

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	モード縮退型超音波モータの構成法に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	高野剛浩
Author(English)	
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第2529号, 授与年月日:1993年9月30日, 学位の種別:論文博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第2529号, Conferred date:1993/9/30, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

モード縮退型超音波モータの 構成法に関する研究

平成 5 年 6 月

高 野 剛 浩

目 次

第 1 章	序 論	1
1・1	モード縮退形振動子を用いる超音波モータ研究の 目的と意義	1
1・2	本論文の構成と要旨	4
	参考文献	8
第 2 章	モード縮退型振動子を用いる超音波モータの 原理と分類	10
2・1	緒 言	10
2・2	モード縮退型振動子と超音波モータ	11
2・2・1	超音波モータの構成原理	11
2・2・2	モード縮退型振動と超音波モータ	12
2・2・3	同形モード縮退による楕円運動の形成	17
(a)	2相駆動の場合	17
(b)	同相駆動の場合	20
2・2・4	異形モード縮退による楕円運動の形成	23
(a)	2相駆動の場合	23
(b)	同相駆動の場合	24
2・3	モード縮退型超音波モータの分類と構成	25
2・3・1	同形縮退モード利用の超音波モータ	25
(a)	円板（円環）振動子の非軸対称振動利用の構成	25
(b)	円板（円環）振動子の面垂直振動利用の構成	27
(c)	円筒（円柱）振動子の屈曲振動利用の構成	27
2・3・2	異形縮退モードを利用する超音波モータ	29
(a)	平板振動子の縦一屈曲振動利用の構成	29
(b)	円筒振動子の伸び一縦振動利用の構成	29
(c)	円板（円環）振動子の伸び一屈曲振動利用の構成	30
(d)	円筒振動子の対称伸び一捩り振動利用の構成	32
(e)	円筒振動子の縦一捩り振動利用の構成	32
2・3・3	その他の構成	33
2・4	結 言	35
	参考文献	36

第3章 同形モード縮退型振動子を用いる回転型超音波モータ	38
3・1 緒言	38
3・2 円環の非軸対称振動を利用する超音波モータ	39
3・2・1 圧電セラミック円環の非軸対称振動	39
(a) 境界条件と周波数方程式	39
(b) 変位と変位の楕円運動	44
(c) 誘起電荷と電気機械結合係数	51
(d) 各モードの特徴	56
3・2・2 試作超音波モータの特性	57
(a) 構造と特性（内周面を利用する構成）	57
(b) 構造と特性（外周面を利用する構成）	61
3・2・3 振動子の小型化への対策	64
(a) 円環の内径対外径比に対する $((2, 1))$, $((3, 1))$ モードの共振周波数	64
(b) 試作超音波モータの特性	66
3・3 円板の面垂直屈曲振動利用の同相駆動型超音波モータ	70
3・3・1 振動モードと動作原理	70
(a) 円板の共振モードと使用モードの選択	70
(b) 動作原理	73
(c) ステータの構造と特性	75
3・3・2 試作超音波モータの特性	77
(a) モータの構造	77
(b) 負荷特性	79
3・4 結言	81
参考文献	83
第4章 異形モード縮退型振動子を用いる回転型超音波モータ	85
4・1 緒言	85
4・2 円柱の縦一振り振動利用の超音波モータ	86
4・2・1 縦一振り振動利用超音波モータの構成と分類	86
4・2・2 縦一振りモード縮退型振動子	89
(a) 振りモードの励振	89
(b) 端部段付き振動子の縮退条件	90
(c) 中央部段付き振動子の縮退条件	93
4・2・3 試作超音波モータの特性	95

(a)	端部段付き振動子を用いるモータの特性	95
(b)	中央部段付き振動子を用いるモータの特性	98
4・2・4	単一振動子組み合わせ使用した超音波モータ	101
4・3	平板の縦一屈曲振動利用の超音波モータ	105
4・3・1	縦一屈曲モード縮退型振動子を用いる 超音波モータの分類と構成	105
4・3・2	縦一屈曲モード縮退型振動子	106
(a)	平板の縦振動と屈曲振動の縮退条件	106
(b)	変位の橢円運動の形成	109
4・3・3	試作超音波モータの特性	110
(a)	縦振動1次と厚み屈曲振動4次モード利用の構成	110
(b)	縦振動1次と幅方向屈曲振動2次モード利用の構成	117
4・4	結 言	120
	参考文献	122
第5章	モード縮退型振動子を用いる直線移動型超音波モータ	124
5・1	緒 言	124
5・2	円環の径方向対称伸び振動と非軸対称振動を 利用する直線移動型超音波モータ	125
5・2・1	$(R, 1) - ((1, 1))$ モード縮退形振動子と動作原理	125
(a)	縮退条件	125
(b)	橢円運動の形成と動作原理	126
(c)	駆動方法と振動子の特性	127
5・2・2	試作直線移動型モータの特性	129
(a)	モータの構造と特徴	129
(b)	試作モータの特性	131
5・3	平板の縦振動と屈曲振動を利用する 直線移動型超音波モータ	132
5・3・1	縦一屈曲モード縮退形振動子	132
5・3・2	$L_1 - B_4$ モード利用の直線移動型モータ	133
(a)	橢円運動の形成と振動子の構造	133
(b)	モータの構造と特性	136
5・3・3	$L_1 - B_8$ モード利用の直線移動型モータ	137
(a)	$L_1 - B_8$ モード縮退型振動子と試作モータの構造	138
(b)	試作モータの特性	140

5・5	結 言	142
	参考文献	143
第6章	モード縮退型振動子を用いる超音波モータ構成の総合評価	145
6・1	結 言	145
6・2	ステータ形状によるモード縮退型超音波モータの 分類と評価	146
6・2・1	円板（円環）振動子をステータとする モード縮退型超音波モータ	146
6・2・2	平板振動子をステータとする モード縮退型超音波モータ	148
6・2・3	円柱（円筒）振動子をステータとする モード縮退型超音波モータ	151
6・3	結 言	155
	参考文献	156
第7章	紙送り機構への超音波モータの応用	158
7・1	結 言	158
7・2	円環の $(R, 1) - ((1, 1))$ モード利用超音波モータの カードリーダーへの応用	159
	(a) 背 景	159
	(b) 構成要素と構造	159
	(c) モータ特性	161
	(d) 温度特性と対策	163
7・3	縦－屈曲モード縮退型振動子を用いる紙送りデバイス	164
7・3・1	紙送りデバイスの構造と特性	164
7・3・2	紙送り特性におよぼす各種要因の測定	167
7・4	結 言	170
	参考文献	171
第8章	結 論	172
	謝 辞	174
	発表論文リスト	176

第 1 章 序 論

1・1 モード縮退形振動子を用いる超音波モータ研究の目的と意義

圧電セラミクスや圧電セラミクスと恒弾性材料との貼り合わせによる振動子の共振現象を利用するデバイスは、通信・計測や動力的な応用分野に広く応用されている⁽¹⁾。超音波振動を動力源として利用する機器としては加工、洗浄、溶接などの分野で古くから研究されているが、本格的な超音波モータ研究の発端となったのは、1982年指田によって発表された縦－屈曲結合子を持つ超音波モータ⁽²⁾であり、その歴史は比較的新しい。超音波振動をモータの駆動源として利用するという発想は1970年代にソ連とアメリカにあるとされているが、本格的に機械的出力を取り出し、超音波モータの概念を定着させたのは上記の指田によって提案されたモータである。当時、超音波振動を駆動源として利用する機器は、上述のように数多く実用化されていたがこれらの機器に使用される超音波振動子の機械的出力が非常に大きいことに着目したといわれている。

超音波モータの特徴は性能的には、(1)低速、(2)高トルク、(3)制御特性が良い、(4)自己保持機能があるなどが挙げられ、各種機器のダイレクトドライブ、小型化、高速動作制御などの高度な要求とあいまって、各種精密、制御機器への応用が期待されてきた。その一部はすでにカメラの自動フォーカス機構などで実用化されているが⁽³⁾、さらに近年のメカトロニクス時代における変位制御デバイスの広範囲にわたる要求を満たすデバイスとして活発な開発研究・実用化研究が行われている⁽⁴⁾。加えて超音波モータの構造的な特徴も実用化研究の大きな刺激となっている。すなわち、薄型構造、中空構造、直線移動型構造など現実的な要求に合致する長所も多い。このように、超音波モータは高度な要求に対応できる変位制御デバイスとして、また多様な要求に対応できるモータとして期待されている。

超音波モータは2つの直交する振動変位によって形成される変位の楕円運動あるいは直線運動によって、物体を摩擦駆動するものである⁽⁵⁾。したがって変位をどのように実現するかによって、様々な構成の超音波モータが提案され

てきた⁽⁶⁾。先の縦－屈曲結合子を持つ超音波モータは50(%)を越す効率を有し、機械的出力を取り出すという点においては優れた構成であったが、一点駆動であるために駆動点の摩耗や原理的に一方向回転という欠点を持っていた。その後、熊田によって縦－捩り結合子を持つモータが報告され、トルク10(kgf-cm)、効率が80(%)を越す試作例が示されたが、一方向回転のためか実用化には至らなかった⁽⁷⁾。しかし、このタイプの構成を“モード変換型”と言う視点で捉えるならば、弾性フィンを用いた小型モータ⁽⁸⁾、縦－ねじり変換を用いた大トルクモータ⁽⁹⁾にその後の展開を見ることができる。

一方、ロータとステータ間の接触点の摩耗と一方向回転という欠点を補うタイプの進行波型モータが1982年指田によって提案された⁽¹⁰⁾。これは接触面積の増加によって摩耗の問題を軽減し、波の伝搬方向を変えることによって両方向回転を可能にする構成である⁽¹¹⁾。また、矩形棒に屈曲進行波を励振しリニアモータとして利用する試みが栗林によって報告され、進行波の励振条件が確立された⁽¹²⁾。1985年頃より円板あるいは円環振動子の面垂直屈曲振動を利用する進行波型モータがいくつかのメーカーから発表され、実用化へ大きく前進した⁽¹³⁾。その後、多重モード振動子⁽¹⁴⁾の直交する2つの変位の位相を変えて橢円運動を得る定在波型モータ⁽¹⁵⁾、あるいは1個の振動子と他の振動素子を併用する複合振動子型超音波モータ⁽¹⁶⁾が提案され、超音波モータの研究が構成や設計理論の確立を目指して一段と活発に行われるようになった。筆者は、これらの超音波モータのステータ用振動子の多くが1個の振動子に互いに直交する変位を生じ、かつ共振周波数が接近した2種類の振動モードを有するモード縮退型振動子と見なせることに着目し、超音波モータの研究に着手し本論文で示すような各種のモード縮退型振動子を用いる超音波モータを考案した⁽¹⁷⁾。

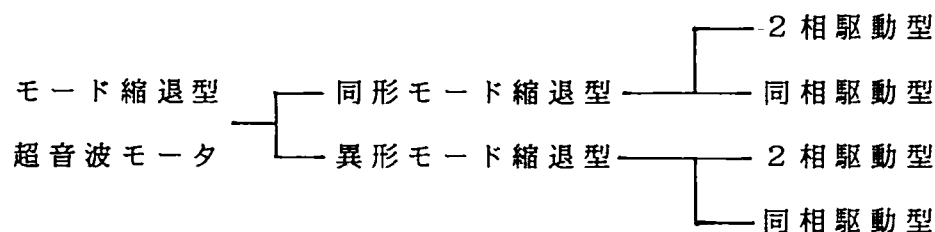
超音波モータのステータとして使用される振動子に着目して超音波モータの構成を分類すると次のように大別される。

- (1)：振動子の単一共振モードを利用する構成
- (2)：複合振動子を利用する構成
- (3)：モード縮退型振動子を利用する構成

(1)の構成は上に述べたように振動子の周波数調整の必要がないこと、構造が簡単であることなどの特徴を有しているが本文では扱っていない。(2)の構成は1個の振動子に積層型圧電アクチュエータを複合配置し、各々の振動素子で独立に2つの振動成分を得る構成が提案されている。この構成は2つの振動成分を独立に制御できる点に特徴があり、縦－振り振動を利用する構成についてはすでにその設計手法が確立されている⁽¹⁸⁾。圧電アクチュエータの積層化技術の発達や高品質化によって今後ますます活用される構成と考えられる。

本研究では(3)の構成を扱っている。モード縮退型振動子は1個の振動子に同形あるいは異形の2個の共振モードの共振周波数を接近させ、両モードを同時に励振する振動子である。それらの振動モードの直交する変位によって楕円運動を形成するのであるから、縮退条件が実現できればステータとして利用する場合には、最も基本的な構造の振動子と言える。さらに一方の振動を別の振動素子(例えば上述の積層圧電アクチュエータ)に置き換えることも可能であるから、この振動子に対する考察は構成そのものの拡大につながることもなる。

表 1 - 1 モード縮退型超音波モータの分類



モード縮退型振動子を用いる超音波モータは利用モードと駆動方法の点から分類すると表1-1となり、これが振動子形状とモードの組み合わせによる振動子に適用できるから数多くの構成が考えられる。この中で円板の面垂直振動を利用する進行波型超音波モータは実用化され、その他2～3の構成についても構造や特性の報告はあるが、モード縮退型超音波モータに関する組織的な研究は見当たらない。さらに超音波モータはステータ用振動子の駆動方法や駆動力の取り出し方などによって、回転型あるいは直線移動型にみられるようにモ

ータの構造自体まで変わるから、モード縮退型超音波モータを振動子の構造からモータの特徴まで系統的に研究し、その体系化を計ることが必要とされている。このことは構造や特性に対する多様な要求に応え、超音波モータの応用分野の拡大を計る意味においても重要である。

このような背景を考慮し、本論文では従来の超音波モータを振動子形状と振動モードの組み合わせにより分類整理し、いくつかの新しい超音波モータを考案するとともに、各モードの縮退条件およびそれらを利用するモータの特徴を明らかにし、モード縮退型超音波モータを選択する上での有用な指針を与えることを研究の目的とした。すなわち、具体的には

1. 振動子を円板（円環）、平板、円筒（円柱）に分け、それぞれの振動モードの組み合わせとしてモード縮退型振動子を分類し、ステータとしての適否について検討を加え、新しい構造のモータを提案する。
 2. モード縮退型振動子を（1）縮退条件実現の容易さ、特に独立な周波数調整の可能性、（2）構造の単純さ、（3）圧電的な励振の容易さ、（4）駆動力の取り出し方の容易さ、（5）モータ構造の特徴、を評価の対象として考察し、新しい実用的な超音波モータを考案・試作し、さらにその性能的、構造的な特徴を明らかにする。
 3. 本論文で提案した新しいモード縮退型超音波モータに関する知見と、従来得られている既存のモータの知見を合わせて分類し、用途に応じたモータ選択の指針を与える。
 4. 超音波モータの応用として紙送り機構への適用例を示す。
- を研究の対象とした。

1・2 本論文の構成とその要旨

本論文は8章から成っている。第1章は序論である。第2章はモード縮退型振動子を用いる超音波モータの分類と構成について述べる。モード縮退型振動子を利用するモードの形から同形モード縮退と異形モード縮退に大別し、いずれの場合も2相駆動あるいは単相駆動によって超音波モータの原理となる変位の

楕円運動（直線運動も含む）が形成されることを示した。次にモードの組み合わせによってモード縮退型振動子を分類し、各振動子をステータとして利用する観点から考察を行い、モータ構成まで含めて実用の可能性を論じた。

第3章から第5章には試作した超音波モータの構造と特性が示されている。第3章は同形縮退モードを利用する回転型超音波モータと題し、円板（円環）の同形縮退モード利用の超音波モータについて述べる。3・2では円環の非軸対称振動利用の超音波モータを扱っている。最初に非軸対称振動をステータとして利用する立場から検討を加え、 $((2,1)), ((3,1))$ モードについては誘起電荷の極性に合った駆動方法を採用することにより、圧電的に強勢に励振出来ることを見だし、円環の内径対外径比による共振周波数の変化を考慮することによって、低周波で小型モータが構成できることを明らかにした。さらに、縮退モードによって形成される変位の楕円運動を考察し、楕円の形状からモードによっては駆動力の取り出しや円環の形状比に制限のあることも明らかになった。円環の内周面，外周面を利用するいくつかの試作例を示した。

3・3は円板の面垂直振動利用の同相（単相）駆動型超音波モータについて述べる。本構成の特徴は、単相駆動で両方向回転が可能なモータが構成できる点にあり、モード回転を伴わないことが、いわゆる進行波型モータと原理的に異なる。動作原理に基づいて面垂直振動の B_{13} ， B_{14} を用いた超音波モータを試作し、動作原理の妥当なことを確認した。

第4章は異形縮退モードを利用する回転型超音波モータについて述べる。第2章で述べたように異形モード縮退型振動子を利用する構成は数多くあるが、その中で円柱の縦一振り振動利用と平板の縦一屈曲振動利用の構成を取り上げている。4・2では円柱の縦一振り振動利用の構成について述べる。最初に縦一振り振動を利用する構成を分類・整理した。均一な円柱では、振り振動の共振周波数(f_T)が縦振動共振周波数(f_L)より低いが、段付き振動子を用いることにより両モードの縮退を実現した。具体的には振動子の端部に段付きを設けることによって f_L の低下を、中央部に設けることによって f_T の上昇を計り、高次モードまで含めて縮退条件を求めた。実際の動作状態では加圧による

共振周波数と振動モードが変化するために実験的な補正を必要とするが、振動子の基礎的な設計指針を与えている。これに基づいてモード縮退型振動子を製作し、超音波モータを試作した。4・3では平板の縦一屈曲振動利用の超音波モータについて述べる。この構成は、利用モード、駆動力の取り出し方によって種々の形状のモータが構成できる。縦1次一屈曲8次利用のモータを通して、この種構成の特徴と課題を示した。

第5章はモード縮退型振動子を用いた直線移動型超音波モータの試作特性例を示す。大半の振動子は駆動力の取り出し方によって、回転型にも直線移動型にも使用できるが、ここでは主に薄型構造に適する2種類の構成を取り上げた。5・2では円環の径方向対称伸び振動($R,1$)モードと非軸対称振動($(1,1)$)モード利用の構成について、動作原理、モータ構造、特性例を示した。4・3で扱った平板の縦一屈曲モード縮退型振動子は駆動力の取り出し方を工夫することによって、直線移動型モータとして利用できる。5・3では直接駆動あるいはベアリングを併用する直線移動型モータの構成を示している。

第6章は第3章から5章まで示したモード縮退型振動子を用いる超音波モータについて、これまで得た知見を基に特性と構造を中心に総合的な評価を行い、超音波モータを利用する際の選択の指針を与えた。また、各形状の振動子ごとにモード組み合わせとモータ構造の一覧表を付した。

第7章は紙送り機構への超音波モータの応用と題し、円環の($R,1$)-(1,1)モード縮退型振動子のカードリーダーへの応用、縦一屈曲モード縮退型振動子を用いる超音波モータの紙送りデバイスへの応用を提案し、試作検討を行った。7・2ではカードリーダーの実用化の可能性を示し、7・3では紙送りデバイスの実験的な検討すなわち、可動のメカニズム、加圧、紙質の影響について考察した。

第8章は結論である。

本論文の構成を整理し、図1-1に示した。

第1章 序 論

- ・ 研究の背景
- ・ モード縮退型モータ研究の意義
- ・ 研究の目的・概要

第2章 モード縮退型振動子を用いる 超音波モータの原理と分類

- ・ モード縮退型振動子と超音波モータ
- ・ モード縮退型超音波モータの分類と構成

第3章 同形モード縮退型 振動子を用いる回 転型超音波モータ

- ・ 円環の非軸対称振動利用
の構成
各モードの特徴
モータ特性
小型化への対策
- ・ 円板の面垂直振動利用の
同相駆動型構成
動作原理と特性

第4章 異形モード縮退型 振動子を用いる回 転型超音波モータ

- ・ 円柱の縦－捩り振動利用
の構成
構成と分類
縮退条件とモータ特性
- ・ 平板の縦－屈曲振動利用
の構成
構成と分類
モータ特性

第5章 モード縮退型振動 子を用いる直線移 動型超音波モータ

- ・ 円環の(R,1)-((1,1)) モ
ード利用の構成
縮退条件と動作原理
モータ特性
- ・ 平板の縦－屈曲振動利用
の構成
動作原理と構成
モータ特性

第6章 モード縮退型振動子を用いる 超音波モータ構成の総合評価

- ・ 分類と評価

第7章 紙送り機構への超 音波モータの応用

- ・ カードリーダーへの応用
- ・ 紙送りデバイスへの応用

第8章 結 論

図 1 - 1 本論文の構成

参 考 文 献

- (1) 実吉純一，菊池喜充，能本乙彦監修：“超音波技術便覧”，日刊工業新聞社 (1966).
- (2) 指田年生：“超音波モータの試作” 応用物理，VOL.51，PP.713-720 (1992).
- (3) 細江三弥：“超音波モータの自動焦点レンズへの応用” 東北大学電気通信研究所 第25回シンポジウム論文集，PP.117-122 (1989).
- (4) 上羽貞行，富川義朗：“新版超音波モータ”，トリケップス (1992).
- (5) S.Ueha: "Present State of the Art of Ultrasonic Motors", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.28, Suppl.28-1, pp.3-6 (1989).
- (6) Y.Tomikawa, T.Ogasawara and T.Takano: "Ultrasonic Motors -Constructions / Characteristics / Applications -", Ferroelectrics Vol.91, pp.163-178 (1989).
- (7) A.Kumada: "A Piezoelectric Motor", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.26, Suppl.26-1, pp.191-193 (1985).
- (8) U.Uchiki, T.Nakazawa, K.Nakamura, M.Kurosawa and S.Ueha: "Ultrasonic Motor Utilizing Elastic Fin Rotor", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.30, No.9B, pp.2289-2291 (1991).
- (9) J.Tsujino, M.Takeuchi: "Ultrasonic Rotary Motor Using a Longitudinal-Torsional Vibration Converter", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.31, Suppl.31-1, pp.245-247 (1991).
- (10) 指田年生：“超音波振動を利用したモータ装置”，特許公報，昭58-148682 (1983).
- (11) 見城尚志，指田年生：“超音波モータ入門”，総合電子出版社，(1991).
- (12) M.Kuribayashi, S.Ueha and E.Mori: "Excitation Conditions Flexural Traveling Waves for Reversible Ultrasonic Linear Motor", J. Acoust. Soc. Am. Vol.77 No.4, pp.1431-1435 (1985).
- (13) 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 (1986).
- (14) 永井健三，近野正編：“電気・機械振動子とその応用”，コロナ社，(1974).

- (15) Y.Tomikawa, T.Ogasawara, S.Sugawara, M.Konno and T.Takano: "Construction of Ultrasonic Motors and thier Application", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.27, Suppl.27-1, pp.195-197 (1988).
- (16) 黒澤実, 上羽貞行: "振動子と積層アクチュエータを用いた超音波モータ", 電子情報通信学会技術報告, US87-31, pp.27-31 (1987).
- (17) T.Takano, Y.Tomikawa, T.Ogasawara, S.Sugawara and M.Konno: "Ultrasonic Motors Using Piezoelectric Ceramic Multi-Mode Vibrators", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.27, Suppl.27-1, pp.192-194 (1988).
- (18) 中村健太郎, 黒澤実, 上羽貞行: "複合振動子型超音波モータの特性設計", 音響学会平成元年度秋季研究発表会講論集, NO.1-4-2, pp.831-8832 (1989).

