

【 211 】

氏 名	AVIGDOR ZANGVIL アビガドル ザングビル
学 位 の 種 類	工 学 博 士
学 位 記 番 号	工 博 第 359 号
学 位 授 与 の 日 付	昭 和 49 年 3 月 23 日
学 位 授 与 の 要 件	学 位 規 則 第 5 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	工 学 研 究 科 冶 金 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	A STUDY OF STRUCTURES AND PHASE EQUILIBRIA IN TITANIUM ALLOYS MAINLY BY MEANS OF TRANSMISSION ELECTRON MICROSCOPY AND ELECTRON PROBE X-RAY MICROANALYSIS (チタン合金の組織と相平衡の主として電子顕微鏡透過法およびX線マイクロアナリシスによる研究) (主 査)
論 文 調 査 委 員	教 授 村 上 陽 太 郎 教 授 足 立 正 雄 教 授 森 山 徐 一 郎

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は工業用チタン合金として最近注目されている Ti-Cu 二元系および Ti-Mo-Al 三元系を取り上げ、前者に関してはマルテンサイト変態の形態学、結晶学および時効析出挙動を、後者には平衡状態図と熱処理による各相の形態の変化を、主として電子顕微鏡透過法、制限視野電子線回折法およびX線マイクロアナリシスなどで研究した結果をまとめたもので、8章から成っている。

第1章は緒論で本研究の目的を述べ、研究の遂行に必要な相変態ならびに異相平衡に関する基礎理論を詳説している。

第2章は Ti-Cu 合金の焼入および時効マルテンサイトの形態と下部組織を、0.95, 1.95 および 5.3 重量% Cu を含む三種類の試料について研究した結果を述べたもので、これらの合金のマルテンサイトはいずれもほぼ平行な板の集団から成っているが、Cu 量が少なくなると塊状になる傾向を生じ、下部組織は転位と双晶から成っていること、Cu 量が多くなると針状の傾向が強くなり、双晶の量も多くなるが、これらの双晶面はいずれもほとんど $\{10\bar{1}1\}$ 面であること、0.95 および 1.95 重量% Cu 合金のマルテンサイトの一次板の界面は不規則で、その形成の機構にはマッシブ (massive) 変態の要素が含まれていることなどを明らかにし、一方過飽和マルテンサイトを時効すると、かなりの大きさになるまで母相に整合な薄板状の析出物の均一析出が見られるが、高温時効ではマルテンサイト板の境界、転位および双晶が析出の核生成場所となるため、時効マルテンサイト組織中の析出物の大きさと分布は著しく不均一であることなどを見出している。

第3章では Ti-Cu 合金のように母相が残留しない完全マルテンサイト変態の場合には従来は不可能であった方位関係と晶癖面を決定する新しい方法を提案し、第4章ではこの方法を Ti-Cu 合金に適用した結果を述べている。マルテンサイトと母相との方位関係は、その平行性が低指数の最密面と最密方向に存在するとする仮定を用いれば、隣接した一対のマルテンサイト板の制限視野電子線回折のデータを利用してステレオ投影法で決定され、行列代数学で解析できることを示し、さらに母相とマルテンサイトの方位

関係に Bowles-Mackenzie (B-M) 理論が仮定できるならば、晶癖面の指数は 180° の回転の自由度はあるが、約 4° 以内の精度で決定できることを明らかにしている。

Ti-Cu 合金のマルテンサイトの解析結果としては、上記の三種類のいずれの合金にも Burgers の方位関係、 $\{110\}_\beta // (0001)_\alpha$; $\langle 111 \rangle_\beta // \langle 2\bar{1}10 \rangle_\alpha$ が存在し、この方位関係からの偏倚は 1° あるいはそれ以下であること、次に晶癖面に関しては、母相とマルテンサイトの方位関係に仮定した B-M 理論のクラス “A” (α^- , ω^+) の解が適当で、ステレオ投影面上の $(10\bar{7}9)$ 極点から 4° 以内の範囲に晶癖面が存在すること、さらに上記のようにマルテンサイトの下部組織の双晶としては $(10\bar{1}1)$ 双晶のみが見られ、これが $\{110\}_\beta$ 面から発生し、またクラス “A” の変態とよい一致を示すことは B-M 理論の仮定が妥当であることを示す証明になることなどを明らかにし、またこの解析法を残留 β を含む Ti-Cr 合金のマルテンサイトに適用して、この方法が正しい解を与えることを実証している。

