



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

ターニングポイント

土田紀之

Noriyuki Tsuchida

兵庫県立大学大学院 工学研究科
准教授

現在著者は、兵庫県姫路市書写にある兵庫県立大学大学院工学研究科で、鉄鋼材料を中心に材料強度に関する研究を行っている。引張試験を軸に、変形特性におよぼす試験温度、ひずみ速度の影響の調査や引張試験で得られた応力-ひずみ曲線を記述する構成方程式についての研究に取り組んでいる。ここでは、これまでに取り組んできたふたつの研究テーマについて紹介させていただきたい。

1 炭素鋼の応力-ひずみ曲線におよぼす結晶粒径、温度とひずみ速度の影響

結晶粒微細化強化は、環境負荷を上げることなく高強度を達成できる強化機構である¹⁾。一方で結晶粒微細化だけでは延性の確保が難しく、このため第二相や第二組織との組み合わせ（複合組織強化）により強度・延性バランスを向上させる研究が広く行われている。本研究では、引張特性におよぼす結晶粒径の影響を調査することを大きな目的として、単純組成のJIS-SM490鋼を組織制御することでフェライト結晶粒径が $0.5\mu\text{m}$ から $46\mu\text{m}$ のフェライト-セメンタイト（FC）鋼とフェライト-パーライト（FP）鋼を作製し、常温以下における静的ならびに高速引張試験を行った^{2,3)}。引張試験により得られる応力-ひずみ曲線は、結晶粒径の範囲によりそのタイプが分かれる。変形応力におよぼす温度とひずみ速度の影響は結晶粒径によらず等しく、一方で、結晶粒径の影響は温度、ひずみ速度に依存しないことが明らかとなった。これらの実験結果を元に、熱活性化過程に基づいたKocks-Meckingモデルを用いて、結晶粒微細化による強度の増大を温度やひずみ速度に依存しない非熱的応力成分に結晶粒径の $-1/2$ 乗の関数で与えることによって、結晶粒径の異なるFC鋼、FP鋼の常温以下、ひずみ速度 10^{-6} s^{-1} から 10^3 s^{-1} における応力-ひずみ曲線を精度良く記述できることを明らか

にした⁴⁾。また、ひずみ速度 10^3 s^{-1} における高速引張試験では、超微細粒鋼の結果は伸びを著しく低下させることなく強度が増大することを確認し、一般的に高強度になると低下する静動差は結晶粒径によらずほぼ同じ値であった。これにより結晶粒微細化強化と複合組織強化の組み合わせは、高速変形挙動にも有効であることがわかった⁵⁾。ところで、低炭素鋼を引っ張ると変形初期に降伏点降下とリュウダース伸びが観察される。リュウダース伸びの大きさは、結晶粒径をはじめとする様々な因子によって変化する。著者らの実験結果においても、結晶粒径が微細なほど、温度が低いほどリュウダース伸びは大きくなった。このリュウダース伸びの大きさは、リュウダース変形が終了した後の加工硬化挙動が関係しているというButlerの論文⁶⁾を読み、実験結果からリュウダース変形終了直後（下降伏応力）における加工硬化率とリュウダース伸びの関係を整理したところ、ほぼ1本の曲線に乗っていることがわかった（図1）⁷⁾。図1は結晶粒径や温度、ひずみ速度、炭素量の異なる様々な炭素鋼のリュウダース伸びについて整理した結果であるが、すべて下降伏応力における加工硬化率の大きさと整理できることがわかった点は非常に興味深い結果であった。現在は、超微細粒鋼を用いて破断直前までの真の応力-ひずみ関係を推定する実験を進めている⁸⁾。従来、最高荷重点までしか計算できない真応力-ひずみ曲線を破断直前まで推定することで、破断までの変形挙動を真応力-ひずみ関係の点より眺めることができることは、同じ引張試験でも多くの新しい発見があり、非常に面白さを感じている。真応力-ひずみ関係から見た結晶粒微細化強化の特長とその理由を明らかにすることが本研究課題における重要な目的である。これは科研費 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：京都大辻伸泰教授）」等の支援により取り組んでいるテーマであり、特に同じ班の3名の先生方の強力なサポートのおかげで楽しく研究を進めることができている。