第2章 モード縮退型振動子を用いる超音波モータの原理と分類

2・1 緒言

超音波モータは、基本的には振動体に直交する2つの変位を与え、その位相差を考慮して変位の橢円運動を実現し、利用するものである⁽¹⁾。したがって、この橢円運動をどのように実現し、利用するかによって超音波モータの構造が変わり、多様な構成が考えられることになる。その中でモード縮退型振動子を用いる構成は、ステータにあたる振動子が1個ですむ点に最大の特徴がある。

本章では、モード縮退型振動子を用いる超音波モータの構成原理と、モード利用の立場から超音波モータの分類を試みている⁽²⁾。2・2では、最初に超音波モータ構成の原理について述べ、モード縮退型超音波モータ⁽³⁾と他の構成との比較検討を行っている。次にモード縮退型振動子を同形モード縮退と異形モード縮退に大別し、その各々について超音波モータの動作原理に関わる変位の橢円運動の形成について具体例を挙げて論じている。また2相駆動以外に単相駆動によっても変位の橢円運動が形成されることを明らかにしている。

2・3では、2・2の分類に基づいて具体的なモード縮退型振動子を挙げ、各振動子で形成される変位の橢円運動とモータ構成例を示している。振動子形状として、円板（円環，正方形板）・円柱（円筒）・平板を、振動モードとして伸び・屈曲・振り・縦振動を考えている。モード縮退型振動子は、これらのモードの組み合わせとして得られるから、多種多様な振動子が考えられる。しかし、現実には共振周波数による振動子形状の制限や、構造の複雑さによってモードの組み合わせが制限される。これらの点を考慮して、既発表の構造も含めて検討・整理している。

2・2 モード縮退型振動子と超音波モータ

2・2・1 超音波モータの構成原理

図 2-1 (a) に示す振動物体のある質点が、直交する変位

$$u_x = U_{x0} \sin(\omega t), \quad u_y = U_{y0} \sin(\omega t + \phi) \quad (2-1)$$

で振動していると、位相差 ϕ によって質点は図 2-1 (b) のような楕円軌跡を描く。この振動物体に可動物体（ロータ）を押し付けると、質点の楕円運動による駆動力が両物体間の摩擦力を介してロータに伝達され推力となる。ロータが質点の運動に追従する場合は、ロータもまた同じ地点で楕円運動するだけであるが、図 2-1 (c) のように y 方向の変位が最大になる付近だけで、ロータが接触すれば一方向に進むことになる。楕円運動の方向を逆にするによって、ロータには反対方向の推力が与えられる。一方、 u_x 、 u_y の位相差が $\phi = 0, 180^\circ$ の場合には軌跡は直線となる。この状態でも質点と可動物体は、変位の最大点付近である時間接触するために、質点の x 軸方向の速度成分によって物体も x 軸方向の推力を受ける。“突っつき型”と呼ばれるモータが構成される。

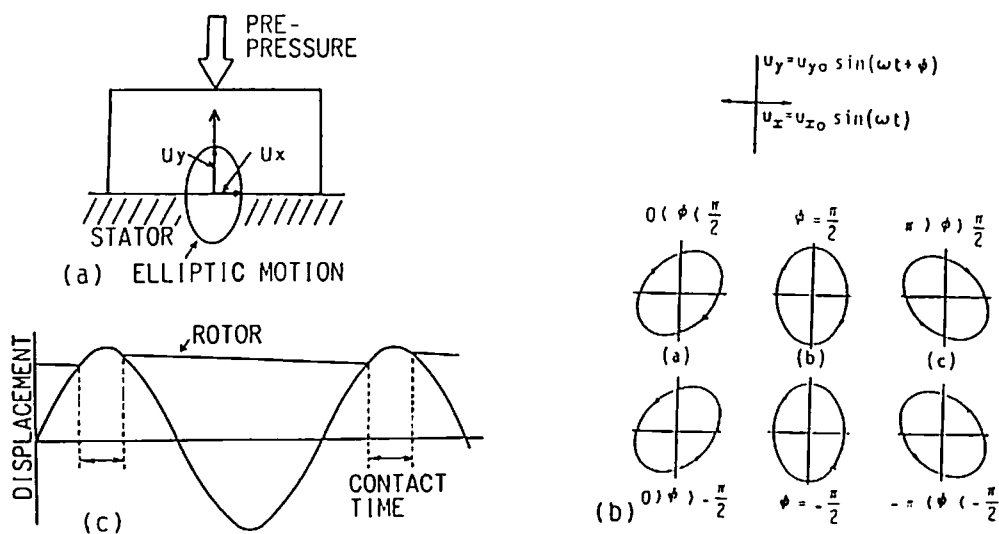


図 2-1 超音波モータの構成原理

2・2・2 モード縮退型振動子と超音波モータ

図2-1に示すように変位の楕円運動をどのように実現するかによって、超音波モータの構成が変わり多様な構成が考えられることになる。既発表の超音波モータをも考慮すると表2-1のように分類される。(1)は、単一共振モードを利用する構成で、この構成は一方向の振動成分を何らかの方法(例えば、モード結合あるいは結合子を用いる方法)で2つの方向の振動成分を得、結果としてロータとの接触点で変位の楕円運動、あるいは直線運動を利用する構成と、振動そのものの傾斜成分を利用して2方向の振動成分を得る構成⁽⁴⁾に大別される。この構成は原理的に一方向の回転であり本論文では扱わない。

正逆回転可能なモータは結合振動⁽⁵⁾とモード縮退型振動子を利用する構成に分けられる。前者の構成は振動の内部結合により2つの振動を励振し、それによって変位の楕円運動を得る構成で、駆動周波数によって2つの振動変位の位相差が変化することを利用して正逆回転を行うものである。単相駆動で正逆回転ができ、X-Yステージなどリニアモータとして応用されている。しかし、一般には周波数を変えることによって楕円運動の軌跡が変化するので、正逆対称な特性は得られにくく、振動子の構造上も制限される。

モード縮退型振動子は前章で述べたように1個の振動子に2つの振動モードを励振し、利用する振動子である⁽⁶⁾⁽⁷⁾。それらの直交する2つの変位を位相差の異なる信号で駆動することによって得られる変位の楕円運動、あるいは直線運動を形成し、利用するものである。したがって、振動子の形状や振動モードの組み合わせ、さらに駆動力の取り出し方などによって数多くのモータ構成が考えられる。また表2-1に示すようにこの振動子の一方の振動を他の振動素子に置き換えることによって他の構成への発展も可能であり、モード縮退型超音波モータを考察することはモータ構成の拡大につながることもなる。

表2-2～4は振動子形状ごとにモード組み合わせの点からモード縮退型振動子を分類し、モータ構造の概略図を示したものである。この表の中で、◎印の構成は本論文の中で構造と特性を詳述しているモータで、○印の構成は本論文には含まれていないが筆者らが考案したモータを示している。これらの表

に示すようにモード縮退型超音波モータは、振動子構成の他に駆動力の取り出し方によってモータの動作形態まで変わる。これらの各構成の詳細な検討は第6章で行う。

次にモード縮退型振動子を用いて変位の楕円運動実現する方法と実用的なモード縮退型超音波モータの具体的な構造について述べる。

表 2 - 1 超音波モータの分類

一方向回転——振動子の単一共振モードを利用する構成

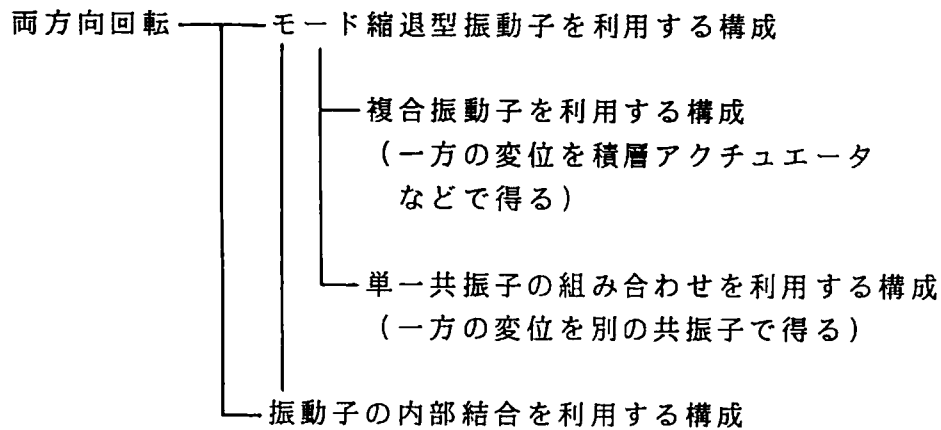


表 2-2 円板（円環）振動子を用いるモード縮退型
超音波モータの構成

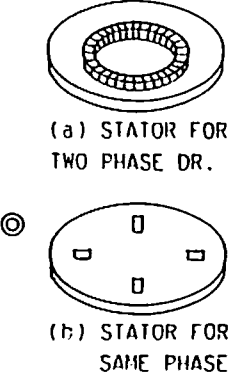
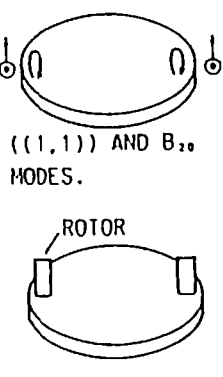
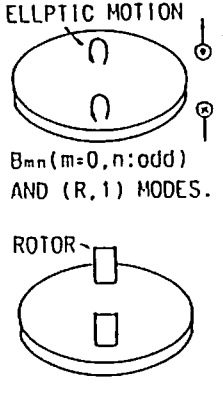
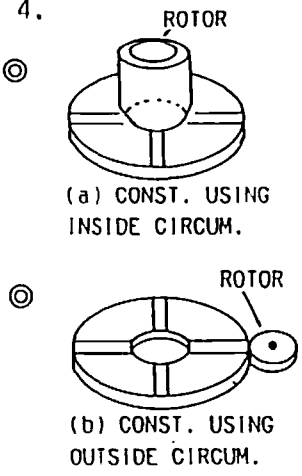
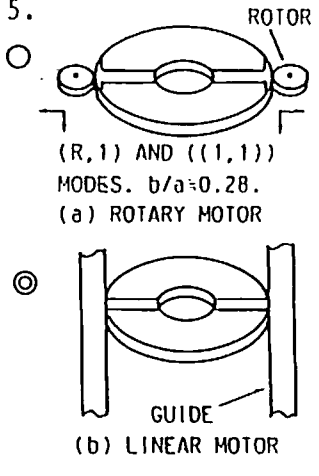
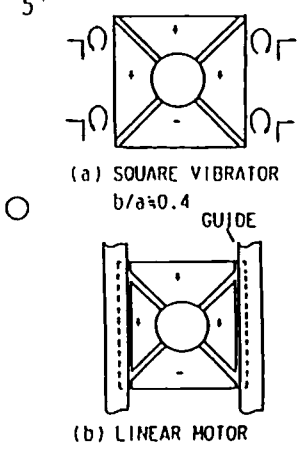
	BENDING VIBRATION B_{mn} MODE	NON-AXISYMMETRIC VIB. $((n,m))$ MODE	RADIAL VIBRATION $((R,1))$ MODE
BENDING VIBRATION B_{mn} MODE	1.  (a) STATOR FOR TWO PHASE DR. (b) STATOR FOR SAME PHASE DR.	2.  $((1,1))$ AND B_{10} MODES. ROTOR	3.  ELLPTIC MOTION $B_{mn}(m=0, n: \text{odd})$ AND $(R,1)$ MODES. ROTOR
NON-AXISYMMETRIC VIBRATION $((n,m))$ MODE		4.  (a) CONST. USING INSIDE CIRCUM. (b) CONST. USING OUTSIDE CIRCUM. ROTOR	5.  (a) ROTARY MOTOR (b) LINEAR MOTOR GUIDE
RADIAL VIBRATION $(R,1)$ MODE		5'  (a) SQUARE VIBRATOR $b/a \approx 0.4$ (b) LINEAR MOTOR GUIDE	

表 2 - 3 平板振動子をステータとするモード縮退型
超音波モータの構成

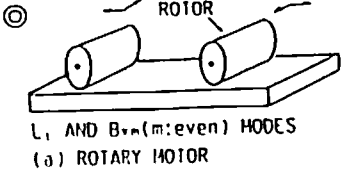
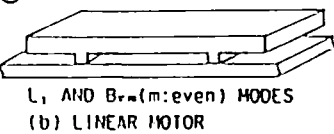
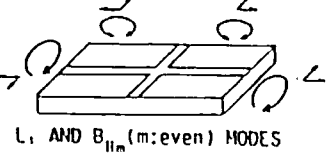
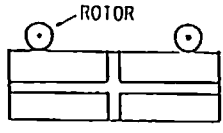
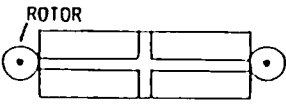
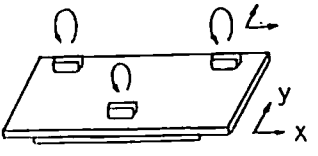
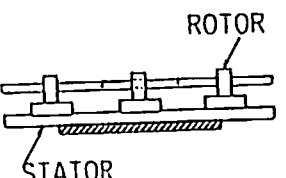
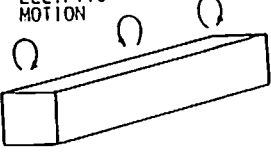
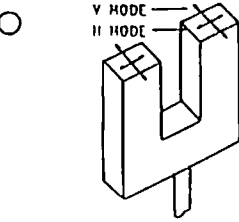
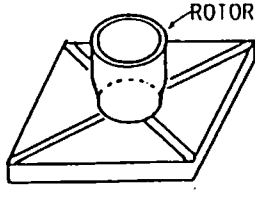
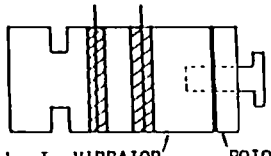
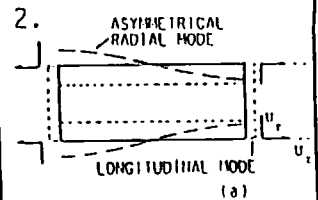
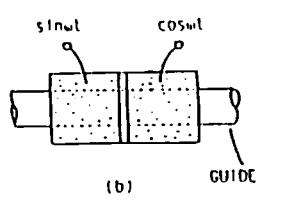
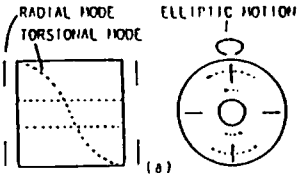
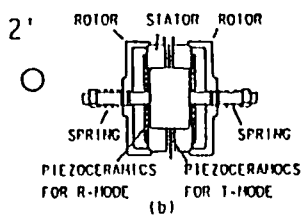
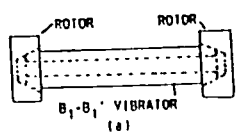
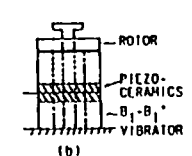
	LONGITUDINAL VIB. L_m MODE	BENDING VIBRATION B_{vm} MODE	BENDING VIBRATION B_{Hm} MODE
LONGITUDINAL VIBRATION L_m MODE		1.  ⊙  L_1 AND $B_{vm}(m:\text{even})$ MODES (b) LINEAR MOTOR	2.  L_1 AND $B_{Hm}(m:\text{even})$ MODES  ROTOR  ROTOR MOTOR CONSTRUCTION
BENDING VIBRATION B_{vm} MODE		3.  y x  ROTOR STATOR CONST. USING $B_4(x \text{ DIR.})$ AND $B_2(y \text{ DIR.})$ MODES	4. ELLIPTIC MOTION  ELLIPTIC MOTION  V MODE H MODE
BENDING VIBRATION B_{Hm} MODE			5.  ROTOR CONST. USING INSIDE CIRCUMFERENCE (a) ROTARY MOTOR

表 2 - 4 円柱（円筒）振動子をステータとするモード縮退型
超音波モータの構成

	LONGITUDINAL VIB. L_m MODE	TORSIONAL VIBRATION T_m MODE	BENDING VIBRATION B_m MODE	RADIAL VIBRATION ($R, 1$) MODE
LONGITUDINAL VIBRATION L_m MODE		1. ◎ PIEZOCERAMICS FOR L-MODE T-MODE  L_1-T_1 VIBRATOR ROTOR		2.  ASYMMETRICAL RADIAL MODE LONGITUDINAL MODE (a)  $\sin \omega t$ $\cos \omega t$ (b) GUIDE
TORSIONAL VIBRATION T_m MODE				 RADIAL MODE TORSIONAL MODE ELLIPTIC MOTION (a) 2.  ROTOR STATOR ROTOR SPRING SPRING PIEZOCERAMICS FOR R-MODE PIEZOCERAMICS FOR T-MODE (b)
BENDING VIBRATION B_m MODE			3.  ROTOR ROTOR B_1-B_1' VIBRATOR (a)  ROTOR PIEZO-CERAMICS B_1-B_1' VIBRATOR (b)	
RADIAL VIBRATION (R, n) MODE				

2・2・3 同形モード縮退による楕円運動の形成

(a) 2相駆動の場合

円板振動子の面内屈曲振動（非軸対称振動と呼ばれる）の場合について説明する⁽⁸⁾。このモードは一般に $((n, m))$ モード（ n ：振動次数， m ：高調波次数）と表される。これらのモードを利用すると、共振モードの回転とそれに伴う変位の楕円運動が実現できる。図2-2に示す $((2, 2))$ モードについて考える。このモードには同図(b)に示す同形の縮退モードが存在するから、各モードを図に示すように 90° 位相の異なる入力 $(\sin \omega t, \cos \omega t)$ で駆動すると、全体の変位 u_r, u_θ は次のように表される。

$$\begin{aligned} \text{aモードで} \quad u_{ra} &= \{U_r\} \cos(n\theta) \sin(\omega t) \\ u_{\theta a} &= \{U_\theta\} \sin(n\theta) \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (2-2)$$

$$\begin{aligned} \text{bモードで} \quad u_{rb} &= \{U_r\} \cos(n\theta - \pi/2) \cos(\omega t) \\ u_{\theta b} &= \{U_\theta\} \sin(n\theta - \pi/2) \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (2-3)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \{U_r\} &= \left\{ A \frac{\partial J_n(hr)}{\partial r} + nB \frac{J_n(kr)}{r} \right\} \\ \{U_\theta\} &= - \left\{ nA \frac{J_n(hr)}{r} + B \frac{\partial J_n(kr)}{\partial r} \right\} \end{aligned} \quad (2-4)$$

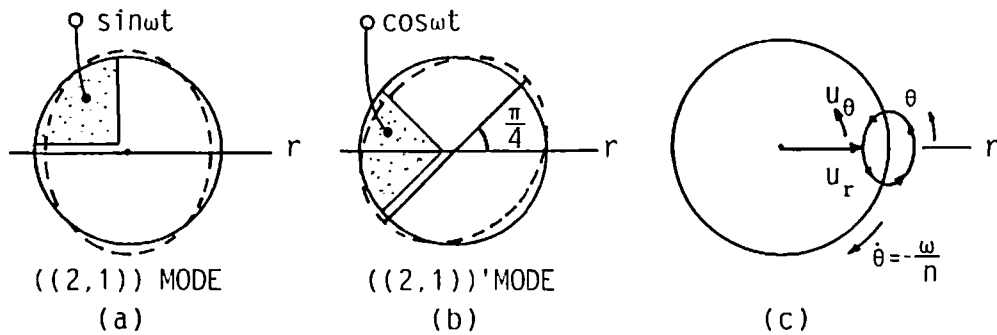


図2-2 (a), (b) 縮退する面内屈曲振動 $((2,1))$ モード
(c) 変位の楕円運動とモード回転

$$h^2 = \rho \omega^2 (1 - \sigma^2) / E \quad (2-5)$$

$$k^2 = 2\rho \omega^2 (1 + \sigma) / E \quad (2-6)$$

ρ , σ , E はそれぞれ密度、ポアソン比、ヤング率である。

従って、

$$u_r = u_{ra} + u_{rb} = \{U_r\} \sin(\omega t + n\theta) \quad (2-7)$$

$$u_\theta = u_{\theta a} + u_{\theta b} = \{U_\theta\} (-1) \cos(\omega t + n\theta) \quad (2-7)$$

$$\dot{u}_\theta = \omega \{U_\theta\} \sin(\omega t + n\theta) \quad (2-8)$$

$$(u_r / \{U_r\})^2 + (u_\theta / \{U_\theta\})^2 = 1 \quad (2-9)$$

となり、変位 u_r , u_θ により楕円運動が形成されることが示される。この場合、図 2-2(c)にも示すように時計方向に $(\dot{\theta} = -\omega/n)$ の角速度で回転移動することになる。図 2-3(a), (b) は変位 u_r , u_θ 、ならびに速度 $\dot{u}_\theta$ を図示したものである。すなわち、 u_r , u_θ によって楕円運動が形成され、それによるロータの移動方向が統一的に理解される。入力位相 ($\sin \omega t$ と $\cos \omega t$) を反転すると、共振モードの回転方向とロータの移動方向が反転する。振動モードや円環の場合、形状によって形成される楕円運動の形状が変化し、これがステータとしての良否を決める一つの目安となる。詳しくは次章で述べる。このように円板（円環）の非軸対称振動を利用すると、その内周面と外周面の変位の楕円運動を利用できるから、種々の超音波モータが構成される⁽⁹⁾。

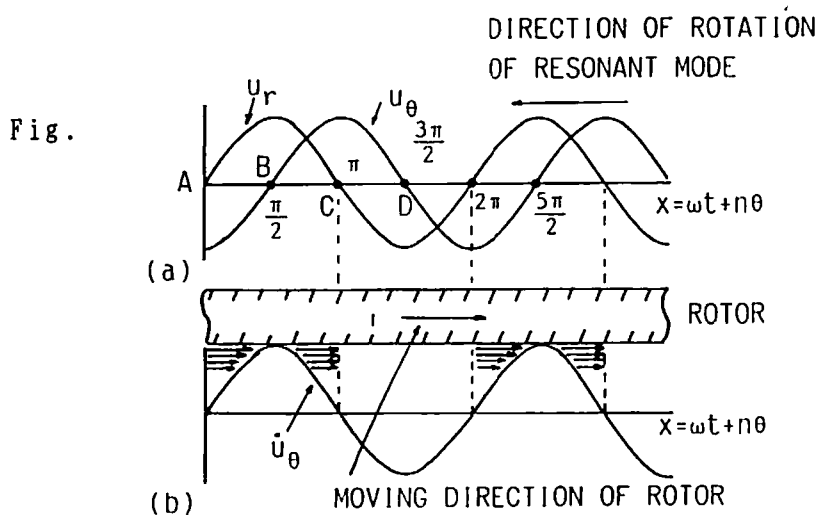


図 2-3 モード回転型モータの動作原理

円板の面垂直屈曲振動を利用しても同様に変位の橢円運動が形成される。図2-4(a)に示す円板の B_{02} モード（一般に B_{mn} モードと表される。 m ：節円数， n ：節直径数）には、同図(b)の節直径位置の異なる縮退モードが存在する。従って、これらのモードを 90° 位相の異なる信号で駆動すれば、面内屈曲振動から類推されるように、円板の板面上で変位の橢円運動が形成される。これは進行波型モータとして実用的な超音波モータの発端となったもので、使用モードの適否、構造などについてすでに詳しく報告されている⁽⁹⁾。

さらに、図2-5(a),(b)に示す円柱あるいは正方形断面を持つ矩形棒の縮退する屈曲振動によって、橢円運動が形成されることも容易に類推される。

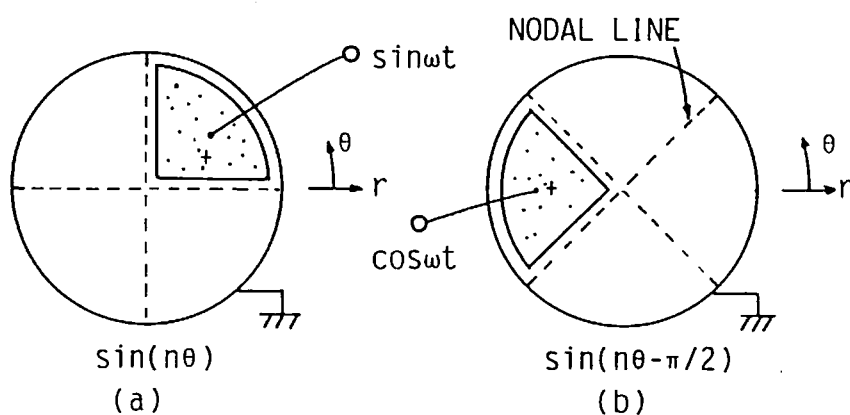


図2-4 縮退する面垂直屈曲振動 B_{02} モード

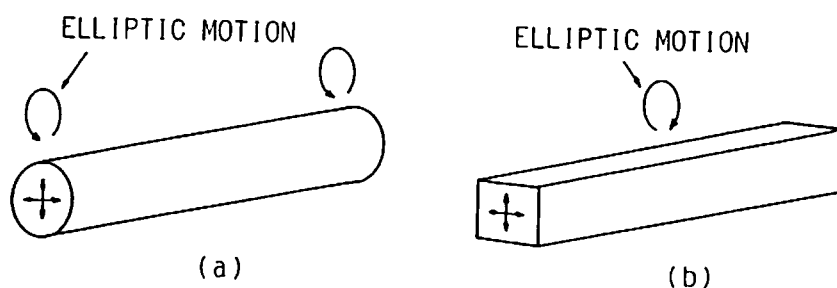


図2-5 (a)円柱の縮退する屈曲振動
(b)矩形棒の縮退する屈曲振動

(b) 同相駆動の場合

モード回転を利用せずに円板（円環）の同形縮退モードを用いて、変位の橢円運動を形成することができる。図2-6(a)に示すように、MODE1のLOOPが、MODE2ではNODEである2つの縮退モードを考える。この点では、MODE1によって垂直方向の、MODE2の振動の傾斜成分によって水平方向の変位が生じるから両モードを同相駆動することによって、同図(b)に示すような対角方向の直線運動が形成される。実際は水平方向の変位拡大を兼ねて、図に示すような突起が設けられる。すなわち、表2-1(2)の分類に属する“突っつき型”のモータが構成される⁽¹⁰⁾。

円板の面垂直屈曲振動 B_{11} モードを用いて具体的に説明する。図2-7(a), (b)に示す縮退モードで点①, ②, ③, ④の変位について考えると、点①, ③は(a)のモードの節直径上、(b)のモードでは振動のループ上にある。点②, ④は全くこの逆の位置になる。すなわち、点①, ③は(a)のモードで矢印方向に

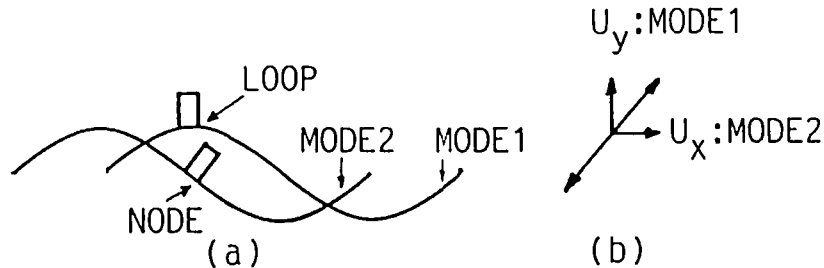


図2-6 同相駆動型超音波モータの動作原理

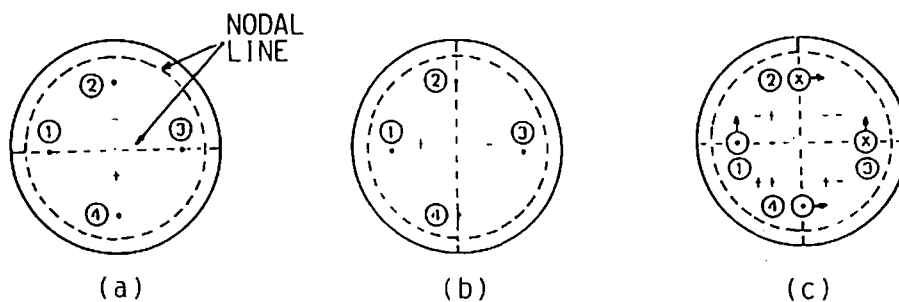


図2-7 面垂直屈曲振動 B_{11} モードによる同相駆動型モータの動作原理

変位の傾斜を持ち、(b)のモードで①は面の上方に、③は面の下方に変位する。従って、図2-7(c)のようにこの点に突起を設けると、その先端は各々、対角方向の変位を持つ。点②、④についても全く同様の考察ができるが、超音波モータとして利用する場合は、同じ方向の回転力を得る突起だけを利用することになる。具体的な構成は第3章で述べる。面内屈曲振動でも同様の構成が可能である。

同形縮退モードは、振動子に非対称性を付加することにより縮退を分離することができる。これはかつて2重モード(双共振)フィルタなどの例で良く知られている現象で、例えば円板振動子では図2-8に示すように円周の一部を削り落とすことによって縮退を分離することができる。この2個のモードを用いると単相駆動により変位の回転移動現象を励起することが可能である⁽¹¹⁾。

