

屈曲波振動型超音波モータの逆転現象について

秋 山 勇 治*・小 川 孝 彦**

The Reversing Rotation Phenomena of Disk Rotor Type Ultrasonic Motors

Yuji AKIYAMA and Takahiko OGAWA

Abstract

There are any abnormal phenomena of Ultrasonic Motor (USM) which looks like out of phase that as synchronous motors or stepping motors, and abnormal acoustic noise and reverse rotation when occoring in over load and high slip condition.

Such phenomena was found by our study, and these abnormal phenomena of USM was depending on the contact condition of the stator and rotor, and changing the vibration mode of the rotor.

These phenomena are found by our study, and it's veriflicated theoritil calculation by FEM and inspection by test.

1. ま え が き

屈曲波振動型超音波モータの運転特性及び異常現象についてはいくつかの報告がなされている。そのひとつに振幅制御無しのオープンループ駆動時に生じる逆転現象があり、これは不安定運転の原因ともなる。このまま実用化された場合何らかの方法を考慮しておかないと大変であると考えられる。

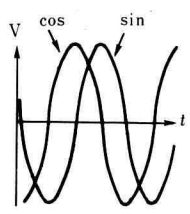
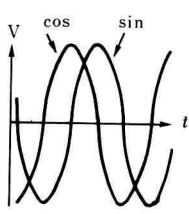
超音波モータには、共振モードを用いるものと非共振モードを用いるものがあるが、今回対象とするモータは前者である。一般には圧電素子の振動振幅を検出しながら閉ループ制御による振幅制御(即ち速度制御)を行っている。今回の実験ではこの閉ループを切りはなしオープンループ駆動にし振動周波数を幅広くとることにより、この時生じる「逆転現象」について、USR-60を対象に運転特性及び異常現象時の振動の状態や楕円振動形成の状態を検討することにより、逆転現象解明の手がかりが得られたのでここに報告する。

2. 逆 転 現 象

まず、正常運転と逆転運転の時の比較を行うと表1のようになる。

通常、方向の切り換えはドライバのスイッチによっ

表1. 正・逆転時におけるドライバ出力

ス イ ッ チ	CW	CW
駆 動 電 圧 位 相		
駆 動 周 波 数	42.7 ~ 39.0 [kHz]	33.7 ~ 31.8 [kHz]
回 転 方 向	CW(正転)	CCW(逆転)

平成2年9月28日受理

* 電気工学科

** 電気工学専攻大学院生

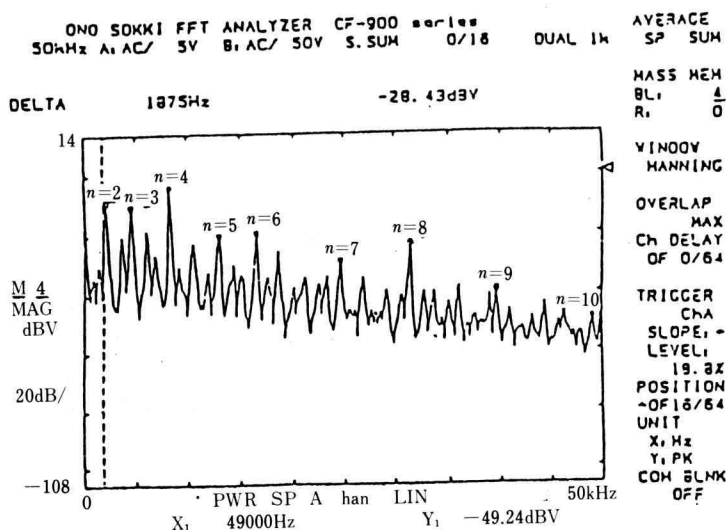


図1. 弾性体固有振動数スペクトル波形

表2. 弾性体固有振動数

次数	波数	固有振動数 f [kHz]
1	2	2.02
2	3	4.24
3	4	8.28
4	5	13.12
5	6	16.65
6	7	24.73
7	8	31.67
8	9	40.00
9	10	49.45

