

令和7年10月21日

各報道機関文教担当記者 様

電子廃棄物から着想を得た リサイクル型新ハイエントロピー合金の開発に成功 — 相分離による超微細粒と高強度化を同時実現 —

金沢大学理工研究域機械工学系の宮嶋陽司教授、インド工科大学ハイデラバード校（IIT Hyderabad）の Pinaki Prasad Bhattacharjee 教授らの研究グループは、電子材料の廃棄物（e-waste）に含まれる、金属成分を積極的に活用できる「リサイクル型」合金設計法を提案し、その実証として新しい相分離型ハイエントロピー合金（Phase-Separated High Entropy Alloy : PS-HEA）の開発に成功しました。

ハイエントロピー合金（HEA）（※1）は、複数の金属を均等に混ぜることで高い強度や耐久性を持つ次世代材料ですが、従来の HEA は高価な金属を含むため、実用化にはコスト面で課題がありました。本研究では、電子機器などのリサイクル過程で生じるスクラップ中の銅（Cu）を活用し、新たな合金を設計しました。この合金は、Cu を多く含む2種類の面心立方相（FCC1/FCC2）から成り、加工・熱処理によって1 μm 以下の超微細組織と約 850 MPa の高い降伏強度を両立することを実証しました。

本研究成果は、持続可能な資源循環社会に向けた低コスト・高性能構造材料設計に新たな方向性を示すもので、今後の環境配慮型ものづくりに大きな貢献が期待されます。

本研究成果は、2025年10月1日に『*Journal of Alloys and Compounds*』のオンライン版に先行掲載され、2025年10月15日に正式掲載されました。

【研究の背景】

ハイエントロピー合金は、5 種類以上の元素をほぼ等量で混合した新しいタイプの多元合金であり、高強度・高靱性・高耐食性などの優れた特性から次世代構造材料として注目されています。しかし、これらの合金は高価な元素 (Ni、Co など) を多く含むため、実用化時の高コストが課題となっていました。

一方、電子機器やモーター等のリサイクル過程で発生するスクラップには、銅 (Cu) などの遷移金属が多く含まれており、既存の鉄鋼材料では混入が性能悪化を引き起こすことがあり問題視されています。本研究は、リサイクルされた廃棄金属の組成をむしろ積極的に利用して新合金を設計するという「リサイクル型設計 (recycling-inspired design)」の概念に基づき、これらスクラップ中の Cu を活用可能な新しいハイエントロピー合金の開発を目的としました。

【研究成果の概要】

研究グループは、広く用いられている面心立方構造を持つハイエントロピー合金 (FCC-HEA) である Co–Cr–Fe–Mn–Ni 系合金 (※2) に、Cu を 25% 添加した新しい組成の $(\text{Co}_{20}\text{Cr}_{26}\text{Fe}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Ni}_{14})_{0.75}\text{Cu}_{0.25}$ 合金を設計し、その組織と加工特性を詳細に評価しました。この合金は、Cu を豊富に含む FCC1 相と Cu が乏しい FCC2 相に自然に分離し、さらに FCC2 相内にはクロム (Cr) が豊富な σ 相が析出して、コア-シェル構造を形成していました。その後の冷間圧延により σ 相が分断・溶解し、Cr 過飽和領域が生成されることを見出しました。本合金では、焼鈍により再析出したナノサイズの σ 相析出物が Orowan 機構 (※3) で高強化に寄与していました。その結果、約 850 MPa の降伏強度と 5~6 % の伸びを兼ね備える優れた強度-延性バランスを達成しました。計算による推定値 (固溶強化+Hall-Petch+Orowan-Ashby モデル) (※4) と実験値が良く一致することも確認され、微細構造制御の有効性を実証することができました。

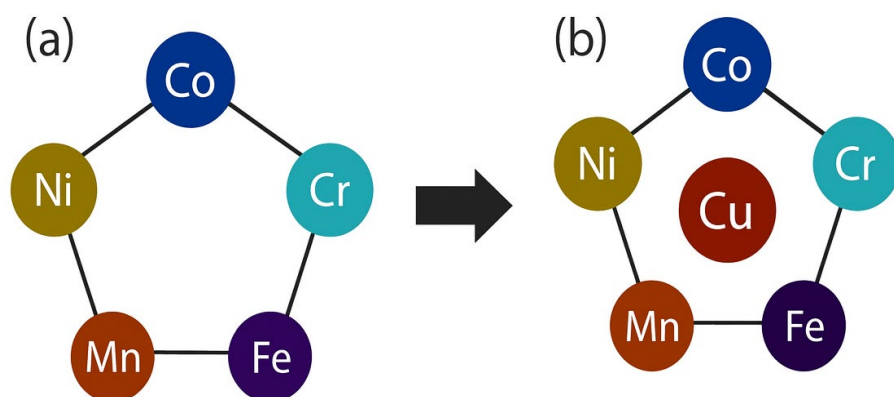
これらの成果は、従来利用しにくかった Cu 汚染スクラップの有効利用と合金設計の脱レアメタル化を両立させる実証例として、国際的にも注目されています。

