

進行波型超音波モータの駆動メカニズム (強制加振されたステータに生じる進行波)

中山智了^{*1}, 山下清隆^{*1}

Driving Mechanism of a Travelling Wave Ultrasonic Motor (Travelling Wave on the Stator Surface Subjected to the External Excitation)

Tomoaki NAKAYAMA^{*1} and Kiyotaka YAMASHITA^{*1}

^{*1}Department of Mechanical Engineering

A travelling wave ultrasonic motor is an actuator that exploits vibration. Vibration in the ultrasonic range occurs in the stator, which is the oscillator of this motor. Because the vibration amplitude is extremely small, however, experimentation that employs the actual unit is difficult. In the research presented here, the stator of the ultrasonic motor was replaced by an elastic beam of finite length. A theoretical analysis of lateral vibrations of the beam, generated by imposing a forced displacement at the same frequency with a phase difference to both ends of this beam, was conducted. An apparatus was also fabricated with shakers installed on both ends of the beam. Appropriateness of the theoretical analysis was verified through experiments employing this apparatus. Consequently, generation of travelling waves, standing waves, and receding waves reliant upon the phase differences at the two ends became apparent through the theoretical analysis. The experimentation further confirmed undulations similar to the theoretical analysis results.

Key Words : Travelling Wave, Forced Vibration, Vibration of Continuous System, Ultrasonic Motor

1. はじめに

近年、微細な機械の駆動や物体の搬送などに摩擦接触を利用したアクチュエータが注目されており、それらの一つに進行波型超音波モータがある。このモータは振動子であるステータに位相差のある二つの定在波を発生させることで、ステータ表面に進行波を発生させ回転体であるロータを駆動している⁽¹⁾。超音波モータは、高トルクでありながら静粛性や制御性が高く、停止時の保持トルクも大きいなどの多くの長所を有する反面、摩擦駆動のため低エネルギー効率であり耐久性にも問題がある。これらの短所の改善を目的として、ステータとロータの接触部分に関する多くの研究⁽²⁾⁽³⁾がなされてきた。

筆者らは、これまでロータ下面に張り付けてある弾性体のライナーとステータの複雑な接触挙動を解明するため、増分理論を適用した有限要素法解析プログラムを開発し、その手法を用いて数値解析を行い、接触率や摩擦係数などの各種パラメータが駆動特性に与える影響について明らかにした⁽⁷⁾。この数値解析結果の妥当性を検証するには、実機の超音波モータを用いて実験を行うことが望ましい。しかしながら、超音波モータのステータに発生する進行波は、振動数が超音波領域の約 40kHz、振幅はわずか 2 μ m であるため、実機に発生する進行波を用いた実験は困難である。

そこで本研究では、これまで行った数値解析結果の妥当性を検証する実験の前段階として、まず、ステータを有限長さの弾性体はりに置き換え、このはりの両端に位相差を持たせた同一の振動数の強制変位を与えることにより生じるはりの横振動の理論的検討を行った。次に真鍮製のはりの両端に加振器を設置した装置を作成し、この加振器を用いて位相差のある強制変位をはりに与え、可視レベルの定在波、進行波、後退波の発生を実験により検証した。

* 原稿受付 2015 年 2 月 27 日

^{*1} 機械工学科

E-mail: t-nakayama@fukui-ut.ac.jp

2. はりに生じる進行波の理論解析

2.1 解析モデル

一様断面を有する有限長さ弾性はりの両端に、位相差を持たせた周期的な強制変位を与え、はりが強制変位方向に面内運動をしている系について解析を行う。この解析モデルを Fig.1 に示す。

弾性はりの全長を l 、断面積を A 、密度を ρ 、曲げ剛性を EI 、横変位を w とする。中立軸に沿った座標 s を Fig.1 のように定め、はりは伸びないと仮定する。このはりは両端に強制変位を受けているが、その変位は $s = 0$ の端点では $w = a \cos \Omega t$ 、 $s = l$ では $w = a \cos(\Omega t - \Phi)$ で記述されるとする。また、はりの両支持部は単純支持で回転端とし、これより支持部におけるモーメントを 0 とする。

