

令和 2 年 7 月 13 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14565

研究課題名(和文) ギガサイクル疲労負荷における溶接材の疲労強度とき裂検出に関する研究

研究課題名(英文) Study on gigacycle fatigue strength of welded metals and crack detection technique

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) 3,400,000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診断技術の開発のための基礎研究として、ギガサイクルまでの疲労過程を金属組織の変化に着眼し明らかにすることを目的とした。パルス核破砕中性子源の標的構造材であるオーステナイト系ステンレス鋼に対して、超音波法によるギガサイクル疲労試験を実施し、疲労過程で生じる転位密度変化を中性子回折法により定量評価を実施した。繰返し負荷に伴う転位密度の変化は、硬さや残強度の変化と良く対応していた。さらに、溶接材のギガサイクルまでの疲労データの構築を実施すると共に、疲労強度に及ぼす溶接ビードの影響を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

オーステナイト系ステンレス鋼のギガサイクル疲労データは、報告例があるものの、溶接材及び溶接金属については調べられていない。溶接材のギガサイクル領域の疲労データを整備することは効率的な機器の設計や寿命評価のために重要である。また、ギガサイクル疲労過程における力学特性変化は報告例がなく、繰返し応力負荷により生じる硬化及び軟化減少と転位密度の変化を関連づけて評価することは学術的意義も高い。

研究成果の概要(英文)：As a fundamental study of the fatigue durability investigation and its diagnostic technique under high-cycle and high-strain rate loading, we have performed gigacycle fatigue test using an ultrasonic fatigue testing method aiming to focusing on metal structure change. Change in the dislocation density by cyclic loading up to gigacycle for austenitic stainless steel was evaluated through the neutron diffraction method. Change in the dislocation densities by cyclic loading were well-correlated with the change of the hardness and the residual strength. Furthermore, the effect of the weld bead on the gigacycle fatigue was investigated. The fatigue strength of the removed weld bead specimen was greater than without weld specimen. By contrast, fatigue strength of the weld specimen with bead, wherein we estimated the stress amplitude while ignoring the bead shape, was obviously degraded because of the stress concentration at the weld toe in comparison with removed bead specimen.

研究分野：機械工学

キーワード：ギガサイクル疲労 超音波疲労試験 溶接 転位密度 中性子回折

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

液体金属標的にパルス陽子線を入射して大強度の中性子を発生させる大強度核破砕パルス中性子源では、液体金属の急激な熱膨張で生じる圧力波が引き起こすキャビテーションによる壊食損傷が標的容器の構造健全性を低下させる。さらに毎秒数十回入射する陽子線による圧力波によって、標的容器は数億回に及ぶ繰返し負荷を受け、壊食損傷を起点とした疲労破壊が生じることが懸念されている。実際、米国中性子源の液体水銀標的では、厚さ 3 mm のステンレス鋼壁を貫通するほどの激しい壊食損傷を起点とした疲労破壊が観測された。また、陽子及び中性子による材料劣化を評価するために実施された照射後試験では、積算照射量 7 dpa でも使用に耐える十分な延性を維持していることが示されたが、一部の材料で介在物を起点としたき裂伝ばにより顕著な伸びの減少が観測されている [1]。

同様に液体水銀を標的に用いている日本の核破砕パルス中性子源では、壊食損傷を引き起こすキャビテーションの発生源である圧力波の緩和技術を開発し、壊食損傷の問題は解決されつつあり、今後は照射損傷と疲労が中性子源標的の寿命を決定する因子になると考えられる。一方で、標的容器は溶接を多用した多重構造容器であり、溶接材であることを考慮した疲労寿命評価が必要とされている。

近年、ギガサイクル領域での疲労試験を従来の手法と比較して短時間で実施可能な超音波疲労試験法が普及しつつあるが、溶接材を含む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

本研究は、高ひずみ速度負荷環境下での材料の耐久性を明らかにすると共に、その診断技術の開発を行うことを最終目的とし、(1) 超音波疲労試験装置により溶接材に高ひずみ速度で繰返し応力を負荷し、ギガサイクルの疲労強度に及ぼす溶接及び溶接ビードの影響を評価した。さらに、

(2) 高ひずみ速度の繰返し負荷過程で生じる力学特性変化について、転位密度に着目して評価した。

3. 研究の方法

(1) 高ひずみ速度下での繰返し負荷に伴う溶接材の疲労強度評価

ギガサイクルまでの繰返し負荷を短時間で実現可能な超音波疲労試験法により、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L の TIG 溶接材に対して、標的容器が実際に受けるひずみ速度に近い 10^{-2} 1/s 程度で疲労試験を実施した。間欠運転と圧縮空気による冷却で高ひずみ速度での変形による発熱を抑えた。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。

