

インフラ構造物へのレーザー加工適用性の研究

レーザー技術総合研究所 レーザープロセス研究チーム

主席研究員 藤田 雅之

(平成 29 年度 一般研究開発助成 AF-2017233)

キーワード：レーザー加工，ファイバーレーザー，インフラ構造物，土木・建築

1. 研究の背景と目的

近年、ファイバーレーザーの高出力化と共に高輝度化が進み、連続波 (CW) であっても $10^4 \sim 10^5 \text{ W/cm}^2$ の照射強度を容易に実現することが可能となってきた。従来は加熱用光源としての CW レーザーであったが、高輝度ファイバーレーザーはアブレーションを伴う除去加工用光源としても使うことができるようになり、その利用範囲を拡大しつつある。

また、ビームデリバリーに関する周辺機器も取り扱いやすく高性能なものが開発され、50,000 mm/s の掃引速度を可能とするガルバノスキャナが市販されている。このような高速掃引を利用すると、CW レーザーであっても試料に対してパルス的なレーザー照射を行うことができる。例えば、直径 1mm のスポットを 10,000 mm/s で掃引すると、試料が感じるレーザー照射時間は $100 \mu\text{s}$ となる。見方を変えれば、CW レーザー光とガルバノスキャナを組み合わせ、掃引速度を変えることで試料に照射するフルエンスを幅広く変化させることができると言える。先の例では、レーザー出力 100 W に対して照射フルエンスは $100 \text{ W} \times 100 \mu\text{s} \div 1 \text{ mm}^2$ から、約 1.3 J/cm^2 に相当することになる。

さらに、ファイバーレーザーの堅牢性は屋外での利用に適しており、土木・建築現場での活躍が期待される。これまでにも建築用部材へのレーザー加工は kW 級炭酸ガスレーザーや YAG レーザーを用いて試されてきたが¹⁾、最近のレーザー光源とその周辺機器の性能向上により新たな局面を迎えようとしている。

このような背景から、本研究では土木・建築分野におけるインフラ構造物の代表である木材、鋼板、コンクリートを対象として、レーザー加工の適用性を調べることを目的として実験を行った。

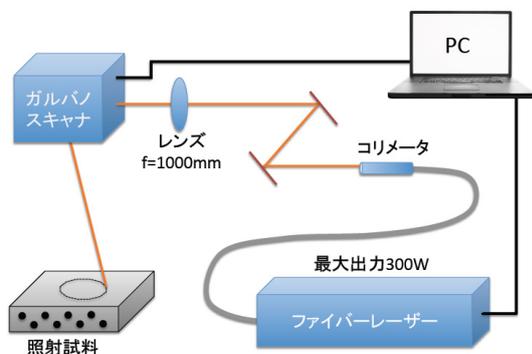


図 1. 実験配置図

2. 実験方法

用いたレーザーはフジクラ社製 CW ファイバーレーザー (FLC-300-A) で、主な仕様は最大出力 300 W、波長 1095 nm、 $M^2 < 1.3$ である。図 1 に実験配置を示す。コリメータから出射されたレーザー光 (ビーム径 5 mm^{ϕ}) を焦点距離 1000 mm の平凸レンズを用いて集光し、YE データ (現: 安川コントロール) 社製ガルバノスキャナを用いて試料上に掃引照射した。

レーザーおよびガルバノスキャナはパソコンで制御され、レーザーパワー、レーザーの ON/OFF、掃引エリアの設定、掃引速度、ハッチ間隔等、自在に設定することが可能となっている。

3. 実験結果

3.1 木材の塗装除去

まず、木材の塗装除去を紹介する。いわゆる、レーザークリーニングである。図 2 (a) に塗装前の木材 (松) の表面、(b) に塗装後の表面を示す。この塗装面にスポット径 2 mm^{ϕ} で 154 W のレーザー光を集光し、掃引速度 2,250 mm/s で 20 mm 角の領域を照射した。照射強度は約 5 kW/cm^2 、試料が受けた照射パルス幅は約 0.9 ms、フルエンスは 3.4 J/cm^2 に相当する。図 2 (c) に照射時の様子を示す (30 fps の動画の一コマ)。炎が吹き上がって塗膜が除去されている状況が確認できる。図 2 (d) に照射後の表面を示す。図 2 (a) と比べると若干着色が見られるが、極端な炭化は起きていない。

