

# 高輝度青色半導体レーザマルチビームクラディングシステムを用いた純銅皮膜の高速形成技術の開発

森本 健斗\*, 佐藤 雄二\*\*, 竹中 啓輔\*\*,  
水谷 正海\*\*, 東條 公資\*\*\*, 林 良彦\*\*\*\*,  
安積 一幸\*\*\*\*, 阿部 信行\*\*, 塚本 雅裕\*\*

\*大阪大学大学院 (〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

\*\*大阪大学 接合科学研究所 (〒 567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 11-1)

\*\*\*株式会社島津製作所 (〒 243-0213 神奈川県厚木市飯山 2385-13)

\*\*\*\*大阪富士工業株式会社 (〒 660-0811 兵庫県尼崎市常光寺 1-9-1)

k\_morimoto@jwri.osaka-u.ac.jp

Development of High Speed Pure Copper Layer Formation Technology Using  
Multi Beam Laser Cladding System with High Intensity Blue Diode Lasers

MORIMOTO Kento, SATO Yuji, TAKENAKA Keisuke, MIZUTANI Masami, TOJO Koji,  
HAYASHI Yoshihiko, AZUMI Kazuyuki, ABE Nobuyuki and TSUKAMOTO Masahiro

(Received August 10, 2021)

Multi-beam laser cladding system is a method of forming a layer by heating and melting both a substrate and powders with lasers. Due to the melting of flying powder, it is possible to form a layer having a dilution region of 10  $\mu\text{m}$  or less. The cladding speed in multi-beam laser cladding has not been increased. We developed a high intensity laser cladding system using three 100 W blue diode lasers, and performed high-speed laser cladding with a cladding speed of 100 mm/s. A model for the powder heating distance of a three-beam multi-laser cladding system was derived. The region of uniform heating in multi-laser cladding using three beams was clarified. As a result of performing laser coating under the set conditions, the desired high-quality layer was obtained. The correlation between the laser power density and the dilution layer was clarified.

**Key words** : blue diode laser, pure copper, multi-beam laser cladding system, heating distance of powder

## 1. 緒 言

銅は熱伝導性および電気伝導性に優れており、ヒートシंकやコイルやモータなどの配線素材として用いられている<sup>1)</sup>。また、銅は細菌に対して殺菌・抗菌作用、ウイルスに対しては不活化作用を有する<sup>2,3)</sup>。病院、介護施設、学校、電車など公共施設で不特定多数の人が触れる手すりやドアノブなどに銅を使用することで細菌・ウイルスによるリスクを低減させることができる。すでに一部の施設では銅製の手すりやドアノブが使用されている<sup>4)</sup>。これらの銅製品は、バルク材(素材)からの削り出しや塑性加工などで製作されているため、銅の使用量が多くなり、コスト高になってしまう<sup>5)</sup>。これらの課題を解決する方法として、銅のコーティング技術が有用となる。一般的に銅のコーティング方法としてめっき法<sup>6)</sup>、溶射法<sup>7)</sup>、プラズマ粉体肉盛り法(Plasma Transfer Arc Welding : PTA法)などの手法があげられる。めっき法や溶射法は基板に多種の皮膜を堆積可能であるが、十分な接合強度を得ることが困難で、皮膜中の空隙形成の課題がある<sup>8,9)</sup>。一方、PTA法はプラズマによる基板への入熱によって溶融池が形成され、粉末が投入され皮膜を形成するプロセスであるので、皮膜と基板の

溶融接合により接合強度は高いが、基板成分が皮膜に混ざり量が多い(希釈層が大きい)<sup>10)</sup>。希釈層を小さくするためには、入熱量を制御することで、溶融池の大きさを制御する必要がある。そこで、高度な入熱制御が可能なレーザクラディング法に着目した。本方法はPTA法と同様に基板をレーザで溶融し、溶融池に粉末を投入して皮膜を形成するプロセスであるが、レーザによる入熱の制御性が高いため、溶融池の大きさを低減することができ、その結果、レーザクラディング法はPTA法よりも希釈を低減することができる<sup>11)</sup>。希釈層の範囲を希釈領域とし、希釈領域を十数 $\mu\text{m}$ 以下に抑える場合は、溶融池の深さが希釈領域と同程度の十数 $\mu\text{m}$ 以下に制御する必要があると考えた。そのためには、さらに高度な入熱量の制御技術が求められる。そこで、マルチビームレーザクラディング法を開発した<sup>12)</sup>。本手法は、複数本のレーザを加工点で重畳し、そこに金属粉末を供給することで飛行中の粉末を均一に加熱溶融することができる。飛行中の粉末の加熱原理として、2ビームによる粉末加熱のモデルを導出し、粉末が均一に加熱されることを実証した<sup>13)</sup>。飛行中の粉末の均一加熱により、基板の表層が溶融する条件で皮膜の形成が可能となるので、溶融池の溶込み深さを制御し、希釈領域を極小化

した皮膜を形成できる。

従来レーザークラッディングで用いるレーザーは主に波長が915 nm や 1030 nm の近赤外線レーザーである。近赤外の波長領域における銅の光吸収率は約 6%<sup>14)</sup> と低い。純銅に対して光吸収率が約 60%<sup>14)</sup> と高い青色半導体レーザーを用いることで、粉末を効率良く加熱溶融できる<sup>15)</sup>。これまでに出力 20 W の青色半導体レーザーを 6 台用いたマルチビーム加工ヘッドを開発した<sup>12)</sup>。6 本のレーザービームを重畳したレーザースポットにおけるパワー密度は  $7.9 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$  であり、ステンレス基板上に純銅皮膜を形成するためのパワー密度を達成した。当加工ヘッドを搭載したレーザークラッディングシステムを用いてステンレス基板上に純銅皮膜を形成した。しかしながら、皮膜形成速度は 10 mm/s 以下であった。工業的にはすでに皮膜形成速度が数十 mm/s 以上のレーザークラッディングが実用化されている。そのため、マルチビームレーザークラッディング法での高速な皮膜形成技術の開発が求められている。そのためには、青色半導体レーザーの高出力化が必要となる。そこで、我々は出力 100 W の高輝度青色半導体レーザーを開発・製品化した<sup>16)</sup>。本研究では 100 W 青色半導体レーザーを 3 台用いたマルチビーム加工ヘッドを開発した (Fig. 1)。3 本のレーザービームを基板上で重畳した。そのレーザーのスポット径を 290  $\mu\text{m}$  (半値全幅) にしたので、それぞれのレーザー出力が 100 W の際、重畳領域の総出力が 300 W となり、パワー密度  $4.5 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  を得ることができた。当加工ヘッドを用いてステンレス基板 (SUS304) に対してビードオンプレート溶接 (粉末を供給せずにレーザーを掃引照射) を行ったところ、掃引速度 100 mm/s で基板表層を溶融することができた。掃引速度 100 mm/s で基板を溶融するのに必要なパワー密度は  $1.5 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  以上であった。基板の溶込み深さが十数  $\mu\text{m}$  以下となるパワー密度は  $1.5 \times 10^5 \sim 1.6 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  であった。掃引速度 100 mm/s において基板の溶込み深さが

