

# 管内走行を目的とした円筒状湾曲型弾性クローラの開発

永瀬純也<sup>\*1</sup>, 重本佳孝<sup>\*1</sup>

## Development of Cylindrical Elastic Tracked-crawler for pipe inspection

Jun-ya Nagase<sup>\*1</sup>, Yoshitaka Shigemoto<sup>\*1</sup>

There are many pipes such as a water pipe and a gas pipe in a chemical plant, a factory and house. It is possible to prevent accident ensure safety by these investigating. However, many pipes are very narrow and it is difficult for people to inspect directly. In this study, a cylindrical crawler robot based on Amoeba locomotion, which has a simple mechanism and does not need large space to move, is proposed. When moving the inside of a pipe, this crawler robot uses the elastic force of a crawler belt to hold the robot in pipe. Additionally the robot uses elastic deformation of a crawler belt to pass of a step between pipes with different diameters. Therefore, the robot can move the pipes of different diameters and the perpendicular pipe by using only on actuator. This paper reports the structure, drive mechanism, design, and prototype evaluation.

**Key Words:** narrow path, pipe inspection, worm-rack mechanism, cylindrical crawler

### 1. 諸 言

化学プラントラインの施設や工場などの構造物、家庭では水道管やガス管などいたるところに配管設備がある。これらの配管設備は、配管内の調査・点検を行うことで事故を未然に防ぎ、安全を確保しなければならない。しかし、配管内は非常に狭く、また人にとって有害な化学物質が存在している場合があり、人による直接的な調査・点検は困難である。そこで、配管内を自走するロボットは、人の手に代わって管内の調査・点検を行うことができることから期待が高まっており、研究や開発が行われている。

これまでに自走式の管内走行用ロボットはその移動方式によって、車輪型ロボット、ヘビ型ロボット、蠕動運動型ロボット、クローラ型ロボットなどさまざまなものが開発されている。これらのロボットは、水平管内だけでなく、垂直管内や異径管内などの配管環境においても走行可能にするため、機体の構造や駆動機構が複雑化していた。これらの複雑化によりいくつかの問題点が挙げられる。例えば、これまでに開発されている車輪型のロボット[1]～[4]は、リンク機構により車輪を制御しT字管やL字管内を走行可能とする高い移動性能を有している。しかしながら、多数のリンク機構や複数のアクチュエータとギヤを用いて車輪を駆動させる複雑な構造であるため、小型化が困難である。自由度の高い関節を調整することによって管内段差や方向転換が容易な蛇型ロボット[5][6]も、推進には機体をくねらせる構造を用いて蛇行運動をしなければならないため、管

内走行には機体と管内にある程度広いスペースが必要となり、小径の管内の走行は困難である。一方で、管径の比較的小さな管内の走行が容易なロボットとして、垂直管内や管内径が変わる異径管内でも走行可能である蠕動運動型のロボット[7]～[9]が提案されている。これらはロボットの体軸方向に後退波を伝播させる駆動機構により前進することができる。しかしながら、ロボットの推進に最適な後退波の伝播周期は管内径に依存してしまうため、異径管走行においては管内径の変化により移動速度が低下してしまう。また、実際の配管内は、整地された環境だけでなく管内壁が腐食した配管が多く存在し、自走式の管内走行用ロボットは腐食によって凹凸のある不整地上を走行しなければならない。このような実際の環境を想定して、従来の研究では、不整地でも走破性の高いクローラ型の管内走行ロボットの開発[10]～[12]がなされてきた。クローラ型ロボット[10]は、管内壁に接地面積の比較的大きなクローラベルトを接地させることで、腐食による凹凸面でも移動することが可能であり、実際の管内走行に適している。しかしながら、これらのロボットも車輪型ロボットと同様で、クローラ機構は複数のギヤとアクチュエータからなり、加えてクローラベルトを管内壁に近づけ接地させるスライド機構[11]や関節制御により管内壁に機体を押しつけロボットの管内保持を行う機構[12]により機体の構造が複雑化し、小型化や小径の管内走行が困難であった。

そこで本研究では、管内径の小さな配管環境でかつ垂直管内や異径管内においても容易に走行可能な、管内走行用クローラ型ロボットの実現を目的として、複数のクローラベルトを単一のウォームを介して単一のモータで駆動させる、シンプルでコンパクトな円筒状クローラ型ロボットを開発した。このクローラ型ロボットの推進機構はアメーバの推進原理に基づいており、

