

## 構造材内部欠陥を起点とする疲労き裂のマイクロ CT による 可視化と破壊メカニズムの検討

### Visualization of fatigue cracks from inside defects by micro-CT and investigation of fracture mechanism of structural materials

佐野 雄二<sup>a</sup>, 政木 清孝<sup>b</sup>, 梶原 堅太郎<sup>c</sup>, 久保 達也<sup>a</sup>, 田澤 俊之<sup>a</sup>, Igor Altenberger<sup>d</sup>  
Yuji Sano<sup>a</sup>, Kiyotaka Masaki<sup>b</sup>, Kentaro Kajiwara<sup>c</sup>, Tatsuya Kubo<sup>a</sup>, Toshiyuki Tazawa<sup>a</sup>, Igor Altenberger<sup>d</sup>

<sup>a</sup>榎東芝, <sup>b</sup>沖縄工業高等専門学校, <sup>c</sup>財高輝度光科学研究センター, <sup>d</sup>German University in Cairo  
<sup>a</sup>Toshiba Corporation, <sup>b</sup>Okinawa National College of Technology, <sup>c</sup>JASRI, <sup>d</sup>German University in Cairo

SPring-8 を使用した断層撮影 (CT) により, 鋳造アルミニウム合金 (AC4CH) 試験片内部の鋳造欠陥の形状・位置を調査した. その結果から, 疲労き裂の発生予測を行い, 内部き裂が発生する可能性の高い試験片を選定した. 試験片の表面をレーザピーニングにより強化し, 疲労負荷と CT を交互に繰り返すことによって内部き裂発生の様子を観察した. 微細な欠陥が多数集合して大きな欠陥を形成している場合, 従来の欠陥評価手法では必ずしもき裂の発生を正しく予測できないことがわかった.

キーワード: 内部欠陥, 疲労き裂, 応力拡大係数, 断層撮影, 可視化

#### 1. はじめに

構造物の損傷は疲労によることが多く, 表面から破壊する場合は殆どである. このため, 重要な構造物では, ピーニング等の表面処理を施して強度を高めている. しかしながら表面の強度を高めていくと, き裂が内部から発生することがある. 材料内部の微細な初期き裂は検査で見つけることが難しいため, この場合には構造物が内部から突然破壊して大きな災害に結びつく可能性がある.

本研究では, 高輝度・高エネルギーで平行度が高い SPring-8 の放射光の特徴を活用して, 吸収と屈折コントラスト効果を併用したマイクロ CT を行うことにより, 材料内部の微細なき裂とその進展の様子を可視化して破壊力学的に評価する新しい手法を開発し, 構造物を安全に設計するための基盤技術を確立することを目的とする.

その第一歩として, 我々は 2005B~2006B の戦略活用プログラム課題および 2007A の重点産業利用課題で, マクロサイズの試験片 (AC4CH アルミニウム合金) の表面に導入したマイクロな疲労き裂を可視化する実験を行った<sup>1-7)</sup>. その結果, SPring-8 の利用によってき裂の形状と進展の挙動を非破壊で画像化できることを確認した. また, 材料表面および内部の残留応力分布を制御すれば, き裂の発生や進展を制御できることを確認した.

2007B および 2008A の重点産業利用課題では, 内部欠陥を起点としたき裂の発生とその進展に着目した実験を 1 年課題として実施した. まず 2007B で各試験片に内在する欠陥をマイクロ CT により可視化し, 適切なサイズの内部欠陥を有する試験片を選択した. 次に, 内部から疲労き裂を発生させるため, 試験片にレーザピーニング処理を施し, 表面に高い圧縮の残留応力を付与した<sup>3,8,9)</sup>. 2008A ではその試験片を使用して, 疲労負荷とマイクロ CT による断層撮影を交互に繰り返すことにより, 内部起点による疲労き裂の再現とその可視化を行った.

#### 2. 試験片

供試材には SPring-8 におけるこれまでのき裂可視化実験<sup>1-7)</sup>と同じく, Al-Si-Mg 系鋳造アルミニウム合金 (AC4CH) を使用した. 試験片内部からき裂を発生させるため, 鋳造時の脱ガス処理 (Degassing) を行わず, 鋳造欠陥を多く含む供試材を作製した. 疲労試験片の形状・寸法を図 1 に示す. 試験片ゲージ部 (切り欠き部) の最小直径は 7mm である.

