

# 振動推進機の動特性

茨城職業能力開発短期大学校

竹内 生 公

Dynamic Behavior of a Vibro-Mover

Seikou TAKEUCHI

**要約** 振動推進機の底部に曲率をもたせると慣性モーメントを考慮する必要がある、2自由度系の運動方程式になる。これを適当な条件のもとで数値計算を行っている。また、これに関する実験を行い、その結果と数値解析結果とを比較・検討し、本解析方法の妥当性や振動推進機に作用する慣性モーメント、垂直抗力、ピッチング運動による回転角などの動特性について述べている。

## I 序 論

振動推進機とは車体内部に設置されている不釣合質量を鉛直面内で回転させ、それにより生じた不釣合力と推進機に働く摩擦力の変動を利用して自己推進を行う装置である。この推進機は自己推進性と垂直抗力の変動を持つため土木用の地ならし機や駆動源にバイモルフ型の圧電セラミックスを利用することにより小型の移動ロボットなどへの応用分野が考えられる。

振動推進機の接地部（底部）が平面で、回転中心と接地部との間には慣性モーメントが作用しないと仮定した場合は並進運動のみを行うので推進機を質点として扱うことが可能である<sup>(1)(2)</sup>。しかし、振動推進機の接地部（底部）に曲率をもたせると慣性モーメントを考慮する必要がある。このため並進運動にピッチング運動が加わる2自由度系の複雑な運動になり、見通しのよい結果を得ることは非常に難しくなる。

そこで、本報告では振動推進機を適当な条件でモデル化した運動方程式より慣性モーメント、垂直抗力や平均速度などを求める式を誘導し、これをルンゲ・クッタ法により数値解析をする。この解析結果の妥当性を調べるために推進機の接地部に曲率をもたせた実験用振動推進機を試作し、その平均速度、垂直抗力、不釣合力から誘起されるピッチング運動の周期と振動数および2つの不釣合質量の位相角の影響などについて実験を行なう。これにより、摩擦力の作用方向が不釣合質量の回転方向と推進機の平均速度の相対的な関係

で決定されること、最大平均速度は位相角がある程度大きいときに生じること、垂直抗力は不釣合質量の位相角を零としたときに最大値を示すことなどを明らかにすることができたので以下に報告する。

## II 主な使用記号

$d_x$	: Y軸から不釣合質量の回転中心までの距離	m
$d_y$	: X軸から不釣合質量の回転中心までの距離	m
$e$	: 不釣合質量の偏心量	m
$p$	: 不釣合力	N
$f_0, f_p$	: 摩擦力	N
$J$	: 慣性モーメント	kg·m <sup>2</sup>
$l$	: 弧の中心から重心までの距離	m
$M$	: 推進機の全質量	kg
$m$	: 不釣合質量	kg
$N$	: V章では不釣合質量の回転速度	rpm
$n, n_p$	: 垂直抗力	N
$r$	: 接地部（底部）の弧の半径	m
$t$	: 時間	Sec.
$\bar{V}$	: 平均速度	m/Sec.
$x_0$	: X方向の重心の変位	m
$x_i$	: X方向の接触点の変位	m
$y_0$	: Y方向の重心の変位	m
$\theta$	: ピッチング運動による回転角	rad.
$\mu$	: 摩擦係数	
$\phi$	: 位相角 ( $\phi = \phi_1 + \phi_2$ )	rad.
$\omega$	: 不釣合質量の回転角速度	rad/s

- $\omega_n$  : 固有角振動数 rad/s
- $\omega_p$  : ピッチングの角振動数 rad/s
- 無次元量
- $P$  : 無次元不釣合力
- $F_0$  : 無次元摩擦力
- $K^2$  : 無次元回転半径
- $L$  : 弧の中心から重心までの無次元距離
- $N$  : 無次元垂直抗力
- $R$  : 弧の無次元半径
- $X_0$  : 無次元変位
- $\tau$  : 無次元時間

$$M\ddot{y}_0 = n - Mg + p\sin(\omega t + \phi_1) + kp\sin(\omega t + \phi_2)$$

$$J\ddot{\theta} = -f_0(r - l\cos\theta) - nl\sin\theta - \{dx\cos\theta + (dy - r + l)\sin\theta\}p\sin(\omega t + \phi_1) - \{-dx\sin\theta + (dy - r + l)\cos\theta\} \times p\cos(\omega t + \phi_1) + k\{dx\cos\theta - (dy - r + l)\sin\theta\}p\sin(\omega t + \phi_2) - k\{dx\sin\theta + (dy - r + l)\cos\theta\} \times p\cos(\omega t + \phi_2) \quad (2)$$

### III 理論式の誘導

#### 1. 基礎運動方程式

図1に円弧底面をもつ振動推進機の概略とその運動状態を示す。推進機的全質量を  $M$ 、重心まわりの慣性モーメントを  $J$ 、推進機の接地部の弧の半径を  $r$ 、弧の中心から重心  $G$  までの距離を  $l$ 、不釣合質量  $m$  の回転中心から  $x$  および  $y$  軸までの距離を  $dx$ 、 $dy$  とする。2つの不釣合質量は反時計方向に角速度  $\omega$  で回転する。推進機に作用する摩擦力と垂直抗力をそれぞれ  $f_0$  および  $n$  とし、それらの力の大きさの間には  $|f_0| = \mu |n|$  の関係が常に成立しているものとする。すなわち、摩擦力としてクーロン摩擦を仮定する。さらに、推進機は接地面を離れないと仮定して解析を進める。

