

レーザクラディング法による高度機能化技術と応用

辰巳 佳宏*, 林 良彦, 土田 貴之

High Functionalization Technology by Laser Cladding Method and Its Application

Yoshihiro TATSUMI*, Yoshihiko HAYASHI and Takayuki TSUCHIDA

Abstract

Surface modification technology is applied in various situations, and it is a method that can be made into a multi-material by coating the material with different materials. For example, a tough metal can be coated with a high hardness material, or the coating material itself can be combined to have multiple functions. Among them, wear-resistant coating used at high temperature is an indispensable technique for extending the life of industrial members and requires multiple performances. One of the surface modification methods Laser Metal Deposition (LMD) can control input energy precisely. Because of this, heat inputs reduced, and show high functionality of coating. This report describes LMD technology and use cases.

Key Words : laser metal deposition, surface modification, heat resistant, abrasion resistance, ball bearing, brake disc

1. はじめに

表面高機能化を目的とした表面処理技術にレーザクラディング (Laser Metal Deposition : LMD) 法がある。この方法は、従来のアーク溶接法と同様に基材、溶接材料を溶融し表面処理を行うが、熱源にレーザを用いる。そのため照射出力やビームプロファイルの精密制御が可能となり、基材への熱影響がわずかながらも、高品質で強固な密着力の皮膜形成を行うことができる。そのため、今まで困難であった基材、部品への表面処理と機能性セラミック粉体施工も可能となった。

表面高機能化処理に求められる性能は使用環境に応じて、耐食性、耐摩耗性、耐熱性など様々であり、いくつかの性能を複合的に向上させることが必要になる場合が多い。それら要求に応えるために種々の表面処理技術が存在する。近年、ファイバによる導光が可能な波長域での高出力レーザが出回るようになり、利便性が高まってきたことから、レーザを利用した表面処理技術の研究開発が多く行われている。本報告では各種 LMD 技術

の原理、特長や表面処理層の特性とともに、その応用事例について述べる。

2. 従来の表面改質法との違いと各種 LMD 法

2.1 従来の表面改質法

Figure 1 に各種表面改質法の模式図を示す。溶射 (Fig. 1(a)) は粉末材料を溶融し、基材に吹き付けることで皮膜形成する方法であり、基材を溶かすことがないため入熱が小さい。しかし機械的な接合であることから、密着力が溶融接合されたものより劣る。一方、粉体アーク肉盛溶接 (Plasma Transferred Arc : PTA) (Fig. 1(b)) は粉末材料を強力な熱量を持つプラズマアークなどの熱源を用いて溶融し被覆層を形成するため密着力は高い。その反面基材への入熱が大きくなり、基材の材質によっては軟化や脆化などの問題が生じる。また溶込みが大きくなるため、基材に希釈され本来の皮膜性能を発揮できない場合もある。LMD (Fig. 1(c)) は前述の通り精密な入熱制御が可能であることから、皮膜の機能性を十分に発揮できるプロ

大阪富士工業(株) 技術センター LPJ 研究所 (〒661-0977 兵庫県尼崎市久々知3丁目24-33)

LPJ Laboratory, Technology Center, OSAKA FUJI Corporation (24-33, Kukuchi 3-chome, Amagasaki-shi, Hyogo 661-0977)

* Corresponding author : E-mail: yoshihiro-tatsumi@ofic.co.jp

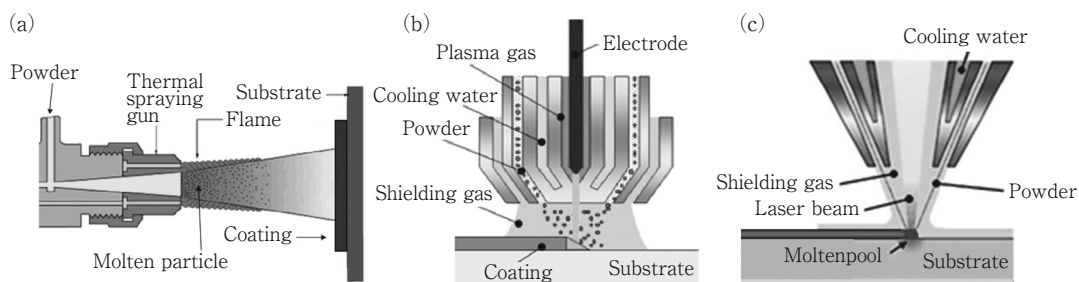


Fig. 1 Principle diagram of various surface modification technologies (a) Thermal spraying (b) PTA (c) LMD

