

進行波型超音波モータの駆動メカニズム

－ 反転挙動の解明 －

高 塚 公 郎*

Driving Mechanism of a Travelling Wave Ultrasonic Motor

－ Analysis of Inverse Rotation Phenomenon －

Kohro Takatsuka

We theoretically investigate the driving mechanism of a travelling wave ultrasonic motor that consists of a rotor and a stator, in consideration of the rotor vibration. As a results, we can make clear the inverse rotation phenomenon of the ultrasonic motor that could not be analyzed out of consideration of its vibration. And also, it is found that the driving characteristics are classified into several patterns according to the phase and the amplitude of the rotor vibration and that, in the case that the phase of rotor vibration is opposite to that of the stator, the driving force becomes generally greater than in the case of the same phase. Furthermore, it is experimentally confirmed that, in the case of the same phase, the rotating direction is normal (opposit to a travelling wave direction) if the amplitude of the rotor vibration is smaller than that of the stator.

1. 緒 言

超音波モータとは、駆動源に超音波領域の機械的振動を利用したアクチュエータであり¹⁾、従来の電磁モータとは構造、特性ともに大きく異なる。そのため、独自性を生かした新たな分野での応用が期待されているが、摩擦駆動のメカニズムや振動現象が複雑であり、改善すべき点も多く、これまでにモータ駆動時のステータとロータの接触部分に関する研究^{2), 3)}などの多くの努力がなされている。

しかしながら、現在までのいずれの研究においても、駆動特性に大きな影響を及ぼすと推定されるロータの変形および振動は無視されて、ロータは剛体として取扱われており、ロータの回転方向がステータの進行波の進む向きと同じ向きに回転する反転現象など、未だ明らかにされていない現象も多い。

そこで本研究では、ロータの変形を考慮した振動解析^{4), 5)}を行った後、その結果より推定されるステータとロータの接触状態に基づいた駆動メカニズムの解析を行い、未だ解明されていなかった反転現象を解明するとともに、ロータ振動の駆動特性に及ぼす影響を明らかにした。さらに、実機の進行波型超音波モータを用いて実験を行い、これらの解析の妥当性を検証したので、報告する。

* 機械工学科

2. 駆動メカニズムの解析

2.1 進行波型超音波モータの構造¹⁾

進行波型超音波モータの構造を Fig. 1 に示す。ステータ下面には、Fig. 2 に示すように＋、－に永久分極された圧電セラミックスが接着されており、この圧電セラミックスに可聴域を越える 20kHz 以上の高周波交流電圧を印加することにより、ステータは加振され、定在波が発生する。位相が 1/4 波長ずれた A、B の二つの相の圧電セラミックスをステータ下面に接着し、位相のずれた二つの定在波を生じさせると、これらの合成波である進行波を得ることができ、ステータ表面に楕円運動が生じる。スプリングによりステータに押さえつけられたロータは、このステータ表面の楕円運動の摩擦力により駆動され、回転する。これが、進行波型超音波モータの駆動原理である。

