

高温疲労における 2 段 S-N 曲線の高寿命域での破壊形態

Fracture Morphology in High-Cycle Region of Stepwise S-N Curve under Elevated Temperature Fatigue

中央大学理工学部精密機械工学科共同研究員 高橋幸男
TAKAHASHI Yukio

第 1 章 緒 論

機械・構造物を構成する鉄鋼材料の疲労破壊は、材料表面からき裂が発生し進展することで破壊に至る表面破壊によってもたらされる。この場合の疲労特性としては、材料に負荷される繰返し応力と疲労寿命の関係を示す S-N 曲線において、応力繰返し数 $10^5 \sim 10^6$ サイクル近傍で水平部が現れ疲労限度が認められる。鉄鋼材料の疲労限度は、ビッカース硬さや引張強度と良い比例関係が認められる。表面破壊を抑制し疲労強度を向上する手法としては、素材の高強度化や表面強化処理などがある。この場合の疲労特性としては、応力繰返し数 $10^5 \sim 10^6$ サイクル近傍でいったん水平部が現れるが、 10^7 サイクルを超える高寿命域では試験応力の低下に伴い繰返し数が漸次大きくなる傾向を示し、2 段の S-N 曲線となる。このときの破壊形態としては、高応力・低寿命域では表面破壊となるが、低応力・高寿命域では内部破壊となる。内部破壊は、材料内部の非金属介在物などの欠陥を起点として発生したき裂が同心円的に進展し、表面に到達すると表面き裂となって進展し破壊に至る現象である。内部破壊を起こした破面には、表面に到達した時点でのき裂の痕跡としてフィッシュアイが認められる。¹⁾

高温下における鉄鋼材料の疲労特性としては、素材の強度が高くなく表面強化処理も施されていない鋼においても、2 段の S-N 曲線となることが報告されているが、^{2)~4)} 高寿命域における破壊形態やその形成機構に及ぼす影響因子など明らかにされていない。

近年、発電プラントなど高温環境下で稼働する機械・構造物においては、高性能化、高効率化が求められており、高速化、高温高圧化などにより、使用される材料の苛酷化に伴い振動、熱応力、流体振動による高温高サイクル疲労が問題となっている。^{5)~7)}

そこで本論文では、高温機器用鉄鋼材料の高温下において 2 段の S-N 曲線となった高寿命域での破壊形態を明らかにすべく、高寿命域での破壊形態について詳細に観察し、その破壊形態に及ぼす影響因子について調べ、高

温疲労における高寿命域での破壊機構や疲労限度の意味などについて検討した。

第 2 章 オーステナイトステンレス鋼 SUS321-B の 2 段 S-N 曲線における疲労破壊形態

オーステナイトステンレス鋼の高温高サイクル疲労特性としては、繰返し応力のもとでの加工硬化に加え、 $400 \sim 500^\circ\text{C}$ では動的ひずみ時効による硬化、 $600 \sim 700^\circ\text{C}$ では Cr 炭化物の析出時効硬化により、いずれの場合も試験片は疲労試験中に硬化する。その結果、室温 $\sim 600^\circ\text{C}$ までの温度範囲においては明瞭な疲労限度が認められる S-N 曲線となるが、 700°C では 2 段の S-N 曲線になる。これは長時間におよぶ疲労試験の経過に伴い、過時効の現象によってそれまでの硬化が損なわれ、軟化することで疲労破壊が起こるためと考えられてきた。^{2), 3)} しかし、2 段の S-N 曲線となったオーステナイトステンレス鋼の高寿命域での破壊形態については、具体的な事例をもつての報告はなされていない。

そこで本章では、オーステナイトステンレス鋼 SUS321-B を供試材とし、^{3), 8)} 700°C において疲労試験を行い、2 段の S-N 曲線となった高寿命域での破壊形態を調べた。また、試験片の硬化・軟化現象を確認するため試験中の変形挙動を調べた。これらの結果を踏まえ、オーステナイトステンレス鋼の 700°C における 2 段 S-N 曲線について破壊形態との関連のもとに検討した。

