振動式管内自走機構に関する基礎的研究*
(第2報, 走行体の走行特性)森 光 武 則*¹, 阪 田 秀 明*²A Study of a Vibrating Bristled Vehicle for Small Pipes
(2nd Report, Moving Characteristics of the Vehicle)

Takenori MORIMITSU and Hideaki SAKATA

This paper proposes a new vehicle that moves inside small pipes with inner diameters of less than 100 mm in order to maintain and inspect them. The vehicle is surrounded by bristles vibrated by centrifugal force provided by rotating eccentric weights. Since this method does not require wheels or reduction gears, there is a good potential for miniaturization. First, the sliding velocity of each bristle and its friction are discussed. Then, moving simulations and experiments are conducted using a vehicle with 16 bristles in order to clarify the relationship between the moving velocity of the vehicle and the angular velocity of the rotating eccentric weights. It is shown that the vehicle moves smoothly inside a small pipe. The calculated moving velocity agrees with the experimental results.

Key Words: Vehicle, Bristle, Angular Velocity, Moving Velocity Eccentric Weight, Centrifugal Force

1. 緒 言

近年, 石油, ガス, 水道および各種化学プラント用配管の点検技術に関する研究が活発に行われるようになってきた。このため, 配管の内側を走る走行体の開発も盛んに行われている⁽¹⁾⁽²⁾。従来は比較的口径の大きい配管を対象に研究が進められてきたが, 最近では点検対象の配管の種類や大きさも多岐にわたってきており, 口径が100 mm以下の小口径管内を自由に走行できる走行体の必要性も生じてきている。ところが, 走行体の小形化については走行特性の点から実現性に困難な面があり, 新しい発想による走行機構の開発が望まれていた。著者らは, 別報⁽³⁾で小口径管に適した振動式走行機構を提案し, その振動特性を解析した。本報では, 弾性針の振動による走行機構を明らかにし, シミュレーションにより走行特性を解析した。さらに実際に振動式走行体を製作して走行実験を行い, 走行体の振動数, 走行速度およびけん引能力などの関係がシミュレーション結果とよく一致することを示した。

これらの研究結果により振動式管内自走機構の実現性を明らかにすることができた。

2. 走行体の運動解析

2・1 弾性針の滑り速度と摩擦力 本研究で解析した振動式走行体の概要を図1に示す。走行体の周上に複数の弾性針を傾けて取付け, 走行体の両端に設けた偏心重りが走行体内のモータによって回転する構造としている。走行体を管内に挿入した状態では, 弾性針がいくらかたわんで管内面に圧接する。したがって, この偏心重りの回転速度が小さい場合は弾性針と管内面との摩擦力のため, 弾性針は管内面で滑らず, 走行

図1 振動式管内自走機構の概要

* 昭和62年7月22日 九州支部久留米地方講演会において講演, 原稿受付 昭和61年10月30日。

*¹ 正員, 日本電信電話(株)電気通信研究所 (〒319-11 茨城県東海村)。

*² 日本電信電話(株)電気通信研究所。

体の振動は生じないが、偏心重りの回転速度が大きくなると偏心重りの遠心力が増大して、弾性針が管内面で滑り始める。図2は走行体の重心が管断面中心Oの回りに半径 s 、回転角速度 ω で円振動を行っている場合の弾性針(走行体の周上に等間隔に8本設けた場合)の状態を示している。図3は走行体が円振動を行うときの一つの弾性針の動きを示している。すなわち、図3では図2に示した1番めの弾性針の位置関係を示しており、Aは弾性針の管内面との接点、Bは弾性針の走行体への取付点、 L は弾性針の長さ、 α は取付角度であり、AとBを結ぶ線が管軸となす角度を示している。今、走行体の管軸方向の動きを拘束し、また、弾性針の滑り方向は管軸方向のみとする。すなわち、図3(b)における点Aは左右方向には滑らないものと仮定する。さらに走行体の重心回りの回転はないものとする、点Bの動きは円運動となるので、点Aの原点を $t=0, s=0$ における位置とすると、時間 t における点Aの位置 y は

$$y = L \cos \alpha - \sqrt{L^2 - (L \sin \alpha + z)^2 - x^2} \quad \cdots (1)$$

