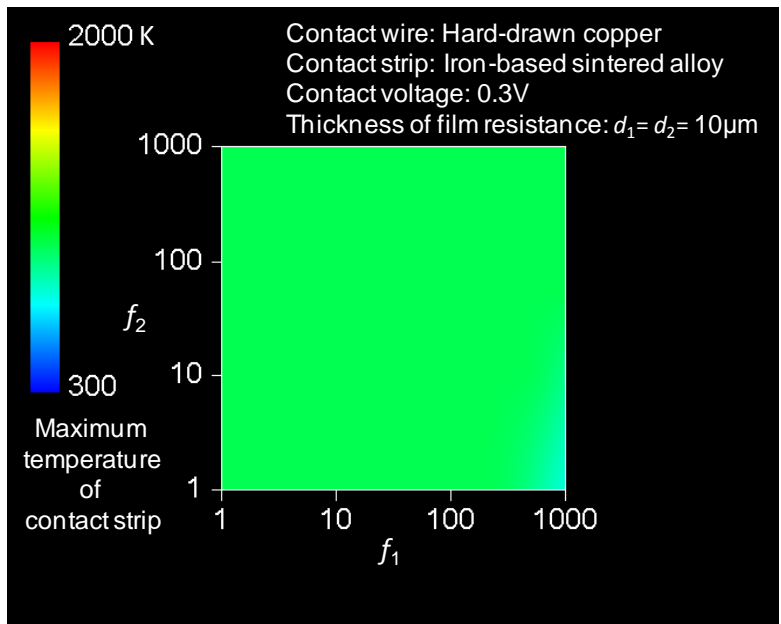


Figure 5.4.2 Relationship between film resistance factor and contact boundary factor  $\alpha$

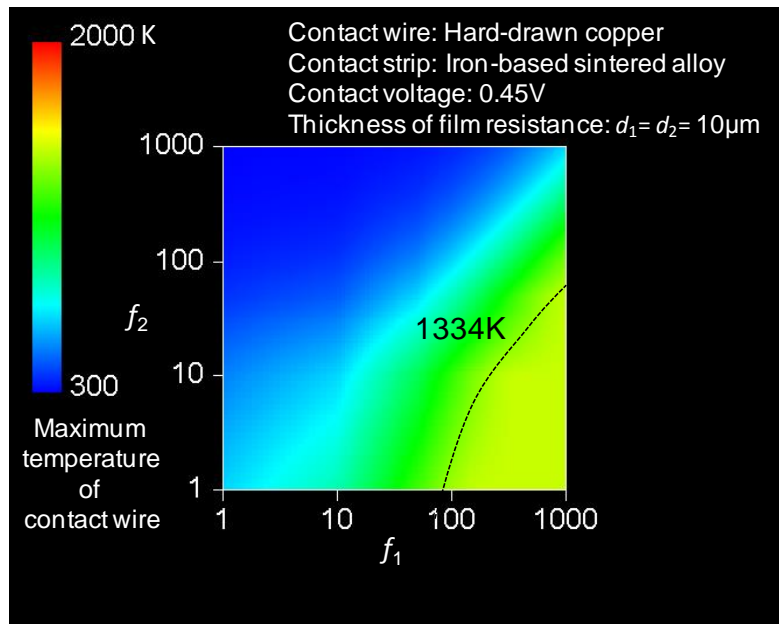


(a) Contact wire

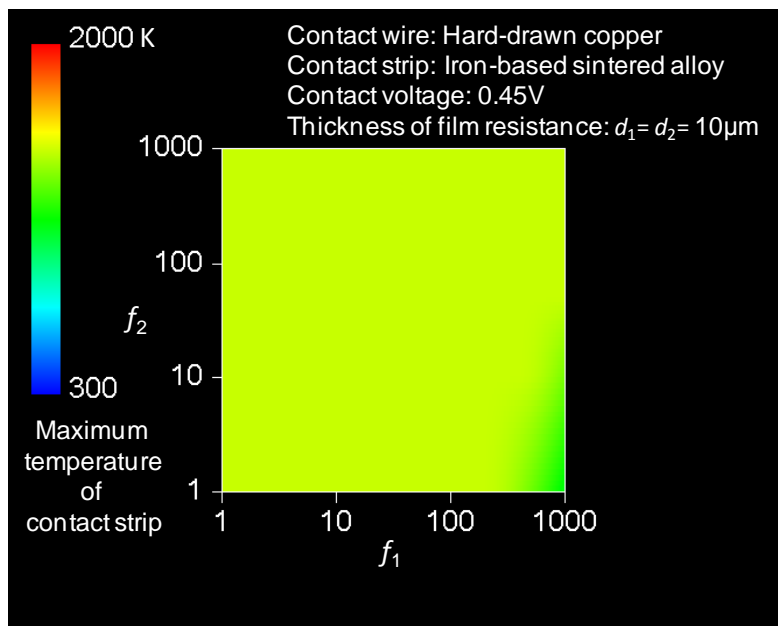


(b) Contact strip

Figure 5.4.3 Relationship between film resistance factor and maximum temperature (Contact voltage: 0.3V)



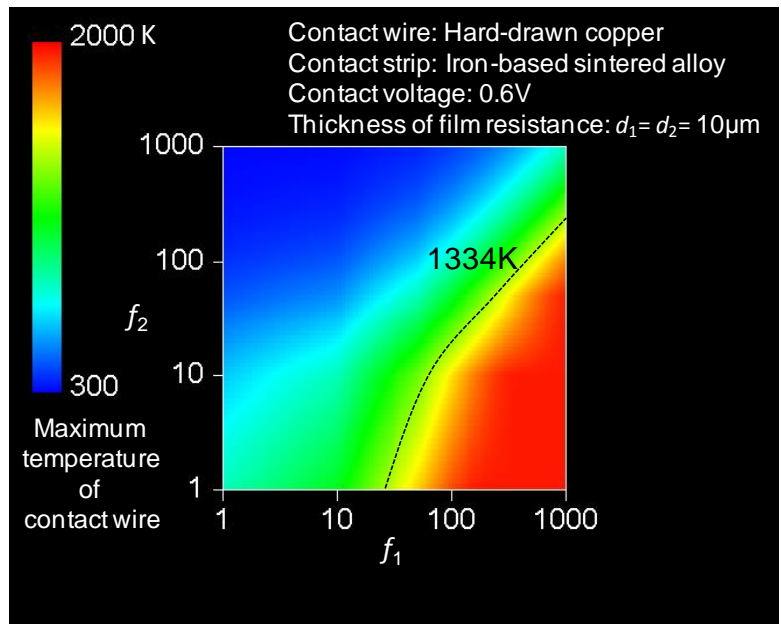
(a) Contact wire



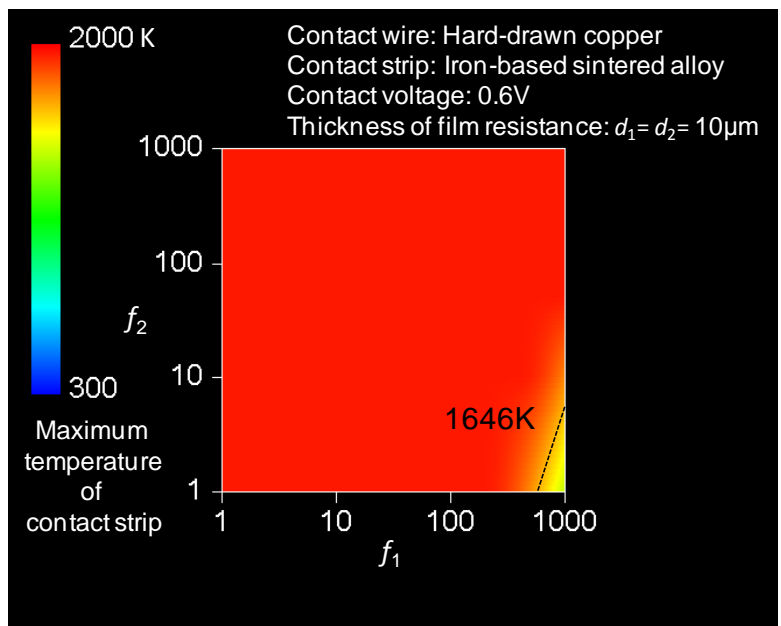
(b) Contact strip

Figure 5.4.4 Relationship between film resistance factor and maximum temperature (Contact voltage: 0.45V)



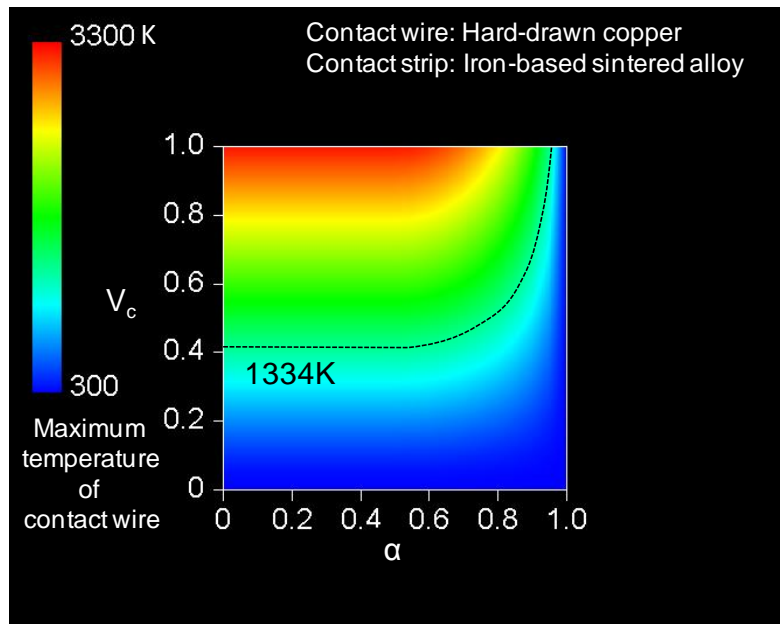


(a) Contact wire

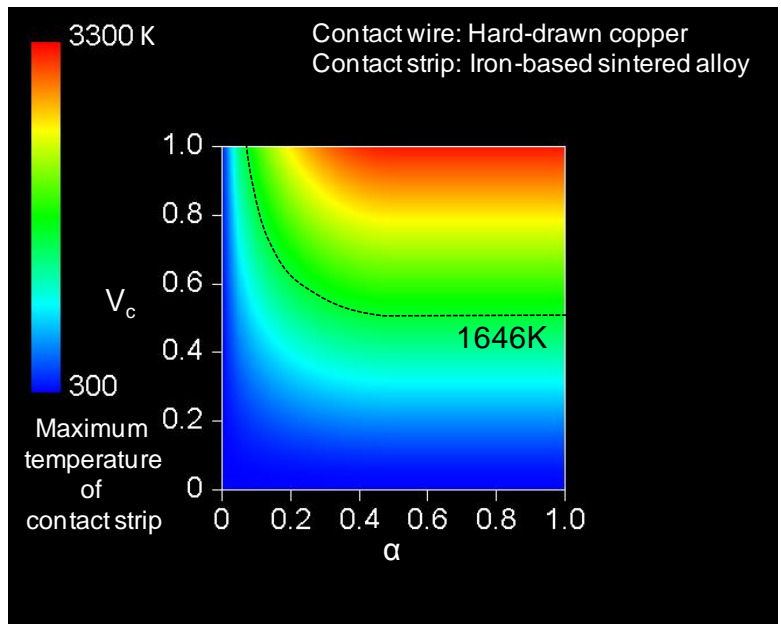


(b) Contact strip

Figure 5.4.5 Relationship between film resistance factor and maximum temperature (Contact voltage: 0.6V)



(a) Contact wire



(b) Contact strip

Figure 5.4.6 Relationship between contact boundary factor  $\alpha$  and maximum temperature

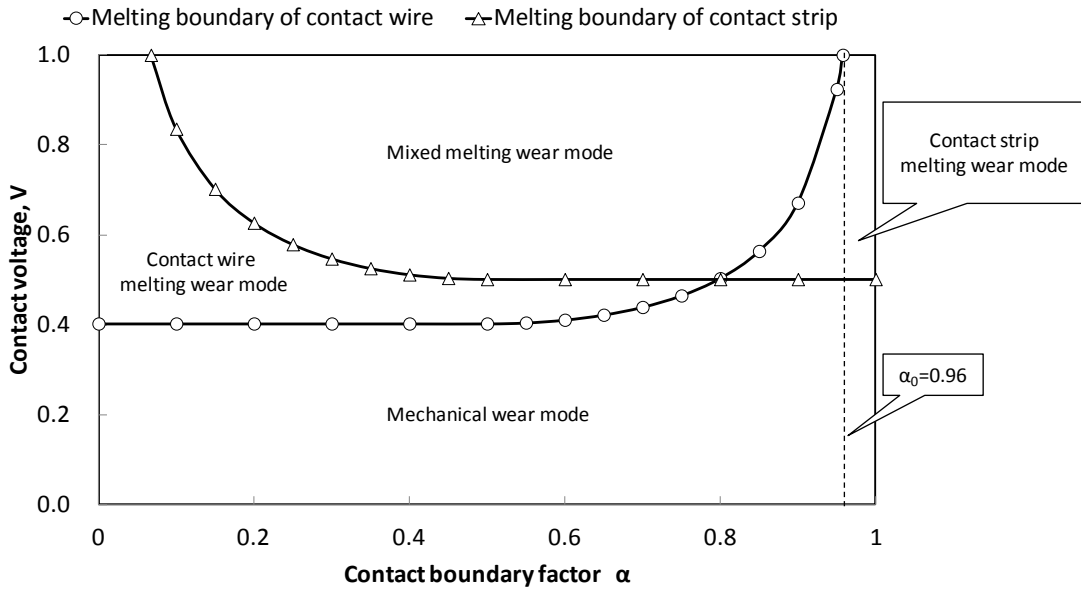


Figure 5.4.7 Wear mode map for combination of hard-drawn copper contact wire and iron-based sintered alloy contact strip

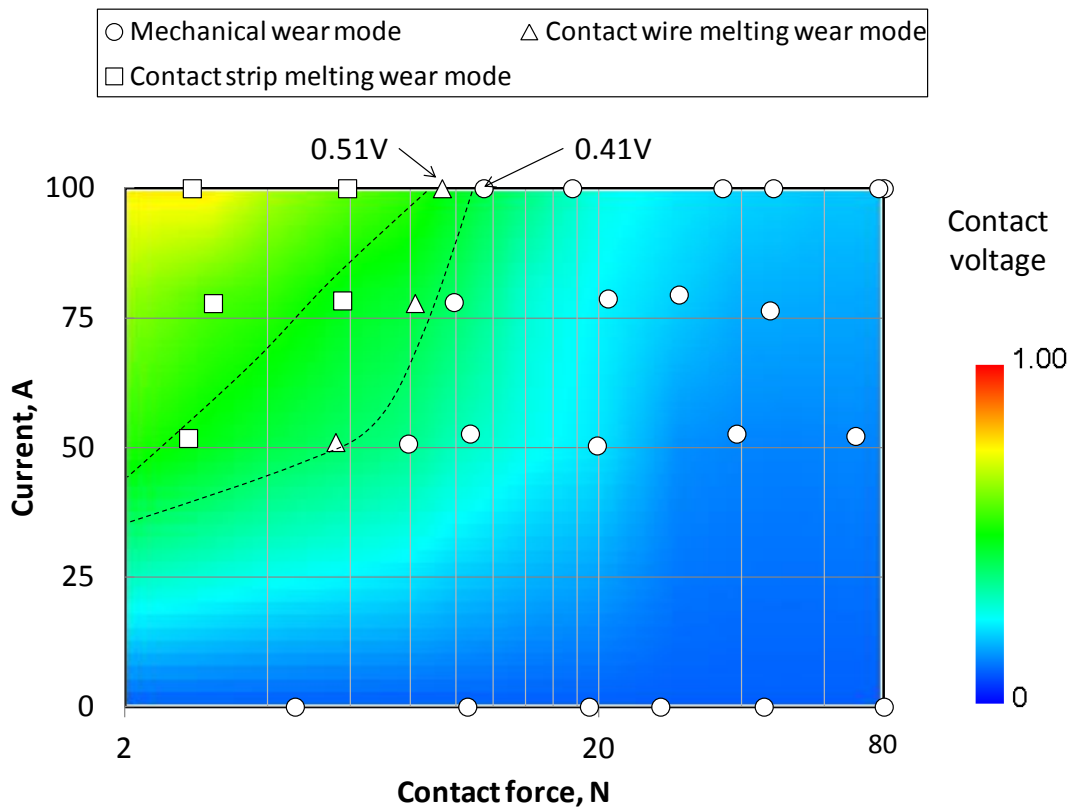


Figure 5.4.8 Relationship between wear mode and statistic maximum contact voltage

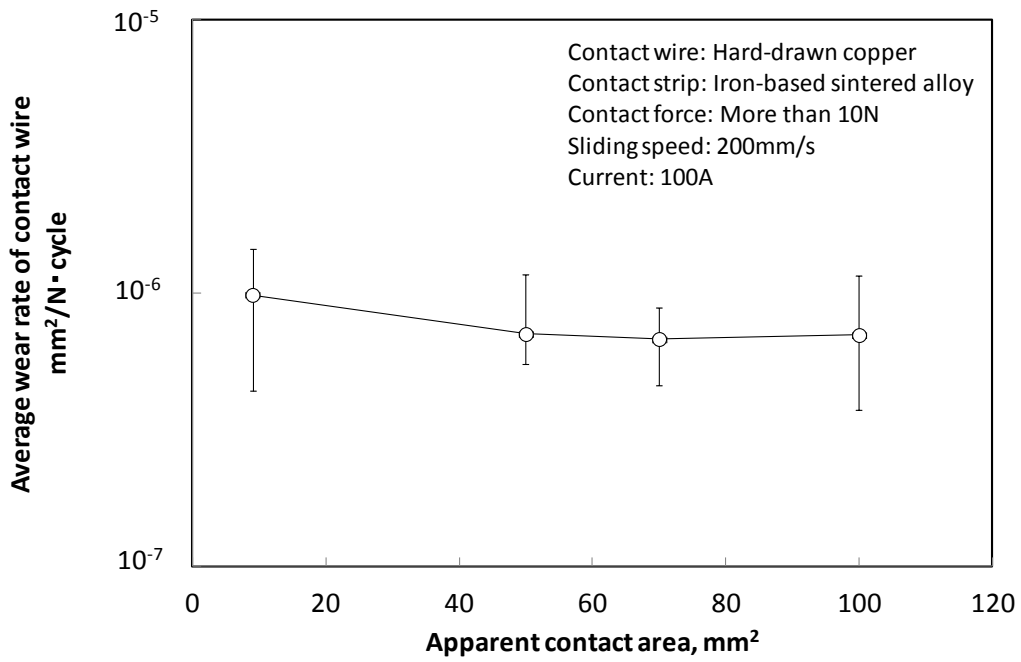


Figure 5.4.9 Relationship between average wear rate of contact wire and apparent contact area in mechanical wear mode