疲労試験は、直径 8mm、長さ 25mm の平行部を有する平滑試験片に対して、電気加熱炉付 4 点曲げ回転曲げ疲労試験機を用い、試験温度 700°C 、速度 100Hz で行った。試験応力は、2 段 S-N 曲線で高寿命側の結果を与える^{3), 8)} $150 \sim 170\text{MPa}$ において重点的に行った。

S-N プロットを図 1 に示す。破面の光学顕微鏡観察の結果から、破壊形態との関連のもとに 2 段 S-N 曲線について検討した結果、以下のことが明らかになった。

(1) 破壊形態としては、高応力・低寿命域では試験片表面を起点とした表面破壊に、低応力・高寿命域ではフィッシュアイを伴う内部破壊であった。なお、破壊の起

点は非金属介在物が集合した領域であった。

(2) 内部破壊の場合は、表面直下を起点とする小さなフィッシュアイを形成する場合 (図 2 (a)) と、表面から深い位置に起点があり、大きなフィッシュアイを形成する場合 (図 2 (b)) とがあった。前者の場合、フィッシュアイの周囲に半円状領域が形成されていた。

(3) 2 段 S-N 曲線となるのは、疲労試験の初期の段階で試験片は硬化し、水平部が認められる S-N 曲線となるが、 10^7 サイクルを超える高寿命域では軟化傾向が現れることが試験中の変形挙動の観察から確認された。

(4) 高寿命域で表面破壊が認められなかったことから、表面き裂が発生しても、進展を抑制する機構が働くことが示唆された。

第 3 章 オーステナイトステンレス鋼 SUS321-B の 700°C における疲労破壊形態に及ぼす酸化効果

前章の疲労試験にて得られた内部破壊形態としては、小さなフィッシュアイを伴う表面直下型の場合と起点が深く大きなフィッシュアイを伴う場合とがあった。しかし、両者の破壊形態の相違をもたらす因子としては、起点の深さだけでなく、高温疲労での特徴であるき裂面が酸化されることにより疲労き裂の進展挙動に影響を及ぼすことが予想される。^{9)~12)} しかし、そのような観点からの観察や検討はなされていない。

そこで本章では、これらの点を明らかにするため、図 1 の S-N 線図に示すプロットのうち、●印で示す前章にて得られた疲労破面を観察対象とし、酸化という観点から起点を含むフィッシュアイ周辺について、EPMA (電

