

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04687

研究課題名（和文）溶質原子の粒界偏析予測に基づく材料組織設計指針の提示

研究課題名（英文）Material microstructure design based on prediction of grain boundary segregation of solute atoms

研究代表者

塚田 祐貴（Tsukada, Yuhki）

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00620733

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：計算状態図の熱力学データベースを用いて多成分系合金の粒界組成を予測するプログラムを開発した。複数の多成分系合金について、粒界組成の予測値が文献データ（実験値）と一致することを示した。また、結晶粒径が10 μm以下の場合、粒界組成計算において粒界体積率の影響を考慮する必要があることを示した。32種類のニッケル基超合金の粒界組成を予測し、その結果を説明変数に用いてクリープ強度予測モデルを構築した結果、ホウ素の粒界偏析がニッケル基超合金のクリープ強度の上昇に有効であることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

計算状態図の熱力学データベースを用いて多成分・多相系の粒界組成の温度依存性を計算できることが示された意義は大きく、今後、種々の合金開発での活用が期待される。また、粒界組成の予測結果をクリープ強度予測モデルの説明変数に用いることで、ニッケル基超合金のクリープ強度の発現における粒界偏析の重要度の理解につながった。このアプローチは耐熱鋼をはじめとする他の耐熱材料にも適用可能であり、粒界偏析を考慮したクリープ強度予測、ならびに材料組織設計の実現に寄与すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：A computational code was developed to predict the grain boundary composition of multi-component alloys using a thermodynamic database of calculation of phase diagrams. For several multi-component alloys, the predicted grain boundary compositions were shown to agree with literature data (experimental values). It was also shown that when the grain size is 10 μm or less, it is necessary to consider the effect of the grain boundary volume fraction in the computation of grain boundary composition. The grain boundary compositions of 32 types of nickel-base superalloys were predicted, and the results were used as explanatory variables to construct a creep strength prediction model. As a result, it was revealed that grain boundary segregation of boron is effective in increasing the creep strength of nickel-base superalloys.

研究分野：計算材料組織学

キーワード：粒界偏析 多成分系合金 ニッケル基超合金 オーステナイト系ステンレス鋼 ハイエントロピー合金  
マグネシウム合金 ソリユートドラッグ フェーズフィールド法

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

合金における溶質原子の粒界偏析は材料特性を左右する重要な材料組織因子の一つである。近年、アトムプローブトモグラフィ (APT) により、粒界偏析の詳細な実験データが得られるようになった。粒界偏析の実験データが蓄積されれば、将来的に粒界偏析と材料特性の関係が定量的に明らかになると予想される。一方、粒界偏析を予測する熱力学モデルに粒界相モデルがある。粒界相モデルでは、粒界を薄い“相”とみなしてギブスエネルギーを設定する。粒界相の組成 (粒界偏析) は、結晶粒相と粒界相の化学ポテンシャルを計算し、Hillert の平行接線則 (二成分系の場合) を満たすように計算される<sup>1)</sup>。化学ポテンシャルは計算状態図の熱力学データベースを用いて温度・組成の関数として計算することができる。多成分系合金についても同様のアプローチで粒界偏析の予測が可能と思われるが、必要な計算量が多くなるため前例が無く、「粒界相モデルに基づく多成分系合金の粒界偏析予測の実現性と妥当性」、さらに、「実用合金の粒界偏析と材料特性の関係」は明らかになっていない。

### 2. 研究の目的

本研究では、計算状態図 (CALPHAD)<sup>2)</sup>の熱力学データベースを用いて、Hillert の粒界相モデルに基づく多成分系合金の粒界組成予測プログラムを開発する。多成分系合金の粒界組成の予測値を文献データ (実験値) と比較し、予測結果の妥当性を評価する。また、ニッケル基超合金について、析出強化相の体積率、母相組成、粒界組成とクリープ強度の関係を機械学習モデルにより回帰し、クリープ強度の発現における粒界偏析の重要度を数値化する。最終的に、粒界偏析を考慮した材料組織設計指針を示すことを目的とする。

