

令和元年6月5日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04537

研究課題名(和文) 低温・高速超塑性を実現する航空機チタン合金のヘテロ組織制御による新しい指導原理

研究課題名(英文) New type of guiding principle of heterogeneous microstructural control of aerospace Ti alloys for enhancing low-temperature-high-strain-rate-superplasticity

研究代表者

松本 洋明 (Matsumoto, Hiroaki)

香川大学・創造工学部・教授

研究者番号：40372312

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では航空機Ti合金の超塑性特性の高度化を目指し、動的組織変化を利用した応力緩和機構の活性化に着目した不均質組織制御の新しい組織の指導原理の開発を目指した。その結果、準安定組織を利用し、また伸長粒や粗大粒を適切な分量で制御する事で変形過程にて動的再結晶が活性化され、応力緩和機構として有効に作用する事を見出した。また準安定組織にて最適な β 量比とし、更には濃度不均一な duplex組織を形成する事で拡散・相変態が促進され、応力緩和機構として有効に作用する事も見出した。開発した準安定組織・不均質組織制御は航空機Ti合金の超塑性特性を高度化する新しい組織設計の指導原理として強く期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

航空機Ti合金において粒界すべりの活動と応力緩和機構の発現を最適にバランスする準安定組織・不均質組織を軸とした新しい組織設計の指導原理を構築した。社会的意義としてもTi合金の低温・高速超塑性加工を実現する新組織・プロセス設計の指針を明示した。

研究成果の概要(英文)： This work aims at establishing the new type of guidance principle for microstructural control technique via heterogeneous microstructural formation of Ti alloys for enhancing superplasticity. The obtained results reveal that the Ti alloy having an optimum fraction of coarse-grains and ultrafine-grains exhibits the excellent superplastic property, which is mainly due to the optimized activation of GBS and an additional accommodation mechanism associated with occurrences of dynamic recrystallization and precipitation. Additionally, the optimization of β fraction and the heterogeneity of alloying composition in the duplex microstructure also contribute to an additional accommodation mechanism (due to the enhancement of diffusion, phase decomposition). Thus, we can expect that the metastable and heterogeneous microstructural control suggested in this work will be the new type of guiding principle of microstructure for enhancing superplasticity of the aerospace-Ti alloy.

研究分野：金属冶金学

キーワード：構造・機能材料 チタン合金 超塑性変形 不均質組織制御 準安定組織制御 応力緩和機構

1. 研究開始当初の背景

Ti-6Al-4V 合金および Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 合金は航空機用部材を中心として応用され、一部では超塑性加工により複雑形状に成形加工が施される。一方、工業的に超塑性の更なる低温・高速化の実現が要望され、低温超塑性を示す超微細粒 Ti 合金の研究開発が 2000 年度代より盛んに行われている。著者らはこれまでに Ti-6Al-4V 合金にてマルテンサイト組織を適切な条件下で加工する事により超微細粒組織が得られるとともに世界最高レベルで低温・高速超塑性を発現する事を見出し、更にはマルテンサイト単相組織や準安定 α 単相状態からの変形で動的再結晶や動的 β 析出が応力緩和機構として強く作用し、超塑性の低温・高速化に貢献する事を明らかとしてきた。

超塑性の低温・高速化には、粒界すべりの活動を促進させる事を目的に材料組織として如何に均質な超微細等軸組織が得られるかが鍵であり、Ti 合金においても強加工法を中心として均質な超微細粒組織が形成されるプロセスが多く開発されている。本研究では、低温-高速超塑性の実現のため、如何に微細組織が得られるかのみに着眼するのではなく、如何に変形過程にて応力緩和機構およびその補助機構が作用できるかに着眼して、動的組織変化を利用するためにそれを誘発する組織形成(準安定組織制御、不均質組織制御)を行い、超塑性特性を高度化させる新しい組織設計の指導原理を開発・構築する事に着目した。