原稿受付 2014年7月29日

\*1 龍谷大学

\*1 Ryukoku University

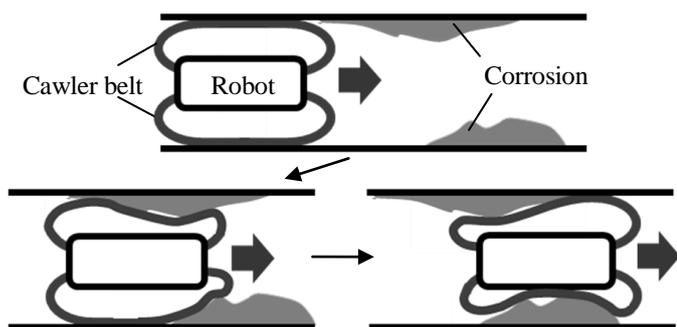


Fig. 1 Run over rust and corrosion in the pipe

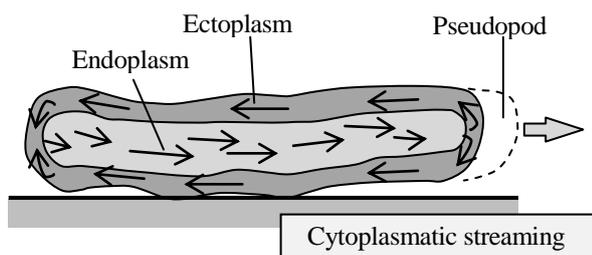


Fig. 2 Structure and locomotion mechanism of amoeba

円筒状のフレームの軸対称に配置された複数のクローラベルトを、単一のウォームを介して単一のモータのみで駆動させ、軸方向に推進力を得ることにより直進することができる。従って、複雑なクローラ機構を有していた従来のクローラ型ロボット [13]~[19] に対して本クローラ型ロボットは、非常にシンプルな構造である。さらに、本クローラ型ロボットのクローラベルトは、フレームに対して湾曲させた構造であり、その弾性力をロボットの管内保持力に、また、弾性変形を異径管内の段差乗り越えに利用可能であるため、管内保持のアクチュエータや機体の大きさを調節するアクチュエータを必要としない。以上のことより、機体の大幅な小型化が可能であると考えられる。また、Fig. 1 に示すようにクローラベルトを柔軟に管内壁へ接地させることで、ロボットは腐食した凹凸の激しい管内壁に対しても走行可能であると考えられる。本研究で提案したシンプルな構造により、従来型 [10]~[12] よりも小型化され、従来型での走行可能な最小の管内径はパイプの呼び 100A 相当(内径  $\Phi 105.3\text{mm}$ ) までであったのに対し、本クローラ型ロボットはパイプの呼び 50A(内径  $\Phi 52.9\text{mm}$ ) での走行が可能となる。

本報では、まず 2 章でアメーバの推進原理に基づいた自走式の管内走行用クローラ型ロボットの基本構造及び駆動原理について説明を行う。3 章では、機体の設計理論と、垂直管内におけるクローラベルトの弾性力とロボットの管内保持力との関係を述べる。4 章では、管内走行用クローラ型ロボットの試作と、試作した管内走行用クローラ型ロボットを水平管内と垂直管内および異径管内の走行実験と評価について述べ、5 章でまとめる。

## 2. 基本構造

Fig. 2 にアメーバの推進原理を示す。アメーバは基本的に、内質(Endoplasm)と外質(Ectoplasm)、および仮足(Pseudopod)から

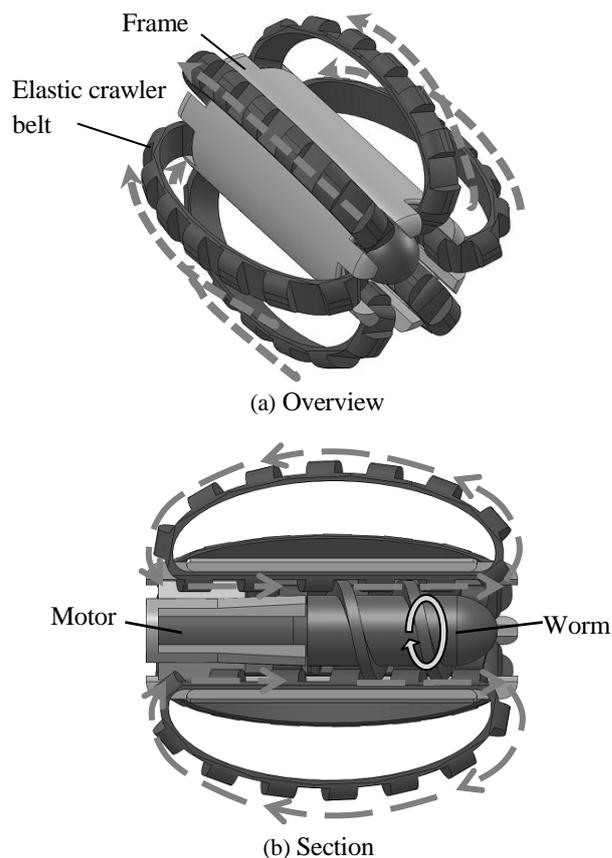


Fig. 3 Structure of worm-rack driven cylindrical crawler unit

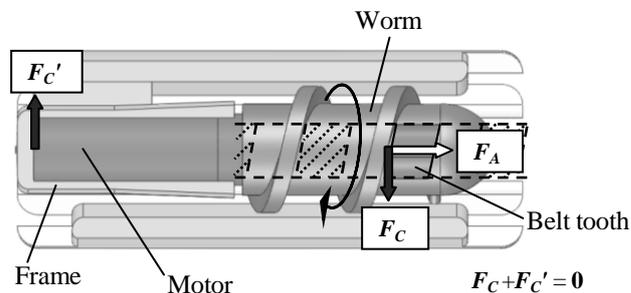


Fig. 4 Relationship circumferential force

成っている。移動原理は、粘性の高い外質の内側を、流動性の高い内質が前方へ連続的に流れて仮足を前に押し出すことによってアメーバ自身が推進するといわれている。

この推進原理を基に本研究で考案したクローラ機構を Fig. 3 に示す。このクローラ機構は、ゴム製のクローラベルト 6 本、ギヤモータ 1 つ、ウォーム 1 つおよび円筒状のフレームで構成されている。クローラベルトは、ベルトの外側にウォーム歯と噛み合うための歯が形成されており、フレームの軸周りに対して等間隔に 6 本配置されている。また、それぞれはフレームを囲うように湾曲させて 1 本の輪状にしてある。また、ギヤモータはフレームの内部に、その同軸上に固定されている。ウォームはモータ軸に取り付けられ、クローラベルトの歯とそれぞれ噛み合うように配置されている。

