レーザピーニングによる AC4CH アルミニウム合金の疲労き裂進展抑制[†]

政 木 清 孝* 越 智 保 雄** 松 村 隆**
佐 野 雄 二*** 秋 田 貢 一**** 梶 原 堅 太 郎*****

Retardation of Fatigue Crack Growth on AC4CH Cast Aluminum Alloy by Laser Peening

by

Kiyotaka MASAKI*, Yasuo OCHI**, Takashi MATSUMURA**, Yuji SANO***,
Koichi AKITA**** and Kentaro KAJIWARA*****

The effect of laser peening to retard fatigue crack propagation has been demonstrated through rotating bending fatigue tests conducted on pre-cracked AC4CH casting aluminum alloy. The apparent maximum stress intensity factor at the surface of laser peened specimens was nearly equal to four times of the threshold stress intensity factor of long surface fatigue cracks just starting the propagation on AC4CH. The increase of the threshold stress intensity factor was due to the effect of compressive residual stress introduced by laser peening. The three dimensional (3D) image of fatigue cracks was reconstructed by micro computed tomography (μ CT) using synchrotron radiation of SPring-8. The reconstructed images were used to visualize the crack propagation behavior inside the specimens, which could not be attained by usual replication technique. The 3D image of a laser peened specimen showed a legible plastic deformation on the surface of the specimen.

Key words : Laser peening, Fatigue crack property, Micro computed tomography, Synchrotron radiation, Aluminum alloy

1 緒 言

金属材料の疲労特性改善手法として、原子炉内構造物などの応力腐食割れ損傷対策のために開発された、レーザピーニング処理 (Laser Peening: 以後 LP 処理と称す) の適用が試みられている。^{1)~3)} LP 処理は従来のショットピーニング (SP) 処理に比べて、被加工材の表面粗さ劣化の少ないピーニング処理であることから、軟質なアルミニウム合金などの疲労特性改善手法として期待され、航空機産業分野の一部で実機適用へ向けた研究が始められている。⁴⁾

アルミニウム合金に関しては、著者らも過去に溶湯処理した鋳造アルミニウム合金 AC4CH へ LP 処理を適用し、SP 処理よりも表面粗さの劣化を抑え、かつ SP 処理材以上の疲労特性が得られることを明らかにした。³⁾ さらに、X線残留応力測定法にて得られた試験片最表面の残留応力値と、未処理材および LP 処理材のき裂進展挙動の違いから算定される残留応力値がほぼ一致することを示し、疲労寿命改善効果の主要因が圧縮残留応力による表面き裂の進展の遅延にあることを示した。^{5), 6)}

本研究では引き続き AC4CH を供試材として、疲労き

裂を有する部材へ LP 処理を施し、LP 処理による予き裂の進展抑制効果に注目した。一般に疲労き裂の進展挙動評価には、コンパクトテンション (CT) 試験片を用いた疲労き裂進展試験が行われる。本研究では機械構造物材表面に疲労き裂が発生したことを想定して、CT 試験片ではなく通常の回転曲げ疲労試験片に疲労予き裂 (表面き裂) を導入し、疲労き裂発生部を含めた試験片平行部表面に LP 処理を施すことで、LP 処理のき裂進展抑制の効果を調査することとした。

表面き裂の進展挙動調査にはレプリカ法を用いることが一般的であるが、LP 処理などの表面硬化処理材においては表面近傍の圧縮残留応力の影響によって、試験片表面の円周方向へのき裂進展挙動と、試験片内部方向へのき裂進展挙動が異なることが予想される。このときレプリカ法では、試験片内部のき裂形状も含めたいき裂進展挙動を調査することが難しいため、何らかの方法で試験片内部のき裂形状を把握しなければならない。一般的な方法として、疲労破断後の破面調査や試験片の強制破断による破面調査が行われるが、著者らは前報で大型放射光施設 (SPring-8) を利用した断層撮影技術 (micro

