

特別講演

□第181回春季講演大会西山賞受賞記念特別講演
(2021年3月17日)

多結晶フェライト鋼の降伏挙動に関する新たな知見

New Findings on the Yielding Behavior of Poly Crystalline Ferritic Steels

高木節雄 九州大学 名誉教授
高周波熱錬(株) 技監
Setsuo Takaki



*脚注に略歴

1 はじめに

本協会の学会賞(西山賞)は、鉄の研究に従事している学者にとってまさに金メダルに相当し、この度この賞を授与されたことは身に余る栄誉である。この場をお借りして、これまでお世話になった方々や研究を共にした卒業生に感謝の意を表したい。受賞の対象となったのは「鉄鋼材料の結晶粒微細化に関する研究」であり、本稿では、“多結晶フェライト鋼の降伏挙動”に的を絞って、これまでの研究で得られた新たな知見をいくつか紹介する。

2 フェライト鋼の純度と降伏挙動の関係

多結晶のフェライト鋼については不連続降伏が発現することが知られており、長い間、CやNなどの侵入型原子による転位のCottrell固着が原因とされてきた。その根拠としてしばしば引用されている実験結果¹⁾を図1に示す。湿水素処理によって鋼の純度が上がるにつれて降伏点が低下しており、あたかも高純化によって転位のCottrell固着効果が消失しているように見える。しかし実際には、炭素量が50 ppm以下の成分域でHall-Petch係数が変化していることが原因であり²⁾、図1の現象は図2のように説明できる。すなわち、高純化によってHall-Petch係数が小さくなると、同じ結晶粒径であっても降伏応力が小さくなるわけである。例えば、結晶粒径が40 μm のフェライト鋼については、50 ppmの固溶炭素の有無によって降伏応力に約0.07 GPaの差が生ずる。

3 調質圧延(temper rolling)による不連続降伏の消失

調質圧延とは、プレス成型時の皺(Stretcher strain defect)が発生しないようにあらかじめ1%程度の軽圧下を鋼板に施す処理を言う。調質圧延を施すと、降伏伸びが消失するだけでなく降伏応力も低下することから³⁾、これまで、Cottrell固着された転位が調質圧延によって解放されるためにこのような現象が起これと考えられてきた。Goldman⁴⁾は、調質圧延の効果を詳細に調査して図3に示すような結果を得ている。0.04% C鋼に着目すると、1%の調質圧延で転位のCottrell固着効果が消失し、加工軟化が起これているようにも見える。

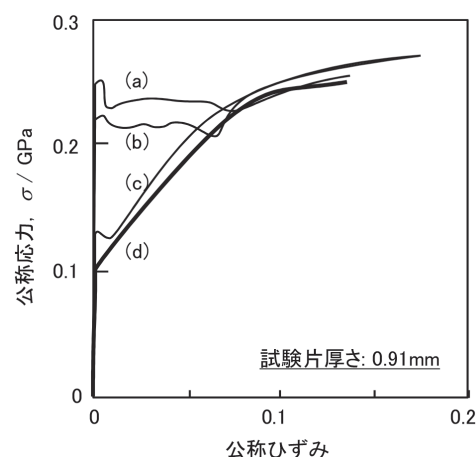


図1 フェライト鋼の降伏挙動に及ぼす純度の影響¹⁾。使用した鋼はリムド鋼(0.05% C)。725 °Cでの湿水素処理時間: (a) 0.75 時間、(b) 1.5 時間、(c) 3 時間、(d) 5 時間

* 1981年3月に九州大学大学院・工学研究科・鉄鋼冶金学専攻の博士後期課程を修了したのち、ただちに同大学・工学部の助手に着任し、講師、助教授、を歴任した後、1996年から2018年3月まで九州大学教授を務めた。その後、2020年に高周波熱錬(株)の技監に就任し、現在に至る。

