

すみの  
角 野 こう  
浩 じ  
二

授 与 学 位	理 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 37 年 9 月 19 日
学 位 記 番 号	理 第 5 号
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項
学 位 論 文 題 目	結 晶 転 位 の 挙 動 に 及 ぼ す 規 則 化 及 び 表 面 の 効 果
論 文 審 査 委 員	東 北 大 学 教 授 山 本 美 喜 雄 東 北 大 学 教 授 日 比 忠 俊 東 北 大 学 教 授 上 田 正 康

## 論文内容要旨

結晶の塑性的性質は其中に於ける転位の易動度によつて決定される。ところで、転位の易動度は一般に比較的低温に於ても粘性を示す結晶、即ち金属、合金、イオン結晶等、に於いてはそれと結晶中に存在する個々の溶質原子の配列及び分布状態、ならびに各種の格子欠陥との間の相互作用によつて決められる。この中、転位と溶質原子との相互作用は塑性的性質の物質による相異を規定する上に決定的役割を演じ、これに対して、転位と格子欠陥との相互作用は結晶自体がその変形の途上に於いて示すさまざまな塑性特性に対して重大な役割を果す。前者の相互作用に注目して、構成原子間の相互作用が強くて規則格子を形成する固溶体合金結晶中に於いて転位が原子配列と如何なる相互作用をするか、そして、それに伴つて転位の易動度が如何に変化するかについての考察を行なつたものが本学位論文の第1部をなし、これに対して後者の相互作用に焦点を絞つて結晶表面領域に於ける転位同志の相互作用の特性について考察し、進んでこれまで屢々実験的に報告されて来た結晶表面領域の優先変形に対する一つの新しい解釈を提示したものが第2部をなす。

なお、第1部はSci. Rep. RITU, A10(1958) No.4に、また第2部はJ. Phys. Soc. Japan 17(1962) No.3に印刷発表された。

### 第1部 固溶体合金結晶に於ける転位と原子規則配列との相互作用

#### 1.1 緒論

結晶転位はその近傍に於いて起る各種の事象と相互作用を行ない、そして平衡状態に於いては両者が安定な相対配置をとる。従つて、かかる状態にある結晶に応力を加えて転位を運動させる、即ち塑性変形を起させる際には、転位を安定な状態からより高いエネルギー状態にもたらしねばならないので、この様な相互作用が存在しない場合に結晶中で転位を動かすに必要な応力よりも大きな応力が必要となる。この効果は該事象による転位の固着作用と呼ばれ、そして結晶の硬化機構の最も重要なものの一つである。

一般に固溶体合金が相転移を行なうさいには、多くの場合、その原子配列の変化に応じた体積変化を示す。この体積変化と転位の応力場との間には当然弾性的な相互作用が期待される。規則-不規則変態の場合にはこの相互作用エネルギーのために転位近傍に於ける安定な原子配列は転位が存在しない場合のそれと異なり、そしてそれによつて規則格子合金に特有な転位の固着作用即ち硬化現象が起ると期待される。

本第1部に於いてはCsCl型規則格子合金に於ける転位の周りの安定な原子配列について考察して、その安定な原子配置から転位を解放するに要する応力を求め、また、一般に規則格子に於て起る転位の運動がその迂回面を横切つて存在する安定な異種原子対を不安定な同種原子対に変えるために起る硬化についても考察し、そしてこれら2つの硬化の大きさを比較した。

#### 1.2 転位と原子の規則配列との相互作用及びそれによる転位固着作用

まず、転位のまわりに於ける原子配列の規則-不規則に関する問題を、普通のBethe近似による取扱いに転位の応力場と規則化に伴う体積変化との相互作用エネルギー項を入れて解く、一般に応力が作用する場合のこの問題の取り扱いが岩田によつて与えられているが、それに従つて転位の応力場に於ける規則度の値を系の自由エネルギーが極小であるとの条件から求める。

各最近接原子対の方向に対し短範囲規則度 $\sigma_k$ を定義した場合、その転位の応力場に於ける値の応力場が存在しない場合の値からのずれを $\sigma'_k$  k方向余弦を $(\alpha_{kx} \alpha_{ky} \alpha_{kz})$ として

$$\Gamma_{ij}^* = \sum_k \sigma'_k \alpha_{ki} \alpha_{kj} \quad (i, j = x, y, z)$$

なるテンソルを定義するとき、転位と原子の規則配列との相互作用エネルギーEは次式で与えられる。

$$E = -R \int \sum_{ij} P_{ij} \Gamma_{ij}^* dv$$

但し、ここにRは規則化に伴うk方向の伸縮率に対するk方向を向く原子対の寄与と $\sigma_k$ とを結びつける常数であり、また、 $P_{ij}$ は転位の応力成分である。

