

京都大学	博士 (工学)	氏名	伊藤 良規
論文題目	航空機向けチタン合金鍛造材のマクロゾーン微細化技術に関する研究		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、航空機向けチタン合金鍛造材の品質管理において重要な超音波探傷性向上のために、チタン合金鍛造材においてしばしば形成される、<math>\alpha</math> 相の結晶方位が類似した局所集合組織領域 (マクロゾーン) が超音波探傷性に与える影響を調査し、マクロゾーンの形成機構と微細化原理を調査・議論した研究成果を取りまとめたものであり、全6章から成っている。</p> <p>第1章は序論であり、本研究の背景と目的を示している。チタン合金鍛造材の非破壊検査において用いられる超音波探傷においては、材料組織に起因して発生する信号強度が、欠陥から生じる信号との識別を阻害することから、発生原因となる組織を取り除き超音波探傷性を向上させることが実用上重要である。チタン合金は hcp 構造を有する <math>\alpha</math> 相と bcc 構造を有する <math>\beta</math> 相から成り、<math>\alpha</math> 相の形態は <math>\beta</math> 単相域での熱間鍛造 (<math>\beta</math> 域鍛造) 材において得られる板状 <math>\alpha</math> 組織と、<math>\alpha+\beta</math> 域での熱間鍛造 (<math>\alpha+\beta</math> 域鍛造) 材において得られる粒状 <math>\alpha</math> 組織に分類できる。光学顕微鏡写真で認められる <math>\alpha</math> 相組織は粒径数 <math>10\mu\text{m}</math> と微細であるが、数 <math>100\mu\text{m}</math> を超える大きさで結晶方位の揃ったマクロゾーンが形成され、超音波探傷性に悪影響を及ぼすとされている。しかし、マクロゾーンの形成に与えるプロセス因子の影響を系統的に調査した研究報告は限定的であった。そこで本研究では、チタン合金鍛造材に形成されるマクロゾーンが超音波探傷性に与える影響を調査し、マクロゾーンの形成機構と微細化原理の解明を目的としている。その際、板状 <math>\alpha</math> 組織と粒状 <math>\alpha</math> 組織の両方を研究対象とすることで、<math>\alpha</math> 相形態によらない系統的な理解を目指している。</p> <p>第2章では、<math>\beta</math> 域鍛造を施した Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo 合金に形成される板状 <math>\alpha</math> 組織におけるマクロゾーンの特徴と超音波探傷性に及ぼす影響を明らかにしている。<math>\beta</math> 単相域で圧下率が 50%以上の一軸鍛造を施すことで、<math>\alpha</math> 相の c 軸が鍛造軸に対して垂直方向に配向した板状 <math>\alpha</math> から成るマクロゾーンが形成されることを明らかにした。また超音波探傷性を向上させるためには、マクロゾーンを微細化することが有効であることを実験・解析により証明した。これにより、本研究の目的を達成するための組織制御指針を明確にしている。</p> <p>第3章では、第2章の結果を受け、Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo 合金におけるマクロゾーンの形成メカニズムとその微細化指針を明らかにし、超音波探傷性の向上効果を示している。鍛造材の多数の組織を走査電子顕微鏡 (SEM) 内における Electron Back-Scattering Diffraction (EBSD) 法による結晶方位マッピング結果をもとにした結晶学的・材料組織学的解析を詳細に実施した。マクロゾーンの形成は、<math>\beta</math> 域鍛造後の冷却過程における <math>\beta\rightarrow\alpha</math> 相変態における <math>\alpha</math> 相のバリエーション選択が原因であること、バリエーション選択は、<math>\beta</math> 域鍛造における <math>\beta</math> 相の熱間圧縮集合組織 (<math>\langle 111 \rangle + \langle 001 \rangle</math> 集合組織) の発達と、鍛造軸に垂直な方向に広く伸びた <math>\beta</math> 粒界を原因としていることを初めて明らかにしている。すなわち、<math>\langle 111 \rangle + \langle 001 \rangle</math> 圧縮集合組織を有する <math>\beta</math> 相においては、隣接する <math>\beta</math> 粒間に共通 <math>\{110\}</math> が形成されやすいことをまず見出した。<math>\alpha</math> 相は <math>\beta</math> 相と Burgers の方位関係 (<math>\{110\}_\beta // (0001)_\alpha</math>, <math>\langle -111 \rangle_\beta // \langle 11-20 \rangle_\alpha</math>) を満足するように形成されるが、隣接 <math>\beta</math> 粒間の共通 <math>\{110\}</math> が <math>\alpha</math> 相析出において重要な役割を果たす。</p>			

$\alpha$ 相はまず $\beta$ 粒界上に不均一析出するが、共通{110}を有する隣接 $\beta$ 粒間の鍛造軸に垂直な方向に広く伸びた $\beta$ 粒界上では、特定の $\alpha$ 相バリエントが形成されることになる。その結果、粒界 $\alpha$ を起点として $\langle 111 \rangle$ 方位または $\langle 001 \rangle$ 方位を有する $\beta$ 粒内に別のバリエントの $\alpha$ 相が成長する際にも、特定の結晶方位の $\alpha$ 相が結晶学的に発達しやすく、マクロゾーンを形成するのである。得られた知見をもとに、鍛造前 $\beta$ 粒径の細粒化とひずみ速度の低減( $\beta$ 粒界の湾曲化)によりマクロゾーンを微細化でき、超音波探傷性が向上することを示している。

