

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H04624

研究課題名（和文）超高分解能X線顕微鏡が拓く3D/4Dマルチスケール・マルチモーダル材料科学

研究課題名（英文）Ultra-high resolution X-ray microscopy enabled by 3D/4D multiscale and multimodal materials science

研究代表者

戸田 裕之（Toda, Hiroyuki）

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：70293751

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 21,400,000円

研究成果の概要（和文）：最近完成した高エネルギー・高分解能X線顕微鏡を中核とし、X線CTとXRDとの融合を図った。この手法によれば、破壊を単に高分解能で観察するだけでなく、局所損傷や破壊等を見逃さずズームインしながら、従来のX線CTでは得られなかった転位、空孔、結晶方位、粒界等のナノレベル情報を3D/4Dマッピングすることができる。X線CTとXRDの情報を精密に突き合わせたり、融合情報を解析して上記情報を抽出する手法のアルゴリズムやソフトウェアも開拓した。また、この様な先端分析計測技術をアルミニウムやTRIP鋼など代表的な構造用金属材料に応用して各応用研究でも新たな知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発した手法の適用により、格子欠陥から粗大な製造欠陥まで、ナノ～マクロに至る材料内部の3D構造を全てカバーし、外乱下のそれらの時間発展現象を誤りなく把握・解釈できるようになった。この統合的な実験・解析環境の整備により、単にこれを見る道具、調べる道具として用いるのではなく、マルチスケール・マルチモーダルな学術手段への展開から3D/4D材料科学へと至る道筋が開かれたと言える。これにより、各種構造・機能材料の力学挙動などの理解が深まり、学術が進展すると期待される。それだけではなく、実効的で効果の高い材料組織制御法の開発などを通じて社会的な貢献も期待できる。

研究成果の概要（英文）：The recently completed high-energy, high-resolution X-ray microscope is at the heart of the fusion of X-ray CT and XRD. This method allows not only high-resolution fracture observation, but also 3D/4D mapping of nano-level information such as dislocations, vacancies, crystal orientation, grain boundaries, etc. that cannot be obtained with conventional X-ray CT, while zooming in without missing local damage, fractures, etc. Algorithms and software have been developed to precisely match X-ray CT and XRD information and to analyse the fusion information to extract the above information. The algorithms and software for precisely matching X-ray CT and XRD information and for analysing the fusion information to extract the above information have also been developed. New knowledge has also been gained in each application study by applying such advanced analysis and measurement techniques to typical structural metal materials such as aluminium and TRIP steel.

研究分野：構造・機能材料

キーワード：シンクロトロン 3Dイメージング 3DのX線回析 高分解能 マルチモーダル

1. 研究開始当初の背景

X線CT: SPring-8等の放射光施設では、投影型X線CTの空間分解能の物理的上限: 約1 μm が得られる。図1の様に、理工学や産業技術でこれを活用した研究開発が行われている。また、第3世代以降のシンクロトロン放射光施設では、X線顕微鏡を用いた超高分解能観察ができる。現在、SPring-8は、赤外～高エネルギーX線まで幅広くカバーしている。しかし、3GeV級光源(ナノテラス)の誕生により、SPring-8-IIは高エネルギーに特化する。さらなる高輝度化もあり、次世代放射光では高エネルギー・高分解能イメージングが有望な利用分野とされる。SPring-8では、2017年5月に20keV(アルミニウム観察可能)、2018年5月には30keV(鉄観察可能)と、ここ数年で利用可能X線エネルギーは飛躍的に向上した。これは、試料-カメラ間距離が160mというこれまでにない大規模X線顕微鏡で、世界でも高輝度X線と長大なビームラインがあるSPring-8でのみ実現可能である。

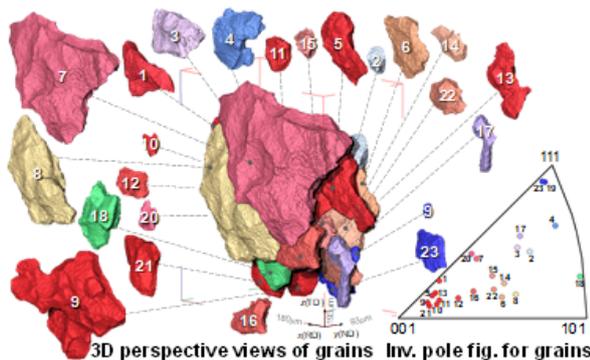


図1 SPring-8 X線CTの産業技術への応用例: 多結晶組織可視化

マルチスケールという言葉は人口に膾炙している。しかし、単に様々な機器を用い、幾つかのサイズスケールで観察するだけのマルチスケールでは、意義は乏しい(図2)。その場合、往々にして限られた領域のマイクロ構造をサンプリングしてサイズ等の平均情報を取得し、これとマクロ特性とを無理に関連付ける事になる。構造用金属では、直径1 μm 以上に限っても、数十万個/ mm^3 の粒子や欠陥等、膨大な数のマイクロ構造が存在する。例えば、その破壊を考えると、全粒子が一斉に破断する訳ではなく、ごく限られた数の、そして疲労破壊でそうである様に時としてただ1個のマイクロ構造(粒子等)がマクロ特性を支配する。その場合、サンプリング、平均化を旨とする従来アプローチは、全く用をなさない。真に必要なのは、

