

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：11301  
 研究種目：基盤研究(B) (一般)  
 研究期間：2014～2016  
 課題番号：26289252  
 研究課題名(和文) 3Dプリントされた人工関節用コバルト合金の疲労とその抑止法：準安定結晶変形の科学  
  
 研究課題名(英文) Fatigue of 3D Printed Cobalt Alloy for Artificial Joints and Methods for its Improvement : Science of Deformation in Meta-Stable Crystals  
  
 研究代表者  
 小泉 雄一郎 (KOIZUMI, Yuichiro)  
  
 東北大学・金属材料研究所・准教授  
  
 研究者番号：10322174  
 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：Co-Cr-Mo (CCM) 合金はその優れた強度、耐食性、耐摩耗性、生体為害性の低さから、人工関節用材料として使用されている。一方、電子ビーム積層造形 (EBM) は、形状・サイズを患者毎に最適化したカスタムインプラント製造技術として注目されている。本研究では、EBMで造形したCCM合金が部位により結晶粒径・方位、構成相が異なる不均一な組織を有し、低強度を示す場合があることを見出すとともに、造形後に、室温で準安定な -fcc相と安定相である -hcp相の間での相変態を生じさせることにより、形状やサイズを変化させることなく、熱処理だけで組織を均一微細化し疲労寿命を向上させることに成功した。

研究成果の概要(英文)：Co-Cr-Mo (CCM) alloy is used for artificial joints because it has excellent wear and corrosion resistances and biocompatibility. Additive manufacturing technologies such as electron beam melting (EBM) is attracting growing attention because of their ability to fabricate tailor-made artificial joints. In this study, we have investigated, (i) the inhomogeneity of the microstructure with special focus on the phase distribution, (ii) the relation between the microstructure and fatigue behavior, and (iii) the effects of post-built heat treatment on the microstructure and fatigue properties of EBM-built CCM alloys. The constituent phases and grain structure were found to depend considerably on the position of the build part in the building space. Heat treatment to form -hcp-phase and subsequently reverse it to -fcc-phase via diffusive transformation greatly homogenized the phase distribution and refined the microstructure, which resulted in the great improvement of the fatigue property.

研究分野：材料組織、材料プロセス、材料強度

キーワード：電子ビーム積層造形 3Dプリンター 人工関節 疲労破壊 相変態 マルテンサイト 結晶粒微細化  
 繰返し変形

1. 研究開始当初の背景

Co-Cr-Mo (CCM) 合金はその優れた強度、耐食性、耐摩耗性、生体為害性の低さから、人工関節や義歯などの骨代替インプラント用材料として使用されている。中でもその強度や耐摩耗性は、チタン合金等他のインプラント用材料と比べて特に高いことから高負荷加重部や摺動部分には欠かせない材料となっている。一方、金属用3Dプリンターすなわち金属用積層造形は、形状やサイズを患者毎に最適化された人工関節等を実現する技術として注目されている。しかしながら、造形物の材料組織が従来製法のものとは大きく異なる場合があることから、その機械的性質への影響の解明が必須である。我々は研究開始当初までに、電子ビームを熱源に用いた粉末床熔融結合方式の金属積層造形法である電子ビーム積層造形 (EBM) 法で造形された CCM 合金が、 $\langle 100 \rangle$  方向に強く配向した単結晶状の  $\gamma$ -fcc 準安定相を有すること等を見出した。一方、従来製法で得た CCM 合金の組織と機械的性質に関する研究において、 $\gamma$ -fcc 相から  $\epsilon$ -hcp 相への変態を伴う特有の塑性挙動や特異な表面起伏の形成を伴う疲労挙動等も見出しおり、これらの挙動への EBM 材の組織が及ぼす影響を解明することは、3D プリントされた人工関節の信頼性を担保する上で重要である。

2. 研究の目的

CCM合金の特異な力学挙動に対する金属積層造形材の組織が及ぼす影響を解明し、それに基づく組織制御により疲労特性を向上させ、3Dプリント人工関節に必要な信頼性を与えるとともに、準安定結晶の変形に関する普遍的な学術的知見及び積層造形による材料開発指針を得ることを目的とした。さらに EBM の造形空間での位置が及ぼす組織への影響を解明するとともに、造形後に熱処理による組織変化と、その疲労挙動への影響を解明することを目的とした。