セスと言える。

2.2 各種 LMD 法について

2.2.1 モルテンプル型と非モルテンプル型法

Figure 2¹⁾に従来のモルテンプル型 LMD 法と非モルテンプル型 LMD 法の図を示す。従来法は基材にレーザー照射することで基材表面を加熱溶融させ、粉末材料を供給し、溶融させることで皮膜形成を行う。この時レーザー照射部が溶融しプールを形成することからモルテンプル型と呼ばれる (Fig. 2(a))¹⁾。一方、レーザー中で粉末材料を溶融し基材表層で被覆する方法を

非モルテンプル型 LMD 法と呼ぶ (Fig. 2(b))¹⁾。従来法と違い、レーザーによる入熱は基材側よりも粉末側に占める割合が大きく、基材入熱に起因する問題の抑制を図ることができる。これにより従来法よりも精密な入熱制御が必要な歪みやすい薄肉の部材や、熱影響により変質しやすい材質に対して非常に有効である。Figure 3 に各施工法によるステライト合金のミクロ組織、硬度を示す。LMD で形成した皮膜は従来のアーク溶接法に比べ冷却速度が速い影響により、緻密な組織で高硬度の肉盛層となる。また、LMD 工法の違いにおいても、冷却速度の速い非モルテンプル型 LMD 法では、その傾向は顕著に認められる。この工法の特長上、高速化、薄膜化することが可能である。また従来の LMD 法と同等の密着力が確保できることから溶射やめっきなどに代わる手法として期待されている。

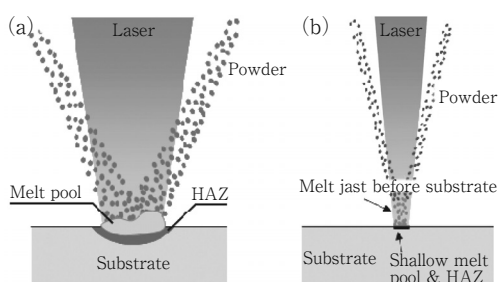


Fig. 2 Cladding images of (a) Molten pool LMD (b) Non-molten pool LMD [出典：文献 1)]

2.2.2 矩形ビーム型 LMD 法 Figure 4²⁾に矩形ビーム型のレーザークラディング法を示す。基本的な原理は従来型と同じであるが、矩形にすることで進行方向の幅が小さく、横幅が広くなり、1 ビードあたりの施工面積を広くすることができ

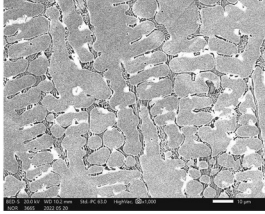
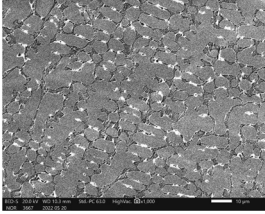
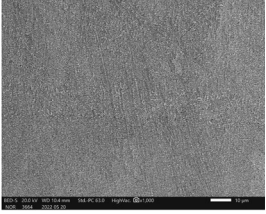
	PTA	Molten pool LMD	Non-molten pool LMD
Metallographic cross section			
Hardness (Hv, 0.5kgf)	430	490	580

Fig. 3 Metallographic cross section and hardness of Stellite alloy

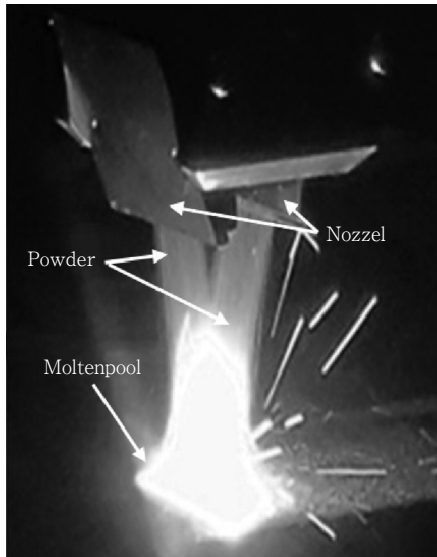


Fig. 4 Laser cladding with rectangular beam
〔出典：文献2〕

る。レーザ強度はパワー密度（出力／照射面積）に依存することから、円形のビームよりも低パワーで施工効率を上げることが可能である。例えば $\phi 5\text{ mm}$ の円形ビームは約 20 mm^2 のスポットである。ほぼ同じ面積である $10 \times 2\text{ mm}$ の矩形ビームを使用すると Fig. 5²⁾で示すように円形ビームに対して同じパワー密度で幅が2倍のビードを形成できる。現行装置では、レーザクラディング用に5～45 mm 幅でかつ均一な強度の矩形ビーム（半導体レーザ）が使用されることが多く、大型ロールなどの施工面積の広い部材で適用

