躍 動
若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

オーステナイト鋼の塑性変形の面白さと我が研究の反省点

Attractive Issues on Plastic Deformation in Austenitic Steel and Reconsideration of My Works

上路林太郎
Rintaro Ueji
物質・材料研究機構
構造材料研究拠点
塑性加工プロセスグループ
主幹研究員

1 はじめに

著者は、大学での卒業論文テーマ「低炭素鋼の繰返し重ね接合圧延 (ARB)」に関する研究活動を端緒として、これまで鉄鋼を主とする金属材料の組織と機械的特性に関して研究してきた。学位を取得してから10年以上が経過したが、自分自身でこれまでを振り返ってみると、多いにやりがいのある研究テーマに巡り合うことができたと思うが、反省点もある。本稿では、著者が取り組んだ研究のうち、これまで最も精力を傾けてきた、高マンガンオーステナイト鋼に関する研究を簡単に紹介させていただく。合わせて、今後さらに飛躍するためのやり方を考えるために、過去の自分の研究のやり方を反省してみたい。

2 高マンガン鋼の延性と双晶変形

主として薄板の利用を念頭において良好な強度−延性バランスを得るために、室温にてオーステナイトを全面あるいは部分的に含有する鋼が注目されている。その研究対象の一つに、TWIP (Twinning Induced Plasticity) 鋼[1]と呼ばれるFe-Mn-Al-SiまたはFe-Mn-C-Alを基本組成とする高マンガンオーステナイト鋼がある。この鋼は名前 (TWIP) に見られるように、変形双晶が室温準静的変形において生じ、転位のすべり運動との相互作用など、複雑な変形挙動を示すTWIP鋼を含む高マンガンオーステナイト鋼の研究の歴史は決して短いものではないことは、まず初めに指摘しておかなければならない[2]。古くは、第一次世界大戦前に開発されたHadfield鋼がある。また戦後では、ステンレス鋼中のニッケルの代替元素としてマンガンの利用が検討されている。加えて、非磁性鋼[3]や鉄系形状記憶合金[4]に関連して多くの研究がなされている。過去の研究においては、双晶変形に加えて、変形中のマルテンサイト変態[5]や動的ひずみ時効[6]など解析されている。種々の変形機構が同時に発生するため、その塑性変形挙動を理解することは困難を伴う。

こうした背景の元で、筆者は特に変形双晶に注目した。その動機は、微細粒鋼の強度延性バランスの向上であった。本稿の冒頭で述べたように、筆者は学生時代の研究で鉄鋼材料の結晶粒微細化に関する研究に取り組んだが、その際に高強度・高延性の両立が当該分野に取り組む研究者にとって一つの課題になっていた。延性向上の指針の一つに、加工硬化の増大があるが、そのために転位組織以外の微細な変形組織が導入できれば、と安直に考えたのが、筆者のTWIP鋼研究の始まりであった。TWIP鋼という言葉は、文献調査によって鋼の研究動向を整理した際に、たまたま見かけて知った。その程度の取っ付きであり、当初は高マンガン鋼の歴史の深さなどまったく知らず、また、微細化により双晶変形が抑制される場合があることなどすでに報告[7]があったにも関わらず、とりあえず体を動かして実験してみた。バックグラウンドの十分な文献調査に基づいて見通しを立てず研究したことは、安直であったとしか言い様が無い。過去の著名な研究論文は特に奥が深く自分の知識として使いこなすまでに時間がかかる場合が多いので、なるべく早めに調査して触れておくべきであった、と反省する。一方で、高強度・高延性という普遍的なものつくりの課題を動機とした点は、周囲の理解を得やすく、自身の研究の駆動力を高める上で良かったと思う。