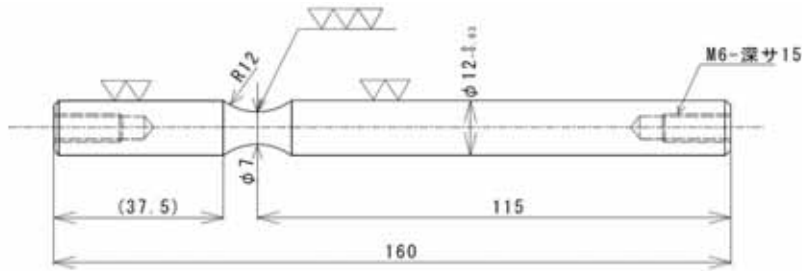


図1 AC4CH 試験片の形状および寸法

### 3. マイクロ CT による内部欠陥の事前評価 (2007B)

内部き裂の発生とその可視化実験 (2008A) に供する試験片を選定するため、2007B では各試験片ゲージ部の断層撮影を行い、内在する鑄造欠陥の形状・寸法を評価した。

#### 3.1 測定方法

準備した 19 体の試験片について、試験片ゲージ部に内在する欠陥を可視化するため、BL19B2 第 1 ハッチで断層撮影 (マイクロ CT) を行った。測定のレイアウトを図 2 に示す。X 線エネルギーは 28keV、試験片と検出器 (蛍光面) の距離は 800mm を標準とした。投影データは 0~180 度まで 0.5 度ごとに採取し、データ積算時間は 0.5 秒/frame とした。画像再構成アルゴリズムはフィルタード・バックプロジェクションを使用した。使用した CCD カメラの有効画素数は横 3000 × 縦 1400 であり、実効的なピクセルサイズは約 2.85 $\mu$ m であった。視野は横 8.55mm × 縦 3.99mm である。

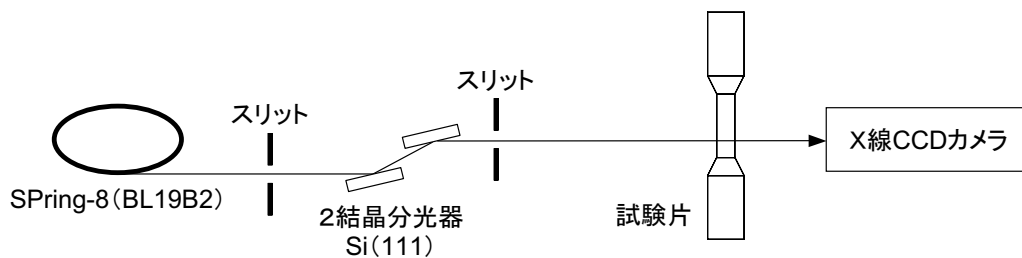
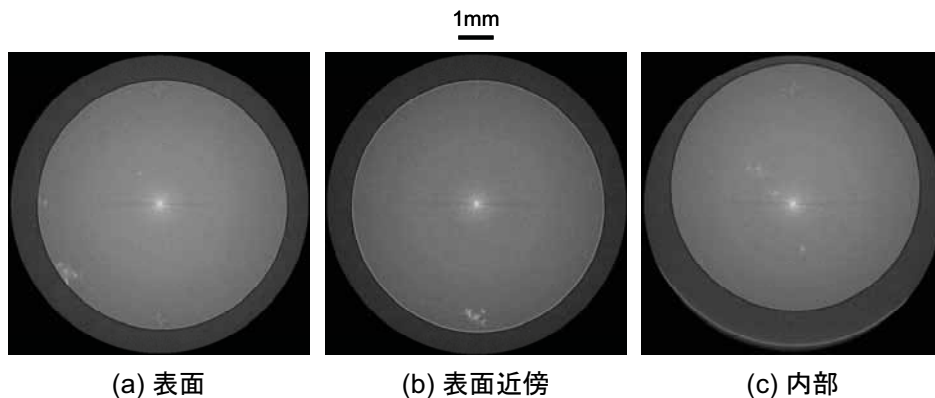


図2 マイクロ CT 測定レイアウト (BL19B2, 第 1 ハッチ)

#### 3.2 測定結果

マイクロ CT による断層撮影および画像再構成処理の結果、AC4CH 試験片に内在する鑄造欠陥を 3 次元的に可視化することに成功した。円筒状試験片 (図 1 参照) の軸方向から欠陥を透視した像を図 3 に示す。白く表示されている部分が鑄造欠陥 (回転中心は除く) であり、(a) は表面に、(b) は表面近傍に、(c) は内部に鑄造欠陥のあることがわかる。



