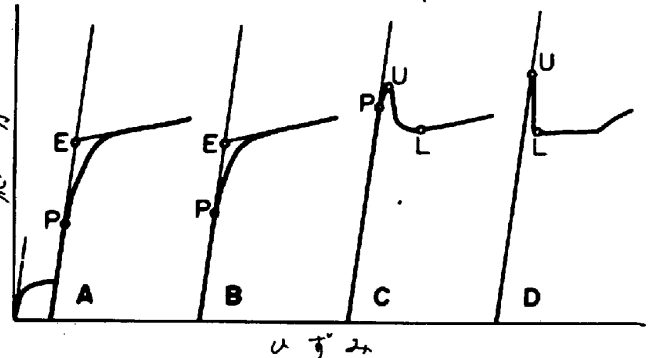


討 19 鉄鋼の降伏 (転位と格子間不純物原子との相互作用の観点から)

金属材料技術研究所

武内 朋之

鉄および軟鋼の中の炭素原子がその降伏応力に与える影響については、これまでに無数の研究が行なわれてきたにもかかわらず、いまだに論争が続いている。その一例としては、一方の人々は、鉄の降伏応力が低温で大きくなるのは理想的に純粋な鉄の性質であると言い、他方の側の人々は、これは格子間不純物原子の存在が主な原因であると言っている。この種の問題を考えるときには、次の2点を考慮しておく必要がある。第1に、降伏応力といっても図1に示すようにいろいろな定義があるから、そのどれについて論じているのかをはっきりさせておくこと、そして第2に、焼鈍した軟鋼のときには、必ず図1のDのような応力-ひずみ曲線を示し、不均一な変形をするから、この時の下降伏応力は均一変形の際の下降伏降力(曲線C)とは区別しなければならないことである。そこで、始めに不均一変形をする多結晶体の降伏応力について考え、次に運動する転位の性質に直接関係する降伏応力について考える。



§ 1. 多結晶体の降伏応力

軟鋼を湿水素中で焼鈍して脱炭するときの応力-伸び曲線の変化を、最初に系統的に調べたのは、LowとGensamer¹⁾(1944)である。それによると、

図2に示すように、炭素量が分析限界($\sim 0.003\%$)以下になったあとで、下降伏応力が始めの値の半分から3分の1に下がり、逐には上下の降伏点なくなる。この実験は、鉄の降伏応力はごく微量の炭素原子によってきわめて大きな影響があることをはっきりと示した。その後Cottrell²⁾(1949)は、軟鋼に降伏点が見られるのは、きわめて微量の炭素原子が転位を動けなくさせるからだと考えた。

軟鋼の降伏応力のひずみ速度依存性は、すでに1930年代に明らかにされていた。³⁾ この流れをくむWoodとClark⁴⁾(1951)は、軟鋼とそれを脱炭したものについて降伏遅延時間を測定し、図3の結果を出した。彼らはその論文の中で、「脱炭によって鋼の上降伏点なくなることは、降伏の機構に本質的な変化が生じたことを示すものではない」という実験屋の直観からくる素朴な見解を述べている。しかし、この見解はCottrellの理論をもとにして考える人からの強い反対をうけ、10年後に、降伏点が転位の動的な性質としてとらえられるようになるまで、その本質的な意味が評価されなかった。

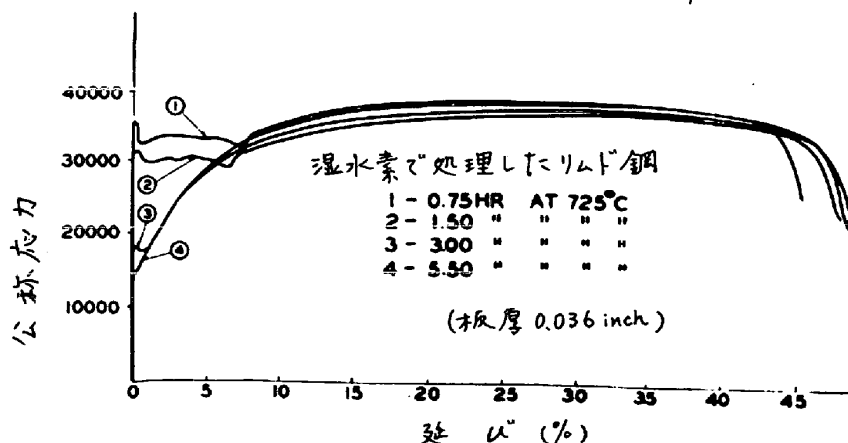


図2 軟鋼を脱炭するときの降伏点の変化 (Low, Gensamer¹⁾)