一方、転位に対する固着力 $\tau$ は転位線の方向をZ軸に、またその運動方向をx軸にとると

$$-(R/b) \frac{\partial}{\partial x'} \left\{ \iint \sum_{ij} P_{ij} (x-x', y) \Gamma_{ij}^*(x, y) dx dy \right\}$$

の $x'$ に関する最大値で与えられる。但し、bは転位のバーガース・ベクトルである。

刃状転位及びらせん転位について、転位線の単位長当りの相互作用エネルギーE、及び $E_s$ 、ならびに固着力 $\tau_{00}$ 及び $\tau_{0s}$ を計算した結果は次のようである。

$$E_s = - \left( R^2 G^2 b^2 / 2 \pi (1-\nu)^2 kTN \right) \left\{ (4/27)(47+20\nu+48\nu^2) \phi + (128/9)(1+\nu)^2 \Psi \right\} \ln(R_0/r_0),$$

$$E_s = - (0.189 R^2 G^2 b^2 \phi / kTN) \ln(R_0/r_0),$$

$$\tau_{00} = \left[ R^2 G^2 / 2 \pi (1-\nu)^2 kTN \right] \left\{ [(47+20\nu+48\nu^2)/3] \phi + 32(1+\nu)^2 \Psi \right\},$$

$$\tau_{0s} = 16 R^2 G^2 \phi / 81 \pi kTN$$

但し、Gは剛性率、 $\nu$ はポアソン比、kはBoltzmann 常数、Tは温度、NはAvogadro 数、 $\ln(R_0/r_0) \simeq 16$ 、そして $\phi$ 及び $\Psi$ は応力場が存在しない時の規則度及び合金濃度の函数である。 $E_s$ 及び $\tau_{00}$ の値は低温から規則-不規則変態の臨界温度 $T_c$ に近づくにつれて大きくなり、そして $T_c$ に於て最大値を示して飛躍的に減少する。一方、 $E$ 、ならびに $\tau_{0s}$ の値は $E_s$ 及び $\tau_{00}$ のそれより小さく、 $T_c$ 以上で約10%、 $T_c$ 直下では1%程度にすぎない。

以上求めた転位固着力 $\tau$ の値は各温度に於いて平衡な転位のまわりの原子配置(これを平衡雰囲気と称する)をそのまま0°Kにもつて来た場合に転位を動かすために加えるべき応力である。0°K以上の温度に於ては転位は熱運動の援けを借りて $\tau$ 以下の外部応力で解放される。そこで鈴木の方法に従つて各温度に於て平衡雰囲気から転位を解放するのに必要な応力 $\tau(T)$ を求めた。 $\beta$ -黄銅について計算した $\tau_{00}$ 及び $\tau_{0s}$ (T)の値はT。近傍の温度に於て充分観測にかかる程度の大きさである。

### 1.3 短範囲規則配列による硬化

以上述べた効果の他に規則格子中の転位の運動に対して重大な抵抗として働くものに、迂り面を横切つて存在する原子対の種類が変化することに起因する硬化効果がある。CsCl型規則格子についてかかる効果による抵抗力 $\tau^*$ を長範囲規則度S及び短範囲規則度 $\sigma$ の函数として求めた。その結果は次のようである。

$$\tau^* = (Z/2b) \sigma (1+S^2) (V_{AA} + V_{BB} - 2V_{AB}),$$

此処にZは迂り面単位面積当りの原子数、そして $(V_{AA} + V_{BB} - 2V_{AB})/2$ は規則化エネルギー

ギーである。この式の成立する温度領域に於て $\beta$ -黄銅について計算される $\tau^*$ の値は先に求めた $\tau_{00}$ 及び $\tau_c(T)$ の $T_c$ に於けるピーク値と同程度であるが、その温度依存性に於て異なる。

#### 1.4 本考察に対する実験的支持

本考察によつて明らかにされた重要な事実は刃状転位と原子規則配列との相互作用が規則-不規則変態点 $T_c$ の近傍に於て鋭いピークとそれに続く飛躍的減少を示すことであり、そして規則格子合金の臨界剪断応力乃至は変形応力も一般に同様な挙動を示すことが期待される。かかる機械的性質の挙動は $\text{Cu}_3\text{Au}$ 合金、 $\beta$ -黄銅及び $\text{F}_{03}\text{Al}$ 合金等について実験的に観察されて報告されており、それら論文の著者等によつてその測定結果が本考察によつてよく説明されることが指摘されている。

