

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H00296

研究課題名（和文）破壊に強い高強度鋼の先進的設計 - 粒界偏析制御におけるパラダイム転換

研究課題名（英文）Advanced Design of Fracture-Resistant High Strength Steels - Paradigm Shift in Controlling Grain Boundary Segregation

研究代表者

古原 忠（Furuhara, Tadashi）

東北大学・金属材料研究所・教授

研究者番号：50221560

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,800,000円

研究成果の概要（和文）：多結晶構造材料における結晶粒界は原子間結合が切断され、高強度化を追求するほど必ず材料破壊の起点になるため、材料の高強度化設計を行うためには、粒界破壊を助長する不純物元素の局所的濃化（「粒界偏析」）の制御が必須である。そこで、本研究では、元素偏析の定量評価、粒界偏析構造の理論的評価、材料特性との相関解明により、鉄鋼の高強度化を阻む粒界脆化を克服するための先進的材料設計原理を確立することを目的とした。その結果、粒界構造と粒界偏析の関係を明確にして元素間相互作用を解明し、さらに不純物元素偏析が粒界腐食に及ぼす影響を明確にすることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

輸送機器や建築物などに使用される構造用金属材料を高強度化することで、小型化や軽量化、長寿命化により高効率・高安心社会構築に資することができる。多結晶材料である構造用金属材料を高強度化すると粒界からの破壊が生じるため、粒界破壊を抑制する材料設計指針を確立することが重要である。そこで本研究では、鉄鋼の粒界における元素の濃化に注目し、粒界構造と元素濃化量およびそれらが特性に及ぼす影響を明確にし、粒界強化鋼の設計指針を確立した。

研究成果の概要（英文）：Grain boundaries (GB) in polycrystalline materials causes fracture because interatomic bonds are broken and the strengthening always leads to fracture. Therefore, it is essential to control local enrichment of impurity elements ("grain boundary segregation"), which contributes to GB fracture, for designing higher strength materials. Therefore, the objective of this study was to establish advanced material design principles to overcome intergranular embrittlement, which hinders high strength of steel, by quantitative evaluation of elemental segregation, theoretical evaluation of GB segregation structure, and elucidation of its correlation with properties. As a result, we were able to elucidate the relationship between GB structure and segregation behavior and elemental interactions of C and P at the GB, and clarify the effect of impurity element segregation on GB corrosion.

研究分野：材料組織制御学

キーワード：鉄鋼材料 粒界偏析 元素間相互作用 ナノ解析 原子ポテンシャルモデリング 粒界腐食

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

多結晶構造材料における結晶粒界は原子間結合が切断されているため、高強度化を追求するほど必ず材料破壊の起点になる。この宿命を乗り越えて材料の高強度化設計を行うためには、粒界破壊を助長する不純物元素の局所的濃化(「粒界偏析」)の制御が必須である。軽元素の多くは不純物元素として強い粒界偏析傾向を持ち、高強度鋼において粒界破壊を引き起こす。粒界偏析は粒界構造に直接影響されるが、従来の粒界構造の理解には、高温の液体に近いランダム構造と基底状態としての幾何学的な構造ユニットの周期的構造という2つの両極端のパラダイムがある。しかし、その中間で多様に変化することが予想される実際の粒界原子構造と元素偏析との相関についての研究はほぼ手つかずの状態にある。

我々の研究グループでは、これまで微量添加された軽元素と重元素の元素間相互作用に基づく規則化と相分離の重畳を利用した鉄鋼の新しい高強度化設計を行っている。不純物偏析による粒界脆化の抑制は特定の合金元素添加により経験的に行われるが、多様な粒界構造中に局在化する元素間相互作用の詳細についてはほとんど不明であり、粒界脆化の材料科学的制御には至っていない。

### 2. 研究の目的

本研究は、粒界性格を決定した上で元素偏析の実験的定量評価と粒界偏析構造の理論的評価の双方を行うとともに、粒界偏析と材料特性との相関を解明することで、鉄鋼の高強度化を阻む粒界脆化を克服する先進的材料設計原理を確立することを目的とする。そのため、粒界構造遷移と元素偏析の重畳の制御による脆化抑制を目指す。研究のターゲットは(1)粒界偏析と粒界微細構造との関連の解明、(2)材料特性と粒界偏析との相関の解明、の2つである。

