

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01330

研究課題名(和文) 軽元素のスピノーダルオーダーリングを活用した鉄鋼の新規な高強度化原理の構築

研究課題名(英文) Establishment of novel strengthening principle of steels by spinodal ordering of light elements

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) 34,000,000円

研究成果の概要(和文)：侵入型元素と置換型元素の相互作用に注目し、炭素・窒素マルテンサイトの焼戻しおよび窒化時の元素クラスタリング挙動を実験および計算の両面で調査した。置換型元素添加による高炭素マルテンサイトの低温焼戻し反応の遅延、ナノクラスタリングと合金炭窒化物の生成、転位回復の抑制による低炭素・窒素マルテンサイトの高温焼戻し軟化抵抗の発現が明らかとなった。また、窒化時のナノクラスタリングを前駆として安定窒化物の微細分散化が可能であること、第一原理熱力学およびキネティックモンテカルロ計算より窒素-置換型元素の強い引力型相互作用がクラスター生成を誘起することが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピノーダルオーダーリングの概念に基づくマルテンサイトの低温焼戻しは、従来の機械構造用鋼での熱処理の意義を大きく覆し、ナノ合金炭窒化物の析出強化を用いる自動車用薄鋼板の分野でも新しい強化原理を提供する。また、窒化処理によるスピノーダルオーダーリングを利用することで、機械部品/金型の耐摩耗性を飛躍的に向上させるポテンシャルがある。さらに、この理論を他の合金系へ展開することで、金属材料全般の特性改善が期待される。

研究成果の概要(英文)：Focusing on the interaction between interstitial and substitutional elements, the clustering behaviors by competition and coupling of ordering and phase separation during tempering of carbon/nitrogen martensite and nitriding process were investigated experimentally and theoretically. With the addition of substitutional elements, the kinetics of low-temperature tempering of high-carbon martensite was found to be delayed, while the resistance to temper softening occurs due to the formation of alloy carbide/nitride and nano-cluster, as well as the suppression of dislocation recovery. Moreover, the clustering behavior inducing the formation of nitride can enhance surface hardening during nitriding process. Such a precipitation sequence was reproduced by the combination of first-principles thermodynamics and kinetic Monte Carlo calculation.

研究分野：金属材料

キーワード：結晶・組織制御 時効析出

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、輸送器機用の材料開発において地球温暖化防止を目的とした高強度化による軽量化や安全性向上などの要求が年々厳しくなっている。鉄合金中の固溶炭素 (C) /窒素 (N) は、高温相 fcc オーステナイトからの急冷時のマルテンサイト変態で C を強制固溶させたバルク材の高強度化や、窒素処理など表面からの N 固溶を用いた機械部品の表面硬化など、高強度・高硬度鋼の製造に不可欠である。

低温相 bcc フェライト中の C、N の最大固溶量はそれぞれ 0.02mass%、0.1mass%と極微量なため、急冷で得られる過飽和固溶体であるマルテンサイトの時効 (焼戻し) 時には鉄炭化物/窒素化合物が安定相や準安定相として析出する。ところが、近年、炭素鋼の急冷ままマルテンサイト中に、鉄炭化物ではなく非平衡 C クラスターがナノスケールで存在することが報告された。これは、急冷時に bcc 相中の侵入型元素である C が自発的な濃度分離 (スピノーダル分解) を起こしたと考えられ、その詳細と特性への影響が改めて注目されている。

一方、強い窒素生成能を有する置換型元素を微量添加したフェライト鉄を窒素処理すると、非平衡な原子クラスターが生成して著しい表面硬化が起こることが報告されている。このクラスターは bcc 構造の一原子面内で規則配列しており、その生成過程が置換型合金で見られる異種元素の規則化に誘起されたスピノーダル分解「スピノーダルオーダーリング」に類似するが、侵入型固溶体でのスピノーダルオーダーリングという概念は今までない。

2. 研究の目的

C、N を幅広い組成で強制に固溶できるマルテンサイト鋼の焼戻し処理および置換型合金元素を添加したフェライト鋼の窒素処理を研究対象とし、鉄合金で見出された新奇なスピノーダルオーダーリングの発現状態を実験と理論の両面から解明し、その知見を応用した新しい高強度化設計原理の構築を図ることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 炭素マルテンサイトの低温焼戻し

Fe-0.8mass%C の高炭素鋼にそれぞれ 2at%Mn、Si、Cr、Al を加えた合金の焼入れマルテンサイトを、室温から 5°C~20°C/min の速度での連続昇温を施し、300°C以下の低温域における各焼戻し反応に帰属する発熱または体積変化のピークを示差走査熱量測定および熱膨張測定で解析することで、低温焼戻しの kinetics におよぼす合金元素添加の影響を調査した。

