学術論文

レーザクラッディングにおけるビームプロファイルが 皮膜特性に及ぼす影響

谷川大地*,阿部信行**,塚本雅裕**,林 良彦** 山崎裕之**,辰巳佳宏***,米山 三樹男***

> *大阪大学大学院(〒565-0871 吹田市山田丘 2-1) **大阪大学接合科学研究所(〒567-0871 茨木市美穂ヶ丘 11-1) ***大阪富士工業(㈱(〒660-0811 兵庫県尼崎市常光寺 1-9-1) tanigawa@jwri.osaka-u.ac.jp

Influence of Laser Beam Profile on Cladding Layer

TANIGAWA Daichi, ABE Nobuyuki, TSUKAMOTO Masahiro, HAYASHI Yoshihiko, YAMAZAKI Hiroyuki, TATSUMI Yoshihiro and YONEYAMA Mikio

(Received November 27, 2013)

Laser cladding is one of the useful methods for improving the quality of wear and corrosion resistance of material surfaces. In order to generate the sound cladding layer which has smooth surface and low dilution, optimizing the cladding parameter is necessary. The Ni-base self-fluxing alloy was deposited on SUS304 plate surface with direct diode laser. The influence of the laser beam profile were investigated on surface appearance and dilution of the cladding layer with a high speed video camera. The laser beam of the direct diode laser was shaped for improving the quality of the cladding layer with a copper mask. The surface appearance and Vickers hardness was improved by beam shaping.

Key words : Laser cladding, Thin cladding layer, Ni-base self-fluxing alloy, Beam profile, Dilution

1. 緒 言

近年、産業機器などの部材が曝される環境が過酷化して いる.このため、材料表面の性能を向上するために、異種 材料を基板表面に溶着することによる表面処理が行われて いる.このような表面処理は、溶射法やプラズマ粉体肉盛 溶接によって行われてきた^{1),2)}.しかしながら、一般的に 溶射法によって形成される皮膜は,基板との密着性が低く, 緻密な皮膜の形成が難しいといった問題がある. これに対 し、プラズマ粉体肉盛溶接では密着性が良好で、緻密な皮 膜の形成が可能であるが、入熱量が大きいため、母材の変 形などの熱影響や、母材が皮膜に溶け込むことによる希釈 の発生を引き起こしやすいといった問題がある. これらの 手法に対して、レーザを用いて粉末状の材料を溶融するこ とで、皮膜を形成するレーザクラッディングにおいては、 入熱量を小さくすることが可能となる、このため、レーザ クラッディングでは母材の熱影響が小さく、皮膜の希釈が 少ない良好な皮膜を形成することが可能となる^{3),4)}.現在. レーザクラッディングでは、一般的に kW クラスの大出力 レーザを用いることで、数mm 程度の厚い皮膜が形成さ れている^{5),6)}.大出力レーザによるクラッディングでは. 厚肉の母材に対しては、良好な皮膜を形成することが可能 である.しかしながら,投入熱量が大きくなるため厚さが

比較的薄い母材へ適用すると、熱影響が大きくなりやすい という問題がある.このため、薄肉母材に対してレーザク ラッディングを適用するためには、低出力のレーザを用い て、数百 µm 程度の薄い皮膜を形成することが有効である と考えられる. 数百 µm 程度の薄く低希釈な皮膜を形成す るためには、レーザクラッディングに関するパラメータを 正確に制御し、入熱量を低減することが必要である、レー ザクラッディングに関するパラメータとしては、レーザ出 力,掃引速度,オーバーラップ率やビームプロファイルな どが挙げられる.これらのパラメータは、レーザ照射時に おける粉末の溶融挙動に大きく関わっていると考えられ る. レーザ出力, 掃引速度およびオーバーラップ率が変化 すると、単位長さあたりの入熱が変化し、溶融不足や過剰 入熱による基板溶融が起こる可能性がある. レーザ強度に 分布が存在すると、材料粉末が均一に溶融せず、 平滑な皮 膜が形成されない可能性がある.このため、これらのパラ メータを精密に制御することによって、低希釈で、平滑な

 Table 1
 Chemical composition of Ni-base self-fluxing alloy.