研究対象として最も重要な構造用金属材料である鉄鋼をモデル系として選択する。鉄鋼材料の粒界破壊に影響をおよぼす不純物/合金元素は、以下のカテゴリーに分けられる。

- (a) 粒界を脆化させる不純物(リン(P)、硫黄(S)、水素(H))
  - (b) 粒界を強化すると考えられる元素(炭素(C)、ボロン(B))
  - (c) 不純物偏析を抑制すると考えられる元素(モリブデン(Mo)、ニオブ(Nb)、チタン(Ti)など)
- 特に室温での鉄の安定相であるフェライトを選択し、各元素が単独偏析する場合について明らかにした上で、(a)の不純物元素の偏析および力学性質の低下に対して(b)、(c)の元素添加がおよぼす影響を解明する。

### 3. 研究の方法

粒界構造/偏析評価では先端解析と計算材料科学の両面からのアプローチを行う。以下が各調査項目と用いる手段である。

- ・ 粒界偏析の実験的評価 - 粒界性格(方位差、粒界面)を同定した粒界での偏析を三次元アトムプローブで定量評価する。
- ・ 粒界偏析の理論的評価 - 第一原理に基づき粒界偏析構造を決定するとともにランダム構造を仮定した場合とも比較し偏析量を評価する。
- ・ 粒界偏析の特性への影響評価 - 不純物の粒界偏析を抑制した材料での破壊・腐食および水素脆化挙動を調べる。

### 4. 研究成果

#### (1) 粒界偏析と粒界構造の関係の実験的評価と、粒界における元素間相互作用の解明

高純度 Fe-P 二元合金を、フェライト単相域の 600 °C において P が平衡偏析に達するように長時間焼鈍した。個々の粒界の回転軸と回転角を電子線後方散乱回折法(EBSD)により測定し、面方位を集束イオンビーム(FIB)加工により作製した断面上のトレースから評価した上で、粒界性格を方位差の傾角成分とねじれ成分で評価した。三次元アトムプローブ(3DAP)の結果から、図 1 に示すように大角粒界における P の偏析量が比較的高く、ねじれ成分よりも傾角成分のほうが偏析量に大きな影響を与えることがわかった。

次に、不純物粒界偏析の温度依存性を高純度の Fe-P 合金を用いて調査した。焼鈍温度を低くすると、フェライト粒界における P の偏析量が高くなることが明らかとなった。また、Fe-P 二元合金とともに C を微量添加した Fe-P-C 三元合金に対して比較実験を行った結果、図 2 に示すように C が粒界に偏析することによって P の偏析量が低下し、P-C 間の反発的相互作用がその主因であることがわかった。

同種元素間の相互作用についても解明するため、純鉄材の浸炭または窒化実験によって、異なる C と N 含有量の Fe-C および Fe-N 二元合金を作製し、フェライト粒界の溶質偏析について三次元アトムプローブを用いて調査した。C または N の添加量とともに粒界偏析量が増加し、高濃度側で飽和する傾向が見られた。これは主に粒界における溶質元素間の反発的な相互作用によるものである一方、粒界偏析サイトの密度も重要な役割を果たしていることが考えられる。また、

分子動力学法とパーシステントホモロジー法を組み合わせることで、 $3\{111\}$ フェライト粒界に対して偏析サイトの抽出を試みた結果、第一原理計算の結果と良い一致を示した。