十数  $\mu\text{m}$  とすることができたので、パワー密度  $1.5 \times 10^5 \sim 1.6 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  で溶込み深さを十数  $\mu\text{m}$  以下に抑えた皮膜を形成できる可能性がある。

次の章では、レーザースポット内の任意の位置に到達する粉末が飛行中にレーザーに加熱される距離 (加熱距離) のモデル式を導出し、粉末の温度分布を明らかにした。粉末の速度を一定とした場合、粉末の温度が加熱距離に比例する。このモデルから飛行中に融点に達する粉末の粒径を算出し、この粒径を含む粉末をレーザークラッディング実験に用いた。本研究では、3 台の青色半導体レーザーを用いたマルチビームクラッディングシステムを用いて、純銅皮膜の高速形成のためのレーザークラッディング条件の設定を行った。掃引速度 100 mm/s において基板の溶込み深さが十数  $\mu\text{m}$  となるパワー密度において、飛行中に溶融可能な粒径の粉末でレーザークラッディングを行い、ステンレス基板上に純銅皮膜を形成した。皮膜品質の評価指標として、希釈領域を測定し、レーザーパワー密度と希釈領域との相関を明らかにした。

## 2. マルチビームレーザークラッディング法における飛行中の粉末粒子の加熱

マルチビームレーザークラッディング法はレーザーで基板と飛行中の粉末を溶融して、皮膜と基板を溶融接合する手法である。皮膜形成量  $m_c$  は、レーザースポット内に供給される粉末供給量、粒子の密度、皮膜の厚さ、皮膜の幅および皮膜形成速度をそれぞれ  $m_p$ ,  $\rho$ ,  $L_h$ ,  $L_w$  および  $v$  とすると、次式で表される。

$$m_c = am_p = \alpha \rho L_h L_w v \quad (1)$$

ここで、係数  $\alpha$  は、供給粉末の粉末効率である。ここで、レーザー加熱による粉末の温度上昇  $\Delta T$  の温度分布を考えるために、マルチビームレーザークラッディングの粉末とレーザーの相互作用を考える。3 本のマルチビームクラッディングシステムのレーザー照射配置と粉末流の概略図を Fig. 2 に示す。

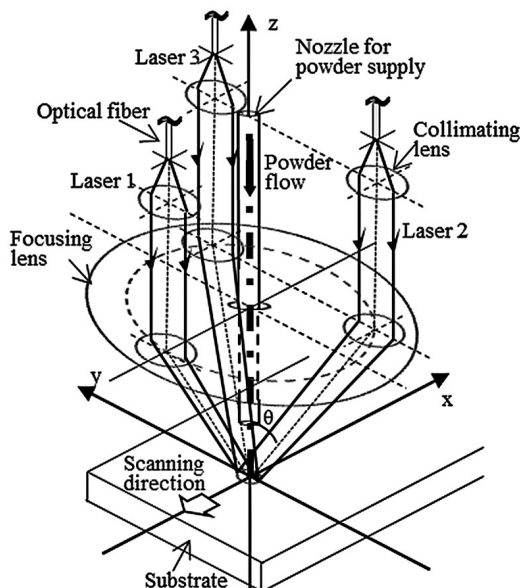


Fig. 1 Schematic diagram of multi-beam laser cladding system with three blue diode lasers.

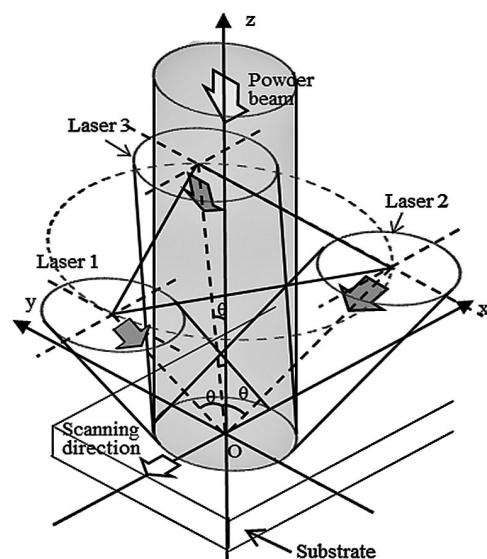


Fig. 2 Schematic diagram of three lasers irradiation and powder flow.

青色半導体レーザの高出力化により、3本のレーザビームで掃引速度 100 mm/s で基板の溶融を達成した。今までより、必要なレーザビームの本数が少なくなり、レーザビームの重畳およびレーザの照射の制御が容易となった。3本のレーザ中心は正三角形の頂点に配置され、基板に対して角度  $\theta$  となるように照射し、半径  $r$  のレーザスポットの中心を基板上で重畳した。3本のレーザビームの中心と基板が接する位置を原点  $O$  とした。粉末はレーザを通過して基板に到達するので飛行中にレーザで加熱される。ここで、飛行中の粉末がレーザから受けるエネルギー  $Q_p$  は<sup>12)</sup>

$$Q_p = A \frac{\pi d_p^2}{4} I t \quad (2)$$

となる。  $A$ ,  $d_p$ ,  $I$ ,  $t$  は、粉末の光吸収率、粒子の直径、レーザのパワー密度、粒子がレーザに加熱される時間を示している。粉末がレーザに加熱される時間  $t$  は

$$t = \frac{L}{v_p} \quad (3)$$

となり、  $L$ ,  $v_p$  は飛行中の粉末がレーザに加熱される距離(加熱距離)、粉末の飛行速度である。したがって、レーザから受ける  $Q_p$  は温度上昇  $\Delta T$  を用いて次式で表される<sup>15)</sup>。

$$Q_p = mc\Delta T = \frac{\pi d_p^3 \rho}{6} c \Delta T \quad (4)$$

$m$ ,  $c$  はそれぞれ粒子の質量および比熱である。式 (2), (3), (4) より  $\Delta T$  は次式で表される<sup>14)</sup>。

