

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01676

研究課題名(和文) 構造材料の結晶粒界・転位偏析計算システムの構築と偏析デザインによる組織制御

研究課題名(英文) Development of a computation system for grain boundary and dislocation segregation in structural materials and microstructure control by segregation design

研究代表者

大沼 郁雄(OHNUMA, Ikuo)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・構造材料研究センター・主席研究員

研究者番号：20250714

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：鉄鋼材料をはじめ各種構造材料において、溶質元素や不純物元素の粒界偏析が材料の組織と特性に多大な影響を及ぼすことが知られている。本研究では鉄鋼材料、Cu合金、Al合金の各種構造材料における多種類の偏析元素を対象に、Hillertが提唱した平行接線則に基づく粒界相モデルを拡張し、(1)複合偏析の相互作用効果、(2)結晶粒径、(3)粒界エネルギー、および、(4)粒界偏析の温度依存性を考慮して、CALPHAD法を援用した偏析濃度計算システムを構築し、実験結果と比較してその精度を検証した。また、計算対象とする合金の熱力学データベースの高精度化を目的に、実験による状態図の決定と熱力学解析を併せて実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

粒界偏析が材料の諸特性に及ぼす影響が広く知られているが、複数元素を溶質とする多元系多結晶合金における粒界偏析を定量的に予測する手法の確立には至っていなかった。本研究により構築された『結晶粒界偏析計算システム』により、多元系合金における粒界偏析濃度を定量的に予測することが可能となり、粒界偏析効果を制御する手法が確立された社会的意義は非常に大きい。さらに、結晶粒界への偏析、さらには転位や積層欠陥など他の格子欠陥への溶質元素の偏析計算に展開できれば、析出物の核生成の前駆段階となるクラスター形成の予測と制御にも計算システムが拡張できると考えられ、学術的な展開が期待できる。

研究成果の概要(英文)：It is well known that grain boundary segregation of solute and impurity elements has significant effects on the microstructure and properties of various structural materials, including iron and steel materials. In this study, the grain boundary phase model based on the parallel tangent law proposed by Hillert is extended to cover various types of segregated elements in structural materials such as steel, Cu alloys and Al alloys, taking into account (1) the interaction effect between segregated elements on complex segregation, (2) grain size, (3) grain boundary energy and (4) temperature dependence of grain boundary segregation. The accuracy of the calculation system was verified by comparison with experimental results. In addition, phase diagrams were determined experimentally and thermodynamic analyses were carried out to improve the accuracy of the thermodynamic database of the alloys to be calculated.

研究分野：材料組織学

キーワード：結晶粒界偏析 CALPHAD法 熱力学・拡散データベース 鉄鋼材料 銅合金 アルミニウム合金 格子欠陥 核生成

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

鉄鋼材料中の添加・不純物元素の結晶粒界への偏析について、P や S の粒界偏析に関する旧知の実験データに加え、近年、3D アトムプローブ (3D-AP) による B や C などの偏析濃度の定量測定が実現している⁽¹⁾。更に、第一原理計算を駆使して、既知構造の $\alpha\text{Fe}\Sigma 3(111)$ 対応粒界への各種元素の偏析エネルギーが評価される⁽²⁾ など、最新の実験と計算による粒界偏析の理解が深まりつつある。しかし、粒界偏析予測により鉄鋼材料の組織と特性を制御するためには、粒界の大部分を占めるランダム粒界に加え、小角粒界や対応粒界等の低エネルギー粒界における多種溶質元素の偏析挙動を定量的に予測する必要があるが、現時点では実現していない。一方、Al 合金中の Cu, Mg, Si, Zn, Fe 等、および Cu 合金中の Be, Ni, Si, Cr, Ti, Zr 等の溶質元素の多くが析出硬化を示すと同時に、結晶粒界に偏析する傾向を有することは、粒界や転位等の格子欠陥への偏析が析出物の核形成と成長に関与することを示唆している。従って、本研究課題の目標である『結晶粒界・転位偏析計算システムの構築』は、実用的重要性に加え、従来の古典的核生成理論に、粒界や転位への溶質原子偏析が析出物核のクラスター形成を駆動する新しい核生成の学術的原理を確立し得るものと期待できる。

