

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 9 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820016

研究課題名(和文)高ひずみ速度下における疲労強度評価技術に関する研究

研究課題名(英文)Study on fatigue strength evaluation technique under high-strain rate

研究代表者

直江 崇(Naoe, Takashi)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 J-PARCセンター・研究副主幹

研究者番号：00469826

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：高ひずみ速度の繰返し負荷に対する耐久性評価とその損傷診断技術の開発のための基礎研究として、超音波法によるギガサイクル疲労試験を実施し、疲労過程で生じる微小き裂から主き裂に移行する過程を非破壊的に捕らえる手法を検討した。オーステナイト系ステンレス鋼SUS316Lの溶体化処理材及び冷間圧延材に対して、室温及び約250度でのギガサイクルまでの疲労データを構築すると共に、疲労試験中に観測された破断直前の急激な温度上昇のメカニズムについて実験的・解析的に究明した。

研究成果の概要(英文)：As a fundamental study of fatigue durability investigation and its diagnostic technique under high-strain rate and high-cycle loading, we have performed gigacycle fatigue test using an ultrasonic fatigue testing machine to investigate the nondestructive detection technique of fatigue crack initiation and propagation. Fatigue strength of solution-annealed and cold-worked austenitic stainless steel SU316L up to 10^9 cycles under room temperature and 250 degC were evaluated. Furthermore, the mechanisms of abrupt temperature rise observed in the fatigue test were experimentally and analytically investigated.

研究分野：機械材料・材料力学

キーワード：ギガサイクル疲労 超音波疲労 き裂検出 熱弾性効果

1. 研究開始当初の背景

液体水銀ターゲットに数MWのパルス陽子線を入射して大強度の中性子を発生させる核破砕パルス中性子源では、液体金属の急峻な熱膨張によって生じるキャビテーションに伴う壊食がターゲット容器の構造健全性を著しく低下させる。加えて、毎秒数十回入射する陽子ビームによって励起される水銀中の圧力波の影響で、使用中に数億回以上の繰返し負荷を受け、壊食が激しい箇所を起点として疲労破壊することが懸念されている。実際、米国中性子源の水銀ターゲットでは、厚さ3mmのステンレス鋼壁を貫通する程の激しい壊食損傷を起点とした疲労破壊が観測された。さらに、照射後試験として実施された準性的な引張り試験では、7 dpa までの照射後でも使用に耐える延性を有することが示されたが、一部の試料で介在物を起点としたき裂の伝ばにより顕著な伸びの減少が観測された[1]。

これまでに、圧力波に起因する壊食損傷が疲労強度に与える影響について、損傷付加試験片を用いた曲げ疲労試験により評価し、壊食による強度低下は、延性が確保される積算照射量(5 dpa)に基づいた設計寿命よりも短時間で生じることを明らかにした。一方、研究代表者の所属するグループが開発した水銀中圧力波の緩和技術によって壊食損傷はある程度防げる見込みであり、今後は、照射と疲労による材料劣化が中性子源の寿命を支配する因子となる。

一般的にギガサイクル疲労では、表面からき裂が伝ばしない低応力範囲であっても、介在物を起点としたき裂伝ばにより破断することが知られている[2]が、オーステナイト系ステンレス鋼の高ひずみ速度、且つギガサイクル領域の疲労強度は十分調べられていない。

2. 研究の目的

本研究では、高ひずみ速度負荷条件下での材料の耐久性を明らかにすると共に、疲労に対するその場診断技術の開発を最終目的とし、(1)高ひずみ速度によるギガサイクル繰返し応力負荷に伴う疲労強度の評価、(2)ギガサイクル領域での照射による疲労強度劣化の評価、(3)遠隔非接触での疲労き裂検出技術の開発を実施した。

3. 研究の方法

(1)高ひずみ速度下でのギガサイクル繰返し応力負荷に伴う疲労強度評価

従来の手法と比較してギガサイクル領域までの疲労試験を短時間で実施可能な超音波疲労試験法により、パルス中性子源ターゲット容器構造材であるオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L の溶体化処理材(SA材)に対して、実際に負荷されるひずみ速度に近い 10^2 1/s 程度のひずみ速度で疲労試験を実施した。本研究では、疲労き裂の発生により試験片の共振周波数が 0.5 kHz 低下した場合を破断と定義した。

