

# レーザー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

佐野 雄二	東芝 電力・社会システム技術開発センター	〒235-8523 神奈川県横浜市磯子区新杉田町 8
政木 清孝	沖縄工業高等専門学校 機械システム工学科	〒905-2192 沖縄県名護市辺野古905
秋田 貢一	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 1-28-1
久保 達也	東芝 電力・社会システム技術開発センター	〒235-8523 神奈川県横浜市磯子区新杉田町 8
佐藤 眞直	高輝度光科学研究センター	〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1
梶原堅太郎	高輝度光科学研究センター	〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

**要旨** 高エネルギー放射光の侵入深さを制御することにより、残留応力深さ分布を非破壊で測定した。この手法を適用して、レーザーピーニング処理した SUS304試験片に熱履歴を与えながら残留応力深さ分布をその場測定した。その結果、残留応力は安定で、673 K までの熱履歴を与えても十分圧縮側に保持されることを確認した。また、吸収と屈折コントラストを併用した断層撮影により、AC4CH 疲労試験片のき裂が進展していく様子を非破壊で画像化し、レーザーピーニング処理した材料ではき裂の進展が抑制されることを確認した。

## 1. はじめに

構造物の損傷は、疲労や応力腐食割れが原因となり、表面から起きる場合がほとんどである。このため、表面処理を施すことによって表面の特性を改善し、構造物を安全に運用する試みが行われている<sup>1)</sup>。

レーザーピーニングは表面処理の一つであり、ピークパワーの高いレーザーパルスを照射したときの機械的な衝撃作用を利用して材料の表面に圧縮の残留応力を形成する技術である。その結果、疲労強度が向上し応力腐食割れ(SCC)の発生や進展が抑制されるため、米軍用機のジェットエンジン・ファンブレードの高サイクル疲労対策<sup>2)</sup>や原子炉構造物の応力腐食割れ対策<sup>3)</sup>として利用が広がっている。

レーザーピーニングを始めとする表面処理の有効性は、実構造物への適用や種々の試験によって揺るぎないものとなっている。ところが、表面観察を除けば効果の確認は破壊的な手段によるのが一般的であり、確認した時点で試験の継続が不可能となるため、表面処理の効果を継続的に確認していくことはできない。

例えば残留応力に対する効果はその深さ分布を比較して評価することが重要であるが、深さ分布はX線回折と電解研磨を繰り返して求めるため、表面処理の効果を同一の試験片で確認することは難しい。また、構造物の余寿命評価において極めて重要なき裂の進展速度は、残留応力分布とともにき裂の三次元的な形状に依存するが、その形状を非破壊で精度よく測定することは一般には困難である。

従って、材料表面の残留応力分布やき裂形状を非破壊で測定する手法を確立すれば、表面処理の効果やその経時変化、外部負荷の影響などを直接確認することが可能となる。また、処理条件の最適化や処理メカニズムの解明、さらには材料の劣化現象の把握や劣化メカニズムの解明などにも寄与することは言うまでもない。

我々は SPring-8 の高エネルギー放射光を利用して、構造物の健全性に直接影響を及ぼす残留応力の深さ分布とき裂の三次元形状の非破壊測定を進めてきた<sup>4)</sup>。本稿では、レーザーピーニングの概要を紹介した後、SPring-8 を使用したこれらの測定の結果について報告する。

## 2. レーザーピーニングの概要

### 2.1 レーザーピーニングの基礎プロセス

レーザーピーニングには、あらかじめ材料の表面にコーティングを施す方法<sup>5,6)</sup> (Fig. 1(a), 米仏が開発) と、コーティングを施さずに直接レーザーを照射する方法<sup>7)</sup> (Fig. 1(b), 日本が開発) の二つの方法がある。以下では、まず Fig. 1(a)の表面にコーティングを施す方法について説明する。

アブレーション閾値を超える高ピークパワーのレーザーパルスを照射すると、コーティング層がプラズマ化して表面に高圧のプラズマが発生する。水中でこの操作を行うと、水の慣性がプラズマの膨張を妨げるため、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<sup>8)</sup>。

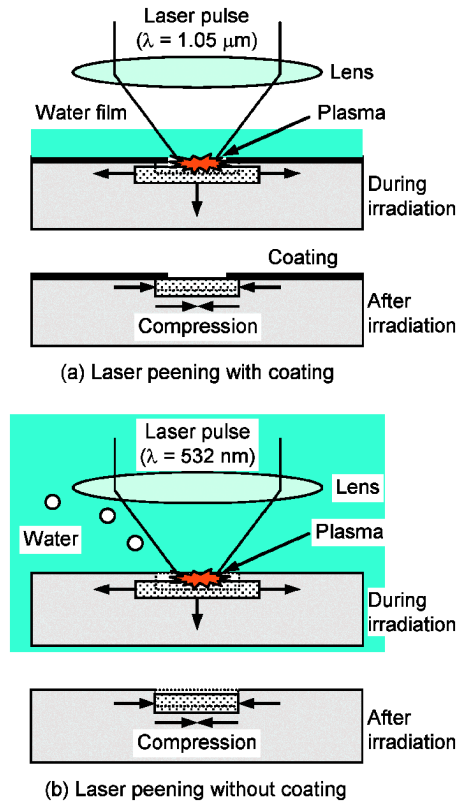


Fig. 1 Laser peening process with coating (a) and without coating (b).

