

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02412

研究課題名（和文）リエントラント形状記憶合金 - 異常なマルテンサイト変態を示す新規Co系合金の開発 -

研究課題名（英文）Development of novel Co-based reentrant shape memory alloys showing anomalous martensitic transformation

研究代表者

XU XIAO (XU, XIAO)

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：20781389

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,000,000円

研究成果の概要（和文）：一般に、マルテンサイト変態は冷却時に母相 マルテンサイト相の正変態が生じるが、最近、研究代表者らは、Co₂Cr(Ga,Si)合金において冷却で母相 マルテンサイト相 母相の拳動を示す異常なリエントラント・マルテンサイト変態を報告し、このような特徴を有する形状記憶合金のことをリエントラント形状記憶合金と命名した。本研究は新規形状記憶合金の開発を目標とし、新たにCo-V-AlおよびCo-V-Al-Siなど、新しい形状記憶合金の開発に成功した。さらに、リエントラント形状記憶合金を用いて、世界で初めて周囲の温度で冷暖切替する固体冷媒材料を開発し、次世代固体冷凍技術の実現に貢献できると期待する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究はまず新規Co系形状記憶合金の開発を目的とした。Co系合金は独特の電子構造から形状記憶合金にはなりにくいと言われてきたが、本研究で新規形状記憶合金の開発に成功したことで学術的に大きな意味を持つと言える。また、Co-V-AlとCo-V-Si-Al合金はいずれもGaなど高価な元素を含まないため、実用上の意味も大きい。さらに、Co-Cr-Al-Si合金において、周囲の温度で冷暖切替する固体冷媒材料の開発に成功した。こちらは新しい物理現象であると同時に、装置設計に新たな自由度が生まれることから、次世代固体冷凍技術の実現にも貢献できると期待され、学術的にも社会的にも大きな意義を持つ研究成果である。

研究成果の概要（英文）：Conventional martensitic transformation occurs as a parent-to-martensite transformation during the cooling process. Recently, we developed a new Co₂Cr(Ga,Si) alloy system, where a unique parent-martensite-parent reentrant martensitic transformation occurs; shape memory alloys showing this unique behavior were named as reentrant shape memory alloys. In this study, we focused on the development of new shape memory alloys, and new systems such as Co-V-Al and Co-V-Al-Si were successfully developed. Moreover, by using the reentrant shape memory alloys, we found the elastocaloric switching effect for the first time in the world. This achievement is considered as a solid progress for the realization of the upcoming solid-state refrigeration technique in the near future.

研究分野：金属物性

キーワード：形状記憶合金 リエントラント・マルテンサイト変態 Co系合金

1. 研究開始当初の背景

一般に、マルテンサイト変態は冷却時に母相→マルテンサイト相の正変態が生じるが、最近、研究代表者らは、 $\text{Co}_2\text{Cr}(\text{Ga},\text{Si})$ 形状記憶合金において、冷却で母相→マルテンサイト相→母相の挙動を示す異常なリエントラント・マルテンサイト変態を報告し、このような特徴を有する形状記憶合金のことをリエントラント形状記憶合金と命名した^{1,2}。

しかし、ホイスラー構造を有するCo系形状記憶合金は研究開始当初では極めて希であった。Co系ホイスラー合金の中で、マルテンサイト変態が最初に報告されたのは Co_2NbSn ³であるが、形状記憶効果は確認されておらず、厳密に形状記憶合金とは言えない。また、Co系ホイスラー合金の多くはハーフメタルと呼ばれる強磁性合金⁴であり、その特徴的な電子構造から構造安定性が高いとされ、形状記憶効果は出現しにくいと考えられてきた。さらに、 $\text{Co}_2\text{Cr}(\text{Ga},\text{Si})$ 合金に見られるリエントラント・マルテンサイト変態は学術的に面白い物理現象であるが、応用への可能性は不明であった。

2. 研究の目的

本研究はまず、第一原理計算と実験を併用した研究手法を用いて、新たにCo系形状記憶合金の開発を目的とした。さらに、リエントラント・マルテンサイト変態を示すCo系合金に対して、弾性熱量効果に関する新しい物理現象を見出し、固体冷媒材料への応用の可能性を示した。

