

## 伸長型ソフトアクチュエータの軸方向 弾性/剛性繊維拘束による管内推進機構

石橋 卓実・赤木 徹也<sup>1)\*</sup>・篠原 隆<sup>2)</sup>・趙 菲菲<sup>1)</sup>・横田 雅司<sup>1)</sup>

岡山理科大学大学院理工学研究科

1)岡山理科大学情報理工学部情報理工学科

2)研究・社会連携機構 工作センター

(2024年10月11日受付、2024年11月12日受理)

### 1. 緒言

8年前の調査になるが、平成28年度時の厚生労働省の調査結果によると、我が国の水道管総延長約68万kmのうち、14.8%の配管が既に耐久年数を過ぎている。一方、年度内に更新された水道管の割合は0.75%であり、更新に約130年かかることになる<sup>1)</sup>。この危機的な状況は報道にも現れ近年、図1に示すような水道管の破裂事故が多く報告されている。また、漏水により町中にある道路や、道幅のほとんどが陥没するような重大な事故も生じている。水道管の埋設・交換費用の膨大さから、国会では水道の「民営化」による経費のスリム化を図るなどの政策も検討している<sup>2)</sup>。この水道管の状態は水質によって大きく異なり、耐久年数を過ぎたものの中でも緊急性のあるものや、ないものなど大きな差がある。特に民営化によるコストを考慮した水道管の交換では、緊急を要する箇所の特定は重要であり、配管の検査が急務である。こういった水道管など水分を含む環境下での検査では、従来、ファイバースコープを利用した検査が行われてきた<sup>3)</sup>。しかし分岐を含む複雑な配管内<sup>2)</sup>を思い通りに進めるには、スコープ等の押し出し作業による検査では限界があり、自走式のロボットによる検査が必要である。水道管検査ロボットに関していえば、感電やショートの問題から電動アクチュエータではなく、流体アクチュエータを用いたロボットも有効な手段の1つである。特に水道管の場合、人の生活に必要な不可欠なインフラであるため、配管内の水が抜けきるまで待つなど使用制限期間を長く設定することは難しい。そのため水分や水溜まりなどが残った管内の走行が必要であり、上図のように漏電の心配のないアクチュエータの使用が望ましい。また、錆等により断面形状が不均一な配管内の移動ではロボット自身の変形する必要があり、これらの機能を実現するため、重量や容積が増し、より移動・変形のためのエネルギーが必要となる。そのため、ロボット自身が自然と配管形状に合わせて変形する軽量で柔軟なロボットが理想的である。さらに、バイオ系の汚れのついた管内走行では洗浄コストも無視できない。そこで本研究

では、柔軟な構造により管内形状が変わっても推進でき、さらに水分を含む狭隘空間内で使用できる空気圧ソフトアクチュエータを用いた使い捨て可能なほど安価な管内推進機構の開発をめざす。



図1 錆が付着した配管内部

イメージとしては図1に示すように、錆などがこびりついたことで配管内の直径が変化した場合を想定して配管内を走破できる推進機構の開発をめざす。

ここで、実際の配管検査会社が運用しているロボットの例として図2に示す(株)シーエックスアールのMOGRERを紹介する。このロボットは複雑な管内を走行するため、蛇のような動きを実現できるものの剛体のロボットボディを曲げることで管の保持を実現するため、我々がめざす断面形状が変化するような管内の走行は難しい。また、上述のロボットは電動アクチュエータ（モータ）を推進動力として用いており、水中など水分を含む環境では使用は困難である。つまり、本研究で開発する空気圧ソフトアクチュエータを用いる管内走行機構はこの防水性や柔軟性の点で大きな利点がある。また、古家ら<sup>4)</sup>が開発した保持機構やロボットのように、1つのロボットで複数の径の管を走破できるようになれば、錆び等により径変化を生じた管など、多様な配管の走破が可能であり、より有用性が増すものと考えられる。以上のことから、本研究でめざす推進機構はこれらの異径管の1/3~1/5ほどの細径のアクチュエータを用いて走破できる推進機構である。

