

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 28 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23686021

研究課題名(和文)高密度電子流衝突を利用した金属原子再配列・再結合による疲労損傷治癒

研究課題名(英文)Healing of fatigue damage by metallic atom rearrangement and recombination through high-density electron collisions

研究代表者

細井 厚志 (HOSOI, ATSUSHI)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：60424800

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,400,000円、(間接経費) 5,820,000円

研究成果の概要(和文)：機械・構造物の高齢化・老朽化に伴う事故や災害等を防止すると共に長寿命化を図るために、疲労き裂治癒技術の開発を行った。その結果、高密度の電流印加によって、疲労き裂の閉口および接合を実現することに成功した。一時的ではあるものの、き裂進展速度が低減した。さらに、転位密度の減少により、疲労き裂発生までの寿命を延ばすことに成功した。本研究の成果により、高密度電子衝突の作用を利用し、金属原子の再配列・再結合を誘起することによって、疲労損傷を治癒できる可能性を見出した。

研究成果の概要(英文)：A technique to heal fatigue crack was developed to prevent accidents due to aging of structures and improve their fatigue life. As the results, the closure of the fatigue crack and the bonding between the crack surfaces were realized by applying high-density electric current. Decreasing the crack growth rate temporarily was also succeeded. In addition, the delay of fatigue crack initiation was realized due to the decrease of dislocation density. It was found that the technique with the electrical stimulation has the potential to heal a fatigue crack and to restore fatigue damage.

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：疲労 損傷治癒 転位 高密度電流

1. 研究開始当初の背景

高度経済成長時代に集中投資した機械・構造物の高齢化が進行している。それ故に、機械・構造物の高齢化・老朽化に伴う事故や災害等を防止すると共に長寿命化を図り、長期的に見たトータルコストを低減させる機械・構造物ストックの戦略的維持管理に取り組む必要がある。機械・機器部材の破壊事例の原因は約80%が疲労破壊である。金属材料の疲労損傷治癒技術を確立させ、機械・構造物の長寿命化を図ることは、環境保全や安全性を向上させるために重要な課題であり、ライフサイクルCO₂削減といった観点から、我が国の環境負荷の低減に多大に貢献するものである。例えば、高経年原子力発電プラント配管に生じた欠陥を治癒することで、長期安全性を向上させると共に、原子力発電の稼働効率も引き上げることが出来る。

2. 研究の目的

疲労寿命の大半は、疲労き裂形成に費やされるため、その過程で微小損傷を治癒することが長期信頼性・安全性を確保する上で非常に重要である。そこで、本研究は、高密度の電子流を金属原子に衝突させることにより原子拡散現象を誘起させ、金属原子の再配列・再結合による疲労損傷治癒を世界に先駆けて実現し、疲労損傷治癒のメカニズムを解明することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 試験片

試験片はオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316 を用いた。試験片の機械的性質を表1に示す。疲労き裂を治癒するためにコンパクトテンション (CT) 試験片、疲労き裂発生前の損傷を治癒するためにダンベル型試験片を用いた。図1, 2 にそれぞれの試験片形状を示す。試験片は残留応力除去のために、焼鈍しを行った後、鏡面研磨を施した。

(2) 疲労き裂治癒

疲労き裂を導入するための疲労試験は応力拡大係数 K 一定のもので行われた。疲労試験条件を表2に示す。試験片 CT1 を用いて、疲労き裂の修復過程を観察し、試験片 CT2 を用いて、き裂進展速度を評価することで、き裂修復における治癒効果を定量的に評価した。疲労試験により疲労き裂を導入した後、き裂表面を活性化させるために、き裂面の酸化膜除去及び Ni 薄膜コーティング (表面活性化処理) を行った。その後、疲労き裂を治癒するために試験片に電流を印加した。電流印加条件を表3に示す。電流を複数回印加し、疲労き裂の治癒状態を走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて観察した。

(3) 疲労損傷治癒

疲労き裂の発生寿命を評価するために、荷重制御下で疲労試験を行った。それぞれの応

力レベルで、電流を印加する場合、しない場合のき裂発生までの疲労寿命を評価した。本研究において、表面のき裂が 25 μ m に達した時を発生と定義した。表4に疲労試験条件を示す。任意の繰り返し荷重を付与した後、電流を印加した。電流の印加条件を表5に示す。電流を印加した後、再び疲労試験を行い、疲労き裂が発生するまで、繰り返し荷重を付与した。また、電流印加前後における転位構造を透過型電子顕微鏡 (TEM) により観察した。ワイヤー放電により、試験片のノッチ先端近傍で ϕ 3mm のサンプルを切り出し、TEM 観察用サンプルとした。

