

報 文

回転不釣合力を利用した振動輸送機の動特性

茨城職業訓練短期大学校 竹内 生公

Dynamic Behavior with Rotating Unbalance Force Used a Vibro-Mouver

Seikou Takeuchi

要 約 本論文は車体内に取付けた2個の不釣合質量を垂直面内で回転運動をさせることにより生じる回転不釣合力および車体と接地面間との摩擦力の変動を利用して、振動しながら自己推進を行う装置を提案し、その力学的解析と実験について述べている。解析は基礎運動方程式より不釣合力と摩擦係数に対する車体の加速度、速度および変位の関係式を導出し、運動特性を簡潔に把握している。解析モデルに近い実験装置を製作し、それを用いた実験結果と解析結果を比較・検討している。この結果、平均速度は不釣合力と摩擦係数、2個の不釣合質量の位相角の大ききで変化し、定常運動の1サイクル中に車体が一時停止する場合のあることなどを明らかにしている。これらより、ここに提案した駆動機構とそれの解析方法の妥当性を示している。

I 序 論

現在、陸上において最も多く使用されている駆動機構は動力を回転運動に変え、それを車輪に伝達し車輪の回転により車体を移動させる方式である。ここに提案する駆動機構は不釣合おもりを鉛直面内で回転させることにより生じる不釣合力および車体と接地面との間に作用する摩擦力の変動を利用して車体を移動させる方式である。したがって、従来の駆動機構とは異なった機構を持つ装置で、回転遠心力によって振動しながら自己推進する。この装置を本報告では振動輸送機とよぶことにする。

これと同じ系統に属すると考えられる機構に振動フィーダがある。これは振動する面に物体を載せ、物体と面との摩擦力を利用して物体を輸送するものである。振動フィーダは現在広く使用されており、これに関する理論解析や実験の報告はすでになされている^{(1)~(5)}。本機は振動輸送の分野に属するものであり、振動フィーダとの相違点は加振源の位置にある。すなわち、本機の加振源は輸送機あるいは物体に直接取付けてあるが、振動フィーダの場合は接地面に取付けてあり、加振源

は移動しない。ゆえに、ここに述べる振動輸送機は車輪を用いなくて前進・後退が可能な機械装置である。

そこで、振動輸送機の運動特性を簡潔に把握するための駆動機構の基礎的な理論解析とそれに関する実験を行なった。この結果、平均速度は不釣合力と車体と接地面間の摩擦係数の大ききで変化し、定常運動の1サイクル中に車体が一時停止する場合のあることなどを明らかにすることができたので報告する。

II 理論解析

1. 基礎運動方程式の導出

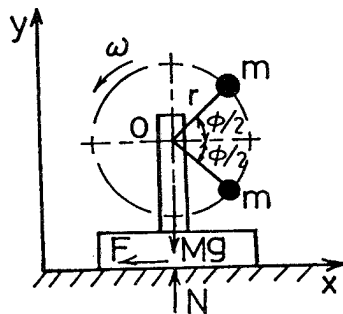


図1 解析モデル

図1に振動輸送機の解析モデルを示す。車体上の回転中心Oから半径rの位置に取付けられた2個の不釣合質量mが、反時計方向に角速度ωで回転運動をしている。不釣合質量mの位相角をφとして、次の仮定をおく。(1)回転中心Oと接地面との間のモーメントは無視できる。(2)摩擦係数は速度、垂直抗力が変化しても一定値をとる。(3)車体は接地面を離れないとする。車体には接地面からの垂直抗力N、不釣合力P、車体と接地面間の摩擦力Fが作用する。これより、車体に関する運動方程式は次式のように与えられる。

$$M\ddot{x} + F \cdot \text{sgn}[\dot{x}] = P \cos \omega t, \tag{1}$$

$$M\ddot{y} - N + Mg = P \sin \omega t.$$

ここで、Mは車体の全質量、gは重力加速度である。記号上のドットは時間tに関する微分を意味し、sgn[]は符号関数で[]内が正のとき+1、負のとき-1をとるものと約束する。