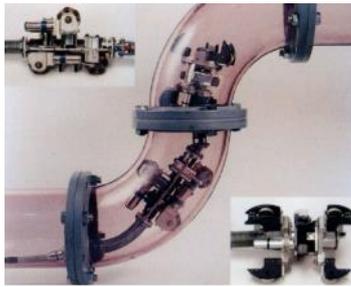


図2 配管内で曲がり部を走行中のモグラ装置

## 2. 従来の配管検査ロボット

次に、以前に富本<sup>5)</sup>が開発した配管検査ロボットについて紹介する。まず、配管推進機構の構成要素であるソフトアクチュエータの構造と動作原理について説明する。図3に伸長型柔軟空気圧アクチュエータの外観と構造を示す。以後このアクチュエータの英語名(Extension type Flexible Pneumatic Actuator)からEFPAと略す。EFPAは、シリコンゴムチューブ(外径10mm, 内径8mm, 長さ311mm)を軸方向にのみ伸縮する蛇腹状のナイロン製のスリーブ(株式会社直村企画 びっくりホースプロ)で覆い、その両端を樹脂製のコネクタで固定した簡易な構造のアクチュエータである。動作原理は、供給圧力をEFPAに加えると、内部のシリコンゴムチューブが膨らみ、周方向および軸方向に向かって伸びる。しかし、蛇腹状のナイロン製スリーブにより、周方向への伸びは拘束され、軸方向のみに伸びることになる。また、排気を行うと内部のシリコンゴムチューブの復元力により、EFPAは自然長へと戻る。このEFPAは自然長の約2.5倍伸長し、ゴムチューブの復元弾性力により約20Nの最大引張力が得られる。

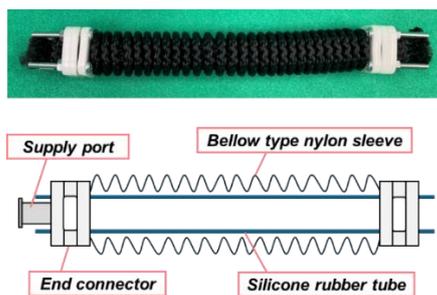


図3 EFPAの外観と構造図

図4に、富本らが開発した従来の管内推進機構の外観を示す。機構は、1本のEFPAを中央部で折返し、蛇腹を互いに拘束した湾曲アクチュエータを、中心から半径33mmで120度毎に、円の接線方向に湾曲する方向に配置している。この配置により、2方向への湾曲を推進に活用できる。EFPAの自然長を107mmとし、拘束間隔を2, 4, 5, 4, 2山の順で17山とした。機構全体の質量は約328g

である。富本らはこのスイング式保持/推進機構が電力源を含むシステム全体を引っ張りながらスイング動作によるスムーズな管内走破が可能であることを確認している。



図4 従来の管内推進機構の外観

図5にシステム構成図を示す。スイング式保持/推進機構のシステムは、マイクロコンピュータ(ESP32)の6つのI/Oポートからトランジスタ(株式会社TOSHIBA, TD62083APG)を介して弁を駆動し各EFPAを動かす。ここで、各I/Oポートに接続されたON/OFF弁(SMC株式会社SS073M02-06C)は、EFPAの圧力室A~Fのそれぞれを駆動する。制御システムはBluetooth経由で予め設定したシーケンス動作を選択する方式を採用した。Bluetooth経由にすることで、環境に囚われず、スマートフォンやタブレット等に標準装備のBluetooth通信を用いて操作することが可能になった。

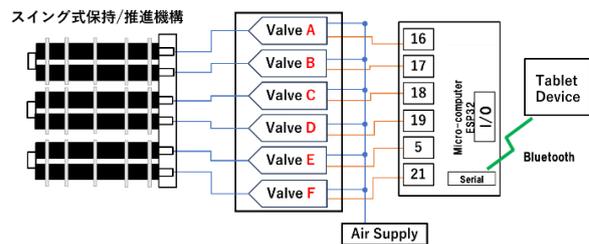


図5 スイング式保持/推進機構のシステム構成図

図6に従来の推進機構の管内推進実験風景を示す。実験では、アクチュエータの湾曲動作を10回繰り返している。10回の動作に要する時間は、排気時間と合わせて45秒である。前進動作では、3本のEFPAを同時に伸ばした状態から周方向に湾曲させて縮めることで管路壁面を、掴みながら移動することができる。実験での供給圧力は400 kPaであり、10回の動作で最大375mmの移動量が得られた。この移動量と操作時間から算出した推進速度は12.5 mm/sである。