2. 研究の目的

航空機分野においてチタン合金の超塑性 低温・高速化が強く要望されている。本研究では準安定状態(マルテンサイト組織、準安定 α/β 量比)、微細ヘテロ組織(微細等軸粒と粗大粒の混在した不均質組織)や濃度分配の不均質性を呈す組織を軸とした組織制御で低温-高速超塑性を実現する組織設計のコンセプトを提案する。研究では Ti-6Al-4V 合金および Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 合金を対象として不均質微細組織制御・準安定組織制御した合金の高温塑性の特異性を実験・理論の両面から解明し、低温・高速超塑性を実現する新しい基礎原理の構築を本研究の目的とする。組織制御の手法および合金に分けて、下記の項目で高温塑性の基礎原理を解明した。

(1) 超微細等軸粒と伸長ラメラ粒の混在した不均質微細組織を有す Ti-6Al-4V 合金の超塑性特性、(2) 不均質形態な($\alpha+\alpha'$)duplex 組織を呈す Ti-6Al-4V 合金の高温塑性、(3) 組成分配の不均質性および不均質組織形態(粗大 α 粒と微細等軸($\alpha+\beta$)で構成)を呈す Ti-6Al-4V 合金の低温高速超塑性、(4) 超微細粒組織を有す準安定 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo(Ti-6242S)合金の低温高速超塑性

3. 研究の方法

Ti-6Al-4V 合金および Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 合金の供試材について適切な温度(920°C-1100°C)で溶体化焼入れ処理を施し α' マルテンサイト単相組織もしくは($\alpha+\alpha'$)duplex 組織を得て(STQ 材)、適切な条件下で熱間圧延(750°C、850°C、圧延率を 13%~68%の範囲で変化)を行い、準安定組織制御および不均質組織制御を施した。得られた素材は 700°C~900°C-10-4s-1~10-2s-1 の試験条件で引張試験を行い、高温塑性特性・超塑性特性を評価した。また組織は SEM-EBSD 法を中心に詳細に解析した。以下の成果では項目別に分けて、成果報告する。

4. 研究成果

(1) 超微細等軸粒と伸長ラメラ粒の混在した不均質微細組織を有す Ti-6Al-4V 合金の超塑性特性

① 圧延材の組織

Fig.1 に熱間圧延後の各試料の EBSD-BC 像を示す。溶体化焼入れ後は針状の α' マルテンサイト単相組織を呈し、圧下後の圧延率の増加に伴い粒径 0.5 μm 以下の等軸域が増加し、等軸粒とラメラ粒から成るヘテロ組織が得られた。画像解析で得られた等軸粒の面積率は圧延率の増加に伴い増加し、39%HR 材で約 65%、68%HR 材で約 80%であった。

② 高温変形特性

Fig.2 に各圧延材の高温引張試験の結果(伸び)を示す。ここで、 α' マルテンサイト単相組織の STQ 材の 700°Cでの結果、および塗潰し域は粒径 3 μm の微細粒 Ti-6Al-4V 合金の 800°Cでの結果を併せて示している。Fig.2 より等軸域の増加に伴い伸びは増加する傾向にあり 39%HR 材、68%HR 材では極めて優れた伸び値を示す事が分かる。これらの両圧延材を比較した際、興味深いのは高速域では 68%HR 材の方が良好な伸びを示し、 10^{-3}s^{-1} の中速域では 39%HR 材の方が良好な伸び値(583%)を示す事にある。700°Cでのひずみ速度感受性指数(m 値)は 13%HR 材では 0.36、39%HR 材および 68%HR 材ではともに同等な 0.41 を示し、いずれの圧延材においても超塑性の発現が示唆される。