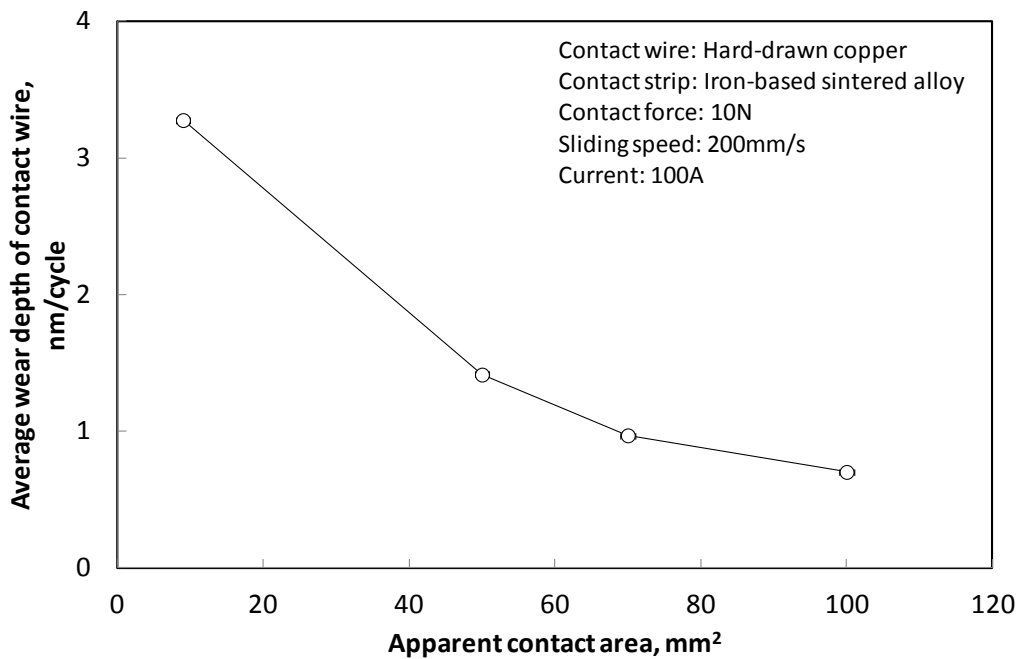


Figure 5.4.10 Relationship between average wear depth of contact wire and apparent contact area in condition of contact force 10N

## 5.5 結言

通電下の硬銅トロリ線と鉄系焼結合金すり板の摩耗機構を明らかにするべく、酸化膜や摩耗粒子などの被膜抵抗を考慮した通電接点モデルを作成し、通電下の電極内電位分布を解析した。また、Wiedemann-Franz の法則を適用した熱伝導方程式を新たに提案し、通電下の電極内温度分布を解析した。

得られた具体的な結果は以下のとおりである。

- (1) 接点半径を変化させた電位分布の解析より、接触抵抗の解析値と理論値は誤差 3%未満であった。また、被膜厚さを変化させた電位分布より、接触抵抗の解析値と理論値は被膜抵抗の厚さが  $10\mu\text{m}$  以下であれば解析値と理論値の誤差は 5.0%未満となり、本章で提案した解析手法は十分な精度を有することがわかった。
- (2) 電位分布および温度分布解析結果より、電極内の電位と温度は放物線状の関係となる(電位—温度放物線)。電位—温度放物線の曲線は接触電圧のみに依存し、電極材料の組合せ、見かけの接触面積、バルク温度、および被膜抵抗に依存しない。
- (3) 電極内の最高温度は接触電圧  $V_c$  の中間値  $V_c/2$  で発生し、その値は  $\varphi$ - $\theta$  理論に従う。
- (4) トロリ線とすり板内の電圧降下および温度分布は被膜抵抗によって変化する。
- (5) 電極の集中抵抗および被膜抵抗を用いた接触境界係数  $\alpha$  を新たに考案し、電位—温度放物線を定式化した。また、電極の熔融条件をマッピングすることで摩耗形態マップを作成し、第 3 章および第 4 章で確認された摩耗現象を説明した。
- (6) 摩耗形態マップより、摩耗形態の遷移現象を支配するパラメータを接触電圧、融点、接触境界係数  $\alpha$  に特定した。

## 参考文献

- (1) 長沢広樹, Cr-Zr 系銅合金トロリ線の通電下の摩耗特性の研究, 東北大学学位論文, (1996) 136-178.
- (2) 柳田憲史, 岩田健, 加藤達朗, 土谷撰, 藤垣哲郎, 飯塚元信, 摺動通電時におけるブラシ摩耗解析モデル化の基礎検討, 電学論 D, 132, 12 (2012) 1097-1103.
- (3) P. G. Slade, *Electrical Contacts Principles and Applications*, CRC Press (1999) 4.
- (4) T. Utsumi, *Theoretical and Experimental Investigations of the Dynamic Molten Bridge*, IEEE Trans. on Parts, Materials and Packaging, 5, 1 (1969) 62-68.
- (5) R. Holm, *Electric Contacts Theory and Applications*, Springer (1967).
- (6) 高木相, 電気接点のアーク放電現象, コロナ社, (1995).
- (7) 岩瀬勝, 横井一雄, 国分欣治, 熊谷正博, 斉藤稔男, 前田正己, パンタグラフすり板(2)―新幹線すり板の開発とその改良―, 鉄道技術研究報告, 574 (1967) 20-21.

## 第 6 章

# 集電材料組合せによる摩耗形態制御

### 6.1 緒言

第 5 章では、硬銅トロリ線と鉄系焼結合金すり板の接点近傍における電位分布および温度分布解析を実施し、摩耗形態マップを作成することで通電摩耗機構を明らかにした。これにより材料の溶融によって摩耗形態を以下の 4 つに分類した。

- (1) 機械的摩耗形態
- (2) トロリ線溶融摩耗形態
- (3) すり板溶融摩耗形態
- (4) 混合溶融摩耗形態

また、各摩耗形態の遷移現象の支配パラメータを以下の 3 つに特定した。

- (a) 接触電圧
- (b) 融点
- (c) 接触境界係数  $\alpha$  (材料の電気抵抗率および被膜抵抗)

これらを用いて、任意の材料の組合せに対して発生し得る摩耗形態の演繹的予測や、摩耗形態制御による摩耗低減対策の可能性を示した。

集電材料であるトロリ線とすり板の摩耗に関する研究や材料開発がこれまでも数多く報告されている<sup>(1-5)</sup>。長沢<sup>(4)</sup>は Cr-Zr 系銅合金トロリ線に対するすり板の組合せを変更した摩耗試験結果より、接触面温度上昇の観点から摩耗を整理したトロリ線摩耗マップを作成している。また、久保<sup>(5)</sup>は無酸素銅に対するすり板の組合せを変更した摩耗試験結果より、アーク放電エネルギーの累積値で摩耗を整理している。しかしながら、集電材料の摩耗を低減するための材料組合せ指針には至っておらず、トロリ線とすり板はそれぞれ独自に開発されているのが現状である。

そこで、本章では第 5 章で作成した摩耗形態マップに基づき通電摩耗試験に供する材料の組合せを選定し、摩耗試験結果より得られる摩耗特性と材料組合せの関係を調査することで、摩耗形態マップの妥当性を検証する。以て材料の組合せによる摩耗形態制御の可能性を示す。

### 6.2 摩耗試験用材料

#### 6.2.1 材料組合せと摩耗形態発生条件の関係

第 5 章で作成した硬銅トロリ線と鉄系焼結合金すり板の組合せに対する摩耗形態マップを図 6.2.1 に再掲する。図中のトロリ線およびすり板の溶融境界は第 5 章の式(5.13)および式(5.17)を用いて、以下のとおり算出できる。

曲線区間

$$V_c = \left\{ \frac{L(T_m^2 - 300^2)}{\alpha - \alpha^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6.1)$$

水平区間

$$V_c = \{4L(T_m^2 - 300^2)\}^{\frac{1}{2}} \quad (6.2)$$

ここで、 $V_c$ は接触電圧[V]、 $L$ はローレンツ数( $=2.4 \times 10^{-8}$  [V/K]<sup>2</sup>)、 $T_m$ は材料の融点[K]である。また、摩耗形態マップの横軸である接触境界係数  $\alpha$  の式を再掲する。

$$\alpha = \frac{\frac{\rho_2}{4a} + \frac{f_2 \rho_2 d_2}{\pi a^2}}{\frac{\rho_1 + \rho_2}{4a} + \frac{f_1 \rho_1 d_1 + f_2 \rho_2 d_2}{\pi a^2}} \quad (6.3)$$

ここで、 $\rho_1, \rho_2$ はトロリ線およびすり板の電気抵抗率[Ωm]、 $a$ は接点半径[m]、 $f_1, f_2$ はトロリ線およびすり板表面の被膜抵抗係数、 $d_1, d_2$ はトロリ線およびすり板表面の被膜厚さ[m]である。式(6.3)より、すり板被膜抵抗の増加に伴い  $\alpha$  は増加し、トロリ線被膜抵抗の増加に伴い  $\alpha$  は減少することがわかる。なお、被膜抵抗の存在しない清浄な接触における接触境界係数  $\alpha_0$  は次式となる。

$$\alpha_0 = \frac{\rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \quad (6.4)$$

摩耗試験時に被膜抵抗を能動的に設定することは困難であるが、融点  $T_m$  と清浄時接触境界係数  $\alpha_0$  は材料の組合せによって容易に設定することができ、接触電圧  $V_c$  は電流と接触力を与えることで設定することができる。ここでは各摩耗形態が発生する境界を求め、融点  $T_m$  と清浄時接触境界係数  $\alpha_0$  に基づく材料組合せの定量的な目安を設定する。

まず摩耗形態マップにおいて、トロリ線溶融境界とすり板溶融境界が一致する接触境界係数を  $\alpha_1$  とし、式(6.1)と(6.2)より以下のとおり算出する。

トロリ線融点  $T_{mt} \geq$  すり板融点  $T_{ms}$  の場合

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{T_{mt}^2 - 300^2}{T_{ms}^2 - 300^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.5)$$

トロリ線融点  $T_{mt} <$  すり板融点  $T_{ms}$  の場合

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{T_{ms}^2 - 300^2}{T_{mt}^2 - 300^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.6)$$

この接触境界係数  $\alpha_1$  は図 6.2.1 にも示してある。この  $\alpha_1$  を境界とし、材料表面の被膜抵抗によってトロリ線著大摩耗が発生するトロリ線溶融摩耗形態や、すり板著大摩耗が発生するすり板溶融摩耗形態に遷移する。

次に、混合溶融摩耗形態が発生する境界を求める。第 3 章および第 4 章の実験結果より、電気抵抗率が比較的大きい鉄系焼結合金すり板が溶融する一方で硬銅トロリ線が溶融しない現象、すなわち混合溶融摩耗形態が発生しない現象を確認した。この現象について第 5 章では、溶融したすり板表面に被膜抵抗が形成され、接触境界係数  $\alpha$  が増大したためと考察している。以上より、比較的電気抵抗率が大きい材料が十分に溶融する条件を、混合溶融摩耗形態の境界として考える。ここでは、比較的電気抵抗の高い材料の融点より 800K 高い温度（接触電圧差として 0.25V）を設



定し、式(6.5)および式(6.6)を用いて混合溶融摩耗形態が発生する境界  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  を求める。

トロリ線電気抵抗率  $\rho_1 \geq$  すり板電気抵抗率  $\rho_2$  の場合

$$\alpha_2 = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{T_{ms}^2 - 300^2}{(T_{mt} + 800)^2 - 300^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6.7)$$

トロリ線電気抵抗率  $\rho_1 <$  すり板電気抵抗率  $\rho_2$  の場合

$$\alpha_3 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{T_{mt}^2 - 300^2}{(T_{ms} + 800)^2 - 300^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.8)$$

式(6.5)～式(6.8)より、 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  はトロリ線およびすり板の融点によって決定されることがわかる。そこで、横軸をトロリ線融点とすり板融点の差とし、 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  を算出した結果を図 6.2.2 に示す。なお、縦軸は清浄時接触境界係数  $\alpha_0$  とした。図 6.2.2 より、材料組合せによって摩耗形態の発生条件は 8 つの領域に分かれることがわかる。ここでは図 6.2.2 を集電材料組合せマップと呼称する。図 6.2.3 は、トロリ線とすり板の融点が異なる 2 種類の摩耗形態マップに対して  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  を破線で示すことで、図 6.2.2 に示した 8 つの領域を模式的に表現しており、各領域について摩耗形態の発生条件を以下の通り表示している。

領域①：  $T_{mt} > T_{ms}$ , かつ  $\alpha_0 > \alpha_3$  の場合

この領域では、トロリ線表面に厚い被膜抵抗が存在し、 $\alpha$  が非常に小さくならなければ、トロリ線溶融摩耗形態および混合溶融摩耗形態が発生することはない。しかも、すり板がトロリ線よりも先に溶融することで、すり板表面に厚い被膜抵抗が発生し、接触境界係数  $\alpha$  は増加する傾向にあるため、トロリ線の溶融は小さくなる。このことより、最もトロリ線が溶融しにくい材料組合せとなる。

領域②：  $T_{mt} < T_{ms}$ , かつ  $\alpha_0 > \alpha_3$  の場合

この領域では、トロリ線の融点がりすり板よりも低いため、トロリ線表面に被膜抵抗が存在することでトロリ線溶融摩耗形態が発生する。ただし、すり板が溶融することですり板表面に厚い被膜抵抗が発生し、接触境界係数  $\alpha$  が増加するため、混合溶融摩耗形態は発生しにくく、すり板溶融摩耗形態となる。なお、第 3 章および第 4 章で摩耗試験に供した硬銅トロリ線および鉄系焼結合金すり板の組合せは領域②に該当しており、材料組合せの明確な指針がなかった時代に開発した鉄系焼結合金すり板であるが、比較的トロリ線が溶融しにくい組合せであったことがわかる。

領域③：  $T_{mt} > T_{ms}$ , かつ  $\alpha_1 < \alpha_0 < \alpha_3$  の場合

この領域では、トロリ線表面に厚い被膜抵抗が存在し、 $\alpha$  が非常に小さくならなければ、トロリ線溶融摩耗形態が発生することはないが、混合溶融摩耗形態は必ず発生するため、接触電圧が増加する離線時にはトロリ線が溶融する。また、すり板の融点がりトロリ線よりも低いため、すり板溶融摩耗形態は必ず発生する。

領域④：  $T_{mt} < T_{ms}$ , かつ  $\alpha_1 < \alpha_0 < \alpha_3$  の場合

この領域では、トロリ線の融点がりすり板よりも低いため、トロリ線表面に被膜抵抗が存在することでトロリ線溶融摩耗形態が発生する。なお、すり板溶融摩耗形態および混合溶融摩耗形態は

必ず発生する。

領域⑤：  $T_{mt} > T_{ms}$ ，かつ  $\alpha_2 < \alpha_0 < \alpha_1$  の場合

この領域では，すり板の融点がトロリ線よりも低いため，すり板表面に被膜抵抗が存在することですり板溶融摩耗形態が発生する．なお，トロリ線溶融摩耗形態および混合溶融摩耗形態は必ず発生する．

領域⑥：  $T_{mt} < T_{ms}$ ，かつ  $\alpha_2 < \alpha_0 < \alpha_1$  の場合

この領域では，すり板表面に厚い被膜抵抗が存在し， $\alpha$  が非常に大きくならなければ，すり板溶融摩耗形態が発生することはないが，混合溶融摩耗形態は必ず発生するため，接触電圧が増加する離線時にはすり板が溶融する．また，トロリ線の融点がすり板よりも低いため，トロリ線溶融摩耗形態は必ず発生する．

領域⑦：  $T_{mt} > T_{ms}$ ，かつ  $\alpha_0 < \alpha_2$  の場合

この領域では，すり板の融点がトロリ線よりも低いため，すり板表面に被膜抵抗が存在することですり板溶融摩耗形態が発生する．ただし，トロリ線が溶融することでトロリ線表面に厚い被膜抵抗が発生し，接触境界係数  $\alpha$  が減少するため，混合溶融摩耗形態は発生しにくく，トロリ線溶融摩耗形態となる．

領域⑧：  $T_{mt} < T_{ms}$ ，かつ  $\alpha_0 < \alpha_2$  の場合

この領域では，すり板表面に厚い被膜抵抗が存在し， $\alpha$  が非常に大きくならなければ，すり板溶融摩耗形態および混合溶融摩耗形態が発生することはない．しかも，トロリ線が溶融することでトロリ線表面に厚い被膜抵抗が発生し，接触境界係数  $\alpha$  は減少する傾向にあるため，すり板の溶融は小さくなる．このことより，最もすり板が溶融しにくい材料組合せとなる．

## 6.2.2 摩耗試験用材料の組合せ選定

本節では，図 6.2.2 および図 6.2.3 に基づいて通電摩耗試験用の材料組合せを選定する．

第 1 章 1.2 節より，トロリ線は導電率を高くする必要があり，すり板はトロリ線を摩耗させないことが求められている．このことより，一般にトロリ線の電気抵抗率はすり板よりも小さく，図 6.2.2 および図 6.2.3 において  $\alpha_0 > 0.5$  となる領域で使用されている．すなわち，図中の領域①，②，③，④，⑥となる組合せである．このうち領域②については，硬銅トロリ線と鉄系焼結合金すり板の組合せについて第 3 章および第 4 章で試験を実施済みである．

本節で摩耗試験に供する試験片として，必要な検討事項を以下に示す．

- (1) 異種金属とし，摩耗試験後の移着物や溶融物の成分分析が容易であること．
- (2) トロリ線もしくはすり板形状に加工できること．

これらの事項を考慮した結果，選定した材料組合せを表 6.2.1 に示す．

硬銅トロリ線とニッケルすり板の組合せは図 6.2.2 および図 6.2.3 中の領域⑥となり， $\alpha_0 > 0.5$  となる範囲では最もトロリ線が溶融しやすい組合せとなる．この材料組合せに対する摩耗形態マップを図 6.2.4 に示す．

硬銅トロリ線とアルミニウムすり板の組合せは図 6.2.2 および図 6.2.3 中の領域③となる。なお、アルミニウムはパンタグラフの補助すり板に使用されており、アルミニウムすり板と硬銅トロリ線が接触する箇所ではトロリ線摩耗が著しくなるという報告がなされている<sup>(6,7)</sup>。この材料組合せに対する摩耗形態マップを図 6.2.5 に示す。

ニッケルトロリ線と鉄系焼結合金すり板の組合せは図 6.2.2 および図 6.2.3 中の領域①となり、最もトロリ線が溶融しにくい組合せとなる。この材料組合せに対する摩耗形態マップを図 6.2.6 に示す。なお、トロリ線材料に従来通りの銅系金属を選定しなかった理由は、銅系トロリ線に対して領域①となり、かつ上記(1)~(2)の事項を満たすすり板材料がなかったためである。