[†] 原稿受理 平成 19 年 2 月 7 日 Received Feb. 7, 2007 ©2007 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 沖縄工業高等専門学校機械システム工学科 〒905-2192 名護市辺野古, Dept. of Mech. Systems, Eng., Okinawa National College of Tech., Henoko, Nago, 905-2192

** 正 会 員 電気通信大学電気通信学部知能機械工学科 〒182-8585 調布市調布ヶ丘, Dept. of Mech. Eng. & Intelligent Systems, Univ. of Electro-Communications, Chofugaoka, Chofu, 182-8585

*** 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

**** 正 会 員 武蔵工業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., Musashi Inst. of Tech., Setagaya-ku, Tokyo, 158-8557

***** (財)高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町, Japan Synchrotron Radiation Res. Inst., Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

Computed Tomography : μ CT) によって, 通常用いられる疲労試験片サイズのアルミニウム合金などの軽金属内部の三次元的なき裂形状の観察手法を確立した.^{7), 8)}そこで本研究では, 一般的なレプリカ法による表面き裂の観察結果から応力拡大係数を算出して, LP 処理による AC4CH の疲労予き裂の進展抑制効果の定量的評価を行うとともに, μ CT 法を利用した試験片内部方向のき裂進展挙動と, LP 処理にともなう表面近傍組織の塑性変形挙動について検討を行った.

2 供試材および実験方法

2・1 供試材および試験片形状

供試材は一連の研究と同一の溶湯脱ガス (Degassing : DG) 処理した鋳造アルミニウム合金 AC4CH である.^{3)~9)}以下 DG 材と称す. 供試材の化学組成を Table 1 に示す. 底面幅約 150mm $\times$ 底面厚さ約 22mm $\times$ 高さ約 100mm の舟形ブロックを金型による重力鋳造にて製作後, T6 処理 (溶体化処理: 540℃ 4h 保持後, 60℃ $\sim$ 80℃ 水冷, 時効処理: 160℃ 4h 保持後水冷) を施した. この舟形ブロックから Fig. 1 に示す試験片を, 舟形底面から 37.5mm の位置が試験片中心軸となるように機械加工にて切り出した. 試験片形状に機械加工後, 試験片中央部はエメリー研磨, バフ研磨を施して鏡面仕上げとした. 組織は Fig. 2 に示すように DAS II が約 30 μ m のデンドライト組織であった.

2・2 疲労試験方法

疲労試験ならびに予き裂の導入には, 小野式回転曲げ疲労試験機を用いた. 負荷繰返し数 46Hz, 応力比-1, 室温・大気中にて試験を行った. 表面き裂進展挙動の調査はレプリカ法により実施し, 疲労試験後には, 走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた破面観察を行った.

Table 1 Chemical compositions of AC4CH. (wt%)

Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Al
0.032	6.92	0.307	0.009	0.158	Bal.

Fig. 1 Shape of fatigue test specimens (unit : mm).

Fig. 2 Microstructure of tested material.

2・3 予き裂導入

試験片中央部に直径 $d = 0.3$ mm, 深さ $h = 0.3 \sim 0.5$ mm の微小ドリル穴を付与し, 応力振幅 130MPa (DG 材の 10^7 回疲労強度⁹⁾) で疲労試験を実施してドリル穴のみからき裂を発生させ, ドリル穴を含めたき裂全長 $2a$ が約 2.5mm となるまで疲労負荷繰返しを与えた. Fig. 3 に予き裂のレプリカ写真の一例を示す. 疲労予き裂はドリル穴を中心として左右ほぼ均等な長さに成長した.