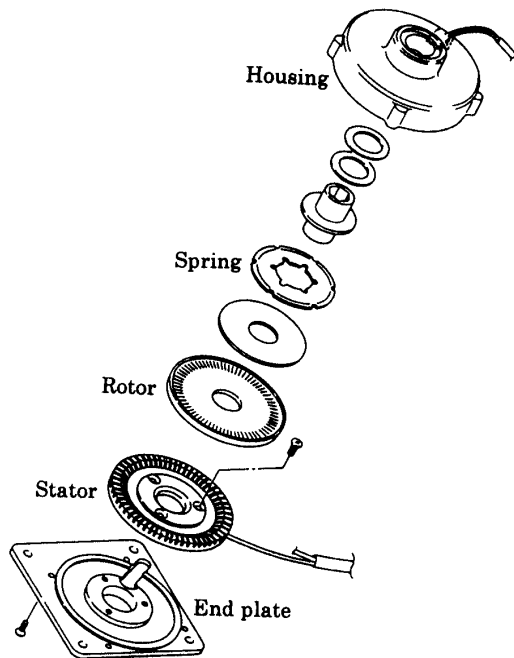


Fig.1 Structure of Ultrasonic Motor¹⁾

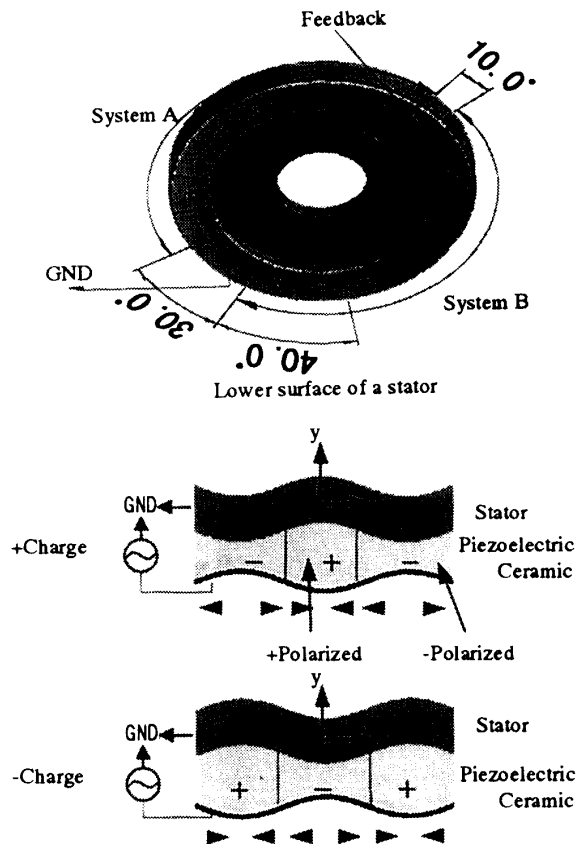


Fig.2 Stator with Piezoelectric Ceramic

2.2 ステータの表面速度³⁾

ステータ表面に生じる進行波の進む方向を右向きとすれば、表面の楕円運動の方向は、Fig. 3 に示すように山部で左向き（進行波の進む方向と反対方向）となり、谷部で反対の右向き方向となる。このことから、従来の駆動メカニズムの研究のように、ロータを剛体とすれば、ロータは常に進行波

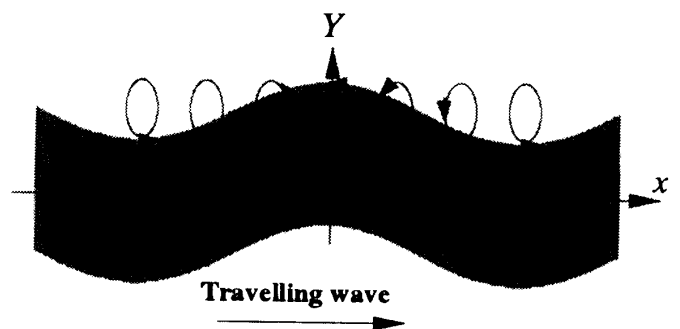


Fig.3 Oval Movement of Rotor Surface

の進む方向と反対方向に回転（この方向を正転と称する）する結果が導かれることが容易に理解される。

ステータ表面の進行波 Y は、一般に次式で表される。

$$Y = a \cos(kx - \omega t) \quad (1)$$

ここで、 x 、 t 、 k および ω はそれぞれ円周方向の座標、時刻、ステータの振幅、 $2\pi/\lambda$ [λ は波長]および加振角速度である。式（１）よりステータ表面の x 方向の速度 v_s は、ステータ厚さを h_s として次式のようなになる。

$$v_s = - (ak\omega h_s/2) \cos(kx - \omega t) \quad (2)$$

2.3 ロータの振動およびライナーの表面速度⁴⁾

ロータは、上部のさらばねにより下向き力を受け、下面のライナーを介して下部のステータより上向きの力を受ける。本研究のロータの変形および振動解析に用いた解析モデルを Fig. 4 に示す。

ロータの狭い幅の円周部分だけがステータの振動に起因する外力を受けるため、ロータの形状を有限長さの梁の両端をつないだリングとみなして、進行波の1波長分の領域について考え

