



反省、そして前進

戸高義一

Yoshikazu Todaka

豊橋技術科学大学 機械工学系
准教授

筆者が所属する材料機能制御研究室では、鉄鋼材料を中心とした構造材料から熱電材料などの機能材料まで、幅広い材料の特性・機能を高度化する研究を行なっている。そのためのキーテクノロジーは、巨大ひずみ加工や相変態などを利用した微細組織の制御、および、それに基づく合金設計である。また、それらを駆使して創製した新材料を産業界へ展開するため、新規プロセスの開発や既存技術の高度化にも取り組んでいる。特に筆者が近年注力している研究分野は、各個の金属がもつ力学的ポテンシャルを最大限に活かすことを目標に、巨大ひずみ加工による格子欠陥制御に基づいた力学的高機能化である。ここに、その一端を紹介すると共に、今後の展望を述べさせて頂く。

結晶粒（組織）微細化や相変態を利用した組織制御は、力学的ポテンシャルを最大限に引き出すことのできる優れた方法である。これらの組織制御を可能にするために、筆者は、巨大ひずみ加工法に着目してきた。巨大ひずみ加工法は、相当ひずみ4（例えば圧延では圧下率97%）を超える大きな塑性変形を金属に付与することで、ナノ・サブミクロンオーダーの組織微細化と同時に、高密度に格子欠陥（空孔、転位、粒界など）を導入することが可能である。組織微細化と格子欠陥制御により、以下に示す新しい知見が得られている。

1 巨大ひずみ加工により作製した ナノ・サブミクロン結晶粒バルク 金属に関する研究

筆者は、巨大ひずみ加工法の一つであるHPT (High-Pressure Torsion) 加工により、高密度に格子欠陥を有するナノ・サブミクロンオーダーの組織からなる鉄鋼材料を作製し、その力学的特性を調査してきた。HPT加工は、円板試料を高圧下でねじり加工するため、形状を変えずに大き

なひずみを付与できる。HPT加工を施した極低炭素鋼 (Fe-11ppmC) は、現在最も優れた力学的特性をもつ高合金鋼の一つであるマルエージング鋼に匹敵する引張特性（高強度・高延性の両立）・疲労特性を示すことを明らかにした^{1,2)}。また、引張平均応力（応力比 $R > 0$ ）下での疲労強度がマルエージング鋼に比べて高いことを明らかにした。さらに、金属の高強度化を阻害する最大の要因の一つとなっている水素脆化に関して、格子欠陥の種類を制御することで、力学応答における水素脆化をも抑制できることを明らかにした³⁾。また、図1、図2に示すように、高歪速度での引張試験では、引張変形破壊に及ぼす水素の力学応答への影響が見られないものの（図1）、破面においては水素の影響が顕著に表れることが分かった（図2）。これらの現象を、動的な水素と格子欠陥との相互作用・協調運動と関連付けて理解することで、水素脆化

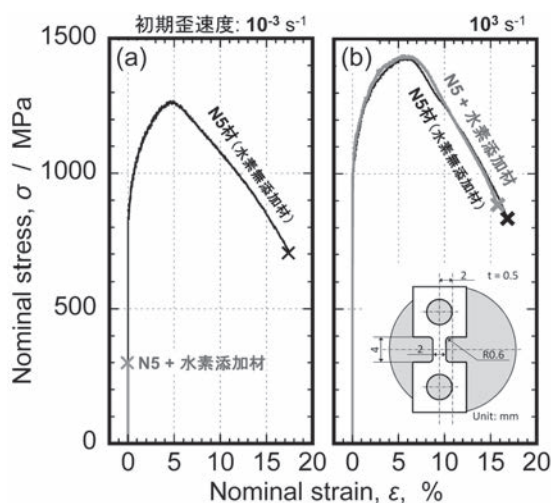


図1 HPT加工 (N5材；ねじり回数 $N: 5$ 、圧力：5GPa、ねじり速度：0.2rpm) および陰極チャージにて水素添加 (N5+水素添加材) した極低炭素鋼 (Fe-11ppmC) の引張試験結果
(a) 低歪速度 10^{-3} s^{-1} 、(b) 高歪速度 10^3 s^{-1} の引張試験 (b) では、水素添加の有無に依らず、同様の引張変形挙動を示した

の支配因子を明らかにできると考えている。以上の力的高機能化は、ナノ・サブミクロンオーダーの組織微細化と格子欠陥の制御により発現する現象である。HPT加工という極めて特殊なプロセスを用いることで、純金属でさえも、特異な現象を顕在化できる。純金属のような単純な化学組成の材料で現象発現の素過程を解明することで、より容易に現象を発現させるための合金設計や、工業的応用が可能な新規プロセスの開発につなげることができると考えている。

