

## 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17日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760095

研究課題名（和文） 構造材料の応力腐食割れ機構の解明と合理的寿命評価指針の確立

研究課題名（英文） Elucidation of mechanism of stress corrosion cracking and guidelines for lifetime estimation of structural materials

研究代表者

藤井 朋之（FUJII TOMOYUKI）

静岡大学・工学部・助教

研究者番号：30377840

研究成果の概要（和文）：

応力腐食割れによるき裂進展挙動について、材料の塑性変形を考慮した弾塑性破壊力学パラメータの提案を行い、き裂進展挙動の高精度評価法について検討を行った。応力腐食割れは材料の塑性変形の影響を強く受け、同じ応力拡大係数で比較すると、小規模降伏条件で進展するき裂よりも、大規模降伏条件において進展するき裂の方が高速であることを明らかにした。き裂進展速度は、塑性変形を考慮した破壊力学パラメータ（J 積分より換算した等価応力拡大係数）による評価が適切であることが確認された。

研究成果の概要（英文）：

The elastic-plastic fracture mechanics parameter taking account of plastic deformation was proposed to investigate crack growth by stress corrosion cracking. The stress corrosion crack growth was affected by plastically deformed area. That is, the crack growth rate under the large scale yielding condition is higher than under the small scale yielding condition when applied stress intensity factor is same level. The appropriate parameter to evaluate the crack growth rate is equivalent stress intensity factor defined by J integral.

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	3,300,000	990,000	4,290,000

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：応力腐食割れ，き裂進展速度，J積分，応力拡大係数，塑性変形，オーステナイト系ステンレス鋼

## 1. 研究開始当初の背景

発電プラントにおいて長期にわたる安全な管理・運転のためには、炉内構造物に発生する応力腐食割れ(SCC)対策が最重要課題である。従来、応力腐食割れによるき裂進展速度は、応力拡大係数により評価がなされている。しかしながら、応力腐食割れは、溶接部や機械加工による降伏応力程度の残留応力場において発生・進展することから塑性変形を考慮していない応力拡大係数による評価では不十分である。材料の塑性変形を考慮して

き裂進展速度を評価することにより、高精度な余寿命評価が可能になると期待できる。

## 2. 研究の目的

応力腐食割れによるき裂進展挙動に及ぼす塑性変形の影響を考慮し、小規模降伏・大規模降伏条件および塑性変形場に発生・進展する応力腐食割れ挙動の力学的因子の統一的な評価法を確立する。

### 3. 研究の方法

鋭敏化処理したオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 を用いて、応力腐食割れを誘発するテトラチオン酸溶液環境下で、下記の二つの試験により応力腐食割れによるき裂進展に及ぼす弾塑性変形の影響を解明する。

#### (1) 塑性変形場におけるき裂進展試験

塑性変形場に発生するき裂進展は、四点曲げ試験片を用い、予曲げにより塑性変形を与えた状態で、テトラチオン酸溶液下でのき裂進展試験を実現した。なお、単一き裂の進展挙動評価のため、四点曲げ試験片には、浅い疲労予き裂を導入し、試験を実施した。き裂進展速度は、応力拡大係数  $K$  および  $J$  積分より換算した等価応力拡大係数  $K_J$  により評価を行った。

#### (2) 小規模および大規模降伏条件下におけるき裂進展試験

き裂進展試験には、コンパクト引張試験片を用いた。試験片に負荷を与え、テトラチオン酸溶液の中に浸し、き裂進展挙動の評価を行った。き裂進展速度は、(1)と同様に、 $K$  および  $K_J$  を用いて評価を行った。

##### ① $K$ 漸減条件

$K$  漸減条件では、試験片に負荷を与えた状態で変位を固定し、テトラチオン酸溶液に浸漬させた。なお、本条件では、応力拡大係数はき裂の進展とともに、減少する。

##### ② $K$ 漸増条件

$K$  漸増条件では、試験片に負荷を与えた状態でばねにより荷重を保持し、テトラチオン酸溶液に浸漬させた。なお、本条件では、応力拡大係数はき裂の進展とともに、増加する。

(1) および (2) ①, ②の実験から、塑性変形を考慮しないき裂進展評価 ( $da/dt-K$  関係) および塑性変形を考慮したき裂進展特性

( $da/dt-K_J$  関係) を比較することにより、小規模降伏から大規模降伏条件下にわたる統一的评价パラメータの検討を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 塑性変形場におけるき裂進展試験

