

オーステナイト系ステンレス鋼の 二軸応力下における配管部疲労き裂進展評価

Study on the Behavior of Fatigue Crack Growth of
Austenitic Stainless Steel Piping under biaxial Stress

大阪大学	原田 祥五	Shogo HARADA	Student member
大阪大学	北田 孝典	Takanori KITADA	Non member
大阪大学	竹田 敏	Satoshi TAKEDA	Non member
大阪大学	中村 隆夫	Takao NAKAMURA	Member
原子力安全システム研究所	釜谷 昌幸	Masayuki KAMAYA	Member

Abstract

Nuclear power plants (NPPs) are required to ensure safety in long term operation under aging degradation. The fatigue degradation is one of the major ageing phenomena and is evaluated to ensure safety by design fatigue curve obtained by the results of axial fatigue test. On the other hand, the stress that occurs in piping element such as elbow is not uniaxial but biaxial. For accurate evaluation of fatigue crack growth, it is required to confirm the effect of biaxial stress. In this study, membranous pressure fatigue tests were conducted to confirm biaxial stress effects. The calculation result of equivalent stress intensity factor based on test results indicates that crack growth under biaxial stress is faster than that under uniaxial stress. The relationship between crack growth rate under uniaxial stress and that under biaxial stress is clarified.

Keywords: Biaxial stress, Fatigue degradation, Crack growth, Equivalent stress intensity factor.

1. はじめに

現在、原子力発電プラントでは運転年数の長期化により生じる経年劣化管理が課題となっている。プラント機器の経年劣化により発生する機能喪失は重大な事故の原因となる可能性があるため、寿命を評価することにより、機能が喪失する前に劣化した機器の取り換えが求められるが、寿命予測の判断は難しい。現在、プラント機器のうちクラス1などに属する重要な機器では、機器の疲労寿命評価には日本機械学会が発行する設計・建設規格に規定されている設計疲労曲線を用いた累積疲労係数の評価が行われる。設計疲労曲線は単軸方向での疲労試験で得られたデータに補正係数をかけて作成されているため、設計疲労曲線から求めた累積疲労係数による疲労寿命の評価は保守的とされているが、供用期間中に行う非破壊検査結果や余寿命との関連をつけるのが難しい。そこで、運転中の疲労き裂進展予測モデルを導入した疲労管理の検討が行われている^{[1][2]}。

疲労き裂進展予測モデルによる疲労管理を行うた

めには、実機における疲労き裂の進展を正確に評価する必要がある。機器には運転中に様々な応力が加わる。熱応力を含め応力状態は多軸となる。原子力発電所の配管エルボ部における地震荷重等の機械的荷重による応力に注目すると、応力の加わる方向は二軸であることが知られている^[3]。一方、疲労評価に用いられている疲労試験データは単軸状態で取得されている。疲労き裂進展予測モデルにおいて単軸応力での疲労試験で得られたデータを用いてき裂進展を予測する場合には、二軸応力の影響について考慮する必要がある。そこで二軸応力下での疲労試験を行い、得られたデータを単軸での疲労試験結果と比較することにより二軸応力の影響をき裂進展モデルに反映し、実機の状況に即したき裂進展予測評価が行うことが可能となる。すでに先行研究において、等二軸応力下でのき裂進展速度が単軸と比べて速いことが報告されている^{[4][5][6]}。

本研究では、原子力発電所の保全活動にき裂進展モデルを導入するため、単軸・二軸応力間でのき裂進展速度の差を明らかにし、二軸応力による進展速度への影響について検討する。