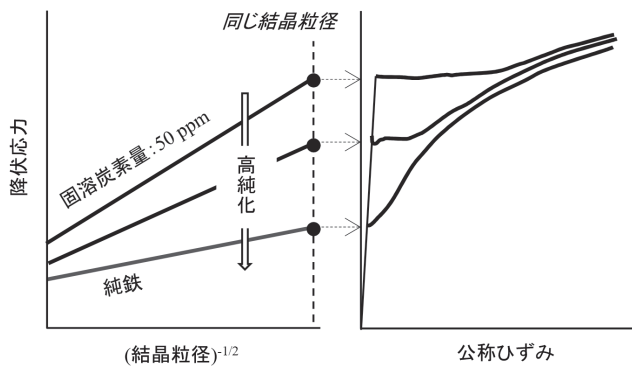


図2 フェライト鋼の純度を上げると降伏点が低下する理由を示す模式図

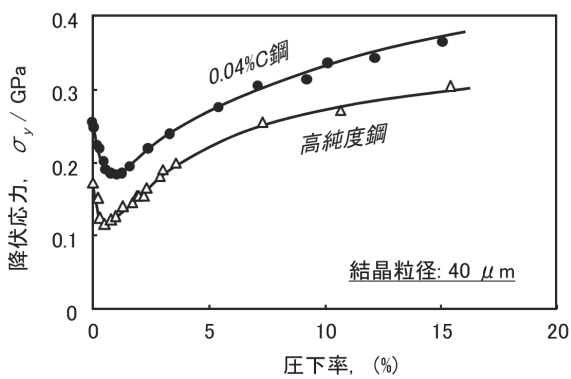


図3 冷間圧延を施した試料の降伏応力と圧下率の関係⁴⁾。高純度鋼は湿水素処理で作製している。両鋼とも、再結晶法で結晶粒径を40 μmに調整し、その後冷延を施している

興味深い点は、高純度鋼においても1%の調質圧延で加工軟化が起こっていることであり、これについてはCottrell固着説では説明できない。論文⁴⁾では、純度が低い0.04% C鋼において高い転位密度となることも報告されており、著者が転位密度と降伏応力の関係で整理し直した結果を図4に示す。0.04% C鋼ならびに湿水素処理した高純度鋼のフェライト粒径はいずれも40 μmに調整してあり、焼鈍材の降伏応力の差(0.07 GPa)については、前述のようにHall-Petch係数に及ぼす固溶炭素の影響で説明できる。降伏応力が最低値を示したあとの試料については、鋼の純度にかかわらず次式で表される直線に沿ってデータが存在することが分かる。

$$\sigma_y [\text{GPa}] = 0.05 + 1.8 \times 10^{-8} \sqrt{\rho} \quad (1)$$

つまり、同じ加工率で比較すると0.04% C鋼の転位密度が高いために降伏応力が高くなるが、転位密度が等しい条件では、降伏応力は同じになるということである。降伏は、粒内に存在する転位の運動で起こるので、このような降伏を粒内転位降伏という⁵⁾。一方、焼鈍材の降伏応力は結晶粒微細化強化に依存しており、降伏は粒界からの転位の放出によって

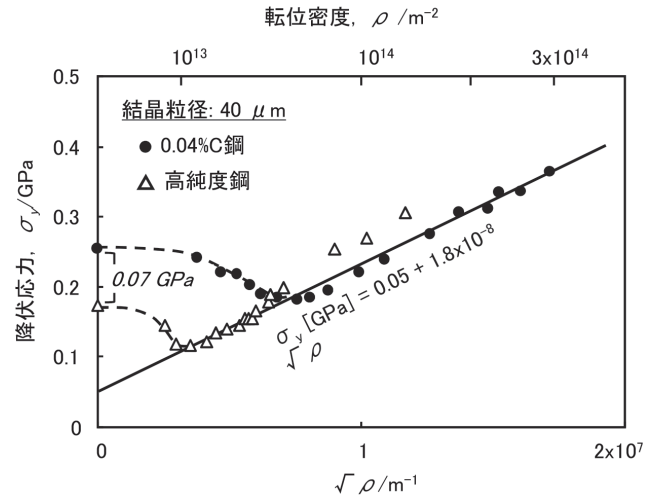


図4 冷延材における転位密度と降伏応力の関係。転位密度は透過型電子顕微鏡で観察して求めている

起こるので、このような降伏を粒界転位降伏という⁵⁾。つまり、1%程度の軽圧下を施すと粒内に可動転位が導入され、降伏機構が粒界転位降伏から粒内転位降伏に変化したと考えられる。しかし、1%程度の加工で導入される転位の密度は低いために十分な転位強化が得られず、降伏機構が変化する過程で加工軟化という現象が現れたわけである⁵⁾。

