

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02457

研究課題名（和文）微小き裂先端の転位運動その場観察および解析法確立：金属疲労を克服する

研究課題名（英文）Development of In situ characterization methods for dislocation motion at a crack tip: overcoming metal fatigue

研究代表者

小山 元道 (Koyama, Motomichi)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：20722705

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：鉄鋼材料、Ni合金ならびにTi合金を対象にその場観察および有限要素法の新機軸構築に取り組んだ。特に、以下4つに成果として達成した。応力負荷中のその場電子チャネリングコントラストイメージング（ECCI）法の技術構築、BCC結晶への疲労負荷を対象とした、結晶塑性有限要素解析による鋭い切欠き近傍の空孔密度分布解析の実現、元素移流拡散-有限要素法連成解析による硬化に由来した変形局所化現象の再現、ECCI法およびその場二次電子線観察の併用によるラスマルテンサイト組織によける微視的疲労き裂進展の組織依存性の解明、の4点である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の大きな成果は金属疲労に繋がる現象の観察および計算解析の技術構築である。金属疲労は試験片形状依存性が大きく、特にき裂進展についてはバルク試料での解析が要求される。この観点から、その場ECCI法の構築はバルク試料での観察を実現しており、疲労現象にとらわれないバルク試料に対する広範な応用が期待される。また、金属疲労では応力、水素、空孔といったそれらの分布を可視化することが極めて困難である因子が試料内部で発達し、疲労損傷発達に影響する。実験的には得ることが非常に困難なこれら因子に関連するパラメーターを有限要素法の応用で実現したことも、金属疲労研究全般で利用が検討される成果であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have worked for technical developments of in situ microscopic observations and finite element analysis (FEA) with target materials of steels, Ni alloy, and Ti alloy. Specifically, the following four achievements were obtained: (1) technical developments of in situ electron channeling contrast imaging (ECCI), (2) Methodological establishment of vacancy concentration distribution at a sharp notch tip using crystal plasticity FEA, (3) simulation of plasticity localization based on a hardening model using FEA coupled with an element diffusion analysis, (4) Clarification of microstructure dependence of small fatigue crack growth in a lath martensitic steel using ECCI coupled with in situ secondary electron imaging.

研究分野：金属組織学

キーワード：金属疲労 水素脆化 そのば観察 電子チャネリングコントラスト き裂

### 1. 研究開始当初の背景

機械システムにおける破壊事故原因の8割が金属疲労である。金属疲労とは、繰返し荷重により引張強度以下の負荷条件で部材が破壊する現象であり、マイクロマシンからスペースシャトルまで、破壊事故を取り扱う上での共通問題である。なぜ金属疲労による事故がなくなるのか。この一因は、破壊力学を基にした経験則により疲労寿命および疲労強度が見積もられていることにある。特に最近では、新たな機械構造や材料の開発が進み、経験則から逸脱した金属疲労現象が起り易い状況にある。今後日本では、初の国産ジェット旅客機 MRJ の納品開始 (2020 年目標) や、リニア新幹線の開業 (2027 年目標) に加えて、全く新しい機械システムである燃料電池自動車の普及 (2020 年都内 6 千台普及目標) などが計画・進行しており、次世代交通インフラ時代が到来しようとしている。この新時代交通インフラの安全を確保するため、より精緻な金属疲労寿命および強度の予測が求められる。つまり、経験則ではなく、より物理的なメカニズムに基づく金属疲労設計が必要である。

多くの金属における疲労寿命は微小き裂の進展抵抗によって支配されている。この疲労き裂の進展機構を理解することが、金属疲労において最も重要であるといっても過言ではない。また、金属疲労は塑性変形の繰返しにより起こる現象である。つまり、微小疲労き裂先端の転位運動および金属組織発達を理解することが金属疲労機構の主たる部分を理解することに繋がる。換言すれば、微小疲労き裂先端近傍の転位運動や金属組織発達を観察および制御することで耐疲労材料を創製することが可能であり、また、より廉価な材料を安全に使用できる環境を提案することができる。つまり、耐疲労材料創製に向けて、金属疲労き裂進展の微視的機構を示すとともに、これに必要なとされる解析技術構築を行うことが希求されている。

