



Title	大気の電離閾値を超える超短パルスレーザー集光特性変化機構の解明とレーザー衝撃加工への展開
Author(s)	西端, 樹
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/96072
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (西 端 樹)

論文題名

大気の電離閾値を超える超短パルスレーザ集光特性変化機構の解明とレーザ衝撃加工への展開

論文内容の要旨

超短パルスレーザ加工は、生産性の向上と付加価値の向上に寄与し、次世代のものづくり産業に貢献する技術である。この加工法は単位面積当たりのエネルギー（フルエンス）に基づいて様々な加工方法に活用される。数 J/cm^2 以下の低フルエンス領域では、表面処理加工や微細加工への応用が進んでいる。一方で、 $10\text{ J}/\text{cm}^2$ 以上の高フルエンス領域では、レーザピーニングなどのレーザ衝撃加工への応用が期待されている。例えば、パルス幅 100 fs のレーザにおいて、 $10\text{ J}/\text{cm}^2$ のフルエンスはレーザ強度に換算すると $10^{14}\text{ W}/\text{cm}^2$ となり、これは大気の電離閾値を超える。このような高いレーザ強度領域では、光カー効果や大気の電離に伴うプラズマなどの非線形光学現象が影響を与え、集光特性が非線形に変化することが知られている。集光特性の変化は加工現象を支配する重要な現象であり、その理解は重要であるが、焦点距離が数十 mm から数百 mm 程度のレーザ加工分野では、その非線形なレーザ集光特性変化の研究例は限られている。百 μJ 以下のパルスエネルギーやフェムト秒パルス、開口数が単一の条件での研究が主であり、レーザ集光特性変化の各種パラメータ依存性の理解や汎用性が不足している。レーザ衝撃加工においては、数 mJ 級のパルスエネルギー、フェムト秒から数ピコ秒領域のパルス幅、複数の開口数におけるレーザ集光特性の網羅的な理解が必要である。

そこで、本研究では、 mJ 級の高パルスエネルギーおよびフェムト秒からピコ秒のパルス幅条件において、数 J/cm^2 から $100\text{ J}/\text{cm}^2$ 程度の高フルエンス領域の超短パルスレーザの集光特性を実験的および計算的に調査し、その非線形な集光特性を解明することを目的とした。さらに、高フルエンス領域の超短パルスレーザ加工の一種であるドライレーザピーニングを実施し、集光特性変化を含むレーザパラメータの影響を調査し、照射位置制御や加工品質の高度化を目的とした。第1章では研究背景について述べ、第2章ではレーザ伝搬の数値計算方法について述べた。

第3章では、大気の電離閾値を超える超短パルスレーザ加工におけるフェムト秒からピコ秒領域のパルス幅依存性に着目し、アブレーションやピーニング加工に及ぼすパルス幅の影響について論じた。フェムト秒パルス条件においては、レーザ集光過程でレーザ発散が生じ、アブレーション深さやピーニング効果の低下が実験的に示された。ピコ秒パルス条件では、レーザ集光過程のレーザ発散を抑制でき、アブレーション加工やピーニング加工に適切な条件となることを示した。さらに、より長い数ピコ秒パルスでは熱影響が生じ、加工に不利な影響を及ぼすと考えられた。

第4章では、数値シミュレーションを用いて、レーザ集光特性に及ぼす大気非線形光学現象の影響とそのメカニズムについて述べた。大気電離閾値を超えるレーザ集光時には、大気電離によって生じたプラズマの影響を受けレーザ発散が生じ、集光位置の変化やフルエンスの低下が生じることが示された。また、回折現象と大気非線形光学現象の位相変化量パラメータを定義し比較することで、パルス幅と開口数に応じた大気非線形光学現象の影響の変化が示された。レーザ条件に応じた非線形なレーザ発散を開始するレーザ強度やその位置の推定手法を提案した。

第5章では、サブ mJ から数 mJ のパルスエネルギー依存性に着目し、アブレーションやピーニング加工に及ぼすパルスエネルギーの影響について論じた。同一の開口数条件およびパルス幅の条件下で、パルスエネルギーの増加に伴い、レーザ発散が顕著となり、最集光位置でのアブレーション量が増加せず、アブレーション径の拡大が生じることが示された。数値シミュレーションを用いて、パルスエネルギーの増加がレーザ集光時の最大フルエンスの増加に寄与しないことを明らかにした。一方、ピーニング効果はアブレーション径が大きくなることで深くまで導入できることが実験的に示され、レーザ衝撃加工においてはフルエンスだけでなくアブレーション径の重要性も示された。

第6章では、高フルエンス条件を照射可能な高開口数条件でのレーザ集光特性について述べた。非線形光学現象の影響を上回る高開口数条件では、大気電離閾値を一桁上回るレーザ強度の集光、照射が可能であることが示された。また、レーザ衝撃加工に及ぼすフルエンスやアブレーション径の影響について述べた。高フルエンスは衝撃圧力を高め、アブレーション径は衝撃波伝搬挙動を定め、深い領域までの衝撃圧縮による塑性変形に寄与することが示された。

