

博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

氏名	うちだ よし ひさ
学位の種類	内田 敬久 ¹
学位記番号	博士 (工学)
学位授与年月日	博甲第 7 号
学位授与の要件	平成 12 年 3 月 18 日
論文題目	学位規定第 4 条第 1 項該当
論文審査委員	傾斜機能材料のエキシマレーザ加工に関する研究 (主査) 教授 山田 諄 ² 教授 築島隆繁 ² 教授 大橋朝夫 ³ 教授 林 二一 ⁴

論文内容の要旨

傾斜機能材料のエキシマレーザ加工に関する研究

21 世紀を間近に控え、スペースプレーンが世界的に脚光を浴び、その基盤研究が行われている。スペースプレーンの開発には、技術的に多くの課題が山積している。とりわけ超耐熱材料の開発は、最も重要な課題の一つである。このニーズに応えるために提案されたのが傾斜機能材料である。傾斜機能材料とは、材料内部の組成や微視的組織を連続的に傾斜分布化させることで分布の両端面で異なった機能を持たせた材料である。傾斜機能材料は、合金や混合材料のように特性が一面的ではなく、二つの原材料の有用な特性を引き出している。したがって、各種の原材料の組み合わせと作製法を選ぶことにより、広範な分野での応用に適した材料を提供できることが期待されている。

このようにして作製された傾斜機能材料を実際に使用するに当たっては、必要な形状に加工する工程が必要である。従来から、単一の材料を加工するには、その材料に適した加工法が確立されて

いるが、傾斜機能材料のように各種の材料の組み合わせで作られた材料に対しては、未だ最適加工法が確立されているとは言い難い。

本研究の目的は、傾斜機能材料の各種材料に合わせて加工条件を最適化し、精密微細加工や表面処理に高い精度を実現することである。そのために、精密微細加工が可能とされているレーザ加工法に注目し、特に発振波長が紫外線領域にあり、1 光子当たりのエネルギーが大きく、高出力が得られるエキシマレーザを用いて傾斜機能材料を加工することを試みた。

特に本研究では、加工対象として分布の両端で機能の大きく異なるセラミックス-金属系傾斜機能材料をとりあげ、種々の組成の材料に対し波長 308nm のエキシマレーザで加工を行い、加工特性を明らかにした。組成比の違いにより加工特性が異なることから、精密微細加工のためのモニタリングとして、加工時に発生するアブレーションプラズマの計測を行い、考察を加えた。

以下本論文の各章の概要と得られた結果をまとめる。

第 1 章では、本研究の背景と目的および本論文の構成について述べた。

第 2 章では、本研究に使用したエキシマレーザの諸特性、レーザ加工実験システムおよび実験方法等について述べた。

第 3 章では、傾斜機能材料の特性と作製方法ならびに作製したセラミックス-金属系傾斜機能材料について述べた。SEM 写真から段階添加法

1 愛知工業大学大学院工学研究科博士課程電気・材料工学専攻 (豊田市)

2 愛知工業大学 電子工学科 (豊田市)

3 愛知工業大学 電気工学科 (豊田市)

4 愛知工業大学 機械工学科 (豊田市)

の有効性を示した。構築したレーザ加工実験システムおよび顕微鏡写真による被加工材料表面の結果と接触式マイクロメータによる深さ特性について述べた。実験結果から、カオリン層が光化学反応によるアブレーション加工、酸化第二鉄層が熱過程の加工と考えられるそれぞれ異なる加工特性を示した。加工速度が組成比により複雑に変化していることを示した。組成が内部で連続的に変化している傾斜機能材料を精密に加工するには、加工条件を詳細に制御することが必要となることを示した。

