

## レーザーピーニングの適用

光産業創成大学院大学 特任教授 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の溶接をする際に、ビード表面をコツコツとたたく技術である。これにより表面積を広げ、圧縮の残留応力を与え、延性のない鋳鉄でも溶接割れなく溶接できる。肉盛溶接時にも多層溶接すると残留応力が大きくなるので、ピーニングで表面を延ばして行う。ショットピーニングは1927年ころより、材料表面を鋼球で叩くことにより硬化する技術として発達してきた。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、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)</sup>～<sup>2)</sup> およびウオータジェットピーニングなども適用されている。

レーザーピーニングの基本原理は1963年ころアルミニウムや銅のような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、レーザー衝撃硬化法として発達してきた。現在、限られた分野ではあるが表面処理技術として実用化されている。これらは溶射技術を異なり、表面に強い衝撃を与え、塑性変形を生じさせ、圧縮の残留応力を導入できる。溶射は溶射した粒子などが溶着後、冷却することにより溶射層に引張の残留応力が生じやすいが、ピーニングした表面は圧縮の残留応力が残る利点がある。

### 2. レーザーピーニングの機構と特徴

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）を機械的に打込む代わりに、図1に示すように、高ピークエネルギーのレーザーを短時間（5～20ナノ秒）に、材料表面に照射して、材料が瞬時に発生する超高圧のプラズマの衝撃波により、表面部を塑性変形させ、表面マイクロ加工を行うものである。すなわち、金属表面のレーザー照射部では瞬時に超高圧（約2～5万気圧）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 $\mu\text{m}$ から数十 $\mu\text{m}$ ）のディンプル（窪み）を図2のように形成する<sup>3)</sup>。

