

鉄の降伏現象に及ぼす高圧処理の影響

The Effect of Hydrostatic Pressure on the Yielding of Iron

矢 島 正 美* 石 井 満*
Masami Yajima Mitsuru Ishii

要 旨

純鉄の降伏現象は6~14 K_bの高圧処理により大きく変化する。高圧処理はLüders帯の発生と伝播(でんぱ)を容易にし、上部、下部降伏点は著しく減少する。これは試料中に含まれる酸化物などが、静水圧中で弾性的性質の不均質点となり、近傍に自由転位が発生するために生ずる現象と思われる。降伏点の減少は、降伏点 σ_y と結晶粒径 d との間に存在するPetchの式 $\sigma_y = \sigma_i + k_y d^{-1/2}$ の中のパラメータ k_y の減少によるもので、摩擦力 σ_i はほとんど変化しない。高圧処理材の k_y は室温以下で鋭い温度依存性を示し、低温では未処理材の値に達する。この k_y の温度依存性のために、処理効果は低温で消失する。 k_y の中に導入される処理効果は、試料の結晶粒度にも関係し、結晶粒度が小さくなると処理効果はあまりはいらない。これらの実験結果から、 k_y は自由転位密度に非常に敏感であることが明らかとなったが、このことは k_y あるいはPetchの関係式に関する従来の物理的解釈が修正されねばならないことを意味するものである。

1. 緒 言

鉄の降伏現象は非常に組織に敏感で、きわめて小さい前ひずみが試料の取り扱い中に加えられても、降伏現象が変わってしまうことはよく知られている⁽¹⁾⁽²⁾。Bullen氏ら⁽³⁾はアームコ鉄を数千気圧の静水圧中に数分間放置し、これを取り出して引張ると降伏現象が大幅に変わることを見いだしたが、これも一種の前ひずみの効果と考えてよい。以後このような静水圧中に試料を放置することを高圧処理と呼ぶが、この場合に考えられる組織変化としては試料中に含まれる炭化物などの介在物のまわりでの転位の発生である。このことからBullen氏らは高圧処理により生ずる降伏現象、すなわち上部、下部降伏点の減少は、定性的にはJohnston-Gilman⁽⁴⁾の降伏理論で説明できるとしている。

鉄ならびにそれに類似する金属の降伏現象については、これまで非常に多くの研究がなされてきたが、いまだに完全な理論的説明が与えられていない。より多くの実験事実が出てくればくほど、この現象が複雑であり、これまでの二、三の転位論的説明では不完全であることが明らかにされてきた。これまでの転位論的説明のうちで、もっとも重要なものは古典的なCottrell氏⁽⁵⁾の固着理論である。この理論は降伏強度と試料の結晶粒度との間に普遍的に成立するところのPetchの関係式を説明できる。しかし降伏点の温度依存性については、この理論による説明は正しくないと言う反論が多い⁽⁶⁾⁽⁷⁾。またこの理論には自由転位密度と言う概念がはいっていない。一方1960年以後に提出されたJohnston-Gilman理論は、固着理論に対し動力学的理論とも呼ばれるもので、自由転位の動力学的性質から、鉄その他の降伏現象が説明できることを明らかにしたもので注目すべき理論である。しかし、もともとこの理論は単結晶に対して成りたつもので、多結晶鉄に関する実験結果と理論との一致は定性的なものであろう⁽⁸⁾。またこの理論は下部降伏点やLüders変形などの問題を扱えない。すでに筆者ら⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾は多結晶鉄の降伏現象に及ぼす高圧処理効果が、Bullen氏らの主張に反し、このような単純な理論では説明できないことを示した。すなわち高圧処理に基づく下降伏点の減少、あるいはLüders伸びの減少はPetchの式

$$\sigma_y = \sigma_i + k_y d^{-1/2} \dots \dots \dots (1)$$

の中のunpinning term ($k_y d^{-1/2}$)の減少に基づくものであり、摩擦力(σ_i)の変化によるものでないことを明らかにした。(1)式で σ_y は降伏点を、 d は試料の結晶粒径を表わし、 k_y は σ_y の粒度依存性

表1 各種試験片の熱処理条件と結晶粒度

材 料	熱 処 理*	平均粒径 d^{**} (μ)	$d^{-1/2}$ ($\text{mm}^{-1/2}$)
純 鉄	600°C×1h	15.6	8.0
純 鉄	700°C×1h	23.7	6.5
純 鉄	900°C×1h	40.0	5.0
純 鉄	1,000°C×1h	500.	~0
軟 鋼	1,000°C×1h	33.1	5.5
ニオブウム	1,000°C×1h	30.5	5.6

* 真空焼鈍

** 平均粒径 = $\sqrt{\text{平均粒面積}}$

を示す常数である。本報告では、上述の結論を裏付けるために、直接(1)式の中の k_y を求め、高圧処理により k_y が変化することを明らかにする。また高圧処理材の k_y が室温以下で鋭い温度依存性をもち、このために高圧処理は、下降伏点の温度依存性を変えることを述べる。

2. 試料ならびに実験方法

実験は純鉄、電磁軟鋼、ニオブについて行なった。純鉄は50 ppm、電磁軟鋼は200 ppmの炭素を含む、また純鉄は600 ppmの酸素を含んでいる。ニオブは電子衝撃溶解法により溶製した鋳塊を加工したもので介在物を形成する酸素や炭素はきわめて少ない。

引張り試験片は鉄の場合が、断面積0.5 mm×3.0 mm、平行部20 mmからなる板状試験片であり、ニオブは1.0φの線である。いずれも種々の温度で真空焼鈍を行なって、所要の結晶粒度の試験片を作製した。表1に各種の焼鈍条件と得られた結晶粒径とを示した。焼鈍後の冷却は、炉冷に近い速度で行なわれたので、試料中の転位は十分に固着された状態にあると見てよい。これらの引張り試験片を、所要の静水圧中に約5分間放置したのち、とり出して引張り試験を行なった。用いた高圧処理装置(高圧発生装置を含む)に関しては、すでに報告⁽¹⁰⁾してあるので、ここでは述べない。引張り試験を行なうまでの待ち時間中、時効の影響をさけるために、試験片はドライ・アイスの中につめて保存した。引張り試験には容量100 kgのテンシロン自動引張り試験機を用い、荷重、伸びを自動記録した。本実験のように、降伏現象を問題にし、それを観察するには試験機の剛性が問題となるが⁽¹¹⁾、用いた試験機はhard machineと考えられるので、これを用いることはさしつかえない。引張りひずみ速度は 4.2×10^{-3} /s、温度は室温、-34°C、-72°Cの三点である。