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材料の表面が押し延ばされるように塑性変形し、未変形部による弾性拘束によって材料の表層に圧縮残留応力が形成される<sup>9)</sup>。

米国およびフランスでは、大出力のNd: glass レーザ(波長 $1.05\ \mu\text{m}$ )を使用している。この波長の光は水に吸収されやすいため、材料の表面に薄い水膜を形成した状態でレーザを照射し、水による減衰(吸収)を回避している。また、コーティング層には黒色ペイント等を使用してレーザ照射による材料表面の溶融や損傷を防ぐとともに、レーザの吸収率を高めている<sup>5,6)</sup>。

一方国内では、レーザの照射条件を最適化することにより、コーティングを必要としないプロセス(Fig. 1(b))が開発されている<sup>7)</sup>。水に吸収されにくいNd: YAG レーザの第2高調波(波長 $532\ \text{nm}$ )を使用することにより、水中の構造物への適用も容易である。また、欧米と比較してパルスエネルギーを二桁~三桁小さくすることにより、レーザ伝送路として光ファイバを使用することができる<sup>10)</sup>。

米仏および日本のレーザピーニング技術の比較をTable 1にまとめて示す。また、Fig. 2にレーザピーニング処理の様子を示す。ここでは水槽内に設置した試験片を二次元的に走査することによって、材料の表面に一様にレーザパルスを照射している。

Table 1 Laser peening processes in the USA, France and Japan

	with coating	without coating
Laser oscillator	Nd: glass ( $1.05\ \mu\text{m}$ )	Nd: YAG ( $532\ \text{nm}$ )
Pulse duration	$< 100\ \text{ns}$	$< 10\ \text{ns}$
Pulse energy	$\leq 100\ \text{J}$	$40\sim 250\ \text{mJ}$
Spot size	$\leq 19\ \text{mm}\phi$	$\leq 1.2\ \text{mm}\phi$
Delivery system	Mirror	Fiber or mirror
Developed in	USA, France	Japan

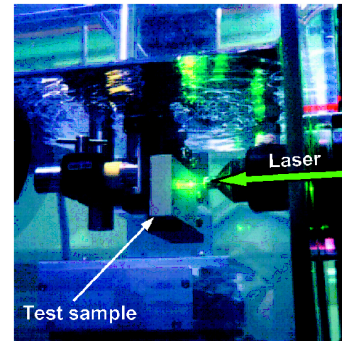


Fig. 2 Laser peening with water-penetrable green laser.

ピーニング技術には、多数の微細な金属塊(ショット)を材料の表面に高速で投射するショットピーニング、水中でキャビテーションが崩壊するときの衝撃力を利用するキャビテーションピーニングなどが知られているが、何れもランダムなプロセスの統計的な(平均的な)効果を期待している。一方、レーザピーニングはパルス毎の条件を精密に制御することが可能なため、効果が確実に再現性が高く、材料や形状に応じて処理条件を瞬時に変更することが可能である。また、ショットピーニングでは1ショットのエネルギーは高々 $1\ \text{mJ}$ 程度であるが、レーザピーニングは $100\ \text{mJ}$ 、場合によっては $100\ \text{J}$ と1ショットのエネルギーを桁違いに大きく設定することができる。このため、その効果はより深くまで達し、表面から $4\ \text{mm}$ 程度の深さまで圧縮残留応力を導入した例も知られている<sup>11)</sup>。

## 2.2 レーザピーニングの効果

レーザピーニングは材料の表面に様々な効果を及ぼす。ここでは、原子炉の構造材料として使用されているオーステナイトステンレス鋼を例にとり、残留応力、疲労強度および応力腐食割れ(SCC)に対するレーザピーニングの効果を説明する。なお、レーザピーニングは材料の表面にコーティングを行わずに実施した(Fig. 1(b))。

### 2.2.1 残留応力に対する効果

レーザピーニング処理したオーステナイトステンレス鋼SUS304の残留応力深さ分布をFig. 3に示す<sup>9)</sup>。処理条件は、パルスエネルギー： $200\ \text{mJ}$ 、照射スポット径： $0.8\ \text{mm}$ 、照射密度： $36\ \text{パルス}/\text{mm}^2$ である。レーザピーニン

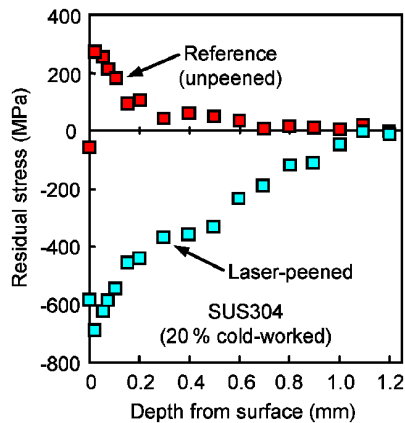


Fig. 3 Laser peening effect on residual stress depth profile of SUS304<sup>9)</sup>.

