

第2回フロンティア研究助成受給テーマ10件の研究期間終了に伴い、その成果をまてりあ3号および4号で報告します。

「電子ビーム積層造形法における特異な組織形成機構の理解に立脚した新規 TiAl 合金の開発」

1. 研究期間：2021年4月～2023年3月(2年間)
2. 研究の概要(申請書の内容を記載すること)

様々な輸送機器用エンジンの燃費向上、CO<sub>2</sub>排出量削減が急務とされる中、その軽量化が重要な課題となっている。本研究では、軽量耐熱合金である TiAl 合金について、電子ビーム積層造形(EB-PBF)法を用いた『形状・組織・力学特性』の同時制御が可能な独自の新規製造法を確立し、既存合金を凌駕する極めて優れた高温力学特性を有する新規合金の創製を目指す。これを実現するため、EB-PBF法特有の「急速凝固および繰り返し熱処理」に由来する特異な組織形成機構を活用した、従来の熱処理では不可能な EB-PBF 特有の組織制御法を確立する。さらに、二相ラメラ組織や粒界反応型セル状組織といった複雑な組織を有する同合金について、各組織構成要素の変形挙動を系統的に調査し、その理解に基づく組織設計法を構築する。本研究の成果は、EB-PBF法における特異な組織形成機構と TiAl 合金の変形挙動の理解を深化させるという学術的な意義を有するだけでなく、同合金の“製造が困難”という工業的課題を克服し、その応用範囲拡大に資することで、人類が直面する最重要課題の一つである環境問題の解決に大きく貢献することができる。

3. 研究実施の概要(実施状況・研究成果等)

本研究では、造形時の投入エネルギー密度( $E$ )と形成される微細組織の関係を明らかにするため、異なる  $E$  にて角柱試料を作製し、微細組織を解析した。Fig. 1(a)に高  $E$  材(32 J/mm<sup>3</sup>)、(b)に低  $E$  (16 J/mm<sup>3</sup>)材の縦断面の微細組織を示す。高  $E$  材には、 $\beta$ 相(白色)と $\gamma$ 相(黒色)を含む $\beta/\gamma$ 二相領域と $\alpha_2$ 相(灰色)と $\gamma$ 相からなる $\alpha_2/\gamma$ ラメラ領域で構成される $\alpha_2+\beta+\gamma$ 混合組織が形成されている。本組織は、熔融池からの高温の熱影響によって① $\beta$ 単相組織が形成された後、冷却にともなう② $\beta+\alpha$ 組織への相分離を経て、③各相に $\gamma$ 相が析出したものである。この三相混合組織は、一般的な熱処理材にも見られる組織であるが、EB-PBF法を用いることで各相の平均粒径が5 $\mu$ m以下の圧倒的に微細な組織を得ることができる。これは、熔融池近傍の冷却速度が非常に速く、短時間のうちに上記の相変態、組織形成過程を経ることに由来する。一方、低  $E$  材には、三相混合組織に加え、 $\beta/\gamma$ セル状組織で粒界を被覆されたラメラ間隔が約30 nmのナノ $\alpha_2/\gamma$ ラメラ粒が形成されている(Fig. 1(b))。このナノラメラ粒は、①凝固時に形成された $\beta$ 単相組織が $E$ 低下にともなう冷却速度の高速化によって生じる②マッシュ

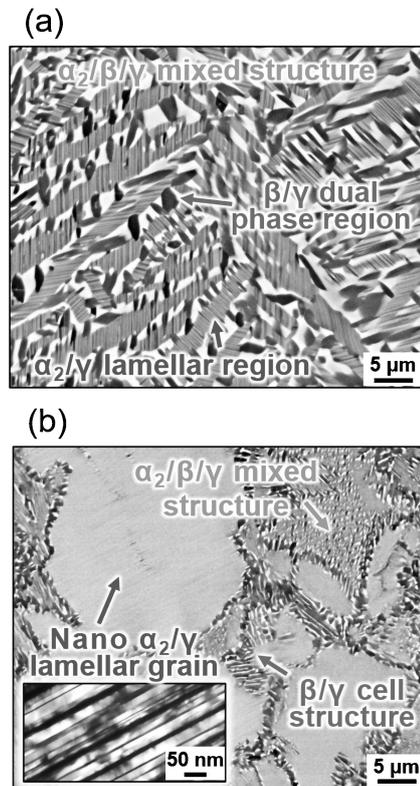


Fig. 1 Microstructure of the rods fabricated by EB-PBF at high (a) and low (b)  $E$  conditions.

