

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¹⁾²⁾およびウオ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。

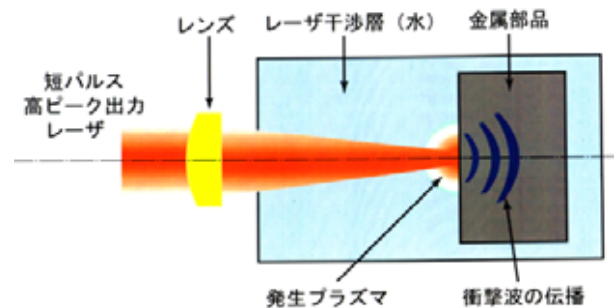


図1 レーザピーニングの原理図

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μmから数10μm)ディンプル(窪み)を図2のように形成する³⁾。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³⁾。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⁴⁾。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。

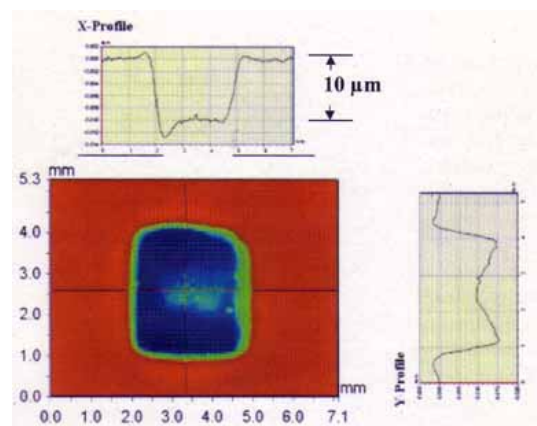


図2 金属表面に生じる窪み³⁾

このレーザーピーニングも当初はレーザー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⁵⁾。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⁶⁾⁷⁾。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ー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⁷⁾。

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

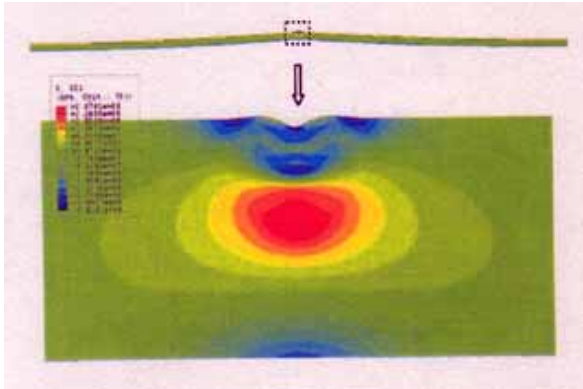


図3 レーザピーニング後の板内部の応力分布⁴⁾

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^{8)~12)}。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)

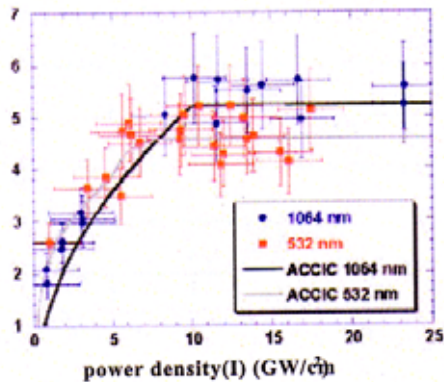


図4 照射レーザーのピーク出力密度と発生するプラズマ圧の相関¹³⁾

レーザー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/cm²という高ピーク出力密度の短パルス(パルス幅:5~20 ns)の固体レーザー(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・溶融・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ー干渉層(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ーのピーク出力密度から次式のように計算でき²⁾、図4に示すように照射するレーザーの出力密度が10 GW/cm²以上で約5 GPa以上になる。

$$P = \dots (1)$$

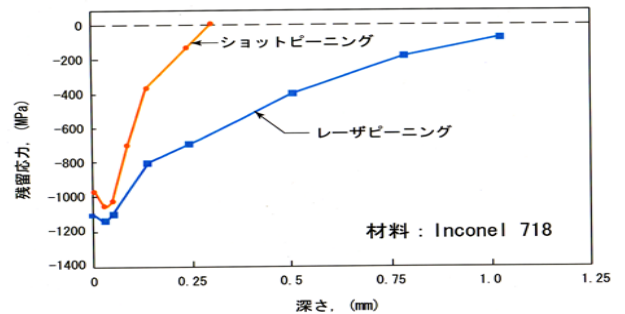


図5 ピーニング部の残留応力¹⁴⁾

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¹⁴⁾。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、米国では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、我が国では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ー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¹⁴⁾。

