

## 透明体電極を用いた放電加工現象の解明

著者	北村 朋生
学位授与年月日	2015-03-24
URL	<a href="http://doi.org/10.15083/00008192">http://doi.org/10.15083/00008192</a>

## 論文の内容の要旨

論文題目 透明体電極を用いた放電加工現象の解明

氏 名 北村 朋生

放電加工の加工特性向上のためには、加工現象の解明が不可欠である。しかし加工は、絶縁性の加工液中で工具電極と工作物を数十マイクロメートル程の狭い距離を隔てて対向させて、その極間で毎秒数千から数万回の高い頻度で放電を生じさせることにより進行する。また、工具電極の進行により、加工領域が工作物内に入り込んでしまう等の理由により、加工の現象を直接観察することは困難であり、放電加工現象は従来ほとんど解明されてこなかった。電極の一部に透明なガラス板やアクリル板を埋め込むことで、実際の加工間隙を模して、これらを通して極間の様子を観察する研究が行われてきたが、ガラス板やアクリル板上で放電が発生するわけではないため、実際の加工面領域における極間の様子の直接観察には至っていない。また、工具電極への給電線を分割し、給電線に流れる電流の比を測定することによって放電の発生位置を検出する手法も考案されたが、放電が加工液中で発生しているのか、気泡中で発生しているのか、またはそれらの境界で発生しているのか区別することはできない。また、除去メカニズムの解明のために、熱源であるアークプラズマの挙動を、高速度ビデオカメラを用いて観察する研究も行われてきたが、プラズマを側面から観察することは可能であるが、細線電極を用いた場合に限られ、電極面積が大きい場合の観察は困難である。また、大気中での放電の観察は容易であるが、加工液中で生じるアークプラズマは加工液による光の吸収が大きいことから、直接観察は困難である。一方で、仮に放電加工の電極材料が透明であれば、加工中における極間現象を透明な電極を通して直接観察することが可能となる。半導体である単結晶SiC材料は、不純物濃

度によって電気伝導率，また光の透過率が変化する．そこで本研究では，透明かつ放電加工を行ううえで十分な導電性を有する単結晶SiC材料を放電加工の電極として用い，加工液中における放電加工現象を高速度ビデオカメラにより撮影し，放電加工間隙の可視化を行い，加工現象の解明を行った．まず，連続放電加工中の極間現象を観察し，放電により発生する気泡が極間を占める割合，放電の発生する雰囲気，放電の発生位置の測定による連続する放電の発生間距離を調査した．続いて，単発放電によるアークプラズマを観察し，アーク柱の挙動や直径，その時間変化を調べた．さらに，得られたプラズマ直径を用いて単発放電の材料中の温度分布を熱伝導解析した．放電加工は，一般的に加工液として灯油系の放電加工油，あるいは脱イオン水が用いられる．両者の加工速度を比較すると，脱イオン水を用いた方が速いことが多く報告されているが，その要因は未だ解明されていない．そこで，油中と水中における極間の加工現象を直接観察し，加工速度に及ぼす影響を調査した．さらに，油中と水中における極間の気泡挙動の解析を行い，加工液物性に関して，加工速度を向上させるための指針を得た．本論文は5章から構成されている．

第1章では，放電加工の原理と加工現象，特徴について述べた．さらに，放電加工間隙の加工現象の把握のために，これまでに行われた様々な手法による加工間隙の可視化に関する研究動向について説明し，本研究の目的と本論文の構成について述べた．

第2章では，透明体電極を用いて，連続放電の極間現象を高速度ビデオカメラにより観察し，極間の可視化を行った．放電加工では，加工開始後，数百発の放電の発生の中に，極間隙を占める気泡の割合が急激に増加し，加工中は極間の70%以上が気泡で満たされていることがわかった．この結果は，これまでの先行研究で，電極にガラスを埋め込んでガラスを通して極間の生成物を観察した研究や，加工中に発生する気泡を置換法により採集し発生量を測定した研究結果，また極間の流れ場解析による気泡運動シミュレーションの研究結果を裏付ける結果である．また，放電の発生にともない放電点から放射状に飛散する加工くずを観察し，さらにその加工くずを起点として発生する放電を直接観察した．従って，放電加工では放電の発生は，以前の放電によって生成された加工くずを介して発生し得ることがわかった．さらに，連続放電中の放電の発生する雰囲気を調べると，加工液中のみではなく，気液境界，気泡中においても生じ得ることがわかった．加工液中，気泡中，気液境界での単位面積当たりの放電発生確率は，加工液中，気泡中に比べて気液境界が最も高いことがわかった．これは，加工くずが放電により生成された気泡の境界に密に分布することで，加工くずを介して放電が生じやすいという推論を裏付けている．放電点の発生位置分布から連続する放電の発生間距離を調べることで，放電点の発生位置は完全なランダムではなく，放電はそれ以前の放電によって生成された加工くずを介して発生しやすく，特に直前の放電によって発生した気泡の境界で発生する確率が高いことがわかった．

