

金属結晶粒界転位のバーガースベクトル

On the Burgers Vector of Grain Boundary Dislocations of Metals

石 田 洋 一*

Yoichi ISHIDA

透過電顕法で金属薄膜中の結晶粒界を観察すると粒界転位像がみられることをこれまでしばしば報告した^{1)~6)}。これら粒界転位のうち軽度の冷間変形後見出されるものは主に格子転位が粒界上にとつただけのものであって、したがってそのバーガースベクトルは格子転位のそれと同じであることがわかっている¹⁾。粒界転位像はしかし焼鈍状態の結晶粒界にもしばしば見出される^{2)~5)}。これら粒界転位がどんなバーガースベクトルをもっているか測定することは粒界構造を決定するうえにも興味ある問題である。これに関して Bollmann⁶⁾ はゼロ格子の理論から符合粒界⁶⁾ 上の転位のバーガースベクトルは格子転位のそれとちがうであろうと指摘している。筆者らはこの種の粒界転位像のみられる粒界が符合粒界に非常に近いものであることを電子回折によって見出したので⁶⁾、符合粒界上の転位のバーガースベクトルについて同様な見地から考察をおこなった。その結果、符合粒界上に階段を考えることにより数種のバーガースベクトルをもつ粒界転位が可能であること、また粒界に至った格子転位はこれらの転位に分解できることがわかったので 1 例をあげて説明する。

Fig. 1 は符合粒界関係の 1 例である。これは Brandon 表示法⁷⁾で $\Sigma 9$ 粒界といい $[110]$ 軸に 38.9° 回転した方位関係をもつものである。図では紙面を (110) にして表

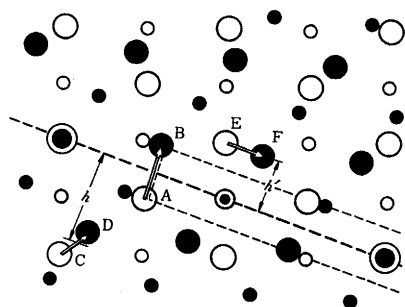


Fig. 1 Atomic arrangements in a $\Sigma 9$ coincidence site lattice grain boundary $(1\bar{1}4)$. (110) plane is parallel to the paper. The broken line is the trace of the grain boundary

示してある。符合粒界面として考えられるものはいくつかあるが、1 例として、紙面に垂直で破線で示したもの $(1\bar{1}4)$ を選ぶことにする。粒界がこの面のときは、粒界面上の原子の位置は、すべて結晶粒 1 と 2 の格子点に合致

するので粒界エネルギーは大きい節約されていると考えられる。図で黒丸は結晶粒 1 の原子の位置、大黒丸は紙面上にあり、小黒丸は紙面より 1 原子面上 (または下) にあることを示す。同様に白丸は結晶粒 2 の原子の位置で大白丸は紙面上、小白丸は紙面より 1 原子面上 (または下) にあるものとする。この図では結晶粒 1 と 2 の格子を重ねあわせて書いてあるが、粒界をいったん決めれば、それを境にして片方は黒丸のみ、他方は白丸のみが実際に存在していることになる。体心立方晶の場合、格子は (110) 面に関し ABAB 型の重なりをしているのでこれですべての原子の位置を表示したことになる。

図の AB 両原子に着目して点線でかこまれた部分の原子を抜き去って残りをふたたびくっつけるという操作を考えてみよう。 \vec{AB} は粒界面 $(1\bar{1}4)$ に垂直であるから、ここに $\vec{AB} = a/9 [1\bar{1}4]$ なるバーガースベクトルをもつ刃状転位ができたことになる。AB 両原子がここで一致するのであるから、あたらしく生じた粒界も符合粒界であり、結局ままと同じひとつづきの粒界 $(1\bar{1}4)$ に刃状転位が 1 個はいったことになる。(Fig. 2 (a)) 同様な操作を図の CD 両原子についてしてやると、こんどは \vec{CD}

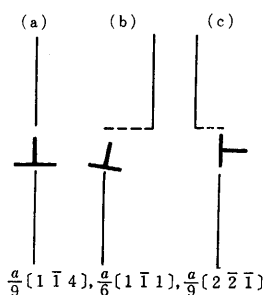


Fig. 2 Steps in a $\Sigma 9$ coincidence site lattice grain boundary $(1\bar{1}4)$ due to the presence of boundary dislocations.

は粒界面に垂直ではないので刃状転位ではあってもそのバーガースベクトルは $\vec{CD} = a/6 [1\bar{1}1]$ で Fig. 2 (b) のように粒界に対して傾いたものになる。そればかりではない。CD 両原子の中点がもとの粒界面上にないため、 $h=0.95b$ 程度の階段が符合粒界に生じてしまう。もし階段ができないものとするると符合粒界はここで切れてしまい、ここから下は原子の符合状態のわるい、したがって粒界エネルギーの高い粒界になってしまうので、階段をつくることによっておこる粒界エネルギーの増加分を勘定にいれてもそれでもなお階段をつくる符合粒界につづけた方がエネルギー的に節約される。このように粒界に階段を認めさえすれば \vec{CD} のように格子転位より小さいバーガースベクトルをもつ転位を符合

* 東京大学生産技術研究所第 4 部

粒界に入れることが可能である。上述の例は刃状転位に関するものだがラセン転位についても同じことがいえる。たとえば \vec{EF} なるバーガースベクトルをもつラセン転位を粒界に入れる場合、 $h'=0.54b$ なる高さの階段を粒界に入れてやりさえすればやはり粒界を符合粒界のままにしておくことができる。粒界階段の存在は同時に粒界面の巨視的方向にある程度の自由度を与えることになる。

