- (6) J. Horvath and H.H. Ulig : J. Electrochem. Soc., **115** (1968), 791.
- (7) T. P. Hoar : J. Electrochem. Soc., **117** (1970), 17 C.
- (8) 杉本克久, 沢田可信 : 防食技術, **20** (1971), 264.
- (9) K. Sugimoto and Y. Sawada : Corrosion, **32** (1975), 347.
- (10) K. Sugimoto and Y. Sawada : Corros. Sci., **17** (1977), 425.
- (11) 松田史朗, 杉本克久, 沢田可信 : 日本金属学会誌, **39** (1975), 848.
- (12) S. Matsuda, K. Sugimoto and Y. Sawada : Trans. JIM, **17** (1977), 66.
- (13) N. Sato and K. Kudo : Electrochim. Acta, **19** (1974), 461.
- (14) S. Robert : Phys. Rev., **114** (1959), 104.
- (15) E. Menzel and J. Gebhart : Z. Phys., **168** (1962), 392.
- (16) N. Sato and K. Kudo : Electrochim. Acta, **16** (1971), 447.
- (17) J. L. Ord and D. J. DeSmet : J. Electrochem. Soc., **113** (1966), 1258.
- (18) A. B. Winterbottom : J. Iron Steel Inst., **165** (1950), 9.
- (19) G. M. Bulman and A. C. C. Tseung : Corros. Sci., **17** (1977), 425.
- (20) J. Kruger : Corrosion, **22** (1966), 88.

Ti-Mo および Ti-V 2 元合金における準安定 β 相の 応力誘起生成物*

岡 宗雄** 谷 口 芳 幸**

Muneo Oka and Yoshiyuki Taniguchi : Stress-induced Products in Meta-stable Beta Ti-Mo and Ti-V Alloys. The stress-induced products formed by cold-rolling in Ti-11~20% Mo and Ti-16% V binary alloys have been examined by means of optical microscopy, X-ray diffraction and transmission electron microscopy.

Plate-like products in a Ti-11% Mo alloy with a meta-stable β phase were {332} twins and a small amount of orthorhombic martensites, and those in Ti-13% Mo, 15% Mo and 16% V alloys with a meta-stable β phase were {332} twins. Meanwhile, plate-like products in a Ti-20% Mo alloy with a stable β phase were {112} deformation twins. It is considered that the unusual {332} twinning in *bcc* crystals is associated with the unstability of atoms in a meta-stable β phase rather than with the presence of the ω phase formed during quenching.

(Received May 23, 1978)

I. 緒 言

Ti-Mo および Ti-V 系合金の準安定 β 相 (9~17% Mo, 12~18% V) を常温で塑性変形すると, 板状の応力誘起生成物† (以下には Stress Induced Product の略である SIP と記す。) が現われるが, それに関する過去の研究の概略は次の通りである。

まず 1950 年代に光学顕微鏡と X 線回折法によってなされた Ti-Mo 合金 (10.5~14% Mo) を用いた Wenig ら⁽¹⁾, Liu⁽²⁾ および Gaunt ら⁽³⁾ の研究では, SIP はいずれも {344} β に近い晶癖面を有する *hcp* 構造の α' マルテンサイトであるとされていた。そして結晶方位関係やマルテンサイト変態に伴う剪断歪の方向および量についても求められていた。その後 Ti 合金の SIP に関する研究報告はなされなかったが, 1968 年に Blackburn ら⁽⁴⁾ が透過電子顕微

鏡 (以下には Transmission Electron Microscopy を略して TEM と記す。) 法を用いて, Ti-11.5% Mo 合金の SIP を調べた結果, SIP は晶癖面が {112} β に近い *bcc* か *bct* 構造のマルテンサイトであると報告されており, この研究発表は 1950 年代の研究結果と著しく異なるものであった。しかしながら, Blackburn ら⁽⁴⁾ が指摘しているように, β 相が準安定な Ti-Mo 合金では TEM 用の薄膜作製のため電解研磨をする際に電解液からの水素吸収と極端に試料厚み (数百 nm) が小さいこととにより, 薄膜試料