- ①ロータとステータとは全面接触する。
- ②ステータは進行波形状に変形する。
- ③さらばねのばね力は均一にかかる。
- ④すべての減衰項は無視できる。
- ⑤さらばねおよびライナーの初期変位はない。
- ⑥ロータの自由振動は減衰している。

を仮定すると、ロータにはステータとロータの変位差による力とさらばねによる力がかかるため、力のつり合い式は

$$\rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = K(Y - y) - K' y \quad (3)$$

となる。ここで、 y 、 ρ 、 A 、 E 、 I 、 K および K' は、それぞれロータの y 方向（軸方向）変位、円周部の密度、断面積、ヤング率、断面2次モーメント、ロータ下面のライナーおよびさ

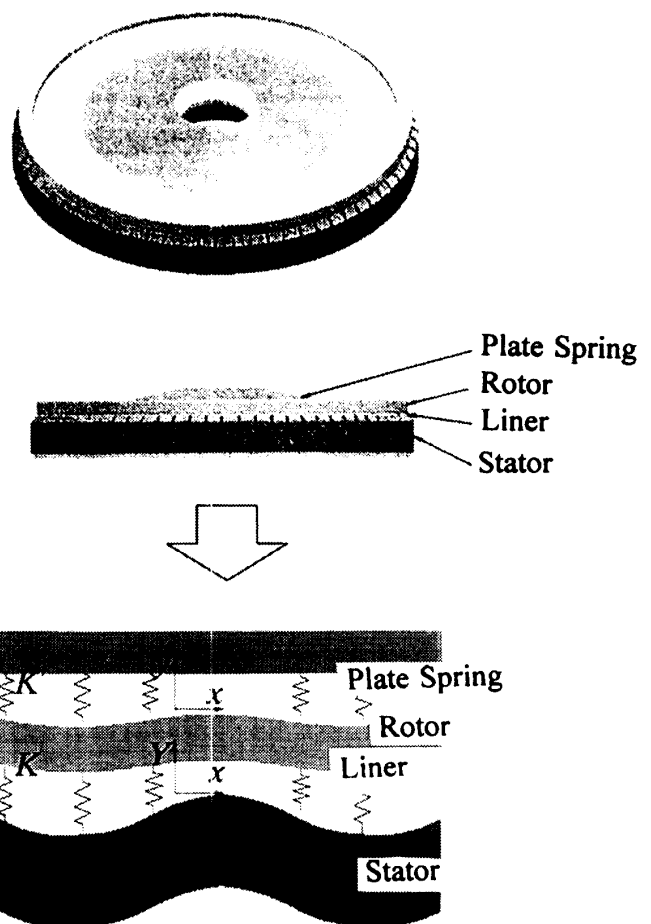


Fig.4 Analysis Model of Rotor

らばねのばね定数である。式(1)を式(3)に代入して y について解き、境界条件として y の連続性〔 n 次の微係数はリング1周後の位置で同じ値となる($n = 0 \sim 3$)〕を用いて積分定数を決めると y はつぎのようになる。

$$y = \frac{a K}{\left(\frac{16\pi^4 EI}{\lambda^4} + K + K'\right) - \rho A \omega_r^2} \cos(kx - \omega_r t) \\ = b \cos(kx - \omega_r t) \quad (4)$$

ここで、 b は次式で表されるロータの振幅である。

$$b = a K / \left\{ \left(\frac{16\pi^4 EI}{\lambda^4} + K + K' \right) - \rho A \omega_r^2 \right\} \quad (5)$$

上式の b の符号は分母の符号に依存するが、 $b > 0$ のときはロータの変位はステータと同じ向きになるため両者の振動は同相となり、反対に $b < 0$ のときは反相となる。