また、圧力誘起相変態するIV族元素である純Ti、純Zrにおいて、HPT加工により高压 ω 相が形成する状態で格子欠陥を導入することで、高压 ω 相が常温・常圧下でも安定化することを明らかにした^{4,5)}。しかしながら、純Feにおいては、HPT加工による高压 ϵ 相の常温・常圧下での残留は認められない。これらの現象の相違に及ぼす原因を明らかにするため、系の自由エネルギーおよび相変態の活性化エネルギーを制御したFe-Mn-C系およびTi-Fe-O系について現在調査を行っている。圧力の次元を取り入れた相変態による材質制御を目的に、高压相の常温・常圧下での安定化メカニズムの解明に取り組んでいる。

2 巨大ひずみ加工により形成する表層ナノ結晶粒組織に関する研究

強切削加工やショットピーニングなどの処理を施した被加工物表層において、光学顕微鏡により白色に観察される、脆い組織が形成することが知られている。白色組織が表層に不均一に形成することで破壊起点となるため、問題視されるこ

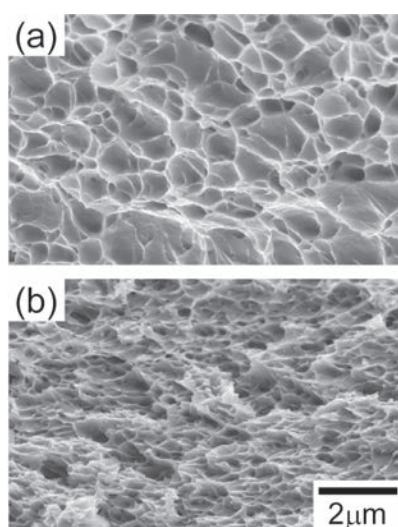


図2 図1で示した高歪速度 10^3 s^{-1} で引張試験した試料の破面のSEM観察結果
(a) N5材(水素無添加材)、(b) N5+水素添加材
両試料において、引張特性は概ね同じであったが、破面形態は全く異なる

とがある。筆者らは、表層の局所的な塑性変形に起因して形成するナノ結晶粒組織が、白色組織の一つであることに注目した。形成した白色組織(ナノ結晶粒組織)を組織学的に調査し、それによりナノ結晶粒化のために必要な加工因子(歪量、歪勾配量など)や組織因子を明らかにした⁶⁻¹¹⁾。また、相変態を利用することで、効率良く結晶粒を微細化できることを示した。これらの成果に基づいて、筆者は、これまで表層に不均一に形成することで欠陥として扱われてきた白色組織(ナノ結晶粒組織)を、表層に均一に形成させることで材質制御に展開した。つまり、ナノ結晶粒組織形成のメカニズムを考慮した加工プロセスを提案し、表層ナノ結晶粒組織をもつ鉄鋼材料の優れた力学的特性(疲労特性など)を明らかにした¹²⁻¹⁴⁾。さらに、巨大ひずみ加工で形成するナノ結晶粒組織の熱的安定性に着目して、表層ナノ結晶粒化巨大ひずみ加工と高周波焼入れを組み合わせたプロセスを開発した^{15,16)}。表層にナノ結晶粒組織とその内部に焼入れ硬化層を付与することで、焼入れ硬化層のみをもつ従来材に比べて、転がり疲労特性が向上することを明らかにした¹⁷⁾。巨大ひずみ加工による表層ナノ結晶粒化は、合金元素添加に依らないため、単純な化学組成からなる鉄鋼材料の力的高機能化に大いに有効である。表層ナノ結晶粒化鉄鋼材料がもつ優れた特性を明らかにし、工業的に応用できるプロセスとして昇華させたいと考えている。

筆者は、2002年度に教員となってから構造材料(鉄鋼材料)の研究を開始した。前述の研究は、筆者の少ない知識・研究活動の経験にも関わらず、早い時期から鉄鋼協会の各種研究会・フォーラムなどに参加させて頂き、多くのディスカッションの機会を頂いたことで、大きく進展したと考えている。特に、「超強加工の材料科学」研究会(主査:豊橋技科大梅本教授)では、現在の研究活動の基礎となる最新の研究成果を知ることができた。

この経験に基づき、学生には、自身の無知や経験不足に臆することなく、種々の研究会・フォーラムなどへ参加し、自身の言葉でディスカッションするように指導している。しかしながら、そのような指導は、ディスカッションした経験の少ない学生にとっては重荷になることが危惧される。多くの経験は成長の切っ掛けとなると信じているが、タイミングを間違えると成長の芽を摘んでしまう恐れがある。学生のポテンシャルを最大限に引き出す教育とは何か、日々、自問自答しながら教育している次第である。

