

1. 氏名	CHIU WAN TING(キウオンテイ)
2. 所属機	東京科学大学・物質理工学院
3. 研究題	Ni-Mn-Ga単結晶粒子のマルテンサイト再配列の促進とそのポリマー複合材料の磁気特性の向上
4. 研究の目的:	<p>本研究の目的は、5層変調(5M)マルテンサイト構造を有する単結晶 Ni-Mn-Ga 粒子をシリコンポリマー中に配列させた強磁性形状記憶合金 (Ferromagnetic Shape Memory Alloys; FSMAs) 複合材料において、磁場誘起ひずみ (Magnetic Field-Induced Strain; MFIS) の発現機構を解明するとともに、低磁場で高い機能応答を実現する材料設計指針を確立することである。単結晶 Ni-Mn-Ga は大きな MFIS を示す一方、作製コストや脆性の問題から実用化には課題がある。そこで本研究では、Bi 微量添加と熱処理により作製した単結晶粒子を弾性率整合したシリコン中に分散・配向させた複合材料に着目した。</p> <p>第一に、磁場誘起マルテンサイト変種再配向 (Martensite Variant Reorientation; MVR) が個々の単結晶粒子で生じた際、それが粒子グリッド (particle grid) を介してどのように複合体全体の巨視的変形へと伝達されるのかを明らかにした。そのため、X線マイクロCT三次元イメージングを用い、磁場印加下における粒子グリッドの寸法変化を非破壊で可視化・定量評価した。</p> <p>第二に、軟磁性 Fe 粒子を導入することで内部磁場を補強し、外部磁場の低減と十分な MFIS の両立が可能かを検証した。Fe 添加が磁気特性、弾性率、双晶境界移動に与える影響を体系的に評価し、磁氣的相互作用と機械的拘束の関係を解明することを目的とした。</p>

5. 研究の内容(手法、経過、評価など。書ききれない場合には、同一様式のページを追加してください。):

本研究では、5層変調(5M)マルテンサイト構造を有する単結晶 Ni-Mn-Ga 粒子を用いた強磁性形状記憶合金 (FSMA) /シリコン複合体を作製し、粒子グリッドの磁場誘起変形挙動と Fe 添加効果を体系的に検討した。まず、Ni-28Mn-22Ga (at.%) 合金に 0.03 at.% の Bi を添加し、アーク溶解によりインゴットを作製した後、1273 K で均質化熱処理を行った。得られた合金を高温下で機械的に粉碎し、再アニール処理を施すことで単結晶粒子を作製した (図 1)。粒径は 150-250  $\mu\text{m}$  の範囲を選別し、室温硬化型シリコンに 20 vol% で分散させた。さらに、3-5  $\mu\text{m}$  の軟磁性 Fe 粒子を 10 vol% 添加した複合体も作製した。硬化時には 1 テスタの磁場を印加し粒子をチェーンに配列させた試料と、無磁場硬化試料を準備し、構造制御の効果を比較した。

構造評価として、X線回折により 5M マルテンサイト相の形成を確認し、示差走査熱量測定 (DSC) により変態温度およびキュリー温度を同定した (図 2)。磁気特性は振動試料型磁力計 (VSM) を用いて室温で測定し、磁化曲線から磁気異方性および飽和磁化を評価した。磁場誘起変形の評価には、X線マイクロCT三次元イメージングを用い、0、0.3、0.6 T の磁場下で粒子グリッドの寸法変化をその場観察した。得られた三次元画像から各軸方向の長さ変化を定量化し、磁場誘起ひずみ (MFIS) を算出した。これにより、粒子配列の有無および Fe 添加が磁気応答、弾性率、双晶境界移動挙動に及ぼす影響を総合的に評価した。

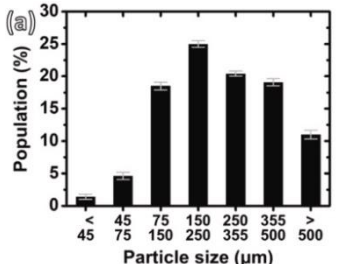
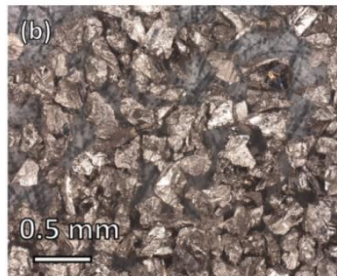