式(4)のロータ変位 y より、ライナーの接線方向変位を求め、更に微分してライナーの x 方向の表面速度 V_l を求めると、ステータの進行波と逆向きのロータの回転速度を $-V_r$ として、

$$v_l = -V_r + b k \omega_r (h_l + h_r / 2) \cos(kx - \omega_r t) \quad (6)$$

となる。ここで、 h_r および h_l はそれぞれロータおよびライナーの厚さである。

2.4 ロータの押付力とモータの駆動力

ロータの単位長さ当たりのステータへの押付応力 f_y は

$$f_y = K (w_l + \delta) \quad (7)$$

と表される。ここで、 δ はさらばねの初期押付力によるライナーの縮み量であり、 w_l は式(1)および式(4)を用いてつぎのように表されるライナーの厚さ変化量である。

$$w_l = Y - y = (a - b) \cos(kx - \omega_r t) \quad (8)$$

進行波1波長 λ 当たりのステータへのロータの押付力 F_y は、式(7)に式(8)を代入して積分し、つぎのように求められる。

$$F_y = 2 \int_0^{\lambda/2} K \{ (a - b) \cos kx + \delta \} dx \quad (9)$$

モータの駆動力を生じさせるライナーとステータとの間の摩擦応力 f_x は、式(7)の押付応力 f_y と摩擦係数 μ の積として求められるが、その作用する方向は両面の速度関係に依存する。Fig. 5に示すような両者の振動が同相でステータの振幅 a がロータの振幅 b よりも大きい場合について考えると、山部では、ステータの方が振幅の大きいため、進行波の進む向きと反対方向(左向き)の表面速度は、ステータの方が速くなり、ロータの受ける摩擦応力は左向きとなる。反対

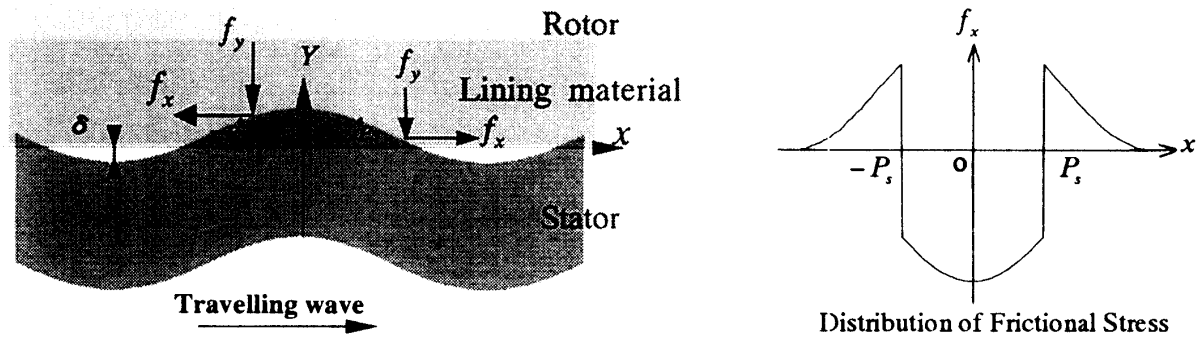


Fig.5 Distribution of Frictional Stress

の谷部では、同様に、ロータの受ける摩擦応力は右向きとなる。したがって、摩擦応力の分布は、進行波の進む向き（Fig. 5 の左図で右向き）を正の方向にとると、押付応力 f_y の分布を考慮して、Fig. 5 の右図のようになる。ここで、 P_s はライナーとステータの表面速度が一致する点で固着点と言われている点であり、この点を境に摩擦応力の方向が変わる。モータの駆動力は、この摩擦応力をつぎのように接触部分に対して積分することにより求められる。

x 方向の単位長さ当たりの摩擦応力 f_x は、式（7）の押付応力 f_y に摩擦係数 μ を掛け、摩擦応力の働く方向を考慮した次式

$$f_x = \text{sgn}(|x| - P_s) \mu f_y \quad (10)$$

で表されるから、進行波 1 波長当たりの駆動力 F_x は、式（10）に式（7）および式（8）を代入して積分し、つぎのように求められる。

$$\begin{aligned} F_x &= 2 \int_0^{P_s} \mu K(Y - y + \delta) dx - 2 \int_{P_s}^{\lambda/2} \mu K(Y - y + \delta) dx \\ &= 4\mu K \left[\frac{a-b}{k} \text{sinc} P_s + \delta P_s \right] - 2\mu K \left[\frac{a-b}{k} \text{sinc} \lambda/2 + \delta \lambda/2 \right] \end{aligned} \quad (11)$$

