

令和 6 年 6 月 16 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18895

研究課題名（和文）鉄合金のインタースティシャルサブラティス設計 - 多様な周期構造がもたらす新機能

研究課題名（英文）Interstitial sub-lattice design of ferrous alloys

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） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：鉄結晶をモデル系として、新たに侵入型副格子の元素の規則配置を置換型副格子の元素配置および構造相変態と重畳させて行う挑戦的テーマ「サブラティスエンジニアリング」を提唱し、その設計原理を現象の包括的な理解に基づいて探索した。その結果、侵入型元素と置換型元素との強い引力型相互作用が、2つの副格子間に渡る規則化で元素クラスタリングを誘起し、材料の高強度化に資することが明らかとなった。本コンセプトは、不規則性が高い金属固溶体に応用することで、多次元かつ幅広い構造・機能の設計につながると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本コンセプトは、リジッドな構造を持たず不規則性が高い金属固溶体における強度発現の原理を解明したものであり、置換型および侵入型の異なるサブラティス間の引力型相互作用の大きさが、ナノ領域の濃度分離と規則化の重畳による大きな強化能を発現する鍵となることを明確に示した。この知見は低合金鋼・高合金鋼に応用可能であることは言うまでもなく、非鉄合金も含めてナノ構造の多次元的制御に基づく機能の設計につながると考えられる。

研究成果の概要（英文）：A novel concept 'sub lattice engineering', in which the arrangement of interstitial element was controlled in coupling of that of substitutional element as well as phase transformation, was proposed. In materials design by choosing iron lattice as a model system. It was confirmed that strong attractive interaction between interstitial and substitutional elements was important in nanoscale clustering induced by atomic ordering and resultant large strengthening effects. This concept can be applied to a wide variety of metallic solid solution for the design of multi-dimensional structure and functions.

研究分野：鉄鋼材料学，金属組織学

キーワード：鉄鋼 析出 熱処理 合金元素 高強度化

1. 研究開始当初の背景

合金固溶体中の元素分布はランダムではなく、結合性や原子サイズの違いなどに起因して多様な周期性を持つことが明らかになりつつある。従来その規則性は元素間の短距離相互作用に基づいて議論されてきたが、一方で高強度軽合金などで見られる長周期規則構造の形成は、隠れた“中・長距離”相互作用の関与を示唆する。しかし、その周期性の起源は不明で、その制御に基づく材料設計は未踏の研究領域である。また置換型合金においては原子配置の規則化と元素間相互作用との相関についての研究は以前よりあるが、特に金属の強化能が著しい炭素や窒素、酸素などの侵入型合金元素の規則化、また副格子として占有サイトが異なる置換型合金元素との相互作用の効果についても不明な点が多く残されている。

2. 研究の目的

本研究では、鉄結晶をモデル系として、新たに侵入型副格子の元素の規則配置を置換型副格子の元素配置および構造相変態と重畳させて行う挑戦的テーマ「サブラティスエンジニアリング」を提唱し、その設計原理を現象の包括的な理解に基づいて探索することを目的とする。本コンセプトは、リジッドな構造を持たず不規則性が高い固溶体に応用することで、金属を含む結晶性材料における多次元かつ幅広い構造・機能の設計につながると考えられる。

3. 研究の方法

鉄の結晶格子フレームとしてfcc構造（オーステナイト）を選択し、窒素と相互作用が種々異なる置換型元素Xを添加したFe-36Ni高合金にプラズマ窒化による非平衡固溶処理を行い、固溶体中のナノレベルの元素分布を評価した。また、低合金低炭素鋼におけるフェライト変態時の相界面における微量添加元素の偏析と炭素等の主要元素の分配との相関について検討した。熱処理材の組織解析にはX線回折、電子顕微鏡、三次元アトムプローブを用い、ピッカース硬度測定による力学特性の評価、炭素・窒素と置換型元素の相互作用の熱力学検討により、周期性の制御原理の探索を行った。

(a) オーステナイト合金中の窒素の固溶・析出におよぼす置換型元素添加の影響

X-N相互作用とクラスタリング・ナノ析出との相関を解明するため、窒素と相互作用の異なるFe-35Ni-10X(X = V, Cr, Mo, Mn Al)合金に低温窒化処理を施し、高濃度の窒素固溶合金を創製した。Fe-35Ni合金とFe-35Ni-30Cr合金との拡散接合でCr濃度勾配を有する合金を作製し、低温窒化を施すことでCr-Nクラスタリングと表面硬化に及ぼすCr濃度依存性を評価した。

