

【補助事業概要の広報資料】

補助事業番号 27-165
補助事業名 平成27年度 外科手術用高硬度高靱性チタン合金開発 補助事業
補助事業者名 愛媛大学大学院 理工学研究科 小林千悟

1 研究の概要

外科手術用のメスやはさみの刃先に利用可能な高硬度・高靱性な（硬く・壊れにくい）チタン合金の開発を行った。チタン合金の高硬度化を低コストにて実現するために合金元素として酸素を利用し、さらに熱処理による相分解ならびに窒化処理によって高硬度化を実現し、加工熱処理技術による組織微細化により高靱性を達成した。そして、外科手術用メスの刃先の試作を行った。

2 研究の目的と背景

外科的な疾病治療法の歴史は、手術器具の発展に支えられていると言っても過言ではなく、医師の技能を最大限に発揮させる手術器具は治療成績を飛躍的に向上させる。手術器具の材料として、強度ならびに靱性に優れているという観点で金属の材料が多用されているが、その中でも生体親和性に優れたチタン合金を利用した製品が近年増えている。しかしながら、これまで開発されてきたチタン合金では、硬度（強度）が不十分であるために手術用のメスやはさみ等の刃先にはチタン合金は利用できず、マルテンサイト系ステンレスなどの他の金属材料が利用されている。したがって、脳外科手術用はさみを例に挙げると、繊細な作業が実施できるように、現在は、いくつもの異なる特性を有する素材（高強度鋼、ステンレス、純チタン、チタン合金）をレーザーによる接合によってつなぎ合わせて製品としている。今後、術中MRI（手術室にMRI画像診断装置があり、MRI画像診断を行いながら手術をする）が普及していくことを考えると、手術器具は非磁性であることが求められる。つまり、手術器具は磁性を持つ高強度鋼からチタンなどの非磁性材料への転換が求められている。そこで本研究では、高強度・高靱性なチタン合金を開発し、外科手術用のメスや脳外科手術用はさみの開発を目指している。

3 研究内容

（1）外科手術用高硬度高靱性チタン合金開発

<http://www.kobayashi.material.ehime-univ.jp/research.html>

純チタンは硬度が低く（JIS 2種では110～150 Hv）、刃物の刃先としては硬度不足のために利用できない。刃先の材料特性としては、硬度は 550 Hv以上、伸びは5%（破断歪）以上必要である。刃先材料としてチタンを用いる場合、他の元素をチタンに添加して合金化し、チタンの硬度を上げる必要がある。本研究ではチタン合金の高硬度化を低コストにて実現する方法として、合金元素に酸素の利用を考えた。さらに、熱処理を利用してスピノーダル分解による高硬度化を併用することも考え、そのためにモリブデン、ニオブなどの元素も合金

元素として検討した。以下には紙面の都合上、最終的に刃先材料の候補合金となったTi-Mo-O系合金の研究結果について重要な点のみ述べる。

まず、アーク溶解炉にてTi-(1~4)Mo-(0~3.0)O(at%)合金を溶製した。得られたボタン試料を石英管中に真空封入し、1473 Kにて3.6 ksの均質化処理を施した。その後1073 Kにて熱間圧延を施し1.5 mm厚の板状試料とした。試験用途に応じて種々の大きさに切り出した後、1473 Kにて0.6 ksの溶体化処理を施し急冷後、673~773 Kにて0.3~86.4 ksの時効処理（熱処理）を行った。結晶構造ならびに内部組織の評価にはX線回折(XRD)測定および透過型電子顕微鏡法を用い、機械的特性の評価にはビッカース硬度試験を行った。ここではTi-4Mo合金系の結果について紹介すると、Ti-4Mo合金及びTi-4Mo-(1.0, 1.5, 3.0)O合金の溶体化処理後の焼き入れ組織は、XRD測定の結果 α'' 相であり、ビッカース硬度は酸素添加に伴い増加した。酸素添加によって、時効処理

する前の硬度は大きく上昇し、酸素を添加していない場合より3at%酸素を添加すると200 Hvほど硬度が上昇した。各合金のビッカース硬度は時効に伴い増加し、ピーク値を示した後低下する傾向がみられた。そして、Ti-4Mo-30合金においては、図1に示すように、目標値の550 Hvを超える硬度が得られた。硬度上昇

