

平成28年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「レーザークラッ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」

研究開発成果等報告書

平成29年 3月

担当局 近畿経済産業局
補助事業者 一般財団法人 大阪科学技術センター

目 次

	頁
第1章 研究開発の概要	2
1. 研究開発の背景・研究目的及び目標	2
2. 研究体制	4
3. 成果概要	4
4. 当該研究開発の連絡窓口	5
第2章 本論	6
【1. 高速鉄道用ブレーキディスクの肉盛材料開発】	6
1. 目的	6
2. 試験結果	6
【2. 生産性の高いレーザークラッディングによる溶込み制御技術開発】	7
【2-1. 小出力（600、1000W）レーザー照射形状試験】	7
1. 実験概要	7
2. パウダー供給位置の試験	8
3. パウダー供給方向の影響	12
【2-2】高出力（4000W、5000W）レーザー機での試験	18
1. 条件選定試験	18
2. 実物大台上試験用ブレーキディスク（φ720）での肉盛試験	19
【3. 高速鉄道用ブレーキディスクへのレーザークラッディング技術の適用】	21
【3-1】モデルブレーキディスク肉盛試験	21
【3-2】高速対応の肉盛ブレーキディスクの性能試験	22
【3-3】高能率のブレーキディスクの自動肉盛装置の開発	29
第3章 全体総括	30

第1章 研究開発の概要

1. 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1. 研究開発の背景

近年の高速鉄道の高速化に伴う熱負荷の増大で、現用の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速度400km/h走行においては、摺動面が1000℃近く上昇するため、鋼製では熱亀裂や変形の問題が生じることから、高速対応ブレーキディスク開発は必須である。

今までに高速鉄道用ブレーキディスクの開発は、クラッド材、炭素繊維合金、セラミック合金等で研究検討が行われたが、性能、コスト面で課題があり、採用に至っていない。

そのため、優れた耐熱性を有する特殊金属材料を鋼製ディスクの摩擦摺動面にのみに付与することができる経済的な方法として、粉体肉盛プラズマアーク溶接法による肉盛ブレーキディスクの開発を行った。

現状の開発状況は、実物大の台上試験（最高速度400km/h）において、計画に近いブレーキ性能が得られているが、筋状摩耗、熱亀裂問題を抱えている。

本研究開発は、将来計画されている時速400km/hの次世代高速鉄道ブレーキディスク開発を目的に、熱負荷が小さく溶込み制御が可能なレーザークラディング技術を用いて、高速鉄道用ブレーキディスクの肉盛材料及び生産性の高く、高品質（溶込み制御）の施工技術の研究開発を行う。

1-2. 研究目的及び目標

1) 高速鉄道用ブレーキディスクの肉盛材料開発

現状のブレーキディスク（速度300km/h以下）には、鋼製ディスクが用いられているが、速度400km/hで走行する高速鉄道用には、耐熱性が不十分で適用できない。

そのため、耐熱性に優れた特殊材料を肉盛するブレーキディスクの開発に取り組むこととし、これまで高融点金属含有Ni基合金による肉盛材料を検討して、高熱伝導性で低熱膨張係数の新材料を開発（特許申請中）し摺動肉盛面の温度上昇を抑制した。その結果、ブレーキ性能は速度400km/hにおいても高いブレーキ力（安定した

摩擦係数による優れたブレーキ停止距離）が得られようになった。

しかしもう一つの課題である耐熱亀裂性で高耐摩耗性の向上は依然未解決の課題である。

本研究開発の目標は、高いブレーキ力を維持しつつ、耐熱亀裂性、耐摩耗性に優れた肉盛材料を開発することである。

2) 生産性の高いレーザークラッディングによる溶込み制御技術開発（熱亀裂発生の抑制）

高速鉄道用ブレーキディスクの摺動面は、常に厳しいヒートサイクルを受けることから、特に、安全性・耐久性の観点から耐熱亀裂性に優れていることが求められる。しかし、これまで粉体肉盛プラズマアーク溶接法で施工したブレーキディスクは、肉盛層の溶込み過多によるじん性の低下、及び溶込み不均一による肉盛層（熱膨張率 7×10^{-6} ）と母材（鋼：熱膨張率 12×10^{-6} ）の熱膨張差から溶込み不均一部へ熱応力が集中し、熱亀裂が発生していた。

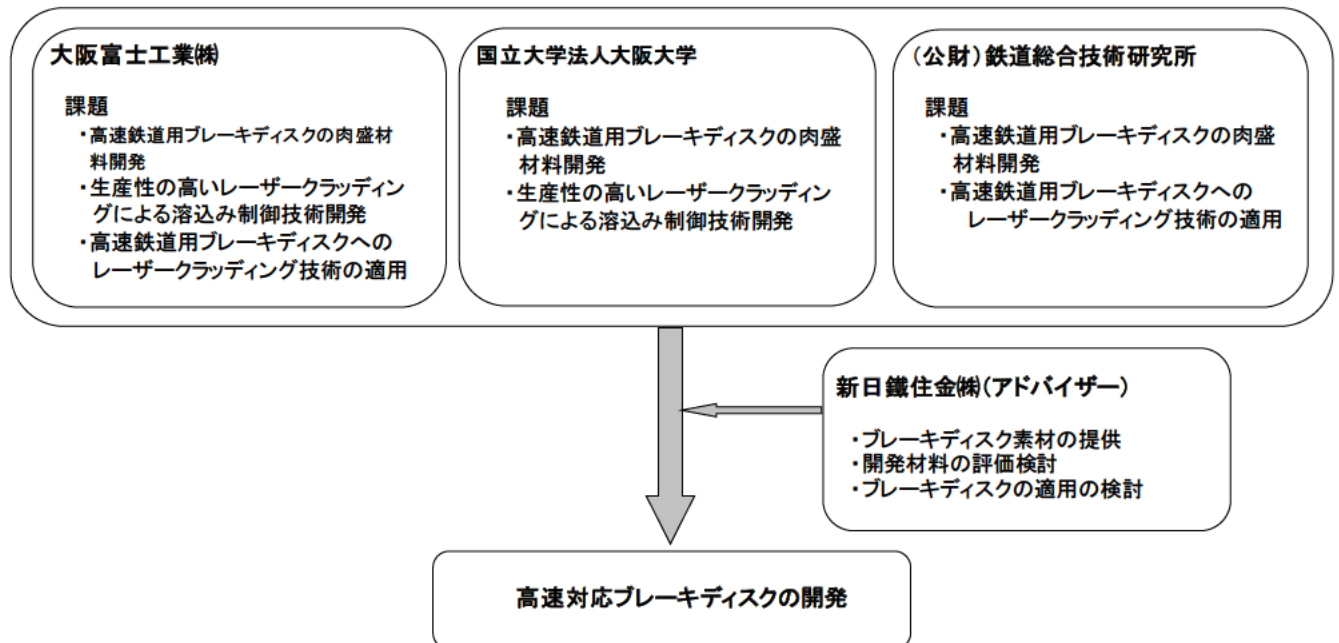
本研究では、レーザークラッディングの優れた特質である母材への低熱負荷を最大限に活かして、レーザースポットの照射形状とパウダー供給方法（スポットの大きさ、形状、強さとパウダー供給の位置、角度、速度）を開発し、かつ母材の熔融状態に合わせたパウダー供給（溶込みとビード形状を正確にコントロール）方法を開発することで、母材への均一な低溶込みを実現して熱亀裂の発生を抑制する。

さらに、肉盛後の機械加工量を低減して肉盛材料の歩留りを向上させ、高生産性の溶込み制御技術を開発する。

3) 高速鉄道用ブレーキディスクへのレーザークラッディング技術の適用

上記開発成果を用いて、ブレーキディスクへの肉盛施工技術確立し、速度 400 km/h に対応可能なブレーキディスクを開発する。そして、実用化する上で必須の低コスト化を図るため、ブレーキディスク用の高性能で高能率なスパイラル型自動肉盛の量産装置を試作開発する。

2. 研究体制



3. 成果概要

1) 高速鉄道用ブレーキディスクの肉盛材料開発

高速鉄道用ブレーキディスクに適した、優れたブレーキ力と耐摩耗性のある肉盛材料を開発する必要がある。

下記の特性を有する肉盛材料を開発し、目標を達成した。

- ・熱間強度を500N/mm² (800℃) 以上
- ・マトリックス硬度をHV240以上

2) 生産性の高いレーザークラッディングによる溶込み制御技術開発（熱亀裂発生の抑制）

熱亀裂発生を防ぐためには、母材への均一な低溶込み制御技術を確立する必要がある。このため、レーザークラッディング装置のレーザースポット照射形状と肉盛材料パウダー供給方法を開発し、機械的信頼性が高く、生産性の高い肉盛施工技術を確立する目的で試験を行い、溶込み率は10%以下、溶込みの均一化（溶込み深さのバラツキ0.3mm以内）を達成した。

3) 高速鉄道用ブレーキディスクへのレーザークラッディング技術の適用

肉盛ブレーキディスク適用に向け、下記の開発目標を達成した。

- ・現行鋼製ブレーキディスクの品質基準（製造基準：線状欠陥無し、ピンホール0.3 mm以下）に合格
- ・最高速度400 km/h以下の条件で、ブレーキ性能は安定した摩擦係数（0.3以上）、開口亀裂（亀裂幅0.1 mm以上）および筋摩耗が発生しない肉盛ブレーキディスクを開発
- ・高能率のスパイラル型自動肉盛の量産装置を試作開発し、肉盛施工時間を従来法の約1/2に短縮

4. 当該研究開発の連絡窓口

大阪富士工業株式会社 技術センター レーザープラズマ接合研究所

所長 辰巳佳宏

住所：〒660-0811 兵庫県尼崎市常光寺1-9-1

電話：06-6487-1885

E-Mail：yoshihiro-tatsumi@ofic.co.jp

第2章 本論

【1. 高速鉄道用ブレーキディスクの肉盛材料開発】

1. 目的

各種耐熱材料の試験検討の結果、耐熱性に優れ、高速度に対応したブレーキ力が得られる肉盛材料として、Ni基合金に高融点金属を複合した材料が優れていることが分かった。

しかし、本開発肉盛材料は、下図に機械特性、物性を示す様に、マトリックス部の硬度が低く、肉盛層の伸びが低いことにより、耐摩耗性及び耐熱亀裂性に課題がある。このため、耐熱性の向上とともに、マトリックス硬度及び肉盛層の伸びを向上した材料に改良する。