高ひずみ速度での変形に伴う発熱を抑えるために、間欠負荷に加えて圧縮空気による冷却を実施し、従来の疲労データと比較考察することで疲労強度に及ぼすひずみ速度、及び試験温度の影響を評価した。

(2)ギガサイクル領域での照射による疲労強度劣化の評価

照射による転位導入を模擬するために SUS316L に対して冷間圧延を施した板材(CW材)から疲労試験片を作成し、加工度と疲労強度との関係について超音波疲労試験により調査した。また、任意の繰返し数で疲労試験を中断し、引張り強度及び断面硬度を測定し、繰返し過程における材料の力学特性変化を調べた。

(3)遠隔非接触での疲労き裂検出技術の開発

これまでに予備的に実施した超音波疲労試験において、疲労破壊する直前に試験片表面温度が著しく上昇する減少を観測している。本研究では、疲労き裂の発生・進展により生じる急激な温度上昇の挙動と、そのメカニズムを明らかにし、き裂検出技術として適用するために、放射温度計及びサーモグラフィを用いて温度及びその分布の計測を実施すると共に、解析的な検討を実施した。

4. 研究成果

(1)高ひずみ速度下でのギガサイクル繰返し応力負荷に伴う疲労強度評価

図1に示す超音波疲労試験装置を用いて、高ひずみ速度下での疲労試験を実施した。図

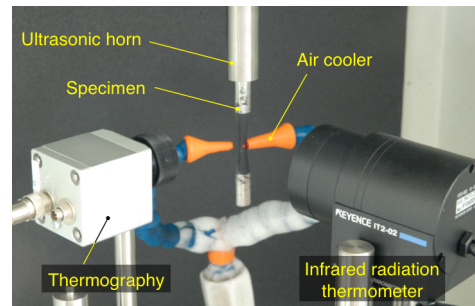


図1 超音波疲労試験装置

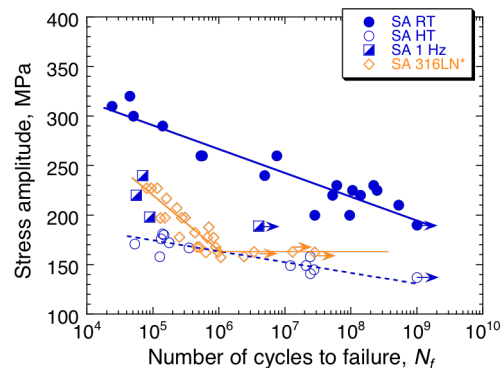


図2 SA材の室温と250℃のS-N曲線

2にSA材の室温(RT),及びターゲット容器使用環境を想定して表面温度が250°Cになるように冷却量を調整(HT)して実施した疲労試験結果を示す. 負荷周波数は20 kHz, 応力比は-1である. なお, 運転0.11 s, 休止5.0 sでの間欠運転を実施したため単位時間あたりの負荷回数は430回である.

図中に超音波疲労試験と同じSA材を用いた1 Hz(応力比0.1)試験の結果,及び316LN材の10 Hz(応力比-1)試験結果[3]を併せて示す. いずれの場合もひずみ速度は 10^{-1} 以下である. 通常の疲労試験と比較するとひずみ速度が速いため,超音波疲労試験では疲労強度が高くなる傾向にあることが分かる.

また,試験温度の上昇によって疲労強度が著しく低下する傾向が確認されたが, 10^9 回までの疲労試験では,RT及びHT共に明確な疲労限度は観測されなかった.

(2) ギガサイクル領域での照射による疲労強度劣化の評価

図3にCW材の疲労試験結果をSA材の結果と併せて示す. CW材の疲労強度は,SA材と比較して高く,その順位は加工度と対応している.加工度に関わらず 10^9 回までの試験では,明確な疲労限度が確認されなかった.また,SA材の場合と同様に,HT条件では疲労強度の著しい低下が認められた.