連絡先: 原田祥五

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻

E-mail: s-harada@ne.sec.eng.osaka-u.ac.jp

2. 記号説明

- a : き裂深さ (mm)
- σ_L : L方向主応力
- σ_T : T方向主応力
- σ_m : 相当応力
- ε_m : 相当ひずみ
- f : 形状係数
- $\Delta\varepsilon$: ひずみ範囲
- $\Delta\varepsilon_m$: 相当ひずみ範囲
- ΔK : 応力拡大係数
- ΔK_m : 相当応力拡大係数
- da/dN : 進展速度 (m/cycle)
- D, m : 材料定数
- E : ヤング率 (MPa)
- t : 試験片厚み (mm)
- dL : 試験片長軸有効長さ(mm)
- dT : 試験片短軸有効長さ(mm)
- R : 試験片円盤部有効半径(mm)

3. 二軸疲労試験

3. 1 試験装置

本研究では膜圧式試験機⁷⁾を改造した加圧平板曲げ疲労試験機を用いて二軸疲労試験を行った。当該試験機の試験部の模式図を Fig.1 に示す。試験機は上下の空気室に圧縮空気を交互に注入・排気することにより試験片中心部に二軸応力を繰り返し発生させる仕組みとなっている。

3. 2 試験片

試験片の材料として 316 ステンレス鋼を用いた。試験片の形状は長円形で、寸法は Fig.2 に示す。このとき長軸方向を L 方向、短軸方向を T 方向とした。試験片表面を 1200 番のエメリー紙で磨いた後、磨き材を用いてバフ仕上げを行い、表面粗さを取り除いた。

3. 3 試験方法

試験条件を Table 1 に示す。Fig.2 に示すように試験片表面中心部にひずみゲージを取り付け、疲労試験中の L 方向、T 方向のひずみ振幅の値をそれぞれ測定した。また、空気室に圧力計を取り付け圧縮空

気圧の測定も同時に行った。2000 サイクルごとに疲労試験を中断し、試験片中心部のレプリカを採取することによりき裂の成長観察を行った。

本研究において疲労寿命はき裂が深さ方向に進展し試験片を貫通した時点と定義した。き裂が貫通すると駆動用空気が排出側の空気室に流れるため、空気室の圧力計により圧力の低下を検出できる。

Table 1 Test condition.

Material	SUS316
Pressure (MPa)	0.78
Cycle frequency (Hz)	1
Fatigue life (cycle)	35000

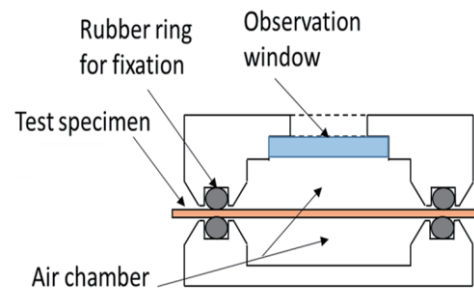


Fig.1 Scheme of pressurized disc fatigue test device.

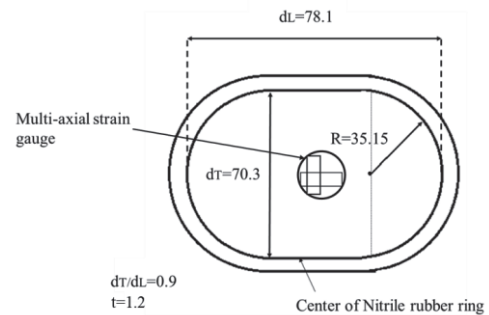


Fig.2 Geometry of test specimen (unit: mm).

4. 試験結果

4. 1 ひずみ測定

ひずみゲージによる試験片中央部でのひずみ範囲の測定結果を Fig.3 に示す。図中のプロット点は T 方向のひずみ範囲と相当ひずみ範囲の測定結果を示す。相当ひずみについては 4 章の式(5)で説明する。

2 軸のひずみゲージのひずみ比の測定結果を Fig.4 に示す。ひずみ比は T 方向のひずみ範囲と L 方向のひずみ範囲の比である。Fig.4 より T 方向と L 方向の

ひずみ比は約 1.2 であり、T 方向の応力の方が大きい値となることを確認した。試験途中でひずみゲージが破損したため張り替えたことから、ひずみが測定できていない期間が存在する。