2. 研究の目的

上述した状況を鑑み、本研究では鉄鋼、Al 基および Cu 基の各種構造材料の多くの成分元素を網羅し、元素間の相互作用が評価された熱力学データベースを CALPHAD (Calculation of Phase Diagrams) 法に適用して、結晶粒径 (粒界の体積分率)、粒界性格 (粒界エネルギー)、および温度依存性 (溶質元素の拡散) を考慮した多成分系の単独および複合偏析計算を可能にする計算システムを構築する。さらに、STEM-EDS により単独・複合偏析濃度を定量測定し、計算システムの精度を検証する。構築した計算システムを駆使して、合金濃度と熱処理温度により最適化した結晶粒界偏析デザインを行い、粒界偏析に起因する構造材料の組織制御と特性設計を実現することを目的とする。

3. 粒界偏析濃度の計算方法と計算結果

α 相の結晶粒内に添加元素 X が濃度 x_X^α で固溶しているとき、結晶粒界 (GB) への X の偏析濃度 x_X^{GB} は、偏析エネルギー $\Delta\varepsilon_X^{\text{GB}}$ を用いる McLean の粒界偏析式、

$$x_X^{\text{GB}} = \frac{x_X^\alpha \exp\left(\frac{\Delta\varepsilon_X^{\text{GB}}}{RT}\right)}{1 + x_X^\alpha \exp\left(\frac{\Delta\varepsilon_X^{\text{GB}}}{RT}\right)} \quad (1)$$

により計算される⁽³⁾。ここで R は気体定数、 T は絶対温度 [K] を表す。例えば Cu における S, Ag, Bi の $\Delta\varepsilon_X^{\text{GB}}$ の値として、-65, -39, -66.2 [kJ/mol] が報告されているが⁽⁴⁾、 $\Delta\varepsilon_X^{\text{GB}}$ の値が評価されている元素が少ないため、McLean の粒界偏析式を用いて計算できる合金系は多くはない。より多くの元素についての粒界偏析濃度を計算するために、自由エネルギー (G) - 組成 (x) 図における平行接線則を用いる粒界相モデルが Hillert により提案されている⁽⁵⁾。この方法では、図 1 (a) に示すようにランダム粒界を 3 原子程度の厚みを有する粒界 (GB) 相と仮定し、その自由エネルギーを G^{GB} と表す。図 1 (c) に示すように α 相の自由エネルギー G^α の結晶粒内濃度 x_X^α の点に引いた接線と平行な直線が、 G^{GB} に接する点の X 濃度 x_X^{GB} が M-X 2 元系が多結晶組織における元素 X の粒界偏析濃度として計算できる。このとき、M と X の化学ポテンシャル (μ) に次式の関係が成り立つ。

$$\mu_M^{\text{GB}} - \mu_M^\alpha = \mu_X^{\text{GB}} - \mu_X^\alpha \quad (2)$$

M-X₁-X₂ 3 元系、あるいはそれ以上の多元系における複数元素の粒界偏析濃度を計算するためには、(2) 式を多元系に拡張した

$$\mu_M^{\text{GB}} - \mu_M^\alpha = \mu_{X_1}^{\text{GB}} - \mu_{X_1}^\alpha = \mu_{X_2}^{\text{GB}} - \mu_{X_2}^\alpha = \dots \quad (3)$$

を満足するような溶質元素の濃度 $x_{X_1}^{\text{GB}}$, $x_{X_2}^{\text{GB}}$, ... を求めれば良い。

上述した計算を行うためには、 α 相 (結晶粒内) と粒界相の自由エネルギーが必要である。本研究では、市販の熱力学データベースを熱力学計算ソフトウェア Thermo-Calc⁽⁶⁾ (version 2024a) に組み込み、アプリケーション・プログラミング・インターフェース (API) TQ-Interface を介して、C 言語で記述したプログラムに自由エネルギーの値を取り込み、粒界偏析濃度を計算した。熱力学データベースには「粒界相」という相は定義されていないので、ランダム粒界の構造に類似する性質を持つと考えられる、液相の自由エネルギーを合金の融点以下の熱処理温度まで外挿し

