

令和元年6月21日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06771

研究課題名(和文) 4次元組織解析による型Ti合金の変形挙動解明とそれに基づく新合金設計法の確立

研究課題名(英文) Investigation of deformation behavior of beta-type Ti alloys using 4D microstructure analysis and establish of new alloy design method

研究代表者

趙 研 (Ken, Cho)

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：00633661

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：チタン合金特有の変形機構である{332}<113>双晶変形は、本合金の力学特性向上に有効であることが知られているが、その発現機構や発現条件などは不明である。本研究では、{332}<113>双晶変形の前駆体が応力誘起 "マルテンサイト相であることを初めて実験的に示した。また、この成果を応用した新しい型チタン合金の設計法を提案することで、合金の塑性変形機構を制御することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、{332}<113>変形双晶の前駆現象については、モデル実験や結晶学に基づいた理論計算などが行われてきたものの、直接的な実験手法により詳細を解明した例はない。これに対して、本研究では、その場中性子回折実験を行うことで、応力誘起 "マルテンサイト相がその前駆体となることを初めて実験的に明らかにした。この成果は、学術的に極めて意義が大きい。また、本研究の成果に基づいて提案した塑性変形機構制御を可能にする新しい合金設計法を利用することで、これまでにはない、極めて優れた強度-延性バランスおよび疲労特性を示す合金の実現が可能となる。

研究成果の概要(英文)：{332}<113> deformation twinning is one of the unique deformation modes for beta-type Ti alloys. This twinning is known as an important deformation mode for improving strength-ductility balance of the alloys. However, the detail behavior about the {332}<113> deformation twinning such as formation mechanism is still unknown. In this study we found that the {332}<113> twins nucleate within stress-induced martensite. In addition we succeeded to develop new alloy design method for controlling deformation mode of beta-type Ti alloys.

研究分野：材料組織・強度学

キーワード：型チタン合金 力学特性 変形機構 双晶変形 "マルテンサイト 合金設計

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

構造材料であるチタン合金の高強度化は、部材の薄肉化を可能にすることから、製品の軽量化に有効であり、エネルギー資源問題およびCO₂排出量削減問題の解決に繋がる極めて重要な課題である。チタン合金の高強度化には、室温でbcc構造を有するβ型チタン合金が有力である。これは、β型チタン合金が高い加工性を有しており、加工熱処理によりω相あるいはα相に着目した微細組織制御による高強度化が可能なためである。

これまで低コスト元素であるマンガンを用いた低コスト高強度チタン合金として、β型Ti-Mn合金が開発された (Acta Biomater., 26, (2015) 366)。特にβ型Ti-13Mn合金は、加工熱処理により、最大引張強さが、約1850 MPaに達する。この高い引張強度は、ナノサイズの微細な非熱的ω相と変形誘起ω相による析出強化に由来する。しかし、ω相は脆化相であるため、本合金の引張伸びは、1%以下であり、延性は低い。

一方、構造材料には、靱性を確保するため高強度と同時に高延性が求められる。強度と延性は、トレードオフの関係にあるため、一般的にその両立は困難であるが、β型チタン合金の延性改善には、{332}<113>変形双晶による双晶誘起塑性 (TWIP) の導入が有効であることが知られている (Acta Mater., 61 (2013) 6406)。そこで、β型Ti-Mo合金やβ型Ti-Cr合金等において双晶変形の発現制御に実績のある*d*電子合金設計法やβ相の安定度の尺度として用いられている*e/a* (1原子当たりの価電子数) に基づき、双晶変形が発現すると考えられるβ型Ti-(6-10)Mn合金を設計した。しかしながら、これらのTi-Mn合金では、破断に至るまでに{332}<113>変形双晶が発現しないことが明らかとなった。この結果から、β安定化元素には、双晶変形を導入しやすい元素 (Mo, Cr など) とそうでない元素 (Mn など) が存在することが示唆された。そこで、双晶変形の発現に有利であると考えられるMoを添加したβ型Ti-Mn-Mo合金を開発した結果、変形中に双晶変形が発現することで、最大引張強さ1000 MPaと引張伸び30%の両立を実現した。これは、ナノサイズのω相による析出強化と{332}<113>変形双晶によるTWIPとを利用することで、強度と延性のトレードオフを克服した、超高強度・高延性チタン合金を実現できる可能性があること示唆している。