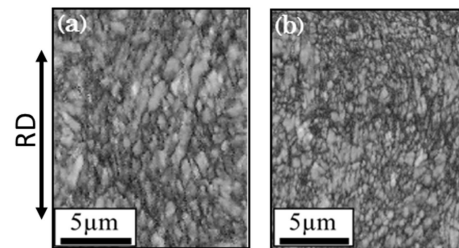


Fig.1 EBSD-band contrast images of (a)39%HR and (b)68%HR

一般に、等軸域の増加により超塑性特性はより向上する事が知られており、その点では 68%HR 材がより高い延性を示す事が推察される。では、なぜ微細ラメラ組織をより多く有すへテロ形態な 39%HR 材にて中速域で優れた高温延性を示したのであろうか。Fig.3 は 39%HR 材にて 700°C -(10^{-2} s^{-1} , 10^{-3} s^{-1}) で高温変形・破断後の EBSD-OIM 像(Gage 部, Grip 部)を示している。Gage 部の変形域ではいずれのひずみ速度においても、ランダム配向を呈す均質な等軸組織を呈す事が分かる。一方で未変形域の Grip 部においては強い結晶配向性が観察され、微細ラメラ組織が残存した様子も観察される。これから初期の微細ラメラ組織域は変形過程で動的再結晶により等軸化され、一方で初期の等軸粒域は変形過程で粒界すべりが支配的に進行している事が分かる。高延性化の要因について、とりわけ、ここでは微細ラメラ域の動的再結晶の発現が変形で重要な役割を担うと推察される。一般に、超塑性変形を律速するには、粒界すべりが活発に活動するとともに粒界にて応力緩和機構が有効に活性化される必要があり、これらがバランス良く起きる事が必要条件となる。上記した微細ラメラ域での動的再結晶は粒界部にて応力緩和機構として強く作用し、一方で微細粒域では変形初期より粒界すべりが活動する事から、39%HR 材では 10^{-3} s^{-1} の中速変形域にてこれらがバランス良く活動したために良好な超塑性特性を示したと考えられる(この変形機構のコンセプトは Fig.4 にまとめている)。この事は応力緩和試験の結果から IV 理論より得られた粒界すべりの活動頻度の解析結果、またひずみ速度急変試験より見積もられた m 値の変化からも良く説明する事ができている。また、本研究で作製した HR 材は β 量が極めて少ない準安定状態であり、変形過程で動的 β 析出が粒界 3 重点で起こり、これも応力緩和機構として強く作用する事を付記しておく。

これまで、Ti 合金の超塑性特性の高度化において、均質な超微細粒組織をいかに造り込むかに主眼が置かれ、世界的に研究開発が行われてきた。本研究の結果では、微細等軸組織と微細ラメラ組織を最適にバランスさせ組織制御を行う事で超塑性特性が向上する事を示しており、新しい組織制御の可能性・展開を示唆している。

(2) 不均質形態な($\alpha+\alpha'$)duplex 組織を呈す Ti-6Al-4V 合金の高温塑性

Fig.5 は初析 α 量を変化させた($\alpha+\alpha'$)duplex 組織 STQ 材の組織および 800°C での引張試験後の破断伸びをまとめている。これより、出発組織形態に依存して伸び値は特異的なひずみ速度依存性を示し、低速域ではマルテンサイト組織で著しく大きな伸びを示し、一方で高速域では等軸な初析 α 相の増加により伸びは増加する傾向にある。このような特異性に相関して、塑性流動の応力値も出発組織や試験条件に依存して変化した。Fig.6 は Zener-Hollomon(Z)因子で伸び値を整理している。これより、勾配に注目するとマルテンサイト域の増加に伴い、高い勾配を示す事が分かる。これは各種 STQ 材で組織変化・変形機構が異なるとともに高温・低速域にて特にマルテンサイト域の増加に伴い、不連続動的再結晶の活性化が付随調整機構補助として有効に作用した事を示唆している。

(3) 組成分配の不均質性および不均質組織形態(粗大 α 粒と微細等軸($\alpha+\beta$)で構成)を呈す Ti-6Al-4V 合金の低温-高速超塑性

($\alpha+\alpha'$)duplex 組織(Fig. 7(a))を有す 960STQ 材に対して 750°C -68%圧延率で熱間加工を施した試料の組織(初析 α 分率: 42%)を Fig.7(b)(c)に示す。粗大 α 粒と超微細等軸($\alpha+\beta$)組織が混在した微

