

銅単結晶表面のじり帯

固体が弾性限以下の変形をうけている様子を考えると、固体の中の歪は場所の連続函数として表現される。弾性力学というものは、基礎となる微分方程式を求めてそれを与えられた境界条件のもとで解けば、その目的を達するわけであろう。もちろん実際に解を見つけるにはいろいろの数学的な困難さがあるから、微小歪といって、高次の項を無視したりしていろいろの簡単化の工夫をしているが、歪の連続性を仮定しているという点にかわりはない。

固体はすべて原子構造をとっていることを考えると、微視的にいって、連続性の仮定はおかしいはずだけれども、実際上歪はそんなに急激な変化をしないので何の差支えもおこらぬようである。

ところが、連続性を考えたはずの弾性力学でもある意味で不連続性を考えざるを得ない場合が起る。例えば、細長い棒を圧縮する場合を考えよう。圧縮する力がだんだん増して行つてある値になるといわゆる“挫屈”を起してしまう。急激に、不連続的に全くちがった歪の状態へと移ってしまうのである。次にこの棒を引張る場合には、圧縮する場合のようなことは起らない。しかしある荷重になると別の種類の不連続性が起る。**塑性変形の開始**がこれである。

塑性変形の始つた試料をしらべてみると、直線状の階段が表面にあらわれている。この階段は、結晶のある定つた結晶面に沿つて局所的なじり変形の起つたことを示している。カットの写真がその一例であつて、これは真空溶解法でつくつた高純度の銅単結晶を変形させた場合の写真である。このように、弾性変形から塑性変形へと連続的にうつつて行くのではなくて、今迄連続的な歪の分布をしていた固体の中に突然局所的変形が起り始める

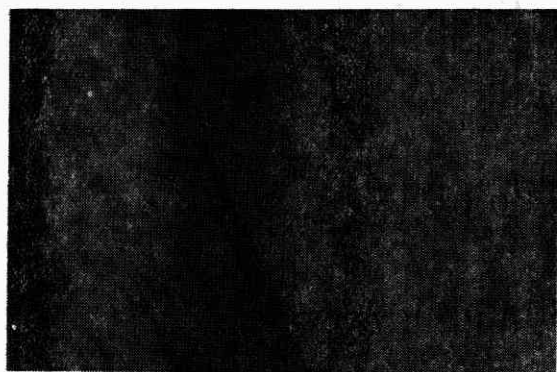
## 塑性変形に起る 不均一性

神 前 潤

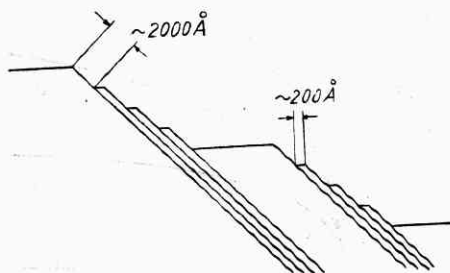
結晶体の塑性変形というものは元来不連続的な性質をもっているが、その不均一性の中にも亦いろいろな不均一性がみられ、しかもこれが実用上問題となる加工硬化とか熱処理による軟化とかに密接に結びついている。

のである。

カットにみられるような直線的な階段部がじり帯とよばれているものであるが、これを電子顕微鏡でしらべて



第1図 銅単結晶表面のじり帯(荒居氏による)



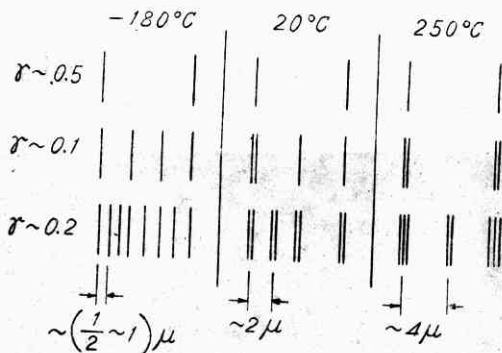
第2図 じり帯の微細構造

じり線の間隔 (2000 Å) と1本のじり線でのじり変位量 (2000 Å) とは常にほぼ一定である。

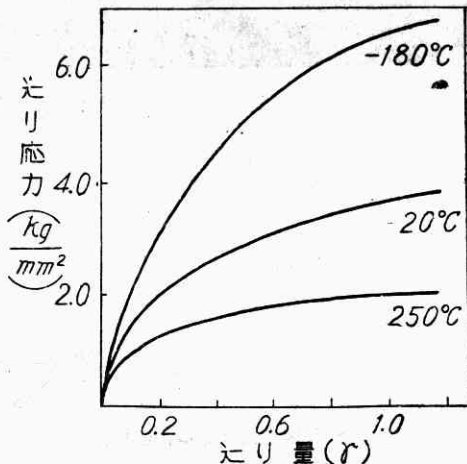
みると、おのおののじり帯は数本のじり線とよばれるような、もつと細かい階段の集合から成り立っていることがわかる。第1図はカットと同じ結晶表面の電子顕微鏡写真であるが、これをもつとわかり易く模型的にあらわしてみると第2図のようなじりが起つていることがわかる。