逆転時 7次振動モード・波数8
9次振動モード・波数10

3. 脱調現象及び異音の発生

これは無負荷状態よりじょじょに負荷を掛けてゆくとスベリが増加し丁度誘導電動機の(S-T)カーブと同じ High Slip 特性と成っているが、スベリが50%以上大きく成ると急激に回転が停止し、以降回転力が全く無くなるという現象である。

正式な名称は未だ存在しないがこの現象を「脱調現象」と呼んでいる。丁度ステッピングモータの脱調現象に極似の現象であるためこの様に呼んだのであるが、再起動してやらないとトルクは発生しない。また無負荷及び軽負荷状態では特に問題はないがスベリが大きくなり、過負荷状態に成るとキーキーという異音を生ずる場合がある。この状態が一番大きいトルクを発生できるのだが、大きな異音の発生は実用上具合が悪く、寿命を極端に短縮するであろう事が予想されるため、この様な状態で長い時間運転することは避けなければならない。

この様な異音発生状態を「鳴く」と呼んでいる。図2に鳴くと表示した箇所が発生している。これはキシミ音とかスリップのような現象により発生している。

て、入力電圧の位相を入れ換えることによって行われる。しかし、逆転現象は単にA・B両相の入れ換えのみで生ずるとはかぎらないことが判明している。では何が原因かと考える、まず現象的には表1に示す駆動周波数が逆転時に大きく変化していることに気付く。

図1は屈曲波振動板の固有振動数をショックテスト法により打診測定したもので、共振モード次数と共振周波数の関係は表2のようになる。正常状態の駆動周波数は8次振動モード、逆転状態の駆動周波数は7次振動モードの周波数とほぼ一致していることがわかる。つまり、

正常時 8次振動モード・波数9

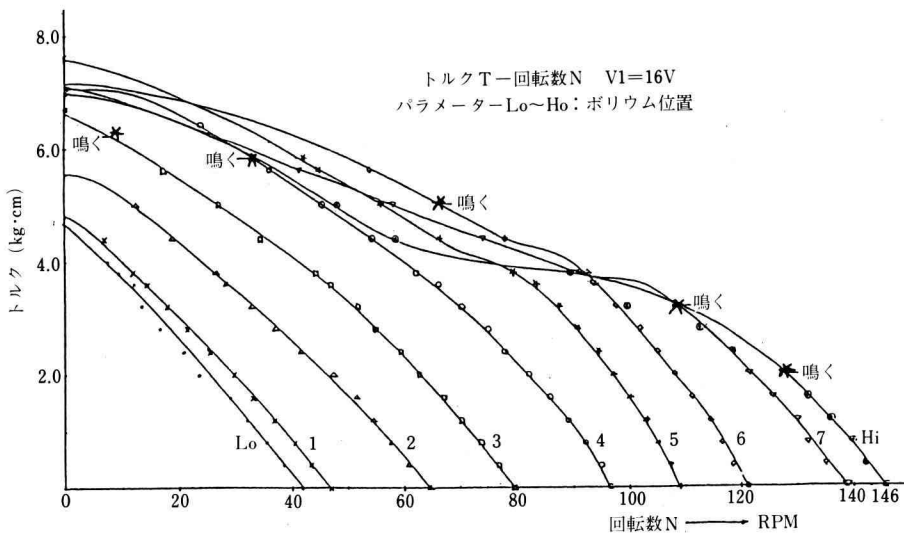


図2. 異音発生 (鳴く: *印)

4. 精円振動の発生と回転方向

まず, 新生工業 (株) USR-60 の圧電セラミックスの配置であるが, 図3のようになっている。

この圧電素子の上に弾性体を接着し, SIN 相・COS 相の時間的に 90° 位相の異なる加振力の合成にて進行波を発生させる。図4は, これらの関係 (屈曲波振動板の屈曲の様子) を直線状に展開し表したものである。(a) は8次モード (正転), (b) は7次モード (逆転) 時を示す。

