

< 1 > 超高密度フォトン利用実証レーザーシステムの開発

< 1 - 2 > 超高密度フォトン反応制御技術の開発

サブテーマリーダー：光科学技術研究振興財団 コア研究室 研究リーダー 青島 紳一郎

応用のための計測・制御技術の開発

小テーマ： フェムト秒レーザー加工における飛散物の振る舞いの研究

研究従事者：静岡大学工学部機械工学科教授 齋藤 隆之

光科学技術研究振興財団 コア研究室 研究員 青島 紳一郎、大石 真吾

### ( 1 ) 研究の概要、新規性及び目標

#### 研究の概要

本研究は、平成 17 年度のみ実施した。フェムト秒レーザー照射時の被加工物からの飛散物の振る舞いを計測して解析する方法について検討し、方針の決定と必要機材の選定と手配を実施した。導入した高速ビデオカメラを用いて撮影して、解析により飛散物の粒径、速度などを明らかにでき、実用化するに十分な成果を得ることができた。

フェムト秒レーザー加工の研究において、アシストガスの有無によって加工結果が大きく異なることが明らかになってきた。実用化には、アシストガスの有無によって、加工結果が異なるメカニズムを明らかにすることが重要である。そこで、フェムト秒レーザー照射時の被加工物からの飛散物を可視化して、その振る舞いを計測して解析する。

#### 研究の独自性・新規性

これまでのフェムト秒レーザー加工の研究では、加工後の被加工物の観測に注力されていた。フェムト秒パルス照射時の飛散物の振る舞いを鮮明に可視化撮影して、飛散物の振る舞いを詳細に調べた例はなかった。共同研究先である静岡大学の高度な計測技術と、本事業での高いフェムト秒パルス利用技術を融合して独自性の高い研究を実施し、新規な現象を発見できた。

#### 研究の目標

フェムト秒レーザー照射時の被加工物からの飛散物を可視化して、その振る舞いを計測して解析する。これまでの研究では、加工後の被加工物の様子を主に研究してきたが、アシストガスの有無による飛散物の振る舞いの変化を知ることによって、良好な加工結果をもたらす手法を創出できると期待される。

本テーマは、静岡大学工学部機械工学科の齋藤隆之教授との共同研究で実施する。

### ( 2 ) 研究の進め方及び進捗状況

本事業での他の研究テーマの成果によって、フェムト秒レーザー加工ではアシストガスの有無によって加工結果が大きく異なることが明らかになってきた。そこで、フェムト秒レーザー照射時の被加工物からの飛散物を可視化して、その振る舞いを計測して解析した。導入した高速ビデオカメラを用いて撮影して、解析により飛散物の粒径、速度などを明らかにでき、実用化するに十分な成果を得ることができた。この過程で、フェムト秒パルスによる金属加工において、飛散物が加工点に集まるという新規で特異な現象を発見し、これが静電気に起因していることを明らかにした。よって、本テーマの目標達成度は 150 % である。

なお、本テーマは、静岡大学工学部機械工学科の齋藤隆之教授との共同研究で実施した。

### ( 3 ) 主な成果

フェムト秒レーザー金属加工時の飛散物の振る舞いを可視化計測した。

加工時の様子を観測し、現象を的確に捉えて定量化するには、場の計測すなわち可視化が重要である。可視化には高速性と高解像度の両方が要求されるため、Phantom V9.0 (Vision Research 社製)を導入した。この高速ビデオカメラを用いて、飛散物の可視化計測を行った。金属サンプルの表面に表面と並行にシート状のcwグリーンレーザー光を照射し、フェムト秒レーザー(50 fs, 440  $\mu$ J, 810 nm, 1 kHz)を20  $\mu$ m に集光して照射する。飛散した飛散物の散乱光を高速ビデオカメラで撮影し、鮮明に可視化計測した。