双晶変形挙動は初期結晶粒径の影響を受けて変化する。この事実を不勉強な筆者は実験をしてはじめて知った。そこ

で、当初方針であった「高強度・高延性の直接的な追及」から、「双晶変形が及ぼす応力−ひずみ曲線への影響の明確化」、と論点を改めることとした。論点を変えることができた理由としては、平均粒径をパラメータとしたデータを系統的に十分取得していたため、議論の土台が比較的堅固であり、多角的な検討を展開しやすかったことが、まず一つあげられる。また、講演大会や「加工硬化と組織」研究会において自分の発表後、関係各位から頂いた叱咤激励によるところも大きい。以下では、圧延と焼鈍により種々の平均粒径を有する31mass％ Mn-3％ Al-3％ Si TWIP鋼（オーステナイト単相鋼）の引張変形挙動を調査した例[8]を紹介する。

図1[9]は種々の平均粒径（d）を有する完全再結晶組織を有するTWIP鋼の公称応力−公称ひずみ曲線（a）および応力−ひずみ曲線から得られた真応力−加工硬化率曲線（σ-dσ/dε）（b）を示している。加工硬化率曲線中の破線は、加工硬化率が真応力と等しくなる塑性不安定条件（dσ/dε＝ε）を示している。応力−ひずみ曲線（a）が示すように、結晶粒径が微細になるほど強度が上昇し伸びが低下する。しかし、最も粒径が小さい場合であっても、比較的大きな伸びを示す。

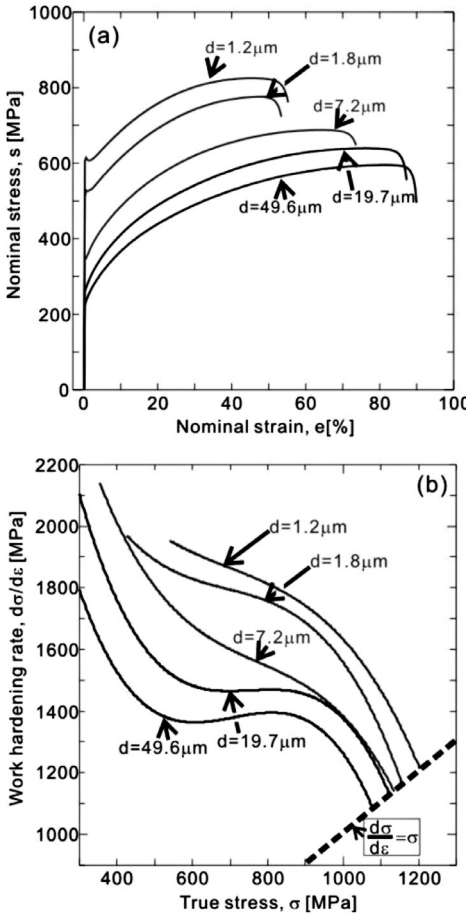

図1　各種粒径を有するTWIP鋼の公称応力−公称ひずみ曲線（a）および加工硬化率-応力曲線（b）[9]。

特に、同様に平均粒径が1μm程度の微細粒フェライト単一組織鋼の場合、均一伸びは2−5％程度にまで低下してしまうこと[10]と比較した場合、その差は明確である。加工硬化曲線（b）は、粒径により異なる二種類の挙動を示す。すなわち、平均結晶粒径が微細な場合は、真応力の増大に伴い加工硬化率は単調に減少する。一方で、平均粒径が粗大な場合、加工硬化率は単調には減少せず、ある応力またはひずみ以上となると増加し、その後ふたたび減少する。このような加工硬化の増加はTRIP現象が発現する場合において顕著に認められる[11]。

図2[9]に、真ひずみで0.3まで引張ひずみを与えた初期粒径49.6μm（a）あるいは1.8μm（b）のTWIP鋼のTEM明視野像を示す。引張変形後の通常粒径材（a）は変形双晶が多く観察される。変形双晶は均一に分散して存在するのではなく、数十〜百nm程度と微細な厚さを有する双晶が束状になって存在している。また、変形双晶に加えて転位も多く観察されるが、明瞭な転位セル組織の形成は認められない。これは、TWIP鋼の低積層欠陥エネルギー（〜40mJ/m^2）に起因する動的回復のし難さを示している。一方で、微細粒材（b）では変形双晶は観察されず、回折条件の違いによるコントラストが観察されるのみである。

