

令和 3 年 10 月 22 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04296

研究課題名(和文) 進行波と粘液の相互作用により凹凸壁面や天井でも推進する吸着式移動体の創出

研究課題名(英文) Creation of adsorption type moving body that propels even on uneven wall surface and ceiling by interaction of traveling wave and mucus

研究代表者

塚越 秀行 (Tsukagoshi, Hideyuki)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：50313333

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、カタツムリの動作を参考に、凹凸・ひび割れ・汚れを伴う壁面や天井において、吸着したまま推進可能な新しい移動体の基盤技術の構築を目指した。移動体は、空気圧により進行波を生成する柔軟駆動部と、せん断応力や吸着力が速度により変化する粘液から成る。これにより、収縮波が尾部から頭部に進行する間せん断応力は減衰し、波間では吸着力を生成できる。当該原理をもとに、コンクリート構造物の老朽化検査への応用も視野に入れ、1)進行波を生成する柔軟アクチュエータの設計法、2)粘液による吸着特性の解明、3)繊毛構造の設計法、4)人工粘液の精製法、などを検討し、試作機を用いた実験により、提案手法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

凹凸・ひび割れ・汚れを伴うコンクリート壁面や天井面における移動は、従来までの壁面移動ロボットで試みられてきたものの、安定した吸着力と推力の双方の実現には至っていなかった。本研究は、カタツムリの吸着移動メカニズムに着目し、柔軟アクチュエータで生成される進行波と粘液との相互作用により、壁面に吸着したまま推進する移手段を新たに提案し、その有効性と改善すべき設計上の課題を明らかにしたものである。また、本研究で提案した進行波と粘液との相互作用は、壁面移動ロボットだけでなく、体内を移動する内視鏡や医療ロボットなど、他の領域にも応用可能な成果を創出できたものと考えている。

研究成果の概要(英文)：In this research, we aimed to construct a basic technology for a new mobile robot capable of propelling while adsorbed on walls and ceilings with irregularities, cracks, and dirt, referring to the behavior of snails. The moving body is composed of a flexible driving unit generating a traveling wave by air pressure and a mucus whose shear stress and adsorption force change with speed. As a result, the shear stress is attenuated while the contracting wave travels from the tail to the head. Based on this principle, considering application to aging inspection of concrete structures, 1) Design method of flexible actuator that generates traveling wave, 2) Elucidation of adsorption characteristics by mucus, 3) Cilia on adsorption surface. The design method of the structure, 4) the purification method of the artificial mucus, etc. were examined, and the effectiveness of the proposed method was confirmed by the experiment using the prototype.

研究分野：ロボット工学

キーワード：ソフトメカニクス アクチュエータ

## 様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

トンネルや橋の老朽化点検において、高所でも安全かつ迅速に打音検査や腐食検出を行える手段が要求されている。その解決には、構造物に多用されるコンクリート壁面に沿って測定機器を安定に搬送でき、打音検査時の反力を支えられるような壁面移動技術が求められる。

一方、従来の壁面移動ロボットを上記用途に適用しようとする、以下の技術的課題が内在していた。車輪やクローラのような無限回転式は、推進反力としてせん断応力が吸着面に作用し動作が不安定だった。脚式は、吸着と離脱の動作の切換で接地面積が増減するため、安定な吸着が困難だった。また、吸着方法も、従来手法をそのまま適用することが難しかった。たとえば、真空吸着は、ひび割れ・凹凸壁面では密閉しづらく、空気漏れが生じやすかった。磁力は、磁化されないコンクリート面には適用できなかった。ファンデル・ワールス力は、汚れやダストが付着した壁面では作用しづらかった。

以上より、吸着困難だったコンクリート壁面において、安定な吸着移動を実現するには、1) 壁面への吸着状態を保持しつつ、吸着面でのせん断応力を減衰・分散して推進でき、2) 壁面や天井の表面状態を問わず吸着力を生成できる新たな吸着手法の創出が必要と考えられる。

### 2. 研究の目的

凹凸・ひび割れ・汚れを伴う壁面や天井において、カタツムリの動作を参考に、吸着したまま推進可能な新しい移動体の基盤技術の構築を目指す(図1)。移動体は、進行波を生成する柔軟駆動部と、せん断応力や吸着力が速度により変化する粘液から成る。Wave(収縮波)が尾部から頭部に進行する部位においてせん断応力は減衰し、Interwave(波間)では吸着力が生じる。当該原理をもとに、柔軟駆動部に生じる進行波とせん断応力の減衰機能を備えた粘液との相互作用により、壁面に吸着したまま這行運動で進む、全く新しい構成に基づく移動手法を構築する。そして、コンクリート構造物の老朽化検査への応用も視野に入れ、1) 進行波を生成する柔軟アクチュエータの設計法、2) 粘液による吸着特性の解明、3) 吸着面の繊毛構造の設計法、4) 人工粘液の精製法、などをカタツムリの吸着這行運動と対比しながら追究し、壁面・天井移動ロボットのブレークスルーを図る。

