

令和 3 年 5 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2019～2020

課題番号：19K22053

研究課題名(和文) '相で強化したオーステナイト系鉄基超合金の開発 - 新規な超耐熱構造材料

研究課題名(英文) Development of gamma prime-strengthened austenitic Fe-based superalloys - A new ultra high-temperature structural materials

研究代表者

乾 晴行 (INUI, HARUYUKI)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：30213135

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)：Ni基超合金の優れた耐熱性はFCC構造を基礎としたL12-Ni₃Al()規則相がFCC-Ni()相にCube-On-Cube方位関係で整合析出した2相組織に起因すると考えられるが、Feを主成分とする耐熱鋼でこのような二相組織が実現されたことはない。Fe₃Ge-Ni₃Ge擬二元系で全率L12固溶体を形成することを見出し、このL12-固溶体相とFCC-(Fe,Ni)相の相平衡を調べ、Fe-rich組成でCube-On-Cube方位関係で整合析出した - '2相組織を所望の体積分率で形成できることを見出し、Fe基超合金の開発に繋げるための耐熱性・高温強度を向上させる合金設計を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Fe-rich組成で優に50%を超える '相をCube-On-Cube方位関係で整合析出させた - '2相組織を実現するのは世界初であり、高温材料や鉄鋼材料の多くの教科書に「Fe基の合金では '相の相分率は10%を超えることはない」との記述を覆す学術的な意義を有する。このような2相組織は構造材料の耐熱性を向上させる上で有用であり、現在の耐熱鋼の耐用温度630 を遥かに超える耐用温度をもつ新規な鉄基超合金の開発に繋がる研究であり、例えば火力発電所の発電効率を改善し、地球温暖化ガス排出量の大幅な削減に繋がり得るため社会的意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：Although the excellent high-temperature properties of Ni-based superalloys have been considered to stem from two-phase cuboidal microstructures consisting of FCC () and L12 () phases, such microstructures have never been formed in heat-resistant steel based on Fe. We have found that L12 solid solutions are formed continuously in the Fe₃Ge-Ni₃Ge pseudo-binary system and the L12 phase can coexist with FCC-(Fe,Ni) phase up to a chemical composition considerably rich in Fe, forming two-phase cuboidal microstructures. We have further elucidated some guiding principles for alloy design of Fe-based superalloys.

研究分野：材料物性

キーワード：鉄基超合金 耐熱構造材料 2相組織 整合析出 格子ミスフィット 高温強度 クリープ 単結晶

1. 研究開始当初の背景

わが国の火力発電蒸気タービンプラントでは、世界最高水準の発電効率 43%を蒸気温度 620°C、30MPa で達成している。しかし、わが国の CO₂ ガス排出量の約 3 分の 1 が火力発電からの排出であることに鑑み、更に発電効率を高めるべく、700°C級 A-USC (先進超々臨界) プラントの開発研究が行われている。これを実現するためには、700°Cでクリープ破断強度が 100MPa 以上の材料が必要であり、従来のフェライト (BCC) 系やオーステナイト (FCC) 系耐熱鋼では達成できない。Ni 基超合金の耐熱性はこの条件を満たすもののコストが高すぎ、鋼をベースとした新たな耐熱材料の開発が待ち望まれている。Ni 基超合金の優れた耐熱性は FCC 構造を基礎とした L1₂-Ni₃Al (γ') 規則相が FCC-Ni (γ) 相に Cube-On-Cube 方位関係で整合析出した 2 相組織に起因すると考えられている。このような 2 相 Cuboidal 組織を Fe 基合金で実現すれば、耐熱鋼の耐用温度の飛躍的増大が期待できるが、このような 2 相組織が Fe を主成分とする耐熱鋼で実現されたことはない。これは、Ni-Al 系のように、FCC-Fe と平衡共存する L1₂-Fe₃X (γ') 相が存在しないためと考えられている。また、Ni 基超合金と同様に高温材料として使用されるオーステナイト系ステンレス鋼は Fe-Cr-Ni を主成分とするが、これに L1₂ (γ') 規則相析出させるべく Ti, Al を添加しても、個々の L1₂ (γ') 規則相析出物は非常に小さく、体積分率も 10% を越えることはできない。このような中、同じ L1₂ 構造を持つ Fe₃Ge と Ni₃Ge がその擬 2 元系で全率 L1₂ 固溶体を形成することを見出し、この L1₂-(Fe,Ni)₃Ge 固溶体相と FCC-(Fe,Ni) 相の相平衡を調べるうちに、この 2 相はかなり Fe-rich 組成 (最大で Fe/Ni=3.53) まで共存することができ、2 相領域も広く (Ge 濃度で 14~19 at.%) その体積分率を容易に変えることができることを見出した。驚愕に値するのは、適切に熱処理をすれば、Cube-On-Cube 方位関係で整合析出した γ - γ' 2 相組織を所望の体積分率で容易に形成できることである。すなわち、この γ - γ' 2 相組織が Ni 基超合金と同様に耐熱性・高温強度に直結するならば、 γ' 相で強化した Fe 基超合金の開発に繋がる発見と言える。

