# 「環境に優しい」メーカーを支援するレーザクラッディング技術

ロジャー・カウフォールド

## 低コストの改修で高価値な部品を実現する技術

社会は全般的に「環境に優しい」方向に進行しており、私たちは自分の考え方やさまざまな技術の使い方に根本的な変化が生じていることを実感している。最終製品の品質が落ちるわけではないのであれば、誰もが資源、器具、機器のリサイクルや再利用のメリットを理解している。世界の中の産業的に発展した地域における過去の経験から、また、世界中で続く経済困難を目の当たりにするなかで、私たちは、少し壊れたものはすべて捨ててよいというようなぜいたくはもはや許されないことを知っている。それにもかかわらず世界中において、商業的広告やマーケティングツールは、最新製品を買うように社会にプレッシャーを与えている。消費者社会は、自然資源に損害を与えながら、そのように作られて、これまで持続してきた。

幸い、社会や製造業界には冷静な判断力の持ち主がいて、修理、再生、リノベーションによってコストを削減しなければならないことを理解している。業界に、新しい機械を購入するための余分な資金はない。従って復旧が必要で、それに依存しているといって過言ではない。資源が利用できるとしても、今の時代に資金を風に吹き飛ばすほど無謀な人はいない。こうした社会的変化、新しい考え方、経済的圧力のおかげで、機械や製造エンジニアリングの修理および改修部門は現在、好景気にある。

この修理およびリノベーション市場の規模と潜在機会は、重機から溶接までの実質的にすべての製造部門で莫大である。産業サービス市場は、2017年から2023年の間に5.4%の年平均成長率（CAGR：Compound Annual Growth Rate）で成長し、2023年までに354億1000万ドル規模に達する見込みである。

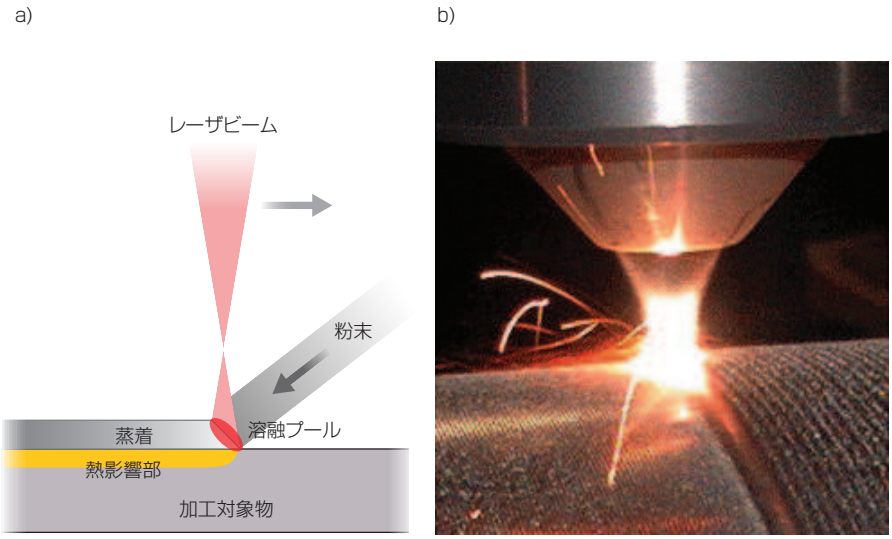


**図1**　レーザクラッディング加工の概念図(a)と、高強度鋼鉄によるスチールロールの表面再生処理(b)。

## レーザクラッディングの仕組み

レーザクラッディングという産業用プロセスでは、アークを確立することにより、母材表面が浅い深さまで溶融される。続いてクラッド材が、ワイヤーまたは粉末の形状で供給され、これもアークによって溶融することで、クラッド層が形成される。アーク溶接は一般的に、高い強度、良好な耐衝撃性、低いポロシティを備えた、完全に溶接された金属結合を生成する。しかし通常は、部品に高熱が加わることで、母材が大量にクラッド層に混合するほど基板が溶融してしまう。この希釈は、クラッド材を選択したそもそもの理由である性質を変えてしまうので、望ましくない。また、高熱は、機械的ゆがみを引き起こす恐れがあり、クラッディングのあとに部品の寸法精度を復元するためにさらなる処理を施さなければならなくなる。この熱ストレスは、機械的品質を低下させ、亀裂やポロシティなどの表面品質の問題を引き起こし、修理部品の寿命を縮めることにもつながる。マイクロエレクトロニクスは、生産コストを抑えるという同じ包括的な目標を追求しつつ、それと同時に、歩留まりと最終製品品質を向上させることを目指している。