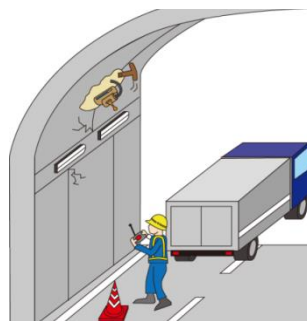


図1 トンネルの老朽化点検を行う  
壁面移動ロボットのイメージ図

### 3. 研究の方法

カタツムリの吸着移動に作用する進行波と粘液の原理を解明し、凹凸コンクリート壁にも吸着可能な移動体の基盤技術を構築する。そのため、以下4項目を研究の柱とする。

1) 進行波生成式柔軟アクチュエータの設計方法を構築し、波形パラメータ(振幅、波長、縦波・横波)と吸着特性との関係を調査する。

2) カタツムリの調査結果をもとに、壁面の吸着移動に要求される粘液の特性を明らかにする。カタツムリやナメクジの粘液は、巨大な糖タンパク質が架橋した網目状の分子構造が95%以上を占める水分を保持するゲル構造を有している。この構造により、粘液はせん断に伴い固体から液体へ遷移する性質を示すことが知られており、粘液上を這って移動することができると考えられていた。しかし、せん断速度に応じて固体から液体にどのように変化するのか不明確であった。そこで、カタツムリの一つであるミスジマイマイの粘液を採取し、レオロジー特性をレオメータで調査する。

3) カタツムリの腹足の接地面構造を調査し、凹凸コンクリートに対応するための表面構造の設計指針を明らかにする。

4) 進行波と粘液の相互作用で生じる吸着這行運動を解明し、設計法を構築する。また、インフラ老朽化点検への応用も視野に入れ、システムとしての統合と最適化を図り、フィールド実験により、提案手法の有効性を検証する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 進行波生成する柔軟アクチュエータの開発

圧力室自体が波形状に変形する「波形チャンバ連結式」とも呼ぶべき進行波を生成するシート状柔軟アクチュエータを開発した。当該アクチュエータは、複数本の圧力室を波の進行方向と平行に配置した構造から成る。各圧力室は、空気圧で加圧されると互いに位相の異なる横波を生成する。本駆動方式は、以下の特徴を有する。i) 圧力室自体が湾曲するため大きな振幅を生成しやすい, ii) 配管チューブは不要となる, iii) 全面で駆動力を生成でき、柔軟性も確保しやすい, iv) 最小3つの圧力室で進行波の生成が可能となり、それぞれ位相が  $120^\circ$  異なる正弦波を形成するように交互に加圧を繰り返すことにより、連続体に近い進行波を生成できる、などである。

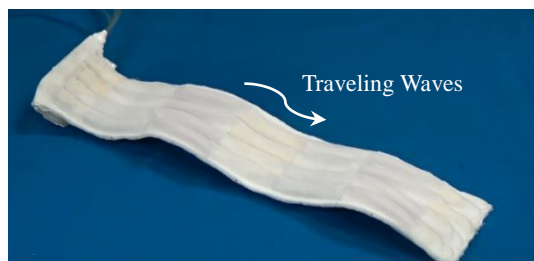


図2 試作した進行波生成式柔軟アクチュエータ

表1. 進行波生成式柔軟アクチュエータの仕様

Mass (g)	78
Size (mm)	350 × 70 × t10
Maximum pressure (kPa)	200
Air flow rate (L/cycle)(normal)	1.5 (when 140 kPa)
Rubber tube (mm)	φ 6.0, t 0.3

試作した進行波生成式柔軟アクチュエータの外観は図2に、そして諸元は表1に示す通りである。試作機の質量は78gとなり、全長は約350mmで2波長分の波を生成した。厚さは無加圧時に約10mmであり、加圧時は約15mmとなった。試作機の推進速度は、1.7Hzで弁を駆動させたとき、図3のような実験結果となり、1.2~2.2mm/sで前進および後退が可能であることを確認した。

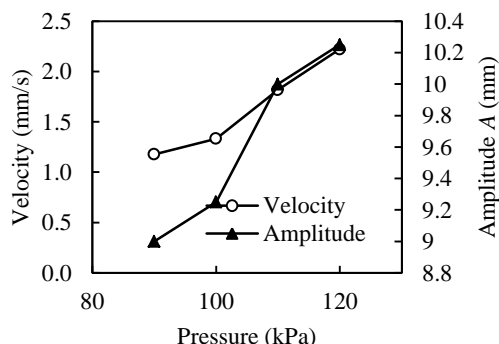


図3 試作機の推進速度に関する実験結果

##### (2) 粘液による吸着特性の解明

ミスジマイマイのレオロジー特性をレオメータで調べた結果、1.8[kPa]程度の降伏応力が存在し、せん断速度の増加に伴い、急激にせん断応力が低下することが明らかとなった。ニュートン流体などでみられるせん断応力が増加していく現象と異なり、特異なレオロジー特性を有することが確認された。この特性は、WavesやRimの摺動時の抵抗の軽減に効果的である。また、カタツムリの粘液は降伏値が存在する塑性や、せん断速度の増加に伴い粘度が低下する揺変性、流体が平らで滑らかになりやすい流展性といった3つの性質を兼備することが確認された。

