

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18761

研究課題名（和文）直流パルス及び高周波電子風力制御による金属疲労き裂治癒

研究課題名（英文）Metal Fatigue Crack Healing by DC Pulse and High Frequency Electronic Wind Control

研究代表者

細井 厚志（Hosoi, Atsushi）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：60424800

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では高密度パルス電流印加においてき裂閉口メカニズムやき裂が生じる前の損傷回復について実験及び解析的にそのメカニズムを明らかにすることを目的とした。高密度パルス電流における疲労き裂閉口メカニズムについては、き裂を迂回した電流がき裂先端で高密度化し、き裂先端には圧縮熱応力が作用する。高温環境下で降伏応力が低下しており、塑性変形を生じるが、冷却後は引張残留応力が生じる。それに釣り合う形で近傍には圧縮応力が作用する。局所的な曲げ変形が生じ、き裂閉口が生じることを明らかにした。一方、き裂が生じる前に高密度パルス電流を印可すると、滑り帯の成長が抑制されることも分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

機械や構造物には寿命が存在する。金属材料の疲労破壊を遅延させる技術としては、ショットピーニングや高周波焼き入れ等の手法が挙げられてきた。しかしこれらの手法ではき裂や転位等の損傷自体を修復することはできない。根本的に疲労損傷部分を修復することでインフラの長寿命化、安全性の向上を低コストで行う技術が求められており、これらの技術は脱炭素社会や持続可能な社会の実現につながる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to experimentally and analytically clarify the crack closure mechanism and damage recovery before crack initiation in high-density pulsed current. The fatigue crack closure mechanism in high-density pulsed currents is that the current bypassing the crack densifies at the crack tip, and compressive thermal stresses act on the crack tip. The yield stress is lowered under high temperature environment, resulting in plastic deformation, and after cooling, tensile residual stress is generated. Balanced compressive stresses act in the vicinity of the crack. Localized bending deformation and crack closure are observed. On the other hand, it was also found that the growth of the slip zone was suppressed by applying a high-density pulsed current before the crack initiation.

研究分野：材料力学

キーワード：疲労き裂治癒 高密度パルス電流

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

機械や構造物には寿命が存在する。金属材料の疲労破壊を遅延させる技術としては、ショットピーニングや高周波焼き入れ等の手法が挙げられてきた。しかしこれらの手法ではき裂や転位等の損傷自体を修復することはできない。根本的に疲労損傷部分を修復することでインフラの長寿命化、安全性の向上を低コストで行う技術が求められており、これらの技術は脱炭素社会や持続可能な社会の実現につながる。しかし、き裂修復技術が構築されておらずそのメカニズムも明らかになっていない。

2. 研究の目的

研究代表者らはこれまで疲労き裂治癒に関する研究を行ってきたが、治癒の発現に際してき裂開口量が増える機構が未解明であることや、パルス電流印加中のき裂の挙動、き裂界面の酸化膜によってき裂治癒が阻害されるという課題があった。また、き裂が発生する前の微視的損傷が蓄積された状態において、電流印加による金属の損傷回復、疲労き裂発生への遅延に関するメカニズムは解明されていない。そこで本研究では高密度パルス電流印加においてき裂開口メカニズムやき裂が生じる前の損傷回復について実験及び解析的にそのメカニズムを明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

3. 1 き裂治癒に関する研究

本研究では板厚は 1mm のステンレス鋼 SUS304 を用いた。試験片形状を図 1 に示す。疲労試験により最大試験力 2.5kN、応力比 0.05、周波数 5Hz の条件の下、予き裂を 2mm 導入し、疲労き裂を導入した。その後、図 1 円孔部に電極を取り付け、3.3kA、5ms のパルス電流を印加した。治癒処理の前後で、走査型電子顕微鏡によりき裂の開口量を測定および破面観察を行った。また、電流印加によるき裂先端の塑性域形成と開口量の変化のメカニズムを明らかにするため、数値解析を行った。解析では電流、伝熱、応力に関する方程式のもとで解が導かれており、それぞれ強連成解析を実施した。解析モデルは温度依存性を考慮した線形等方硬化の弾塑性モデルを使用した。

