

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06265

研究課題名（和文）形状記憶ポリマーの温度による剛性変化を利用したロボットアームの開発

研究課題名（英文）Development of robot arm utilizing stiffness change of shape-memory polymer based on temperature

研究代表者

高嶋 一登 (Takashima, Kazuto)

九州工業大学・大学院生命体工学研究科・准教授

研究者番号：30435656

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、温度によって剛性が大きく変化する形状記憶ポリマー（SMP）を用いて柔軟性と感度可変のロボットアームを開発した。まず、SMPを用いた姿勢維持機構、人工筋肉、力覚・触覚センサという機械要素の個別の精度向上・小型化を図った。さらにそれら機械要素を組み合わせたロボットアームを作製して評価した。試作品を用いた実験により、SMPを用いたロボットアームと個別の機械要素の有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来、工場と介護・福祉の現場で使用するロボットには求められる仕様が異なり、異なったロボット開発が必要であったが、本研究課題により開発を進めたロボットアームは、産業用ロボットに必要な正確性・高剛性と介護・福祉ロボットに必要な柔軟性・多自由度を両立でき、両分野で応用可能である。一方、開発した各機械要素は個別に使用でき、介護・福祉・産業・医療などさまざまな分野で応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed the robot arm with variable stiffness and sensitivity by utilizing the stiffness change of shape-memory polymer (SMP) based on the temperature. We improved and miniaturized the SMP machine elements such as the position-keeping mechanism, the artificial muscle and the force and tactile sensors. Moreover, we developed the robot arm by combining the SMP machine elements. Through the experiments using the prototypes, we verified the effectiveness of the robot arm and the SMP machine elements.

研究分野：ロボット工学、医工学

キーワード：ソフトメカニクス 形状記憶ポリマー 機械要素 ロボットアーム 剛性制御 人工筋肉 力覚センサ 触覚センサ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

1. 研究開始当初の背景

近年、少子高齢化社会へと急激に進むなかで、ロボットは、介護・福祉などの分野にさまざまな形で適用され、ロボットが人と接する機会が増大している。医療福祉ロボットの国内市場は、2020年には2500億円、2035年には8000億円以上と予想された⁽¹⁾。一方、医療ロボットの世界販売は2014～2017年には、医療ロボット：7130台、障害支援：12400台と予想された⁽²⁾。

そのような、介護・福祉などの分野に適用される「人と接するロボット」は、従来の産業用ロボットと異なり、人と接したときのお互いの損傷が少ないように、柔軟な関節や皮膚が必要とされる。しかし、モータとギアの組み合わせで、大きな力を出そうとすると、必要がないときでも関節が硬くなってしまふ。一方、ロボットの皮膚を柔らかくした場合、容易に傷ついてしまふし、関節の位置決め精度、皮膚に搭載された触覚センサなどの測定精度が悪化してしまふ。さらに、従来のように工場のみで使用される場合に比べ、幅広い環境で使用されるため、さまざまな外界情報の測定も必要であるが、従来のセンサのレンジ・感度はセンサ材料によって決まっており、センサ作製後に変更することはできない。

そのような背景から研究代表者らは、形状記憶ポリマー (SMP) のロボットへの応用を研究してきた⁽³⁾⁻⁽⁷⁾。本研究で使用するSMPは、成型加工後に力を加えて変形しても、ガラス転移温度 (T_g) 以上に加熱すると元の形状に回復するポリマーである。さらに、SMPは室温付近に設定された T_g 以上に加熱すると弾性率が大きく変化し、約100～1000分の1になる(図1)。研究代表者らは、SMPの特徴を活かしたロボットへの応用として、これまで基礎となる機械要素(姿勢維持機構、人工筋肉、力覚・触覚センサ(皮膚))の研究を進めてきた。

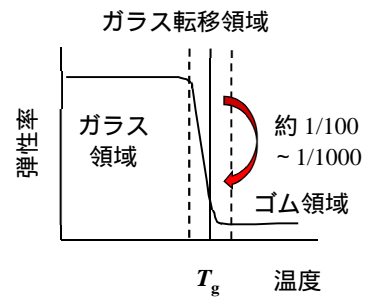


図1 SMPの温度と弾性率の関係

2. 研究の目的

本研究の目的は、研究代表者らがこれまで研究してきたSMPを用いた機械要素を組み合わせ、柔軟性と感度可変のロボットアーム(図2)を開発することである。温度によって剛性の変化するSMPに電熱線を埋め込み温度制御することによって、微細な感覚と硬さ(人間の柔軟性と工場従来使われてきた金属製ロボットの正確性と高剛性)を自在に切り替え可能なロボットアームを開発できる。本研究の学際的な特色は、柔軟なだけでなく、その柔軟性を変えられるという点である。ロボットが人間より優れた柔軟性可変の腕を持つことは、ロボットが人間以上の巧みな動きを実現するための基盤となる。一方、開発した姿勢維持機構、人工筋肉、皮膚、力覚センサは個別に使用できるので、ロボットアーム以外にも幅広い応用が考えられる。

