

セレーション挙動の解明

—高強度・高延性を示す高 Mn 鋼の変形の本質に迫る—

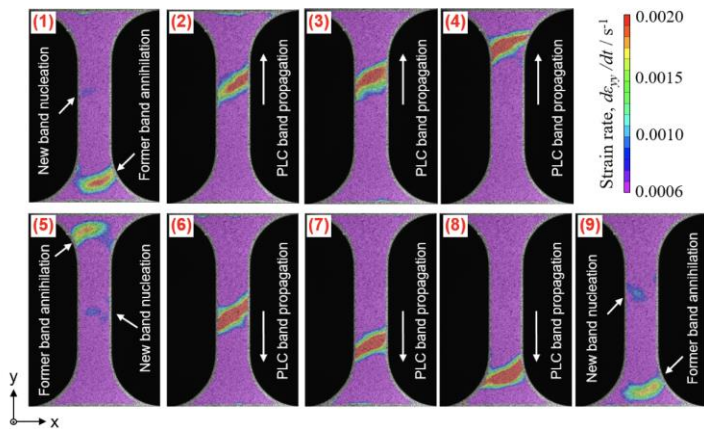
概要

京都大学大学院工学研究科材料工学専攻 黄錫永 博士後期課程学生、学際融合教育研究推進センター 朴明 験 特定助教、工学研究科材料工学専攻 バイ・イ 助教、辻伸泰 同教授（兼：京都大学構造材料元素戦略研究拠点（ESISM）主任研究者）らは、兵庫県立大学、高輝度光科学研究センター（JASRI）の共同研究者とともに、高 Mn 鋼が変形時に示すセレーション挙動の原因を初めて解明しました。

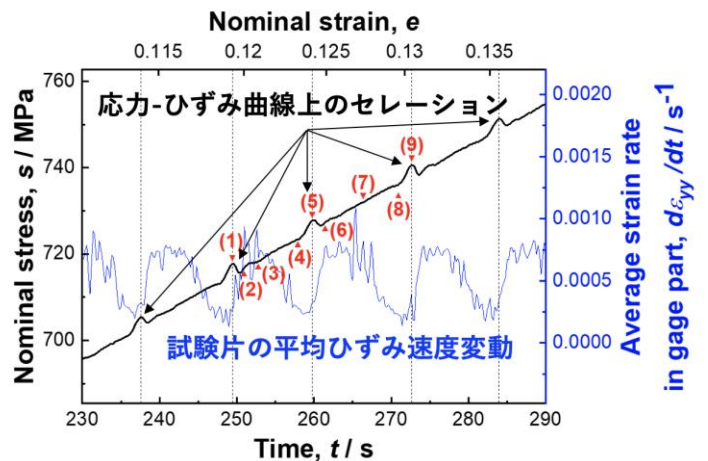
セレーションとは、材料の応力-ひずみ曲線上に現れる鋸歯状の応力変動のことであり、炭素鋼の温間変形、Al-Mg 合金、高 Mn 鋼の変形などで観察されます。セレーションは、結晶中の転位（dislocation）の運動と溶質原子の相互作用（動的ひずみ時効または Portevin-Le Chatelier 効果）によるものとされてきましたが、そうした原子スケールで生じる効果が、なぜ材料のマクロな変形挙動として現れるのかなど、不明な点が数多く残っていました。本研究では、デジタル画像相関（DIC）法による局所ひずみ解析と放射光 X 線回折法を引張変形中の高 Mn 鋼に適用することにより、試験片中に PLC バンドと呼ばれる局所変形帯の形成・伝播・消滅が繰り返し生じ、その挙動が応力-ひずみ曲線上のセレーションと完全に対応することを、リアルタイムで初めて明らかにしました。セレーションは金属材料の加工硬化率を向上させる一方、鋼の青熱脆性のような不安定破壊につながる場合もあることが知られており、本成果は高強度と高延性を示す安全な構造材料の変形挙動の理解と材料設計に重要な知見を与えるものです。