図4に示すように SIN 相・COS 相, それぞれの振動によって定在波が生じる。この場合, 8次モードでは圧電素子の長さ (幅) と弾性体の波長は一致しているの

で特に問題はないが, 7次モードでは一致しないので安定した定在波が形成されず不安定となる。図5(b)に示す測定結果より, 若干の歪波を生じていると考えられる。

では, 2つの定在波を合成したとき8次と7次とでは, どのような条件の相違や現象がみられるかを表3に示してみた。

励振位相 (時間的位相) はドライバ出力電圧の位相関係に変化がみられないので8次の場合も7次の場合も同じである。しかし, 位置関係 (空間的位相) には変化がみられる。それは7次においても安定に回転する条件として, 約 $1/4 \cdot \lambda (=90^\circ)$ の空間的位相差を有することが必要である。

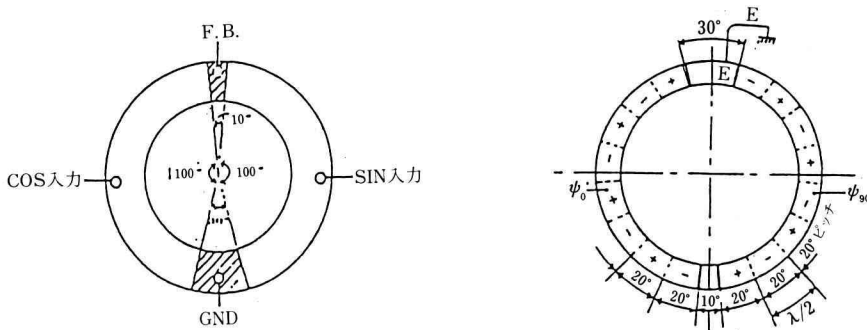


図3. 圧電素子電極パターン

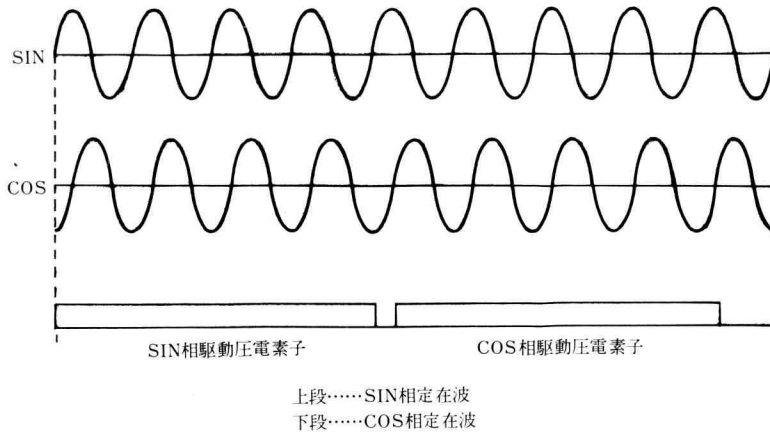


図4. (a) 8次振動モード定在波

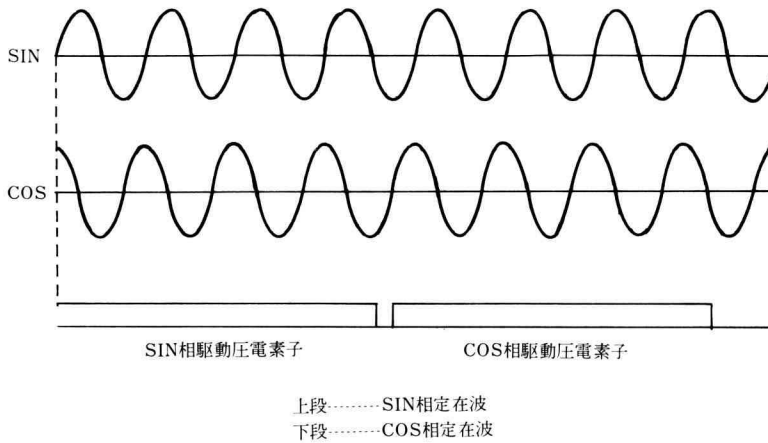


図4. (b) 7次振動モード定在波

表3. 振動状態の相違

振動モード	8 次	7 次
条 件	変 化 無 し	
ドライバ出力電圧の位相		
位置間隔 (変位量)	右に 約 $1/4 \cdot \lambda$	左に 約 $1/4 \cdot \lambda$

注1: 位置間隔の欄の数字は, SIN 相定在波を中心にどれだけ COS 相定在波が移動したかの変位量である。

注2: 縦方向最大振幅及び波数は楕円振動の大きさを決定するが, 回転方向を決定するのには無関係なので定数とする。

この2つの条件を代入して, それぞれのモードで発生する進行波(楕円振動)の状態を比較してみると以下のようである。

$K1, K2$: 定数 λ : 波長

$\omega = 2\pi f$ f : 駆動周波数

Y, Ya, Yb : 縦方向変位

X, Xa, Xb : 横方向変位

(A) 8次振動モード(正常状態)

