

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01735

研究課題名（和文）界面制御による共晶単結晶超耐熱構造材料の高強度・高靱性化法の確立

研究課題名（英文）Interface tailoring of eutectic composites for ultra-high temperature structural applications

研究代表者

岸田 恭輔 (Kishida, Kyosuke)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20354178

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）：構造材料において一般にトレードオフ関係にある「強度」と「延性・靱性」を両立するための新しい方策として、共晶単結晶材料中の異相界面を活用した強度と靱性の同時向上機構モデルを提案し、そのモデルの検証ならびに適用可能条件の解明を目的とした基礎研究を行った。その結果、MoSi₂/Mo₅Si₃共晶合金系においてモデルの有効性を確認するとともに、他の合金系の調査からモデルの適用可能範囲について、さらに単結晶マイクロ機械試験により共晶合金の構成相の基礎力学特性に関する様々な知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により脆性的な複数の構成相からなる超耐熱共晶合金の異相界面特性制御と組織微細さの制御により、高い高温強度特性と高い破壊靱性値の同時賦与が可能であることを明らかにしたとともに、これまで十分に解明されていなかった超高融点金属間化合物材料の塑性変形の基礎を明らかにしたことは学術的に非常に意義がある。また得られた成果は新規超高融点材料の実用化に向けた基礎としても重要であり、将来的な発電用ガスタービンをはじめとする熱機関の熱効率の向上と、それによる化石燃料の消費量ならびに温室効果ガスの排出量削減に大きく寄与することが期待されるため、社会的意義も高い。

研究成果の概要（英文）：We have recently found a possibility to endow a new class of ultra-high temperature structural materials with high strength and high toughness simultaneously by utilizing interphase boundaries in directionally solidified in-situ eutectic composites. In the present study, we have systematically investigated microstructure - mechanical property relationship in various transition-metal silicide based eutectic composites in order to verify the strategy and to clarify the requirement for applying the strategy. In addition, deformation behaviors of various transition-metal silicides have been investigated by mechanical tests of micrometer-sized single crystals to elucidate the deformation mechanism of the component phases in the eutectic composites.

研究分野：金属物性

キーワード：界面特性制御 共晶複相材料 構造・機能材料 力学特性

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

構造材料において一般に「強度」と「延性・靱性」はトレードオフ関係にあるため、「高強度」と「高延性・靱性」を兼ね備える構造材料の実現はすべての構造材料研究者が目指す究極の目標である。発電用ガスタービンやジェットエンジンに用いられる高温耐熱構造材料の分野では、ガスタービンの燃焼温度の上昇がシステム全体の熱効率の大幅向上に有効であるため、現在用いられている Ni 基超合金の耐用温度をはるかに上回る新規超耐熱材料の開発が急務である。高温強度特性を優先して考えた場合、セラミックス基や金属間化合物基材料において本質的な問題となる弱い結晶粒界のない材料、究極には単結晶材料が有利であり、一方向凝固による単結晶化が可能な種々の共晶材料が注目され、実際に優れた高温強度を有するものも多く見出されてきた。しかしながら、これらの候補もやはり破壊靱性が乏しいこと、大型部材化が困難等といった理由のため実用化には至っていない。

研究代表者は近年、新規超耐熱材料の候補の一つである MoSi_2 (融点 2020°C , Brittle ではあるが、条件により室温以下でも転位運動可) を基軸材料とし、Brittle な金属間化合物相 Mo_5Si_3 を第二相として含有する Brittle/Brittle 共晶単結晶合金の実用化を目指した研究を行ってきた。これまでに異相界面強度の低下に伴いと破壊靱性値が向上する傾向を見出すとともに、格子ミスフィットと界面偏析の制御により異相界面強度を制御できること、さらに異相界面強度の制御と組織微細化を組み合わせることにより高温強度特性と破壊靱性値が同時に向上する可能性があることを独自に見出したが、その高強度化・高靱性化の同時発現機構モデルの検証、適用可能範囲・条件の解明については不十分であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は $\text{MoSi}_2/\text{Mo}_5\text{Si}_3$ 共晶単結晶合金において見出した高強度化・高靱性化の同時発現機構モデルの妥当性と有効性(適用可能範囲・条件)について実験研究を中心に検証することである。これまでに多くの複相一方向凝固複相材料が研究されてきたが、異相界面強度特性を合金元素添加により意図的に変化させることを通じて強度・靱性の制御を試みた例は存在せず、学術的独自性・創造性が高い。また本研究ではマクロな力学特性評価、通常の走査電子顕微鏡法(SEM)や透過電子顕微鏡法(TEM)による変形組織観察といった一般的な解析手法だけでなく、走査透過電子顕微鏡(STEM)法を駆使した原子スケールでの異相界面構造解析、マイクロ機械試験による構成相や異相界面の力学特性評価といった最先端の解析手法を駆使することにより異相界面の構造と強度特性に及ぼす添加元素の効果を原子スケールからバルクスケールまでマルチスケールで徹底的に調査し、共晶単結晶合金の高強度化・高靱性化の同時発現機構モデルの検証、適用可能範囲・条件の解明を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 第3,4元素添加 C11b型 $\text{MoSi}_2/\text{D8}_m$ 型 Mo_5Si_3 共晶単結晶合金の微細組織と力学特性

