

# レーザーピーニングの実用化

## Applications of Laser Peening

\*名古屋大学 工学研究科  
沓名 宗春\*

### 1. はしがき

“Peening ピーニング”という用語は、ショットピーニングとかハンマーピーニングとして古くより使われてきた。例えば、ハンマーピーニングは先の尖ったハンマーで鋳鉄を溶接をする際に、ビード表面をコツコツとたたくことにより、凹凸を表面に作り、表面積を広げ、圧縮の残留応力を与えることにより、延性のない鋳鉄でも溶接割れなく溶接できる。ショットピーニングは1927年のボールによる材料表面の硬化や1935年の E. Weibel のショット噴射による疲労強度の向上試験、長沢雄次の鋼球噴射による表面硬化などに始まり、現在は工業的に、表面硬化、残留応力付与、疲労強度の改善、応力腐食割れ防止、表面粗さ調整、耐摩耗性向上、ピーンフォーミング、バリ取り、研削加工、黒皮除去、などに広く利用されている。また、超音波ピーニング<sup>1) 2)</sup> およびウォータージェットピーニングなども開発され、利用されている。

レーザーピーニングの基本原理は1963年に金属に高エネルギーのパルスレーザーを照射すると衝撃波の発生および塑性変形が生じることが確認され、表面硬化法として研究された。1970年代初めに米国の Battelle Memorial Labo (バットル記念研究所) ではその有効性がさらに研究され、表面硬化のみならず、疲労強度の改善効果なども確認された。現在、レーザーピーニングは限られた分野で表面処理技術として実用化され、利用されている。

本報告では、レーザーピーニングの原理、その応用を紹介するとともに、最近、著者らが開発した特殊レーザーの原理、およびその応用分野についても紹介する。

### 2. レーザピーニング

#### 2.1 レーザピーニングの原理と特徴

ここで、取り上げるレーザーピーニングはショット(鋼球、セラミックス粉体、ガラス粉体など)を打ち込む代わりに、図1に示すように、高ピークエネルギーのレーザーを5~20nsの短時間に、被加工

物表面に照射して、発生する超高圧のプラズマ圧により、その表面部を塑性変形させ、残留応力変化を伴う表面処理を行うものである。

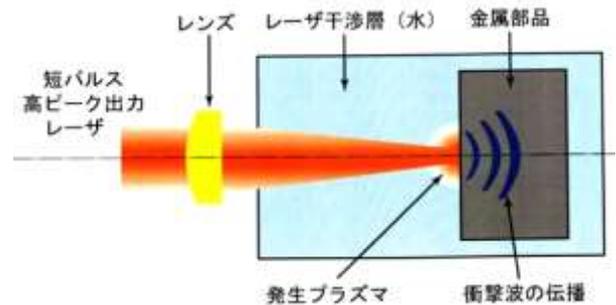


図1 レーザピーニングの原理図

すなわち、金属表面のレーザー照射部では瞬時に約2~5GPa (1GPaは約1万気圧)の超高圧のプラズマが発生し、その衝撃波が材料に伝わり、微小な(深さが数 $\mu\text{m}$ から数10 $\mu\text{m}$ )ディンプル(窪み)を図2のように形成する<sup>3)</sup>。この照射を繰り返すと、表面近傍は約1mmの深さまで圧縮の残留応力が生じる<sup>3)</sup>。図3に示すように、板表面部に圧縮の圧縮残留応力が、板内部に引張の残留応力が生じる<sup>4)</sup>。このように表面に圧縮の残留応力が発生すれば、疲労強度の改善や溶接部の応力腐食割れ防止等が可能である。