#### 1.5 第1部の要約

- (1) 規則格子合金中における原子の規則配列が転位の応力場によつて如何なる影響を受けるかについて考察を行ない、それらの間の相互作用ならびにその機械的性質に及ぼす効果について計算を行なつた。
- (2) また、短範囲規則配列が存在する状態に於て転位の運動によつて安定原子対が不安定原子対に変化する効果についても考察し、特にそれらが合金の機械的強度に及ぼす影響について計算を行なつた。
- (3) 規則格子合金の機械的強度の値は規則-不規則変態の臨界温度 $T_c$ に於てピークとそれに続く飛躍的減少を示す。
- (4) この結果は $T_c$ の近傍に於ける規則格子の機械的性質の挙動に関する実験事実をよく説明する。

## 第2部 結晶の塑性変形に於ける表面領域に存在する転位源の容易作動性

### 2.1. 緒 論

結晶に外部応力が作用して塑性変形が起きる場合、それがまず結晶の表面から始つて次第に内部に向つて進行すること、及び変形後に於ても表面領域が内部領域に比してより塑性変形が進んだ状態にあることを示す実験事実が数多く報告されている。このような結晶表面領域の優先塑性変形は、転位論的には、そこに於ける転位源が内部領域に於けるそれよりも活動し易いことを意味する。この表面領域に於ける転位源の容易作動性については既に若干の転位論的解明が提案されているが、しかし、それらのあるものはその後見出された新しい実験事実と矛盾して効力を失ひ、また残るものも不完全である。本研究は新しい観点から結晶の塑性変形に於いて活動する転位分布について考察しその結果の上に立つて表面領域に存在する転位源の容易作動性と優先変形に対して満足すべき説明を与えたものである。本研究に於て特に注意を払つた点は、従来の解釈に於て全く無視されていた重大な事実、即ち、少なくともマクロに観察される結晶表面領域の優先変形のためにはその領域に於ける転位源が内部のそれに比して充分な数の転位をより容易にしかも充分大きな距離に亘つて送り出すこと、を考慮した点である。

### 2.2 結晶の変形中に於ける転位源の活動のための条件

転位の運動を継続させるに必要な応力としての変形応力は、多くの結晶に於ては、転位の運動に対して障害として働く内部応力の大きさに等しい。この内部応力の性質について考察し、更に変形前から結晶内に存在する転位の分布状態及び活動している転位源から発生した運動転位ループ群の配置を考慮すると、塑性変形中に活動している転位源は一般に変形中にそれから発生する転位ループ群による押応力と外部応力との共同作用によつて運動転位を通過させ得るような内部応力領域がその回り面上にあるような転位源であることが判る。この活動転位源の条件から結晶の変形応力は回り面上の運動転位に対する抵抗応力が最大である位置と運動転位ループ群からの最大の逆応力を

受ける活動転位源の位置に於て内部応力に等しいことが導びかれる。

### 2.3 表面近傍にある転位源の容易作動性

結晶表面の近傍に存在する転位源から発生する転位ループはその一部分が発生後直ちに、または間もなく、表面に到達して半円形状をとり、またそれ自身のイメージの作用下にあるという特徴をもつ、本考察に於ては転位間相互作用に主役を果す応力成分が表面で零になるようにイメージを選んで問題を扱う。従つて、本取扱いの結果は問題にする効果の最大値を与えることになる。

結晶表面近傍に於ける転位ループの転位源に及ぼす逆応力は Peach 及び Koehler の基本式を用いて計算することが出来る。前述の活動転位源の条件によれば、変形応力の大きさは活動している転位源に対してそれから発生した転位ループ群が及ぼす逆応力と密接に結びついているので、変形中に実現する2つの転位配置模型について逆応力の値を計算し、その結果を基にして結晶の表面及び内部の変形容易度の相違を議論した。本研究に於て考えた2つの模型とは転位源から発生した転位ループが等間隔に配置する模型と、それらが障害に停められて堆積する模型である。前者は結晶の変形の初期段階に於て、また、後者は比較的変形の進んだ状態に於て成立すると考えられる。これら転位配置模型に於て塑性変形が表面から出発すること、ならびに、仮に表面領域に於ける有効応力の値が内部領域に於けるそれよりも小さい場合でもなお、変形は表面領域に於て優先することが示された。

### 2.4 本解釈の利点

本考察はこれまで報告された表面優先変形に関する数多くの実験事実を無理なく説明し得ると同時に、また、結晶表面に於て観察される迂り線の高さが、長さが一定であるにもかかわらず、一定でないことを示す実験事実をも容易に説明し得る。

本解釈が従来のものに対して特に有利な点を以下に列挙する、

- 1) 転位源の種類に対しては何ら限定を行なつておらず、応力下で転位増殖作用を行ない得るあらゆる種類の転位源に対して適用出来る。このことは特に最近直接観察法によつて報告されている転位増殖中心に関するデータと矛盾しない。
- 2) 充分多数の転位が長距離運動している状態を扱つているので、マクロに観察される表面優先変形現象の説明のための必要且つ充分な条件を満たしている。
- 3) 活動している転位源に働く転位ループによる逆応力に注目するので、それらが如何なる配置をとつても、即ち如何なる加工硬化理論の基礎の上に立つても、現象を説明し得る。

