

低出力近赤外 CW レーザ光の斜角照射による 高速表面微細構造形成法

岡山大学 学術研究院自然科学学域

准教授 岡本 康寛

(2022 年度 一般研究開発助成 AF-2022209-B2)

キーワード：CW レーザ，斜角照射，高速走査，表面微細構造

1. 研究の目的と背景

レーザによる金属表面への微細溝形成技術は工具摩耗を考慮する必要がなく，表面性状や化学的組成により表面エネルギーを制御し，異材接合の性能を向上できることから広く利用されている．レーザ加工における溝加工はレーザスクライビングと称され，材料表面に対する機能性の付与や，脆性材料の切断のために板厚に対して十分な深さの溝を設ける手法であり，広く実用化されている．金属の微細溝加工では材料の蒸散現象を利用することから，高ピーク出力パルスレーザによる手法が用いられるが^{1,2)}，パルス繰り返し数がプロセス速度の制約となる．高出力高繰り返しパルスレーザを用いることでプロセス速度を向上させることはできるが，比較的安価な近赤外連続発振レーザ発振器を用いて同等の微細溝加工が実現できれば，実用上有用である．

一般に，金属材料に対してパワー密度 10^6 W/cm^2 より大きな高輝度近赤外連続発振レーザを照射すると，材料の蒸散によってキーホールが生ずる．しかし，近赤外連続発振レーザを用いた溶融現象プロセスでは，工作物表面へ垂直に照射して走査すると，レーザ光通過後のキーホール形性領域は溶融金属で埋められて除去加工には至らず，図 1 左側に示すように，レーザ光走査領域の中央部が盛り上がり，その両側には微細なアンダーカットが形成される^{3,4)}．これに対して，低出力の連続発振レーザにおいてもレーザ光走査軸に垂直な面内である値以上のレーザ光入射角 θ_i を設けて数 m/s 以上と比較的高速に走査すると，図 1 右側に示すように，加工現象の非対称性からレーザ光入射側に溶融再凝固物の盛り上がり，反射側には程度微細溝を形成できる^{5,6)}．これは材料除去が行われると推測できるレーザ光入射側に溶融再凝固物が盛り上がり，その反対側に微細溝を形成するという，一見すると盛り上がりと微細溝の形成位置が真逆の結果になる特異的な現象である．この現象に関しては不明な点が多いことから，その形成メカニズムを明らかにすることを目指して検討を行った．

2. 実験方法

2.1 レーザ光照射方法

図 2 にレーザ光照射実験方法の模式図を示す．本研究で用いたレーザ発振器は，波長 1085 nm のシングルモード連続発振 Yb ファイバレーザである．レーザ光は光ファイ

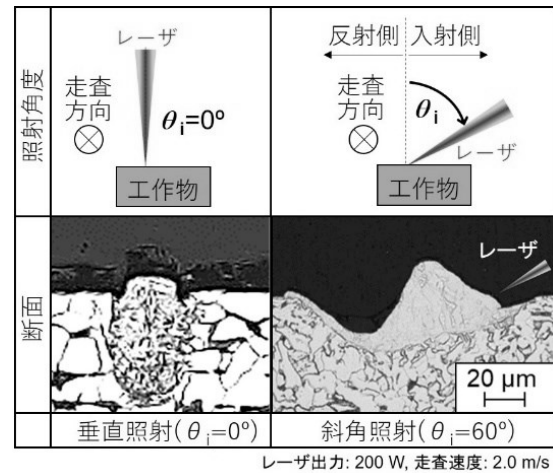


図 1 軟鋼への垂直と斜角照射

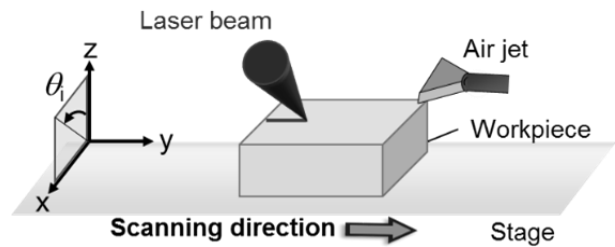


図 2 レーザ光照射方法の模式図

バによって伝達され，コリメーションにより出力された $\phi 7 \text{ mm}$ のビームを焦点距離 100 mm の集光レンズによりスポット径 $18 \mu\text{m}$ にして照射した．このとき，ステージにより所定の送り速度を与えた工作物表面に対して大気中にてレーザ光を鉛直上方向より照射した．

