

# 論文審査の結果の要旨

氏名 櫻井治之

強いレーザー光電場と物質の相互作用の研究の歴史はレーザーの発明とともに始まった。中でもレーザーによる誘電体破壊現象は、レーザー加工という新たな技術を生み出し、特に近年は産業応用の面から高い関心が払われている。しかし、光電場による誘電体破壊の物理過程は本質的に非平衡、高次非線形あるいは非摂動、非可逆現象であり、未解明な点が多いのが現状である。実験技術上も、破壊に至る微視的過程の解明のためには、超高速の時間分解能で物質の破壊のダイナミクスを観測する技術が必須である。このような観点から、本論文は超短パルスレーザーによる誘電体破壊、レーザーアブレーションの特性を実験的に明らかにすることを目指したものである。

本論文は 7 章からなる。第 1 章は序論でありレーザー加工、レーザーアブレーション現象の簡潔な概説の後、本論文の目的、構成が記されている。

第 2 章はレーザーアブレーションの理論背景、特に単一光パルスによる誘電体破壊について述べられている。前半ではレーザーアブレーションの時空間スケールについて概説され、後半では、初期過程である電子励起のダイナミクスの解析において標準的に用いられているレート方程式による手法が解説されている。まず比較的弱電場領域での多光子励起の記述から始まり、強電場下で支配的となるトンネルイオン化過程、両者を統一的に記述するケルディッシュの強電場イオン化モデルが記述されている。さらに、励起された伝導電子が光電場による加速され獲得した運動エネルギーを放出して新たなバンド間電子励起を引き起こす衝突イオン化過程についても述べられている。

第 3 章は本論文の中核をなすアブレーション閾値の評価法の開発に関するものである。まず、集光位置でのレーザー光の強度分布を高い空間分解能で計測するレーザープロファイラーの開発について詳しく述べられている。開発の鍵となった市販の CMOS センサーカメラの改良についても詳しく解説されている。続いて、サファイア結晶を対象に、アブレーションにより結晶表面に形成された穴の形状とレーザー強度分布との相関が様々な光強度の場合について調べられ、結晶表面に形成される穴の深さが局所光強度で決定されていることが示されている。この結果から、フルーエンスマッピングと名付けられた本手法が従来法に比べて、アブレーション閾値を確度良く決定する手法であることが結論されている。

第 4 章では第 3 章で開発した手法を用いて、2 種類の誘電体  $\text{TiO}_2$  と  $\text{Al}_2\text{O}_3$  に対して、アブレーション閾値のレーザー波長依存性が近紫外から赤外領域の広い波長範囲に亘って調べられている。 $\text{TiO}_2$  では 2 光子励起と 3 光子励起過程の間のステップ構造が観測されたが、これは単一光パルス励起下でのアブレーション閾値の多光子吸収ステップの観測例と

しては初めてである。より大きなバンドギャップ( $\sim 9.5\text{eV}$ )を持つ誘電体  $\text{Al}_2\text{O}_3$  に対しても同様の測定がなされ、有意な励起波長依存性が観測されている。

第5章では、実際のレーザー加工プロセスを想定し、複数の光パルスが連続して照射される場合の影響が調べられている。パルス照射数と試料表面でのアブレーション深さとの関係が調べられ、光照射によりダメージが蓄積していることを考慮したモデル計算で実験結果が説明されている。

第6章では、レーザー加工の具体的な応用を念頭に、前半では連続パルス照射の際に生じる加工深さの飽和現象について、Si 基板での V 字型溝形成の具体例をもとに考察がなされている。後半では、実際の加工例として、Si 基板へのテラヘルツ周波数帯の反射防止加工とその検証実験が示されている。

第7章では、全体のまとめと展望が述べられている。

超高速レーザーパルスによるレーザーアブレーションは、産業応用が高く期待されている反面、超高速現象、非摂動、高次非線形過程など様々な複雑過程の帰結として生じているためその基礎学理の解明は容易ではなく光学、光物性、電子物性、非平衡ダイナミクスなどの多様な物理学の学理を必要としている。本論文で実現された単一光パルス照射下でのアブレーション閾値の定量評価、これに基づいて得られたアブレーション閾値の励起波長依存性は、多光子励起過程やトンネルイオン化などの理論との比較に資する重要な実験的知見を与えており、アブレーションの初期過程で起きる電子励起の機構解明について資するものといえる。本研究の成果は光科学、物性科学にとって意義があると言える。

尚、本論文の中核をなす研究内容は指導教員らとの共同研究として学術雑誌に公表、及び公表予定であるが、論文提出者が自ら主体となって行ったものであり、論文提出者の寄与は十分であると判断する。

以上の理由により、博士(理学)の学位を授与できると認める。