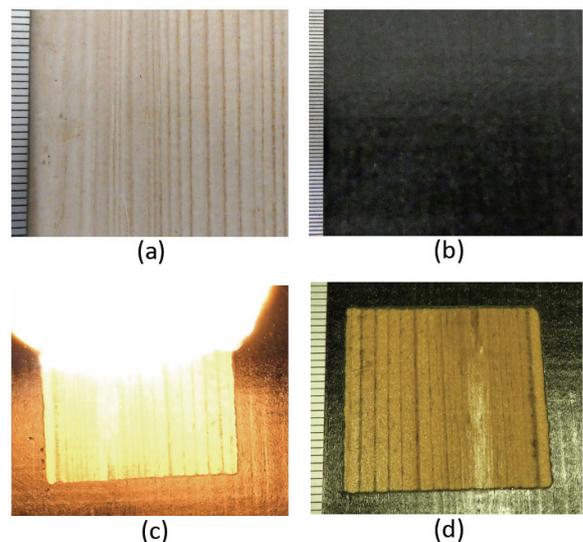


図 2. (a) 塗装前の木材 (松) の表面、(b) 塗装後の表面、(c) レーザー照射中の様子、(d) レーザー照射後の表面。

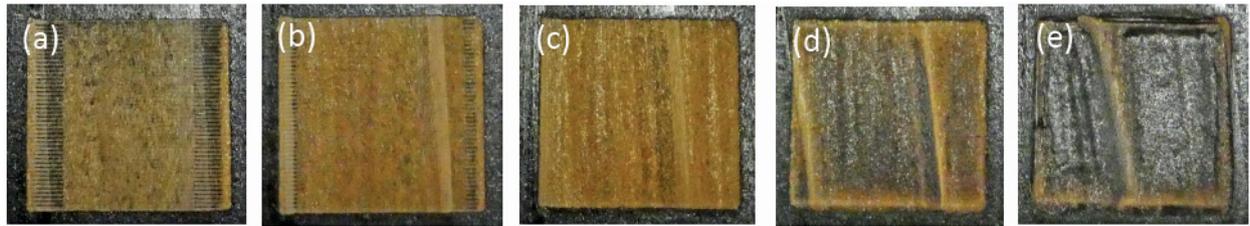


図3. 黒色に塗装された木材(松)に対してCWレーザーを掃引速度 (a) 4,500 mm/s、(b) 2,250 mm/s、(c) 1,125 mm/s、(d) 450 mm/s、(e) 225 mm/s で照射した結果。レーザースポット径は約1 mm。

図3に黒色に塗装された木材(松)に対して154 WのCWレーザーを掃引速度 (a) 4,500 mm/s、(b) 2,250 mm/s、(c) 1,125 mm/s、(d) 450 mm/s、(e) 225 mm/s で照射した結果を示す。レーザースポット径は約1 mmであった。掃引速度が遅い場合は木材の炭化が見られている。塗装除去としては不適切な条件であるが、外壁材として用いられている「焼き板」作りに使えるかもしれない。一方で、掃引速度が早すぎると塗装の除去が不完全となる。往復掃引の場合はビームを折り返すところで顕著な加減速が生じるために、照射領域の両端で母材表面に掃引の痕がくっきりと観察されている。いずれにせよ、最適な条件を選ぶことにより、下地の材料を再利用可能な状態で塗膜の除去を行うことができる。

3・2 鋼板の錆取り

興味深いことに、図3(c)と全く同じ条件で錆び付いた鋼板にレーザーを照射すると、サビを除去できることが確認された。図4に、(a) 塗装木材試料の照射中、(b) 同照射後、(c) 錆びた鋼板の照射中、(d) 同照射後、の表面写真を示す。照射中の様子を比較すると、木材の場合は炎が吹き上がり(図4(a))、鋼板の場合は火花が飛び散って(図4(c))表面の除去が進行している。