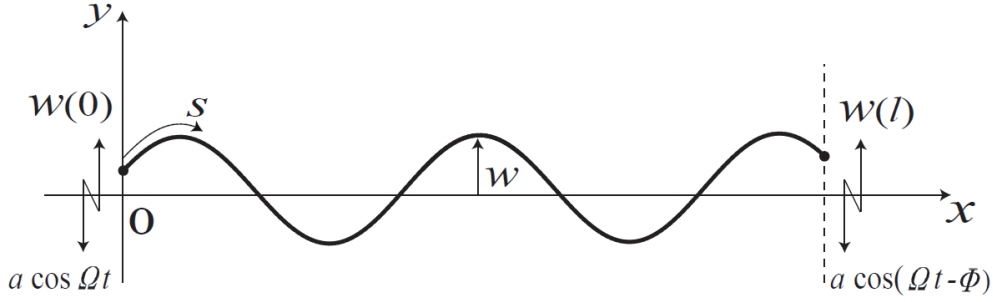


Fig.1 Analytical model

2.2 基礎方程式および境界条件

このはりの運動方程式および境界条件は以下のように記述される。

$$\rho A \ddot{w} + EI w'''' = 0 \quad (1)$$

$$s = 0 : w = a \cos \Omega t, \quad w'' = 0 \quad (2)$$

$$s = l : w = a \cos(\Omega t - \phi), \quad w'' = 0 \quad (3)$$

ここで \cdot は時間 t 、 $'$ は s での微分を意味する。

はりの横変位 w を代表長さ a 、 s を全長 l 、時間 t を $\sqrt{\rho A l^4 / EI}$ を用いて、無次元横変位 w^* 、無次元座標 s^* 、および無次元時間 t^* を導入し、それぞれ以下のように定義する。

$$w = aw^*, s = ls^*, t = \sqrt{\frac{\rho A l^4}{EI}} t^* \quad (4)$$

式(4)を用いて式(1)を無次元化すると、

$$\ddot{w} + w'''' = 0 \quad (5)$$

これ以降、無次元量を表す $*$ は省略する。同様に式(4)を用いて式(2)および式(3)を無次元化すると、次式が得られる。

$$s = 0 : w = \cos \omega t, \quad w'' = 0 \quad (6)$$

$$s = l : w = \cos(\omega t - \phi), \quad w'' = 0 \quad (7)$$

ここで ω は $\omega = N \sqrt{\rho A l^4 / EI}$ である。

以上のことより，この問題は式(5)から式(7)で記述され，この方程式系に含まれる無次元パラメータは加振振動数 ω と，端点の強制変位の位相差 ϕ である．

2.3 はり横変位の進行波の解法

式(5)で表されるはりの横変位において，強制振動成分のみを考える．式(6)および式(7)を用いて w を以下のように仮定する．

$$w = X(s) \cos \omega t + Y(s) \sin \omega t \quad (8)$$

式(8)を式(5)に代入すると

$$(X'''' - \omega^2 X) \cos \omega t + (Y'''' - \omega^2 Y) \sin \omega t = 0 \quad (9)$$

となり，式(9)が任意の時間 t について成り立つ条件より以下の式を得る．

$$X'''' - \omega^2 X = 0 \quad (10)$$

$$Y'''' - \omega^2 Y = 0 \quad (11)$$

式(10)および式(11)において $X = Ae^{\lambda s}$ ， $Y = Be^{\lambda s}$ とすると次式を得る．

$$\lambda^4 - \omega^2 = 0 \quad (12)$$

式(12)を解くと， λ は $\lambda = \pm\sqrt{\omega}$ ， $\pm i\sqrt{\omega}$ となり， X および Y は未定係数 $a \sim h$ を用いて以下のように記述される．

$$X = a \cos \sqrt{\omega} s + b \sin \sqrt{\omega} s + c \cosh \sqrt{\omega} s + d \sinh \sqrt{\omega} s \quad (13)$$

$$Y = e \cos \sqrt{\omega} s + f \sin \sqrt{\omega} s + g \cosh \sqrt{\omega} s + h \sinh \sqrt{\omega} s \quad (14)$$

