アルミニウム合金におけるレーザーピーニング残留応力の 機械的負荷による緩和挙動[†]

宮下大輔^{*} 竹田和也^{*} 大谷眞一^{**}
佐野雄二^{***} 斎藤利之^{****} 秋田貢一^{*****}

Relaxation Behaviour of Laser Peening Residual Stress due to Mechanical Loading on Aluminum Alloy

by

Daisuke MIYASHITA^{*}, Kazuya TAKEDA^{*}, Shin-ich OHYA^{**}, Yuji SANO^{***},
Toshiyuki SAITO^{****} and Koichi AKITA^{*****}

The relaxation behavior of residual stress induced by laser peening during mechanical loading was investigated on an aluminum alloy A2024. The residual stress relaxation process was measured by x-ray diffraction method and analyzed by a finite element method (FEM). The plastic deformation behavior was evaluated from the x-ray diffraction peak width and the FEM. The surface residual stress relaxation under tensile loading occurred when the plastic deformation started at the inside of material where the balancing tensile residual stress existed. Under the compressive loading, the surface residual stress relaxation started due to the plastic deformation beneath the surface where the maximum compressive residual stress existed. The plastic deformation at the inside of material caused the redistribution of the residual stress and resulted in the relaxation of the surface residual stress. For both tensile and compressive loading, the surface compressive residual stress relaxation occurred before the total stress (= (residual stress) + (applied stress)) at the surface reached the yield condition. All discussions in this study based on the mechanical deformation behaviour of the material. Therefore, the conclusions of this study are thought to be able to apply to the behavior of the residual stress under the mechanical loading on metallic materials treated by any mechanical surface treatment.

Key words : Laser peening, Residual stress relaxation, Aluminum alloy, FEM analysis, X-ray stress measurement

1 緒 言

レーザーピーニング (Laser peening, 以下 LP) は、レーザーパルス金属材料に照射することにより、材料表面に圧縮残留応力を付与する表面改質技術のひとつである。国内では原子炉内構造物の応力腐食割れ (Stress corrosion cracking, SCC) 防止策として適用されている。¹⁾ また LP は、金属の疲労強度向上効果も有することから、²⁾ 欧米では航空機用機械部品への適用がなされており、³⁾ 今後のさらなる適用範囲拡大が期待されている。

表面改質によって導入される圧縮残留応力は、機械・構造物に移動時に作用する熱的・機械的等の外的負荷によって緩和する可能性があり、特にショットピーニング残留応力の疲労過程における緩和については多くの報告がなされている。⁴⁾ また、LP 残留応力の緩和に関しても高

温や疲労負荷における検討結果が報告されている。^{5)~9)} 筆者らは、¹⁰⁾ LP 施工したアルミニウム合金の疲労負荷における残留応力緩和過程を検討し、疲労負荷第 1 サイクル目の緩和量が支配的であること、その緩和量は引張負荷における残留応力緩和の結果をもとにある程度予測できることを明らかにした。また、従来、ピーニング残留応力の緩和に関する研究では、極表面層における残留応力変化を検討している例が多かったが、^{11), 12)} 特に引張負荷に対しては内部の残留応力の挙動が重要であることを示した。すなわち、引張負荷を増加していくと、表面層内の圧縮残留応力に釣り合う形で発生している内部の引張残留応力領域が初めに塑性変形し、そのとき表面の圧縮残留応力の緩和が開始することが示唆される結果を報告した。

[†] 原稿受理 平成 22 年 11 月 15 日 Received Nov. 15, 2010 © 2011 The Society of Materials Science, Japan

^{*} 学生会員 東京都市大学大学院工学研究科 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤, Graduate School of Eng., Tokyo City Univ., Setagaya-ku, Tokyo, 158-8557

^{**} 正 会 員 東京都市大学工学部機械システム工学科 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤, Dept. of Mech. Systems Eng., Tokyo City Univ., Setagaya-ku, Tokyo, 158-8557

^{***} 正 会 員 (株)東芝電力・社会システム技術開発センター 〒235-8523 横浜市磯子区新杉田町, Power and Industrial Systems Res. and Development Center, Toshiba Corporation, Isogo-ku, Yokohama, 235-8523

^{****} (株)東芝磯子エンジニアリングセンター 〒235-8523 横浜市磯子区新杉田町, Isogo Nuclear Eng. Center, Toshiba Corporation, Isogo-ku, Yokohama, 235-8523

