② レーザを用いた複合加工*

Laser Hybrid Processing*

米 田 理 史**, 勝 村 宗 英**

Masafumi YONEDA**, Munehide KATSUMURA**

キーワード：レーザー，複合加工，レーザー・アーク複合溶接法，レーザー・プラズマビーム複合溶射法，レーザー・イオンビーム複合加工法，レーザー FRM 成形法

1. は じ め に

科学技術の発展の歴史はものを作る歴史としてみることができる。その基本となるものは、物質・材料であると言っても過言ではない。この物質・材料に関連する科学技術は、他の科学技術分野を展開させるための基盤になるとともに、経済社会の発展にも寄与すると考えられる¹⁾。

物質・材料を物性論的観点からみれば、その基礎的学問分野は、物理学、化学、生物学など多岐に関連している。これらの境界領域における学問・技術の発展およびツールとしての各種ビーム技術の著しい発展につれて、現在では物質・材料を原子・分子レベルで制御することが可能となりつつある。また、技術の高度化・高精度化から、他の分野においても原子・分子レベルでの操作を目標において開発が進んでいる。

これらの研究開発において、ブレイクスルーをもたらすためには、より高度な共通・基盤的技術の開発あるいはハイブリッド化技術の開発が重要となる。

ここでは、このハイブリッド化関連技術という観点から、従来技術にレーザーを複合させた加工法について著者らの行なっている研究もまじえて紹介する。

2. レーザ・アーク複合溶接法

レーザーは単一波長のビームが得られるため高エネルギー密度となる。その適用分野の一つとして熱加工があり、熱処理、切断、溶接用の熱源としても使用されている。しかし、実用面では、薄板への適用はともかく、厚板へのレーザー溶接の適用はなされていない。この最大の原因は能力に比較してレーザー発振機の高価なことにある。このため、深溶け込みまたは溶接速度の高速化を必要とする場合でも、レーザー出力を増大させ装置の高騰を招かないように、低出力レーザーに既存のティグ (TIG) 溶接法やミグ (MIG) 溶接法を複合する研究が試みられている。

レーザー・TIG 複合溶接法については、2kW 未満の比較的低出力のレーザーについて W. M. Steen ら²⁾が報告している。著者らの四国工業技術試験所では、より大出力の 5kW のレーザーを用いて複合溶接の研究を行なっている^{3,4)}。また、同所ではレーザー・MIG 複合溶接法についても検討している⁵⁾。

図 1 および 2 はそれぞれレーザー・TIG 複合溶接法およびレーザー・MIG 複合溶接法の模式図を示す。複合の方法としては、レーザー溶接は上方から行ない、アーク溶接は裏面からする方法もあるが、図 1 および 2 に示すように、アークで母材を溶かし、そのクレータにレーザーを照射する方法を採用している。また、溶接部および表面ビードの保護のため、トレーサノズルが使用される場合が多い。

この複合に関しては以下に示す三つの目的がある。レーザー溶接におけるエネルギー密度は約 10^5 W/cm^2 で、穴あけなどと比較して母材が溶融点に達するまでに時間のかかることが多い。一方、レーザーの

*原稿受付 平成元年 6 月 19 日

**正 員 通産省工業技術院四国工業技術試験所
Member, Government Industrial
Research Institute Shikoku, AIST, MITI

図1 レーザ・TIG 複合溶接法

図2 レーザ・MIG 複合溶接法

吸収率は母材が固体の場合は低いが、溶融すると50～100%と高くなる。このため、あらかじめTIGあるいはMIG溶接で母材を溶融しておけば、レーザーの吸収率は著しくよくなり、レーザーのエネルギーを有効に使用することができる。これが複合の第1の目的である。

第2は、レーザー単独で P_L なる溶け込みになったとすると、レーザー・アーク複合でもレーザーによる溶け込みは P_L になるが、アーク溶接のみでも溶け込み P_T を生じる。つまり、アーク直下には溶融池ができ、クレータを生じている。このクレータの底にレーザーを照射するようになるため、レーザー・アーク複合による溶け込みはレーザー単独の場合より深溶け込みになるからである。

第3は、アーク溶接において生じるアークの不安定さをレーザーで安定化する効果である。つまり、アーク溶接においてよく経験されるように、電流値を低くするとか、ある電流値において溶接速度を限界値以上に速くすると、アークワンダリングを起こした