(a) 表面

(b) 表面近傍

(c) 内部

図3 マイクロ CT による鑄造欠陥の可視化例 (AC4CH)

#### 4. 欠陥評価および試験片の選定

破壊力学パラメータである応力拡大係数を使用して、2007B で可視化した試験片内部の鋳造欠陥が疲労破壊の起点となりうるか否かを判定した。すなわち、欠陥の形状と応力から算出した応力拡大係数が AC4CH の疲労き裂発生下限界値 ( $1.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ )<sup>6,10,13)</sup>以上のものを「内部から破壊する可能性がある試験片」とし、3 体を選定した。選定した試験片には、表面からき裂が発生することを避けるため、表面にレーザーピーニング処理を施し (詳細は後述) 2008A の試験片とした。

選定の基準となる鋳造欠陥の応力拡大係数は、それぞれの欠陥の存在位置と軸方向への投影面積から、式 1 に示す村上らの式<sup>14)</sup>により算出した。

$$K_{I\max} = F_{loc} \sigma_0 \sqrt{\pi \sqrt{\text{area}}} \quad (1)$$

ここで  $K_{I\max}$  : 応力拡大係数最大値 [MPa $\sqrt{\text{m}}$ ]  
 $F_{loc}$  : 欠陥の存在位置に関する係数  
           表面上に露出もしくは表面上に接する場合 0.65  
           試験片内部に存在する場合 0.50  
 $\sigma_0$  : 欠陥の対象箇所における作用応力 [MPa]  
 $\sqrt{\text{area}}$  : 欠陥の軸方向投影面積の平方根 [m]

である。

作用応力 ( $\sigma_0$ ) は、レーザーピーニング処理した AC4CH の疲労限度  $160 \text{ MPa}$ <sup>6,10,12)</sup>より  $20 \text{ MPa}$  高い  $180 \text{ MPa}$  を疲労負荷の応力振幅とし、その値にレーザーピーニング処理によって生じる残留応力を加味した値とした。また、鋳造欠陥は複雑な形状であるため、村上らの方法に基づいて包絡線の面積を代表面積とし、 $\sqrt{\text{area}}$  を算出した。結果の一例を図 4 に示す。この例では鋳造欠陥 No.3 と No.9 の応力拡大係数がき裂発生下限界値 ( $1.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ) より大きいため、この鋳造欠陥から疲労き裂が発生すると予測される。No.7 および No.10 に関しては、鋳造欠陥そのものは他の欠陥に比べてより表面近傍に位置しているものの、応力拡大係数が  $1.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  以下であり、レーザーピーニング処理によって欠陥寸法の縮小も見込まれるため、き裂は発生しないと考えられる。

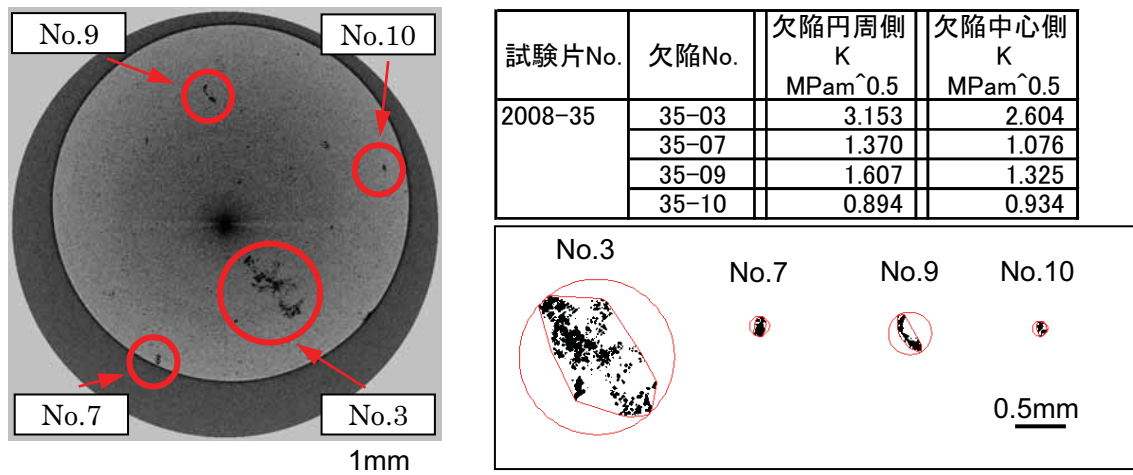


図 4 鋳造アルミニウム合金試験片 (AC4CH) 内部欠陥の評価例

#### 5. レーザピーニング処理

表面上に圧縮残留応力を付与することにより、試験片表面からのき裂発生を防ぎ内部からき裂を発生させるため、選定した 3 体の試験片に対してレーザーピーニング処理を行った。