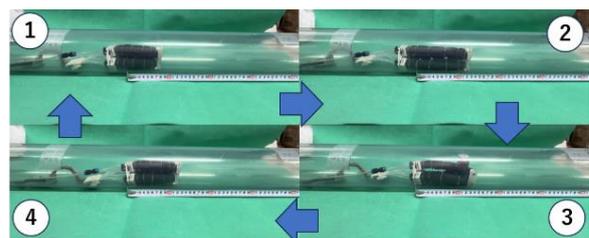


図6 従来の推進機構の管内推進実験風景

3. 軸方向の弾性/剛性繊維拘束による配管保持EFPA

従来の管内推進機構では配管内径を考慮してEFPAを用いた湾曲アクチュエータの製作を行う必要がある。この問題点を解決するためには、細径で自身の外径よりはるかに太い配管を保持・推進できる管内推進機構の開発が求められる。そこで、EFPAを用いて蛇がとぐるを巻くような動作を行い、自身の径よりはるかに大きい径の管を保持する手法を提案し、新たな推進機構を提案した。以上のコンセプトをもとに、提案する弾性繊維と剛性繊維を有するEFPAの構想図を図7に示す。構想のアクチュエータは、伸縮性繊維拘束（ゴム紐拘束）と剛性繊維拘束（糸拘束）で構成されている。これら2種類の繊維拘束はそれぞれ「比例型拘束」と「飽和型拘束」を実現している。変位に比例して力を生じるものに、弾性のゴム紐を用い、EFPAの飽和値の設定を非伸縮性の繊維で実現することを考える。この2つの繊維を組み合わせることで、省スペース化を実現しながらとぐる動作などの機能を実現できるものと考えられる。

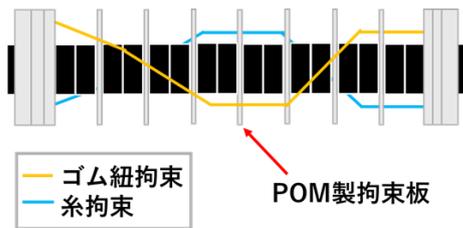
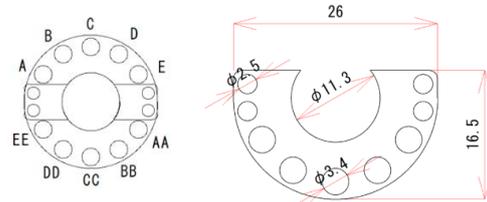


図7 弾性/剛性繊維拘束を有するEFPAの構想図

図8に試作アクチュエータに使用する拘束板の形状を示す。図8 (a) に示すように厚さ1 mmのPOM製の拘束板を2枚重ねて使用し、拘束板の耐久性と剛性を向上させることで拘束板の変形や破損が起こりにくいように設計した。拘束板は図8 (b) に示すように三日月状の部品を重ねて構成され、重複部分の4つの孔をM2ネジで締結することで固定している。また、図8 (a) に示すように、拘束板にゴム紐と糸を通す孔を設けており、ゴム紐を通す孔をA~E、糸を通す孔をAA~EEとして拘束パターンを考える。使用している2種類の拘束繊維は前述の図7の構想図で述べたようにそれぞれ目的が異なる。ゴム紐は弾性拘束として印加時におけるEFPAの伸長力に対して一定の抵抗力を有しながら伸長する特性を有した「比例型拘束」である。そのためゴム紐の抵抗力が機能している間は、EFPAは湾曲を生じながら伸長動作を生じることになる。一方、剛性繊維であるPライン(非伸縮性の釣り糸)は、変位の飽和つまりEFPAに対してストッパーとして飽和位置の役割を担う「飽和拘束」である。ゴム紐によって湾曲しながら伸長したEFPAをそれと平行に配列した剛性繊維によって直線伸長を止め、配管内で湾曲状態を形成する。この