本研究においては，レーザ光の入射角を変化させており，図に示すように工作物表面に垂直入射する場合をレーザ光入射角 $\theta_i = 0^\circ$ ，そこから工作物表面に傾けていく場合をレーザ光入射角 θ_i が正の方向に増加すると定義している．なお，観察時は垂直照射の場合，反射レーザ光によって発振器の破損を防ぐため，垂直照射に近い現象としてレーザ光入射角 $\theta_i = 5^\circ$ とし，本研究ではレーザ光入射角 θ_i が 5° と 60° の 2 条件を用いた．その他の主な実験条件を表 1 に示す．工作物には横 50 mm ，縦 100 mm ，厚さ 4 mm の軟鋼(SS400)を使用し，レーザ光出力 200 W とした．照

射後の工作物表面とレーザ光走査方向に対して垂直な断面を観察して評価を行った。なお、熔融飛散材料から集光レンズを保護するために、側方より工作物表面に平行に圧縮空気を噴出させた。

表 1 主なレーザ光照射条件

Wavelength: λ (nm)	1085
Workpiece	SS400
Spot diameter: d_s (mm)	18
Laser power: P (W)	200
Scanning speed: v (m/s)	0.2, 2.0
Incident angle of laser beam: θ_i (°)	5, 60

2.2 高速度カメラによるレーザ光照射部観察方法

高速度カメラを用いて連続発振レーザによる微細溝加工実験を観察した。図 3 に高速度カメラ観察における実験装置模式図を示す。照明光には波長 850 nm の LED 照明を用いており、カメラレンズの前方にノッチフィルターおよび中心波長 880 nm で半値幅 135 nm のフィルターを、それぞれカメラ光軸に垂直になるように設置した。図に点線で示している観察領域内のレーザ光照射部とその後方を高速度カメラにより撮影することで、キーホール形状や熔融金属流れを観察して、微細溝形成現象を実験的に考察した。

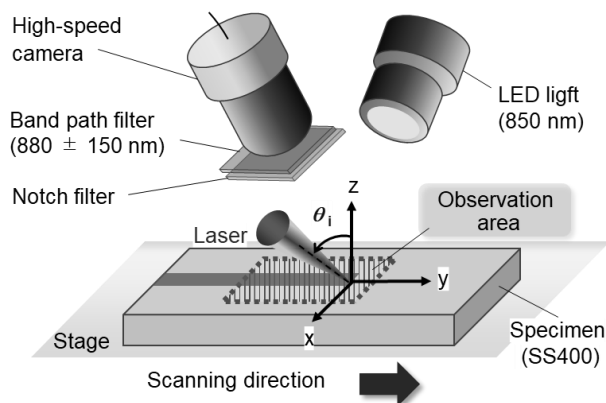


図 3 レーザ光照射部観察方法の模式図

2.3 熱流体解析における解析条件と解析モデル

材料の熱物性を考慮した熱伝導による温度変化、およびそれにより発生した熔融材料の流動に関し、VOF (Volume-of-Fluid) 法⁷⁾を用いて明確な自由表面を有して表現できる熱流体解析を行い、微細溝形成現象を定性的に検討した。

図 4 に試料である軟鋼 SS400 に対し、レーザ光を走査方向に垂直な x - z 平面内で入射角 $\theta_i = 60^\circ$ を設けて照射した解析モデルの模式図を、表 2 に本解析に用いた SS400 の常温における密度、比熱、熱伝導率、融点における粘度、表面張力を示す。ここでは代表値のみ示すが、各材料物性値には温度依存性を考慮した値を用いた。解析モデルにおける SS400 の領域は、照射実験により得られる微細溝加

工部を十分に再現できる大きさに設定した。固相試料上部に空気層を仮定し、境界条件として試料表面には大気圧境界、その他境界には境界外に熱および流体の移動が起こらない断熱境界を適用した。レーザ光入射角は、工作物表面に垂直入射する時を入射角 $\theta_i = 0^\circ$ とし、そこから走査方向に対し垂直な平面内で工作物表面に向かって傾く角度を正の角度と定義した。レーザ光はガウス分布の連続発振であり、試料表面に対し焦点距離 100 mm で集光して得られるスポット直径 18 μm にてレーザ光照射実験と同様に、出力 200 W、走査速度 2.0 m/s で y 軸正の方向に走査するように設定した。