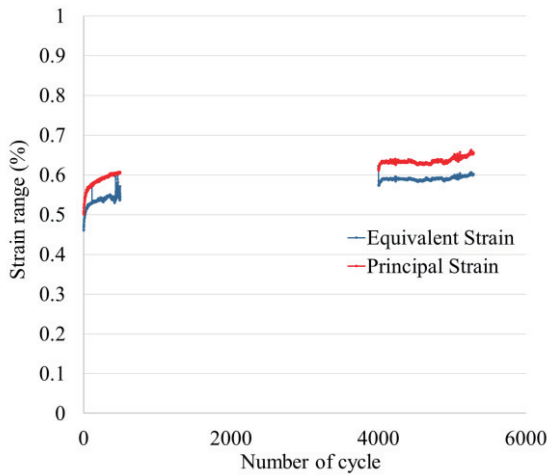


Fig.3 Strain range measured by strain gage.

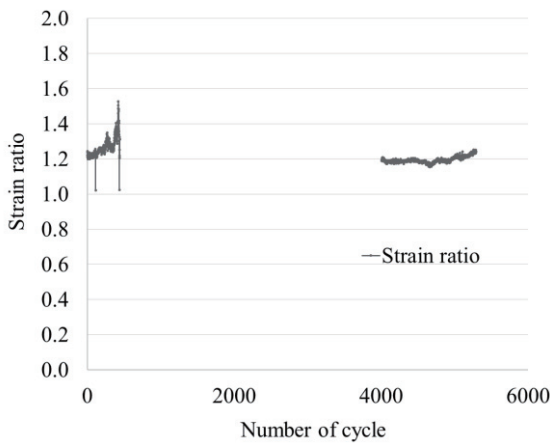


Fig.4 Strain ratio measured by strain gage.

4.2 き裂成長観察

試験片中心部に発生したき裂をレプリカフィルムに転写し、き裂の観察及び長さの測定を行った。き裂長さ測定には計測機能付き光学顕微鏡を用いた。き裂の測定限界は約数十 μm である。

き裂長さの測定結果を Fig.5 に示す。レプリカフィルムからき裂の寸法が測定できていないサイクルも存在する。き裂の発生は 2000 サイクルで観察できたため、2000 サイクルよりも早い段階でき裂は発生

していた可能性がある。き裂のレプリカフィルム観察の一例を Fig.6 に示す。き裂の進展方向は試験片中心から試験片長軸 (L) 方向に進展しており方向は一定であった。き裂貫通後の試験片の画像を Fig.7 に示す。

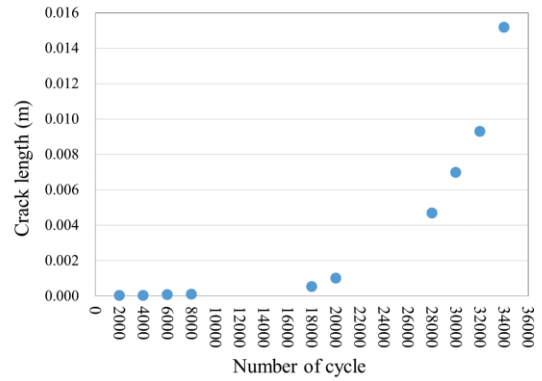


Fig.5 Growth of Crack length

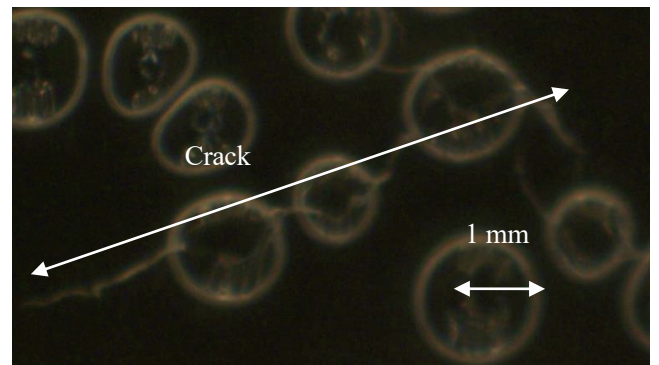


Fig.6 Example of crack by replica observation (30000 cycles).