$x$  方向における重心  $G$  の変位を  $x_0$ 、接触点までの変位を  $x_1$ 、 $y$  方向の変位を  $y_0$  とすれば、次の関係式が図1より得られる。

$$\begin{aligned} x_0 &= x_1 + l\sin\theta \\ y_0 &= r - l\cos\theta \end{aligned} \quad (1)$$

重心  $G$  に関する  $x$ 、 $y$  および  $\theta$  の運動方程式は

$$M\ddot{x}_0 = -f_0 + p\cos(\omega t + \phi_1) + kp\cos(\omega t + \phi_2)$$

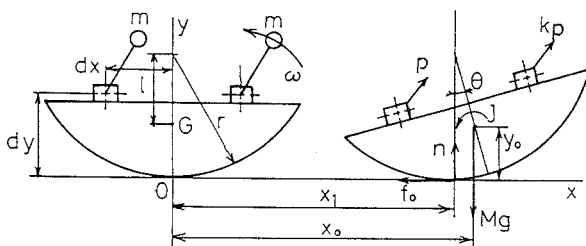


図1 振動推進機の運動状態

となる。なお、不釣合力  $p$  は不釣合質量  $m$  の偏心量を  $e$  とするとき、 $p = 2me\omega^2$  で与えられる。

前述の仮定から滑り運動の条件として摩擦力  $f_0$  は

$$f_0 = \text{sgn}\mu n \quad (3)$$

と表される。ただし、符号関数  $\text{sgn}$  は正あるいは負の符号を示し、後述のように推進機のピッチング運動による角速度と移動速度の相対関係で決定される。式(2)の第2式に式(1)の関係を代入すると次式を得る。

$$n = M(l\sin\theta \cdot \ddot{\theta} + l\cos\theta \cdot \dot{\theta}^2) + Mg - p\sin(\omega t + \phi_1) - kp\sin(\omega t + \phi_2) \quad (4)$$

したがって、式(3)は次式になる。

$$f_0 = \text{sgn}\mu \{Ml\sin\theta \cdot \ddot{\theta} + Ml\cos\theta \cdot \dot{\theta}^2 + Mg - p \times \sin(\omega t + \phi_1) - kp\sin(\omega t + \phi_2)\} \quad (5)$$

次に式(2)の第3式に式(4)と式(5)を代入して整理すると次式を得る。

$$\begin{aligned} &\{J + \text{sgn}\mu(r - l\cos\theta)Ml\sin\theta \\ &+ Ml^2\sin^2\theta\}\ddot{\theta} + \{\text{sgn}\mu(r - l\cos\theta) \\ &\times Ml\cos\theta + Ml^2\sin\theta\cos\theta\}\dot{\theta}^2 \\ &+ \{\text{sgn}\mu(r - l\cos\theta)Mg + Mgl\sin\theta \\ &- \{\text{sgn}\mu(r - l\cos\theta) - dx\cos\theta \\ &- (dy - r)\sin\theta\}p\sin(\omega t + \phi_1) \\ &- k\{\text{sgn}\mu(r - l\cos\theta) + dx\cos\theta \\ &- (dy - r)\sin\theta\}p\sin(\omega t + \phi_2) \\ &- \{dx\sin\theta - (dy - r + l)\cos\theta\}p\cos \\ &\times (\omega t + \phi_1) + k\{dx\sin\theta + (dy - r \\ &+ l)\cos\theta\}p\cos(\omega t + \phi_2) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

また、水平方向の運動を表す運動方程式(2)の第1式に

式(5)を代入することにより

$$M\ddot{x}_0 = -\operatorname{sgn}\mu\{Ml\sin\theta\cdot\ddot{\theta} + Ml\cos\theta\cdot\dot{\theta}^2 + Mg - p\sin(\omega t + \phi_1) - kp\sin(\omega t + \phi_2)\} + p\cos(\omega t + \phi_1) + kp\cos(\omega t + \phi_2) \quad (7)$$

が得られる。以上で式(6)から求められた回転角  $\theta$  を式(4)、(5)および式(7)に代入することにより垂直抗力  $n$ 、摩擦力  $f_0$  および重心  $G$  の  $x$  方向の変位  $x_0$  をそれぞれ求めることができる。

次の諸記号を用いて、式(4)~(7)を無次元表示すると

$$\begin{aligned} \omega t = \tau, \quad \frac{1}{\omega} \dot{\theta} = \theta', \quad \frac{1}{\omega^2} \ddot{\theta} = \theta'' \\ \frac{\omega^2}{g} x_0 = X_0, \quad \frac{\omega}{g} \dot{x}_0 = X_0' \\ \frac{1}{g} \ddot{x}_0 = X_0'', \quad \frac{p}{Mg} = P, \quad \frac{n}{Mg} = N \\ \frac{f_0}{Mg} = F_0, \quad \frac{\omega^2}{g} r = R, \quad \frac{\omega^2}{g} l = L \\ \frac{\omega^2}{g} dx = X, \quad \frac{\omega^2}{g} dy = Y \\ \frac{J}{M} \left(\frac{\omega^2}{g}\right)^2 = K^2 \end{aligned} \quad (8)$$