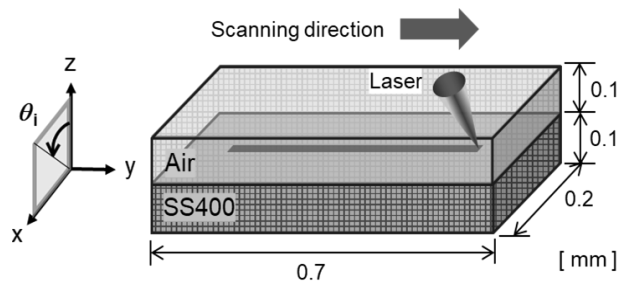


図 4 熱流体解析モデルの模式図

表 2 熱流体解析に用いた主な材料物性値(SS400)

Density (kg/m^3)	7.86×10^3
Viscosity ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	6.0
Surface tension (g/s^2)	1872
Specific heat ($\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)	0.486
Thermal conductivity ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)	51.9
Absorption rate (%)	35

3. 高速度カメラによる観察と解析結果から考察される微細溝形成現象

3.1 レーザ入射角が熔融金属流れに及ぼす影響

工作物表面を水平に固定してレーザ光入射角 $\theta_i = 5^\circ$ と 60° で走査速度 2.0 m/s にて照射した場合のレーザ光照射部とその周囲の熔融金属流れを観察した結果を図 5 に示す。図より、レーザ光入射角 $\theta_i = 5^\circ$ ではレーザ光照射部後方においてキーホールの形状によって照射部から走査軸後方に直線的にブルームが生じていることがわかる。これに対して、レーザ光入射角 $\theta_i = 60^\circ$ では走査軸からレーザ光入射方向に解放されたキーホールからブルームが生じ、扇状に広がりながら噴出している。これは熔融金属が蒸発したものが蒸発反跳力によって押し出されたものである。垂直照射と斜め照射でブルームの向きが変わっていることから、レーザ光入射角度によって異なる方向に蒸発反跳力が作用して熔融金属流れ方向に影響を及ぼすと考える。

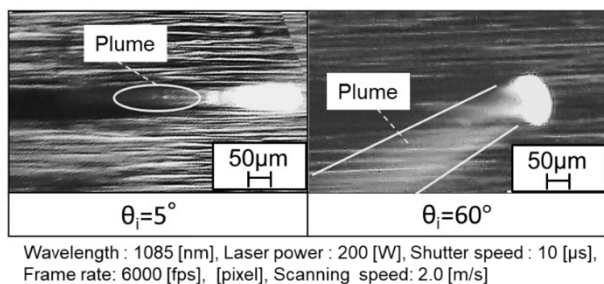


図 5 垂直と斜角照射によるプルーム発生状況の様子

3.2 レーザ光垂直照射による熔融現象

図 6 に工作物表面を水平に設置した軟鋼 SS400 に対してレーザ光入射角 $\theta_i = 5^\circ$ で走査速度 0.2 m/s にて照射し、レーザ光照射部とその周囲の熔融金属流れを観察した結果を示す。図より、入射角 $\theta_i = 5^\circ$ でレーザ光を照射した場合、レーザ光照射部後方のビード中央に熔融金属が均等に合流している。これは蒸発反跳力の作用する方向が関係していると考えられる。入射角 $\theta_i = 5^\circ$ では、照射部から走査軸後方に蒸発反跳力が作用することとなるが、キーホールを中心に左右均等に各種応力が作用することから、その応力によってキーホール周囲を走査方向後方へ押し出された熔融金属が、再びビード中央部に均等に合流していると考えられる。