図 1 に予ひずみを 1% 導入した四点曲げ試験片における浸漬時間とき裂長さおよび荷重の関係を示す。浸漬時間 10 時間付近よりき裂は定常的に進展し、それに伴い荷重は低下している。

図 2 に四点曲げ試験片における浸漬時間と応力拡大係数および等価応力拡大係数の関係を示す。浸漬時間とともに応力拡大係数および等価応力拡大係数は単調に増加した。また高い応力拡大係数になる程、応力拡大係数と等価応力拡大

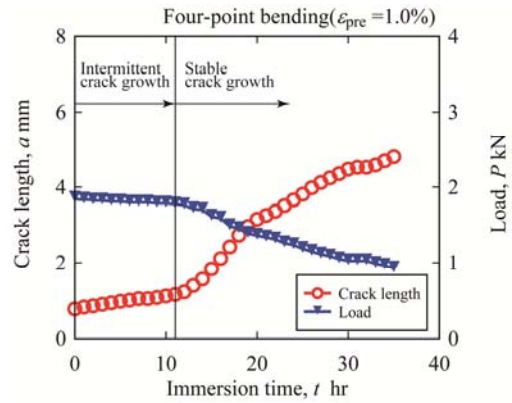


図 1. 四点曲げ試験片における浸漬中のき裂長さおよび荷重の変化

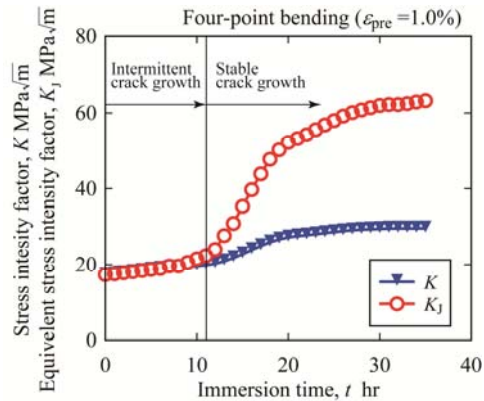


図 2. 四点曲げ試験片における浸漬中の応力拡大係数の変化

係数の差が大きくなった。

なお、予ひずみ 0.5% および 2% においても実験を実施し、同様の結果となっている。

#### (2) 小規模および大規模降伏条件下におけるき裂進展試験

##### ① $K$ 漸減条件

図 3 にコンパクト引張試験片における浸漬時間とき裂長さおよび荷重の関係を示す。なお、本試験では、定期的に応力拡大係数を増加させるため、荷重を増加させている。各定変位区間において、時間の経過と共にき裂は進展し、荷重は低下している。高荷重においては荷重の低下量が大きい。

図 4 にコンパクト引張試験片における浸漬時間と応力拡大係数および等価応力拡大係数の関係を示す。応力拡大係数が  $70 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  の条件では、急激に応力拡大係数が減少している。応力拡大係数が低い条件では、応力拡大係数と等価応力拡大係数はほぼ等しいが、応力拡大係数が高い条件では、等価応力拡大係数の方が応力拡大係数より大きくなった。応力拡大係数が低い場合、小規模降伏条件下で

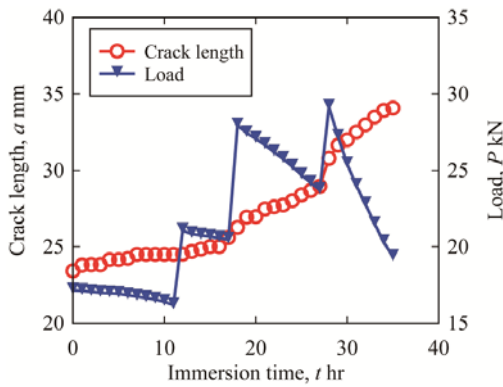


図 3. コンパクト引張試験片における浸漬中のき裂長さと荷重の変化 ( $K$  漸減)