* 日立製作所中央研究所

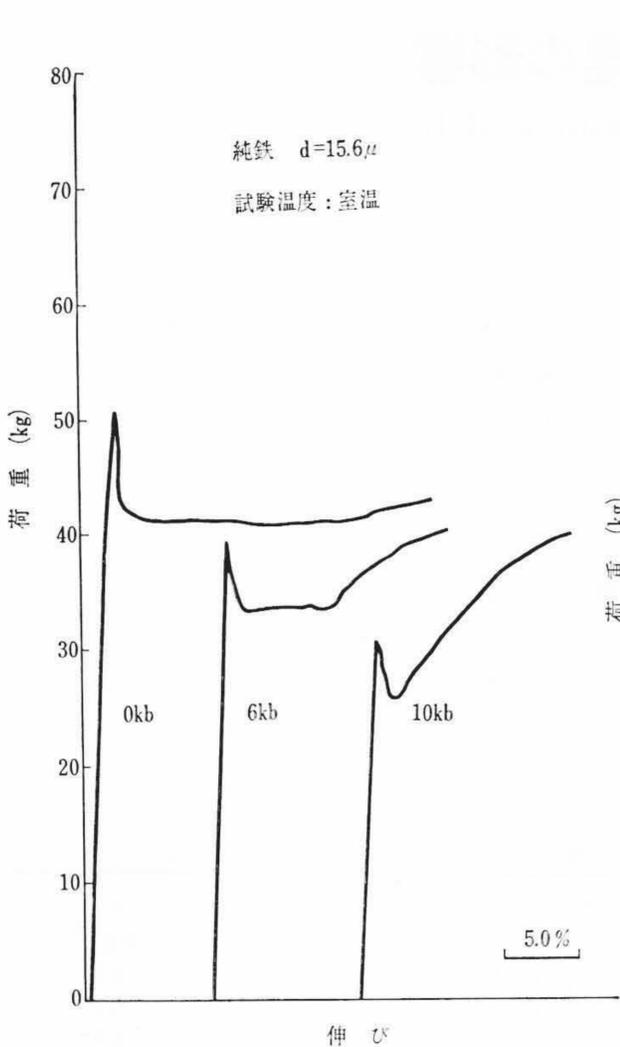


図1 高圧処理を受けた純鉄の荷重-伸び曲線

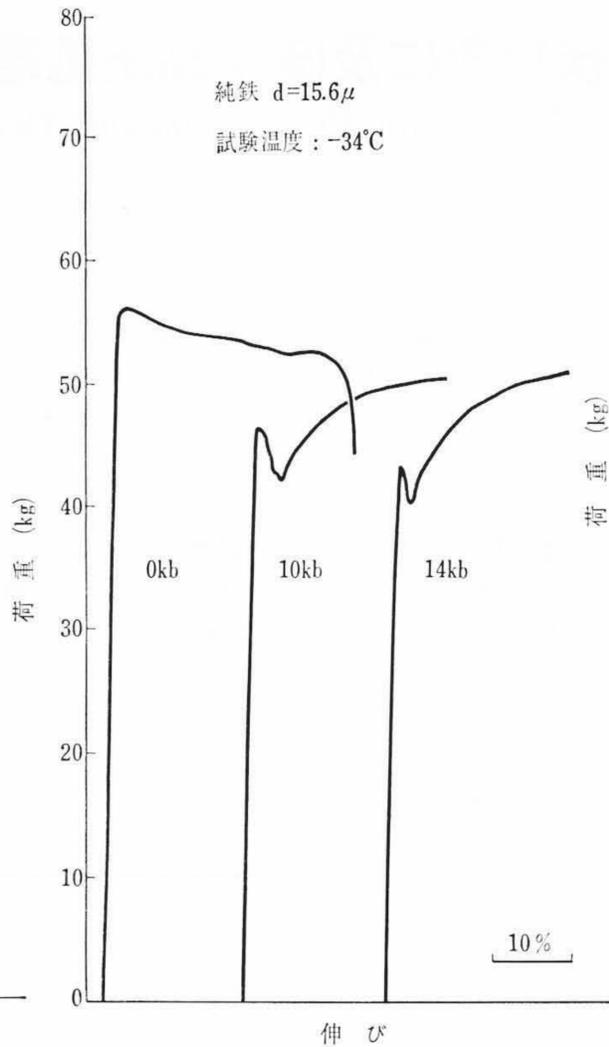


図2 高圧処理を受けた純鉄の荷重-伸び曲線

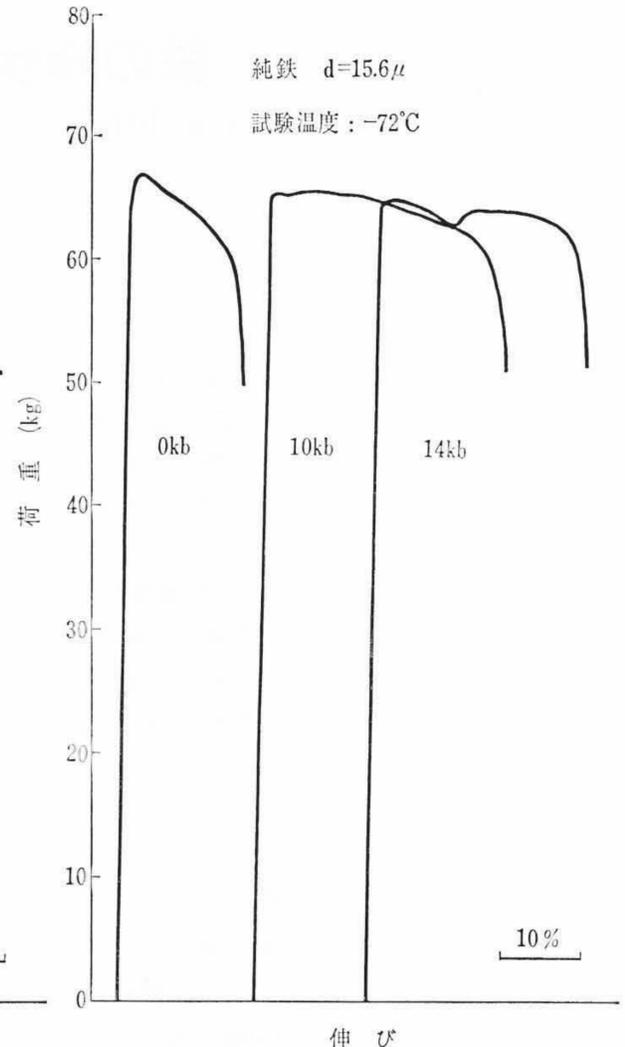


図3 高圧処理を受けた純鉄の荷重-伸び曲線

3. 実験結果

3.1 降伏現象に及ぼす高圧処理の影響

図1~3は、純鉄の降伏点近傍の荷重対伸び曲線の一例である。試料の結晶粒径は 15.6μ である。室温の結果は、ほかのものに比べて横軸を2倍のスケールで記録したが、図から高圧処理により、上部、下部降伏点が著しく減少し、かつ Lüders 伸びが減少することが明らかである。0 Kb と明示してあるのは未処理材のことで、未処理材は降伏点で大きな応力低下を示したのち、数パーセントの Lüders 変形をする。10 Kb の処理により、Lüders 伸びは消失し、降伏点での応力低下も小さくなる。14 Kb の処理では、この応力低下の現象も消え、材料は完全に均質変形を行なうようになる。低温の結果(図2, 3)も室温の結果とほぼ同様であるが、室温の結果に比較し処理効果は小さく、14 Kb の処理を行なったものでも降伏点で応力低下の現象を示す。これらの結果は高圧処理効果が低温で消失することを意味する。次に同様な高圧処理効果を電磁軟鋼試験片について見た結果を図4に示した。これは室温での測定結果であり、試料の粒径は 33.1μ である。純鉄の場合と同様な処理効果が認められるが、降伏点の減少の割合はかなり小さく、炭素含有量または酸素含有量が、高圧処理効果の大小と関連していることを示唆している。このことはさきに述べたとおり、試料中の介在物の存在が処理による組織変化の直接の原因と考えられることから、当然期待される結果である。さらに同じ現象をニオブについて示したのが図5である。この場合はまったく処理の影響を受けず、著しく純度を上げた場合には処理効果は導入されないことを示している。

3.2 高圧処理による下部降伏点の変化

図6~8は結晶粒度の異なる数種の純鉄試料につき、高圧処理による下部降伏点の変化を処理圧力に対してプロットしたものである。おのおのの曲線には試料の結晶粒度を粒径で示した。室温では $d=500 \mu$ の試験片を除き、下部降伏点は10 Kb まで処理圧力とともに

