

# 2016 年度 科学技術共同研究センター 研究プロジェクト実績報告書

|      |   |
|------|---|
| 課 題  | 1 インチの細管内走行を目的とした円筒状クローラ型移動機構の開発  |
| 研究組織 | 永瀬 純也 (理工学部・講師) 研究代表者<br>小川 圭二 (理工学部・准教授)<br>左近 拓男 (理工学部・教授)<br>渋谷 恒司 (理工学部・教授) |
| 研究期間 | 2 年研究の 1 年目   |

## 1. 2016 年度の研究計画

急速な技術革新による設備のハイテク化・複雑化が進む現代社会において、重大な事故を未然に防ぐための、それらの信頼性の高いメンテナンスは、社会にとって最重要課題のひとつである。中でもライフライン等の役割を担っている配管のメンテナンスは、破裂や腐食による事故を防ぐ上で必要不可欠である。そのためこれまでに、大学や企業で何十年もの間、管内検査ロボットが数多く研究されてきたものの、実環境で想定される異径管走行や段差乗越えおよび上昇を行うためには、複数のモータが必要であったり機構を複雑化したりする必要があるため、水道管・ガス管など、“細管部”を多く有する配管内を検査可能な有効な検査装置・ロボットは未だ実現されていない。

このような背景の中で、本研究は異径管走行・段差乗越え及び管内上昇が可能な小型の管内走行ロボットを実現することを目的とする。そこで我々は、異径管や継手部のような段差においても高い走破性を有する推進機構として、様々な移動機構の中で最も不整地走破性が高いと言われているクローラ構造(商標でいう“キャタピラ”)に着目した。しかしながら一般的なクローラ機構は、構造が複雑でかつモータを複数要するため小型化が困難である。そこでこの問題の抜本的な解決手段として、アメーバの細胞質流動に基づく推進原理(図1)にヒントを得て、従来型クローラと比べて極めてシンプルかつコンパクトな、新しいクローラ型構造を独自に考案した(永瀬, 特許第 6109643 号 (特願 2012-120338))。

このクローラ構造は、図2のように円筒フレームの周囲に、複数のゴム製クローラベルトを配置し、それらを“単一”のウォームギヤ(螺旋状歯車)を介して“単一”のモータで駆動するシンプルなクローラ構造であるため、大幅な小型化が可能となり、従来型のクローラ構造では内径φ100mmの走行が限界であったものの、本クローラロボットはφ50mmの小径管内を走行することに成功した(Nagase et al., J. Advanced Mech. Sys. and Manufact., 2013)。また、クローラベルトには、フレームに対して大きくたわませた独自開発した湾曲型クローラベルトを採用している。これによって、クローラベルトが、カーブや段差等の形状に沿って柔軟に弾性変形することにより、L字管や異径管などをスムーズに通過することが可能となり、また、ベルトの弾力を利用して管内上昇が可能である。実験ではいずれの走行環境においても95%以上の速度効率で推進可能であることが実証された。(永瀬 他, 日本ロボット学会誌, 2015)

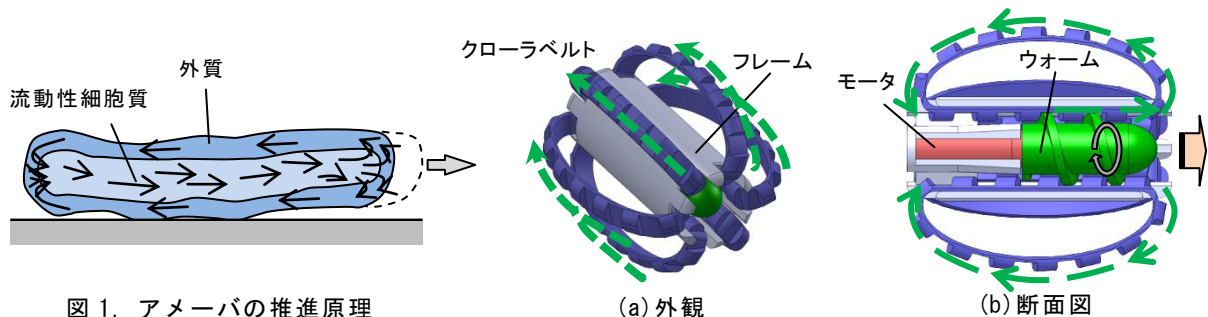


図 1. アメーバの推進原理

図 2. 本研究のクローラ構造

しかしながら、実環境、特に水道管やガス管等のパイプラインは、その内径が最小で1インチ（正確にはφ28mm）を有するものが多いため、現状のサイズでは走行が困難である。