2・4 LP 処理

予き裂を付与した後, 試験片中央部に LP 処理を施した. なお LP 処理条件は, 過去の研究と同一の Table 2 に示す条件とした.^{3)~8)}本 LP 処理条件は, LP 処理後の AC4CH の表面性状劣化をなるべく抑え, かつ 0.5mm 程度の硬化層厚さの得られる処理条件である. なお, この LP 処理材の 10^7 回疲労強度は約 170MPa で, 約 40MPa の疲労強度向上の効果がある.^{3), 5)~8)}LP 処理を施す前の試験片については, ドリル穴を有する DG 材という意味で DG-hole 材, LP 処理を施した試験片については DG-hole-LP 材と称す.

3 実験結果および考察

3・1 LP 処理によるき裂進展抑制

3・1・1 LP 処理した予き裂材の疲労試験 疲労予き裂を持つ AC4CH に LP 処理を施すと, 表面き裂の進展を抑制可能であることは, 前報にて既に明らかとなっている.^{7), 8)}DG-hole 材と DG-hole-LP 材について, 再度 130MPa にて疲労試験を実施し, それぞれ約 1×10^5 回の負荷繰返しを与えた時の予き裂の進展挙動についてレプリカ法により調査し, 予き裂導入時の寿命を基準として整理したものを Fig. 4 に示す.^{7), 8)}また追試験前後のレプリカ写真を Fig. 5 に示す. なお図中, ○, □は, そのまま疲労破断させた場合のき裂進展曲線である. ●, ■, ◆, および Fig. 5 (b) で示されているように, LP 処理によって予き裂が停留した. 過去の研究から AC4CH の疲労き裂のアスペクト比がおおよそ 0.73 であることが分かっているので,⁵⁾負荷応力振幅 130MPa, き裂長さ $2a = 2.5$ mm におけるき裂先端の最大応力拡大係数は, 村上らの式¹⁰⁾より $5.4 \text{MPa} \sqrt{\text{m}}$ となる. すなわち LP 処理には, 少なくとも最大応力拡大係数が約 $5 \text{MPa} \sqrt{\text{m}}$ 以下の予き裂に対し, 成長をほぼ停止させる効果がある.

さらにき裂進展抑制効果を調査するため, 130MPa より高い応力振幅域にて疲労試験を実施した. 結果を Fig. 6

Fig. 3 Example of pre-crack (replica), $\sigma_a = 130$ MPa, $N = 2.1 \times 10^5$ cycles.

Table 2 Condition of laser peening treatment.

Pulse energy	Spot diameter	Pulse number density
100 [mJ]	0.6 [mm]	27.3 [pulse/mm ²]

Fig. 4 Fatigue crack propagation curves.^{7), 8)}

Fig. 5 Surface crack observation results.

に示す。横軸の繰返し数 N_f は LP 処理後の負荷繰返し数であり、予き裂導入時の負荷繰返し数を含んでいない。疲労試験の結果、DG-hole-LP 材の疲労寿命特性は DG-LP 材よりも短寿命となったが、DG-hole-LP 材の 10^7 回疲労強度は DG-LP 材の 10^7 回疲労強度とほぼ一致した。このことは、AC4CH に発生した疲労き裂長さが $2a = 2.5\text{mm}$ 以下であれば、LP 処理によって疲労き裂の進展をほぼ停止させることが可能であることを示している。

Fig. 6 Result of fatigue test (DG-Hole-LP).

3・1・2 LP 処理した予き裂材の表面き裂進展挙動と破壊力学的評価 DG-hole-LP 材のき裂進展挙動を調査するため、応力振幅 170MPa と 200MPa で疲労試験を行った際の表面き裂挙動を、レプリカ法により観察した。得られたき裂進展曲線を Fig. 7 に示す。図中約 2.5mm の疲労き裂が予き裂であるが、両応力振幅とも予き裂は破断寿命の約 1/2 までほとんど進展することが無く、他の箇所から発生・進展したき裂と合体した後に急速に進展した。このときのレプリカ観察例を Fig. 8 に示す。ドリル穴から進展した予き裂と、違う場所から新規に発生・進展した疲労き裂が合体する様子が明らかである。負荷応力振幅が DG-LP 材の 10^7 回疲労強度以上であるので、予き裂以外から疲労き裂が発生したものと考えられる。