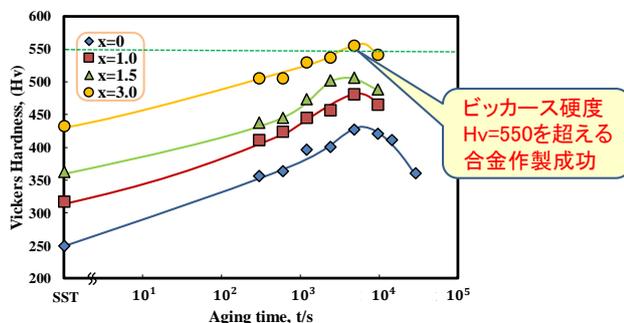


図1. Ti-4Mo-(0~3.0)O合金の773 K時効硬化挙動

の原因は、透過型電子顕微鏡を用いた合金内部の構造解析から、スピノーダル分解による変調構造の形成であることが分かった。以上より、適切な合金元素の選択と熱処理によって、本研究の目標値である硬度550 Hv以上のチタン合金の開発に成功した。次に、加工熱処理による組織微細化によって靱性の改善を試みた結果を示すと、例えば、1073 Kで熱間圧延（50%圧延を0.5 mm/passで実施）し、1073 Kで再結晶熱処理を1時間施した後、再度熱間圧延を1073 Kで施して（50%圧延を0.15 mm/passで実施）2 mm厚の試料を作製すると、硬度は409 Hvで伸びが目標値より2倍大きい10.4%の破断歪を有するチタン合金となった。硬度が目標値の550 Hvより不足している分は、スピノーダル分解もしくは窒化処理を併用して目標の硬度値を確保できる。刃先の材料として必要な機械的特性を満たすチタン合金の開発に成功した後、医療用の材料として利用する上で重要な生体適合性についても細胞培養実験から評価した。図2に示すように、本研究で開発したTi-Mo-O合金は、純チタンと同等の細胞適

合性は、純チタンと同等の細胞適

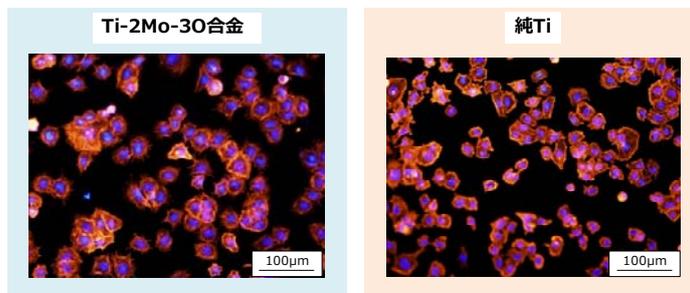


図2. 本研究で開発したTi-2Mo-30合金と純チタン上の骨芽細胞培養結果

合性を有していることが明らかとなった。

外科手術用のメスやはさみの刃先材料としての機械的特性ならびに生体適合性を満たすチタン合金を開発した後、メスの刃先の試作を行った。開発したチタン合金は成形性もよく様々な形状のメスの刃先を作ることができた。現在は、医師による評価からのフィードバックをかけながら、最適な材料特性について検討を行っており、さらに、より小型な刃先であるマイクロ剪刃をH29年内に作製する予定で株式会社シャルマンの協力のもと研究を継続している。

4 本研究が実社会にどう活かされるかー展望

本研究で開発した合金は、非磁性で術中MRIにおける手術器具や装置への利用が考えられるほか、体内に埋入して利用する生体用材料として利用できる。さらに、高強度・高靱性材料の開発は、航空機や自動車などの輸送機器の軽量化を実現することになり、航空宇宙産業や自動車産業等の発展にも寄与することが期待される。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

1998年4月に愛媛大学工学部の助手として赴任以来、金属材料の研究に従事し、当初は構造物の金属材料の研究に取り組んでいたが、2000年頃から生体・医療用の材料についても研究を始めた。今回、長年培ってきた金属材料の内部構造解析とその制御技術をチタン合金の高硬度・高靱性化に適用し、外科手術用のメスやはさみの刃先に利用できる材料を開発した。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

【発表論文等】

1. Sengo Kobayashi, Riku Wakamoto, Tatsuaki Sakamoto: Proceedings of the 13th World Conference on Titanium, 2016, 671-675.
2. Hiroaki Sogame, Sengo Kobayashi, Tatsuaki Sakamoto: Proceedings of TWENTY-FOURTH International Symposium on PROCESSING AND FABRICATION OF ADVANCED MATERIALS: XXIV, 2015, 126-132.