グ処理により、表面から約 1 mm の深さまで圧縮残留応力が形成されている。ここで、残留応力の深さ分布は X 線回折 ( $\sin^2 \psi$  法) と電解研磨を交互に繰り返して求めた。

### 2.2.2 疲労特性に対する効果

オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L の高サイクル疲労に対するレーザピーニング処理の効果を図 4 に示す<sup>7)</sup>。試験片には事前に二種類 (SR および FH) の熱処理を施し、回転曲げにより疲労強度を評価した。レーザピーニング処理の条件は、2.2.1 項と同一とした。FH (Full heat treatment) は結晶の均一化を目的とし、1373 K で 3600 s の真空焼鈍を行った。SR (Stress-relieving heat treatment) は機械加工により生じた残留応力を除去するため、1173 K で 3600 s の処理を行った。

疲労限度 (無限回繰り返しても材料が破壊されない最大の変動応力) は、未処理 (Reference) の SR 材が 240 MPa であるのに対してレーザピーニング処理 (Laser-peened) した SR 材は 340 MPa であり、疲労限度が約 1.4 倍向上した。また、FH 材では 190 MPa (Reference) が 320 MPa (Laser-peened) となり、疲労限度が約 1.7 倍向上した。

疲労強度については、SUS316L のほか、SUS304、後述の鋳造アルミニウム合金 AC4CH、構造用鋼材 SM490、モータ用電磁鋼板、チタン合金 Ti-6Al-4V などについても試験を行い、疲労強度の向上を確認している<sup>12,13)</sup>。

### 2.2.3 応力腐食割れに対する効果

レーザピーニング処理により材料の表面に圧縮残留応力が形成され、その結果として応力腐食割れ (SCC) の発生が防止できることを示すため、原子炉の環境を模擬した高温・高圧水中で応力腐食割れの加速試験を行った。なお、レーザピーニング処理の条件は、前項と同一である。

試験結果の一例を図 5 に示す<sup>14)</sup>。未処理の場合、Fig. 5

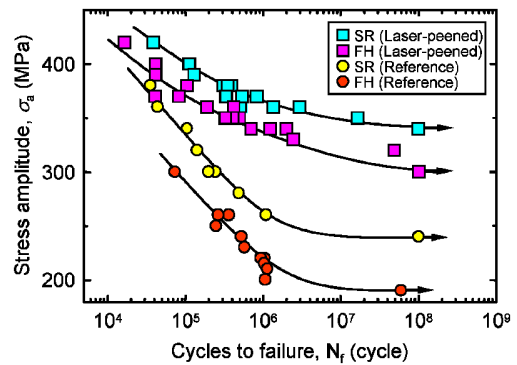


Fig. 4 Laser peening effect on fatigue strength of SUS316L<sup>7)</sup>.

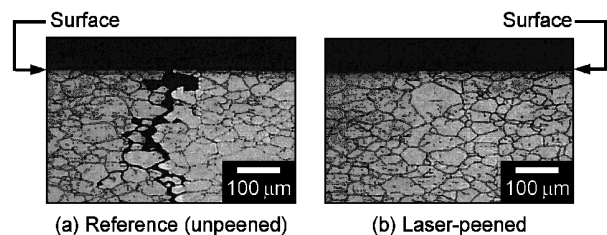


Fig. 5 Stress corrosion cracking test results on sensitized SUS304<sup>14)</sup>.

(a) のような結晶粒界に沿った典型的な応力腐食割れがすべての試験片 (7 体) に発生していた。一方、レーザピーニング処理した試験片 (7 体) には応力腐食割れは全く観察されず、SUS304 の応力腐食割れの発生を抑制することがわかった。原子炉で使用されている他の材料 (600 合金やその溶接金属) についても試験を行い、レーザピーニングが応力腐食割れの発生を抑制することを確認した。

また、応力腐食割れの進展に対する効果を確認するため、表面にあらかじめ応力腐食割れを発生させた試験片を準備し、レーザピーニング処理を行った後、応力腐食割れを加速する環境で試験を継続した。その結果、初期の応力腐食割れの深さが 1 mm 以下であれば、レーザピーニング処理によってその進展が確実に抑制されることを確認した<sup>7)</sup>。

## 3. 放射光による残留応力深さ分布の非破壊測定

構造物は何らかの機械的あるいは熱的負荷の下で使用されるため、供用期間中の残留応力分布の変化を予測することは、構造物を安全に設計・運用する上で極めて重要である。通常、残留応力の深さ分布測定は破壊的な手法によるため、その変化の確認には複数の試験片を使用している。このため、試験片のばらつきが測定結果に与える影響は不可避であり、非破壊での測定が強く望まれている。

我々は、平行度の高い (発散角が小さい) SPring-8 の放射光を利用して材料に対する X 線の侵入深さを厳密に

制御することにより、材料表層の残留応力深さ分布の精密非破壊測定を試みた<sup>15,16)</sup>。通常のX線管を線源とした場合、鉄系材料のX線の侵入深さは数 $\mu\text{m}$ 程度であるが、SPring-8の高エネルギー放射光を使用すれば、表面から数十 $\mu\text{m}$ 程度の深さまで非破壊で残留応力を測定することができる<sup>17)</sup>。

### 3.1 試験片およびレーザピーニング処理

供試材には、圧延により20%の冷間加工を施したオーステナイトステンレス鋼 SUS304を使用した。SUS304は初期に建設された原子力発電所の炉内構造物の材料として使用されており、溶接時の熱影響によって応力腐食割れの感受性を持つことが知られている。20%の冷間加工は、高速中性子の照射による材料の硬さ上昇を模擬したものである。試験片の寸法は30 mm $\times$ 40 mm、厚さ10 mmであり、グラインダで研削加工仕上げを行って、表面に大きな引張残留応力を導入した。