ところで、FCC金属の加工組織に関しては、著者が学生（博士後期課程2年）のときに研究留学したデンマークのリソー国立研究所（現　デンマーク工科大学リソーキャンパス）で系統的な研究が展開されていた。著者が留学していた間、

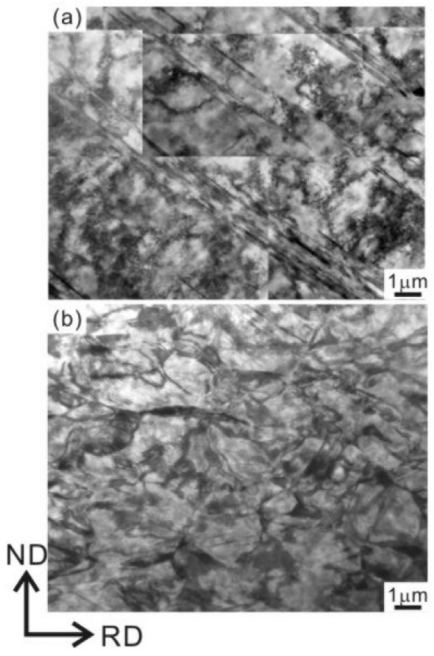

図2　真ひずみ0.3まで変形させた初期平均粒径49.6μm（a）または1.8μm（b）を有するTWIP鋼のTEM明視野像[9]。

電子顕微鏡を用いたアルミニウムの加工組織を研究させていただいた。そこでは、関連する理論の他に研究データ解析に臨む際の真摯な姿勢の重要性を学ぶことができた。そこで学んだ解析方法をTWIP鋼に対しても利用してみようと思い立ち、得た結果が図3[9]である。図3は、真ひずみ0.2まで引張変形させた試料のTEM観察を行い、個々の結晶粒内の双晶発生の有無を、その引張軸の方位に対してプロットした結果である。図中の黒丸は変形双晶の観察された粒の方位を示している。結晶粒を微細化することにより、変形双晶が観察される粒の頻度は著しく減少する。すなわち、TWIP鋼の場合、結晶粒微細化により双晶変形は抑制される。一方で、引張軸

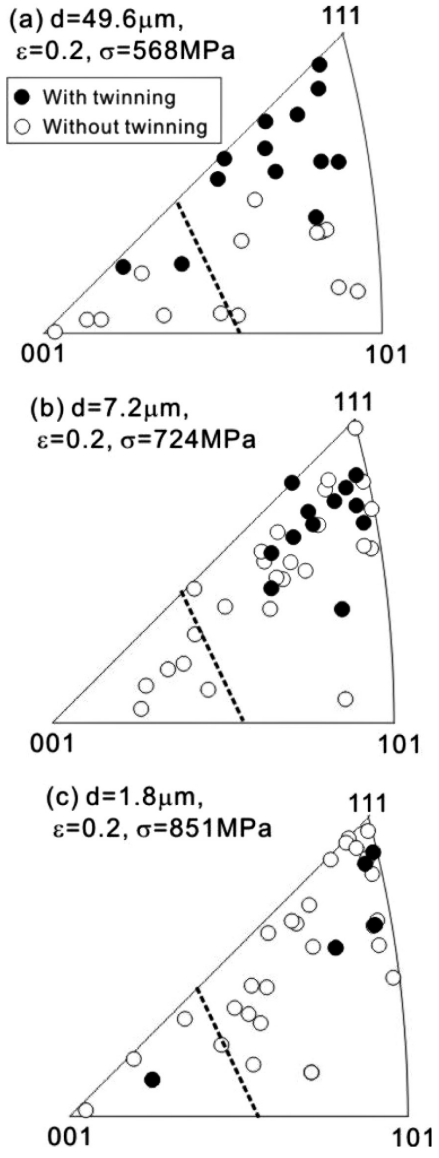

図3　種々の平均粒径（d）を持つ完全再結晶組織を有するTWIP鋼における引張軸方位と双晶変形発生の有無の関係。丸印で示された引張軸方位における変形双晶の有無を黒（有）または白（無）で示している。ひずみ速度10^{-4}/secの室温引張で真ひずみ（ε）0.2まで変形し、その際に達した真応力（σ）も合わせて示している[9]。

