

HVOF溶射した鋳鉄溶射皮膜のレーザ処理*

桑嶋 孝幸**、齋藤 貴**、堀江 皓***

鋳鉄粉末をHVOF溶射して熱処理及びレーザ処理を行い、処理条件の皮膜組織への影響について検討を行った。鋳鉄粉末はガスアトマイズ法で作製したFe-C-Si粉末とFe-C-Si-Al粉末の2種類を、金属基材はAC-4Aを使用した。HVOF溶射した皮膜中には黒鉛相は認められなかった。電気炉での熱処理では、1073K以上の処理条件で黒鉛相が観察された。レーザ処理した皮膜では、Fe-C-Si-Al粉末を溶射した皮膜に黒鉛相が観察された。

キーワード：鋳鉄粉末、HVOF溶射、熱処理、YAGレーザ、黒鉛組織

Post Laser Treatment of Cast Iron Coatings Sprayed by HVOF spraying

KUWASHIMA Takayuki, SAITOH Takashi and HORIE Hiroshi

Effects of YAG laser post treatment conditions on cast iron coatings micro structure sprayed by HVOF spraying were studied and compared with heat treated ones that was carried out using electric furnace in the vacuum atmosphere of 1×10^{-3} Pa. Gas atomized Fe-C-Si powder and Fe-C-Si-Al powder were used as sprayed materials and Al-Mg-Si alloy (JIS AC-4A) was used as substrate. Graphite phase was not observed in sprayed coating. But it was observed at the processing temperature of 1073K or more. After YAG laser post treatment, graphite phase was observed in the coating micro structure using Fe-C-Si-Al powder but it was not observed using Fe-C-Si powder.

key words : cast iron powder, HVOF spraying, heat treatment, YAG laser, graphite phase

1 緒 言

今日、自動車産業をはじめとする産業界では、製品の重量低減による省エネルギーの推進や性能向上のために軽金属材料への材料代替が進んでいる。特にアルミニウム合金は低密度で高い熱伝導性を示すため自動車部品などの多くの工業的用途で使用されている。しかし、アルミニウム合金は軟らかく、耐摩耗性に乏しいという欠点がある。この欠点を補い摩擦摩耗特性に優れた軽金属材料の開発が求められている。

一方、鉄鋼材料のひとつである鋳鉄は、加工性、成形性に優れ、材料内に含まれる遊離黒鉛が優れた固体潤滑材料であるといわれている。そのため機械構造物の摺動面に使われることも多い。この優れた特性を軽金属材料に付与して複合化すれば摩擦摩耗特性に優れた軽金属複合材料が創製されることが考えられる。

軽金属材料と鋳鉄を複合化する方法として機械的接合や溶接などが上げられる。機械的接合の特徴としては各種材料の接合が可能であるが、ボルトやリベットを用いるため製品形状に限りがあり、溶接に比べて作業能率が悪い。溶接は自動化しやすく作業能率は上がるが、接合するもの同士を溶融させるため接合界面に脆弱な金属間化合物が形成されるなどの問題がある。表面改質技術の一つである溶射法は、成膜速度が速く複雑な曲面構造物

や、大型構造物の表面に皮膜を安価に形成できる。金属、プラスチック、セラミック、サーメットなどほとんどの材料をコーティングできるなどの優れた特徴を有している。溶射皮膜と基材は機械的なアンカー効果によって密着しているため、鉄鋼材料を軽金属材料へ溶射をしても界面に脆弱な金属間化合物が生成されず複合化が可能であると考えられる。

溶射加工プロセスにおいて溶射材料は急熱、急冷されるため、アトマイズ鋳鉄粉末を用いた溶射では、皮膜中に黒鉛相を形成することは非常に難しく¹⁾、皮膜組織の改善が必要となる。熱処理は皮膜組織の改質に有効な手段であり、皮膜中に黒鉛層の形成が期待できる。レーザによる後処理も有効な手段の一つである。レーザ処理の特徴としては、①局部処理性：必要な部分のみ選択的に処理できる。②処理領域の制御性：処理深さ、処理面積が精密に制御できる。③適応の容易性：複雑な形状の一部や、パイプの内面のみの処理ができる。などが上げられる。溶射皮膜のような表面組織のみの改質が必要な場合、これらの特徴をもつレーザ処理は非常に効率的である。