$$Xa = K1 \cos 2\pi x / \lambda \cdot \sin \omega t$$

$$Ya = K2 \sin 2\pi x / \lambda \cdot \sin \omega t$$

…① SIN 相定在波

$$Xb = -K1 \sin 2\pi x / \lambda \cdot \cos \omega t$$

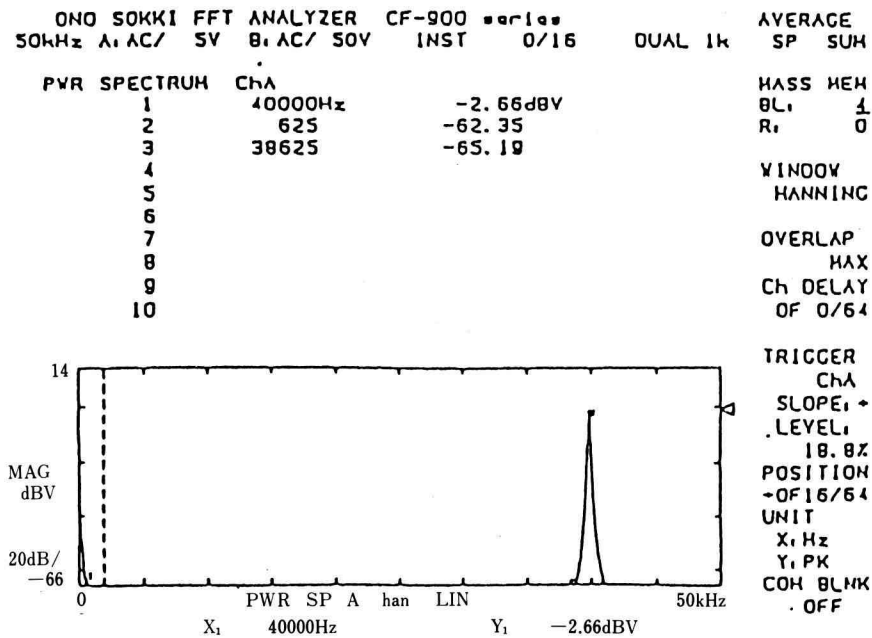


図 5. (a) 運転周波数 40.0[KHz] 正転時加速度振動周波数分析

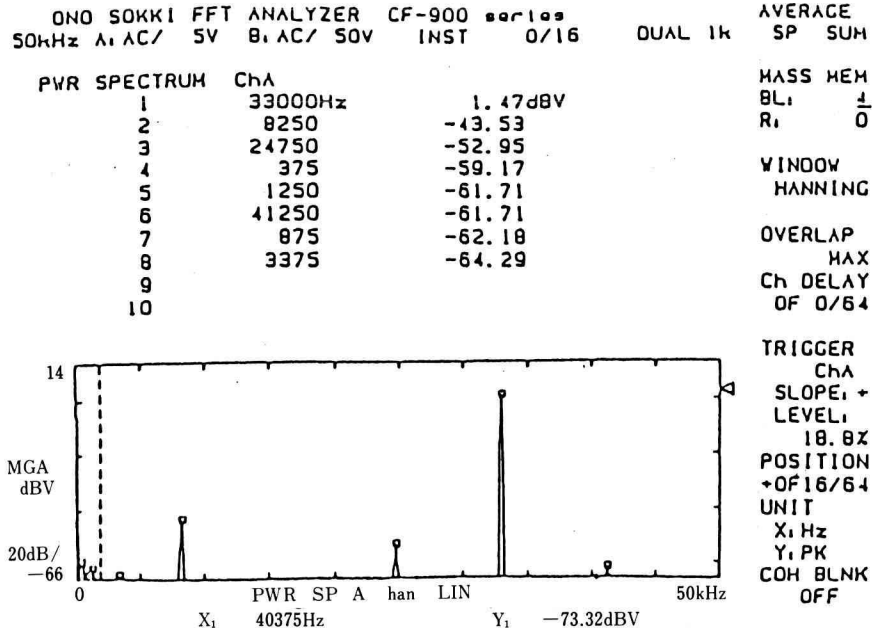


図 5. (b) 運転周波数 33.0[KHz] 逆転時加速度振動周波数分析

$$Yb = K2 \cos 2\pi x/\lambda \cdot \cos \omega t$$

…② COS 相定在波

楕円振動 (1)

①+②

$$X = Xa + Xb$$

$$= K1 \sin (\omega t - 2\pi x/\lambda)$$

$$Y = Ya + Yb$$

$$= K2 \cos (\omega t - 2\pi x/\lambda)$$

(B) 7 次振動モード (逆転状態)

$$Xa = K1 \cos 2\pi x/\lambda \cdot \sin \omega t$$

$$Ya = K2 \sin 2\pi x/\lambda \cdot \sin \omega t$$