なお、上式中の固着点 P_s は、式（2）および式（6）より以下のように求められる。

$$P_s = \frac{1}{k} \cos^{-1} \frac{V_r}{k\omega_s \{h_s a + (h_l + h_r/2)b\}} \quad (12)$$

3. モータの駆動特性

ロータの変形および振動を考慮して求めたモータの駆動力の式（11）を用いることにより、モータの駆動特性をどの程度明らかにすることができるかを調査するため、実機超音波モータを想定した数値解析を行った。

本研究では、ロータの振幅が変化した時、モータの駆動特性がどのように変化するかを調査した。すなわち、種々のステータとロータの振幅比 $R = b/a$ に対して、モータの回転数 $N =$

$60Vr/2\pi r_m$ と駆動トルク $T=nFr_m$ (n :進行波の数、 r_m :ステータの平均半径)の関係性を求めた。用いた数値は、

$$a=2\mu\text{m}, \quad h_l=0.3\text{mm}$$

$$h_r=3.0\text{mm}, \quad h_s=4.2\text{mm}$$

$$r_m=28.1\text{mm}, \quad n=9,$$

$$A=6.3\text{mm}^2, \quad E=61.7\text{GPa}$$

$$I=4.73\text{mm}^4, \quad K=600\text{MPa}$$

$$K'=0.145\text{MPa},$$

$$R=b/a=-1.75\sim 1.75$$

$$V_r=-0.6\sim 0.9\text{ m/s}$$

$$\delta=a-b, \quad \lambda=19.6\text{mm}$$

$$\mu=0.3, \quad \rho=2.65\text{g/mm}^3$$

$$\omega_s=40,000\text{ Hz}$$

である。ロータの振動がステータと同相 ($R>0$) および反相 ($R<0$) の場合の結果をそれぞれ Fig. 6 および Fig. 7 示す。

横軸の正の方向は、進行波の進む向きと反対方向の回転(反転現象)をあらわすが、これらの図より、同相反相いずれの場合にも、 $|R|>1$ の領域で反転現象が発生し、 $|R|$ が大きいほど駆動トルクが大きくなることが明らかになった。また、 $|R|<1$ の領域は、通常の正

転回転であり、この領域では $|R|$ が小さいほど駆動トルクが大きくなり、同相よりも反相の方が駆動トルクが大きくなることも明らかになった。なお、 $|R|=1$ では駆動しない。これは、同相($R=1$)では、接触域全域で面圧が等しく、正と負の摩擦応力が働く面積が等しくなり、反相($R=-1$)では、接触域全域でライナーとステータの表面速度が等しくなるためである。

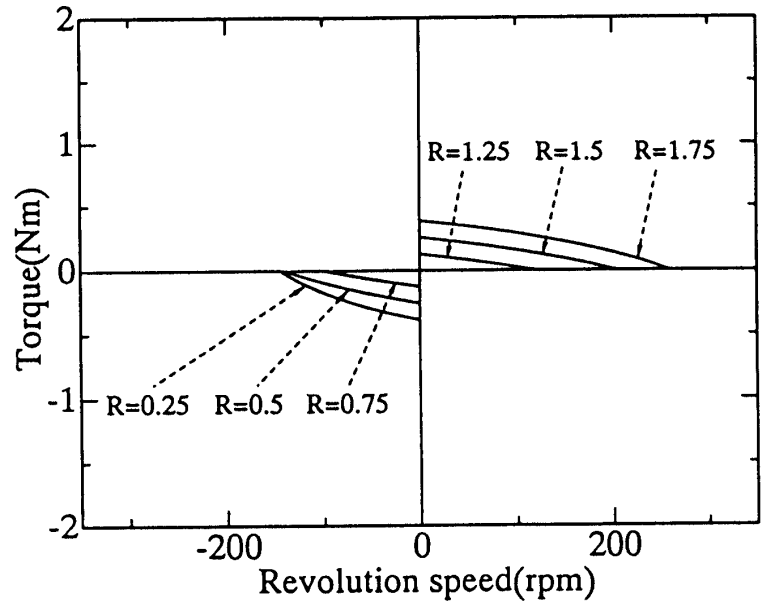


Fig.6 Characteristics of ultrasonic motor
(same phase)