仮定(3)より、 $\dot{y} = 0$ であるから $\ddot{y} = 0$ である。したがって、式(1)の第2式より垂直抗力Nは

$$N = Mg - P \sin \omega t, \tag{2}$$

のように変化する。さらに、不釣合力Pは

$$P = 2mr\omega^2 \cos(\phi/2), \tag{3}$$

で与えられる。

摩擦力Fに関して、車体が静止しているときは $\dot{x} = 0$ であるから $\ddot{x} = 0$ である。このときの摩擦力をF = Fsとすると、式(1)の第1式より次式を得る。

$$F = F_s = P \cos \omega t. \tag{4}$$

これは不釣合力と同じ大きさである。車体が運動しているとき、車体と接地面との間にクーロン摩擦が作用するものとする。運動している車体に働く摩擦力をF = Fmとすると摩擦係数をμとして次式で表せる。

$$F = F_m = \mu N \cdot \text{sgn}[\dot{x}]. \tag{5}$$

式(2)、(3)を式(5)に代入し、さらにそれを式(1)に代入すると次の運動方程式を得る。

$$M\ddot{x} + \mu \{Mg - 2mr\omega^2 \cos(\phi/2) \cdot \sin \omega t\} \times \text{sgn}[\dot{x}] = 2mr\omega^2 \cos(\phi/2) \cdot \cos \omega t. \tag{6}$$

上式を無次元化するために次の無次元量を導入する。

$$P' = \frac{P}{Mg} = \frac{2mr\omega^2}{Mg} \cdot \cos \frac{\phi}{2}, \quad N' = \frac{N}{Mg},$$

$$F' = \frac{F}{Mg}, \quad F_s' = \frac{F_s}{Mg}, \quad F_m' = \frac{F_m}{Mg},$$

$$\tau' = \omega t, \quad \alpha' = \frac{\ddot{x}}{g}, \quad v' = \frac{\omega}{g} \dot{x},$$

$$x' = \frac{\omega^2}{g} x. \tag{7}$$

便宜上、式(7)の右肩のダッシュを以後、省略して用いる。したがって、特にことわりのない限り以下に示す量は全て無次元量である。式(6)より加速度αは次式になる。

$$\alpha = P \cos \tau - \mu (1 - P \sin \tau) \text{sgn}[v], \tag{8}$$

速度vと変位xは上式を積分することにより得られ、それぞれ次式になる。

$$v = P \sin \tau - \mu (\tau + P \cos \tau) \text{sgn}[v] + C, \tag{9}$$

$$x = -P \cos \tau - \mu \{(\tau^2/2) + P \sin \tau\} \text{sgn}[v] + C\tau + D. \tag{10}$$

ここでC、Dは積分定数である。

また、垂直抗力N、摩擦力FsとFmは次式で示される。

$$N = 1 - P \sin \tau, \quad F_s = P \cos \tau,$$

$$F_m = \mu N \cdot \text{sgn}[v] = \mu (1 - P \sin \tau) \text{sgn}[v]. \tag{11}$$

車体が接地面を離れない条件としては常に垂直抗力N ≥ 0が成立することで、このためには

$$1 - P \sin \tau \geq 0, \quad 1 \geq P \sin \tau, \tag{12}$$

でなければならず、1 ≥ Pなる条件が得られる。

2. 運動形態の分類

車体の運動は接地面に対して正方向にすべる運動、負方向にすべる運動、すべりが無い運動およびこれら

の組み合わせからなる運動が考えられる。

不釣合力質量 m が回転運動をしていても車体が静止している場合は摩擦力 F_m に比べて摩擦力 F_s (あるいは不釣合力 P) は常に小さい。したがって、式(11)より

$$|P \cos \tau| \leq |\mu(1 - P \sin \tau)|, \quad (13)$$

あるいは

$$-\mu(1 - P \cos \tau) \leq P \cos \tau \leq \mu(1 - P \sin \tau), \quad \dots\dots(14)$$

が成立しているときは車体は動き出さない。このときの摩擦力 F_m と F_s との関係を図示すると図2 (a) になる。

もし、摩擦係数 μ が小さくなるか、不釣合力 P が大きくなれば摩擦力 F_m は摩擦力 $F_s = P \cos \tau$ に近づき図 (b) に示すようになる。このように P (あるいは F_s) と F_m が交われば車体の運動は生じる。すなわち式(13)あるいは式(14)の成立しない条件

$$P \cos \tau > \mu(1 - P \sin \tau),$$

$$P \cos \tau < -\mu(1 - P \sin \tau), \quad (15)$$

を満たす時間 τ が存在すれば車体は運動をはじめ。式(15)のもとで静止していた車体が時刻 τ_1 で運動をはじめると運動の方向は図2 (b) より、不釣合力 $P \cos \tau$ は負の方向に向かっているから車体の運動方向は負となる。運動を続けるうちに不釣合力 $P \cos \tau$ は運動中の摩擦力 F_m より小さくなり、車体はやがて停止す

