

# 屈曲波振動型超音波モータの運転特性（その1）

秋 山 勇 治

## Running Characteristics of Disc Type Ultrasonic Motors (PART-I)

Yuji AKIYAMA

### Abstract

Remarkable progress has been made in Japan in the research and development of ultrasonic motors. Three manufacturers have already introduced practical models. In the following, we will divide the course of development of ultrasonic motor and their future applications into four periods (A, B, C and D) from the standpoint of past research and patent applications.

We believe that we are now at point C in product development and that point D or practical application will begin soon.

This paper describes about Torque-Speed Characteristics and Vibrations which are measured in our laboratory.

### 1. ま え が き

最近日本では超音波モータの研究が盛んであり、特に実用化研究の面では世界を完全にリードしていると言っても過言ではあるまい。

超音波モータの歴史をふり返ってみると図1に示すようにA, B, Cの三つの代表的な研究開発の時代と今後の実用化の時代Dが考えられる。これらの各々の時代をA（第一次基礎研究）、B（第二次基礎研究：特許創出期）、C（製品化研究）、D（実用化期）と名付けてみた<sup>2,5)</sup>。

しかし、最近の予想ではDの予想曲線は数年遅れるようである。超音波モータを特許面でみると、振動モータとか表面波モータ、圧電モータ、超音波モータなどと各国で各種の呼び方がなされていた。

しかし、最近では米国式の Ultrasonic Motor（超音波モータ）なる呼び方が普及しつつある。だが現象を良く表現している名称としては“振動モータ”という名前が適しているように思われる。現在までに研究、試作された各種超音波モータの代表的なものを表1に示してみた<sup>4)</sup>。

研究の初期には単純な振動力を回転運動に変換する

機構を用いたキッツキ型からスタートし、これを改良したホーン型、さらにリング型、リニア型、屈曲波振動型、ねじり結合子型、フラフープ型などとそのほとんどが日本で研究開発されたものである。

これらの中で現在一番実用的と考えられているのが屈曲波振動型であり、新生工業、松下電産、キャノンからこれらのタイプのサンプル品が出荷される段階になっている。

超音波モータは従来の電磁誘導型の原理を用いたモータとは全く異なる画期的なモータである。100年のモータの歴史の中で特殊モータの名のもとに何百種類もの各種モータが研究・発表されてきたが、現在も実用されているモータはIM, SM, DC, 油圧モータ等十指に満たない。

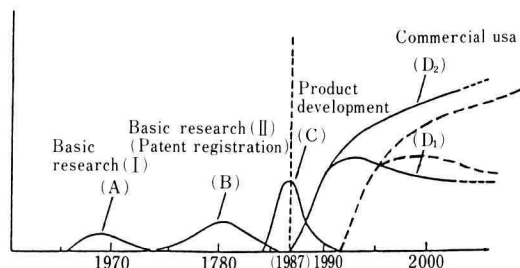


図1. 超音波モータの研究の歴史と将来予測

表1. 試作発表された各種超音波モータ

モータの種類	波の種類	研究・試作	特徴
1. 屈曲振動型	進行波	新生工業・松下キャノン	(本命)
2. 円管振動型	進行波	日立マクセル・キャノン	
3. ねじり結合子型	進行型	日立マクセル	メカ方式
4. ホーン型/キャッキ型	メカ駆動	新生工業	(短寿命)
5. リニア表面波型	表面波進行波	新生工業	リニア駆動
6. 尺取り虫型	メカ駆動	東芝, 日電	微細位置決め

しかし、超音波モータはこの十指に入る可能性が有る有望なもので、10年いや20年に一度の画期的なモータである。ここではその可能性を期待し、早期に実用化するために“特徴や限界性能”を把握するとともに、欠点をも十分認識した上で改良、実用化、性能向上のための研究に着手しようというものである。