最後に、第7章にて本研究の結論を述べた。大気電離閾値を超える超短パルスレーザ集光特性の網羅的な理解やピーニング加工のレーザパラメータ依存性が明らかとなり、超短パルスレーザ衝撃加工の高度化に貢献した。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (西 端 樹)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	佐野 智一
	副 査	教授	浜口 智志
	副 査	教授	神原 淳
	副 査	教授	吉川 洋史
	副 査	准教授	荻野 陽輔

論文審査の結果の要旨

超短パルスレーザ加工は、生産性の向上と付加価値の向上に寄与し、次世代のものづくり産業に貢献する技術である。この加工法は単位面積当たりのエネルギー（フルエンス）に基づいて様々な加工方法に活用される。数 J/cm² 以下の低フルエンス領域では、表面処理加工や微細加工への応用が進んでいる。一方で、10 J/cm² 以上の高フルエンス領域では、レーザピーニングなどのレーザ衝撃加工への応用が期待されている。例えば、パルス幅 100 fs のレーザにおいて、10 J/cm² のフルエンスはレーザ強度に換算すると 10¹⁴ W/cm² となり、これは大気の電離閾値を超える。このような高いレーザ強度領域では、光カー効果や大気電離に伴うプラズマなどの非線形光学現象が影響を与え、集光特性が変化する。これらの変化は加工現象を支配する重要な要素であり、その理解は極めて重要である。一般的に、焦点距離が数 m のレーザフィラメンテーション分野では、これらのレーザ集光特性変化に関する研究が進んでいるが、焦点距離が数十 mm から数百 mm 程度のレーザ加工分野では、その研究例が限られている。百 μJ 以下のパルスエネルギーやフェムト秒パルス、集光強度が単一の条件での研究が主であり、レーザ集光特性変化の各種パラメータ依存性の理解や汎用性が不足している。レーザ衝撃加工においては、数 mJ 級のパルスエネルギー、フェムト秒から数ピコ秒領域のパルス幅、複数の集光強度におけるレーザ集光特性の網羅的な理解が求められている。

そこで、本研究では、mJ 級の高パルスエネルギーおよびフェムト秒からピコ秒のパルス幅条件において、数 J/cm² から 100 J/cm² 程度の高フルエンス領域の超短パルスレーザの集光特性を実験的および計算的に詳細に調査し、その物理現象を解明することを目的としている。さらに、高フルエンス領域の超短パルスレーザ加工の一種であるドライレーザピーニングを実施し、集光特性変化を含むレーザパラメータの影響を詳細に調査している。

最初に、大気電離閾値を超える超短パルスレーザ加工におけるフェムト秒からピコ秒領域のパルス幅依存性に着目し、アブレーションやピーニング加工に及ぼすパルス幅の影響について論じている。フェムト秒パルス条件においては、レーザ集光過程でレーザ発散が生じ、アブレーション量やピーニング効果が低下することが実験的に示されている。ピコ秒パルス条件では、レーザ集光過程のレーザ発散を抑制でき、アブレーション加工やピーニング加工に適切な条件となることを示している。さらに、より長い数ピコ秒パルスでは熱影響が生じ、加工に不利な影響を及ぼすと考えられている。次に、数値シミュレーションを用いて、レーザ集光特性に及ぼす大気非線形光学現象の影響とそのメカニズムについて述べている。大気電離閾値を超えるレーザ集光時には、大気プラズマの影響によりレーザ発散が生じ、それによってフルエンスが低下することが示されている。また、集光強度と大気非線形光学現象の位相変化量のパラメータを比較することで、パルス幅と集光強度に応じて大気非線形光学現象の影響量が変化し、到達可能なレーザ強度やフルエンス、集光位置が変化することが示されている。

次に、サブ mJ から数 mJ のパルスエネルギー依存性に着目し、アブレーションやピーニング加工に及ぼすパルスエ

エネルギーの影響について論じている。同一の集光条件およびパルス幅の条件下で、パルスエネルギーの増加に伴い、レーザー発散が顕著になり、最集光位置でのアブレーション量が増加せず、アブレーション径の拡大が生じることが示されている。数値シミュレーションを用いて、パルスエネルギーの増加がレーザー集光時の最大フルエンスの増加に寄与しないことを明らかにしている。また、ピーニング効果はアブレーション径に依存して深くまで導入できることが示唆され、レーザー衝撃加工においてはフルエンスとアブレーション径が重要であることが示されている。

最後に、高フルエンス条件を照射可能な高集光強度条件でのレーザー集光特性について述べている。非線形光学現象の影響を上回る高集光強度では、大気の電離閾値を一桁上回るレーザー強度の集光が可能であることが示されている。また、レーザー衝撃加工に及ぼすフルエンスやアブレーション径の影響について述べている。高フルエンスは衝撃圧力を高め、アブレーション径は衝撃波伝搬挙動を制御し、深い領域までのピーニング効果付与に寄与することが示されている。

以上のように、本論文では大気の電離閾値を超える超短パルスレーザー集光特性の網羅的な理解やピーニング加工のレーザーパラメータ依存性を明らかとし、超短パルスレーザー衝撃加工の高度化に貢献している。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。