長距離走行を可能とする小径管内走行ロボットの基礎研究*

大野 学** 濱野 聡明*** 加藤 重雄†

A Basic Study of a Mobile Inspection Robot Movable the Long Distance in Small Diameter Pipes

Manabu ONO, Toshiaki HAMANO and Shigeo KATO

This paper describes the feasibility of an in-pipe mobile inspection robot which is able to move the long distance in small diameter pipes, using the pneumatic and vacuum pressure switched by an electromagnetic valve for driving power of the robot. We propose that the electromagnetic valve must be attached near the pneumatic actuator in order to move the long distance. The pneumatic pressure of +300 kPa and vacuum pressure of -80 kPa are supplied to the electromagnetic valve by two feeding tubes which are 140 m long. The fabricated robot attached with 4 friction rings at double ends of actuator could move the distance of 20 m in the inner diameter of 44 mm vinyl chloride pipe at the time of 15 minutes. From this basic study, we confirmed that the inspection robot may be able to move the long distance, if the inspection robot is combined by 4 or 5 driving robots.

Key words: inspection robot, small diameter, long distance, bellows, pneumatic actuator

1. 緒 言

先年、敦賀原子力発電所の内径 76mm の冷却管が亀裂破損し、一次冷却水が漏洩する事故が発生した。破損箇所の特定は配管周囲の保温材の撤去の後に行われている。もし、破損した冷却管の接近し易い所から管内に検査ロボットを挿入して検査を行い破損箇所が特定できれば、放射能被爆や困難な保温部材の撤去工事も回避でき、検査に要する時間も費用も大幅に縮小された可能性がある。小口径の管はこの他、ボイラ管などの工業用の送気送水管から個人住宅・集合住宅用のガス管や水道管に至るまでさまざまにある。これらの管の長さは十分に長いので、その検査ロボットは長距離走行できることがまず必要条件となる。

さて、長距離走行に関しては、電気モータを動力源としたロボットによる 300m の走行が実現しているが、管径が 150mm 以上の大径管に限られている¹⁾。電気モータはその[出力/重量]比があまり大きくないため、小径管の長距離走行ロボットの動力源としては厳しい状態にある²⁾。小径管で 20m 以上の走行距離を得られたものは、ねじの原理を用いたロボットが唯一である³⁾。出力と重量の比で有利な空気圧アクチュエータを用いて管内を走行するロボットが提案されているが、長距離走行には至っていない^{4) 5) 6)}。これは、気体の持つ圧縮性に起因するもので、空気発生源と空気圧アクチュエータの距離が長くなると空気圧の伝搬に時間が掛かり、空気圧アクチュエータの応答が遅くなるためである。筆者達は、小径管走行には、空気圧アクチュエータを用いたロボットは出力と重量の比で有利である点に注目し、長距離走行が可能な手法を検討した。従来の問題点は、空気圧発生源と空気圧アクチュエータの距離が長くなると長距離走行できないという

ことである。そこで、空気圧発生源を空気圧アクチュエータの隣に置いたと殆ど同じ状態でロボットを走行させるという方法を考案した。これは正負の空気圧パルスが発生する電磁弁を空気圧アクチュエータに隣接して配置することで実現できる。その走行部は空気圧アクチュエータとなるゴム製のベローズ、ロボットの足となる摩擦リングと小型電磁弁で構成され、空気圧供給管や信号線を牽引する。本ロボットでは、合計 8 枚の摩擦リングを用いた場合 20m の走行が確認できた。これは、1 台のロボットの走行部は 20m の空気圧供給管や信号線を牽引走行することができることを示している。従って、ロボットの走行部を 4 体ないし 5 体連結すれば、さらに長距離走行の可能性もあることが分かったので、今回、その基礎研究としてここに報告する。

