

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19760059  
 研究課題名 (和文) レーザピーニングによるアルミニウムの疲労信頼性向上と放射光による疲労破壊機構解明  
 研究課題名 (英文) Improvement of fatigue property by laser peening and investigation of fatigue fracture mechanism with synchrotron radiation on aluminum alloy  
 研究代表者  
 政木 清孝 (MASAKI KIYOTAKA)  
 沖縄工業高等専門学校・機械システム工学科・准教授  
 研究者番号：30323885

研究成果の概要： 交通・輸送機器の信頼性向上と長寿命化、ならびに部材の軽量・高強度化を目的として、自動車や航空機の構造部材として多用されるアルミニウム合金に、原子力プラントの炉内構造物の保全技術であるレーザピーニングを適用し、疲労特性改善効果のあることを明らかとした。さらに材料内部の疲労き裂成長挙動を観察する手段として、放射光を利用したコンピュータ断層撮影技術 (CT) に着目し、その観察手法を確立した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	700,000	0	700,000
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,800,000	630,000	3,430,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械材料・材料力学

キーワード：疲労，長寿命化，放射光，レーザピーニング，アルミニウム合金，断層撮影技術，き裂進展，高サイクル疲労

#### 1. 研究開始当初の背景

近年の機械・構造物の破損事例の多くは、機械構成部品の破壊が原因となることが多い。ある研究資料によれば、破壊原因の約8割が疲労破壊（材料の降伏応力よりも低い応力の繰返しによって生じる疲労き裂の発生・進展に伴う材料の破断）によるものと報告されている。疲労破壊はときに機器の突然破壊の原因ともなり、数多くの尊い人命が失われ、社会的に大きな影響を与える大きな事故に発展しかねない。機械構成部材の疲労破壊防止は設計時には欠かすことのできない

重要事項であるが、近年の機械・構造物の大型化、高機能化にともなう部品点数の増加や、使用条件・使用環境の過酷化に対応するため、ますます設計条件が厳しくなりつつある。なかでも交通・輸送機器においては高速化にともなう軽量化も求められるため、アルミニウム合金などの軽金属材料を素材とする機械構成部品の小型軽量化と高強度化が同時に求められている。

機械構成部品の小型軽量化と高強度化を同時に達成する方法としては、従来からショットピーニング処理が有効な手段として適

用されてきた。ショットピーニング処理とは、「ショット」と呼ばれる小さな金属粒子を高速で被加工物表面に噴射し、被加工物表面に高い圧縮残留応力と硬化層を付与する（ピーニング効果を与える）技術である。ショットピーニング処理によって被加工物の材料表面を強化することで、疲労き裂の発生防止、き裂の進展抑制が可能である。しかし、粉塵発生という問題点の他、機械構成部品の小型化や施工部位の局所化への対応が困難であるという欠点を有している。一方で、部材にはより高い圧縮残留応力の付与が要求されるようになり、あらたな表面処理の適用が求められるようになった。この要求に対して、本研究ではレーザーピーニング処理が適していると考えた。レーザーピーニング処理は、原子力発電プラントの経年劣化損傷対策として適用されてきたが、多くの優れた利点を有しているにもかかわらず、疲労に関する研究が十分でないため疲労特性改善手法として実用化された事はなかった。

## 2. 研究の目的

本研究は、レーザーピーニング処理による疲労特性改善効果ならびに疲労き裂進展抑制効果を明らかにすることを主たる目的とするが、疲労破壊メカニズムについても言及する。疲労破壊は、通常表面から発生した疲労き裂が負荷繰り返しと共に徐々に成長し、最終的に部材を破壊に至らしめる現象である。部材の表面をき裂発生起点とする表面起点型疲労破壊の場合、疲労き裂は材料表面の直接観察・もしくはレプリカ法（薄いフィルムに表面の凹凸を転写して観察する方法）などによる間接観察によって、非破壊的に容易に連続観察が可能である。しかし、部材の内部に存在する欠陥などを起点として疲労き裂が発生する内部起点型疲労破壊では、材料内部の疲労き裂を観察するための有効な手法が確立されていない。材料に発生した疲労き裂について、材料内部の情報も含めて非破壊的に観察する技術を確立すれば、疲労破壊メカニズムの解明が飛躍的に進展すると考えられる。そこで申請者は、大型放射光施設（SPring-8）を利用したマイクロCTに着目した。マイクロCTとはX線を物体に照射し、透過X線を検出して三次元的に物体内部情報を取得する技術であり、医療分野で用いられるCTスキャンと類似の技術である。密度の高い金属材料中の微細な疲労き裂を検出するには、高解像度のCT像を取得する必要があるが、SPring-8の高輝度X線を用いれば数 $\mu\text{m}$ 程度の解像度で、直径が数mm単位の軽金属のCT像が取得可能である。

