

# 特別講演

□第187回春季講演大会学会賞(西山賞)受賞記念  
特別講演(2024年3月13日)

## 研究対象としての鉄鋼の魅力

—若者の好奇心に応える材料—

Steels that Respond to the Curiosity of Young People

津崎兼彰

Kaneaki Tsuzaki

国立研究開発法人  
物質・材料研究機構  
フェロー



\*脚注に略歴

### 1 はじめに

2024年3月13日(水)午後、東京理科大学葛飾キャンパスにて開催された第187回春季講演大会一般表彰授賞式にて、古原忠会長より学会賞(西山賞)の表彰状を頂戴いたしました。日本鉄鋼協会に育てていただいた私にとって本賞の受賞は誠に光栄なことであり、これまでに会いお世話になった全ての方々々に心より感謝し厚く御礼申し上げます。

さて受賞講演の内容ですが、まずBhadeshia先生と牧先生の言葉を引用させていただき、「鉄鋼材料の明るい未来のための必要条件」が有能な若い研究者・技術者の存在にあることを示しました。そして、「若者が魅力を感じるもの」として若者がワクワクする研究とは何かを考え、その一つのタイプとして「常識を覆す研究」があることを述べて、その事例として私自身が関係した研究例3件を紹介しました。最後に、改めて「魅力ある鉄鋼研究の発信・継続が重要である」ことを指摘しました。鉄鋼研究に携わる全ての方々へのエールとして話をさせていただきました。以下、その概要を示します\*\*。

### 2 鉄鋼材料の明るい未来のための必要条件

英国ケンブリッジ大学のH.K.D.H.Bhadeshia先生(現Queen Mary University of London)は鉄鋼研究の第一人者です。先生は2004年に出版されたベイナイト変態に関する論文特集号の序文<sup>1)</sup>において、「鉄鋼は、材料にとってのゴールド基準であると同時に進化する基準である」と指摘されて

います。そして「鉄鋼は、最も成功した材料であり、今も多量に生産され、人類の生活向上に貢献している」と締めくくっておられます。このことは20年後である2024年の今も変わりません。

同じく鉄鋼研究の第一人者である牧正志先生はその教科書『鉄鋼の組織制御—その原理と方法—』の第一章「序論：ミクロの世界から見た鉄鋼材料の魅力」において、鉄鋼材料の魅力を次のようにQ & A式に示されています<sup>2)</sup>。

1. なぜ鉄鋼材料は多様な用途に対応できるのか
  2. なぜ鉄鋼材料は広範な強度レベルをカバーできるのか
  3. なぜ鉄鋼材料にはさまざまな相変態があるのか
  4. なぜ鉄鋼材料の組織が変わると強度が変わるのか
  5. パーライトの有難さ、マルテンサイトの素晴らしさ
- 最後の「パーライトの有難さ、マルテンサイトの素晴らしさ」は、牧正志先生の名言です。

このように鉄鋼は、人類にとって必須の材料ですし、魅力にあふれる材料なのですが、その鉄鋼材料を将来にわたって明るいものとするための必要条件があります。それは牧正志先生のふえらむ連載記事「アラカルト：若手研究者・技術者へのメッセージ-1」の最後の一文に見ることが出来ます<sup>3)</sup>。引用します：「鉄を愛し、情熱を持った有能な若い研究者・技術者がいる限り、鉄鋼材料の未来は明るいと確信しています。」

### 3 若者が魅力を感じるものは何か

鉄鋼材料の明るい未来の必要条件である有能な若い研究者・技術者を獲得するために何が大切でしょうか。それは「魅

\* 1983年京都大学大学院博士後期課程を修了、米国・MIT博士研究員の後、1985年京都大学工学部助手、1991年同助教授を経て、1997年より科学技術庁金属材料技術研究所(現NIMS)に勤務の後、2013年より九州大学教授、そして2020年から現所属にて勤務している。

\*\* 転載許可手続上の理由のために本稿の一部の図については講演時とは異なる図を掲載させていただいております。

力」です。賃金・サラリーは大きな魅力でしょうが、私の責任範囲ではありません。長年、教育研究で糧を得てきたものとしては、研究活動で若者に応えたいと思います。まずは、どんなものに「魅力」を感じるのか若者に聞いてみることにしました。