第2図のようなじり帯の微細構造は、最初アルミニウム単結晶について Bell Telephone 研究所の Heidenreich と Shockley (1947) によつて見出された。Heidenreich は電子顕微鏡の専門家であり、Shockley は金属、イオン結晶、最近ではトランジスターの理論的研究で有名である。このように見事な成果は Bell Telephone 研究所の特色である実験と理論との協力の上に咲いた一輪の花であろう。

弾性変形から塑性変形に移つてじりが始つてから、変形の進むに従つてこのようなじり線の数はどうなる変化をしめすのであろうか。じり線の数に変形の進行と共に増加するのはもちろんであるが、その様子は変形のおこなわれる温度によつて著しく変つて来る。これを模型的に示してみると第3図のようになる。変形温度が高い



第3図 変形の進行に伴うじり線の増加。  
変形温度による依存性を示す ( $\gamma$  はじり歪)



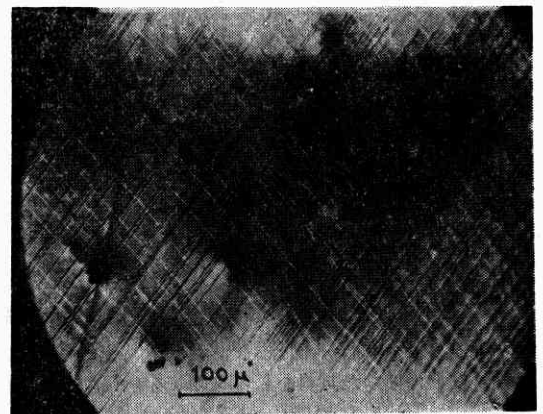
第4図 アルミニウム単結晶のじり応力～じり曲線

程1個のじり帯の中にふくまれるじり線の数はいくつになることがわかる。第3図はアルミニウム単結晶についての観察結果であるが、一方この場合の応力～歪曲線は第4図のようになる。同じ変形量を引き起すための応力は温度が高くなると共に非常に少くなる。つまり変形を起させる温度が高い程歪硬化の程度は大へん少くて済むことがわかる。

変形温度をかえても、結晶学的なじり面とかじり方向とかは全く同じであつて、ただ違うのは第3図のようなじり線の集合の有様だけなのである。又図からわかるように、同じだけのじり変形量を起させる場合にじり線の数はいくつになるかは温度とは無関係に同じである。つまり歪硬化に対する第4図のような著しい変化は、じり帯の数(じり線の数ではなくて)の変化にその原因を帰さなくてはならないことになる。この場合はじり帯の少ない方が歪硬化の度は少いことがいえる。いいかえれば不均一性の大きい方が歪硬化が少いことになる。

塑性変形にみられる不均一性はしかし単なるじり帯の出現だけにはとどまらない。次にそのいろいろについて順に説明してみよう。

何度も述べたように、じり変形は結晶の種類によつて定まつた一定の結晶面の上で、一定の結晶方向へのじりによつて引き起される。銅とかアルミニウムのような面心立方格子では(111)面上で[110]方向に起るのであるが、結晶の対称性から一つの結晶でもいろいろのじりが考えられる。実際にはその方向への応力の成分が一番大きいようなじりが実現されるわけであるが、たまたま2方向への応力成分が同じ値をとるような場合には2重じりが起る。第5図はその例である。同じようにして3重



第5図 銅単結晶の2重じり

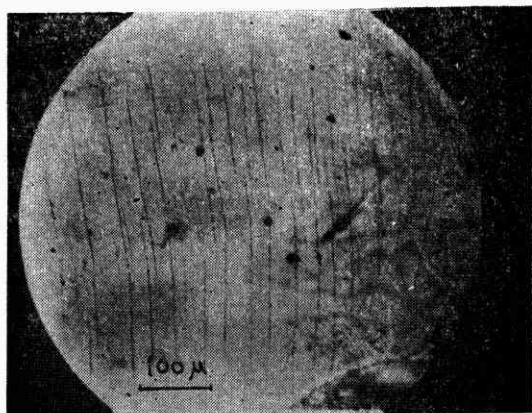
じりとか4重じりとかも起る場合がある。このような場合には異つた方向のじりの間の相互干渉によつて歪硬化を増加させることが見出されている。

