

# 硬質クロムめっき代替のレーザークラッド技術の開発 —レーザークラッドを用いた複合研削盤の検討—

## Development of Laser Cladding Technology as an Alternative to Hard Chrome Plating — Study on an Integrated Laser Cladding System and Cylindrical Grinding Machine —

澁川大朗 H. SHIBUKAWA 小川史樹 F. OGAWA

Laser cladding technology was developed as an alternative to hard chrome plating, which has a high environmental impact due to the use of hexavalent chromium. First, a basic evaluation of laser cladding was performed to determine the processing parameters. A prototype multi-use machine was then constructed integrating a laser cladding system and a cylindrical grinding machine, and the coating formation and grinding processes were evaluated. The results, we were able to form a high quality hard coating by laser cladding. Laser cladding coating was shown to be an alternative to hard chrome plating by confirming that the corrosion resistance, wear resistance, and adhesion strength were equivalent or superior to hard chrome plating.

**Key Words:** additive manufacturing, laser cladding, laser metal deposition, hard chrome plating, cylindrical grinding machine

### 1. はじめに

切削加工や研削加工など従来の除去加工に対し、近年では金属 3D プリンターに代表される付加加工（AM：Additive Manufacturing）の普及が急速に進んでいる。たとえば、日本国内における金属 AM の市場規模は、2015 年は 27 億円程度であったが、10 年後の 2025 年には 4 倍以上の 125 億円程度になることが予測されている。その理由として、AM は除去加工では実現できない内部構造や複雑形状の加工が可能であることや、ニアネットシェイプによるコストダウン効果、材料歩留りの向上が挙げられる。

金属 AM は大別すると、敷き詰めた金属粉末を選択的に熔融させ積層するパウダーベッド（PBF：Powder Bed Fusion）方式と、金属粉末とレーザーを同時に照射し熔融させ積層するレーザークラッド（LMD：Laser Metal Deposition）方式がある。PBF 方式は複雑形状の造形に適しており、航空宇宙分野や医療分野での適用が進んでいる。これに対して、LMD 方式は既存製品の補修や異種材料のコーティングに適しているため、金型の補修や製品への機能付与が可能である。また、工作機械などの設備へ搭載できる利点もある。

これまで工作機械は、精度向上、省スペース化、稼働率向上のため、種々の除去加工工程を集約した複合加工機が開発されてきたが、付加加工が可能なレーザークラッドと複合化することで、より高度な工程集約が可能となる。たとえば、当社の円筒研削盤のワークである高精度ロールは、めっきや溶射などの表面処理工程で機能付与を行っていることが多い。この表面処理をレーザークラッドで代替し、研削盤に搭載できれば、効果的な工程集約となる。そこで、めっきを代替するレーザークラッドの技術開発および複合研削盤の開発に取り組んだ。本報では、レーザークラッドの加工評価と、硬質クロムめっき代替としての被膜の有用性を検証した結果を報告する。

### 2. 高精度ロールの現状

高精度ロールは耐食性と耐摩耗性が必要なため、硬質クロムめっきが採用されることが多い。しかし、硬質クロムめっきの製造工程では六価クロムに該当する無水クロム酸が使用されており、非常に強い毒性から各国で厳しく規制されている。特に欧州では、製品に含有する有害物質を規制する RoHS 指令の対象 10 物質に六価クロ

ムが含まれている。さらには、REACH 規則の認可対象物質にも追加され、六価クロムの製造、使用、上市\*が規制されている。日本においても、労働安全衛生法で製造、使用を規制する特定化学物質に指定されている。

また、高精度ロールの需要増加に対し、めっきの事業者数が減少しており、めっきのリードタイムが長くなっていることも問題となっている。経済産業省の統計によると、2009年の日本国内のめっき事業者数は1316社<sup>1)</sup>であったが、10年後の2019年では1070社<sup>2)</sup>であり、2割ほど減少している。以上の要因から、硬質クロムめっきの代替技術が求められている。

※上市：有償無償を問わず供給すること。

### 3. レーザークラッドによるめっき代替

#### 3.1 硬質被膜の現状

硬質クロムめっきの代替技術として各種工法が研究されているが、完全に代替可能な工法は実現していない。一般的に知られる溶射は密着強度が低く、作業環境にも課題がある。現状の硬質被膜工法とその特性を表1に示す。硬質クロムめっきの主な特長は、硬さ、耐食性、耐摩耗性が高いことである。硬さはJIS H8615で750HV以上と規定されており、一般的には900HV程度の硬さを有している。理想的なめっきは基材とめっき被膜の強固な金属結合となるが、実際には基材表面の酸化物や油、汚れなどを完全に除去することは難しい<sup>5)</sup>。そのため、仕上げ加工時や高精度ロールの使用時に被膜が剥離することがあり、前述の環境影響と合わせて問題となっている。また、六価クロムの代わりに無害な三価クロムを用いる三価クロムめっきは、六価クロムめっきより密着性は優れるものの、耐食性やコストで劣るため、完全な代替工法となっていない。

