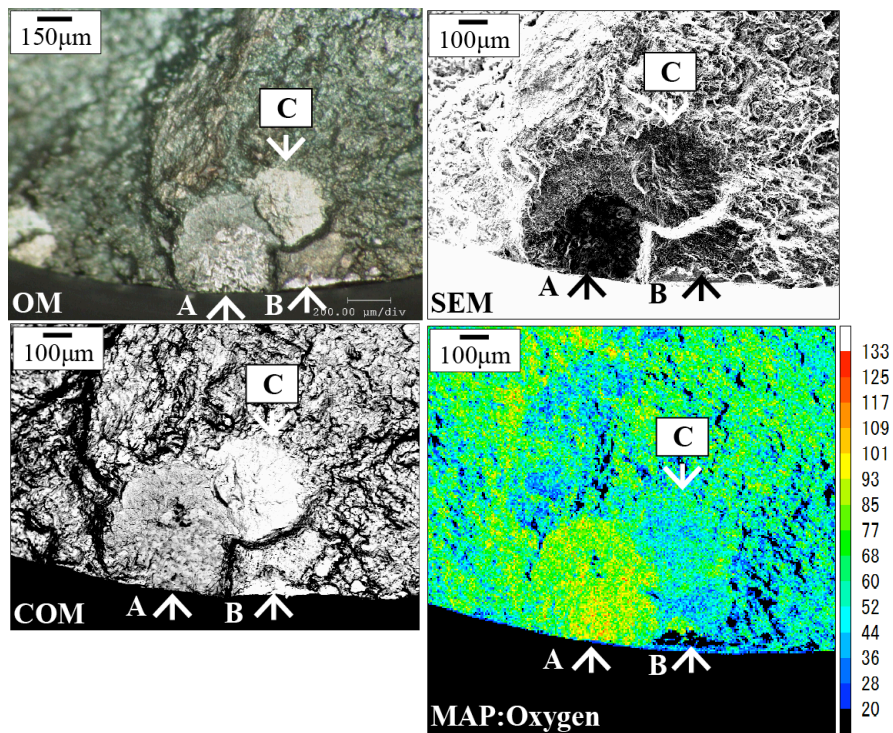


(c) Section II



(d) Section V

図 5-9 マルチフィッシュアイ破面上のフィッシュアイの例 (つづき)