一方、β型チタン合金の塑性変形機構については、一部研究 (Metall. Trans. A, 16 (1985) 789) されているが、たとえば、『なぜ双晶変形に有利な元素 (Mo, Cr など) とそうでない元素 (Mn など) が存在するのか』あるいは『変形双晶とω相との間にどのような相互作用があり、なぜそれが生じるのか』など、合金元素やω相と変形双晶との相互作用については、未だ不明な点が多い。これまでにない優れた強度-延性バランスを有する超高強度・高延性チタン合金を実現するためには、これらの不明な点を解明し、その理解に立脚した合金設計法を確立することが求められる。

2. 研究の目的

本研究では、転位論・結晶学・材料強度学の観点からβ型Ti-Mn系合金の変形挙動を詳細に解析し、本合金における、合金元素、ω相やα''マルテンサイト相と変形双晶との相互作用を解明することを目的とする。そのため、{332}<113>双晶変形が発現する合金と発現しない合金について、各種その場観察手法や高分解能透過型電子顕微鏡法などの組織解析法を駆使した詳細な変形組織解析を行う。また、これらの理解に基づいた塑性変形機構制御に着目し、新しいチタン合金の合金設計法の確立を試みる。

3. 研究の方法

(1) 試験合金作製

本研究では、アーク溶解法を用いて様々なβ安定化元素を添加したβチタン合金を作製した。このとき、変形機構に大きな影響を及ぼすことが知られているβ相の安定度が等しくなるよう、その尺度である*e/a*あるいはMo等量が同程度となるように各合金の組成を決定した。作製した各合金のインゴットは、熱間圧延により板材とし、溶体化処理 (1173 K, 3.6 ks) を施した後、各試験に供した。

(2) 塑性変形挙動に合金元素やω相、α''相が及ぼす影響

β型チタン合金の塑性変形挙動にMoが及ぼす影響を調査するため、Ti-Mn合金およびTi-Mn-Mo合金に対して光学顕微鏡法 (OM) を用いたその場観察と電子線後方散乱回折法 (EBSD) を組み合わせた変形組織解析を行った。また、ω相の影響を調査するため、各合金について高分解能透過型電子顕微鏡法 (HR-TEM) により原子オーダーでの組織観察を実施した。さらに、α''マルテンサイト相の影響を明らかにするため、低温下での引張試験および高酸素濃度合金による引張試験を実施し、変形組織を詳細に調査した。

(3) α''相が{332}<113>双晶変形に及ぼす影響

(2) よりα''マルテンサイト相が{332}<113>双晶変形の発現に影響を及ぼすことが示唆されたため、J-PARCにおいて中性子回折その場実験 (BL19 TAKUMI) を実施し、{332}<113>双晶変形の前駆現象について調査した。なお、本実験では、Ti-Mo合金を対象とした。

(4) α'' 相に着目した{332}<113>双晶変形の発現制御（新合金設計法の提案）

(3) より{332}<113>双晶変形の前駆現象として α'' マルテンサイト相が形成することが示唆された。そこで、応力誘起 α'' マルテンサイト相の形成制御に着目した合金設計を行うことで、{332}<113>双晶変形の発現制御を試みた。提案した合金の変形組織を解析することで、新合金設計法の双晶変形の発現制御に対する有効性を評価すると同時に、引張特性や疲労特性に{332}<113>変形双晶が及ぼす影響についても詳細を調査した。

4. 研究成果

(1) 塑性変形挙動に合金元素や ω 相、 α'' 相が及ぼす影響

作製した Ti-Mn 合金および Ti-Mn-Mo 合金の X線回折(XRD)プロファイルと ω 相の TEM 暗視野像をそれぞれ図1および図2に示す。各合金はともに β 相を母相とし、ナノメートルオーダーの非熱的 ω 相を有することがわかる。また、各合金の0002および222逆格子ベクトルの比は同値を示すことから、変形機構に影響を及ぼす β 安定度は同程度であると言える。図3にOMその場観察から明らかにした、各合金において最初に発現した変形組織のEBSD-IPFマップと図中のA-A'における方位差プロファイルを示す。Ti-Mn合金は、方位差約60°の{112}<111>双晶変形が発現したのに対して、Ti-Mn-Mo合金では、方位差約50.5°の{332}<113>双晶変形が発現している。また、表1に各変形組織が発現した結晶粒における{112}<111>双晶変形と{332}<113>双晶変形のシュミット因子を示す。Ti-Mn合金では、{332}<113>双晶変形のシュミット因子の方が{112}<111>双晶変形のものより大きいにも関わらず、{112}<111>双晶変形が発現している。このことから、Mnは{332}<113>双晶変形の発現を抑制していることがわかる。一方、Moを添加することによりその抑制効果が弱まり、{332}<113>双晶変形が発現したと考えられる。