以下に詳細を述べる。

Phantom V9.0は、最高画素数1,600 × 1,200の時に画像撮影速度1,000コマ / 秒、画素数48 × 16の時に最高速度144,000コマ / 秒の高速度撮影を実現できるビデオカメラである。この高速ビデオカメラを用いて、飛散物の可視化計測を行った。図1に実験系を示す。金属サンプルの表面に表面と並行にシート状のcwグリーンレーザー光を照射し、フェムト秒レーザー(50 fs, 440 μJ, 810 nm, 1 kHz)を20 μm に集光して照射する。飛散した飛散物の散乱光を高速ビデオカメラで撮影し、鮮明に可視化計測した。金属サンプルはステンレス(SUS-304)を用いた。

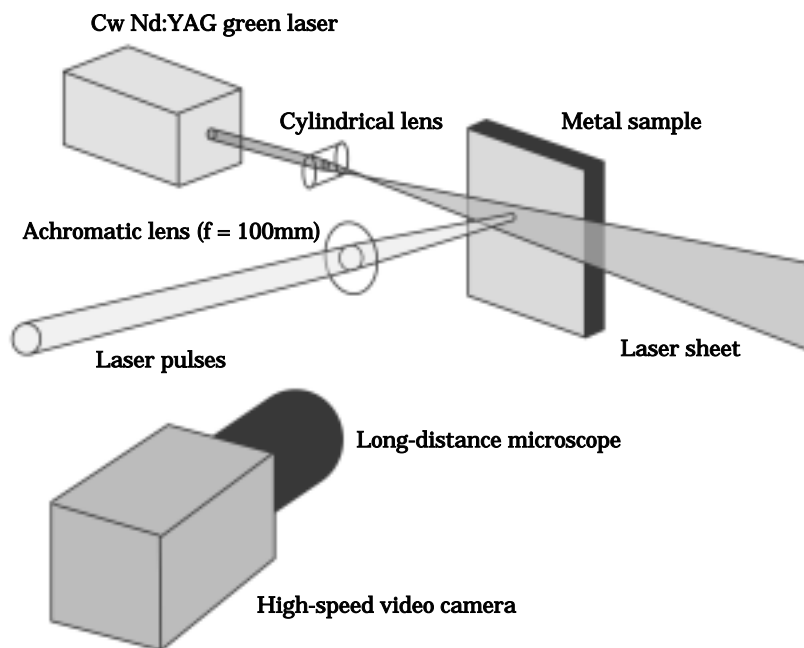


図1 実験系

図2に、高速ビデオカメラを用いた撮影による、加工開始から1.8 s後の画像を示す。中央の加工点から放射状に多数の飛散物が飛散していることがわかる。

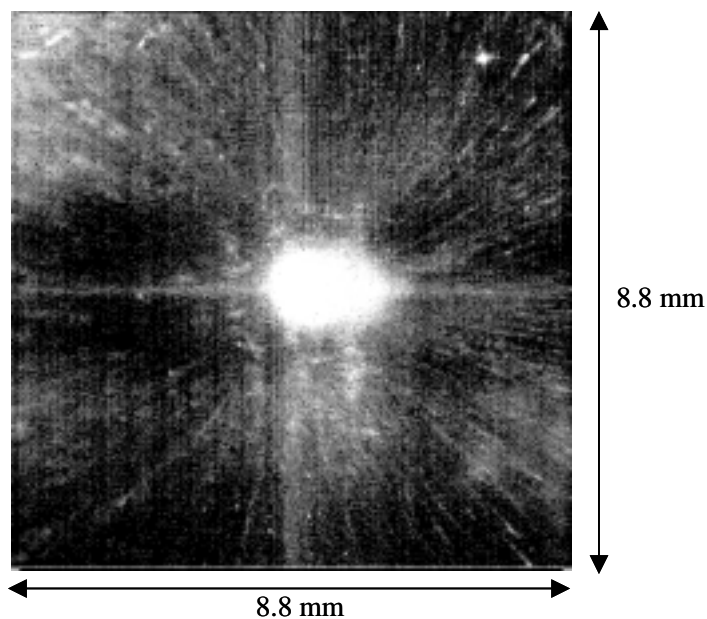


図2 放射状に飛散する飛散物

可視化計測結果を解析し、飛散物の振る舞いの全容を明らかにした。