本研究成果は、2020 年 12 月 24 日に校正済最終版が国際学術誌「Acta Materialia」にオンライン掲載されました。

引張試験片中の PLC バンドの形成・伝播・消滅



DIC解析結果（局所ひずみ速度マップ）



1. 背景

近年、車などの輸送機器の軽量化や建築物の巨大化を背景として、構造用金属材料には極めて高い強度が要求されるようになってきました。同時に、構造材料には形を作るための延性・加工性や、事故時に脆く破壊しないための靱性なども要求されます。本研究グループは、高い強度と大きな延性・靱性を併せ持つ革新的構造材料を実現するための基礎研究を行なっています。高強度と高延性・靱性を実現するための重要なポイントは、金属材料を変形すればするほど硬くなる加工硬化 (strain-hardening) という現象を促進し、強度の上昇とともに安定的な塑性変形を実現することです。

Al-Mg 合金や高 Mn 鋼といった大きな加工硬化を示す合金においては、その変形挙動を表す応力-ひずみ曲線上に、セレーション (serration) と呼ばれる鋸歯状の応力変動がしばしば現れることが知られています。本研究で用いた高 Mn 鋼におけるセレーションの実例を図 1 に示します。セレーションは、加工硬化現象を促進するために重要な役割を果たしていると考えられます。一方、炭素鋼を 200°C~500°C で塑性変形した場合にもセレーションが生じますが、この場合は不安定破壊が起こりやすくなり、鋼の青熱脆性 (blue brittleness) と呼ばれ忌避されてきました。セレーションは、結晶中の転位 (dislocation) の運動と溶質原子 (Al-Mg 合金中の Mg や鉄鋼材料中の炭素(C)など) との相互作用 (動的ひずみ時効または Portevin – Le Chatelier (PLC) 効果) によるものとされてきました。しかし、そうした原子スケールで生じる効果がなぜ材料のマクロな変形挙動として現れるのかなど、不明な点が多く残っていました。セレーション挙動の本質の解明は、高強度と高延性・靱性を実現する構造用金属材料の実現において、上述のように加工硬化の促進と不安定破壊の抑制という両面で重要な課題でした。

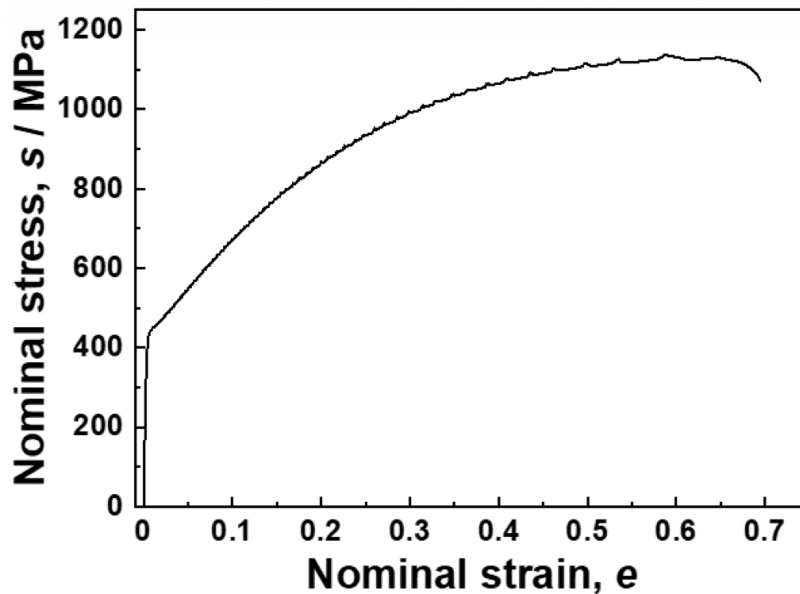


図 1 Fe-22Mn-0.6C 合金の応力-ひずみ曲線。鋸歯状のセレーションが観察される。

2. 研究手法・成果

本研究では、顕著なセレーション挙動を示し、高強度と高延性をともに示すことが知られている Fe-22Mn-0.6C (mass% : 質量百分率) 合金 (高 Mn-TWIP (Twinning Induced Plasticity) 鋼) を用いました。同合金の引張変形中に、デジタル画像相関 (Digital Image Correlation: DIC) 法によって試験片中の局所ひずみ・局所ひずみ速度分布を解析し、また同時に播磨・SPring-8 での放射光 X 線回折を実施して、試験片中の局所領域