以上のことを鑑み、本研究では軽金属の代表であるアルミニウム合金に対してレーザーピーニングを適用し、疲労強度信頼性の向上

を目指すとともに、その破壊メカニズムの解明を目的とする。以下に具体的な目的を示す。  
 (1) 鋳造アルミニウム合金、展伸アルミニウム合金に対してレーザーピーニング処理を適用し、疲労特性改善効果と、疲労き裂進展抑制効果を明らかにする。

(2) 大型放射光施設 SPring-8 の放射光を利用して、アルミニウム合金の疲労き裂発生・進展を非破壊で連続的に観察する技術を確立する。表面起点型疲労破壊、内部起点型疲労破壊の疲労き裂進展挙動、ならびに複数き裂の合体挙動について評価を行い、疲労破壊メカニズムの解明を目指す。

## 3. 研究の方法

(1) アルミニウム合金の疲労特性改善に対するレーザーピーニング処理の効果

① 自動車用鋳造アルミニウム合金 AC4CH を供試材として、試験部直径 5~7mm の回転曲げ疲労試験片を作成し、レーザーピーニング処理を施す。レーザーピーニング処理の概要を図1に示す。レーザーピーニング処理とは、液体被膜を付与した金属材料表面にレーザーパルスを照射し、瞬間的に発生する金属プラズマの膨張を液体被膜により抑制することで高い衝撃力を被加工材表面に発生させ、ショットピーニング処理と同様なピーニング効果を得る処理である。試験片にレーザーピーニング処理を行っている時の様子を図2に示す。レーザーピーニング処理した試験片と、未処理材を用いて回転曲げ疲労試験（室温大気中条件下、負荷繰り返し速度 2760rpm）を行い、疲労強度ならびに疲労寿命の改善効果について調査した。

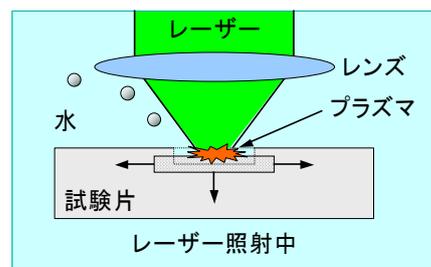


図1 レーザーピーニング概要

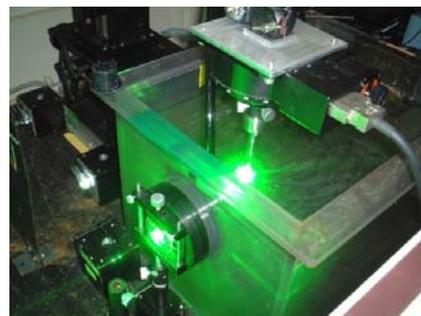


図2 レーザーピーニング施工

② レーザピーニングによる疲労き裂進展抑制効果を調査するため、未施工材に微小ドリル穴（直径 0.3mm、深さ約 0.5mm）を設け、図 3 に示すような全長約 2.5mm の疲労予き裂を導入した試験片を用意した。疲労予き裂を導入した試験片に対してレーザピーニング処理を施し、再度疲労試験を実施することで、疲労き裂の進展抑制について調査を行った。