疲労試験を中断して測定した断面硬度と繰返し数の関係を図4に示す.硬度は5点の平均値である.SA材では,繰返し数の増加と共に

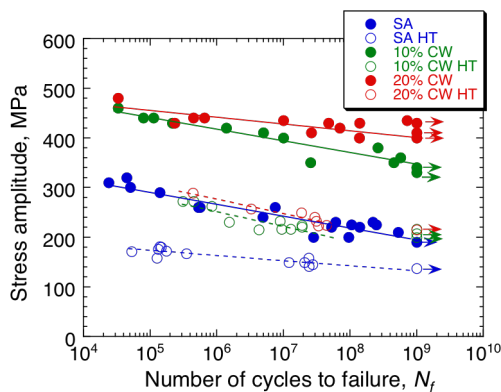


図3 CW材の疲労試験結果

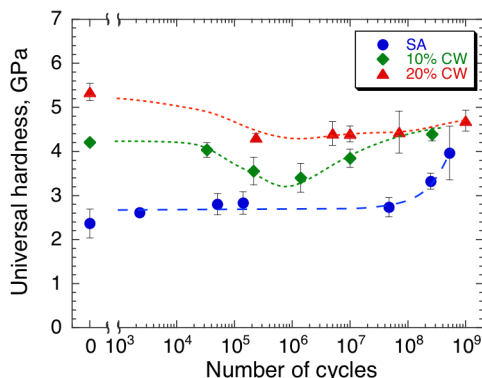


図4 繰返し数と断面硬度の関係

に転位の蓄積に起因すると考えられる硬度の上昇が確認された. CW材では, 10^6 回以下では繰返し負荷による硬度の低下が生じ,その後再び硬度が上昇する傾向が観測された.これは,転位の再配列(消滅)と再蓄積によるものと考えられる.この繰返し負荷による転位の消滅(D_d)と照射環境で生じる転位の蓄積(D_c)が相殺し,照射による硬化(脆化)が抑制され,照射に対する寿命が延びる可能性が期待される(図5参照).なお,繰返しによる力学特性変化については,次期の研究テーマとして,転位密度の観点から更に詳細な計測を実施する.

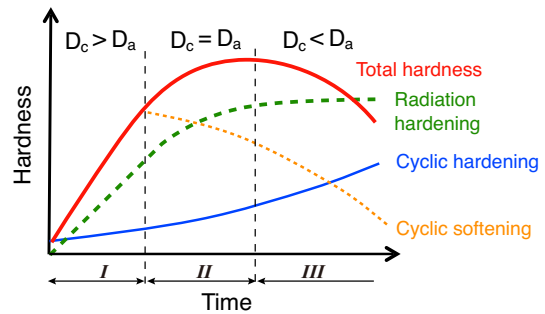


図5 照射環境での硬度変化の概念図

(3) 遠隔非接触での疲労き裂検出技術の開発

図6に放射温度計により測定した疲労試験中のSA材表面温の変化を示す.振幅220 MPaでは,試験開始直後(領域I)に変形による温度の上昇が見られ,破断の直前まで(領域II)は変形による温度上昇と圧縮空気による冷却がバランスし15°C程度で安定している.領域IIIでは,破断直前に急激な温度上昇を確認できる.240 MPa及び260 MPaでは,変形による発熱量が冷却量を上回り温度が安定する前に比較的lowサイクルで疲労破壊が生じ,破断直前の急激な温度上昇は明瞭でない.図6に示した急激な温度上昇は,複数の微小き裂から主き裂へ成長する過程の共振周波数が変化する程度の十分残強度を有している状態で生じることから,温度分布計測により構造物の微小き裂の検出に適用可能と考えられる.

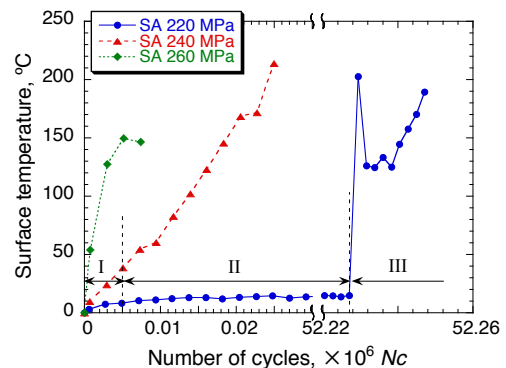


図6 試験中の表面温度変化

破断直前の温度上昇を詳細に調べるために、平板試験片に対してき裂発生箇所を限定するために切欠きを設け、サーモグラフィによる温度分布を計測した結果を図 7 に示す。振幅は 190 MPa、破断回数は 2.95×10^5 回である。繰返し数の増加と共に、最高温度点が図中 A 側から B 側に移動すると共に、発熱領域が拡大していることが分かる。また、画像解析により導出した図 7 中の最高温度点の推移と試験後の試験片表面写真を重ねた結果を図 8 に示す。最高温度点は繰返し数の増加と共にき裂上を移動していることから、破断直前の急激な温度上昇は、き裂進展に起因し、最大温度はき裂先端に位置すると考えられる。

