

氏名	杉本 等
授与学位	博士（工学）
学位授与年月日	平成6年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気及通信工学専攻
学位論文題目	動コンタクトにおけるアーク放電現象とコンタクト性能の 関係に関する研究
指導教官	東北大学教授 高木 相
論文審査委員	東北大学教授 高木 相    東北大学教授 佐藤 徳芳 東北大学教授 中鉢 憲賢    東北大学助教授 曾根 秀昭

## 論 文 内 容 要 旨

コンタクトは、電気回路の開閉または接触を機械的に行う電氣的接触素子であり、電気が利用される限り必要とされるデバイスの1つである。コンタクト（電気接点）は、半導体技術の進歩に伴い半導体スイッチが急速な成長を遂げた今日においても、半導体スイッチに比べ遮断能力、耐環境性、耐サージ性、制御性などの優れた点を有するため、ますます需要増加の一途をたどっている。

アーク放電を伴う動コンタクトにおいては、アーク放電現象がコンタクトの性能に最も大きく影響する。本論文の研究では、アーク放電とコンタクト性能の関係に関して、定量的関係を実験的に検討した。そして、アークのガス相移行の有無が、コンタクト性能（接触抵抗、消耗転移）に多大な影響を与えることを明らかにした。また、ブリッジ現象がアークのガス相移行の有無に関わっていることも明らかにした。これらの知見は、実時間並列計測システムを構築し、コンタクト性能パラメータとアーク放電現象諸量を毎回動作毎に同時計測できることになったことによって、初めて可能となったものである。以下に各章をまとめる。

第1章「緒論」では、コンタクトの小型化、高信頼化が近年の要求であり、これに応える設計技術の確立が早急の課題であることを述べた。概念的な設計法は提案されているものの、現象のメカニズムは明らかにされておらず、当面の課題としてアークとコンタクト性能の関係を定量的に検討すべきである。そのためにはまず毎回動作の関係の検討が必要であるという本研究の基本方針を

決定した。

第2章「アーク放電現象とコンタクト性能の関係に関する従来の研究と課題」では、従来の研究を概観し、本研究の課題が何であるかを検討した。アークとコンタクト性能（接触抵抗、消耗転移）の定性的関係は明らかになってきており、その関係においてアークのメタリック相及びガス相という区別をして検討をするべきであることを指摘されている。しかし、その結果をもとにした概念的設計論も提案されたものの、定量的関係が未だ明らかとされず設計論の確立には程遠い状況である。そこで、本研究で取り上げる課題を、アークと接触抵抗の関係（第3及び第4章）、アークと消耗転移の関係（第5章）とし、それらの結果を考察しアークの初期状態を決定するブリッジ現象にも着目しアーク放電現象とブリッジ現象の関係（第6章）とした。そして、本研究課題を遂行するために、実時間自動並列計測システムを構築した。毎回のアーク放電現象諸量と表面形状を同時取得できることで、アークとコンタクト性能の詳細な関係の検討が可能となった。

第3章「アーク放電現象と接触抵抗の関係」では、振動条件及び電流条件を変えながら、Agコンタクトにおける毎回動作のアーク継続時間と接触抵抗の関係について実験的に検討した。アーク電圧、電流が、電極間距離に依存していることがわかった。このことから、開離軸方向に振動を与えることでアーク継続時間を制御できることを明らかにした。そのことがアークとコンタクト性能の関係を検討するに当たって1つのアプローチとなる可能性を示した。接触抵抗は、アーク継続時間が短い場合が続くと低く安定し、アーク継続時間が長い場合が発生すると増大することを明らかにした。しかし、振動を与えた場合、アークのメタリック相からガス相への移行境界の判別が困難となった。アークとコンタクト性能の関係においては、全アークで評価するよりもアークのメタリック相及びガス相という区別をして評価をするべきであるという指摘がある。まず、アークのメタリック相、ガス相を考慮して、アークとコンタクト性能の関係を調べる必要がある。そこで、無振動条件下で検討を行うことを本研究の方針とした。無振動条件下では、アークのガス相移行率が深く関わっていることがわかった。ガス相アークへ移行すると接触抵抗が増大し、メタリック相のみでアークが終われば接触抵抗が低く安定することを明らかにした。

