

フェムト秒レーザーを用いた金属加工において生じるデブリの挙動

Behavior of debris in processing of metals using femtosecond laser

○学 村田純平 (静大工)

学 山田雅人 (静大院)

正 齋藤隆之 (静大院)

大石真吾 (浜松ホトニクス)

青島紳一郎 (浜松ホトニクス)

Junpei MURATA

Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Hamamatsu, Shizuoka, 432-8561

Masato YAMADA

Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Hamamatsu, Shizuoka, 432-8561

Takayuki SAITO

Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Hamamatsu, Shizuoka, 432-8561

Shingo OISHI

Hamamatsu Photonics K.K., 5000 Hirakuchi, Hamamatsu, Shizuoka 434-8601

Shin-ichiro AOSHIMA

Hamamatsu Photonics K.K., 5000 Hirakuchi, Hamamatsu, Shizuoka 434-8601

Key Words: Femtosecond Laser, Debris, PIV

1. 緒言

超短光パルス発生とその増幅に関する研究は早くから行われており、近年のレーザー技術の進展に伴って、テラワットクラスのピーク強度を作ることも可能となっている。フェムト秒レーザーは非熱的加工、化学反応制御、新物質の創製などの産業応用を見据えた研究領域でもさかんに用いられ、多くの研究がなされている。著者らはフェムト秒パルスレーザーを用いた金属加工において発生するデブリの運動を解明してきた[1]-[5]。

本実験ではフェムト秒レーザーの特性を活かした精密加工方法、加工制御手法を検討するために、サンプル金属プレートにフェムト秒レーザーを照射することで発生するデブリの運動についてPIV(粒子画像速度測定法)を応用して詳細な計測・解析を行った。また、デブリの挙動に対する電界の影響を確認するため、リアルタイム微分を利用して可視化計測を行った。

2. 実験装置および方法

2.1 PIVによるデブリ運動解析

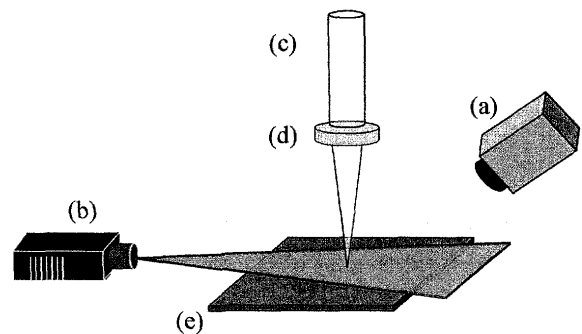
実験装置の概略をFig. 1に示す。サンプル金属(e)を水平に設置し、鉛直方向からフェムト秒パルスレーザー(c) (以下 fs レーザーと呼ぶ) をアクロマティックレンズ(d) ($f=100\text{ mm}$) を使用して、金属表面に集光させて金属加工を行い、デブリを発生させた。スポット径は $20\text{ }\mu\text{m}$ で、fs レーザーの仕様はTable 1に示したとおりである。また、今回使用したサンプル金属はSUS304である。PIV計測の光源としてcw Nd:YAGのグリーンレーザー(5 W)(b)をシート状にしたものを使用した。照射されたデブリからの散乱光を、高速度カメラ(PhantomV5.0)を使用して撮影した。シート光の厚さは 1 mm であり、金属表面から垂直方向の計測領域は 1 mm となる。撮影条件はフレームレートを125または300 fps、露光時間を $20\text{ }\mu\text{s}$ 、画素数を $512\times 512\text{ pixels}$ 、空間分解能を $8.6\text{ }\mu\text{m/pixel}$ とした。

2.2 電圧印加実験

電圧印加実験装置の概略をFig. 2に示す。サンプル金属(e) および fs レーザーの設置方法は上記実験と同様である。金属表面から鉛直方向に 5 mm 、照射点を中心に電極プローブ先端の間隔を 3 mm として、電極プローブを設置し、fs レーザー照射して、デブリを発生させた。電源ユニット(b)から、電極プローブに電圧を印加し、電極の一本とサンプル金属はグランドを取る。光出力を $230\text{ }\mu\text{J}$ と一定にし、電極プローブに $\pm 25\sim 650\text{ V}$ の電圧を印加した。

電極へのデブリ付着は通常の方法では可視化が困難であることから、リアルタイムで画像を微分することにより可視化した。電極プローブおよびデブリの撮影には、光源としてハロゲンランプ (200 W) を使用し、リアルタイム