表1 SUS316 の機械的特性

Yield stress [MPa]	300
Tensile strength [MPa]	573
Young's Modulus [GPa]	193
Poisson's ratio	0.30
Hardness HBW	161

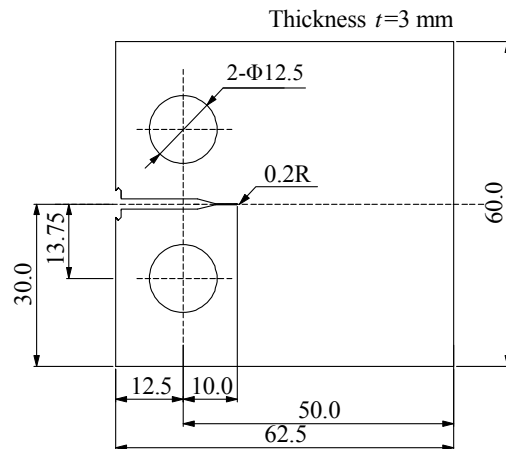


図1 CT 試験片形状

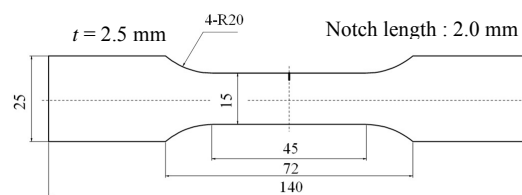


図2 ダンベル型試験片形状

表2 疲労き裂治癒における CT 試験片を用いた疲労試験条件

	CT 1	CT 2
Stress ratio R	0.05	
Frequency f [Hz]	10	
Pre-crack length a [mm]	3.0	8.0
Stress intensity factor range K [MPa \cdot mm ^{1/2}]	35	25

表 3 疲労き裂治癒における電流印加条件

	CT 1	CT 2
Application of current [A]	9000	8000
Pulse duration [ms]	2.0	4.0
Number of current application	3.0	8.0

表 4 疲労損傷治癒におけるダンベル試験片を用いた疲労試験条件

	D1	D2	D3	D4
Stress ratio R	0.05			
Frequency f [Hz]	10			
Maximum net stress σ_{max} [MPa]	115	139	162	185

表 5 疲労損傷治癒における電流印加条件

	D1	D2	D3	D4
Application of current [A]	3000			
Pulse duration [ms]	0.5			
Number of cycles to apply current N [$\times 10^3$ cycle]	200	90	50	15

4. 研究成果

(1) 疲労き裂治癒

図 3 に複数回の高密度電流を付与した CT1 試験片のき裂閉口の SEM 写真を示す。電流を印加する毎に SEM 画像からき裂幅を計測し、すべての段階で、疲労き裂が閉口していることが確認された。電流印加前と 35 回の電流印加後のき裂幅を比較すると、ノッチ先端で $18.1\mu\text{m}$ から $3.7\mu\text{m}$ に減少した。また、き裂進展方向と垂直に試験片を切り出し、き裂表面が接着していることを確認した。

さらに、き裂治癒効果を定量的に評価するために、き裂進展速度を評価した。き裂進展の評価には CT2 を使用した。図 4 は電流印加前と 20 回の電流印加後のき裂進展速度を示した結果である。図 4 中の a_0 は電流印加前のき裂長さである。中空と中塗のプロットはそれぞれ、電流印加前と電流印加後の結果を示している。図 4 から、電流印加直後はき裂進展速度が 4.17×10^{-8} m/cycle から 3.01×10^{-8} m/cycle へ減少した。

図 3 のように疲労き裂が閉口し、治癒した原因の一つは、熱圧縮応力の影響と考えられる。高密度のパルス電流を試験片に印加すると、き裂先端部に高密度電流場が形成され、き裂先端部はジュール熱により瞬時に発熱する。しかし、き裂周りの大部分の健全部位との温度分布が生じ、発熱部位は健全部に拘束されるため、き裂周辺部では熱圧縮応力が生じき裂が閉じる方向に変形する。さらにき裂面には表面活性化処理を施しているため、発熱によりき裂面が容易に接合されたものと思われる。