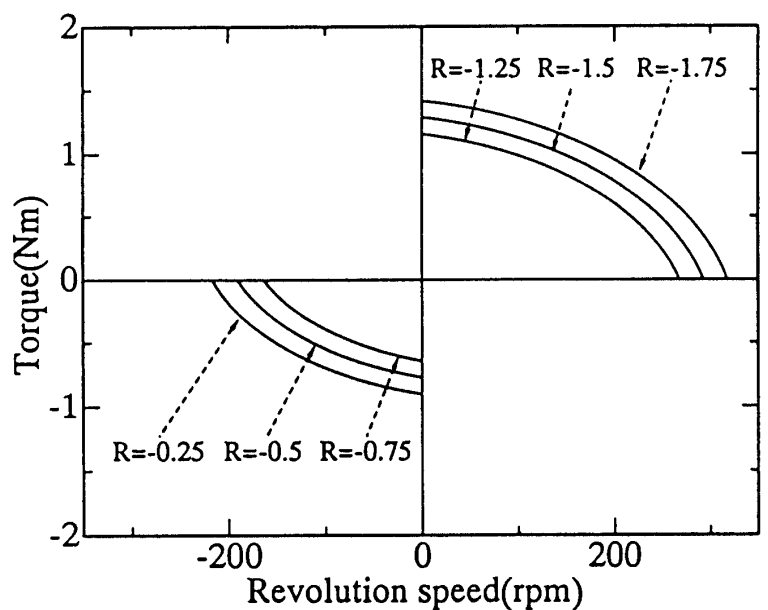


Fig.7 Characteristics of ultrasonic motor
(inverse phase)

4. 実験による検証

理論解析結果の妥当性を確認するため、前章の数値解析で用いた数値の<株>ミツバ製リング状進行波型超音波モータを用い、3種類のロータ厚さ h_r 駆動特性を調査した。実験装置の外観をFig. 8に示す。右側後方に見えるのが可聴域を越える高周波交流電圧の発生装置であり、左側手前が超音波モータである。

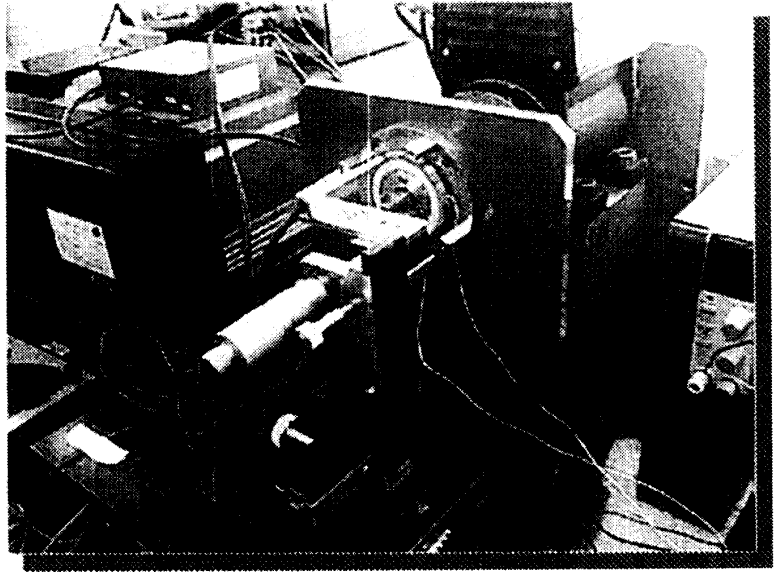


Fig.8 Experimental Apparatus

ロータ厚さ $h_r = 1\text{ mm}$ では、加振すると異音が発生し、モータは駆動しなかった。ロータの振動が大きくなり過ぎて、ステータとの全面接触の前提が大きく崩れたためと思われる。

