
鉄鋼研究プロジェクト 中間報告会

「粒界工学手法による汎用鋼の高機能鋼化」シンポジウム II 開催案内

現在、粒界工学の応用はオーステナイト鋼等の積層欠陥エネルギーの低い材料に限られている。本研究では、オーステナイト系以外の鉄鋼材料に対する粒界制御の指導原理および具体的な制御方法を確立し広範な鋼種への粒界工学手法の適用を可能とすること、粒界制御された鉄鋼材料の実用化に向けた課題を解決すること、さらに、粒界工学の学術基礎を確かなものにするために方位制御された双結晶試料を用いて最新の実験・理論的解析手法により粒界が関わる諸現象の理解の深化を図ることを目的としている。

本シンポジウムでは、プロジェクトメンバーによる研究開発の途中経過を報告し、その内容について討議する。参加者による活発な議論を期待する。

1. 日 時：2025年9月17日(水) 10:00~16:20

2. 場 所：北海道大学 札幌キャンパス (第190回秋季講演大会 会場10)
〒060-0808 北海道札幌市北区北8条西5丁目
JR線「札幌」駅 北口改札から構内まで徒歩約7分

3. プログラム：

10:00~10:15 プロジェクト概要紹介 連川貞弘(熊大)

10:15~10:45 転位一粒界の力学的相互作用の定量評価
○大村孝仁、井誠一郎、出口裕佳(NIMS)、連川貞弘(熊大)

10:45~11:15 転位の3次元観察に関する最近の進展
○波多聰(九大)、村田貴太、趙一方(九大院生)、譚田真人、井誠一郎、大村孝仁(NIMS)

11:15~11:35 粒界工学に基づく省資源型オーステナイト系ステンレス鋼の開発に向けた基礎検討
○志賀春日(熊大・現東京科学大院生)、多久島睦子、濱田純一(日本製鉄)、連川貞弘(熊大)
(昼食)

13:00~13:25 ラボスケールおよび実スケールで作製したSUH409L粒界制御材の引張変形挙動
○大賀舜介(足利大院生)、小林重昭(足利大)、連川貞弘(熊大)

13:25~13:55 フェライト系ステンレス鋼粒界制御材の溶接熱影響部における組織変化
○山下正太郎、才田一幸、平田弘征(阪大)
(休憩10分)

14:05~15:05 【基調講演】鉄鋼材料における軽元素の粒界偏析の定量測定とそのモデル化
宮本吾郎(東北大)
(休憩10分)

15:15~15:40 STEM-EELS法を用いたFe-3mass%Si合金粒界近傍の磁気モーメント分布評価
○中嶋優希(熊大院生)、井誠一郎(NIMS)、津志田雅之、山室賢輝、連川貞弘(熊大)

15:40~16:10 Fe-Mn鋼における低温脆化とMnが粒界強度へ及ぼす影響
田中將己、森川龍哉、山崎重人(九大)

16:10~16:20 総合討論

4. 資 料：配布資料あり
講演大会サイトよりダウンロードできます。

5. 参 加 費：無料

6. 申込方法：当日申込

【講演大会に参加される方】

別途、参加登録が必要です。[協会WEBページ \(https://www.isij.or.jp\)](https://www.isij.or.jp)をご確認いただき、期間内にお申込みください。

【シンポジウムのみに参加される方】

講演大会当日、大会受付にてお申込みください。(WEB申込は不要です)

7. 問い合わせ先：熊本大学 大学院先端科学研究部 連川 貞弘(プロジェクト主査)
Email: turekawa@kumamoto-u.ac.jp

転位—粒界の力学的相互作用の定量評価

Quantitative evaluation of dislocation-grain boundary interaction

NIMS 大村 孝仁, 井 誠一郎, 出口 裕佳
熊大 連川 貞弘

1. はじめに

粒界における塑性変形抵抗は、転位—粒界相互作用を素過程とする局所的な力学挙動に深く関係する。相互作用モデルとして、すべり運動の障害となるパイルアップモデルや転位源として働くモデルが示されているが、機構の詳細を解明するには粒界性格の影響などを明らかにすることが重要である。本研究では、局所力学挙動を実験的に解析する手段としてナノインデンテーション法を応用し、単独粒界の変形抵抗を定量的に評価する試みについて述べる。これにより、塑性変形の伝播に対する粒界の抵抗について考察する。