ここで，式(6)および式(7)に式(8)を代入すると以下の式を得る．

$$s = 0: X = 1, Y = 0, X'' = 0, Y'' = 0 \quad (15)$$

$$s = l: X = \cos \phi, Y = \sin \phi, X'' = 0, Y'' = 0 \quad (16)$$

これらの式(13)～式(15)より $a = 1/2$ ， $c = 1/2$ となる．一方，式(13)および式(16)より

$$\frac{1}{2} \cos \sqrt{\omega} - b \sin \sqrt{\omega} + \frac{1}{2} \cosh \sqrt{\omega} + d \sinh \sqrt{\omega} = \cos \phi \quad (17)$$

$$-\frac{1}{2} \cos \sqrt{\omega} - b \sin \sqrt{\omega} + \frac{1}{2} \cosh \sqrt{\omega} + d \sinh \sqrt{\omega} = \cos \phi \quad (18)$$

となり，式(17)および式(18)より $b = \cos \phi - \cos \sqrt{\omega}/2 \sin \sqrt{\omega}$ ， $d = \cos \phi - \cosh \sqrt{\omega}/2 \sinh \sqrt{\omega}$ を得る．以上より X は以下ようになる．

$$X = \frac{1}{2} \cos \sqrt{\omega} s + \frac{\cos \phi - \cos \sqrt{\omega}}{2 \sin \sqrt{\omega}} \sin \sqrt{\omega} s + \frac{1}{2} \cosh \sqrt{\omega} s + \frac{\cos \phi - \cosh \sqrt{\omega}}{2 \sinh \sqrt{\omega}} \sinh \sqrt{\omega} s \quad (19)$$

同様に Y は以下の式で表される.

$$Y = \frac{\sin \phi}{2 \sin \sqrt{\omega}} \sin \sqrt{\omega} s + \frac{\sin \phi}{2 \sinh \sqrt{\omega}} \sinh \sqrt{\omega} s \quad (20)$$

よって, 式(8)に式(19)および式(20)を代入すると, はりの横変位 w は以下のように記述される.

$$w = \frac{1}{2} \cos \omega t \left[\cos \sqrt{\omega} s + \frac{\cos \phi - \cos \sqrt{\omega}}{\sin \sqrt{\omega}} \sin \sqrt{\omega} s + \cosh \sqrt{\omega} s + \frac{\cos \phi - \cosh \sqrt{\omega}}{\sinh \sqrt{\omega}} \sinh \sqrt{\omega} s \right] + \frac{1}{2} \sin \omega t \left[\frac{\sin \phi}{\sin \sqrt{\omega}} \sin \sqrt{\omega} s + \frac{\sin \phi}{\sinh \sqrt{\omega}} \sinh \sqrt{\omega} s \right] \quad (21)$$

ここで加振振動数 ω が十分に大きい場合, すなわち $\sqrt{\omega}$ が大きい場合には $\cosh \sqrt{\omega} = e^{\sqrt{\omega}} + e^{-\sqrt{\omega}}/2 \approx e^{\sqrt{\omega}}/2$, $\sinh \sqrt{\omega} = e^{\sqrt{\omega}} - e^{-\sqrt{\omega}}/2 \approx e^{\sqrt{\omega}}/2$ となることを考慮すると $\cosh \sqrt{\omega} s + (-\cosh \sqrt{\omega}/\sinh \sqrt{\omega}) \sinh \sqrt{\omega} s \approx \cos \sqrt{\omega} s - \sinh \sqrt{\omega} s = e^{-\sqrt{\omega} s}$ となり, 上記の項は $s=0$ の端点から離れるとほぼ零となる. 同様に $\sinh \sqrt{\omega} s / \sinh \sqrt{\omega}$ は $s=1$ の端点近傍を除くとほぼ零となる. 以上のことを考慮すると, はりの端点近傍を除けば次のようになる.

$$w = \left[\frac{1}{4} + \frac{\sin \phi}{4 \sin \sqrt{\omega}} \right] \cos(\sqrt{\omega} s - \omega t) + \frac{\cos \phi - \cos \sqrt{\omega}}{2 \sin \sqrt{\omega}} \sin \sqrt{\omega} s \cos \omega t + \left[\frac{1}{4} - \frac{\sin \phi}{4 \sin \sqrt{\omega}} \right] \cos(\sqrt{\omega} s + \omega t) \quad (22)$$

式(22)を用いて, 後に説明する実験に対応した $s = 0.32$ および $s = 0.7$ の条件で理論解析を行った結果を Fig.2 に示す. (a)は位相差 $\phi = 0$, (b)は $\phi = 0.98\pi$ における w の時刻歴である.