私は、2020年3月末に九州大学機械工学部門を定年退職するころから日本の高専教育に関心を持っておりました。そして国立高専51校の中で材料系学科を持つ4校のうちの一つである久留米高専にご縁を得ました。皆さんご存じかもしれませんが(私は知らなかったのですが)、高専生は15歳での入学後すぐの4月から専門科目の実習教育を受けます。キューポラを使った溶解鑄造実習や石炭燃焼加熱による自由鍛造実習で、学生諸君は目をキラキラさせながら鉄と鋼に向き合い作業に取り組んでいます。その学生諸君に聞くことにしました。質疑を要約します。質問「どんな物に魅力を感じる?」; 答え「ワクワクするモノ」。さらに、質問「どんな時にワクワクする?」; 答え「新しいモノが見えた時」。

現代の15歳もやはり『新しい世界：フロンティア』には魅力を感じるのです。これは現在69歳である私の感覚とも一致します。『今までにない新たな景色が見える研究』、それが『学生も教員自らもワクワクする研究』ということになります。別の言葉に言い換えると『現象解明を極める研究』; 『限界に挑戦する研究』; 『常識を覆す研究』などが該当する研究ということになります。「従来の延長線上の研究」も必要な研究ですが「若者が魅力を感じるもの」ではないようです。

## 4 常識を覆す研究～事例紹介3件～

常識を覆す研究の事例を3件紹介するのですが、その前に、具体的に何を紹介するかを検討した過程をお話しさせていただきます。私は、1976年4月に京都大学の田村今男先生と牧正志先生の研究室に配属となって以来、一貫して「鉄鋼のミクロ組織と力学特性」に関する研究を行ってきました。そして1997年42歳の時に京都からつくばに異動してからは、「損傷・破壊現象」にも力を入れて研究しました。話題を絞るという意味でも「常識を覆す研究」の対象を「損傷・破壊現象」としました。

「損傷・破壊現象」といっても沢山ございます。そこでこれまた鉄鋼研究の第一人者であるG.Krauss先生が書かれた教科書<sup>4)</sup>を参考にしました。この本の献辞に「To the men and women who make, use, and study steel」とあることにこの度初めて気がつきました。Krauss先生にこれまでの不注意をお詫びするとともに長年この本で勉強させていただいたことに改めて御礼する次第です。この教科書には鉄鋼に現れる多くの脆化現象が取り上げられています。

本日はこれらの脆化現象の内、典型的な3つを取り上げます。すなわち鉄鋼における3つの常識：「鉄鋼は低温になると脆化する」; 「粒界に不純物元素が偏析すると脆化する」; 「水素が侵入すると脆化する」について、これら常識を覆す研究の事例を紹介します。それによって、『鉄鋼は、常に変化し革新するものであり、若者の好奇心に応え得る素晴らしい材料である』ことを示します。

### 4.1 「常識：鉄鋼は低温になると脆化する」を覆す研究

BCC鋼の低温脆性は、シャルピー衝撃値の温度依存性と延性-脆性遷移温度の存在とともに示されます。Krauss先生の教科書<sup>4)</sup>では261頁に、F.B.Pickering先生の1978年論文の焼きならし処理した炭素鋼の衝撃試験結果<sup>5)</sup>が引用されています。NIMSの木村勇次さんらは、温間テンプレフォーミング処理によって<011>//RD繊維集合組織が発達した微細伸長結晶粒組織とすることで、引張強度1.8GPa級の0.4C-2Si-1Cr-1Mo鋼において、低温になるほど衝撃値が増加することを見出し、その成果を2008年のSCIENCE誌に論文公開しました<sup>6)</sup>。NIMS超鉄鋼プロジェクトの主要成果の一つです。ここではISIJ Inter.誌の2015年のKimura-Inoue論文<sup>7)</sup>における0.2C-2Si-1Cr-1Mo鋼の結果を図1に示します。図1(a)のQT材は1473Kから焼入れ773K焼戻して引張強度1.4GPa級に調整されています。試験温度573Kでは100J以上ある衝撃吸収エネルギーが、試験温度の低下とともに減少しています。これが常識です。一方、焼入れマルテンサイトを773Kで減面率78%まで溝ロール圧延加工した温間テンプレフォーミング材(TF:1.6GPa級)では、試験温度が573Kから300Kに低下するに従い衝撃吸収エネルギーが顕著に増加しています。そして試験温度300Kで比べると、TF材の衝撃吸収エネルギーはQT材の10倍以上となっています。この常識を覆す結果は、図1(b)に見られるデラミネーション破壊の発現が鍵を握っています。そしてデラミネーションの発生は、微細伸長結晶粒組織と<011>//RD繊維集合組織に強く関係しています。つまり、炭化物の析出した粒界面および{001}へき開面のそれぞれ割れやすい界面を試験片長手方向に配向させることで、デラミネーション破壊を誘発させ曲げ変形を優先させて試験片の脆性的な破壊を抑制しています。ミクロ組織制御による力学特性向上の成功例で、加工熱処理の醍醐味を見ることができます。上記のプロセスやメカニズムなどの詳細については、木村勇次さんと井上忠信さんの2012年ふえらむ論文<sup>8)</sup>が分かりやすい解説となっています。