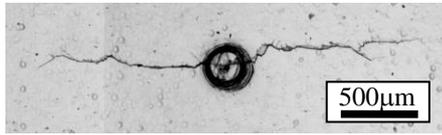


図 3 予き裂外観（レプリカ）

(2) 大型放射光施設 SPring-8 を利用した放射光マイクロCTによる疲労き裂進展挙動調査

① 試験片に発生した疲労き裂の三次元形状を放射光マイクロCTによって非破壊的に調査できるか否かを確認するため、あらかじめ疲労予き裂を導入した試験片から疲労き裂を含むようにタブレット状のサンプルを作成し、SPring-8 の産業用ビームライン BL19B2 の第 3 ハッチにおいて予備試験を行った。マイクロCTによる疲労き裂観察の測定体系を図 4 に示す。X線エネルギーを 28keV とし、試験片から X線検出器までの距離を約 800mm と設定した。この距離は屈折コントラストの効果によって試験片のエッジが適度に強調される距離である。この観察体系での実効的な分解能は約  $6 \mu\text{m}/\text{pixel}$  であり、本研究では全てこの条件にて疲労き裂の観察を実施した。なお、試験片として(1)–②で用いた疲労予き裂導入試験片と、レーザピーニング処理した予き裂導入試験片を用い、それぞれのき裂形状を比較することでレーザピーニング処理が疲労き裂に与える影響についても併せて調査した。

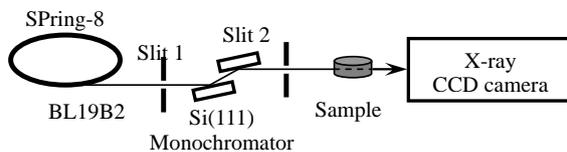


図 4 疲労き裂観察の測定体系

② 回転曲げ疲労試験における疲労き裂の発生から、試験片の疲労破断にいたるまでのき裂進展挙動について、マイクロCTによる観察を行った。負荷応力振幅 130MPa にて回転曲げ疲労試験を実施し、疲労負荷繰り返しとマイクロCTによる疲労き裂観察を交互に実施することで、試験片の内部情報も含めた疲労き裂成長挙動を調査した。

③ 疲労破壊においては、疲労き裂が単独で発生・成長することは希であり、複数き裂の合体を含む干渉挙動について調査することも重要である。軸荷重負荷を受ける平板試験片における疲労き裂合体挙動は、これまでに解析的検討が行われているが、回転曲げ疲労荷重下における複数き裂の合体挙動は検討されていない。本研究では、航空機用展伸アルミニウム合金 A7050 を供試材とし、二つの微小ドリル穴を付与して予き裂を導入した試験片を用いて回転曲げ疲労試験を実施した。図 5 に予き裂のレプリカ写真を示す。二本のき裂が同一平面上に存在する場合のき裂合体挙動と、異なる平面上にあって干渉しながら成長する場合について、疲労試験とマイクロCTによる疲労き裂観察を交互に繰り返し、直接観察することのできなかった試験片内部の疲労き裂成長挙動を直接的に観察した。得られた疲労き裂進展速度から応力拡大係数を推測し、疲労き裂の干渉挙動と応力拡大係数の相関性について検討した。



(a) 同一平面上に存在する場合



(b) 異なる平面上に存在する場合  
図 5 予き裂外観（レプリカ）

#### 4. 研究成果

(1) アルミニウム合金の疲労特性改善に対するレーザピーニング処理の効果

① レーザピーニング処理によって自動車用鋳造アルミニウム合金 AC4CH の疲労特性は改善された。縦軸を応力振幅、横軸を破断繰り返し数で整理した疲労試験結果（S-N 線図）を図 6 に示す。供試材の AC4CH 材には、鋳造時の鋳造欠陥発生を抑制するために溶湯処理（DG）を施しているため、参考のために溶湯処理を施していない材料のデータ（ND）も併せて示した。疲労限度（ $10^7$  回疲労強度）を比較すると、レーザピーニング未処理材（DG）では約 130MPa であったのに対し、レーザピーニング処理（DG-LP）によって 170MPa まで改善した。また疲労寿命特性に対しては、レーザピーニング処理を施すことによって 5~10 倍の改善効果がある。従来、アルミニウム合金に対するピーニング処理は効果がないとされてきたが、レーザピーニング処理は疲労特性改善に有効であることが分かった。また、詳細な調査の結果、疲労特性改善は圧縮残留応力が主要因であった。

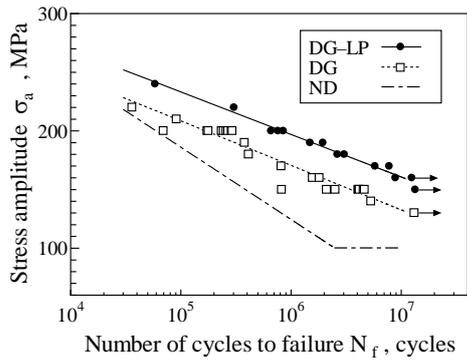


図6 疲労試験結果 (S-N線図)