2. 試作した管内走行ロボットの構造

平均的な小径管として内径 44mm の管を選び、この管を走行できる管内走行ロボットを試作した。その構造を図 1 に示す。ロボットは、空気圧アクチュエータとなるベローズ、摩擦リング、電磁弁、検査用 CCD カメラ及び照明用 LED によって構成される。ベローズは外径 33mm、内径 23mm、自然長 150mm、NBR (Nitrile Butyl Rubber) 製である。その収縮時の内容積(死容積)は $33 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ であり、ロボット先端が 150mm の変位をする伸張時の内容積は $628 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ である。ベローズには管内走行ロボットの足となる摩擦リング(外径 48mm、内径 20mm、厚さ 1mm、NBR 製)が 4 枚ずつベローズの最前部と最後部の谷に装着される。ベローズの伸縮によって谷の間隔が変化するので、摩擦リングの間隔は変化する。その移動範囲は約 10mm である(これは、後述の図 5 において、 x_1, y_1 で示される)。摩擦リングの内径はベローズの谷外径より 3mm 小さいため、摩擦リングを装着すると、摩擦リングの内径は大きく伸ばされる。この結果、摩擦リングは装着時に必ずテーパ状になる。後述するが、テーパ状の摩擦リングの摩擦力はその方向によって大きく変化する。本管内走行ロボットが 1 個の空気圧アクチュエータと 2 組の摩擦リングで 1 方向に走

* 原稿受付 平成 14 年 2 月 6 日

** 学生会員 日本工業大学工学部 (現、日本工業大学大学院工学研究科; 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台 4-1)

*** 日本工業大学工学部 (現、(株)テクノス; 東京都港区芝 4-2-3)

† 正 会 員 日本工業大学工学部

Fig. 1 Structure of fabricated in-pipe mobile robot

Fig. 2 Fabricated in-pipe mobile robot system

行できるのは、摩擦リングのテーパの方向による摩擦力の差によるのである。検査用 CCD カメラ及び照明用 LED はロボットの先端部に装着される。検査用 CCD カメラ及び照明用 LED を装着したロボットの自然長は 190mm である。ベローズを伸張させるための正圧と収縮させるための負圧を切換えて、ベローズに空気圧を供給する電磁弁は、ベローズに隣接して配置される。すなわち、電磁弁はロボット本体と一緒に走行することになる。内径 44mm の管内を走行できる電磁弁はかなり小型であり、そのオリフィス有効断面積 (ca) は 0.22mm^2 である。電磁弁には正圧と負圧の 2 つの圧力を供給する 2 本のポリウレタン製の空気供給管 (外径 6mm, 内径 4mm) が接続される。本来、負圧空気供給管はベローズ内の空気を除去するための管であるが、正圧空気供給管と対比して、このような表現とした。空気供給管の耐圧は $+1.8\text{MPa}$ 以上で、負圧にも十分耐えるものである。検査用カメラと照明の電源線、検査カメラの信号線、電磁弁の信号線は空気供給管と一緒に束ねられ、100m 以上の長距離走行を目的としているため、その長さは 140m としてある。電源線・信号線と空気供給管はロボット本体から牽引索によって固定されて牽引されるので、中間にある電磁弁には牽引の負荷は掛からない。走行中、これらは管の内壁と自由に接触し、走行の抵抗となる。電源線・信号線と空気供給管の 10m 当りの質量は 0.75kg である。

管内走行ロボットの制御駆動装置を図 2 に示す。コンピュータには、ロボットの動作シーケンスがプログラムされている。ロボットに与える空気圧供給時間をコンピュータに入力し、電磁弁制御装置を介して 140m 離れた電磁弁を制御する。電磁弁に接続される 2 本の 140m の長さを持つ空気供給管の他方は、空気圧縮機と真空ポンプに接続される。空気圧縮機の吐出流量は標準状態で $1200 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ であり、真空ポンプの吐出流量は標準状態で $4000 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ である。空気供給管が極めて短い場合、これらの空気圧発生源は本ロボットの空気圧アクチュエータを毎秒約 2 回伸縮できる。

3. 長距離走行要件の検討

従来、10m 程度の短距離走行の空気圧応用管内走行ロボットシステムにおいては、空気圧アクチュエータへの給排気を制御する電磁弁は走行部分側ではなく、空気圧縮機と真空ポンプなどの空気圧発生源側に配置されていた。すなわち、電磁弁固定方式である。しかし、今回提案の管内走行ロボットシステムでは前述したごとく、電磁弁は空気圧アクチュエータに隣接して配置される。すなわち、電磁弁は空気圧アクチュエータとともに走行する。この電磁弁走行方式が長距離走行に如何に有効であるかと検討した。管内走行のために往復動する空気圧アクチュエータ内の圧力変動はあまり大きくない。摩擦リングによる摩擦力に抗する力の発生のための内圧変化は圧力差で 50kPa ないし 60kPa 程度である。これらの内圧変動に対して、100m もの長い空気供給管でどのような変動時間が必要であろうか。もしも大きな変動時間が必要であれば、ロボットの走行速度は低下し、実用にならないことにもなり得る。