Cr	Si	В	Fe	С	Ni	$\begin{array}{c} Particle\\ size(\mu m) \end{array}$
16.0~18	.0 3.9~4.9	3.2~3.5	3.0~3.5	0.8~1.0	Bal.	55~65

皮膜を形成することが可能となると考えられる. 本研究で は、低入熱クラッディングの基礎的特性を検討するために、 300 W 級のダイレクトダイオードレーザを用いて、厚さ3 mmの SUS304 基板上に Ni 基自溶性合金皮膜の形成を行っ た。材料粉末は基板上にあらかじめ静置することによって 供給し、集光ビームスポットを皮膜上で掃引することに よって、皮膜を形成し、レーザ出力、掃引速度およびオー バーラップ率が皮膜特性に与える影響について調べた.皮 膜の希釈に関しては、断面のビッカース硬さを測定するこ とで評価を行った. 形成される皮膜のビッカース硬さの目 標値を 650 HV としている. 形成される皮膜の厚さが薄い ため、希釈の影響を考慮して使用したビッカース硬さの設 計値が 810 HVの Ni 基自溶性合金粉末を使用した.次に, ハイスピードカメラを用いて皮膜の形成現象を高速度観察 することで、ビームプロファイルが皮膜形成プロセスに与 える影響を調べた. 高速度観察によって得られた結果を基 に、ビームプロファイルの制御を行うことで、皮膜の表面 形状および希釈の改善を行い、良好な皮膜が得られること を明らかにした.

2. 実験方法

2.1 供試材料

皮膜材料としては、Ni 基自溶性合金粉末を用いた. Table1 に使用した Ni 基自溶性合金粉末の化学組成を示す. Ni 基自溶性合金粉末の粒径は 55-65 μm とした. 基板材料 は SUS304 ステンレス鋼板を用いた. 基板の大きさは 50 mm^w×50 mm^l×3 mm^t とした. 実験を行う前には、アルミナ グリットを用いて基板に対してブラスト処理を行った.

2.2 実験装置

レーザクラッディングの実験装置の模式図を Fig.1 に示 す. この装置は、ダイレクトダイオードレーザ、XY ステー ジ、ハイスピードビデオカメラおよびメタルショートアー クランプで構成されている. ダイレクトダイオードレーザ



Fig. 1 Schematic diagram of experimental system.



Fig. 2 Laser beam profile of direct diode laser.



Fig. 3 Schematic diagram of laser scanning method.

は定格出力が 300 W である. 集光スポットは Fig. 2 に示 すように、長径および短径が 3.24 mm×0.52 mm の楕円ビー ムである. レーザ照射方法の模式図を Fig.3 に示す. Fig. 3 に示したように, XY ステージ上に SUS304 基板を 固定し、そのステージを制御することで、ビームの短径方 向にレーザ集光スポットを掃引した. 短径方向に 10 mm 掃引後, ビーム長径方向にシフトした後, 再びビーム短径 方向に集光スポットを掃引させた. ここで, ビームがシフ トしたときの集光スポットの重なり率をオーバーラップ率 とした. オーバーラップ率は、ビームの長径をD、ビーム の重なり幅をdとした時, Overlap rate = $d/D \times 100[\%]$ と して計算した. レーザ出力を 200 W, 220 W および 240 W, 掃引速度は5 mm/s, 10 mm/s および 15 mm/s で, オーバー ラップ率を95%,90%,85%および80%と変化させて実 験を行った. 材料粉末は, 基板上に 100 µm および 200 µm の厚さで静置することで供給した.