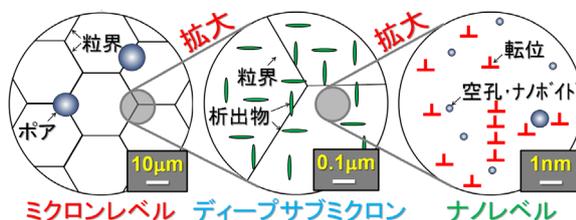


図2 従来のマルチスケール観察: 倍率を変え観察しても、全体積をナノでは観察できない

複雑な形態を有する膨大な数のマイクロ構造を全て観察、記録した上で、マクロ特性に直接大きく影響する、時として極めて限定された種類、性状、領域のマイクロ構造のみを特定し、マクロ特性との関係を解明することである。そのため、材料の全体積、全時間にわたる内部4D観察と、必要に応じた破壊フロントへのズームイン観察が必要で、これこそ真のマルチスケール観察と言える。

2. 研究の目的

X線CTと細束X線を用いた特殊なX線回折技術(以下XRD)との融合を図る。この実現により、広くナノ～マクロをカバーし、材料内部の関心領域にズームイン・ズームアウト可能な、真の意味でのマルチスケール解析が可能になる。また、3D局所

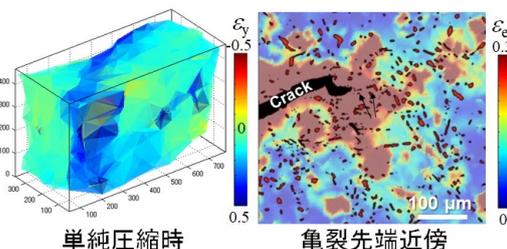


図3 歪み3Dマッピングの例

XRD 計測を超高分解能観察にふさわしい高精度で実現する。形状 (3D 観察) とその変化 (4D 観察)、結晶方位 4D マッピング (XRD)、転位や原子空孔等のナノレベル格子欠陥 4D マッピング (図 3) からなるマルチモーダル解析環境を実現する。細束 X 線を用いる特殊な X 線回折技術、および塑性歪み 3D/4D マッピングに基づくナノレベル格子欠陥 4D マッピングにより、他法では得られない高度な 3D/4D 情報が得られる。

本研究では、これらに X 線顕微鏡に

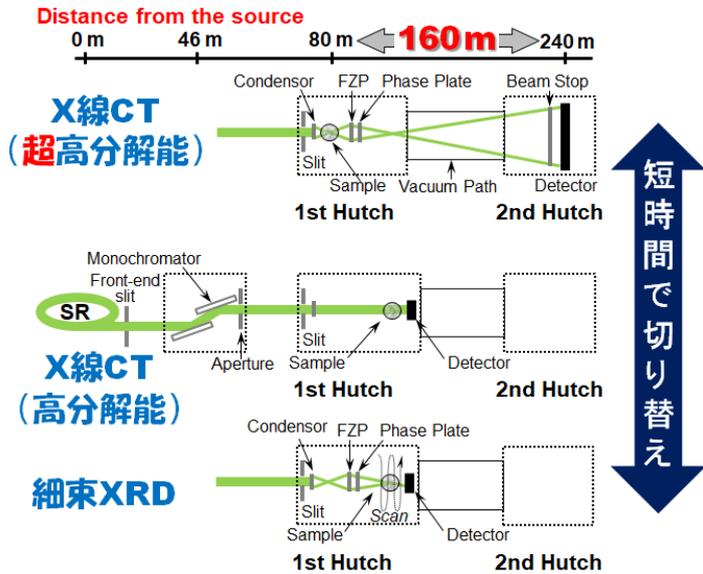


図 4 マルチスケール X 線 CT-特殊 XRD 統合計測

に関する最新の研究成果を組み合わせる統合環境を構築し、ソフト・ハード両面で整備する。本研究では、塑性歪み 3D/4D マッピングなど、申請者が長年開発・応用してきた各種 3D/4D イメージベース解析技術に注目した。これを利用してナノ構造を間接的に可視化する事で、ナノからミクロを経てマクロに至る、サイズスケールで 6 桁にも及ぶミクロ構造、欠陥等の切れ目のないマルチスケール可視化がズームインを伴い可能になる。