図2-8(a)は、 B_{11} モード円板の圧電セラミックス接着位置と縮退分離のための周辺カット例を示している。同図(b)の ω_{op} は分離した2つの共振モードのコードランタル周波数で、単相駆動時の周波数として使用する⁽¹²⁾。単相駆動時の等価回路は図2-8(c)および(c')で表され、 $\omega = \omega_{op}$ で各共振系に流れる電流 i_1 と i_2 の間には、

$$i_2 = i_1 e^{-j\frac{\pi}{2}} \quad (2-10)$$

の関係が成り立つ。従って、図2-8(a)の構成で単相駆動する場合の変位は、 $i_1(\sin \omega t)$ での変位を u_1 、 $i_2(\sin(\omega t - \pi/2))$ での変位を u_2 とすると

$$u_1 = \{U_0\} \sin(n\theta) \sin(\omega t) \quad (2-11)$$

$$u_2 = \{U_0\} \sin(n\theta - \pi/2) \sin(\omega t - \pi/2) \quad (2-12)$$

となる。ただし、 $\{U_0\}$ はモード関数である。したがって、全体の変位 u は

$$\begin{aligned} u &= u_1 + u_2 \\ &= \{U_0\} \cos(\omega t - n\theta) \quad (n = 1) \end{aligned} \quad (2-13)$$

となる。式(2-13)より、 $\dot{\theta} = \omega / n$ であるから、変位 u は反時計方向に回転する。逆に図2-9の構成による円板振動子を単相駆動する場合は、変位 u は時計方向に回転することになる。

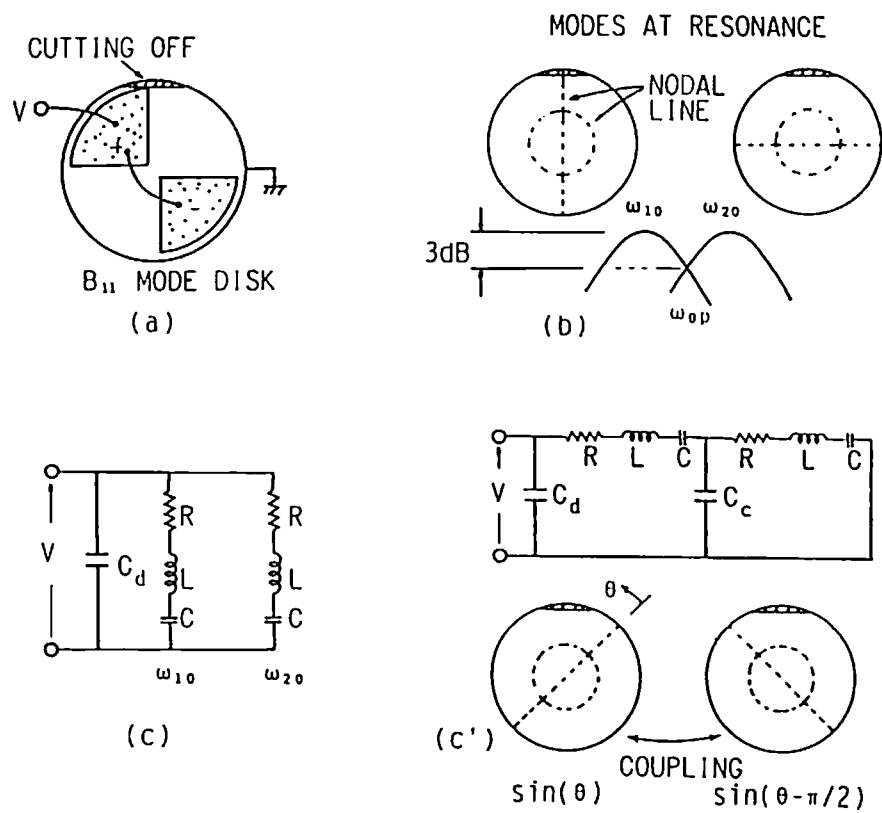


図 2 - 8 共振モードの縮退分離による
モード回転（反時計方向）

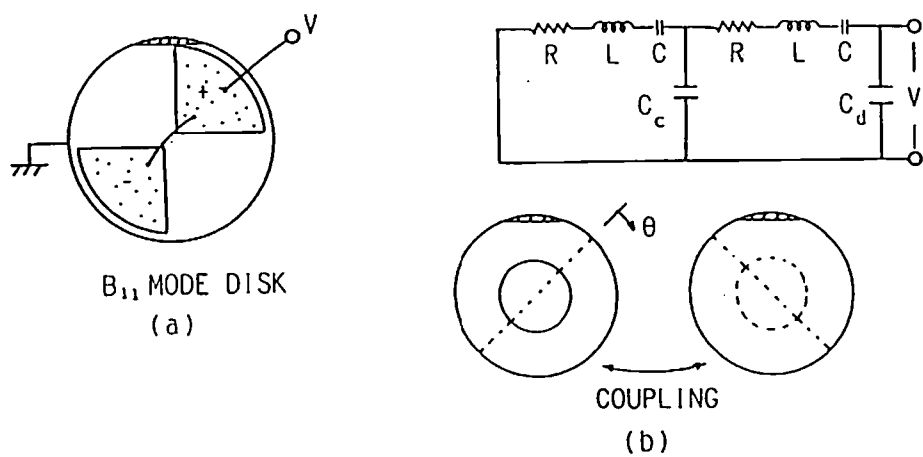


図 2 - 9 共振モードの縮退分離による
モード回転（時計方向）

2・2・4 異形モード縮退による楕円運動の形成

(a) 2相駆動の場合

図2-10(a)に示す矩形振動子で、長さ方向の伸縮振動（縦振動）と厚み方向の屈曲振動の共振周波数は、振動子の辺比を適当に選ぶことによって一致する。このように異なった振動モードの共振周波数が一致した状態を、異形モード縮退と呼ぶ。図2-10(b)に縦振動1次と屈曲振動4次モードの縮退した状態を示す。屈曲振動のループ上の点①、②を考えると、これらの点では縦振動によってx軸方向、屈曲振動によってy軸方向の変位が生じる。従って、両モードの駆動位相を変えることによって、これらの点が楕円軌跡を描くことは容易に理解される。異形モードの縮退は、かつてエレクトロメカニカルフィルタへの応用を目的として考察された多重モード振動子を参考にするによって、いくつかの種類の振動子で実現される。具体的な構造については次節で詳述する。

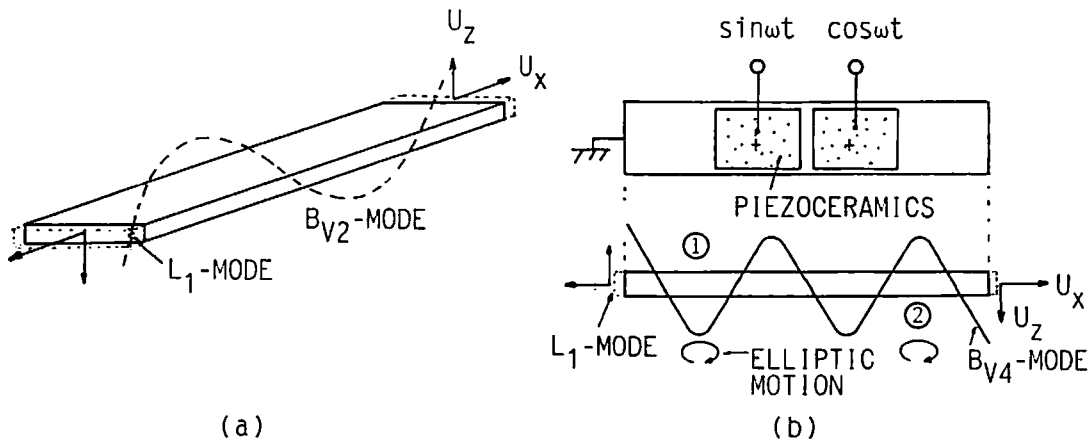


図2-10 (a) 平板の縦-屈曲モード縮退型振動子
(b) 縦1次-屈曲4次モード縮退型振動子と変位の楕円運動

(b) 同相駆動の場合

前述の同形モード縮退型振動子の場合と同様に、異形モード縮退による振動子においても両モードを同相駆動することによって、変位の直線運動が形成される。図2-11(a)に示す円環の対称伸び振動 $(R, 1)$ モードと非軸対称振動 $((1, 1))$ モードを考える。次節で述べるように、これらのモードは円環の内径対外径比が $b/a=0.28$ 近傍で縮退し、それぞれのモードは外周上の点A, Bでは同図(b)に示す変位成分を持つ。したがって、これらのモードを同相駆動すなわち同図(b)の端子①あるいは②で駆動すると、同図(c)に示す変位の直線運動が形成される。例えばこれらの点にガイドを圧接することによって、直線移動型モータが構成できる。端子①あるいは②で駆動するかによってモードの組み合わせが変わるので、同図(c)に示すような直交する直線運動が形成されモータの移動方向が反転する。

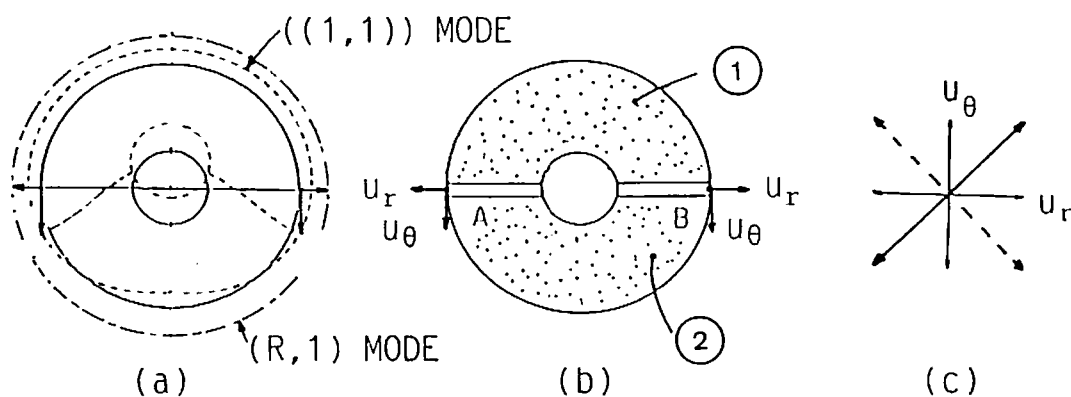


図2-11 (a) 円環の $(R, 1)$ モードと $((1, 1))$ モードの振動モード
 (b) 振動成分と駆動端子
 (c) 同相駆動による変位の直線運動の形成

2・3 モード縮退型超音波モータの分類と構成

前節では超音波モータの原理となる橢円運動の形成について述べた。ここでは上記の分類に基づき具体的な構成例を示す。

2・3・1 同形縮退モード利用の超音波モータ

(a) 円板(円環)振動子の非軸対称振動利用の構成

円環振動子の縮退する $((1, 1))$ モードを図2-12(a),(b)に示す。2・2・2で述べたようにこれらの縮退モードを 90° 位相の異なる信号で駆動すれば、円環の内・外周面で変位の橢円運動が形成される。すなわち、超音波モータのステータとして利用する場合は、円環の内・外周面から駆動力を取り出すことができるので、図2-13に示すように多様な構成が可能になる。ここで、(a),(b)はそれぞれ円環の内周部、外周部にロータを押し付ける構成、(c)は円環の内周部に、テーパを持つロータを押し込む構成、(d)は同様に外周部を利用する構成である⁽¹³⁾。

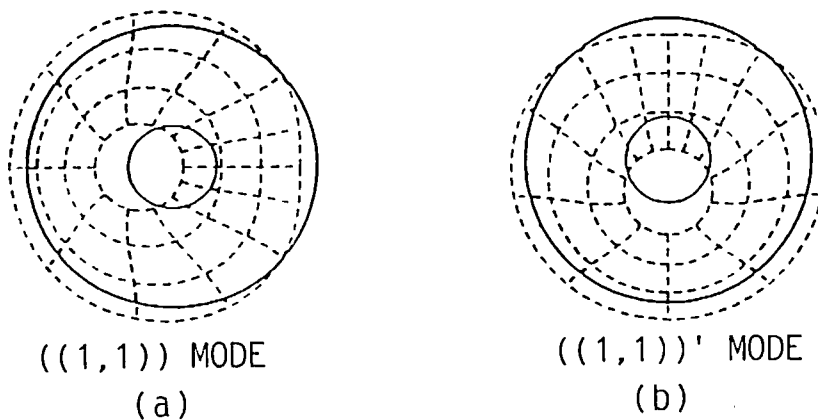


図2-12 縮退する非軸対称振動 $((1,1))$ モード

また 2・2・2(b)で述べた面垂直振動を利用するモータと同じ原理で、縮退する非軸対称振動を同相駆動することによって超音波モータを構成できる。 $((2,1))$ モード利用の超音波モータ構成例を図 2-14に示すが、この場合ステータは使用モードに合った突起を持つ必要がある。

非軸対称振動を利用する超音波モータの特徴は、内・外周面の楕円運動が利用できるので薄型構造に適することと、図 2-13に示したように多彩な構造が可能になることにある。試作特性例については第 3 章で述べる。

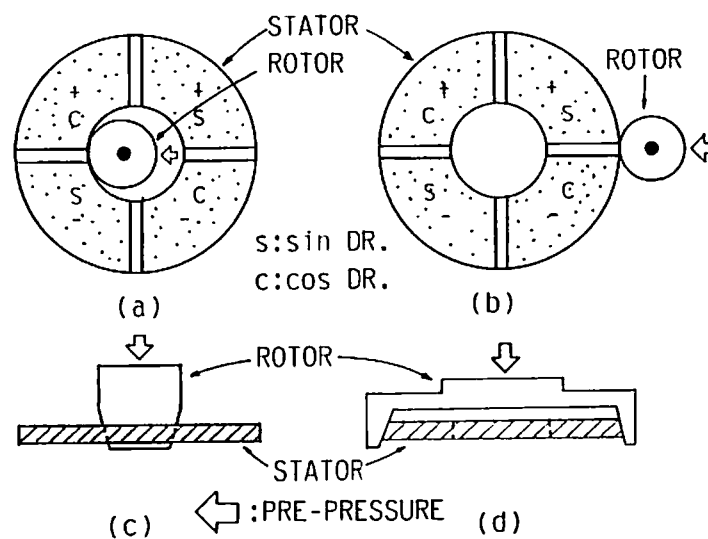


図 2-13 縮退する $((1,1))$ モードを用いる超音波モータ

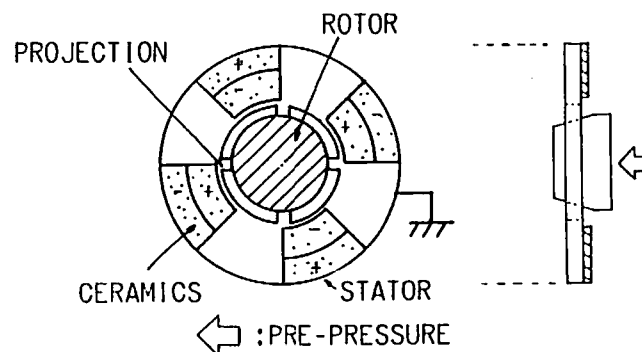


図 2-14 $((2,1))$ モードを用いる同相駆動超音波モータ

(b) 円板（円環）振動子の面垂直振動利用の構成

2・2で述べたように、このモータは円板の板面内から駆動力を取り出す構造となる。2相駆動では効果的に駆動力を取り出すために櫛歯上の変位拡大機構を設け、また同相駆動の場合は、同方向の駆動力を得るために使用モードに合った突起を持っている。ロータはステータ板面内への加圧となるために構造的に安定である。2相駆動の構成については、前に述べたようにすでに実用に使われているが、本文では図2-15の同相駆動型モータについて、第3章で詳しく述べている。

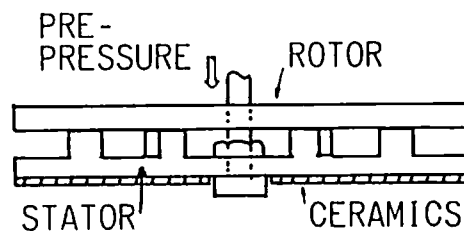


図2-15 B₁₃モードを用いる同相駆動型モータ

(c) 円筒（円柱）振動子の屈曲振動利用の構成

円筒振動子の1次の屈曲振動を利用すれば、図2-16に示すように振動子の両端部、あるいは中央部で変位の橢円運動が形成される。両端部から回転力を取り出しカードリーダーへ応用した例や、振動子の一端を固定したモータが報告されている。駆動方法として、円柱の場合はセラミクスを外周部に貼ることは困難なので、セラミクス単体の振動子やセラミクスをアルミニウムなどの金属材料で挟み込む振動子が用いられている。後者は圧電セラミクスの縦効果を利用することになるので、効率の良いモータが構成できることが指摘されている⁽¹⁴⁾。

この構成は、同図(b)の矩形(正方形)断面を有する振動子においても可能で、同図(c)に示すような中央部での楕円運動を利用する直線移動型モータが提案されている⁽¹⁵⁾。

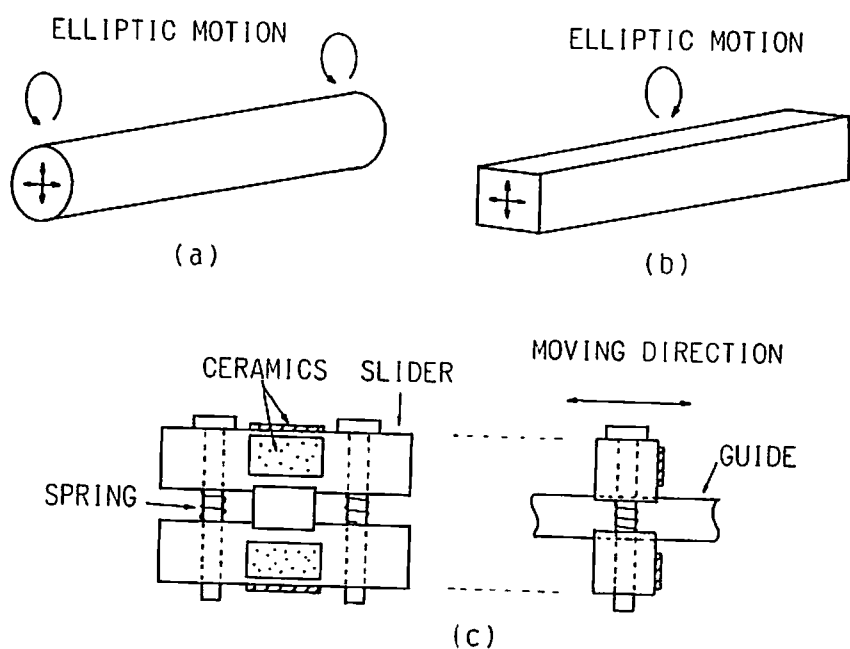


図 2 - 16 (a) 屈曲-屈曲モード縮退型円筒振動子
 (b), (c) 屈曲-屈曲モード縮退型矩形振動子と
 直線移動型モータ

2・3・2 異形縮退モードを利用する超音波モータ

(a) 平板振動子の縦－屈曲振動利用の構成

この構成は縦振動と厚み方向の屈曲振動、幅方向の屈曲振動との組み合わせ、さらに駆動力の取り出し方によっていくつかの構成が考えられる。図2-17(a)は、縦1次－屈曲(厚み方向)4次からなる縮退振動子を直線移動型モータへ応用した例で、振動子に突起を設けることによって同じ方向の回転力を得ている。同図(b)は、縦1次－屈曲(幅方向)2次からなる振動子を用いる例である。第4章に試作特性例を述べている。また平板振動子は、厚み方向屈曲振動と幅方向屈曲振動の縮退を利用する構成も可能である。

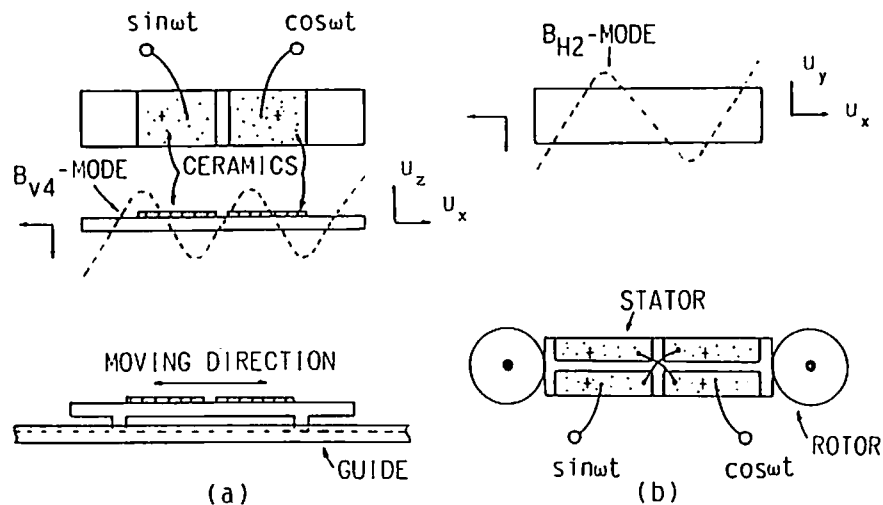


図2-17 平板の縦－屈曲モード縮退型振動子を用いる超音波モータ

- (a) L_1-B_{v4} モードを利用する直線移動型モータ
- (b) L_1-B_{H2} モードを利用する回転型モータ

(b) 円筒振動子の伸び－縦振動利用の構成

図2-18に示す円筒の径方向非対称伸び振動と、縦振動からなるモード縮退型振動子を考えると、両モードの変位が図のように直交するから、両端部の内周・外周面で変位の橢円運動が形成される。モータ構造としては同図(b)のような直線移動型モータが考えられる。

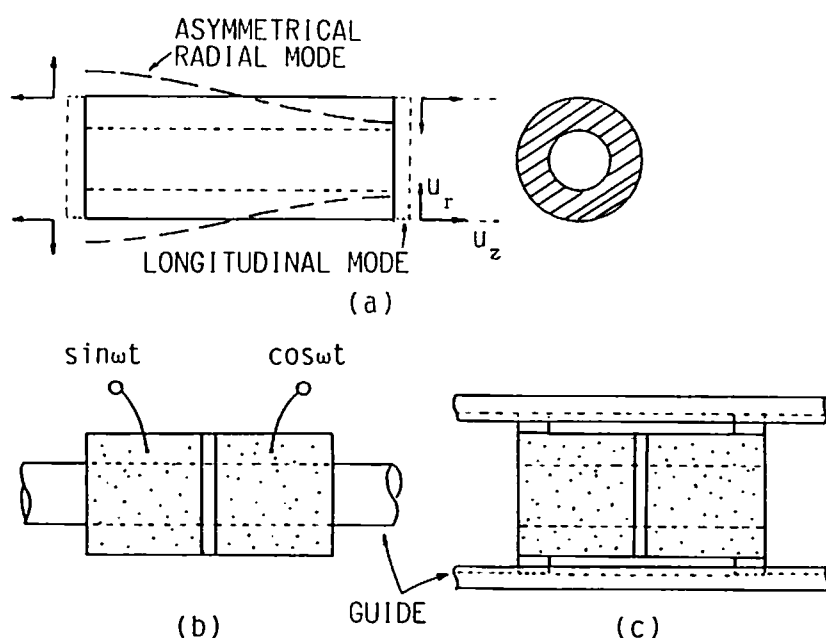


図 2-18 円筒の縦－伸びモード縮退型振動子を用いる直線移動型モータ

(c) 円板（円環）振動子の伸び－屈曲振動利用の構成

2・2・3(b)で述べたように、円環の伸び振動($R, 1$)モードと非軸対称振動($(1, 1)$)モードは、円環の内径と外径比を変えることによって縮退する。両モードの変位成分を考慮すると、図 2-19(a), (b)に示す直線移動型モータ、あるいは押し付け型回転モータが構成される。第 5 章で構造と特性例、また第 7 章でカードリーダーへの応用例を示す。

この分類には、円板（円環）振動子の面内垂直振動をも考慮すると

- ・ 対称伸び振動と面垂直屈曲振動
- ・ 非軸対称振動と面垂直屈曲振動

の組み合わせも可能になる。図 2-20に($R, 1$)と面垂直屈曲振動 B_{11} モードを利用する構成を示している。非対称な屈曲振動を用いることによって、図の A, B 点で同じ方向の駆動力を得ることができる。図 2-21は($(1, 1)$)モードと面垂直屈曲振動 B_{20} モードを利用する構成で、対称な屈曲振動を用いることによって、図の A, B 点で同じ方向の駆動力を得ることができる。

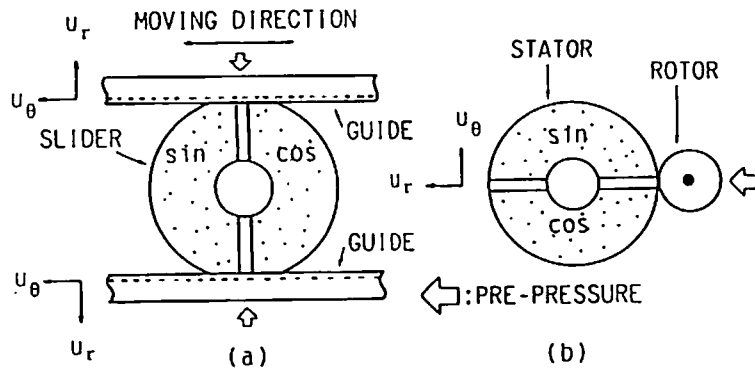


図 2-19 円環の $(R,1)-(1,1)$ モードを利用するモータ
(a) 直線移動型モータ, (b) 回転型モータ

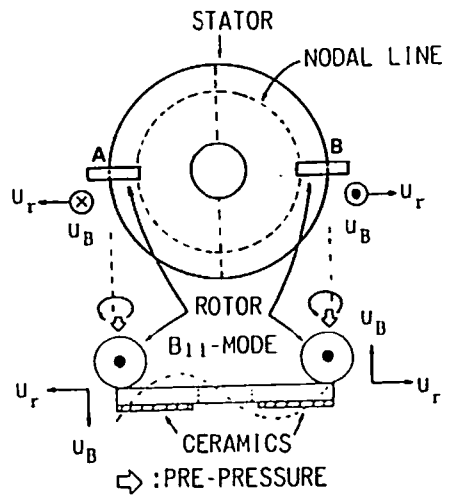


図 2-20 円環の $(R,1)-B_{11}$ モード縮退型振動子を用いるモータ

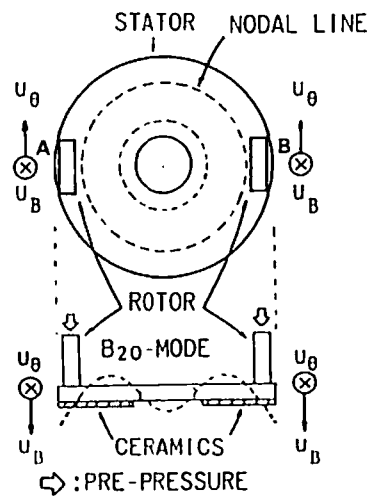


図 2-21 円環の $((1,1))-B_{20}$ モード縮退型振動子を用いるモータ

(d) 円筒振動子の対称伸び－振り振動利用の構成

図2-22に示す円筒振動子の対称伸び振動と振動は、振動子の直径と長さを調整することによって両モードの縮退が実現できる。縮退状態では、同図(b)に示すように円周面で橢円運動が形成されるので、同図(c)に示す構造で振動子の周辺から駆動力を取り出すモータが提案されている。ただし、この構造では左右のロータは逆回転することになる⁽¹⁶⁾。