における弾性ひずみおよび転位密度の測定を行いました。引張変形中その場放射光 X 線回折の実験系を **図 2** に示します。

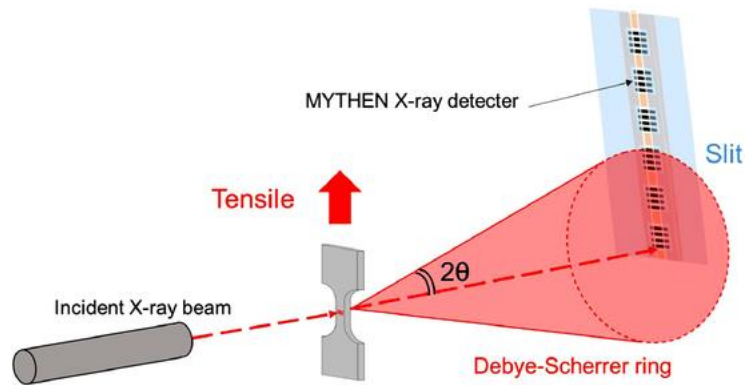


図 2 引張変形中その場放射光 X 線回折の実験系の模式図。

引張変形中のリアルタイム DIC 解析の結果、本合金の引張試験中には、**図 3** に示すように局所的に変形の集中した変形帯が発生し、試験片平行部を伝播して試験片肩部で消滅するという現象が繰り返し生じることが明らかとなりました。これは、PLC バンドと呼ばれる局所変形帯であり、応力-ひずみ曲線上は連続的に変形しているように見える本合金の塑性変形が均一ではなく、不均一変形帯の繰り返し運動を伴いながら全体が変形するという特徴的な挙動を示すことが明らかとなりました。