…③ SIN 相定在波

$$Xb' = K1 \sin 2\pi x/\lambda \cdot \cos \omega t$$

$$Yb' = -K2 \cos 2\pi x/\lambda \cdot \cos \omega t$$

…④ COS 相定在波

楕円振動 (2)

③+④

$$X' = Xa + Xb'$$

$$= K1 \sin (\omega t + 2\pi x/\lambda)$$

$$Y' = Ya + Yb'$$

$$= -K2 \cos (\omega t + 2\pi x/\lambda)$$

図 6 は振動板の振幅と位相関係を示すもので、この図より弾性体固有振動数のモードの変化 (2 つの定在波の入れ換わり) で回転方向が変わっている事が判る。

5. 振動モード次数と発生力/安定性の関係

円板の屈曲波振動のモード次数により接触点の数が異なり、且、共振周波数も異なる。発生トルクをより増大させる目的ならば高い次数の振動モードを選び接触点の数を多くすることである。ただし、その場合には機械加工精度の面はきびしくなる。

逆に振動モード次数を低く選ぶと発生力は小さくなり、特性は High Slip 気味となるかも知れないが、機械加工及び組立て精度は楽にできるので経済性の面では有利と言える。

(USR-60-4-100) の場合 8~9 次の振動モード次数に選定されており、その分発生トルクは大きい。反面松下製は次数が低いので丁度この逆の傾向が出ており互いに一長一短がある。