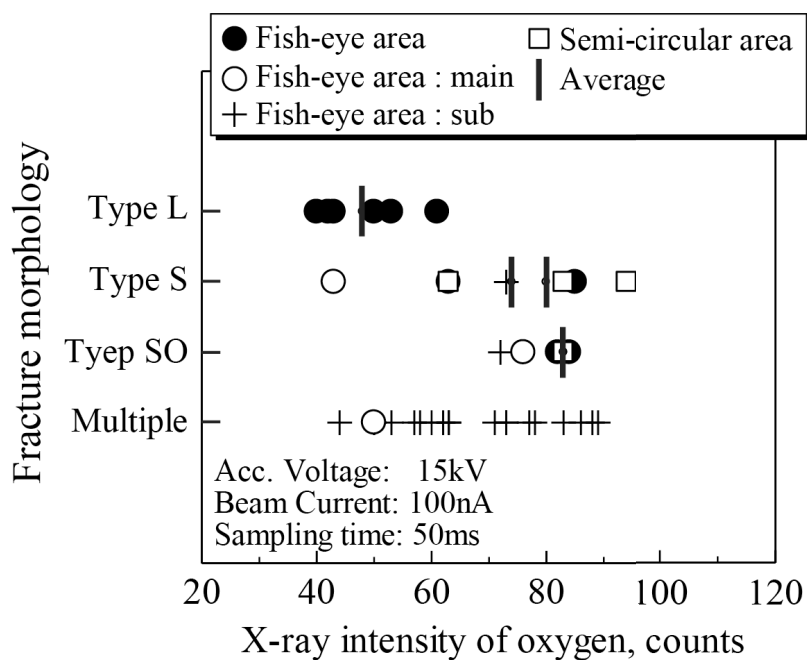


図 5-10 破壊形態と酸素の X 線強度（濃度）との関係

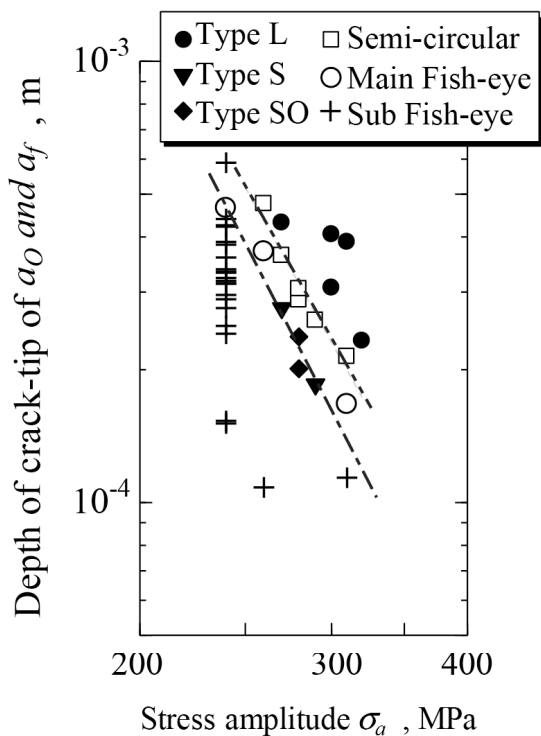


図 5-11 表面からのき裂深さと応力との関係

第 6 章

本論文により得られた成果の工学的意義と課題

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とは、かつてはき裂の発生限界応力と考えられてきたが、現在は、発生したき裂が進展するか停留するか限界応力であるとされている。^{1), 2)} き裂進展に影響を及ぼす因子としては、疲労試験中の硬化現象、酸化物誘起き裂閉口現象、塑性誘起き裂閉口現象などと考えられている。このように、疲労破壊現象である表面き裂の発生や進展過程においては種々の知見が得られている。^{1), 2)} また、高強度鋼や表面強化処理が施された材料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。^{3)~10)}

しかし、本論文で認められた破壊形態においては、試験片内部を起点として発生したフィッシュアイが試験片表面に到達し、表面き裂として進展する過程において、フィッシュアイ破面に及ぼす酸化物誘起き裂閉口現象によって、もはや最終破壊を導く表面き裂として進展しなくなる停留現象が起こることを明らかにした。場合によっては、停留したき裂の試験片表面近傍に新たな表面き裂が誘起され、最終破壊をもたらすことも明らかとなった。

これらの成果は、鉄鋼材料の高温高サイクル疲労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あると考える。

今後、さらに高温高サイクル疲労における疲労破壊現象を把握するためには、得られた疲労破面に対して、本論文に基づく破面観察及び分析手法を用いれば、破壊形態やその形成過程と形成機構など明らかにされるものと予測する。また、残された課題としては、フィッシュアイが試験片表面に到達後、フィッシュアイが酸化物で閉塞状態となり停留するか否かの限界条件、新たな表面き裂が誘起されるか否かの限界条件などを明らかにする必要がある。そのためには、表面き裂

となったフィッシュアイ面上における酸化物生成量と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に基づく解析が必要と考えられる。もし、これらの限界条件が明らかとなれば、高温環境下における高寿命域での疲労破壊現象を工学的に制御できうる可能性があるものとする。