^{*****} 正 会 員 (独)日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村, Quantum Beam Sci. Directorate, Japan Atomic Energy Agency, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

本研究では、機械的負荷における残留応力緩和挙動を、より詳細に検討するために、X線応力測定装置に負荷装置を設置することで、引張負荷が作用した状態での表面応力および除荷後の表面残留応力のそれぞれを測定し、また、圧縮負荷の場合の残留応力変化についてもX線により測定した。そして、X線では極表面の情報しか得られないため、有限要素法 (FEM) を用いて、引張りおよび圧縮負荷における内部を含めた試験片全体の残留応力挙動の解析を行った。

2 実験方法

2・1 試験片

供試材は、超ジュラルミン A2024-T3 の板材および A2024-T4 の丸棒材とし、それぞれを引張試験および圧縮試験に用いた。引張試験片、圧縮試験片の寸法形状をそれぞれ Fig. 1 および Fig. 2 に示す。両者の機械的性質はほぼ同じであり、代表として A2024-T3 について Table 1 に示す。

引張試験片では、Fig. 1 (a)の斜線部（表裏両面）に、Fig. 1 (b)に示すようにジグザグにレーザーパルスを走査、照射した。圧縮試験片では、Fig. 2 (a)の斜線部（円筒面）に、Fig. 2 (b)のようにらせん状にレーザーパルスを走査、照射した。レーザーパルス照射条件は、パルスエネルギーを 100mJ、照射スポット径 $D = \phi 0.7\text{mm}$ 、照射密度 $N_D = 9\text{Pulse/mm}^2$ 、エネルギー密度 0.9J/mm^2 、カバレッジ (C_v) を 350% とした。カバレッジは $C_v = (\pi D^2/4) \cdot N_D$ と定義した。

2・2 残留応力測定

試験片の残留応力測定には、汎用 X 線応力測定装置を用い、標準法である $\sin^2\psi$ 法により、試験片の長手方向、すなわち引張りおよび圧縮の負荷方向の応力を測定した。X 線応力測定条件を Table 2 に示す。なお、X 線の材料

への侵入深さは $10\mu\text{m}$ 程度であり、本測定で得られる応力は、表面から $10\mu\text{m}$ 程度深さまでの平均的応力となる。残留応力測定精度は、 $2\theta\text{-}\sin^2\psi$ 線図から算出した応力値の 68.3% 信頼区間で評価し、図中にエラーバーで示した。X 線応力定数 K は、A2024-T3 の曲げ試験片を用いた四点曲げ試験により実測した。LP 施工後の初期残留応力の深さ分布は、電解研磨と X 線応力測定を繰り返すことで測定した。電解研磨では、穴をあけたプラスチックテープを LP 施工面に貼付することで電解研磨領域を直径 8mm に制限し、深さ約 1mm までの残留応力分布を測定した。

引張負荷による表面の応力変化挙動は、Fig. 3 に示すように、研究室で開発した汎用 X 線応力測定装置に自作の手動式引張試験機をセットして、引張負荷中および除荷後の残留応力をそれぞれ測定した。圧縮負荷における残留応力変化挙動の測定には、(株)島津製作所製の油圧式疲労試験機（容量 50kN）を用いて、所定の圧縮荷重を負荷後、除荷して試験片を試験機から取り外して X 線応力測定を行い、これを繰り返した。

2・3 有限要素法による残留応力シミュレーション

FEM 解析には、市販の汎用 FEM 解析ソフトウェア“ANSYS10”を使用し、非線形構造解析を行った。使用要素は 3 次元 8 節点固体要素とした。Fig. 4 に、使用し

Table 1 Mechanical properties of A2024-T3.

0.2 % proof stress $\sigma_{0.2}$, MPa	354
Young's modulus E , GPa	76
Poisson's ratio ν	0.33
Tensile strength σ_B , MPa	448

Table 2 Conditions of X-ray stress measurement.

Diffraction plane	Al 311
Characteristic X-ray	Cr-K α
Diffraction angle 2θ , deg	139.3
X-ray irradiated area, mm	$\phi 3.0$
X-ray detector	PSPC
X-ray stress constant K , MPa/deg	-183

Fig. 1 Tensile specimen (A2024-T3).

Fig. 2 Compression specimen (A2024-T4).

Fig. 3 Setup for X-ray stress measurement.

Fig. 4 FEM model.