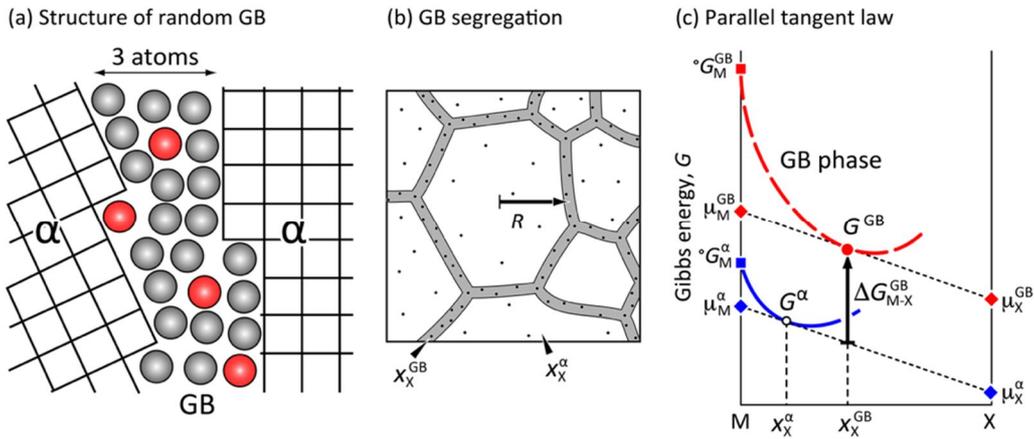


図1 粒界相モデルと Hillert の平行接線則による粒界偏析濃度の計算原理⁽⁵⁾

た値を計算に適用した⁽⁷⁾。

図1(a)と(b)に模式的に示したように、結晶粒界は有限の厚みを持つと考えられ、その体積分率 f^{GB} は結晶粒の平均半径を \bar{R} [m]とすると、

$$f^{GB} = \frac{(1/2) \cdot 4\pi \bar{R}^2 \delta}{(4/3) \cdot \pi \bar{R}^3} = \frac{3\delta}{2\bar{R}} \approx \frac{1.15 \times 10^{-9}}{\bar{R}} \quad (4)$$

の式より見積もることができる。ここで δ はランダム粒界の厚さであり、3原子層程度と仮定した場合、溶媒原子Mの原子半径 r から δ の値が計算できる。各種合金の多結晶組織では、数100 [μm]から数10 [nm]の範囲の平均半径 \bar{R} が報告されており、このとき粒界相の体積分率 f^{GB} は、 10^{-5} から0.1程度の広い範囲で変化するため、 \bar{R} が小さく f^{GB} が大きい条件では、結晶粒内と粒界への溶質原子の分配が無視できなくなる。結晶粒の平均半径 \bar{R} (あるいは粒界相の体積分率 f^{GB})を考慮して粒界偏析濃度を計算するために、溶質元素の質量保存の式

$$f^\alpha(x_X^0 - x_X^{GB}) = f^{GB}(x_X^{fcc} - x_X^0) \quad (5)$$

を満足する条件で、 γ Fe多結晶組織の \bar{R} に依存する溶質原子Bの粒界偏析濃度を計算した結果を図2(a3)と(a4)に示した。ここで x_X^0 は合金中のX濃度である。上述した方法により、 \bar{R} (あるいは f^{GB})を考慮した任意の温度における溶質原子Xの粒界偏析の平衡濃度が計算でき、温度が低下するほどその濃度は大きくなる。しかし、実際には温度が低下するほど、拡散係数(D_X)、熱処理温度(T)と熱処理時間(t)により定まる溶質原子Xの拡散距離(l_X)が短くなる(図2(b1)

