

[研究論文]

平円板型 piezo 素子 屈曲 進行波 振動の 超音波モータ異常現象動作シミュレーション

宮澤啓太¹・秋山勇治²¹ 博士前期課程電気電子工学専攻 (miyazawa@ele.kanagawa-it.ac.jp)² 電気電子情報工学科 (akiyama@ele.kanagawa-it.ac.jp)

The simulation of the abnormal phenomenon of the ultrasonic motor of
common disk type piezo-electric element bending traveling wave vibration

Keita MIYAZAWA¹), Yuji AKIYAMA²)

Abstract

Consideration of Mr. H.V.Barth of Russia is famous as an ultrasonic motor using the progressive wave ingredient by an oscillating phenomenon. Since Mr. Toshio Sashita announced the progressive wave type ultrasonic motor by bending wave motion, especially in 1983, research of an ultrasonic motor (USM) has changed from the advantage to the real appearance performed briskly.

This paper performs the behavior of excitation by bending and progressive wave type ultrasonic motor's oscillating simulation of a piezo-electric element using with the simulation software "ATILA" that joint developed with NY.RPI, and succeeded more detail of mechanical motion of the progressive wave and the operational characteristics.

Key Words: piezo-electric, ultrasonic motor, bending wave, ATILA, modal simulation

1. はじめに

1.1 超音波モータの歴史と現状

振動現象による進行波成分を利用した超音波モータ (Ultrasonic Motor (USM)) としてロシアの H. V. Barth 氏の考案は有名である。また 1983 年に指田年生氏が屈曲波振動型進行波超音波モータを発表して以来、その高い性能から超音波モータの研究が盛んに行われるようになった。

その後、超音波モータは、カメラのオートフォーカス、光学機器のレンズミラーの駆動、ロールスクリーンの巻き上げ、高磁場内のアクチュエータなど、様々な分野で実用化の検討がされてきたが、その可能性はまだ未知数とはいえ今後も動向が注目されている。

タイプとしては回転型や直線型、極微小位置決め制御やパワー用等多岐に渡り検討されかつ特許出願されている^[1]。原理としては機械系のタンク回路 (共振物体) との組合せ方式が多い。いずれにせよ、日本は USM に関する研究や応用面では先進国と言える。

これらの超音波モータの駆動にはタンク回路の共振周波数が大きく関わっている。本論文は NY. RPI 工科大学との共同研究の piezo 素子等解析シミュレーションソフト「ATILA[®]」を用いて piezo 素子の励振や挙動と屈曲波進行波型超音波モータの振動解析を行い、運転特性をシミュレートしたものである。

1.2 圧電素子の現状及び将来

油圧・空気圧アクチュエータなどの従来のアクチュエータに替わる新しい機能材料アクチュエータの中で、唯一、実用化されているのが圧電アクチュエータであろう。

電界を印加すると微小変位を生じる電歪アクチュエータは、その微小変位運動を利用した超精密位置決め制御機構のアクチュエータとして必要不可欠のものである。具体的には半導体露光装置の極微動アクチュエータ、走査トンネル顕微鏡や原子顕微鏡などのプローブ駆動用アクチュエータやレーザ干渉計の反射鏡の駆動アクチュエータとして使用されており、ナノテクノロジー開発の礎となっている。また、高速応答、大発生力という固体アクチュエータ固有の利点を活用してタンク回路と組合せ制御型駆動アクチュエータとしても実用される。

このことから、既に圧電アクチュエータは実用域にあり、その微小変位特性を活用して「ナノテクノロジー」を支える要素としてますます重要性が高まっている。圧電アクチュエータ駆動上の問題点である、電界による精密制御を行う方法として、デジタル電子回路技術の飛躍的な発展により、容易に制御が行えるようになったため、ますますその使用範囲は広がっている^[1]。

2. PZT (圧電) 素子

PZTは強力な圧電性を示す材料でClevite社の商品名でもある。現在ではPZTといえ、Pb (Zr-Ti) O₃の元素を母体として構成された材料全般をいう。

Linne' は、電気石のこの性質を電気現象と結びつけた最初の一人であり (1747年)、Brewsterが1824年に“pyroelectricity” (焦電性) という言葉を提案した。焦電性に関する実験は1880年のJacques and Pierre Curie による水晶の“piezoelectricity” (圧電性) の発見をもたらした。1942年以降、アメリカ・日本・旧ソ連で独立にBaTiO₃が強誘電体であることが発見された。それ以来、新しい強誘電体の発見が続いている。