予き裂の進展に対する LP 処理の抑制効果について定量的に評価するため、破壊力学的パラメータである応力拡大係数を用いて検討した。Fig. 6 に示した予き裂材の S-N 特性を、縦軸を予き裂先端の最大応力拡大係数として再整理したものを Fig. 9 に示す。応力拡大係数算出位置は図中に示した試験片最表面 (point C) で、係数 F の算出も含めて白鳥らの式を用いた。¹¹⁾ ここでき裂長さは疲労試験前の予き裂長さを適用し、アスペクト比は 0.73 を適用した。負荷応力振幅に残留応力を考慮しない場合 (図中○, ●), 疲労き裂の進展が認められた最大応力拡大係数の下限値は $6.2\text{MPa} \sqrt{\text{m}}$ であった。文献によれば AC4CH の長いき裂進展に対する下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} が約 $1.5\text{MPa} \sqrt{\text{m}}$ であることから、¹²⁾ LP 処理によ

Fig. 7 Fatigue crack propagation curves of DG-hole-LP.

Fig. 8 Example of crack observation result at 200MPa :
(a) $N = 1.6 \times 10^5$ cycles ; (b) $N = 4.6 \times 10^5$ cycles.

Fig. 9 Relation between stress intensity factor and fatigue life. ○, ●; residual stress is not considered and □, ■; residual stress is considered.

り AC4CH の ΔK_{th} が見かけ上約 4 倍に向上したことになる。図中には負荷応力振幅に試験片最表面の残留応力を $\sigma = \sigma_a + \sigma_{residual}$ として考慮した場合についての最大応力拡大係数算出結果も示した (□, ■)。LP 処理材の最表面における残留応力値 $\sigma_{residual}$ には、X 線回折法ならびに表面き裂の観察結果を総合的に判断して得られた -120MPa を用いた。⁵⁾ 応力振幅に残留応力を考慮すると、予き裂の進展が確認された最大応力拡大係数の下限値が約 $1.5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ となり、AC4CH の ΔK_{th} と一致した。これにより LP 処理による AC4CH の疲労き裂進展抑制効果は、付与された圧縮残留応力の影響であることが定量的に示された。

3・2 き裂進展挙動調査への μCT 技術の適用

3・2・1 き裂形状可視化手法 き裂の可視化は前報と同様に大型放射光施設 SPring-8 の BL19B2 (第 3 ハッチ) を利用して行った。^{7, 8)} X 線エネルギーは 28keV 、試験片と検出器 (冷却 CCD カメラ: 画素数 1024×1024) との距離は 800mm であり、屈折コントラストの効果によるエッジ強調が適度に現れる距離である。この観察体系での実効的なピクセルサイズは約 $6\mu\text{m}/\text{pixel}$ である。透過データは $0 \sim 180$ 度まで 0.5 度ごとに、積算時間 2s 、ドリル穴を中心とする軸方向約 3mm の領域について取得した。画像再構成にはフィルタード・バックプロジェクションアルゴリズムを使用した。各スライス画像から閾値操作によりき裂面のみを抽出し、ノイズ除去を実施して積層する事によりき裂の 3D 像が構築可能である。

3・2・2 LP 処理によるドリル穴の変形 SP 処理と同様に LP 処理によって試験片表面近傍組織には、塑性変形が生じることが考えられる。この塑性変形の様子を把握するため、予き裂導入のために付与したドリル穴の変形に着目した。DG-hole-LP 材の疲労破断後のドリル穴付近の SEM による破面観察例を Fig. 10 (a) に、 μCT 技術によって再構成されたドリル穴形状を Fig. 10 (b) に示す。LP 処理により表面近傍のドリル穴直径が小さくなり、表面近傍の組織には大きな塑性変形が生じたことが明らかである。そこで、表面からの深さが異なる三箇所におけるドリル穴の断層撮影画像を作成し、ドリル穴の変形について定量的に調査した。ドリル穴における断層

Fig. 10 Example of drill hole observation.