$\alpha$ 変態によってマッシュ $\alpha$ 粒となり、さらなる冷却によって③ラメラ組織化したものである。この時、ラメラ粒界では③不連続析出反応によって $\beta/\gamma$ セル状組織が形成する。これらの組織は、その形成に超高速冷却時に生じるマッシュ $\alpha$ 変態を経由することが必須であることから、安定的かつ継続的に超高速冷却が生じるEB-PBF法で作製した合金に特異な微細組織であると言える。Fig. 2に造形体全体に含まれる $\beta$ 相の体積率( $V_\beta$ )と $E$ の関係を示す。 $E$ が増加するとともに熔融池からの温度分布が高温化するため、各組織中の $\beta$ 相割合が増加し、 $V_\beta$ は増加する。以上のように、 $E$ に着目することで、組織形態や各相の体積率を制御可能であることが明らかとなった。

そこで、EB-PBF法によって組織制御した角柱試料について、高温引張特性を調査した。Fig. 3に各試料の750°Cでの(a)最大引張強さ( $\sigma_B$ )と(b)破断伸び( $EL$ )の $E$ 依存性を示す。 $E$ が増加するほど強化相である $\beta$ 相体積率が高くなるため、強度は向上する(Fig. 3(a))。一方、 $\beta$ 相体積率の低い低  $E$  材においも、強度低下は限定的である。これは、EB-PBF材特有のナノラメラ粒が $\beta$ 相の減少を補う強化因子と

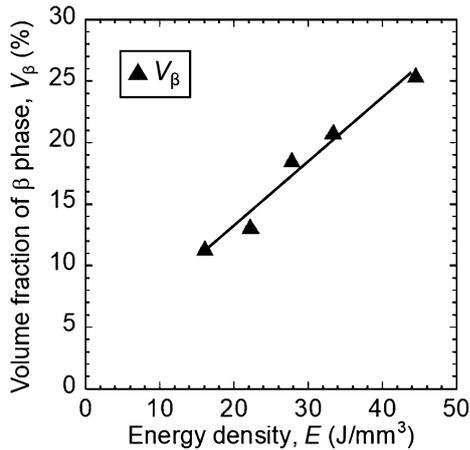


Fig. 2 Volume fraction of the  $\beta$  phase as a function of  $E$ .

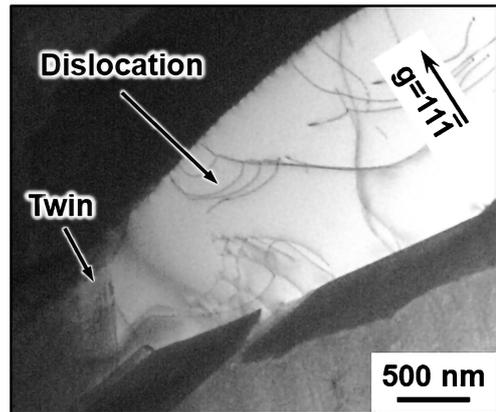


Fig. 4 Typical TEM image of the  $\gamma$  phase in high  $E$  rod tensile-deformed at 750°C.