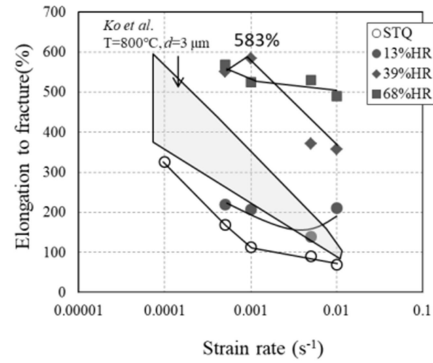


Fig.2 Elongation to fracture after tensile deformation at 700°C of the HR specimens.

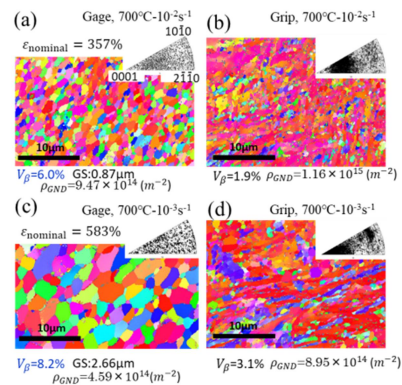


Fig.3 EBSD-OIM images of deformed microstructures of 39%HR specimen tested at 700°C -(a)(b) 10^{-2} s^{-1} and

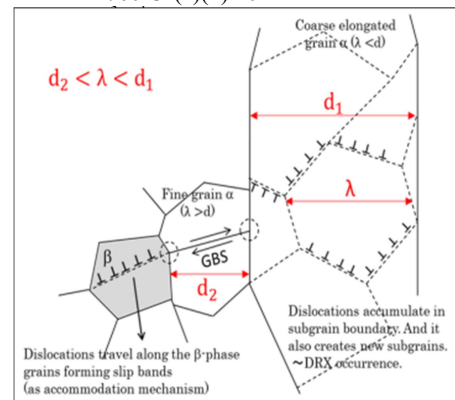


Fig.4 Predicted deformation mode for the 39%HR specimen tested during deformation at 700°C .

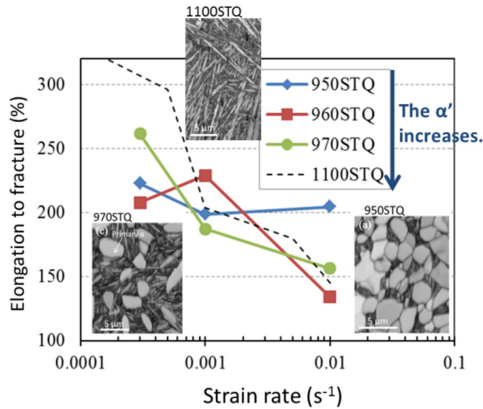


Fig.5 Microstructures of STQ specimens and summary of elongation for each STQ specimen tested at 800°C.

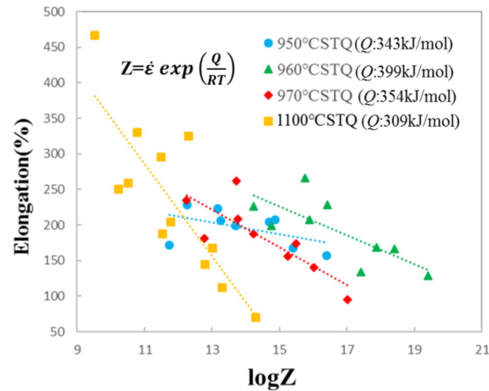


Fig.6 Relationship between Z parameter and elongation to fracture for all STQ specimens.