3. 研究の方法

新規合金開発に関しては、第一原理計算を先行としたアプローチを取り、Co系ホイスラー合金に対してスクリーニングを行った。スクリーニングの結果から絞り込まれた合金系に対して実験的に合金を作製し、マルテンサイト変態の有無を調査した。マルテンサイト変態を示す合金においては、シリーズで合金を作製し、マルテンサイト変態温度およびキュリー温度などの実験結果に基づき相図を作成した。

$\text{Co}_2\text{Cr}(\text{Al},\text{Si})$ を対象に弾性熱量効果を系統的に評価した。まず、サイクル熱処理による単結晶育成の技術⁵を利用して、機械試験に供する単結晶試料を作製した。その後、圧縮試験片に熱電対を溶接し、擬断熱状態における弾性熱量効果を直接に評価し、初めて温度の変化によって弾性熱量効果の符号が変化する、Elastocaloric Switching Effectを報告した。さらに、母相とマルテンサイト相の比熱を測定し、幅広い温度範囲におけるエントロピー変化を評価することで、Elastocaloric Switching Effectにおける熱力学的解析を示した。

4. 研究成果

4.1 新規Co-V-Al形状記憶合金の開発

本研究による新規形状記憶合金開発の一例を図1に示す。図1(a)のように、第一原理計算によって、 Co_2VAl ホイスラー合金の生成エネルギーの軸比依存性に $c/a=1.0$ 以外にも約 $c/a=1.25$ あたりでローカルミニмумが存在することが分かった。よって、 Co_2VAl 合金は母相が最安定相であるものの、マルテンサイト変態を示す傾向があることが分かった。この結果を踏まえて、Co-rich合金を用いて、実験で調査を行った結果、図1(b)のように、 $\text{Co}_{60}\text{V}_{26}\text{Al}_{14}$ においてマルテンサイト変態が出現していることが分かった。さらに、熱分析によって変態温度が室温直上であることが判明したため(図1(c))、室温で歪みを与えた後加熱を行うことで、形状記憶効果が得られ(図1(d))、新規Co-V-Al形状記憶合金の開発に成功した⁶。

4.2 Co-V-Al-Si形状記憶合金の系統的調査

さらに、本研究はCo-V-AlおよびCo-V-Siの混晶系に注目した。Co-V-Si合金は変態点の高いものが多く、安定したマルテンサイト変態が得られにくい。Co-V-SiにAlを添加することで、安定したマルテ

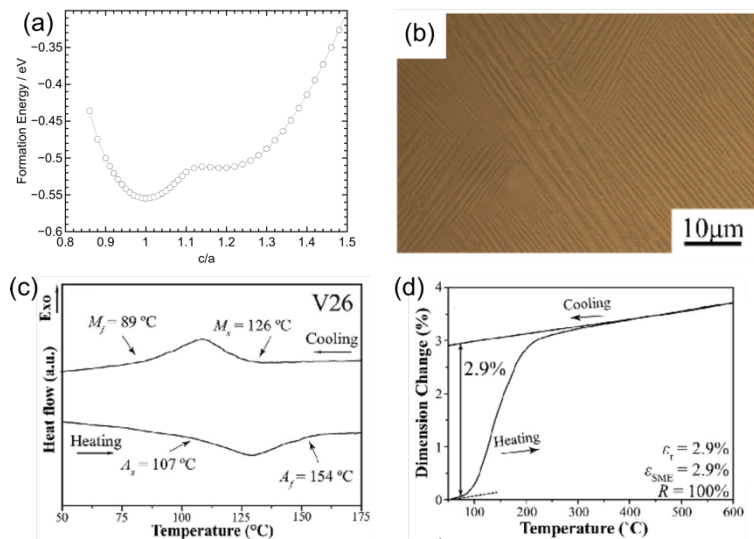


図1 (a)第一原理計算による Co_2VAl 合金の生成エネルギーの軸比依存性。 $\text{Co}_{60}\text{V}_{26}\text{Al}_{14}$ 合金における(b)光学顕微鏡組織、(b)熱分析曲線および(c)形状記憶効果