### 4.2 「常識：不純物元素が粒界偏析すると脆化する」を覆す研究

この脆化は、リンや硫黄などの粒界凝集力を低下させる元素を含むマルテンサイト鋼を焼戻し処理した際に現れ、焼

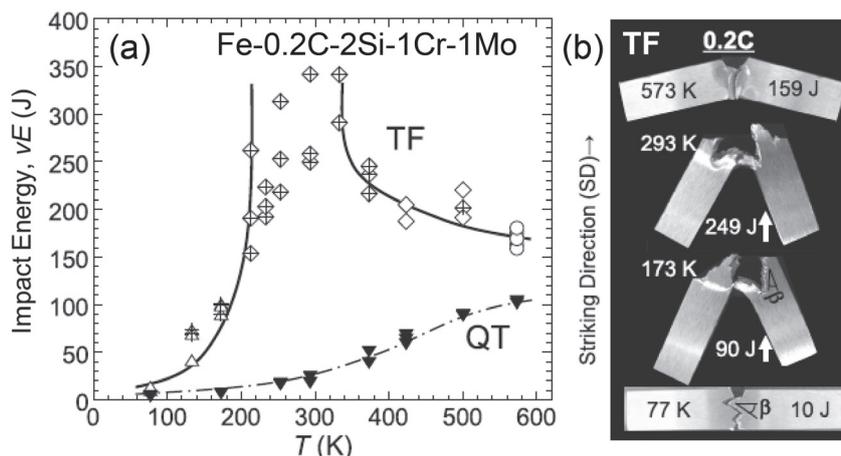


図1 0.2C-2Si-1Cr-1Mo鋼の焼入れ焼戻し材 (QT: 1400MPa級) と温間テンプレフォーミング材 (TF: 1600MPa級) のシャルピー衝撃試験結果<sup>7)</sup>。(a) 衝撃値のフルカーブ、(b) TF材の破断後の試験片形状。(a) でのTF材の+マークは試験片が二つにならなかったことを示す

戻し脆性としてよく知られています。Krauss先生の教科書<sup>4)</sup>では典型例であるリン (P) による焼戻し脆化について先生ご自身の1979年の研究結果<sup>9)</sup>が398頁に引用されています。NIMSの我々のグループは、前節4-1の温間テンプレフォーミング処理を活用するとPによる脆化を防げるだけでなくむしろ靱性が向上するのではないかと着想しました。界面に加えてP偏析領域の配向によってデラミネーション破壊が誘発されれば靱性は向上するはず、と考えたわけです。

この予想は見事に的中しました。2016年に公開した結果<sup>10)</sup>を図2に示します。SCM440相当の0.4C-1Cr-0.2Mo鋼をベースとして、P量を0.001から0.093 wt.%まで5水準変化させた合金を作成して、最終熱処理の焼戻し温度を823Kとして引張強度1100MPa級に調整しました。QT材においては高純度鋼では100J弱程度ある吸収エネルギーがP量増加とともに減少し、0.093% Pでは約10Jへと低下するとともに破面は旧オーステナイト粒界割れを呈しました。これが常識です。一方、微細伸長結晶粒組織としたTF材では、P量が増加しても吸収エネルギーは低下せず、P量0.06%を超えるとむしろ吸収エネルギーが増加しています。この常識を覆す結果の鍵は予想したようにデラミネーション破壊の誘発にありました(図2 (b))。