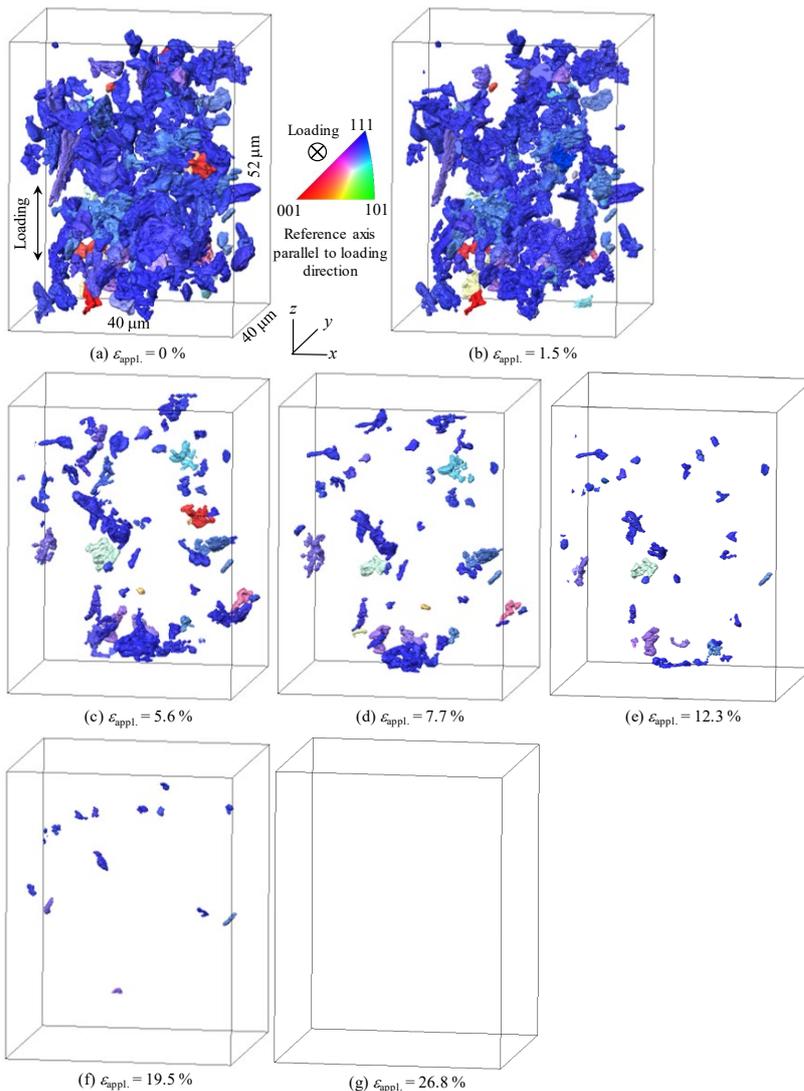


図 5 X 線 CT で観察された γ 結晶粒に XRD 情報で結晶方位を割り当てたもの

マルチスケール可視化がズームインを伴い可能になる。

3. 研究の方法

マルチスケール・マルチモーダル計測環境を構築するため、3つの観察・計測セットアップを同一ビームラインに同時に併設し、カメラや光学デバイスの X 線光路上への精密入退出により切り替えた。例えば、1本の引張試験片に対し試験中に数十回の観察・計測セットアップの切り替えが可能になった。また、X 線 CT で得られた破壊挙動等の時間発展挙動と XRD で得られた結晶方位情報とを精密に位置合わせする 4D 画像解析技術、超高分解能観察でズームインした場合にバルク試験片 (eg. $\phi 1$ mm) 内部で一部領域のみ (eg. $\phi 60 \mu\text{m}$) をアーティファクト無く、

精度よく 3D 画像再構成する関心領域画像再構成法を開発した。

さらに、ナノレベル格子欠陥である転位 (GND と SSD) と原子空孔に関し、図 3 に示す塑性歪み 3D/4D マッピングの高精度化、および格子欠陥密度と塑性歪み分布の対応関係の材料学的な検討を行った。また、3D 結晶方位分布計測の高精度化のため、通常試験片単位体積(1 mm³)当たり数十万点以上計測できる XRD 斑点をさらに増加させる大情報量化、逆にその大情報量を効率よく縮減して確度の高い情報のみを取り出す粗視化を行った。粗視化技術は、過去に基盤研究 (S)(~2016 年)で開発したアルゴリズムに基づくものとした。

高精度かつ高速回転可能なエアベアリングステージを導入するとともに、結像型 X 線 CT のデータと細束 XRD のデータを精密に位置合わせできる実験シーケンスにより、本格的なマルチモーダル計測を可能とした。

結像型 X 線 CT は、CZP を用いたケーラー照明系と FZP、その後側焦平面に挿入した位相板等からなる Zernike 型 X 線位相差顕微鏡を用いた。XRD には、FZP によって形成した公称 1 μ m 径 (半値全幅) の細束 X 線を用いた。細束 X 線を 3 μ m ステップで縦 20 層、横 27 層ラスタースキャンし、各ビーム位置で、試験片を 1 $^\circ$ ステップで 180 $^\circ$ 回転し、1 荷重段階あたり、合計 98,279 枚の X 線回折画像を取得した。

X 線回折画像を二値化後、を無負荷段階から時系列順に追跡し、同一の回折斑点を全て対応付けた。計測では、同一の結晶粒からの回折斑点は、縦横方向にそれぞれ最大で数回観測された。そこで、同一の結晶粒からの同じ回折斑点をまとめてラベリングするクラスタリング処理を行った。X 線 CT で 3D 可視化される個々の結晶粒の光軸方向の投影像と局所 XRD 計測で得られる回折斑点のクラスターを重ね合わせ、両データの精密な位置合わせを行った。クラスタリングした全回折斑点について、試料回転を考慮して散乱ベクトルを算出した。特定の結晶粒に対応付けられた全ての回折斑点ペアを用いて結晶方位を計算した後、算出される結晶方位解が 3D 方位差で 1 $^\circ$ 以内に集まるものを結晶方位解グループとした。結晶方位解が最も多く集積した結晶方位解グループの結晶方位をその結晶粒の結晶方位として採用した。

