

# ハイエントロピー合金 (TaNb)<sub>0.7</sub>(ZrHfTi)<sub>0.3</sub>の 磁場中超伝導特性

工学研究科 産業技術デザイン専攻  
電気情報技術分野 博士前期課程  
2024年3月修了

川崎佑太

主査 西寄照和 副査 今坂公宣 末吉哲郎

## 研究背景

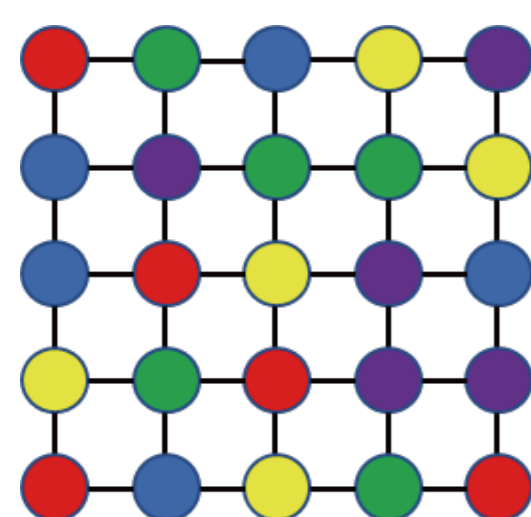
ハイエントロピー合金 (High Entropy Alloy: HEA) とは、主要元素が特定できない多成分系高濃度合金で、かつ単相の不規則固溶体である。これまで未開拓の多元系かつ高濃度の化学組成を持つハイエントロピー合金は、機械的強度、耐腐食性、耐酸化性が高く、熱的・構造的安定性にも優れているため、新規材料の開発につながると期待されている。

## 研究概要

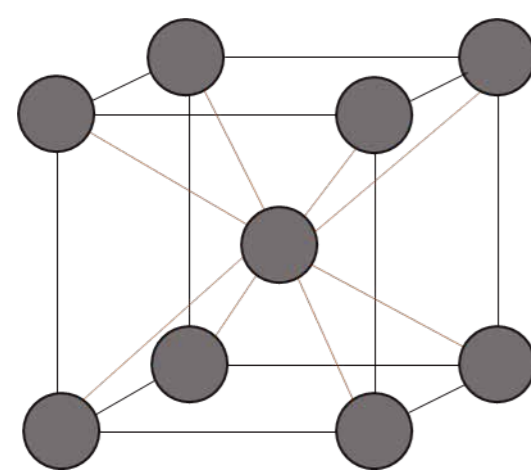
### 実験方法

- ・ (TaNb)<sub>0.7</sub>(ZrHfTi)<sub>0.3</sub> 試料
  - ・ アーク溶解法で作製、熱処理(真空中, 4日間)
  - ・ 熱処理温度  $T_{an}$ : 200°C, 300°C, 400°C, 600°C, 800°C, 1000°C
- ・ X線回折(結晶構造の確認)
- ・ 電界放出型走査電子顕微鏡 (FE-SEM) による表面分析
  - ・ 反射電子像(組成像の観察)
  - ・ エネルギー分散型X線分光 (EDX) 分析(元素の組成分布の確認)
- ・ SQUID磁束計による磁化測定(総合機器センター MPMS3)

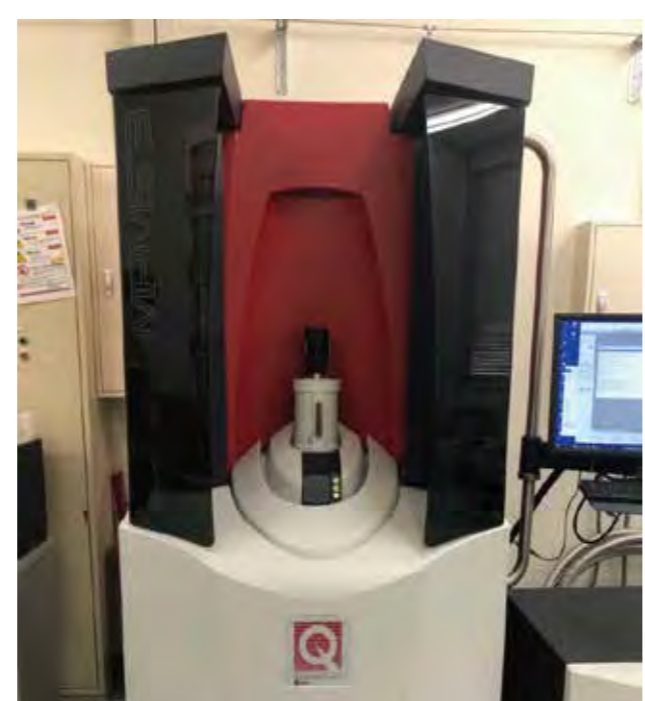
ハイエントロピー合金の概念図  
(5元素の場合)