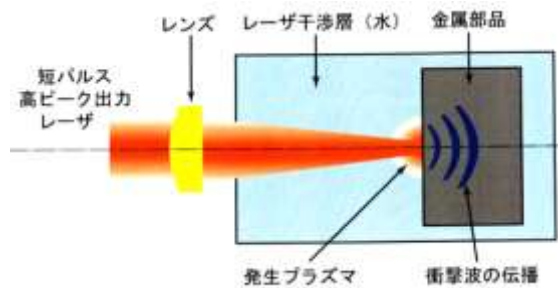


図1 レーザーピーニングの原理図

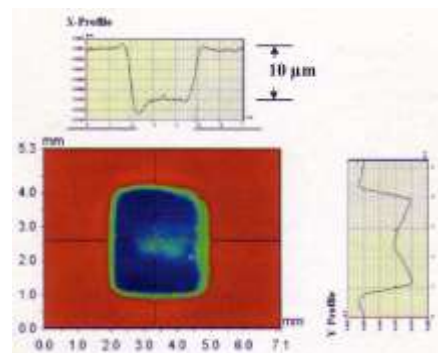


図2 レーザーピーニングで表面に生じる窪み<sup>3)</sup>

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。

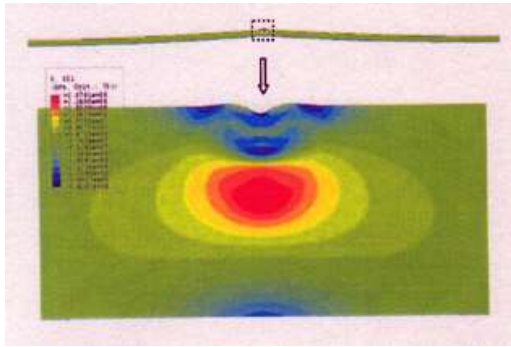


図3 レーザピーニング後の板内部の応力分布<sup>4)</sup>

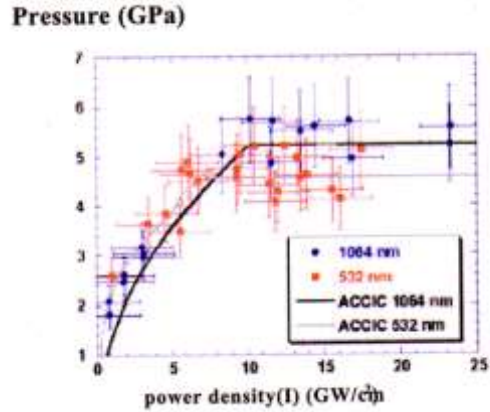


図4 照射レーザの出力密度とプラズマ圧の相関<sup>5)</sup>

レーザピーニングの基本的な機構は図1示したように5~15GW/cm<sup>2</sup>という高ピーク出力密度の短パルス（パルス幅：5~10ns）の固体レーザ（波長：1064nm又は532nm）を金属表面に照射すると、金属表面は5000℃以上に急速に加熱され、金属が約15nsで加熱・溶融・蒸発・イオン化（プラズマ化）され、超高圧（約5万気圧）のプラズマ圧が瞬時に生じる。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、金属表面から内部方向に強い衝撃波が伝わる。この時のプラズマ圧力は図4に示すように出力密度と関係があり5万気圧以上になる。この圧力で金属表面に塑性変形を与える<sup>5)</sup>。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に示すように最大で降伏点に相当する圧縮の残留応力が分布することになる<sup>3)</sup>。この塑性変形による圧縮の残留応力は疲労亀裂の進展を抑制する効果がある。図6はアルミニウム合金の疲労試験結果を示す<sup>3)</sup>。ショットピーニング処理試験片に比べて、約10倍の寿命を示している。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。

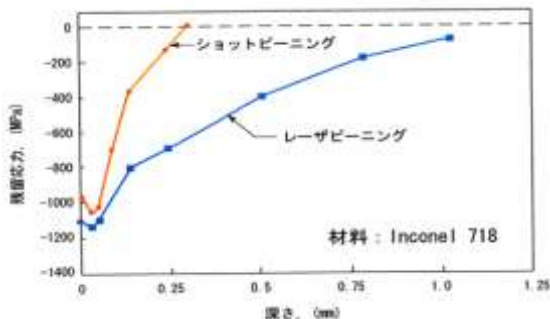


図5 ピーニング部の残留応力<sup>3)</sup>

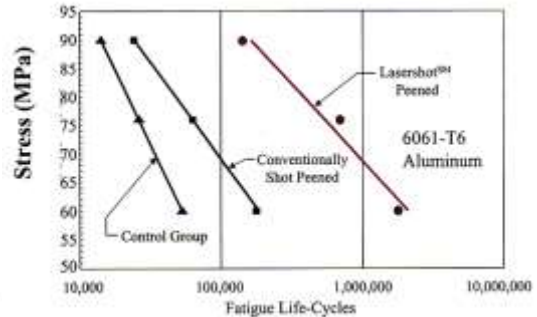


図6 A6061 アルミ合金の疲労試験結果<sup>3)</sup>

このレーザー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。

### 3. レーザピーニングの適用例

このレーザーピーニング技術も、1974年に米国特許が出願され、1976年に米国パツェル研究所での開発が報告されている<sup>6) 7)</sup>。その後、多くの研究開発がなされ、特に、米軍では1992年ごろから図7に示すような軍用機のジェットエンジン部品（ブレードローター）へのレーザーピーニングが研究され、1996年頃よりオーバーホール時に採用されてきた<sup>3)</sup>。民間機ではボーイング社が2002年より図8に示すように、ジェットエンジンのTi-6Al-4V合金製ファンブレードに適用している。

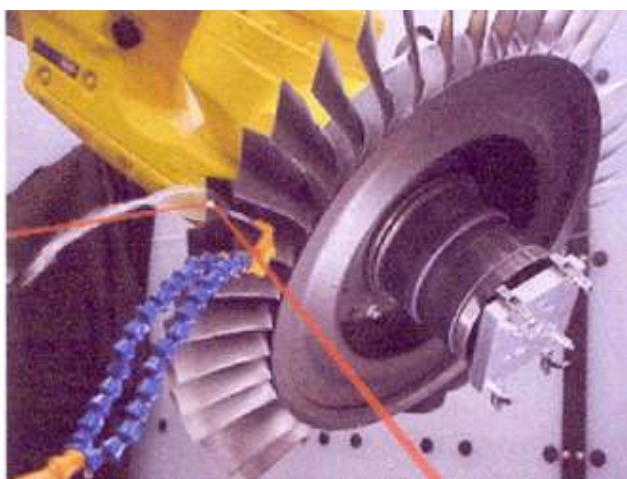


図7 米軍戦闘機のジェットエンジン部品<sup>1)</sup>への適用<sup>8)</sup>



図8 民間機エンジンファンブレードのLP<sup>3)</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、東芝がレーザーピーニングの研究開発を行い、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>9) ~12)</sup>。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、レーザーピーニングの研究・開発を始め、1999年に世界で初めて、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。図9はその適用状況を示す。QスイッチのYAGレーザー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（米国のGEの原子炉にも）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300Hzのパルス照射で行っている。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ー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ている。<sup>11)</sup>