非伸縮性繊維の拘束つまり片側の伸長の飽和を設定することで、EFPAを湾曲状態に維持することができ、配管内でのとぐる動作を実現し、保持が可能であると考えられる。



(a) 拘束板の外観図 (b) 三日月状部品の形状  
図8 試作アクチュエータに使用する拘束板の外観図(a)と形状(b)

以上の考えをもとに2種類の繊維拘束の軸方向の位置と回転方向位置を図9に示す。図9の横軸方向のマスは先端側(左側)からのEFPAの蛇腹の山数を示す。また、拘束板を番号1~9で示す。縦軸方向のマスは拘束繊維を通す孔の位置を示している。図9に示す黄色と青色部分は、それぞれ弾性紐と非伸縮性糸を表している。2種類の繊維による拘束パターンは、とぐるを巻きながら伸長するように試行錯誤的に求めた結果である。ここで弾性紐として使用したゴム紐は輪ゴム2本を1組として使用し、図9の拘束番号1では2つに分けてCとDの孔に配置している。その結果、図9の赤線で示すようにジグザグ形状にゴム紐と非伸縮性糸を拘束すると、EFPAは加圧時にらせん状に変形し、伸長した後に管を保持できることを確認した。また、実際に使用したEFPAの外観を図10に示す。ここで、この軸方向に比例型拘束と飽和型拘束の両方を持つEFPAを、その拘束に用いる繊維から以後、弾性/剛性繊維拘束EFPAと呼ぶ。また、このEFPAの全長は440mm、質量は約130gであり後部に1つの入力口を有している。

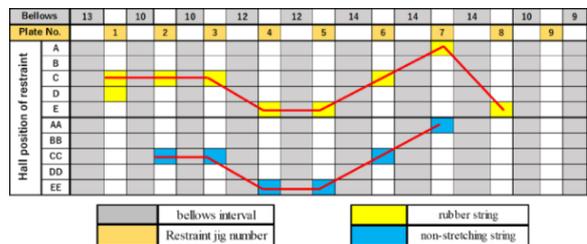


図9 ゴム紐と非伸縮性糸の拘束位置

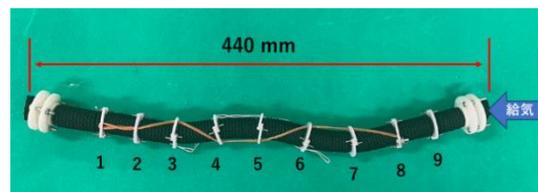


図10 弾性/剛性繊維拘束EFPAの外観

図11に試作した弾性/剛性繊維拘束EFPAの配管内での動作実験風景を示す。実験では、試作EFPAに空気圧コンプレッサとレギュレータを介して500 kPaに調整した圧力を、ON/OFF弁(株) KOGANEI, G010HE1)を手動操作することでステップ状に給排気の切り替えを行った。実験に使用している配管は、100A規格の内径が103.5 mmのものを使用している。ここで、ON/OFF弁はアクチュエータ後部の空気圧コネクタの付いた入力口側に接続されている。図11より、機構径(26 mm)の4倍程度の配管内で使用することで、試作アクチュエータが周方向のとぐろ動作と軸方向の伸長動作を繰り返しながら移動する様子がよくわかる。この実験で、試作EFPAのとぐろ動作とその後の伸長動作が可能であることを確認した。この実験によって確認した弾性と剛性繊維拘束によるアクチュエータの挙動の特性を利用することで、とぐろ動作と伸長動作の切り替えのタイミングを制御でき、管内を移動可能な推進機構が実現できると考える。