### 2. 研究の目的

1953 年に金属疲労を原因としてコメット機墜落事故が起こって以来、半世紀以上その重要性が認識されながら、未だ微小き裂進展メカニズムは明確になっていない。より具体的に言及すると、疲労き裂の発生問題は、転位組織発達 (金属組織学) の観点から一定の理解が得られている。また、大きなき裂については応力拡大係数範囲で表現される力学場によって進展速度が支配されていることが明らかになっており、破壊力学で進展挙動が整理されている。一方、疲労寿命の主要な部分を占める微小き裂進展は、き裂発生と大きなき裂の中間的な性質を持っており、そのメカニズムと支配因子を把握するためには、き裂先端という力学的特異場の中の転位運動および組織発達を観察・理解する必要がある。しかし、微小疲労き裂近傍における転位運動を観察し、メカニズムを理解するためには、以下の三点の課題がある。

(1) 上述したように、き裂先端近傍の転位運動を観察することが重要である。しかし、疲労き裂進展は力学条件に敏感なため、現実部材の条件に沿うように「バルク試料」で負荷をかけながら、「転位運動をその場観察」することが必要である。

(2) 微小き裂は、すべり面に沿う結晶学的な進展をする。この結晶学的なき裂進展は、転位組織形成に伴う空孔形成が鍵である。つまり、(1)で観察される転位運動を微小き裂進展と関連づけるためにはき裂近傍の空孔量および分布を把握する必要がある。しかし、 $\mu\text{m}$  スケールの局所空孔量の測定技術は確立されておらず、顕微鏡法による観察も難しい。

(3) 汎用的に用いられる「炭素鋼」の疲労現象や、燃料電池車関連インフラで問題となる「水素環境」中では、静水圧応力勾配を駆動力として炭素や水素などがき裂先端近傍に拡散し、微小き裂の開口に伴う転位運動に影響する。しかし、き裂近傍局所の固溶元素拡散は顕微鏡法では解析困難であり、力学計算を拡散と連成させた解析が必要となる。

本研究では、バルク試料の転位運動その場観察法を有する申請者と、結晶塑性有限要素法 (CP-FEM) の専門家である奥山助教、ならびに拡散-力学連成解析の専門家である佐々木助教が連携することで上記 3 つの技術的・学術的課題に挑戦し、微小疲労き裂進展の本質的機構を理解する。

### 3. 研究の方法

微小疲労き裂進展の機構と支配因子を把握するためには、き裂先端という力学的特異場の中の転位運動および組織発達を観察・理解する必要がある。微小疲労き裂近傍における転位運動を観察し、機構を理解するためには、目的で述べた三点の課題がある。

(1)の観点では、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いたき裂近傍の転位運動のその場観察技術を利用した。具体的には、SEMチャンバー内に引張試験機を導入し、電子チャネリングコントラスト (ECC) を利用して引張負荷などの外力不可に対