4. 研究成果

(1) 開発・計測結果

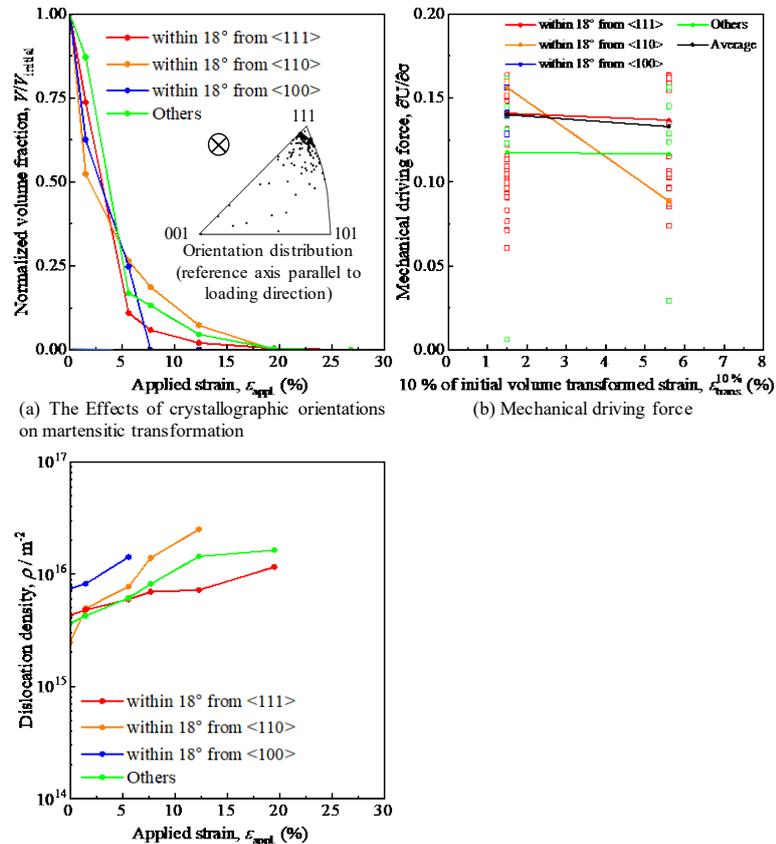


図 6 XRD 計測により得られ、X 線 CT 画像とのマッチングにより解析が実現した様々なデータ。(a)各結晶方位毎の変態挙動の違い、および(b)力学的変態駆動力は、XRD で計測した結晶方位から直接計算できる情報。(c)の転位密度変化は、XRD 回折斑点を直接画像解析して得られる情報

0.1 %C–5 %Mn–2 %Si の低炭素 C–Mn–Si 多相鋼 (γ 相結晶粒の平均径 3.5 μm) をモデル材料として用い、その引張試験時の歪み誘起相変態挙動を例に、得られた成果を解説する(1)。

一つの試験片には、全 170 個の γ 相結晶粒が見られた。図 5 には、その 3D 形態とその外部負荷に伴う変化を示した。これは、X 線 CT により観察したものである。図中の γ 相結晶粒の方位は、逆極点図に示したカラーに対応し、X 線 CT 画像と XRD 情報とを対応させる(2)(3)ことで決定することができた。この図から、ほとんどの γ 相結晶粒は、 $\langle 111 \rangle$ に配向していること、ほぼ全ての γ 相結晶粒は負荷前には 3 次元的に連結していること、負荷歪み 1.5%で既にかなりマルテンサイト変態が進行し、 γ 相結晶粒は消滅している事などが明らかである。

TRIP 鋼の圧延板では、 α 相は $\{111\}\langle 110 \rangle$ 優先方位を持つのに対し、 γ 相は $\{110\}\langle 111 \rangle$ に優先配向し、一部の γ 相は $\{110\}\langle 001 \rangle$ にも配向する。 $\langle 111 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 100 \rangle$ 方位に配向した γ 相結晶粒とそれ以外の γ 相結晶粒の変態挙動を図 5 と同様に解析したものを図 6(a)に示す。各方位から 18°以内の γ 相結晶粒を割り当てた結果、供試材でも強い $\{110\}\langle 111 \rangle$ 配向が確認された。変形のごく初期において、 $\langle 110 \rangle$ および $\langle 100 \rangle$ 配向の γ 相結晶粒は急速に変態し、 $\langle 111 \rangle$ およびその他の方位に配向する γ 相結晶粒の変態速度は低かった。XRD により結晶方位が計測できるため(2)、図 6(b)の様に、変形初期の応力誘起変態の生じ易さを規定する力学的駆動力が算出できる。急速な変態を示した $\langle 110 \rangle$ 配向の γ 相結晶粒は、高い力学的駆動力を有することが分かる。一方、負荷歪み 5.6%以降では傾向が逆転し、 $\langle 111 \rangle$ 配向の γ 相結晶粒が最も速く変態し、 $\langle 110 \rangle$ 配向の γ 相結晶粒は変態が最も遅くなっている。図 6(c)には、XRD 回折斑点の広がりから Williamson-Hall 法で求めた転位密度変化を示す。変形初期に急速に変態が進行した $\langle 110 \rangle$ 配向の γ 相結晶粒では、転位密度の急激な上昇がみられた。比較的ゆっくりとしたマルテンサイト変態を呈した $\langle 111 \rangle$ 方向では、転位密度の上昇が最も緩やかである。また、 $\langle 100 \rangle$ 配向の γ 相結晶粒の初期転位密度が高いことも特徴的である。

(2) 開発成果のまとめ

X 線 CT と局所 XRD を融合した本格的なマルチモーダル計測環境を整備した。また、その初めての応用例として、TRIP 鋼の応力・歪み誘起マルテンサイト変態と損傷挙動に適用した。実験・解析環境の整備の成果として、個々の γ 相結晶粒のマルテンサイト変態挙動および損傷挙動を隣接粒間の相互作用も含めて精密に解析する事ができた。これにより、 γ 相結晶粒の変態や損傷挙動を支配する因子を特定し、損傷に対する抵抗の高い TRIP 鋼マイクロ組織を設計する指針を得るなどの材料学的学術成果も得られた。この様な高度な材料学的知見が得られれば、損傷に強い構造材料を設計する産業的な方策の検討も可能になる。