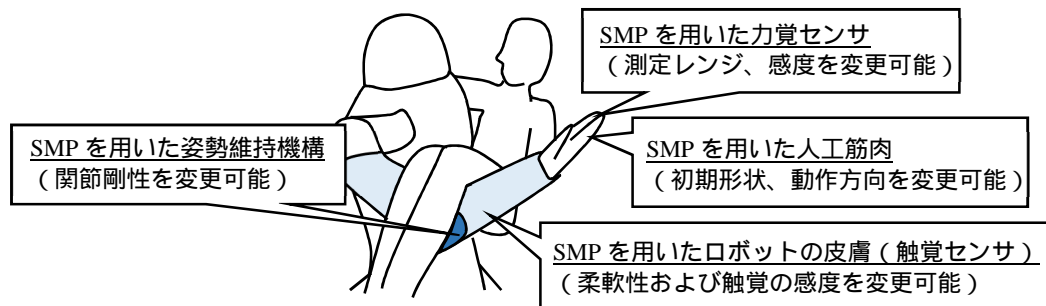


図2 SMPを用いた柔軟性・感度可変のロボットアームの適用イメージ
(温度によって特性を変更可能)

3. 研究の方法

本研究では、以下の2点を実施し、人間の腕程度の大きさのロボットアーム（介護ロボットへの応用を想定）の開発を目指した。

(1) ロボットアームの各機械要素の個別開発

図2のようにSMPを用いた姿勢維持機構、人工筋肉、皮膚、力覚センサの個別の精度向上・小型化を図った。また、どの要素でも使用するSMPシートの特性について検証した。

(2) 個別に開発した機械要素を組み合わせた柔軟性・感度可変ロボットアームの開発

まず、個別に開発した各機械要素を組み合わせたロボットアームを設計した。さらに、そのロボットアームを実際に試作し、評価した。

4. 研究成果

(1) ロボットアームの各機械要素の個別開発

姿勢維持機構

SMPシートを用いた姿勢維持機構（図3）にモータを追加した。制御プログラムを作成し、ロボットアームを目標角度に動作可能となった。また、SMPを冷却することでアームの角度を維持できた。さらに、大きく角度変化できるように、新たな機構を作製した。

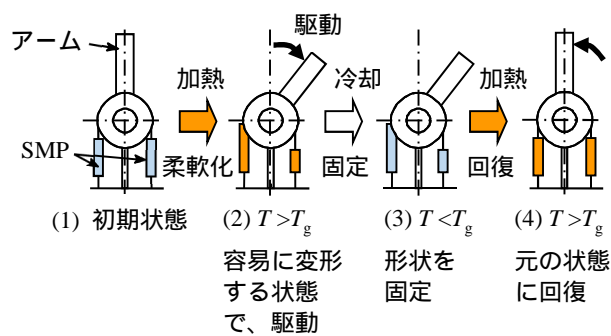


図3 SMPを用いた姿勢維持機構

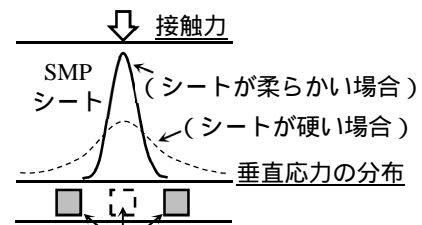
人工筋肉

SMPを用いた湾曲型空気圧ゴム人工筋にひずみゲージを搭載することで、人工筋の湾曲角度の測定が可能になった。また、測定した湾曲角度を用いて制御することによって、目標湾曲角度に追従させることができた。さらに人工筋の内圧と湾曲角度の特性を考慮して制御することで、誤差を低減できた。一方、SMPシートを人工筋の繰返し湾曲特性を調べた結果、100回以上耐えられることが分かった。