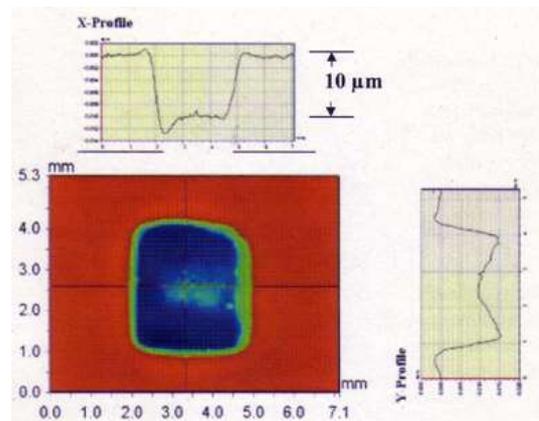


図2 金属表面に生じる窪み<sup>3)</sup>

このレーザピーニングも当初はレーザ衝撃硬化として研究された。1974年に P.Malozzi および B.P.Fairand が米国特許を取得した<sup>5)</sup>。1976年に米国バットル研究所でさらに研究され、疲労強度の改善も報告された<sup>6) 7)</sup>。その後、多くの研究開発がなされ、1992年ごろから米国の軍用機のエンジン部品へのレーザピーニングが研究され、1996年頃に工業的に適用されるようになった<sup>7)</sup>。

我が国では原子力発電プラントの応力腐食割れ防止に、東芝がレーザピーニングの研究開発を行い、

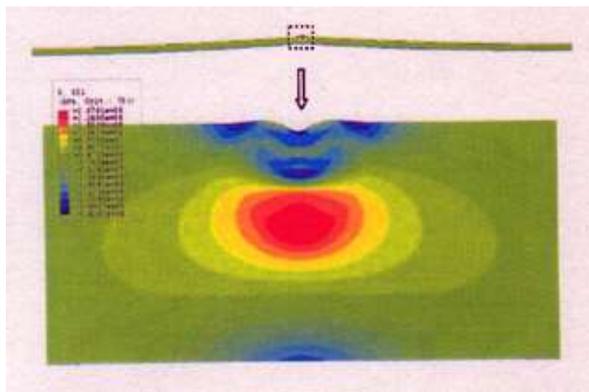


図3 レーザピーニング後の板内部の応力分布<sup>4)</sup>

1999年4月に浜岡の原子力発電所のシュラウドに適用したのが最初と思われる<sup>8) ~ 12)</sup>。さらに最近、ピーニングを道路橋の疲労強度改善などに適用しようとする研究・開発も活発であり、ますます、ピーニング技術そのものが花を開こうとしている。

#### Pressure (GPa)

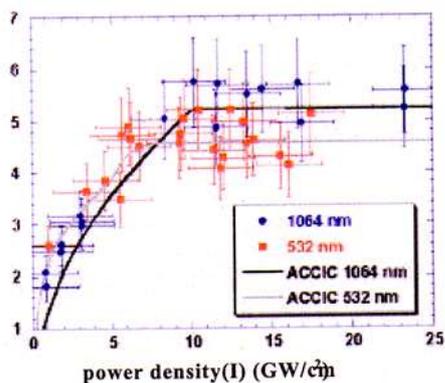


図4 照射レーザのピーク出力密度と発生するプラズマ圧の相関<sup>13)</sup>

レーザピーニングの基本的な機構は図1に示したように5~15 GW/cm<sup>2</sup>という高ピーク出力密度の短パルス(パルス幅:5~20 ns)の固体レーザ(波長:1064 nm又は532 nm)を金属表面に照射すると、金属表面は5000℃以上に瞬時に

加熱され、金属が加熱・熔融・蒸発・イオン化(プラズマ化)され、超高压(約5 GPa)のプラズマ圧が瞬時(10~15 ns後)に生じる。このプラズマは放射状に空間に広がろうとする。もし、この図のようにレーザ干涉層(水など)があると、この層により、プラズマが閉じこめられ、金属表面から内部に強い衝撃波が伝わる。この時のプラズマ圧力はレーザのピーク出力密度から次式のように計算でき、図4に示すように照射するレーザの出力密度が10 GW/cm<sup>2</sup>以上で約5 GPa以上になる。