本研究では、実際の配管検査のなかで非常に困難かつ最もニーズの高い、ガス管・水道管などのライフラインを検査可能なロボットの実現を最終目標として、本年度は、これまで開発してきたクローラロボットをベースに、ガス管・水道管などの最小内径であるφ28mmの管路が走行可能な移動機構を開発することを目的とする。

## 2. 研究実績の概要(研究経過と成果)

### 2.1 機体の径方向寸法設計

図3はロボットを、走行可能な最小内径の管へ進入させたときの軸方向から見た断面図である。図3より、ロボットを走行させる管内の半径は $R$ である。算出する機体の寸法は、フレーム側面半径 $R'$ 、ベルト溝幅 $b$ 、ウォーム歯先半径 $r$ 、ウォーム歯底半径 $r'$ である。まず、フレーム外径 $R'$ は、ロボットを走行させる管の内径 $R$ 、ベルト歯たけ $h$ およびベルト厚さ $t$ から以下の式より算出される。

$$R' = R - (h + t) \quad (1)$$

また、ベルト溝幅 $b$ は管内径 $R$ から次式で求められる。

$$b = 2R \sin \theta \quad (2)$$

ただし $\theta$ は、ベルトが管内壁に接する点と管の中心点を結んだ線と、そのベルト幅 $b$ の垂直二等分線のなす角で、ベルトの本数 $n$ より次式を満たさなければならない。

$$\theta \leq \frac{\pi}{n} \quad (3)$$

さらに、ウォーム歯先径 $r$ はベルト溝幅 $b'$ から

$$r = \sqrt{(R' - c)^2 - (b'/2)^2} - t \quad (4)$$

で表され、ウォーム歯底径 $r'$ はウォーム歯先径 $r$ を用いて

$$r' = r - (h + H) \quad (5)$$

より求められる。ここで、ベルト歯たけ $h$ 、ベルト厚さ $t$ 、ベルト歯先面とウォーム歯底面とのクリアランス $H$ 、フレーム最小厚さ $c$ の寸法は、駆動効率やベルトの弾性力、摩擦によるエネルギーロスおよびフレーム強度に依存する。

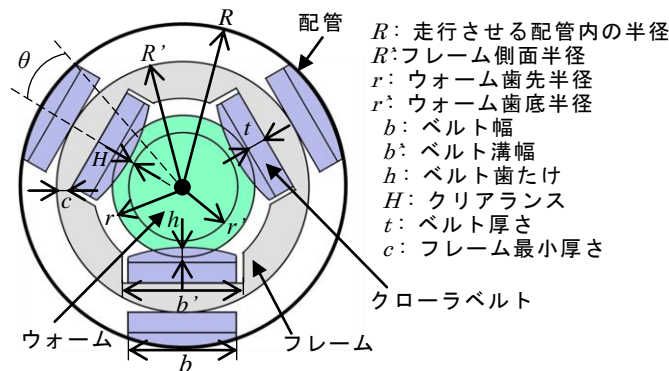


図3 軸方向から見た機体断面図

本クローラ型ロボットのクローラベルトはゴム製であるため、ウォーム歯とベルト歯の噛み合い面が広がると、噛み合い面の摩擦力に比例して駆動効率が低下してしまう。そのため、ウォーム歯とベルト歯の噛み合い面の摩擦力による駆動効率の低下を考慮してベルト歯たけ $h$ を1mmとし、ベルト厚さ $t$ を1.5mmとした。さらに、クローラベルトとウォームの駆動時に、ベルト歯先面とウォーム歯底面が接触し摩擦によるエネルギーロスを避けるため、ベルト歯先面とウォーム歯底面とのクリアランス $H$ は0.5mmとした。フレームの造形に使用する3Dプリンタは、積層方向により強度が変動する。その積層方向による強度と、フレームの材質となるABS樹脂の強度から、フレームに必要な強度を確保できるようにフレーム最小厚さ $c$ を1mmとした。