† 準安定 β 相を有するチタン合金の冷間加工による生成物は, 古くから研究されている外国の文献には “stress-induced product” あるいは “stress-induced martensite” と記されており, “応力誘起” と “歪誘起” とを厳密に区別して用いられていない。そのため過去の文献との比較の際の用語上の混乱を避けるため, 本論文においても “応力誘起” という表現を用いることとした。本研究では生成物が応力誘起のものか歪誘起のものかの区別を厳密につけることができなかったもので, 本来は加工誘起生成物と表現すべきであろう。

** 鳥取大学工学部生産機械工学科 (Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Tottori University, Tottori)

* 1976 年 10 月日本金属学会仙台大会に一部発表

内に *fcc* 構造のマartenサイトが自然発生的に多数生成し、SIP の結晶学的な解析を困難ならしめた。そのため、彼らは Mo 含有量が同じでしかも薄膜効果による生成物を生じ難い β III 合金 (Ti-11.5% Mo-6% Zr-4.5% Sn) の SIP を TEM 法によって観察した結果、マartenサイトではなく、 $\{332\}_\beta$ 変形双晶であることを明らかにした⁽⁵⁾。その後 Roberson ら⁽⁶⁾ も β III 合金の SIP を X 線法と TEM で調べて、同様に $\{332\}_\beta$ 変形双晶が存在すると報告している。しかし、Koul ら⁽⁷⁾ は TEM で Ti-13% Mo 合金の SIP を観察し、 α' マartenサイトであると報告している。

一方、Ti-V 2 元系合金の準安定 β 相における SIP については、Ti-16% V 合金を TEM で調べた Koul ら⁽⁷⁾ の α' マartenサイトという簡単な報告のみである。安定 β 相を有する Ti-20~40% V 合金の SIP⁽⁸⁾⁽⁹⁾ は詳しく研究され、 $\{112\}_\beta$ 変形双晶であることが明らかにされている。以上簡単に記述したように、過去の Ti-Mo および Ti-V 2 元合金の準安定 β 相の SIP はマartenサイトか変形双晶か未だ確定的でない。

最近著者らは Ti-Mo および Ti-V 2 元合金の準安定 β 相の TEM 用の薄膜試料の作製のため、ある電解液⁽¹⁰⁾ を用いて研磨すれば Blackburn らが懸念した“自然発生的なマartenサイト”は生成しないことを見出した。そのため Ti 2 元合金の SIP に対する TEM 研究が行えるようになった。そこで Ti-Mo および Ti-V 2 元合金の SIP を明確にし、且つ過去の研究結果と比較検討するため、次の点を考慮して本研究を行った。

(1) Ti-Mo 合金の準安定 β 相領域の組成として、11%、13% および 15% Mo を選び、さらに安定 β 相領域の 20% Mo を含む合金も加えて溶質原子の濃度の違いによる SIP の変化を調べる。

(2) Ti-Mo 系と類似の状態図を有する Ti-16% V の準安定 β 相の SIP を調べる。

(3) SIP の測定方法として過去の研究者が用いた光学顕微鏡、X 線回折法および電子顕微鏡のすべてを用いる。

II. 実験方法

各種組成の合金を作るために、まずスポンジ Ti (純度 99.8%) に切屑状 Mo (99.98%) あるいは同じく切屑状 V (99.9%) を重量で 11, 13, 15 および 20% Mo と 16% V になるように秤量後よく混合し、直径 30 mm ϕ 高さ 15 mm の円板 (約 50 g) にプレスした。それらをボタンテスト炉に装入し、Ar 雰囲気中で電弧溶解して塊状の合金を得た。溶解は成分の均一化を十分にするために数回繰返して行った。5 種類の合金の化学分析の結果を Table 1 に示す[†]。得られた塊状試料を 1273 K で 14.4 ks 真空中で焼鈍し、炉冷後 1073~1273 K の温度範囲で熱間圧延により 3 mm

Table 1 Chemical analysis of the alloys used, wt%.