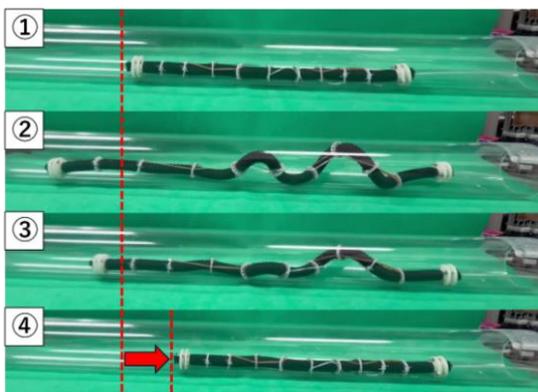


図11 弾性/剛性繊維拘束EFPAの管内動作実験

#### 4. 弾性/剛性繊維拘束を有する管内推進機構

「比例型拘束」と「飽和型拘束」の両方を実現するため、軸方向に弾性と剛性繊維拘束を有する弾性/剛性繊維拘束EFPAの構造やその拘束パターンについて検証した。また、動作実験を通じてとぐろ動作と伸長動作の切替のタイミングをこの両繊維で制御できることが確認された。この結果から、弾性/剛性繊維拘束EFPAを管内推進機構に使用することを考え、少ない弁数で配管内を推進・保持し、蛇のアコーディオン運動のように管内を走破できるロボットの開発を検討する。具体的には、推進機構の構造と拘束パターンについて述べるとともに配管内での推進原理やその駆動システム、これらを用いた配管走破実験について本節で述べる。

軸方向の弾性/剛性繊維を有する弾性/剛性繊維拘束EFPAを用いた管内推進機構の外観図を図12に示す。ロボットは弾性/剛性繊維拘束EFPA2本を直列に配置しており、この前部320mm(蛇腹84山)と後部440mm(蛇腹118

山)のEFPAとこの2つをつなぐ端部コネクタから構成される。また、各EFPAには図8で示す拘束板、つまり半径10.8mmの円周上に中心から30度毎に孔( $\phi$ 3.2mm)を有するC字型の拘束板2枚を重ね合わせて、蛇腹谷部を外部から蛇腹14~9, 13~9山毎に拘束している。

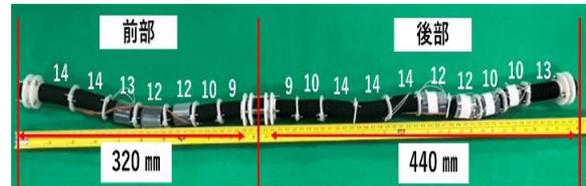


図12 試作推進機構の外観

図13に試作ロボットに使用した2本の弾性/剛性繊維拘束EFPAのゴム紐と非伸縮性糸の拘束パターンを示す。拘束治具は、図13に示すように前部EFPAの進行方向から14, 14, 13, 12, 12, 10, 9山毎に蛇腹を拘束し、後部は13, 10, 10, 12, 12, 14, 14, 14, 10, 9山毎に拘束している。拘束はA~Eの半面をゴム紐で拘束し、AA~EEは伸びない繊維(糸)で拘束している。前部と後部の先端部は空気圧供給口のため拘束を外し、自由伸長するようにしている。ゴム紐拘束と糸拘束は軸対称の位置で1パターンずらして拘束することでとぐろ動作を実現している。ここでゴム紐はEFPAの自然長に合わせ、糸は拘束EFPA長の1.2倍に設定した。後部は拘束板1~3までは左右湾曲つまりアコーディオン動作が生じるように軸対称位置を直線に拘束し、3~8の区間でとぐろ動作を生じるように螺旋状に拘束している。とぐろ動作の原理は、EFPAの加圧による伸長に伴い、ゴム紐の引張力がEFPAの伸長力より大きくなるとゴム紐拘束側に湾曲を生じる。その後、糸拘束の長さ到達すると螺旋状の湾曲が固定され剛性が増し、配管の保持動作が実現できる。