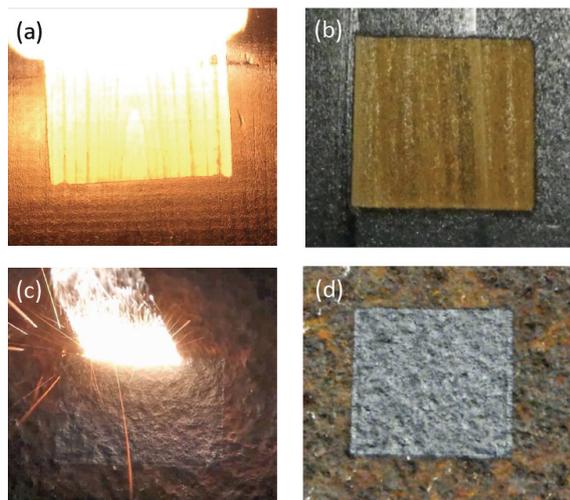


図4. (a) 塗装木材試料の照射中、(b) 同照射後、(c) 錆びた鉄板の照射中、(d) 同照射後、の表面写真。

前節と同様に、鋼板に対しても照射パワー一定で掃引速度を変化させた時の様子を観察することにした。過剰照射すると、木材は炭化が発生するが、鋼板の場合は酸化が起きると

考えられる。図4(d)の試料は“たまたま実験室にころがっていた”錆びた鋼板であったが、パラメーターを変化させて比較するためには、ある程度性状が揃った試料を複数枚用意する必要がある。そこで、50 mm × 100 mmの鋼板(3.2 mm厚)の表面をショットブラストで処理した後、中性洗剤で洗浄し油分を除去し、その後サビ発生促進剤(サビ-X)に浸して試料を作成した。図5に、(a) 洗浄後の原板、(b) サビ-X処理後の試料の写真を示す。サビ発生促進剤により板全面にわたり赤サビを発生させている。

図5(b)に一例を示した錆び付き鋼板に対して250 WのCWレーザーを掃引速度1,500 mm/s~150 mm/sの範囲で照射した結果を図6示す。図6(a)、(b)、(c)の段はそれぞれ、照射直後、1日後、10日後の試料写真である。また、各段の(-1)、(-2)、(-3)、(-4)はそれぞれ、掃引速度1,500 mm/s、750 mm/s、(c) 300 mm/s、150 mm/sで照射した結果を示す。レーザースポット径は約1 mmであったので、照射強度は 3.2×10^4 W/cm²、各段の(-1)、(-2)、(-3)、(-4)に対応した照射フルーエンスは、21 J/cm²、42 J/cm²、105 J/cm²、210 J/cm²に相当する。

照射フルーエンスが低いと照射直後にはサビが除去できたように見えるが、一日で赤サビが再発生している。一方、フルーエンスが高いと10日後でも変化が見られず表面が安定している。おそらく、高フルーエンス照射時には表面が瞬時に酸化し黒サビが発生しているものと考えられる。また、赤サビの再発生(言い換えれば、黒サビが発生していない)と黒サビの発生を分けるフルーエンスのしきい値のようなものが40 J/cm²近辺にあるものと推察される。今後は、酸化膜の厚みや表面状態が塗装に与える影響等を調べて行く必要があると思われる。

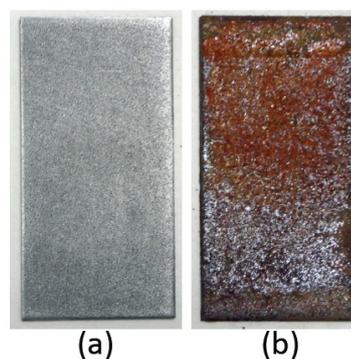


図5. サビ取り実験用鋼板(5 mm × 10 mm × 3.2 mm) : (a) 洗浄後の原板、(b) サビ-X処理後の試料。



図6. 250 W の CW レーザーを掃引速度 1,500 mm/s～150 mm/s の範囲で照射した結果。(a), (b), (c)の段はそれぞれ、照射直後、1 日後、10 日後の試料写真。照射強度は 3.2×10^4 W/cm²、各段の (-1), (-2), (-3), (-4)に対応した照射フルーエンスは、21 J/cm², 42 J/cm², 105 J/cm², 210 J/cm² に相当する。

3・3 ニッケル鉍石の加工

次に、ニッケル鉍石のレーザー加工を試みた。用いたニッケル鉍石は 20～40 mm 程度の不規則な形状で、原産地はフィリピンである。主な成分は、SiO₂ 38-48 %、MgO 33-38 %、Fe 5-10 %、Al₂O₃ 0.8-1.2 % で、僅かに Ni が 0.8-1.0 % 含まれている。