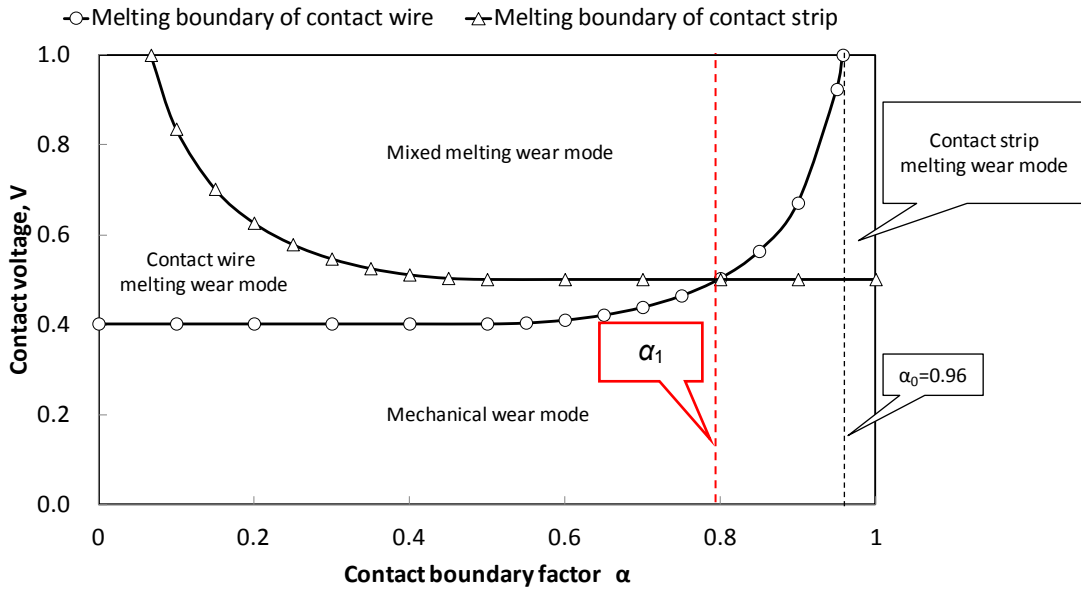


Figure 6.2.1 Wear mode map for combination of hard-drawn copper contact wire and iron-based sintered alloy contact strip

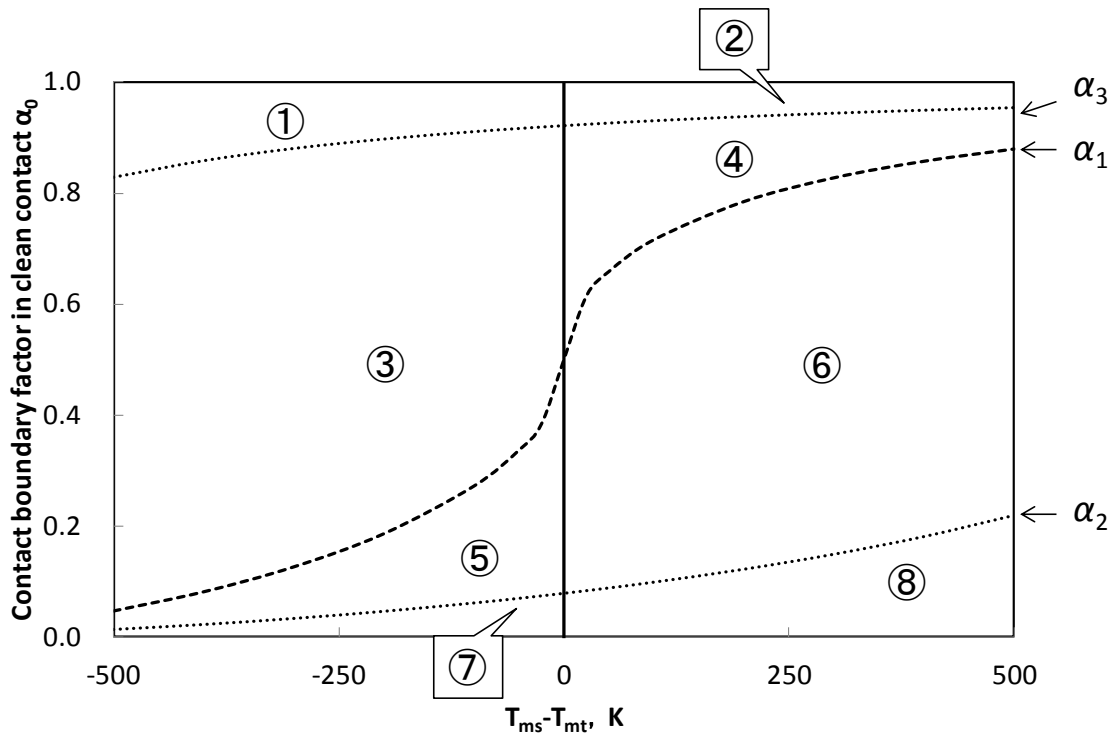
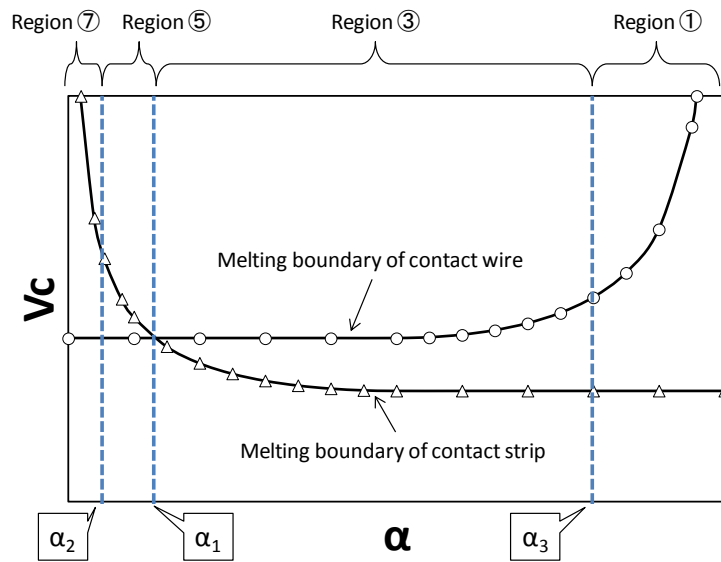
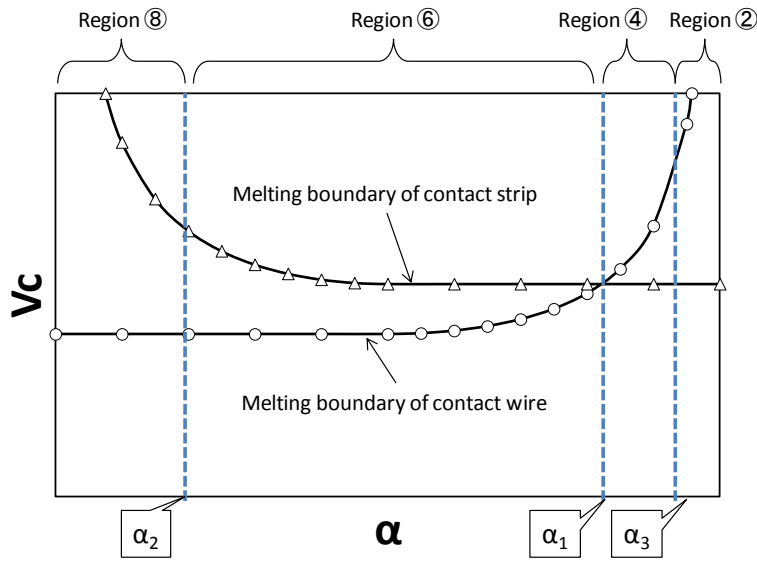


Figure 6.2.2 Material combination based on difference of melting point and contact boundary factor in clean contact



(a)  $T_{mt} > T_{ms}$



(b)  $T_{mt} < T_{ms}$

Region	Occurrence condition of wear mode		
	Contact wire melting wear mode	Mixed melting wear mode	Contact strip melting wear mode
①	Thick film on contact wire	Film on contact wire	Always occur
②	Film on contact wire	Film on contact wire	Always occur
③	Thick film on contact wire	Always occur	Always occur
④	Film on contact wire	Always occur	Always occur
⑤	Always occur	Always occur	Film on contact strip
⑥	Always occur	Always occur	Thick film on contact strip
⑦	Always occur	Film on contact strip	Film on contact strip
⑧	Always occur	Film on contact strip	Thick film on contact strip

Figure 6.2.3 Occurrence condition of wear mode in respective material combinations

Table 6.2.1 Material combination of wear specimen

Contact wire material		Hard-drawn copper	Hard-drawn copper	Nickel
Contact strip material		Nickel	Aluminum (A6063)	Iron-based sintered alloy
Melting point, K	Contact wire	1334	1334	1728
	Contact strip	1728	933	1646
Electric resistivity, $\mu\Omega\text{m}$	Contact wire	$1.77 \times 10^{-2}$	$1.77 \times 10^{-2}$	$6.2 \times 10^{-2}$
	Contact strip	$6.2 \times 10^{-2}$	$2.6 \times 10^{-2}$	0.40
Difference of melting point, K		394	-401	-82
Contact boundary factor in clean contact $\alpha_0$		0.77	0.59	0.86
Region in figure 6.2.2		⑥	③	①

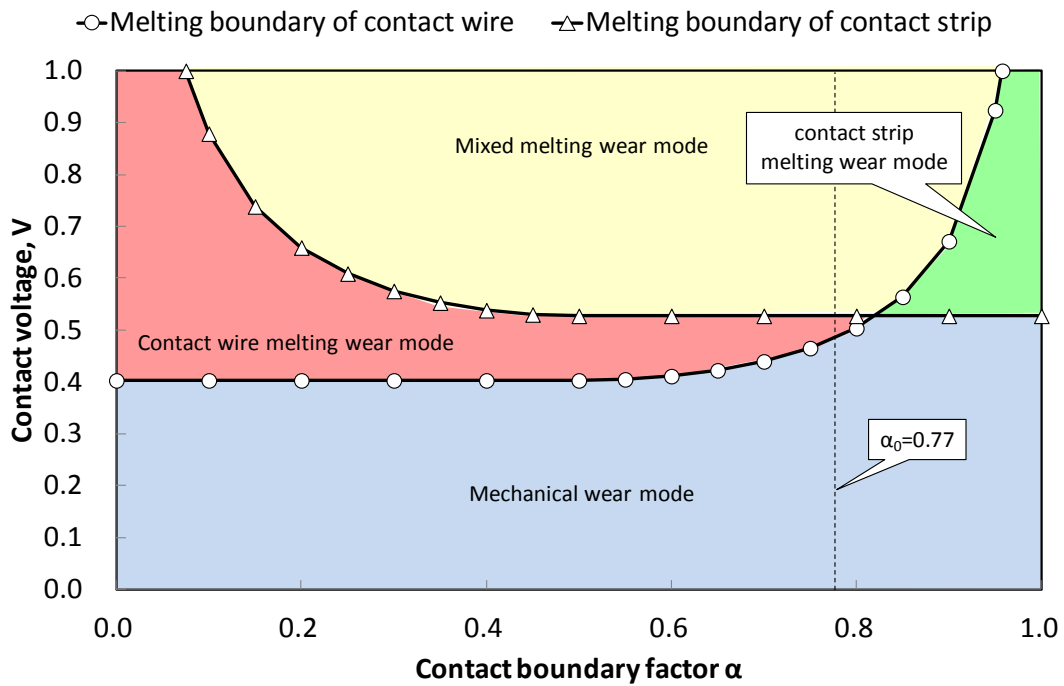


Figure 6.2.4 Wear mode map for combination of hard-drawn copper contact wire and nickel contact strip

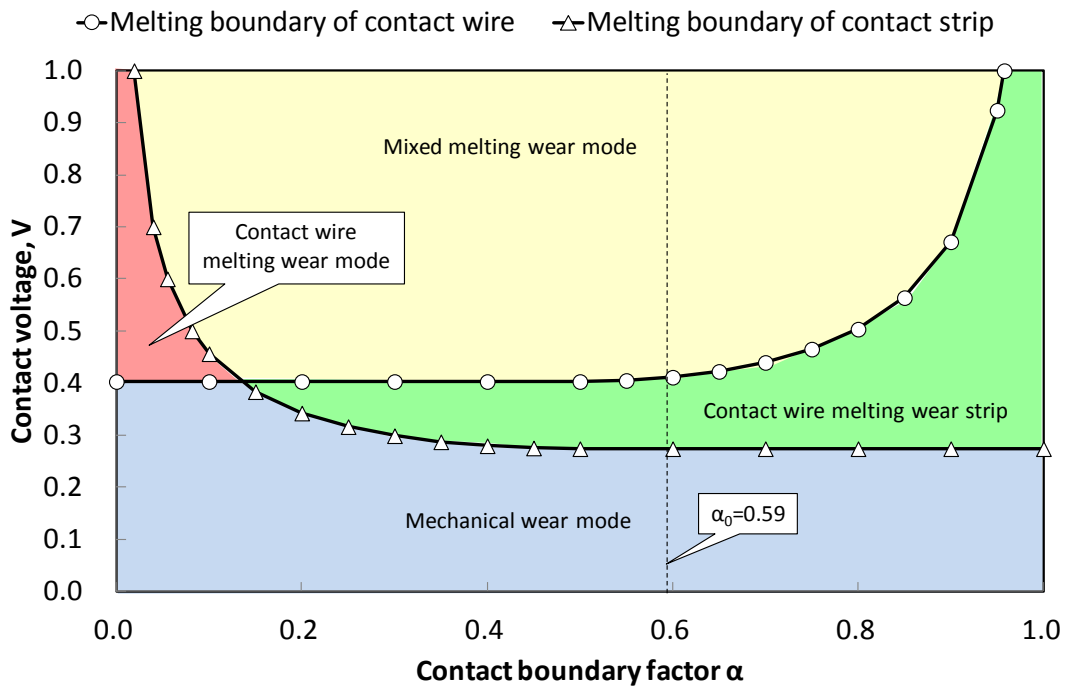


Figure 6.2.5 Wear mode map for combination of hard-drawn copper contact wire and aluminum contact strip

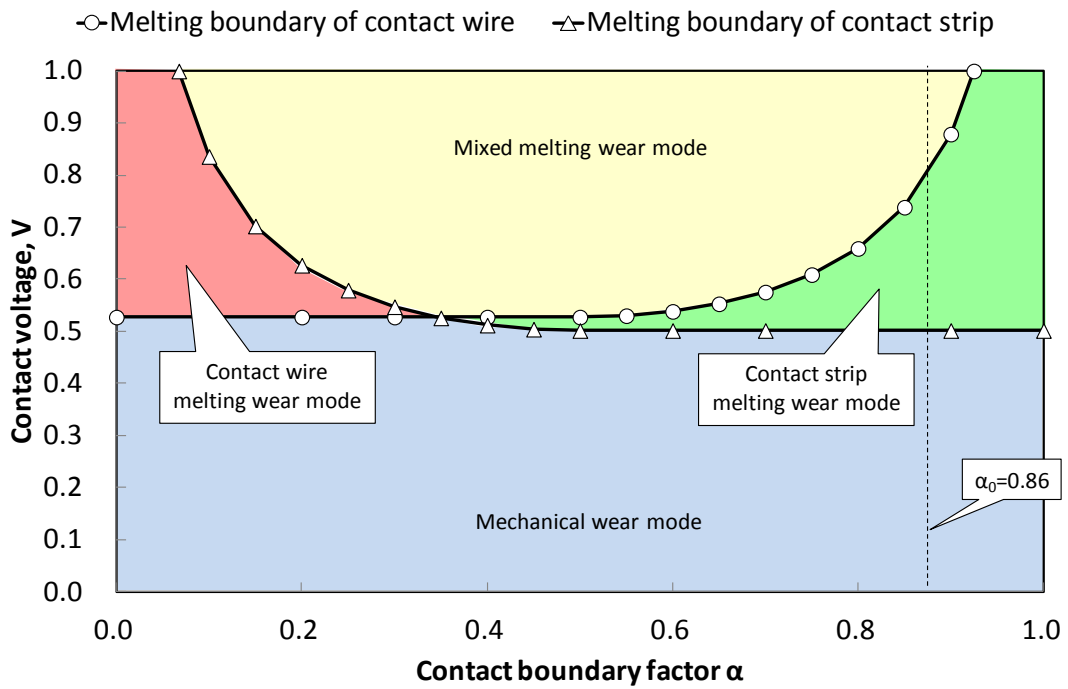


Figure 6.2.6 Wear mode map for combination of nickel contact wire and iron-based sintered alloy contact strip

## 6.3 試験方法

### 6.3.1 試験装置

試験に用いた装置は、第2章で開発した直動型摩耗試験機である。

### 6.3.2 試験条件

本試験の試験条件を表6.3.1に示す。試験条件の設定理由を以下に述べる。

#### (1) 見かけの接触面積

見かけの接触面積は第2章2.4.2節で述べたように、すり板試験片形状から  $10\text{mm} \times 10\text{mm} = 100\text{mm}^2$  となる。

#### (2) 接触力

接触力の設定理由については第3章と同一であり、2~80Nとした。

#### (3) しゅう動速度

しゅう動速度の設定理由については第3章と同一であり、200mm/sとした。

#### (4) しゅう動インターバル

しゅう動インターバルの設定理由については第3章と同一であり、約5秒とした。

#### (5) しゅう動回数

しゅう動回数の設定理由については第3章と同一であり、3000回とした。ただし、トロリ線やすり板の摩耗が著しい場合は、3000回未満で試験を停止する。

#### (6) しゅう動距離

しゅう動距離の設定理由については第3章と同一であり、1サイクルのしゅう動距離を250mmとした。

#### (7) 通電電圧

通電電圧および通電方向の設定理由については第3章と同一であり、電源電圧を100V、通電方向はトロリ線を陽極、すり板を陰極とした。

#### (8) 通電電流

第3章の摩耗試験の結果、摩耗特性に対する通電の影響が最も大きい電流条件は、100Aであった。摩耗形態の遷移現象把握を容易にするため、本章では通電電流を100Aとする。



### 6.3.3 測定項目および測定方法

#### (1) 試験前

第 3 章と同様，摩耗試験前に粗さ計を用いたトロリ線断面プロファイルを測定し，2 次元レーザー変位計ですり板の 3 次元形状を測定する．

#### (2) 試験中

摩耗試験中の測定項目はしゅう動速度，接触力，摩擦力，電流，接触電圧であり，測定方法は第 2 章と同一である．

#### (3) 試験後

第 3 章と同様，摩耗試験後に粗さ計を用いたトロリ線断面プロファイルを測定し，2 次元レーザー変位計ですり板の 3 次元形状を測定する．これによりトロリ線およびすり板の摩耗率を算出する．

また，直動型摩耗試験機からトロリ線およびすり板を取り外し，摩耗粒子を採取する．それらを走査型電子顕微鏡(SEM : Scanning electron microscope)を用いて観察し，X 線マイクロアナライザ(EPMA : Electron probe X-ray microanalyzer)を用いて元素分布像を撮影する．

### 6.3.4 試験手順

摩耗試験手順は，第 2 章で述べたものと同一である．

Table 6.3.1 Wear test conditions

Apparent contact area, mm <sup>2</sup>	100
Contact force, N	2~80
Sliding speed, mm/s	200
Friction interval, sec	Approximately 5.0
Sliding cycle	3,000
Sliding distance, mm	250
Voltage, V	DC 100
Current, A	100

