

NACHI
**TECHNICAL
REPORT**
Components

Vol. **32A1**
November/2017

機能部品事業

ベアリング
マテリアル

■ 寄稿・論文・報文・解説

高強度鋼の超高サイクル疲労

「内部介在物起点型破壊」

Very High Cycle Fatigue of High Strength Steels
"Internal Inclusion-Induced Fracture"

〈キーワード〉 超高サイクル疲労・軸受鋼・内部起点型破壊
介在物・細粒状領域

富山大学大学院理工学研究部

教授 小熊 規泰 Noriyasu Oguma

要 旨

高強度鋼は低サイクル疲労における表面起点型のS-N曲線と超高サイクル疲労における内部起点型のS-N曲線が重なったS-N特性を呈することが明らかになっている。実工業製品の長期耐久性を確保する観点から、超高サイクルにおける構造用材料の疲労特性の把握が重要である。長期間にわたり繰返し負荷が与えられると内部破壊の起点となった介在物の近傍に微細な形態を呈する特徴的な領域が形成される。この領域の縦断面のSEM像やTEM像において細かな粒子が観察されるので、この領域を「細粒状領域FGA」と呼んでいる。

本稿では、内部起点型破壊した破面の特徴とFGA形成メカニズムについて解説する。

Abstract

It has been clarified that high strength steels exhibit the S-N property consisting of an S-N curve for the surface-induced fracture in low cycle fatigue and another S-N curve for the interior inclusion-induced fracture in very high cycle fatigue. From a viewpoint of an ensuring the long term durability of the actual industrial products, the fatigue property of structural materials in the very high cycle regime has become an important subject. A characteristic area indicating the fine morphology is formed in the vicinity of an inclusion at the crack initiation site on the interior induced fracture mode during the long sequence of cyclic loadings. This area is so called as “Fine Granular Area (FGA)” because ‘fine granular’ particles are observed in scanning iron microscope (SIM) images and transmission electron microscope (TEM) images of longitudinal section of the FGA.

The features of fracture surface and FGA formation mechanisms of internal inclusion induced fracture are reviewed in this paper.

1. 超高サイクル疲労とは

多くの鉄鋼材料のS-N曲線の特徴は、一般に傾斜部と水平部からなり、産業機械やその構成部品の設計にあたり、この水平部の応力値（疲労限度）を基にした耐久設計が広く普及している。耐久設計による部材は基本的に疲労破壊を生じないはずであるが、長期にわたって使用しているとその使用環境により破損することが、しばしば報告されている¹⁾。これは、コスト面での採算性だけでなく、資源枯渇回避や地球環境負荷の低減などの観点から、各種機械製品を従来以上に長期間有効利用しなければならない社会的背景に起因するものと考えられる。すなわち、実機部材が従来以上の長期にわたり実際に繰返し負荷を受けるようになったことが主たる理由と考えられる。

近年の多くの研究結果から、疲労限度以下の負荷応力でも 10^7 回をはるかに超えて 10^9 回程度まで負荷を与え続けると必ず疲労破壊を起こす現象が明らかになっている^{2) 3)}。このような鉄鋼材料の 10^7 回から 10^9 回程度の疲労特性は「超高サイクル疲労」または「ギガサイクル疲労」と呼ばれ、そのメカニズムや発現材料の探求が重要課題として国内外の研究機関で盛んに推進されている。

このような超高サイクル疲労における一つの特徴は、超長寿命域での疲労破壊の多くが材料内部を起点として発生することである^{2) 4)}。



図1は高強度鋼の一つである高炭素クロム軸受鋼SUJ2の片持ち回転曲げ疲労試験で得られた広帯域S-N特性である²⁾。図中の○印は表面(結晶すべり)起点型破断データを示し、●印は内部(介在物)起点型破断データを示す。同図から分かるように、○印で示される高応力低寿命域のS-N曲線と●印で示される低応力長寿命域のS-N曲線が明確に分離している。すなわち、表面起点型と内部起点型の別々のS-N曲線が二重に現れるので、「二重S-N曲線」と呼んでいる^{5) 6)}。前述したように、超長寿命域データの破壊起点は全て内部介在物である。

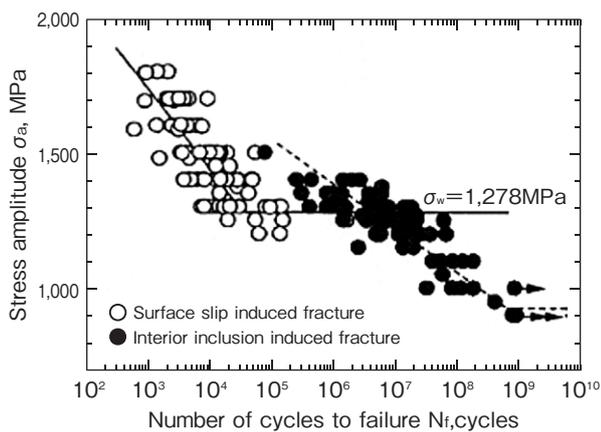


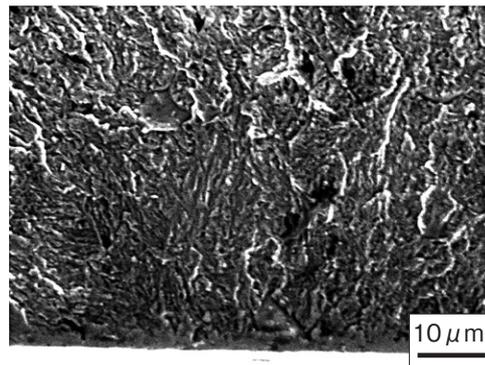
図1 軸受鋼の回転曲げ疲労における二重S-N特性

2. 内部起点型破壊の特徴

1) 破面様相

回転曲げ疲労試験で破断した試験片の破面を走査型電子顕微鏡SEMで観察した例を示す。図2は応力振幅1,300MPa、繰返し数 4.28×10^5 回で試験片表面の結晶すべりが起点となって破断したものである。これに対し、図3は応力振幅1,000MPa、繰返し数 5.13×10^7 回で試験片内部の非金属介在物が起点となって破断したものである。図3(a)は比較的

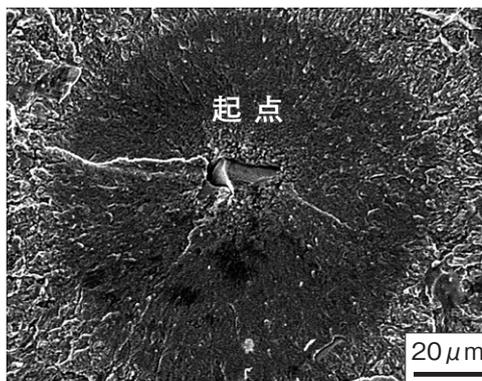
低倍率で観察したものであり、介在物から広がる平坦な破面領域 (Fish-eye) が認められる。このレベルの倍率での観察は従前から行なわれているため、新たな知見を与えるものではない。しかし、介在物近傍を図3(b)のように高倍率観察すると、介在物の周囲に細かな凹凸領域が認められる。



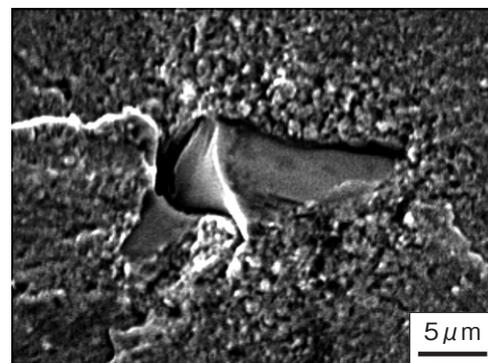
起点

応力振幅 $\sigma_a = 1,300 \text{MPa}$, 破断寿命 $N_f = 4.28 \times 10^5$ 回

図2 回転曲げ疲労破面(表面起点)のSEM観察例



(a) Fish-eye (低倍率)



