

公益財団法人 光科学技術振興財団

委託研究報告書（令和7年度）

レーザー科学技術の将来に関する調査研究

－国内外最新のレーザーを用いた表面処理の動向と将来に関する調査－ 4. 質量増加を伴わない溶融プロセス

令和8年（2026年）3月

光産業創成大学院大学

目次

第1章 序論	1 頁
第2章 質量の増減を伴わない溶融プロセスの概要	3 頁
2.1 従来熱源による溶融プロセスとの相違・優位点	
2.2 レーザーによる表面溶融池の挙動	
参考文献	
第3章 国内出願特許に見る質量の増減を伴わない溶融プロセス	5 頁
3.1 γ 系ステンレス鋼の脱鋭敏化	
3.2 コンソリデーション	
3.3 溶接止端部処理	
3.4 粗面化	
3.5 磁区細分化	
3.6 汚染封止	
3.7 ファイバ端部処理	
3.8 平坦化（バリ取り）	
3.9 フォーミング	
3.10 チル化	
3.11 欠陥修復	
3.12 グレージング（非晶質化）	
参考文献	
第4章 レーザー研磨（ポリッシング）とその派生技術	17 頁
4.1 レーザー研磨（レーザーポリッシング）	
4.2 選択的レーザー研磨（SLP: Selective Laser Polishing）	
4.3 造形（Surfi-Sculpt®）	
4.4 表面構造化（WaveShape）	
参考文献	
第5章 令和7年度調査の結言	21 頁
第6章 レーザー表面改質技術調査総括	23 頁

第1章 序論

本報告書では、令和4年度に着手したレーザー科学技術の将来に関する調査研究－国内外最新のレーザーを用いた表面処理の動向と将来に関する調査－の4年目にあたる、令和7年度の調査結果を報告する。

「表面処理」技術は、レーザー加工分野において、一般的に「表面改質」と呼称・分類されている。レーザーによる表面改質技術の分類については、令和4年度の報告書の中で、レーザーによる表面処理技術を俯瞰的に捉えるために言及しているが、本報告書においても表1-1に再掲して示す。

表1-1 レーザー表面改質の分類

プロセス	名称		主たる処理目的
非溶融	変態焼入れ		表面硬化
	結晶粒微細化		表面硬化、強度特性改善等
	溶体化処理		耐食性改善
	アニーリング		残留応力・歪み低減、結晶成長
	衝撃硬化(ピーニング)		疲労強度改善、耐 SCC
	磁区細分化		電磁鋼板鉄損改善
	フォーミング		歪付与、曲げ加工
溶融	通常凝固	再溶融(偏析解消)	耐食性改善
		コンソリデーション	気孔率低減、均質化
		溶接止端部処理	疲労強度改善
		粗面化	異材接合前処理、ロール機能化
	急速凝固	チル化	耐摩耗性・耐孔食性改善
	超急速凝固	グレージング	非晶質化、耐食性改善
	合金元素添加	アロイング	耐摩耗性・耐食性等改善
素材被覆	肉盛り(クラッディング)		欠損部補修、耐摩耗性・耐食性改善
	直接描画		回路形成
除去	クリーニング		除染、除錆
	ストリッピング		被膜剥離
	ホーニング		潤滑特性付与
	マイクロテクスチャリング		耐摩耗性改善、濡れ性等制御

レーザーによる表面処理の目的は、耐疲労特性・耐摩耗性・耐食性・意匠性・濡れ性・電磁気特性・その他機能付与等と多岐に亘り、加工原理も熱的(溶融・非溶融)・非熱的なものに分類でき、付加・変形・除去全ての加工方法にまたがっている。同種材料・同目的でも、異なる表面改質技術・原理を応用するケースが多く提案・実用化されていることが判明した。このため、令和4年度報告書では、材料溶融・質量変化を伴わない熱的プロセス(表1-1で「非溶融」と標記分類された技術領域)に焦点を絞り、夫々の技術の概要と技術開発・実用化に向けた取組みの調査結果

を報告した。

表面処理技術調査2年目となる令和5年度は、質量の減少(物質除去)を伴うプロセスに関する調査を実施することとした(表1-1で「除去」と標記分類された技術領域)。質量の減少(除去)を伴う表面処理技術だけでも、非常に多岐に亘っているため、近年、社会的に関心の高まっているレーザークリーニング技術に焦点を絞った調査結果を報告した。

表面処理技術調査3年目となる令和6年度は、質量の増加(物質添加)を伴うプロセスに関する調査を実施した。表1-1で「素材被覆」と標記分類された技術領域および「溶融」中の「合金元素添加(アロイング)」が該当する。

表面処理技術調査最終年(4年目)となる令和7年度は、質量変化を伴わない材料溶融プロセスに焦点を絞り調査を行う。また最後に、4年間に亘る表面処理技術全体を俯瞰しての調査結果の総括を行う。

質量の減少を伴う除去加工を除き、レーザーを熱源とした金属材料の表面改質技術(いわゆる「熱処理」)の概念を図1-1に示す。

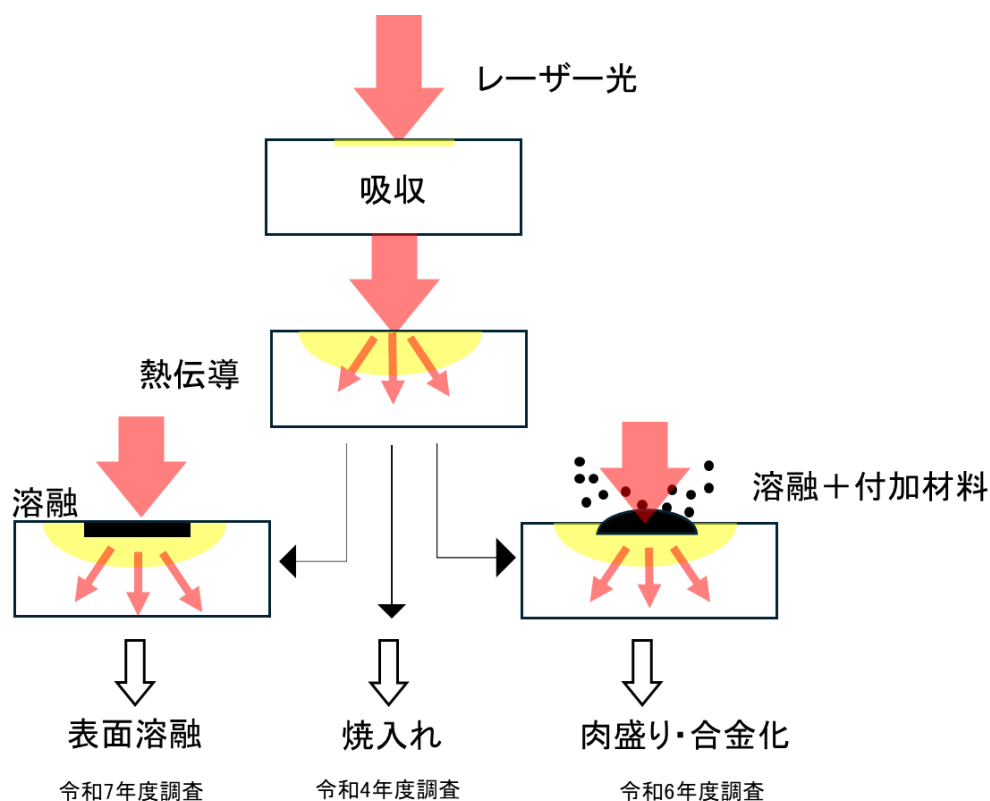


図 1-1 レーザーを熱源とした金属の表面改質技術

第2章 質量の増減を伴わない溶融プロセスの概要

2.1 従来熱源による溶融プロセスとの相違・優位点

非溶融プロセスの場合に対して、溶融プロセスの場合はより高い集光ビームが利用され、不活性ガス雰囲気中で実施されることが一般的である。レーザーと競合する従来熱源による溶融プロセスのトレードオフを表2-1に示す。レーザーによる溶融プロセスでは、時間的・空間的に高度に制御された入熱が可能となり、従来熱源では困難であったレベルでの表面改質を実現できる。

表 2-1 従来熱源とレーザーによる溶融プロセスのトレードオフ

熱源	投資コスト	局所加熱	急凝固	再現性	ひずみ	制御性
火炎	◎	×	×	×	×	×
プラズマ	○	×	×	×	×	×
TIG	○	×	×	×	×	△
誘導加熱	△	△	×	×	×	△
レーザー	×	◎	◎	○	○	◎

レーザーによる溶融プロセスは、

- ・凝固速度が速く、微細かつ均質な組織が得られる
- ・材料への入熱が時間的・空間的に極めて限定的なため、熱に敏感な部品近傍にも適用可能
- ・処理材に発生する変形・ひずみが小さく、仕上げ等の後加工の負担軽減が可能
- ・コンピュータ制御によるフレキシブルな工程設計が実現可能

等がその特徴である。

2.2 レーザーによる表面溶融池の挙動

材料表面を溶融させる表面改質プロセスでは、材料を溶融させるに足る出力密度のレーザースポットを材料表面上の所望エリアを走査させる。材料表面上をレーザー走査させる際の溶融池挙動を観察すると、照射点（レーザースポット）が凹んだ溶融池が形成されると共に、走査方向の後方側に尾を引く様子が観察される¹⁾。