次式になる。ただし、ダッシュ記号は無次元時間  $\tau$  での微分を表している。

$$N = L\sin\theta\cdot\theta'' + L\cos\theta\cdot\theta'^2 + 1 - P\sin(\tau + \phi_1) - kP\sin(\tau + \phi_2) \quad (9)$$

$$F_0 = \operatorname{sgn}\mu\{L\sin\theta\cdot\theta'' + L\cos\theta\cdot\theta'^2 + 1 - P\sin(\tau + \phi_1) - kP\sin(\tau + \phi_2)\} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \{K^2 + \operatorname{sgn}\mu(R - L\cos\theta)L\sin\theta + L^2\sin^2\theta\}\theta'' \\ + \{\operatorname{sgn}\mu(R - L\cos\theta)L\cos\theta + L^2\sin\theta \\ \times \cos\theta\}\theta'^2 + L\sin\theta + \operatorname{sgn}\mu(R - L\cos\theta) \\ - \{\operatorname{sgn}\mu(R - L\cos\theta) - X\cos\theta - (Y - R) \\ \times \sin\theta\}P\sin(\tau + \phi_1) - k\{\operatorname{sgn}\mu(R \\ - L\cos\theta) + X\cos\theta - (Y - R)\sin\theta\}P\sin \\ \times (\tau + \phi_2) - \{X\sin\theta - (Y - R + L)\cos\theta\} \\ \times P\cos(\tau + \phi_1) + k\{X\sin\theta + (Y - R \\ + L)\cos\theta\}P\cos(\tau + \phi_2) = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

$$X_0'' + \operatorname{sgn}\mu\{L\sin\theta\cdot\theta'' + L\cos\theta\cdot\theta'^2 + 1$$

$$\begin{aligned} - P\sin(\tau + \phi_1) - kP\sin(\tau + \phi_2)\} \\ - P\cos(\tau + \phi_1) - kP\cos(\tau + \phi_2) = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

## 2. 符号関数の決定

式(3)の符号関数  $\operatorname{sgn}$  に関して、図1に示した振動推進機の接地部(円弧底部)と床面の接触点の速度  $\dot{x}_1$  が  $r\dot{\theta}$  と等しいとき接触点には滑りは生じない。滑り運動を行う場合は  $r\dot{\theta} - \dot{x}_1 \neq 0$  を常に満足している(ただし、瞬間的には  $r\dot{\theta} = \dot{x}_1$  となる)と考える。この場合、摩擦力の方向は  $\dot{\theta}$  (あるいは  $\theta'$ ) と  $\dot{x}_1$  (あるいは  $X_0'$ ) の正負の組み合わせ、および  $|r\dot{\theta}| - |\dot{x}_1|$  の正負によって決定される。各々の考えられる運動の組み合わせを図2(a)~(d)に示すと共に組み合わせの全てを表1に整理して示す。図2から摩擦力の方向がわかるので表1の最下段に示すように符号関数  $\operatorname{sgn}$  の

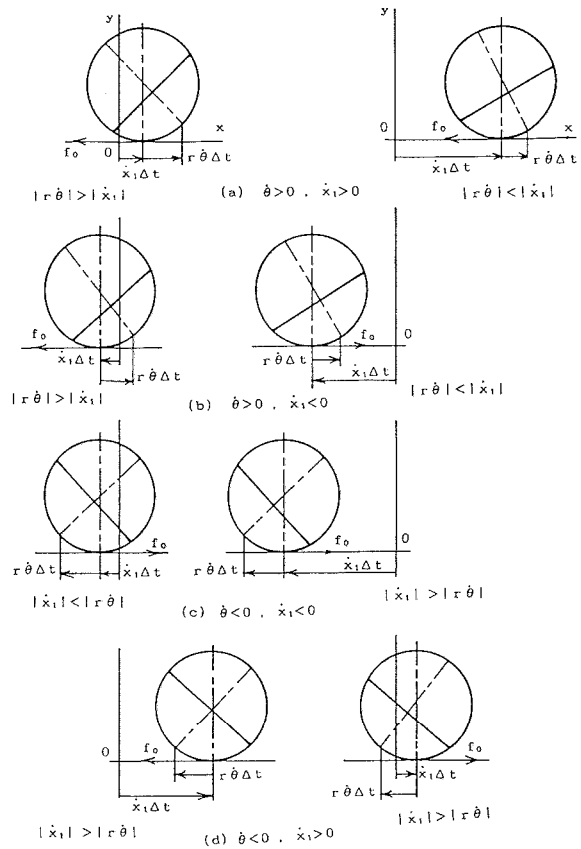


図2 摩擦力の方向

表1  $\operatorname{sgn}$  の土について

$\dot{\theta}, \theta'$	+		-	
$\dot{x}_1, X_0'$	+	-	+	-
$ r\dot{\theta}  -  \dot{x}_1 $	+	-	+	-
$\operatorname{sgn}$	-	+	-	+

記号として+または-を記すことができる。

### 3. 慣性モーメントの式

円弧底部をもつ振動推進機の重心まわりの慣性モーメントは推進機のピッチング運動の固有振動数から計算により求める。すなわち、推進機を図3で示すとき式(1)の関係式が成り立ち、自由振動の際、接触点

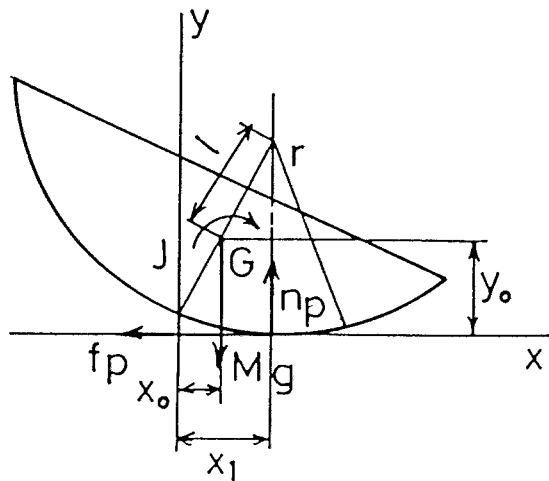


図3 重心まわりのモーメント

での滑りはないと考えられるから次式が成立する。

$$\dot{x}_1 = r\dot{\theta} \quad (13)$$

一方、重心 G に関する x, y 方向および回転角  $\theta$  の運動方程式は

$$\begin{aligned} M\ddot{x}_0 &= -f_p \\ M\ddot{y}_0 &= -Mg - n_p \\ J\ddot{\theta} &= f_p(r - l\cos\theta) - n_p l \sin\theta \end{aligned} \quad (14)$$