Nominal composition	Chemical composition
Ti-11% Mo	10.74% Mo
Ti-13% Mo	12.77% Mo
Ti-15% Mo	15.14% Mo
Ti-20% Mo	19.17% Mo
Ti-16% V	15.50% V

厚と 1 mm 厚の板にした。前者から光学顕微鏡用 (15×20×3 mm) および二面解析用の試料を、後者から TEM 用 (15×20×0.3 mm) の試料を作製した。試料が所定の寸法に成形された後、1273 K で 3.6 ks 真空中で焼鈍後水焼入れされた。二面解析用試料は粗大な結晶粒径 (3~5 mm) を得るために特に 1473 K で 72 ks 真空中で焼鈍された。粗大な結晶粒の方位を求めるための Laue 写真は SIP を発生させる以前に撮影され、あらかじめ結晶方位は決定されていた。続いて 3~10% 程度の加工度の冷間圧延により試料に応力誘起生成物を発生させた。TEM 用薄膜試料はメタノールに硫酸を 5% の体積比で混入した液⁽¹⁰⁾ を用いて電解研磨により得られた。使用した TEM は JEM 200 A で、加速電圧は 200 kV であった。存在する相の X 線による同定は Ni でフィルターされた Cu-K α 線を用いてディフラクトメーターにより行われた。また、二面解析用の粗大結晶粒の方位は W-管球を用いて背面反射 Laue 法により決定した。

III. 実験結果

1. 光学顕微鏡観察

1273 K より水焼入れした各試料を光学顕微鏡により観察すると、残留 β 相よりなる結晶粒のみで変態生成物は認められなかった。これらの試料を常温で圧延すると、带状組織の SIP が β 相の結晶粒内に現れる。Photo.1 は Ti-13% Mo, Ti-20% Mo および Ti-16% V 合金の典型的な SIP の光学顕微鏡写真である。SIP の形態は Ti-11% Mo, Ti-13% Mo と Ti-15% Mo では類似しており、(a) に示すように平行な带状組織であった。一方 Ti-20% Mo 合金のそれは (a) に見られるような組織とは異なり、(b) に示すようにすべり線が多くなり直線性のよい带状組織が得難くなり生成物の幅も狭くなっているのが特徴的であった。また Mo の含有量が多くなると歪み量を大きくしないと SIP は発生し難い傾向があった。Ti-16% V 合金の SIP を (c) に示す。この合金の SIP は Ti-13% Mo 合金の SIP が直線性のよい带状であるのに比べてむしろ線状に近くなり、また直線性もやや劣る傾向にあった。

2. X 線回折

Photo.1 に見られる SIP の結晶構造を調べるため、SIP を有する試料から X 線ディフラクトメーターによる X 線回折図形がとられた。用いた試料の結晶粒径は 0.2~0.3 mm

[†] 本論文では添加元素の量は秤量値で示し、文献から引用した合金組成はすべて分析値で示す。

Photo.1 Optical micrographs of stress-induced products in three Ti alloys. Unetched.

- (a) Ti-13% Mo, (3% reduction in thickness)
- (b) Ti-20% Mo, (12% reduction)
- (c) Ti-16% V, (4% reduction)

であり、ディフракトメーターの走査角度は $2\theta = 35 \sim 90^\circ$ であった。5種類のいずれの試料でも β 相の $\{110\}$, $\{200\}$, $\{211\}$ および $\{220\}$ の回折線を明瞭に認めることができた。Ti-11% Mo 合金では、Fig.1 に示すように β 相のほか斜方晶マルテンサイト (α'') による回折線が見出された。 α'' は Bagariatskii ら⁽¹¹⁾ が最初に Ti 合金に見出したもので、後に β III を強加工 (20% 以上) した際にも現れたと報告されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。Ti-11% Mo 合金の β と α'' の格子定数はそれぞれ $a_\beta = 0.3265$ nm, および $a = 0.3055$ nm, $b = 0.4932$ nm, $c = 0.4647$ nm であった。なお、このほかに ω 相による弱い回折線も認められた。Ti-13, 15 および 20% Mo 合金では β 相の回折線のみで、Ti-16% V 合金では β 相とわずかに確認できる ω 相の回折線とであった。

過去の文献から存在が予想された *hcp* 構造の α' は、本実験では認められなかった。以上の X 線回折の結果から、SIP は Ti-11% Mo 合金では α'' † であり、他の合金では *bcc* 晶即ち双晶であると考えられる。

次に二面解析法により Ti-13 および 15% Mo 合金の SIP の晶癖面を測定した結果を Fig.2 に示す。図中に参考のために示した指数のうち、 $(\bar{3}44)$ は従来から Ti 合金の SIP の晶癖面として取りあげられているものであり、

Fig.1 X-ray diffraction line profiles of a cold-worked specimen (9.8% reduction) of a Ti-11% Mo alloy scanning the range from 33° to 43° , showing the first five peaks of orthorhombic martensite. $\text{Cu-K}\alpha$ radiation with Ni filter.