レーザー走査時の溶融池には多くの力が作用しているが、最も大きな力の一つは、急激な温度勾配による表面張力の変動である。表面張力によって溶融池に発生する走査方向後方へのせん断力の Ni での試算例²⁾によれば、

- ・表面張力の温度による変化は、 $d\sigma/dT = 0.38 \times 10^{-3} \text{ N/m/}^\circ\text{C}$
- ・レーザー加工時の温度勾配は、 $dT/dx \sim 2.5 \times 10^6 \text{ }^\circ\text{C/m}$ のオーダー

であり、表面張力によって発生する溶融池後方へのせん断力は、

$$0.38 \times 2.5 \times 10^3 \text{ N/m}^2 = 10^3 \text{ Pa} = 0.01 \text{ atm}$$

と見積もられる。

参考文献

- 1) 第 55 回 JAEA 敦賀総合研究センターオープンセミナー 「レーザ加工技術の産業界への展開」 (2024/11/26)
- 2) W. M. Steen, J. Mazumder, Laser Material Processing, 4th ed.; Springer: London, UK, pp.417-440, ISBN 978-1-84996-061-8(2010)

第3章 国内出願特許に見る質量の増減を伴わない溶融プロセス

本章では、日本特許庁に出願された特許を、その目的・応用別に分類して報告する。1978年（昭和53年）以降に出願されたレーザーによる表面改質技術に関連する特許全484件を調査した。特許調査全体に関わる総括報告は、第6章に記述する。

質量の増減を伴わない溶融プロセス関連は484件中の50件であった。本章では、このうちの46件に関して記述する。なお、造形にかかわる特許1件については、関わる論文情報等も含めて第4章で取り上げる。

3.1 γ 系ステンレス鋼の脱鋭敏化

オーステナイト（ γ ）系ステンレス（SUS）鋼の熱影響部（HAZ）における粒界へのCr炭化物の析出に起因する鋭敏化は「ウェルドディケイ」として古くから知られていたが、原子炉配管系の粒界応力腐食割れ（SCC）の原因になることも判明し、原子力施設の安全管理上、非常に重要な技術課題である。ウェルドディケイ対策として、従来は非溶融プロセス（溶体化処理：1050-1100°C）が溶接後の後処理として行なわれてきた。表面のみを加熱・急冷する局部溶体化処理を行なうことによって大型構造物であってもこの改善策の適用できる可能性が考えられ、原子力産業を中心に各社がレーザーを熱源とした溶体化処理に関する研究・開発・実用化が進められた。レーザーによる γ 系SUSの脱鋭敏化に関連する国内出願特許を調査した結果、現場では、非溶融プロセスだけではなく、溶融プロセスも実用化の検討が進められていることが判明したので、幾つかの事例を以下に紹介する。

溶接部およびHAZ部表面にレーザーを照射し、ごく表層のみを再溶融させる。溶接ビードに沿ってレーザーを移動しつつ、ビード幅方向にも少しずつ重ねて照射することにより、HAZ部表面全体を再溶融する。表面溶融部は急冷されるために微細凝固組織となり、結晶粒界におけるCr炭化物の析出現象が発生せず、鋭敏化現象が消失する¹⁾。

溶融プロセスでの脱鋭敏化可能な γ 系SUSの組成に関しては、Ni当量がCr当量との関係で特定範囲にある γ 系SUSにレーザー照射し、ごく表層部のみを溶融・凝固させると、オーステナイト γ の微細セル間に δ -フェライトが微細に分散凝固した組織が形成され、Cr炭化物の粒界析出が阻止され、耐SCC性を回復可能であるとの出願がある²⁾。

レーザー照射による溶融・凝固プロセスの条件に関して、鋭敏化した γ 系SUS表面の深さ50 μm 以上の領域を溶融させ、10 $^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ 以上の速度で冷却・凝固させることにより、脱鋭敏化（粒界腐食）を防止できるとの出願がある³⁾。

表面溶融を許容しない非溶融プロセス（固相プロセス）に対して、表面溶融を許容する溶融プロセスでの脱鋭敏化は、レーザー処理条件の設定裕度が大きい（パラメータウィンドーが大きい）。その一方で、表層に形成される溶融・凝固層には、引張の残留応力も発生することとなり、耐SCC処理としては望ましいことではない。溶融・凝固プロセスの後、表層の引張応力残留部のみ、研磨・削除する方法が提案されている⁴⁾。

不活性環境下において、 γ 系SUS溶接部およびHAZ部表面上に出力密度200~2000 MW/m^2 、

エネルギー密度 150~1500 MJ/m²でのレーザー照射で、表層のみを溶融・急冷凝固させることにより、板厚方向に成長していた樹枝状結晶を消失させて、耐 SCC 性の高い微細な粒状結晶化を実現できるとする提案もなされている⁵⁾。

SUS 製の機器・部品において、メタルフロー（伸展加工）方向と交差する面（加工フロー面）が腐食環境に曝されると、メタルフロー方向に沿って加工フロー腐食（孔食）が発生する。孔食が進行すると裏面まで貫通した欠陥となり、リーク等のトラブルを引き起こす。この原因は、ステンレス鋼塊の凝固過程における介在物や Cr 炭化物などの粒界偏析が、圧延時のメタルフローとして連続し、選択的な粒界腐食として進行するためである。（Cr 炭化物の粒界偏析という意味では、溶接時の鋭敏化現象と同じものである。） γ 系 SUS の加工フロー面へのレーザー照射で、ごく表層のみを溶融・急速凝固させることにより、介在物・Cr 炭化物を母材組織に固溶し、また組織の微細化によって、耐食性を向上させる技術が権利化されている⁶⁾。

3.2 コンソリデーション

廃棄物焼却炉においてダイオキシンの生成を低減するためには、廃棄物を極力高温での燃焼処理が必要である。また鉄鋼製造プロセスにおける高温腐食環境で使用されるロール等の部品には、優れた耐熱性・耐食性・耐摩耗性が要求される。これらの要求を満たすために、炉の内壁や熱交換パイプ等の素材は溶射技術により、耐熱・耐食・耐摩耗性合金で被覆処理されている。

溶射皮膜は一般的に多孔質で、特に皮膜表面から素材(母材)に達する貫通孔が存在するため、腐食性成分の素材浸透が起こるため、レーザー照射により、溶射被膜を溶融・再凝固させている(封孔処理)。溶射皮膜材料を Ni 基・Co 基・Fe 基または WC 自溶合金とし、昇温時の温度範囲 700~1000 °Cにおける加熱速度が 20 °C/s 以上、降温時の降温範囲 800~500 °Cにおける冷却速度が 40 °C/s 以上とすることにより、従来のレーザー封孔処理被膜よりも優れた耐熱・耐食・耐摩耗性を得る技術が権利化されている⁷⁾。

半導体・液晶デバイス等の製造プロセスでは、処理容器内でふっ化物や塩化物をはじめとする処理ガスを使用するため、処理容器内の部材は、強い腐食環境に晒される。また処理容器内で生じるパーティクルの存在は、製品品質と生産性の低下に繋がる。耐食性向上とパーティクル発生リスクの低減を目的として、処理容器内の部材表面に溶射被膜を形成することが一般的に行われている。

微細化の一途をたどる半導体・液晶デバイスにおいては、より過酷な腐食環境下に対応可能で、緻密な溶射被膜品質が要求されている。このため、溶射被膜にレーザー照射し、表層を再溶融・再凝固されることにより、被膜を緻密化する。溶射被膜の緻密化層は、可能な限り厚いことが望ましいが、過多のレーザー入熱は、被膜の凝固収縮によるクラック発生リスクを伴う。クラック発生リスクを抑制しつつ、可能な限り緻密化層を厚くするため、時間差連続レーザー照射により再溶融・再凝固プロセスを緩やかにする処理方法が権利化されている⁸⁾。

耐熱性・耐食性・耐摩耗性の向上を目的として、レーザー照射による溶射被膜表層の再溶融・再凝固による緻密化が広く実施されているものの、基材と溶射被膜の密着性も課題である。基材

と溶射被膜界面に、両者と合金を形成する中間層を介在させた合金化層を形成することも行われているが、入熱過多の場合、中間層材料による溶射被膜の希釈等による耐熱性・耐食性・耐摩耗性低下のリスクがある。基材と溶着被膜間の密着性を向上させる方法として、

- ① 基材(金属・合金・サーメット)上に、基材と異なる材料(金属・合金・サーメット)からなる溶射皮膜を形成する工程
- ② 上記①で形成した溶射皮膜表面にレーザー照射し、厚み方向における溶射皮膜全体及び基材の一部を溶融・凝固させて緻密な改質層を形成する工程
- ③ 上記②で形成した改質層上に、基材と異なる材料(金属・合金・サーメット)からなる溶射皮膜を形成する工程
- ④ 上記③で形成した溶射皮膜表面にレーザーを照射し、厚み方向における溶射皮膜全体及び②で形成した改質層の一部を溶融・凝固させ、緻密化された改質層を形成する工程