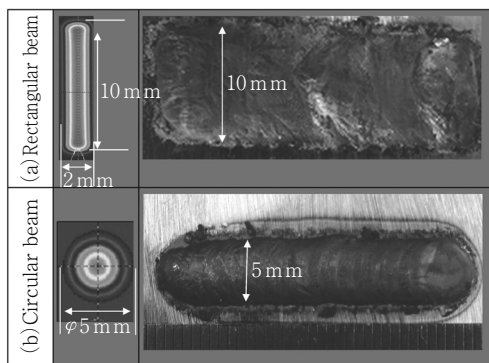


Fig. 5 Cladding layer (a) Rectangular beam (b) Circular beam
〔出典：文献2〕

される。

現在、高効率サブマージアーク溶接法（バンドアーク法）では最大 75 mm 幅の表面改質が可能であるが、LMD においても矩形ビームの幅広化が進んでおり、将来には 100 mm 以上の高効率の LMD 施工が期待できる。

2.2.3 ビームプロファイル制御 (DOE) を使用した LMD 法

DOE (Diffractive Optical Elements: 回折光学素子) とは、レーザを通過させるだけで、多点スポットへの変換が可能なスリット的一种である。Figure 6²⁾にその模式図を示す。DOE を使用すれば1台のレーザ装置で数百個のレーザスポットをつくることができ、一つのスポットごとに光強度分布の設定が可能である。またスポットの配列を自由に設定できるので、強度分布を持った矩形ビームを容易に実現できる。DOE を入れ替えるだけで、レーザ照射部の形状と強度分布を変更することが可能である。

レーザそのものが均一な強度分布を持っていても入熱分布は均一ではなく、中心付近に集中しやすい。そこで、両端の強度を中心の2倍となるような DOE を用いて比較を行った。強度がフラットなビーム（以下フラットビーム）、両端の強度が中心の2倍であるビーム（以下、両端強化ビーム）で皮膜形成を行った。Figure 7²⁾にその結果を示す。フラットビームでは中心が高い山なりのビードになる (Fig. 7(a))²⁾。これはレーザ照射した際に中心の温度が高くなり、中心の溶融池が端より



Fig. 6 DOE explanatory diagram 〔出典：文献2〕

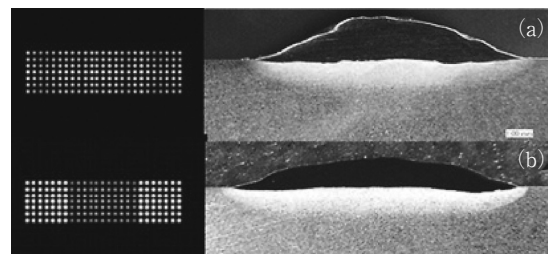


Fig. 7 Cladding layer using DOE (a) Flat beam (b) Reinforced beam at both ends
〔出典：文献2〕

も遅れて凝固するからである。一方、両端強化ビームでは均一に熔融凝固するため、フラットなビードを形成することが可能である (Fig. 7(b))²⁾。DOE の使用によるビームプロファイル制御により、ビードの凹凸を減らし、ビード間の重ね幅を小さくすることができる。そのため矩形ビームの単位時間あたりの成膜面積を広くすることが可能である。

3. 耐熱ボールベアリングの開発 (応用事例①)

3.1 耐熱ボールベアリングについて

高温対応のボールベアリングは 400℃ を境に金属製とセラミック製に分かれる。しかしながら、オールセラミック製のベアリングは衝撃による突発性の破損が懸念されるため大型装置部品向けとして、600℃ 対応の金属製ベアリングが求められている。そこで金属製ボールベアリングにセラミック複合皮膜を LMD でコーティングすることで、耐熱、耐摩耗性と靱性を有するボールベアリングの開発を行った事例を紹介する。Figure 8¹⁾ にベアリングの模式図を示す。内輪、外輪に分かれており溝の部分にボールを入れることでしゅう動する。Figure 9¹⁾ に示すようにこの部分に特殊合金とセラミックスの複合材料で被覆する。外径 $\phi 34\text{ mm}$ $\times$ 内径 $\phi 25\text{ mm}$ の内輪と、外径 $\phi 52\text{ mm}$ $\times$ 内径 $\phi 44\text{ mm}$ の外輪に試験施工した。

