

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2015～2019

課題番号：15H05766

研究課題名(和文) 構造用鉄系超弾性合金 - 形状記憶材料の新展開

研究課題名(英文) Ferrous Structural Superelastic Alloys-New Stage of Shape Memory Materials-

研究代表者

貝沼 亮介 (KAINUMA, Ryosuke)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：20202004

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 154,100,000円

研究成果の概要(和文)：形状記憶合金における超弾性は、マルテンサイト変態に起因して大きな弾性変形を示し、小型医療デバイス等で用いられてきた。本研究は、世界初の鉄系超弾性合金を大型構造部材へ応用するための基礎研究である。Fe-Ni-Co-Al系、Fe-Mn-Al-Ni系合金において、粒界析出の抑制、整合析出組織制御、結晶粒組織制御と超弾性、諸特性評価と実用化検討について実施し、大型部材として有望であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超弾性合金は典型的な機能性材料であるが、鉄系超弾性合金は従来の超弾性合金よりもコストが低く、構造部材としての新たな応用が可能である。本研究では、ナノ整合析出物と集合組織、結晶粒成長の制御により、2つの鉄系合金の実現可能性を示した。Fe-Ni-Co-Al系合金は薄板としての利用に適しており、高強度で超弾性回復歪量が大きい特徴を活かした用途が望ましい。Fe-Mn-Al-Ni系合金は大型部材としての利用可能性を有しており、応力の温度依存性が極めて小さいことも特徴である。建築、土木用の制震構造システムに利用することで、巨大地震によるビルや高速道路の残留変形を抑制することが可能と考えられる。

研究成果の概要(英文)：Superelasticity in shape memory alloy shows a large elastic strain due to martensitic transformation. This project was a basic research to apply the first ferrous superelastic alloys to large structural components. The following studies were conducted in Fe-Ni-Co-Al-based and Fe-Mn-Al-Ni-based alloy systems: (i) suppression of grain boundary precipitates, (ii) control of fine coherent precipitates, (iii) control of grain growth and superelasticity, (iv) evaluation of materials properties and possibilities of practical application.

研究分野：工学

キーワード：マルテンサイト変態 整合析出 異常粒成長 形状記憶合金 超弾性合金

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

形状記憶合金は、マルテンサイト変態に起因して、形状記憶効果や超弾性効果が得られる典型的な機能性材料であり、感温駆動バネ、メガネフレーム、カテーテル用ガイドワイヤーなどとして実用に供されている。現在までに実用されている形状記憶合金は、優れた形状記憶特性を示す Ni-Ti (ニチノール) 合金に事実上限られている。しかし、Ni-Ti 合金は、冷間加工性が不十分のため商業的に線材しか得られず、素材面ばかりでなく製造コストも高いため、主な適用が医療などの高付加価値な製品分野に限定されている。

鉄系合金は究極の低コスト合金であり、歴史的に Fe-Ni-Co-Ti 系 (β 変態) や Fe-Mn-Si 系 (γ 変態) 形状記憶合金が盛んに研究されてきたが、室温での超弾性実現には至っていない。その様な中、我々の研究グループは、従来の Fe-Ni-Co-Ti 系に用いられていた合金設計手法 (β -L1₂ の整合析出) に加え、B 添加と再結晶集合組織を利用することで β 相 (B2) 析出を抑制し、鉄合金としては初めて室温超弾性を示す Fe-Ni-Co-Al-Ta-B (FNCA TaB) 合金を開発した。実用材として利用されている Ni-Ti 合金の約 2 倍もの巨大な超弾性ひずみ得られ、ヒステリシスループ面積に対応するエネルギー吸収能は、Ni-Ti より数倍大きい。一方、我々は Fe-Mn-Al 系状態図の研究中に鉄系としては珍しい β マルテンサイト変態を見出し、さらに整合析出物 β 相 (NiAl-B2) を利用した Fe-Mn-Al-Ni (FMAN) 合金においても室温超弾性を得ることに成功した。Ni-Ti 合金と異なり、本合金系は超弾性応力の温度依存性が極めて小さい特徴がある。この特徴は、宇宙空間や自動車内部など温度変化の激しい環境においても、超弾性応力があまり影響を受けないことを意味する。両合金は、母相とマルテンサイト相の結晶構造の関係が全く逆でありながら、しかし、規則相析出物を微細に整合析出させることで超弾性を得ている共通点を有する。