微分カメラ(浜松ホトニクス)にマイクロレンズを装着して撮影した。撮影条件はフレームレートを30 fps、画素数を $640\times 480\text{ pixels}$ とし、空間分解能は $4.5\text{ }\mu\text{m/pixel}$ であった。

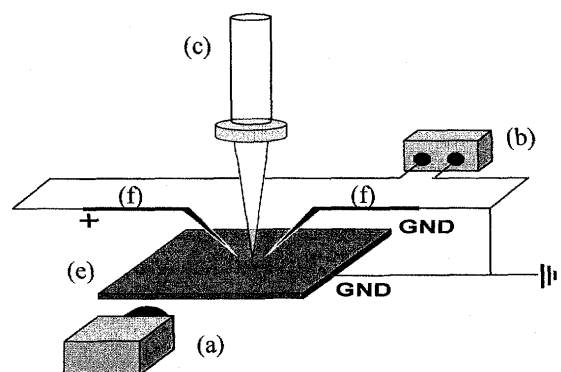


(a) High-speed camera, (b) cw Nd:YAG green laser, (c) Femtosecond laser pulses, (d) Achromatic lens, (e) Sample metal (SUS304 : $50\times 50\times 1\text{ mm}$)

Fig. 1: Experimental setup

Table 1 Specification of femtosecond pulse laser

光出力[μJ]	440
パルス幅[fs]	50
中心波長[nm]	810
繰り返し周波数[Hz]	1000



(a) Real-time differential video camera, (b) Power supply unit, (c) Femtosecond laser pulses, (d) Achromatic focusing lens, (e) Sample metal, (f) Electrode probe

Fig. 2: Experimental setup for applied voltage measurement.

3. 結果と考察

3.1 運動過程

fs レーザーを金属表面に照射すると、加工点からデブリが発生する。このデブリの運動過程には規則性が見られ、時間の経過によって五つのフェイズに分類することができる。

照射後変化の無い状態を Phase-1 をとする。Phase-2 に移ると今回の空間分解能では詳細に捉えることのできない煙状の細かいデブリが発生した。Phase-3 に入ると煙状のデブリだけでなく、異なる粒径を持った大きなデブリの発生が確認された。大きなデブリは加工中心点から放射状に一樣に飛散する。Phase-4 に移行すると、Phase-3 において中心から撮影領域外に飛び出したデブリが進行方向を変えて加工中心部に向かって集まってくるという新たな現象が確認された。この Phase では中心部から飛散するデブリと中心部に集まってくるデブリの異なる運動方向を持ったデブリが同時に存在する。Phase-5 では中心部から飛散するデブリがなくなりすべて中心部に向かっていくデブリのみとなる。

Fig. 3 に Phase-5 におけるデブリの画像を示す。撮影した 512×512 pixels の画像を右下部分 256×256 pixels の領域で切り出した画像である。画像を見ると明瞭な粒子に連なって帯状の残像が確認でき、加工点中心に向かってデブリが集まっていく現象が確認できる。

3.2 デブリの運動

Fig. 4 に Phase-3 におけるデブリの速度 U_3 の加工中心点からの距離の関係を示す。デブリは加工中心に近いほど大きな速度を有しており、加工中心からの距離が伸びるにしたがって速度が減少する。また、同図から速度と中心との距離の二乗の逆数と正の相関があることがわかる。

Phase-4 において、デブリの多くは加工中心点から放射状に広がり、運動の方向を変えて中心に向かって集まってくる。Fig. 5 に運動の方向を変える点を時間軸 $t = 0$ と置き、運動の変向点 ($t = 0$) 前後の時間におけるデブリの速度 U_4 との関係を示す。速度の正は中心から計測領域外に向かう方向、負は中心に向かう方向を表している。 $t = -0.1$ において速度の差が最大で約 20 mm/s にも及ぶが、 $t = 0$ に近づくにつれて、速度の変動は小さくなっている。このことから特定の減衰過程を通ることが考えられる。しかし、速度の加速過程においてはばらつきが生じており、減速過程に比べて不安定な挙動を示した。今後より多くのデブリをトレースして検証していく必要がある。