さらに、人工筋の作製方法を変更することで、柔軟で破損しにくく、なめらかに大きく湾曲させることができた。一方、人工筋の湾曲角度増大のため、シートを分割して異方性を持たせたSMPシートを作製し、各種実験により、シートの性能向上を確認した。

ロボットの皮膚（触覚センサ）

触覚センサ（図4）上部に載せた対象物の接触領域の加圧中心を測定できるプログラムを作成した。また、センサ構造の改良により測定精度が向上した。一方、対象物の安定した保持を目指し、荷重負荷時の変形量を大きくできるような構造改良を検討した。さらに、SMPシートに埋め込んだ電熱線形状を変更し、温度分布の均一化ができた。



感圧素子（温度によって使用する素子数を変え、空間分解能を変更可能）

図4 SMPシートを用いた皮膚（触覚センサ）

力覚センサ

ひずみゲージの数や鉄板の有無など構造の異なる4種類のセンサを作製し、測定誤差と感度の評価により、性能を比較した。さらに、評価結果が最も良好であった構造の力覚センサの小型

化を検討した。市販のロードセルと同等のサイズに小型化でき、従来と同様の性能を確認した（図5）。

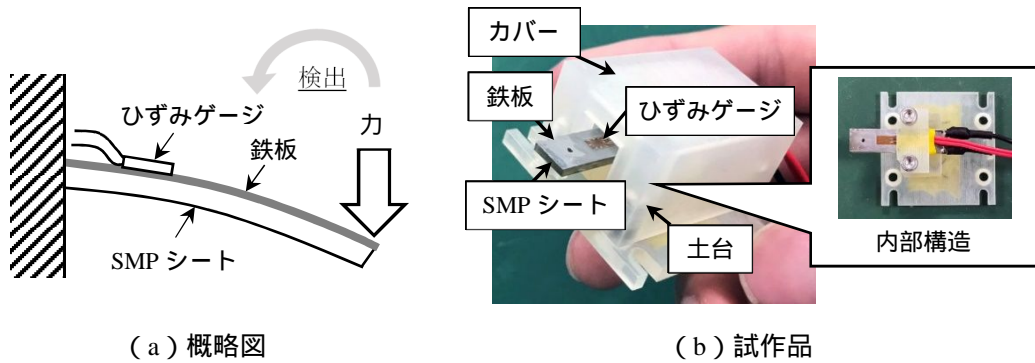


図5 SMPを用いた力覚センサ

電熱線埋め込み型 SMP シート

電熱線埋め込み型 SMP シートの繰返し引張試験を行った結果、シートを十分に加熱することでひずみ 10%における繰返し荷重に 1000 回は耐えられた。

(2) 機械要素を組み合わせた柔軟性・感度可変ロボットアームの開発

以上のように開発してきた触覚センサと人工筋を実際に搭載したアームを作製して評価した。まず、触覚センサを搭載したロボットアーム(図6)上部に対象物を保持する動作を確認した。触覚センサの柔軟性を変更することで、センサ上面に載せた物体の保持性能が向上した。また、アーム先端に搭載した人工筋の柔軟性を変更できた。

一方、開発した人工筋を 3 つ用いてアームに搭載可能なロボットハンドを作製した。従来では持つことが難しいサイズのものも含め、さまざまな形状の対象物を持つことができた(図7)。