本研究は、JST-CREST元素戦略プログラム (PO: 玉尾皓平先生) において古原忠先生が代表を務められた「軽元素戦略に基づく鉄鋼材料のマルチスケール設計原理の創出」(2011-2015年度)<sup>11)</sup>の一部として実施されました。私は、その当時、高強度鋼にとっての有害元素Pも工夫すれば有効元素に生まれ変わるのではないかとワクワクしながら研究しておりました。この時の成功は、私自身の研究活動の両軸であ

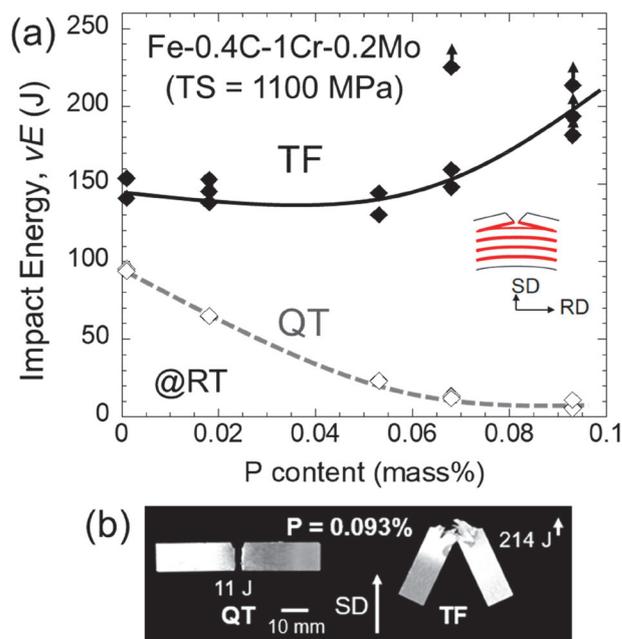


図2 0.4C-1Cr-0.2Mo鋼の焼入れ焼戻し材 (QT) と温間テンプレフォーミング材 (TF) のシャルピー衝撃試験結果に及ぼすP量の影響<sup>10)</sup>。(a) 室温での衝撃値、(b) 0.093% P材の破断後の試験片形状 (Online version in color.)

る「現象解明」と「特性改善」のその後の在り方に大きな影響を与えました。つまり「特性改善」においては「有害元素の許容・有効活用」の視点を重視するようになりました。それは、次節の「水素活用鋼」、そして現在の私が掲げている重要研究「不純物元素・有害元素を許容し活用する鉄鋼ものづくり技術」(図3)<sup>12)</sup>に繋がっています。

### 4.3 「常識：水素が侵入すると脆化する」を覆す研究

水素脆化の現象解明とその対策は2GPa級時代に突入した自動車用ハイテンにとって一丁目一番地の重要課題です。Krauss先生の教科書<sup>4)</sup>では、408頁にA.R. Troiano先生の1958年の研究結果<sup>13)</sup>が引用されています。4340鋼切欠付き丸棒試験片を用いて水素チャージ+ペーキング処理後に定荷重試験をした結果です。吸蔵された平均水素量は1wt.ppm程度ですが、チャージ後ただちに試験すると、切欠き強度が300ksi (2070MPa) から75ksiへの1/4に減少し、破面は旧オーステナイト粒界割れとなっています。

1997年にスタートしたNIMS超鉄鋼プロジェクトでは、私も高強度鋼の遅れ破壊評価法や耐水素脆性の研究に取り組みましたが、ここで紹介する「常識を覆す結果：水素活用鋼の実現」は、FCCオーステナイト鋼を対象としたものです。研

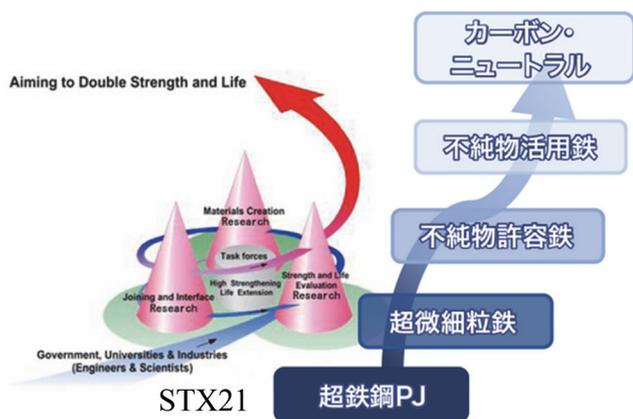


図3 「不純物元素・有害元素を許容し活用する鉄鋼ものづくり技術」<sup>12)</sup>：超鉄鋼プロジェクトSTX21の成果<sup>6)</sup>を源とし、その後の関連プロジェクトで得た技術知識を総活用；不純物元素Pを無害化・逆活用して高強度鋼の衝撃靱性値の飛躍的向上を達成<sup>10)</sup>；カーボンニュートラル時代におけるスクラップを鉄源とした鉄鋼ものづくり技術へと展開 (Online version in color.)

