疲労対策用レーザピーニングの低出力化に関する検討*

崎野 良比呂**, 佐野 雄二***

Investigations for Lowering Pulse Energy of Laser-peening for Improving Fatigue Strength*

by SAKINO Yoshihiro** and SANO Yuji***

Laser peening can introduce compressive residual stress on the surface of various materials and, therefore, is effective in enhancing the fatigue strength. This study clarifies whether the laser peening with lower pulse energy comparing to the preceding studies generates compressive residual stress, and whether such stress would account for prolonged fatigue life in the welded zone of high-strength steel HT780. As a result, laser peening condition, which can generate large compressive residual stress on the base metal surface, were selected under the pulse energy of 6, 10 and 20 mJ, respectively. With the reduction of the pulse energy, it was observed that the depth of the compressive residual stress tended to decrease. Fatigue lives of the toe of the butt welded joints pretreated by laser peening with the selected conditions were prolonged to the same level of fatigue lives with the pulse energy of 200 mJ.

Key Words: Laser peening, Residual stress, Fatigue strength, Butt welded joint, Low pulse energy, High-strength steel

1. 緒 言

橋梁、建築、発電所、プラント、エネルギー貯蔵・輸送等の産業及び社会基盤を支えている鋼構造物は、わが国の大切な社会資本ストックである。20世紀、わが国の高度成長期に建設された多くのこれら社会資本ストックが徐々に設計寿命を迎えつつあり、そのリメイクやメンテナンスがわが国の喫緊の課題となりつつある。特に、近年の交通量および車重の増加にともない、自動車専用道路の橋梁に予想を遙かに超えた数と長さのき裂が見つかり、鋼橋の架け替えもしくは補修・補強による疲労寿命向上の重要性が広く認識されてきている。

これら疲労き裂を防止するための手法として、レーザピーニングに注目した。レーザピーニングは、水等の透明媒質で覆われた材料に数nsのパルス幅のレーザを照射して高圧のプラズマを発生させ、その衝撃力を利用して材料表面の強度上昇を図る技術である^{1),2)}。レーザ照射時の写真をFig.1に示す。レーザピーニングを行うと、材料の表面に高い圧縮残留応力が生成されるため、応力腐食割れの防止に有効であることが知られており、沸騰水型原子炉の炉心シュラウドや加圧水型原子炉の炉内計装筒内外面の応力腐食割れ予防保全対策として用いられている²⁾。また、レーザピーニングではパルス毎の照射条件を厳密に制御することが可能なため、より信頼性の高い処理を行うことができる²⁾。照射

位置もコンピュータ制御により厳密に制御できるため施工漏れがなく、小さな照射径で連続的に処理していくので複雑な対象物や局所への適応性も高い。さらに、ショットピーニングと比較して、その効果がより深くまで及ぶとの報告もある³⁾。

圧縮残留応力の生成による疲労強度の向上についても、オーステナイト系ステンレス鋼⁴⁾、アルミニウム合金^{5),6)}、チタン合金⁷⁾等に対する疲労試験が行われている。しかし、現在橋梁や建築物等の大型構造物に最も多く用いられている構造用鋼材や、ましてやその溶接部に対する適用性についての研究はなされていなかった。

そこで筆者らは、疲労き裂が大きな社会問題となっている橋梁等の大型構造物溶接部にレーザピーニングが適用可能か否かを調べるための基礎的な研究として、構造用鋼材に対するレーザピーニングの照射条件を残留応力測定と硬

Fig.1 Underwater laser peening

*受付日 平成30年1月19日 受理日 平成30年5月9日

**正 員 近畿大学工学部 Member, Kindai University Faculty of Engineering

*** 科学技術振興機構(JST) Japan Science & Technology Agency (JST)

さ試験により検討し⁸⁾、強度の異なる4種類の構造用鋼材の表面残留応力、残留応力の深さ方向分布、硬さ分布、表面粗さの変化を明らかにした⁹⁾。これらの結果、400 N/mm²級以上の構造用鋼材の場合、パルスエネルギー 200 mJ、スポット径 0.8 mm、照射密度 36 Pulse/mm²で十分大きな圧縮残留応力が生成されることが明らかとなった。

