



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

複相鋼の強度/延性におけるロバスト性改善指針: 微視的損傷の発達を止める

Designing Robustness of Ductility/Strength Balance in Dual-Phase Steels:
Micro-Damage Arrestability

小山元道

Motomichi Koyama

九州大学

工学研究院機械工学部門

助教

1 はじめに

著者は鉄鋼の機械的性質および破壊挙動を対象に研究を進めております。格子欠陥のふるまいから考えるボトムアップ型の研究である材料工学の出身であり、設計に必要とされる現場で使えるパラメータを考えるトップダウン型の材料力学の研究室に現在在籍している身です。材料工学と材料力学の観点から力学特性を考えると、それぞれ転位組織発達とひずみ/応力集中がキーワードとなります。つまり、き裂/ボイド(損傷)近傍の転位組織発達に関する研究は、材料工学と材料力学の狭間にある研究と言えます。本稿では、この損傷形成・成長に関連するひずみ発達と転位組織の研究事例について紹介し、水素環境や低温環境における延性/強度バランスのロバスト性改善指針の一端を示したいと思います。

2 微視的損傷のアレスト: 損傷発生よりもその進展が止まる ことに注目

破壊を取り扱う際、その臨界条件をき裂発生とするか、き裂伝ばとするかは重要な観点です。例えば、鉄鋼の疲労現象ではき裂が発生しても進展しない場合が多くあり、き裂の進展下限界が破壊の臨界条件として重要視されます^{1,2)}。単調引張試験でも、特に複相鋼では、多量の損傷が形成するにも関わらず、その後大きな塑性変形を許容することが知られています³⁾。これら損傷は多くの場合、材料に内在する硬質相に由来します。典型的な例はフェライト/マルテンサイトの二相鋼(DP鋼)の場合で、マルテンサイト部またはフェライト/マルテンサイト界面で塑性ひずみ集中が起こり、損傷が

発生します⁴⁾。Fig.1 (a) は平均損傷サイズの塑性ひずみ依存性を示しています。ここでは、損傷が発生後、そのサイズがしばらく増大しないことに注目します。つまり、(ほぼ)完全脆性破壊が応力または応力拡大係数で支配される現象であるのに対し、DP鋼の室温引張破壊は塑性ひずみ依存型の損傷発達が現象を支配します。より具体的には、マルテンサイト部で発生したき裂がフェライトの塑性変形によって鈍化し、き裂先端の応力集中を緩和します⁵⁾。十分に鈍化したき裂は進展を止め、更なる成長のためにはフェライト中での延性き裂進展が起こるために必要な塑性ひずみ蓄積を必要とします。結果として、Fig.1 (a) においてき裂発生後、サイズがしばらく増大しない領域(Damage nucleation regime)が現れます。この領域では、き裂の数が塑性ひずみ増大とともに増加しますが、いずれもフェライト部でアレストされます。つまり、マルテンサイト部でのき裂発生は最終破断に対して致命的な問題ではなく、フェライトの塑性変形限界が破壊の臨界条件となっています。この事実に基づいて、塑性変形能を著しく劣化させることで知られる水素の影響を考えます。

Fig.1 (a) 中、赤色の曲線は水素添加をした場合の損傷成長挙動を示しています。この図から、水素は損傷成長に対して、三つの効果があることがわかります。(1) 損傷発生の臨界ひずみの低下、(2) 損傷サイズの停留領域の縮小、(3) 損傷が成長を開始したあとのひずみあたりの損傷成長率の増大、の三つです。この中で、伸びを大きく低下させている支配因子は、(1) 損傷発生の臨界ひずみの低下と(2) 損傷サイズの停留領域の縮小、です。まずは(1)を考えます。Fig.1 (b) に示すように、損傷はまず旧オーステナイト粒界から発生します。しかし1~2%のひずみ増加でラス界面やマルテンサイト/フェライト界面が割れ始めます⁵⁾。つまり、特定マルテンサ