駆動原理は、まず、フレームに固定されたギヤモータを駆動させると、モータ軸に取り付けられているウォームが回転を始

め、ウォーム歯とクローラベルトの歯が噛み合う。ここで Fig. 4 に示すように、ウォーム歯は螺旋状に形成されているため、ウォーム歯とクローラベルトの歯の噛み合い面には、軸方向の力成分  $F_A$  と周方向の力成分  $F_C$  がそれぞれ発生する。しかし、モータがフレームに固定されていることにより、モータとフレーム間にも  $F_C$  と同じ大きさの周方向の力成分  $F_C'$  がそれとは反対向きに作用するため、それらの力が互いに打ち消し合い、ロボット本体に作用する周方向の合力は 0 になる。その結果、軸方向に働く力成分  $F_A$  だけがベルトを駆動するための力として作用することにより、ウォームと噛み合ったすべてのクローラベルトが軸方向に移動し、ロボットは直進する。また、モータを逆回転させることで、同じ原理で後退をすることも可能である。以上の駆動原理より本クローラ型ロボットは、単一のアクチュエータの源動力から単一のウォームを介し、円筒状のフレームに複数配置したクローラベルトを駆動させる、非常にシンプルな構造のため大幅な小型化が可能である。

さらに、クローラベルトはフレームに対して撓ませて巻かれた構造となっているため、垂直管内の走行時においては、クローラベルトの弾性変形により発生する弾性力によって、クローラ自身を管の内壁に保持しながら管内上昇を行うことが可能となる。これまでに開発されている管内走行用ロボット [20][21] の管内上昇では、推進用のアクチュエータの他に、ロボットを管内に押しつけてロボットの管内保持を行うアクチュエータと機構を要していたが、本クローラ型ロボットでは管内保持のアクチュエータを必要としない。また、異径管内の走行の際には、湾曲したクローラベルトが異径管に対し柔軟に弾性変形することにより、管内段差を容易に走行することが可能である。このことにより、本クローラ型ロボットではアクチュエータを使用した段差を乗り越える機構は必要なく、またタイムロスに伴うことなく異径管に進入することができる。

従って本クローラ型ロボットは、使用するアクチュエータは単一のモータのみでかつ直進運動によって、一様な水平管内だけでなく、実際の管内検査で想定される垂直管内や異径管内を走行し、配管内の調査を行うことが可能な機構を有していると考えられる。

本クローラ型ロボットの特徴をまとめると、以下のようになる。

- (i) 本クローラ機構はウォームラック機構で駆動するシンプルな構造であるため、大幅な小型化が可能であり、狭い空間内、特に管径の小さな配管内における走行に適している。
- (ii) クローラベルトを軸対称に複数配置しているため、ロボットの上下および左右が同時に壁面に接触しても走行可能である。
- (iii) 垂直管内では、クローラベルトの弾性力を用いることで管内上昇動作が可能となる。
- (iv) さらに、異径管内においてはクローラベルトが管径に応じて柔軟に弾性変形することで、管内段差を容易に走破できる。

### 3. 設計

本章では、提案するクローラ型ロボットの設計理論について説明する。

$R$  : standard pipe inside radius  
 $R'$  : radius of the frame  
 $r$  : tooth tip radius of the worm  
 $r'$  : tooth bottom radius of worm  
 $b$  : width of belt  
 $b'$  : width of belt flute  
 $h$  : height of tooth  
 $H_C$  : clearance (between the belt and the belt flute)  
 $H_C'$  : clearance (between the tooth of belt and the tooth bottom of worm)  
 $t$  : thickness of a belt  
 $a$  : play between a belt and a frame  
 $c$  : thickness of the minimum frame

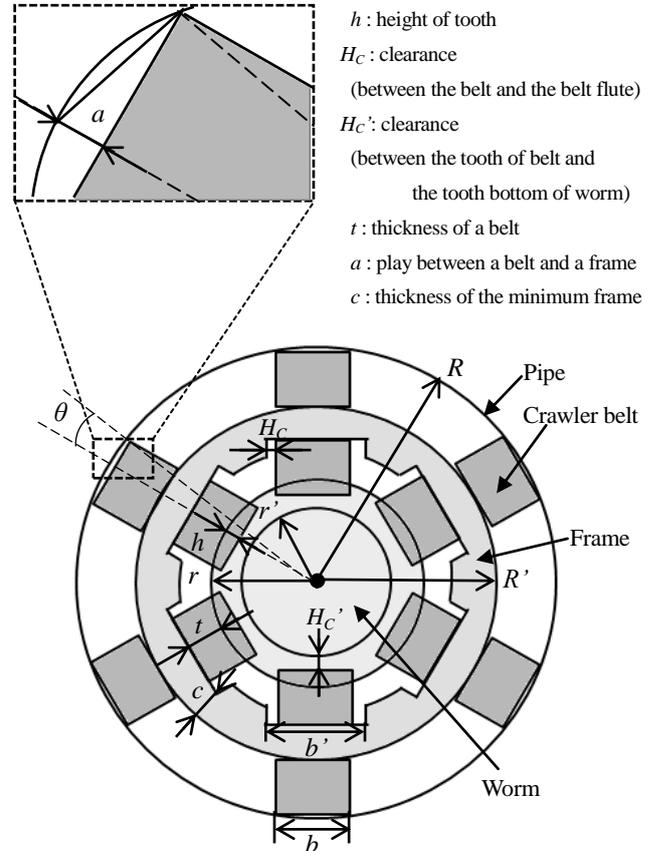


Fig. 5 Schematic diagram of the proposed robot in an axial view

#### 3.1 機体の設計

はじめに、機体の寸法の設計について述べる。機体の寸法は、ロボットが走行する管内の径を基準として各寸法を幾何学的に設計する。Fig. 5 はロボットを、走行可能な最小内径の管へ進入させたものを、軸方向から見た断面図である。Fig. 5 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  $R'$ 、ベルト幅  $b$ 、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。