溶接部に関しても、リブを回し溶接した止端部にレーザーピーニングを施した試験体により、レーザーピーニングによる残留応力の変化を調べた。その結果、レーザーピーニングにより溶接部の残留応力が引張から圧縮に大きく変化すること、止端部に近いほどその効果が大きいことが明らかとなった¹⁰⁾。

さらに、突合せ溶接継手試験体での疲労試験により、疲労寿命についても検討を行い、レーザーピーニングによる疲労寿命向上効果が非常に大きいこと¹¹⁾、その向上効果の主要因は圧縮残留応力の生成であること明らかにしている^{12),13)}。また、リブを回し溶接した試験体の疲労試験により、普通鋼のみならず高張力鋼 HT780 でもレーザーピーニングによる疲労寿命向上効果が発揮されることを確認している^{14),15)}。

この様に、レーザーピーニングによる大きな圧縮残留応力の生成とそれによる疲労寿命向上効果がすでに明らかになっている。このレーザーピーニングを実際の大型構造物に適用するためには、小型で可搬型のレーザーピーニング装置の開発が必要になる。そのためには、これまでより低いパルスエネルギーでのレーザーピーニングが必要となる。

そこでパルスエネルギーを小さくした場合に、生成される残留応力と疲労寿命がどのように変化するかを検討した¹⁶⁾。さらに、低出力化したレーザーピーニングが実構造物でも効果があるか否かを明らかにするため、大型試験体での疲労試験を行った¹⁷⁾。これらの研究では、低出力の一部の条件で疲労強度向上効果は認められたものの、最適な照射条件は明らかになっていなかった。

これらを踏まえて本研究では、パルスエネルギーが 6 mJ や 10 mJ、20 mJ と小さい場合でも大きな圧縮残留応力が生成されるレーザーピーニングの最適な照射条件を選定する。さらに、選定された条件で実際に疲労強度が向上するか否か疲労試験によって明らかにすることを目的とする。

2. レーザーピーニングの基礎プロセス¹⁾

本研究で用いたレーザーピーニングによる残留応力生成のメカニズムを模式的に Fig.2 に示す²⁾。アブレーション発生を閾値を超える強いレーザーパルス在水中の材料に照射すると、材料の表層がプラズマ化して表面に高圧のプラズマが発生する。水中では水の慣性がプラズマの膨張を妨げ、狭い領域にレーザーのエネルギーが集中する。その結果、プラズマの圧力は空気中と比較して 10～100 倍となり数 GPa に達する。この圧力によって衝撃波が発生し、材料中を伝播する。衝撃波による応力によって塑性変形が生じ、周囲の

未変形部からの拘束によって材料の表層に圧縮残留応力が生成される。このレーザーパルスを移動させながら対象物に連続的に照射することにより、表面にばらつき無く一様に圧縮残留応力を生成させることが出来る。

プラズマの膨張を抑制するためには厚さ 0.1 mm 程度の水膜が必要である。これまでの実験では試験体を水中に設置していたが、橋梁等の実構造物を対象とする場合には、水中での施工は困難である。その場合、ノズルから水を噴きかけながらレーザーを照射するノズルタイプの施工法の適用が考えられ、その有効性が確かめられている¹⁶⁾。

3. 照射条件の選定

3.1 実験概要

現在、内閣府の革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) の「ユビキタス・パワーレーザーによる安心・安全・長寿社会の実現」¹⁸⁾において、Fig.3 に示すパルスエネルギー 20 mJ の小型マイクロチップレーザーの開発が行われている。このマイクロチップレーザーを用いれば現場で適用可能な携帯型レーザーピーニング装置が実現可能になると考えられる。レーザーピーニングが現場で使用できると、新設のみならず既設構造物の補強にも使え、自重分の応力キャンセルによる効

Fig.2 Mechanism of residual stress improvement by laser irradiation

Fig.3 Photo of microchip laser

果増大も期待できる。

そこで本研究では、低出力でも大きな残留応力が生成されるレーザピーニングの照射条件を選定するため、パルスエネルギーを20mJ、10mJおよび6mJで固定とし、Table 1に示すように照射径と照射密度を変化させてレーザピーニングを施した。ここで、パルスエネルギーの低下によるプラズマ圧力の極端な低下を避けるため、既往の研究(200mJ)と比較して小さな照射径とした。使用したレーザはQスイッチNd:YAGレーザ(波長532nm)である。50×50×30mmのHT780試験片($\sigma_u=812\text{MPa}$, $\sigma_y=745\text{MPa}$)に10mm角で各2カ所にレーザピーニングを施し、残留応力測定と表面粗さ測定を行った。