β 安定度が等しい各合金において、塑性変形機構に差異が生じた原因を調査するため、まずは{112}<111>双晶変形の発現に着目した。{112}<111>双晶変形の発現は、非熱的 ω 相の原子位置が大きく影響を及ぼすことが報告されている (Acta Mater. 62 (2014) 122)。そこで、各合金中に存在する非熱的 ω 相をHR-TEMにより観察した(図4)。図4に示す通り、それぞれの非熱的 ω 相の原子位置に顕著な違いはない。このことから、各合金における塑性変形機構の違いは、

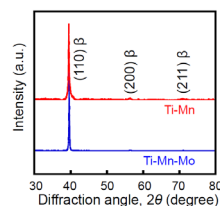


図1 Ti-Mn、Ti-Mn-MoのXRDプロファイル

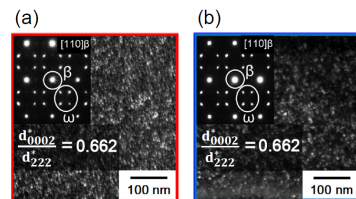


図2 Ti-Mn (a)、Ti-Mn-Mo (b)における ω 相の暗視野像および電子線回折像

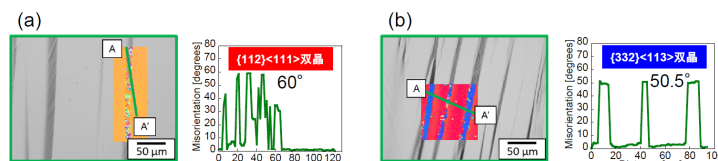


図3 引張変形初期におけるTi-Mn (a)、Ti-Mn-Mo (b)の変形組織 (OM像、EBSD-IPF map および A-A'間の方位差プロファイル)

表1 各変形組織が見られた結晶粒における{112}<111>双晶変形と{332}<113>双晶変形のシュミット因子; (a)Ti-Mn, (b)Ti-Mn-Mo

(a)			(b)		
{112}<111> Schmid factor	{332}<113> Schmid factor		{112}<111> Schmid factor	{332}<113> Schmid factor	
($\bar{1}21$)[$\bar{1}\bar{1}\bar{1}$]	0.3526	(332)[113]	($\bar{1}21$)[$\bar{1}\bar{1}\bar{1}$]	0.3185	(332)[113]
($\bar{1}21$)[111]	0.3277	(233)[$\bar{3}\bar{1}1$]	($\bar{1}21$)[111]	0.3176	(332)[113]
(121)[$\bar{1}\bar{1}\bar{1}$]	0.2188	(332)[113]	($\bar{2}11$)[$\bar{1}\bar{1}\bar{1}$]	0.1473	(233)[$\bar{3}\bar{1}1$]
				0.1946	

また、表1に各変形組織が発現した結晶粒における{112}<111>双晶変形と{332}<113>双晶変形のシュミット因子を示す。Ti-Mn合金では、{332}<113>双晶変形のシュミット因子の方が{112}<111>双晶変形のものより大きいにも関わらず、{112}<111>双晶変形が発現している。このことから、Mnは{332}<113>双晶変形の発現を抑制していることがわかる。一方、Moを添加することによりその抑制効果が弱まり、{332}<113>双晶変形が発現したと考えられる。

