電気接点の電流遮断時の溶融現象に関する研究

石巻専修大学 大学院 理工学研究科 博士課程 物質機能工学専攻

指導教員 若月 昇 教授

DM23-0001H

工藤 孝之

電磁リレーやブレーカなどの電気接点を備えたデバイスは、大電流回路の開閉を手軽に行 えるデバイスである。古くから多くの研究が報告され、多くのデバイスや機器が報告されて いる。最近、太陽光発電や風力発電などの直流発電が見直され、直流電力を利用したインバ ータ技術が省電力の電気機器に普及している。その趨勢に対応した直流用電気接点デバイス の小型化・高信頼化技術が注目されている。小型化と高信頼化の技術にとって、開離時アー ク放電と電極金属の接点間転移が本質的な課題である。これらの問題に対して、通電電流遮 断時の溶融現象が深く関わることはよく知られている。しかし、現象が複雑で、溶融からア ーク放電に至るメカニズムはほとんど解明されていない。

本研究では、接点電圧 Vaが、溶融電圧 Um と呼ばれる電圧付近の接点溶融現象を扱う。これ までの研究では『ブリッジ (Molten Metal Bridge)』・『初期(イニシャルアーク)』と呼称さ れた現象に含まれる現象であるが、取り扱う視点が異なる部分があるので、あえて溶融現象 と呼んでいる。

Holmの $\varphi \theta$ 理論では、接点形状も抵抗分布も無視して接点電圧は接点の最高温度によって決 まる。融点温度に対して、接点形状も抵抗分布も関係なく溶融電圧 U_m が定義され、活用され ている。筆者は、溶融現象の研究を始めるにあたって、溶融現象は固相から液相への相変化 であり、唯一の融点温度において、固相と液相が存在することに着目した。固相と液相では、 抵抗率は大きく異なる。この変化には溶融エネルギー(潜熱・融解熱)が必要であり、ジュ ール熱として電気回路から供給されることになる。同じ融点温度なのに、固相での電位分布 と液相での電位分布が異なることが予想される。 $\varphi \theta$ 理論で求められる U_m は固相・液相どち らの抵抗率に対応するのか、もう一方の抵抗率について異なる接点電圧が存在するはずであ る。固相の抵抗率を U_m に対応すれば、瞬時の相変化に抵抗率の上昇による電圧上昇は蒸発温 度に対応する接点電圧 U_b を超すことになってしまう。そこで U_m を液相の抵抗率に対応する と考え、融点での固相の抵抗率の比から潜熱電圧 U_h を指標として導入してみた。溶融にかか わる接点電圧の実験結果に、この値を書き加えると、溶融にかかわると考えられる複雑さが 起こる電圧下限に、この潜熱電圧 U_h が相当することが確認できた。次に、この相変化に必要 なジュール熱の電源からの供給条件が、溶融現象での固体から液体への変化を支配すると考 えた。

これまで、電気接点の研究において、このような相変化の溶融エネルギーと電気回路からの ジュール熱の注入条件に着目した研究はわれわれの調査範囲ではなかった。上記の立場での 本研究の具体的な研究目的は以下の3項目である。

(1)溶融と関わる複雑な電流電圧特性に溶融エネルギー(潜熱)がかかわることを確認し、潜熱電 圧として Ubを提案し、指標としての妥当性を検討する。

(2)溶融現象は溶融エネルギーが必要な相変化現象であり、抵抗増加時のジュール熱量を

決める電気回路条件が溶融現象を支配することを検討する。

(3)電流遮断時の開離後の電極痕跡を観察し、溶融痕の特徴を検討する。

本研究での特徴的な実験手法としては以下の5項目である。

(1)Ag,Auの細線クロスロッド構成、電極の変形・変質を避けた単発開離実験。

- (2)接点電流電圧特性を測定し、接触痕跡を観察。過渡電流スイッチ回路で開離後のアーク放 電の影響回避した実験。
- (3) *V_c=U_m*後の初期アークといわれる現象は、過渡電流スイッチ回路と付加インダクタンスによって、現象時間を制御した実験。
- (4)電源から接触点への電力が最大となるような回路条件に着目した実験。
- (5)接点開離後の表面(接触痕、溶融痕、アーク放電痕など)を、レーザ顕微鏡を用いて深い 焦点深度で高倍率の画像観察。

本論文では、研究結果からの以下の事項を明らかにすることができた。

- (1)対象とした溶融現象が起こる融点では、金属は固体と液相があり、抵抗率は大きく異なる。 φθ理論では、抵抗率を扱わないが、接点電圧には影響を与える。融点電圧 Umに対して、 融点での液相の抵抗率と固相の抵抗率の比から求め Umとを指標とした。溶融と関わる複 雑な電流電圧特性は V_c=Um以上で発生していることを確認した。
- (2)対象とした溶融現象が、電気的な回路条件に支配されて電流遮断へと進む。電気的な回路 条件として、電源から電気接点に流れ込む電力 Peの接点抵抗 Reでの微係数(dPe/dRe)が 支配的な要因であることを確認した。金属ブリッジと呼ばれる現象には、主に電気回路条 件で決まる溶融現象と、電気的条件と機械的開離条件の組み合わせで決まる溶融現象の二 種類があることを確認した。
- (3) *V_c=U_m*直後の痕跡は、溶融状態での溶断を暗示する銀光沢の小球面の集合形状で、正極が 凹状、負極が凸状であった。いわゆる『初期アーク』とよばれる *V-I* 特性の初期段階では、 同様の痕跡が確認された。初期アーク時間では、アーク放電への移行の萌芽となる電子的 な現象と、伝導電流とが並行して存在する可能性を示す溶融痕跡を確認した。

電気接点の電流遮断時の溶融現象に関する研究

石巻専修大学 大学院 理工学研究科 博士課程

物質機能工学専攻

指導教員 若月 昇 教授

DM23-0001H

工藤 孝之

目次

第1章 緒論・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1
1-1 本研究の背景・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
1-2 本研究の目的と構成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・3
1-3 研究結果の概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・5
第2章 電流遮断時の溶融現象の特徴とその測定・観察方法の検討・・・・・・・7
2-1 まえがき・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・7
2-2 溶融現象と関わる電流電圧特性の複雑さ・・・・・・・・・・・・・・8
2-3 溶融現象と関わる開離後の電極表面痕跡の複雑さ・・・・・・・・・・・11
2-4 溶融現象と関わる電流電圧特性や電極表面痕跡の複雑さをふまえた測定・観察方
法の検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・18
2-4-1 開閉動作後の溶融痕確認のためにアーク放電を抑止する回路・・・・・18
2-4-2 機械的な開離動作の再現性向上をめざした実験・・・・・・・・・・21
2-4-2-1 ヒンジリレーの改造機構と実験サンプル及びホルダ・・・・・・21
2-4-2-2 パルスモータ精密開閉装置による位置(接点ギャップ)制御・・・22
2-4-3 レーザ顕微鏡による痕跡観察方法・・・・・・・・・・・・・・・・24
2-5 Au,Ag接点の電流遮断時の接点電圧 V_c が溶融電圧 U_m 付近での電流電圧特性や開
離動作後の痕跡観察からの考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・27
2-6 むすび・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・27
第3章 電流遮断時の接点電圧 Vcが溶融電圧 Um付近での溶融現象の検討・・・・・28
3-1 まえがき(電源から溶融エネルギーを供給する電気回路条件への着目)・・・28
3-2 電気接点の電流遮断時現象と金属ヒューズの溶断時現象の比較・・・・・・29
3-3 接点溶融現象における固相・液相の相変化を評価する指標の検討・・・・・31
3-3-1 融点における相変化と対応する抵抗率に着目した潜熱電圧 Uhの提案・・31
3-3-2 機械的な接触力のみによる条件での接触抵抗測定結果と Ulbの対応・・・35
3-3-3 U_m 付近での複雑な電圧特性への U_{lh} の適用・・・・・・・・・・・36
3-3-4 接点電圧変化 (V=U1)と V=Um) に着目した電流遮断段階の分類・・・38
3-4 V=Um付近で溶融エネルギーを供給する電気回路条件の検討・・・・・・40
(電気接点に接続される電源と負荷と接点抵抗 R _e の関係)
3-4-1 接点抵抗 R_e が変化するとき電源から接点に流れ込む電力 P_e の R_e に関する微
係数(dPc/dRc)が、溶融現象を支配する要因であることの検討・・・・40
3-4-2 融点での相変化に必要な電力の供給に関する dP_e/dR_e の関係の検討・・42
3-4-3 電気回路条件で自律的に溶融に進む時の電流電圧特性の測定・・・・・43

3-4-4 電気回路からの潜熱の供給を受けるにもかかわらず、電流遮断までは機械的
な開離条件で進む電流電圧特性の測定とブリッジ形成の観察・・・・・46
3-4-5 最初から電気回路条件が dP_c/dR_c が負で、機械的な開離動作で接点抵抗が
増大して開離に至る電流電圧特性の測定・・・・・・・・・・・・48
3-5 接点電流による溶融痕のレーザ顕微鏡による観察・・・・・・・・・・50
3-5-1 開離動作後の接点表面の溶融痕の観察の工夫・・・・・・・・・・50
3-5-2 回路電流 Ioの違いによる溶融痕の観察・・・・・・・・・・・・・52
3-5-2-1 電流電圧特性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・52
3-5-2-2 溶融痕と接触円との位置関係・・・・・・・・・・・・・・54
3-5-2-3 電流による溶融痕の違い・・・・・・・・・・・・・・・55
3-5-3 正極痕跡が凹形、負極痕跡が凸形であることの確認実験・・・・・・60
3-6 接点電圧 V_c が溶融電圧 U_m 以上での電流に関する考察・・・・・・・・・66
3-7 むすび・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・68
第4章 接点開離時の初期アーク時間での電流遮断と溶融現象の検討・・・・・・69
4-1 まえがき(初期アークとよばれる現象における溶融現象に着目)・・・・・69
4-2 電流遮断時に測定される『初期アーク』の特徴・・・・・・・・・・・69
4-3 測定回路と初期アーク現象を特徴つける指標・・・・・・・・・・・・・・72
4-4 初期アークの電気回路条件への依存性・・・・・・・・・・・・・・・・74
4-4-1 電源電圧 E_0 依存性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・74
4-4-2 回路電流 <i>I</i> o依存性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
4-4-3 付加インダクタンス L _r 依存性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・76
4-5 初期アーク時間を変化させた開離動作後の接点表面痕跡の観察・・・・・・77
4-5-1 初期アーク時間をコイルで制御する測定方法・・・・・・・・・・・77
4-5-2 初期アーク時間をコイルで制御した実験後の電極表面観察・・・・・・79
4-5-3 初期アーク時間を変化させた開離実験後の電極表面観察結果の考察・・・91
4-6 初期アーク時間に接点溶融現象が併存していることに関する考察・・・・・95
4-7 むすび・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・·96
第5章 結言・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・97
謝辞・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
発表論文リスト・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・101

第1章 緒論

1.1 本研究の背景

[電気接点研究の重要性]

電磁リレーやブレーカなどの電気接点を備えたデバイスは、大電流回路の開閉を確実に 行える。古くから多くの研究が報告され、多くのデバイスや機器が報告されている[1]-[3], [9]。最近、太陽光発電や風力発電などの直流発電が見直され、直流電力を応用したインバ ータ技術が省電力の電気機器に普及している。その趨勢に対応した直流用電気接点デバイ スの小型化・高信頼化技術が注目されている。小型化と高信頼化の技術にとって、開離時 アーク放電と電極金属の接点間転移が本質的な課題である。これらの問題に対して、通電 電流遮断時の溶融現象が深く関わることはよく知られている。しかし、現象が複雑で、溶 融からアーク放電に至るメカニズムには未解明な分野が残されている。

[過去の研究との関係]

図 1-1 に電気接点の動作と等価回路および電流電圧測定の説明図を示す。図 1-1(a)に代表 例としてのヒンジリレーを示す。電気接点が電磁石で開閉される。図 1-1(b)は、電源 E_0 、 負荷 R_0 、接点 S_w の素子で構成された回路である。電源 E_0 から負荷 R_0 への電流供給を接点 S_w が開閉する等価回路である。この時の開閉動作全体の電流電圧特性は図 1(c)となる。こ の間の物理現象の説明図が図 2 である。図 1-1(c)中の丸印部が研究対象とした電流遮断時で あり、図 2 では→印で示した。この間の溶融からアーク放電直前までの現象を研究対象と した。



(a)電気接点の動作(b)等価回路(c)接点開閉動作での電流電圧特性図 1・1電気接点の動作と等価回路および電流電圧測定の説明図



図 1-2 電気接点の開閉動作と物理現象

この電気接点の溶融現象は、これまでも多くの研究者が取り上げてきた。Holm の $\varphi \theta$ 理 論がベースであった。Holm らの $\varphi \theta$ 理論とは、金属においての高い導電率と熱伝導率はい ずれも自由電子によるものであり、電気接点の接触点において、等温面と等電位面との対 応を根拠に、接点電圧 V_c は接点の最高温度 T_{max} に対応することが知られている。接点形状 や抵抗分布は等温面と等電位面は対応するので、対称構造であれば電位の積分値としての 接点電圧と温度の積分値としての最高温度の関係は(1-1)式[9]のように単純になる。

$$T_{\max} = \left(\frac{V_c^2}{4L} + T_0^2\right)^{\frac{1}{2}} \approx 3200 \times V_c[K]$$
 (1-1)

V。は接点電圧であり、電流路の両端部位置の温度が T_0 、 T_{max} は接点内の最高温度である。 また式中の Lは (L=2.45×10^s [(V/K)²]) で、Widemann-Franz の法則より得られる。 T_0 を室温、 T_{max} を融点温度とすれば、対応する溶融電圧 U_m が決まる。この溶融電圧以 上で金属溶融ブリッジと呼ばれる現象が起こると考えられてきた。図 1-3 にこれまでの代 表的な説明図を示す。図 1-3(a)は 1975 年に P.Koren らが IEEE Transaction に発表した 図である。接点電圧 U_m からアーク放電点弧に至る期間を可動部の機械的な動きと電極間 のギャップ間隙長の増加によって引き起こされる Molten Metal Bridge Stage と名づけて、 多くの実験データを報告した。その後、多くの研究者がそれを引用している。図 1-3(a)は、 当該分野の専門家の方々がまとめた教科書的な書籍 "Electric Contact (1999 年 Marcel Dekker Inc.刊行)" [2]での説明図である。機械的な開離運動に従って、接点電圧が V_m 以 上になると、接点ギャップの拡大に従ってブリッジが形成され、さらにギャップが拡大す るとアーク放電点弧に移行すると説明している[4]-[8]。



図 1-3 開離時の溶融からアーク放電に至る現象の代表的な説明

(a) 溶融金属ブリッジの形成と破壊時における接点電圧の変化の P.Koren による説明図

(b) 接点間ギャップに着目した溶融金属ブリッジの形成と破壊の G.Slade による説明図

筆者は、これらの現象において、金属接触による伝導電流による金属溶融が、電気回路 条件によってどのように進み、どのような電極表面への痕跡を残すかについて研究した。

1.2 本研究の目的と構成

【研究で扱う溶融現象と視点】

本研究では、接点電圧 Voが、溶融電圧 Um と呼ばれる電圧付近の接点溶融現象を扱う。 これまでの研究では『ブリッジ (Molten Metal Bridge)』・『初期(イニシャルまたはショ ート)アーク』と呼称された現象に含まれる現象であるが、取り扱う視点が異なる部分が あるので、あえて溶融現象と呼んでいる。

