



1/2 インチ配管内の検査補修用レーザー加工ヘッドの開発

Development of a laser processing head for the inspection and repair of damages inside of a half-inch pipe

秋田大学	小松 和三	Kazumi KOMATSU	
	関 健史	Takeshi SEKI	
	長縄 明大	Akihiro NAGANAWA	
量子科学技術研究開発機構	岡 潔	Kiyoshi OKA	Member
日本原子力研究開発機構	西村 昭彦	Akihiko NISHIMURA	Member

In recent years, the inspection of pipes is being carried out by using inspection techniques which employ ultrasonic and eddy current testing, endoscope (CCD cameras or optical fiber). Currently, the inspection devices can be performed only a visual check of the pipes. In case of a damage, they cannot be repaired. In such case, the damaged portion has to be excluded or the pipe has to be replaced. The authors develop a laser processing head comprising an optical fiberscope. It is capable of inspection and repair of a pipe with a diameter of 25 mm. The pipes of such size are used in the heat exchanger of a fast breeder reactor. However, pipes with diameters smaller than 25 mm, require a sufficiently small laser processing head that can be inserted into them. The research aims to develop a laser processing head for the inspection and repairing of a pipe with 12 mm diameter. For this purpose, it is used a standing wave type ultrasonic actuator which is orthogonally positioned to the piezoelectric elements. This ultrasonic actuator is developed for implementation in the laser processing head, which is used in inspection and repair of the 12-mm-diameter pipe. In this study, the structure and results of the verification experiments are explained.

Keywords: Half-inch pipe, Inspection, Repair, Laser processing head, Ultrasonic motor

1. 緒言

産業工場や電力供給施設などでは、様々な流体を搬送するために多くの配管が設置されているが、これらの配管は施設の安全確保や生産性の向上のため定期的に検査を行う必要がある。一般に配管内の検査では、超音波探傷検査や渦電流探傷検査 (ECT: Eddy Current Test) などが行われているが、近年では、CCD カメラや光ファイバースコープなどの内視鏡を用いた装置により、配管内部から検査を行なうことも多くなってきた。例として、Zhang らは、ガス管内を移動するロボットを開発した[1]。このロボットの本体は、周囲に 120 deg 間隔で配置された 3 個のパンタグラフによって構成されており、400~600 mm の範囲の直径を持つ配管に適用することができる。また、Lim らは、直径 12 mm の細い配管に使用することができる空気圧を用いたロボットを開発した[2]。このロボットは、内部への空気の注入と解放を繰り返すことで、芋虫の様に管内を這って移動する。さらに、山田らは、直径

10 mm の配管内を無線移動する検査ロボットに搭載される、マイクロカメラ視覚システムの開発を行なった[3]。このロボットでは、ミラー上に反射する画像を CCD カメラで捉えることにより、管内壁面を検査することができる。他にも開発されたロボットはあるものの、これまでの装置では、配管内の観察機能は有するものの、損傷が見つかっても補修することができず、配管の施栓や交換により対処していた。

一方、著者らは、高速増殖炉の熱交換器に使われている直径 25 mm の配管内を、検査・補修することができるレーザー加工ヘッドを開発した[4,5]。これは、光ファイバースコープと組み合わせて用いられ、その内部にはミラーとミラーを直動・回転させるための可動スリーブが配置されている。その機能は、光ファイバースコープでは配管の長手方向しか観察することができないが、配置したミラーにより光を配管の半径方向へ屈曲させることができるため、管壁面の損傷部を目視で確認することができる。また、固定したままのミラーでは目視で確認できる範囲に限られるが、可動スリーブをモータで直動・回転駆動することによりミラーも同調して動き、360 deg 方向の管壁面を観察することができる。さらに、光ファイバから補修用レーザーを照射することもできるため、配管

連絡先:小松和三,
〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1, 秋田大学,
E-mail: kkomatsu@gipc.akita-u.ac.jp

内部の観察に加えて、損傷部の補修も行うことができる。実際に使用する場合には、ECT 装置と組み合わせて用いられ、ECT 装置でおおよその損傷場所を特定した後、本加工ヘッドを用いて損傷部を目視で確認し、必要に応じて補修を行う。また、本技術を発展させ、レーザーヘッドの精密制御が可能な配管検査補修装置の試作や、レーザー熱加工による補修技術の研究も進められている[6,7,8]。一方、高速増殖炉ならびにその他の施設には、様々な直径の配管があり、25 mm より太い配管には、上述の加工ヘッドに何らかの部品を組み合わせることにより対応できると考えられる。しかし、25 mm より細い配管に対しては、上述の加工ヘッドを挿入することさえできないため、細径配管内で使用できるレーザーヘッドを開発する必要がある。