2. 研究の目的

FNCA TaB や FMAN 合金は、従来の Ni-Ti 合金には無い特徴を持つ鉄系超弾性合金である。本研究は、見出されて間もない Fe-Ni-Co-Al (FNCA) 基および Fe-Mn-Al (FMA) 基合金が抱える材料学的諸問題点を明確にしつつ解決し、建築・土木や機械産業で求められる大型かつ低廉な構造用部材への適用できる超弾性合金を目指すものである。

3. 研究の方法

(1) 粒界析出の抑制

FNCA X B 基合金において、 β 相中の β 相や β 相の析出挙動や集合組織の変化を調査した。析出相の同定は X 線回折、TEM や EPMA による組成分析により行った。固溶温度は電気抵抗により測定した。冷間圧延率を変化させた板材を準備し、加熱過程における集合組織の変化を EBSD や X 線その場観察により調査した。超弾性は室温での引張試験にて評価した。また、状態図の計算は Thermo-Calc ソフトウェアを用いた。

(2) 整合析出組織制御

FNCA X B 基合金では、 β 相の固溶温度を電気抵抗測定で決定した。硬さはビッカース硬度計を用いて測定した。 β 相析出組織の観察には TEM、STEM-HAADF を用いた。

(3) 結晶粒組織制御と超弾性評価

超粗大結晶粒を実現するために、単相域と 2 相域を往復させる連続熱処理による異常粒成長を調査した。熱処理条件を系統的に変化させて光学顕微鏡や EBSD により組織観察を行った。

(4) 諸特性評価と実用化検討

超弾性を含む機械的性質の評価のため、極低温から 200 °C までの温度範囲で引張試験や圧縮試験を行った。RC 部材および通常の鉄筋を有する RC 部材に対して両引き試験を行い、漸増繰返し引張試験を行った。

4. 研究成果

(1) 粒界析出の抑制

【FNCA 基合金】

FNCA 基合金では β 相の整合析出が熱弾性型マルテンサイト変態と超弾性にとって不可欠である一方、 β 相析出のための時効処理中に β 相が粒界析出して著しい脆化を引き起こす。そこで、合金元素による β 相と β 相の安定性制御と粒界性格制御による粒界析出の抑制に取り組んだ。

β 相による強度上昇に有効な添加元素中、 β 相の粒界析出を促進させる効果は Ti > Ta > Nb であることがわかった。Ti は粒界析出の恐れがある一方、安価であることから、FNCA Ti 合金の β 相と β 相、 β 相の相安定性の実験を実施した。熱力学データベース TCNI5 を使用してこれらの相平衡を計算したところ、 β 相を過剰に安定に評価していることが判明した。そこで、 β 相の安定性を修正することで固溶温度を正しく計算す

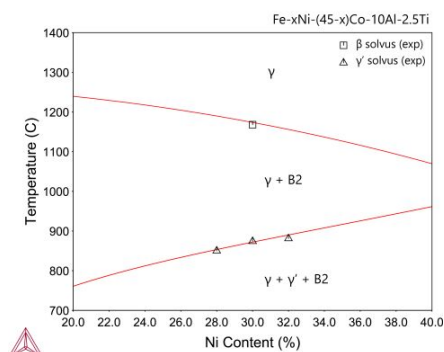


図 1. 修正した熱力学 DB による Fe-Ni-Co-Al-Ti 系相平衡の計算結果。記号は実験結果。

ることができるようになった(図1)。また、計算の結果、如何なる Al/Ti 組成比であっても脆性析出相を抑制することは困難であることがわかった。これは Ta、Nb も同様である。従って、粒界析出の抑制の効果のある B 添加と共に、粒界性格制御による粒界析出の抑制に取り組んだ。