(b) 介在物近傍 (高倍率)

応力振幅 $\sigma_a = 1,000 \text{MPa}$, 破断寿命 $N_f = 5.13 \times 10^7$ 回

図3 回転曲げ疲労破面(内部起点)のSEM観察例

2) 縦断面様相

図4は軸受鋼の片持ち回転曲げ疲労試験における応力振幅1,050MPa、繰返し数 1.14×10^7 回で内部起点型破壊した試験片破面の走査型イオン顕微鏡SIMで観察した例である。破壊起点となった介在物近傍を拡大観察したものであり、試験片のクランプ側と重錘負荷側の両破面を並べて示した。また、白い破線で囲った範囲は凹凸領域であり、この領域は両破面で認められた。図4の両破面の凹凸領域の白実線の位置を集束イオンビーム装置FIBでスパッタリングし、破面直下の縦断面をSIMで観察した像を図5に示す。同図(a)(b)は図4(a)(b)に対応している。図5(b)を見ると破面表層の結晶組織が微細化していることが分かる。一方、相手側の図5(a)には破面

表層に微細化領域は認められない。いくつかの試験片破面の縦断面観察結果では、このように片方の破面で微細化領域が存在していると相手方の破面には微細化領域が認められなかった。

上記の知見から、微細組織とマトリックスの境界が剥離・分断され、微細化領域が破面のどちらかに残留して図3のような凹凸様相になったと考えられる。この特徴をもとに、筆者らはこの領域を細粒状領域(Fine Granular Area : FGA)と呼んでいる³⁾⁵⁾。このような内部破壊起点となった介在物などの近傍に見られるFGAは軸受鋼の他に、ばね鋼や高速度工具鋼のような高強度鋼の内部起点型破壊に特有の特徴である。