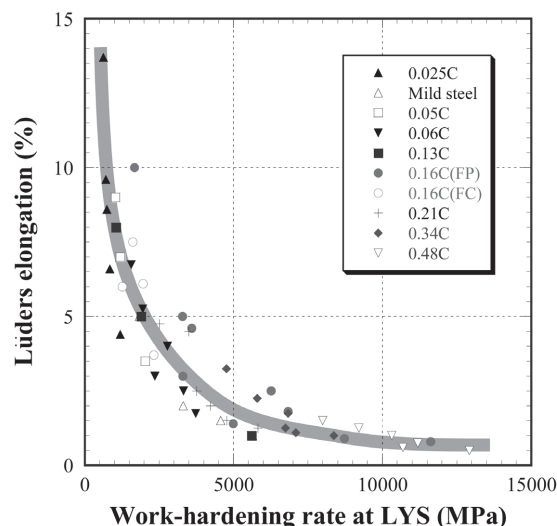


図1 下降伏応力における加工硬化率とリュース伸びの関係⁷⁾。著者らの実験結果だけでなく、過去に報告された様々な炭素鋼の実験も含まれている。いずれのリュース伸びも下降伏応力における加工硬化率により整理できる

2 鉄鋼材料のTRIP効果と加工誘起変態挙動の関係

TRIP (Transformation induced plasticity) 効果とは、オーステナイト組織の一部が強度の高いマルテンサイト組織に変態する(加工誘起変態)ことにより高強度、高延性が得られる強化機構であり、優れた衝突エネルギー吸収能(高速変形挙動)も期待できることから自動車用構造部品用鋼板にも利用されている⁹⁾。この強化機構について取り組み始めたきっかけは、マイクロメカニクスによる応力-ひずみ曲線の計算であった。著者が所属していた研究室では、以前より実用鉄鋼材料の応力-ひずみ曲線の予測計算について研究を行っており、計算手法の拡張としてTRIP効果についても取り組んだ¹⁰⁾。まずは計算の立場から、TRIP効果におよぼす残留オーステナイト体積率や加工誘起変態挙動、組織の組み合わせの影響について検討し、これまでに研究されてきた準安定オーステナイト鋼やTRIP型複相鋼などのTRIP効果による均一伸びの大小について議論した。その後現在の大学に移り実験ができる環境が整い、準安定オーステナイト鋼の実験から改めてスタートした。市販のSUS304鋼、SUS301L鋼を用いて試験温度とひずみ速度を変えた引張試験を行い、機械的特性について調査するとともに、加工誘起変態挙動をX線回折実験等で調べ、機械的特性との関係について考察した^{11,12)}。SUS304の温度依存性の結果¹¹⁾からは、TRIP効果により優れた均一伸びの得られる加工誘起変態条件として、次の2条件を明らかにした(図2、3)。^①ひずみ30%加えたときの加工誘起マルテンサイト体積率は約5%、^②最大変態速度を迎