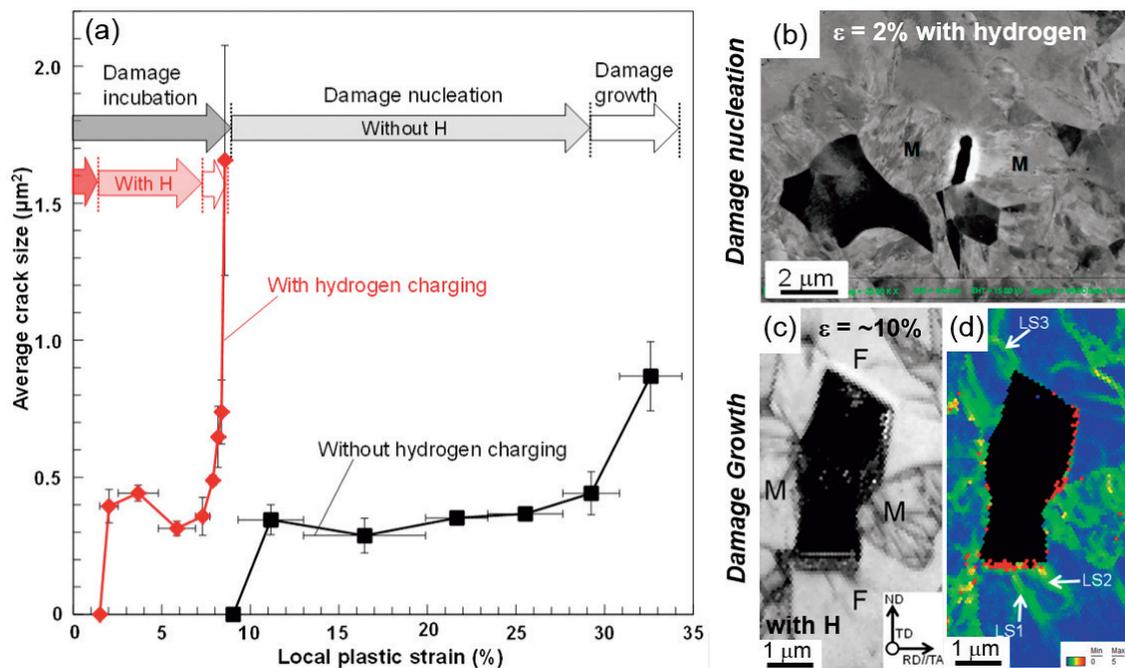


Fig.1 Damage evolution in a DP steel with and without hydrogen uptake. (a) Average damage size plotted against strain. (b) An ECC image showing damage nucleation and subsequent arrest. (c) Image quality and (d) Kernel average misorientation maps that indicate crack growth to ferrite involving plastic deformation⁵⁾. F and M indicate ferrite and martensite, respectively. LS: localized strain. Reproduced with permission from Acta Materialia, 70, 174-187 (2014) Copyright 2014.

イト界面のき裂発生抵抗を向上させただけでは、DP鋼の耐水素性向上を達成できません。しかし、これら「全て」のき裂は一旦フェライトでアレストされます。つまり、マルテンサイトがどのようにいつ割れようと、フェライトの塑性変形能が十分であれば、破壊に至りません。この観点では、水素によるフェライトの微視的損傷アレスト能低下が、DP鋼の水素脆化の主因であると言えます。より詳細に言及すると、ひずみが小さいときは水素添加なしの場合と同じく、マルテンサイトで発生したき裂がフェライトの塑性変形によって鈍化し、アレストされます (Fig.1 (b))。しかし、変形が進行すると、き裂は塑性ひずみ発達をとめないながらフェライト中に進展します (Fig.1 (c, d))。このフェライト中の進展に対応する破面ではディンプルが観察されることから、本条件における水素はフェライトの塑性変形限界を低下させ、微視的損傷のアレスト能を劣化させたと考えます⁵⁾。