Fig.2 Stereographic projection showing the normals to habit planes of stress-induced products derived from two surface trace analysis for coarse grains in bulk specimens.

- x : Ti-13% Mo alloy
- o : Ti-15% Mo alloy

† 後述の電子回折の結果から見て、双晶も存在する。

($\bar{1}12$)は bcc 金属に最もよく観察される双晶面である。Fig.2 から明らかなように両合金の SIP の晶癖面の極は ($\bar{3}44$)と ($\bar{2}33$)の極の近傍に集中して存在しており、($\bar{1}12$)の近くには1つも存在しなかった。しかし、Fig.2 の結果にはバラツキがあり、SIP の晶癖面が ($\bar{3}44$) $_{\beta}$ か ($\bar{2}33$) $_{\beta}$ かいずれとも決められなかった。バラツキの原因としては測定誤差のほかに、TEM の観察の項で述べるような2次双晶を伴った SIP もあり、そのため晶癖面が2次双晶を含まないものとは少しずれることが考えられる。

3. 電子顕微鏡観察

Ti-13% Mo 合金の SIP の TEM 写真を Photo.2(a) に示す。写真内で斜め右上方向に沿って並んでいる2本の平行なバンドが SIP である。(c)の説明図に示された指数から明らかなように、(b)の回折斑点はすべて β 相の $[\bar{1}10]$ と $[\bar{1}10]_t$ の2組の晶帯軸に属し、これらの斑点は SIP 晶癖面に平行なトレース(矢印)を含む紙面に垂直な面を鏡面として互に対称の位置にあり、バンドと地は双晶の関係にあることが判る。その双晶面は矢印のトレースに直交する位置に回折斑点を有する (332) 面である。したがって(a)のバンドは (332) 変形双晶であることが明らかとなった。(b)中の回折斑点および他の試料からの回折斑点はいずれも bcc 晶で指数付けできるもので、それ以外の結晶構造による斑点は認められなかった。Photo.3 は (332) 変形双晶の内部に2次的に生成した $\{332\}$ 双晶を示す。(a)内の黒枠内は制限視野絞りの位置を示し、その場所から撮られた回折図形を(b)に示す。この回折図形は Photo.2(b)の回折図形と全く同じ方位のものであり、 $\leftrightarrow$ 印に平行な小さなバンドは $\leftarrow$ 印に平行な大きな (332) 双晶内の2次双晶でその双晶面は (332) と指数付けされた。このような2次双晶を含む $\{332\}$ 変形双晶は Ti-11% Mo および Ti-15% Mo 合金の SIP にも見られた。(b)の回折図形には実線で示された $[\bar{1}10]$ 晶帯のものと、点線で示された $[\bar{1}10]$ 晶帯に属する斑点以外に二重矢印線のごく近傍に2つの強度の弱い斑点が認められるが、これらは ω 相による $\{10\bar{1}1\}$ による斑点である。このことからX線では検出されなかった ω 相が僅かではあるが存在するといえる。Photo.4(a) は Ti-11% Mo 合金の SIP を示し、(b)は Photo.2(b)に示したと同じ典型的な $\{332\}$ 双晶による回折斑点が示されており、この組成でも $\{332\}$ 変形双晶の生成が確かめられたことになる。また本合金では Fig.1 のX線回折図形に示された α'' も SIP として存在するはずである。その写真を撮るために数多くの板状生成物を TEM 法により撮影した。しかし、それらの多くは母相と同じ bcc 晶(双晶)であった。それ以外のものは電子回折法の精度内で β か α'' かあるいは α' かの明確な判定を下せなかった。

Ti-20% Mo 合金では Mo 量が増加したために β 相が常温で安定となる。Photo.5(a)はこの合金の SIP を示して

Photo.2(a) Transmission electron micrograph showing (332) $_{\beta}$ twin bands produced in a Ti-13% Mo alloy. (7% reduction in thickness)
 (b) Electron diffraction pattern taken from the encircled area containing the matrix and a twin band in (a). The arrow is parallel to the trace of a twin band.
 (c) Key diagram of (b).
 ○ : matrix spots, ● : twin spots.