という多層被膜形成とレーザー処理方法が提案され、権利化されている⁹⁾。

溶射技術と類似しているが、より簡便に鉄鋼製品への耐食性・耐摩耗性付与する技術として、粉体を直接基材に塗布する方法がある。これは、粉体状の被膜形成材料を樹脂系塗料・アルコール等の液体に混合し、液体の濡れ付着性を利用して基材に付着させて被膜を形成するものである。このようにして形成された被膜は粉末粒子間が固化した液体で結合された状態であるに過ぎないために、気孔等の欠陥が発生しやすい。これらの欠陥を消滅させるために、レーザー照射により粉体を少なくとも部分的に溶融結合させる方法がとられているが、冷却速度が極めて速く(約1000 °C/sec)、凝固割れ(クラック)が発生し易いため、予熱(350 °C以上)を必要とする。予熱された状態でのレーザー照射により、クラックの発生は抑制可能であるが、高温状態が長く続くこととなるため、被膜材料が基材により希釈されるため、耐食性・耐摩耗性等の特性が低下する。レーザー照射後、400~700 °Cの温度範囲での後熱処理を行うことにより、基材からの元素を固溶した金属間化合物、炭化物を結晶粒間に析出させることにより、被膜硬度を回復させる技術が権利化された¹⁰⁾。

3.3 溶接止端部処理

Fe 基合金(特に自動車産業で多用される低炭素鋼)は、金属組織の微細化等の制御技術による高張力化・高靱性化の点で大きく進歩している。しかし、このような優れた材料も、溶接施工により、継手部の引張強度・疲労強度が低下する場合がある。自動車の実使用環境(振動等による疲労負荷環境)において、溶接部には応力集中しやすく、疲労強度を高める処置が望ましい。

低炭素鋼材料の疲労損傷部にレーザー照射して溶融・凝固せしめた後、該溶融・凝固部およびその幾何学的形状急変部(応力集中部)近傍に、レーザーによる急熱(A3 変態点~融点の温度域)・急冷を2~20回繰返すことにより、 α (フェライト)組織を微細化することにより、溶接部疲労強度を改善する方法が提案・権利化されている¹¹⁾。

高張力鋼板溶接部の疲労強度が低下する要因は、隅肉アーク溶接によって生じたHAZ(熱影響層)の材質劣化であると考えられる。溶接止端部とHAZ境界を含む領域をレーザーで再溶融し、

局所的に焼入れ硬化させることにより、疲労強度を改善させる方法が提案・権利化された¹²⁾。

3.4 粗面化

様々な産業分野において、摩擦力増大・接合面の密着性改善等を目的として、材料表面の粗面化ニーズがある。このようなニーズに対して、様々な加工方法・加工原理が利用されている。研磨等の除去加工(質量減)が、最も安易な方法と考えられるが、質量の増減を伴わない塑性加工や、溶接原理を利用した付加加工も一部で利用されている。

材料表面に対して、静止レーザー光を移動しながら断続的に照射し、クレーター状の熔融・凝固による凹凸パターンを形成する粗面化が提案されている¹³⁾。

静止レーザー照射した後にレーザー光を偏向させ、より大きな凹凸パターンを形成することが提案され、権利化された¹⁴⁾。

半導体パッケージの製造において、金属・樹脂間の密着性は、重要な生産技術課題の一つである。導電性接合層を介して電子部品を搭載した構成を有するパッケージにおいて、電子部品を囲む金属封止面にレーザー照射痕を複数形成することによって粗面化し、封止樹脂との密着性を高める方法が提案・権利化されている¹⁵⁾。

半導体パッケージに限らず、金属と樹脂からなる複合成形体を製造する際、両者の界面での密着性を向上する目的で、金属表面を粗面化することは公知である。レーザーによる金属表面の粗面化について、

- ① エネルギー密度 1 MW/cm^2 以上、掃引速度 2000 mm/s 以上でレーザー照射
- ② 粗面化対象となる金属表面に対して、レーザー照射を断続的に行い、照射部分と非照射部分が交互に生じさせる

という方法が提案され、権利化されている¹⁶⁾。

自動車のボディパネルに使用される塗装用鋼板は、①プレス成形時の焼付低減と②塗装膜の密着性向上を目的として、表面にダル加工を施した調質圧延ロールにて加工されている。従来、このダル加工には、ショットブラストまたは放電加工が利用されていたが、現在では、レーザーによる粗面化技術(レーザーダル加工)が広く利用されている。塗装用鋼板は、高い鮮映性(光沢性・写像性)が要求されることから、圧延に使用されるロール表面の激しい凹凸は好ましくない。塗装用鋼板表面にレーザーを照射するとクレーターが形成される。エネルギー密度が低い領域では、外周縁部に熔融金属が凸状フランジのある「熔融型クレーター」となるが、エネルギー密度が高い領域では、外周縁部にフランジの無い「蒸発型クレーター」となることが判明した。ロールのダル加工としては、凹凸が激しくならない「蒸発型クレーター」が望ましく、 $10^5 \text{ W}\cdot\text{s/cm}^2$ のエネルギー密度で、ロール表面へのレーザーダル加工を施すことが権利化された¹⁷⁾。

自動車用塗装鋼板圧延ロール表面処理専用の装置仕様、設定パラメータ、ロール加工仕様に関して

- ① 装置仕様：共振器内部にテレスコープレンズと回転チョッパーからなる Q スイッチ装置を有する Q スイッチ CO_2 レーザーであり、放出されるレーザーパルスが、初期スパイク部分

とパルスステール部分から構成されること

- ② 初期スパイク幅：100 ns~1 μs、パルスステール幅：0.9~29 μs、パルス全幅：1~30 μs、ピークパワー：5~300 kW、パルス繰り返し周波数：0.4~40 kHz を有し、集光ピーク出力密度：40 MW/cm²~1.0 GW/cm² であること
- ③ 加工ロール表面の加工穴外径 D：120~350 μm、深さ：8~40 μm、ピッチ：1.5D~5D の規則的なテクスチャリングパターン

と規定する提案がなされ、権利化された¹⁸⁾。

3.5 磁区細分化

鉄損改善を目的としたレーザー照射による磁区細分化技術について、ひずみを与える非溶融プロセスとして令和4年度報告書にて取り上げた。国内出願特許調査の結果、主としてトランス等の電力変換器鉄心として用いられる Fe 基非晶質合金薄帯の鉄損改善を目的としたレーザー照射溶融プロセスとしての出願も為されていることが判明した。

溶融状態から急冷凝固することによって作製される非晶質合金薄帯は、磁束密度が高く鉄損が低い各種鉄心の材料として利用されている。非晶質合金の鉄損が低い理由は、非晶質合金は原理的に異方性がなく、結晶粒界等の欠陥がないためヒステリシス損が小さい上に、板厚が薄く、電気抵抗が大きいため渦電流損も小さいこととして説明されている。しかし、鉄損値から直流ヒステリシス損を差し引いた広義の渦電流損は、一様磁化を仮定して計算される古典的渦電流損と比較して、10~100 倍も大きい。これは磁区幅が大きいため不均一磁化変化に起因する異常渦電流損の割合が大きいことを示す。

非晶質材料に独特の鉄損低減手段として、局所結晶化による磁区細分化する方法が提案されているが、低周波数域での鉄損低減に対しては、有効でないという欠点があった。レーザー照射により、非晶質合金薄帯表面を局所的・瞬間的に溶解・急冷凝固させて、再非晶質化することにより、著しく鉄損低減させる方法が提案され、権利化された¹⁹⁾。

従来、Fe 基非晶質合金薄帯へのレーザー照射による部分溶融・急冷凝固（非晶質化）による鉄損改善処理はオフラインで行なわれていた。薄帯の casting 工程とレーザー照射工程を一貫工程で行なうための製造方法および装置に関する提案がなされている²⁰⁾。

軟磁性非晶質合金薄帯表面に長手方向所定間隔で幅方向にレーザー照射し、点列状に非晶質な凹部を形成する際、凹部の周囲に形成される環状突状部がレーザー光の照射により溶解した合金の飛散物が実質的にない滑らかな表面を有するドーナツ状突状部となり、かつその高さが 2 μm 以下、凹部深さ (t_1) と、薄帯厚 (T) との比を $t_1/T=0.025\sim0.18$ とすることにより、高ラミネーションファクタ・低皮相電力・鉄損低減を実現できるとの提案がなされ、権利化された²¹⁾。

非晶質合金は、通常液相や気相から急冷し製造され、結晶が存在しないため結晶磁気異方性が存在せず、優れた軟磁気特性を示すことが知られている。飽和磁束密度 B_s が高い Fe 基非晶質合金は、低損失であるため、配電用トランスなどの磁心材料として使用されている。

配電用トランス等に用いられている Fe 基非晶質軟磁性合金 (Fe-Si-B 系等) は、磁気ヒステリ

シスが小さく、低保磁力でヒステリシス損失が小さいが、鉄損値からヒステリシス損失を引いた、広義の渦電流損失は、古典的渦電流損失の数 10~100 倍も大きい。この渦電流損失増加は、異常渦電流損失（あるいは過剰損失）と呼ばれ、主に不均一磁化変化に起因し、非晶質合金の磁区幅が大きいことが原因である。Fe 基軟磁性非晶質合金の鉄損低減のため、薄帯製造時に、長手方向に対して一定間隔で、薄帯表面に薄帯幅方向に向かって波目模様状の形状的欠陥部を形成による磁区細分化で、鉄損を低減させる方法が用いられている。しかし薄帯が広幅（20 mm以上）になると、波目模様状の形状的欠陥が形成されない領域が生じやすく、鉄損低減が困難であった。薄帯の自由凝固面側の長手方向に対して、一定間隔で、薄帯表面に薄帯幅方向に向かって波目模様状の形状的欠陥が形成されており、同時に波目模様状の形状的欠陥が形成されていない部分には、薄帯幅方向にレーザー照射による凹部を形成する製造方法が提案され、権利化された²²⁾。