2. 試験結果

開発材料の高温機械特性及び耐摩耗性の評価を行った結果、目標とする性能が得られた。

表 1. 各種材料の高温機械特性

材料	OFP-G66T (PTA)		OFP-G66T (LMD)		開発材②		開発材④	
試験 温度	引張強さ MPa	伸び %	引張強さ MPa	伸び %	引張強さ MPa	伸び %	引張強さ MPa	伸び %
常温	895	1.2	1026	5.0	908	1.7	693	0.8
1000℃	232	5.6	239	5.0	262	6.2	351	3.4
1200℃	75	3.8	87	4.9	71	4.6	60	5.9

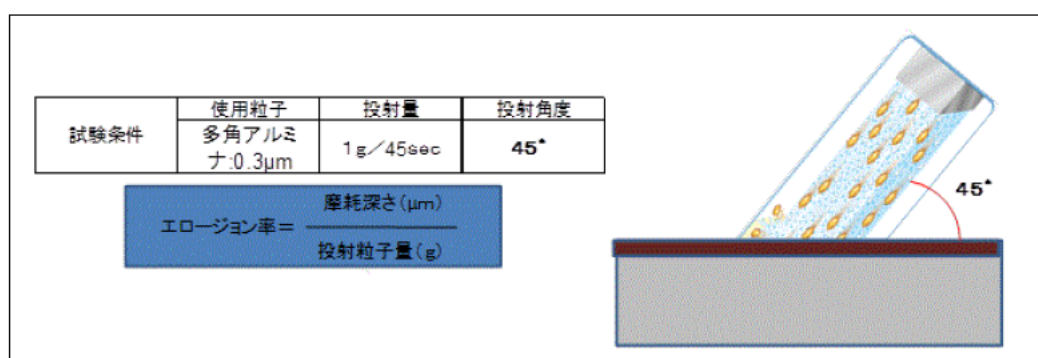


図 1. 摩耗試験方法（マイクロスラージェットエロージョン法）

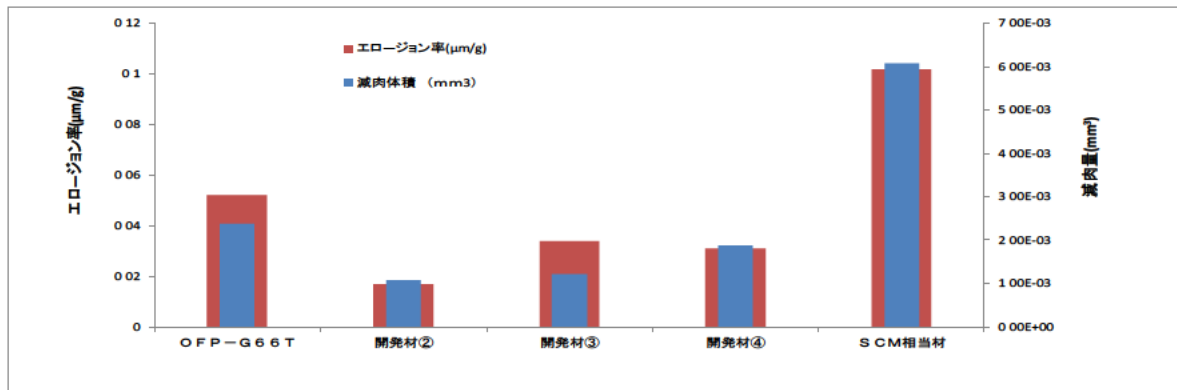


図 2. 各種材料の耐摩耗性

【2. 生産性の高いレーザークラディングによる溶込み制御技術開発】

【2-1. 小出力（600、1000W）レーザー照射形状（レーザープロファイル）試験】

1. 実験概要

本研究では、次世代高速鉄道用ブレーキディスクの開発を目的とした大出力レーザークラディングのために、実験用レーザー装置を用いてレーザークラディングの基礎パラメータが皮膜形成に及ぼす影響について研究を行っている。

レーザークラディングは従来法であるプラズマ粉体肉盛溶接(PTA 法)と比較して、皮膜の希釈が小さくかつ基板への熱影響の小さな皮膜を形成することが可能とされている。大出力レーザークラディングにおいては、レーザー照射によって溶融池を形成し、溶融池に材料粉末を投入することにより粉末を溶融させ皮膜の形成を行う（モルテンプール型レーザークラディング）。そのため溶融池の形状を制御することが非常に重要であると考えられる。

レーザー照射形状（レーザープロファイル）試験では、ピグテール型半導体レーザーモジュールを複数配置することで、2mm×2mmの矩形スポットを有する1kW級半導体レーザー実験装置（図3）を開発し実験を行った結果、基板の溶込み形状を均一化できることを明らかにした。本試験では、本装置を用いてパウダーの供給位置が溶融池形状および皮膜特性に与える影響を明らかにした。



図3. 1kW 級半導体レーザー装置

2. パウダー供給位置の試験

2-1. パウダー供給方向が皮膜特性に与える影響

2-1-1. レーザーの掃引方向に対する粉末供給方向が皮膜特性に与える影響

粉末の供給方向が皮膜特性に与える影響について検討した。実験にはステライト No. 6 粉末を用い、基板材料として SUS304 を使用した。このとき、粉末供給方向をレーザーの掃引方向に対して前方(パウダー先行型)および後方(レーザー先行型)に変化させて比較実験を行った。レーザー出力は 800 W、掃引速度は 5 mm/s および 10 mm/s、粉末供給量は 0.4 g/cm とした。粉末の供給狙い位置はレーザー照射部と同一点とした。

図4に形成した皮膜の断面形状を示す。この結果から、掃引速度が 5 mm/s の条件においては、パウダー先行型の場合は溶込み深さが 200 μm であるのに対し、レーザー先行型の場合は溶込み深さが 322 μm と大きくなり希釈が増加することが明らかとなった。また、ビッカース硬さはパウダー先行型で 468 HV、レーザー先行型で 428 HV であり、パウダー先行型で形成した皮膜のビッカース硬さがレーザー先行型より高いことが明らかとなった。これは、粉末の供給方向を変化させたことにより、基板への入熱の割合が変化し、皮膜の希釈が低減したためであると考えられる。

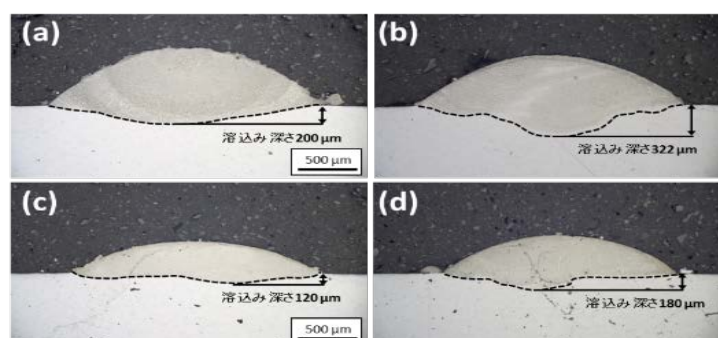


図4. ステライト皮膜断面光学顕微鏡像

掃引速度が 10 mm/s の条件においても皮膜の溶込み深さはパウダー先行型では 120 μ m、レーザー先行型では 180 μ m となり、パウダー先行型の方が希釈の小さな皮膜が形成可能であることが明らかとなった。皮膜のビッカース硬さはパウダー先行型およびレーザー先行型でそれぞれ 477 HV および 463 HV であった。これらの結果より、モルテンプール型レーザークラディングにおいては、粉末の供給方向をレーザーの掃引方向に対して前方にすることで希釈の小さな皮膜が形成可能であることが明らかとなった。

2-1-2. 溶融池挙動

粉末の供給方向により皮膜の溶込み深さが変化したのは、レーザー照射によって形成される溶融池の形状や挙動が変化したためであると考えられる。そこで、溶融池挙動を観察するため、高速度カメラを用いて観察を行った。

図5に実験装置配置図を示す。溶融池の観察はレーザーの掃引方向に対して直角方向側面から高速度カメラを用いて 45° 上方から撮影速度 2000 FPS で行った。高速度カメラ

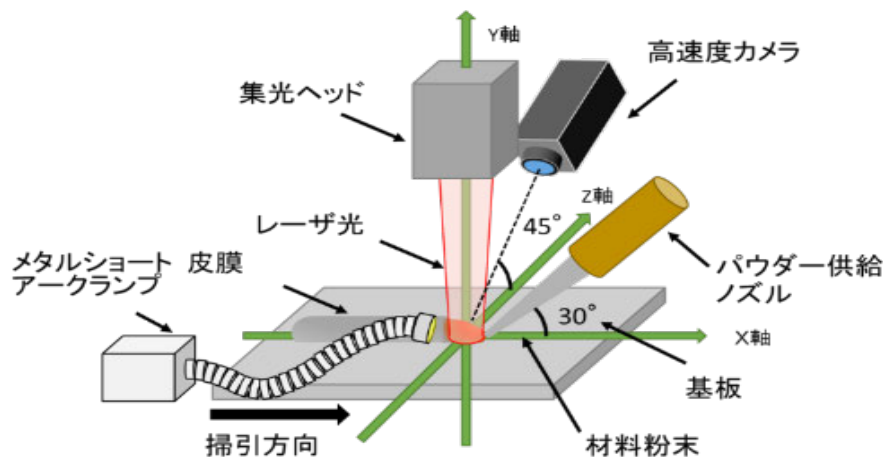


図5. 溶融池挙動観察用実験装置配置図

と反対側からメタルアークランプによる照明を行っている。皮膜の形成条件は 2-1 におけるものと同様、レーザー出力 800 W、掃引速度 5 mm/s および 10 mm/s、ステライト粉末供給量 0.4 g/cm とした。粉末供給ノズルの位置は固定で、ステージの移動方向を変えることで、レーザー先行型およびパウダー先行型の実験を行った。

図6および図7に掃引速度 5 mm/s におけるパウダー先行型およびレーザー先行型の溶融池観察結果を示す。これらの結果から、パウダー先行型およびレーザー先行型のどちらの条件においても皮膜形成中の溶融池挙動は安定しており、溶融池形状に変化は生じていないことが明らかとなった。しかし溶融池の長さに着目すると、パウダー先行型における

【公開版】

溶融池長さは平均 7.4 mm であるのに対し、レーザー先行型では溶融池長さが平均 6.1 mm と短くなっており、パウダー先行型の方が溶融地の長いことが明らかとなった。