(b2)) ために、高温で全てのXについて $\bar{R} < l_X$ (図2(b1))であれば、その温度における平衡偏析が生じるが、低温で $\bar{R} > l_X$ (図2(b2))となるXについては、粒界面から l_X までの範囲内のX原子のみが粒界面まで移動して偏析できる。 γ Fe多結晶組織中の溶質原子(NbとB)の拡散距離の温度依存性を考慮した粒界偏析計算結果を図2(b3)と(b4)に示した。図2(b3)はNbの粒界偏析であり、青線はNbの単独添加、赤線はBとの複合添加によるBの影響を示している。Bの添加により γ Fe結晶粒界へのNbの偏析が大きく増大すること、また、900をピークに温度の低下によってNbの偏析濃度が低下することが予測された。図2(b4)はBの粒界偏析であり、青線はBの単独添加、赤線はNbとの複合添加によるNbの影響を示している。Nbの複合添加によりBの偏析も増大し、900以下のNb偏析の低下に伴いB偏析も一旦低下するが、600に γ Fe中のB拡散に由来する偏析濃度のピークが予測される。これまでの計算では、結晶粒界をランダムな構造を有するランダム粒界(RGB)と仮定し、粒界相の自由エネルギーに液相の自由エネルギーを代用してきたが、実際が多結晶組織においては、小角粒界や対応粒界のような低エネルギー粒界(LEGB)が存在し、粒界偏析濃度に影響を及ぼすことが予測される。粒界エネルギーの影響をモデル化するために、図2(c2)に示したように、 G^{RGB} と G^α の間に次式により表される低エネルギー粒界相の自由エネルギー G^{LEGB} を設けて、粒界エネルギーが偏析濃度におよぼす影響を計算した。