撮影箇所と断層撮影画像、ならびにその断層撮影画像から求めたドリル穴の直径を Fig. 11 に示す。表面に近づくほど、ドリル穴の縮小が顕著となっている。ドリル穴の縮小割合を A (断層撮影位置での穴面積) / A_0 ($d = 0.3\text{mm}$ とした場合の基準穴面積) にて定義すると、試験片最表面近傍では実に 50% までドリル穴が縮小している。

LP 処理材の残留応力値には、軸方向と円周方向とで差があり、レーザの走査方向と垂直な方向 (本研究の場合は軸方向) の残留応力値の方が大きな圧縮残留応力を示すことが知られている。^{1), 7, 8)} しかし、ドリル穴の変形挙動には軸方向、円周方向でほとんど差が無く、ほぼ均等に變形しているようである。LP 処理は SP 処理に比べて被加工材の表面粗さ劣化が少ない処理であるが、AC4CH の表面近傍を大きく塑性変形させる事が可能であり、部材の表面近傍に存在する引け巣などの鑄造欠陥を縮小させる効果があると考えられる。

3・2・3 LP 処理による表面き裂の進展抑制 前報では 3・1 節で使用した試験片 (Fig. 5 に示したき裂のレプリカを採取した試験片) を用いて、DG-hole-LP 材のき裂形状可視化を試み、き裂を含めた表面全体に LP 処理を施した場合のき裂進展抑制効果を確認した。^{7, 8)} 本研究ではさらに、DG-hole 材の予き裂部分を残して LP 処理を施した部分 LP 処理材 (LP (part) 材) を用意し、LP 処理後に再度 130MPa にて 3×10^4 回の疲労負荷繰返しを与えたものを調査対象とすることで、LP 処理の施工場所の影響について検討した。

部分 LP 処理の模式図ならびに追加疲労試験前後のレ

Fig. 11 Plastic deformation of drilled hole.

プリカ写真を Fig. 12 に示す。試験片表面におけるき裂先端と LP 処理領域の端部が一致するように LP 処理を施すことが困難であるため、追加疲労試験により表面の予き裂が成長し、LP 処理端面でほぼ進展を停止している。このときの表面き裂長さは $2a_1 = 3.37\text{mm}$ で、追加疲労試験前の長さ $2a_0 = 2.57\text{mm}$ に比べて $2\Delta a = 0.8\text{mm}$ の成長であった。表面き裂長さ情報のみしか得られないならば、き裂先端の応力拡大係数は疲労き裂を半楕円形状と仮定し、表面き裂長さとき裂形状のアスペクト比から求めるのが一般的である。アスペクト比は過去の研究から経験的に決定する場合が多く（本研究で使用している AC4CH では 0.73）、一般に回転曲げ疲労試験の場合では 1.0 以下の値が採用される。

3・2・4 μCT 技術を利用した疲労き裂進展挙動評価

この試験片に対して μCT 技術を適用し、試験片内部のき裂形状を調査した。Fig. 13 に再構成画像を軸方向から見た図を示す。比較のために、前報で得られた DG-hole 材 ($2a_0 = 2.62\text{mm}$ の予き裂導入後、 130MPa にて 6×10^4 回の疲労負荷繰返しを与えたもの。追加疲労試験後のき裂長さ $2a_1 = 3.84\text{mm}$) のき裂再構成画像を non-LP 材として示した。^{7), 8)} 両者のき裂形状は明らかに異なっている。これらの図からアスペクト比を算出すると、non-LP 材では 0.76 で、DG 材の試験片を強制破断させて得られた疲労き裂のアスペクト比 (0.73) とほぼ一致した。一方の部分 LP 処理材では約 1.11 となり、試験片内部方向へ優先的にき裂が進展した様子が明らかである。