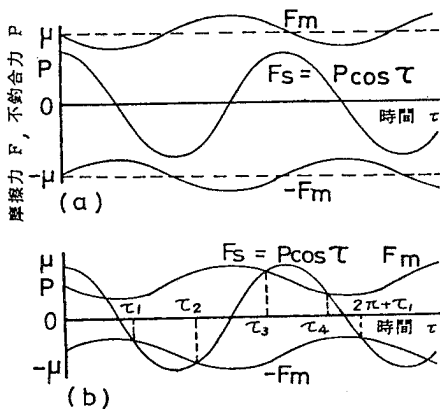


図2 摩擦力と不釣合力の関係

る。この時刻を τ_2 とする。 $\tau = \tau_3$ で再び不釣合力 $P \cos \tau$ が大きくなり車体は運動をはじめ、 $\tau = \tau_4$ で停止する。 τ_3 から τ_4 間の運動方向は正方向である。このときの摩擦力 F の変化は図2 (b) より、時刻 τ_1 において車体は運動を始めるから $-F_m (= -\mu(1 - P \sin \tau))$ の線上を時刻 τ_2 まで変化し、 τ_2 からは車体が停止するので $F_s = P \cos \tau$ の線上に沿って時刻 τ_3 まで変化する。 τ_3 からは再び車体が運動をはじめ、 $F_m (= \mu(1 - P \sin \tau))$ の線上に沿って変化し、 τ_4 で停止すると再び $F_s = P \cos \tau$ の線上に沿って変化する。車体の運動開始時刻 τ_1 と τ_3 は式(15)の不等号を等号に置き換えた式より、次式のごとく求められる。

$$\tau_1 = \pi - \sin^{-1} q_1, \quad \tau_3 = 2\pi + \sin^{-1} q_2. \quad (16)$$

ただし、 q_1 と q_2 は次式である。

$$q_1 = \frac{\mu^2 + \sqrt{\mu^2 P^2 - \mu^2 + P^2}}{(\mu^2 + 1)P},$$

$$q_2 = \frac{\mu^2 - \sqrt{\mu^2 P^2 - \mu^2 + P^2}}{(\mu^2 + 1)P}. \quad (17)$$

式(17)の分子にある根号内が零のとき、つまり

$$\mu = P/\sqrt{1 - P^2}, \quad (18)$$

の関係を摩擦係数 μ と不釣合力 P が満たすとき摩擦力 F_s と F_m は1点で接し、車体の停止と運動の境界を与える。 $\mu > P/\sqrt{1 - P^2}$ の場合、式(18)の根号内が負になり、2曲線の交点が存在しない条件式(13)の場合に相当することになる。

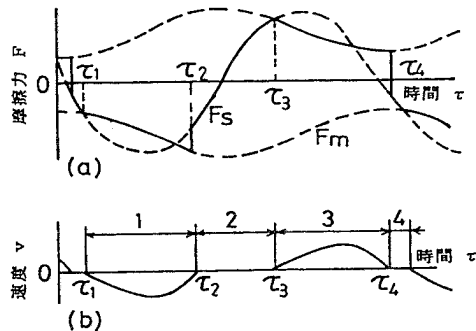


図3 摩擦力と速度の関係

いま、摩擦力の変化曲線が図3 (a) に示す状態であった場合を考えると車体の速度曲線は図3 (b) に示すようになる。このときの速度 v を1、2、3および4と区間を分け、それぞれの区間における加速度 a 、速度 v 、変位 x はそれらの添字を付して示す。したがって、速度 v については速度の方向に注意して、式(9)より次式のように書き表せる。

$$v_1 = P \sin \tau + \mu (\tau + P \cos \tau) + C_1、$$

$$v_3 = P \sin \tau - \mu (\tau + P \cos \tau) + C_3。 \quad (19)$$

ここで、 C_1 、 C_3 は積分定数で、初期値 $v_1(\tau_1) = 0$ 、 $v_3(\tau_3) = 0$ より

$$C_1 = -P \sin \tau_1 - \mu (\tau_1 + P \cos \tau_1)、$$

$$C_3 = -P \sin \tau_3 + \mu (\tau_3 + P \cos \tau_3)、 \quad (20)$$

と与えられる。式(20)を式(9)に代入し、条件 $v_1(\tau_2) = 0$ 、 $v_3(\tau_3) = 0$ を用いると次式が得られる。

$$P \sin \tau_2 + \mu (\tau_2 + P \cos \tau_2) - P \sin \tau_1 - \mu (\tau_1 + P \cos \tau_1) = 0、$$

$$P \sin \tau_4 - \mu (\tau_4 + P \cos \tau_4) - P \sin \tau_3 + \mu (\tau_3 + P \cos \tau_3) = 0。 \quad (21)$$