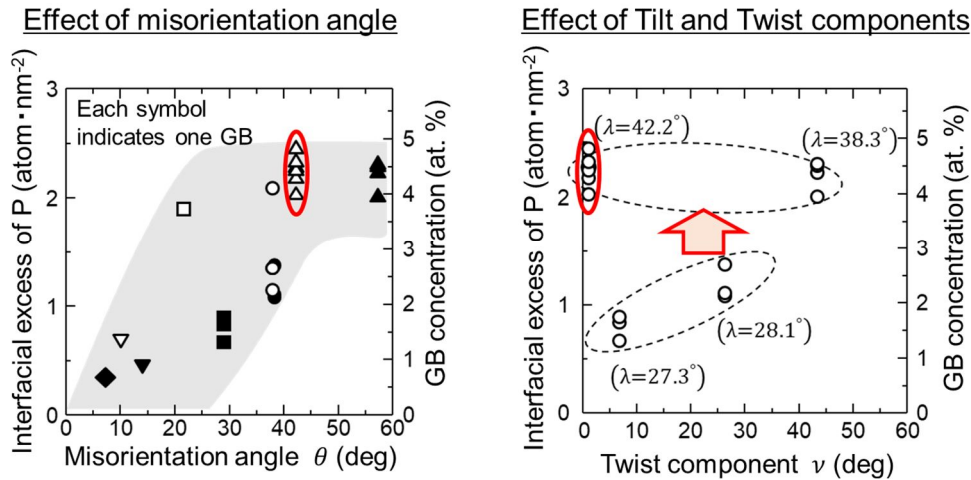


図1 Fe-0.01mass%P合金の600の平衡偏析における粒界性格依存性

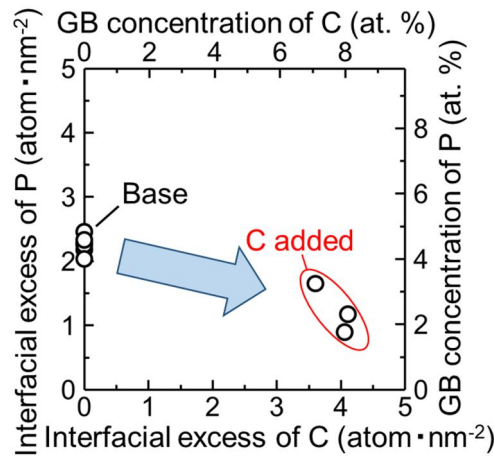


図2 Fe-0.01mass%P合金のP粒界偏析に及ぼすC粒界偏析の影響(600の平衡偏析)

## (2) 粒界における原子構造の理論評価

粒界を対象とした大規模なモデルを第一原理計算の精度で計算可能にする目的で、第一原理計算を高精度で再現する深層学習ポテンシャルの作成に取り組んだ。作成した深層学習ポテンシャルは第一原理計算結果を誤差0.03 eV/atom以内の精度で再現する結果が得られた。さらに10000原子以上の大規模なモデルにおける計算が可能であることも確認し、粒界中の局所構造の特徴を明らかにする計算手法を整えた。

更に、粒界構造を対象とした大規模な原子シミュレーションを可能にすることを目的として、第一原理計算の精度で古典分子動力学法を行うニューラルネットワークポテンシャルの作成を進めた。作成したポテンシャルからは数万原子規模の原子シミュレーションが可能であることを確認した。しかしながら、非磁性の第一原理計算条件を用いた学習データを基にニューラルネットワークポテンシャルを構築した場合、粒界部がHCPへと変態する異常な振る舞いが確認されたため、ニューラルネットワークポテンシャルの高精度化に取り組んだ。強磁性による計算条件の学習データを用いたことで粒界がBCC構造を保持する良好な結果を得ることができた。

## (3) 不純物元素偏析下での腐食挙動の評価

リンの粒界偏析量がそれぞれ2 at%, 4 at%, 6 at%であるFe-0.01P (mass%)を用いて浸漬試験を行い、リンの粒界偏析が鉄の腐食に及ぼす影響を調査した。合わせて腐食粒界の結晶方位差を測定することで以下の2つの結論を得た。リンの偏析量が大きいかほど腐食の開始確率が高まったが、腐食の進展速度には影響を与えなかった。小角粒界では腐食が生成しなかった。また、結晶方位差が大きくなるとともに腐食痕の数が増加していた。

