

東京大学 工学部 境界研  
東京大学 大学院

小原 嗣朗  
松下 明行

1. 目的

銅の多結晶体を圧延すると、試片の側面で板面に対して一定の傾きをもつ帯状の変形模様を観察されることは古くから知られていたが<sup>1)2)</sup>、このような変形模様が圧延変形によつて形成された塑性ひずみの集中した部分であることが明らかにされてせん断帯と名づけられ、研究が行われるようになったのは比較的最近のことである。したがつて、せん断帯に関する研究の歴史は比較的新しい<sup>3)</sup>。

せん断帯は、多くの面心立方金属において圧延の際に形成されることが認められている。一般に圧延によつて、変形ひずみが結晶内で帯状の部分に集中して、外見的にmacro的な単純せん断変形を生じている場合をせん断帯とよんでいるのであるが、せん断帯の発生は結晶の初期方位によつて難易がある。銅の場合、圧延の最終安定方位に近い(112) [111]方位の単結晶はせん断帯を生じ易い<sup>4)</sup>。再結晶においては、変形帯のような不均一変形組織が核発生のsiteになることが、これまでよく知られているが、せん断帯がどのような挙動を示すかということについては、あまり知られていない。

この研究は、再結晶におけるせん断帯の挙動を明らかにすることを目的として、銅の(112) [111]方位の単結晶を用いて圧延によつてせん断帯を発生させ、これを再結晶させた場合に生じるせん断帯内部およびその近傍の結晶の方位を測定したものである。

2. 実験方法

OFHC銅を用いて Bridgeman 法によつて(211) [111]方位の単結晶を作り、40X25X10 mmの板を切出して、2段圧延機によつて50%圧延した。これより20X13X5mmの板を切出し試験片とした。試験片は、ひずみを除くために切断部を電解研摩で除去した後 silicon oil中で 250-300°Cで焼なましを行つた。再結晶組織は、70v%リン酸溶液で電解研摩後10v%リン酸溶液で電解腐食して観察し、再結晶粒の方位は、電子チャネリングパターン(ECP)あるいはKossel法によつて決定した。

3. 実験結果

圧延した(112) [111]単結晶の側面で観察されたせん断帯の例とそのmacro的な形状を、図1に示す。せん断帯の発生は、全体の圧延率と1pass当りの圧下率によつて左右される。図の例は1mm/passで圧延したもので、このように板の表面から裏面まで貫通したせん断帯が発生しているが、条件によつては一方の面から板厚の中間までしかせん断帯が発生しない場合がある。圧延率が高くなると、種々な傾きのせん断帯が発生するが、初期に発生するせん断帯は板面に対して37-40°の傾きのものが多い。

図2は、1mm/passで50%圧延した試験片を250°Cx9hの焼なましを行つた場合、試験片に発生した再結晶粒を示す。このようにせん断帯の内部は優先的に再結晶が起こるが、せん断帯の間の領域には再結晶粒はほとんど発生しない。図3は、この段階でせん断帯内部に発生した再結晶粒の方位を、ECPおよびKossel法で決定したものである。図は、(111)極点図で、圧延板の側面を投影面にして(以後TD面とよぶ)。この例では、~10μm以上の再結晶粒はすべて取上げて方位決定を行つたが、全体としてrandomでなくてTD方向の周りにring状の分布をしてい

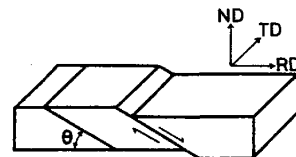
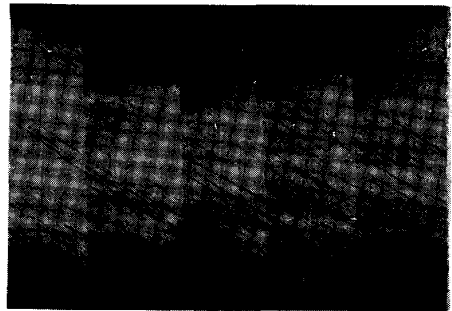