さらに、LS-DYNA により非線形構造解析を実施し、要素のひずみエネルギーから温度上昇を導出した結果、破面の摩擦による温度上昇よりもき裂先端の塑性変形による温度上昇が支配的であることを確認した。

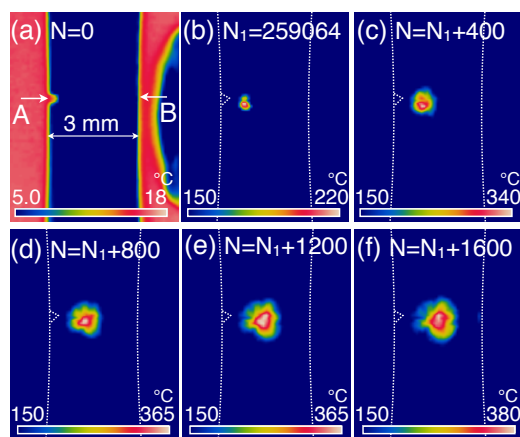


図 7 切欠き試験片の温度分布

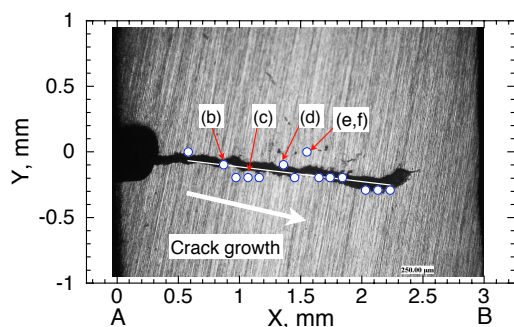


図 8 最高温度点の推移

<引用文献>

[1]D. McClintock 他, Post-irradiation tensile properties of the first and second operational target modules at the Spallation Neutron Source, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 450, 2014, pp. 130-140.

[2]Y. Furuya, Specimen size effects on gigacycle fatigue properties of high-strength steel under ultrasonic fatigue, *Scripta Materialia*, Vol. 58, 2008, pp.

1014-1017.

[3]J. Strizak 他, Fatigue properties of type 316LN stainless steel in air and mercury, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 343, 2005, pp. 134-144.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

① T. Naoe, Z. Xiong, M. Futakawa, Gigacycle fatigue behavior of austenitic stainless steels used for mercury target vessels, *Journal of Nuclear Materials*, 査読有, Vol. 486, 2016, pp. 331-338,

DOI:10.1016/j.jnucmat.2015.07.040

② Z. Xiong, T. Naoe, T. Wan, M. Futakawa, K. Maekawa, Mechanical property change in the region of very high-cycle fatigue, *Procedia Engineering*, 査読有, Vol. 101, 2015, pp. 552-560,

DOI:10.1016/j.proeng.2015.02.066

[学会発表] (計 6 件)

① 直江 崇, 水銀ターゲット容器構造材のギガサイクル疲労強度評価, 第 8 回 MLF シンポジウム, 2017 年 3 月 14 日-15 日, つくば国際会議場 (茨城県つくば市)

② T. Naoe, Temperature measurement for in-situ crack monitoring under high-frequency loading, The 13th International Workshop on Spallation Materials Technology, 2016 年 10 月 30 日-11 月 4 日, チャタヌーガ (アメリカ合衆国)

③ T. Naoe, Very high-cycle fatigue behavior of the mercury target vessel for the spallation neutron source, The 12th International Workshop on Spallation Materials Technology, 2014 年 10 月 19 日-23 日, ブレゲンツ (オーストリア)

[その他]

ホームページ等

<http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/search/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

直江 崇 (NAOE, Takashi)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
原子力科学研究部門 J-PARC センター・
研究副主幹
研究者番号: 00469826

(2) 研究協力者

二川 正敏 (FUTAKAWA, Masatoshi)

熊 志紅 (XIONG, Zhihong)