さらに、ミスジマイマイにおもりを吊り下げ、重力方向を変えることで3つの方向の吸着力を測る実験を行った。吸着対象面はアクリル、溝が入って負圧が生成しにくいスリット入りのアクリル、表面が濡れにくいテフロン、表面が粗い紙やすりの4種類の平板で行った。垂直方向の外力に対する最大吸着力は、アクリルやテフロン、紙やすりでは大きな差が無いものの、スリット入りのアクリルで大きく低下した。移動と逆方向の外力に対する最大吸着力は、表面が粗い紙やすりで最も大きくなり、ほかの表面が滑らかな面ではその半分程度となった。移動と同方向の吸着力は、移動と逆方向の吸着力に対して、2倍程度大きいことも明らかとなった。

##### (3) 繊毛ファイバー構造の開発

カタツムリの繊毛構造を疑似的に再現するため、足裏に針状突起を追加し、吸着力に異方性を持たせることを試みた。直径0.4[mm]の形状記憶合金(SMA)の線材を  $45^\circ$  の角度で傾けて各足に2本ずつ固定し、足裏全体を厚さ3[mm]のウレタンスポンジを固定した。これにより、コンクリートなどの凹凸面において、SMAの流れに逆らう方向に対して大きな支持力が発生し、流れと同方向には微小な抵抗力のみが発生する効果を確認できた。

#### (4) 人工粘液の精製法

カタツムリの粘液に類する人工粘液の設計方法を明らかにするため、シリコンオイルとナノシリカからなる混合液体に着目し、その特性を計測した。

まず、人工粘液のせん断降伏応力に関する設計パラメータとして、①ナノシリカの濃度、および②シリコンオイルの粘度、の2種類に着目した。ずり速度一定でレオメータを動作させたときの人工粘液のせん断応力と時間応答の関係を調べた。その結果、人工粘液のせん断降伏応力は、ナノシリカの濃度の増加にともない増加することが分かった。一方、シリコンオイルの粘度を変えても、せん断降伏応力は増加しなかった。これより、せん断降伏応力は、ナノシリカの濃度により設計可能と考えられる。

次に、人工粘液の垂直吸着力に関する設計パラメータとして、ナノシリカの濃度に着目した。引張試験機を用いた垂直吸着力の測定実験の結果、濃度の増加とともに吸着力が増加すること、および吸着力を最大化する最適な粘液の厚みが存在することが明らかとなった。

#### (5) コンクリート面で検証実験

試作機を用いて壁面での移動実験を行った。吸着対象面の材質は、通常の負圧吸盤や磁石では吸着が困難なコンクリートとした。移動体として、(1)で開発した進行波生成する柔軟アクチュエータを用いた。コンクリートに接地するアクチュエータの表面には、(3)で開発した繊維ファイバーを付加した。また、粘液として用いる流体は、(4)で開発したシリコンオイルとナノシリカからなる混合液体を用いた。進行波の振幅は2mm、波長80mm、周波数1.2Hzで駆動した。

コンクリート壁面の移動実験において、壁面に密着状態を保持し、突起をコンクリート表面の凹凸に引っ掛けながら壁面を移動可能なことが確認された。移動速度はおよそ1[mm/s]であった。したがって、壁面を移動するためには流体で足裏を面と十分密着するための流体の流展性が重要な要素であることを改めて確認できた。

一方、コンクリート天井面の移動実験の結果、今回開発した人工粘液は塑性に乏しかったため、静止状態では吸着を維持できたものの、進行波を生成し始めると落下してしまった。水平面に対して70度の傾斜をなすコンクリート斜面では、落下することなく約1[mm/s]の移動が確認された。

本研究で試作した人工粘液は、カタツムリの粘液に近い特性を有していたものの、移動体の振幅が大きかったため、吸着力の維持が困難だったと思われる。適切な振幅を調整できる移動体の設計により、この課題は解決可能と考えられる。

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 1件）

1. 著者名 Masahiro Watanabe, Hideyuki Tsukagoshi	4. 巻 無
2. 論文標題 Suitable configurations for pneumatic soft sheet actuator to generate traveling waves	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 363-374
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/01691864.2017.1392347	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Masahiro Watanabe, Hideyuki Tsukagoshi
2. 発表標題 Soft Sheet Actuator Generating Traveling Waves Inspired by Gastropod's Locomotion
3. 学会等名 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡辺将広、塚越秀行
2. 発表標題 腹足類の運動を参考とした柔軟シート形アクチュエータ
3. 学会等名 第15回「運動と振動の制御」シンポジウム(MOVIC2017) (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡辺 将広、塚越 秀行
2. 発表標題 カタツムリの運動を参考としたシート形進行波生成アクチュエータ
3. 学会等名 ROBOMECH2016 in Yokohama (ロボティクス・メカトロニクス講演会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Masahiro Watanabe, Hideyuki Tsukagoshi
2. 発表標題 Flexible Sheet Actuator That Generates Bidirectional Traveling Waves
3. 学会等名 2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 特許権	発明者 塚越秀行、渡辺将広	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2016-03271	出願年 2016年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

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

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