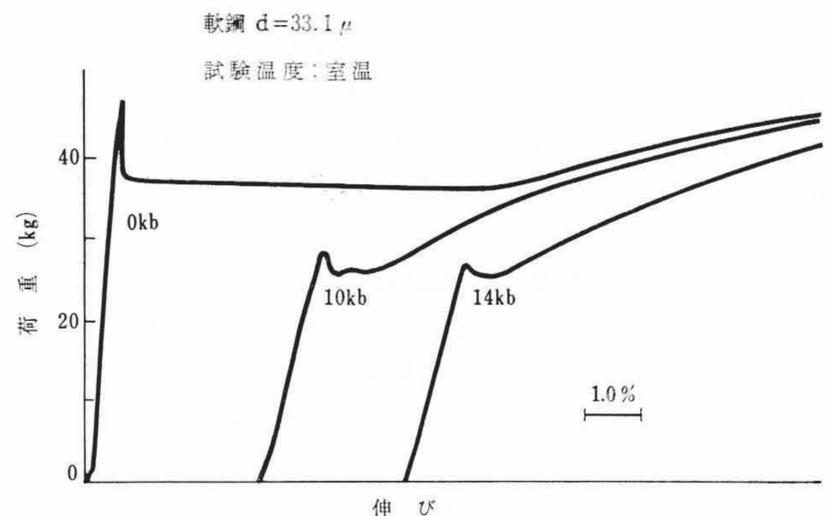


図4 高圧処理を受けた電磁軟鋼の荷重-伸び曲線

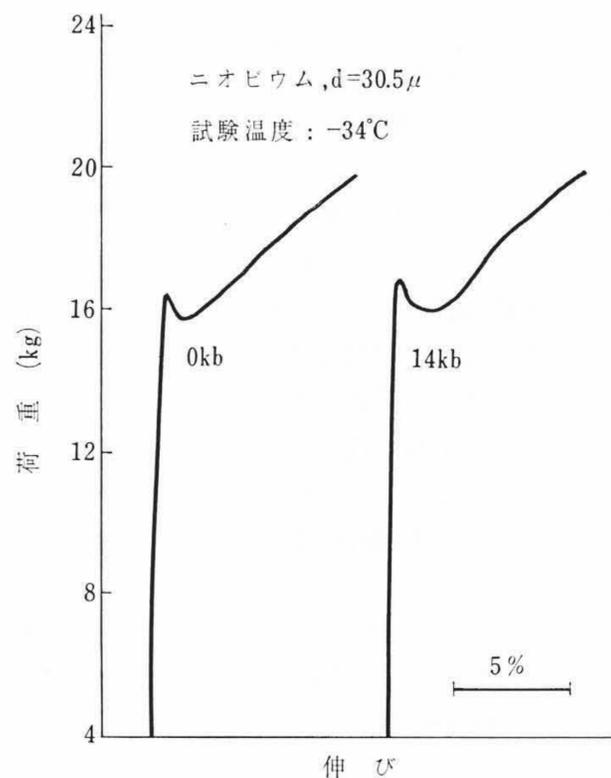


図5 高圧処理を受けたニオブの荷重-伸び曲線

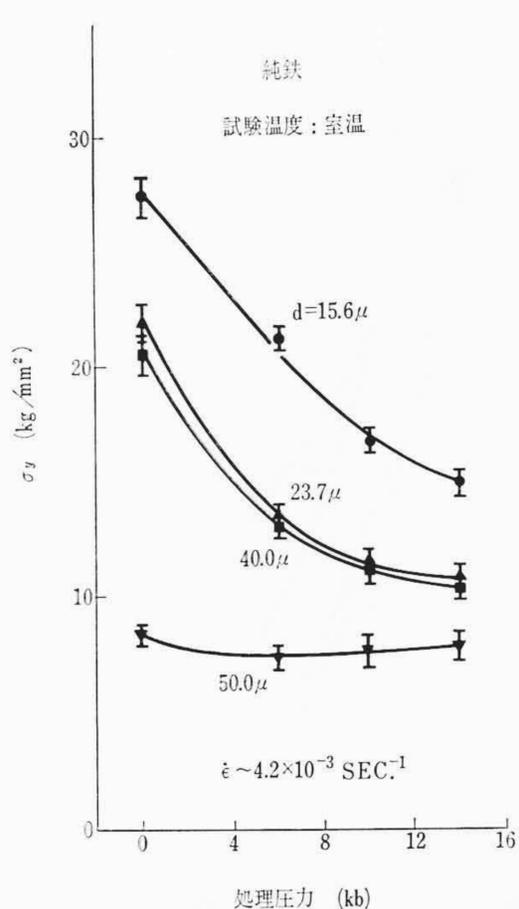


図6 下部降伏点に及ぼす高圧処理の影響

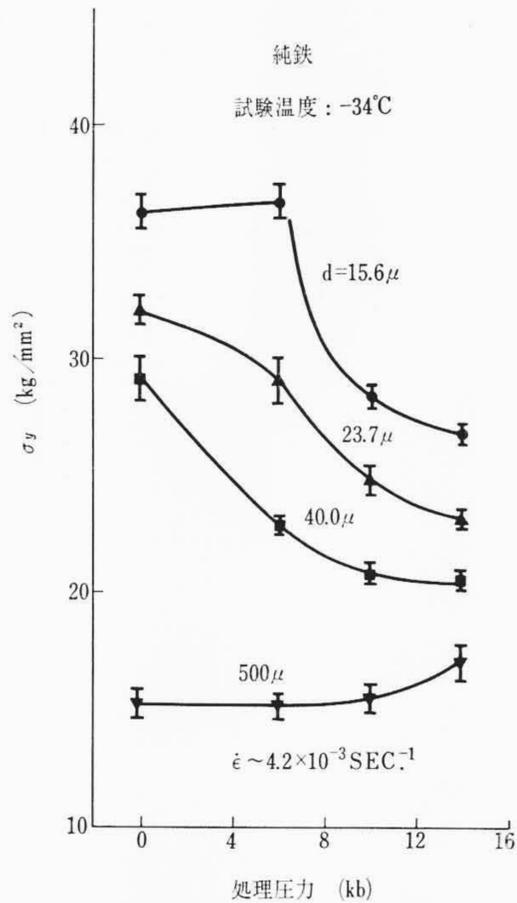


図7 下部降伏点に及ぼす高圧処理の影響

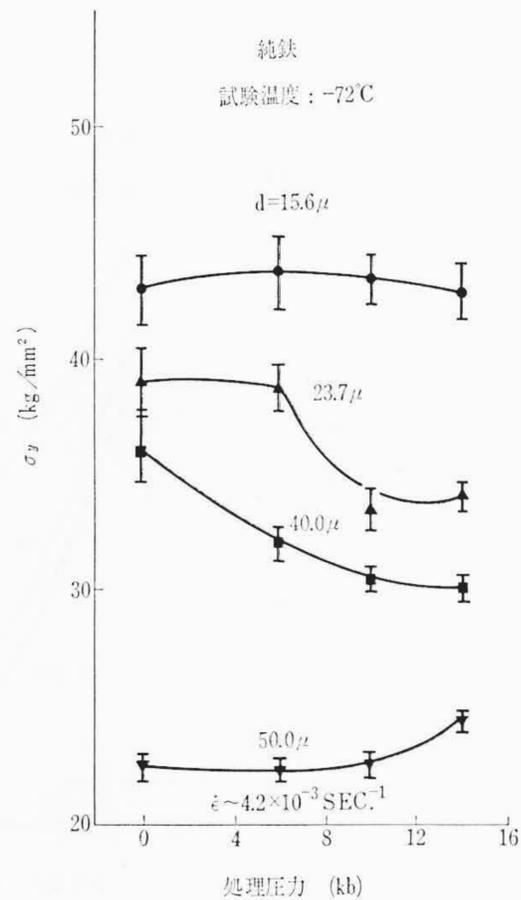


図8 下部降伏点に及ぼす高圧処理の影響

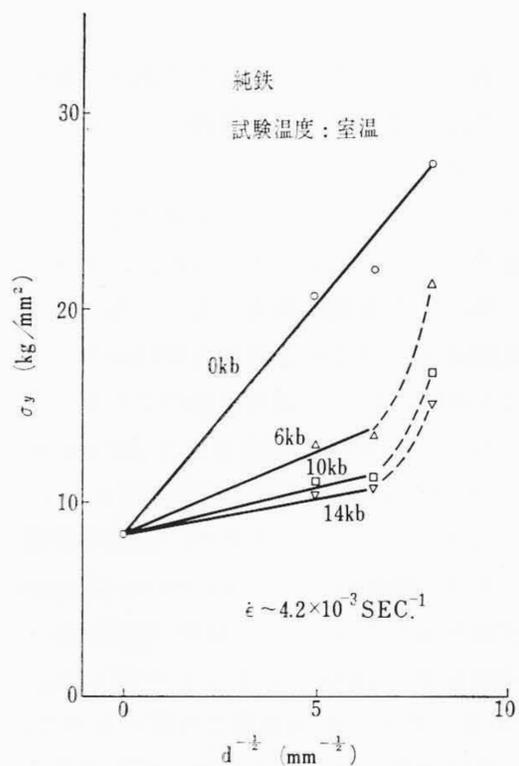


図9 高圧処理材の下部降伏点を示す結晶粒度依存性

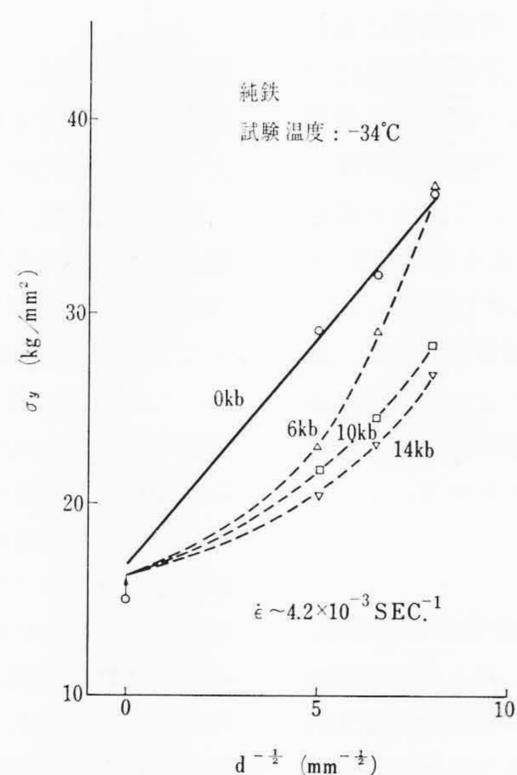


図10 高圧処理材の下部降伏点を示す結晶粒度依存性

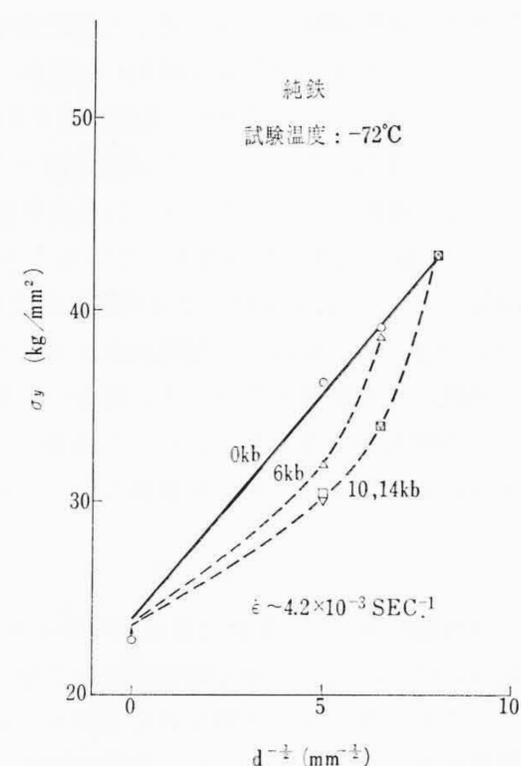


図11 高圧処理材の下部降伏点を示す結晶粒度依存性

にほとんど直線的に減少している。500 μ の試料は高圧処理の影響をほとんど受けない。低温では処理による下部降伏点の減少は一般に小さく、また低温では試料の結晶粒度の相違が顕著に出てくる。 $d=15.6 \mu$ の試験片の場合、 -34°C では6 Kbまでほとんど変化を受けず、6 Kb以上の所で急激な減少が見られる。 -72°C ではここで行なったすべての処理圧力範囲で降伏点は変化を受けない。同様なことは、 $d=23.7 \mu$ の試料に関してもいえる。すなわち -72°C では6 Kbまで降伏点は変化を受けない。 $d=40.0 \mu$ の場合は、処理効果はいずれの温度でも、いずれの処理圧力に対しても見られるが、降伏点の減少量は低温になるほど小さくなり、他の結晶粒度の試料の場合と同様な温度効果が認められる。粒径が500 μ の試料では、試験温度に無関係に下部降伏点は処理圧力に依存しないが、これは前述したとおり、まったく処理効果を受けないためであろう。

このような試料の結晶粒度と高圧処理の関係は、当然のことながら高圧処理がPetchの関係式を変えることを意味しており、前報⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾で述べたとおり、室温では見掛け上Petchプロット(すなわち σ_y 対 $d^{-1/2}$ のプロット)の直線のこう配を変えるような結果となるが、本報告で述べる低温の結果では単純にこう配の変化としては表われず、Petchプロット自体が満足されなくなる。これは結晶粒度により処理効果あるいは処理による組織変化の大きさが異なるためと考えられる(図9~11)。

3.3 高圧処理による下部降伏点の温度依存性の変化

本節では高圧処理材の下部降伏点を示す温度依存性について述べる。図12, 13は結晶粒度の異なる数種の純鉄試験片について、その下部降伏点を試験温度に対してプロットしたものである。すべての試験温度範囲で処理効果がよく認められる $d=40.0 \mu$ の試料では、図

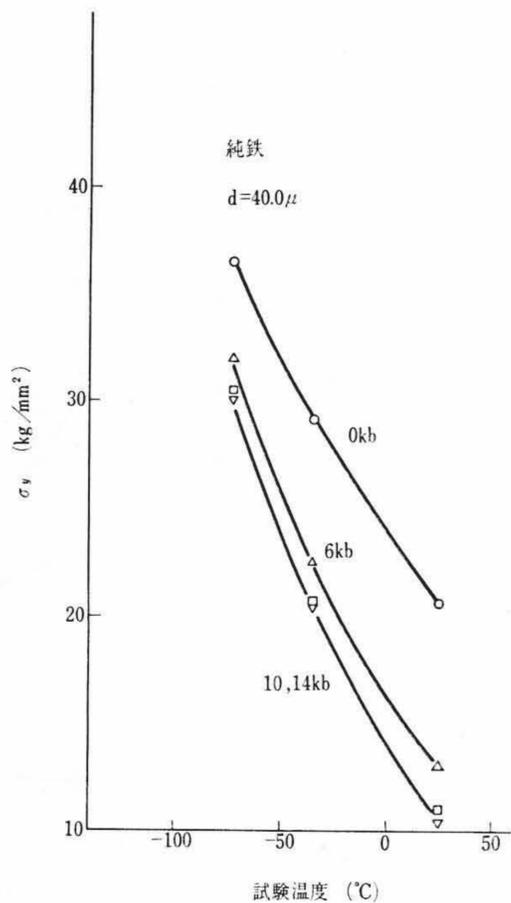


図12 下部降伏点の温度依存性に及ぼす高圧処理の影響

12のように温度依存性は高圧処理により急激となる。次に d が 15.6μ の細粒試験片では、同じく高圧処理により温度依存性は変化を受け、しかも上述の $d=40.0\mu$ の場合に比較し、変化の程度ははるかに大きい。 $d=15.6\mu$ 、処理圧力 $6Kb$ の結果は一見非常に特異である。