可視化計測結果を解析し、飛散物の振る舞いを明らかにした。ステンレス(SUS-304)の加工について述べる。図3は、可視化計測をした結果をもとに、飛散物の振る舞いの概要を示した図である。フェムト秒レーザー照射開始時間を $t = 0$ とした。すると、何も起こらない状態があり( Phase 1 )、25 ms後に煙状の細かい飛散物が発生し( Phase 2 )、180 ms後には大きな粒径のものが放射状に飛散した( Phase 3 )。この中には、花火のように発光しているものも存在する。この後、大きな粒径のものが飛散し続けるが、3.3 s を境に飛散物が加工点に向かって集まっていく現象が観測され、発生するものと戻っていくものが混在する( Phase 4 )。6.0 s 後にはすべての飛散物が加工点に向かって放射状に集まっていく( Phase 5 )ということが明らかになった。

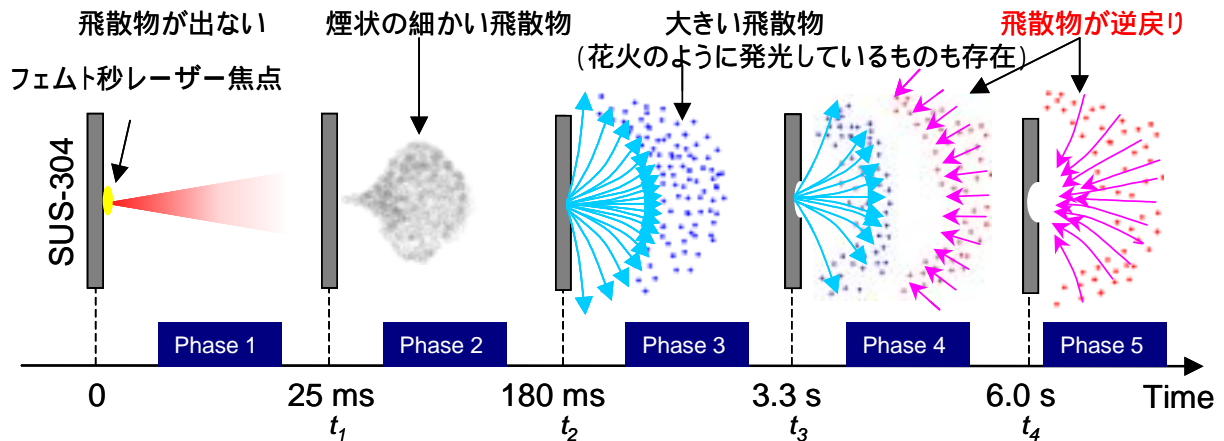


図3 フェムト秒レーザー加工における飛散物の振る舞いの概要

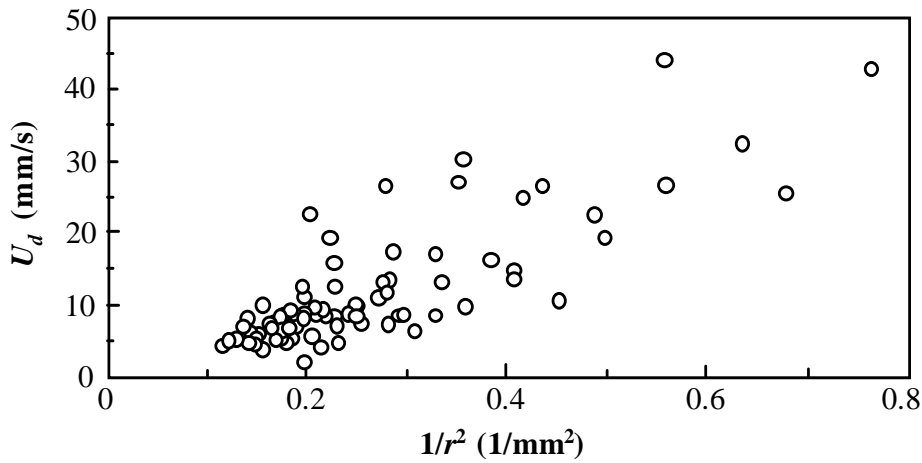
- $t = 0$  : レーザー照射開始
- $t = 25 \text{ ms} (= t_1)$  : 煙状の飛散物が発生
- $t = 180 \text{ ms} (= t_2)$  : 大きい飛散物が発生
- $t = 3.3 \text{ s} (= t_3)$  : 飛散物が加工部に向かって戻り始める
- $t = 6.0 \text{ s} (= t_4)$  : すべての飛散物が戻り始める