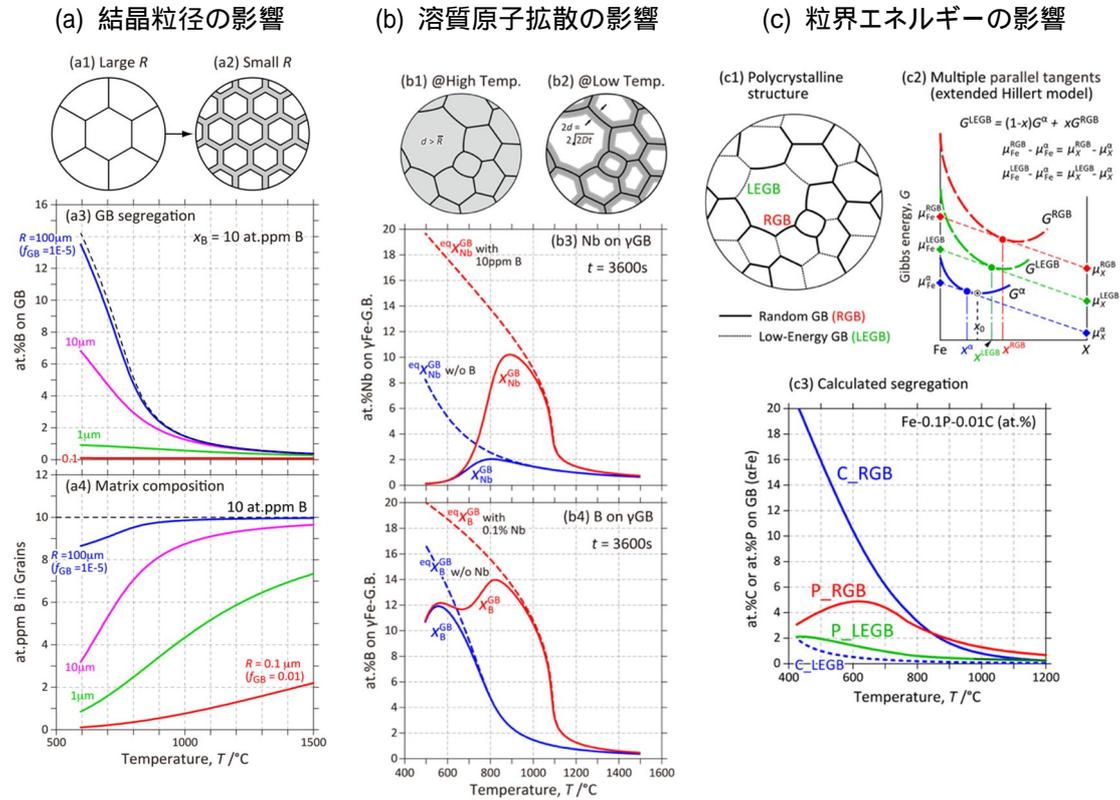


図2 粒界偏析に及ぼす(a) 結晶粒径, (b) 溶質原子の拡散, および (c) 粒界エネルギーの影響

$$G^{LEGB} = (1-x)G^{\alpha} + xG^{RGB} \quad (6)$$

図2 (c3)に Fe-0.1P-0.01C (at.%)合金の α Fe 粒界への P と C の粒界偏析濃度の計算結果を示した。(6)式の x を 0.5 とした場合の低エネルギー粒界上への P と C の偏析がランダム粒界と比較して大きく抑制されることが予測される。

4. 研究成果

本項では一例として「Al-Mg-Si 合金の一段目時効におけるクラスター形成と核生成」に関する研究成果について報告する。

工業的に利用されている析出強化型アルミニウム合金の一種である Al-Mg-Si 系合金 (6000 系合金)におけるクラスター形成に着目する⁽⁸⁻¹¹⁾。Al-Mg-Si 系合金は成形性や耐食性に優れるため自動車用のボディ板材として広く利用されている。その強度の発現には塗装焼付時の時効硬化、すなわちベイクハード (BH) 性の最適化が要求されるが、室温 (RT) に保持 (自然時効) した後人工時効 (BH 処理@443K など) すると十分に時効硬化しない「二段時効の負の効果」が生じてしまう。一方、373K で一段目の時効を行うと、焼入れ後すぐに BH 処理を行う一段時効と比較して二段目の時効硬化が大きくなる「正の効果」が現れる。このような時効硬化の発現メカニズムは、里らにより詳細に調査が進められており⁽⁸⁻¹¹⁾、一段目時効の温度条件によって形成するナノクラスタの制御が正負の効果を左右することが報告されている。図3 (a)に里らが提唱した Al-Mg-Si 合金における二段時効現象のメカニズムを示した。一段目の時効温度が 343K 以下では有害クラスタが形成し、図3 (c)に示したように、二段目の時効後に十分な硬さが得られない。一方、一段目の時効温度を 343K 以上に設定すると有効クラスタが形成し、このクラスタが二段目の時効時に析出強化に寄与する β'' 相に構造遷移して、より大きな時効硬化が発現する。一段目の時効温度の違いによって生成するクラスタが有害になるか有効になるかを左右する要因として、溶質元素である Mg と Si の格子欠陥への偏析の観点から考察する。

前節では結晶粒界への溶質元素偏析の計算方法と計算例を説明したが、結晶粒界以外にも、積層欠陥や転位などの格子欠陥全般に溶質元素が偏析することが 3D-APT (3次元アトムプローブトモグラフィ) などの手法で、近年定量的に確認されている⁽¹²⁾。Takahashi らはフェライト系ステンレス鋼中の転位への Nb の偏析を 3D-APT を用いて詳細に調査した結果、転位芯を中心とする直径 2~3nm の領域に粒界偏析と同程度の Nb が濃化することを明らかにしている⁽¹²⁾。結晶粒界や転位にどの程度の溶質原子が偏析するのか、Al-0.96Mg-0.84Si (mass%) 合金を 270K ~ 650K

