

bcc 金属における転位の応力場, 相互作用力 およびエネルギーの異方性

本橋 嘉信*, 大竹 周一**

(昭和52年9月8日受理)

Anisotropy of Stress Fields, Interaction Forces and Energy of Dislocations in bcc Metals

YOSHINOBU MOTOHASHI and SYUICHI OHTAKE

abstract:—The anisotropic properties of dislocations in many bcc metals are evaluated in terms of an anisotropic elasticity theory. It becomes evident that the zero-stress contours in the stress fields, τ_{xy} , for $\{112\} \langle 111 \rangle$ and $\{123\} \langle 111 \rangle$ type edge dislocations incline toward counter-clockwise sense about the z axis for metals with $A > 1$, where A is the Zener's anisotropy factor, whereas for metals with $A < 1$, the inclinations of the zero-stress contours about the z axis are toward clockwise sense as compared with the isotropic estimate. The f_x - x curve, where f_x is the interaction force between parallel edge dislocations with parallel Burgers vector $a/2 \langle 111 \rangle$ in planes $\{112\}$ and x is the distance measured along the slip direction, shows distinct anisotropy, therefore the maximum attraction and repulsion in the interaction forces have different values whether slip direction of one dislocation is positive or negative, and whether slip plane of the dislocation is $y > 0$ or $y < 0$ against the another dislocation.

Similar results are obtained for the interaction force of dislocations in planes $\{123\}$. Coefficients in the Energy Factor expression, $K(\theta) = U \sum_{n=0}^9 \alpha_{2n} \cos 2n\theta$, for $\{110\} \langle 100 \rangle$ and $\{110\} \langle 110 \rangle$ slip systems are determined.

1. 緒 言

実在の金属結晶は少なからず異方性を有する。従って転位の性質も等方理論より得られる結果と非等方理論を用いて計算された結果に大きな差を生じる場合が少なくない。^{1), 2)} bcc 金属は W を除いて異方性が強い^{3) ~ 12)}ため、その転位の弾性的性質が非等方弾性論を用いて調べられているが、^{3) ~ 12)}解析的に計算できるのは転位線、バーガースベクトル(以後 B.v. と記す)が対称性のよい結晶軸に存在する場合であり、多くの転位に関しては数値計算によらね

^{13) ~ 20)}ばならず、現在までに計算されていない bcc 金属、転位系も多い。著者らは、Eshelby らの式を用いて、²¹⁾いかなる結晶中の転位でもその弾性的性質を数値計算により解析できるプログラムを作成し、^{22) ~ 24)}菱面体結晶、^{25), 26)}bcc 結晶に²⁷⁾応用した。

本報では単元素よりなるほとんど全ての bcc 金属および Fe-Si 合金、 β -brass について、その転位の弾性的性質の異方性のうち、転位の応力場、 τ_{xy} 、転位間の相互作用力、 $\{110\} \langle 100 \rangle$ および $\{110\} \langle 110 \rangle$ 系転位の弾性エネルギーの方位依存性を調べた結果について報告する。

* 茨城大学工学部機械工学科 (日立市中成沢町)

** 東京理科大学理学部 (東京都新宿区神楽坂)

2. 結果および考察

2.1 { p q r } < 111 > 型刃状転位の応力場, τ_{xy} .

Table 1 に計算の対象とした *bcc* 各結晶の弾性定数, C_{ij} , 格子定数, *a*, Zener の異方性因子, $A (=2C_{44} / (C_{11} - C_{12}))$ を示す. *bcc* 金属の { p q r } < 111 > 型転位の応力場に対して, 従来 { 110 } < 111 > 系については $\alpha - \text{Fe}$ ^{27)~32)}, { 112 } < 111 > 系については $\alpha - \text{Fe}$ ^{34),35)}, W, Nb, Li, { 123 } < 111 > 系については $\alpha - \text{Fe}$ ³⁶⁾,²⁵⁾ などが調べられている.

ここではほとんど全ての *bcc* 金属について, 重要な二り転位である { 110 } < 111 >, { 112 } < 111 > および { 123 } < 111 > 系の刃状転位のまわりの応力場 τ_{xy} の異方性を調べた結果について述べる. 応力場は次式で与えられる.²¹⁾

$$\tau_{xy} = -\frac{b}{2\pi} \sum_{l=1}^3 \left[\frac{L_{xy(l)}(x+P_{1(l)}y) - M_{xy(l)}P_{2(l)}y}{(x+P_{1(l)}y)^2 + P_{2(l)}^2 y^2} \right], \quad (1)$$

ここで $L_{xy(l)} = B_{2xy(l)}D_{1(l)} + B_{1xy(l)}D_{2(l)}$,
 $M_{xy(l)} = B_{1xy(l)}D_{1(l)} - B_{2xy(l)}D_{2(l)}$,
 $B_{ij(l)} = B_{1ij(l)} + i B_{2ij(l)}$,
 $D_l = D_{1(l)} + i D_{2(l)}$,
 $P_l = P_{1(l)} + i P_{2(l)}$

であり考えている転位座標系に対する弾性定数のみに関係する定数である.

Fig.1 (a)~(c)に Fe-3.1 Si, Nb, Mo 各結晶の { 123 } < 111 > 系刃状転位の応力場 τ_{xy} を示す. 転位線は *z* 軸に沿っており B.v.は *x* 軸方向, また二り面は *xz* 面である. Fe-3.1 Si で, 応力零の等圧線は $x = 0.9404 y$, $x = -0.0689 y$ および $x = -1.0514 y$ の直線である. また Nb の場合, 零等圧線は $x = 1.0677 y$, $x = +0.0237 y$ および $x = -0.9086 y$ の直線である. 等方ではこれらは $x = 0 y$ および $x = \pm y$ の直線となる. 従って $A > 1$ である Fe-3.1 Si の零等圧線は等方の場合と比較して *z* 軸のまわりに反時計方向に偏っており, $A < 1$ である Nb, Mo では時計方向に偏っている. このような等方からの偏りは { 112 } < 111 > 系の τ_{xy} に対しても同様である. またこれら以外の *bcc* 金属も同様の性質を示す.