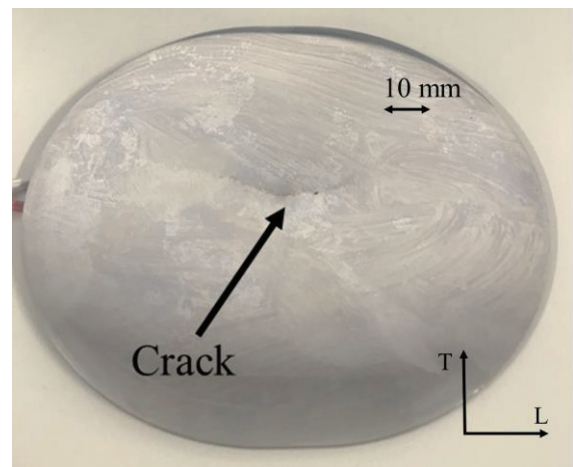


Fig.7 Image of test specimen after penetration.

4. 3 き裂進展速度

単軸応力下のき裂成長挙動において、応力拡大係数と進展速度は式(1)の相関を有することが知られている。

$$\frac{da}{dN} = D(\Delta K)^m \quad (1)$$

今回の試験で得られたき裂進展時の寸法測定結果及びひずみ範囲測定結果から二軸応力下におけるき裂進展速度と応力拡大係数を算出した。応力拡大係数は式(2)により算出した。

$$\Delta K = f\Delta\varepsilon E\sqrt{\pi a} \quad (2)$$

形状係数 f は Raju-Newman の式^[8]を用いた。

き裂の進展方向は試験片表面に対し垂直とし、き裂長さは試験片の大きさに対して十分に小さいものとした。Fig.7 に示すようにき裂の進展は L 方向のため、ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon$ は二軸のひずみゲージから得られる二方向のひずみ範囲のうちの T 方向の値を採用して応力拡大係数を計算した。ひずみ範囲は 0.6、き裂のアスペクト比は 0.5 とした。

Fig.8 には過去に得られた丸棒試験片、平板試験片、CT 試験片の試験データ^[9]を用いて求めた単軸応力下のき裂進展速度の近似線を合わせて示す。今回の試験で得られたデータのうち、応力拡大係数の一番大きいプロット点でのき裂長さは 1 mm 程度である。

4. 4 相当応力を用いたき裂進展速度

多軸応力場において相当応力が降伏点に達するとその材料は降伏すると考えられている。

き裂の進展はき裂先端の局所的な塑性変形により生じることが知られている。そのため本検討では相当応力に基づく応力拡大係数によりき裂進展速度を評価した。二軸疲労試験で得られたひずみゲージによるひずみの測定結果をもとに、応力拡大係数の式(2)のひずみ範囲 $\Delta\varepsilon$ を相当ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_m$ に置き換えることで、相当応力に基づく応力拡大係数を式(3)により算出した。

$$\Delta K_m = f\Delta\varepsilon_m E\sqrt{\pi a} \quad (3)$$

(3)式は式(4),(5)であらわされる。

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E} \quad (4)$$

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{1}{2}\{(\sigma_L - \sigma_T)^2 + \sigma_L^2 + \sigma_T^2\}} \quad (5)$$

Fig.9 に相当応力を用いて計算した応力拡大係数で整理した二軸応力下のき裂進展速度を示す。Fig.8 と同様に単軸疲労試験におけるき裂進展速度の近似線を比較のために記載した。

