

名誉会員からのメッセージ

構造材料の研究に必要な 3つの学術分野

Three Academic Fields Required for the Investigation of Structural Materials



高周波熱錬(株) 技監
九州大学 名誉教授

高木節雄

1 はじめに

今回、本協会の名誉会員に推挙していただき、「ふえらむ」に寄稿する機会をいただいたので、構造材料の研究を行う上で何が必要だったかを振り返ってみた。結論から言うと、図1に示す3つの学術分野に精通しておくことが重要である。構造材料と言えば強度や靱性などの力学的な特性が要求されるので、第一に機械試験に関する知識が必要である。例えば、硬さ試験では何を評価しているのか？硬さ試験では硬質の圧子押し付けてその時の変形抵抗を計測しているので、平均で10%程度の塑性変形が生ずるといわれている。そのため、引張試験で得られる引張強さと硬さの間に良好な相関性が見られる。そのほか例を挙げればきりが無いが、様々な機械試験について原理・原則を理解しておく必要がある。

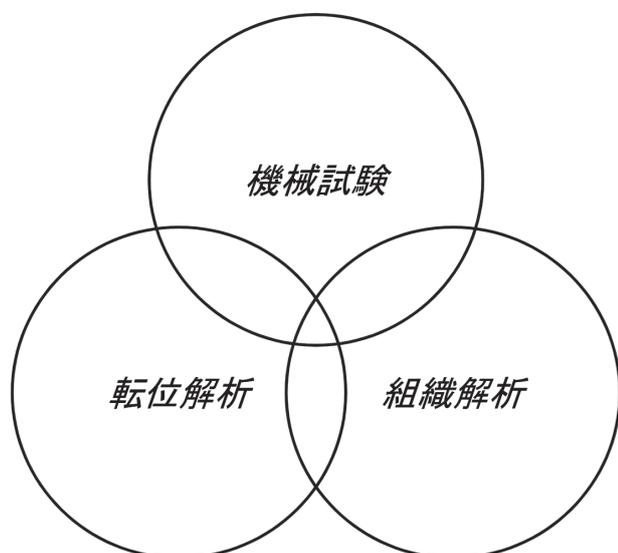


図1 構造材料の研究に必要な3つの学術分野

二番目は、対象とする構造材料がどのような組織で構成されているかを知るための組織解析である。構造材料に関わる研究者については、おそらくこの分野に属する人の割合がかなり高いと思われる。最近では、走査型電子顕微鏡や透過型電子顕微鏡などの組織解析機器の性能が向上し、この分野の研究はますます活発になりつつある。三番目は転位解析である。降伏強度は、多くの転位が一斉に動き出すしきい応力に対応しており、材料を強化するという観点からすると、転位の挙動を理解することが最も重要である。それにも拘わらず、この分野の研究に関わる研究者の数はそれほど多くないように思われる。その理由は、転位解析の手法が複雑で手間がかかるためであろう。転位解析で最も重要な因子は転位密度であるが、透過型電子顕微鏡でそれを計測するには多くの時間と労力を要するだけでなく、計測できる転位密度にも限界がある。一方でX線や中性子線などを用いた間接的な評価方法では、回折ピークの半価幅から得られるひずみの情報を転位密度に変換する際に多くの手続きが必要であり、転位密度が低い材料については大きな誤差が生ずるといった問題点もある。このような理由から、鉄鋼材料をはじめとした多くの構造材料については、機械試験と組織解析の結果を基にして強化機構が議論されることが多かった。本稿では、結晶粒微細化強化と転位強化が関与した現象について誤認されてきた事例を示し、構造材料の研究における3つの学術分野の重要性を述べたい。

2 多結晶フェライト鋼における流動応力の解釈

焼鈍した多結晶金属の降伏応力が結晶粒径の平方根の逆数に比例することはHall-Petchの関係として広く知られているが、図2に例示するように、結晶粒が微細になると降伏後の流動応力も大きくなる¹⁾。このようなデータを見ると、図3に

示すように、降伏応力や流動応力をHall-Petchの関係で整理したくなる。無加工材の降伏応力については、摩擦力に結晶粒微細化強化の寄与が加算されていることは間違いないが、この図を見ていると結晶粒微細化強化に転位強化量が加算されていると思ってしまう。流動応力に関してHall-Petchプロットした図は、鉄鋼材料だけでなくアルミや銅などの構造材料についても数多く見受けられ、これらのデータが根拠となって、長い間、結晶粒微細化強化と転位強化は加算的に作用すると考えられてきた。著者が受けた大学の授業でもそのように教えられたが、粒径が $1\mu\text{m}$ 以下の超微細粒鋼を作製して引張試験すると、降伏後に高密度の転位が導入されているにも関わらず加工硬化しないという事実と直面し^{2,3)}、上記の加算則に疑問を持った。そこで、結晶粒径が $1\sim 100\mu\text{m}$ の範囲で異なるフェライト鋼を作製して転位密度を計測した結果、同じ加工率であっても、結晶粒径が小さいほど転位密度