レーザピーニング処理は、Qスイッチ発振Nd:YAGレーザの第2高調波(波長:532 nm)を使用して、コーティングなしで行った(Fig. 1(b))。処理の条件は、パルスエネルギー60 mJ、照射スポット径0.7 mm、照射密度70パルス/mm<sup>2</sup>とし、試験片の片面全体を処理した。

### 3.2 測定方法

材料表層部の残留応力深さ分布を非破壊で測定するため、SPring-8の高エネルギー放射光をX線源とした侵入深さ一定法(Constant penetration depth method)を使用した。X線残留応力測定で一般的に使用されている $\sin^2\psi$ 法では、測定中に $\psi$ 角が変化してX線の侵入深さも変化するため、応力勾配の大きい材料の残留応力を正確に測定することは難しい。

侵入深さ一定法は、多軸ゴニオメータの動作を工夫することにより、X線の侵入深さを一定に保ちながら $\sin^2\psi$ 法による残留応力測定を行う方法である<sup>15,17)</sup>。ゴニオメータの軸をFig. 6のように定義すると、X線の侵入深さ( $D$ )は次式により表される。

$$D = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\cos \chi}{1/\sin \omega + 1/\sin(\theta - \omega)} \quad (1)$$

ここで、 $\mu$ は線吸収係数であり、 $\omega$ 、 $\chi$ 、 $\psi$ の間には

$$\cos \psi = \cos(\theta - \omega) \cdot \cos \chi \quad (2)$$

が成立する。Eq. (1)の $D$ が一定になるように $\psi$ と $\chi$ に対応する $\omega$ を決定することにより、X線の侵入深さを一定に保ちながら $\sin^2\psi$ 法による残留応力測定を行うことができる。

測定はSPring-8産業用ビームラインBL19B2の第2ハッチで行った。測定体系をFig. 7に、測定の様子をFig. 8に示す。X線のエネルギーは25 keV(波長0.0496 nm)とし、回折面は $\gamma\text{-Fe}$ (422)とした。 $2\theta \approx 39.4$ 度の回折X線をソーラスリットを介してシンチレーションカウンタで計測した。 $\psi = 0$ におけるX線侵入深さは15.7  $\mu\text{m}$ である。

ヒーターを使用して試験片に室温 $\rightarrow$ 562 K(289 $^{\circ}\text{C}$ ) $\rightarrow$ 673 K(400 $^{\circ}\text{C}$ ) $\rightarrow$ 室温の温度履歴を与え、その都度残留応力の深さ分布をその場測定して熱的安定性を評価した。加熱時には試験片にカプトドームを被せて温度の安定を図り、各温度で3600 s(1時間)以上保持した後、測定した<sup>4)</sup>。

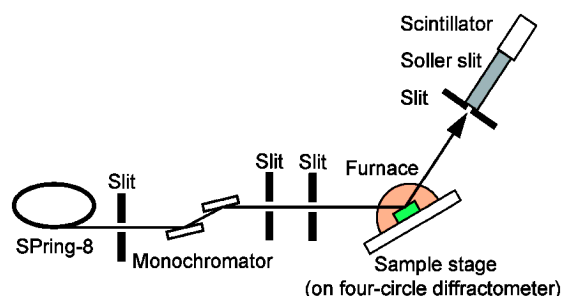


Fig. 7 Experimental scheme of constant penetration depth method.

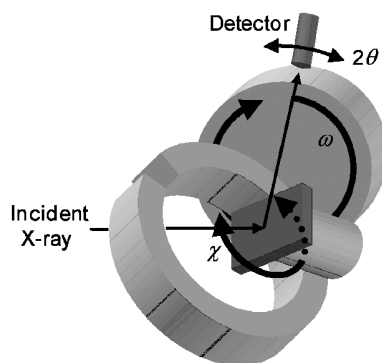


Fig. 6 Schematic view of four-circle diffractometer<sup>15)</sup>.

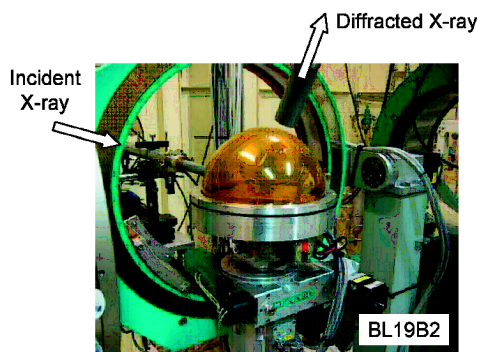


Fig. 8 Nondestructive measurement of residual stress depth profile at elevated temperature by constant penetration depth method.

### 3.3 残留応力深さ分布とその安定性

侵入深さ一定法を使用した残留応力深さ分布の測定結果を Fig. 9 に示す。横軸は X 線の侵入深さであり、材料による吸収で回折 X 線の強度が 1/e になる深さで定義した。縦軸は残留応力であり、 $\sigma_x$  はレーザをスキャンする方向の応力、 $\sigma_y$  はスキャンに垂直な方向の応力である。

米仏では、コーティングなしでレーザピーニングを行うと、強力なレーザパルスの照射によって材料の表層が熔融し、その後の冷却による収縮で表面から約 30  $\mu\text{m}$  の深さまで引張の残留応力状態になることが報告されている<sup>18-20)</sup>。今回、侵入深さ一定法を使用して表面層の残留応力深さ分布を精密に測定した結果、コーティングなしでレーザピーニング処理した場合においても、材料の表面は数百 MPa 程度の高い圧縮残留応力状態となることを確認した<sup>15)</sup>。また、試験片に 673 K (400°C) までの温度履歴を与えた結果、応力値はわずかに低下するものの残留応力分布は安定で、十分圧縮側に保持されることも確認した<sup>16)</sup>。なお、コーティングなしでレーザピーニング処理したときの特徴であるが、表面近傍の残留応力に異方性が生じ、 $\sigma_y$  の応力値 (絶対値) が  $\sigma_x$  より大きくなる場合がある。