成膜時の現象については、250 W のメタルショートアー クランプを用いて照明を行い、ハイスピードカメラを用い て撮影速度 500 fps で観察を行った.照明用のメタルショー トアークランプ光は、集光レンズを用いて直径 10 mm の 大きさで基板上に集光した.観察はビードが形成される際 の現象と,溶融池付近の材料粉末の挙動が見えるようにし、 レーザの掃引方向に対して垂直方向で 30° 上方から観察を 行った.また、レーザの散乱光を除去するため、バンドパ スフィルターを用いて撮影を行った.皮膜の評価として、 表面および断面を光学顕微鏡によって観察を行い,荷重 0.5 N で皮膜の断面深さ方向のビッカース硬さを測定した.ま た、EDX によって皮膜中の元素濃度を測定することで、 皮膜の希釈を調べた.

3. 実験結果および考察

3.1 レーザ出力,オーバーラップ率および掃引速度が皮 膜に与える影響

掃引速度,レーザ出力およびオーバーラップ率が皮膜特 性に対して及ぼす影響を調べた.材料粉末は100μmの厚 さで静置した.レーザ出力,オーバーラップ率をそれぞれ 220W,95%でそれぞれ一定とし,掃引速度を5mm/s, 10mm/sおよび15mm/sと変化させて形成した皮膜の表面 および断面写真をFig.4に示す.これらの結果から,掃引 速度が5mm/sにおいては,皮膜が基板に対して溶込んで おり,掃引速度を15mm/sまで増加すると,膜表面に球状 に凝固した材料が形成されることがわかった.掃引速度が 10mm/sの条件では,皮膜表面が平滑で,基板に対して溶



Fig. 4 Optical images of cladding layer surfaces and cross sections at the scanning speed of (a), (d) 5, (b), (e) 10 and (c), (f) 15 mm/s.



Fig. 5 Optical images of cladding layer surfaces and cross sections at the laser power of (a), (d) 200, (b), (e) 220 and (c), (f) 240 W.



Fig. 6 Optical images of cladding layer surfaces and cross sections at the overlap rate of (a), (d) 85, (b), (e) 90 and (c), (f) 95 %.

込みが少ない皮膜が形成されることがわかった. 掃引速度 が10 mm/s において, 平滑な皮膜が形成されていたため, 掃引速度を10 mm/s で一定として, レーザ出力を変化させ て成膜を行った. Fig. 5 に掃引速度, オーバーラップ率を 10 mm/ および 95% でそれぞれ一定とし, レーザ出力を 200 W, 220 W および 240 W でそれぞれ変化させて形成し た皮膜の表面および断面写真を示す. これらの結果から, レーザ出力が 200 W の時は皮膜表面に球状に凝固した材 料や, 凹凸(ハンピング)が形成されており, 平滑な皮膜が 形成されていなかった. レーザ出力を 240 W まで増加す ると, 皮膜が基板に対して溶込んでいた.

これらの結果から、掃引速度が遅いときもしくはレーザ



Fig. 7 The area of smooth cladding layer formation.

出力が大きい条件では投入熱量が大きくなるため,基板の 溶融量が大きくなったと考えられる.また,投入熱量が小 さくなる条件においては,基板の温度が十分に上昇しない ため材料粉末が濡れ広がらず,球状に凝固したと考えられ る.

掃引速度およびレーザ出力をそれぞれ 10 mm/s および 220 W で一定として、オーバーラップ率を 85 %,90% お よび 95% でそれぞれ変化させ、オーバーラップ率が皮膜 に与える影響を調べた. Fig. 6 に形成した皮膜の表面およ び断面写真を示す、オーバーラップ率が 85% および 90% のときは、皮膜表面にハンピングが形成されており、平滑 な皮膜が形成されないことがわかった.このことから、オー バーラップ率を増加させることで、皮膜表面が平滑になる ことがわかった.これは、オーバーラップしたレーザがハ ンピングや球状の材料を再溶融させるため、皮膜が平滑に なったと考えられる.