様々な第3,第4元素を添加した $\text{MoSi}_2/\text{Mo}_5\text{Si}_3$ 共晶合金母材を、光学式浮遊帯域溶融装置を用いて種々の結晶育成条件で一方向凝固することにより単結晶状試料を得た。得られた試料中の構成相間の結晶方位関係、界面微細構造を詳細にキャラクタライズするとともに、破壊特性および高温強度特性を評価し、第3,4元素添加による格子ミスフィット、異相界面偏析、組織微細さと力学特性の相関について調査した。

(2) C40型 $(\text{Nb},\text{Mo})\text{Si}_2/\text{D8}_m$ 型 $(\text{Nb},\text{Mo})_5\text{Si}_3$ 共晶単結晶合金の微細組織と力学特性

Nb-Mo-Si 三元系合金系において C40型 $(\text{Nb},\text{Mo})\text{Si}_2/\text{D8}_m$ 型 $(\text{Nb},\text{Mo})_5\text{Si}_3$ 共晶組織が得られる組成範囲を決定したのち、様々な Mo 置換比($x = \text{Mo}/(\text{Nb}+\text{Mo})$)を有する Nb-Mo-Si 三元系 C40/ D8_m 共晶一方向凝固合金を光学式浮遊帯域溶融法で作製した。得られた単結晶状試料について、構成相間の結晶方位関係、界面微細構造を詳細にキャラクタライズするとともに、破壊特性および高温強度特性を評価し、第3,4元素添加による格子ミスフィット、異相界面偏析、組織微細さと力学特性の相関について調査した。

(3) 遷移金属シリサイドのマイクロピラー圧縮変形

研究候補としている様々な共晶材料の構成相である各種遷移金属シリサイドについて、単結晶マイクロピラー圧縮試験を行うことで、それらの基礎力学特性(活動すべり系およびそれらの活動のための臨界分解せん断応力)の実験的評価ならびに変形組織の観察を行うとともに、第一原理計算による各すべり系に対する一般化積層欠陥エネルギーの理論計算を行った。

4. 研究成果

(1) 第3,4元素添加 C11b型 $\text{MoSi}_2/\text{D8}_m$ 型 Mo_5Si_3 共晶単結晶合金の微細組織と力学特性

異相界面の強度特性制御による強靱化のためには、組織の均質微細化が有効であると考えられる。一般に共晶合金の組織微細化のためには一方向凝固の際の凝固速度を早くすることが有効であるが、 $\text{MoSi}_2/\text{Mo}_5\text{Si}_3$ 共晶合金の場合凝固速度を一定以上速くすると均質な単結晶状共晶凝

固から不均質なセル状共晶凝固へと組織が変化する傾向が観察された。セル状凝固組織は、微細なスクリプトラメラ型整列共晶組織からなるセル中央部が粗大な共晶組織からなるセル周縁部で包囲された不均一な組織であり、高温強度特性の観点からは好ましくないことがこれまでの二元系合金の研究によりわかっており、セル状凝固組織の形成は避ける必要がある。しかしながらこのような共晶組織の凝固速度の上昇に伴う組織の不均一化の傾向は特に第3, 4元素を添加した合金において顕著となることが明らかとなった(図1上段)。このような問題を解決するためには、一方向凝固共晶組織に影響を及ぼすもう一つの要因である固液界面における温度勾配を上昇させることが有効であると考え、その実現のため、現有のハロゲンランプ熱源型光学式浮遊帯域熔融(FZ)装置に加えて、従来装置よりも集光度および熱源温度が高いキセノンランプ熱源型FZ装置を本研究予算により新たに導入し、一方向凝固試験を行った。その結果、従来装置では均質微細化が困難であった第3, 4元素添加合金において従来よりも均質微細なスクリプトラメラ型共晶組織を持つ試料の育成に成功した(図1下段)。得られた組織の平均ラメラ間隔 λ と成長速度 R の間にはおよそ $\lambda^2 R = \text{一定}$ (Jackson-Huntの関係)が成立し、特に第3, 4元素添加合金において成長速度の上昇が組織微細化に極めて有効であることを確認した(図2)。