2. 実験方法

試料は、 $\langle 110 \rangle$ 方向を共通回転軸とする対称傾角粒界 $[111]\Sigma 3$ を含む Fe-Si 固溶体双結晶を用いた。試料表面には、機械研磨損傷層を取り除くために電解研磨で最終仕上げを施した。ナノインデンテーションは、Berkovich 型ダイヤモンド圧子を用いた荷重制御方式で行い、得られた荷重—変位関係から力学挙動を解析した。また、インデンテーションとプローブを共有した走査プローブ顕微鏡によって、試料表面上の計測位置を高い精度で決定した。

3. 結果と考察

Fig. 1 (a)は、双晶界面近傍に形成された圧痕の SPM (Scanning Probe Microscope)像である。圧痕三角形の周辺に現れている白いコントラストは、塑性変形に対応する試料表面上の隆起である。図の左側に形成されている隆起は、粒界部分で強い抵抗を受けていることが確認できる。この圧入変形の過程において、圧痕下に形成される塑性変形域が粒界に到達する前後の変形抵抗を荷重—変位関係から抽出し、粒界からの距離に対してプロットしたものが Fig. 1 (b)である。到達前を粒界相互作用無し (赤丸)、到達後を相互作用有り (青丸)として表記し、それぞれの平均値を同色の水平線で示している。相互作用有りの平均値は無しに比べて約 20%上昇しており、粒界からの変形抵抗をある程度の定量性で評価可能と判断される。塑性域が粒界に到達する条件は押し込み深さで規格化しており、プロットが横軸に対して傾向を持たないことは、このモデルを用いれば粒界からの距離にかかわらず同様の評価が可能であることを示している。

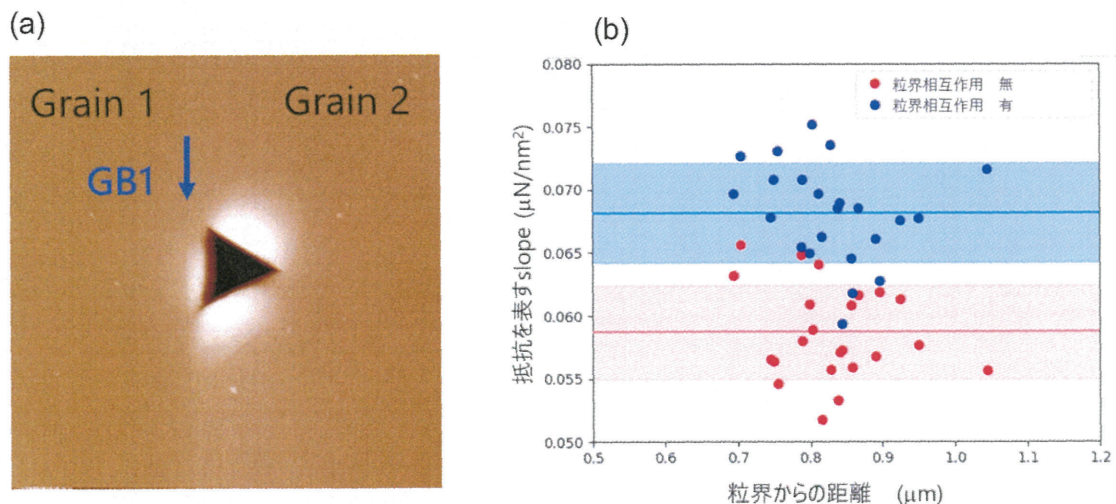


Fig.1 (a) Scanning probe microscope image of indent mark showing significant impedance to plastic deformation at grain boundary (b) impedance factor with (blue) / without (red) interaction between plastic zone and grain boundary demonstrating a quantitative evaluation of GB resistance.

転位の 3 次元観察に関する最近の進展

Recent progress in three-dimensional observation of dislocations

九大 波多聰、九大院生 村田貴太、趙一方、NIMS 譯田真人、井誠一郎、大村孝仁

転位の 3 次元観察に関する報告は、電子線や X 線を用いたコンピュータ断層撮影 (CT) による材料組織解析が普及し始めた 2000 年台から 2010 年台にかけて増えている。なかでも、電子顕微鏡による転位の 3 次元観察は、国内では東田、田中ら[1]、海外では Robertson、Kacher ら[2]により精力的に行われ、結晶性材料の塑性変形や破壊の研究における 3 次元転位観察の有効性が示されてきた。