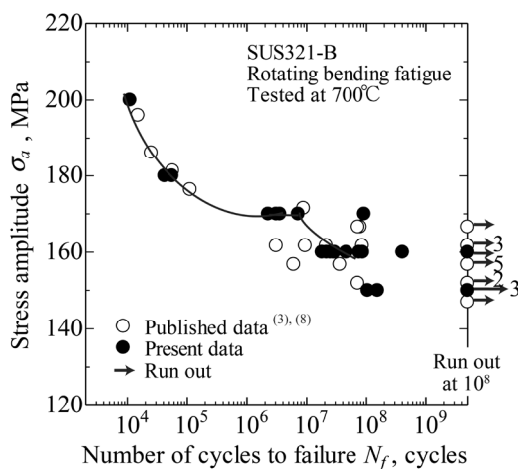


図 1 SUS321-B 鋼の 700°C における回転曲げ疲労試験による S-N プロット^{3),8)}

子線マイクロアナライザ) を用いて、破面上にある酸化物について分析及び評価を行った。

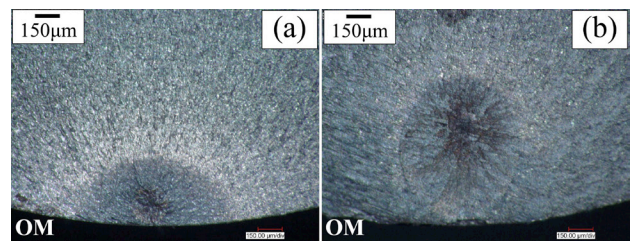
破壊形態に及ぼす酸化効果について、以下のことが明らかになった。

(1) 高寿命域での破壊形態の多くは、小さなフィッシュアイを伴う内部破壊で、そのフィッシュアイ周囲に形成される半円状領域は酸化度合いが高い領域であった。

図 3 の例に示すようにフィッシュアイ面内と半円状領域の各々の酸化度合いにより、破壊形態を分類することができた。

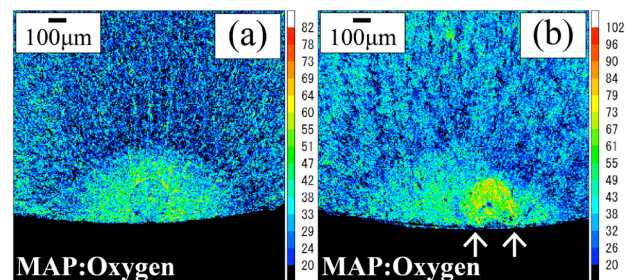
(2) 高温高サイクル疲労における新たな破壊形態を明らかにした。すなわち、フィッシュアイが試験片表面に到達後、表面き裂として進展する前にフィッシュアイ面内が酸化物で覆われ閉塞状態のき裂となるが、その閉塞状態となったフィッシュアイの試験片表面近傍 (図 3 (b) の矢印) に新たなき裂が発生し進展することで、破壊に至るものであった。

(3) 破壊形態に及ぼす影響因子としては、フィッシュアイが試験片表面に到達し表面き裂になった時点での、フィッシュアイの試験片中心方向先端の応力拡大係数と、表面き裂となったき裂面における酸化物誘起き裂開口現象^{9)~15)} を伴う酸化の進行の兼ね合いによってもたらされるということが明らかになった。



$\sigma_a=160\text{MPa}, N_f=2.91 \times 10^7$ $\sigma_a=160\text{MPa}, N_f=7.54 \times 10^7$

図 2 SUS321-B 鋼の 700°C におけるフィッシュアイを伴う破面の光学顕微鏡写真例



$\sigma_a=160\text{MPa}, N_f=2.91 \times 10^7$ $\sigma_a=160\text{MPa}, N_f=2.14 \times 10^7$

図 3 フィッシュアイを伴う破面の酸化度合い

(4) 低応力・高寿命域で表面破壊が起こらないのは、表面を起点としたき裂が発生してもき裂進展過程において酸化物で閉塞状態となり進展しなくなる機構が働いたためと考えられた。

第4章 オーステナイトステンレス鋼の高温高サイクル疲労における破壊形態

前章までにおいて、SUS321-B 鋼を供試材として破面に及ぼす酸化効果といった観点から破壊形態を分類し、その形成過程について明らかにした。これらの結果が他のオーステナイトステンレス鋼においても再現性のある現象なのか確認する必要がある。

そこで本章では、オーステナイトステンレス鋼 SUS304-HP を供試材として、¹⁶⁾ 前章までと同じ実験方法にて疲労試験及び疲労試験中の硬化・軟化現象の測定などを実施し、得られた破面に対して酸化効果といった観点から破面の形状観察及び表面組成分析を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) S-N 曲線としては、全寿命領域において試験応力の低下とともに疲労寿命が漸次大きくなる S-N 曲線となったが、¹⁶⁾ 高寿命域では非金属介在物が集合した領域が起点となり、フィッシュアイを伴う内部破壊となった。
- (2) 破壊形態の多くは、起点が浅く小さなフィッシュアイを伴う表面直下型の内部破壊で、フィッシュアイ面内とその周囲の半円状領域の酸化度合いにより分類することができた。
- (3) フィッシュアイの起点が浅く試験応力がより低い

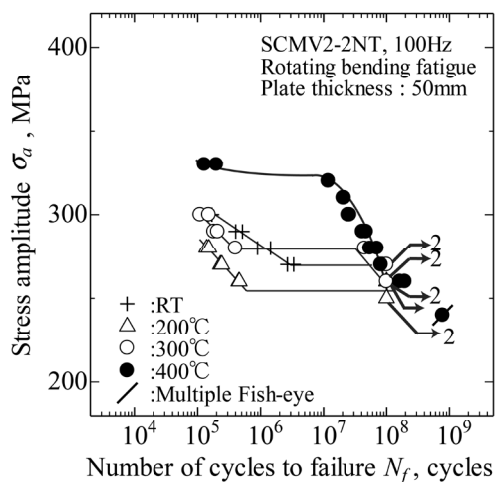


図4 SCM V2-2NT 鋼の回転曲げ疲労試験による S-N プロット ^{4),17)}

場合は、フィッシュアイ面内は酸化物で覆われ閉塞状態になり、閉塞状態となったフィッシュアイの近傍に新たな表面き裂が誘起され、破壊に至る現象が認められた。

(4) 本供試材におけるフィッシュアイを伴う破壊形態は、SUS321-B 鋼と同じであると見なされたことから、これらの現象はオーステナイトステンレス鋼の 700°C における高寿命域において、再現性のある現象であることが明らかになった。