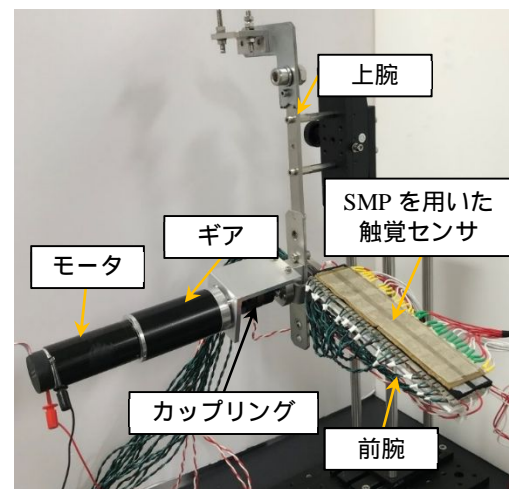


図6 SMPを用いたロボットアーム

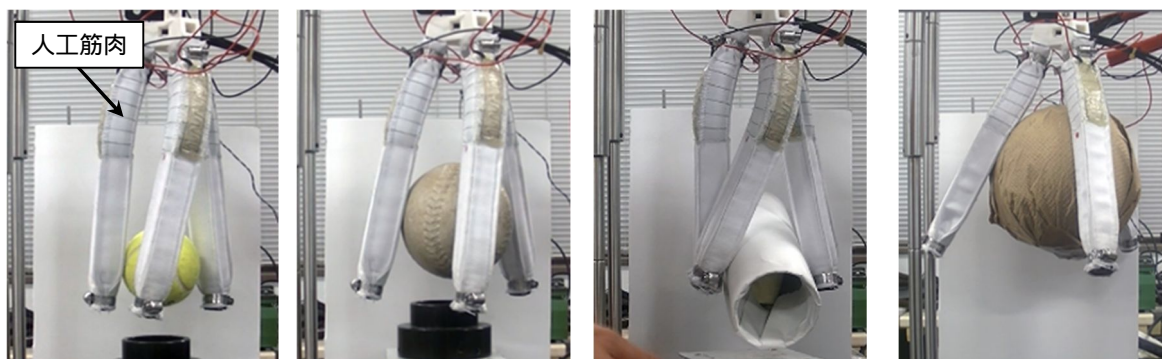


図7 SMPを用いたロボットハンド

研究期間全体の研究成果として、査読付き雑誌論文 1 件、学会発表 24 件（うち招待講演 3 件 / うち国際学会 2 件）、図書 1 件など技術の蓄積は進んだ。今後は、本研究をさらに発展させた

基盤研究(C)(研究課題名:全身の剛性と感度を可変のロボットの開発、課題番号:20K04401)も実施する予定である。

従来、工場と介護・福祉の現場で使用するロボットには求められる仕様が異なり、異なったロボット開発が必要であったが、本研究課題により開発を進めたロボットアームは、産業用ロボットに必要な正確性・高剛性と介護・福祉ロボットに必要な柔軟性・多自由度を両立でき、両分野で応用可能である。一方、開発した各機械要素は個別に使用でき、介護・福祉・産業・医療などさまざまな分野で応用が期待できる。

