



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

鋼の更なる高強度・高靱性化の 指導原理構築を目指して

Aiming at Developing a Guiding Principle in Obtaining Steels with
Further Strength and Toughness

田中將己
Masaki Tanaka

九州大学 大学院工学研究院
材料工学部門 准教授

1 はじめに

筆者は2005年に学位を取得した後、ポスドクを経て2008年10月に九州大学に奉職し一昨年より現職に就いている。学生時代の研究はシリコン単結晶の変形や破壊に関するもので、主に亀裂先端に発生する転位を電子顕微鏡にて観察する内容であったため、鋼を初めとする金属に直接触れる機会は極めて乏しかった。しかし、研究会等で行われる他研究室や大学の先輩・同輩達の鋼に関する議論を聞く機会に恵まれ、鉄鋼研究に携わる人たちの情熱は肌を感じていた。そんな筆者が鋼の研究にも従事するようになったきっかけは、ポスドク時代にFe-Cr二元系の延性-脆性遷移(DBT: ductile-to-brittle transition)挙動に関する基礎研究である。それまでは鋼はおろか金属の研磨そのものの経験もなかったが、毎日研磨台で試料と格闘し、鉄屋は徹夜と学生時代に誰かが言っていた冗談が頭に浮かんだものである。それから早いものでまもなく10年を迎えようとしている。現在自身が携わっている研究テーマを概観すると、その大半が鉄鋼に関係しており、鉄の魔力、ではなく魅力に益々引きつけられているようである。そのような中、筆者は鉄と鋼の力学特性を支配する重要な諸因子(添加元素の種類、結晶粒径、加工硬化、組織)がどのようにDBT挙動に影響を与えるのか転位論を基盤として明らかにしようとしている。本稿ではこれまでに得られた結果からその一部を紹介する。

2 DBT 挙動に及ぼすNiの影響¹⁾

図1(a)にGerberich^{2,3)}らが示した純鉄、Fe-4at.%Ni、Fe-4at.%Siにおける降伏応力の温度依存性を示す。室温の降伏応力は、元素添加によって上昇しており固溶硬化が見られ

る。その温度依存性に注目すると、何れの試料においても一般的なbcc金属で見られる様に、変形温度の低下に伴って降伏応力は上昇している。しかし、低温における降伏応力はNiあるいはSi添加鋼のいずれにおいても純鉄より低下しており、いわゆる固溶軟化を示している。低温での降伏応力の低下は転位易動度の上昇を示唆するため、転位易動度と強く関連するDBT温度はNiあるいはSi添加により低下することが期待される。しかし、実際には図1(b)に示すように遷移温度はNi添加では低下するのに対して、Si添加では反対に上昇しており、鋼における遷移温度の低下は固溶軟化現象か

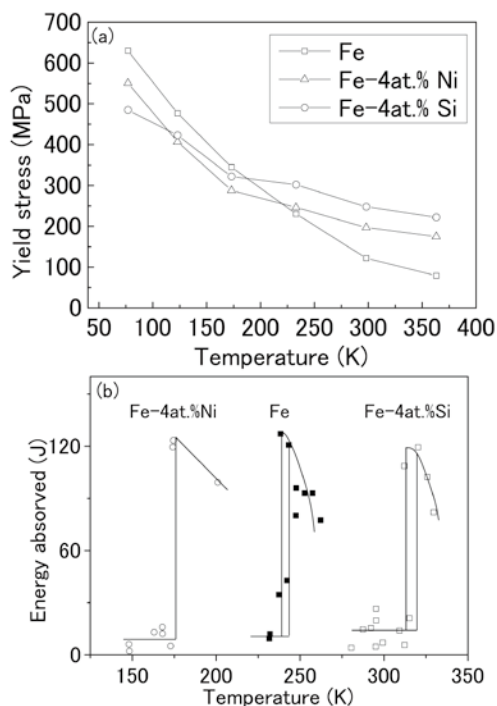


図1 (a) 降伏応力の温度依存性. (b) 吸収エネルギーの温度依存性^{2,3,6)}

ら直ちに導かれる単純な現象ではないことが分かる。従って、鋼におけるDBT挙動を理解するためには、添加される各元素の効果を一つ一つ明らかにすることが重要となる。そこで本項では、まずNiの効果について述べる。

