

# 屈曲波振動型超音波モータの各種速度 制御方法の検討 (その2)

秋 山 勇 治

A Study of Some Speed Control method in  
Disc Type Ultrasonic Motors (PART-II)

Yuji AKIYAMA

## Abstract

It is rare that Japan has developed its own unique motor. Ultrasonic motors may be regarded as one such product. However, it is necessary to pay attention here to the fact that unlike conventional motors, the ultrasonic motor should be used as an actuator for a short time rating. However, it is necessary to pay attention here to the fact that unlike conventional motors, the ultrasonic motor should be used as actuator for a short time rating.

This paper describes about the theoretically and the measuring all kinds of speed control principles and factors (6 factors). We can be understood that most usefule speed control method is adjusting of resonance condition i.e. anplitude control of the vibration.

## 1. ま え が き

パワー用超音波モータの速度制御の可能性が出てくるにつれサーボモータとしての研究開発が指向されるようになった。この場合速度の安定や応答性及び速度制御範囲の問題等解決しなければならない多くの問題が判明してきている。

パワー用としての条件には ① 共振モード型であること, ② 進行波型であること, ③ 速度制御が可能であること, ④ 応答性が良いことの4つの条件が最低限必要であろう。ここで取り扱う内容はサーボモータとしての使用を前提に, いかに応答性を良く速度制御範囲を広く安定した運転ができるかという事である。

進行波方式の屈曲波振動型(ディスクロータ型)超音波モータにつき理論的検討を行い特定機種に対し基本特性の実験を行った結果をもとに各種速度制御方式の中で経済性も含め一番理想と思われる速度制御方式の検討を行っている。

まず, 共振モードの進行波型超音波モータの各種速度制御方式につき理論的に考えられるすべての方式に

つき検討し, その中でも特にすぐれていると思われるいくつかの方法につき実験的に制御特性を確認している。

この様にして各々の速度制御方式に対し制御範囲とその限界を示し, 制御の容易さと制御性能及び経済性を考慮の上での方式が一番有利かを定める。つぎに速度の安定性向上であるが, 共振モードを用いるかぎり必然的に不安定性はつきものであり, 制御技術を用いてもこの不安定性をいかに安定化制御するかという事につきよう。

## 2. 屈曲波振動型超音波モータの 速度制御の原理

これは進行波型であり, その場合の進行波の一般式は(その1)にも示しているが, 定性的には下式(1)式のように記述できる。

$$y = A\omega \cdot \sin \phi \cdot \sin(\omega t + \varphi)(1 - S) \cdots \cdots (1)$$
$$A = f(E, Q, \delta)$$
$$Q = f(f, \delta, p)$$

ここで  $y$  は進行波によるスライダの移動速度,  $A$

は進行波の変位（楕円振動の振幅）、 $\omega$ は波動の角速度、 $\phi$ はA, B 両定在波の位相差である（時間位相と空間位相は同一とする）。

$E$ は印加電圧（加振力）、 $f$ は加振周波数、 $p$ はロータとステータの接触圧力、 $Q$ はタンク回路の共振倍率、 $\delta$ は振動系のダンピングファクター（減衰係数）であり波の振幅値  $A$ は  $f(E, Q, \delta, f/f_0)$  の関数となっている。

つぎに power 用のディスクロータ型超音波モータとして現在考えられている一般条件を示すと基本的には共振モードの進行波型と成らざるを得ない。その場合ほぼ下記の条件が必要であろう。

（必要条件）

1. 振動周波数 ……20~50 KHz
2. 振動モード次数 ……3~10 次
3. 正逆転駆動、停止が可能
4. 速度制御範囲 ……1 対 10 以上
5. 応答性 ……0.05 秒以上
6. 速度変動率 ……2% 以下

ディスクロータ型屈曲波振動物体で進行波を作るには多相モータの回転磁界の原理により進行波を作ることができる。即ち最少限時間及び空間位相の異なる二相以上の定在波が必要であり、現在 A, B 二相の電極を空間的に  $90^\circ$  位相をずらせて配置し、この電極に  $90^\circ$  時間的に位相差を有する電圧を印加する事により丁度分相型単相（二相）誘導電動機の回転磁界と類似の進行波を作る事ができる。

この場合 A, B 二相の時間位相が  $90^\circ$  ならばバランス条件を満足し理想的な円磁界（円運動）が形成されるが、運転条件（速度）によっては必ずしも円磁界とはならず楕円磁界と成る。もしも時間位相が同相ならば移動磁界はできず単振動と成る。

丁度これと同じ考え方であり、A, B 二相の電極配置を  $90^\circ$  にし、この電極に印加する二相の時間位相差を任意に調整すれば楕円振動の短軸即ち進行速度を任意に調整可能である。また位相関係を逆にすれば逆転も可能なはずである。これらの関係を図 1 に示す。