た直方体モデル（厚さ5mm，縦横30mm × 30mm）を示す。降伏条件は Von Mises とし，硬化則には等方硬化則を用いた。解析に用いる応力-ひずみ関係は A2024-T3 の引張試験で得られたものとした (Fig. 5)。

FEM モデル上で初期残留応力を発生させるために，レーザーを1パルス照射したときの弾塑性挙動解析を行い，LP 施工範囲にわたってその解析を繰り返すのは容易ではない。そこで，ショットピーン成形の変形シミュレーション技術¹³⁾を応用して，解析モデルの表面層および裏面層に熱塑性ひずみを導入することで残留応力を模擬した。まず，解析モデル表層内の熱膨張係数 α を表面に近いほど小さく設定する。このモデル全体を室温からある温度まで昇温して，表層に引張塑性変形を生じさせ，その後室温まで戻すことで，表面に平行方向に圧縮残留応力が発生する。こうして発生させた圧縮残留応力の深さ分布が，LP 施工後の試験片長手方向残留応力の深さ分布の実測結果とほぼ等しくなるように，熱膨張係数 α の分布および加熱温度を調整した。なお，上記の手順では，等方の線膨張係数を設定しているため，モデルの表面に平行な面内で等二軸応力状態となる。一方，実際のレーザーピーニングにおける応力状態にはまだ不明点があり，厳密にはまだモデルの改良が必要と思われるが，ここでは，単軸の機械的荷重を与えた場合の残留応力の挙動を明らかにすることを目的としており，その荷重方向

Fig. 5 Stress strain curve of A2024-T3 used in the FEM analysis.

以外の残留応力が残留応力緩和メカニズムに及ぼす影響は小さいものと仮定した。

以上の手順で作成した LP 施工モデルに単軸の引張負荷もしくは圧縮負荷を段階的に与え，表面から内部にかけての残留応力および塑性ひずみ分布を解析した。

3 実験結果および考察

3・1 初期残留応力分布

LP 施工した A2024-T3 における RD 方向残留応力 $\sigma_{r,RD}$ の実測結果，および，LP 施工モデル上で発生させた X 方向残留応力 $\sigma_{r,X}$ の深さ分布を Fig. 6 に示す。表面に圧縮残留応力が発生し，深さ約 0.1mm において最大の圧縮残留応力を示した後，徐々に残留応力が減少する分布となっている。なお，実測の際には，表面の直径 8mm の領域を電解研磨しており，それによる残留応力の開放は，表面近傍においては極くわずかであると考えられるため，図に示したデータでは残留応力解放の補正は行っていない。Fig. 6 で分かるように，実測値と FEM による分布とは良く一致しており，LP 施工で発生した試験片長手方向残留応力の深さ分布が，FEM モデル上で再現できていることが認められる。モデルでは厚さ 5mm の板の両面に同じ残留応力分布を設定した。そのため，板の表面から 1mm 以上内部では，両面の圧縮残留応力に釣り合う引張残留応力が発生した。

3・2 引張負荷における残留応力変化挙動

LP 施工材に引張負荷を与えたときの，表面残留応力測定結果を Fig. 7 に示す。図中の○は，引張負荷を与えた状態での表面応力 (= 残留応力 + 負荷応力) であり，●は引張負荷後除荷した状態での残留応力である。LP により導入された圧縮残留応力 (●) は，引張負荷が $\sigma_{ap} = 280\text{MPa}$ を越える付近から緩和し始めた。 $\sigma_{ap} = 280\text{MPa}$ を負荷した状態での表面応力 (○) は，初期の圧縮残留応力約 -300MPa と負荷応力 280MPa との和になるためほぼゼロになっており，本材料の 0.2% 耐力 (354MPa) には明らかに達していない。したがって，表面応力が 0.2% 耐力に達するより低い負荷応力で，表面の残留応力が緩和し始めたことになる。その後， σ_{ap} の上昇とともに表面の残留応力は減少し続けた。

Fig. 8 は，塑性変形の指標となる回折線半幅 FWHM の変化挙動の測定結果である。半幅幅は $\sigma_{ap} = 380\text{MPa}$

Fig. 6 Initial residual stress distribution.

Fig. 7 Changes of surface stress in loading direction during and after tensile loading measured on A2024-T3.

Fig. 8 Changes of surface full width at half maximum during and after tensile loading on A2024-T3.