いる。写真の黒いバンドは $(112)_\beta$ 変形双晶であることが、(b)の回折図形をもとにして作図した Fig.3 のステレオ図による解析から明らかとなった。(b)の $[335]$ と $[0\bar{3}\bar{1}]_t$ の晶帯軸に属する回折斑点は、Fig.3 に示すように (112) 双晶面のトレースで互いに折り返しの関係にあり、2つの晶帯に属する斑点は互いに双晶関係にある。(b)の回折図形中に見られる散漫散乱は Ti-20% Mo 合金の焼入状態の試

Photo.3(a) Transmission electron micrograph of a $(332)_\beta$ twin band in a Ti-13% Mo alloy showing $(332)_\beta$ secondary twins involved in a primary $(332)_\beta$ twin. (10% reduction)
(b) Selected area diffraction pattern taken from the encircled area in (a). It shows the same typical $(332)_\beta$ twin pattern as Photo.2(b). The double headed arrow is parallel to the trace of a $(332)_\beta$ twin.

Photo.4(a) Transmission electron micrograph showing a $(332)_\beta$ twin band produced in a Ti-11% Mo alloy. (7% reduction)
(b) Selected area diffraction pattern taken from the encircled area in (a).

料では見られないが、加工度を増した試料では観察される。このことから(b)の散漫散乱は加工によって誘起された ω 相あるいは ω 相の析出前段階⁽¹²⁾によるものと考えられる。

Photo.6(a)は Ti-16% V 合金の SIP を示している。(b)と(c)の回折斑点はいずれも bcc 晶で指数付けがなされ、Fig.4 のステレオ図から $\{332\}$ 面で互いに鏡面対称の関係にあることが明らかで、(a)中のバンドは $\{332\}$ 変形双晶であることが理解される。

Photo.5(a) Transmission electron micrograph showing a $(112)_\beta$ twin band formed in a Ti-20% Mo alloy. (12% reduction)
(b) Selected area diffraction pattern taken from the encircled area in (a).

Fig.3 Stereographic projection associated with the diffraction pattern of Photo.5(b), showing that indices of the matrix and twin are in mirror positions each other with respect to the trace of the (112) plane indicated by a dot-dashed line.

Photo. 6 (a) Transmission electron micrograph showing a $\{332\}_\beta$ twin band in a Ti-16% V alloy. (6% reduction)
(b) and (c) Selected area diffraction patterns taken from a twin band and the matrix, respectively.

Fig. 4 Stereographic projection associated with the diffraction patterns of Photos. 6 (b) and (c), showing that $\{332\}$ plane is the mirror plane between the matrix and twinned lattices.

IV. 考 察

緒言に記したように Ti-Mo 2 元合金の準安定 β 相の SIP が α' であるとか bcc マルテンサイトであるとか研究者によって異なった結果が報告されていた。最近 β III 合金の SIP は $\{332\}$ 変形双晶であることが明らかにされたが、多量の溶質原子を含んだ安定 β 相の SIP と Ti-Mo 2 元合金の SIP とを比較することは適当でない。その理由として β III 中には 11% Mo 以外に 6% Zr と 4.5% Sn の溶質原子が含まれており、これらの溶質原子が β 相のマルテンサイトへの変態および ω 相の析出等の相変態挙動あるいは加工による変形挙動に大きな影響を与えることなどが考えられる。したがって過去の研究結果と比較検討するには、Ti-Mo あるいは Ti-V の 2 元合金を調べる必要があった。その結果、2 元合金の準安定 β 相の SIP は主と