さて、安定性に関して言うならば振動モード次数が高い程機械加工、組立精度もシビアに成り、周波数の幅も狭くなるので、運転中に振動モード (次数) が変わったり特性が変わる等の不安定な現象が出やすい。しかし、その分剛性の高い運転特性が期待できる。反面モード次数が低い場合には回転力が少ない目だが安定性が期待できる。

いずれの場合も振動周波数は 20 KHz 以上の非可聴域に選定しないと超音波モータとしての意味がなくなる。

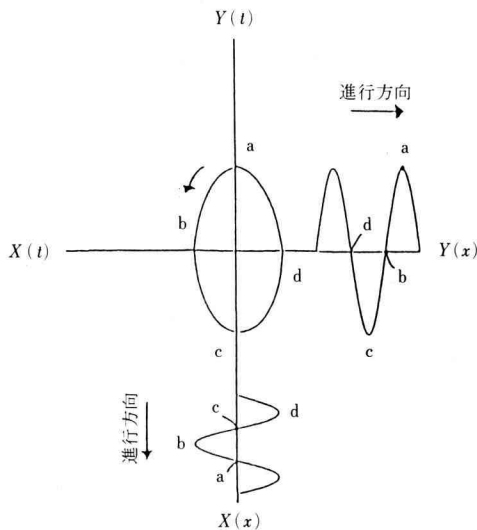


図 6. (a) 楕円振動・・・正転

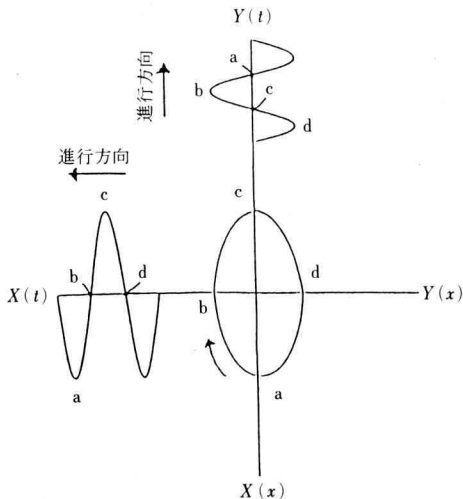


図 6. (b) 楕円振動・・・逆転

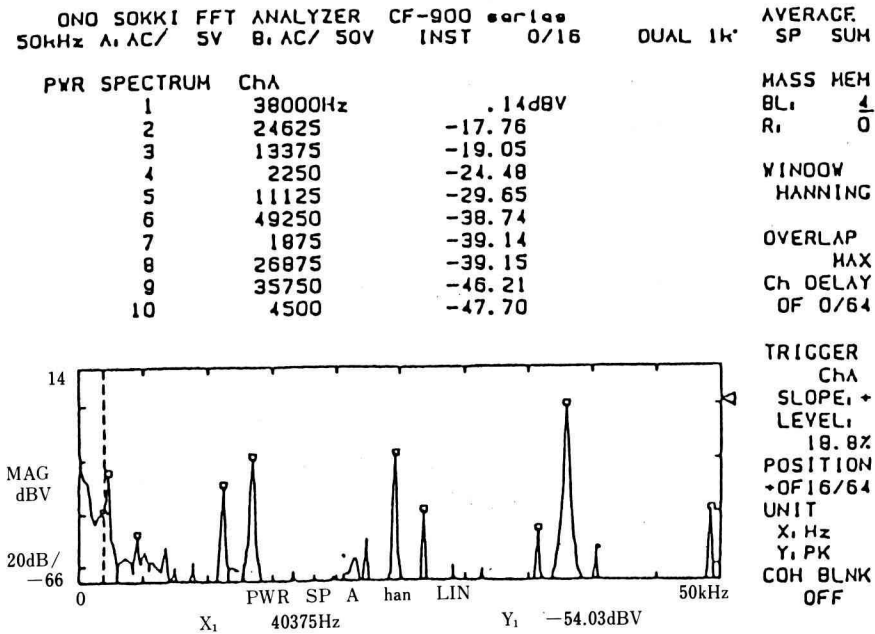


図 7. (a) 運転周波数 38.0[KHz] 正転鳴き

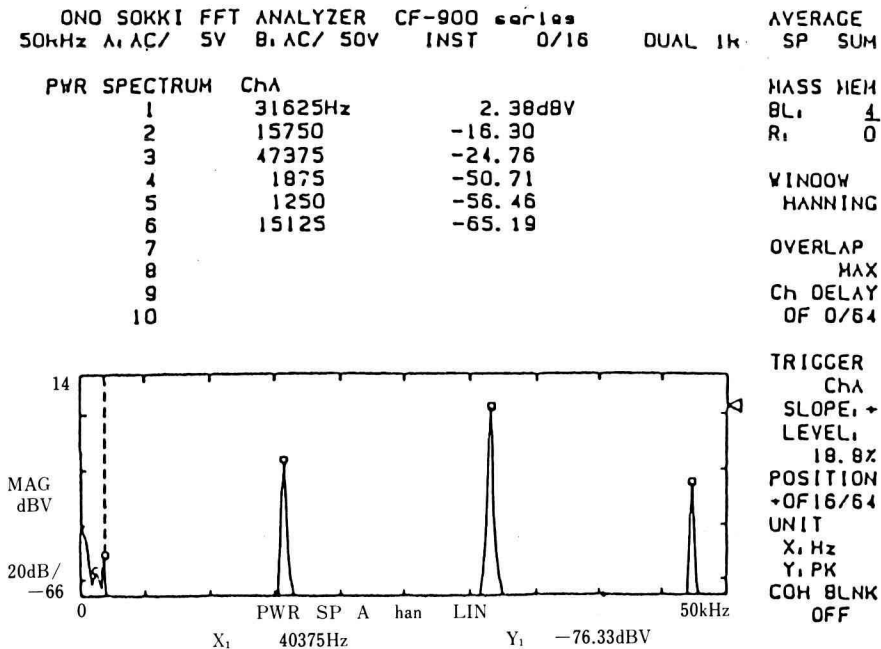


図 7. (b) 運転周波数 31.625[KHz] 逆転鳴き

6. 検討及びまとめ

以上述べたように、共振物体（屈曲波振動板）の加振周波数の変化による逆転現象については、振動（波）の波長の変化と位相変化及び多角形変形共振現象という、三つの要素の組合せから加振周波数を変えていくことにより、「モード反転」を起こすという一応の説明がつく。