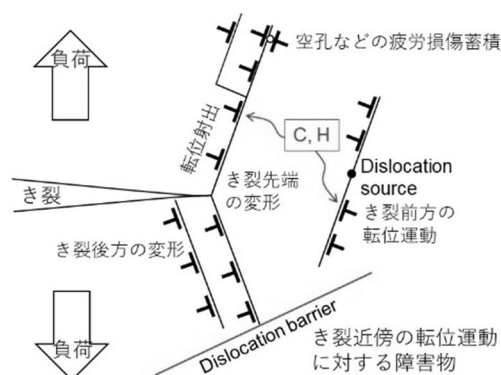


図 1 疲労き裂進展に関わる現象

応する転位運動をその場観察した。ECC像とは、いわゆる反射電子像である。試料表面方位がチャネリング条件にあるときに反射電子線強度が極めて低くなることを利用して、格子欠陥の弾性ひずみを明瞭にとらえることができる。双晶、積層欠陥等の面欠陥のみならず、線欠陥である転位も一本々々を分解して観察できる。ECC法の重要な利点は、き裂近傍の極局所領域の転位運動を試験片の薄膜化なしに観察できる点にある。この観察手法を確立、転位運動の観察に適用することでき裂に関わるバルク試料における転位キャラクタリゼーションを行った。また本研究では、上記観察法に加えて課題(2)、(3)を解決するため、結晶塑性有限要素法ならびに拡散-力学連成解析を用いる事で上記3つの技術的・学術的課題解決を試みた。

#### 4. 研究成果

##### 4.1 その場電子チャネリングコントラスト法の構築

マイクロCompact tension (CT)試験片や治具を作製し、その場ECCIによる転位運動観察をするセットアップを構築した。本実験の対象材料は単結晶Coとし、負荷中に双晶変形および双晶変形にともなう変形適合性を満たすための転位運動および増殖が起こっている様子が観察された。こののちにノッチ部近傍の双晶界面でき裂が発生、進展した。このような転位組織発達、き裂発生ならびにき裂進展の一連の過程をその場ECCI法で観察できることを示したことが第一の成果である。また、Ni-20Cr合金を用いた変形中転位運動その場観察にも成功し、本手法の汎用性を確認した(図2)。具体的には、プラナー転位列の形成過程を応力下でかつ、転位一本一本を数えられる分解能を有した状態で観察し、水素脆化粒界破壊などで問題となるNi合金における転位由来の粒界応力集中の有意性を示した。

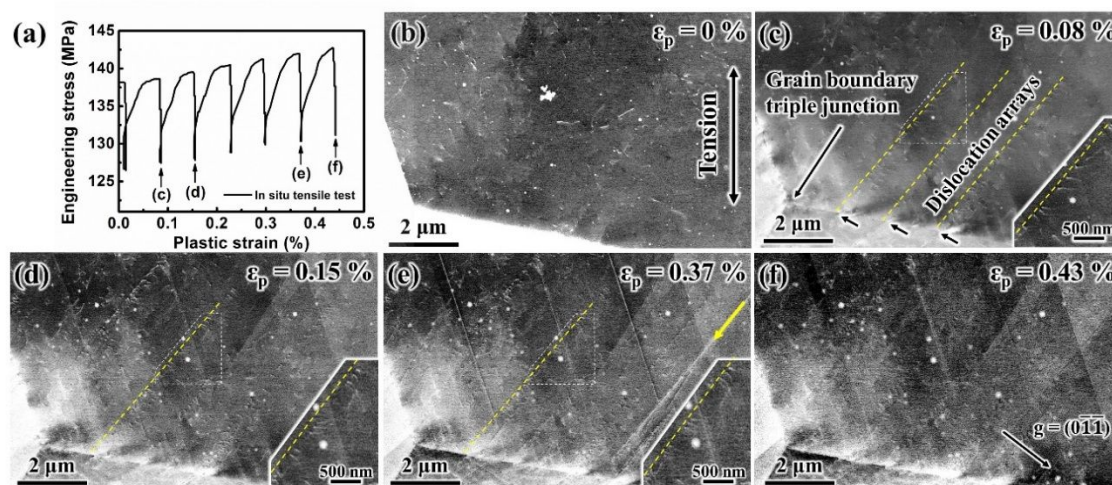


図2 その場ECCI観察結果(すべて応力下で撮影)。(a) 応力-塑性ひずみ線図。(b) 0%, (c) 0.08%, (d) 0.15%, (e) 0.37%, (f) 0.47%塑性ひずみを与えた時のECC像。(T. Kong, M. Koyama, M. Yamamura, E. Akiyama. Multi-probe characterization of plasticity heterogeneity: Requirement of alloy design considering dislocation planarity for developing crack-resistant Ni-Cr alloys. Mater. Trans. 63 (2022) 88-91.)