3. 研究の方法

組成 Co-28Cr-6Mo-0.23C-0.2N (mass %) の粉末を原料として、EBM 積層造形装置 (Arcam A2X) を用いて、造形方向と平行な、直径 15 mm、高さ 85 mm の円柱試料ならびに直径 18 mm、高さ 160 mm の円柱試料を造形した。尚、高さ 160 mm の試料については、20 本を 4 行 5 列に配列させて同時に造形した。各試料の各高さ位置の組織を SEM-EBSD 法にて解析し、造形空間での高さおよび水平位置の異なる種々の部位から、ほぼ  $\gamma$  単相 ( $\gamma$  相材)、 $\gamma + \epsilon$  混相 (混相材)、ほぼ  $\epsilon$  単相 ( $\epsilon$  相材) の板状の引張圧縮一軸繰返し試験用試験片を切り出し、ひずみ制御疲労試験ならびに、応力制御疲労試験を行った。また混相材に  $\epsilon$  相化 (750°C, 12 h) とその後の  $\gamma$  相化逆変態熱処理 (1000°C, 10 min) を施した試料、さらに、 $\epsilon$  相化熱処理と  $\gamma$  相化逆変態熱処理をもう一サイクル繰返し施した試料 (2 サイクル熱処理材) も作製し、それらの組織および疲労挙動の評価も行った。

4. 研究成果

(1) EBM により造形された CCM 合金の高さ及び造形位置の違いによる組織への影響:

高さ 85 mm の造形ままの CCM 合金円柱試料の組織を、構成相と結晶方位に注目して調べたところ、図 1 にその一例を示す様に、上部 40 mm 程度の範囲は  $\gamma$  単相で、 $\langle 100 \rangle$  に強く配向した組織、下部では配向性の低い  $\epsilon$  単相組織、中央部分では、両相が混合した不均一な組織が得られた。高さ 160 mm の円柱試料に関しては、高さの中央となる高さ 80 mm の部分の相分布を SEM-EBSD で調べたところ、図 2 に示すように、配列の中心部の柱では、配列の端部の柱よりも  $\gamma$  相の割合が大きく  $\epsilon$  相の割合が小さかった。中心部の柱は端部の柱に比べて周囲が柱に多く囲まれているため、より高温で保持される。そのため  $\gamma$  相から  $\epsilon$  相への変態速度が遅くなり、相分布が異なると考えられる。すなわち、水平位置の違いによる熱履歴の違いが、組織分布に影響を及ぼすことが明らかになった。この結果に基づき、 $\gamma \rightarrow \epsilon$  変態による組織制御とその疲労特性への影響の実験を実施した。

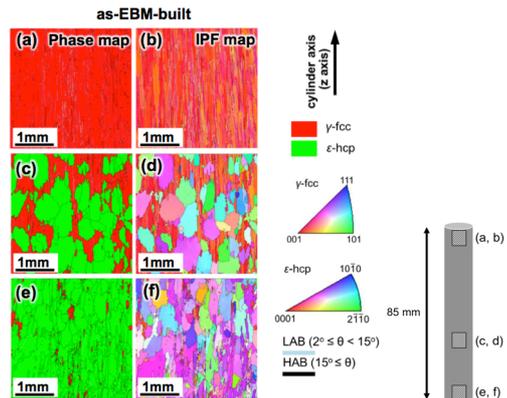


図1 EBM 造形まま CCM 合金の組織 (電子線後方散乱回折による相分布像(a,c,e)及び結晶方位像(b,d,f)) 高さ位置により構成相が異なる例。[Sun et al. Acta Mater. 86 (2015) 305]

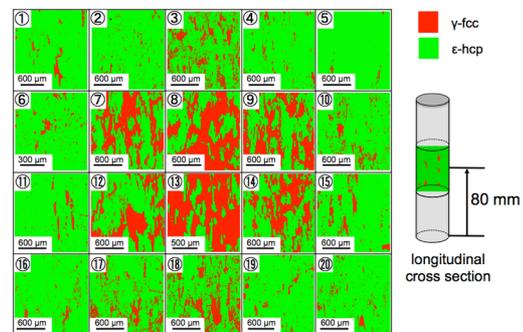


図2 EBM 造形まま CCM 合金の組織 (電子線後方散乱回折による相分布像) . 水平位置により相構成が異なる例。[Takashima et al. Mater Trans. 57 (2016) 2041]