2. 研究の目的

Fe 基 (あるいは Fe-Ni 基) 超合金と呼ばれる合金はこれまでも開発されている。Ni₃(Ti,Al) で強化された A286 鋼 (Fe-15Cr-25Ni-2Al-3Ti (wt.%)) がその代表例である。しかし、この強化相である γ' 相は準安定相であると言われ、もともと 10% 以上に相分率を上げることはできず、Ti 量あるいは熱処理温度の増加により安定な η 相に変態するといわれている (例えば、T. Sourmail, Mater. Sci. Tech., 17 (2001) 1)。このような γ' 相の相安定性の低さもあり、耐熱性があまり高くないため、A286 鋼は高温構造材料として広汎には使われていない。また、Co-Al 系には存在しない L1₂ (γ') 相が Co-Al-W 3 元系で発見され FCC-Co 相と 2 相平衡することが報告されて (J. Sato et al., Science 312 (2006) 90) 以来、集約的に研究された Co 基超合金でも、期待されるほどの高温強度特性は報告されていない。これも 3 元系 L1₂-Co₃(Al,W) 相の相安定性が低く、高温で γ' 相の相分率の低下が起こる上に、 γ' 相そのものの強度があまり高くないためと申請者は考えている (Suzuki, Inui, Annual Review of Materials Research, 45 (2015) 345)。それ故、「 γ - γ' 2 相 Cuboidal 組織の (長時間) 高温強度は γ' 相の相安定性が重要な決定因子となる」との仮説を持っている。本 Fe 基 γ - γ' 2 相合金 (800°C で γ' 相が 65% に調整) は、 γ' 相の相分率は 1000°C でも 30% と高く、700°C でも 800MPa を越える非常に高い圧縮強度を示し、 γ' 相の相安定性がかなり高いことを予測させる。

本合金の最も期待される実用は、火力発電蒸気タービンプラントのボイラー材と考えられ、耐高温腐食・酸化性向上のために Cr 添加が必須であり、更に材料コスト削減のために高価な Ge を Al や Si で置換する必要があると考えられる。 γ - γ' 2 相組織を維持しつつ、これらの元素添加に伴う γ' 相の相安定性の変化と高温力学特性の相関を調査し、「 γ - γ' 2 相 Cuboidal 組織の (長時間) 高温強度は γ' 相の相安定性が重要な決定因子となる」との仮説を検証しつつ、700°C 以上の耐熱性を持つ、 γ' 相で強化した Fe 基超合金を開発する、このことこそ本研究の終極の目的である。

3. 研究の方法

本研究では、以下の実験項目に従い、Cr, Al, Si などを添加した Fe-Ni-Ge 基合金を作製し、 γ - γ' 2 相 Cuboidal 組織を示す化学組成、熱処理条件を探索し、その高温強度特性を測定して、 γ' 相の相安定性と高温強度特性の構造物性の確立を目指す。

[1] Cr, Al, Si を添加した Fe-Ni-Ge 系合金試料作製:

Fe-Ni-Cr 3 元系状態図の先行研究から Cr は Fe-Ni 系 γ 相に相当量固溶することが知られているため、 γ - γ' 2 相 Fe-Ni-Ge 基合金の γ 相に優先的に分配されると予測している。ステンレス鋼の耐高温腐食・酸化性を本質的に向上させるには 12wt.% 以上の Cr 添加が必要とされているため、Cr 添加量については 12wt.% 以上を目指す。Al, Si は、 γ - γ' 2 相 Fe-Ni-Ge 基合金の γ' -(Fe,Ni)₃Ge 相の Ge サイトを優先的に置換し、 γ' 相の相安定性を変化させると期待しているが、 γ 相への固溶も考えられ、数~10at.% 程度の添加を行う。更に、Ni 基の γ' 相の相安定性を向上させることが知られている Ti, Nb, Hf などの添加についても本研究中盤以降に計画する。 γ - γ' 2 相組織が得られる化