レーザは、高精度で非接触型の処理を行う能力によって、多くの業界でこのトレンドを支えている。特にクラッディングは、この目標を達成する処理である。機械を長い間使い続けることによって、ごみ処理施設の$CO_2$排出量を抑えようとする方向に経済的圧力がシフトするなか、生産エンジニアリングの修理および改修部門の需要は急激に高まっている。レーザ応用の急速な成長と、レーザシステムのコストの低下に支えられて、レーザ材料加工は、自動車、航空宇宙、造船と船舶修繕、石油とガスの掘削など、多数の業界で順調に導入されている。

レーザクラッディングは基本的に、材料を蒸着するための手段である。積層造形（AM：Additive Manufacturing）のように、レーザを使用して粉末またはワイヤー状の原材料を溶融して結合することにより、ニアネット形状（完成品に近い形状）の部品を表面再生または作製する。多くの場合において、レーザクラッディング技術は、あらゆる種類の機械装置の修理と再生に利用されている（**図1**）。金属クラッディングのための最も一般的な従来手法はすべて、アーク加工に基づいている。

レーザを熱源として使用することは、アーク溶接に代わる魅力的な手段である。レーザは、必要な熱を非常に局所的に、かつ制御された方法で生成できるためである（「レーザクラッディングのメリット」を参照）。レーザクラッディングは、バルク材料をほんの少しだけ溶融することにより、クラッド層の希釈を大幅に抑えつつ、真の金属結合を生成することができる。また、熱入力が低いので、部品がゆがむことがなく、後処理の必要性をほぼなくすことができる。高出力半導体レーザは、高速で大面積のクラッディングのニーズに特に適している。

## システム開発

かなりの研究活動が現在、自動レーザクラッディング装置（**図2**）の開発に注がれている。レーザ出力、レーザ焦点、基板速度、粉末注入速度など、プロセスパラメータの多くを手動で設定しなければならないので、適切な結果を確実に得るには専門の技術者が注意を払う必要がある。しかし、多くの組織が、プロセスをオンラインで測定するセンサの開発に関心を寄せている。そのようなセンサによって、蒸着させたトラックのクラッド形状の高さと幅や、凝固速度などの冶金特性、最終的な微細構造、直近の溶融プールとその周辺領域の温度情報を監視する。そのようなセンサを利用して、技術者が常時監視しなくても最終製品が生産できるような制御戦略が設計されている。フォワードプロセッシングを目指す、一歩進んだ研究も行われている。微細

**図2**　トラック用アクスルにレーザクラッディング加工を施す様子を示している。この処理は、破損または摩耗したシャフトなど、風力タービン部品の修理にも適用できる。

## レーザクラッディングのメリット

- 摩耗部品の寿命を延長するための任意の形状のコーティングに対して、最良の手法である
- 部品を修理するための特定の蒸着が可能で、部品の金型がもう存在しないか、新しく作製すると時間がかかりすぎる場合に理想的
- 傾斜材料の適用に最も適している
- ニアネット形状の製造に適切に適応できる
- （他の溶接加工と異なり）トラックと基板の間の希釈が低く、強力な金属結合が得られる
- 基板の変形が小さく、熱影響部（HAZ：Heat Affected Zone）が小さい
- 微細構造に対して、冷却速度が高いか同等
- 幅広い材料に対応する柔軟性を備える（金属、セラミック、さらにはポリマーにも対応）
- 亀裂やポロシティのない部品が生成される
- コンパクトな技術である
- 生産時間が短縮される
- 満足度の高い部品修理が可能
- 傾斜機能部品の生産に対応
- 小さな構造の生産に対応