(2) EBM 造形された CCM 合金への熱処理が及ぼす組織と疲労特性への影響:

EBM 造形された試料に  $\epsilon$  化熱処理と  $\gamma$  化逆変態熱処理, さらにそれらを交互に 2 回ずつ繰り返す, 繰り返し熱処理を行った. その結果, それぞれの熱処理で均一化した組織を得ることができ,  $\gamma$  化逆変態熱処理と繰り返し熱処理では結晶粒が微細化された (図 3).

$\gamma$  相と  $\epsilon$  相が混在した初期組織をもつ平板状疲労試験片に  $\gamma$  化逆変態熱処理を施すと,  $\gamma$  相の微細粒が均一に形成された. 図 4 は造形まま材と  $\gamma$  単相化熱処理材の表面の低サイクル疲労試験後の phase マップであり, どちらも同じロッドの同じ高さ位置から切り出された試料である.  $\gamma$  相領域がひずみ誘起マルテンサイト変態 (SIMT) によって  $\epsilon$  相に変態した様子を示している. 造形まま材では筋状に変態が進行し, 変態部分には大きな表面起伏が存在した. 一方  $\gamma$  単相化熱処理材では表面全体に広がるように変態が進み, 表面起伏は滑らかであった.

さらに応力制御疲労試験でも熱処理の効果を評価した. 例えば, 応力振幅 600 MPa 一定での試験では, 図 5 に示すように, 破断サイクル数 ( $N_f$ ) は, 造形ままロッドの異なる高さ位置から切り出した試料の場合,  $\gamma$  相材で  $N_f=422$ , 混相材で  $N_f=136$  と  $\gamma$  相を含む場合はいずれも 500 以下と小さかったのに対し,  $\epsilon$  相材では  $N_f=4822$  と一桁以上大きかった. 造形ままで混相組織を有する試料に対して  $\epsilon$  化熱処理を施した試料の疲労寿命は  $N_f=933$  にまで上昇し, さらに  $\gamma$  化逆変態熱処理を施した試料は  $N_f=4462$  にまで上昇した. これは粗大な  $\gamma$  粒の繰り返し変形時に SIMT で  $\epsilon$  相へのすべりの集中による急峻な表面起伏及びそれに伴う応力集中が, 熱処理による結晶粒微細化によって抑制されたためと考えられる. このように, 応力制御疲労試験供した結果でも,  $\gamma$  化逆変態熱処理した試料は長寿命を示した. しかしながら, 繰り返し  $\epsilon$  化と  $\gamma$  化を施した試料の疲労寿命は, 平均結晶粒径が  $10\mu\text{m}$  以下にまで結晶粒微細化が進行したにもかかわらず,  $N_f=1002$  と低下した. このことは, 相構成や結晶粒径だけでなく, 平衡相である炭化物相や金属間化合物相の析出が熱処理中に進行したことが, 疲労寿命に影響していることを示唆している.

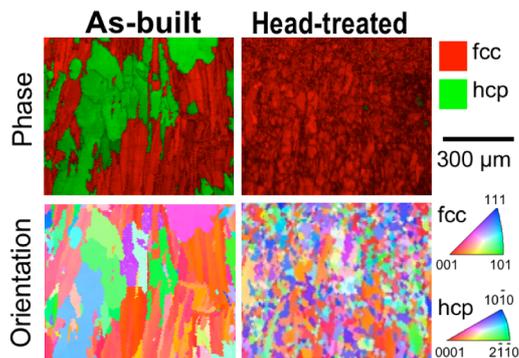


図 3 EBM 造形ままと熱処理後の CCM 合金の組織 (電子線後方散乱回折 相分布像と結晶方位像)