細不均質組織が得られている事がわかる。この組織を有す試料の高温塑性特性について、700°Cの試験ではひずみ速度が高速になるに伴い全伸びが増加し、 $10^{-2} s^{-1}$ の高速変形域で500%以上の極めて優れた超塑性伸びを呈す事が分かった。Fig.7(b)の組織の他にも初析 α 分率が22%の微細不均質組織を得た試料についても同様に高温塑性特性を評価し、均質な超微細粒組織を呈す試料(68%HR)と併せて、試験条件(温度、ひずみ速度)を1元化したZ因子と全伸びの関係をFig.8にまとめている。均質な超微細粒組織を有す試料(68%HR)では、Z因子の増加とともに伸びが低下する熱活性化過程で整理できるのに対し、不均質組織を有す試料では特定の条件下で極めて優れた巨大な伸びが発現する特異的な現象が現れる事が理解できる。このように最適に不均質組織形態を呈す試料で優れた超塑性特性が発現する要因として、変形下で粗大 α 域で連続型のDRXが活発に起き、粗大 α 粒周辺に集中する応力緩和が有効に作用する事が挙げられ、結果として粒界すべりの活性化に寄与する。更に特定の条件下にて特異的に巨大伸びが発現する要因として、粗大 α 粒域で起きるDRXの粒径が周辺の超微細粒組織の結晶粒径と同様になる試験条件にて特に巨大伸びが発現しており、この試験条件では変形後期においても粒界すべりが均一に継続的に起きるためであると推定される。

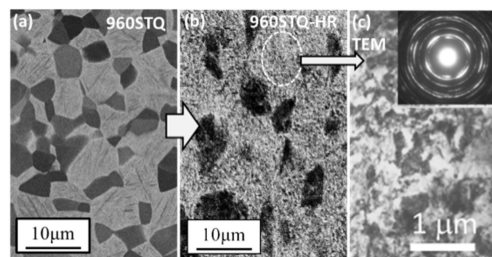


Fig.7 SEM images of (a) the 960STQ specimen, (b) the 960STQ-HR specimen, and (c) TEM image of the 960STQ-HR specimen.

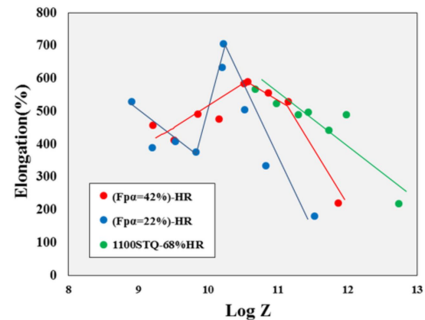


Fig.8 Elongation to fracture as a function of Z parameter for various HR specimens.

(4) 超微細粒組織を有す準安定 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo(Ti-6242S)合金の低温高速超塑性

① 出発組織

Fig. 9 に準備した試料組織を(a)(b)EBSD-OIM像、(c)(d)SEM-反射電子像を示す。(a)UFG1材は超微細等軸組織($d_\alpha=0.8\mu m$)を有していた。これは作製時の熱間圧延過程において針状マルテンサイトから不連続動的再結晶が活発に起きたためである。 β 分率は2.8%と平衡分率(約11%)と比較し、低い値を示した。一方、UFG2材では超微細粒形態を維持して β 分率は24.2%と非常に高い値を示した。これは低温熱処理にて β が過剰に析出したためと推察される。(c)FG1材($d_\alpha=2.65\mu m$)および(d)FG2材($d_\alpha=4.12\mu m$)では、 β 分

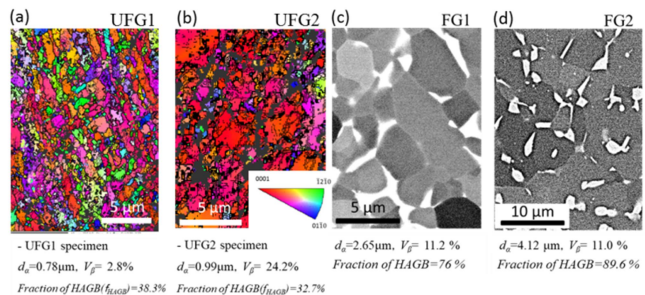


Fig.9 Starting microstructures of the Ti-6242S alloys of (a) UFG1, (b) UFG2, (c) FG1 and (d) FG2.

