

# 強度と延性に優れた FCC 純コバルトを創製

## —結晶粒微細化による相安定性の制御—

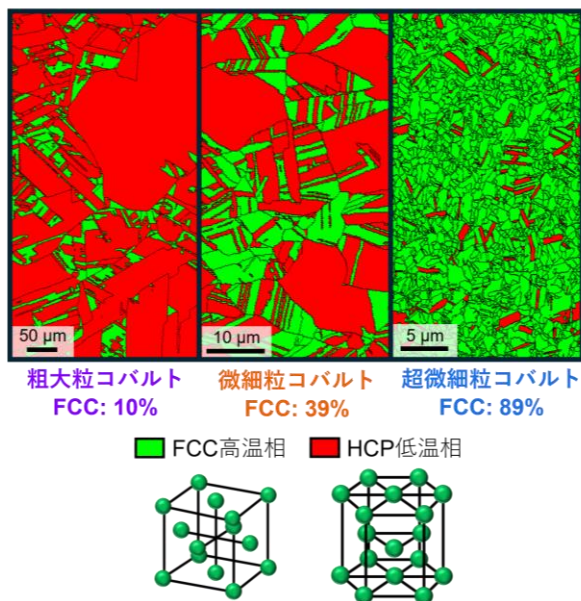
### 概要

京都大学大学院工学研究科 鈴木 拓未 特定研究員、高 斯 同准教授、吉田 周平 同助教、辻 伸泰 同教授らの研究グループは、高温で安定な結晶構造を室温でも多量に残留させることで、多結晶純コバルトの室温での強度（強さ）と延性（ねばさ）を大きく向上させることに成功しました。

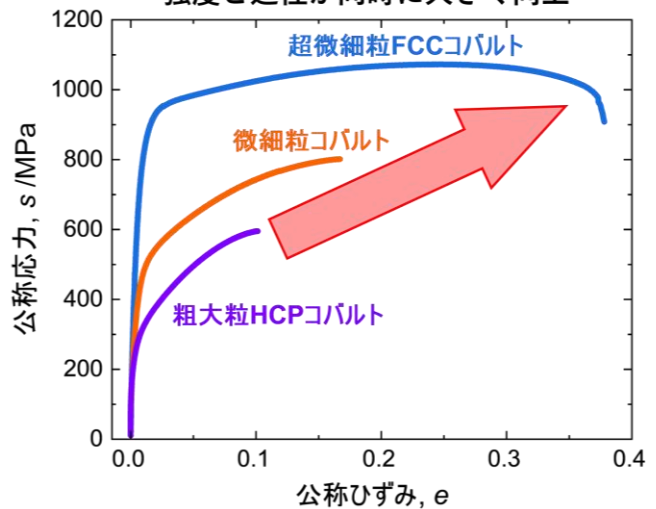
純コバルトは、室温では六方最密（HCP）構造が安定であり、一般に延性に乏しい金属です。一方、多結晶純コバルトでは、高温で安定な面心立方（FCC）構造が室温でも少量残留します。本研究では、純コバルトの平均結晶粒径を  $1 \mu\text{m}$  以下まで超微細化し、室温での FCC 相分率を 89%まで増加させました。その結果、超微細粒 FCC コバルトは粗大粒 HCP コバルトよりも優れた引張強度と伸びを示しました。引張変形中のその場 X 線回折測定と変形組織解析により、この高い延性は、変形中に FCC から HCP への相変態が促進されたことに加え、粗大な HCP 粒に起因する破壊が抑制されたことによるものと判明しました。本成果は、コバルトの応用可能性を広げるとともに、コバルト合金の高性能化に向けた組織設計に重要な指針を与えるものです。

本研究成果は、2026 年 4 月 16 日に国際学術誌「*Acta Materialia*」にオンライン掲載されました。

### 結晶粒微細化に伴う室温での FCC 相分率の増加



### 強度と延性が同時に大きく向上



図：多結晶純コバルトにおける結晶粒微細化に伴う室温での相分布と引張特性の変化（作成：鈴木拓未）

## 1. 背景

コバルトおよびその合金は、高温部材、切削工具、医療用インプラント、磁気記録媒体など、多様な用途に利用されており、現代社会を支える重要な金属材料の一つです。これらの材料が、荷重に耐える強度（強さ）と、衝撃を受けても急に割れずに変形できる延性（ねばさ）を兼ね備えていることは、高性能で信頼性の高い製品を開発する上で重要です。純コバルトは通常、室温では六方最密（Hexagonal close-packed: HCP）結晶構造をとります。HCP 構造では、塑性変形を担う転位すべり<sup>(注1)</sup>が起りやすい結晶面や方向に限られるため、純コバルトは延性に乏しいという課題がありました。