して $\{332\}$ 変形双晶であり、Ti-11% Mo 合金ではそのほかに少量の α'' が生成することが明らかとなった。

bcc 結晶の $\{332\}$ 双晶は、Crocker⁽¹³⁾によって鉄系マルテンサイト内の変態双晶の可能な様式の 1 つとして取りあげられた。彼によって提唱された双晶様式は $K_1 = \{332\}$, $\eta_1 = \langle 113 \rangle$, $K_2 = \{112\}$, shear の量 $S = 1/2\sqrt{2} = 0.35$ であった。この双晶様式の場合すべての原子は $\langle 113 \rangle$ 方向に動くのではなく、一部の原子は *shuffle* することを考慮しており、 $\{112\} \langle 111 \rangle$ 双晶様式の shear の量の丁度半分の shear であることに注目すべきである。もし *shuffle* を考慮せずにすべての原子が $\{332\}$ 面で $\langle 113 \rangle$ 方向に shear したとすれば、 $S = 3.5$ ⁽¹⁴⁾ という大きな値となり実際に双晶は起り難いと考えられる。

では、Ti-20% Mo とか Ti-20~40% V 合金⁽⁸⁾⁽⁹⁾の安定 β 相の SIP は $\{112\}$ 双晶が生成するが、準安定な β 相では何故 $\{332\}$ 双晶が生じるのかについては Blackburn ら⁽⁵⁾の次のような見解がある。準安定 β 相内に多数の微細な ω 粒子が存在するが、双晶形成のための剪断歪によってそれらが破壊される。その際に $\{112\}$ 双晶様式における ω 相内の原子移動は β 相中のそれとは異なり、剪断方向と反対方向に動く原子もあるが、 $\{332\}$ 双晶様式では β 相中の原子の動きと ω 相中のそれとに大きな変化がないので準安定 β 相内の ω 粒子が $\{112\}$ 双晶の発生を困難にしているというものである。しかし、本実験結果によれば X 線回折では ω 相は Ti-11% Mo と Ti-16% V 合金を除いて検出されず、電子線回折でも Photo. 3 および Photo. 5 の回折図形に示すように僅かしか ω 相が検出されない β 相内に $\{332\}$ 双晶が見出されている。このことから ω 相の存在が $\{332\}$ 双晶生成の本質的な条件ではないと考えられる。そこで、準安定 β 相は時効とか加工によって容易に ω 相の析出物を生成することから、著者らは $\{332\}$ 双晶が準安定 β 相で生成する原因を次のように考えている。

β 相内の $\{111\}$ 面の 3 層のうちの 2 層の原子が $\pm 0.14a$ (a は β 相の格子定数) だけ僅かに移動することによって ω 相の結晶構造に変化する⁽¹⁵⁾ことから、準安定な β 相の原子はその位置を変化させ易い不安定な状態にある。したがって $\{332\}$ 双晶の形成の際に Crocker⁽¹³⁾によって提案された *shuffle* を伴う原子移動を行うとすれば、 β 相の格子不安定性が $\{332\}$ 双晶の形成の際の原子の *shuffle* を容易にすると考える方が妥当と思われる。このことに関連して、Ti-20~28% V 合金を時効処理により ω 相を全体の 50% の体積にまで増加させた試料を引張り変形しても粗大なレンズ状生成物は $\{112\}$ 変形双晶であったという報告⁽⁹⁾は、 $\{332\}$ 双晶の形成に ω 相は不可欠なものでないことを示唆するものである。

過去の Ti-Mo および Ti-V 系 2 元合金の準安定 β 相の SIP が α' ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁷⁾とか bcc マルテンサイト⁽⁴⁾であったという報告と本研究結果とは一致しないので、この点につい

て考察を加える。SIP が α' か $\{332\}$ 双晶かは結晶構造の違いを除けば、両者の晶癖面指数、剪断歪の大きさおよびその方向が互いに非常に近い値であることに注目してみた。応力誘起された α' の晶癖面として二面解析法により求められた $\{344\}$ が変形双晶の $\{332\}$ とは 2.7° しか離れていないので、二面解析の精度からは晶癖面がいずれとも断定し難い。次に SIP が α' としてその shear の大きさ (S) および方向について Wenig ら⁽¹⁾ はそれぞれ $S=0.28$ と $[147]$ から 10° 以内とし、Gaunt ら⁽³⁾ は $S=0.27$ と $\langle 338 \rangle$ を scratch displacement 法により求めているが、Crocker の提案した $\{332\}$ 双晶ではそれぞれ $S=0.35$ と $\langle 113 \rangle$ となっている。したがって shear の量と方向の点では過去に α' といわれたものでも $\{332\}$ 双晶で説明できないことはない。以上のことから、結局 SIP が α' か双晶かの決め手になるのは結晶構造であることになる。そして緒言の最後に記したような点に注意して結論にまとめられるような結果を得た。