### 3. 研究の方法

(1) 多結晶組織の粒界を薄い相とみなしてギブスエネルギーを設定する粒界相モデルに基づき、多成分系合金における粒界組成予測プログラムを開発した。粒界相の組成は、粒界相の体積が一定の条件の下で結晶粒相 (主相) と粒界相の二相組織のギブスエネルギーが最小となる条件を探索することで求めた。ランダム粒界の組成を解析対象とし、粒界相のギブスエネルギーとして液相のギブスエネルギーを代用した。主相および液相のギブスエネルギーは、CALPHAD の熱力学データベースを用いて温度・組成の関数として計算した。

(2) 760°Cにおける 1000 h クリープ破断強度データが入手可能な 32 種類のニッケル基超合金について、上記 (1) で開発したプログラムを用いて 760°Cにおける粒界組成を予測した。公開されているデータベース、専門書、学術雑誌論文からクリープ破断強度データを収集し、母相組成 (主相  $\gamma$  の組成)、粒界組成、析出強化相 ( $\gamma'$  相と炭化物相) の体積率、積層欠陥エネルギー、クリープ破断強度の相関を解析した。さらに、 $\gamma$  相組成、粒界組成、析出強化相の体積率を説明変数、クリープ破断強度を目的変数として LASSO 回帰を行い、クリープ破断強度予測モデルを構築した。

(3) 粒界に溶質原子が偏析すると、粒界移動の際に偏析原子を引きずるため、粒界移動速度が低下する (ソリュートドラッグ効果)。フェーズフィールド法により、一定速度で移動する粒界近傍における溶質元素の定常濃度プロファイルを解析し、移動粒界に働くドラッグ力を計算するプログラムを開発した。結晶粒相と粒界相のギブスエネルギー計算には、CALPHAD の熱力学データベースを用いた。ランダム粒界の組成を解析対象とし、粒界相のギブスエネルギーとして液相のギブスエネルギーを代用した。

### 4. 研究成果

(1) CALPHAD データベース TTNi8 を用いて Ni 基超合金 Inconel617B の粒界組成を予測した。平衡相分率の温度依存性を図 1(a) に示す。母相  $\gamma$  (fcc 固溶体) 以外の主要な構成相は、 $\gamma'$  -Ni<sub>3</sub>Al、 $\mu$  (Topologically

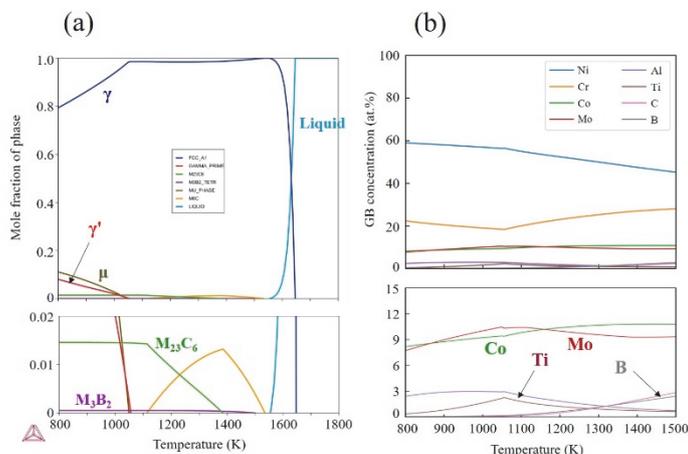


図 1 Ni 基超合金 Inconel617B に対する計算結果<sup>3)</sup>: (a) 平衡相分率の温度依存性, (b) 粒界組成の温度依存性. 下図は上図の縦軸を拡大したものである。