第一次世界大戦中の1917年には、Langevinによって水中超音波の発信と受信に用いられ、Nicholson (1918年) とCady (1920年) により共振器やフィルタとして用いられた。圧電効果が単結晶固有の性質と考えられ、水晶やロッシェル塩などの単結晶のみが実用されていた頃の、1947年にRobertsが多結晶体のBaTiO₃セラミックスの圧電効果を測定した。このセラミックスは優れた特性とともに製造面の有利さを有していたので、実用的圧電材料として広く認められるに至った。1954年にはさらに圧電性の優れたPb (Zr, Ti) O₃セラミックスが発見され、今日の圧電セラミックスの主流となっている^[2]。

2.1 圧電素子の特性の求め方

今回の解析ソフト「ATILA[®]」は我々の共同研究先の(株)ISENで開発したものであり、電歪、磁歪、応力、振動、流体、等幅広く解析できる。状態方程式としては(1)式のマトリクスを使用している。この中から電歪、応力関係の部分を取り出して圧電素子との連成解析シミュレーションの式を作っている^[3]。

$$\begin{bmatrix} [K_{uu}] - \omega^2 [M] & [K_{u\phi}] & [K_{u\psi}] & [K_{uI}] & -[L] \\ [K_{\phi u}]^T & [K_{\phi\phi}] & [0] & [0] & [0] \\ [K_{\psi u}]^T & [0] & [K_{\psi\psi}] & [K_{\psi I}] & [0] \\ [K_{Iu}]^T & [0] & [K_{I\psi}]^T & [K_{II}] & [0] \\ -\rho c^2 \omega^2 [L]^T & [0] & [0] & [0] & [H] - \omega^2 [M_I] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ \Phi \\ \Psi \\ \mathbf{I} \\ \mathbf{P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ -\mathbf{q} \\ -\mathbf{f} \\ -\mathbf{f}_b \\ \rho c^2 \Psi \end{bmatrix} \dots (1)$$

ただし、各記号の意味は下記のようなのである。

- U**: 変位場成分の接点のベクトル値
- Φ**: 接点の電界ベクトル値
- ψ**: 接点の磁気ポテンシャルベクトル値
- I**: 各コイルの励磁電流ベクトルポテンシャル
- P**: 圧力場の接点のベクトル値
- F**: 応力場の接点のベクトル値
- q**: 電価の接点のベクトル値
- f**: 磁場との境界面近傍の微小磁束の接点でのベクトル値
- f_b**: コイルにより見られる微小磁場磁束のベクトル値(各コイルによる1成分)

- ψ**: 表面S境界上合成成分の接点ベクトル値
- [K_{uu}]**: 剛性マトリクス
- [K_{uφ}]**: 圧電素子 (PZT) マトリクス
- [K_{uψ}]**: 電場磁場の結合マトリクス
- [K_{uI}]**: 電源-構造 結合マトリクス
- [K_{φφ}]**: 誘導マトリクス
- [K_{φψ}]**: 電源-励磁 結合マトリクス
- [K_{φI}]**: 磁気(擬似)剛性マトリクス
- [K_{ψI}]**: 真空中のインダクタンス マトリクス
- [M]**: 均一質量マトリクス
- [H]**: 流体(擬似)剛性マトリクス
- [M_I]**: 均質(擬似)流体質量マトリクス
- [L]**: 流体・構造物接触面結合マトリクス(接続マトリクス)
- [0]**: ゼロマトリクス
- ω**: 角速度
- ρ**: 流体密度 (比重)
- c**: 流体の音速
- T**: 転置 (転置行列)

2.2 共振周波数

圧電素子の振幅の大きさは流れる電流に比例する。同じ電圧を加えた場合、電流はアドミタンスに比例する。従って共振周波数に近い電圧を加えれば、アドミタンスが大きくなるので比較的低い電圧で大きな振幅が得られるが不安定になる。また、共振周波数は温度や負荷によって変化するので、最適な動作は共振周波数の関数となりアダプティブ制御を要する。