4 結晶粒微細化強化と転位強化の関係

結晶粒微細化強化におけるHall-Petch係数は炭素量に依存して変化するが、50 ppm以上の炭素を含むフェライト鋼についてはHall-Petch係数は一定となり、降伏応力 σ_y [GPa]と結晶粒径 d [μm]の関係は次式で与えられる²⁾。

$$\sigma_y [\text{GPa}] = \sigma_0 + 0.6 / \sqrt{d} \quad (2)$$

σ_0 は摩擦力 (Friction stress) であり、温度やひずみ速度、合金元素による固溶強化などに依存して変化する。室温で 10^{-4} /s程度のひずみ速度を前提とした場合、 σ_0 は純鉄で0.05 GPa、市販鋼で0.1 GPa程度の値となる。一般に、フェライト粒径が小さいほど均一変形域の流動応力も高いため、流動応力についてもHall-Petchの関係で整理されたデータをしばしば見受ける。一例として、0.055% C鋼の20%流動応力 (真応力)⁶⁾をHall-Petchの関係で整理した結果を図5に示す。降伏応力については、 $\sigma_0=0.075$ GPaとして上式が成り立ち、20%加工材の流動応力については、あたかもその値に転位強化分が加算されたように見える。こうしたデータを根拠として、強化機構の議論においては、長い間、結晶粒微細化強化と転位強化が加算的に評価されてきた。

ところが、結晶粒径が異なるフェライト鋼に関して転位密

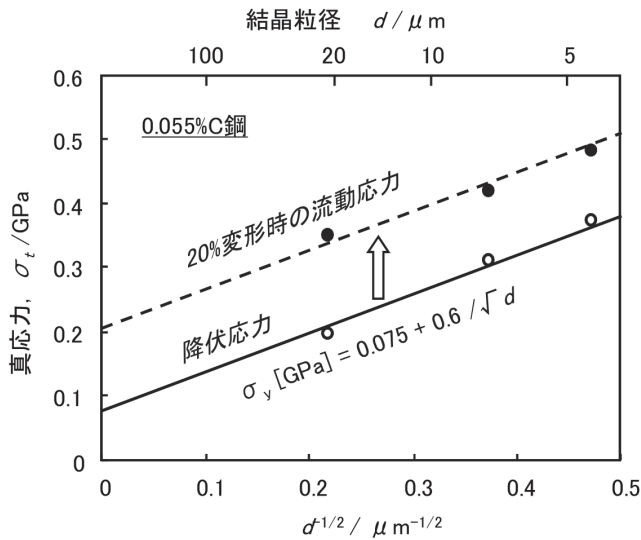


図5 降伏応力ならびに流動力に関するHall-Petchプロット

度を測定すると、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いということが分かった^{7,8)}。冷延した試料について転位密度 ρ と降伏応力 σ_y の関係を整理すると、図6に示すような結果が得られる^{7,8)}。すなわち、加工材の降伏応力は、加工率や結晶粒径に関わらずに転位密度の関数として式(1)で与えられるわけである。