同様の手法、考え方は複相鋼の低温脆性にも適用できます⁶⁾。Fig.2 (a) にDP鋼の損傷発達挙動の変形温度依存性を示します。-180 °Cでは、Fig.2 (b) に示すように破面全体がへき開破壊を示しています。このような脆性挙動を示す場合でも、複相鋼では微視的損傷のアレストが観察されます (Fig.2(c))。マルテンサイト部は容易にへき開破壊しますが、水素脆化の場合と同様にフェライト部でアレストされます。ひずみが増大した後、フェライトの {100} へき開破壊を呈

し、最終破断に至ります (Fig.2 (d-f))。このようにフェライトの大変形を必要とする脆性破壊では、大きな伸びが得られます (Fig.2 (a) 挿入図)。換言すれば、マルテンサイト連結性が低い組織形態のDP鋼では、マルテンサイトの脆性挙動によらず、フェライトの塑性変形が現象を支配します。このため、破面は脆性的であるものの、冷却による伸びの低下が現れません。延性-強度バランスの観点では、脆性挙動が現れているときの方が優れているとさえ言えます。このように、微視的損傷に対するアレスト能に注目することで、変形温度に対してロバストな複相鋼を創製することが可能であると言えます。同様の観点から、水素環境に対してロバストな複相鋼創製も期待されます。本知見に基づいて、DP鋼の微視的損傷アレスト能に影響する組織因子に簡単に言及すると、(a) 微視的損傷先端の応力集中を決定する荷重方向に垂直な方向のマルテンサイトサイズ、(b) フェライト中の塑性ひずみ分散能 (転位分散能)、(c) 損傷先端の最大せん断応力面に働く転位の長範囲応力場 (応力遮蔽効果)⁷⁾ が想定されます。(a) はマルテンサイトサイズ/形態の制御の問題です。一方、(b) と (c) は交差すべりと転位易動度およびその均質性、そしてこれらに関わる転位下部組織の発達が支配因子です。つまり、特定損傷近傍の転位組織観察が必要不可欠となります。この損傷近傍の組織観察について次節に示します。

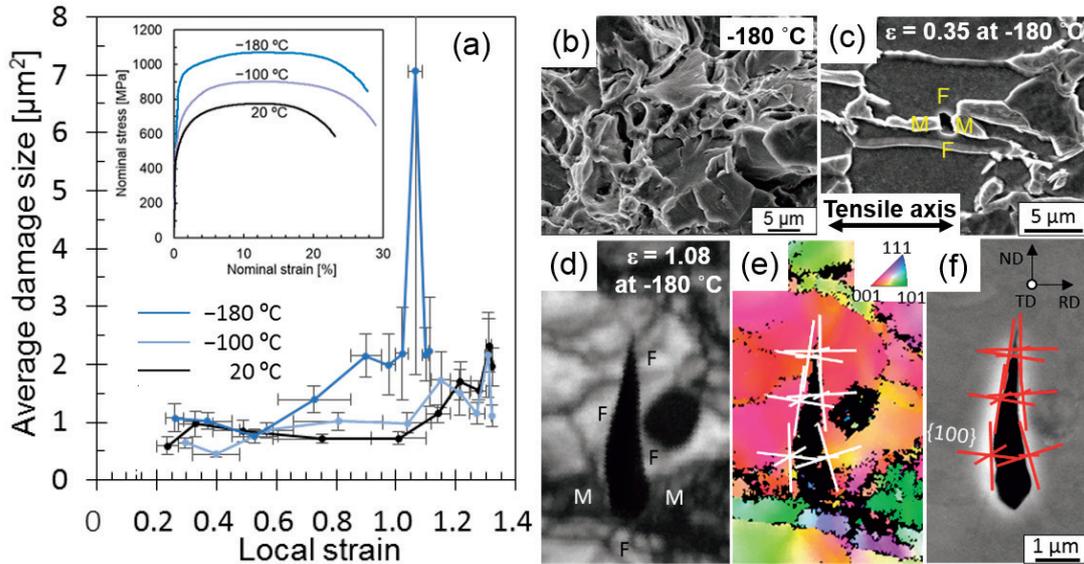


Fig.2 (a) Damage evolution curves: case of low-temperature embrittlement in a DP steel. The inset indicates stress-strain curves. (b) Cleavage feature on the fracture surface obtained at -180 C. (c) Micro-damage initiation at martensite associated with the cleavage fracture. (d) Image quality map, (e) RD-inverse pole figure map, and (f) secondary electron image showing damage growth to ferrite⁶⁾. The lines indicate {100} traces in ferrite.

