

氏 名 井 上 徳 之

学位（専攻分野） 博士(工学)

学 位 記 番 号 総研大乙第37号

学位授与の日付 平成9年3月24日

学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学 位 論 文 題 目 イオンスパッタ加工の加工特性に関する研究

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 野田 信明
教 授 本島 修
教 授 川村 孝式
助 教 授 岡村 昇一
教 授 室賀 健夫（核融合科学研究所）
教 授 田辺 哲朗（名古屋大学）

論文内容の要旨

近年、種々の製品の高精度化にともない精密加工技術の向上が強く要望されるようになった。超精密加工技術としてイオンスパッタ加工は、最近では特に電子機器の発達にともなう集積回路の微細化が進み、固体電子素子やパターン形成のほかにも精密部品のパターン成形、形状加工、先端加工や平面加工に適用されている。

本研究ではイオンスパッタ加工の精密加工への利用の問題点として、加工表面粗さを取り上げ、加工表面粗さを小さくする（研磨加工：ポリッシング）可能性について詳細に検討するとともに、その機構について考察した。イオンスパッタ研磨加工の対象物として、長さの基準として用いられているブロックゲージの研磨加工特性を研究した。ブロックゲージの材料として用いられているSKD1は日本工業規格（JIS）で規定されるゲージ・ダイス用の工具用特殊鋼で、焼き入れ変形が非常に小さく、耐摩耗性に優れている。ブロックゲージには高い寸法精度と良好な加工表面粗さが求められるが、これまでの砥粒（主としてダイヤモンド）ラッピングによる仕上げには限界があり、さらに小さい表面粗さを得るためには新しい仕上げ方法が必要とされている。

本研究では、イオンスパッタ加工が加工表面粗さいかに影響するかを調べ、表面粗さを減少させる可能性を見いだすことを目的として研究を行い、これまで不可能だと考えられていたイオンスパッタ加工による加工表面粗さ減少の可能性を見だし、その一般的な機構と検証例を系統的に検討した。

各章ごとの内容を要約すると以下のようになる。

第1章は緒論であり、本研究を行った目的とその重要性について述べ、これまでのイオンスパッタ加工に関する研究の歴史と現在の状況を述べるとともに、本研究の特色を述べ、最後に本論文の構成を述べている。

第2章においては、イオンスパッタ加工の原理、実験装置の特徴、供試材料、実験方法と条件について述べている。

第3章から第5章までは、SKD1を用いて、加工表面粗さを小さくするポリッシングの可能性について検討した。

第3章では、イオンスパッタ加工の基礎的な研磨特性を調べるため、実験条件（イオンエネルギー、イオン電流密度、イオン入射角、研磨時間）による研磨加工への影響について研究を行った結果について述べている。実験の結果、研磨初期に研磨表面粗さがあまり劣化しないことがわかった。このときの研磨表面を走査型電子顕微鏡（SEM）、特性X線分析（EPMA）および表面形状測定により観察した。また、フロート法を用いると、研磨表面粗さの劣化が少ないことがわかった。

第4章では、前章で研磨表面粗さの劣化の少なかったフロート法を改良し、バイアス電圧法を用いてイオンエネルギーの小さい場合について詳細に調べた結果、研磨表面粗さの減少する条件を研磨初期に見いだすことに成功したことを述べている。研磨表面粗さ減少のメカニズムについては、衝突カスケードのモデルを考案し、表面の凸部が凹部より優先的に除去される機構を説明した。

第5章では、研磨表面粗さを減少させる研磨条件としてイオンの質量に注目し、ヘリウ

μイオンの研磨特性を調べた結果を述べている。ここでは、予想どおり小さい研磨表面粗さを得ることに成功している。前章で提案した機構に関連し、イオンと表面原子の質量差による衝突時のエネルギー伝達効率と形成されるカスケードの関係による凸部を優先的に除去する条件を説明した。初期の加工特性について、オージェ分光分析結果をもとに、表面酸化物層が有効であることも説明した。

第6章から第8章までは、これまで検討してきたSKD1のイオンスパッタ研磨加工の機構について系統的に説明するため、SKD1の組織が金属とセラミックス質（クロム炭化物）で構成されていることに注目し、金属の材料とセラミックス質を含む材料について、それぞれ一般的な加工特性とその機構を明らかにすることを試みた。