<引用文献>

- (1) https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_0095A.html
- (2) 国際ロボット連盟「World Robotics 2014」
- (3) 高嶋 一登、張 楠、向井 利春、郭 士傑、形状記憶ポリマーを用いた姿勢維持モジュールの基礎研究、日本ロボット学会誌、Vol. 28, No. 7 (2010), pp. 905-912.
- (4) K. Takashima, J. Rossiter, T. Mukai, McKibben Artificial Muscle Using Shape-Memory Polymer, *Sensors Actuators A*, Vol. 164 (2010), pp. 116-24.
- (5) K. Takashima, T. Noritsugu, J. Rossiter, S. Guo, T. Mukai, Curved Type Pneumatic Artificial Rubber Muscle Using Shape-Memory Polymer, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 24, No. 3 (2012), pp. 472-479.
- (6) K. Takashima, K. Sugitani, N. Morimoto, S. Sakaguchi, T. Noritsugu, T. Mukai, Pneumatic Artificial Rubber Muscle Using Shape-Memory Polymer Sheet with Embedded Electrical Heating Wire, *Smart Materials and Structures*, Vol. 23 (2014), 9 pages (125005).
- (7) K. Takashima, H. Kamizono, M. Takenaka, T. Mukai, Force Sensor Utilizing Stiffness Change of Shape-Memory Polymer Based on Temperature, *ROBOMECH Journal*, Vol.4 (2017), Article:17 (8pp).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 長田 拡、高嶋 一登、向井 利春	4. 巻 55
2. 論文標題 形状記憶ポリマーを用いた触覚センサのロボットアームへの応用	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 25 ~ 34
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.9746/sicetr.55.25	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24件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 三浦 智史、高嶋 一登、向井 利春
2. 発表標題 形状記憶ポリマーを用いた触覚センサの変形特性評価
3. 学会等名 日本機械学会第30回バイオフィロントニア講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 茂呂 和樹、高嶋 一登、向井 利春
2. 発表標題 形状記憶ポリマーを用いた小型力覚センサの構造評価
3. 学会等名 日本機械学会第30回バイオフィロントニア講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大城 竣、高嶋 一登、則次 俊郎、向井 利春
2. 発表標題 形状記憶ポリマーシートを用いた空気圧ゴム人工筋の構造改良および評価
3. 学会等名 日本機械学会第30回バイオフィロントニア講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大城 竣、高嶋 一登、則次 俊郎、向井 利春
2. 発表標題 形状記憶ポリマーシートを用いた空気圧ゴム人工筋の開発（ロボットハンドへの応用）
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩本 大輝、高嶋 一登、則次 俊郎、向井 利春
2. 発表標題 電熱線を埋め込んだ分割形状記憶ポリマーシートの機械的特性の評価
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 茂呂 和樹、高嶋 一登、向井 利春
2. 発表標題 形状記憶ポリマーを用いた小型力覚センサの性能評価
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三浦 智史、高嶋 一登、向井 利春
2. 発表標題 形状記憶ポリマーを用いた触覚センサの構造改良および評価
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋 美貴、高嶋 一登、向井 利春
2. 発表標題 形状記憶ポリマーの温度による剛性変化を利用したロボットアームの性能評価
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 服部 成浩、高嶋 一登、久佛 良明、長田 拓、向井 利春
2. 発表標題 形状記憶ポリマーを利用した関節と皮膚の剛性可変なロボットアームの研究
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2018 (ROBOMECH2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 茂呂 和樹、高嶋 一登、向井 利春
2. 発表標題 形状記憶ポリマーを用いた力覚センサの小型化
3. 学会等名 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三浦 智史、高嶋 一登、向井 利春
2. 発表標題 形状記憶ポリマーを用いた触覚センサの応用と検証
3. 学会等名 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 服部 成浩、高嶋 一登、向井 利春
2. 発表標題 形状記憶ポリマーを用いた関節機構の評価
3. 学会等名 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久佛 良明、高嶋 一登、則次 俊郎、向井 利春
2. 発表標題 形状記憶ポリマーシートを用いた空気圧ゴム人工筋の繰返し湾曲動作
3. 学会等名 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大城 竣、高嶋 一登、則次 俊郎、向井 利春
2. 発表標題 形状記憶ポリマーシートを用いた空気圧ゴム人工筋の湾曲角度制御（誤差補正方法の検討）
3. 学会等名 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Takashima
2. 発表標題 Actuators and sensors utilizing stiffness change of shape-memory polymer according to temperature
3. 学会等名 Japan-China Joint Workshop on Recent Advances on Active Soft Materials 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Takashima, R. Onoda, T. Mukai
2. 発表標題 Evaluation of error and sensitivity for force sensor using shape-memory polymer
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高嶋 一登
2. 発表標題 形状記憶ポリマーの温度による剛性変化を利用したロボット
3. 学会等名 第168回産学交流サロン「ひびきのサロン」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高嶋 一登
2. 発表標題 形状記憶ポリマーを用いたアクチュエータ・センサ
3. 学会等名 日本MRS 研究会「ソフトアクチュエータ産業化研究会」シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高嶋 一登
2. 発表標題 形状記憶ポリマーと有機圧電フィルムのアクチュエータ・センサへの応用
3. 学会等名 日本機械学会機素潤滑設計部門 第7回ヒューマン・マシン・インターフェイス設計研究会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久佛 良明、高嶋 一登、向井 利春
2. 発表標題 電熱線埋め込み型形状記憶ポリマーシートの繰返し引張試験
3. 学会等名 第18回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 服部 成浩、高嶋 一登、向井 利春
2. 発表標題 形状記憶ポリマーを用いたロボットアームの制御
3. 学会等名 第18回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松本 翔平、高嶋 一登、則次 俊郎、向井 利春
2. 発表標題 形状記憶ポリマーを用いた空気圧ゴム人工筋の角度制御
3. 学会等名 第18回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長田 拡、高嶋 一登、向井 利春
2. 発表標題 形状記憶ポリマーを用いた触覚センサのロボットアームへの応用
3. 学会等名 第18回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小野田 亮、高嶋 一登、向井 利春
2. 発表標題 形状記憶ポリマーを用いた力覚センサの誤差評価
3. 学会等名 第18回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2017)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 高嶋一登	4. 発行年 2020年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 446 (担当範囲 : pp. 390-396)
3. 書名 「第6章 形状記憶を利用したマテリアルの開発とその特性 第4節 形状記憶ポリマーを用いたアクチュエータ・センサの設計」, 自己修復材料、自己組織化、形状記憶材料の開発と応用事例	

〔産業財産権〕

〔その他〕

九州工業大学大学院生命体工学研究科高嶋研究室ホームページ http://www.life.kyutech.ac.jp/~ktakashima/research/research.html

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
---------	---------------------------	-----------------------	----