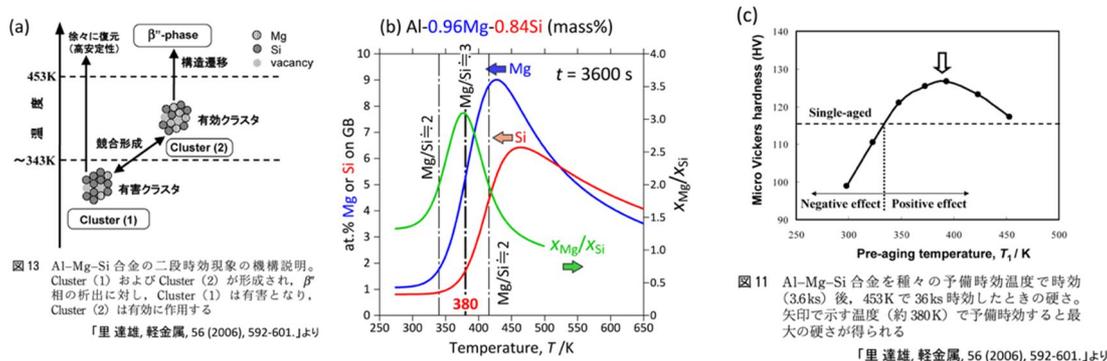


図 3 (a) Al-Mg-Si 合金の二段時効現象機構⁽¹¹⁾, (b) Al-0.96Mg-0.84Si 合金の偏析計算, (c) Al-Mg-Si 合金の時効硬さに及ぼす予備時効温度の影響⁽¹¹⁾.

の範囲で 3600s 熱処理した条件での計算結果を図 3 (b)に示した。計算では fcc-Al 母相中の Mg と Si の拡散距離の温度変化も考慮されており, Si は 455K, Mg は 425K をピークに温度の低下とともに偏析量が大きく減少する。この 30K 程度の温度差は fcc-Al 母相中において Mg の方が Si よりも若干拡散し易いことに起因するが, この違いが格子欠陥への Mg と Si の偏析比に大きな影響をおよぼす。図 3 (b)中の緑の曲線は Mg と Si の偏析比 x_{Mg}/x_{Si} の温度変化を計算した結果であり, 380K で $x_{Mg}/x_{Si} \approx 3$ のピークを示し, その ± 40 K までに $x_{Mg}/x_{Si} \approx 2$ に低下する。この傾向は図 3 (c)の最終硬さの予備時効(一段目)温度依存性にほぼ一致しており, また, 里らは Si-rich クラスタが負の効果をもたらすと報告していることから⁽¹¹⁾, 有害・有効クラスタの形成に格子欠陥への溶質原子の偏析が影響をおよぼしている可能性が示唆される。

格子欠陥への溶質原子の偏析が, クラスタの形成やその先の析出物の核生成に影響をおよぼし, 析出強化型合金の特性制御の指針となれば, 本研究で開発した「格子欠陥偏析計算システム」が「偏析エンジニアリング」の実現に大きく寄与できるものと考えられる。

参考文献

- (1) J.Takahashi, et al., Acta Mater., 133 (2017), 41-54.
- (2) 山口正剛, 日本金属学会誌, 72 (2008), 657-666.
- (3) D. McLean: Grain Boundaries in Metals, Clarendon Press, Oxford, UK (1957), 116.
- (4) P. Lejcek: Grain Boundary Segregation in Metals, Springer, Heidelberg, Germany (2010), 209.
- (5) M. Hillert: Lecture on the theory of phase transformations, (H.I. Aaronson ed.), AIME, New York, (1975), 36.
- (6) J.O. Andersson, T. Helander, L. Höglund, P. Shi, B. Sundman: Calphad, 26 (2002), 273-312.
- (7) H. Ohtani and M. Enoki: CALPHAD XLVII, Querétaro, México, (2018), 108.
- (8) 山田健太郎, 里達雄, 神尾彰彦, 軽金属, 51 (2001), 215-221.
- (9) 里達雄, 軽金属, 56 (2006), 592-601.
- (10) 里達雄, 軽金属, 66 (2016), 433-443.
- (11) 里達雄, までりあ, 56 (2017), 338-345.
- (12) J. Takahashi, K. Kawakami, J. Hamada, K. Kimura, Acta Mater., 107 (2016), 415-422.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