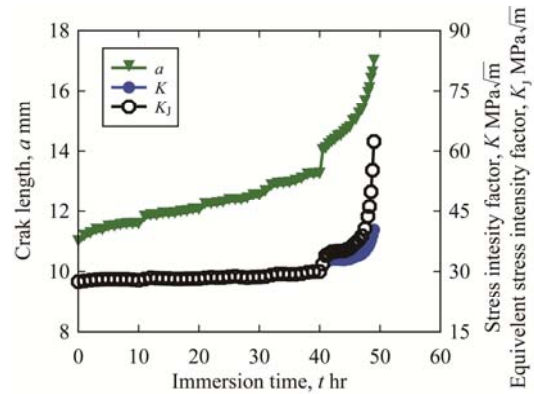


図 5. コンパクト引張試験片における浸漬中の応力拡大係数の変化 ( $K$  漸増)

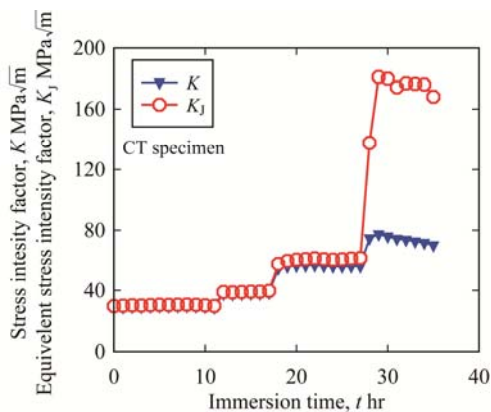


図 4. コンパクト引張試験片における浸漬中の応力拡大係数の変化 ( $K$  漸減)

あるが、応力拡大係数が高い場合は、大規模降伏条件となるためである。

②  $K$  漸増条件

図 5 にコンパクト引張試験片における浸漬時間とき裂長さおよび応力拡大係数、等価応力拡大係数の関係を示す。き裂進展が緩やかであった 40 時間付近までは応力拡大係数および等価応力拡大係数はほぼ一定であったが、それ以降両者とも急激に増加している。また高い応力拡大係数になる程、応力拡大係数と等価応力拡大係数の差が大きくなった。

(3) き裂進展速度の評価

図 6 に (1) および (2) ① で得られたき裂進展速度と応力拡大係数の関係を示す。なお、き裂進展速度は、7 点のデータをグループとした増分多項式を用いた 7 点近似法により算出した。四点曲げ試験片では、すべての条件において、応力拡大係数が増加するとき裂進展は高速になったのちに、減速した。コンパクト引張試験片では、応力拡大係数が増加するとともに、き裂進展速度も高速と

なった。

応力拡大係数が同レベルにおける両試験片のき裂進展速度を比較すると、四点曲げ試験片におけるき裂進展速度は、コンパクト引張試験片よりも高速となる領域があり、 $da/dt-K$  関係は、大きなばらつきを持っていることが分かる。

図 7 にき裂進展速度と等価応力拡大係数の関係を示す。等価応力拡大係数は、小規模降伏条件においては応力拡大係数と一致し、大規模降伏条件や塑性変形場においては応力拡大係数よりも大きくなるため、四点曲げ試験片や高い応力拡大係数におけるコンパクト引張試験片の結果は右にシフトする。等価応力拡大係数が同レベルにおけるき裂進展速度は、ばらつきはあるものの両試験片ともに同程度となった。よって、 $da/dt-K_j$  関係は、 $da/dt-K$  関係よりも、ばらつきは小さくなり、等価応力拡大係数による評価の方が適切であると考えられる。

図 8 に (1) および (2) ①② で得られたき裂進展速度と等価応力拡大係数の関係を示す。 $K$  漸増条件におけるコンパクト引張試験片のき裂進展速度は、四点曲げ試験片および  $K$  漸減条件におけるコンパクト引張試験片の結果よりも、高速度側となっている。一般には、応力腐食割れによるき裂進展において、き裂進展速度は、応力拡大係数  $K$  および応力拡大係数変化率  $dK/da$  の影響を受けることが知られており、本結果においても等価応力拡大係数変化率の变化率の影響があると考えられる。

以上より、詳細なき裂進展挙動評価には、等価応力拡大係数  $K_j$  および等価応力拡大係数変化率  $dK_j/da$  の検討が必要であり、今後の検討が必要である。