従って、超音波モータを安定に効率よく駆動するためには状態変化に対応し精度良く共振周波数を合せる必要がある^[4]。

共振周波数を導出する算定式はその形状によって変わる。超音波モータでの共振周波数は、長さ *l* [m]、断面積 *S* [m²]、断面2次モーメントが *I*、使用している物質のヤング率 *E* [N/m²]、密度 *ρ* [kg/m³] の *n* 次振動の共振周波数 *v_n* [Hz] は一般式として

$$v_n = \frac{\pi n^2}{2l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho S}} \text{ [Hz]} \dots \dots \dots (2)$$

で表されるが、今回は圧電素子のみ、補強部材を使用していないので、**I = bh³/12** となるため、

$$v = \frac{\pi h}{\sqrt{3}\lambda^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \text{ [Hz]} \dots \dots \dots (3)$$

のように求めることができる^[5]。

3. 解析シミュレーション

3.1 概要

従来圧電素子の開発では試作を行い実験・検討を繰り返してきたが、試作にはコストと時間がかかる。そこで、試作の回数を減らし特性の概略を知るために解析ソフトの使用が有効である^[3]。本研究では「ATILA[®]」の中の

圧電素子に関する式を用いている。このソフトの優れているところは、圧電素子の形状変化が視覚的に分かりやすいということである。CUI(Command user interface)に近いので、扱いやすいGUI(Graphical user interface)であるオペレーションソフト「GiD」を介して使用している。

「GiD」はCAD機能を備えているので別途CADソフトを必要としない。解析シミュレーションソフトの計算方法には色々な種類が存在する。その中で主な計算方法の特徴を表1に示す、「ATILA」は有限要素法を用いて解析を行っている。

有限要素法では、複雑な連続構造体を小領域の要素に分割し、領域に等価的な離散化モデルを作り、全体を組み立て、連立方程式として解析を行う手法である^[5]。

表 1 各計算方法の特徴

	時間差分法 (FDTD法)	モーメント法 (MoM)	有限要素法 (FEM)
計算機容量	少ない	やや多い	多い
計算時間	多い	少ない	やや多い
計算精度	並	やや高い	高い
汎用性	高い	やや高い	高い

3.2 モデリング

解析モデルは円盤状のピエゾ素子に支持弾性体である2.5mm厚の燐青銅板を張り合わせたものであり、図3のようにモデリングした(図1参照)。

材料設定として図1-bの上部表面部がピエゾ素子、下部が燐青銅であり、寸法は外径60mm、内径40mm、高さ0.5mmである。有限要素法のためメッシュの設定は解析ソフトによるオートメッシュであり特に細かい設定はしていない。メッシュ数は約8000個^[6]。

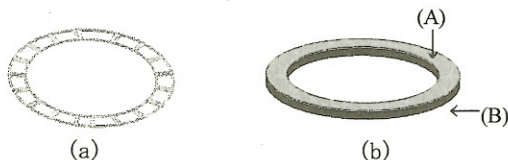


図 1 解析モデルのジオメトリ

4. 脱調現象

解析の結果を図2に示す。この図は駆動周波数40,000Hz付近の周波数から一つ下の共振周波数までのアドミタンス変化を示した図であり、アドミタンスの最大点がこの圧電体タンク回路の共振点である(図2参照)。図3-a, b, cにつき言及すると、図3-aは6次モード(7角形)の共振現象、図3-cは7次モード(8角形)で安定した振動であるが、図3-bは図3-cの7次モードの一部が変形し6次モードとの中間状態の不安定振動の様子を示している。

この状態の時間的経過に対する変化の様子をATILAでシミュレーションした結果を図4の(1~6)6枚に、回転角度45°相当分を順に並べてみた。やはり異常な振動を生じていると考えるべきであろう。これらの現象と諸条

件を加味し、今後主題のトルクフリー現象や脱調現象の解明に対し研究を進めてゆく予定である。

さらに図5-a, b, cではそれぞれ図3-a, b, cに対応したモードの変位量を示している。最大変位量は図5-aでは $1.88e-7m$ であり、図5-cでは $1.71e-7m$ である。不安定振動をしている図5-bの最大変位量は振幅 $1.55e-9m$ であった。これは安定した振動である6次モードや7次モードに比べて小さい値であった。