(b) 低炭素鋼のフェライト相界面でのNbおよびCの偏在状態の解明

フェライト中で炭素(C)と引力型相互作用を持つNbを微量添加したFe-0.2C-1.5Mn鋼をオーステナイト化後冷却して恒温保持によりフェライト変態させた試料におけるNbCの相界面析出挙動をナノ組織解析により解明した。

4. 研究成果

Fe-35Ni-10X(X=V, Cr, Mo)合金を低温窒化した際の試料断面の光学顕微鏡組織を図1左に示す。ともにコントラストが均一な層が窒化領域に生成しているが、右の硬度プロファイルおよび窒

素濃度プロファイルより、この領域が高硬度かつ高窒素濃度であることがわかる。この領域は窒素が非平衡に固溶した拡張オーステナイトであるが、その窒素含有量および硬化量は合金元素Xの種類によって異なり、窒素との引力型相互作用が大きいほど、硬化および窒素量が高い。ナノ組織観察より、拡張オーステナイト相中にはX-Nの濃化領域がスピノーダル分解で形成されること、さらに表面側では γ' 構造に対応する規則化が生じることが明らかとなった。図2は、Cr濃度勾配を有するFe-35Ni-Cr合金拡散対の窒化材の組織観察結果である。左下図よりCr濃度の増加に伴いほぼ 1:1 の割合で拡

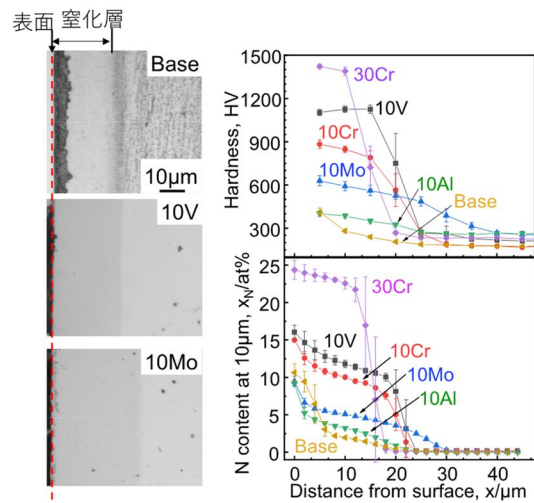


図1 Fe-35Ni-10X 低温窒化材の表面近傍組織(光顕)と、深さ方向の硬さおよび窒素濃度プロファイル。

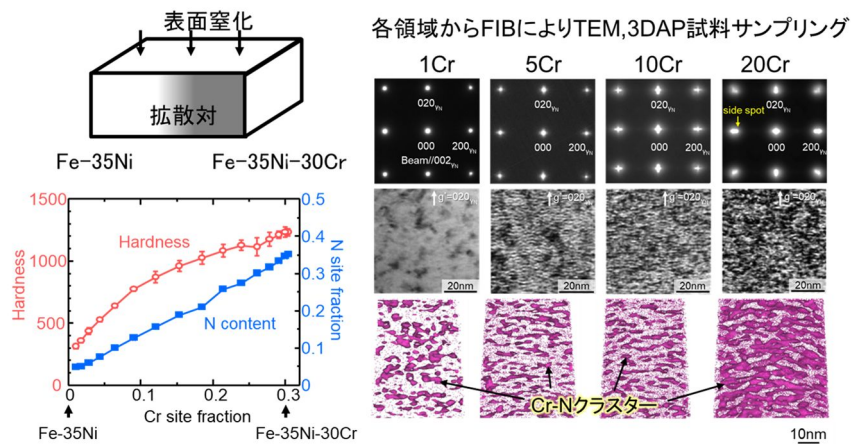


図2 Fe-35Ni-Cr 拡散対の低温窒化を利用した Cr-N クラスタリングに及ぼす Cr 濃度の影響

張オーステナイト中のN含有量が増加している。一方、硬化割合は低Cr側での増加が大きく、Cr量が多くなると増加割合がなだらかになる傾向が見られた。右図はナノ領域のCr-Nクラスタリングの観察結果であるが、Cr量の増加に伴い、スピノーダル分解による回折ストリークと変調構造が見られるようになり、Cr-Nのナノクラスタリングがより密に起こることが示された。

図3は、フェライト変態時の相界面で偏析するNb原子の偏在状態を示す原子マップである。明確なNbC析出は検出できないが、Nbのナノスケールでの偏在が観察される。偏析したNbは相界面近傍でオーステナイト母相側に濃化したCとの間に引力型相互作用を持つことから、相界面では2次元に拘束された規則化/相分離によりNb-Cナノクラスタリングが起こっていると考えられる。