$$\Delta T = \left( \frac{3A}{2\rho c d_p} \right) \left( \frac{I}{v_p d_p} \right) L = K \frac{IL}{d_p} \quad (5)$$

$$K = \left( \frac{3A}{2\rho c v_p} \right)$$

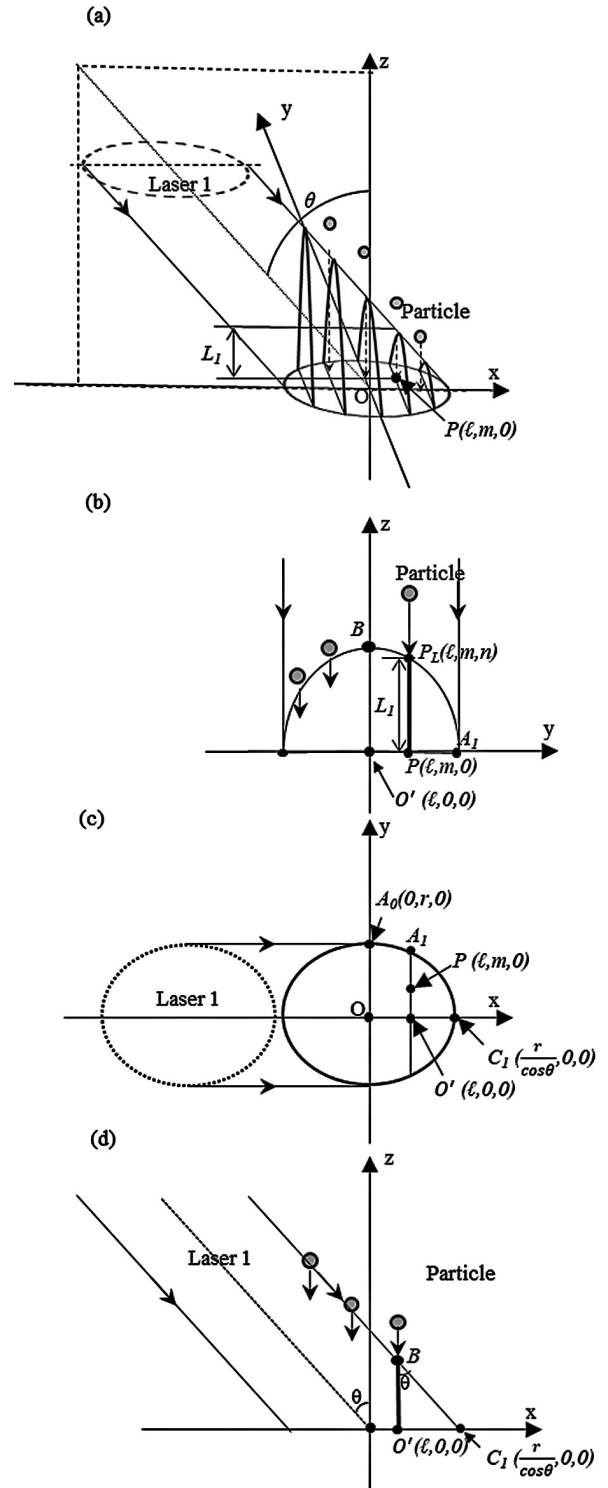
ここで、吸収率は温度依存性を考慮しないので吸収率  $A$  を一定とし、粉末の飛行速度  $v_p$  はキャリアガスと重力によって速度が決まるので一定とした。  $K$  を一定とすると、  $\Delta T$  はレーザのパワー密度  $I$ , 加熱距離  $L$  に比例し、粉末粒径  $d_p$  に反比例することがわかる。ここで、加熱距離  $L$  は、**Fig. 2** に示すように3本のレーザからそれぞれエネルギーを受けるので、3本のレーザをレーザ1、レーザ2、レーザ3とし、各レーザと粉末粒子との加熱距離を  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  とすると

$$L = L_1 + L_2 + L_3 \quad (6)$$

となる。したがって、3本のレーザで加熱された粉末粒子の温度上昇  $\Delta T_{total}$  は、式 (5), (6) より、

$$\Delta T_{total} = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 = K \frac{I}{d_p} (L_1 + L_2 + L_3) \quad (7)$$

となる。式 (6), (7) より、  $\Delta T_{total}$  が加熱距離  $L$  に比例すると仮定すると、  $\Delta T_{total}$  の温度分布の形状は加熱距離  $L$  の分布の形状と等しくなる。加熱距離  $L_1$  を求めるために、**Fig. 3** (a) にレーザ1と粉末粒子との相互作用の概略図を示す。半径  $r$  の円柱でレーザのエネルギー分布はトップハット型と仮定し、レーザ1を入射角  $\theta$  で原点  $O$  を中心に照射した。  $xy$  平面上 ( $z=0$ ) におけるレーザ1のスポット径内の任意の点を  $P(\ell, m, 0)$  とした。**Fig. 3** (a) の  $x=\ell$  における  $yz$  平面を **Fig. 3** (b) に示す。レーザ1と  $y$  軸との交点を  $A_1$ ,



**Fig. 3** (a) Schematic diagram of the laser 1 and powder flow. (b) Heating length of a particle,  $L_1$ , in the  $yz$  plane in the range of  $-r/\cos\theta \leq x \leq r/\cos\theta$  is varied in the range of  $-|O'A_1| \leq y \leq |O'A_1|$ . (c) Laser spot of laser 1 in the  $xy$  plane at  $z=0$ .  $|O'A_1|$  is varied in the range of  $-r/\cos\theta \leq x \leq r/\cos\theta$ . (d) Schematic diagram of Laser 1 and the powder in flight in the  $xz$  plane.  $|O'B|$  is varied in the range of  $-r/\cos\theta \leq x \leq r/\cos\theta$ .