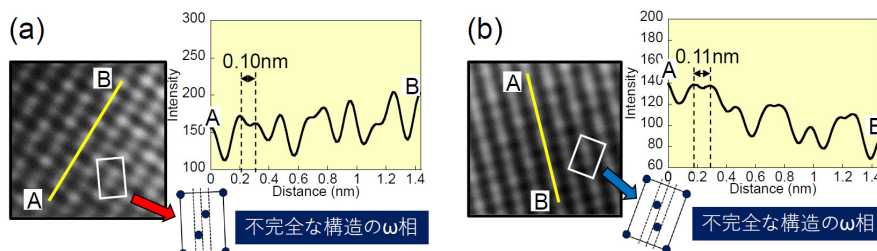


図4 Ti-Mn (a)およびTi-Mn-Mo (b)における ω 相のHR-TEM像およびA-B間の強度プロファイル

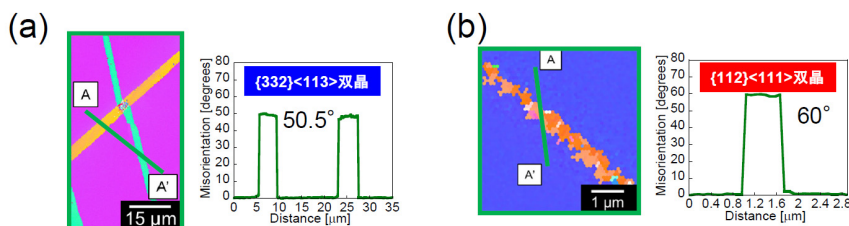


図5 -50°Cで引張変形させたTi-Mnの変形組織(a)および室温で引張変形させたO-rich Ti-Mn-Mo (b)の変形組織 (EBSD-IPF map および A-A'間の方位差プロファイル)

{112}<111>双晶変形の発現し易さによるものではないことがわかる。次に、{332}<113>双晶変形の発現に影響を及ぼすことが示唆されている α'' マルテンサイト相に着目した (Acta Mater. 111 (2016) 173)。図5に応力誘起 α'' マルテンサイト相の形成が促進される -50°C でTi-Mn合金を変形した際の変形組織と応力誘起 α'' マルテンサイト相の形成が抑制されるよう酸素を添加した O-rich Ti-Mn-Mo合金 (O:0.25 mass%)を室温で変形した際の変形組織を示す。 α'' マルテンサイト相の形成を促進することで、Ti-Mn合金においても{332}<113>双晶変形が発現することがわかる。一方、 α'' マルテンサイト相の形成を抑制した場合、Ti-Mn-Mo合金においても{332}<113>双晶変形が発現しなくなった。以上の結果から、{332}<113>双晶変形の発現には、応力誘起 α'' マルテンサイト相の形成が大きな影響を及ぼすことが示唆された。

(2) α'' 相が{332}<113>双晶変形に及ぼす影響
 応力誘起 α'' マルテンサイト相が{332}<113>双晶変形の前駆体となることを検証するため、J-PARC BL19において、中性子回折装置「TAKUMI」によるその場中性子回折実験を行った。図6に全ひずみ (ϵ) 約5%まで引張変形させたTi-Mo合金の中性子回折プロファイルとその場測定した結果を示す。 $\epsilon=0\%$ (無負荷)では、 β 相と ω 相由来する回折ピークのみが見られるのに対して、 $\epsilon=4.8\%$ では明確な α'' マルテンサイト相由来する回折ピークが見られる。これら回折プロファイルをもとにリートベルト解析により得た α'' マルテンサイト相の体積率を表2に示す。塑性変形の開始とともに α'' マルテンサイト相が形成し、塑性ひずみの増加に伴って体積率は約13.7% ($\epsilon=4.8\%$)まで増加することが明らかとなった。また、除荷後も約12.2%の α'' マルテンサイト相が残留している。そこで、中性子回折実験後の試験片について、EBSDによる変形組織の解析を行った。図7(a)に示す通り、変形後の試験片に α'' マルテンサイト相は見られず、バンド状の変形組織は全て母相との方位差が約 50.5° (図7(b), (c))である{332}<113>変形双晶であった。この結果から、Ti-Mo合金では{332}<113>双晶変形が塑性変形を担っていることがわかる。一方、変形後の試験片についてTEM観察を行った結果、100 nm程度の比較的細かいバンド状組織 (図7(d))と、1 μm 程の比較的太いバンド状組織 (図7(f))が観察された。各バンド状組織における電子線回折像 (図7(e), (g), (h), (i))から、これらは極めて微細な応力誘起 α'' マルテンサイト相 (図7(d))と α'' マルテンサイト相から{332}<113>変形双晶が形成される途中のもの (図7(f))であることが明らかとなった。以上の実験結果は、世界で初めて応力誘起 α'' マルテンサイト相が{332}<113>双晶変形の前駆体となることを捉えたものである。このことから、{332}<113>双晶変形の発現制御には、応力誘起 α'' マルテンサイト相の形成促進が有効であることが示唆される。