② 予き裂材に対してレーザーピーニング処理を施すことで、疲労き裂の進展を抑制する効果が確認された。疲労き裂長さを縦軸に取り、応力振幅 130MPa の負荷繰り返し数を横軸にとって整理したものを図7に示す。横軸は予き裂導入時の繰り返し数を基準「0」としており、一部の試験片はそのまま疲労試験を継続、また一部の試験片はレーザーピーニング施工後に疲労試験を継続した。レーザーピーニング処理材の予き裂長さは、初期き裂長さ(約2.5mm)のままとなっており、き裂成長が抑制されている。レーザーピーニング処理による疲労き裂進展抑制効果は、破壊力学的パラメータである応力拡大係数を用いて定量的に評価したところ、圧縮残留応力の影響であることがわかった。

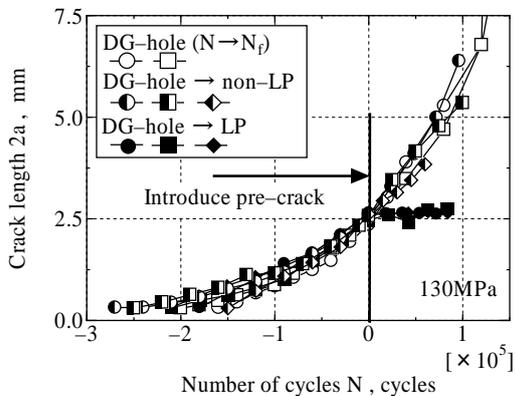
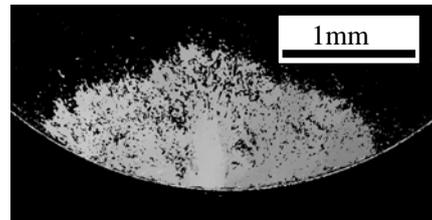


図7 レーザピーニングによるき裂進展抑制効果

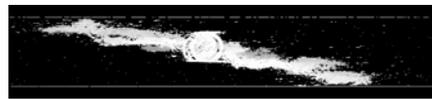
(2) 大型放射光施設 SPring-8 を利用した放射光マイクロCTによる疲労き裂進展挙動調査

① 放射光マイクロCTによって、アルミニウム合金に発生した疲労き裂を、非破壊で三次元的に観察することに成功した。試験片内部の疲労き裂部分を可視化し、試験片軸方向ならびに半径方向に投影したものを、未処理材については図8に、レーザーピーニング処理材については図9にそれぞれ示す。両者とも、

試験片内部の疲労き裂形状が綺麗に可視化されている。両試料とも予き裂導入後にほぼ同等の疲労負荷繰り返しを与えたが、未処理材に比べてレーザーピーニング処理材のき裂成長が鈍いことがわかる。特に試験片表面近傍では、本来ならば疲労き裂部分として白く検出されるはずであるのに、疲労き裂として検出されていない部分がある。これは、レーザーピーニングによるピーニング効果によって、疲労き裂が閉口しているためである。

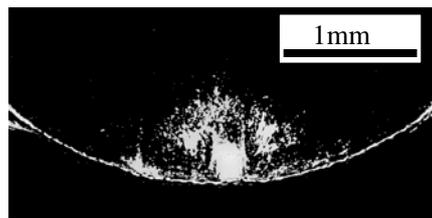


(a) 軸方向への投影

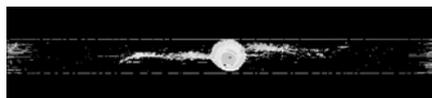


(b) 半径方向への投影

図8 き裂の可視化像 (未処理材)



(a) 軸方向への投影

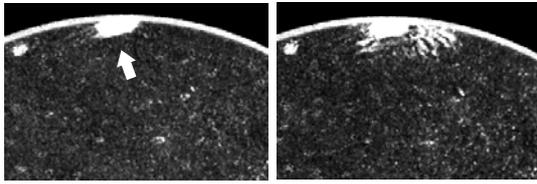


(b) 半径方向への投影

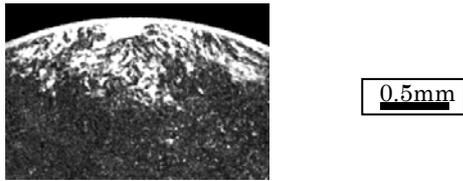
図9 き裂の可視化像 (レーザーピーニング処理材)

