

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：11501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656173

研究課題名(和文) ホット アイス現象により超形状・剛性可変性を実現する作業移動ロボットの創成

研究課題名(英文) Creation of the mobile working robot with variable shape and stiffness by using hot-ice phenomenon

研究代表者

多田 隈 理一郎 (Tadakuma, Riichiro)

山形大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：50520813

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000 円、(間接経費) 900,000 円

研究成果の概要(和文)：酢酸ナトリウム三水和物水溶液を過冷却状態にした後に刺激を加えると、熱を放出しながら急激に結晶化が起こるというホット-アイス現象を用いて、形状・剛性が可変な作業移動ロボットの製作を行った。磁性スライムで構成されたロボットを移動させる手段として、研究開始時には主にネオジム磁石を手で動かす方法を用いていたが、より広範囲にロボットを移動させるために、複数の平歯車により全方向駆動歯車およびネオジム磁石を任意の方向に移動させる全方向搬送テーブルを製作した。また、磁石や刺激のための電極よりも小さな機器を環境側に配置するだけで形状・剛性が変化できる新しいゲル材料によるロボットについても検討した。

研究成果の概要(英文)：We have been studying the hyper flexible morphing mobile robot that has flexible gel states and can change its shape via a magnetic field. It can also change its stiffness by using hot-ice phenomenon. The basic performances and characteristics, movements, and abilities to change shape and stiffness of the prototypes have been confirmed through experiments. To expand the gel robot's motion range, we manufactured the omnidirectional X-Y stage to move neodymium magnets in any direction for the dexterous control of the magnetic field. This omnidirectional X-Y stage is composed of multiple spur gears whose rotating axes are perpendicular to each other and the planar omnidirectional driving gears to move neodymium magnets with them smoothly. We also fabricated and tested a novel gel material that can change its shape and stiffness without any magnetic fields. Many types of gel robotic actuators were tested including robotic grippers and flexible omnidirectional driving gears.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、知能機械学・機械システム

キーワード：ロボティクス 知能ロボティクス 知能機械 機械要素

### 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初の背景として、作業移動ロボットによる未知環境や極限環境の探査活動の需要が高まっていたことが挙げられる。これらの研究においては、形状を自在に変え、狭い場所を通過できるロボットを開発する必要がある。

### 2. 研究の目的

移動作業体の究極形態として、身体全体が自由に変形し、剛性も変えられる「剛性可変アメーバ」のような形態が考えられる。従来、水銀を駆動させる方法や、磁性スライムで形を変えるなど、電場や磁場を変化させて全体形状を可変にするものは、研究として行われていた。しかしながら、これらの移動体は、剛性が可変では無いため、構造体として働いたり、作業をしたりすることが困難であった。今回、当該研究者は、剛性を可変にし、作業も可能な移動体として、磁性スライムと過冷却現象としての Hot-Ice との合成に成功した。本研究ではこの Hot-Ice (ホット-アイス) 現象により、超形状・剛性可変性を実現する作業移動機構を創成することを目的とする。

### 3. 研究の方法

酢酸ナトリウム三水和物水溶液を過冷却状態にした後に何らかの刺激を加えると、熱を放出しながら急激に結晶化が起こる。この通称「Hot-Ice 現象」と呼ばれる現象を用いて、形状・剛性を変化させることが可能な作業移動ロボットの製作を行った。具体的には、酢酸ナトリウム無水結晶と精製水、およびMR流体と増粘多糖類のキサントガムという4種類の物質を混合して作成した「MR Hot-Ice」という磁性スライムを用いて、図1に写真を示すような作業移動ロボットを作成し、各成分がゲルの物質特性に与える影響の定量評価を行った。



図1： 磁性スライムによる作業移動ロボットの固化の様子

### 4. 研究成果

(1) 磁性スライムで構成されたロボットを広範囲で移動させるためのネオジム磁石用全方向搬送テーブルの作成

磁性スライムで構成されたロボットを移動させる手段として、研究開始時には主にネオジム磁石単体を手動により移動させる方法を用いていたが、より広い範囲に自在にロボットを移動させて、様々な作業を行わせるために、図2の写真のように複数の平歯車を直交する2方向に配置した上で、その平歯車により全方向駆動歯車を平面上の任意の方向にホロノミックに移動させられるようにした全方向搬送テーブルを構成した。これにより、全方向駆動歯車に取り付けられたネオジム磁石を、平面に沿った任意の方向に動かして、磁性スライムで構成されたロボットの移動方向や形状を、より滑らかに広範囲に渡って制御することが可能になった。