表面残留応力は、X線源としてCr-K α (17kV, 2.0mA)を用いたX線回折法($\cos \alpha$ 法: コリメータ直径1mm, 計測範囲直径2mm)によって計測した。また、残留応力の板厚方向分布はX線回折法と電解研磨を交互に繰り返すことにより推定した。本推定法では、被測定面を局所的に($\phi 8\text{mm}$ 程度)電解研磨した後に研磨されて凹んだ底面で応力を測定し、それを未研磨状態の深さ位置での応力と近似的にみなしている。この方法では、研磨することにより残留応力が再配分されてしまうため、厳密な残留応力分布は得られない。しかし、電解研磨が浅い場合には研磨による

誤差が小さいことは、放射光によって非破壊的に測定された残留応力との比較で示されている¹⁹⁾。試験体の写真をFig.4に、残留応力計測の模様をFig.5に示す。レーザピーニングによって生成される残留応力は、レーザの移動方向(レーザを照射する際のステージの移動方向)とその直角方向では値が異なることが知られている。そこで、それぞれ2方向から計測を行った。

レーザピーニングを施工することにより表面の粗さが変化する。この表面粗さも疲労強度に影響を及ぼす因子の一つである。そこで、レーザピーニングを施した試験体表面の粗さを計測した。計測には触針先端半径2 μm の接触式粗さ計を用い算術平均粗さRaと最大高さRzを計測した。カットオフ値および基準長さは2.5mm, 評価長さは7.5mmとした。計測は任意の方向の3ラインで行った。

3.2 表面残留応力測定結果

表面残留応力の計測結果をTable 1中に示す。 σ_ξ がレーザを照射する際のステージの移動方向の残留応力成分、 σ_η がそれと直角方向の残留応力成分である。表中には参考として、既往の研究¹⁶⁾によるこれまでの研究で適用したレーザピーニングの照射条件(パルスエネルギー200mJ)の結果も示している。

Table 1 Laser peening conditions and results of residual stress measurements on surface

Laser peening condition			Residual stress (MPa)					
Pulse energy (mJ)	Spot diameter (mm)	Irradiation density (Pulse/mm ²)	σ_ξ		σ_η		Mean	
			①	②	①	②	σ_ξ	σ_η
200	0.8	36	-241	-196	-529	-453	-219	-491
20	0.4	36	-113	-102	-167	-160	-107	-164
		72	-214	-194	-396	-393	-204	-395
		180	-306	-298	-668	-655	-302	-662
	0.5	180	+89	+66	-11	-30	+78	-20
10	0.25	216	-412	-410	-776	-753	-411	-765
		288	-391	-439	-753	-766	-415	-760
	0.3	216	-301	-355	-657	-640	-328	-649
		288	-321	-352	-733	-676	-337	-705
6	0.26	18	+52	+66	-32	-32	+59	-32
		36	-83	-93	-77	-98	-88	-88
		72	-136	-132	-229	-231	-134	-230
		144	-330	-310	-587	-606	-320	-597

Fig. 4 Specimen for residual stress measurement

Fig. 5 Photo of residual stress measurement by XRD ($\cos \alpha$ method)

3.2.1 パルスエネルギー 20 mJ

照射径 0.4 mm の場合、照射密度が 36 Pulse/mm² では σ_x で -100 MPa 前後、 σ_y で -150 MPa 前後であるのに対し、照射密度が大きくなるにつれて残留応力の値が大きくなり、180 Pulse/mm² では σ_x で -300 MPa 前後、 σ_y で -650 MPa 以上と非常に大きな値となった。この値は、既往の研究¹⁶⁾で疲労強度が向上しなかったレーザピーニングの照射条件で生成されていた圧縮残留応力の約2倍の値となっている。しかし、照射径 0.5 mm では、照射密度が 180 Pulse/mm² でも σ_x で +80 MPa 前後、 σ_y でも -20 MPa 前後と圧縮残留応力はほとんど生成されなかった。照射径を大きくしたことによるプラズマ圧力の減少が原因であると考えられる。