3. 2 損傷回復に関する研究

試験片には純銅 C1020 を用いた。試験片形状を図 2 に示す。試験開始前に熱処理と電解研磨を行った。熱処理は残留応力を除去し結晶粒を粗大化することを目的として、700°C で 6 時間を行った。熱処理によって試験片表面に形成された酸化被膜を除去し、試験片表面を平滑化することを目的として電解研磨を行った。2000 cycles ごとに疲労試験機から試験片を取り外して電流を印加し、10000 cycles まで試験を行うことで、電流印加が突き出しの高さや成長速度に与える影響を調査した。疲労試験は変位制御で行い、変位振幅は ± 0.05 mm、周波数は 3 Hz とした。電流密度は 60 A/mm² と 120 A/mm² の 2 条件で成長を追跡した。どちらの場合も印加時間 5 ms の直流パルス電流を用いた。電極は試験片の穴に挿入し電流は常に同じ方向に印加した。試験片表面は原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて観察した。毎回同じ滑り線 (PSM) の、同じ個所を測定するようにした。

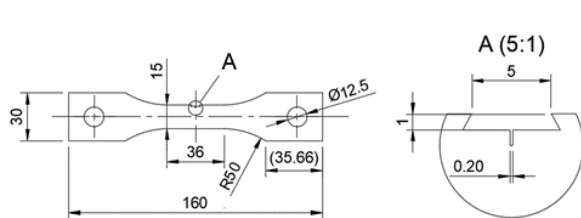


Fig. 1 Specimen geometry for crack healing.

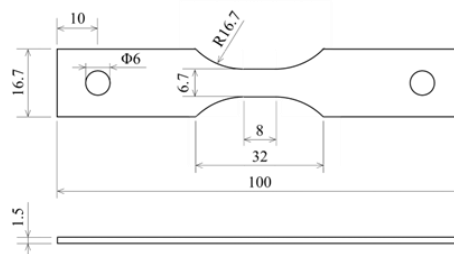


Fig. 2 Specimen geometry for damage healing.

4. 研究成果

4. 1 疲労き裂治癒における実験結果

デジタルマイクロスコープ及び、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて電流印加前後のき裂周辺の観察を行った。それぞれの供試材においての電流印加条件と観察結果を以下に示す。図 3 左側のき裂全体の観察の結果、電流印加によってき裂先端に熱影響を示す変色が見られた。このことから、き裂先端に電流が集中し、き裂先端に局所的なジュール熱が生じていることが分かる。

開口量取得のために SEM で観察した結果が、右側に示す拡大図である。電流印加によってき裂はいずれの位置でも閉口していた。き裂の根元では $77.1\mu\text{m}$ から $73.3\mu\text{m}$ へとわずかにき裂が閉口していた。最も熱影響を受けていたき裂の先端付近においては、 $4.93\mu\text{m}$ から $1.78\mu\text{m}$ へと約 63%もき裂が閉口した。