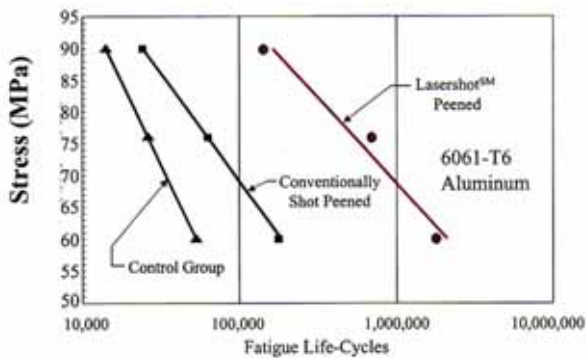


図6 アルミ6061合金の疲労強度に及ぼすピーニング処理の影響¹⁴⁾

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⁸⁾。

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ピーム伝送を

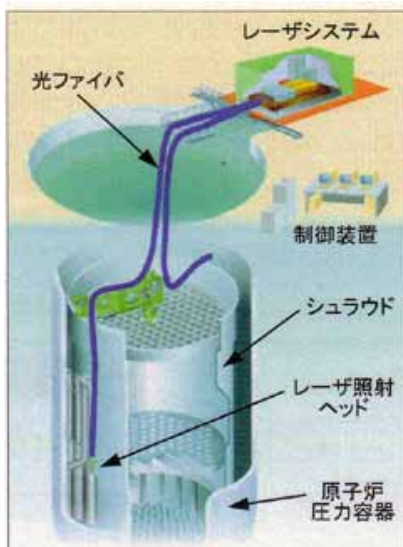


図7 原子力発電プラントの応力腐食割れの予防保全にレーザピーニング処理¹²⁾

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)を用いて行っている。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約700MPaの圧縮残留応力が生じていることが確認された¹¹⁾。

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¹⁴⁾。民間機ではボーイング社



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¹⁴⁾

が図8に示す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¹⁴⁾。

2.3 レーザピーニングによる溶接継手の疲労強度の改善

著者らはアルミニウム合金のMIG溶接継手のHAZの軟化による引張強度および疲労強度の低下の問題点を解決する方法としてレーザピーニング処理を検討した。板厚6mmのA5052合金をMIG溶接し、その疲労強度を調査した。

供試材として、熱処理合金である、A6061-T6 アルミ

ニウム合金を用いた。寸法は 260×80×6mm である。

MIG 溶接機を用いて、突合せ溶接を行った。溶接電流を 200A、電圧を 21V、溶接速度を 30mm/min とした。この溶接継手の止端部にレーザーピーニング処理を行った。図9に示すように、作製した溶接継手の止端部に幅 7mm にわたってレーザーピーニングを施した。パルスエネルギーを 100mJ、スポット径を 0.6mm、パルス密度を 27.3 pulse/mm²、カバーレージを 7.7 とした。なお、レーザーは水に吸収されにくい Nd:YAG レーザの第 2 高調波 (波長 532nm, パルス幅 8ns) を用いた。得られた試験片に対して、断面観察、表面粗さ測定、ビッカース硬さ測定、疲労試験、残留応力測定などを行った。

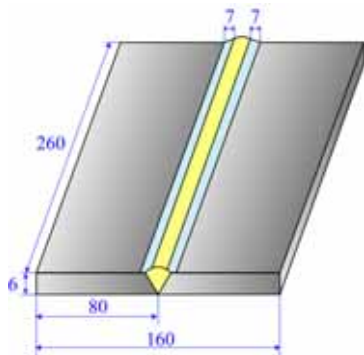


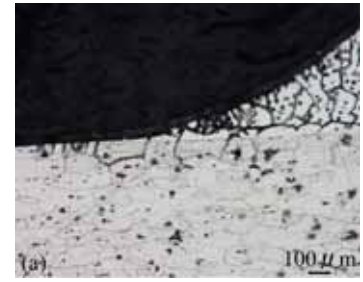
図9 MIG溶接継手の止端部のピーニング処理
(両止端部 7mmの幅で処理)

図10に溶接止端部のマイクロ組織写真を示す。プロセス中の塑性変形により表面がややくぼんでいること、粗くなっていることが確認された。表面粗さを測定したところ、最大で 50 μ m、平均で 37 μ m であることが確認された。

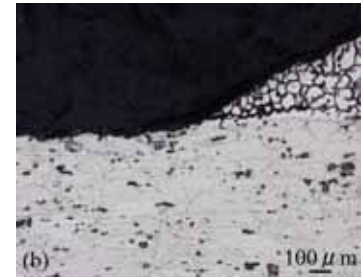
図11に止端部における硬度分布を示す。レーザーピーニングを施した場合の表面の硬さは約 105Hv で、母材と同等、レーザーピーニングを施していない場合と比べて 30Hv 程度上昇していた。また、硬さが上昇していたのは表面から約1mm までであり、レーザーピーニングの影響は表面近傍のみであることが分かる。

