



フェムト秒レーザー加工初期の 電荷分離過程をパルスごとに可視化

フェムト秒レーザーアブレーション初期過程からのテラヘルツ波放射を
パルスごとに観測することに成功

本研究のポイント

- ・フェムト秒レーザーアブレーション初期過程からのテラヘルツ波放射をパルスごとに観測することに成功
- ・高感度なシングルショット分光法を適用することで、世界で初めて 10 V/cm の微弱なテラヘルツ波をシングルショットで検出した
- ・今後、本技術を用いてテラヘルツ波放射を観測し、レーザー加工初期過程を解明することで、加工の効率化や最適化につながることを期待される

【研究概要】

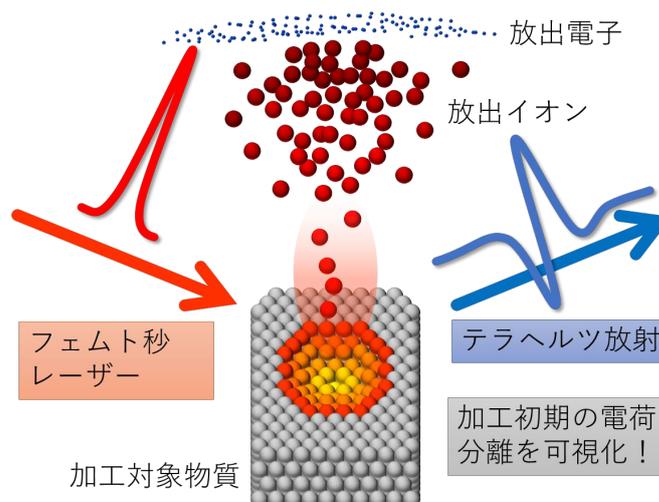
神奈川県立産業技術総合研究所の玉置亮常勤研究員、横浜国立大学の笠井達基大学院生（研究当時）、片山郁文教授、武田淳教授、株式会社ニコンの浅井岳氏、瀧川雄一氏らの研究グループは、フェムト秒レーザー加工初期過程において生じる電荷分離を起源としたテラヘルツ波放射を、励起パルスごとに観測することに成功しました。そして、その波形がレーザー加工の進行に伴って変化していくことを見出しました。これらの結果は、テラヘルツ波放射とレーザー加工過程が強い相関を持つことを示唆しており、この現象を利用して加工初期過程を解明することで、加工の効率化や最適化の実現につながると期待されます。

本研究成果は、光学関係の国際科学雑誌「Optics Express」（6月14日付）に掲載されました。

【研究成果】

超短パルスレーザーを用いたフェムト秒レーザー加工は、ナノ秒レーザーや連続波レーザーなどを用いた加工と比較すると熱変形が比較的少なく、高精度な加工が可能であることから、産業界でも盛んに用いられています。しかしながら、加工プロセスの初期過程を解明することは難しく、特にパルスごとの計測に課題がありました。レーザー加工において

は、時々刻々と表面の性質や形状が変化していくため、パルスごとの加工条件が大きく異なり、それによって初期過程のダイナミクスが変わると期待されるからです。そこで本研究では、超短パルスレーザー照射時に発生するテラヘルツ波放射が、初期の電荷分離を反映することに着目し、その検出を試みました。その結果、高い信号雑音比でパルスごとにテラヘルツ電場波形を検出することに成功し、その波形がレーザー加工の進行とともに変化していくことを見出しました。



【実験手法】

シングルショットのテラヘルツ分光法には、横浜国立大学独自で開発した階段状の光学素子を用いました。階段状の素子によって、レーザー1パルスを多数のパルスに分割し、それを検出用のプローブ光として用いることで、レーザー1パルスでの波形検出を実現することができます。また、レーザー加工初期過程からのテラヘルツ波は微弱であることから、位相オフセット法と呼ばれる高感度なテラヘルツ波検出手法を適用することにより、1 V/cm以下の電場強度であっても波形検出を可能としました。