図2 (a) にTi添加極低炭素鋼の衝撃吸収エネルギーの温度依存性を示す。上棚部と下棚部の中間の吸収エネルギーを示す温度をDBT温度とすると、Niを添加していない試料のDBT温度は201Kであった。一方、Niを1mass%添加した試料(Fe-1%Ni)のDBT温度は175K、2mass%添加した試料(Fe-2%Ni)のDBT温度は143Kであった。Ni添加によるDBT温度の低下要因として、転位易動度の増加と結晶粒径の減少という2点が考えられる。そこでまず、結晶粒径減少によるDBT温度低下量を見積もった。本研究で用いたNi無添加鋼、Fe-1%Ni、Fe-2%Niにおける粒径はそれぞれ99 μ m、77 μ mおよび53 μ mであった。Hodgeら⁴⁾が報告した3.6%Ni鋼におけるDBT温度の粒径依存性を基に、本研究で用いた試料での粒径の変化に伴う遷移温度の低下量を推定すると、Ni無添加鋼からFe-1%Ni、Fe-2%Niでそれぞれ約13K、約30Kとなる。本研究で得られた遷移温度の低下量はNi無添加鋼からFe-1%Ni、Fe-2%Niでそれぞれ約26K、約58Kであり、Ni添加に伴う遷移温度の低下は粒径の減少のみでは説明できな

い。従って、DBT温度に及ぼすNiの影響を正しく理解するためには、Ni添加量の増加に伴うフェライト鋼中の転位易動度の上昇も考慮する必要がある。

Ni添加に伴う、フェライト鋼中の転位易動度の上昇量を見積もるため、転位運動と密接に関係する降伏応力の温度依存性を測定した。図2に0.2%耐力の温度依存性をそれぞれ示す。一般的なフェライト鋼で見られるように、0.2%耐力は温度の上昇と共に低下し、Ni無添加鋼では300K以上、Fe-1%Niでは250K以上、Fe-2%Niでは225K以上でほぼ一定になった。この応力が一定となる温度領域はプラトー領域と呼ばれており、この領域での耐力はNi添加により上昇した。これはNi添加が室温において固溶硬化を引き起こすことを示している。一方、ある温度以下ではNi添加に伴い降伏応力が純鉄より低くなる固溶軟化が見られた。これはNi添加により低温で転位の易動度が増加したことを示唆している。そこで、活性化体積と有効応力の温度依存性から各試料における転位移動の活性化エネルギーを求めた。その結果、転位運動の活性化エネルギーはNi濃度の増加に伴って低下することが明らかとなった。更に、その転位易動度を用いてDBT挙動を転位動力学計算より求めたところ、遷移温度の低下が得られた。以上の結果より、Ni添加は転位易動度上昇を通してDBT温度を低下させると結論付けられる。

3 DBT挙動に及ぼすAlの影響^{5,6)}

図3 (a) にFe-4mass%Al (C濃度0.0004mass%) およびFe-8mass%Al単結晶 (C濃度: 0.0012mass%) から引張方向が[001]となるように曲げ試験片を切り出して測定した衝撃吸収エネルギーの温度依存性を示す。図より、Al濃度の増加に伴って遷移温度が250K程度上昇していることが分かる。一般に鋼において双晶発生は遷移温度上昇に寄与することから、Al添加量の増加に伴い双晶発生が容易になることが期待される。そこで、それぞれの試料において引張軸を[001]方向として、降伏応力の温度依存性を測定した。その結果を図3 (b) に示す。室温におけるFe-8%Alの降伏応力はFe-4%Alと比べて185MPa上昇していた。更に降伏応力はここでも同様にFe-4%Al、Fe-8%Alともに温度低下と共に上昇している。ここで白抜きの点は、試料が降伏する前に変形双晶を伴って脆性破壊した際の破壊応力を示している。SEM観察より、双晶の交叉が破壊の起点になっていることが明らかとなった。ここで図中の点線は破壊応力の平均を示しており、その値は、Fe-4%Al、Fe-8%Alでそれぞれ420MPa、470MPaであった。このことは、応力レベルからみれば、変形双晶を伴う破壊はAl濃度が高い方が起こりにくいことを示している。一方、変形双晶によって破壊する上限温度に注目すると、Al濃

