

寄 書

## 高輝度ブルーレーザによる超硬合金基材へのクラッディング

安田 忠史<sup>\*,\*\*,\*\*\*</sup>, 北川 義大<sup>\*</sup>, 道家 照幸<sup>\*</sup>, 楠本 利行<sup>\*\*\*</sup>,  
沖原 伸一朗<sup>\*\*\*</sup>, 長谷川 和男<sup>\*\*\*</sup>, 坪井 昭彦<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>中日クラフト(株) (〒486-0953 春日井市御幸町1丁目1-3-21)

<sup>\*\*</sup>浜名レーザー(株) (〒431-1202 浜松市西区呉松町1955-1)

<sup>\*\*\*</sup>光産業創成大学院大学 (〒431-1202 浜松市西区呉松町1955-1)  
optsales@cybernet.co.jp

Laser Cladding Method by High Power Blue Laser Irradiation to Cemented Carbide-Base Material

YASUDA Tadafumi, KITAGAWA Yoshihiro, DOUKE Teruyuki, KUSUMOTO Toshiyuki,  
OKIHARA Shin-ichiro, HASEGAWA Kazuo and TSUBOI Akihiko

(Received July 12, 2021)

In this study, we have established laser irradiation conditions for laser cladding of tungsten carbide (WC) on cemented carbide substrates. The selective laser melting (SLM) method using a high-brightness blue diode laser was used to achieve a laser cladding of WC powders, but on the other hand conventional method using near-infrared wavelength laser could not create a cladded layer on the surface. After adjusting the components added to the WC powders, a WC-Cu cladded layer with an average height of 55  $\mu\text{m}$ , average hardness of 915 HV, and maximum hardness of 1151 HV was produced. It was found that a laser WC powders cladded layer on the WC substrate was strong enough for the press-mold.

**Key words** : laser cladding, blue laser, tungsten carbide

### 1. 緒 言

鉄 (Fe) やコバルト (Co) などの金属を結合材料 (Binder metals) として, タングステン炭化物 (WC) 粉末を焼結により結合した合金である超硬合金は, 金属加工用の切削工具や精密金型, 線引きダイスなどの工具材料として使用され, 加工精度の向上や製造コストの低減に寄与する. この合金材料は, ダイヤモンドに次ぐ硬さを有し, 耐摩耗性に優れるなどの高機能である反面, 靱性がなく非常に脆く, 衝撃が加わると欠けてしまうという欠点もある. 欠損した工具は超硬工具メーカー等により回収・再精錬され再利用される. リサイクル工程に投入する前の分別として, 人手によってスクラップを選別する必要があることや, 湿式処理法の作業工程の複雑さや相対的処理コストの高さなどの理由から, その再利用率は約 30% と報告されている<sup>1)</sup>. 欠損した高価な超硬工具を修復・再利用できれば, コストダウンに寄与すると考えられる.

欠損した超硬工具の再生に有効と考えられる技術の一つとして, 近赤外パルスレーザを使用した肉盛り補修があげられる. これは, レーザ照射中に溶接ワイヤを供給し, 金型の欠損部など補修したい部分に肉盛りを行う技術である. この技術では, パルスレーザの入熱制御性により, 熱歪みによる母材変形を極限まで抑えることができるというメリットがある. しかしながら, 超硬合金へ適応した場合, WC が高融点のため, 近赤外パルスレーザ単体では熔融温度まで到達させることが困難である. 熔融を実現させるた

めには, 母材と WC を結合させるための結合材料を導入し, 母材への入熱を極限まで抑え, 母材表面上の WC 凝集を防ぐ必要がある. レーザを使用した超硬合金の補修には, 先述の課題を考慮した加工が必要と考えられる. この問題を解決する技術の一つとして, 金属粉末を使用した付加製造技術 (Additive Manufacturing, 以下 AM 技術) がある. AM 技術に使用される金属材料は多岐にわたり, ステンレス鋼, ハステロイ, インコネル, ステライト系統の超合金, 自溶性合金, サーメット等, すでに多くの材料が使用されている<sup>2)</sup>. 実際の産業応用例として, ジェットエンジン部品の新しい製造技術の研究が盛んであり, 実用化がされている. 特に General Electric 社においては, 燃料ノズルの量産も始まっている<sup>3)</sup>. AM 技術の一つに, 材料粉末を基材上に塗布して上面からレーザを照射する粉末静置法 (Pre-Placed Powder Bed Laser Cladding)<sup>4)</sup> がある. この技術の造形物は当初, 融点よりも低い温度で粉末粒子が熔融せずに, 粉末粒子同士が接合し, 隙間が小さくなると同時に全体が縮小される焼結に留まり, 気孔を多く含むものであった. 高出力レーザを使用することにより粉末粒子を完全に熔融させることができ, 気孔率の低い造形物が製作できるようになった<sup>5)</sup>. これに関する先行事例として WC 粉末のレーザ造形がある. 京極ら<sup>6)</sup> は, 近赤外 CW ファイバーレーザを光源として使用し, WC-10%Co に Cu を 30% 添加した粉末を用いて造形すると表面が滑らかな積層痕を製作できることを報告している.