本研究では、超音波疲労試験で一般的に用いられる砂時計型試験片に加えて、溶接ビードの影響を評価することを目的として、数値解析による共振周波数の評価に基づいて設計した図 1 に示す形状の平板型の試験片を用いた試験も併せて実施した。

(2) 高ひずみ速度下での繰返し負荷に伴う転位の生成と消滅に関する評価

これまでに繰返し負荷を中断し、試験片の引張り強度、及び断面の硬度を測定した結果、繰返し負荷によって力学特性が変化していることが確認された [2]。本研究では、その力学特性変化のメカニズムについて、転位密度に着目し、定量的な評価を実施することを目的として、溶体化処理及び冷間圧延した SUS316L におけるギガサイクルまでの疲労負荷に対して、任意の繰返し数で負荷を中断し、J-PARC の工学材料回折装置 (BL19) にて、中性子回折法による転位密度評価 [3] を実施した。測定は図 2 に示すように、砂時計型試験片を長手方向に対して 45 度傾け、ビームに対し 90 度方向に検出器を設置して実施した。ゲージボリュームは $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$ である。

4. 研究成果

(1) 高ひずみ速度下での繰返し負荷に伴う溶接材の疲労強度評価

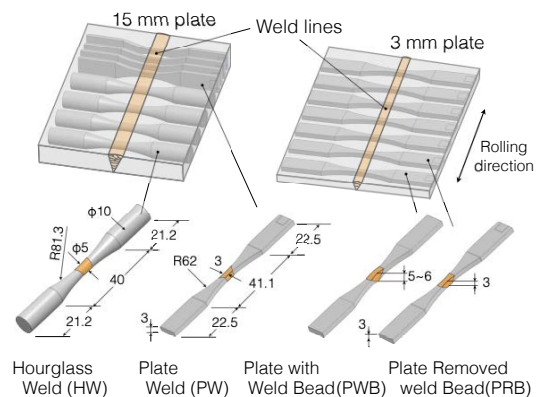


図 1 溶接部を有する超音波疲労試験片

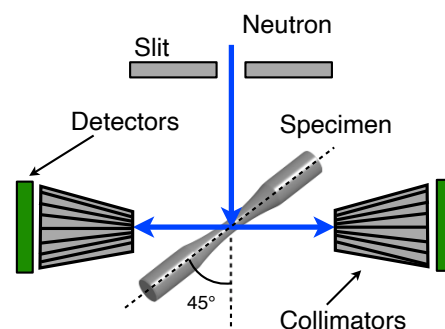


図 2 中性子回折測定時の試料と検出器配置

図 3 に平板試験片を用い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, 発振 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 20 Hz, 応力比 0.1 で実施された MAG 溶接材の結果 (PBM*, PWB*) [4] を併せて示す。ここでビード有り試験片 (PWB) の応力振幅はビード形状を考慮しない解析結果に基づいて導出したものである。厚板から切り出した溶接材 (PW) の疲労強度は, 非溶接材 (PBM) と比較して疲労強度は高いことが分かる。また, ビードを除去した溶接材 (PRB) においても非溶接材以上の強度を有している。なお, 10^9 回までの試験では, 明瞭な疲労限度は確認されなかった。

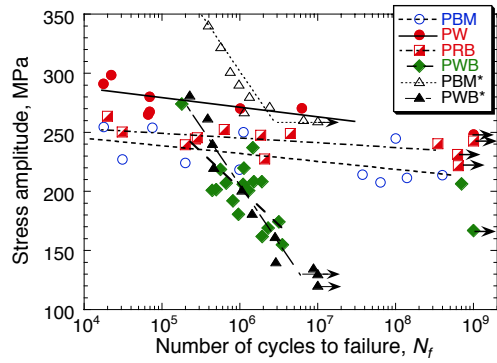


図 3 平板試験片により得た疲労曲線

溶接材とビード除去材の違いは, 試験片内部の残留応力や熱影響部の範囲に起因すると考えられる。一方, ビード有り試験片では, 非溶接材と比較して疲労強度が著しく低下しており, 本試験用に設計した試験片形状で負荷可能な応力範囲ではギガサイクルに達することができなかった。溶接ビードによる強度低下は文献[4]でも同様の傾向が見られている。