Fig. 5 より、フレーム側面半径  $R'$  は、ロボットを走行させる管内の半径  $R$ 、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。

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

ここで、ベルト歯先と管内壁との隙間  $a$  は、ロボットを走行させる管内の半径  $R$  と幾何学的位置関係より次式で表される。

$$a = \frac{R \sin \theta}{\tan\left(\frac{\pi - \theta}{2}\right)} \quad (2)$$

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 2 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ぬ。

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

また、ベルト幅  $b$  はロボットを走行させる管内の半径  $R$  から次式で求められる。

$$b = 2R \sin \theta \quad (4)$$

ここでベルト溝幅  $b'$  は、ベルト幅  $b$  より

$$b' = b + 2H_c \quad (5)$$

さらに、ウォーム歯先半径  $r$  はベルト溝幅  $b'$  から

$$r = \sqrt{(R' - c)^2 - \left(\frac{b'}{2}\right)^2} - t \quad (6)$$

で表され、ウォーム歯底半径  $r'$  はウォーム歯先半径  $r$  を用いて

$$r' = r - \left(h + H_c'\right) \quad (7)$$

から求められる。

ここで、ベルト歯たけ  $h$ 、ベルト厚さ  $t$ 、ベルト片側面とベルト溝側面とのクリアランス  $H_c$ 、ベルト歯先面とウォーム歯底面とのクリアランス  $H_c'$ 、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。今回はそれらの寸法を試行錯誤的に求めた。まず、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による駆動効率の低下を考慮してベルト歯たけ  $h$  を 3mm とした。次に、湾曲したクローラベルトがロボットの管内保持に必要な弾性力を十分に発生し、さらに管内段差を乗り越える際には、管径に応じてクローラベルトが柔軟に弾性変形するように、ベルト厚さ  $t$  は 2mm とした。また、ベルトの側面とベルト溝の側面の接触し摩擦によるエネルギーロスを抑えるため、ベルトの片側面とベルト溝の側面のクリアランス  $H_c$  は 0.75mm 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  $H_c'$  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、十分にフレーム強度を確保できるフレーム最小厚さ  $c$  を 2mm 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 50A 相当(内径  $\Phi 52.9\text{mm}$ )を想定して、ロボットを走行させる管内の内径  $R$  を 25mm とした。従って、 $R=25\text{mm}$  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 18mm、ベルト幅  $b$  を 10mm、ベルト溝幅  $b'$  を 11.5mm、ウォーム歯先半径  $r$  を 11.8mm、ウォーム歯底半径  $r'$  を 8.3mm とした。

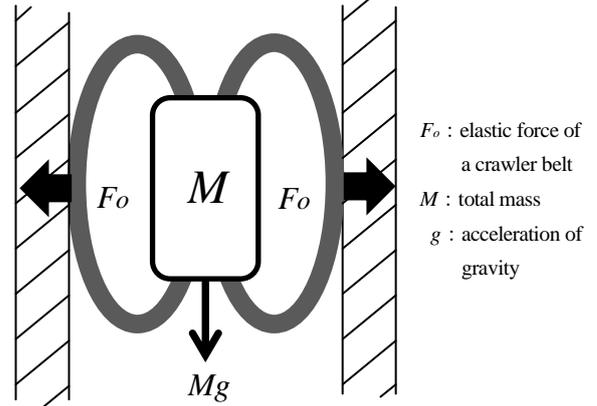


Fig. 6 Schematic diagram of crawler unit for climbing

### 3.2 ロボットと管内保持力の関係

次に、本クローラ型ロボットの保持力について述べる。垂直管内において本クローラ型ロボットは、湾曲したクローラベルトの弾性力を、管内保持力として利用することにより、管内上昇を行うことができる。Fig. 6にロボットの保持力の図を示す。図中の  $M[\text{kg}]$  はロボットの質量、 $g[\text{m/s}^2]$  は重力加速度である。ここで、 $\mu$  をクローラベルトと管の内壁との静止摩擦係数とすると、クローラユニットが自身を保持するために必要なクローラベルトの弾性力  $F$  は以下の式で表すことができる。

$$F \geq \frac{Mg}{\mu} \quad (8)$$

クローラベルトと管内壁との静止摩擦係数は、実験的に求め  $\mu=2.0$  とした。管内の走行時において各クローラベルトがそれぞれ均等に変形すると仮定すると、クローラベルト1本につき必要なベルトの弾性力  $F_0$  は以下の式で表される。

$$F_0 \geq \frac{F}{n} \quad (9)$$

ここで  $n$  は、クローラベルトの本数である。以上の条件より、ロボットが垂直管内の走行時において、クローラベルトの内壁に掛かる弾性力が上式を満たすように、ベルトの硬度および長さを実験的に決定した。