本研究では、直径 12 mm 配管内の検査補修を行なうためのレーザー加工ヘッドの開発を目的とする。この大きさにした理由は、原子力施設の配管などではインチを基準寸法としており、すでに開発した 25 mm 配管用レーザーヘッドの半分の大きさに設定したヘッドが開発できるかどうかの検討を行うためである。本レーザーヘッドは、上述した直径 25 mm 配管用レーザーヘッドと同様に、光ファイバスコープと組み合わせて用いるためファイバを通すことができる中空構造とし、可動スリーブ内に配置されるミラーを介して配管内の観察・補修ができるようにする。しかし、直径 25 mm の配管用に開発した加工ヘッドに用いたモータは、直径 6 mm のステッピングモータであるため、直径 12 mm の配管内ではスペースの問題から導入することができない。また、直径 4 mm 以下の電磁モータも存在するが、トルク不足が懸念されるため導入することができない。

一方、超音波アクチュエータは、体積比あたりのトルクが他のモータよりも大きく減速機が不要であるなどの理由により、工業や医療分野など様々な場面で用いられている。例として、Minghui や Takemura らは、ミラーを取り付けた球面を駆動する多自由度超音波アクチュエータを開発したが、中空構造でなければならない本レーザー加工ヘッドへ適用することはできない[9,10]。他にも様々な動作原理のモータが開発されているが、直径 12 mm の配管内に適用でき、かつ中空部を確保することができるモータはほとんどないのが現状である[11,12,13]。

そこで著者らは、2つの圧電素子を直交して配置した定在波型超音波アクチュエータを 3 つ使用し、これを中空円板上に 120° 間隔に並べてファイバスコープを通過さ

せる空間を作り、直径 12 mm の配管内で用いるレーザー加工ヘッドを開発することができたため、その構造や動作検証実験の結果について報告する[14]。

本論文の構成は以下の通りである。第 2 章では、検査補修システムの概要を述べた後、開発したレーザー加工ヘッドの構造について述べる。第 3 章では、レーザー加工ヘッドに用いた定在波型超音波アクチュエータと、それを導入した回転および直動ユニットの構造について述べる。第 4 章では、導入したアクチュエータユニットの回転性能について述べる。第 5 章では、レーザー加工ヘッド動作実験の概要、ならびに実験結果について述べる。最後に第 6 章では、結論を述べる。

2. レーザー加工ヘッド

2.1 検査補修システムの概要

本研究では、原子力などの大型施設に設置される熱交換器の全長 20 m、直径 12 mm の直管を想定し、配管内を検査・補修することができるレーザー加工ヘッドを開発する。これらの配管内で確認できる損傷の大きさは 1 mm 程度と非常に小さいため、配管内全体を光ファイバスコープで検査することは困難である。このため、Fig. 1 にレーザー加工ヘッドと ECT 装置を組み合わせたシステム構成を示す。本システムを用いた配管内の検査・補修の手順は、次の通りである。

- 1) システム全体が配管内に挿入され、エアリーによって配管内を移動させる。このとき、ECT 装置を用いて配管内の損傷の有無を確認する。損傷があった場合には、配管内のおおよその場所を特定する。
- 2) レーザー加工ヘッドを損傷部付近に移動させ、ミラーを配置した可動スリーブを、回転あるいは直動動作させて、光ファイバスコープの映像として損傷部を映し出す。その結果、もし補修が必要と判断された損傷部であれば、補修用レーザーを照射して損傷部を溶接補修する。