(1)式に於いて  $y$  の値を制御するためには振動振幅  $A$  と AB 二相間の時間位相差  $\phi$  を変えるのが一番能率的であろう。この他スベリ  $S$  の制御も多少の可能性はあるが実用的とは思われない。

進行波の振幅値  $A$  を制御するためには  $A=f(E, Q(\omega), \delta, f_0)$  と四つの要因の制御が可能であろう。以

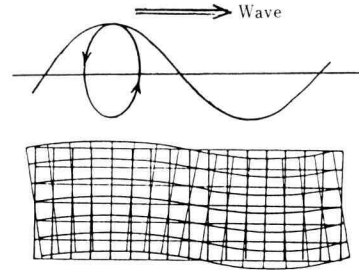


図 1. 屈曲波振動と進行波

下この四つの要因と運転速度の関係を実験により確認する。この他非共振モードの場合には駆動周波数の制御が中心と成るが共振モードの場合には数パーセントの周波数変化が限度である。

もう一つの位相差  $\phi$  の制御は制御回路の問題であり実験結果は速度制御の可能性は有ったがあまり良い結果が得られなかった。結局進行波の振幅  $A$  の制御が現状では一番実用的な方法と言える。

### 3. 各種制御要因に対する最大速度制御範囲の検討

一応可能性を有する各種速度制御要因として下記 1~7 のものが考えられる。

1. 振動振幅 ( $A$ )
2. 位相差 ( $\phi$ )
3. ダンピングファクター ( $\delta$ )
4. 駆動周波数 ( $f_0$ )
5. 印加電圧 ( $E$ )
6. スベリ ( $S$ )
7. ロータの押付圧力 ( $p$ )

ただしこの中で電氣的に自由に制御できないものがある。例えば (7) のロータの押付圧力とか機械系のダンピングファクターなどである（電気系は可能）。

また制御範囲が十分大きく取れないものもある。例えば駆動周波数とか印加電圧がこれに当る。以下各制御要因に対する予想制御特性と速度制御の範囲を図 3 に示す。また検証実験のために図 2 に示すように制御回路の振幅一定制御フィードバック回路（×印）をはずして実験している。実験機は（USR-60-4-100）を用いて行った。

図 3(a) は印加電圧と発生トルクの関係であり、丁度 High Slip の誘導電動機の特性和ほぼ同じなので、ト

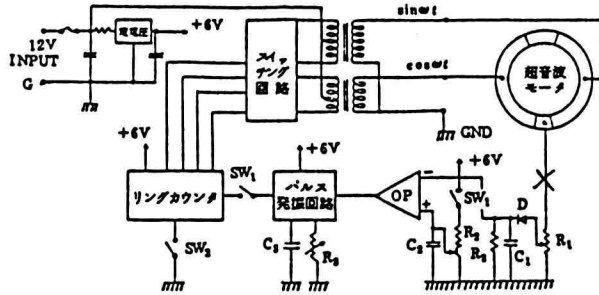


図2. 超音波モータの駆動回路

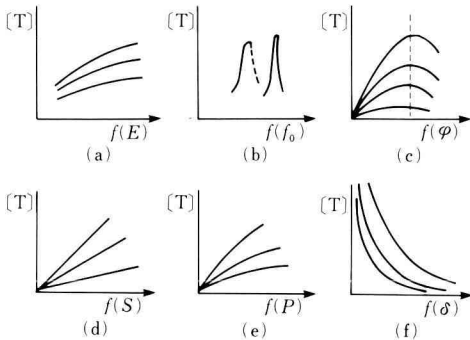


図3. 各種要因別制御特性 (概略)

ルク制御の範囲がほぼ速度制御範囲と考えてよい。この図からはせいぜい1.5~2倍程度の制御範囲と言えよう。

(b)の励磁周波数  $f_0$  を制御する場合、共振系の共振倍率  $Q$  を制御することになる。共振体の材質や形状にもよるが50倍(1対50)の制御範囲は可能である。しかし、ディスクロータ形の場合には回転力の取り出しのためのロータの接触圧力が必要であり、これがダンピング作用となり共振倍率は実質的に10~20倍程度の範囲と成っている。

(c)のAB二相間の電圧位相(時間位相)の調整制御であるが、これは  $\sin \phi$  であるから位相を  $0 \sim \pm 90^\circ$  制御すれば理論的には無限大の制御範囲が可能なのはである。しかし現実には高調波成分の影響、サイドバンド効果などで安定した可変速制御は中々困難である。せいぜい5~10倍というところであろう。

(d)のスベリ  $S$  の制御は受動的な制御であり速度制御には向いていない。誘導機の High Slip 特性から類推し、電圧制御によるトルク変化の範囲と考えてもよくせいぜい1.5~3倍程度の制御範囲と考える。