両者のき裂進展挙動を定量的に評価するため、表面方向へのき裂進展速度と、内部方向へのき裂進展速度をそれぞれ算出した。算出に用いた模式図を Fig. 14 に示す。両者の表面き裂長さがほぼ等しい状態で評価するため、non-LP 材ではレプリカ観察の結果、表面き裂長さが $2a_1 = 3.45\text{mm}$ となった追加疲労繰返し数 4.5×10^4 回のき裂形状を評価対象とした。予き裂の半径方向き裂長さ b_0 は両者ともアスペクト比 0.73 を用いて算出し、追加疲労繰返し後の半径方向き裂長さ b_1 は、 μCT の再構成画像より得られたアスペクト比を用いて算出した。

Fig. 12 Surface crack of LP (part) specimen.

Fig. 13 Image of fatigue crack by μCT technique.

Fig. 14 Pattern diagrams of fatigue crack propagation.

両試験片における追加疲労試験全体の平均的なき裂進展速度（表面き裂の進展速度 da/dN と半径方向き裂進展速度 db/dN ）を算出した結果を Table 3 に示す。non-LP 材の表面き裂の進展速度 da/dN に対して部分 LP 処理材の値は約 1.4 倍のき裂進展速度となっているが、一方の半径方向き裂進展速度 db/dN は、実に 4 倍ものき裂進展速度である。

き裂進展速度の高速化は、当然の事ながら破断寿命を短寿命化させる要因となりうる。予き裂長さ $2a_0 =$ 約 2.5

Table 3 Crack propagation rate.

		non-LP	LP(part)
Before additional testing	$2a_0$ (mm)	2.62	2.57
	aspect ratio b_0/a_0	0.73	0.73
	b_0 (mm)	0.96	0.94
After additional testing	ΔN (cycle)	4.5×10^4	3.0×10^4
	$2a_1$ (mm)	3.45	3.37
	da/dN (m/cycle)	9.2×10^{-9}	1.3×10^{-8}
	aspect ratio b_1/a_1	0.76	1.11
	b_1 (mm)	1.31	1.87
	db/dN (m/cycle)	7.8×10^{-9}	3.1×10^{-8}

mm を持つ DG-hole 材を 130MPa にて追加試験すると、平均して 1.5×10^5 回で疲労破断するのに対し、部分 LP 処理材を用意して同様の追加疲労試験を実施した結果、 4.3×10^4 回の早期に疲労破断した。このき裂進展速度の高速化は、小型試験片に部分的に LP 処理を施した事で試験片断面に圧縮残留応力と引張残留応力が不均一に生じ、き裂開口方向（モード I）の曲げモーメントが発生して、引張平均応力がき裂面に作用した結果と考えられる。同一の小型試験片であってもき裂面全体をカバーするように LP 処理した場合には、前報^{7), 8)}で示したように表面（円周）方向、内部方向ともに、き裂の進展を抑制することが可能である。また比較的大型の試験片であれば残留応力分布も異なるため、部材の寸法も重要なパラメータとなるであろう。

このように、表面処理材の疲労特性を定量的に評価するためには、処理対象とする部材の寸法、き裂の形状、試験片内部の残留応力分布、ひずみ分布とき裂の進展挙動について調査し、総合的に判断する必要がある。放射光は、このような情報を非破壊的に提供することが可能であり、表面処理材の疲労破壊挙動や内部起点型疲労破壊のメカニズム解明に対する有用な手段として期待される。

4 結 言

鋳造アルミニウム合金 AC4CH に導入した疲労予き裂の進展を抑制するためにレーザピーニング処理を施し、疲労試験を実施した結果、以下の知見を得た。

(1) 予き裂を有する AC4CH 鋳造アルミニウム合金に対するレーザピーニング処理は、予き裂の進展を抑制させるのに十分な効果がある。予き裂先端の最大応力拡大係数が約 $5\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 以下であれば、LP 処理によってき裂の進展をほぼ停止させることが可能である。この疲労き裂進展抑制効果は、処理によって付与された圧縮残留応力の影響である。