② 回転曲げ疲労試験における、疲労き裂の発生から試験片が疲労破断にいたるまでのき裂進展挙動を、マイクロCTによって非破壊的に調査することに成功した。特に、試験片表面から観察することのできない試験片内部の铸造欠陥を起点として、疲労き裂が発生・成長する様子を、世界で初めて観察することに成功した。試験片内部の铸造欠陥からき裂が発生し、進展していく様子を捉えたのが図10である。また、このときの表面き裂成長挙動をレプリカ法により観察したものが図11である。起点となった铸造欠陥は試験片表面に露出しておらず、二本の独立したき裂から構成されている。レプリカ観察結果からではこれ以上の情報を得ることができ

ないのに対し、マイクロCTによるき裂観察結果を詳細に調査したところ、二本のき裂がひとつの鋳造欠陥の異なる位置より発生したものであり、実質的に一本の大きな疲労き裂を構成していることをつきとめた。

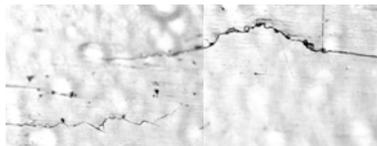


(a)  $1.0 \times 10^5$  cycles (b)  $2.0 \times 10^5$  cycles

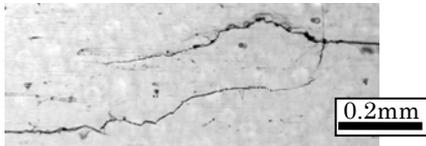


(c)  $3.0 \times 10^5$  cycles

図10 内部欠陥からの疲労き裂発生・進展 (マイクロCTによる内部観察結果)



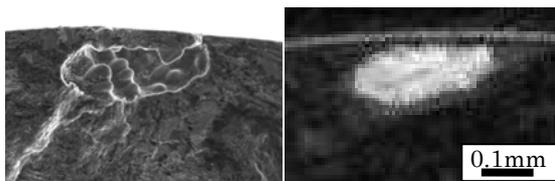
(a)  $2.0 \times 10^5$  cycles



(b)  $3.0 \times 10^5$  cycles

図11 内部欠陥からの疲労き裂発生・進展 (レプリカ法による表面観察結果)

起点となった鋳造欠陥の可視化像と、試験片の疲労破壊後に走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて鋳造欠陥を観察した結果を比較したものを図12に示す。両者は良く対応している。試験片内部の鋳造欠陥からの疲労き裂発生挙動を把握できたことは、内部起点型疲労破壊の疲労き裂成長メカニズムを調査するうえで、マイクロCTが有用なツールになることを示唆するものである。



(a) SEM画像 (b) CT画像

図12 起点となった鋳造欠陥

マイクロCTによる疲労き裂観察結果から表面き裂成長挙動を調査した結果と、従来のレプリカ法による表面き裂観察結果について比較検討を行った。表面き裂の成長挙動から得られたき裂進展速度と応力拡大係数範囲の関係を図13に示す。レプリカ法により得られたデータは、応力拡大係数範囲が小さい領域において顕著なばらつきを生じているのに対し、マイクロCTにより得られたデータはばらつきの少ないデータとなっている。これはレプリカ法では表面き裂情報のみしか得られないことに起因するものである。マイクロCTによって疲労き裂を観察することで、ばらつきの少ない精度のよいデータを取得できることがわかる。

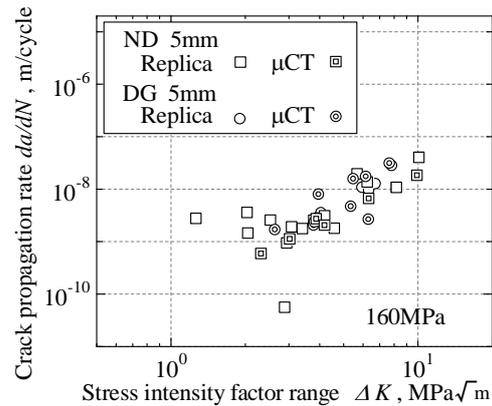
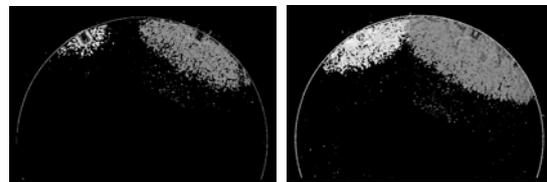
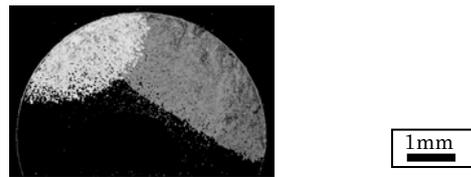