(e)ロータの接触圧は制御困難であるが、もしも可能とすれば2~3倍の制御範囲が可能となろう。これは(d)のスベリ制御と同じである。

(f)共振物体のダンピングファクター( $\delta$ )を制御できれば(b)と同様な現象なので50倍(実質10~20倍)の制御範囲が期待できる。

しかし機械系のダンピングファクターの調整のうまい方法は見当たらない。電気系として共振エネルギーの吸収回路を設ける可能性は十分考えられるので今後の研究課題としたい。

以上に対し(USR-60-4-100)で検証実験を行い確認した結果を図4, 5, 6に示した。図4では印加電圧とトルク特性の関係を、図5では駆動周波数とトルクとの関係を、図6ではロータの接触圧力の変化とトルクとの関係を示している。

各種要因別速度制御特性を測定するために図2に示すように振幅制御フィードバック回路を切断しOpen

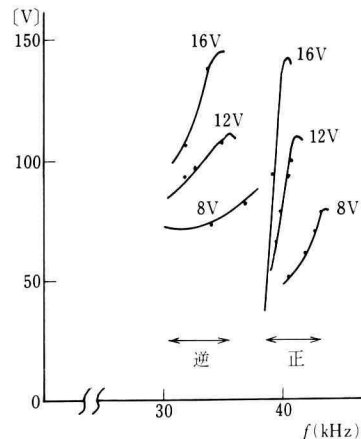


図4. 印加電圧と出力電圧 (トルク特性)

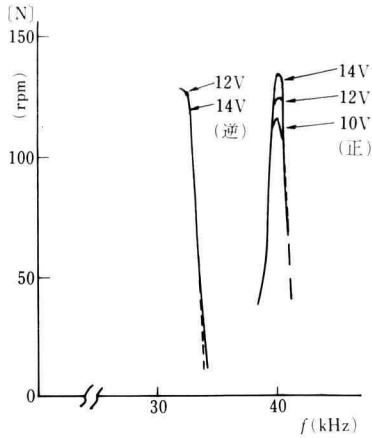


図5. 駆動周波数変化によるトルク

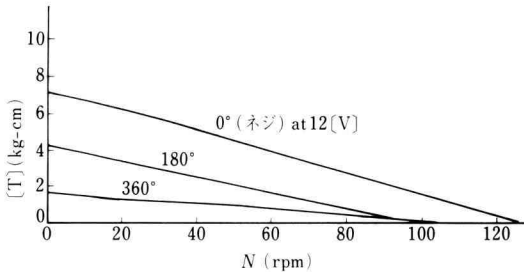


図6. ロータの接触圧力とトルク特性

Loopとし、ただ一つのパラメータのみを変化させながら測定した結果を図4～図6に示す(印加電圧をパラメータとしている)。

図4は印加電圧を変化させた場合の出力電圧(振動振幅)の変化、図5は駆動周波数 $f_0$ を微小に変化させ共振特性(回転力)を変える場合、図6は振動板とロータの接触圧力を変えた場合のトルク特性の変化の様子を示す。

ダンピングファクター $\delta$ と振幅の関係はほぼ理論計算できる。ただしこの $\delta$ の制御方法については別途検討する必要がある。

図6で判るように、ロータの接触圧力は発生トルクに大きな影響を与えるので、製造工程でロータ接触圧力の管理が大切である。現状ではこの圧力バラツキのため個々のモータの特性に相当大きな相異が出ている。

図4の例で判る事は、振動モードを高次に設定すると前後の振動モードの共振周波数が接近し調整がむず

かしくなる。図4では40 KHz近辺で標準運転しているが、これを38 KHz以下に下げると共振状態を維持できなくなり振動は停止し、更に37 KHz以下に下げると今度は逆転運転し出す。

ともかく運転制御範囲はせいぜい1 KHz以内と狭い範囲内での周波数の制御であり、調整は非常にむずかしい。また印加電圧による制御可能範囲はこの図より判断し1:2(2倍)程度であろう。

図5では横軸に駆動周波数を、縦軸に無負荷回転数を取っている。この図から系の共振特性が判る。実際の運転には山の両側は使わずに片側のみを用いているが、これは誘導電動機の場合と同じ理由である。この図でも40 KHz近辺の共振で正転、33 KHz近辺で逆回転と成っており、共振特性は非常にシャープである。

図6では固定子共振体とロータの接触圧力を変えた場合の回転速度と発生トルクの関係を示している。これは丁度 High Slip 特性の誘導電動機特性と同じである。

ロータの接触圧力の調整にはブラケットの取付ネジをゆるめる事により行っている。運転は周波数一定制御である。この図よりロータとの接触圧力の大きい方が発生トルクが大きく且無負荷回転速度も高い。