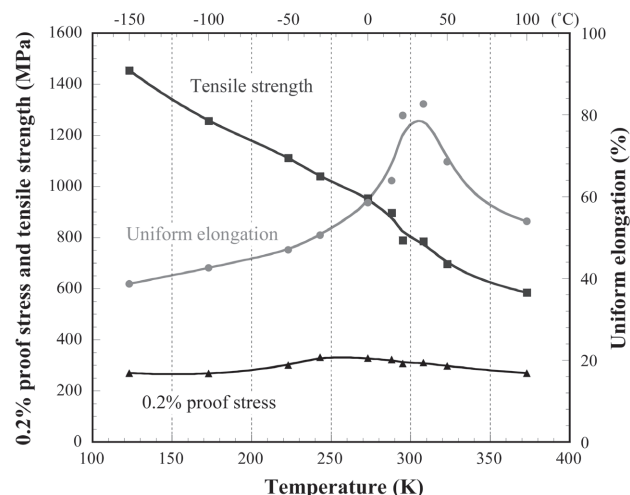


図2 SUS304鋼における様々な温度での機械的特性¹¹⁾。308K (35℃)において一番優れた均一伸びが得られた

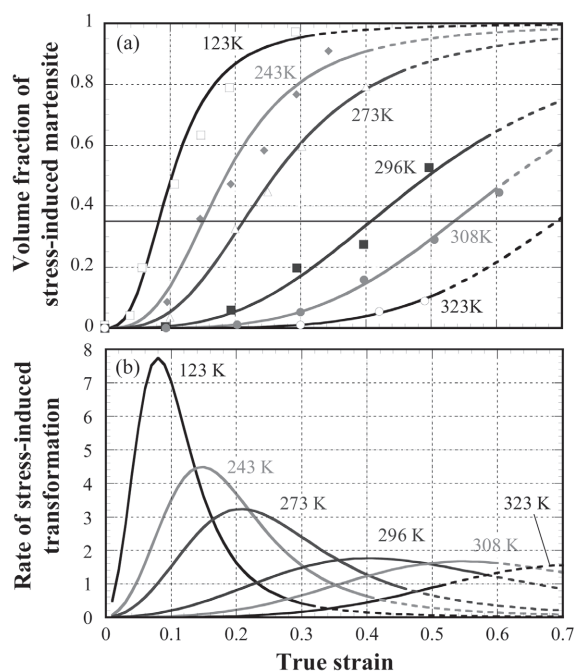


図3 SUS304鋼の様々な温度での加工誘起変態マルテンサイト体積率(a)と変態速度(b)¹¹⁾。308Kの結果より、本文中の①、②の条件が明らかとなった

える真ひずみがより大きく、最大変態速度の大きさは2(ひずみ1%加えたときの加工誘起マルテンサイト体積率が2%)以下である。これらの条件は、田村らが示した、変形初期のひずみ20%まではオーステナイト相のみが変形しなければいけないこと、ひずみ20%以降は加工誘起変態がひずみとともに刻々と起こる、という条件¹³⁾とよく一致すると考えられる。現在はこの加工誘起変態条件についてさらに検討を進める目的で、使用済み材料を用いるなどして化学成分(Ni当量)の異なる準安定オーステナイト鋼を作製し、TRIP効果にお

よばすNi当量の影響について研究を進めている¹⁴⁾。今更ながら真空溶解、圧延、熱処理といった工程を学生とともに作業できたことは自分にとっては貴重であった。また、TRIP型複相鋼の研究にも取り組み始めており、高速変形時に優れた機械的特性を示すことのできる条件を明らかにすることを大きな目標に、現在は引張特性の温度、ひずみ速度依存性について実験を進めている。

大学4年生の時に卒業論文で初めて研究というものに触れ、それから約20年。40代に突入し、自分自身何をやってきたかこの機会に振り返ってみると、引張試験と応力-ひずみ関係のことしかやっていない。大学院博士課程に進んだ際、当時の所属グループ長に引張試験のプロになれと言われて、それまで深く考えもしなかったロードセルの校正、伸び計の作製、データの取得および整理の仕方を一から学ばせてもらった。ひずみ速度や加工硬化率の意味を実験データと数式の両面から理解することができた点や、他の機械的特性との違いといった基礎をたたき込まれたことは、当時実験で得られたデータがアナログであったが故に内容をしっかりと理解することができ、現在大学の教員として学生などに教える立場として非常に役立っている。

現在、幸いなことにやりたい研究をやれる環境にある。それもひとえに、現在、またはこれまでに世話になった先生方や諸先輩方、研究に協力していただいている先生方、そして兵庫県立大学での約9年間、一緒に研究に取り組み、多くの実験データを出してくれた学生の皆さん（現在、各企業で活躍している皆さん）のおかげである。この場を借りて心から感謝申し上げたい。現在の自分にとって非常に大きな存在である、恩師の先生方がここ1、2年で全員定年退職となる。現在好きなことをやれてはいるが、自立しているとはいえず、数年後のことを考えるとこれからはいろいろな意味で立ち止まらなければいけないことを強く感じる。先日、ある師からのメールに研究に対する夢が書かれていた。20年近い付き合いの中でこういったことはずっと当たり前のことではあ

るが、今なお大きな夢を抱いて研究に励んでいる姿には改めて脱帽する思いである。数年後、数十年後の自分を見据えて、これからどうあるべきかはこれまで教わってきたこと、見てきたこと、経験してきたことを大きな教訓として生かしていきたい。最後に、今後ともご指導ご鞭撻のほど、よろしくお願い申し上げます。

参考文献

- 1) 辻伸泰：鉄と鋼, 88 (2002), 359.
- 2) N.Tsuchida, H.Masuda, Y.Harada, K.Fukaura, Y.Tomota and K.Nagai : Mater. Sci. Eng. A, 488 (2008), 446.
- 3) N.Tsuchida, Y.Tomota and K.Nagai : ISIJ Int., 42 (2002), 1594.
- 4) N.Tsuchida, K.Fukaura, K.Nagai and Y.Tomota : ISIJ Int., 48 (2008), 1020.
- 5) 土田紀之, 友田陽, 長井寿：鉄と鋼, 90 (2004), 1043.
- 6) J.F.Butler : J. Mech. Phys. Solids, 10 (1962), 313.
- 7) N.Tsuchida, Y.Tomota, K.Nagai and K.Fukaura : Scripta Mater., 54 (2006), 57.
- 8) N.Tsuchida, T.Inoue and K.Enami : Mater. Trans., 53 (2012), 133.
- 9) 潮田浩作, 高橋学：ふえらむ, 11 (2006), 779.
- 10) N.Tsuchida and Y.Tomota : Mater. Sci. Eng. A, 285 (2000), 345.
- 11) N.Tsuchida, Y.Morimoto, T.Tonan, Y.Shibata, K.Fukaura and R.Ueji : ISIJ Int., 51 (2011), 124.
- 12) 高木勝規, 上路林太郎, 水口隆, 土田紀之：鉄と鋼, 97 (2011), 450.
- 13) 田村今男, 牧正志, 波戸浩, 油井孝輔：日本金属学会誌, 33 (1969), 1383.
- 14) N.Tsuchida, S.Kawabata, K.Fukaura and R.Ueji : J. Alloys and Compounds, in press.