摩擦係数 μ および不釣合力 P を与えることにより、式(16)で τ_1 、 τ_3 が決まり、上式から τ_2 、 τ_4 を求めることができる。

3. 各運動形態における加速度、速度および変位の式

車体の運動は摩擦係数 μ と不釣合力 P の大きさの関係により定常運動の1周期間に一時停止が2度ある場合、1度ある場合、1度も無い場合とに分けることができる。これらの運動を形態I、IIおよびIIIとよぶことにする。したがって、アラビア数字は運動区間を示し、ローマ数字は運動の形態を示すものとして加速度 a 、速度 v 、変位 x および積分定数 C 、 D を表示する。

はじめに、図3 (b) に示す運動形態Iの加速度 a は式(8)より次式で表される。

$$a_{11} = P \cos \tau + \mu (1 - P \sin \tau)、$$

$$a_{21} = 0、$$

$$a_{31} = P \cos \tau - \mu (1 - P \sin \tau)、$$

$$a_{41} = 0。 \quad (22)$$

速度 v は式(9)より

$$v_{11} = P \sin \tau + \mu (\tau + P \cos \tau) + C_{11}、$$

$$v_{21} = 0、$$

$$v_{31} = P \sin \tau - \mu (\tau + P \cos \tau) + C_{31}、$$

$$v_{41} = 0、 \quad (23)$$

で表せる。ただし、式(23)の v_{11} と v_{31} は式(19)の v_1 と v_3 と同じであり、 C_{11} と C_{31} はそれぞれ式(20)の C_1 と C_3 に等しい。

変位 x は式(10)より次式になる。

$$x_{11} = -P \cos \tau + \mu (\tau^2/2 + P \sin \tau) + C_{11} \tau + D_{11}、$$

$$x_{21} = x_{11}(\tau_2) = -P \cos \tau_2 + \mu (\tau_2^2/2 + P \sin \tau_2) + C_{11} \tau_2 + D_{11}、$$

$$x_{31} = -P \cos \tau - \mu (\tau^2/2 + P \sin \tau) + C_{31} \tau + D_{31}、$$

$$x_{41} = x_{31}(\tau_4) = -P \cos \tau_4 - \mu (\tau_4^2/2 + P \sin \tau_4) + C_{31} \tau_4 + D_{31}、 \quad (24)$$

ここで、 D_{11} および D_{31} は条件 $x_{11}(0) = 0$ 、 $x_{21} = x_{31}(\tau_3)$ から次式になる。

$$D_{21} = P \cos \tau_1 - \mu (\tau_1^2/2 + P \sin \tau_1) - C_{11} \tau_1、$$

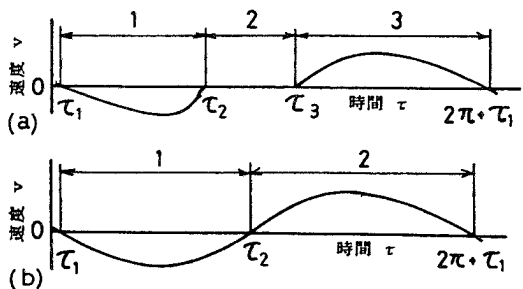


表4 速度曲線

$$D_{31} = -P(\cos \tau_2 - \cos \tau_3) + \mu P(\sin \tau_2 + \sin \tau_3) + \mu(\tau_2^2 + \tau_3^2)/2 + C_{11}\tau_2 - C_{31}\tau_3 + D_{11}, \quad (25)$$

次に、運動の形態Ⅱの場合、速度曲線は図4(a)のように与えられる。このときの加速度 α は前と同様に

$$\alpha_{1II} = \alpha_{1I}, \quad \alpha_{2II} = 0, \quad \alpha_{3II} = \alpha_{3I}, \quad (26)$$

であり、速度 v と変位 x はそれぞれ次式になる。

$$\begin{aligned} v_{1II} &= P\sin \tau + \mu(\tau + P\cos \tau) + C_{1II}, \\ v_{2II} &= 0, \\ v_{3II} &= P\sin \tau - \mu(\tau + P\cos \tau) + C_{3II}, \\ x_{1II} &= -P\cos \tau + \mu(\tau^2/2 + P\sin \tau) + C_{1II}\tau + D_{1II}, \\ x_{2II} &= x_{1II}(\tau_2) = -P\cos \tau_2 + \mu(\tau_2^2/2 + P\sin \tau_2) + C_{1II}\tau_2 + D_{1II}, \\ x_{3II} &= -P\cos \tau - \mu(\tau^2/2 + P\sin \tau) + C_{3II}\tau + D_{3II}. \end{aligned} \quad (27)$$

ここで、積分定数は条件 $v_{1II}(\tau_1) = 0$ 、 $v_{3II}(\tau_3) = 0$ 、 $x_{1II}(\tau_1) = 0$ 、 $x_{2II} = x_{3II}(\tau_3)$ より $C_{1II} = C_{1I}$ 、 $C_{3II} = C_{3I}$ 、 $D_{1II} = D_{1I}$ 、 $D_{3II} = D_{3I}$ となる。

