

討16 BCC金属の異方塑性の理論(I)

東京大学理学部

鈴木秀次

体心立方金属および合金単結晶の降伏強さの異方性は田岡¹⁾によって最初に見出されて以来多くの研究者の興味をひき、今日では体心立方金属の塑性の中心問題の一つとなっている。この異方性はBCC金属の大きなパイエルス力と結びつけられ、異なった面上に拡張したらせん転位の運動という立場から論じられてきた²⁾。このように立場からの異方塑性の理論は(II)で橋口教授が講演された予定である。

一方著者³⁾は体心立方結晶中のらせん転位は拡張していかなくとも、結晶の対称性と原子間力の一般的な性質から、大きなパイエルス力をもつことを示した。また近年の数多くの転位のまわりの原子配列の数値計算は $\frac{a}{2}[111]$ らせん転位は3枚の $\{110\}$ 面上に分解しているが、 $\frac{a}{6}[111]$ 転位は転位の中心からちょうど1/原子距離の位置にあることを示している。この転位芯の構造は原子間ポテンシャルには依存せず、結晶の対称性がらぎまるとことを示唆している。著者⁴⁾はまたBCC合金の硬化はキンクの移動に対する抵抗力によってまるといふ考えで固溶体硬化を詳細に論じ竹内⁵⁾の実験結果とよく一致することを示した。

以上のように著者の立場に立つとBCC金属の異方塑性をこれまでの議論とは異なった立場から説明しなくてはならない。この場合、純金属と合金では異なった機構を考へなければならぬ。

1. 純金属結晶の降伏強さの異方性

純金属結晶の降伏直近の応力-歪曲線の形は結晶方向によって著しく異なる場合が多い。このためふつうの降伏応力は加工硬化をかなり含んでおり、その異方性は加工硬化の異方性をかなり含んでいる式それがある。しかし、転位のパイエルス力そのものにも実験で見出されている通りの異方性が存在する

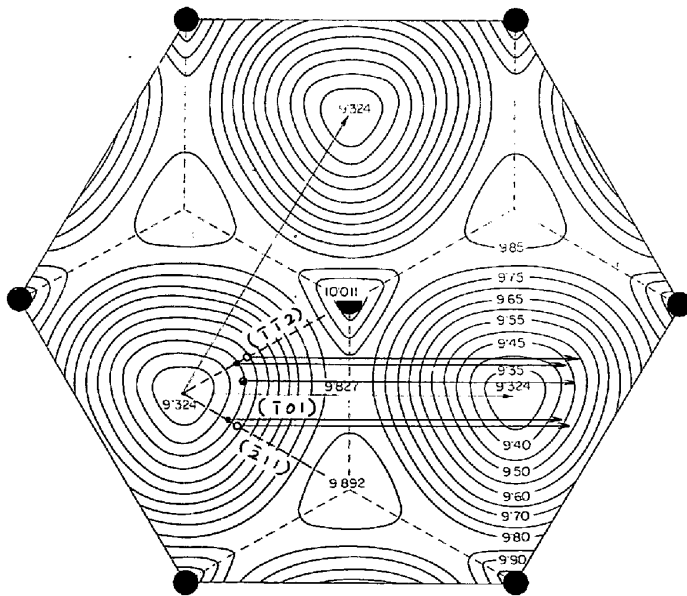


図1

るのである。図1は最も簡単な原子間ポテンシャルを考えたときのパイエルスポテンシャルを示す。図の黒丸は最密原子列の位置であって、紙面はこれらの原子列 $[111]$ に垂直である。

いま最大剪断応力 $[111]$ 方向への面が $(\bar{1}\bar{1}2)$, $(\bar{1}01)$, (211) であるような外力が加わっているとすると、転位は等ポテンシャル線が最大剪断応力面と垂直であるような方向に移動する。 $(\bar{1}\bar{1}2)$, (211) が最大のときにはこれらの面にそって動き、 $(\bar{1}01)$ が最大せん断応力面のときには図のように多少ずれる。熱運動で越えなければならぬポテンシャルの山を比較すると、

$(\bar{1}01)$, $(\bar{1}\bar{1}2)$, (211) 面が最大せん断応力面である頃に大きくなる。もっと比較し易いように、 $(\bar{1}01)$ 面への