## 6.4 試験結果および考察

### 6.4.1 硬銅トロリ線とニッケルすり板の組合せの場合

#### 6.4.1.1 統計的最大接触電圧と接触力の関係

硬銅トロリ線とニッケルすり板の組合せにおいて、電流 100A を通電した場合の統計的最大接触電圧と接触力の関係を図 6.4.1 に示す。ここで統計的最大接触電圧とは、通電しゅう動時に測定したトロリ線とすり板間の接触電圧波形について、平均値+3 $\sigma_e$ ( $\sigma_e$ : 標準偏差)としたものである。なお、同図の右縦軸には次式に示す  $\varphi$ - $\theta$  理論<sup>(8)</sup>より求めた接点最高温度  $T_{max}$ [K]、およびトロリ線の融点 1334K とすり板の融点 1728K を破線で示してある。

$$T_{max} = \left( \frac{V_c^2}{4L} + T_0^2 \right)^{1/2} \quad (6.9)$$

ここで、 $L$  はローレンツ数(=2.4 $\times 10^{-8}$ [(K/V)<sup>2</sup>])、 $V_c$  は統計的最大接触電圧[V]、 $T_0$  はバルク温度(室温)[K]である。

図 6.4.1 および図 6.2.4 の摩耗形態マップより、接触力 6N 近傍で接点最高温度が硬銅トロリ線の融点に達しトロリ線熔融摩耗形態となり、接触力 4N 以下で接点最高温度がニッケルすり板の融点に達し混合熔融摩耗形態となることが予測される。

#### 6.4.1.2 通電摩耗特性

硬銅トロリ線とニッケルすり板の組合せにおいて、電流 100A を通電した場合のトロリ線摩耗率、すり板比摩耗量および摩擦係数と接触力の関係を図 6.4.2～図 6.4.4 に示す。これらの図より、硬銅トロリ線とニッケルすり板の通電摩耗特性は、接触力条件によって以下の 3 つに分類することができる。

##### (1) 接触力 10N 以上の条件

図 6.4.2～図 6.4.4 より、通電かつ接触力 10N 以上の条件において、トロリ線摩耗率やすり板比摩耗量、および摩擦係数は接触力に依存せず、ほぼ一定の値となることがわかる。特徴としては、摩擦係数の平均値が約 0.9 と比較的大きく、トロリ線摩耗率の平均値も 4.6 $\times 10^{-6}$  mm<sup>2</sup>/N $\cdot$  cycle と大きいことが挙げられる。

この条件におけるトロリ線とすり板の摩耗面および摩耗粒子の、典型的な SEM 写真および EPMA 写真を図 6.4.5 に示す。なお、成分分析は硬銅トロリ線の主成分である Cu、ニッケルすり板の主成分である Ni について実施した。図 6.4.5(a)(b)より、トロリ線摩耗面にはしゅう動方向に塑性流動した痕が確認でき、すり板表面には Cu が移着していることがわかる。なお、いずれの摩耗面にも熔融した痕は確認されなかった。図 6.4.5(c)より、摩耗粒子はロール状の形状をしており、成分分析結果より主成分は Cu であることがわかる。笹田<sup>(9)</sup>の報告では、無通電時においてもロール状の摩耗粒子が観察されることから、トロリ線熔融摩耗形態特有の摩耗粒子ではなく、機械的摩耗形態でも観察される可能性は十分にある。

銅とニッケルの組合せでは、凝着が著しいために摩擦係数が大きく、トロリ線表面は凝着によ

って塑性流動し摩耗する。トロリ線からすり板に移着した Cu が高摩擦力によって伸され、相對運動をするトロリ線とすり板に巻き込まれてロール状の摩耗粒子が発生したと考える。

以上の特徴は、第 3 章で觀察された機械的摩耗形態とは異なるが、その摩耗機構は機械的な凝着によることから、機械的摩耗形態とする。

## (2) 接触力 6N 近傍の条件

図 6.4.2 および図 6.4.4 より、通電かつ接触力 6N 近傍の条件において、トロリ線摩耗率および摩擦係数に極大値が存在することがわかる。

接触力 6N 近傍の条件におけるトロリ線とすり板の摩耗面および摩耗粒子の、典型的な SEM 写真および EPMA 写真を図 6.4.6 に示す。トロリ線表面の Cu が溶融しており、すり板表面に溶融した Cu の移着物が堆積し、摩耗粒子はロール状である。なお、すり板表面の Ni に溶融痕は確認できなかった。

以上の傾向は、第 3 章および第 4 章で確認されたトロリ線溶融摩耗形態の特徴と一致する。

## (3) 接触力 4N 未満の条件

図 6.4.3 より、通電かつ接触力 4N 未満の条件では、接触力の減少に伴いすり板比摩耗量が著しく増加することがわかる。一方で図 6.4.2 および図 6.4.4 より、同条件では接触力の減少に伴いトロリ線摩耗率および摩擦係数は減少する。

接触力 4N 未満の条件におけるトロリ線とすり板の摩耗面および摩耗粒子の、典型的な SEM 写真および EPMA 写真を図 6.4.7 に示す。トロリ線およびすり板の摩耗面はいずれも溶融痕が觀察され、成分分析から Cu および Ni が同程度検出されたことから、両材料が溶融したことがわかる。また、摩耗粒子はロール状のものや球形のものが觀察され、その成分も Cu および Ni が同程度検出された。

以上のことから、硬銅トロリ線とニッケルすり板の組合せにおいて、十分に接触力が小さい条件では、第 3 章および第 4 章で確認された摩耗形態とは異なり、両材料が溶融していることから、混合溶融摩耗形態とする。

6.4.1.1 節では、統計的 maximum 接触電圧と接触力の関係および摩耗形態マップより、接触力 6N 近傍でトロリ線溶融摩耗形態、接触力 4N 以下で混合溶融摩耗形態となることを予測したが、本節の試験結果より摩耗形態予測の妥当性が示された。

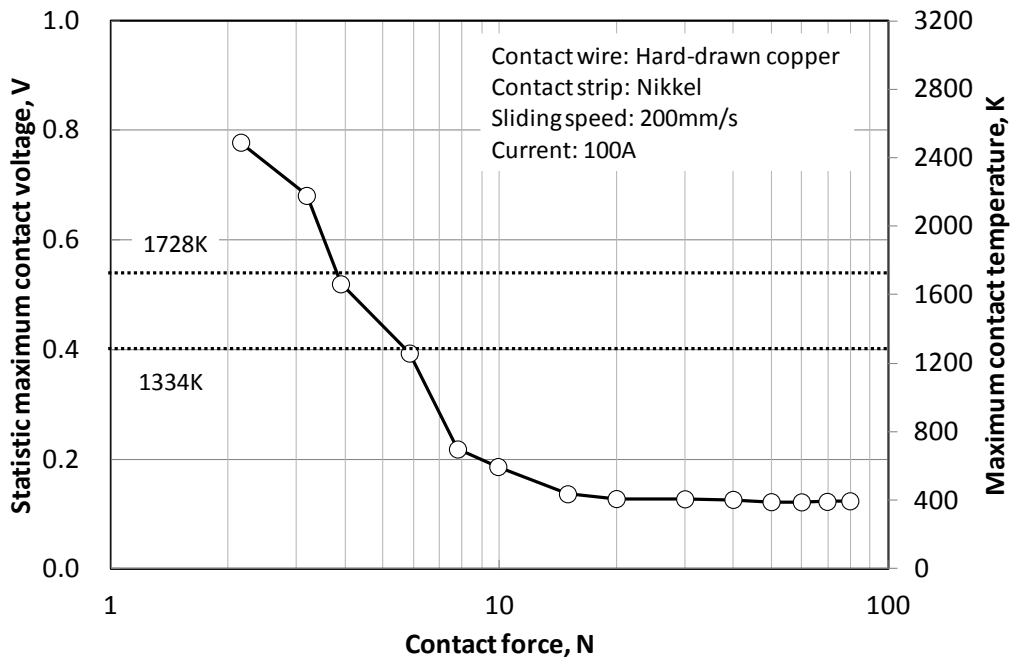


Figure 6.4.1 Relationship between contact force and statistic maximum contact voltage  
(Contact wire: hard-drawn copper, contact strip: nickel)

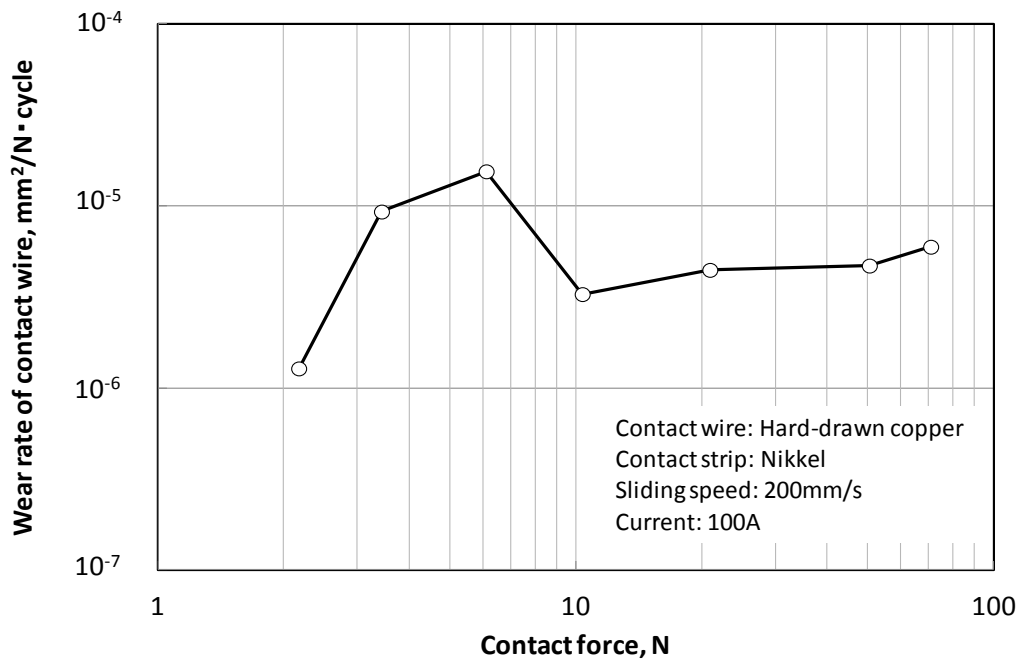


Figure 6.4.2 Relationship between contact force and wear rate of contact wire  
(Contact wire: hard-drawn copper, contact strip: nickel)

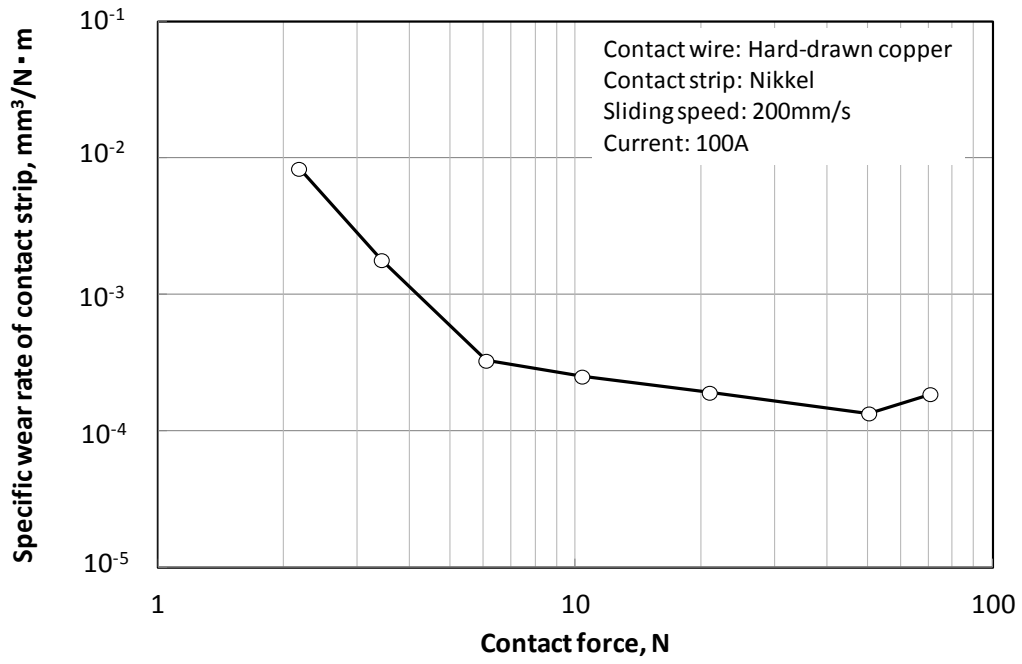


Figure 6.4.3 Relationship between contact force and specific wear rate of contact strip (Contact wire: hard-drawn copper, contact strip: nickel)

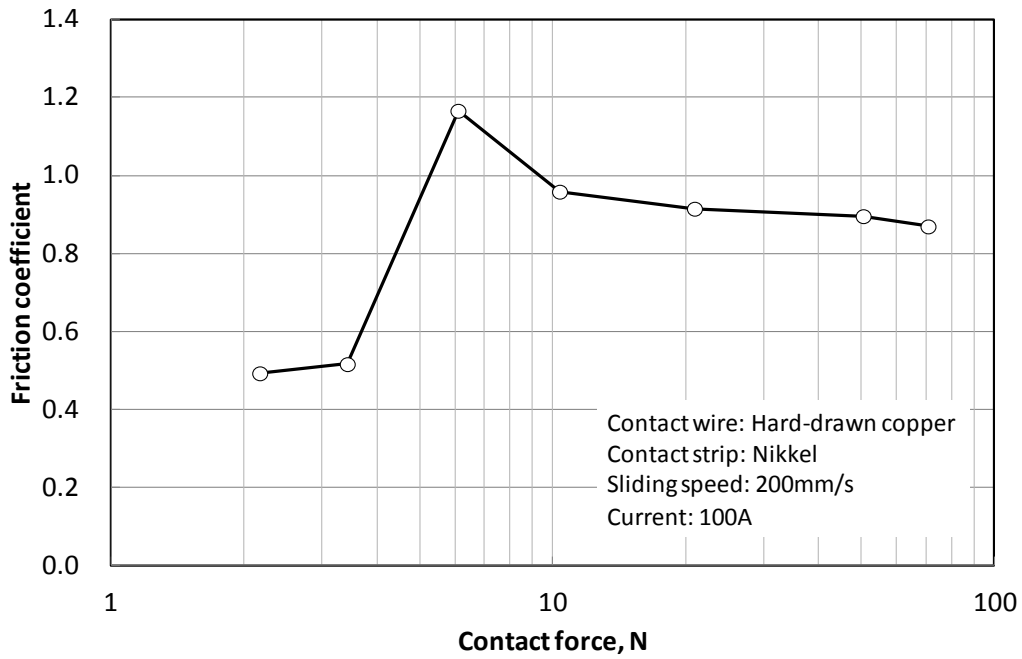
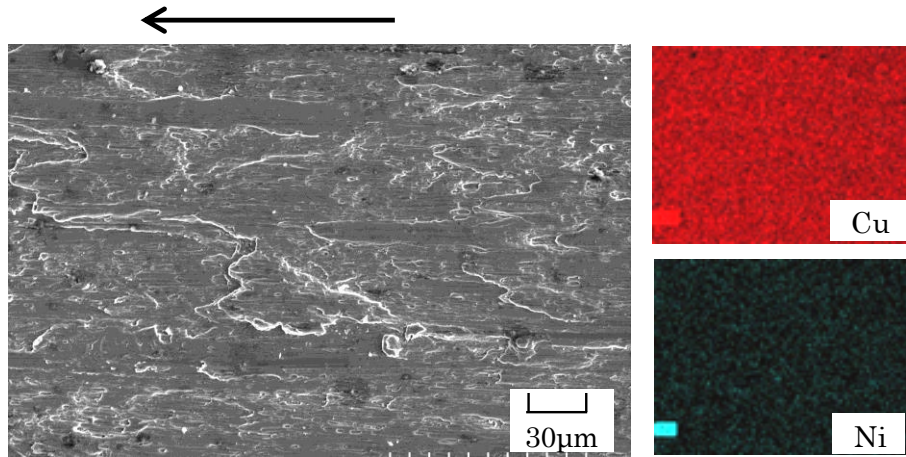
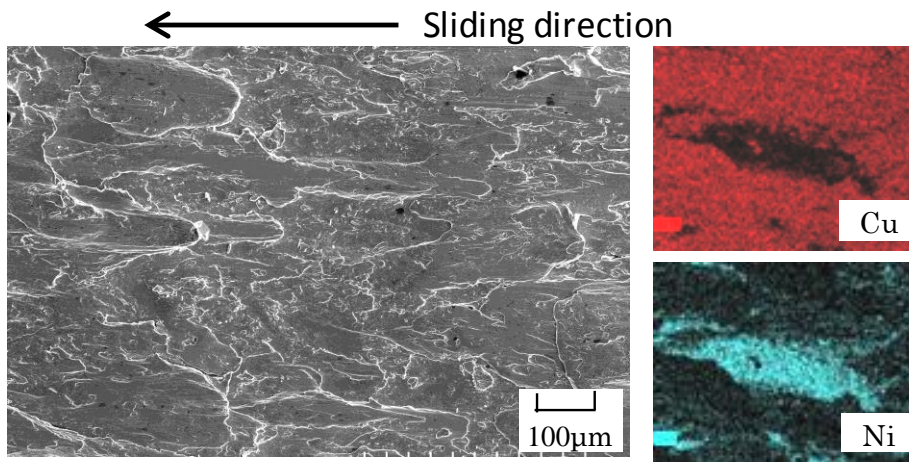


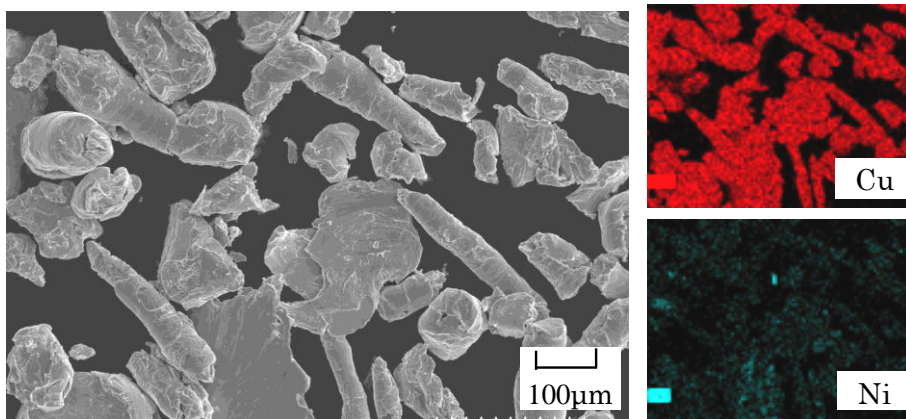
Figure 6.4.4 Relationship between contact force and friction coefficient (Contact wire: hard-drawn copper, contact strip: nickel)