FNCATiB 合金について、加工集合組織、再結晶集合組織について加熱速度や加熱温度の依存性を系統的に調査し、ミクロ組織変化を観察することで集合組織形成の過程を明らかにした。80%以上の冷間圧延により 相の{110}<112>加工集合組織が形成され、1000 以下における一次再結晶集合組織も同様であった。その後の加熱において、第二相として存在する 相の固溶温度近傍である約 1100 で二次再結晶が生じ、{210}<001>集合組織が発達することがわかった。その結果、超弾性に最も有利な{210}<001>集合組織(変態歪量は<001>で最大になる)は、低温で粒界析出する 相が異常粒成長のインヒビターとして有効に作用することが判明した。

このような集合組織の形成には、強冷間圧延が必要である。これまで、FNCATaB 合金では 98.5%もの冷間圧延により集合組織が形成されてきたが、利用できる板形状が薄板に限定される。そこで、二次再結晶を有効に誘起させるために 相固溶温度近傍の温度域を徐加熱したところ、加熱速度が遅くなるほど二次再結晶集合組織が強く形成され、エネルギーの低い低角粒界(LABs)の割合も高くなることがわかった(図2a)。これにより、相の粒界析出を大きく遅延させることが可能となり、徐加熱をすることで、従来 98.5%もの大きな圧下率が必要であった冷間圧延加工を 90%に低減できることを示した(図2b)。90%圧延材においても 98.5%圧延材と同等の超弾性が得られた(図3)。この成果は、0.2mm 厚程度の薄板に限定されていた試料厚を 1mm 程度まで厚く出来ることを意味し、適用可能な応用範囲を広げられる。

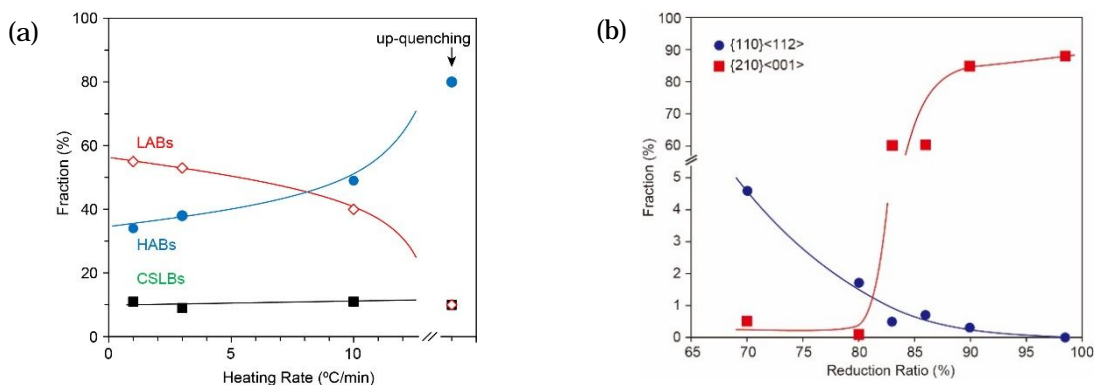


図2. FNCATiB の(a)粒界性格に及ぼす加熱速度の影響と(b)集合組織に及ぼす冷間圧延率の影響、ここで、LABs：低角粒界、HABs：高角粒界、CSLBs：対応粒界 (Shape Memory and Superelasticity 4 (2018) 102)

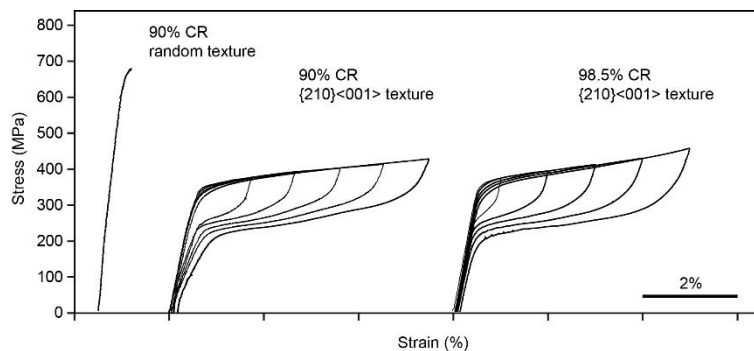


図3. FNCATiB の 90%圧延材と 98.5%圧延材の超弾性特性 (Shape Memory and Superelasticity 4 (2018) 102)