<引用文献>

- ① H. Toda, K. Hirayama, K. Okamura, T. Suzuki, A. Takeuchi, M. Uesugi, H. Fujihara, Multimodal assessment of mechanically induced transformation in metastable multi-phase steel using X-ray nano-tomography and pencil-beam diffraction tomography, *Acta Mater.*, 234 (2022) 117956. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.117956>.
- ② H. Toda, X-Ray C.T. Hardware and Software Techniques, 2021 Springer Nature Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-0590-1>.
- ③ H. Toda, T. Kamiko, Y. Tanabe, M. Kobayashi, D. J. Leclere, K. Uesugi, A. Takeuchi, K. Hirayama, Diffraction-amalgamated grain boundary tracking for mapping 3D crystallographic orientation and strain fields during plastic deformation, *Acta Mater.*, 107(2016) 310-324. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.01.072>.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Tang Jianwei, Wang Yafei, Fujihara Hiro, Shimizu Kazuyuki, Hirayama Kyosuke, Ebihara Kenichi, Takeuchi Akihisa, Uesugi Masayuki, Toda Hiroyuki	4. 巻 239
2. 論文標題 Stress corrosion cracking induced by the combination of external and internal hydrogen in Al-Zn-Mg-Cu alloy	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 115804 ~ 115804
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scriptamat.2023.115804	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 Fujihara Hiro, Toda Hiroyuki, Ebihara Ken-ichi, Kobayashi Masakazu, Mayama Tsuyoshi, Hirayama Kyosuke, Shimizu Kazuyuki, Takeuchi Akihisa, Uesugi Masayuki	4. 巻 174
2. 論文標題 Assessment of hydrogen embrittlement behavior in Al-Zn-Mg alloy through multi-modal 3D image-based simulation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 International Journal of Plasticity	6. 最初と最後の頁 103897 ~ 103897
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijplas.2024.103897	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 Suzuki Yoshio, Toda Hiroyuki, Takeuchi Akihisa	4. 巻 2990
2. 論文標題 Hard x-ray schlieren microscopy and its application to computer tomography	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Conference on X-ray Microscopy	6. 最初と最後の頁 30001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0168802	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 Shimizu Kazuyuki, Toda Hiroyuki, Fujihara Hiro, Yamaguchi Masatake, Uesugi Masayuki, Takeuchi Akihisa, Nishijima Masahiko, Kamada Yasuhiro	4. 巻 79
2. 論文標題 Hydrogen Embrittlement and its Prevention in 7XXX Aluminum Alloys with High Zn Concentrations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Corrosion	6. 最初と最後の頁 818 ~ 830
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5006/4300	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 Yaegashi Shono, Shimizu Kazuyuki, Kamada Yasuhiro, Toda Hiroyuki, Fujihara Hiro, Uesugi Masayuki, Takeuchi Akihisa	4. 巻 73
2. 論文標題 高純度アルミニウムおよびA6061アルミニウム合金におけるポアの成長挙動と水素脱離挙動	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Japan Institute of Light Metals	6. 最初と最後の頁 212 ~ 217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2464/jilm.73.212	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 Toda Hiroyuki, Hirayama Kyosuke, Yamaguchi Shogo, Fujihara Hiro, Higa Ryota, Shimizu Kazuyuki, Takeuchi Akihisa, Uesugi Masayuki	4. 巻 64
2. 論文標題 Dominant Factors Controlling the Initiation of Hydrogen Embrittlement in Al-Zn-Mg Alloy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 2729 ~ 2738
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-M2023116	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 Higa Ryota, Fujihara Hiro, Toda Hiroyuki, Kobayashi Masakazu, Ebihara Kenichi, Takeuchi Akihisa	4. 巻 73
2. 論文標題 Multi-modal 3D image-based simulation of hydrogen embrittlement crack initiation in Al-Zn-Mg alloy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Japan Institute of Light Metals	6. 最初と最後の頁 530 ~ 536
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2464/jilm.73.530	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 Toda Hiroyuki, Shimizu Kazuyuki, Fujihara Hiro, Hirayama Kyosuke, Wang Yafei, Xu Yuantao, Tang Jiangwei	4. 巻 62
2. 論文標題 Suppressing Hydrogen Embrittlement and Stress Corrosion Cracking in Aluminum Alloys via Local Hydrogen Partitioning	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Materia Japan	6. 最初と最後の頁 359 ~ 367
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/materia.62.359	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 Toda Hiroyuki, Li Han, Batres Rafael, Hirayama Kyosuke, Fujihara Hiro	4. 巻 257
2. 論文標題 Surrogate-based optimization of microstructural features of structural materials	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 119188 ~ 119188