図 2 に示される管内走行ロボットシステムにおいて、空気圧アクチュエータが走行のために収縮から約 160mm 伸張し、その後、再度収縮するまでの内圧の時間的変化を観察した。これを図 3 に示す。空気圧アクチュエータを連続して伸縮した時の収縮時の内圧は -40kPa である。約 160mm 伸張時の内圧は $+10\text{kPa}$ である。圧力上昇は -40kPa から $+10\text{kPa}$ まで圧力調整器後圧力を $+300\text{kPa}$ で供給して行った。また、圧力降下は $+10\text{kPa}$ から -40kPa まで真空タンク圧力を -80kPa として、真空ポンプで排気して行った。伸張に 0.8s、収縮に 4.0s 要するので、この空気圧アクチュエータの 1 サイクルの内圧変化に要する時間は 4.8s であることが分かった。

一方、電磁弁固定方式の検討に関しては、空気圧アクチュエータに隣接して配置される電磁弁を除去して、空気圧発生源側に固定して設置した。従って、この場合は、電磁弁と空気圧アクチュエータとの間には 140m の距離があることになる。 -40kPa から $+10\text{kPa}$ までの圧力上昇は、電磁弁上流側の圧力調整器後圧力を $+300\text{kPa}$ で供給して行った。また、 $+10\text{kPa}$ から -40kPa まで圧力降下は、真空タンク圧力を -80kPa として、真空ポンプで排気して行った。この結果を図 4 に示す。すなわち、空気圧アクチュエータの 1 サイクルの圧力上昇と圧力降下の内圧変化に要する時間は約 36.8s も掛かることが分かった。従って、この電磁弁固定方式では電磁弁走行方式に比べて約 8 倍、走行時間が必要となる。以上のことは長距離走行の管内走行ロボットシステムにおいては、電磁弁が空気圧発生源側に固定して設置される電磁弁固定方式は有効ではなく、空気圧アクチュエータの近隣に在ること、すなわち、電磁弁が走行部分側に配置される電磁弁走行方式が有利であること

Fig. 3 Response of internal pressure in the actuator (the case where the electromagnetic valve is attached near the actuator)

Fig. 4 Response of internal pressure in the actuator (the case where the electromagnetic valve is attached near air-pressure generators)

を示している。

4. 管内走行ロボットの力学モデル

管内走行ロボットの力学モデルを図5に示す。図において、(a) はベローズの内圧が上昇して伸張する状況を示し、(b) はベローズの内圧が降下して収縮する状況を示している。 p はベローズ内圧、 p_a は大気圧、 p_1 は電磁弁上流側圧力、 p_2 は電磁弁下流側圧力である。従って、(a) の状態では $p=p_2$ 、(b) の状態では $p=p_1$ である。 F_p は空気圧によって発生する力、 F_b はベローズの弾性によって発生する力、 F_{i1} はベローズ前半部の慣性力、 F_{i2} はベローズ後半部の慣性力、 F_1 はテーパ状になった摩擦リングの順方向（テーパの仮想頂点の方向に摩擦リングが動かされる場合）の摩擦力、 F_2 はテーパ状になった摩擦リングの逆方向（テーパの仮想頂点と逆方向に摩擦リングが動かされる場合）の摩擦力である。従って、(a) の状態では F_1 は前側摩擦リングの摩擦力となり、前側摩擦リングの前進を妨げる力となる。 F_2 は後側摩擦リングの摩擦力となり、後側摩擦リングの後退を妨げる力として働く。一方、(b) の状態では F_1 は後側摩擦リングの摩擦力となり、後側摩擦リングの前進を妨げる力となる。 F_2 は前側摩擦リングの摩擦力となり、前側摩擦リングの後退を妨げる力として働く。 m_1 はカメラ・照明・前側摩擦リングを含むロボット前半部の質量で 0.06kg、また、 m_2 は電磁弁・後側摩擦リングを含むロボット