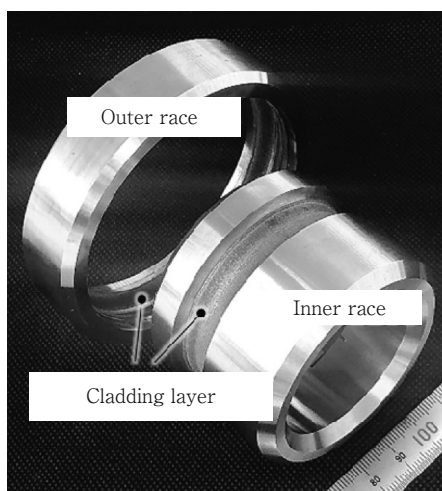


Fig. 8 Exterior of ball bearings [出典：文献 1)]

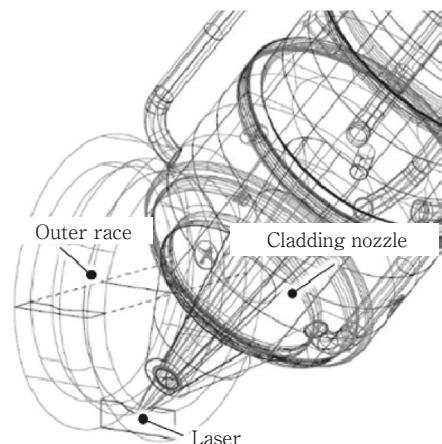


Fig. 9 Cladding image [出典：文献 1)]

3.2 レーザ法の選定

本試験で使用したベアリング、特に外輪においては基材厚みが 3mm と薄く、歪みや変形を抑制しながら表面改質を行う必要がある。LMD 法であっても通常の方法では基材入熱を大幅に低減することから、非モルテンプール型 LMD 法を適用した。

3.3 高温摩耗試験結果

耐摩耗性の検証は、ボールオンディスク摩耗試験法 (Fig. 10)¹⁾ で行った。ボール材質は玉軸受で用いられる Si_3N_4 、ディスク材質は Ni 基の金属間化合物合金 (NST-Nb) と Cr_3C_2 または TiC を 40 vol% 添加した材料をレーザクラッドした肉盛層を使用した。その他の試験条件については Table 1¹⁾ に示す。Figure 11¹⁾ に示す試験結果のように炭化物添加による耐摩耗性の向上が確認され、硬質粒子を含まない NST-Nb に比べて、 Cr_3C_2 および TiC 複合材料は摩耗損失部の断面積が半分程度にまで減少していた。また、 Cr_3C_2 と TiC を

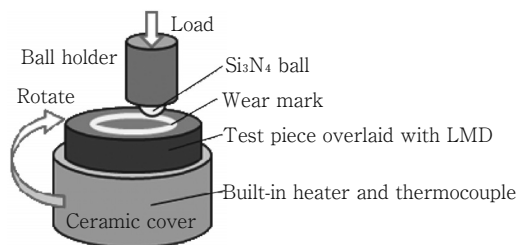


Fig. 10 Image of ball-on-disk wear test [出典：文献 1)]

Table 1 Ball-on-disk test parameters [出典：文献 1)]

Test temperature	Load	Radius of rotation	Sliding speed	Times of test
600 °C	10 N	9 mm (ϕ 18 mm)	100 mm/s (106 rpm)	20000 laps

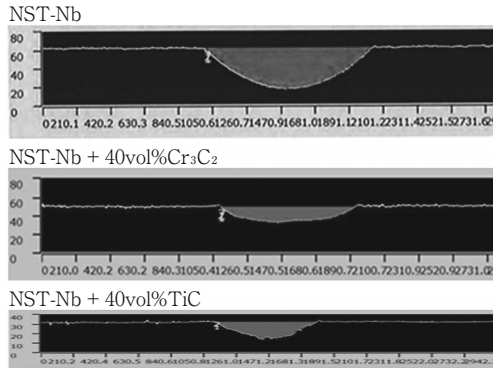


Fig. 11 High temperature wear test results [出典：文献 1)]

比較すると、TiC 複合材料が Cr_3C_2 複合材料よりも摩耗量が少なく、TiC 複合材料では NST-Nb 合金単体に比べ摩耗量が約 45% にまで減少した。

3.4 実ベアリング試験

NST-Nb 合金 + 40 vol% TiC 材を非モルテンプール型 LMD 施工した内外輪を所定の寸法に仕上げ加工し、 Si_3N_4 ボールとカーボンセラミックス製リテーナの組合せで玉軸受を試作した (Fig. 12)¹⁾。これを Fig. 13¹⁾ に示す運転試験機にて評価試験を実施した。試験条件は、600°C 大気雰囲気下、試験荷重 10 kgf、回転数は 50 rpm となる。Figure 14¹⁾ に試験結果を示す。現行仕様である SUS440C 製内外輪で製作された玉軸受は、233h で摩耗量過多により回転ロックし、その摩耗量(軌