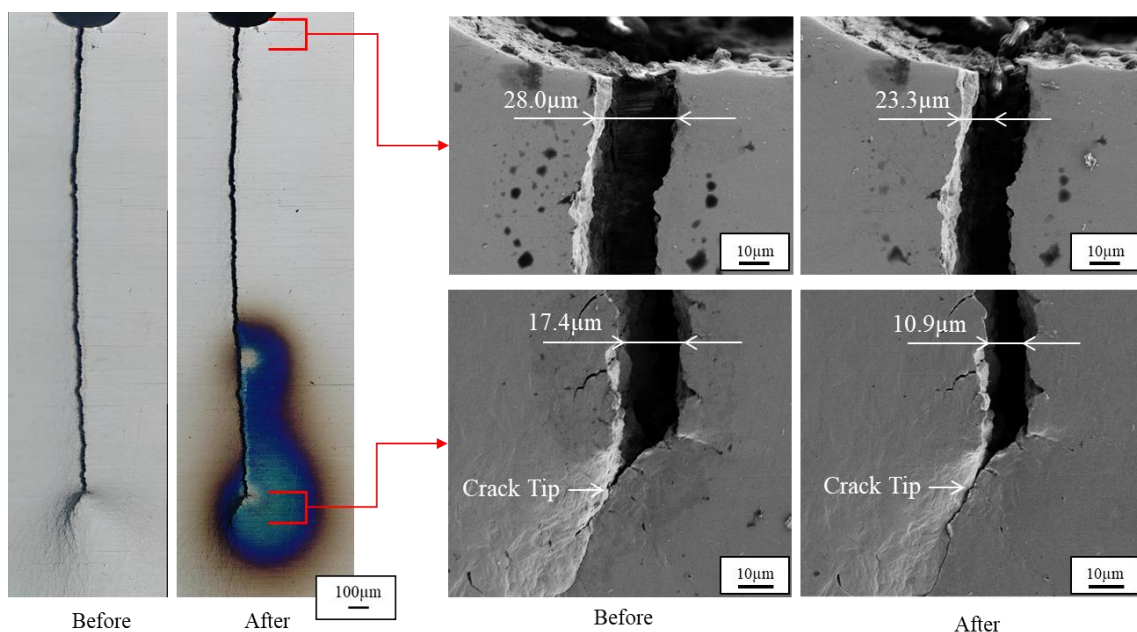


Fig. 3 Crack observation before and after electropulsing treatment (EPT) in SUS304.

4. 2 き裂に及ぼす電流印加の影響の解析

前節で電流印加によってき裂閉口が生じていることが明らかとなった。その原因と考えられる残留応力について数値解析結果をもとに解明した。まず、電流印加によって形成された塑性域分布を図 4 に示す。図では塑性変形が生じた部分を緑色で表示している。残留応力は次のような過程によって形成される。まず、き裂を迂回した電流がき裂先端で高密度化する。それに伴ってき裂先端に高いジュール熱が生じる。その結果、高温化したき裂先端は熱膨張を引き起こし、ミーゼス応力が高まる。高温化した領域は降伏応力が著しく低くなるため、容易に降伏する。その結果、き裂先端に塑性域を形成すると考えられる。続いて、電流印加終了後に十分空冷した際のき裂に対して垂直な方向の応力 σ_x 分布を図 5 に示す。この結果より、残留応力はき裂先端にのみ生じ、引張残留応力を呈していることが分かる。この引張残留応力によってき裂先端の前後に圧縮残留応力が付与されていることもわかる。これは、き裂先端の引張残留応力によって引き起こされ、内力のつり合いを保つように生じている。この結果、局所的な曲げ変形が生じ、裂閉口を生じさせる力として働いていることが明らかとなった。

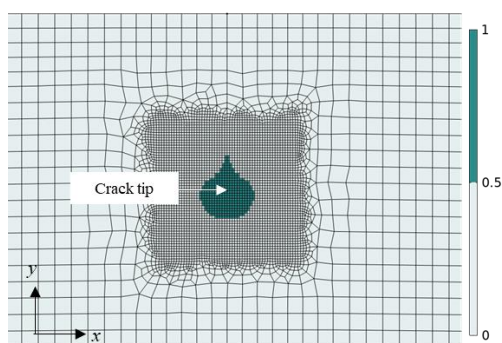


Fig. 4 Plastic zone distribution after EPT.

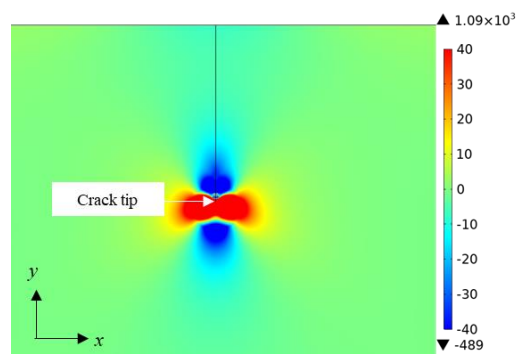


Fig. 5 Normal stress σ_x distribution after EPT.

4. 3 疲労損傷回復における疲労初期の突き出しの成長追跡結果

PSMA は 60 A/mm^2 の電流印加を行った場合、PSMB は 120 A/mm^2 の電流印加を行った場合、PSMC は電流印加を行わなかった場合である。PSMA の AFM 観察結果を図 6 に示す。サイクル数が増加すると、突き出しも成長している。PSM A の突き出しの成長を追跡した結果を図 7 に示す。各サイクルにおける突き出しの高さは同程度であり、 5nm 以内の差は測定誤差であると考えられる。よって、電流印加は突き出しの高さに影響を与えないと考えられる。電流密度が突き出しの成長速度に与える影響を図 8 に示す。突き出しはサイクル数