## 4. $\mu\text{CT}$ による疲労き裂の可視化

構造物を長期間安全に使用していくためには、定期的な検査が肝要である。検査により構造物の表面にき裂が認め

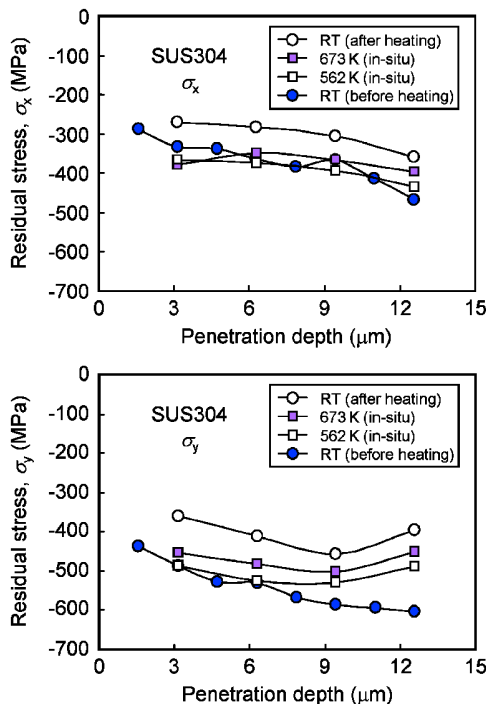


Fig. 9 Residual stress depth profile of laser-peened SUS304 before, during and after thermal loading<sup>16)</sup>.

られた場合には、従来の知見からき裂の深さを推定し、構造健全性に対する影響を評価する。一方、表面処理を施した材料は、き裂の形状やその進展の様子が通常と異なる可能性がある。そこで、SPring-8 の高エネルギー放射光を使用した  $\mu\text{CT}$  により、試験片の断層撮影を行って微細な疲労き裂を非破壊で画像化することを試みた<sup>21,22)</sup>。

### 4.1 試験片およびレーザピーニング処理

供試材には、自動車を始めとする輸送機器などで使用されている Al-Si-Mg 系鋳造アルミニウム合金 AC4CH を使用した。疲労試験片の形状・寸法を Fig. 10 に示す。また、疲労試験片からき裂可視化用のタブレット状試験片を作成する手順を Fig. 11 および Fig. 12 に示す。

き裂の発生位置を制御するため、疲労試験片の中央に直径 0.3 mm、深さ 0.3~0.5 mm のドリル穴を付与した。次に、応力振幅 130 MPa の回転曲げ疲労負荷を与え、試験片表面のき裂長さが約 2.5 mm の予き裂を周方向に導入した。半数の試験片にはき裂長さが 4~5 mm となるまで約  $10^5$  cycle の疲労負荷を更に与えて、参照材 (Reference sample) とした。残りの試験片には中央部分の長さ 50 mm にコーティングなしでレーザピーニング処理を行った

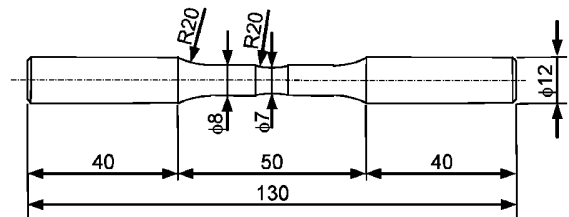


Fig. 10 Shape and dimensions of AC4CH fatigue samples.

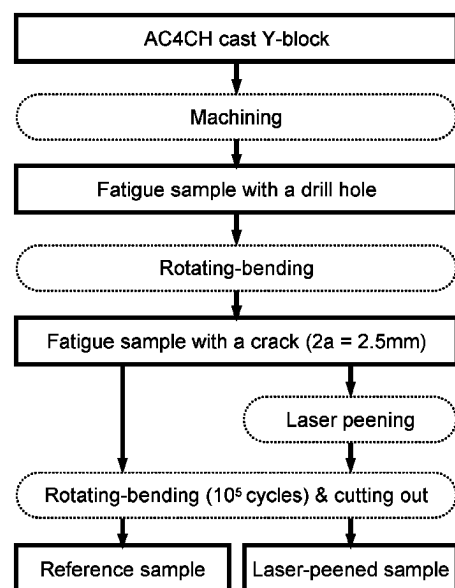


Fig. 11 Sample preparation for imaging of fatigue cracks.

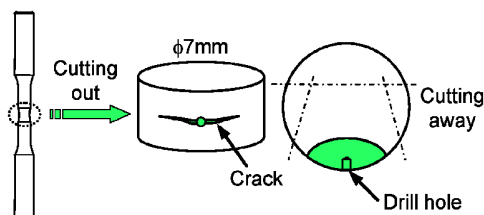


Fig. 12 Cutting out of samples for imaging experiment.