運動形態Ⅲの速度曲線は図4(b)で与えられ、各区間の加速度 α 、速度 v 、変位 x はそれぞれ次式になる。

$$\begin{aligned} \alpha_{1III} &= \alpha_{1I}, \quad \alpha_{2III} = \alpha_{3I}, \\ v_{1III} &= P\sin \tau + \mu(\tau + P\cos \tau) + C_{1III}, \\ v_{2III} &= P\sin \tau - \mu(\tau + P\cos \tau) + C_{2III}, \\ x_{1III} &= -P\cos \tau + \mu(\tau^2/2 + P\sin \tau) + C_{1III}\tau + D_{1III}, \\ x_{2III} &= -P\cos \tau + \mu(\tau^2/2 + P\sin \tau) + C_{2III}\tau + D_{2III}. \end{aligned} \quad (29)$$

ここで、積分定数は初期条件 $v_{1III}(\tau_1) = 0$ 、 $v_{1III}(\tau_2) = 0$ 、 $x_{1III}(\tau_1) = 0$ 、 $x_{1III}(\tau_2) = x_{2III}(\tau_2)$ より、 $C_{1III} = C_{1I}$ 、 $D_{1III} = D_{1I}$ 、 $C_{2III} = -P\sin \tau_2 + \mu(\tau_2 + P\cos$

$\times \tau_2)$ 、 $D_{2III} = \mu(\tau_2^2 + 2P\sin \tau_2) + (C_{1III} - C_{2III})\tau_2 + D_{1III}$ になる。式(22)から式(28)を用いて、種々の摩擦係数 μ と不釣合力 P の値を与えることにより時間 τ に対する加速度 α 、速度 v と変位 x の曲線が求められる。

4. 計算例

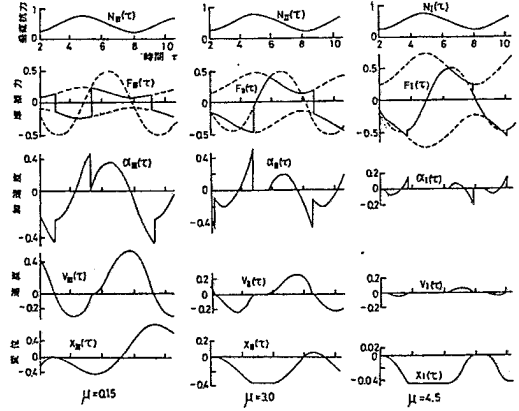


図5 計算結果の一例
(不釣合力 $P = 0.5$ 、位相角 $\phi = 0$ 度)

図5に、計算結果の一例を示す。同図は摩擦係数 μ をパラメータにとり、不釣合力 $P = 0.5$ としたときである。加速度 α 、速度 v および変位 x の他に摩擦力 F と垂直抗力 N の変化も示してある。図より、いずれの運動形態においても不釣合力の大きさが等しいので垂直抗力 N は同じであるが、摩擦係数 μ の大きさにより摩擦力 F の大きさやその曲線形状が大きく変化している。したがって、それにとまない車体速度 v も大きく異なる。また、車体が静止するところ、あるいは車体の速度の符号が切り変わる所で摩擦力 F が不連続に変化するため加速度も不連続になる様子もわかる。

次に、車体の平均速度を \bar{v} で表すとき、定常状態になったときの1サイクルの変位を x_c とすれば、平均速度 \bar{v} は容易に次式のように得られる。

$$\bar{v} = \frac{x_c}{2\pi}. \quad (32)$$

この平均速度 \bar{v} と摩擦係数 μ の関係を不釣合力 P をパラメータにとり図6に示す。同図は $x(\tau)$ の計算結果と式(32)から \bar{v} を求めて図示したものである。

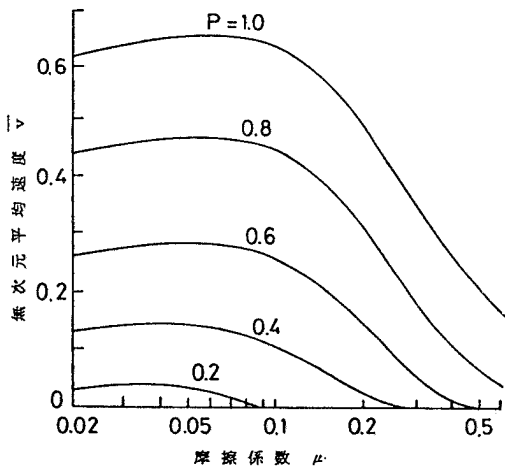


図6 摩擦力と平均速度の関係
(位相角 $\phi = 0$ 度)