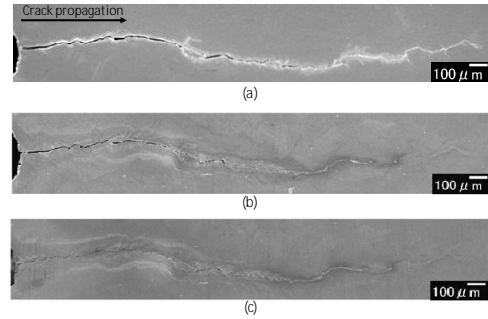


図 3 CT1 における疲労き裂閉口の観察写真：(a)電流印加前、(b)8回電流印加後、(c)35回電流印加後

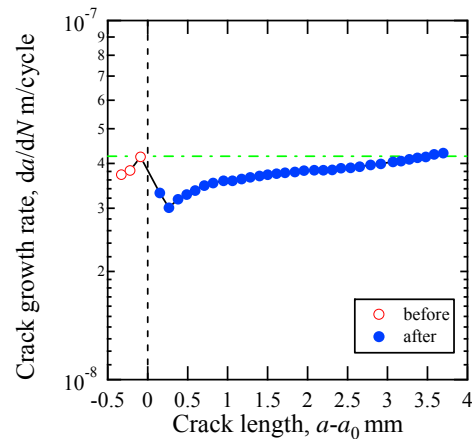


図 4 CT2 における電流印加前後のき裂進展速度

(2) 疲労損傷治癒

図 5 に疲労き裂発生寿命における S-N 曲線を示す。電流印加した試験片においては、き裂発生寿命が延びている事がわかる。その遅延効果は負荷レベルが小さいほうが大きいことがわかる。

疲労寿命増加の原因を詳細に検討するために、TEM による転位の観察を行った。図 6 は、観察した典型的な転位の観察写真を示している。電流印加によって、大幅に転位密度が小さくなっていることがわかる。これは、高密度電子衝突によって、刃状転位が対消滅した結果であると推測される。

さらに、転位論に基づき、転位密度を疲労損傷の累積パラメータとし、疲労き裂発生までの疲労寿命予測を行った。その結果を図 7 に示す。電流印加により転位密度が減少し、転位密度の減少分に応じて疲労寿命が延びることを定量的に評価した。実験結果と解析結果は良い一致を示した。

転位の消滅は、電子風力と呼ばれる高密度電子衝突の効果によって生じたと推測される。ここでは、転位消滅によってき裂発生までの疲労寿命が延びた原因を考える。転位は結晶内部ですべり、累積することによって、結果的に試験片内部でひずみエネルギーが増大する。疲労き裂は、ひずみエネルギーが表面

エネルギーなどのある閾値を越えると発生する。従って、転位密度の減少によって内部に蓄積されたひずみエネルギーが減少し、疲労寿命が延びたと考えられる。

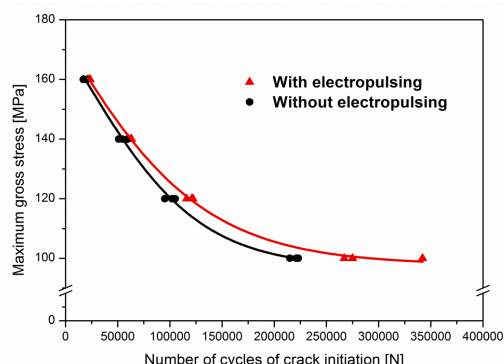


図 5 電流印加有無における疲労き裂発生における S-N 曲線

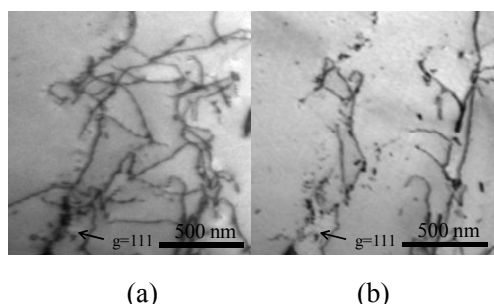


図 6 TEM による転位構造の観察：(a)疲労試験後、電流印加無し、(b)疲労試験後、電流印加有り

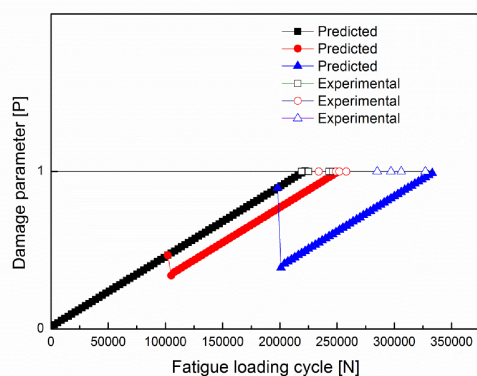


図 7 転位密度を損傷パラメータとした疲労寿命予測線図

(3) 結論

本研究では、高密度の電流印加によって、疲労き裂の閉口および接合を実現することに成功した。一時的ではあるものの、き裂進展速度が低減した。さらに、転位密度の減少により、疲労き裂発生までの寿命を延ばすこ