ンサイト変態が得られたと報告されている⁷が、Co-V-SiとCo-V-Alの混晶系に関する調査が不十分で、マルテンサイト変態温度や磁気変態などの情報もない。本研究では、 $\text{Co}_{64}\text{V}_{15}(\text{Si}_{21-x}\text{Al}_x)$ の断面を選択し、磁気相図を実験的に決定した。

高温域には熱分析、低温域には熱磁化測定を行い、マルテンサイト変態温度を決定した。さらに、熱磁化測定を用いて、母相とマルテンサイト相のキュリー温度も決定した。図2(a)のように、Al濃度の増加に伴ってマルテンサイト変態温度が著しく低下し、 $x \leq 15$ の試料において、約90 Kから1050 Kまでの温度範囲でマルテンサイト変態が現れることが分かった。その一方、母相のキュリー温度は約200 Kであり、ほとんど組成依存を示さないが、Al濃度の増加に伴ってマルテンサイト相のキュリー温度が上昇することが分かった。 $\text{Co}_{64}\text{V}_{15}(\text{Si}_7\text{Al}_{14})$ 合金に注目すると、温度の低下で常磁性母相→強磁性母相→常磁性マルテンサイト相→強磁性マルテンサイト相の順に相変態が起きていることが分かった。Ms点である185 K以下では母相がマルテンサイト相より強い磁化を示すため、パルス強磁場を印加して磁化測定を行った。図2(b)のように、磁場の印加によってマルテンサイト相から母相が誘起されることが確認でき、Co-V-Al-Si系において初めてメタ磁性相変態が観察された⁸。

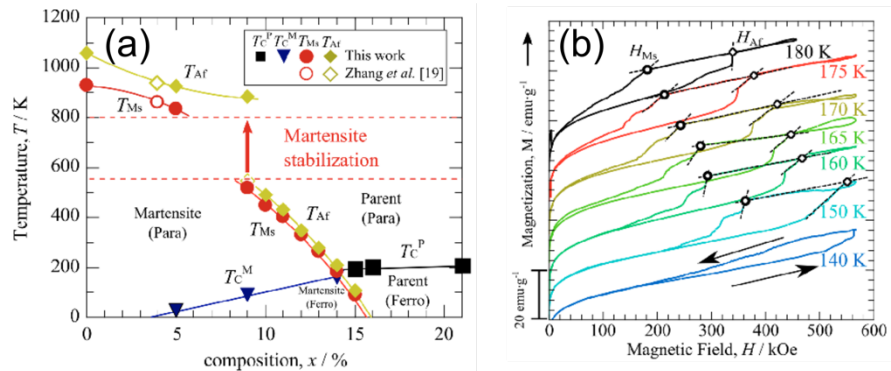


図2 (a) $\text{Co}_{64}\text{V}_{15}(\text{Si}_{21-x}\text{Al}_x)$ 合金における磁気相図。(b) $\text{Co}_{64}\text{V}_{15}(\text{Si}_7\text{Al}_{14})$ 合金における磁場誘起逆マルテンサイト変態。

さらに、熱磁化測定を用いて、母相とマルテンサイト相のキュリー温度も決定した。図2(a)のように、Al濃度の増加に伴ってマルテンサイト変態温度が著しく低下し、 $x \leq 15$ の試料において、約90 Kから1050 Kまでの温度範囲でマルテンサイト変態が現れることが分かった。その一方、母相のキュリー温度は約200 Kであり、ほとんど組成依存を示さないが、Al濃度の増加に伴ってマルテンサイト相のキュリー温度が上昇することが分かった。 $\text{Co}_{64}\text{V}_{15}(\text{Si}_7\text{Al}_{14})$ 合金に注目すると、温度の低下で常磁性母相→強磁性母相→常磁性マルテンサイト相→強磁性マルテンサイト相の順に相変態が起きていることが分かった。Ms点である185 K以下では母相がマルテンサイト相より強い磁化を示すため、パルス強磁場を印加して磁化測定を行った。図2(b)のように、磁場の印加によってマルテンサイト相から母相が誘起されることが確認でき、Co-V-Al-Si系において初めてメタ磁性相変態が観察された⁸。

