

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年6月3日現在

機関番号：82108

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760106

研究課題名（和文）ナノビーチマーク法による高強度鋼のギガサイクル疲労機構の解明

研究課題名（英文）Elucidation of gigacycle fatigue mechanism of high-strength steel using a nano beach mark method

研究代表者

古谷 佳之（FURUYA YOSHIYUKI）

独立行政法人物質・材料研究機構・材料信頼性評価ユニット・主幹研究員

研究者番号：60354255

研究成果の概要（和文）：

高強度鋼のギガサイクル疲労機構を解明するためには内部き裂の伝ば挙動を解明する必要があるが、ビーチマークを用いて内部の微小な疲労き裂の伝ば挙動を可視化することに成功した。その結果、発生直後の内部き裂では、き裂伝ば速度が格子間隔より小さくなり得ることが分かった。これは、き裂伝ば支配説に基づくギガサイクル疲労強度の評価を可能にするものである。

研究成果の概要（英文）：

The internal fatigue crack growth was successfully visualized by using beach marks, which is necessary for the elucidation of gigacycle fatigue mechanism of high-strength steel. The beach marks indicated that a minimum crack propagation rate could be smaller than a lattice length. This means that evaluation of the gigacycle fatigue strength could be based on the crack propagation life.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 機械材料・材料力学

キーワード：

1. 研究開始当初の背景

通常、鋼の疲労限 σ_w は引張強度 σ_B やビッカース硬さ HV とよい相関を示し、疲労限の推定には $\sigma_w=0.5\sigma_B=1.67HV$ 型のモデルが使用される。ところが、高強度鋼のギガサイクル疲労（内部破壊）の場合には引張強度や硬さとの相関が小さくなるため[文献：金材技研材料強度データシート資料 No.9 (1995), 20]、この型のモデルは使用できない。また、最近の研究で高強度鋼のギガサイクル疲労では寸法効果が大きく、疲労試験結果が試験片寸法に依存することが明らかとなった[文献：古谷他，鉄と鋼，95(2009)，426]。このことは、単に疲労試験を行っただけではその材

料の疲労強度を求めることができないことを意味する。すなわち、現状では高強度鋼の疲労強度の評価は厳密にはできておらず、機械部品の設計者は経験と過剰な安全率を頼りに高強度鋼を使いこなしていくしか道が無い。このような状況を打破するため、高強度鋼におけるギガサイクル疲労の本質的なメカニズムの解明が必要なことを痛感した。

高強度鋼のギガサイクル疲労の問題は近年盛んに研究され、多くの発見が成された。その結果、内部破壊は通常の疲労で見られる表面破壊とは特性が大きく異なり、表面破壊とは独立な内部破壊の S-N 曲線が存在するという 2重 S-N 曲線の考え方[Sakai et al.,

Int. J. Fatigue, 32(2010),497]が定着しつつある。また、高強度鋼のギガサイクル疲労における主な支配因子が介在物寸法であることは多くの実験結果により裏付けられている。内部破壊によるギガサイクル疲労メカニズムについて現状を整理すると、主に以下の3つの説に大別することができる。

1) き裂発生支配説

き裂伝ば速度が格子間隔程度(最小値)だとしても、ギガサイクル域に達する前に試験片を破断させる大きさまでき裂が成長するため、き裂発生寿命が全寿命の大半を占めるとする説。一見すると合理的に思えるが、き裂発生支配の場合、介在物寸法を考慮したモデリングが困難となる。

※き裂発生の場合には応力集中係数がパラメータとなるが、応力集中係数は形状のみによって決まり、寸法は影響しない。

2) 停留き裂支配説

停留き裂の存在を仮定すると応力拡大係数がパラメータとなり、介在物寸法を考慮したモデリングが可能となる。ギガサイクル疲労の場合には疲労限が存在しないため、停留き裂も存在しないと考えられるが、ODA (Optically Dark Area)と呼ばれる特異なき裂伝ば領域を欠陥の成長とみなすことでモデリングが可能とされている。しかし、実際にはODAの成長速度の定量的な評価が不完全なため、有効なモデリングはできていない。

3) き裂伝ば支配説

この場合も応力拡大係数がパラメータとなるため、介在物寸法を考慮したモデリングが可能である。また、繰返し数も考慮できるため、ギガサイクル疲労のモデリングも可能である。ただし、通常の実験では確認できない極低速(格子間隔以下)でのき裂伝ばを仮定しなければならない。