(2) 整合析出組織制御

【FNCA 基合金】

計算状態図によると、 β' 形成元素である Al や Ta を増やすことで β' 相の存在分率が高まり、時効による硬度の上昇が期待できる。そこで、Fe-Ni-Co-Al 合金に対して種々の合金元素 (Ta, Nb, Ti, V, Mo, W など) を添加し、 β' 相固溶温度や硬さを測定した。Ta、Ti、Nb を添加した合金で β' 相固溶温度が上昇し、硬さも上昇することがわかった。そのため、これらの添加元素が熱弾性型マルテンサイト変態を得るのに有効であると考えられる。

図4は、FNCATaB 合金における硬度の組成や時効条件の依存性を示している。Ta 添加により著しい硬度の上昇が得られるが、2at%程度で飽和することがわかった。また、硬さの上昇は、時効温度が高いほど急激に生じ、変態温度も高くなる傾向が見られた。低コストを考慮し、Ta を Ti で置換した FNCATiB 合金についても FNCATaB 系と同様の研究を行い、マルテンサイト変態温度の組成依存性も決定し、超弾性を示す最適合金組成を決定した。

FNCATiB 合金において析出組織と超弾性特性との関係を明らかにするため、最適合金組成の

合金を用いて 600 の異なる時効熱処理を行った試料の超弾性試験を行った。その結果、ある条件では 2%歪で 500 回のサイクルでも超弾性が得られることを初めて明らかにした。また、その組織と硬さとの関連を明らかにした。

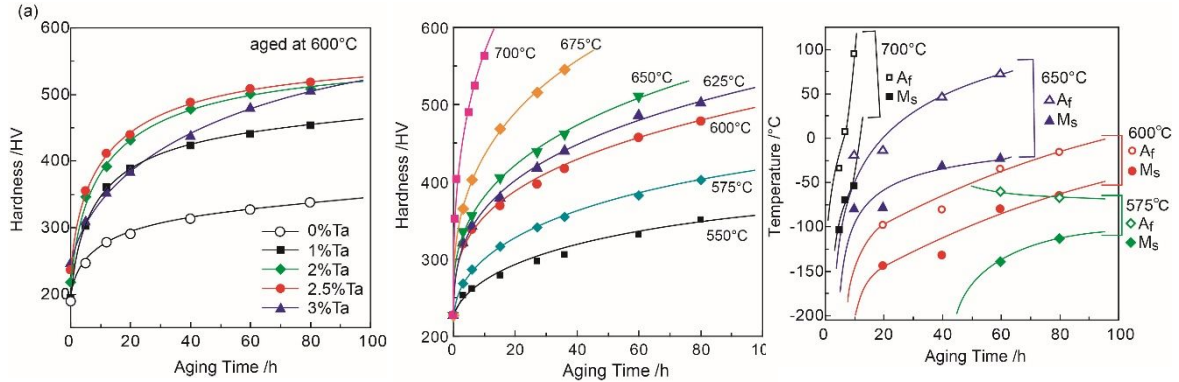


図 4. Fe-28Ni-17Co-11.5Al-Ta の硬さの Ta 濃度依存性 (左図)、Fe-28Ni-17Co-11.5Al-2.5Ta の硬さの温度依存性 (中央図)、Fe-28Ni-13.5Co-11.5Al-2.5Ta の変態温度の時効依存性 (右図) (Y. Tanaka et al. Mater Today (2015) 485)

(3) 結晶粒組織制御と超弾性評価

【FMAN】

FMAN における超弾性は、試料断面サイズに対する結晶粒径に強く依存し、比結晶粒径が大きいほど優れた超弾性を示す。そのため、大きな断面の部材に適用できる超弾性合金を開発するには、結晶粒を粗大化させる技術が必要である。