均質微細組織を有する高Ta添加材およびTa,B複合添加材の1400°Cにおける降伏応力を評価したところ、いずれも凝固速度の上昇に伴う平均ラメラ間隔の減少(=組織微細化)に対応して上昇する傾向を示した(図3)。また組織微細化に伴う強度上昇の度合いは合金系によって異なり、Ta,B複合添加材の方がより強い傾向を示すことがわかった。さらに高Ta添加材およびTa,B複合添加材のいずれも組織微細化(凝固速度の上昇)に伴い破壊靱性値が向上することも確認しており、格子ミスフィットの制御と組織均質微細化による強靱化機構の有効性を確認できた。

また、二元系 $\text{MoSi}_2/\text{Mo}_5\text{Si}_3$ 共晶合金についてレーザービームを用いた試料の表面熔融凝固試験を行い、熔融条件と組織微細さの相関について調査を行った。その結果、ある一定の熔融条件で得た熔融凝固部では、基板結晶と同じ結晶方位を引き継ぐ超微細ラビリンス組織を形成されること(図4)、また熔融凝固部のヴィッカーズ硬度、破壊靱性値は通常の一方向凝固法で作製した二元系ラビリンス合金単結晶のものと比較して、それぞれ約38%、約34%向上していることを確認した。これらの結果から $\text{MoSi}_2/\text{Mo}_5\text{Si}_3$ 共晶合金をはじめとする高融点共晶合金の構造体作製法として積層造形法が非常に有効であることが示唆された。

(2) C40型(Nb,Mo) $\text{Si}_2/\text{D8}_m$ 型(Nb,Mo) Si_3 共晶単結晶合金の微細組織と力学特性

様々な組成を有するNb-Mo-Si三元系合金の多結晶アークメルト材を作製し、微細組織観察、構成相の同定、構成相の格子定数および組成の評価を系統的に行い、一方向凝固による単結晶状