下降伏応力の σ_y が結晶粒の大きさ d に対して

$$\sigma_{LY} = \sigma_0 + kd^{1/2} \quad \dots\dots (1)$$

の関係で変化することは、始め Hall⁵⁾(1951)によって見いだされた。ここで k は粒界への応力集中の大きさを表わす係数である。その後 Petch らは軟鋼についてこの関係を詳しく調べている。微量の炭素を含む純鉄とこれを脱炭したもので得られた下降伏応力の結晶粒度に対する変化を図4に示した。これにも示されたように、一般に(1)式の σ_0 は脱炭によって変化しない。結晶粒の小さなものを脱炭すると降伏応力が大きく下がるのは、図2に示したような意味である。脱炭したものは均一な変形をするのであるから、炭素を含むもので k が大きいのは、リュース帯を伴う不均一変形と深い関係がある。

Cottrell の考え方は、リュース帯の先端の結晶粒界にあらわれる応力集中により、隣の結晶粒の中の炭素原子にとらえられに転位が解放されることが、ひずみの伝播を決める主要因であるとした。このような転位の集団の作る静的な応力関係から(1)式を説明する理論は、これまで、主なものだけでも10以上ある。

1960年代に入ると、降伏応力の変形速度依存性が、転位の動的な性質との関係で考えられるようになった。そして、鉄の多結晶で図1-Cのような型の上降伏曲が見られるようになり、⁷⁾ ある種の条件では、転位の速度と応力の関係、および転位の多重発生という動的な性質だけで説明できる上降伏曲が存在することがわかった。また、Hahn⁸⁾によっても、リュース帯の先端の構造と、その伝わる速度は、転位の動的な性質だけから説明がつくことが指摘された。すなわち、リュース帯が伝わるような変形をするときには、実際に変形している領域の中の真のひずみ速度が、一様な変形をするときに比べて、試験片の体積と実際の変形域との比に比例して大きくなるから、下降伏応力が、たとえば 10 kg/mm^2 位大きくなることは当然なことになる。だから、図4の k の差は、変形が均一か不均一かといったことで、定性的には一応説明することはできるが、今後、ひずみ速度効果と、粒界への応力集中と関係のある結晶粒度の効果の両方を取り入れに理論が期待される。

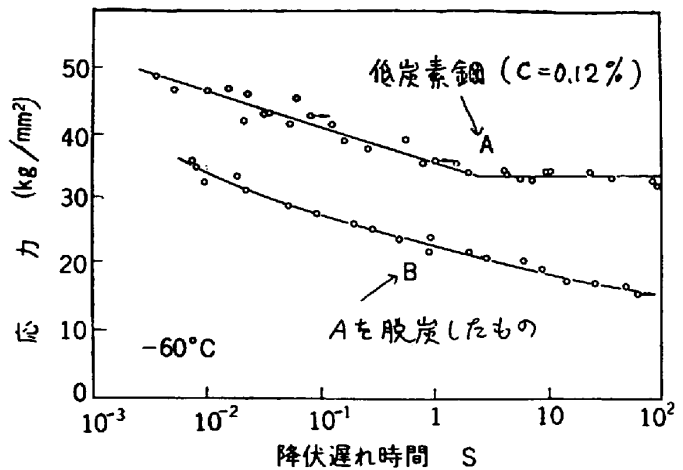


図3 降伏遅れ時間と引張り応力 (Wood, Clark⁴⁾)