過去の研究で、高温 単相、低温 + 二相となる Cu 系合金において、 / + 相変態を生じる温度域を冷却・加熱のサイクル熱処理を行うことで、相の異常粒成長が生じることがわかっている。FMAN 合金は高温で 単相、低温で + 二相となるため、同様のサイクル熱処理法を FMAN 合金に適用し、本現象を利用できることを検証した。

単相になる 1200 から + 二相になる 600 ~ 1100 の温度域に冷却し、ミクロ組織を調査した。1000 以下で 相分率が約 80%になり、相周囲の 相に方位差が確認された。特に 900 以下において方位差は顕著であった。これを 単相化するため 1200 に加熱したところ、亜結晶粒組織が観察された。さらに 1200 で等温保持を行ったところ、いくつかの結晶粒が速い速度で成長する異常粒成長現象が確認できた (図 5a)。このことから、FMAN 合金においてもサイクル熱処理誘起の異常粒成長が生じることがわかった。このサイクル熱処理を繰り返すことで、長さ 50mm の棒全体が単結晶になった。サイクル熱処理法は冷却・加熱の熱処理を繰り返すだけでなく、凝固プロセスを利用するブリッジマン法やチョクラルスキー法に比べて量産性が高い。そのため、サイクル熱処理法により単結晶が製造可能であることは、鉄系超弾性合金を構造部材に適用するための道が拓けたことを意味している。

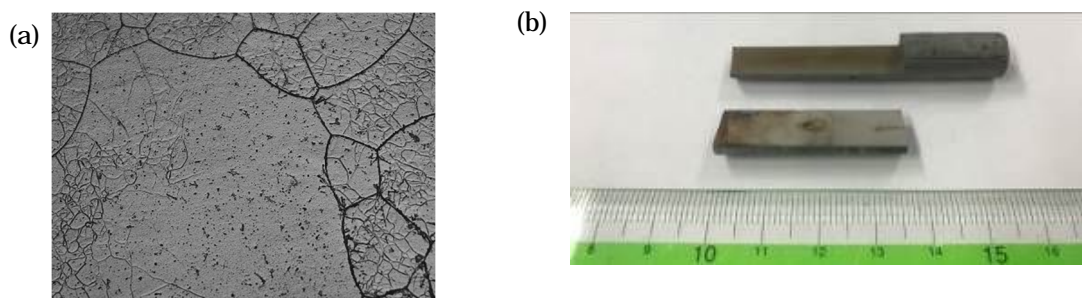


図 5. (a)Fe-Mn-Al-Ni 合金の異常粒成長開始直後の組織写真と(b)サイクル熱処理により得られた単結晶 (50mm 長)

サイクル熱処理法による単結晶化を促進する手法の検討を行った。この手法では 相析出に伴い生成する亜結晶粒の粒界エネルギーが粒成長の駆動力として重要な役割を果たしていると考えられる。そのため、駆動力を高めるには亜結晶粒組織を微細化することが効果的であると考えられる。図 6 は FMAN 合金で Al 濃度が 15% (従来の組成) と 17%の時の亜結晶粒組織とサイクル熱処理後の結晶粒径を示した図である。15Al に比べて 17Al において亜結晶粒径が小さいことがわかる。さらに、サイクル熱処理後の試料は、15Al では結晶粒の小さい多結晶組織を呈しているが、17Al では結晶粒の長さが 10mm 以上に巨大化していた。Al 濃度が高くなると 相に対して 相の安定性が高まることから、より低温で 相が析出すると予想される。そのため、亜結晶粒が微細化したと考えられる。このことにより、より大きな単結晶を得るための合金設計指針を明らかにすることができ、大型単結晶超弾性部材の実現に向けて重要な成果となった。

(4) 諸特性評価と実用化検討

【FMAN 基合金】

FNCA 基合金は、延性を低下させる粒界析出を抑制するために比較的大きな加工が必要なことや、結晶粒間の拘束力を低減させるための異常粒成長手法が適用できないことから、薄板としての利用が適していると結論付けられる。一方、FMAN 合金はサイクル熱処理法により大きな単結晶を作製できる可能性が高いため、大型部材としての利用可能性を有する。そのため、構造用鉄系超弾性合金としての適用範囲が広いと考えられ、主に FMAN の諸特性評価を行った。

