

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760072

研究課題名(和文) 高密度電流場制御による金属材料の疲労き裂治癒手法の開発と評価

研究課題名(英文) Development of fatigue crack healing in metals by controlling high-density electric current field and its evaluation

研究代表者：

細井 厚志 (HOSOI ATSUSHI)

名古屋大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：60424800

研究成果の概要(和文)：本研究は、高密度電流場を制御することによりステンレス鋼の疲労き裂修復技術を新規に開発し、疲労き裂修復の効果について評価することを目的とした。実験結果より、疲労き裂に電流を印加することにより、き裂閉口やき裂面間のブリッジングが生じ、一時的にき裂進展速度が低下することが定量的に示された。また、き裂表面に生成される酸化皮膜を取り除き、酸化防止のための保護金属膜をコーティングを施した試験片では、き裂閉口やき裂面間に生じるブリッジングが助長され、枝分かれした微小き裂の完全接着にも成功した。

研究成果の概要(英文)：A technique was developed to heal a fatigue crack in stainless steel by controlling a high-density electric current field. From the experimental results, it was observed that the crack closure and the bridging between the surfaces of a crack were caused around the vicinity of the crack tip after high density pulse current was applied to a specimen. It was shown that crack propagation was delayed temporarily in the healed specimen. Moreover, by removing oxide membrane and coating the metal protection film for preventing re-oxidation on the crack surfaces, the crack closure and the bridging were promoted, and the branched small crack was healed completely by application of current.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：材料力学, 破壊力学

科研費の分科・細目：機械材料・材料力学

キーワード：疲労, き裂進展, き裂修復

## 1. 研究開始当初の背景

科学技術の発達の代償として地球温暖化をはじめとし、地球環境に対する負荷の増大が問題となっている。環境負荷を低減させるために、さらなる省エネルギー化が早急な課題である。構造物の長期安全性、信頼性を向上させることは、ライフサイクルの原料・メンテナンス・リサイクル・廃棄コスト等の削減といった観点から、環境負荷の低減を可能にする。近年、国内外の研究の現状として、構造材料の長期安全性向上のためにき裂治癒技術が注目されている。これらの研究の代

表的な例として、高分子材料においては、熱可逆性を利用したき裂修復技術、セラミック材料においては、き裂表面の酸化を利用したき裂修復技術が挙げられる。しかし、金属材料の疲労き裂修復技術は未だ確立されていない状況にある。特に、機械・機器部材の破壊事例の原因は、約80%が疲労破壊によるものである。このような背景から、金属材料の疲労き裂修復技術を確立させることは、環境保全や安全性の向上において大変重要な課題であり、我が国の持続可能な経済発展にも多大に貢献するものである。

## 2. 研究の目的

本研究は、高密度電流場を制御することによりステンレス鋼の疲労き裂修復技術を新規に開発し、疲労き裂修復効果について評価することを目的とした。

## 3. 研究の方法

### (1) 材料および試験片

本研究では、試験材料としてオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316 を用いた。図 1 に本研究で用いた試験片の形状を示す。試験片中央には長さ 2 mm、切欠半径 0.18 mm の切欠を導入した。放電加工により試験片を作製した後、残留応力を除去するため、焼き鈍し処理を施した。試験片表面は、エメリーペーパーによる研磨及び、アルミナによるバフ研磨、コロイダルシリカによる研磨により、鏡面に仕上げた。

### (2) 疲労試験条件および電流印加条件

疲労試験には油圧サーボ式引張疲労試験機を用い、室温及び標準大気下で実施した。試験条件は、応力比  $R=0.05$ 、試験周波数  $f=10$  Hz、最大負荷応力  $\sigma_{max}=150\sim 200$  MPa とした。任意の長さの疲労予き裂を導入後、試験片に電流を印加した。疲労試験中の疲労き裂長さは、ビデオマイクروسコープを用いてその場観察により測定した。

高密度電流場を形成するための電流印加には、トランジスタ型直流電源を用いた。この電源では  $0.5\sim 10$  kA の直流電流を  $0.5\sim 10$  msec のパルス幅で印加できる。試験片への電流印加では、直径 5 mm のクロム銅製電極 2 本を 1.3 mm 間隔で試験片切欠をまたいで配置した。図 2 に電流印加の様子を示す。