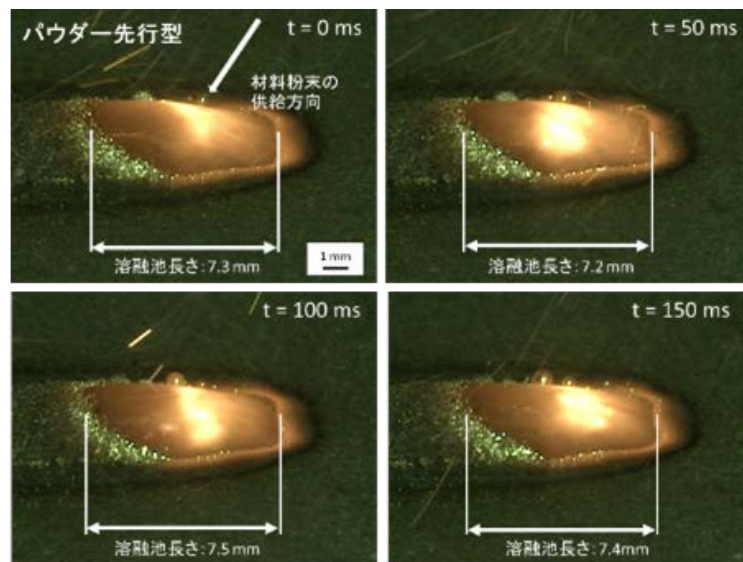


図6. パウダー先行型における溶融池挙動観察結果(掃引速度 5 mm/s)

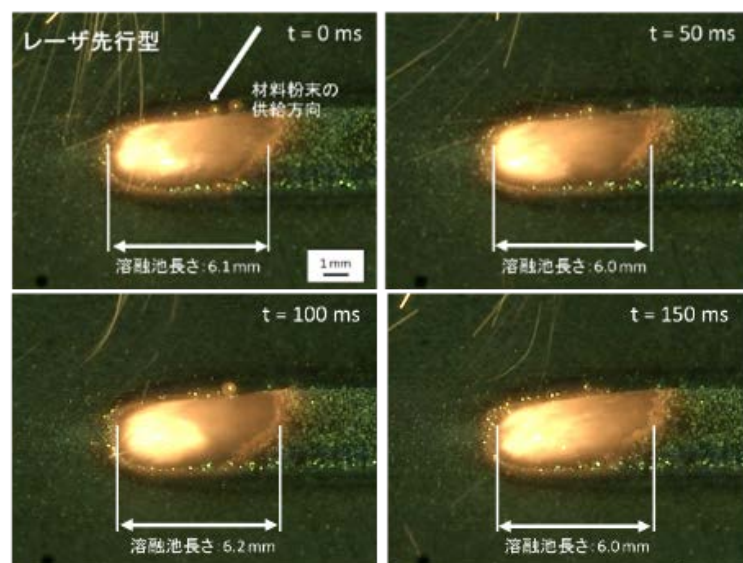


図7. レーザー先行型における溶融池挙動観察結果(掃引速度 5 mm/s)

図8および図9に掃引速度 10 mm/s における溶融池観察結果を示す。掃引速度 10 mm/s においても溶融池形状はどちらの粉末供給方式においても安定していることが明らかとなった。

溶融池の長さについては、パウダー先行型で 5.2 mm、レーザー先行型で 4.3 mm であり、掃引速度 5mm/s の場合と同様にパウダー先行型の方が溶融池の長くなることが明らかとなった。これは、パウダー先行型では溶融池後方へも粉末が供給されるため、溶融地が長くなるとともに、レーザーによる熱量が粉末の溶融に使われるため溶融池の温度上昇が抑制され、基板への溶込みが浅くなったと考えられる。これに対してレーザー先行型では、溶融池前方へ供給された粉末は溶融されないため、溶融池が短くなるとともに粉末溶融に使われなかった分、溶融池温度が上昇し溶込みが深くなったと考えられる。

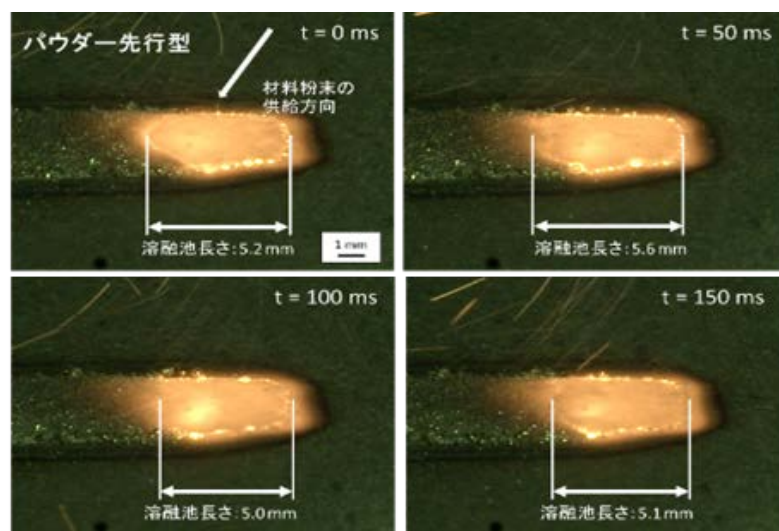


図8. パウダー先行型における溶融池挙動観察結果(掃引速度 10 mm/s)

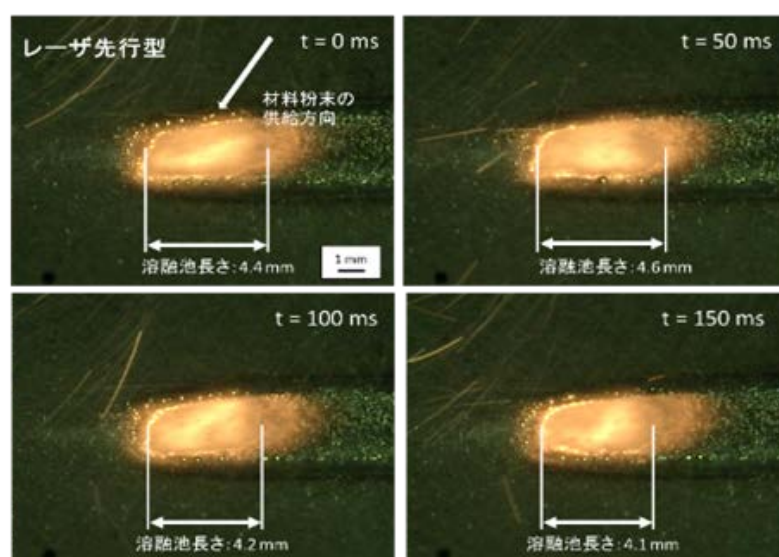


図9. レーザー先行型における溶融池挙動観察結果(掃引速度 10 mm/s)

2-2. パウダー供給位置試験の結論

大出力レーザーにより基板上に形成した大きな熔融地に粉末を投入して溶解することで高速成膜を行う方式（モルテンプール型レーザークラディング）においては、熔融地の安定性が形成される皮膜の再現性や信頼性に対する大きな要因となる。そこで、開発した実験装置を用いて、粉末供給位置及び供給方向が熔融池形状や皮膜形成に与える影響を明らかにした。

パウダー供給位置がレーザーの掃引方向に対して横方向にずれることにより、皮膜形状が不均一となり希釈が増大することが明らかとなり、粉末供給位置の再現性が重要であることが分かった。

従来多く用いられている同軸方式に対して、レーザー掃引方向に対して前方から粉末を供給する場合（パウダー先行型）、および後方から粉末を供給する場合（レーザー先行型）について相違を検討した。その結果、粉末供給方向をレーザーの掃引方向に対して前方にすることで皮膜の溶込み深さが低減しビッカース硬さを増加させることが可能であることが明らかとなった。熔融池の長さはパウダー先行型の方が長くなることが明らかとなり、このことによる温度分布の緩和が基板への入熱を減少させたと考えられる。

将来的には、温度分布の実測を行うとともに、粉末供給方向の再検討も必要であると思われる。

3. パウダー供給方向の影響

3-1. 実験概要

図10に実験装置の模式図を示す。

実験は、最大出力 1000W の半導体レーザーと粒径 $30\mu\text{m}$ のステライト No.6 を用いて行った。基板は $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 4\text{mm}$ の SUS304 を用いた。レーザーは垂直照射とし、粉末供給ノズルには 30 度の傾斜をつけた。試料ステージの方向を変えることで、パウダー先行型とレーザー先行型（図11）の実験を行った。

モルテンプールに対する粉末供給位置の影響について検討も行ったが、本研究ではレーザーのスポット径が $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ と小さいため、少し位置がずれただけで大きく影響が出るため、粉末供給位置はレーザー照射中心位置とした。粉末供給量を $0.4\text{g}/\text{min}$ 、掃引速度を $5\text{mm}/\text{s}$ 一定とし、レーザー出力を 770W から 800W まで変化させ、得られた

皮膜の外観形状や断面形状を評価した。

溶融池挙動の観察には 2000FPS のカラー高速カメラを用い、温度計測は 10000FPS の白黒高速カメラに二波長分岐光学系を取り付け、二波長方式の温度計測を行った。

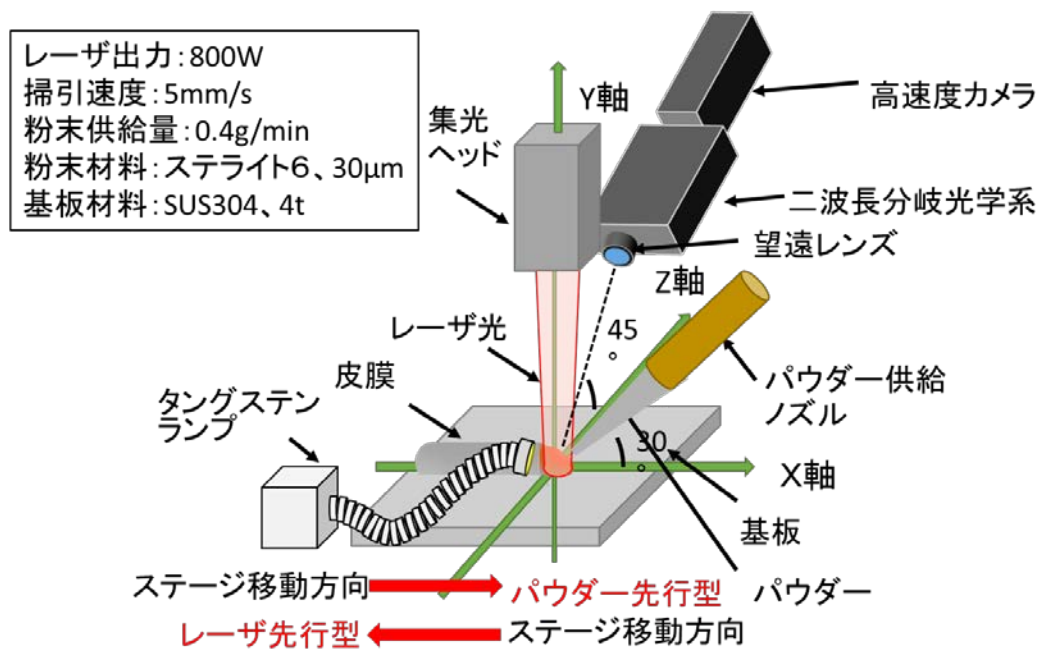
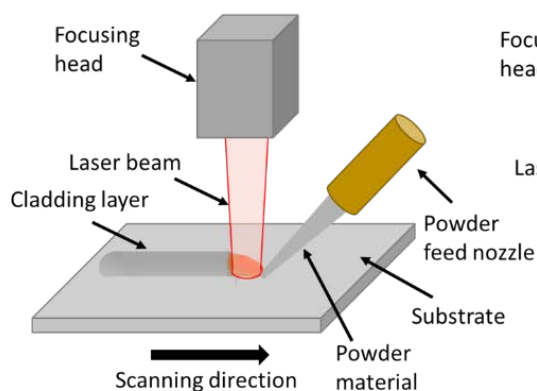