FMAN の最大の特徴のひとつが、マルテンサイト変態誘起応力の温度依存性が小さいことである。一般に、超弾性合金は温度が高くなるとマルテンサイト変態誘起応力が高くなる。超弾性を得るには一定の応力範囲内で変形されることが必要のため、応力の温度依存性は超弾性合金の作動温度範囲を狭くする原因となる。

本研究では、FMAN 合金単結晶を用い 10K から室温まで各温度における圧縮試験を行い、図 7 に示す様に広い温度範囲で超弾性が安定に発現することを確認した。変態誘起応力は極低温域から室温まで殆ど変化せず作動温度範囲が極めて広い。Ni-Ti 合金では、変態誘起応力の大きな温度依存性に加え極低温域における応力ヒステリシスの異常な増大を生じるが、FMAN 合金ではヒステリシスもほとんど変化していない。この点も広い温度範囲で安定した超弾性が得られる一因である。

FMAN 基合金における変態誘起応力の温度依存性の起源を明らかにするため、母相とマルテンサイト相間の変態エントロピー変化 (S) を比熱から求めたところ、本合金の S は極めて小さいことがわかった。Clausius-Clapeyron の関係から、この小さな S が温度に鈍感な超弾性特性の原因であることが判明した。さらに、適量の Cr 添加により温度依存性がほとんど消失することもわかった。これまでの超弾性合金は外気温の変化に対して特性が大きく変動するため利用温度域に強い制約があったが、FMAN 合金ではそれが全く無く温度変化の激しい環境で利用するには極めて魅力的であると言える。

鉄系超弾性合金の構造部材への応用展開のため、超弾性の原点復元機能を利用した建築、土木構造物の制震システムへの適用可能性を検討した。2016 年の熊本地震では、最初の揺れで耐震性が低下したところに強い余震が発生し、建物が大きな被害を被った。超弾性合金をブレースなどの部材として利用することで残留変形を抑制することができ、耐震性が劣化しない建物の実現が期待できる。また、災害復旧のために高速道路の機能維持は重要であり、超弾性合金により残留変形を抑制する機構を検討した。本用途への超弾性の効果検証のため、30cm 長の単結晶試験体を作製可能であった CuAlMn を用い、コンクリート部材中における引張性能を評価した。超弾性合金を有する RC 部材および通常の鉄筋を有する RC 部材に対して両引き試験を行い、漸増繰り返し引張载荷を行った。RC 部材長さ 800mm の試験体に対して最大 6mm 程度まで変位を与えた結果、残留変位は、鉄筋コンクリート試験体では 5mm 程度、超弾性合金を有する試験体では 0.5mm 程度であった。最大変位に対する残留変位を残留変位率とすると、鉄筋コンクリート試験体の残留変位率は 83%であったのに対して超弾性合金を有する試験体の残留変位率は 8%となり、大幅に残留変位が低減されることを明らかにした。FMAN 合金は CuAlMn 超弾性合金よりもさらに応力が高い (図 8) ため、制震用部材として有用であると考えられる。製造性検証のため、製造メーカーにて棒材の試作を実施し、高周波誘導溶解、熱間鍛造、冷間伸線が通常のプロセス内で 11mm の棒材を作製することができた。現在企業にて量産化技術の開発を行っている。