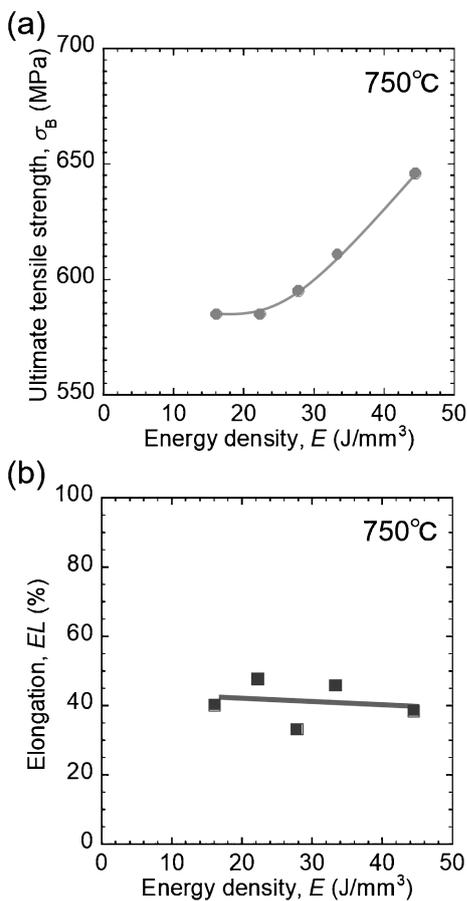


Fig. 3 Variations in  $\sigma_B$  (a) and  $EL$  (b) of the rods fabricated by EB-PBF as a function of  $E$ .

して作用するためである。さらに、EB-PBF材の興味深い点として、約40%もの大きな $EL$ が挙げられる (Fig. 3 (b))。変形後の $\gamma$ 相には多数の転位や双晶が観察されることから、三相混合組織やセル状組織中の数 $\mu\text{m}$ 程度の微細な $\gamma$ 相が延性因子として作用していると考えられる (Fig. 4)。この優れた延性は、TiAl合金の問題点である破壊靱性の低さを克服するものである。

さらに、Fig. 1に示した低 $E$ 材と高 $E$ 材の750°Cでの疲労特性を調査した結果、どちらも既存合金よりも高い疲労強度を示すことが明らかとなった。これは、低 $E$ 材ではセル状組織中、高 $E$ 材では三相組織中の $\beta$ 相にてき裂進展の停止と偏向が繰り返されるためである。

以上に示す通り、本研究により、EB-PBF製 $\beta$ 相含有TiAl合金の組織形成機構と力学特性に及ぼす各組織の影響を明らかとした。これにより、EB-PBF法を利用した同合金の組織制御法を提案し、既存合金より優れた力学特性を有する新規合金の創製に成功した。

#### 4. 成果の発表

##### 【学会発表】

「電子ビーム粉末床溶融結合法により作製した $\beta$ 相含有TiAl合金の微細組織および力学特性の造形方向依存性」日本金属学会2021年秋期大会, 2021年9月

「電子ビーム粉末床溶融結合法により作製した $\beta$ 相含有TiAl合金におけるセル状析出反応を利用した組織制御による高温力学特性向上」日本金属学会2022年春期大会, 2022年3月

「電子ビーム粉末床溶融結合法で作製した $\beta$ 相含有TiAl合金の微細組織と疲労特性の関係」日本金属学会2022年春期大会, 2022年3月

「不連続粗大化反応を利用した $\beta$ 相含有TiAl積層造形体の組織制御」日本金属学会2022年秋期大会, 2022年9月

「 $\beta$ 相含有TiAl合金の電子ビーム積層造形」日本金属学会2022年秋期大会, 2022年9月

「金属3Dプリント製 $\beta$ 相含有TiAl合金のナノラメラ組織を利用した高強度化」日本金属学会2023年春期大会, 2023年3月

「金属3Dプリント製 $\beta$ 相含有TiAl合金の高温疲労挙動」日本金属学会2023年春期大会, 2023年3月

「Microstructure and Mechanical Properties of Additively Manufactured  $\beta$ -containing TiAl Alloys」7th International Workshop on Titanium Aluminides, 2023年6月

「 $\beta$ -containing TiAl alloy prepared by additive manufacturing」

THERMEC'2023, 2023年7月

「金属3Dプリント製 $\beta$ 相含有TiAl合金の微細組織に及ぼす酸素添加の影響」日本金属学会2023年秋期大会, 2023年9月

【論文発表】

「Influence of Input Energy Density on Morphology of Unique Layered Microstructure of  $\gamma$ -TiAl Alloys Fabricated by Electron Beam Powder Bed Fusion」Materials Transactions, 64 (2023) 44-49.

「Effect of Scan Speed on Microstructure and Tensile Properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb Alloys Fabricated via Additive Manufacturing」Materials Transactions, 64 (2023) 1112-1118.