(a) Wear surface of contact wire



(b) Wear surface of contact strip



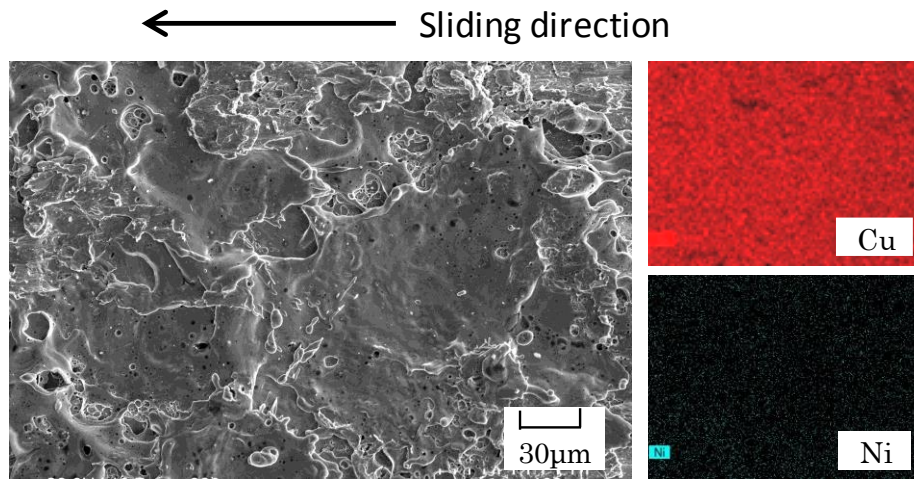
(c) Wear particle

Figure 6.4.5 SEM-EPMA pictures of wear surface and wear particle

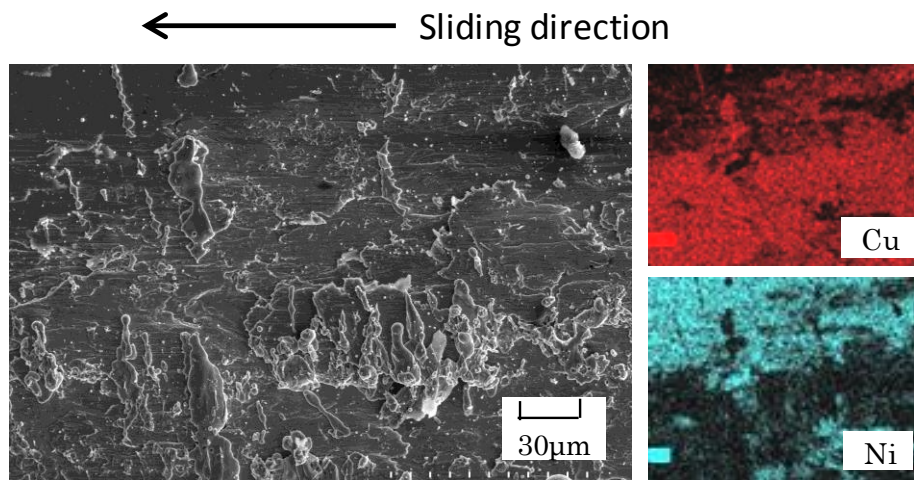
(Contact force: 50N, sliding speed: 200mm/s, current: 100A)

Arrows in this figure show the sliding direction of the contact strip.

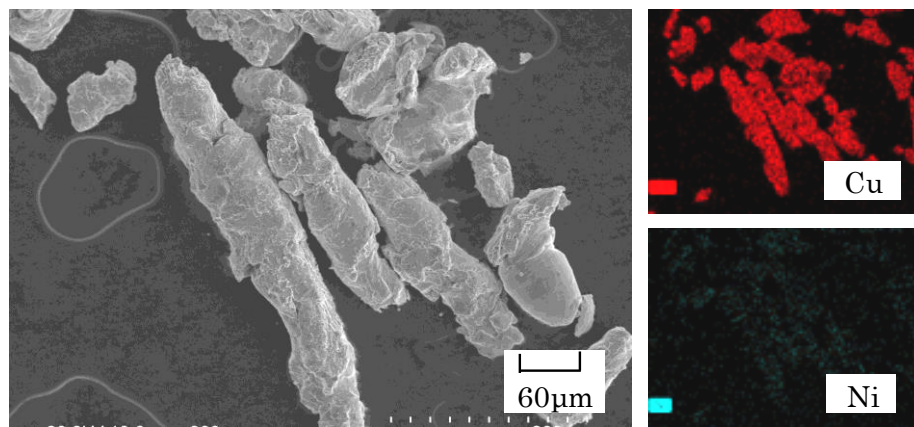




(a) Wear surface of contact wire



(b) Wear surface of contact strip

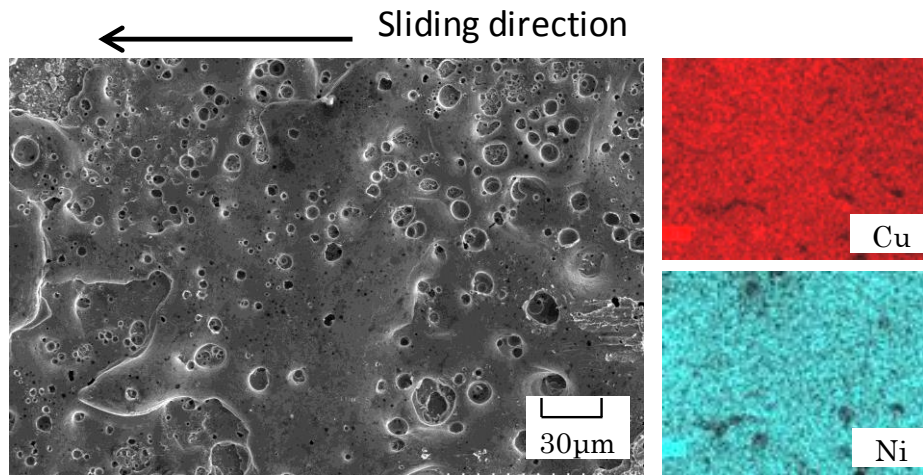


(c) Wear particle

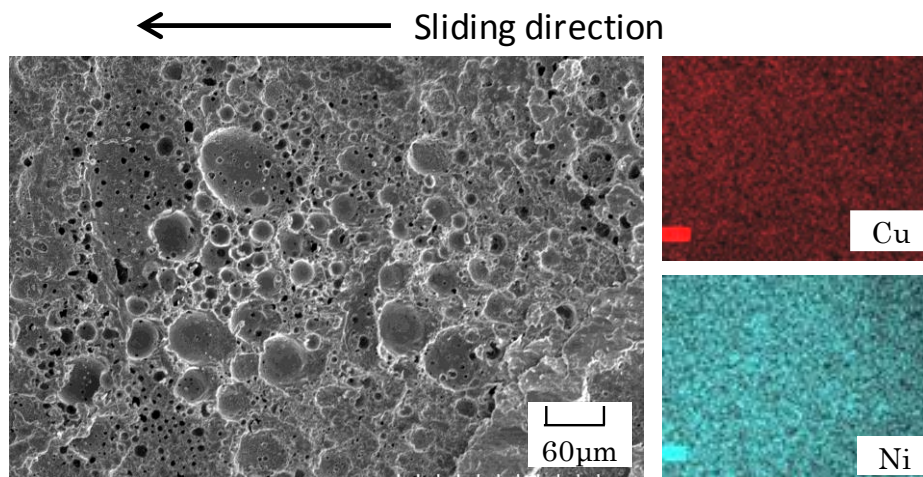
Figure 6.4.6 SEM-EPMA pictures of wear surface and wear particle

(Contact force: 6.1N, sliding speed: 200mm/s, current: 100A)

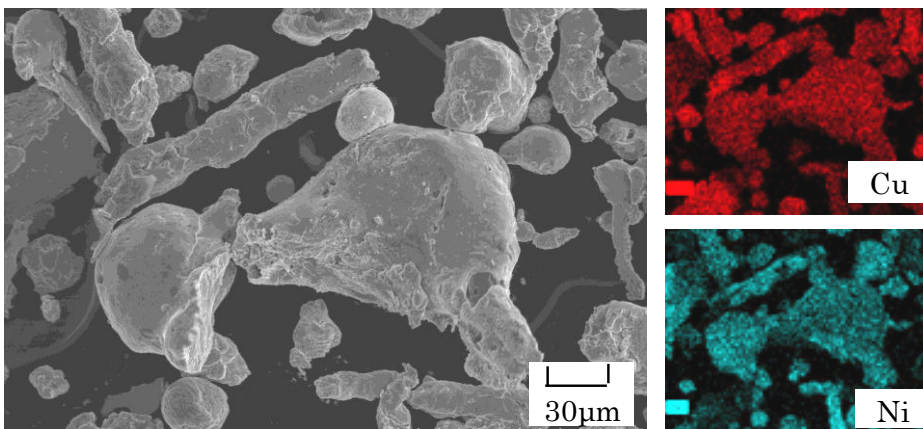
Arrows in this figure show the sliding direction of the contact strip.



(a) Wear surface of contact wire



(b) Wear surface of contact strip



(c) Wear particle

Figure 6.4.7 SEM-EPMA pictures of wear surface and wear particle  
 (Contact force: 2.2N, sliding speed: 200mm/s, current: 100A)  
 Arrows in this figure show the sliding direction of the contact strip.



## 6.4.2 硬銅トロリ線とアルミニウムすり板の組合せの場合

### 6.4.2.1 統計的最大接触電圧と接触力の関係

硬銅トロリ線とアルミニウムすり板の組合せにおいて、電流 100A を通電した場合の統計的最大接触電圧と接触力の関係を図 6.4.8 に示す。なお、同図の右縦軸には式(6.9)より求めた接点最高温度  $T_{max}[K]$ 、およびトロリ線の融点 1334K とすり板の融点 933K を破線で示してある。

図 6.4.8 および図 6.2.5 の摩耗形態マップより、接触力 6N 近傍で接点最高温度がアルミニウムすり板の融点に達しすり板熔融摩耗形態となり、接触力 5N 以下で接点最高温度が硬銅トロリ線の融点に達し混合熔融摩耗形態となることが予測される。

### 6.4.2.2 通電摩耗特性

硬銅トロリ線とアルミニウムすり板の組合せにおいて、電流 100A を通電した場合のトロリ線摩耗率、すり板比摩耗量および摩擦係数と接触力の関係を図 6.4.9～図 6.4.11 に示す。なお、図 6.4.9 のトロリ線摩耗率に関しては、接触力 5N 未満の条件で負の値となったため、両対数グラフでは表現できず、図 6.4.9(b)に片対数グラフを追加した。これらの図より、硬銅トロリ線とアルミニウムすり板の通電摩耗特性は、接触力条件によって以下の 3 つに分類することができる。

#### (1) 接触力 10N 以上の条件

図 6.4.9～図 6.4.11 より、通電かつ接触力 10N 以上の条件において、トロリ線摩耗率やすり板比摩耗量、および摩擦係数は接触力に依存せず、ほぼ一定の値となることがわかる。特徴としては、摩擦係数の平均値が約 0.37 と比較的小さく、すり板比摩耗量の平均値が  $1.0 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$  と比較的大きいことが挙げられる。

この条件におけるトロリ線とすり板の摩耗面および摩耗粒子の、典型的な SEM 写真および EPMA 写真を図 6.4.12 に示す。なお、成分分析は硬銅トロリ線の主成分である Cu、アルミニウムすり板の主成分である Al について実施した。図 6.4.12(a)(b)より、トロリ線およびすり板の摩耗面にはしゅう動方向にせん断された痕が確認でき、トロリ線表面には Al が移着していることがわかる。なお、いずれの摩耗面にも熔融した痕は確認されなかった。図 6.4.12(c)より、摩耗粒子は塊状の形状をしているが、成分分析結果より Cu と Al が混合したものではないことがわかる。なお、Cu の摩耗粒子も散見されるが、大部分は Al の摩耗粒子であった。

トロリ線およびすり板表面に熔融痕がないこと、摩耗粒子が塊状であるという特徴は、第 3 章および第 4 章で観察された機械的摩耗形態と一致する。

#### (2) 接触力 5N 近傍の条件

図 6.4.9(a)および図 6.4.10 より、通電かつ接触力 5N 近傍の条件では、トロリ線摩耗率およびすり板比摩耗量が増加する。一方で、図 6.4.11 の摩擦係数においては、通電かつ接触力 5N 近傍と接触力 10N 以上の条件で大きな差はない。

接触力 5N 近傍の条件におけるトロリ線とすり板の摩耗面および摩耗粒子の、典型的な SEM 写真および EPMA 写真を図 6.4.13 に示す。トロリ線およびすり板の摩耗面はいずれも熔融痕が観察され、成分分析から Cu および Al が同程度検出されることから、両材料が熔融したことがわかる。また、摩耗粒子は塊状のものと熔融した Cu と Al の混合物が観察される。

トロリ線およびすり板のいずれも溶融していることから、混合溶融摩耗形態とする。

### (3) 接触力 5N 未満の条件

図 6.4.9(b)および図 6.4.10 より、通電かつ接触力 5N 未満の条件では、接触力の減少に伴いすり板比摩耗量が著しく増加するが、トロリ線摩耗率は負の値を示すことがわかる。また、図 6.4.11 より、同条件では摩擦係数が著大になることがわかる。

接触力 5N 未満の条件におけるトロリ線とすり板の摩耗面および摩耗粒子の、典型的な SEM 写真および EPMA 写真を図 6.4.14 に示す。すり板表面には主に Al が溶融した痕が観察され、トロリ線表面には溶融した Al が移着していることがわかる。ただし、トロリ線表面の Cu にも溶融痕を観察することができた。また、摩耗粒子は剥片のものや球形のものが観察され、その主成分は Al であった。

硬銅トロリ線とアルミニウムすり板の組合せでは融点の差が大きいため、トロリ線よりもすり板の溶融量が多いことは十分に考えられる。さらに、直動摩耗試験機による摩耗試験では同一接触力のしゅう動を繰り返すため、大量の Al 溶融物がトロリ線に移着し、断面プロファイル測定によって算出するトロリ線摩耗率は負の値を示したと考える。また、トロリ線表面が Al で覆われることで、すり板の Al との「ともがね摩擦」となることで、摩擦係数が著大になったと考える。

トロリ線およびすり板のいずれも溶融していることから、混合溶融摩耗形態の一種と考える。

6.4.2.1 節では、統計的最大接触電圧と接触力の関係および摩耗形態マップより、接触力 6N 近傍ですり板溶融摩耗形態、接触力 4N 以下で混合溶融摩耗形態となることを予測したが、本節の試験結果では、5N 以下の条件で混合溶融摩耗形態となった。これは、接触力 5N 近傍の条件でアークが多少発生しており、接触電圧が局所的に 10V に達したためである。しかしながら、予測した摩耗形態遷移条件と実験で確認した摩耗形態遷移条件はほぼ一致していると考えられる。

アルミニウムすり板はパンタグラフの補助すり板として実際に使用されており、文献(6, 7)ではアルミニウムすり板と硬銅トロリ線が接触する箇所において、トロリ線摩耗が著しいと報告されている。また同文献では、パンタグラフの主すり板として使用している材料はカーボン系すり板であり、その電気抵抗率はアルミニウムすり板よりも十分大きいため、パンタグラフが集電する電流のほとんどはアルミニウムすり板に集中することも報告されている。本節の試験結果より、硬銅トロリ線とアルミニウムすり板の接触において、大電流かつ小接触力の条件ではトロリ線およびすり板の表面が溶融する混合溶融摩耗形態となるため、トロリ線表面が軟化し摩耗が増大することは十分に説明することができる。

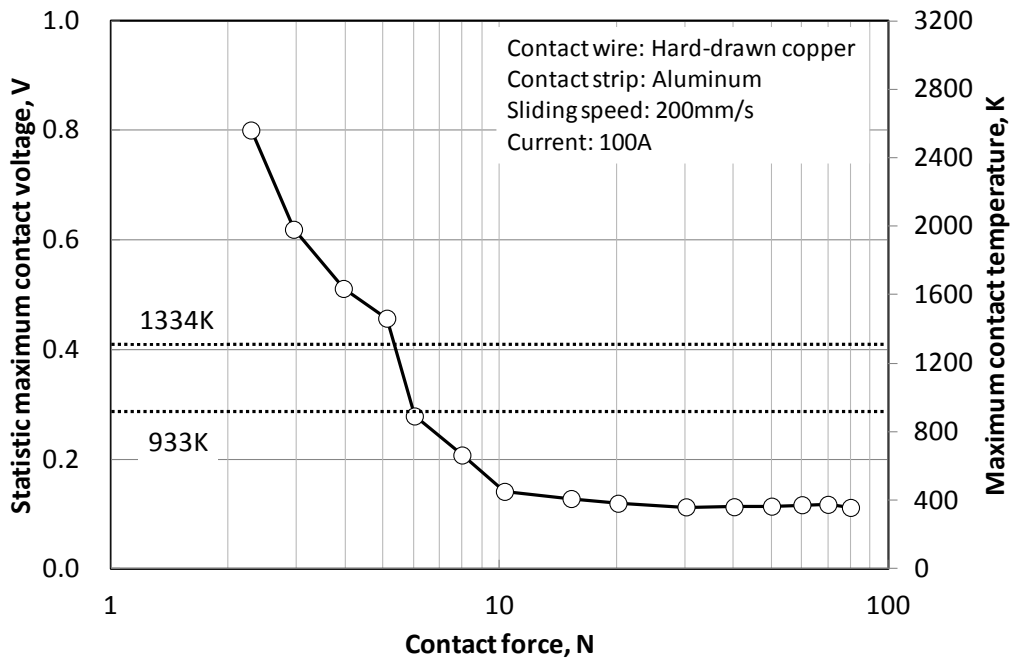
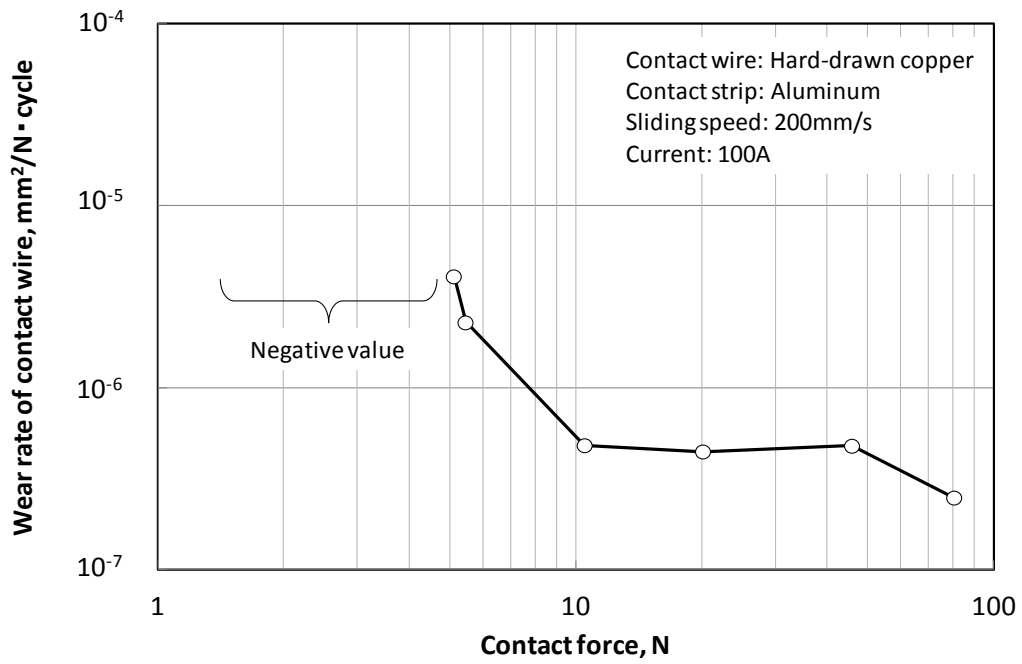
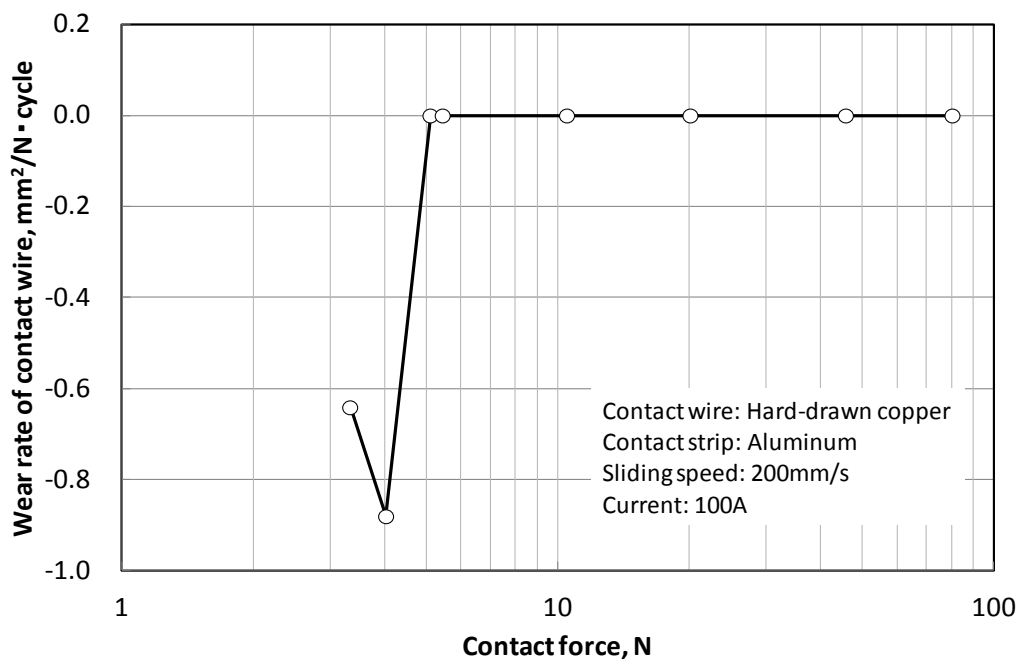