となる。式(1)を式(14)に代入し、式(13)の関係を用いると

$$\begin{aligned} f_p &= -M(r - l\cos\theta)\ddot{\theta} - Ml\sin\theta \cdot \dot{\theta}^2 \\ n_p &= Ml\sin\theta \cdot \ddot{\theta} + Ml\cos\theta \cdot \dot{\theta}^2 + Mg \end{aligned} \quad (15)$$

が得られる。さらに、式(15)を式(14)の第3式に代入すると

$$\begin{aligned} \{J + M(r - l\cos\theta)^2 + Ml^2\sin^2\theta\}\ddot{\theta} \\ + \{Ml\sin\theta(r - l\cos\theta) + Ml^2\sin\theta\cos\theta\} \\ \times \dot{\theta}^2 + Mgl\sin\theta = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

になる。ここで、回転角  $\theta$  を微小であるとして  $\sin\theta \approx \theta$ ,  $\cos\theta \approx 1$ ,  $\sin^2\theta \approx 0$  および  $\dot{\theta}^2 \approx 0$  とおけば次式を得る。

$$\{J + M(r - l)^2\}\ddot{\theta} + Mgl\theta = 0 \quad (17)$$

これより、慣性モーメント  $J$  は上式より計算できて、推進機のピッチング運動の角振動数を  $\omega_p$  とすれば、

$$\omega_p^2 = \frac{Mgl}{J + M(r - l)^2} \quad (18)$$

の関係が成り立つ。

ピッチング運動の角振動数  $\omega_p$  を正確に測定するには後章で述べる垂直抗力の測定装置を利用する。つまり、推進機が

$$\theta = B\sin\omega_p t \quad (19)$$

で自由なピッチング運動をする場合、垂直抗力  $n_p$  の変化は式(15)の第2式に式(19)を代入して整理することにより得られ、次式となる。

$$n_p = MlB^2\cos 2\omega_p t + Mg \quad (20)$$

上式から垂直抗力波形の周期の2倍の周期が自由振動の周期であることがわかる。したがって、垂直抗力の波形  $n_p(t)$  からピッチング運動の角振動数  $\omega_p$  を知り、式(18)から慣性モーメント  $J$  を知ることができる。

## IV 実験装置および実験方法

図4に実験用振動推進機の概要を示す。供試装置は加工が容易で、かつ装置自体の剛性が大きくとれるように厚さ8mmのアクリル板を使用してある。寸法は幅258×高173×奥250mmで、全質量は3.9kgである。供試装置の動力源として内部に両軸型の直流モータ

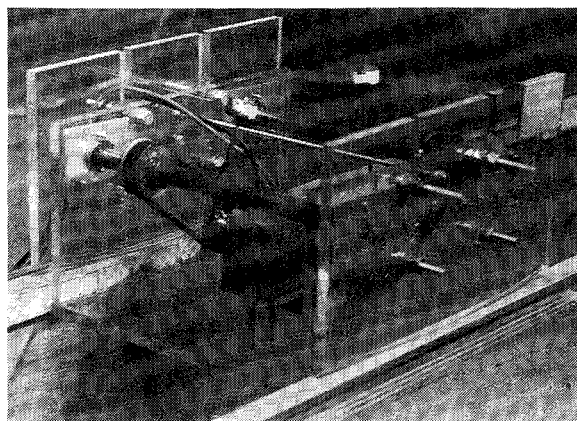


図4 振動推進機の概要

(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個の不釣合質量を反時計方向に回転させている。この回転速度は入力電圧を変えることにより任意に変えられ、モータの回転速度と不釣合質量の回転速度は1対1としてある。不釣合質量は1個  $m=26.0\text{g}$ 、偏心量  $e=50\text{mm}$  と実験中は一定にしてある。2つの不釣合質量の位相角  $\phi$  はタイミングプリー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、その回転方向に一方の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。

供試装置は厚さ30mm、幅400mm、長1800mmの合板を2枚貼合わせた軌道上を移動させる<sup>(1)(2)</sup>。予備実験により、軌道上には摩擦係数が実験中、比較的変動の少ないテフロン樹脂系のテープを用いる。軌道の内側と供試装置が接触する場合が考えられるので、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。なお、軌道上面の水平度は予め水準器で確かめてある。

供試装置と軌道上面間の摩擦係数は傾斜式法にて測定しており<sup>(1)(2)</sup>、測定結果は  $\mu=0.23$  である。

平均速度は軌道上の一定距離(本実験では0.5m)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。所用時間は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測定する。回転速度は実験中、常にストロボスコープにて監視する。

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、またはシグナルプロセッサに入力している。速度

波形はチャージアンプ内で加速度波形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、供試装置の接地部と軌道上面が接触する位置と同じ高さのところに取付ける。

