

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 高橋 孝

レーザー加工は非接触、型レスで自由形状加工が可能であり、デジタル制御との相性が良いことから、次世代ものづくりにおいて中心的な役割を果たすと期待されている。レーザー加工をスマートものづくりに適用するためには、現在は職人の経験と勘に頼っている、物質に応じたレーザーの条件出しを、学理ベースのシミュレーターに置き換える必要がある。これを実現するには、レーザー光が照射されてから物質が破壊されるまでの物理現象を理解しなければならない。ところが、レーザー加工はフェムト秒からミリ秒、原子スケールからメートルのオーダーまでのそれぞれ 10 桁程度にも及ぶマルチスケール過程であり、レーザーによる電子励起、電子系から格子系へのエネルギー移動、バリステック伝導および拡散によるエネルギー散逸、相変化などを含む複雑な物理である。さらに、レーザー加工は高次の非線形過程を含み、かつ不可逆過程であるため、少しの条件の違いでも大きく結果が異なる。そのため、これまでの実験データには大きなエラーバーがついており、またデータの点数も少なく、学理構築のための物理を議論するには十分ではなかった。

このような背景のもと、本論文ではレーザー加工においてどのように高精度なデータを大量に取得するかを主眼に装置開発を行った。レーザー発振器から自作をすることで、パルス幅とパルスエネルギーを変化させながらアブレーション閾値を自動で測定する装置が完成し、これまでに比べて一桁以上高精度なデータが得られるようになった。アルミや銅、シリコンの破壊閾値を測定し、レーザー加工において物質に与えられたエネルギーがどのように伝達するかについての議論を行うことができるようになった。

本論文は 6 章から構成されている。

第 1 章では序論として本研究の背景や位置づけ、構成を述べている。

第 2 章ではモード同期レーザー、ファイバーレーザーの原理や、光と物質との相互作用、熱の散逸などの理論について記述している。

第 3 章ではアブレーション閾値パルス幅依存性の精密測定について説明している。ANDi タイプのレーザー発振器を作成し、増幅をしたのちに可変のパルス圧縮機を開発した。チャープパルス増幅では回折格子対でパルス圧縮を行うが、回折格子の間隔を自動ステージで可変にすることでパルス幅を 0.5 ps から 30 ps まで制御できる装置である。パルスエネルギーは波長板と偏光ビームスプリッターで可変できるようになっている。シリコンを加工サンプルとして XYZ 自動ステージに装着し、パルス幅とフルエンスを変化させながらサンプルに照射する。この際、レーザーの条件を変えるたびにサンプルの位置をずらす。これにより、サンプル上で横軸がパルス幅、縦軸がフルエンスの変化として、アブレーション閾値以上であれば加工痕が残る「アブレーションマッピング」を取得することができるようになった。

第 4 章では第 3 章で述べた装置の改良を行った。これまでの装置で大量にデータが自動取得で

きるようになったことで、高精度な実験データを得ることができるようになった。一方で、系統誤差が大きい問題が顕在化した。パルスの時間波形がガウス分布から離れていることで、回折格子の間隔を変化させたときのパルス時間波形変化が線形ではない部分があることが一つの要因であった。そこで、レーザー装置を発振器から作り直し、スペクトルを改善することでより時間幅の確度を改善した。さらに、レーザーのスポット径が閾値に与える影響も小さくする改良を行った。その結果、高精度かつ信頼性の高いアブレーション閾値を得ることが可能となった。

第5章ではアブレーション閾値の材料依存性を調べている。ここではシリコン、銅、アルミニウムの3種類について、高精度にアブレーション閾値の計測を行った。その結果、これらのアブレーション閾値のパルス幅依存性は大きく異なる傾向を示すことを発見した。先行研究ではエラーバーに埋もれるような細かいふるまいも見られるようになった。通常レーザーアブレーション閾値のパルス幅依存性は熱拡散で説明されることが多いが、精密測定の結果、拡散では説明できないことが分かった。物質内のバリスティック伝導や、相変化に伴う入熱の変化を導入して考察がなされている。

第6章では全体のまとめと今後の展望について述べている。

以上のように、高橋孝氏はレーザーアブレーション閾値のパルス幅依存性について、これまでより一桁以上精密に測定する手法を開拓し、その結果物質内のエネルギー散逸について精密に議論を行うための素地を作った。これはレーザー加工の学理を構築するうえで重要な基盤技術であり、本研究の成果は今後の物理工学の発展に大きく寄与することが期待される。

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。