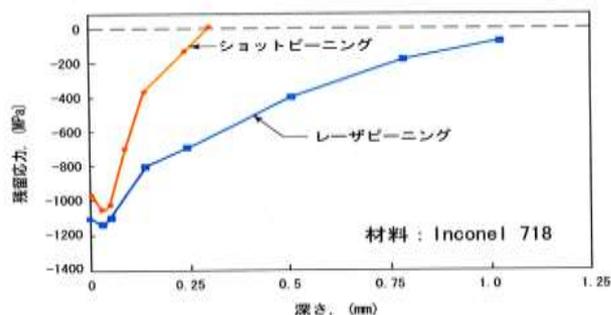


図5 ピーニング部の残留応力<sup>14)</sup>

この5万気圧で金属表面に塑性変形を与える。その結果、図2に示したように窪み(ディンプル)が生じ、その周辺の応力分布は、図5に示すように、最大値として、その材料の降伏点に相当する圧縮の残留応力が表面近傍に発生し、約1.0 mmの深さまで、広く圧縮の残留応力が分布することになる<sup>14)</sup>。この塑性変形による圧縮の残留応力は溶接構造物などの疲労亀裂の進展を抑制する効果がある。また、応力腐食割れの進展を防止するなど、工業的に非常に有効である。すでに、航空機ジェットエンジン部品の疲労亀裂進展防止や疲労強度の改善、原子力発電プラントのシュラウドの応力腐食割れ防止や予防保全対策作業に工業的に利用されている。航空機用 Inconel718 合金の疲労試験でレーザピーニングがショットピーニングに比べて、十分高い疲労強度を有し、その寿命が約10倍ほど延命することが図6のように確認されている<sup>14)</sup>。

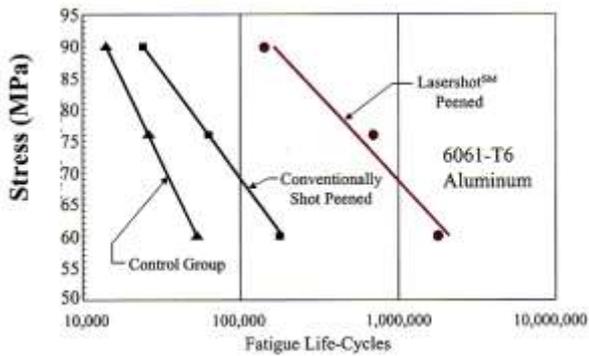


図6 アルミ6061合金の疲労強度に及ぼすピーニング処理の影響<sup>14)</sup>

このレーザピーニングは他のピーニングに比べて次のような特徴がある。

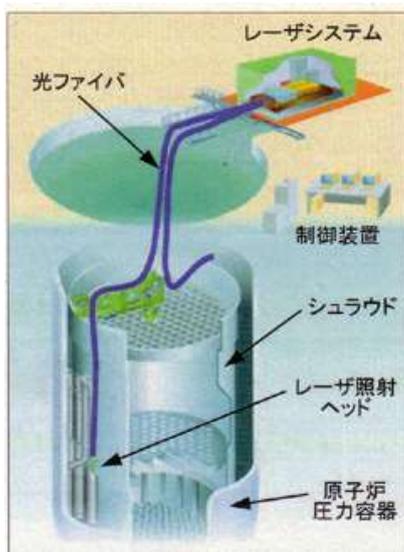
- ◆ 圧縮残留応力分布が大きく深い。
- ◆ 疲労寿命がショットピーニングの約10倍である。
- ◆ 局所のマイクロピーニングも可能である。
- ◆ 応力腐食割れ防止を容易にできる。
- ◆ 粉体を用いないので環境がクリーン。
- ◆ 騒音も少ない。
- ◆ 小型化、自動化が容易。

## 2.2 レーザピーニングの応用

1997年ごろ、東芝の佐野らは原子力発電プラントの応力腐食割れの事故を防止したり、その補修・延命のために、レーザピーニングの研究・開発を始め、1999年4月に世界で初めて、浜岡の原子力発電所の炉心シュラウドの補修に適用した<sup>8)~12)</sup>。

図7は最近の適用状況を示す。QスイッチのYAGレーザ発振器からシュラウドまでビーム伝送を光ファイバー伝送により行い、現在、多くのプラントに対して実施している。水を透過しやすい波長の2倍波(波長: 532nm)を用いている。SUS304鋼のピーニング実験では残留応力分布が材料表面で