Close Packed (TCP)相と呼ばれる有害相の一つ)、 $M_{23}C_6$ 、および $M_3B_2$ である。図1(a)に現れる平衡相をすべて考慮して計算した粒界組成の温度依存性を図1(b)に示す<sup>3)</sup>。1500 K以下の温度域で温度低下とともにBの粒界濃度が減少するが、これはBが $M_3B_2$ に分配して $\gamma$ 相のB濃度が減少することによる。同様に、1050 K以下の温度域で温度低下とともにCo、Mo、Tiの粒界濃度が減少するが、これはCo、Moが $\mu$ 相、Tiが $\gamma'$ 相にそれぞれ分配し、 $\gamma$ 相のCo、Mo、Tiの濃度が減少するためである。このように、多成分・多相系の相平衡を考慮して粒界組成の温度依存性を解析できることが、CALPHADデータベースを用いた粒界組成計算の大きな利点である。

$\gamma$ 単相多結晶を想定して計算したInconel617Bの粒界組成の温度依存性を図2に示す。すべての平衡相を考慮した計算結果(図1(b))とは対照的に、温度低下とともにMo、Bの粒界濃度が顕著に高くなる。1450 Kにおける溶質元素の粒界濃度の計算値を図3(a)に示す。Cr、Mo、B、Cの粒界濃度は合金濃度(図中のひし形記号)より高く、これらの元素が粒界に偏析することがわかる。図中の丸記号は、過去にAPTで取得された実験データ<sup>4)</sup>であり、1450 Kで均質化処理したInconel617Bの粒界濃度を示している。粒界組成計算でCr、Mo、B、Cの偏析傾向が予測されているものの、偏析元素の粒界濃度の計算値と実験値の差が大きい。ここで、1100 Kにおける溶質元素の粒界濃度の計算値を図3(b)に示す。なお、図中の丸記号は1450 Kで均質化処理した試料の実験データである点に留意されたい。Mo、Bの粒界濃度の計算値(1100 K)と実験値がよく一致している。この結果は、1450 Kの均質化処理後の水冷過程で粒界組成が変化しており、結果的に1100 K付近の粒界組成が低温まで凍結されたことを示唆している。Cr、Mo、B、Cは $M_{23}(B,C)_6$ の構成元素であることから、これらの元素の粒界偏析が $M_{23}(B,C)_6$ の粒界析出を誘起する可能性が高い。実際に均質化処理後の水冷過程において粒界に薄いフィルム状の炭化物が析出している可能性が指摘されている<sup>4)</sup>。Hillertの粒界相モデルとCALPHADデータベースを用いた粒界組成予測が粒界偏析制御、および粒界析出制御に有用であることを示唆する結果である。

(2) CALPHADデータベースTCFE11を用いて316Lオーステナイト系ステンレス鋼の粒界組成を予測した。 $\gamma$ (fcc固溶体)単相多結晶を想定して計算した粒界組成の温度依存性を図4(a)に示す<sup>3)</sup>。温度低下とともにPの粒界濃度が増加している。1316 Kにおける溶質元素の粒界濃度の計算値を図4(b)に示す<sup>3)</sup>。図中の丸記号は過去にAPTで取得された実験データ<sup>5)</sup>であり、1316 Kで溶体化処理した316L鋼の粒界濃度を示している。Mo、P、B、Cの偏析傾向を計算で予測することができている。偏析元素Mo、P、B、Cの粒界濃度の計算値はMo: 1.96 at.%, P: 2.11 at.%, B: 0.17 at.%, C: 0.21 at.%であり、偏析比(粒界濃度と合金濃度の比)はMo: 1.6、P: 42、B: 340、C: 5.3と計算される。この結果は偏析元素の中でBの偏析比が突出して高いという報告<sup>5)</sup>と一致する。

以上の計算では、粒界相の体積率は無視できるほど小さいとみなしたが、粒界相の体積率は結晶粒径の減少とともに増加する。316L鋼の粒界組成計算において、結晶粒径と粒界組成の関係を検討した結果、結晶粒径300  $\mu\text{m}$ の条件での粒界組成は粒界体積率が無視できるほど小さいと考えた場合の粒界組成とほぼ等しくなったが、結晶粒径3~6  $\mu\text{m}$ の条件ではMo、B、Pの粒界組成がわずかに減少し、結晶粒径1  $\mu\text{m}$ の条件ではB、Pの粒界組成が大きく減少した<sup>3)</sup>。この結果は、結晶粒径10  $\mu\text{m}$ 以下の条件では、粒界組成計算において粒界体積率の影響を考慮する必要があることを示唆している。