### 3.3 ロボットの移動速度

本クローラ型ロボットの移動速度は、クローラベルトが管内壁に接地して推進力を得ることから、クローラベルトの移動速度より算出できる。クローラベルトの移動速度  $V[\text{mm/s}]$  は、モータの回転数  $N[\text{s}^{-1}]$ 、ギヤの減速比  $i$ 、およびウォーム歯のピッチ  $p[\text{mm}]$  より次式で求められる。

$$V = \frac{p \cdot N}{i} \quad (10)$$

ここで、ギヤの減速比  $i$  は駆動に必要なトルクから 275、ウォームの歯のピッチ  $p$  はベルト歯との噛み合いを考慮して 16.3mm と実験的に求め、入力するモータの回転数  $N$  からロボットの理論上の移動速度を算出した。

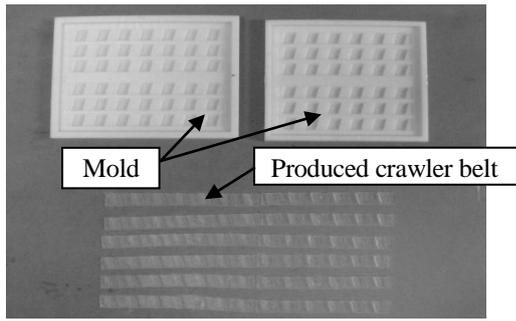


Fig. 7 Molds and produced crawler belt

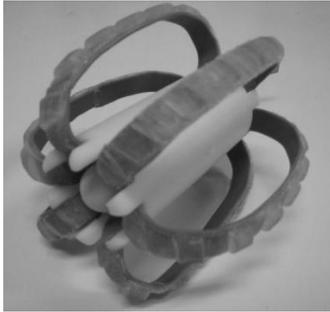


Fig. 8 Prototyped crawler unit

Table 1 Specifications of proposed crawler unit

Length		92mm
The pipe that can be run	Horizontal pipe	50A(Φ52.9mm) or more
	Perpendicular pipe	50A(Φ52.9mm) ~65A(Φ67.9mm)
Weight		0.12kg
Motor		6W GP 13A SL: Maxon motor
Pitch of worm gear		16.3mm
Lead angle of worm gear		26deg
Crawler belt		
	Number	6
	Material	Silicon rubber
	Width	10mm
	Height of belt part	2mm
	Height of tooth part	3mm
	Hardness of belt part	80

## 4. 試作評価

### 4.1 試作

設計理論に基づいて、クローラ型ロボットの試作を行った。はじめに、フレームとウォームの製作について述べる。まず、3DCAD によって作成した形状データを、3D プリンタ

(Dimension Elite, Stratasys 製) に転送し造形を行った。なお、材質は ABS 樹脂である。次に、クローラベルトの製造方法について述べる。まず、液状ゴム (KE1600, 信越シリコン製) を注入した型に蓋をかぶせ、そのまま 70°C の恒温室に 60 分間放置させた。その後、固まって成形されたゴムを取り出し、フレームを囲うように 1 本の輪状にして、片端に液状ゴムを塗布した後、両片端を密着させた。その状態で再び恒温室に 60 分間放置して接着させた。Fig. 7 に使用した型、および製作したクローラベルトを示す。また、造形したウォームを、選定したギヤモータ (GP13A SL, Maxon motor 製) の軸に取り付け、フレーム内に配置した。

Fig. 8 に試作したロボットの写真を、Table 1 に仕様を示す。試作機は、全長は 92mm、質量は 0.12kg である。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 Φ90mm、外圧を掛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 Φ46mm である。

### 4.2 実験

試作したクローラ型ロボットの管内走行の実験を行った。はじめに、水平管内および垂直管内走行の実験を行った。水平管および垂直管には、呼び 65A 相当(内径 Φ68mm)の亚克力パイプを使用した。また、クローラ型ロボットの走行特性を評価するために、次式に示す速度効率  $\eta$  [%] を定義する。

$$\eta = \frac{V'}{V} \times 100 \quad (11)$$

ここで  $V$  は (10) 式で求められるクローラベルトの移動速度の理論値、 $V'$  は走行中の動画からモーションキャプチャにより求めたロボットの実際の移動速度の実験値である。Fig. 9, Fig. 10 にロボットが水平管内と垂直管内をそれぞれ走行している様子を示す。ロボットの管内の移動速度はそれぞれ同一の約 30mm/s となるように走行させた。まず、試作したロボットは水平管内において、すべてのベルト歯が内壁に接地して走行していることを確認した。また、垂直管内の走行では、弾性変形したクローラベルトの弾性力によって機体を管内保持し、ロボットが管内上昇を行えていることを確認した。Fig. 11 に水平管内及び垂直管内走行の実験で得られた結果を示す。水平管内走行の実験では 98.8% の速度効率が得られた。100% とならなかった要因としては、設計の際に、ウォーム歯とベルト歯の歯面同士の摩擦を小さくし噛み合いを滑らかにするため、ウォーム歯ピッチの寸法の 16.3mm に対し、ベルト歯ピッチの寸法を 15.0mm とし、1.3mm のバックラッシュを設けている。このバックラッシュが、ロボットの移動速度の理論値であるクローラベルトの移動速度  $V$  とロボットの実際の移動速度  $V'$  に誤差を生じさせたと考えられる。また、垂直管内走行においては 91.3% の速度効率が得られた。管内上昇の際に、機体の軸の若干のブレとわずかなクローラベルトの滑りを確認したことから、垂直管内の走行において 8.7% の滑りが生じた要因を以下のように考察する。駆動している 1 本のクローラベルトにおいて、ベルト歯がバックラッシュを経てウォーム歯と噛み合うまでの間は、モータの駆動力がクローラベルトに伝達しないため、瞬間的に 6 本のうちいずれか