Figure 6.4.8 Relationship between contact force and statistic maximum contact voltage  
 (Contact wire: hard-drawn copper, contact strip: aluminum)



(a) Log-log plot



(b) Semi-log plot

Figure 6.4.9 Relationship between contact force and wear rate of contact wire  
(Contact wire: hard-drawn copper, contact strip: aluminum)

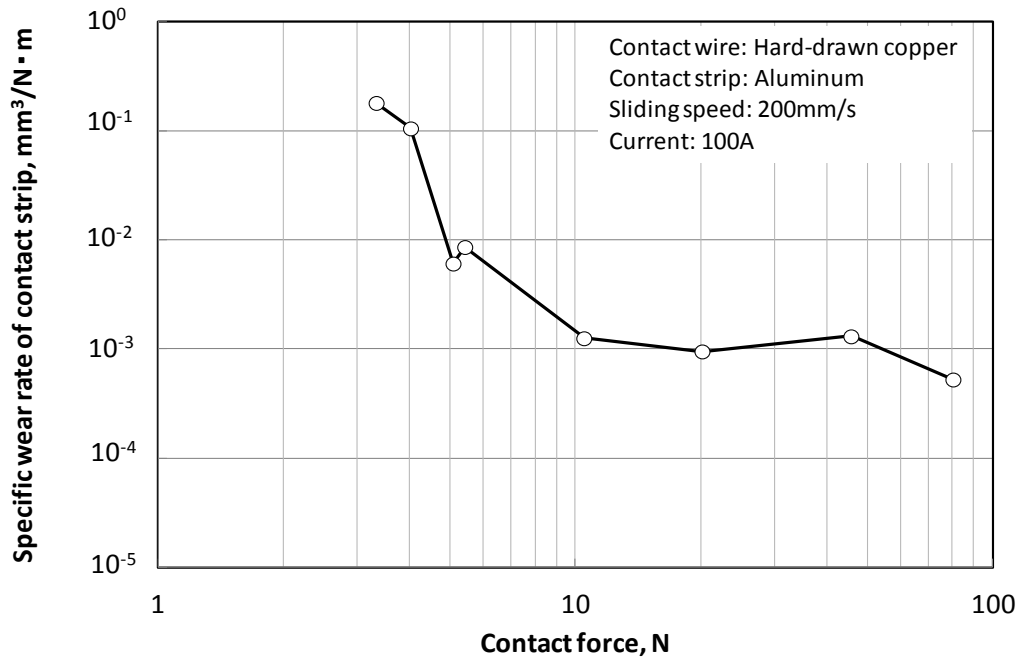


Figure 6.4.10 Relationship between contact force and specific wear rate of contact strip  
(Contact wire: hard-drawn copper, contact strip: aluminum)

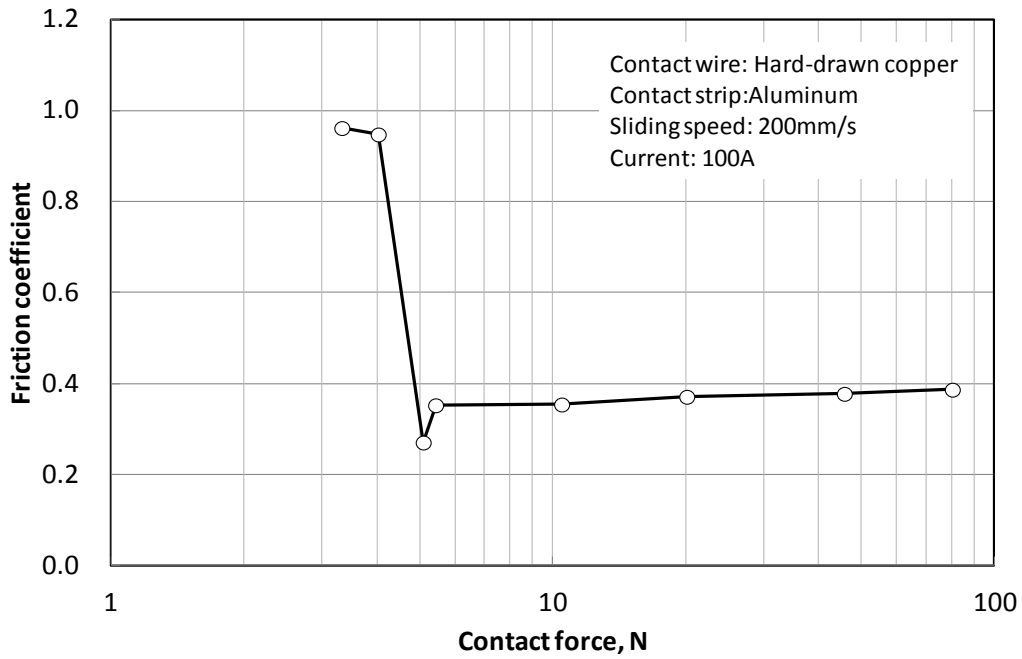
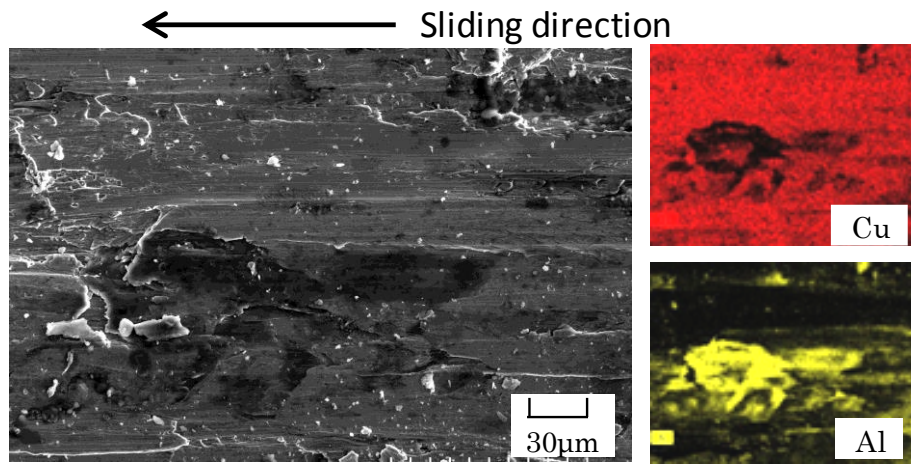
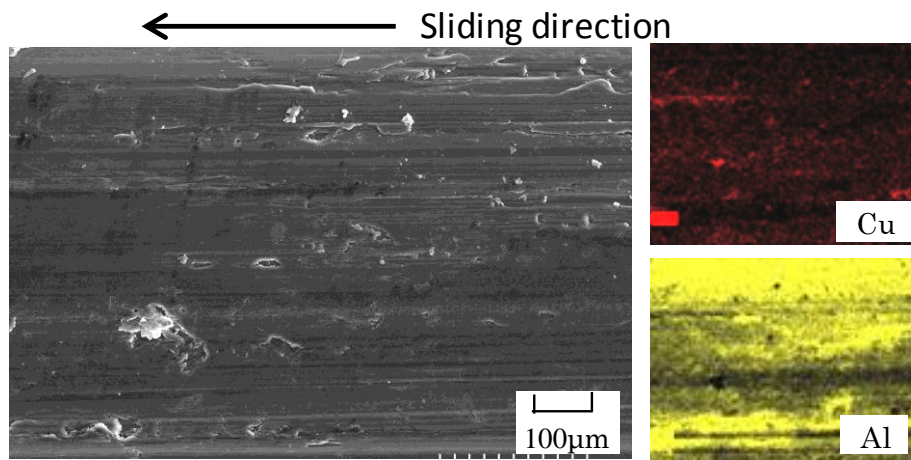


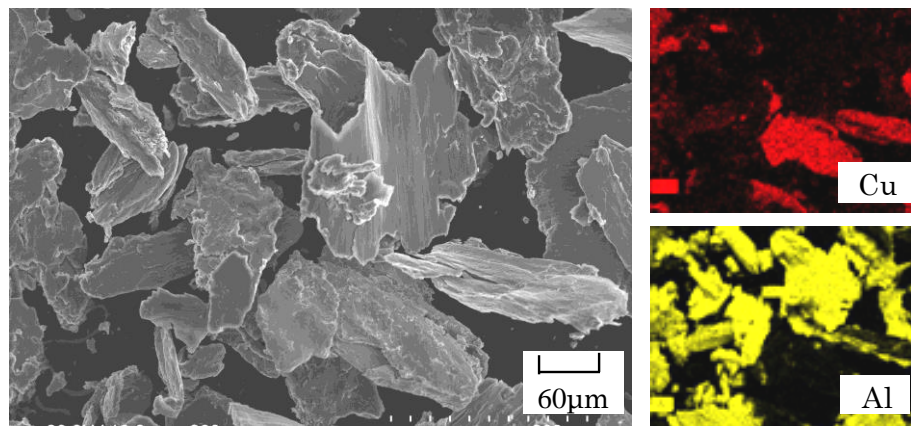
Figure 6.4.11 Relationship between contact force and friction coefficient  
(Contact wire: hard-drawn copper, contact strip: aluminum)



(a) Wear surface of contact wire



(b) Wear surface of contact strip



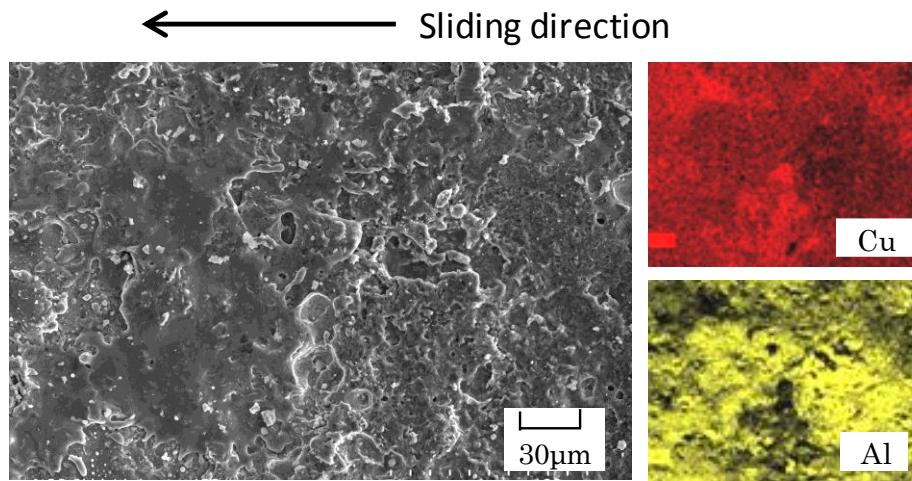
(c) Wear particle

Figure 6.4.12 SEM-EPMA pictures of wear surface and wear particle

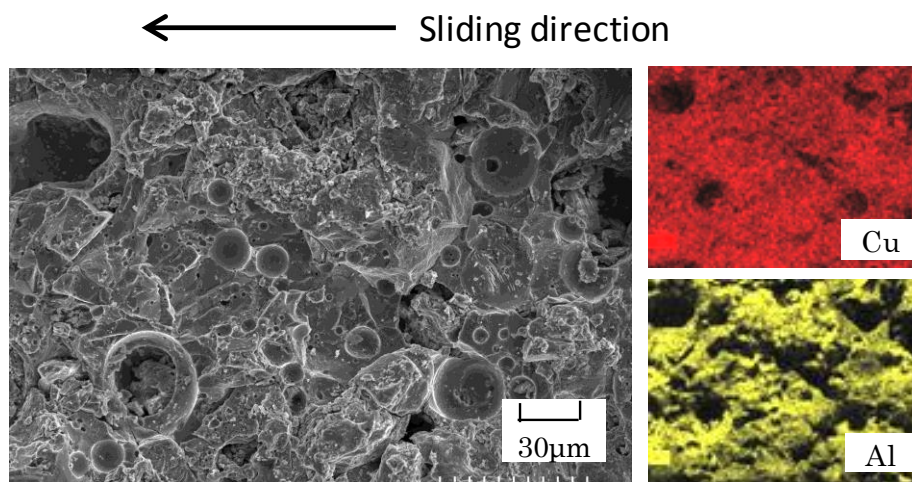
(Contact force: 45N, sliding speed: 200mm/s, current: 100A)

Arrows in this figure show the sliding direction of the contact strip.

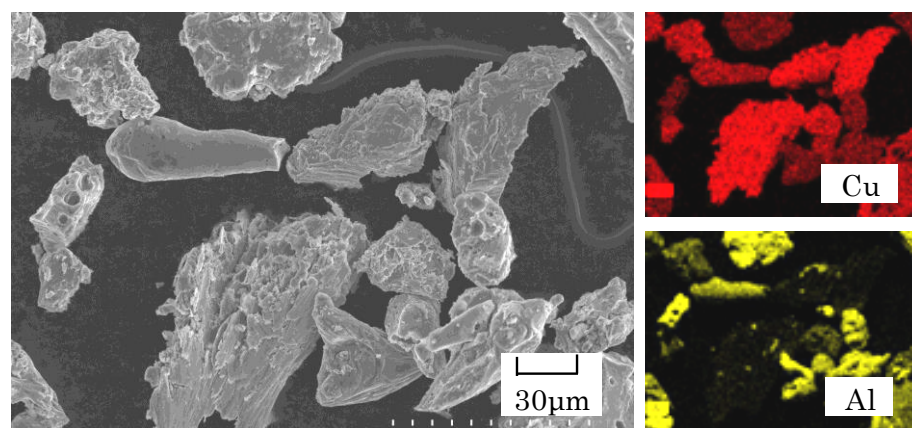




(a) Wear surface of contact wire



(b) Wear surface of contact strip

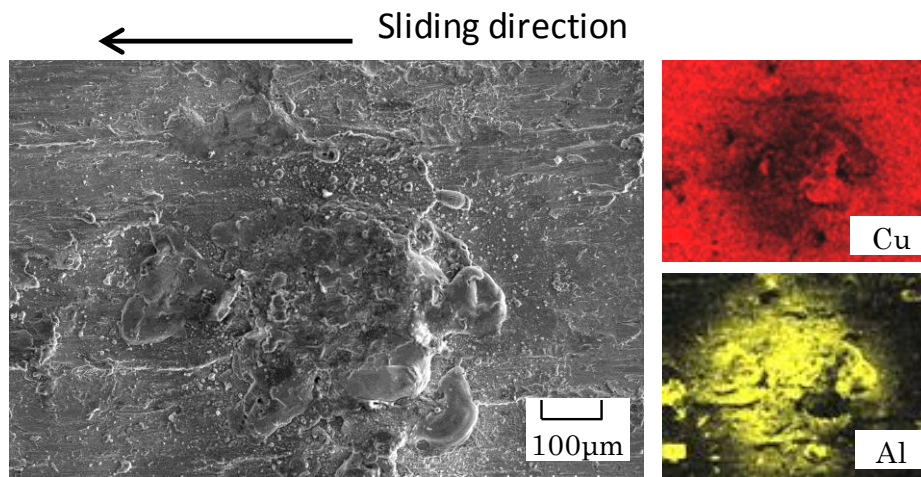


(c) Wear particle

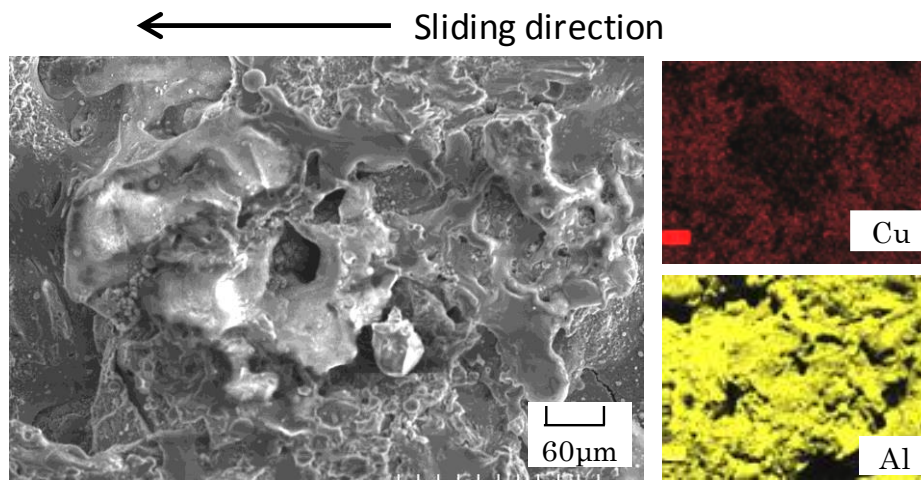
Figure 6.4.13 SEM-EPMA pictures of wear surface and wear particle

(Contact force: 5.1N, sliding speed: 200mm/s, current: 100A)

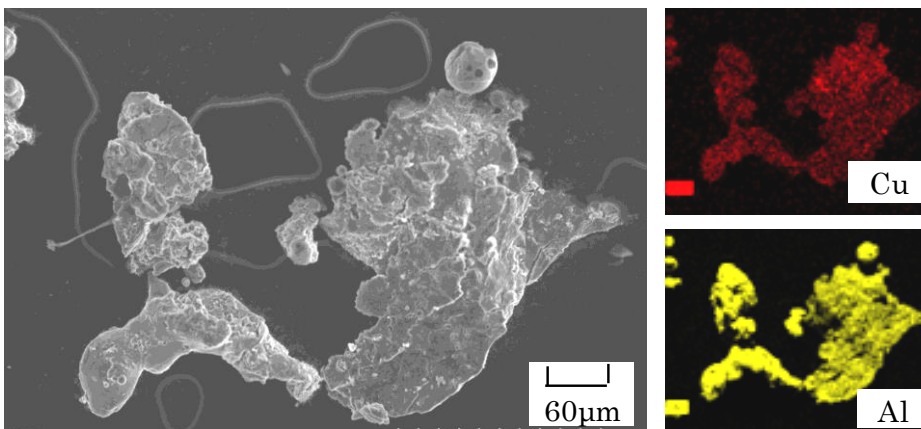
Arrows in this figure show the sliding direction of the contact strip.