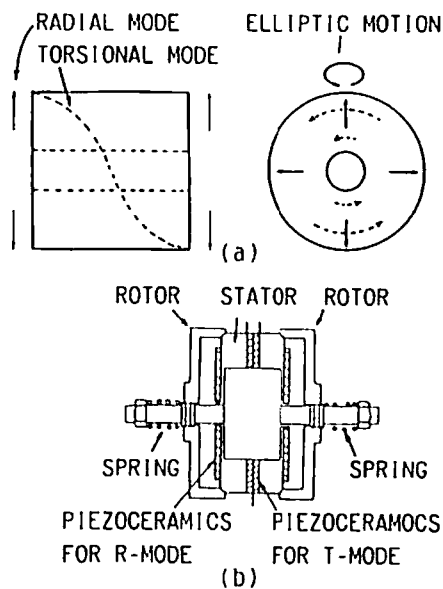


図2-22 円筒の伸び－振りモード縮退型振動子を用いるモータ

(e) 円筒振動子の縦－振り振動利用の構成^{(17)～(19)}

これらのモードを利用するモータは、低速、高トルクという超音波モータ本来の特徴を有する構成として、種々の構成のモータが提案されている。一様な円筒では縦振動の共振周波数は振り振動のそれより1.4倍程度高いが、段付き振動子を用いることによって両モードの縮退を実現することができる。

縮退条件は、振動子の形状や各部の寸法によって異なるが、例えば図2-23に示すような端部に段付き部を有する振動子では、直径比 d_2/d_1 が与えられれば、段付き部の長さ(x)を変えることによって、縦1次モード共振周波数の

低下を計り、容易に $f_{L1} = f_{T1}$ が実現される。図 2 - 24 にモータ構造の一例を示している。モード組み合わせ、あるいはモータ構造により種々の構成のモータが考えられる。いくつかの試作例を第 4 章で詳述している。

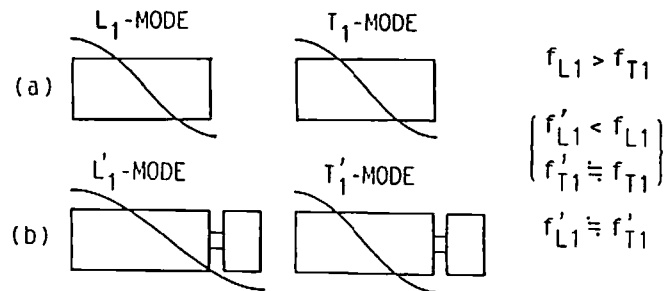


図 2 - 23 円筒の縦－振りモード縮退型振動子

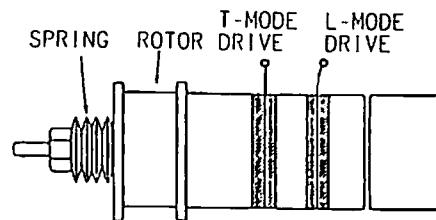


図 2 - 24 円筒の縦－振りモード縮退型振動子を用いるモータ

2・3・3 その他の構成

いままで述べた振動子以外にもいくつかのモード縮退型振動子が考えられるが、ここでは試作した 2 種類の構成例を示す。

図 2 - 25 に音さ振動子を示す。図に示す水平方向の振動（Hモード）と、両アームが非対称に振動する垂直方向の振動（Vモード）は、振動子の辺比を調整することにより縮退する。縮退条件は詳しく報告されており、アームの断面寸法のみならず、振動子のアーム間隔とベースの長さも両モードの共振周波数へ影響を与えることが指摘されているが、概ねアーム断面が正方形の場合に両モードは接近する。縮退状態では、同図(b)に示すようにアームの内側と外側で楕円運動が形成されるので、この位置から駆動力を取り出すことにより超音

波モータが構成できる。低周波で小型のモータが構成できる⁽²⁰⁾。

図2-26に正方形板の縮退モードと、これを利用したモータ構成例を示している。これは2・2・3(c)で述べた円環のモードに対応するもので、この場合 $b/a \div 0.4$ で両モードは縮退することが実験的に確かめられた。円環の場合と同様、直線移動型モータとして利用できる⁽²¹⁾。

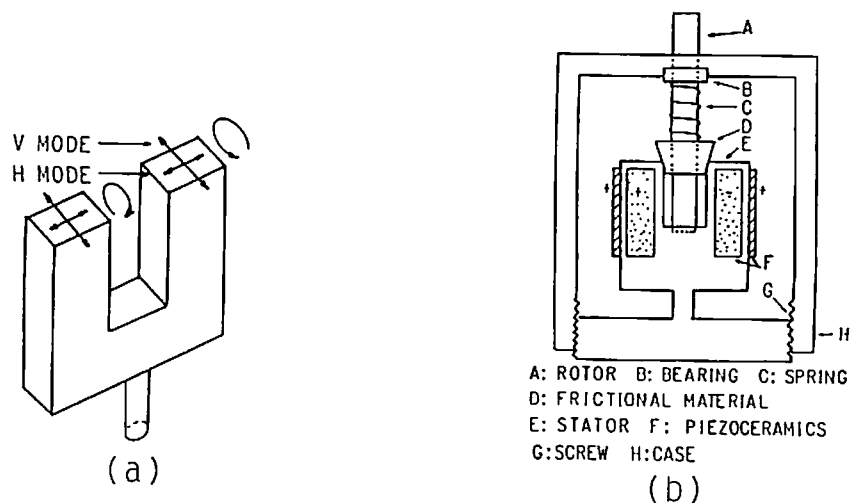


図2-25 (a) モード縮退型音さ振動子と変位の楕円運動
(b) モード縮退型音さ振動子を用いる超音波モータ

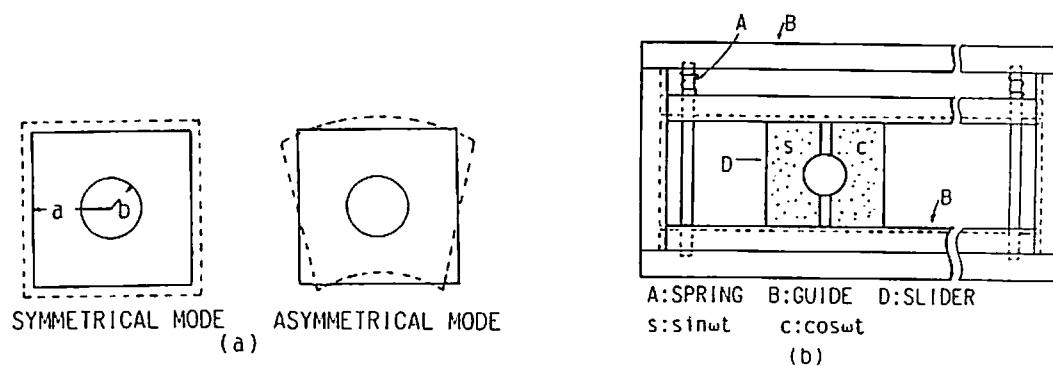


図2-26 (a) 正方形板の対称伸び振動と面内屈曲振動
(b) 正方形板の縮退モードを利用する直線移動型超音波モータ

2・4 結 言

超音波モータの構成原理を述べモード縮退型超音波モータと他の構成との比較を行い、この種モータの多様性を明らかにした。モード利用の立場から超音波モータ構成の分類を試みた。モード縮退型振動子を

(a) 同形縮退モードを利用する構成、(b) 異形縮退モードを利用する構成に大別し、その各々の構成が2相駆動と同相(単相)駆動の超音波モータのステータとして利用できることを明らかにした。また同形モード縮退型振動子では縮退を分離した2つの共振モードを、コードランタル周波数で単相駆動することによって変位の回転現象を励起し、超音波モータのステータとして利用可能であることを述べた。

2・3では2・2で与えたモード縮退型振動子の分類に基づいて、具体的なモード組み合わせによるモード縮退形振動子を取り上げ、各振動子を用いる超音波モータの構成例を示した。

以上を要約すると

- (1) 各構成の超音波モータとモード縮退型超音波モータの比較検討を行い、その特徴を明らかにした。
- (2) 振動子形状とモードの組み合わせによってモード縮退型超音波モータを分類した。
- (3) 2相駆動以外に単相駆動でも正逆回転のモータが構成できることを示した。
- (4) 縮退分離した2つのモードを単相駆動することによって変位の回転現象が励起可能であることを明らかにした。
- (5) 実用的な超音波モータの構成例を示した。

となる。

参 考 文 献

- (1) S. UEHA: "Present State of the Art of Ultrasonic Motors", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.28, Suppl.28-1, pp.3-6 (1989).
- (2) Y.Tomikawa, T.Ogasawara and T.Takano:"Ultrasonic Motors -Constructions / Characteristics / Applications -",Ferroelectrics Vol.91, pp.163-178 (1989).
- (3) 富川, 高野:"縮退形圧電振動子利用の超音波モータ", 東北大学電気通信研究所第25回シンポジウム, No.III-3, PP.85-94 (1989).
- (4) T.Iijima, M.Wada, Y.Nakagawa and H.Itoh: "Ultrasonic Motor Using Flexural Standing Wave", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.26, Suppl.26-1, pp.191-193 (1987).
- (5) K.Ohnishi, K.Yamakoshi: "Ultrasonic Linear Actuator", J. Acoust. Soc. Jpn., Vol.11, No.4, pp.235-241 (1990).
- (6) 永井健三, 近野正編:"電気・機械振動子とその応用", コロナ社 (1974).
- (7) 電気学会エレクトロメカニカル機能部品常置専門委員会編:"エレクトロメカニカル機能部品", 電気学会 (1972).
- (8) T.Takano, Y.Tomikawa, T.Ogasawara, S.Sugawara and M.Konno: "Ultrasonic Motors Using Piezoelectric Ceramic Multimode Vibrators", IEEE Trans. UFFC, Vol.37, No.3, pp.224-229 (1990)
- (9) 見城尚志, 指田年生:"超音波モータ入門", 総合電子出版社 (1991).
- (10) 高野, 富川, 小笠原,"円板の屈曲モードを利用する同相駆動型超音波モータ", 電子情報通信学会技術報告, US90-50, pp.29-35 (1990).
- (11) 栗林実, 上羽貞行, "円形超音波モータの単相駆動法の検討",昭和61年度音響学会秋季講演集, NO.1-2-15, pp.697-698 (1986).
- (12) Y.Tomikawa, T.Kondo, T.Ogasawara, S.Sugawara and M.Konno,"Fundamental Considerations of Excitation of a Flexural Progressive Wave and its Application", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.26 Suppl.26-1, pp.194-196 (1987).
- (13) 高野, 富川, 小笠原, 菅原, 近野,"面内振動の多重モード振動子利用による超音波モータ", 電子情報通信学会技術報告, US87-32 pp.33-40 (1987).

- (14) M.Kurosawa, K.Nakamura, T.Okamoto and S.Ueha: "An Ultrasonic Motor Using Bending Vibrations of a Short Cylinder", IEEE Trans. UFFC, Vol.36, No.5, pp.517-521 (1989).
- (15) 富川, 小笠原, 菅原, 近野, 高野: "横振動2重モード音片利用の直線移動自走式モーター", 昭和63年電子情報通信学会春季全国大会講論集, No.A-222, pp.1-224 (1988).
- (16) 寒河江, 富川, 足立, 高野: "伸び-振りモード利用超音波モータの試作" 音響学会平成2年度秋季研究発表会講論集, NO.2-Q-3, pp.859-860 (1990).
- (17) 富川, 足立, 青柳, 高野, "縦-振り振動利用の超音波モータ", 電気学会第19回EMシンポジウム, pp.5-12 (1990).
- (18) 黒澤実, 上羽貞行: "振動子と積層アクチュエータを用いた超音波モータ", 電子情報通信学会技術報告, US87-31 pp.27-31 (1987).
- (19) O. Ohnishi, O. Myouga, T. Uchikawa, M. Tamegai, T. Inoue and S. Tkahashi: "Piezoelectric Ultrasonic Motor Using Longitudinal-Torsional Composite Vibration of a Cylindrical Resonator", Proc. of 1989 IEEE Ultrasonics Symposium, pp.289-294 (1989).
- (20) 高野, 富川, 小笠原, 青柳: "低周波小型超音波モータの試作", 音響学会平成3年度秋季研究発表会講論集, NO.2-4-2, pp.935-936 (1991).
- (21) 高野, 富川, 青柳: "矩形振動子を用いた直線移動型超音波モータ", 音響学会平成4年度春季研究発表会講論集, NO.1-7-11, pp.803-804 (1991).

第3章 同形モード縮退型振動子を用いる回転型超音波モータ

3・1 緒言

同形モード縮退型振動子は、同形の共振モードを使用するため周波数調整が不要なこと、特に加圧や温度変化による共振周波数の変動が基本的に同一であるために超音波モータのステータとして好都合である。

円板や円環振動子の面垂直屈曲振動や面内屈曲振動は、かつてメカニカルフィルタやセラミックフィルタへの応用を目的として研究され、同形縮退モードの存在が知られていた。1982年指田によって提案された進行波型超音波モータは⁽¹⁾、円板の面垂直屈曲振動の同形縮退モードを利用する構成で実用的な超音波モータの発端となったものである。すでにモータ単体として市販され⁽²⁾、またカメラのオートフォーカス機構などに実用化されている⁽³⁾。一方、筆者は円板（円環）の非軸対称振動の同形縮退モードを利用した超音波モータを提案し、いくつかの構成、特性例を示した⁽⁴⁾。このモードを利用した構成は時を同じくして熊田によって発表されているが、当時使用モードや特性が明らかにされなかった⁽⁵⁾。非軸対称振動を利用する構成は⁽⁶⁾、ロータの構造に多少の複雑さを伴うが、円環の内周・外周面での橢円運動が利用できること、薄型化・小型化構造に適することなどを考慮すると、今後の超音波モータの応用分野や拡大の一端を担うものと考えられる⁽⁷⁾。

本章では、円板（円環）の同形モード縮退型振動子を用いた2種類の超音波モータの試作特性例を述べている。最初に超音波モータへの応用を目的として円環の非軸対称振動を解析している。比較的低次のモードについて電気機械結合係数の改善方法と、モータの動作原理に関わる変位の橢円運動を検討し、これを基にいくつかのモータを試作しその特性例を与えた⁽⁸⁾。

次に、円板の面直屈曲振動の同形縮退モードを利用する同相（単相）駆動型超音波モータを提案し、その特性例を示している。このモータは、いわゆる進行波型モータと全く同じモード使用しながら、2つのモードを定在波として利用することに特徴があり、同相駆動ながら入力端子の切り換えによって両方向

回転モータとして利用できる。動作原理，モード選択について検討を加え、いくつかの特性例を示している⁽⁹⁾。

3・2 円環の非軸対称振動を利用する超音波モータ

3・2・1 圧電セラミック円環の非軸対称振動

円板や円環の比較的低次の非軸対称振動の解析はすでに報告されているが^{(10)・(11)}、誘起電荷の分布や超音波モータの動作原理に関わる内周・外周面での変位の楕円運動については明かでない。ここでは、圧電セラミック円環振動子を超音波モータのステータとして応用する観点から、その非軸対称振動の変位分布や円環の内周・外周面での変位の楕円運動、並びに誘起電荷分布、電気機械結合係数について述べる⁽¹²⁾。

(a) 境界条件と周波数方程式

図3-1の圧電セラミック円環の非軸対称振動を考える。径方向と円周方向の変位 u_r, u_θ ，応力 $T_{rr}, T_{r\theta}$ は、各々式(3-1)～(3-4)で与えられる。

$$u_r = \frac{1}{h} \left[A \frac{\partial J_n(hr)}{\partial r} + B \frac{\partial Y_n(hr)}{\partial r} + \frac{n}{r} \{ C J_n(kr) + D Y_n(kr) \} \right] \cos(n\theta) e^{j\omega t} \quad (3-1)$$

$$u_\theta = -\frac{1}{h} \left[\frac{n}{r} \{ A J_n(hr) + B Y_n(hr) \} + C \frac{\partial J_n(kr)}{\partial r} + D \frac{\partial Y_n(kr)}{\partial r} \right] \sin(n\theta) e^{j\omega t} \quad (3-2)$$

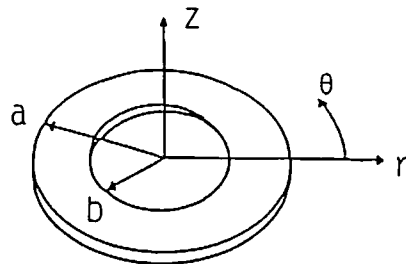


図3-1 円環振動子と座標系

$$T_{rr} = (\lambda' + 2\mu) \frac{\partial u_r}{\partial r} + \lambda' \frac{u_r}{r} + \frac{\lambda'}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \quad (3-3)$$

$$T_{r\theta} = \mu \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta}{r} \right) \quad (3-4)$$

ここで、

$$h^2 = \rho \omega^2 / (\lambda' + 2\mu)$$

$$k^2 = \rho \omega^2 / \mu \quad (3-5)$$

$$\lambda' + 2\mu = E / (1 - \sigma^2)$$

$$\mu = E / 2(1 + \sigma)$$

E : ヤング率, ρ : 密度, σ : ポアソン比,

2 a : 円環の外径, 2 b : 円環の内径 である。境界条件

$$T_{rr} \big|_{r=a} = T_{rr} \big|_{r=b} = 0 \quad (3-6)$$

$$T_{r\theta} \big|_{r=a} = T_{r\theta} \big|_{r=b} = 0 \quad (3-7)$$

を、式(3-1)～(3-4)に代入すると次式が導かれる。

$$\begin{bmatrix} H_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} = 0 \quad (3-8)$$

ここで、マトリクスの各要素は

$$\begin{aligned} H_{11} &= [(ka)^2/2 - n(n+1)]J_n(ha) + ha J_{n-1}(ha) \\ H_{12} &= [(ka)^2/2 - n(n+1)]Y_n(ha) + ha Y_{n-1}(ha) \\ H_{13} &= n(n+1)J_n(ka) - nka J_{n-1}(ka) \\ H_{14} &= n(n+1)K_n(ka) - nka K_{n-1}(ka) \\ H_{21} &= [(kb)^2/2 - n(n+1)]J_n(hb) + hb J_{n-1}(hb) \\ H_{22} &= [(kb)^2/2 - n(n+1)]Y_n(hb) + hb Y_{n-1}(hb) \\ H_{23} &= n(n+1)J_n(kb) - nkb J_{n-1}(kb) \\ H_{24} &= n(n+1)Y_n(kb) - nkb Y_{n-1}(kb) \\ H_{31} &= nha J_{n-1}(ha) - n(n+1)J_n(ha) \\ H_{32} &= nha Y_{n-1}(ha) - n(n+1)Y_n(ha) \end{aligned} \quad (3-9)$$

$$H_{33} = -k a J_{n-1}(k a) + [n(n+1) - (k a)^2/2] J_n(k a)$$

$$H_{34} = -k a Y_{n-1}(k a) + [n(n+1) - (k a)^2/2] Y_n(k a)$$

$$H_{41} = n h b J_{n-1}(h b) - n(n+1) J_n(n b)$$

$$H_{42} = n h b Y_{n-1}(h b) - n(n+1) Y_n(n b)$$

$$H_{43} = -k b J_{n-1}(k b) + [n(n+1) - (k b)^2/2] J_n(k b)$$

$$H_{44} = -k b Y_{n-1}(k b) + [n(n+1) - (k b)^2/2] Y_n(k b)$$

である。周波数方程式

$$\det[H_{ij}] = 0 \quad (3-10)$$

より円環の周波数定数 $h a$ が求められる。従って、共振周波数は次式で与えられる。

$$f_r = \frac{\alpha_{n,m}}{2\pi a} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\sigma^2)}} \quad , \quad \alpha_{n,m} = h a \quad (3-11)$$

ここで、添字 n と m は各振動モードの円周次数（振動モードの対称軸に対応）と高調波次数に対応し、各振動モードを $((n, m))$ で表す。

各モードに対応する周波数定数 $\alpha_{n,m}$ の計算値を表 3-1 に示す（材料定数は圧電セラミック NEPEC-6, $E = 7.874 \times 10^{11}$ [dyne/cm²], $\rho = 7.73$ [g/cm³], $\sigma = 0.32$ を使用）。実験に使用した直径 $2a = 40$ (mm) の圧電セラミック円環の共振周波数を図 3-2 に示している。これより b/a を大きくなると $((2, 1))$ と $((3, 1))$ の共振周波数が急激に低下することがわかる⁽¹³⁾。

表 3-1 円環振動子の周波数定数 ($\sigma = 0.32$)

(a) $((1, m))$ モードの場合

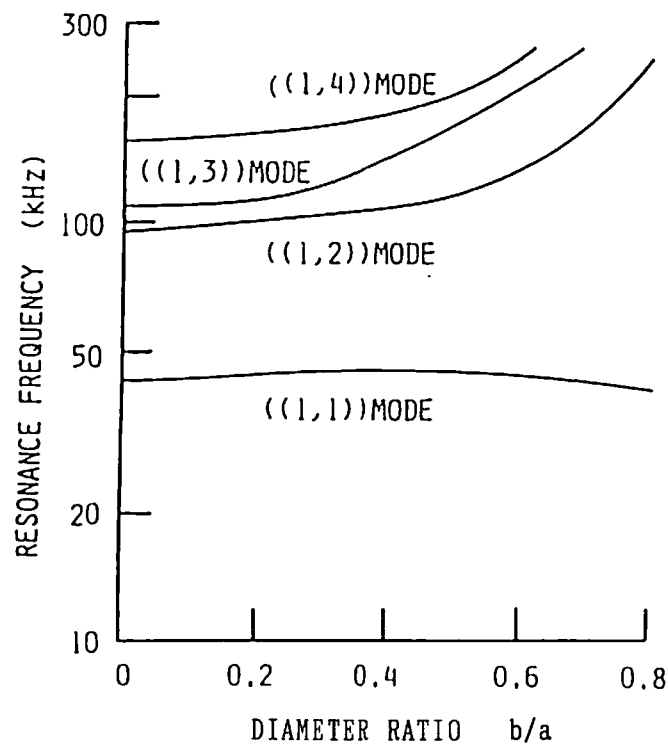
b/a	$((1, 1))$	$((1, 2))$	$((1, 3))$
0.0	1.60237	3.52371	4.00057
0.1	1.61250	3.63698	4.02742
0.2	1.63678	3.83840	4.15371
0.3	1.66146	3.89973	4.58054
0.4	1.67000	3.99918	5.28005
0.5	1.65137	4.32260	6.30395
0.6	1.60962	5.02162	7.86298
0.7	1.54602	6.38887	
0.8	1.47781	9.32314	
0.9	1.40810		

(b) ((2,m)) モードの場合

b/a	((2,1))	((2,2))	((2,3))
0.0	1.36793	2.48912	4.48389
0.1	1.28745	2.43701	4.06721
0.2	1.09733	2.37810	3.99437
0.3	0.89519	2.38707	4.37423
0.4	0.71509	2.42674	5.04821
0.5	0.55671	2.45893	5.15445
0.6	0.41642	2.45462	5.61082
0.7	0.29563	2.40512	6.77548
0.8	0.20930	2.32267	9.55044
0.9	0.17118	2.22356	

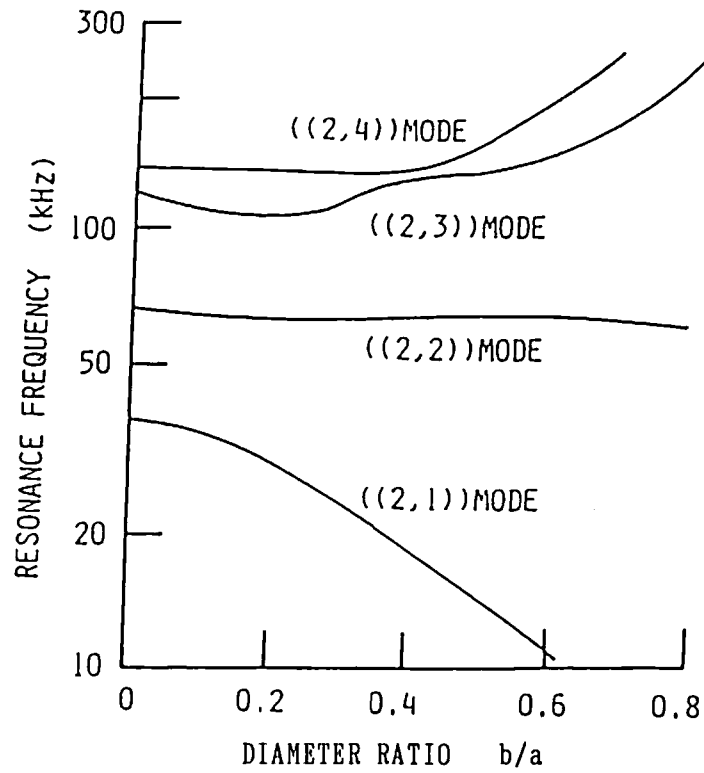
(c) ((3,m)) モードの場合

b/a	((3,1))	((3,2))	((3,3))
0.0	2.10112	3.41984	5.29527
0.1	2.09724	3.41576	5.22225
0.2	2.04317	3.36615	4.73208
0.3	1.86707	3.29431	4.64949
0.4	1.60121	3.30905	5.08874
0.5	1.31598	3.36790	5.96545
0.6	1.03330	3.40235	6.42091
0.7	0.75176	3.37076	7.35023
0.8		3.27507	9.91019
0.9		3.14281	