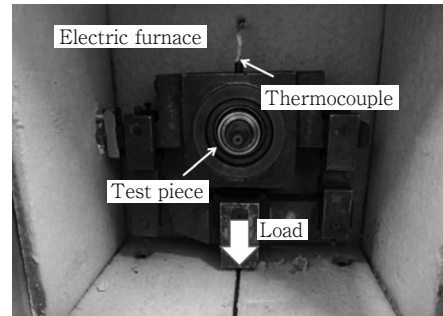


Fig. 13 Operation tester [出典：文献 1)]

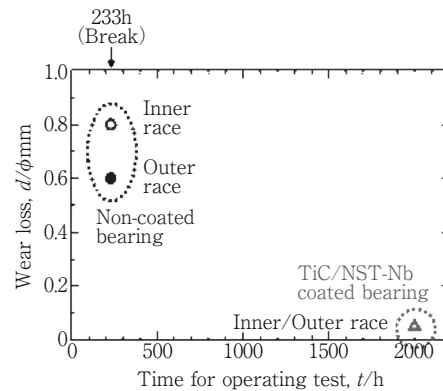


Fig. 14 Result of operation tester test at 600 °C [出典：文献 1)]

道面の摩耗損失厚さ)は外輪が平均 ϕ 0.6 mm、内輪が平均 ϕ 0.8 mm であった。これに対し、開発仕様の玉軸受は 2000 h 耐久し、その摩耗量は外輪が ϕ 0.05 mm、内輪が ϕ 0.05 mm、摩擦係数は試験開始から 2000 h を経過しても 0.05 を維持した。

今後は実機試用にて課題の確認と改良を重ね、実用化を目指す予定である。

4. 次世代高速鉄道用ブレーキディスクの開発(応用事例②)

4.1 ブレーキディスクへの表面改質について

高速鉄道の高速化に伴う熱負荷の増大で、現用の鍛鋼製ブレーキディスクの適用は限界に近づきつつある。さらに、将来計画されている時速 400 km 走行においては、しゅう動面が 1000°C 近く上昇するため、鍛鋼製では熱き裂や変形の問題が生

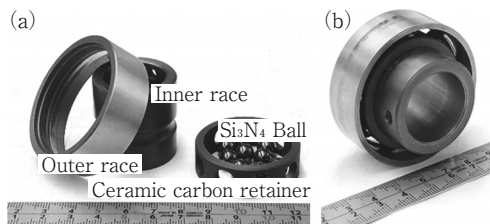


Fig. 12 Prototype super heat-resistant ball bearing (a) Before assembly (b) After assembly [出典：文献 1)]

じることから、高速対応ブレーキディスク開発は必須である。そのため、優れた耐熱性を有する特殊金属材料を鍛鋼製ディスクの摩擦しゅう動面にのみに付与することができる方法として、PTA による肉盛ブレーキディスクの開発を行った。しかし、入熱が大きく溶込み量も多いため、変形や熱き裂が発生し、安定した品質を得るのが困難であった。PTA に代わる高品質な溶接肉盛法として、LMD の適用検討を行い、新たなブレーキディスクの開発を行った事例を紹介する。

4.2 高融点複合材料について

皮膜のマトリックス素材には Ni 基合金のハステロイ C 系 (Ni, Cr, Mo, W, Fe, C, Mn, Si) を用いた。この素材は凝固組織をなしており、冷却過程で組織変態を生じない特性を持つ。また、ヤング率と線膨張係数がディスク基材とほぼ同等で溶接密着性 (濡れ性) が良いこと、ディスク基材と上盛の熱応力に起因する剪断力を緩和する効果が期待できることから下盛材に適用した。ライニングと摩擦しゅう動し、膨大な摩擦入熱を受ける上盛材には Ni 基合金と未溶解の高融点金属 (W, Mo, Nb, Ta) 複合材料を用いた。溶接方法の違いによるディスク基材への熱影響を評価するにあたり、試験片の片面に PTA と LMD をそれぞれ行い、溶接断面の観察を行った。ただし、予熱温度は 250℃、350℃ の 2 種類、LMD は下盛 1 層、上盛 2 層とし、PTA は下盛 2 層、上盛 2 層の肉盛を各溶接法で行った。Figure 15³⁾にマイクロビッカース硬さを、Fig. 16³⁾に予熱温度 250℃ 施工品の断面観察の比較を示す。硬度測定の結果をみると基材の熱影響層 (Heat Affected Zone: HAZ) は下盛層からの距離が、PTA で 4mm, LMD で 2mm であることがわかり、LMD の方がディスク基材に与える熱影響が低く抑えられていることがわかる。ディスク断面観察をみると、LMD 上盛部のマトリックスには高融点金属が溶解した析出物がみられ、LMD の基材熱影響部は PTA に比べて薄い領域に限定されており、熱影響が小さく抑えら

