

## 論文の内容の要旨

論文題目 超短パルスレーザー加工におけるアブレーション閾値の  
精密測定

氏名 高橋 孝

### 研究背景

超短パルスレーザーを用いた高精度・高品質な加工は次世代加工技術として近年着目されている。現在、レーザー加工パラメータの最適化は対象・目的に応じて膨大な試行錯誤を経て行われており、最適化時間を短縮するため最適パラメータを予測できるようなシミュレータが待望されている。シミュレータの構築には物理現象のモデル化が必要であり、レーザーがどのように物質に作用し、壊すのかという学理の解明が求められる。特に1-10ピコ秒の時間領域は電子・フォノン相互作用やフォノンの熱化など様々な現象が典型的なタイムスケールとして持つと考えられている重要な領域である。本研究はこの時間領域でのエネルギー伝搬を調べる手法としてアブレーション閾値のパルス幅依存性に着目し、閾値の変化から物質内でのエネルギー伝搬を議論することを目指した。先行研究において様々な物質に対するアブレーション閾値パルス幅依存性が調べられているが、加工の非線形性や不可逆性によって値の不確かさやデータ点数の少なさなどの課題があった。そこで本論文では各種レーザーパラメータを自動で振るシステムを構築し、大量に良質なデータの取得を実現した。そのデータを用い、精度の高いアブレーション閾値決定手法を確立した。加えて、本システムの確度向上に取り組み、物質固有のアブレーション閾値の振る舞いの観測に成功した。

## 1. パラメータ可変レーザー加工機とアブレーション閾値精密測定手法の開発

本研究では初めにパラメータ可変のレーザー加工機の開発に取り組んだ。ファイバーをベースとした発振器、増幅器と集光レンズを用いて金属・半導体を加工するのに必要なフルエンス  $1 \text{ J/cm}^2$  を達成した。また回折格子対を用いたパルス圧縮器を構築し、回折格子対の間隔を変えることで  $0.53\text{--}31$  ピコ秒の範囲でパルス幅を連続的に変化させることを可能にした。フルエンスやパルス幅、サンプルの照射位置は自動ステージを用いて制御でき、パラメータを変えながら自動で加工することができる。

アブレーション閾値を精密に決定するために加工結果のモニタリングシステムと閾値近傍のデータをサンプリングするプログラムの開発に取り組んだ。レーザーアブレーションに伴い多くの物質ではレーザー誘起プラズマ発光が観測される。そのプラズマ発光に着目し、その有無でアブレーションが起きたかどうかを瞬時に判定するその場観察システムを構築した。閾値近傍では照射結果が揺らぐため、結果が揺らぐフルエンス近傍を重点的にサンプリングすることで高精度なデータが取得できる。照射結果から次のパラメータを選択するサンプリングプログラムを用いることで閾値近傍の 1 万点のデータが数時間で取得可能になった。このデータを誤差関数モデルでフィットすると再現よく閾値を決められることが分かり、標準偏差の大きさが 1% 以下の高精度な閾値測定を実現した (図 1)。

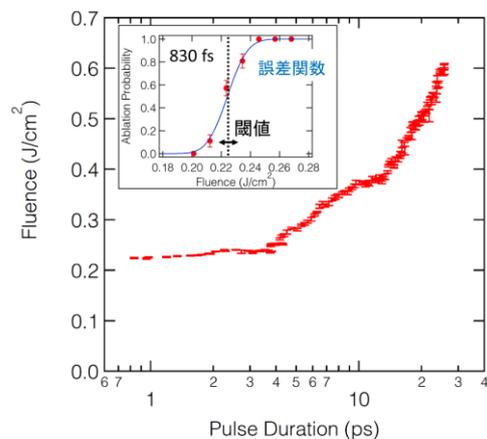


図 1 : Si のアブレーション閾値測定結果

## 2. アブレーション閾値測定の確度向上に向けたレーザー加工機開発

アブレーション閾値測定において、報告されている閾値フルエンスの絶対値は論文間で数倍異なることがある。閾値の確度を高めることは理論モデルと実験値を比較するうえで重要である。そこでアブレーション閾値測定の確度向上のためにレーザー加工機の改良を行った。まずパルス幅の確度を高めるためにガウス分布に近いスペクトルを持つレーザー発振器を新たに開発した。さらに 4f 光学系を用いてスペクトル形状をよりガウス分布に近づけることでパルス幅を変えたときのパルス形状変化を抑制した。また回折格子を動かしたときに集光点での空間プロファイル変化を抑制するためにパルス圧縮器の改良を行った。改良した加工機を用いてパルス幅依存性のスポットサイズ依存性を測定し、スポットサイズによって絶対値の変化はあるが相対的な傾向は変わらないことを実験的に確かめ、パルス幅依存性の結果を議論するための土台を新たに築くことができた。

### 3. アブレーション閾値の材料依存性

アブレーション閾値は材料の光学的、熱的、機械的性質などに依存すると考えられる。そこで典型的なサンプルであるシリコン、銅、アルミニウムを用いてアブレーション閾値の物質依存性を調べた(図2)。物質によって閾値の傾向は異なり、特に金属サンプルにおいて、これまで考えられていたような熱伝導で支配されるアブレーション閾値の依存性よりはるかに個性的で複雑な振る舞いの観測に成功した。銅の3ピコ秒以下の振る舞いは音速でのバリステック伝導を仮定すると説明でき、3ピコ秒以上の振る舞いは溶解やフォノンの熱化によるエネルギー散逸の減少などが考えられる。アルミニウムは閾値が減少しているため、液化による吸収率増加によって入熱が変化していることなどが考えられる。以上の成果は、高密度励起下でのエネルギー伝搬過程について本研究で開発した手法が有用であることを示している。

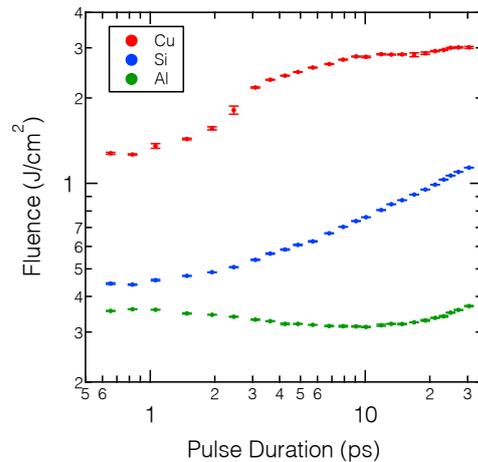


図2：アブレーション閾値の材料依存性

### 結論

本研究では高密度励起下でのエネルギー伝搬過程を調べるためにアブレーション閾値のパルス幅依存性に着目した。加工の非線形性や不可逆性による値の不確かさやデータ点数の少なさなど課題に対して、パラメータ可変のレーザー加工機とプラズマ発光を用いたその場観察システムを組み合わせ、大量のデータを効率的に取得することで解決した。閾値の確度を向上するためにレーザー加工機の改良を行い、パルス幅依存性におけるスポットサイズの影響を明らかにした。また異なる材料を用いて閾値測定を行い、材料によって個性的で複雑な振る舞いを観測した。本研究で開発した精密測定手法によりレーザーアブレーションダイナミクスの詳細な議論が可能になった。