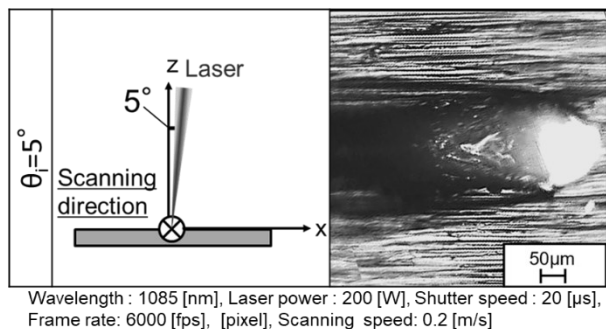


図 6 垂直照射による熔融金属流れ

3.3 入射角を設けたレーザ光照射による熔融現象

工作物表面を水平に設置した軟鋼 SS400 に対してレーザ光入射角 $\theta_i = 60^\circ$ で走査速度 0.2 m/s にて照射し、レーザ光照射部とその周囲の熔融金属流れを観察した結果を図 7 に示す。図より、入射角 $\theta_i = 60^\circ$ でレーザ光を照射した場合、レーザ光通過後の加工幅が入射角 $\theta_i = 5^\circ$ のときに比べて大きくなっている。これは入射角が大きくなることで試料表面でのレーザ光サイズの増大、ならびにキーホールが浅くなることから、試料表面方向への熱影響領域が大きくなることが原因であると考えられる。

一方、レーザ光入射角 $\theta_i = 60^\circ$ の場合では、入射角 $\theta_i = 5^\circ$ に比べると、熔融領域が広く、熔融金属が入射側で多く流れており、左右均等に合流していない。これにも垂

直照射と同様に、蒸発反跳力の作用する方向が関係していると考えられる。入射角 $\theta_i = 60^\circ$ の場合、走査軸からレーザ光入射方向に蒸発反跳力が作用する。そしてその力によって押し出された熔融金属がレーザ入射側に多く集まることで熔融金属が左右均等に合流していないと考える。

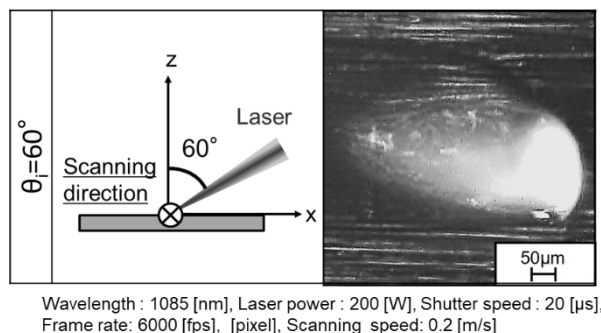


図 7 斜角照射による熔融金属流れ

4. 熱流体解析により得られた溝形成時の熔融金属挙動

図 8 に、熱流体解析においてレーザ光照射後、熔融金属が完全に凝固した時刻における解析モデル中央部の x - z 断面と、レーザ光照射実験により得られた断面図、さらに各再凝固層を赤色の点線で示す。コンターは液相率であり、固相と液相を表わしている。これらの形状を数値的に比較するために、再凝固層深さ、溝幅、照射部中央の盛り上がり頂点から加工端部までの長さを測定したところ、それら数値の平均誤差は実験値に対して $\pm 7\%$ であり、熱流体解析において入熱と形状の妥当性はある程度確認できた。

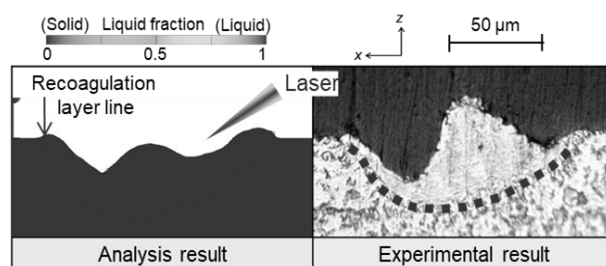


図 8 照射実験と熱流体解析結果の比較

次に熱流体解析結果から、微細溝形成現象における熔融金属流れを考察する。解析モデルの表面を $z = 0 \mu\text{m}$ とし、そこから下方向を負としたときの、任意の高さにおける各 x - y 断面を図 9 に示す。コンターは図 8 と同様の液相率であり、固相と液相を表す。レーザ光は図の下側から入射しており、図中の中央白色領域は、レーザ光の入熱にともなう状態変化により、その断面において材料が存在しない箇所を示す。図の点線で囲んだ部分に着目すると、レーザ光入射側に熔融金属が多く存在していることがわかる。さらに熔融金属は走査方向前方から後方にかけて流動しており、レーザ光入射側から多く流れ込んでいることが確認で