第5章では、二相組織を熱処理によってほぼ平衡状態にした場合には、代表的な少数の試料を使用して各試料についてミクロ的に隣接した二相の組成をX線マイクロアナライザーで定量すれば、相境界と同時に二相の共軛線を決定でき、正確な平衡状態図を求めることができるという考えにもとづき、Ti-Mo-Al 三元系のチタン隅の平衡状態図を走査型電子顕微鏡とX線マイクロアナライザーを併用した全く新しい方法で確定した結果を述べている。まずX線マイクロアナライザーによる Mo および Al 量の定量法を検討し、原子番号、吸収および蛍光各補正を行ない、また単相組織の数種類の試料の化学分析の結果とも対比し、5~7%の精度で定量できることを確かめ、次に試料の平衡状態の度合を知るため、熱処理温度に低温度からと高温からとの両方から近接させる巧好な熱処理法を考案してこれを確かめ、この範囲の組成の合金では、 800°C では約300時間、 900°C では約200時間の熱処理でほぼ十分な平衡状態が得られることを明らかにした上で、チタン隅の30重量% Mo, 13重量% Al の組成範囲について、 700° , 800° , 900° および $1,000^\circ\text{C}$ の各等温断面状態図を確定している。またこれらの結果は、 $\alpha/(\alpha+\beta)$ 相境界に関しては従来の研究とよい一致を示していること、 $(\alpha+\beta)/\beta$ および $(\alpha+\beta)/(\alpha+\alpha_2+\beta)$ 相境界に関しては相区域の形状には類似性が認められるが、相境界の位置はかなりのずれがあること、実験方法などを考慮すれば本実験の結果がより信頼性があることなどを明らかにしている。

第6章は前章の実験結果を整理するため、修正した正則溶液近似を用い、各二元系の相互作用のエネルギー・パラメータとその組合せを選択して状態図の熱力学的計算を電算機で行なった結果を述べたものである。正則溶液近似はごく限定された温度範囲に適用できるにすぎないが、広い温度範囲にあてはめるためにはパラメータを温度あるいは組成に対して変化させる必要があること、実験で求められた相境界のみならず共軛線をも一致させることによって適当なパラメータの組合せがより正しく選択できること、Ti-Mo 系のパラメータを Ti-Mo 二元系状態図によく一致するように温度あるいは組成の関数として決めた場合は、他の二つの系のパラメータは一定値を用いてよいこと、また Ti-Al 系および Ti-Mo 系について Kaufmann および Bernstein によって求められたパラメータを用いた場合などについて検討した結果などを述べ、計算結果は実験結果とかなりよい一致が得られ、実験結果の整理に有用であることなどを明らかにしている。

第7章は Ti-Mo-Al 三元系のチタン隅の合金の熱処理に関して、均一 β 相から生成する α および α_2

相の形態を、本研究で求めた平衡状態図と関連させて究明した結果を述べたものである。組織成分の量的割合は合金組成の相境界からの相対的な位置に依存することは勿論であるが、第二相の核生成の駆動力に関係するので、例えば $(\alpha+\beta)/\beta$ 相境界の近傍では α 相の生成は結晶粒界で起こること、駆動力の小さいときは第二相の分散が不均一であること、過飽和度が大きい場合には α 相は β 相粒内で晶癖面にそうて長く伸びた形状を示し均一分散をするが、中間の場合には粗大な分散が起こること、また例えば β 相域から 700°C に恒温保持し、さらに 900°C に昇温して加熱すると極めて微細な α 相粒子が丸味を帯びた状態で分散すること、 β 相域から三相領域に段階的に温度を低下させるような熱処理を行なうと、 $(\alpha+\alpha_2)$ 粒子の特異な組織を生じることなどこの合金の熱処理に重要な資料を与えている。