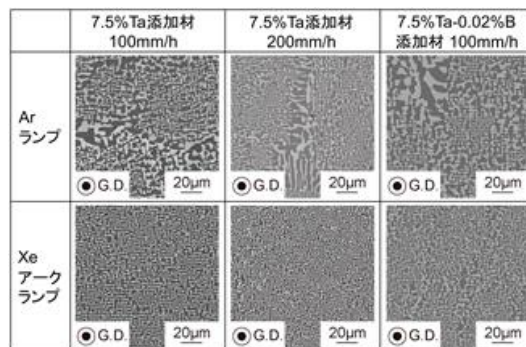


図1. Ta添加およびTa-B添加 $\text{MoSi}_2/\text{Mo}_5\text{Si}_3$ 共晶合金の一方向凝固組織に及ぼす熱源の影響。

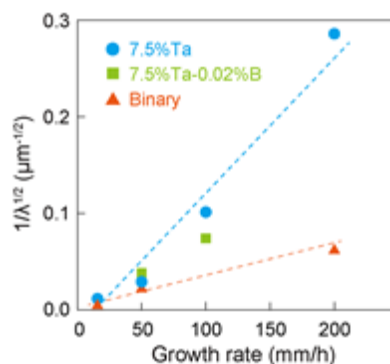


図2. $\text{MoSi}_2/\text{Mo}_5\text{Si}_3$ 共晶合金における平均ラメラ間隔の成長速度依存性。

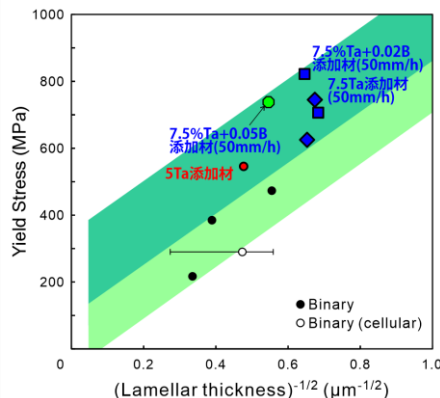


図3. $\text{MoSi}_2/\text{Mo}_5\text{Si}_3$ 共晶合金の1400°Cにおける降伏応力の平均ラメラ間隔依存性。

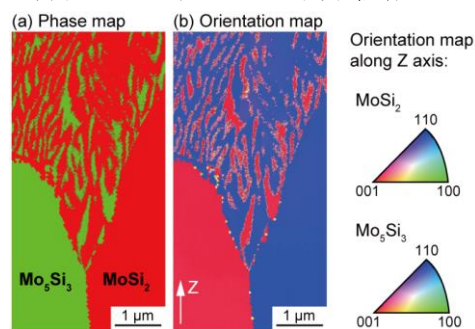


図4. レーザービーム表面熔融凝固処理した $\text{MoSi}_2/\text{Mo}_5\text{Si}_3$ 共晶合金の微細組織。

C40/D8_m 共晶組織を得るのに適した組成範囲を決定した。得られた知見を基に様々な Mo 置換比($x = \text{Mo}/(\text{Nb} + \text{Mo})$)を有する合金について一方向凝固処理を行った。その結果、Mo 置換比 0.05~0.79 の合金組成において、比較的均質なスクリプトラメラ型 C40/D8_m 共晶組織を有する棒状試料の育成に成功した(図 5)。スクリプトラメラ組織内では C40 型(Nb,Mo)Si₂ と D8_m 型(Nb,Mo)₅Si₃ はともに成長方向に長く伸びた複雑に入り組んだネットワーク構造をとり、優先成長方向は C40 型(Nb,Mo)Si₂ の[0001]、D8_m 型(Nb,Mo)₅Si₃ の[001]方向にほぼ平行であった。また二相間には優先的な方位関係があることを確認した。得られた一方向凝固材について破壊靱性値の評価を行ったところ、MoSi₂/Mo₅Si₃ 共晶合金系とは異なり、格子ミスフィットおよび組織微細さといった組織的要因と破壊靱性値には明確な相関が認められなかったことから、Nb-Mo-Si 三元系 C40/D8_m 共晶合金では界面強度特性の制御による破壊靱性値の向上は困難であり、破壊靱性値が構成相そのものの脆弱性など他の何らかの要因に支配されている可能性が示唆された。一方で高温圧縮試験では、1300°C以上の温度範囲で塑性変形すること、一部の合金において 1400°Cの降伏強度が二元系 MoSi₂/Mo₅Si₃ 共晶合金のものよりも 50%以上高い値をとることが明らかとなったことから、C40/D8_m 共晶合金が新規超耐熱材料として非常に魅力的な高温強度特性を有することを確認できた。