Table 1 Values of elastic constants, lattice constants and Zener's anisotropy factors in *bcc* metals. Unit of C_{ij} : 10^{11} dyne/cm².

Crystal	Temp. (°K)	Elastic constants			Lattice constants (Å)	Anisotropy factors	Ref.
		C ₁₁	C ₁₂	C ₄₄			
α-Fe	300	23.31	13.54	11.78	2.8664	2.41	(27)
Fe-2.5Si	300	21.98	13.46	12.22	2.864(293K)	2.87	(28)
Fe-3.1Si	300	21.86	13.6	12.15	2.863(293K)	2.94	(28)
Nb	300	24.6	13.4	2.87	3.3066	0.513	(29)
V	300	22.8	11.9	4.26	3.0231	0.782	(29)
Ta	300	26.7	16.1	8.25	3.298	1.56	(29)
W	300	52.14	20.18	16.04	3.1652	1.00	(30)
Mo	300	46.96	16.76	10.68	3.1468	0.707	(30)
Cr	298	35.0	6.78	10.08	2.884	0.714	(31)
K	83	0.459	0.372	0.263	5.247(78K)	6.05	(32)
K	R.T.	0.371	0.315	0.188	-	6.71	(32)
Li	195	1.342	1.125	0.96	3.51(298K)	8.85	(32)
Na	299	0.739	0.622	0.419	4.2906	7.16	(32)

Table 2 A tabulation of angle φ_i defined in Fig.2 for the three slip systems in *bcc* metals.

Crystal	Temperature (°K)	{110}<111>			{112}<111>			{123}<111>		
		φ_1	φ_2	φ_3	φ_1	φ_2	φ_3	φ_1	φ_2	φ_3
Fe-3.1Si	300	46.47°	90°	46.80°	-85.35°	-42.29°	-46.76°	-86.06°	-43.57°	
Fe-2.5Si	300	46.36	90	46.81	-85.42	-42.39	46.67	-86.12	-43.58	
α-Fe	4.2	45.68	90	46.41	-86.38	-42.72	46.33	-86.95	-43.49	
-	100	45.69	90	46.41	-86.35	-42.71	46.33	-86.92	-43.49	
-	100	45.72	90	46.45	-86.30	-42.68	46.37	-86.88	-43.47	
-	300	45.79	90	46.50	-86.25	-42.61	46.43	-86.83	-43.45	
Ta	300	45.11	90	46.26	-88.56	-43.24	46.10	-88.77	-43.60	
W	300	45.00	90	44.99	-89.99	-45.01	44.99	90	-45.01	
Y	300	45.11	90	44.18	-89.28	-46.07	44.36	-89.39	-45.94	
Cr	298	45.42	90	44.65	-88.35	-45.98	44.82	-88.62	-45.91	
Nb	300	45.40	90	44.21	-88.67	-46.27	44.42	-88.87	-46.14	
Nb	300	45.92	90	42.44	-88.41	-48.03	43.13	-88.64	-47.74	
Li	195	53.57	90	48.99	-81.34	-40.72	48.97	-81.81	-50.21	
K	83	-	90	49.11	-83.72	-39.93	48.73	-84.20	-44.53	
K	R.T.	52.43	90	50.08	-84.32	-38.75	49.93	-84.49	-44.59	
Na	299	52.64	90	49.70	-83.93	-39.30	49.59	-83.81	-45.87	
β-brass	300	54.06	90	49.79	-82.51	-39.43				

Table 2 に種々の *bcc* 金属の各転位の応力場 τ_{xy} において, 零等圧線が *x* 軸となす角 φ_i ($i = 1, 2, 3$) を示す. φ_i の定義を Fig.2 に示す. φ_i は等方の場合, $\varphi_1 = -\varphi_3 = 45^\circ$, $\varphi_2 = 90^\circ$ である. { 110 } < 111 > 系ではすべての金属について $\varphi_2 = 90^\circ$ であり, また $|\varphi_1| = |\varphi_3|$ で, *x* 軸および *y* 軸に関して対称である. { 112 } < 111 > および { 123 } < 111 > 系では *x* および *y* 軸に

+ 転位の応力場のうち, その転位の二り面, 二り方向の応力成分である τ_{xy} が最も重要である.