付近まではほぼ一定で、その後、急激に上昇し始めた。つまり、引張負荷によって表面の塑性変形が開始したのは $\sigma_{ap} = 380\text{MPa}$ の時点であり、表面残留応力緩和が始まった $\sigma_{ap} = 280\text{MPa}$ の時点では、表面の塑性変形はまだ起こっていなかったことになり、Fig. 7 の結果を裏付ける結果となっている。

次に、FEM 解析結果を Fig. 9 および Fig. 10 に示す。Fig. 9 は試験片厚さ全体の残留応力深さ分布であり、横

Fig. 9 Analyzed distributions of residual stress in loading direction. The distributions show the unloading state after loading.

Fig. 10 Analyzed distributions of equivalent plastic strain in whole thickness of specimen.

軸の $d = 0\text{mm}$ と $d = 5\text{mm}$ の位置は、それぞれ試験片の表面と裏面である。試験片内部の $d = 1 \sim 4\text{mm}$ の領域では、引張残留応力が発生しているが、これは、表面層内圧縮残留応力に釣り合う形で発生しているものである。なお、本研究においては 1mm よりも深い部分での残留応力は実測していないが、表層に圧縮残留応力を導入した場合、内部に引張残留応力が発生するという実測結果が報告されており¹⁴⁾本研究においても試験片内部には引張残留応力が発生していたものと考えられる。

Fig. 9 は、無負荷、 $\sigma_{ap} = 310\text{MPa}$ および $\sigma_{ap} = 390\text{MPa}$ をそれぞれ負荷した後に除荷した状態を示している。 $\sigma_{ap} = 310\text{MPa}$ を負荷すると、表面圧縮残留応力および内部の引張残留応力が同時に緩和し始めた。表面残留応力が緩和開始する負荷応力値は、実験では $\sigma_{ap} = 280\text{MPa}$ 付近であり (Fig. 7)、解析結果とほぼ一致している。引張負荷がさらに増加し、 $\sigma_{ap} = 390\text{MPa}$ に達すると表面圧縮残留応力は -100MPa まで減少し、内部の引張残留応力は約 40MPa にまで減少した。

機械的負荷を与えた場合の残留応力緩和は、塑性変形に起因して生じるため、その塑性変形挙動を検討することで、残留応力緩和メカニズムが明らかとなる。なお、ここでは Von Mises の降伏条件を用いているため、相当塑性ひずみにより検討する。Fig. 10 は、相当塑性ひずみ ϵ_{eq} の変化の様子を示す。表面から深さ約 1mm までの領域には、引張負荷前 ($\sigma_{ap} = 0\text{MPa}$) の段階で塑性ひずみが発生している。これは LP 施工による初期残留応力を発生するために導入した塑性ひずみである。この状態から負荷していき、Fig. 9 で表面残留応力が緩和を開始した $\sigma_{ap} = 310\text{MPa}$ に達しても、表面の相当塑性ひずみに変化は見られない。しかし、このとき、深さ約 $1 \sim 4\text{mm}$ の領域、すなわち表面の圧縮残留応力に釣り合う形で存在している引張残留応力領域において相当塑性ひずみが増加を開始した。そして $\sigma_{ap} = 390\text{MPa}$ に達したとき、表面層内においても相当塑性ひずみが増加し始めた。この負荷応力値は、実験において回折線半価幅が増大を開始した負荷応力 $\sigma_{ap} = 380\text{MPa}$ (Fig. 8) とほぼ一致している。X 線では $10\mu\text{m}$ 程度深さまでの表層内の測定である

ため、内部での塑性ひずみ増大開始時点 (Fig. 10 の $\sigma_{ap} = 310\text{MPa}$) では半価幅は増大せず、表面の塑性ひずみ開始と対応して増大したことは妥当である。

Fig. 9 および Fig. 10 から、内部の引張残留応力に引張負荷応力が重畳して、内部の塑性変形の増大が開始したとき内部引張残留応力が緩和し、同時に力学的バランスが崩れて残留応力再配分が生じ表面圧縮残留応力が緩和することが明らかとなった。

引張負荷過程における表面残留応力の実測値と FEM 解析結果との比較を Fig. 11 に示す。両者の定量的一致は未だ不十分であるが、傾向は比較的良く一致している。

3・3 圧縮負荷における残留応力変化挙動

次に圧縮負荷時の表面残留応力挙動について検討した。Fig. 12 に、圧縮負荷に対する表面残留応力変化の実測結果を示す。表面圧縮残留応力は、 $\sigma_{ap} = -200\text{MPa}$ 付近から緩和し始め、圧縮負荷応力の増加に伴い緩和し続けた。

Fig. 13 は、板厚全体の残留応力分布の変化挙動を FEM 解析した結果である。 $\sigma_{ap} = -240\text{MPa}$ の圧縮負荷を与えることにより、表面圧縮残留応力と内部の引張残留応力の両方が緩和している。そして圧縮負荷が $\sigma_{ap} = -400\text{MPa}$ に達すると、表面圧縮残留応力は約 -60MPa まで、内部の引張残留応力は約 30MPa まで減少した。

Fig. 11 Comparison of measured and analyzed surface residual stresses in tensile loading.