(2) 炭素・窒素マルテンサイトの高温焼戻し

Fe-0.1C-1.5Mn-0.05Si(mass%)にそれぞれ 0.4mass%までの V、0.1mass%の Nb、Ti を添加した低炭素鋼、または窒素量が 0.3mass%になるまで浸窒処理された 1mass%Mn、Si、Cr、Mo を含有する窒素鋼の焼入れマルテンサイトを 650°C以下の各温度で等温焼戻し処理を施し、硬さ変化を測定することで、焼戻し軟化抵抗におよぼす合金元素の影響を調査した。

(3) フェライトの窒素処理

0.4at%までの Ti を添加した Fe-Ti と Fe-Al-Ti 合金を 550°Cでプラズマ窒素処理を施し、硬さ測定を行うことで、窒素処理による表面硬化におよぼす合金元素添加の影響を調査した。

以上の各処理で得られた試料に対して、X線回折 (XRD) や透過型電子顕微鏡 (TEM)、三次元アトムプローブ (3DAP) を用いて溶質元素のクラスタリング・析出挙動に着目した組織解析を行った。また、第一原理計算とモンテカルロ計算を組み合わせることで、クラスターの生成機構について検討した。

4. 研究成果

(1) 炭素マルテンサイトの低温焼戻しにおける元素添加の効果

Fig. 1 に Fe-0.8mass%C (Base 材) および各合金添加材を 10°C/min の速度で連続昇温した時の熱膨張係数の変化を示す。Base 材において、これまで報告された通り、各焼戻し段階に帰属する体積の変化が見られた。Fig. 2 に体積収縮が起こった第 1 段階がほぼ終了となる 200°C まで昇温した Base 材の TEM 写真を示す。制限視野電子回折図形および暗視野像から、準安定の η/ϵ 炭化物がナノスケールで析出していることがわかった。他の合金添加材においても同様な結果が確認された。Fig. 1 に下矢印で示した各合金における体積変化のピーク温度を Fig. 3 にまとめた。準安定炭化物の析出である第一段階について、Si 添加材を除き合金元素添加でピーク温度が高くなり、反応 kinetics が遅延される傾向が見られた。これは、低温焼戻し反応の律速過程である C の拡散が合金元素添加により抑制されるためであると考えられる。また、第二段階の残留オーステナイト分解と第三段階のセメントイト析出についても同様な結果が見られ、特に Si、Al の遅延効果が大きいことがわかった。

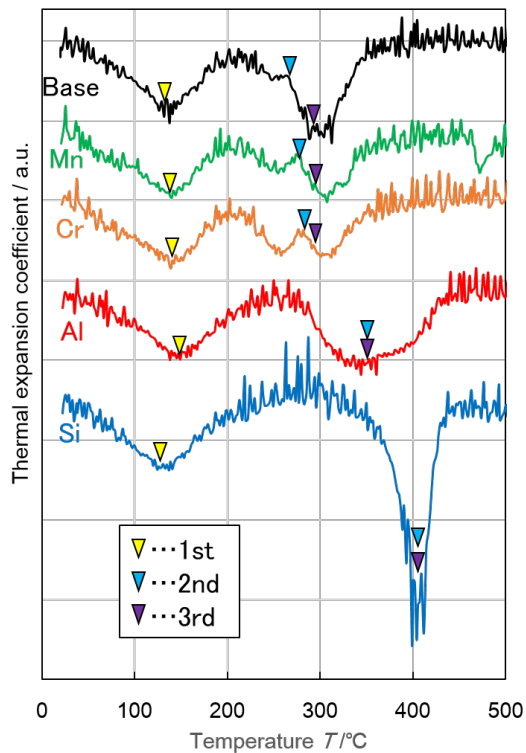


Fig. 1 10°C/min で連続昇温した際の各合金の熱膨張係数の変化。

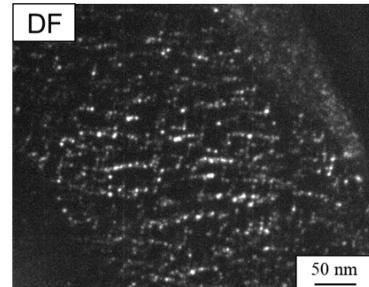
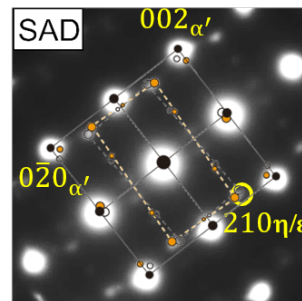