レーザピーニングにより最大0.0Mの圧縮応力が確認



ピーニングにより約7Paの残留応力を生じることが確認

た<sup>11)</sup>。

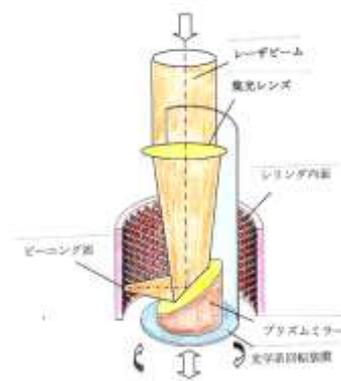
図7 原子力発電プラントの応力腐食割れの予防保全にレーザピーニング処理<sup>12)</sup>

また、米国ではGE社などで1992年ごろより軍用機のジェットエンジン部品のレーザピーニングを研究開発し、1996年頃よりオーバーホール時に採用してきた<sup>14)</sup>。民間機ではボーイング社が図8に示す



図8 民間機エンジンファンブレードに適用されるレーザピーニング<sup>14)</sup>

民間機エンジンファンブレード(Ti-6Al-4V合金)にレーザピーニングを2002年より採用している



14)。レーザピーニングの最大のメリットは図6に示したように疲労寿命がショットピーニングの約10倍長くなることである。それにより、オーバーホールの期間を延長でき、費用を削減できる。米国軍用機はその費用は年間約140億ドルにもなるので、大きな効果が生じる<sup>14)</sup>。

### 3. 特殊レーザピーニングの研究・開発

3.1 特殊レーザピーニングの原理と特徴 著者は(株) 斉藤工業の斉藤清隆氏らと従来のレーザピーニングに変えて、新しく特殊レーザピーニング技術(Special Laser Peening = SLP法)を開発した。その基本的な考え方は図9に示す。

従来のレーザピーニングでは粉体を打ち込むことはできなかったが、この特殊レーザピーニングでは各種の粉体を部材表面に打ち込むことができる。部材表面にレーザ吸収粉体層シートを設け、その上に水などのレーザ干渉層を準備し、高ピーク出力短パルスレーザにより生じる超高压プラズマでこのシートを変形させ、このシートの底部に付着している粉体を部材に打ち込む方法である。ショットピーニングではWPC処理としてすでに各種部品の表面処理に利用されている<sup>17)</sup>。