第4章「ガス相移行率と接触抵抗の相関」では、第3章の結果をふまえ、電流条件でアークのガス相移行率を変化させながら、Agコンタクトにおけるアーク継続時間と接触抵抗の関係について定量的に検討した。そして、アーク継続時間と直後の接触抵抗の相関が強いことを明らかにした。アークがガス相へ移行した後に接触抵抗が急激に増大し、その後メタリック相のみで終わるアークが続くと接触抵抗が徐々に減少した。また、電極表面形状を同時に取得し、接触抵抗の構成要素のうち集中抵抗について検討を行った。表面形状から予想される集中抵抗変化とアークによる接触抵抗変化が密接に関わっていることを明らかにした。

第5章「アーク放電現象と消耗転移の関係に関する実験的検討」では、アークのメ

タリック相及びガス相を区別し、Ag コンタクトにおける毎回動作のアーク継続時間と消耗転移に関して定量的に検討した。そして、アークのガス相移行発生時に消耗転移方向が逆転することを明らかにした。すなわち、メタリック相のみで終わるアークが続く場合は、電極質量は陽極が増加、陰極が減少するが、アークのガス相移行が発生すると一時的に陽極が減少、陰極が増加した。そして、その際の電極表面形状を取得し、陽極に畝、陰極に溝が生成されることを明らかにした。1回のアークで電極表面形状が急激に変化することについて、そのメカニズムを実験的に検討した。アークの足と消耗転移の関係が指摘されているので、磁界を放電路と垂直に印加して放電痕跡が重ならないようにした。その結果、陽極と陰極で、アークによる変色部分の色の種類が異なった。そして、磁界を印加した場合に、電極表面の変色域が移動することがわかった。また、本章では、Ag コンタクトにおけるアークが発生しない条件での、ブリッジによる消耗転移現象についても検討した。電極表面形状は、陽極が凹、陰極が凸となった。また、陽極のブリッジ痕直径の方が、陰極のそれよりも大きくなることがわかった。そして、通電電流値及びブリッジエネルギーとブリッジ痕直径の大きさが比例関係にあることを明らかにした。

**第6章「アーク放電現象及び接触抵抗とブリッジ現象の関係に関する実験的検討」**では、アークのメタリック相及びガス相を区別し、Ag コンタクトにおけるアーク継続時間、接触抵抗とブリッジ継続時間の関係について検討した。その結果、アークのガス相移行の有無によってアーク継続時間、接触抵抗とブリッジ継続時間の相関が異なった。とくに、メタリック相アーク継続時間とブリッジ継続時間の相関が異なることを明らかにした。この相関の違いに関して、ブリッジ電圧波形に注目した。そして、アークのガス相移行の有無によって、ブリッジ電圧波形が異なることを明らかにした。また、メタリック相のみで終わるアークが続いた後ガス相へ移行するアークが続いたとき、あるいはガス相移行が続いた後メタリック相アークのみで終わるアークが続いたときに、ブリッジ電圧波形が徐々に変化することがわかった。この変化は、接触抵抗、消耗転移量、表面形状と同様な変化の傾向であり、現象間に関連があると考えられる。そこで、本研究の成果をまとめ、今後の研究課題を提示した。アークとコンタクト性能に多大な影響を及ぼすのは、アークのメタリック相からガス相への移行である。ガス相移行条件を解明することが重要な課題である。その解明の1つの鍵となるのは、ブリッジ現象の詳細な観察である。動作条件で、アークのガス相移行率を制御しながら、ブリッジ現象を中心とした現象諸量の同時並列計測が必要であることが明らかとなった。

本論文の成果は、表1に示した通りである。今後、第6章で述べた研究課題を遂行し、アークのガス相移行条件を解明することによって、定量的なコンタクト設計法の確立に接近できるものと期待される。