すなわち、それらの試験片は -34°C 前後で温度依存性が変化し、曲線は二つのスロープから成り立っている。これは -34°C 以下で、高圧処理効果が消失していることと対応するものであり、 -34°C 以下では未処理材とほぼ同様な温度依存性を示す結果となる。以上のように、純鉄の下部降伏点を示す低温での温度依存性は、高圧処理により影響を受け、その度合いは結晶粒度によっても異なることが明らかとなった。これらの結果から、鉄の機械的性質に及ぼす高圧処理効果は、かなり複雑なものであることがわかる。

4. 考 察

弾性論に従えば、完全な静水圧の中に理想的な物体を置いた場合、物体の中には応力のせん断成分は生じないから、このような理想的な均質かつ等方性の物質を考える限り、高圧処理はなんらの塑性的履歴を与えない。もちろん、高圧処理により相変化ないしは密度変化の行なわれる場合は別である。一般には、金属は成分的な均質性の点でも、また弾性的な等方性の点でも理想的物体とは考えがたく、静水圧の中に放置するのみで、ある塑性的履歴を受けることが考えられる。

Davidson 氏ら⁽¹²⁾はすでに Cd , Zn , Bi など異方性の強い多結晶金属が、数千気圧の静水圧中に置いただけでも、すべり、双晶変形などの微視的塑性変形することを報告している。これに対し成分的な不均質性のため、高静水圧下で塑性的履歴を受けることを報告した論文は見当たらない。しかし本報告で述べた鉄の降伏点に及ぼす高圧処理効果は、材料の不均質性に基づく塑性的履歴を静水圧中で受けたために生じたものと考えられる。すなわちここで使用した純鉄、あるいは電磁軟鋼は、多量の酸化物とか炭化物を含み、これら介在物とマトリックスとの間の圧縮率などの相違が、volume indentation 効果⁽¹³⁾を起し、介在物のまわりに転位を発生することが期待される。転位の発生に関する実験的証明はまだ行なわれていないが、前章で述べた純ニオブの結果、または純鉄と電磁軟鋼における処理効