学組成と熱処理（溶体化・時効）条件を確立する。

[2] 相安定性（格子定数, γ' ソルバス温度）評価：

上記で γ - γ' 相組織形成が確かめられた試料につき, X線回折（装置現有）により格子定数を評価するとともに, 熱膨張係数測定（装置現有）により γ' ソルバス温度を評価する。 γ' ソルバス温度は γ 相が γ 相に固溶する温度で相安定性の直接の指標であるが, 格子定数も γ' 相の原子間結合の強さを反映し相安定性の指標となると考えられ, 次項目の第一原理計算結果と照合できるパラメータになると予測している。

[3] 高温力学特性評価：

γ - γ' 相 Cuboidal 組織をもつ試料について, 通常の引張/圧縮試験（歪速度: 10^{-4}s^{-1} 程度）により降伏強度などの強度の温度依存性を求める。特に, 600°C 以上で高い強度を示した合金については, クリープ試験を行い長時間高温強度を評価して, γ - γ' 相 Cuboidal 組織の（長時間）高温強度と γ' 相の相安定性の相関の確立を目指す。本研究で開発された合金が, 従来材を越える高温強度特性を持つかに着目し, クリープ試験は $700\sim 800^\circ\text{C}$, $50\sim 150\text{MPa}$ の温度, 応力範囲で行う。

4. 研究成果

Fe-Ni-Ge3 元系合金で, 同じ $L1_2$ 構造を持つ Fe_3Ge と Ni_3Ge がその擬 2 元系で全率 $L1_2$ 固溶体を形成し, この $L1_2$ - $(\text{Fe,Ni})_3\text{Ge}$ 固溶体相と FCC- (Fe,Ni) 相の相平衡を調べた結果, この 2 相はかなり Fe-rich 組成（最大で $\text{Fe/Ni}=3.53$ ）まで共存でき, 2 相領域も広く（Ge 濃度で $14\sim 19\text{at.}\%$ ）その体積分率を容易に変えることができることが明らかとなった（図 1）。適切に熱処理をすれば, Cube-On-Cube 方位関係で整合析出した γ - γ' 相組織を所望の体積分率で容易に形成することも明らかとなった（図 1(b),(c)）。 γ - γ' 相 Cuboidal 組織が最適組織であるが, 溶体化処理温度で γ 単相とならなければ最適組織を得ることができない。 γ' 相体積を大きくしようと Ge 濃度を高めると, 初晶の γ' 相あるいは DO_3 相が晶出し, 溶体化で γ 単相とすることができない。このような限界の Ge 濃度を Fe/Ni 組成比の関数として決定した。最も Fe/Ni 組成比の大きい組成で決定した化学組成では, 1000°C の溶体化で γ 単相となり, 800°C の時効で γ' 相の体積分率を 60%にすることができる（図 1(b),(c)）。組織観察の結果では, 700°C 以下では γ' 相の体積分率に変化はないが, それ以上の温度で温度上昇とともに体積分率は減少する。これに対応して圧縮強度は室温から 700°C まであまり変化することなく 500MPa を越える非常に高い値を示し（図 2）, γ' 相の相安定性の高さとともに高い高温クリープ特性を予測させる結果である。この合金は, 多結晶でも室温で 50%以上の伸びを示し, 靱性（延性）にも富んでいる。また, 単結晶作製が可能であることも明らかとなった。

Fe-Ni-Ge3 元系合金で最適組織制御プロセスの開発とそれによって作製された合金の高温力学特性の解明を完了し, 強化相としての $L1_2$ - $(\text{Fe,Ni})_3\text{Ge}$ (γ') 相の相安定性を高めるべく, 実用に必要と考えられる合金元素（Cr, Al, Si など）を更に添加し, 相平衡関係を調査するとともに, 単結晶化の可否に加え, その力学特性の調査を行った。Al, Si などは Ge を置換する形で固溶させることができるが, 固溶量は極めて小さく, $2\sim 4\%$ のオーダーである。特に, Al はこれ以上添加すると γ' 相の相安定性を阻害し, DO_3 相の析出を引き起こす。一方, Cr は 10%程度固溶させることができるが, Cr 添加量の増加とともに γ' 相の相分率は低下してしまう。Cr は耐酸化性向上に非常に有効で Cr 添加量の増加とともに耐酸化性は向上する。しかし, この耐酸化性の向上は添加量の少ないときに劇的に生じ, Cr 添加量増加に伴う γ' 相の相分率の低下を考えれば, $2\sim 4\%$ のオーダーの添加で十分である（図 3）。Cr 添加に伴う γ' 相の相分率の低下は Ge 量の調整により補うことができる。Ge 置換による Si 添加は耐酸化性を向上させる効果があり, 耐酸化性に必要な Cr 添加をより少量に抑えることが出来る。一方, Al 添加は