以下新生工業製(USR-60-4-100)屈曲波振動型超音波モータに対する特徴や性能および問題点につき実験・調査した結果を紹介する。

## 2. 構造, 原理

屈曲波振動型超音波モータ(USR-60-4-100)の構造例を図2, 図3に示す。ドライバーのキャリヤ波は約40 KHzで、二相ステッピングモータで言うA, B二相方形波交流出力のバイポーラ駆動方式である。

出力電圧は結合兼昇圧トランスで200 Vまで上げている。この電圧をバイモルフ型電歪素子に印加し、歯型の付いた固定円板(ステータ)上に進行波を作る。進行波の屈曲振動モード次数は高いほどステータとロータの接触点が多くなるので発生推力は大きくとれる。

本例では9次調波の振動モードを使用しており、こ

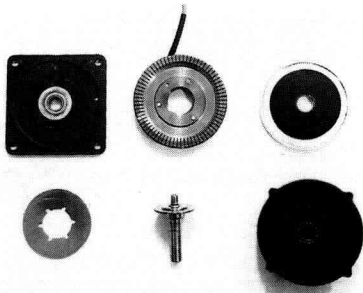
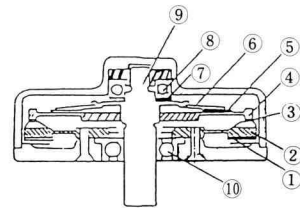


図2. USR-60-4-100 分解写真



1 圧電体	6 板バネ
2 弾性体	7 ワッシャー
3 スライダ	8 ベアリング
4 アルミ合金	9 シャフト
5 ゴム板	10 ベアリング

図3. 構造断面図

の固定振動板(ステータ)に回転円板(ロータ)がバネにより圧接され、この接触圧により進行波の推力が回転円板に伝達される。図4にドライバー回路を示す。

## 3. 基本運転特性及び計測装置

図5に今回の実験で用いた超音波モータの基本的な運転特性(S-Tカーブ)及び振動測定装置を示す。インクリメンタルエンコーダのパルス出力により運転速度を検出、パウダーブレーキのリアクショントルクを台ばかりにて測定する。また超音波モータの回転円板の振動状態を振動加速度としてシャフト端面より取り出している。

この様にして測定した(S-T)カーブを図6から図12に示す。図6は印加電圧と発生トルクの関係、図7は振動周波数に対するトルクの経時変化の様子、図8~図12は印加電圧に対する運転特性を示す(速度設定ボリュームをパラメータとしている)。

また、速度制御用ボリュームと出力周波数の関係を図13に、速度制御用ボリュームの目盛(Lo, 1 2 3 4 5 6, Hi) 8目盛とドライバー入力電圧と速度制御用目盛及