Fig.7に横軸をオーバーラップ率,縦軸を単位長さあた りの入熱量とし,形成した皮膜表面が平滑になる条件範囲 を示す.丸印で示される条件において,ハンピングが少な い皮膜が形成された.この結果から,単位長さあたりの入 熱を大きくすることで皮膜の表面形状を平滑にすることが 可能であることがわかる.また,単位長さあたりの入熱量 が少ないときでもオーバーラップ率を増加させることで皮 膜を平滑にできることがわかった.これらの結果から,オー バーラップ率および単位長さあたりの入熱量を増加させる ことで,平滑な皮膜が形成可能であるということがわかっ た.

掃引速度,レーザ出力およびオーバーラップ率がそれぞ れ 10 mm/s, 220 W および 95% で形成した皮膜のビッカー ス硬さを測定すると,259.4 HV であった.本研究では皮 膜のビッカース硬さの目標値を 650 HV としていることか ら,形成された皮膜には希釈が発生していると考えられる. これらの結果から,掃引速度,レーザ出力およびオーバー ラップ率を制御するのみでは皮膜を平滑にして,希釈の発 生を抑制することができないことが明らかになった.

3.2 高速度観察による, ハンピングおよび希釈発生のメ カニズムの検討

形成した Ni 基自溶性合金皮膜における、ハンピング形 成や希釈発生の原因を調べるため、レーザ照射時の材料粉 末の挙動を高速度カメラによって観察した. 掃引速度, レー ザ出力およびオーバーラップ率をそれぞれ 10 mm/s, 220 Wおよび 95% で一定とした. Fig.8 に高速度観察の説明 図を示す. Fig. 8(a)の点線で囲まれた領域が高速度観察領 域を示しており, 左方向にレーザスポットが掃引されてい る. Fig. 8(b) は高速度観察の結果である. 高速度観察画像 中央部にレーザが照射されており、溶融池が形成されてい る. 奥側には形成された皮膜が, 手前側には静置された材 料粉末が見えている. 高速度観察の結果から, Fig.9 に示 されるように 60 ms の時点で,溶融池の手前側の丸で囲ん だ領域における、未溶融の材料粉末が凝集することがわ かった. この凝集によって、基板表面に材料粉末が存在せ ず,表面が露出した領域が形成されることがわかった.オー バーラップしたレーザが球状に凝固した材料および基板が 露出した領域に照射されることによって、ハンピングの形 成や希釈が発生することがわかった. Fig. 10 にオーバー ラップしたレーザが照射された際の高速度観察結果を示 す. Fig. 10(a)に示すように、球状に凝固した材料にオー バーラップしたレーザが照射されると、球状に凝固した材 料が再溶融し、ハンピングが形成された、形成されたハン



Fig. 8 (a) Optical image of high speed observation area and (b) high speed observation image.



Fig. 9 High speed images of powder gathering (220 W, 10 mm/s and 95%).

ピングはオーラップしたレーザによって何度も再溶融する ことがわかった.このため、オーバーラップ率が高いとき はハンピングが再溶融することによって皮膜が平滑になっ たと考えられる.Fig.10(b)から、基板が露出した領域に オーバーラップしてきたレーザが照射されることで皮膜と 基板が同時に溶融していることがわかる.このとき、溶融 した基板が皮膜に混ざりこむことによって、Ni 基自溶性 合金皮膜が SUS304 基板によって希釈されたと考えられ る.これらの結果から、材料粉末の凝集が、皮膜の表面に ハンピングの形成や、皮膜の希釈を引き起こしていると考 えられる.

Fig. 11 (a) に実験に用いたレーザのビームプロファイル, Fig. 11 (b) にプロファイルの断面模式図を,Fig. 11 (c) に高 速度観察結果とレーザ照射部の関係を示す.Fig. 11 (a) お よび(b) から,ビームにはレーザ強度が高く一定強度と なっている領域Aとレーザ強度が低い領域Bの2つの領 域が存在することがわかった.領域Aの幅は0.8 mm,領 域 Bの幅は左右それぞれ1.2 mmである.Fig. 11 (c) から, 領域Aの照射部においては溶融池が形成されているが, 領域Bの照射部においては材料粉末が凝集していること がわかる.これは,領域Bはレーザ強度が低いため,粉 末の粒子表面のみが溶融し,液体となった粒子表面の表面 張力によって凝集が発生したと考えられる.レーザの長径 が 3.24 mmであるのに対し,溶融池の幅が約1.1 mmであ



Fig. 10 High speed image of (a) hump formation and (b) layer and substrate melting. (220 W, 10 mm/s and 95%)



Fig. 11 (a) Laser beam profile of direct diode laser (b) schematic diagram of laser intensity of direct diode laser and (c) the optical image of laser irradiated area.