図10. 実験装置の模式図

パウダー先行型



レーザー先行型

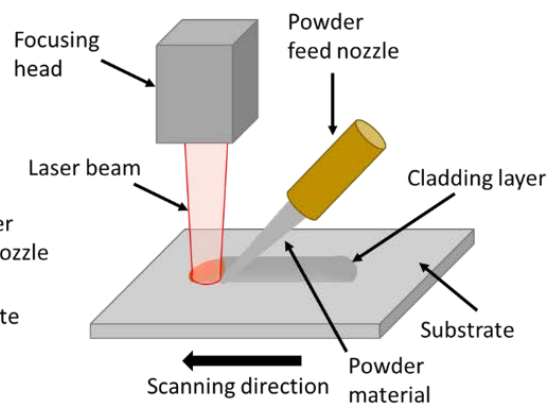


図11. 粉末供給方向の定義

3-2. 試験結果（ビード断面形状）

図12から図15にレーザー出力を 770W から 800W まで変化させた場合のビード断面形状の変化を示す。

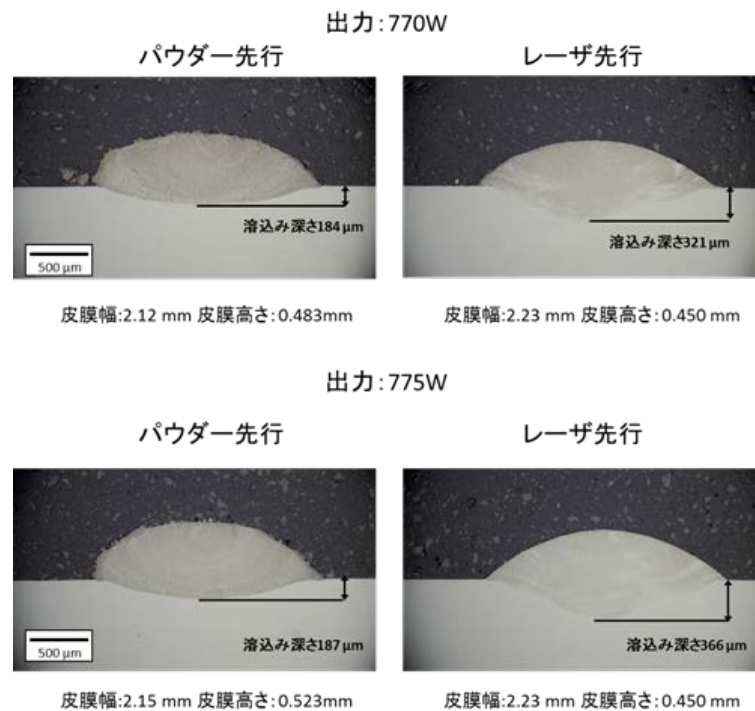


図12. ビード断面比較（1）

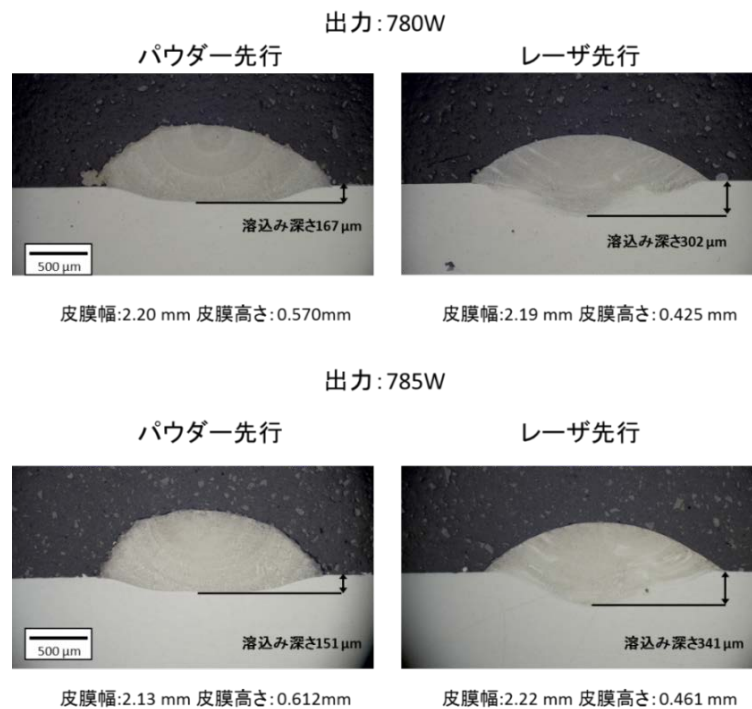


図13. ビード断面比較（2）



図14. ビード断面比較（3）

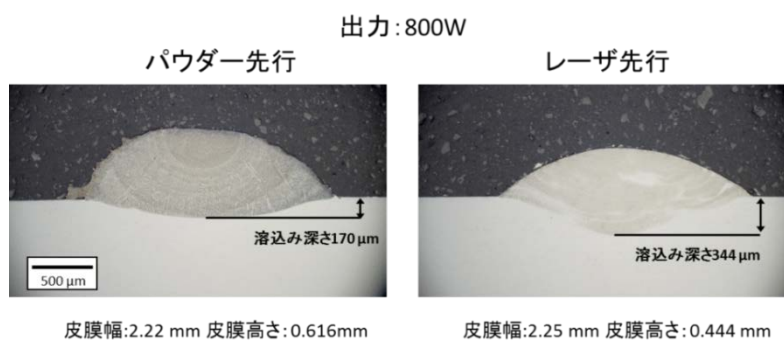


図15. ビード断面比較（4）

ビード断面形状を見ると、パウダー先行方式では比較的フラットな溶込み形状を示すのに対し、レーザー先行方式では中央部に深い溶込みが見られるのが特徴的である。いずれのレーザー出力においても溶込み深さはパウダー先行方式の方が小さく、皮膜高さが高い。結果を図16にまとめる。

どちらの方式においても溶込み深さにはあまり変化は見られなかったが、パウダー先行方

式の方がレーザー先行方式に比べて 0.2mm と小さい値を示し、目標値の 0.3mm を下回ることがわかった。

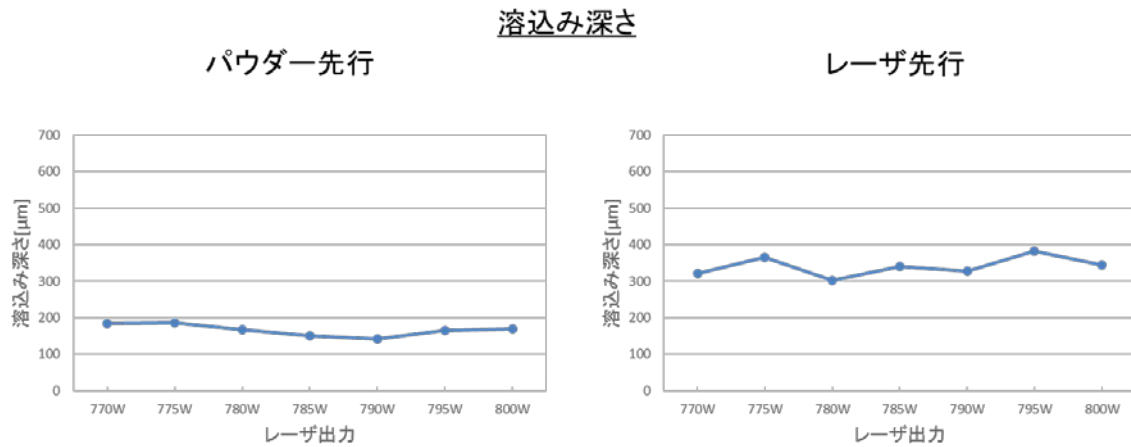


図 1 6. 溶込み深さの比較

3-3. レーザー照射部の温度分布計測

この原因を考察するために、二色法による溶融池の温度計測を行った結果の一例を図 1 7 に示す。

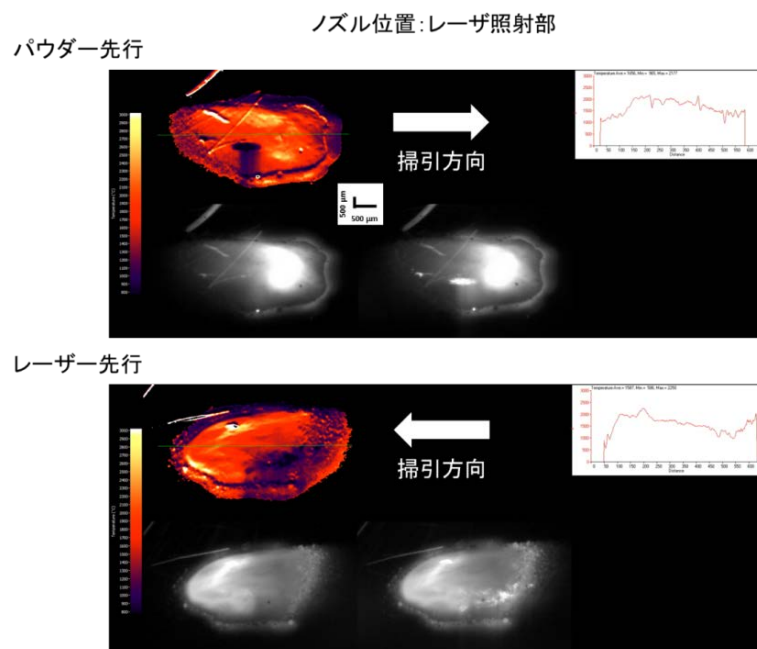


図 1 7. 溶融地の温度測定結果

溶融池中心線に沿った温度分布を見ると、クラディング方向前方から粉末を供給するパウダー先行方式の方は 2000℃ 付近の温度分布が後方に寄っているのに対し、後方から粉末を供給するレーザー先行方式では前方に寄っていることが分かった。