また、図5-a及び図5-cは変位が均一に表れており安定した振動であることがわかる。図5-bでは変位が不均一であり不安定な状態である。

図6-a, b, cでは支持板内の応力を示している。

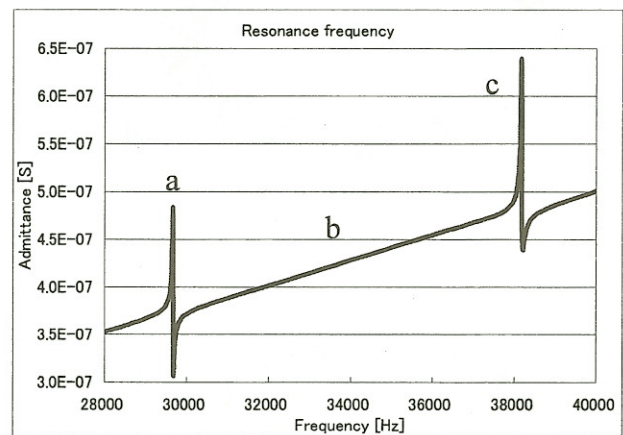


図 2 解析結果

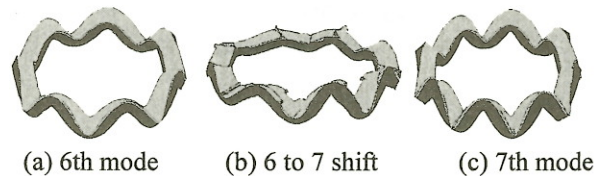


図 3-a, b, c 振動変形

表 2 実測値

Drive frequency [H z]	Rotation	Drive frequency [H z]	Rotation
4 0 0 0 0	C W		
3 9 9 0 0	C W	3 3 8 0 0	C C W
3 9 8 0 0	C W	3 3 7 0 0	C C W
3 9 7 0 0	C W	3 3 6 0 0	C C W
3 9 6 0 0	C W	3 3 5 0 0	C C W
3 9 5 0 0	C W	3 3 4 0 0	C C W
3 9 4 0 0	C W	3 3 3 0 0	C C W
3 9 3 0 0	C W	3 3 2 0 0	C C W
	Out of step		Out of step

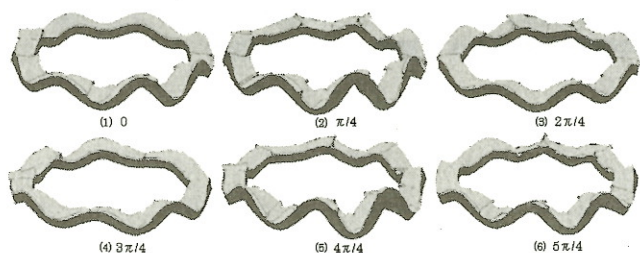
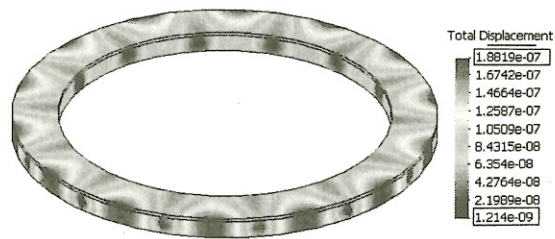
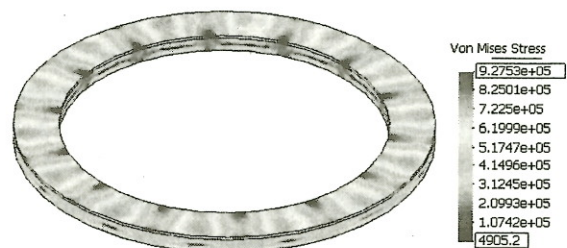


図 4 34,000Hz時の振動形状シミュレーション(1~6)