と表される。

ここで、 $x = s \cos \omega t$

$$z = s \sin \omega t$$

である。

したがって、弾性針と管内面との滑り速度は

$$\frac{dy}{dt} = \frac{L \omega x \sin \alpha}{\sqrt{L^2 - (L \sin \alpha + z)^2 - x^2}} \quad \cdots (2)$$

となる。ここで $s \ll L$ であるので近似的に

$$dy/dt = s \omega \tan \alpha \cos \omega t \quad \cdots (3)$$

と表すことができる。今、仮に走行体が、速度 v で走行しているとする、弾性針と管内面との滑り速度は

$$u = dy/dt + v \quad \cdots (4)$$

となる。この速度 u は図2の1番めの弾性針の滑り速度に相当するが、同じ時間における他の2～8番めの弾性針の管内面との滑り速度 $u_n (n=2 \sim 8)$ は

$$\begin{aligned} u_n &= dy_n/dt + v \\ &= s \omega \tan \alpha \cos\{\omega t - (n-1)\pi/4\} + v \quad \cdots (5) \end{aligned}$$

で求められる。

次に、この弾性針と管内面との摩擦力について考える。図2における第 n 番めの弾性針と管内面との垂直抗力を N_n とすると、個々の弾性針と管内面とのみかけの摩擦力は弾性針の滑り方向によって変わり、次のようになる⁽⁴⁾。

$$(i) \quad u_n > 0 \text{ のとき } -\mu_a N_n \quad \cdots (6)$$

$$(ii) \quad u_n < 0 \text{ のとき } \mu_b N_n \quad \cdots (7)$$

である。

ここで

$$\mu_a = \mu / (1 + \mu \tan \alpha) \quad \cdots (8)$$

$$\mu_b = \mu / (1 - \mu \tan \alpha) \quad \cdots (9)$$

である。ただし、 μ は弾性針と管内面との滑り摩擦係数である。なお N_n の値は走行体の円振動によって、次のように表される。

$$N_n = k_r [s_0 - s \sin\{\omega t - (n-1)\pi/4\}] \quad \cdots (10)$$

ここで s_0 は管断面方向における弾性針の初期たわみ量、 k_r は個々の弾性針のばね定数で以下のように表される。

$$k_r = 3EI/L^3 \cos^2 \alpha \quad \cdots (11)$$

E は弾性針のヤング率、 I は断面二次モーメントである。走行速度 v が零の場合は、式(5)より、滑り速度が正になる弾性針の数と、負になる弾性針の数は同じになる。今、走行体の円振動半径 s が初期たわみ s_0 に比べて小さいと仮定すると弾性針と管内面との垂直抗力 N_n は一定とみなせるので、これを N_0 とおく。この場合、走行体には弾性針の滑り摩擦力によって弾性針1列(8本)当たり $4(\mu_b - \mu_a)N_0$ なる外力すなわち管軸方向の推進力が作用することになる。したがって、走行体を管内で自由に走行させると、この推進力により走行体は加速され、管内を振動しながら走行するこ

図2 走行体の円振動

図3 弾性針の運動

とが予想される。

次に、走行体が定常速度で走行している状態について、弾性針1列(8本)の力の釣り合いを考察する。今、弾性針と管内面との滑り速度($dy_n/dt + v$)が正となる弾性針の数を i 、走行体に作用する負荷を F_0 とすると、定常速度に達した状態では、弾性針と管内面との摩擦力 $i\mu_a N_0$ 、 $(8-i)\mu_b N_0$ および走行体に作用する負荷 F_0 (けん引力と考えてもよい)がおおむね釣り合っていると考えることができる。

すなわち、

$$i\mu_a N_0 = (8-i)\mu_b N_0 - F_0 \quad \dots\dots\dots (12)$$

がほぼ成り立っていると考える。この式を式(8)、(9)を用いて書き直すと

$$i = 4(1 + \mu \tan \alpha) - \frac{F_0(1 - \mu^2 \tan^2 \alpha)}{2\mu N_0} \quad \dots\dots\dots (13)$$