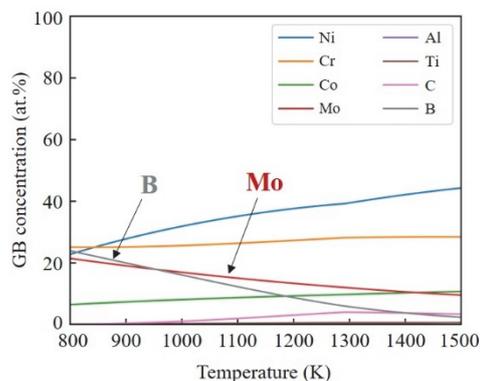


図2 Ni基超合金Inconel617Bにおける粒界組成の温度依存性の計算結果<sup>3)</sup>。

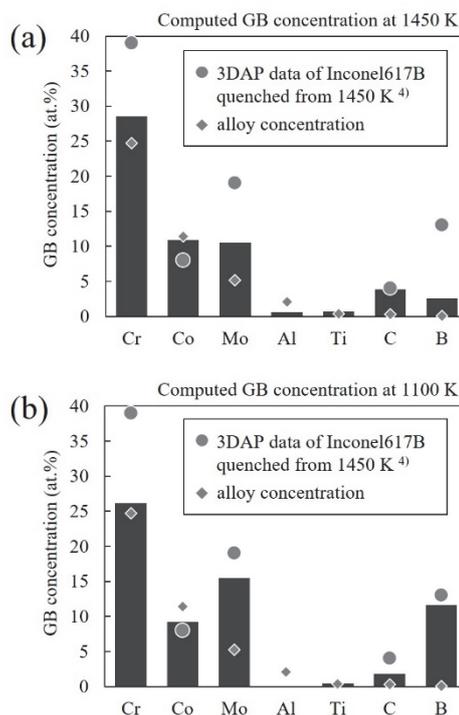


図3 Ni基超合金Inconel617Bにおける溶質元素の粒界濃度の計算結果<sup>3)</sup>: (a)1450 K, (b)1100 K. 図中の丸記号は1450 Kで均質化処理後の粒界濃度(APTデータ)<sup>4)</sup>であり、ひし形記号は合金濃度である。

(3) CALPHAD データベース TTNI8 を用いて、32 種類のニッケル基超合金の 760°C における粒界組成を予測した。多くの合金において B と Mo の粒界濃度が  $\gamma$  相濃度より高くなり、また、いくつかの合金においては Cr の粒界濃度が  $\gamma$  相濃度より高くなった<sup>6)</sup>。粒界組成の計算結果を用いて、760°C における  $\gamma$  相組成、粒界組成、析出強化相の体積率、積層欠陥エネルギー、1000 h クリープ破断強度の相関を解析した。Co、Mo、Ti、Fe の粒界濃度はそれぞれの  $\gamma$  相濃度との間に強い正の相関関係が認められた。また、Mo と B の粒界濃度の間に正の相関関係が認められ、Mo と B が共偏析する傾向があることが示唆された<sup>6)</sup>。クリープ破断強度は、析出強化相の体積率との間に強い正の相関関係、積層欠陥エネルギーとの間に強い負の相関関係がそれぞれ認められた。また、クリープ破断強度と Cr、Co の  $\gamma$  相濃度との間に正の相関関係が認められた。一方、粒界強化元素である B、C、Zr の粒界濃度とクリープ破断強度との間に明確な相関関係は認められなかった。