3-4. 考察

粉末供給方向の相違により溶融地の温度分布が相違することから、溶込み深さの相違の原因は、図 18 に示すように考えられる。

粉末の送給にはガス搬送方式を用いているので、前方から粉末を供給する場合には搬送ガスにより溶融池が後方に押しやられ、粉末供給位置の溶融金属が減少する。このため溶融池の温度が低下し、結果的に基板の溶込み深さが減少すると考えられる。

逆に後方から粉末を供給する場合には、粉末供給位置における溶融金属量が増加するため溶融池温度が低下せず、結果的に基板の溶込み深さが増加するものと考えられる。

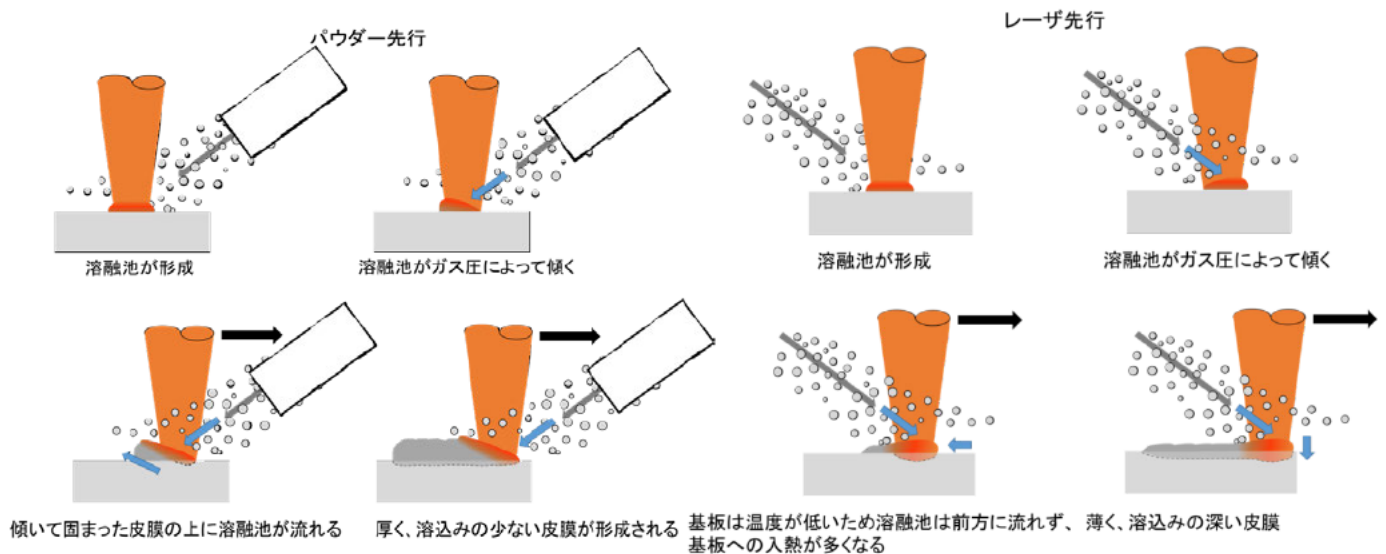


図 18. 粉末供給方向の相違による溶融池の相違

3-5. パウダー供給方向の影響試験の結論

粉末供給方向による溶込み深さへの影響について調査した結果、前方から粉末を供給するパウダー先行方式の方が、後方から粉末を供給するレーザー先行方式より溶込み深さを減少できることが明らかとなった。

【公開版】

実験条件である粉末供給量 0.4g/min、掃引速度を 5mm/s においては、レーザー出力を 770W から 800W まで変化させたいずれの条件においても、パウダー先行方式において溶込み深さ 0.3mm 以下を達成できることが分かった。

【2-2】高出力（4000W、5000W）レーザー機での試験

1. レーザー条件選定試験

1-1. 試験要領

レーザー出力、パウダー量、ガス流量、溶接速度等を変化した肉盛試験（ビードオンプレート試験）を実施し、溶込み形状、肉盛形状（ビード外観）の研究を行う。

1-2. 試験結果

図19に試験実施例（レーザー出力、フィーダー回転数（パウダー量）、キャリアガス（粉末供給ガス流量））の、ビード外観と溶込み形状を示す。

目標とする溶込み率10%以下、溶込みの均一化（0.3mm以内）した肉盛層が得られた。

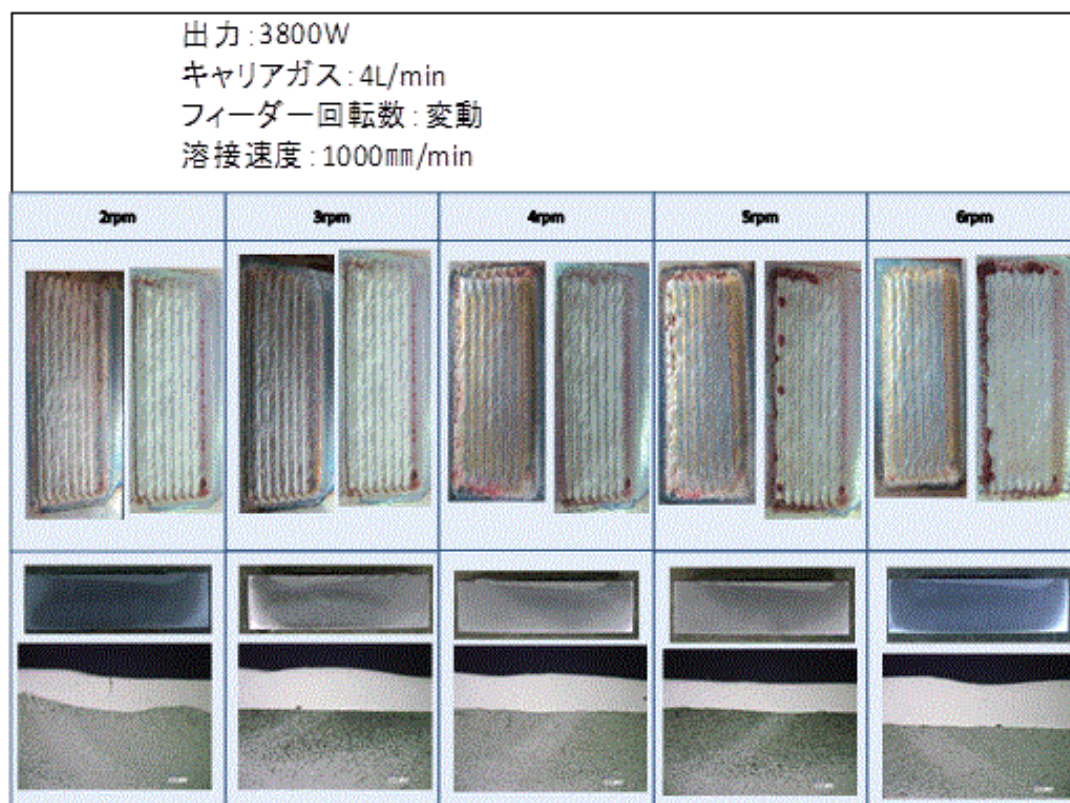


図19. 試験結果

2. 実物大台上試験用ブレーキディスク（φ720）での肉盛試験

2-1. 目的及び試験法

LMDでの実物大ブレーキディスクへのOFP-G66Tの肉盛試験を実施し、溶接性を評価する。

表2に肉盛仕様、図20に実物大ディスク形状と肉盛箇所を示す。

表2. 実物大ブレーキディスク肉盛仕様

(1) 素材	: ブレーキディスク素材(鍛鋼材)
(2) 形状	: φ722×20t
(3) 肉盛有効厚	: 下盛 2mm、上盛 3mm
(4) 肉盛材料	: 下盛 OFP-00T 2層盛 上盛 OFP-G66T 3層盛
(5) 肉盛方法	: LMD
(6) 予熱温度	: 予熱無し

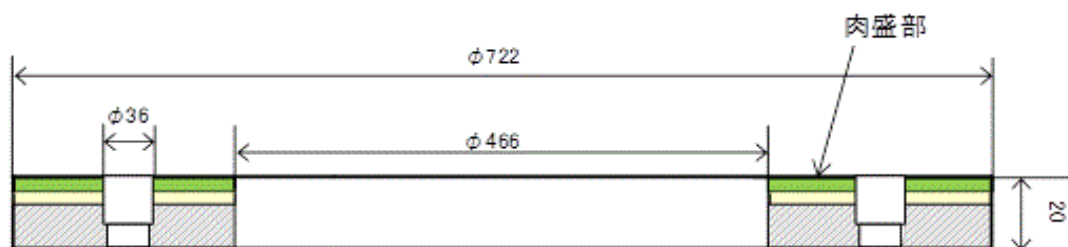


図20. 実物大ブレーキディスク形状と肉盛箇所

2-2. 肉盛試験結果

図21に肉盛後、機械加工の外観及び浸透探傷試験結果を示す。

肉盛層の割れは無く、微小なピンホールは一部認められるが、問題ないと考えられる。

歪量は、1mm以内となり、目標以内の歪量であった。

断面調査結果、目標とする溶込み率10%以下、溶込みムラ0.3mm以内を確保できた。

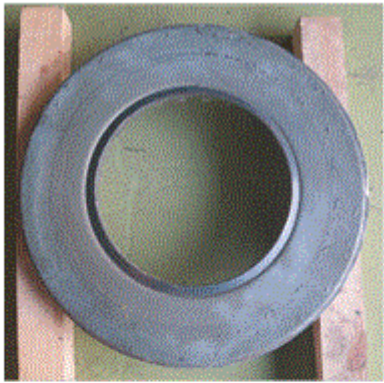
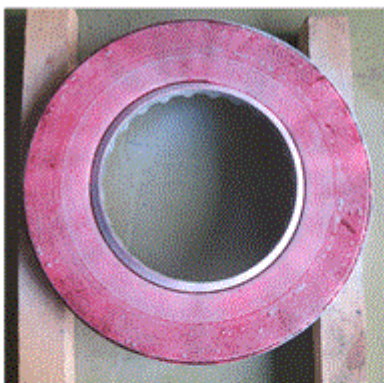
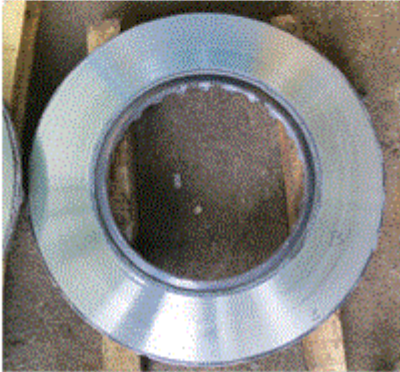
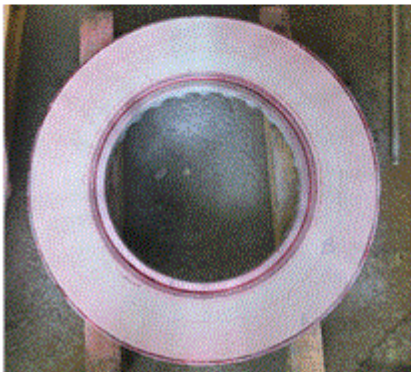
	外観	浸透探傷試験
肉盛後		
肉盛面機械加工後		