となる。すなわち、走行体が自由走行している場合には、 $\mu \tan \alpha$ が大きいほど i は大きくなり、また負荷 F_0 が大きいほど i は小さくなる。一方、 i は滑り速度が正となる弾性針の数であるから、整数のはずであるが、式(13)で求まる値は通常は整数とはならない。この i の値の整数部分を $[i]$ で表すと、滑り速度が正となる弾性針の数は実際には $[i]$ と $[i]+1$ を時間とともに交互に繰返すことになる。今、仮に走行体の定常速度 v の速度変動が極めて小さく、ほぼ一定であると仮定する。そして、例えば、式(13)より求めた i が $4 < i < 5$ であったとすると定常速度に達した後の8本の弾性針の管内面との滑り速度は式(5)より求められて、その結果は図4に示すように得られる。すなわち、 $[i] = 4$ 、 $[i]+1 = 5$ となるためには図4のように $0 < v < v_a$ であることが必要である。なお、図4中に示した番号1~8はそれぞれ図2の番号の弾性針に対応している。図4において、時間域 t_a においては、滑り速度 u_n が正となる弾性針の数は4であり、時間域 t_b においては、その数は5となる。したがって、実際には厳密に式(12)が成り立つことはなく、式(12)における力のアンバランスのためわずかながら走行体は加速減速を繰返すことが推測される。

2.2 走行体の円振動半径 走行体の円振動半径の解析については、第1報⁽³⁾に述べているが、第1報では管軸方向の運動を拘束して解析しているため、ここでは走行中における円振動について概説する。走行体の管軸方向を拘束した場合は2.1節に述べた i の値が常に4であるが、走行中では i の値は μ 、 F_0 、 α などによって式(13)により種々の値をとる。走行体の円振動半径は、この i の大きさにも依存することを考慮する必要がある。図5には走行体が走行中に管内面から

受ける力を示している。すなわち、弾性針は管内面との滑り方向に応じて、図5(a)に示したように $\mu_a N_0$ または $\mu_b N_0$ なる摩擦力を受ける。この管軸方向の摩擦力のため弾性針には $\mu_a N_0 / \cos \alpha$ または $\mu_b N_0 / \cos \alpha$ なる軸力が作用し、したがって、管断面方向には $\mu_a N_0 \tan \alpha$ または $\mu_b N_0 \tan \alpha$ の力が図5(b)に示したように働く。図5の例は式(13)より $i=5$ と計算された場合であり、 $2n\pi + \pi/8 \leq \omega t < 2n\pi + 3\pi/8$ の時間域における各弾性針と管内面との摩擦力の大きさとその方向を示している。すなわち、この時間域では5, 6, 7番めの弾性針の滑り方向が負となり、管断面方向の力の合力として $\omega t = -\pi/4$ の方向に

$$Q = (1 + \sqrt{2})(\mu_a + \mu_b)N \tan \alpha \quad \dots\dots\dots (14)$$

の大きさの力が働く。なお、この状態から時間が進んで $2n\pi + 3\pi/8 < \omega t < 2n\pi + 5\pi/8$ になると、今度は図5(b)の6, 7, 8番めの弾性針の滑り速度が負となって、その時間域では式(14)と同じ大きさの抵抗 Q が $\omega t = 0$ の方向に作用する。したがって、走行体の運動モデルは図6に示すことができる。図6において、走行体の重心移動の方向と管断面方向の抵抗 Q とがなす角度 β は $3\pi/8$ から $5\pi/8$ まで変化するが、平均値をとると $\beta = \pi/2$ となり、この値を用いて、力のバランスから走行体の円振動半径 s を求めると

図4 弾性針の滑り速度

図5 走行体円振動に対する抵抗

(i) $\omega < \sqrt{k/(M+m)}$ のとき

$$S = \frac{\sqrt{(ml_0\omega^2)^2 - Q^2}}{K - (M+m)\omega^2} \quad \dots\dots\dots (15)$$

(ii) $\omega > \sqrt{k/(M+m)}$ のとき

$$S = \frac{\sqrt{(ml_0\omega^2)^2 - Q^2}}{(M+m)\omega^2 - K} \quad \dots\dots\dots (16)$$

となる。

ここで M は走行体の質量, m は偏心重りの質量, K は弾性針 16 本による走行体の断面方向変位に対する等価ばね定数で, 次のように表される⁽³⁾。

$$K = \frac{24EI(1+\cos^2\alpha)}{L^3\cos^2\alpha} \quad \dots\dots\dots (17)$$

なお, 図 6 において, O は管断面の中心, M_0 は走行体が円振動を行うための所要モーメント, l_0 は偏心重りの偏心量である。

さらに, 一般的に $i=5$ 以外について考えると, 例えば式(13)により $i=4, 6, 7$ と得られた場合の Q および β を図 5 (b) に示した考え方で求めると表 1 に示す結果を得る。表 1 からわかるように i の大きさが変わっても, β の変化する範囲は一定であるが, Q は変化する。したがって, 前述したように式(13)から求まる i は通常, 整数ではないので厳密には弾性針の滑り方向が変わるたびにすなわち滑り速度が正となる弾性針の数が $[i]$ の時間域と $[i]+1$ になる時間域とでは Q の大きさが変わる。しかしながら, ここでは近似的に式