究の最前線で頑張ってくれたのは、現在東北大学金属材料研究所 (IMR) 准教授の小山元道さんで、彼が学位を取得した2012年3月の前年に研究をスタートしました。当時NIMSでの共同研究者であった秋山英二さん (現IMR教授) と「学位論文もほぼ仕上がったことだし、小山君はオーステナイト鋼が専門だから、彼の学振ポスドクのテーマにいいだろう」と相談したことを覚えています。しかし水素活用鋼の実現までの道のりは平坦ではありませんでした。本稿では、3月13日の講演では時間の関係でお伝え出来なかった、その過程を少し詳しくご紹介したいと思います。

#### 4.3.1 水素活用鋼：黎明期

最初は、双晶誘起塑性鋼 (TWIP鋼) に着目しました。水素で積層欠陥エネルギーが低下するという報告があり、それならば、水素で変形双晶が促進されて強度伸びバランスがさらに向上すると目論んだのでした。しかし、水素脆化がその狙いを拒みました。TWIP鋼 (Fe-18Mn-1.2C) を室温にて電解水素チャージしながら低ひずみ速度で引張試験すると、もともとは約90%あった全伸びが50%程度まで減少しました。そして、伸びが50%と大きな塑性変形をしているのに破面はフラットで脆性的でした。さらに割れとマイクロ組織の関係を2012年当時注目されたElectron Channeling Contrast Imaging法で観察すると、図4に示すように、粒界に加えて、焼鈍双晶境界そして変形双晶境界までもが割れていました<sup>14)</sup>。当初の目論見どおりとはいかなかったのですが、「なぜ整合なΣ3界面が割れるのか？」という現象解明研究に踏み込むきっかけとなりました。小山元道さんが現在主査を務めるISIJ研究会テーマ「局所塑性に由来する損傷発達および破壊」(2023年度開始)の魁だったように思います。

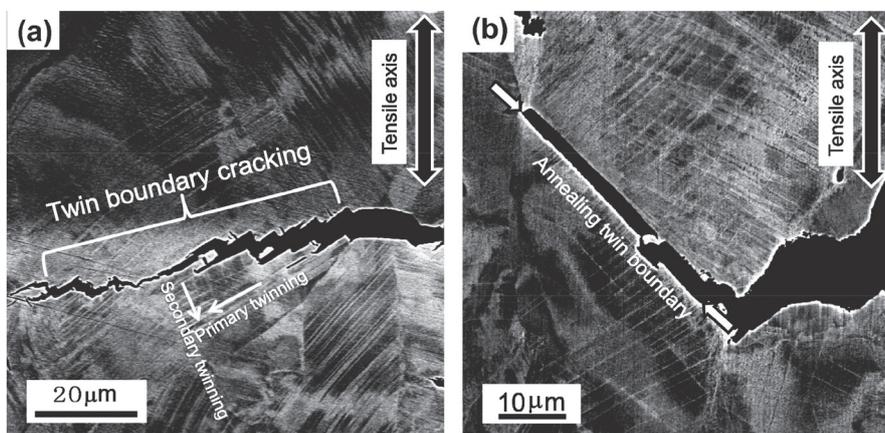


図4 TWIP鋼 (Fe-18Mn-1.2C) の水素誘起割れを示すSEM-ECCI像<sup>14)</sup>。(a) 変形双晶境界での割れ, (b) 焼鈍双晶境界での割れ

### 4.3.2 水素活用鋼：ヘテロ構造制御プロジェクト

「水素活用鋼」へ正面から挑戦する機会が2014年に訪れました。その機会とは故加藤雅治先生がPOを務められたJST産学共創基礎基盤研究プログラムの技術テーマ「ヘテロ構造制御 (略称)」(2012~2019年度)<sup>15)</sup>でした。私は、2013年4月58歳のときにつくばNIMSから九州大学機械工学部門に異動し、同じ材料力学大講座の教授野口博司さんと連携して教育研究を遂行することにしました。そして同じ年の12月に小山元道さんが野口研究室の助教として着任したのです。小山さんは野口研と津崎研の両研究室の数多くの研究テーマで大車輪の活躍をしてくれたのですが、その一つが「ヘテロ構造制御」の研究でした。