垂直抗力  $n$  は図5に示すように、供試装置の接地部のアクリル板の代わりに曲率半径  $r=0.8\text{m}$  にしたりん青銅板(厚2mm×幅10mm)を取付けて垂直抗力を板のたわみに変換させて間接的に測定する。剛性を高くする必要があるので板の厚さを十分厚くしなければならないが、たわみを歪ゲージで検出するため、あまり厚くすることはできない。予め、推進機に静荷重を加えたときの歪計の出力を測定して出力電圧対垂直抗力の校正グラフを作成しておくことにより、実際の垂直抗力  $n$  の振幅を力の単位で校正することができる。なお、テフロンとりん青銅板との間の摩擦係数はテフロンとアクリルの間のそれとほぼ等しく0.20の摩擦係数をもっている。

慣性モーメント  $J$  の測定は図5に示した装置を利用して、供試装置がピッチング運動をしているときの自由振動波形をシグナルプロセッサまたはFFTアナライザにて記録し、その波形より自由振動周期  $T$  を求める。さらに、その自由振動周期  $T$  から固有角振動数  $\omega_p$  を求めて式(18)から慣性モーメント  $J$  を算出する。

回転方向の変位波形  $\theta(t)$  は供試装置に圧電式小型ピックアップ(P.U.)を静止時に軌道面に対して垂直になるように固定して測定する。直接測定されるのは変位であるが、回転中心とピックアップの取付位置が固定されているのでピックアップの出力は  $\theta(t)$  に比例していると考えてよい。ただし、そのためには予め校正しておく必要がある。

## V 数値計算結果と実験結果の比較・検討

### 1. きざみ精度

振動推進機の運動方程式(11)、(12)を解析的に解くことは困難なので回転角、垂直抗力や平均速度などの解曲線をいくつかの条件のもとで数値的に計算する。数値計算においては回転角  $\theta$  が微小であることから  $\sin\theta=\theta$ 、 $\cos\theta=1$  として式(11)、(12)を書き換える。また、これらの式を1階の連立4元微分方程式に変え、ルンゲ・クッタ法にて運動が定常状態になるまで計算を進める。このとき、初期条件として  $X_0=0$ 、 $X_0' (=V_0)=0.0001$ 、 $\theta=0$ 、 $\theta' (= \Omega)=0$  としている。これは推進機が静止している状態から計算を始めていると考えてよい。水平方向の移動速度  $V_0=0$  とすると式(3)の摩擦力  $f_0$  の正負が定まらず、計算を進めることがで