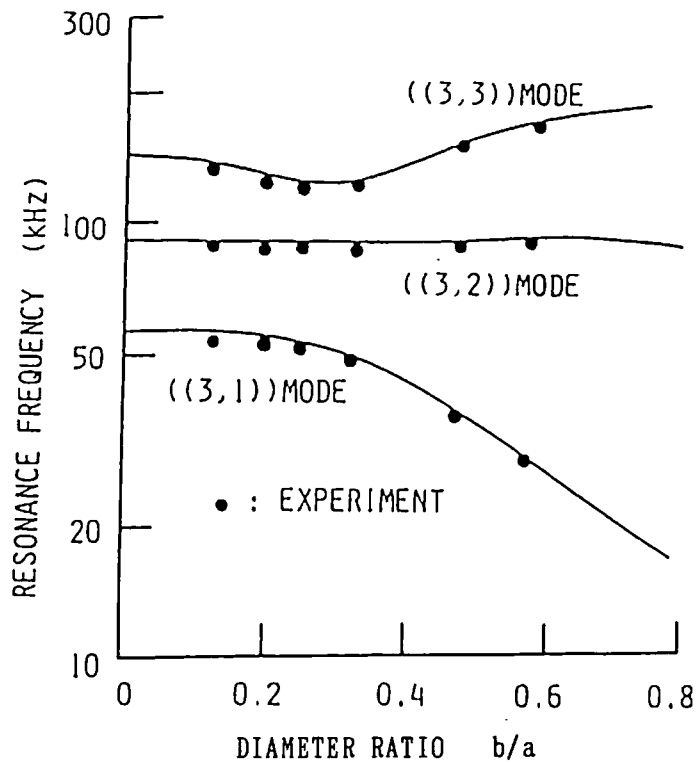


(a) ((1,m)) モードの場合

図 3 - 2 円環振動子 ($2a=40.0$ mm) の共振周波数
 ($E=7.874 \times 10^{12}$ dyne/cm², $\rho=7.73$ g/cm³, $\sigma=0.32$)



(b) $((2,m))$ モードの場合



(c) $((3,m))$ モードの場合

図 3-2 円環振動子 ($2a=40.0$ mm) の共振周波数
($E=7.874 \times 10^{12}$ dyne/cm², $\rho=7.73$ g/cm³, $\sigma=0.32$)

(b) 変位と変位の楕円運動

式(3-10)より求めた $\alpha_{n,m}$ を式(3-9) に代入すると

$$-\frac{1}{A} \begin{bmatrix} B \\ C \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{22} & H_{23} & H_{24} \\ H_{32} & H_{33} & H_{34} \\ H_{42} & H_{43} & H_{44} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} H_{21} \\ H_{31} \\ H_{41} \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

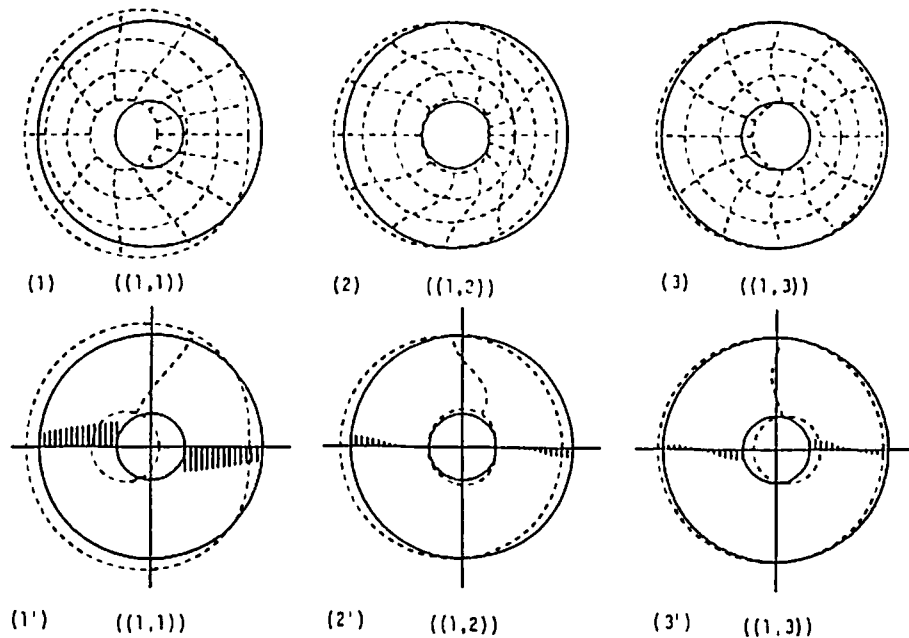
が得られる。これより係数の比 B/A , C/A , D/A が定まる。また変位の規準化は式(3-13), (3-14)で行われる。

$$\int \rho \Xi^2 dV = M \quad (3-13)$$

$$\Xi = i u_r + j u_\theta \quad (3-14)$$

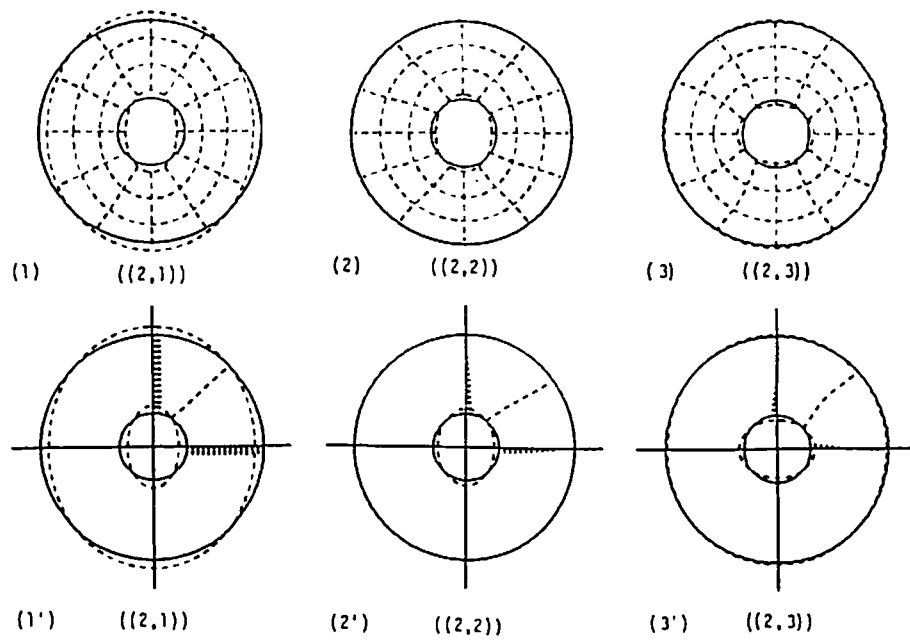
ここで、 M は円環の全質量、 i , j は径および円周方向の単位ベクトルである。係数 A は式(3-13), (3-14)に式(3-1), (3-2)を代入することにより求められる。

図3-3に、 $b/a=0.3$ の場合の $((n,m))$ モード ($n,m=1\sim 3$) のモード図を示している。各図で、プライムを付けて表した図は振動の対称軸上での変位の大きさを線分の長さで図示的に表したものである。例えば、 $((1,1))$ モードでは対称軸上では内周面と外周面は同じ方向に変位し、対称軸と直交する軸上に節点が存在することが分かる。

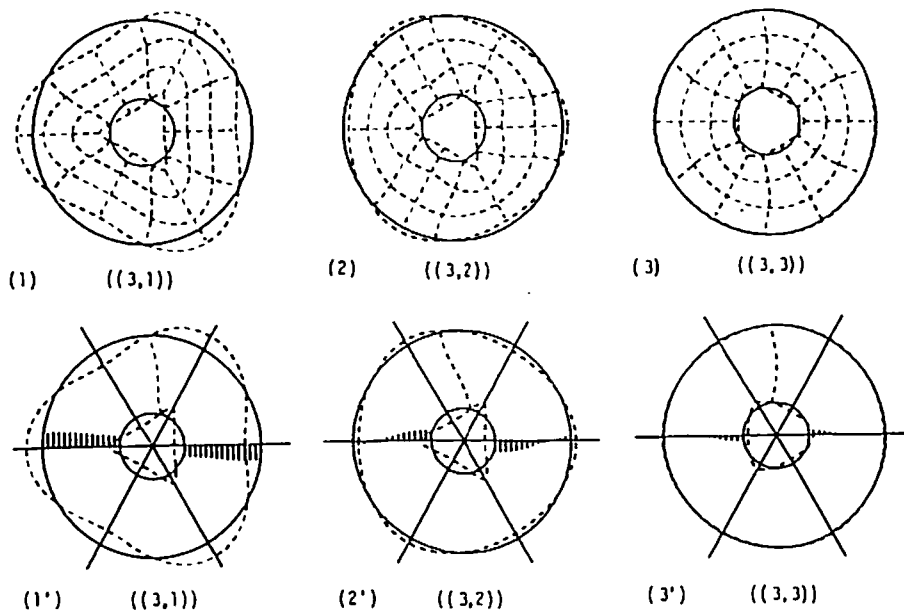


(a) $((1,m))$ モードの場合

図3-3 非軸対称振動の振動モード ($b/a=0.3$)



(b) $((2, m))$ モードの場合



(c) $((3, m))$ モードの場合

図 3 - 3 非軸対称振動の振動モード ($b/a=0.3$)

次に変位の楕円運動について考察する。図3-4に示す同形縮退((1,1))モードを90°位相の異なる入力($\sin \omega t, \cos \omega t$)で駆動すると、円環の内周、外周面での変位 $\overline{s}_1, \overline{s}_2$ はそれぞれ次式のように表される。

$$\begin{aligned}\overline{s}_1 &= \overline{a}_1 \sin \omega t + \overline{b}_1 \cos \omega t \\ \overline{s}_2 &= \overline{a}_2 \sin \omega t + \overline{b}_2 \cos \omega t\end{aligned}\quad (3-15)$$

ここで、 $\overline{a}_1$ と $\overline{b}_1$ は内周面の点 P_1 での変位、 $\overline{a}_2$ と $\overline{b}_2$ は外周面での点 P_2 での変位である。従って、変位の楕円運動は内周あるいは外周上で作られ、 θ 方向に回転することが分かる。

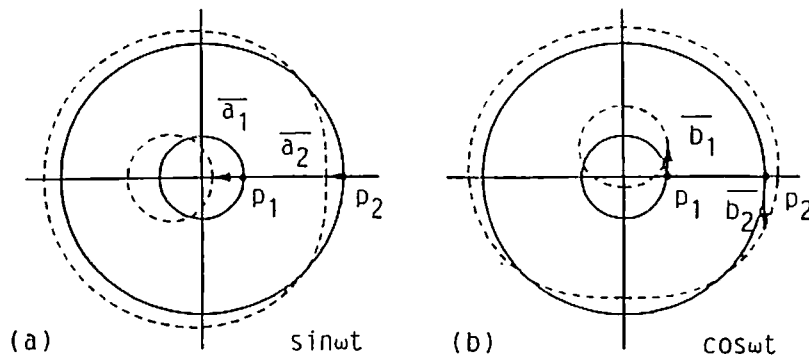


図3-4 縮退する非軸対称振動((1,1))モード

図3-5に縮退する非軸対称振動を2相駆動した場合に、円環の内周・外周面での形成される変位の楕円運動の様子を示している。この図で紙面上の水平方向が径方向の、上下方向が円周方向の変位を表している。例えば同図で(I)は内周部の楕円運動を表し、径方向の変位が円周方向の変位より大きいことを示している。楕円運動の回転成分 U_θ の大きいモードを使用して回転力を取り出す構造が有利と考えられるから、この表現を用いると使用モードや内周・外周面の選択が容易になる。

図3-6に円環の内径対外径比(b/a)を変えたときの、各モードの楕円運動の形状を示している。同図で(a)~(c)は((1,m))モード、(d)~(f)は

$((2,m))$ モード、 $(g) \sim (i)$ は $((3,m))$ モードの楕円運動を表している。ただし、変位の規準化を行っているので、あるモードの内周・外周面での比較できても各モード間の楕円運動の大きさの比較は出来ない。例えば、 $((1,1))$ モードは $b/a=0.5$ 近傍で内周面（図3-6(a) A点参照）で θ 方向の成分が小さいので、内周面の利用は好ましくないことが分かる。これは実験的にも容易に検証できる。

以上の結果から、円環の非軸対称振動を超音波モータのステータとして利用する場合次のようなことが言える。

(1): 内周面の楕円運動から駆動力を取り出すのに適しているモード

$((1,1))$, $((1,2))$, $((1,3))$, $((2,1))$,
 $((2,3))$, $((3,1))$, $((3,3))$

(2): 外周面の楕円運動から駆動力を取り出すのに適しているモード

$((1,1))$, $((2,2))$, $((3,2))$

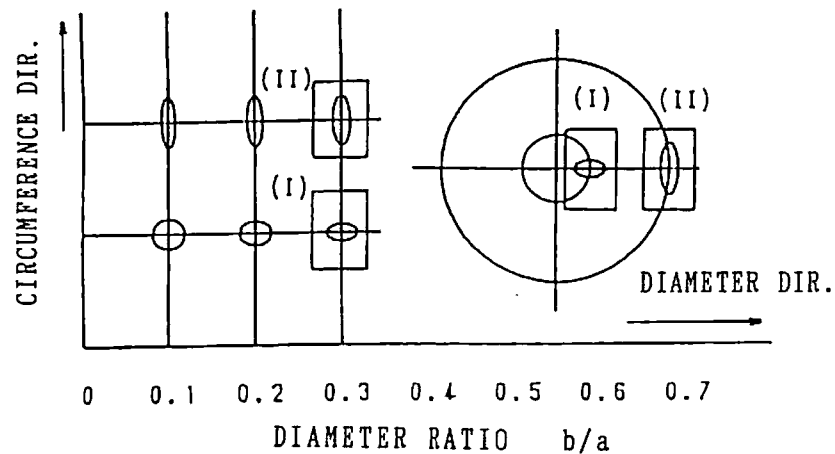
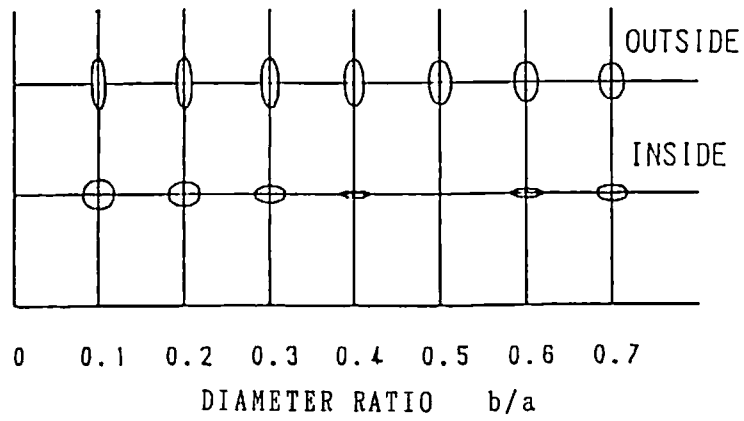
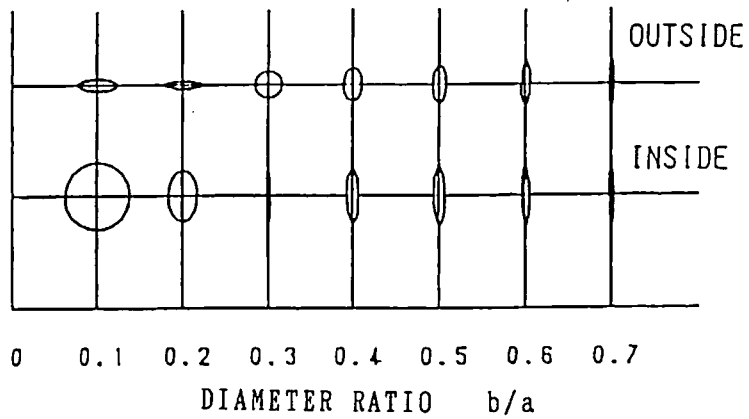


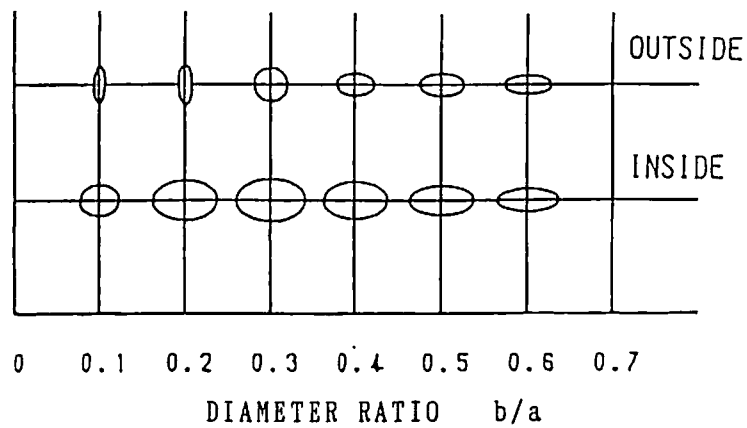
図3-5 内周面と外周面での変位の楕円運動の表し方



(a) ((1,1)) モードの場合

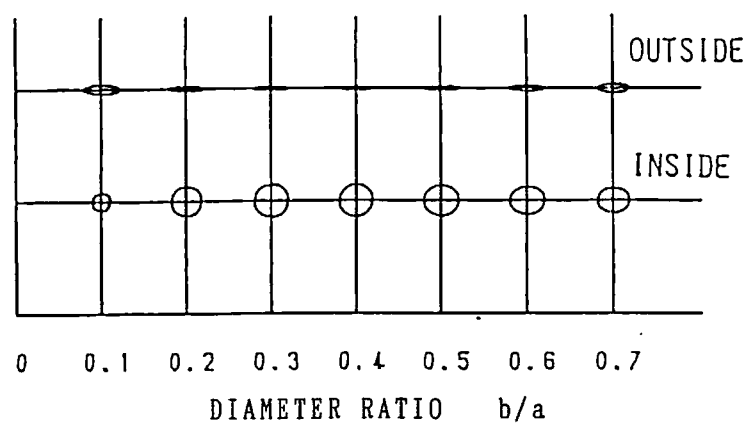


(b) ((1,2)) モードの場合

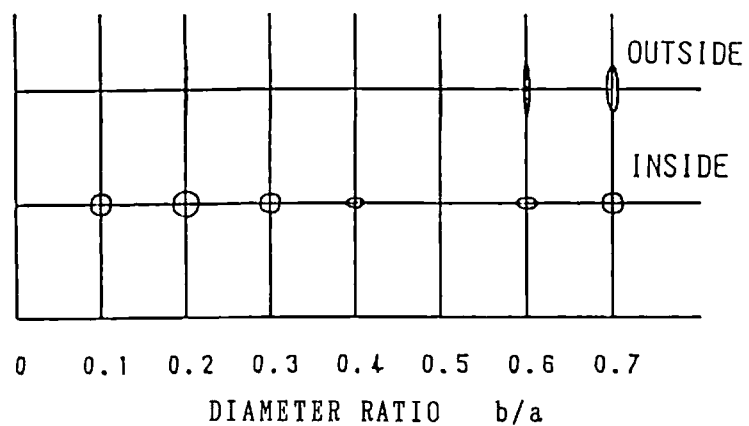


(c) ((1,3)) モードの場合

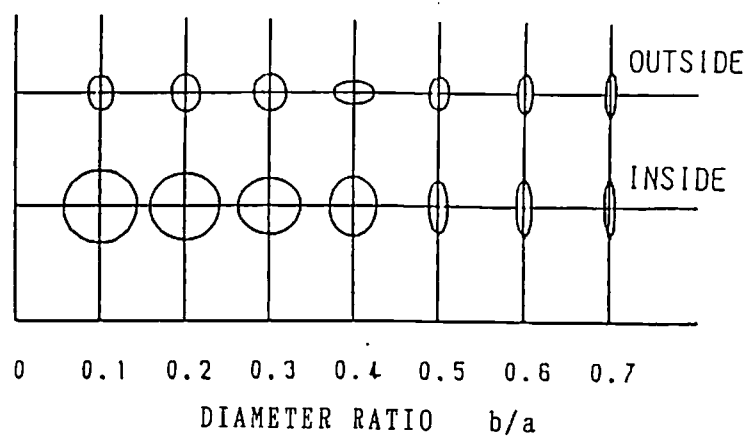
図 3 - 6 内径対外径比に対する楕円運動の変化



(d) ((2,1)) モードの場合



(e) ((2,2)) モードの場合



(f) ((2,3)) モードの場合

図 3-6 内径対外径比に対する楕円運動の変化

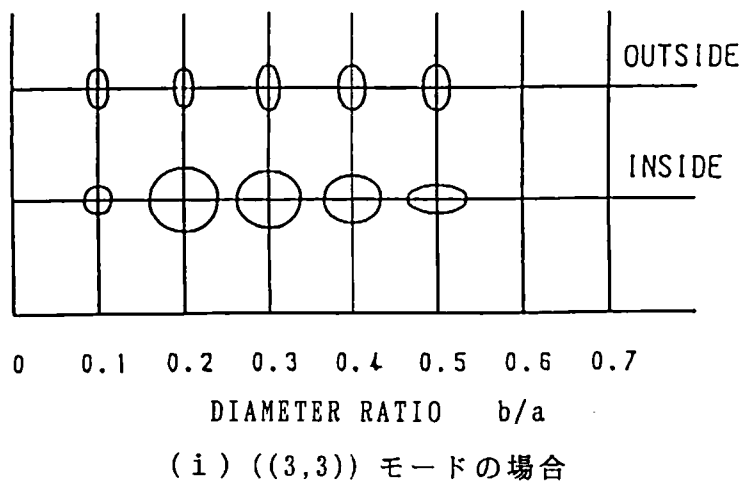
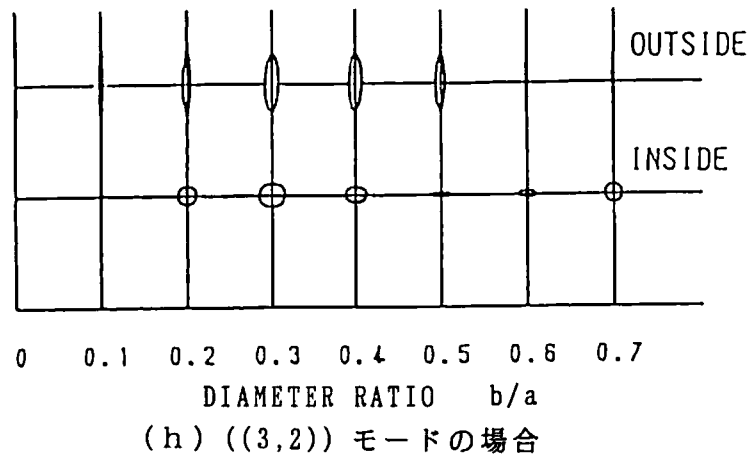
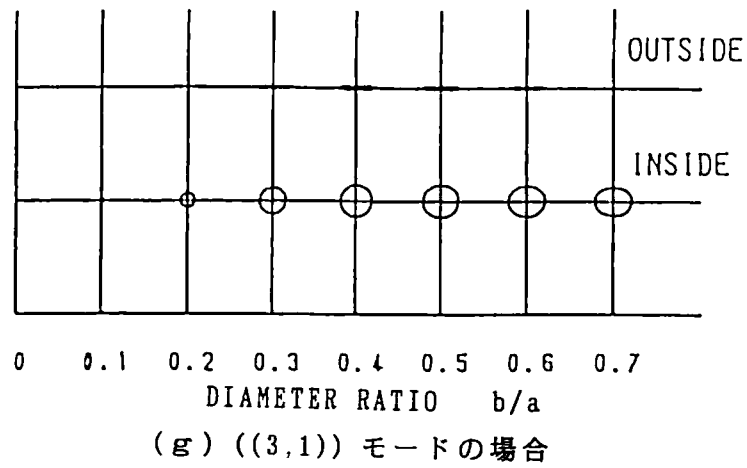


図 3 - 6 内径対外径比に対する楕円運動の変化

(c) 誘起電荷と電気機械結合係数

厚み方向に分極された圧電セラミック円環振動子の誘起電荷は、次式により与えられる。

$$D_z = -2d_{31}(\lambda' + \mu)h[AJ_n(hr) + BY_n(hr)]\cos(n\theta) \quad (3-16)$$

ここで d_{31} は圧電定数である。周波数定数を上式に代入することによって、誘起電荷の分布を求めることができる。各モードの $b/a = 0.2, 0.4, 0.6$ の場合の径方向の誘起電荷の計算値を図3-7に示している。ただし、ここでは最大値が1になるよう規準化し図示した。非軸対称振動を励振するためには、振動の非対称性を考慮して円周方向に電極を分割する必要があるが、図3-7は効果的な励振のためには、径方向に対しても誘起電荷の符号に対応した分割電極、あるいは分割分極が必要であることを示している。

次に、電気機械結合係数を求める。振動子の持つ運動エネルギー T_k ，速度 v は次式で表される。

$$u = \sqrt{u_r^2 + u_\theta^2} e^{j\omega t} \quad (3-17)$$

$$v = \frac{\partial u}{\partial t} = j\omega \sqrt{u_r^2 + u_\theta^2} e^{j\omega t} \quad (3-18)$$

$$T_k = \iiint \frac{\rho v^2}{2} dV \quad (3-19)$$

$$= (-1/2)\rho\omega^2 d e^{j\omega t} \int_0^{2\pi} \int_b^a (u_r^2 + u_\theta^2) r dr d\theta \quad (3-20)$$