5. 本研究終了後の計画等

耐熱材料の実用化には、高温クリープ特性も重要な指標となる。今後は、このような材料信頼性に関わる特性にも着目した最適組織をEB-PBF法特有の相変態に着目した組織制御によって実現することで、EB-PBF製TiAl合金の実用化ステージに大きく引き上げる。

6. 研究代表者：趙 研(大阪大学大学院工学研究科)

7. 共同研究者(研究実施者)

安田弘行(大阪大学大学院工学研究科)

中野貴由(大阪大学大学院工学研究科)

田中幸樹(大阪大学大学院工学研究科)

野島駿佑(大阪大学大学院工学研究科)

「骨適合性と抗菌性を両立した生体内溶解性バイオアクティブコーティング膜の創製」

1. 研究期間：2021年3月～2023年2月(2年間)

2. 研究の概要

人工歯根等の硬組織代替デバイスには骨との迅速かつ強固な結合(骨適合性)と術後の炎症予防(抗菌性)が求められる。チタン製デバイスにはリン酸カルシウム(主にHAp)コーティングが施されているが、生体内において、デバイスはHAp膜を介して骨と結合しており、チタンのオッセオインテグレーション(骨とチタンが光学顕微鏡レベルで結合)を十分に活用できていない。そこで本研究では、生体内溶解性を有するSi-Ca-O系生体活性ガラスに着目し、そこに抗菌性元素を担持させることで、生体内における生体活性ガラスの溶解による骨適合性向上と抗菌性元素の放出による抗菌性を両立したバイオアクティブガラスコーティング膜の創製を目的とする。

埋入初期においてはコーティング膜の溶解による骨形成促進と抗菌性を発現させ、その後、コーティング膜は完全に溶解し、最終的には骨とチタン(デバイス)が直接接合する、「生体内における完全溶解」という新しい概念を、学術的根拠を基に導入する。日本の整形外科・歯科用インプラント市場は90%程度が輸入品で占められており、新たなコンセプト

と確実な有効性を発現する製品の開発は、我が国の競争力強化につながる。将来的には金属イオンの骨形成促進や抗菌性発現機序の解明にまで踏み込んだ研究に展開可能であり、金属イオン/生体間相互作用という新しい学理の構築につながる。

3. 研究実施の概要

SiO<sub>2</sub>-CaO系生体活性ガラスは骨伝導性に加え、生体内での高い溶解性を有することから、ガラスの溶解に伴う添加元素徐放が可能である。そこで、抗菌性元素酸化物X<sub>m</sub>O<sub>n</sub>を固溶させたSiO<sub>2</sub>-CaO-X<sub>m</sub>O<sub>n</sub>生体活性ガラスをチタン製硬組織代替デバイス表面にコーティングすれば、骨との強固かつ迅速な結合に加え、抗菌性元素Xの徐放に伴う抗菌性の発現も期待できる。

歯科インプラント等の複雑な形状を有するデバイス上へのコーティングを念頭に、本研究ではゾルゲル・ディップコーティング法に着目した。しかし、ゾルゲル・ディップコーティング法では、コーティング膜と基板との密着力は数MPaと、ISO 13779-4で規格化されている基板との密着力(25MPa)よりも小さい。そこで、基板の前処理としてチタンへのNaOH処理<sup>(1)</sup>を活用した。すなわち、NaOH処理によりチタン基板表面にTi-Na-OHゲル層を作製し、その上にSiO<sub>2</sub>-CaO-X<sub>m</sub>O<sub>n</sub>系ゾルをディップ法によりコーティングすることで、化学的な結合を目指した。さらに、生体活性ガラス膜が完全溶解した後においてもTi-Na-O層は残存し、これがチタンの骨適合性を向上させることが期待される。

片面鏡面研磨を施した工業用純チタン(CP Ti)円板(φ13mm×1mm<sup>t</sup>)を、10M NaOH水溶液に24時間浸漬することで表面にTi-Na-OHゲル層を作製した(図1)。NaOH処理により網目状のゾル層が形成されており、その厚さは約0.8mmであった。