114 学術論文 谷川, 阿部, 塚本, 林, 山崎, 辰巳, 米山: レーザクラッディングにおけるビームプロファイルが皮膜特性に及ぼす影響

ることからも、領域 A のみが溶融池を形成しており、領 域 B は材料粉末を凝集していると考えられる.このため、 材料粉末の凝集を抑制するためには、領域 B を除去する ことが有効であると考えられる.

3.3 皮膜特性改善のためのビーム整形

高速度観察から、ビームにレーザ強度の低い領域が存在 すると、ハンピングの形成や希釈が発生することがわかっ た.そこで、レーザ強度が低い領域を除去することでビー ムを整形し、ビームプロファイルが皮膜特性に与える影響 を調べた.Fig.12に示すような中央部に幅0.8 mm、長さ 20 mmの大きさのスリットを形成した銅製のマスクを用 いて、レーザ強度が低い領域を除去した.ここで、スリッ トの幅は Fig.11 (a)の結果から、レーザ強度が高い領域の みを透過するように設計している.また、レーザスポット の位置決めを容易にするためにスリットの長さを20 mm とした.スリットを透過後のレーザの広がりの影響を抑え るため、スリットは粉末から1 mm 離れた位置に固定した. Fig.13 に整形後のビームプロファイルを示す.この結果 から、マスクを用いることで領域 B が除去され、レーザ 強度が均一なビームが形成されたことがわかる.

未整形ビームと整形ビームを用いて皮膜を形成し,皮膜 の表面およびビッカース硬さの比較を行うことで,ビーム



Fig. 12 Schematic diagram of laser beam shaping.



Fig. 13 Laser beam profile after beam shaping.



Fig. 14 Optical images of cladding layer surfaces (a) before beam shaping and (b) after beam shaping.

整形の効果を調べた. レーザ出力および掃引速度をそれぞ れ 260 W および 10 mm/s でそれぞれ一定として実験を行っ た. レーザのシフト幅は 320 µm で一定とした. 静置粉末 厚さは 200 µm とした. このとき, マスクを粉末の直上に 固定しているため,高速度観察を行うことはできなかった. Fig. 14 に形成した皮膜の表面観察結果を示す. Fig. 14(a) から、未整形ビームを用いて形成した皮膜表面は、大きな ハンピングが形成されていることがわかった.これに対し て Fig. 14(b) に示されるように, 整形ビームを用いて形成 した皮膜表面はハンピングが形成されず、平滑な皮膜が形 成されていることがわかった. ハンピングが形成される原 因は材料粉末の凝集であったことから、ビームを整形する ことによって、材料粉末の凝集が抑制されたと考えられる. 次に, Fig. 15 に形成した皮膜のビッカース硬さ試験の結 果を示す. Fig. 15(a)に示すように、整形ビームを用いて 形成した皮膜の平均ビッカース硬さは 472.1 HV であるこ とがわかった.これに対して, Fig. 15(b)に示すように, ビー ム整形を行うことによって皮膜の平均ビッカース硬さは 681.9 HV まで向上することがわかった.