最後に SIP としての α'' については、 β III 合金の β 相を 22% 引張り⁽⁵⁾あるいは冷間スエーピング⁽⁶⁾などの強加工をした場合に少量の α'' が見出されているが、大部分は $\{332\}$ 双晶である。 α'' の格子定数は加工度や組成などによってその値が異なるようであるが、本実験の α'' のそれに近い値である。この α'' は Ti-Mo 合金の準安定 β 相領でも最も不安定な組成でのみ生成したもので、しかも量的に少ないことから、古くから取りあげられてきた板状 SIP の考察の対象から少し外れるものである。また *bcc* マルテンサイト⁽⁴⁾は母相と同じ結晶構造であることから恐らく変形双晶であろうと推測される。

V. 結 論

Ti-Mo および Ti-V 2 元合金の冷間圧延(加工度 3~12%) による応力誘起生成物の本性を調べるため、光学顕微鏡、X線回折法および電子顕微鏡法により研究した結果は、次のようにまとめられる。

(1) Ti-11% Mo 合金の応力誘起生成物は、斜方晶マルテンサイト (α'') と $\{332\}_\beta$ 変形双晶であった。Ti-13% Mo, Ti-15% Mo および Ti-16% V 合金のそれは、 $\{332\}_\beta$ 変形双晶であった。変形双晶の内部には ω 相の微細な粒

子が増加しているのが観察され、また $\{332\}_\beta$ 型の 2 次双晶を含むものがしばしば観察された。

(2) Ti-20% Mo 合金の安定 β 相内の応力誘起生成物は、 $\{112\}_\beta$ 変形双晶であった。

(3) Ti 合金の準安定 β 相に $\{332\}_\beta$ 変形を生じる原因は、 ω 相の存在とは直接の関係はなく、 ω 相を生成し易いという β 相の不安定なことにより $\{332\}_\beta$ 双晶形成における原子移動の際の *shuffle* を容易にするためと考えられる。

本研究を遂行するにあたり、Ti 合金の溶解・圧延にご協力いただいた関西大学工学部亀井研究室の杉本隆史、寺内俊太郎の両氏、ならびに試料の化学分析にご協力下さいました(株)神戸製鋼所中央研究所の佐藤宏士氏に深く感謝いたします。

文 献

- (1) S. Wenig and E.S. Machlin : Trans. AIME, **191** (1954), 1280.
- (2) Y.C. Liu : Trans. AIME, **206** (1956), 1036.
- (3) P. Gaunt and J.W. Christian : Acta Met., **7** (1959), 534.
- (4) M.J. Blackburn and J.C. Williams : Trans. Met. Soc. AIME, **242** (1968), 2461.
- (5) M. J. Blackburn and J. A. Feeny : J. Inst. Metals, **99** (1971), 132.
- (6) J. A. Roberson, S. Fujishiro, V. S. Arunachalam and C. M. Sargent : Met. Trans., **5** (1974), 2317.
- (7) M. K. Koul and J. F. Breedis : Acta Met., **18** (1970), 579.
- (8) Fu-Wen Ling, E. A. Starke, Jr. and B. G. LeFevre : Met. Trans., **5** (1974), 179.
- (9) H. G. Paris, B. G. LeFevre and E. A. Starke, Jr. : Met. Trans., **7 A** (1976), 273.
- (10) R. A. Spurling : Met. Trans., **6 A** (1975), 1660.
- (11) L. A. Bagariatskii, G. I. Nosova and T. V. Tagunova : Soviet Phys. Doklady (English Transl.), **3** (1959), 1014.
- (12) D. de Fontaine, N. E. Paton and J. C. Williams : Acta Met., **19** (1971), 1153.
- (13) A. G. Crocker : Acta Met., **10** (1962), 113.
- (14) R. H. Richman : *Deformation Twinning*, Eds. by R. E. Reed-Hill et al., Gordon and Breach, New York, (1964), 237.
- (15) D. de Fontaine and O. Buck : Phil. Mag., **27** (1973), 967.