$\gamma$  相組成、粒界組成、析出強化相の体積率を説明変数、クリープ破断強度を目的変数として LASSO 回帰を行った。クリープ破断強度の予測結果を図 5(a) に示す。横軸と縦軸はそれぞれクリープ破断強度の実験値と予測値を示しており、予測誤差 (二乗平均平方根誤差) は 26.40 MPa であった。LASSO で選択された説明変数の回帰係数の値を図 5(b) に示す。強化相の体積率 (sqrt\_f) の回帰係数が最も大きな正の値を示した。また、Cr、Co、Mo の  $\gamma$  相濃度 (Cr\_ $\gamma$ 、Co\_ $\gamma$ 、Mo\_ $\gamma$ ) の回帰係数も正の値を示した。これらの元素は固溶強化、および積層欠陥エネルギーの低下に有効であることが知られている。さらに、B の粒界濃度 (B\_GB) の回帰係数が正の値を示しており、B の粒界偏析がクリープ破断強度の上昇に有効であることが示された。

以上のように、CALPHAD データベースを用いて粒界組成を予測し、その結果をクリープ強度予測モデルの説明変数に用いることで、クリープ強度の発現における粒界偏析の重要度を数値化して理解することができる。このアプローチは耐熱鋼をはじめとする他の耐熱材料にも適用可能であり、粒界偏析を考慮したクリープ強度予測、ならびに材料組織設計の実現に寄与すると考えられる。

(4) フェーズフィールド法と CALPHAD データベース TCMG6 を用いて、マグネシウム合金の移動粒界近傍の溶質元素の定常濃度プロファイルを解析し、粒界に働くドラッグ力を計算した。Mg-Zn-Ca 系の解析により、溶質元素の Zn と Ca は粒界偏析を相互に助長し、ソリュートドラッグ効果を高めることが明らかとなった<sup>7)</sup>。一方、Mg-Al-Zn 系の解析により、Al と Zn は粒界偏析を相互に抑制し、ソリュートドラッグ効果を弱めることが明らかとなった<sup>7)</sup>。圧延・熱処理した Mg 板材は六方晶の c 軸が板厚方向に配向した底面集合組織が形成されるが、Mg-Zn-Ca 系合金は底面集合組織強度が低く、良好な室温成形性を示すことが報告されている<sup>8)</sup>。上述の解析結果を踏まえると、粒界に Zn と Ca が共偏析することで粒界移動が抑制され、それが集合組織形成の抑制につながっていると解釈

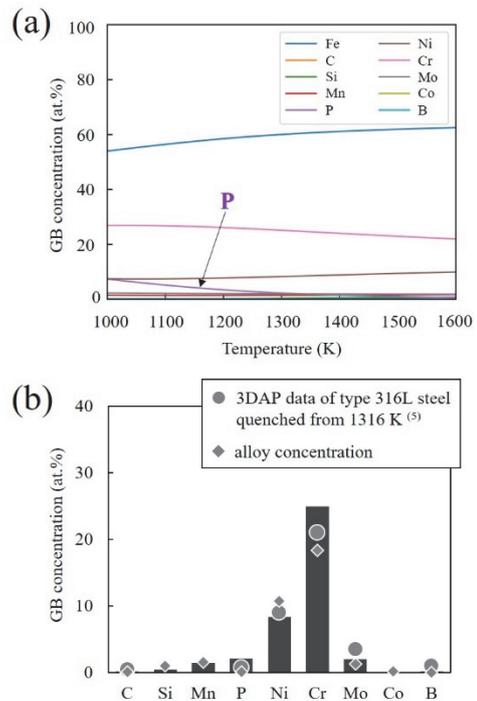


図4 オーステナイト系 316L ステンレス鋼に対する計算結果<sup>3)</sup>: (a)粒界組成の温度依存性, (b)1316 K における溶質元素の粒界濃度. (b)の図中の丸印は 1316 K で溶体化処理後の粒界濃度 (APT データ)<sup>5)</sup>であり, ひし形記号は合金濃度である.