ロータ厚さ $h_r = 2\text{ mm}$ および 3 mm ではともに同相となった。これらの駆動特性の測定結果をFig. 9に解析結果とともに示す。

2 mm の場合は逆転となり、駆動特性は、解析結果と一致した。 3 mm の場合は正転となり、駆動特性は解析結果と一致しているとはいえないものの、定性的な一致は認められ、ロータ振動を考慮した本研究の妥当性が確認された。

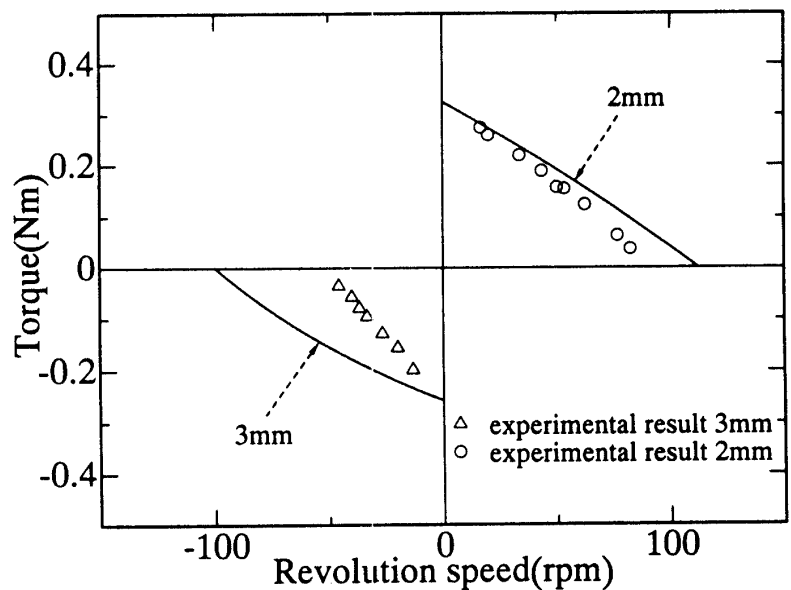


Fig.9 Experimental results compared with theoretical ones

5. 結 言

ロータの変形および振動を考慮して進行波型超音波モータの駆動メカニズムを解析した結果、今まで解明されていなかった反転現象を明らかにすることができた。また、本研究の解析結果として、以下のような超音波モータの駆動特性が明らかになった。

- ① 同相反相いずれの場合にも $|R| > 1$ の領域で反転現象が生じる。

- ② $|R| > 1$ の領域では、 $|R|$ が大きいほど駆動トルクが大きくなる。
- ③ $|R| < 1$ の領域では、 $|R|$ が小さいほど駆動トルクが大きくなる。
- ④ 反相の方が同相よりも駆動トルクが大きい。

さらに、実験的検証を試みた結果、同相の場合は解析結果と定性的な一致をみたが、反相の場合の検証はできなかった。反相では大きな駆動トルクが期待されるため、今後、ライナー材等を変え、再度、試みたい。

なお、本研究は、進行波型超音波モータの効率向上と長寿命化を目的として、(株)ミツバ、慶應義塾大学および本学が産学協同で実施している研究の成果の一部である。

参考文献

- 1) 見城・指田, 超音波モータ入門, 総合電子出版(1991), pp.187-193.
- 2) 黒沢・上羽, 進行波型超音波モータの効率, 日本音響学会誌, 44-1(1988), pp.40-46.
- 3) 前野, 超音波モータに関する基礎研究, 東工大博士論文(1993)
- 4) 高塚他 4 名, 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 1999年度 年次大会講演論文集(II), No99-1(1999), pp.137-138.
- 5) 中島他 5 名, ロータの振動を考慮に入れた進行波型超音波モータの摩擦接触駆動機構, 第11回「電磁力関連のダイナミックス」シンポジウム講演論文集(1999), pp.436-439.

(平成11年12月 3 日受理)