以上の設計式と寸法値から、機体の各寸法を求めた。今回は走行可能な最小の内径を呼び 25A 相当(内径  $\phi 28\text{mm}$ )を想定して、ロボットを走行させる管の径  $R$  を  $14\text{mm}$  とした。管内でロボットを安定させて支えるための最小数の支持点は、等間隔で 3 点必要となる。そこで、その支持点の役割を果たすクローラベルトを等間隔に配置し、その本数  $n$  を今回は 3 本とした。従って、 $R=14\text{mm}$  を基準として、機体の各寸法の設計式を満たすようにフレーム側面半径  $R'$  を  $10.5\text{mm}$ 、ベルト溝幅  $b'$  を  $10\text{mm}$ 、ウォーム歯先半径  $r$  を  $6\text{mm}$ 、ウォーム歯底半径  $r'$  を  $4.5\text{mm}$  とした。

## 2.2 機体の軸方向寸法設計

次に、本クローラ型ロボットの機体全長について検討した。クローラ型ロボットが管内を走行する際には一様管だけではなく、曲管や L 字管といったエルボ管が考えられる。このような配管を走行する際には、クローラ型ロボットが配管経路に沿って曲がる際に機体がスタックしないようにする必要がある。そこで、本章では、エルボ管を通過するための機体全長の条件式を記述する。図 4 にエルボ管と機体との関係図を示す。機体はクローラベルトをフレームに接触するまで弾性変形させた状態であつ、円柱状の剛体と想定して設計を行った。機体全長の設計式は、機体直径  $d$  が  $oc$  内に収まるか否かで異なる。ここで  $o$  は曲率の最も小さな内壁の円弧上の midpoint、 $c$  は曲率半径の最も大きな円弧の  $a$  点と  $b$  点を直線で結んだ線の中点である。今回、設計において、機体直径  $d$  は  $oc$  内に収まる次式で表される条件式を満たす。

$$d < \frac{\sqrt{2}}{2} \left( R + \frac{D}{2} \right) - \left( R - \frac{D}{2} \right) \quad (6)$$

従って、機体全長  $L$  は次式を満たすように設計を行った。

$$L < 2\sqrt{2} \left[ \left( R + \frac{D}{2} \right) - \left\{ \sqrt{2} \left( R - \frac{D}{2} \right) + \sqrt{2}d \right\} \right] + 2d + \left( R - \frac{D}{2} \right) \quad (7)$$

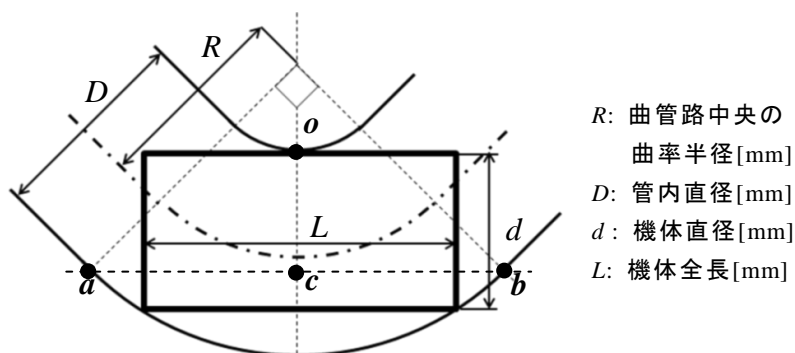


図 4 機体とエルボとの位置関係

## 2.3 製作

以上の設計を基に、ロボットの試作を行った。図 5 に試作した本クローラ型ロボットの写真を示す。また、その仕様を表 1 に示す。試作したロボットは、全長は  $43\text{mm}$ 、質量は  $17.8\text{g}$  である。また外径は、クローラベルトに外圧が掛かっていない状態では  $\phi 50\text{mm}$ 、外圧をかけてベルトをフレームに接触するまで弾性変形させた状態では  $\phi 26\text{mm}$  である。ギヤモータは、機体内に搭載できるサイズの中で、最も大きな出力が得られるものを選定した。