2重以上のじりの場合はとも角として、普通のじりではじり帯は平行な直線の集合としてみられるはずであ

る。ところが実際にはここに示した写真にみられるようにジグザグになっているものとか、彎曲しているものとか、平行でなくて交叉しているものとかが到る所にみられる。室温で変形した銅単結晶では、ジグザグのものはあまり顕著ではないが相交つているものは普通にみられる。これを更に倍率をあげて観察すると細かいジグザグ状にり帯であることがわかり、この2つのものは同じ分類に入れられている。この同類をくめて**交叉にり** (Cross Slip) とよんでいる。又彎曲しているものは**変形帯** (Deformation Band) とよばれるものの同類に入る。

にり帯にみられる不均一性の中で今あげた2つのものは特に有名であるので、これに関係のある2,3の問題について述べておこう。交叉にりについて著しいことはその温度依存性である。例えば、 $-180^{\circ}\text{C}$  (液体窒素) で変形させたような場合には交叉にりは殆んどみられない。一方、変形させる温度が高くなると交叉にりはだんだん著しくなり、遂には一見、網目状を呈するような極端な場合さえある。又同じ変形温度では、銅よりもアルミニウムの方が交叉にりの現れる割合が多い。このような事実は次のような考え方で説明できよう。以前に「生産研究」4,90 (1952) で説明したように、にりは結晶転位の運動によつて記述することができる。転位には、刃型とネジ型とがあつた。このうち刃型の方については、にり面がきまつている。つまり移動する方向は一方に限定されている。ネジ型ではこれと反対にどの方向へも運動できる特徴をもっている。ある方向に運動していた転位が方向を変える——交叉にりをそのように考えて——機構としてはネジ型転位の方向転換を考えるとまことに都合がよい。ところがここで注意すべきことが一つある。それは刃型転位もにり面以外の面上を動けないことではないということである。ただしこの場合には空孔 (格子点に原子がないような場所) を必要とするのである。つまり空孔の数さへ充分にあれば、刃型転位の方向転換決して不可能ならずという訳なのである。どうしてここでわざわざ刃型転位の方向転換をもち出したかという、今述べた交叉にりの温度変化を説明するためには、空孔をつかつた説明の方が易しいのである。一般に、空孔の数とか空孔の易動率とかは強い温度依存性をしめし、又その依存性は金属の種類によつて異なるのである。交叉にりの温度及び金属による依存性を満足に説明するためには、このような空孔を媒介とした転位の方向転換を考えた方がうまく行くように考えられる。

温度依存性といえば、先に第3図に関係してにり帯自身の内部構造の温度依存性を述べた。実をいうとにり帯を何故つくるかという問はなかなか難問であつて、今のところ満足な説明を与えた人はいないようである。一つの原因は表面観察から内部機構を問題にするという甚だ

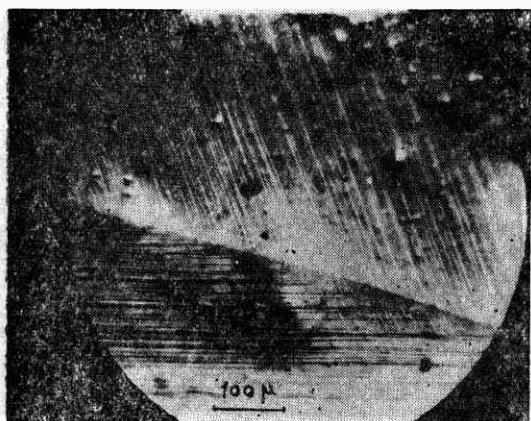


第6図 にり帯の変曲 (結晶粒の相互作用による不均一変形の例) 図の右の方に結晶粒境界によるにり帯の屈曲がみられる。

かんばしくない研究方法が悪いのであろう。しかしどのような説明をするにしても、にりのスタートは結晶の中に比較的一様に分布していて、それが表面に到着してにり線として観察される以前に、にり帯にまで「集合」すると考えなくてはならぬ。そうすれば今、交叉にりについて述べた「にりの方向転換」という機構を使えば、第3図のようなにり帯の温度依存性は説明できる。

変形帯はその形状から同符号の転位が局部的に集つた場所であることがわかる。しかしその原因、つまり転位の移動に対する障害となつているものは一概にはなかなかいえない。例えば第6図のように別の結晶粒の変形の干渉によつてにり帯の彎曲が起ることもある。このように、いわば巨視的スケールでの不均一性が利いて来る場合があつて、原因はそのおのおのに対して考える必要がある。ただ実験的にこのようなにり帯の彎曲が起り始める場合には歪硬化が急に増加することが知られている。転位の相互作用は、静電荷のそれと相似で同種符号の転位の間には斥力が働くから、このような歪硬化の急増は予想に難くはない。変形帯はこのようななかなか得体が知れない癖に大きな役割を歪硬化に対して果しているのだが、これは又軟化及び再結晶に於ても主役的な役廻りを演じているようである。