$z$  軸との交点を  $B$ , 中点を  $O'$  とする。粉末粒子は、  $z$  軸に平行に飛行し、  $z=n$  の点  $P_L$  でレーザが照射され  $z=0$  の点  $P$  に到達する。

**Fig. 3** (b) より、レーザ1の  $yz$  断面は半楕円になるので、

$$\frac{|O'P|^2}{|O'A_1|^2} + \frac{|PP_L|^2}{|O'B|^2} = 1 \quad (8)$$

の関係が得られる。したがって、レーザー1と粉末粒子との加熱距離  $L_1$  は

$$L_1 = |PP_L| = |O'B| \sqrt{1 - \frac{|O'P|^2}{|O'A_1|^2}} \quad (9)$$

となる。次に、Fig. 3 (c) に Fig. 3 (a) の  $z=0$  における  $xy$  平面を示す。 $z$  軸に対してレーザー1は角度  $\theta$  で入射するので、レーザースポットは短軸が  $r$ 、長軸が  $r/\cos\theta$  の楕円となる。レーザー1と  $x$  軸との交点を  $C_1$ 、 $y$  軸との交点を  $A_0$  とすると

$$\frac{|O'A_1|^2}{|OA_0|^2} + \frac{|OO'|^2}{|OC_1|^2} = 1 \quad (10)$$

となり、 $|O'A_1|$  は次式となる。

$$|O'A_1| = \sqrt{\left(1 - \frac{\ell^2}{\left(\frac{r}{\cos\theta}\right)^2}\right)} r = \sqrt{r^2 - \ell^2 \cos^2\theta} \quad (11)$$

次に Fig. 3 (d) に Fig. 3 (a) の  $y=0$  での  $xz$  平面を示す。レーザー1は  $z$  軸に対して角度  $\theta$  で入射されるので  $|O'B|$  は

$$|O'B| = \frac{|C_1O'|}{\tan\theta} = \frac{\left|\left(\frac{r}{\cos\theta}\right) - \ell\right|}{\tan\theta} = \frac{r - \ell \cos\theta}{\sin\theta} \quad (12)$$

となる。レーザー1のスポット径内の任意の点  $P$  における粉末粒子の加熱距離  $L_1$  は、 $|O'P|$  は  $m$ 、式 (9)、(11)、(12) より

$$L_1 = \left(\frac{r - \ell \cos\theta}{\sin\theta}\right) \sqrt{\left(1 - \frac{m^2}{r^2 - \ell^2 \cos^2\theta}\right)} \quad (13)$$

となる。ここで、式 (13) より算出した、レーザー1におけるレーザースポット径内の粉末粒子との加熱距離  $L_1$  の分布を Fig. 4 に示す。レーザースポットの半径  $r$  を  $145 \mu\text{m}$  としたので  $m$  および  $\ell$  の範囲はそれぞれ、 $-145 \leq m \leq 145 \mu\text{m}$  および  $-159 \leq \ell \leq 159 \mu\text{m}$  となり、レーザーの入射角は本クラディングシステムと同じ  $24^\circ$  とした。レーザー1のみの照射では、レーザースポット径内の粉末粒子の加熱距離は不均一になっていることがわかる。Fig. 4 の色の分布は式 (5) の  $K$ 、 $d_p$ 、 $I$  を定数として加熱距離  $L_1$  を代入し、最も高い粉末の温度上昇  $\Delta T$  で規格化した温度分布を示す。

次に、レーザー2とレーザー3の粉末粒子との加熱距離  $L_2$ 、

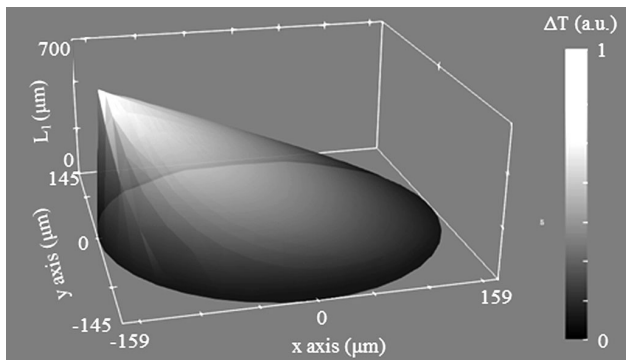


Fig. 4  $L_1$  calculated by equation (13) in the ranges of  $-159 \leq \ell \leq 159 \mu\text{m}$  and  $-145 \leq m \leq 145 \mu\text{m}$ , where  $\theta$  and  $r$  are  $24^\circ$  and  $145 \mu\text{m}$ , respectively.

$L_3$  を求めるために Fig. 5 に3本のレーザー(レーザー1, 2, 3)を重畳した  $z=0$  における  $xy$  平面を示す。任意の点  $P$  におけるレーザー2と粉末粒子の加熱距離  $L_2$  は、点  $P$  を原点を中心に  $\alpha^\circ$  回転させた点  $P_2(\ell', m', 0)$  におけるレーザー1と粉末粒子の加熱距離と等しい。 $P_2(\ell', m', 0)$  におけるレーザー1と粉末粒子の加熱距離は式 (13) に回転後の座標を代入したもので、 $L_2$  は

$$L_2 = \left(\frac{r - \ell' \cos\theta}{\sin\theta}\right) \sqrt{\left(1 - \frac{m'^2}{r^2 - \ell'^2 \cos^2\theta}\right)} \quad (14)$$

となる。 $\ell'$  および  $m'$  は

$$\ell' = \ell \cos\alpha - m \sin\alpha \quad (15)$$

$$m' = \ell \sin\alpha + m \cos\alpha \quad (16)$$

となり、 $\ell$  および  $m$  で表される。

任意の点  $P$  におけるレーザー3と粉末粒子の加熱距離  $L_3$  は、点  $P$  を原点を中心に  $\beta^\circ$  回転させた点  $P_3(\ell'', m'', 0)$  におけるレーザー1と粉末粒子の加熱距離と等しい。したがって  $L_2$  と同様に  $L_3$  は

$$L_3 = \left(\frac{r - \ell'' \cos\theta}{\sin\theta}\right) \sqrt{\left(1 - \frac{m''^2}{r^2 - \ell''^2 \cos^2\theta}\right)} \quad (17)$$

となる。 $\ell'$  および  $m'$  は

$$\ell'' = \ell \cos\beta - m \sin\beta \quad (18)$$

$$m'' = \ell \sin\beta + m \cos\beta \quad (19)$$

となる。

したがって、加熱距離  $L$  は、式 (6)、(13)、(14)、(17) より、

$$L = L_1 + L_2 + L_3 = \left(\frac{r - \ell \cos\theta}{\sin\theta}\right) \sqrt{\left(1 - \frac{m^2}{r^2 - \ell^2 \cos^2\theta}\right)} + \left(\frac{r - \ell' \cos\theta}{\sin\theta}\right) \sqrt{\left(1 - \frac{m'^2}{r^2 - \ell'^2 \cos^2\theta}\right)} + \left(\frac{r - \ell'' \cos\theta}{\sin\theta}\right) \sqrt{\left(1 - \frac{m''^2}{r^2 - \ell''^2 \cos^2\theta}\right)} \quad (20)$$