第 4 章では、加工メカニズムとアブレーションプロセスを理論的に考察し、エキシマレーザの有効性について述べた。エキシマレーザを用いることにより、光子エネルギーを材料のバンドギャップエネルギーに一致させれば、光化学反応により熱効果を最小にしたアブレーション加工が可能となる。構築したアブレーションプラズマの形状計測システムおよび計測結果とアブレーションプラズマの特性について述べた。アブレーションプラズマの生成時間はフルエンスの増加とともに早くなった。また、酸化第二鉄層の場合がカオリン層の場合より早く生成され、混合層の場合はほぼその中間の特性を示した。アブレーションプラズマの大きさは、フルエンスの増加とともに最初急激に増加し、その後飽和傾向を示した。また、酸化第二鉄層のアブレーションプラズマの大きさがカオリン層より大きい特性を示した。アブレーションプラズマ膨張の初速度は、 10^4m/s のオーダーであり、酸化第二鉄層の方がカオリン層より速い特性を示した。

第 5 章では、レーザ干渉計測法を用いたプラズマ電子密度の計測方法について述べ、次に、構築したアブレーションプラズマの電子密度計測システムと計測結果について述べた。マッハ・ツェンダー干渉計を構成することにより、干渉波形から電子密度を得た。電子密度は、組成比が異なってもフルエンスが増加するとほぼ一定値を示し、 10^{25}m^{-3} 程度となった。また、電子密度分布は、フルエンス 1.0kJ/cm^2 において、試料からの高さが 0.7mm で最大となり、それ以上高くなると減少する傾向を示した。

第 6 章では、構築したアブレーションプラズマの分光特性計測システムと計測結果について述

べた。分光特性から評価した電子温度について述べた。線スペクトル比から電子温度を求めたところ、各組成比とも 1eV 程度となった。酸化第二鉄層の場合がカオリン層の場合より電子温度がやや高い値を示した。この違いは、酸化第二鉄層の方がカオリン層より吸収率が大きく、生成時間が短いために、強く加熱されるためと考えられる。連続光スペクトル分布から評価した電子温度も線スペクトル比から求めた値とほぼ同様の値を得た。

第 7 章では、構築したアブレーションプラズマの吸収特性計測システムと計測結果について述べた。プラズマによるレーザ光の吸収は、レーザの照射開始後数 ns から始まり約 20ns 後にほぼ 100% 吸収される特性を示した。加工効率を向上させるためには、レーザパルス幅をさらに狭くする、あるいは外部から適当なガスを吹き付けてプラズマを除去する方法が有効なことを述べた。

第 8 章では、本論文の総括と本研究の将来展望について述べた。

以上のように、本研究では、傾斜機能材料の一例としてセラミックス-金属系傾斜機能材料をとりあげ、これに波長 308nm のエキシマレーザを照射した場合について、材料組成、照射レーザのフルエンス等を可変パラメータとして加工実験を行った。その際、加工時に発生するアブレーションプラズマの電子密度、電子温度分布およびプラズマによるレーザエネルギーの吸収率等を測定し、加工の程度、表面状況との関係を明らかにした。本研究によって最適加工条件を見出すための有用な知見が得られた。これらの知見は将来材料加工におけるエキスパートシステムの構築に寄与するものと期待される。

論文審査結果の要旨

この論文は、セラミック-金属系傾斜機能材料をエキシマレーザ加工したときの加工特性とアブレーションプラズマの特性について論述している。科学技術の進展に伴い、材料の高機能化の要求が高まってきた。現在までに、合金や化学処理及び熱処理等による素材の高機能化が行われてきたが、従来の方法では限界がある。最近、高機能材料の一つとし

て傾斜機能材料が注目を浴びている。傾斜機能材料は、原材料の組成を材料内部で任意に傾斜化させることにより機能を傾斜化させ、材料の両面で異なる機能を持つ新しい材料である。これは合金や混合材料のように特性が一面的でなく、二つの原材料の有用な特徴を引き出すことが出来る。原材料の組み合わせと作製法により多様な産業応用が期待されているが、組成が連続的に傾斜しているため二次加工が困難であるという欠点がある。

そこで本研究では、傾斜機能材料をエキシマレーザで精密加工することを目指し、加工プロセスの解明や加工条件を最適化するための基礎的研究を行っている。酸化第二鉄と朝鮮カオリンを原材料として、固液濾過分離技術を用いた段階添加法でセラミック-金属系傾斜機能材料を作製し、XeCl エキシマレーザで傾斜機能材料を穴あけ加工及び走査加工したときの加工特性を明らかにしている。各層の組成比の違いにより加工特性が異なることから、精密加工のためのモニタリングとして、加工時に発生するアブレーションプラズマの計測を行い、観測結果について考察を加えている。