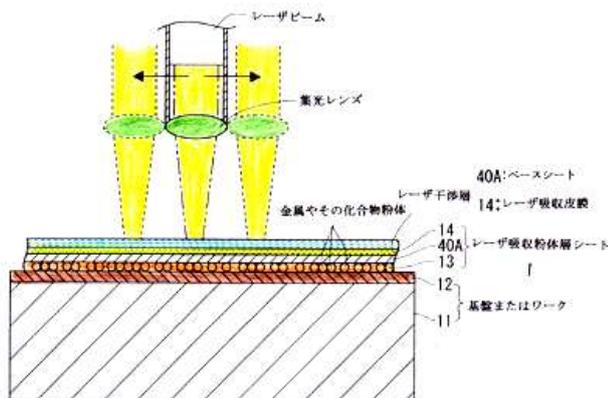


図9 特殊レーザピーニングの原理図<sup>15) 16)</sup>

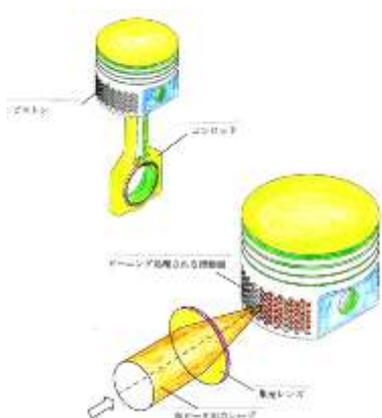


図10 ピストンスカート、ピストンシリンダーへの適用案<sup>15)</sup>

この粉体シートを用いる特殊レーザピーニング技術は、図10に示すような自動車エンジンなどのエンジンシリンダ、ピストン、ベアリングなどの摺動機械部品の表面に対して、従来にない表面改質技術を提供するものである。従来はその耐摩耗性や摺動性を向上するために、焼入れ、浸炭・窒化処理、ショットピーニング処理、合金化処理などを施しているが、ここではその表面を改質するのみでなく、被加工物表面に異物を高ピーク出力レーザで瞬時に発生させたプラズマの衝撃波で打込むとともに、その表面層の内部応力分布を圧縮残留応力になるように制御する手段を用いて、従来法に比べ、数倍から数10倍の耐摩耗性や摺動性を向上する技術を開発するものである。この摺動性や耐摩耗性の向上により、自動車や船舶などの内燃機関エンジンの回転数の向上、エンジン効率の向上により燃費効率の向上が可能となる。よって、環境問題にも大きく寄与できる新技術である。

特殊レーザピーニングの特徴はつぎようである。

- ◆各種粉体を利用できる
- ◆各種表面機能の向上が可能
- ◆処理深さが深い
- ◆処理面の性能向上が非常によい。
- ◆局部照射もよい。
- ◆作業環境がよい。
- ◆自動化が容易。

摺動部品の改善以外に、この間接型レーザピーニングは触媒(金、白金など)、特に最近注目されている光触媒( $TiO_2$ など)、抗菌剤(銀など)、香料、耐食性材料などを反応容器以外に、各種工業製品や生活用品の表面に打ち込むことができ、将来の我々の生活を一層快適にすることに寄与できると期待されている。例えば、

家庭のエアコンにつく“「カビ」の問題があるが、抗菌剤をエアコン部品に図11のように打ち込めれば、滅菌作用があり、この問題の解決も可能になる。



図11 金属表面への抗菌剤の打ち込み案

### 3. 2 特殊レーザーピーニングの基礎実験

この特殊レーザーピーニング処理はその打込む粉体と基板の材質を種々変化させることでその応用分野はピストンの摺動性改善、反応容器の触媒による機能向上、医療機器、日用品、エアコンなどへの抗菌剤の打ち込み、装飾品への香料の打ち込みなど、非常に幅広い適用が考えられる。そこで、著者は「特殊レーザーピーニング研究会」のメンバーである光産業創成大学院大学（山中正宣研究室）の高ピーク出力のQ-スイッチYAGレーザー装置の2倍波を用いて、図12のような実験装置でアルミニウム合金基板に平均 $6.7\mu\text{m}$ 径のアルミナ粉末をレーザーピーニングした。

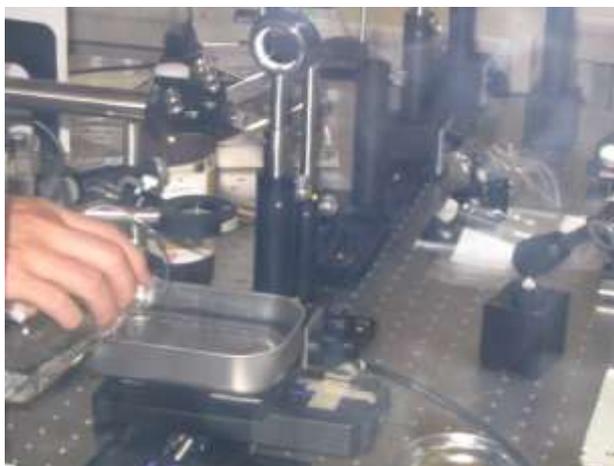


図12 間接型レーザーピーニングの実験状況

ビームスポットは $0.5\text{mm}$ で、ピークパワー密度を $8\text{GW}/\text{cm}^2$ として、 $7\text{ns}$ のパルス幅でピーニングした。そのピーニング部のSEM写真を図13