近年, Cu への吸収率が高いグリーンレーザ, ブルーレー

ザの高出力化により金属加工に応用される報告例が増えている。ヒマニーら<sup>7)</sup>は、Cu 粉末を銅 (Cu)、アルミ (Al)、鉄 (Fe)、チタン (Ti) の種々の基材上でグリーンレーザを光源としたレーザクラディング (LMD) 装置を用いて積層し、ハイスピードカメラで観察を行っている。

ブルーレーザにおける高出力化は、近年成長が目覚ましく、加工用途を想定した場合には、光源の輝度が重要なパラメータとなる。市販品ベースの素子端面のパワー密度の比較では、近赤外半導体レーザよりもブルーレーザの方が優れている<sup>8)</sup> という報告がある。その加工事例として、塚本<sup>9)</sup>は、内閣府革新的イノベーション創造プログラム (SIP) 革新的設計生産技術「高付加価値設計・製造を実現するレーザコーティング技術の研究開発 (2014～2018 年度)」において、ブルーレーザをマルチビーム重畳した装置を開発し、ステンレス基板上に純銅をコーティングすることに成功している。

しかしながら、京極ら<sup>8)</sup>の研究では、最大出力 50 W のファイバーレーザを用いて、積層を実現するための最適なレーザ出力、走査速度、合成粉末の検討はされているが、積層造形による積層痕の滑らかさの違いのみに焦点が当てられており、積層された基材の材質が記載されていない。塚本<sup>9)</sup>の研究では、100 W 級ブルーレーザ搭載コーティング装置を用いて、Cu を基材上にコーティングすることに成功している。この事例では、Cu、SUS 基材などに Cu のレーザコーティングが行われているが、超合金基材については検討がなされていない。

本研究では、超合金の硬度を保持した状態で、超合金基材への超合金粉末の積層造形に関する基礎特性の把握を目的とし、最大出力 20 W のブルーレーザを使用して、積層を実現するために WC 粉末に結合材として混合する材料の検討と、その加工条件の検討を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 基材および供試材料

クラディングの基材については、耐摩耗・耐衝撃工用である超合金 V10 を用いた。クラディングの材料には、WC 粉末 (アライドマテリアル製 WC08、粒度 0.83  $\mu\text{m}$ ) を使用し、その他元素粉末については Co、Ni、Cu を選定した。選定した理由として、Co は、WC 基超合金の結合用金属としては Fe、Co、Ni のうち<sup>10)</sup>、機械的特性がもっともすぐれ、WC 基超合金に混合される一般的な材料であるためである。Ni は、WC-Co の超合金と類似した疲労強度を示すというタリアゴら<sup>11)</sup>の報告を参考に、Co の比較対象物として選定した。Cu については、450 nm 域波長での光吸収率が高いこと、および京極ら<sup>6)</sup>の実験においてファイバーレーザを使用して滑らかな積層痕の製作を実現していることを参考に選定した。各混合用粉末については、高純度科学研究所製 Co (粒度 5  $\mu\text{m}$ 、純度 3N)、Ni (粒度 3～5  $\mu\text{m}$ 、純度 3N)、Cu (粒度 5  $\mu\text{m}$ 、純度 3N) を使用した。

### 2.2 レーザクラディング装置

レーザによる超合金基材の肉盛溶接を行うと、WC の

融点が約 2900°C と高いため、WC をつなぎとめている結合材料のみが溶融する。その後の凝固プロセスでは、引張応力による低温割れなどが発生しやすい。この対策として肉盛りをする際、母材への熱影響を極限まで抑える必要があると考える。そこで、Cu への入熱を効率的に行うことができ、加えて母材への入熱を抑制することを想定した加工が期待できるブルーレーザを用いた。

