

審査の結果の要旨

論文題目：Development of Electrical Discharge Machining System for Cutting Single Crystal SiC（単結晶 SiC の放電加工システムの開発）

氏名 趙永華（ちょう えいか）

本論文は、次世代のパワーデバイス用に脚光を浴びている、単結晶 SiC の放電スライシング加工システムの開発研究の成果をまとめたものである。シリコンインゴットのスライシングはワイヤソーを用いて行われているが、SiC の硬度は単結晶 Si の 2 倍、ダイヤモンドの半分なので、ワイヤソーによるスライシングでは効率が低い。加工速度を上げるために張力を上げると断線する問題があり、ソーワイヤの直径を大きくするとカーフロスが大きくなるので高価な材料の歩留まりが下がる。よって、加工反力の小さなワイヤ放電加工の使用が検討されている。放電加工は硬度に関わらず加工ができ、ワイヤ電極の直径を小さくすることによりカーフロスを低減できる。しかし、加工速度を上げるため放電電流を増加すると、ソーワイヤと同様に断線の危険性が増大する。また、加工反力はゼロではないので、ワイヤ振動を抑え、カーフロスを小さくするために張力を上げるとやはり断線の確率は上がる。そこで、本研究は、大電流を流し、かつ大きな張力を印加できる箔電極を用いた放電スライシングシステムを新たに提案し、単結晶 SiC の高能率切断とカーフロスの低減を実現している。

本論文は 6 章からなり、第 1 章は序論、第 6 章は結論である。第 2 章は SiC の放電加工特性を調べた結果を述べている。SiC の基本的な加工特性を調べた報告は少なく、延性材料である金属に対して硬脆材料であり、金属よりも高い抵抗率、熱伝導率をもつ SiC の特異な加工特性を調べた結果は工学的にも価値がある。加工特性は一般の形彫り放電加工やワイヤ放電加工を用いて調べている。放電加工における加工のし易さを示す指標である $\lambda\theta^2$ (λ は熱伝導率、 θ は融点) の値は一般的な工作物材料である炭素鋼に比べて大きいため、SiC は放電加工しにくいはずであるが、実験結果は炭素鋼に比較して 5 倍から 8 倍の加工速度を示すという興味ある結果を得ている。この理由は、SiC が高抵抗材料であるため、放電アーク柱からの熱流束に加えて材料中の Joule 発熱が放電点近傍の温度上昇に寄与するからであるとの推論を立て、これを熱伝導解析結果を用いて証明している。また、放電点近傍の熱応力により硬脆材料である SiC が破碎することが除去の主なメカニズムであることがもう一つの原因であることを、破碎型の加工屑の電子顕微鏡写真を示すことで証明している。こうして、放電加工が

SiCのスライシングに適していることを示すことができている。

第3章は、第2章の基礎研究の結果を踏まえて、箔電極を用いた切断加工の基礎研究を行っている。パルス条件については、パルス幅が数 μs と短い方が加工速度が大きく、電極消耗が少ないことを明らかにしている。時間経過とともにプラズマ直径は大きくなり、熱流束が下がるため、パルス幅が4 μs を超えるとSiCの表面温度がSiCの分解温度以下に低下することを第2章の熱伝導解析が示しており、第3章の実験結果は理論通りの結果である。また、水加工液と油加工液を比較し、水加工液の方が加工速度は大きいカーフ幅が大きいことを示している。そして、50 μm の板厚の箔電極を用い、油加工液中で100 μm のカーフ幅が得られた結果を示している。本章で得られた加工速度とカーフ幅は従来の他の研究者の報告では達成されていない値である。さらに、箔電極の消耗を箔の長手方向に均一にするため、高速テーブルを用いて工作物を往復運動させた加工結果を示している。往復動のストロークを大きくすることによって消耗は均一化できるが、両端の加減速区間での消耗が定速区間とは異なるため、往復動に伴い加工ギャップ長が変動し、箔電極のサーボ送り制御の追従が間に合わず、加工速度が低下する問題があることを明らかにしている。

そこで第4章では、ワイヤ放電加工のように箔電極を一方向に巻き取る装置を設計製作し、加工特性を調べている。その結果、板厚30 μm の箔電極を用い、従来の報告よりも大きな加工速度で、100 μm のカーフ幅が得られ、箔電極を用いた放電スライシングの有効性が示されたと言える。

第5章ではマルチ放電による加工速度の向上の可能性について検討を行っている。ワイヤソーは一本のソーワイヤを何重にもインゴットに巻きつけることによって、数十枚のウェハを一度に切断できる。しかし、放電加工では一つのパルスに対して一箇所しか放電しないため、一本のワイヤ電極を何重にも巻きつけて複数枚のウェハを切断しても、枚数に反比例して切断の送り速度は減少する。そこで、ワイヤ電極のインピーダンスを利用し、ワイヤに沿って高周波電流が流れるときに電圧降下が生じる現象を使って、多点で給電して複数の放電を同時に生じさせる方法が提案されている。それに対して本研究は、箔電極は分割する必要があるが、一つのパルス電源から箔電極ごとに容量を介して静電誘導給電することにより、一つのパルスで同時に複数の箔電極に放電を生じさせることができる放電回路を提案している。実験は箔電極を用いた実験装置の製作が困難であるため、インゴットから円筒状のSiC材料をくり抜く加工を対象に、複数に分割した電極に別々に容量結合し、複数放電を生じさせることによって加工速度を増大できることを実証している。原理が実証されたことにより、箔電極を用いたSiCウェハの高速放電スライシングが可能であることが示されたと考えられる。

以上のように、本論文では加工特性の基礎研究により、単結晶 SiC が炭素鋼の加工よりも効率よく放電スライシング可能であることを理論と実験の両方で実証している。また、新たに設計製作した箔電極によるスライシング装置を用いて、従来よりも大きな加工速度で他の報告では達成されていないカーフ幅での切断を可能としている。本研究の中では、実験装置の制限により放電電流には制限があったが、容量の大きなパルス電源の使用により、加工能率はさらに向上すると考えられる。さらに、マルチ箔電極を用いた複数放電による高速切断の可能性が実証されており、放電スライシングの実用化の可能性が十分に示された研究であると評価できる。よって、単結晶 SiC という特異な物性値を示す材料に関する基礎的アプローチによって工学的に、また独創的なスライシング装置と放電パルス回路の提案により工業的に、放電加工技術の発展に大きく貢献している。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。