(a) Wear surface of contact wire



(b) Wear surface of contact strip



(c) Wear particle

Figure 6.4.14 SEM-EPMA pictures of wear surface and wear particle

(Contact force: 3.3N, sliding speed: 200mm/s, current: 100A)

Arrows in this figure show the sliding direction of the contact strip.



### 6.4.3 ニッケルトロリ線と鉄系焼結合金すり板の組合せの場合

#### 6.4.3.1 統計的最大接触電圧と接触力の関係

ニッケルトロリ線と鉄系焼結合金すり板の組合せにおいて、電流 100A を通電した場合の統計的最大接触電圧と接触力の関係を図 6.4.15 に示す。なお、接触力 6N 未満ではアークが多発したため統計的接触電圧が算出できなかった。同図の右縦軸には式(6.9)より求めた接点最高温度  $T_{max}[K]$ 、およびトロリ線の融点 1728K とすり板の融点 1646K を破線で示してある。

図 6.4.15 より、トロリ線とすり板の融点差が小さいため、接触力 15N 近傍で接点最高温度がトロリ線とすり板の融点に達する。ただし、図 6.2.6 の摩耗形態マップより、清浄時接触境界係数  $\alpha_0$  が大きいと、トロリ線表面に厚い被膜抵抗が存在しない限り、すり板溶融摩耗形態となることが予測される。さらに、すり板が溶融することですり板表面に被膜抵抗が発生するため、接触境界係数  $\alpha$  は増加する傾向にあり、混合溶融摩耗は発生しないことが予測される。

#### 6.4.3.2 通電摩耗特性

ニッケルトロリ線と鉄系焼結合金すり板の組合せにおいて、電流 100A を通電した場合のトロリ線摩耗率、すり板比摩耗量および摩擦係数と接触力の関係を図 6.4.16～図 6.4.18 に示す。なお、図 6.4.16 のトロリ線摩耗率に関しては、接触力 20N 未満の条件で負の値となったため、両対数グラフでは表現できず、図 6.4.16(b)に片対数グラフを追加した。これらの図より、ニッケルトロリ線と鉄系焼結合金すり板の通電摩耗特性は、接触力条件によって以下の 2 つに分類することができる。

##### (1) 接触力 20N 以上の条件

図 6.4.16～図 6.4.18 より、通電かつ接触力 20N 以上の条件において、トロリ線摩耗率やすり板比摩耗量、および摩擦係数は接触力に依存せず、ほぼ一定の値となることがわかる。

この条件におけるトロリ線とすり板の摩耗面および摩耗粒子の、典型的な SEM 写真および EPMA 写真を図 6.4.19 に示す。なお、成分分析はニッケルトロリ線の主成分である Ni、鉄系焼結合金すり板の主成分である Fe について実施した。図 6.4.19(a)(b)より、トロリ線およびすり板の摩耗面にはしゅう動方向にせん断された痕が確認でき、トロリ線表面には Fe が移着していることがわかる。なお、いずれの摩耗面にも溶融した痕は確認されなかった。図 6.4.19(c)より、摩耗粒子は  $\mu\text{m}$  オーダー以下の微細な塊状の形状をしていることがわかる。成分分析結果より摩耗粒子は Ni と Fe の混合物であることがわかる。

トロリ線およびすり板表面に溶融痕がないこと、摩耗粒子が微細であるが塊状であるという特徴は、機械的摩耗形態と一致する。

##### (2) 接触力 15N 以下の条件

図 6.4.16(b)より、通電かつ接触力 15N 以下の条件では、接触力の減少に伴いトロリ線摩耗率は減少し、負の値を示すことがわかる。また、図 6.4.18 より、同接触力条件では摩擦係数が比較的小さくなることがわかる。一方で図 6.4.17 より、すり板比摩耗量は接触力の減少に伴い増加することがわかる。

接触力 15N 以下の条件におけるトロリ線とすり板の摩耗面および摩耗粒子の、典型的な SEM

写真および EPMA 写真を図 6.4.20 に示す。図 6.4.20(a)(b)より、すり板表面の Fe が溶融しており、トロリ線表面に溶融した Fe が移着している。なお、トロリ線表面の Ni に溶融痕は確認できなかった。図 6.4.20(c)より、摩耗粒子は数百  $\mu\text{m}$  オーダーの剥片であり、その主成分は Fe である。摩耗粒子には溶融痕が確認できることから、溶融したすり板がトロリ線表面に移着し伸され、トロリ線表面から脱落したものと推測される。

以上の傾向は第 3 章および第 4 章で確認されたすり板溶融摩耗形態の特徴と一致する。

6.4.3.1 節では、統計的最大接触電圧と接触力の関係および摩耗形態マップより、接触力 15N 以下ですり板溶融摩耗形態となり、トロリ線溶融摩耗形態や混合溶融摩耗形態は発生しないと予測したが、本節の試験結果より摩耗形態予測の妥当性が示された。このことにより、トロリ線の融点ですり板よりも高く、かつトロリ線の電気抵抗率がすり板よりも小さく清浄時接触境界係数  $\alpha_0$  が十分大きい条件では、接触電圧によらずトロリ線は溶融せず、極大摩耗も発生しないことが実験的に明らかとなった。

6.4 節の試験結果および考察より、異なる材料の組合せにおいても摩耗形態マップが適用可能であることが実験的に検証された。このことにより、集電材料の組合せに対する摩耗形態の演繹的予測が可能となると考える。

さらに、これまで電車線とパンタグラフの動特性を改善することで離線アークを抑制し、トロリ線の電氣的摩耗の低減を図ってきたが、本章ではトロリ線の摩耗が著大になる摩耗形態自体を抑制するという新たな耐摩耗設計指針の可能性を示した。今後、図 6.2.2 に示した集電材料組合せマップを目安とすることで、摩耗形態制御を考慮した材料開発に貢献できるものと考えている。

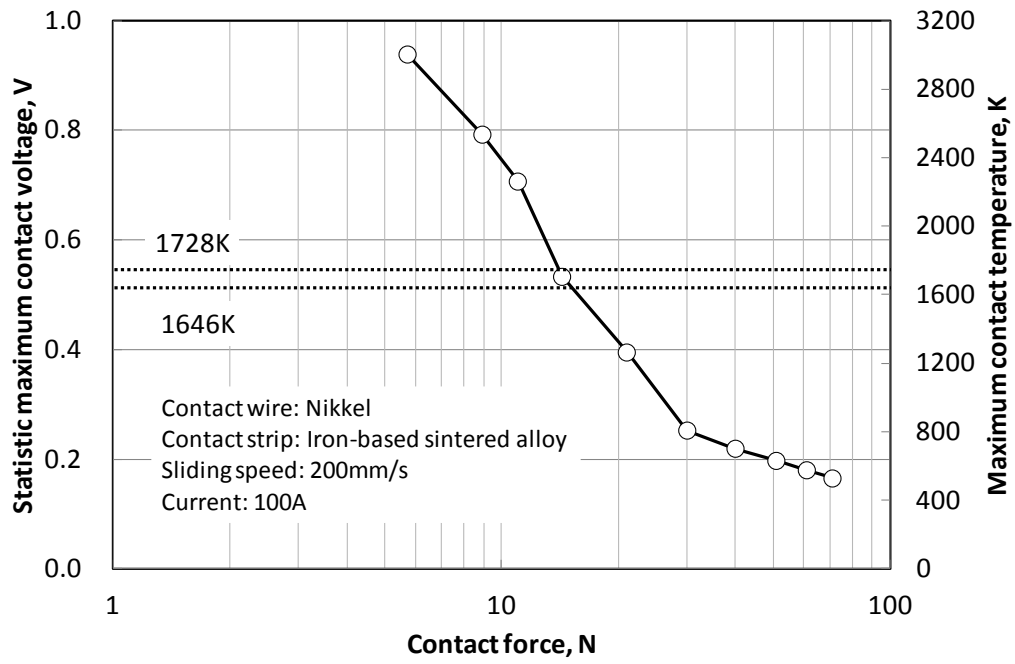
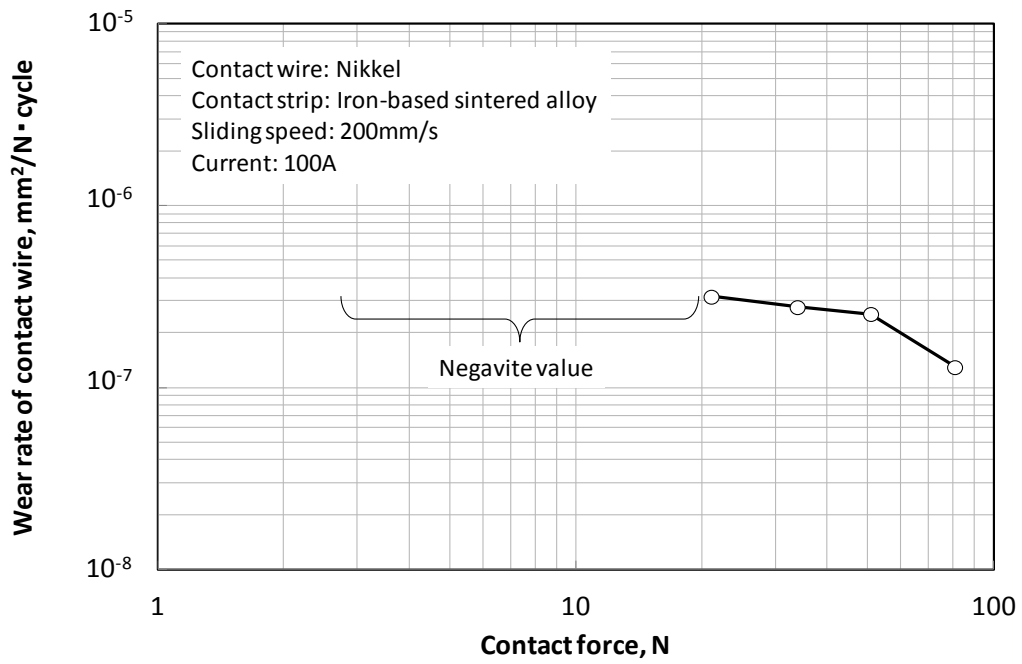
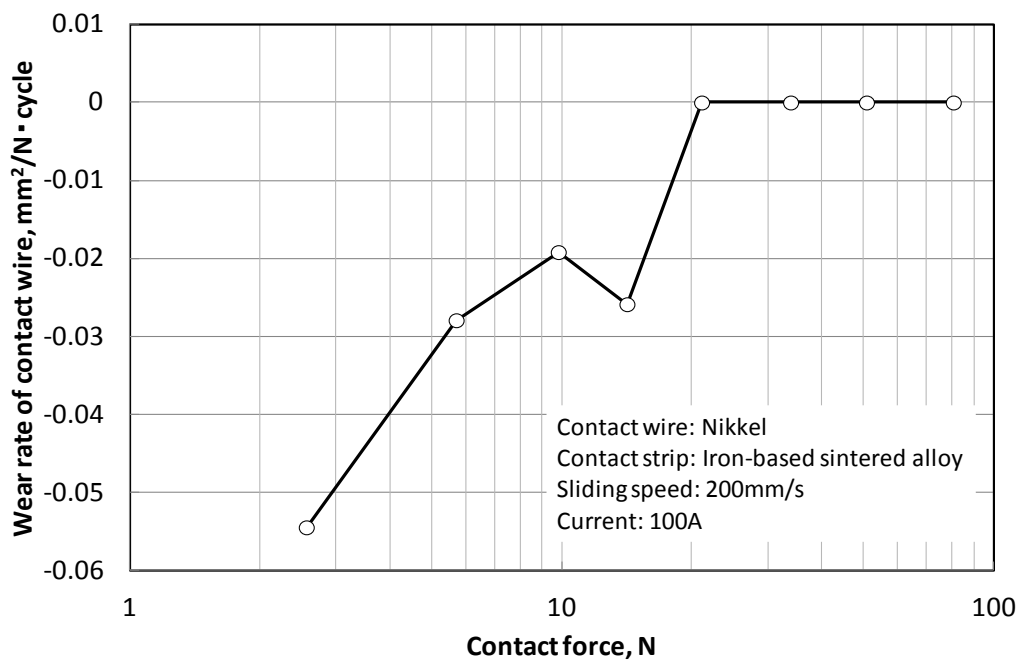


Figure 6.4.15 Relationship between contact force and statistic maximum contact voltage  
 (Contact wire: nikkell, contact strip: iron-based sintered alloy)



(a) Log-log plot



(b) Semi-log plot

Figure 6.4.16 Relationship between contact force and wear rate of contact wire  
 (Contact wire: nikkel, contact strip: iron-based sintered alloy)

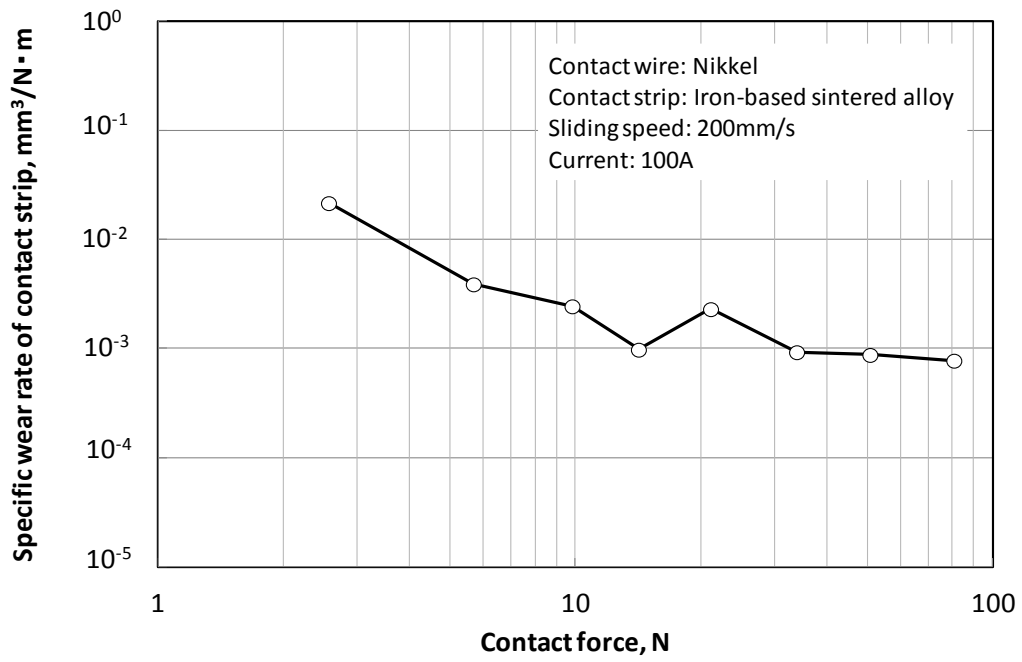


Figure 6.4.17 Relationship between contact force and specific wear rate of contact strip  
(Contact wire: nikkell, contact strip: iron-based sintered alloy)

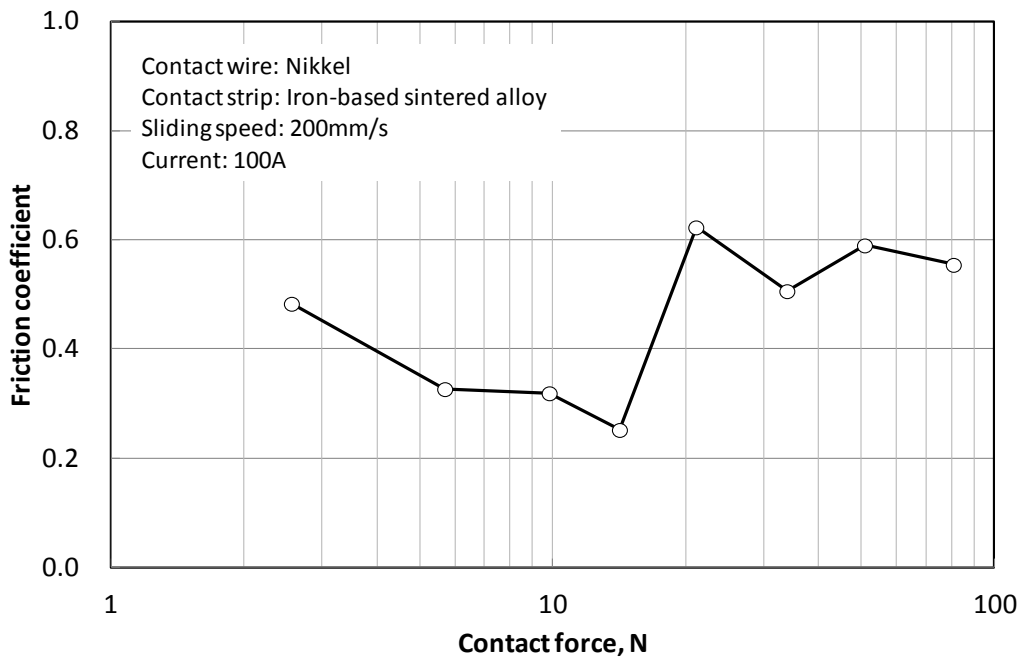
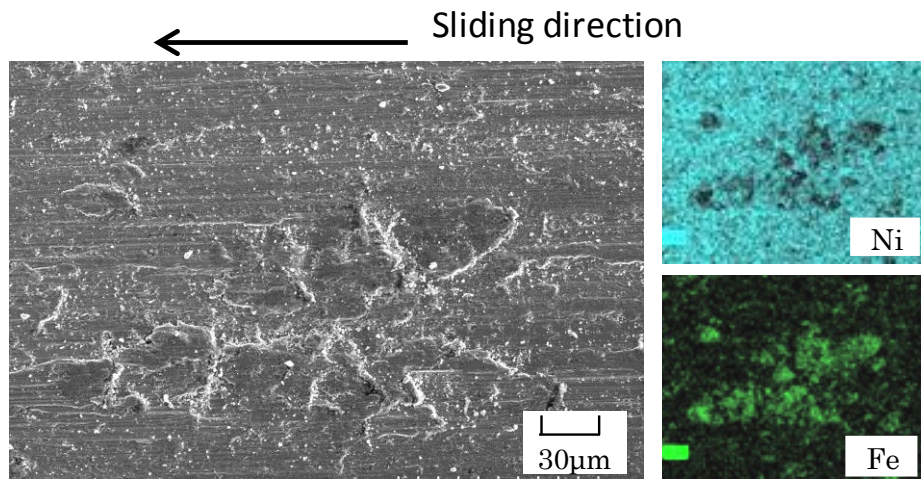
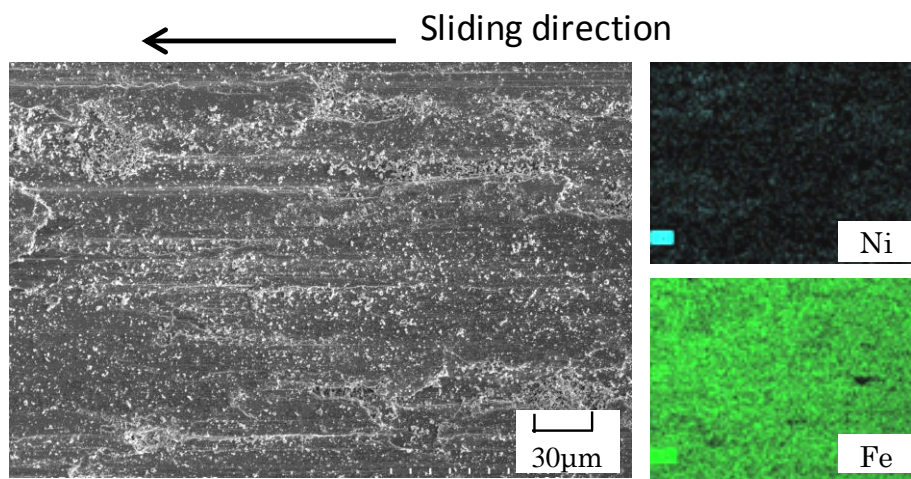