3.2.2 パルスエネルギー 10 mJ

照射径 0.25 mm の場合、照射密度が 216 および 288 Pulse/mm² 共に σ_x で -400 MPa 程度、 σ_y で -750 MPa 程度の非常に大きな値となっており、20 mJ での照射径 0.4 mm、照射密度が 180 Pulse/mm² と比較しても大きな圧縮残留応力が生成されている。照射径 0.3 mm の場合でも σ_x で -330 MPa 前後、 σ_y で -650 MPa 以上と 20 mJ の最も圧縮残留応力の大きな条件と同等の値となった。

3.2.3 パルスエネルギー 6 mJ

パルスエネルギー 6 mJ では照射径を 0.26 mm の 1 水準とした。照射密度が 18 Pulse/mm² では圧縮残留応力はほとんど生成されなかった。しかし、照射密度が大きくなるにつれて残留応力の値が大きくなり、144 Pulse/mm² では σ_x で -320 MPa 前後、 σ_y で -600 MPa 程度と、6 mJ とパルスエネルギーが非常に小さくても、表面には 20 mJ と 10 mJ の最も圧縮残留応力の大きな条件と同程度の圧縮残留応力が生成されていた。

3.3 残留応力の板厚方向分布

パルスエネルギー 20 mJ, 10 mJ, 6 mJ の各照射条件における残留応力の板厚方向分布を比較したものをそれぞれ Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8 に示す。

3.3.1 パルスエネルギー 20 mJ

照射径 0.4 mm の場合、どの条件でも表面より 25 μ m の残留応力の方が大きな圧縮残留応力となっている。これは内部の方が表面よりも拘束が大きいためであると考えられる。また、表面残留応力と最大残留応力との差は照射密度が小さいほど大きく、照射密度 72 Pulse/mm² と 144 Pulse/mm² とでは表面で 200 MPa 程度の差があったのに対し、最大値では 25 MPa 程度の差しかない。しかしながら、照射密度が 36, 72, 180 Pulse/mm² と大きくなると、圧縮残留応力の生成深さが 200, 250, 350 μ m と深くなっていた。この様に、照射密度は圧縮残留応力の生成深さに大きな影響を及ぼしていた。

照射径 0.5 mm の場合、表面では圧縮残留応力がほとんど生成されていなかったが、表面より 25 μ m の深さでは -600 MPa 程度の大きな圧縮残留応力が生成されていた。し

かし、圧縮残留応力の生成深さは 200 μ m と同条件の照射径 0.4 mm の場合の半分程度となっていた。

3.3.2 パルスエネルギー 10 mJ

照射径 0.25 mm の場合、照射密度が 216 および 288 Pulse/mm² 共に表面残留応力と最大圧縮応力の差はほとんど無かった。圧縮残留応力の生成深さも両者共に 200 μ m 程度と差がなかった。

Fig. 6 Residual stress distribution over thickness (20 mJ)

Fig. 7 Residual stress distribution over thickness (10 mJ)

Fig. 8 Residual stress distribution over thickness (6 mJ)

Table 2 Surface roughness of laser-peened area

Laser peening condition			Surface roughness							
Pulse energy (mJ)	Spot diameter (mm)	Irradiation density (Pulse/mm ²)	Ra (μm)			Rz (μm)			Mean (μm)	
			①	②	③	①	②	③	Ra	Rz
200	0.8	36	3.5	3.5	3.4	22.8	23.5	22.3	3.5	22.9
20	0.4	36	1.01	0.98	0.94	7.10	7.53	7.38	0.98	7.38
		72	1.28	1.29	1.26	9.15	9.23	9.40	1.27	9.26
		180	1.65	1.70	1.77	9.98	10.95	11.07	1.71	10.67
	0.5	180	1.14	1.10	1.09	6.33	6.40	5.74	1.11	6.14
10	0.25	216	0.97	0.76	1.06	6.32	7.19	7.69	0.93	7.07
		288	1.02	0.92	1.11	5.80	3.03	6.55	1.02	6.80
	0.3	216	1.03	1.16	1.02	5.50	7.97	6.95	1.07	6.80
		288	1.05	0.80	1.14	7.32	5.40	6.44	1.00	6.38
6	0.26	18	0.71	0.67	0.67	6.61	5.82	5.88	0.68	6.10
		36	1.04	0.82	0.99	10.76	8.00	8.97	0.95	9.18
		72	0.77	0.89	0.82	10.37	10.16	9.93	0.83	10.15
		144	1.07	1.07	1.05	8.10	9.05	8.58	1.07	7.72

