

オーステナイトステンレス鋼における微小疲労き裂発生挙動と照射損傷の影響

Fatigue Micro-crack Initiation Behavior and Effect of Irradiation Damage on It in Austenitic Stainless Steel

東北大学	中井 亮介	Ryosuke NAKAI	Member
東北大学 (現、電源開発)	佐藤 佑毅	Yuki SATO	Non-Member
東北大学	野上 修平	Shuhe NOGAMI	Member
東北大学	長谷川 晃	Akira HASEGAWA	Member

The effect of irradiation on slip band formation and growth and micro-crack initiation behavior under low cycle fatigue in SUS316L austenitic stainless steel was investigated using accelerator-based proton irradiation and a low cycle fatigue test at room temperature in air. The micro-crack initiation was observed at slip band, grain boundary, twin boundary, and triple junction regardless of the total strain range and the proton irradiation. In unirradiated specimens, the micro-crack initiation life dropped by 75-90% due to the increase of the plastic strain range. Under the condition the plastic strain range was 0.4%, the micro-crack initiation was observed mainly at the grain boundary. On the other hand, under the condition the plastic strain range was 1.0%, the number fractions of the micro-crack initiation in slip band and twin boundary were increased. In proton-irradiated specimens, the micro-crack initiation life decreased by 50-80% and the micro-crack initiation was observed mainly at slip band and twin boundary.

Keywords: Fatigue, Micro-crack Initiation Irradiation damage, Proton irradiation, Slip band, Grain boundary, Twin boundary, Triple junction, Localized deformation

1. 緒言

原子炉炉内機器の構造材料として使用されるオーステナイトステンレス鋼は、中性子照射によるはじき出し損傷の導入に伴い、照射硬化により降伏応力が増加し、伸びが減少することが知られている。また、照射硬化により、塑性変形時に粗大なすべりを伴う不均一変形が生じることが報告されている[1]。

連絡先: 中井亮介、〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01-2 東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻、E-mail: ryosuke.nakai@jupiter.qse.tohoku.ac.jp

このような中性子照射による機械特性の変化が疲労挙動に及ぼす影響として、疲労寿命の低下[2]やき裂進展速度の増加[3]などが確認されている。原子炉炉内機器の設計や保全管理において、より高精度な疲労寿命管理を行い、その長期的な構造信頼性を確保するためには、疲労下における微小き裂の発生過程と、その後のマクロき裂の進展過程それぞれにおける中性子照射の影響を理解することが重要である。特に、すべり線の形成・発達を伴う微小き裂の発生

過程においては、一般的にすべり線の入込みや突出しといった材料の表面性状の変化を伴うため、中性子照射による粗大すべりを伴う不均一変形の影響が大きいと予想される。

本研究では、中性子照射によりはじき出し損傷を導入されたオーステナイトステンレス鋼における微小き裂発生挙動に関する基礎的知見を得ることを目的とし、加速器を用いたイオン照射によりはじき出し損傷を導入したオーステナイトステンレス鋼を対象に、低サイクル疲労によるすべり線の形成・発達挙動および微小き裂発生挙動に及ぼす照射の影響を系統的に評価した。

2. 実験方法

供試材は、SUS316L オーステナイトステンレス鋼の溶体化処理材（1120°C×4 min）であり、平均結晶粒径は約 45 μm であった。疲労試験片は、側面に曲率半径 10 mm のくびれを有する、最小断面が幅 1.25 mm、厚さ 1.52 mm である平板試験片を使用した。

疲労試験片へのはじき出し損傷の導入のため、東北大学ダイナミトロン加速器を使用し、試験片くびれ面底に 2 MeV のプロトン照射を行った。はじき出し損傷量は、表面から深さ約 15 μm において約 0.25 dpa であった。また、照射温度は約 230°C であった。