表1 硬質被膜工法の比較<sup>3,4)</sup>

Comparison of hard coating methods

	硬質クロムめっき	HVOF 溶射	レーザークラッド
一般的な最大硬さ	900HV	1200HV	1000HV
代表的な厚み	0.005 - 0.1mm	0.05 - 0.5mm	0.2 - 2 + mm
密着強度	400MPa	80MPa	800MPa
作業環境リスク	六価クロム	騒音	-

一方、レーザークラッド工法は図1に示すとおり、レーザーを照射して溶かした基材に金属粉末を供給することで被膜を作る技術であり、使用する粉末材料によって硬質クロムめっき並みの硬さの被膜にできる。密着強度は一般的に800MPaと高く、2mm以上の厚い被膜が形成できる。また、六価クロムを使用せず、加工時の騒音もないため、作業環境リスクも少ない。

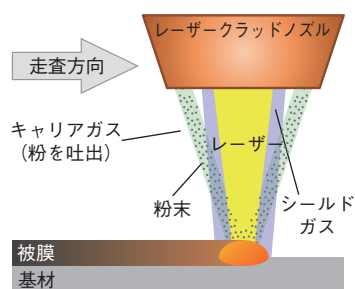


図1 レーザークラッド工法概略図  
Schematic of laser cladding method

#### 3.2 レーザークラッド複合研削盤の提案

前述のとおり、被膜の硬さ、密着強度という品質面での利点と六価クロムフリーという環境面での利点があり、めっき代替技術としてレーザークラッド技術が有望であることから、レーザークラッド技術開発および複合研削盤の開発に着手した。

レーザークラッド装置を円筒研削盤に組み込んだ複合機は、前述のレーザークラッド技術の利点に加え、工程集約によるリードタイムの短縮が可能である。ロールの製造工程において、従来の硬質クロムめっきの場合とレーザークラッド複合研削盤によるロール製造工程の比較を図2に示す。従来のめっきロール製造工程は、旋盤で素材を旋削し、研削盤に載せ替えて荒研削し、めっき事業者においてめっきを施工し、最後に研削盤で仕上げ研削を行う。この工程でリードタイムの多くを占めるのが輸送とめっき施工である。

これに対し、レーザークラッド複合研削盤であれば、工作物を脱着することなく研削と被膜形成が可能である。そのため、従来のめっき事業者への輸送リードタイムがゼロとなることに加え、工作物の脱着に要する段取り時間を大幅に短縮できる。

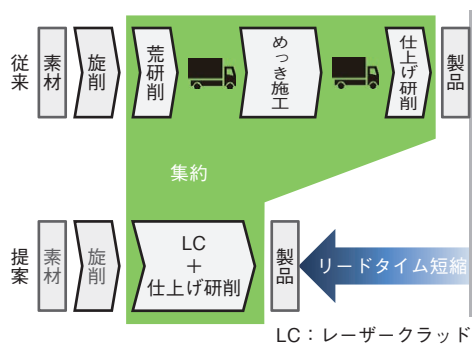


図2 ロール製造工程の比較  
Comparison of roll manufacturing processes

## 4. レーザークラッド加工評価

### 4.1 粉末材料の選定

レーザークラッド加工で形成した被膜の特性は供給する粉末材料の特性に依存するため、要求される被膜の特性に応じた粉末材料の選定が重要となる。硬質クロムめっきを代替するには、耐食性と耐摩耗性を満足する粉末材料が必要となる。一般的に耐摩耗性と硬さには相関がある場合が多く、耐摩耗性の指標として硬さが用いられることがある。したがって、硬質クロムめっきと同等の耐摩耗性を得るには、同程度の硬さが必要である。しかし、硬質クロムめっきと同程度の硬さの材料でレーザークラッド加工を施すと、粉末材料の再凝固時のぜい性によりクラックを生じやすい。これを回避するには基材への予熱が有効である。基材の予熱で、レーザー照射後の施工部において冷却時の温度勾配が緩やかになるため、クラックの抑制が可能である。一方、予熱には追加の設備・装置が必要となることや、熱ひずみが大きくなることなどの問題があるため、予熱を必要としないことが望ましい。しかし現状では、硬質クロムめっきと同等の硬さと耐食性を満足し、予熱を必要としない粉末材料は確認できていない。硬質クロムめっき代替の候補となる2種類の粉末を表2に示す。