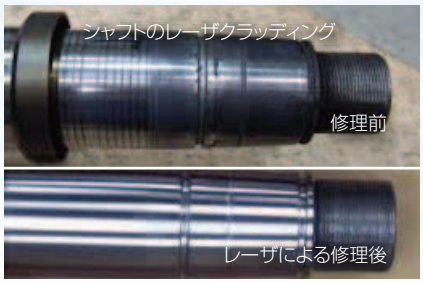


**図3**　摩耗や腐食に対し、消費エネルギーや材料浪費を低減し、有害物質の排出量を政府が定める基準以下に抑える、環境的に持続可能なエンジニアリング手法を実践することが必要である。

構造、内部ストレス、希釈ゾーンの勾配、クラッド接触角度など、ユーザー定義のアプリケーション用の特定の冶金特性に関するシステムパラメータを開発するものである。

クラッド層には性能の向上に加えて、コストを引き下げ、部品の基板材料の選択肢を広げる効果もある。そこには必ず、バルク特性と表面特性や、コストとの間の妥協が必要になる。たとえば、エンジンのクランクシャフトは、高いねじり応力を受けても破損しないように、十分に柔軟性のある材料から作製するのが望ましい可能性がある。しかしその一方で、たとえば、このクランクシャフトのベアリング面は、使用し始めてすぐに部品が摩耗しないように非常に硬ければ好都合である。クラッディングでは、材料のバルク特性と表面特性をそれぞれ独立して選択できるので、こうした妥協を回避することができる。具体的に説明すると、クラッディングでは、母材とは異なる組成の新しい表面層が基板の上に作成される。たとえば、低コストの材料を部品の大部分に使用しつつ、より高価な合金の摩耗、腐食、熱耐性を選択的に達成することができる。また、高価値部品を交換するにはかなりのコストがかかるが、クラッディングを利用すれば、それを経済的に改修することができるので、多くの業界においてコストの削減につながる。

レーザクラッディングに用いられる粉末は、通常は金属性で、同軸または横方向ノズルによってシステムに注入される。流入する金属粉末とレーザの相互作用によって溶融が生じ、いわゆる溶融プールが形成される。これを基板上に蒸着させる。基板を動かすことによって、溶融プールが凝固し、固体金属のトラックが生成される。これが最も一般的な方法だが、レーザ／ノズルアセンブリを固定の基板の上で動かして、凝固トラックを生成する方法もある。基板の動きは、CAD（Computer Aided Design）システムによって誘導される。CADシステムは、固体物質が一連のトラックに挿入されて、求められる部品が軌跡の最後で生成されるまでの処理を制御する。

研究活動は現在、自動レーザクラッディング装置の開発に注がれている。レーザ出力、レーザ焦点、基板速度、粉末注入速度など、プロセスパラメータの多くを手動で設定しなければならないので、適切な結果を確実に得るには専門の技術者が注意を払う必要がある。しかし、多くの組織が、プロセスをオンラインで測定するセンサの開発に関心を寄せている。そのようなセンサによって、クラッド形状（蒸着させたトラックの高さと幅）や冶金特性（凝固速度、ひいては最終的な微細構造）、直近の溶融プールとその周辺領域の温度情報を監視する。そのようなセンサを利用して、技術者が常時監視しなくても最終製品が生産できるような制御戦略が設計されている。フォワードプロセッシングを目指す、一歩進んだ研究も行われている。ユーザー定義のアプリケーション用の特定の冶金特性に関するシステムパラメータを開発するものである（微細構造、内部ストレス、希釈ゾーンの勾配、クラッド接触角度など）。

## 産業界での使用事例

海上掘削装置のシャフトや、ボイラーチューブ、水冷壁、風力タービンの部品といったエネルギー業界用の駆動部品など、広範囲にわたる成功事例が存在する（**図3**）。そのほかの用途としては、農業向けの切断ブレードやナイフ、森林管理装置業界向けの伐木搬出装置、製鉄業界向けのガイド／ローラー／引き抜き型、重機業界向けの油圧シャフト処理／バケツ／オーガ、採鉱業界向けの特殊な掘削および採取部品の修理などがある。また、デジタルプリント機器業界や、製紙工場、プラスチックフィルムや繊維業界でも利用されている。

レーザクラッディングは、製造業界や修理業界において基本的に、表面クラッディング、溶接修理、造形製造の3つの分野で導入されている。これらの技術は、過去15年間のレーザ肉盛溶接の商業的成功に密接に関連している。新世代のレーザビーム源が次々に提供されたことが、この成功過程を促進する決定的な要素となった。製造／生産装置の部品は、酸化、高温腐食、熱疲労、高い圧縮応力、摩損などを引き起こす恐れのある、過酷な動作条件にさらされる場合が多い。このような動作条件は、機能的表面の劣化を促し、部品の耐用年数の短縮につながる。