が<111>に近い粒において双晶変形が生じやすいという傾向が、結晶粒径の如何に関わらず共通して認められる。

以上の結果で特に注目すべき点は、結晶粒微細化により双晶変形を伴わないTWIP鋼であっても大きな延性を示す、という点である。この結果は、TWIP鋼における大きな延性は、双晶変形以外にも原因があることを示唆している。その原因の一つとして、TWIP鋼の低い積層欠陥エネルギーが挙げられる。積層欠陥エネルギーが低ければ、引張変形中の動的回復が抑制されるため、転位密度が増大しやすく、大きな加工硬化が得やすいはずである。

TWIP鋼の大きな延性の主因は双晶変形か動的回復抑制のどちらであるか、という問題は筆者としてはこだわりたい問題であった。それは当該鋼の機械的性質を最適化するための成分設計・組織設計の指針に直結するからである。双晶変形を主とするのであれば、双晶形成メカニズムの過去の研究が参考になるであろうし、動的回復であるなら、まず積層欠陥エネルギーが主たる指針となる。加工組織とマクロな力学特性の関係を重視するセンスは筆者が学生時代に受けた教育、デンマークでの研究生活などから学んだ一つの確かな行動指針である。しかし、いろいろな研究トピックに意味なく目移りしてしまい努力が発散した結果、上記の問題に対する答えを打ち出すことができなかった点は反省すべき点であると筆者は思う。一方で、実用を意識するのであれば、単に準静的条件での応力−ひずみ曲線のみだけではなく、他の特性を調べることも重要となる。次に述べる高速変形特性に関する研究に取り組めたことは幸運であった[12]。

3 高マンガン鋼の高速変形と双晶変形

自動車構造用材料を目指す場合、衝突事故時の衝撃吸収エネルギーが大きく、生存空間を十分確保できる材料が望まれる。衝突事故の際には、ひずみ速度が10^3/sec程度の高速変形を受けるため、その衝撃吸収エネルギーを評価する際には、高速変形の塑性変形挙動に関する知見が必要となる。図4[13]は各種平均粒径（d）を持った完全再結晶組織を有するTWIP 鋼をそれぞれ10^{-3}sec^{-1}, 10^2sec^{-1}, 10^3sec^{-1}のひずみ速度で変形したときの公称応力−公称ひずみ曲線である。ひずみ速度10^3sec^{-1}にて得られた応力ひずみ曲線は、高速材料試験特有の大きな応力振動を伴っているが、10^2/sec^{-1}以下のひずみ速度では応力振動は認められなかった。ひずみ速度によらず、平均結晶粒径が微細になるにつれて、あるいはひずみ速度が増大するにつれ、強度が増大し伸びが低下する。ひずみ速度を大きくすると変形抵抗は増大する傾向はあるが、伸びについては必ずしも一定の傾向を見いだせない。しかし、微