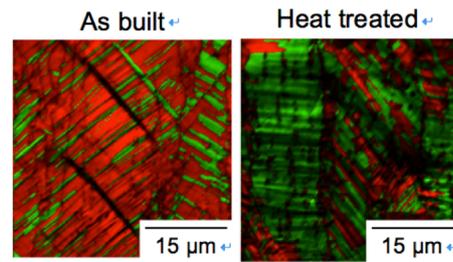


図 4 造形まま材と  $\gamma$  単相化熱処理材の疲労試験後の表面の phase マップ (明部が  $\epsilon$  相, 暗部が  $\gamma$  相)

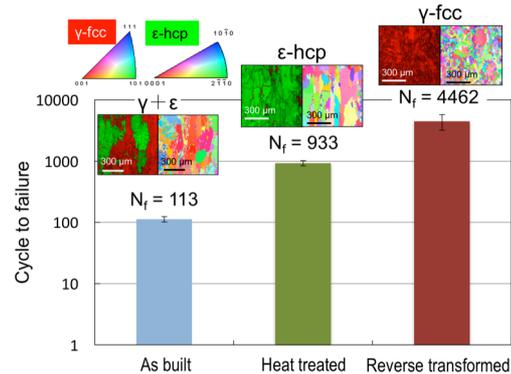


図 5 疲労寿命への熱処理の効果. (応力振幅  $\Delta\sigma = \pm 600$  MPa,  $R = -1$  での評価).  $\epsilon$  単相化 (heat treated),  $\gamma$  化逆変態 (Reverse transformed) による疲労寿命の向上.

### (3) まとめ

EBM により製造された人工関節用 CCM 合金の組織の特徴とその疲労特性との関係性を評価するとともに, 特性を改善するための組織制御の指針を, 塑性挙動と相安定性の関係並びに固相変態による組織微細化の観点から示した.

EBM 造形における造形領域内での水平位置により, 造形ままの Co-28Cr-6Mo-0.23C-0.2N 合金の組織は,  $\gamma$  相と  $\epsilon$  相の分布や結晶粒径の異なる不均一なものとなり, 引張特性や疲労特性も部位によって異なったものとなり, 特に 2 つの相が混在した組織をもつ部位の特性は低い. その組織の不均一を解消するための方策として,  $\gamma$  相と  $\epsilon$  相間の固相変態を利用した熱処理が有効である.  $\epsilon$  単相化熱処理, さらに  $\gamma$  相への逆変態熱処理を施すことにより, 結晶粒が微細化され疲労特性は向上する. すなわち, 造形後に形状やサイズを変化させることなく, 熱処理だけで組織を均一微細化し高強度を発現させることに成功した.

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 11 件)

- [1] Y. Koizumi, A. Okazaki, A. Chiba, T. Kato, A. Takezawa, Cellular lattices of biomedical Co-Cr-Mo-alloy fabricated by electron beam melting with the aid of shape optimization, Additive Manufacturing 12 (2016) 305-313. 査読有, DOI: 10.1016/j.addma.2016.06.001.