Holm の φθ理論では、接点形状も抵抗分布も無視して接点電圧は接点の最高温度によって決まる。融点温度に対して、接点形状も抵抗分布も関係なく溶融電圧 Umが定義され、活用されている。

筆者は、溶融現象の研究を始めるにあたって、溶融現象は固相から液相への相変化であ り、唯一の融点温度において、固相と液相が存在することに着目した。固相と液相では、 図 3 に示す如く、抵抗率は大きく異なる。この変化には溶融エネルギー(潜熱・融解熱) が必要であり、ジュール熱として電気回路から供給されることになる。同じ融点温度なの に、固相での電位分布と液相での電位分布が異なることが予想される。*φθ*理論で求められ る *U*_mは固相・液相どちらの抵抗率に対応するのか、もう一方の抵抗率について異なる接点 電圧が存在するはずである。固相の抵抗率を Umに対応すれば、瞬時の相変化に抵抗率の上 昇による電圧上昇は蒸発温度に対応する接点電圧 Ub を超すことになってしまう。そこで Umを液相の抵抗率に対応すると考え、融点での固相の抵抗率の比から潜熱電圧 Ub を指標 として導入してみた。溶融にかかわる接点電圧の実験結果に、この値を書き加えると、溶 融にかかわると考えられる複雑さが起こる電圧の下限に、この潜熱電圧 Ub が相当すること が確認できた。次に、この相変化に必要なジュール熱の電源からの供給条件が、溶融現象 での固体から液体への変化を支配するのではないかと考えた。



図 1-4 通電電流遮断時の溶融現象を取り扱う筆者の視点:融点における相変化に着目

これまで、電気接点の研究において、このような相変化の溶融エネルギーと電気回路からのジュール熱の注入条件に着目した研究はわれわれの調査範囲ではなかった。上記の立場での本研究の具体的な研究目的は以下の3項目である。

(1) 溶融と関わる複雑な電流電圧特性に溶融エネルギー(潜熱)がかかわることを確認し、潜熱電圧として Umを提案し、指標としての妥当性を検討する。

(2)溶融現象は溶融エネルギーが必要な相変化現象であり、抵抗増加時のジュール熱量を 決める電気回路条件が溶融現象を支配することを検討する。

(3)電流遮断時の開離後の電極痕跡を観察し、溶融痕の特徴を検討する。

【本研究での特徴的な実験手法】

電極材料は、代表的な接点金属材料である金 Au と銀 Ag を対象とした。接点電流は、お もに数~数十 A で実験を行った。電源は、主に乾電池・蓄電池などの内部抵抗の低い電源 を対象とした。以下に、本研究での実験の特徴を羅列する。

(1)Ag,Auの細線クロスロッド構成。電極の変形・変質を避けた単発開離実験。

(2)接点電流電圧特性を測定し、開離後の電極表面を観察。過渡電流スイッチ回路で開離後のアーク放電の影響回避した実験。

(3) *V_c=U_m*後の初期アークといわれる現象を過渡電流スイッチ回路と付加コイルにより現象の時間を制御した実験。

(4)電源から電気接点への電力が最大となるような回路条件に着目した実験。

(5)接点開離後の電極表面(接触痕、溶融痕、アーク放電痕など)を、レーザ顕微鏡を用い て深い焦点深度で高倍率での電極表面観察。

1.3 研究結果の概要

本論文は以下の構成である。

- 第1章 緒論
- 第2章 電流遮断時の溶融現象の特徴とその測定・観察方法の検討
- 第3章 電流遮断時の接点電圧 Veが溶融電圧 Um付近での溶融現象の検討
- 第4章 接点開離時の初期アーク時間での電流遮断と溶融現象の検討
- 第5章 結論

まず第2章で、電流遮断時の溶融現象の特徴を捉えるための実験を行い、その結果に基づき、溶融現象の特徴をとらえるための測定・観察方法を検討した。第3章では、電流遮断時の接点電圧 Vaが溶融電圧 Um付近での溶融現象のを検討した。これは、ブリッジとよばれる現象における接点電圧に対応した溶融現象である。第4章では、接点開離時の電流遮断時における初期アーク発生期間の開離後の電極表面の痕跡の観察について述べる。第5章は結論である。

本論文では、研究結果からの以下の事項を明らかにすることができた。

(1)対象とした溶融現象が起こる融点では固体と液相の2種類の温度があり、抵抗率は大き く異なる。 $\varphi\theta$ 理論では、固相から液相へ相変化する際の抵抗率は含まれていない。我々は 固相、液相の温度に対応する2種類の抵抗率は接点電圧に影響を与えると考えた。そこで、 融点電圧 U_m に対して、融点での液相の抵抗率と固相の抵抗率の比から U_{Lh} 求め、溶融から アーク放電を明らかにする指標とした。溶融と関わる複雑な電流電圧特性は $V_c=U_{Lh}$ 以上で 発生していることを確認した。

(2)対象とした溶融現象が、電気的な回路条件に支配されて電流遮断へと進む。接点抵抗 R_e が変化する電気的な回路条件として、電源から電気接点に流れ込む電力 P_e の接点抵抗 R_e での微係数 (dP_e / dR_e) が支配的な要因であることを確認した。金属ブリッジと呼ばれる 現象には、主に電気回路条件で決まる溶融現象と、電気的条件と機械的開離条件の組み合 わせで決まる溶融現象の二種類があることを確認した。

(3) *V_e=U_m* 直後の痕跡は、溶融状態での溶断を暗示する銀光沢の小球面の集合形状で、正極 が凹状、負極が凸状であった。いわゆる『初期アーク』とよばれる電流電圧特性の初期段 階では、同様の痕跡が確認された。初期アーク時間では、アーク放電への移行の萌芽とな る電子的な現象と考えられる痕跡と、伝導電流とが並行して存在する可能性を示す溶融痕 跡を確認した。

第2章 電流遮断時の溶融現象の特徴とその測定・観察方法の検討

2-1 まえがき

電流遮断時の溶融現象は、電極間の電流電圧測定でも、顕微鏡による開離後の表面痕跡 の観察でも、複雑な結果が得られる。金属接点の溶融現象は、対向する電極の構造・表面 状態・金属物性、電気回路条件・機械的な開離運動などとかかわる[10]-[11]。本章では、代 表的な電気接点デバイスである電磁リレーを取り上げる。まず Au 接点電極のヒンジリレー を例に、溶融と関わる電流電圧特性の複雑さを述べる。次に、リニアに動作する圧電アク チュエータによる超低速の開離実験を行い、溶融と関わる開離後の電極表面痕跡の複雑さ を述べる。開離動作後のレーザ顕微鏡による電極表面画像には、閉成から始まり、通電、 溶融、ブリッジ、放電(イニシャルアーク、アーク放電他)等の現象全てが混在して痕跡 を観察した。アーク放電の痕跡は他の現象の痕跡を覆い隠すほど広範囲に存在する。この ため個々の現象の痕跡の判別が困難である。次に、これらの電流遮断時における溶融現象 の測定・観察の複雑さを踏まえて、現象をできるだけ類別して取り扱う工夫をした。本章 での特徴的な実験手法を以下に述べる

電極材料は、代表的な接点金属材料である金 Au と銀 Ag を対象とした。接点電流は、お もに数~数十 A で実験を行った。電源は、主に乾電池・蓄電池などの内部抵抗の低い電源 を対象とした。以下に、特徴を羅列する。

(1)Ag,Auの細線クロスロッド構成。電極の変形・変質を避けた単発開離実験。

(2)接点電流電圧特性を測定し、接触痕跡を観察。過渡電流スイッチ回路で開離後のアーク 放電の影響回避した実験。

(3)電源から接触点への電力が最大となるような回路条件に着目した実験。

(4)接点開離後の表面(接触痕、溶融痕、アーク放電痕など)を、レーザ顕微鏡を用いて深い焦点深度で高倍率での電極表面観察。

2-2 溶融現象と関わる電流電圧特性の複雑さ

電流遮断時の溶融電圧 Um付近の現象は古くから多くの研究がなされている。第1章で これまで溶融現象がどのように取り扱われてきたかについて述べた。一般には、接点電圧 Veが溶融電圧 Umで接点間にブリッジが形成。その後、沸騰電圧 Ubまで安定なブリッジ形 成がなされ、最終的にブリッジが破壊されアーク放電に至ると考えられている。われわれ は、この過程の物理現象をより正確に把握するために電気回路条件を変えて、接点電圧 Ve が溶融電圧 Um前後の電流電圧特性と電流遮断後の電極表面痕跡に注目した実験を行った。 溶融電圧 Umから電流遮断、またはアーク放電が発生するまでの電圧特性は、金属溶融ブリ ッジとして、あるいは初期アークとして扱われることに含まれる現象である。

代表的な電磁リレーであるヒンジリレー(富士電機製 HH62P)の機構を利用した電流遮 断時の電流電圧特性の一例を図 2-1 に示す。この電流電圧特性は電極に Au を用い、電気回 路条件は、電源電圧 *Eo*=25V,電流 *Io*=2.5A での電流遮断時の特性である。アーク放電を過渡 電流スイッチ回路 (2-4 節で詳述)で抑止した実験であり、開閉動作全体の電流電圧特性は、 実用的には問題のない応答を示した。しかし、接点電圧 *Vo*が溶融電圧 *Um*である 0.43V 付 近の電圧レンジと時間軸を拡大すると、図 2-1 に示すごとく複雑な応答を示す。 溶融電圧後、沸騰電圧 *Ub* (Au の場合 0.9V)以上に上昇した後、電流遮断に向かっている。 このように 0.43V(Au)付近の電圧応答が、複雑な繰り返し応答を示すことは電気回路条件

(電源電流電圧)に関係なく共通であるが、電圧波形には再現性が乏しい。そこで、特性の再現性を向上させるために接点接触状態を出来る限り同一になるように努め、以下の工 夫をした。

- ・0.5mmφを直角に対向するように配置したクロスロッド構成の電極
- ・接点閉成後に通電しオンバウンスを避けた実験
- ・1回だけの開離実験

このような条件で、溶融電圧 Um 付近の電圧特性の測定を数十回行った。図 2-2(a)がその測 定回路である。図中の一点鎖線で囲んだ回路は TCS 回路である。しかし、Um 付近の繰り 返し波形が多少単純にはなったが、応答の複雑さは残った。この複雑さの傾向を、代表的 な3グループに分けてみた。電流電圧特性の代表的特性が同図(b),(c),(d)である。(b)図には 溶融電圧以後は単純な電流遮断に至り、ブリッジ特性と呼ばれるような V=Um 付近での複 雑な電圧変化は観られない。これは、例外的な波形である。(c),(d)図ではブリッジ特性と呼ばれるような電圧応答が確認できる。(c)では、複雑な電圧応答の変化後に $V_{c=}U_{m}$ から一気に電流遮断に至るが、(d)では V_{c} が U_{m} から沸騰電圧 U_{b} 上昇したのち、電流遮断に至っている。この複雑さが起こる要因について、第3章で検討する。



(Au 電極、汎用ヒンジリレーHH62P、回路条件: V=25V,L=2.5A)





(d) V=Um後に Vb より高い電圧まで上昇した後に電流遮断に至る V-Le特性
 図 2-2 複雑な溶融電圧付近の接点電圧 Ve応答の分類

2-3 溶融現象と関わる開離動作後の電極表面痕跡の複雑さ

電気接点の溶融現象を研究するためには、電流遮断時の接点電流電圧特性の測定と組み 合わせて、電極表面の溶融痕の観察が不可欠である。可動電極の移動距離がナノメータ程 度の間に起こる接点開離現象の痕跡の複雑さをレーザ顕微鏡により観察した。しかし、電 流開閉動作後の電極表面には、閉成時のオンバウンス現象や接点開離動作後のアーク放電 など、全ての現象の痕跡が混在することになる。加えて、電極表面の加工痕や接触力によ る塑性変形などの痕跡がある。それらと区別して、溶融痕を探すことが必要になる。接点 の電流遮断時の電流電圧特性と、開離動作後の接点表面の痕跡を対応させて観測するため に、汎用ヒンジリレー(HH62P)の機構を利用して、以下のように改造した実験を行った。

- ・対称的な接触力を安定に発生するために、汎用ヒンジリレーの Ag 電極の可動側正極電 極の接触部を曲率半径 0.5mm の半球状に加工
- ・電流遮断時の可働電極の動きは低速かつ定速に行うために、積層圧電セラミック アクチュエータを速度 4.5µm/s で駆動
- ・電極部の閉成は手動マニュピレータで行う
- ・ 電源電圧は 25V, 電流は 1.2A として、比較的短いアーク時間での痕跡観察・単発実験 ・表面観察は、平面電極側(負極)をレーザ顕微鏡で観察

図 2・3 に圧電アクチュエータを用いた微小変位を操作する開離実験装置の構成を示した。 圧電アクチュエータの駆動電圧を図 2・3(c)に示す。立ち上がり時間が 4.5µm/s、経ち下がり 時間も 4.5µm/s を与えるような電圧 125V の台形波形である。図 2・4 は、そのときの電流遮 断時の電流電圧特性である。図中の点線円は左から開離時の現象を類別したものである。 左から順に、通電現象、機械的開離に従い接触抵抗が増大し V=Umから初期アークまでの 現象、アーク放電の点弧から電流遮断までの現象を区別して 3 つの楕円で囲った。溶融か らはじまり、130µs で収束するアーク放電に対応した接点電圧 V₆接点電流 I_c 特性である。 圧電アクチュエータは剛性が高く、定速動作であり、時間と変位が比例するので、アーク 放電が収束する時間での可動電極の変位は、4.5µm/s×130µs であり、0.6nm ということに なる。この時間までに、アクチュエータがどのような挙動で、どのようなギャップ状態か は推定できないが、駆動電圧と変位が定速範囲での動作と推定した。



(a) 圧電アクチュエータを用いた接点開離実験装置



(b) 平電極と曲面電極の接点構成



(c) 圧電アクチュエータの駆動電圧

図 2-3 変位を定速で操作する開離実験装置の構成



図 2-4 130µs で溶融からアーク放電消弧まで変位する接点電圧 V_c,接点電流 I_c 特性(E₀=25V、 I₀=1.2A)