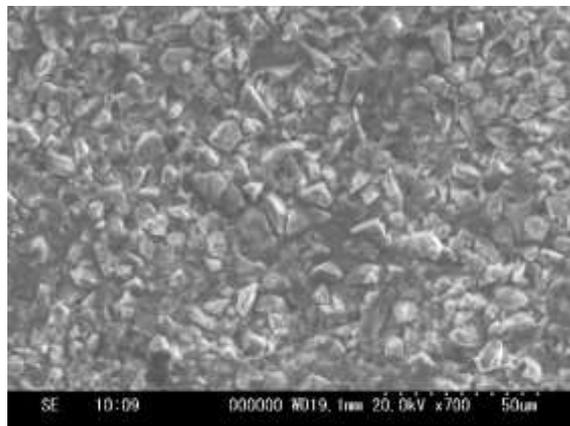
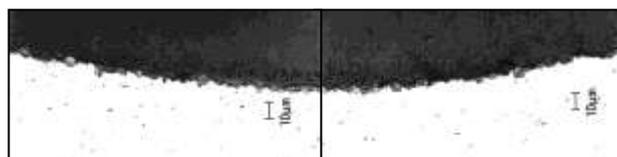


図13 アルミニウム合金表面に打込まれたアルミナ粉体（平面写真）

に示す。窪みの表面には一面、アルミナ粉体が打込まれている。この窪み（ディンプル）の表面には図14に示すように半球状の鍋底型のディンプルが得られた。その底面にはアルミナ粉体が打込まれていた。従来のレーザーピーニングでは図15に示すようにディンプルは底面が凹凸状になり、周辺部に盛上

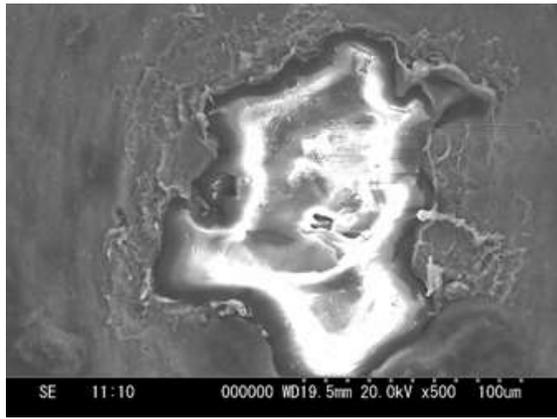


がりが見られ、滑らかで

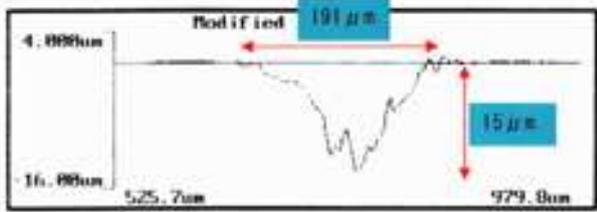
なく、不均一な形状である。

図14 特殊レーザーピーニングにより打ち込まれたアルミナ粉体（断面写真）

この窪みの形状を見ると、従来のレーザーピーニングの窪み形状に比べ、非常に滑らかである。今回のパルス繰り返し数は $1\text{Hz}$ で実験しているが、市販の装置で $5\text{kHz}$ とか $10\text{kHz}$ の繰り返しで、微小な径のピーニング処理を行うことができる。無数に近い微小なディンプルを数10分で部品表面に形成することも容易である。



(a) ディンプルの平面写真



(b) ディンプルの深さ測定結果

図15 ベースシート (SUS304 薄板) に生じた  
プラズマ圧によるディンプルの形状

### 3. 3 特殊レーザーピーニング技術の応用分野

この特殊レーザーピーニング技術の応用分野として次のような機能向上に応用できると考えられる。

- ◆摺動部品の摩擦抵抗の低減、摺動性の向上<sup>17)</sup>  
(ピストンエンジンの摺動性改善により摩擦抵抗エネルギー損失を約8%向上させ、燃費を改善できる。回転数の向上も期待できる。)
- ◆圧縮残留応力による疲労強度の改善と応力腐食割れの防止(構造物の疲労強度改善、化学プラント、発電プラントの応力腐食割れの防止、核燃料の廃棄用キャニスターの応力腐食割れの防止など)
- ◆各種触媒の打込み  
(各種反応容器の性能向上、燃料電池の効率向上)  
(光触媒による環境浄化機能、消臭機能、殺菌機能の付与)
- ◆抗菌剤の効率的な塗布  
(食品機器、厨房機器及び医療機器等への抗菌剤の付着、空調機器の金属フィルター等のかびの除去、除菌効果)
- ◆香料などの効率的な塗布  
(装飾品、身の回り品や家庭用品への各種香料の低温での塗布)