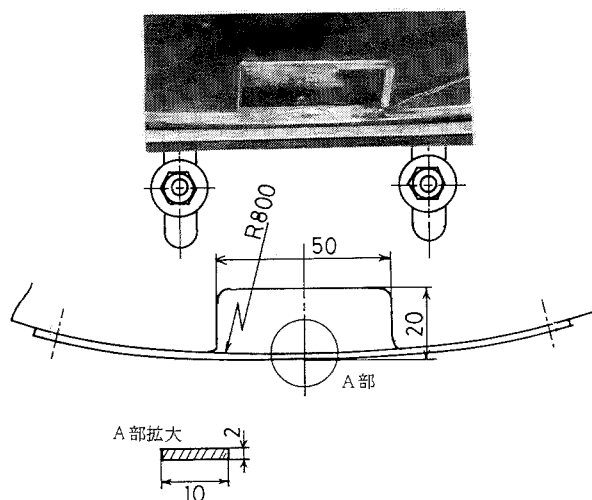


図5 垂直抗力測定装置

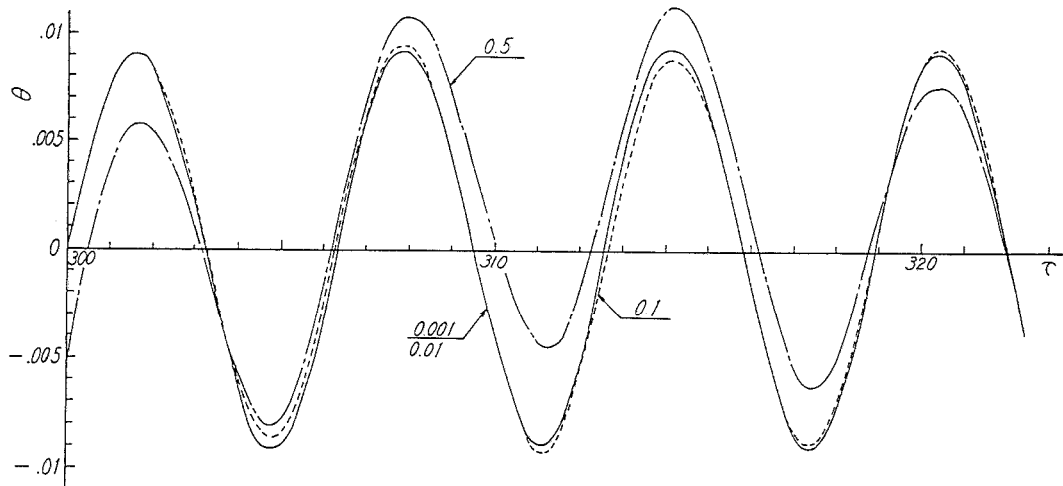


図6 きざみ精度

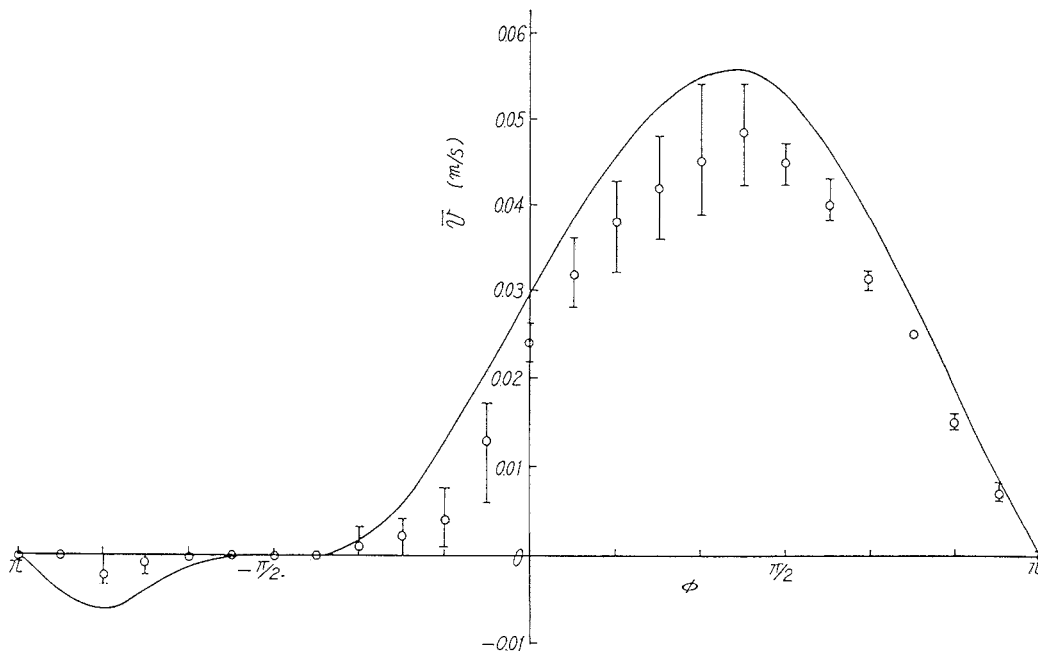


図7 平均速度と位相角の関係 ( $r=0.8\text{ m}$ ,  $l=0.67\text{ m}$ ,  $dx=0.08\text{ m}$ ,  $dy=0.11\text{ m}$ ,  $M=3.9\text{ kg}$ ,  $\mu=0.2$ ,  $P=11\text{ N}$ ,  $K=1$ ,  $J=0.025\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ )

きないので、 $V_0$  が微小ではあるが零でない値としている。

次に、本計算法の適正なきざみ幅  $\Delta\tau$  を決定するため、 $\Delta\tau$  を 0.5、0.1、0.01、0.001 に採ったときの振動推進機の回転角  $\theta$  の計算結果を図 6 に示す。この図は過渡状態から定常状態に移った時点での波形で、横軸は無次元時間  $\tau$  である。図より、 $\Delta\tau=0.01$  で十分収束した解曲線が得られていることから、 $\Delta\tau=0.01$  として以下解曲線を求める。収束した解曲線が必ずしも正しい解とはいえないので実験で確かめる必要がある。

## 2. 推進機の平均速度

図 7 は位相角  $\phi$  と平均速度  $\bar{v}\text{ m/s}$  の関係である。図中の実線は理論値、プロット点は実験値である。図より、ピッチング運動を伴う場合、平均速度の曲線は位相角  $\phi=0$  度を中心に対称とはならず非対称となり、 $\phi$  が  $\pi/3\sim\pi/2$  付近で最大平均速度が得られている点特徴的である。位相角  $\phi$  を  $-\pi/4\sim-\pi/2$  に設定すると供試装置は静止状態となる場合があり、 $\phi=-2\pi/3$  付近に設定すると負の最大平均速度（供試装置が後退する最大平均速度）をもつことを明らかにすることができた。これらの理論値と実験値はよい

一致を示している。また、位相角を一定としたときは不釣合質量の回転速度を大きくすると平均速度も大きくなることは接地部が平面のときと同様である。

### 3. 垂直抗力 $n$ の測定結果

図8は、垂直抗力と歪ゲージの出力電圧との校正曲線で、推進機本体に5~65Nの力を加えたときの実験結果である。図より、出力電圧と推進機に加わる力の関係は比例しており、本実験の範囲内では換算係数を  $A$  とするとき、 $A=24.5$  (N/V) である。

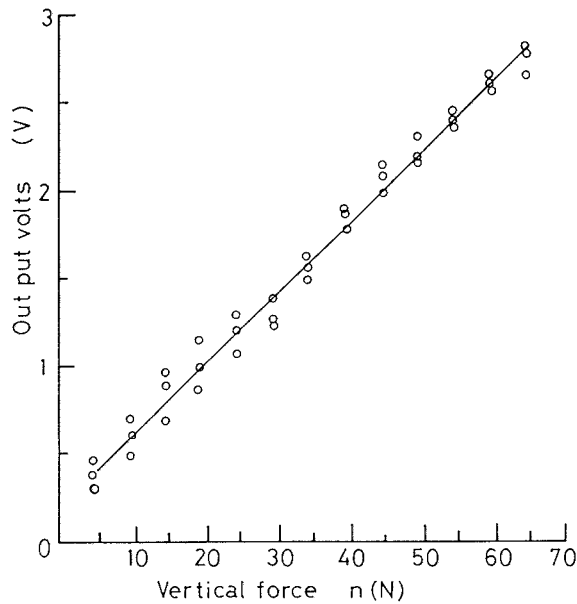


図8 垂直抗力の校正曲線

図9は垂直抗力  $n$  の記録波形と理論波形の比較例で、回転速度  $N=890$ rpm、位相角  $\phi=0$  度としたときである。図より、両者は比較的よい一致を示しており、垂直抗力は正弦波状に変化している。また、垂直抗力波形の谷底が丸みを帯びて、大きな弧を描いている。