【今後の展開】

本研究は、リサイクル資源を積極的に取り入れた「スクラップ耐性型材料開発 (scrap-tolerant materials)」という新しい方向性を拓くものです。今後は、Cr 量などの組成最適化により延性をさらに改善し、次世代の持続可能な構造材料・輸送機器材料への応用を目指します。

また、産業副産物や電子廃棄物を起点とした持続可能型材料設計の国際共同研究を継続して推進します。

本研究は、インド科学技術省（DST）プロジェクト（STR/2021/000044）、インド教育省 SPARC プログラム（SPARC/2019-2020/P2338/SL）、国際協力機構 JICA「FRIENDSHIP 2.0」、および日本科学技術振興機構（JST）Young India Research Program の支援を受けて実施されました。



図：(a) Co-Cr-Fe-Mn-Ni 系合金（従来材）、(b) (Co-Cr-Fe-Mn-Ni)-Cu 系合金（本研究）。

【掲載論文】

雑誌名：*Journal of Alloys and Compounds*

論文名：Recycling-inspired design and development of an ultrafine-grained phase-separated high entropy alloy

（超微細粒・相分離型ハイエントロピー合金のリサイクル発想に基づく設計と開発）

著者名：R. Yara, M.K. Singh, N.K. Chaitanya, M. Gor, U. Sunkari, Y. Miyajima, P.P. Bhattacharjee

（R. Yara, M.K. Singh, N.K. Chaitanya, M. Gor, U. Sunkari, 宮嶋陽司, P.P. Bhattacharjee）

掲載日時：2025 年 10 月 1 日にオンライン版に掲載、10 月 15 日に正式掲載。

DOI：10.1016/j.jallcom.2025.184155

【用語解説】

※1 ハイエントロピー合金（HEA）

複数の構成元素をほぼ同じ割合（5～35%）で混ぜ合わせた新しい概念の合金。従来の合金では、微量にしか添加されなかった元素を主要元素として用いることで、高い強度

や靱性、優れた耐熱性や耐食性など、既存の材料にはない特異な性質を示す。

※2 Co-Cr-Fe-Mn-Ni 系合金

クロム (Cr)、マンガン (Mn)、鉄 (Fe)、コバルト (Co)、ニッケル (Ni) の 5 つの元素を等しい原子比で混ぜ合わせた合金。2004 年に報告された、最も代表的なハイエントロピー合金の一つ。発見者の名前を使って「カンター合金」とも呼ばれることがある。

※3 Orowan 機構 (※3)

金属中の転位（原子面のずれ線）が、析出物などの障害物の内部を通らずに周りをすり抜ける（バイパスする）際に材料が強化される現象。微細な障害物が多数存在する場合、塑性変形を妨げるため、降伏強度が上昇する。

※4 固溶強化+Hall-Petch+Orowan-Ashby モデル

合金の強度を理論的に予測するための複合モデル。

- **固溶強化**：原子サイズの異なる元素が混ざることによって格子ひずみを生じ、転位の移動を阻害する効果。
- **Hall-Petch 関係**：結晶粒が細かいほど粒界が転位運動を妨げ、降伏強度が増加する関係。
- **Orowan-Ashby モデル**：析出粒子による転位バイパス機構（Orowan 機構）を定量的に組み込んだ強化モデル。

これらを組み合わせることで、合金の実際の降伏強度を理論的に再現・予測することができる。

【本件に関するお問い合わせ先】

■研究内容に関すること

金沢大学理工研究域機械工学系 教授

宮嶋 陽司（みやじま ようじ）

TEL：076-234-4716

E-mail：yoji-miyajima@se.kanazawa-u.ac.jp

■広報担当

金沢大学理工系事務部総務課総務係

松田 理奈（まつだ りな）

TEL：076-234-6951

E-mail：s-somu@adm.kanazawa-u.ac.jp