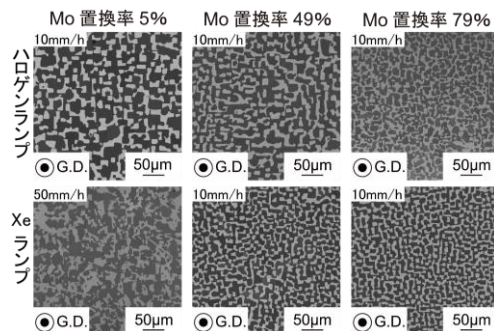


図 5. Nb-Mo-Si 三元系 C40/D8_m 共晶一方向凝固材の微細組織に及ぼす合金組成と熱源の影響。

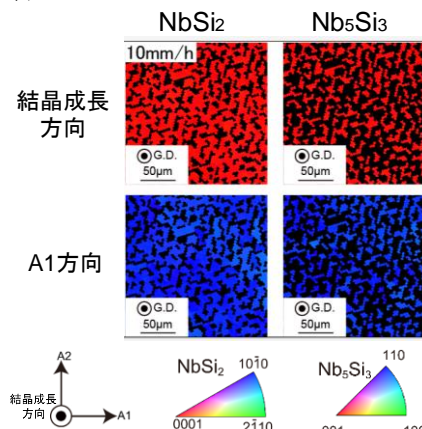


図 6. Nb-Mo-Si 三元系 C40/D8_m 共晶一方向凝固材(Mo 置換率 79%)の EBSD 方位マップ。

(3) 遷移金属シリサイドのマイクロピラー圧縮変形

本研究の研究ターゲットである遷移金属シリサイド基共晶合金の構成相の一つである遷移金属元素(TM)と Si の比が 5:3 の TM₅Si₃ は TM 元素の種類、組成により 3 種類の異なる結晶構造、正方晶 D8_m 型(Mo₅Si₃, β-(Nb,Mo)₅Si₃), 正方晶 D8_l 型(Mo₅SiB₂, α-Nb₅Si₃), 六方晶 D8₈ 型(Ti₅Si₃)をとる。これらはいずれも非常に複雑な結晶構造を有することに起因してバルクサイズの試料では 1500 度を超える高温で試験した場合にわずかな塑性変形が観察されるのみであった。また TM₅Si₃ より比較的単純な結晶構造を有する C40 型 TMSi₂(TM=Cr, V, Nb, Ta)も高温でのみすべり変形による塑性変形が可能であることが見出されてきた。いずれの場合も、高温変形中の表面酸化の影響などによりすべり線観察の困難さ、機械試験中あるいは冷却過程における転位の上昇運動の可能性といった問題点のため、活動変形モードの詳細についてはいまだ不明な点も多い。本研究では硬質性材料の塑性変形挙動の新規解析手法である単結晶マイクロピラー圧縮試験法を適用し、これら各種遷移金属シリサイドの変形挙動についての調査を行った。

正方晶 D8_l 型 Mo₅SiB₂ および α-Nb₅Si₃ では、ともに室温において 3 つのすべり系、(001)<100>すべり、{110}<110>すべり、{011}<111>すべりの活動とそれらの活動のための CRSS のサイズ依存性を明らかにした(図 7)。さらに Mo₅SiB₂ では各すべり系の転位組織ならびに転位芯構造の原子分解能での解析に成功(図 8)したとともに、観察されたすべり系について第一原理計算により一般化積層欠陥エネルギー(GSFE)を求め、実験データとの比較からこれら 2 つの遷移金属シリサイドの各すべりが生じる原子面、転位

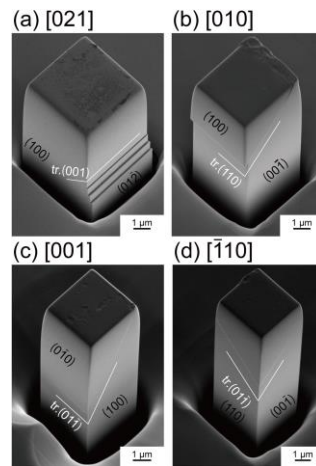


図 7. 正方晶 D8_l 型 Mo₅SiB₂ の単結晶マイクロピラー圧縮の例
Glide plane of [010] disl. on (001)

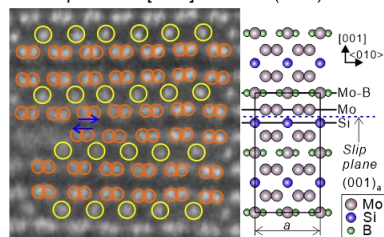


図 8. 正方晶 D8_l 型 Mo₅SiB₂ の (001)[010]すべりの転位芯構造。

の分解反応，変形応力の支配因子など室温でのすべり変形機構の詳細を明らかにした．さらに六方晶系 $D8_8$ 型 Ti_5Si_3 では，室温において3つのすべり系 $\{1\bar{1}00\}[0001]$ すべり， $\{2\bar{1}\bar{1}2\}\langle 2\bar{1}\bar{1}\bar{3}\rangle$ ， $\{1\bar{1}01\}\langle 2\bar{1}\bar{1}\bar{3}\rangle$ すべりの活動とそれらの CRSS のサイズ依存性を明らかにした．これらに比較して，正方晶 $D8_m$ 型 Mo_5Si_3 はごく一部の荷重軸方位において $\{0\bar{1}1\}\langle 111\rangle$ すべりの活動を示唆する結果が得られたものの，単結晶マイクロピラー試験においても極めて脆性的な性質を示すことが明らかとなった．また，六方晶 $C40$ 型遷移金属シリサイド ($CrSi_2$, VSi_2 , $NbSi_2$, $TaSi_2$) はその結晶構造の特徴に起因して， $400^\circ C$ 以上の高温において底面すべりのみが活動可能で，それ以下の温度域では極めて脆性的な性質を示すことが知られていた．これらの遷移金属シリサイドにおいても室温での底面すべりの活動ならびにその CRSS の値のサイズ依存性の同定に成功した．このように遷移金属シリサイド基共晶材料の塑性変形挙動ならびに破壊挙動の理解のために必要不可欠な各構成相の塑性変形に関する様々な基礎的知見を得た．