【社会的な背景】

フェムト秒レーザーアブレーションは高い加工精度を非接触で実現することができることや、加工対象を選ばないことなどから、盛んに応用されています。しかしながら、アブレーション過程が不可逆であることから、その原理解明は難しく、特にレーザー照射直後の超高速時間領域のダイナミクスはこれまでにあまり研究されてきませんでした。一方で、ナノ秒レーザーや連続波レーザーによる加工よりも精度の高い加工が、フェムト秒レーザーを用いて実現できる原因は、このような超高速の領域にあるものと期待され、そのダイナミクスを解明する研究が待たれていました。本研究結果はそのような中でテラヘルツ波放射が、レーザー加工初期過程のダイナミクスを解明する上で、初期の電荷分離過程に関する重要な情報を与えることを示したものであり、その理解に寄与することが可能となると考えられます。

【今後の展開】

今回得られた成果によって、フェムト秒レーザー加工の初期過程に関する理解が深まるとともに、パルスごとに加工のダイナミクスを可視化することが可能になるものと期待できます。将来的には得られた知見をより高効率・高精度な加工の実現へとつなげることで、

フェムト秒レーザー加工の発展に貢献できるものと考えられます。レーザー加工は、加工そのもののみではなく、加工による表面改質を通じた摩擦の低減や、触媒反応の高効率化などを通じた省エネルギー、カーボンニュートラルの実現等に貢献することができます。また、レーザー加工技術を高度化させることによって、望みの機能を持つデバイスの作製など、産業技術への貢献も期待できます。

【発表雑誌】

タイトル: Pulse-to-pulse detection of terahertz radiation emitted from femtosecond laser ablation process

著者: Ryo Tamaki, Tatsuki Kasai, Gaku Asai, Daiki Hata, Hajime Kubo, Yuichi Takigawa, Jun Takeda, and Ikufumi Katayama*

掲載誌: Optics Express 30(13), 23622-23630 (2022). DOI: 10.1364/OE.459588

フェムト秒レーザー: フェムト秒 (10^{-15} s) 程度の時間幅の間だけ光を発するレーザーのこと。通常は 100 フェムト秒程度の時間幅を持つレーザーが多いが、中には数フェムト秒程度の時間幅のレーザーもある。光のエネルギーが非常に短い時間幅に集中しているため、瞬間的に非常に高い光強度を物質に照射することが可能となる。

レーザーアブレーション: 高強度のレーザーを物質に照射することによって、物質を構成するイオンや電子が表面から放出されること。この過程によってレーザー加工が可能となっている。放出過程で熱的平衡に達するかどうかによって、加工結果が大きく異なることが知られており、フェムト秒レーザー加工では加工精度が良いことが分かっている。

テラヘルツ波放射: テラヘルツ (10^{12} Hz) 領域の電磁波を放射する現象のこと。電荷の移動や分極の生成がピコ秒 (10^{-12} s) 程度の時間領域で起こると、その時間変化に応じた電磁波が放射される。

シングルショット分光法: 超高速時間領域のダイナミクスをレーザー1パルスで計測する技術。具体的にはレーザー1パルスを多数のパルスに分割し、それを連続的に検出結晶に照射することによって、レーザー1パルスでの波形検出が可能となる。

位相オフセット法: テラヘルツ電場によって誘起される屈折率変化を感度よく測定する手法。クロスニコルに設置した偏光子ペアの間に位相板を置き、それを微小な角度だけ回転させることによって、微小な偏光変化を高い信号雑音比で計測することが可能になる。

本研究成果に関するお問い合わせ先

横浜国立大学・工学研究院・片山郁文

045-339-3695、katayama-ikufumi-bm@ynu.ac.jp

KISTEC 事業に関するお問い合わせ

地方独立行政法人神奈川県立産業技術総合研究所

研究開発部 研究支援課

044-819-2034、rep-kenkyu@kistec.jp