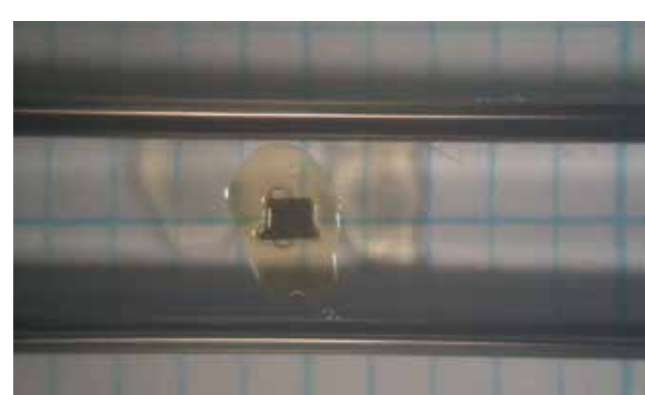
体心立方格子 (bcc) 構造



SQUID磁束計 (MPMS3)



石英試料ホルダと測定用試料



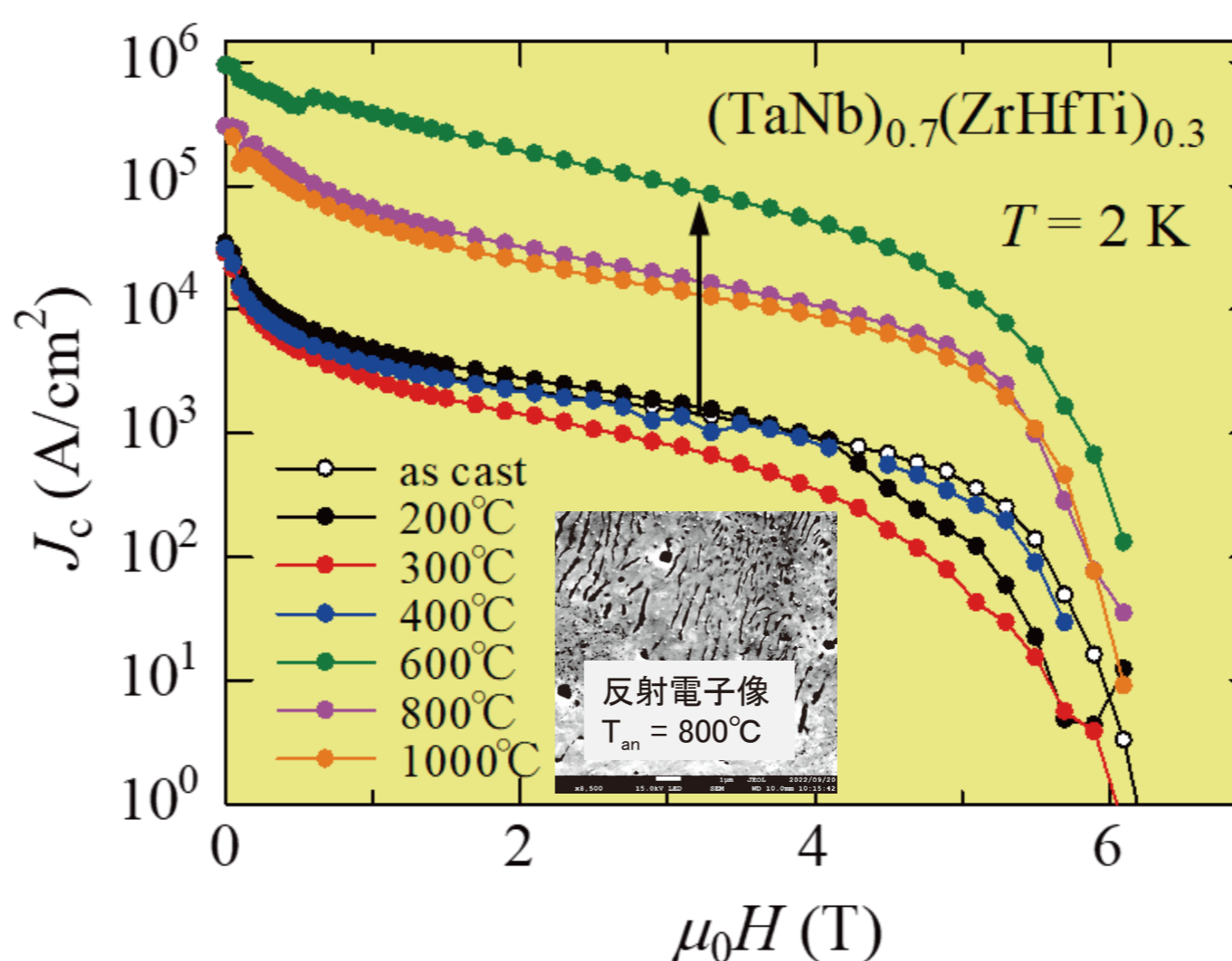
## 研究目的

本研究の目的は、ハイエントロピー合金 (TaNb)<sub>0.7</sub>(ZrHfTi)<sub>0.3</sub> の超伝導特性と磁束ピン止め特性を熱処理効果をもとに系統的に明らかにすることである。そのために、(TaNb)<sub>0.7</sub>(ZrHfTi)<sub>0.3</sub> の磁化測定を行い、臨界温度  $T_c$ 、上部臨界磁場  $H_{c2}$ 、臨界電流密度  $J_c$  などの超伝導特性を明らかにする。また、熱処理が超伝導特性に与える影響を調べ、 $J_c$  の最適条件を調べる。