従来、Fe 基非晶質合金薄帯の鉄損・励磁電力は、磁束密度 1.3 T で測定・評価されることが一般的であった。近年、Fe 基非晶質合金薄帯で製作される変圧器の小型化等の観点から、より高い磁束密度 1.45 T での鉄損・励磁電力低減を要求されている。Fe 基非晶質合金薄帯の励磁電力の著しい上昇に対しては、

- ① 薄帯の自由凝固面・ロール面の少なくとも一方の面に、複数のレーザー照射痕列を形成する。
- ② 隣接するレーザー照射痕列間隔（ライン間隔 d_1 ）を 10~60 mm とする。
- ③ 隣接するレーザー照射痕列間隔（スポット間隔 d_2 ）を 0.10~0.50 mm とする。
- ④ レーザー照射痕密度（ $D=1/(d_1 \times d_2)$ ）を 0.05~0.50 mm⁻² とする。

以上の設定とすることにより、磁束密度 1.45 T でも低鉄損・低励磁電力を両立できるとする提案がなされ、権利化された²³⁾。

3.6 汚染封止

原子力産業で利用される機材・物体表面は、⁶⁰Co・¹³⁷Cs・⁹⁰Sr のような放射性核種、PuO₂・UO₂ のような放射性化合物で汚染されている。汚染する放射性核種は機材・物体表面部分に深く浸透しており、通常の除染技術による除去が困難な場合もあると共に、放射性物質が大気中に拡散するリスクも大きい。少なくとも 150 W/cm² のエネルギー密度で機材・物体表面にレーザー照射することにより、放射核種を機材・物体内（表面近傍）に固定・封止することにより、二次的な放射性物質の拡散を抑制する提案がなされ、権利化された²⁴⁾。

世界中の商業用原子力発電所の運転により生じる使用済み核燃料を再処理する際には、高レベル放射性廃棄物が発生する。高レベル放射性廃棄物処理には、半減期の長い高放射性物質を回収・低減する必要がある。高レベル廃棄物の放射能低減は、高放射性元素の酸化物・珪化物・窒化物・炭化物を Th・U・Zr の酸化物・珪化物・窒化物・炭化物マトリクスとともに含有するペレットを成型した後、原子炉の強い中性子スペクトルに曝すことにより、放射性元素を安定な核分裂生成物に変換する。原子炉用燃料ペレットを遠隔調製するため、レーザー焼結システムが提案され、権利化された²⁵⁾。

3.7 ファイバ端部処理

光ファイバ通信システムの広範な利用に向けて光コネクタの開発が進められ、多くのメーカーから各種製品が多量に販売されるようになった。この光コネクタの性能については、接続損と共に反射の大きさが問題になる。反射が大きいと光源の半導体レーザーに再入射する光が生じ、レーザーから出力される光信号を劣化させる。また、複数の反射点があると、2重反射で信号光と混ざる反射光が生じ、受光部において受信信号を劣化させるため、低反射性が重要視される。

光ファイバ端面を機械的に研磨した場合、高屈折率の加工変質層が形成されるため、端面の加工層の屈折率を光ファイバの本来の値に回復させ、光ファイバ接合面での反射を本質的に除去することが望ましい。光ファイバとフェルールは接着剤で固定されているだけであるため、この接着面の温度が高くなると接着剤が変質して光ファイバの端面位置が設計値とずれたり、接着面がはがれたりする恐れがある。従って、CO₂レーザーを用いて、光伝送特性に影響する光ファイバコアの部分だけを、局部的に、短時間加熱するようにすることにより、光ファイバ端面のコア部分は一時的に軟化し、再度冷却した後は、本来の光ファイバの物性を回復させる方法が提案され、権利化された²⁶⁾。

接着剤による固定ではなく、光ファイバとフェルールの両者の端部を共にレーザー（リング状のビームプロファイル）によって加熱・溶融させる方法も提案されている²⁷⁾。

フォトリソグラフィファイバの一種であるホーリーファイバは、コア近傍のクラッド部に空孔を存在させることにより、クラッドの実効的な屈折率を下げて、コア/クラッド間の比屈折率差を拡大させることで、従来の光ファイバと比較して曲げ損失特性を大幅に向上させる。クラッドにファイバ軸心方向に伸びた複数の空孔の端部が開放されていると、水分が内部に進入する結果、機械的強度の劣化・露結による光学的特性変動が生じてしまう。ホーリーファイバ端部に、軸心方向と直角の端面を形成し、ファイバと同一成分のガラス粉末(粒径 1 μm 以下)を空孔に挿入した後、CO₂レーザー照射する。ファイバの空孔近傍のみが加熱・溶融させて封止する技術が提案され、権利化された²⁸⁾。

空孔にガラス粉末を挿入せず、ホーリーファイバ端部を CO₂レーザーによる加熱・溶融して封止した後に、空孔が潰れた先端部分だけを機械研磨して、光学特性を維持する方法も提案されている²⁹⁾。

光ファイバ端面における空孔封止・研磨面形成を簡易に実現可能とするための温度分布を高精度に形成できるようにした光ファイバ端面処理装置・方法が提案・権利化されている。レーザー光をフレネルレンズで平行ビームに変換した後、更に回折レンズでリングビームに変換した後、集光レンズを通して、ファイバ端面に照射する。ファイバ端面に対して、光学系の位置・配置を調整することにより、ファイバ端面での加熱温度プロファイルを制御可能としている³⁰⁾。

複雑な光学系とその制御を必要としない、光ファイバ端部封止処理を実現するため、レーザー照射を軸心ではなく、側方（軸心に直行）からする方法が提案・こちらも権利化されている³¹⁾。

3.8 平坦化（バリ取り）

樹脂成形や金属の鋳造・切削加工等において、加工品端部・端面にバリやエッジの発生が起こりえる。バリやエッジは、外観上の問題となるだけでなく、取り扱い時の怪我等の原因ともなるため、バリ取・面取りと呼称される処理が必要である。レーザーアブレーションによるバリ取技術に関する提案が既に為されているが、バリ除去後のエッジ部端面が粗く、二次バリが発生してしまうという問題があった。また、エッジ部の整形は、主に機械切削加工により、平らで滑らかな面に仕上げているが、例えば曲面などの平面でない形状を持つエッジ部への仕上げは困難であった。さらに、バリ取りや面取り加工等のエッジ部の整形を人の手によらず短時間で精密に行いたいという要望がある。エッジ部バリにレーザー照射して、バ리를溶融させる。渦巻状シールドガスにより溶融池表面を滑らかにする方法が、提案されている³²⁾。

3.9 フォーミング

レーザーフォーミングは、金属板にレーザーを所定パターンで走査しながら照射し、レーザー照射部分の加熱に基づく熱塑性変形によって金属板に反り（曲げ）を形成する加工技術であり、本来は、非溶融プロセスに分類される。

レーザーフォーミングの加工は概略次のように進む。板状ワークの上面にレーザー照射されると照射部は急激な温度上昇によって熱膨張し、下方に変形する。このとき、部材下部や常温の周辺部からの拘束により部材上部は圧縮応力を受けて降伏し、塑性ひずみが生じる。そしてレーザー照射が終了すると、周辺への熱拡散によって加熱部は冷却・収縮する。結果的にレーザー照射時に生じた塑性ひずみのため、ワークは上方へ変形する。レーザーフォーミングは、変形部分がスプリングバックすることなく所望の反りを維持することが可能であり、またプレス金型が不要となるため、多品種少量生産に有効である。

レーザーフォーミングでは、1回の走査での曲げ角度が小さく、大きな角度での成形に時間を要する。また、曲げ角度の制御がレーザーの走査回数によるため、高精度の曲げ加工に難があるとして、金属板にレーザーを走査しながら照射し、曲げ予定線（レーザー走査線）に沿って外力で曲げ加工を行う金属板の加工方法が提案されている³³⁾。この提案によれば、金属板が曲げ予定線（レーザー走査線）を中心として凹状に撓むように金属板の端部から力を加える工程と、レーザー照射部位の金属板を板厚方向で完全液相状態となるような表面から裏面までが液相状態となるようにレーザー照射する。曲げ予定線部分の材料が液相状態となっているため、従来の塑性加工技術と比較して、小さな外力での加工が実現すると共に、1回のレーザー走査で大きな角度での曲げ加工を実現できるとされる。

3.10 チル化

自動車用エンジンのカムシャフトは、鋳鉄製であり、そのカム面の耐摩耗性向上のため、カム面の表層近傍のみを、レーザー等で局所的にチル化（鋳鉄を溶融・急冷凝固させ、炭素を Fe_2C_3 としてFe中に微細に分散析出）させることにより、内部の靱性を維持したまま、表層の耐摩耗性・対面圧性を向上させている。従来は、カム面の幅方向に、スライダクランク機構を用いて、レー

ザーを、サインカーブ運動により、走査させている。この場合、チル硬化層の深さ分布が不均一となる（カムの両端が深く、幅中央部付近が浅くなる）³⁴⁾。レーザー走査を等速直線往復運動に変更することにより、チル硬化層深さ分布を均一化できるとする提案され、権利化された³⁵⁾。