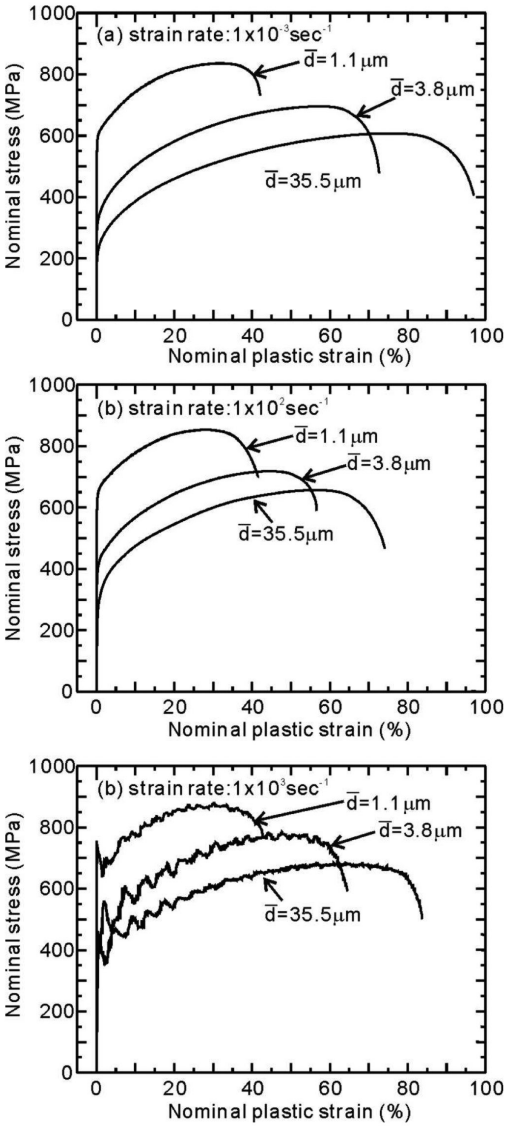

図4　種々の粒径の完全再結晶組織を有するTWIP 鋼の各種ひずみ速度における室温引張で得られた公称応力−公称ひずみ曲線。(a) 10^{-3}sec^{-1}, (b) 10^{2}sec^{-1}, (c) 10^{3}sec^{-1} [13]。

細粒組織を有するTWIP鋼では高速変形時に比較的大きな伸びを示す傾向もある。

図5[13]は、各種ひずみ速度におけるTWIP鋼の0.2％耐力と平均粒径の-1/2乗の関係であり、いわゆるHall-Petchプロットを示している。この図に示したデータには、応力振動が観察された10^{3}/secのデータは含めていない。ひずみ速度ごとに、Hall-Petch型の関係式でデータを表現した場合、それぞれの直線の傾き（k）は、ひずみ速度の増大とともに減少する傾向が見られた。これは、結晶粒微細化により静的な降伏応力と動的な降伏応力の差が小さくなることを意味している。

ひずみ速度の増大に伴う変形応力の増大は、転位の熱活性化過程を考察して議論される。より具体的には、ひずみ速度の変化に伴う変形応力の変動から、転位のすべり運動を律速

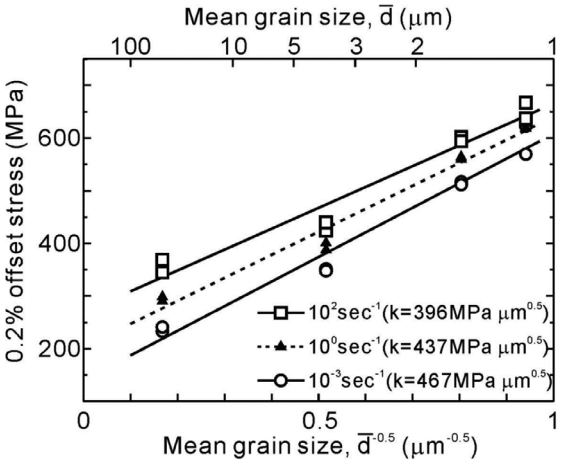

図5　各種ひずみ速度のもと、室温引張試験により得られたTWIP 鋼のHall-Petchの関係[13]。

している過程のバリアの大きさを示す活性化体積を求めることができる。実際に図5で示したデータを用いて算出すると、平均粒径が35.5μmから1.7μmまで微細化することにより、見かけ上の活性化体積は1.7x10^{-28}m^{3}から2.5x10^{-28}m^{3}へと約1.5倍大きくなることが分かった。この変化は、FCC金属における完全転位と部分転位のバーガースベクトルの大きさの違い（約1.73倍）に対応する。すなわち、FCC金属における双晶変形は先行部分転位の単独運動により発現すると見なせるため、結晶粒微細化に伴う双晶変形の抑制は、変形を担う運動をする転位の運動単位が部分転位から完全転位に変化することに対応する、と考えることができる。オーステナイトの変形では、塑性変形中に双晶変形や動的相変態を伴い、塑性変形を担う転位の種類にも変化があることを、障害物分布や応力分布の変化と合わせて考える必要があると思われる。