表2 粉末材料の比較  
Comparison of powder materials

材料名	成分 (wt%)							硬度
	Fe	C	Cr	Ni	WC	Co	他	
鉄系材料	Bal.	0.15	18	2.5	—	—	< 2.3	600HV
超硬材料	—	—	—	—	88	12	—	1 000HV

### 4.2 加工評価

レーザークラッド技術の基盤構築のため、まず浸炭焼入れ程度の硬さで耐食性の高い鉄系材料(表2)を選定した。レーザークラッド加工における成膜品質は、レーザー出力、走査速度、粉末の供給量、シールドガスなどの加工条件で決まる。最適な加工条件を選定するため、基材への予熱を行わず、レーザークラッド加工の基礎評価を行った。加工テストと被膜品質確認の簡便さから、平板形状のワーク(材料はS45C、サイズは250×80×6mm)を用いた。試験に用いた条件範囲を表3に示す。試験後の断面観察により、断面にクラックや空孔が少なく、基材への入熱が少ない加工条件を導いた。

表3 加工条件  
Process parameters

項目	試験条件
レーザー発振器	Laserline 製 LDF-4000
レーザークラッドノズル	GTV 製 PN-6625
レーザー集光径	φ3.1mm
レーザー出力	1 000 ~ 4 000W
走査速度	5 ~ 25m/min
キャリアガス	5 ~ 10L/min
シールドガス	20L/min
粉末供給量	26 ~ 39g/min
走査間隔	0.6 ~ 1.5mm
予熱	なし

次に、レーザークラッド装置を取り付けたロボットを円筒研削盤に組み合わせ、図3に示すレーザークラッド複合研削盤試験機を製作した。レーザークラッド加工の手順は以下のとおりである。レーザークラッド時は研削盤の天井部に設けた開口部から加工室内にロボットハンド先端のレーザーヘッドを挿入する。工作物上方にレーザーヘッドを停止させ、研削盤の主軸回転とテーブルの送り、レーザー発振の同期により、らせん状に走査し被膜を形成する(図4)。研削時はレーザーヘッドを加工室外に退避させ、クーラントミストの付着を防ぐ。この試験機を用いて、ロールへのレーザークラッド加工評価を

行った。工作物の材料は S45C で、サイズが  $\phi 53\text{mm}$  の多段のロール形状ワークを用いた。平板への基礎評価で導いた条件でレーザークラッド加工を行った。レーザークラッド加工後は研削を行い、表面欠陥の有無を確認するため、浸透探傷試験を行った。クラックや空孔などの表面欠陥があれば、赤色の指示模様として表れる。この結果、表面欠陥がないことが確認できた (図5)。ロールへの加工評価により、レーザークラッドで高品質な被膜を形成できることが示された。



図3 レーザークラッド複合研削盤試験機  
Prototype laser cladding and grinding machine



図4 試験機によるレーザークラッド加工  
Laser cladding process on prototype machine

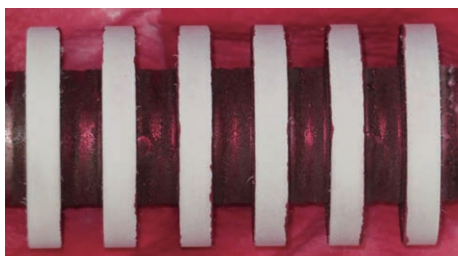


図5 浸透探傷試験結果  
Result of penetrant testing

## 5. レーザークラッド被膜の性能

レーザークラッド試験機にて製作した被膜を硬質クロムめっきの代替として有用か検証するため、代表的な特性である硬さ、耐食性、耐摩耗性の3項目について、比

較試験で評価した。さらに、硬質クロムめっきの課題である被膜の剥離に対し、レーザークラッド被膜の密着強度も評価した。

### 5.1 硬さ評価

マイクロビッカース硬さ試験で硬質クロムめっきとレーザークラッド被膜の硬さを測定した結果を表4に示す。硬質クロムめっきの硬さは 883HV であり、一般的な硬質クロムめっきの硬さ 900HV と同等となった。一方、レーザークラッド被膜は加工条件によって異なるが、500 ~ 600HV 程度であり、使用した鉄系材料の硬さと同程度の結果となった。