に対して線形に成長することが報告されているため[1], 2000 cycles 時の高さが同程度の PSMA, PSMB, PSM C の成長速度を比較した. 突き出しの成長速度は, PSMA は $dh/dN = 0.0723 \text{ nm/cycle}$, PSB B は $dh/dN = 0.0887 \text{ nm/cycle}$, PSM C は $dh/dN = 0.0846 \text{ nm/cycle}$ となる. PSM A と PSM C を比較すると, 電流密度 60 A/mm^2 の場合は突き出しの成長速度が遅くなることが確認された. 一方, PSMB と PSM C を比較すると, 電流密度 120 A/mm^2 の場合は突き出しの成長速度に影響を与えていない.

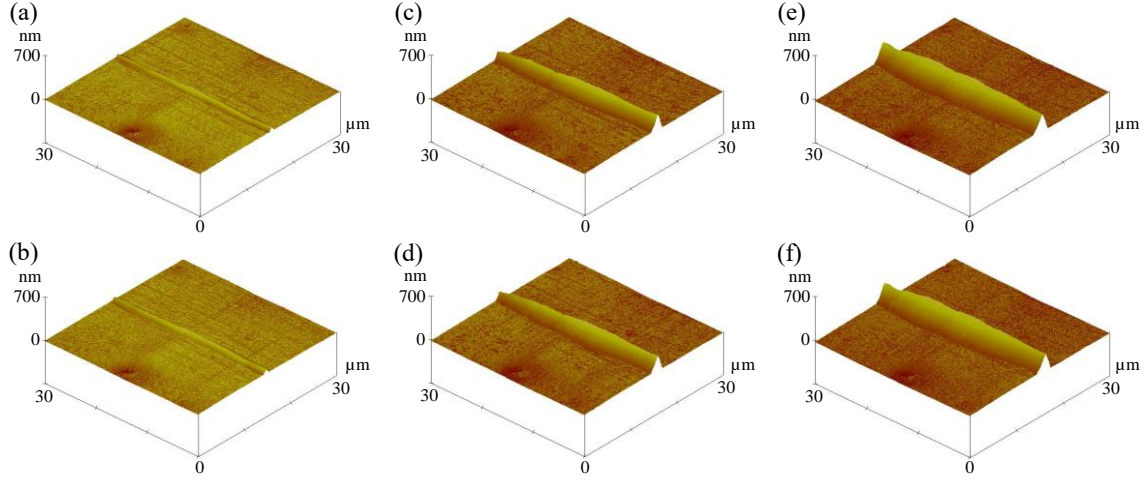


Fig.6 AFM images of PSMA with electropulsing.

- (a) $N = 2 \times 10^3$ cycles (before electropulsing). (b) $N = 2 \times 10^3$ cycles (after electropulsing).
(c) $N = 6 \times 10^3$ cycles (before electropulsing). (d) $N = 6 \times 10^3$ cycles (after electropulsing).
(e) $N = 1 \times 10^4$ cycles (before electropulsing). (f) $N = 1 \times 10^4$ cycles (after electropulsing).

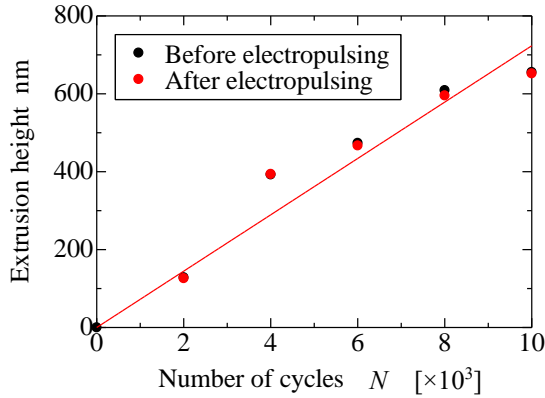


Fig. 7 Growth of extrusion height observed through AFM of PSMA.

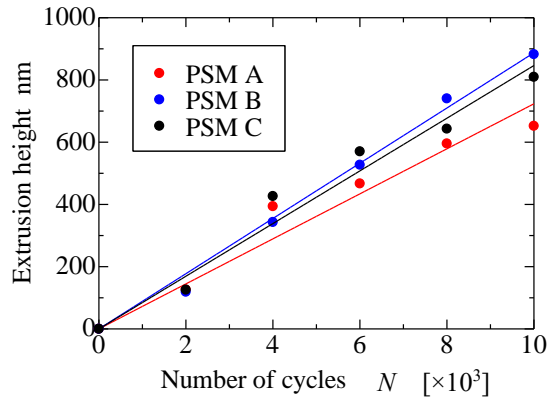


Fig. 8 Comparison of extrusion growth rates with and without electropulsing.