- [2] T. Takashima, Y. Koizumi, Y. Li, K. Yamanaka, T. Saito, S. Sun, A. Chiba, Effect of building position on phase distribution in Co-Cr-Mo alloy additive manufactured by electron-beam melting, *Materials Transaction*, 57 (2016) 2041-2047. 査読有, DOI: 10.2320/matertrans.Y-M2016826
- [3] Y. Koizumi, Y. Chen, Y. Li, K. Yamanaka, S.-I. Tanaka, Y. Hagiwara, A. Chiba, Uneven damage on head and liner contact surfaces of a retrieved Co-Cr-based metal-on-metal hip joint bearing: an important reason for the high failure rate, *Materials Science and Engineering C*, 62 (2016) 532-543. 査読有, DOI:10.1016/j.msec.2016.01.006
- [4] X. Wang, Y. Li, Y. Hou, H. Bian, Y. Koizumi, A. Chiba, Effects of surface friction treatment on the in vitro release of constituent metals from the biomedical Co-29Cr-6Mo-0.16N alloy, *Materials Science and Engineering C*, 64 (2016) 260-268. 査読有, DOI: 10.1016/j.msec.2016.03.050
- [5] 高島 大洋, 小泉 雄一郎, 李 云平, 山中謙太, 齋藤 毅, 千葉 晶彦, 電子ビーム溶融 (EBM) 積層造形により作製された Co-Cr-Mo 合金の造形位置が及ぼす組織への影響, *粉体および粉末冶金*, 63 (2016) 10-16. 査読有, DOI:10.2497/jjspm.63.10
- [6] S.H. Sun, Y. Koizumi, S. Kurosu, Y. Li, A. Chiba, Phase and grain size inhomogeneity and their influences on creep behavior of Co-Cr-Mo alloy additive manufactured by electron-beam melting (EBM), *Acta Materialia*, 86, (2015) 305-318. 査読有, DOI: 10.1016/j.actamat.2014.11.012
- [7] P. Stenlund, S. Kurosu, Y. Koizumi, F. Suska, H. Matsumoto, A. Chiba, A. Palmquist, Osseointegration Enhancement by Zr doping of Co-Cr-Mo Implants Fabricated by Electron Beam Melting, *Additive Manufacturing* 6 (2015) 6-15. 査読有, DOI: 10.1016/j.addma.2015.02.002
- [8] T. Mitsunobu, Y. Koizumi, B.S. Lee, K. Yamanaka, H. Matsumoto, Y. Li, A. Chiba. Role of strain-induced martensitic transformation in the formation of extrusion and intrusion during fatigue deformation of biomedical Co-Cr-Mo alloys, *Acta Materialia* 81 (2014) 377-385. 査読有, DOI: 10.1016/j.scriptamat.2013.10.015
- [9] B.-S. Lee, Y. Koizumi, H. Matsumoto, A. Chiba, Collective behavior of strain-induced martensitic transformation (SIMT) in biomedical Co-Cr-Mo-N alloy polycrystal: an ex-situ electron backscattering diffraction study, *Materials Science and Engineering A* 611 (2014) 263-273. 査読有, DOI:10.1016/j.msea.2014.05.071
- [10] S.H. Sun, Y. Koizumi, S. Kurosu, Y. Li, A. Chiba, Effect of phase transformation on tensile behavior of Co-Cr-Mo fabricated by electron-beam melting, *Journal Japanese Society of Powder Metallurgy* 61 (2014) 234-242. 査読有, DOI: 10.2497/jjspm.61.234
- [11] 小泉 雄一郎, 孫 世海, 齋藤 毅, 黒須 信吾, 千葉 晶彦, 電子ビーム積層造形による Co-Cr-Mo 合金製ゼンマイばねの試作, *粉体及び粉末冶金* 61 (2014) 243-249. 査読有, DOI: 10.2497/jjspm.61.243
- [学会発表] (計 37 件)
- [1] 小泉 雄一郎, 電子ビーム積層造形 (EBM) における金属材料組織の形成とその制御, *粉体粉末冶金協会 平成 28 年度第 2 回粉末積層 3D 造形委員会*, 2017-3-3, 大阪大学中之島センター, 大阪.
- [2] 小泉 雄一郎, 凝固界面反応の理解と電子ビーム積層造形における金属材料組織制御, *大阪大学接合科学研究所東京セミナー 界面科学の理解を通じた新奇な材料・プロセス研究*, 2016-12-9, 東京工業大学・田町キャンパス, 東京.
- [3] 小泉 雄一郎, 電子ビーム積層造形された金属材料の組織とその制御, *溶接学会第 116 回マイクロ接合研究委員会 アディティブ・マニファクチャリングにおける溶接・接合現象*, 2016-12-9(11:15-12:00) 大阪大学 医学・工学研究科東京ランチ, 東京.
- [4] 小泉 雄一郎, 金属積層造形 (3D プリンター) で形状だけでなく材質を制御する方法, *マテリアル工学セミナー ～非鉄金属材料の最新展開～*, 2016-10-28, 東京大学 本郷キャンパス, 東京.
- [5] 小泉 雄一郎, 岡崎 新, 富永 皓祐, 千葉 晶彦, 日立製作所 藤枝 正, 加藤 隆彦, 電子ビーム積層造形した格子状多孔体の例に見る金属積層造形の現状と課題, *日本金属学会 第 159 会講演大会 公募シンポジウム S4 ナノ・マイクロ造形構造体の材料学*, 2016-9-22, 大阪大学豊中キャンパス, 大阪.
- [6] 小泉 雄一郎, 金属 3D プrint における結晶組織形成の計算機シミュレーション, *CTC CAE POWER 2016 / 金属材料*, 2016-7-21, 東京コンファレンスセンター・品川, 東京.
- [7] 小泉 雄一郎, 丁 笑, 山中 謙太, 齋藤 毅, 千葉 晶彦, 孫 世海, 電子ビーム溶融 (EBM) 積層造形された Co-Cr 基合金と Ni 基超合金ロッドの組織と機械的性質, *溶接学会 平成 28 年春季全国大会, オーガナイズドセッション アディティブ・マニファクチャリングにおける溶接・接合現象*, 2016-4-14, アジア太平洋トレードセンター (大阪南港 ATC ホール)
- [8] 鈴木 もえ, 久森 紀之, 小泉 雄一郎, 千葉 晶彦, 電子ビーム積層造形法により作製した Co-Cr-Mo 合金の疲労特性に結晶構造が及ぼす影響, *日本金属学会春期講演*