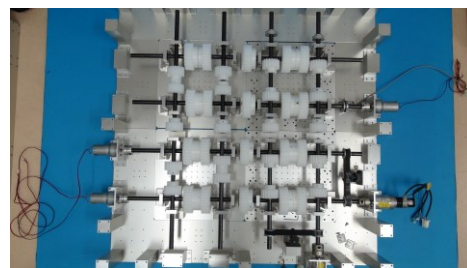


図2： 全方向搬送テーブルの内部構造

(2) ホット-アイス用磁性スライムの外皮となるトーラス状全方向移動機構の研究

磁性スライムで作業移動ロボットを構成する際には、その外部環境との境界として袋構造を用いることで、スムーズに移動することが可能となる。柔軟な磁性スライムで効率的な移動ロボットを製作するにあたり、磁性スライムを入れることが可能な繊維による袋構造をトーラス状に運動させることにより、全方向移動が可能なトーラス状移動機構を図3～図5のように開発し、基礎的な走行実験を行った。今後は、ホット-アイス現象により、この袋構造の中の磁性スライムの剛性を様々に制御できるようにすることで、この全方向移動機構の段差踏破性能・不整地走破性能を高めることを目指す。

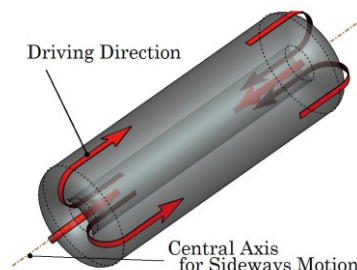


図3： 磁性スライムを用いたトーラス状全方向移動機構の原理図

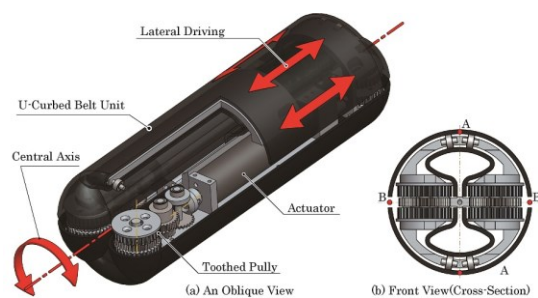


図4： 磁性スライム用トーラス状全方向移動機構の内部構造の見取り図

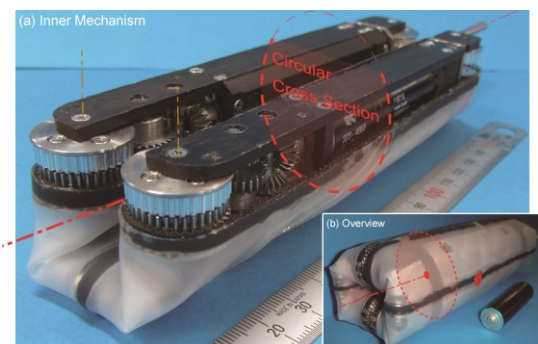


図5： 磁性スライム用トーラス状全方向移動機構の内部構造と全景の写真

### (3) 超形状・剛性可変型ロボットハンドの研究開発

本研究開発プロジェクトにおいては、超形状・剛性可変性を磁性スライムと同等に実現し、かつ磁石マトリクスや刺激のための電極を環境側に広範囲に配置する必要の無いゲル材料の開発を、磁性スライムの研究と並行して進め、それを作業移動ロボットに応用する可能性について確認した。

具体的には、山形大学工学部の古川英光研究室および山野光裕研究室と共同で、形状記憶ゲルを用いた超形状・剛性可変型ロボットハンドを開発し、川田工業製の人型ロボットHIROのハンドとして実際にロボットアームに取り付けて運用した。これは、ロボットハンドが把持する物体の形状や大きさに合わせて、ロボットハンドの形状が自在に変形することにより、安定した把持を可能としたものである。

形状記憶ゲルとは、山形大学の古川英光研究室で開発された高分子材料であり、常温では硬く、変形しにくいですが、加熱して摂氏60度以上になると軟化して、容易に変形できるようになる。軟化した形状記憶ゲルを、力を加えて変形させたまま冷却して常温に戻すと、変形した状態で形状が維持され、疑似的な塑性変形ができる。しかし、変化するのはゲルの内部の結晶の構造のみであり、結晶のフォーメーション自体は変化していないため、再び熱を加えると元の形状に戻るといった特性を持つ。

今回の実験においては、人型ロボットHIROの左手として図6のように形状記憶ゲルを使用した。平面形状の指先は、物体を2本の指で図7のように挟んで把持するときを用いる。