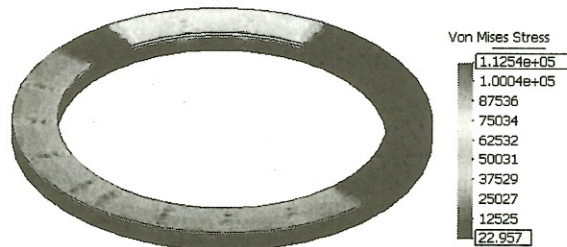
(a) 6th mode



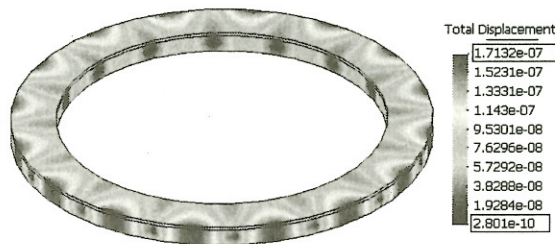
(a) 6th mode



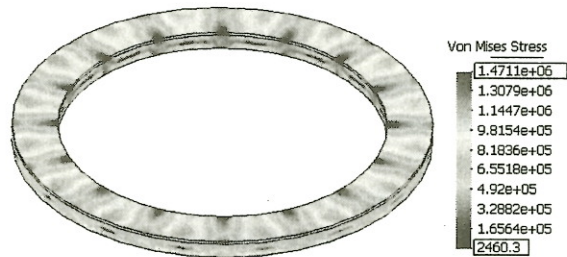
(b) 6 to 7 shift



(b) 6 to 7 shift



(c) 7th mode



(c) 7th mode

図 5-a, b, c 変移量

図 6-a, b, c 応力

図7の実測グラフより本方式の屈曲振動波型 USM の特徴と異常現象の原因及び利点、欠点の一部が理解できようである。つまり、この USM は誘導電動機と類似のトルク特性でありメカニカルなスベリ現象を伴っている。このようにして、ロータとタンク回路共振板との圧接摩擦力に対する反力を回転力としてシャントより取り出しているものである^[7]。

そのトルク特性は正に誘導電動機の二次抵抗値の高い High Slip特性のスピード-トルク (S-T) カーブであり、ロータとステータの接触圧力または印加電圧が最大発生トルク値を決定している。この関係はトルクフリー現象や脱調現象に大きく関係している (図7)。

5. トルクフリー及び脱調現象

(α)図8に示す制御回路を用い、共振点近辺での加振周波数の調整を行う事により振動板の振幅制御を強制的に一定値に制御を行う事により、進行波(回転数)速度を制御する振動振幅制御を行う方式と、(β)加振周波数制御に比例した進行波の速度を制御する非共振型速度制御方式が考えられる。

但し現実には世界のUSMでは前者(α)の方式が圧倒的に多い。その理由は共振物体の共振現象を用い、振動エネルギーの増加を計る方式の方が大きな出力を得易いからである。逆に出力は小さいが正逆転を含むリニアな回転速度制御方式を望む精密サーボ系としては、後者(β)の方式が適している場合もある。

しかし、この現象は(α)の方式では欠点と成る。今回は特に正逆転動作に焦点を絞り、円板型USMにつき以下これらの現象を研究する。

そこで指田氏の提案した方式の円板(ドーナツ円板)型振動板につき、図8に示す振幅制御用フィードバック回路を切断し、本方式の振動板の持つ本来の振動特性(β)につき実験的に調べてみた。その結果を図9~16に示す。

図2~7は前者(α)に対する測定結果である。

更に図9~12のオシログラムに USM のドライバ出力端子電圧波形(グランドとフィードバック信号端子の電圧)をフィードバック回路無しの状態にて測定した。無負荷時の鳴き状態(図9)、無負荷逆転時(図10)。図11は脱調時、図12はトルクフリー現象発生時の同上グランド-フィードバック回路信号端子間の電圧波形である。いずれも掃引時間及び電圧スケールは同一である。

