

超長寿命域における鋼中の疲労損傷の観察 Observations of Fatigue Damage in Ultra-Long Life Region for Steels

塩澤 大輝^a, 中井善一^a

Daiki Shiozawa^a, Yoshikazu Nakai^a

^a 神戸大学大学院 工学研究科

^a Kobe University, Graduate School of Engineering

超長寿命域の疲労損傷を観察するために、疲労試験により内部の介在物を起点として破断した疲労試験片と、中途止めした疲労試験片の観察を行った。中途止めした疲労試験片では、最大で20 μm の介在物が検出され、介在物の形状・寸法を評価することができた。また内部破壊が生じた試験片では、破壊の起点となった介在物は直径が約30 μm の大きさであり、介在物の下部においてき裂が発生している様子が観察された。

キーワード：超長寿命域疲労損傷，内部発生型疲労き裂，鉄鋼材料

【背景と研究目的】

1千万回の負荷の繰返しに耐えられれば十分であると考えられて耐疲労設計が行われてきたが、近年、1億回以上の負荷の繰返し後疲労破壊する現象が発見された。このような場合、材料内部の非金属介在物を起点として疲労き裂が発生し破壊に至ることが分かっており、従来知られていた疲労破壊のメカニズムと全く異なった現象が起きている¹⁾。

従来表面観察手法では材料内部から発生する疲労き裂の破壊挙動を捉えることが不可能である。これに対し、高輝度X線を利用したSR- μCT を適用することにより、内部の疲労き裂の発生条件および進展機構を明らかにできる可能性がある。本研究では、SR- μCT による内部疲労き裂の検出への適用性を検討し、超長寿命域における安全設計への指針を得ることを目的とする。

【実験】

本研究で用いたのは、SKH51 (C:0.88, Mo: 5.0, W: 6.0, V: 2.0, Fe: Val (Mass%))である。試験片の形状を Fig. 1 に示す。疲労試験は電気油圧式サーボ疲労試験機 (Saginomiya 製, 50kN) を用いて行った。

CT 観察はビームライン BL19B2 の第1ハッチにて、X線エネルギー37keV、積算時間60秒、回転角度0.6degステップ、試料-カメラ間距離700mmの条件で行った。検出器としてビームモニタ (BM3,x10) および CCD カメラ (C4880-41S) を用いた。透過像の1pixelあたりの寸法は0.35 μm である。CT観察が可能な試料寸法にするために、最小直径部が1.2mmである砂時計型の疲労試験片を断面方向に4等分したものをCT撮影に用いた。同材料について得られた疲労強度特性²⁾をもとに、本試験片の疲労試験を中断した試験片 (Sample A, 応力比 $R=-1$, 応力振幅 $\sigma_a=800\text{MPa}$, 繰返し数 $N=6.0 \times 10^6$ cycles) と、内部介在物を起点として破断したもの (Sample B, 応力比 $R=-1$, 応力振幅 $\sigma_a=900\text{MPa}$, 破断繰返し数 $N_f=2.1 \times 10^6$ cycles) の2種類の試料について測定を行った。

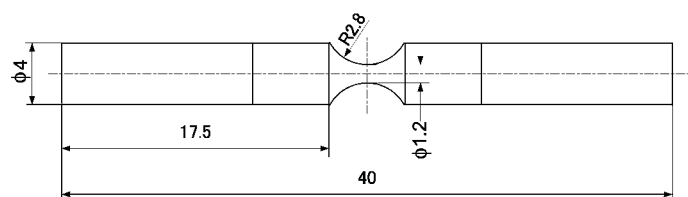


Fig. 1 Shape and dimensions of specimens (in mm)

【結果および考察】

Sample Bにおいて、破断の起点となった介在物周辺の電子顕微鏡 (SEM) による観察結果およびCT観察結果を Fig. 2 および Fig. 3 にそれぞれ示す。Fig. 2 より内部から疲労破壊した破面に特

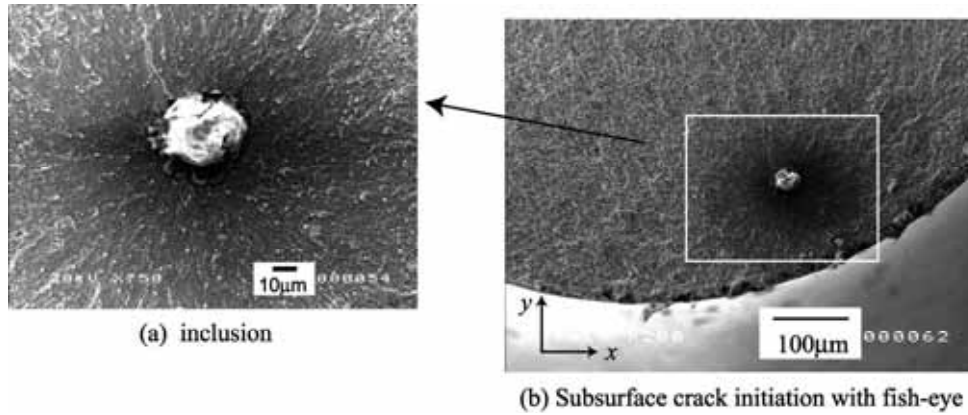


Fig. 2 SEM micrograph of fracture surface and Fish-eye in Sample B
 $(\sigma_a=900\text{MPa}, R=-1, N_f=2.1 \times 10^6 \text{ cycles})$