以上より、本研究の結果、侵入型元素と置換型元素との強い引力型相互作用が、副格子間に渡る規則化で元素クラスタリングを誘起し、材料の高強度化に資することが明らかとなった。

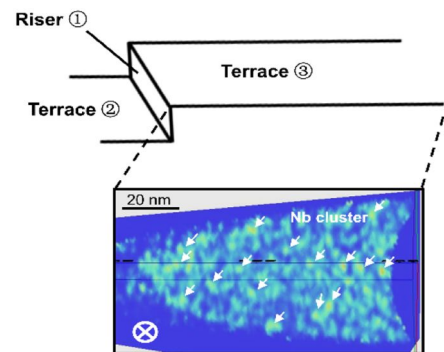


図3 Nb 添加低炭素鋼のフェライト相界面における Nb 偏析を示す 3DAP 原子マップ。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Xie Yulin, Miyamoto Goro, Furuhashi Tadashi	4. 巻 213
2. 論文標題 Nanosized Cr-N clustering in expanded austenite layer of low temperature plasma-nitrided Fe-35Ni-10Cr alloy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 114637 ~ 114637
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scriptamat.2022.114637	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 Xie Yulin, Miyamoto Goro, Furuhashi Tadashi	4. 巻 -
2. 論文標題 High-throughput investigation of Cr-N cluster formation in Fe-35Ni-Cr system during low-temperature nitriding	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 118921 ~ 118921
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2023.118921	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 Dong Haokai, Zhang Yongjie, Miyamoto Goro, Inomoto Masahiro, Zhang Weiwen, Liu Lehua, Chen Hao, Furuhashi 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 Furuhashi 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 Kubo Hironori、Miyamoto Goro、Tagashira Satoshi、Furuhara Tadashi	4. 巻 64
2. 論文標題 Alloying Effects on the Microstructure of Fe-1mass%M Binary Alloys Treated by Austenitic Nitriding and Quenching Treatment	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 226 ~ 234
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2023-260	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、Marusawa Kento、Kudo Kohei、Morooka Satoshi、Harjo Stefanus、Miyamoto Goro、Furuhara Tadashi	4. 巻 64
2. 論文標題 Multi-aspect Characterization of Low-temperature Tempering Behaviors in High-carbon Martensite	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 245 ~ 256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2023-251	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10件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 6件)

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

1. 発表者名 Tadashi Furuahara
2. 発表標題 Interface Engineering in Controlling Microstructure and Property of Steels
3. 学会等名 The 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 古原忠
2. 発表標題 元素クラスタリング・ナノ析出の利用による鉄鋼材料の高強度化設計
3. 学会等名 日本金属学会東海支部 第32回 材料フォーラム TOKAI (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yulin Xie, Goro Miyamoto, Tadashi Furuvara
2. 発表標題 Surface hardening and nano-sized clustering during low temperature nitriding of Fe-35Ni-X (X=Cr, V, Mo, Al) alloys
3. 学会等名 The 7th International Conference on Advanced Steels(ICAS2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yongjie Zhang, Goro Miyamoto, Tadashi Furuvara
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 The 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 宮本吾郎、謝玉麟、古原忠
2. 発表標題 Fe-Ni-X-N(X:Cr,V,Mo,Al)高濃度侵入型合金における規則化と溶質クラスタリング
3. 学会等名 日本金属学会2022年秋期第171回講演大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 謝玉麟, 宮本吾郎, 古原忠
2. 発表標題 低温窒化したFe-35Ni-X MEA合金におけるスピノーダル分解の熱力学的解析
3. 学会等名 日本金属学会2023年春季第172回講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 古原 忠
2. 発表標題 高強度鋼の組織不均一性制御におけるデータ駆動型研究の展望
3. 学会等名 日本金属学会2023年秋季第173回講演大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tadashi Furuohara, Yongjie Zhang, Mitsutaka Sato, Goro Miyamoto
2. 発表標題 Sublattice alloy design for application of solute clustering in high-strength steels
3. 学会等名 Thermec 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tadashi Furuohara, Yulin Xie, Goro Miyamoto
2. 発表標題 High-throughput Approaches for Sublattice Alloy Design of High Performance Nitriding Steels
3. 学会等名 TMS2024 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024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	佐藤 充孝 (Sato Mitsutaka) (10547706)	東北大学・金属材料研究所・助教 (11301)	
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)	

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