

レーザーピーニングを施された高張力鋼の X 線回折法による残留応力評価

崎野 良比呂* 佐野 雄二** 高木 章好*** 佐藤 竜次***

Evaluation of Residual Stress in Laser-peened High-strength Steel by X-ray Diffraction Methods

Yoshihiro SAKINO, Yuji SANO, Akiyoshi TAKAGI and Ryoji SATOU

Synopsis

Laser peening can introduce compressive residual stress to the surface and, therefore, is effective in enhancing the fatigue strength. This study used laser-peened high-strength structural steel to compare the residual stress near the toe of the welded zone measured by two type of X-ray diffraction methods, "Sin²ψ method" and "Cosα method". The Cosα method is recently developed method, whereas the Sin²ψ method is conventional method.

It is concluded that the Cosα method can apply to residual stress measurements in the toe of the welded zone, because surface and depth distributions of residual stress measured by two type of methods were agree rather well. Moreover, effect of laser peening conditions on surface residual stress on high-strength structural steel is investigated by using the Cosα method.

Key Words: Residual stress, X-ray diffraction, Sin²ψ method, Cosα method,
Laser peening, High-strength steel, Box welding

1. はじめに

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重量の増加にともない、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、レーザーピーニングに注目した。レーザーピーニングは、水等の透明媒質中に設置された材料に数 ns のパルス幅のレーザー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)}。照射時の写真を Fig. 1 に示す。レーザー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、レーザー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

* 近畿大学工学部建築学科

Department of Architecture,

** 株式会社 東芝 電力システム社
(現所属: 科学技術振興機構 (JST))

Faculty of Engineering, Kinki University

Toshiba Power Systems Company

(Current affiliation: Japan Science and Technology Agency)

*** パルステック工業株式会社

Pulstec Industrial Co., Ltd

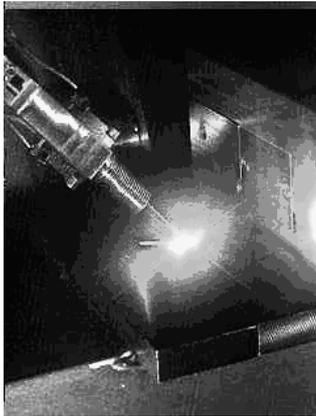


Fig. 1 Underwater laser peening

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のやり残しがなく、小さな照射径で連続的に動か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、現在一部で用いられている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ー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ーピーニングの照射条件を残留応力測定と硬さ試験により検討した⁸⁾。この照射条件を用いて、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、400N/mm²級以上の構造用鋼材の場合、パルスエネルギー200mJ、スポット径0.8mm、照射密度36Pulse/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っており、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、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¹¹⁾。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¹²⁻¹⁴⁾。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明らかになってきている。

これまで残留応力を非破壊で計測する方法としてX線回折法(XRD)を用いてきた。近年では、これまで多く用いられてきた $\text{Sin}^2\phi$ 法に加え、 $\text{Cos}\alpha$ 法も用いられるようになってきた。多結晶の応力測定の方法である $\text{sin}^2\phi$ 法では、回析面法線と試料表面法線のなす角度 ϕ を種々変化させ、各 ϕ 値に対する回析強度分布を複数回測定することによって応力を決定する。これに対して、回析環全体の情報を活用することができる場合には、1つのX線入射角度について得られた回析環から、複数回の測定を必要とせずに応力を決定する事ができる。この方法が $\text{Cos}\alpha$ 法である。 $\text{Cos}\alpha$ 法は1回のX線照射で測定でき、角度を変える機能が必要ないので装置も小型化されている。これにより、測定時間の短縮化、位置合わせの簡略化が図られている。

しかし、 $\text{Cos}\alpha$ 法はX線回析方法としては、まだ一般的ではなく、そのため標準的方法である $\text{Sin}^2\phi$ 法と $\text{Cos}\alpha$ 法の測定結果を比較したデータは少ない。本研究で対象としている溶接部での残留応力測定に $\text{Cos}\alpha$ 法が適用できるか否かも明らかではない。