管内推進機構には配管内の推進動作に蛇のアコーディオン運動と同じ動作を利用して推進している。ここで、アコーディオン運動とは、蛇が管内で行う移動方法である。都立高専の田中ら<sup>6)</sup>によると、この運動は管の内径に依存することなく管を保持できるメリットがあると考えられ、配管内径が異なる形状やL字、T字型配管などの複雑形状のものにも対応が可能であると考えられる。具体的には、本研究で開発したロボットは蛇のアコーディオン運動と全く同じ動作をするのではなく、とぐろを巻くことで管を保持する動作と蛇にはできない推進機構自体のボディが伸長する動作の組み合わせによってこの動作を実現するものである。図14に本研究における配管内推進動作の動作原理を示す。アコーディオン運動を模倣して配管内を推進するためには、推進機構の前部と後部で交互に配管内の保持を行うことが必要であると考えられる。そこで、まず

後部の配管保持機構のEFPAを膨らませとぐる動作により配管を保持する。その状態で、後部1~3の拘束でジグザク動作を実現し、本体前部を推進させる。その後、前部の配管保持機構のEFPAを加圧し、とぐる動作により配管を保持する。ここで、とぐる部分にはゴムシートを巻き、保持時の摩擦力を増している。最後に後部EFPAを排気し保持機構を収縮させることでEFPAの収縮力により進行方向への推進運動が実現される。

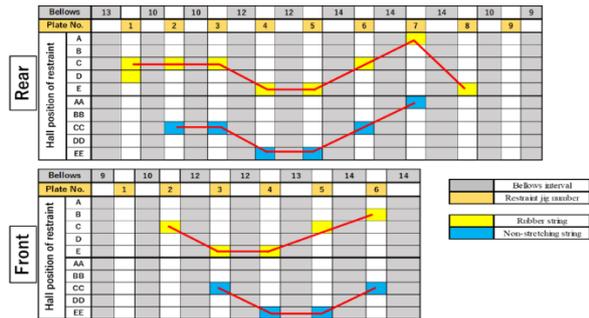


図13 推進機構内のゴム紐と非伸縮性糸の拘束位置

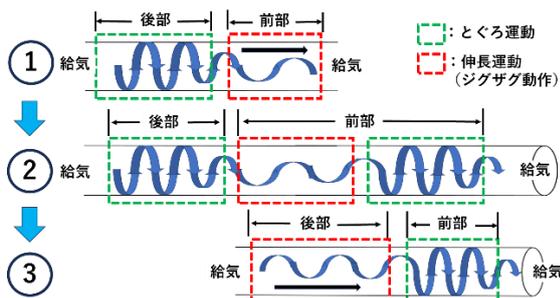


図14 とぐる・伸長動作の動作原理

試作推進機構の駆動システムを図15に示す。駆動システムは試作ロボットとコントローラとなるBluetooth通信機能を有するマイクロコンピュータ (Espressif Systems, ESP-WROOM-32E) と2個のON/OFF弁 (株 KOGANEI, G010HE1) から構成される。この推進機構は前部と後部のEFPAに独立して給気/排気の操作を必要とするため両EFPAともにロボットの両端に相当する位置から弁を介して空気圧を供給している。図15中の赤色線は、ON/OFF弁への接続管を示す。使用しているON/OFF弁は3ポート弁で給気/排気が独立してできる、また、前部と後部のEFPAは4本のネジで固定されているため独立した圧力室を持つ2つのEFPAが必要となる。ここで、各EFPAの供給圧力は500 kPaである。推進機構の操作は、Bluetoothを介してタブレットから送信された文字コード“0”で行われる。このコードをESP32マイコンで受信しあらかじめ設定しているシーケンスプログラムに従い2つの弁を駆動する。ここで図16に弁の

操作タイミングのタイムチャートを示す。図16中の Valve Fは前部, Valve Bは後部のEFPAに接続したON/OFF弁でありその列に描かれている線は各弁の操作のタイムチャートを示す。Valve Fは開始から3 sまでOFF状態でその後ON状態となる。また、Valve Bは開始からON状態で駆動され、Valve FがONになった後、1 sの間をあけて(開始から4 s)でOFF状態となり、最終行程の9 sまでその状態を維持する。また、Valve Fは最終7 sで再びOFF状態となる。この一連の動作は9 sの動作である。試作した配管検査ロボットの80A規格配管の推進動作実験の風景を図17に示す。この実験では、図16に示す文字コード“0(9 s)”による遠隔マニュアル操作により弁の操作を切り替え、上記の操作パターンを1回の操作として実施した。実験では5回の前進動作で1mの配管を通過できることを確認した。さらに、試作推進機構の配管内における平均移動速度を計測した結果、平均移動速度は13.7 mm/sであり1度の推進動作における管内推進距離の平均は230 mmであることを確認した。しかし、この推進機構は前部と後部の両端からの空気圧供給を必要とするため、今後後方側からのみの供給による駆動を実現する必要がある。