- 大会, 東京理科大学, 2016-03-25.
- [9] 小泉 雄一郎, 高島 大洋, 山中 謙太, 青柳 健大, 齋藤 毅, 千葉 晶彦, 電子ビーム積層造形された生体用 Co-Cr-Mo 合金の組織と繰り返し変形挙動, 日本金属学会春期講演大会, 東京理科大, 2016-03-23.
- [10] T. Takashima, Y. Koizumi, Y. Li, K. Yamanaka, T. Saito, A. Chiba, Effect of building position and heat treatment on phase distribution and mechanical property in Co-Cr-Mo alloy manufactured by electron beam melting, 2015 Annual Meeting of Excellent Graduate Schools for Materials Integration Center and Materials Science Center, Sendai, Japan, 2016-03-18.
- [11] Y. Koizumi, F. Suska, H. Matsumoto, A. Chiba, A. Palmquist, Mechanical and biological response of biomedical Co-Cr-Mo alloy produced by additive manufacturing using electron beam melting (EBM), Patrik Stenlunda, Shingo Kurosu, Innovative Research for Biosis-Abiosis Intelligent Interface Symposium, Sendai, Japan, 2016-01-18 - 2016-01-18
- [12] 高島 大洋, 小泉 雄一郎, 李 云平, 山中 謙太, 齋藤 毅, 千葉 晶彦, 電子ビーム積層造形された生体用 Co-Cr-Mo 合金の組織と力学特性への造形位置と熱処理の影響, 第 130 回金属材料研究所講演会, 東北大学金属材料研究所, 2015-11-25.
- [13] A. Chiba, Y. Koizumi, S. Sun, S. Kurosu, Microstructure and Mechanical Properties Evolution of Biomedical Co-Cr-Mo Alloys Produced by Electron Beam Additive Manufacturing, The Third International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, 2015-10-29.
- [14] 小泉 雄一郎, 孫 世海, 山中 謙太, 千葉 晶彦, 電子ビーム積層造形で形成される材料組織の不均一性と傾斜機能化の可能性, 第 26 回 新構造・機能制御と傾斜機能材料シンポジウム, 2015-9-30, 九州大学西新プラザ, 福岡.
- [15] 小泉 雄一郎, 孫 世海, 丁 笑, 山中 謙太, 齋藤 毅, 千葉 晶彦, 電子ビーム溶融(EBM)積層造形による材料組織制御 2015, 日本鉄鋼協会第 170 回秋季講演大会, 九州大学, 2015-09-16 - 2015-09-18
- [16] 小泉 雄一郎, P. Stenlund, 黒須 信吾, F. Suska, 齋藤 毅, 松本 洋明, A. Palmquist, 千葉 晶彦, 電子ビーム積層造形された Zr 添加 Co-Cr-Mo 合金の骨結合, 日本金属学会 2015 年秋期(第 157 回)講演大会, 九州大学, 2015-09-16 - 2015-09-18