Fig. 2 200°Cまで連続昇温後冷却した Base 材の制限視野電子回折図形および炭化物の暗視野像。

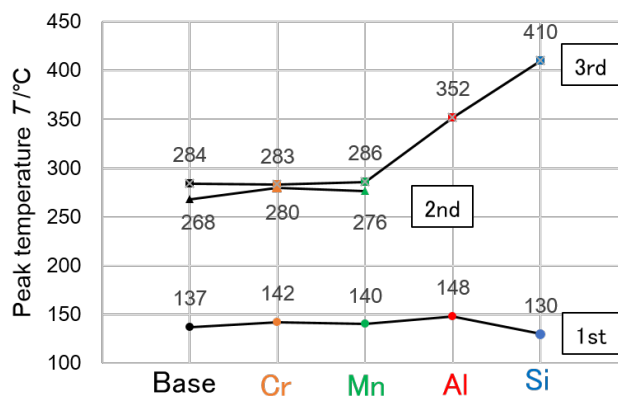


Fig. 3 連続昇温時の各焼き戻し段階のピーク温度におよぼす合金元素の影響

(2) 炭素・窒素マルテンサイトの高温焼戻しにおけるナノクラスタリング／析出現象

Fe-0.1C-1.5Mn-0.05Si ベースの合金における炭素マルテンサイトおよび Fe-0.3N ベースの合金における窒素マルテンサイトの硬さ変化を焼戻しパラメータに対してプロットしたものを Fig. 4 に示す。同一合金の硬さは焼戻しパラメータに対してほぼ一本の曲線で表すことができる。全体傾向として合金元素添加による焼戻し軟化抵抗が見られ、強炭窒化物生成元素の添加で二次硬化が見られるが、その大きさは炭素系では $0.4V > 0.1Nb \approx 0.1Ti > 0.1V$ 、窒素系においては $1Cr > 1Mo > 1Mn \approx 1Si$ の順番にそれぞれなっている。

Fig. 5 に合金元素を添加した焼戻し材の組織解析結果を示す。炭素マルテンサイトに V、Nb、Ti を微量添加すると高温焼戻しで B1 型合金炭化物がナノスケールで生成していることが 3DAP の結果からわかる。Cr 添加窒素マルテンサイトの焼戻しでも 3DAP で検出される合金窒化物とともに高分解能 TEM により矢印で示す単原子層厚さのクラスターの存在が観察された。同様のナノクラスタの生成は、Mo、Mn 添加材においても見られた。一方、比較的低温での焼戻しにおいても焼戻し軟化抵抗が見られるが、明瞭な合金炭窒化物の析出は検出できない。XRD 解析では焼戻しに伴う転位密度の低下が合金元素添加により抑制されることが確認された。これより、析出・クラスター強化と転位強化の両方が焼戻し軟化抵抗に寄与することが明らかとなった。

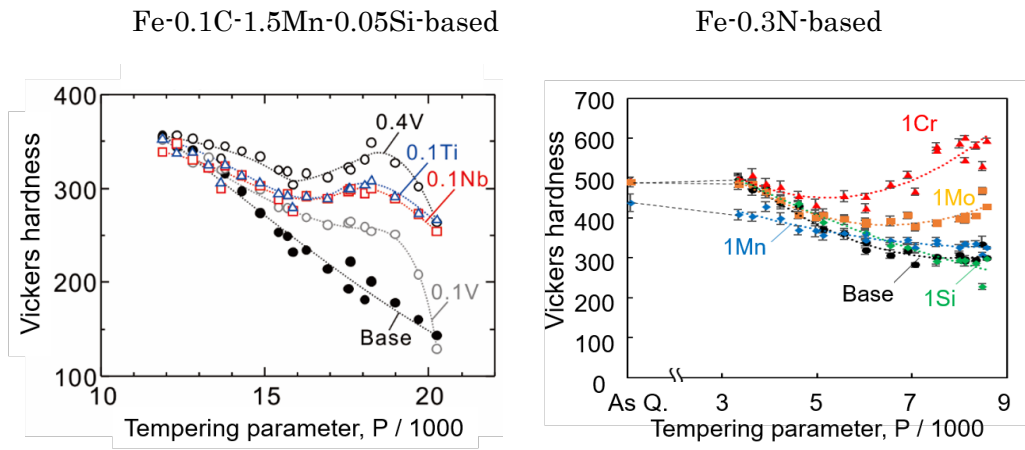
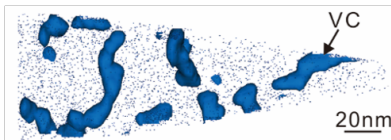