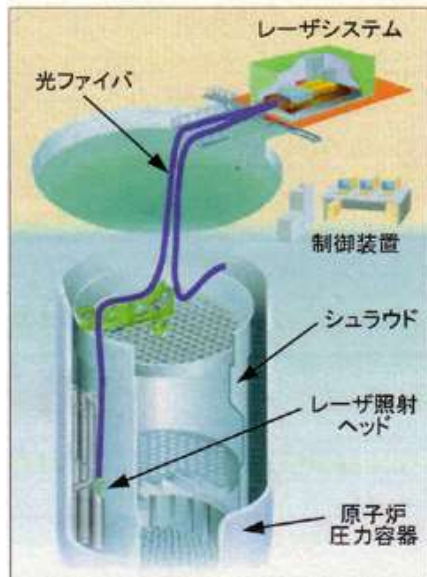


図9 原子炉シールドへのLPの適用<sup>11)</sup>

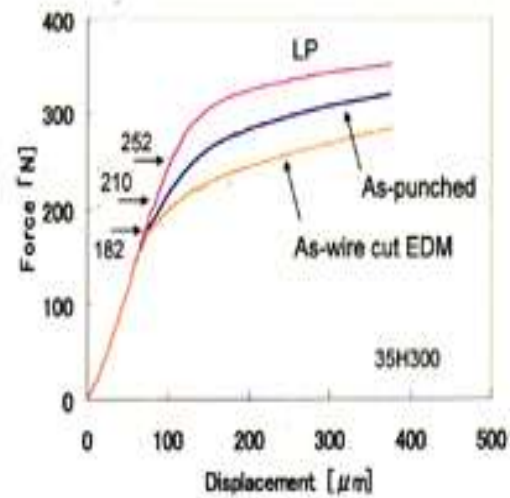


図10 電磁鋼板の静的引張試験結果<sup>13)</sup>

レーザーピーニングのメリットの1つは図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。米国軍用機のその費用は年間約140億ドルにもなるので、大きな効果が生じる<sup>3)</sup>。

2008年の日本自動車技術会の表彰に輝いたレーザーピーニング技術がある。日産自動車の島田らが開発したIPMモーターのロータコアに採用されている電磁鋼板の端面へのレーザーピーニング処理による静的および疲労強度の改善技術である<sup>13)</sup>。図10は電磁鋼板の静的引張試験結果に及ぼすレーザーピーニング処理の影響を示す。放電加工で切断したままのもの、打ち抜きしたものに比べ、0.2%耐力が向上している。疲労試験結果でも放電加工で切断したままのものに比べ、50%の疲労限の向上が認められた<sup>13)</sup>。

## 4. 間接型レーザーピーニング技術の開発

### 4.1 間接型レーザーピーニングの原理と特徴

著者は(株)齊藤工業の齊藤清隆氏と従来のレーザーピーニングに変えて、新しく間接型レーザーピーニング技術 (Indirect Laser Peening) を開発した。その基本的な考え方は図11に示すように、従来のレーザーピーニングでは粉体を打ち込むことはできなかったが、この間接型レーザー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。部材表面にレーザー吸収粉体層シートを設け、その上に水などのレーザー干渉層を準備し、高ピーク出力短パルス

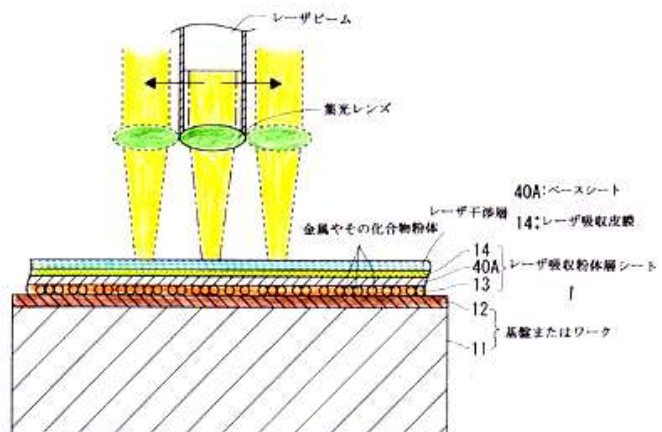


図11 間接レーザーピーニングの機構<sup>14)、15)</sup>

レーザーにより生じる超高圧プラズマでこのシートを変形させ、図12に示すような微小なディンプルを任意の寸法で形成させ、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。この粉体シートを用いる間接型レーザーピーニング技術は、図13に示すような自動車エンジンなどのピストン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。