さらに、Ti-6Al-4V合金の疲労挙動を転位運動と紐づけるためにECCI法を破面直下の観察に適用した(図3)。関連するき裂先端の変形中その場観察画像を取得することで、画像相関法によるひずみ解析も行った(図4)。Ti-6Al-4V合金ではDwell疲労と呼ばれる負荷保持による疲労寿命の低下が問題となっていた。今回の結果から、負荷保持中にき裂先端で塑性変形に由来したき裂開口が起こっており、これに関連して、き裂先端から多くの転位射出が起こっていることが明らかになった。一般に1サイクルあたりの塑性変形量が大きくなるとき裂閉口が働き、き裂進展抵抗を低下させる働きがあることが知られるが、負荷保持により誘起された塑性変形および転位射出はき裂閉口の影響を強める働きはなく、むしろ転位射出量増大によるき裂開口過程におけるき裂進展量の増加がき裂進展を加速させていた。更に興味深い点として、変位保持サイクル後数サイクルにおいて、変位保持前と比べて多くの塑性変形および速いき裂進展(大きいストライエーション間隔)が確認されたことである。これは、変位保持によってき裂先端が過剰に開口するために、変位保持後の塑性誘起き裂閉口現象の影響を低減させた可能性がある。

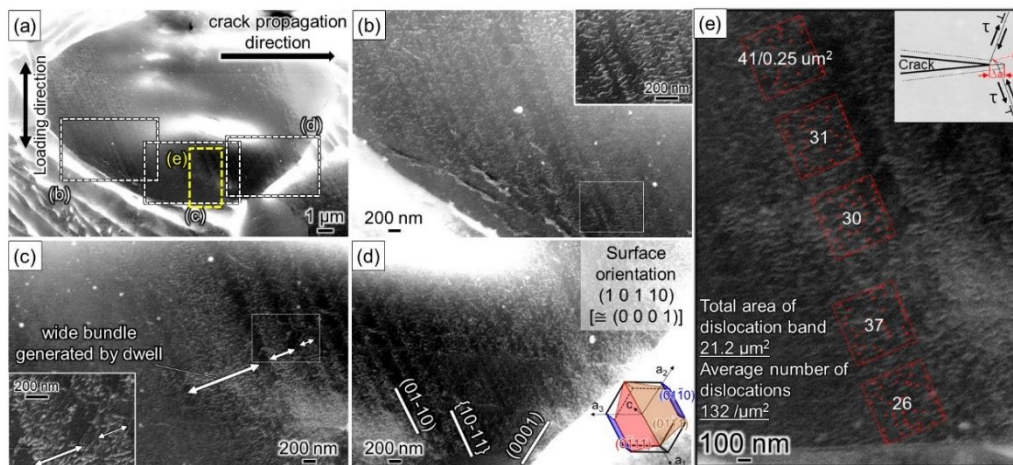


図3 (a) バイモーダル組織を有するTi-6Al-4V合金の疲労破面直下のECC像。この破面領域に対応するき裂進展時には1サイクルだけ変位保持を与えた。この結果、変位保持をしていない領域(b)に比べ、変位保持をした領域(c)では転位列の集団の幅が広がっていた。ここで観察された転位列は、錐面すべりに属する(d)。また、転位の数を定量評価することも可能であった(f)。

(Y. Aoki, M. Koyama, M. Tanaka, K. Tsuzaki. Crack tip deformation during dwell fatigue and its correlation with crack/fracture surface morphologies in a bi-modal Ti-6Al-4V alloy. Materials Transactions 63 (2022) 1232-1241.)