図12に疲労試験結果を示す。レーザーピーニングを施したものにおいては止端部にき裂が発生していないことが確認できた。また、レーザーピーニングを施した試験片では残留応力が圧縮となっていることが確認された。レーザーピーニング処理を施した場合、疲労強度が大幅に向上することが分かった。疲労試験後に試験片

の断面観察を行った。レーザーピーニングを施したものは図13に示すように亀裂の発生が認められなかった。



(a) 溶接のまま



(b) レーザーピーニング処理後

図10 止端部の組織写真

--- 母材
- - - 溶接のまま
— レーザーピーニング処理

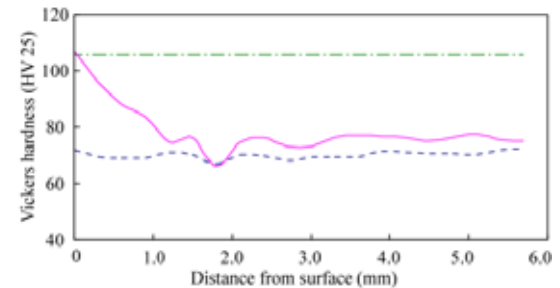


図11 表面からの距離と硬さ分布

この研究では、アルミニウム合金 MIG 溶接継手を作製し、作成した溶接継手にレーザーピーニング処理を行うことにより、HAZ 軟化の防止、疲労強度の改善を検討した。レーザーピーニングを施すことにより、疲労強度が改善するとともに、表面の硬さが母材と同等にまで高くなること、止端部の残留応力が圧縮応力となることを確認した。

なお、鋼材の溶接継手についても佐野らの試験結果が報告されており、疲労強度に対するレーザーピーニング処理の効果が確認されている、

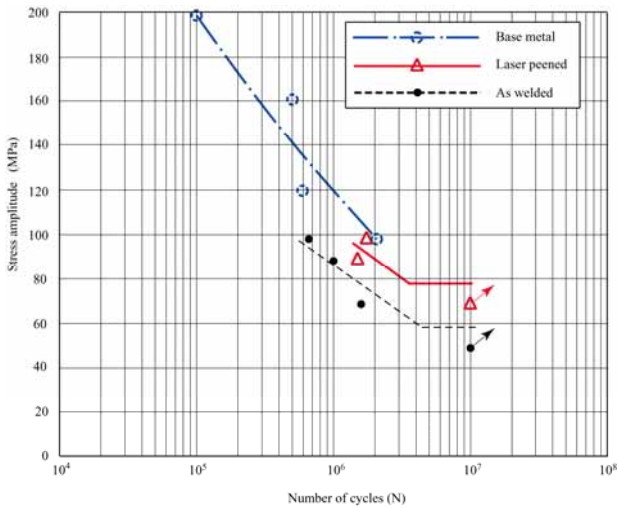


Fig. Effect of laser peening on fatigue strength

図 1 2 疲労試験結果

(○ : 母材 △ : レーザピーニング ● : 溶接のまま)



溶接のまま



レーザピーニング後

図 1 3 1 千万回後の試験片断面写真

3. 特殊レーザピーニングの開発

3.1 特殊レーザピーニングの原理著者

は(株)齊藤工業の齊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 1 4 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¹⁷⁾。