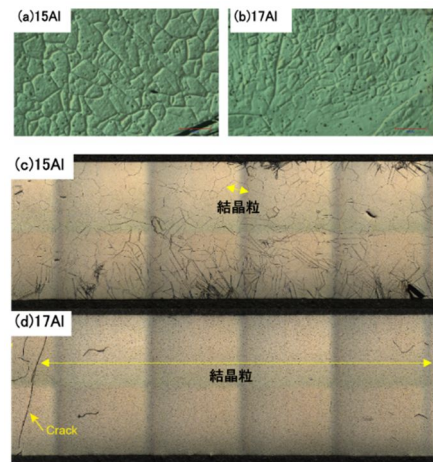


図 6. FMAN の 15Al, 17Al の比較。(a)(b)亜結晶粒組織、(c)(d)サイクル熱処理で得られた結晶粒。

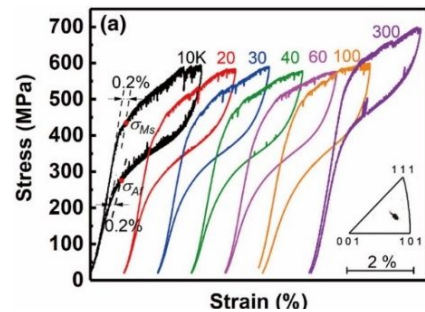


図 7. FMAN の 10K ~ 300K での超弾性(J. Xia et al. Shape Memory and Superelasticity 3 (2017) 467)

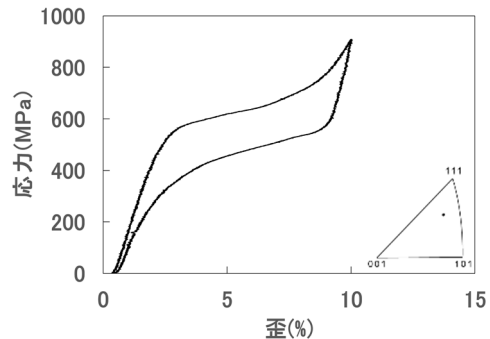


図 8. FMAN(17Al)の室温での超弾性。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計32件（うち査読付論文 32件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Ji Xia, Yuki Noguchi, Xiao Xu, Takumi Odaira, Yuta Kimura, Makoto Nagasako, Toshihiro Omori, Ryosuke Kainuma	4. 巻 369
2. 論文標題 Iron-based superelastic alloys with near-constant critical stress temperature dependence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 855-858
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.abc1590	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 Ji Xia, Toshihiro Omori, Ryosuke Kainuma	4. 巻 187
2. 論文標題 Abnormal grain growth in Fe-Mn-Al-Ni shape memory alloy with higher Al content	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 355-359
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scriptamat.2020.06.044	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 I. Ohnuma, S. Shimenouchi, T. Omori, K. Ishida, R. Kainuma	4. 巻 67
2. 論文標題 Experimental determination and thermodynamic evaluation of low-temperature phase equilibria in the Fe-Ni binary system	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 CALPHAD	6. 最初と最後の頁 101677
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.calphad.2019.101677	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 Lee Doyup, Omori Toshihiro, Han Kwangsik, Hayakawa Yasuyuki, Kainuma Ryosuke	4. 巻 4
2. 論文標題 Effect of Thermomechanical Processing on Texture and Superelasticity in Fe-Ni-Co-Al-Ti-B Alloy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Shape Memory and Superelasticity	6. 最初と最後の頁 102 ~ 111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s40830-018-0160-5	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 Niitsu Kodai, Kimura Yuta, Omori Toshihiro, Kainuma Ryosuke	4. 巻 10
2. 論文標題 Cryogenic superelasticity with large elastocaloric effect	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 NPG Asia Materials	6. 最初と最後の頁 e457 ~ e457
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/am.2017.213	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 Xia Ji, Xu Xiao, Miyake Atsushi, Kimura Yuta, Omori Toshihiro, Tokunaga Masashi, Kainuma Ryosuke	4. 巻 3
2. 論文標題 Stress- and Magnetic Field-Induced Martensitic Transformation at Cryogenic Temperatures in Fe-Mn-Al-Ni Shape Memory Alloys	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Shape Memory and Superelasticity	6. 最初と最後の頁 467 ~ 475
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s40830-017-0132-1	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 Omori Toshihiro, Kainuma Ryosuke	4. 巻 3
2. 論文標題 Martensitic Transformation and Superelasticity in Fe-Mn-Al-Based Shape Memory Alloys	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Shape Memory and Superelasticity	6. 最初と最後の頁 322 ~ 334
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s40830-017-0129-9	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 Kusama Tomoe, Omori Toshihiro, Saito Takashi, Kise Sumio, Tanaka Toyonobu, Araki Yoshikazu, Kainuma Ryosuke	4. 巻 8
2. 論文標題 Ultra-large single crystals by abnormal grain growth	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1 ~ 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-017-00383-0	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. Omori, H. Iwaizako, R. Kainuma	4. 巻 10
2. 論文標題 Abnormal grain growth induced by cyclic heat treatment in Fe-Mn-Al-Ni superelastic alloy	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Materials and Design	6. 最初と最後の頁 263-269
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.martdes.2016.04.011	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 K. Han, I. Ohnuma, R. Kainuma	4. 巻 668
2. 論文標題 Experimental determination of phase equilibria of Al-rich portion in the Al-Fe binary system	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS	6. 最初と最後の頁 97-106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jallcom.2016.01.215	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 -