図 2 1．肉盛後、機械加工の外観及び浸透探傷試験結果

2－3．モデルディスク及び実物大ディスク肉盛試験結果まとめ

肉盛品質は、品質基準内であった。

【3. 高速鉄道用ブレーキディスクへのレーザークラッディング技術の適用】

【3-1】モデルブレーキディスク肉盛試験

1. 試験方法

各種開発材料の肉盛モデルブレーキディスク（小型ディスク）を製作し、モデルブレーキ試験を実施し、耐摩耗性、耐き裂性、摺動特性の観点から評価を行う。

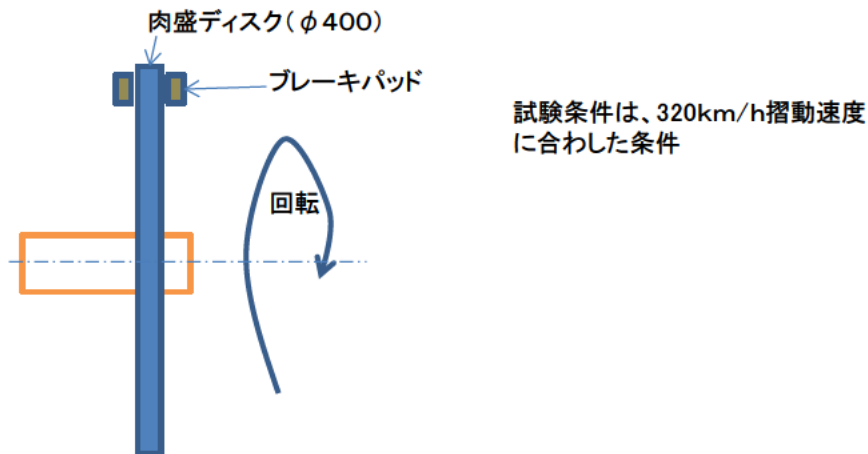


図22. モデルブレーキ試験結果

2. 試験結果

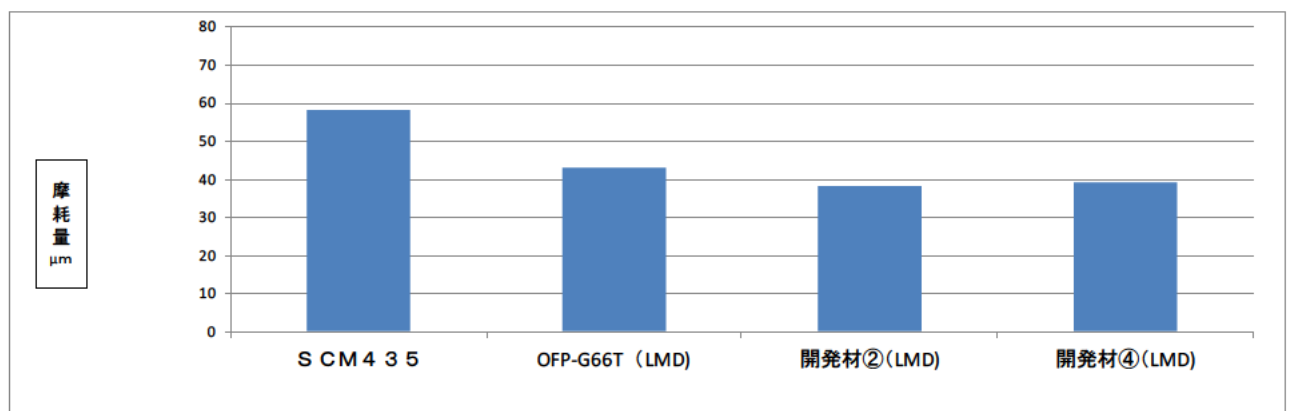


図23. モデルブレーキ試験方法

3. 結論

モデルブレーキ試験結果、硬質Ni合金が優れた結果が得られたが、従来品のOFP-G66T (PTA) に比べ、OFP-G66T (LMD) においても、優れた結果が得られたことから、台上試験は、機械的性質で優れたOFP-G66T (LMD) で進める。

【3-2】高速対応の肉盛ブレーキディスクの性能試験（鉄道総合技術研究所で実施）

1. 目的

ブレーキディスクの摩擦面にレーザー粉体肉盛溶接（LMD）により耐熱性を図るとともに、従来の粉体肉盛プラズマアーク溶接法（PTA）よりも耐摩耗性を向上する。
400km/h までの台上試験により基本ブレーキ性能を、300km/h の非常ブレーキ耐久試験により耐摩耗性を評価する。

2. 台上試験

2-1. 試験条件

表3. 試験諸元

項目		諸値
試験機	車両重量	54ton
	慣性倍率	5%
	車輪径	860mm
	慣性モーメント	1322 kgm ² (54.5ton)
ディスク	材質	上盛（Ni 基合金＋高融点金属粒）：3mm 下盛（Ni 基合金）：2mm ＋母材（特殊一体鍛鋼） ※ボルト締結孔は下盛（Ni 基合金）
	形状	中央締結型
キャリパ	方式	空圧テコ式
ライニング	材質	無鉛銅系焼結合金
	形状	等面圧
	想定摩擦係数	0.3（EB）、0.28（EB 向上）



図24. ディスク



図25. ライニング外観

2-2. ブレーキ条件

ライニングの押付制御は通常の押付力制御とし、ブレーキ種別を B7、EB、EB 向上の3種類とした。

表4. 試験条件

ブレーキ条件	ノッチ	初速度 [km/h]	試験回数
非常	EB	70、118、169、210、260、300、 320、360、400	各3回
地震	EB 向上	70、118、169、210、260、300、 320、360、400	各3回
耐久（非常）	EB	300	105回

2-3. ブレーキ試験結果

- ブレーキ距離は概ね想定値を満足した。
- 摩擦係数は概ね想定値前後の値を示し、ブレーキ初速度に依存せず安定していた。
- ディスク最大温度は、目安値の 700℃を下回った。
- ライニング最大温度は、目安値の 1050℃を下回った。
- 耐久試験後のディスク外観は、目立った亀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。
- ディスクの摩耗量は PTA 比で約 1/7、LMD（2015 年度）比で約 1/5 となり、耐摩耗性が向上した。加えてこの結果は、従来の鋼製ディスクの約 1/3 であり、従来品よりも優れた性能を有している。その理由として、ライニング成分がディスク摩擦面