カム部を予熱することなく再溶融チル硬化処理を施すと、急冷凝固過程でのチル化層形成時にクラック（凝固時の体積収縮による）・気泡（鑄鉄組織内酸化物から O_2 が分離し、C と結合して CO_2 を発生）という不具合が発生しえる。これを回避するため、再溶融前に、250~400 °Cで、カムシャフト全体を予熱するのが一般的である。ジャーナル（軸受け）部は、カム部ほど過酷な負荷を受けないため、熱処理対象から外されているものの、軸受と摺接するため、耐摩耗性向上を目的とした処理が望ましい。先ずカムシャフトのジャーナル部にレーザー等で表面硬化熱処理を施し、この熱処理による入熱をカム部予熱として利用し、引き続いてカム部にレーザー照射によるチル硬化処理を行うことが提案され、権利化された³⁶⁾。

従来、自動車用ディスクブレーキロータ本体は、ねずみ鑄鉄製であり、その表面に摺動面として溶射被膜を形成していた。溶射被膜はアンカー効果のみでロータ本体と密着しているのみであり、自動車の実使用環境での冷熱サイクル等の負荷で、被膜剥離やクラックが発生する不具合が生じる。溶射被膜を形成することなく、鑄鉄製ロータ本体に硬化層面積率 10~40%として、部分的に再溶融させてチル硬化層部を摺動面として形成することにより、溶射被膜と同等の耐摩耗性と摩擦係数を得られるとの提案が為された³⁷⁾。

自動車用カムシャフトやディスクブレーキロータ等の鑄鉄製摺動部材においては、摺動部にレーザーを照射し、急熱・急冷の再凝固組織としてチル硬化層を形成することが一般的に行われているが、再凝固の際にクラック等の不具合が発生しやすい。生成するチル硬化層の Fe 基地部分は、パーライト組織（フェライト+ Fe_2C_3 ）であり、硬さは十分であるとは言い難い。鑄鉄材料よりなる素材の摺動部となる部位に、チル硬化層を形成した後、レーザー等の高密度エネルギーを照射することによって、A1 変態点（オーステナイト化温度）～融点の温度範囲に加熱し、その後、前記部位を自己冷却させることによって Fe 基地部分をマルテンサイト化し、耐摩耗性に優れた摺動部材を得ることが提案されている³⁸⁾。

3.11 欠陥修復

脆性材料からなる基板を所定の形状や寸法に加工した場合、脆性材料の特質上、加工される箇所、とりわけ基板の側端面にマイクロクラック・欠け等の欠陥が発生することがある。欠陥除去するために、基板側端面を研磨する方法もあるが、研磨後に洗浄が必要である上、欠陥の完全除去は困難であった。欠陥が発生した被加工基板の側端面全体に、レーザーをスキャン照射することによって、全ての欠陥を修復する方法が提案され、権利化されている³⁹⁾。

通常、Si ウェハ・Ge ウェハの表面加工は、ダイヤモンド工具を用いた切削・研削・ラッピング・ポリッシングなどの機械加工プロセスによって行われている。nm レベル精度の超平滑化も可能であるが、その表面・内部にしばしば加工変質層が形成され、Si・Ge の機械的・電氣的・光学的性能に大きな悪影響を及ぼす。従来、加工変質層除去には、主にエッチング・化学機械研磨 (CMP)・

プラズマガス放電を利用したドライエッチングを使用するプロセス等の利用検討が進められてきた。

単結晶ウェハ表面の材料を除去することなく、機械加工により生じた加工変質層を基板部分と全く同様な結晶構造に修復できれば、部品加工精度を維持したまま、コストダウン・環境負荷低減が期待でき、

- ① 波長：532 nm または 355 nm (Nd:YAG レーザーの第2または第3高調波)
- ② パルス幅：3~4 ns
- ③ パルスエネルギー：0.5~30 J
- ④ エネルギー密度：0.125~7.5 J/cm²

とすることにより、大気中で単結晶ウェハ表面欠陥の修復が可能であるとする提案が為された⁴⁰⁾。

半導体デバイス等に利用されるウェハの品質向上は極めて重要な技術課題であり、端面（エッジ部）やノッチ部の加工状態が重要視され、ハンドリングによるチップング防止のため、エッジ部には研削（面取り）・研磨（鏡面面取り）加工が行われる。ウェハの外周エッジ部・ノッチ部の研削後、表面の研削痕を除去・平滑化するため、従来は、表面のバフ研磨が行われていたが、クラック・加工歪・非晶質層が除去しきれず、破損で歩留まりが悪くなる等の問題があった。バフ研磨のような機械的表面修復加工とは異なり、レーザー照射による改質・修復技術が提案されているが、高速で効果的な処理は困難であった。ウェハの表面研削とレーザー修復の両方の機能を持つ装置とするだけでなく、ウェハの表面状態と形状を測定する機能を備えることにより、処理の高速化と効率化が図れるとする提案がなされ、権利化された⁴¹⁾。

従来のレーザー照射によるウェハの欠陥修復技術は、単純な平面に対しては有効であるが、複雑形状や、研削後表面の「粗さ」・「うねり」が残留した表面状態に対して、フレキシブルで有効な対応が困難であった。ウェハの面取り工程後、その研削面に1回目のナノ秒パルスレーザーを照射して、「うねり」と欠陥修復を行う。その後、ウェハをエッチング処理した後、再びナノ秒パルスレーザーを照射することにより、内部欠陥の修復と併せて、「粗さ」と「うねり」を除去する方法が提案され、権利化された⁴²⁾。

レーザー照射により、ウェハの内部欠陥(加工変質層)・粗さ・うねりの修復において、ノッチ部のような複雑な3次元形状に均一にレーザー照射することは、極めて困難である。レーザーをノッチ部へ照射する専用光学系を備えた装置・工法が提案され、権利化された^{43,44)}。その光学系は、レーザーを反射し、側面がくの字状に組み合わされ凹面鏡となる円弧型であるミラーへ導くポリゴンミラーと、断面形状が平凸型で上面から見て曲面形状となった3次元曲面体である。ミラーで反射されたレーザーを処理対象であるノッチ部へ集光する集光レンズを備え、ポリゴンミラーの回転により、ノッチ部へレーザーを走査・照射する装置・工法である。

半導体ウェハは、切削・研削・ラッピング・ポリッシングなどの機械的表面加工が行われるが、表面・内部に加工変質層が形成される。加工変質層には亀裂を含む場合もあり、この除去は、主にエッチングや化学機械研磨（CMP）等の化学的・機械的方法により行われるが、亀裂等を完全に除去できない。エッチング処理後のウェハ表面にレーザーを用いた好適な熱処理を行うことで、

加工応力の影響をなくし均一で平坦化された表面に改質するため、エッチング処理後、照射箇所
の結晶方位に対応した累積照射エネルギーを決定してナノ秒パルスレーザーを照射する方法が提
案され権利化された⁴⁵⁾。

3.12 グレージング（非晶質化）

光メモリ素子の大容量化方法の一つとして、書込み領域の3次元化がある。記録密度のさらな
る高密度化、マーキングの高精度化・明確化、マーキングの消去など、記録素子としての基本機
能の向上を図るため、パルスレーザーを加工対象物に照射して加工対象物の当初の原子・分子配
列状態を可逆的にアモルファス状態へと相転移させる方法が検討された。高密度・高精度マーキ
ングに関しては、多光子吸収を利用して微小な改質領域（ピット）を発生させる。また、リライ
タブルなマーキングに関しては、加工対象物内部にアモルファス領域を形成する方法が提案され、
権利化された⁴⁶⁾。

参考文献

- 1) 特開昭 61-177325 ステンレス鋼溶接部の耐食性改善方法
- 2) 特開昭 63-053210 ステンレス鋼の耐応力腐食割れ性改善方法
- 3) 特開平 03-017234 ステンレス鋼の粒界腐食防止方法
- 4) 特開平 04-128312 ステンレス鋼の表面処理方法
- 5) 特開平 05-125432 ステンレス鋼溶接部の高耐食化方法
- 6) 特許 2696632 ステンレス鋼材の加工フロー腐食防止方法
- 7) 特許 4862125 溶射皮膜を形成した素材の改質方法
- 8) 特許 5670862 溶射皮膜における緻密化層の形成方法
- 9) 特許 6542367 表面改質部材の製造方法
- 10) 特許 1527909 粉体形成被膜の硬度回復方法
- 11) 特許 4953172 レーザ照射によるフェライト組織の微細化方法
- 12) 特許 6515299 隅肉アーク溶接継手及びその製造方法
- 13) 特開平 07-148584 表面処理法
- 14) 特許 4363039 表面改質法及び表面改質による加工物の接合方法
- 15) 特許 6776801 電子装置及びその製造方法
- 16) 特許 6646018 金属成形体の粗面化方法
- 17) 特許 1818876 塗装用鋼板とその製法
- 18) 特許 3027695 冷延ロール表面のダル加工方法
- 19) 特許 1673827 非晶質合金薄帯の磁性改善方法
- 20) 特開昭 61-258404 磁性に優れた非晶質合金薄帯の製造方法およびその装置
- 21) 特許 5440606 軟磁性アモルファス合金薄帯及びその製造方法、並びにそれを用いた磁心
- 22) 特許 5656114 超急冷 Fe 基軟磁性合金薄帯および磁心
- 23) 特許 6687168 Fe 基アモルファス合金薄帯及びその製造方法、鉄心、並びに変圧器