ブルーレーザは、近赤外レーザより材料の光吸収率が高く、Cu では 60% 程度となり、近赤外レーザと比べ約 6 倍に及ぶ。ブルーレーザを用いれば、近赤外レーザに比べて材料加工が効率的に行えると考えられる。また、従来の近赤外レーザに比べて低い出力で可能であるため、スパッタの発生を抑えた加工の実現が期待されている<sup>8)</sup>。

本研究のレーザ光源には、中心波長が 450 nm、最大出力 20 W、ファイバーコア径 100  $\mu\text{m}$  のマルチモード高輝度ダイレクトダイオードレーザ (島津製作所製ブルーレーザモジュール BLUE IMPACT™ シリーズ (B020-SM10-D)) を選択した。本実験は、粉末を基材上に塗布して上面からレーザを照射する粉末静置法 (Pre-Placed Powder Bed Laser Cladding)<sup>4)</sup> を用いた (Fig. 1)。集光光学系は、1:1.3 マッチドアクロマティック複レンズペア (コリメートレンズ  $f=30$  mm、集光レンズ  $f=40$  mm) を使用した。レンズ固定には、専用治具部品を用いた。光軸方向での焦点調整は、集光レンズを粗微動ラックオピニオンステージに固定することで 100 mm 間で作動長を調整できるようにした。光軸に直行する X-Y 軸の走査については、シグマ光機製高剛性精密自動ステージ (OSMS26-100) と 2 軸ステージコントローラ (GSC-02) を使用して走査速度の制御を行った。

### 2.3 レーザ照射実験

#### 2.3.1 供試材料の検証

京極ら<sup>6)</sup>の研究では WC 粉末に Co を 10% 添加した粉末、WC に Cu-20%Sn を 30% 添加した粉末、Cu を 30% 添加したものに近赤外レーザを照射し、滑らかな積層造形面の作成の検討を行っている。その結果、WC に Cu を 30% 添加した場合に滑らかな積層痕ができるとしている。このことから、WC へ各元素粉末を混合させて作成し、各元素粉末の混合比率を変えて、最適な混合粉末と混合比率を検証した。

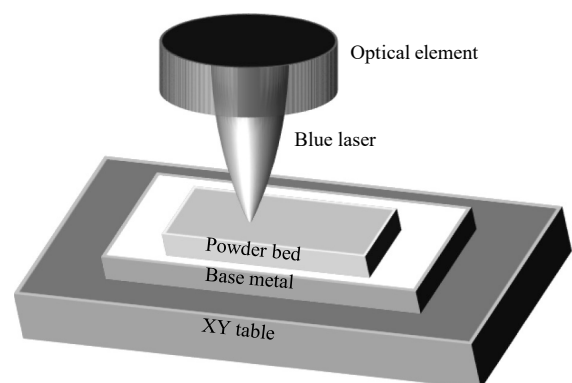


Fig. 1 Pre-placed powder bed laser cladding.

基礎実験段階では, 5回以上同じ軌跡にレーザ照射することで積層が実現することを確認している. このため本検証では, WC 合成粉末を約 20 μm の厚みで 1 回塗布し, レーザ出力は 20 W, 作動長は 13.5 mm, 走査速度は 0.5 mm/s とし, 1 パス当たり加工長 10 mm, 同じ軌跡上に 5 回レーザ照射をした. 照射実験後, 3D マイクロスコープ (KEYENCE 社 VHX-2000) で表層の観察をした. その後, 表層の未溶着部の除去を行い, 再度積層の観察をした.

2.3.2 レーザ加工条件依存性

最適積層条件を検証するため, レーザ出力, レンズから基材までの作動長の検討を行った. レーザ照射 1 サイクルを Fig. 2 に, レーザ照射条件を Table 1 に示す. レーザ照射 1 サイクルとは, WC 合成粉末 1 塗布 (厚さ約 20 μm) につき加工長 10 mm を 10 回レーザ照射し, 未溶着物の除去を行うことを意味する. このサイクルを基に, 以下に示す 3 条件にて実験を行った.