これら3説のうち、ギガサイクル疲労強度を定量的に推定する上で最も合理的なものは3)のき裂伝ば支配説である。ただし、その場合には1)の説で指摘されているき裂伝ば速度の問題について説明する必要がある。すなわち、極低速(格子間隔以下)でのき裂伝ばが実在することを証明する必要がある。

2. 研究の目的

内部破壊による高強度鋼のギガサイクル疲労強度の評価法を確立するために、き裂伝ば支配説の実証を行う。そのためには、内部き裂伝ば挙動を解明し、極低速(格子間隔以下)でのき裂伝ばが実在することを証明する必要がある。ただし、内部き裂の場合には表面き裂のように直接観察することができな

い。そこで、本研究ではビーチマークを用いた内部き裂伝ば挙動の解析技術(ナノビーチマーク法)を確立する。ビーチマークとは変動荷重が作用した場合に疲労破面上に形成される模様であるが、実験的には2段多重変動応力試験を行うことにより破面上に再現することができる。このようなビーチマークを観察することにより、内部き裂の伝ば挙動を調べることができる。従って、本研究のより具体的な目的はビーチマークを用いた内部の微小な疲労き裂の伝ば挙動を可視化する技術を確立し、内部き裂の伝ば挙動を解明することである。

3. 研究の方法

発生直後の疲労き裂は非常に小さいため、初期の内部き裂の伝ば挙動を観察するためには微小かつ明瞭なビーチマークを作製する必要がある。そのためには、最適な変動荷重疲労試験の条件を探索する必要がある。この作業は2段多重疲労試験により破断させた試験片の破面を観察し、有効なビーチマークが形成されていない場合には条件を見直して再び2段多重疲労試験を行うという試行錯誤により行う。この作業には膨大な時間を要するが、超音波疲労試験を用いた加速試験技術を用いることにより、所要時間の短縮を図った。また、最適条件を探索する際には応力条件だけでなく、試験片の材種や熱処理条件の最適化も図った。

4. 研究成果

最適条件の探索を行った結果、以下の条件により十分に微小かつ明瞭なビーチマークが得られることが分かった。まず、材料は低合金鋼SCM440の熱間圧延丸棒である。熱処理は880℃、30分、油冷の焼入れと、200℃、60分、空冷の焼戻しである。応力条件は図1の通りである。疲労試験は応力振幅が500MPa、応力比がR=0の条件で行い、10⁶回毎に応力振幅が800MPaの変動荷重を与える。変動荷重の平均応力は500MPa、回数は10⁴回である。

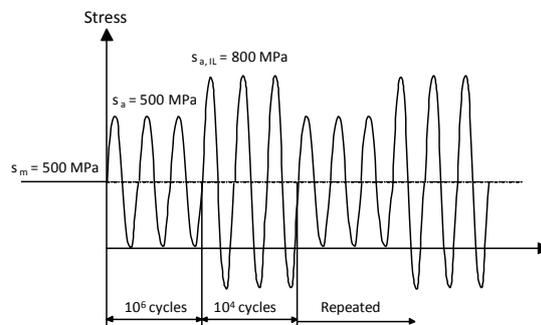
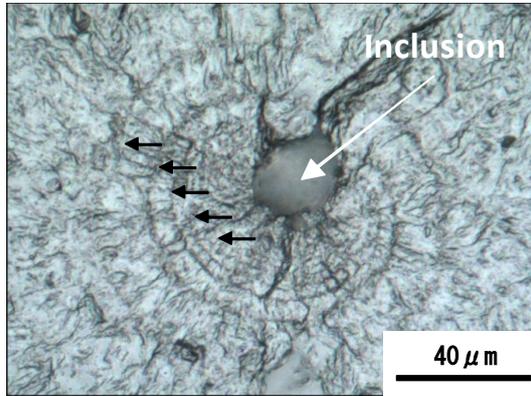
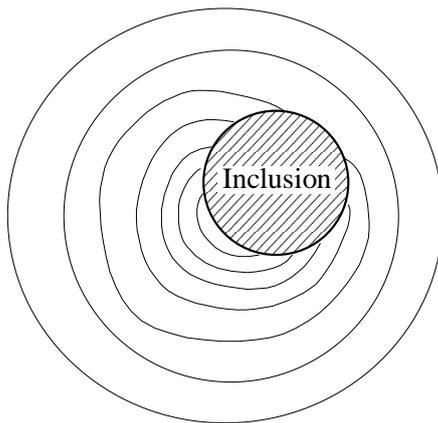