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 -
1. 著者名 Han K., Saito M., Xia J., Ohnuma I., Kainuma R.	4. 巻 919
2. 論文標題 Experimental determination of phase diagram involving silicides in the Fe-Si binary system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Alloys and Compounds	6. 最初と最後の頁 165810 ~ 165810
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jallcom.2022.165810	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 Han Kwangsik, Lee Inho, Ohnuma Ikuo, Kainuma Ryosuke	4. 巻 888
2. 論文標題 Formation and growth behavior of intermetallic compound phases in the interfacial reaction of solid Fe / liquid Zn at 450 °C	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Alloys and Compounds	6. 最初と最後の頁 161562 ~ 161562
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jallcom.2021.161562	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 Ohnuma Ikuo, Han Kwangsik, Lee Inho, Yamashita Takako, Kainuma Ryosuke	4. 巻 45
2. 論文標題 Thermodynamic Evaluation of the Fe-Zn Binary System with Reference to the Latest Experimental Phase Diagram	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Phase Equilibria and Diffusion	6. 最初と最後の頁 In press
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11669-024-01110-1	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 Irooi Kazushige, Ohnuma Ikuo, Xu Xiao, Kainuma Ryosuke, Omori Toshihiro	4. 巻 85
2. 論文標題 Thermodynamic assessment of the Cr-Si binary system	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Calphad	6. 最初と最後の頁 102690 ~ 102690
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.calphad.2024.102690	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 Han K., Sahara R., Abe T., Oikawa K., Ueshima N., Ohnuma I.	4. 巻 965
2. 論文標題 Phase equilibria of the Co-Cr-Mn ternary system at 700	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Alloys and Compounds	6. 最初と最後の頁 171315 ~ 171315
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jallcom.2023.171315	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 Abe Taichi, Han Kwangsik, Goto Yumi, Ohnuma Ikuo, Koyama Toshiyuki	4. 巻 64
2. 論文標題 Stabilization of Equiatomic Solutions Due to High-Entropy Effect	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 877 ~ 884
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-M2022167	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9件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 大沼 郁雄
2. 発表標題 Fe-Zn系合金の状態図と Fe/溶融Znの界面反応
3. 学会等名 日本金属学会第169回講演大会 (JSAE・ISIJ・JIM 合同シンポジウム) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ikuo Ohnuma
2. 発表標題 Extended calculation model of grain boundary segregation and its application to segregation engineering
3. 学会等名 51st International Conference on Computer Coupling of Phase Diagram and Thermochemistry (CALPHAD LI) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 大沼 郁雄
2. 発表標題 CALPHAD法による構造材料の粒界偏析計算と偏析エンジニアリングへの展開
3. 学会等名 日本金属学会・日本鉄鋼協会東海支部特別講演会（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 大沼 郁雄
2. 発表標題 状態図実験と実プロセスへの適用
3. 学会等名 第15回豊田理研ワークショップ
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 江上 真理子
2. 発表標題 Fe-P-Mn合金における粒界偏析の計算熱力学解析
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第187回春季講演大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 村田 祐也
2. 発表標題 STEM-EDS による粒界偏析厚さの測定
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第187回春季講演大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Kwangsik Han
2. 発表標題 Formation behavior of phase in the early stage of solid/liquid interfacial reaction between Fe and molten Zn at 450 °C
3. 学会等名 GALVATECH 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 江上 真理子
2. 発表標題 Fe-P二元系合金におけるP粒界偏析の計算熱力学的検討(粒界偏析の精密測定と定量予測技術の開発-2)
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 村田 祐也
2. 発表標題 STEM-EDSと 因子法による粒界偏析の精密測定(粒界偏析の精密測定と定量予測技術の開発-1)
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

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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