形状記憶ゲル製の左手の指を変形させる手順は次の通りである。

- (1) 指先の形状記憶ゲルを温風で加熱する。
- (2) ゲルを十分に加熱した後、指先を移動し、机に固定された金属丸棒の曲面に形状記憶ゲルを密着させる。
- (3) ロボットの右手で形状記憶ゲルを押さえ、形状記憶ゲルが丸棒を包み込むようにする。
- (4) ロボットの右手が形状記憶ゲルを押さえた状態のまま、冷風でゲルを十分に冷却する。

上記の手順により、凹面状に変形する前後のロボットハンドの指先を図8に示す。さらにその後、凹面状に変形した指先で家庭菜園用の軽石をすくう実験の様子を図9に示す。

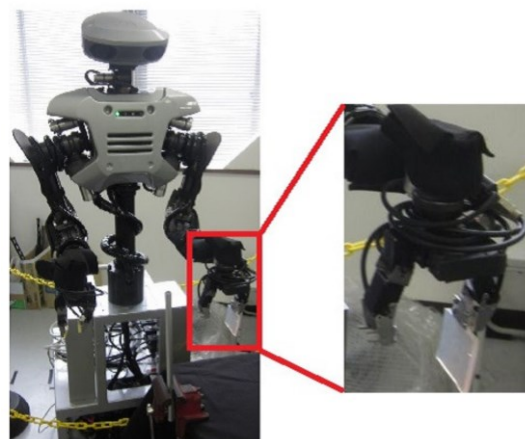


図6： 左手に形状記憶ゲルを用いた人型ロボットHIRO



図7： 平面形状の指2本で物体を把持する場合



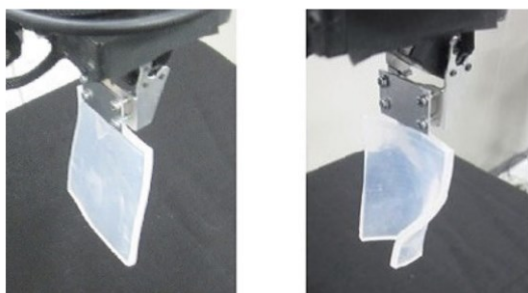


図 8 : 変形前 (左) と凹面状に変形した後 (右) の形状記憶ゲル製のロボットハンドの指先

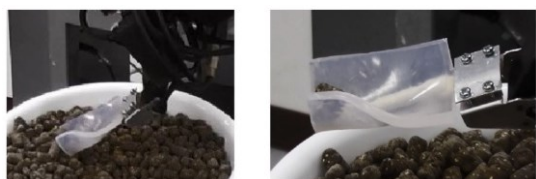


図 9 : 凹面状に変形した指先で家庭菜園用の軽石をすくう実験の様子

#### (4) ゲルによる超形状・剛性可変型全方向駆動歯車の研究

ゲルによる超形状・剛性可変構造においても、動力を安定して伝達することを可能とするための基礎実験として、全方向駆動歯車を形状・剛性可変型のゲル材料により構成することを試みた。これは、強度の高い相互侵入網目ゲルである、形状可変な Particle-DN ゲルを用いた全方向駆動機構であり、図 10 のように直交する 2 方向に歯車構造を持ち、複数の平歯車によって、曲面に沿った任意の方向に動力を伝達できるようにした。

今後は、このような形状・剛性可変型のゲル材料で動力を効率よく伝達するための全方向駆動歯車を構成するために最適なゲルの材質や紫外線照射の方法を研究してゆく予定である。