参考文献

- 1) 日本材料学会編, “疲労設計便覧”, (1995) 養賢堂.
- 2) 日本材料学会編, “材料強度学”, (2005) 日本材料学会.
- 3) 江村秀樹, 浅見克敏, “高強度鋼の疲労強度特性”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.55, No.509, pp.45-50 (1989).
- 4) 阿部孝行, 金澤健二, “高強度鋼の疲労強度と疲労き裂発生・進展”, 材料, Vol.40, No.458, pp.1447-1452 (1991).
- 5) 村上敬宣, “微小欠陥と介在物の影響”, (1993) 養賢堂.
- 6) 金澤健二, 阿部孝行, 西島敏, “高硬度鋼の疲労特性”, 金属材料技術研究所データシート資料 9, (1995) 科学技術庁 金属材料技術研究所.
- 7) 森山三千彦, 永野茂憲, 皮籠石紀雄, 高木節雄, 長島悦一, “18%Ni マルエージング鋼の疲労強度に及ぼすショットピーニングの影響”, 日本機械学会論文集論文集 A 編, Vol.65, No.639, pp.2267-2273 (1999).
- 8) 酒井達雄, 武田光弘, 塩沢和章, 越智保雄, 中島正貴, 中村孝, 小熊規泰, “高炭素クロム軸受鋼の広寿命域における特徴的回転曲げ疲労特性に関する実験的検証”, 材料, Vol.49, No.7, pp.779-785 (2000).
- 9) 魯連涛, 塩沢和章, “高炭素クロム軸受鋼の超長寿命疲労強度に及ぼすショットピーニングの影響”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.67, No.662, pp.1630-1638 (2001).
- 10) 独立行政法人物質材料研究機構, “強度材料の超音波疲労特性”, 構造材料データシート資料 19, (2013) 独立行政法人物質材料研究機構.

第 7 章

総 括

第7章 総括

機械・構造物の経済性，安全性を追求する時代背景から，機械・構造物を構成する部材の耐用年数を考慮しつつ軽量化，高寿命化が実現できるよう設計することが求められている．特に安全性といった観点から，高寿命域での疲労破壊現象や疲労特性について把握することは必要不可欠である．

本論文では，高温環境下における高寿命域での疲労破壊現象について，形成されたき裂面に及ぼす酸化の効果といった観点から観察及び分析をし，破壊形態の分類とその形成過程について検討を行った．その結果を以下に総括する．

第1章では，緒論として本論文の背景と目的，構成を述べた．

第2章では，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いて2段のS-N曲線となった高寿命域での疲労破壊現象について取り扱った．疲労試験片としてオーステナイトステンレス鋼 SUS321-B を準備し，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検討した結果，以下の結論を得た．

- (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・高寿命域では試験片内部を起点としたフィッシュアイを伴う内部破壊であることを明らかにした．いずれの破壊形態においてき裂発生起点は，非金属介在物が集合した領域であった．
- (2) 内部破壊を起こした場合は，表面直下を起点とした小さなフィッシュアイを伴う表面直下型の内部破壊と，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伴う内部破壊の2つが認められた．前者の場合，フィッシュアイ周囲にやや着色された半円状領域が形成されていた．

- (3) 2段の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、疲労限度が認められるS-N曲線になるが、 10^7 サイクルを超える高寿命域になると軟化傾向が現れることを示した。
- (4) 高寿命域において軟化傾向を示しても、試験片表面にもある非金属介在物が集合した箇所を起点とした表面破壊が認められなかったのは、表面き裂が発生してもき裂進展を抑制する機構が働くことが示唆された。

第3章では、第2章で得られた高寿命域での破壊形態において、そ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た。そこで、本章では、第2章で得られた破面を観察対象とし、フィッシュアイを含む広い領域に対して、EPMAを用いて破面上の酸化度合いについて評価を行った。これら観察及び分析結果から、破壊形態に及ぼす酸化効果について検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) 低応力・高寿命域での破壊形態の多くは、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、そのフィッシュアイの周囲には酸化された半円状領域を伴っており、フィッシュアイ面内と半円状領域のそれぞれの酸化度合いにより破壊形態を分類できることを明らかにした。
- (2) 高温高サイクル疲労での新たな破壊形態としては、フィッシュアイが試験片表面に到達後、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っても、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に新たなき裂が発生し進展することで、破壊に至る現象があることを明らかにした。
- (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、表面き裂となったき裂面における酸化物誘起き裂閉口現象を伴う酸化の進行度合い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。

第4章では、第3章までに得られた破壊形態とその形成過程は、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について取り扱った。疲労試験片としてオーステナイトステンレス鋼 SUS304-HP を準備し、第3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・軟化現象の測定を行い、得られた破面に対して観察・分析をし検討した結果、以下の結論が得られた。