(13) から得られる値 i を四捨五入した整数すなわち $[i]$ と $[i]+1$ のうちで i に近いほうの数を用いて Q を求め, また, β については時間平均をとって $\beta=\pi/2$ として計算を進めた。

2.3 走行のシミュレーション 本節では運動方程式を解くことにより走行シミュレーションを試みる。走行体の運動方程式は, 弾性針が 2 列であることから,

$$dv/dt = 2(\sum_{n=1}^8 \mu_n N_n - F_0)/(M+m) \quad \dots\dots\dots (18)$$

と表される。ここで μ_n は式(6), (7)に示したように $u_n > 0$ のとき $-\mu_a$, $u_n < 0$ のとき μ_b を用いる。 N_n は式(10)で与えられている。具体的な計算のフローを図 7 に示す。またシミュレーションを行った計算条件を表 2 に示す。図 8 (a), (b), (c) にこの計算条件により求めたシミュレーション例を示す。ここで注意すべきことは走行体の初速を零として計算するため, 最初の間は $i=4$ である。しかしながら, 定常速度における i の値はこれよりも大きく, 実際のシミュレーション計算ではこの定常状態における i を用いるため, 定常速度に達するまでのシミュレーション結果は実際とは異なる。したがって, 図 8 (a)~(c) では定常速度に達した後の走行速度を示している。 ωt が $2\pi \sim 4\pi$ で定常速度に達し, その後は偏心重りが一回転する間に 8 周期の加速, 減速を繰返しながら走行する。例えば, 図

表 1 走行体円振動に対する抵抗 Q と β

i	$Q/(\mu_a + \mu_b)N_0 \tan \alpha$	β
4	$\sqrt{4+2\sqrt{2}}$	$\frac{3}{8}\pi \sim \frac{5}{8}\pi$
5	$1 + \sqrt{2}$	
6	$\sqrt{2+\sqrt{2}}$	
7	1

図 6 走行体円振動の力学モデル

図 7 シミュレーションの計算フロー

8(a)は負荷 $2F_0=0$ のシミュレーション例を示しているが、表2の計算条件で式(13)より i を求めると $i=5.33$ を得る。したがって、走行時は $[i]=5$ で加速し、 $[i]+1=6$ で減速する走行パターンとなり、加速・減速の様子がシミュレーション結果によく表れている。

一方、この走行体の最大けん引力は、弾性針の数が8本 $\times$ 2列であることを考慮すれば、

$$2F_0=8(\mu_b-\mu_a)N_0 \quad \dots\dots\dots (19)$$

となり、表2の計算条件では、走行体の最大けん引力は1.416 Nとなる。 $2F_0$ がこれより小さい間は走行体は前進するが、これより大きくなると後退する。このことは $2F_0=0.9$ N および 1.8 N の条件でシミュレーションした図8(b), (c)に走行体の前進・後退の様子がよく表れている。

2.4 走行速度の簡易な推定法 2.3節では走行体に加わる管軸方向の外力、すなわち各弾性針と管内面との滑り摩擦力を求め、運動方程式を解くことによって走行シミュレーションを行った。ここでは先に示した図4から容易に走行速度が得られることを示す。走行速度 v を時間平均で表すこととすると、 $v=0$ の場合は図4からわかるように明らかに $i=4$ であり、 $0 < v < v_a$ の場合には $4 < i < 5$ となり、 $[i]=4$ 、 $[i]+1=5$ である。同じように $v=v_a$ で $i=5$ 、 $v=v_b$ で $i=6$ さらに $v=v_c$ で $i=7$ となる。なお、通常は走行体の走行速度が v_c 以上になることはないが、式(9)において $\mu \tan \alpha > 1$ なる場合にはその弾性針についてはセルフロックの状態となり、 μ_b は無限大となり、弾性針は滑り方向が負の方向には滑らなくなる。したがって、この場合の走行速度は

$$v(t)=\text{Max}|u_n(t)| \quad \dots\dots\dots (20)$$

表2 シミュレーションの計算条件

Items		Values
Vehicle	Vehicle Mass M	0.266 kg
	Eccentric Mass m	0.043 kg
	Eccentric Length ℓ_0	4 mm
Bristle	Material	Piano Wire
	Young's Modulus E	206 GPa
	Diameter d	0.45 mm
	Length L	11.8 mm
Pipe	Inclination Angle α	57.7°
	Material	Acryl
	Friction Coefficient μ	0.21
Friction	Inner Diameter	80 mm
	$\mu_a N_0$ / 1 Bristle	0.202 N
	$\mu_b N_0$ / 1 Bristle	0.379 N