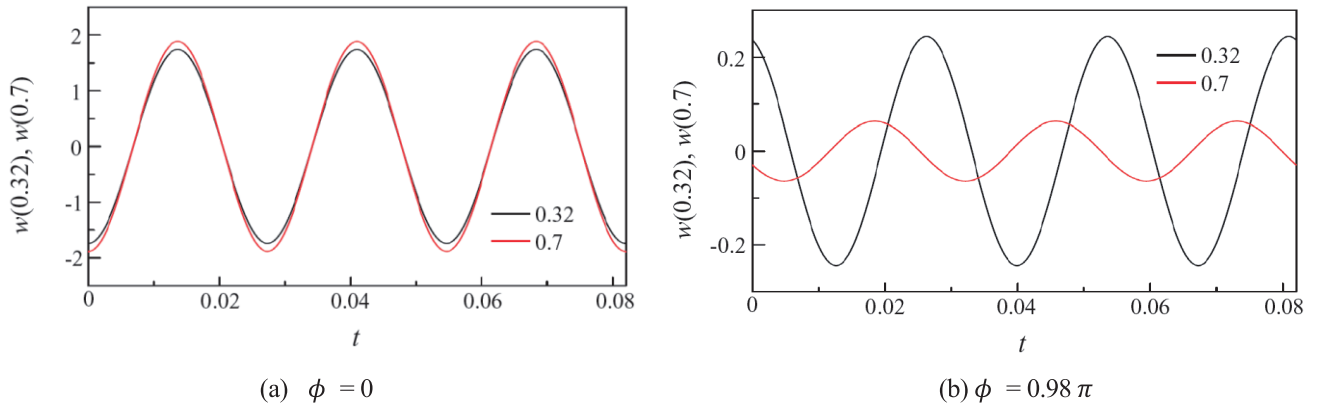


Fig.2 Time histories of w ($\omega=230$, $\phi=0, 0.98 \pi$)

式(22)において、第2項および第3項の係数が零となれば w は進行波のみで記述することが可能となる。この係数が零となる条件は同式より $\cos \Phi = \cos \sqrt{\omega}$, $\sin \Phi = \sin \sqrt{\omega}$ である。このときの w は以下のように記述され、 Φ, ω とは無関係に決定される。

$$w = \frac{1}{2} \cos(\sqrt{\omega}s - \omega t) \quad (23)$$

同様に、式(22)において第1項および第2項の係数が零となる $\sin \Phi = -\sin \sqrt{\omega}$, $\cos \Phi = \cos \sqrt{\omega}$ の条件では後退波のみで記述できる。

これら以外の条件では、進行波、定常波および後退波が混在した波動が生じることになる。また、この解析では減衰項を無視した。減衰項を無視すると共振状態に近づくほど振幅が大きくなり、加振振動数と固有振動数が一致する共振点では振幅は無限大となる。また、共振状態では w の位相に与える減衰の影響が大きくなる。したがって、本解析は減衰項が振幅の決定に大きく影響する共振状態に適用することはできない。

3. 実験による検証

本章では、前章で示したようにはりの両端を異なる位相差を持つ同一の振動数で変位加振した場合に生じる進行波、定在波、後退波の発生を実験により検証することを目的とした。

3.1 実験装置および実験方法

進行波を発生させるはりとして、低次モードの固有振動数を低く抑えることを考え、幅や厚さに対し全長を長く設定した全長 1000mm、幅 12mm、厚さ 1.5mm の真鍮製の板を用いた。このはりに位相差を持たせた強制変位を与えるため、はりの両端部に二基の加振器を取り付け、それらをアルミフレームからなる台に設置した。この二基の加振器に入力する信号は、振幅および周波数が同一の正弦波信号であるが、波形発信器より出力した信号を二つに分岐して、そのうちの一つのみをオールパスフィルターを通して入力することにより、加振器の作動に位相差を持たせた。この実験装置を Fig.3 に示す。

製作した装置を使用して、加振振動数を 40Hz で一定とし、はりの両端の位相差を 0° から 180° までの範囲を 20° 刻みで変化させた 10 パターンで実験を行った。また、はりの横変位の測定には、微細で速い変位にも対応可能である渦電流式距離センサを用い、はりの端点から 320mm と 700mm の位置に設置した。