Fig. 4 焼戻しパラメータに対する各合金の炭素/窒素マルテンサイトの硬さ変化。

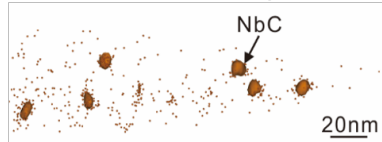
Fe-0.1C-1.5Mn-0.05Si-based, 650°C, 5min

Fe-0.3N-based, 500°C, 1h

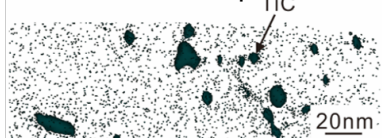
0.4V, V atom map



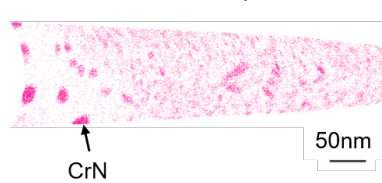
0.1Nb, Nb atom map



0.1Ti, Ti atom map



1Cr, Cr atom map



1Cr, HR-TEM image

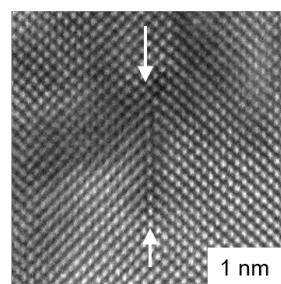


Fig. 5 炭素/窒素マルテンサイトの焼戻し時における合金炭化物とナノクラスタの生成。

(3) フェライト合金の窒化処理におけるナノクラスタリングを利用した表面硬化

Fig. 6 は Fe-Ti および Fe-Al-Ti 合金の窒化材における表面硬さおよび N 濃度におよぼす Ti 添加量の影響をまとめたものである。Fe-Al-Ti 合金の表面硬さは Ti 添加量の増加とともに上昇する。また、16h 窒化した Fe-Ti 合金よりも Fe-Al-Ti の表面硬さが高い。3DAP 観察より Ti 添加量の増加に伴う硬化の原因は、Ti-N クラスターの増加に加えて Al 窒化物の微細析出がクラスター生成に誘起されたためであることが示された。また、長時間窒化処理ほど窒化物の量が増えるため表面硬さも増加しており、これらの結果に対応して N 濃度についても高 Ti 添加量、長時間窒化ほど増加することもわかった。

第一原理計算とキネティックモンテカルロ計算を組み合わせることで、Ti-N クラスターの生成過程を、Fe に体積を固定した条件下でシミュレーションした結果を Fig. 7 に示す。この図で Fe 原子を非表示として、Ti と N 原子だけを示した。Ti と N 原子が凝集していく傾向が見られており、4000 MCS で実験結果を再現できるような板状クラスターが現れた。一方、体積を緩和した条件下でのクラスターが球状であることが確認されているため、実際フェライト母相中で生成するクラスターは、Fe 母格子による弾性拘束に強く影響されることが明らかとなった。