(3) α'' マルテンサイト相に着目した{332}<113>双晶変形の発現制御

以上の研究結果から、{332}<113>双晶変形の発現を制御するためには、応力誘起 α'' マルテンサイト相の形成を促進することが有効であると考えられる。そこで、応力誘起 α'' マルテンサイト相の形成が多く報告されているNb (Philos. Mag. 87 (2007) 3325)をTi-Mn合金に添加することで、{332}<113>双晶変形の発現制御を試みた。また、Ti-Mn系合金以外への適用を検討するため、Ti-V-Mo合金を作製し、その力学特性および変形機構を調査した。図8および図9にTi-Mn-Mo合金、Ti-Mn-Nb合金、Ti-V-Mo合金の引張特性とTi-Mn-Nb合金、Ti-V-Mo合金の変形組織のEBSD-IPFマップと図中のA-A'における方位差プロファイルを示す。Ti-Mn-Nb合金およびTi-V-Mo合金は、{332}<113>双晶変形により塑性変形し、Ti-Mn-Mo合金と同様の優れた強度-延性バランスを有することがわかる。以上のことから、応力誘起 α'' マルテンサイト相の

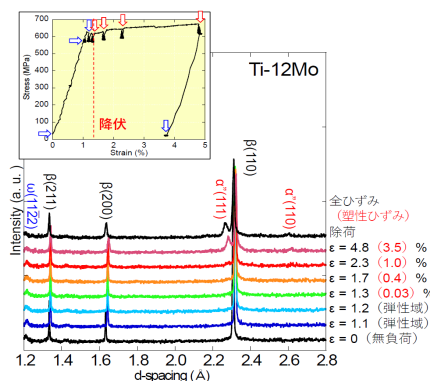


図6 変形中Ti-Moの中性子回折プロファイル

表2 各ひずみにおける α'' 相の体積率

全ひずみ	塑性ひずみ	α'' 体積率
0	—	0
1.1	—	0
1.2	—	0
1.3	0.03	0.1
1.7	0.4	1.4
2.3	1.0	4.6
4.8	3.5	13.7
除荷	除荷	12.2

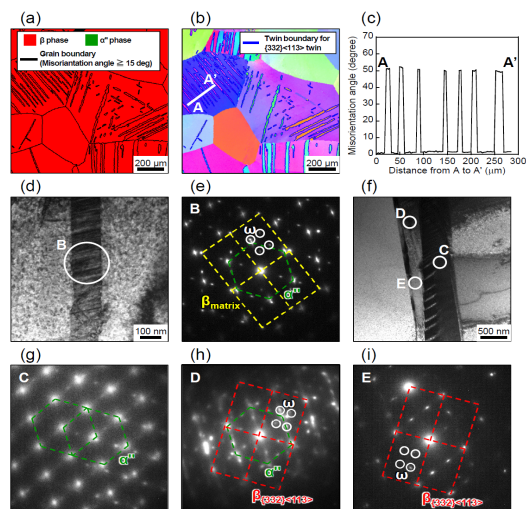


図7 引張変形させたTi-Mo合金の変形組織；(a) EBSD-Phase map, (b) EBSD-IPF map, (c) (b)中のA-A'間の方位差プロファイル, (d), (f) TEM明視野像, (e), (g), (h), (i) (d), (f)中のA, B, C, D, Eにおける電子線回折像

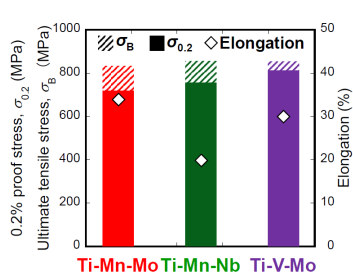


図 8 Ti-Mn-Mo、Ti-Mn-Nb、Ti-V-Mo の引張特性

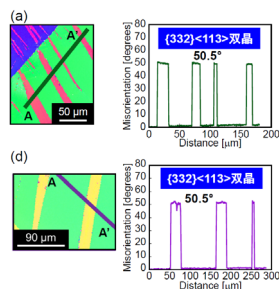


図 9 Ti-Mn-Nb(a)、Ti-V-Mo(b)の変形組織 (EBSD-IPF map および A-A'間の方位差プロファイル)