率は約 11%の均質な等軸組織を呈している。

② 高温変形特性

塑性流動特性では結晶粒径の微細化に伴い、流動応力の減少と定常変形域の拡大、巨大伸びの発現が観察された。これは結晶粒径の微細化に伴い、UFG 材にて粒界滑りがより活性化されたためである。実際、塑性ひずみ量 0.1 の際のひずみ速度感受性指数 m 値は 700°Cでは UFG1 材および UFG2 材で 0.3 以上を示し、低温超塑性を発現している。また興味深い事に、流動特性では高速域で UFG1 材と比較して UFG2 材の方が低い応力値と高い伸び値を示す。これは β 量の多い UFG2 材において変形初期より α/β 粒界すべりが活性化されたためである。Fig. 10 は 700°C, 800°Cにおける全伸びのひずみ速度依存性をまとめている。先述した通り、出発組織の結晶粒径の微細化に伴い、全伸びが著しく増加し、また UFG 材同士で比較すると、低速域では UFG1 材の方が、一方で高速域では UFG2 材の方が良好な伸び特性を示している事が分かる。高速域では先述した通り α/β 界面の影響(粒界すべりの易動度が高い)に起因する。一方で低速域では変形過程にて動的な β 析出が促進され、これが付加的に応力緩和機構として作用、変形後期では粒界すべりも活性化されるために UFG1 材にて優れた高温延性を示す。

③ 粒界滑りおよび転位滑りの活動頻度

UFG1 材および UFG2 材ともに β 量は平衡状態(約 11%)とは大きく異なり、それが要因で同様な超微細粒形態を呈すにも関わらず塑性流動特性が異なる。ここではより定量的に活動する変形機構を評価するために、応力緩和試験(10%の塑性ひずみから緩和)を実施して、Internal Variable (IV)理論²⁾に基づいて、下記の構成式から粒界滑りおよび転位滑りの活動頻度を評価した。

$$\left(\frac{\sigma^*}{\sigma'}\right) = \exp\left(\frac{\dot{\alpha}^*}{\dot{\alpha}}\right)^p \quad (1) \quad \left(\frac{\dot{g}}{\dot{g}_0}\right) = \left(\frac{\sigma}{\Sigma_g - 1}\right)^{1/Mg} \quad (2)$$

ここで(1)式が転位滑りの構成式、(2)式が粒界すべりの構成式であり、上式にて $\dot{\alpha}$ および \dot{g} はそれぞれ転位滑りおよび粒界滑りのひずみ速度に相当する。Fig. 11 は各試料の 700°C-(a) 10^{-3} s^{-1} , (b) 10^{-4} s^{-1} での活動頻度をまとめている。いずれのひずみ速度で UFG 材の方が FG 材に比べ粒界滑りの活動頻度が高く、微細化に伴い粒界滑りが活性化される。更に詳細には、UFG2 材の方が UFG1 材と比較して粒界すべりの活動頻度がわずかに高く、これは先述したように α/β 界面での易動度の高さに起因する。Fig. 11 は変形初期(塑性ひずみ: 10%)の結果であり、変形過程における動的 β 析出の変形機構に及ぼす影響を評価するために、塑性ひずみ 40%以上にてひずみ速度急変試験(700°C)を実施して、 m 値を評価した。その結果、UFG1 材では m 値は 0.41($\epsilon_p=10\%$)から 0.47($\epsilon_p=40\%$)に著しく増加する事が分かり、一方で UFG2 材では m 値は 0.36 から 0.38 にわずかに増加するのみであった。この結果は、UFG1 材において変形過程で動的 β 析出が促進され、付加的な応力緩和機構として作用するとともに、変形中期・後期では粒界滑りも促進する事を示唆している。