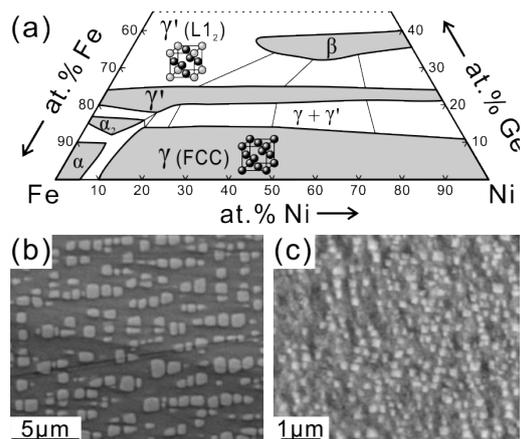


図 1. (a) Fe-Ni-Ge 3 元系部分状態図 (800°C 等温断面)と熱処理後の γ - γ' 相 Cuboidal 組織; (b) Fe-40Ni-20Ge, (c) Fe-18Ni-17Ge.

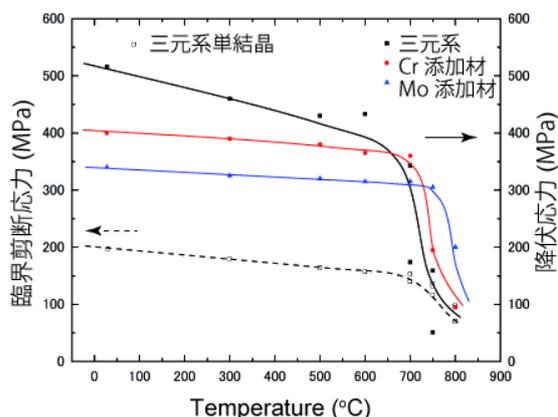


図 2. 三元系組成, 4Cr 添加材, 0.5Mo 添加多結晶材の降伏応力の温度依存性及び三元系単結晶材の臨界分解剪断応力の温度依存性.

合金の耐酸化性を劣化させる傾向が見られる。高温強度は、Al, Si の添加では大きな影響はないが、Cr 添加量増加に伴い γ' 相の相分率が低下するため減少する。耐酸化性と高温強度両立の観点からは、1Si+2Cr(at.%)オーダーの複合添加がもっとも望ましい。上記の合金の内、 γ - γ' 相組織が形成される組成では、ブリッジマン法による単結晶化が可能であった。多くの FCC 基合金と同様に $\langle 001 \rangle$ を優先成長方向とする傾向が高い。これらの合金は室温で 50%以上の伸びを示し、靱性（延性）にも富んでいる。750°Cで γ' 相が体積率で 50%以上になるよう組成調整した合金では 700°Cでも 500MPa を越える非常に高い高温圧縮強度を示し、 γ' 相の相安定性の高さとともに高い高温強度を示すことが明らかとなった。

L1₂-(Fe,Ni)₃Ge (γ') 相の相安定性をさらに高め、高温強度を向上させるために、Ti, Ta, Nb, Hf, V, W, Mo 計 7 種類の元素添加の相平衡及び力学特性に与える影響も調査した。Ni 基および Co 基超合金の γ' 安定性を大幅に向上させる Ti, Ta, Nb, Hf の Fe-Ni-Ge₃ 元系における固溶量は極めて限られており、いずれも添加量が 0.2at%の時に γ' 相以外の析出相が確認され、有効な添加量は 0.1% オーダーと推測される。加えて、添加材の γ' 相の体積分率に明瞭な増加が見られていないことから、上記 4 種の元素添加は Fe 基超合金の高温強度向上に有効ではないと判断した。一方、V は合金組成を適切に調節することで、2%オーダー添加することが出来る。しかし、V 添加は D0₃ 相の析出を促進し、均一な γ - γ' 二相組織を保つには、一部の Fe を Ni で置換する必要がある。また、Fe-Ni-Ge 三元系組成と比べ、V 添加材の γ' 相の体積分率が減少することから、V 添加も Fe 基超合金の特性向上には有効ではないと考えられる。W 及び Mo は、Fe-Ni-Ge 三元系の組成を適切に調節することで、少量に(0.5%オーダー)添加することが出来る。三元系組成と比べ、W, Mo 添加が γ' 相の体積分率に明確な影響は見られていないものの、高温力学特性をある程度改善すると考えられる。多結晶材による高温圧縮試験では、W 添加材は 800°Cまでの 0.2%耐力が同温度における三元系組成より数十 MPa 高くなっており、Mo 添加材においては、高温で降伏強度が低下し始める温度が三元系組成の 700°C近傍から約 50°C高温側にシフトしていることが明らかになった。特に 0.5Mo(at%)添加材は、750°Cにおいて、設計した合金の中で一番高い高温強度を示す。W と Mo を有効に添加することで、合金の使用温度をさらに高くすることが可能と考えられる。