Fig. 5 Dynamic models of the in-pipe mobile robot

後半部の質量で 0.12kg、 M は牽引される物体の質量で要する牽引力は W である。 x はベローズ前半部の変位、 y はベローズ後半部の変位である。 x_1 は、前述したが、ベローズの伸縮につれて谷の間隔が変化することによって発生する 4 枚の前側摩擦リングが移動する距離で 0mm から最大約 10mm の範囲で変化する。 y_1 も x_1 と同じくベローズの伸縮につれて谷の間隔が変化することによって発生する 4 枚の後側摩擦リングが移動する距離で 0mm から最大約 10mm の範囲で変化する。

従って、走行部の力の釣り合い方程式は、

(a) ベローズの伸張時：

$$F_p - F_1 - F_b - F_{i1} = 0 \quad (1)$$

$$F_2 + F_b - W - F_p + F_{i2} = 0 \quad (2)$$

(b) ベローズの収縮時：

$$F_2 - F_p + F_b + F_{i1} = 0 \quad (3)$$

$$F_p - F_b - W - F_1 - F_{i2} = 0 \quad (4)$$

で表される。

5. ロボット構成要素の特性

5.1 電磁弁を通過する流量

電磁弁は流体的にはオリフィスの一種で、流体の圧力変化は断熱的に行なわれる。そこを通過する質量流量 G は、空気の比熱比を $\kappa (=1.4)$ とすると、その上流側及び下流側流体の圧力によって、次のように決定できる。

$$G = 0.0404 \times cA \times \frac{p_u}{\sqrt{T_1}} \times f\left(\frac{p_d}{p_u}\right) \quad \text{kg/s} \quad (5)$$

ここで、

cA : 電磁弁オリフィスの有効断面積 m^2

p_u : 電磁弁の上流側絶対圧力 ($=p_1+101$) kPa

p_d : 電磁弁の下流側絶対圧力 ($=p_2+101$) kPa

T_1 : 電磁弁の上流側流体温度 K

$f\left(\frac{p_d}{p_u}\right)$: $\frac{p_d}{p_u}$ によって決定される係数で、

$$\frac{p_d}{p_u} \leq 0.528 \quad \text{のとき, } f\left(\frac{p_d}{p_u}\right) = 1 \quad (6)$$

$$0.528 < \frac{p_d}{p_u} < 1 \quad \text{のとき,}$$

$$f\left(\frac{p_d}{p_u}\right) = 1.4597 \sqrt{\left(\frac{2\kappa}{\kappa-1}\right) \left\{ \left(\frac{p_d}{p_u}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_d}{p_u}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right\}} \quad (7)$$

である。

5.2 摩擦リングに生じる摩擦力

管内走行ロボットの足となる摩擦リングに生じる順方向摩擦力 (F_1) と逆方向摩擦力 (F_2) を、摩擦リングの枚数を変化させて測定した。その測定結果を図 6 に示す。管は長距離走行用の内径 44mm の塩化ビニルと伸縮運動視覚計測用の内径 46mm の透明アクリルである。摩擦リングが 4 枚のとき、透明アクリル管では順方向に 6.3N、逆方向に 19.7N の摩擦力が発生し、塩化ビニル管では順方向に 10N、逆方向に 27N の摩擦力が発生する。摩擦力は摩擦リングの枚数におおむね比例し、逆方向摩擦力は順方向の摩擦力のほぼ 3 倍大きい。前述したが、この逆方向摩擦力と順方向の摩擦力の差が存在することによって、空気圧アクチュエータが 1 個の本管内走行ロボットは走行できるのである。