このように、特殊レーザーピーニング技術は自動車エンジンから医療機器まで、各種工業、食品産業、装飾品、医療分野など非常に幅広い応用に利用できるイノベーション的技術を提供できると考えられる。

このような成果をもとに、平成19年度の経済産業省の地域新生コンソーシアム研究開発事業に、3大学(名古屋大学、三重大学、光創成大学院大学)、1公的研究機関(愛知県産業技術研究所)、7企業(斎藤工業、レーザックス、中央精機、東洋精鋼、新東ブレーター、石原薬品、エンシュウ)、管理団体団(中部科学技術センター)で応募したところ、8月2日付けで採択され、現在、研究開発を推進中である。

この特殊レーザーピーニング技術は工業的な利用以外にも広く利用できるので、さらに広く発展して行くものと思われる。

### 4. 最新レーザー利用生産システムの開発

1990年より急速に発達した高出力半導体レーザーを主に利用した加工用レーザー、また、高ピーク出力・高繰り返しパルスレーザー、超短パルスレーザーなどの最新のレーザーを用いたレーザー加工システムが2000年以降、特に加工分野で利用されるようになってきた。これらは光変換効率が高く、小型であり、今後ますます、各種レーザー加工に利用されると思う。そこで、茶者はこれらの加工システムを「最新レーザー利用生産システム:Advanced Laser Integrated Manufacturing System=ALIMS」と名付けた。これらはつぎのレーザー加工技術を含む。

- 1) レーザ・アークハイブリッド溶接
- 2) リモート溶接
- 3) レーザろう付
- 4) 異種金属のレーザーロール溶接
- 5) 樹脂のレーザー溶着
- 6) レーザ直接造形・肉盛
- 7) レーザ成形・曲げ加工
- 8) レーザクリーニング・ストリッピング
- 9) レーザピーニング
- 10) レーザ微細加工・ナノ加工

#### 1 1) フェムト秒レーザー加工.

ここでは著者らのグループで開発したシステムを紹介する。

#### 4. 1 3Dリモートレーザー溶接・切断ロボット

H16・17年度に地域コンソーシアム研究開発により、研究グループのレーザーックス社は図16に示すような2kWファイバレーザー装置、小型6軸多関節ロボットおよびX、Y-ガルバノミラー付き小型遠隔加工用ヘッド(XYZ-3軸サーボモータ制御)を用いた3次元のリモートレーザー加工システムを開発した。

加工可能エリア、ワーキングディスタンス、レーザーキャン角度、最大ポジショニング速度、繰返し位置決め精度に関しても、自動車産業などでの応用を考慮した開発目標仕様をクリアする成果が得られた。現在、さらにソフトウェアの改良作業などを進めている。



図16 3Dリモートレーザー溶接・切断ロボット

#### 4. 2 レーザロール溶接による異種金属継手

上述のコンソーシアム研究開発において、各種異種金属継手を持つ高強度・高機能部材の製造技術の開発も行った。図17に示すレーザーロール溶接で、異種金属の片側の金属のみ所定の高温に加圧し、ローラでもう一方の金属に加圧接触させ、

熱伝導と原子の拡散により接合するもので、脆弱な金属間化合物を形成を抑制し、難接合継手とされているTi-Al合金、Fe-Ti、Fe-Al合金の異材継手を接合できるのが特徴である。何れも引張せん断試験で母材破断する接合継手が得られる溶接条件を選定できた。図18はアルミニウム合金と純チタンの重ね継手の引張せん断試験結果を示す。



図17 開発したレーザーロール溶接装置

重ね代(接合幅)と強度の関係を示すが、ある接合幅以上ではすべて母材破断を示した。図19はその破断状況を示す。

航空機部材のAl-Ti部材、Al-Steelの高強度・軽量の自動車パネルおよびTi-Steelの耐海水腐食性高性能パネルなどをレーザーロール溶接により製作する技術を開発した。新開発のレーザーロール溶接技術をALIMSとして実現することにより軽量、高強度、高耐食性、高機能な各種異種金属構造部材を低コストで生産できる技術を開発した。