が高くなるという事実が明らかとなった^{4,5)}。その結果、フェライト鋼の加工強化量 $\Delta\sigma$ [Pa] は、結晶粒径や加工率とは無関係に、転位密度 ρ [m^{-2}] の関数として次式で与えられることも分かった^{4,5)}。

$$\Delta\sigma \approx 18\sqrt{\rho} \dots\dots\dots (1)$$

この関係式はBailey-Hirschの関係と言われるもので、流動応力が単純に転位強化に依存して決まることを示唆している。すなわち、転位解析を行うことによって、“結晶粒径が小さいほど転位の導入が促進され、結果的に流動応力が高められる”という真実が明らかになったわけである。

以上のように、結晶粒微細化強化と転位強化は加算的に作用するのではなく、加工を施すことによって強化機構が変化すると考えるべきである。理解しやすいように、焼鈍した多結晶金属の降伏・変形挙動と強化機構の関係を図4に示す⁴⁾。

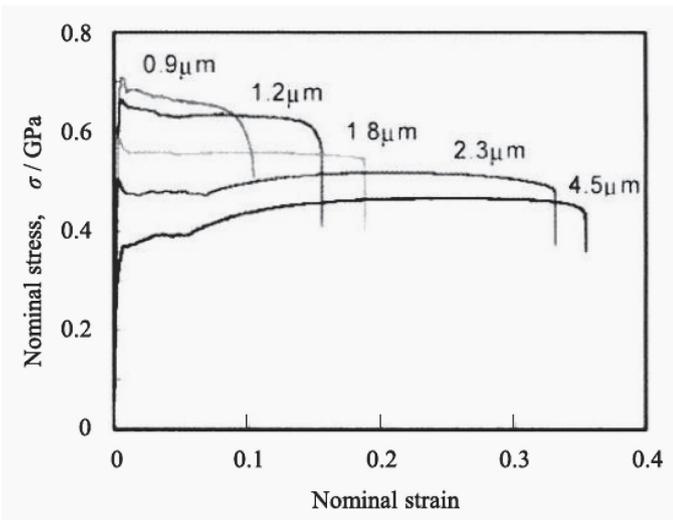


図2 フェライト鋼の引張変形挙動に及ぼす結晶粒径の影響¹⁾

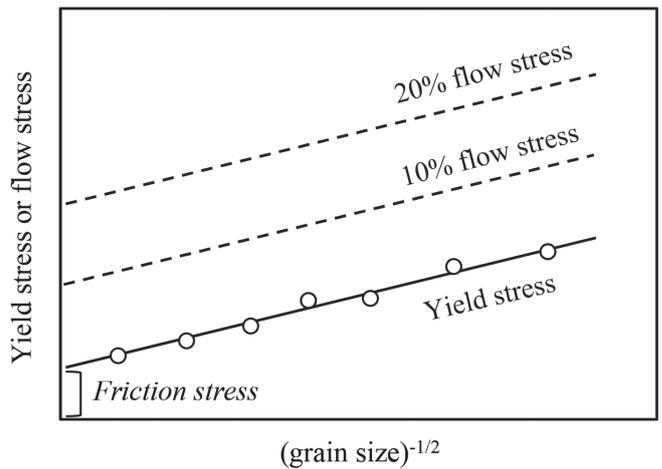


図3 焼鈍した多結晶金属の降伏応力と流動応力に関するHall-Petchプロットの例

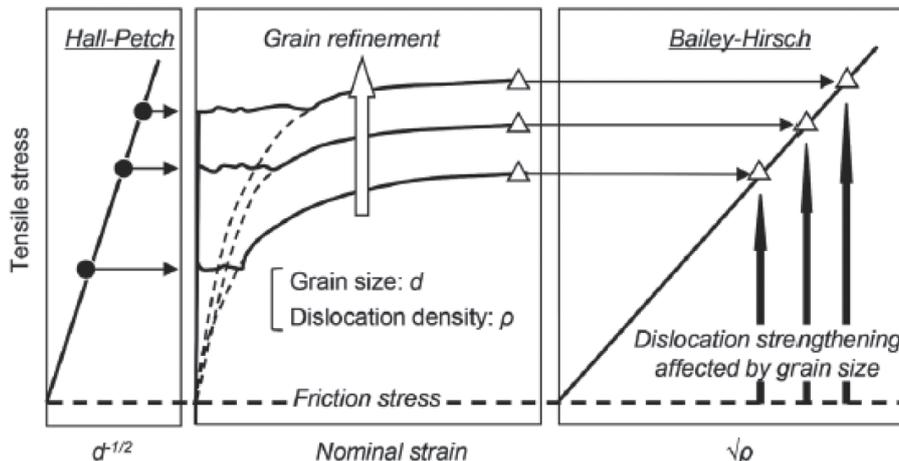


図4 多結晶金属の降伏・変形挙動と強化機構の関係⁴⁾

焼鈍した多結晶金属の場合、粒内に塑性変形を担うだけの十分な量の転位が無いために、降伏は粒界からの転位放出で起こる(粒界転位降伏)⁶⁾。粒界転位降伏で材料が降伏する場合、降伏応力はHall-Petchの関係に従う。粒界転位降伏で粒内に転位が導入されると、変形に必要な応力が急激に低下するために塑性不安定が起こり、ネッキングを伴った降伏伸びという現象が発現する⁶⁾。この現象を理解するには、引張試験における変形様式が応力制御変形であるということと、塑性不安定とは何かといった機械試験の基礎を知っておかねばならない。転位密度が十分に高くなり、転位強化量が降伏応力のレベルに到達すると塑性不安定が解消され、変形様式が均一変形へと移行する。均一変形域の流動応力は、式(1)で得られる転位強化量と摩擦力を加算した値となり、十分な量の転位を内蔵した金属の降伏は、粒内で絡み合った転位を動かすのに必要な応力で降伏応力が決まる(粒内転位降伏)⁶⁾。上述のように、同じ変形量であっても結晶粒が小さいほど転位密度が高くなるので、図に示すように流動応力に差が生ずることになる。本稿では、転位の導入に及ぼす結晶粒径の影響を述べたが、固溶元素や析出物、ひずみ速度、加工温度なども転位の導入挙動に影響を及ぼすので注意が必要である。いずれにせよ、降伏が粒内転位降伏で起こる場合には、降伏応力はBailey-Hirschの関係に従う。

また、最近の著者の研究によれば、転位強化には、転位密度だけでなく転位の性質や分布状態が影響を及ぼすことも分かった⁷⁾。転位の線張力係数はらせん転位に比べて波状転位の方が約1.4倍大きいので、同じ転位密度で分布状態が同じであれば、刃状転位の方が転位強化量が1.4倍大きいことになる。フェライト鋼を加工した場合、加工率が大きくなるにつれて転位の性質がらせん転位から刃状転位に変化し、転位密度の変化と相まって転位強化量が式(1)で表せることも分かった⁷⁾。転位密度、転位の性質、転位の分布状態を同時に解析する方法としてmodified Williamson Hall法が提唱されている⁸⁾。また、加工したフェライト鋼やマルテンサイト鋼については、これを簡略化した方法⁹⁾も提示しているので活用していただければ幸いである。ただし、炭素を固溶したマルテンサイトの場合、結晶構造が正方晶となっていて回折ピークの半価幅にその影響が含まれているので、解析結果の補正が必要となってくる¹⁰⁾。