表1：本研究の成果

対象	実験考察内容	主な成果
<p>【第3章】 アーク放電現象と接触抵抗の関係</p>	<p>[振動条件下] ・振動が及ぼすアーク放電への影響</p> <p>[電流条件を変化] ・毎回動作のアーク継続時間と接触抵抗</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・アーク電圧，電流は，振動と関係なく電極間距離で決まる。</li> <li>・アーク継続時間を制御可能</li> <li>・接触抵抗変化は，アークのガス相移行率と，深く関わっている。</li> </ul>
<p>【第4章】 ガス相移行率と接触抵抗の相関</p>	<p>[電流条件を変化] ・振動を与えない場合のアーク継続時間と接触抵抗の関係の定量的解析</p> <p>・アーク，接触抵抗と表面形状</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・アーク継続時間とアーク直後の接触抵抗の相関が強い</li> <li>・接触抵抗は，ガス相移行発生後急激に上昇，その後のメタリック相アークにより徐々に低下する。</li> <li>・接触抵抗（集中抵抗）と表面形状変化が密接に関連</li> </ul>
<p>【第5章】 アーク放電現象と消耗転移の関係</p>	<p>[電流条件を変化] ・毎回動作毎のアーク継続時間と消耗転移量</p> <p>・アーク，消耗転移と電極表面形状</p> <p>[磁界を印加] ・1回のアークによる表面状態変化</p> <p>・アークへ及ぼす磁界の影響</p> <p>[電流条件を変化] ・無アーク下におけるブリッジ痕跡</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ガス相へ断続的に移行する条件下では，ガス相移行発生時に消耗転移方向が逆転する</li> <li>・消耗転移方向逆転と表面形状変化が関連</li> <li>・陽極と陰極で，変色域の色の種類に相違</li> <li>・変色域が磁界と垂直に移動</li> <li>・陽極が凹，陰極が凸</li> <li>・陽極痕跡径が陰極の痕跡径より大きい</li> <li>・ブリッジエネルギー及び通電電流値とブリッジ痕跡径が比例</li> </ul>
<p>【第6章】 アーク放電現象及び接触抵抗とブリッジ現象の関係</p>	<p>[電流条件を変化] ・アーク継続時間及び接触抵抗とブリッジ継続時間</p> <p>・メタリック相アーク継続時間とブリッジ継続時間</p> <p>・アークによるブリッジ電圧波形の変化</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・アークがメタリック相のみで終わる条件下とガス相まで移行する条件下では，ブリッジ継続時間とメタリック相アーク継続時間の相関が異なる</li> <li>・ガス相移行の有無によりブリッジ電圧波形が変化</li> </ul>
<p>・以上の実験事実から，今後の研究課題の提示</p>		

## 審査結果の要旨

動コンタクトは閉成時の接触抵抗が零に近く、また解離時のそれがほぼ無限大であることから、理想的なスイッチとして広く使用されている。しかし、開閉動作時にアーク放電を伴うため、接触面が消耗し、接触抵抗が大きくなるなどの問題がある。そしてこの問題の定量的解明はまだ十分なされていないのが現状である。著者は、コンタクト表面の画像計測を含む新しい計測システムを開発して、コンタクトの1回の動作による表面の変化と接触抵抗の変化及びブリッジ電圧波形などを同時に計測して、アークと接触抵抗との関係、ブリッジ波形とアークとの関係などを調べ、これらの相互関係の一部を明らかにした。本論文はこの研究成果を取り纏めたもので全編7章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、本研究課題に関する従来の研究を概観し、本研究の目的を達成するための新しい計測システムについて述べている。

第3章では、アーク継続時間とコンタクト動作との関係を明らかにするため、コンタクトに振動を与え、アークが一定のギャップ長で切断されることを確認し、実験条件設定の資料としている。

第4章では、アークが金属相とガス相の2つから成っていることに注目し、Agコンタクトについて、ガス相まで移行するアークの発生率と接触抵抗の変化との関係を測定した結果を示している。ここで、金属相アークでは低接触抵抗を示し、ガス相アークが発生すると接触抵抗が高くなるという新知見を得ている。

第5章では、アークと電極の消耗・転移との関係の測定結果を示している。ここで金属相アークとガス相アークでは電極表面の変化が異なることを定量的に明らかにしている。これは、アークによる消耗・転移現象の解明に有力な手がかりを与えたもので高く評価される。

第6章では、アークが金属相で終わる場合とガス相に移行する場合があることを解明する目的で、コンタクトが開離する直前に発生するブリッジ電圧波形を計測している。この結果、アークのガス相移行にはブリッジエネルギーが重要な役割を果たしているという新知見を得ている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、アークを伴うAgコンタクト現象の解明に新しい計測技術を導入することにより、アークと接触抵抗及び電極の消耗・転移などとの間の関係の一部を明らかにし、動コンタクトの設計論に新知見を加えたもので、電気材料工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。