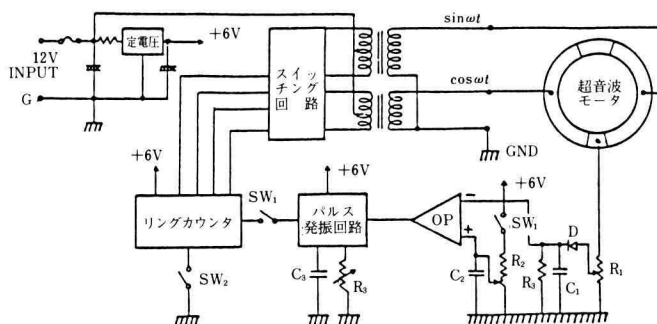


図4. 超音波モータの駆動回路



図5. 運転特性及びロータ振動加速度の測定

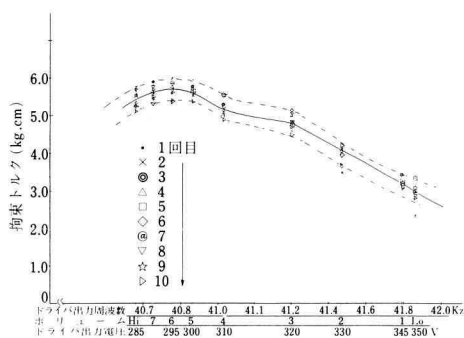


図7. 拘束トルク

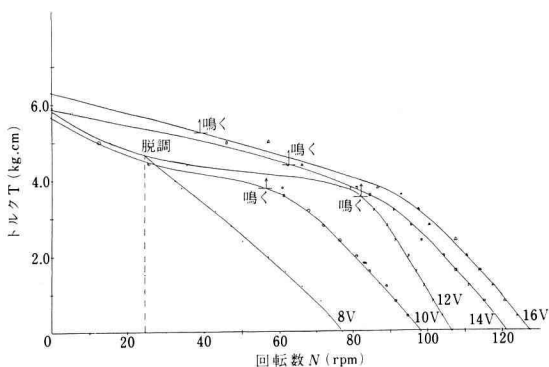


図6. トルク T-回転数 N ボリューム: 6

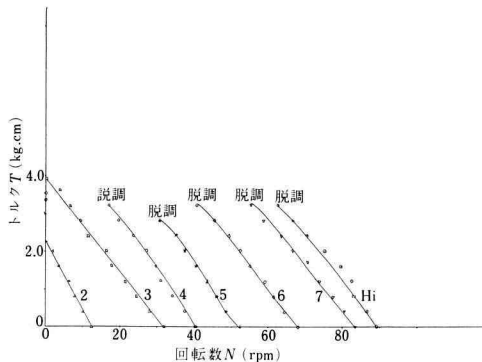


図8. トルク T-回転数 N V1=8V

びドライバー出力 (P to P 値) を参考までに示している。

#### 4. 進行波型超音波モータの速度制御の原理

進行波型超音波モータの推力の発生及び駆動原理の説明をレーリー波及び屈曲波振動につき図16, 図17を用いて示す<sup>1)</sup>。

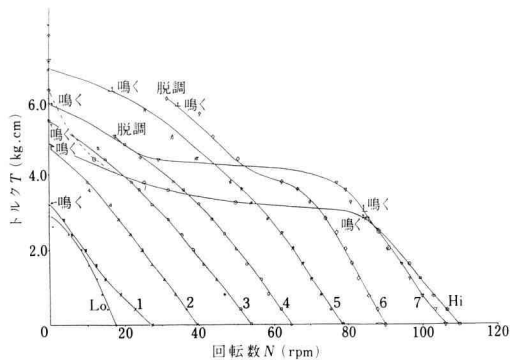


図 9. トルク T-回転数 N  $\hat{V}=10$  V

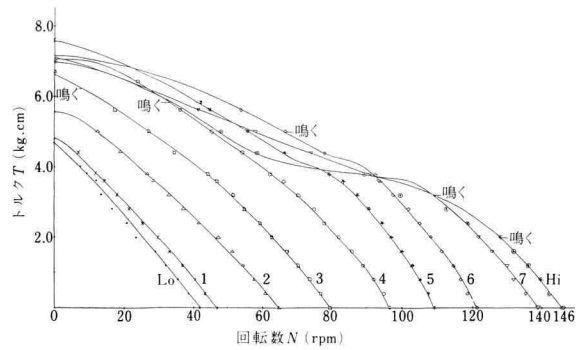


図 12. トルク T-回転数 N  $V_1=16$  V