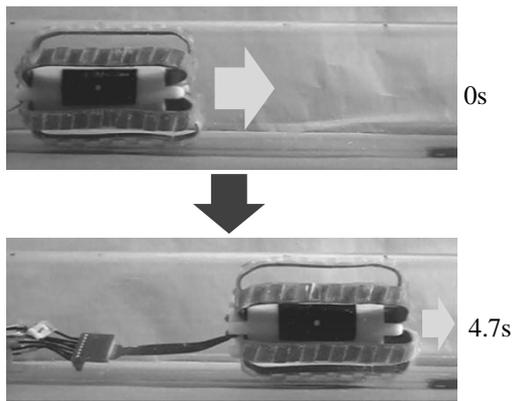


Fig. 9 The run in a horizontal pipe

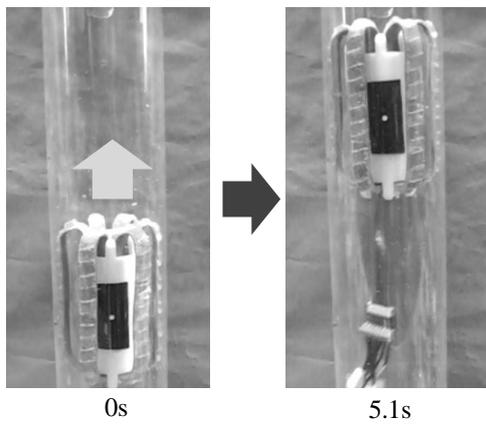


Fig. 10 The run in a perpendicular pipe

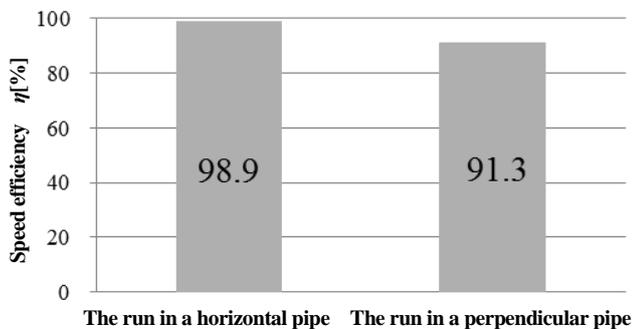


Fig. 11 Comparison of speed efficiency

の1本のクローラベルトが駆動しない状態となる。また、ウォーム歯と6本それぞれのベルト歯との幾何学的位置関係により、クローラベルトが駆動しない状態が発生するタイミングは6本それぞれで異なり、ウォームの回転に伴って順々に生じる。このことにより、6本のクローラベルトが駆動をしている際にそのうちの1本がわずかに駆動しないことで、推進方向とは逆方向の微小な負荷がその駆動しないクローラベルトに生じる。そのため、そのクローラベルトの方向へ機体が傾いてしまう。この機体の傾きが順々に生じることでロボットの中心軸は、配管の中心軸に対し若干のブレを生じながら走行を行ってしまうため、管内壁面とベルト歯の接地歯数が一定とならないことから、一定の摩擦係数を得ることができない。従って、垂直管内

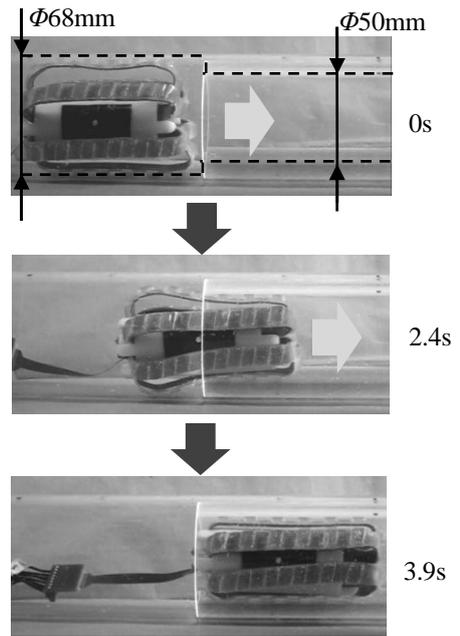


Fig. 12 The run in a level difference pipe

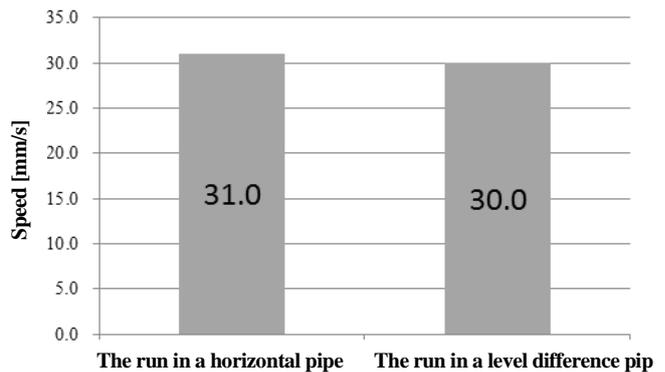


Fig. 13 Speed comparison in a horizontal pipe and a level difference pipe

におけるロボットの管内保持条件の(8)式より、鉛直下方向に働く  $Mg$  の力に対し、保持力を保てなくなったベルトに滑りが生じたことが、速度効率を低下させた要因として挙げられる。