図 5 試作機

表 1 試作機の仕様

|         |                         |
|---------|-------------------------|
| 全長      | 42mm                    |
| 外径      | 最大 50mm, 最小 26mm        |
| 質量      | 17.8g                   |
| ギヤモータ   | RE6 0.3W 221:1 Maxson 製 |
| ウォームの材質 | ポリアセタール                 |
| フレームの材質 | ABS 樹脂                  |
| クローラベルト |                         |
| 数       | 3 本                     |
| 歯幅      | 9mm                     |
| 厚さ      | 1.5mm                   |
| 歯たけ     | 1mm                     |
| 材質      | シリコーンゴム                 |

## 2.4 牽引力の定性的特性

本クローラ型ロボットはベルトの弾性力によりベルトと管内壁との間に生じる摩擦力を利用し牽引力を得ている。しかし、そのベルトの弾性力は機体の内側にも作用しており、ベルトと機体内部との接触面には内部摩擦が生じ、この内部摩擦はベルトの駆動力の抵抗となるので牽引力に影響を与える。そのため、ロボットに高い牽引力を発生させるには、適度な弾性（剛性）をベルトにもたせる必要があると考えられる。そのためにはベルト剛性と牽引力の定性的関係を明らかにすることが重要である。そこで、ベルト剛性と牽引力の定性的関係について理論と実験の両面から検証した。図6に示すような姿勢においては、機体には、ウォームからベルトに伝達される力  $F_D$ [N]、ベルトと管内壁との摩擦力  $F_O$ [N]、ベルトと機体内部との摩擦力  $F_I$ [N]、機体に作用する重力  $Mg$ [N]が生じており、牽引力  $F_T$ [N]との関係は(8)の条件のときに(9)式、(10)の条件式のときに(11)が成り立つ。以上の式からベルト剛性と牽引力の定性的関係として図7を導出した。図7より、本クローラロボットは、 $F_O = F_D - F_I + Mg$ で牽引力に最大値(極大値)を持つ牽引力特性であることがわかる。