したがって、どのような種類のものであれ、可動部をともなう機械装置を稼働させる場合は、摩耗した金属部品

の修理や改修が日常的に必要になる。新しい部品の何分の1かのコストで部品を修理すれば、かなりのコストを節約することができる。また、部品を修理して元の仕様を復元すれば、予備を用意する必要性も低下し、修理をすばやくその場で行うことができれば、ダウンタイムを大幅に短縮することができる。

摩耗した部品を改修する際に、性能が向上するようにそれを修理し、新しい部品よりも摩耗寿命が長くなるようにできる可能性もある。レーザを利用した改修には独特の能力があり、幅広い種類の部品に適用でき、さらには、それらの部品を改良できる場合さえある。ただし、レーザクラッディングによる改修で最大のメリットが得られるのは一般的に、改修や保守が定期的に発生する高価値部品である。レーザとドナー材料を用いて部品の修理、表面パターニング、強化を行う改修処理は、何十年も前から開発されているが、レーザを利用した改修が、産業と商業の分野で広く採用され始めたのはつい最近のことである。普及が進んだ理由は、レーザ溶接が成長した理由と同じで、用途に応じたビームプロファイルを備える高出力レーザシステムが登場し、部品の品質や寿命が向上したためである。

たとえば**図4**は、過度に摩耗したスラリーポンプを示している。青色のスラリーポンプに、黄色の境界マークが付いている。このポンプを取り外して交換するたびに、54トン分の生産ロスが生じる。1トン当たり100ドルとすると、損失額は5400ドルに相当する。稼働時間が4000時間に達した時点、つまり、およそ年一回の保守で改修を行う場合のコストは、ポンプ当たり平均2万ドルである。クラッドライナーの寿命の改善目標は1万6000時間、つまり約2年間である。

**図4**　摩耗した製油所用スラリーポンプ。

この技術は、新規部品や中古部品の信頼性を高める莫大な可能性を秘めている。世界中の研究機関や政府組織が、レーザクラッディング技術に関する研究プログラム、産業アプリケーション、学生向けトレーニングを通して、その成長を促進し続けている。

製造において現在、最も重要な検討事項の1つが、ライフサイクルエンジニアリングである。設計者は、使用期間を通した部品の影響と、使用が済んだあとの廃棄の両方を検討する必要がある。つまり、$CO_2$排出量と部品が環境に与える長期的な影響という観点で、ライフサイクルを通した部品の影響を検討する必要がある。

改修に際して、製品の設計を最適化して、絶対最小限の材料でそれを製造すれば、部品の重量を大幅に抑えることができる。その部品が航空機や自動車の部品であったならば、その車両の使用期間を通した$CO_2$排出量が大幅に削減されることになる。レーザ加工で製造された部品は軽量になるので、燃費が高くなるためである。

## まとめ

レーザクラッディングには、修理プロセスとしての多数のメリットがある。部品の初期品質を完全に復元したり、全般的に改良したりすることによって、耐用年数を延長することができる。従って、高価値部品の改修に対する十分な持続可能性を示しているといえる。入力、加工、出力パラメータを統一し、経験に基づいて必要な調整を行うためのさらなる研究が求められる。それは、レーザクラッディング加工による現場改修にきわめて重要な、知識ベースのコントローラの開発につながる。


**参考文献**

(1) E. Toyserkani, A. Khajepour, and S. F. Corbin, Laser Cladding, CRC Press (Aug. 12, 2004).
(2) J. A. Folkes, Surf. Coat. Technol., 63, 65–71(1994).
(3) W. M. Steen, "Laser surface treatment—an overview," Laser Processing: Surface Treatment and Film Deposition, Kluwer Academic Publishers (1996).
(4) C. Bremer, "Automated repair and overhaul of aero-engine and industrial gas turbine components," Proc. ASME, 4725X, GT2005-6819, 841–846 (Jan. 1, 2005).
(5) J. Wang, S. Prakash, Y. Joshi, and F. Liou, "Laser aided part repair – a review," Department of Mechanical Aerospace & Engineering Mechanics University of Missouri – Rolla, Rolla, MO (2002).
(6) "Market Analysis & Industry Outlook: Repair & Maintenance," AnythingResearch (Feb. 2018); see https://goo.gl/sSVxLP



**著者紹介**

ロジャー・カウフォールド(ROGER KAUFOLD)は、自身が経営する米R. W. Kaufold, LLC社の表面/コーティング・エンジニアリング・コンサルタント。e-mail: trotters1@verizon.net


ILSJ