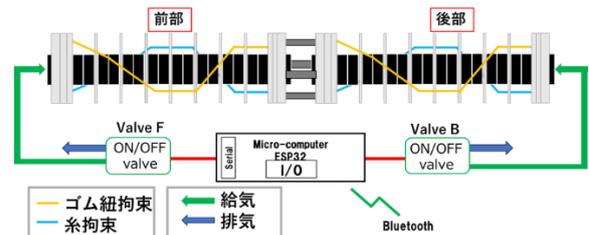


図15 試作推進機構の駆動システム

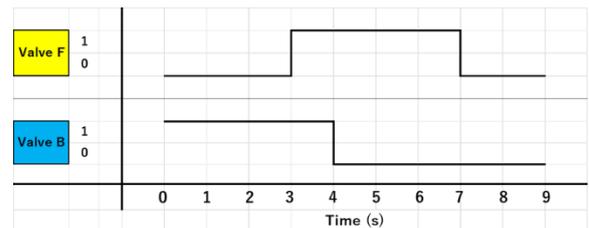


図16 送信文字コード0に対する弁の操作タイミング

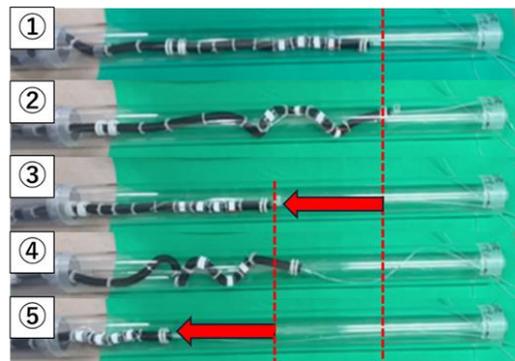


図17 試作推進機構の管内推進実験

## 5. 結言

管径に比べ、スリムな推進機構の実現のため、軸方向に弾性繊維による「比例型拘束」と剛性繊維による「飽和型拘束」の両方を実現する弾性/剛性繊維拘束EFPAを提案し、とぐろ巻き動作と伸長動作の切替タイミング制御が可能なEFPAを試作した。また、試作EFPAによる管内走破実験を行い、その有効性を確認した。さらに、弾性/剛性繊維拘束EFPAを2本直列に配置した管内推進機構を試作し、とぐろ巻き動作と伸長動作による配管内の保持と管内推進動作が行えることを確認した。また、タブレット等からBluetoothを介して送られた文字コードをもとに、あらかじめプログラムされたシーケンスプログラムに従って推進機構を駆動するシステムを構築し、80A配管の走破実験を行った結果、平均13.7mm/sの速度が得られた。

## 参考文献

- 1) 厚生労働省 資料1-1, 新水道ビジョンの推進について, 新水道ビジョン推進のための地域懇親会, [https://www.mhlw.go.jp/seisakunitsuite/bunya/topics/bukyoku/kenkou/suido/newvision/chiikikondan/10/suishin\\_kondan\\_10-1.pdf](https://www.mhlw.go.jp/seisakunitsuite/bunya/topics/bukyoku/kenkou/suido/newvision/chiikikondan/10/suishin_kondan_10-1.pdf).
- 2) 熊谷和哉, 筒井誠二, “水道民営化と日本の水道事業の方向性”, 衛生工学シンポジウム論文集, (2003), pp. 73-76.
- 3) 日本水道管路株式会社, “水道管内カメラ調査”, <http://www.suidou-kanro.co.jp/camera/>.
- 4) Takashi Shinohara, Hikaru Furuya, Tetsuya Akagi, Shujiro Dohta, Takumi Kobayashi, So Shimooka, “Development of Pneumatic Drive Pipe Inspection Robot using Radial Bending Type Soft Actuator”, JFPS International Journal of Fluid Power System, Vol. 15, No. 1, pp. 7-16, (2022).
- 5) 富本 洸喜, “空気圧駆動配管検査ロボットの改良と要素技術”, 令和5年度 岡山理科大学卒業論文 (2024).
- 6) 田中 美友紀 他4名, “ヘビのアコーディオン運動を模擬したマイクロロボットの試作”, 日本機械学会東北支部第41期総会・講演会講演論文集 (2006).