そこで本研究では鋳鉄溶射皮膜の組織改善を目的として熱処理とレーザによる後処理について検討を行い、それに伴う皮膜組織及び性状の変化について検討した。

* 夢県土いわて戦略的研究推進事業

** 材料技術部

*** 岩手大学工学部

2 実験方法

2-1 供試材

溶射材料は、ガスアトマイズ法で作製した鋳鉄粉末を使用した。鋳鉄粉末はFe-Si-C系の粉末と黒鉛化促進元素といわれているAlを約3.5%添加した粉末を使用した。(以下、ガスアトマイズ粉末でAlを添加した粉末をGA粉末、添加されていないものをGO粉末と記す。)基材には熱処理用として板状(幅50mm×長さ60mm×厚さ5mm)のSUS304を、レーザ処理用として板状(幅60mm×長さ70mm×厚さ5mm)のAC4A(Al-Si-Mg合金)を用いた。溶射に際しては、基材をアセトンで脱脂後、ブラスト処理を行い表面を粗面化、清浄化して溶射に供した。

2-2 溶射条件及び熱処理条件

溶射法は代表的な溶射法の一つである高速フレイム溶射法(以下HVOF溶射法と記す。)を採用した。HVOF溶射法は、半熔融状態にした溶射粒子を加速して基材に吹き付けて皮膜を形成する溶射方法である。使用した溶射装置はスルザーメテコ社製のDJ溶射装置である。溶射装置は6軸多関節ロボットに取り付け、プログラムによる自動方式で、皮膜厚さは約250μmになるようにパス数を調整して行った。燃料ガスは酸素とプロピレンガスを使用した。

溶射した試験片の熱処理は、加圧雰囲気炉を使用して 1.33×10^{-3} Paの真空中で行った。処理条件は、昇温速度10K/minで最高温度673K、873K、1073K、1273Kまで加熱し、1時間保持10K/minで炉冷した。

2-3 レーザ処理条件

鋳鉄溶射皮膜の熱処理において基材が軽金属材料の場合、基材の融点が溶射皮膜より低いため熱処理温度が制限されてしまう。そこでエネルギーの集中度が高く、局部加熱が可能であるレーザにより鋳鉄溶射皮膜の後処理を行った。レーザ発信機は最大出力3kWのYAGレーザ装置(石川島播磨重工業(株)製iLS-YC25C)を使用した。レーザは光ファイバーで発信機からレーザヘッドへ伝送した。レーザ加工ヘッドは6軸多関節ロボットに取り付け、所定の移動速度で移動させながら、皮膜表面へレーザを照射した。また皮膜表面へ照射されるレーザのエネルギー密度を変えるためレーザの焦点位置を調整してデフォーカスする方法を採用した。レーザ出力を2.0kWと一定にして、デフォーカス距離を±0、30、60、90mmの4水準、移動速度を150、300、600、1200cm/minの4水準としてこれらを組み合わせた16条件について試料を作成した。

2-4 評価方法

溶射後熱処理を施した板状試験片を精密切断機で切断して樹脂に埋め込み自動研磨機で研磨した。組織観察に

際しては3%ナイトルでエッチングをし、光学顕微鏡、SEMによる組織観察を行った。溶射皮膜の構造解析はX線回折及びEPMAを使用して面分析を行った。熱処理皮膜のX線回折はX線回折装置((株)リガク製RINT2200)を使用した。分析条件はCu管球を使用し、管電圧40kV、管電流30mAで行った。レーザ処理皮膜は、処理部分の領域が小さいため微小部X線回折装置((株)リガク製RINT2550V/PC)を使用した。分析条件はCr管球を使用し、管電圧40kV、管電流250mAで測定した。X線は50μmにコリメートして測定を行った。

面分析はEPMA(日本電子(株)製JXA-8900M)を使用した。特性エックス線の検出は波長分散型の検出器を使用して測定を行った。

皮膜硬さはマイクロビッカーズ硬さ計((株)アカシ製MVK-H100A2)により評価した。試験条件は、荷重0.98N、保持時間15secで10点を測定し、その平均を求めた。

3 実験結果及び考察

3-1 熱処理の溶射皮膜組織への影響

図1に熱処理溶射皮膜断面の光学顕微鏡組織を示す。熱処理をされていない溶射皮膜(以下As spray皮膜と記す)中に大きな未熔融粒子が確認できる。また、溶射皮膜特有のラメラ構造や気孔が観察される。熱処理温度873K以下の皮膜では組織変化はほとんどみられない。これに対して処理温度1073K以上で処理した皮膜組織ではラメラ組織はうすれ、マトリックス中に黒い粒状の組織が均一に分布している。