後、 $10^5$  cycle の疲労負荷を与えてレーザピーニング処理材 (Laser-peened sample) とした<sup>23)</sup>。レーザピーニング処理条件はパルスエネルギー100 mJ, 照射スポット径0.6 mm, 照射密度27パルス/mm<sup>2</sup>である。

$\mu$ CT による断層撮影では試験片の切断 (Fig. 12) は必ずしも必要ないが、き裂の透過像を各方向から自由に観察するため試験片中央部分のき裂を含む厚さ約4 mm をタブレット状に切り出し、さらに検出器の視野 (約6 mm × 6 mm) に納まるように切断した。なお、詳細は省略するが、タブレット作成時には疲労き裂がわずかに開口するような工夫を行った。

#### 4.2 実験方法

疲労き裂の可視化実験は、SPring-8 産業用ビームライン BL19B2 第3ハッチで行った。測定体系を Fig. 13 に示す。ベンディングマグネットから放出される放射光 (白色) を Si (111) モノクロメータで 28 keV に単色化して使用した。ベンディングマグネットから試験片までの距離は110 m, 試験片と検出器 (冷却 CCD カメラ) の距離は、屈折コントラストによるエッジの強調が期待できる距離 (800 mm) とした。CCD の画素数は1024 × 1024であり、検出器光学系の拡大率を考慮した実効ピクセルサイズ (画像解像度) は約6  $\mu$ m である。

データの積算時間は2 s/frame とし、0度から180度まで0.5度ステップで投影データを取得した。データ転送を含めた各投影データの測定時間は約10 sであった。検出器の出力にはバックグラウンドの補正を行うとともに、投影データを5回取得するたびに試験片を視野から退避させ、X線強度の絶対値を測定して投影データを校正した。画像再構成アルゴリズムには、フィルタード・バックプロジェクションを使用し、再構成した各スライス像のノイズは閾値操作により除去した。

#### 4.3 き裂の可視化とレーザピーニング処理効果の確認

試験片軸方向から見たき裂像の一例を Fig. 14 の上段に、ドリル穴を正面から見たときのき裂像を下段に示す。(a)は参照材 (レーザピーニング処理なし), (b)はレーザピーニング処理材であり、参照材については Fig. 15 に種々の角度から見たときのき裂像を示した。再構成した各スライス像には、き裂の存在によりX線透過率が大きく表

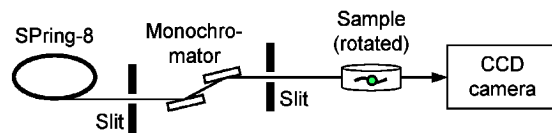


Fig. 13 Experimental setup of  $\mu$ CT for fatigue crack imaging.

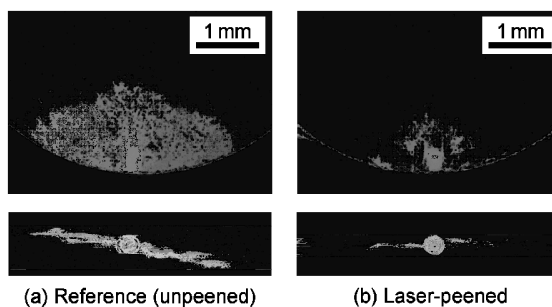


Fig. 14 3D image of fatigue crack in AC4CH samples<sup>22)</sup>.

示される部分の他に、屈折コントラストの効果により透過率が小さく表示される部分がある。Fig. 14 では、域値操作によりその両者を抜き出し、重ね合せて表示した。白い影がき裂の開口している領域であり、中央にはドリル穴が確認できる。

Fig. 14 (a) のき裂はほぼ半楕円状に進展し、画像から読み取った表面のき裂長さは参照材 (Reference sample) のき裂長さ (4~5 mm) とほぼ一致した。一方、(b) のレーザピーニング処理材 (Laser-peened sample) では、表面のき裂長さは予き裂の長さ (約2.5 mm) のままであった。従って、(b) ではレーザピーニング処理によって導入された圧縮残留応力の影響によりき裂の進展が抑制され、レーザピーニング処理後に与えた疲労負荷繰り返し ( $10^5$  cycle) では、予き裂はほとんど進展しなかったものと考えられる。なお、レプリカ法による表面き裂長さの測定も行い、 $\mu$ CT による再構成画像から予測されるき裂長さとほぼ一致することを確認した<sup>24)</sup>。

再構成画像に与える屈折コントラストの影響<sup>22)</sup> など、検討すべき点が多く残されているが、今回の実験により疲労き裂の形状を非破壊で測定できる可能性が示された。

上述のとおり  $\mu$ CT により疲労き裂の画像化が可能であることが確認できたため、疲労負荷とき裂の画像化を交互に繰り返して、き裂が発生・進展していく様子を観察した<sup>24)</sup>。結果の一例を Fig. 16 に示す。この図は Fig. 14 の上段と同じく、試験片を軸方向から見たものである。Fig. 16 (a) の A および B が製造欠陥であり、Fig. 16 (b) および (c) の表面近くで白く表示されている部分がき裂の開口部である。表面直下にあった製造欠陥 B から疲労き裂が発生し、そのき裂が順次進展していく様子を確認することができた。