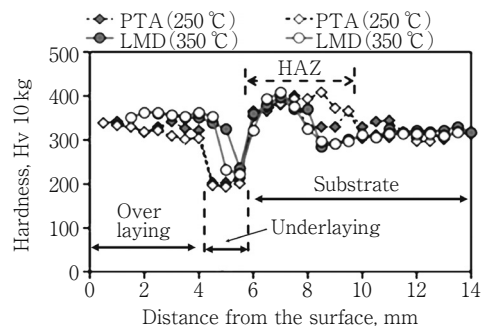


Fig. 15 Hardness distribution comparison [出典: 文献 3)]

れているのがわかる。

4.3 LMD で皮膜形成した場合の高温強度

肉盛の有無による高温環境下での材料強度試験を実施した。温度条件は、室温から 1200℃ までとした。Figure 17³⁾に引張強さおよび伸び測定の結果を示す。いずれの性質も溶接方法による違いは認められなかった。現用のディスク基材は、600℃ 付近で引張強さが著しく低下する鉄系材料特有の性質を示したのに対し、耐熱性の高い Ni 基合金を用いた肉盛材では温度が高くなるにつれて低下傾向はみられるが、1200℃ の高温時においても高い強度を維持した。伸び測定の結果では、ディスク基材が 600℃ 付近で著しい増加が生じている。肉盛材ではこれとは反対に、温度が高くなるにつれて伸びが減少する性質を示した。

高速サーモカメラの観察結果から、ブレーキ中のディスク摩擦しゅう動面の最高温度は約

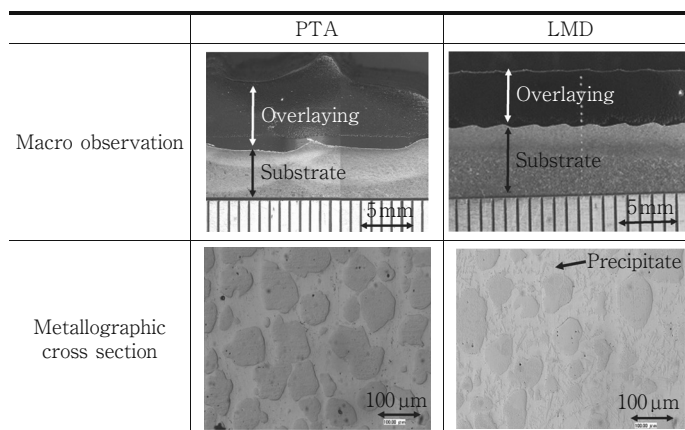


Fig. 16 Metallographic cross section comparison (preheat : 250 °C) [出典: 文献 3)]

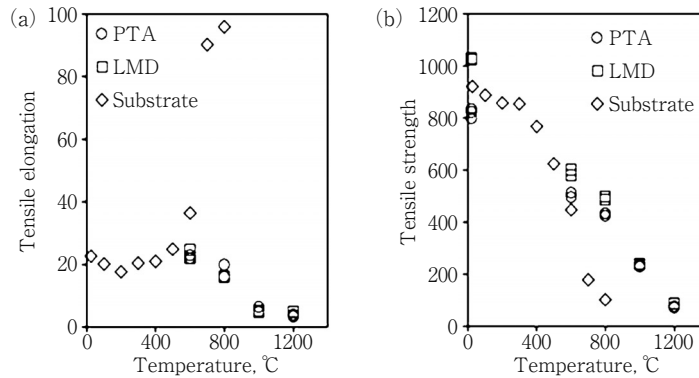


Fig. 17 High temperature tensile test (a) Tensile strength, (b) Tensile elongation〔出典：文献3〕

1000℃の高温状態であることがわかっている。したがって、ブレーキ時の摩擦熱によってディスク基材は強度が低下し、さらに伸びが増大することで熱き裂が発生しやすい状態になっているものと考えられる。一方、肉盛材では高温環境下でも強度低下が抑えられ、加えて伸びが抑制されることから熱き裂が発生し難い状態になっている。また、肉盛層が緩衝領域となってディスク基材への直接的入熱を緩和する役割を果たし、基材の強度低下も低く抑えられることが期待できる。

4.4 肉盛マトリックスの組織分析

表面改質法の違いによる肉盛層の性質を比較するため、肉盛マトリックスの詳細な組織分析を実施した。分析用の試験片は、幅60mm×長さ150mm×厚さ40mmのディスク基材（特殊鍛鋼）に下盛2mm、上盛3mmの肉盛層を形成したものをを用いた。