$$F_O < F_D - F_I + Mg \quad (8)$$

$$F_T = F_O - Mg \quad (9)$$

$$F_O \geq F_D - F_I + Mg \quad (10)$$

$$F_T = F_D - F_I - Mg \quad (11)$$

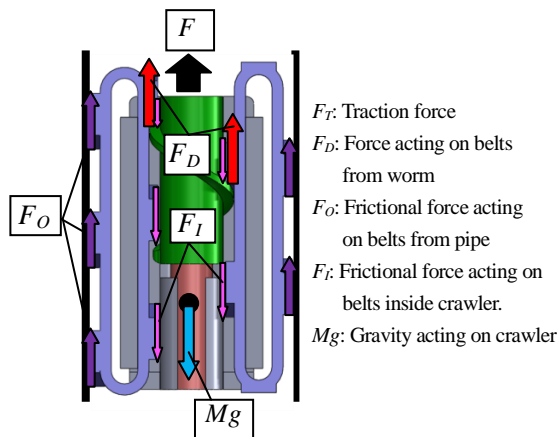


図6 機体に作用する力

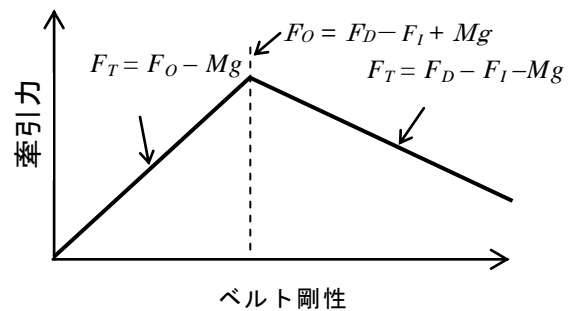


図7 理論解析に基づくベルト剛性と牽引力の定性的関係

次に試作機を用いて、ベルト剛性に対する牽引力特性の測定を行い、理論との比較を行った。ベルト剛性を変更する手段として、ベルトに用いているシリコンゴムシートのゴム硬度(デュロメータA)を変更して測定を行った。また測定は、機体をフォースゲージに接続して行うため、測定中はロボットの移動が拘束された状態である。測定結果を図8に示す。管内径が  $\phi 40\text{mm}$ 、 $\phi 36\text{mm}$  のときはゴム硬度が高くなるにつれ、牽引力が増加している。このとき、クローラベルトの駆動力がベルトと管内壁との摩擦力を上回り、ベルトが管内壁にたいして摺動しており、これは(8)式(ベルトが管内に対して摺動)および(9)式(ベルト剛性増→牽引力増)と一致する。また、管内径が  $\phi 32\text{mm}$ 、 $\phi 28\text{mm}$  のときは牽引力にピークが見られ、ピーク後のベルト硬度では、ベルトの駆動が停止した。これはベルトと管内壁との摩擦力がクローラベルトの駆動力を上回ったからと考えられ、これは(10)式(ベルトは摺動しない)および(11)式(ベルト剛性増→牽引力減)と一致する。以上より、ベルト剛性と牽引力の定性的関係が理論と実験により明らかとなった。

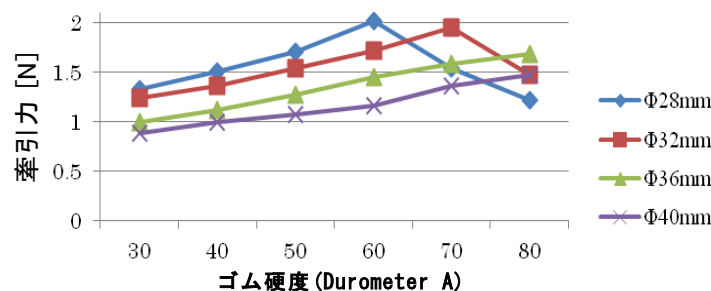


図8 実験結果に基づくベルト剛性と牽引力の関係

## 2.5 走行実験

前節の実験で得られた牽引力特性を基にベルト剛性を決定し、管内走行実験を行った。配管は水平に設置した一様管、管内に段差を設けた異径管、機体の管内保持が必要となる垂直に設置した一様管、およびエルボ管（L字管）のそれぞれの管内における走行実験を行った。一様管には水道管やガス管で用いられる配管の最小管内径であるパイプの呼び25Aを想定した内径 $\phi 28\text{mm}$ の亚克力パイプを用いた。異径管の主管には内径 $\phi 40\text{mm}$ 、支管には内径 $\phi 28\text{mm}$ の亚克力パイプを使用した。図9に各管内走行の様子を示す。まず一様管内の走行では、提案した駆動機構によりクローラベルトが駆動し、すべてのベルト歯が管内壁に接地しており、滑りを伴うことなく走行を行っていることを確認した。また、垂直管内の走行では湾曲クローラ構造により、弾性変形したクローラベルトの弾性力を利用して機体を管内保持し、ロボットが管内の上昇を行えていることを確認した。異径管内では主管から段差を乗り越え支管へ進入する際に、クローラベルトが管内径に対し柔軟に弾性変形することで、異径管内の段差乗り越えを行えていることを確認した。さらにエルボ管においては、ベルトが曲管に沿って変形しながら、走行速度が低下することなく走行する様子を確認できた。以上より、本研究の目標である $\phi 28\text{mm}$ の管内を走行可能な移動機構の実現に成功できたといえる。2017年度は、本機構をもとに、T字管などにおいて任意の方向に走行可能なステアリング機構を開発する予定である。