レーザーピーニングは、従来の AC4CH に関する研究<sup>1-7,10-12)</sup>と同一の条件で行った。すなわち、Nd:YAG レーザの第 2 高調波 (波長:  $532 \text{ nm}$ , パルス幅: 約  $8 \text{ ns}$ , 繰り返し:  $60 \text{ Hz}$ ) を水中に設置した試験片のゲージ部 (長さ: 約  $15 \text{ mm}$ ) に照射した。レーザー照射の条件は、パルスエネルギー:

100mJ, 照射スポット径: 0.6mm $\phi$ , 照射密度: 27 パルス/mm<sup>2</sup>である. レーザピーニング処理により, AC4CH 表面の残留応力は 200~300MPa 程度の圧縮となり, 表面から約 1mm の深さでほぼ 0 となることが期待される<sup>3)</sup>.

## 6. マイクロ CT による内部き裂の可視化 (2008A)

2007B で選定した 3 体の試験片にレーザピーニング処理を施し, 2008A で疲労負荷と断層撮影を交互に繰り返すことにより, 内部起点による疲労き裂の再現とその可視化を試みた.

### 6.1 測定方法

測定方法, レイアウト (図 5) は 2007B とほぼ同等であるが, 試験片と検出器 (蛍光面) の距離は 400mm を標準とした. また, より鮮明なき裂像を得るため, 投影データは 0~180 度まで 0.2 度ごとに採取し, データ積算時間は 0.6 秒/frame (検出器がオーバーフローしない範囲) に延長した.

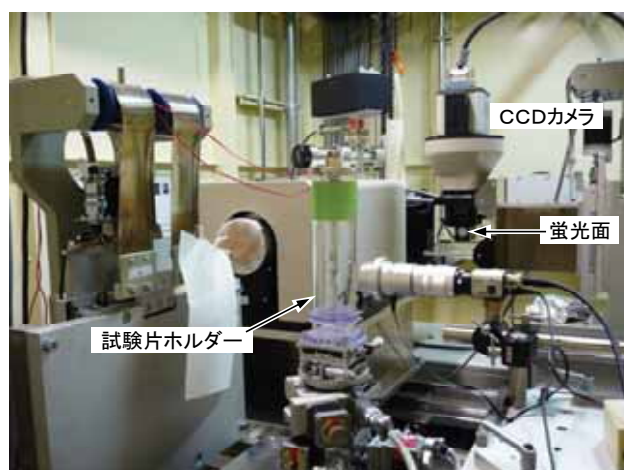


図 5 2008A 測定レイアウト

試験片は図 5 に示す専用のホルダーを使用して回転ステージに固定した. このホルダーは X 線に対してはほぼ透明であり, 棒状の試験片を回転ステージ上に保持するとともに, 軸方向 (上下方向) に引張の荷重を与える機能を持っている. これにより, 水平方向のき裂をわずかに開口させ, より明瞭なき裂像を得ることができる. なお, ホルダーにはひずみゲージを貼り付け, 試験片に与える軸方向の引張荷重を制御した.

ビームタイムを有効活用するため, 使用したビームライン (BL19B2) の傍らに小型の回転曲げ疲労試験機を持ち込んだ. 外観を図 6 に示す. 約 500 mm 四方の大きさで, 独立して同時に 2 体の疲労試験が可能な片持ち式の試験機である. 回転曲げにより 1 分間に 3000 回 (3000 rpm) の正弦波状の引張-圧縮荷重を試験片に負荷することができる.



図 6 回転曲げ疲労試験機の外観 (左) と試験片破断後の様子 (右)

## 6.2 測定結果

選定した3体の試験片について2008AでマイクロCTによる断層撮影を順次行い、図4に示した試験片(No. 2008-35)について内部の铸造欠陥から発生した疲労き裂を可視化することに成功した。結果の一例を図7に示す。(a)はスライス像、(b)は試験片を軸方向から透視した像、(c)は破断面の光学顕微鏡像である。図7(a)で内部欠陥と標記した部分(楕円内)は、図7(b)の欠陥No.3の存在する箇所であり、疲労によりき裂の開口が確認された。欠陥No.3は、レーザピーニング処理前の透視像(図4)と比較すると、表面側の欠陥が消滅して全体的に小さくなっていることが確認される。破断面を観察した結果、欠陥No.3の存在していた箇所(図7(c)の円中)では擬へき開割れが観察され、さらに組織中に小さなボイドが無数に発生していることが確認された。