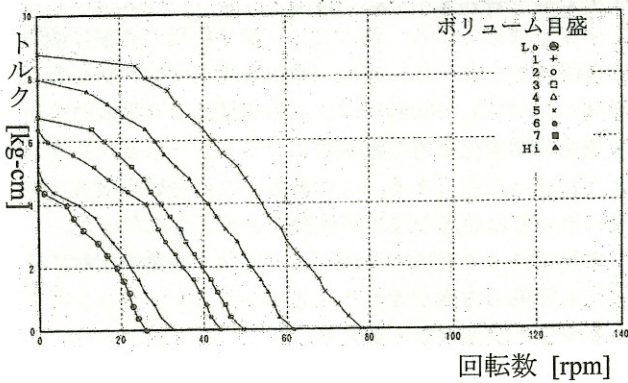


図 7 トルク - 回転数特性 ドライバ入力電圧14V

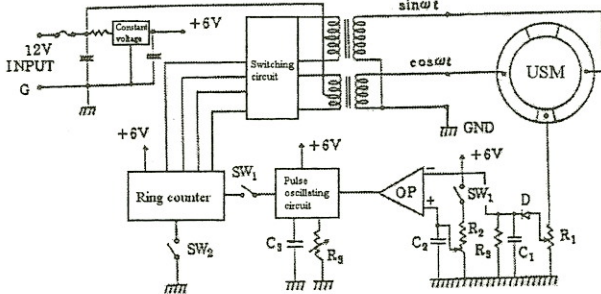


図 8 駆動回路図

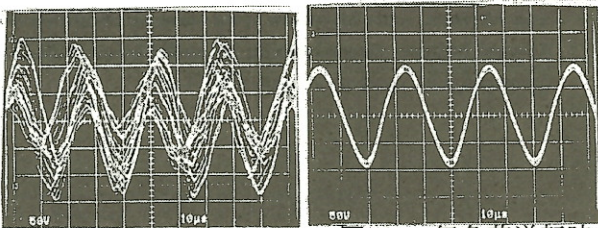


図 9 無負荷鳴き状態

図 10 無負荷逆転時

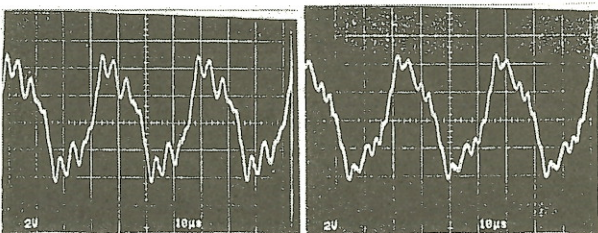


図 11 脱調時

図 12 トルクフリー現象発生時

6. 逆転現象

解析の結果を図13に示す。図14, 15での変位の振幅倍率は分かり易いように全て 5×10^7 倍で表現してある。この図は共振点が見られる21996[Hz]から57233[Hz]までのアドミタンス変化を示した図である。アドミタンスの最大点がこの圧電体タンク回路の共振点である(図13参照)。図14は5次モード(六角形)、図15は6次モード(7角形)の共振現象である。

21996[Hz]での振動状態は時計回りに動いている。次に29665[Hz]では反時計回り、38157[Hz]では時計回り、47347[Hz]では反時計回り、57233[Hz]では時計回りと成る。このように共振モードごとに振動(回転)の方向が変わる。この様子を5次モードと6次モードにつき、図16に示す。一つの山に注目して見ていくと、5次モードでは時計回り、6次モードでは反時計回りに回転している。これは他のモードでも同様である。

また共振周波数付近以外は極端に変移量も少なくなり振動自体も安定しない。つまり逆転現象の対処法は、使用する共振周波数とその前後の共振周波数を把握し、可変周波数範囲を制限することである。

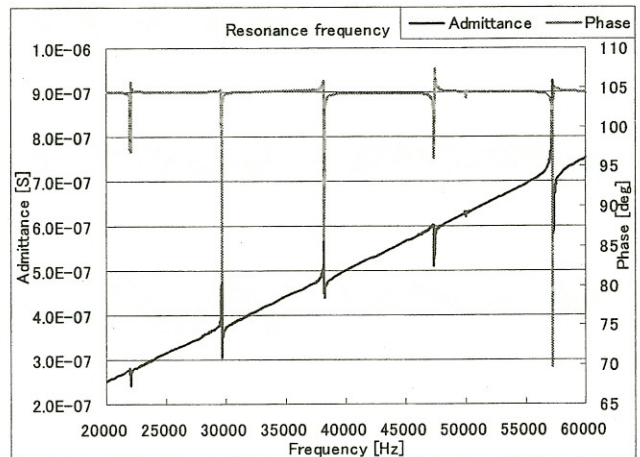


図 13 解析結果

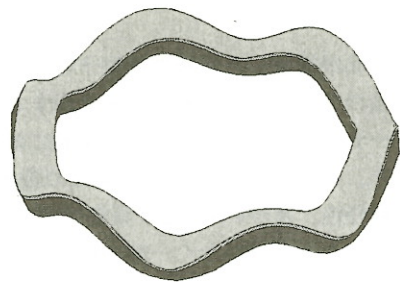


図 14 21996[Hz]の時の振動状態(5次モード)

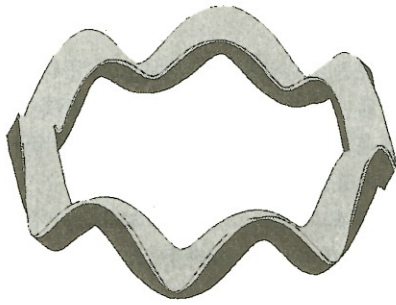


図 15 29665[Hz]の時の振動状態(6次モード)