4.1 Co-Cr-Al-Si合金におけるElastocaloric Switching Effect

Co-Cr-Al-Si合金は本研究グループによって開発され⁹、Co-Cr-Ga-Siより低コストであることから、実用材料として期待されている。しかし、Co-Cr-Al-Si合金は相図からリエントラント・マルテンサイト変態の兆候は見られるものの、直接的証拠がない¹⁰。本研究は温度を変化させながら、超弾性効果による熱量効果(弾性熱量効果)を直接調査することに挑戦した。

まず、サイクル熱処理の技術⁵を用いて単結晶を育成した。さらに、熱電対を取り付けた後、173 Kから373 Kの間に、応力でマルテンサイト変態を誘起した後、応力を素早く除荷することで擬似的に断熱条件を作り、その時の試料の温度変化を熱電対より読み取った。その結果、図3のように、本合金は室温以上の温度範囲においては、通常の形状記憶合金と同様に吸熱反応が見られたが、室温以下では発熱反応を示し、珍しい逆弾性熱量効果を実現した。さらに、相変態によって、周囲の温度変化で本質的に符号が変わる弾性熱量効果、Elastocaloric Switching Effectを世界で初めて観測した¹¹。本成果は、装置設計に新たな自由度が生まれ、次世代固体冷凍技術の実現に貢献できると期待する。

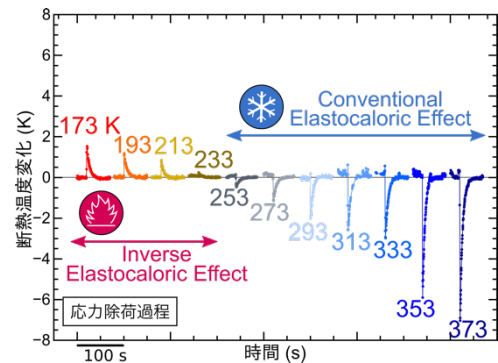


図3 (a) $\text{Co}_{55}\text{Cr}_{23}(\text{Al}_{11.5}\text{Si}_{10})$ 合金におけるElastocaloric Switching Effect。