- 24) 特許 3141030 表面を処理する方法
- 25) 特許 6348122 高放射性元素を含む高密度ペレットを遠隔製造するためのレーザー焼結システムおよび方法
- 26) 特許 3238002 光コネクタ端面処理方法および装置
- 27) 特開平 11-142688 光ファイバ固定方法及び光ファイバ固定構造
- 28) 特許 3890038 光ファイバ端部の封止方法
- 29) 特開 2009-175271 光ファイバ端部形状及び光ファイバ端部処理方法
- 30) 特許 4959647 光ファイバ端面処理装置及び方法
- 31) 特許 5859806 光ファイバの端面処理方法及び端面処理された光ファイバ
- 32) 特開 2024-021965 レーザ加工ノズル
- 33) 特開 2011-073013 金属板の加工方法
- 34) 特開昭 60-052526 再溶融チルカムシャフトの製造方法
- 35) 特許 1718409 再溶融チルカムシャフトの製造方法
- 36) 特許 1479567 カムシャフトのカム部の再溶融硬化処理方法
- 37) 特開平 05-157134 ディスクブレーキロータ
- 38) 特開平 07-026321 耐摩耗性に優れた摺動部材の製造方法
- 39) 特許 5209883 レーザ加工装置及びレーザー加工方法
- 40) 特開 2008-147639 単結晶ウェハの表面欠陥の修復方法及び修復装置
- 41) 特許 7347939 シリコンウェハの表面の研削修復装置及び研削修復方法
- 42) 特許 7686413 シリコンウェハのエッジ品質向上方法
- 43) 特許 6932865 ウェハエッジ部の改質装置及び改質方法
- 44) 特許 7221345 ウェハエッジ部の改質装置及び改質方法
- 45) 特許 7596191 シリコンウェハの表面改質方法
- 46) 特許 4264020 レーザ加工方法および装置

第4章 レーザー研磨（ポリッシング）とその派生技術

質量の増減を伴わない溶融プロセスとしての新しい表面改質技術の一つであるレーザー研磨（ポリッシング）技術と、そこから派生・発展した三つの技術について調査結果を報告する。

4.1 レーザー研磨（レーザーポリッシング）^{1,2)}

従来の研磨技術（砥石研削等）が、材料除去加工であるのに対して、レーザー研磨は、質量の増減を伴わない（除去加工でも付加加工でもない）、金属自由曲面を平滑化・光沢化する新しいアプローチである。レーザー研磨では、レーザー加熱により金属材料のごく表層のみを溶融させ、表面張力によって凸部から凹部へと材料を流動させる。レーザー研磨の典型的な処理時間は 1 min/cm² であり、手作業が中心となる従来技術による研磨と比較して、最大 30 倍の処理能力を持つとされる。レーザー研磨による面粗度の改善は、金型・成形産業向けの熱間加工鋼や医療機器に利用される Ti 合金など、様々な材料で利用されている。

従来の研磨技術が、粗加工→仕上げ加工と多段階プロセスであるのと同様に、レーザー研磨も多段階のプロセスである。レーザー研磨では、マクロ研磨（ミーリング溝の平滑化レベルの粗加工）とマイクロ研磨（鏡面化・光沢向上レベルの仕上げ加工）の 2 段階に分類される。マクロ研磨では、CW レーザーが用いられ、入射レーザーによって溶融池が形成される。レーザーは、所定の走査速度で表面上を移動し、溶融池の進行方向前側で材料溶融が進行し、後方側で再凝固していく。溶融材料の表面張力により、再溶融・再凝固プロセス中に表面粗さが平滑化される。結果として得られる表面には、クラック・気孔等の欠陥の無い研磨面が形成される。マクロ研磨では、10~80 μm の深さの連続した再溶融表面層が形成される。マイクロ研磨ではパルスレーザーが使用され、5 μm 以下の超表層の再溶融だけではなく、微視的には微細な表面突起部分では、材料の蒸発も利用している。連続的な再溶融プロセスであるマクロ研磨とは異なり、マイクロ研磨は離散的な再溶融プロセスである。マクロ研磨とマイクロ研磨の特徴を表 4-1 に示す。

表 4-1 レーザー研磨（マクロ研磨とマイクロ研磨）の特徴

	マクロ研磨	マイクロ研磨
対象	粗加工（ミーリング溝の平滑化レベル）	仕上げ加工（鏡面化・光沢向上レベル）
光源	CW レーザー	パルスレーザー
再溶融	連続的プロセス	離散的プロセス
再溶融 深さ	10~80 μm	5 μm 以下
特徴	波長 80~1280 μm の初期表面粗さに対応	波長 80 μm 以下の微細表面粗さに対応

4.2 選択的レーザー研磨（SLP: Selective Laser Polishing）^{1,3)}

自動車の計器パネル等のプラスチック部品の表面には、皮革風等のシボ加工がなされている。すなわち、これらの部品成形金型表面には、転写されるそれに応じた構造にする必要があり、このパターンを金型成形面へ製作するには、従来、電気化学的方法が主に利用されている（電鍍金

型)。

独 Fraunhofer ILT は、このような金型成形面へのシボ加工を、レーザー照射のみで実現する技術を開発し、選択的レーザー研磨 (SLP) として発表した。レーザーによるシボ加工に先立ち、モデルとなる皮革等表面を、3D スキャナーでデジタルデータ化している。レーザー研磨技術を用いて、金属 (金型材料) 表面に皮革の質感を表現するに当たり、選択的レーザー研磨 (SLP) では、選択的にレーザー研磨された領域と未処理の表面部分によって生じる視覚的な印象 (dual-gloss effect) を利用する。レーザー出力を局所的に変調することで、構造の特定の領域の光沢度を制御・調整する。レーザーは CW 発振とパルス発振の両方を使い分ける。

選択的レーザー研磨を実現するため、レーザーは表面上を蛇行して移動する。主スキャン方向への処理は走査速度 v_{scan} で行われ、副加工方向への速度は $v_{sec} = dy \times v_{scan} / (x + dy)$ で計算される。指定された位置 (x, y) において、レーザー出力は、処理が行われない基準レベルと、レーザー出力が表面を再溶融するのに十分な加工レベルの間で直交変調され、表面の指定された領域のみが平滑化され、二重光沢効果が得られる

4.3 造形 (Surfi-Sculpt®) 4-7)

英国接合・溶接研究所 (TWI) で開発された表面改質技術は、質量の増減を伴わない (付加加工でも除去加工でもない) 造形技術である。レーザー (または電子ビーム) 加熱により材料表面を溶融させ、mm 単位の高低差をもつパターンを短時間 (数秒/cm²) で造形する技術であり、“Surfi-Sculpt®”として商標登録されている。この技術登場の背景には、レーザー加工における二つの進歩である「レーザーの高輝度化」と「長焦点での高出力密度スポット」がある。ビームは加工対象材料表面上で高速に走査され、突起と窪み (または空洞) の配列からなる造形を生み出す。このプロセスは、様々な金属、ポリマー、セラミック、ガラスに、高さ最大 3.5 mm の高アスペクト比の造形が可能である。

Surfi-Sculpt®による造形は次のメカニズムによる。ビームが基板表面に接触すると、溶融材料のプールが形成される。ビームを横方向に移動 (スワイプ) させると、蒸気圧と表面張力の相乗効果により、穴から出た材料がビームの移動方向の後方に堆積する。このプロセスを同じ場所で何度も繰り返すことで、最大高さ 3.5 mm、幅 cm²程度の突起を成長させることができ、それぞれの突起には一つ以上の対応する貫通孔または穴が伴う。造形高さは、スワイプの距離と回数で制御できる。

Surfi-Sculpt®プロセスの用途としては、

- ・機械的特性向上
 - 複合材と金属の接合強度向上 (Comeld™)
 - 接着信頼性向上
 - コーティング被膜密着性向上
 - 金属部品と樹脂材料の異材直接成形
- ・空力および流体力学的特性の向上

- ・熱交換特性の向上
熱交換器用マイクロフィン等
- ・生体親和性の向上
埋込型インプラント表面

等の分野での応用検討例が示されている。なお、本技術は日本国内でも特許として権利化されている⁸⁾。

4.4 表面構造化 (WaveShape)⁹⁻¹²⁾

独国フラウンホーファーレーザー技術研究所 (ILT) で開発された表面改質技術は、質量の増減を伴わない (付加加工でも除去加工でもない) 技術であり、レーザー加熱の変調により材料表面を溶融させ、「うねり」・「粗さ」レベルでの表面性状制御技術であり、“WaveShape”と呼称される。同じ ILT が開発した表面改質技術 SLP が CW レーザーとパルスレーザーの両者を利用し、光沢面領域と非光沢面領域を生成するものであるのに対して、WaveShape 技術では、CW レーザーのみを利用し、表面性状を連続的に制御するものである。

レーザー再溶融による表面構造化は、CW レーザー照射を用い、同時にレーザー出力を変調する再溶融プロセスに基づいている。この変調により、溶融プールの容積が変化する。レーザー出力が増加すると、溶融速度が上昇するため、溶融プールの容積が増加し、溶融プールが膨らむ。凝固は、溶融プールの曲面に沿って進行し、表面が粗さレベルで隆起する。レーザー出力を低下させると、メカニズムは逆方向に作用し、窪みが形成される。隆起は初期表面より上に突出し、窪みは初期表面より下にある。

レーザーアブレーションによる表面構造化とは対照的に、WaveShape は、質量の増減を伴わないレーザー再溶融凝固プロセスであり、処理と同時に構造表面は平滑化されるため、後処理 (仕上げ) が不要である。WaveShape の特徴と利点として、