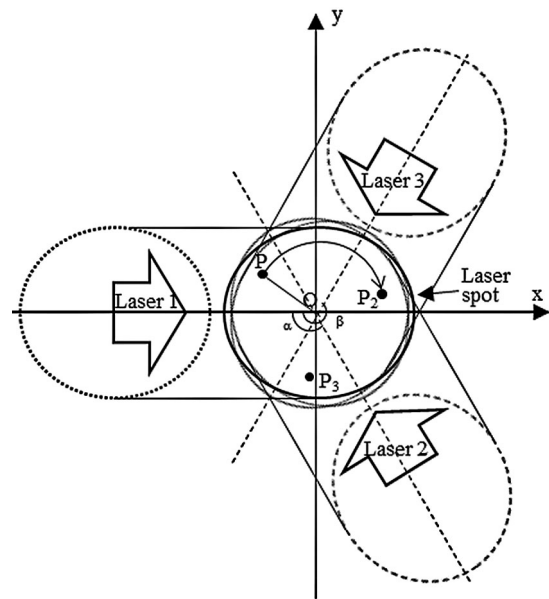


Fig. 5 Laser spots of laser 1, 2 and 3 in the  $xy$  plane. Laser 2 and the laser 3 are rotated by  $\alpha$  degrees and  $\beta$  degrees around from the laser 1, respectively.

となる。式 (20) を用いて算出した、レーザースポット径内の粉末粒子との加熱距離  $L$  の分布を Fig. 6 に示す。本マルチビームレーザークラディングシステムでは、設計値が  $\alpha=120^\circ$ ,  $\beta=240^\circ$ ,  $\theta=24^\circ$ ,  $r=145\ \mu\text{m}$  であるので、 $m$  および  $\ell$  の範囲がそれぞれ、 $-145 \leq m \leq 145\ \mu\text{m}$  および  $-159 \leq \ell \leq 159\ \mu\text{m}$  とした。Fig. 6 の色の分布は式 (5) の  $K$ ,  $d_p$ ,  $I$  を定数として加熱距離  $L$  を代入し、最も高い粉末の温度上昇  $\Delta T$  で規格化した温度分布を示す。加熱距離が最も長くなるのは原点  $O$  に到達する粉末粒子であった。y 軸上において加熱距離がレーザースポット中心の最高到達温度の 70% となる範囲は、原点から約  $127\ \mu\text{m}$  までの範囲であり、その範囲の外側では加熱距離が急激に減少する。よって、加熱距離が原点に到達する粉末の 70% となる範囲を均一加熱の範囲とした。3 ビームを用いたマルチレーザー照射法は Fig. 4 で示した 1 ビーム照射よりも粉末を均一に加熱できることがわかった。

### 3. レーザクラディングの皮膜形成条件と実験方法

出力 100 W の青色半導体レーザーを 3 台搭載したマルチビームクラディングシステムを用いてステンレス基板への純銅皮膜の高速形成条件の設定を行った。高速形成のための条件として掃引速度  $v$  は  $100\ \text{mm/s}$ 、膜厚は  $30\ \mu\text{m}$ 、稀釈領域の幅を  $10\ \mu\text{m}$  以下とした。レーザースポットへの粉末供給量  $m_p$  は、粒子の密度  $\rho$  を  $8.96\ \text{g/cm}^3$ 、皮膜の厚さ  $L_n$  を  $30\ \mu\text{m}$ 、皮膜の幅  $L_w$  を  $290\ \mu\text{m}$ 、掃引速度  $v$  を  $100\ \text{mm/s}$  として、式 (1) に代入し  $7.8\ \text{mg/s}$  とした。粉末はパウダーフィーダーからキャリアガスを用いて加工ヘッドに搬送し、Fig. 1 に示す加工ヘッド中心を通る粉末供給ノズルから射出した。粉末は基板に対して垂直に供給されるので、粉末の分布は均一であると仮定した。粉末は飛行中に融点以上に加熱される必要があるので、式 (5) を用いて融点まで加熱される粉末の粒径  $d_p$  を求めた。 $d_p$  の計算のためのパラメータをそれぞれ次のように設定した。 $\Delta T$  は室温からの純銅の融点までの温度  $1064^\circ\text{C}$  とした。パワー密度  $I$  は掃引速度  $100\ \text{mm/s}$  において基板を熔融するのに必

要なパワー密度  $I$  の閾値から 1.2 倍の範囲である  $1.5 \times 10^5 \sim 1.8 \times 10^5\ \text{W/cm}^2$  とした。吸収率  $A$ 、および比熱  $C_p$  をそれぞれ、 $0.67$ ,  $0.384\ \text{J/gK}$ 、粉末の飛行速度  $v_p$  はハイスピードビデオカメラを用いて観察した飛行中の粉末の速度の平均値  $5\ \text{m/s}$  とした。加熱距離  $L$  は式 (20) より算出し、 $L$  が最長となるレーザースポット中心における  $1105\ \mu\text{m}$  とした。結果として、パワー密度が  $1.5 \times 10^5 \sim 1.8 \times 10^5\ \text{W/cm}^2$  のときに融点に達する粉末の粒径は  $30 \sim 38\ \mu\text{m}$  となる。よって、今回は Fig. 7 に示すように平均粒子径は約  $34\ \mu\text{m}$  の純銅粉末を用いた。

Fig. 1 にマルチビームクラディングシステムの概略図を示す。本システムでは、最大出力 100 W、NA 0.2 の高輝度青色半導体レーザーをコア径  $100\ \mu\text{m}$  の光ファイバーで加工ヘッドにそれぞれ伝送し、加工ヘッド内にてそれぞれコリメートレンズを用いて平行光にし、焦点距離  $74\ \text{mm}$  の 1 枚の集光レンズを用いて 3 本のレーザーを焦点で重畳した。3 本のレーザーを焦点距離で重畳したビームプロファイル像を Fig. 8 に示す。レーザースポット径は半値全幅で x 軸、y 軸ともに  $290\ \mu\text{m}$  であった。

基板には  $40\ \text{mm} \times 40\ \text{mm} \times 1\ \text{mm}$  の SUS304 を用いた。加工ヘッド中央部から粉末供給ノズルを通して純銅粉末を

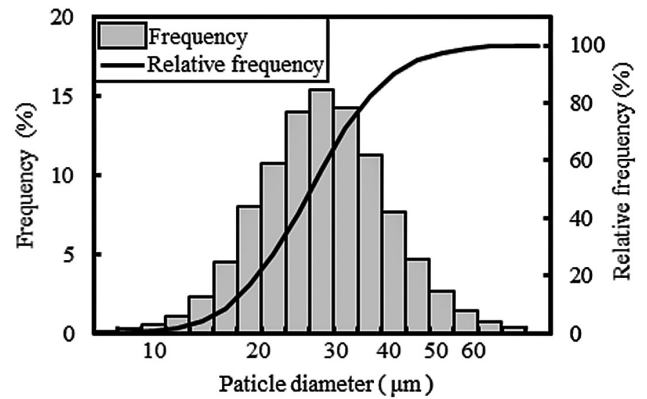


Fig. 7 Particle size distribution of the copper powder. The bar graph shows the frequency. The line graph shows the relative frequency.