そこで本研究では、リブの回し溶接部を対象とし、レーザーピーニングを施された止端部近傍の表面残留応力と残留応力の板厚方向分布を $\text{Sin}^2\phi$ 法と $\text{Cos}\alpha$ 法でそれぞれ計測し、両者を比較する事により $\text{Cos}\alpha$ 法の精度と溶接止端部への適用性を検討した¹⁸⁾。

さらに、精度が確認された $\text{Cos}\alpha$ 法を用い、レーザーピーニングの施工条件を変化させて施工した構造用鋼材表面の残留応力を測定する事により、レーザーピーニングの各施工条件が生成される残留応力に及ぼす影響について検討

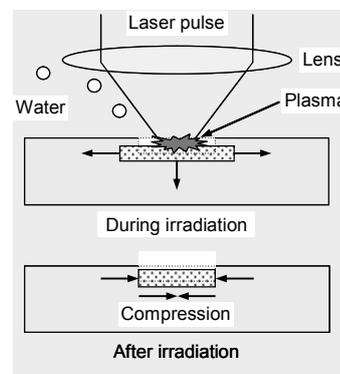


Fig.2 Mechanism of residual stress improvement by laser irradiation

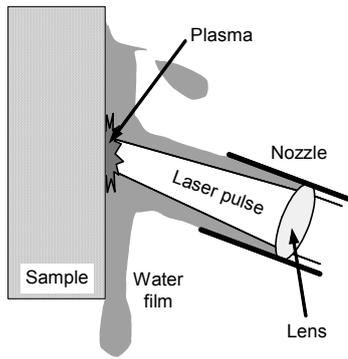


Fig.3 Laser peening process with water flow from nozzle

した¹⁹⁾。

2. レーザピーニングの基礎プロセス

レーザーピーニングによる残留応力形成のメカニズムを模式的に Fig. 2 に示す。アブレーション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。衝撃波による動的な応力によって塑性変形が生じ、周囲の未変形部か

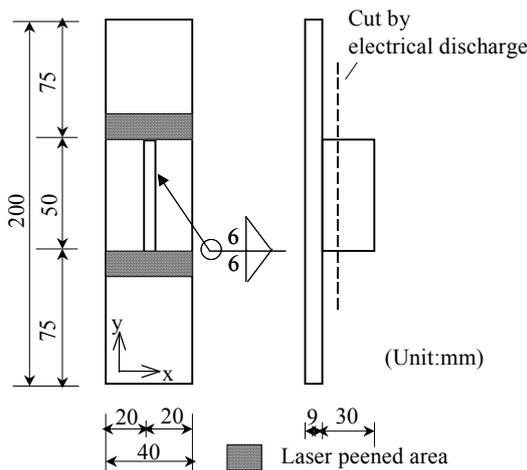


Fig.4 Fillet weld specimen

Table 1 Mechanical property and chemical composition

	Mechanical property				Chemical composition (%)												
	σ_Y	σ_U	δ	YR	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	Ti	Ceq
	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	$\times 10^{-2}$			$\times 10^{-3}$			$\times 10^{-2}$			$\times 10^{-3}$		$\times 10^{-2}$	
HT-1	804	823	21	95	15	36	120	12	1	1	1	10	12	0	1	42	42
HT-2	812	745	21	92	14	25	130	10	3	1	2	26	0	0	8	0	42

$Ceq=C+Si/24+Mn/6+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14$

らの拘束によって材料の表層に圧縮残留応力が形成される。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残留応力を形成させることができる。

今回使用したレーザーは市販の小型 Nd:YAG レーザであり、パルスエネルギーが小さいため伝送路に光ファイバを使用することが可能である。また、プラズマの膨張を抑制するためには厚さ 0.1mm 程度の水膜が必要であるが、橋梁の溶接部などを対象とする場合には、Fig. 3 に模式的に示すように、ノズルから水を噴きかけながらレーザーを照射することによって施工することができる。このように、レーザーピーニングは、工場のみならず現場でも適用できる技術であると考えられる。

