

放射光 CT イメージングを用いた高強度鋼中の疲労き裂の検出および定量的評価

中井 善一*¹, 田中 拓*², 宮下 卓也*³, 尾角 英毅*⁴, 塩澤 大輝*¹, 森影 康*⁵

Detection of fatigue cracks in high-strength steels by synchrotron radiation CT imaging

by

Yoshikazu NAKAI, Hiroshi TANAKA, Takuya MIYASHITA,
Hideki OKADO, Daiki SHIOZAWA and Yasushi MORIKAGE

key words : Fatigue, Very long life Fatigue, High strength steel, Synchrotron radiation, SPring-8 Refraction-Contrast

1. 緒 言

破壊事故の原因究明やその破壊メカニズムの解明において、構造部材内部の詳細な観察手法が必要不可欠である。例えば、従来の耐疲労設計ではこれ以上は疲労き裂が発生しないとされてきた超長寿命域(繰返し数: 10^8 回程度)において、疲労き裂が材料内部より発生することが報告されている。このような疲労き裂発生メカニズムについてはまだ推測の域を出ておらず、この解明が疲労破壊事故防止の喫緊の課題となっている。

一般に鉄系材料の内部観察に用いられている産業用 X 線 CT 法や超音波イメージング法では、 $100\mu\text{m}$ 以下の寸法の内部介在物やき裂を非破壊で検出することはできない。そこで、本課題実験者らは、鉄鋼材料の内部観察に放射光の適用を提案している。2005A期の実験「放射光 CT イメージングを用いた高強度鋼中の介在物の検出および定量的評価」において、放射光 CT イメージングを適用することにより、高強度鋼内部の金属組織を非破壊的に検出できることがわかった。しかしながら、介在物の分析結果より、介在物およびパーライト相が同じような分布傾向で存在することが確認された。このことから放射光 CT イメージングでは介在物およびパーライト相のどちらか、またはその両方を検出していることが考えられ、詳細な検討が必要とされていた。

2005B 期実験「高強度鋼中の疲労き裂寸法および位置の定量的評価」(課題番号: 2005B0179)では、まず放射光による介在物とパーライト相の検出の可能性について検討した。次に、ねじり疲労試験により導入された疲労表面き裂の検出を行い、放射光 CT イメージングによる疲労き裂の定量的評価への適用性に関する検討を行った。

2. パーライト相および介在物の検出実験

2.1 実験方法

本実験は、大型放射光施設(SPring-8)の産業用ビームライン BL19B2, 第3ハッチにおいて行われた。第3ハッチはイメージング用の施設である。測定装置の構成概要を Fig. 1 に示す。検出器としてズームング管(浜松フォトニクス製, C5333)および CCD カメラを用いた。試料を透過した X 線は検出器により撮影され、制御用コンピュータに記録される。試料はステージに設置されており、ステージを回転させることにより試料に対する様々な方向からの X 線透過像を得ることができる。全方向の X 線透過像を CT の原理を用いて再構成することにより、試料内部のイメージを得る。

2.2 試料

放射光 CT (SR-CT)イメージングでは、介在物およびパーライト相のどちらか、またはその両方を検出していることが考えられた。そこで本実験では、パーライト相のみの検出を試みた。測定用試料として機械構造用高炭素鋼 S35C を用いて、放射光 CT によりその内部金属組織の観察を行った。本測定に用いた S35C, および 2005A 期の測定に用いた快削鋼 SAE12L14 のマイクロ組織写真を Fig. 2(a), (b)お

