

4117 フェムト秒パルスレーザーを用いた金属加工における飛散物の振る舞い Behavior of debris in processing of metal using femtosecond pulse laser

○ 学 山田雅人(静大工)*¹ 正 齋藤隆之(静大院)*¹
大石真吾(浜松ホトニクス)*² 青島紳一郎(浜松ホトニクス)*²

Masato YAMADA Takayuki SAITO
Shingo Oishi Shin-ichiro Aoshima

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

*2: Hamamatsu Photonics, 5000 Hirakuchi, Hamamatsu, Shizuoka 430-8601

In processing of metal using femtosecond pulse laser, we discovered a novel phenomenon of behavior of debris. The process has five phases: in the first phase, no debris are generated even under irradiation of the femtosecond laser; in the second phase, smoke-like debris burst out from the processed point; in the third phase, large debris blast off in a radial pattern from the processed point; in the fourth phase, the splattered debris decelerate its velocities and some debris already scattered around the outside of the visualized area reverses the motion direction, rushing toward the center of the processed point; in the fifth phase, all scattered debris rush toward the processing point.

Key words: Femtosecond Laser, Debris Motion, PIV

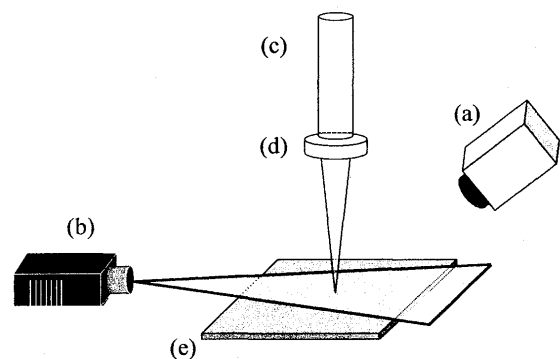
1. 緒言

極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、現在パルス幅はフェムト秒からアト秒の領域に向かっている。フェムト秒パルスは非常に高いピーク強度を有しており、フェムト秒レーザープロセッシングは、非熱的加工・多光子吸収による透明材料加工、内部加工などを行い得る優れた特徴を有することから、産業応用が非常に期待されている分野であり、多くの研究者によって研究がなされている[1]。大石ら[2]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。

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、サンプル金属にフェムト秒パルスレーザーを照射することで発生するデブリの運動の詳細な計測、解析を行った。また、デブリの運動の計測手法として、本来は流体の計測手法であるPIV(粒子画像流速計)を応用して計測を行った。

2. 実験装置および方法

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(以下fsレーザーと呼ぶ)を金属表面に照射することでデブリを発生させた。fsレーザーの仕様はTable 1に示したとおりである。fsレーザーはアchromaticレンズ(d)を使用して、金属表面に約20 μm に集光させて加工を行った。また、今回使用したサンプル金属はSUS304(50mm \times 50mm \times 1mm)である。PIV計測の光源としてCW Nd:YAGのグリーンレーザー(5W)(b)を使用した。出力されたレーザーはシリンドリカルレンズを介して金属面に対して平行なシート状にし、計測領域のデブリを照射した。照射されたデブリからの散乱光を高速度カメラ(Phantom V5.0)を使用して撮影した。シート光の厚さは1mmであり、金属表面から垂直方向の計測領域は1mmとなる。撮影条件はフレームレートを125または300fps、露光時間を20 μs 、画素数を512 \times 512 pixels、空間分解能を8.6 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ とした。



(a) High-speed camera, (b) CW Nd:YAG green laser, (c) Femtosecond laser pulses, (d) Achromatic lens, (e) Sample metal

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
スポット径	[μm]	20
集光レンズ		f = 100

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Phase1をとする。Phase2

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。Fig.2(a)に Phase3 におけるデブリの画像を示す。画像は撮影した 512×512 pixels の画像を右下 256×256 pixels の領域で切り出した画像である。Phase3 に入ると、煙上のデブリとは明らかに異なる粒径の大きなデブリが確認された。大きなデブリは加工中心点から放射状に一樣に飛散し、撮影領域の外へ飛び出していく。Phase4 においては新規な現象が確認された。Phase3 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ことを確認された。Phase4 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存在する。Phase5 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.2(b)に Phase5 におけるデブリの画像を示す。(b)の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、(a)の画像と比較すると運動の方向が変わり、加工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.3 に Phase3 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。データ点の偏りは加工中心部で発生しているプラズマから発せられる強い光によって中心部に近いほどトレース可能な粒子の数が激減してしまったためである。結果から、デブリは加工中心に近いほど大きな速度を有しており、加工中心と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は正の相関があることがわかる。