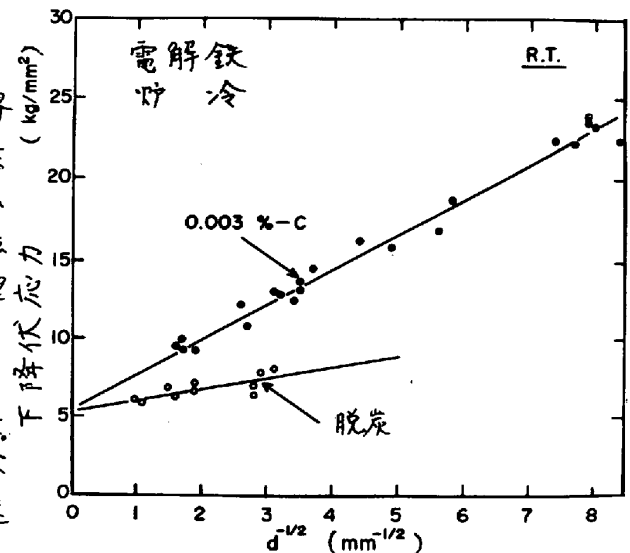


図4 炒冷した電解鉄の室温における下降伏応力の結晶粒度依存性 (大庭⁶⁾)

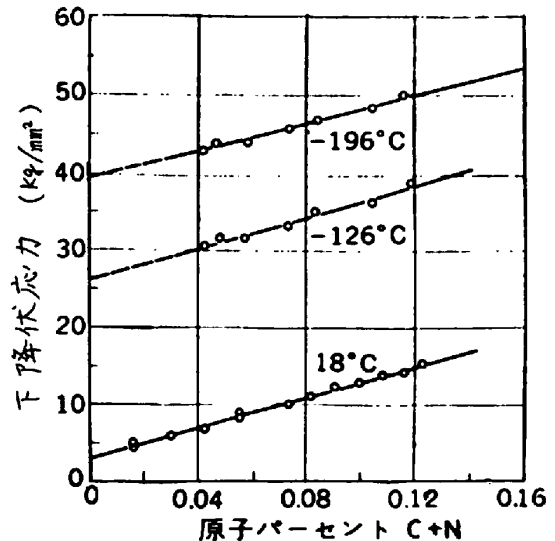


図5 鉄の結晶粒度と無関係な下降伏応力
固溶したC+Nとの関係 (Heslop, Petch⁷⁾)

§2 運動する転位と格子間不純物原子

HeslopとPetch¹²⁾ (1956)は、いろいろな結晶粒度をもつ軟鋼をいろいろな温度から急冷して固溶炭素量をいろいろに変えた試料を作り、これらの下降伏応力を無限大の結晶粒に外挿した応力を求め、これを図5に示すように、固溶した(C+N)量に対して示した。この結果は、「降伏応力の温度依存性は固溶したC+Nの量が増してもほとんど影響されない」ことを意味する。彼らはこれをもとにして、鉄の結晶粒度に依存しない降伏応力が低温で急激に大きくなるのは、不純物の影響ではなく、純粋な鉄が本来もっている性質、すなわち、パイエルスカで決められているといった。この考え方に賛成する人々にとっては、運動する転位と炭素原子との相互作用の問題は、図5の結果で基本的には片づいたと見なすことができる。しかし、これは当時の正統的な見解に反するものであり、にだちにSeeger¹⁰⁾によって批判され、図5で不純物量が零の点まで直線で外挿するのはまちがっており、Cottrellの理論によると零の近くで急激に小さくなるはずだ、と決めつけられた。

Brownら¹¹⁾は、図1のAのように、室温で前ひずみを与えた鉄を低温で引張るとき、ひずみの測定を 10^{-6} 程度の高い精度でおこなうと、その比例限応力は十分に脱炭した材料では温度に依存しなくなるという結果を出した。これは、普通の意味の降伏に対応する転位の運動とは違った、キンクの移動によってひき起こされるひずみである。ということと結着がついている。¹²⁾

Steinら¹³⁾は図6に示すように、鉄単結晶の炭素含有量を 5×10^{-3} ppm以下にすると、その比例限応力の温度依存性は非常に小さくなった、と報告した。これは、「炭素を完全に除けば、鉄の降伏応力は低温でも大きくなり」と教えこまれた人々には、10数年間待ちつづけた実験のように思われた。しかし、1960年代に入ってから、降伏応力は転位の固着からの開放ではなく、その動的な性質で決まるというのが一般的な見解になっていたので、別の説明が必要になった。そこで、Fleischer¹⁴⁾が非等方的な歪場をもつ不純物原子が運動する転位と大きな相互作用をもつから、これが鉄の降伏応力の強い温度依存性を作り出すのだといった。