歪硬化した金属を熱処理によつて軟くする経過は次のようにして進んで行く。最初テンデンバラバラに分布している転位はまず再配置することによつて、数原子距離の大きさをもつ小さな結晶粒の境界を形づくる。このような小さい粒の間の併合がだんだんに起つて、大きい粒が育ち遂に再結晶粒として顕微鏡乃至X線的に確認されるわけなのである。このような過程が起る場合、その先頭をきつてリーダーとしこ常に一番大きい粒のできている場所は他ならぬ「変形帯」の部分なのである。常に一番大きい粒子ができていているというのは、いわば形態学的にいつてそうなので、実際にはこの部分が触媒的作用を



第7図 結晶粒界附近のりり帯

して遂に結晶全体に軟化を引き起すようである。変形帯はX線的に見られる格子の彎曲、つまり「アステリズム」の原因となつていゝと考えられるが、その生因の複雑な割にはよく研究されているのは、一つにはこのような軟化過程での重要性の故であらう。

写真でみるとすぐわかるようにりり帯とりり帯との開の間隔は決して一定ではない。りり帯同志が密に集合している所がちよいちよいみられる。このようなりり帯のかたまりを **Slip Cluster** とよんでいる。この場合にも、歪硬化を大いに増すことは変形帯の場合と同様である。

最後に多結晶体における不均一変形の一例とし結晶粒界附近のりり帯の一例をあげておく(第7図)。よく知られているように、多結晶金属は単結晶にくらべて歪硬化

の程度が大層著しい。多結晶の場合、一番ものをいうのは結晶粒境界に於けるりりの連続の問題である。転位がとなりの結晶へぬけて行くためには、交叉りりについて上で述べたような転位の方転換が必要である。又結晶粒界においてせきとめられた転位の集積の様相は変形帯の場合と相似である。各結晶粒の変形の干渉は、内部応力をますます複雑化するから2重りりの起る機会もそれだけ多くなるし、これによつて内部にも変形帯が生ずるであらう。このように事情は複雑にはなるけれども、その一つ一つの要素は単結晶においてより簡単な形ですでにあらわれたものなのである。

又逆にこのような多結晶における転位の運動の様相から単結晶内部での歪硬化の機構を推測することもできる。前にも述べたようにりり帯の不規則様相が歪硬化と密接な関係をもつことはわかつてゐるが、その成因については不明な点が多い。しかしとも角、歪硬化を説明するためには転位の運動を妨げる「障害物」の存在を考えなくてはならない。この障害物は丁度多結晶の場合の結晶粒界に相当するものであるが、単結晶について考えられるものとしては次のようなものであらう。先ず結晶粒界と同じ性質をもつモザイクブロックの境界、その他、不純物原子、格子空孔とか格子間原子(之は熱平衡状態でも存在するし、変形の途中で生れることも多い)などがこれである。塑性変形の機構において理論的にも実験的にも現在中心問題となつてゐるのは、転位とこれらの障害物との相互作用、特にその動力学的の問題なのである。(1953.1.20)

## 生産技術研究所報告 予告

(第3巻第3号)

安藤良夫著「生研試作アルミ艇の構造について」

“On the Structure of a Tentatively-built All-Aluminium Boat”

近年船体構造用にアルミ合金が使用されるようになった。船舶では強度と耐蝕性が同時に要求されるので Al-Mg 合金が用いられ、JIS 規格では Mg の量に従つて第一種、第二種が規程されている。第二種は強度と耐蝕性の点では前者にまさるが加工困難といわれている。この材料を用いて長さ 5m のヨット兼舷外機艇が試作され、今回舷外機艇としての工事が完了した。本報告は主として試作艇の強度、構造、工作について述べたもので、艇は予想した通り極めて軽く造ることができた。

## 次号予告 (4月号)

## 研究解説

- 衝撃波管による高速気流の研究……………玉木 章夫  
大島 耕一  
進水時を利用した船体応力分布の測定……………安藤 良夫  
微粒子表面測定……………河添邦太郎  
工学的に見た土の種類……………三木五三郎  
ジーゼル機関出力の温度習性……………平尾 収

## 速報

- 水面波の反射に関する計算……………服部 剛  
再び可熔合金について……………古川 浩  
塩原 武治  
紙麵製造の機械化に関する研究……………渡辺綱市郎  
中村 亦夫  
友田 宜孝  
精製澱粉及精製水飴中の窒素化合物  
に関する研究……………吉弘 芳郎  
中村 亦夫  
友田 宜孝

抄録、生研ニュース、その他