5.3 ベローズの弾性力と空気圧で発生する力

ベローズは弾性体で、その弾性によって発生する力 F_b は変位 (x) に依存する。変位と弾性によって発生する力 F_b の測定値を図 7 に示す。測定は、変位を増大する場合 (○印で示す) と変位を減少する場合 (×印で示す) の双方の場合を行った。変位の大きい範囲で誤差が生じるが、その差は 0.3N 程度と小さく、他に作用する力に比べて小さいためヒステリシスの影響は十分に小さい。弾性によって発生する力は、変位の大きい範囲で負の値 (収縮力) となるが、変位が 0 に近い小さい範囲では正の値 (伸張力) を取る。このことは、ベローズ内圧力が負圧でもベローズは伸張し得ることを示している。

さて、空気圧によって発生する力である F_p は、ベローズの空気圧発生面積を S とすると、

$$F_p = S(p - p_a) \quad (8)$$

で示すことができる。 S はベローズの有効断面積で $707 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ である。

ベローズ内の空気絶対圧力 $p_0 (= p + 101) \text{ kPa}$ 、体積を $V \text{ m}^3$ 、質量を $m \text{ kg}$ 、温度を $T \text{ K}$ 、空気の気体定数を $R (= 287 \text{ N m/kg} \cdot \text{K})$ とすると、状態方程式から、

$$p_0 V = mRT \quad (9)$$

と表される。微小時間 Δt におけるベローズ内の質量増加 Δm は、式 (5), (6), (7) の質量流量 G から、

$$\Delta m = G \Delta t \quad (10)$$

と表される。式 (9), (10) によって、時刻 t におけるベローズ内圧力 p_0 と、ベローズ体積 V すなわちロボットの変位が決定できる。このときの条件が式 (1), (2), (3), (4) である。

6. ロボットの走行特性

6.1 ベローズ内圧力と変位の測定

塩化ビニル管内での走行の前に、走行状態が分り易い透明アクリル管内でロボットを負荷のない状態で走行させ、ベローズ内圧力と変位を測定した。供給の正圧力は正圧空気供給管の固定側で +300kPa である。負圧力は負圧空気供給管の固

Fig. 6 Relationship between number of friction rings and friction force: F_1, F_2

Fig. 7 Relationship between displacement of bellows and elastic force of bellows: F_b

定側で -80kPa である。正圧力は 0.8s 間供給し、負圧力は 4.0s 間供給した。この時間はベローズが十分伸張し、かつ十分収縮するために要するものである。ベローズ内圧力を図 8 に実線で示した。また、ロボットの先端部と後端部の変位を図 9 に実線で示した。

さて、圧力であるが、+300kPa の正圧が供給されると、 $196 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$ の流量で空気がベローズ内に流入し、内圧は線形的に上昇する。ベローズ内圧力 p は、スタートから 0.8s 後には最高圧の +13.3kPa となる。正圧の供給が停止して負圧が供給されると、ベローズ内の圧力は減圧され、スタート後 1.2s には大気圧になる。その後、ベローズ内はさらに減圧されて負圧となり、スタートから 4.8s 後には -49kPa となる。

さて、変位であるが、スタート後約 0.1s に、内圧が -12.3kPa となると、ベローズ内圧力 F_p がベローズの弾性力 F_b 、摩擦リングの摩擦力 F_1 の和よりも大きくなり、ベローズは伸張を始める。式 (1) において、ロボットの先端部の慣性力 F_{i1} が現れることを示している。この後、ロボットの先端部はほぼ等速的に伸張し、スタート後 0.8s に 150mm の変位を得る。この時、ベローズの谷の間隔が広がるため、それに従い、4 枚の前側摩擦リングの前後の間隔は約 10mm ($x_1=10\text{mm}$) 広がった状態にある。もちろん、 $x_1=10\text{mm}$ はベローズが伸張した時に発生するので、収縮するに従って消滅する。加速減速が行われるのは、走行に要する 0.7s の前後の約 0.05s で、この時、約 250mm/s ($=150\text{mm}/0.6\text{s}$) の等速度に達するものと思われる。この時の加速度は 5m/s^2 となるので、ロボットの先端

