東北大学
TOHOKU UNIVERSITY

Press Release

令和 2 年 8 月 24 日

報道機関　各位

東北大学金属材料研究所

耐火用ハイエントロピー合金のナノ構造の解明に成功

― ナノレベルの不均一性利用による新しい高強度合金設計に貢献 ―

【発表のポイント】

- その新規性が注目されているハイエントロピー合金において、含有元素のナノレベルでの不均一な分布が優れた強度および延性を発現する起源であることを解明
- 加工の困難さや低い耐衝撃性が課題だったチタン基ハイエントロピー合金において、鋳造後の自然冷却中におこる元素の自発的混合を利用して優れた機械的特性を持つ新合金を実現
- 新たな高強度―高耐熱材料への応用展開が期待される

【概要】

ハイエントロピー合金は、画期的な特性実現の可能性を秘めた構造用金属材料として世界的に注目されています。東北大学金属材料研究所 金属組織制御学研究部門の張咏杰助教、古原忠教授は、米国マサチューセッツ工科大学、韓国ソウル国立大学との国際共同研究において、チタン基耐火ハイエントロピー合金のナノ構造を解明し、凝固時の相分離で自然に形成される固溶体の組成を持つ合金が新規 β’相のナノ析出で優れた強度―延性バランスを達成することを見出しました。本研究の成果は、ハイエントロピー合金の設計指針に元素の不均一分布の制御という新しい側面があることを明確に示すもので、この考え方に基づいた合金設計によって新たな高強度―高耐熱材料への展開が期待されます。

本研究成果は、Nature Materials に 2020 年 8 月 24 日（英国時間　16:00, 米国東部時間　11:00 ）にオンライン掲載（URL: https://www.nature.com/articles/s41563-020-0750-4）されます。

【詳細な説明】

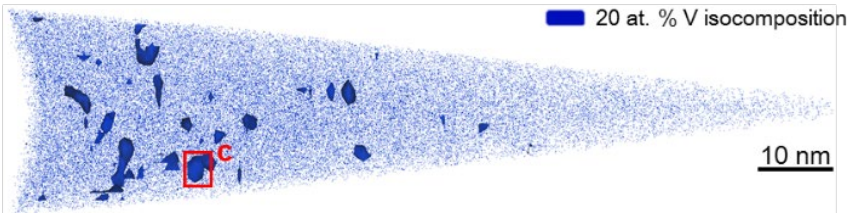
〇研究背景

現在、画期的な特性実現の可能性を秘めた構造用金属材料として世界的に注目されているハイエントロピー合金は、多種元素を等量含有することでエントロピーを著しく増大させ、合金構造が持つエネルギーを低下させて固溶体の安定化を図るという新しい材料設計のコンセプトによるものです。一方で、異種元素の組み合わせが元素間の結合を複雑かつ多彩に変化させることで、固溶体の不安定化を生む可能性も秘めています。しかし、ナノスケールの領域でのどの元素がどれくらい分布しているかの同定は容易ではなく、ハイエントロピー合金の特性との関係解明は未知の研究領域になっています。東北大金研の研究グループでは、原子種を特定したナノ領域での元素の空間分布を大規模かつ定量的に決定できる３次元アトムプローブ法という解析手段を用いて、ハイエントロピー合金の優れた特性の起源解明に取り組んでいます。

〇成果の内容

チタン基耐火性ハイエントロピー合金は、体心立方構造を持つβチタン母相中に化学組成が多様に変化した領域を大量に含んでいるため、優れた耐熱性を示す一方で製造プロセスでの加工の困難さや衝撃に対する弱さが課題となっています。本研究では、耐火チタン基ハイエントロピー合金を鋳造後自然冷却中におこる元素の自発的混合を利用して、室温でβ単相領域を示す合金組成を見出し、この情報を元に優れた強度と延性を兼ね備えた合金設計に成功しました。本特性の起源となるのはβ母相中にナノスケールで形成された体心正方構造を持つβ’相の析出です。

下図は、東北大グループが行った３次元アトムプローブ解析で得られた元素マップの一例です。 合金成分の１つであるバナジウム（V）が濃化した数ナノメートルの粒径を持つ β’相粒子（図中の濃い青の領域）が、微細に分布していることがわかります。この粒子は材料に力が加わった時に変形を引き起こす「転位」と呼ばれる欠陥の運動を阻害して強度を上昇させる一方で、一旦転位が粒子を通過するとその領域の変形が容易になるという「チャネリング効果」を誘起し、延性を維持する効果があります。今回の研究成果は、このような特異なナノ構造の形成が優れた機械特性の起源であることを明らかにしたものです。



〇意義・課題・展望
　ハイエントロピー合金が示す特異な性質は、多種元素の組み合わせによる高エントロピー効果がもたらす構造安定性に起因すると一般的に考えられていますが、本研究の成果はハイエントロピー合金の設計指針に、元素の不均一分布の制御という新しい側面があることを明確に示すもので、この考え方に基づいた合金設計によって新たな高強度―高耐熱材料への展開が期待されます。

【発表論文】
雑誌名：Nature Materials
英文タイトル：Natural-mixing guided design of refractory high-entropy alloys with as-cast tensile ductility
全著者：Shaolou Wei, Sang Jun Kim, Ji Yun Kang, Yong Zhang, Yongjie Zhang, Tadashi Furuhara, Eun Soo Park, and Cemal Cem Tasan
DOI：10.1038/s41563-020-0750-4

【専門用語解説】
※1　３次元アトムプローブ
　超高真空下で針状試料に高電圧やレーザーパルスを印加することで試料自身の原子をイオン化させた後、電界下で位置敏感型質量分析器まで飛行させて検出する。試料の表面から検出器までイオンの飛行時間を測定し、ポテンシャルエネルギーと運動エネルギーの保存則からイオンの質量電荷比が求めて元素の種類を決定し、飛行経路を元に試料中での原子配置まで同定できる解析技術。

※2　エントロピー
　構造の乱雑性・無秩序性・不規則性の度合を表す量で、物質や熱の出入りがない状態では常に増大する方向に物質の構造が変化する。原子の分布状態の組み合わせ数が大きいほどエントロピーは大きくなることから、多成分かつ等量の場合に高エントロピー状態となり。合金の構造が安定化する。

※3　耐火性
火災が発生した場合の熱に耐える性質、あるいは燃えにくい性質。

【共同研究機関および助成】
本成果は、米国マサチューセッツ工科大学の Prof. Cemal Cem Tasan らのグループ、韓国ソウル国立大学の Prof. Eun Soo Park らのグループとの共同研究によるものです。また本研究は、文部科学省科学研究費補助金「新学術領域研究」“ハイエントロピー合金 ― 元素の多様性と不均質性に基づく新しい材料の学理”（領域番号 6006 代表：乾晴行）の計画研究課題 “ハイエントロピー合金に

内在する元素間相互作用と相安定性原理の実験的解明”（課題番号 18H05456 代表：古原忠）に基づいて進められました。

本件に関するお問い合わせ先

◆研究内容に関して
東北大学金属材料研究所
金属組織制御学研究部門
教授　古原　忠
TEL：022-215-2045
Email：furuhara@imr.tohoku.ac.jp

◆報道に関して
東北大学金属材料研究所　情報企画室広報班
TEL：022-215-2144　FAX:022-215-2482
Email：pro-adm@imr.tohoku.ac.jp