Fig. 12 Change of surface residual stress during compressive loading.

Fig. 13 Changes of residual stress distributions by compressive loading.

Fig. 14 に圧縮負荷による相当塑性ひずみの FEM 解析結果を示す。 $\sigma_{ap} = -240\text{MPa}$ の結果が示すように、圧縮負荷を与えることにより、まず表面直下の ϵ_{eq} が減少し始める。相当塑性ひずみが負荷によって減少する原因は、初期残留応力導入時に発生している表面に平行方向の引張塑性ひずみ領域が、圧縮負荷により圧縮方向に塑性変形するためである。

なお、圧縮負荷の場合は、圧縮残留応力が大きい領域ほど負荷中の相当応力が大きくなるため、表面直下の最大圧縮残留応力領域が最初に降伏条件に達する。 $\sigma_{ap} = -380\text{MPa}$ に達すると、内部の相当塑性ひずみが増加した。最後に $\sigma_{ap} = -400\text{MPa}$ に達すると、表面近傍の相当塑性ひずみ ϵ_{eq} は逆に増加し始めた。これは LP により導入されていた負荷方向の引張塑性ひずみが圧縮荷重による圧縮塑性ひずみと相殺し、次いで圧縮塑性ひずみが蓄積され始めたためである。

Fig. 15 に示すように、圧縮負荷の場合についても、表面残留応力の変化傾向は、FEM 解析と実験とで比較的良く一致している。なお、本図および Fig. 11 における、実験結果と FEM 解析結果との若干の差の原因は、本研究の FEM 解析では、加工硬化などの LP 施工による材料特性変化を考慮していないこと、また、特に圧縮負荷の場合には、等方硬化則を仮定しているために、バ

Fig. 14 Changes of equivalent plastic strain distributions.

Fig. 15 Comparison of measured and analyzed surface residual stresses in compressive loading.

ウシナー効果が考慮されていないことであると考えられる。実験と解析の定量的一致については今後の課題としたい。

以上のように、LP 施工材に引張負荷が作用した場合は最大引張残留応力領域で、また、圧縮負荷が作用した場合は最大圧縮残留応力領域でそれぞれ塑性変形が始まり、そのとき表面残留応力が緩和し始めることが明らかとなった。引張残留応力領域は常に試験片内部に存在し、また、最大圧縮残留応力は表面直下に存在する場合が多い。したがって、引張負荷の場合は必ず、そして圧縮負荷の場合も多くの場合は、表面の応力 (= 表面残留応力 + 負荷応力) が降伏条件に達するよりも低い負荷応力の段階で、表面残留応力が緩和を開始することになる。

4 結 言

レーザーピーニング (LP) を施工したアルミニウム合金試験片に、引張および圧縮負荷が作用した場合の残留応力緩和挙動を、有限要素法解析と実験により明らかにした。得られた主な結論を以下に示す。

(1) LP 施工材に作用する引張負荷を増加していくと、LP によって形成された表面層の圧縮残留応力に釣り合う形で存在する、内部の引張残留応力領域がまず塑性変形する。その結果、残留応力の再配分が生じて、表面残留応力が緩和し始める。

(2) LP 施工材に作用する圧縮負荷を増加していくと、LP により形成された最大圧縮残留応力領域で塑性変形が始まり、その結果、圧縮残留応力が緩和し始める。

(3) 引張残留応力領域は常に試験片内部に存在し、また、最大圧縮残留応力は表面直下に存在する場合が多いため、引張負荷の場合は必ず、そして圧縮負荷の場合も多くの場合は、表面の応力 (= 残留応力 + 負荷応力) が降伏条件に達するよりも低い負荷応力の段階で、表面残留応力が緩和を開始する。

(4) 表面圧縮残留応力の機械的負荷中の緩和過程は、FEM 解析によって予測できる。

従来、ピーニング残留応力の機械的負荷による緩和の研究では、表面あるいは極表面層の残留応力と負荷応力とから緩和挙動が検討されていたが、本研究では、試験

片の内部も含めて検討し、緩和挙動には内部の残留応力分布が影響することを明らかにした。表面圧縮残留応力が同じであっても、それに釣り合う内部の残留応力は、部材の寸法形状に依存する。したがって、内部の残留応力を考慮しない場合には、誤った残留応力緩和開始応力を推定してしまう可能性がある。