他方、鉄をはじめとしていろいろなbcc金属の降伏応力の温度および速度依存性に関する実験結果の集積により、これらの降伏応力の温度依存性は、不純物の影響ではなく、結晶本来の性質であることが、次第に確からしくなってきた。これは図6とは相いれない結果である。そこで図6が出てきた実験条件を検討してみる必要がある。Steinらの単結晶は図1.Cのような降伏応力を持つべき材料であるのに、実験のやり方がよくないために、降

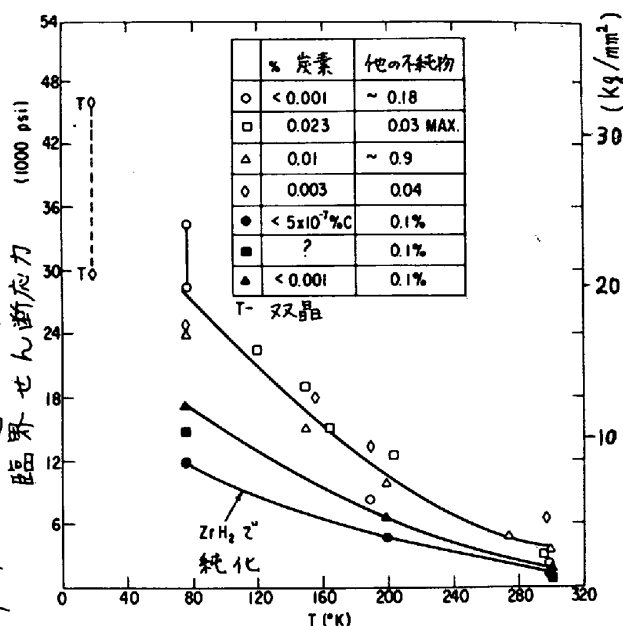


図6 炭素を十分に除いた鉄単結晶の臨界せん断応力(黒丸)。(Stein et al.¹³⁾)

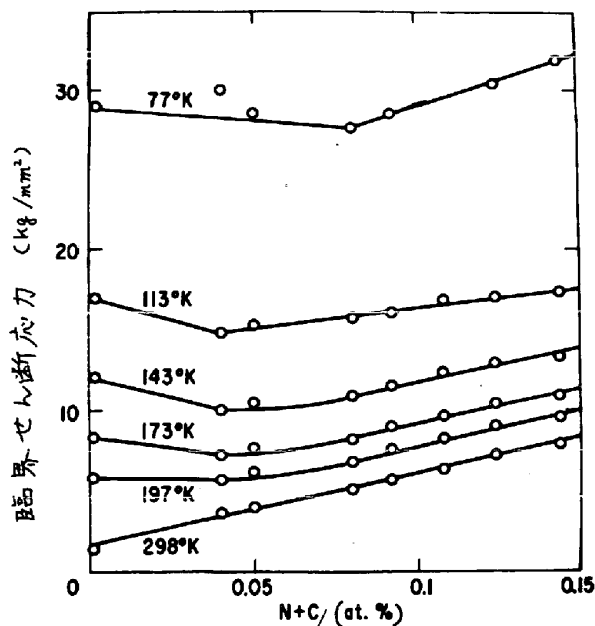


図7 鉄単結晶の降伏応力の固溶した(C+N)量との関係(Nakada, Keh¹⁴⁾)

伏変の形がBのような形になったのであり、しかもチャック部の構造によって試験片に前ひずみを与えたのと同じような測定をしたことになってしまった。だから、図6の比例限度力を、すぐに転位に動く摩擦力に対応させることはできない。

炭素と同じような働きをする窒素の固溶量をいろいろに変えたときの降伏応力、または小さなひずみのときの変形応力は、阪本、和田、菅野¹⁵⁾およびNakada, Keh¹⁶⁾によって調べられた。これによると、図7に示すように、室温では図5の結果とほぼ一致している。低温では窒素量が零に近づくとき、むしろ降伏応力は増加している。これらの結果は、格子間原子が完全に除かれたとしても、純鉄の降伏応力は低温で小さくならないことを示している。