2009～10年度には、鉄鋼協会「組織制御に関する産学連携推進フォーラム」(材料の組織と特性部会)の主査を務めさせて頂いた。同年代の研究者・技術者との交流を主な目的とした当該フォーラムでは、それぞれの立場における将来展望や産学官連携の在り方、そして悩みなどについて広く意見



図3 材料機能制御研究室の仲間たち（梅本教授（右端）主催の新メンバー歓迎会にて（筆者は左端））

交換することができた。研究・技術開発や教育における問題を共有できたことで、同年代の研究者・技術者間で意見交換できる土壌ができた。このフォーラムを通じて、現在でも自由に相談できる仲間ができたことは幸せなことである。一方で、「材料の組織と特性部会」以外の研究者・技術者と、当該フォーラムで交流を深めることができなかったことを残念に感じている。高機能化した今日の鉄鋼材料では、僅かな元素の添加（混入）であっても、その特性は大いに変化する。僅かな元素の添加（混入）やその存在状態を制御して鉄鋼材料をさらに高機能化するためにも、他の部会の研究者・技術者との交流・連携を密にする必要がある。

前述の研究成果は、多くの先生・先輩方の指導や後輩・学生諸君の協力の下で得ることができた。また、鉄鋼研究振興助成^{5,11,14}をはじめ、科研費 特定領域研究「巨大ひずみ加工による高密度格子欠陥新材料（代表：九大 堀田教授）」、新学術領域「バルクナノメタル～常識を覆す新しい構造材料の科学（代表：京大 辻教授）」などの支援を頂いたことで、研究が加速された。得られた成果については、学会・論文などにて発表すると共に、特許出願することで、社会還元してきたつもりである。しかしながら、その方法によって十分な形で社会還元できているのか、不安を感じないわけでもない。今後も産業界の方々から意見を頂き、より良い形で産学連携・社会貢献ができればと考えている。

巨大ひずみ加工による格子欠陥制御に基づいた力学的高機能化に関する学術を追求し、また、それを産業界へ展開できるように技術開発を意識した研究に努めて参りたいと考えております。今後とも、ご指導・ご支援の程、よろしくお願い致します。

参考文献

- 1) Y.Todaka, H.Nagai, Y.Takubo, M.Yoshii, M.Kumagai and M.Umemoto : Int. J. Mater. Res., 100 (2009) , 775.
- 2) Y.Todaka, M.Yoshii, M.Umemoto, C.Wang and K.Tsuchiya : Mater. Sci. Forum, 584-586 (2008) , 597.
- 3) Y.Todaka, K.Morisako, M.Kumagai, Y.Matsumoto and M.Umemoto : Adv. Mater. Res., 89-91 (2010) , 763.
- 4) Y.Todaka, J.Sasaki, T.Moto and M.Umemoto : Scripta Mater., 59 (2008) , 615.
- 5) 鉄鋼研究振興助成および石原・浅田研究助成 第18回受給研究テーマ
- 6) Y.Todaka, M.Umemoto, Y.Watanabe, A.Yamazaki, C.Wang and K.Tsuchiya : ISIJ Int., 47 (2007) , 157.
- 7) Y.Todaka, M.Umemoto, Y.Watanabe and K.Tsuchiya : Mater. Sci. Forum, 503-504 (2006) , 669.
- 8) Y.Todaka, M.Umemoto, S.Tanaka and K.Tsuchiya : Mater. Trans., 45 (2004) , 2209.
- 9) 戸高義一, 梅本実, 渡辺幸則, 土谷浩一 : 日本金属学会誌, 67 (2003) , 690.
- 10) Y.Todaka, M.Umemoto and K.Tsuchiya : ISIJ Int., 42 (2002) , 1430.
- 11) 鉄鋼研究振興助成 第12回受給研究テーマ
- 12) 戸高義一, 川畑雄士, Jinguo Li, 田中修二, 小栗和幸, 鈴木正, 梅本実, 土谷浩一 : 鉄と鋼, 96 (2010) , 21.
- 13) 特許第4713344号, 特許第4711629号
- 14) 鉄鋼研究振興助成 第15回受給研究テーマ
- 15) 永井宏典, 戸高義一, 寺島章, 三阪佳孝, 川寄一博, 梅本実 : CAMP-ISIJ, 22 (2009) , 1477.
- 16) 特開2011-105991
- 17) 神志那薫, 戸高義一, 永井宏典, 寺島章, 深沢剣吾, 三阪佳孝, 川寄一博, 梅本実 : CAMP-ISIJ, 23 (2010) , 1276.