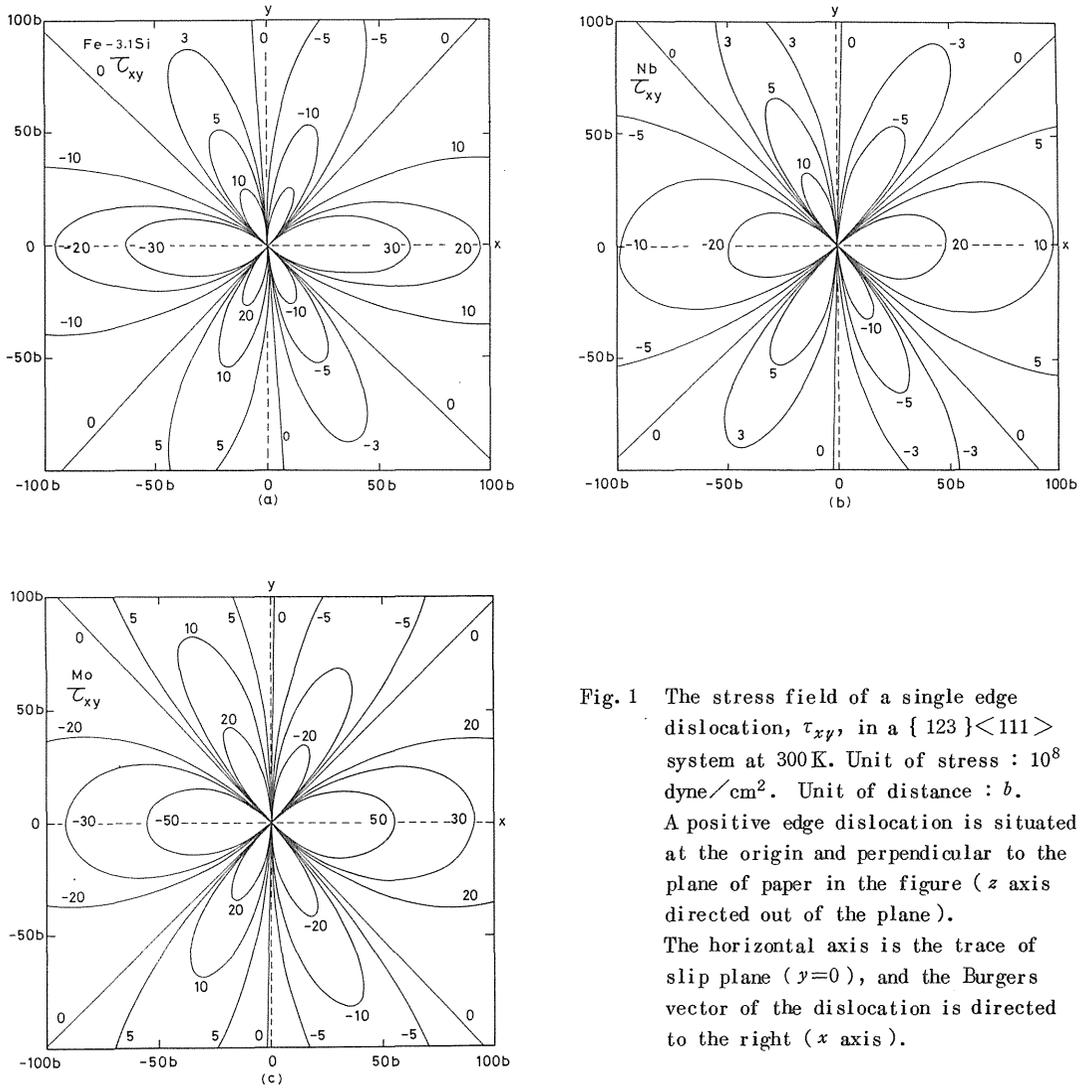


Fig. 1 The stress field of a single edge dislocation, τ_{xy} , in a $\{123\}\langle 111\rangle$ system at 300 K. Unit of stress: 10^8 dyne/cm². Unit of distance: b . A positive edge dislocation is situated at the origin and perpendicular to the plane of paper in the figure (z axis directed out of the plane). The horizontal axis is the trace of slip plane ($y=0$), and the Burgers vector of the dislocation is directed to the right (x axis).

関して非対称であるが, z 軸に関しては 2 回回転対称である (ただし応力の符号は逆となる)。異方因子が $A \approx 1$ である W の φ_i はほぼ等方の場合に等しいが, その他の金属では A の値が 1 と異なるほど, また $\{123\}\langle 111\rangle$ 系より $\{112\}\langle 111\rangle$ 系の方が φ_i の等方からの偏りは大きい。また α -Fe について φ_i の温度依存性を調べた結果, 温度の低下とともに等方に近づく傾向を示している。bcc 金属では $\{112\}\langle 111\rangle$ 系は主要なまがり系の一つであり, その転位の応力場の異方性は転位源の活動にも影響することを後述する。

2.2 転位間の相互作用力の異方性, 非等方結晶中において, 互いに x 軸に平行なバーガースベクトル b_1, b_2 を有し, 一方の転位は z 軸に沿っており, 他方の転位は z 軸に平行な刃状転位間の相互作用力の x 方向の成分は

$$f_x = \tau_{xy} b_2 \quad (2)$$

で与えられる³⁷⁾。相互作用力 f_x とまがり方向に沿う転位間距離 x との関係を示す $f_x - x$ 曲線は, 等方の場合原点に関して対称な曲線であるが, bcc の $\{112\}\langle 111\rangle$,

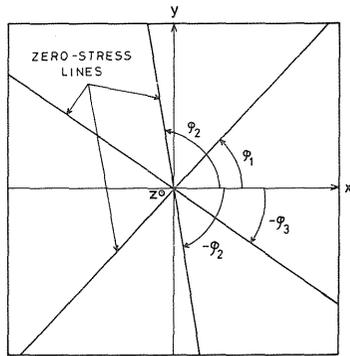


Fig. 2 Definition of φ_i , where φ_i is the angle between x axis and the zero-stress line on the stress field, τ_{xy} . The φ is defined positive in the counter clockwise sense, and measured from the x axis.

{ 123 } < 111 > 型転位などの $f_x - x$ 曲線は応力場の異方性のため対称性がなく異方性を示す。

Fig. 3(a)に Fe-3.1 Si 結晶の { 112 } < 111 > 型刃状転位間の $f_x - x$ 曲線を示す。同符号の運動転位が $x > 0.9391 y$ の範囲にあるときは斥力をうけ、その最大斥力は $f_1 (= 2.561 \times 10^{11} b^2 / 2 \pi h \cdot \text{dyn/cm}^2)$ である⁺。また $-0.0812 y < x < 0.9391 y$ の範囲では引力をうけ、その最大引力は $f_2 (= 3.534 \times 10^{11} b^2 / 2 \pi h \cdot \text{dyn/cm}^2)$ である。さらに $-1.091 y < x < -0.0812 y$ の範囲では斥力、 $x < -1.091 y$ の範囲では引力をうけ、それぞれの最大値は f_3, f_4 である。従って $x = -0.0812 y$ の位置で安定な配列となり等方性の場合の $x = 0 y$ とは異なる。ところで $+x$ 方向から運動してきた同符号転位が自由に通り抜けるには $f_a > f_1$ の力を外部からうけなければならない。一方、 $-x$ 方向から運動してくる転位が通り抜ける外力は $f_a > f_2$ である。 $|f_1| < |f_2|$ であり転位の回り方向が逆、すなわち回り面上の剪断応力の向きが逆のとき f_a 値は異なる。このことは結晶を引張り変形する場合と圧縮変形する場合で転位の相互作用力が異なることを示している。