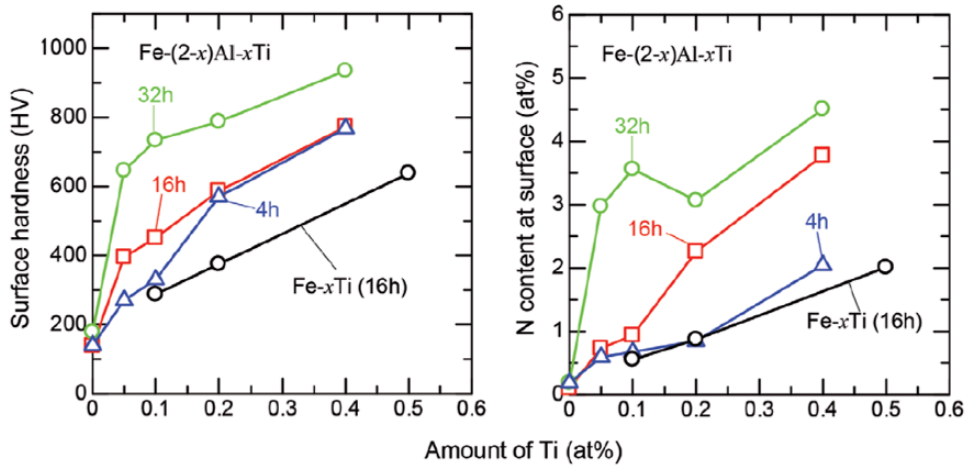


Fig. 6 窒化処理された各合金における表面での硬さと N 濃度。

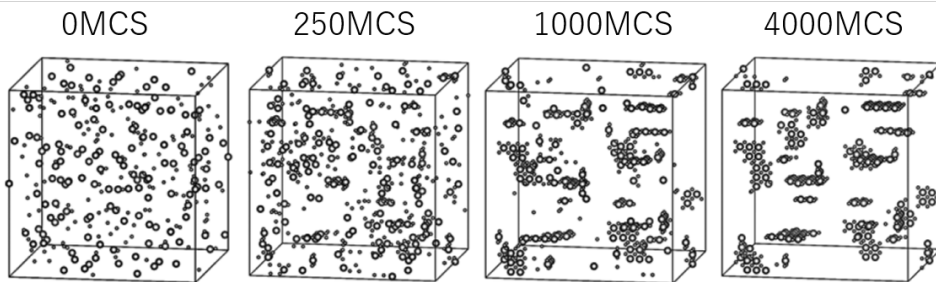


Fig. 7 Ti-N クラスター生成過程のモンテカルロシミュレーションの結果。

MCS: モンテカルロシミュレーションステップ。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 古原忠	4. 巻 24
2. 論文標題 鉄鋼における析出現象を考える	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ふえらむ	6. 最初と最後の頁 572 ~ 577
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Tadashi Furuhashi, Yongjie Zhang, Goro Miyamoto	4. 巻 580
2. 論文標題 Roles of transformation interfaces in the design of advanced high strength steels	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 012005 ~ 012005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/1757-899X/580/1/012005	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 Elango Chandiran, Yu Sato, Naoya Kamikawa, Goro Miyamoto, Tadashi Furuhashi	4. 巻 50
2. 論文標題 Effect of ferrite/martensite phase size on tensile behavior of dual phase steels with nano-precipitation of vanadium carbides	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Metallurgical and Materials Transactions A	6. 最初と最後の頁 4111 ~ 4126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/s11661-019-05353-3	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 Shoya Kawano, Satoshi Iikubo, Hiroshi Ohtani	4. 巻 171
2. 論文標題 Role of substituted atoms in stacking fault formation in long-period stacking ordered system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computational Materials Science	6. 最初と最後の頁 109210 ~ 109210
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2019.109210	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 孟凡輝, 宮本吾郎, 古原忠	4. 巻 59
2. 論文標題 ガス窒化したフェライト合金の化合物層組織と硬化挙動に及ぼす置換型添加元素の影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 熱処理	6. 最初と最後の頁 336 ~ 343
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Yongjie Zhang, Kunio Shinbo, Goro Miyamoto, Tadashi Furuahara	4. 巻 186
2. 論文標題 Weak influence of ferrite growth rate and strong influence of driving force on dispersion of VC interphase precipitation in low carbon steels	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 533 ~ 544
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.01.025	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 Ran Ding, Yingjie Yao, Binhan Sun, Geng Liu, Jianguo He, Tong Li, Xinhao Wan, Zongbiao Dai, Dirk Ponge, Dierk Raabe, Chi Zhang, Andy Godfrey, Goro Miyamoto, Tadashi Furuahara, Zhigang Yang, Sybrand van der Zwaag, Hao Chen	4. 巻 6
2. 論文標題 Chemical boundary engineering: A new route toward lean, ultrastrong yet ductile steels	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eaay1430 ~ 1430
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1126/sciadv.aay1430	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 宮本吾郎, 沼倉宏, 榎木勝徳, 上杉徳照, 大谷博司, 古原忠	4. 巻 59
2. 論文標題 鉄鋼材料における侵入型溶質原子-置換型溶質原子のナノクラスタリング	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 まてりあ	6. 最初と最後の頁 128 ~ 133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 張咏杰, 趙超, 佐藤充孝, 宮本吾郎, 古原忠	4. 巻 106
2. 論文標題 V, Nb, Tiの微量添加による低炭素マルテンサイト鋼の焼戻し軟化抵抗	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 鉄と鋼	6. 最初と最後の頁 361 ~ 370
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2019-113	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 榎木勝徳, 大谷博司	4. 巻 106
2. 論文標題 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	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 鉄と鋼	6. 最初と最後の頁 341 ~ 350
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/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 Yongjie Zhang, Goro Miyamoto, Tadashi Furuwara	4. 巻 25
2. 論文標題 Atom Probe Compositional Analysis of Interphase Precipitated Nano-Sized Alloy Carbide in Multiple Microalloyed Low-Carbon Steels	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Microscopy and Microanalysis	6. 最初と最後の頁 1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1431927618015374	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 朱萌, 宮本吾郎, 古原忠	4. 巻 105
2. 論文標題 プラズマ窒化したFe-(2-x) at%Al-x at%Ti合金の表面硬化挙動と析出組織形成	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 鉄と鋼	6. 最初と最後の頁 324 ~ 333
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/tetsutohagane.TETSU-2018-109	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 榎木勝徳, 大谷博司	4. 巻 105
2. 論文標題 BCC-FeにおけるTi, N原子のナノクラスター形成の モンテカルロシミュレーション	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 鉄と鋼	6. 最初と最後の頁 334 ~ 342
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/tetsutohagane.TETSU-2018-111	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 Mitsutaka Sato, Sou Matsumoto, Goro Miyamoto, Tadashi Furuvara	4. 巻 156
2. 論文標題 Microstructure of reverted austenite in Fe-0.3N martensite	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 85 ~ 89
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scriptamat.2018.07.020	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 Yongjie Zhang, Kunio Shinbo, Takahito Ohmura, Takuya Suzuki, Kaneaki Tsuzaki, Goro Miyamoto, Tadashi Furuvara	4. 巻 58
2. 論文標題 Randomization of Ferrite/austenite Orientation Relationship and Resultant Hardness Increment by Nitrogen Addition in Vanadium-microalloyed Low Carbon Steels Strengthened by Interphase Precipitation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 542 ~ 550
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-537	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 Yongjie Zhang, Chao Zhao, Goro Miyamoto, Kunio Shinbo, Tadashi Furuvara	4. 巻 -
2. 論文標題 Resistance to Temper Softening of Microalloyed Low Carbon Steels	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceeding of International Symposium on Steel Science	6. 最初と最後の頁 143 ~ 146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Mitsutaka Sato, Tadashi Furuohara	4. 巻 -
2. 論文標題 Tempering Behaviour of Iron-nitrogen-based Martensite	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceeding of International Symposium on Steel Science	6. 最初と最後の頁 123 ~ 126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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65件 (うち招待講演 20件 / うち国際学会 28件)