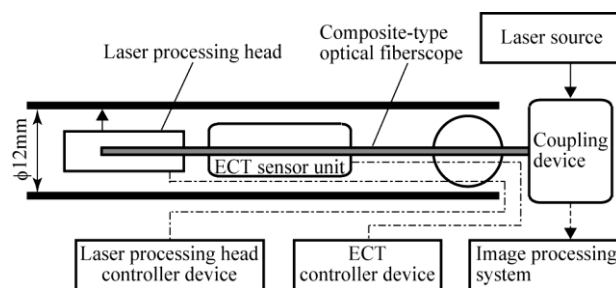


Fig.1 Whole system of laser processing head

2.2 構造と仕様

Fig. 2 に本レーザー加工ヘッドの構造を示す。レーザーヘッドは、光ファイバスコープ、ミラー、可動スリーブ、スリーブを回転・直動動作させるユニットで構成される。光ファイバスコープは、その先端部を自在に伸縮および屈曲させることができないため、可動スリーブに内蔵されているミラーにより、画像や溶接用補修レーザーを管内壁面方向へ屈折させるため、本構成とした。光ファイバスコープは、レーザー加工ヘッドに挿入して使用するため、本体は中空構造となっている。レーザー加工ヘッドの設計仕様を以下に示す。

- 1) レーザー加工ヘッドは、今後、他の配管へも適用するため、全長 100 mm、直径 12 mm(1/2 インチ)以内に収まること。
- 2) 光ファイバスコープを配置するために、レーザー加工ヘッドに直径 3 mm の中空部分を設けること。
- 3) 回転方向へ±185 deg、直動方向へ±2.5 mm の動作範囲を持つ可動スリーブとすること。
- 4) 光ファイバスコープの画像やレーザーを管内壁面へ反射させるため、可動スリーブ内にミラーを設置すること。
- 5) アクチュエータは、中空部分の外側の直径 3~10 mm の範囲の空間内に配置すること。
- 6) レーザー加工ヘッドの全ての配線は、可動スリーブの動作に影響を与えないようにすること。

Fig. 3 に上記の設計仕様に基づいて開発したレーザー加工ヘッドを示す。その概要は、以下の通りである。

- (a) ファイバヘッドは、全長が約 65 mm、全質量は 31g であり、ほぼ全ての部品の材質は SUS304 とした。
- (b) 部品の組み立ては、はめあいおよび接着により行った。
- (c) 本体の剛性を高めるため、本体の外周に 120 deg 間隔でフレームを配置した。さらにアクチュエータに電圧を与えるための配線を収められるよう、フレーム側面に溝を設けた。
- (d) 超音波アクチュエータの与圧は、レーザー加工ヘッドが中空構造であるため、波ワッシャにより与えた。
- (e) 回転するロータ円盤は、超音波アクチュエータと接触し駆動されるため、ロータ円盤表面にちっ化処理 (PSN 処理) を施し、疲労性や摩耗性を軽減させた。

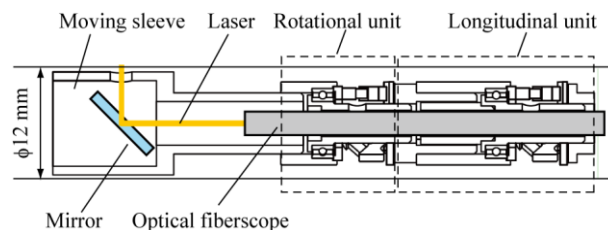


Fig.2 Sketch of laser processing head design

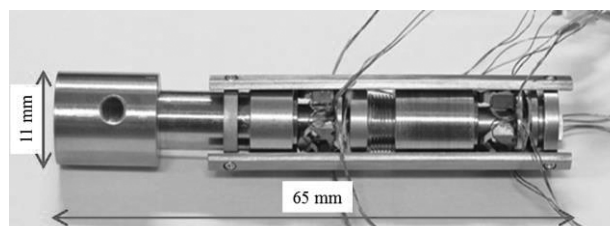


Fig.3 External view of laser processing head

3. アクチュエータ

3.1 定在波型超音波アクチュエータ

本レーザー加工ヘッドは、ミラーを配置した可動スリーブを回転・直動動作させるため、アクチュエータを導入する必要がある。

Fig. 4(a)に、レーザー加工ヘッドに導入した定在波型超音波アクチュエータを示す。このアクチュエータは、直角に配置された 2 個の圧電素子、チップ、ベースで構成されており、その大きさは高さ 5.2 mm、幅 5.2 mm、厚さ 1.6 mm である。その駆動は、2つの圧電素子に位相が異なる正弦波を印加して行うことができるが、本研究では単相駆動法により駆動する[12]。すなわち、片方の圧電素子には電圧を印加せず、もう片方の圧電素子にのみ正弦波電圧を印加する。このとき、電圧を印加していない圧電素子が、ばねダンパとなりチップ先端部に楕円軌跡を描くことができる。これにより、物体を駆動することができる。