以上の知見を元に、純鉄も含め、アノード分極試験により同材料の腐食挙動調査を行った。基本的にはPの影響は浸漬試験と同様の傾向を示したが、純鉄では粒界腐食は見られなかった。つまり、Pの偏析によって粒界腐食が起こり、各粒界におけるPの偏析量が粒界腐食の結晶方位依存性を与えていると考えられた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Dong Haokai, Zhang Yongjie, Miyamoto Goro, Inomoto Masahiro, Chen Hao, Yang Zhigang, Furuha Tadashi	4. 巻 215
2. 論文標題 Unraveling the effects of Nb interface segregation on ferrite transformation kinetics in low carbon steels	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 117081 ~ 117081
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2021.117081	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 Zhang Y.-J., Chandiran E., Dong H.-K., Kamikawa N., Miyamoto G., Furuha T.	4. 巻 73
2. 論文標題 Current Understanding of Microstructure and Properties of Micro-Alloyed Low Carbon Steels Strengthened by Interphase Precipitation of Nano-Sized Alloy Carbides: A Review	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JOM	6. 最初と最後の頁 3214 ~ 3227
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11837-021-04882-w	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 Enoki Masanori, Takahashi Kota, Mitomi Soei, Ohtani Hiroshi	4. 巻 107
2. 論文標題 Electron Theory Calculation of Thermodynamic Properties of Steels and Its Application to Theoretical Phase Diagram of the Fe-Mo-B Ternary System	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Tetsu-to-Hagane	6. 最初と最後の頁 923 ~ 933
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/tetsutohagane.TETSU-2021-078	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 Enoki Masanori, Takahashi Kota, Mitomi Soei, Ohtani Hiroshi	4. 巻 60
2. 論文標題 Electron Theory Calculation of Thermodynamic Properties of Steels and Its Application to Theoretical Phase Diagram of the Fe-Mo-B Ternary System	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 2963 ~ 2972
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-189	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 Enoki Masanori, Sundman Bo, Sluiter Marcel H. F., Selleby Malin, Ohtani Hiroshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Calphad Modeling of LRO and SRO Using ab initio Data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Metals	6. 最初と最後の頁 998 ~ 998
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/met10080998	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 Enoki Masanori, Osawa Yohei, Ohtani Hiroshi	4. 巻 106
2. 論文標題 Thermodynamic Analysis of the Formation Process of Metastable Carbides in Iron-Carbon Martensite	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Tetsu-to-Hagane	6. 最初と最後の頁 342 ~ 351
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/tetsutohagane.TETSU-2019-098	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 Zhang Yongjie, Miyamoto Goro, Furuhashi Tadashi	4. 巻 212
2. 論文標題 Enhanced hardening by multiple microalloying in low carbon ferritic steels with interphase precipitation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 114558 ~ 114558
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scriptamat.2022.114558	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 Zhang Yongjie, Sato Mitsutaka, Miyamoto Goro, Furuhashi Tadashi	4. 巻 62
2. 論文標題 Strengthening of Low Carbon Steel by Nano-sized Vanadium Carbide in Ferrite and Tempered Martensite	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 2016 ~ 2024
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2022-156	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 Militzer Matthias、Hutchinson Christopher、Zurob Hatem、Miyamoto Goro	4. 巻 なし
2. 論文標題 Modelling of the diffusional austenite-ferrite transformation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Materials Reviews	6. 最初と最後の頁 1~30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/09506608.2022.2126257	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 Dong Haokai、Zhang Yongjie、Miyamoto Goro、Inomoto Masahiro、Zhang Weiwen、Liu Lehua、Chen Hao、Furuhara Tadashi	4. 巻 222