1. X. Xu, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 2013, **103**, 164104.
2. X. Xu, *et al.*, *Phys. Rev. B*, 2015, **91**, 104434.
3. M. Terada, *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 1974, **36**, 620.
4. I. Galanakis, *et al.*, *Phys. Rev. B*, 2002, **66**, 174429.
5. T. Omori, *et al.*, *Science*, 2013, **341**, 1500-1502.
6. H. X. Jiang, *et al.*, *J. Alloys Compd.*, 2019, **786**, 648-654.
7. Y. Zhang, *et al.*, *Mater. Lett.*, 2020, **260**, 126930.
8. K. Nakamura, *et al.*, *Metals*, 2021, **11**.
9. K. Hirata, *et al.*, *J. Alloys Compd.*, 2015, **642**, 200-203.
10. T. Odaira, *et al.*, *Scripta Mater.*, 2018, **153**, 35-39.
11. T. Odaira, *et al.*, *Appl. Phys. Rev.*, 2020, **7**, 031406.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 許 晶, 大平拓実, 許 勝, 大森俊洋, 貝沼亮介	4. 巻 16
2. 論文標題 Co系ホイスラー合金の新規弾性熱量効果	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 まぐね	6. 最初と最後の頁 239-245
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Odaira Takumi, Xu Sheng, Xu Xiao, Omori Toshihiro, Kainuma Ryosuke	4. 巻 7
2. 論文標題 Elastocaloric switching effect induced by reentrant martensitic transformation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Reviews	6. 最初と最後の頁 031406 ~ 031406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0007753	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Hirata Kenji, Xu Xiao, Omori Toshihiro, Kainuma Ryosuke	4. 巻 500
2. 論文標題 Phase stability and magnetic properties in Co ₂ Cr(Al,Si) shape memory alloys	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 166311 ~ 166311
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmmm.2019.166311	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nakamura Kousuke, Miyake Atsushi, Xu Xiao, Omori Toshihiro, Tokunaga Masashi, Kainuma Ryosuke	4. 巻 11
2. 論文標題 Martensitic Transformation and Metamagnetic Transition in Co-V-(Si, Al) Heusler Alloys	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Metals	6. 最初と最後の頁 226 ~ 226
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/met11020226	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 T. Sakon, Y. Hayashi, A. Fukuya, D.X. Li, F. Honda, R. Y. Umetsu, X. Xu, G. Oomi, T. Kanomata, T. Eto	4. 巻 12
2. 論文標題 Investigation of the Itinerant Electron Ferromagnetism of Ni _{2+x} MnGa _{1-x} and Co ₂ VGa Heusler Alloys	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 575
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ma12040575	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Xiao Xu, Takumi Kihara, Atsushi Miyake, Masashi Tokunaga, Toshihiro Omori, Takeshi Kanomata, Ryosuke Kainuma	4. 巻 1
2. 論文標題 Magnetic phase diagrams in Co ₂ Cr(Ga, Si) alloys with reentrant martensitic transformation behavior	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The 6th International Conference on Ferromagnetic Shape Memory Alloys	6. 最初と最後の頁 60-61
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takumi Odaira, Xiao Xu, Toshihiro Omori, Ryosuke Kainuma	4. 巻 1
2. 論文標題 Superelastic properties at cryogenic temperatures in Co-Cr-Al-Si shape memory alloys	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The 6th International Conference on Ferromagnetic Shape Memory Alloys	6. 最初と最後の頁 164-165
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jiang Hengxing, Yang Shuiyuan, Wang Cuiping, Zhang Yanqing, Xu Xiao, Chen Yuechao, Omori Toshihiro, Kainuma Ryosuke, Liu Xingjun	4. 巻 786
2. 論文標題 Martensitic transformation and shape memory effects in Co-V-Al alloys at high temperatures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS	6. 最初と最後の頁 648-654
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jallcom.2019.01.216	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 許焜
2. 発表標題 形状記憶・超弾性合金の基礎と最近の研究
3. 学会等名 第1回 ASMA Webセミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村上諒, 許焜, 大森俊洋, 貝沼亮介
2. 発表標題 Co-Cr-Ga-Si 合金のリエントラント・マルテンサイト変態と相平衡調査
3. 学会等名 日本金属学会2021年秋期（第169回）講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kousuke Nakamura, Atsushi Miyake, Xiao Xu, Toshihiro Omori, Masashi Tokunaga, Ryosuke Kainuma
2. 発表標題 Martensitic Transformation and Magnetic Properties of Co ₆₄ V ₁₅ (Si _{21-x} Al _x) Alloys