第4章では、 $\alpha+\beta$ 域鍛造を施し粒状 $\alpha$ 組織を形成するTi-6Al-4V合金について、マクロゾーンの主要構成組織要素である粒状 $\alpha$ の形成素過程を、SEM-EBSD法などを駆使して調査している。 $\beta$ 単相域からの冷却で形成される板状 $\alpha$ (ラメラ状 $\alpha$ )を初期組織とし、 $\alpha+\beta$ 域での熱間変形と焼鈍で得られる粒状 $\alpha$ のサイズは、熱間変形時に板状 $\alpha$ 内に発達する局所方位差の形成頻度と相関があることを明らかにしている。これは、粒状 $\alpha$ 組織の形成機構を明らかにしたものとして、重要な成果である。

第5章では、第4章の結果を受け、Ti-6Al-4V合金における板状 $\alpha$ (ラメラ状 $\alpha$ )組織への $\alpha+\beta$ 域鍛造における等軸化とマクロゾーン形成に及ぼす鍛造(圧縮)加工パスの影響を調査している。2パス目の圧縮軸を1パス目と一致させた一方向多段加工プロセスにおいては、圧縮軸に対して垂直に伸びたマクロゾーンが形成された。マクロゾーンは粒状 $\alpha$ の $c$ 軸の配向が類似した領域であり、 $c$ 軸は圧縮軸に対して垂直に配向していることから、マクロゾーンは $\alpha$ 相の熱間圧縮集合組織の発達に起因していることを明らかにした。2パス目の圧縮軸を1パス目の半径方向に変更した多段加工プロセスの場合、等軸化挙動に及ぼす影響は小さいものの、マクロゾーンの形成が抑制された。得られた結果をもとに、一方向に変形を加え続けた場合には、板状 $\alpha$ の等軸化は進展するがマクロゾーンの微細化は実現できないこと、一方、鍛造プロセスにおける加工パス(変形方向)の変更は、熱間圧縮集合組織の発達を抑制し、マクロゾーンを微細化する有効な手段であることを明らかにした。

第6章は総括であり、本研究で得られた結果を要約しまとめている。

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、航空機向けチタン合金鍛造材においてしばしば形成される、 $\alpha$ 相の結晶方位が類似した局所集合組織領域（マクロゾーン）が超音波探傷性に与える影響を調査し、マクロゾーンの形成機構と、超音波探傷性向上のためのマクロゾーン微細化原理を調査した実験的研究成果を取りまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1.  $\beta$ 域鍛造を施した Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo 合金に形成される板状  $\alpha$ 組織におけるマクロゾーンの特徴と超音波探傷性に及ぼす影響を系統的に調査し、 $\beta$ 単相域で圧下率 50%以上の一軸鍛造を施すことで、 $\alpha$ 相の  $c$ 軸が鍛造軸に対して垂直方向に配向した板状  $\alpha$ から成るマクロゾーンが形成されること、また超音波探傷性を向上させるためにはマクロゾーンを微細化することが有効であることを明らかにした。
2.  $\beta$ 域鍛造を施した Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo 合金におけるマクロゾーンの形成機構を初めて明らかにした。マクロゾーンの形成は、 $\beta$ 域鍛造後の冷却過程における  $\beta \rightarrow \alpha$ 相変態時の結晶方位（バリエーション）選択が原因であり、バリエーション選択は  $\beta$ 相の  $\langle 111 \rangle + \langle 001 \rangle$ 熱間圧縮集合組織の発達と、鍛造軸に対して垂直に広く伸びた  $\beta$ 粒界の形成が重要であることを見出した。そして、鍛造前  $\beta$ 粒径の細粒化とひずみ速度の低減によりマクロゾーンを微細化でき、超音波探傷性を向上できることを示した。
3.  $\alpha + \beta$ 域鍛造を施した Ti-6Al-4V 合金における粒状  $\alpha$ 組織形成の素過程を調査し、粒状  $\alpha$ のサイズは、熱間変形で板状  $\alpha$ 内に発達する局所方位差の形成頻度と相関があることを見出した。 $\alpha + \beta$ 域鍛造プロセスを施された同合金におけるマクロゾーンの形成が、 $\alpha$ 相の熱間圧縮集合組織の発達に起因していることを明らかにした。得られた結果をもとにマクロゾーンの微細化手法を考案し、一方向多段鍛造加工プロセスの場合には、等軸化は進展するがマクロゾーンは微細化されないこと、一方で、加工パスの変更が熱間圧縮集合組織の発達を抑制し、マクロゾーンを微細化する有効な手段であることを明らかにした。

以上の成果をまとめた本論文は、チタン合金鍛造材に形成され超音波探傷性に悪影響を及ぼすマクロゾーンの特徴および形成機構と、その微細化指針を明らかにした。チタン合金において代表的な二種類の  $\alpha$ 相形態を研究対象とすることでマクロゾーン形成の本質的解明が達成されており、得られた知見は学術上、実用上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和3年2月18日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、（令和6年3月22日までの間）当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。