この節ではこの間に生じた電極表面の変化・痕跡の複雑さを以下に羅列する。 図 2-4 の電 流遮断時応答には点線円で類別した現象である通電現象、機械的開離に従い接触抵抗が増 大し V=Umから初期アークまでの現象、アーク放電の点弧から電流遮断までの現象が含ま れていると推定した。矢印で示した 130μs の間に、V=Umからは、初期アークと呼ばれる 現象を経て、アーク放電に移行していると考えられる。図2-5の電流電圧特性に対応する負 極である平面電極表面の顕微鏡写真を以下に示す。図 2-5 には、接触面全体の画像を示した。 金属顕微鏡で測定した図 2-5(a)は、痕跡の全体像である。電極全体からみると、わずか直径 200µm 程度の黒点として観測される。図 2-5(b)は、レーザ顕微鏡での画像であり、深い焦 点深度での高分解能の画像が得られた。大きな特徴として、特徴の異なる痕跡が散在して いることが挙げられる。図 2-5(c)は、球形と平面の接触により塑性変形した接触痕を 3D 画 像として表現したものである。塑性変形の痕跡のみならず、接触円の内部や周辺に、アー ク放電と関わると思われる痕跡が確認できる。図2-6は接触円の中心付近に存在する凹状の 痕跡画像、図 2-7 は中心付近に存在する凸状の痕跡である。図 2-8 は、 接触痕跡全体の接 触痕の凹凸、接触円、接触円のプロフィールをまとめて表示したものである。比較的単純 な電極構成で有りながら、130μs という短時間にこのような複雑な痕跡ができる複雑な現象 であることは特筆すべきことである。これらの画像から、溶融痕を識別することはできな かった。そこで、アーク放電を抑えて、できるだけ溶融痕だけを強調して観察する実験を 検討した。



(a) 平面電極(負極)全体 (金属顕微鏡)



(b) 接触痕(金属顕微鏡)



(c) 3D 画像(レーザ顕微鏡)図 2-5 溶融と関わる電流遮断時の接点痕跡



(a)凹状の痕跡





(c) 凹状の痕跡 3D 画像

図 2-6 中心付近に存在する凹状の痕跡 (レーザ顕微鏡)



(a) 凸状の痕跡





(c) 凸状の痕跡 3D 画像

図 2-7 中心付近に存在する凸状の痕跡(レーザ顕微鏡)



図 2-8 接触痕跡全体と図内黒線部のプロフィール

第1章で引用した開離時の溶融からアーク放電に至る現象の代表的な説明図である図1-3では、 *Vc=Um* からアーク放電点弧までの変化が、ギャップが拡大することによって起こっている との説明である。われわれの測定した電圧特性と表面痕跡から、この時間内に、溶融から アーク放電点弧・消弧が起こっている。アクチュエータの速度から予測されるようなわず かのギャップの広がりが、溶融からアーク放電が短時間に停止するまでを支配していると は考えにくい。このような接点溶融から始まる複雑な現象のきっかけは、明らかにそれま での可動電極の動きである。しかし、ある閾値を超えて接点溶融からアーク放電に至る現 象は、エネルギーは電源からしか供給されない。よって、電気回路条件がそれらの現象を 支配していると考えるのが妥当であろう。この複雑な現象のスタートに位置する接点溶融 現象を支配する電気回路条件について、第3章、4章で検討する。

2-4 溶融現象と関わる電流電圧特性や電極表面痕跡の複雑さをふまえた測定・観察方 法の検討

2-4-1 開閉動作後の溶融痕確認のためにアーク放電を抑止する回路

溶融現象に直接かかわる痕跡を観察しようとすると、その後に発生するアーク放電に由 来する痕跡が優勢となり、対象とする溶融現象の痕跡を識別しにくい。 図 2-9(a)に示した過 渡電流スイッチ回路(TCS)を用いて、コンデンサの容量を的確に設計し、アーク放電を 抑止する。これは直流高電圧大電流の電気接点において、小型化や高信頼化のために、電 流遮断時のアーク放電を抑止する回路である[13]-[14]。 図 2-10 に定常的なアーク放電抑止 (TCS 回路使用)の動作説明図を示す。図中の斜線長方形で示したアーク放電領域内を通る ような電流電圧値で開離を行うとアーク放電現象が起きる開離となる。この放電現象を避 けるためには接点電圧がほぼゼロのときに電流を遮断する。図 2-11 に定常的なアーク放電 抑止(TCS 回路使用)を行った時の電流遮断時の接点電流電圧特性をモデル的に示した。従 来回路と TCS 回路を使用した場合の回路電流 Io、接点電流 Io、や接点電圧 Voを比較した。 TCS 回路によって、開閉接点での電力発生が抑えられ、アーク放電が点弧しない。この回 路のもう一つの特徴は、開閉接点電流は瞬時に遮断できるが、電源と負荷を流れる回路電 流は、接点開離直後には同量の電流がコンデンサに流れ続ける。これにより配線等による 残留インダクタンスによるサージ電圧を大幅に低減できる。これを、本研究に適用するこ とによって、本来ならアーク放電が発生する電気回路条件での実験でも、溶融現象が起き た後、電流遮断時に不可避的に発生すると思われたアーク放電を抑止すれば、溶融痕の観 察において著しく便利である。また、溶融現象から定常的なアーク放電に移行する間に、 回路のインダクタンスによって電流遮断時に発生するサージ電圧は初期アークと呼ばれる 現象を起こす。電圧振幅が最小アーク放電電圧であるパルス状の電圧とその期間に電流が ゼロに減少するのが特徴である。この現象は初期アーク(イニシャルアーク、ショートア ーク)と呼ばれる。このときの接点電流電圧特性を模式図として図 2-9(b)に示した。TCS 回路に付加コイル Lrを挿入すると、初期アークの電圧とその時間幅を調整でき、溶融現象 のその後の推移を実験するのに便利である。このことは、第4章で詳述する。

18



(a) アーク放電を抑止し、初期アーク時間を制御した過渡電流回路(TCS回路)



(b) アーク放電が起きないような条件で、初期アーク時間を制御した電流遮断時の 接点電流電圧特性

図 2-9 開閉動作後の痕跡確認のためのアーク放電を制御する回路



図 2-10 定常的なアーク放電抑止(TCS 回路使用)の動作説明図

	項目	従来回路 アーク放電なし アーク放電なり	TCS回路
「 電」	回路電流Io	アーク放電なし アーク放電あり Io	Io 丸電電流
流	接点電流I₀	。t 	
電圧	接点電圧Vc		Vc E0
電 カ	接点電圧Pc	P_{c} $I_{c} \times V_{c}$	$ \begin{array}{c c} P_c \\ P_c \Rightarrow 0 \\ 0 \end{array} P_c = 0 \end{array} $

図 2-11 定常的なアーク放電抑止(TCS 回路使用) を行った時の電流遮断時接点電流電圧特 性の説明図

2-4-2 機械的な開離動作の再現性向上をめざした実験

2-4-2-1 ヒンジリレーの改造機構と実験サンプル及びホルダ

前節までに述べた接点開離動作後の電極表面の複雑な痕跡から、溶融現象と関わる痕跡 を他の要因から区別して観察したい。そのためには、機械的な接触の仕方に、以下のよう な工夫をした。なお、実験は、取扱いが簡便で開離速度が比較的早いヒンジリレーの改造 機構と、開離速度を制御できるパルスモータによる開閉機構の2種類で行った。ヒンジリ レーの構造は、図2-12(a)に示した様な柔らかな片持ちハリで接点に接触力を与える構造で ある。初期ギャップとバネ定数や駆動コイル電流の組み合わせで、力は0.001Nから0.1N 程度の範囲で変化できる。ヒンジリレー用のサンプルやサンプルホルダを以下に示す。図 2-12(b)に後述のパルスモータによる開閉機構での共用をめざしたホルダを示す。図2-12(c) は細線を搭載する電極である。

- ・接触は円柱電極を直角に押し当てるクロスロッド構成。Au,Ag。0.5mmφ。長さ4mm。
 (ヘルツの接触理論によれば、接触面は円形となる。塑性変形による接触痕も円形)
- ・接点金属ホルダは、ロッドに対応した溝付の 4mmφ Cu 円板。金属はんだで搭載。 (1回開離実験のために接点材料交換のしやすい構造)

以上の構成の外観や構造図を、図 2-12 に示す。



図 2-12 実験サンプル及びホルダ (ヒンジリレー用)

2-4-2-2 パルスモータ精密開閉装置による位置(接点ギャップ)制御

開閉機構での細密な位置制御により、塑性変形などを含めた接触を取り扱うことを目指 した。前述の圧電アクチュエータだけでは変位量が小さく、手動マニピュレータとの組み 合わせでの実験であった。接触開始時の設定が難しいので、パルスモータによる精密開閉 装置を検討した。クロスロッドの接触力や開閉速度を制御するために、パルスモータと減 速ギヤを組み合わせた精密開閉装置を試作した。接点はヒンジリレーと同様にクロスロッ ド機構とした。図 2-13 に実験サンプル及びホルダを示す。特徴として

接点ホルダは、ねじ穴付プリント板に実装され外部電極に接続し残留インダクタンスの少ない構成にしたことが挙げられる(TCS回路に接続)。



図 2-13 実験サンプル及びホルダ(精密開閉実験装置用)

精密装置の基本仕様は、制御精度 0.1µm/パルス、最大速度 1mm/s である。剛性が高く、 パルス数による精密な位置決めにより、接点間変位の精確な設定を目指した。ソフト的に は1パルスの設定が可能だが、バックラッシュが 7µm パルスであった。押しつけ量の制御 によって、クロスロッド電極の塑性変形による接触痕をほぼ円形に形成できた。深さをレ ーザ顕微鏡で測定することで、クロスロッドの接触状態を推定できる。以下に、精密開閉 装置の外観を図 2-14 に示す。図 2-14(a)はクロスロッド電極取り付け位置であり金属線材 (金属接点)は対向に配置されている。図 2-14 (b)は開閉精密装置外観であり測定回路とア クチュエータ側に取り付けた負極側の電極、固定された金属板に取り付けた正極の電極の 画像である。図 2-14(c)は測定機器全体の外観である。画像内には実験の初期条件として接 点を閉成の位置に持っていくために使用するレーザ変位計、接点電流電圧を測定するため のオシロスコープ等の機器が撮影されている。





- (a) クロスロッド接点電極ホルダ取り付け位置
- (b) 開閉精密装置外観



パルスアクチュエータ ・0.1μm/パルス ・最大速度1mm/s

(c) 測定機器全体の外観

図 2-14 精密開閉実験装置の外観

2-4-3 レーザ顕微鏡による痕跡観察方法

開離動作後の電極表面は円筒面上に接触痕の凹面があり、その中に溶融やアーク放電に 由来する複雑な痕跡が生じる。この表面観察には、レーザ顕微鏡が威力を発揮する。 以下に、使用した顕微鏡の仕様を示す。

- ・型式:島津製作所 OLS4000
- ・光学系:オリンパス製。共役焦点レンズ使用。
- ・倍率:~8556倍
- ・高さ方向分解能: 100nm ステップ 3000 枚の画像合成

レーザ顕微鏡の特徴として、深い焦点深度で接触痕全体の画像が表示さること、部分的な 拡大がおこなえること、接触円の径や凹凸部の体積が定量化できることなどがある。図 2-15 には、レーザ顕微鏡でクロスロッド電極での実験の例と電極を測定する箇所を示した。測 定は接触円の縦横プロフィール、面積等をおこなう。また、接触円内に存在する開離動作 後の開離現象に伴う痕跡にも同様の測定を行う。



図 2-15 レーザ顕微鏡で測定する開離動作後の接触痕跡

本レーザ顕微鏡装置の特徴は、充実したソフトウエアによって、部分的な拡大はもとより、3次元表示や、レーザ画面への光学像からの自然な着色機能など、多彩な機能を有する。 1例として、図 2-16 にレーザ顕微鏡で測定する際の操作画面を示した。全体像と部分拡大 像の対応。保存データでの接触痕の定量化が可能である。



図 2-16 レーザ顕微鏡で測定する際の操作画面一例

電気接点観測において、対向する正負電極の痕跡位置を正確に測定することが必要である。われわれは、クロスロッドによる接触痕が円形であることと、線引き加工によるロッドには線引き方向に薄く筋状の加工痕が残ることに着目した。図 2-17(a)は、レーザ顕微鏡で測定した痕跡画像の一例であり、(b)は測定した痕跡を定量化したデータの1例である。



(a) 観察画像

幾何	測定/	パラメータ										
番号	判定	距離[µm]	角度[°]	面積[µm²]	半径[µm]	周囲長[µm]	中心X[µm]	中心Y[µm]	直径[µm]	ΔX[µm]	ΔY[µm]	
1		-	-	8366.405	51.605	-	129.031	129.078	103.211		-	
2		-		97,246		43.166	-	-	-		-	

プロファイル測定パラメータ

	番号	判定	幅[µm]	高さ[µm]	長さ[µm]	角度[°]
7	1		52.216	2.447	52.273	2.683

幾何測定パラメータ

1: 塑性変形の円の面積,半径

2:痕跡1の面積

疽跡の面積	志	休巷パー・	1/5
派则♥♥囬悢、	12凹113、	「仲介良ノ・ノノ	. ,

	番号	判定	面積[µm²]	表面積[µm²]	体積[µm³]
7	1		8428.700	8681.981	12172.263

プロファイル測定のパラメータ 1:プロファイル画像による、円の中心の深さ

痕跡の面積、表面積、体積パラメータ 1:塑性変形の円の体積

(b) レーザ顕微鏡で測定した痕跡の各測定項目の一例

図 2-17 レーザ顕微鏡で測定した痕跡の一例

2-5 Au,Ag 接点の接点電圧 Vaが溶融電圧 Um付近での電流電圧特性や開離動作後の痕跡観察からの考察

電流遮断時の溶融現象における電気的な測定、光学的な痕跡観察の複雑さとその取り扱いに関するわれわれの工夫について述べた。第1章で述べたこれまでの研究内容と、本章 での検討結果を比較しながら、電流遮断時の溶融現象の研究は、以下の3項目の視点で行 うこととした。

- ・対象とした Au,Ag 接点での電流遮断時電流遮断時の溶融現象は、機械的な接触状態に は依存するが、機械的な開離速度ではなく、電気回路に支配される条件を検討する。
- ・接点抵抗 Rcの増加は、接点接触部が潜熱を受け固相から液相に変化する現象が電流電 圧特性に複雑な影響を与ることを検討する。
- ・対象とした過渡現象では溶融現象やアーク放電に移行する電子的現象が並列に起る可能性を検討する。

2-6 むすび

2-5節で考察した仮定の妥当性を、第3章、第4章で検討する。溶融現象の確認のために、 過渡電流スイッチ回路を適用して開離動作後のアーク放電を抑止した開離実験を行う。そ の結果の痕跡を、実効的に焦点深度の深いレーザ顕微鏡の観察と組み合わせる。

第3章 電流遮断時の接点電圧 Vaが溶融電圧 Um付近での溶融現象の検討

3-1 まえがき(電源から溶融エネルギーを供給する電気回路条件への着目)

前章の2-5節において図2-1、2-2の電流電圧特性の複雑さについて次のことを検討した。 接点抵抗 *R*_eの増加は、接点接触部が潜熱を受け固相から液相に相変化する現象が電流電圧 特性に複雑な影響を与える。また図2-1内の電圧特性に Holm の φθ理論に基づく溶融電圧 *U_n、沸騰電圧 U_b*の値に線を引いた。その電圧特性付近には次のような特徴がみられた。 溶融電圧 U_m付近では急激で複雑な変化を繰り返す。沸騰電圧 *U_b*を超えた後に電流が遮断 する。これらのような特徴を持つ現象は多くの研究者によってブリッジ現象として取り扱 われてきた。この現象の直後、接点電圧は Holm が示したアーク放電最小電圧付近まで上 昇して、その後、アーク放電に移行する。第2章で示した圧電リニアアクチュエータでの 開離実験では、溶融からアーク放電終了までの130μsの可動電極の想定移動距離が0.6nm にもかかわらず、開離後の電極表面は、接点の塑性変形による接触痕全体に、アーク放電 と係ると思われる輪郭が明瞭な凸部、凹部と、痕跡全体は銀白色といった複雑な痕跡であ った。