しかし、この構造のままではレーザー加工ヘッド内に中空部を確保することができないため、Fig. 4(b)に示すアクチュエータユニットを製作した。このユニットは、中空円盤上に超音波アクチュエータを 120 deg 間隔に 3 個配置した構造となっている。また、3 個のアクチュエータのチップ先端にはロータ円盤が接触しており、アクチュエータを駆動することでロータ円盤が回転する。

3.2 回転ユニット

Fig. 5 に Fig. 4(b)のアクチュエータユニットを用いて構成

した回転ユニットの構造を示す。アクチュエータユニットは、番号7の与圧ばね（波ワッシャ）と番号8の与圧ねじによって、番号4のロータ円盤に押しつけられている。超音波アクチュエータに電圧が印加されると、チップ先端部の接触摩擦によりロータ円盤は回転する。ロータ円盤の回転は、番号3のベアリングおよび番号1のベアリングハウジングに伝達される。なお、番号3のベアリングは、番号2の中空部品とはめあう。さらに、番号2の中空部品は番号3から7の中空部分を通っており、与圧ネジによって超音波アクチュエータが押し付けられている。番号1のベアリングハウジングは可動スリーブと結合されるため、これにより可動スリーブは回転動作を行なうことができる。

3.3 直動ユニット

可動スリーブは要求される仕様から、直動方向へ動作させる必要がある。Fig. 6に直動ユニットの構成を示す。この直動ユニットは、Fig. 5の回転ユニットと同様にFig. 4に示したアクチュエータユニット（番号2から8）と同じ構成として設計されている。番号11のロニアガイドは、側面に設けられている溝によって番号9の送りねじ（ピッチ：0.5 mm）が回転するのを防ぐ。このため、アクチュエータユニットによる番号10のベアリングハウジングの回転運動は、直動運動へ変換される。また番号9の送りねじは、回転ユニットと結合される部品であるため、これにより可動スリーブを直動方向へ動作させることができる。

4. アクチュエータユニットの回転性能

可動スリーブを用いて配管内を目視で観察するには、Fig. 4(b)に示すアクチュエータユニットを低速で駆動する必要がある。しかし、本レーザー加工ヘッドのように、中空部を確保したまま直径12 mm以内の大きさで回転速度を計るセンサは存在しない。このため、アクチュエータユニットの駆動性能を予め検証し、低速駆動の方法について検討する必要がある。本節では、アクチュエータユニットの回転性能を検証した結果について述べる。

4.1 駆動回路

Fig. 7に本アクチュエータの駆動回路を示す。この回路はオペアンプによる増幅率2倍の非反転増幅回路と、プッシュプル・エミッタ・フォロアの電力増幅回路を組み合わせ構成した。プッシュプル・エミッタ・フォロアとは、2つのトランジスタの不感帯を、トランジスタのベースにダイオードによる0.6Vのオフセットをかけて取