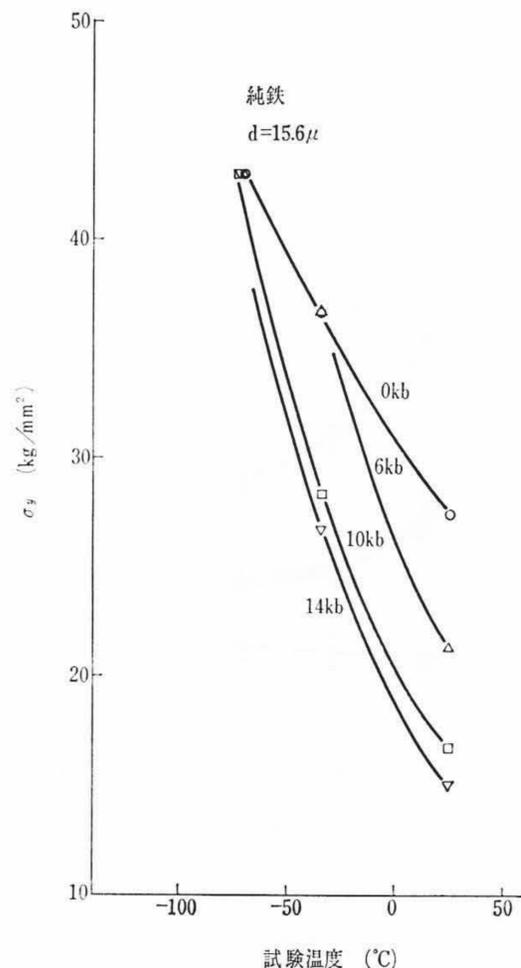


図13 下部降伏点の温度依存性に及ぼす高圧処理の影響

果の相違などは、この推論を裏付けるのに十分なものである。転位の発生に關与する介在物としては、含有する不純物のレベルから考えておもに酸化物であることが考えられる。

鉄の降伏現象が高圧処理により大きく変化すること自体は、この現象が本質的に非常に組織敏感なためであると考えられ、この意味では本報告で述べたことは、体心立方金属に特有なものであると考えてよい。多結晶鉄は、不連続降伏と呼ばれる複雑な降伏を行なうが、この現象に關し、従来は Cottrell 氏⁽⁵⁾の固着理論により転位論的説明が行なわれてきた。しかし、1959年に提出された Johnston-Gilman⁽⁴⁾の理論は、運動する転位が受ける摩擦力だけを考慮しても、降伏点での急激な応力低下を説明できるというもので、従来の固着理論とはまったく別なものである。Hahn 氏⁽¹⁴⁾は Johnston-Gilman 理論を鉄の場合に拡張して理論を組みなおし、その結果、理論は多くの多結晶鉄の降伏に關する実験結果を説明できることを示した。Hahn 氏の理論は、鉄の降伏現象が非常に組織敏感な性質のもので、とくに自由転位密度によって降伏現象がまったく変わってしまうことを述べており、この点では高圧処理による鉄の降伏現象の変化に關する本報告での実験結果を説明できそうである。しかし、本来この理論は鉄単結晶にのみ応用されるべき性質のもので、理論と実験結果との一致は定性的なものである。多結晶鉄は、降伏点の所ではしばしば Lüders 変形と称する不連続変形を行ない、これが上述のような単純な理論で説明できないことは、本実験結果について以下に述べるいくつかの特長からも明らかである。

第一に、高圧処理は上部、下部降伏点を減少し、かつ Lüders 伸びを減少させる点である。Lüders 帯を伴う降伏において、上部降伏点は Lüders 帯の発生に必要な応力、下部降伏点は Lüders 帯の伝播に必要な応力と考えられており、Lüders 帯の伝播速度 V と Lüders 伸び ϵ_L との間には、下式の関係がある⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。

$$\dot{\epsilon}L = \epsilon_L V \dots \dots \dots (2)$$

ここで $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度、 L は試験片のゲージ長さである。引張り条件で決まる $\dot{\epsilon}$ を一定に保てば、 V と ϵ_L とは反比例する。したがって、上部、下部降伏点ならびに Lüders 伸びの減少は、Lüders 帯の