図 4 に疲労試験後の溶接試験片の断面組織観察結果を示す。 7.0×10^8 回の超高サイクル領域においてもビード止端部近傍から疲労き裂が伝ばしていることがわかる。一方, 図 5 に示す試験後に強制的に破壊して観察した断面の SEM 写真では, 5.6×10^5 回では表面からき裂が伝ばしているのに対して, 7.0×10^8 回では, 微小な溶接欠陥と見られる内部からのき裂進展が確認された。これまでの研究では, 母材である SUS316L では, ギガサイクル領域においても表面からのき裂伝ばが支配的であったが, 溶接材では, 微小な内部欠陥からの疲労破壊が懸念される。

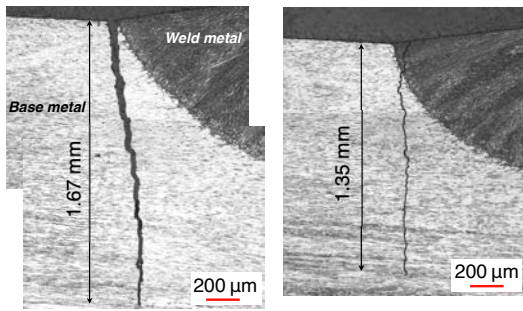


図 4 PWB 試験片の断面写真

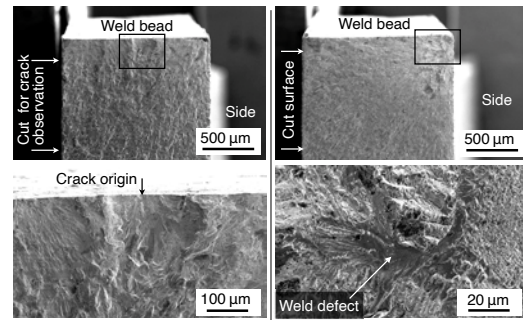


図 5 PWB 試験片の疲労破面 SEM 写真

(2) 高ひずみ速度下での繰返し負荷に伴う転位の生成と消滅に関する評価

図 6 に示すような回折プロファイルの測定結果に対して, CMWP (Convolutional Multiple Whole Profile fitting) 解析を実施し, 転位密度の評価した。図中の横軸は格子間隔の逆数, 数字はミラー指数, A 及び M はオーステナイト, マルテンサイトである。無負荷の溶体化処理材であるが, 試験片への加工時にマルテンサイトが生じていると考えられる。溶体化処理材 (SA) 及び冷間加工材 (CW) について, ピーク値で規格化した [200] 面の回折プロファイルを図 7 に示す。この回折プロファイルの幅と転位密度には相関があることが知られており, 圧延度の増加に伴い半値幅が増加していることがわかる。

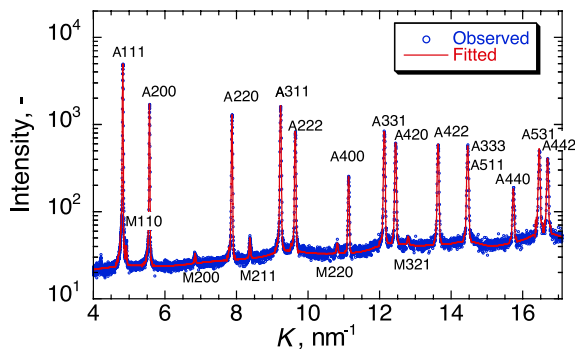


図 6 溶体化処理材 (N=0) の回折プロファイル

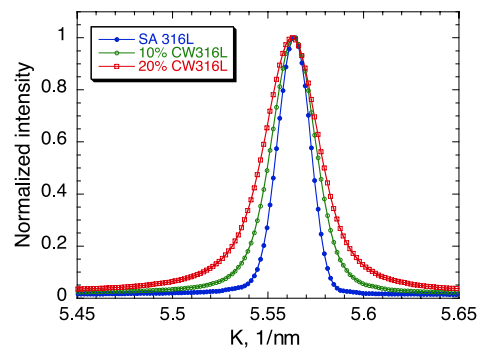


図 7 [200] 面における回折プロファイル

半値幅から導出した転位密度と負荷の繰返し数の関係を図 8 に示す。溶体化処理材では, 検出下限に近いが, 転位密度は負荷回数と共に増加していることがわかる。一方, 10%冷間加工材で

は、 10^8 回までは転位密度はなだらかに減少した後、 10^9 回で増加している。20%冷間加工材では、転位の再配列により繰返し負荷の 5×10^4 回までに転位密度は大きく減少し、その後回数が増加と共になだらかに増加している。冷間加工材における減少から増加へと遷移する負荷回数の違いは、初期の転位密度に起因すると考えられる。図9に、同条件で負荷を実施した試験片断面の硬度と繰返し負荷回数の関係を示す。繰返し負荷に対する転位密度変化は硬度や、引張り強度と良く対応することを確認し、力学特性と疲労強度についての知見を蓄積することで本手法により非破壊的に材料劣化を評価できる見込みを得た。