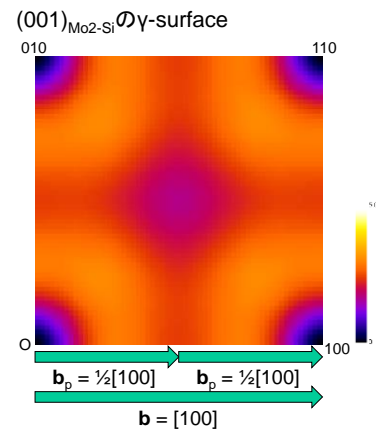


図7. 正方晶 $D8_1$ 型 Mo_5SiB_2 の (001)すべり面の GSFE マップ．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Kishida Kyosuke, Kim Jim Geum, Nagae Tadashige, Inui Haruyuki	4. 巻 196
2. 論文標題 Experimental evaluation of critical resolved shear stress for the first-order pyramidal c+a slip in commercially pure Ti by micropillar compression method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 168 ~ 174
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2020.06.043	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 Kishida Kyosuke, Fukuyama Takayoshi, Maruyama Takuto, Inui Haruyuki	4. 巻 10
2. 論文標題 Room temperature deformation of single crystals of Ti ₅ Si ₃ with the hexagonal D88 structure investigated by micropillar compression tests	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 17983-1 ~ 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-75007-7	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 Kishida Kyosuke, Maruyama Takuto, Fukuyama Takayoshi, Inui Haruyuki	4. 巻 21
2. 論文標題 Micropillar compression deformation of single crystals of -Nb ₅ Si ₃ with the tetragonal D8I structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science and Technology of Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 805 ~ 816
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/14686996.2020.1855065	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 Kawamura Marino, Asakura Makoto, Okamoto Norihiko L., Kishida Kyosuke, Inui Haruyuki, George Easo P.	4. 巻 203
2. 論文標題 Plastic deformation of single crystals of the equiatomic Cr-Mn-Fe-Co-Ni high-entropy alloy in tension and compression from 10 K to 1273 K	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 116454 ~ 116454
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2020.10.073	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 Zhu Chuan Qi、Yamamoto Jimpei、Koizumi Yuichiro、Yuge Koretaka、Kishida Kyosuke、Inui Haruyuki	4. 巻 1016
2. 論文標題 Comprehensive Phase Field Study on Directionally-Solidified MoSi2/Mo5S3 Eutectic Alloy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Science Forum	6. 最初と最後の頁 749 ~ 754
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/MSF.1016.749	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 Paul Bhaskar、Okamoto Norihiko L.、Kusakari Misato、Chen Zhenghao、Kishida Kyosuke、Inui Haruyuki、Otani Shigeki	4. 巻 211
2. 論文標題 Plastic deformation of single crystals of CrB2, TiB2 and ZrB2 with the hexagonal AlB2 structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 116857 ~ 116857
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2021.116857	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 岸田恭輔、乾晴行	4. 巻 90
2. 論文標題 MoSi2基Brittle/Brittle複相単結晶超耐熱材料の開発	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 金属	6. 最初と最後の頁 556 ~ 562
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 Zhu Chuanqi、Koizumi Yuichiro、Chiba Akihiko、Yuge Koretaka、Kishida Kyosuke、Inui Haruyuki	4. 巻 116
2. 論文標題 Pattern formation mechanism of directionally-solidified MoSi2/Mo5Si3 eutectic by phase-field simulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Intermetallics	6. 最初と最後の頁 106590 ~ 106590
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.intermet.2019.106590	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 Kishida Kyosuke, Shinkai Yasuharu, Inui Haruyuki	4. 巻 187
2. 論文標題 Room temperature deformation of 6H ₂ SiC single crystals investigated by micropillar compression	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 19 ~ 28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2020.01.027	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 Tsuji Nobuhiro, Ogata Shigenobu, Inui Haruyuki, Tanaka Isao, Kishida Kyosuke, Gao Si, Mao Wenqi, Bai Yu, Zheng Ruixiao, Du Jun-Ping	4. 巻 181
2. 論文標題 Strategy for managing both high strength and large ductility in structural materials?sequential nucleation of different deformation modes based on a concept of plaston	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 35 ~ 42