また、電流印加前後の疲労き裂周辺の試験片表面の状態について、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて観察を行い、Paris 則を用いて、き裂修復後のき裂進展特性を定量的に評価した。

### (3) 表面活性化プリコート処理

疲労き裂表面には、酸化皮膜が生成され、それに伴い、き裂修復が妨げられる。そこで、金属材料の疲労き裂に生じた酸化皮膜の除去および再酸化防止のための保護金属膜の生成のための電気化学的処理 (表面活性化プリコート処理) を行い、き裂修復の促進を図った。

本実験で行った表面活性化プリコート処理の具体的な過程は、①電解洗浄、②塩酸活性化、③ストライク Ni メッキの 3 段階からなる。図 3 に概略図を示す。まず電解洗浄では、NaOH,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_4\text{SiO}_3$  をそれぞれ 30 g/l ずつ混合したアルカリ溶液中 (溶液温度 333 K) で、陽極にアルミニウム板、陰極に試験

片を接続し、 $10 \text{ A/dm}^2$  の定電流を 60 s 流し、脱脂・洗浄を行った。次に 37 % HCl 溶液中 (室温) にて 15 s 塩酸活性化を施し、酸化膜の大半を除去し表面を活性化させた。最後にストライク Ni メッキでは、37 % HCl 80 g/l,  $\text{NiCl}_2$  240 g/l を混合したメッキ液中 (室温) にて、陽極に Ni 板、陰極に試験片を接続し、 $10 \text{ A/dm}^2$  の定電流を流し、酸化膜を除去しながら表面保護のための Ni 薄膜をコーティングした。また電流印加時間によってメッキ厚を制御する。これらの各工程間は純水による洗浄を行っている。

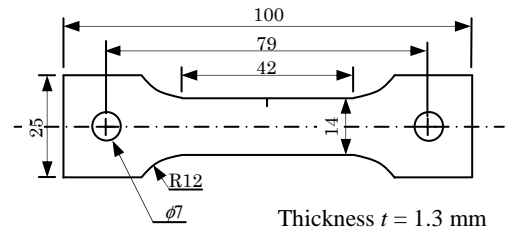


図 1 試験片形状

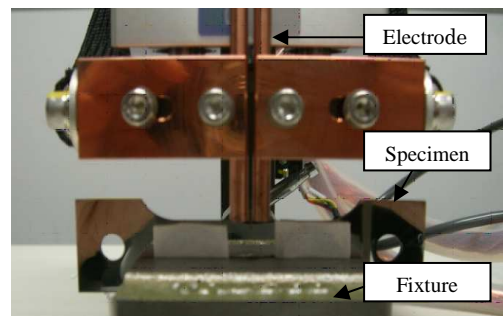


図 2 試験片と電流印加のための電極

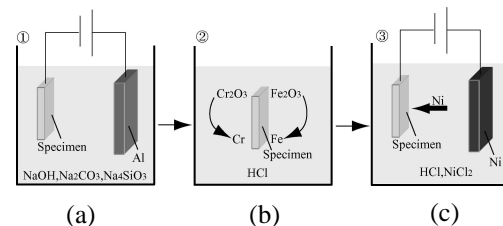


図 3 表面活性化プリコート処理の概要  
(a)電界洗浄、(b)塩酸活性化、(c)ストライク Ni メッキ

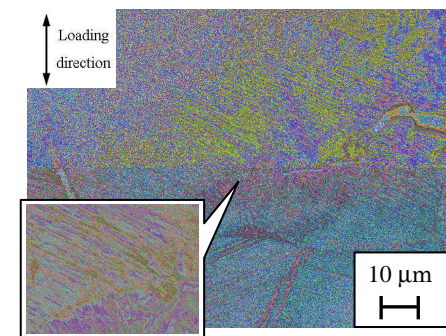
## 4. 研究成果

### (1) 疲労き裂状態の観察結果

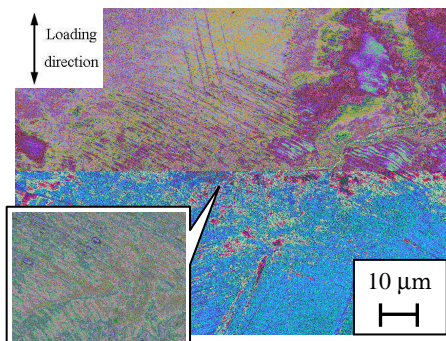
図 4 および図 5 は応力拡大係数幅  $\Delta K$  が  $25 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  より大きい疲労予き裂を導入し、電流印加前後の疲労き裂先端近傍の SEM 画像、及び疲労き裂一部の拡大画像を示している。図 4 において、電流印加後にはき裂が閉口し、修復されていることが分かる。また、図 5