第5章 低合金鋼 SCM V2-2NT の 400°C における 2 段 S-N 曲線の高温高サイクル疲労破壊形態

低合金鋼 SCM V2-2NT の高温高サイクル疲労特性としては、図4に示すように、室温と 200°C では明瞭な疲労限度が認められる S-N 曲線となるが、300°C、400°C では 2 段の S-N 曲線となることが報告されている。^{4),17)} 低応力・高寿命域では内部の非金属介在物などの欠陥を起点としたフィッシュアイを伴う内部破壊になるが、^{4),18)} 詳細な破壊形態に関する観察はなされていない。

そこで本章では、前章までに得られたオーステナイトステンレス鋼のフィッシュアイを伴う破壊形態に及ぼす酸化効果について、他の鋼種においても同様に認められる現象なのか確認するべく、低合金鋼の高温疲労試験によって既に得られた疲労破面を観察対象とし、^{4),17)} 破壊形態に及ぼす酸化効果という観点から観察・分析を行った。また、この低合金鋼の疲労破壊としては、図4の●印プロットに斜線を入れた 10⁹ サイクル近傍で破壊した破面においては、図5に示す同一破面上に 20 数個のフィッシュアイが観察されたという報告がなされている。⁴⁾ しかし、なぜ同一破面上に 20 数個のフィッシュアイが認められるのか、その形成過程について十分に検討がなされていない。この点に関しても破面に及ぼす酸化の効果との関連のもと形成過程について検討を行った。

観察の対象とした試験片は、図4に●印で示すプロットのうち高寿命域で内部破壊を起こした破面とした。

観察・分析の結果、以下のことが明らかになった。

- (1) フィッシュアイを伴う破壊形態は、フィッシュアイ面内とフィッシュアイ周囲に形成される半円状領域のそれぞれの酸化度合いにより分類することができた。
- (2) 同一破面上に複数個のフィッシュアイを有する破面においては、フィッシュアイが試験片表面に到達した後、そのフィッシュアイ面内が酸化物で覆われ閉塞状態

となり表面き裂としては進展せず最終破壊には直接関与しないサブフィッシュアイ（図 6 (a)）と、閉塞状態とはならないで最終破壊をもたらすメインフィッシュアイ（図 6 (b)）に分類することができた。

(3) 形成されたフィッシュアイがメインフィッシュアイとなるかサブフィッシュアイとなるかの条件としては、表面き裂となった時点でのフィッシュアイの試験片中心方向先端の応力拡大係数とフィッシュアイ面における酸化物誘起き裂閉口現象の影響との兼ね合いによってもたらされることを明らかにした。

第 6 章 本論文により得られた成果の工学的意義と課題

一般に、鉄鋼材料の疲労限度はき裂の発生限界応力ではなく、発生したき裂が進展するか停留するかの限界応力であるとされてきた。¹⁾ また高強度鋼や表面強化処理材などに認められるフィッシュアイを伴う内部破壊にお