部の慣性力 F_{ii} は 0.3N である。しかし、この値はあまり大きくなく、力のバランスからは殆ど無視できるものである。一方、ロボットの後端部は、式 (2) では、負荷のないロボット単体の走行時でも逆方向の摩擦力 F_2 が十分大きいので移動しないはずではあるが、ベローズが大きく伸びる 0.8s 間に約 10mm 後退している。これは、ベローズの伸張につれて谷の間隔が広がるため、それに従い、約 10mm 広がる 4 枚の後側摩擦リングがこの範囲 ($y_1=10\text{mm}$) で後方に移動するものと考えられる。柔軟なベローズの中央部は式 (1), (2) に支配されないで、蛇行して伸張する。ロボットの走行に関与しない伸張量は約 15mm である。従って、伸張時、ベローズの最大の伸び量は約 175mm であることが分かった。この時、ベローズの伸縮によって発生する前側摩擦リングの移動 x_1 は約 10mm が発生している。最大の伸び量に達した後、負圧になると収縮が始まり、まずベローズの蛇行部分がなくなり、次いで前側および後側のそれぞれ 4 枚の摩擦リングの移動距離の x_1 と y_1 が消滅する。スタートから 2.0s 後、前側摩擦リングの摩擦力は F_2 に換わり、後側摩擦リングの摩擦力は F_1 に換わる。前側摩擦リングの摩擦力 F_2 は、負圧によって発生する力 F_2 よりも十分大きな値まで耐えられるため、ロボットの先端部は保持される。一方、後側摩擦リングの摩擦力 F_1 は、負圧によって発生する力 F_1 よりも小さな値までしか耐えられないため、ロボットの後端部は前進することになる。スタートから 4.6s 後、 y は 140mm 変位し、ロボットの変位と一致する。結局、ロボット全体としては、4.8s 間に 140mm の距離を進み、平均の走行速度は 29.2mm/s が得られたことになる。

6.2 ベローズ内圧力と変位のシミュレーション

式 (1) から式 (10) を用いて、ベローズ内圧力とロボット変位のシミュレーションを行った。ベローズ内圧力の計算値を図 8 に破線で示す。正圧供給時はかなり実験値と合っている。負圧が供給されると、傾向が似ているが 10kPa 程の誤差が出てくる。ベローズ内の最低の圧力に達成する時間は実験値と殆ど等しい。一方、ロボット変位の計算値を図 9 に破線で示す。変位も正圧供給時はかなり実験値と合っている。しかし、負圧が供給され、ロボット後端部が前進し始めると、実験より計算値の方が早く変位してその最大値は 0.8s である。経過時間は 20% 弱の誤差が出るが、圧力と変位の大きさは実験値に近い値が計算できることが、このシミュレーションによって分った。

6.3 ロボットの牽引力の検討

ロボットの牽引力の検討を行う。牽引すべきものは、正圧および負圧用の空気供給管と検査用カメラと照明の電源線、検査カメラの信号線、電磁弁の信号線である。これらの牽引力は当然ながらその距離とともに増大する。直線に配置される配管の走行距離と必要な牽引力の関係を図 10 に示す。走行距離 20m に要する牽引力は 6.9N であることが分かった。牽引される空気供給管などの 20m 当りの質量は 1.5kg であるので、管の内壁との摩擦係数を 0.47 と見積もると、6.9N の牽引力は 20m の走行距離には妥当といえる。さて、ロボットが牽引力を発生して走行するのは、ベローズの収縮時である。この時、式 (3), (4) が同時に満足しなければならないので、

$$W=(F_2-F_1) + (F_{ii}-F_{id}) \quad (11)$$

である。ロボットの先端部は静止しているので、その慣性力 F_{ii} は 0 とできる。一方後端部の加速度は、 0.5m/s^2 程度であるの

Fig. 8 Internal pressure in the actuator (experimental and calculated)

Fig. 9 Displacements at front end and rear end of the actuator (experimental and calculated)

Fig. 10 Relationship between moving distance and needed traction force

Fig. 11 Relationship between number of friction rings and generated traction force

で F_2 は 0.1N 以下で無視できる。式(11)から、牽引力 W はテーパー状になった摩擦リングの逆方向の摩擦力 F_2 と順方向の摩擦力 F_1 の差 ($F_2 - F_1$) に依存することが予測される。実測した垂直方向の牽引力と摩擦リングの枚数との関係を図 11 に示す。摩擦リングが片側 4 枚では、7.1N が得られた。牽引力 W は、予測通り、($F_2 - F_1$) にかかなり依存するが、その大きさはその 0.4 倍程度であることが実験的に分った。従って、大きな牽引力を得るには、摩擦リングの数を増やせばよいことになる。