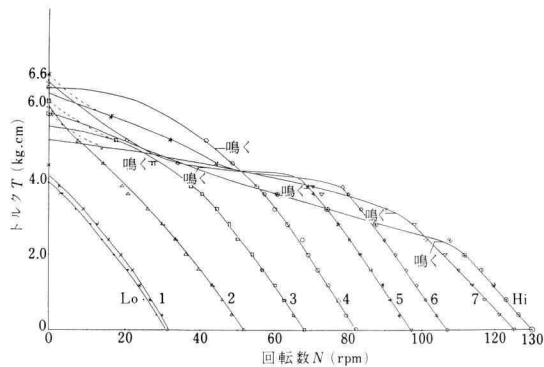


図 10. トルク T-回転数 N  $V_1=12$

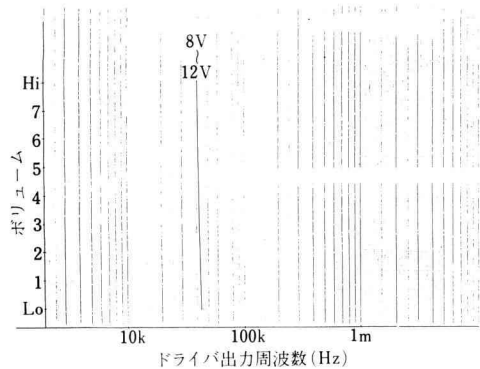


図 13. ポリボリュームドライブ出力周波数

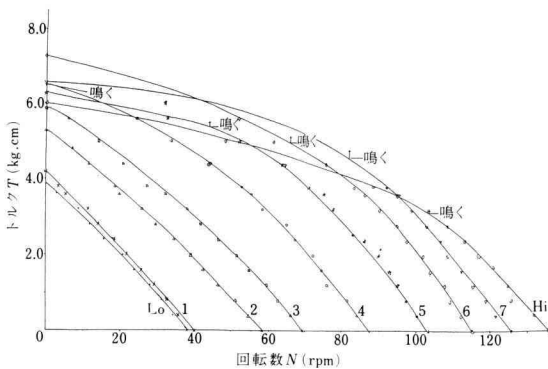


図 11. トルク T-回転数 N  $V_1=14$  V

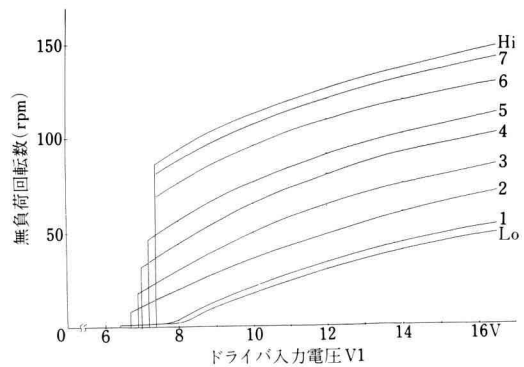


図 14. 無負荷回転数特性

進行波の場合には両波のいずれの場合も物体表面が山の部分で伸び谷の部分で縮むという伸縮運動を行っており、この波が定在波でなく進行波となっている。

この結果、進行波による振動物体の表面の任意点の運動軌跡は図示のように楕円運動を行い、波の進行方

向と逆向きに移動している。よって進行波の上にスライダを置くと進行波の進行方向と反対の方向に移動する。これらの原理を振動論の立場より数式を用いて表示すると以下のように成る<sup>1)</sup>。

今、平板表面上の任意の点を  $A(x_e, 0)$  とする。中立

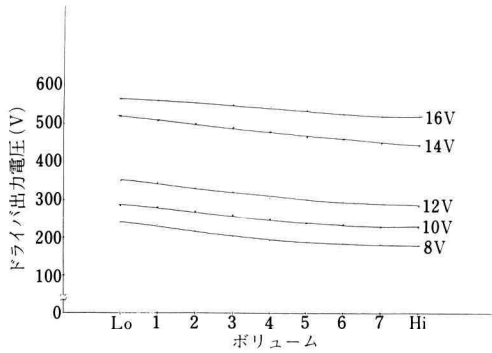


図 15. ボリューム-ドライブ出力電圧 (PtoP)