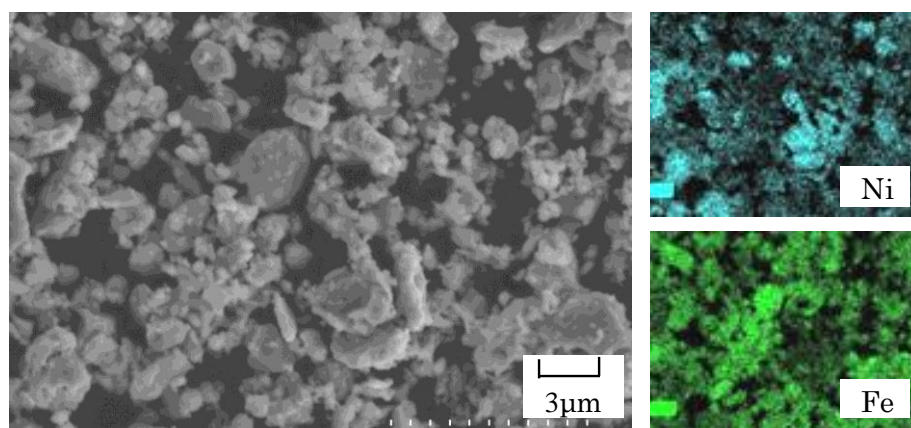
Figure 6.4.18 Relationship between contact force and friction coefficient  
(Contact wire: nikkell, contact strip: iron-based sintered alloy)



(a) Wear surface of contact wire



(b) Wear surface of contact strip



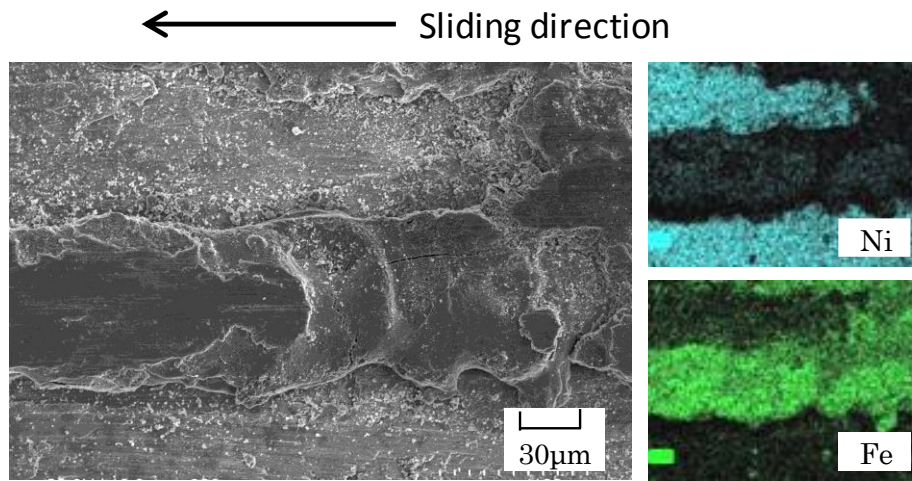
(c) Wear particle

Figure 6.4.19 SEM-EPMA pictures of wear surface and wear particle

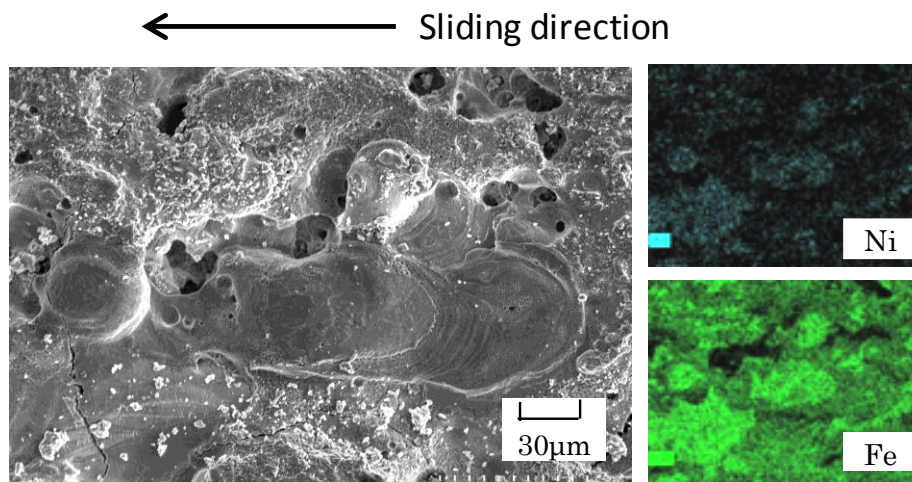
(Contact force: 50N, sliding speed: 200mm/s, current: 100A)

Arrows in this figure show the sliding direction of the contact strip.

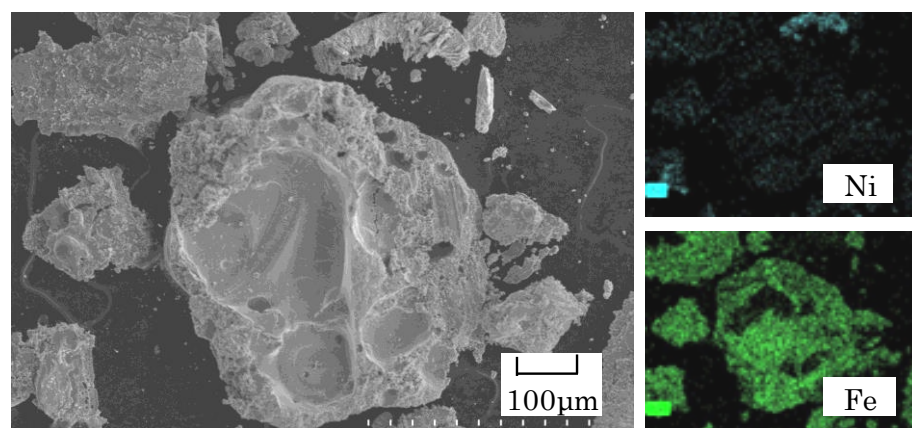




(a) Wear surface of contact wire



(b) Wear surface of contact strip



(c) Wear particle

Figure 6.4.20 SEM-EPMA pictures of wear surface and wear particle

(Contact force: 5.7N, sliding speed: 200mm/s, current: 100A)

Arrows in this figure show the sliding direction of the contact strip.

## 6.5 結言

集電材料の組合せによる摩耗形態制御の可能性を検証するため、摩耗形態マップに基づき3組のトロリ線およびすり板の組合せを選定し、通電摩耗試験を実施した。

得られた具体的な結論は以下のとおりである。

- (1) 摩耗形態マップに基づき、トロリ線とすり板の融点差および清浄時接触境界係数  $a_0$  を用いて、トロリ線およびすり板の溶融しやすさを判定する集電材料組合せマップを作成した。
- (2) 材料組合せマップに基づき、最もトロリ線が溶融しやすい組合せである硬銅トロリ線とニッケルすり板の組合せについて、通電摩耗試験を実施した結果、接触力 6N 以下の条件においてトロリ線は溶融し、トロリ線摩耗率は著大となった。
- (3) 硬銅トロリ線と実機のパンタグラフ補助すり板に使用されているアルミニウムすり板の組合せについて、通電摩耗試験を実施した結果、接触力 6N 以下の条件においてトロリ線が溶融した。
- (4) 材料組合せマップに基づき、最もトロリ線が溶融しにくい組合せであるニッケルトロリ線と鉄系焼結合金すり板の組合せについて、通電摩耗試験を実施した結果、どのような接触力条件においてもトロリ線の溶融はなく、トロリ線の極大摩耗は発生しなかった。
- (5) いずれの材料組合せに対しても、摩耗試験で確認された摩耗形態および各摩耗形態が遷移する接触力条件は、集電材料組合せマップおよび摩耗形態マップと整合しており、材料の組合せを調整することで、摩耗形態を演繹的に制御できることを実験的に示した。



## 参考文献

- (1) 菅原淳, 「新しいトロリ線の開発と適用」, 鉄道車両と技術, 96 (2004) 46-50.
- (2) 宮平裕生, 土屋広志, 「パンタグラフすり板の摩耗を低減する」, RRR, 71, 2 (2014) 8-11.
- (3) 池田充, 土屋広志, 「高速鉄道用パンタグラフのトライボロジーに関わる最近の動向」, トライボロジスト, 58, 7 (2013) 447-454.
- (4) 長沢広樹, 「Cr-Zr 系銅合金トロリ線の通電下の摩耗特性の研究」, 東北大学学位論文, (1996).
- (5) 久保俊一, 「銅または銅鉛錫合金を溶浸した炭素製パンタグラフすり板のアーク放電下の摩耗機構の研究」, 東北大学学位論文, (1999).
- (6) 宮口浩一, 石井順, 武井一男, わたり線箇所におけるトロリ線異常摩耗の考察, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, (2001) 729-732.
- (7) 森本大観, 小林英治, 大熊茂, 石井順, わたり線部分におけるトロリ線異常摩耗対策, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, (2004) 115-116.
- (8) 高木相, 電気接点のアーク放電現象, コロナ社, (1995) 56-58.
- (9) 笹田直, 摩耗, 養賢堂, (2008).



# 第7章

## 結論

電気鉄道の集電材料であるトロリ線およびすり板においては、車両の高速化に伴う集電電流の増加やパンタグラフ数削減によって、ジュール熱に起因する摩耗が増大する傾向にあり、メンテナンスにかかるコストを削減するため、摩耗の抑制が必須の課題となっている。従来、現地調査や定置試験結果より、集電材料の摩耗形態を凝着による「機械的摩耗形態」、および離線時のアークによって損耗する「電氣的摩耗形態」に大別し、トロリ線の著大摩耗が発生する電氣的摩耗を低減するため、離線アークの抑制を摩耗対策として実施してきた。しかしながら、実機で起こる通電摩耗現象は未だ解明されておらず、抜本的な耐摩耗設計指針は存在していない。

本研究では、集電材料の耐摩耗設計指針に資するため、ジュール熱に起因する摩耗形態に着目し、摩耗試験機の開発および摩耗試験の実施により摩耗形態を精緻に把握し、電位分布および温度分布解析により摩耗形態の遷移条件について考察した。得られた具体的な結論を以下に示す。

- (1) 集電材料の摩耗特性に対して、ジュール熱の影響を顕在化させた直動型摩耗試験機を開発し、接触力変動を1N未満に抑制した通電摩耗試験の結果、これまで機械的摩耗形態と電氣的摩耗形態の2つのみと考えられてきた通電下の摩耗形態を、「機械的摩耗形態」「トロリ線溶融摩耗形態」「すり板溶融摩耗形態」の3つに分類できることを明らかにした。
- (2) 摩耗試験時の接触電圧より推定した接点最高温度が、硬銅トロリ線および鉄系焼結合金すり板の融点に達する条件で摩耗形態が遷移することを明らかにし、トロリ線著大摩耗の主要因が離線時のアークではなく、その前に発生するブリッジによるトロリ線溶融摩耗形態であることを明らかにした。
- (3) 通電摩耗試験の結果、トロリ線のブリッジは接点最高温度のみならず、すり板の溶融や見かけの接触面積によって変化することを明らかにした。
- (4) 接触表面の酸化膜や摩耗粒子などの被膜抵抗を考慮した電気接点モデルを構築し、Wiedemann-Franzの法則を適用した新たな熱伝導方程式の提案により、摩耗現象を説明し得る電位分布および温度分布の解析に成功した。解析結果に基づき、電位と温度の関係を定式化することにより、集電材料の摩耗形態発生条件を明示する「摩耗形態マップ」を提案した。
- (5) 摩耗形態マップを構成するパラメータのうち、能動的に制御可能な融点および電気抵抗率の組合せによる摩耗形態制御理論を提案し、材料選定の目安となる「集電材料組合せマップ」を提案した。3種類の組合せに対する通電摩耗試験の結果は、いずれも集電材料組合せマップおよび摩耗形態マップと整合しており、摩耗形態を演繹的に制御できることを実証した。これにより、摩耗形態制御による新たな耐摩耗設計の可能性を示した。

以下、各章で得られた主な結論を示す。

## 第2章 直動型摩耗試験機の開発

- (1) 通電下の摩耗形態を分別・観察するために開発した直動摩耗試験機は、接触力の変動値を平均値の10%以下に抑制することができ、大きな接触力条件で離線することはないため、摩耗形態の混在を抑制できる。その結果、微小な接触力範囲で発生する摩耗形態も確認することができる。
- (2) アークの発生条件と統計的的最大接触電圧が材料の沸点に達する条件はほぼ一致し、接触電圧の測定精度は良好である。

## 第3章 集電材料の摩耗特性に及ぼす通電電流の影響

- (1) 硬銅トロリ線と鉄系焼結合金すり板の組合せにおける通電摩耗試験結果より、摩耗形態を大きく3つに分類した。
- (2) 通電電流と接触力によって変化する接触電圧に対して  $\varphi$ - $\theta$  理論を適用し、推定した接点最高温度が各材料の融点に達する条件で、摩耗形態が遷移することを明らかにした。
- (3) 硬銅トロリ線と鉄系焼結合金すり板の組合せにおいて、トロリ線の摩耗率が最大となる条件はアーク発生時ではなく、トロリ線のみが溶融する範囲であることを明らかにした。

## 第4章 集電材料の摩耗特性に及ぼす見かけの接触面積の影響

- (1) 通電時の接触電圧は見かけの接触面積に依存せず、接触力に依存する。
- (2) 硬銅トロリ線と鉄系焼結合金すり板の組合せにおける通電摩耗試験では、すり板比摩耗量は見かけの接触面積に依存せず、接点最高温度は見かけの接触面積に依存しない。
- (3) 一方、トロリ線摩耗率は見かけの接触面積によって変化し、見かけの接触面積  $50\text{mm}^2$  以下ではどのような接触力条件であっても、トロリ線の溶融は観察されなかった。このことにより、摩耗形態の遷移現象の支配パラメータは最高接点温度以外に存在することを示した。

## 第5章 電位分布および温度分布解析による集電材料の通電摩耗機構の解明

- (1) 集電材料の通電摩耗機構を解明するため、現場や摩耗試験では無視し得ない酸化膜や摩耗粒子などの介在物を考慮した通電接点モデルを作成し、電極内の電位分布および温度分布を解析した。
- (2) 電極内の電位と温度は放物線状の関係となり、その曲線は接触電圧のみに依存し、電極材料の組合せ、見かけの接触面積、バルク温度、および被膜抵抗に依存しない。
- (3) 電極内の最高温度は接触電圧の中間値  $V_c/2$  で発生し、その値は  $\varphi$ - $\theta$  理論に従う。
- (4) トロリ線とすり板内の電圧降下および最高温度は被膜抵抗によって変化する。
- (5) 摩耗形態を支配するパラメータとして、電極の集中抵抗および被膜抵抗を用いた接触境界係数  $\alpha$  を新たに考案し、電極内の電位と温度の関係を定式化した。
- (6) 摩耗形態の発生条件を表す摩耗形態マップを作成し、支配パラメータを材料融点や接触電圧、および接触境界係数  $\alpha$  に特定した。

## 第6章 集電材料組合せによる摩耗形態制御

- (1) 摩耗形態マップに基づき、トロリ線とすり板の融点差および清浄時接触境界係数  $a_0$  を用いて、トロリ線およびすり板の溶融しやすさを判定する集電材料組合せマップを作成した。
- (2) 3組のトロリ線およびすり板の組合せに対する通電摩耗試験の結果、いずれの材料組合せに対しても、摩耗試験で確認された摩耗形態および各摩耗形態が遷移する接触力条件は、集電材料組合せマップおよび摩耗形態マップと整合しており、材料の組合せを調整することで、摩耗形態を演繹的に制御できることを実験的に示した。



# 謝辞

本研究を進めるにあたり、東北大学大学院工学研究科ナノメカニクス専攻 足立幸志教授には、終始懇切丁寧なご指導ご鞭撻を賜りましたこと、深く感謝の意を表します。

また、有益なご指導ならびにご助言を賜りました東北大学大学院工学研究科 坂真澄教授、横堀壽光教授、琵琶哲志教授に深く感謝の意を表します。同時に、有益なご討論ならびにご助言を賜りました東北大学大学院工学研究科 竹野貴法助教、日本大学工学部 加藤康司元教授、伊藤耕祐准教授に深く感謝の意を表します。

静岡大学工学部 関川純哉准教授には、第 5 章の温度分布解析手法に関して、有益なご指導ならびにご討論を賜りましたこと、深く感謝の意を表します。

公益財団法人鉄道総合技術研究所 長坂整主査には、第 2 章の直動摩耗試験の開発に関して、多大なご協力を賜りましたこと、深く感謝の意を表します。

最後ではありますが、公益財団法人鉄道総合技術研究所の上司、先輩、同僚の皆様には、本研究を進めるにあたり日頃より有益なご討論ならびにご助言を賜りましたこと、心より感謝の意を表します。