図1 応力条件

上記の試験の結果得られた破面を図2に示す。(a)の矢印で示すように、多数の微細なビーチマークが認められる。ビーチマークの様子をスケッチしたのが(b)である。この試験片は 4.73×10^7 回で破断した。従って、変動荷重の回数(ビーチマークの最大数)は47である。



(a) 破面の光学顕微鏡写真



(b) ビーチマークのスケッチ
図2 破面の様子

ビーチマークの様子から分かるように、き裂は介在物の一部から発生し、初期の形状はリング状ではなく半楕円形状である。この場合、図3に図示するように2次元き裂と3次元き裂は等価とはならない。内部き裂の形状が通常のリング状であれば2次元き裂と3次元き裂が等価となるため、1. の1) で述べたような比較的単純な議論が可能であるが、2次元き裂と3次元き裂が等価でない場合には議論が複雑となる。仮に3次元き裂の平均的な伝ば速度を2次元き裂の伝ば速度とみなした場合には、2次元き裂の伝ば速度は非常に小さくなる。すなわち、局所的なき裂伝ば速度は格子間隔以上であっても、平均的なき裂伝ば速度は格子間隔以下となり得る。

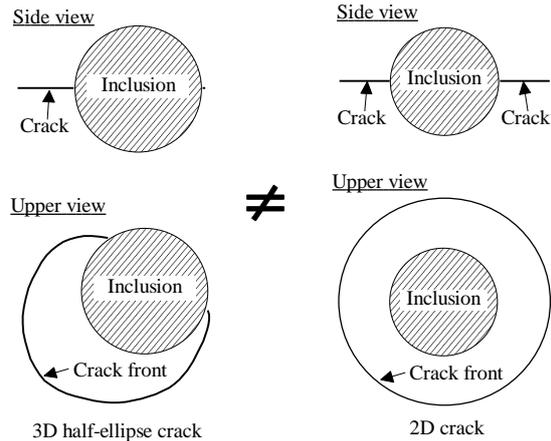


図3 3次元半楕円き裂と2次元き裂の比較

また、破面を詳細に観察すると少なくとも15個のビーチマークを確認することができる。ビーチマークの最大数は47であるため、き裂伝ば寿命は全寿命に対して30%以上となる。より具体的には全寿命は 4.73×10^7 回であるため、き裂伝ば寿命は 1.42×10^7 回以上である。仮にき裂伝ば速度が一定で試験片の半径である1.5mmまで疲労き裂が成長すると仮定すると、き裂伝ば速度は0.1nmとなる。実際には寿命末期のき裂伝ば速度は非常に速いため、き裂伝ば速度の最小値は平均的な伝ば速度である0.1nmより小さくなる。すなわち、き裂伝ば速度の最小値は格子間隔より小さかったことになる。

以上のように、本研究では内部き裂伝ば挙動の可視化に成功し、内部き裂伝ば挙動を解明することができた。その結果、発生直後の内部き裂では2次元き裂と3次元き裂が等価とならないため、2次元き裂で考えた場合のき裂伝ば速度の最小値は格子間隔以下となることを実証した。すなわち、き裂伝ば支配説に基づくギガサイクル疲労強度の評価は可能である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

(1) 古谷佳之: SCM440 鋼ダブルメルト材のギガサイクル疲労特性と寸法効果、鉄と鋼、査読有、99(2013)、pp. 373-379

DOI:

<http://dx.doi.org/10.2355/tetsutohagane.99.373>

〔学会発表〕(計2件)

① 古谷佳之: SCM440 鋼ダブルメルト材のギガサイクル疲労特性、日本鉄鋼協会 第164回秋季講演大会、2012年9月17日、

- 愛媛大学
- ② 古谷佳之：高純度鋼のギガサイクル疲労における寸法効果、日本機械学会2012年度年次大会、2012年9月10日、金沢大学

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古谷 佳之 (FURUYA YOSHIYUKI)
独立行政法人物質・材料研究機構・材料信頼性評価ユニット・主幹研究員
研究者番号：60354255

(2) 研究分担者 無し

(3) 連携研究者 無し