(2) LP 処理によって AC4CH の表面近傍は顕著な塑性変形を生じるため、表面近傍に生じた鋳造欠陥の寸法を縮小させる効果も期待できる。

(3) 予き裂材に LP 処理を施す場合、条件によってはき裂進展を加速させる可能性があるため、試験片の寸法、き裂形状のみならず、導入される残留応力の分布に注意して施工方法等を決定する必要がある。

本研究の一部は(財)高輝度光科学研究センター (JASRI) の大型放射光施設 (SPring-8) の産業用ビームライン (BL19B2) で実施した課題番号 2005B0886 の研究成果である。実験に際しては保田 陽君 (当時、電通大学部生)、田中寛大君ならびに高橋和馬君 (当時、武蔵工大院生)、そして内藤英樹氏 (東芝プラントシステム) に多大なご協力をいただいた。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 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", *Materials Science and Engineering : A*, Vol.417, pp.334-340 (2006).
- 2) Y. Sano, K. Akita, K. Masaki, Y. Ochi, I. Altenberger and B. Scholtes, "Laser peening without coating as a surface enhancement technology", *Proceedings of the 4th International Congress on Laser Advanced Materials Processing*, CD-ROM, Kyoto (2006).
- 3) Y. Ochi, K. Masaki, T. Matsumura, Y. Kumagai, T. Hamaguchi and Y. Sano, "Fatigue strength improvement by peening treatment in degassing processed cast aluminum alloys", *International Journal of Modern Physics B*, Vol.20, pp.3593-3598 (2006).
- 4) T. Adachi, M. Shimanuki, H. Taguchi and Y. Sano, "Study of fatigue improvement by laser peening for aircraft structure parts", *Proceedings of 2006 KSAS-JSASS Joint International Symposium on Aerospace Engineering*, CD-ROM, Busan (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*, Vol.55, pp.706-711 (2006).
- 6) K. Masaki, Y. Ochi, T. Matsumura and Y. Sano, "Effects of laser peening treatment on high cycle fatigue property of degassed processed cast aluminum alloy", *Materials Science and Engineering : A*, Vol.468-470, pp.171-175 (2007).
- 7) K. Masaki, Y. Ochi, T. Matsumura, Y. Sano, K. Akita and K. Kajiwar, "Retardation of fatigue crack growth on AC4CH cast aluminum alloy by laser peening and visualization of fatigue crack with micro tomography (μ CT) technique", *Proceedings of the 28th Symposium on Fatigue*, Nagoya, pp.160-164 (2006).
- 8) Y. Sano, M. Obata, K. Akita, K. Masaki, Y. Ochi, H. Suzuki, M. Sato and K. Kajiwar, "Characterization of laser peened materials by X-Ray and neutron diffraction techniques", *Proceedings of International Symposium on Advanced Fluid/Solid Science and Technology in Experimental Mechanics* CD-ROM, Sapporo, (2006).
- 9) K. Masaki, Y. Kumagai, Y. Ochi, T. Matsumura and T. Hamaguchi, "Influence of shot peening treatment on high-cycle fatigue properties of degassing processed AC4CH aluminum alloy", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.54, pp.1255-1261 (2005).
- 10) Y. Murakami, "Stress Intensity Factors Handbook, II", p.657-658 (1986) Pergamon Press.
- 11) M. Shiratori, T. Miyoshi, Y. Sakai and G. R. Zhang, "Analysis of stress intensity factors for surface crack subjected to arbitrarily distributed surface stresses", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.53, pp.779-785 (1987).
- 12) K. Tokaji, Z. Chen and T. Horimoto, "Stress ratio dependence of fatigue crack initiation and small crack growth in cast aluminium alloy AC4CH", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.51, pp.279-285 (2002).