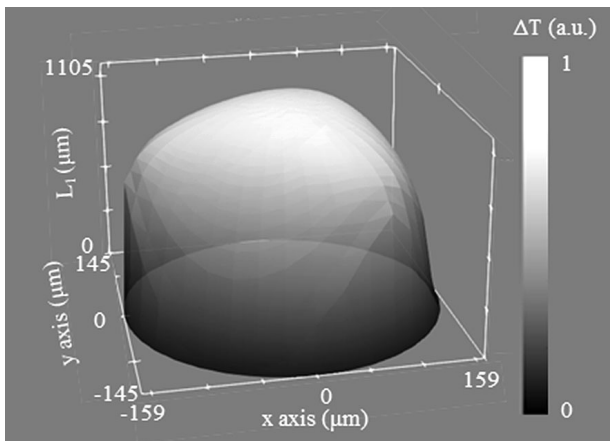


Fig. 6  $L$  calculated by equation (20) in the ranges of  $-159 \leq \ell \leq 159\ \mu\text{m}$  and  $-145 \leq m \leq 145\ \mu\text{m}$ , where  $\theta$  and  $r$  are  $24^\circ$  and  $145\ \mu\text{m}$ , respectively.

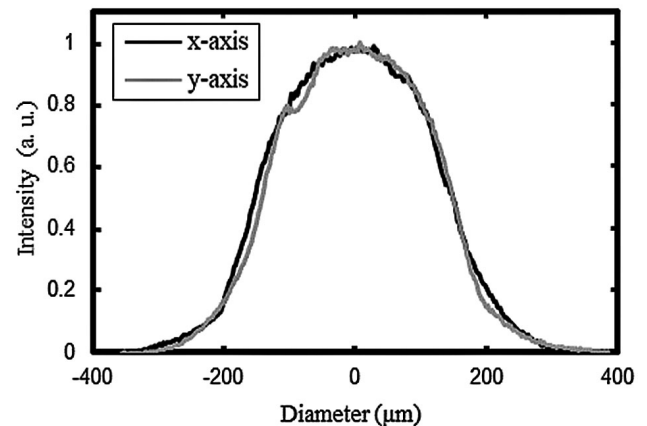


Fig. 8 Beam profiles of laser spot with three superimposed lasers on the x- and y-axes.

供給した。SUS304 基板を XY 電動ステージ上に設置し、Fig. 1 の -x 方向へ移動させながらレーザー照射を行うことで粉末および基材が溶融・凝固を繰り返し、基板表面に皮膜を形成した。ここで掃引速度は 100 mm/s 一定として、レーザーのパワー密度を  $1.3 \times 10^5 \sim 1.8 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  と変化させた。Table 1 にレーザークラディング条件を示す。レーザークラディングで形成した基板の表面および断面を光学顕微鏡で観察した。形成された皮膜の希釈領域を確認するために、皮膜の断面で皮膜表面から基板方向に EDX ライン分析を行った。レーザークラディングと同様のパワー密度でビードオンプレート溶接を行い、溶接ビードを形成した。溶接ビードの断面観察を行うことで、基板の溶込み深さを調べた。

4. 実験結果および考察

レーザーの掃引速度を 100 mm/s として形成した皮膜の表面の観察像を示す。Fig. 9 (a), (b), (c), (d), (e) および (f) のレーザーパワー密度はそれぞれ  $1.3 \times 10^5$ ,  $1.4 \times 10^5$ ,  $1.5 \times 10^5$ ,  $1.6 \times 10^5$ ,  $1.7 \times 10^5$  および  $1.8 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  である。(a), (b) では粉末が基板上に付着しているものの、離散的なビードが形成された。一方、レーザーパワー密度の高い Fig. 9 (c), (d), (e) および (f) では皮膜が連続的に皮膜が形成された。

次に Fig. 9 (c~f) の断面の観察像を Fig. 10 (a~d) に

Table 1 Laser cladding condition.

Scanning speed (mm/s)	Powder supply (mg/s)	Carrier gas (ℓ/min)	Shielding gas (ℓ/min)	Laser intensity ( $\times 10^5 \text{ W/cm}^2$ )	Laser output (W)
100	7.8	0.5	10	1.3	86
				1.4	92
				1.5	99
				1.6	106
				1.7	112
				1.8	119

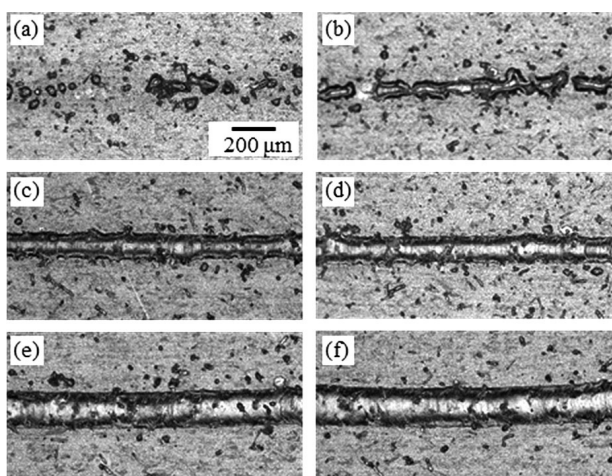


Fig. 9 Optical images of the coating layer surfaces at the laser intensity of (a)  $1.3 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ , (b)  $1.4 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ , (c)  $1.5 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ , (d)  $1.6 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ , (e)  $1.7 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  and (f)  $1.8 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ .

示す。Fig. 10 では、膜厚は (a) 14.0 μm, (b) 17.5 μm, (c) 15.7 μm, (d) 16.9 μm と変わらなかったが、皮膜幅はレーザーパワー密度が大きくなるにしたがって (a) 153 μm, (b) 171 μm, (c) 193 μm, (d) 216 μm と大きくなった。

次に、希釈層を評価するために、皮膜の表面から基板方向に EDX ライン分析を行った。希釈領域の指標として、皮膜成分 Cu の相対強度が 0.1 以上、基板成分の Fe の相対強度が 0.1 以上の範囲を希釈領域と定義した。Fig. 11 に Fig. 10 (a) 内の A-A', (d) の B-B' における EDX ライン分析の結果を示す。黒線は Cu の相対強度、灰色の線は Fe の相対強度を示している。その結果、Fig. 11 (a) では、皮

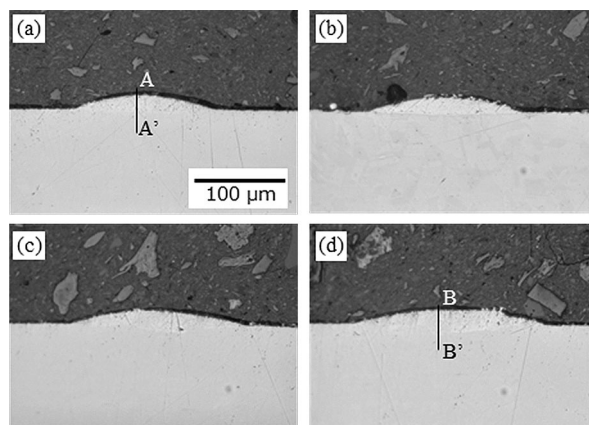


Fig. 10 Optical images of the cross section of coating layer at the laser intensity of (a)  $1.5 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ , (b)  $1.6 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ , (c)  $1.7 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  and (d)  $1.8 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ .

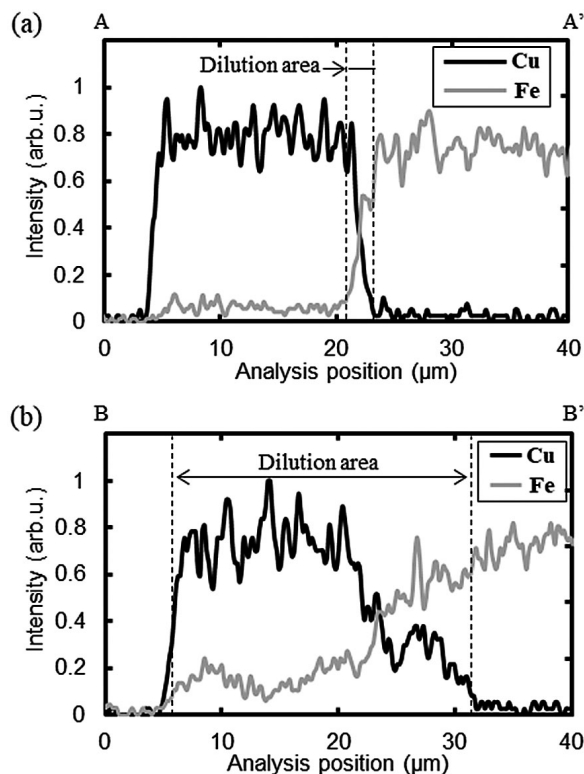


Fig. 11 Detecting intensity of copper and iron in line analysis of coating cross section at the laser intensity of (a)  $1.5 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  and (b)  $1.8 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ .

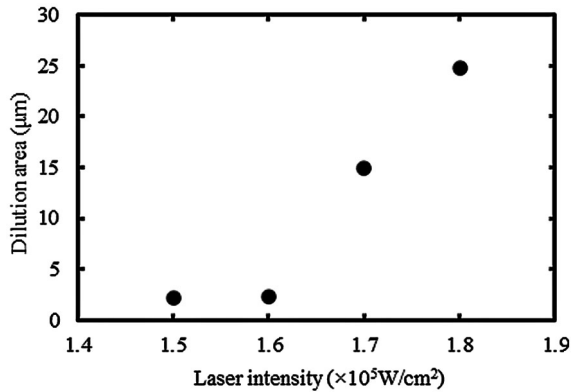


Fig. 12 Dependence of dilution area on laser intensity.

膜側である A 側から Cu が検出され、分析位置 20 mm を境にほぼ 0 となった。一方 Fe は A 側では 0.1 以下の相対強度であったが、分析位置 20 mm を境に Fe の強度が高くなった。次にレーザーパワー密度の高い条件で形成した Fig. 11 (b) では、皮膜表面の B 側で Cu とともに Fe が検出された。Cu は 20 mm を境に減少したが、Fe は、検出されてから徐々に増加を続け、測定終端の 40 mm まで増加した。

EDX ライン分析結果から求めた希釈領域の長さとしてパワー密度の関係を Fig. 12 に示す。希釈領域は、皮膜形成閾値のパワー密度  $1.5 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  で  $2.1 \mu\text{m}$  を示し、レーザーパワー密度の増加とともに大きくなり、 $1.8 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  で形成した皮膜の希釈領域は  $24 \mu\text{m}$  となり、約 11 倍大きくなった。

皮膜の厚さは、式 (1) より目標の厚さ  $30 \mu\text{m}$  になるよう粉末供給量  $7.8 \text{ mg/s}$  としたが、得られた膜厚は約  $17 \mu\text{m}$  であった。これは、レーザースポット中央に供給した粉末の約 55% が皮膜を形成していることを示している。式 (5) で求めたように、パワー密度  $1.5 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  のときに融点に達する粒径を算出すると、 $30 \mu\text{m}$  となる。すなわち粒径  $30 \mu\text{m}$  以上の粉末は飛行中に溶融しないことになる。Fig. 7 から粒径  $30 \mu\text{m}$  以下の割合が 56% となり、皮膜を形成した粉末の割合と同等の値を得た。したがって、本プロセスでは飛行中に溶融した粉末が皮膜を形成していることを示唆している。また、皮膜の幅は約  $120 \sim 230 \mu\text{m}$  であり、レーザースポット径  $290 \mu\text{m}$  および均一加熱の領域  $254 \mu\text{m}$  に比べて小さかった。これは Fig. 6 で示した 3 ビームにおける飛行粉末の温度分布ではレーザースポットの円周近傍では飛行粉末の温度が低く皮膜とならないことを示唆している。本計算ではレーザービームのエネルギー分布はトップハット状と仮定して計算したが、実験では Fig. 8 に示すビームプロファイルに強度に分布があり、レーザースポットの円周近傍では強度が低くなっているため、均一加熱の領域より内側で、皮膜が形成されたものと考えられる。

希釈領域は、パワー密度が増加するにつれて大きくなった。Fig. 13 にビードオンプレート溶接のレーザーパワー密度に対する基板溶融深さの依存性を示す。レーザーパワー密度が増加するにしたがって線形的に増加していることがわかる。今回皮膜形成閾値はレーザーパワー密度  $1.5 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$

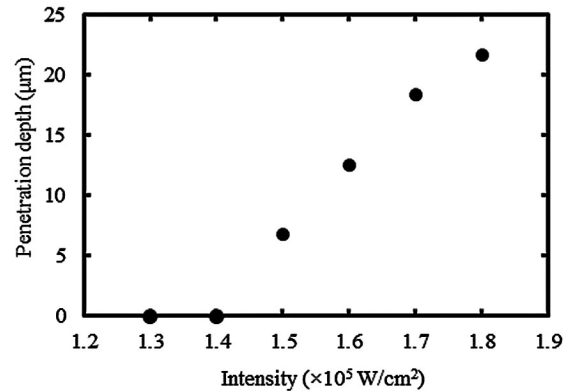


Fig. 13 Dependence of penetration depth on intensity in bead on plate welding.