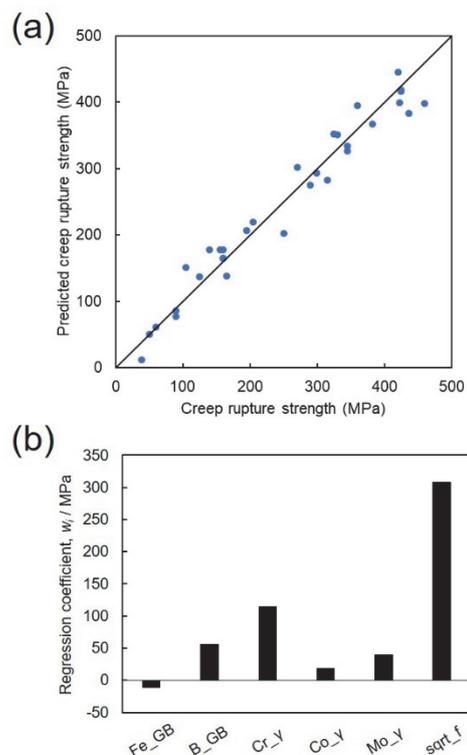


図5 ニッケル基超合金の材料組織とクリープ破断強度の LASSO 回帰結果<sup>6)</sup>: (a)760°C における 1000 h クリープ破断強度の予測結果, (b)LASSO で選択された説明変数の回帰係数の値.

することができる。

Hillert の粒界相モデルと CALPHAD データベースを用いることで、多成分系合金における種々の溶質元素の粒界偏析を予測し、組成設計につなげることができる。Mg-Cu-Ca 系について粒界組成の合金組成依存性を解析すると、0.1 wt.%以下の Cu および Ca の共添加によりこれらの元素が粒界に共偏析することが明らかとなった<sup>9)</sup>。Cu および Ca が粒界に共偏析すると、集合組織強度の低下および結晶粒径の減少につながる。このような粒界偏析予測を合金組成設計に活用することで、優れた室温成形性・放熱性・耐食性を示す Mg 合金が開発された<sup>9)</sup>。

#### <引用文献>

- 1) M. Hillert: Applications of Gibbs energy-composition diagrams, in Lectures on the theory of phase transformations, 2nd edition, ed. by H. I. Aaronson, TMS, Warrendale, (1999).
- 2) N. Saunders, A. P. Miodownik: Calphad, a comprehensive guide, Pergamon, Oxford, (1998).
- 3) M. Funamoto, Y. Matsuoka, Y. Tsukada, T. Koyama: Prediction of grain boundary chemistry in multicomponent alloys, Sci. Technol. Adv. Mater. Meth., **2** (2022), 322-333.
- 4) D. Tytko, P. P. Choi, J. Klöwer, A. Kostka, G. Inden, D. Raabe: Microstructural evolution of a Ni-based superalloy (617B) at 700° C studied by electron microscopy and atom probe tomography, Acta Mater., **60** (2012), 1731-1740.
- 5) M. Tomozawa, Y. Miyahara, K. Kako: Solute segregation on  $\Sigma$ 3 and random grain boundaries in type 316L stainless steel, Mater. Sci. Eng. A, **578** (2013), 167-173.
- 6) H. Uruchida, Y. Tsukada, Y. Matsuoka, T. Koyama: Computational approach to grain boundary segregation engineering of nickel-base superalloys, Sci. Rep., accepted.
- 7) Y. Matsuoka, M. Bian, Y. Tsukada, Y. Chino, T. Koyama: CALPHAD-linked analysis of grain boundary segregation and phase-field simulation of solute-drag effect in multicomponent magnesium alloys, Comput. Mater. Sci., **234** (2024), 112796.
- 8) Y. Chino, X. Huang, K. Suzuki, M. Mabuchi: Enhancement of stretch formability at room temperature by addition of Ca in Mg-Zn alloy, Mater. Trans., **51** (2010), 818-821.
- 9) M. Bian, I. Nakatsugawa, Y. Matsuoka, X. Huang, Y. Tsukada, T. Koyama, Y. Chino: Improving the mechanical and corrosion properties of pure magnesium by parts-per-million-level alloying, Acta Mater., **241** (2022), 118393.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7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 6件）