3. Sin²φ法と Cos α法の比較

3.1 実験概要

試験体は、厚さ 9mm の板に厚さ 6mm のリブを脚長 6mm で全周すみ肉溶接を施したもので、鋼種は共に HT780 (HT-1 と称す) である。機械的性質と成分分析結果を Table 1 に示す。溶接法は炭酸ガスアーク溶接とし、溶接材料は 780MPa 級鋼用ソリッドワイヤを用いた。形状・寸法を Fig. 4 に示す。ただしリブは、残留応力測定時の障害となるため、すみ肉溶接の実測の脚長である高さ 8mm の位置でワイヤカットにより切断した。

まず、Fig. 5 に示すリブ先端回し溶接部の A-H 点で示した位置の表面残留応力を Sin²φ法で測定した¹⁰⁾。その後、試験体の回し溶接部 2 ヶ所にレーザーピーニングを 40mm×20mm の範囲でレーザーピーニングを施し、再び同じ位置の残

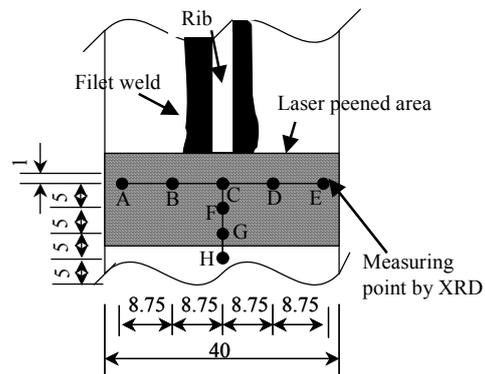


Fig.5 Measuring point of XRD

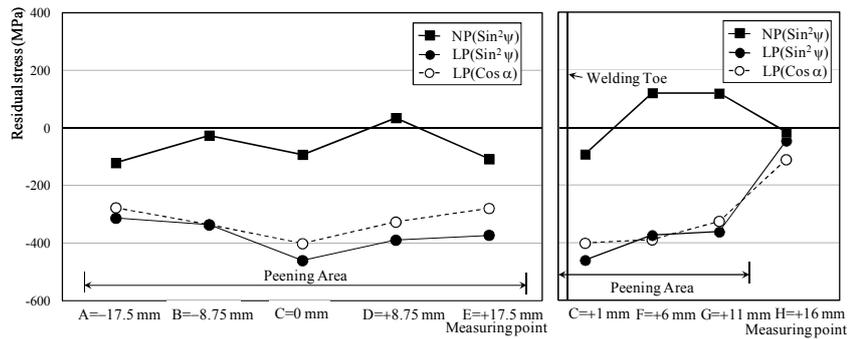


Fig.6 Residual stress on surface

留応力を $\text{Sin}^2\phi$ 法と $\text{Cos}\alpha$ 法で測定した。その後、上端回し溶接部の板厚分布を $\text{Sin}^2\phi$ 法で、下端回し溶接部の板厚方向分布を $\text{Cos}\alpha$ 法で測定した。残留応力の板厚方向分布の測定は、XRD と電解研磨を繰り返すことによって行った。残留応力はいずれも Fig. 4 に示す y 方向 (試験体長手方向) の成分を計測した。

レーザピーニングに使用したレーザは Nd:YAG レーザ (波長 $532\mu\text{m}$) であり、照射条件はパルスエネルギー:200mJ, スポット径:0.8mm, 照射密度:36Pulse/mm², 照射周波数:60Hz とした。

3.2 表面残留応力

表面残留応力の測定結果の一例を Fig. 6 に示す。レーザピーニングを施す前の残留応力 (図中の NP) に比べ、レーザピーニング後 (図中の LP) は $\text{Sin}^2\phi$ 法と $\text{Cos}\alpha$ 法ともに大きな圧縮残留応力が計測されている。レーザピーニングを施された点の内、A, B, F, G 点の値は $\text{Sin}^2\phi$ 法と $\text{Cos}\alpha$ 法で非常に良く一致していたが、C, D, E 点では $\text{Sin}^2\phi$ 法に比べ $\text{Cos}\alpha$ 法の方が小さな値となる傾向が見て取れる。全データを平均すると、 $\text{Cos}\alpha$ 法の値が $\text{Sin}^2\phi$ 法の値に比べ約 8% 小さな値となっていた。しかし、分布形状は x 方向 y 方向ともによく合っていると云える。