本論文は 8 章で構成されている。

第 1 章では、本研究の背景と目的及び本論文の構成について述べている。

第 2 章では、大出力の紫外線レーザであるエキシマレーザが精密加工に有用である事について述べている。研究に用いられた XeCl エキシマレーザは、波長 308nm、最大出力 17MW、最大繰り返し周波数 50Hz である。焦点距離 100mm のレンズで集光したときのビームスポット径を計測し、 $110\mu\text{m} \times 240\mu\text{m}$ を得ている。

第 3 章では、傾斜機能材料の特性と作製方法ならびに作製したセラミックス-金属系傾斜機能材料のレーザ加工特性について述べている。作製した傾斜機能材料の SEM 写真から段階添加法の有効性を示した。被加工材料表面の顕微鏡写真や接触式マイクロメータによる深さ特性等の加工特性について述べている。カオリン層が光化学反応によるアブレーション加工、酸化第二鉄層が熱過程の加工とそれぞれ異なる加工特性を示した。また、加工速度が組成比により複雑に変化していることを明らかにしている。従って、組成比が連続的に変化している傾斜機能材料の精密加工には、加工条件の詳細な制御が必要であることを示している。

第 4 章では、加工メカニズムとアブレーションプロセスを理論的に考察し、エキシマレーザの有効性について述べている。構築したアブレーションプラズマの形状計測システムについて述べ、計測されたアブレーションプラズマの特性について述べている。プラズマ生成時間はレーザフルエンスの増加と共に早くなり、酸化第二鉄層がカオリン層より早く生成され、混合層はほぼ中間の特性を示すことを明らかにした。プラズマの大きさは、フルエンスの増加と共に最初急激に増加し、その後飽和傾向を示した。又、酸化第二鉄層のプラズマの大きさはカオリン層より大きい特性を示した。プラズマの膨張初速度は 10^4m/s 程度であり、酸化第二鉄層の方がカオリン層より早い特性を示すことを明らかにした。

第 5 章では、構築したマッハ・ツェンダーレーザ干渉計について述べ、アブレーションプラズマの電子密度を計測した結果について述べている。アブレーションプラズマの電子密度は、組成比が異なってもフルエンスが増加するとほぼ一定値を示し、 10^{25}m^{-3} 程度になる。また、電子密度分布を測定し、フルエンス $1.0\text{kJ}/\text{cm}^2$ において、試料からの高さが 0.7mm で最大となり、それ以上の高さで減少する傾向があることを明らかにした。

第 6 章では、アブレーションプラズマの分光計測の結果について述べている。分光出力は、連続光の上に多くの線スペクトルが観測され、線スペクトルを同定したところ、主に試料原子のスペクトルであることが分かった。線スペクトル強度比から電子温度を求めたところ、各組成比とも 1eV 程度であることが分かった。酸化第二鉄層がカオリン層より電子温度が高い特性を示した。これは酸化第二鉄層の方がカオリン層より吸収率が大きく、生成時間が短いため、強く加熱されたためであると考えられた。連続光スペクトル分布から評価した電子温度は線強度比から求めたものとはほぼ同じ程度であることが分かった。

第 7 章では、構築したアブレーションプラズマの吸収特性計測システムについて述べ、プラズマによる照射レーザ光吸収特性について述べている。プラズマによるレーザ光の吸収は、レーザ照射開始後約 10ns から始まり、約 20ns 後にほぼ 100% 吸収されることを明らかにした。加工効率を向上させるためには、レーザパルス幅を狭くするか、あるいはアシストガスによりプラズマを除去する方法が有効であ

ることを指摘している。

第 8 章では、本論文の総括と、本研究の将来展望について述べている。

以上、本論文を審査した結果、博士論文として適格であると判定した。

(受理 平成 12 年 3 月 18 日)