Fig. 16 に皮膜と基板の界面付近における, EDX による Fe 元素の濃度分析結果を示す.Fig. 16(a)に示すように, SEM 画像左側が皮膜,右側が基板となっている.Fig. 16(b) および(c)から示されるように,未整形ビームによって形 成された皮膜は整形ビームと比較して Fe 元素濃度が高く なっていることがわかる.このことから,未整形ビームに よって形成された皮膜では基板が皮膜に混ざりこむことで Fe 元素濃度が増加しているが,ビームを整形することに よって,Fe 元素の混入が抑制されたと考えられる.Ni 基 自溶性合金中は Fe 元素が増加することによって硬度が低 下する⁷⁾.このため,皮膜中のFe 濃度が低下したことによっ て,整形ビームを用いて形成した皮膜の硬度が向上したと



Fig. 15 Vickers hardness of cladding layers (a) before beam shaping and (b) after beam shaping.



Fig. 16 EDX line analysis of elements at the inter-face between cladding layer and substrate (a) schematic diagram of cross section (b) before beam shaping and (c) after beam shaping.

考えられる.これらのことから,良好な皮膜を形成するためには、レーザ強度が均一なレーザを用いることが有効であることがわかった.

4. 結 言

本研究では、低出力ダイレクトダイオードレーザを用い て、SUS304 基板上に薄い Ni 基自溶性合金皮膜の形成を 行い、レーザ照射条件が皮膜形成に与える影響について検 討を行った.また、レーザ照射時における材料粉末の挙動 の高速度観察を行った.高速度観察の結果をもとに、ビー ム整形を行い、皮膜の表面粗さおよびビッカース硬さの改 善を行った.以下に得られた結果について要約する.

(1) 掃引速度,レーザ出力およびオーバーラップ率を それぞれ変化させて実験を行ったところ,投入熱量が小さ いときは皮膜にハンピングが形成され,大きいときは皮膜 が基板に溶込むことがわかった.オーバーラップ率を増加 させることで,皮膜表面を平滑にすることが可能であるこ とがわかった.また,掃引速度,レーザ出力およびオーバー ラップ率を制御することは希釈を抑制できないことがわ かった.

(2) レーザ照射時における材料粉末の溶融挙動の高速 度観察から,溶融池の周辺の材料粉末が凝集し,基板が露 出した領域が形成されることがわかった.オーバーラップ してきたレーザが,球状の材料および基板露出部を照射す ることによって,ハンピングや皮膜の希釈が発生すること がわかった.材料粉末の凝集は,レーザ強度の低い領域が 粉末に照射されることが原因であることがわかった. (3) 銅製マスクを用いてビームのレーザ強度が低い領 域を除去することによって、Ni基自溶性合金皮膜の表面 形状が改善され、希釈を低下させることができることがわ かった。

参考文献

- Xu, G., Kutsuna, M., Liu, Z. and Yamada, K. : Comparison between diode laser and TIG cladding of Co-based alloys on the SUS403 stainless steel, Surf. Coat. Tech., 201, (2006), 1138.
- Luo, F., Yao, J., Hu, X. and Chai, G.: Effect of laser power on the cladding temperature field and the heat affected zone, J. Iron Steel Res. Int., 18-1, (2011), 73.
- Yongjun, H. and Xiaoyan, Z.: Investigation on cracking behavior of Ni-based coating by laser-induction hybrid cladding, Appl. Surf. Sci., 256, (2010), 5985.
- Brueckner, F., Lepski, D. and Beyer, E. : Modeling the influence of process parameters and additional heat sources on residual stresses in laser cladding, J. Therm. Spray Tech., 16, (2007), 355.
- 5) Tabernero, I., Lamikiz, A., Ukar, E., López, L., Angulo, C. and Urbikain, G. : Numerical simulation and experimental validation of powder flux distribution in coaxial laser cladding, J. Mater. Process Tech., 210, (2010), 2125.
- Silva, M.D., Partes, K., Seefeld, T. and Vollertsen, V.: Comparison of coaxial and off-axis nozzle configurations in one step process laser cladding on aluminum substrate, J. Mater. Process Tech., 212, (2012), 2514.
- Hemmati, I., Ocelík, V., Hosson, J.M.: Dilution effects in laser cladding of Ni-Cr-B-Si-C hardfacing alloys, Mater. Lett., 84, (2012), 69.