3. 学会等名 16th International Conference on Martensitic Transformation (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takumi Odaira, Sheng Xu, Xiao Xu, Toshihiro Omori, Ryosuke Kainuma
2. 発表標題 Abnormal Behavior in Elastocaloric Effect at Low Temperatures in Co-Cr-Al-Si Alloys
3. 学会等名 16th International Conference on Martensitic Transformation (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村 浩輔, 三宅 厚志, 許 晶, 大森 俊洋, 徳永 将史, 貝沼 亮介
2. 発表標題 Co64V15(Si21-xAlx)合金のマルテンサイト変態と磁気特性
3. 学会等名 (公社)日本金属学会2020年秋期(第167回)講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 許 晶, 三宅 厚志, 木原 工, 浜本 悠吾, 長嶋 顕秀, 長迫 実, 大森 俊洋, 徳永 将史, 鹿又 武, 貝沼 亮介
2. 発表標題 マルテンサイト変態を示すCo-V-Gaホイスラー合金の熱力学的調査
3. 学会等名 (公社)日本金属学会2020年秋期(第167回)講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村上諒, 許晶, 貝沼亮介
2. 発表標題 Co-Cr-Ga-Si合金のリエントラントマルテンサイト変態と超弾性効果
3. 学会等名 (一社)形状記憶合金協会講演会・ポスター発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 X.Xu, T. Kanomata, R. Kainuma
2. 発表標題 Co-based Heusler alloys with reentrant martensitic transformation behavior: Fundamentals and application possibilities
3. 学会等名 TMS(The Minerals, Metals & Materials Society) 149th Annual Meeting, San Diego (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 許晶, 三宅厚志, 木原工, 浜本悠吾, 長嶋顕秀, 長迫実, 大森俊洋, 徳永将史, 鹿又武, 貝沼 亮介
2. 発表標題 Co-V-Ga ホイスラー合金のマルテンサイト変態とメタ磁性相転移
3. 学会等名 (公社) 日本金属学会2020年春期(第166回)講演大会, 東京工業大学
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大平拓実, 許勝, 許晶, 大森俊洋, 貝沼亮介
2. 発表標題 Co-Cr-Al-Si合金の低温における特異な弾性熱量効果
3. 学会等名 (公社) 日本金属学会2020年春期(第166回)講演大会, 東京工業大学
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村浩輔, 許晶, 大森俊洋, 貝沼亮介
2. 発表標題 Co ₆₄ V ₁₅ (Si _{21-x} Al _x)合金のマルテンサイト変態と磁気特性
3. 学会等名 第18回日本金属学会東北支部研究発表大会「21世紀を支える構造材料」, 仙台高等専門学校名取キャンパス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大平拓実, 許勝, 許晶, 大森俊洋, 貝沼亮介
2. 発表標題 Co-Cr-Al-Si合金の極低温における超弾性特性
3. 学会等名 第18回日本金属学会東北支部研究発表大会「21世紀を支える構造材料」, 仙台高等専門学校名取キャンパス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大平拓実, 許勝, 許晶, 大森俊洋, 貝沼亮介
2. 発表標題 Co-Cr-Al-Si合金の極低温における超弾性特性
3. 学会等名 (一社)形状記憶合金協会第12回SMAシンポジウム2019in熊本
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xiao Xu
2. 発表標題 Reentrant martensitic transformation and its application possibilities in CoCr-based Heusler alloys
3. 学会等名 The Future of Materials Engineering - Dramatic Innovation to the next 100 years (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Odaira, X. Xu, T. Omori, R. Kainuma
2. 発表標題 Superelastic properties at cryogenic temperatures in Co Cr Al Si shape memory alloys
3. 学会等名 ICFSMA 2019 (International Conference on Ferromagnetic Shape Memory Alloys) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 X. Xu, T. Kihara, A. Miyake, M. Tokunaga, T. Omori, T. Kanomata, R. Kainuma
2. 発表標題 Magnetic Phase Diagrams in Co ₂ Cr(Ga,Si) Alloys with Reentrant Martensitic Transformation Behavior
3. 学会等名 ICFSMA 2019 (International Conference on Ferromagnetic Shape Memory Alloys) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 X. Xu, T. Kanomata, R. Kainuma
2. 発表標題 Reentrant Martensitic Transformation and Related Phenomena in Heusler-type Co ₂ Cr (Ga, Si) alloys
3. 学会等名 The 2nd Symposium for World Leading Research Centers -Materials Science and Spintronics- 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 許島, 貝沼亮介, 鹿又武
2. 発表標題 Co ₂ Cr(Ga, Si)系ホイスラー合金のマルテンサイト相における低温物性異常
3. 学会等名 日本金属学会2019年春期(第164回)講演大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 Co基超弾性合金材、Co基超弾性合金材からなる板材及び線材、ならびにCo基超弾性合金材の製造方法	発明者 貝沼亮介、大森俊洋、許キョウ、大平拓実	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-104095	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 Co基超弾性合金材、Co基超弾性合金材からなる板材及び線材、Co基超弾性合金材の製造方法、ステント、ガイドワイヤならびに人工股関節	発明者 貝沼亮介、大森俊洋、許キョウ、大平拓実	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2022/11653	出願年 2022年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>周囲の温度で冷暖切換する固体冷媒材料を開発 - 固体冷凍技術における新発見 - https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2020/08/press20200820-04-cool.html Exploring the elastocaloric switching effect and its mechanism https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5001793</p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	辻川 雅人 (Tsuji-kawa Masato) (40615019)	東北大学・電気通信研究所・助教 (11301)	
研究分担者	大森 俊洋 (Omori Toshihiro) (60451530)	東北大学・工学研究科・教授 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関