図より、平均速度 \bar{v} が最大になるところは摩擦係数 μ が比較的小さいときで、不釣合力 P が大きいほど平均速度 \bar{v} も大きくなっている。いいかえると、不釣合質量 m 、その偏心量 r もしくは回転角速度 ω のいずれかまたは全部を大きな値に設定することにより平均速度を大きくすることができる。

III 実験

1. 実験装置および実験方法

図7に、実験用振動輸送機の概要を示す。寸法は幅240×高155×奥230mmで、全質量は5.0kgである。供試装置内部に両軸型の直流モータ(出力32.4W)を組み込んであり、タイミングベルトを介して2個の不釣合質量を同方向に回転させる。これの回転速度は入力電圧を変えることにより任意の回転速度が得られ、回転

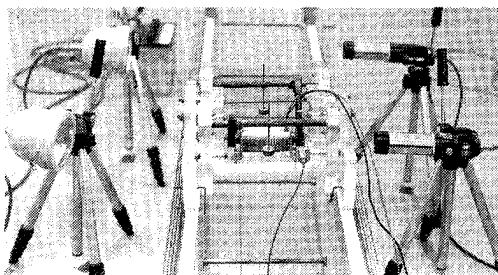


図7 実験装置

速度と不釣合質量の速度比は1対1である。不釣合質量の回転方向はモータへの入力電圧の正負を入れ換えることにより変えられ、これにより供試装置の前進・後退が可能となっている。

不釣合質量による遠心力を正確に出すために、不釣合質量取付軸を各回転軸の横幅の中心位置に配置してある。不釣合質量は1個 $m = 22.9$ g、偏心量 $r = 58$ mmと実験中は一定にしてある。2つの不釣合質量の位相角 ϕ はタイミングプーリをずらすことにより任意の値に設定できる。位相角の正、負の関係は不釣合質量が直上にある時を基準に、回転方向に不釣合質量を移動した時を正、その逆に設定した時を負とする。

供試装置は図1のモデルに近いものにするためと、実験データを取得しやすくするために、装置の両側に接触子を取付け、軌道上を移動できるようにしてある。この軌道は厚さ30mm、幅400mm、長1800mmの合板を2枚貼合わせた上にL型鋼を固定し、車体が移動できるように間隔をおいてM12のボルト10本で固定してある。予備実験により、軌道上には摩擦係数が実験中、比較の変動の少ない安定なテフロン樹脂系のテープを貼った状態とL型鋼上面を研磨した状態の2通りとし、その上を供試装置が移動できるようにしてある。なお、軌道の内側と供試装置が接触する場合は考えられるので、その部分にもテフロン樹脂系のテープを貼り付けて抵抗の低減を図っている。摩擦係数は供試装置両側に取付けた接触子の材質と軌道上面の材質の組み合わせにより変えられ、接触子の材質は軟鋼(メッキ仕上げ)、アクリル板とプラスチック板の3種類としている。また、軌道の水平度は予め簡単な水準器で確かめてある。

摩擦係数は傾斜式法にて測定する。このとき、実験に用いた軌道上面の材料を一部切り取り、それを傾斜させる面に用いる。その上に接触子を載せて、斜面の傾き角 λ を大きくしていくと、ある角度になると接触子が滑りはじめるので、この値を λ_s とすると $\mu = \tan \lambda_s$ より摩擦係数は求められる。

平均速度は軌道上の一定距離を供試装置が通過するのに要する時間を測定し、その距離を所要時間で除した値で表示する。この平均速度を種々の不釣合力に対して図示する。このとき、不釣合力の大きさは不釣合質量の回転速度を変化させることにより変える。回転

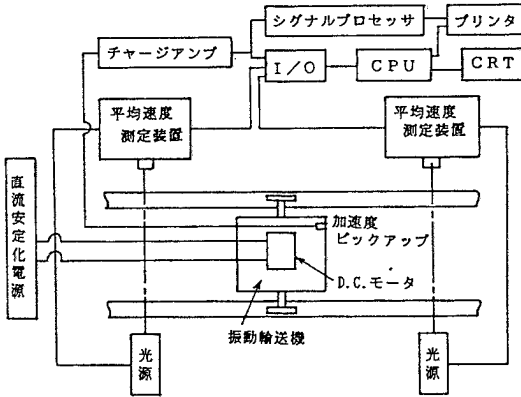


図8 ブロック線図

速度は実験中、常にストロボスコープにて監視する。

図8に、平均速度測定方法、加速度、速度波形の記録方法およびデータ処理などに用いた機器のブロック線図を示す。軌道の横に設置した光電管を利用した電動式ストップウォッチにより供試装置の通過時間を測定し、そのデータを中央演算装置に入力している。また、加速度は小型の圧電式加速度ピックアップを用いて検出し、チャージアンプを介してオシロスコープ、シグナルプロセッサまたは中央演算装置に入力している。平均速度の値はチャージアンプ内で加速度を積分したデータを用いる。なお、ピックアップの取付位置は供試装置の進行方向と平行に、接触子と軌道上面の接触位置と同じ高さに取付けてある。