以上ディスクロータ型超音波モータを可変速駆動しサーボモータとして使用する場合の各種速度制御の方法について述べたが、制御が容易で経済的、且制御範囲が十分に大きく取れる方法はやはり現行のタンク回路の共振倍率 $Q$ を駆動周波数の微小調整により変える方法が一番良さそうである。

#### 4. 共振モード方式の欠点

共振モード型の中で一番実用的と思われる制御方式は共振系の共振倍率 $Q$ の制御である事を前述したが、この方式には下記の欠点がある。

1. 安定振動(振幅)の維持が困難且不安定
2. 起動、停止に多少の時間を要する。
3. 微細制御、精密制御がむずかしい。
4. 基本的に不安定で Open Loop 駆動は困難

つまり、基本的に不安定な共振現象を用いているためこれを安定運転させるためには振幅制御が行われている。図7に振動の時間的変化の様子の一例を示したが、十分きめ細かい制御は期待できない。この例では振動にビート波が含まれておりこれが速度の脈動の原

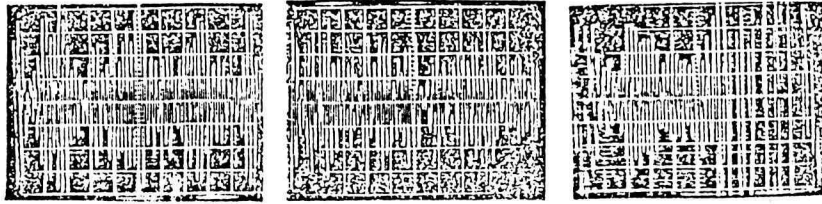


図7. 振幅変化（脈動）

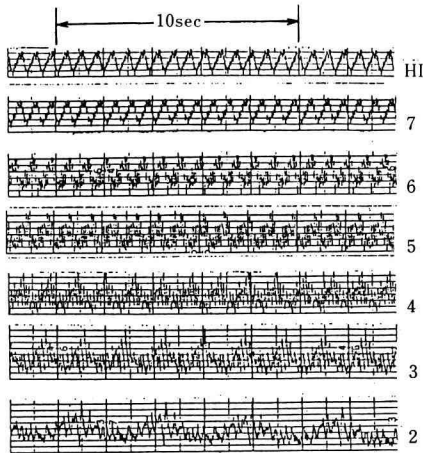


図8. 回転ムラ（無負荷）

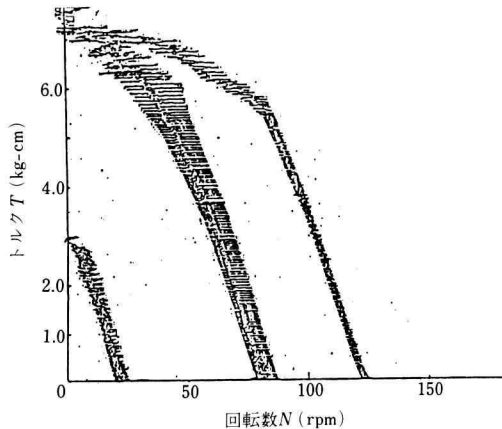


図9. 荷ルックと速度変動幅

因と成っている。速度変動率としては10~15%と結構大きな値である（図8, 図9）。

図8には時間に対する振幅脈動の様子を、図9は発

生トルクと運転速度の脈動の関係の測定結果を示している。これら脈動現象の主要原因はやはり振動振幅の不安定性によるものである。

次に始動、停止時間についてであるが、応答時間は数十ミリ秒と速いので位置センサを用いてのNO, OFF制御で十分アクチュエータの機能は発揮でき、サーボ機能も持たせる事ができそうである。

改良点の一つとして、現在は加振力制御のみであるが新に電気ダンパーを追加しダンピング制御を行う事により、より安定した振幅制御が可能と成るであろうと考えている。

## 5. ま と め

ディスクロータ型超音波モータにサーボ機能を持たせるための速度制御にはどの方法が良いかにつき、(1)可変速制御範囲、(2) 応答性、(3) 安定性、(4) 制御装置の経済性などを総合的に検討する必要がある。現在判っている事は共振倍率を変え振動振幅の制御を行う方法が一番実用的であるという事、この場合振幅の安定化対策を別途講ずる必要があるという事である。安定化制御なしのOpen Loop駆動では実用化は困難であろう。

本論文は電気学会、回転機研究会に発表の論文を加筆修正したものであり、卒研生の平岩、辻、東山及び高橋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, 電気学会, 回転機研究会資料 Rm-89-11
- 3) 秋山, 電気学会, 回転機研究会資料 Rm-88-21
- 4) 秋山 他, 平成元年度電気学会全国大会, 741, 742