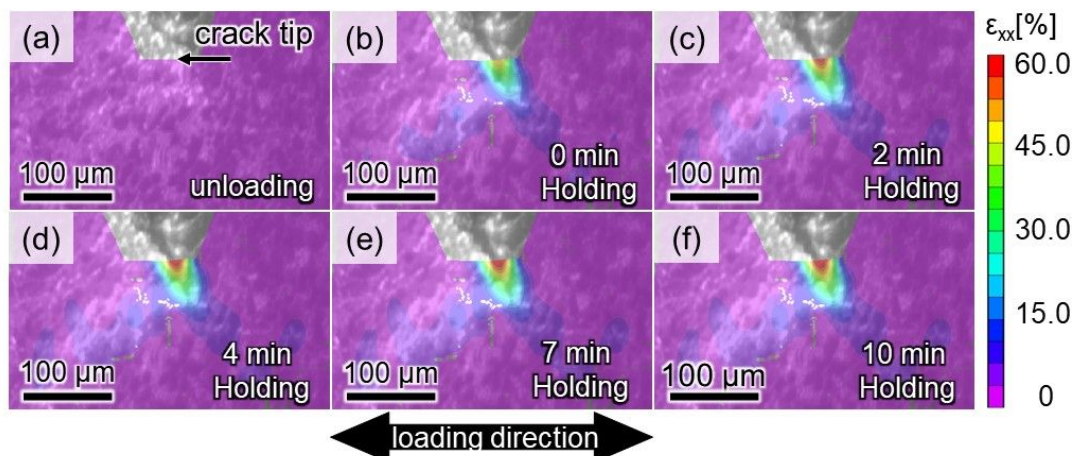


図4 画像相関法による疲労き裂先端近傍のひずみ解析。50 MPa m<sup>1/2</sup>負荷し、最大荷重到達後変位保持を行った。それぞれの保持時間を各図右下に示す。(Y. Aoki, M. Koyama, M. Tanaka, K. Tsuzaki. Crack tip deformation during dwell fatigue and its correlation with crack/fracture surface morphologies in a bi-modal Ti-6Al-4V alloy. Materials Transactions 63 (2022) 1232-1241.)

(Y. Aoki, M. Koyama, M. Tanaka, K. Tsuzaki. Crack tip deformation during dwell fatigue and its correlation with crack/fracture surface morphologies in a bi-modal Ti-6Al-4V alloy. Materials Transactions 63 (2022) 1232-1241.)

最終年度には、FCC合金系に対するその場ECCI観察を継続するとともに、より複雑なラスマルテンサイト組織にその場観察を展開した。一般に、ラスマルテンサイトでは電子チャネリングコントラスト法による転位組織観察が容易ではないので、通常の二次電子線像を用いたその場観察と、その後のEx-situによるECCI観察および電子後方散乱回折測定結果を合わせることで解析した。この解析を通して、微小疲労き裂進展の進展挙動に及ぼす結晶方位および金属組織の影響の一端を明らかとした。具体的には、ラスの配向およびサイズとき裂進展に強い相関があり、ラスが引張負荷方向と斜めに配置されているときはすべり面に沿ったき裂進展が現れた。また、サイズが大きいラスの{110}面が負荷方向に対して45°に近いとき、同様に滑り面に沿ったき裂進展が観察された。一方、ラスが負荷方向と平行に配向している場合、き裂はラスを横切って進展した。き裂が屈曲または分岐したサイトが強いき裂進展抵抗を有すると仮定すると、ブロック境界が最小単位としてき裂進展抵抗に寄与していたことが示された。ここで得られた転位組織やき裂進展経路などの観察結果を、結晶塑性解析による空孔密度分布と対応付けて考察することで、空孔に由来する疲労き裂進展メカニズムに迫った。具体的には、空孔密度の上昇した領域とき裂進展方向に対応が見られた。

#### 4.2 有限要素法によるシミュレーション

本研究では計算的手法として、有限要素法を主軸に置き、2つの有限要素法解析を進展させた。まずは、空孔密度計算を可能とする結晶塑性有限要素法解析である。転位の対消滅モデルに基づき、疲労変形を与えた際の「空孔密度分布」およびそのサイクル数にともなう発展の計算を体心