においては、電流印加後に疲労き裂後方の開口変位が減少していることがわかる。また疲労き裂先端から約  $300\ \mu\text{m}$  の箇所のき裂面に架橋が形成されていることが観察できる。疲労き裂閉口や架橋が形成された原因として、電流印加によるジュール熱の発生がこれらに影響を及ぼしていると考えられる。き裂近傍に瞬時のパルス電流を印加すると、き裂先端近傍で瞬間的に高密度電流場が形成され、ジュール熱が発生する。ジュール熱によりき裂先端の微小領域に局所的な高温域が形成され熱膨張するが、き裂先端の高温域はき裂先端周囲の常温部に拘束されるため、き裂先端部に熱圧縮応力場が形成される。この圧縮応力が降伏応力を超えることによって、き裂が閉口したと考えられる。また、高密度電流場形成によりジュール熱が発生したため、材料が熔融し、き裂面間で架橋が形成されたと考えられる。

一方、図 6 は応力拡大係数幅  $\Delta K$  が  $10\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  より小さい疲労予き裂を導入し、電流印加前後の疲労き裂先端近傍の SEM 画像を示している。この結果を見ると、電流印加後にき裂が閉口していることが分かる。この理由としては、既に閉じていたき裂面が熱応力によって圧迫され、残留塑性ひずみが形成されたためであると考えられる。

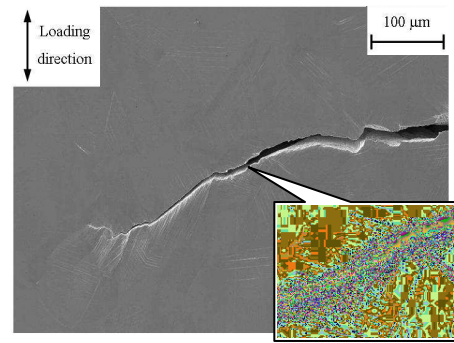


(a)

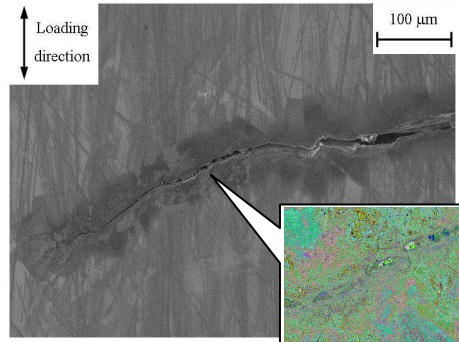


(b)

図 4  $\Delta K > 25\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  における疲労き裂先端部の観察写真 (Sample I)  
(a)電流印加前, (b)電流印加後

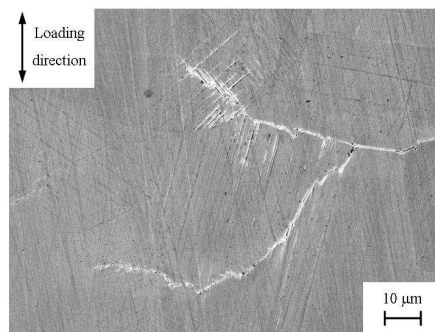


(a)

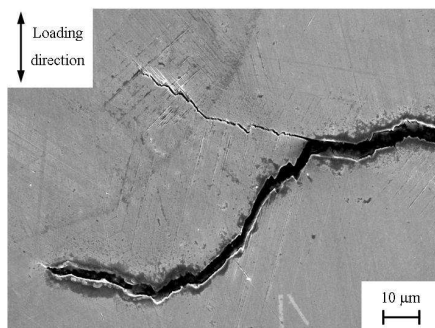


(b)

図 5  $\Delta K > 25\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  における疲労き裂先端近傍部の観察写真 (Sample II)  
(a)電流印加前, (b)電流印加後



(a)



(b)