- (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傾向であったが、 10^7 サイクルを越える高寿命域になると試験片が軟化傾向を示し、試験片内部の非金属介在物が集合した領域が起点となるフィッシュアイを伴う内部破壊であった。
- (2) 低応力・高寿命域での破壊形態の多くは、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、破壊形態を分類できることを明らかにした。
- (3) オーステナイトステンレス鋼の 700°C における破壊形態とその形成過程は、再現性のある現象であることが明らかとなった。
- (4) 低応力・高寿命域で表面にある非金属介在物が集合した領域を起点とした表面破壊が認められないのは、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くものと考えられた。

第5章では、第4章までに得られた破壊形態やその形成過程は、他の鋼においても同様に認められる現象なのか確認を行った。観察の対象とした試験片は低合金鋼 SCM V2-2NT で、既に 400°C のもと疲労試験が行われ2段 S-N 曲線となった高寿命域でフィッシュアイを伴う内部破壊を起こした破面を準備し、第4章までと同じ観察及び分析方法を用いて破壊形態に及ぼす酸化効果という観点から検討を行った。さらに、観察対象とした試験片には、同一破面上に複数個のフィッシュ

アイが認められたとの報告がなされているが、その形成過程を明らかにするべく検討した結果、以下の結論が得られた。

- (1) 低合金鋼の 400°Cにおける破壊形態としては、オーステナイトステンレス鋼の 700°Cにおける破壊形態と同様に、フィッシュアイ面内と半円状領域の酸化度合いにより破壊形態を分類できることを明らかにした。
- (2) 最終破壊をもたらすフィッシュアイは、破面上に単一のフィッシュアイを伴う破面も、複数のフィッシュアイを伴うマルチフィッシュアイ破面も、いずれの場合も酸化度合いが低いことがわかった。
- (3) 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、最終破壊には直接関与しないサブフィッシュアイが2通り認められた。すなわち、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停留してしまう場合と、試験片内部でフィッシュアイとして同心円的に進展過程にある場合とに分類できることを明らかにした。
- (4) 形成されたフィッシュアイが試験片表面に到達した後、最終破壊をもたらすメインフィッシュアイとなるか、閉塞状態となり停留してしまうサブフィッシュアイとなるかは、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形成されたき裂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章では、本論文により得られた成果の工学的意義と課題を述べた。

第7章では、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。

本論文で得られた知見を基にすると、高温における疲労限度の意味を考える上で、新たな情報を提供する一助となり得るものとする。

本研究に関する著者の

発表論文と口頭発表

本研究に関する著者の発表論文と口頭発表

1. 発表論文

- (1) 高橋幸男, 金澤健二, 杉本真優, 村井里穂, 岡田紘明, “ステンレス鋼 SUS316NG の 300°Cにおける疲労破壊に対する予加工と動的ひずみ時効の効果”, 材料, Vol.60, No.8, pp.728-734 (2011).
- (2) Y. Takahashi, K. Kanazawa and M. Sugimoto, “Internal fracture of austenitic stainless steels under high cycle fatigue regions”, Proceedings of the fifth international conference on very high cycle fatigue, pp.83-88 (2011).
- (3) 高橋幸男, 小林真優, 金澤健二, “オーステナイトステンレス鋼の高温高サイクルにおける 2 段 S-N 曲線と内部破壊”, 材料, Vol.62, No.2, pp.99-104 (2013).
- (4) 高橋幸男, 井原透, 金澤健二, “オーステナイトステンレス鋼 SUS321-B の 700°Cにおける高疲労寿命領域でのフィッシュアイを伴う破壊形態”, ばね論文集, Vol.59, pp.19-27 (2014).

2. 口頭発表

- (1) 金澤健二, 杉本真優, 高橋幸男, “ステンレス鋼の超高サイクル域における内部疲労破壊”, 日本機械学会, M&M 材料力学カンファレンス 2010 講演論文集, pp.1029-1030 (2010).
- (2) 高橋幸男, 大川達也, 杉本真優, 金澤健二, “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内部破壊”, 日本材料学会, 第 60 期学術講演会論文集, pp.13-14 (2011).
- (3) Y. Takahashi, K. Kanazawa and M. Sugimoto, “Internal fracture of austenitic stainless steels under high cycle fatigue regions”, The fifth international conference on very high cycle fatigue, June 28-30, 2011 Berlin, Germany.
- (4) 高橋幸男, 大川達也, 杉本真優, 金澤健二, “オーステナイトステンレス鋼の高温疲労における 2 段 S-N 曲線と内部破壊”, 日本材料学会, 高温強度・破壊力学合同シンポジウム講演論文集 (第 49 回高温強度シンポジウム, 第 15 回

破壊力学シンポジウム), pp.131-135 (2011).