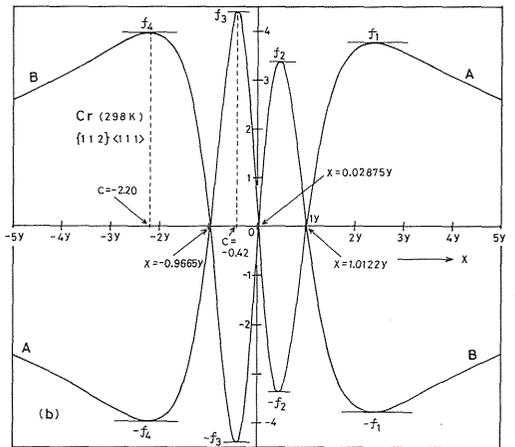
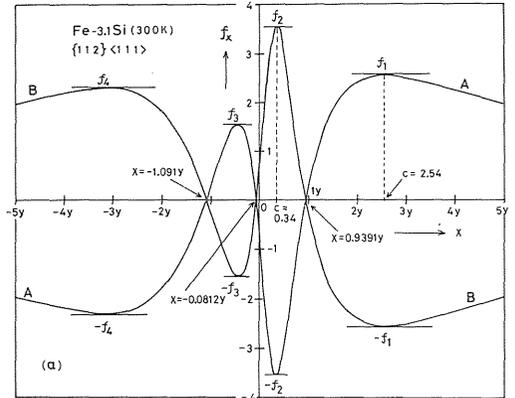


Fig. 3 Force between parallel edge dislocations in { 112 } planes with parallel Burgers vectors $a/2 \langle 111 \rangle$ in Fe-3.1 Si and Cr crystals. Unit of force f_x is $10^{11} b^2 / 2 \pi h$ (dyne/cm²), where h is the distance between the two slip planes containing the dislocations ; also x is the distance measured along the slip direction using y as the unit of length. The curve A is for like dislocations, and the curve B for unlike dislocations.

次に B.v. が互いに異符号の場合の $f_x - x$ 曲線は同符号の $f_x - x$ 曲線の x 軸対称な曲線である。異符号転位が $+x$

+ 一方の転位は原点に固定されていると仮定している。また $f_i > 0$ で斥力、 $f_i < 0$ で引力、 x の正方向が斥力方向である。 f_i は $+x$ 方向から順に、極大、極小値をそれぞれ $f_1 \dots f_4$ とする。異符号転位の場合も同様である。

方向から運動してくる場合, $x = 0.34 y$ の位置で最大の斥力 f_2 をうける。従って異符号転位が自由に通り抜けるに必要な外力は $f_a > f_2$ である。一方, $-x$ 方向からの転位は最大 $|f_1|$ の抵抗力をうける。また外力がない場合の異符号転位の互いに安定な配置は, $x = 0.9391 y$ および $x = -1.091 y$ である。

次に運動転位が原点に位置する転位の回り面 ($y = 0$) の下側の回り面 ($y < 0$) を運動する場合の $f_x - x$ 曲線は上側の回り面 ($y > 0$) を運動する場合の $f_x - x$ 曲線を原点に関して 180° 回転させた曲線である。従って運動転位の回り面の上下の違いは外力の方向が逆の場合と同様の $f_x - x$ 依存性を示す。このことから外力の作用方向が逆となっても転位間の相互作用力は結晶全体で平均すると変わらないと思われる。

次にこれらの異方性が bcc 金属において重要な転位源の一つであるらせん転位の二重交叉にりに影響することを以下に述べる。らせん転位が二重交叉にりして生じる転位源が活動するためには刃状転位の双極子を構成している上下の転位が互いに無関係に動く外力が必要である。この外力は等方の場合

$$f_a \geq \frac{\mu b^2}{8\pi(1-\nu)h} \quad (3)$$

で与えられる。ここで μ は剛性率, ν はポアソン比, b は $\mathbf{B} \cdot \mathbf{v}$ の大きさ, h は 2 本の転位ののっている回り面の間隔である。しかし異方性の強い bcc 結晶中の転位間の相互作用は前述のように転位の回り方向, 相対的な回り面の配置, また回り面の別, 金属の種類によって異なる。Fig.4 にらせん転位 a b が二重交叉にりして刃状転位の双極子 A, B を生じる場合を示す。A および B の双極子の部分での転位の相対的配置, 運動方向を Fig.5 に示す。たとえば Fig.3(a) に示した Fe-3.1 Si の $\{112\} \langle 111 \rangle$ 系の場合, A の部分の双極子 (転位源) の転位が自由に動ける外力は f_2 である。一方 B の部分では f_1 の外力でよい。従って外力が $f_2 > f_a \geq f_1$ のときは B の転位源のみが活動することになる⁺。

次に外力の向きが逆のとき (引張り \leftrightarrow 圧縮) は, A の部分では $f_a \geq f_2$, B の部分では $f_a \geq f_1$ である。すなわち外力の方向が逆となっても B の転位源の方がより小さい外力で活動できる。このように二重交叉にりして $\{112\}$ を回り面として生じる二つの転位源は互いに異

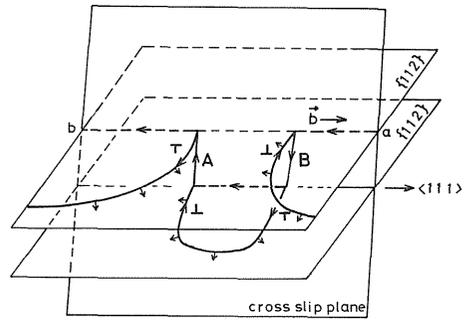


Fig. 4 A schematic representation of the double cross slip of a $a/2 \langle 111 \rangle$ screw dislocation. The A and B in the figure indicate edge dislocation dipoles, which may be important dislocation sources in bcc crystals.

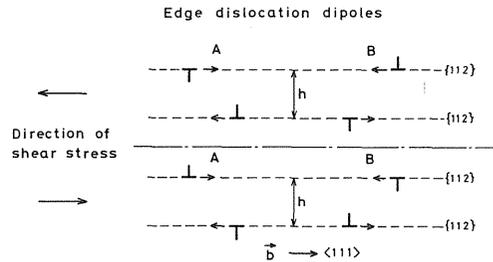


Fig. 5 Relative slip directions of dislocations composing edge dislocation dipoles A and B illustrated in the Fig.4.

なった性質を持つと考えられる。この結果は Fe-Si のほか $A > 1$ の金属に対しても同様に成立つ。一方, $A < 1$ の金属では f_2 を f_3 , f_1 を f_4 に置き換えて考えれば同様に成り立つと考えられる。回り面が $\{123\}$ の場合も同様の結果が得られた。一方回り面が $\{110\}$ 面の場合の $f_x - x$ 曲線は $|f_1| = |f_4|$, $|f_2| = |f_3|$ で $|f_2| > |f_1|$ であり, 運動転位が $+x$ 側および $-x$ 側から通り抜けるに必要な外力はいずれも $f_a \geq f_2$ である。すなわ

+ h の値は A, B のところで変わらないと仮定している。

Table 3 A tabulation of the interaction force f_i which is defined in Fig.3 for three slip systems in *bcc* metals.

Crystal	Temp. (°K)	{110}<111>		{112}<111>				{123}<111>				Isotropy u	p: r : t : u
		c	p	c	q	c	r	c	s	c	t		
Fe-3.1%Si	300	+0.36	2.457	+0.34	3.534	+2.54	2.561	+0.34	3.374	+2.58	2.498	2.396	1:1.042:1.017:0.975
Fe-2.5%Si	300	0.36	2.490	+0.34	3.562	+2.54	2.593	+0.34	3.402	+2.58	2.533	2.434	1:1.041:1.017:0.978
α -Fe	4.2	0.37	2.727	+0.35	3.643	+2.54	2.825	+0.35	3.503	+2.54	2.779	2.663	1:1.036:1.019:0.977
"	100	0.37	2.704	+0.35	3.621	+2.54	2.802	+0.35	3.480	+2.55	2.756	2.642	1:1.036:1.019:0.977
"	200	0.37	2.655	+0.35	3.569	+2.53	2.751	+0.35	3.429	+2.55	2.705	2.591	1:1.036:1.019:0.976
"	300	0.37	2.599	+0.35	3.508	+2.53	2.694	+0.35	3.369	+2.55	2.647	2.529	1:1.037:1.019:0.973
Ta	300	0.39	2.432	+0.37	2.757	+2.46	2.479	+0.37	2.708	+2.48	2.460	2.417	1:1.019:1.011:0.994
W	300	0.42	5.546	+0.41	5.553	+2.42	5.545	+0.41	5.553	+2.42	5.545	5.714	1:1:1:1.03
V	300	0.43	1.946	-0.42	2.063	-2.24	1.967	-0.42	2.045	-2.24	1.961	1.974	1:1.011:1.008:1.015
Cr	298	0.43	3.885	-0.42	4.404	-2.20	3.970	-0.42	4.317	-2.22	3.953	4.626	1:1.022:1.017:1.191
Mo	300	0.43	4.713	-0.42	5.224	2.18	4.801	-0.42	5.143	-2.19	4.779	4.937	1:1.019:1.014:1.048
Nb	300	0.46	1.843	-0.43	2.086	-1.92	1.898	-0.43	2.048	-1.94	1.877	1.891	1:1.030:1.018:1.026
Li	195	0.31	0.1354	+0.29	0.2538	+2.65	0.1462	+0.30	0.2430	+2.68	0.1341	0.1533	1:1.080:0.990:1.132
K	83	-	-	+0.30	0.07081	+2.60	0.04531	+0.30	0.06777	+2.65	0.04246	0.04487	
K	R.T.	0.31	0.02975	+0.29	0.04955	+2.58	0.03228	+0.29	0.0478	+2.60	0.02993	0.03128	1:1.085:1.006:1.052
Na	299	0.31	0.06424	+0.29	0.1107	+2.60	0.06954	+0.29	0.1065	+2.63	0.06436	0.06569	1:1.083:1.002:1.023
β -brass	300	0.30	1.064	+0.29	1.942	+2.62	1.160						1:1.090

c - x/y , p - $|f_2| = |f_3|$, q and s - $|f_2|$ for metals with $A > 1$ and $|f_3|$ for $A < 1$, r and t - $|f_1|$ for metals with $A > 1$ and $|f_4|$ for $A < 1$, u - $\mu/4(1-\nu)$.

ち外力の向きが逆でも $|f_a|$ は同一であり { 110 } を送り面とする場合の A, B 二つの転位源は同価である。

Table 3 には種々の *bcc* 金属の刃状転位間の相互作用力 f_i を { 110 } < 111 > 系については $f_2 (= f_3)$, { 112 } < 111 > 系および { 123 } < 111 > 系については $A > 1$ の金属では f_2 と f_1 , $A < 1$ の金属では f_3 と f_4 , また等方結晶の場合について $f_1 (= f_2 = f_3 = f_4)$ をそれぞれ示した。{ 112 } 系の $|f_i|_{\max}$ は $A > 1$ では $+x$ 側で f_2 , $A < 1$ では $-x$ 側で $|f_3|$ である。従って $A > 1$ の金属では運動転位が $+x$ 方向から通り抜ける場合の抵抗力は $-x$ 方向からのそれよりも大きい。一方 $A < 1$ の金属では逆に $+x$ 方向からのほうが抵抗力は小さい。例えば $A > 1$ の Fe-3.1 Si 結晶の { 112 } < 111 > 送り系の場合, $+x$ 側から通り抜けるときの抵抗力は, $f_2 = 3.534 \times 10^{11} b^2 / 2 \pi h$ [dyn/cm²] であるが, $-x$ 方向からのそれは, $f_1 = 2.561 \times 10^{11} b^2 / 2 \pi h$ [dyn/cm²] であり, $f_2/f_1 = 1.38$ である。すなわち

抵抗力は $+x$ 側からの方が 1.38 倍大きい。一方 $A < 1$ である Cr の { 112 } < 111 > 系の場合, $+x$ 方向からは $f_4 = 3.97 \times 10^{11} b^2 / 2 \pi h$, $-x$ 方向からは $f_3 = 4.404 \times 10^{11} b^2 / 2 \pi h$ であり, $f_4/f_3 = 0.901$ である [Fig. 3 (a), (b)]。

次に, 転位源が活動する外力は前述のように { 112 } < 111 > および { 123 } < 111 > 系では f_1 または f_4 , { 110 } < 111 > 系では f_2 であるので各金属の { 110 } < 111 > 系の f_2 を単位としてそれらを比較すると, いずれの金属でも { 112 } 系の f_i が最大, 次に { 123 }, { 110 } 系の順である。従って { 110 } 面を送り面とする転位源が最も活動し易く, { 112 } のそれが最も活動しにくいことになる。しかしその差はいずれの金属でも数パーセント程度であり, < 111 > らせん転位が二重交叉送りして転位源となる場合, < 111 > 晶帯面のどの面を送り面としても, 転位源を活動させる外力はあまり変わらないといえるであろう。さて, どの程度の外部剪断応力が加

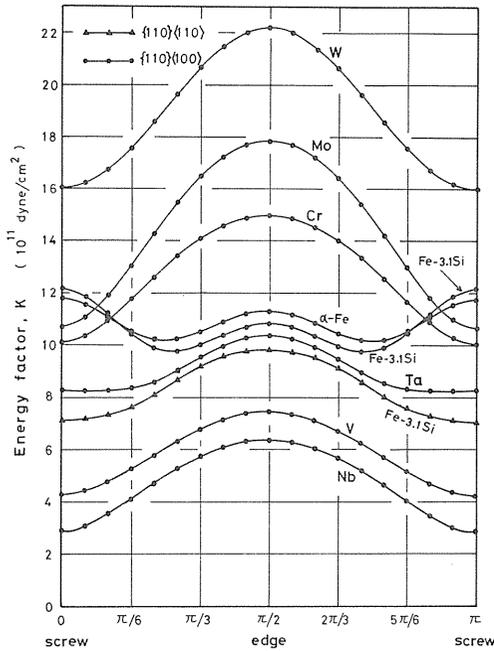


Fig. 6 The variation of K with the edge-screw composition angle θ , for $\{110\}\langle 100\rangle$ and $\{110\}\langle 110\rangle$ slip systems at room temperature in bcc crystals.

わると上述の転位源が活動するか調べる。きり面, きり方向の分解剪断応力が τ (kg/mm²) のとき, 転位は $f = \tau/b$ の力をうける。 α -Fe (300K) の場合, $b = 2.4824 \text{ \AA}$ であるから $f = 2.4344 \tau$ (dyn/cm²) である。一方, α -Fe (300 K) 中の $\{112\}\langle 111\rangle$ 系の転位間の相互作用力は Fig.4 の B の部分で $f_1 = 2.694 \times 10^{11} b^2 / 2 \pi h$ (dyn/cm²) である。 $h = 200 \text{ \AA}$ とすると $f_1 = 13.21$ (dyn/cm²) となる。すなわち $f_a \geq 13.2$ (dyn/cm) ならば $\{112\}$ 面上をきり面とする転位源は活動する。そのために必要な外部剪断応力は $\tau_a \geq f_1/f = 5.427$ (kg/mm²) である。この値は $\{110\}$ 系では 5.235 (kg/mm²) となる。純 α -Fe の分解剪断応力は 200°K 付近で 5 kg/mm^2 程度である。³⁹⁾ 従ってそれ以上の温度領域では温度依存性の小さい (剛性率程度) f_x-x 関係の塑性変形に対する重要度は相対的に増加すると思われる。

2.3 $\{110\}\langle 100\rangle$ および $\{110\}\langle 110\rangle$ 型転位の弾性エネルギー, bcc では $\{pqr\}\langle 111\rangle$ 系が主要なきり転位であるが, α -Fe, Fe 系合金の変形後の転位

組織に $a\langle 100\rangle$ および $a\langle 110\rangle$ 型非らせん転位がそれぞれ全体の20%ほど存在することが観察されている。⁴⁰⁾ また Nb では $\{110\}\langle 100\rangle$ および $\{110\}\langle 110\rangle$ 系転位の弾性エネルギーの方位依存性 $E(\theta)$ を調べた結果について述べる。ここで θ は B.v. と転位線のなす角である。 $\{pqr\}\langle 111\rangle$ 系については既に Chou¹¹⁾ により計算が行なわれている。

Fig.6 に種々の bcc 金属の $\{110\}\langle 100\rangle$ および $\{110\}\langle 110\rangle$ 系転位のエネルギー因子の θ 依存性を示す。 $K(\theta)$ 値は 5 度間隔で数値計算により求めた。 $\{110\}\langle 100\rangle$ 系について, 異方因子の大きい Fe-Si, α -Fe などではらせん転位の K 値 $[K(0)]$ が最大で, 刃状転位のそれ $[K(\pi/2)]$ は極大値, 混合転位の部分に最小値がある。従って等方の関係

$$K(\theta) = [\mu/2(1-\nu)] [(2-\nu) - \nu \cos 2\theta] = 1/2 \{ [K(0) + K(\pi/2)] + [K(0) - K(\pi/2) \cos 2\theta] \} \quad (4)$$

では $\{110\}\langle 100\rangle$ 系転位の $K(\theta)$ を表わすことはできない。 Wit⁴⁾ によれば異方結晶における転位の $K(\theta)$ は次式で与えられる。

$$K(\theta) = \sum_{n=0}^{\infty} [A_n \cos n\theta + B_n \sin n\theta] \quad (5)$$

ここで係数 A_n, B_n は弾性定数によってのみ定まり, θ にはよらない。立方結晶の $\{110\}\langle 100\rangle$ および $\{110\}\langle 110\rangle$ 系では対称性から $A_{2n+1} = 0, B_n = 0$ である。従って(5)式は

$$K(\theta) = U \sum_{n=0}^k \alpha_{2n} \cos 2n\theta \quad (6)$$

で表わされる。ここで $U = 10^{11} \text{ dyn/cm}^2$ である。

Table 4 に $k = 9$ の場合の係数 α_{2n} を示す。この場合の最大誤差は高々 0.1 % である。W の場合, $\alpha_0 \approx [K(0) + K(\pi/2)]/2, \alpha_2 \approx [K(0) - K(\pi/2)]/2, \alpha_4, \alpha_6, \dots \approx 0$ であり, (4)式と(6)式はほぼ一致異方性はほとんどないといえる。また $\{110\}\langle 110\rangle$ 系に対する $K(\theta)$ はほとんどの bcc 金属に対して近似的に(4)式で表わせ, この系は等方的である。(4)~(6)式を用いて弾性エネルギーは

$$E(\theta) = \frac{K(\theta) b^2}{4 \pi} \log \frac{R}{r_0} \quad (7)$$

Table 4 Computed coefficients in the Energy Factor expression, $K(\theta) = U \sum_{n=0}^9 \alpha_{2n} \cos 2n\theta$, for $\{110\} \langle 100 \rangle$ and $\{110\} \langle 110 \rangle$ slip systems in *bcc* metals. $U = 10^{11}$ dyne/cm².

Crystal	slip system	α_0	α_2	α_4	α_6	α_8	α_{10}	α_{12}	α_{14}	α_{16}	α_{18}
Fe-3.15Si	a	10.6279	0.57678	0.84438	0.07430	-0.00773	0.09384	-0.00174	0.00212	-0.00008	0.00017
	b	10.8543	0.16626	-0.59200	0.07200	-0.00240	0.00306	0.00089	-0.00001	-0.00016	0.00017
α-Fe	a	9.0464	-1.1058	0.27024	0.03777	-0.00179	-0.00358	0.00004	-0.00008	0.00004	-0.00005
	b	19.1050	-3.0948	-0.00119	-0.00147	-0.00187	-0.00176	-0.00063	0.00003	0.00006	0.00005
Ti	a	5.9394	-3.5733	-0.08694	-0.01717	-0.00769	-0.00507	0.00019	-0.00001	-0.00007	0.00001
	b	12.7637	-2.4074	-0.23751	-0.03856	-0.00174	-0.00053	0.00011	0.00018	-0.00008	0.00001
Nb	a	14.5700	-2.5487	-0.28490	-0.05000	-0.00284	-0.00149	0.00060	0.00015	-0.00006	0.00000
	b	4.8000	-1.7120	-0.17366	-0.03499	-0.00103	-0.00017	-0.00077	-0.00000	0.00008	0.00017
Fe-3.15Si	a	8.4029	-1.4427	0.06238	0.07384	-0.00084	-0.00318	-0.00004	0.00047	0.00000	-0.00003
	b										

a - $\{110\} \langle 100 \rangle$, b - $\{110\} \langle 110 \rangle$.

と与えられる。(7)式から線張力因子⁴⁾

$$T(\theta) = E(\theta) + \frac{\partial^2 E(\theta)}{\partial \theta^2} \quad (8)$$

が計算され、転位の安定性を調べる^{8), 11), 42)}ことができる。また転位網の解析⁴³⁾、かどばった転位に関する力の解析^{44), 45)}などに適用できる。これらに関しては別の機会に報告する予定である。

3. 結 言

種々の *bcc* 金属結晶の転位の弾性的性質の異方性を非等方弾性論を用いて計算し以下の結果を得た。

- (1) $\{112\} \langle 111 \rangle$ および $\{123\} \langle 111 \rangle$ 系刃状転位の応力場 τ_{xy} において、零応力線は $A > 1$ の金属では等方の場合と比較して z 軸のまわりに反時計方向に偏っており、 $A < 1$ の金属では時計方向に偏っている。 $\{110\} \langle 111 \rangle$ 系刃状転位の τ_{xy} は x および y 軸に関して対称である。 $\{112\} \langle 111 \rangle$ および $\{123\} \langle 111 \rangle$ 系刃状転位の τ_{xy} は z 軸に関して 2 回回転対称である(応力の符号は逆となる)。
- (2) 相互作用力 f_x と向き方向に沿う転位間距離 x との関係を示す $f_x - x$ 曲線は $\{110\} \langle 111 \rangle$ 系では原点に関し対称な曲線である。一方 $\{112\} \langle 111 \rangle$ および $\{123\} \langle 111 \rangle$ 系の $f_x - x$ 曲線は対称性がない。従って相互作用力は転位の向き方向、相対的な向き面の位置の違いにより異なる。この結果から二重交叉向きによって生じる転位源は $\{112\}$ または $\{123\}$ を向き面とする場合異方性を示すことが推論された。

- (3) $\{110\} \langle 100 \rangle$ 系および $\{110\} \langle 110 \rangle$ 系混合転位の弾性エネルギーの方位依存性 $E(\theta)$ を 5 度間隔で計算し、 $E(\theta)$ を解析的に表わすため三角級数に展開したときの係数を決定した。

参 考 文 献

- 1) J.P.Hirth and J.Lothe : *Theory of Dislocations*, McGRAW-HILL, New York, (1968).
- 2) J.W.Steeds : *Introduction to Anisotropic Elasticity Theory of Dislocations*, CLARENDON PRESS, Oxford, (1973).
- 3) J.D.Eshelby : *Phil. Mag.*, 40 (1949), 903.
- 4) G.deWit and J.S.Koehler : *Phys. Rev.*, 116 (1959), 1113.
- 5) Y.T.Chou, F.Garofalo and W.Whitemore : *Acta Met.*, 8 (1960), 480.
- 6) R.J.Wasilewski : *Acta Met.*, 11 (1963), 63.
- 7) C.N.Reid : *Acta Met.*, 14 (1966), 13.
- 8) L.K.France, C.S.Hartley and C.N.Reid : *Met. Sci. J.*, 1 (1976), 65.
- 9) Y.T.Chou and T.E.Mitchell : *J. Appl. Phys.*, 38 (1967), 1535.
- 10) M.H.Yoo and B.T.M.Loh : *J. Appl. Phys.*, 43 (1972), 1373.
- 11) Y.T.Chou and G.T.Sha : *Metallur. Trans.*, 3 (1972), 2857.
- 12) Y.T.Chou : *Mater. Sci. Eng.*, 10 (1972), 81.
- 13) A.J.E.Foreman : *Acta Met.*, 3 (1955), 322.
- 14) A.K.Head : *Phys. Stat. Sol.*, 6 (1964), 461.
- 15) Y.T.Chou : *J. Appl. Phys.*, 34 (1963), 429.
- 16) L.J.Teutonico : *Phil. Mag.*, 18 (1968), 881.
- 17) J.P.Hirth and P.C.Gehlen : *J. Appl. Phys.*, 40 (1969), 2177.
- 18) J.P.Hirth, K.Malen and J.Lothe : *Scripta Met.*, 5 (1971), 231.
- 19) Y.T.Chou and G.T.Sha : *Scripta Met.*, 5 (1971), 551.
- 20) Y.T.Chou and G.T.Sha : *J. Appl. Phys.*, 42 (1971), 2625.
- 21) J.D.Eshelby, W.T.Read and W.Shockley : *Acta Met.*, 1 (1953), 251.
- 22) Y.Motohashi, S.Otake and T.Shibata : *Japan.*

- J. Appl. Phys., 13(1974), 1287.
- 23) Y.Motohashi and S.Otake : Japan. J. Appl. Phys., 14(1975), 435.
- 24) Y.Motohashi, P. Brailon and J. Serughetti : Phys. Stat. Sol., (a) 37(1976), 263.
- 25) 本橋嘉信, 大竹周一, 山崎明 : 茨城大学工学部研究集報, 23(1975), 103.
- 26) 本橋嘉信, 大竹周一 : 日本金属学会誌, 41(1977), 1240.
- 27) J.A.Rayne and B.S.Chandrasekher : Phys. Rev., 122(1961), 1714.
- 28) W.B.Daniels : Thesis, cited from Y.T.Chou, Acta Met., 13(1965), 261.
- 29) D.I.Bolef : J. Appl. Phys., 32(1961), 100.
- 30) D.Cline : J. Appl. Phys., 33(1962), 2310.
- 31) D.I.Bolef and J.deKlerk : Phys. Rev., 129(1963), 1063.
- 32) 日本金属学会編 : 金属データブック, 丸善,(1974), 35.
- 33) W.B.Pearson : *A Handbook of Lattice Spacings and Structure of Metals and Alloys*, PERGAMAN PRESS, Oxford vol. 2, (1967), 936.
- 34) J.Bastecka : Czech. J. Phys., B 15 (1965), 595.
- 35) M.H.Yoo and B.T.M.Loh : Oak Ridge National Laboratory Internal Report # ORNL-TM-3408 (1971).
- 36) M.H.Yoo and B.T.M.Loh : J. Appl. Phys., 41(1970), 2805.
- 37) M.Peach and J.S.Koehler : Phys. Rev., 80(1950), 436.
- 38) たとえば, A.H.Cottrell : *Dislocations and Plastic Flow in Crystals*, CLARENDON PRESS, Oxford (1953), 48.
- 39) たとえば, Y.Nakada and A.S.Keh : Acta Met., 16(1968), 903.
- 40) D.J.Dingley and K.F.Hale : Proc. Roy. Soc., A 295 (1966), 55.
- 41) C.N.Reid, A.Gilbert and G.T.Hahn : Acta Met., 14(1966), 975.
- 42) A.K.Head : Phys. Stat. Sol., 19(1967), 185.
- 43) Y.T.Chou : J. Appl. Phys., 36(1965), 1435.
- 44) J.Lothe : Phil. Mag., 15(1967), 353.
- 45) L.M.Brown : Phil. Mag., 15(1967), 363.

討 論

〔質問〕 柴田孝夫(指名)

本論文の計算値と実測に基づく計算との違いが生ずるはずです。その違いをどのように考えるのですか。このへんの関係についての解説が必要のように思われます。

〔回答〕

各結晶の転位の弾性的性質を調べるために用いた弾性定数は実験的に得られた数値であり、このことから本報の計算値は実測値に基づいていると考えられ、得られた結果は実験と良く一致するはずです。

計算値と実験結果との検討は現在まで菱面体結晶, bcc 金属, セラミックスなどの二り系の選択などについて行ない成功しています。また本報で述べた個々の転位の弾性的性質の異方性が小傾角境界, 双晶境界などの巨視的性質に影響しますが、これに関する実験的検証については別に報告致します。