一方、純コバルトは約 417 °C 以上では面心立方（Face-centered cubic: FCC）結晶構造をとります。興味深いことに、多結晶純コバルトでは、冷却中に生じる FCC 相から HCP 相へのマルテンサイト変態<sup>(注2)</sup>が通常完全には進行せず、高温で安定な FCC 相が室温でも少量残留します。この残留 FCC 相の量は材料内部のミクロ組織に依存し、特に高温で FCC 単相であったときの平均結晶粒径（旧 FCC 粒径）が小さくなるほど増加します。これまでの研究では、旧 FCC 粒径を 10  $\mu\text{m}$  以下まで微細化すると、室温での FCC 相分率が 50% 以上に増加し、さらに残留 FCC 相が引張変形中に HCP 相へマルテンサイト変態し得ることが報告されています。このような変形誘起マルテンサイト変態は、鉄鋼材料やチタン合金などでは強度と延性の向上に寄与する場合があることが知られています。しかし、純コバルトにおいて、粗大粒径（100  $\mu\text{m}$  程度）から超微細粒径（1  $\mu\text{m}$  以下）までの広い範囲で旧 FCC 粒径を系統的に制御した例はなく、旧 FCC 粒径が FCC 相の安定性（室温での FCC 相の残留量）に及ぼす影響は十分に明らかではありませんでした。さらに、純コバルトにおいて、結晶粒微細化に伴う FCC 相分率および変形誘起マルテンサイト変態挙動の変化が力学特性にどのような影響を与えるのかも、これまで十分に理解されていませんでした。

## 2. 研究手法・成果

本研究では、純度 99.97 mass% の純コバルト板材に圧延加工を施した後、FCC 相が安定となる温度域で焼鈍することで、旧 FCC 粒径を 85  $\mu\text{m}$  から 0.64  $\mu\text{m}$  まで微細化しました。その結果、図 1 のように室温での FCC 相分率は、旧 FCC 粒径が 85  $\mu\text{m}$  の粗大粒コバルトでは 10% であったのに対し、旧 FCC 粒径 6.3  $\mu\text{m}$  の微細粒コバルトでは 39%、0.64  $\mu\text{m}$  の超微細粒コバルトでは 89% まで著しく増加しました。このように、結晶粒超微細化により FCC 高温相を室温で大きく安定化させ、FCC 相を主相とする「FCC コバルト」を室温で創製することに成功しました。

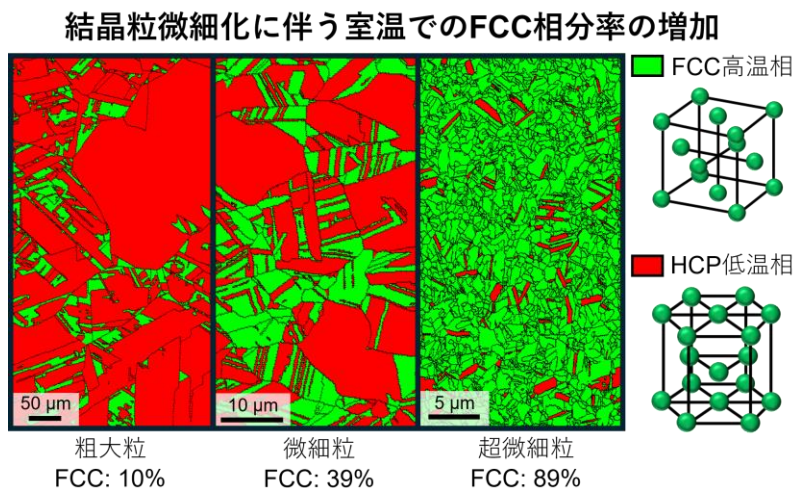


図 1：平均結晶粒径の異なる純コバルトにおける FCC 相と HCP 相の分布

室温での引張試験<sup>(注3)</sup>の結果、図2のように、結晶粒超微細化により純コバルトの強度と延性が大きく向上することが判明しました。従来の粗大粒 HCP コバルトでは引張強度が 581 MPa、破断伸びが 9%であったのに対し、超微細粒 FCC コバルトでは引張強度が 1072 MPa、破断伸びが 38%に達しました。一般に、純金属では、結晶粒超微細化により転位すべりの障害となる結晶粒界の密度が増加するため、強度は向上する一方で、延性が低下することが知られています。しかし、本研究で得られた純コバルトでは、結晶粒超微細化により、強度だけでなく延性も同時に向上するという特異な挙動が見られました。