り、陽極点の不連続移動を起こしアークは不安定となり溶接できなくなる。この場合、レーザーを複合させるとプラズマガスを発生し、このプラズマガスによりアークが安定する。レーザー溶接では、プラズマガスの発生はレーザーの通過を妨げ溶け込みを妨害するが、この現象をうまく利用すればアークの安定に役立たせることができる。

厚板（ここで言う厚板とは、現用されているレーザーの能力から言って厚板という意味である。）の溶接には上述の第1および第2の目的で、薄板には第3の目的で複合される場合が多い。

図3は、TIG単独溶接およびこれにレーザーを複合させた場合のアーク電圧および電流のオシログラフを示す。(a)は溶接速度135cm/min、電流100AでTIG溶接している場合に、レーザーを複合させるとアーク電圧は著しく低くなり、電流値の増加する状態を示している。また、(b)に示すように、溶接速度270cm/minの場合、電流70Aではアーク電圧および電流の不安定さからも分かるように溶接不可能である。しかし、これにレーザーを複合させると、アーク電圧、電流ともに安定し良好な溶接のできることを示している。

図4は出力4kWのレーザー単独およびこれに100～300AのTIG電流を複合させ、軟鋼厚板を溶融させた場合の溶接速度と溶け込みの関係を示したものである。また、図5はレーザー単独溶接および複合溶接の場合の溶け込み状況を示す。レーザー・TIG複合により溶け込みが増加することが分かる。なお、溶け込み深さはレンズの焦点位置に大きく影響されるが、ここで述べた溶接結果はすべて最大溶け込みの得られる位置が選定されている。また、シールドガスとしては、一般に厚板の場合はヘリウムが、薄板の場合はアルゴンが使用される。

前述のように、レーザーの最大の問題点は発振機の価格の高いことである。溶接を対象とした場合、出力5kW以下では薄板のみしか対象にならず用途も限られている。しかし、アーク溶接との複合により、アークは安定し、厚板溶接あるいは高速溶接を可能にする利点がある。

図6は1～5kWのレーザーを使用した場合のレーザー出力が溶接速度と溶け込み深さにおよぼす影響より、5kW以上のレーザーを用いた場合にその溶け込みがどうなるかを見たものである。これより、5kWレーザーと電流300AのTIGを複合させた場合に、それがレーザー単独で何kWの溶け込みになるかを推

図3 レーザ・TIG 複合溶接法のアークの安定性

図4 複合 TIG 電流の溶け込みにおよぼす影響

定すると、溶接速度にもよるが、大体7~9kWに相当することが分かる。このように、5kWのレーザーにTIG溶接機を複合させることで、7~9kWのレーザーに相当する能力を得ることができ、これがレーザー・アーク複合溶接の最大の利点と言える。

3. レーザ・プラズマ複合溶射法

プラズマ溶射は、材料の耐熱性、耐食性、耐摩耗性を向上させる目的で使用される表面被覆法の一つであり、近年脚光を浴びている。しかしながら、その皮膜内部では粒子間の未接合部、粒子内マイクロクラック、素材との密着性の弱さなどの欠点があ

図5 レーザ単独(a)および複合溶接(b)の場合の溶け込み状況

図6 レーザ高出力域のレーザー出力と溶け込みの推定

り、それらを克服することが重要な課題となっている。一方、レーザービームは高エネルギー密度熱源として前述の溶接および切断、表面改質などの分野で広く利用されている。そこで、プラズマとレーザーを複合させ、それぞれの特徴を有効に利用することで、溶射皮膜の改善、新機能性付加などの全く新しい性質を有する皮膜形成が期待できる。

このような目的で、プラズマ溶射皮膜をレーザー再溶融処理することが試みられているが^{6,7)}、レーザー再溶融による溶射皮膜の急激な熱膨張のための微小割れの発生といった問題や、それを防ぐために予熱が必要であるなど、まだ解決されねばならない問題点が数多く残っている。

一方、大森ら⁸⁾は、図7に示すように、溶射直前、直後、同時にしくは飛行溶射粒子にレーザー照射を複合させることにより、従来とは全く異なった皮膜が従来の溶射法よりもファインに、また、PVD, CVDよりも速やかに形成できることを示している。表1は以上のレーザー・プラズマ複合溶射法で期待される効果の一例を列挙したものである。