となる。さて、

$$\left. \begin{aligned} v_a &= \cos(3\pi/8) s \omega \tan \alpha \\ v_b &= \cos(\pi/4) s \omega \tan \alpha \\ v_c &= \cos(\pi/8) s \omega \tan \alpha \\ v_d &= s \omega \tan \alpha \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (21)$$

であるから、これを用いて i と v の関係を図示すると図9を得る。すなわち、 $i=4, 5, 6, 7$ に対する走行速度は上述した検討結果から求めた値で○印で表し、 $4 < i < 5$ 、 $5 < i < 6$ 、 $6 < i < 7$ については、各点から内挿して推定し、実線で表している。すなわち、式(13)より i を求め表1の Q を用いて、式(15)または式(16)から s を算出すれば、図9より走行速度の推定が可能となる。

一方、2.3節に示した走行シミュレーション結果から求めた定常状態における平均速度を図9中に●印で示している。図9から明らかなように、両者はよく一

図8 シミュレーション結果

図9 滑り速度が正となる弾性針の数 i と走行速度 v の関係

図10 実験装置の概要

致しており、式(13)によって求められる i から走行速度が容易に得られることが明らかになった。

3. 実験結果

実験装置の概要を図10に示す。走行体はアルミニウムのシリンダにモータを内蔵し、シリンダの外周に8本×2列の弾性針を取付けている。実験条件は走行シミュレーションと同じ(表2)である。なお、弾性針と管内面との真の摩擦係数が滑り方向によって影響を受けないように弾性針の先端部に黄銅製の半球体(0.5 mmR)を取付けた。走行実験では走行体は透明のアクリル管内に挿入し、図10に示したように重りを負荷とし、一定距離を走行する時間から走行速度を求めた。また、 $\mu_a N_0$ および $\mu_b N_0$ の測定は同じく図10の装置を用い、走行体を静止させた状態で、それぞれ弾性針の傾斜方向に対して順方向、逆方向に滑り始める重りの大きさから求めた。なお、偏心重りの回転角速度は非接触回転計により測定した。図11は先に2・4節で

図11 偏心重りの回転角速度 ω と走行速度 v の関係

述べた走行速度の簡易な推定法から求めた計算値を実線で示し、走行実験による実測値を○、●印で示している。○印は無負荷の場合、●印は負荷1.2 Nの場合の実測値である。実験値と計算結果はよく一致し、本解析結果の妥当性を明らかにすることができた。

4. 結 言

車輪を用いない新しい管内走行機構すなわち弾性針の振動による管内走行機構の走行特性を明らかにした。まず最初に走行シミュレーションを行い、走行機構を明らかにするとともに弾性針の滑り方向から容易に走行速度を求める方法を提案し、これがシミュレーション結果とよく一致することを示した。最後に走行体の模型による走行実験を行い、計算結果とよく一致することを示した。このことにより弾性針の振動を利用した管内走行機構の実現性が明らかになった。

最後に本研究に対し、御指導いただいた日本電信電話(株)茨城電気通信研究所 小島線路研究部長、内田主席研究員および石原線路機械研究室長に深甚なる謝意を表す。

文 献

- (1) Okada, ほか1名, Vehicle in Pipe for Monitoring Inside of Pipe, MOGRER, Proc. 15th ISIR, (1985), 297-304.
- (2) 福田・細貝, 管内走行検査ロボットに関する基礎的研究, 第24回 SICE 学術講演会予稿集, (昭60), 333-334.
- (3) 森光・阪田・野村, 振動式管内自走機構に関する基礎的研究-第1報 走行体の振動特性, 機論, 53-489, C (昭62).
- (4) 横山, 自動組立のためのダイナミックス, オートメーション, 19-8 (昭49), 91-97.