の時であったが、これ以下だと基板が溶融していないため、溶融した粉末が固着するだけで溶融接合が起こらなかったことがわかる。レーザーパワー密度が  $1.5 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  および  $1.6 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  でそれぞれ溶込み深さが  $7 \mu\text{m}$  および  $13 \mu\text{m}$  となり、希釈領域はそれぞれ約  $2 \mu\text{m}$  であった。一方、溶込み深さが  $19 \mu\text{m}$  となるレーザーパワー密度が  $1.7 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  の条件では、希釈領域が  $15 \mu\text{m}$  に増加した。レーザーパワー密度が高くなると溶込み深さが増加するため、溶融した粉末とのコンタミネーションが起こる領域が増加し、希釈領域が増加したものと考えられる。これらの試験結果から、マルチビームレーザークラディング法において、基板の溶込み深さを最小限にして皮膜を形成する事が重要であることがわかった。

## 5. 結 言

本研究では、マルチビームレーザークラディング法による純銅皮膜形成の高速化のために、3 本の高輝度青色半導体レーザーを用いたマルチビームクラディングシステムを開発し、皮膜形成のための条件設定を行った。3 本のレーザーを用いたマルチビームレーザークラディング法の加熱距離のモデル式を構築し、レーザースポット内に供給される粉末の加熱距離の分布を示した。高速クラディングによるレーザーパワー密度と皮膜形成時に生じる希釈との相関を明らかにした。ビードオンプレート溶接において基板の溶込み深さが  $13 \mu\text{m}$  以下となるパワー密度  $1.5 \times 10^5$ ,  $1.6 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  で皮膜形成速度  $100 \text{ mm/s}$  の高速レーザークラディングを行った結果、希釈領域が約  $2 \mu\text{m}$  の高品質な純銅皮膜が形成された。

## 謝 辞

本成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業によって行われた。

## 参 考 文 献

- 1) Chen, S., Huang, J., Xia, J., Zhao, X. and Lin, S. Lin : Influence of processing parameters on the characteristics of stainless steel/copper laser welding, Journal of Materials Processing Technology,

- 222 (2015), 43.
- 2) Miyano, Y., Kunihiro, K., Yoshihiro, S. and Yasushi, K.: Evaluation of Antibacterial ability of pure copper and copper alloy, *Journal of the JRICu*, 48-1, (2009), 290.
  - 3) Suzuki, S., Miyakusu, K., Sato, Y., Kikuchi, Y. and Kawakami, H.: Antimicrobiability of Cu Contained Stainless Steels 100-8 (2014), 97.
  - 4) Grass, G., Braun, J. and Nies, D.: Survival of bacteria on metallic copper surfaces in a hospital trial, 87 (2010), 1875.
  - 5) Gupta, D. and Sharma, A. K.: Copper coating on austenitic stainless steel using microwave hybrid heating, *Proc. IMechE* (2011), 132.
  - 6) Zhao, H., Huang, Z. and Cui, J.: Electroless plating of copper on AZ31 magnesium alloy substrates, *Microelectronic Engineering*, 85-2 (2008), 253.
  - 7) Ubara, T., Asano, H. and Sugimoto, K.: Heat transfer enhancement of falling film evaporation on a horizontal tube by thermal spray coating, *Applied Sciences*, 10-5 (2020).
  - 8) Chis, M. C. and Cojocaru, M. O.: Adhesion prediction on metal thermal spray coatings, *Surface Engineering*, 21-1 (2005), 72.
  - 9) Yang, G. J., Li, C. J., Li, C. X., Kondoh, K. and Ohmori, A.: Improvement of adhesion and cohesion in plasma-sprayed ceramic coatings by heterogeneous modification of nonbonded lamellar interface using high strength adhesive infiltration, *Journal of Thermal Spray Technology*, 22-1 (2013), 36.
  - 10) Buytoz, S., Orhan, A., Gur, A. K. and Caligulu, U.: Microstructural Development of Fe-Cr-C and B4C Powder Alloy Coating on Stainless Steel by Plasma-Transferred Arc Weld Surfacing, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38-8 (2013), 2197.
  - 11) Shayanfar, P., Daneshmanesh, H. and Kamal, J. :Parameters Optimization for Laser Cladding of Inconel 625 on ASTM A592 Steel, *Journal of Materials Research and Technology*, 9-4 (2929), 8258.
  - 12) Asano, K., Tsukamoto M., Funada M., Sakon Y., Abe N., Sato Y., Higashino R., Sengoku M. and Yoshida M.: Copper film formation on metal surfaces with 100 W blue direct diode laser system, *Journal of Laser Applications*, 30-3 (2018), 032602.
  - 13) Asano, K., Tsukamoto, M., Funada, Y., Sakon, Y., Morimoto, K., Sato, Y., Masuno, S., Hara, T. and Nishikawa, H.: Development of Multiple Laser Beam Irradiation Method for Precision Laser Cladding of Metal, *The review of laser engineering*, 46-10 (2018), 604.
  - 14) Spisz, E. W., Weigand, A. J., Bowman, R. L. and Jack, J. R.: NASA Technical Note, NASA TN D-5353 (1969), 1-21.
  - 15) Asano, K., Tsukamoto, M., Sechi, Y., Sato, Y., Masuno, S., Higashino, R., Hara, T., Sengoku, M. and Yoshida, M: Laser metal deposition of pure copper on stainless steel with blue and IR diode lasers, *Optics and Laser Technology*, 107 (2018), 291.
  - 16) Blue Diode Laser Module with World's Highest Class of Power and Brightness to be Commercialized (2018), [https://www.nedo.go.jp/english/news/AA5en\\_100363.html](https://www.nedo.go.jp/english/news/AA5en_100363.html), Accessed 7 August 2021.