このレーザー・プラズマ複合溶射法の特徴として次

図7 レーザ・プラズマ複合溶射法におけるレーザーの照射方法

表1 レーザ・プラズマ複合溶射による効果

溶射皮膜の改良点	新しい付加機能
1. 空孔の少ない緻密な膜形成	1. 半導体・超電導体皮膜
2. 粒子間結合の強化	2. 超先端材料
3. 溶射皮膜と基材間の密着力増加	3. 光電池、固体燃料電池
4. 溶射皮膜表面の平滑化	4. その他

図8 レーザ・プラズマ複合溶射装置の模式図

のように考えられている。

- 1) 非常に高温の状態で熱処理を行なうので急加熱、急冷によるクラックの発生がない。
- 2) 基材もレーザーにより溶融させ、皮膜と基材との合金化処理が可能である。
- 3) 基材表面をレーザーにより溶融状態にすることにより従来不可能であったセラミックスなどの硬質基材への溶射が可能である。また、それによりプラストレスの溶射が可能となる。
- 4) 基材、溶射材料、雰囲気を選定し、レーザー熱源による反応性溶射が可能となる。また、それによりレーザー照射部分のみに任意の微細パターンでの成膜が可能となる。

図8はこのようなレーザー・プラズマ複合溶射装置の模式図を示す。プラズマガンは最大出力 80kW、レーザー発振機は最大出力 1kW の CO₂ レーザを用いている。溶射および熱処理は 1~760Torr の任意の雰囲気内に設定可能なチャンバ内で行なわれ、試片は

水平・垂直・回転方向に移動させることが可能である。レーザーノズルはプラズマガンと 45° の方向に設定されていて、ノズルからはレンズ保護および反応ガスとして 1~10kgf/cm² のガスを吹き付け、レーザー照射とプラズマ溶射とを同時に行なうことが可能である。また、レーザーのノズルにはレーザービーム径とほぼ同等の溶射領域を得るためにマスクが取り付けられており、マスク位置を調整することにより、レーザー熱処理を溶射直前、同時、溶射直後の各方法で行なうことができる。

図9はこのようなレーザー・プラズマ複合溶射法による Al₂O₃ の溶射皮膜およびレーザー熱処理部の断面組織を示す。ここでは気孔部を評価するために皮膜に電解銅メッキ⁹⁾が施されており、図中白く観察される部分が貫通気孔の存在を示している。(a)に示す溶射のままの皮膜の断面組織は偏平粒子の積層構造で、その粒界に多量の未結合粒界が認められるのに対し、(b)に示すレーザー処理を行なったものは柱状晶

図9 Al_2O_3 のプラズマ溶射皮膜(a)およびレーザー・プラズマ複合溶射皮膜(b)

図10 レーザ処理した Mo 溶射皮膜の硬度分布

を呈した組織で、貫通気孔はほぼ消滅している。このように、溶射直後の高温状態でレーザー熱処理を行えば、皮膜にクラックが発生することなく気孔を消滅させることができ、溶射皮膜特有の多孔性を改善することが可能となる。

図10はSS材にMoを溶射した直後にレーザーを照射し、基材との合金化を行なった場合の断面のマクロビッカース硬さを示す。合金層の硬度は基材、溶射のままの皮膜層よりも大幅に増大しているのが認められる。このように、複数の素材を複合させ、単独素材以上の性質を引き出すことも可能である。

以上のレーザー・プラズマ複合溶射法は多くの利点を有しているが、さらにその特徴を引き出すために、

図11 マスクを用いたレーザー・プラズマ複合同時溶射

複合同時溶射が検討され始めている。図11はマスク(SUS板に直径2mmの穴がけられている。)を取り付けた状態でレーザー・プラズマ同時溶射を行っている様子を示す。この手法による溶射皮膜の性能あるいは特徴についてはまだ報告がなされていないが、前述の溶射直前、直後のレーザー処理も含め、これらのレーザー・プラズマ複合溶射法の研究はまだ端緒についたばかりであり今後の研究成果が大いに期待される。