# Pipe Propulsion Mechanism Using Extension type Soft Actuator with Axial Elastic/Rigid Fiber Constraints

Takumi Ishibashi , Tetsuya Akagi<sup>1)\*</sup>, Takashi Shinohara<sup>2)</sup> , Feifei Cho<sup>1)</sup>,  
and Masashi Yokota<sup>1)</sup>

*Department of Systems Science, Graduate School of Science and Engineering,*

<sup>1)</sup>*Department of Information Science and Engineering, Faculty of Information Science and Engineering,*

<sup>2)</sup> *Design and Manufacturing Center, Organization for Research Development and Outreach,  
Okayama University of Science.*

*1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama 700-0005, Japan*

(Received October 11, 2024; accepted November 12, 2024)

Many Japanese water supply pipes had reached the end of their life period. Based on the critical situation, a pipe inspection has been strongly required. It is also required to inspect the piping in hazardous environments such as a nuclear reactor and chemical plant. In addition, a pneumatic actuator has an advantage that is no risk of electric leakage or short circuits. They can be safely used in damp and hazardous area such as in water supply pipe and flammable fluid pipeline. Therefore, many inchworm type pipe inspection robots using pneumatic soft actuators such as pneumatic artificial muscles and flexible cylinders were developed. However, most inchworm type robots must hold the pipe by changing the diameter of the robot to get propulsive force, and extend longitudinally to travel in the pipe. Therefore, the outer diameter of the robot should not be extremely different to the inner diameter of applied pipe in order to decrease the volume change for holding pipe. The limitation of radial size of the robot leads to be easily stuck in the pipe. It causes to be difficult to retrieve the robot in an emergency. In ideal, a slim pipe propulsion mechanism for inspection robot whose outer diameter is less than one third of pipe diameter is suitable. In addition, to decrease the cleaning cost after inspection, a propulsion mechanism that is cheap enough to be disposable is desirable.

In this study, we proposed a slim and low-cost pipe propulsion mechanism using pneumatic soft actuators with elastic/rigid fiber constraint. As a soft actuator, Extension type Flexible Pneumatic Actuator (we call it "EFPA" for short) was used. Elastic/rigid fiber constraints can realize both "proportional type constraint" by elastic fibers and "saturation type constraint" by rigid fibers in the axial direction in order to realize coiling and extensional motions. A prototype pipe propulsion mechanism using EFPA with elastic/rigid fiber constraints was also developed. The traveling test in pipe by changing the timing of switching between coiling and extending motions was also carried out. As a result, it could be confirmed that the tested mechanism could travel in 100 A pipe with inner diameter of 100 mm by giving simple supply or exhaust to EFPA, even if the outer diameter of the mechanism is 26 mm (that is one fourth of pipe). The wireless control system via Bluetooth that can operate the mechanism by selecting a pre-programmed sequence program according to a transmitted character code from a tablet or mobile phone. By using the tested control system, the pipe traveling test using a propulsion mechanism that two EFPAs with elastic/rigid fiber constraints were connected in serial was also carried out. As a result, it could be confirmed that the mechanism could travel smoothly in 80A pipe with the average speed of 13.7 mm/s.

**Keywords:** Extension Type Flexible Pneumatic Actuator (EFPA), EFPA with axial elastic/rigid fiber restraints, Slim and low-cost pipe propulsion mechanism, Coiling and extension.