次に、異径管内走行の実験を行った。実際の配管内は、継ぎ手部、および内径の大きな主管と内径の小さな支管の境界部などに管内段差が存在する。そこで、本クローラ型ロボットは、そのような異径管内においても管内段差の走行が可能かどうかを実験により検証した。Fig. 12 にロボットが水平の異径管内を走行する様子を示す。異径管の主管には呼び 65A 相当(内径  $\Phi 68\text{mm}$ )の亚克力パイプを、支管には呼び 50A 相当(内径  $\Phi 50\text{mm}$ )の亚克力パイプを使用した。Fig. 12 から本クローラ型ロボットは異径管内の走行において、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、ロボットが段差乗り越え時に、移動速度を維持して走行しているかを評価するために、ロボットを、主管部のみの一様な水平管内、および主管と支管から成る水平

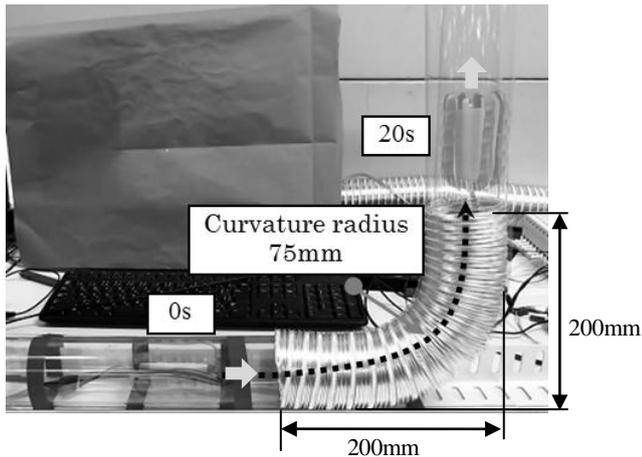


Fig. 14 Experiment of propelling in a curving pipe

異径管内においてそれぞれ走行させ、両者の平均速度の比較を行った。実験では、水平管については内径  $\Phi 68\text{mm}$  のアクリルパイプを、異径管についても主管部は内径  $\Phi 68\text{mm}$  そして支管部には  $\Phi 50\text{mm}$  のアクリルパイプを使用した。どちらも長さ  $200\text{mm}$  の管内を走行させたときの平均速度を測定した。また、異径管内の段差は走行距離の半分である  $100\text{mm}$  地点に設けた。ロボットの移動速度は、どちらの管内も同一の約  $30\text{mm/s}$  として走行させた。Fig. 13 にその平均速度の結果を示す。主管部のみの一様な水平管内を走行させた時の平均速度は  $31.0\text{mm/s}$  だったのに対し、異径管内を走行させた時の平均速度は  $30.0\text{mm/s}$  であったため、今回の実験において、本クローラロボットは段差部においても速度が低下することなく異径管内をスムーズに走行することが可能であることが確認できた。

Fig. 14 は、水平管内に侵入し曲管内を走行後、管内上昇を行っている様子を示している。本クローラ型ロボットは、曲管内においてもクローラベルトが経路に沿って柔軟に変形することによって走行可能なことを示すことができた。また、曲管内において、外側の管内壁とそれより曲率半径の小さい内側の管内壁に接地するクローラベルトでは走行距離が異なってしまう。このことにより、曲率半径の小さい内側の管内壁に接地しているクローラベルトに滑りが生じてしまいロボットは走行が困難となる。しかし、Fig. 14 に示す曲管路の中心を通る曲率半径  $75\text{mm}$  の管内壁に接地する 2 本のクローラベルトには走行距離に差はないため、このクローラベルトの駆動力によってロボットは管内で停止することなく走行したと考えられる。今後、曲管内におけるロボットの挙動について、実験による定量的な評価を行っていく予定である。

## 5. 結 言

本論文では、管内径の小さな配管でかつ垂直管内や異径管内を容易に走行可能なロボットの実現を目的として、アメーバの推進原理にヒントを得た円筒状の柔軟弾性クローラ機構を提案した。そして、提案したクローラ型ロボットの基本構成と駆動原理、設計理論、試作評価について述べた。以下に結論をまとめる。

- (i) 本クローラ型ロボットは、円筒状のフレームに軸対称に配置した複数のクローラベルトを単一のウォームと単一のギヤモータのみで駆動してロボットを推進させる、シンプルかつコンパクトな機構である。
- (ii) またクローラベルトは、フレームに対して湾曲させた構造であるため、その弾性力をロボットの管内保持力に、さらに、その弾性変形を異径管内の段差乗り越えに利用可能である。
- (iii) 管内走行の実験において、水平管内走行では全てのベルトが管内壁に接地して走行していることを確認した。また、ベルトの弾性力によってクローラ自身を保持しながら管内上昇が可能であることを実験により示した。
- (iv) さらに、異径管内走行では、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、異径管内の段差に対してタイムロスを伴うことなく走行可能であった。同様に曲管においても、管路に沿ってクローラベルトが柔軟に弾性変形することで走行可能であることを確認した。

開発したクローラ型ロボットは、現時点の機構ではウォームとベルトの噛み合い面に異物が噛み込んでしまい、ベルト歯とウォーム歯が摩擦してしまう恐れがある。そこで異物の噛み込み対策としては、ブラシを回転軸に取り付け、そのブラシが回転することにより異物をベルトから排除するような機能が必要であると思われる。また、水で満たされた水道管では、クローラベルトの摩擦係数の低下により機体の管内保持力が低下してしまう可能性が考えられる。今後は、ロボットの防水構造を検討し施した後、水道管内での走行特性の評価についても行う予定である。