2. 論文標題 Heterogeneous segregation behavior of Nb at the stepped migrating interface during phase transformation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 115038~115038
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scriptamat.2022.115038	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 Furuhara Tadashi、Zhang Yongjie、Sato Mitsutaka、Miyamoto Goro、Enoki Masanori、Ohtani Hiroshi、Uesugi Tokuteru、Numakura Hiroshi	4. 巻 223
2. 論文標題 Sublattice alloy design of high-strength steels: Application of clustering and nanoscale precipitation of interstitial and substitutional solutes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 115063~115063
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scriptamat.2022.115063	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 Enoki Masanori、Minamoto Satoshi、Ohnuma Ikuo、Abe Taichi、Ohtani Hiroshi	4. 巻 63
2. 論文標題 Current Status and Future Scope of Phase Diagram Studies	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 407~418
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2022-408	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32件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 山崎康一郎, 張咏杰, 宮本吾郎, 古原忠
2. 発表標題 炭素添加によるフェライト粒界でのリン偏析の抑制効果
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 2021年秋季（第182回）講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yongjie Zhang, Kohei Ikeda, Koichiro Yamasaki, Goro Miyamoto, Tadashi Furuhashi
2. 発表標題 Effects of Carbon and Molybdenum Additions on Grain Boundary Segregation of Phosphorus in Ferrite
3. 学会等名 Virtual-Asia Steel 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 榎木勝徳, 大谷博司
2. 発表標題 クラスター展開法を用いたCantor合金の平均二乗原子変位の評価
3. 学会等名 日本金属学会 2021年秋期（第169回）講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大谷博司, 榎木勝徳
2. 発表標題 CrFeCoNiM (M=Pd, Pt)合金の熱力学的性質の評価
3. 学会等名 日本金属学会 2021年秋期（第169回）講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 戸島一哉, 味戸沙耶, 張 咏杰, 北條智彦, 宮本吾郎, 小山元道, 古原 忠, 秋山英二
2. 発表標題 鉄の粒界腐食に与えるリンの粒界偏析と結晶方位差の影響
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 2022年春季 (第183回) 講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 榎木勝徳, 大澤洋平, 大谷博司
2. 発表標題 鉄 - 炭素系マルテンサイトにおける準安定炭化物の生成過程の熱力学的検討
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 2022年春季 (第183回) 講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大谷博司, 榎木 勝徳
2. 発表標題 FCC-FeにおけるB原子対の固溶状態と拡散挙動の電子論的考察
3. 学会等名 日本金属学会 2022年春季 (第170回) 講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 榎木 勝徳, 大谷博司
2. 発表標題 ハイエントロピー合金の強度に及ぼす因子の熱力学的検討
3. 学会等名 日本金属学会 2022年春季 (第170回) 講演大会
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 張咏杰
2. 発表標題 アトムプローブ解析を利用した鉄鋼材料のナノ析出制御
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 2022年春季 (第183回) 講演大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 張咏杰, 池田幸平, 宮本吾郎, 古原忠, 木津谷茂樹, 高山直樹, 伊木聡
2. 発表標題 フェライト粒界におけるP偏析におよぼす C, Mo添加の影響
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第180回秋季講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 戸島一哉, 味戸沙耶, 張 咏杰, 北條智彦, 宮本吾郎, 小山元道, 古原 忠, 秋山英二
2. 発表標題 粒界に偏析した リン が鉄の腐食に 与える影響
3. 学会等名 腐食防食学会 東北支部講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 顔 魯春, 榎木 勝徳, 大谷 博司
2. 発表標題 分子動力学シミュレーションの機械学習モデル
3. 学会等名 日本金属学会 2020年春季(第166回)講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大谷 博司, 榎木 勝徳
2. 発表標題 電子論計算に基づく理論状態図の構築
3. 学会等名 日本金属学会 2020年秋期(第167回)講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柴田暁伸, Ivan Gutierrez-Urrutia, 中村晶子, 原 徹, 津崎兼彰, 宮本吾郎
2. 発表標題 マルテンサイト鋼における水素脆性粒界クラックの 3 次元形態
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第183回春季講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 梅田岳昌, 張咏杰, 宮本吾郎, 古原忠, 諸岡聡
2. 発表標題 Fe-C-Mn合金のパーライト変態におけるエネルギー散逸
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第184回秋季講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 唐国剣, 宮本吾郎, 古原忠
2. 発表標題 -Fe粒界へのN偏析濃度の定量測定
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第184回秋季講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y.-J. Zhang, T. Umeda, G. Miyamoto, T. Furuhashi, S. Morooka
2. 発表標題 Pearlite growth kinetics in Fe-C-Mn eutectoid steels