5 冷間加工した多結晶金属における降伏応力

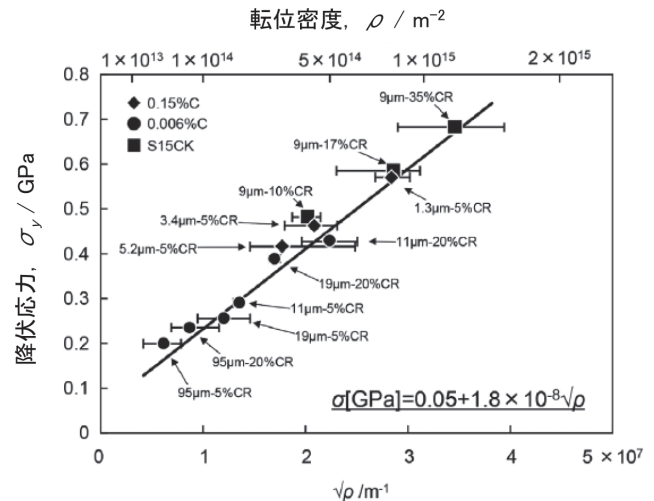
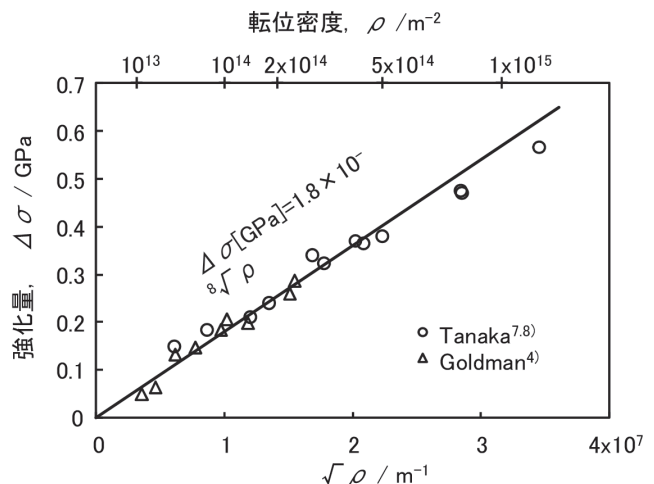
前述のように、Goldmanはフェライト粒径をそろえて炭素量が転位強化に及ぼす影響を調査し、著者らはフェライト粒径が転位強化に及ぼす影響を調査した。用いた試料によって摩擦力が異なるため、降伏応力から摩擦力を差し引いた強化量について転位密度との関係を求めた。その結果を図7に示す。興味深いことに、すべてのデータが同じ線上に分布している。このような現象は、他の多結晶金属でも共通して起こるはずであり、加工した多結晶金属の降伏応力 σ_y は、摩擦力 σ_0 と転位密度 ρ の関数として次式で与えられると思われる。

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_d \sqrt{\rho} \quad (3)$$

k_d は、金属の剛性率、転位のBurgersベクトル、Taylor因子などの物性値に加えて、転位の性質と分布状態で決まる定数である。転位の密度、性質、分布に影響を及ぼす因子としては次の3つが挙げられる。

- 1) 加工条件 (加工方法、温度、ひずみ速度、ひずみ量)
- 2) 材料の化学成分 (固溶した合金元素)、
- 3) 組織因子 (分散粒子、結晶粒径)

これら3つの要因が k_d や ρ にどのように影響するかは金属の

図6 結晶粒径が様々なフェライト鋼における転位密度と降伏応力の関係^{7,8)}図7 結晶粒径^{7,8)}や炭素量⁴⁾が様々なフェライト鋼における転位密度と強化量の関係。強化量は、降伏応力から摩擦力を差し引いた値である

種類によって異なるであろうが、フェライト鋼の場合は、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、結果的に式(1)で示したBailey-Hirschの関係が成り立つことが分かっている⁹⁾。これまで、転位強化と言えば転位密度にのみ関心が注がれてきたが、実際には転位の性質や分布の影響は想像以上に大きい。

以上の結果を踏まえて、加工を施した金属の強化機構を模式的に示すと図8のようになる。焼鈍した多結晶金属の降伏応力は結晶粒微細化強化、均一変形域の流動応力は転位強化に依存した値となる。ただし、転位の導入挙動に上記の3つの因子が複雑な影響を及ぼすので、流動応力を組織因子だけから予測するのは容易ではない。最も簡単な方法は、転位の密度、性格、分布状態を正確に計測することであり、今後、転位解析を抜きにして金属材料の強化機構は議論できないと思われる。