- (5) 高橋幸男, 大川達也, 杉本真優, 金澤健二, “オーステナイトステンレス鋼の 700°Cにおける高サイクル疲労寿命域での内部破壊”, 日本材料学会, 第 61 期学術講演会論文集, pp.193-194 (2012).
- (6) 高橋幸男, 金澤健二, “SUS304-HP 鋼の 700°Cにおける高寿命域での疲労破壊形態”, 日本機械学会, M&M 材料力学カンファレンス 2012CD-ROM 講演論文集, OS2101, (2012).
- (7) 高橋幸男, 金澤健二, 小林真優, “低合金鋼の高温高サイクル疲労におけるマルチフィッシュアイの形成”, 日本材料学会, 第 31 回疲労シンポジウム講演論文集, pp.176-180 (2012).
- (8) 高橋幸男, 金澤健二, 小林真優, “EPMA を用いたステンレス鋼 SUS321-B の 700°Cにおける高寿命域での内部破壊の破面観察”, 日本材料学会, 第 50 回高温強度シンポジウム講演論文集, pp.56-60 (2012).
- (9) 高橋幸男, 井原透, 金澤健二, “オーステナイトステンレス鋼の 700°Cにおけるフィッシュアイを伴う疲労破壊形態に及ぼす酸化効果”, 日本ばね学会, 2014 年度春季ばね及び復元力応用講演会, pp.5-8 (2014).
- (10) 高橋幸男, 金澤健二, “オーステナイトステンレス鋼の 700°Cにおけるフィッシュアイを伴う疲労破壊形態”, 日本機械学会, M&M 材料力学カンファレンス 2014CD-ROM 講演論文集, OS2102 (2014).

謝 辭

謝 辞

本論文を纏めるにあたり、懇切なるご指導、ご教示を賜った元中央大学工学部精密機械工学科教授 金澤健二博士に深甚なる謝意を表します。金澤健二博士には、学部生として研究室に所属させていただいた時代、中央大学工学部精密機械工学科にて教育技術員として勤務させていただいた頃、いつも変わらず熱心なご指導ご鞭撻を賜ったこと厚く感謝申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、主査として中央大学工学部精密機械工学科教授 井原透博士には、ご指導、ご助言、多大なるご支援を賜りましたこと深甚なる謝意を表します。

本論文のご審査及び貴重なご助言を賜りました中央大学工学部精密機械工学科教授 辻知章博士、中央大学工学部精密機械工学科准教授 米津明生博士、には深く御礼申し上げます。本論文のご審査をお引受くださった中央大学工学部応用化学科教授 新藤斎博士、電気通信大学名誉教授 越智保雄博士には感謝の意を表します。また、研究に臨む姿勢など貴重なご助言を賜りました元中央大学工学部精密機械工学科教授 井上英夫博士には深く御礼申し上げます。

本研究は、中央大学工学部精密機械工学科材料工学研究室（1996年度～2011年度）にて、金澤健二博士のもと多くの学生が取り組まれてきた研究の成果を礎としており、同研究室の卒業生、修了生の皆様にあらためて感謝の意を表します。特に、同研究室ご出身である元中央大学工学部精密機械工学科助教（現 警視庁科学捜査研究所）小林真優博士には、数々のご助言、ご支援をいただき深く感謝申し上げます。

日々の研究活動を遂行するにあたり、快く受け入れていただいた中央大学工学部精密機械工学科の教職員の皆様に厚く御礼申し上げます。

最後に、親・家族から絶え間ない支えをいただいたこと深く感謝いたします。

2015年3月 高橋 幸男