非照射試験片および照射試験片について、室温大気中において低サイクル疲労試験を実施した。試験は両振引張圧縮のひずみ制御のもと、ひずみ速度 0.01%/sec、全ひずみ範囲 0.6% および 1.2% において実施した。全ひずみ範囲 0.6% および 1.2% における塑性ひずみ範囲は、それぞれ 0.4% および 1.0% であった。数十 μm から結晶粒径程度の表面長を有する微小き裂の発生まで、一定サイクル数毎に試験を中断し、試験片くびれ面底に対して光学顕微鏡および SEM による表面観察と、EBSD による結晶方位などの解析を実施し、これより得られる CSL マップ、Twin マップ、IPF マップよりき裂発生サイトを同定した。

CSL マップは粒界および双晶境界を粒界性格ごと

に色別で表示するマップであり、Twin マップは双晶境界を表示させることが出来るため、粒界と双晶境界を区別することが出来る。また、IPF マップは色別で結晶方位を表示し、き裂が粒内で発生しているか粒界および双晶境界で発生しているか区別することが出来る。

3. 実験結果・考察

非照射材と照射材の同じ繰返し数におけるすべり線の間隔を比較した場合、照射材のすべり線間隔は、同じ繰返し数における非照射材のすべり線間隔と比較して 1.25~1.4 倍であった。本研究の結果と、従来の研究における SUS316L 照射材の粗大すべりの評価結果[4, 5]などから、本研究の照射条件においても、低サイクル疲労により粗大すべりが形成したと考えられる。

図 1 に示すように、発生した全微小き裂に対して個別に EBSD による解析を行い、Twin マップや CSL マップ、IPF マップより、微小き裂の発生サイトは、塑性ひずみ範囲にかかわらず、非照射材、照射材ともにすべり線上 (SB)、双晶境界上 (TB)、結晶粒界上 (GB)、粒界三重点 (TJ) の 4 つに分類された。図 2 に、非照射材及びプロトン照射材の各サイトにおける微小き裂発生繰返し数 (N_i) を示す。非照射材では、塑性ひずみ範囲の増加により N_i は 75~90% 減少した。また、塑性ひずみ範囲 0.4% では GB での微小き裂の発生割合が最も高かったが、塑性ひずみ範囲 1.0% では SB 及び TB での微小き裂の発生割合が増加した。これは、塑性ひずみの増加により、結晶粒内に発生したすべり線の数が増加したことによると考えられる。一方、プロトン照射材では、塑性ひずみ範囲の大きさによらず、 N_i は 50~80% 減少し、SB 及び TB での微小き裂の発生割合が最も高かった。これは、プロトン照射材では塑性ひずみの影響に比べ、照射による粗大すべり等の不均一変形により固執すべり帯が早期に形成された影響が大きいとめと考慮される。