今回の試験片No. 2008-35は、4章の評価結果に反して欠陥No.3が主き裂とならず、異なる場所が疲労による内部破壊の起点となった。き裂発生起点となった場所にはマイクロCTでは铸造欠陥が観察されなかったが、SEMにより破断面を観察した結果、面状の铸造欠陥が観察された。欠陥が面状でほとんど空隙が存在していなかったため、マイクロCTでは観察できなかったものと考えられる。

マイクロCTによって観察された比較的大きな铸造欠陥No.3が疲労き裂の発生起点とならなかった理由について考察するため、欠陥No.3を詳細に検討した。欠陥No.3の拡大図とその欠陥を立体視した結果を図8に示す。欠陥No.3は全体として大きな欠陥を形成してはいるが、小さなボイド状の欠陥が基地組織中に立体的に分散し、欠陥どうしの間隔が広いことがわかった。4章では、全体を一つの大きな欠陥として荷重方向に対する投影面積で応力拡大係数を評価したが、その結果で疲労き裂の発生・進展を予測することは、この場合には妥当でないことがわかった。

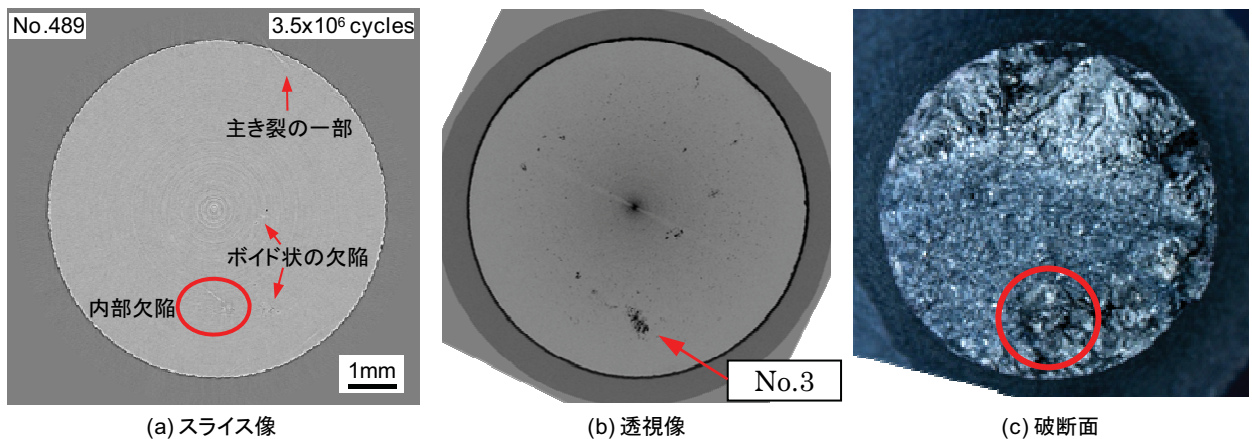


図7 AC4CH 試験片内部欠陥の可視化結果と破断面

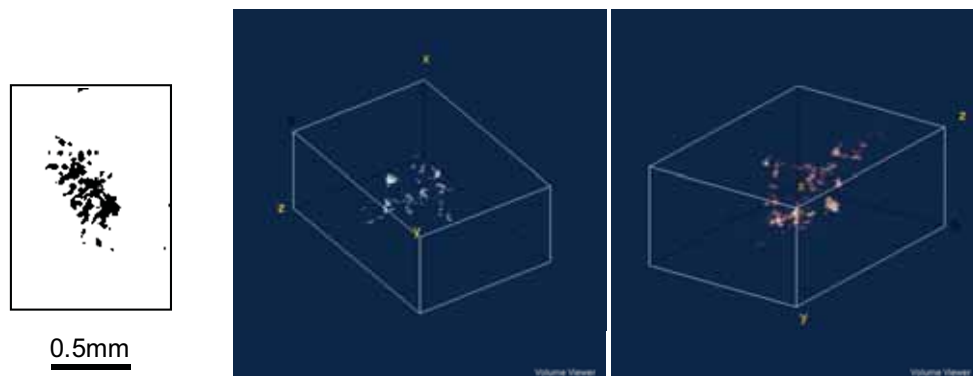


図8 内部欠陥の拡大図とその3D像

## 7. おわりに

「初期内部欠陥の可視化」「き裂進展評価」「レーザピーニング処理」「内部き裂の発生とその進展の可視化」の一連の研究を 2007B および 2008A の 1 年課題として実施した。その結果、高輝度・高エネルギーで平行度が高い SPring-8 の放射光を活用することにより、これまで可視化が難しかったマクロな試験片の内部で発生したミクロな疲労き裂を可視化することに成功した。しかしながら、微細な欠陥が集合して大きな欠陥を形成しているような場合、全体の欠陥寸法から応力拡大係数を算出する従来のき裂進展評価手法では、正しくき裂の進展を予測できない場合のあることがわかった。

今後は、本 1 年課題における測定結果を詳細に検討し、内部き裂の発生条件の把握、3 次元なき裂形状とその進展評価など実施する。また、本 1 年課題の成果をもとに更に詳細な試験データを取得し、今回明らかになったような複雑な欠陥に対する評価方法を検討する。更には、これらの結果を有限要素解析によるき裂進展評価と組合せることにより、内部からき裂が発生する場合も考慮した構造物の安全設計の基盤技術の確立を図る。

## 参考文献

- 1) 佐野雄二, 政木清孝, 秋田貢一, 久保達也, 佐藤眞直, 梶原堅太郎: レーザピーニング処理した材料の高エネルギー放射光による非破壊評価, 放射光, **21** (2008), pp.270-278.
- 2) K. Masaki, Y. Sano, Y. Ochi, K. Akita and K. Kajiwara: Investigation of Fatigue Crack Behavior with Synchrotron Radiation on AC4CH Casting Aluminum Alloy, *J. Solid Mech. Mater. Eng.*, **2** (2008), pp.1104-1113.
- 3) 佐野雄二, 政木清孝, 越智保雄, 秋田貢一, 梶原堅太郎: 放射光を使用したマイクロ CT によるアルミニウム合金疲労き裂の可視化, 材料, **57** (2008), pp.395-400.