- [17] 高島 大洋, 小泉 雄一郎, 李 云平, 山中 謙太, 齋藤 毅, 千葉 晶彦, 電子ビーム積層造形された生体用 Co-Cr-Mo 合金の組織と力学特性への造形位置と熱処理の影響, 日本金属学会 2015 年秋期(第 157 回)講演大会, 九州大学, 2015-09-16 - 2015-09-18
- [18] 千葉 晶彦, 小泉 雄一郎, 山中 謙太, 電子ビーム積層造形により得られる生体・構造用金属材料の組織と力学特性 2015, 日本金属学会 2015 年秋期(第 157 回)講演大会, 九州大学, 2015-09-16 - 2015-09-18
- [19] 小泉 雄一郎, 孫 世海, 丁 笑, 山中 謙太, 齋藤 毅, 千葉 晶彦, 電子ビーム溶融(EBM)積層造形による材料組織制御 日本鉄鋼協会 予告セッション「粉末冶金の技術課題及び新たな進展 I」, 2015-9-17 九州大学伊都キャンパス, 福岡.
- [20] Y. Koizumi, A. Okazaki, A. Chiba, Microstructure and Shape Optimization of Porous Biomedical Co-Cr-Mo Alloy Fabricated by Electron Beam Melting 2015, 13th U.S. National Congress on Computational Mechanics (USNCCM13), Sand Diego, California, USA, 2015-07-26 - 2015-07-30
- [21] 小泉 雄一郎, P. Stenlund, 黒須 信吾, F. Suska, 齋藤 毅, 松本 洋明, A. Palmquist, 千葉 晶彦, 電子ビーム積層造形された Zr 添加 Co-Cr-Mo 合金インプラントのオッセオインテグレーション, 粉体粉末冶金協会平成 27 年度春季大会, 早稲田大, 2015-05-27 - 2015-05-27
- [22] 高島 大洋, 小泉 雄一郎, 千葉 晶彦, 李 云平, 山中 謙太, 齋藤 毅, 電子ビーム積層造形により作製された生体用 Co-Cr-Mo 合金の組織と力学挙動への熱処理の影響, 粉体粉末冶金協会平成 27 年度春季大会, 早稲田大, 2015-05-27 - 2015-05-27
- [23] 小泉 雄一郎, 孫 世海, 岡崎 新, 高島 大洋, 齋藤 毅, 山中 謙太, 李 云平, 黒須 信吾, 千葉 晶彦, 電子ビーム積層造形された生体用 Co-Cr-Mo 合金の微細組織の不均一性, 粉体粉末冶金協会平成 27 年度春季大会, 早稲田大, 2015-05-26 - 2015-05-26
- [24] S.H. Sun, Y. Koizumi, S. Kurosu, T. Saito, Y. Li, K. Yamanaka, A. Chiba, Microstructure Variation in Co-Cr-Mo Alloy Fabricated by Electron Beam Melting, 粉体粉末冶金協会平成 27 年度春季大会, 早稲田大, 2015-05-26
- [25] 高島 大洋, 小泉 雄一郎, 千葉 晶彦, 李 云平, 山中 謙太, 齋藤 毅, 電子ビーム積層造形により作製された Co-Cr-Mo 合金が有する相分布とその力学挙動への影響, 日本金属学会秋期(第 156 回)講演大会, 2015-03-18 - 2015-03-20, 東京大学
- [26] 小泉 雄一郎, 陳 妍, 千葉 晶彦, 田中 俊一郎, 萩原 嘉廣, Metal-on-Metal 型人工関節の動向調査と再手術対象製品の組織観察, 日本金属学会秋期(第 156 回)講演大会, 2015-03-18 - 2015-03-20, 東京大学
- [27] 小泉 雄一郎, 金属用 3D プリンターで形状だけではなく結晶組織も制御できる可能性,