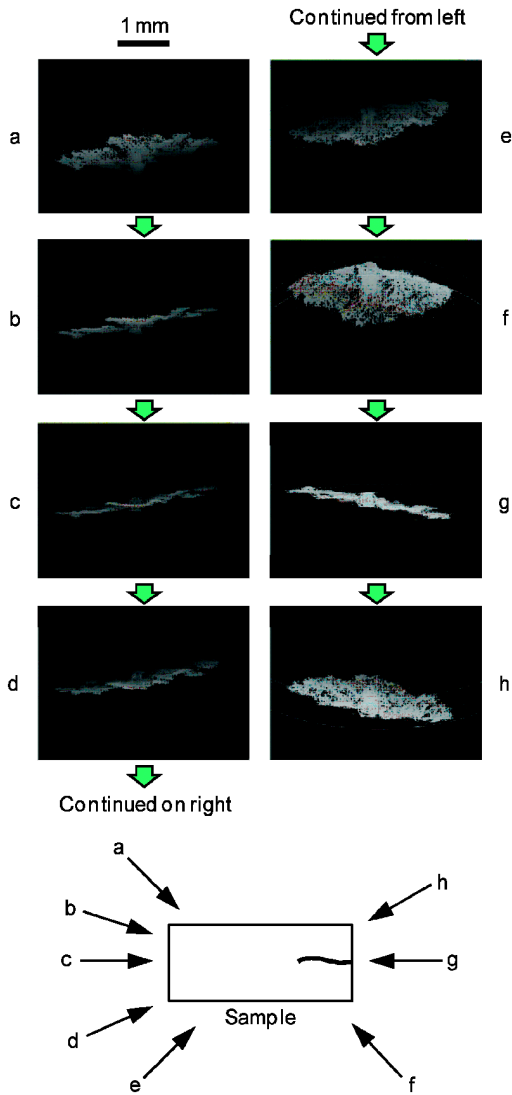


Fig. 15 Crack image in reference (unpeened) sample viewed from various directions.

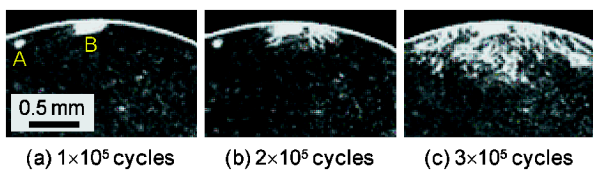


Fig. 16 Crack propagation in an AC4CH sample observed by  $\mu$ CT<sup>23)</sup>.

## 5. おわりに

残留応力の深さ分布および疲労き裂の進展に対するレーザーピーニング処理の効果を確認するため、SPring-8の高エネルギー放射光を使用して残留応力の非破壊測定および $\mu$ CTによるき裂の可視化実験を行った。その結果、以下の知見を得た。

(1) 侵入深さ一定法を使用して、レーザーピーニング処理したオーステナイトステンレス鋼 SUS304表面層の残留応力深さ分布を非破壊で測定した。その結果、コーティングなしでレーザーピーニング処理した場合においても、最表面の残留応力は数百 MPa の圧縮であることを確認した。また、室温から 673 K (400°C) までの熱負荷を与えても、表面層の応力値は低下するが、残留応力分布は十分圧縮側に保持されることを確認した。

(2) 鋳造アルミニウム合金 AC4CH 試験片表面の疲労き裂を  $\mu$ CT により可視化した。その結果、レーザーピーニング処理した試験片については、き裂の進展が抑制されることを確認した。また、表面直下の鋳造欠陥から疲労き裂が発生・進展していく様子を可視化することに成功した。

放射光による残留応力深さ分布の非破壊測定および  $\mu$ CT によるき裂の可視化実験は、(財)高輝度光科学研究センター (JASRI) 大型放射光施設 (SPring-8) の産業用ビームライン (BL19B2) で行った (課題番号: 2004A0806, 2004B0915, 2005B0886, 2006A0189, 2006B0187, 2007A1430)。

## 参考文献

- 1) V. Schulze and A. Niku-Lari: Shot Peening and other Mechanical Surface Treatments (IITT-International, 2005).
- 2) D. W. See et al.: Surf. Eng. **18**, 32 (2002).
- 3) N. Mukai et al.: Rev. Laser Eng. **33**, 444 (2005).
- 4) Y. Sano et al.: Jikken Rikigaku Special Issue **7**, 61 (2007).
- 5) A. H. Clauer et al.: Key Eng. Mater. **197**, 121 (2001).
- 6) P. Peyre et al.: Opt. Quant. Electron. **27**, 1213 (1995).
- 7) Y. Sano et al.: Mater. Sci. Eng. A, **417**, 334 (2006).
- 8) Y. Sano et al.: Nucl. Instrum. Methods B, **121**, 432 (1997).
- 9) Y. Sano et al.: J. At. Energy Soc. Japan **42**, 567 (2000).
- 10) M. Yoda et al.: Rev. Laser Eng. **28**, 309 (2000).
- 11) R. Fabbro et al.: J. Laser Appl. **10**, 265 (1998).
- 12) Y. Sano et al.: Proc. ASME Pressure Vessels and Piping Division Conf., Vancouver (2006).
- 13) Y. Sakino et al.: Proc. Int. Conf. on Welded Structures (ICWS), Miskolc (2008).
- 14) Y. Sano et al.: Key Eng. Mater. **345-346**, 1589 (2007).
- 15) M. Sato et al.: Proc. 9th Int. Conf. on Synchrotron Rad. Instrum. (SRI 2006), Daegu (2006).
- 16) Y. Sano and K. Akita: SPring-8 Res. Frontiers 2005, 127 (2006).
- 17) Y. Akiniwa et al.: J. Soc. Mater. Sci. Japan. **52**, 764 (2003).
- 18) Banaś et al.: Computer Methods and Experimental Measurements for Surface Treatment Effects (Computational Mechanics Publications, 1993) 171.
- 19) P. Peyre et al.: J. Mater. Sci. **33**, 1421 (1998).
- 20) P. Peyre et al.: Modeling Simul. Mater. Sci. Eng. **15**, 205 (2007).
- 21) Y. Sano and K. Masaki: SPring-8 Res. Frontiers 2006, 151 (2007).
- 22) Y. Sano et al.: J. Soc. Mater. Sci. Japan. **57**, 395 (2008).
- 23) Y. Sano et al.: Proc. Int. Symp. on Advanced Fluid/Solid Sci. and Technol. in Experimental Mechanics, Osaka (2007).
- 24) K. Masaki et al.: J. Solid Mech. Mater. Eng. **2**, 1104 (2008).