1. 著者名 Haruna Uruchida, Yuhki Tsukada, Yusuke Matsuoka, Toshiyuki Koyama	4. 巻 -
2. 論文標題 Computational approach to grain boundary segregation engineering of nickel-base superalloys	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
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 Yusuke Matsuoka, Mingzhe Bian, Yuhki Tsukada, Yasumasa Chino, Toshiyuki Koyama	4. 巻 234
2. 論文標題 CALPHAD-linked analysis of grain boundary segregation and phase-field simulation of solute-drag effect in multicomponent magnesium alloys	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Computational Materials Science	6. 最初と最後の頁 112796
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.commat.2024.112796	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 塚田祐貴, 松岡佑亮, 小山敏幸	4. 巻 62
2. 論文標題 多成分系合金の粒界偏析計算と組成設計への応用	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 まてりあ	6. 最初と最後の頁 673-679
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/materia.62.673	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 Mingzhe Bian, Yusuke Matsuoka, Xincheng Huang, Yuya Ishiguro, Yuhki Tsukada, Toshiyuki Koyama, Yasumasa Chino	4. 巻 254
2. 論文標題 Insights into the microstructures and mechanical properties of magnesium-calcium-transition elements: a combined experimental and simulation study	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 118958
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2023.118958	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 松岡佑亮, 塚田祐貴, 小山敏幸	4. 巻 64
2. 論文標題 多成分系合金の粒界偏析予測	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本学術振興会耐熱金属材料第123委員会研究報告	6. 最初と最後の頁 39-45
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 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 Mingzhe Bian, Isao Nakatsugawa, Yusuke Matsuoka, Xinsheng Huang, Yuhki Tsukada, Toshiyuki Koyama, Yasumasa Chino	4. 巻 241
2. 論文標題 Improving the mechanical and corrosion properties of pure magnesium by parts-per-million-level alloying	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 118393
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2022.118393	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 Masataka Funamoto, Yusuke Matsuoka, Yuhki Tsukada, Toshiyuki Koyama	4. 巻 2
2. 論文標題 Prediction of grain boundary chemistry in multicomponent alloys	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science and Technology of Advanced Materials: Methods	6. 最初と最後の頁 322-333
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/27660400.2022.2112915	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8件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Yuhki Tsukada
2. 発表標題 Grain boundary segregation and creep rupture strength of high-temperature materials
3. 学会等名 NIMS Award Symposium 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 穂田春菜, 塚田祐貴, 小山敏幸
2. 発表標題 粒界偏析計算を活用したNi基超合金のクリーブ破断強度予測
3. 学会等名 日本金属学会2023年秋期講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 林けい, 塚田祐貴, 小山敏幸
2. 発表標題 熱力学計算で得られる粒界組成と316ステンレス鋼の降伏強度の関係
3. 学会等名 日本金属学会2023年秋期講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuhki Tsukada, Yusuke Matsuoka, Toshiyuki Koyama
2. 発表標題 Computational approach for predicting grain boundary chemistry and its application to alloy design
3. 学会等名 Thermec'2023 (International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 塚田祐貴, 舟本将崇, 松岡佑亮, 小山敏幸
2. 発表標題 CALPHADデータベースを活用した多成分系合金の粒界偏析予測
3. 学会等名 日本金属学会2022年秋期講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yusuke Matsuoka, Yuhki Tsukada, Yasumasa Chino, Toshiyuki Koyama
2. 発表標題 Phase-field simulation of solute segregation to moving grain boundary in multicomponent system
3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松岡佑亮, 舟本将崇, 塚田祐貴, 小山敏幸
2. 発表標題 多成分系 Ni基耐熱合金の粒界偏析における構成元素間の関係
3. 学会等名 日本金属学会2022年春季講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 塚田祐貴, 舟本将崇, 松岡佑亮, 小山敏幸
2. 発表標題 粒界相モデルに基づく多成分系合金の粒界偏析予測
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第183回春季講演大会シンポジウム「高温材料の高強度化」
4. 発表年 2022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
---------	---------