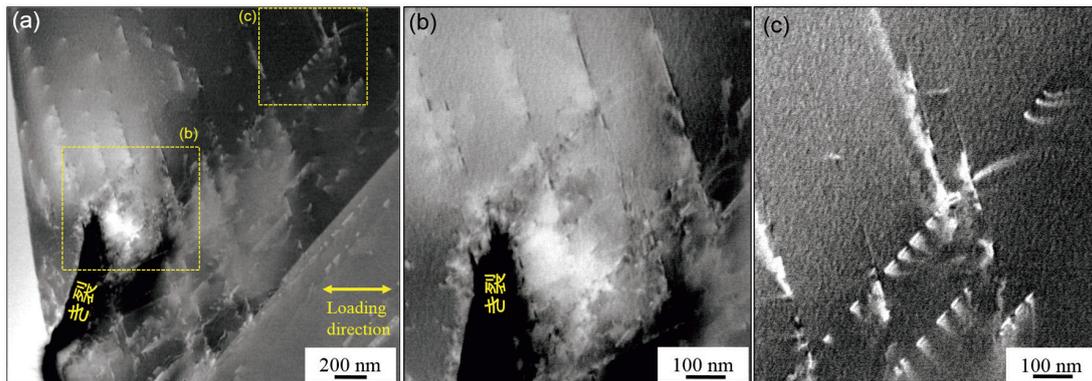


Fig.3 (a) An ECC image showing an overview microstructure including a crack. (b, c) Magnified images corresponding to the highlighted regions in (a). The crack was introduced by fatigue in an Fe-25Cr-1N austenitic steel¹¹⁾.

3 微視的損傷アレストのための転位組織観察

上述の通り、微視的損傷アレストを考えるためには、アレストされた損傷周辺の転位組織を簡便かつ高空間分解能で観察できる手法が要求されます。ここでは、Electron Channeling Contrast Imaging (ECCI) を紹介します。ECCIの原理詳細は近年の優れた総説⁸⁾がありますので、そちらに譲ります。ECCIはバルク試料において、転位一本々を分解可能な組織観察手法です。筆者はこの利点を活かし、き裂やボイドなどの近傍の転位分布観察を試みています^{9,10)}。Fig.3に一例としてオーステナイト鋼における疲労き裂近傍の転

位組織観察結果を示します(単調引張による組織ではありません。)¹¹⁾。Fig.3 (b) では、き裂先端から転位が射出され、プレーナに配列していることがわかります。Fig.3 (c) ではより明瞭に拡張転位が観察されています。拡張転位同士の転位反応である Lomer-Cottrell Lock により不動転位が形成し、これが射出転位運動の障害となっています。この場では、50 MPa以上のバックストレスがき裂に負荷されていることになり、き裂の進展が有効に抑えられています。今後、このような観察をフェライトでアレストされた損傷に適用することで、より詳細な微視的損傷アレスト能の設計指針が確立できると考えます。また、試験片がバルクですので、変形その場観察の際にもより現実に近い負荷を与えることが可能で