3.3 残留応力の板厚方向分布

Fig. 7 に C 点の残留応力の板厚方向分布を比較して示す。同じ試験体の回し溶接止端部から 1mm の点のデータであるが測定点が違うため表面残留応力の様に値の厳密な比較

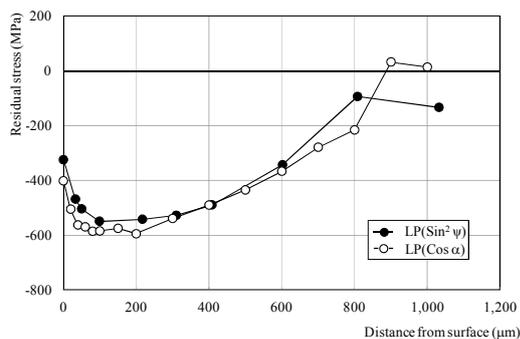


Fig.7 Depth distribution of residual stress

はできない。しかし、 $\text{Sin}^2\phi$ 法 $\text{Cos}\alpha$ 法ともに、深さ $100\mu\text{m}$ で残留応力が最大となり $200\mu\text{m}$ 以上でなだらかに減少しており、両方で測定された残留応力の分布形状は非常によく合っている事が分かる。深さ $800\mu\text{m}$ 以上の点で 100MPa 程度の違いが見られるが、大きな圧縮残留応力の分布が $800\mu\text{m}$ 程度であることは両方の計測法ともに見て取れる。

3.4 $\text{Cos}\alpha$ 法の精度と適用性

以上のように、 $\text{Sin}^2\phi$ 法と $\text{Cos}\alpha$ 法で計測されたリブ回し溶接部における残留応力分布の形状は、表面分布および板厚方向分布ともに非常に良く一致していた。また、レーザピーニングにより生成された表面残留応力の絶対値は、 $\text{Cos}\alpha$ 法の計測値が $\text{Sin}^2\phi$ 法の計測値に比べ平均で約 8% 小さかったが、X 線回折法の精度から見るとよく一致していると言え、 $\text{Sin}^2\phi$ 法と $\text{Cos}\alpha$ 法は同程度の精度を持っていると考えられる。よって、 $\text{Cos}\alpha$ 法は溶接止端部の残留応力測定に適用可能であると考えられる。

4. 残留応力に及ぼすレーザピーニング処理条件の影響

残留応力は疲労、応力腐食割れ (SCC)、脆性破壊、座屈強度等の構造体の性能にさまざまな影響を及ぼす。この残留応力の改善法 (引張残留応力を圧縮残留応力に変える方法) の一つとしてショットピーニングが用いられている。しかし、ショットピーニングでは残留応力を局所毎にコントロールすることは容易ではない。これに対し、レーザピーニングは施工条件を細かく制御して施工できるため、局所毎にさらには連続的に大きさおよび深さを変えることができる可能性がある。レーザピーニングにより任意の場所に任意の大きさおよび深さで圧縮残留応力を生成させる事ができれば、圧縮残留応力が最適化された高機能な材料および接合部が製作可能となる。そこで圧縮残留応力の大きさをコントロールするため基礎的実験として、レーザピーニングの施工条件を変化させて施工した構造用鋼材表面の残留応力を測定した。

4.1 実験概要

$50 \times 50 \times 30\text{mm}$ の残留応力測定試験片に施工条件 (パルス

エネルギー、照射径、照射密度)を変化させて10mm角で2カ所にレーザーピーニングを施し、その施工面の表面残留応力をX線回折法(Cos α法)によって4方向から計測した。残留応力測定試験片の鋼種はHT780 (Table 1中のHT-2)である。

基本となるパルスエネルギーは70mJとした。ただし、既往の研究²⁰⁾で用いたパルスエネルギー:70mJ、照射径:0.7mm、照射密度:51pulse/mm²(70-0.7-51と称す)ではプラズマ圧力の不足が示唆されることから、基本となる施工条件を70-0.5-51とした。この場合のプラズマ圧力は3.0GPaとなる。