図 1 Ni-Mn-Ga 単結晶

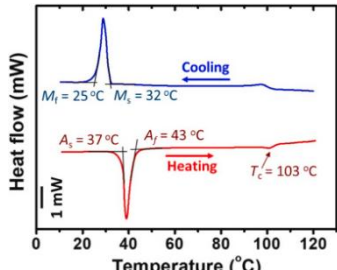


図 2 Ni-Mn-Ga 熱分析

6. 研究の成果と結論、今後の課題:

本研究では、単結晶 Ni-Mn-Ga 粒子をシリコンマトリックス中にチェーン状配列させた強磁性形状記憶合金 (FSMA) 複合体を対象に、磁場誘起ひずみ (MFIS) の発現機構の解明と、軟磁性 Fe 粒子添加による低磁場駆動化の可能性について実施した。

まず、得られた成果として、無磁場下で硬化させた複合体で単結晶は粒子がランダムに分散しており、磁場を印加しても顕著な形状変化は観察されなかった。これは、個々の単結晶粒子内部でマルテンサイトバリエーション再配向 (MVR) が生じて、空間的に配列していなければ巨視的なひずみとして現れないことを示している。一方、1 テスラの磁場下で硬化させた試料では、Ni-Mn-Ga 粒子がチェーン状に整列し、磁場をチェーンに垂直に印加すると、単結晶粒子グリッドは鎖方向に伸長し、直交方向に収縮する明確な異方的変形を示した (図 3)。X 線マイクロ CT 三次元イメージングにより、磁場印加下での粒子集合体内部の寸法変化を非破壊で可視化・定量化することに成功し、粒子レベルの双晶境界移動が粒子グリッドの幾何学的再構成を通じて複合体全体の形状変化へ伝達されることを実証した点は重要な成果である。

Fe 粒子を添加した複合体では、低磁場側でのひずみ応答の立ち上がりやや早まる傾向が見られ、内部有効磁場効果の可能性が示唆された。しかし最大 MFIS は Fe 無添加試料よりも低下した。磁化測定および圧縮試験の結果から、Fe 添加により複合体の磁化は増加する一方、弾性率も上昇していることが確認された (図 4)。数  $\mu\text{m}$  サイズの Fe 粒子は、単結晶 Ni-Mn-Ga 粒子に対して十分な磁気相互作用を形成できなかった可能性があり、さらにマトリックスの局所的硬化や機械的拘束の増大が双晶境界移動を抑制したと考えられる。すなわち、磁氣的利点と力学的拘束の競合が MFIS 応答を決定することが明らかとなった (図 5)。

以上より、粒子のチェーン状配列と結晶方位制御が高い MFIS 発現の前提条件であり、Fe ミクロ粒子の添加による機能向上には粒径や分散状態の最適化が不可欠であると結論づけられる。今後は、より大粒径のミクロ粒子 Fe 粒子の導入や体積分率の最適化、磁場依存ひずみの詳細測定による臨界磁場の精密評価、さらには粒子-マトリックス間の応力伝達を考慮した数値モデルの構築が必要である。これらの検討を通じて、低磁場駆動かつ高応答性を備えた FSMA 複合アクチュエータ材料の設計指針確立が期待される。