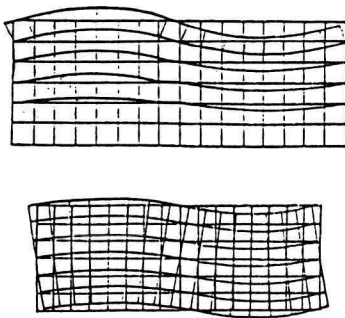


図 16. (上) レーリー波. (下) 屈曲波

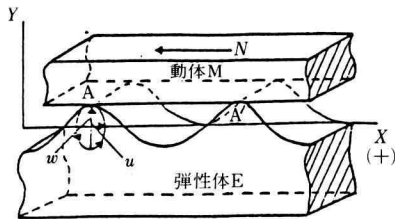


図 17. 進行波型超音波モータの原理

軸から表面までの厚みを  $e_2$ , 屈曲後の位置を  $A'(x, y)$  とし,  $A$  から  $A'$  に変位した時の  $x$  方向変位を  $y_a$ , たわみ角を  $\theta_a$  とするこの平板弾性体のたわみの式は下記と成る。

ただし  $\xi_0$  = 振幅,  $\lambda$  = 波長,  $\omega$  = 角速度, たわみ前の  $y$  の式は,

$$y = \xi_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} x \sin \omega t \dots\dots\dots(1)$$

A 点のたわみに対しては (ダッシュ: たわみ後の値)

$$\theta_t = y'_e = \xi_0 \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \cos \frac{2\pi}{\lambda} x_t \sin \omega t \dots\dots\dots(2)$$

$$x_a = e_2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \xi_0 \cos \frac{2\pi}{\lambda} x_e \cdot \sin \omega t \dots\dots\dots(3)$$

$$y_a = \xi_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} x_e \cdot \sin \omega t \dots\dots\dots(4)$$

ただし,  $x_a, y_a$  はたわみ後の  $x$  方向及び  $y$  方向の変位量を示す。ステータ表面上の点 A の動きにつき考えると, 進行波型超音波モータで  $90^\circ$  の時間的及び空間的位相差を有する A 相, B 相二相の定在波の合成による進行波では, 時間位相差  $90^\circ$ , 空間位相差  $\lambda/4$  波長 ( $90^\circ$ ) ずれている二種類の定在波を仮に A 相定在波, B 相定在波と呼ぶ事にしよう。

A 相定在波による A 点の  $x_a, y_a$  は (3), (4) 式にて示される。同相に B 相定在波による A 点の変化の様子は (6), (7) 式のようになる。

$$y = \xi_0 \cos \frac{2\pi}{\lambda} x \cdot \sin (\omega t - 90^\circ) \dots\dots\dots(5)$$

$$\left. \begin{aligned} x_b &= -e_2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \xi_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} x_e \cos \omega t \\ y_b &= \xi_0 \cos \frac{2\pi}{\lambda} x_e \cdot \cos \omega t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(6)$$

実際の A 点の変位は A 相と B 相の励振の合成結果として得られるので (3) (4) (6) 式を合成した結果の  $X, Y$  座標は (7) (8) 式と成り合成結果は (9) 式のように楕円の式となる。

$$\begin{aligned} X &= x_a + x_b \\ &= e_2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \xi_0 \cos \frac{2\pi}{\lambda} x_e \sin \omega t \\ &\quad - e_2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \xi_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} x_e \cos \omega t \\ &= -e_2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \xi_0 \sin \left( \frac{2\pi}{\lambda} x_e - \omega t \right) \dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y &= y_a + y_b \\ &= \xi_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} x_e \sin \omega t \\ &\quad + \xi_0 \cos \frac{2\pi}{\lambda} x_e \cos \omega t \\ &= \xi_0 \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} x_e - \omega t \right) \dots\dots\dots(8) \end{aligned}$$

$$\frac{X^2}{\left( -e_2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \xi_0 \right)^2} + \frac{Y^2}{\xi_0^2}$$

$$= -\sin^2 \left( \frac{2\pi}{\lambda} x_e - \omega t \right)$$

$$+ \cos^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_e - \omega t\right)$$

$$= 1 \dots\dots\dots(9)$$

これらの諸式から判るように、進行波型超音波モータの速度制御を行う場合には進行波の移動速度を制御すればよく、共振・モード型の場合下記の(1)~(4)の方法が考えられる。