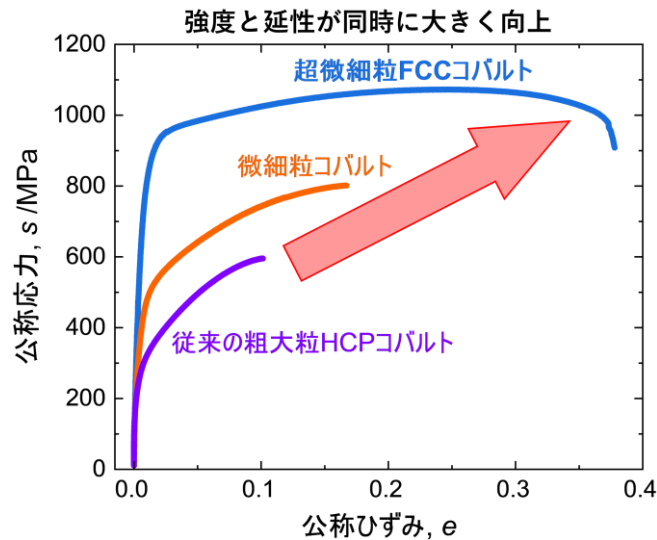


図2：平均結晶粒径の異なる純コバルトの応力（単位面積あたりの力）-ひずみ（変形の割合）曲線

超微細粒 FCC コバルトが高い延性を示す理由を明らかにするため、大型放射光施設 SPring-8（兵庫県）のビームライン BL13XU において、引張変形中のその場放射光 X 線回折測定<sup>(注4)</sup>を行いました。その結果、図3に示すように、超微細粒 FCC コバルトでは、他の試料と比べて、変形中に FCC 相から HCP 相へのマルテンサイト変態が顕著に生じることが分かりました。また、HCP 相は FCC 相よりも大きな内部応力を担い、塑性変形しにくい硬質相として働くことも明らかになりました。超微細粒コバルトでは、変形中に硬い HCP 相が次々に生じることで変形が一部に集中しにくくなり、延性を保つことができたと考えられます。

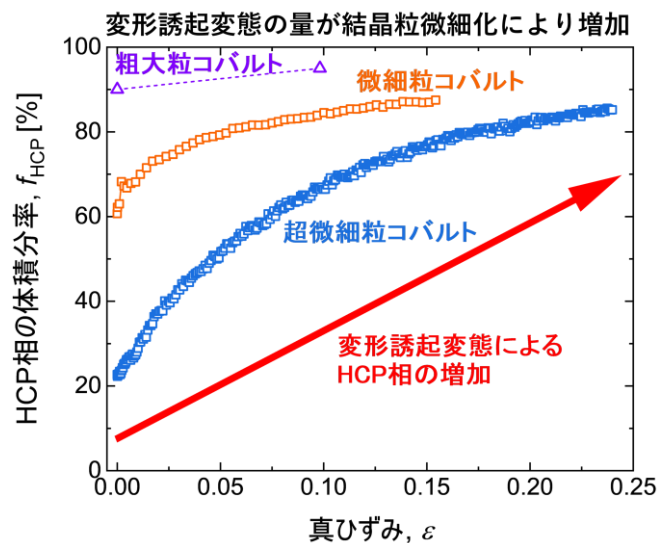


図3：引張変形に伴う HCP 相の体積分率の変化

さらに、引張破断後の組織観察により、結晶粒超微細化が破壊挙動も大きく変化させることが分かりました。図4に示すように、粗大粒 HCP コバルトでは、変形中にき裂が発生・進展し、破断に至りました。一方、超微細粒コバルトでは、このようなき裂の発生が抑制され、試験片全体が大きく伸びた後、微小な空洞の発生・結合を伴って破断しました。したがって、結晶粒超微細化は、純コバルトを「もろい材料」から「しなやかに変形できる材料」へと変える有効な手段であることが示されました。