### 2.5 第2部の要約

- 1) 塑性変形中に於ける結晶の内部応力の性質を考察して転位源が活動するための条件を求め、それから変形応力と転位源に及ぼすそれから発生した転位ループ群からの逆応力との関係を明らかにした。
- 2) この関係を基礎にして、表面領域に於ける転位源から発生した転位ループは半円形状をなし、そしてそれら自身のイメージの作用の下にあるために、結晶の表面領域に於ける転位源が内部に於けるそれよりもはるかに容易に多くの転位ループを長距離に亘つて送り出すことが出来ることを示し、表面優先変形現象を説明した。
- 3) この考えによれば、従来提唱された如何なる考えよりも結晶の表面優先変形現象を満足に説明し得る。

## 論 文 審 査 要 旨

主論文は結晶の塑性変形の特性を決定する転位の挙動に対する固溶体合金内の原子の規則配列の効果並びに結晶表面の効果についての理論的研究であつて、「固溶体合金結晶に於ける転位と原子規則配列との相互作用」(第1部)と「結晶の塑性変形に於ける表面領域に存在する転位源の容易作動性」(第2部)の2部より成る。第1部は Science Reports of the Research Institutes of Tohoku University に、そして第2部は Journal of the Physical Society of Japan に共に自著論文として掲載されたものである。

第1部では、一般に固溶体合金が規則-不規則変態を行う際に示す体積変化と転位の応力場とが弾性的な相互作用をするために転位の周りの原子配列は転位が存在しない場合とは異なることを指摘し、そしてその相違の程度とその温度依存性を Cscl 規則格子の場合について Bethe 近似を用いて計算した。従つて、規則化状態にある合金の結晶が塑性変形する際には特有の硬化現象を示すことになるが、計算の結果によればその機械的強度は規則-不規則変態の臨界温度に於てピークとそれに続く不連続な低下を表わすことになる。この理論的な期待は実際に於て本論文の発表後  $\beta$  黄銅及び Fe<sub>3</sub>Al について実験的にたしかめられた。なお、第1部に於ては上記の硬化現象の他に一般に規則状態にある合金結晶の中を転位が運動すると安定原子対が不安定原子対に変換するために起る所謂 Short-range order hardening についても最近接原子対模型を用いて計算を行つている。

第2部は、これ迄屢々実験的に観察されている結晶の表面領域に於ける優先変形現象の原因について理論的考察を行つたものである。まず、この現象に関してこれ迄に提案されている2, 3の解釈が何れも実験事実と矛盾することを指摘した後、一般に結晶が塑性変形する際に実現される転位配置及び転位の運動に対する障碍として働く内部応力場の性質を検討して転位源が活動するための条件を明らかにし、そしてこの条件を基にして、結晶の変形応力と活動転位源に働くそれから発生した転位ループ群からの逆応力との関係を求めた。次いで、この関係を基礎にして、結晶の表面領域に於ける転位源から発生した転位ループは半円形状を成し、かつそれら自身のイメージの作用の下にあるために、それらが転位源に及ぼす逆応力の値は結晶内部にある転位源の場合よりも小さく、従つて、表面領域にある転位源は内部にあるそれよりもはるかに容易に多数の転位ループを長距離に亘つて送り出すことが出来、斯様にして結晶の表面優先変形の現象が説明され、しかもこの考えによればこの現象に関してこれ迄に報告されているすべての実験事実が矛盾なく説明されることを示した。

また、参考論文3篇の中第1の論文は Al-Ag 合金に於けるゾーン形成及び析出現象による機械的性質の変化を測定して、その結果を転位論的に解釈したものであり、第2の論文は  $\alpha$ -F<sub>2</sub> 及び Al の単結晶について表面領域に於ける優先変形を実証したものであり、そして第3の論文は Cu の薄膜結晶の塑性を決定してその結果に対して転位論的解釈を与えると共にその研究の結果を基にして面心立方結晶に於ける加工硬化機構に関して新しい提唱を行つたものである。この中、最初の2つの論文は夫々日本金属学会誌及び Journal of the Physical Society of Japan に印刷発表され、また、第3の論文は日本金属学会誌に印刷中である。

以上述べた角野浩二の業績は何れも独創的であつて、結晶塑性及び格子欠陥の分野に於て高く評価されるべき学問的価値をもつ、よつて、角野浩二の提出した論文は理学博士の学位論文として合格と認める。