2. 結果の検討

図9は、摩擦係数 μ の測定結果の一例で、図(a)は接触子に軟鋼(メッキ仕上げ)、軌道上は研磨したL型鋼の状態、図(b)はアクリル材、テフロン樹脂系テープをそれぞれ用いたときである。縦軸はデータ数(頻度)、横軸は接触子が滑りはじめる傾斜角度と摩擦係数である。データ数は各条件ごとに100個取得

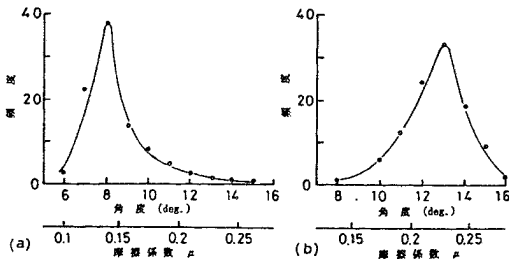


図9 摩擦係数の測定結果の一例

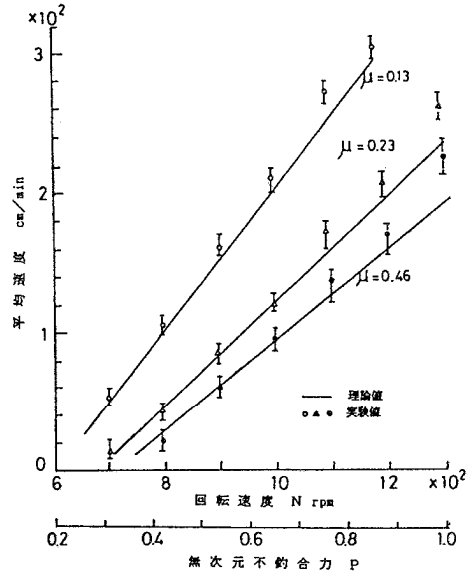


図10 不釣合力と平均速度の関係
(位相角 $\phi = 0$ 度)

し、その分布曲線のピークを示すところの値をもって摩擦係数 μ を表示する。本実験に用いた各材料の組合わせにより摩擦係数は $\mu = 0.12 \sim 0.46$ の値が得られている。

図10に、不釣合力 P と平均速度 \bar{v} の関係を摩擦係数 μ をパラメータにとって示す。図中のプロット点は実験値、実線は理論値である。図より、平均速度は不釣合力 P が大きくなる(不釣合質量の回転速度が高くなる)につれて大きくなる。同一の不釣合力 P で運転されるときは摩擦係数 μ が小さいほど供試装置の平均速度は大きくなる。摩擦係数 μ が小さいときの実験値と理論値は比較的良好に一致しているが、摩擦係数 μ と無次元不釣合力 P が大きい領域では実験値と理論値に差が生じている。これは静摩擦係数と動摩擦係数の差が大きくなるためと考えられる。

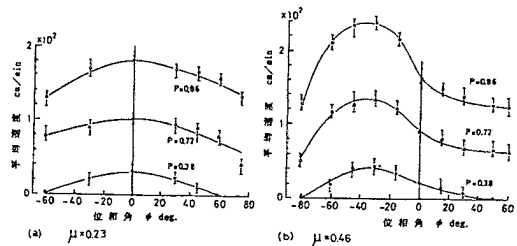


図11 位相角と平均速度の関係

図11 (a)、(b) に、位相角 ϕ と平均速度 \bar{v} の関係を不釣合力 P をパラメータとして示す。図より、いずれの不釣合力 P で運転しても平均速度の最大値はある位相角のもとで生じている。本実験の範囲内では摩擦係数が大きい条件のとき、位相角 ϕ を負に設定することにより平均速度の最大値が得られている。

図12は、摩擦係数 μ と平均速度 \bar{v} の関係で、プロット点は実験値、実線は理論値である。実験値は $\bar{v}' = \bar{v} (\omega/g)$ で無次元表示してあり、右肩のダッシュは省略して用いる。図より、本実験の範囲内では摩擦係数 μ が小さいほど平均速度は大きくなるのが確かめられ、理論値と実験値はよい一致を示している。