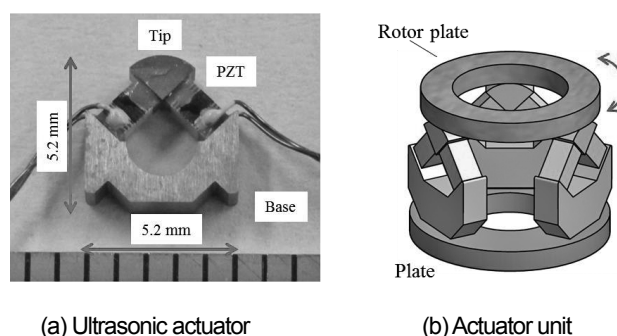


Fig.4 An ultrasonic actuator and an actuator unit

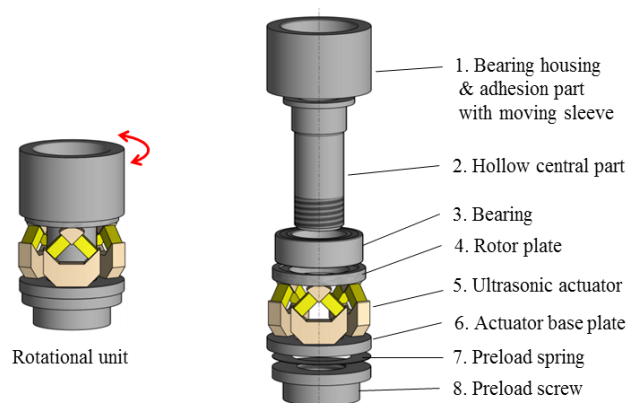


Fig.5 Structure of the rotational unit

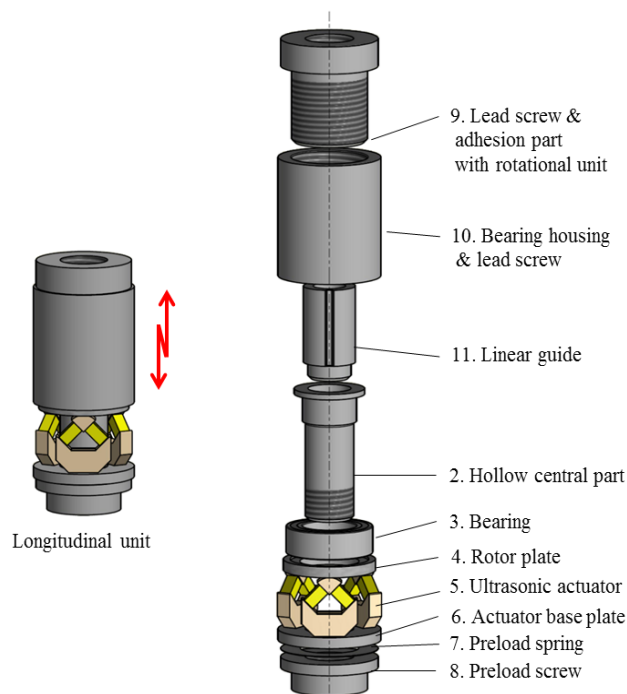


Fig.6 Structure of the longitudinal unit

り除き、効率よく電流を取り出すことができる回路構成であり、モータや各種アクチュエータを駆動する回路としてよく用いられる。帰還はオペアンプの出力からではなく、プッシュプル・エミッタ・フォロア回路の出力か

らかけており、帰還抵抗に 10 pF のセラミックコンデンサを並列に接続している。トランジスタのベース部分のバイアス回路には、電圧が 0.6 V の一般的なシリコンダイオードを用いた。トランジスタは 2SA1020 と 2SC2655 のコンプリメンタルペアのものを使用した。デュアルオペアンプ AD826 によって与えられる電圧は ±6.5 V である。また、この電圧はデュアルトラッキング DC 電源装置へ与えられる。一方、AD826 への入力信号は関数発生器によって与えられる。回路からの出力信号は圧電素子に印加され、これによりアクチュエータユニットが駆動する。

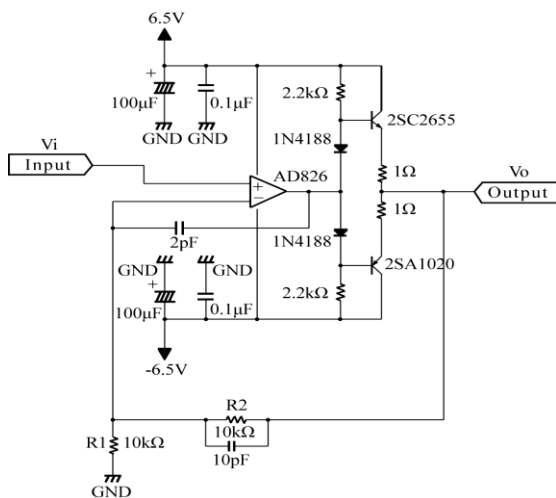


Fig.7 Driving circuit used for actuators working on one-phase drive

4.2 回転性能検証装置

Fig. 8 に製作したアクチュエータユニットの性能検証装置を示す。本検証装置の番号 2~7 の部品は、Fig. 5 の回転ユニット、Fig. 6 の直動ユニットと同じ構成とした。回転速度はロータリーエンコーダにより検出し、アクチュエータユニットとエンコーダとのカップリングには番号 12 の円筒により行った。なお、番号 12 の円筒は、レーザー加工ヘッドの動作を想定し、可動スリーブとほぼ同じ直径・質量になるように製作した。

4.3 回転性能検証実験の結果

Fig. 9 に回転性能検証装置を用いて行ったアクチュエータユニットの回転速度性能を示す。駆動電圧は 4 V の正弦波とし、駆動周波数は 165 kHz から 5 kHz 刻みでデータを取得した。なお、170 kHz~175 kHz の周波数帯域に最高回転速度を示す傾向が見られたため、この帯域の実験は 1 kHz 刻みで行った。図より、反時計方向駆動では 171 kHz のとき、また時計方向駆動では 174 kHz のとき最高回転速度を示していることがわかり、駆動周波数に若干の差が見られた。この理由としては、カップリング内

