

補助事業番号 2025M-461

補助事業名 2025年度 多結晶金属材料の変形に及ぼす結晶粒界と異相界面の役割の解明と高強度化 補助事業

補助事業者名 東京科学大学 永島涼太

## 1 研究の概要

本研究は、構造用多結晶金属材料に存在する結晶の境界、すなわち結晶粒界(同じ結晶構造どうしの界面)と異相界面(異なる結晶構造どうしの界面)の近傍で生じる局所変形を系統的に調査し、変形挙動に及ぼす両界面の役割の解明を目的とする。一般的に、粒界は、室温では、塑性変形の素過程となる転位運動を妨げることで強化因子としてはたらく一方、高温では弱化学子としてはたらく。我々のグループではこれまでに、粒界を母相とは異なる第二相で被覆することで高温強度が向上することを見出した。しかし、粒界面積は第二相の形成により減少する一方で、新たに異相界面が生成するため、粒界と異相界面がそれぞれ機会的特性に及ぼす影響を切り分ける必要がある。結晶界面の幾何学は、二結晶間の相対的な方位と界面の法線方向で規定されるが、マクロ試験における複雑な応力状態下でその効果を実験的に比較することは容易ではない。そこで本研究では、結晶方位と粒界面方位を同定した上で、ナノインデンテーション試験を行い、粒界と異相界面の役割を定量的に解明する。

## 2 研究の目的と背景

2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、自動車や航空機の燃費向上が求められている。燃費向上のためには軽量化およびエネルギーの高効率化が喫緊の課題である。これらを達成するには、車両重量の大部分を占めるボディ用材料に加え、高温環境で使用されるエンジン用材料の高強度化が鍵となる。さらに、省資源化と低コスト化の観点から、希少元素に依存しない材料設計が必要である。本研究では、多結晶金属材料に存在する結晶界面、すなわち結晶粒界(同相界面)および異相界面の近傍で生じる局所変形を広い温度範囲で系統的に調査し、両界面が材料特性に与える影響を解明することを目的とする。

## 3 研究内容

### (1) 粒界被覆率に及ぼす材料学的因子の解明

([http://kamonohashi.iem.titech.ac.jp/nakada/member\\_nagashima.html](http://kamonohashi.iem.titech.ac.jp/nakada/member_nagashima.html))

$\alpha$ -Cr相による粒界被覆率の組成依存性(過飽和度)および粒界の幾何学依存性を調査し、平均値では捉えられない粒界ごとのばらつきの要因を明らかにした。詳細を図を用いて以下に示す。図1に、過飽和度に伴う平均粒界被覆率の変化を示す。過飽和度の増加に伴い、粒界被覆率は著しく増加するが、1.5 at.%を超えると、粒内析出により過飽和度が消費されるため、増加は鈍化し、約3.0 at.%で概ね飽和する(平均粒界被覆率約90%)。さらに過飽和度を高めると、不連続析出により、平均粒界被覆率が低下する。したがって、過飽和度制御により平均被覆率を最大で90%まで

高めることが可能である。

一方で、いずれの過飽和度においても粒界ごとに被覆率は大きく異なり、平均被覆率が90%となる場合でも粒界被覆率が70%を下回る粒界も存在する。この粒界ごとのばらつきを支配する因子として、図7に粒界被覆率と粒界面と晶癖面とのなす角 $\phi$ の関係を示す。粒界を挟んだ両側の母相と結晶学的な方位関係を有する場合、被覆率は $\phi$ に依存せずほぼ100%である。これは、両側の結晶粒との方位関係が、母相同士の結晶方位によって決まり、粒界面方位に依存しないことに起因する。一方、片側の母相とのみ結晶学的方位関係が存在する場合、 $\phi$ の増加に伴って被覆率が低下し、30 deg以上で飽和する。 $\phi$ が小さいほど粒界上核生成の活性化エネルギーが低下し、核生成が促進されるため、被覆率が高くなると考えられる。