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2023.119188	査読の有無 無
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 Toda Hiroyuki, Hirayama Kyosuke, Okamura Kai, Suzuki Takafumi, Takeuchi Akihisa, Uesugi Masayuki, Fujihara Hiro	4. 巻 234
2. 論文標題 Multimodal assessment of mechanically induced transformation in metastable multi phase steel using X ray nano tomography and pencil beam diffraction tomography	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 117956 ~ 117956
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2022.117956	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 Wang Yafei, Toda Hiroyuki, Xu Yuantao, Shimizu Kazuyuki, Hirayama Kyosuke, Fujihara Hiro, Takeuchi Akihisa, Uesugi Masayuki	4. 巻 227
2. 論文標題 In-situ 3D observation of hydrogen-assisted particle damage behavior in 7075 Al alloy by synchrotron X-ray tomography	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 117658 ~ 117658
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2022.117658	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 Hirayama Kyosuke, Toda Hiroyuki, Suzuki Takafumi, Uesugi Masayuki, Takeuchi Akihisa, Ludwig Wolfgang	4. 巻 63
2. 論文標題 Crystallographic Analysis of Hydrogen Embrittlement Behavior in Aluminum Alloy Using Diffraction Contrast Tomography	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 586 ~ 591
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-L2021020	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 Fujihara Hiro, Shimizu Kazuyuki, Toda Hiroyuki, Takeuchi Akihisa, Uesugi Masayuki	4. 巻 63
2. 論文標題 Suppression of Hydrogen Embrittlement due to Local Partitioning of Hydrogen to Dispersed Intermetallic Compound Particles in Al-Zn-Mg-Cu Alloys	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 1406 ~ 1415
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-L2022007	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 Xu Yuantao, Toda Hiroyuki, Shimizu Kazuyuki, Wang Yafei, Gault Baptiste, Li Wei, Hirayama Kyosuke, Fujihara Hiro, Jin Xuejun, Takeuchi Akihisa, Uesugi Masayuki	4. 巻 236
2. 論文標題 Suppressed hydrogen embrittlement of high-strength Al alloys by Mn-rich intermetallic compound particles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 118110 ~ 118110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2022.118110	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 Yafei, Sharma Bhupendra, Xu Yuantao, Shimizu Kazuyuki, Fujihara Hiro, Hirayama Kyosuke, Takeuchi Akihisa, Uesugi Masayuki, Cheng Guangxu, Toda Hiroyuki	4. 巻 13
2. 論文標題 Switching nanoprecipitates to resist hydrogen embrittlement in high-strength aluminum alloys	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 6860
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-022-34628-4	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 Hirayama Kyosuke, Toda Hiroyuki, Fu Dongsheng, Masunaga Ryohei, Su Hang, Shimizu Kazuyuki, Takeuchi Akihisa, Uesugi Masayuki	4. 巻 184
2. 論文標題 Damage micromechanisms of stress corrosion cracking in Al-Mg alloy with high magnesium content	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Corrosion Science	6. 最初と最後の頁 109343 ~ 109343
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.corsci.2021.109343	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 戸田裕之, 山口正剛, 都留智仁, 清水一行, 松田健二, 平山恭介	4. 巻 60
2. 論文標題 ナノ~マクロを繋ぐトモグラフィ: 界面の半自発的剥離	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 まてりあ	6. 最初と最後の頁 13~18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/materia.60.13	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 Tubei Valary, Toda Hiroyuki, Hassanipour Meysam, Hirayama Kyosuke, Takakuwa Osamu, Takeuchi Akihisa, Uesugi Masayuki	4. 巻 249
2. 論文標題 3D short fatigue crack closure behavior in Ti-6Al-4V alloy investigated using in-situ high resolution synchrotron X-ray tomography	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Engineering Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 107755 ~ 107755
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.engfracmech.2021.107755	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 Fujihara Hiro, Toda Hiroyuki, Arita koto, Shimizu Kazuyuki, Takeuchi Akihisa, Uesugi KentaroMa	4. 巻 62
2. 論文標題 Assessment of Hydrogen Accumulation Behavior in Al?Zn?Mg Alloy under Strain with Kelvin Force Microscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 636 ~ 641
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.L-M2020873	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49件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 17件)