きる．そして溝底部付近である $z = -29 \mu\text{m}$ では，レーザ光入射側からだけでなく，反射側から入射側にかけて熔融金属の大きな流れが確認された．

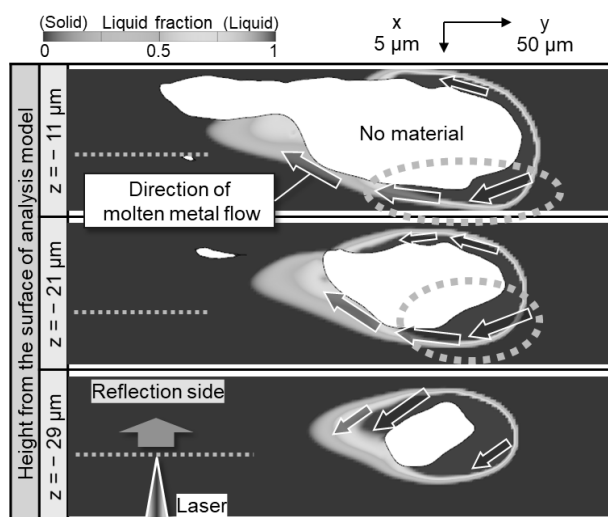


図9 各深さ位置での熔融金属流れ

5. レーザ光斜角照射の高速走査による熔融金属挙動に関する考察

図10に，入射角 $\theta_i = 60^\circ$ ，走査速度 2.0 m/s の条件でレーザ光を走査した際のプルーム噴出の様子を高速カメラにより観察した画像と，熱流体解析結果をレーザ光照射部真上から観察した3D形状，およびそれと同じ画角で透過率を50%とした画像を示す．熱流体解析結果は，形状をわかりやすくするためにグレースケールで表示しており，さらに透過像を用いることで，熔融金属が覆いかぶさり，試料上部からは見ることが出来ない形状を可視できるようにした．レーザ光反射側に深く溶け込んだキーホール形状が，図の透過像では濃いグレーで表示されている．図のプルーム噴出画像から，斜角照射 CW レーザを高速走査した際，レーザ光走査軸に対して入射側に偏った特定の方向にプルームが噴出していることがわかる．これは図10の透過像から確認できるレーザ光反射側に溶け込んだキーホール形状に起因していると考えられる．つまり，レーザ光を斜角照射すると，レーザ光反射側に形成される特徴的なキーホール形状から，蒸発反跳力は特定の方向に拘束されて働き，それとともに蒸発金属もプルームとして同方向に噴出する．

この蒸発反跳力を含め，斜角照射 CW レーザを高速走査した際に熔融金属に働く力を図11に示す．図に示す熱流体解析結果は，グレースケールで3D表示したレーザ光照射部を，レーザ光照射方向から斜めに観察しており，キーホールおよびキャビティ空間を立体的に見ている．レーザ光の高速走査により走査方向前方の固相試料とキーホールに挟まれた熔融金属に対して，レーザ光照射部前方の矢印で表すような走査軸後方へ向かう力が働いている．そ

して，斜角照射による特徴的なキーホール形状により，図下方向へ記した矢印の方向であるレーザ光反射側から入射側に向かう蒸発反跳力が働いている．さらにキーホールのキャビティ形状に着目すると，キーホール後方の反射側は熔融金属の一部がスパッタとして飛散することで丘陵な壁面となっている．つまり，レーザ光反射側に存在する熔融金属は丘陵なキャビティ壁面を加速しながらキャビティ底部を通り，入射側に流れていると考えられる．