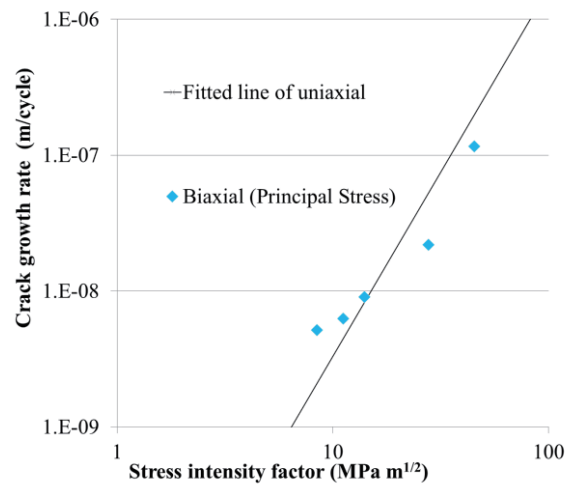


Fig.8 Comparison of crack growth rate between biaxial and uniaxial fatigue test.

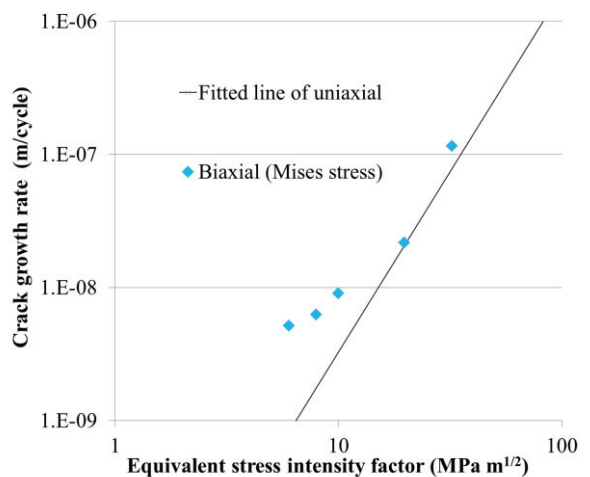


Fig.9 Comparison of crack growth rate between biaxial and uniaxial stress fatigue test.

5. 考察

5. 1 単軸応力下のき裂進展速度との比較

4.3 節では、試験片に発生したき裂長さに垂直の方向（T方向）の応力から応力拡大係数を算出した二軸応力下のき裂進展速度を単軸応力下と比較した。その結果、二軸応力下のほうが単軸応力下よりもき裂進展速度が遅くなる範囲が生じた。この結果は、単軸応力下よりも二軸応力下の方が疲労寿命が短いというこれまでの研究成果と一致しない。

4.4 節では、ミーゼスの相当応力を用いて算出した二軸応力下のき裂進展速度を単軸応力下の試験データと比較した。その結果、すべてのプロット点でき裂進展速度が単軸応力下よりも大きくなった。このことから二軸応力下におけるき裂進展速度を評価するパラメータとしては相当応力を用いた応力拡大係数が適切であると考えられる。

5. 2 等二軸応力下のき裂進展速度

Fig.10 に、先行研究^[6]において本研究と同じ試験装置を使用して得られた等二軸応力下におけるき裂進展速度と本研究における二軸応力下のき裂進展速度を比較した結果を示す。いずれの場合も単軸応力下のき裂進展速度よりも速い結果となった。このことは、過去の研究で得られた二軸応力下での疲労寿命が短くなる結果と傾向が一致している。

等二軸応力では主応力は等しく、ひずみ比は 1.0 となる。このため相当応力と主応力は同じ値となる。

また、等二軸応力下では分岐き裂が発生したが今回の二軸応力下の疲労試験ではき裂は一本となり分岐は発生しなかった。これは今回の試験ではき裂長さに垂直な T 方向の応力が L 方向よりも常に大きいため、き裂先端にかかる応力の方向に大きな変化がないためと考えられる。