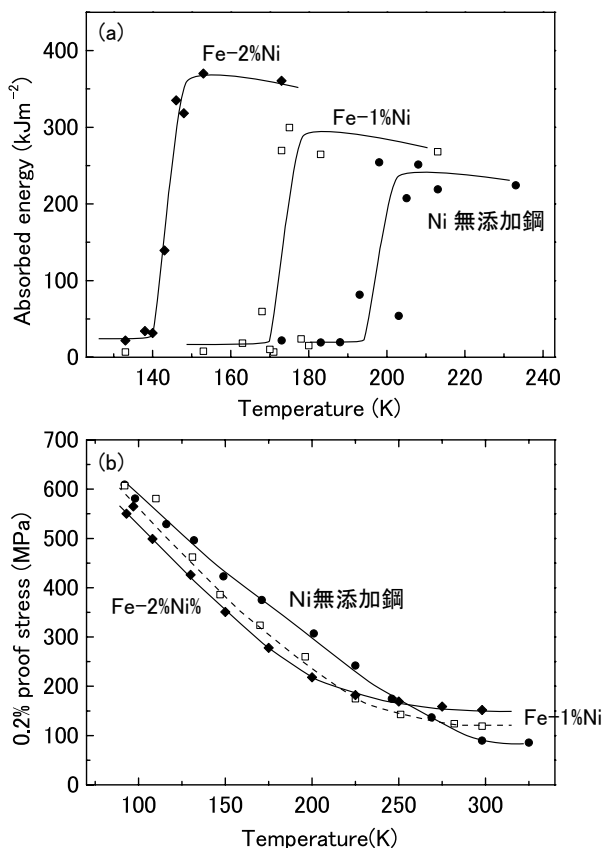


図2 (a) Ti添加極低炭素鋼へのNi添加に伴う吸収エネルギーの温度依存性の変化、(b) 0.2%耐力の温度依存性¹⁾

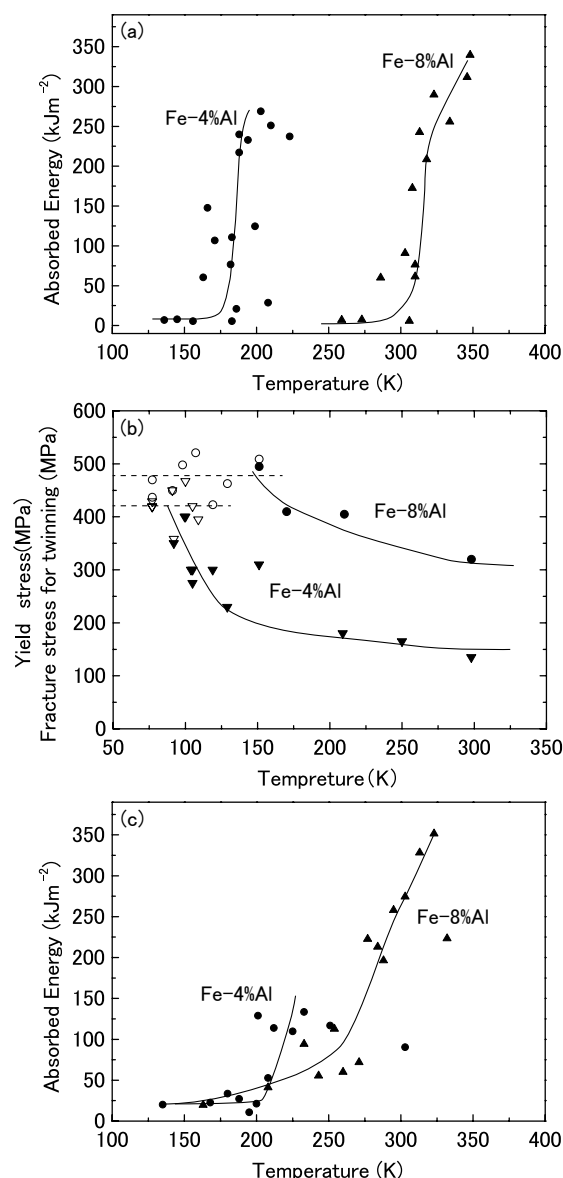


図3 (a) 単結晶極低炭素鋼における吸収エネルギーの温度依存性(亀裂面 [001])⁵⁾、(b) 降伏応力の温度依存性と双晶破断応力⁵⁾、(c) 吸収エネルギーの温度依存性(亀裂面 [110])⁶⁾