以上より、平均被覆率の向上には過飽和度制御が有効である一方で、粒界間のばらつきの低減には粒界性格を考慮した材料設計が重要であることが明らかとなった。

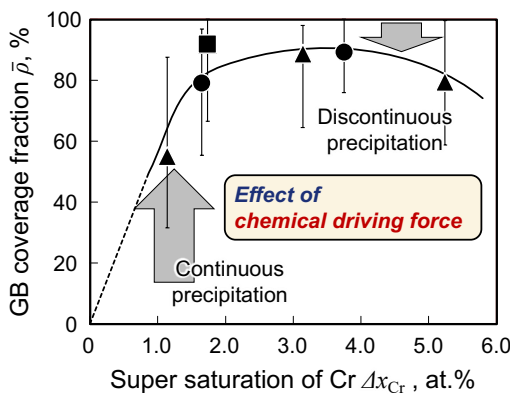


図1 粒界被覆率に及ぼす過飽和度の影響

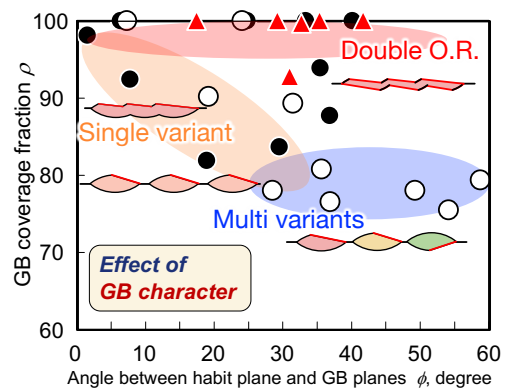


図2 粒界被覆率に及ぼす粒界性格の影響

## (2) 粒界および異相界面近傍の力学特性

([http://kamonohashi.iem.titech.ac.jp/nakada/member\\_nagashima.html](http://kamonohashi.iem.titech.ac.jp/nakada/member_nagashima.html))

図3および4はそれぞれ、粒内(GI)および異相界面(IPB)近傍でのナノインデンテーション試験による荷重P-変位h曲線の一例を示す。いずれも試料面法線方向が $(111)_\gamma$ となる粒に対して測定を行った。押し込み深さが160 nm以下の領域では、いずれの曲線もほぼ重なっている。一方、160 nm以降では異相界面近傍、180 nm以降では粒界近傍の曲線の傾きが粒内の傾きと比較して増加する。それぞれの圧痕中心から粒界および異相界面までの距離は、それぞれ0.96  $\mu\text{m}$ および0.68  $\mu\text{m}$ であり、Itokazuらが報告している塑性域の半径が押し込み深さの約5倍となる関係と、粒内の曲線からの乖離のタイミングが一致している。

粒界近傍における変形抵抗を評価する指標として、中野らが報告しているP/h-h曲線の傾きを用いると、粒内の変形抵抗が0.061 mN/nm<sup>2</sup>であるのに対し、異相界面の変形抵抗が0.075 mN/nm<sup>2</sup>となり、粒内に対して23%大きいことが明らかとなった。この差は、負荷中に散発する1 nm以下の微小なPop-inの影響を考慮するとさらに顕著に現れる。また、粒界の変形抵抗は、粒界を挟むす

ベリ系の幾何学的な整合性が低いほど増加する傾向が認められ、強化への寄与が示唆される。以上の結果より、異相界面は粒界と比較して転位運動を妨げる効果が高く、強化因子としてより支配的に作用する。したがって、粒界性格の制御および異相界面の導入により、さらなる高強度化が可能となることが明らかとなった。