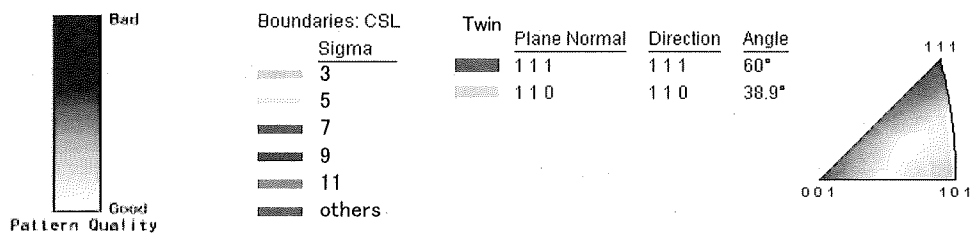
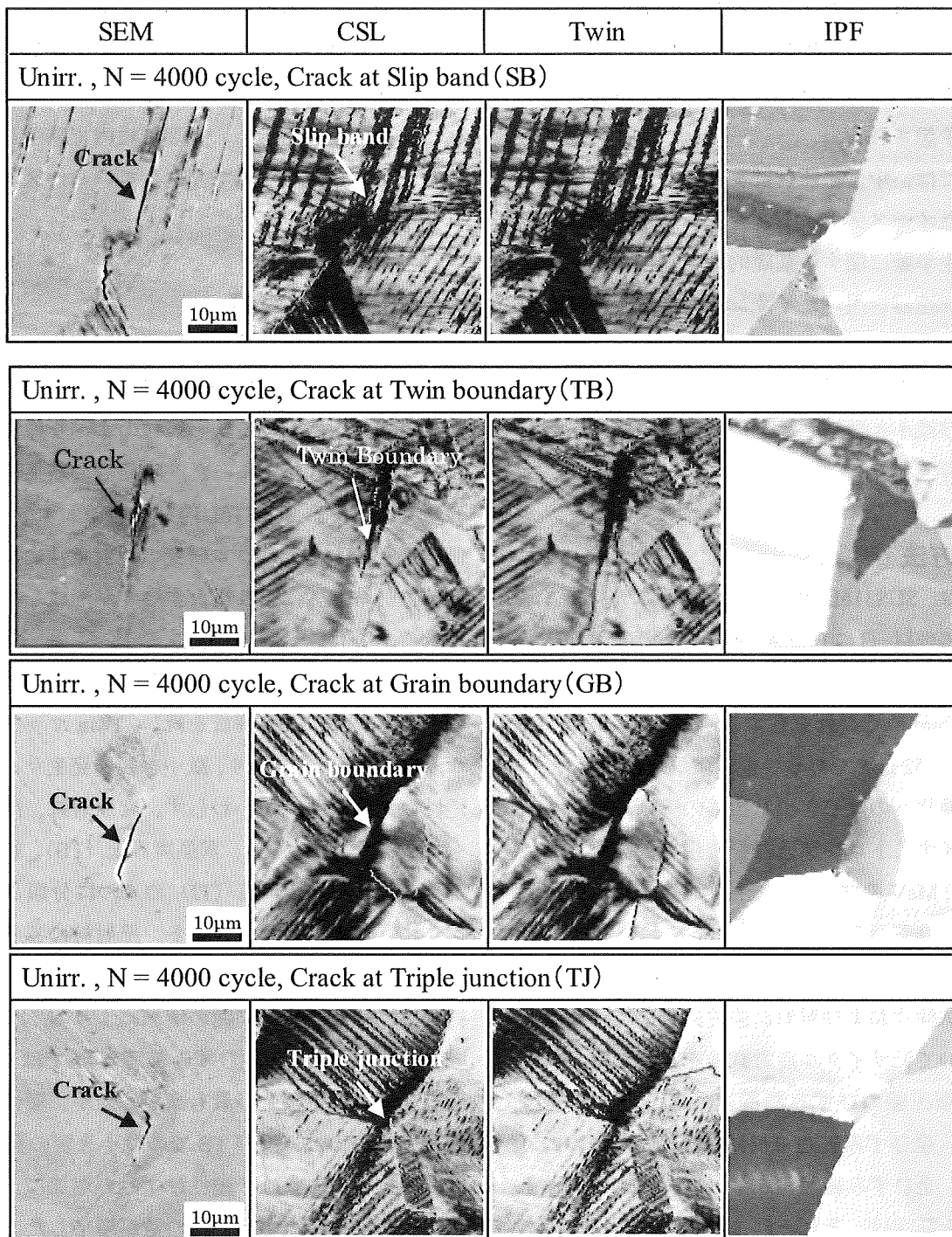