本研究ではプラズマ圧力(レーザーパルスの照射出力密度[フルエンス]から算出)と単位面積あたりの投入エネルギーに注目した。施工条件は以下の通りとした。なお、照射条件の後の()内はプラズマ圧力もしくは単位面積あた

りの投入エネルギーを表している。

(1) プラズマ圧力の影響 1

(パルスエネルギーと照射密度一定で照射径を変化)
70-0.5-51(3.0GPa), 70-0.7-51(2.1GPa), 70-1.0-51(1.5GPa)

(2) プラズマ圧力の影響 2

(照射径一定でピークエネルギーを変化。照射密度は単位面積あたりの投入エネルギーが一定となる様に調整)
20-0.5-180(0.8GPa), 70-0.5-51(3.0GPa), 100-0.5-36(4.0GPa)

(3) 単位面積あたりの投入エネルギーの影響

(パルスエネルギーと照射径一定で照射密度を変化)
70-0.5-13(9MJ/m²), 70-0.5-26(18MJ/m²), 70-0.5-51(36MJ/m²)

4.2 実験結果

(1) プラズマ圧力の影響 1

測定結果を Fig. 8 に示す。σ_ξがレーザー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。なお、両方向とも0°と180°方向からとった値の平均値をプロットしている。以下の図も同様である。

σ_ξ, σ_ηともにプラズマ圧力1.5GPaで-200MPa程度であったが、プラズマ圧力が2.1GPa, 3.0GPaと大きくなるにつれて圧縮残留応力の値は増加した。しかし、圧縮残留応力の増加の割合はσ_ξの方がσ_ηよりも2倍程度大きかった。

(2) プラズマ圧力の影響 2

測定結果を Fig. 9 に示す。σ_ξは①の結果と同様にプラズマ圧力が大きくなるにつれて圧縮残留応力は大きくなったが、増加の割合は非常に小さかった。σ_ηもプラズマ圧力が0.8GPaから3.0GPaに大きくなると圧縮残留応力は2倍弱に大きくなったが、4.0GPaではわずかに減少している。残留応力の値が鋼材の降伏点にほぼ達しているため増加しなかったことが考えられる。

(3) 単位面積あたりの投入エネルギーの影響

測定結果を Fig. 10 に示す。横軸は1mm²あたりの照射密度としている。σ_ξ, σ_ηともに投入エネルギーが9MJ/m²から18MJ/m²に増加すると圧縮残留応力は大きく増加したが、18MJ/m²と36MJ/m²とは全く同じ値であった。照射密度はある値を超えると残留応力は一定値に収束すると考えられる。

5. まとめ

- Sin²φ法とCos α法で計測されたリブ回し溶接部における残留応力分布は、表面分布および板厚方向分布ともに非常に良く一致していた。これより、Sin²φ法とCos α法は同程度の精度を持っていると考えられる。よって、Cos α法は溶接止端部の残留応力測定に適用可能である。
- Cos α法を用いた表面残留応力の測定より、レーザーパルスのプラズマ圧力(照射出力密度)を大きくすることにより表面圧縮残留応力を大きくすることができること、