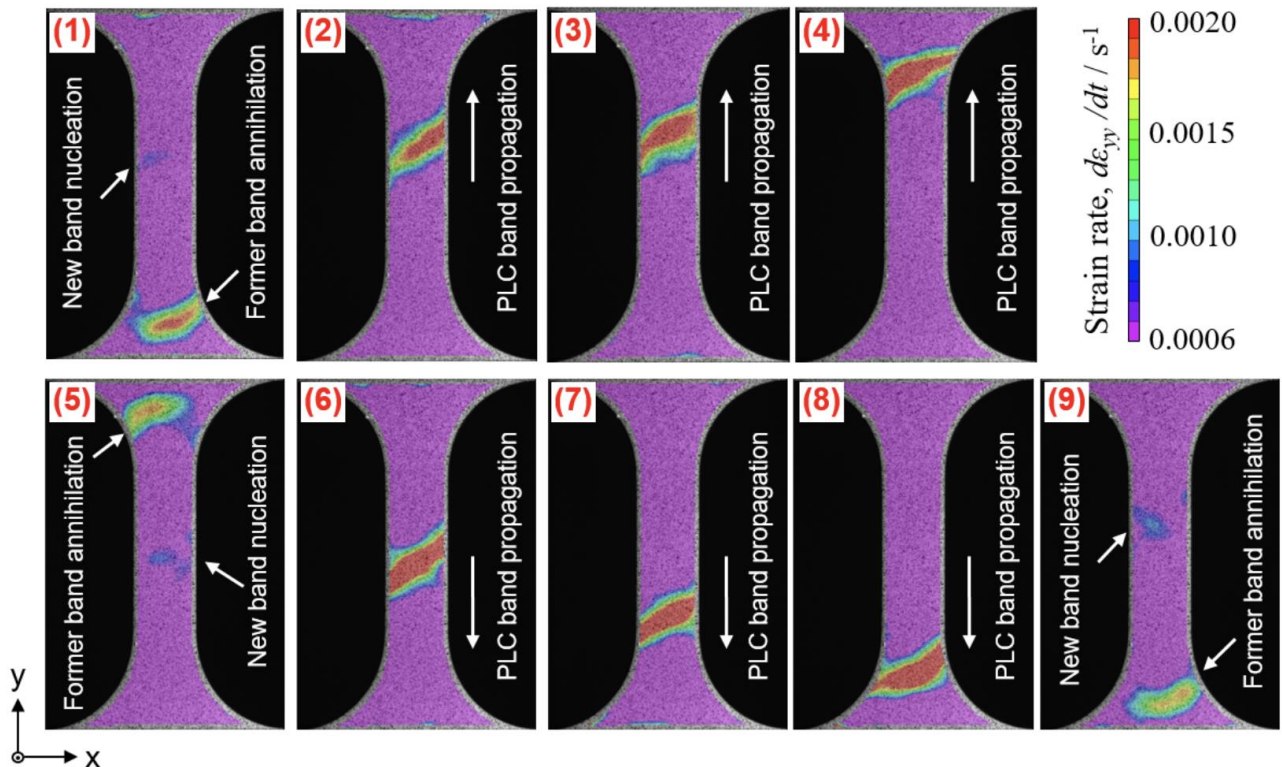


図 3 引張変形中のリアルタイム DIC 解析により得られたひずみ速度マップ。ひずみ速度が高く変形が集中した PLC バンドが試験片中央部から発生し(1)、上方向に伝播して(2,3,4)、上側肩部で消滅(5)した後、別の PLC バンドが中央部で発生して(5)、今度は下方向に伝播して(6,7,8)、下側の肩部で消滅する(9)様子が明確に観察された。こうした PLC バンドの形成・伝播・消滅は引張変形中繰り返し生じた。論文の掲載サイトに動画ファイルあり。

DIC 解析を行った試料の応力ひずみ曲線との対応を調査した結果、試験片平行部から PLC バンドが消滅すると、平行部の平均ひずみ速度が低下し、応力が急激に増大して応力-ひずみ曲線上にツノが現れることが明らかとなりました (図4の(1,5,9))。これは PLC バンドの消滅によって平行部の塑性変形が抑制され、大きな弾性変形もたらされたものであると考えられました。そして次の PLC バンドが平行部に形成されると、平行部の平均ひずみ速度は大きく増大し、応力は急激に低下しました (図4の(2,6))。同時に行ったその場放射光 X 線回折により、PLC バンドの消滅とともに試験片の弾性ひずみが急激に増大すること、PLC バンド内では転位密度が急激に増大し、塑性変形がバンド内で集中的に担われ、また加工硬化が PLC バンドの移動とともに逐次的に進行していくことが確かめられました。本研究により、試験片全体のグローバルな力学応答を表す応力ひずみ曲線上に現れるセレーションは、PLC バンドの形成・伝播・消滅と完全に一致することが、引張変形中のリアルタイムその場観察により始めて明らかとなりました。