図1. 非照射材において発生したき裂のSEM写真、CSLマップ、TwinマップおよびIPFマップ

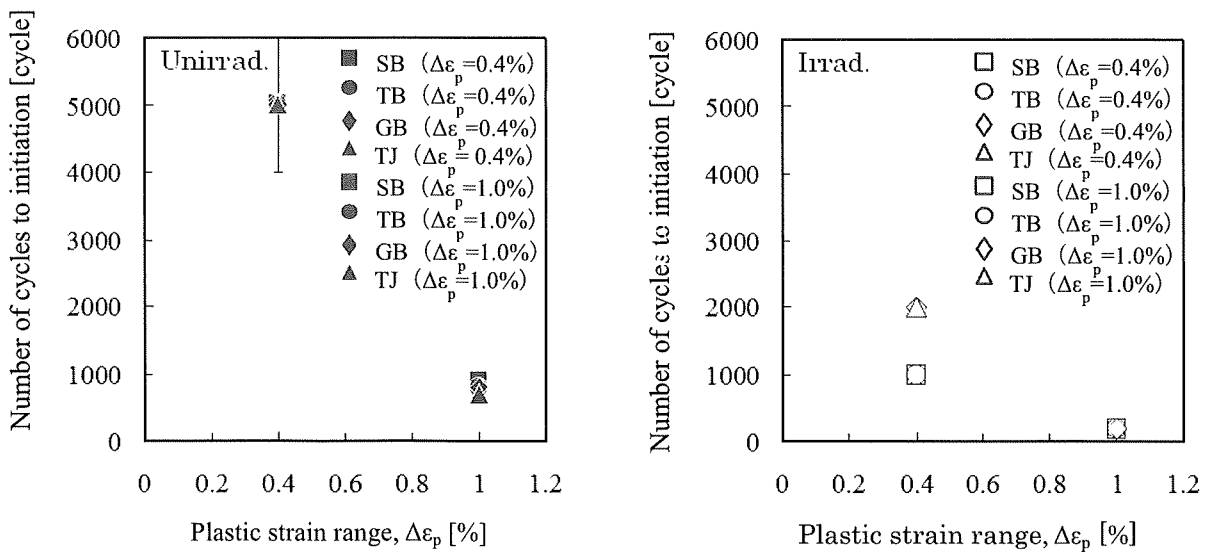


図 2. 非照射材及びプロトン照射材の各サイトにおける微小き裂発生繰返し数(N_i)

4. 結言

中性子照射によりはじき出し損傷が導入されたオーステナイトステンレス鋼における微小き裂発生挙動に関する基礎的知見を得ることを目的とし、プロトン照射によりはじき出し損傷を導入したオーステナイトステンレス鋼について低サイクル疲労試験を行い、微小疲労き裂発生挙動と照射損傷の影響を調査した結果、以下の知見を得た。

- 1) 塑性ひずみ範囲に関係なく、非照射材、照射材ともに微小き裂はすべり線上、双晶境界上、結晶粒界上、粒界三重点の4種類のサイトで発生した。
- 2) 非照射材では、塑性ひずみ範囲の増加により微小き裂発生繰返し数は75~90%減少した。また、塑性ひずみ範囲0.4%では結晶粒界上での微小き裂の発生割合が最も高かったが、塑性ひずみ範囲1.0%ではすべり線上及び双晶境界上での微小き裂の発生割合が増加した。
- 3) プロトン照射材では、塑性ひずみ範囲の大きさによらず、微小き裂発生繰返し数は50~80%減少し、すべり線上及び双晶境界上での微小き裂の発生割合が最も高かった。

参考文献

- [1] T. Onchi, K. Dohi, N. Soneda, J. R. Cowan, R. J. Scowen, M. L. Castano, J. Nucl. Mater., 320, 2003, pp.194-208.
- [2] 白石春樹、鉄と鋼、第69年第14号、1983
- [3] S. Jitsukawa et al., Fatigue Crack Propagation by Channel Fracture in Irradiated 316 Stainless Steel, Effect of Radiation on Materials Vol.17, 1996, pp.933-944.
- [4] 三浦照光、藤井克彦、福谷耕司、INSS journal 14, 2007, pp.167-183.
- [5] T. Tanno, A. Hasegawa, S. Sasaki, S. Nogami, M. Satou, Proc. of 14th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems, 2009, CD-ROM.

(平成24年6月21日)