とに成功した。本研究の成果により、高密度電子衝突の作用を利用し、金属原子の再配列・再結合を誘起することによって、疲労損傷を治癒できる可能性を見出した。

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 8 件)

Atsushi Hosoi, Takahiro Yano, Yasuyuki Morita and Yang Ju, Quantitative evaluation of the displacement distribution and stress intensity factor of fatigue cracks healed by a controlled high-density electric current field, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 査読有, 2014, in press

DOI: 10.1111/ffe.12175

Atsushi Hosoi, Kishi Tomoya and Yang Ju, Healing of fatigue crack by high-density electropulsing in austenitic stainless steel treated with the surface-activated pre-coating, *Materials*, 査読有, Vol. 6, 2013, pp. 4213-4225.

DOI: 10.3390/ma6094213

Yongpeng Tang, Atsushi Hosoi, Yuichi Iwase and Yang Ju, Effect of high-density electric current on the microstructure and fatigue crack initiation of stainless steel, *Materials Transactions*, 査読有, Vol. 54, 2013, pp. 2085-2092.

DOI: 10.2320/matertrans.M2013198

Yongpeng Tang, Atsushi Hosoi, Yasuyuki Morita and Yang Ju, Restoration of fatigue damage in stainless steel by high-density electric current, *International Journal of Fatigue*, 査読有, Vol. 56, 2013, pp. 69-74.

DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.08.012

Atsushi Hosoi, Takatsugu Nagahama and Yang Ju, Fatigue crack healing by a controlled high density electric current field, *Material Science and Engineering: A*, 査読有, Vol. 533, 2012, pp. 38-42.

DOI: 10.1016/j.msea.2011.11.024

Yang Ju, Atsushi Hosoi, Fumiya Inukai and Yuichi Iwase, Nondestructive evaluation of wall thinning in metal pipes by microwaves and restoration of fatigue damage in stainless steel using high-density pulse current, *Proceedings of Joint Symposium on Reliability Engineering & Fracture Mechanics*, 査読無, 2013.

Atsushi Hosoi, Tomoya Kishi and Yang Ju, Healing of fatigue crack treated with surface-activated pre-coating method by controlling high-density electric current, *Proceedings of 13th International Conference of Fracture*, 査読有, 2013, Paper no. S18-003.

Yongpeng Tang, Atsushi Hosoi, Yasuyuki Morita and Yang Ju, Effect of high density electric current on recovery of strain caused by fatigue loading, Proceedings of Asian Pacific Conference on Fracture and Strength-Mechanics and Materials 2012 (APCFS-MM 2012), 査読有, 2012, pp. 88-89.

〔学会発表〕(計6件)

浅岡幸靖, 細井厚志, 巨陽, 高密度電流場制御と熱処理による疲労き裂閉口に関する研究, 日本ばね学会 2013 年度秋季ばね及び復元力応用講演会論文集, p44, 名古屋市中小企業振興会館, 名古屋, 2013 年 11 月 1 日.

岩瀬友一, 細井厚志, 唐永鵬, 巨陽, 高密度電流場制御による疲労損傷を付与したステンレス鋼における転位の消滅, 日本機械学会 2013 年度年次大会, Paper no. G031052, 岡山大学, 岡山, 2013 年 9 月 10 日.

浅岡幸靖, 細井厚志, 巨陽, 疲労き裂修復における表面活性化プリコート処理のき裂進展へ及ぼす影響, 日本機械学会 2013 年度年次大会, Paper no. G031072, 岡山大学, 岡山, 2013 年 9 月 10 日.

貴志友哉, 細井厚志, 巨陽, 高密度電流場制御による表面活性化プリコート処理を施した疲労き裂の修復, 日本機械学会 M&M2012 材料力学カンファレンス講演論文集, Paper no. 415 in CD-ROM, 愛媛大学, 2012 年 9 月 23 日.

矢野貴浩, 細井厚志, 森田康之, 巨陽, 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 年度年次大会講演論文集, No. G030101 in CD-ROM, 東京工業大学, 東京, 2011 年 9 月 13 日.

貴志友哉, 細井厚志, 巨陽, 高密度電流場制御による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, 日本ばね学会 2011 年度春季ばね及び復元力応用講演会講演論文集, p.65, 名古屋市中小企業振興会館, 名古屋, 2011 年 6 月 9 日.

〔その他〕

ホームページ等

<https://tenure-track-waseda.jp/researchers/researchers03.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：6 0 4 2 4 8 0 0