本章では、これら溶融と係る現象について、電流電圧特性と開離動作後の接点表面観察結果などから、電流遮断時の溶融現象について検討する。

まず、電気接点と電流ヒューズにおける電流遮断現象の差異を比較し、電気接点におい ても、熱的、電気的現象として電流遮断を検討すべきことを述べる。次に、金属は融点温 度において、固相と液相が存在し、それらの抵抗率は大きく異なることに着目した。さら に、固相から液相への相変化には、溶融エネルギー(潜熱)が必要で、電気回路からジュ ール熱としての供給が回路条件で異なることを検討する。最後に、接点が溶融し、電流が 遮断した後の接点表面状態を観察し、溶融痕の特徴を検討する。

28

3-2 電気接点の電流遮断時現象と金属ヒューズの溶断時現象の比較

開離時の接点の電流電圧特性は、通電状態から溶融現象の前までは、おおよそは接点間の接触力の変化で決定される。しかし、接点の溶融時付近の現象は異なる。前章で述べた低速の圧電リニアアクチュエータでの実験では、溶融からアーク放電終了までの時間は130µs であった。この間のリニアアクチュエータ先端の移動距離は、0.6nm と推定した。この間に、急激な電流遮断と安定したアーク放電現象への移行・持続・終了が実現している。これらは、 電気的なエネルギーの供給で決定される現象ではないかと考えて、以下の実験を行った。

電源電圧(3.2A)、負荷抵抗(1.8Ω)がほぼ同じ電気回路条件で、導体部を電磁リレー、ヒュ ーズの2種類を使用した開離実験を行った。まず電磁リレー(富士電機製 Ag 接点 HH62P) で実験を行った。次に単純なジュール熱により溶断する電流ヒューズ(ガラス管ヒューズ Ag 細線 仕様値 1A) での電流遮断時の素子間の電流電圧特性を測定した。図 3-1(a)は、リ レーに対する電流遮断時の特性、(b)はヒューズの電流遮断時の特性である。いずれも、電 流遮断時特性を時間軸 500ns/div で表示した。実験はヒューズが過電流で溶断する条件で行 い、リレーは同じ電流値を開閉する実験である。接点電流は、リレーでは初期アーク時間 電流遮断が開始する直前まで電源と負荷抵抗で決まる値であるのに対して、ヒューズでは、 エレメント部(Ag:20mm)全体が溶断直前には高温となり抵抗値が上昇するので、溶断前 に徐々に接点電流が減少している。まったく異なるデバイスであるにもかかわらず、電流 遮断時特性がリレーは 500ns、ヒューズは 250ns と、ほぼ同じであることに驚く。ヒュー ズには機械的な開離力なくても、電流遮断に至る。電気接点でも、この段階における電流 遮断時間は、機械的な条件よりも電気的な条件に支配されていると推定した

リレーにおける電流遮断時の電圧波形は、溶融電圧 Um後、振幅が約 12V、時間幅が 500ns のパルス状応答へ移行する。初期アークと呼ばれる現象であろう。これに対して、ヒュー ズでも類似の電圧特性が観察されたが、山形の特性であり最大値は 17V、時間幅は 250ns であった。いずれも、回路の残留インダクタンスによるサージ電圧と関わる。これらの類 似性から、電気接点の溶融現象は、接触抵抗が機械的な開離運動によって抵抗が増加した 後、ジュール熱による溶融・溶断過程によりすすむ。ジュール熱による溶融・溶断過程は 電気的条件に支配されると推定し、次節では、この熱的・電気的な過程をどのように表現 するかを検討する。



(a) 電磁リレー金属接点での溶断



図 3-1 電気接点の開離時現象と金属ヒューズの溶断時現象の比較
3-3 接点溶融現象における固相・液相の相変化を評価する指標の検討

3-3-1 融点における相変化と対応する抵抗率に着目した潜熱電圧 Umの提案

電気接点の電極は、金・銀・銅などの金属である。固体金属の抵抗率は、温度によって 上昇する。軸対象な接点構造で、温度分布と電位分布が同じであるとみなされる場合、Holm らの *φθ* 理論(接点電圧 *V*_cから接点接触面近傍の最高温度を推定できる理論)によって、 融点温度に対応する接点電圧は溶融電圧 *U*_mとして、(3-1)式から求められる。

$$T_{\max} = \left(\frac{V_c^2}{4L} + T_0^2\right)^{\frac{1}{2}} \approx 3200 \times V_c[K] \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad (3-1)[9]$$

この式中の V_c は接点電圧であり、 T_o は測定環境の温度、 T_{max} は接点内の最高温度である。 また式中の L ($L=2.45\times10^{s}$ 〔(V/K)²〕)は、 $\rho\lambda=L\cdot T$ (Widdemann-Franz の法則)より得られる。

(3-1 式)から、Holm は、電流路の材料の軟化点 T_s 、融点 T_m や沸点 T_b に相当する電位差 を求め、各々を軟化電圧 U_s 、溶融電圧 U_m や沸騰電圧 U_b を示している。すなわち、 $\varphi\theta$ 理 論の成立状況下で接触電圧が 0.5V になれば、接触部の最高温度は 1625K となり、多くの 金属は溶融していることとなる。

表 3-1、3-2に、金 (Au) と銀 (Ag) に対する融点付近の抵抗率の温度との関係を示した。 日本金属学会編金属データブック (P14~15 参照) による。融点において、固相から液相 に相変化するものとして、融点における固相の抵抗率は固相としての最高温度での測定値 から推定した。図 3-2 はその関係をグラフで表現した。金属の固相の抵抗率は、液相にな ると、Au では 2.35 倍、Ag では 2.13 倍となる。この相変化には溶融エネルギー (潜熱) が 必要である。金属がこのような相変化する前後や途中における電気的・熱的な物性の変化 に関する定量的な報告は見つけられなかった。電気接点の場合、溶融エネルギーの提供は 電気回路からであり、相変化の速度は電気回路条件に支配されると推定した。次節では、 接点の最高温度が融点温度のとき、接点の一部は、固相の抵抗率から液相の抵抗率へと変 化すると推定されるが、その電気的な特性への影響を検討する。 U_m 付近の接点電圧の測定において、電圧の立ち上がりが U_m 付近で、それまでの時間変化とは異なる変化を示し、明確に U_m を観測できる。 $\varphi\theta$ 理論で求められる U_m は固相・液相どちらの抵抗率に対応するのか、もう一方の抵抗率について異なる接点電圧が存在するはずである。固相の抵抗率を U_m に対応すれば、瞬時の相変化に抵抗率の上昇による電圧上昇は蒸発温度に対応する接点電圧 U_b を超すことになってしまう。そこで U_m を液相の抵抗率に対応すると考え、融点での固相の抵抗率の比から潜熱電圧 U_b を指標として導入してみた。

この Umは、接点部が溶融エネルギーによる液化後に対応すると想定した。相変化前後で は接点形状に変化がないと想定し、溶融エネルギー(潜熱:latent heat)を吸収する相変 化直前の状態での接点電圧を Umと定義する。

相変化前後での密度の比を検討する。Ag の場合、融点 960.7℃での固体の密度を室温密 度と線膨張係数から推定すると、 $9.88 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ となった。一方、液体の密度は $9.346 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ であり、相変化によって体積は 5%増加することになる。比抵抗率の変化は 213% であるので、相変化前後の電気的な抵抗値は比抵抗率の変化のみで推定することにした。 接点電流 L、溶融電圧 U_m と接触抵抗 R_m との関係は(3·2)式である. 接触点を 1 点とした場 合で R_m は、Holm の a-spot の半径の計算式を適用すると。金属の抵抗率で表現できる。な お、式中の R_m は液体としての融点での抵抗率であり、 R_h は固体としての融点での抵抗率 である。

$$U_m = I_c \times R_m \cdots (3 \cdot 2)$$
$$R_m = \frac{\rho_m}{2a} \cdots (3 \cdot 3)$$

ここで、接触の形状が一定で抵抗率のみが変化するとすれば、抵抗値が R_bとなる。

$$R_{lh} = \frac{\rho_{lh}}{2a} \cdots (3-4)$$

ここで、潜熱電圧 Unとして、相変化前の固相の状態の電圧を想定する。接点電流が相変

化前後で変わらないものとすると、

$$U_{lh} = I_c \times R_{lh} \qquad \dots \dots (3-5)$$

これらの式を整理すると、Ullは以下の式で定義される。

Ag, Au の場合 Uh は以下の値となる。

Ag の場合:
$$U_{lh} = 0.37 \times \frac{0.081}{0.173} = 0.174$$
[V](3-7)

Au の場合: $U_{lh} = 0.43 \times \frac{0.133}{0.313} = 0.183$ [V](3-8)

相変化前後の抵抗率の比によって、*Uh*を表現した。融点付近での接点電圧の複雑な変化 を解釈する指標とした。また、このときの接触点の状態は以下のように推察される。*Ve*が *Uh*に達すると、温度は融点に達しているとみなせるが、状態は固相と想定している。*Ve* が*Uh*から *Um*になる間に抵抗は Ag ならば 2.3 倍上昇しながら溶融エネルギー(潜熱)を 受け取ることになる。必要なエネルギーが供給されなければ固相と液相の間に留まる。



図 3-2 Ag および Au の抵抗率の温度特性

Au	温度(°C)	抵抗率($\mu \Omega \times m$)
固相	20	0.022
	100	0.028
	500	0.068
	900	0.118
固相上限	1063	0.133
液相下限	1063	0.313
液相	1100	0.318
	1200	0.332

表 3-1 Auの温度と抵抗率の関係

溶融エネルギー(潜熱)

12.37 [10³ J/mol]

表 3-2 Agの温度と抵抗率の関係

Ag	温度(°C)	抵抗率($\mu \Omega \times m$)
固相	20	0.016
	100	0.021
	500	0.047
	900	0.076
固相上限	960	0.081
液相下限	960	0.173
液相	1100	0.184
	1200	0.194

溶融エネルギー(潜熱)

 11 ± 0.5 [10³ J/mol]

3-3-2 機械的な接触力のみによる条件での接触抵抗測定結果と Uhの対応

電気接点における電流電圧の変化を生じる原因は接点の抵抗変化である。接点での電流 遮断時の溶融が無視できる条件で、機械的な接触力のみでの接触抵抗を測定し、外挿によ って機械的な接触抵抗の全体を推定した。2章2-2節で取り上げた溶融電圧付近の複雑な現 象観察(接点電流 2.5A)に用いた同型格のヒンジリレーを対象に、図 3-3-(a)に示すような 10 回の測定結果から、図 3-3-(b)のような接触抵抗変化の6次多項式近似曲線で想定した。同 図(a)では溶融が起こる *V*_c=*U*_m直前までの *V*_c測定データと *L*_c測定データから導出した接触 抵抗の時間変化を示した。ここで Au の軟化温度は 100℃であり、これ以上では電流のジュ ール熱による接点抵抗の上昇が無視できないと考えた。

そこで、接触抵抗を、*V=Us*までの測定データの平均値をからより高い抵抗値を外挿で求めた。図中には、2.5Aを想定した時の軟化電圧 *Us*,溶融電圧 *Um*, 沸騰電圧 *Ub*に加えて、 潜熱電圧 *Ub*も記入した。接触抵抗が高抵抗になっても外挿曲線に位置するとすれば、2.5A の電流遮断時の溶融電圧付近で観察される複雑な電圧応答の原因は、他の要因としての電 気的な回路条件が重要となることを示している。

ヒンジリレーでのAgクロス電極開離時の仮想的な接点抵抗変化だけでは約80 μ sの間に、 接点電圧 V_c は、 通電時接触抵抗相当電圧 $\rightarrow U_h$ 相当電圧 $\rightarrow U_m$ 相当電圧 \rightarrow 完全開離(電源電 圧) へと移行することになる。この時間は、実験で使用したリレーにおける溶融現象と係 る抵抗変化の起点から終点までの基本的な時間であろうと推定した。



(a) 溶融電圧付近の接点電圧 Vcと接点電流 Lcから導出した接触抵抗

(10 サンプル→平均)





(b) 溶融電圧付近までの接点電圧 V_e,接触抵抗と時間の関係 図 3-3 溶融の起らない電流条件での接触抵抗と時間変化推定

3-3-3 Um付近での複雑な電圧特性への Ubの適用

溶融時のAuクロスロッド電極での典型的な溶融電圧 Um付近の接点電圧測定結果例(第2 章 図 2-2)に、前節で求めた溶融と係る機械的な時間 80µs と潜熱電圧 Uhを書き加えた。 図 3-4-(a) は時間内に単純な電圧上昇がある場合で、V=Uh付近で時間変化の傾斜が変化 している。80µs 程度で、V=Umで電流遮断に至る。 図 3-4-(b)は、Uhと Umの間を2段の 繰り返し波形である。Uhと Um間で接点抵抗が変化しているとみなせる。一方、より複雑 な 図 3-4-(c)は、機械的な時間内の多段の変化がみられるが、それらはいずれも Uhと Um 間での変化である。一方、機械的な時間 80µs 以降の接点電圧の上昇は、接点の溶融と係る 機械的な再接触の発生の可能性を暗示している。



(b) 溶融電圧後、スパイク状の電圧特性を繰り返した後電流遮断に至る開離時 Ve-Ie特性



(c) 溶融電圧後、更に複雑な応答後、電流遮断に至る開離時 Ve Ie 特性

図 3-4 ヒンジリレー接点(Au)での V=Um付近の電流電圧特性

3-3-4 接点電圧変化(V=U1と V=Um)に着目した電流遮断段階の分類

図 3-3-(a)に示した機械的な抵抗変化と、図 3-3-(b)で示したような複雑な電圧波形が、 *V=U*_hと *V=U*_m間で発生することを踏まえて、開離時の応答を、図 3-5 に示すような 4 段 階に分けてみた。複雑な溶融現象は C 段階で発生する。

A: 機械的な接触力減少による接点抵抗増加

B: ジュール熱による比抵抗温度係数による抵抗値増加が顕著になる領域

C: 接点金属の相変化による抵抗増加(相変化による抵抗増加)

D:相変化に伴う状態の急変



図 3-5 V=Um付近で観察される接点電圧の電気的な応答を接点電圧変化

(V_c=U_{lh} と V_c=U_m) に着目した開離段階の分類

前節までに取り扱った *V=U* 付近の現象が複雑なケースに関して、この分類を適用して みた。図 3-6(a),(b),(c)の異なる応答に、この分類を書き加えてみた。いずれにも A-B-C-D の過程があり、*V=U* になった後の展開に、大きな差異が生じている。差異が発生する因 果関係の解明は今後の課題である。



図 3-6 V=Um付近で観察される接点電圧を電気的な応答メカニズムで分類

3-4 Vc=Um付近で溶融エネルギーを供給する電気回路条件の検討

(電気接点に接続される電源と負荷と接点抵抗 R の関係)