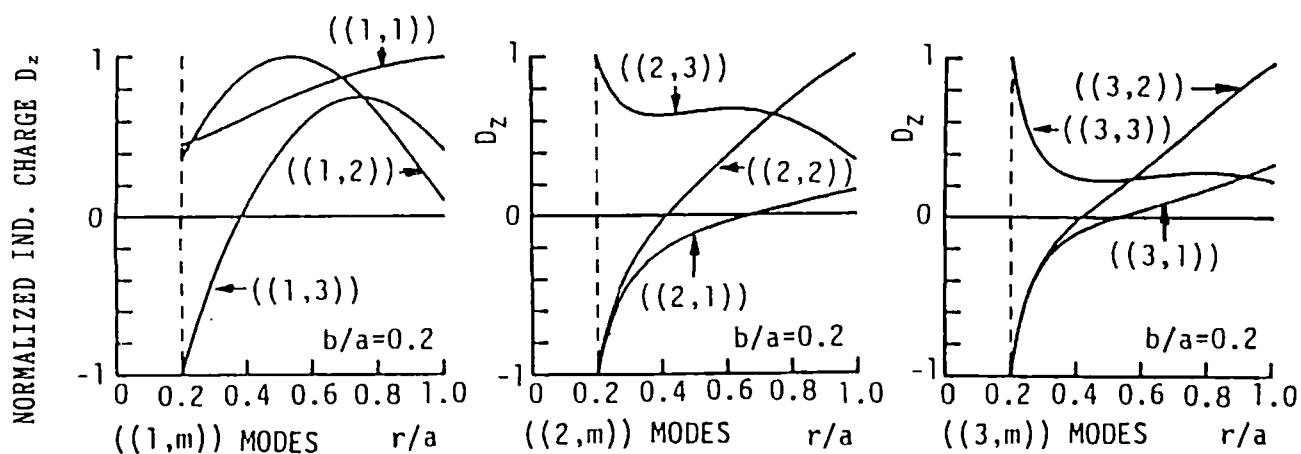
ここで、 d は振動子の厚さである。一方、変位電流 I は誘起電荷より求められる。

$$I = \int_0^{2\pi} \int_b^a \left(\frac{\partial D_z}{\partial t} \right) r dr d\theta \quad (3-21)$$

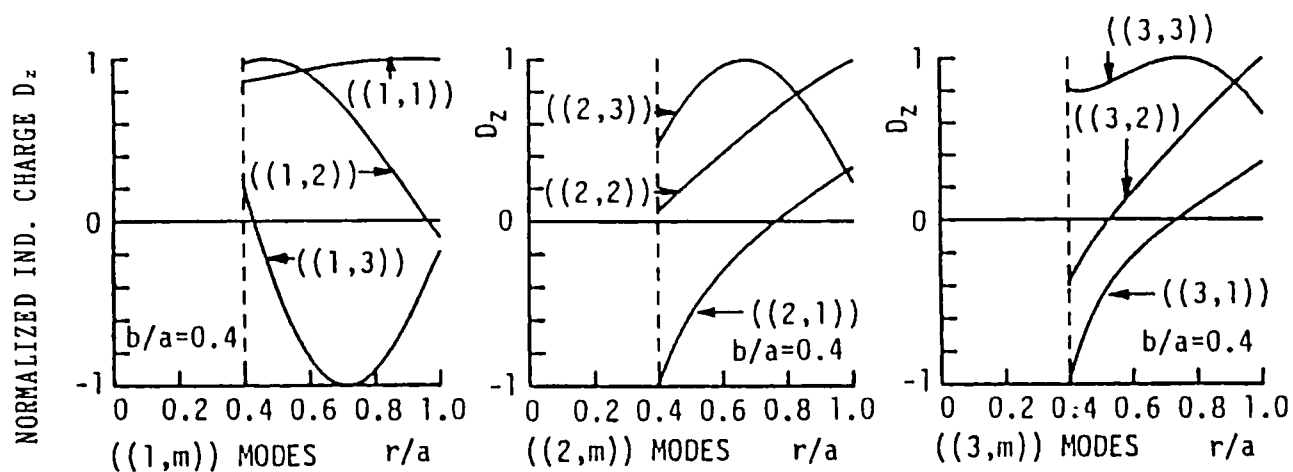
電荷が相殺されない電極配置とすると、上式は

$$I = j\omega e^{j\omega t} \int_0^{2\pi} \int_b^a |D_z| r dr d\theta \quad (3-22)$$

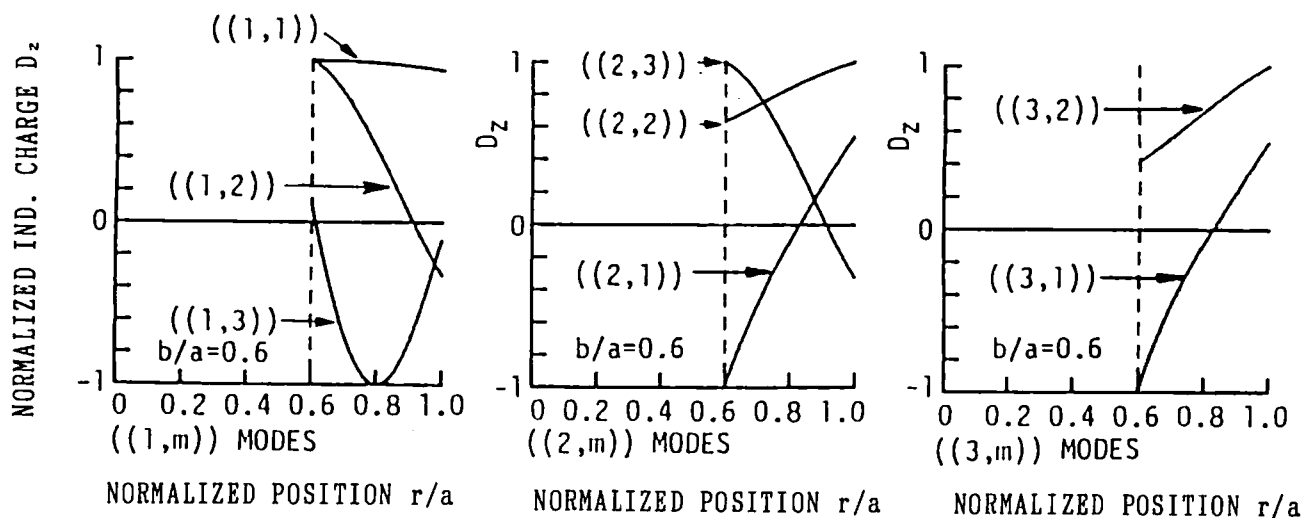
のように表現される。



(a) $b/a = 0.2$ の場合



(b) $b/a = 0.4$ の場合



(c) $b/a = 0.6$ の場合

図 3-7 内径対外径比に対する誘起電荷分布

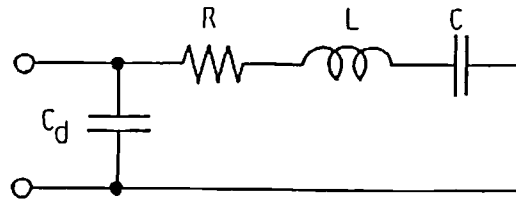


図 3 - 8 振動子の等価回路

図 3 - 8 に示す振動子の等価回路のインダクタンス L が持つ電気エネルギー T_E は

$$T_E = L I^2 / 2$$

$$= (-1/2) L \omega^2 e^{j\omega t} \left[\int_0^{2\pi} \int_b^a |D_z| r dr d\theta \right]^2 \quad (3-23)$$

で与えられるから、振動子の持つ運動エネルギーと電気エネルギーが等しいと置くと、等価回路中のインダクタンス L が求められ

$$L = \frac{\rho d \left[\int_0^{2\pi} \int_b^a (u_r + u_\theta) r dr d\theta \right]}{\left[\int_0^{2\pi} \int_b^a |D_z| r dr d\theta \right]^2} \quad (3-24)$$

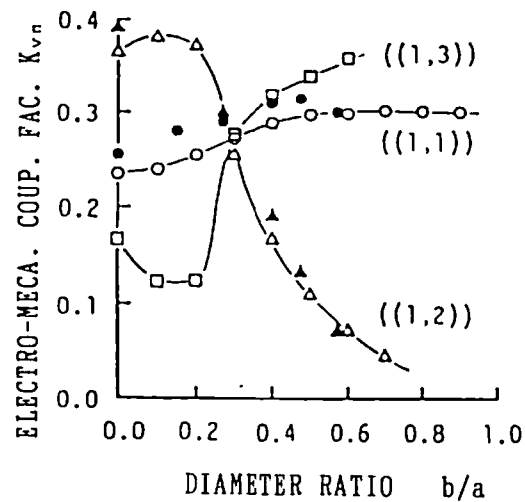
となる。等価容量 C 、制動容量 C_d は次式で与えられる。

$$C = \frac{1}{\omega_r^2 L} \quad C_d = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r \pi (a^2 - b^2)}{d} \quad (3-25)$$

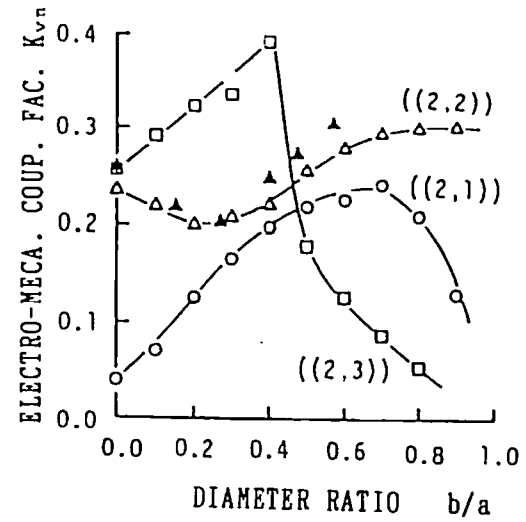
ここで、 ϵ_r は圧電セラミックスの比誘電率である。これらより振動子の容量比 $\gamma = C_d / C$ を求めることができ、電気機械結合係数 k_v は近似的に次式で計算される。

$$k_{vn}^2 \doteq 1/\gamma = C/C_d, \quad k_{vn} \doteq \sqrt{C/C_d} \quad (3-26)$$

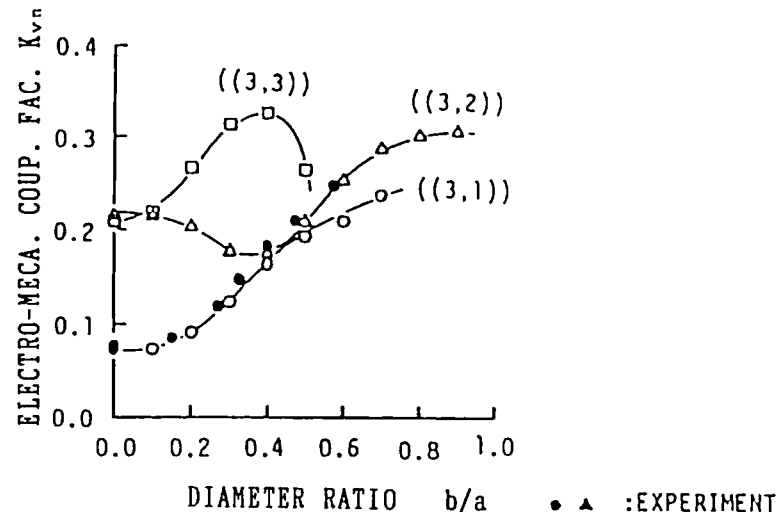
電気機械結合係数の計算値を図 3 - 9 に示している。いくつか実測値も示しているが両者はよく一致している。



(a) $((1,m))$ モードの場合



(b) $((2,m))$ モードの場合



(c) $((3,m))$ モードの場合

図 3 - 9 内径対外径比に対する電気機械結合係数

以上の結果から次のようなことが明らかになった。

- (1) $((1,1)), ((1,3))$ モードでは、内径対外径比 b/a が大きくなるにつれて k_{vn} が大きくなり、電氣的励振に対して好ましい。
- (2) $((2,1)), ((2,2))$ モードについても上記(1)のモードと同じ傾向を示す。
特に、 $((2,1))$ モードでは b/a が大きくなるにつれ共振周波数が低下することから、低周波で小型モータが実現できる。
- (3) $((3,1))$ モードについても $((2,1))$ と同じ傾向を持つ。

(d) 各モードの特徴⁽¹⁴⁾

以上の考察から、次のような点に重点を置いて、非軸対称振動の円環振動子を2相駆動の超音波モータのステータとして使用する場合の総合評価を行った。

- (1) 共振周波数が比較的低いこと
- (2) 変位の楕円運動の形状が駆動力の取り出しに適すること
- (3) 電気機械結合係数が大きいこと
- (4) 電極構造が単純であること

これらの点を考慮して、比較的共振周波数の低いモードを整理すると表3-2のようになる。ここで、共振周波数と結合係数は $2a=40.0(\text{mm})$, $b/a=0.3$ の値を示している。次節では、 $((1,1))$, $((2,1))$ モードを用いた回転型超音波モータの特性例について述べる。

表3-2 ステータとしての円環振動子の評価
(a) 内周面利用の場合

MODE	$f_r[\text{kHz}]$	DIVIDED ELECTRODES	ELLIPTIC MOTION	COUPLING FACTOR	EVALUATION
$((1,1))$	45	NON	O	0.27	##
$((1,2))$	105	NON	X	0.26	
$((2,1))$	24	NECESSARY	O	0.17	##
$((2,2))$	64	NON	O	0.21	#

(b) 外周面利用の場合

MODE	$f_r[\text{kHz}]$	DIVIDED ELECTRODES	ELLIPTIC MOTION	COUPLING FACTOR	EVALUATION
$((1,1))$	45	NON	O	0.27	##
$((1,2))$	105	NON	O	0.26	#
$((2,1))$	24	NECESSARY	X	0.17	
$((2,2))$	64	NON	X	0.21	

3・2・2 試作超音波モータの特性

(a) 構造と特性（内周面を利用する構成）

第2章で述べたように単相駆動，2相駆動のいずれによっても超音波モータを構成できるが，ここでは((1,1))モードの内周面を利用する2相駆動モータの試作特性例を述べる。

内周面を利用する構成として図3-10，図3-13のモータを試作した。図3-10(a)の構成はステータの内周面がテーパ状になり，同じテーパを持つロータが円環の内周面に加圧挿入される。ステータにあたる振動子とロータの寸法を同図(b)に示している。振動子の内周面には0.5(mm²)程度の摩擦材を添付し，((1,1))モードを使用しているので電極を図示のように分割して2相駆動している。ロータは真鍮製で，図のように4箇所に溝を設けることによってより安定な回転を得ることができた。構造全体を図3-11に示している。特性を図3-12に示すが，最大効率約10(%)，最大トルク約0.7(kgf-cm)であった。特性は，ロータ構造や振動子の支持方法の工夫することによって，ある程度改善されるだろうが，回転力を取り出す位置（半径）が小さいこと，ステータとロータの接触機構がステータの持つ駆動力を有効に取り出し得る構造となってい

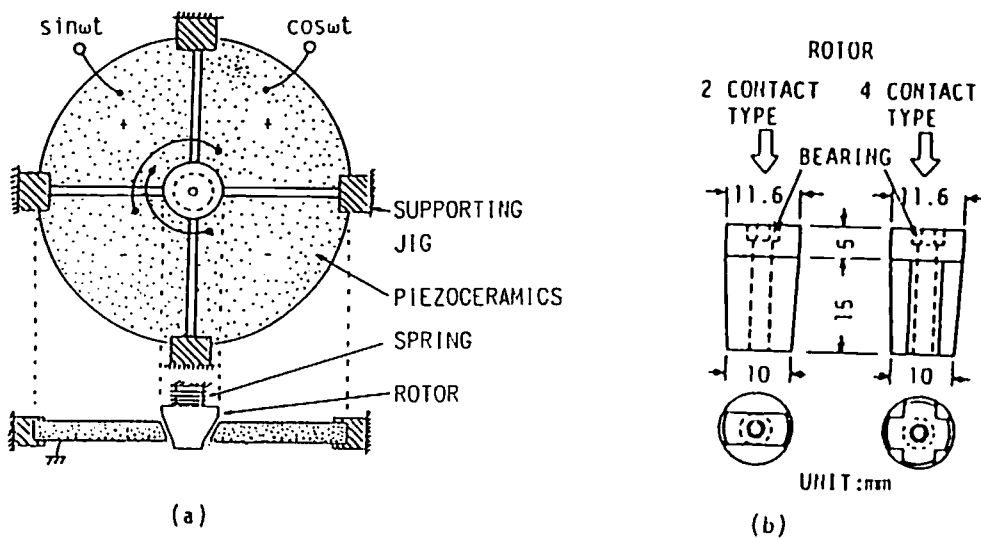


図3-10 ((1,1))モードを利用する超音波モータ
(押し込み型)

ないことなどを考え合わせると、この構成はそれ程の高効率、高トルクのモータは期待できない。むしろ薄型構造、高速回転を生かしたモータとして捉えるべきであろう。

図 3 - 11 ((1,1))モードを利用する超音波モータ

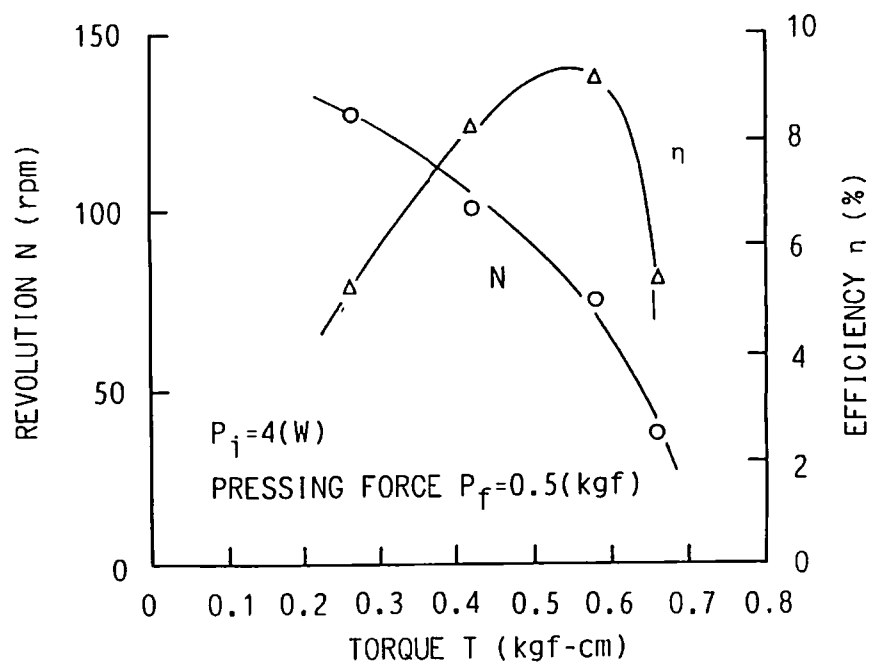


図 3 - 12 図 3 - 10に示す超音波モータの特性

図3-13は、ロータの一点をステータの内周面に加圧接触しただけの構造で、回転シャフトがベアリングを介してケースに固定され、板バネによってステータがロータを押しつける構造となっている。構造が簡単であること、振動子と同程度の厚さに構成できることに特徴があるが、反面一点接触のために接触点の摩耗や効率、トルク面での低下は避けられない。 $((1,1))$ モードを用いた特性を図3-14に示している。最大トルク $0.14(\text{kgf}\cdot\text{cm})$ 、最大効率 $5(\%)$ 程度で、安定に回転するが前述のモータより特性は大幅に低下する。ステータは、外径 $2a=40.0(\text{mm})$ 、内径 $2b=12.0(\text{mm})$ 、厚さ $t=2.0(\text{mm})$ のセラミクス単体で、共振周波数は $f \doteq 43(\text{kHz})$ である。

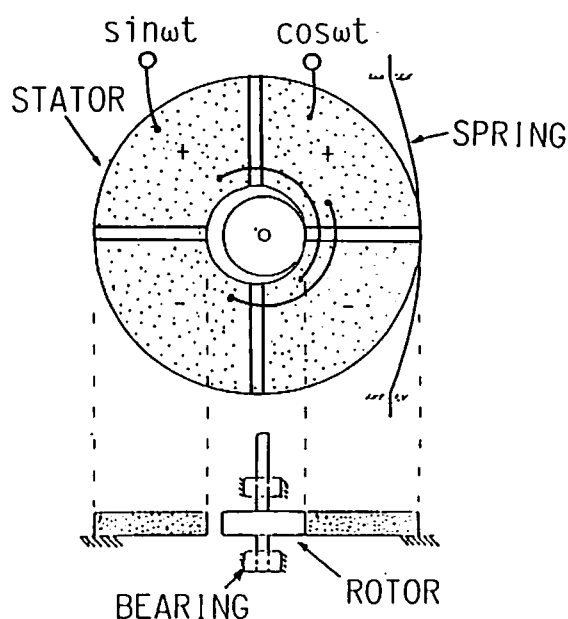
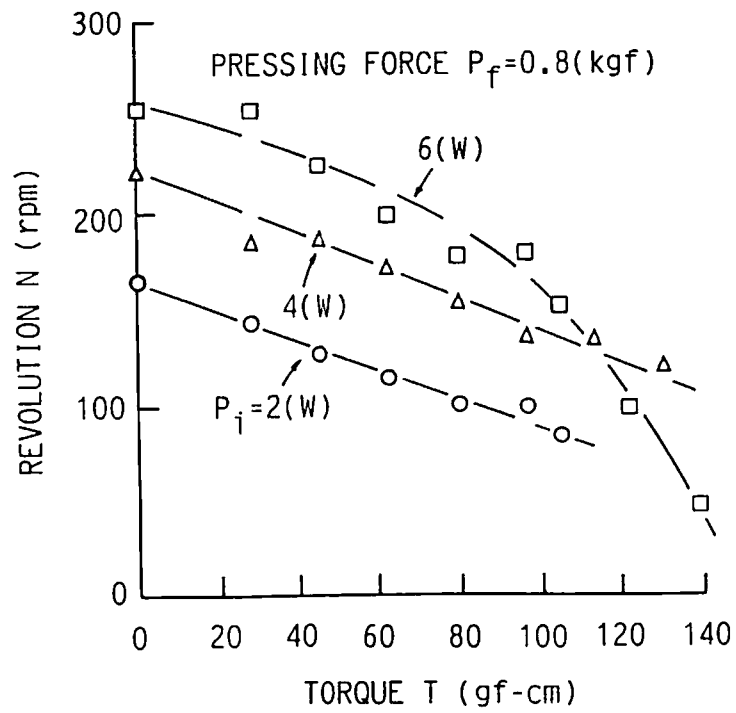
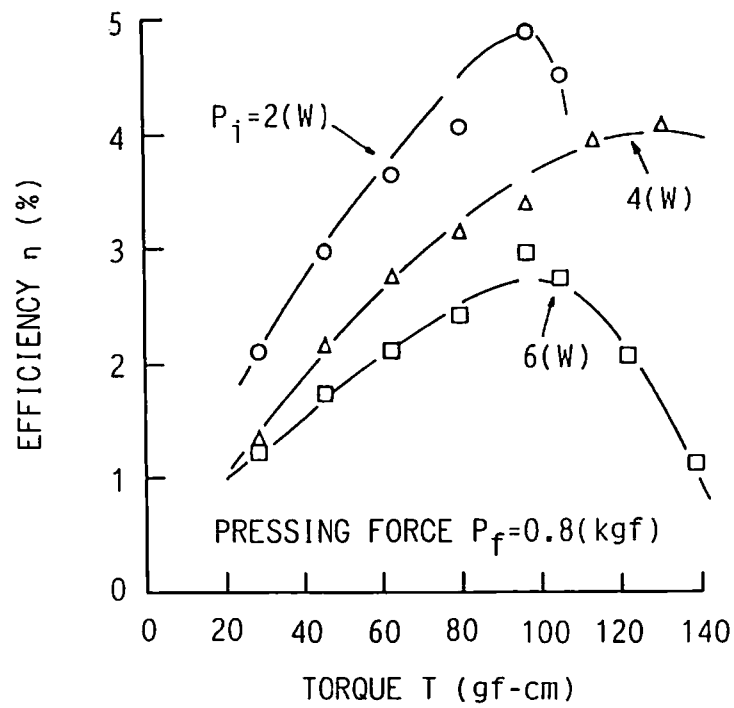


図3-13 $((1,1))$ モードを利用する超音波モータ
(押し付け型)



(a) トルクー回転数特性



(b) トルクー効率特性

図 3-14 図 3-13 に示す超音波モータの特性

(b) 構造と特性（外周面を利用する構成）

3・2節で述べたように、円環の外周面で形成される橢円運動を利用することによっても超音波モータが構成できる。図3-15にステータを、図3-16に試作したモータの構造図を示している。ステータは外径40.0(mm)、内径16.0(mm)、厚さ1.5(mm)のステンレス円環を基板に、外径35.0(mm)、内径23.0(mm)、厚さ1.0(mm)の、円環状の圧電セラミクスを接着したバイモルフ振動子を用いた。その周辺部は変位拡大も兼ねて図のように櫛歯形状になっている。共振周波数は58(kHz)である。ロータは基本的には図3-16中の(B)に示す真鍮製の一部を切り欠いたリングである。これがスプリング(C)によってステータの外周部に加圧される。このスプリングがデルリン製のケース(A)に固定されているので、(A),(B),(C)全体が回転することになる。支持はステータ(D)の内周部で行われる⁽¹⁵⁾。

特性を図3-17、図3-18に示している。図3-17は、入力電圧を $V_{P-P} = 160(V)$ 一定にした時の周波数に対する回転数の測定例である。共振周波数近傍を境にして、それ以下の周波数では回転数は急激に低下し停止する。それ以上の周波数では回転数は徐々に低下する。他の構成の超音波モータも同様の特性を持っており、回転数が最大になる付近では動作は不安定で、それより若干高い周波数では、回転数は下がるが安定に動作する。図3-18は負荷特性であり、最大効率13(%), 最大トルク0.5(kgf-cm)であった。加圧力を増せばより大きいトルクが得られると思われるが、前述の内周面利用と同様、より効果的な加圧機構を見いだすこと、トルクが大きくなった場合に振動子の支持が特性改善の重要なポイントとなろう。