に組み込まれている番号 3 のベアリング摩擦の影響などが考えられる。

一方、1000 deg/sec の回転速度は、約 167 rpm に相当する回転数である。本アクチュエータユニットは、可動スリーブの動作に用いるため高速に回転させる必要はなく、数 rpm 程度で回転すればよい。このため、本研究では、反時計方向および時計方向駆動で回転速度がほぼ一致している 185 kHz (回転数は約 98 rpm) を駆動周波数とし、5.1 節で述べる低速駆動法を導入して可動スリーブを駆動する。

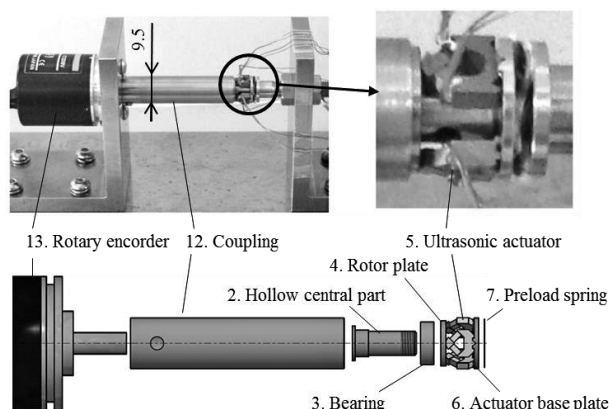


Fig.8 Actuator of the experimental rotational performance verification apparatus

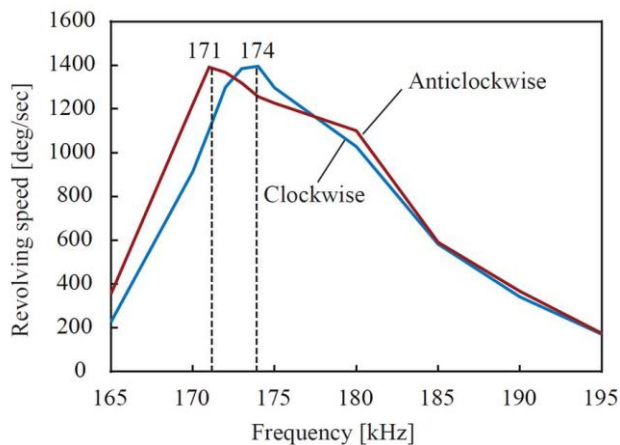


Fig.9 Relationship between frequency and rotational speed

5. レーザー加工ヘッドの駆動性能

前章では、アクチュエータユニットの性能を検証したため、本章ではレーザー加工ヘッドの動作について検証する。

5.1 低速駆動法

前章では Fig. 4(b) のアクチュエータユニットの回転性

能を検証した。その結果、駆動周波数は、反時計方向および時計方向へほぼ同じ速度で動作させることができる 185 kHz (周期では約 5.5 μ sec) に設定することとした。しかし、回転速度が約 98 rpm であったため、本研究では低速駆動法を導入する[15]。

Fig. 10 に低速駆動法の駆動波形を示す。この方法では、超音波アクチュエータに印加する波形を、バースト波のように、波形を印加する時間 a と印加しない時間 b を設けて駆動するものである。本研究では、PC を用いて波形を制御するため、そのサンプリング周期を $h=2$ msec とする。時間 a と b は、このサンプリング周期 h の整数倍とし、可動スリーブの動作速度を見ながら決定した。