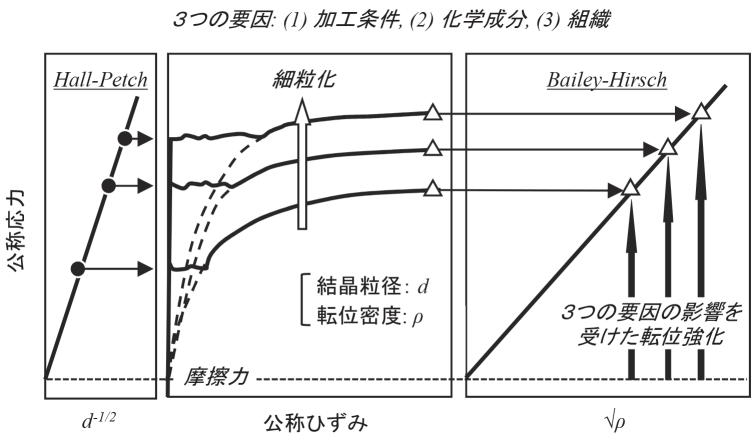


図8 多結晶金属における強化機構を示す模式図。焼鈍材の降伏応力は結晶粒微細化強化、均一変形域の流動応力は転位強化に基づいている

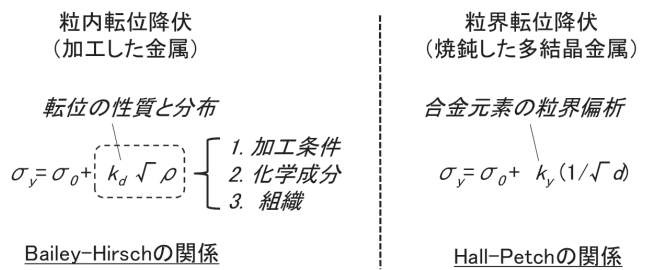


図9 加工した金属と焼鈍した多結晶金属における降伏メカニズムの相違。降伏応力; σ_y 、摩擦係数; σ_0 、転位密度; ρ 、結晶粒径; d

6 まとめ

金属材料の強化機構としては、固溶強化、転位強化、粒子分散強化、結晶粒微細化強化の4種類があり、多結晶金属材料の強度については、これらすべての強化機構を加算して見積もるのが一般的であった(単純加算則)。ただし、上述のように各強化機構の単純加算では説明できない事例も多くあり、多結晶金属の強化機構については今一度見直す必要がある。参考までに、図9に著者の考え方を紹介する⁵⁾。固溶元素と転位の相互作用力は大変小さいために、固溶強化の影響は摩擦係数 σ_0 に含まれる。加工した金属については、降伏は粒内転位降伏の機構で起こり、降伏応力と転位密度の間にはBailey-Hirschの関係が成り立つ。ただし転位の導入挙動には、(1) 加工条件、(2) 材料の化学組成、(3) 材料の組織が影響を及ぼし、転位の性質と分布状態は係数 k_d に影響を及ぼす。一方、十分に焼鈍した多結晶金属のように粒内転位降伏が困難な場合、降伏は粒界転位降伏の機構で起こり、降伏応力と結晶粒径の間にHall-Petchの関係が成り立つ。係数 k_y は、合金元素の粒界偏析に依存して変化する。90%冷延を上

回るような超強加工を金属に施すと、加工によって動的な結晶粒の超微細化が進行し、降伏機構が再び粒界転位降伏に変化することも確認している⁹⁾。粒径が小さくなりすぎて粒内転位降伏が困難になったためと推察されるが、詳細については今後の研究展開に期待したい。いずれにせよ、結晶粒微細化強化と転位強化は加算的な関係ではなく、競合的な関係にあることは間違いない。本稿では、これまでの著者の研究成果を総括する形で要点のみを簡単に書かせていただいたが、鉄鋼材料の研究に取り組んでおられる技術者や研究者にとって、本稿が少しでもお役に立てれば幸いである。

参考文献

- 1) J.R.Low Jr. and M.Gensamer : Trans. AIME, 158 (1944), 207.
- 2) K.Takeda, N.Nakada, T.Tsuchiyama and S.Takaki : ISIJ Int., 48 (2008), 1122.
- 3) A.J.K.Honeyman : Sheet Metal Industries, 34 (1957), 51.
- 4) A.J.Goldman : Trans. ASM, 57 (1964), 900.
- 5) 高木節雄 : 日本金属学会誌, 83 (2019), 107.
- 6) W.B.Morrison : Trans. ASM, 59 (1966), 824.
- 7) 田中友基, 高木節雄, 土山聡宏, 植森龍治 : 鉄と鋼, 104 (2018), 284.
- 8) Y.Tanaka, S.Takaki, T.Tsuchiyama and R.Uemori : ISIJ Int., 58 (2018), 1927.
- 9) 高木節雄 : 鉄と鋼, 105 (2019), 941.

(2021年3月9日受付)