度が高い方がより高温まで変形双晶により破壊が発生していることが分かる。双晶変形とじり変形には補完関係があるため、変形双晶の出やすさはじり変形との相対的な関係で決定される。即ち、Al 濃度の増加は変形双晶を抑制する効果があるが、同時にじり変形も抑制する。従って、Al 濃度が高いとより高温まで変形双晶が発生することになる。この変形双晶が DBT 温度上昇に寄与していることは間違い無いことであるが、Al 添加による遷移温度の上昇は、プラトー応力の上昇によってじり変形がより困難になったことが本質である。そのことを明らかにするため、変形双晶が抑制される [110] 方向に引張応力が負荷されるように試験片を単結晶から切りだし、同様の衝撃試験を行った結果を図3 (c) に示す。遷移温

度は引張方向が [001] の場合とは異なっているが、Fe-8%Alの方が依然としてFe-4%Al より高いことが分かる。衝撃試験後に試料側面のSEM 観察を行ったが、変形双晶の交叉は観察されなかった。このように、変形双晶はじり変形が困難になったために陽にでてきた現象であり、Al 添加に伴う遷移温度の上昇は、じり変形能の低下にその本質があると結論付けられる。

4 おわりに

先に述べた研究に加えて筆者は近年、計算科学を主体とする研究者との共同研究も展開している。例えば、現在JSTの産学共創基礎基盤研究プログラムにおいて、「材料科学と固体力学の融合によるヘテロナノ構造金属における高強度・高靱性両立の指導原理確立」というテーマでチームを組み(代表: 金沢大・下川准教授)、主にパーライト鋼の変形・破壊メカニズムの解明に取り組んでいる。他にも、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)では結晶粒径と粒内転位が鋼の低温における変形・破壊に与える影響について詳しく検討している。牧正志先生のお言葉にあったことであるが、筆者自身も鉄鋼研究に広がるフロンティアを前にして日々ワクワクしながら研究を行っている。この楽しさを学生に伝え、鉄鋼研究の進展に少しでも貢献できればと考えている。

参考文献

- 1) 前野圭輝, 田中将己, 吉村信幸, 白幡浩幸, 潮田浩作, 東田賢二: 鉄と鋼, 96 (2012), 667.
- 2) Y.T.Chen, D.G.Atteridge and W.W.Gerberich: Acta Metall., 29 (1981), 1171.
- 3) W.W.Gerberich, Y.T.Chen, D.G.Atteridge and T.Johnson: Acta Metall., 29 (1981), 1187.
- 4) J.M.Hodge, R.D.Manning and H.M.Reichhold: Trans. AIME, 185 (1949), 233.
- 5) K.Tsujii, M.Tanaka, K.Higashida, M.Fujikura and K.Ushioda, in: 4th International Conference on Fundamental Properties of Dislocations (Dislocations 2012), ed by I.Groma, Experimental Physics at Eötvös University and the Department of Materials Physics, Budapest, Hungary, (2012), 41.
- 6) M.Tanaka, K.Maeno, K.Higashida, M.Fujikura and K.Ushioda: ISIJ Int., 51 (2011), 999.

(2014年3月19日)

先輩研究者・技術者からのエール

北見工業大学 工学部 機械システム工学科 教授

大橋 鉄也

田中將己先生の「躍動」の記事は、これまで田中先生が進めてこられた研究活動における困難と、それを乗り越えてきた強い熱意を想像させるものでした。田中先生に最初にお目にかかったのは、何かの学会の折であったと思います。初対面であったにもかかわらず、フレンドリーな笑顔で、しかし学術的な話題では素早く本質的なポイントに向かって突進するという印象を受けました。現在でもその印象はそれほど変わらず、時としてユーモラスでさえあるそのような姿は、皆さんから好かれる所以の一つであろうと思われます。