(2012年1月23日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

東京工業大学 大学院総合理工学研究科 材料物理科学専攻 教授

加藤 雅治

「躍動」の記事の趣旨は大変面白いと思って、深く考えもせずにコメント役をお受けしたが、予想以上に難しかった。その理由は、戸高先生は年齢的には若い、すでに気鋭の研究者として、学界で高く評価されているからである。

「学生のポテンシャルを最大限に引き出す教育とは何か、日々、自問自答しながら教育している」という点には共感を覚える。私自身まだこの解答を持ち合わせていないが、研究に対する良いアイデアが出ずに悩んでいる姿を学生にさらけ出すことも教育であると考えたい。良くも悪くも、飾らない自分を他人に見て貰っても平気であるという、一種の自負を持つことは大切だと思う。自分を大きく見せようと背伸びをせずに、できるだけ「自然体」で振る舞いたいものである。それでも他人から一目置かれるような人は本物の人物であろうし、そのような人物の周りには人が集まるものだと思う。

戸高先生も仰っているように、今までの研究成果は、梅本先生はじめ多くの方々のご指導、ご協力の賜があったからこそのものであろう。これからも、誰からも好かれる天性の明

るさを武器に、「知り合えた人の頭脳は自分のものも同然」という貪欲さも忘れず、自然体で多くの方々と知遇を得て、躍進していただきたい。「他の部会の研究者・技術者との交流・連携」に留まらず、今のうちに、まとまった期間（できれば2年）、海外での研究生生活が送れば、視野を大きく広げるために理想的であるが、そのチャンスは作れるだろうか？

私事になってしまうが、30代後半の頃の私は、研究し、学会発表し、論文を書くことに必死であった。世の中を見る余裕など全くなかった。一方、戸高先生は、すでに研究成果の「社会還元」にまで、考えが及んでおられる。当時の私などとは比べものにならない俊秀である。しかし、敢えて言う。まだ若く、研究能力も高いのだから、社会還元などあまり気にせずに、独創的な研究アイデアを発想し、良い成果を挙げることに集中していただきたい。研究はアイデア勝負であり、若く優秀な頭脳は、アイデアを生み出すためにこそ使うべきだと思うからである。

無責任なコメントだったとしたらお許しいただきたい。

戸高先生のますますのご発展をお祈りします。

新日本製鐵（株） 技術開発本部 フェロー

潮田 浩作

若手研究者のリーダー格として大いに活躍されている戸高先生の力強い記事「反省、そして前進」を読み、鉄鋼業界の研究開発部門に約34年間勤務してきた筆者がコメントさせていただきました。

京大名誉教授牧正志先生は常日頃から「我々は鋼材の持つ能力の一部しか引き出していない。鋼材は大変魅力あふれる材料である。そのためには、挑戦すべき課題が一杯ある。」と主張されています。この本質的な課題に挑戦すべく、金属が持つポテンシャルを最大限に活かすように必死になって取り組まれている姿が目につきました。

巨大ひずみ加工は金属の能力を引き出すための一つのプロセスです。それを駆使して特性の飛躍を図り、機構を解明し、工業的に応用可能な新規プロセスへと繋げる挑戦は、産業界から見ても大変期待が大きいものです。一方では飛躍が大きい故に、多くの難局が予想されます。

自ら苦勞してサンプルを作製し従来にないデータを獲得するのに加え、今後は異分野との融合が重要でしょう。進歩の著しい最先端解析技術や計算科学との連携を図り、材料サイエンスにおけるブレイクスルーを期待します。例えば、巨大ひずみ加工による特徴ある組織の発達と力学特性との関係、あ

るいは鋼中の水素と格子欠陥との相互作用およびこれと水素脆化との関係を本質的に解明することが挙げられます。その際、最も重要なのは研究課題の設定と考えます。タコツボで議論するのではなく、産業界からのニーズも参考に検討することにより、新たな研究課題も発掘できる可能性があります。また、新プロセスの開発には、機械・エンジニアリング分野、および企業との連携も必要でしょう。新しいことを産むのは本当に大変です。10～20年かかることもざらにあります。失敗を恐れず起業家になるくらいのつもりで挑戦してください。研究開発と実用化の間には“死の谷”があり、新規性が高いほどこれを越えるに必要なエネルギーは大きくなります。そのためには、若い力が必要です。一方、失敗を許し、リスクテイクして新しいことに果敢に挑戦できる環境作りも大切と考えます。ご指摘のような鉄鋼協会の他の部会研究者との若手交流は全く問題ありません。

我が国を支える物造り産業、素材産業が将来にわたり発展するには、革新的シーズの発掘と新指導原理の提案、そして多様性を尊重した若手の人材育成が必須です。これらは、学の若手研究者に産業界が最も期待するところです。そして、次代を切り拓いてください。