図 1 圧延によつて生じたせん断帯

る。これを大体以た方位に分類すると、互に双晶関係にある2つのグループに分けることができる。図4は、その中のA,B,C成分の方位関係を示す。図に示されているように、A,Bは1つの<111>軸を共有して~60°の回転関係にあり、CはBと1つの<111>軸を共有して互に~60°の回転関係にある。この結果は多数の結晶粒の方位決定から導かれたものであるが、実際に双晶関係にあることは相互に隣り合っていることを示す図5から明らかである。図で、A-Bの境界が直線的であることおよび、B-Cの境界がやはり直線的であるがA-B境界と大きい角度で交わることは、相互に双晶関係にあることを明らかに示すものである。図6に、すべての成分をまとめて示す。これらの成分は、いずれもせん断帯内部に発生したものであるが、せん断帯の間のマトリックスとは<111>軸を共有していない。図7に、上述のA,B成分とマトリックスの間方位関係を示す。A-B成分間の共通<111>軸とマトリックスの<111>軸との間には約17°の差がある。このことが、せん断帯内部に発生した再結晶粒がマトリックス内に成長してゆかない原因であると思われる。

次に、せん断帯の間のマトリックスの再結晶について述べる。圧下率1mm/passで50%圧延した(112) [111]単結晶を、1) 240° C X 4h, 2) 300° C X 30min, 3) 300° C X 30minと3段階の焼なましを行った。

この各過程に対応する組織写真および再結晶率を図8,9に示す。各図の番号は、それぞれ焼なましの各段階を示す。再結晶率は、第3段階でマトリックスの再結晶が進行するようになってから急激に増加する。このことは、全体の再結晶に対してせん断帯の寄与はあまり大きくないということを表している。マトリックスに発生した再結晶粒は、いずれも大きく成長しているが、これらの結晶粒とマトリックスの方位関係を図10に示す。この場合は、マトリックスと共通<111>軸をもち、±30°の回転関係にあるものが大部分を占め、最大成長速度の方位関係