あり、変形にともなう損傷近傍の転位運動観察に強い期待を持っています。

4 おわりに

筆者は中学生のときに、なんとなく材料系のものでつくりがしたい、という想いがあり、高校ではすぐに化学部へ入りました。初めはローズ合金(低融点合金)を作製した記憶があります。目に見える融点の変化に驚きを覚えました。その後、テルミット反応を使って鉄を還元したりしていました(思い返すと学問の対象として、これが初めての鉄との出会いです)。このように合金について勉強、実験していると、形状記憶合金に出会いました。このときはNi-Ti合金です。これは面白いと思い、早速合金作製しようとNiとTiを準備しましたが、融点が高く、自分で溶製することはできませんでした。これが動機となり、形状記憶合金の作製およびマルテンサイト変態に関する研究をしたいと思い始めました。その後、芝浦工業大学の村上雅人教授に師事し、物質・材料研究機構の澤口孝宏博士に教を請い、Ni-Tiではなく、Fe-Mnオーステナイト系の形状記憶合金/マルテンサイトの研究を開始しました。そして、同機構および筑波大学(現九州大学教授)の津崎兼彰教授のもとで、オーステナイトの加工硬化を研究し、博士号を授与いただきました。現在も九州大学野口博司教授のもとでマルテンサイトやオーステナイトを含む鉄鋼材料の力学/破壊に関する研究に従事しており、マルテンサイトとオーステナイトとは強い関係が続いています。現在の恵まれた環境に至るまでに様々なことをご教示いただいた先生方に感謝することは当然ですが、本稿では敢えて、高校からここまで私の人生を導いてくれた、マルテンサイトとオーステナイトに深い謝意を捧げたいと思います。今後ともよろしくお願いします。

参考文献

- 1) M.Koyama, Z.Zhang, M.Wang, D.Ponge, D.Raabe, K.Tsuzaki, H.Noguchi and C.C.Tasan : *Science*, 355 (2017), 1055.
- 2) B.Li, M.Koyama, E.Sakurada, N.Yoshimura, K.Ushioda and H.Noguchi : *Int. J. Fatigue*, 98 (2017), 101.
- 3) T.Kaneko, M.Koyama, T.Fujisawa and K.Tsuzaki : *ISIJ Int.*, 56 (2016), 2037.
- 4) C.C.Tasan, M.Diehl, D.Yan, M.Bechtold, F.Roters, L.Schemmann, C.Zheng, N.Peranio, D.Ponge and M.Koyama : *Ann. Rev. Mater. Res.*, 45 (2015), 391.
- 5) M.Koyama, C.C.Tasan, E.Akiyama, K.Tsuzaki and D.Raabe : *Acta Mater.*, 70 (2014), 174.
- 6) N.Uehata, M.Koyama, S.Takagi and K.Tsuzaki : *ISIJ Int.*, 58 (2018), 179.
- 7) 田中將紀 : *ふえらむ*, 21 (2016), 29.
- 8) S.Zaefferer and N.-N.Elhami : *Acta Mater.*, 75 (2014), 20.
- 9) M.Koyama, E.Akiyama, K.Tsuzaki and D.Raabe : *Acta Mater.*, 61 (2013), 4607.
- 10) M.Koyama, C.C.Tasan, T.Nagashima, E.Akiyama, D.Raabe and K.Tsuzaki : *Philos. Mag. Lett.*, 96 (2016), 9.
- 11) K.Habib, M.Koyama, T.Tsuchiyama and H.Noguchi : *Mater. Res. Lett.*, 6 (2018), 61.

(2018年4月4日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

上智大学 理工学部 機能創造理工学科 教授

高井 健一

「先輩研究者から」となっておりますが、普段は同じ方向を目指している研究パートナーですので、このような立場から小山元道先生について述べたいと思います。小山先生の論文を個々には理解してきたつもりでしたが、本稿の「微視的損傷の発達を止める」を読んで、ここに至るまでの微視的な損傷解析の精緻な積み上げの全体像がよくわかり、改めて国内だけでなく国際的にも高く評価されている理由が再認識されました。

これまで、「水素脆化の基本要因と特性評価」研究会における3年間の活動を通して、連携テーマと一緒に取り組み、小山先生に対して感じた一つ目は「研究の勢い」です。この研究会では、連携テーマを設定しそれぞれ得意な技術を協力し合うことで、一研究機関では達成できないテーマに挑戦することを目指しました。慣れない分野に対しては壁があり、なかなか一歩を踏み出せないのですが、小山先生は相変態と水素脆化の関係解明を軸として、格子欠陥～マクロな力学特性までそれぞれ技術を持った研究者を巻き込み、新たな知見を見出すことに成功しました。研究の提案段階から成果発表まで、楽しそうに説明する小山先生の姿に皆引き込まれ、いつのまにか協力していたという印象です。