図10は、垂直抗力  $n$  の実験値と理論値の比較例である。図より、垂直抗力  $n$  は位相角  $\phi=0$  度を中心に左右対称形であり、位相角  $\phi=0$  度のときに最大垂直抗力が得られる。これは不釣合力の合力が位相角が零のときに最大値を示すことから十分推測でき、位相角が  $\pi$  に近づくにつれて垂直抗力は低下する。ここでは図示していないが、不釣合質量  $m$  の回転速度  $N$ rpm と垂直抗力  $n$  の関係は位相角  $\phi$  を小さくすると回転速度  $N$ rpm が高くなるにつれて直線的に垂直抗力  $n$  は増加し、それをさらに大きくすると2次曲線的に増加する。また、同一回転速度の場合は位相角  $\phi$  が小さいときに垂直抗力  $n$  は大きな値を示す。図10の理論値と実験値はよい一致を示していることから解析方法の妥当性がうかがえる。

### 4. 慣性モーメント $J$ の測定

推進機の自由振動波形は図9と同様の波形であり、これより振動周期  $T$  を求める。この振動周期  $T$  は重心の位置  $l$  により変化すると考えられるので、 $l$  の位置を変えて測定する。これにより得られた角振動数  $\omega_p$  を式(18)に代入して慣性モーメント  $J$  を算出する。こ

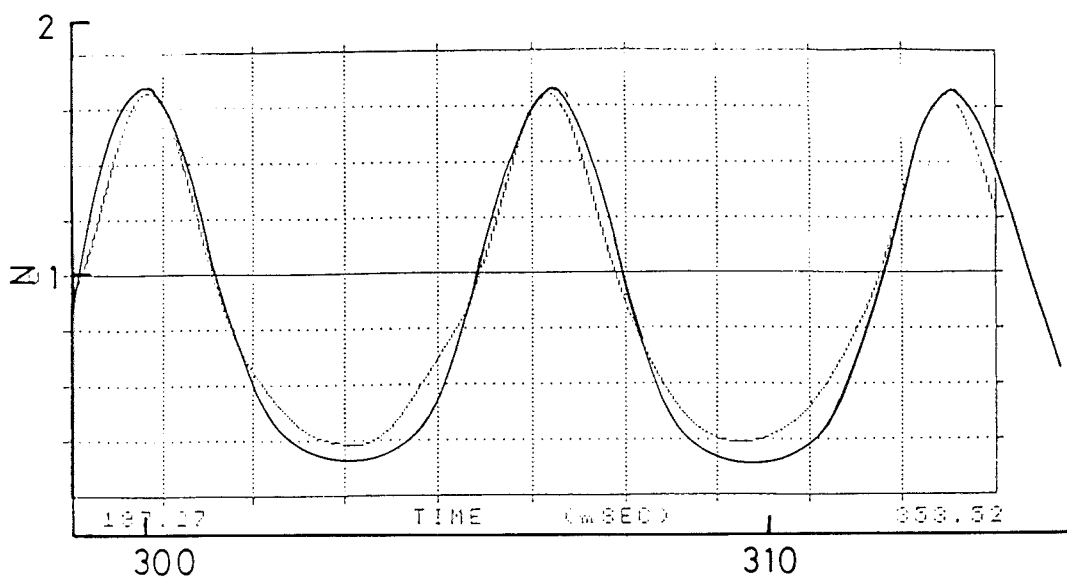


図9 垂直抗力の記録波形  
 ( $N=890$  rpm、 $\phi=0$ 、 $r=0.8$  m、 $l=0.68$  m、 $dx=0.08$  m、 $dy=0.11$  m、 $M=3.9$  kg、 $\mu=0.2$ 、 $P=11$  N、 $K=1$ 、 $J=0.024$  kg $\cdot$ m $^2$ )

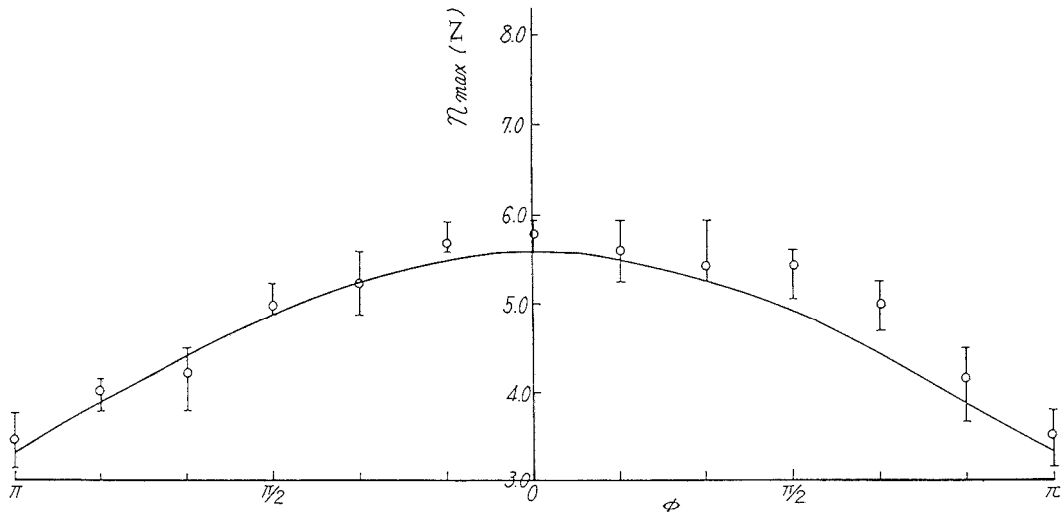


図10 垂直抗力  $N_{max}$  と位相角の関係  
 ( $r=0.8$  m,  $l=0.67$  m,  $dx=0.08$  m,  $dy=0.11$  m,  $M=3.9$  kg,  $\mu=0.2$ ,  $P=11$  N,  $k=1$ ,  $J=0.025$  kg·m<sup>2</sup>)