- 条件 1 レーザ出力 20 W, 作動長 13.5 mm, 走査速度 0.5 mm/s, 5 サイクル.
- 条件 2 レーザ出力 20 W, 作動長 13.5 mm, 走査速度 0.5 mm/s, 5 サイクル.  
レーザ出力 10 W, 作動長 13.5 mm, 走査速度 0.5 mm/s, 5 サイクル. 合計 10 サイクル.
- 条件 3 レーザ出力 20 W, 作動長 13.5 mm, 走査速度 0.5 mm/s, 5 サイクル.  
レーザ出力 20 W, 作動長 15.0 mm, 走査速度 0.5 mm/s, 5 サイクル. 合計 10 サイクル.

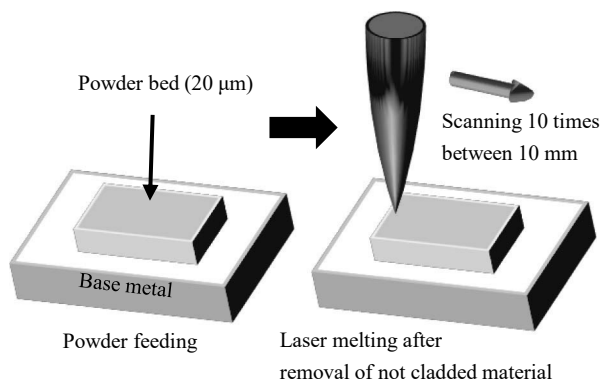


Fig. 2 One cycle of powder feeding and laser melting. Mixed powders of WC-30%Cu were placed to coat base metal, and laser scanning was performed 10 times.

Table 1 Laser scanning conditions.

| Condition | Scan Speed (mm/s) | Laser Power (W) | Working Distance (mm) | Cycles |
|-----------|-------------------|-----------------|-----------------------|--------|
| 1         | 0.5               | 20              | 13.5                  | 5      |
| 2         | 0.5               | 20              | 13.5                  | 5      |
|           |                   | 10              | 13.5                  | 5      |
| 3         | 0.5               | 20              | 13.5                  | 5      |
|           |                   | 20              | 15.0                  | 5      |

混合粉末は, 供試材料の検証で積層に成功した WC-30%Cu を使用した. 均一な粉末積層を実現するためにアクリル酸エステル樹脂製テープ接着剤 (Tombou 製テープノリ PiT パワー GLUE TAPE C) を下地とし, その上に粉末を塗布し, テープで固定されなかった粉末をスキージにて除去した. 照射時の雰囲気は大気中とした. 積層した試験材については, 表面の未溶着部の除去後, 3D マイクロスコープにて積層の高さ計測をした. 積層高さは 4 箇所にて計測を行い, 平均積層高さを算出した. 積層した焼結材については, 機械的性質を調査するため, # 2000 の研削砥石で研磨を行い, ビッカース硬度計にて積層部端面から 0.5 mm ピッチで積層表面側, 基材側で各 17 か所の測定をした.

3. 実験結果

3.1 供試材料の検証結果

WC 粉末への各元素粉末の最適な混合比率を確かめるため, WC 粉末と各元素粉末を乳鉢にて混合し, レーザ照射実験を行った. WC に対して, 各元素を混合し, レーザを照射した. 各合成粉末の混合比率を Table 2 に示す. 照射後に加工状態を確認したところ, Co, Ni は不良であった. Cu は溶融物を確認することができたが, 母材への融着は未達であった. 京極ら<sup>6)</sup>の実験結果を参考にして, Cu の組成を 30% に変えたところ, 母材への積層を実現した.

レーザ照射後, WC-30%Cu の写真, 未融着部を除去した後の WC-50%Cu の写真を Fig. 3 に示す (WC-30%Cu の積層物は黒色化していた). このことから, 基材との結合材料には Cu が有効であり, 最も良好な混合比率は, WC が 70% で Cu が 30% (WC-30%Cu) であった.