「ヘテロ構造制御」へ応募したのは、POである加藤雅治先生の運営方針に大きな魅力を感じたからです。当時のHPにその方針が次のように示されていました：「不均一なヘテロ構造を扱う場合、原点に立ち戻って既存の理解を見直し、既存の理解の延長線上にはない、金属学・材料工学にブレークスルーをもたらすような新たな指導原理を構築することが必要になるでしょう<sup>15)</sup>。」これにワクワクした私は、小山さんと一緒に2014年春から研究計画を練りに練って「鉄鋼における水素／マルテンサイト変態相互作用の定量的・理論的解明と水素利用材料の創製～利用可能な新固溶元素獲得を目指して～」という長いタイトルで課題申請したのです。幸い申請課題は採択され2014年10月に研究開始しました(2019年度で終了)。その申請に至る経緯と研究計画・体制さらに研究に対する想いについては2015年の学術功績賞受賞記念講演のふえらむ記事<sup>16)</sup>に詳しく述べたので参照ください。

研究過程の詳細は省略しますが、水素活用鋼の目標達成例として、鉄系形状記憶合金の特性向上をあげることができます。研究プロジェクト前半の基礎研究で得られた知見：水素によってFCCすべりによる降伏応力は増加する；熱誘起FCC-HCPマルテンサイト変態は顕著に抑制される；逆に変形誘起マルテンサイト変態や双晶変形は促進されるなどから着想しました。結果として、鉄系形状記憶合金 (FCC-HCPマルテンサイト変態を起こすFe-29Mn-7Cr-6Si合金) で水素チャージ (吸蔵量27wt.ppm) すると形状回復ひずみが有意に増加することを報告しました<sup>17)</sup>。

一方で、水素による高強度化・高延性化の実現にあたっては、TWIP鋼で体験した粒界・境界割れを防ぐことに注力しました。粒界凝集力を下げた変形の局在化を生むMnは合金元素から除外しました。また、BCCとHCPマルテンサイトの生成は共に局所応力集中を高めさらにBCC生成は水素の再分配と局部濃化を通して破壊を誘起するためFCCの相安定性が高い合金組成を目指しました。さらに粒界への応力集中を低減した上で高強度を実現するために微細結晶

粒組織としました。このような創製指針のもとで、結晶粒径を1.9mmに微細化した等原子量比CrFeCoNi4元系ハイエントロピー合金で、100MPa高压水素ガス条件でも脆化しない高強度・高延性合金 (降伏強度600MPa, 引張強さ850MPa, 全伸び50%)：耐水素合金を達成・報告しました<sup>18)</sup>。しかし、吸蔵水素量が64wt.ppmと比較的少なかったためなのか、CrMnFeCoNi5元系ハイエントロピー合金で見られたような水素による高強度化<sup>19)</sup>は実現できませんでした。

### 4.3.3 水素活用鋼：想定外の発見

前節4-3-2に示した「ヘテロ構造制御」での取り組みを行っている最中に想定外の発見がありました。実用鋼であるオーステナイト系ステンレス鋼が高温高压水素ガス曝露によって強度が上昇するだけでなく全伸びも増加していることを見つけたのです。それは2019年2月の九州大学機械工学部門材料強度分野での卒研発表会での一枚のスライドの中にありました。直ぐに事の重大性を指導教員の方々にお伝えして、確認のための再実験それに引き続いての系統的な力学試験と詳細なマイクロ組織解析を行うことにしました。そして成果をActa誌に投稿し、2020年8月15日にオンライン公開となりました<sup>20)</sup>。その代表的な結果が図5です。オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS310S) において、高温高压水素ガス曝露によって水素を均一に分布させた試験片を用いた引張試験の結果で、平均水素量の増加とともに、降伏応力、引張強さ、均一伸び、全伸びが増大しています。水素により脆化するという常識が覆っています。