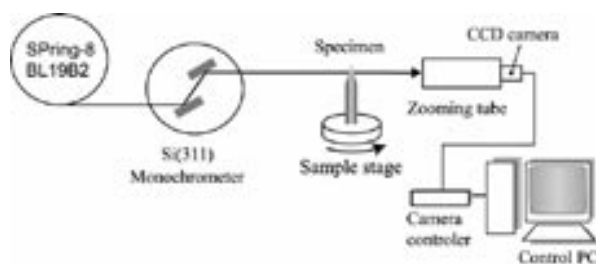


Fig. 1 Schematic illustration of measurement system

*1 神戸大学工学部機械工学科

*2 神戸大学大学院自然科学研究科 機械・システム科学専攻

*3 (財)新産業創造研究機構

*4 (株)川崎重工業 技術研究所

*5 JFEスチール(株) スチール研究所

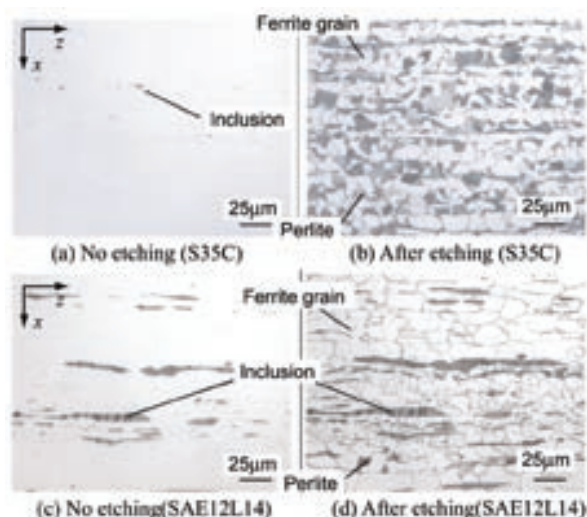


Fig. 2 Metallographic structure on vertical section

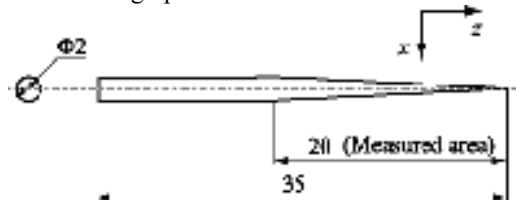


Fig. 3 Geometry of the sample for measurement of inclusions

よび(c), (d)にそれぞれ示す。Fig. 2(a)および(c)では、介在物が黒い部分として現れており、S35C 内の介在物は、SAE12L14 と比較して非常に少ないことがわかる。ナイトール 3%によるエッチング処理を施すことにより、フェライト・パーライト相の組織が現れる。Fig. 2(b)および(d)を比較すると、S35C の炭素量は 0.35(mass%)であり、SAE12L14 の炭素量 ($\leq 0.15\text{mass}\%$) よりも多いため、S35C ではパーライト相が多く存在していることがわかる。

測定用試料として、棒鋼から Fig. 3 に示すような先端が円錐状の形状に加工した。試料の先端部分について、放射光 CT イメージングによる観察を行った。

2.3 測定結果

本実験では、 0° から 180° までの角度を 1° 刻みで透過像を撮影した。X線のエネルギーを 25keV、ズームング管の倍率を x80 とした。断面図の再構成には、SPring-8 が公開している、FBP(Filtered Back Projection)法を用いたソフトウェアを適用した。

S35C および SAE12L14 の放射光 CT イメージング結果を Fig. 4 および 5 に示す。Fig. 4 では、断面像を示している。Fig. 4 より、SAE12L14 では、内部に黒い像が現れているのに対して、S35C ではこのような像が現れていないことがわかる。Fig. 5 では、内部の像が見えるように、2 値化処理により黒色部分を白色に、その他の領域を背景色に変換した

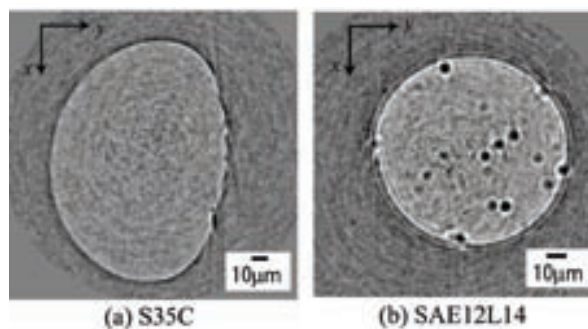


Fig. 4 Cross-sections of Synchrotron Radiation (SR)-CT image

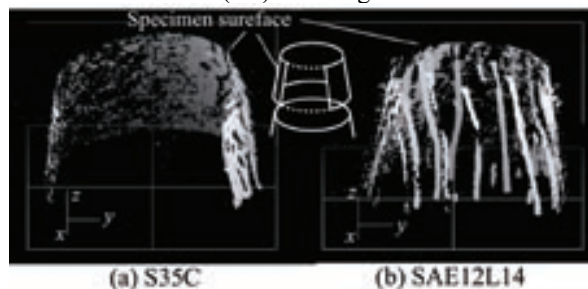


Fig. 5 3D-view of SR-CT image

後、三次元イメージ化処理を施している。Fig. 5 より、SAE12L14 では円柱状の像が試料長手方向に伸びるように分布しており、Fig. 2(d)に示した介在物およびパーライト相と同様の分布傾向を示していることがわかる。S35C では、試料内部において Fig. 2(b)に示したパーライト相のような像が検出されていない。