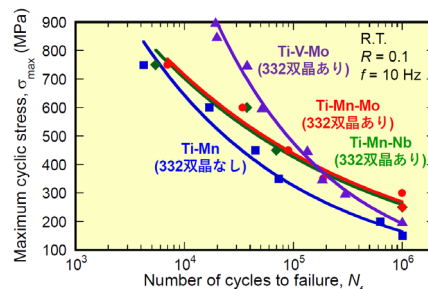


図 10 Ti-Mn、Ti-Mn-Mo、Ti-Mn-Nb、Ti-V-Mo の疲労特性

形成に着目することで{332}<113>双晶変形の発現を制御するという全く新しい合金設計法は、高強度—高延性チタン合金の開発に有効であることが示された。

また、図 10 に Ti-Mn 合金、Ti-Mn-Mo 合金、Ti-Mn-Nb 合金、Ti-V-Mo 合金の疲労特性 (S-N 曲線) を示す。{332}<113>双晶変形が発現する合金は、発現しない Ti-Mn 合金に比べて高い疲労強度を示す。これは、{332}<113>変形双晶の発現が、疲労き裂の発生を抑制することと、{332}<113>変形双晶がき裂進展の障壁となるためである。このことから、{332}<113>双晶変形は、合金の高強度—高延性化だけではなく、疲労特性向上にも有効であることがわかる。つまり、本研究で提案する、{332}<113>双晶変形の発現制御を可能にする新しい合金設計法により、より優れた力学特性を有するチタン合金の実現が可能となる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

- (1) K. Cho, K. Yuki, H. Kobata, M. Niinomi, H.Y. Yasuda, Effects of {332}<113> deformation twinning on fatigue behavior of Ti-Mn system alloys, *Materials Transactions*, 査読有, (2019), <https://doi.org/10.2320/matertrans.ME201919>
- (2) R. Morioka, K. Cho, H.Y. Yasuda, Effects of Mo Addition on Deformation Behavior of Metastable Beta-Type Ti-Mn Single Crystals, *Materials Science Forum*, 査読有, 941 (2018) 1360-1365, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.941.1360>
- (3) 趙 研, 新家光雄, 安田弘行, {332}<113>変形双晶導入による低コスト準安定 β 型チタン合金の強度—延性バランス改善, *チタン*, 査読無, 66 (2018) 274-277
- (4) H. Liu, M. Niinomi, M. Nakai, K. Cho, H. Fujii, Deformation-induced ω-phase transformation in a β-type titanium alloy during tensile deformation, *Scripta Materialia*, 査読有, 130 (2017) 27-31, 10.1016/j.scriptamat.2016.10.036
- (5) P.F. Santos, M. Niinomi, K. Cho, H. Liu, M. Nakai, T. Narushima, K. Ueda, Y. Itoh, Effects of Mo Addition on the Mechanical Properties and Microstructures of Ti-Mn Alloys Fabricated by Metal Injection Molding for Biomedical Applications, *Materials Transactions*, 査読有, 58 (2017) 271-279, 10.2320/matertrans.M2016286
- (6) P.F. Santos, M. Niinomi, H. Liu, K. Cho, M. Nakai, A. Trenggono, S. Champagne, H. Hermawan, T. Narushima, Improvement of microstructure, mechanical and corrosion properties of biomedical Ti-Mn alloys by Mo addition, *Materials & Design*, 査読有, 110 (2017) 414-424, 10.1016/j.matdes.2016.07.115
- (7) P.F. Santos, M. Niinomi, H.H. Liu, K. Cho, M. Nakai, Y. Itoh, T. Narushima, M. Ikeda, Fabrication of low-cost beta-type Ti-Mn alloys for biomedical applications by metal injection molding process and their mechanical properties, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 査読有, 59 (2016) 497-507, 10.1016/j.jmbbm.2016.02.035
- (8) K. Cho, M. Niinomi, M. Nakai, H.H. Liu, P.F. Santos, Y. Itoh, M. Ikeda, M. Abdel-hady Gepreel, T. Narushima, Improvement in mechanical strength of low-cost beta-type Ti-Mn alloys fabricated by metal injection molding through cold rolling, *Journal of Alloys and Compounds*, 査読有, 664 (2016) 272-283, 10.1016/j.jallcom.2015.12.200

[学会発表] (計 16 件)