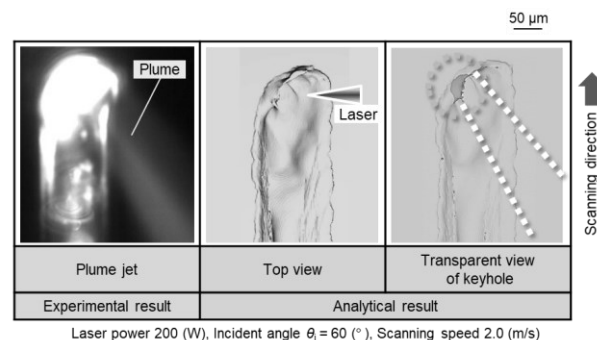


図10 斜角照射におけるプルームとキーホール形状

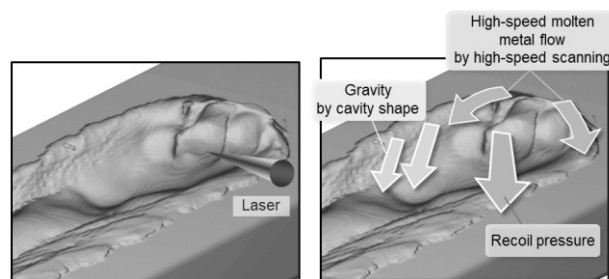


図11 斜角照射で熔融領域に作用する力

以上の検討から，斜角照射 CW レーザを高速走査した際には，発生する熔融金属に対してこれら3つの力が作用することによって，レーザ光反射側から入射側に進む熔融金属流れと入射側から走査軸後方に進む熔融金属流れが形成されていることがわかった．また，熱流体解析において熔融金属の流速を評価したところ，レーザ光走査速度よりも早い熔融金属流れが確認されたのは，この3つの力が熔融金属に作用しているからだと考えられる．

斜角入射 CW レーザを高速走査した際に金属表面に形成される微細溝構造形成メカニズムについてまとめる．図12に斜角入射 CW レーザを高速走査した場合における微細構造形成メカニズムを模式図で示す．図の右側には，レーザ光走査軸に対して垂直な面である $x-z$ 平面の模式図を，図の左側にはレーザ光照射部を真上から見た $x-y$ 平面の模式図を示す．まずレーザ光が入射されると，レーザ光走査軸に対して反射側に偏ったキーホールが形成され，その周囲に熱伝導により熔融金属が発生する．そしてレーザ光の高速走査によりキーホール周囲に存在する熔融金属

は走査軸後方に流れながら、レーザ光反射側に存在する熔融金属の一部は、蒸発圧によってスパッタとして飛散して、レーザ光反射側に丘陵な壁面を作り出す。このレーザ光反射側に形成された丘陵な壁面が高速走査によって維持されながらキャビティが形成される。一方で、レーザ光反射側に偏ったキーホール形状によって拘束された蒸発反跳力が、レーザ光反射側から入射側に作用する。高速走査によってキーホール周囲を通り走査軸後方に進む熔融金属流れのうち、反射側に存在する熔融金属がこの蒸発反跳力によってレーザ光反射側から入射側へ進む流れとなる。この流れが、キャビティを通る際に、キャビティの持つ丘陵な壁面形状により加速される。そしてレーザ光反射側から入射側へ進む熔融金属流れと、レーザ光入射側を走査軸後方に進む熔融金属流れが、キャビティを通り合流しながら冷却していくことで、レーザ光入射側に盛り上がり、反射側に微細溝を含む特徴的な盛り上がり形状が形成される。つまり、CW レーザを用いた微細溝構造形成には、斜角照射と高速走査の組合せが必要になる。