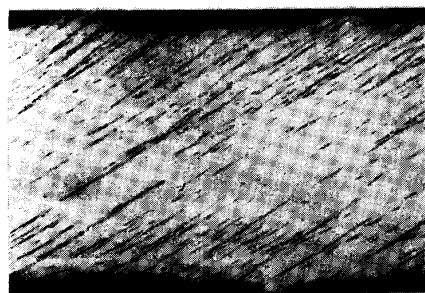


図2 再結晶したせん断帯

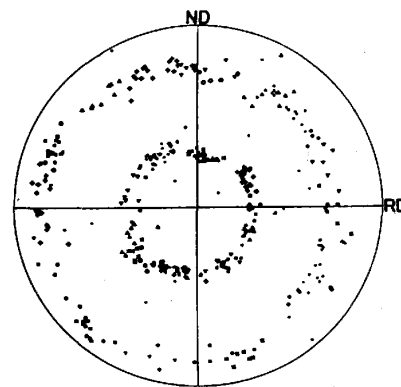


図3 せん断帯内の再結晶粒の方位

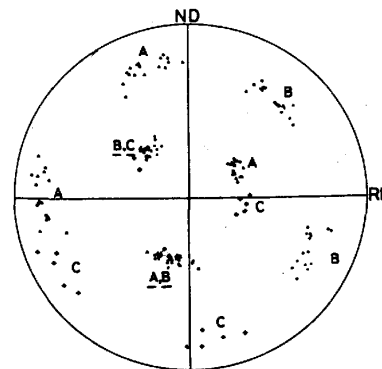


図4 図3の中の3成分の方位

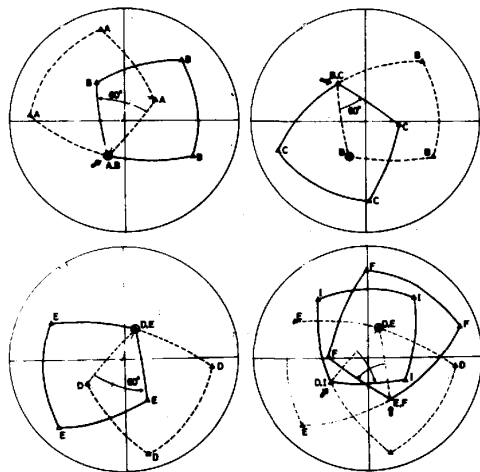


図6 せん断帯内の再結晶粒の方位関係



図5 再結晶したせん断帯の拡大写真

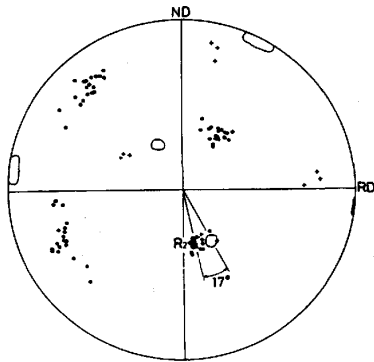
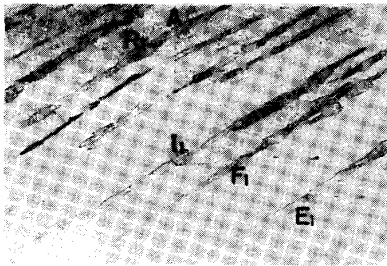
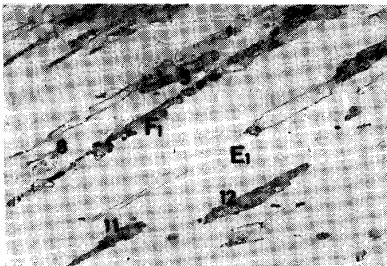


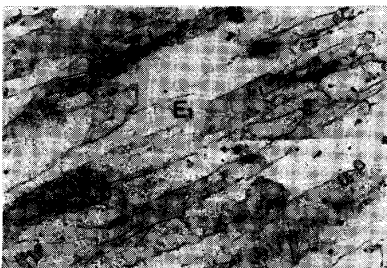
図7 せん断帯内部の再結晶粒とマトリックスの方位関係



(1) 250°C×4h



(2) 300°C×30min



(3) 300°C×30min

図8 再結晶の進行過程

をもっている。

4. 考察

以上の実験結果から明らかなように、せん断帯内部とマトリックスは、それぞれ別な再結晶挙動を示す。せん断帯内部に発生して成長した再結晶粒の間には共通な  $\langle 111 \rangle$  軸が存在するが、これとマトリックスの  $\langle 111 \rangle$  軸の間には約  $17^\circ$  の差がある。このように、共通  $\langle 111 \rangle$  軸をもたないこと、およびその差がかなり大きいということが、せん断帯内部の再結晶粒がマトリックス内へ成長しない原因であろう。

せん断帯内部の再結晶については、せん断帯内部がマトリックスとは別な集合組織をもつと考えることによつて説明できる。せん断帯内部が、せん断変形に対する安定方位の  $(111) [211]$  集合組織をもち、またせん断帯が板面に対して  $39^\circ$  の傾きをもつて形成されると仮定すると、この集合組織の  $\langle 111 \rangle$  軸はマトリックスの  $\langle 111 \rangle$  軸から  $17^\circ$  ずれた位置にあり、図7の極点の集積の位置と一致する(図11)。したがつて、せん断帯内部で  $\langle 111 \rangle$  軸回転関係の再結晶粒の優先成長が起こつたと考えられる。

せん断帯は、外見的にはmacro的な単純せん断変形が生じているように見えるが、せん断面とすべり面は一致しているのではないから、実際に単純せん断変形が生じているのではない。同じ結晶内で異つたすべり系による変形が生じると、その境界に変形帯が形成され、それが再結晶の核発生のsiteとなることがよく知られている<sup>6)</sup>。せん断帯は、多重すべりによつて変形した部分の境界に形成されるのであるから、マトリックスとの境界が変形帯の場合とは異なるのであらうと考えられる。このことは、図12に示す実験例からも明らかである。図