1. 発表者名 張咏杰, 楊少文, 佐藤充孝, 宮本吾郎, 古原忠, 埋橋淳, 大久保忠勝, 宝野和博
2. 発表標題 焼戻しマルテンサイトにおけるナノクラスターのアトムプローブ解析
3. 学会等名 日本学術振興会 材料の微細組織と機能性 第133委員会 第244回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 張咏杰, 工藤航平, 宮本吾郎, 古原忠
2. 発表標題 高炭素マルテンサイトの低温焼戻し挙動におよぼす合金元素の影響
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 2019年秋期 (第178回) 講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 楊少文, 佐藤充孝, 嶋田雄介, 宮本吾郎, 古原忠
2. 発表標題 Fe-Nマルテンサイトの高温焼戻しに及ぼす合金元素添加の影響
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 2019年秋期 (第178回) 講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Haokai Dong, Yongjie Zhang, Goro Miyamoto, Tadashi Furuhashi, Masahiro Inomoto
2. 発表標題 Effect of Nb addition on the ferrite transformation in low carbon steel
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 2019年秋期(第178回)講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榎木勝徳, 大谷博司
2. 発表標題 第一原理計算に基づくBCC-Fe中の溶質原子クラスタリング過程の組織シミュレーション
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 2019年秋期(第178回)講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fei Sun, Yikun Liu, Goro Miyamoto, Tadashi Furuhashi
2. 発表標題 Aging hardening of Fe-35Ni-(Al,Mn) alloys
3. 学会等名 日本金属学会 2019年秋期(第165回)講演大会
4. 発表年 2019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形成要因の熱力学的検討
3. 学会等名 日本金属学会 2019年秋期(第165回)講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 楊少文, 佐藤充孝, 嶋田雄介, 宮本吾郎, 古原忠
2. 発表標題 Fe-Nマルテンサイトの高温焼戻しに及ぼす合金元素の影響
3. 学会等名 日本金属学会 第18回東北支部研究発表大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yongjie Zhang, Goro Miyamoto, Tadashi Furuhara
2. 発表標題 Origin of Resistance to Temper Softening in Low-carbon Martensitic Steels by Microalloying of V, Nb and Ti
3. 学会等名 PRICM 10 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Ohtani, Masanori Enoki
2. 発表標題 Study on thermodynamic properties of high entropy alloys
3. 学会等名 PRICM 10 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yongjie Zhang
2. 発表標題 Nano-Precipitation of Alloy Carbide in Microalloyed Steels: Interphase Precipitation in Ferrite and Aging Precipitation in Tempered Martensite
3. 学会等名 The 7th Chinese Young Researcher's Workshop on Materials Science (招待講演)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Goro Miyamoto, Tadashi Furuvara
2 . 発表標題 Solute clustering and its hardening effect in ferrous alloy
3 . 学会等名 Canadian Materials Science conference
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Tadashi Furuvara, Fanhui Meng, Goro Miyamoto, Yoshikazu Todaka
2 . 発表標題 Roles of heady deformation on microstructure and properties on nitrated ferritic steels
3 . 学会等名 MS&T2019 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Tadashi Furuvara, Yongjie Zhang, Goro Miyamoto
2 . 発表標題 Roles of transformation interface in the design of advanced high strength steel
3 . 学会等名 40th RISO Symposium (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Haokai Dong, Yongjie Zhang, Goro Miyamoto, Tadashi Furuvara, Masahiro Inomoto
2 . 発表標題 Effect of Nb addition on the ferrite transformation in low carbon steel
3 . 学会等名 SMS2019 & GIMRT User Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Ohtani, Hayato Ogino, Masanori Enoki
2. 発表標題 A thermodynamic study on the formation process of Z-phase in heat resistant steels
3. 学会等名 CALPHAD XLVIII (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Haokai Dong, Yongjie Zhang, Goro Miyamoto, Tadashi Furuhashi, Masahiro Inomoto
2. 発表標題 Effects of Nb interface segregation on ferrite transformation kinetics in low carbon steels
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 2020年春期(第179回)講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 楊少文, 佐藤充孝, 嶋田雄介, 宮本吾郎, 古原忠
2. 発表標題 窒素マルテンサイトの低温焼戻し挙動におよぼす合金元素添加の影響
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 2020年春期(第179回)講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 板坂京香, 宮本吾郎, 古原忠
2. 発表標題 Fe-Ti-N合金におけるTi-Nナノクラスターによる強化機構解明
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 2020年春期(第179回)講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 榎木勝徳, 大谷博司
2. 発表標題 モンテカルロ法を用いた Fe中の溶質原子クラスタリング過程の考察
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 2020年春期(第179回)講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤悠, 榎木勝徳, 大谷博司
2. 発表標題 Fe-C系マルテンサイトの焼戻しにおける準安定炭化物の遷移に関する熱力学的検討
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 2020年春期(第179回)講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古原忠, 小林大介, 宮本吾郎
2. 発表標題 窒化鋼の多元化がもたらすナノクラスタリング・析出の促進と高強度化