第8章は本論文の総括である。

論文審査の結果の要旨

本論文は最近工業用チタン合金として注目されている Ti-Cu 二元系および Ti-Mo-Al 三元系の二つを取り上げ、前者に関してはマルテンサイト変態の形態学、結晶学および時効析出の挙動を、後者には平衡状態図と各相の形態を主として電子顕微鏡透過法、制限視野電子線回折法およびX線マイクロアナリシスなどで研究したもので、得られた主な成果は次のように要約される。

(1) 1~5.3 重量% Cu を含む Ti 合金のマルテンサイトはいずれも平行な板状の形態を示すが、Cu 量が少ないと塊状に、多いと針状になる傾向をもち、下部組織には転位と $\{10\bar{1}1\}$ 双晶が存在し、低濃度合金のマルテンサイトにはマッソ (massive) 変態の傾向があることなどを明らかにした。

(2) マルテンサイトを時効すると母相に整合な薄板状の析出物の均一析出が起こるが、高温時効ではマルテンサイト板の境界、転位および双晶などが析出の優先的核生成場所となるため、この組織では析出物は粗大化し、分布は不均一になることを示した。

(3) Ti-Cu 合金では母相 β が残留せず完全マルテンサイト α' となり、従来このような場合には方位関係および晶癖面の決定は不可能とされていたが、 β と α' の方位関係に Bowles-Mackenzie 理論の対応性があると仮定すれば、隣接した一対のマルテンサイト板の制限視野電子線回折のデータを用いてステレオ解析法によってこれらを決定できる方法を見出し、この方法を残留 β を含む場合にも適用して一般的な解析法として利用できることを実証した。

(4) Ti-Cu 合金の一次マルテンサイトにこの解析法を適用し、母相 β とマルテンサイト α' との方位関係には、Burgers の関係、 $\{110\}_{\beta} // (0001)_{\alpha'}$; $\langle 111 \rangle_{\beta} // \langle 2\bar{1}10 \rangle_{\alpha'}$ が存在し、この方位関係からの偏倚は 1° あるいはそれ以下であること、晶癖面はステレオ投影上の $(10\bar{7}9)$ 極点から 4° 以内の範囲に存在することを決定した。

(5) Ti-Mo-Al 三元系のチタン隅の Mo 約 30 重量%、Al 約 13 重量%の範囲について、試料を巧妙な熱処理法で平衡状態に近接させ、ミクロ的に隣接した二相の組成をX線マイクロアナライザーで定量する新しい方法で、 700° 、 800° 、 900° および 1000°C の各等温断面状態図を確定し、二相範囲の共転線をも決定した。またこの状態図を利用して、熱処理法と各相の形態との関連を明らかにした。

(6) 上記の三元系状態図の相境界および共転線は、各二元系の相互作用のエネルギー・パラメータの値

の選択とその組合せを行ない，修正した正則溶液近似を用いて電算機によって行なった熱力学的計算の結果とかなりよい一致が得られることを明らかにし，このような計算が合金の平衡状態図の決定に利用できることを示した。

以上要するに，この論文はチタン合金として重要な Ti-Cu 二元系および Ti-Mo-Al 三元系合金に関して組織と相平衡の研究を行ない，基礎的ならびに工業的に重要な新しい多くの知見を得るとともに，マルテンサイト結晶学の解析ならびに合金の平衡状態図の決定に対して優れた方法を確立したもので，学術上はもとより実際上にも寄与するところは少なくない。

よって，本論文は工学博士の学位論文として価値あるものと認める。