この現象は屈曲波振動を用いた進行波型超音波モータに共通した現象といえる。また異音の発生時における振動板の振動周波数特性をFFTアナライザーで周波数分析してみた結果を図7(a), (b)に示す。

このように、正常運転状態にくらべ振動波形が歪波と成っている事が判る。これは振動板とローターの接触状態によるものと思うが振動状態に変化がみられる。

また、振動振幅制御フィードバックの有無にかかわらず、駆動周波数を《低→高》に変化させた場合と《高→低》に変化させた場合とでは、同じ周波数でも運

転特性（トルク特性）が大きく異なる。つまり、行きと帰りでは大きなヒステリシス特性を示すということである。この様な現象からも、上記推論の加振周波数の変化による振動モード変化（進行方向の反転）による反転現象の可能性が大きいといえる。

この他、二種類の波の合成による $(f_1 \pm f_2)$ による反転現象についても検討してみたがこの考え方では現象をうまく説明できなかった。

今後の課題として、この様な反転現象を起こしにくい電極形状の研究を行ってゆきたいと思っている。

参 考 文 献

- 1) 秋山他, 超音波モータ/アクチュエータトリケップス
- 2) 秋山, 回転機研究会 RM-89-11
- 3) 秋山他, 平成2年度電気学会全国大会 778
- 4) 秋山他, 平成2年度電気学会全国大会 779
- 5) 秋山, 回転機研究会 RM-88-21