3. 学会等名 日本金属学会 2020年春期(第166回)講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Fei Sun, Goro Miyamoto, Tadashi Furuhara
2. 発表標題 Precipitation behaviors in aged Fe-Ni-Al alloys
3. 学会等名 日本金属学会 2020年春期(第166回)講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柴田暉大, 榎木勝徳, 大谷博司
2. 発表標題 Cr-Nb-N 三元系におけるZ相の生成機構の熱力学的解析
3. 学会等名 日本金属学会 2020年春期(第166回)講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柳玉恒, 堀内寿晃, Stein Frank, 榎木勝徳, 大谷博司
2. 発表標題 Co-Nb2元系におけるクラスター形成機構のモンテカルロ法による検討
3. 学会等名 日本金属学会 2020年春期(第166回)講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shao-Wen Young, Mitsutaka Sato, Yusuke Shimada, Goro Miyamoto, Tadashi Furuvara
2. 発表標題 Effect of alloy elements on the hardness of high-temperature tempered Fe-N martensitic steels
3. 学会等名 The 3rd Symposium for The Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Goro Miyamoto, Tadashi Furuvara
2. 発表標題 Nitride precipitation induced by nitrogen-solute clustering in ferrous alloys
3. 学会等名 TMS2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shaolou Wei, Sang Jun Kim, Yongjie Zhang, Goro Miyamoto, Tadashi Furuwara, Eun Soo Park, Cem Tasan
2. 発表標題 Designing ductile refractory high-entropy alloys guided by natural mixing
3. 学会等名 TMS2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yongjie Zhang, Goro Miyamoto, Tadashi Furuwara
2. 発表標題 Atom Probe Compositional Analysis of Nano-Sized Alloy Carbide in Multiple Microalloyed Low-Carbon Steels
3. 学会等名 Atom Probe Tomography & Microscopy 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yongjie Zhang, Goro Miyamoto, Takahito Ohmura, Tadashi Furuwara
2. 発表標題 Correlation between Dispersion of VC Interphase Precipitation and Local Hardness of Ferrite in Low Carbon Steels
3. 学会等名 6th International Indentation Workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yongjie Zhang, Goro Miyamoto, Tadashi Furuwara
2. 発表標題 Nucleation of Vanadium Carbide Interphase Precipitation with Different Ferrite Growth Rate in Low Carbon Steels
3. 学会等名 17th ALEMI Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yongjie Zhang, Goro Miyamoto, Tadashi Furuhara
2. 発表標題 Strengthening of Low Carbon Steel by Nano-sized Vanadium Carbide in Ferrite and Tempered Martensite
3. 学会等名 THERMEC 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 張咏杰, 宮本吾郎, 古原忠
2. 発表標題 低炭素鋼フェライトおよび焼もどしマルテンサイト中のナノサイズVCによる強化
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第176回秋季講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 張咏杰, 宮本吾郎, 古原忠
2. 発表標題 マルテンサイトの焼戻しにおよぼす合金元素の影響
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第177回春季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 朱萌, 宮本吾郎, 古原忠
2. 発表標題 プラズマ窒化したFe-2Al合金の表面硬化挙動に及ぼす微量Ti添加の影響
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第176回秋季講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤充孝, 村田貴優, 宮本吾郎, 古原忠
2. 発表標題 Fe-0.3NおよびFe-0.3N-1X (X : Cr, Mo, Mn) オーステナイトからのフェライト生成挙動
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第177回春季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榎木勝徳, 大谷博司
2. 発表標題 第一原理計算に基づくBCC-Fe中の i-s クラスターの安定性評価
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第176回秋季講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大谷博司, 榎木勝徳
2. 発表標題 低温焼戻しにおける 炭化物の形成に関する熱力学的検討
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第177回秋季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榎木勝徳, 大谷博司
2. 発表標題 鉄における溶質原子クラスターの組織シミュレーション
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第177回秋季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Goro Miyamoto, Tadashi Furuvara
2. 発表標題 Strengthening of Steels by Solute Clusters or Nano-sized Precipitates
3. 学会等名 25th IFHTSE congress (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Meng Zhu, Goro Miyamoto, Tadashi Furuvara
2. 発表標題 Effects of Ti addition on surface hardening behavior in plasma-nitrided Fe-2Al alloys
3. 学会等名 CAMS2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shao-wen Young, Mitsutaka Sato, Tadashi Furuvara
2. 発表標題 Precipitation behavior of alloy nitrides during Tempering of Fe-N martensitic steels
3. 学会等名 CAMS2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古原忠, 宮本吾郎
2. 発表標題 多元鉄合金のクラスタリング・析出における元素間相互作用
3. 学会等名 日本金属学会 第163回秋期講演大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮本吾郎
2. 発表標題 鉄鋼の窒化処理及び浸室焼入れ処理における組織制御
3. 学会等名 日本熱処理技術協会 第84回秋季講演大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tadashi Furuvara