次に各熱処理溶射皮膜断面の反射電子線像とEPMAによる面分析結果を図2に示す。面分析はC-Kα, O-Kα, Fe-Kαの分析を行った。As spray皮膜の酸素分析結果に注目すると、層状に濃度の高い部分が認められる。こ

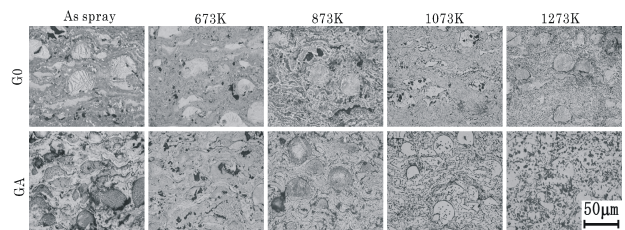


図1 溶射皮膜断面の光学顕微鏡組織

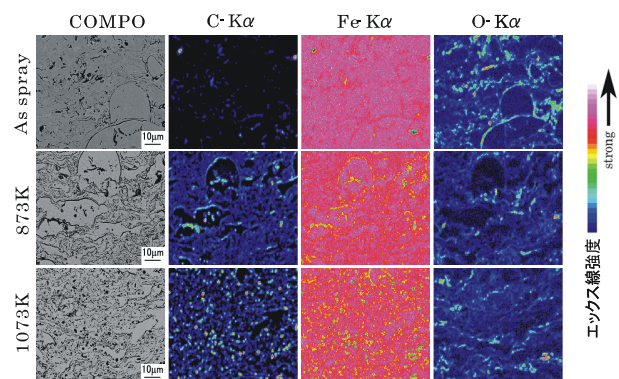


図2 溶射皮膜断面のEPMA分析結果

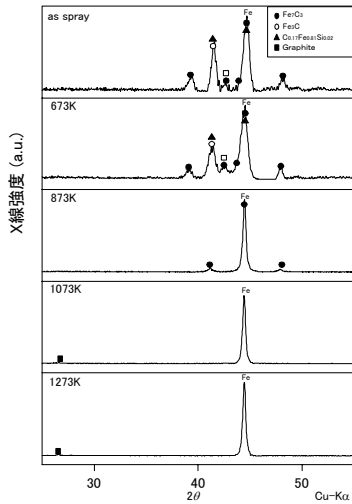


図3 溶射皮膜 X線回折結果

これは溶射中に酸化した酸化物層であると考えられる。また、C 濃度の高い部分はほとんど認められず全体的に存在している。熱処理温度 673K 以下の皮膜では、As spray 皮膜とほぼ同様の分析結果となった。熱処理温度 1073K 以上の皮膜では C 濃度の高い部分が分布していることが確認できる。これにより図 1 で認められた黒い粒状の組織は C に富んだ組織であることがわかった。

図 3 に X 線回折結果を示す。As spray 皮膜では Fe のピークはブロードになり Fe₃C、Fe₃C₂ などの Fe の炭化物のピークが認められた。この原因は、溶射時に基材に衝突した溶射粒子は急冷されるため、Fe は種々の濃度の C を含んだ過飽和固溶体になっているためと考えられる。熱処理した皮膜の結果に注目すると 673K で処理した皮膜は、Fe のピークはシャープになり、Fe 炭化物のピークはほとんど認められない。また、処理温度 1073K 以上の皮膜では黒鉛のピークが認められる。これは C を含んだ過飽和固溶体から微細な黒鉛が析出したためと考えられる。なお、面分析の結果では 0 の濃度が高い部分が認められ、酸化物が皮膜に生成されたと考えられるが、X 線回折では同定できなかった。

3-2 皮膜組織に及ぼすレーザ処理条件の影響

はじめに処理条件の影響を調べるために G0 皮膜を用いてレーザ処理を行った。図 4 に G0 溶射皮膜表面のマクロ写真を、図 5 に G0 溶射皮膜断面の光学顕微鏡組織を示す。デフォーカス距離が小さく、移動速度が遅い、すなわち単位時間あたりのエネルギー密度が高い条件で処理した皮膜は溶融部が認められ、エネルギー密度が小さくなるにつれて溶融部は認められなくなった。デフォーカス距離 +90mm で処理した皮膜では、組織変化はほぼ認められず、またデフォーカス距離 ±0mm、+30mm では皮膜の溶融部が認められた。これらの中間のデフォーカス距離 +60mm では、皮膜組織に大きな変化見られなかったが、大きな溶融部も認められなかった。そこでデフォーカス