1. 発表者名 F. Shuo, 戸田裕之, 藤原比呂
2. 発表標題 Surrogate-based optimization for fatigue crack initiation behavior in Ti-6Al-4V alloy
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第187回春期講演大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 竹藤剛, 戸田裕之, 藤原比呂, 石川恭平, 平山恭介, 竹内晃久
2. 発表標題 曲げ変形を受けるTRIP鋼の 変態挙動のマルチモーダル解析
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第187回春期講演大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 比嘉良太, 藤原比呂, 戸田裕之, 海老原健一, 眞山剛
2. 発表標題 Al-Zn-Mg合金における粒界亀裂進展挙動のマルチモーダル3Dイメージベース解析
3. 学会等名 日本金属学会春期(第174回)講演大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 小森一樹, 藤原比呂, 戸田裕之
2. 発表標題 水素脆化による粒界亀裂の結晶学的発生挙動のメタモデル解析
3. 学会等名 日本機械学会 九州支部 九州学生会第55回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 竹田昌輝, 藤原比呂, 戸田裕之, 戸高義一, 足立望
2. 発表標題 HPT加工を施した高強度化Al-Zn-Mg合金における水素脆化防止
3. 学会等名 日本機械学会 九州支部 九州学生会第55回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 藤井翔太, 藤原比呂, 戸田裕之, 石川恭平
2. 発表標題 マルテンサイト鋼における損傷挙動の4Dマルチモーダル解析
3. 学会等名 日本機械学会 九州支部 九州学生会第55回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 藤原比呂, 本山裕登, 戸田裕之, 海老原健一, 竹内晃久, 上相真之
2. 発表標題 7000系アルミニウム合金の4D 応力腐食割れ特性
3. 学会等名 軽金属学会第144回春期大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 竹藤剛, 戸田裕之, 藤原比呂, 石川恭平
2. 発表標題 TRIP鋼の曲げ負荷中における損傷破壊挙動のマルチモーダル解析
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第186回秋季講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水一行, 土屋昇大, 戸田裕之, 藤原比呂, 上相真之, 竹内晃久, 鎌田康寛
2. 発表標題 T相優先析出によるAl-Zn-Mg-Cu合金における水素誘起粒界・擬へき開破壊の防止
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2023材料力学カンファレンス
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 比嘉良太, 藤原比呂, 戸田裕之, 海老原健一, 平山恭介, 清水一行
2. 発表標題 Al-Zn-Mg 合金の粒界亀裂進展に及ぼす水素濃化学動の影響
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2023材料力学カンファレンス
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤原比呂, 戸田裕之, 海老原健一, 平山恭介, 清水一行
2. 発表標題 Al-Zn-Mg合金の応力腐食割れ挙動に対する内部および外部水素の影響
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2023材料力学カンファレンス
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Jianwei Tang, Yafei Wang, 藤原比呂, 清水一行, 平山恭介, 竹内晃久, 上相昌之, 戸田裕之
2. 発表標題 T相とMn系分散粒子を含む高強度Al-Zn-Mg合金の応力腐食割れ
3. 学会等名 軽金属学会第145回秋期大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yafei Wang, Jianwei Tang, 足立望, 藤原比呂, 戸高義一, 清水一行, 平山恭介, 戸田裕之
2. 発表標題 ナノ組織を有する高強度アルミニウム合金の水素脆化防止
3. 学会等名 軽金属学会第145回秋期大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 比嘉良太, 藤原比呂, 戸田裕之, 海老原健一, 小林正和, 竹内晃久, 上相真之
2. 発表標題 結晶塑性有限要素法と水素拡散解析によるAl-Zn-Mg合金の粒界亀裂進展挙動の評価
3. 学会等名 軽金属学会第145回秋期大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤原比呂, 戸田裕之, 海老原健一, 平山恭介, 清水一行, 竹内晃久, 上相真之
2. 発表標題 Al-Zn-Mg合金の水素脆化挙動に対する内部および外部水素の影響
3. 学会等名 軽金属学会第145回秋期大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. Fujihara, H. Toda, K. Ebihara, M. Kobayashi, K. Shimizu, A. Takeuchi, M. Uesugi
2. 発表標題 Assessment of hydrogen embrittlement behavior in Al-Zn-Mg alloys by multimodal 3D image-based simulation
3. 学会等名 International Hydrogen Conference 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Wang, B. Sharma, Y. Xu, K. Shimizu, H. Fujihara, H. Toda
2. 発表標題 Role of T phase in the hydrogen embrittlement suppression for Al-Zn-Mg-Cu alloys
3. 学会等名 International Hydrogen Conference 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1 . 発表者名 Y. Wang, J. Tang, H. Fujihara, N. Adachi, Y. Todaka, A. Takeuchi, M. Uesugi, H. Toda
2 . 発表標題 Hydrogen embrittlement of ultra-finegrained Al-Zn-Mg-Cu alloys processed by high pressure torsion
3 . 学会等名 The Advanced Technology in Experimental Mechanics and International DIC Society Joint Conference 2023 (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 J. Tang, Y. Wang, H. Fujihara, K. Hirayama, K. Shimizu, H. Toda
2 . 発表標題 Stress corrosion cracking of high strength Al-Zn-Mg-Cu alloy with Mn-rich dispersoid and T phase
3 . 学会等名 The Advanced Technology in Experimental Mechanics and International DIC Society Joint Conference 2023 (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 K. Shimizu, S. Tsuchiya, H. Toda, H. Fujihara, M. Uesugi, A. Takeuchi, Y. Kamada
2 . 発表標題 Deformation and fracture behavior of T-phase precipitated Al-Zn-Mg alloys under hydrogen influence using synchrotron imaging
3 . 学会等名 The Advanced Technology in Experimental Mechanics and International DIC Society Joint Conference 2023 (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 R. Higa, H. Fujihara, H. Toda, K. Ebihara, M. Kobayashi
2 . 発表標題 Influence of crystal plasticity and hydrogen diffusion under stress on intergranular crack propagation in Al-Zn-Mg alloy
3 . 学会等名 The Advanced Technology in Experimental Mechanics and International DIC Society Joint Conference 2023 (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 H. Fujihara, H. Toda, K. Ebihara, M. Kobayashi, M. Uesugi, A. Takeuchi
2 . 発表標題 Assessment of hydrogen embrittlement behavior in Al-Zn-Mg alloy via multimodal 3D image-based analysis
3 . 学会等名 The Advanced Technology in Experimental Mechanics and International DIC Society Joint Conference 2023 (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 H. Toda, C. Koga, H. Fujihara, A. Takeuchi, M. Uesugi, K. Ishikawa
2 . 発表標題 Multi-modal measurements of 3D crystallographic transformation behaviour in TRIP steel
3 . 学会等名 The Advanced Technology in Experimental Mechanics and International DIC Society Joint Conference 2023 (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 H. Fujihara, H. Toda, K. Ebihara, M. Uesugi, A. Takeuchi