このニッケル鉍石にスポット径 0.6 mm^φ で 140 W のレーザー光を集光して貫通加工を試みた。照射強度は約 50 kW/cm² となる。図7に厚さ約 20 mm のニッケル鉍石の (a) 貫通加工した試料をレーザー照射側から見た写真、(b) 貫通した瞬間を真横から撮影した写真（動画の一コマ）を示す。貫通に要した時間はビデオフレームの解析から約 0.6 秒であり、意外と短時間で貫通できていることが分かる。

穴開けは容易にできたが、切断やコア抜きは困難であった。一旦溝が形成され始めると溝内でレーザー光が散乱されるためか、或いは溶融部が形成され溝の埋め戻しが始まるためか、連続的な貫通には至らなかった。変調パルスを用いて入熱を制御する、切り幅を広げる、アシストガスを用いる、などの工夫が必要であると思われる。

3・4 コンクリートの溶融ビード形成

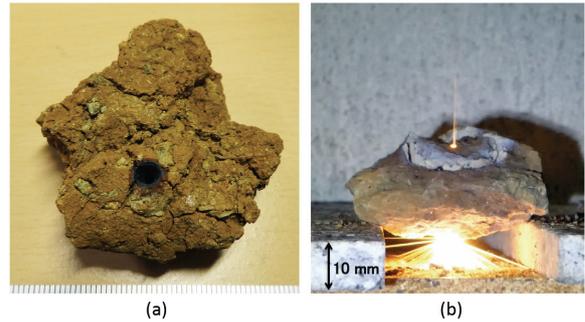


図7. ニッケル鉍石の貫通加工：(a) レーザー照射側から見た貫通痕、(b) 貫通した瞬間の映像。
((a)と(b)は異なる加工サンプル)

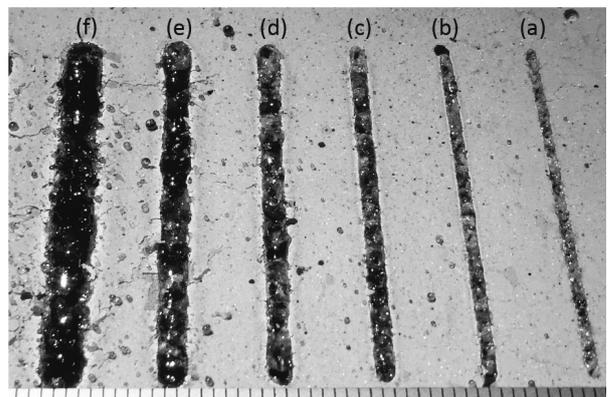


図8. 掃引速度を (a) 22.5 mm/s、(b) 11.3 mm/s、(c) 4.5 mm/s、(d) 2.3 mm/s、(e) 1.13 mm/s、(f) 0.45 mm/s と変えながら形成したコンクリートの溶融ビード。

CW ファイバーレーザーの主要な用途として金属部材の溶接が挙げられる。同様のことをコンクリート等に対して行うことができるのであろうか？ コンクリートはセメントと骨材を混ぜて固めたものであり、その主成分はシリカ (SiO₂) である。レーザー光で溶融させることによりガラス化を誘起し、部材同士を接合できることが期待される。

金属溶接の条件出しにおいて、材料表面にビード（溶融部の盛り上がり）を形成して、その形成状態を確認する手法をとることがある。同様のことをコンクリートに対して行ってみた。100 W のレーザー光を集光し掃引速度を変えながらビード形成を試みた。図8に掃引速度を、(a) 22.5 mm/s、(b) 11.3 mm/s、(c) 4.5 mm/s、(d) 2.3 mm/s、(e) 1.13 mm/s、(f) 0.45 mm/s と変えながら形成した溶融ビードの写真を示す。スポット径は 0.6 mm^φ であるため、照射強度は 35 kW/cm² となる。掃引速度 4.5 mm/s の場合、フルーエンスは約 4 kJ/cm² に相当する。掃引速度が遅くなるに従って単位面積当たりの入熱量が増え、ビードの幅が広がりガラス化した盛り上がりを確認できた。