図 6  $\Delta K < 10\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  における疲労き裂先端部の観察写真 (Sample III)  
(a)電流印加前, (b)電流印加後

## (2) 疲労き裂進展挙動の評価

図7および図8はそれぞれ、応力拡大係数幅が  $\Delta K > 25 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  (Sample II) と  $\Delta K < 10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  (Sample III) における電流印加前後における Paris 線図を示している。プロットは実験結果、実線は電流未印加による標準的な疲労き裂進展速度を測定したデータから得られた結果である。図7より電流印加直後に、疲労き裂進展速度が大きく低減していることがわかる。これは、前節で述べた、き裂開口変位の減少やき裂面間の架橋の形成、き裂先端近傍の残留応力により、疲労き裂伝播抵抗が増加したためと考えられる。しかしながら、電流印加後に疲労試験を実施し続けると、疲労き裂進展速度は通常の水準に戻った。電流印加により生じたき裂開口やき裂面間の架橋、き裂先端部の残留応力場の影響は微小な領域に限られる。そのため、繰返し負荷を受け、疲労き裂が進展することにより、き裂進展を妨げる要素が取り除かれ、き裂進展速度は通常の水準に戻ったと考えられる。一方、図8より、 $\Delta K < 10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  では電流印加によりき裂開口変位が増大し、き裂進展速度が増加した。これらの結果より、疲労き裂の条件によりき裂修復効果が異なることが分かった。

## (3) 表面活性プリコート処理による影響

上述したようにき裂表面の酸化皮膜の影響により、き裂修復が妨げられる。そこで表面活性プリコート処理を行った。図9は、表面活性化プリコート処理を施した試験片の深さ方向の Cr, O, Fe, Ni に関する元素分布を示している。Ni の元素強度が表面より深くなるに従い小さくなり、SUS316 の主元素である Fe の元素強度が大きくなることから、Ni 保護膜の形成を確認できる。SUS316 の酸化皮膜の主元素である Cr, O の強度が急激に増すことがないことから、SUS316 表面上に存在していた酸化皮膜も除去されていると考えられる。また Ni 保護膜の表面上も O の元素強度が小さく、酸化膜はほとんど存在しないと考えられる。よって本実験で用いた手法でもプリコート処理は効果的に行われていることが確認できた。

図10および図11は表面活性プリコート処理を施した試験片を用い、電流印加前後の観察写真を示している。表面活性プリコート処理を施すことにより、枝分かれしたき裂の完全な閉口が実現された。また、き裂面間の架橋が促進された。表面活性プリコート処理を施すことにより、疲労き裂修復効果が促進されることが明らかとなった。