これらの観察結果より、放射光 CT イメージングでは、パーライト相ではなく介在物を検出していることがわかった。

3. 疲労き裂の検出

放射光 CT イメージングを適用し、微小な疲労き裂の定量的評価を行った。

3.1 試料

試料として、ねじり疲労試験により破断した試験片を用いた。試験片の材料は自動車用高強度鋼である。化学成分および機械的性質を Table 1 おおび 2 にそれぞれ示す。ねじり疲労試験条件は、せん断応

Table 1 Chemical composition of materials (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
0.07	1.1	1.1	0.006	0.002	0.2	0.2	bal.

Table 2 Mechanical properties of materials

Yield stress(MPa)	Tensile stress(MPa)	Elongation (%)	Young's module(GPa)
463	653	30	206

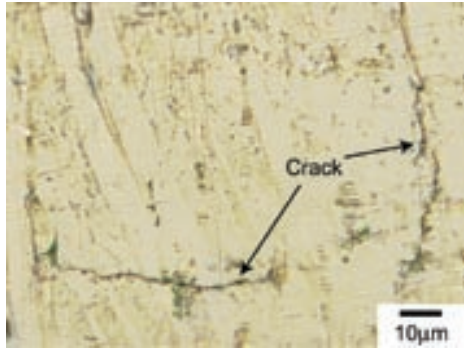


Fig. 6 Optical image of broken specimen by torsion fatigue test

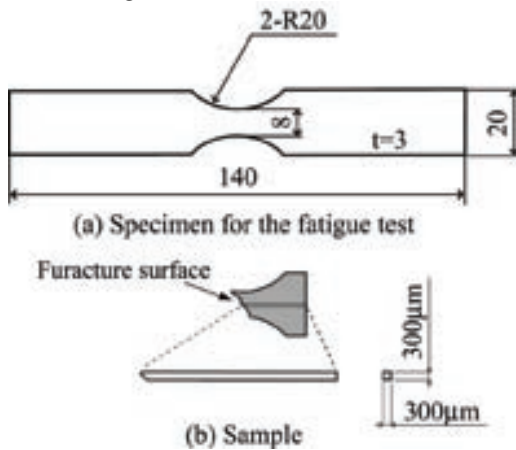


Fig. 7 Geometry of the specimen for Fatigue test and sample for SR-CT imaging

力振幅 $\tau_a=310\text{MPa}$, 応力比 $R=-1$ である。疲労試験後の試験片表面の光学顕微鏡写真を Fig. 6 に示す。Fig. 6 より、せん断応力により Mode II 型のき裂が多数生じていることがわかる。

測定試料形状を Fig. 7 に示す。Fig. 7 に示したように、この破断試験片の表面から、断面形状が $300\mu\text{m}\times 300\mu\text{m}$ である棒状に測定用の試料を切り出した。

3.2 測定結果

試料における透過像の一例を Fig. 8 に示す。Fig. 8 より、試料長手方向および幅方向にそれぞれスジ状の像が現れていることがわかる。試料長手方向に伸びたき裂を”Crack A”, 幅方向に伸びたき裂を”Crack B”とそれぞれ呼ぶ。これらのき裂について放射光 CT イメージングによる定量評価を行った。

Crack A の放射光 CT イメージング結果を Fig. 9 に示す。Fig. 9 では、内部のき裂形状が見えるように 2 値化処理によりき裂部分を白色に変換し、さらに三次元イメージ化処理を施している。Fig. 9 より、Crack A は 2 つの半円形状のき裂、すなわち Crack A₁ および Crack A₂ から構成されていることがわかる。Crack A₁ のき裂長さは約 40 μm , き裂深さは約 16 μm であり、Crack A₂ のき裂長さは約 45 μm , き裂