へ移着して自己潤滑層を形成したことにより、ディスク摩擦面が保護されたことが考えられる。図33をみると、この移着物によってディスク形状が変化しているのが分かる。

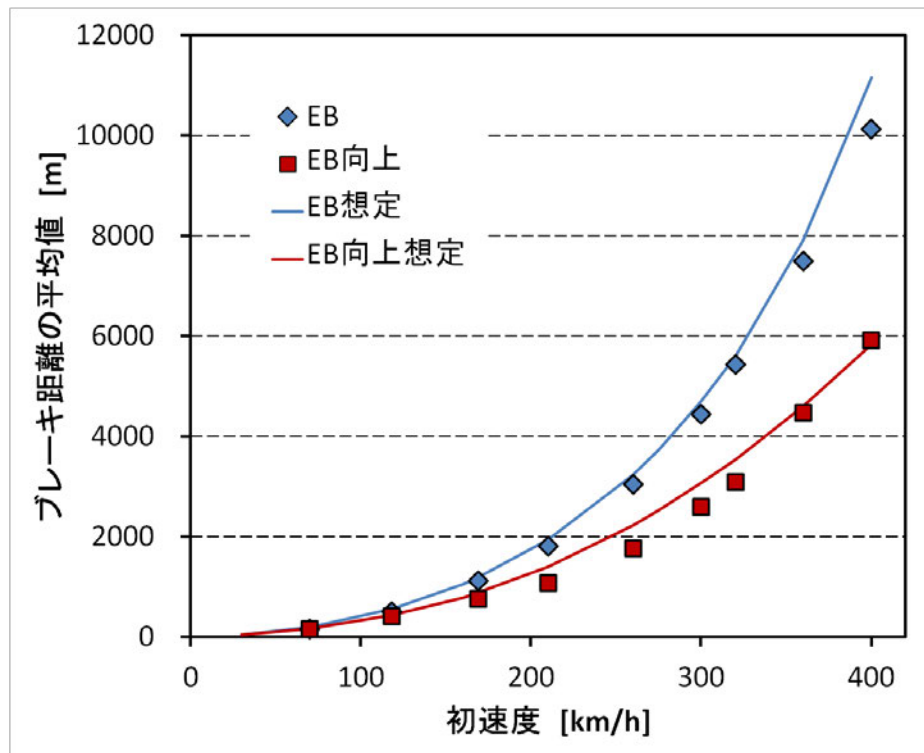


図26. ブレーキ距離

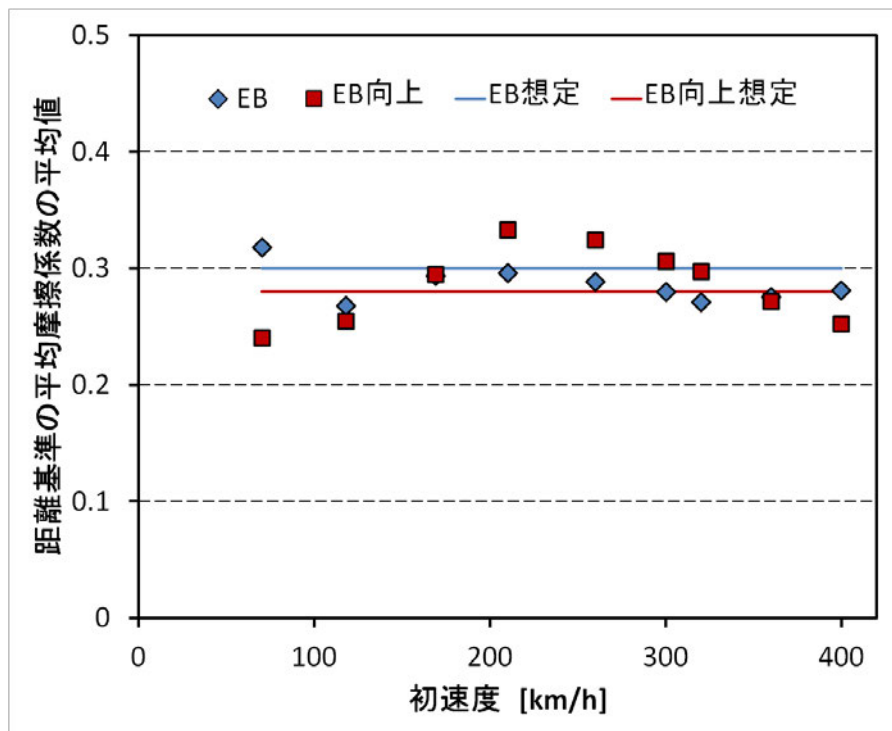


図27. 平均摩擦係数

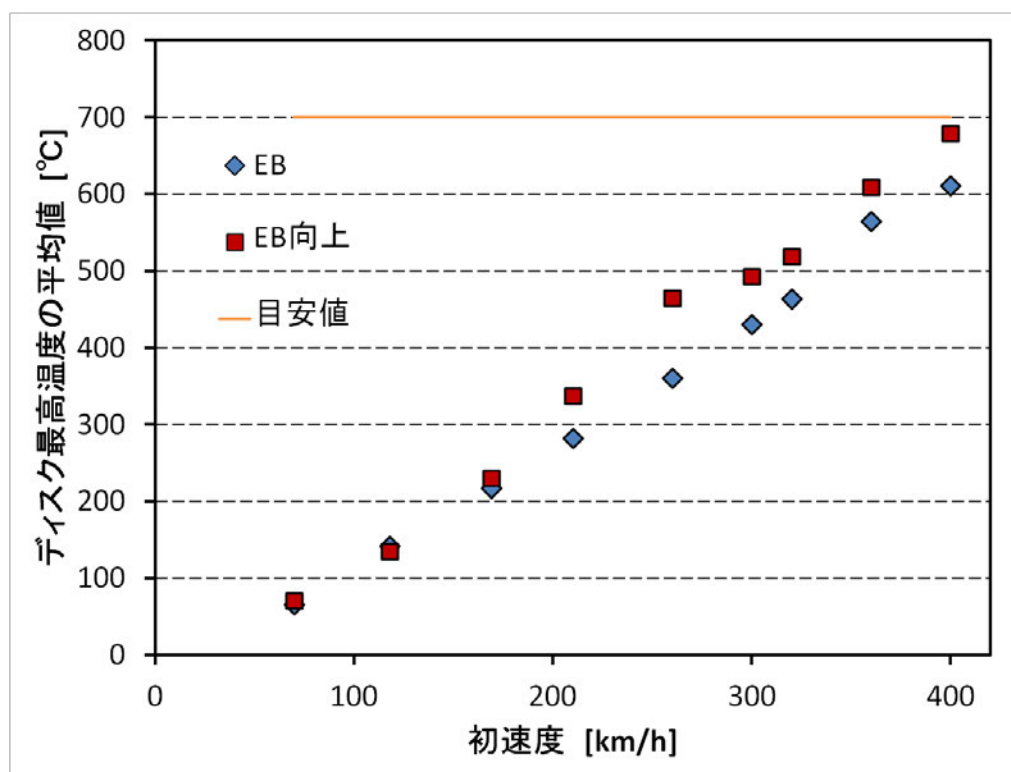


図28. ディスク最高温度

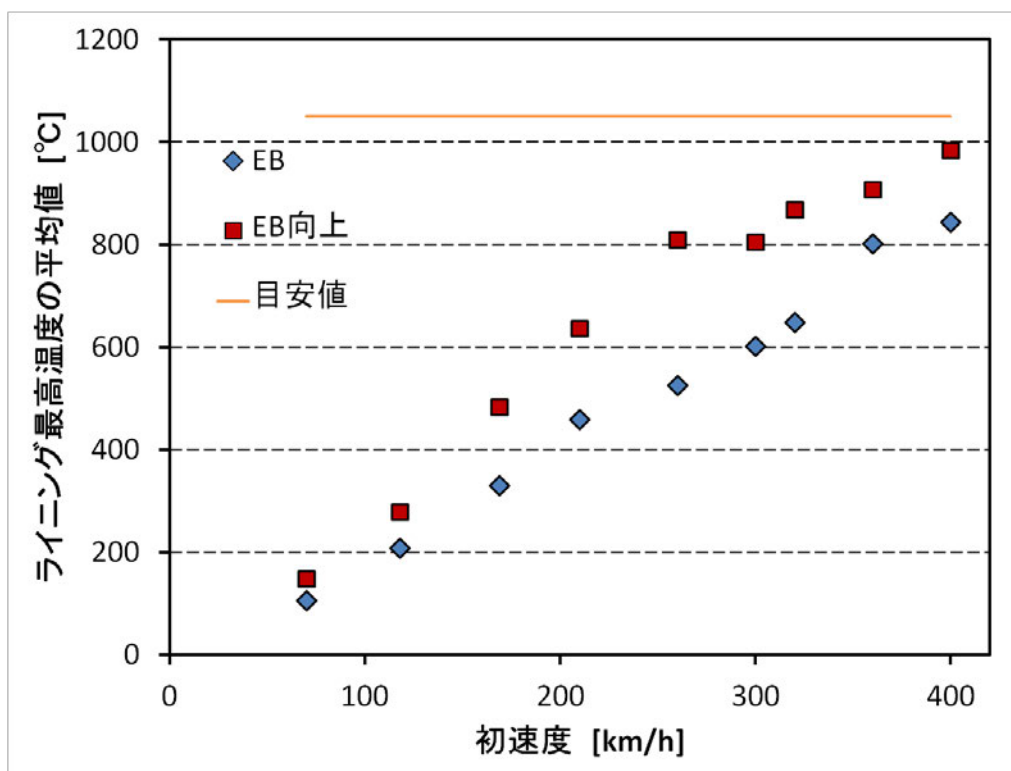
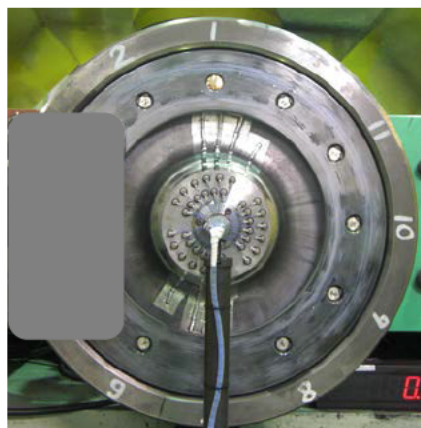