- (1) A, B 両相の位相関係を制御する(楕円の短軸の制御)
- (2) 波の振幅を制御する(楕円の振幅(長軸)の制御)
- (3) 振動周波数を制御する(共振倍率の制御)
- (4) スペリ量の制御(推力伝達の制御)

**5. 温度特性による影響**

このモータは圧電素子を用いているため素子の放熱がむずかしく、且スベリも大きいので接触面での発熱が大きい。このため運転特性が温度の影響を受ける。図7もその一例であるが、一応温度的に安定させてから測定した特性バラツキの事例である。

図18は冷時から3回運転する間にどれだけトルク特性が変化するかを測定してみたものであり、特性変化の大きさが判る。

この他、図19~図22に運転時間の経過と負荷状態による回転速度(負荷トルク, 0, 1.0, 2.5, 3.8 kg-cm)の変化の様子を示している。

このように、軽負荷ならば特に問題はないが、3 kg-cm以上に成ると速度変化にうねり現象が見られる。なおこの超音波モータの熱時定数は取付台により大幅に異なるが、厚さ10ミリのアルミニウム板に取付けた場

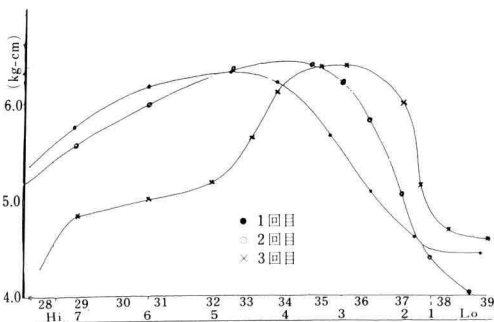


図18. 温度による拘束トルクの変化

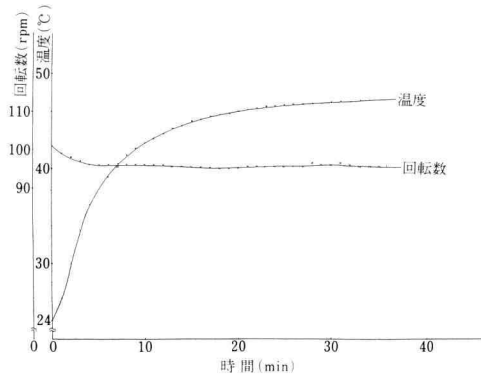


図19. 温度特性 無負荷時(12V ボリューム:6)

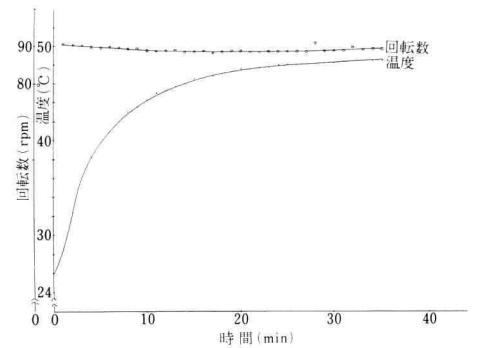


図20. 温度特性 負荷1kg・cm時(12V ボリューム:6)

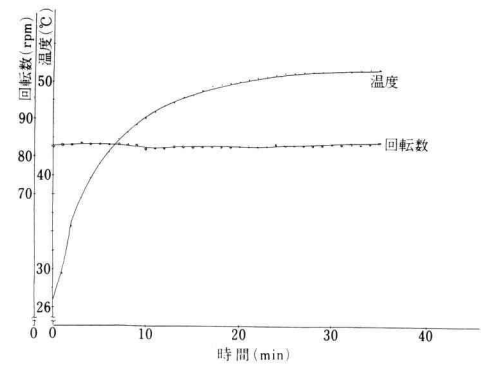


図21. 温度特性 負荷2.5kg・cm時(12V ボリューム:6)