飛散物の粒径、速度などを明らかにした。

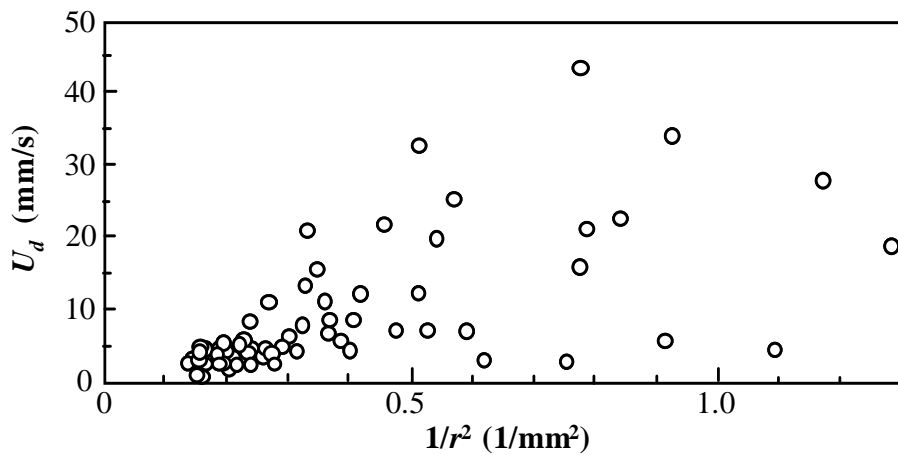
$t = t_2$ で発生する飛散物の粒径は $20 \mu\text{m}$ 程度、phase 3および5における飛散物の速度は最大で $40 \text{ mm/s}$ 程度であることが明らかになった。また、飛散物の速度は距離の二乗に反比例することが分かった。

以下に詳細を述べる。

phase 3、4および5における各飛散物の速度を、連続画像を比較することにより解析した。図4(a)にphase3で発生する飛散物の速度を、図4(b)にphase5で集まる飛散物の速度をそれぞれ示す。横軸は、加工点から飛散物の距離 $r$ の、二乗の逆数とした。



(a)



(b)

図4 加工点からの距離に対する飛散物の速度  
 (a) phase3で加工点から発生する飛散物の速度  
 (b) phase5で加工点に向かって集まる飛散物の速度  
 r : 加工点と飛散物間の距離

解析の結果より、 $t = t_2$ で発生する飛散物の粒径は $20 \mu\text{m}$ 程度、phase 3および5における飛散物の速度は最大で $40 \text{ mm/s}$ 程度であることが明らかになった。また、飛散物の速度は距離の二乗に反比例することが分かった。

Phase4では、逆方向への飛散物の加速が約 $3.3 \text{ s}$ から始まり、約 $6.0 \text{ s}$ には完全に飛散物の動きが反転するといった複雑な現象が現われる。そこで、このphaseシフトに注目し、時間に対する速度およびその極性の変化を解析した。図5に飛散物速度の時間変化を示す。速度におけるプラスは外側への方向（飛散物が発生する方向）、マイナスは内側への方向（飛散物が戻る方向）を意味する。運動の変化が、時間の経過とともに徐々に生じていることがわかる。これらのことから、飛散物の振る舞いは重力の影響にもかかわらず他の力に依存しており、それが電氣的、磁氣的なものが起源であるということが強く示唆される。