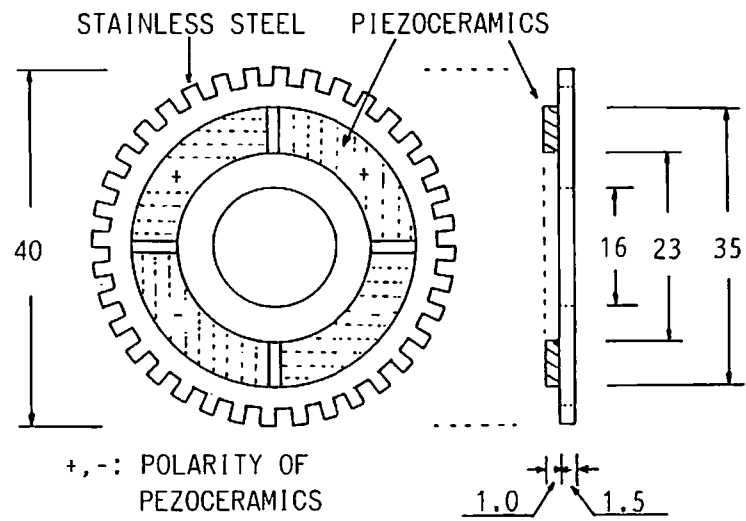


図 3 - 15 外周面利用超音波モータのステータ振動子

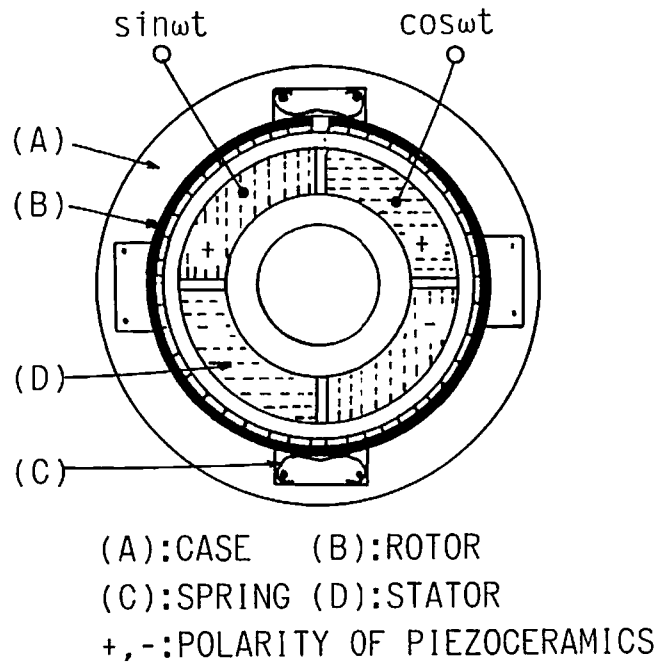


図 3 - 16 ((1,1))モードを利用する超音波モータの構造
(外周面利用)

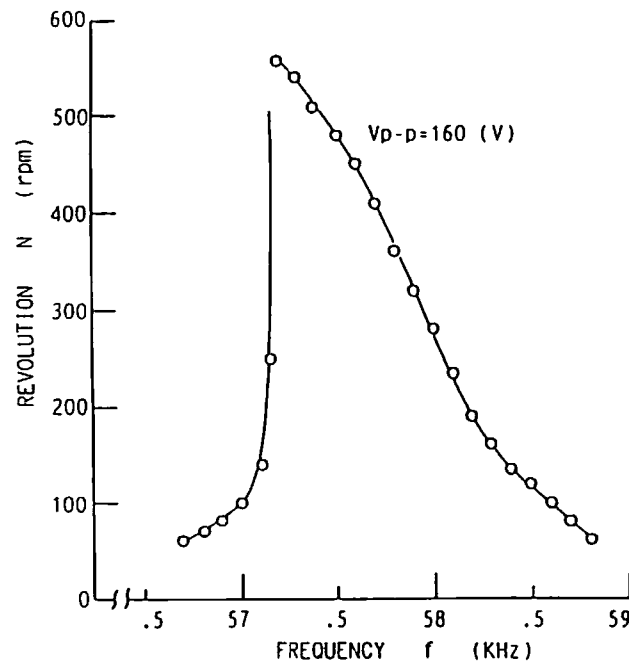


図 3 - 17 図 3 - 16に示す超音波モータの特性
(周波数-回転数特性)

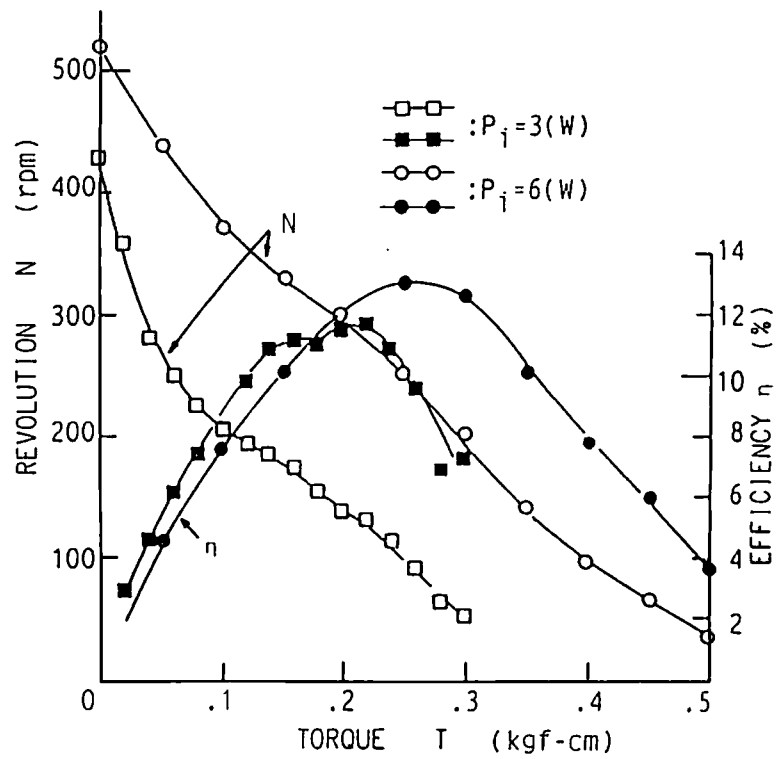


図 3 - 18 図 3 - 16に示す超音波モータの特性

3・2・3 振動子の小型化への対策

(a) 円環の内径対外径比に対する((2,1)), ((3,1))

モードの共振周波数

表3-1に示したように((2,1)), ((3,1))モードの周波数定数は、円環の内径対外径比(b/a)が大きくなるにつれて急激に小さくなる。すなわち、外径が一定ならば両モードの共振周波数は、計算の一例(NEPEC-6, $2a=40.0\text{mm}$)を図3-19に示すように、 b/a が大きくなるにつれ低下する。これらのモードを用いると低周波で小型のモータが構成できる。また、図3-20, 図3-21に((2,1)), ((3,1))モードの b/a に対する電気機械結合係数と変位の楕円運動の様子を示している。両モード共 $b/a=0.5$ 近傍で電気機械結合係数が最大になり、内周部の楕円運動もステータとして利用するのに好ましい形状となっている。図3-7に示すように、径方向の誘起電荷の符号を考慮する必要があるので、電極構造あるいは分極が複雑になるが、電気機械結合係数は20(%)程度になり((1,1))モードと対比し得る値となる。以上を考え合わせると、 b/a が0.3~0.6で、内周部から駆動力を取り出す構造が実用的な構成になる。

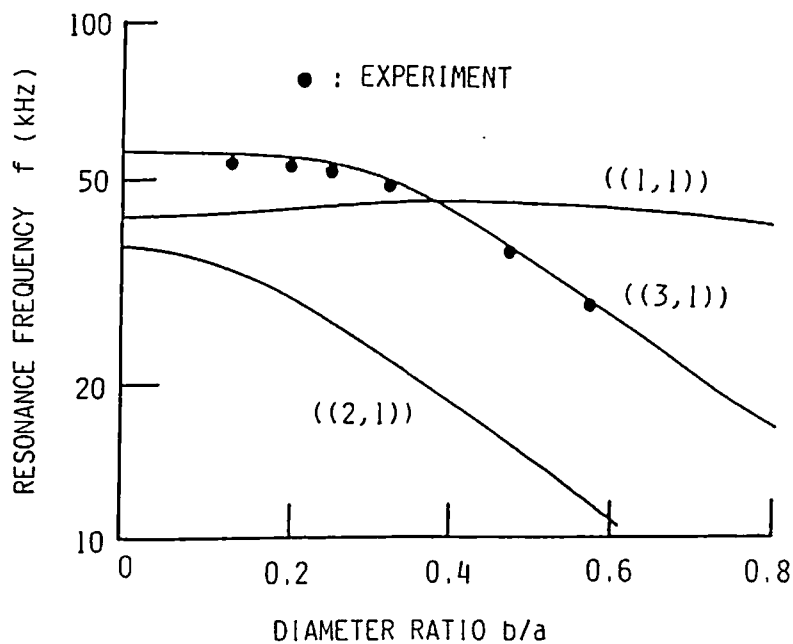


図3-19 内径対外径比に対する((1,1)), ((2,1)), ((3,1))モードの共振周波数 ($2a=40.0\text{ mm}$, NEPEC-6)

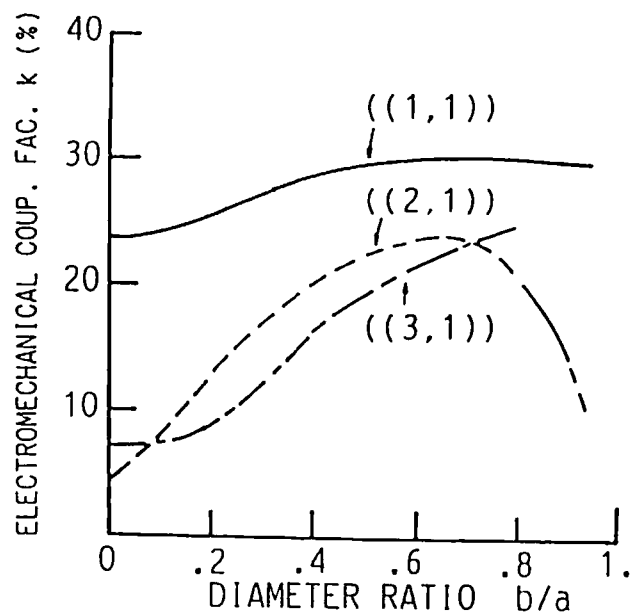
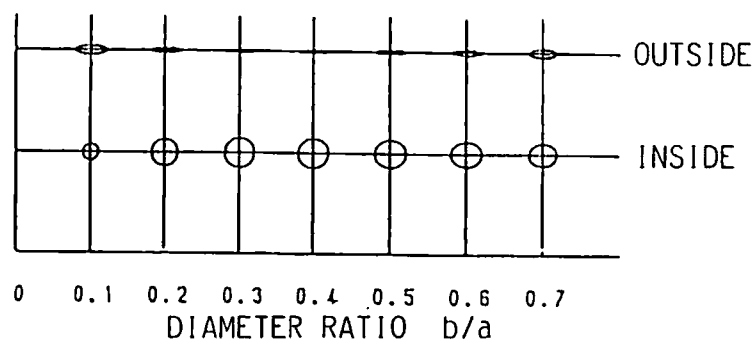
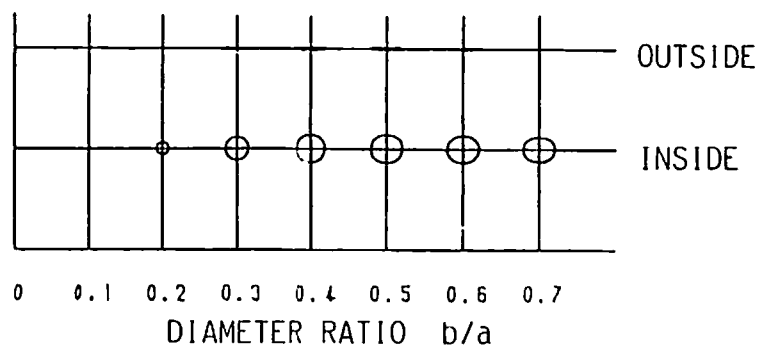


図 3-20 内径対外径比に対する $((1,1))$, $((2,1))$, $((3,1))$ モードの電気機械結合係数 (NEPEC-6)



(a) $((2,1))$ モードの場合



(b) $((3,1))$ モードの場合

図 3-21 内径対外径比に対する楕円運動の変化

(b) 試作超音波モータの特性

図3-22に((2,1))モードを利用するステータとモータ構造を示している。ステンレス円環を基板とするバイモルフ振動子を用い、圧電セラミクスを図のように予め分割分極し、接着している。接触部に摩擦材を持つロータがステータの内周部に加圧接触される。直径が30.0 mm ($b/a=0.36$)と22.0 mm ($b/a=0.49$)の振動子を用いたが、両者の共振周波数はそれぞれ31.8 (kHz), 35.3 (kHz)であった。図3-23, 図3-24に各々の特性を示している。効率はそれぞれ3.5(%), 1.2(%)と小さいが、低周波で小型の超音波モータが構成できることが確かめられた。

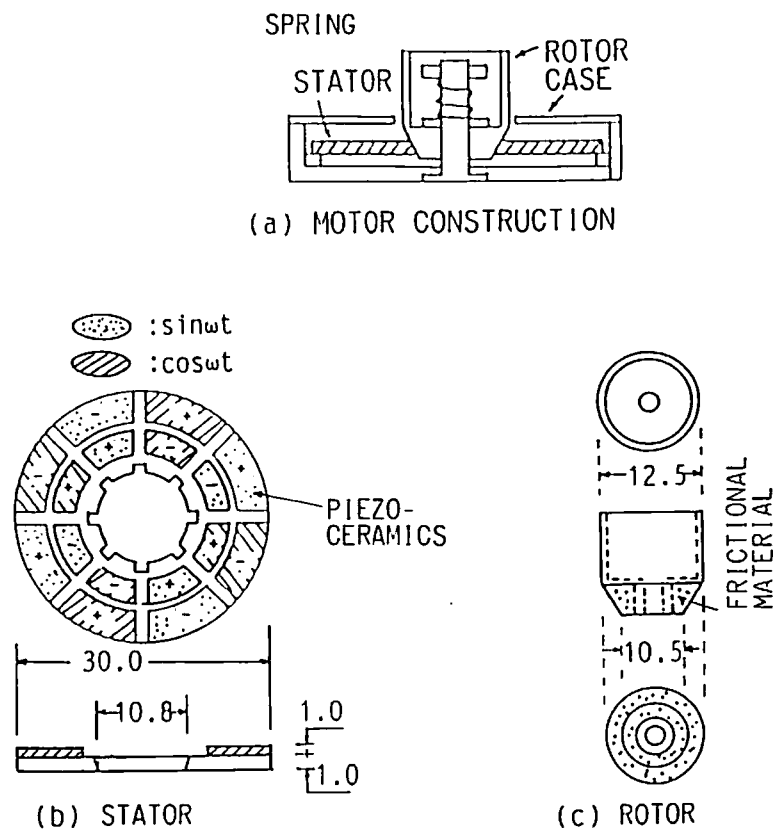


図3-22 ((2,1))モードを利用する超音波モータ
(a) : モータ構造
(b) : ステータ振動子, (c) : ロータ

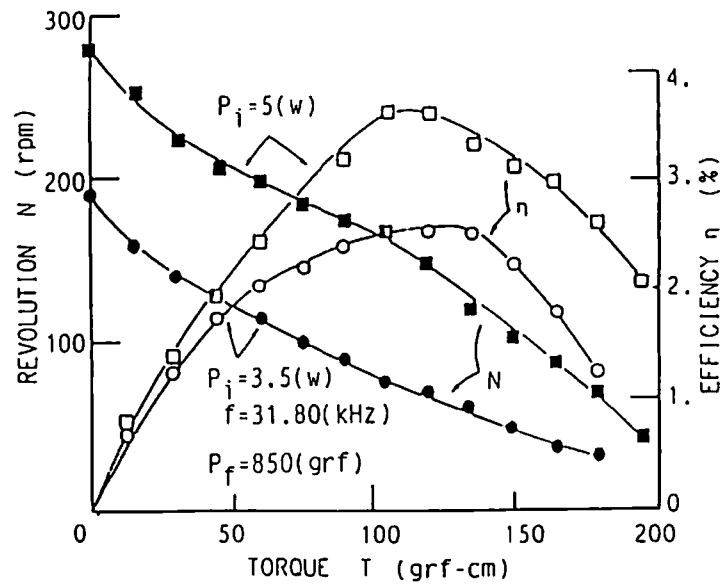


図 3 - 23 図 3 - 22に示す超音波モータの特性

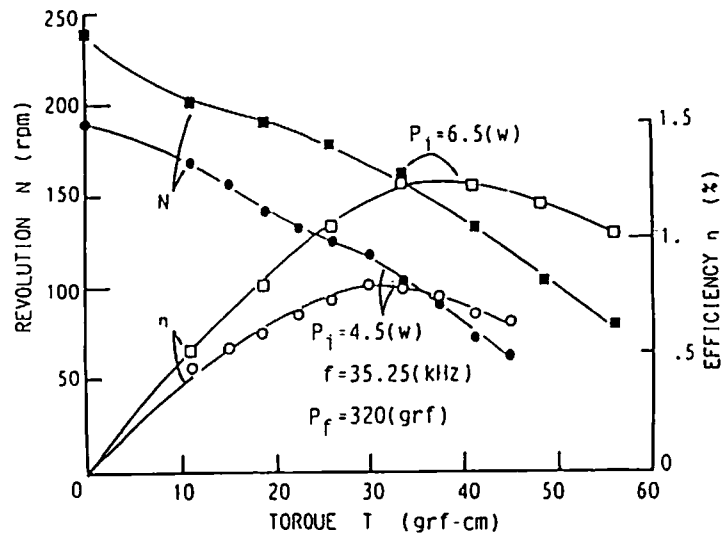


図 3 - 24 ((2,1))モードを利用する超音波モータの特性
($2a=22.0 \text{ mm}$, $2b=10.8 \text{ mm}$)

モータ構造の簡単化を計るためには、((2, 1))モードで用いたロータを内周部に押しつける構造（図3-13参照）も有効である。図3-25に試作したモータの写真を示している。構造は図3-13と全く同じである。ステータ振動子として、外径30(mm)、内径10.8(mm)、厚さ1.0(mm)の圧電セラミクスを用い、ロータとの接触部には厚さ0.1(mm)程度の摩擦材を張り付けている。ロータは直径10.0(mm)の真ちゅう製である。図3-26～3-28に試作したモータの特性を示している。図3-26は負荷特性であるが、効率、トルクとも図3-23の特性よりも劣る。しかし動作は安定で、図3-27と3-28に示すようにバースト波入力に対する回転角度は、広範囲なバースト波数に対して直線性の良い特性が得られる。

図3-25 ((2.1))モードを利用する押しつけ型超音波モータ

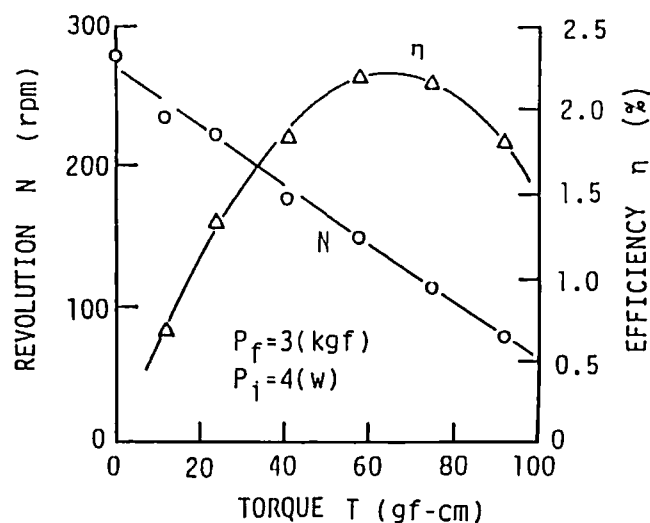


図3-26 図3-25に示す超音波モータの特性

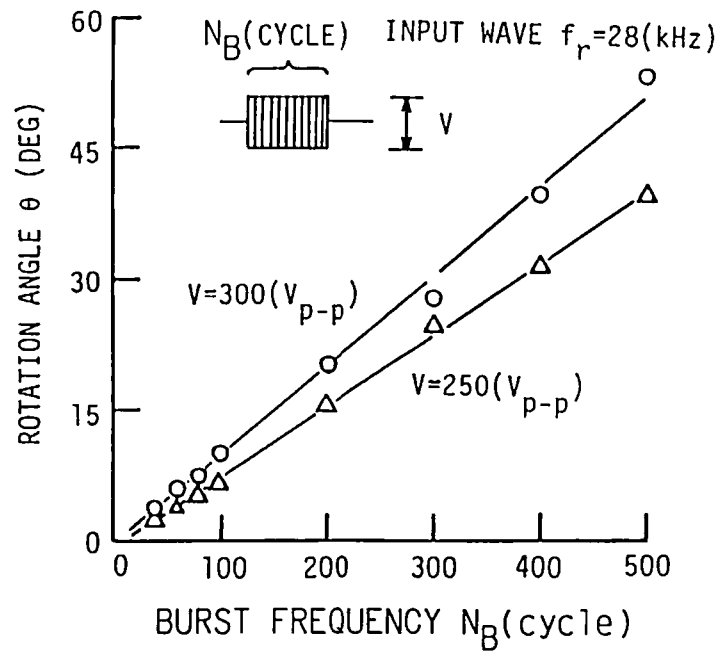


図 3 - 27 図 3 - 25に示す超音波モータのバースト波入力に対する特性

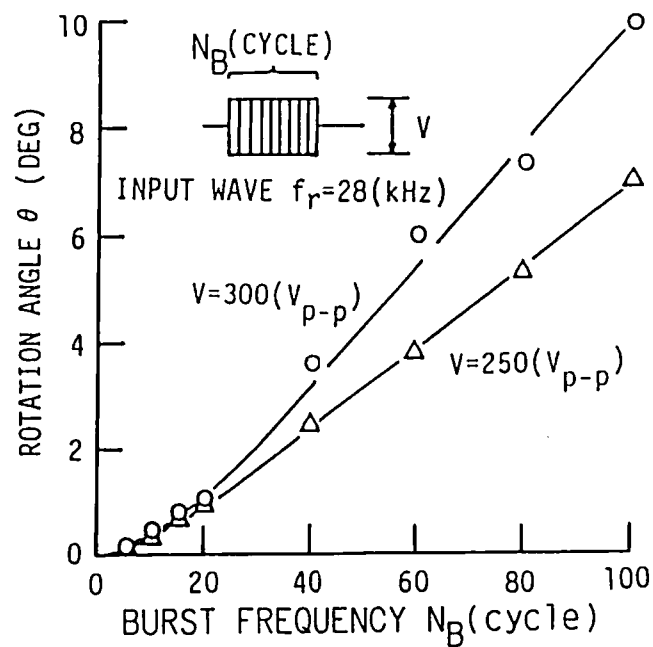


図 3 - 28 図 3 - 25に示す超音波モータのバースト波入力に対する特性 ($N_B \leq 100$)

3・3 円板の面垂直屈曲振動を利用する同相駆動型超音波モータ

3・3・1 使用モードと動作原理

円板や円環の縮退する面垂直屈曲振動を、 90° 位相の異なる信号で駆動するモード回転型超音波モータはすでに実用に供されているが、ここでは同形の縮退モードを同相駆動することによって超音波モータが構成できることを示し、その動作原理と試作特性例について述べる。

この構成はモード回転を利用しないこと、駆動電源が1台で良いことに特徴がある。このモータは原理的には一方向だけの回転であるが、縮退モードの組み合わせによって両方向回転のモータが構成できる。最初に動作原理を述べ、次に2種類のモードを用いた試作モータの特性を示している。

(a) 円板の共振モードと使用モードの選択

比較的低次の円板の共振モードは図3-29に示される。ここで $\alpha_{m,n}$ は、ポアソン比 $\sigma = 1/4$ の時の各モードの周波数定数である。これらのモードには同形の縮退モードが存在する。円板の面垂直モードについては、共振周波数(f_r)や変位(u_{mn})はすでに詳しく解析されている^{(17)・(18)}。

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \frac{\alpha_{mn}^2}{a^2} h \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}} \quad (3-24)$$

$$u_{mn} = A \left\{ J_n \left(\alpha_{mn} \frac{r}{a} \right) + C_{mn} I_n \left(\alpha_{mn} \frac{r}{a} \right) \right\} \sin(n\theta) \sin(\omega t) \quad (3-25)$$

$$C_{mn} = \frac{\alpha_{mn}^2 J_n(\alpha_{mn}) + (1+\sigma) \{ \alpha_{mn} J_n'(\alpha_{mn}) - n^2 J_n(\alpha_{mn}) \}}{\alpha_{mn}^2 I_n(\alpha_{mn}) - (1-\sigma) \{ \alpha_{mn} I_n'(\alpha_{mn}) - n^2 I_n(\alpha_{mn}) \}}$$

ここで、 ρ 、 E 、 σ は材料の密度、ヤング率、ポアソン比、 a 、 $2h$ は円板の半径、厚さである。図3-29に示すモードの中で節円を持たない B_{0n} モードは、通常の横効果利用の圧電セラミック接着による励振では、電気機械結合係数が小さく大きな変位は得られにくい。ここでは節円のある B_{1n} を超音波モータのステータとして使用する立場から検討する。

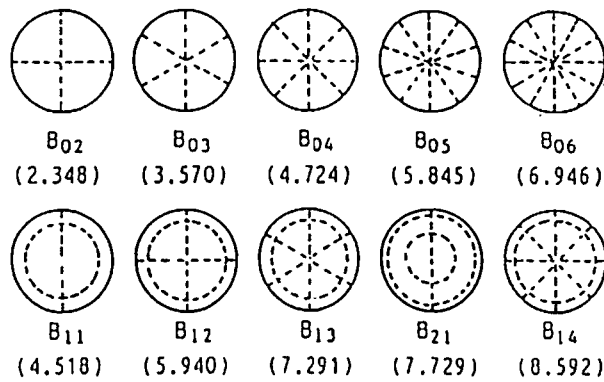


図 3 - 29 円板の共振モードと周波数定数 ($\alpha_{mn}, \sigma=0.25$)

図 3 - 30 に式 (3 - 25) から求めたモードパターンを示している。超音波モータのステータとして利用する場合、円板振動子の変位振幅の最大点から回転力を取り出すのが有効である。この図より B_{1n} ($n=1 \sim 5$) モードは、 n が大きくなるにつれ変位振幅最大点が外周方向へ移動することがわかる。より大きいトルクを得る観点からすると n は大きい方が好ましい。図 3 - 31 に次式より求めた電荷分布の計算結果を示している⁽¹⁹⁾。

$$D_z = J_n \left(\alpha_{mn} \frac{r}{a} \right) - C_{mn} I_n \left(\alpha_{mn} \frac{r}{a} \right) \quad (3-26)$$

$$Q_{mn} \propto \int_0^a D_z r dr \quad (3-27)$$

ここで、 D_z は電荷分布関数で、その積分値がステータ振動子に蓄えられる電気エネルギー (Q_{mn}) に比例する。これより、振動次数 n が大きくなると D_z が小さくなり、蓄えられるエネルギーもまた小さくなる。この結果は、変位分布の最大点を示す結果と相反することになる⁽²⁰⁾。すなわち、超音波モータのステータとして利用する場合は総合的に検討する必要がある。実験的に検討を行ってみると B_{1n} ($n=1 \sim 4$) モード利用では、 n が大きいほどトルクが大きく効率もよいことが確かめられた。このことは、ステータとロータの接触点数 (n 個になる) が大きく影響しているためと考えられる。これらを考慮し実験では B_{13} , B_{14} モードを用いた。