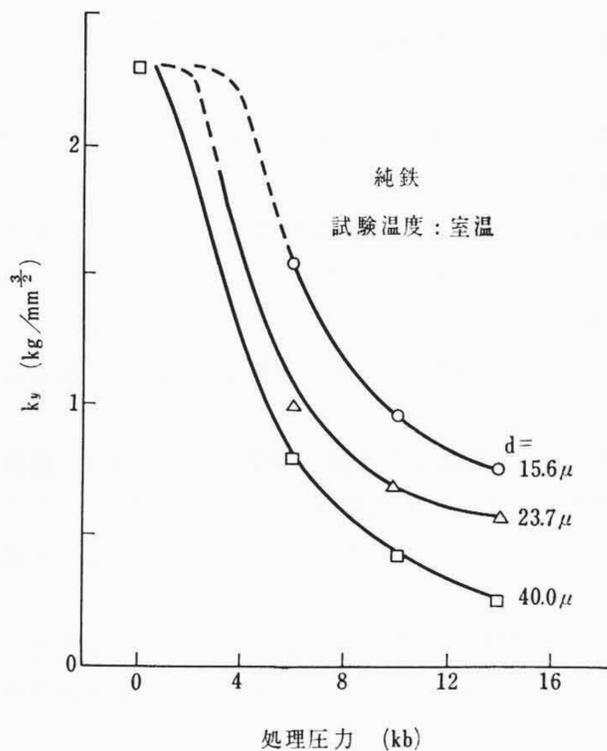


図14 高圧処理による \$k_y\$ の変化

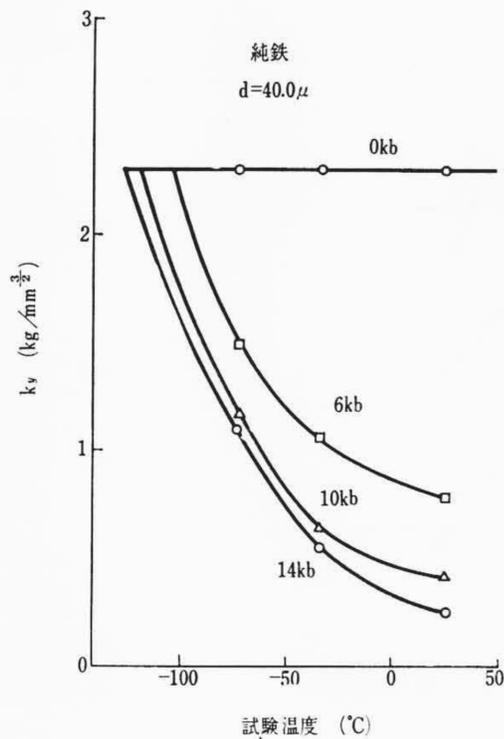


図15 \$k_y\$ の温度依存性

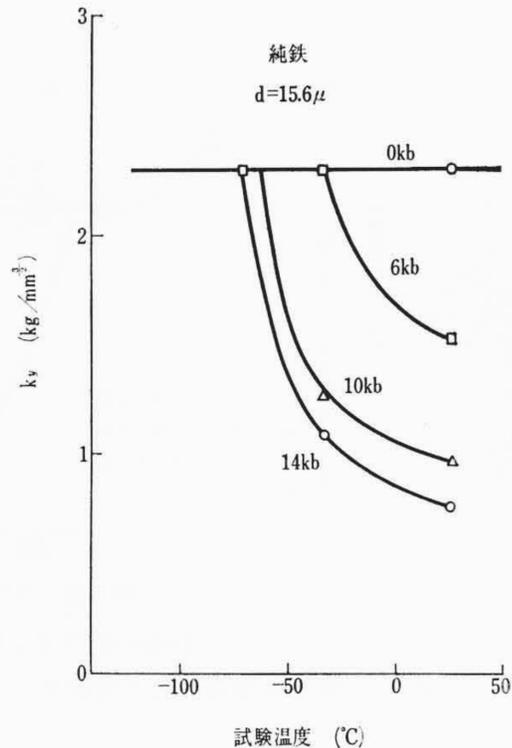


図16 \$k_y\$ の温度依存性

発生と伝播が容易になることを意味している。

第二の特長は、下部降伏点の温度依存性を変えることである。下部降伏点の室温以下の所での急激な温度依存性は、一般には運動する転位が受ける摩擦力、すなわち Petch の式の σ_i に基づくものと信じられている。その転位論的説明は必ずしも一致していないが、鉄に関する多くの実験結果を整理し、検討してみた結論として、Conrad 氏⁽⁶⁾は σ_i を格子の Peierls-Nabarro stress を越えるための応力であるし、その温度依存性は転位が Peierls-Nabarro potential を越えて動くときの、熱的活性化過程により生ずると考えた。Conrad 氏の考えは現在広く受け入れられていることを考え、ここでもこの理論を前提にして考えれば、高圧処理により導入される自由な転位は下部降伏点の温度依存性にほとんど影響を与えないはずであり、高圧処理が温度依存性を変える事実を説明できない。他方 Fisher 氏⁽¹⁷⁾は転位の固着が弱い場合に、Petch の式の中の k_y も鋭い温度依存性をもつことを明らかにしたが、このことは高圧処理による降伏点の変化が k_y の変化によるもので、その結果処理材の k_y が温度依存性をもつようになり、下部降伏点の温度依存性が変化することを示唆している。

第三に試料の結晶粒度は高圧処理効果の大小と密接に関連している。いま、高圧処理効果として観測しているのは、下部降伏点の変化(減少)であるから、Petch の式から、

$$\Delta\sigma_y = \Delta\sigma_i + \Delta k_y \cdot d^{-1/2} \dots\dots\dots (3)$$

したがって、もしも $\Delta\sigma_i$ に比べて $\Delta k_y \cdot d^{-1/2}$ が無視できる場合には、観測される処理効果の大小は直接 $d^{-1/2}$ に依存する。すなわち $\Delta\sigma_y$ を測定したのみでは、結晶粒度の影響を分離できない。いずれにしても粒度の影響が非常に大きいことから、処理効果が k_y の中に導入されていることは明白である。さらに具体的にいえば、測定された $\Delta\sigma_y$ の大きさは 10 kg/mm^2 以上にもおよび、これがすべて $\Delta\sigma_i$ によるものとは考えられない。また $d=500 \mu$ のきわめて粗大な結晶からなる試料の結果は、 σ_i がほとんど処理により影響を受けないことを示している。いわば高圧処理は、不連続な降伏を行なう場合に、これを均質変形に変えるのみで、 $d=500 \mu$ の場合のように、もともと均質変形を行なう試料は処理の影響をまったく受けないと解釈することができる。

以上の議論から、高圧処理により細粒試験片で下部降伏点が大きく減少するのは、Johnston-Gilman 理論から予想されるような摩擦力 σ_i の減少に基づくものではなく、 $k_y d^{-1/2}$ の項の減少、すなわち k_y

の減少によるものであると結論することができる。よって(3)式は $\Delta\sigma_i$ を $\Delta k_y d^{-1/2}$ に対して無視でき、

$$\Delta\sigma_y \approx \Delta k_y d^{-1/2} \dots\dots\dots (4)$$

となる。 k_y の変化(減少)は、この式から、 $\Delta\sigma_y$ を測定することにより直ちに求めることができる。処理材の k_y はしたがって、

$$k_y = k_y^0 + \Delta k_y \dots\dots\dots (5)$$

ここに k_y^0 は高圧処理を施す前の k_y で温度に無関係に約 $2.3 \text{ kg/mm}^{3/2}$ である。

以下処理による k_y の変化を求めてみる。図6~8から Δk_y を求め、(5)式を用いて k_y を求めて、これを処理圧力に対してプロットした。図14はその結果である。 k_y は処理圧10 Kbまでほぼ直線的に減少するが、それ以上の所では飽和する傾向にある。処理材の k_y は試料の結晶粒度が大なるほど小さく、粒度の粗い試料のほうが処理効果はよく導入されることがわかる。次に $d=15.6 \mu, 40.0 \mu$ の試料につき、 k_y と温度との関係をプロットした結果を図15, 16に示す。0 Kbで示される未処理材の k_y は温度に依存しないが、処理材の k_y はある温度範囲で急激な温度依存性を持ち、この温度範囲では k_y は処理圧力が高いほど小さくなっている。高圧処理によって k_y が変化することは、 k_y が本質的に組織敏感であることを示している。また処理材の k_y が室温以下で鋭い温度依存性を示すことは、処理効果の現われ方が試験温度により著しく異なるという温度効果をこれにより説明することができる。すなわち処理材の k_y は低温になると急激に増大し、未処理材の $k_y (=k_y^0)$ に達する。このため低温では処理効果が消失することになる。また、この k_y の鋭い温度依存性は、処理による下部降伏点の温度依存性の変化をも説明してくれる。 k_y に温度依存性がある場合には、

$$\left(\frac{\partial \sigma_y}{\partial T}\right)_{\dot{\epsilon}} = \left(\frac{\partial \sigma_i}{\partial T}\right)_{\dot{\epsilon}} + \left(\frac{\partial k_y}{\partial T}\right)_{\dot{\epsilon}} \cdot d^{-1/2} \dots\dots\dots (6)$$