このように、飛散物の粒径、各phaseにおける飛散物の速度などを明らかにすることができた。

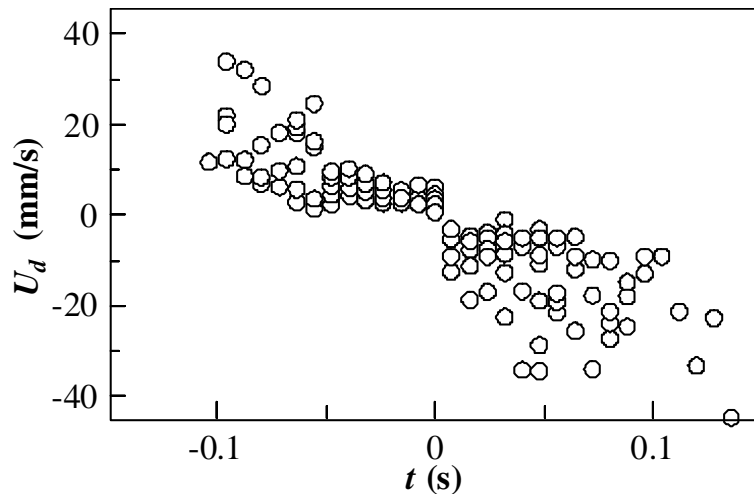


図5 phase4 における飛散物速度の時間変化

飛散物が加工点に集まるという新規で特異な現象を発見した。

前記 で述べたように、研究の過程で、フェムト秒レーザーを固定点に照射し続けた場合、前記 Phase 5で飛散物が加工点に向かって放射状に集まっていくという新規で特異な現象を発見した。この現象は、常識では考えられない予期しない現象である。

以下に詳細を述べる。

図6(a)および(b)は、それぞれ加工開始から3.2 s ( Phase 3 )、6.4 s ( Phase 5 )後の画像を拡大し、そのうちの第4象限を示したものである。画像寸法は画素数512×512であり、4.4 mm×4.4 mmに相当する。白いドットおよび雲状のものが飛散物である。図の左上隅が加工点であり、レーザーを集光することによって金属表面に生成されたプラズマ発光が確認できる。図6(a)においては、白く尾を引いてみえる運動残像が加工点の中心に向かってできており、飛散物が急速に加工点