また、二つ目は「発想の斬新さ・柔軟さ」です。例えば、従来、fccからbcc格子への相変態時の水素の挙動は推測の域でした。そこで、熱的に相変態する鉄鋼材料に対し

て、-200℃から昇温可能な水素分析装置を逆に、降温過程で水素放出を検出できないか？と相談に來られました。あまりにも斬新なアイデアであり、そのような用途に設計していないため制御系から改造する必要があったのですが、「面白そう」という好奇心から「やってみましょう」と回答しました。改造が済んだ直後には九大から試験片を持参し、相変態に対応した明瞭な水素放出が検出され、従来の推測の域から実験による実証へと発展させ、あっという間に論文へとまとめられた「行動力」には感嘆しました。このような「研究の勢い」、「発想の斬新さ・柔軟さ」、「行動力」を持ち合わせた小山先生を見てると、まだまだ伸びしろがある楽しみな研究者だと感じたいです。

水素脆化の研究の残された課題は難しいものばかりです。このような状況を打破できるのは、一研究室に閉じた研究者でなく、小山先生のように「材料工学と材料力学の狭間の研究」、「ミクロからマクロの損傷」、「ご自身の専門と他研究者の専門」など多くの面から現象を見ることができ「幅広い視差」を持った研究者が新たな局面を切り拓いていくと確信しています。最後に、ソニー創業者の盛田昭夫氏は「アイデアのいい人は世の中にたくさんいるが、いいと思ったアイデアを実行する勇氣ある人は少ない」と言われており、小山先生には今後も実行し続け、この分野の新たな局面を切り拓いていただけることを願っております。

JFEスチール(株) 経営企画部 主任部員

高木 周作

「マルテンサイトとオーステナイトに深い謝意を捧げたい」(本文より引用)

この一文が、小山先生の金属材料研究に対する想いを端的に表しているなあ、と感じました。

先輩研究者・技術者からのエールを、とのご依頼をいただきました。しかし、小山先生はすでに多くの研究実績をあげられ、論文賞等、いくつもの賞を受賞されています。私が研究のことで何か申し上げるよりも、小山先生の研究に対する姿勢を皆様を知っていただくことが一番のエールと考え、トピックスを二つご紹介します。

一つ目は、小職にとって印象深い、小山先生との出会いについてです。小職は2012年に材料におよぼす水素の影響を議論する「International Hydrogen Conference」に出席しました。4年毎に、Jackson Lake Lodge (米) で開催される、大変魅力的な会議です。会議は午前と夕方に行われ、昼間は自由時間です。Lodgeは大自然の中にポツンと建っており、近くには何もありません。私は大学の先生方に誘っていただき、10キロ程度離れた観光センターまで数名で散策に出かけました。その内の一人が小山先生で、当時ポスドクでMax Planck Instituteに留学中でした。最初の数分は自然風景を眺めながら歩いていま

したが、小山先生から「高木さん、水素脆化についてわからないことがあります」と話しかけられました。熱心な学生さんだなあ、と思って質問に答えていたのですが、そのうち、答えに窮する質問がどんどん出てきて、「うっ…」とか「そうだなあ……」とか言っているうちに、気づいたら2時間程度経過し観光センターへ着いていました。おかげで途中の風景等、全く覚えていません。それだけ、小山先生との議論は楽しく、また難しいもので、研究に対する興味・情熱と深い洞察力のある人だと感じました。(アメリカの自然を満喫するための散策中にやることではないですが…)

二つ目は、小山先生が九州大学助教に着任後に共同研究(本文中の文献6)をさせていただいた時のことです。出会った時以上に情熱を持って議論いただき、楽しく、また刺激的な研究ができました。さらに印象的だったことは、研究担当の学生さんが皆優秀だったことに加えて、すごく楽しそうに研究や議論をしていることでした。小山先生が教育者としても素晴らしい人材だという証です。

今後の益々のご活躍を、「マルテンサイトとオーステナイト」とともに期待しております。