以上の結果より、同様な超微細粒形態を有す Ti-6242S 合金(UFG1 材, UFG2 材)において出発組織での β 分率の高温変形特性に及ぼす影響は大きく、超塑性の高度化において高速域では変形初期よりいかに α/β 粒界すべりを活性化させるかが鍵で β 量は多い方が望ましく、一方で低速域では、変形過程において応力緩和機構をいかに作用させるかが鍵となり、動的な β 析出など動的な組織変化(DRX など)を促進できる出発状態が最適な出発組織となる事を明らかとした。

(5) まとめ

本研究では航空機 Ti 合金(Ti-6Al-4V, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-Si)の超塑性特性の高度化を目指し、

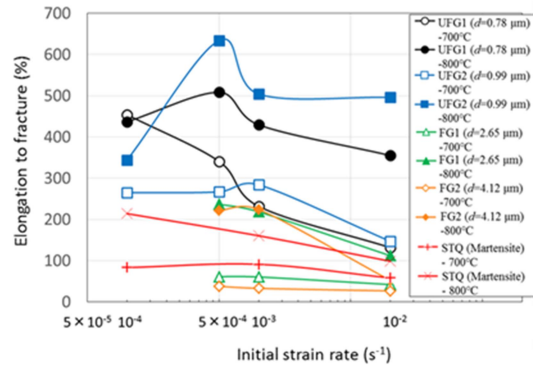


Fig. 10 Elongation to fracture (as a function of strain rate) of the Ti-6242S alloys with various kinds of starting microstructures.

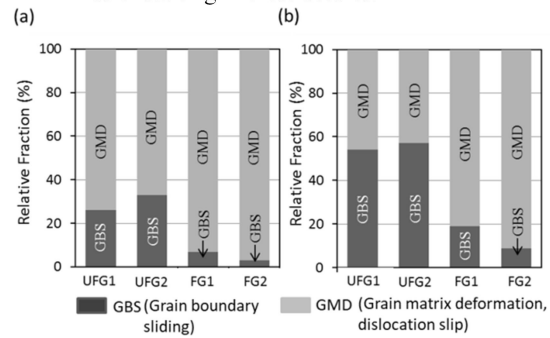


Fig. 11 Distributions of active deformation mode (at 700°C- (a) 10^{-3} s^{-1} , (b) 10^{-4} s^{-1}) of the Ti-6242S alloys with various microstructures.

微細粒組織形成のみに依らず、変形過程における動的組織変化による応力緩和機構を活性化させる組織制御に着目した準安定組織制御・不均質組織制御の新しい組織制御の指導原理の開発・構築を目指した。その結果、 α' -マルテンサイトを利用、伸長粒や粗大粒を適切な分量で組織に含有させる事で変形過程にて動的再結晶が活性化され、また準安定な α/β 量比とする事で、更には濃度不均一な duplex 組織を形成する事で変形過程で拡散・相変態・析出が促進され、これらが応力緩和機構として有効に作用して、極めて優れた低温・高速超塑性を示す事を見出し、今後の新しい組織設計の設計原理として強く期待できる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文]

- ① **H. Matsumoto**, T. Nishihara, **V. Velay**, V. Vidal, “Superplastic property of the Ti-6Al-4V alloy with ultrafine-grained heterogeneous microstructure”, Adv. Eng. Mater., 査読有, 2017 DOI: 10.1002/adem.201700317.
- ② L. Despax, V. Vidal, D. Delagnes, M. Dehmas, M. Geyer, **H. Matsumoto**, **V. Velay**, “Superplasticity in Fine Grain Ti-6Al-4V Alloy: Mechanical Behavior and Microstructural Evolution”, Defect and Diffusion Forum, 査読有, 385, 2018, 137-143.
- ③ G. Yamane, **V. Velay**, V. Vidal, **H. Matsumoto**, “Mechanical Behavior of Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo Titanium Alloy under Hot and Superplastic Forming Conditions: Experiment and Modeling”, Defect and Diffusion Forum, 査読有, 385, 2018, 413-418.
- ④ **H. Matsumoto**, H. Ito, “High temperature tensile deformation mode and microstructural conversion of Ti-6Al-4V alloy with the ($\alpha+\alpha'$) duplex starting microstructure”, Mater. Trans., 査読有, 2019 accepted in press.
- ⑤ H. Imai, G. Yamane, **H. Matsumoto**, V. Vidal, **V. Velay**, “Superplasticity of metastable ultrafine-grained Ti-6242S alloy: mechanical flow behavior and microstructural evolution”, Mater. Sci. Eng. A, 査読有, A754, 2019, 569-580.