## ● 著者紹介 ●

**佐野雄二**

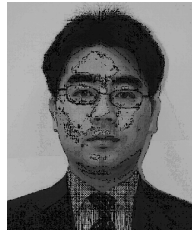
東芝 電力・社会システム技術開発センター 技監

E-mail: yuji.sano@toshiba.co.jp

専門：レーザ応用工学，原子力工学

**【略歴】**

1977年3月東京工業大学大学院理工学研究科原子核工学専攻修士課程修了。同年4月㈱東芝入社。2002年博士（工学）（大阪大学）。2006年4月より現職。

**久保達也**

東芝 電力・社会システム技術開発センター 金属材料開発部 主務

E-mail: tatsuya.kubo@toshiba.co.jp

専門：腐食工学，材料力学

**【略歴】**

1995年3月東北大学大学院機械工学第二専攻修士課程修了。同年4月㈱東芝入社。2004年7月より現職。

**政木清孝**

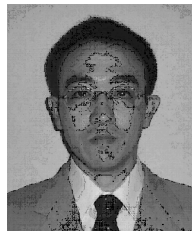
沖縄工業高等専門学校機械システム工学科 准教授

E-mail: masaki-k@okinawa-ct.ac.jp

専門：材料強度，表面改質処理，疲労

**【略歴】**

2000年3月電気通信大学大学院電気通信学研究科機械制御工学専攻博士後期課程修了，博士（工学）。同年4月電気通信大学大学院電気通信学研究科助手，2007年4月より現職。

**佐藤真直**

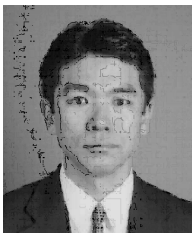
高輝度光科学研究センター 産業利用推進室 副主幹研究員

E-mail: msato@spring8.or.jp

専門：X線回折

**【略歴】**

1999年3月大阪大学大学院理学研究科博士後期課程終了，理学博士。1999年4月日本原子力研究所先端基礎研究センター博士研究員，2000年7月高輝度光科学研究センター着任。2004年4月より現職。

**秋田貢一**

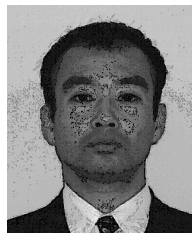
武蔵工業大学工学部機械システム工学科 教授

E-mail: kakita@sc.musashi-tech.ac.jp

専門：材料強度学

**【略歴】**

1990年3月東京都立大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了。1994年博士（工学）（東京都立大学）。1991年4月東京都立大学助手，2002年武蔵工業大学工学部講師，2003年同助教授を経て，2008年4月より現職。

**梶原堅太郎**

高輝度光科学研究センター 産業利用推進室 副主幹研究員

E-mail: kajiwara@spring8.or.jp

専門：X線トポグラフィ，X線イメージング

**【略歴】**

2003年3月九州工業大学大学院工学研究科博士後期課程物質工学専攻終了，博士（工学）。2001年4月高輝度光科学研究センター着任。2005年4月より現職。



---

# Nondestructive evaluation of laser-peened materials by high-energy synchrotron radiation

**Yuji SANO**

Power and Industrial Systems Research and Development Center,  
Toshiba Corporation 8, Shinsugita-cho, Isogo-ku, Yokohama 235-8523, Japan

**Kiyotaka MASAKI**

Department of Mechanical Systems Engineering, Okinawa National College of  
Technology 905, Henoko, Nago-shi, Okinawa 905-2192, Japan

**Koichi AKITA**

Department of Mechanical Systems Engineering, Musashi Institute of  
Technology 1-28-1, Tamazutsumi, Setagaya-ku, Tokyo 158-8557, Japan

**Tatsuya KUBO**

Power and Industrial Systems Research and Development Center,  
Toshiba Corporation 8, Shinsugita-cho, Isogo-ku, Yokohama 235-8523, Japan

**Masugu SATO**

Japan Synchrotron Radiation Research Institute  
1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198, Japan

**Kentaro KAJIWARA**

Japan Synchrotron Radiation Research Institute  
1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198, Japan

**Abstract** The authors have studied residual stress depth profile nondestructively by precisely controlling the penetration depth of high-energy synchrotron radiation in austenitic stainless steel SUS304. In-situ measurement of the profile was performed with this method in elevated temperatures. The profile was quite stable and remained fully compressive during and after the thermal loading up to 673 K. Fatigue crack propagating behavior in cast aluminum alloy AC4CH was nondestructively observed by tomographic imaging with phase contrast effect. The retardation of the fatigue crack propagation was confirmed in the laser-peened material.

---