表4 マイクロビッカース硬さ試験の結果  
Result of micro-Vickers hardness test

硬度, HV	硬質クロムめっき	レーザークラッド被膜		
		条件①	条件②	条件③
	883	503	534	596

### 5.2 耐食性評価

耐食性は、図6に示す塩水噴霧試験で平板に硬質クロムめっきを施工した試験片とレーザークラッド被膜を形成した試験片を、それぞれ研削した面で評価した。試験は JIS Z2371:2015 に基づき 5% NaCl を用いて、24 時間の連続噴霧を行った。試験中は 2 時間ごとに目視による外観観察を行い、発錆が確認できた時点で試験槽から取り出し、発錆が確認できなかった試験片は試験を継続した。試験終了後は発錆部分の顕微鏡観察および SEM-EDS による元素分析を実施した。

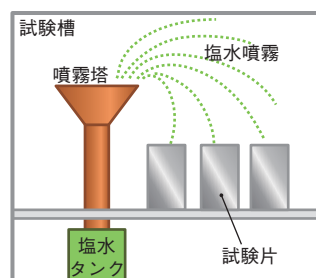


図6 塩水噴霧試験概略図  
Schematic of salt spray test

試験の結果、硬質クロムめっきは 2 時間でさびが発生した。さびは図7の顕微鏡拡大写真に示すとおり、変色部が円形に広がっている。また、変色部の元素分析では、めっき被膜には含まれない鉄成分が多く含有していたこ

とから、基材まで貫通するピンホールからさびが発生したと推定できる<sup>6)</sup>。硬質クロムめっきのピンホールは前処理の不良や水素ガスの気泡で生じるため、ピンホールをなくするのは困難である。一方で、レーザークラッド被膜は24時間経過後でもさびが発生しなかった。以上の分析から、適正な条件で施工したレーザークラッド被膜は、硬質クロムめっき以上の耐食性を有することが確認できた。

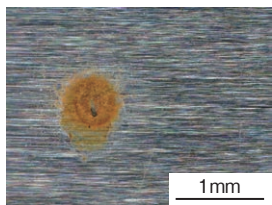


図7 硬質クロムめっきのさび

Optical micrograph of rust on hard chrome plating

### 5.3 耐摩耗性評価

耐摩耗性の評価として、図8に示すボールオンディスク試験を実施した。試験片の摩耗量の差を明確に判定するため荷重を1000gとし、試験片上でしゅう動させるボール材は、硬さ1400HVの窒化けい素を用いた。試験条件を表5に示す。試験終了後はレーザー顕微鏡で、摩耗部の観察と摩耗痕の深さを測定した。

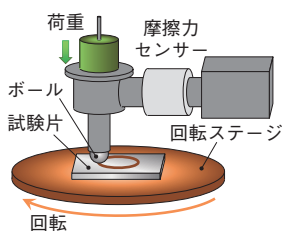


図8 ボールオンディスク試験概略図

Schematic of ball-on-disk test

表5 試験条件  
Test conditions

項目	試験条件
荷重	1000g
しゅう動半径	5mm
回転速度	20min <sup>-1</sup>
時間	10800s
ボール	3/16 inch (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> )
潤滑	無潤滑

測定結果を図9に示す。硬質クロムめっきの摩耗痕の深さが約100μmであるのに対し、レーザークラッド被膜はほとんど摩耗しておらず、硬質クロムめっき以上の耐摩耗性を確認できた。

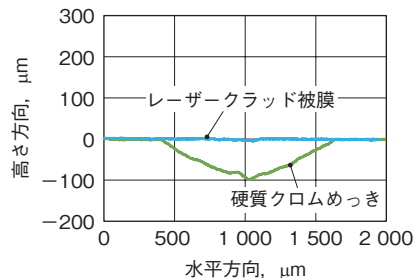


図9 摩耗痕の深さ  
Depth of wear scar

### 5.4 密着強度評価

密着強度はJIS G 0601で規定されるクラッド鋼の試験方法を参考に、図10に示すせん断強さ試験で評価した。試験は、切り出した試験片をせん断用の治具で固定し、被膜部分に当てたせん断刃に荷重をかけ、破断時の最大荷重を被膜と基材界面の面積で割った値を密着強度として評価した。ただし、治具の破損を防ぐため、荷重の上限を4000Nとした。