[学会発表]

- ① 西原卓郎, **Vincent Velay**, **松本洋明**, “不均質微細組織形態を有す Ti-6Al-4V 合金の超塑性変形特性”, 日本金属学会講演大会 秋期大会 大阪大学
- ② 今井浩之, **松本洋明**, “Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si 合金の微細粒域での高温変形特性に及ぼす粒径の影響”, 日本金属学会講演大会 秋期大会 大阪大学
- ③ 今井浩之, **Vincent Velay**, Vanessa Vidal, **松本洋明**, “種々の出発組織を有す Ti-6242S 合金の超塑性変形特性と塑性構成式の検討”, 日本金属学会秋期講演大会 北海道大学
- ④ 伊藤大真, **Vincent Velay**, **松本洋明**, “($\alpha+\alpha'$) duplex 組織を出発組織とした Ti-6Al-4V 合金の高温変形特性”, 日本金属学会秋期講演大会 北海道大学
- ⑤ **松本洋明**, 西原卓郎, **Vincent Velay**, “超微細不均質組織を呈す Ti-6Al-4V 合金の超塑性変形特性”, 日本軽金属学会 秋期講演大会 宇都宮大学
- ⑥ **H. Matsumoto**, H. Ito, T. Nishihara, “High Temperature Deformation Behavior of Ti-6Al-4V Alloy with Metastable Microstructures”, International Conference on Frontiers in Materials Processing, Applications, Research & Technology, France (invited lecture).
- ⑦ **松本洋明**, 伊藤大真, 今井浩之, 西原卓郎, “準安定 α' 組織を有す Ti-6Al-4V 合金の高温引張変形特性”, 日本金属学会春期講演大会 千葉工業大学
- ⑧ 伊藤大真, **V. Velay**, V. Vidal, **松本洋明**, “不均質組織形態を制御した UFG-Ti-6Al-4V 合金の超塑性変形特性”, 日本金属学会秋期講演大会 東北大学
- ⑨ **松本洋明**, 今井浩之, **Vincent Velay**, Vanessa Vidal, “超微細粒組織を有す Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si(Ti-6242S)合金の超塑性変形特性”, 日本軽金属学会秋期講演大会 芝浦工業大学
- ⑩ **松本洋明**, “準安定組織・不均質(ヘテロ)微細組織制御した航空機チタン合金の高温塑性・超塑性特性”, 日本金属学会春期講演大会 東京電機大学
- ⑪ G. Yamane, **V. Velay**, V. Vidal, **H. Matsumoto**, “Mechanical Behavior of Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo Titanium Alloy under Hot and Superplastic Forming Conditions: Experiment and Modeling”, ICSAM-201813th International Conference on Superplasticity in Advanced Materials (ICSAM 2018), St. Petersburg, Russia
- ⑫ L. Despax, V. Vidal, D. Delagnes, M. Defmas, M. Geyer, **H. Matsumoto**, **V. Velay**, “Superplasticity in Fine Grain Ti-6Al-4V Alloy: Mechanical Behavior and Microstructural Evolution”, ICSAM-201813th International Conference on Superplasticity in Advanced Materials (ICSAM 2018), St. Petersburg, Russia

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名： 本間智之, ローマ字氏名：(HONMA Tomoyuki), 所属研究機関名：長岡技術科学大学, 部局名：工学研究科, 職名：准教授, 研究者番号：50452082

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：Velay Vincent, ローマ字氏名：(VELAY Vincent)