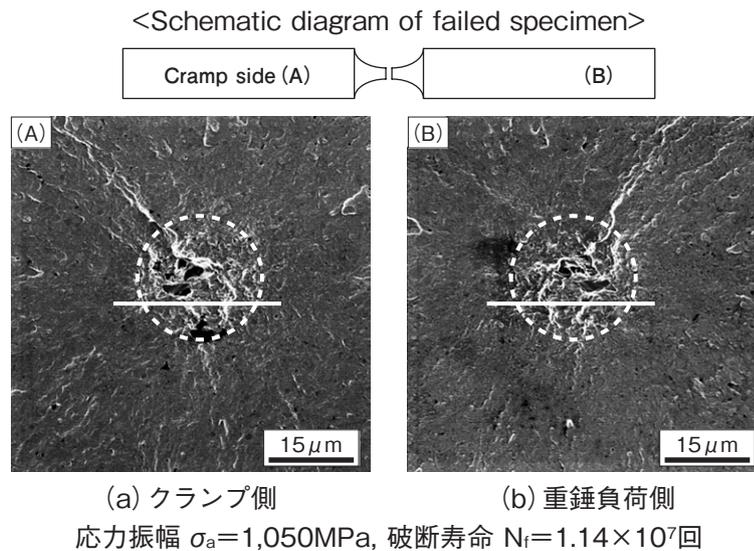


図4 内部起点型疲労破面のSIM観察例

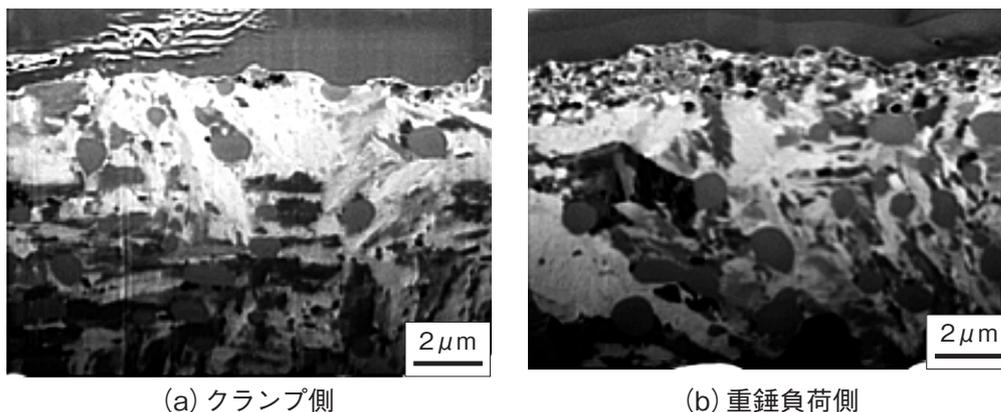


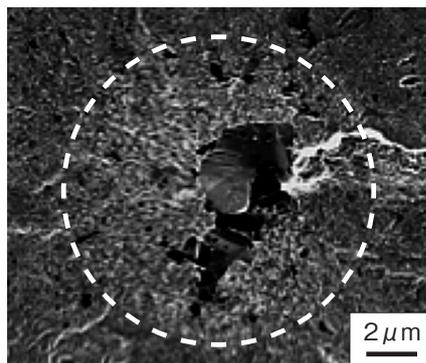
図5 凹凸部の縦断面のSIM観察像

3) 制限視野像⁷⁾⁸⁾

図6は応力振幅1,100MPa、繰返し数 5.46×10^7 回で内部起点型破壊した試験片の破面上に形成されたFish-eye中央部のSIM像である。破壊起点となった介在物の周囲(白い破線で囲んだ領域)にFGAが形成されている。このFGA内部の縦断面をFIBで加工して剥片を切り出し、透過型電子顕微鏡TEMで観察した明視野像とFGA内外における制限視野回折像(Selective Area Diffraction Pattern : SADP)を図7に示す。図7左側の明視野像を見ると、破面表層が微細組織になっていることが改めて確認できる。その微細化組織層の厚さはほぼ400nm程度である。また、図7右側下段の

マトリックス部のSADPは典型的なマルテンサイトの回折スポットを示しているのに対し、上段のFGA内のSADPは回折スポットがリング状に連なっていることが認められる。すなわち、多数の結晶方位が回折に起因していることを意味しており、制限視野内には結晶方位の異なる微細組織が存在することを示している。

以上から、長期間の繰返し負荷により介在物近傍のマトリックスのマルテンサイト組織が極めて薄い層状領域において細粒状組織に分断・微細化したものと推論できる。



応力振幅 $\sigma_a=1,100\text{MPa}$, 破断寿命 $N_f=5.46 \times 10^7$ 回

図6 内部介在物周囲に形成されたFGA

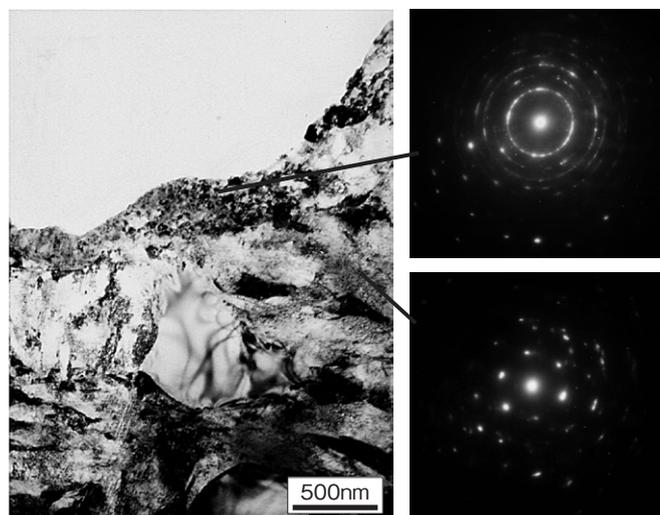


図7 FGA部の縦断面のTEM明視野像(左側)とFGA内外の制限視野X線回折像(右側)