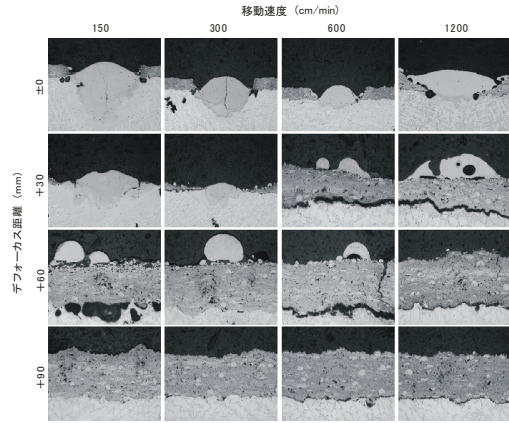


図4 レーザ処理した溶射皮膜表面のマクロ写真 (溶射皮膜 : G0)

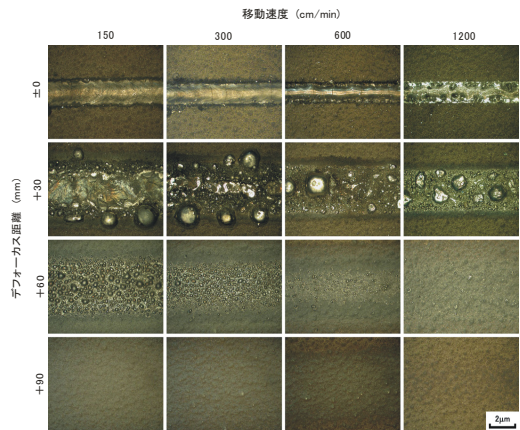


図5 レーザ処理した溶射皮膜断面の光学顕微鏡組織 (溶射皮膜 : G0)

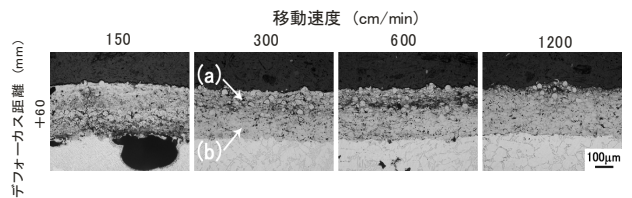


図6 溶射皮膜断面の光学顕微鏡組織 (溶射皮膜 : GA)

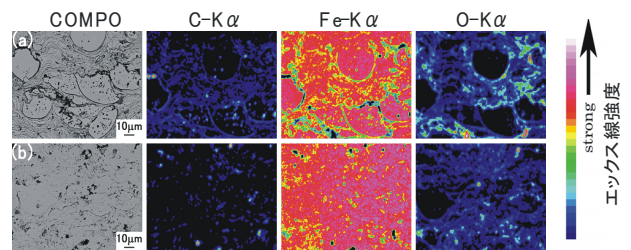


図7 溶射皮膜断面の EPMA 分析結果 (溶射皮膜 : GA)