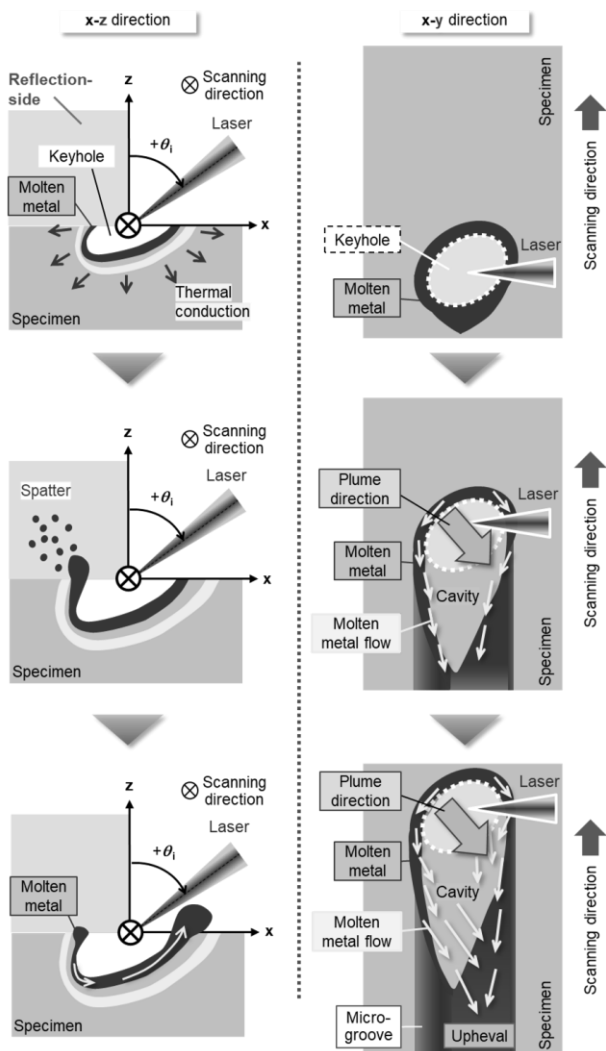


図 12 微細表面構造形成過程

この微細溝構造形成メカニズムは、今後、近赤外 CW レーザを用いた様々な照射条件で各種金属に対して表面微細溝構造を形成していくにあたり、基本的な指針になるものと考えられる。

6. 結言

近赤外 CW 発振レーザを用いた金属材料表面への高速微細溝形成において、熱流体解析による定性的な現象の理解と高速度カメラを用いた実験的観察から、本プロセスの現象解明を試みた。本検討より得られた主な結言は、以下のとおりである。

- (1) 垂直照射ではキーホールの形状によって照射部から走査軸後方に直線的にブルームが生じるのに対し、斜め照射では走査軸からレーザ光入射方向に解放されたキーホールからブルームが生じ、扇状に広がりながら噴出する。
- (2) 垂直照射と斜め照射でブルームの向きが変わっていることから、レーザ光入射角度の違いによって、異なる方向に蒸発反跳力が作用して熔融金属流れ方向に影響を及ぼす。
- (3) 斜角入射レーザ光を高速走査させると、レーザ光照射部では反射側に深く入り込んだ特徴的なキーホールが形成され、その形状に拘束されることでレーザ光入射側から走査軸後方に角度を有して蒸発金属が噴出する。さらに高速走査により、キーホール後方にレーザ光反射側に丘陵な壁面をもつ熔融金属の流動空間キャビティが存在する。
- (4) 連続発振レーザを斜めに入射して高速走査した際、キーホール形状により拘束された方向に発生する蒸発反跳力が、高速走査により保たれているキーホール後方のキャビティにおいて、反射側から入射側への熔融金属流れを生み出す。キャビティ底部を通り、反射側から入射側へ流れる熔融金属と入射側に存在する走査軸後方に流れる熔融金属が入射側で合流することで、レーザ光入射側に熔融金属の盛り上がり、反射側に微細溝が連続的に形成される。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の研究助成を受けて行われたものであり、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) A. Dunn, J. V. Carstensen, K. L. Wlodarczyk, E. B. Hansen: Nanosecond Laser Texturing for High Friction Applications, Opt. Laser Eng., 62, (2014), pp.9-16.
- 2) Aguilar-Morales, S. Alamri, A. F. Lasagni: Micro-fabrication of High Aspect Ratio Periodic Structures on Stainless Steel by Picosecond Direct Laser Interference Patterning, J. Mater. Process. Technol., 252, (2018), pp.313-321.

- 3) M. I. S. Ismail, Y. Okamoto, A. Okada, Y. Uno: Experimental Investigation on Micro-welding of Thin Stainless Steel Sheet by Fiber Laser, American Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol.4, No.3, (2011), pp.306-312.
- 4) 井澤太登, 宇野義幸, 岡本康寛: ファイバレーザを用いたステンレス箔の微細溶接に関する基礎的研究, 日本機械学会第7回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, (2008), pp.135-136.
- 5) 隈元 健: 連続発振レーザを用いた軟鋼に対する高速微細溝加工の試み, 日本機械学会中国四国学生会第48回学生員卒業研究発表講演会講演論文集, (2018), 講演番号 S1609.
- 6) T. Sakai, Y. Okamoto, C. Katayama, H. Imai, A. Okada: High-Speed Micro-Grooving of Metal by Angled Irradiation of Single-mode CW Fiber Laser, Appl. Sci., 10, (2020), 8333.
- 7) C. W. Hirt et al., Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, Journal of Computational Physics, Vol. 39, (1981), pp.201-225.