

辻 伸泰

京都大学大学院工学研究科
教授

異種変形モードの核生成制御による高強度・高延性金属の実現

§ 1. 研究成果の概要

輸送機器の軽量化や建築物等の巨大化などを背景に、構造材料に対する高強度化の要求が高まっている。一方で構造材料には、部材に加工するための加工性(延性)や、事故・災害時に脆く破壊しないためのねばさ(靱性)も要求される。金属材料は高い強度と金属結合に由来した大きな延性・靱性を併せ持ち、安全で信頼性の高い社会に不可欠な構造材料であるが、一般に材料の強度が高くなると延性・靱性は低下し、金属材料もその例外ではない。研究代表者はこれまでにバルク体を構成する結晶粒の大きさをナノメートルスケールに超微細化した金属材料(バルクナノメタル)の研究を継続的に行い、ある種の金属・合金のバルクナノメタルにおいては、高い強度と大きな延性・靱性が両立できることを発見した。高強度・高延性バルクナノメタルにおいては、通常は活動しない変形モードが結晶粒界から核生成し、それが材料全体の加工硬化能の向上につながって、高い強度と延性をもたらしていた。こうした知見を背景に、本研究はバルクナノメタルなどのナノ・マイクロ組織を制御した金属材料において、種々の変形モードの新たな発生(核生成)をもたらす機構と、その結果として生じる加工硬化の再生機構を基礎的に明らかにした上で、異なる変形モードを順次核生成することのできる材料とナノ・マイクロ組織を設計し、高強度と高延性を両立した究極の構造材料を実現することを目的としている。分子動力学法による原子シミュレーションおよび電子顕微鏡(TEM、SEM)中の直視観察・解析により変形モードの界面からの核生成機構を明らかにし、DIC(デジタル画像相関法)による局所ひずみ応力解析、マイクロピラー試験、その場回折実験や Phase-field・転位-結晶塑性-FEM 解析などの先端的な実験・計算手法を駆使して、ナノスケールの変形機構とマクロスケールの力学挙動を結びつけるとともに、優れた材料の設計と創製につなげる。

初年度である 2019 年度は、まず第一に、バルクナノメタルにおける粒界からの新たな変形モードの核生成と、それによる加工硬化の向上に基づく高強度と高延性の両立という本研究の基礎概

念を国際学術誌に論文として発表した(代表的な原著論文)。約半年間の研究期間に、超微細粒二相材料・TWIP 材料の作製、マイクロピラー試験による核生成直視観察実験のための試料作製と試験条件の確立、粒界からの核生成の TEM 内直視観察実験のための装置導入と試料作製条件の確立、二相材料および TWIP 材料の原子シミュレーションモデルの構築、TRIP 材料の Phase-field・転位-結晶塑性-FEM 解析モデル構築など、研究遂行のために必要な実験基盤・技術やシミュレーションモデルを整備できた。作製した種々の平均粒径の TWIP 材料(高 Mn 鋼)の力学特性を系統的に試験して高い強度と大きな引張延性の両立を確認するとともに、TEM グループとの連携研究により、結晶粒微細化とともに粒内の転位すべりが抑制され、粒界から変形双晶が発生することを見出した(図)。これはバルクナノメタル化に伴う変形モードの変化を実証したものであり、本研究を今後進展させる上で重要な成果である。また分子動力学原子シミュレーションにより、粒界から核生成する変形双晶の頻度やサイズが結晶粒径に依存するという知見が得られた。今後はターゲットとしている各材料においてこうした実験的知見と計算科学による知見を獲得・融合し、連携研究から生まれる新しいアイデアを柔軟に取り入れて研究を進展させていく。

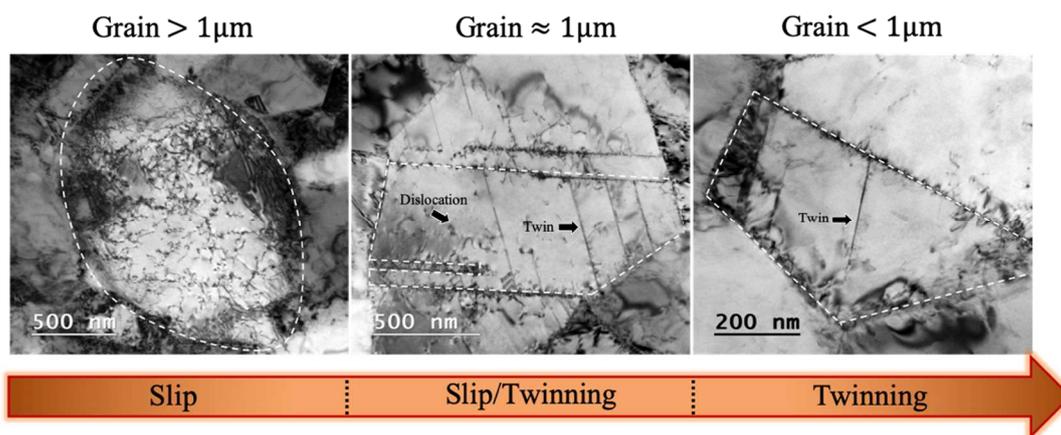


図 結晶粒微細化に伴う 31Mn-3Al-3Si TWIP 鋼の降伏直後の変形組織の遷移を示す TEM 観察結果。

【代表的な原著論文】

1. Nobuhiro Tsuji, Shigenobu Ogata, Haruyuki Inui, Isao Tanaka, Kyosuke Kishida, Si Gao, Wenqi Mao, Yu Bai, Ruixiao Zheng, Jun-Ping Du, “Strategy for managing both high strength and large ductility in structural materials - sequential nucleation of different deformation modes based on a concept of plaston”, Scripta Materialia, vol. 181, pp.35-42, 2020.

§ 2. 研究実施体制

(1)「辻」グループ

- ① 研究代表者:辻 伸泰 (京都大学工学研究科、教授)
- ② 研究項目
 - ・種々の粒径や硬質相分布状態を有する二相材料の創製
 - ・作製した二相材料のマクロ力学特性と変形機構の解明
 - ・種々の粒径を有する TRIP 材料・TWIP 材料の創製とマクロ力学挙動解明
 - ・粒界・界面からの硬質相の核生成のメゾスケール直視観察

(2)「下川」グループ

- ① 主たる共同研究者:下川 智嗣 (金沢大学理工研究域、教授)
- ② 研究項目
 - ・種々の粒径や硬質相分布状態を有する二相材料の変形応答に関する力学シミュレーション
 - ・原子シミュレーションによる粒界・界面からの硬質相の核生成機構解明

(3)「志澤」グループ

- ① 主たる共同研究者:志澤 一之 (慶應義塾大学理工学部、教授)
- ② 研究項目
 - ・二相材料の Phase-field・転位-結晶塑性解析による組織形成シミュレーション
 - ・種々の粒径や硬質相分布状態を有する二相材料の変形応答に関する力学シミュレーション

(4)「村山」グループ

- ① 主たる共同研究者:村山 光宏 (九州大学先導物質化学研究所、教授)
- ② 研究項目
 - ・粒界・界面からの硬質相の核生成のナノスケール直視観察と力学物性解析