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 J.H. Kim, Y.-J. Zhang, G. Miyamoto, T. Hojo, M. Koyama, T. Furuhashi
2. 発表標題 Influence of prior austenite grain boundary (PAGB) misorientation on hydrogen-induced crack propagation in SCM435 tempered martensitic steel
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 Goro Miyamoto, Tadashi Furuhashi
2. 発表標題 Comparison of driving force necessary for bainite and martensite transformations in steels
3. 学会等名 16th International Conference on Martensitic Transformation (ICOMAT2022) (招待講演) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tadashi Furuhashi, Yongjie Zhang, Mitsutaka Sato, and Goro Miyamoto
2. 発表標題 Interface Engineering in Controlling Microstructure and Properties of Steels
3. 学会等名 7th International Conference on Advanced Steels (ICAS 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tadashi Furuahara, YongJie Zhang, Mitsutaka Sato, Goro Miyamoto
2. 発表標題 Interface in Solid-Solid Phase Transformation -Interplay of Kinetics and Crystallography
3. 学会等名 8th International Conference on Solid->Solid Phase Transformation in Inorganic Materials(PTM2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Goro Miyamoto, Tadashi Furuahara
2. 発表標題 Interaction of alloying element with migrating ferrite / austenite interface
3. 学会等名 8th International Conference on Solid->Solid Phase Transformation in Inorganic Materials(PTM2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Haokai Dong, Yongjie Zhang, Goro Miyamoto, Hao Chen, Zhigang Yang, Masahiro Inomoto, Tadashi Furuahara
2. 発表標題 On the Role of Nb Interface Segregation in Ferrite Transformation of Low Carbon Steels
3. 学会等名 8th International Conference on Solid->Solid Phase Transformation in Inorganic Materials(PTM2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yongjie Zhang, Goro Miyamoto, Tadashi Furuahara
2. 発表標題 Interphase Precipitation of Nano-sized Alloy Carbide in V-Nb and V-Ti Multiple Microalloyed Low-carbon Steels
3. 学会等名 8th International Conference on Solid->Solid Phase Transformation in Inorganic Materials(PTM2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuya Tojima, Saya Ajito, Yongie Zhang, Tomohiko Hojo, Goro Miyamoto, Motomichi Koyama, Tadashi Furuhashi, Eiji Akiyama
2. 発表標題 Influence of phosphorus segregation and grain boundary misorientation on intergranular corrosion of $\alpha$ -Fe
3. 学会等名 European Corrosion Congress, 2022, EUROCORR2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大谷博司, 榎木勝徳
2. 発表標題 第一原理計算に基づく理論状態図の作成
3. 学会等名 日本金属学会 2023年春期 (第172回) 講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大谷博司, 榎木勝徳
2. 発表標題 ハイエントロピー合金における規則-不規則変態挙動の熱力学的解析
3. 学会等名 日本金属学会 2022年秋期 (第171回) 講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Enoki, H. Ohtani
2. 発表標題 Thermodynamic Analysis on a Formation Mechanism of Metastable Carbides During Tempering of Fe-C Martensite
3. 学会等名 MRS Fall Meeting (2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 榎木勝徳, 大谷博司
2. 発表標題 第一原理クラスター展開を用いた合金中の SRO と MSAD の評価
3. 学会等名 第32回日本MRS年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 榎木勝徳, 大澤洋平, 大谷博司
2. 発表標題 鉄 - 炭素系マルテンサイトにおける準安定炭化物の生成過程の熱力学的検討
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 2022年春季 (第183回) 講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 榎木勝徳, 大谷博司
2. 発表標題 FCC-FeにおけるB原子対の固溶状態と拡散挙動の電子論的考察
3. 学会等名 日本金属学会 2022年春季 (第170回) 講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大谷博司, 榎木勝徳
2. 発表標題 ハイエントロピー合金の強度に及ぼす因子の熱力学的検討
3. 学会等名 日本金属学会 2022年春季 (第170回) 講演大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 乾 晴行 (編著)	4. 発行年 2020年
2. 出版社 内田老鶴園	5. 総ページ数 296
3. 書名 ハイエントロピー合金	

〔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	榎木 勝徳 (Enoki Masanori) (60622595)	島根大学・材料エネルギー学部・准教授  (15201)	
研究分担者	大谷 博司 (Ohtani Hiroshi) (70176923)	公益財団法人豊田理化学研究所・フェロー事業部門・フェロー  (73903)	
研究分担者	秋山 英二 (Akiyama Eiji) (70231834)	東北大学・金属材料研究所・教授  (11301)	

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