コーティング材として80SiO<sub>2</sub>-19CaO-1X<sub>m</sub>O<sub>n</sub>(mol%)組成の生体活性ガラスを用いた。ガラス原料としてオルトケイ酸エチル(TEOS)、硝酸カルシウムおよび添加元素Xの硝酸塩を、溶媒には水およびエタノールを用い、その比を変化させた。得られたゾル中にNaOH処理チタン基板を浸漬させ、各引抜速度でディップコーティング後、大気中873Kにて熱処理した。図2に、ゾル中溶媒の水/エタノール比およびディップコーティング時の引抜速度を変化させて作製したコーティング膜の表面および断面SEM像を示す。水/エ

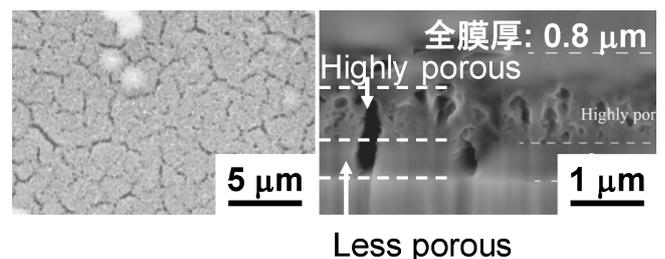


図1 NaOH処理+焼成後のチタン基板表面および断面SEM像。

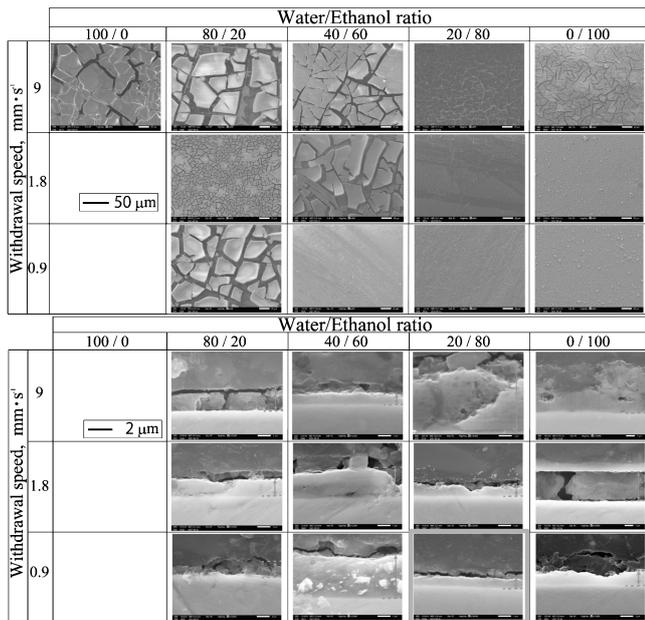


図2 ゴル中溶媒の水/エタノール比およびディップコーティング時の引抜速度を変化させて作製したコーティング膜の表面および断面 SEM 像。

タノール比20/80, 引抜速度  $0.9 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  の条件において, 基板全体にクラックの無いガラス層を作製することができた. 薄膜 XRD 分析の結果, 短時間熱処理では NaOH 処理基板由来の Ti-Na-O 相と非晶質相が検出され, ガラス層が得られた. 一方, 長時間の熱処理ではガラス中の CaO と基板の Ti が反応して生成した  $\text{CaTiO}_3$  相が検出されたことから, 熱処理時間も重要なパラメータであることが分かった.

得られたコーティング膜の断面 STEM 分析から, コーティング膜は二層構造を有していることが分かった. Inner 層からは Ca の濃化が確認された. Outer 層は NaOH 処理により形成した網目状 Ti-Na-O が  $\text{SiO}_2$ -CaO 系生体活性ガラスにより充填されており, 機械的な嵌合もしていた. コーティング膜と基板との密着力をピン引抜法により測定したところ, 上記の最適条件にて作製したコーティング膜においては  $40 \text{ MPa}$  以上の密着力を示した. Tris-HCl 溶液への浸漬試験により, Si, Ca および抗菌性元素 X の放出が確認され, 骨形成能の向上と抗菌性の発現が期待される.