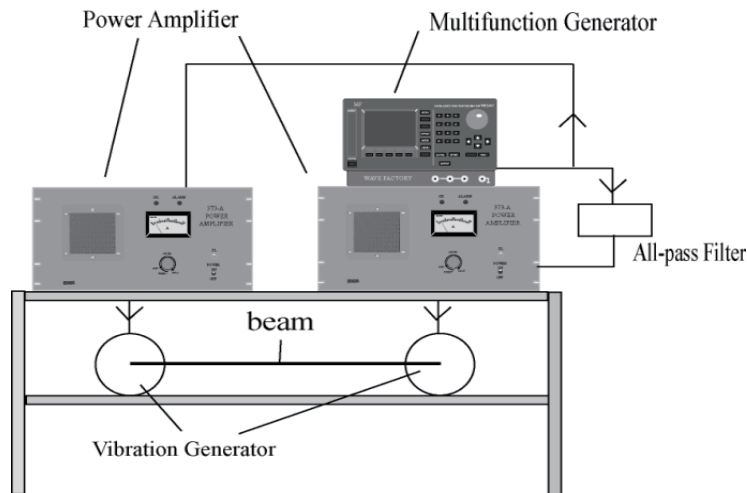


Fig.3 Experimental apparatus

3.2 実験結果

Fig.4 に位相差 $\Phi=0[\text{rad}]$ の場合の実験結果を示す. 同図(a)は, 加振器への入力電圧 V_a および V_b の時刻歴であり, 同図(b)は, 端点から 320mm と 700mm の位置の渦電流式距離センサにて計測した, はりの横変位 w の時刻歴応答である.

Fig.4 に示すように, 加振器の入力電圧に位相差がない場合, はりの横変位 w は加振振動数と同一の振動数成分が支配的な曲げ振動をしており, また, 異なる測定位置において殆ど位相差のない波形となっていることから, 定在波が支配的であることがわかる.

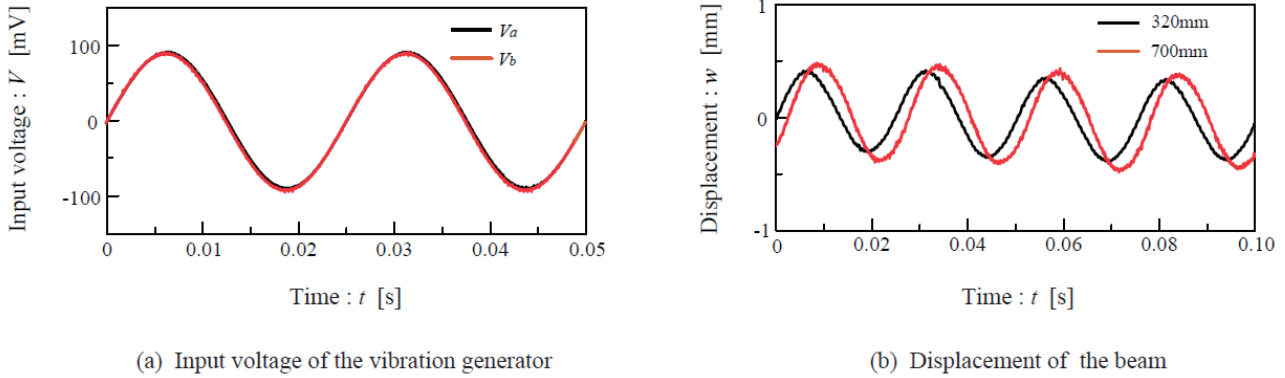


Fig.4 Time histories in the case that a standing wave is dominant ($\Phi=0[\text{rad}]$)

Fig.5 に位相差 $\Phi=0.98\pi [\text{rad}]$ の場合の実験結果を示す. Fig.4 と同様, (a)は二基の加振器への入力電圧の時刻歴であり, (b)ははりの横変位 w の時刻歴応答である.

同図からわかるように, 加振器への入力電圧が逆相の場合, Fig.4 と比較して, 異なる 2 点で測定したはりの横変位 w の位相差が大きくなっている. すなわち, 進行波または後退波が定在波より支配的であると考えられる.