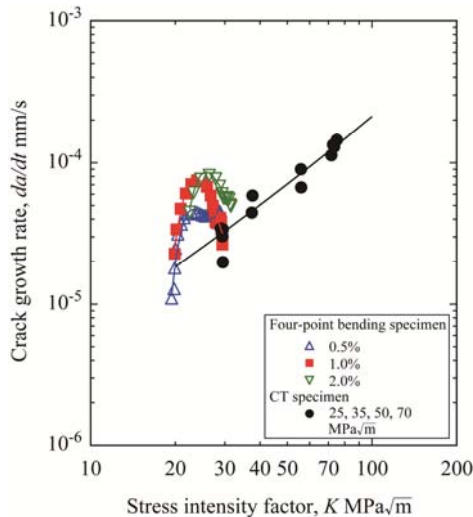


図 6.  $da/dt$ - $K$  関係

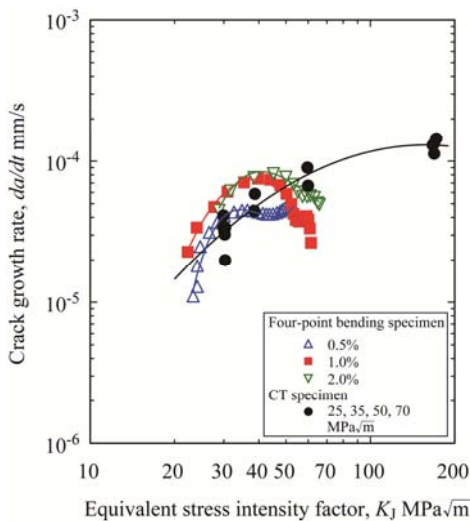


図 7.  $da/dt$ - $K_j$  関係

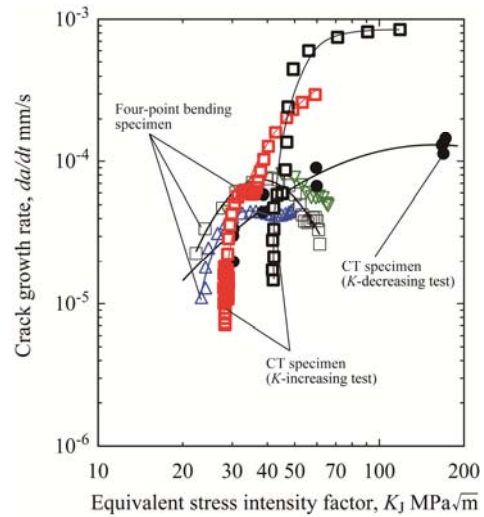


図 8.  $da/dt$ - $K_j$  関係

Keiichiro Tohgo, Yoshinobu Shimamura, Masahiro Takanashi, Yu Itabashi, Gen Nakayama, Yohei Sakakibara, Takashi Hirano, Applicability of nonlinear fracture mechanics in stress corrosion cracking of austenitic stainless steel under corrosive environment, The 12th Joint Symposium among Sister Universities in Mechanical Engineering (JSSUME2012), 2012年8月25-26日, Nagasaki, pp. 9-12

- (4) 藤井朋之, 東郷敬一郎, 石塚直宏, 島村佳伸, 高梨正祐, 板橋遊, 中山元, 榎原洋平, 平野隆, 腐食環境下における応力腐食割れ進展挙動に関する破壊力学的研究, 日本機械学会 M&M 若手シンポジウム 2012Hakodate, 2012年8月11-12, 函館, pp. 157-171

[その他]

ホームページ等

<http://mechmat.eng.shizuoka.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

藤井 朋之 (FUJII TOMOYUKI)

静岡大学・工学部・助教

研究者番号：30377840

### (2)研究分担者

なし ( )

研究者番号：

### (3)連携研究者

なし ( )

研究者番号：

## 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)

[学会発表] (計7件)

- (1) 石塚直宏, 藤井朋之, 東郷敬一郎, 島村佳伸, 高梨正祐, 板橋遊, 中山元, 榎原洋平, 平野隆, 非線形破壊力学に基づく応力腐食割れによるき裂進展挙動評価に関する研究, 日本機械学会東海支部第62期講演会, 2013年3月18-19日, 津, pp.323-324
- (2) 石塚直宏, 藤井朋之, 東郷敬一郎, 島村佳伸, 高梨正祐, 板橋遊, 中山元, 榎原洋平, 平野隆, 非線形破壊力学に基づく腐食環境における応力腐食割れ進展挙動評価, 日本機械学会 M&M2012 材料力学カンファレンス, 2012年9月21-22日, 松山, PS21(CDROM)
- (3) Naohiro Ishizuka, Tomoyuki Fujii,