3-4-1 接点抵抗 Reが変化するとき電源から接点に流れ込む電力 Peの Reに関する微係

数(*dP_c*/*dR_c*)が、溶融現象を支配する要因であることの検討

開離時には、ジュール熱によって接点抵抗 *R*eは増加するので、その抵抗増加が更なるジ ュール熱の発生にどのような影響を与えるのかについて、電気的な回路条件を検討した。 電源と負荷と接点抵抗からなる単純な等価回路を図 3-7(a)に示した。電源から負荷抵抗を通 して、電気接点に流れ込む電力 *P*eは(3-9)式であり、接点抵抗 *R*eを変数とした時の微係数 (*dPe*/*dRe*)は、(3-10)式となる。*R*eが *Ro*より小さな条件では、温度による抵抗増加は正 帰還となり、金属抵抗体における電気的な発熱現象は電気回路として更なる抵抗増加に自 律的に進む。一方、*Re*が *Ro*より小さな条件では、温度による抵抗増加は負帰還としなり、 電気的な発熱現象は進行しない。*Re=Ro*の前後で *Re*の増加に対する変化の様子が劇的に変 わることになる。

接点での消費電力は、(3-9)式のように単純な式であらわされる。電力 P_{max} の計算例を 図 3-7-(b) に示す。縦軸の電力は、最大電力 P_{max} で、横軸は、回路抵抗 R_0 で正規化した 計算値で、横軸は対数目盛で示した。 $R_c=R_0$ で最大値を持つ特性である。

$$P_{c} = \left[\frac{E_{0}}{(R_{0} + R_{c})}\right]^{2} R_{c} \cdots (3-9)$$

接点抵抗 R_c による消費電力を示す微係数は(3·10)式であらわされる。 $R_c=R_0$ で、電力は最大値 P_{max} となる。微係数の符号が逆転する。

$$\frac{dP_c}{dR_c} = \frac{R_0 - R_c}{\left(R_0 + R_c\right)^3} E_0^2 \cdots (3-10)$$

機械的な開離動作では、抵抗は常に増加傾向である。そのために、溶融現象の進行には、 相変化に必要な潜熱の蓄積と、相変化による大幅な抵抗増加とが、自律的に、又は機械的 に開離動作を伴なって進行することが必要になる。電気接点の電流遮断時の回路において、 発生するジュール熱によって、接点抵抗 *R*eは増加する。固相と液相の相変化では、抵抗値 が瞬時に2倍程度も変化する。相変化に必要な潜熱の供給と電気回路条件との関係につい て、次節で検討する。



(a) 電源・負荷・接点抵抗の等価回路



(b) 接点抵抗値を正規化した時の電力

図 3-7 電源・負荷・接点抵抗の等価回路で、接点抵抗 Re が変化する時の電力 Pc

*R*_eの時間変化の要因は、機械的な開離による接触力の変化のみならず、ジュール熱による 接点金属の抵抗温度特性による増加や、固相から液相に変化による抵抗率変化に由来する。

3-4-2 融点での相変化に必要な電力の供給に関する dP_c / dR_c の関係の検討

実際の電気接点の溶融現象に、前節の検討結果を適用する。以下に R_m、R_hと R_cの大小 関係によって決まる溶融条件を述べる。

(A) 電気回路条件で自律的に溶融に進む条件:

接点電流値がきまれば、潜熱電圧 U_{lb} 、溶融電圧 U_{m} に対応する接触抵抗 $R_{lb} \geq R_{m}$ が定ま る。接触抵抗 R_{c} が徐々に増加して、 R_{lb} , R_{m} となる場合を検討する。 $R_{c}=R_{m} \leq R_{0}$ の場合であ る。前節の回路で、接点抵抗 R_{c} が等価的な負荷抵抗(実効的な電源の内部抵抗または接点 抵抗への入力抵抗) R_{0} より小さな条件では、抵抗増加は正帰還となる。電気的な発熱現象 による抵抗増加は、自律的に進むことになる。相変化後もこの条件を満たせば、液化が進 み電流の溶断に至ることになる。すなわち、 $V_{c}=U_{lb}$ の R_{c} 、すなわち R_{lb} が $R_{lb} \leq R_{0}$ で、発 生電力 P に対する dP_{c}/dR_{c} は常に正であり、相変化が起こり自律的にすすみ、 $R_{m} < R_{0}$ であ れば、 R_{m} まで到達する。



図 3-8 電気回路条件で自律的に溶融に進む条件

(B) 電気回路から潜熱の供給は受けるが、溶融までは自律的に進めない条件:

 $V_{c}=U_{h}$ での R_{c} が $R_{h} \leq R_{0}$ であるが、 $V_{c}=U_{m}$ での R_{c} が $R_{m} \geq R_{0}$ となる場合である。負荷 抵抗 R_{0} が接点抵抗 R_{m} より小さな条件では、温度による抵抗増加は負帰還としなり、電気 回路発熱現象は進行しない。 $V_{c}=U_{h}$ での $R_{c}(U_{h})$ は R_{0} 以下だが、 $V_{c}=U_{m}$ での $R_{c}(U_{m})$ が R_{0} より大きいので、自律的には溶融は進まず、溶融直前状態が接点の機械的な開離段階まで 持続することが想定される。



図 3-9 電気回路から潜熱の供給は受けるが、溶融までは自律的に進めない条件

(C) 最初から電気回路条件が *dPJ dR*_c が負で、機械的な開離動作で接点抵抗が増大して開 離に至る条件

 $V_{c=}U_{h}$ となるはずの抵抗値 R_{c} が $R_{c} \ge R_{0}$ である場合である。 R_{c} (U_{h}) が R_{0} 以上なので、 溶融温度にも至らず、機械的な接触力の変化に準じた開離となる。 R_{c} が R_{m} に到達しても潜 熱を吸収できず固体のままで開離することになる。



図 3-10 最初から電気回路条件が dPc/dRc が負で、機械的な開離動作で接点抵抗が増大して開離に至る条件

以下に、これらの条件に対応した実験結果を述べる。

3-4-3 電気回路条件で自律的に溶融に進む時の電流電圧特性の測定

接点電圧 V_c が U_m のときの接触抵抗 R_c が、電気回路として入力抵抗 R_0 より小さければ、 融点で溶融にいたるまで電力は抵抗増加とともに増大し、溶融に至る。Au や Ag の接点で は、この条件が一般的な使い方での回路条件に相当する。図 3-11(a)に、この条件 ($R_m < R_0$) での Ag 接点での実験回路を示す。 (b)には V_c - I_c および P_c 特性,(c)には溶融痕の顕微鏡写 真を示した。(b)図に示した位置を潜熱注入開始時刻 ($V_c=U_m$)と終了時刻 ($V_c=U_m$)の電流値 から、本推定法の妥当性を検討する。Ag 接点の潜熱電圧 U_m は 0.174V である。この時の 電流は 1.6A であるから、このとき接触部の抵抗値は 0.11 Ω と推定する。この部分が相変化 して、抵抗が増加し、電流値が減り、その条件で溶融電圧 U_m に達すると相変化が完了して 溶融となる。その時の推定接点抵抗値は

0.11Ω(潜熱電圧/電流)×2.13(固相→液相による抵抗率の比)

×1.5A/0.9A(潜熱開始時電流/潜熱終了時電流)=0.3905Ω ……(3-11) となる。

43

一方、電流遮断時の電圧は、Ag 接点の U_m: 0.37V に相当した。そのときの接点電流は 0.9A なので、接点抵抗は、0.37V/0.9A=0.411Ω となり、潜熱電圧から求めた値と良い一 致を示した。この間、発生電力は 0.91W とほぼ一定であった。

一方、(a)に示した等価回路から、2Vの定電圧源に 1.15Ωの抵抗が直列に接続された回路 から負荷(接点)に供給可能な最大電力は、

最大電力= (電源電圧の二乗) / (直列抵抗) / 4 …… (3-12) 0.87W が得られる。この値は、前述の電力測定値 0.91W とほぼ一致し、溶融過程が電気回 路で律速されていることを示している。

なお、顕微鏡観察された溶融痕は、茶褐色で周辺部が薄色の直径 80µm 程度の円形であった。その溶融痕を図 3-11(c)に示す。本実験は次節で述べるブリッジ形成条件と対比した 実験でありヒンジリレーの開離バネには弱バネを用いて、開離速度を低下させて実験を行った。





(b) 回路条件 *R_m*<*R*₀条件で開離した時の *V_c*-*I_c*-*P_c* 特性



(c) 開離後の溶融痕
図 3-11 R_m<R₀ 条件での V_c-I_c特性

3-4-4 電気回路からの潜熱の供給を受けるにもかかわらず、電流遮断までは機械的な 開離条件で進む電流電圧特性の測定とブリッジ形成の観察

潜熱電圧に対応する接点抵抗値 $R_{\star}(U_{lh})$ が R_{0} より小さいと、溶融の途中までは dP_{c}/dR_{c} が正であり潜熱はたまる。しかし、溶融電圧に対応する接点抵抗値 $R_{c}(U_{m})$ が R_{0} より大き いと、*dP_c/dR_cがゼロと*なる段階で相変化に至るためのジュール熱の発生は増加しない。そ のために、機械的な開離条件まで潜熱の注入が平衡した状態で持続すると考えられる。 す なわち、接点電圧 Veが潜熱電圧 Ubのときの接触抵抗 Reが、電気回路として入力抵抗 Ro より大きければ、潜熱の注入は開始される。しかし、溶融電圧 Umに対応した接点抵抗 Rm が R_0 より大きければ、徐々に抵抗が増大して $R_c=R_0$ になると、 dP_c / dR_c はゼロとなり、電 力は自律的には増加しなくなり、溶融は進まず、全体の溶融には至らない。図 3-12-(a)は、 この条件でのAg接点での実験回路である。乾電池と配線抵抗を組み合わせて、テブナンの 定理から、実効的な電源電圧と抵抗値とを測定値から求めたものである。なお本実験では 機械的な開離時間によって現象が制限されると予想して、できるだけ長い開離時間とする ためにヒンジリレーの開閉バネの剛性を弱くした。その結果、約 4ms に相当するブリッジ が形成された。(b)には Vc-Le および Pe特性を示した。 開離動作が進み、 接点抵抗 Veが溶融 電圧 Umの 0.37V(Ag)に近づく段階では、電流値は 4A、接点抵抗は 0.09Ω 程度であり、R。 より小さい。その後、一時、Vaは約 0.4V のピーク値を示しその時の電流は 2.5A 程度の谷 を示す。この時の接触抵抗は、 0.166Ω となり、 R_0 よりわずかに大きい。その時の電力は 0.92W で、その後、4ms 同じ状態が継続する。この間、電力は 0.7W 程度に漸減するが開 離直前には 0.9W になる。この値は、0.75V の電源と 0.15Ω の直列抵抗の回路からの最大 供給可能電力である 0.91W にほぼ一致する。(c)には溶融痕の顕微鏡写真を示した。(b)図に 示した位置を潜熱注入開始時刻(V=Un)以降、接点が機械的な開離状態にいたるまで 4ms の間、接点電圧は Unと Unの間にとどまった。この間、ジュール熱は連続的に注入され、 (c)に示したようなピグテールのようなブリッジが形成された。



0.15Ω

(b) $R_c(U_{lb}) < R_0$ 、 $R_c(U_m) \ge R_0$ の回路条件で開離した時の $V_c \cdot I_c \cdot P_c$ 特性



⁽c) 開離後に確認されたピグテール状のブリッジ

図 3-12 $R_c(U_h) < R_0$ 、 $R_c(U_m) \ge R_0$ での条件での V_c - I_c 特性測定実験

3-4-5 最初から電気回路条件が *dPc/dRc*が負で、機械的な開離動作で接点抵抗が 増大して開離に至る電流電圧特性の測定

このような条件は,実際の電気接点の使用条件ではありえないだろう。しかし、テブナン の定理に基づき、蓄電池と電力用抵抗体を組み合わせると図 3-13-(a)に示すような回路での 実現ができた。接触抵抗はヒンジリレーのばね調整で、4.2Ω と大きな値を実現しての開離 実験である。接点電流は 0.13A であり開離直前接点電圧は 1V まで上昇したが、溶融を示す *Vc-Le* 特性は現れず、単純な機械的な開離に至っている。この条件では電流が小さいので明 確な溶融痕は観測できなかった。閉成時にすでに接触抵抗が高く、すでに接点電圧が溶融 電圧よりも高かった。潜熱が蓄えられる条件ではなかったため溶融が起こらなかった。



図 3-13 $R_m > R_0$ 条件での V_c - L_c 特性 単純に機械的な開離

3-5 接点電流による溶融痕のレーザ顕微鏡による観察

3-5-1 開離動作後の接点表面の溶融痕の観察の工夫

接点の電流電圧特性の測定において、潜熱電圧と溶融電圧に着目すれば、溶融の有無の 推定はできる。しかし、開離動作の再終段階にはアーク放電などの現象の萌芽となる現象 が予想される。2章における圧電リニアアクチュエータの実験は、純銀接点で、平面電極と 半球状電極構成で、開離動作1回だけの実験であった。溶融電圧を経て、アーク放電電圧 が130µs 持続した実験であったが、図2.9に再掲載した写真では、接点面には、溶融から アーク放電に至る過程で発生した複雑な痕跡が重なり合っていると思われる。この中の溶 融にかかわる痕跡の特徴を明らかにする目的で実験を行った。



図 2-9(再掲載) 接触痕跡全体の接触痕の凹凸、接触円、接触円のプロフィール

実験で留意した事項を以下に羅列する。

【再現性のための工夫】

- ·純銀 99.9% 線材
- ・クロスロッド構成 0.5mmφ
- ・位置決め溝付ロッドホルダ

(実験は基本的には、固定電極側が正極、稼働電極側が負極)

- ・残留インダクタンスを最小にするプリント板配線
- ・精密パルスアクチュエータによる開離動作

(0.1µm 精度での初期接触状態の設定)

- ・開離速度:1mm/s
- ・1回だけの開離動作
- ・接点閉成後の電流投入

【顕微鏡観察のための工夫】

・過渡電流スイッチ回路でアーク放電の点弧の抑止

対向電極の対応痕跡を明確にするための接触痕(塑性変形した円形の接触痕跡)の利用

- ・レーザ顕微鏡での対応位置の並置処理
- ・線材の欠陥箇所のあらかじめ観測による除去

(線材には、ダイスによると思われる線状痕が存在する。研磨剤等による研磨を試 みたが、均一な平滑面はえられなかった。)

3-5-2 回路電流 Lの違いによる溶融痕の観察

電圧条件 25V で電流条件(0.25A,2.5A,25A)を変えたとき、接点開離後の痕跡がどのようになり、その溶融痕にはどのような特徴があるのかを検討する。

3-5-2-1 電流電圧特性

まず、電流が遮断される時間付近の電流・電圧特性を測定した。図 3-14-(a~c)は、電流が (a)0.25A, (b)2.5A, (c)25A の場合の電流・電圧特性である。それぞれに、潜熱電圧 U_{bb}、溶 融電圧 U_mを書き加えてある。0.25A との 2.5A の場合には、U_{bb}が複雑な電圧変化に至る起 点とみなされ、U_m付近では激しい電圧変化が生じているが、U_{bb}以下になることはほとん どないようである。25A の場合は、U_{bb}、U_m付近での電圧上昇が急であるが、どちらも、 電圧増加にわずかな傾斜の差異が生じていると推定。なお、25A の場合でも、電流遮断時 に接点電圧は 10V を超えることはないので、この間にアーク放電は発生しないと推定した。