立方構造に対して成功した。この計算を、き裂を模擬した鋭い切欠き先端近傍における疲労負荷中の空孔密度および転位密度、内部応力の計算に適用した。結果として、4.1節で述べたように、き裂進展経路と空孔の集積に位置対応があり、すべり面に沿った微視的き裂進展に空孔が寄与している可能性が示唆された。

つぎに注目すべきは元素移流拡散-有限要素法連成解析である。水素を含む侵入型固溶元素を対象に解析法の構築をした。元素拡散、集積によるき裂前方の塑性変形挙動の変化をシミュレーションした結果、従来しられるき裂先端近傍の水素が引き起こす塑性変形集中および塑性域の縮小を硬化の観点から再現できることを示した。この成果は、一般に水素が軟化を引き起こすことで塑性変形集中を引き起こすとされてきた考え方とは反対である。しかし、水素は一般にマクロな硬さに対しては硬化に寄与することが報告されており、むしろ実験事実とは整合する結果である。より具体的には、硬化および転位のピンning-デピンing現象を考慮することで変形の局在化および塑性域の縮小を再現した。炭素と転位の相互作用は一般に硬化現象を引き起こすが、炭素の硬化から外れて（デピンingされて）転位が動くと局所軟化する。これを模擬して、水素原子による硬化およびデピンingによる軟化の効果を含む有限要素解析を行った結果、“塑性域サイズの縮小”および“き裂先端の局所塑性ひずみの増加”が現れることを明らかとした。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計24件（うち査読付論文 23件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 15件）

1. 著者名 Koyama Motomichi, Eguchi Takeshi, Tsuzaki Kaneaki	4. 巻 61
2. 論文標題 Fatigue Crack Growth at Different Frequencies and Temperatures in an Fe-based Metastable High-entropy Alloy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 641 ~ 647
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-504	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Verma Virendra Kumar, Koyama Motomichi, Kumai Bakuya, Hojo Tomohiko, Akiyama Eiji	4. 巻 61
2. 論文標題 Roles of Hydrogen Content and Pre-strain on Damage Evolution of TRIP-aided Bainitic Ferrite Steel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 1309 ~ 1314
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-514	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Koyama Motomichi, Saitoh Hiroyuki, Sato Toyoto, Orimo Shin-ichi, Akiyama Eiji	4. 巻 11
2. 論文標題 Depressurization-induced diffusionless transformation in pure iron hydrogenated under several gigapascals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Letters: X	6. 最初と最後の頁 100078 ~ 100078
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mblux.2021.100078	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Koyama Motomichi, Gondo Takeaki, Tsuzaki Kaneaki	4. 巻 11
2. 論文標題 Microstructure Refinement by Low-Temperature Ausforming in an Fe-Based Metastable High-Entropy Alloy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Metals	6. 最初と最後の頁 742 ~ 742
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/met11050742	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hao Chunxi, Koyama Motomichi, Ajito Saya, Akiyama Eiji	4. 巻 46
2. 論文標題 Strain rate sensitivity of hydrogen-assisted $\alpha$ -martensitic transformation and associated hydrogen embrittlement in high-Mn steel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy	6. 最初と最後の頁 27221 ~ 27233
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2021.05.162	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 -

1. 著者名 Wang Haoyu, Koyama Motomichi, Hojo Tomohiko, Akiyama Eiji	4. 巻 46
2. 論文標題 Hydrogen embrittlement and associated surface crack growth in fine-grained equiatomic CoCrFeMnNi high-entropy alloys with different annealing temperatures evaluated by tensile testing under in situ hydrogen charging	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy	6. 最初と最後の頁 33028 ~ 33038
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2021.07.136	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 -

1. 著者名 Chen Tingshu, Chiba Takahiro, Koyama Motomichi, Shibata Akinobu, Akiyama Eiji, Takai Kenichi	4. 巻 52
2. 論文標題 Hierarchical Characteristics of Hydrogen-Assisted Crack Growth and Microstructural Strain Evolution in Tempered Martensitic Steels: Case of Quasi-cleavage Fracture	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Metallurgical and Materials Transactions A	6. 最初と最後の頁 4703 ~ 4713
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11661-021-06423-1	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 -