粒界転位のバーガースベクトルとしてどのようなものが許されるかを格子点として表示したのが Fig. 3 である。これは Fig. 1 の紙面(110)上のすべての原子について上述したような原子対をさがしてつくったものである。したがって(110)面上のバーガースベクトルだけしか集めてないが [110] 軸方向の成分をもつものについても同様な格子点が存在し結局 3 次元の格子をかたちづいている。これは実は Bollmann⁶⁾ の DSC 格子と同等のものである。ただし、Bollmann は粒界面上においてゼロ格子のチョウ模様を保存するような変位としてこの格子を定義したが原子対は粒界面上に限定する必要はなく、3 次元で考えればもっと小さいバーガースベクトルをもつ粒界転位の存在が可能になる。またゼロ格子のチョウ模様を考えることはここでは必ずしも必要でなく保存されるものは結晶粒 1 および 2 の原子の配列模様であるとするれば十分である。

Fig. 3 において大白丸点、大黒丸点はそれぞれ結晶粒 1 および 2 の格子転位のバーガースベクトルに相当す

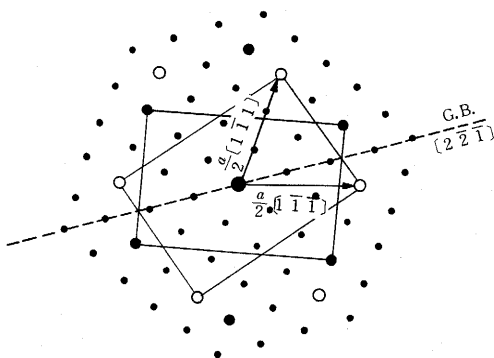


Fig. 3 Burgers vectors of the boundary dislocations lying in (110) plane. The broken line is the trace of the grain boundary.

る。これで明らかなように格子転位のバーガースベクトルは符合粒界においては粒界転位のバーガースベクトルがつくる格子の重格子である。したがって変形に伴って粒界に至った転位は粒界拡散のおこるような温度では部分転位に分解し、この図に示すような格子ベクトルをバーガースベクトルにもつ粒界転位になってしまうと考えられる。転位のエネルギーがおよそバーガースベクトルの

2 乗に比例することから結晶粒 1 の格子転位 $a/2[1\bar{1}1]$ 、および $a/2[1\bar{1}\bar{1}]$ はそれぞれ下に示すように $a/6[1\bar{1}\bar{1}]$ 、 $a/9[2\bar{2}\bar{1}]$ 、 $a/18[1\bar{1}\bar{5}]$ という 3 種の部分転位に分解することが予想される。

$$\frac{a}{2}[1\bar{1}\bar{1}] = \frac{a}{6}[1\bar{1}\bar{1}] + \frac{a}{6}[1\bar{1}\bar{1}] + \frac{a}{6}[1\bar{1}\bar{1}]$$

$$\frac{a}{2}[1\bar{1}\bar{1}] = \frac{a}{9}[2\bar{2}\bar{1}] + \frac{a}{9}[2\bar{2}\bar{1}] + \frac{a}{18}[1\bar{1}\bar{5}]$$

[110] 方向の成分をもつ転位もやはり同様な分解反応をおこすと考えられる。このように符合粒界では両側の結晶粒からはいってきた格子転位は共通の数種類の転位に分解するためこれらの部分転位のうち異符号のもの同志が消し合うことも多いと考えられる。

軽い冷間変形によって粒界にはいった転位の電顕像が焼鈍によって消失したのは²⁾このような分解反応によって生じた粒界転位が異符号同志合体して消滅したり、すでに規則的に配列していたこれら粒界転位の列に割りこむことによってその長範囲のひずみ場を消し合ったために電顕像としてあらわれなくなったものと考えられる。

これら粒界転位のうちにはバーガースベクトルが粒界に平行なもの $b=a/9[2\bar{2}\bar{1}]$ がある。Crussard と Friedel⁸⁾ はこのような部分転位が優先的に粒界にそってすべて増殖し粒界すべりをおこすと考えたが、Fig. 2(c) で明らかなようにこの転位は通常、粒界の階段上の上のっているので粒界拡散が盛んで粒界移動が起こる温度でないと動くことはできず、したがってバーガースベクトルが粒界に平行でない他の粒界転位に比べて特に早く動くとは思われない。階段の高さがゼロという特別な場合であっても粒界面は一般にすべり面のような稠密面ではないのであるから、転位がすべることに対する抵抗は大きいと思われる。クリープ粒界すべりは粒界転位の非保存運動と粒界移動とを必要条件とする現象であると考えてよいであろう。(1968 年 9 月 10 日受理)

文 献

- 1) Y. Ishida and M. Henderson-Brown: Acta Met. V 15, 857, (1967).
- 2) Y. Ishida, T. Hasegawa and F. Nagata: Proceedings of International Conference on the Strength of Metals and Alloys. the Japan Institute of Metals, Tokyo, 504, (1967)
- 3) 石田, 長谷川, 永田: 生産研究, 19 卷 11 号 339, (1967)
- 4) 石田, 長谷川, 永田: 生産研究, 20 卷 3 号 140, (1968)
- 5) 石田, 長谷川: 生産研究この巻 (1968)
- 6) W. Bollmann: Phil. Mag. V 16, 363 and 383, (1967).
- 7) D. G. Brandon et al.: Acta Met. V 12, 813, (1964).
- 8) C. Crussard and J. Friedel: "Creep and Fracture of Metals at Elevated Temperatures" H. M. S. O. England, 243, (1956).