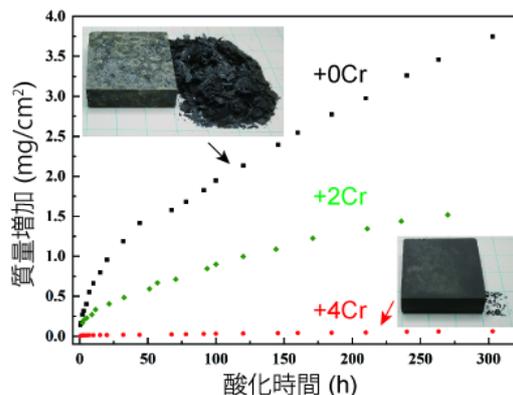


図 3. 800°C, 大気中での繰返し酸化による三元系および Cr 添加材の質量増加曲線と 300 時間酸化後の試料外観.

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 2件/うちオープンアクセス 2件）

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 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 MoSi ₂ /Mo ₅ Si ₃ 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 Niitsu Kodai, Asakura Makoto, Yuge Koretaka, Inui Haruyuki	4. 巻 61
2. 論文標題 Prediction of Face-Centered Cubic Single-Phase Formation for Non-Equiatomic CrMnFeCoNi High-Entropy Alloys Using Valence Electron Concentration and Mean-Square Atomic Displacement	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 1874 ~ 1880
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-M2020144	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 Zhou Dengshan, Chen Zhenghao, Ehara Kazuki, Niitsu Kodai, Tanaka Katsushi, Inui Haruyuki	4. 巻 191
2. 論文標題 Effects of annealing on hardness, yield strength and dislocation structure in single crystals of the equiatomic Cr-Mn-Fe-Co-Ni high entropy alloy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 173 ~ 178
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scriptamat.2020.09.039	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 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 Chen Zhenghao, Okamoto Norihiko L., Chikugo Kazuyoshi, Inui Haruyuki	4. 巻 858
2. 論文標題 On the possibility of simultaneously achieving sufficient oxidation resistance and creep property at high temperatures exceeding 1000 °C in Co-based superalloys	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Alloys and Compounds	6. 最初と最後の頁 157724 ~ 157724
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jallcom.2020.157724	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 Chen Zhenghao, Inui Haruyuki	4. 巻 208
2. 論文標題 Micropillar compression deformation of single crystals of Fe ₃ Ge with the L12 structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 116779 ~ 116779
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2021.116779	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25件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Haruyuki Inui
2. 発表標題 Single-crystal mechanical properties of equiatomic CrMnFe-CoNi high-entropy alloy and its derivative equiatomic quaternary and ternary medium-entropy alloys
3. 学会等名 2019 DPG Spring Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Haruyuki Inui
2. 発表標題 Single-Crystal Mechanical Properties of FCC High- and Medium-Entropy Alloys
3. 学会等名 Possibilities and Limitations of Quantitative Materials Modeling and Characterization 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 乾 晴行
2. 発表標題 ナノ・メゾ構造を制御した先進構造材料の創成
3. 学会等名 第60回本多記念賞、第16回本多フテリア賞および第40回本多記念研究奨励賞 贈呈式ならびに記念講演 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ehara Kazuki, Makoto Asakura, Kodai Niitsu, Kyosuke Kishida, Haruyuki Inui
2. 発表標題 Mechanical Properties of Single Crystals of Cr-Co-Ni Equiatomic Medium Entropy Alloy
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 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 Haruyuki Inui, Kyosuke Kishida, Kodai Niitsu
2. 発表標題 Single-crystal Mechanical Properties of Equiatomic CrMnFeCoNi High-entropy Alloy and its Derivative Equiatomic Quaternary and Ternary Medium-entropy Alloys
3. 学会等名 Materials Structure & Micromechanics of Fracture (MSMF9) (招待講演) (国際学会)
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 新津甲大、江原和輝、Ashif Eqbal、浅倉誠仁、岸田恭輔、乾 晴行