図13 き裂進展速度と応力拡大係数範囲

③ 回転曲げ疲労における複数き裂の合体挙動を、マイクロCTにより調査した結果、二本のき裂が同一平面上に存在する場合と、異なる平面上に存在する場合において、それぞれ疲労き裂の成長挙動を明らかとした。二本のき裂が異なる平面上に存在する場合のき裂成長挙動を調査した結果を図14に示す。疲労き裂を可視化し、軸方向から投影した図である。この疲労き裂の可視化結果から、そ



(a)  $5.0 \times 10^4$  cycles (b)  $5.5 \times 10^4$  cycles



(c)  $7.0 \times 10^4$  cycles

図14 二本のき裂の干渉 (マイクロCTによる可視化(軸方向投影))

それぞれのき裂のき裂進展速度を調査し、同一ロットの試験片から得られたき裂進展速度と応力拡大係数範囲の関係（パリズ則）を用いて試験片内部の疲労き裂先端の応力拡大係数を推測した。その結果、試験片内部の疲労き裂先端における応力拡大係数の大小関係は、軸荷重負荷を受ける平板の場合と類似の傾向を示すことが明らかとなった。これまで、疲労過程中的試験片内部の疲労き裂先端の応力拡大係数は、解析的手法によって推測することしかできなかったが、実験的に求める手法を確立した。さらに回転曲げ疲労における複数き裂の合体挙動のメカニズム解明に有用な情報を得られた。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計3件）

- ① K. MASAKI, Y. SANO, Y. OCHI, K. AKITA and K. KAJIWARA、INVESTIGATION OF FATIGUE CRACK BEHAVIOR WITH SYNCHROTRON RADIATION ON AC4CH CASTING ALUMINUM ALLOY、Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering、2 巻、1104 頁-1113 頁、2008 年、査読有
- ② 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 巻、395 頁-400 頁、2008 年、査読有
- ③ 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 巻、1133 頁-1138 頁、2007 年、査読有

〔学会発表〕（計5件）

- ① 政木清孝、佐野雄二、越智保雄、秋田貢一、梶原堅太郎、 $\mu$ CT 技術による航空機用展伸アルミニウム A7050 材の疲労き裂進展挙動調査、日本材料学会第 29 回疲労シンポジウム、2008 年 11 月 21 日、京大会館
- ② 政木清孝、佐野雄二、越智保雄、秋田貢一、梶原堅太郎、放射光による A7050 に付与した二本の疲労き裂の合体挙動調査、日本機械学会 2008 年度年次大会、2008 年 8 月 6 日、横浜国立大学
- ③ 政木清孝、佐野雄二、越智保雄、秋田貢一、梶原堅太郎、 $\mu$ CT 技術による 7050 アルミニウム合金の疲労き裂進展挙動調査、日本材料学会 第 57 期学術講演会、2008 年 5 月 24 日、鹿児島大学
- ④ K. MASAKI, Y. SANO, Y. OCHI, K. AKITA

and K. KAJIWARA、INVESTIGATION OF FATIGUE CRACK BEHAVIOR WITH SYNCHROTRON RADIATION ON CASTING ALUMINUM ALLOY、2008 M&M International Symposium for Young Researchers、2008 年 3 月 9 日、和歌山県ホテル古賀の井

- ⑤ 政木清孝、佐野雄二、越智保雄、秋田貢一、梶原堅太郎、放射光を利用したアルミニウム合金のき裂進展挙動調査、日本機械学会 材料力学部門カンファレンス (M&M'07)、2007 年 10 月 24 日、東京大学生産技術研究所

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

政木 清孝 (MASAKI KIYOTAKA)

沖縄工業高等専門学校・機械システム工学科・准教授

研究者番号：30323885