今後は、以上の成果を踏まえ、応力拡大係数幅が小さい疲労き裂に対しても、疲労き裂治癒を実現させる必要がある。

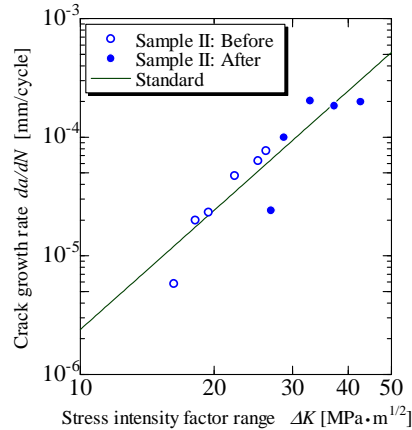


図7 Sample II における電流印加前後のき裂進展速度と応力拡大係数幅の関係

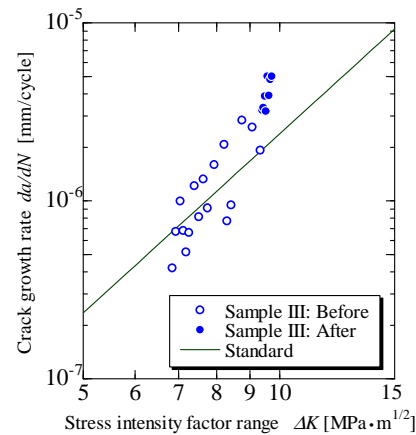


図8 Sample III における電流印加前後のき裂進展速度と応力拡大係数幅の関係

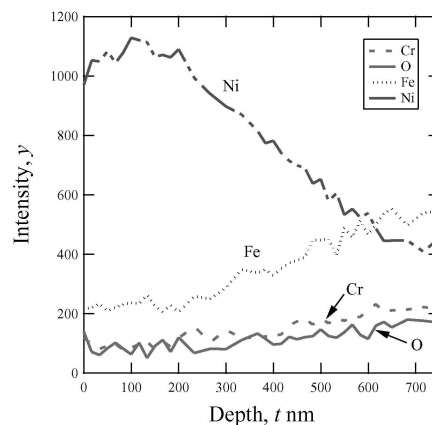
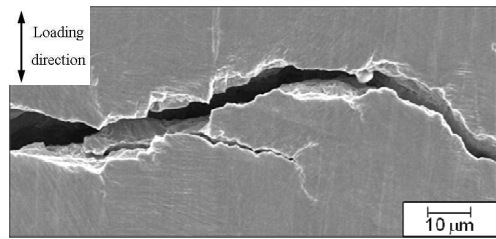
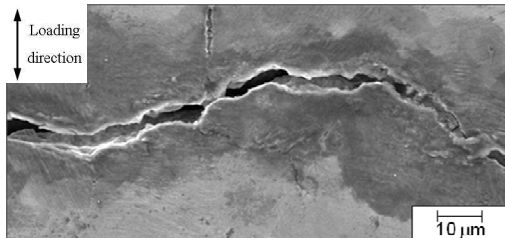


図9 ニッケルストライクメッキ後の試験片表面の Cr, O, Fe, Ni 元素分布の深さプロファイル

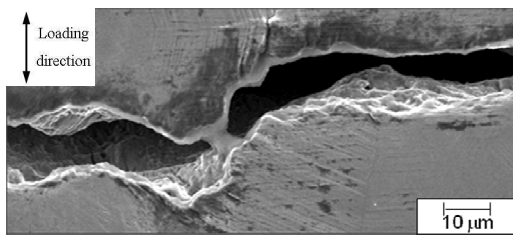


(a)

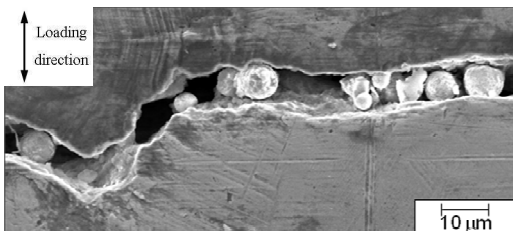


(b)

図 10 表面活性化プリコート処理後の疲労き裂先端近傍の観察写真 (Sample IV)  
(a)電流印加前, (b)電流印加後



(a)



(b)

図 11 表面活性化プリコート処理後の疲労き裂先端近傍の観察写真 (Sample V)  
(a)電流印加前, (b)電流印加後

## 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)

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

- ① A.Hosoi, T.Nagahama and Y. Ju, Effect of high density electric current field on fatigue cracks in stainless steel, Proceedings of ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, 査読

有, (2010) Paper no. IMECE2010- 37819 in CD-ROM.

〔学会発表〕 (計 5 件)

- ① 矢野貴浩, 高密度電流場制御により修復した疲労き裂先端の変位分布の評価, 日本機械学会 2011 年度年次大会, 2011 年 9 月 12 日, 東京工業大学 (発表決定).
- ② 唐永鵬, ステンレス鋼のひずみの回復における電氣的パルスの影響, 日本機械学会 M&M 2011 材料力学カンファレンス, 2011 年 7 月 16 日, 九州工業大学. (発表決定)
- ③ 貴志友哉, 金属材料の疲労き裂修復における表面活性化プリコート処理の影響, 第 42 回学生員卒業研究発表講演会, 2011 年 3 月 13 日, 豊橋技術科学大学.
- ④ 矢野貴浩, 高密度電流場形成による疲労き裂先端におけるすべりに及ぼす影響, 日本機械学会 2010 年度年次大会, 2010 年 9 月 6 日, 名古屋工業大学.
- ⑤ 長濱孝胤, 高密度電流場形成によるステンレス鋼の疲労き裂閉口及び進展挙動に及ぼす影響, 日本機械学会 2010 年度年次大会, 2010 年 9 月 6 日, 名古屋工業大学.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.mech.nagoya-u.ac.jp/ju/index.html>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

細井 厚志 (HOSOI ATSUSHI)

名古屋大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：60424800

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし