

## 討15

## BCC金属の異方塑性

東京大学物性研究所 竹内 伸

## I. 緒言

金属の塑性の異方性に関しては、例えば圧延材の圧延方向からの角度による塑性の変化や、集合組織をもつ金属での変形の異方性などについても広く論じられている。しかし、ここで問題とする異方塑性とは、この67年の間盛んに研究の行われている鉄およびV族VI族のBCC遷移金属単結晶の塑性の特異現象のことである。

一般に、単結晶の歪り変形は剪断応力の大きな歪り系で支配される。従って、本来単結晶の変形応力や外形の変化は異方性を有する。ここで論じる異方塑性とは、上記のSchmidの法則によって支配されている通常の結晶方位依存性から更に大きくずれる現象に関するものである。この種の異方性はBCC金属特有のものであり、特に低温ほど顕著である。従って、BCC金属の低温変形機構と密接な関連を持ち、この特異現象はBCC金属の変形機構解明のカギを握るものとも考えられる。近年低温塑性を支配する機構として提案されたらせん転位の拡張モデルの発展は、この異方塑性を説明することが契機となっている。

ここでは、異方塑性を示す実験事実を総括して述べるのであるが、研究者の間で必ずしも一致した結果が得られていないので、データの取扱選択にはある程度著者の主観が入ることをお断りしておく。

## II. 異方塑性の種類と表現

異方塑性の代表的なものは、 $\{112\}$ 歪りの異方性といわれるものである。 $\{112\}$ 面の $\langle 111 \rangle$ 方向に剪断応力が作用する場合、剪断応力の向きに双晶変形が起りうる方向と双晶変形の起りえない方向の違いがある。歪りの場合にも、この向きの違いに応じて降伏応力や歪り帯の様子が異ってくるのである。異方塑性は、このような剪断応力の向きによる変形初期の変形応力と歪り帯の現われ方の違いに関するものが主である。この種の異方性は一般的に次のように表現される。今、図1のAという引張軸または圧縮軸を持つ単結晶について、応力軸と一次歪り方向 $\langle 111 \rangle$ とのなす角を $\lambda$ 、 $\langle 111 \rangle$ 晶帯面中で最大剪断応力の作用する面をMとしM面と $(\bar{1}01)$ 面のなす角を $\alpha$ 、実際に歪り帯の生じている面をSとし、Sと $(\bar{1}01)$ 面と間の角度を $\psi$ と表わす。 $\alpha, \psi$ は $(\bar{1}11)$ 面の方向に正、 $(\bar{1}\bar{1}2)$ の方向に負に取る。最大剪断応力が $\{112\}$ 面にかゝる方位は $\alpha = \pm 30^\circ$ で、引張では $-30^\circ$ が双晶方位で、圧縮では $+30^\circ$ が双晶方位である。方位依存性は $\psi - \alpha$ の関係と $\sigma_y - \alpha$ の関係( $\lambda$ が試料によって異なる場合は $\sigma_y \cos \lambda \sin \lambda$ で比較すべきであるが、 $\cos \lambda \sin \lambda$ の値は各試料で大体一定にしてある実験が多い)で表示され、剪断応力の向きによる異方性は $\alpha$ の正側負側での非対称性あるいは同一の $\alpha$ 値に対する引張圧縮間の差によって表現される。

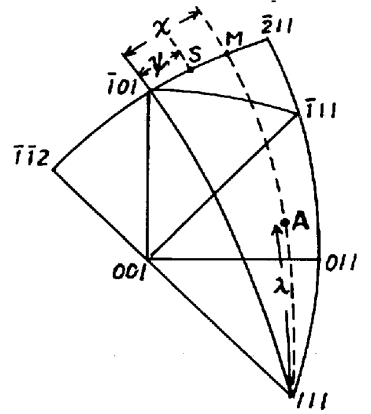


図1 結晶方位の表示法

剪断応力の向きによる異方性のほかに、歪り面の垂直応力成分の影響によると解釈される異方性が見出されている。それは、引張と圧縮で単に $\alpha, \psi$ の符号を入れ替えただけでは一致しない場合である。

そのほか、上記のいずれでも説明のつかない異方性も報告されていて、事態は複雑である。

III.  $\psi - \alpha$ 関係

$\sigma_y$ の $\psi - \alpha$ 関係はかなり古くから研究されており、<sup>(1,2)</sup>Steijnら<sup>(1)</sup>は引張と圧縮で異なるという結果を報告

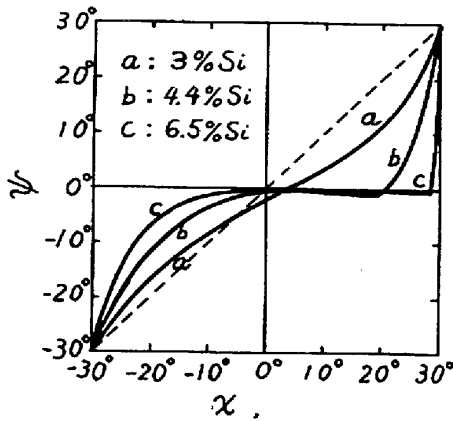


図2 Fe-Si合金のψ-χ関係(室温)<sup>(3,6)</sup>

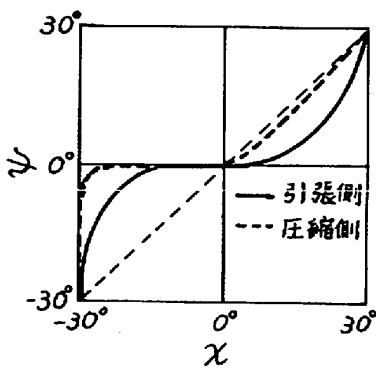


図4 Fe-3%Siに関する77Kの曲げ変形による引張側圧縮側のψ-χ関係<sup>(5)</sup>

している。その後、Fe-Si合金について $\sigma_y$ - $\chi$ 関係の測定と共に詳細な研究が行われ、<sup>(3,6)</sup>異方塑性現象が確立された。図2にFe-Si合金のψ-χ関係の室温引張の結果をまとめて示す。この図で、破線は最大剪断応力面とスリ面が一致する位置であり、実測値はψ=0するわち(101)面の方向にずれていることを示しているが、そのずれ方がχの正負で異なることが分る。異方塑性はSi濃度の増加と共に、また温度の低下と共に強調される。<sup>(4,6)</sup> Nb, <sup>(7,8)</sup> Ta, <sup>(9,11)</sup> Mo, <sup>(12)</sup> についても異方性を示すψ-χ関係が求められている。図3は著者らによるTaに関する極低温までの結果を示す。

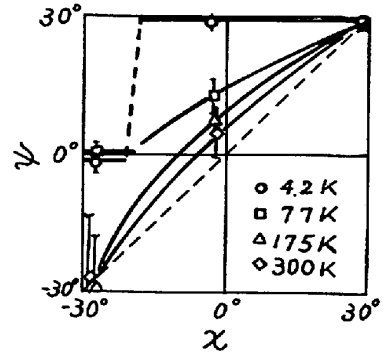


図3 Taの圧縮変形でのψ-χ関係の温度変化<sup>(11)</sup>

ψ-χの関係が剪断応力の向きのみによらない、すなわち引張と圧縮の結果が必ずしも原点に関して対称(ψ(χ) tension = -ψ(-χ) compression)にならないという結果も得られている。<sup>(5,9)</sup> Fe-3%Si合金の77Kでの曲げ変形の結果を図4に示す。この結果は、ψ-χ関係にスリ面の垂直応力成分も影響していることを示すものと解釈される。

超高真空中でガス出しを行った高純度のNbで観察されるスリ線が予想される主スリ系ではなく、Schmid因子がずっと小さい(011)であるという異常も報告されている。<sup>(13)</sup> 変形初期からいくつかのスリ系が同時に働くという観察は、WやMo<sup>(14,15)</sup>でも行われている。しかし、一般に高純

度試料では変形初期のスリ線がdiffuseになって観察しにくくなるため、実際に観察されたスリ系が変形を支配している主スリ系であるかどうかは疑問である。

#### IV. $\sigma_y$ - $\chi$ 関係

スリ線の観察に比べて、降伏応力の方位依存にはいくつか実験的な問題点がある。上降伏現象を示すような試料では、下部降伏応力の方位依存を求めればよいが、W, Moや高純度のTa Nbではスムーズな曲線で降伏するため $\sigma_y$ の定義に曖昧さが生じる。また、低温の降伏応力は侵入型不純物元素量で敏感に変わるため、試料の作成条件を厳密にそろえたデータでなければ信頼できないのである。

応力-歪み曲線の著しい方位依存性はRoseらによってWについて報告されて以後<sup>(16)</sup>多くの研究があるが、特にVIa族の金属について顕著である。 $\sigma_y$ - $\chi$ の系統的な測定はψ-χ関係と同じくFe-Si合金について行われ<sup>(3)</sup>いわゆる{112}スリの異方性が提唱されて以後、Fe<sup>(17,18)</sup> Fe合金<sup>(5,6,17)</sup> Nb<sup>(7,19,20,21)</sup> Nb合金<sup>(22)</sup> Ta<sup>(11)</sup> Mo<sup>(12,23-25)</sup> W<sup>(26)</sup>についても同様の異方性を示す結果が得られている。図5はFe-Si合金の $\sigma_y$ - $\chi$ 関係、図6はWについての $\sigma_p$ - $\chi$ 関係(いずれも引張)を示す。Feおよび種々の鉄合金に関する $\chi=0, \pm 30^\circ$ の三方

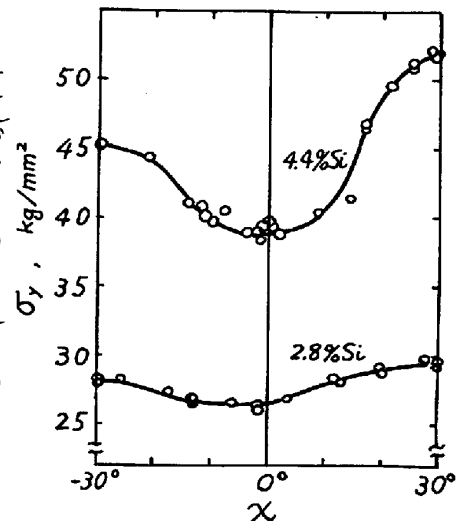


図5 Fe-Si合金の $\sigma_y$ - $\chi$ 関係<sup>(3,6)</sup>

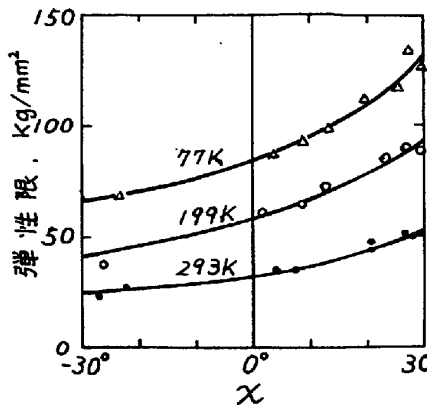


図6 Wの $\sigma_p$ - $\chi$ 関係(3,6)

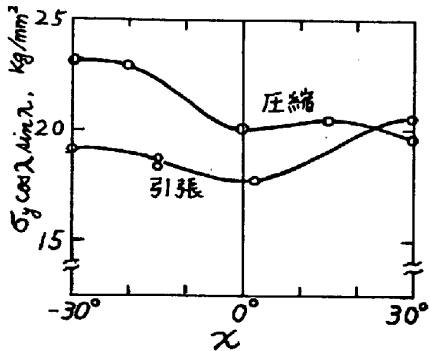


図8 Fe-3%Siの200Kに於ける引張と圧縮の $\sigma_y$ - $\chi$ 曲線(27)

位の試料についての結果は、 $\{112\}$ 面の異方性、すなわち $\chi=+30^\circ$ と $-30^\circ$ の差は低温ほどまた固溶体硬化の大きな合金ほど大きくなる傾向を示している。(47) 図7は純鉄の分解剪断応力の結果を示す。

$\chi$ についての非対称が剪断応力の向きのみの影響であれば、引張と圧縮では $\chi$ の正負を入れ替えた曲線に一致する筈である。しかし、Fe-3%Siについて低温で、図8に示すような不一致が報告されている。(27)  $\chi=0$ では本来結晶学的に剪断の向きの相異がないにもかかわらずこの結果と同様Ta<sup>(11)</sup>、NbおよびNb-O合金<sup>(28)</sup>でも低温程引張と圧縮の間に大きな相異が観察されている。図9はNbの結果である。これらの事実は、変形応力も $\{110\}$ 面の剪断応力のみでなく垂直応力の影響を受けることを示している。

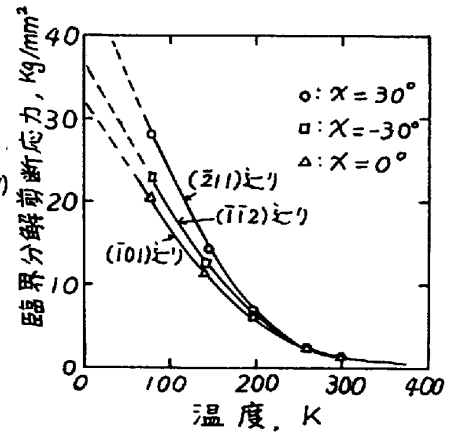


図7 純鉄の $\chi=0, \pm 30^\circ$ の3方位の引張試験の降伏応力の最大剪断応力面への分解剪断応力(47)

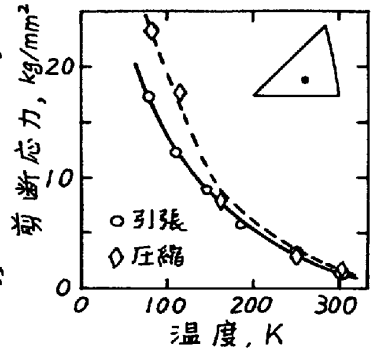


図9  $\chi=0$ のNbの引張と圧縮の $\sigma_y$ - $\chi$ 曲線(27)

なお、 $\sigma_y$ が剪断応力の異方性、垂直応力の影響のいずれを考慮しても説明できない結果もいくつか報告されている。(29-31) また、DaviesらはMoについてmicrostrainの測定を行い、真の弾性限を求めると方位依存性がないことを報告している。(32)

V. 活性化パラメータの方位依存性

Spitzig とKehは $\chi=0, \pm 30^\circ$ の3方位のFe単結晶に関する $\sigma_y$ の温度および歪速度依存性のデータから、活性化体積、活性化エンタルピーの解析を行い、図10のような結果を得ている。(18) 活性化エンタルピーは $\sigma_y$ -Tに対応した結果が得られている。

VI. 総括

以上の結果の特徴をまとめると下記のようになる。(1) 異方塑性は低温ほど顕著である。(2)  $\{110\}$ 面は最大剪断応力面から $\{110\}$ 面の方向にずれる傾向および双晶面の $\{112\}$ 面の方向にずれる傾向を持つ。(3) 降伏応力は反双晶面に最大剪断応力を持つ方位で最大で、最小は $\{110\}$ 面に最大剪断応力を持つ方位または双晶面の $\{112\}$ に最大剪断応力を持つ方位である。(4)  $\{110\}$ 面が最大剪断応力面からずれる方向は常に降伏応力の小さい方向になっていて、(2),(3)の結果はconsistentである。(5)  $\{110\}$ 面に圧縮応力が作用する方が膨

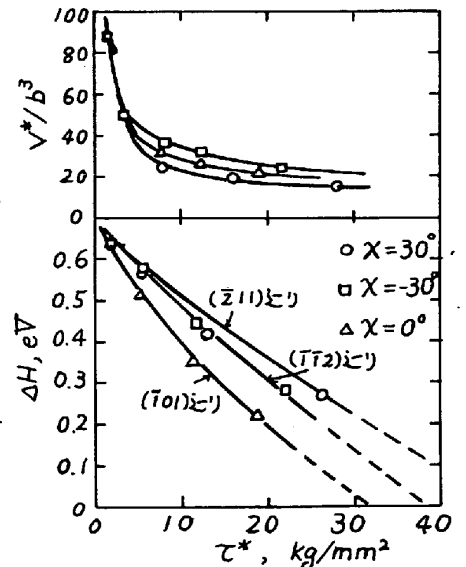


図10  $\chi=0, \pm 30^\circ$ の3方位純鉄の活性化体積 $V^*$ 、活性化エンタルピー $\Delta H$ の有効応力 $\tau^*$ 依存性(18)

張応力が作用する場合より常に  
変形応力が大きく、その差は低  
温ほど大きい。

(2), (3), (4)の結果を  $\sigma$ - $\epsilon$  曲  
線とは別の表現で、種々の場合  
について模式的に示したのが図  
11である。

Ⅶ. 今後の問題

異方塑性現象における固溶原  
子の役割、特に侵入型不純物原  
子の影響は充分明らかになって  
いない。高純度の試料では比較  
的低応力から微小歪みが発生し  
て降伏応力が曖昧になると同時

に、多数の刃り系が観察され異方塑性現象が不明確になることはすでに述べた。これは、恐らく刃状転  
位線の活動と結びつくものと考えられる。従って、単独のらせん転位の易動度の方位依存性に関するデ  
ータが望まれる。勿論、究極的にはこの興味ある異方塑性現象がBCC金属の変形機構との関連の上で  
転位論的に解明されねばならない。

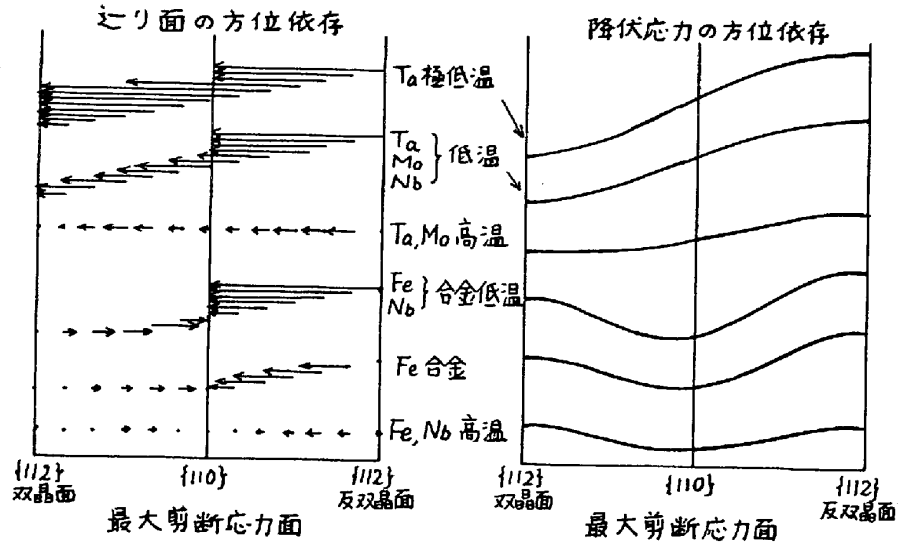


図11 剪断応力の向きの方位性に関する結果の総括

文献

- (1) R.P.Steijin and R.M.Brick: Trans. ASM, 46 (1954), 1406.
- (2) J.J.Cox, G.T.Horne and R.F.Mehl: Trans. ASM, 49 (1957), 118.
- (3) T.Taoka, S.Takeuchi and E.Furubayashi: J. Phys. Soc. Japan, 19 (1964), 701.
- (4) B.Šesták and N.Zárubová: phys. stat. sol., 10 (1965), 239.
- (5) B.Šesták, N.Zárubová and V.Sládek: Canad. J. Phys., 45 (1967), 1031.
- (6) S.Takeuchi, E.Furubayashi and T.Taoka: Acta Met., 15 (1967), 1179.
- (7) M.S.Duesbery, R.A.Foxall and P.B.Hirsch: J. Phys., 27 (1966), C3-193.
- (8) C.D.Statham, D.Vesely and J.W.Christian: Acta Met., 18 (1970), 1243.
- (9) J.F.Byron and D.Hull: J. Less-Common Metals, 13 (1967), 71.
- (10) K.D.Rogausch and B.L.Mordike: Proc. 2nd. Inter. Conf. Strength of Metals and Alloys (1970), Amer. Soc. Metals, p.168.
- (11) S.Takeuchi, E.Kuramoto and T.Suzuki: Tech. Rep. I3SP, (1971) Ser. A, No. 486.
- (12) S.S.Lau and J.E.Dorn: phys. stat. sol., (a)2 (1970), 825.
- (13) M.S.Duesbery and R.A.Foxall: Phil. Mag., 20 (1969), 719.
- (14) R.G.Garlick and H.B.Probst: Trans. AIME, 230 (1964), 1120.
- (15) L.Kaun, A.Luft, J.Richter and D.Schulze: phys. stat. sol., 26 (1968), 485.
- (16) R.H.Rose, D.P.Ferriss and J.Wulff: Trans. AIME, 224 (1962), 981.
- (17) S.Takeuchi, T.Taoka and H.Yoshida: Trans. ISIJ, 9 (1969), 105.
- (18) W.A.Spitzig and A.S.Keh: Acta Met., 18 (1970), 611.
- (19) C.N.Reid, A.Gilbert and G.T.Hahn: Acta Met., 14 (1966), 975.
- (20) D.K.Bowen, J.W.Christian and G.Taylor: Canad. J. Phys., 45 (1967), 903.
- (21) G.Taylor and J.W.Christian: Phil. Mag., 15 (1967), 873.
- (22) D.A.Koss: Phil. Mag., 21 (1970), 493.
- (23) F.Guiu and P.L.Pratt: phys. stat. sol., 15 (1966), 539.
- (24) F.Guiu: Scripta Met., 3 (1969), 449.
- (25) D.F.Stein: Canad. J. Phys., 45 (1967), 1063.
- (26) A.S.Argon and S.R.Malooof: Acta Met., 14 (1966), 1449.
- (27) B.Šesták and A.Seeger: Proc. ICSTIS, Suppl. Trans. ISIJ, 11 (1971), 1283.
- (28) K.V.Ravi and R.Gibala: Proc. ICSMA (1970) p.83.
- (29) J.F.Byron and D.Hull: J. Less-Common Metals, 13 (1967), 71.
- (30) D.Hull, J.F.Byron and F.W.Noble: Canad. J. Phys., 45 (1967) 1091.
- (31) P.J.Sherwood, F.Guiu, H.C.Kim and P.L.Pratt: Canad. J. Phys., 45 (1967), 1075.
- (32) R.G.Davies and A.Gilbert: Acta Met., 15 (1967), 665.