2 . 発表標題 Influence of internal and external hydrogen accumulation behavior on stress corrosion cracking behavior in Al-Zn-Mg alloy
3 . 学会等名 Materials Research Meeting 2023 (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 Y. Wang, N. Adachi, H. Fujihara, Y. Todaka, H. Toda
2 . 発表標題 Hydrogen embrittlement of ultra-fine-grained Al-Zn-Mg-Cu alloys processed by high pressure torsion
3 . 学会等名 Materials Research Meeting 2023 (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1. 発表者名 J. Tang, Y. Wang, H. Fujihara, K. Hirayama, K. Shimizu, H. Toda
2. 発表標題 Stress corrosion cracking of high strength Al-Zn-Mg-Cu alloy with Mn-rich dispersoid and T(Al ₂ Mg ₃ Zn ₃) phase
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Shimizu, S. Tsuchiya, H. Toda, H. Fujihara, M. Uesugi, A. Takeuchi, Y. Kamada
2. 発表標題 Development of hydrogen-resistant Al-Zn-Mg-Cu alloys by T-phase precipitation and trace element addition
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. Toda, Y. Wang, J. Tang, M. Yamaguchi, T. Tsuru, K. Shimizu, H. Fujihara, K. Hirayama, K. Ebihara
2. 発表標題 Hydrogen embrittlement and its prevention in Al-Zn-Mg alloys
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 戸田裕之, 清水一行, 藤原比呂, 平山恭介
2. 発表標題 ナノ~マクロを繋ぐトモグラフィー: 界面の半自発的剥離
3. 学会等名 自動車技術会2022年春季大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 比嘉良太, 藤原比呂, 戸田裕之, 小林正和, 平山恭介, 清水一行, 海老原健一
2. 発表標題 Al-Zn-Mg合金における水素脆化亀裂発生挙動のマルチモーダル3Dイメージベース解析
3. 学会等名 日本金属学会 合同学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹藤剛, 戸田裕之, 藤原比呂
2. 発表標題 TRIP鋼における加工誘起変態挙動のマルチモーダル解析
3. 学会等名 日本金属学会 合同学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古賀智遥, 戸田裕之, 竹内晃久, 上杉健太郎
2. 発表標題 X線CTによるラメラ状 -TRIP鋼の加工誘起変態挙動の評価
3. 学会等名 日本金属学会 合同学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤原比呂, 田中敦基, 戸田裕之, 平山恭介, 清水一行, 竹内晃久, 上相真之
2. 発表標題 Al-Mg-Si合金の金属間化合物粒子の水素誘起損傷挙動の3D/4D解析
3. 学会等名 軽金属学会第142回春期大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 B. Sharma, Y. Wang, H. Fujihara, K. Shimizu, K. Hirayama, A. Takeuchi, M. Uesugi, H. Toda
2. 発表標題 Hydrogen embrittlement prevention in Al-Zn-Mg by Sn addition
3. 学会等名 軽金属学会第142回春期大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 比嘉良太, 藤原比呂, 戸田裕之, 小林正和, 平山恭介, 清水一行, 海老原健一
2. 発表標題 Al-Zn-Mg合金における水素脆化亀裂発生挙動のマルチモーダル3Dイメージベース解析
3. 学会等名 軽金属学会第142回春期大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福田祐輝, 藤原比呂, 平山恭介, 戸田裕之, 竹内晃久, 上相真之
2. 発表標題 7075アルミニウム合金の金属間化合物粒子の水素誘起損傷挙動の統計学的解析
3. 学会等名 軽金属学会第142回春期大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山口翔吾, 戸田裕之, 藤原比呂, 平山恭介, 竹内晃久, 上相真之
2. 発表標題 Al-Zn-Mg合金における水素脆化亀裂の結晶学的発生挙動のメタモデル解析
3. 学会等名 軽金属学会第142回春期大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 V. Tubei, H. Toda, A. Takeuchi, M. Uesugi
2. 発表標題 Three-dimensional time evolution behavior of short fatigue crack morphology and crack closure in Ti-6Al-4V alloy assessed using high-energy imaging type CT
3. 学会等名 TMS 2022 Annual Meeting & exhibition (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 戸田裕之
2. 発表標題 高強度アルミニウム合金における水素脆化挙動のマイクロ・ナノトモグラフィ観察
3. 学会等名 日本鉄鋼協会東北支部講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 戸田裕之
2. 発表標題 X線CTとXRDを組み合わせたマルチモーダルCTとその鉄鋼への応用
3. 学会等名 公益社団法人日本顕微鏡学会第64回シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤原比呂, 戸田裕之, 海老原健一, 小林正和, 竹内晃久, 上相真之
2. 発表標題 Al-Zn-Mg合金の動的水素分配と水素脆化挙動
3. 学会等名 第20回破壊力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 戸田裕之, Yafei Wang, Yuantao Xu, 清水一行, 平山恭介, 藤原比呂, 竹内晃久, 上楨真之
2. 発表標題 7000系アルミニウム合金の水素脆化挙動とその防止
3. 学会等名 軽金属学会第141回秋期大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤原比呂, 戸田裕之, 海老原健一, 小林正和, 竹内晃久, 上楨真之
2. 発表標題 Al-Zn-Mg合金の動的酸素分配および水素脆化挙動の評価
3. 学会等名 軽金属学会第141回秋期大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 V. Tubei, H. Toda, M. Hassanipour, K. Hirayama, A. Takeuchi, M. Uesugi
2. 発表標題 Three-dimensional observation of complex short fatigue crack morphology and variation in crack closure behavior using nano-tomography
3. 学会等名 第6回マルチスケール材料力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤原比呂, 戸田裕之, 海老原健一, 小林正和, 竹内晃久, 上楨真之, 安田匠吾
2. 発表標題 結晶塑性有限要素法と水素拡散解析を組み合わせたAl-Zn-Mg合金の応力下での水素濃化学動評価
3. 学会等名 第6回マルチスケール材料力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤原比呂, 戸田裕之, 海老原健一, 小林正和, 竹内晃久, 上根真之, 安田匠吾
2. 発表標題 Al-Zn-Mg合金の応力下での水素濃化挙動
3. 学会等名 軽金属学会第140回春期大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Fujihara, H. Toda, K. Ebihara, M. Kobayashi, A. Takeuchi, M. Uesugi, S. Yasuda
2. 発表標題 Influence of hydrogen accumulation behavior under stress on hydrogen embrittlement in Al-Zn-Mg alloy
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 V. Tubei, H. Toda, K. Hirayama, M. Hassanipour, A. Takeuchi, M. Uesugi
2. 発表標題 Application of High Energy Imaging CT to Investigate Local 3D Short Fatigue Crack Closure Behavior in Ti-6Al-4V Alloy
3. 学会等名 The 5th International Congress on 3D Materials Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Toda, M. Yamaguchi, T. Tsuru, K. Shimizu, K. Hirayama, K. Ebihara, K. Matsuda
2. 発表標題 Hydrogen embrittlement mechanism of Al-Zn-Mg alloys: semi-spontaneous interfacial decohesion
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

次世代自動車用鋼板の外力による内部組織の変化を直接観察 複合X線CT解析技術の開発
<https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/760/>

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	小林 正和 (Kobayashi Masakazu) (20378243)	豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (13904)	

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
---------	---------