また、本論文では、機械的作用によって発生した残留応力の、機械的負荷による緩和を扱っている。したがって、上記の結論は、ショットピーニングなどの機械的作用によって導入した残留応力の機械的負荷による緩和挙動に、一般に適用可能であると考えられる。

汎用 X 線応力測定装置の開発では、法政大学名誉教授の長谷川賢一先生に多大なるご協力をいただいた。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) Y. Sano, M. Kimura, K. Sato, M. Obata, A. Sudo, Y. Hamamoto, S. Shima, Y. Ichikawa, H. Yamazaki, M. Naruse, S. Hida, T. Watanabe and T. Oono, "Development and application of laser peening system to prevent stress corrosion cracking of reactor core shroud", Proceedings of the 8th International Conference of Nuclear Engineering, pp.1-10 (2000) American Society of Mechanical Engineers.
- 2) K. Masaki, Y. Ochi, Y. Kumagai, M. Takahashi, 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, Vol.55, No.7, pp.706-711 (2006).
- 3) R. D. Tenaglia and D. F. Lahrman, "Preventing fatigue failures with laser peening", The AMPTIAC Quarterly, Vol.7, No.2, pp.3-7 (2003).
- 4) K. Dalaei, B. Karlsson and L. E. Svensson, "Stability of residual stresses created by shot peening of pearlitic steel and their influence on fatigue behavior", Procedia Engineering, Vol.2, pp.613-622 (2010).
- 5) P. S. Prevey, D. J. Hornbach and P. W. Mason, "Thermal residual stress relaxation and distortion in surface enhanced gas turbine engine components", Proceedings of the 17th Heat Treating Society Conference and Exposition and the 1st International Induction Heat Treating Symposium, pp.3-12 (1998) ASM International.
- 6) I. Nikitin and I. Altenberger, "Comparison of the fatigue behavior and residual stress stability of laser-shock peened and deep rolled austenitic stainless steel AISI 304 in the temperature range 25–600°C", Materials Science and Engineering A, Vol.465, pp.176-182 (2007).
- 7) R. K. Nalla, I. Altenberger, U. Noster, G. Y. Liu, B. Scholtes and R. O. Ritchie, "On the influence of mechanical surface treatments – deep rolling and laser shock peening – on the fatigue behavior of Ti-6Al-4V at ambient and elevated temperatures", Materials Science and Engineering A, Vol.355, pp.216-230 (2003).

- 8) A. King, A. Steuwer, C. Woodward and P. J. Withers, "Effects of fatigue and fretting on residual stresses introduced by laser shock peening", *Materials Science and Engineering A*, Vols. 435-436, pp.12-18 (2006).
- 9) Y. Sano and K. Akita, "Evidence of surface compression and stability of laser-peened material without coating", *SPring8 Research Frontiers*, pp.127-128 (2005) Japan Synchrotron Radiation Research Institute.
- 10) T. Sakai, K. Akita, S. Ohya, Y. Sano and T. Saito, "The effect of static and fatigue loading on residual stress induced by laser peening", *Journal of Materials Science, Japan*, Vol.57, No.7, pp.648-653 (2008).
- 11) M. Benedetti, V. Fontanari and B. D. Monelli, "Numerical simulation of residual stress relaxation in shot peened high-strength aluminum alloys under reverse bending fatigue", *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol.132, 011012 (2010).
- 12) H. Hanagarth, O. Vohringer and E. Macherauch, "Relaxation of shot peening residual stresses of the steel 42 CrMo 4 by tensile or compressive deformation", *Proceedings of The Fourth International Conference on Shot Peening*, pp.337-345 (1990).
- 13) T. Yamada, T. Takahashi, M. Ikeda, S. Sugimoto and T. Ohta, "Development of shot peening for wing integral skin for continental business jets", *Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review* Vol.39, No.1, pp.36-39 (2002).
- 14) K. Akita, D. Miyashita, K. Takeda, S. Ohya, T. Shobu, Y. Sano and T. Saito, "Relaxation process of residual stress induced by laser peening", *Proceedings of the 44th Symposium on X-ray Studies on Mechanical Behaviour of Materials*, pp.46-50 (2010) The Society of Materials Science, Japan.