#### 参考文献

- (1) T. Kokubo et al.: J. Am. Ceram. Soc., **79**(1996), 1127-1129.
4. 成果の発表
1. Alexander Samuel, **Kyosuke Ueda**, Takayuki Narushima: "Preparation of bioactive glass layers on NaOH-treated Ti substrates via sol-gel dip coating method," 2022年度東北大学金属材料研究所共同研究ワークショップ・日本バイオマテリアル学会東北ブロック講演会「臨床応用へ向けたバイオマテリアルサイエンス」2022年10月26日

2. 上田恭介, Alexander M. Samuel, Julian Jones, 成島尚之: "NaOH処理チタン表面へのゾルゲル・ディップ法による生体活性ガラス膜コーティング," 日本金属学会2023年春期(第172回)講演大会 2023年3月10日
3. **Kyosuke Ueda**, Alexander Samuel, Takayuki Narushima, Julian Jones: "Synthesis of bioactive glass layers on NaOH-treated Ti using sol-gel dip-coating process," International Conference on PROCESSING & MANUFACTURING OF ADVANCED MATERIALS, THERMEC' 2023 2023年7月5日 (Invited)
4. Takuro Masuda, **Kyosuke Ueda**, Takayuki Narushima: "Synthesis of tantalum- and silver-codoped  $\text{SiO}_2$ -CaO- $\text{P}_2\text{O}_5$  bioactive glasses by the sol-gel method," Biomaterials International 2023 2023年8月1日 (ポスター発表, Best Poster Award)
5. 本研究終了後の計画等

本研究においては, 密着力に優れるコーティング膜作製条件を明らかにすることができた. 加えて, 擬似体液中への抗菌元素の徐放も確認することができた. 一方, 抗菌性評価までは行うことができなかった. 今後は, 大腸菌を用いた抗菌性試験, 骨芽細胞(MC3T3)を用いた骨形成能評価および線維芽細胞(V79)を用いた細胞毒性評価を行う.

これまでの成果を発展させるために, 2023年9月には科学研究費補助金に申請予定である. さらに, 生体応用を念頭に, AMED, 橋渡し研究等に申請し, 基礎研究を継続しつつ, 企業との連携も進めていきたい.

#### 6. 研究代表者

上田恭介(東北大学大学院工学研究科)

#### 7. 共同研究者(研究実施者)

成島尚之(東北大学大学院工学研究科)

**Alexander Mammen Samuel**(東北大学大学院工学研究科 修士課程2年)

増田拓朗(東北大学大学院工学研究科 修士課程1年)

「変形誘起ナノ双晶と酸化物分散強化を利用した高延性高強度アルミナフォーミング CoNiCrAl 合金の創製」

1. 研究期間: 2021年3月~2023年2月(2年間)
2. 研究の概要

耐熱超合金は, 耐食性と高温強度を確保するために,  $1000^\circ\text{C}$ 以上でのアルミナ被膜形成と安定した強化相の両方が必要になる. 高強度と高延性を同時に得ることは困難であり, 耐熱合金の常温での延性が低いことは, 材料の加工難易度を大きく高める. 本研究の目的は,  $1200^\circ\text{C}$ でも耐酸化性と高強度を維持し, 室温で高い延性を有する新しいアルミナフォーミング耐熱超合金を開発することである. 従来の炭化物や  $\gamma'$  強化型 Co/Ni 系耐熱合金に Al を添加すると, 強度の低下を招くため, アルミナフォーミング材料になることができなくなる. 酸化物分散強化(ODS)型耐熱合金に第3元

素である Hf/Zr を添加することで、Al による強度低下の影響がなくなり、アルミナフォーミング高温合金となることが期待できる。室温延性について、変形誘起ナノ双晶の形成が促進されるため、CoCrNi 合金は室温でも伸び率60%の超延性が得られることがある。CoCrNi 合金に数%の Al 添加し、ODS 化によって1200°C以上の高温でも安定性の高い分散強化とアルミナフォーミングが得られるようになれば、室温延性強化機構だけではなく高温で強度と耐酸化性向上も併せ持つ新しい合金強化法を提示する。本研究は、高温用途への応用に向けた新しいエネルギー材料設計指針を提供できると考えられる。

### 3. 研究実施の概要

2021年度(1年目)