有のフィッシュアイと呼ばれる円形領域が現れていることが分かる。フィッシュアイの中心部に約 $30\mu\text{m}$ の介在物が存在しており、この介在物が疲労破壊の起点となったものと考えられる。また CT 像を示した Fig. 3(a)においても SEM 観察結果と同様の試料内部の位置に約 $30\mu\text{m}$ の介在物が認められる。この介在物の 3 次元形状を Fig. 3(b)に示した。Fig. 3(b)では破面から見える介在物の下、すなわち試験片に埋もれている部分を示している。Fig. 3(b)より、この介在物は試料長手方向に約 $30\mu\text{m}$ の長さを持つ球状をしていることが分かる。さらにこの介在物の最下部は半球状ではなく、半球状の外側にもう一つの物体もしくは空洞が存在している様子が見られた。これは介在物周辺に発生したき裂または介在物のはく離を示している可能性がある。またこのき裂らしき部分が、介在物を円孔と見た場合に最も応力集中が生じる介在物の横手からではなく、最下部から生じている点も興味深い。これは介在物が基材よりも硬いものであるため、介在物の最下部で応力集中が生じ、き裂が生じていることが考えられる。Fig. 3(a)では、破断の起点となった介在物のほかにも約 $10\mu\text{m}$ 程度の介在物が確認できる。1 回の CT 撮影 ($400 \times 400 \times 800\mu\text{m}$) で得られた領域内に、直径が約 $20\mu\text{m}$ の介在物では平均 4~5 個観察された。

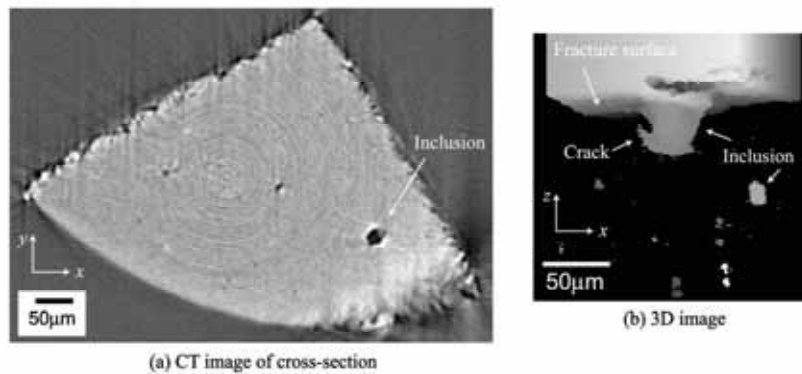


Fig. 3 CT image of subsurface crack initiation in Sample B ($\sigma_a=900\text{MPa}, N_f=2.1 \times 10^6 \text{ cycles}$)

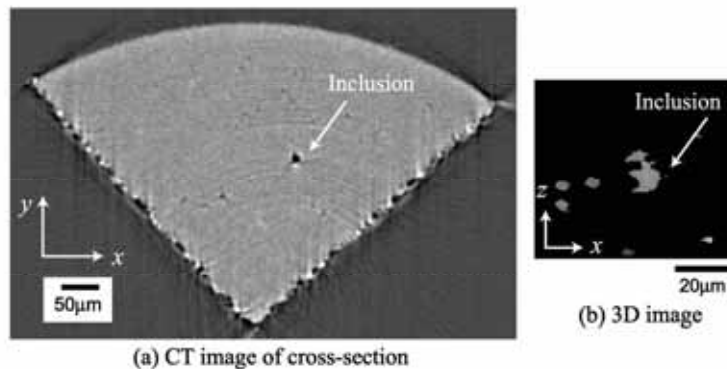


Fig. 4 CT images of inclusions in Sample A
 $(\sigma_a=800\text{MPa}, N=6.0 \times 10^6 \text{ cycles})$

次に疲労試験を中途止めした Sample A の観察結果の一例を Fig. 4 に示す。Sample A では試験片の半分について測定を行っている。測定した領域内では 30 μ m 程度の介在物は確認されなかった。Fig. 4(a)では直径約 20 μ m の介在物が見られた CT 断面像を示している。この介在物の 3 次元形状を示した Fig. 4(b)より、この介在物は球状の形状ではなく、最下部および最上部付近に突起状の像がそれぞれ見られた。Sample B においても直径約 20 μ m の介在物では同様の形状を有するものが確認された。Sample A の予想破断繰返し数は約 1.0×10^7 (cycles) であり、疲労寿命の 60%の繰返し数において介在物周囲のき裂が検出されている可能性がある。

【今後の課題】

今回の測定では、試料内の介在物の形状およびその寸法を測定することができた。また、介在物周囲のき裂と考えられる像を観察することができた。内部疲労き裂の発生限界応力、または負荷繰返し数 $10^7 \sim 10^8$ 回時における発生限界応力を推定することが可能であるものと考えられる。破面におけるフィッシュアイ中央部付近の介在物周縁を SEM で高倍率観察すると、ある限られた領域内で細粒状のやや粗い破面が形成されていることが報告されており、SEM では粒状で白く輝いて観察されることからこの領域を GBF (Granular-Bright-Facet) などと呼ばれている。この GBF の外側では疲労き裂が応力繰返し数ごとに連続的に進展するが、GBF 内部のき裂生成・成長過程は十分明らかとされていない。また GBF 領域の形成は超長寿命域の疲労破壊に対する支配因子であることが指摘されている。この超長寿命域の内部発生型疲労き裂において謎とされる GBF の発生機構について調査するために、GBF が生じた試験片についても介在物周囲の詳細状況を調べる必要がある。

【参考文献】

- 1) K., Shiozawa, et al., "S-N Curve Characteristics and Subsurface Crack Initiation Behavior in Ultra-Long Life Fatigue of a High Carbon-Chromium Bearing Steel", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 24, No.12, pp.781-790 (2001).
- 2) 塩澤和章, 西野精一, 谷内康之, "高速工具鋼 SKH51 の内部疲労き裂に及ぼす応力比の影響", *日本機械学会論文集 A*", Vol. 72, No.720, pp.1153-1160 (2006).