- 4) Y. Sano, M. Obata, K. Akita, K. Masaki, Y. Ochi, H. Suzuki, M. Sato and K. Kajiwara: Characterization of Laser-peened Materials by Synchrotron Radiation and Neutron Diffraction Techniques, *Jikken Rikigaku*, **7** (2007) pp.61-67.
- 5) Y. Ochi, K. Masaki, T. Matsumura, Y. Sano, K. Akita and K. Kajiwara: Effects of Laser Peening on Fatigue Crack Behaviors in Pre-Cracked Cast Aluminum Alloy, *Key Eng. Mater.*, **345-346** (2007) pp.255-258.
- 6) 政木清孝, 越智保雄, 松村隆, 佐野雄二, 秋田貢一, 梶原堅太郎: 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, 材料, **56** (2007), pp.1133-1138.
- 7) Y. Sano and K. Masaki: Three-dimensional Imaging of Fatigue Cracks by Micro-tomography with Refractive Contrast Effect, *SPring-8 Research Frontiers 2006*, pp.151-152.
- 8) Y. Sano, K. Akita, K. Masaki, Y. Ochi, I. Altenberger, B. Scholtes: Laser Peening without Coating as a Surface Enhancement Technology, *J. Laser Micro/Nanoengineering*, **1** (2006), pp.161-166.
- 9) 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, *Mater. Sci. Eng. A*, **417** (2006), pp.334-340.
- 10) K. Masaki, Y. Ochi, T. Matsumura and Y. Sano: Effects of Laser Peening Treatment on High Cycle Fatigue Properties of Degassing-processed Cast Aluminum Alloy, *Mater. Sci. Eng. A*, **468-470** (2007), pp.171-175.
- 11) 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, *Int. J. Mod. Phys. B*, **20** (2006) pp.3593-3598.
- 12) 政木清孝, 越智保雄, 熊谷洋平, 佐野雄二, 内藤英樹, 松村隆: 溶湯処理鋳造アルミニウム合金の疲労特性に及ぼすレーザピーニングの影響, 材料, **55** (2006), pp.706-711.
- 13) 戸梶恵郎, 陳振中, 堀本武志: 鋳造アルミニウム合金 AC4CH における疲労き裂発生および微小き裂成長の応力比依存性, 材料, **51** (2002), pp.279-285.
- 14) 村上敬宜: 金属疲労 微小欠陥と介在物の影響, (1993), 養賢堂.