2. 発表標題 Roles of transformation interface in controlling microstructure and properties of high strength steels
3. 学会等名 THERMEC 2018（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tadashi Furuvara
2. 発表標題 Light element strategy in advanced high strength steels
3. 学会等名 The 9th International Conference on Advanced Materials Processing (ICAMP-9)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tadashi Furuvara
2. 発表標題 Carbon Partitioning during Ferrite and Bainite Transformations in Low-alloy Steels
3. 学会等名 The 6th International Conference on Advanced Steels (ICAS 2018)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tadashi Furuahara
2. 発表標題 Light Element Strategy in Advanced High Strength Low-Alloy Steels
3. 学会等名 Nature Research Round Table - Advanced Manufacturing of Structural Materials: (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tadashi Furuahara
2. 発表標題 Light Element Strategy in Advanced High Strength Steels
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Hetero Structure and Advanced Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮本吾郎、古原忠
2. 発表標題 浸室焼入れ処理における組織制御
3. 学会等名 浸室焼入れ研究会成果報告会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮本吾郎、古原忠
2. 発表標題 Quantitative measurement of tetragonality of Fe-C martensite using EBSD
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第174回秋季講演大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐藤充孝、古原忠
2. 発表標題 Fe-1M-0.3mass%N (M : Si, Cr, Mn, Mo)マルテンサイトの焼戻し挙動
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第174回秋季講演大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大澤洋平、佐伯成駿、榎木勝徳、大谷博司
2. 発表標題 炭素鋼の焼戻しにおけるBCTマルテンサイトから 相への遷移過程
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第174回秋季講演大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 榎木勝徳、大谷博司、大澤洋平
2. 発表標題 第一原理計算に基づくBCC-Fe中の i-s クラスターの形成シミュレーション
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第174回秋季講演大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yongjie Zhang, Chao Zhao, Goro Miyamoto, Kunio Shinbo, Tadashi Furuhara
2. 発表標題 Resistance to temper softening of microalloyed low carbon steels
3. 学会等名 NIMS week 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Sato, T. Furuhara
2. 発表標題 Tempering behaviour of iron-nitrogen-based martensite
3. 学会等名 The 5th International Symposium on Steel Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yongjie Zhang, Chao Zhao, Goro Miyamoto, Kunio Shinbo, Tadashi Furuhara
2. 発表標題 Resistance to temper softening of microalloyed low carbon steels
3. 学会等名 The 5th International Symposium on Steel Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 古原忠
2. 発表標題 ナノクラスタリング・析出利用による鉄鋼材料の高強度化
3. 学会等名 日本金属学会・日本鉄鋼協会・軽金属学会九州支部平成29年度合同学術講演大会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 古原忠、宮本吾郎
2. 発表標題 Roles of transformation interface for controlling microstructure and properties of high strength steels
3. 学会等名 日本金属学会第161回秋季講演大会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 古原忠
2. 発表標題 Light Element Strategy in Advanced High Strength Steels
3. 学会等名 NIMS Week 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 古原忠
2. 発表標題 Light Element Strategy in Advanced High Strength Steels
3. 学会等名 International Seminar on Metallurgy and Materials 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 張咏杰、宮本吾郎、古原忠
2. 発表標題 V, Nb, Tiの微量添加による低炭素鋼の焼もどし軟化抵抗
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第175回春季講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古原忠
2. 発表標題 鉄鋼の高機能化における軽元素戦略-CRESTの成果とその後の展開
3. 学会等名 MEXT-JST元素戦略合同シンポジウム～元素戦略研究の歩みと今後～ (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tadashi Furuhashi, Yongjie Zhang, Goro Miyamoto
2. 発表標題 Roles of Transformation Interface for Controlling Microstructure and Properties of High Strength Steels
3. 学会等名 2018 TMS annual meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tadashi Furuhashi, Yongjie Zhang, Goro Miyamoto
2. 発表標題 Important Factors to Design High strength Ferritic Steel with Nano-sized Interphase Precipitation of Alloy Carbide
3. 学会等名 2018 TMS annual meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018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	大谷 博司 (Ohtani Hiroshi) (70176923)	東北大学・多元物質科学研究所・教授 (11301)	
研究分担者	宮本 吾郎 (Miyamoto Goro) (60451621)	東北大学・金属材料研究所・准教授 (11301)	
研究分担者	佐藤 充孝 (Sato Mitsutaka) (10547706)	東北大学・金属材料研究所・助教 (11301)	

6. 研究組織（つづき）

	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	張 咏ジエ (Zhang Yongjie) (40793740)	東北大学・金属材料研究所・助教 (11301)	