Figure 18³⁾に各肉盛層のSEM観察の結果を示す。下盛を比べると、LMDの方が微細化しており、強度が向上しているものと考えられる。一方、上盛については差異がみられなかった。一般に、高硬度下での結晶粒界破壊を防ぐためにはオーステナイト結晶粒の微細化による結晶粒界強度の向上が有効とされていることから、

LMDにおいても高融点金属との粒界をなす肉盛層の強度がPTAに比べて向上しているものと考えられる。

4.5 実物大台上試験

4.5.1 耐久試験の概要 現用の実物大中央締結型ディスクの摩擦しゅう動面に、LMDを用いて下盛層（厚さ2mm）と上盛層（厚さ3mm）を形成して耐熱性を向上したディスクを試作し、台上試験による性能を確認した。ただし、締結ボルト孔周りには下盛材で肉盛溶接を施し、耐き裂性を向上した。ディスク形状は中央締結型、ライニ

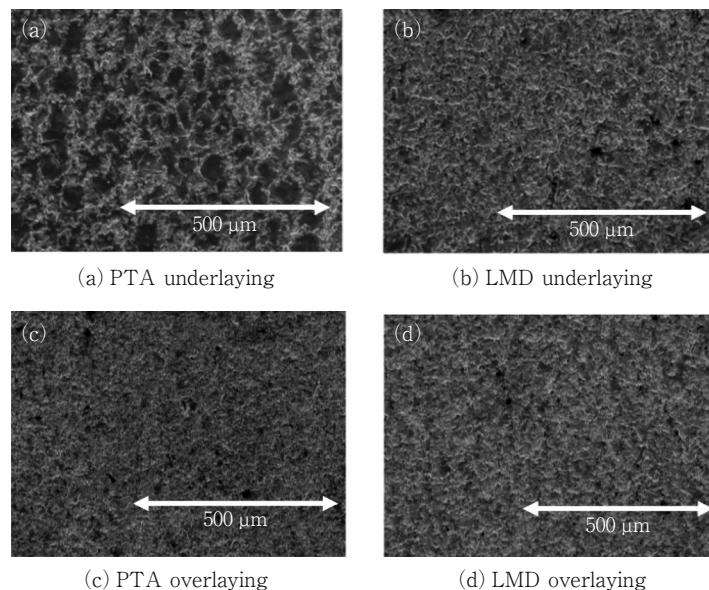


Fig. 18 SEM image comparison〔出典：文献3〕

ング形状は等面圧型とした。Figure 19³⁾にディスクおよびライニングの外観を示す。耐久試験では、初速度 300 km/h からの非常ブレーキを 105 回繰り返す条件とした。ライニングの押付制御は通常の押付力制御とした。

4.5.2 耐久試験結果 (ディスクの耐摩耗性)

Figure 20³⁾に耐久試験後の供試体外観を示す。ディスクの摩擦しゅう動面には目立ったき裂および荒損もなく、良好な状態であった。また、ライニング外観も同様の結果であった。耐久試験後のディスクを解体した後、摩擦しゅう動面の浸透探傷試験を行った結果、摩擦しゅう動面のき裂は認められなかった。Figures 21³⁾, 22 に最も摩耗形状が顕著であったフランジ側のディスク形状を示す。LMD ディスクは、現用の鍛鋼製ディスク比で約 3 倍、耐摩耗性が大幅に向上した。これは、肉盛層の硬度が 1.2 倍に向上していること、結晶粒の微細化により粒界強度が向上していることなどの肉盛層の耐摩耗性向上に加え、ライニング材がディスク摩擦しゅう動面へ移着して自己潤滑層

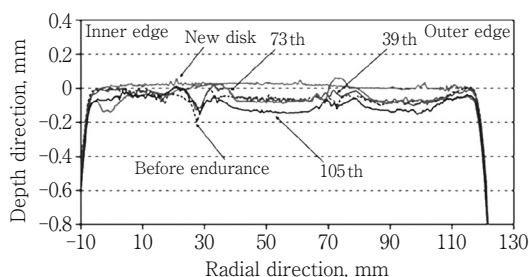


Fig. 21 Disk shape of after brake test [出典：文献 3)]