積層が実現した条件においては, Cu の光吸収率が高いブルーレーザを使用したことで, Cu が融点に達し溶融したことにより母材上に積層され, 黒色化した被膜が形成されたと考えられる. また, WC-30% Cu が積層でき, WC-50%Cu が積層できなかった差異については, WC と Cu の比率による熱伝導係数の違い, レーザ光の吸収率の違いに

Table 2 Chemical compositions and particle size distribution of cladding powders.

|          | Chemical Compositions (mass%) |    |    |    | Particle Size (μm)<br>WC/Binder | Cladding |
|----------|-------------------------------|----|----|----|---------------------------------|----------|
|          | WC                            | Co | Ni | Cu |                                 |          |
| WC       | Bal.                          |    |    |    | 0.8                             | ×        |
| WC-50%Co | Bal.                          | 50 |    |    | 0.8/5                           | ×        |
| WC-50%Ni | Bal.                          |    | 50 |    | 0.8/3-5                         | ×        |
| WC-50%Cu | Bal.                          |    |    | 50 | 0.8/5                           | △        |
| WC-30%Cu | Bal.                          |    |    | 30 | 0.8/5                           | ○        |

○ : Cladding success on the base metal. △ : Only powders coagulates. × : Nothing coagulates.

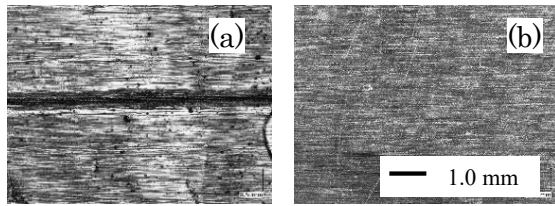


Fig. 3 Surface appearances of specimens after laser irradiation (×50). (a) WC-30%Cu, (b) WC-50%Cu.

よる影響を受けていると考えている。

### 3.2 レーザ加工条件依存性の検証結果

積層造形を実現させるためには、積層条件の最適化が必要である。そこで、積層条件のうち、レーザー出力、スポット径依存性を明らかにすることを目的に、Table 1 に示した3条件にてレーザー照射実験を実施した。

各積層条件に対して、焼結材の外観写真を Fig. 4 に示し、積層した焼結材を焼結部端面から 2 mm, 4 mm, 6 mm および 8 mm の地点で計測した積層高さの値の平均を Fig. 5 に示す。

条件1については、平均高さ 12.2 μm の積層が確認できた。

条件2については、平均高さ 12.7 μm の積層が確認できた。条件1と積層結果があまり変わらなかったことについては、加工ヘッドの位置が固定のまま積層造形を行うと、加工点がインフォーカスになってしまったこと、レーザー出力を 10 W に調整したことにより、エネルギー密度が低下してしまったこと、の二つの条件が重なり、Cu 粉末を熔融させる温度まで上昇させることができなかつたためと考えられる。

条件3については、焼結性が良好な条件であり、平均高さが 55 μm であった。条件3の実験では、レーザー未照射領域の混合粉末の除去工程後も、焼結材は剥がれることがなく、硬度測定のための表面研磨を行っても焼結材の剥がれが発生しなかつた。これは、Cu 粉末が凝固するプロセスにおいて、母材表面へも熔融した Cu が結合し、積層を重ねていく段階において作動長を変えたことにより、パワー密度が調整され、母材へ結合した焼結材にダメージを与えることなく混合粉末の焼結のプロセスが完了したからであると推測される。また、近赤外レーザーでの検証に見られるようなレーザー照射直後に起こる母材表面の剥がれは見られなかつた。近赤外レーザーでは、吸収率の低い Cu 粉末を熔融するためにレーザー出力を高くする必要があるが、ブルーレーザーでは吸収率が高く加工領域への総入熱量を低く抑えることができた。その入熱量が焼結材の積層と、母材表面の熔融状態に影響を与えたと考えられる。

### 3.3 焼結材の硬度測定

生成した焼結部についての機械的性質を調査するため、ビッカース硬度計にて焼結材の硬度を測定した。周りの熱影響を調査するため母材側も行った。測定場所の図を Fig. 6 に示す。測定は、焼結材の端面から 0.5 mm ピッチとし、母材側は、焼結幅を考慮し積層造形部測定点中心から 3 mm 横の地点で行った。

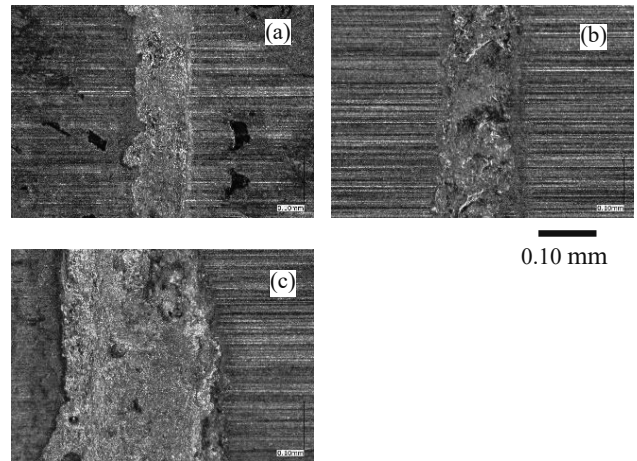


Fig. 4 Microscopic images of WC-30%Cu. (a) Condition 1, (b) Condition 2 and (c) Condition 3.