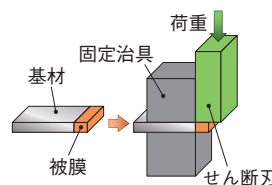


図10 せん断強さ試験概略図  
Schematic of shear strength test

硬質クロムめっきは1種類、レーザークラッド被膜は基材溶融量の密着強度に対する影響を調査するため、希釈率12%、6%、0%の3種類を用意した。なお、希釈率Dは形成したビードの組成が基材成分の混入によって希釈される割合で、基材溶融部の断面積A、形成したビードの断面積Bとして、次式で表される(図11)。

$$D = A / (A + B) \times 100 \quad (1)$$

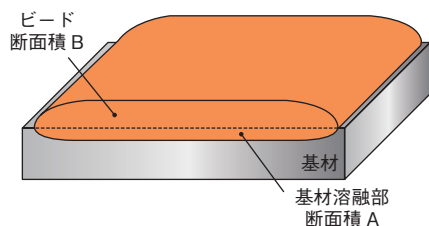


図11 レーザークラッドにおける希釈率  
Dilution rate of laser cladding coating

せん断強さの試験結果を表6に示す。硬質クロムめっきの密着強度は500MPa程度となった。これに対して、レーザークラッド被膜の密着強度は800～1000MPa程度であり、一部は荷重の上限でも破断しなかった。試験片の破断部を観察したところ、硬質クロムめっきは基材との界面で水平にずれるように破断していた。一方、レーザークラッド被膜は界面ではなく基材部分で破断していた。つまり、レーザークラッド被膜の密着強度は基材相当の強度であることが推測できる。また、希釈率の密着強度に対する影響はなく、希釈率0%においても硬質クロムめっきの約2倍の強度であった。これは、界面近傍における微小領域の溶融により冶金的に接合し、分子間力による結合が働いているためと考えられる。

表6 せん断強さ試験結果  
Results of shear strength test

試験片		密着強度 [MPa]		
		N = 1	N = 2	N = 3
硬質クロムめっき		490	547	500
レーザークラッド被膜	希釈率 12%	823	(1 029)	1 035
	希釈率 6%	(969)	(1 011)	868
	希釈率 0%	961	953	(1 023)

( ) 付きは上限荷重を示す

## 6. おわりに

環境負荷の高い六価クロムを使用する硬質クロムめっきの代替として、六価クロムを使用しないレーザークラッド技術の開発および複合研削盤の開発に取り組んだ。レーザークラッドの基礎評価にて最適な加工条件を選定し、良好な被膜が形成できた。硬質クロムめっきの代替としてのレーザークラッド被膜の有用性を検証するため、評価試験を実施した。その結果、硬さ以外の耐食性、耐摩耗性、密着強度においては硬質クロムめっきと同等

以上の性能を有することが確認できた。

今後は、硬質クロムめっき代替として未達成であった硬さにおいても満足する技術開発に取り組み、本技術の実用化による生産技術革新を目指す。

## 参考文献

- 1) 経済産業省大臣官房調査統計グループ：平成22年工業統計表「産業編」データ(経済産業省大臣官房調査統計グループ)[平成24年4月13日公表]，産業別統計表(産業再分類別)，<https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kougyo/result-2/h22/kakuho/sangyo/xls/h22-k3-data-j.xls> (2012)。
- 2) 経済産業省大臣官房調査統計グループ：2020年工業統計表 産業別統計表データ 令和3(2021)年8月13日掲載，従業者規模別統計表，<https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kougyo/result-2/r02/kakuho/sangyo/xls/2020-k3-data.xls> (2021)。
- 3) 和田哲義：レーザークラディングの概要と最新技術動向，レーザー協会誌 特集 レーザ肉盛技術，Vol. 44, No. 2 (2019) 8-14。
- 4) 山下順広，舟田義則，塚本雅裕，阿部信行：レーザー粉体肉盛法を用いた超硬合金の層形成技術開発，石川県工業試験場研究報告，Vol. 67 (2017) 5-8。
- 5) 森河 務，中出卓男，横井昌幸：めっき皮膜の密着性とその改善方法，表面技術誌 小特集：薄膜の密着性，Vol. 58, No. 5 (2007) 10。
- 6) 眞保良吉：硬質クロムめっきの特性，表面技術誌 小特集：めっき皮膜の特性とその変化，Vol. 65, No. 3 (2014) 13-18。

## 筆者



澁川大朗\*

H. SHIBUKAWA



小川史樹\*

F. OGAWA

\* 工作機械・システム事業本部 先行開発部