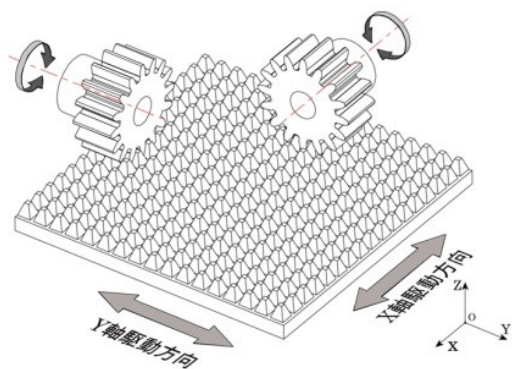


図 10 : 直交する 2 方向に歯車構造を持つ全方向駆動歯車と入力用平歯車による動力伝達の原理図

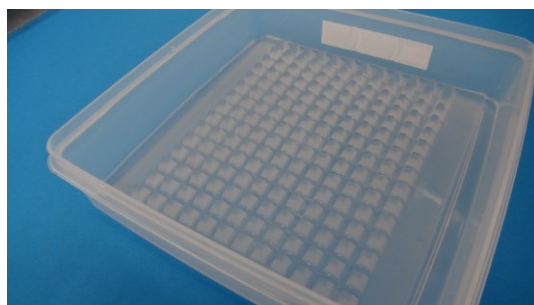


図 11 : 相互侵入網目ゲルである形状可変な Particle-DN ゲルを用いた全方向駆動歯車機構

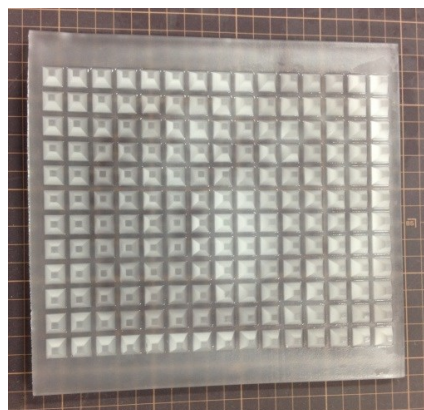


図 12 : 形状可変な Particle-DN ゲルを用いた全方向駆動歯車機構の上面図

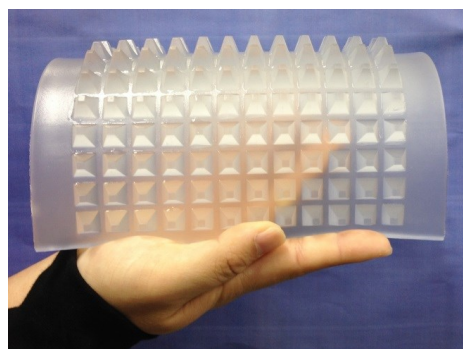


図 13 : Particle-DN ゲルの超形状可変性

#### (5) 結言

以上のように、「MR Hot-Ice」という磁性スライムの各構成成分が、その物質特性に与える影響の定量評価を行いつつ、磁性スライムによるロボットが移動・作業を行うための環境側の機器を作成し、効率良く磁性スライム型ロボットが全方向に移動するための原理の考察と試作機による基礎実験を行った。また、環境側の機器がより単純・小型でも超形状・剛性可変性を実現可能な形状記憶ゲルについても並行して検証および試作・実験を行い、磁性スライムを用いる場合に比べて、より任意の形状に造形しやすいことが分かったため、ロボットハンドや全方向駆動歯車機構へと応用した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 多田隈 建二郎、全方向移動・駆動の機巧、日本ロボット学会誌、査読無、Vol. 32、No. 4、2014、pp. 354-357  
DOI:<http://dx.doi.org/10.7210/jrsj.32.354>
- ② 多田隈 建二郎、多田隈 理一郎、井岡 恭平、妻木 勇一、全方向駆動歯車機構の研究、日本ロボット学会誌、査読有、Vol. 30、No. 6、2012、pp. 611-620  
DOI:<http://dx.doi.org/10.7210/jrsj.30.611>

[学会発表] (計 5 件)

- ① Tadakuma, Kenjiro, Ogata, Hirohiko, Tadakuma, Riichiro, Berengueres, Jose, Torus Omnidirectional Driving Unit Mechanism Realized by Curved Crawler Belts, 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2014年5月31日~2014年6月7日, Hong Kong Convention and Exhibition Center, Hong Kong, China
- ② Yamano, Mitsuhiro, Goto, Daisuke, Ujiie, Kenji, Akiba, Naoki, Gong, Jin, Furukawa, Hidemitsu, Tadakuma, Riichiro, Experiments of a Variable Stiffness Robot Using Shape Memory Gel, 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2013年12月15日~2013年12月17日, Kobe International Conference Center, Kobe, Japan
- ③ Riichiro Tadakuma, Kenjiro Tadakuma, Erick Fernando Moya Arimie, Study on Omnidirectional Driving Mechanisms to Realize Holonomic Power Transmission, 24th 2013 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, 2013年11月10日~2013年11月13日, Nagoya University, Nagoya, Japan
- ④ 氏家 健司、秋葉 直樹、山野 光裕、宮 瑾、古川 英光、多田隈 理一郎、形状記憶ゲルを用いた形状可変ロボットハンドの基礎実験、第31回日本ロボット学会 学術講演会、2013年9月4日~2013年9月6日、首都大学東京 南大沢キャンパス、東京都八王子市
- ⑤ Kenjiro Tadakuma, Erick Fernando Moya Arimie and Riichiro Tadakuma, Hyper Flexible Robot with Variable Stiffness and Shape, The 2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2013年7月9日~2013年7月12日, Wollongong,

Australia

[その他]

ホームページ等

<http://tadakuma.yz.yamagata-u.ac.jp/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

多田隈 理一郎 (TADAKUMA, Riichiro)  
山形大学・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号：50520813

### (2) 研究分担者

多田隈 建二郎 (TADAKUMA, Kenjiro)  
大阪大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：30508833