6.4 中距離走行時の走行速度と走行距離

試作したロボットを内径 44mm、長さ 20m の塩化ビニル管内を走行させた。摩擦リングは、ペローズの前後に 4 枚ずつ合計 8 枚を用いた。図 12 に走行距離とその時の走行速度を示す。走行当初の速度は 24mm/s であるが、20m の距離では、18mm/s まで低下した。速度は低下するが、20m の距離を 15 分で走行することが確認できた。しかしながら、この摩擦リングの発生する牽引力は図 11 に示したように 7.1N である。一方、空気供給間を含む牽引物の牽引距離 20m の必要な牽引力は 6.9N であるので、この摩擦リングの状態では、安定な走行距離は 20m ということになる。

本方式のロボット走行システムの利点は、他の走行ロボットをシステムに追加した場合、他の走行ロボットと共通とすることのできる正圧空気供給管と負圧空気供給管から独立して正圧と負圧の供給を受けられることである。そして、ペローズの前後に 4 枚ずつ合計 8 枚の摩擦リングを装着して 1 個の空気圧アクチュエータで駆動される走行ロボット 1 体は、20m の信号線を含む空気圧供給管を牽引して走行できることである。従って、約 20m 毎に 4 体ないし 5 体の走行ロボットを連結したロボット走行システムにすれば、さらに長距離走行の可能性もあるであろう。このロボット走行システムによる長距離走行は、今後の課題である。

7. 結 言

小径管を長距離走行できる検査ロボットに関して、検討と実験を行い、次の結論を得た。

- (1) 小径管用検査ロボットには、出力と重量の比で有利であるが、長距離走行には不向きとされていた空気圧アクチュエータの不向きの原因を究明し、空気圧切り換え用の電磁弁をロボットとともに走行させることで、この問題が解決できることを見出した。
- (2) 走行用の足となる複数の摩擦リングを空気圧アクチュエータであるゴムペローズに装着し、内径 44mm の塩化ビニル小径管内を通過できる小型電磁弁をペローズのすぐ後に配置したロボットを提案し、試作した。

Fig. 12 Relationship between moving distance and speed

- (3) 試作したロボットは、摩擦リングを 4 枚ずつ使い、正圧 +300kPa、負圧 -80kPa を内径 4mm、長さ 140m の 2 本の空気供給管で供給した時に、空気供給管等を牽引して 20m の距離を走行することが確認できた。約 20m 毎に 4 体ないし 5 体の走行ロボットを連結したロボット走行システムにすれば、さらに長距離走行の可能性もあるであろう。
- (4) 空気圧アクチュエータを用いた管内走行ロボットの力学モデルを提案し、アクチュエータの内圧力と変位をシミュレートし、牽引力を検討した。若干の誤差はあるものの、内圧力と変位はおおまかに計算でき、牽引力も予測できることが分かった。これらの知見は今後の小径管用検査ロボットの設計に大いに寄与できる。

参 考 文 献

- 1) 川口 圭史, 吉田 乙雄, 巖 敬三, 菊田 隆: 鉄管内走行ロボットの走行性能に関する検討, 日本ロボット学会誌, 15, 3(1997) 387.
- 2) 宮川 豊美, 鈴森 康一, 木村 正信, 長谷川 幸久: 1 インチ用配管作業ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, 17, 3(1999) 389.
- 3) 山口 敏明, 香川 美仁, 林 巖, 岩附 信行, 森川 広一, 中村 勝巳: 段差通過が可能な「ねじ原理」移動作業マイクロロボットの研究, 精密工学会誌, 66, 4(2000) 606.
- 4) 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, 18, 6(2000) 831.
- 5) 加藤 重雄, 平山 哲行: 空気圧駆動式人工蚯蚓の試作, 日本機械学会 IMPT-100 講演論文集, (1997) 661.
- 6) 高橋 昌樹, 林 巖, 岩附 信行, 鈴森 康一, 黄木 昇: みみずの運動を応用した細管内移動マイクロロボットの研究, 精密工学会誌, 61, 1(1995) 90.