2. 発表標題 FCCハイエントロピー合金の塑性変形と微視組織
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 江原和輝、新津甲大、岸田恭輔、乾 晴行
2. 発表標題 Cr-Co-Ni等原子量合金単結晶の塑性変形における熱活性化過程
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 Kazuki Ehara
2. 発表標題 Plastic deformation behavior of singlecrystalline Cr-Co-Ni equiatomic medium entropy alloy
3. 学会等名 Intermetallics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kosei Takeda
2. 発表標題 Microstructure optimization of directionally solidified MoSi ₂ /Mo ₅ Si ₃ eutectic composites
3. 学会等名 Intermetallics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Haruyuki Inui, Kyosuke Kishida, Koudai Niitsu, Easo George
2. 発表標題 Single-crystal Mechanical Properties of Equiatomic CrMnFeCoNi High-entropy Alloy and Its Derivative Equiatomic Quaternary and Ternary Medium-entropy Alloys
3. 学会等名 World Congress on High Entropy Alloys (HEA 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Haruyuki Inui, Koudai Niitsu, Kyosuke Kishida
2. 発表標題 Effects of Heat-Treatment on Mechanical Properties of Equiatomic CrMnFeCoNi High-Entropy Alloy and Its Derivative Equiatomic Quaternary and Ternary Medium-Entropy Alloys
3. 学会等名 2019 MRS FALL MEETING & EXHIBIT (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Haruyuki Inui, Koudai Niitsu, Kyosuke Kishida, Easo George
2. 発表標題 Materials Parameters in Designing FCC High-entropy Alloys
3. 学会等名 TMS 2020 Annual Meeting & Exhibition (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019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 陳 正昊、岡本 範彦、乾 晴行
2. 発表標題 L1 ₂ -Fe ₃ Geマイクロピラー単結晶圧縮試験
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 乾 晴行, 土谷 浩一, 佐藤 裕之, 田中 将己, 橋本 直幸, 増野 敦信, 谷本 久典, 金 熙榮, 花咲 徳亮, 田中 克志
2. 発表標題 ハイエントロピー合金の特異な力学特性の支配因子解明
3. 学会等名 日本金属学会2020年秋期(第167回)講演大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 陳 正昊, 岡本範彦, 乾晴行
2. 発表標題 Co基超合金における耐酸化性とクリープ特性が両立する可能性
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 陳 正昊, 岡本範彦, 乾晴行
2. 発表標題 L12-Fe3Ge 単結晶の塑性変形
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 Ashif Equbal, Kazuki Ehara
2. 発表標題 Plastic Deformation of Single Crystals of a Cr-Fe-Co-Ni Equiatomic Medium Entropy Alloy
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 乾 晴行
2. 発表標題 ハイエントロピー合金研究の現状と展望
3. 学会等名 2021年度日本鉄鋼協会チタンフォーラム研究発表会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 李 焱、黒岩 省吾、伊藤 充洋、陳 正昊、岸田 恭輔、乾 晴行
2. 発表標題 Plastic deformation of the equiatomic Cr-Co-Ni single crystalline high entropy alloys
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 姚 宏偉、陳 正昊、乾 晴行
2. 発表標題 Cr添加が / ' 二相Fe基超合金の耐酸化性と力学特性に与える影響
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 伊藤 充洋、Li Le、岸田 恭輔、乾 晴行
2. 発表標題 Cr-Co-Ni等原子量合金単結晶の力学特性に及ぼす熱処理条件の影響
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 陳 正昊、岡本 範彦、乾 晴行
2. 発表標題 マイクロピラー単結晶L12-Fe3Geの塑性変形
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

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 合金およびその製造方法	発明者 乾晴行, アファンディ アハマド, ヤオ ホン ウェイ 外2名	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-134415	出願年 2020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ホームページ 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
研究分担者	岸田 恭輔 (KISHIDA KYOSUKE) (20354178)	京都大学・工学研究科・准教授 (14301)	
研究分担者	新津 甲大 (NIITSU KODAI) (90733890)	京都大学・工学研究科・助教 (14301)	

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		
	米国	オークリッジ国立研究所	オハイオ州立大学
ドイツ	ルール大学ボッフム校		
フランス	パリ東大学		

共同研究相手国	相手方研究機関			
韓国	浦頂工科大学			