1. 著者名 Koyama Motomichi, Saitoh Hiroyuki, Sato Toyoto, Orimo Shin-ichi, Akiyama Eiji	4. 巻 11
2. 論文標題 Hydrogenation treatment under several gigapascals assists diffusionless transformation in a face-centered cubic steel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-98938-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Maeda Milene Yumi, Koyama Motomichi, Nishimura Hayato, Cintho Osvaldo Mitsuyuki, Akiyama Eiji	4. 巻 207
2. 論文標題 Pre-straining alters hydrogen-assisted cracking site and local hydrogen diffusivity in a nitrogen-doped duplex steel	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 114272 ~ 114272
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scriptamat.2021.114272	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 該当する

1. 著者名 Kong Taein, Koyama Motomichi, Yamamura Misaho, Akiyama Eiji	4. 巻 63
2. 論文標題 Multi-Probe Characterization of Plasticity Heterogeneity: Requirement of Alloy Design Considering Dislocation Planarity for Developing Crack-Resistant Ni-Cr Alloys	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 88 ~ 91
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-M2021191	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 -

1. 著者名 Mizoguchi Tomoki, Koyama Motomichi, Noguchi Hiroshi	4. 巻 62
2. 論文標題 Annealing Time Effects on Mechanically Long Fatigue Crack Growth of TRIP-maraging Steels	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 399 ~ 401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-093	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kobayashi Naohiro, Koyama Motomichi, Kobayashi Kenji, Hojo Tomohiko, Akiyama Eiji	4. 巻 63
2. 論文標題 Hydrogen Embrittlement Behavior of Pure Ni and Ni-20Cr Alloy with Different Grain Sizes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 247 ~ 256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-M2021170	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -



1. 著者名 Koyama Motomichi	4. 巻 2
2. 論文標題 Quantification and Characterization of Microdamage Resistance in Metals for Designing High-Strength Ductile Microstructures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Accounts of Materials Research	6. 最初と最後の頁 1167 ~ 1176
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/accountsmr.1c00160	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 -

1. 著者名 Mizoguchi Tomoki, Koyama Motomichi, Noguchi Hiroshi	4. 巻 107
2. 論文標題 Annealing Time Effects on Mechanically Long Fatigue Crack Growth of TRIP-maraging Steels	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Tetsu-to-Hagane	6. 最初と最後の頁 321 ~ 324
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/tetsutohagane.TETSU-2020-106	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Koyama Motomichi, Taheri-Mousavi Seyedeh Mohadeseh, Yan Haoxue, Kim Jinwoo, Cameron Benjamin Clive, Moeni-Ardakani Seyed Sina, Li Ju, Tasan Cemal Cem	4. 巻 6
2. 論文標題 Origin of micrometer-scale dislocation motion during hydrogen desorption	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eaaz1187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.aaz1187	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yang Zhipeng, Koyama Motomichi, Fudouzi Hiroshi, Hojo Tomohiko, Akiyama Eiji	4. 巻 60
2. 論文標題 Availability of Opal Photonic Crystal Films for Visualizing Heterogeneous Strain Evolution in Steels: Example of Luders Deformation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 2604 ~ 2608
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-223	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Koyama Motomichi、Hao Chunxi、Akiyama Eiji、Tszuzaki Kaneaki	4. 巻 51
2. 論文標題 Hydrogen Enhances Shape Memory Effect of a Ferrous Face-Centered Cubic Alloy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Metallurgical and Materials Transactions A	6. 最初と最後の頁 4439 ~ 4441
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11661-020-05886-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Verma Virendra Kumar、Koyama Motomichi、Hamada Shigeru、Akiyama Eiji	4. 巻 791
2. 論文標題 Effects of hydrogen content that alters damage evolution mechanisms in SUH 660 precipitation-strengthened Fe-Cr-Ni steel	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Science and Engineering: A	6. 最初と最後の頁 139750 ~ 139750
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.msea.2020.139750	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 -