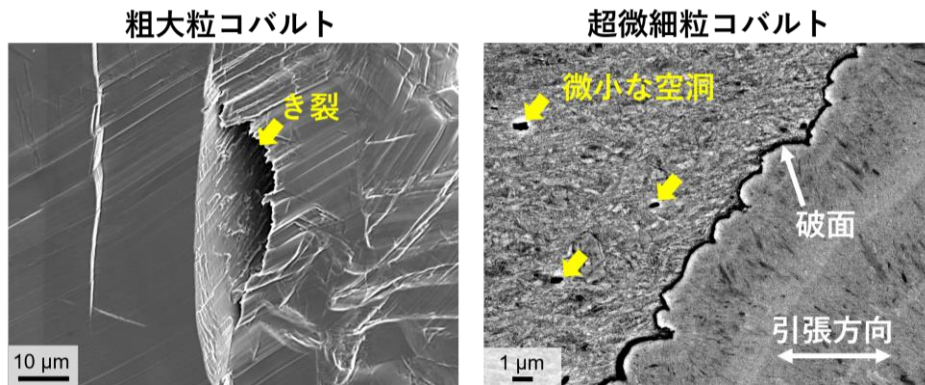


図4：平均結晶粒径の異なる純コバルトの引張破断後の組織

### 3. 波及効果、今後の予定

本研究は、室温で延性に乏しい従来の HCP コバルトとは対照的に、強度と延性を兼ね備えた FCC コバルトを創製し、結晶粒径が純コバルトの相変態挙動、力学特性、破壊挙動に及ぼす影響を系統的に明らかにした点に意義があります。これらの成果は、FCC コバルトの磁性材料などへの新たな応用可能性を広げるとともに、ミクロ組織制御に基づく高性能コバルト合金の開発に向けた設計指針となることが期待されます。

今後は、純コバルトで得られた「結晶粒径による相変態挙動の制御」という知見を他のコバルト合金にも展開し、優れた特性を有する金属材料の設計・開発につながる研究を進めていく予定です。

### 4. 研究プロジェクトについて

本研究は、文部科学省「元素戦略プロジェクト<研究拠点形成型> 構造材料元素戦略研究拠点 (ESISM)」(JPMXP0112101000)、日本学術振興会 科学研究費助成事業 (JP21K20487、JP22K14501、JP22K14509、JP23H00234、JP23K20037、JP25K00050、JP25K08343)、JST CREST (JPMJCR1994)、JST SPRING (JPMJSP2110) の支援により実施されました。放射光 X 線回折実験は、公益財団法人高輝度光科学研究センター (JASRI) の承認のもと、SPring-8 の BL13XU で実施されました (課題番号：2023A1038)。また、本研究の一部は、米国ローレンス・バークレー国立研究所の Molecular Foundry 内の National Center for Electron Microscopy (NCEM) の設備を利用して実施されました。

#### <研究者のコメント>

純コバルトという単純な純金属であっても、ミクロ組織制御により、新たな性質を引き出せることを示せた点に、本研究の面白さがあると考えています。FCC コバルトの作製が思うように進まず苦労した時期もありましたが、こうして本論文の出版に至ることができ、大変嬉しく思います。(鈴木拓未)

### <論文タイトルと著者>

タイトル：Ultra-grain refinement creates FCC pure cobalt with high strength and high ductility（結晶粒超微細化による高強度と高延性を両立した FCC 純コバルトの創製）

著者：Takumi Suzumura（鈴木 拓未：京都大学 特定研究員），Si Gao（高 斯：京都大学 准教授），Shuhei Yoshida（吉田 周平：京都大学 助教），Rohan Dhall（ローレンス・バークレー国立研究所 Molecular Foundry/NCEM Principal Scientific Engineering Associate），Andrew M. Minor（カリフォルニア大学バークレー校 教授 兼 ローレンス・バークレー国立研究所 Molecular Foundry/NCEM 施設長），Nobuhiro Tsuji（辻 伸泰：京都大学 教授）

掲載誌：Acta Materialia DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2026.122245>

### <用語解説>

#### 注1：転位すべり

結晶に応力（力）が加わったときに、一次元の格子欠陥である転位が、特定の結晶面と方向に沿って移動する現象。転位すべりが起こることで、結晶中の原子の並びが一原子面ずつずれていき、塑性変形が生じる。

#### 注2：マルテンサイト変態

原子の長距離拡散を伴わず、結晶構造がせん断的に変化する固体中の相変態の一種。

#### 注3：引張試験

固体試料に荷重または変位を与え、一方向に引張変形させることで、材料の力学特性（降伏強度、引張強度、破断伸びなど）を測定する力学試験。加えた荷重を試験片の断面積で割ることで応力を、試験片の伸びを元の長さで割ることでひずみを求める。

#### 注4：引張変形中のその場放射光 X 線回折測定

高輝度の X 線を試験片に照射しながら引張試験を行い、変形中の X 線回折プロファイルの変化をリアルタイムで測定する手法。回折ピークの積分強度から HCP 相・FCC 相の体積分率を、回折ピーク位置の変化から各相が担う平均内部応力を定量評価できる。