田中先生とは数年前からパーライトの強度・延性両立のテーマで共同研究をさせてもらっています。これは田中先生の記事にもありましたように、科学技術振興事業団の受託研究という形で、材料工学と固体力学の学際領域をそれぞれ2名ずつ役割分担する態勢でのチームになっております。それぞれの領域にシニアと若手が一人ずつと言う点でもコントラストの大きいチームですが、これまでに主に以下の3点が明らかになりました。すなわち、1) 引張負荷軸方向に配向したラメラにおいて、セメンタイト相に確かに塑性変形が生

じていること、2) セメンタイト相に生ずる塑性変形が局在化するかどうかは、フェライトの加工硬化特性に大きく依存すること、3) 塑性変形をもたらす転位がフェライト相からセメンタイト相に供給されるかどうかは、界面の原子の配置と結合状態に依存すること。この共同研究のメンバーは、多かれ少なかれパーライトの素人でしたが、産業界やアドバイザーからの大きな力添えなどもあり、研究としての一つのステップを踏み出すことが出来ました。歴史を知らず、怖いものも知らずの状態で始めた研究でしたが、田中先生、下川先生(金沢大)2名の若手の破壊力もあり、先人たちの遺産にも出会いながら旅をしているような感があります。

「学びて思わざれば..」という教えがありました。研究を行う上で大切なことはたくさんあるのですが、学びと同様に研究でも個人個人がどの様に「思う」という点が非常に重要であると感じております。感覚を研ぎ澄まし、思いを巡らせて筋の良い研究の方向を見いだしましょう。若い研究者の皆様それぞれの一人の研究者としての歩み、societyの重要な一員としての活躍を期待しております。

(株)神戸製鋼所 技術開発本部 材料研究所 主任研究員

難波 茂信

「ふえらむ」に掲載される「躍動」の記事は、読むものであって自分が記事を書くことになるようなことは決まっていなかったと思うところに来た執筆依頼。本当にわたしでいいんですねと田中先生に確認してしまったぐらい。

筆者はちょうど20年前に運良く会社からケンブリッジ大学に派遣される機会を得た。在籍していた研究室には日本からの見学者も多く、「まだ鉄鋼に研究することがあるんですか?」と聞かれることも度々で、その都度「鉄ほど研究された材料はなく、わかったこととわかっていないことが明らかとなっているから、より高性能な鉄鋼材料を求めて、未解明なところを皆一生懸命に研究している」と答えていた。多くの先輩が沢山の結果を残してきた鉄鋼材料の研究であるが、逆に未解明の課題も先輩が残している。その代表的な未解明の課題が「延性-脆性遷移」なのだと感じる。

「延性-脆性遷移」に関する研究は、それこそ過去に膨大な量がある。しかし、その多くが現象論であり田中先生のように、転位論に基づきメカニズムをきちんと解明しようとした研究は数えるほどしかないというのが筆者の理解である。田中先生は記事にあるように単結晶を使い、地道に転位挙動を追いかけて、その本質を明らかにしようとしている。まさに、

先輩が残した未解明の課題をやっつけてしまいそうな勢いである。

今や大学でも直接材料開発に関する研究が盛んに行われるようになり、このような地味な基礎研究を続けている大学の研究者は、「絶滅危惧種」にして「お宝中のお宝」に見える。筆者の回りでは「まだこういうことをやってくれる貴重な人がいたんですね」という声もあった。この貴重な研究者を「絶滅危惧種」でなくすには、産業界側の担う役割も責任も大きいと感じるが、すでに、田中先生は多くの企業の技術者とも関わりを持ち研究されている点がとても頼もしいと思うし、きっと多くの企業人が田中先生の研究に期待されているのを実感していただいているのではないだろうか。

今後は、転位挙動を含めた変形と破壊の過程が「見える化」できると一段と説得力が増し、多くの人にインパクトを与えることになるのではないかと筆者なりに考えているが、それについても、これまでの実験的手法に加えて計算材料科学のグループとも連携していることから、近い将来に「見える化」にもきっと面白い結果を見せてくれるに違いないと、待っているところである。

田中先生の今後の活躍を大いに期待している。