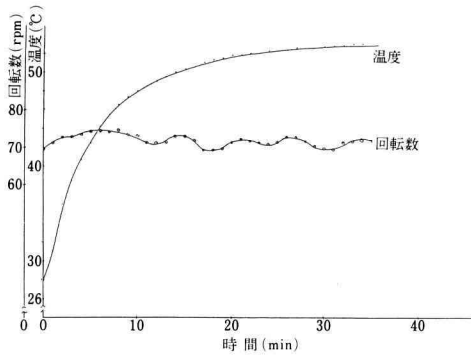


図 22. 温度特性 負荷  $3.8 \text{ kg} \cdot \text{cm}$  時 (12 V ボリューム: 6)

合(図 5)の熱時定数は約 6 分であった。温度の変化による接触面の摩擦係数などの影響が大きい。

### 6. 安 定 性

このモータの特徴の一つとして、共振モードを採用しているためにタンク回路の振動が安定しにくく 4 章に示すように振動振幅の変化が速度変動として現れる。

この原因としては閉回路制御により振動振幅の制御を行っているが(図 4)ロータとステータの接触状態が一定でないため振動が安定せず振動振幅にビート現象が現れている。

図 23~図 28 に示すように、振動振幅に大きなビート波が重畳されているため進行波の速度もこれに対応して脈動する。このためサーボ系のような微細な速度制御への使用には問題を残す。しかし、平均値的な制御 point to point の位置制御などに対しては特に問題はない。

以下図 23~図 32 のオシログラムにつき説明する。このモータには脱調(停止)現象があり、運転状態では振動振幅は大きく且ビート現象が見られる。これに対し脱調状態では振動振幅は小さくなるがビート現象は見られず安定した振動波形である。

この振動周波数は当然ドライバーの駆動キャリア周波で約 40 KHz である。(オシロ掃引速度及び振幅倍率は同一条件)、なお脱調状態では全く回転力は発生せずトルクフリーの状態と成る(停止時のブレーキ力もなくなる)。