3 おわりに

若いころは自分の専門分野に関する知識を深めることで精いっぱい、他の学術分野の勉強にまで手が回らないというのが現実であろう。一つの学術分野を深く掘り下げるといっても大事なことではあるが、心理を見極める際に一つの方向から見た情報だけで判断するのは危険である。天動説と地動説の関係で分かるように、地上から見た情報だけで判断すると万人が天動説を支持するであろう。しかし、ガリレオは天体観測という方法により、地球が動いているという真実を見極めた。現在、天動説を信じている人はいないと思うが、“一方的な見方で物事を判断すると大きな間違いを犯すことになる”という一例である。本稿では、著者と同じ分野の若手研究者を対象として身に着けるべき3つの学術分野を紹介したが、それ以外の分野の研究者や技術者についても、少なくとも仕事に関係した3つの分野に精通するように挑戦していただきたい。物事を多方面から見るといことは、真実を見極めるうえで極めて重要なことである。

参考文献

- 1) M. Etou, S. Fukushima, T. Sasaki, Y. Haraguchi, K. Miyata, M. Wakita, T. Tomida, N. Imai, M. Yoshida and Y. Okada : ISIJ Int., 48 (2008), 1142.
- 2) K. Kawasaki, H. Hidaka, T. Tsuchiyama and S. Takaki : Proc. NANOSPD2, Nanomaterials by Severe Plastic Deformation, ed. by M. J. Zehetbauer and R. Z. Valiev, Wiley-VCH, Weinheim, (2002), 345.
- 3) S. Takaki, K. Kawasaki, Y. Futamura and T. Tsuchiyama : Mater. Sci. Forum, 503-504 (2006), 317.
- 4) 田中友基, 高木節雄, 土山聡宏, 植森龍治 : 鉄と鋼, 104 (2018), 284.
- 5) Y. Tanaka, S. Takaki, T. Tsuchiyama and R. Uemori : ISIJ Int., 58 (2018), 1927.
- 6) 高木節雄 : 日本金属学会誌, 83 (2019), 107.
- 7) 高木節雄 : 鉄と鋼, 107 (2021), 780.
- 8) T. Ungár and A. Borbély : Applied Physics Letter, 69 (1996), 3173.
- 9) 高木節雄, 増村拓朗, 土山聡宏 : 材料, 69 (2020), 661.
- 10) 岩村真歩, 塚原真宏, 井戸原修, 三阪佳孝, 高木節雄 : 鉄と鋼, 107 (2021), 853.

(2022年5月9日受付)