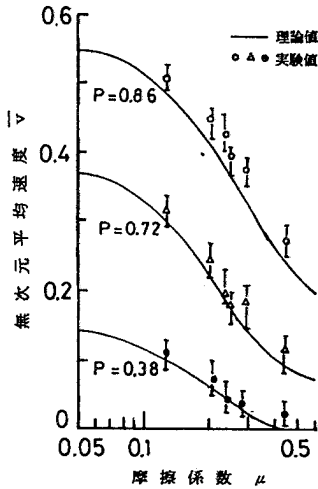


図12 摩擦係数と平均速度の関係 (位相角 $\phi = 0$ 度)

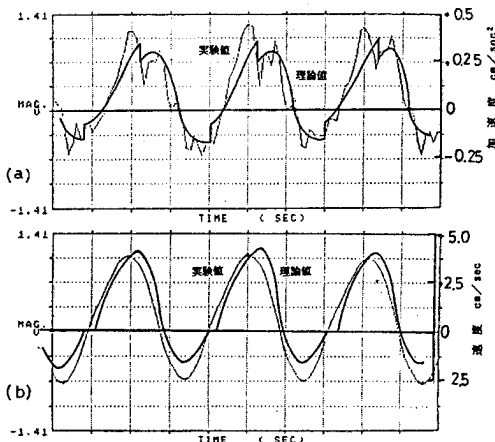


図13 理論波形と記録波形の比較例 (摩擦係数 $\mu = 0.29$, 位相角 $\phi = 0$ 度, 不釣合力 $= 0.72$)

図13は、供試装置の加速度および速度の記録波形と理論波形との比較例である。同図は摩擦係数 $\mu = 0.29$ 、不釣合力 $P = 0.72$ ($N = 1000\text{rpm}$)、位相角 $\phi = 0$ 度としたときで、理論波形と実験による記録波形との時間軸は適当にずらせて波形が一致するようにしてある。図より、加速度波形における不連続点の発生する位置が理論値と実験値とでは多少異なっているが、定性的には理論波形と一致している。また、速度の記録波形では正の領域が多く現れている。理論波形では供試装置が一時停止する区間が生じているのに対し、記録波形ではそれが現れていない。これは供試装置の全質量が大きいと、慣性力により停止区間が消滅したものと考えられる。

これらより、理論解析の正しさを確かめるとともに、ここに提案した駆動機構による車体の移動が可能であることを明らかにすることができた。今後の課題として、車体の跳躍運動および揺動運動を考慮した解析、平面上で運転するときの方向制御方法の開発、垂直抗力の測定などがあるが、これらは別報にて報告する。

IV 結論

不釣合力を利用した振動輸送機の運動特性の解析とこれに関する実験を行った結果、次に示す主な結論を得た。

- (1) 振動輸送機が接地面を離れない範囲において、平均速度を不釣合力と摩擦係数とで図示することができた。平均速度は不釣合力を大きくするか、摩擦係数を小さくすることにより大きくなる。そして、平均速度の最大値を示す摩擦係数が存在する。
- (2) 位相角の大きさにより平均速度は変化し、本実験の範囲内では摩擦係数が大きいとき、位相角を負側に設定することにより最大値が得られている。
- (3) 定常運動において不釣合力と摩擦係数の大きさにより、1周期間に振動輸送機の一時停止がある場合とない場合が存在する。
- (4) 振動輸送機と接地面との間に働く摩擦力をクーロン摩擦と仮定した解析結果は実験結果より正しいこ

とが確かめられた。

- (5) 本装置は振動と推進性（自己移動）を利用して土固め機などの土木機械や粉碎機などに応用できる可能性がある。

最後に、本研究を遂行するにあたり実験装置の製作および実験データの取得に協力いただいた本校自動機械科の平成3年度卒業研究生大塚祐一、岡崎正明、鶴田正明、中山益徳の各君に感謝いたします。また、本研究は平成3年度の指定研究費（テーマ名：振動輸送機の制御機構の開発と実験）を使用させていただきました。ここに本校の室田倬校長はじめ関係各位に厚くお礼を申し述べます。

参考文献

- (1) 谷口修、坂田勝、小山内泰生：振動式フィーダの研究、日本機械学会論文集、28、188（昭37）485.
- (2) 岡部左規一、横山泰男、神保泰雄：振動輸送の研究、精密機械、35、5（1969）299.
- (3) 石坂昭夫、小滝富雄、西村源六郎：交番的な摩擦力が働く振動系の運動、中央大学理工学部紀要、11（1967）69.
- (4) 横山泰男：静摩擦係数におよぼす振動の影響、精密機械、32、6（1966）403.
- (5) 綾武光、小滝富雄、堤一郎：非線形ばねを用いた振動輸送機、中央大学理工学部紀要、21（1978）187.