### 実験結果

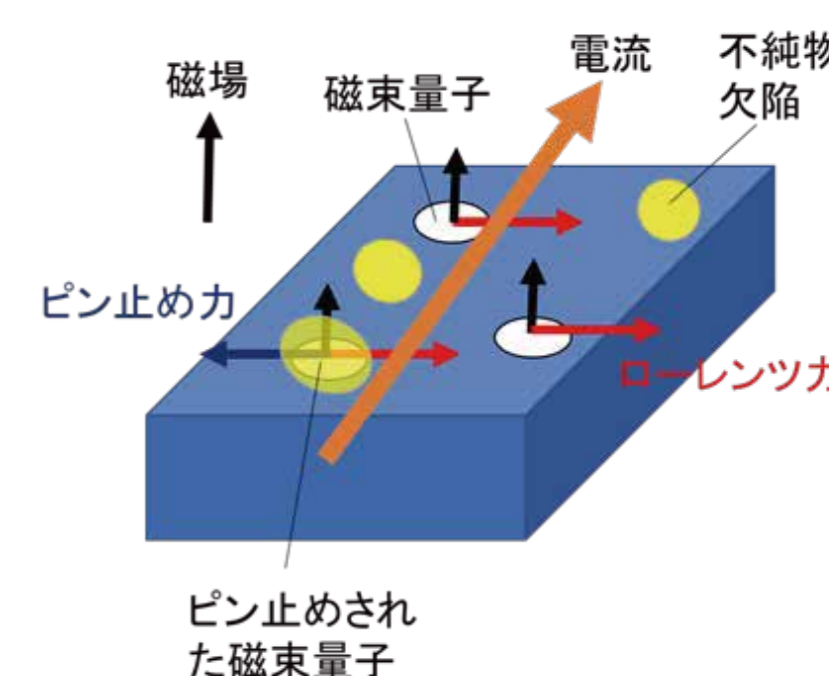
- ・ 非熱処理の as-cast 試料の臨界温度は  $T_c = 7.69$  K であり、熱処理による変化は 0.3 K 程度であった。
- ・ 2 K における臨界電流密度  $J_c$  は、as-cast,  $T_{an} = 200^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$  の試料では、 $3 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup> 程度であった。これに対し、 $T_{an} = 600^\circ\text{C}$ ,  $800^\circ\text{C}$ ,  $1000^\circ\text{C}$  で熱処理をした試料では、 $J_c$  が急激に増加し、 $T_{an} = 600^\circ\text{C}$  では  $J_c \sim 10^6$  A/cm<sup>2</sup> に達した。
- ・ X線回折を行った結果から、結晶構造は熱処理によらず bcc 構造をとり、異なる結晶構造の析出相は観測されなかった。
- ・ 反射電子像と EDX 分析の結果から、元素の組成が空間的に分布していることが分かった。特に  $J_c$  が高い試料では筋状の微細組織構造が観測され、磁束ピン止め中心の候補と考えられる。

$T = 2$  K における臨界電流密度  $J_c$  の磁場依存性



### 磁束ピン止め

- ・ 磁束量子と欠陥の相互作用
- ・ 磁束ピン止め力の増加 →  $J_c$  の増加



## 総括

ハイエントロピー合金の 200°C~1000°C の範囲で熱処理を行った試料を測定した結果、最適熱処理条件 (600°C) で  $\sim 10^6$  A/cm<sup>2</sup> に達する高い  $J_c$  が得られ、超伝導の実用に必要な値を超える特性が得られた。高  $J_c$  の起源を調べるために走査電子顕微鏡観察を行った結果、どの熱処理温度でも明相、暗相の2相に分かれ、暗相の中に筋状の微細組織構造と元素分布の偏りが観測され、これらが磁束ピン止め中心の候補であることを示した。

## point

### 指導教員コメント

本研究は、近年着目されているハイエントロピー合金 (HEA) についてその超伝導特性に着目した実験的研究であり、他大学 (東北大学、福岡工業大学) との共同研究プロジェクトに積極的に参加することで得られた成果も含まれている。超伝導 HEA は、通常の作製方法では臨界電流密度  $J_c$  が低いという問題があったが、熱処理を系統的に行うことで  $J_c$  が2桁程度上昇する条件を見出しており、超伝導応用にとって重要な知見を得ている。

西寄照和