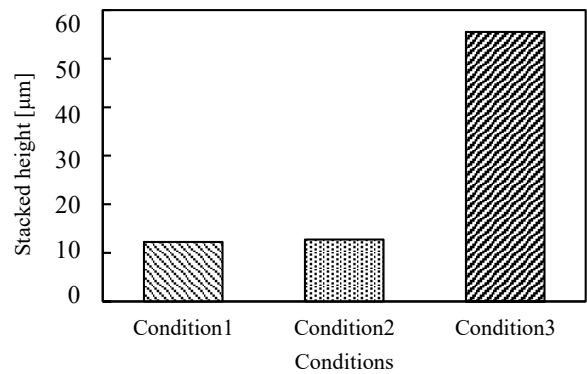


Fig. 5 Stacked height at every condition.

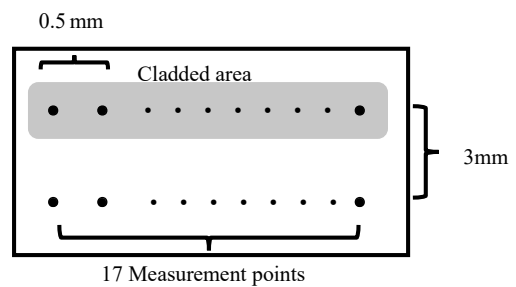


Fig. 6 Top view of measurement point image. The base metal side was measured 3 mm laterally from the center of the cladded area.

焼結材と基材の硬度測定結果を Fig. 7 に示す。測定点により硬度に差が出る結果となった。これは、WC 粉末と Cu 粉末を調合するときに乳鉢を使用し、混ぜ合わせたことによる混合粉末の調合のばらつきが原因だと考える。硬度が高くなった点では WC 粉末の割合が高く、硬度が低くなった点では Cu 粉末の割合が多くなったと推測される。焼結材材料の硬度測定の結果により、平均硬さ 915 HV、最大硬さ 1151 HV となることを明らかにした。

各鋼材と WC-30%Cu 焼結材との硬さの比較を Fig. 8 に示す。冷間金型用鋼である SKD11 の焼き入れ焼き戻し

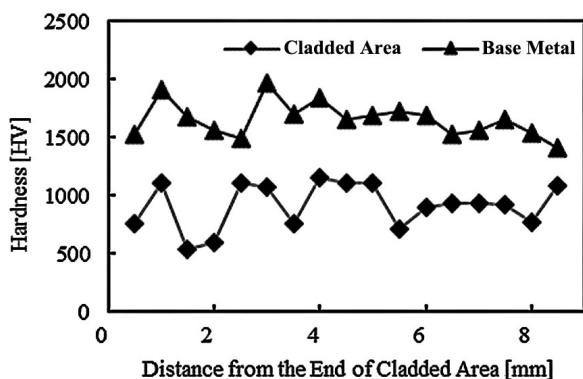


Fig. 7 Hardness of cladded materials.

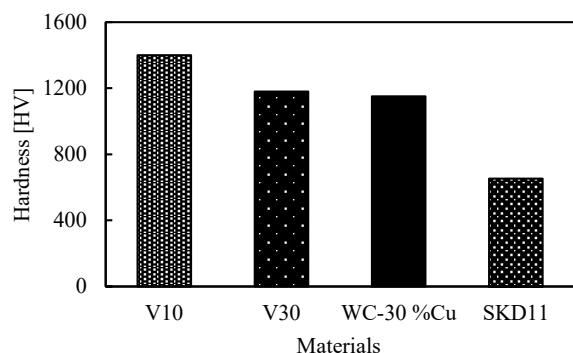


Fig. 8 Hardness of respective materials.