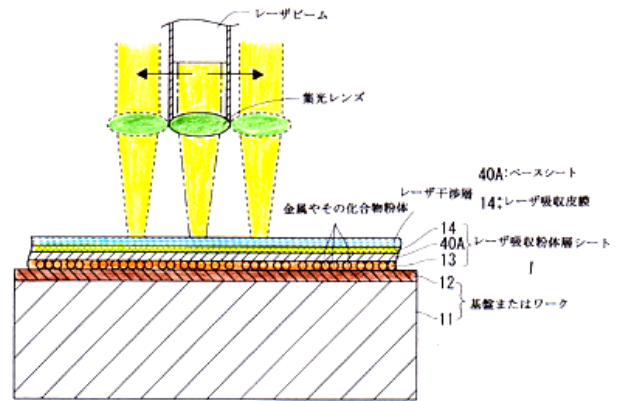


図 1 4 特殊レーザピーニングの原理図^{15) 16)}

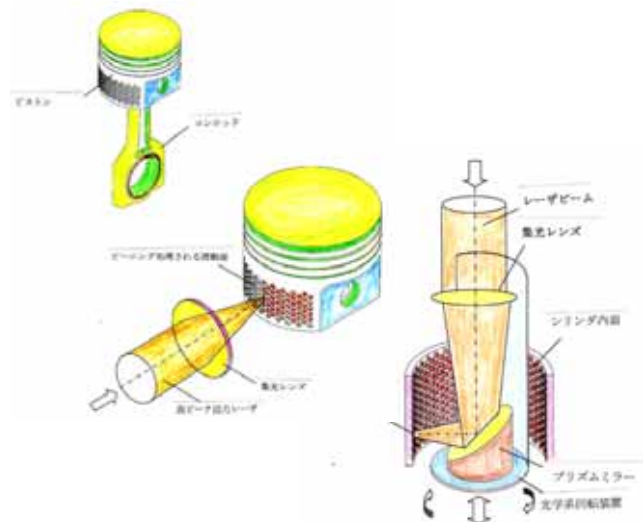


図 1 5 ピストンスカート、ピストンシリンダーへの適用案¹⁵⁾

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 1 5 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ー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。特殊レーザー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、この間接型レーザーピーニングは触媒（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



図16 ステンレス鋼への抗菌剤の打込み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、抗菌剤を工

エアコン部品に図16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。

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 スウィッチーYAG レーザ装置の2倍波を用いて、図17のような実験装置でアルミニウム合金基板に $6.7\mu m$ 径のアルミナ粉末をレーザーピーニングした。



図17 間接型レーザーピーニングの実験状況

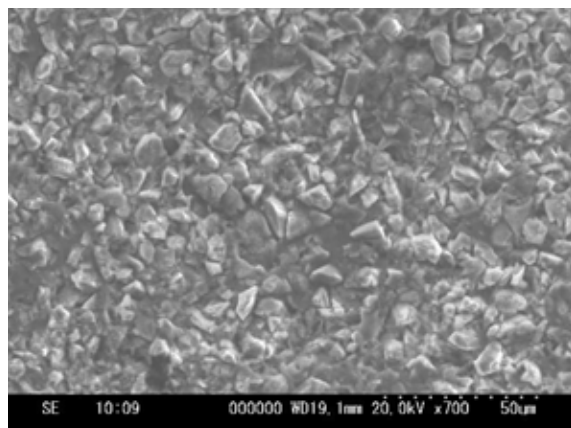


図18 アルミ基板上に打込まれたアルミナ粉末（平均径： $6.7\mu m$ ）

ビームスポットは0.5mmで、ピークパワー密度を8GW/cm²として、7nsのパルス幅でレーザピーニングした。

そのピーニング部のSEM写真を図18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19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。従来のレーザピーニングでは図20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。

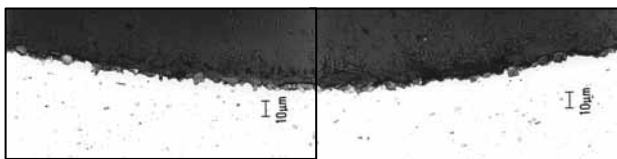
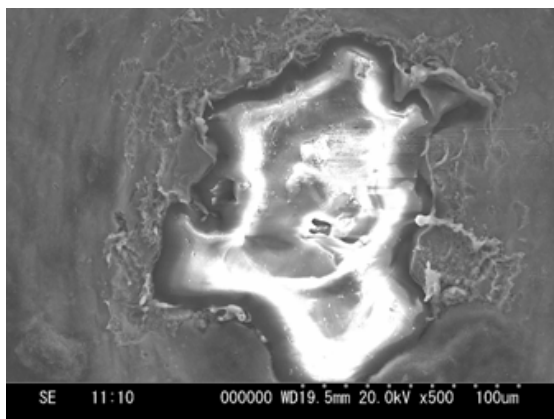
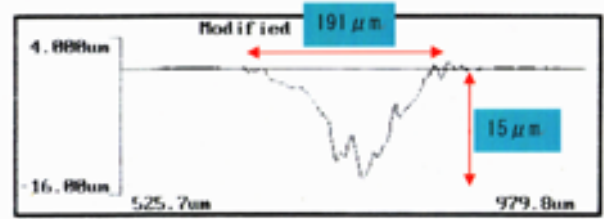


図19 特殊レーザピーニングにより打ち込まれたアルミナ粉体（断面写真）

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。今回のパルス繰返し数は1Hzで実験しているが、市販の装置で5kHzとか10kHzの繰返しで、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20 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 特殊レーザピーニング技術の応用分野

この特殊レーザ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¹⁷⁾

（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、平成19年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もので、さらに広く発展して行くものと思われる。

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,Praque, 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) RockstrohT.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：レーザピーニング技術の開発と応用、名古屋レーザ・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：「レーザピーニング処理方法及びレーザ吸収粉体層シート」
- 16) 特願 2005-371962：「表面処理方法、レーザ吸収粉体層シートおよびレーザ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、