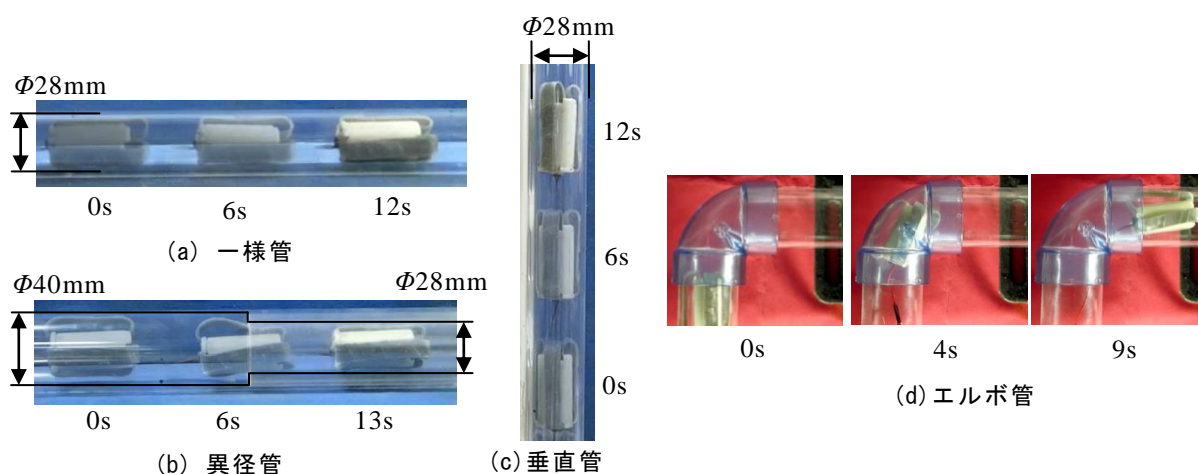


図9 管内走行実験

## 3. 研究発表

- (1) Fumika Fukunaga and Jun-ya Nagase, “Cylindrical elastic crawler mechanism for pipe inspection inspired by amoeba locomotion”, 2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob), pp.424-429, 2016.  
(Finalist Best Conference Paper Award 受賞)
- (2) Jun-ya Nagase and Fumika Fukunaga, “Development of a novel crawler mechanism for pipe inspection”, 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2016, pp. 5873- 5878, 2016.
- (3) Jun-ya Nagase and Fumika Fukunaga, “Development of cylindrical elastic crawler for 25A pipe inspection”, 2016 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS 2016), pp.1-3, 2016.
- (4) 永瀬純也, 重本佳孝, ”円筒状湾曲型弾性クローラの研究—ベルト剛性と牽引力の関係—”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 2A1-06b2, 2016.
- (5) 古木辰也, 廣垣俊樹, 青山栄一, 小川 圭二, “5 軸制御マシニングセンタを用いた非球面型の磁気研磨法の開発”, 砥粒加工学会学術講演会 ABTEC2016 講演論文集 pp.291-292, 2016
- (6) Keiji Ogawa, Heisaburo Nakagawa, Takumi Imada and Hirotaka Tanabe, “Laser Irradiation Method for High-efficiency Pulsed Laser Milling Integrated Die/Mold Machining: Effects of Laser-tracking Irradiation on Laser Milling Accuracy”, Proceedings of AMPT2016,

- pp.1-4, 2016.
- (7) 今田琢巳, 小川圭二, 中川平三郎, 木野晴喜, 児島ひとみ, ” 極小径エンドミル加工における切削現象について-仕上げ加工における左ねじれ工具の効果-”, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文, pp.1003-1004, 2016.
  - (8) T. Sakon, S. Nitabaru, T. Higasa, Y. Hara, K. Nakagawa, “Magnetic Actuators in order to study Faraday Force”, Physics Education, IAPT, Vol. 32 No. 3, pp. 8-1-8-8, 2016.
  - (9) T. Sakon, T. Kitaoka, K. Tanaka, K. Nakagawa, H. Nojiri, Y. Adachi, T. Kanomata, “Magnetocaloric and magnetic properties of meta-magnetic Heusler alloy Ni<sub>41</sub>Co<sub>9</sub>Mn<sub>31.5</sub>Ga<sub>18.5</sub>”, Progress in Metallic alloys, InTech, pp.265-287, 2016.

#### 4. 本研究課題のキーワード

- (1) 管内走行      (2) 移動機構      (3) クローラ      (4) ウォーム
- (5) 牽引力      (6) アメーバ      (7) 1インチ管      (8) 弾性力