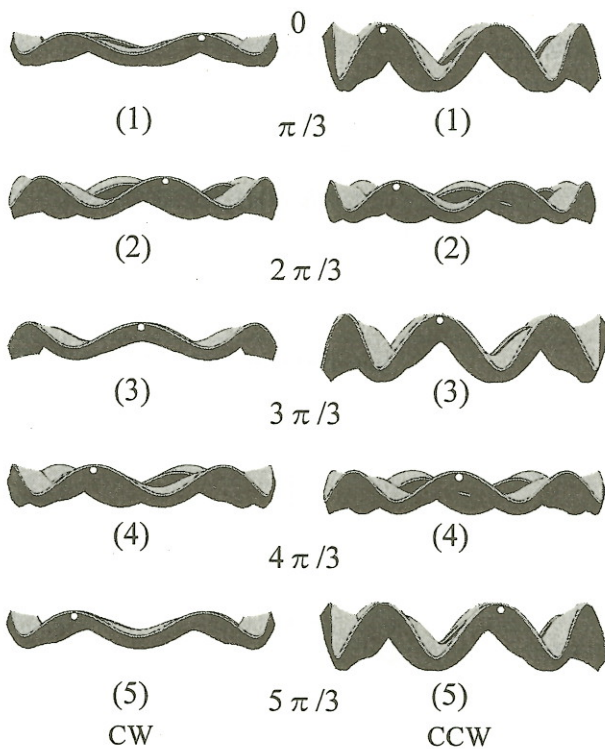


図 16 5次モード, 6次モードの回転の様子

7. 制御方式 $\alpha \cdot \beta$ に対する検討

今回、指田氏が提案した円板型振動子の屈曲波振動の振幅制御回路のフィードバック信号を切断する事により、本来のドーナツ状円板の可変周波数駆動に対する特性が見えてきた。その結果、主題の指田氏の提案したUSMに関する運転特性、及び4つの異常現象(は現状では未だ完全に除去されたわけではなく一部内在している。このため運転条件により、その一部が出来る可能性が有ると見ている)発生原因及びその対策案がほぼ見えてきた。つまり、本タイプの振動板を有するUSMでは基本的に機械式タンク回路の共振倍率の制御により進行波速度を制御

しているため、簡単な制御回路では共振倍率制御が完全ではなく、特に軽負荷時に不安定化し、逆転現象やトルクフリー現象や鳴き(異音発生)現象が発生するという考えに至った。しかしながら本方式の共振倍率制御方式の長所もきわめて大きく、 (β) の非共振型USMよりは実用面では魅力が大きいというのが我々の研究結果の結論である。

8. 結言

扁平円板の屈曲振動波型超音波モータは最近特に(仏)(韓)(英)等世界のUSM研究開発の代表的タイプとして脚光をあび、停滞している日本を尻目に急速に研究を進めている。特に piezo素子利用の共振型機器の解析に於いて(仏)ISEN(電気情報大学院)が研究・開発したATILA, FEM解析ソフトの支援により振動時の諸現象を時間変化に対し動的にシミュレーション出来るようになった点である。この結果、この分野の研究・開発に於いては急速な進歩が期待できるようになった。

本論文により電圧の位相だけではなく振動の次数によっても回転の方向が変わることをシミュレーションにより示すことが出来たと云える。

参考文献

- [1] 秋山勇治 監修, 超音波モータ/アクチュエータ, P47-72, トリケップス, 日本 (1986)
- [2] 塩寄 忠 監修, 新・圧電材料の製造と応用, P3-24, シーエムシー, 日本 (1987)
- [3] Magsoft Co., ATILA MANUAL, P2-40, New York
- [4] 前野隆司, 超音波モータ (日本ロボット学会誌21巻1号), P10-14, 日本 (2003)
- [5] 中田高義, 電気工学の有限要素法(第2版), P21-38, 北森出版, 日本 (1986)
- [6] Yuji Akiyama, Yutaka Yamashima, Yuta Niwa, Keita Miyazawa, The Reversal phenomenon of a Bending wave vibration type Ultrasonic Motors Simulation by ATILA soft, DS2E2-10, ICEMS2006 Nagasaki, (2006)
- [7] Yuji Akiyama, Keita Miyazawa, Yuta Niwa, A simulation of Reversal Rotation phenomenon for Ultrasonic Motor, PC4-20, Compumag2007 Aachen Germany, (2007)