4. 4 電流印加が突き出しの成長に与える影響の評価

Polák のモデルを適用し, 電流印加が突き出しの成長速度に与える影響を PSB 内の空孔濃度に着目して考察する. 空孔濃度が定常状態のときに電流を印加すると, 図 9 に示すように, 空孔は電流印加方向へ移動する. PSB 内のチャンネル構造で生成された空孔は母材へ流出し, 母材の刃状転位によって消滅すると仮定する. 定常状態の空孔濃度分布より[2], PSB から母材へ流出した平均空孔濃度は式(1)と表せる.

$$\bar{c}_{vout} = \frac{p}{Aw} \left\{ r + \frac{\sinh(aw/2 - ar) - \sinh(aw/2)}{a \cosh(aw/2) + (a^2 / \sqrt{\rho_e}) \sinh(aw/2)} \right\} \quad (1)$$

p は PSB 内の空孔生成速度, A は空孔消滅係数, w は PSB の幅, r は電流印加による空孔の移動距離, a は $a = \sqrt{A/D_v \tau}$, D_v は空孔拡散係数, τ は疲労サイクルの周期, ρ_e は母材の刃状転位密度である. PSB 内の空孔濃度を容易に捉えるため, 位置 x に依存しない空孔濃度を平均空孔濃度と定義した. 電流印加によって, (1)空孔は電流と同じ方向のみに移動する, (2)電子風力は PSB に対して垂直方向に作用する, (3)空孔の位置によらず, 電子風力によって同じ距離を移動する, と仮定した.

PSB 内の空孔が母材に移動し消滅するため、PSB 内の空孔濃度は減少する。疲労荷重を加えると、PSB 内の空孔濃度は増加するが、飽和には至らない。PSB 内の空孔濃度が再び飽和するまで、母材への空孔の流出が抑制され、その結果、PSB に内部圧縮応力が発生しないため、突き出しの成長は抑制されると考えられる。PSB 内の空孔濃度が再び定常状態に達すると、突き出しの成長が再開する。電流印加後、突き出しの成長が抑制されるサイクル数は式(2)で求められる。

$$N = \frac{\tau - 1}{A} \left\{ \frac{\log\left(1 - A / p \cdot \bar{c}_{v\text{sat}}\right)}{\log\left(1 - A / p \cdot \left(\bar{c}_{v\text{sat}} - \bar{c}_{v\text{out}}\right)\right)} \right\} \quad (2)$$

$\bar{c}_{v\text{sat}}$ は定常状態の PSB 内の平均空孔濃度、 $\bar{c}_{v\text{out}}$ は PSB から母材へ流出した平均空孔濃度である。

電流印加を行った場合の突き出しの成長予測を図 10 に示す。文献の値[2,3]を引用し、式(1)を用いると、定常状態の PSB 内の平均空孔濃度は、 $\bar{c}_{v\text{sat}} = 3.38 \times 10^{-4}$ at% となる。PSB から母材へ流出した平均空孔濃度を求めると、 $\bar{c}_{v\text{out}} = 8.02 \times 10^{-5}$ at% となる。式(2)を用いると、再び空孔濃度が定常状態に達するまでのサイクル数は $N = 454$ cycles となる。図 8 の突き出しの成長は 16.5 % 抑制されており、本予測は電流密度 60 A/mm^2 で印加した場合の実験と同様の傾向であるといえる。

電気抵抗率増加の 60 % は空孔によるものと推定されており、空孔による電気抵抗率の増加は $\Delta\rho = 1.3 \times 10^{-6} \Omega\text{cm/at\%}$ となる[3]。試験片全体の空孔濃度は電流印加によって 3.4×10^{-2} at% 減少した。PSB から母材へ流出した平均空孔濃度も含まれていると考えられる。一方、 120 A/mm^2 の場合、電流印加による電気抵抗率の変化は少なく、PSB 内の空孔濃度の変化も少ないと考えられる。よって、電流印加は突き出しの成長に影響は与えないと考えられる。PSB 内の空孔に影響を与える電流印加密度には最適値が存在することが明らかになった。