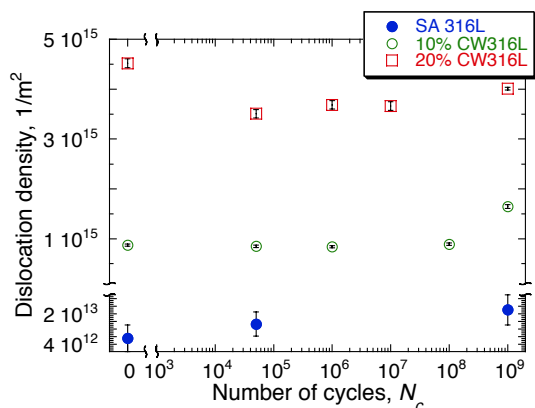


図7 負荷回数に対する転位密度の変化

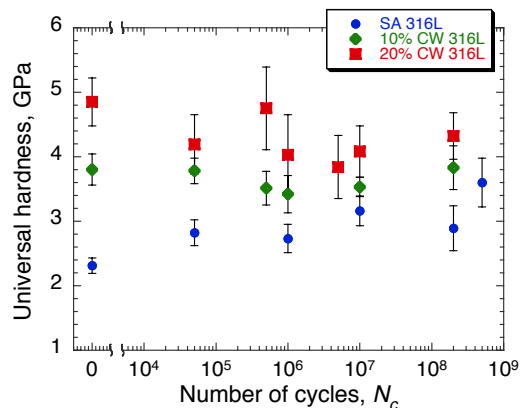


図8 負荷回数に対する断面硬度の変化[2]

<引用文献>

- [1] D. McClintock, et al., 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] T. Naoe, et al., Gigacycle fatigue behaviour of austenitic stainless steels used for mercury target vessels, Journal of Nuclear Materials, Vol. 468, 2016, pp.331-338.
- [3] T. Kawasaki, et al., Dislocation Characteristics in Lath Martensitic Steel by Neutron Diffraction, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 746, 2016, 012046.
- [4] T. Iwate, et al., Fatigue strength of welded joints of SUS316L for chemical tankers, Weld World, Vol. 50, 2006, pp. 82-91.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 3件）

| | |
|--|--------------------------|
| 1. 著者名 Naoe Takashi, Harjo Stefanus, Kawasaki Takuro, Xiong Zhihong, Futakawa Masatoshi | 4. 巻 28 |
| 2. 論文標題 Change in Mechanical Properties by High-Cycle Loading Up to Gigacycle for 316L Stainless Steel | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings | 6. 最初と最後の頁 061009-1-6 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.7566/JPSCP.28.061009 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Takashi Naoe, Zhihong Xiong, Masatoshi Futakawa | 4. 巻 506 |
| 2. 論文標題 Temperature measurement for in-situ crack monitoring under high-frequency loading | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials | 6. 最初と最後の頁 12～18 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jnucmat.2017.12.019 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Takashi Naoe, Takashi Wakui, Hiroyuki Kogawa, Eiichi Wakai, Katsuhiko Haga, Hiroshi Takada | 4. 巻 3 |
| 2. 論文標題 Effect of welding on gigacycle fatigue strength of austenitic stainless steels | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Advanced Experimental Mechanics | 6. 最初と最後の頁 123-128 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11395/aem.3.0_123 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takashi Naoe, Stefanus Harjo, Takuro Kawasaki, Masatoshi Futakawa |
| 2. 発表標題 Change in mechanical properties by high-cycle loading up to gigacycle for the structural material of the mercury target vessel |
| 3. 学会等名 14th International Workshop on Spallation Materials Technology (IWSMT-14) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 T. Naoe, T. Wakui, H. Kogawa, E. Wakai, K. Haga, H. Takada |
| 2. 発表標題 Effect of welding on gigacycle fatigue strength of austenitic stainless steels |
| 3. 学会等名 12th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|--|
| <p>JOPSS (研究開発成果検索・閲覧システム) https://jopss.jaea.go.jp/search/servlet/interSearch 物質・生命科学実験施設 研究成果一覧 http://mlfuser.cross-tokai.jp/ja/publications.html?bl=source Researchmap https://researchmap.jp/read0204155/?lang=japanese</p> |
|--|

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|------------------------------------|-----------------------|----|
| 研究協力者 | ハルヨ ステファヌス (Harjo Stefanus) | | |
| 研究協力者 | 二川 正敏 (Futakawa Masatoshi) | | |