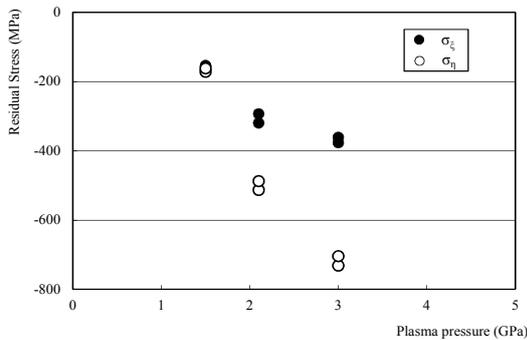


Fig.8 Effect of plasma pressure 1

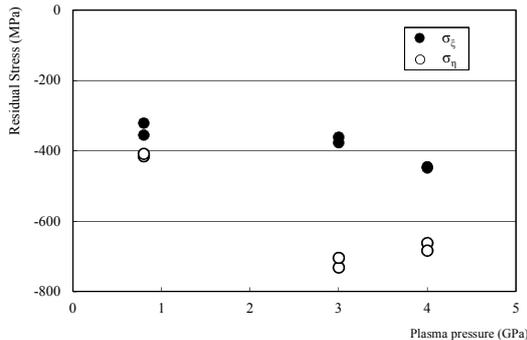


Fig.9 Effect of plasma pressure 2

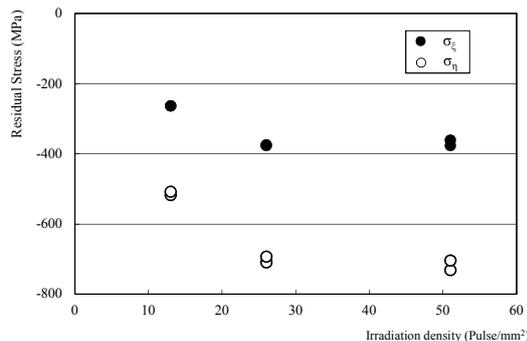


Fig.10 Effect of energy density

投入エネルギー密度も影響を及ぼすが、ある値を超えると一定値に収束することが明らかとなった。

謝辞

本研究の一部は、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年度A-STEP 検索タイプ（課題番号：AS24Z01282K）より助成を受けた。また、本研究の実験において、近畿大学工学部建築学科・加納弘道君の協力を得た。ここに深く感謝致します。

参考文献

- 1) Y. Sano: Residual Stress Improvement on Metal Surface by Underwater Irradiation of High-Intensity Laser, *Journal of Japan Laser Processing Society*, 9, 163-170, (2002). (in Japanese)
- 2) Y. Sano and N. Mukai: Life Extension of Metallic Components by Laser Peening, *Journal of Japan Laser Processing Society*, 17, 1-6, (2010). (in Japanese)
- 3) Japan Society of Shot Peening: 金属疲労とショットピーニング, 133-144, (2004). (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*, 334-340, (2006).
- 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, 706-711, (2006). (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*, 102-113, (1996).
- 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, Paper No. FT124, (2006).
- 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, 419-423, (2007). (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 Steel*, 16, 553-560, (2008). (in Japanese)
- 10) 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, 332-344, (2011).
- 11) 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 and Joining*, 17-5, 402-407, (2012).
- 12) Y. Sakino, Y. Sano and Y.-C. Kim: Improving Fatigue Strength with Laser Peening, *Proceedings of National Symposium on Welding Mechanics and Design 2006*, 2, (2006), 605-608. (in Japanese)
- 13) 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), IIW Doc.XV-1316r1-09, (2009).
- 14) 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*, 471-477, (2009). (in Japanese)
- 15) Y. Sakino, K. Yoshikawa, Y. Sano and Y.-C. Kim: Effect of Irradiation Condition on Residual Stress Distribution over Thickness Imparted by Laser Peening, *Summaries of Technical Papers of 66th JSCE Annual Meeting*, I-146, 291-292, (2011). (in Japanese)
- 16) Y. Sakino, K. Yoshikawa, Y. Sano and Y.-C. Kim: Effect of Peening Condition on Residual Stress Imparted by Laser Peening, *Preprints of the national meeting of JWS*, 196-197, (2010). (in Japanese)
- 17) 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, 660-666, (2008). (in Japanese)
- 18) Y. Sakino, Y. Sano, R. Sumiya, A. Takagi and R. Satou: Evaluation of Residual Stress in Laser-peened Welded Joints by X-ray Diffraction Methods, *Preprints of the national meeting of JWS*, 94, 216-217, (2014). (in Japanese)
- 19) Y. Sakino and Y. Sano: Effect of Laser Peening Conditions on Surface Residual Stress on Structural Steel, *Preprints of the national meeting of JWS*, 93, 304-305, (2013). (in Japanese)
- 20) Y. Sakino, Y. Sano, R. Sumiya and Y.-C. Kim: Effect of Laser Peening Condition under Low Pulse Energy on Residual Stress and Fatigue Lives, *Preprints of the national meeting of JWS*, 90, 124-125, (2012). (in Japanese)