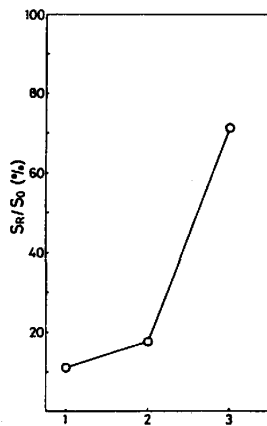


図9 再結晶の進行に伴う再結晶率の変化

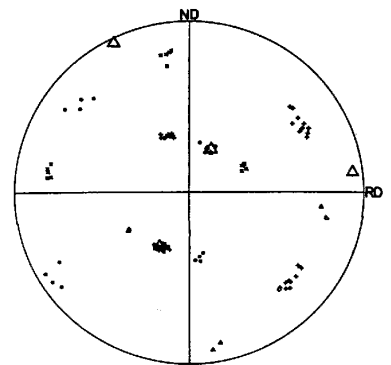


図10 マトリックスに発生した再結晶粒の方位

12 (1) の写真の中の数字は、せん断帯に沿うせん断量を示すが、これを再結晶させると (2) のように、せん断量の多いせん断帯の再結晶粒は、せん断帯内で成長するだけである。一方、せん断量の少ないせん断帯の再結晶粒は、マトリックス中へ成長している。このことは、発達したせん断帯ほど、せん断帯の再結晶がマトリックスの再結晶に対する寄与が少ないことを示している。このように、せん断帯がマトリックスと異つた再結晶挙動を示すと、せん断帯が多数発生するほどマトリックスが分断されるので、マトリックスの集合組織形成を妨げることになる。これにより、せん断帯が発達すると、銅の立方体集合組織の形成が妨げられるという実験結果<sup>7)</sup>を説明できる。

せん断帯内部に発生した再結晶粒は、互に双晶関係にある。せん断帯の電顕写真から、せん断帯内部に双晶の lamellae が存在することが認められている<sup>4)</sup>が、しかし、銅の場合は、再結晶の結晶粒成長の過程で容易に焼鈍双晶を形成するので、これが核成生の段階で生じたのか、あるいはその後の結晶粒成長の段階で生じた結果であるのかということは、まだ明らかではない。

### 5. 結 論

銅の再結晶におけるせん断帯の挙動を研究した結果、次の結論が得られた。

- 1) せん断帯内部は、他の部分より速く再結晶が進行する。しかし、せん断帯内部に発生した再結晶粒がマトリックス内へ成長することは少ない。
- 2) せん断帯内部に発生した再結晶粒の方位は、大部分互に双晶関係にある。しかし、これらの結晶粒は、マトリックスと  $\langle 111 \rangle$  軸を共有する方位関係にはない。
- 3) マトリックス内で大きく成長する再結晶粒は、マトリックスと  $\langle 111 \rangle$  軸を共有する方位関係をもつものである。
- 4) 以上の結果から、銅の再結晶集合組織形成に対するせん断帯の寄与は少ないと考えられる。

### 文 献

- 1) F. Adcock : J. Inst. Metals, 27 (1927) , 73.
- 2) M. Cook, T. L. Richards : J. Inst. Metals, 69 (1943) , 351.
- 3) 野田 : 金属学会会報, 19 (1980) , 638.
- 4) K. Morii, Y. Nakayama : Proceedings of ICOTOM VI, (1981) , 327.
- 5) P. J. Rejenet, H. P. Stüwe : Z. Metallkunde, 54 (1963) , 273.
- 6) A. Kreisler, D. Doherty : Metal Science, 12 (1978) , 5551.
- 7) A.A. Ridha, W. B. Hutchinson : Acta Met. , 30 (1982) , 1929.

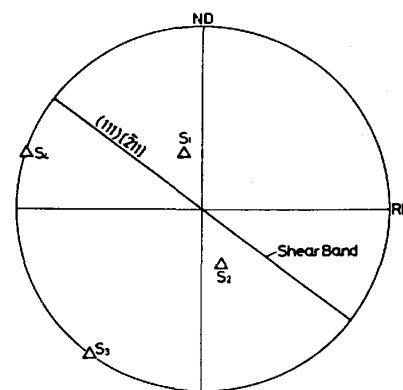
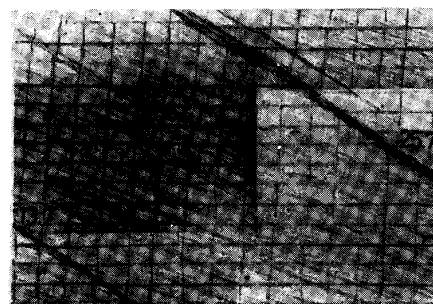
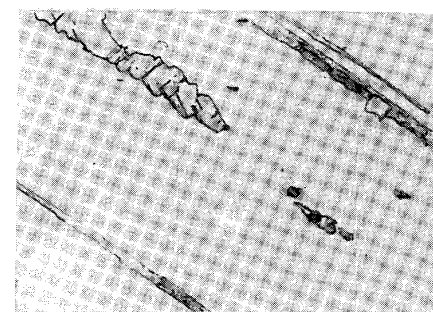


図 11 せん断帯の集合組織の方位



(1)



(2)

図 12 せん断帯のせん断量 (1) と再結晶の様相 (2)