1年目は、実用材料を想定して  $\text{Co}_x\text{NiCr}-x\text{Al}$  (at.%) -  $1.5\text{Y}_2\text{O}_3-2.0\text{Hf}$  (wt.%) をベース組成とし、熱力学拡散状態図と酸化物マップ状態図を用いて Ni と Al 濃度をパラメータに生成する相の体積率とアルミナ形成を制御した成分設計を行なった。選定した合金の組成を Table 1 に示す。メカニカルアロイングと放電プラズマによる粉末の焼結処理、熱間圧延により、8種類の CoNiCrAl ODS 合金バルク材の試作が成功した。また、生成する相とそこでの元素濃度、酸化物粒子の形態を高分解 TEM 顕微鏡で解析した。特に、STEM や 3D アトムプローブ装置を用いて直径~10 nm で微細な  $\text{Y}_2\text{Hf}_2\text{O}_7$  系複合酸化物が形成していることが明らかになった。東北大金研分析コアにある ICP 分析装置を利用して、試作された CoNiCrAl ODS 合金の成分を測定した。

2022年度(2年目)

(1) 機械的特性解析 : アルミナフォーミング CoNiCrAl ODS 超合金の延性を向上させるために、Co-Cr-Al 酸化物分散強化型超合金の微細組織と機械的特性に及ぼす Ni 添加の効果を調べた。作製した ODS 合金における室温引張試験を行い、Ni と酸化物粒子添加の体積割合と強度の関係を定量

的に評価した。Ni を添加しない超合金の完全な脆性破壊と異なり、Ni 添加超合金は延性破壊を示し、Ni 含有量の増加に伴って延性が直線的に増加したとことが証明された (Fig. 1)。高分解能 TEM 顕微鏡を用いて引張試験後試料に変形した場観察することにより、変形誘起マルテンサイト相変態によるナノ双晶形成および転位とナノ双晶・Y-Hf 酸化物粒子の相互作用が観察され、Ni 添加 Co-Cr-Al ODS 超合金の強度と延性の向上が実証された。微細構造の特性評価と機械的特性の結果に基づいて、塑性の増加に関するメカニズムを解明した [学術論文 Materials Characterization, 200, 2023 ; 金属学会講演 2 件]。

(2) 耐高温酸化性評価 : 大気高温耐酸化試験を行い、選定した成分が高温環境にも優れていることを確認した。Co-20Cr-15Al (at.%) ODS 超合金の大気中900°Cでの酸化挙動に及ぼす10, 20, 30 at%の Ni 添加の影響を系統的に調査した。Ni 添加は、初期酸化中の外側  $\theta$ -アルミナの成長と、長期暴露中の内側  $\alpha$ -アルミナの成長を抑制することにより、酸化速度を低下させたことを明らかにした。 $\theta$ -アルミナ層と  $\alpha$ -アルミナ層の界面における  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  の生成は、Ni 含有量の増加とともに確認された [学術論文 Corrosion Science, 212, 2023 ; 金属学会講演 1 件]。Ni 添加が Y-Hf 酸化物粒子の分散に及ぼす影響を発見し、関連するメカニズムを解明した。CoNiCrAl ODS 超合金におけるアルミナ被膜成長への  $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{Hf}$  共ドーピングの影響についても調査し、関連する実験結果をまとめてジャーナルに投稿した [掲載済み, Corrosion Science, 227, 2024]。また、アルミナフォーミング CoNiCrAl ODS 超合金の微細構造と機械的特性に及ぼす  $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{Hf}$  共添加の役割を解明し、その結果を Materials Transactions 誌に投稿する予定である。本研究で開発する ODS 合金では、Y-Hf 系酸化物分散粒子によるピンニング効果を付与することで、変形誘起ナノ双晶の減少を抑制することが証明された。

### 4. 成果の発表

大会発表

(1) 余 浩\*, 近藤創介, 奥野泰希, 笠田竜太 : Effect of Ni addition on the oxidation behavior and mechanical

Table 1 創製した CoNiCrAl 合金の成分.