3 次元観察と並んで近年の顕微鏡研究を大きく進展させているのがその場観察であろう。電子顕微鏡観察の対象が結晶性材料の組織であれば、通常の 2 次元観察から 3 次元観察への微細構造の理解はある程度可能であり、さらにその場観察を組み合わせれば、結晶塑性や破壊現象のよりリアルな観察が可能になるとともに、理論計算との連携も強固なものとなる[3]。計算との連携という観点からみると、3 次元観察は定量的な微細構造情報を与える点で有効であり[2]、その場観察と 3 次元観察の融合が電子顕微鏡研究における最近のトピックの一つとなっている[4]。転位よりもその場 3 次元電子顕微鏡観察が容易な観察対象 (例えば、金属ナノ粒子の焼結) においては、実験誤差までも考慮したデータ同化の手法により、その場 3 次元観察結果を計算で忠実に再現して材料組織を予測する試みが始まっている[5]。転位のその場 3 次元電子顕微鏡観察では、音速レベルに達することもある転位の運動速度に対して 3 次元動画の時間分解能が圧倒的に低いことが課題であるが、最近の研究で、サブ秒レベルの時間分解能で転位の 3 次元その場観察が達成されている[6]。

当該研究プロジェクト「粒界工学手法による汎用鋼の高機能化」では、上記のような最も最近の観察手法よりも少し以前の、比較的確立された電子顕微鏡観察手法を採用している。すなわち、その場観察と 3 次元観察はそれぞれに長けた複数の研究グループで行い、粒界をキーワードに、結晶塑性の理解の深化につながる新知見を、それぞれの研究手法を用いて追及している。これは、汎用鋼がフェライトを主相とした強磁性体であり、そのことが電子顕微鏡による高分解能その場観察や 3 次元観察への障壁になると想定したためである。講演者グループ (波多、村田、趙) が担当する 3 次元電子顕微鏡観察では、ナノインデントにより Fe-Si 固溶体合金双結晶の粒界近傍に導入された転位を 3 次元可視化し、従来理論や理論計算との連携により鉄 (鋼) の粒界と転位の相互作用を調べており、これまでに、 $\Sigma 3 \{112\} \langle 110 \rangle$ 対称傾角粒界近傍転位の 3 次元可視化と転位性格解析を行った[7]。

電子顕微鏡観察用試料の作製に用いる集束イオンビーム加工は、双結晶粒界近傍箇所の選択的な薄膜化と強磁性体試料体積の最小化に不可欠である反面、イオンビーム照射に伴う鉄系試料加工表面部の欠陥 (転位ループと考えられる) の強い像コントラストが、観察したい粒内・粒界の転位の 3 次元可視化を難しくする要因となっており、観察手法と画像処理の観点から課題克服に取り組んでいる[7]。今後の展開として、当プロジェクトで開発中の鋼材において注目すべき粒界 (例えば、小角粒界) の転位組織を 3 次元観察・解析し、粒界制御への指針に繋げることが考えられる。

- [1] M. Tanaka, K. Higashida, K. Kaneko, S. Hata, M. Mitruhara, *Scripta Mater.* **59**, 901 (2008).
- [2] J. Kacher, B.P. Eftink, B. Cui, I.M. Robertson, *Curr. Opin. Solid State & Mater. Sci.* **18**, 227 (2014).
- [3] J. Kacher, T. Zhu, O. Pierron *et al.*, *Curr. Opin. Solid State & Mater. Sci.* **23**, 117 (2019).
- [4] S. Hata, S. Ihara, H. Saito, M. Murayama, *Microscopy* **73**, 133 (2024).
- [5] A. Ishii, A. Yamanaka, M. Yoshinaga, S. Sato, M. Ikeuchi *et al.*, *Acta Mater.* **278**, 120251 (2024).
- [6] Y. Zhao, H. Gao, J. Bo, Z. Guo, Q. Zhang *et al.*, *Mater. Characterization* **221**, 114725 (2025).
- [7] 村田貴太、趙一方 他、日本鉄鋼協会 2025 年秋季 (第 190 回) 講演大会概要集 (2025).

Satoshi Hata (Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University, 6-1 Kasugakoen, Kasuga, Fukuoka 816-8580)

Kanta Murata, Yifang Zhao (Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, 6-1 Kasugakoen, Kasuga, Fukuoka 816-8580)

Masato Wakeda, Seiichiro Ii, Takahito Ohmura (National Institute for Materials Science, 1-2-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-0047)