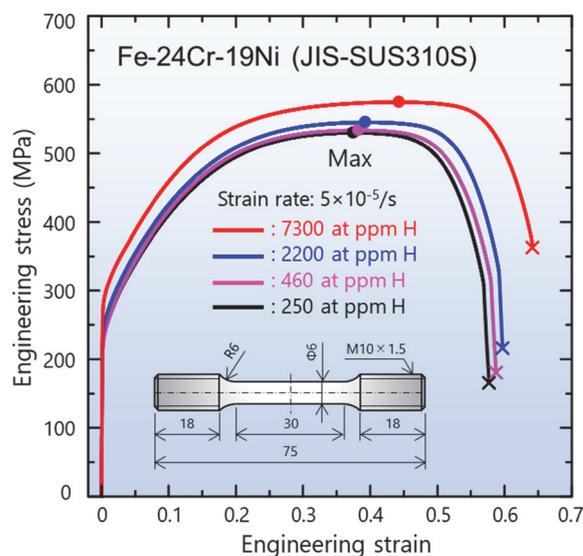


図5 高温高压水素ガス中にて長時間曝露したSUS310Sオーステナイト系ステンレス鋼の応力-ひずみ曲線<sup>20)</sup>。鋼中の水素量が増加するほど、高強度化・高延性化している (Online version in color.)

#### 4.3.4 水素活用鋼：感無量

この研究を引っ張ってくれたのは当時松永久生教授の研究室で助教を務めていた小川祐平さんでした。小川さんは、その後も、この課題で科研費をはじめとした競争的資金を獲得して研究継続し、次々に成果を公開しています<sup>21-26)</sup>。小川さんは、実は私が九大に異動した際の2013年4月に研究室に来てくれた最初の4年生5名の中の一人です。私は、九大機械では、学生諸君に「材料屋の気持ち分かる機械工学者に育ってほしい」と願いました。つまり「状態図と転位論がわかり、ミクロ組織と力学特性の紐づけができる機械工学者」というわけです。九大津崎研一期生の小川祐平さんが、まさにそのようなエンジニアに育ってくれて感無量です。

また、図5の水素による高強度化・高延性化のキモは、多量の侵入水素による顕著な固溶強化に加えて、引張変形後期での水素による変形双晶の促進にありました<sup>20-25)</sup>。4.3.1節で述べたように「水素による変形双晶の促進と高延性化」は、今や中堅鉄鋼研究者のリーダーに育った小山元道さんと2011年に本研究テーマに着手した際の最初の狙いであったわけで、その実現を見ることができて、これも感無量というしかありません。

## 5 おわりに：感謝とエール

私は、48年前の1976年4月に京都大学の田村今男先生と牧正志先生の研究室に4回生で配属になって以来、常にワクワクしながら研究を続けてきました。MITでポスドクを勤めた後に帰国し1985年4月から助手として学生諸君を指導する立場になってからは「ハラハラ、ドキドキ」もありましたが、研究自体は常に「ワクワク」でした。それは研究対象としての鉄鋼を愛し、『現象解明を極める研究』；『限界に挑戦する研究』；『常識を覆す研究』に努めてきたからだ信じます。この環境を与えてくださった全ての方々に感謝いたします。