【学会発表】

1. 佐伯翔吾、小林千悟、岡野 聡: 「Ti-4Mo-0系合金の相分解挙動と硬度に及ぼす時効温度の影響」、第160回日本金属学会春期講演大会、2017年3月16日、首都大学東京
2. 佐伯翔吾、小林千悟: 「Ti-Mo合金の α ”相の相分解挙動と硬度に及ぼす酸素添加の影響」、第173回日本鉄鋼協会春季講演大会、2017年3月16日、首都大学東京
3. 福島峻平、呉 思綺、小林千悟: 「Ti-10at%V 合金の時効硬化挙動に及ぼす酸素及び窒素添加効果」: 第160回日本金属学会春期講演大会、2017年3月16日、首都大学東京
4. 小林千悟: 「低コスト医療・生体用合金の組織制御と細胞適合性」、第4回流氷セミナー - 金属生体材料研究の最前線-、2017年3月6日、北見工業大学

5. 小林千悟:「Ti合金の相分解挙動に及ぼす酸素ならびに窒素の影響」日本金属学会 中国四国支部 第127回 金属物性研究会 — 中国四国支部 チタン・チタン合金研究最前線 (1) —、2017年1月31日、愛媛大学
6. 佐伯翔吾、小林千悟、岡野 聡:「Ti-4Mo-0系合金の相分解挙動と硬度変化」、第159回日本金属学会秋期講演大会、2016年9月22日、大阪大学
7. 小林千悟:「細胞接着・伸展性向上のための金属材料表面処理」、エレクトロニクス実装学会 秋季大会 第26回マイクロエレクトロニクスシンポジウム、中京大学
8. 佐伯翔吾、小林千悟、阪本辰顕:「Ti-4Mo合金の内部組織と硬度に及ぼす酸素添加効果」、第56回 日本金属学会 中国四国支部・第59回 日本鉄鋼協会 中国四国支部 講演大会、2016年8月22日、島根大学
9. Sengo Kobayashi, Yuriko Kiyokane, Satoshi Okano, Takeaki Okamoto, Tatsuaki Sakamoto:「Effects of surface treatments of a Ti alloy on the behavior of osteoblast-like cell and on the initial stage of regenerate bone」、PRICM 9、2016年8月4日、京都市国際交流会館
10. 佐伯翔吾、小林千悟、阪本辰顕:「Ti-4Mo-0系合金のスピンノーダル分解挙動と硬度変化」、第8回 軽金属学会 中国四国支部 講演大会、2016年7月9日、鳥取大学
11. Sengo Kobayashi, Mitsuki Sugeoi and Tatsuaki Sakamoto:「First principle analysis for the effect of beta stabilizer in Ti alloys on the formation of alpha double prime phase」、Thermec2016、2016年6月2日、Graz (Austria)
12. 中甌 慶太、岡野 聡、小林 千悟、黒田 健介、岡本 威明:「濡れ性の異なるTi表面上における骨芽細胞挙動」、日本金属学会 2016年春期講演大会(第158回)、2016年3月23日、東京理科大学
13. 中尾 ありさ、小林 千悟、阪本 辰顕:「Ti-NbおよびTi-Mo合金の内部構造とヤング率の相関関係」、日本金属学会 2016年春期講演大会(第158回)、2016年3月23日、東京理科大学
14. 宮本 裕太、小林 千悟、阪本 辰顕:「Ti-2at%Mo合金のスピンノーダル分解挙動ならびに機械的特性に及ぼす酸素の影響」、日本金属学会 2016年春期講演大会(第158回)、2016年3月23日、東京理科大学
15. 清兼 友理子、小林 千悟、岡野 聡、岡本 威明:「Ti合金ならびに各種純金属上の骨芽細胞挙動に及ぼす熱酸化処理の影響」、日本金属学会 2016年春期講演大会(第158回)、2016年3月23日、東京理科大学
16. 小林千悟:「骨芽細胞挙動ならびに骨形成に及ぼすチタン合金表面状態の影響」、第3回流氷セミナー — 金属生体材料研究の最前線 —、2016年3月7日、北見工業大学
17. Sengo Kobayashi, Keisuke Manabe, Arisa Nakao, Masato Ueda, Masahiko Ikeda and Tatsuaki Sakamoto:「Composition Dependence on Microstructure and Mechanical Properties in Quenched Ti-(Mo, Nb, Fe) Alloys」、Twenty-Fourth International