上記のTWIP鋼の高速変形挙動に関する研究について特に反省しなければならない点は、加工硬化挙動や破壊挙動をもっと調査すべきであった点である。本研究の動機付けで破壊を関連させたにもかかわらず、その前段階である降伏近傍の現象の理解だけに集中してしまい、その結果、その後の自身のオーステナイト鋼研究の展開が遅くなってしまったように思う。破壊の面白さと重要性を強く認識したのは、しばらくしてからHadfield鋼の変形特性を自身で調べた[14]後であった。

4　おわりに

これまでの著者のオーステナイト鋼の研究を振り返り、主な反省点を述べてみた。鉄鋼材料の研究を通して、日本のものつくりに携わることが出来るのは非常に有り難いことである。ふりかえってみて、特に考察の段階や次のステップを考

える段階で、ものつくりへの貢献をもっと強く継続して意識したほうが、結果として新しい物理を見出す可能性も高かったのではないかと思う。また、より強く意識することで、先輩方の過去のご研究をもっと賢く利用できていたのではないかと思う。今後とも精進したい。

参考文献

1) O.Grässel, L.Krüger, G.Frommeyer and L.W.Meyer：Int.J.Plasticity, 16 (2000), 1391.
2) 上路林太郎：塑性と加工, 53 (2012), 541.
3) 非磁性鋼における最近の進歩, 基礎研究会非磁性鋼調査研究部会報告書, 日本鉄鋼協会, (1990)
4) 宮崎修一, 佐久間俊雄, 渋谷嘉一：形状記憶合金の応用展開, CMC出版, (2006)
5) 中津英司, 宮田武志, 高木節雄：日本金属学会誌, 60 (1996), 936.
6) Y.N.Dastur and W.C.Leslie：Metall.Mater.Trans., 12A (1981), 749.
7) M.R.Barnett, Z.Keshavarz, A.G.Beer and D.Atwell：Acta Mater., 52 (2004), 5093.
8) R.Ueji, N.Tsuchida, D.Terada, N.Tsuji, Y.Tanaka, A.Takemura and K.Kunishige：Scr.Mater., 59 (2008), 963.
9) 鉄鋼材料の加工硬化特性への新たな要求と基礎研究, 加工硬化特性と組織研究会報告書, 日本鉄鋼協会, (2011)
10) N.Tsuji, Y.Ito, Y.Saito and Y.Minamino：Scr.Mater., 47 (2002), 893.
11) 高木勝規, 上路林太郎, 水口隆, 土田紀之：鉄と鋼, 97 (2011), 44.
12) R.Ueji, K.Harada, N.Tsuchida, Y.Okitsu and K.Kunishige：Proc.On the International Conference on New Developments in Advanced High-Strength Sheet Sheels, Orlando, USA, Association of Iron and Steel Technology, (2008), 277.
13) 上路林太郎, 原田賢二, 土田紀之, 川村清嗣, 国重和俊：CAMP-ISIJ, 20 (2007), 1400.
14) R.Ueji, D.Kondo, Y.Takagi, T.Mizuguchi, Y.Tanaka and K.Shinagawa：J.Mater.Sci., 47 (2012), 7946.