- ・表面構造化と研磨をワンステップで実現可能である
- ・非接触加工であり、部品への機械的ストレスが少ない
- ・周期構造の生成に特に適している
- ・再現性が高い
- ・質量減少が伴わない (特に高価な材料に有効)

等が挙げられる。

これまでに Fraunhofer ILT において調査された材料には、工具鋼や金型製造に使用される工具鋼 (例: EN1.2343 (JIS SKD6 相当)、EN1.2379 (JIS SKD11 相当))、航空宇宙産業で多用される Ti 合金 (TiAl6V4)・Ni 基合金 (インコネル 718)、医療機器に利用される Co-Cr 合金等が含まれている。WaveShape プロセスは、局所的な材料再分配の原理により、特に数百 μm ~数 mm の構造波長 λ と数 μm から 1 mm の構造高さを持つ周期的な波状構造やノブ構造を生成するために使用できるとしており、複雑なスキャンを使用することで、円形・星型等の様々な表面構造を生成できる。

参考文献

- 1) A. Temmler, E. Willenborg, K. Wissenbach, Laser polishing. In Laser applications in microelectronic and optoelectronic manufacturing (LAMOM) XVII (Vol. 8243, pp. 171-183), SPIE (2012)
- 2) E. Willenborg, R. Ostholt, Polishing Metals with Laser Radiation, Industrial Laser Solutions, Vol.24, No.11, pp.9-13 (2009)
- 3) Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT Annual Report 2012 p.101 (2012)
https://www.ilt.fraunhofer.de/content/dam/ilt/en/documents/annual_reports/Annual_Report_2012.pdf
- 4) <https://www.twi-global.com/who-we-are/innovation/intellectual-property-licensing/surfi-sculpt>
- 5) A New Method of Laser Surface Modification, Industrial Laser Solutions, Vol.27, No.3, pp.13-16(2012)
- 6) J. Blackburn, P. Hilton, Producing surface features with a 200 W Yb-fibre laser and the Surfi-Sculpt® process, Physics Procedia, 2011, 12: pp.529-536(2011)3)
- 7) EAA Aluminium Automotive Manual – Joining 11. – Joining dissimilar materials 11. Joining dissimilar materials (https://european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2022/11/11-joining-dissimilar-materials_2015.pdf)
- 8) 特許 4407515 ワークピースの構造の変更
- 9) <https://www.ilt.fraunhofer.de/en/media-center/brochures/b-waveshape.html>
- 10) A. Temmler, E. Willenborg, K. Wissenbach, Design surfaces by laser remelting. Physics Procedia, 2011, 12: pp.419-430 (2011)
- 11) A. Temmler, et al. , Surface structuring by remelting of titanium alloy Ti6Al4V. Journal of Laser Applications, 27(S2), (2015)
- 12) A. Temmler, Surface Structuring by Laser Remelting (WaveShape), LaP16 – 2nd International Conference on Laser Polishing(2016)

第5章 令和7年度調査の結言

面処理技術調査4年目となる令和7年度は、質量変化を伴わない溶融プロセスに関する調査を実施した。研究開発・実用化動向を探る手段として、関わる技術領域での公開特許情報をベースとし、付随・関連する各社広報資料・学会発表資料等も参考情報とした。

第1章では、令和4年度以降の4年間に亘る「レーザーによる表面改質技術」の調査経緯と今年度（令和7年度）の調査範囲について記述した。表面改質技術は、その目的・方法が多岐に亘るため、プロセスに伴う質量変化によってカテゴリー分類を行い、質量変化を伴わない非溶融プロセス（令和4年度）、質量の減少（物質除去）を伴うプロセス（令和5年度）、質量の増加（物質付加）を伴うプロセス（令和6年度）と調査を進め、調査の最終年度となる令和7年度は、質量変化を伴わない溶融プロセスを調査対象とした。

第2章では、質量変化を伴わない溶融プロセスとしての表面改質技術の概要をまとめた。競合する従来熱源による溶融表面改質法と、レーザー溶融表面改質法との相違・優位点を整理した。レーザーによる溶融プロセスでは、高出力密度のレーザースポットを材料表面上で高速に走査させる。表面溶融池のレーザー特融の動的挙動についても調査した。

第3章では、日本特許庁に出願・公開された出願特許を基に、溶融プロセスとしての表面改質技術へのニーズ（目的・応用）を含めて、技術開発動向の調査結果をまとめた。従来、 γ 系ステンレス鋼の脱鋭敏化は、粒界に析出したCr炭化物を溶体化する固相（非溶融）プロセスと認識されてきたが、現場では、溶融プロセスも実用化の検討が進められていることが判明した。

鉄損改善を目的としたレーザー照射による磁区細分化についても、従来は、局所的な残留ひずみを与える非溶融プロセスとされてきたが、主としてトランス等の電力変換器鉄心として用いられるFe基非晶質合金薄帯の鉄損改善を目的としたレーザー照射溶融プロセスとしての特許出願も為され、権利化されていることが判明した。

原子力産業で利用される機材・物体表面は、放射性核種および化合物で汚染されており、除染（除去加工）が必要である。従来の除染技術による汚染除去が困難な場合、機材・物体表面にレーザー照射することにより、放射核種を機材・物体内（表面近傍）に固定・封止し、二次放射性物質拡散を抑制する方法が権利化されていることが判明した。

光ファイバ通信の広範な普及拡大と共に、光コネクタの高品質化が進められてきた。レーザー照射により光ファイバ端部を局所的溶融処理する様々な方法が、特許出願され権利化されている。

レーザーフォーミングは、金属板にレーザー照射し、非溶融での熱塑性変形させる成形加工と分類されてきた。レーザー照射により溶融領域まで加熱するとともに、曲げ予定線（レーザー走査線）に沿って外力での曲げ加工を併用する加工方法が提案されている。Siウェハ等には、マイクロクラック・欠け等の欠陥が発生しやすく、研磨と洗浄による欠陥除去がなされてきた。レーザーキャン照射による局所的な溶融処理を行うことにより、全ての欠陥を非接触で修復する方法が複数提案され、権利化されていることが判明した。

第4章では、公表されている海外文献・資料から、新しい表面改質技術の一つであるレーザー研磨（ポリッシング）と、そこから派生・発展した三つの技術について、調査結果を報告した。従

来の研磨技術（砥石研削等）が、材料除去加工であるのに対して、レーザー研磨は、質量の増減を伴わない（除去加工でも付加加工でもない）、金属自由曲面を平滑化・光沢化する新しいアプローチである。研磨材を用いず、非接触加工であるレーザー研磨では、レーザー加熱により金属材料のごく表層のみを溶融させ、表面張力によって凸部から凹部へと材料を流動させる。CW レーザーによるマクロ研磨（粗加工）と、パルスレーザーによるマイクロ研磨（仕上げ加工）を使い分けられている。

独 Fraunhofer ILT は、金型成形面へのシボ加工（皮革の質感を表現）を、レーザー照射のみで実現する技術を開発し、選択的レーザー研磨（SLP）として発表した。SLP は、選択的にレーザー研磨された領域と未処理の表面部分によって生じる視覚的な印象（dual-gloss effect）を利用し、レーザー出力を局所的に変調することで、構造の特定の領域の光沢度を制御・調整する。レーザーは CW 発振とパルス発振の両方を使い分ける。

英国接合・溶接研究所（TWI）は、CW レーザー（または電子ビーム）による高速走査加熱により、材料表面を溶融させ、mm 単位の高低差をもつパターンを短時間（数秒/cm²）で造形する技術を開発し、“Surfi-Sculpt®”として商標登録している。ビームは加工対象材料表面上で高速に走査され、突起と窪み（または空洞）の配列からなる造形を生み出す。このプロセスは、様々な金属、ポリマー、セラミック、ガラスに、高さ最大 3.5 mm の高アスペクト比の造形が可能である。

独 Fraunhofer ILT は、走査 CW レーザー加熱時にレーザー出力変調を加えることにより、「うねり」・「粗さ」レベルでの表面性状を制御する技術を開発し、“WaveShape”として発表している。同じ ILT が開発した表面改質技術 SLP が CW レーザーとパルスレーザーの両者を利用し、光沢面領域と非光沢面領域を生成するものであるのに対して、WaveShape 技術では、CW レーザーのみを利用し、表面性状を連続的に制御するものである。

第6章 レーザー表面改質技術調査総括

令和4年度以降の4年間に亘り、「レーザーによる表面改質技術」を調査した。表面改質技術はその目的・方法が多岐に亘るため、プロセスに伴う質量変化によってカテゴリー分類を行い、質量変化を伴わない非溶融プロセス（令和4年度）、質量の減少（物質除去）を伴うプロセス（令和5年度）、質量の増加（物質付加）を伴うプロセス（令和6年度）と調査を進め、調査の最終年度となる令和7年度は、質量変化を伴わない溶融プロセスを調査対象とした。

これまで、レーザーによる表面処理技術を分類・整理し、解説する試み¹⁻⁵⁾が為されており、本調査報告でも、その先行調査例（表1-1参照）に従って調査を開始した。4年間の調査期間中に、レーザー表面改質技術に関連する国内出願特許484件を調査し、記載された技術内容（解決すべき課題・解決手段）による分類・整理を試みた。その結果を表6-1に示す。なお、表6-1中の朱文字で表した技術は、従来の分類（表1-1）には記載の無かった技術である。