4. レーザ・イオンビーム複合加工法

最近イオン注入法による材料表面の加工・改質技術が注目を集めている¹⁰⁾。高エネルギーイオン(10kV～数MV)を用いるイオン注入法は、これまで半導体分野での不純物ドーピング技術として用いられてきた。しかし、近年イオンビームの大電流化が図られ、イオンのコストが大幅に低下しつつあること、また、高精度化、高付加価値化といった材料、製品のハイテク志向の流れにともない、イオン注入

法を利用した一般材料の加工・表面改質の研究がここ数年の間で急激に盛んになってきた¹¹⁾。イオンを利用する加工・表面改質は、(1)原子・分子をイオン化し数 V～数 MV の電位で加速しイオン照射で加工・表面改質を行なうイオン注入、(2)蒸着、スパッタリングなどの皮膜形成技術と前述のイオン照射を組み合わせたイオンミキシングに大別される¹²⁾。

イオンミキシングは基材上に形成した皮膜にイオンを照射する方法、あるいは皮膜形成とイオン照射を同時に行なう方法などがある。これらのイオン応用技術は従来の方法に比べ新しい特徴を有した加工・表面改質の可能性があり、現在、各方面で積極的に研究開発が行なわれている。

四国工業技術試験所では、これらのイオン注入あるいはイオンミキシングにレーザ照射を複合させ、極微小領域での加工・表面改質あるいは活性化イオ

ンビームの開発・利用を試みている。図 12 にレーザ・イオンビーム複合加工装置の模式図を示す。同装置では、可変雰囲気中でのレーザ処理、イオン処理が、それぞれの特徴を生かして操作可能である。また、同時操作も可能な複合ビーム発生装置となっている。同装置の容量は、加速電圧 0.8～40kV (可変)、加速電流 200mA (40kV 窒素ビームにおいて)連続/400mA パルスで、複合されるレーザビーム発生装置は最大出力 5kW の CO₂レーザである。

通産省は、イオンの粒子線ビームを使って超電導素子の開発や半導体材料の極微細加工、細胞、遺伝子改質などの最先端技術を育成するため、関西地区に大型研究施設「イオン工学センター」の建設を進めている。その中で整備計画に入っている主要な装置の一つが、この複合ビーム発生装置である。

一方、レーザによる PVD(レーザ蒸着法: LPVD)にイオンを照射する研究も始められている¹³⁾。図 13 に LPVD 装置の模式図を示す。大出力 CO₂レーザビームを蒸発源としたレーザ蒸着法で、耐摩耗性の優れた硬質 BN 膜を高効率に形成できるが、これにカウフマン型イオンガン(最大 2.5kV)を複合して窒素イオンを補給し、BN 膜の組成制御をしようとするものである。LPVD 法のみでは、非晶質で化学量論的にも母材と異なるものであったものが、この方式によれば、BN の組成比を 1:1 に制御することが可能であり、また、結晶化させ得る可能性が判明している。今後さらにイオン化方式の改善を図ることにより、高硬質 cBN 膜の形成が期待できるとして

図 12 レーザ・イオンビーム複合加工装置の模式図

図 13 レーザ蒸着法 (LPVD) 装置の模式図

5. レーザを用いた FRM 成形法

金属マトリックスに炭素繊維や無機繊維を分散させた FRM 材は比剛性および比強度が高いことから、宇宙、航空用の構造部材として適用されつつあり、その製造法として溶湯鍛造法、熱間圧延法や HIP 法などが開発されている¹⁴⁾。しかしながら、1mm 以下の薄板については、現在のところ製造が困難とされている¹⁵⁾。森田ら¹⁵⁾は FRM 薄板製造を目的としてレーザを用いた FRM 成形法を開発している。その原理は、整列された複数の FRM プリフォームワイヤ (一方向 SiC 繊維強化 Al プリフォームワイヤ、ワイヤ径: 0.5mm, 繊維体積率: 0.4, マトリックス: Al100) にレーザビームを照射し、圧延ロールによりワイヤ間を接合・成形するというものである。

図 14 はレーザを用いた FRM 成形法の模式図を

示す。FRM ワイヤは間隙なく整列されて圧延ロールに供給され、この圧延ロール直前で線状あるいは面状に集光されたレーザビームが FRM ワイヤに照射される。FRM ワイヤはレーザビームを吸収して昇温し、軟化あるいは一部溶融する。このような状態になった FRM ワイヤを圧延ロールで加圧することにより、ワイヤ同士が接合して FRM の薄板が得られるというものである。