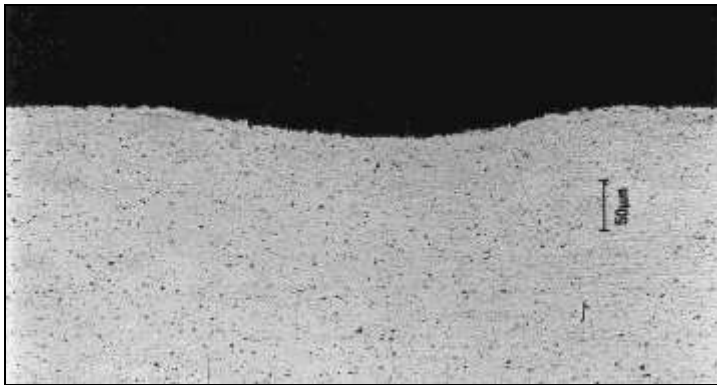


図12 間接型レーザーピーニングでのディンプル形状

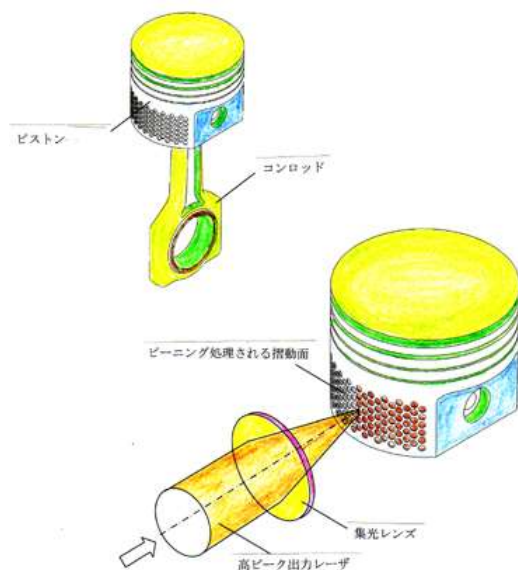


図13 ピストンスカートへの適用案<sup>15)</sup>

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ち込むとともに、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。

間接型レーザーピーニングの特徴は次のようである。

- ◆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打ち込めれば、除菌作用があり、この問題の解決も可能になる。

#### 4. 2 間接型レーザーピーニングの研究開発

平成19年度および平成20年度の経済産業省の地域新生コンソーシアム/イノベーション研究開発事業に、この「間接型レーザーピーニング技術の開発および実用化」が採択され、現在、実用化に向けて開発が進めている。その応用分野をピストンの摺動性改善、反応容器の触媒による機能向上、自動車ホイールの疲労改善に絞り実用化研究を行っている。図14は間接型レーザーピーニングの機構図と水中でのピストンスカート部のピーニング状況を示す。

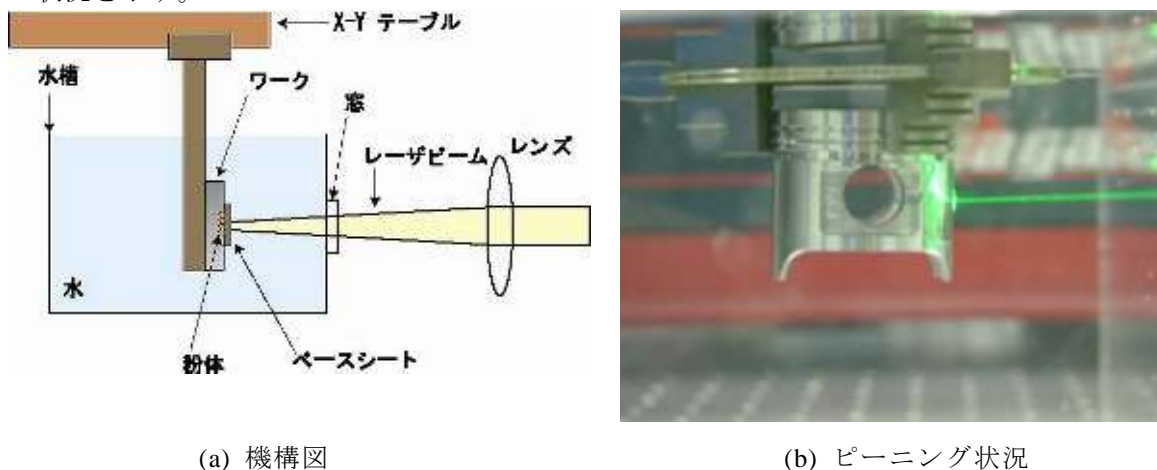


図14 間接型レーザーピーニングの機構とその状況

アルミニウム箔をベースシートとしてオートバイ用ピストンにレーザーピーニングしたシート上の模様を図15に示す。また、シート裏面からアルミニウム合金基板に打ち込まれた二硫化モリブデン粉末（灰色部）を図15に示す。ビームスポットは約 $500\mu m$ とし、 $15GW/cm^2$ のパワー密度で、 $8ns$ のパルス幅で実施したものである。