外力下でらせん転位が熱運動するさいの径路。黒丸は外力の絶対値が大きい場合、白丸は外力の $(\bar{1}01)[111]$ 成分が大きい場合の始点を示す。

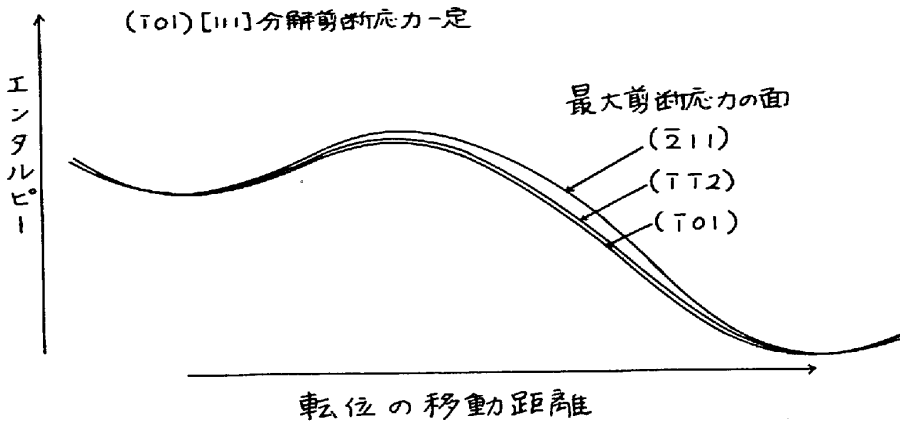


図 2

分解せん断応力が等しい場合のエンタルピーの変化を図 2 に示す。このときに山の高さは同じ順番になっている。

このように反双晶方向への転位の移動に対する抵抗力が非常に大きくなることは、パイエルス力の異方性によって定性的に理解できる。しかし定量的に議論するためには図 1 のようなポテンシ

ヤルの地図を精密に計算しなければならぬ。この地図は原子間ポテンシャルの形に依存するものであり、原子間ポテンシャルと金属の場合に明快に定義できないことを考えたと限界を感じざるを得ない。他方、パイエルス力の計算の精度が向上するにつれて、金属およびイオン結晶では計算値が実験値より遙かに大きくなること判ってきた。著者はこの点に關して、これまでの計算は古典力学に基づいて行われていることが問題であり、量子効果がパイエルス力の計算に大きな影響を及ぼすことを指摘した⁶⁾。しかし、パイエルス力の量子力学的な計算は極めて困難であって、まだ見通しもつかない状態にある。したがって純金属の降伏量の異方性についてはたんに定性的な議論しかできないと考えている。