照射径 0.3mm の場合も、照射密度が 216 および 288 Pulse/mm² とで圧縮残留応力の深さ方向分布に差は見られなかった。しかし、照射径 0.25mm と比較すると圧縮残留応力の生成深さが若干浅くなっていた。

3.3.3 パルスエネルギー 6mJ

パルスエネルギー 6mJ では照射径を 0.26mm の 1 水準とした。照射密度が 72 Pulse/mm² 以下では表面残留応力は大きくなかったが、どの条件でも表面より 25μm の深さでの最大残留応力は -350~-500MPa 程度の大きな圧縮残留応力が生成されていた。しかし、圧縮残留応力の生成深さは照射密度が小さいものほど浅かった。いずれにしる表面残留応力、最大残留応力、圧縮残留応力の生成深さに共に照射密度が最大である 144 Pulse/mm² が最も大きかった。

3.4 表面粗さ

表面粗さの計測結果を Table 2 に示す。表中には参考として、既往の研究¹⁶⁾によるパルスエネルギー 200mJ の結果も示している。

いずれのパルスエネルギーの場合でも、照射密度が大きくなるにつれて表面粗さが大きくなる傾向が見られるが、その差は小さい。さらに、表面粗さは最大でも算術平均粗さ Ra で 1.7μm、最大高さ Rz で 11μm 程度と既往の研究(パルスエネルギー 200mJ) の場合の半分程度となっている。既往の研究で表面粗さの増大は疲労寿命に大きな影響を及ぼさないことが示されており、今回の照射条件の選定に表面粗さを考慮する必要は無いと考えられる。

3.5 照射条件の選定

以上の結果より、表面残留応力が大きく、かつ圧縮残留応力が深くまで分布している照射条件を選定することとし、パルスエネルギー 20mJ では照射径 0.4mm、照射密度 180 Pulse/mm² を、パルスエネルギー 10mJ では照射径 0.25mm、照射密度 216 Pulse/mm² を、パルスエネルギー 6mJ では照射径 0.26mm、照射密度 144 Pulse/mm² を選定した。

Fig.9 Comparison of residual stress distribution over thickness

選定した各パルスエネルギーでの残留応力の板厚方向分布を既往の研究¹⁶⁾によるパルスエネルギー 200mJ の結果と比較したものを Fig.9 に示す。表面残留応力と最大圧縮応力の大きさはパルスエネルギーが小さくても大きな差はなく、表面残留応力は逆に 200mJ の条件が一番小さくなっている。しかしながら、圧縮残留応力の生成深さには大きな差があり、パルスエネルギー 6mJ と 10mJ では 200mJ の 1/4 程度に、20mJ では 1/2 程度になっている。この様に、パルスエネルギーの違いは圧縮残留応力の生成深さに最も大きな影響を及ぼすことがわかる。

4. 疲労試験

4.1 実験概要

選定された条件で実際に疲労強度が向上するか否か検討するため疲労試験を行った。試験には、前章で選定した 10mJ と 20mJ の照射条件を採用した。試験体は厚さ 9mm の鋼板を V 開先突合せ溶接したものから切り出した。鋼板には HT780 ($\sigma_u=833$ MPa, $\sigma_y=764$ MPa) を用いた。溶接法は炭