3.3 電界下での運動（電極への付着量）

電界強度を $25 \sim 500 \text{ V}$ で変化させた際のデブリ付着高さの経時変化を Fig. 6 に示す。fs レーザー照射後 1 秒程度まで、デブリが徐々に電極に付着・堆積し、1~3 秒において、急激にその量が増加することがわかる。その後、大きな増減がない区間 (3~4 秒) があり、4 秒あたりで再度増加に転じ、6 秒前後で付着量は飽和に達する。1~3 秒の時間領域は Phase-3 に、3~4 秒は Phase-4 に、4 秒以降は Phase-5 に相当する。電極へのデブリ付着と堆積は、3.1 並びに 3.2 に述べた過程とデブリ運動にはほぼ合致すると考えられる。また電界強度が強いほど、デブリの付着量が多くなることがわかる。

4. 結言

フェムト秒パルスレーザーを用いた金属加工において、デブリの運動過程は経過時間に伴って変化していき、規則性があることが確認された。さらに、加工点から放射状に飛散したデブリが運動の方向を途中で変向し、加工中心部に向かって一斉に集まってくる新規な現象が確認された。

デブリの運動には加工点からの位置依存性をもっていると考えられる。

また、発生したデブリは電界下で電極への付着特性を持っており、付着過程はデブリの運動過程とも一致した。電界強度の変化によるデブリの付着量の変化からも、デブリは電荷を有し、電場の影響を受けることが固有の運動を生み出している要因の一つと考えられる。

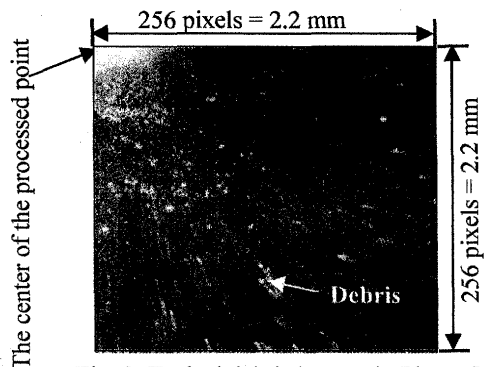


Fig. 3: Typical debris images in Phase-5.

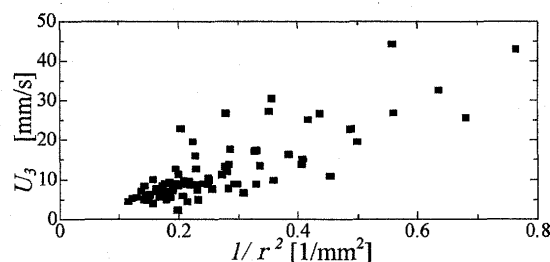


Fig. 4: Debris velocity in Phase-3.

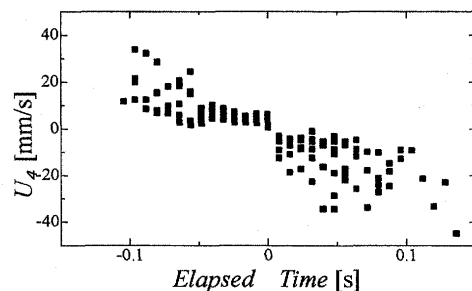


Fig. 5: Debris velocity in Phase-4.

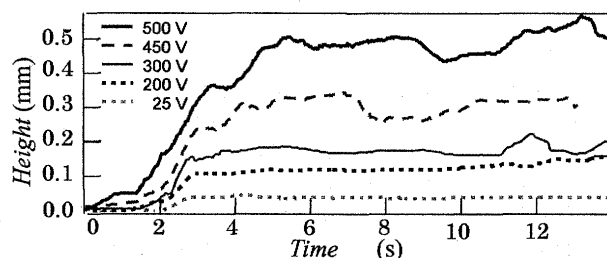


Fig. 6: Growth of debris accumulation under change of electric field intensity

参考文献

- [1] 大石 他：レーザー学会学術講演会第26回年次大会予稿集, p151 (2006).
- [2] 大石 他：レーザー学会学術講演会第26回年次大会予稿集, p152 (2006).
- [3] 大石 他：第67回応用物理学会学術講演会 講演予稿集 30-p-P7-5, p1034 (2006).
- [4] 大石 他：レーザー学会学術講演会第27回年次大会予稿集, p109 (2007).
- [5] 山田 他：レーザー学会学術講演会第27回年次大会予稿集, p110 (2007).