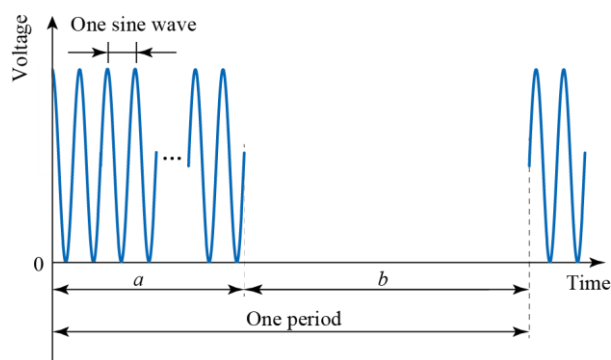


Fig.10 Driving wave for low speed rotation

5.2 回転動作

Fig. 11 に可動スリーブを低速駆動法によって回転させたときの様子を示す。なお、上述した通り、中空部を確保したまま直径 12 mm 以内の大きさで回転速度を計るセンサは存在しないため、本研究ではビデオカメラを用いた画像解析により動作速度の検証を行った。なお、Fig. 10 に示す電圧印加時間 a は 4 msec, オフ時間 b は 26 msec と設定した。図より、駆動時間 0 秒時の初期状態において、可動スリーブの角度を 0 deg とすると、駆動時間 8 秒後には約 90 deg, 16 秒後には約 180 deg の角度に推移したことが確認できた。したがって、可動スリーブは目視で配管内を観察できる約 2 rpm の低速回転駆動を実現できたと考えられる。

5.3 直動動作

Fig. 12 に可動スリーブを低速駆動法によって直動させたときの様子を示す。可動スリーブは目視で配管内を確認できる動作速度にする必要があるため、可動スリーブの動作速度を 0.1 m/sec に設定した。ここで、送りねじのピッチが 0.5 mm であることから、回転数を 12 rpm とする

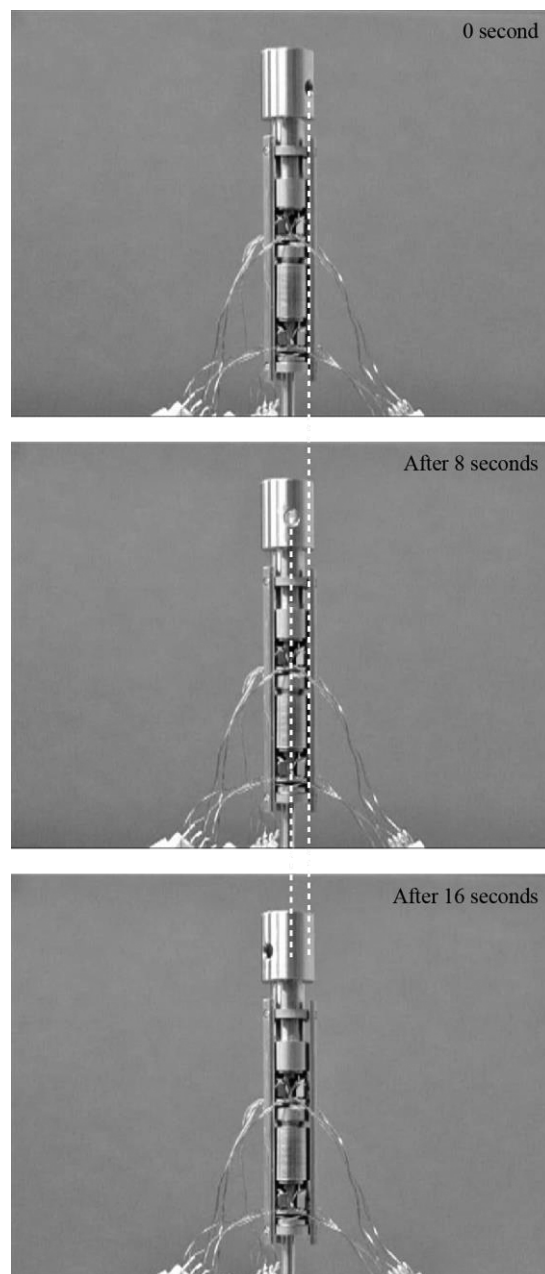


Fig.11 Rotation of the moving sleeve at 2 rpm

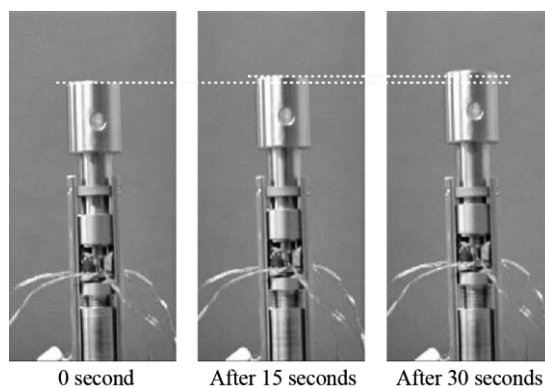


Fig.12 Moving sleeve moves in the longitudinal direction