⁽a)0.25A の場合



(b) 2.5A の場合



図 3-14 溶融電圧付近の電流電圧特性

3-5-2-2 溶融痕と接触円との位置関係

電圧条件 25V で電流条件(0.25A,2.5A,25A)を変えたときの開離後の痕跡のレーザ顕微 鏡画像を図 3-15 に示す。画像から溶融痕の位置を接触円の中心からの長さと角度で表示で きる。塑性変形による接触痕は円形である。接触円の大きさや溶融痕の位置は実験ごとに 差異が生じるが、0.25A の痕跡は接触円周付近、2.5A の痕跡は接触円の中心付近、25A の 痕跡は接触痕の接触円の内側に存在することが多い。



0.25A

(a)電流 0.25A の場合



(b)電流 2.5A の場合



25A

40µm

(c):電流 25A の場合

図 3-15 正極の溶融痕と接触円との位置関係

3-5-2-3 電流による溶融痕の違い

(A) 0.25A の場合

図 3-16 に 0.25A の場合の開離実験後の表面のレーザ顕微鏡写真を示す。(a)は正極表面で ある。薄白色の痕跡が接触円外側の 2 ヶ所に広がっている。(b)は、負極表面であるが対応 箇所に痕跡を確認することができなかった。



(a) 正極表面



(b) 負極面

図 3-16 0.25A の場合の通電後の表面のレーザ顕微鏡写真

(B) 2.5A,と 25A の類似点:溶融痕の面積と凹凸体積の測定

図 3-17-(a),(b)に、2.5A の場合の正負電極の表面写真を示す。図 3-18-(a),(b)に、25A の 場合の正負電極の表面写真を示す。2.5A と 25A の開離実験後の表面のレーザ顕微鏡の写真 は、痕跡の大きさを除けば特徴はよく似ている。いずれも、正負極面の痕跡は、正極側が 凹形で、負極側が全体としては凸である。このことについては、次項 3-5-3 で詳しく取り扱 う。表面は銀白色の小球状が不規則に集合している。25A での痕跡には、正極側に痕跡の 周囲から飛散痕らしきものが観察された。





(b) 負極面

図 3-17 開離実験後の表面(溶融痕): 2.5A の場合







(a) 正極面

(b) 負極面

図 3-18 開離実験後の表面(溶融痕): 25A の場合

図 3-19 は、上記の 2.5A と 25A に対応した顕微鏡写真を、コンピュータによる画像処理 によって求めた溶融痕の面積と基準面からの凹部体積(正極)と凸体積(負極)とを対数グラ フで表示したものである。おおよそ、面積は二乗に、体積は三乗に増加している。正極と 負極の痕跡は対向しており、面積は正極がわずかに大きい。正極が失った体積と負極が得 た体積は、前者が多かった。飛散か、薄く広がって計測から漏れたのかは不明である。



図 3-19 電流と溶融痕半径及び凹部、凸部の体積測定

(C) 電流が大きな場合の指標 潜熱電圧 Ubの適用に関する考察

図 3-14-(a~c)に、溶融痕跡を観察したときの電流 0.25A, 2.5A,25A の電流溶断付近の電流・電圧波形をまとめて比較し、潜熱電圧 U_h と溶融電圧 U_m を記入した。0.25A と 2.5A の波形では、 U_h 以上で複雑な電圧応答が開始し、 U_m 付近では停滞した応答を示す。一方、25A の波形では、 U_h も U_m も予想された電圧値では、相変化を予想させる激しい変化は観測されない。応答が複雑で、再接触と思われる特性である。測定電圧からバイアス電圧を差し引いて示した U_h と U_m を示した。図 3-20 には、第 2 章で取り上げた電気接点とヒューズの溶断時の電流・電圧波形に現象を比較した。ヒューズには、Holm の $\phi \theta$ 理論は適用できないが、試みに U_h と U_m を記入した。ヒューズでは、溶融部分のほかに温度上昇によ

る金属部分の抵抗が含まれた応答波形である。電気接点でも、大電流になると溶融する接触点以外の電極部の温度上昇によって部分的な抵抗値が上がり、潜熱電圧、溶融電圧以外の抵抗値での電圧降下が無視できないものと推定した。このことをモデル的に描いた図を 3-21 に示す。なお、図 3-14(c-2)において、電流値が減り、接触時間の短い再接触と思われ る応答では、*U*_h と,*U*_mとが妥当な値であることは興味深い。潜熱電圧 *U*_hを、溶融現象の 指標として使う場合は、これらについての配慮が必要となる。



(a) 電気接点



(b) ヒューズ

図 3-20 ヒューズと電気接点の電圧特性への比較

図 3-21 は電圧降下が、接点のみならず接点電極内部で発生する場合の説明図である。大 電流の電流電圧測定において、溶融電圧 Umや潜熱電圧 Uhが、電気接点の端子電圧での測 定結果と対応しない場合の説明図である。電流ヒューズの測定では、ヒューズ長が長く、 電流による溶融部分以外の温度上昇による抵抗値変化が明確に観測される。電気接点であ っても、大電流の場合、接触部分以外での発熱、温度上昇、抵抗値増加、電圧降下増加が 予想される。銀や金のように導電率が高い材料でも、電流が 25A の実験ではそれが観察さ れた。



図 3-21 電極内の部分抵抗の増大の説明図

3-5-3 正極痕跡が凹形、負極痕跡が凸形であることの確認実験

電気接点(銀)の実験として、アーク放電が発生しない低電圧下での接点開離実験を行い、 接点開離後の痕跡を測定した W. B. Ittner (JAP vol.27 1956) らは、正極電極に凹部が発生 し、負極電極に凸部が発生することを報告している。溶融金属のブリッジ破壊時に、陽極 面上にクレータができ、負極面上にピップができることも知られている。われわれの実験 結果もそれらに一致する。

再確認のために、以下の2つの実験を行った。

(A) 装置依存性の有無の確認のための可動部、固定部の電極設置を反転した実験

正極面が凹、負極面が凸であった実験結果の妥当性を確認するために、装置依存性の有 無の確認のための可動接点、固定接点の電極配置を反転した。電源 25V、電流 2.5A、過渡 電流スイッチ回路(TCS)適用、0.5mmφAg ロッドなどの条件は同じである。接触円の様 子、溶融痕の位置や様子が従来の観測結果と一致する。さらに、正極には明確な凹形のク レータが、負極は全体が盛り上がった凸形が形成された。よって機械依存性がないことが 確認された。その時の電流電圧波形を図 3-24 に示したが、極性反転以前の応答と類似して いた。



図 3-22 装置依存性確認のための可動部、固定部の電極設置を反転 (固定側を正極から負極に変えた場合の顕微鏡観察)



図 3-23 装置依存性確認のための可動部、固定部の電極設置を反転 (可動側を負極から正極に変えた場合の顕微鏡観察)



図 3-24 装置依存性確認のための可動部、固定部の電極設置を反転時の V_c-I_c特性 (E_o 25V、I_o 2.5A、TCS、Ag)

(B) 正極 Au,負極 Ag として正極側の溶融部での溶断発生を確認する実験

Auの融点は1063℃、Agの融点は960℃である。正極に0.5mmφのAu, 陰極に0.5mmφのAgによるクロスロッド構成で電気接点を構成した。その時の電流・電圧波形を図3-25 に示した。Ag-Agの組み合わせと応答は類似している。Ubh付近の応答が異なるのは、融点の異なる金属の組み合わせによるのかもしれない。



図 3-25 正極 Au,負極 Ag を組み合わせた電気接点の開離時 V_c-I_c特性 (E_o 25V、I_o 2.5A、TCS、Ag)

図 3-26 と図 3-27 は、正極 Au,負極 Ag を組み合わせた電気接点の開離後の表面の観察の 観察結果をそれぞれの面についてまとめた結果である。

痕跡全体画像から、Ag-Ag 接点の場合と溶融痕の位置や形状が同じである。プロフィー ルや 3D 高さ画像やレーザでの撮影画像から、正極 Au 面に凹形のクレータ、陰極 Ag 面に 緩やかな凸部が発生したことが確認できる。カラー付画像からは、正極表面がほとんど金 色に覆われているのに対して、陰極表面は溶融痕の中央部は濃い金色で溶融痕の周囲に薄 い金色部が確認できる。金の融点が 1063℃、銀の融点 960℃と温度差が 100℃ある。Ag の ブリッジが残っているはずであるからブリッジのみであれば Ag が Au 表面に転移するはず である。しかし、金属転移は金が主であった。今後の検討に示唆を与える実験結果と言え るだろう。



(a) 痕跡全体と縦横プロフィール

(b) 溶融痕と測定データ



(c) 溶融痕の拡大図 (カラー画像)

図 3-26 正極 Au,負極 Ag を組み合わせた電気接点の開離実験後の正極 Au 表面の観察

(Eo: 25V, Io: 2.5A, TCS, Ag)



(a) 痕跡全体と縦横プロフィール



(b) 溶融痕と測定データ

(c) 溶融痕の拡大図 (カラー画像)

図 3-27 正極 Au,負極 Ag を組み合わせた電気接点の開離実験後の負極 Ag 表面の観察

(Eo: 25V, Io: 2.5A, TCS, Ag)

3-6 接点電圧 Vaが溶融電圧 Um以上での電流に関する考察

接触点が1点であれば、電流 Iに対して、溶融電圧 Umとなる接触抵抗 Rmは

$$R_m = U_m / I \dots (3-13)$$

となる。金属の抵抗率を ρ とすれば、Holmの a-spotの半径 aは、

 $a = \rho/(2R_m)$ (3-14)

となる。Ag では 25A の場合、5μm となり実測した溶融痕の径とは大きく異なる。 Ag 細線クロスロッドの接触では、明らかな塑性変形による接触痕が確認できた。

接触は面として広がり、多数点が並列に存在すると推定した。それらが瞬時ではなく、 順次に溶融するのならば、それぞれの接点にとっての電気回路条件は、時々刻々と変化す ることになる。図 3-28 にその様子の説明図を示した。まず、溶融直前の接点抵抗は、 R_1 か ら R_n の、位置も抵抗値も異なる抵抗体の並列接続と考える。このうち、溶断する抵抗群を R_1 とし、他を R_2 とする。 R_1 では、第3章で論じた溶融エネルギー(潜熱)のための条件であ る $V=U_m$ において、消費電力 P_{R_1} の R_1 に関する微係数が正であり、溶融が回路的に進行す ることになる。すなわち、 R_1 は、等価的な入力抵抗 R_0 と R_1 の等価並列抵抗値より小さい 場合に相当する。一方、残された R_2 は、 R_0 より大きければ、潜熱が蓄積されず溶融しない ままに、開離を迎えることになる。第3章での溶融電流の増大に溶融痕面積の拡大は、電 流 2.5A→25A が入力抵抗 R_0 を 10 倍にしたことに相当し、溶融に対応する R_1 が 10 倍とな ったことにも関係すると考えた。


[多数点の並列接続の場合]



図 3-28 接触面の広がりに伴う接触痕跡の広がりに関する説明図

上記の説明では、*V=Um*後も、接点間には些細な金属接触部が広がっていると提案。 この接触状態で、回路のインダクタンスに蓄積された電力がサージ電圧として接点に供給 されるのが初期アーク状態であろう。*Um*よりはるかに高い電圧の供給によって、金属接触 部は広範囲にわたって十分な溶融エネルギーが提供され、溶融が進むと推定した。次章で、 これらの推定を、実験で確認する。

3-7 むすび

本章では、開離時の接点電圧が Um付近の溶融現象について実験し、考察を加えた。以下の ように本章のむすびをまとめる。

(1) 融点では、金属は固相と液相があり、抵抗率は大きく異なる。 $\varphi\theta$ 理論では、抵抗率を扱わないが、接点電圧には影響を与える。融点電圧 U_m に対して、融点での液相の抵抗率と固相の抵抗率の比から求め U_{lh} とを指標とした。溶融と関わる複雑な電流電圧特性は $V_c=U_h$ 以上で発生していることを確認した。

(2)開離時の接点抵抗増加には、機械的な開離による接点抵抗増加、ジュール熱によって接 点抵抗 R_cに対する増加が加わる。その場合、電気的な回路条件として、電源から電気接点 に流れ込む電力 P_c の R_cの微係数 (dP_c/dR_c)が、接点が固相から液相へと相変化する潜熱 を電源から受け取れるかどうかを支配する要因であることを確認した。

(3) Vc=Um 直後の痕跡は、溶融状態での溶断を暗示する銀光沢の小球面の集合形状で、正極が凹状、負極が凸状であった。

第4章 接点開離時の初期アーク期間での通電電流遮断と溶融現象の検討

4-1 まえがき(初期アークとよばれる現象における溶融現象に着目)

前章において、接点電圧が Holm の φθ 理論に基づく溶融電圧 Um 付近の現象について、 接触部における固相から液相への相変化に着目した研究を報告した。融点付近で溶融エネ ルギー(潜熱)がかかわり始める現象の指標として、接点電圧に関して潜熱電圧 Uh を提案し た。その電圧以降で、溶融現象に基づくと思われる複雑な接点電流電圧特性が生じる。そ の溶融現象は接点に電流を流す電気回路の条件と関係し、接点電力 P_cに対応する接点抵抗 R_cの微係数が支配的な要因となることを示した。Ag クロスロッドでの実験で、レーザ顕微 鏡によって潜熱電圧、溶融電圧を経た後での開離後の痕跡を測定し、溶融痕の特徴を観察 した。溶融痕は、単一の接触部を想定した真実接触円に比べて、大きな面積であった。多 数の接触点の集合としての接点の溶融が電気的な条件で決まるなら、機械的な開離まで溶 融しないで存在する接触点が存在するだろうと推定している。

一般に開離接点では、接点溶融後は蒸発電圧 Ubを経て、初期アークと呼ばれるアーク放 電最小電圧値程度の矩形の電圧段階に移行するといわれている。その後、本格的なアーク 放電が点孤されることになる。この初期アークの段階においては、3 章で述べたような V=Um の条件では溶融できない金属接触が、電流遮断時に起こる初期アークでは伝導電流 を流しながら溶融すると推定した。本章では、まず、初期アークの継続時間を過渡電流ス イッチ回路の付加インダクタンスによって制御できることを述べる。通電電流 2.5A に対し て、0.08~23µs と時間を変えた実験を行った。次に、この初期アーク時間にも伝導による溶 融現象が起こり、時間に比例して溶融面積が大きくなることを示す。

4-2 電流遮断時に測定される『初期アーク』の特徴

電気接点の開離時に、接点溶融開始直後に電圧が上昇して、一定電圧のパルス状の接点 電圧を示す現象は、その電圧が Holm らが報告したアーク放電最小電圧とよばれる値に近 いので、初期アークまたはイニシャルアークとよばれる。

図 4-1 には、高橋らの実験の報告[12]から引用した。実験回路と初期アークの電圧波形を 示した。工夫を凝らした実験装置と電気回路による丁寧な実験によって、初期アークの特 徴を明らかにされた。