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scriptamat.2020.02.001	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 Vega Farje Juan A., Matsunoshita Hirotaka, Kishida Kyosuke, Inui Haruyuki	4. 巻 148
2. 論文標題 Microstructure and mechanical properties of a MoSi ₂ -Mo ₅ Si ₃ eutectic composite processed by laser surface melting	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Materials Characterization	6. 最初と最後の頁 162 ~ 170
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matchar.2018.12.016	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 Higashi Masaya, Momono Shogo, Kishida Kyosuke, Okamoto Norihiko L., Inui Haruyuki	4. 巻 161
2. 論文標題 Anisotropic plastic deformation of single crystals of the MAX phase compound Ti ₃ SiC ₂ investigated by micropillar compression	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 161 ~ 170
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2018.09.024	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 Laplanche G., Wieczorek N., Fox F., Berglund S., Pfetzinger-Micklich J., Kishida K., Inui H., Eggeler G.	4. 巻 160
2. 論文標題 On the influence of crystallography and dendritic microstructure on micro shear behavior of single crystal Ni-based superalloys	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 173 ~ 184
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2018.08.052	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 Kishida Kyosuke, Maruyama Takuto, Matsunoshita Hirota, Fukuyama Takayoshi, Inui Haruyuki	4. 巻 159
2. 論文標題 Micropillar compression deformation of single crystals of Mo ₅ SiB ₂ with the tetragonal D8 structure	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 416 ~ 428
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2018.08.048	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30件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 岸田 恭輔, 乾 晴行
2. 発表標題 D8I型構造を有する遷移金属シリサイド単結晶の室温変形挙動
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 上村 遥, 岸田 恭輔, 乾 晴行
2. 発表標題 Mo添加NbSi ₂ /Nb ₅ Si ₃ 一方向凝固共晶合金の微細組織
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 Kyosuke Kishida, Haruyuki Inui
2. 発表標題 Micropillar Compression Deformation of Transition-Metal Disilicides with the C40 Structure
3. 学会等名 2020 MRS Virtual Spring/Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Haruka Uemura, Kosei Takeda, Kyosuke Kishida, Haruyuki Inui
2. 発表標題 Microstructure and Crystallographic Orientation Relationships in Directionally Solidified NbSi ₂ /Nb ₅ Si ₃ Eutectic Composites with Mo Addition
3. 学会等名 2020 MRS Virtual Spring/Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岸田恭輔, 乾 晴行
2. 発表標題 6H-SiC単結晶の室温塑性変形挙動
3. 学会等名 日本金属学会2021年春季(第168回)講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上村 遙, 岸田 恭輔, 乾 晴行
2. 発表標題 Mo添加NbSi ₂ /Nb ₅ Si ₃ 共晶合金の微細組織と力学特性
3. 学会等名 日本金属学会2021年春季(第168回)講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kyosuke Kishida, Haruyuki Inui
2. 発表標題 Micropillar compression deformation of transition-metal disilicides with the C11b and C40 structures
3. 学会等名 Thermec ' 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kyosuke Kishida, Haruyuki Inui
2. 発表標題 Development of MoSi ₂ /Mo ₅ Si ₃ -based in-situ composites for ultra-high temperature applications
3. 学会等名 Beyond Nickel-Based Superalloys III (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chuanqi Zhu, Yuichiro Koizumi, Akihiko Chiba, Koretaka Yuge, Kyosuke Kishida, Haruyuki Inui
2. 発表標題 Pattern Formation Mechanism of Script Lamellar Pattern in MoSi ₂ /Mo ₅ Si ₃ Eutectic Examined by Phase Field Method
3. 学会等名 Beyond Nickel-Based Superalloys III (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kosei Takeda, Kyosuke Kishida, Haruyuki Inui
2. 発表標題 Influences of growth conditions on microstructures and mechanical properties of directionally solidified MoSi ₂ /Mo ₅ Si ₃ -based eutectic composites
3. 学会等名 Beyond Nickel-Based Superalloys III
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jimpei Yamamoto, Yuichiro Koizumi, Koretaka Yuge, Kyosuke Kishida, Haruyuki Inui
2. 発表標題 Phase-field simulation of directional solidification in MoSi ₂ /Mo ₅ Si ₃ eutectic alloy with elastic anisotropy
3. 学会等名 Beyond Nickel-Based Superalloys III