この他 High Slip 状態で“キーキー”音を発生する

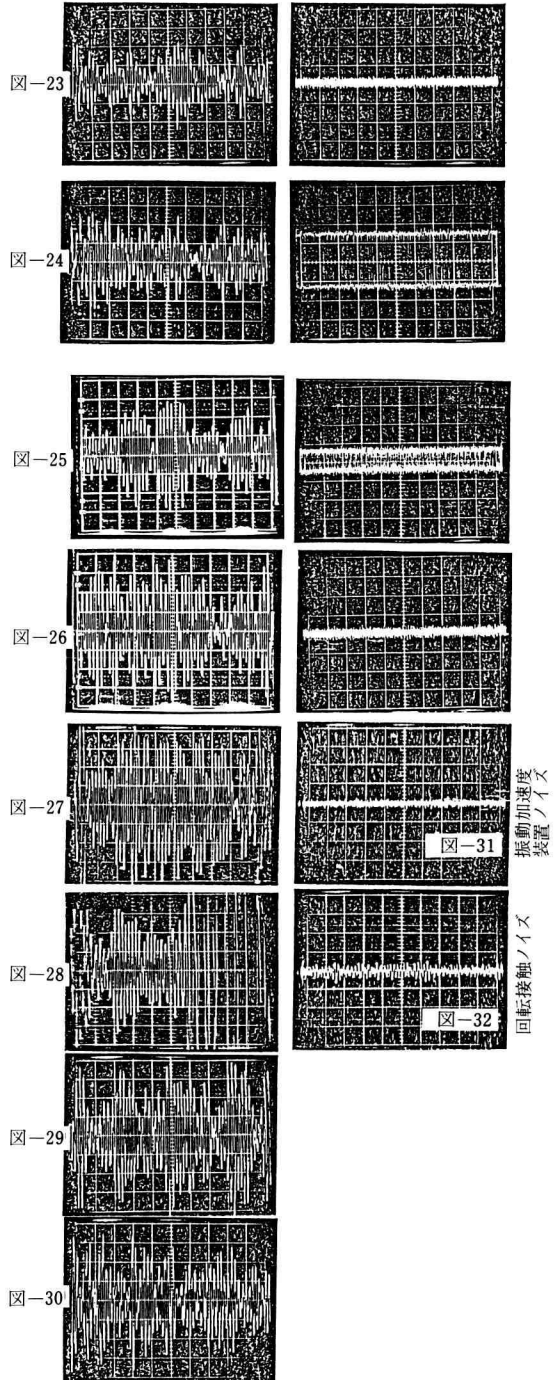


表 2. オシログラフの条件説明

	$V_1(V_5)$	ボリューム	左側	右側
図-23	8	4	運 転 時	脱 調 時
図-24		5		
図-25		6		
図-26		Hi		
図-27	12	4	運 転	
図-28		5		
図-29	12	4	拘 束	
図-30		6		

場合がある。この状態を我々は“鳴く”と呼んでいるが、その場合の振動振幅は非常に大きくオシロではオーバースケールと成っている(図28)。この場合のロータとステータは瞬時非接触の状態つまり浮いた状態でパタパタしているようである。

この他、通常の運転状態と拘束状態(脱調状態ではない)の振動振幅を比較すると、拘束状態の方が振幅は小さくなっている。以上図23~図30までの運転条件をまとめて表2に示した。図中左例は回転状態、右側は拘束状態に於けるロータの振動加速度の様子を示したものである。

ただしこのビート波形が大きく出るものほど回転力も大きいようであり、いちがいに欠点とばかりは言えず今後の研究課題としたい。

また、運転時の軸センターからの振動加速度信号と脱調時の40 KHzのキャリア波の周波数が異っているが、この辺の現象は屈曲波振動固有の物とも言えず制御系の問題も複雑に関係しており改良の余地は充分にあると考えている。

## 7. 研究改良点と今後の展望

以上特定機種に対する屈曲波振動型の超音波モータにつき当研究室で実験した結果の一部を紹介したものであるが、この他に瞬時現象としての速度変動や応答性及び脱調現象などにつき更に詳しく調査研究してゆく予定である。少なくとも超音波モータを進行波型として研究開発し世界をリードして来たのは日本であり

高く評価されている。

この進行波型超音波モータを今後更に研究改良してゆき現在の電磁誘導型モータと互角に競争できるようにするためには下記の点にそのポイントがあると考えている。

1. 不安定現象の原因究明とその対策
2. 特性のバラツキ、品質管理のための設計面よりの対応策の検討、改良
3. Low Slip 特性の超音波モータの研究
4. 脱調現象の解明とその積極的活用
5. トルクフリー現象の活用
6. DD サーボ化への対応

今回の一連の実験で得られた感触としては決して悪いモータではないが、未だ研究改良の余地があり“未完の利器”という感じのモータである。

運転寿命の面でもスベリ条件によっては500~1000時間の寿命が期待でき、アクチュエータとしての間欠駆動には十分な寿命と考えられる。また power Density の面で電磁型モータの5倍もあり且減速機能、ブレーキ機能、クラッチ機能のすべてを内蔵している理想的なアクチュエータであり一日も早く上記の問題点を改良し実用化させたいものである。

なお、本論文は電気学会、回転機研究会に発表した論文に加筆訂正したものである。

最後に本超音波モータの研究に当り当研究室の重村助手及び卒研生の片山、一ノ瀬、稲富の各位に紙面より感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 秋山勇治, 監修, 超音波モータ/アクチュエータ, トリケップス, 昭和61年12月
- 2) 秋山, アクチュエータとしての超音波モータ, 電気計算, 1987年10月
- 3) 秋山, 超音波モータの特性とDDモータへの応用, 機械設計, 1987年9月
- 4) 秋山 他, 屈曲波振動型超音波モータの運転特性, 電気学会, 回転機研究会資料, Rm-87-37
- 5) Y. AKIYAMA, The Future Trends and Recent, Development of Ultrasonic Motors, 大韓電気, 電子学会, 1987 学術大会