Symposium on Processing and Fabrication of Advanced Materials (PFAM XXIV)、2015年12月20日、関西大学

18. Hiroaki Sogame, Sengo Kobayashi and Tatsuaki Sakamoto : 「Effect of Al Addition on the Microstructure Formation in Quenched Ti-Mo and Ti-Nb Alloys」、Twenty-Fourth International Symposium on Processing and Fabrication of Advanced Materials (PFAM XXIV)、2015年12月19日、関西大学
19. 中飯慶太, 岡野 聡, 小林千悟, 黒田健介, 岡本威明: 「Ti板上の骨芽細胞の挙動に及ぼす濡れ性の影響」、第37回日本バイオマテリアル学会大会, 2015年11月10日, 京都テルサ
20. 小林 千悟, 清兼 友理子, 和田 祐典, 岡野 聡, 岡本威明: 「再生初期の骨組織に及ぼすTi合金表面状態の影響」、第37回日本バイオマテリアル学会大会、2015年11月10日、京都テルサ
21. 中尾 ありさ, 小林 千悟, 阪本 辰顕: 「Ti-Nb 合金の微細組織ならびに機械的特性に及ぼすFe 添加効果」、日本金属学会秋期講演大会(第157回)、2015年9月18日、九州大学
22. 真鍋 慶祐, 小林 千悟, 阪本 辰顕: 「Ti合金の焼入れ組織ならびに機械的特性に及ぼす β 相安定化元素の効果」、第157回日本金属学会秋期講演大会, 2015年9月18日, 九州大学
23. Sengo Kobayashi, Riku Wakamoto, Tatsuaki Sakamoto : 「DV-X α First Principle Analysis of the Effect of Alloying Elements on the α Phase Formation in Ti Alloys」、The 13th World Conference on Titanium 2015、2015年8月18日、San Diego (USA)
24. 福島 峻平, 小林 千悟, 阪本 辰顕: 「Ti-3at%Mo合金に及ぼす2段階時効処理の効果」、第7回 軽金属学会 中国四国支部 講演大会、2015年7月4日、岡山大学
25. 中尾 ありさ, 小林千悟, 阪本 辰顕: 「Ti-8Nb合金の内部組織ならびにヤング率に及ぼすFe添加効果」、第7回軽金属学会 中国四国支部 講演大会、2015年7月4日、岡山大学

7 補助事業に係る成果物

(1) 補助事業により作成したもの

<http://www.kobayashi.material.ehime-univ.jp/research.html>

外科手術用メスの刃先の試作(最上段と最下段)、中央の2つは市販のステンレス製のメス



(2)(1) 以外で当事業において作成したもの
なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 愛媛大学大学院 理工学研究科
物質生命工学専攻 物性制御工学研究室
(エヒメダイガクダイガクイン リコウガクケンキュウカ
ブッシツセイメイコウガクセンコウ
ブッセイセイギョコウガクケンキュウシツ)

住 所： 〒790-8577 (半角)

愛媛県松山市文京町3

申 請 者： 役職名 教授 小林 千悟 (コバヤシ センゴ)

担 当 部 署： 工学部 (コウガクブ)

E-mail： kobayashi.sengo.me@ehime-u.ac.jp

URL： <http://www.kobayashi.material.ehime-univ.jp/index.html>