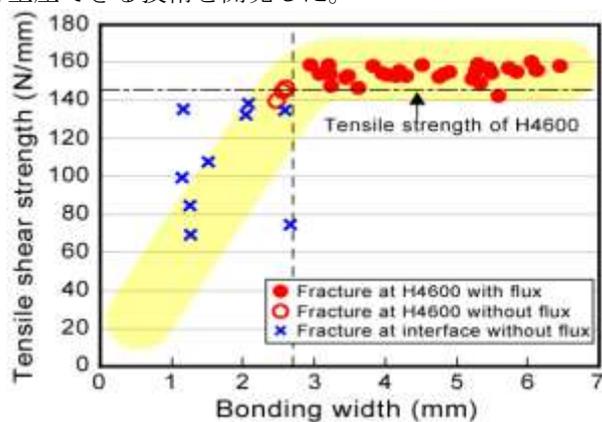


図18 アルミニウム合金とチタンのレーザーロール溶接継手の引張せん断試験結果

参考文献

- 1) Kudryavtsev Y. Kleiman J. et al: Rehabilitation and Repair of Welded Elements and Structures by Ultrasonic Peening, IIW Doc. XIII-2076-05, Prague, Sept., 2005
- 2) White R.M., Journal of Apply Physics, Vol.34(1963), 2123
- 3) Hackel L.A.: Laser Penning to Reduce Corrosion Cracking and Fatigue Failure in Navy Ships and Systems, proc. of SAIL, June 2-4, 2003, Williamsburg, US, Paper #sec6-05
- 4) Fan Y.J., Wang Y.N., et al: Wave-Solid Interactions in Shock Induced Deformation Processes, Proc. ICALEO, Oct.31-Nov.3, 2005, Miami, 479-488
- 5) Fairand B.P. and Clauer A.H.: SPIE Industrial Applications of high Power Laser Tech., 86(1976), p.112-118
- 6) Clauer A.H., Fairand B.P. Proc. of Conf. on Applications of Laser in Materials Processings, by AWS, Ohio, US, 1979, p.291-315
- 7) Rockstroh T.J.: Cost Effective Laser Shock Processing Development at GE Aircraft Engines, Proc. ICALEO, Oct.31-Nov.3, 2005, Miami, 703-709
- 8) 依田、佐野、向井：光ファイバによる20MWレーザーパルスの伝送とその応用、レーザー研究、28-5(2000), p.309-313
- 9) 依田、佐野、向井ほか：レーザーの水中照射による金属材料の残留応力改善メカニズム、日本原子力学会誌、42-6(2000), p.567-573
- 10) 佐野雄二：レーザーピーニング技術の開発と応用、名古屋レーザー・ニュース、20号(2006), p.61-65
- 11) 佐藤、小林、佐野ほか：原子炉炉内構造物の保全技術、東芝レビュー、55-10(2000), p.37-41
- 12) 佐野、牧野ほか：レーザーを使用した原子炉の水中メンテナンス技術、溶接技術、53-5(2005), p.78-82
- 13) Berthe L., Fabbro R., et al: Study of Plasma Induced by Laser in Water Confinement regime: proc. of ICALEO, Oct.13-16, 2003, Jacksonville, FL, CD
- 14) Rockstroh : Cost Effective Laser Shock processing Development at GE Aircraft Engines, Proc. of ICALEO' 2005, Miami, FL, Oct 31-Nov3, 2005, p.703-709
- 15) 特願 2005-371961 : 「レーザーピーニング処理方法及びレーザー吸収粉体層シート」
- 16) 特願 2005-371962 : 「表面処理方法、レーザー吸収粉体層シートおよびレーザーピーニング用粉体スプレー」
- 17) 石渡正人、原田高行：微粒子噴射による表面改質および精密ブラスト処理、日本粉末冶金工業会誌、2005、



図19 チタン母材で破断した異材継手試験片