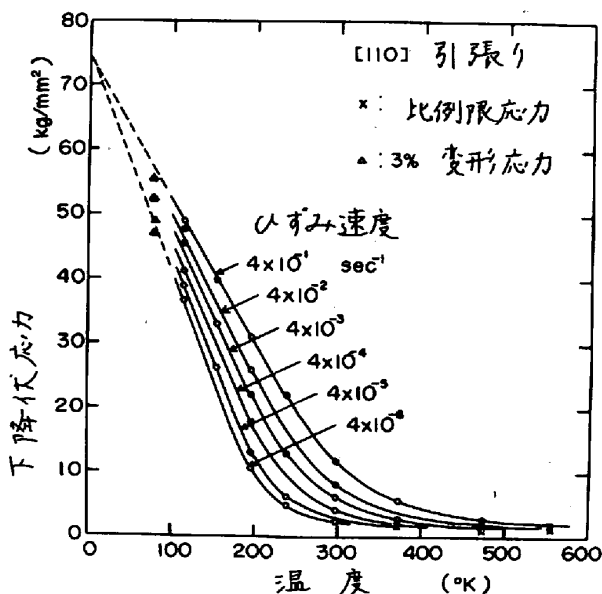


図8 鉄単結晶の下降伏応力の温度およびひずみ速度による変化 (Takeuchi¹⁸⁾)

最後に、著者が鉄単結晶でやった実験¹⁷⁾の主な結果を述べる。(1) 脱炭または急冷をすると、室温および低温での上降伏応力は小さくなるが完全にはなくなる。(2) 炭素をわずかに含む徐冷した結晶では変形初期に肉眼で見られるような逆り帯が現われるが、脱炭したものではこの種の逆り帯は全く見えなくなる。(3) 鉄単結晶の上降伏応力および双晶の発生には、微量の炭素その他の不純物が非常に大きな影響を与えるが、下降伏応力の温度依存性にはほとんど影響がない。そして(4) 図8に示す下降伏応力の温度およびひずみ速度依存性は、理想的に高純度の鉄単結晶の性質とみなしてもよい、というのが結論である。

文 献

- 1) J.R. Low, Jr. and M. Gensamer: Trans. met. Soc. AIME **158** (1944) 207.
- 2) A.H. Cottrell and B.A. Bilby: Proc. Phys. Soc. **62A** (1949) 49.
- 3) J. Winlock and R.W.E. Leiter: Trans. ASM **25** (1937) 163.
- 4) D.S. Wood and D.S. Clark: Trans. ASM **44** (1952) 726.
- 5) E.O. Hall: Proc. Phys. Soc. **64B** (1951) 747.
- 6) 大庭幸夫: 日本金属学会誌, **30** (1966) 958.
- 7) T. Takeuchi and S. Ikeda: J. Phys. Soc. Japan **18** (1963) 488, 767, 1841.
- 8) G.T. Hahn: Acta Met. **10** (1962) 727.
- 9) J. Heslop and N.J. Petch: Phil. Mag. **1** (1956) 866.
- 10) A. Seeger: Handbuch der Physik, VII, (2) (Springer, Berlin 1958) pp. 183.
- 11) N. Brown and R.A. Ekvall: Acta Met. **10** (1962) 1101.
- 12) R. Kossowsky and N. Brown: Acta Met. **14** (1966) 131.
- 13) D.F. Stein, J.R. Low, Jr., and A.V. Seybolt: Acta Met. **11** (1963) 1253.
- 14) R.L. Fleischer: J. appl. Phys. **33** (1962) 3504, Acta Met. **15** (1967) 1513.
- 15) K. Sakamoto, H. Wada, and T. Sugeno: Proc. ICSMA, Trans. JIM **2** Suppl. (1968) 720.
- 16) Y. Nakada and A.S. Keh: Acta Met. **16** (1968) 903.
- 17) T. Takeuchi: Trans. ISIJ **8** (1968) 251.
- 18) T. Takeuchi: Proc. ICSMA, Trans. JIM **2** Suppl. (1968) 871.