が成り立ち、温度依存性は $(\partial k_y / \partial T)_{\dot{\epsilon}} \cdot d^{-1/2}$ の分だけ大きくなる。しかもこの中には $d^{-1/2}$ がはいつているので、結晶粒度によっても温度依存性は異なる結果となるが、このことは図12, 13の結果により見事に証明されている。またこの結果は、下部降伏点の温度依存性が主として摩擦力 σ_i の温度依存性により決まるとい一般に認められている理論を否定するものであり、この点に関する限りは k_y にも温度依存性があるとする。Cottrell 氏⁽¹⁸⁾と Fisher 氏⁽¹⁷⁾の考え方を支持している。すなわち高圧処理材の k_y に関する本報告での結果は、焼入れ時効を行なった鉄の k_y に関する Fisher 氏⁽¹⁷⁾の実験結果

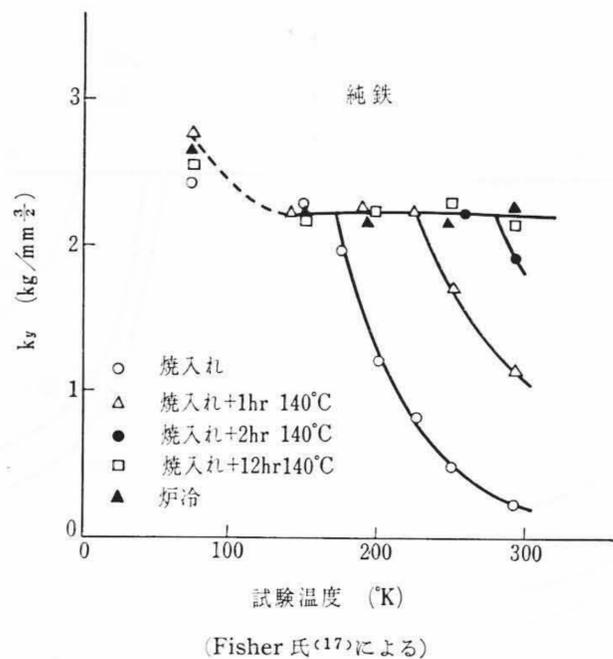


図17 種々の熱処理をした鉄における k_y の温度依存性

と非常に類似している(図17)。焼入れ時効では、溶質原子による転位の固着の強さが時効条件で敏感に変化し、時効を途中で止め固着が弱い場合には、 k_y はある温度範囲で強い温度依存性をもつ。この場合、 k_y の温度依存性は固着力の温度依存性から出てくると考えており、時効が十分進んだ状態で、 k_y が温度に依存せず、一定値を取る場合には、 k_y は転位を新たに作るための力で決められると考えている。

一方高圧処理材の k_y に関する結果がこのような考えで説明できないことは明らかである。なぜならば、試料はあらかじめ十分に時効が完了しており、高圧処理により時効の状態が変わることは考えられないからである。すなわち、 k_y の変化は時効状態の変化に基づくものではなく、自由転位の密度の変化に起因すると思われるべきである。この点は、従来の k_y に関する解釈とはまったく異なるものであり、本報告の重要な結論である。すなわち、ここで筆者らが主張するように、 k_y が自由転位の密度に敏感で、自由な転位を含む試料の k_y が室温以下で温度依存性をもつとすれば、広く一般の材料の間で成り立つ所の強度と結晶粒度の関係式、すなわち Petch の関係式の物理的解釈を改めねばならないであろう。

5. 結 言

純鉄ならびに電磁軟鋼の降伏現象は、6~14 Kk の高圧処理によって著しく変化する。これは成分的な不均質性をもつ材料を、静水圧中に置いたとき、弾性的性質の不均質点 (elastic inhomogeneity) が生じ、その近傍で微視的塑性変形が生ずるためと思われる。降伏現象が変化すること自体は、この現象が非常に組織敏感なためである。本研究で取り上げた材料の場合には、おもに酸化物が弾性的不

均質点となるであろう。

以下降伏現象に及ぼす高圧処理効果を要約すると次のとおりである。

- (1) 高圧処理は上部、下部降伏点を著しく減少させ、Lüders 伸びを減少させる。
- (2) 降伏点の減少は、降伏点と結晶粒度との間で成立する Petch の式 $\sigma_y = \sigma_i + k_y d^{-1/2}$ の中の粒度に依存する項 $k_y d^{-1/2}$ の減少によるもので σ_i はほとんど変化しない。
- (3) Petch の式の中の常数 k_y は非常に組織敏感な量であることが明らかとなった。
- (4) 高圧処理材の k_y は室温以下で鋭い温度依存性をもち、低温になると急激に増大して未処理材の k_y と一致する。この k_y の温度依存性のために、高圧処理効果は低温になると消失する。
- (5) 高圧処理材の下部降伏点を示す温度依存性は、処理圧力、結晶粒度により変わるが、これは処理材の k_y の温度依存性に基づくものである。
- (6) 高圧処理効果の導入は結晶粒度によっても支配され、試料の結晶粒径が小さくなると処理効果ははりにくくなる。

終わりにのぞみ、有益なご討論をいただいた東京工業大学の中村正久教授に深謝するとともに、研究遂行にあたり終始ご支援をいただいた当所第2部前田清治郎部長、小林勝主任研究員に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) N. H. Polakowski: J. Iron Steel Inst. 172, 369 (1952)
- (2) M. M. Hutchison: Phil. Mag, 8, 121 (1963)
- (3) F. P. Bullen, F. Henderson, M. M. Hutchison, and H. L. Wain: Phil. Mag. 9, 285 (1964)
- (4) W. G. Johnston and J. J. Gilman: J. Appl. Phys. 30, 129 (1959)
- (5) A. H. Cottrell: Trans. A. I. M. E. 212, 192 (1958)
- (6) H. Conrad: J. Iron Steel Inst. 198, 364 (1961)
- (7) R. J. Arsenault: Trans. A. I. M. E. 230, 1570 (1964)
- (8) 鈴木秀次: 金属学会セミナー“軟鋼の塑性”(1965) 51
- (9) M. Yajima and M. Ishii: Acta Met. 15, 651 (1967)
- (10) 矢島, 石井: “塑性と加工” 7, 496 (1966)
- (11) W. G. Johnston: J. Appl. Phys. 33, 2716 (1962)
- (12) T. E. Davidson, J. C. Uy, and A. P. Lee: Trans. A. I. M. E. 233, 820 (1965)
- (13) J. Friedel: Dislocations, P. 322, Pergamon Press (1964)
- (14) G. T. Hahn: Acta. Met. 10, 927 (1962)
- (15) J. C. Fisher and H. C. Rogers: Acta Met. 4, 180 (1956)
- (16) J. F. Butler: J. Mech. Phys. Solids, 10, 313 (1962)
- (17) R. M. Fisher: Deformation of Iron, Ph. D. Thesis, Univ. of Cambridge (1962)
- (18) A. H. Cottrell: The Relation bet' the Structure and Mech. Prop. of Metals, vol. 2, 455 (1964)