## 謝辞

本研究の一部は、科学研究費若手研究(B)(課題番号 26750172)の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] 藤原茂, 金原了二, 岡田徳次, 実森毅: “文節主要配管内検査点検ロボットの開発, 日本ロボット学会誌,” vol. 12, no. 2, pp. 318-327, 1994.
- [2] 川口圭史, 吉田乙雄, 巖敬三, 菊田隆: “鉄管内走行ロボットのセンサと円周方向走行,” 日本ロボット学会誌, vol. 15, no. 8, pp. 1164-1171, 1997.
- [3] 福田敏男, 細貝英実: “管内走行検査ロボットの研究,” 日本機械学会論文集(C編), 52巻, 477号, pp. 1584-1588, 1986.
- [4] 宮川豊美, 岩附信行: “遊星歯車式管径追従車輪走行機構による小口径管内移動ロボットの段差走行,” 精密工学会誌, vol. 73, no. 7, pp. 828-833, 2007.
- [5] A. Kuwada, K. Tsujino, K. Suzumori, and T. Kanda: “Intelligent Actuators Realizing Snake-like Robot for Pipe Inspection,” Proc. IEEE Int. Symposium on Micro-nano Mechatronics and HumanScience, pp. 1-6, 2006.
- [6] 篠原良和, 後藤幸也, 萩野雅人, 菊池将則, 大野学, 加藤重雄: “ヘビ型管内走行ロボットのブレイキ特性実験,” 日本機械学会関東支部第16期総会講演会講演論文集, pp. 213-214.

- [7] S. Horii and T. Nakamura: "An In-Pipe Mobile Robot for Use as an Industrial Endoscope Based on an Earthworm's Peristaltic Crawling," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 24, no. 6, pp.1054-1062, 2012.
- [8] 則次俊郎, 久保田充彦: "空気圧ソフトアクチュエータを用いた管内移動ロボットの開発," *日本ロボット学会誌*, vol. 18, no. 6, pp. 831-838, 2000.
- [9] 福田敏男, 細貝英実, 上村昌宏: "柔軟構造管内走行検査ロボット用水素吸蔵合金駆動ゴム製ガス圧アクチュエータとその応用に関する研究," *日本機械学会論文集(C編)*, vol. 55, no. 514, pp. 1377-1384, 1989.
- [10] 株式会社日立製作所, 日立GEニュークリア・エナジー株式会社: "福島第一原子力発電所での燃料取り出しに向けた調査用の水中走行遊泳型ロボット・形状変化型ロボットを開発," <<http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2014/03/0310e.html>> (2014/4/10アクセス)
- [11] M. Muramatu, Y. Suga and K. Mori: "Autonomous Mobile Robot System for Monitoring and Control of Penetration during Fixed Pipes Welding," *JSME International Journal, Series A*, vol. 46, no. 3, pp. 391-397, 2003.
- [12] J. Borenstein, M. Hansen and A. Borrell: "The OmniTread OT-4 Serpentine Robot - Design and Performance," *Journal of Field Robotics*, vol. 24, no. 7, pp. 601-621, 2007.
- [13] W. Lee, S. Kang, M. Kim and M. Park: ROBHAZ-DT3: "teleoperated mobile platform with passively adaptive double-track for hazardous environment applications," *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 33 - 38., 2004.
- [14] A. Kamimura and H. Kurokawa: "High-step climbing by a crawler robot DIR-2 - realization of automatic climbing motion," *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 618-624, 2007.
- [15] G. Lan, S. Ma, K. Inoue and Y. Hamamatsu: "Development of a novel crawler mechanism with polymorphic locomotion," *Advanced Robotics*, 21, 3-4, 421-440, 2007.
- [16] K. Nagatani, D. Endo and K. Yoshida: "Improvement of the Odometry Accuracy of a Crawler Vehicle with Consideration of Slippage," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2752-2757, 2007.
- [17] S. Yokota, Y. Ohyama, H. Hashimoto, J. She, K. Kawabata and H. Kobayashi: "3D measurement sensor system for rough terrain mobile robots," *The international journal of sensing for industry*, vol. 27, no. 3, pp.224-232, 2007.
- [18] I. Fukumoto and A. Sato: "Japanese Unexamined Patent Application Publication," no. 2008-213671, in Japanese.
- [19] K. Tadakuma, R. Tadakuma and K. Nagatani: "Crawler Vehicle with Circular Cross-Section Unit to Realize Sideways Motion," *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2422-2428, 2008.
- [20] 田口幹, 河原崎徳之: "ユニット型小口径配管内走行検査ロボットの開発," *日本ロボット学会誌*, Vol. 15, No.2, pp.230-235, 1997.
- [21] A. Yamaguchi, K. Takemura, S. Yokota and K. Edamura: "An In-Pipe Mobile Robot Using Electro-Conjugate Fluid," *Journal of advanced Mechanical design*, *Systems and Manufacturing, Series C*, vol. 5, no. 3, pp. 214-226, 2011.



**永瀬純也** (Jun-ya Nagase)

2006年住友重機械工業(株)入社。2010年関西学院大学理工学部契約助手。2011年岡山大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了。2012年龍谷大学理工学部機械システム工学科助教, 博士(工学)。バイオメカトロニクスの研究に従事。日本機械学会, IEEE等会員。(日本ロボット学会正会員)



**重本佳孝** (Yoshitaka Shigemoto)

1991年6月20日生。2014年龍谷大学理工学部機械システム工学科卒業, 同年4月同大学大学院理工学研究科機械システム工学専攻入学, 現在に至る。(日本ロボット学会学生会員)