No.	Co	Cr	Al	Ni	$\text{Y}_2\text{O}_3$	Hf
	at. %				wt. %	
1	Bal.	20	15	0	1.5	2.0
2	Bal.	20	15	30	1.5	2.0
3	Bal.	20	10	20	1.5	2.0
4	Bal.	20	20	20	1.5	2.0
5	Bal.	20	15	20	1.5	2.0
6	Bal.	20	15	10	1.5	2.0
7	Bal.	20	15	10	0	0
8	Bal.	20	12	20	0	0

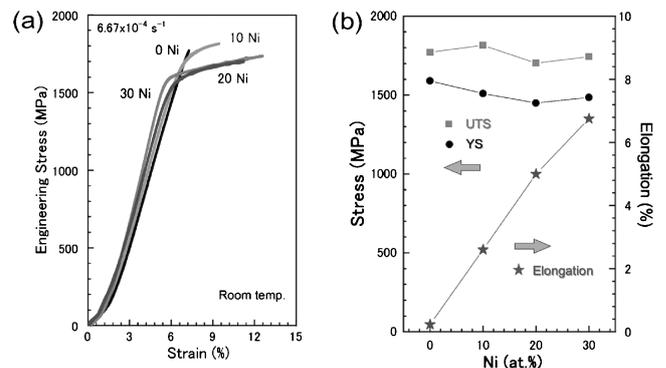


Fig. 1 CoNiCrAl ODS 合金の機械的特性に及ぼす Ni の影響 : (a) 応力-ひずみ曲線 ; (b) 詳細な YS, UTS, 伸び率.

properties of Co-based oxide dispersion strengthened superalloys (一般講演) 金属学会2022年春期(第170回)講演大会

- (2) 余 浩\*, 近藤創介, 笠田竜太: 高延性・高強度アルミナフォーミング CoNiCrAl ODS 超合金の開発(ポスター) 金属学会2022年秋期(第171回)講演大会
- (3) 余 浩\*, 近藤創介, 荻野靖之, 笠田竜太: Co-doping Y/Hf on the oxidation behavior of alumina-forming Co-based oxide dispersion strengthened superalloys (一般講演) 金属学会2023年春期(第172回)講演大会

論文投稿

- (1) Hao Yu\*, Sousuke Kondo, Ryuta Kasada and Shigeharu Ukai: Effect of Ni addition on the microstructure and mechanical properties of Co-Cr-Al oxide dispersion strengthened superalloys, *Materials Transactions* に2022年6月投稿, 7月末にリジェクトされた(受付番号: MT-M2022091). 当該論文は *Materials Characterization* にトランスファーして2023年4月にアクセプトされた: *Materials Characterization*, 200, 2023, 112892
- (2) Hao Yu\*, Sousuke Kondo, Ryuta Kasada and Shigeharu Ukai: Influence of Ni content on the oxidation behavior of alumina-forming Co-based oxide dispersion strengthened superalloys at 900°C, *Corrosion*

*Science*, 2023, 212

- (3) Hao Yu\*, Ryuta Kasada, Koji Inoue, Sousuke Kondo, Yasuyuki Ogino and Shigeharu Ukai: Contribution of Y2O3/Hf co-doping to alumina scale growth on oxide dispersion strengthened Co-based superalloy (*Corrosion Science*, under review)
- (4) The role of Y2O3/Hf co-doping on the microstructure and mechanical properties of alumina-forming Co-Cr-Al-Ni ODS superalloy, Submitted to *Materials Transactions*

#### 5. 本研究終了後の計画等

東北大学金研に就職以来, 新たな ODS 合金の材料製造・加工プロセスの開発や材料特性に関する研究に携わっている。この中で, Al 添加型 ODS オーステナイト鋼の開発において, 従来の同種材料を超える高強度高耐腐食性が得られており, 本研究と同様に変形誘起双晶変形の発生が示唆された。このような中で, 変形誘起ナノ双晶による高強度化の高温限界と, 高強度化と高延性の同時付与に関する新たな合金設計指針の構築に対する興味が高まった。当該研究を申請内容として今後の助成の申請予定がある。

#### 6. 研究代表者: 余 浩(東北大学)

#### 7. 共同研究者(研究実施者)

笠田竜太(東北大学); 近藤創介(東北大学); 劉嘉瑞(東北大学); Wang Haoran(東北大学)