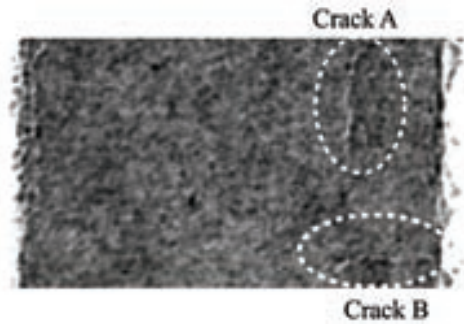


Fig. 8 Radiolucent finding around fatigue crack

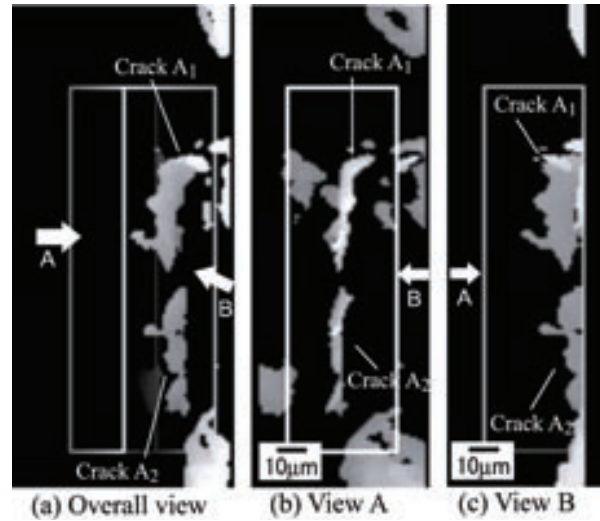


Fig. 9 SR-CT image of fatigue crack A

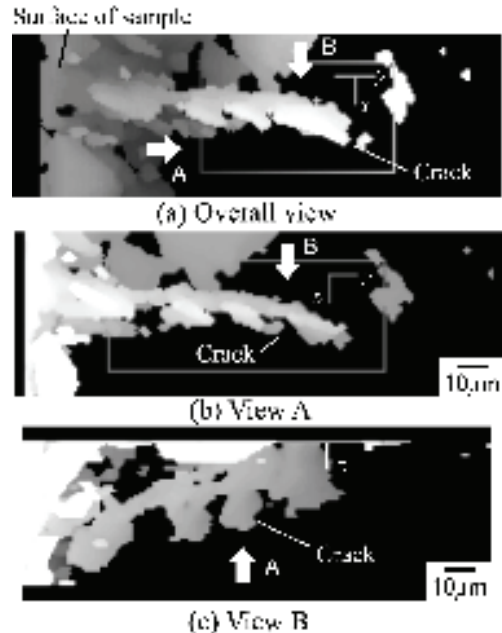


Fig. 10 SR-CT image of fatigue crack B

深さは約 8 μm となっている。また Crack A₁ の上端が湾曲している。これは、き裂進展が Mode II 型から Mode I 型に遷移したことを示している。

Crack B の放射光 CT イメージング結果を Fig. 10 に示す。Fig. 10 では、Fig. 9 と同様に三次元イメー

ジ化処理を施している。Fig. 10 より、試料の切断面でき裂深さが最も大きくなっており、試料の加工時にき裂が切断されたものと考えられる。また、表面き裂が幅 10~15 μm 程度の領域に分かれているが、これは、き裂が部分的に閉口していることを示しているものと考えられる。

これらのイメージング観察結果より、放射光 CT イメージングでは、約 10 μm 程度のき裂深さを有する表面き裂について、内部の寸法および詳細な形状を定量的に評価できることがわかった。放射光 CT イメージングは、高分解能で内部の欠陥を観察できることから、高精度な事故原因説明ツールとして有用であると考えられる。

4. 結言

放射光 CT イメージングを適用し、高強度鋼内部の介在物および疲労き裂の定量的評価を行った。高炭素鋼 S35C について、パーライト相の検出を試みた。測定結果および組織観察結果を比較したところ、S35C 試料内部にパーライト相と思われる組織は観察されなかった。こられの結果より、放射光 CT イメージングではパーライト相ではなく、介在物を検出していることが確認された。SR-CT イメージングを用いて疲労試験により導入された表面き裂の観察を行った。き裂深さ 10 μm の疲労き裂の形状を観察することが可能であることがわかった。