(b) 初期アークの接点電圧特性

図 4-1 初期アークを測定する際に用いた実験回路、装置[12]

この現象は、回路のインダクタンス値と関わる現象であり、アーク放電への移行過程で あることが知られている。われわれは、この現象が接点電圧が Um 直後の現象であることに 注目している。電源電圧が、Ag のアーク放電電圧とほぼ等しい回路での実験結果を図 4-2 に示す。電源電圧 12.5V の Ag 接点のヒンジリレーに、1.4A の電流を流したときの遮断時 の特性を示した。アーク放電に至らない特性である。一方、図 4-3 は、電源電圧が 25V で 電流が 1.2A のときである。アーク放電が発生している。図 4-4 は、アーク放電の有無によ る接点電圧と接点電流を比較した。アーク放電の発生の場合は、途中から一定のアーク電 圧に対応したアーク電流となる。無アーク放電条件でも、接点電圧は、溶融電圧 V=Um 付 近からアーク放電最小電圧にジャンプしており、この電圧がアーク放電と関わり合うこと を示している。アーク放電条件では、ジャンプ後の電圧はアーク放電最小電圧に近い。電 流変化は溶融後の電圧のジャンプ直後は両者の減少傾向は一致している。その後、アーク 放電が点弧する場合としない場合とに分かれる。 図中には、両者の差を放電開始電流と名付けて示した。初期アークとよばれる現象中に測 定される実測電流(接点電流 L)は放電電流と溶断電流と名付けた2種類の異なるメカニズム で流れる電流の和ではないかと考えた。一方は金属接触による伝導電流であり、他方はア ーク放電の萌芽となる電流であり初期アークに相当する電流であろう。両者が同時に存在 する可能性を確認するために、初期アーク時間を制御して行った実験を次節以降で述べる。



(a) 測定回路



図 4-2 アーク放電が発生しない開離時 $V_c I_c$ 特性(E_0 =12.5V、通電電流 I_0 =1.4A)での測定



図 4-3 アーク放電が発生する開離時 Vc-Ic特性(Eo=25V、通電電流 Io=1A)での測定



図 4-4 アーク放電発生した接点電圧、電流特性と発生しない特性の測定から推察される 2 種類の電流

4-3 測定回路と初期アーク現象を特徴つける指標

過渡電流スイッチ回路(TCS)の適用によって、任意の電圧、電流に対して、無アーク放電 での開離実験が可能となる。図 4-5-(a)に実験回路を示した。大容量のコンデンサによって アーク放電を抑止し、付加するインダクタンス *L*によって、初期アーク時間を変化できる 回路である。このとき、インダクタンスの挿入する位置は、図 4-5-(a)の *L*_rの位置である。 (b)は、この時に観測される接点電流、電圧波形の模式図である。コンデンサの大きさによ って、初期アーク後の電圧上昇速度が決まる。インダクタンスが、パルス電圧 *V*_pとパルス 幅 *ΔT*を決める要因である。ここで *V*_pを TCS サージ電圧、*ΔT*を TCS サージパルス幅と呼 ぶことにする。TCS 回路がないと、サージ電流は負荷 *R*₀と電源を介して流れる。TCS 回 路によって、容量の大きなコンデンサに電流が流れるので、サージ電圧は接点に印加され、 サージ電流はすべて接点で消費されることになる。本章の図 4-1 で紹介した高橋篤志先生らの実験では、直列抵抗とコンデンサにサージ電流が流れる工夫がなされている。

この現象は、遮断する電流変化による回路内のインダクタンスによるサージ電圧発生と、 接点間のアーク放電と関わる等価的な定電圧ダイオード特性との組み合わせで表現できる ことは知られている。そこで、この現象に接点溶融現象がどのように関わるかを検討した いので、次節で述べる実験を行った。



(a) TCS 回路を適用した実験回路



(b) 初期アークの特徴抽出箇所 V_p、ΔT

図 4-5 初期アークの電源電圧、通電電流、付加インダクタンスによる依存性を調べるため の実験回路とその特徴抽出箇所

4-4 初期アークの電気回路条件への依存性

汎用の Ag 接点ヒンジリレー(富士電機製 HH62P)での実験である。過渡電流スイッチ回路を適用した電気接点の開離時の初期アークに関して、TCS サージ電圧 V_p と TCS サージ パルス幅 ΔT が、電気回路条件でどのように変わるかを測定した。

4-4-1 電源電圧 Eo依存性

測定回路と測定結果を図 4-6 に示した。対象とする $\Delta T \ge V_p$ は電源電圧には無関係である。低電圧時は乾電池、10V 以上は蓄電池を用いた。乾電池の内部抵抗値の差に大きさに起因すると思われる差異があった。



<u>実験条件</u>

•E₀を1.5Vから50Vに可変
•I₀:5A
•Lr≒0
•V_p、 ∠Tを計測

(a) 実験回路と実験条件







(c) 電源電圧 *E*₀と初期アーク電圧 *V*_pの関係
 図 4-6 初期アークの電源電圧 *E*₀への依存性

4-4-2 回路電流 Io依存性

0.2A 程度以上の電流に対して、対象とする ΔT (初期アーク時間) は電流に比例する。 その時の V_p は、一定である。0.2A 以下では、TCS サージ電圧は通電電流に比例し、TCS 初期アーク時間 ΔT は一定となった。10V 以下のサージ電圧では接点間のアーク放電と関 連する電流が流れないことを暗示しているようである。



<u>実験条件</u> •*I*₀を0.01Aから25Aに可変 •*E*o:25V •*L*r≒0 •*V*_p、∠Tを計測





(b) 通電電流 I_0 と初期アーク時間 ΔT の関係



⁽c) 通電電流 I_0 と初期アーク電圧 V_p の関係

図 4-7 初期アークの通電電流 Ioへの依存性

4-4-3 付加インダクタンス Lr 依存性

数~80μsH 空芯コイルを所定の位置に挿入して実験を行った。Δ*T*は付加するコイルの大きさに比例する。*V_p*には依存性はない。インダクタンスの調整で、初期アーク時間を制御した実験ができることになった。



<u>実験条件</u> •*L_r*を1µHから80µHに可変 •*E*₀:25V •*I*₀:2.5A •*V_p、*∠Tを計測

(a) 実験回路と実験条件



(b) 付加インダクタンス $L_r \ge \Delta T$ の関係



(c) 付加インダクタンス *L*_rと初期アーク *V*_pの関係
 図 4-8 初期アークの付加インダクタンス *L*_rへの依存性

4-5 初期アーク時間を変化させた開離動作後の接点表面痕跡の観察

4-5-1 初期アーク時間をコイルで制御する測定方法

接点開離時には接点電圧 V_cが溶融電圧 U_m以降、電気回路条件によっては機械的な接触 が存続され、初期アークとよばれる現象が起こる。その現象中においてアーク放電と関わ る現象と同時に溶融現象が存在すると仮定しそれを検討する。

図 4-9 に、初期アークから、130µs のアークが点弧したと思われる観察写真を例示した。 塑性変形による接触痕付近の全面に、多様な痕跡が存在し溶融痕の特定が難しい。初期ア ークをできるだけ制御するために以下の工夫をした。



図 4-9 に、初期アークから、130µs のアークが点弧したと思われる観察写真 (図 2-9 の再掲載)

- 1. クロスロッド・プリント板構成で残留インダクタンスの低減
- 2. コイル挿入により、過渡現象時間を 0.08~23µs 間を調整可能 (前節で述べた TCS サージパルス幅は、初期アーク時間に相当する)
- 3. オン時のバウンスなどの影響を避けるために、接点オフ後に通電し、開離実験は1回 のみとした。
- 4. 塑性変形による接触円を基準にして、正負対向電極の位置を特定した。

図 4-10-(a)に、初期アークの期間中の溶融痕の確認のための測定回路インダクタンスを挿入した測定回路を示す。(b)では、接点電流・電圧の変化の様子を比較した。無挿入時は、接点電圧のパルス波高値は 6V,パルス幅は 80ns であった。100µH のコイルによって 23µs まで拡大できた。



(a) 測定回路と測定箇所



(b) 付加インダクタンスにより、過渡応答時間を調整した時の実測した 接点電圧 V_e、接点電流 Le の波形

図 4-10 初期アークの中の溶融痕の確認の測定回路

4-5-2 初期アーク時間をコイルで制御した実験後の電極表面観察

まず、初期アーク時間を変化させたときの表面痕跡のレーザ顕微鏡写真を示す。

(A) $\Delta T = 0.08 \mu s$

図 4-11 は∠T=0.08µs に対応する条件での画像である。この条件では初期アークを無視できると考え、*V=U*mまでの間に溶融した電極の痕跡と考えられる。これ以降の初期アーク時間が長くなった場合の痕跡には、これらの溶融痕が含まれることになる。



5μm

(b) 両極面の溶融痕

図 4-11 ΔT=0.08µs(コイル挿入なし:参照として図 3-17の再掲) (実験条件:電源電圧 E₀=25V、通電電流 I_c=2.5A、TCS)

(B) $\Delta T = 0.23 \mu s$

図 4-12 は∠T=0.23µs に対応する正極面の画像である。図 4-13 は対応する負極面の画像である。中央付近の痕跡は、第 3 章で述べた溶融痕の特徴を具備している。この痕跡のほかには、明確に開閉動作に由来すると判断できる痕跡は確認できなかった。



(a) 接触円(青線)



溶融痕跡 面積: 94.996µm² 深さ: 1.630µm (b) 溶融痕と測定値



(c) 溶融痕(3D)
 図 4-12 Δ*T*=0.23μs 溶融痕(正極面)、回路条件: 25V、2.5A、TCS





(a) 接触円(青線)

溶融痕跡 面積: 95.704µm² 高さ: 0.565µm (b) 溶融痕と測定値



(c) 溶融痕(3D)

図 4-13 ΔT=0.23µs 溶融痕(負極面)、回路条件: 25V、2.5A、TCS

(C) $\Delta T = 2.3 \mu s$

図 4-14 は∠T=2.3µs に対応する正極面の画像である。図 4-15 は対応する負極面の画像である。中央付近の痕跡は、第 3 章で述べた溶融痕の特徴を具備している。一方、左上の痕跡は正極は溶融痕と類似だが、負極には中央の痕跡の周囲に白色状の痕跡がある。この痕跡のほかには、明確に開閉動作に由来すると判断できる痕跡は確認できなかった。



(a) 接触円(青線)



溶融痕跡
 面積: 509.952μm²
 (b) 溶融痕と測定値



(c) 溶融痕(3D)

図 4-14 ΔT=2.3µs 溶融痕(正極面) 、回路条件: 25V、2.5A、TCS



(a) 接触円(青線)



溶融痕跡 面積: 378.01µm² (b) 溶融痕と測定値



(c) 溶融痕 (3D)

図 4-15 ΔT=2.3μs 溶融痕(負極面)、回路条件: 25V、2.5A、TCS

0.08~2.3µs までの主たる痕跡は、初期アークを無視できる溶融痕の様子と類似であり、 面積が増えている。表面の様子だけでなく、接触円内の位置や様子も、正極電極が凹形で 負電極が凸形でることも類似している。溶融痕とみなせるだろう。

(D) $\Delta T = 4.0 \mu s$

図 4-16 は (T=2.3µs に対応する正極面の画像である。図 4-17 は対応する負極面の画像である。10µH のインダクタンスを挿入した実験である。正極の溶融痕は、0.08µs の 25A 痕跡と類似と類似している。正負極の凹凸も対応している。中央付近の痕跡は、第 3 章で述べた溶融痕の特徴を具備している。しかし、負極の表面は、白銀色となり、正極表面とは明らかな差異があった。この痕跡のほかには、明確に開閉動作に由来すると判断できる痕跡があった。図 4-18、4-19 は正負電極に存在した凹形の痕跡である。溶融痕とは全く異なり、アーク放電に移行する電子的な現象の痕跡と推定した。しかし、負極の表面は、白銀色となり、正極表面とは明らかな差異があった。



(a) 接触円(青線)



溶融痕跡 面積: 529.696µm² 深さ: 1.744µm

(b) 溶融痕と測定値



(c)溶融痕(3D)
 図 4-16 ΔT=4.0µs 溶融痕(正極面)、回路条件: 25V、2.5A、TCS



(a) 接触円(青線)



溶融痕跡 面積: 430.825µm² 高さ: 0.693µm

(b) 溶融痕と測定値



(c) 溶融痕(3D)

図 4-17 ΔT=4.0µs 溶融痕(負極面) 、回路条件: 25V、2.5A、TCS

接触円の周辺部には、中央部の溶融痕とは異なる痕跡が観測された。すなわち、溶融 痕とは離れた接触円痕の周辺に存在し、正負ともに表面にほぼ直角にほられた矩形の凹形 が確認された。明らかに、アーク放電と係る電子的な現象によるものと思われる。



(a) 接触円(青線)



.町 面積: 26.353µm² 深さ: 0.516µm

(b) 異なる痕跡と測定値



(c) 異なる痕跡(3D)図 4-18 ΔT=4.0μs 異なる痕跡(正極面)、回路条件: 25V、2.5A、TCS



(a) 接触円(青線)



痕跡 面積: 12.530µm² 深さ: 1.0µm

(b) 異なる痕跡と測定値



(c) 異なる痕跡 (3D)

図 4-19 ΔT=4.0µs 異なる痕跡(負極面)、回路条件: 25V、2.5A、TCS

(E) $\Delta T = 23.0 \mu s$

図 4-20 は∠T=23µs に対応する正極面の画像である。図 4-21 は対応する負極面の画像 である。正極の溶融痕は、0.08µs の 25A 痕跡と類似と類似している。100µH のインダクタ ンスを挿入した実験であり、電子電界放出やアーク放電起こっている可能性が高い。正極 面の主たる痕跡は、溶融痕と類似の特長を示しているが、負極表面は明らかに溶融痕のみ の場合とは異なる。表面を銀白色の薄い膜が表面を覆っていた。



(a) 溶融痕跡



溶融痕跡 面積: 1.596mm²

(b) 溶融痕(3D)と面積
 図 4-20 ΔT=23.0µs 溶融痕(正極面)、回路条件: 25V、2.5A、TCS



(a) 溶融痕跡



溶融痕跡 面積: 1.560mm²

(b) 溶融痕(3D) と面積

図 4-21 ΔT=23.0µs 溶融痕(負極面)、回路条件: 25V、2.5A、TCS

4-5-3 初期アーク時間を変化させた開離実験後の表面観察結果の考察

(A) 初期アーク時間で決まる溶融痕面積

同じ通電電流にも関わらず、初期アーク時間を長くすると、初期アークを無視できる 条件での溶融痕が、大きく拡大した。溶融痕は同じ位置(電流電圧条件により変わる)で、 類似の表面状態や、正極面が凹で負極面が凸であるとの特徴を具備したまま面積が拡大し た。これら金属接触の通電電流に起因すると思われる溶融痕を初期アーク時間を変えて溶 融痕を観察したことにより、初期アークの電流電圧特性には溶融現象と関わる電流電圧が 含まれていることを暗示していると推定した。