(2012年5月7日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

(独) 物資・材料研究機構 ナノ材料科学環境拠点 マネージャー

長井 寿

同じ対象でも、見る角度によっては違って見えるかもしれない。置かれている条件を変えると姿を変えるかもしれない。室温は偶然であり、室温で見える姿が本質だと思いきんではいけない。どうせ角度を変えるなら、天空のあらゆる角度から地球を見るつもりで観察しよう。どうせ条件を変えるなら少なくとも3桁は飛ばそう。

これは私の常套句だ。こう話す側は楽だが、研究、実験をする、させられる側はきっと大変だろう。土田さんは、ひずみ速度を9桁も飛ばしてしまった！ 相変わらず何気なく書いておられるが、自分の苦労を顕わにしない姿にはいつも感服する。ひずみ速度を実感できない人のために老婆心な説明を加える。一本の実験に最短で1秒掛けるとすると最長で10⁹秒 (= 11,574日 = 32年弱) 掛ける。実際には、最短0.001秒で、最長11.5日程度ではなかったか。たとえ室温であっても、定温に保つことが不可欠で、ましてや室温以外での苦労は想像の域を越える。

ここまで言えば苦労の程度が想像できたと思うが、それほどの苦労をするならばもっと多くの実験結果が出る研究がしたいと読者は思われるのではないか。一理ある。だが、私は材料の実験、研究とはこんなものだ、いや本音ではこうある

べきだ、と思う。土田さんのお陰で、地球が銀河の太陽系第三惑星として、自転しながら太陽の周りをまわっているのを天空から眺めているような気分になれる。

何かが分かると、何が分からないか分かる。研究半生の中で雑多なテーマに取り組んでいるようで、実は自身の本源的な疑問に自分で答えようとしている、なんだか変わりようのない自分を発見するものだ。だからいくら寄り道をしてもよい。もっと地球を微細に見たいと思ってもし、次は火星を観察してみたいと思ってもし。夢を持ち、夢を自分自身で実現できるのは人間の特権だ。この特権を忘れこまれた人間が日本を滅ぼす。

材料の難しさというか面白さは、寸法のスケールが飛ぶことだと思っている。マクロの世界とミクロの世界では、スケールが9桁も飛んでいる。土田さんはひずみ速度の9桁の飛びを埋めたが、寸法スケールのこの飛びはそう簡単には埋められない。「ターニング・ポイント」は自分自身のことでもある。いつの間にか60歳定年となった。私自身、この寸法の飛びを少しでも埋めるべく、時々土田さん達ともふれあいながら、第二の人生を楽しみたい。宜しく願います。

平塚金属工業(株) 技術部

守谷 英明

若手研究者として活躍されている土田先生の「ターニングポイント」について、コメントする機会を頂き光栄に存じます。

室温付近の温度領域における鉄鋼材料の引張変形挙動は、エンジニアリング分野全般においては一般に静的な特性として捉えられているように思われます。これは、動的な特性として疲労特性や衝撃特性などがあり、エンジニアリング分野全般における引張挙動に関する議論の中にひずみ速度という因子が取り込まれる機会があまりなかったことによるためと思われます。土田先生がこれまで取り組んでこられた研究では、温度とひずみ速度という因子を静的な特性の議論の中に取り入れることによって、また従来最高荷重点までしか扱われてこなかった真応力-真ひずみ曲線を破断直前まで推定できるようにして破断までの変形挙動を真応力-真ひずみ関係の点から眺められるようにすることによって、今まで見えていなかった多くの新たな発見をされています。そしてなにより、この鉄鋼材料の引張挙動に及ぼす結晶粒径、温度、ひず

み速度、第二相などの諸因子の影響についての研究を、芯がぶれることなく約20年間続けてこられた土田先生の直向な姿に頭が下がります。

最近「素材革命」と言う言葉を良く耳にするようになりましたが、素材分野全般における研究開発に大きな期待が掛けられています。しかも迅速な結果が求められる時代になってしまいました。鉄鋼分野においてもハイテン材の更なる高性能化が強く求められています。今現在土田先生が「高速変形時に優れた機械的特性を示すことのできる条件を明らかにすることを大きな目標」に掲げて進められているTRIP型複合組織鋼に関する研究は、まさにこのような要求に応えられるものの一つと思われます。土田先生はまだまだ若手です。これまで長きに亘って培ってこられた経験は、これからの研究に生かされるべく培われた財産になっていることと思います。今後、TRIPやTWIPなど以外の新しいメカニズムの発見や考案にも期待したいと思います。益々のご活躍をお祈りしています。