- (1) K. Cho, R. Morioka, H.Y. Yasuda, Influences of Mo addition on mechanical properties and deformation behavior of β-type Ti alloys, *The 14th World Conference on Titanium*, 2019.06.10-06.14, Nantes
- (2) 趙 研, 森岡亮太, 安田弘行, 単結晶を用いた準安定 β 型チタン合金における {332}<113>双晶変形挙動の解明, *軽金属学会第 136 回春期大会*, 2019.05.10-05.12, 富山
- (3) 趙 研, 新家光雄, 安田弘行, {332}<113>双晶変形に着目した準安定 β 型チタン合金の高強度—高延性化と変形機構解明, *日本鉄鋼協会平成 30 年度チタンフォーラム第 1 回研究発表会*, 2019.01.25, 大阪

- (4) 行耕平, 趙 研, 新家光雄, 安田弘行, {332}<113>双晶に着目した変形機構制御による β 型 Ti 合金の疲労強度改善, 軽金属学会第 135 回秋期大会, 2018.11.09-11.11, 東京
- (5) 趙 研, 組織制御および変形挙動制御に着目した構造用チタン系合金の力学特性改善, 軽金属学会第 135 回秋期大会, 2018.11.09-11.11, 東京
- (6) 森岡亮太, 趙 研, 安田 弘行, 準安定 β 型 Ti-Mn 合金における {332}<113>変形双晶の形成に及ぼす Mo 添加の影響, 日本金属学会第 163 回秋期講演大会, 2018.09.19-09.21, 宮城
- (7) R. Morioka, K. Cho, H.Y. Yasuda, Effects of Mo addition on deformation behavior of metastable beta-type Ti-Mn single crystals, THERMEC 2018, 2018.07.08-07.13, Paris
- (8) 趙 研, 森岡亮太, 安田弘行, β 型 Ti-Mn 合金の変形挙動に Mo 添加が及ぼす影響, 軽金属学会第 134 回春期大会, 2018.05.26-05.27, 熊本
- (9) 森岡亮太, 趙 研, 安田弘行, 軽金属学会第 133 回秋期大会, 2017.11.04-11.05, 栃木
- (10) 行 耕平, 趙 研, 新家光雄, 安田弘行, β 型 Ti-Mn 系合金の疲労挙動に及ぼす β {332}<113>双晶の影響, 日本金属学会第 161 回秋期講演大会, 2017.09.06-09.08, 北海道
- (11) 趙 研, 古畑弘樹, 行 耕平, 新家光雄, 安田弘行, {332}<113>変形双晶導入による低コスト β 型 Ti-Mn 系合金の疲労特性改善, 軽金属学会第 132 回春期大会, 2017.05.30-05-21, 愛知
- (12) 趙 研, 古畑弘樹, Pedro F. Santos, 伊藤芳典, 新家光雄, 安田弘行, {332}<113>変形双晶による低コスト β 型チタン合金の強度-延性バランス改善, 軽金属学会第 131 回秋期大会, 2016.11.05-11.06, 茨城
- (13) 古畑弘樹, 趙 研, 永瀬丈嗣, 新家光雄, 安田弘行, β 型 Ti-Mn 系合金の力学特性および変形機構に Mo 添加が及ぼす影響, 軽金属学会第 131 回秋期大会, 2016.11.05-11.06, 茨城
- (14) 趙 研, 古畑弘樹, 安田弘行, 低コスト高強度-高延性 β 型チタン合金の開発, 日本チタン協会第 4 回「チタン若手技術者・研究者交流会」, 2016.11.04, 新潟
- (15) 古畑弘樹, 趙 研, 永瀬丈嗣, 新家光雄, 安田弘行, Mo 添加が β 型 Ti-Mn 系合金の変形機構に与える影響, 日本金属学会第 159 回秋期講演大会, 2016.09.21-09.23, 大阪
- (16) K. Cho, H. Kobata, P.F. Santos, H.Y. Yasuda, M. Niinomi, Microstructures and mechanical properties of β -type Ti-Mn-Mo alloys for biomedical applications, 9th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing, 2016.08.01-08.05, Kyoto

[その他]

ホームページ等

<http://www.mat.eng.osaka-u.ac.jp/mse3/mse3-homeJ.htm>

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名 :

ローマ字氏名 :

所属研究機関名 :

部局名 :

職名 :

研究者番号 (8 桁) :

(2)研究協力者

研究協力者氏名 : 安田弘行

ローマ字氏名 : Hiroyuki Y. Yasuda