Fig. 10 Butt-welded specimen for fatigue test

酸ガスを用いたガスシールドアーク溶接，溶接材料は780MPa級鋼用ソリッドワイヤを用い，表面2層，裏面1層とした．試験体の形状・寸法をFig.10に示す．

この試験体の表裏両面の溶接止端部を含む幅9mm，長さ20mmの範囲に選定した条件でレーザーピーニングを施した．比較のため，溶接ままの試験体（NP）も試験に供した．試験機は100kN一軸疲労試験機を用い，応力範囲は $\Delta\sigma=200, 250, 300$ MPaの3段階，応力比 $R=0.1$ ，試験の打ち切り限界は 10^7 回とした．

4.2 実験結果

試験結果から得られたS-N曲線をFig.11に示す．比較のため，レーザーピーニングを施していない試験体（NP）の結果も載せている．NPは $\Delta\sigma=200$ MPaの場合で約 670×10^4 回， $\Delta\sigma=250$ MPaの場合で約 26×10^4 回， $\Delta\sigma=300$ MPaの場合で約 9×10^4 回で破断した．

LP（20mJ）は $\Delta\sigma=200$ MPaと250MPaでは破断せず，打ち切り限界に達した． $\Delta\sigma=300$ MPaでは破断したが，疲労寿命はNPに比べ4倍と57倍であった．

LP（10mJ）は $\Delta\sigma=250$ MPaでは破断せず，打ち切り限界に達した． $\Delta\sigma=300$ MPaでは1体は 65×10^4 回で破断したが，もう1体は打ち切り限界に達した．

これらの結果は，ばらつきは大きいものの寿命の平均値としては，図中に参考として示しているパルスエネルギー200mJの結果¹⁶⁾（ $\Delta\sigma=250$ MPaで $>10^7$ 回， $\Delta\sigma=300$ MPaで 124×10^4 回および 135×10^4 回で破断）と同等であり，非常に大きな疲労強度向上効果であると言える．これにより，選定した照射条件で大きな疲労強度向上効果が認められることが明らかになった．

5. 結 言

レーザーピーニングを実際の大型構造物に適用するための基礎検討として，高張力鋼HT780にパルスエネルギー20mJ，10mJ，6mJでレーザーピーニング施工を行い，発生する残留応力，表面粗さ，突合せ溶接継手の疲労強度を評価した．その結果，以下の結論が得られた．

- (1) 照射径と照射密度の選定により，パルスエネルギー20mJ，10mJ，6mJにおいても，既往の研究（パルスエ

Fig. 11 Results of fatigue test

ネルギー200mJ）とほぼ同程度の表面残留応力と最大圧縮応力が得られた．しかし，圧縮残留応力の生成深さには大きな差が生じた．これより，パルスエネルギーの違いは圧縮残留応力の生成深さに最も大きな影響を及ぼすことが明らかとなった．

- (2) パルスエネルギーを小さくした場合，表面粗さは既往の研究（200mJ）の1/2以下となった．よって，照射条件の選定に表面粗さを考慮する必要は無かった．
- (3) 残留応力と表面粗さの測定を基に，パルスエネルギー20mJ，10mJ，6mJにおけるレーザーピーニング照射条件を選定し，20mJと10mJで突合せ溶接継手試験片にレーザーピーニングを施した．
- (4) パルスエネルギー20mJおよび10mJいずれの場合でも，レーザーピーニング施工された突合せ溶接継手の疲労強度は，パルスエネルギー200mJでの疲労強度と同等まで向上する事が明らかとなった．

謝 辞

本研究は，独立行政法人科学技術振興機構（JST）研究成果最適展開支援プログラム平成24-25年度A-STEP検索タイプ（課題番号：AS24Z01282K）およびJSPS科研費 基盤研究(C)（課題番号：29420468）より助成を受けた．また，実験の一部は，近畿大学工学部建築学科学部生（当時）片山昂大，小倉裕史，田中拓海の卒業論文としてなされた．ここに記して感謝致します．

参 考 文 献

- 1) Y. Sano, N. Mukai, K. Okazaki and M. Obata: Residual Stress Improvement in Metal Surface by Underwater Laser Irradiation, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 121, (1997), 432-436.
- 2) Y. Sano and N. Mukai: Life Extension of Metallic Components by Laser Peening, Journal of Japan Laser Processing Society, 17, (2010), 1-6. (in Japanese)
- 3) Japan Society of Shot Peening: 金属疲労とショットピーニング，