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岸田恭輔
2. 発表標題 単結晶マイクロピラー圧縮試験で探る層状化合物の塑性変形機構
3. 学会等名 日本金属学会2019年秋期(第165回)講演大会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武田康誠、岸田恭輔、乾晴行
2. 発表標題 MoSi ₂ /Mo ₅ Si ₃ 共晶一方向凝固材の微細組織と力学特性に及ぼす凝固条件の影響
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 Kyosuke Kishida, Haruyuki Inui
2. 発表標題 Room-temperature deformation behavior of D8I-type transition-metal silicides investigated by micropillar compression
3. 学会等名 Intermetallics 2019(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kosei Takeda, Kyosuke Kishida, Haruyuki Inui
2. 発表標題 Microstructure optmisation of directionally solidified MoSi ₂ /Mo ₅ Si ₃ eutectc composites
3. 学会等名 Intermetallics 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kyosuke KISHIDA, Haruyuki INUI
2. 発表標題 Room Temperature Deformation Behavior of Hard Intermetallic Compounds Investigated by Micropillar Compression Method
3. 学会等名 MATERIALS RESEARCH MEETING 2019(MRM 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岸田 恭輔、乾 晴行
2. 発表標題 遷移金属ダイシリサイド単結晶のマイクロピラー圧縮変形
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 上村 遙、武田 康誠、岸田 恭輔、乾 晴行
2. 発表標題 Mo添加NbSi ₂ /Nb ₅ Si ₃ 共晶合金の微細組織と力学特性
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 山本陣平, 小泉雄一郎, 弓削是貴, 岸田恭輔, 乾晴行, 朱 伝奇、奥川将行
2. 発表標題 フェーズフィールド法によるMoSi ₂ 基複相超高温耐熱構造材料における組織形成メカニズムの研究
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 岸田恭輔
2. 発表標題 層状結晶構造を有する金属間化合物の結晶構造と塑性変形
3. 学会等名 東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻マテリアル工学セミナー「構造材料の新展開」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kyosuke Kishida, Yuki Kambara, Haruyuki Inui
2. 発表標題 Influences of ternary and quaternary additions on mechanical properties of MoSi ₂ /Mo ₅ Si ₃ -based in-situ composites
3. 学会等名 THERMEC ' 2018 International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岸田恭輔
2. 発表標題 マイクロピラー圧縮試験法を用いた塑性変形研究の最前線
3. 学会等名 日本金属学会2018年秋期(第163回)講演大会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 武田康誠, 神原佑季, 松野下裕貴, 岸田恭輔, 乾 晴行
2. 発表標題 MoSi ₂ 基共晶一方向凝固合金の組織と力学特性に及ぼす添加元素の影響
3. 学会等名 日本金属学会2018年秋期(第163回)講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福山貴義, 丸山拓仁, 岸田恭輔, 乾 晴行
2. 発表標題 TM ₅ Si ₃ 型遷移金属シリサイドの室温変形挙動
3. 学会等名 日本金属学会2018年秋期(第163回)講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Kishida, H. Inui
2. 発表標題 Plastic deformation of layered compounds studied by micropillar compression and scanning electron microscopy
3. 学会等名 International symposium on Atomistic Processes of Crystal Plasticity (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岸田恭輔, 乾 晴行
2. 発表標題 マイクロピラー圧縮試験による結晶性材料の変形機構解析
3. 学会等名 日本材料学会第67期第1回マルチスケール材料力学部門委員会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Kishida, H. Inui
2. 発表標題 Room temperature deformation of transition-metal silicides investigated by micropillar compression method
3. 学会等名 MRS 2018 Fall Meeting & Exhibit (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kosei Takeda, Yuki Kambara, Hirokata Matunoshita, Kyosuke Kishida, Haruyuki Inui
2. 発表標題 Effects of Ta and Nb Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of MoSi ₂ /Mo ₅ Si ₃ /Mo ₅ Si ₃ C Eutectic Composites
3. 学会等名 MRS 2018 Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 武田康誠, 神原佑季, 松野下裕貴, 岸田恭輔, 乾晴行
2. 発表標題 MoSi ₂ /Mo ₅ Si ₃ /Mo ₅ Si ₃ C三相共晶合金の微細組織と力学特性に及ぼすTaおよびNb添加の影響
3. 学会等名 社団法人日本鉄鋼協会・公益社団法人日本金属学会 関西支部 材料物性工学談話会平成30年度第2回講演会ならびにポスター発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武田康誠, 岸田恭輔, 乾晴行, 出村雅彦
2. 発表標題 MoSi ₂ /Mo ₅ Si ₃ 共晶一方向合金の微細組織と力学特性に及ぼす結晶育成条件の影響
3. 学会等名 日本金属学会2019年春季(第164回)講演大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 金属積層成形体及びその製造方法	発明者 乾 晴行, 岸田恭輔, 小岩井修二	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、153996	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 金属積層成形体及びその製造方法	発明者 乾 晴行, 岸田恭輔, 小岩井修二	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、157847	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

京都大学大学院工学研究科材料工学専攻 乾 研究室のページ http://imc.mtl.kyoto-u.ac.jp/ Researchgate https://www.researchgate.net/profile/Kyosuke_Kishida 京都大学大学院工学研究科材料工学専攻 乾 研究室 http://imc.mtl.kyoto-u.ac.jp/

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