図 15 は 10 本のワイヤを Ni ワイヤで編み、ステンレス鋼板に固定して圧延ロールに送給する実験の模式図を示す。レーザ発生装置として CO₂ レーザを用い、可能な限り圧延ロールの加圧部近傍にレーザを照射するため、線状のパワー密度分布を有するポリゴンスキャナーが用いられた。

図 16 は接合率の評価結果を示す。ここで、接合率は圧延されたプリフォームワイヤを半分の厚みまで研磨後、ワイヤに対して横方向の 9 ケ所の接合部をワイヤの長手方向に 4mm おきに計 5 回繰返し光学顕微鏡により観察して接合の良否を判定し、接合

図 14 FRM シートのレーザ成型法

図 15 レーザを用いた FRM の圧延実験装置の模式図

図 16 レーザ成型法による FRM の接合率

率＝接合良の数/接合箇所(45)×100%として求められた。図中には、全ワイヤから求めた接合率とともに内側の6本のワイヤから求めた接合率も示されている。両接合率ともに、圧延速度の増加すなわち入熱の減少にしたがって減少しているが、内側6本のワイヤの接合率は実験の範囲内で60～95%の接合率となっている。また、顕微鏡観察結果では、接合部は組織的に良好であることが示されており、レーザー成形法では従来技術に比較して加熱速度が速いため、繊維に与える損傷も少なくなるとしている。

6. お わ り に

複合という考え方は、従来から材料分野ではもちろんのこと、加工プロセスにおいても導入されている。最近では、本稿で数例を紹介したように先端技術の分野においても適用し始められつつある。すでに成果を出し始めている技術もあるが、今後の成果に大きな期待が寄せられているものもある。

今回注目したレーザを用いた複合加工の主たるものは、加工の高効率化、素材の高性能化、新物質創製などを目標としている。科学技術会議においても、「革新的な物質・材料の創製」の観点から、図 17 に模式的に示すように表面・界面の構造を原子・分子レベルで理解した異種物質間界面の反応、接合性などの解明の重要性が唱えられている。本稿で紹介したレーザを用いた複合加工が、この方面での技術開発の一助になれば幸いである。

図 17 諸先端技術の関連

参 考 文 献

- 1) 科学技術会議 物質・材料系科学技術部会報告書; “物質・材料系科学技術に関する研究開発基本計画について” (1987)
- 2) 例えば, W. M. Steen and M. Eboo; Metal Construction, 7 (1979) 332
- 3) 浜崎, 勝村, 松田, 永田; 高温学会誌, 9-2 (1983) 79
- 4) 浜崎, 勝村; 機械と工具, 4 (1984) 25
- 5) J. Matsuda, A. Utsumi, M. Katsumura, M. Hamasaki and S. Nagata; Joining & Materials, 1-1 (1988) 31
- 6) N. Iwamoto, N. Umesaki, Y. Katayama and H. Kuroki; Surf. Coat. Technol., 34-1 (1988) 59
- 7) R. Sivakumar and B. L. Mordike; Surf. Eng., 4-2 (1988) 127
- 8) 大森, 鎌田; 大阪大学溶接工学研究所超高エネルギー密度熱源センターだより, 5 (1989) 28
- 9) 李, 大森, 荒田, 永山, 森本; 溶接学会全国大会講演概要, 42 (1988) 198
- 10) 例えば, 岩木; 日本鉄鋼協会 第14回白石記念講座資料(1987) 65
- 11) 例えば, 日本学術会議主催; シンポジウム“イオン注入による表面改質” (1988)
- 12) M. Sato; Proc. 5th Symp. Ion Source and Ion Ass. Tech., (1981) 349
- 13) 峰田, 木幡, 袴塚, 安永, 小原, 白鳥, 池田; 昭和61年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, (1986) 313
- 14) 植村, 河合, 牧, 渡辺編; 現代化学増刊8“新しい複合材料と先端技術” 東京化学同人(1986) 201
- 15) 森田, 平本, 奥村, 村上, 宇都; 溶接学会 第120回溶接法委員会資料, SW-1891-88, (1988)