鉄鋼は若者の好奇心に答え得る素晴らしい材料です。皆さん、そのことを若者に伝えるために、魅力ある鉄鋼研究をこれからも継続して発信して参りましょう。

#### 参考文献

- 1) H. Bhadeshia : Bainite Transformations, Current Opinion in Solid State and Materials Science, 8 (2004), 211.
- 2) 牧正志：鉄鋼の組織制御—その原理と方法—, 内田老鶴圃, (2015). ISBN 978-4-7536-5136-8.
- 3) 牧正志：ミクロの世界から見た鉄鋼材料の魅力, ふえらむ, 13 (2008), 544.
- 4) G. Krauss : Steels : Processing, Structure, and Performance, (2005), ASM International, Materials Park, Ohio. ISBN-10 : 0-87170-817-5.
- 5) F.B. Pickering : The Optimization of Microstructures in Steel and Their Relationship to Mechanical Properties, Hardenability Concepts with Applications in Steels, ed. by D.V. Doane and J.S. Kirkaldy, AIME, Warrendale, PA, (1978), 179.
- 6) Y. Kimura, T. Inoue, F. Yin and K. Tsuzaki : Inverse Temperature Dependence of Toughness in an Ultrafine Grain-Structure Steel, SCIENCE, 320 (2008), 1057.
- 7) Y. Kimura and T. Inoue : Influence of Carbon Content on Toughening in Ultrafine Elongated Grain Structure Steels, ISIJ Int., 55 (2015), 1135-1144.
- 8) 木村勇次, 井上忠信：超微細繊維状結晶粒組織を有するフェールセーフ鋼の強靱化, ふえらむ, 17 (2012), 830.
- 9) J.P. Materkowski and G. Krauss : Tempered Martensite Embrittlement in SAE 4340 Steel, Metallurgical Transactions A, 10 (1979), 1643.
- 10) X. Min, Y. Kimura, T. Kimura and K. Tsuzaki : Delamination toughening assisted by phosphorus in medium-carbon low-alloy steels with ultrafine elongated grain structures, Mater. Sci. Eng. A, 649 (2016), 135.
- 11) <https://www.jst.go.jp/crest/element/researchers/index.html>
- 12) [https://samurai.nims.go.jp/profiles/tsuzaki\\_kaneaki?locale=ja](https://samurai.nims.go.jp/profiles/tsuzaki_kaneaki?locale=ja)
- 13) H.H. Johnson, J.G. Morlet and A.R. Toriano : Hydrogen, Crack Initiation, and Delayed Failure in Steel, Transactions TMS-AIME, 212 (1958), 528.
- 14) M. Koyama, E. Akiyama, K. Tsuzaki and D. Raabe : Hydrogen-assisted failure in a twinning-induced plasticity steel studied under in situ hydrogen charging by electron channeling contrast, Acta Mater., 61 (2013), 4607.
- 15) <https://www.jst.go.jp/kyousou/theme/ka.html>
- 16) 津崎兼彰：特別講演 鉄鋼のマルテンサイトと水素脆化の研究, ふえらむ, 20 (2015), 369.
- 17) M. Koyama, C. Hao, E. Akiyama and K. Tsuzaki : Hydrogen enhances shape memory effect of a ferrous face-centered cubic alloy, Metall. Mater. Trans. A, 51 (2020), 4439.
- 18) M. Koyama, H. Wang, V.K. Verma, K. Tsuzaki and E. Akiyama : Effects of Mn content and grain size on hydrogen embrittlement susceptibility of face-centered cubic high-entropy alloys, Metall. Mater. Trans. A, 51

- (2020), 5612.
- 19) K.Ichii, M.Koyama, C.C.Tasan and K.Tsuzaki : Comparative study of hydrogen embrittlement in stable and metastable high-entropy alloys, *Scr. Mater.*, 150 (2018), 74.
- 20) Y.Ogawa, H.Hosoi, K.Tsuzaki, T.Redarce, O.Takakuwa and H.Matsunaga : Hydrogen, as an alloying element, enables a greater strength-ductility balance in an Fe-Cr-Ni-based, stable austenitic stainless steel, *Acta Mater.*, 199 (2020), 181.
- 21) 小川祐平 : 水素を利用した高強度・高延性構造用合金の創製およびこれに関わる新知見, *まてりあ*, 61 (2022), 325.
- 22) H.Nishida, Y.Ogawa and K.Tsuzaki : Chemical composition dependence of the strength and ductility enhancement by solute hydrogen in Fe-Cr-Ni-based austenitic alloys, *Mater. Sci. Eng. A*, 836 (2022), 142681.
- 23) Y.Ogawa, H.Nishida, O.Takakuwa and K.Tsuzaki : Hydrogen-enhanced deformation twinning in Fe-Cr-Ni-based austenitic steel characterized by in-situ EBSD observation, *Materials Today Communications*, 34 (2023), 105433.
- 24) Y.Ogawa, O.Takakuwa and K.Tsuzaki : Solid-solution hardening by hydrogen in Fe-Cr-Ni-based austenitic steel : Temperature and strain rate effects, *Mater. Sci. Eng. A*, 879 (2023), 145281.
- 25) Y.Ogawa : Temperature-sensitive ductilization in hydrogen-alloyed Fe-Cr-Ni austenitic steel by enhanced deformation twinning, *Scr. Mater.*, 238 (2024), 115760.
- 26) J.Moriyama, O.Takakuwa, M.Yamaguchi, Y.Ogawa and K.Tsuzaki : The contribution of Cr and Ni to hydrogen absorption energy in Fe-Cr-Ni austenitic systems : A first-principles study, *Computational Mater. Sci.*, 232 (2024), 112650.

(2024年3月29日受付)