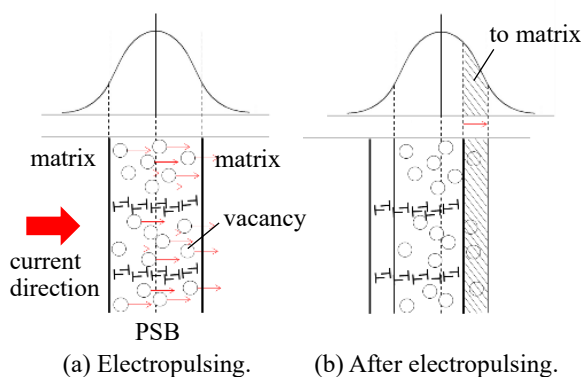


Fig.9 Image of the effect of electropulsing to vacancy in PSB.

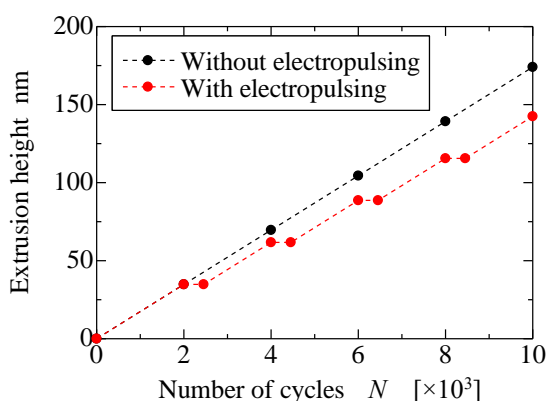


Fig.10 Predicted extrusion height. Electropulsing was performed once every 2000 cycles.

<参考文献>

- [1] Polák, J., Man, J., and Obrtlík, K., "AFM evidence of surface relief formation and models of fatigue crack nucleation," *International Journal of Fatigue*, Vol. 25 (2003), pp. 1027-1036.
- [2] Polák, J., and Man, J., "Mechanisms of extrusion and intrusion formation in fatigued crystalline materials," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 596 (2014), pp. 15-24.
- [3] Polák, J., and Sauzay, M., "Growth of extrusions in localized cyclic plastic straining," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 500 (2009), pp. 122-129.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 SASA Haruka, SHIN Jeehwan, HOSOI Atsushi, KITANO Makoto, KAWADA Hiroyuki	4. 巻 10
2. 論文標題 Electropulsing suppresses extrusion growth in polycrystalline copper subjected to fatigue loading	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 23-00027.1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/mej.23-00027	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 中山翔太, 菅野雄太郎, 上林友人, 細井厚志, 古川雄一, 富田高嗣, 川田宏之
2. 発表標題 近接電極を用いた高密度パルス電流印加による熱間金型用合金鋼の疲労き裂治癒
3. 学会等名 日本機械学会関東支部第30期総会・講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 中山翔太, 菅野雄太郎, 上林友人, 細井厚志, 古川雄一, 富田高嗣, 川田宏之
2. 発表標題 高密度電流印加による熱間金型用合金鋼の疲労き裂治癒
3. 学会等名 第30回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐々春佳, シンジファン, 細井厚志, 川田宏之
2. 発表標題 固執すべり帯の成長抑制におけるパルス電流密度の影響
3. 学会等名 日本機械学会関東支部第29期総会・講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Haruka Sasa, Jeehwan Shin, Atsushi Hosoi, Makoto Kitano, Hiroyuki Kawada
2. 発表標題 Suppression of persistent slip band growth in polycrystalline copper by applying high-density electropulsing and its evaluation
3. 学会等名 17th Asia-Pacific Conference on Failure and Strength and 13th Conference on Structural Integrity and Failure (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshitaka Iwase, Shota Nakayama, Yutaro Sugeno, Atsushi Hosoi, Makoto Kitano, Hiroyuki Kawada,
2. 発表標題 Evaluation of fatigue crack closure phenomena in steel by applying high-density pulse current
3. 学会等名 17th Asia-Pacific Conference on Failure and Strength and 13th Conference on Structural Integrity and Failure (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------