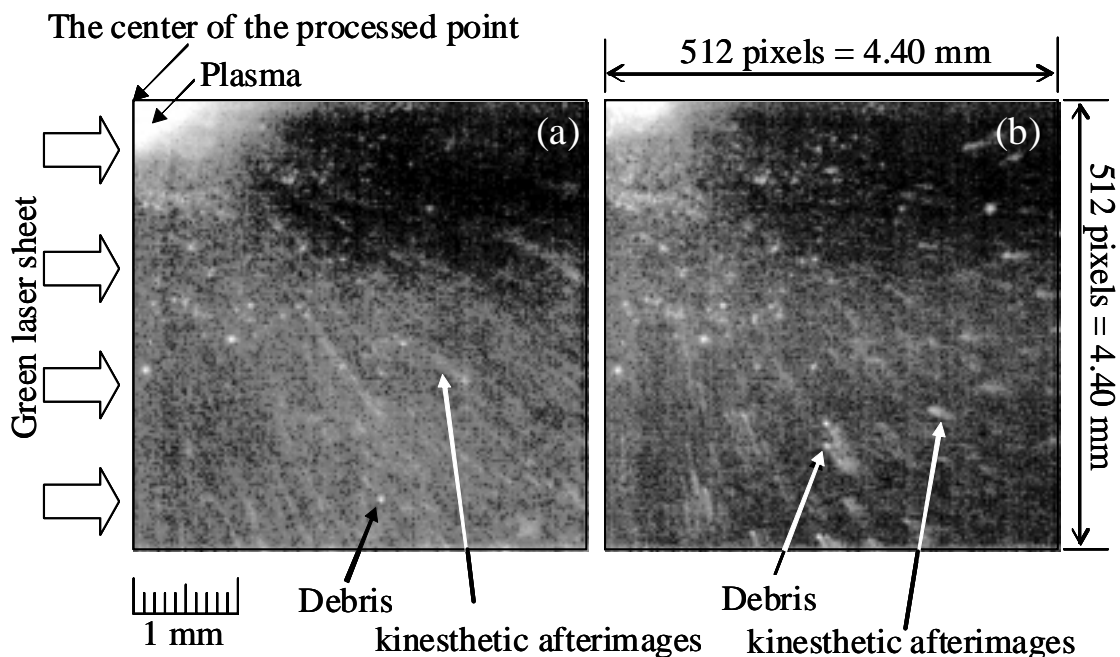


図6 phase 3, 5 における飛散物の振る舞い

- (a)  $t = 3.2$  s ( Phase 3 ) 加工点から飛散物が放射状に発生している
- (b)  $t = 6.4$  s ( Phase 5 ) 加工点に向かって飛散物が集まっていく

から遠ざかっていることがわかる。一方、図6(b)では運動残像が外側に向かってできており、飛散物が加工点の中心に向かっていていることがわかる。さらに、他の3つの象限における飛散物の振る舞いについても、上に述べたものと同じ現象が観測された。

このように、フェムト秒レーザーを固定点に照射し続けた場合、飛散物が加工点に向かって放射状に集まっていくという新規で特異な現象を発見した。この現象は、常識では考えられない予期しない現象である。

飛散物が加工点に集まる現象が静電気に起因していることを明らかにした。

飛散物が加工点に集まる現象において、飛散物の振る舞いは重力の影響にもかかわらず他の力に依存しており、それが電氣的、磁氣的なものが起源であるということが強く示唆される。

そこで、電界下における飛散物の可視化計測を行った。 $\pm 24 \sim 650$  Vの電圧を印加して、電極への飛散物の付着過程をリアルタイム微分カメラにより可視化撮影した。加工開始から 200 msあたりから電極への飛散物の付着が観測され、飛散物の付着量、付着過程は印加電圧により変化し、飛散物の運動が電界の影響を強く受けることがわかった。以上から、飛散物が加工点に集まる現象が静電気に起因していることが明らかになった。

以下に詳細を述べる。

図7に電界下における飛散物の可視化計測の実験系を示す。これまでの実験と同様に、金属サンプルSUS-304を水平に設置し、鉛直上方からフェムト秒レーザー(50 fs, 232  $\mu$ J, 810 nm, 1 kHz)を金属表面に集光した。電極と金属表面との距離を5 mm、電極間距離を3 mmとして、 $\pm 24 \sim 650$  Vの電圧を印加した。電極への飛散物の付着過程をリアルタイム微分カメラにより可視化撮影した。