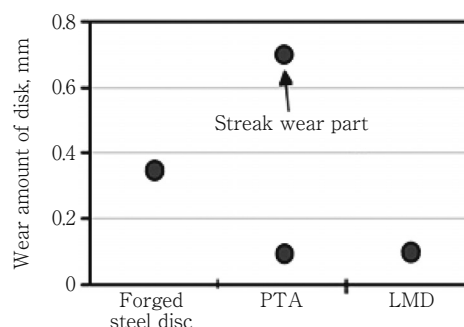


Fig. 22 Abrasion loss compared of after brake test

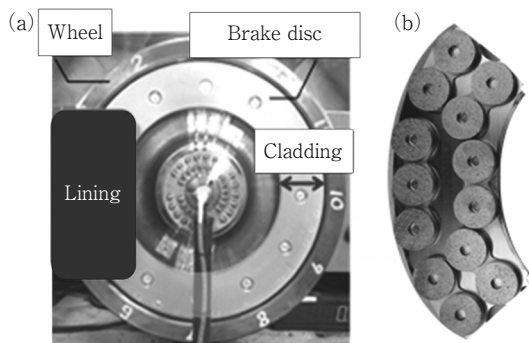


Fig. 19 Test material before brake test (a) Disk (b) Lining [出典：文献 3)]

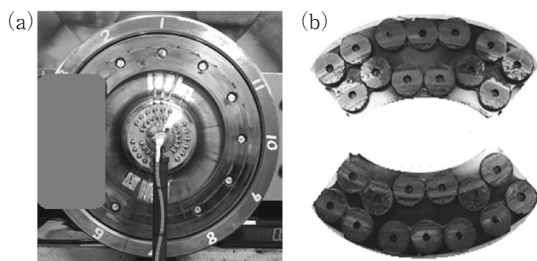


Fig. 20 Test material after endurance test (a) Disk (b) Lining [出典：文献 3)]

を形成し、ディスク摩擦しゅう動面が保護されたことが理由として考えられる。事実、73 回目のディスク形状は耐久試験前よりも摩耗状態が改善されている。この性質は現用の鍛鋼製ディスクではみられないことから、LMD を適用したことによる特質の一つと言える。また PTA と比較してどちらも健全な皮膜であれば差は見られないものの PTA では高融点粒子の分散むらにより耐摩耗性にもばらつきが生じ、鍛鋼製ディスクよりも摩耗する部位が見られる。LMD ではそれが見られないことから安定した品質を確保することが可能である。

5. おわりに

表面高機能化処理は、産業用機械やプラント部品のメンテナンス負担軽減に効果があり、耐用度の向上によるイニシャルコストやランニングコストを含めた総合的なコスト低減、長寿命化要求に対応できる技術である。しかし、従来の表面処理技術である溶接、溶射、めっき、焼入れなど種々の方法においては、満足いく結果が得られなかった部品が多くある。

LMD は、レーザー設備の急速な進歩とレーザー光の特性を活かし幅広い産業分野への適用開発が活発に行われている。今後の発展性の課題は高効率の製造技術を確立し経済面をクリアすることである。しかしながらレーザーは開発要素の幅が広く波長、密度（レーザー出力分布）、照射形状などの技術と生産技術の融合により適用がより加速するものと考えられる。

本稿には、中小企業庁 戦略的基盤技術高度化支援事業による成果が含まれている。

文 献

- 1) 北村裕樹・辰巳佳宏・金野泰幸・宗兼圭司・塚本雅裕・山口拓人：非モルテンプール型レーザークラディングによる超耐熱玉軸受（ボールベアリング）の開発，レーザー加工学会誌，**29**, 1 (2022) 17-22.
- 2) 林 良彦・安積一幸・阿部信行・塚本雅裕：DOE（回折光学素子）を使用したレーザークラディングの技術開発，光アライアンス，**32**, 4 (2021) 24-29.
- 3) 辰巳佳宏・嵯峨信一・阿部信行・坂口篤司・宮部成央・米山三樹男・松井祥司：レーザークラディング表面機能化技術による次世代高速鉄道用ブレーキディスクの開発，レーザー加工学会誌，**25**, 1 (2018) 24-29.

■■■■■■■■■■ 著者プロフィール ■■■■■■■■■■

辰巳 佳宏



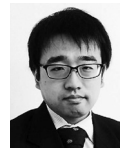
1980 年大阪富士工業(株)入社。アーク溶接，PTA，LMD の研究開発に従事。現在，レーザープラズマ接合研究所 執行役員所長，(一社)レーザープラットフォーム協議会理事，(一財)大阪科学技術センター ニューマテリアルセンター運営委員。

林 良彦



2005 年大阪富士工業(株)入社。溶射，LMD の技術開発に従事。2013 年より大阪大学接合科学研究所大阪富士工業先進機能性加工共同研究部門 特任助教。溶接学会に在籍。

土田 貴之



2015 年大阪富士工業(株)入社。溶射，肉盛溶接，LMD の技術開発に従事。