図29. ライニング最高温度

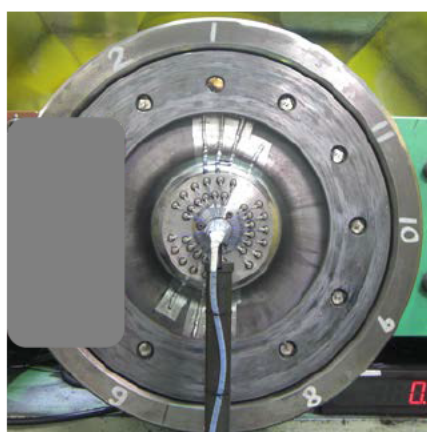


(a) ディスク



(b) ライニング

図30. EB 試験後の外観

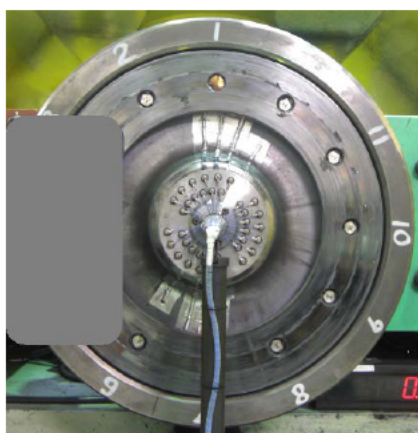


(a) ディスク



(b) ライニング

図31. EB 向上試験後の外観



(a) ディスク



(b) ライニング

図32. EB 耐久試験後の外観

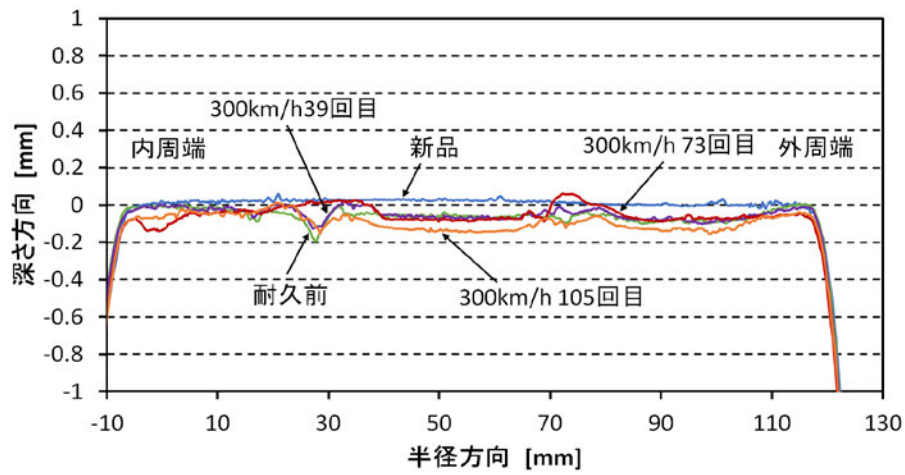


図33. ディスクの摩耗形状

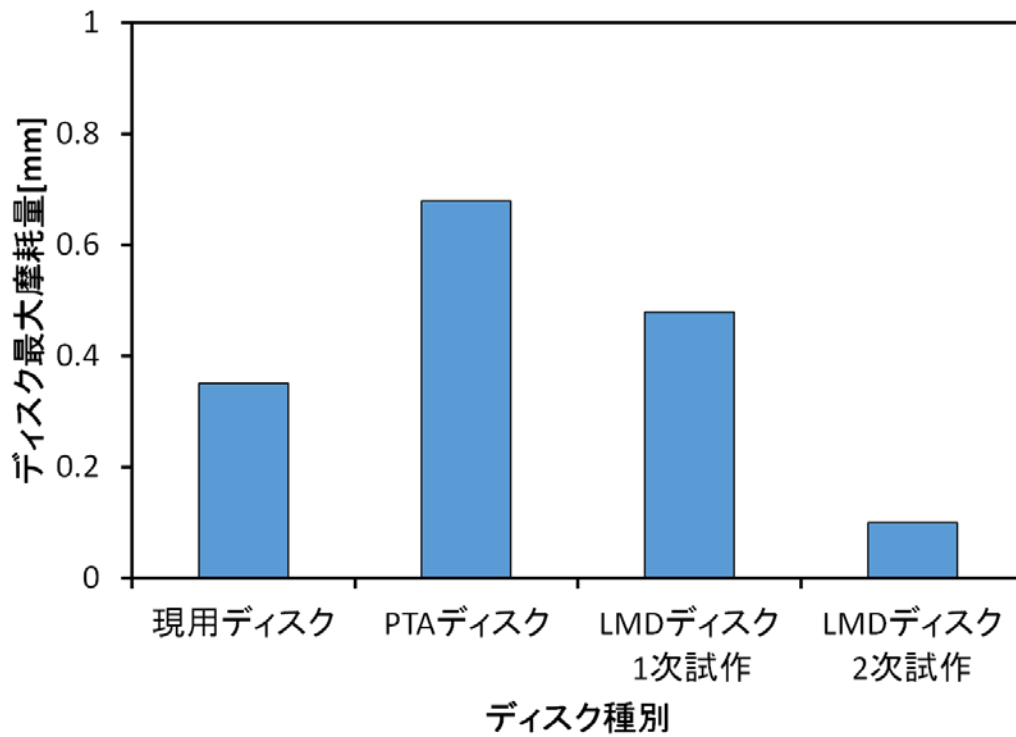
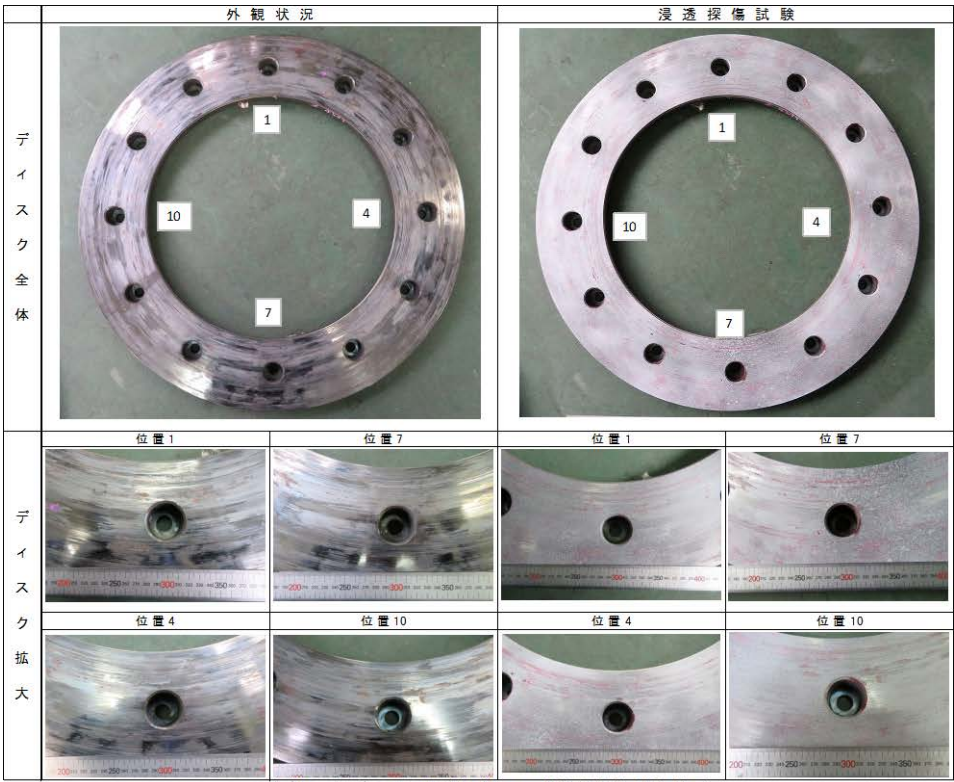


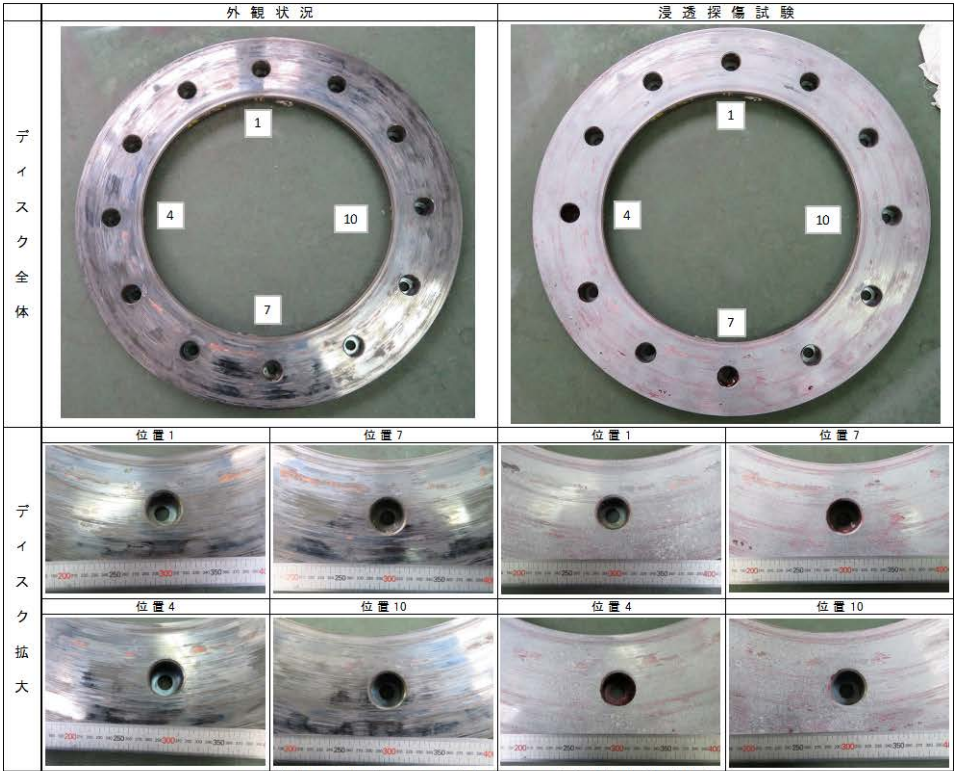
図34. ディスク最大摩耗量の比較

2-4. 試験後のディスク調査結果（外観、浸透探傷試験結果）

両ディスク共に割れ等は認められず、良好な外観状態であった。



F側ブレーキディスクの外観状況及び浸透探傷試験結果



反F側ブレーキディスクの外観状況及び浸透探傷試験結果

図35. 台上試験後の外観、浸透探傷試験結果

【3-3】 高能率のブレーキディスクの自動肉盛装置の開発

1. 自動肉盛設備

スパイラル自動肉盛装置を製作し、実ブレーキディスク形状への肉盛を行った。



図36. 自動肉盛装置（小型ディスク肉盛風景）

2. 実形状ディスク自動肉盛試験

高能率の肉盛条件（2-3 での試験結果条件）で、スパイラル自動肉盛を実施し、良好な盛層が得られた。目標通りの肉盛層が得られた。

下盛後の外観 肉盛厚: 約2mm	上盛後の外観 肉盛厚: 約5.8mm	加工後の外観 肉盛有効層5mmに加工
		

図37. 自動肉盛後の外観

3. まとめ

スパイラル自動肉盛装置を用いて、高能率肉盛条件で肉盛を行った結果、従来の施工時間に対して、ほぼ1/2に短縮できた。肉盛層の品質においても、目標とする品質基準に合格した。

第3章 全体総括

1. 研究開発成果の総括

平成26年度から平成28年度の間に、「レーザークラッ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」のテーマでも研究開発を実施した。その結果、耐熱性、耐摩耗性、耐亀裂性に優れた開発材料をレーザークラッディングでの低溶込み、低希釈技術の確立を行い、ブレーキディスクへの肉盛に適用することで、最高速度400km/h以下の条件で、ブレーキ性能は安定した摩擦係数(0.3以上)、開口亀裂(亀裂幅0.1mm以上)および筋摩耗が発生しない肉盛ブレーキディスクの開発が行えた。

2. 研究開発後の課題・事業化展開

2-1. 課題

肉盛ブレーキディスクの実用化に向け、低コスト化の課題がある。本研究では、高効率自動肉盛装置開発及び高能率肉盛条件選定により、従来に比べ、製作時間短縮は行えたが、今後、大阪大学で基礎研究を行ったデータを基に、高能率レーザー機の導入も検討を行う。

2-2. 事業化展開

(1) ブレーキディスク

本研究のターゲットとする製品は、具体的な川下企業のニーズと繋がっていることから、事業化で成果を出しやすい環境にある。

既存の新幹線では、鋼製ブレーキディスクが採用されている。輸送機関の安全運行を支える要はブレーキであり、将来計画されている速度400km/hの高速鉄道を念頭におくと、ブレーキディスク摺動面の耐熱性能の飛躍的向上と経済的な製造技術の確立は必須条件であり、今回取り組むレーザークラッディング技術の更なる高度化は、これらの要件を満たしている点で、鉄道業界からの期待が大きい。

(2) その他案件

今回、開発を行った母材に対して、熱負荷が小さく、溶接歪を抑え、低溶込み可能な溶接技術を用いて、高品質が要求されるスクリュー、刃、製鉄用スベリ軸受、ポンプ、バルブ部品、タービン部品等に適用を図る。