3. 内部起点型疲労破壊メカニズム

上述したように、高強度鋼の超高サイクル疲労において内部起点型破壊を生じた破面にはFish-eyeが観察され、その中心部に非金属介在物が観察されることが多い。そして、その介在物周辺には特徴的な細粒状領域FGAが形成されることが明らかになった。さらに、破面上のFGA形成に先立ち、介在物周縁のコイン状領域で結晶の微細化が起これ、この細粒状領域が破面の相手方に交互に残るような形態で破断していることを示した。

これらのエビデンスを基に、筆者らは以下のような内部起点型疲労破壊の発生メカニズムを提案している⁹⁾¹⁰⁾。

- ① 長期間の応力繰返し過程において内部介在物周縁でマルテンサイトが細粒化
- ② 細粒層とマトリックスの境界や細粒境界自身で微視的な剥離が発生・進展
- ③ 細粒状領域の微視的剥離が限界サイズ（欠陥とみなしたときの下限界応力拡大係数範囲）となってコイン状のFGAが形成

なお、筆者らの他にもいくつかのメカニズムが提案されており、例えば、村上らの水素脆化説¹¹⁾、塩澤らの界面剥離説¹²⁾がある。前者は、介在物にトラップされた材料内の非拡散性水素の影響を受けて、き裂進展経路に顕著な凹凸が形成されたとした説である。介在物周辺の凹凸領域を光学顕微鏡で観察すると焦点があわず暗く見えることからOptically Dark Area : ODAと呼んでいる。他方、後者は材料内に分布している粒状炭化物とマトリックスの界面が剥離することで粗い破面が形成されたとした説である。この説では凹凸領域をGranular Bright Facet : GBFと命名している。

高強度鋼の内部起点型疲労破壊に関し、細粒状領域FGAの形成が完了する期間が疲労寿命に占める比率を検討した結果、低応力域では90%以上の高い比率であることが報告されている⁶⁾。同様に、FGAの形成開始時期の検討においては、疲労寿命の数%程度で明らかな疲労損傷が確認されている¹³⁾。したがって、高強度鋼の疲労寿命評価のためにはさらに詳細なFGA形成メカニズムの解明が極めて重要である。

4. 今後の展望

高強度鋼の内部起点型破壊寿命に対する影響因子は未だ十分に解明されていない。国内外の研究機関が様々な材料・環境・負荷条件を対象にして超高サイクル疲労の研究にとり組んでいる。機械構造物の長期利用信頼性確保のためにも早急な超高サイクル疲労特性の解明と疲労設計への反映が期待される。

参考文献

- 1) 酒井、日本マリンエンジニアリング学会誌、40(2005) 358.
- 2) 酒井・武田・塩澤・越智・中島・中村・小熊、材料、49(2000) 779.
- 3) Sakai・Sato・Oguma、FFEMS、25(2002) 765.
- 4) Sakai・Sato・Nagano・Takeda・Oguma、International Journal of Fatigue、28(2006) 1547.
- 5) Sakai、Proc. VHCF-4、(2007) 3.
- 6) 小熊・酒井、材料、50(2001) 516.
- 7) 小熊・原田・酒井、材料、52(2003) 1292.
- 8) 小熊・原田・酒井、日本機械学会論文集、70-690、A(2004) 221.
- 9) Sakai・Harada・Oguma、Proc. ECF-16、CD-ROM(2006).
- 10) Sakai・Oguma・Harada、Proc. VHCF-4、(2007) 129.
- 11) 村上・野本・植田・村上・大堀、材料、48(1999) 1112.
- 12) 塩澤・森井・西野・魯、材料、5(2003) 1311.
- 13) 小熊・酒井・渡辺・小竹、日本機械学会論文集、78-789、A(2012) 618.