今回の試験結果から、相当応力による応力拡大係数で整理した等二軸応力下のき裂進展速度と単軸応力下のき裂進展速度の差は二軸応力下のき裂進展速度と単軸応力下のき裂進展速度の差とほぼ同じであった。このことから、相当応力を用いた応力拡大係数で整理することで、これらの二軸応力の影響を適切に評価できると考えられる。

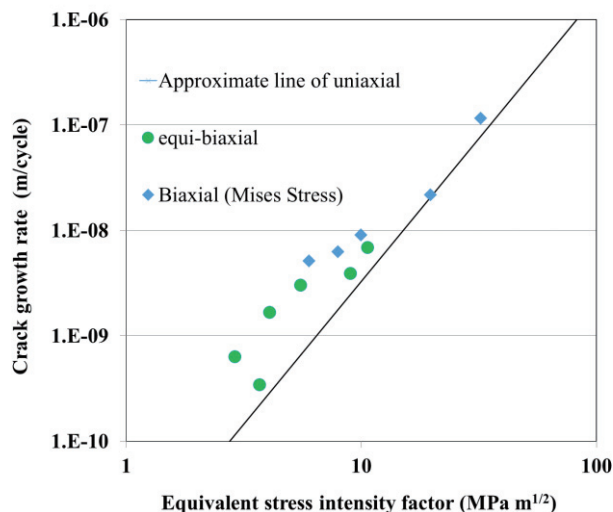


Fig.10 Comparison of crack growth rate between equi-biaxial, biaxial and uniaxial fatigue test. (Equivalent stress intensity factor)

6. 結論

本研究では二軸応力下のき裂進展挙動を観察し、二軸応力がき裂進展に与える影響について検討した。

相当応力を用いた応力拡大係数により整理した二軸応力下のき裂進展速度を単軸応力下のき裂進展速度と比較することにより、二軸応力下におけるき裂の進展速度は、相当応力による応力拡大係数の値をパラメータとして単軸の進展速度から定量的に算出することができる可能性がある。

参考文献

- [1] 釜谷 昌幸、川久保 政洋、“き裂成長予測による低サイクル疲労の損傷評価（成長予測評価モデルの構築とその適用例）”、日本機械学会論文集（A 編）78 巻 795 号、2012
- [2] 釜谷 昌幸、中村 隆夫、“き裂成長予測に基づく疲労評価法の検討”、日本保全学会第 10 回学術講演会、大阪、2013、pp239-244
- [3] 浦部 吉雄、高橋 宏治、松尾 和哉、佐藤 恭兵、安部 央矩、“減肉を有するエルボ配管の低サイクル疲労強度に関する考究”、日本機械学会論文集(A 編) 79 巻 804 号、2013-8
- [4] A. Varvani - Farahani, T.H. Topper, 2003, “Closure - free biaxial fatigue crack growth rate and life

prediction under various biaxiality ratios in SAE 1045 steel” , *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 22(8):697 -710.

- [5] S. Bradaï, C. Gourdin and C. Gardin, “Study of Crack Propagation Under Fatigue Equibiaxial Loading”, proceedings of ASME 2014 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2014-28417.
- [6] 飯田 智、阿部 茂樹、中村 隆夫、釜谷 昌幸、“膜圧式疲労試験による等二軸応力下での微小疲労き裂進展評価”
- [7] Masayuki Kamaya, Takashi Tsuji , “Evaluation of equi-biaxial fatigue of stainless steel by the pressurized disc fatigue test” , *International Journal of Fatigue* Volume 61, 2014, pp 107–115.
- [8] Raju, I.S. and Newman J.C.,Jr., ”Stress-Intensity Factors for Internal and External Surface Crackd in Cylindrical Vessels.”*Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol.104,pp.293-298 (1982)
- [9] S.Abe, T.Nakamura, 2014, “STATISTICAL MODEL OF MICRO CRACK GROWTH FOR THE EVALUATION OF ACCUMULATED FATIGUE IN NPPS”, proceedings of ASME 2013Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2014-28603