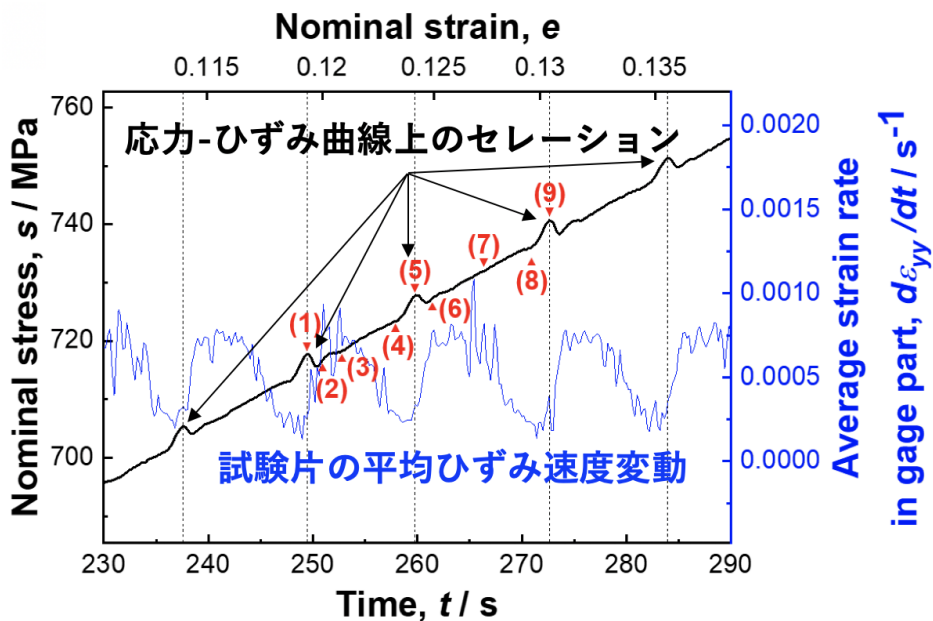


図4 応力ひずみ曲線 (黒線) 上のセレーションと、DIC 解析により得られた試験片平行部の平均ひずみ速度の変動 (青線)。図中の赤色数字(1)~(9)は、図3の数字と対応している。

3. 波及効果、今後の予定

本研究の成果は、セレーションのメゾスケールにおける本質を、試験片に生じる不均一局部変形帯の運動と対応させてリアルタイムで明らかにした初めての成果です。セレーションは合金の高い加工硬化率と対応していることから、本結果をもとに、高い加工硬化率を持ち高強度と大きな引張延性を両立した合金の変形挙動の理解が深まりました。一方セレーションは不安定破壊につながる場合もあることが知られていますが、これも局部変形集中により理解できます。

今後は、転位と溶質原子 (本合金の場合は炭素) との相互作用というミクروسケールの解析を行い、セレーションの本質をあらゆる階層で明らかにしていく予定です。得られる結果は、高強度と高延性・靱性を両立した革新的構造用金属材料の設計に繋がることを期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、JST の CREST 「ナノ力学」領域（研究総括・伊藤耕三東京大学教授）および京都大学構造材料元素戦略研究拠点（ESISM；拠点長・田中 功 京都大学教授）の支援により実施されました。CREST 「ナノ力学」領域において筆者らは、ナノスケール組織を有する金属材料（バルクナノメタル）における変形モードを制御することにより、ESISM は、様々な構造材料の変形と破壊の基礎を徹底的に探求し明らかにすることを通じて、卓越した特性を示す究極の構造材料の実現を目標とする、文部科学省の助成による研究プロジェクトです。本研究における放射光その場 X 線回折実験は、兵庫県立大学・足立大樹教授と JASRI・佐藤真直博士の協力のもと実施しました。

<研究者のコメント>

DIC 解析と放射光 X 線回折という先端的な実験解析手法をリアルタイムで適用することにより、セレーシヨンの発生の理由を描像できたことに充実感を持っています。今回の基礎的研究成果をより深めることにより、優れた特性と安全性を有する構造用金属材料の設計・開発につなげていきたいと考えています。

<論文タイトルと著者>

タイトル Mesoscopic nature of serration behavior in high-Mn austenitic steel

（高 Mn オーステナイト高におけるセレーシヨン挙動のメゾスケールの本質）

著者 Sukyoung Hwang（黄 錫永：京都大学 博士後期課程学生），Myeong-Heom Park（朴 明駿：京都大学 学際融合教育研究推進センター 特定助教），Yu Bai（バイ・イ：京都大学 助教），Akinobu Shibata（柴田暁伸：京都大学 准教授、現・物質・材料研究機構 グループリーダー），Wenqi Mao（毛 文奇：京都大学 博士後期課程学生），Hiroki Adachi（足立大樹：兵庫県立大学 教授），Masugu Sato（佐藤真直：高輝度光科学研究センター（JASRI）），Nobuhiro Tsuji（辻 伸泰：京都大学 教授）

掲載誌 Acta Materialia

DOI <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.116543>