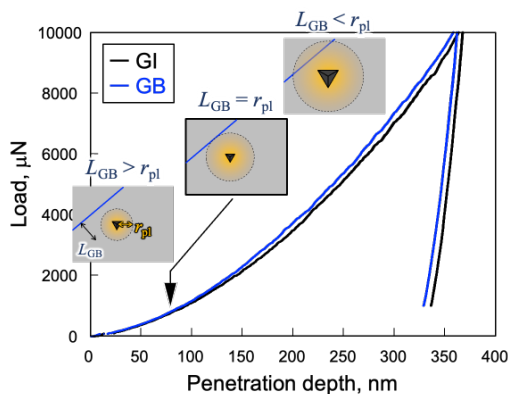


図3 粒界近傍の荷重-変位曲線

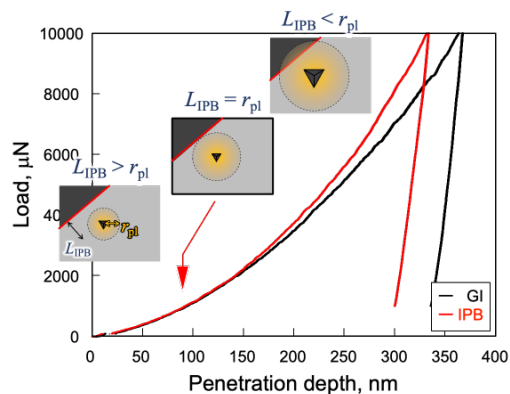


図4 異相界面近傍の荷重-変位曲線

#### 4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究で目指す結晶界面(粒界・異相界面)の役割解明と組織制御指針の確立は、希少元素に過度に依存せずに金属材料の秘めた可能性を引き出し、強度と信頼性を高めるための基盤となる。これにより、自動車分野ではボディ用鋼材のさらなる高強度化と薄肉化が可能となり、車体軽量化を通じて燃費向上と運輸部門のCO<sub>2</sub>排出削減に貢献できる。また、高温環境で使用される部材では、寿命向上および高温強度向上により、エンジンや排熱回収系の高効率化、保守頻度の低減、安全性の向上が期待される。

さらに、本研究で得られる「粒界性格制御」の考え方は、自動車に限らず、発電・化学プラント・航空機など高温高負荷環境で用いられる構造材料にも展開可能である。材料の高強度化・長寿命化は、部材の交換・再製造の頻度を低減し、原料使用量と製造工程由来のCO<sub>2</sub>排出の抑制にも直結するため、環境負荷の低減と産業競争力の強化の両立に資する。

以上より、本研究は、カーボンニュートラルに向けた省エネルギー化と高信頼性材料の開発を支える学理基盤として、実社会への波及効果が大きい。

#### 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

これまで私は、耐熱合金・耐熱鋼を対象として、第二相析出制御に基づく材料組織設計と力学特性評価を軸に研究を進めてきた。今回研究は、その延長線上で、材料強度を支配する結晶界面(粒界・異相界面)に着目し、従来のHall-Petchの関係だけでは捉えきれない界面の幾何学条件が、組織形成および機会的特性に及ぼす影響を定量化した点に特徴がある。

今回研究は、粒界性格を多結晶構造材料開発における粒界性格制御に基づく材料設計指針の

萌芽として位置付けられる。今後は、本成果を基盤として、粒界被覆率のさらなる向上や高温強度・寿命の改善など、界面制御を核とした高強度化・高信頼性化へと展開していく予定である。

#### 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

発表論文: 永島涼太, 中田伸生. Ni-Cr合金における粒界析出物のバリエーション選択とその粒界被覆率への影響, R054カーボンニュートラル実現のための耐熱材料委員会研究会, R054カーボンニュートラル実現のための耐熱材料委員会研究会報告, Vol. 4, No. 1, pp. 19-25

#### 7 補助事業に係る成果物

##### (1) 補助事業により作成したもの

本広報資料 ([http://kamonohashi.iem.titech.ac.jp/nakada/member\\_nagashima.html](http://kamonohashi.iem.titech.ac.jp/nakada/member_nagashima.html))

#### 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 東京科学大学(トウキョウカガクダイガク)

住 所: 〒226-8501(半角)

神奈川県横浜市緑区長津田町4259 J3-20

担 当 者: 助教 永島涼太(ナガシマ リョウタ)

担 当 部 署: 物質理工学院(ブッシツリコウガクイン)

E - m a i l: [nagashima.r.287a@m.isct.ac.jp](mailto:nagashima.r.287a@m.isct.ac.jp)

U R L: [http://kamonohashi.iem.titech.ac.jp/nakada/member\\_nagashima.html](http://kamonohashi.iem.titech.ac.jp/nakada/member_nagashima.html)