第6章では、金属のイオンスパッタ加工特性を調べるため、金属結晶の結晶方位や格子欠陥（転位、結晶粒界、空孔）の影響について検討した結果を論じている。結晶粒内で加工表面粗さが変化することを見つけ、その原因として、格子欠陥（転位、結晶粒界、空孔）の影響を考え、塑性加工や急冷凝固方により、転位密度や結晶粒界の量を変化させた試料を用いて加工特性を検討した。これらの格子欠陥はスパッタ率を減少させることを発見している。

第7章では、前章で金属結晶で格子欠陥の影響が見いだされたことから、アモルファス構造の金属についても欠陥の量を変化させて加工特性を検討した。さらに、アモルファス構造の材料をモデルにしているTRIMコードによるスパッタリングのシミュレーションを行い、実験と比較検討した。

第8章では、金属とともにSKD1を構成するセラミックス質の一般的な加工特性とその機構を検討した。セラミックス質を含む材料として、ステンレス鋼の窒化層の加工特性を検討した。窒化層で6倍も硬くなるが、スパッタ率はむしろ増加する。また、これまでの知見を応用し、将来の実用材料として超伝導セラミックスのポリッシングの可能性を検討し、YBCO（酸化物超伝導体）の研磨加工表面粗さを減少させる画期的なポリッシング効果を見いだした。

第9章では、金属とセラミックスの複合材料であるSKD1への研磨条件と適応される機構について、これまでの研究内容を系統的に説明した。

第10章は、全論文の総括であり、本研究により導かれた成果について述べている。

最近、「ナノスケール構造制御材料の物性と応用」に関する研究が盛んに行われ、表面プロセスに用いるガスクラスタイオンビーム技術などの提案がなされており、低エネルギー照射効果、ラテラルスパッタ効果（基盤表面で入射原子の基盤に平行な運動が助長され、高効率のスパッタ作用を示す）が平坦面形成に効果的な新しいであることが報告されている。

本研究は、これらに先駆けてイオンスパッタ研磨によるポリッシング効果を初めて見だし、その機構と応用について詳細に検討していることから、プラズマ応用プロセスによる超微細加工の分野の発展に寄与する有用な知見を与えているものと考えられる。

論文の審査結果の要旨

本論文の主題はイオンビームによるスパッタリングを利用した表面加工に関するもので、とくに精密加工に必要とされる表面粗さの制御に注目した研究である。スパッタリングは、核融合装置のプラズマ・対向壁相互作用においても重要なプロセスとされており、その基礎過程の理解は共通の課題である。

本研究では、対象とした鋼材SKD11について、エッチング速度と表面粗さの変化を、ビームエネルギー、電流密度、ビーム入射角度、イオン質量などの関数として測定し、実験結果を提示している。主な結果として、(1)イオン照射初期に表面粗さが増加しない、あるいは減少する入射イオン束条件、時間帯が存在すること、(2)入射イオンについて、低いエネルギー、小さい質量、大きな入射角度ほどその挙動が顕著なこと、(3)高クロム濃度領域ではエッチング速度が小さく、表面粗さも減少することなど、いくつかの重要な事実を見いだしている。

スパッタリングを利用した加工では、一般に表面粗さが増大する傾向にあることが知られている。本研究では、SKD11、銅など不均質、あるいは結晶の配向がランダムな物質の表面では、種々の原因で粗さが増大することを自らの実験で検証している。上記(3)はその1例である。また、計算機コードを用いて標的材料の原子間結合力とスパッタリング率の関係を求め、表面粗さに与える影響を論じており、金属非晶質に対する実験結果との比較により、材料の原子間結合力の不均一が表面粗さ増大に寄与することを指摘している。さらに、実験事実(1)、(2)を踏まえ、表面粗さ減少のモデルを考察し、比較的エネルギーが低く、入射イオンと標的原子の質量比が大きい場合、表面粗さが減少する傾向があることを説明している。以上のように、スパッタ加工時の表面粗さを規定する要因を分析し、実験的に検証したこと、限定された条件ではあるが、イオンビームスパッタリングによって表面粗さの制御が可能であることを実験的に初めて示したことは本研究でもっとも評価される点である。

本論文には以上の内容が的確に表現されており、学位論文に十分価値するものと評価される。

本論文に関連する分野の基礎学力については、2回にわたって口頭試問を行い、十分であることが確認された。語学力については、筆頭著者として書かれた英文の論文、本申請論文のアブストラクトを評価し、十分な能力を有するものと判断した。審査委員会における口頭発表、また公開発表会での講演では、論文の趣旨をわかりやすく表現する努力が認められ、発表能力についても十分と認められる。