- 日本金属学会東海支部・日本鉄鋼協会東海支部学術討論会, 2015-2-23, 名古屋大学坂田・平田ホール, 名古屋.
- [28] 小泉 雄一郎, 電子ビーム積層造形における結晶配向性制御と格子構造最適化, 溶接学会第108回軽構造接合加工研究委員会「アーク溶接・ろう付およびその他の接合技術」, 2015-1-20, 東京工業大学キャンパス・イノベーションセンター, 東京.
- [29] 高島 大洋, 小泉 雄一郎, 千葉 晶彦, 李云平, 山中 謙太, 齋藤 毅, 電子ビーム積層造形により得られたCo-Cr-Mo合金の $\gamma/\epsilon$ 二相組織と力学挙動, 粉体粉末冶金協会平成26年度秋季大会, 2014-10-29 - 2014-10-31, 大阪大学
- [30] A. Okazaki, Y. Koizumi, S.H. Sun, T. Saito, Y. Li, K. Yamanaka, A. Chiba, Grain Structure Heterogeneity in Biomedical Co-Cr-Mo-N Alloy Fabricated by Electron Beam Melting (EBM), Materials Science of Additive Manufacturing: Processing II, Materials Science & Technology 2014, 2014-10-13 - 2014-10-16, Pittsburgh, Pennsylvania, USA
- [31] A. Chiba, S.-H. Sun, Y. Koizumi, S. Kurosu, Y. Li, K. Yamanaka, Grain Structure Heterogeneity in Biomedical Co-Cr-Mo-N Alloy Fabricated by Electron Beam Melting (EBM), Materials Science of Additive Manufacturing: Processing II, Materials Science & Technology 2014, 2014-10-13 - 2014-10-16, Pittsburgh, Pennsylvania, USA
- [32] S.H. Sun, Y. Koizumi, S. Kurosu, Y. Li, A. Chiba, Microstructure inhomogeneity and its effect on creep behavior of Co-Cr-Mo alloy fabricated by electron beam melting 日本金属学会秋期(第155回)講演大会, 2014-09-24 - 2014-09-26, 名古屋大学
- [33] 小泉 雄一郎, 孫 世海, 李云平, 山中 謙太, 千葉 晶彦, 寺田 大将, 辻 伸泰 電子ビーム積層造形された生体用Co-Cr-Mo合金中における $\gamma \rightarrow \epsilon$ 変態, 日本金属学会秋期(第155回)講演大会, 2014-09-24 - 2014-09-26, 名古屋大学
- [34] 岡崎 新, 小泉 雄一郎, 千葉 晶彦, 生体用Co-Cr-Mo合金の電子ビーム積層造形におけるビーム条件が微細組織形成に及ぼす影響, 日本金属学会秋期(第155回)講演大会, 2014-09-24 - 2014-09-26, 名古屋大学
- [35] 小泉 雄一郎, 格子構造最適化と電子ビーム積層造形, くいと交流会 2014 2014-9-12, 東京コンファレンスセンター品川, 東京.
- [36] 小泉 雄一郎, 千葉 晶彦, 電子ビームを用いた金属版3Dプリンターの特徴と将来展望, 平成26年度 八戸工業高等専門学校産業技術振興会定時総会特別講演会, 2014-6-20, 八戸グランドホテル, 八戸市.
- [37] 岡崎 新, 小泉 雄一郎, 齋藤 毅, 李云平, 千葉 晶彦, 電子ビーム積層造形された生

体用Co-Cr-Mo合金における組織の造形物サイズ依存性, 第127回東北大学金属材料研究所講演会, 2014-05-28, 東北大学金属材料研究所

[図書](計1件)

- [1] 成島尚之, 中野貴由 編集, 共著者 小泉 雄一郎, 千葉 晶彦, 他計83名, 「バイオマテリアル研究の最前線」, 日本金属学会2014-, pp.93-94 (担当「3-1-5「生体用Co-Cr-Mo合金の結晶粒界でのマルテンサイト変態挙動」」)

[その他]

ホームページ

<http://www.chibalab.imr.tohoku.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

小泉 雄一郎(KOIZUMI, YUICHIRO)  
東北大学・金属材料研究所・准教授  
研究者番号:10322174

### (2)研究分担者

千葉 晶彦(CHIBA, AKIHIKO)  
東北大学・金属材料研究所・教授  
研究者番号:00197617

李云平(LI, YUNPING)

東北大学・金属材料研究所・助教  
研究者番号:80546862

### (3)連携研究者

辻 伸泰(NOBUHIRO, TSUJI)  
京都大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号:30263213

### (4)研究協力者

孫 世海(SUN, SHI-HAI)

高島 大洋(TAKASHIMA, TAIYO)