表 6-1 国内出願特許調査結果のまとめ

質量増減	プロセス	名称	主たる処理目的	調査特許件数		
無	非溶融	変態焼入れ	表面硬化	13		
		結晶粒微細化	表面硬化	3		
			強度特性改善等	1		
		溶体化処理	耐食性改善(脱鋭敏化)	12		
		アニーリング	残留応力・歪み低減	1		
			結晶成長	12		
		衝撃硬化(ピーニング)	疲労強度改善、耐SCC	24		
		磁区細分化	電磁鋼板鉄損改善	21		
		フォーミング	歪付与、曲げ加工	7		
		化学的改質	表面活性化	12		
	酸化膜・窒化膜等被膜形成		10			
	酸化物還元		1			
	硬脆材への予亀裂付与	熱疲労強度改善、SD、発色	5			
	マーキング	LIPSSによる発色	2			
	溶融	通常凝固	再溶融(偏析解消)	耐食性改善(脱鋭敏化)	7	
			コンソリデーション	気孔率低減	2	
				均質化	1	
				被膜硬度改善	1	
			溶接止端部処理	疲労強度改善	2	
			粗面化	異材接合前処理	4	
				ロール機能化	3	
				造形	1	
				磁区細分化	電磁鋼板鉄損改善	5
			汚染封止	放射性核種固定・封止	2	
		ファイバ端部処理	光学特性改善	6		
		平坦化	バリ取り	1		
		フォーミング	歪付与、曲げ加工	1		
		急速凝固	チル化	耐摩耗性・耐孔食性改善	5	
			欠陥修復	Siウエハ	8	
	超急速凝固	グレージング	非晶質化	1		
			耐食性改善	0		
	増	素材被覆	合金元素添加	アロイニング	耐摩耗性・耐食性等改善	3
			肉盛り(クラディング)	欠損部補修	4	
耐摩耗性・耐食性・耐熱性改善				38		
着色ガラス層形成				1		
付加製造(AM)				8		
金属・樹脂異材接合バインダー				2		
直接描画			回路形成	5		
			選択的めっき	1		
マーキング			着色・発色	8		
粗面化			滑り止め	1		
含浸	木質表面強化	1				
減	除去	クリーニング	脱脂	3		
			除染	50		
			除錆	17		
			スキヤプリング(削取)	2		
			その他	54		
		ストリッピング	被膜剥離	32		
			塗膜剥離	31		
		ホーニング	潤滑特性付与	1		
		マイクロテクスチャリング	耐摩耗性改善	0		
			濡れ性等制御	6		
			抵抗体トリミング	1		
		マーキング	触感・化粧効果	2		
			被膜剥離	7		
			彫刻	10		
		粗面化	接合・塗装前処理	6		
滑り止め	2					
平坦化	工具面仕上げ	5				
残留応力制御	耐SCC改善	3				
磁区細分化	電磁鋼板鉄損改善	1				
NA	NA	共通	表面改質用機器・方法	5		

本調査により、レーザー技術そのものの進化に伴って、表面改質技術の応用検討も進み、その裾野が広がっていることが分かったと共に、以下の課題も明らかになった。

① レーザーマーキングの取扱いについて

従来、「レーザーマーキング」は「表面改質」の範疇として取り扱われていなかった。その理由は、当初、レーザーマーキングは、テーキンによる刻印に代わる方法として、単純に文字・記号の輪郭を線状に材料表面に刻む(彫刻)技術との認識だったことによるものと推測する。しかし、レーザーそのものの進化と共に、その応用の範囲も広がり、現在のレーザーマーキング技術は、面加工・発色加工等にも応用されている。このことから、表面改質技術の一範疇として取り扱われるべきと考える。

② レーザークリーニングとレーザーストリッピングの取扱いについて

「レーザークリーニング」と「レーザーストリッピング」の処理対象材料と処理範囲を表 6-2 に示す。従来、両者は夫々、独立した技術として取り扱われてきた。近年、国内外の複数の事業者から専用装置が市販され、両者の明確な区別無く、普及が急速に進んだ現状を見ると、「レーザークリーニング」と「レーザーストリッピング」を独立した別技術として取り扱うことが妥当であるかどうかは、再考の余地があると考ええる。

表 6-2 レーザークリーニングとレーザーストリッピングの対象材料・処理範囲

	処理対象材料	処理範囲
レーザークリーニング	表面上の異物 (錆・放射性物質等)	原則として全面
レーザーストリッピング	表面上の機能層 (塗膜・被膜等)	従来は選択的 (リサイクル・メンテナンス目的の場合には全面)

③ 目的別によるレーザー表面改質技術の分類について

質量の増減、材料溶融の有無というプロセスの違いによる従来の分類方法に基づいて、4年間の調査を進めてきたが、現場では、同じ目的でも異なる表面改質プロセスが利用検討されていることが判明した。(例えば、磁区細分化は従来、質量変化を伴わない非溶融プロセスとされていたが、現場では溶融プロセス・除去プロセスも含めて技術が確立され、利用されていることが本調査で明らかとなった。)

そこで、4年間の本調査結果を、表面改質の目的別に分類し、利用されるプロセスの観点から整理を試みた。整理した結果を表 6-3 に示す。表中の朱文字表記は、従来の表面改質技術の分類に記載の無かったものの、新たな表面改質応用として明らかとなった技術を追記したものである。レーザー技術の進展と共に、その応用の裾野が広がっていることを物語っている。レーザーによる表面改質は、局所・選択的に材料表

面を高度に機能化することができる技術であり、今後も更なる技術の進歩と、その結果としての応用の拡がりが期待される。

表 6-3 処理目的によるレーザー表面改質技術の現状

名称	主たる処理目的	質量増減無			質量増 素材被覆	備考
		質量減 除去	非溶融	溶融		
変態焼入れ	表面硬化		○			
結晶粒微細化	表面硬化		○			
	強度特性改善等		○			
脱鋭敏化	耐食性改善		○	○		
アニーリング	残留応力・歪み低減		○			
	結晶成長		○			
衝撃硬化(ビーニング)	疲労強度改善・耐SCC		○			
磁区細分化	電磁鋼板鉄損改善	○	○	○		
フォーミング	歪付与・曲げ加工		○	○		
化学的改質	表面活性化		○			
	酸化膜・窒化膜等被膜形成		○			
	酸化物還元		○			
硬脆材への予亀裂付与	熱疲労強度改善・SD・発色		○			SD: Stealth Dicing(HPK)
マーキング	着色・発色		○		○	
	被膜剥離	○				
	彫刻	○				
溶射被膜改質	気孔率低減			○		
	均質化			○		
	被膜硬度改善			○		
溶接止端部処理	疲労強度改善			○		
粗面化	異材接合前処理			○		
	ロール機能化			○		
	造形			○		Surfi-Sculpt®(TWI)
	接合・塗装前処理	○				
	滑り止め	○			○	
平坦化	バリ取り			○		
	工具面仕上げ	○				
	研磨			○		Laser Polishing
汚染封止	放射性核種固定・封止			○		
ファイバ端部処理	光学特性改善			○		
チル化	耐摩耗性・耐孔食性改善			○		
欠陥修復	Siウェハ			○		
グレージング	非晶質化			○		
	耐食性改善			○		
アロイング	耐摩耗性・耐食性等改善				○	
肉盛り(クラディング)	欠損部補修				○	
	耐摩耗性・耐食性・耐熱性改善				○	
	着色ガラス層形成				○	
	付加製造(AM)				○	
直接描画	金属・樹脂異材接合バインダー				○	
	回路形成				○	
含浸	選択的めっき				○	
	木質表面強化				○	
クリーニング	脱脂	○				
	除染	○				
	除錆	○				
	スキャッピング(削取)	○				
	その他	○				
ストリッピング	被膜剥離	○				
	塗膜剥離	○				
ホーニング	潤滑特性付与	○				
マイクロテクスチャリング	耐摩耗性改善	○				
	濡れ性等制御	○				
	生体親和性等改善			○		WaveShape(ILT)
	抵抗体トリミング	○				
	触感・化粧効果	○			○	SLP:Selective Laser Polishing(ILT)
残留応力制御	耐SCC改善	○				

(HPK: 浜松ホトニクス株式会社、TWI: 英国接合・溶接研究所、ILT: フラウンホーファーレーザー技術研究所)

参考文献

- 1) 光産業創成大学院大学 レーザーによるものづくり中核人材育成講座テキスト 4.2 レーザー表面処理の基礎と実習(2010)
- 2) 長野幸隆 レーザーによる表面熱処理 レーザー研究 Vol.8 No.4 pp.3-9(1980)
- 3) 松縄朗 レーザーによる表面改質 レーザー研究 vol.16 No.8 pp.21-30(1988)
- 4) 沓名宗春 レーザーによる金属の表面加工 レーザー研究 Vol.22 No.9 pp.32-47
- 5) 萩野秀樹,山口拓人 レーザ表面処理の研究動向,日本真空学会誌,Vol.56,No.8,pp.25-31 (2013)

公益財団法人 光科学技術研究振興財団
委託研究報告書(令和7年度)

レーザー科学技術の将来に関する調査研究
－国内外最新のレーザーを用いた表面処理の動向と将来に
関する調査－ 4. 質量増加を伴わない溶融プロセス

令和8年3月

光産業創成大学院大学
〒431-1202 静岡県浜松市中央区呉松町 1955 番 1
TEL: 053-484-2501 <https://www.gpi.ac.jp/>

(禁無断転載)