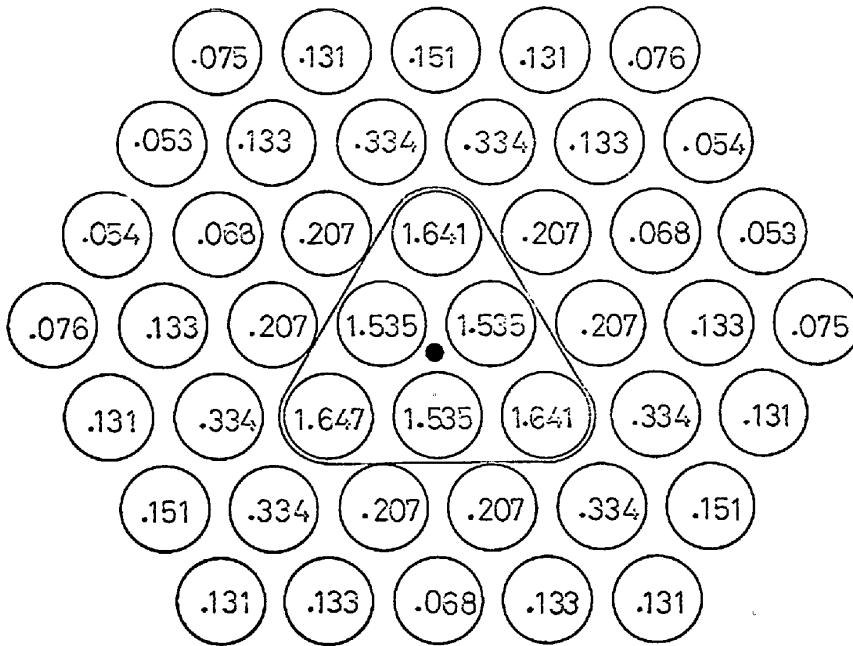


図 3

2. 合金単結晶の降伏強さの異方性

BCC 合金単結晶の降伏強さは低温、低温の場合を除いて、パイエルス力自体とは無関係に定まっている。しかし、もちろん、パイエルス力が大きいというこのために転位と溶質原子の相互作用の機構が特別のものとなるのである。すなわち、キンクが移動すると、転位芯の原子が入れ替わるので、転位芯に含まれる溶質原子の数が変動する。転位芯にある溶質原子は転位と強く相互作用するから、転位のエネルギーは転位芯の溶質原子数に比例した揺動を及ぼす。キンクはこのエネルギーの揺動を乗り越えて動かなければならぬので、硬化が起るのである。

エネルギー変動は統計的に起こるものであろうが、キンクの移動距離が長くなるとより大きなエネルギー障壁に出会う確率をます。そこでキンクがエネルギー障壁で動けなければ、別の場所で新たにキンク対を形成することになるが、うせん転位上のキンク対の形成される面は一つに限られる。何回が経て、独立にキンク対が作られると、反対符号のキンクが出会った所でジヨグを作る可能性がある。実際の転位の運動は上記の過程を多数回繰返すために、平均としては一定の間隔のスーパージヨグをもち、スーパージヨグの抵抗力と、スーパージヨグの向にキンク対を作つてキンクをジヨグの位置まで移動させるのに必要力の和が極小になるようにスーパージヨグの間隔がきまる。したがってジヨグの出来易さも異ろ性の原因とは考えられる。

ところでBCC合金固溶体の降伏強さは近似的に低温を除いて

$$\tau \propto \frac{E^2 c}{T}$$

で与えられる。この理論式は多くの実験結果とよく一致する。ここにEは転位芯に入ることによる転位と溶質原子の相互作用エネルギーの変化、cは合金濃度、Tは温度である。Eは外力零の場合の転位と溶質原子の相互作用エネルギー(オ3図)から求められる。すなわち、曲線で囲まれた6本の原子列はほとんど一定の大きな値をもっており、この外では無視できるほど小さい。このためEは固の単位で1/4程度の値をもつてよい。

いまこの結晶に外力が加わると、転位の位置は外力の方向に僅が移動し、周囲の歪場も変化す。このため溶質原子と転位の相互作用エネルギーも変化す。この変化の様子は転位の変位方向によって異なるのは当然である。この計算は数値計算に頼らなければならず、まだ計算してないが、講演の時までに行い予定である。したがってこの効果についてはまだ何もいえないが、定性的には次のことは明らかである。合金単結晶の降伏強さの異ろ性は降伏強さの高いものほど大きい。この傾向はこれまでの実験に共通している。

文 献

- (1) T. Taoka, S. Takeuchi, and E. Furubayashi: *J. Phys. Soc. Japan*, **19**(1964), 701.
- (2) 例えは V. Vitek, and F. Kroupa: *Phys. Stat. Sol.* **18**(1966), 703.
- (3) H. Suzuki: *Dislocation Dynamics* edited by Rozenfeld et al (McGraw-Hill, New York, 1968) 679.
- (4) H. Suzuki: *Nachrichten der Akademie der Wissenschaften in Göttingen II. Mathematisch-Physikalische Klasse*, 1971.
- (5) S. Takeuchi, H. Yoshida and T. Taoka: *Proc. Intern. Conf. Strength of Metals and Alloys, Tokyo, 1967*, *Trans. Japan Inst. Metals* **9**(1968) Suppl. 715; S. Takeuchi: *J. Phys. Soc. Japan*, **27**(1969), 929.
- (6) H. Suzuki: *Fundamental Aspects of Dislocation Theory*, edited by Simmons et al (National Bureau of Standards, 1970) vol. 1. 253.