3・5 石板の接合

コンクリートをガラス化させて溶融ビードを形成できるこ

とが確認されたので、石材の接合を試みた。試料としてホームセンターで購入したガーデニング用の“みかげ石”に似せた石板を用いた。いずれにせよ、石材であるので主成分はシリカ (SiO₂) となる。図9に2枚の石板を突き合わせて接合した試料の (a) 照射前、(b) 照射後の写真を示す。レーザー出力は168 W、掃引速度は0.45 mm/sであった。照射強度は60 kW/cm²、照射フルエンスは60 kJ/cm²に相当する。スポット径は0.6 mm⁶であるため、照射強度は35 kW/cm²となる。掃引速度4.5 mm/sの場合、フルエンスは約4 kJ/cm²に相当する。また、図10にガラス化した接合部の拡大写真を示す。別の“みかげ石”でも照射を試みたが、安定的に接合を行うことができた。

4. まとめ

高輝度ファイバーレーザーを用いて建築部材等のレーザー加工を試みた。CW レーザーとガルバノスキャナを組み合わせることで、塗膜の除去から石板の溶融接合まで様々な加工を実現することができた。ファイバーレーザーがもつ安定性、堅牢性を活かすことで、屋外での利用を想定した新たなレーザー加工の市場が開けてくるものと期待される。

謝 辞

本研究の一部は公益財団法人天田財団平成29年度一般研究開発助成により実施されたものであり、ここに感謝の意を表します。

参考文献

1) 永井香織：「建設現場におけるレーザー加工-レーザーノンスリップ工法-」, レーザー研究, **38** (10), pp. 744-748, (2010).

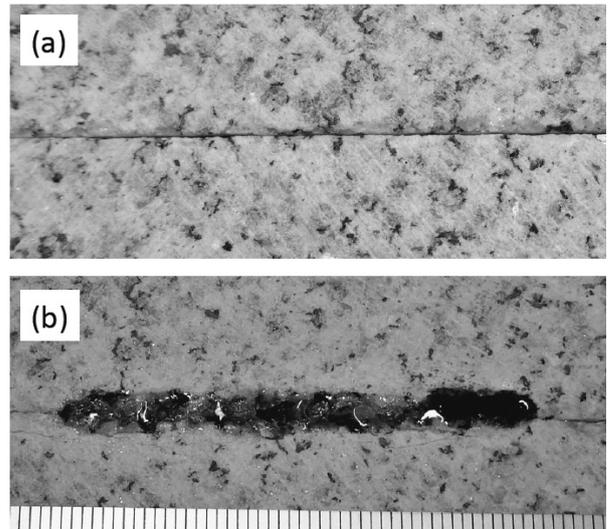


図9. 2枚の石板の突き合わせ接合：
(a) 照射前、(b) 照射後。

- 2) 永井香織、ウイグナラージャ・シバクマラン、松井勇：「レーザーによる石材の微細加工」, セッコウ・石灰・セメント・地球環境の科学 **11** (313), pp. 513-517, 2004-11-01.
- 3) 永井香織、杉本賢司：「CO₂ レーザによる竹床の炭化処理」, レーザー研究, **31** (1), pp. 63-67, (2003).
- 4) 永井香織、市原英樹、ウイグナラージャ・シバクマラン：「レーザー照射によるゼオライトモルタル表面のガラス化に関する研究」, 日本建築学会構造系論文集, 547, pp17-21, (2001).
- 5) M. Kobayashi, Y. Horikoshi, K. Nagai : "Study on Bamboo Floor panel Cutting by CO₂ Laser", SPIE Vol. 3887, pp. 262-269, (1999).
- 6) K. Nagai, H. Hattori : "Study on Rock Excavation with Laser", SPIE Vol. 3887, pp. 277-286, (1999).

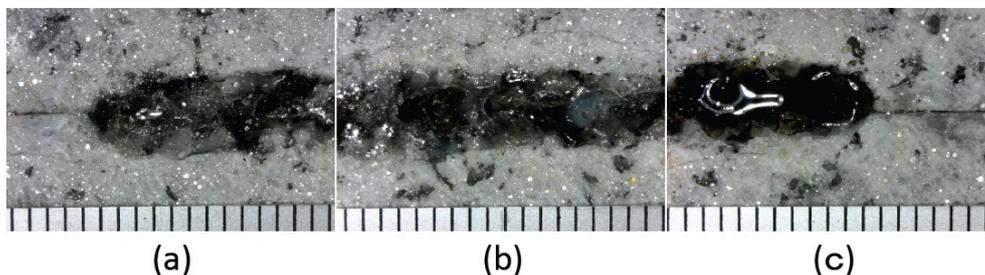


図10. 図9(b)の接合部の拡大写真。