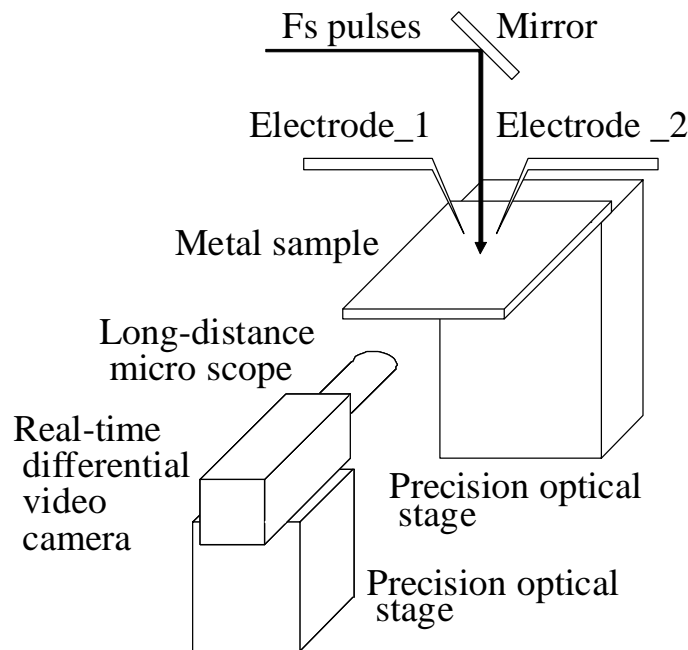


図7 電界下における飛散物の可視化計測実験系

実験結果を図8（印加電圧+650 V）に示す。加工開始から 200 msあたりから電極への飛散物の付着が観測され、その後、時間の経過とともに付着量が増大した。20 sあたりから付着量の増加は観測されなかった。飛散物の付着量、付着過程は印加電圧により変化し、飛散物の運動が電界の影響を強く受けることがわかった。以上から、飛散物が加工点に集まる現象が静電気に起因していることが明らかになった。

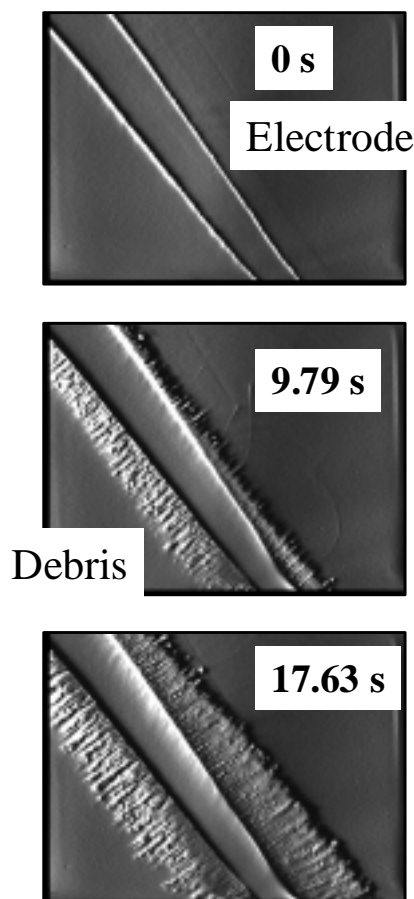


図8 電極プローブへの飛散物の付着

実用化に重要な知見を得た。

シート状のレーザー光を金属サンプルに直角に照射して、シートの長手方向に対して直交する方向から観測する実験も行った。実験において、フェムト秒パルスの繰り返し周波数も変化させた。実験結果から、飛散物はミリ秒以上サンプル付近に漂っており、フェムト秒パルスの繰り返し周波数を上げた場合、この飛散物によってフェムト秒パルスが影響を受け、集光点に到達するフェムト秒パルスの強度が減少することなどを明らかにでき、実用化に重要な知見を得た。

以下に詳細を述べる。

図9に照射開始より0.5 ms 間隔毎の撮影画像を示す。金属サンプルは画像の左側に縦方向に位置しており、右側からフェムト秒レーザー（繰り返し周波数：10 Hz）を照射した。