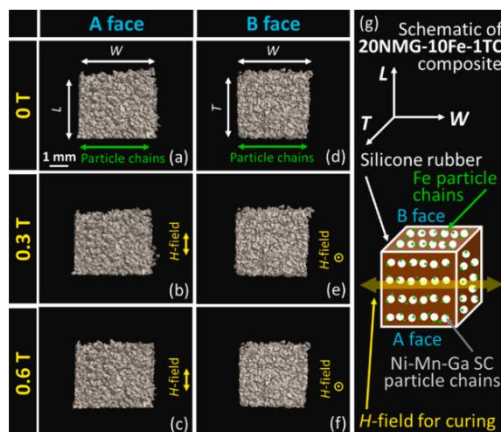


図 3 Fe/Ni-Mn-Ga/シリコンゴムのマイクロ CT 像

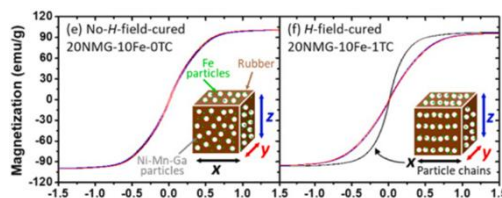


図 4 Fe/Ni-Mn-Ga/シリコンゴム複合材料の磁化曲線

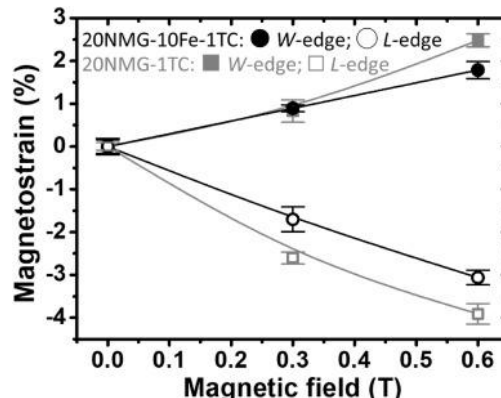


図 5 Fe 添加と Fe なしの複合材料の磁場誘起変形歪みの評価

## 7. 成果の価値

### 7.1\_学術的価値:

本研究は、単結晶 Ni-Mn-Ga 粒子/ポリマー複合体における磁場誘起ひずみの発現機構を、X線マイクロCT三次元イメージングにより非破壊・その場で可視化・定量化した点に学術的独自性がある。粒子内部の双晶再配向が粒子グリッドの幾何学的変形を介して巨視的変形へ伝達される過程を実証し、さらに Fe 添加による磁気効果と力学的拘束の競合関係を明らかにしたことで、今後の FSMA 複合材料設計に新たな知見を提案した。

### 7.2\_社会的価値:

本研究は、低磁場で駆動可能な強磁性形状記憶合金複合材料の設計指針を提示するものであり、省エネルギー型アクチュエータや高応答センサーの実用化に貢献する社会的意義を有する。従来のバルク単結晶材料に比べ、加工性やコスト面で優れた粒子分散型複合体の可能性を示したことで、小型医療機器、精密ロボティクス、振動制御デバイスなどへの応用展開が期待される。また、低磁場化に向けた内部磁場制御の概念は、持続可能なスマート材料開発にも寄与する。

### 7.3\_研究成果:

#### ・「研究論文(原著)」

以下、20 報の発表論文 (国際・査読付き) のうち、もっとも関連する 2 報の論文を記載する。

1. ○**W.-T. Chiu\***, C.X. Wang, N. Naoki, M. Tahara, V. Chernenko, H. Hosoda\*, Magnetostrain behavior of particle grid in particulate Ni-Mn-Ga(Fe)/silicone rubber composites, Journal of Materials Research and Technology 39 (2025) 8553-8561. (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.11.147>)
2. D.K. Han, **W.-T. Chiu\***, M. Tahara, N. Nohira, V. Chernenko, S. Lanceros-Mendez, H. Hosoda, An unusual approach significantly improving the magnetostrain performance of Ni-Mn-Ga composite materials, Scripta Materialia 261 (2025) 116624 (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2025.116624>)

#### ・「国際会議発表」

以下、19 件の国際会議発表のうち、もっとも関連する 3 件を記載する。

1. **W.-T. Chiu**, P. Sratong-on, M. Tahara, V. Chernenko, H. Hosoda, Enhancement of the magnetostrain via manipulation of the Ni-Mn-Ga martensite phase stability, 2026 TMS Annual Meeting & Exhibition, San Diego, California, USA, 15–20 Mar. 2026. \*招待講演 \*共催者 \*口頭発表
2. **W.-T. Chiu**, D. Han, M. Tahara, V. Chernenko, H. Hosoda, Design and development of the layered Ni-Mn-Ga ferromagnetic shape memory alloy-based composites for energy conversion, 2026 TMS Annual Meeting & Exhibition, San Diego, California, USA, 15–20 Mar. 2026. \*招待講演 \*共催者 \*口頭発表
3. **W.-T. Chiu**, P. Sratong-On, D.K. Han, M. Tahara, V. Chernenko, S. Lanceros-Mendez, H. Hosoda, Study of magnetic field-induced martensite variant reorientation behaviors of the Ni-Mn-Ga particles thin film composites, 2025 International Thin Film Conference (2025TACT), Taipei, Taiwan, 26–29 Oct. 2025. \*口頭発表

#### ・「特許」

なし

#### ・「受賞」

1. TMS 若手リーダー育成賞 (TMS Young Leaders Professional Development Award)・米国金属・鈹物・材料学会 (TMS), 2026 年 03 月.
2. 令和 7 年度第 24 回 東京科学大学 挑戦的研究賞・東京科学大学, 2025 年 07 月.