1. 著者名 Koyama Motomichi、Wang Haoyu、Verma Virendra Kumar、Tszuzaki Kaneaki、Akiyama Eiji	4. 巻 51
2. 論文標題 Effects of Mn Content and Grain Size on Hydrogen Embrittlement Susceptibility of Face-Centered Cubic High-Entropy Alloys	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Metallurgical and Materials Transactions A	6. 最初と最後の頁 5612 ~ 5616
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11661-020-05966-z	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 -

1. 著者名 Hao Chunxi、Koyama Motomichi、Akiyama Eiji	4. 巻 51
2. 論文標題 Quantitative Evaluation of Hydrogen Effects on Evolutions of Deformation-Induced $\epsilon$ -Martensite and Damage in a High-Mn Steel	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Metallurgical and Materials Transactions A	6. 最初と最後の頁 6184 ~ 6194
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11661-020-06021-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tsuzazki Kaneaki, Koyama Motomichi, Sasaki Ryosuke, Nakafuji Keiichiro, Oie Kazushi, Shibata Akinobu, Gondo Takashi, Miyazaki Hiroya, Akamine Hiroshi, Nishida Minoru	4. 巻 70
2. 論文標題 Novel -75 °C SEM cooling stage: application for martensitic transformation in steel	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Microscopy	6. 最初と最後の頁 250 ~ 254
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jmicro/dfaa051	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 -

1. 著者名 Maeda Milene Yumi, Koyama Motomichi, Nishimura Hayato, Cintho Osvaldo Mitsuyuki, Akiyama Eiji	4. 巻 46
2. 論文標題 Hydrogen-assisted damage evolution in nitrogen-doped duplex stainless steel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy	6. 最初と最後の頁 2716 ~ 2728
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2020.10.152	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Koyama Motomichi, Eguchi Takeshi, Tsuzaki Kaneaki	4. 巻 61
2. 論文標題 Fatigue Crack Growth at Different Frequencies and Temperatures in an Fe-based Metastable High-entropy Alloy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 641 ~ 647
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-504	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Koyama Motomichi, Seo Misaki, Nakafuji Keiichiro, Tsuzaki Kaneaki	4. 巻 22
2. 論文標題 Stacking fault aggregation during cooling composing FCC-HCP martensitic transformation revealed by in-situ electron channeling contrast imaging in an Fe-high Mn alloy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science and Technology of Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 135 ~ 140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/14686996.2021.1877570	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 M. Koyama, M.Y. Maeda, C. Hao, O.M. Cintho, K. Tsuzaki, T. Hojo, E. Akiyama
2. 発表標題 Hydrogen effects on micro-damage arrest in multiphase steels
3. 学会等名 Asia steel 2021（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 草場祐輝, 佐々木大輔, 小山元道
2. 発表標題 水素によるPinning-Depinningに着目した弾塑性-水素移流拡散連成解析におけるき裂先端のひずみ発達と開口変位
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第185回春季講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Koyama, C. Hao, S. Ajito, E. Akiyama
2. 発表標題 Hydrogen effects on micro-damage arrest in an FCC-HCP transformation-induced plasticity steel
3. 学会等名 European Conference on Fracture (ECF) 23（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥山彫夢, 大橋鉄也, 眞山剛
2. 発表標題 微視組織中の界面とすべり面の相互の空間配置に関する情報を取り入れた新しい臨界分解せん断応力の検討
3. 学会等名 M&M2022 材料力学カンファレンス
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
研究 分担者	佐々木 大輔  (Sasaki Daisuke)  (50772498)	久留米工業高等専門学校・材料システム工学科・助教   (57101)	
研究 分担者	奥山 彫夢  (Okuyama Yelm)  (50804655)	木更津工業高等専門学校・電子制御工学科・助教   (52501)	

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			
ドイツ	Max-Planck-Institut fuer Eisenforschung			
米国	Massachusetts Institute of Technology			