第3章では，透明体電極を用いて，加工液中における単発放電現象を観察した．従来より，放電のアーク柱は極間距離に対して細く，その直径は放電痕直径にほぼ等しいと考えられてきた．アーク柱は放電加工の熱源であり，その直径は熱流束を決定する重要なファクタ

一である。従って放電アーク柱の挙動を明らかにすることは加工現象解明のために非常に重要である。そこで本研究では、加工液中で発生するアークプラズマの直径とその膨張過程を明らかにすることを目的に、透明体電極を用いて液中の単発放電アークプラズマを観察した。加工液中で発生したアークプラズマは、絶縁破壊後10 $\mu$ s以内に急激に膨張し、その後ほぼ一定の直径を維持する。また、プラズマ直径は放電痕直径より大きいことがわかった。これは放電痕直径とアーク柱直径が等しいという従来の定説を覆すものである。さらに観察したアークプラズマ直径を円形の一様熱源として、熱伝導解析により単発放電の材料中の温度分布を計算すると、材料中の温度は融点を超えないことがわかった。この要因を明らかにするために、温度に対する電離度の変化とプラズマの半径方向の温度分布から、プラズマ半径方向の電離度の変化を調べた。その結果、プラズマ半径方向の温度低下は緩やかであるのに対して、電離度は温度に対して非線形的に変化するために、プラズマ中心に電離度の高い領域が集中しており、プラズマ中の電離度は均一ではないことがわかった。従って、プラズマ中の熱流束分布は均一ではなく、熱流束の高い領域がプラズマ中心部に集中しており、円形一様熱源を仮定した場合の熱源直径は、プラズマ直径より小さいことがわかった。それにもかかわらず、この熱源直径は銅電極面に形成される放電痕直径に比べて大きいことがわかった。

第4章では、脱イオン水を用いた方が、油に比べて放電加工速度が速い要因を明らかにし、加工速度を向上させるための指針を得ることを目的として、油中と水中の放電加工現象を、透明体電極を用いて観察し比較した。両者の加工速度が異なる要因として、放電一発あたりの除去量の違い、放電発生雰囲気の違い、加工の安定性の違いが考えられる。油中と水中で単発放電を行い、除去量を比較した結果、両者の単発放電除去量はほぼ等しいことがわかった。油中と水中で発生した放電のアークプラズマの温度を測定すると、両者の温度はほぼ等しいことがわかった。従って、単発放電除去量が等しい要因は、アークプラズマ温度が等しいことが要因の一つであり、油中と水中の単発除去量の違いが加工速度の違いに及ぼす影響は小さいことがわかった。続いて、油中と水中で単発放電と連続放電を行い、透明体電極を通して発生する気泡量の違いを調べた。その結果、油中に比べ水中の方が、気泡発生量が少ないことがわかった。各雰囲気での放電発生割合を比較すると、加工液中で発生する放電の割合が、油中に比べて水中の方が僅かに多く、また気泡中で発生する放電の割合が、油中に比べて水中は僅かに少ない。これは、極間を占める気泡の割合が、油中に比べて水中が小さいためである。従って、加工速度が水中の方が速い要因は、極間を占める気泡割合の違いにより、液中で発生する放電の割合が油中より水中の方が多く、一発あたりの除去量が多くなったためである可能性は否定できないが、両者における各雰囲気の放電発生割合の違いは僅かであり、加工速度の違いを説明するには、十分な違いではないと考えられる。続いて、油中と水中で放電頻度を変更して放電加工を行い、加工速度を比較した結果、水中では放電頻度の上昇にともない線形的に加工速度が上昇するが、油中では集中放電の発生割合が上昇し、放電が偏在することで除去効率が減少し、加工速度

がむしろ低下することがわかった。また、両者の放電点分布を比較すると、水中では、油中に比べて放電が分散して発生しやすいことがわかった。これは、極間の気泡の振動や移動量が、油中に比べて水中の方が大きく、放電後の電離気体の拡散や加工液の素早い流入等による冷却特性の高いことが、放電の安定性に影響を及ぼしているためであると考えられる。さらに、両者で気泡の振動や移動量が異なる要因を調べるために、圧縮性粘性流体解析を行った。その結果、油中と水中における気泡の振動振幅や減衰の違いは、放電の発生に伴う圧力波の極間を伝播する際の粘性摩擦によるエネルギー損失の相違が要因の一つであることがわかった。従って、粘性の低い加工液ほど、放電点の冷却性能に優れ、放電頻度を上昇させることで、加工速度を向上させることができる可能性を示した。

第5章では、第2章から第4章までに得られた知見を要約して本論文の結論を述べ、本論文の総括とした。