(a) 回路条件: *E*=25V、*I*=2.5A、TCS、*AT*=23µs の溶融痕



(b) 回路条件: *Eo*=25V、*Io*=25A、TCS、の溶融痕
 図 4-22 回路条件が異なるが類似している溶融痕の比較



図 4-23 Eo=25V、Io= 2.5A、初期アーク時間 ATと溶融痕面積の関係

図 4-23 に、初期アークの継続時間と、溶融痕面積との関係を示した。正電極の痕跡が負 電極の痕跡よりわずかに大きかった。時間に比例して大きくなる傾向を示している。

(B) 溶融痕とは異なる痕跡の推定

初期アーク時間が長くなると、溶融痕と推定した円状に分布した小球状の集合痕跡以 外に、接触円の近傍に、図 4-24 に示したような、正負電極のいずれもが凹形で、側面が垂 直に近い形状が観察された。溶融痕とは離れた位置ではあるが、正負電極面の位置が正確 に対応することから、電流開離現象に由来すると考えている。発生メカニズムは不明であ る。溶断からかアーク放電に至る電子的現象(電子電界放出→2 次電子放出→Ag イオン化 →アーク放電)の萌芽となる現象の痕跡と推定している。



(a) 正極の異なる痕跡とプロフィール
 (b) 負極の異なる痕跡とプロフィール
 図 4-24 ΔT=4.0µs、回路条件:25V、2.5A、TCS での溶融痕とは異なる痕跡

(C) 正極面と負極面の溶融痕が大きく異なることの推定

初期アーク時間が 23µs に長くなると、正極の溶融痕は初期アーク以前の大電流時の溶 融痕に似た形状である。しかし、負極の溶融痕は形状や大きさは正極に対応するが、表面 は薄く銀白色に覆われ、表面の凹凸も緩やかになる。これは、アーク放電への移行過程が すでに始まっていることを示していると推定した。電界による負極から正極への電子放出、 正極での 2 次電子放出とそれに伴う Ag イオン放出が、負極への Ag イオン吸着に至るもの と推定している。



(a) 正極面の溶融痕



(b) 負極面の溶融痕
 図 4-25 正極面と負極面の溶融痕が大きく異なる痕跡
 回路条件:25V、2.5A、TCS(図 4-20、図 4-21 再掲)

4-6 初期アーク時間に接点溶融現象が併存していることに関する考察

初期アークとよばれる現象に着目し、初期アークの継続時間を制御して、初期アーク時間を、通電電流 2.5A に対して、0.08~23µs の範囲で変えた実験をした。この結果、開閉実験後の電極面の痕跡には、溶融痕と判断できる痕跡が存在し、実験の範囲では溶融痕の面積は初期アーク時間の二乗にほぼ比例した。初期アーク時間が長くなると、アーク放電と係ると思われる痕跡も確認できた。第3章で、溶融電圧 Um以降も、通電接触する部分が残存する可能性について論じた。その結果から、初期アークといわれる段階では、金属接触に基づく伝導電流に起因する接点溶融と、アーク放電関連現象が並列に起こっていると考えられる。

前章の説明では、*V=U*m後も、接点間には些細な金属接触部が広がっているとした。この間に、回路のインダクタンスに蓄積された電力が供給されるのが初期アーク状態であろう。*U*mよりはるかに高い電圧の供給によって、金属接触部は広範囲にわたって十分な溶融 エネルギーが提供され、溶融が進むと推定した。

しかし、通電電流が残存するメカニズムや、初期アーク期間での電流が遮断に至るメカ ニズムなど、溶融・溶断現象に関した解明すべき多くの課題が残されている。

さらに、デバイスの実用上の重要な課題である初期アーク後にアーク放電に移行する過 程に関しては、移行への萌芽となるような痕跡が観察されただけである。

4-7 むすび

初期アークとよばれる現象に着目し、初期アークの継続時間を制御して、初期アーク継 続時間を、通電電流 2.5A に対して、0.08~23µs の範囲で変えた実験をした。この結果、開 閉実験後の電極面の痕跡には、溶融痕と判断できる痕跡が存在し、実験の範囲では溶融痕 の面積は初期アーク時間にほぼ比例した。初期アーク時間が長くなると、アーク放電と係 ると思われる痕跡も確認できた。初期アークといわれる段階では、金属接触に基づく伝導 電流に起因する接点溶融と、アーク放電関連現象が並列に起こっていると考えられる。

本研究は、限られた条件での通電電流遮断時の溶融現象の研究である。対象とした Ag,Au 以外の金属材料の場合はどうか? 電極溶融が電流遮断に至るメカニズムは? 電流遮断時の 空間分布された接触点の接触抵抗分布や溶融の時間変化は? アーク放電に至る過程と溶 融の関係は? 残された課題は多い。

第5章 結言

Ag および Au 接点の開離時の金属接点間の通電電流を遮断するときの現象を、金属の固 相から液相への相変化に着目して研究した。遮断時の電流電圧特性を測定すると同時に、 接点開離動作後の電極表面痕跡を観察した。以下に、研究成果をまとめる。

【特徴的な実験手法】

初期条件(電極形状や開離機構や電気回路条件など)の設定の多様さと、実験の再現性、 アーク放電点弧の問題などに、以下のように対処した。

- (1) 電気接点の開離時の V=Um 付近およびそれに続く機械的な接触が失われる付近ま での過渡現象を研究対象とした。接点は Ag,Au の細線クロスロッドで構成し、電極 の変形・変質を避けた単発開離実験が中心である。
- (2) 接点間の電流電圧特性を測定し、開離後の電極表面の接触痕跡を観察した。その際、 過渡電流スイッチ回路を適用し接点開離後のアーク放電の影響を避けた。また、焦 点深度が深いレーザ顕微鏡を用いることにより、広範囲を、高倍率で、定量的に測 定した。
- (3) V_c=U_m後の初期アーク時間を、過渡現象は、過渡電流スイッチ回路と付加コイルに よって、制御して実験した。

【実験結果からの結論】

通電電流遮断時の溶融現象の電流電圧特性と接点開離後の表面観察から、以下のような結 論が得られた。

(1) Ag および Au の電気接点では、接点抵抗 Rcの増加は、接点接触部が潜熱を受け固 相から液相に変化する現象が電流電圧特性に複雑な影響を与える。融点で起こる固 相と液相の相変化を検討する指標として、従来から用いられている融点電圧 Um に 対して、融点における液相金属の抵抗率と固相の抵抗率の比から求め Uh を提案し た。溶融と関わる複雑な電流電圧特性は V=Uh以上の電圧で発生していることを確 認した。

- (2)対象とした電気接点では、V_e=U_hで始まる溶融現象は、機械的な接触状態には依存 するが、電気的な回路条件に支配されてすすむことを確認した。電気的な回路条件 として、電源から電気接点に流れ込む電力 P_eの R_eに対する微係数(dP_e/dR_e)が支 配的な要因であることを確認した。いわゆる接点の溶融に基づく電極間のブリッジ 現象を、電気回路条件が支配する溶融現象と電気回路条件と機械的開離条件が組み 合わさって決まる溶融現象の二種類に分類できることを確認した。
- (3) V_c=U_m 直後の痕跡は、溶融状態での溶断を暗示する銀光沢の小球面の集合形状で、 正極が凹状、負極が凸状であった。V_c がアーク放電最小電圧付近となるいわゆる『初 期アーク』の時間幅を制御した実験によって、接点の伝導電流による溶融現象と並 行して、アーク放電への移行の萌芽となる現象が観察できた。

【今後の課題】

電気接点の開離時現象は複雑で、解明の困難な多くの課題がある。本研究は、限られた 電流遮断時の溶融現象の研究であるが、上記のような新たな知見を加えることができた。

しかし、対象とした Ag,Au 以外の金属材料の場合はどうか? 電極溶融が電流遮断に至るメカニズムは? 電流遮断時の空間分布された接触点の接触抵抗分布や溶融の時間変化は? アーク放電に至る過程と溶融の関係など残された課題は多い。

98

謝辞

本博士学位論文は、著者が石巻専修大学大学院理工学研究科物質機能工学専攻博士後 期課程在学中に若月研究室において行った研究をまとめたものです。本研究に関して終始 ご指導ご鞭撻を頂きました本学 若月昇教授に心より感謝致します。

そして本論文をまとめるに当たり本学、理工学研究科、高津宣夫教授及び、菅原澄夫 教授、慶応義塾大学澤孝一郎名誉教授には御精読頂き有用なコメントを頂きましたことに 深く感謝致します。

本学 高津宣夫教授には著者が学部以来、現在に至るまで電気接点の研究に関して御懇切 なご指導をいただきました。特に著者が苦手とする数値計算、それを用いたシミュレーシ ョン関連の御教授に対してあらためて感謝いたします。

本学 菅原澄夫教授には学部以来、多方面にわたりお世話になりました。親切な指導、ご 助言をいただき感謝しております、ありがとうございました。

慶応義塾大学澤孝一郎名誉教授には本論文に対して心のこもった貴重なご意見、ご指摘 何度も頂きました。また、情報電子学会機構デバイス研究会にて発表させていただいた際 にも意見をいただきました。そのことを踏まえ、あらためて心より感謝致します。

また、本研究をまとめるにあたってご協力いただきました若月研究室 修士課程学生原大 介君、卒業研究生、実験に協力していただいた研究員斎藤孝志氏に感謝いたします。

最後に学部から現在にいたるまでの 10 年間にわたり学生生活を支えてくれた、両親に深 く感謝いたします。

参考文献

- [1] R.H.Holm, Electric Contacts. 4th ed.New York; Springer-Verlag, 1967
- [2] P.G.Slade, Electrical Contacts. New York; Marcel ekker, Inc, 1999
- [3] Milenko Braunovic, Electrical Contacts. CRC Press, 2007
- [4] PAUL.P, KOREN "The Molten Metal Bridge Stage of Opening Electric Contacts" IEEE TRANSACTIONS ON PARTS, HYBRIDS, AND PACKAGING, Vol.PHP-11, No.1, March 1975
- [5] Takao Utsumi, "Theoretical and Experimental Investigations of the Dynamic Molten Bridge", IEEE Tans vol. Pmp-5.No1 1969.3
- [6] Hiroyuki Ishida, Experimental Study on the Relation Between Bridge-Voltage and Gap Length in Slowly Opening Ag Contacts, Technical Repot of IEICE EMD2001-64 (2001-09)
- [7] L. Morin, N. Ben Jemaa, D. Jeannot, J. Pinard, L. Nedelec, "Make arc erosion and welding in the automotive aria", Proc. Of the 45th IEEE Holm international conference on electrical contact, pp 9-16, Pittsburg, USA, October 1999.
- [8] L. Morin, N. Ben Jemaa, D. Jeannot, J. Pinard, L Nedelec:,"Material Transfer and Welding in Auto move Power Switches and relays", Proc OfICEC conference 2000.
- [9] 高木相、電気接点のアーク放電現象、コロナ社、1995t
- [10] P.W.Bowden and D.Tabor (曽田範宗訳) 固体の摩擦と潤滑、丸善,1961
- [11] 玉井輝雄、電気接点表面と接触のメカニズム、表面技術,Vol.55,No.12, P.102-107、
 2004
- [12] A.Takahashi, T.Okazaki and K.Miyachi "Initial Arc at Breaking of Electrical Contact." Trans. I.E.E.J. Vol.94-A, No.10 pp.31-40, Apr. 1992
- [13] Y.Yonezawa and N.Wakatsuki,"Relay contacts of multi- electrodes with timely controlled operation," IEICE TRANS. ELECTRON., Vol.E87-C No.8 pp.1324-1332, Nov. 2004
- [14] N.Wakatsuki and, H.Honma "Breaking Contact Phenomena of a Time-coordinated Non-arcing Relay," IEICE TRANS. ELECTRON., Vol.E91-C No.8 pp.1206-1210, Aug. 2008

発表論文リスト

口頭発表論文・学会論文誌への掲載論文

〈学術論文〉

[1]Jpn. J. Appl. Phys. 49(2010) 07HB10

JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS

Takayuki Kudo and Noboru Wakatsuki

[Melting and Discharge Phenomena of Breaking Ag Contacts Using a Precisely Controlled Piezoelectric Actuator]

〈国際会議〉

[1]55th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts

September, 2009

Noboru Wakatsuki, Nobuo Takatsu, Toshiteru Maeda and **Takayuki Kudo** [Melting and Discharge Phenomena of Breaking Ag Contacts Using a Precisely Controlled Piezoelectric Actuator]

[2]56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts

September, 2010

Noboru Wakatsuki[†], Masahiro Oikawa, **Takayuki Kudo** and Nobuo Takatsu ^TWo melting phenomena in breaking Ag contacts decided by energizing electric circuit

[3] 57th Holm Conference on Electrical Contacts

September, 2011

Takayuki Kudo, Noboru Wakatsuki, and Nobuo Takatsu

「Transient Phenomena from Melting to Electric Discharge during Making and Breaking Operations of Electric Contacts」 [4]59th Holm Conference on Electrical Contacts

September, 2013

Takayuki Kudo, Noboru Wakatsuki, Nobuo Takatsu, and Daisuke Hara [Equivalent Circuit Analysis for Transient Phenomena from Elastic Contact to Breaking Contact through Metal Melting]

〈国内会議〉

[1]電子情報通信学会 ISEMD2008

Noboru Wakatsuki[,] Nobuo Takatsu, Toshiteru Maeda and **Takayuki Kudo** IEICE TRANSACTIONS on Electronics Vol.E92-C No.8 pp.1003-1007 「Analytical Model of Melting Phenomena for Breaking Relay Contacts」

[2]学術振興会 弹性波素子技術第 150 委員会

2009年7月

若月昇 高津宣夫 工藤孝之

「電気接点における弾性・塑性変形の検討」

[3]電子情報通信学会 機構デバイス研究会 国際セッション

2009年11月19日

Noboru Wakatsuki, Nobuo Takatsu, Toshiteru Maeda and Takayuki Kudo

IEICE Technical Report Vol. 108 No.296 pp129-132

Examination of cluster model of arc ignition at electric contacts

[4] 超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム(USE2009)

2009年11月20日

工藤孝之,若月昇,高津宣夫

「弾性・塑性変形で接触する電気接点現象の等価回路モデル」

[5] 圧電材料デバイス・シンポジウム 2010

若月昇,及川雅弘,工藤孝之,高津宣夫

「圧電アクチュエータによる電気接点の弾性・塑性変形の検討」
[6]電子情報通信学会 機構デバイス研究会 国際セッション

2010年11月11日

Takayuki Kudo, Noboru Wakatsuki and Nobuo Takatsu.

IEICE Technical Report Vol. 110 No.270 pp69-72

Measurement of Breaking Phenomena of Ag and Au Crossbar Electric

Contacts Depending on Contacting Spots J

[7]電子情報通信学会 機構デバイス研究会 国際セッション

2011年11月

Takayuki Kudo, Noboru Wakatsuki

Experimental Analysis of Transient Phenomena from Metal Melting to Electric Discharge during Breaking Operations of Electric Contacts

[8]電子情報通信学会 機構デバイス研究会 国際セッション

2012年11月

Takayuki Kudo, Noboru Wakatsuki

 Equivalent Circuit Analysis for the Transient Phenomena from Elastic Contact to

 Breaking Contact through Metal Melting」