- (2004), 133-144. (in Japanese)
- 4) Y. Sano, M. Obata, T. Kubo, N. Mukai, M. Yoda, K. Masaki and Y. Ochi: Retardation of Crack Initiation and Growth in Austenitic Stainless Steels by Laser Peening without Protective Coating, *Material Science and Engineering A417*, (2006), 334-340.
 - 5) K. Masaki, Y. Ochi, Y. Kumagai, T. Matsumura, Y. Sano and H. Naito: Influence of Laser Peening Treatment on High-Cycle Fatigue Properties of Degassing Processed AC4CH Aluminum Alloy, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, 55, (2006), 706-711. (in Japanese)
 - 6) P. Peyre, R. Fabbro, P. Merrien, H. P. Lieurade: Laser Shock Processing of Aluminum Alloys. Application to High Cycle Fatigue Behaviour, *Material Science and Engineering A210*, (1996), 102-113.
 - 7) I. Altenberger, Y. Sano, I. Nikitin and B. Scholtes: Fatigue Behavior and Residual Stress State of Laser Shock Peened Materials at Ambient and Elevated Temperatures, *Proceedings of 9th International Fatigue Congress (FATIGUE 2006)*, Atlanta, (2006), Paper No. FT124.
 - 8) Y. Sakino, Y. Sano and Y.-C. Kim: Effect of Laser Peening on Residual Stress of Steels and Fillet Welded Zone, *Journal of Constructional Steel*, 15, (2007), 419-423. (in Japanese)
 - 9) Y. Sakino, Y. Sano and Y.-C. Kim: Effect of Laser Peening on Through-thickness Distribution of Residual Stress and Hardness of Structural Steels, *Journal of Constructional Steels*, 16, (2008), 553-560. (in Japanese)
 - 10) Y. Sakino, Y. Sano and Y.-C. Kim: Effects of Laser Peening on Residual Stress, Hardness and Roughness at Weld Toe, 62nd Annual Assembly of Int. Inst. Welding (IIW), (2009), IIW Doc.XV-1315r1-09.
 - 11) Y. Sakino, Y. Sano and Y.-C. Kim: Application of laser peening without coating on steel welded joints, *International Journal of Structural Integrity*, 2-3, (2011), 332-344.
 - 12) Y. Sakino, Y. Sano, R. Sumiya and Y.-C. Kim: Improving Fatigue Strength of Butt Welded Joints by Laser Peening and Its Main Factor, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 29-3, (2011), 146-153. (in Japanese)
 - 13) Y. Sakino, Y. Sano, R. Sumiya and Y.-C. Kim: Major factor causing improvement in fatigue strength of butt-welded steel joints after laser peening without coating, *Science and Technology of Welding & Joining*, 17, 5, (2012), 402-407.
 - 14) Y. Sakino, Y. Sano and Y.-C. Kim: Fatigue Lives of Box-Welded Joints Pretreated by Laser Peening, 62nd Annual Assembly of Int. Inst. Welding (IIW), (2009), IIW Doc.XV-1316r1-09.
 - 15) Y. Sakino, K. Yoshikawa, Y. Sano and Y.-C. Kim: Effects of Laser Peening on Residual Stress and Fatigue Life of Welded Joints of High Strength Steel, *Proceedings of National Symposium on Welding Mechanics and Design 2009*, (2009), 471-477. (in Japanese)
 - 16) Y. Sakino, K. Yoshikawa, Y. Sano, R. Sumiya and Y.-C. Kim: A Basic Study for Application of Laser Peening to Large-scale Steel Structure, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 31-4, (2013), 231-237. (in Japanese)
 - 17) Y. Sakino, Y. Sano, R. Sumiya and Y.-C. Kim: Effect of Laser Peening on Fatigue Lives of Large Welded Specimen, *Preprints of the national meeting of JWS*, (2010), 350-351. (in Japanese)
 - 18) http://www.jst.go.jp/impact/sano/common/pdf/ImPACT_Project2F.pdf.
 - 19) Y. Akiniwa, Y. Kojima, H. Kimura, and K. Maruko: Prediction of Residual Stress Distribution in Severe Surface Deformed Steel by Constant Penetration Depth Method, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, 57-7, (2008), 660-666. (in Japanese)
- ~~~~~