距離 +60mm を最適な処理条件と考え、以下この条件で GA 試料についてレーザ処理を行い、その影響について検討した。

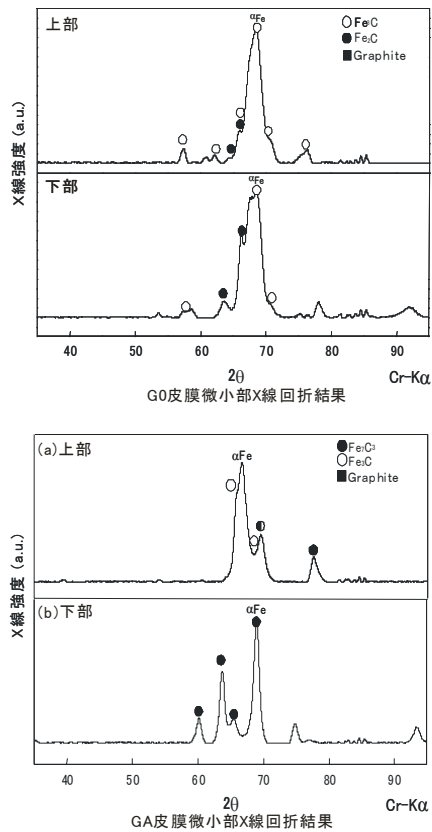


図8 溶射皮膜の微小部X線回折結果

図6にGA皮膜断面の光学顕微鏡組織を示す。G0、GA皮膜ともに移動速度150cm/minでは基材が溶融してしまい接合界面に大きな気孔が認められるが、移動速度300cm/min以上では基材は溶融していない。またGA皮膜では、G0皮膜で認められた皮膜表面の溶融部は認められず、(a)の皮膜上部に溶融はしていないが何らかの組織的变化が起こった部分(以下熱影響部と記す。)が認められた。また、移動速度が速くなるにつれて熱影響部は狭くなっている。このように溶射皮膜より融点が高い基材の場合でも、レーザ処理条件を適切に選択することによって皮膜のみの熱処理が可能であることが判明した。

図7にデフォーカス距離+60mm、移動速度300cm/minで処理したGA皮膜断面の反射電子線像とEPMAによる面分析の結果を示す。反射電子線像を見ると、図6に示したGA皮膜の熱影響部(a)では、ラメラ状の組織の濃淡がはっきりとし、黒い粒状の組織が認められた。一方、皮膜下部の(b)では組織変化はあまり認められずAs spray皮膜と同じ組織となっている。また、面分析結果に注目すると、(a)で認められた黒い粒状の組織はC濃度が高いことがわかった。(a)、(b)部分と、同条件で処理したG0皮膜の上部と下部の微小部X線回折結果を図8に示す。GA皮膜の下部(b)ではAs spray皮膜と同様の結果となり大きな変化は認められない。上部の(a)ではFeのα相のピークはブロードとなり低角度側にシフトしている。また、Fe₇C₃の様々なFe炭化物のピークと、黒鉛のピークが認められた。

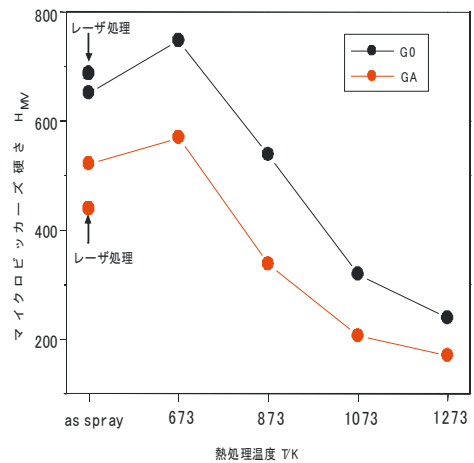


図9 熱処理温度の皮膜硬さへの影響

G0皮膜では黒鉛のピークが認められなかった。これはAlの添加により、レーザ処理のような急熱、急冷による処理でも黒鉛が析出しやすくなっているためであると考えられる。

3-3 熱処理条件のマイクロビッカース硬さへの影響

熱処理溶射皮膜および、レーザ処理皮膜の熱影響部のマイクロビッカース硬さ試験結果を図9に示す。熱処理皮膜では、硬さは全ての熱処理温度でG0皮膜がGA皮膜より高い値を示し、673Kで各試料とも一番高い値を示した。673Kからは熱処理温度の上昇と共に硬さは低下している。また、レーザ処理皮膜では、G0皮膜はAs spray皮膜に比べ約50程高い値を示したが、GA皮膜ではAs spray皮膜に比べ約100程低い値を示した。硬さの低下はAs spray皮膜のマトリックスの硬いFe炭化物のCが分解し、Feに固溶する炭素量が少なくなったためと考えられる。またG0のレーザ処理で硬さがAs spray皮膜より高い値を示したのはレーザ照射によりマトリックス組織がセメントタイトとなったためと考えられる。

4 結 言

鑄鉄粉末をアルミニウム合金表面に溶射して熱処理及びレーザ処理を行った。得られた結果は、以下のとおりである。

- (1) 鑄鉄溶射皮膜中には、黒鉛相は認められなかった。1073K以上で熱処理した皮膜中には黒鉛相が観察された。
- (2) 鑄鉄粉末へのAl添加の有無によりレーザ処理後の皮膜組織に差が認められ、Al添加皮膜のみに黒鉛相が観察された。これは、Alが黒鉛化を促進する働きがあるためであると考えられる。

文 献

- 1) 堀江ら：鑄造工学会誌, **73-10**, 662-667(2001).