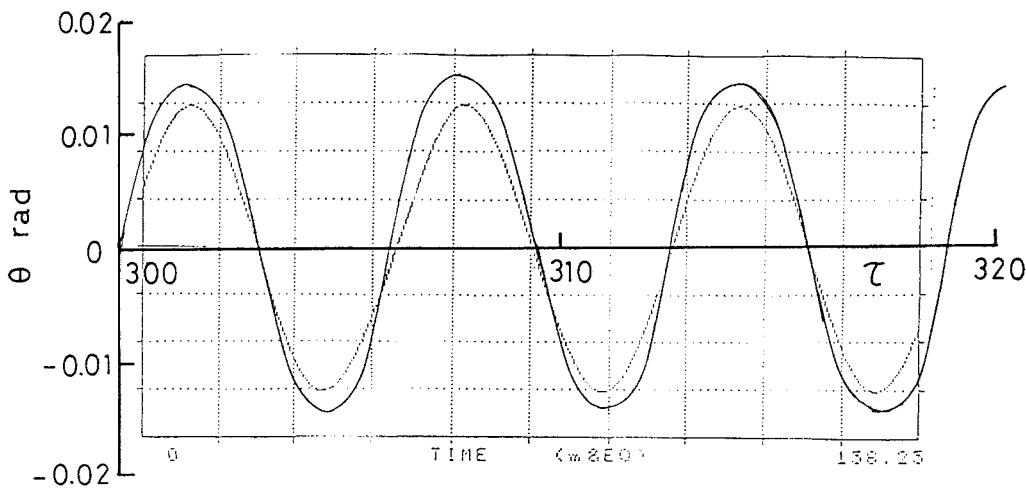


図11 回転方向変位波形の一例  
 ( $N=900$  rpm,  $\phi=45$  度)

表2 慣性モーメント

重心位置 $l$ (m)	周期 $T$ (s)	角振動数 $\omega_p$ (rad/s)	慣性モーメント $J$ (kg·m <sup>2</sup> )
0.655	0.42	14.95	0.027
0.67	0.38	16.52	0.025
0.68	0.36	17.39	0.024
0.73	0.24	26.16	0.018
0.74	0.22	28.55	0.017

これらの結果を表2にまとめて示す。表より、重心位置  $l$  の値が大きくなる（重心  $G$  が接地面に近づく）にしたがって慣性モーメント  $J$  は減少する。すなわち、重心位置が低くなるにつれて推進機がピッチング運動の影響を受けやすくなることを意味している。

### 5. 回転角 $\theta(t)$ の記録波形

図11は時間に対する回転方向変位の理論波形と記録波形の比較例で、これは時間に対するピッチング運動による回転角  $\theta$  の変化である。この図は不釣り合い質量  $m$  の回転速度を  $N=900$  rpm,  $\phi=45$  度としたときで、実線が理論波形、破線が記録波形である。図より、波形は正弦波状に変化しており、理論波形より記録波形の方が少し小さな値を示しているが、波形がプラスからマイナスに変わる場所ではよい一致を示している。

これらより理論波形と実験による記録波形が比較的よい一致を示したことから本解析法および数値計算の妥当性が示され、振動推進機の底部に円弧をもたせた場合の動特性を明らかにすることができた。詳細な数



値計算結果については別の機会に報告する予定である。

## VI 結 論

振動推進機の接地部に曲率をもたせた場合の運動方程式を滑り運動のもとで導き、その数値解析結果とそれに関する実験結果を比較・検討したところ次に述べる主な結論を得た。

- (1) 振動推進機が跳躍運動をしない範囲内で、運動時における摩擦力の作用方向は車体のピッチング運動の角速度と推進機の移動速度との相対関係で決まる。
- (2) 最大平均速度は2つの不釣合質量間の位相角を正の値に設定することにより得られる。
- (3) 重心位置が接地面に近づくにしたがい推進機はピッチング運動の影響を受けやすくなる。
- (4) 垂直抗力は位相角を零としたときに最大値を示す。
- (5) 滑り運動のもとに誘導した運動方程式の数値計算結果と実験結果が比較的よい一致を示したことから解析方法の妥当性が示された。

最後に、本研究は平成3年度および平成4年度の指定研究費を使用させていただきました。ここに本校の矢吹茂郎校長、佐藤広之元教務課長はじめ関係各位に厚くお礼を申し述べます。さらに、装置の製作、実験データの取得に協力していただいた自動機械科の平成4年度卒業生青木哲也、大嶋聡、埴美樹雄、村上勝弘の各君に感謝いたします。

### 参考文献

- (1) 竹内生公：回転不釣合力を利用した振動輸送機の動特性、職業能力開発報文誌、4、2（1992）39。
- (2) 竹内、大塚、岡崎、鶴田、中山：振動輸送機の動特性、茨城職業訓練短期大学校紀要、6（1992）31。
- (3) 竹内生公：回転体のふれまわり速度特性(第2報)、実践教育機械系ジャーナル、4、2（1989）10。