(2016年5月23日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

国立高等専門学校機構　佐世保工業高等専門学校　校長　九州大学　名誉教授　東田　賢二

上路林太郎先生の「躍動」の記事にコメントを書かせて頂けることは大変光栄なことです。今回のオーステナイト鋼の塑性変形に関する記事は、上路先生の博士課程の研究テーマである超微細粒材の研究、そして最も精力的に取り組まれた高マンガン鋼の塑性変形挙動、さらに高速変形の実験手法を取り入れたひずみ速度依存性のご研究等を巧みに組み合わせられたもので、高いオリジナリティーとオーソドックスさを兼ね備えたテーマ設定となっています。これらは材料科学のきわめて基礎的な問題を包含しながら、一方で衝突安全性に対する材料の力学的挙動の基礎データとなる実用的にも重要な意味を持つ研究と思われます。筆者は実用材料の研究の経験は殆どなく鉄鋼材料についても素人です。しかし、高マンガン鋼の塑性変形挙動は、比較的、積層欠陥エネルギーの低いFCC合金における塑性変形挙動として捉えられることから、「すべり変形と双晶変形の競合」という意味で今も興味を持ち続けている課題です。私事ながら筆者が高村仁一先生の研究室に入った大学4年生におけるテーマがCu-8at.% Ge合金単結晶の双晶変形の結晶方位依存性でした。このような基礎的テーマが実用的な鉄鋼材料に展開され、その基本的な考え方が受け継がれ、さらに超微細粒という近年展開されている新たな研究要素を加えて、現在の若手研究者に引き継がれていることは、非常に心強い限りです。結晶性材料の力学的性質に関する研究については、20世紀後半、転位論の普及と多くのそびえ立つような俊英の輩出によって優れた研究が続々と現れました。それらはFCC系ばかりでなくBCC系の金属合金の基礎研究として高い普遍性を持っているように思われます。そしてそれは今日の鉄鋼材料研究に極めて多くの示唆を今も与えているように思えてなりません。もちろん数十年の時を経て、時代も変わり、人も変わり、その研究風土も大きく変化しました。しかし結晶塑性の基礎研究の発展性、そのポテンシャルは、今日改めて高くなっていると感じます。計算科学や計測・観察技術の発展は、かつての材料科学の大家達でも決着を付けることが出来なかった幾つかの難問を解決出来る大きなチャンスを与えてくれているように思われます。但しそこで大切なことは、新奇なものに何でも食らいつく旺盛な雑食的・学際的興味の一方で、優れた古典の持つ普遍性への敬意とそれに基づく奇を衒わないオーソドックスな研究への憧憬ではないでしょうか。丁度それは、現代の古典歌舞伎が世代を越えた役者の連携によって強かな活力を持って光り輝いていることに例えられるかもしれません。

上路先生のますますのご活躍を祈念しています。

(株) 神戸製鋼所　技術開発本部　機械研究所　マルチマテリアル構造・接合研究室長　槙井　浩一

自動車用軽量材料の技術相談で、辻准教授（現京大教授）を訪ねて阪大に伺った時に、博士課程の学生だった上路先生に、初めてお会いしました。直観的に、将来性のある研究者だと思いましたので、上路先生が香川大に移られた後も、何度かご相談に伺いました。

上路先生が香川大時代に、当時、世界で注目されていたTWIP鋼研究を始められたと記憶しています。この材料は、第2世代超ハイテンに分類され、延性的には魅力的でしたが、以下の3点の課題があり、現在、NEDOプロジェクト 革新的新構造材料等技術開発（ISMA）を始め、世界中で注目されている第3世代超ハイテンへと研究の関心が移っています。つまり、以下の3点です。

①高合金であるためにコストとグローバル調達性[1)]の問題、
②降伏強度が低く、部品での軽量化効果が少ないという設計上の問題
③圧延変形抵抗等の製造上の問題

この第2世代超ハイテンの反省を踏まえて、第3世代超ハイテンでは材料開発方針が変更されていますが、延性を支配するオーステナイトの組織制御は、より進化されようとしています。

現在、世界中行われている第3世代超ハイテンの開発競争において、日本がトップランナーを堅持するために、第2世代超ハイテンで上路先生が獲得された組織制御指針を、是非、第3世代超ハイテン開発に取り組んでいる日本企業に、ご指導いただきたいと思います。

最後に、近い将来、第3世代超ハイテンが実験室レベルでの研究から量産を目指す段階に進展すると思います。その時には、圧延等の生産技術、プレス成形等の利用技術が重要になります。この点でも、上路先生のNIMSでのご活躍を期待しております。

1）自動車の様なグローバル商品では、世界で調達できることが重要で、合金成分は少ない方が好まれる。