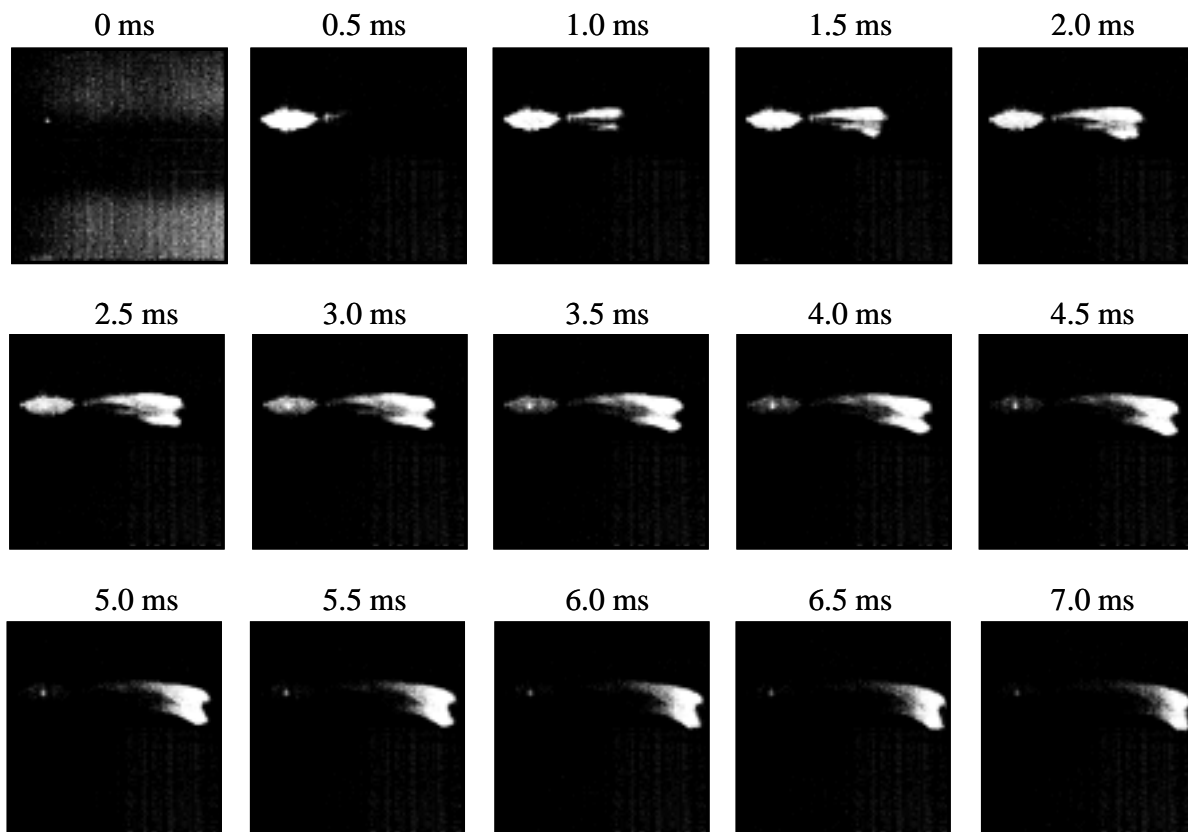


図9 煙状の飛散物の振る舞い

これらの実験において、フェムト秒パルスの繰り返し周波数も変化させた。実験結果から、飛散物はミリ秒以上サンプル付近に漂っており、フェムト秒パルスの繰り返し周波数を上げた場合、この飛散物によってフェムト秒パルスが影響を受け、集光点に到達するフェムト秒パルスの強度が減少することなどを明らかにでき、実用化に重要な知見を得た。

以上より、フェムト秒レーザー金属加工における飛散物の振る舞いについて、実用化するに十分な成果を得ることができた。電氣的制御によって飛散物の振る舞いを制御し、良好な加工結果が得られる可能性がある。

論文数：11 口頭発表件数：24

#### (4) 研究成果に関する評価

##### 国内外における水準との対比

フェムト秒レーザー加工において、飛散物の振る舞いを詳細に調べようという独特の発想で、高度な計測技術と、高いフェムト秒パルス利用技術を融合して独自性の高い研究を実施した。飛散物の振る舞いの全容を明らかにするとともに、新規な現象を発見してその起源を掴んだ。さらに、実用上重要な知見も得た。このように、高い技術レベルで独自の研究を実施し、新規な現象の発見や重要な知見の取得を短期間で実現した。よって、国内外において、高い水準でフェーズを推進して完了することができた。

##### 実用化に向けた波及効果

フェムト秒レーザー金属加工における飛散物の振る舞いについて、実用化するに十分な成果を得ることができた。この過程で、飛散物が加工点に集まるといって新規で特異な現象を発見し、これが静電気に起因していることを明らかにした。電氣的制御によって飛散物の振る舞いを制御し、良好



な加工結果をもたらす手法を創出できると期待される。

(5) 残された課題と対応方針について

今後は、静岡大学科学研究費補助金等を利用しつつこの研究を継続し、フェムト秒レーザー加工の産業応用に有効利用することを行う。