現在、 $MoS_2$ の粉体をアルミニウム合金製ピストン表面に打ち込む実験も進めている。図16はアルミニウム合金板に $MoS_2$ の粉体をピーニングした時のアルミ基板の表面状態を示す。



(a)ベースシート除去前



(b)ベースシート除去後

図15 アルミニウム合金製ピストン表面に形成されたディンプルの例

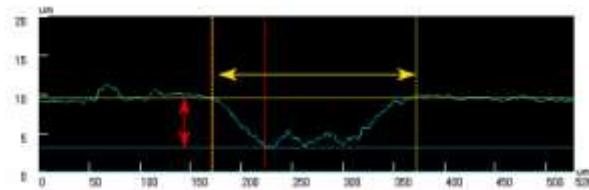


図16 間接型レーザーピーニングにより打込まれた二硫化モリブデン粉体（灰色部）とディンプル形状

#### 4.3 間接型レーザーピーニング処理技術の応用分野

この間接型レーザーピーニング技術の応用分野としては、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>16)</sup>

(ピストンエンジンの摺動性改善により摩擦エネルギー損失を約8%向上させ、燃費を約4%改善することを目標としている。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（溶接構造物の疲労強度改善<sup>17)</sup>、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、ウイルスの殺菌機能の付与)

- ◆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)
- ◆樹脂基板への金属粒子のマイクロ描画  
(電子回路の乾式描画など)

このように、間接型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、農業、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するものと考えられる。

## 5. まとめ

レーザーピーニング技術はまだまだ工業的には限られた応用しか利用されていないが、今後、従来型および間接型レーザーピーニング技術が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)Y.Kudryavtsev, J.Kleiman et al: Rehabilitation and Repair of Welded Elements and Structures by Ultrasonic Peening, IIW Doc. XIII-2076-05,Praque, Sept.,2005
- 2)R.M.White, Journal of Apply Physics,Vol 34(1963),2123
- 3)Lloyd A. Hackel: Laser Penning to Reduce Corrosion  
Cracking and Fatigue Failure in Navy Ships and huck processing.  
Williamsburg,US, Paper #sec6-05
- 4)Y.J.Fan, Y.N.Wang, et al:Wave-Solid Interactions in Shock Induced Deformation Processes, Proc. ICALEO, Oct.31-Nov.3,2005, Miami,479-488
- 5)L.Berthe, A.Sollier,P.Peyre.R.Fabbro; Study of Plasma Induced by Laser in Water Confinement  
Rerime: application to laser Shock Processing with and without Thermal Protective Coating,  
proc. of ICALEO, Jacksonville,ct.13-16, Section B p11-15.(2003), :
- 6) A.H. Clauer, B.P. Fairand : Proc. of Conf. onollier,  
Applications of Laser in Materials Processings,by  
AWS, Ohio,US, 1979,p.291-315
- 7) T.J.Rockstroh: Cost Effective Laser Shock Processing  
Development at GE Aircraft Engines, Proc. ICALEO,  
Oct.31-Nov.3, 2005, Miami, 703-709
- 8) R.D.Tenaglia,D.F.Lahrman;Preventing Fatigue Failures  
with Laser Peening,The AMPTIAC Quarterly, Vol.7,No.2(2003),pp.3-7
- 9) 依田、佐野、向井：光ファイバによる 20 MW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
- 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) 島田、松岡、浦本ら；電磁鋼板の部分強化技術、自動車技術会論文集、  
Vol.38-No.1(2007),pp.209-213
- 14)特許第4058448号(2007)「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」
- 15) 杓名：レーザピーニング処理とその応用、溶接技術、  
Vol.55-No.8(2007),pp63-69
- 16)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
- 17)M. Kutsuna, H.Inoue, K.Amano, Y.Sano;Laser Peening of MIG Welded Joint of Aluminum  
Alloys, Proc. of ICALEO, Orlando,FL. Oct.29-Nov.1(2007),paper#904