鋼は硬さ 653 HV<sup>12)</sup>, 耐摩耗・耐衝撃工具用である超硬合金 V10 は 1400 HV<sup>13)</sup> となり, 超硬合金 V30 は 1180 HV<sup>13)</sup> となる. WC-30%Cu 焼結材の最大硬さで比較した結果, SKD11 材よりも硬く, V10 材よりも柔らかい材料であり, V30 材と同等の硬さを有することがわかった. ブルーレーザを使用し, 基材へ積層した堆積物は, 超硬合金 V30 並みの機能を有する焼結材であることが考えられる.

#### 4. 結 論

本研究では, 高輝度ブルーレーザを使用し, 超硬合金基材への WC 肉盛り方法について, レーザ照射条件・照射回数, 結合材料の選定を行い, 以下のような結果が得られた.

- (1) WC へ混合する結合材料を Cu にすることに加えて, Cu への光吸収を効率的に行えるブルーレーザを使用することにより超硬合金基材への積層を実現できるとわかった.
- (2) 効率的な積層を実現する場合には, 初期段階に高い入熱による母材と焼結材料の結合を実施し, 積層物に対しての作動長を変える必要があることがわかった.
- (3) WC 粉末に Cu を 30% 使用した粉末で超硬基材へ積層を行ったところ, 平均硬さ 915 HV, 最大硬さ 1151 HV が得られた.

高輝度ブルーレーザを使用して, 超硬合金基材へ WC 粉末の積層技術を確立する足掛かりを得ることができた. 現状は, 基礎実験段階であるため実用には至っていない. 今後もさらなる実証試験を行っていく所存である.

#### 謝 辞

研究は, 公益財団法人浜松地域イノベーション推進機構 フォトンバレーセンターの平成 31 年度光・電子技術活用促進事業費補助金の採択を受け進められました, ここに深謝の意を表します.

超硬工具材料に関する技術的知見・試料提供を行っていただいた株式会社内山刃物 内山文宏氏に深くお礼申し上げます.

#### 参 考 文 献

- 1) Ministry of Economy Trade and Industry: 3R Systematization feasibility study business (Carbide tool scrap collection promotion business) report, (2012), 14.
- 2) Wada, T.: Overview of Laser Cladding and Latest Technological trends, *LASER*, **44-2** (2019), 11.
- 3) International Aircraft Development Fund: Trends in Additive Manufacturing in Aircraft Engines, Explanation Overview, **29-5**, (2018), 3.
- 4) Eboo, G.M. and Blake, A.G.: Laser Cladding of Gas Turbine Components, *The American Society of Mechanical Engineer*, **86-GT-298**, (1986), 2.
- 5) Koizumi, Y., Chiba, A., Nomura, N. and Nakano, T.: Fundamentals of Metal 3D Printing Technologies, *Materia Japan*, **56-12**, (2017), 688.
- 6) Kyogoku, H., Ikuta, A., Uemori, T., Shirachi, T., Yoshikawa, K. and Omori, H.: Direct Selective Laser Melting of WC Cemented Carbide, *Journal of Kindai University Fundamental Technology for Next Generation Research Institute*, **2**, (2011), 95-100.
- 7) Himani, S.P., Frank, B., Joerg, V. and Alexander, F. H. K.: Laser Metal Deposition of Copper on Diverse Metals Using Green Laser Sources, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **107**, (2020), 1559-1568
- 8) Tojo, K., Masuno, S., Higashino, R. and Tsukamoto, M.: High Brightness Power Blue Laser, *Journal of Japan Laser Processing Society*, **25-3**, (2018), 10.
- 9) Tsukamoto, M.: Innovative Design/Manufacturing Technologies Research and Development of the Laser Coating Technology to Realize High Value-added Design and Fabrication -100 W Blue Diode Laser Coating System, *Journal of Japan Laser Processing Society*, **24-2** (2017), 5.
- 10) Suzuki, H., Hayashi, K., Yamamoto, T. and Chujo, N.: Relations Between Some Properties of Sintered WC-10%Ni Alloy and its Binder Phase Composition, *Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, **13-6**, (1966), 290-295.
- 11) Tarrago, J.M., Ferrari, C., Reig, B., Coureaux, D., Schneider, L. and Llanes, L.: Mechanics and Mechanisms of Fatigue in a WC-Ni Hardmetal and a Comparative Study with Respect to WC-CO Hardmetals, *International Journal of Fatigue*, **70**, (2015), 252-257.
- 12) JIS Standard Alloy tool steel material JIS G 4404:2006.
- 13) CIS Standard CIS 019C-1990.