Phase4 において、今回の計測領域ではデブリの多くは加工中心点から放射状に広がり、一度計測領域外に出た後に運動の方向を変えて中心に向かって集まってくる。しかし、計測領域内において運動の方向を変えるデブリも確認された。Fig.4 に運動の方向を変える点を時間軸 $t=0.0$ と置き、運動の変向点($t=0.0$)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。トレースした粒子によって加工中心との距離が異なるため $t=-0.1$ おいて速度の差が最大で約 20 mm/s にも及ぶが、 $t=0.0$ 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。

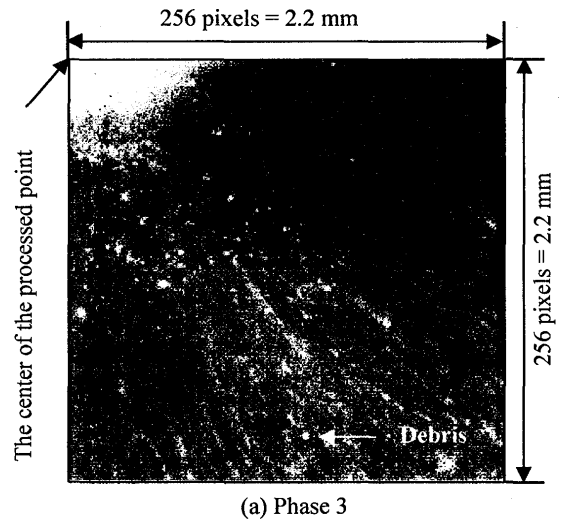
4. 結言

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。また、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。

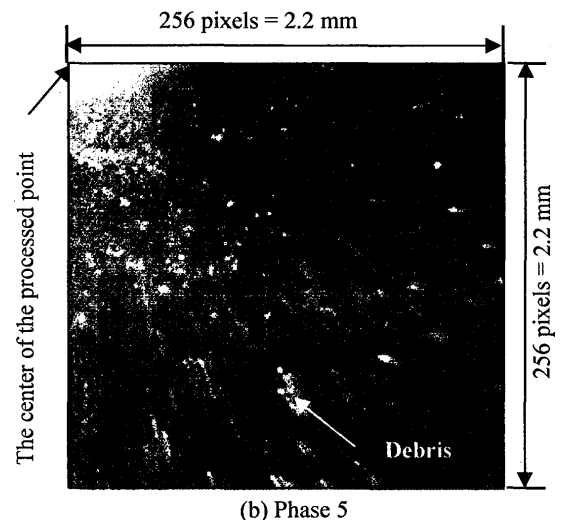
今後、パルス幅、光出力などの条件を変えさせて、デブリの運動との関係を明らかにしていきたい。

参考文献

- [1] B.N.Chichkov, C.Momma, S.Nolte, F.Alvensleben, and A.Tunnermann, *Appl.Phys.* A63, 109 (1996)
- [2] 大石他, レーザー学会学術講演第 26 回年次大会予稿集, 152, (2006)



(a) Phase 3



(b) Phase 5

Fig. 2: Debris motion images in each phase

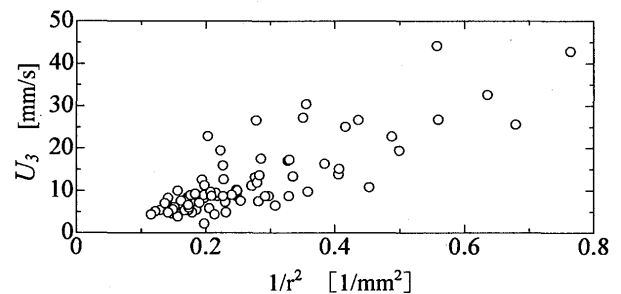


Fig.3: Debris velocity in Phase 3

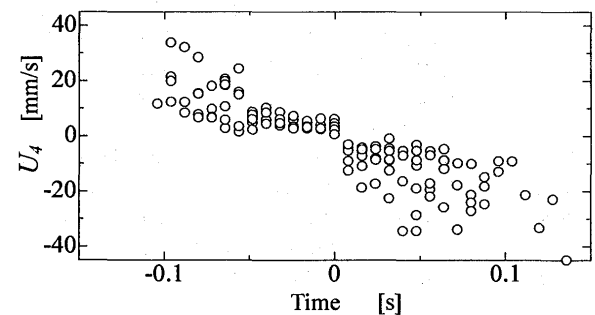


Fig.4: Debris velocity in Phase 4