以上の結果より, はりの両端を同一の振動数で位相差のみを与えた場合に進行波または後退波が発生し, この位相差を変化させることで定在波および進行波（後退波）の比率が変動することが明らかになった. また, この現象は Fig.2 に示す理論解析結果とも定性的な一致をみたと考えられる.

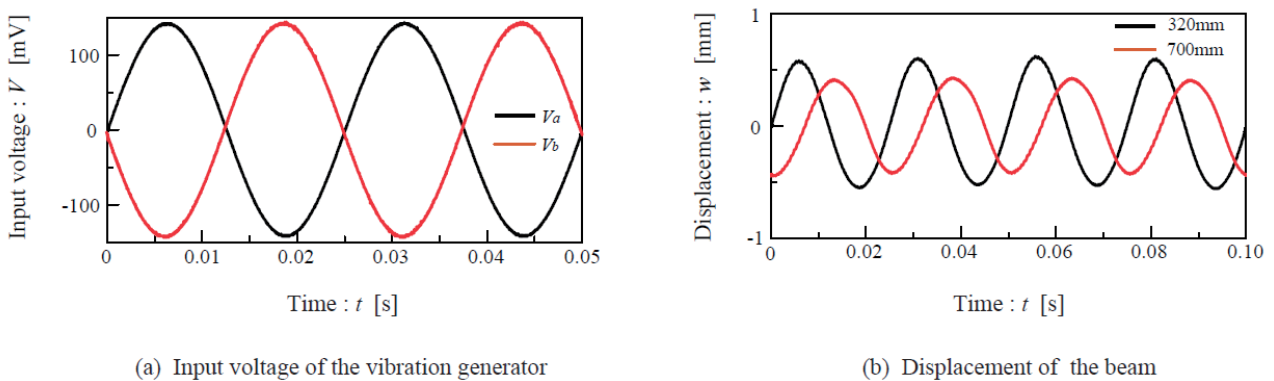


Fig.5 Time histories in the case that a traveling wave is dominant ($\Phi=0.98\pi[\text{rad}]$)

4. おわりに

本研究では、すでに数値解析を行った進行波型超音波モータのステータとライナー間における接触挙動の妥当性を検証する実験の前段階として、ステータを有限長さのはりに置き換え、そのはりの両端を同一の角振動数で周期的に加振した場合に生じる曲げ振動を理論的に考察した。その結果、はりに励振される波動が両端の境界付近を除き、進行波、定在波および後退波の混在した形で記述できることを明らかにした。また、実際にはりの加振実験を行った結果、加振変位の位相差を変化させることで定在波と進行波の比率の変動がみられたことにより理論解析の妥当性が検証された。

文 献

- (1) 見城尚志, 指田年生, 超音波モータ入門, (1991), pp.7-15, 総合電子出版.
- (2) Hagedorn, P. and Wallaschek, J., “Travelling Wave Ultrasonic Motors, Part1: Working Principle and Mathematical Modeling of the Stator”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.155, No.1(1992), pp.31-46.
- (3) Zharri, O.Y., “Adhesive Contact Between the Surface Wave and a Rigid Strip”, *Journal of Applied Mechanics*, Vol.62, No.2(1995), pp.368-372.
- (4) 黒沢実, 上羽貞行, 進行波型超音波モータの効率, 日本音響学会誌, Vol.44, No.1(1988), pp.40-46.
- (5) 中山智了, 山下清隆, 高塚公郎, 大西隆文, 阿久戸庸夫, “進行波型超音波モータの駆動特性に及ぼすロータ振動の影響”, 日本機械学会論文集C編, Vol.79, No.799(2013), pp.529-539.
- (6) 中嶋大智, 前田剛志, 小沢友亨, 津久井道夫, 高塚公郎, 吉沢正紹, “超音波モータの接触挙動に関する基礎的研究”, 日本機械学会論文集C編, Vol.72, No.717(2006), pp.1590-1597.
- (7) 中山智了, 大西隆文, 山下清隆, 高塚公郎, “進行波型超音波モータの駆動メカニズムーロータとステータの動的接触挙動ー”, 福井工業大学研究紀要, No.42(2012), pp.188-199.

(平成 27 年 3 月 31 日受理)