いては、試験片表面に到達したフィッシュアイは必ず表面き裂となって進展し、最終破壊をもたらすものであった。^{19)~23)}

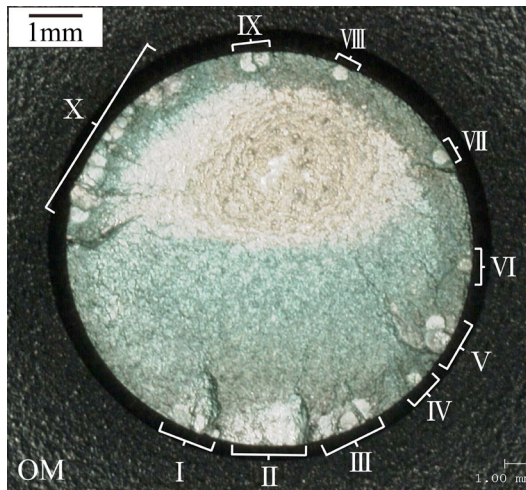
しかし本論文では、高温におけるフィッシュアイを伴う破壊形態においては、内部で発生したき裂がフィッシュアイとして成長し、試験片表面に到達して表面き裂となり、表面き裂として進展する過程において、フィッシュアイ面に及ぼす酸化物誘起き裂閉口現象によって、疲労き裂の停留現象が起こることを明らかにした。場合によっては停留したき裂近傍に新たな表面き裂が誘起され、破壊に至る場合のあることも明らかとした。これらの成果は、鉄鋼材料の高温における疲労限度の意味を考える上で貴重な知見を与えるもので、工学的意義は大きいものとする。なお残された課題としては、表面き裂となったフィッシュアイ面上において酸化物による閉塞現象の進行度合いと表面き裂としてのき裂進展速度との関係などに基づく考察などが挙げられた。

第 7 章 総括

高温機器用材料であるオーステナイトステンレス鋼と低合金鋼の高温疲労における 2 段 S-N 曲線の高寿命域での破壊形態について、第 2 章から第 6 章までの結果をまとめて総括とした。

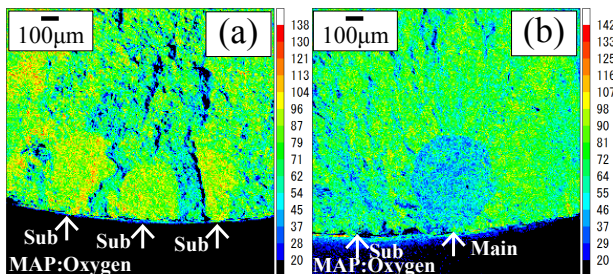
参考文献

- 1) 日本材料学会編, “疲労強度設計”, (1995) 養賢堂.
- 2) 金澤他, 材料, 22-234, pp.257-264 (1973).
- 3) 金澤他, 材料, 23-253, pp.835-841 (1974).
- 4) 金澤他, 材料, 46-12, pp.1396-1401 (1997).
- 5) 藤山, あたりあ, 39-11, pp.873-877 (2000).
- 6) 新田, 材料, 56-1, pp.90-96 (2007).
- 7) 野中他, 材料, 62-2, pp.105-109 (2013).
- 8) S. Yoshida, et al., Trans. of NRIM, 20-1, pp.60-83 (1978).
- 9) S.Suresh, et al., Metall. Trans., 12A, pp.1435-1443 (1981).
- 10) 小林他, 機論, 50A-453, pp.1003-1010 (1984).
- 11) 浅見他, 材料, 33-372, pp.1173-1178 (1984).
- 12) 竹内他, 機論, 60A-570, pp.344-351 (1994).
- 13) 小林他, 機論, 49A-443, pp.771-778 (1983).
- 14) 小倉他, 機論, 52A-473, pp.89-98 (1986).
- 15) 西川他, 機論, 53A-490, pp.993-999 (1987).
- 16) NRIM, NRIM Fatigue Data Sheets, 42 (1984).
- 17) NRIM, NRIM Fatigue Data Sheets, 72 (1992).
- 18) 金澤他, 材料, 52-6, pp.646-652 (2003).
- 19) 江村他, 機論, 55A-509, pp.45-50 (1989).
- 20) 阿部他, 材料, 40-458, pp.9-15 (1996).
- 21) 酒井他, 材料, 49-7, pp.779-785 (2000).
- 22) 森山他, 機論, 65A-639, pp.2267-2273 (1999).
- 23) 魯他, 機論, 67A-662, pp.1630-1638 (2001).



$$\sigma_a=240\text{MPa}, N_f=7.80 \times 10^8$$

図 5 同一破面上に 20 数個のフィッシュアイが観察された破面⁴⁾



サブフィッシュアイ (セクションIII) メインフィッシュアイ (セクションII)

図 6 図 5 の破面におけるメインフィッシュアイとサブフィッシュアイの酸化度合いの相違