〔学会発表〕 計63件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 32件)

1. 発表者名 R. Kainuma, T. Omori
2. 発表標題 Martensitic Transformation and Superelasticity in Novel Ferrous Shape Memory Alloys
3. 学会等名 The 3rd Symposium for The Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Omori, T. Kusama, S. Kise, Y. Araki, R. Kainuma
2. 発表標題 Large Single Crystals by Abnormal Grain Growth and Superelasticity in Cu- and Fe-Based Alloys ”,
3. 学会等名 ESOMAT 2018(11th European Symposium on Martensitic Transformation) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 J. Xia, X. Xu, T. Omori, R. Kainuma
2 . 発表標題 Temperature dependence of critical stress and entropy change for martensitic transformation in Fe-Mn-Al-Ni shape memory alloy,
3 . 学会等名 ESOMAT 2018(11th European Symposium on Martensitic Transformation) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Xu, X. Xu, T. Omori, R. Kainuma
2 . 発表標題 Large <100> single crystals via abnormal grain growth from columnar polycrystal
3 . 学会等名 ESOMAT 2018(11th European Symposium on Martensitic Transformation) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Noguchi, T. Omori, R. Kainuma
2 . 発表標題 Effect of Cr on martensitic transformation and oxidation resistance in Fe-Mn-Al-Ni alloys
3 . 学会等名 ICOMAT 2017 I(INTERNATIONAL CONFERENCE ON MARTENSITIC TRANSFORMATIONS) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 T. Omori, I. Ohnuma, K. Ishida, R. Kainuma
2 . 発表標題 Thermodynamic analysis of BCC/FCC martensitic transformation in the Fe-Mn-Al system
3 . 学会等名 CALPHAD XLV(The forty-fifth International Computer Coupling of Phase diagrams and Thermochemistry) (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1. 発表者名 K. Han, I. Ohnuma, K.Okuda, R.Kainuma
2. 発表標題 Experimentally Determined Phase Equilibria in the Al-rich portion of Al-Fe Binary System
3. 学会等名 (公社)日本金属学会2016年(第158回)春期講演大会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 荒木慶一, 貝沼亮介, 他 2 8 名	4. 発行年 2016年
2. 出版社 日刊工業新聞社	5. 総ページ数 156
3. 書名 トコトンやさしい形状記憶合金の本	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 Fe基形状記憶合金及びその製造方法	発明者 大森俊洋, 貝沼亮介, 野口侑紀, 喜瀬純男, 田中豊延	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2016-174142	出願年 2016年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>東北大学大学院工学研究科マテリアル・開発系金属フロンティア工学専攻貝沼研究室 http://www.material.tohoku.ac.jp/~seigo/publications/index.html</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	大沼 郁雄 (OHNUMA Ikuo) (20250714)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・構造材料研究拠点・ 上席研究員 (82108)	
研究分担者	荒木 慶一 (ARAKI Keiichi) (50324653)	名古屋大学・環境学研究科・教授 (13901)	
研究分担者	大森 俊洋 (OMORI Toshihiro) (60451530)	東北大学・工学研究科・准教授 (11301)	
研究分担者	藤倉 修一 (FUJIKURA Shuichi) (90782558)	宇都宮大学・地域デザイン科学部・准教授 (12201)	

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