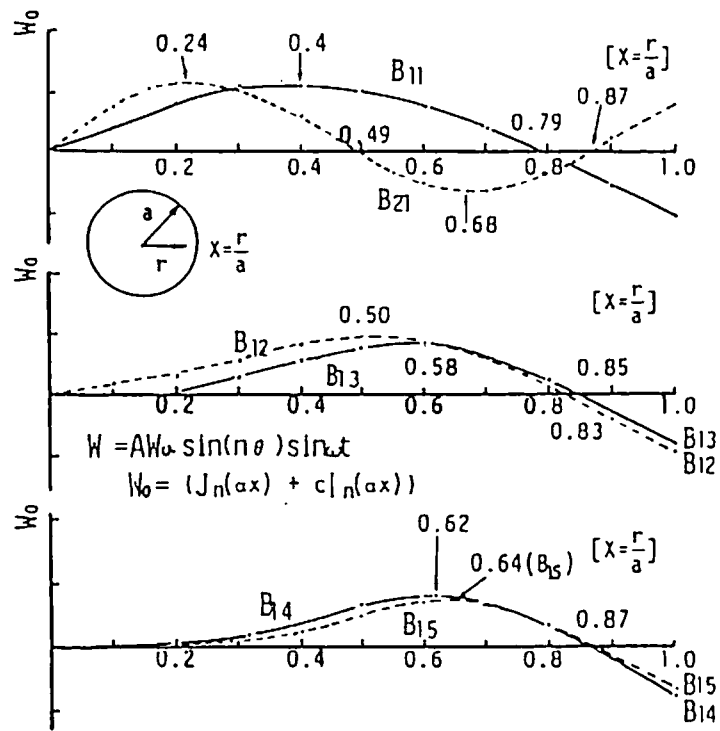


図 3-30 円板の B_{mn} モードの径方向のモードパターン

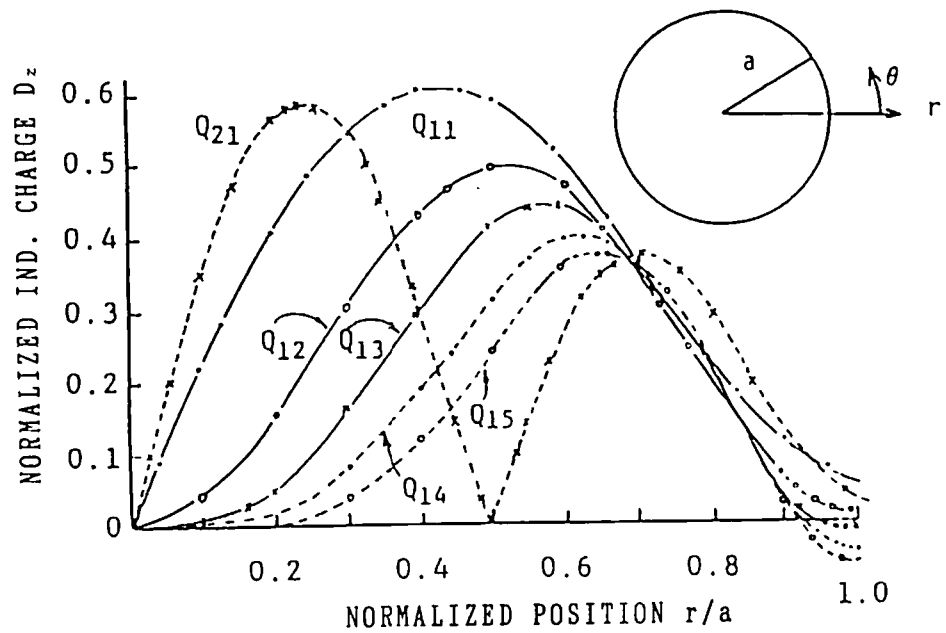


図 3-31 円板の B_{mn} モードの電荷分布 (径方向)

(b) 動作原理 (21), (22)

このモータの簡単な説明は第2章で述べているが、ここでは回転方向まで含めて動作原理を詳述する。説明を容易にするため図3-32に示す B_{11} モードを例にとり説明する。同図(a), (b) は同形の縮退モードで点線は節線を、+、-の記号は振動の位相を示している。(a)図で点②、④、(b)図で点①、③はそれぞれのモードの振動の腹にあるので垂直方向の振動成分を持つ。一方(a)で点①、③、(b)で点②、④は節直径上にあるので、変位の傾きによって引き起こされる水平方向の成分を持つ。従って、これらのモードを同相駆動すれば①から④の点では図3-32(c)に示すような対角方向の変位が生ずる。ここで、○印、⊗印はそれぞれ紙面に対して上向き、下向きの方向を示している。同じ方向の成分を取り出すことによって超音波モータが構成できるから、 B_{11} モードの場合点①、③あるいは点②、④から回転力を取り出せば良い。

実際の構造は同図(d)に示すように、それぞれの点に水平方向の変位拡大も兼ねた突起を設けることによって、同じ方向の駆動力を取り出している。例えば、点①、③に突起がある場合この状態でロータを押しつければ、各突起はロータに半周期毎に交互に右回りの回転力を与える。

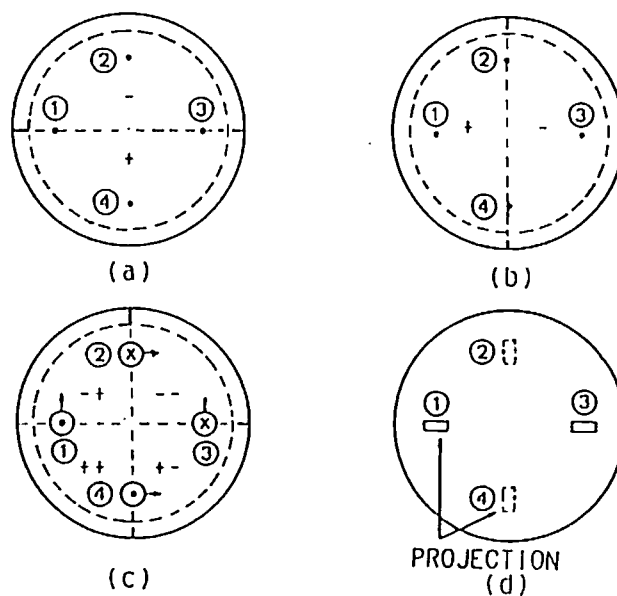


図3-32 (a), (b): 縮退する円板の面垂直屈曲振動 B_{11} モード
 (c): 同相駆動型モータの動作原理
 (d): 同相駆動型モータのステータ振動子

このモータの回転方向は、回転力を取り出す突起の位置と縮退モードの組み合わせ（圧電セラミックスの接着位置）によって決まる。図3-33(a), (b)にその例を示している。例えば、点①, ③に突起がある場合(a)図では右回りの、(b)では左回りの駆動力が生ずる。これらのモードを励振するためには圧電セラミックスをそれぞれ(a'), (b')のように接着すれば良い。したがって、図3-34のように、予め分割・分極した圧電セラミックス円板を用いれば、駆動端子を切り換えることによって各々のモードの組み合わせが実現できる。すなわち、端子の切り換え操作によって正・逆回転のモータが構成できる。

B_{13} や B_{14} モード利用の場合も、ロータとの接触数が異なるだけでまったく同じ動作原理となる。

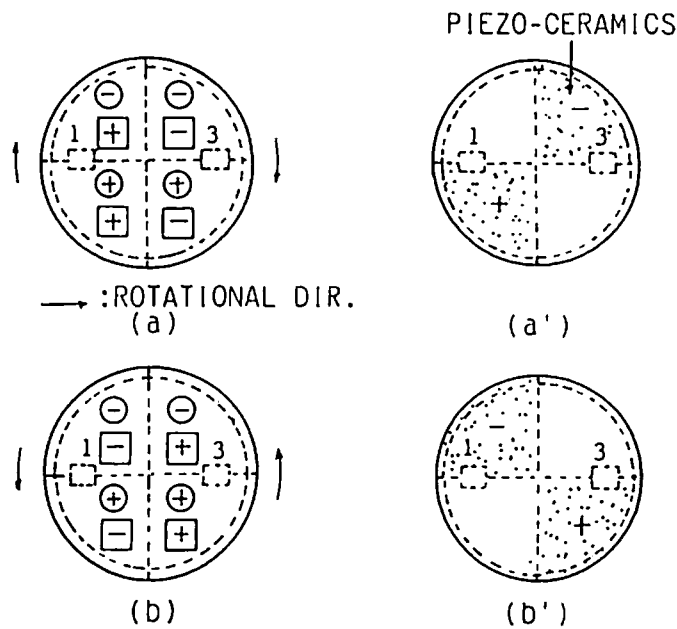


図3-33 同相駆動型モータの回転方向

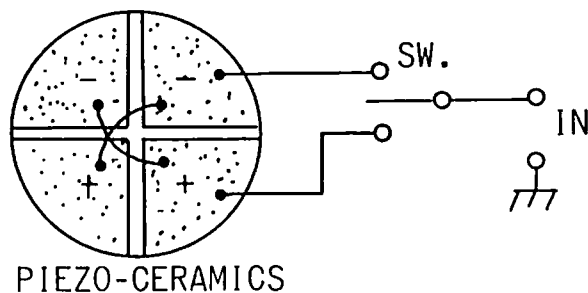


図3-34 同相駆動型モータの回転方向の切り換え

(c) ステータの構造と特性

図 3-35, 図 3-36 にステータとして実験に用いた B_{13} , B_{14} モード利用の円板振動子を示している。ステンレス製円板で、 B_{13} モードの場合突起は同図 (a) に示すように径直径上に 6 個設けている。径方向位置は変位分布の最大値になっている。直径 $2a = 60.0(\text{mm})$, 厚さ $t = 1.8(\text{mm})$ 、突起部は $2.0(\text{幅}) \times 2.7(\text{高さ}) \times 4.0(\text{径方向長さ})(\text{mm}^3)$ である。これらの突起が半周期ごとに 3 個づつロータを駆動することになる。図 3-35(b) は接着セラミックスの様子で、縮退する 2 つの共振モードを同時に駆動するために、扇状セラミックスが図のような極性で 6 枚接着される。図 3-36 の B_{14} モードについても同様のことが言える。

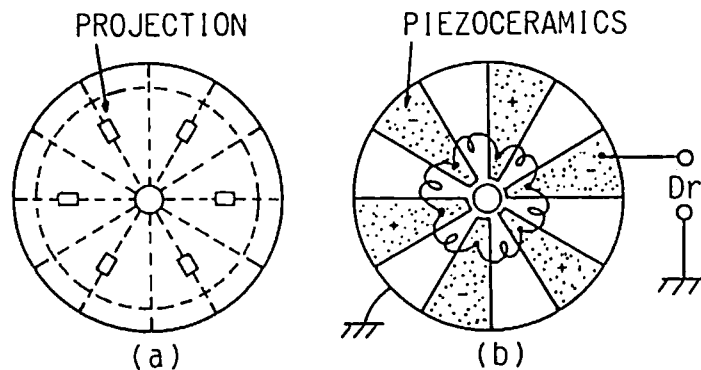


図 3-35 B_{13} モード利用モータのステータ振動子

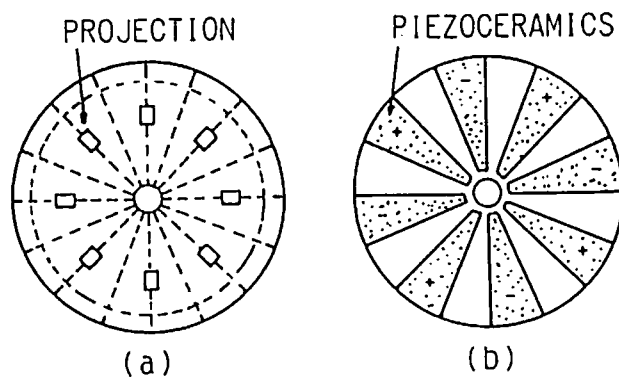


図 3-36 B_{14} モード利用モータのステータ振動子

図 3 - 37 に、 B_{13} モード振動子の加圧 P_f (kgf) に対する周波数レスポンス、表 3 - 3 に等価定数値の測定値を示した。加圧力が増せば共振周波数は上昇し、結合係数は若干小さくなる。

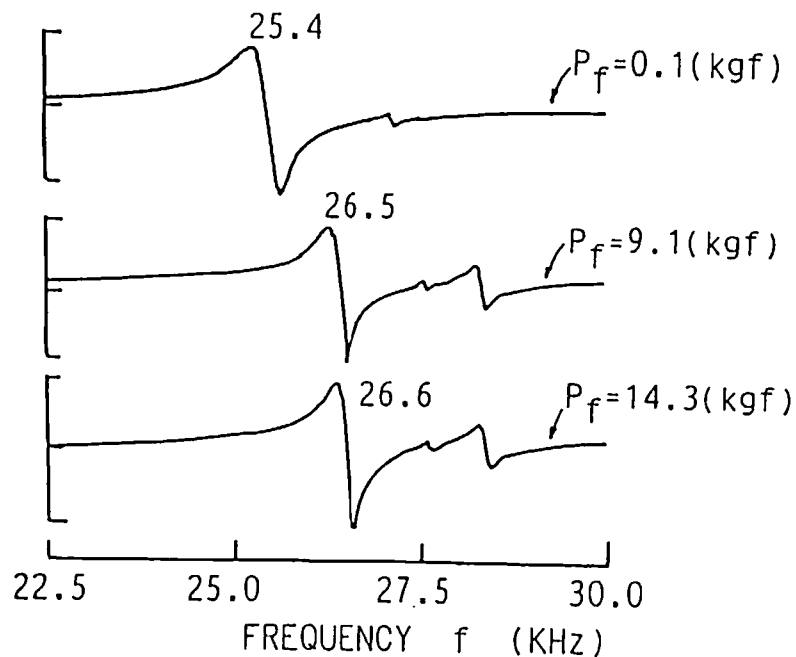


図 3 - 37 加圧力に対する共振周波数の変化 (B_{13} モード)

表 3 - 3 加圧力に対する等価定数値の変化 (B_{13} モード)

P_f [kgf]	0.1	9.1	14.3
f_0 [KHz]	25.43	26.46	26.49
R [Ω]	108.11	103.75	102.78
L [mH]	117.70	185.54	192.22
C [nF]	0.33	0.19	0.19
C_d [nF]	12.52	12.47	12.46
Q	173.98	297.36	311.23
k_v [%]	16.30	12.50	12.28

3・3・2 試作超音波モータの特性

(a) モータの構造

試作したモータの構造を図3-38に示す。ステータには $3.0(\text{mm}^2)$ のボルトが固定されている。ロータはスプリングによってステータに加圧接触されるが、図示のようにステータの突起上を加圧するための治具が挿入されている。その治具とスプリングの間にはスラストベアリングを挿入し、ロータへの影響を軽減している。ロータには接触部に摩擦材(pps)を円環状に接着している。ロータの寸法は直径 $50.0(\text{mm}^2)$ 、厚さ $2.0(\text{mm})$ 、摩擦材の厚さは $1.6(\text{mm})$ である。図3-39は動作時の振動モードを観測した写真で、モード回転の生じていないことがわかる。図3-40は動作時(B_{14} モードステータ)の電流波形で、ステータとロータが半周期毎に接している様子がわかる。このモータは先に述べたように垂直方向と水平方向の変位が、合成された対角方向の変位の直線運動によって半周期毎にロータが駆動される(突っつき型と呼ばれる)。この波形の非対称性からも、このモータが原理に基づいた動作をしていることがわかる。

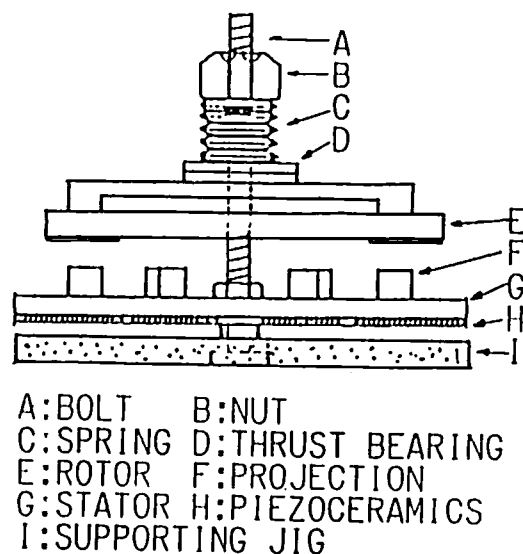


図3-38 同相駆動型モータの構造

図 3 - 39 動作時の振動モード (B₁₄モード)

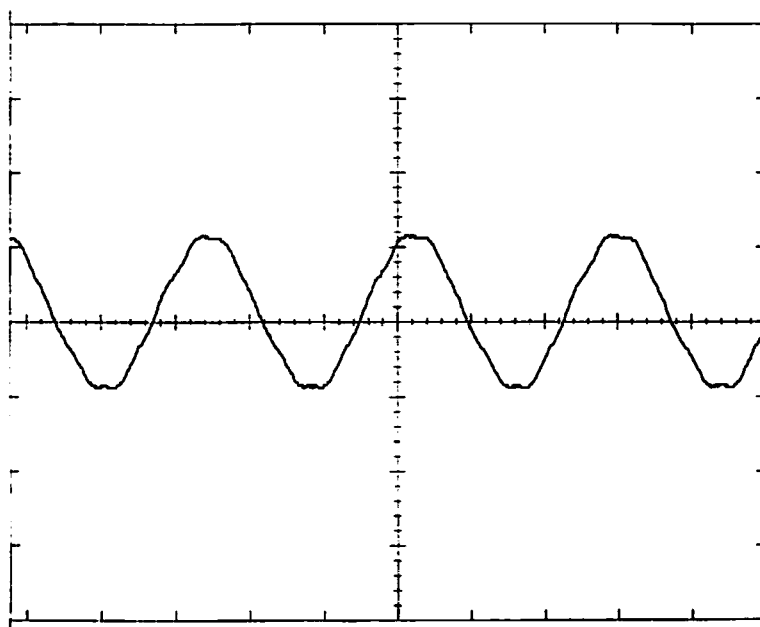


図 3 - 40 動作時の電流波形 (B₁₄モード)

(b) 負荷特性

試作したモータの負荷特性を図3-41~43に示している。図3-41は B_{13} モードを用いたモータの特性で、入力1(W)の時トルク0.9(kgf-cm)で、最大効率24.0(%)の比較的高い効率が得られた。図3-42は B_{14} モードを用いた場合で、入力1.5(W)でトルク1.22(kgf-cm)の時に最大効率26.0(%)の特性が得られた。このようにこの種モータは高い効率を持ち、低速で安定に回転する。加圧によって特性は大幅に変わるが、実験においては $P_f \approx 15$ (kgf)で最大トルク4(kgf-cm)前後のモータも構成できた。またこのモータは入力小さい場合も低速で安定に回転する。図3-43に特性の一例を示しているが、効率は大幅に低下する。

図3-41, 42の特性から分かるように B_{13} モードと B_{14} モードによる特性の差はほとんどないが、若干 B_{14} モードを用いたモータの特性が良い。これはステータとロータとの接触点の違いなどもその原因一つと考えられるが、詳しくは今後の研究を待たねばならない。

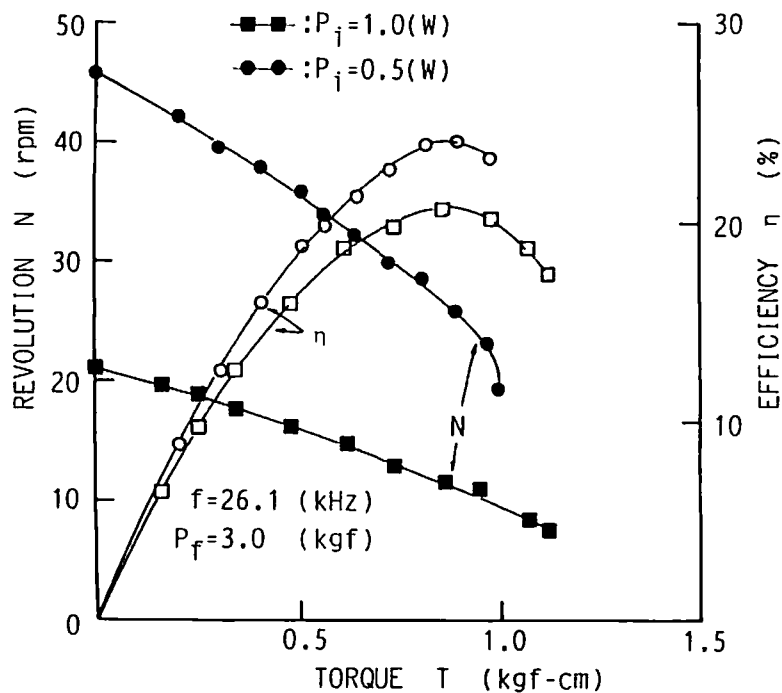


図3-41 同相駆動型モータの特性 (B_{13} モード)

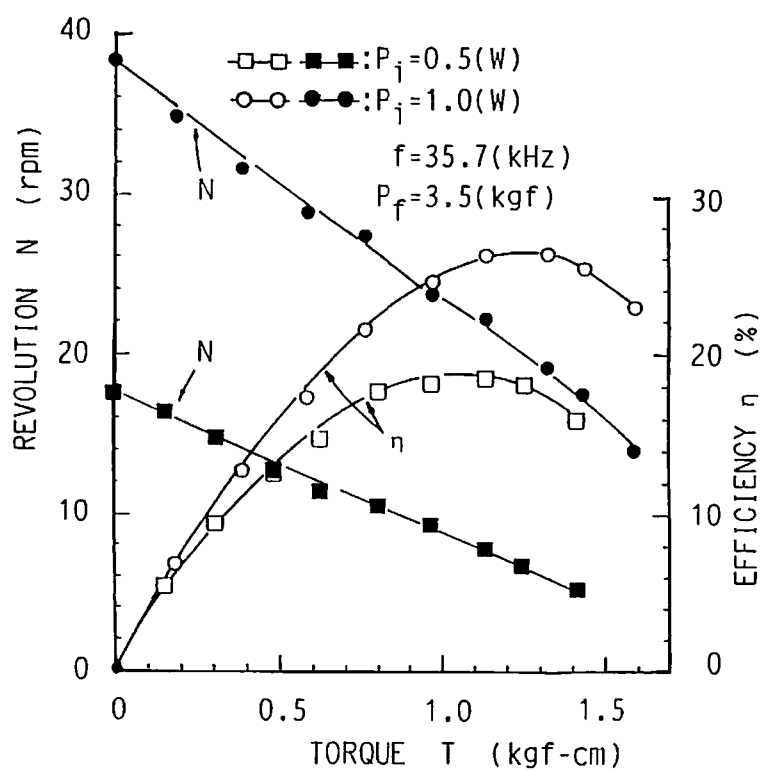


図 3 - 42 同相駆動型モータの特性 (B₁₄モード)

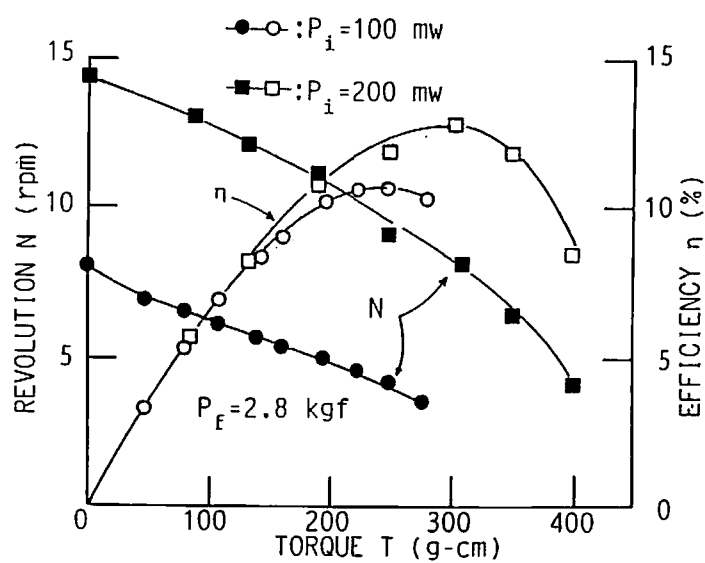


図 3 - 43 同相駆動型モータの特性 (B₁₄モード)

3・4 結 言

2つのタイプの同形モード縮退型振動子を用いる回転型超音波モータを提案し、その試作特性例を通じて各々のモータ構成の特徴と問題点を明らかにした。最初に円環の非軸対称振動を超音波モータへ利用する立場から解析した。縮退する2つの同形モードを90°位相の異なる信号によって駆動した場合に、円環の内周・外周面に生ずる変位の橢円運動に着目し、さらに振動子の板面上に誘起される電荷を求め、各モードを効果的に励振するための電極構成を明らかにした。これより円環振動子（内径対外径比 b/a ）も含めて非軸対称振動の比較的低次のモードについて以下のことが明らかとなった。

(1) $((2,1))$, $((3,1))$ モードの周波数定数 $\alpha_{n,m}$ は b/a が大きくなるに急激に小さくなるので、低周波で小型の振動子が得られる。

(2) $((1,1))$ モードの場合 $b/a=0.5$ 近傍で内周部では、径方向の成分がほとんど生じないのでステータとしての利用には不向きである。

(3) $((2,1))$, $((2,2))$, $((3,1))$ モードの場合も同様に、外周面ではステータに適する変位の橢円運動が形成されない。

(4) $((2,1))$, $((3,1))$ モードの場合、径方向で誘起電荷の極性が反転するのでこれらのモードを効果的に励振するためには、誘起電荷の符号を考慮した駆動方法を採用する必要がある。

以上を考慮して非軸対称振動を使用した2相駆動超音波モータを試作し、この種モータが構成の多様さ薄型中空構造さらに低周波小型モータとして適することを明らかにした。 $((1,1))$ モードを使用したモータでは効率10(%)、最大トルク760(gf-cm)、直径30(mm)の振動子を用いた $((2,1))$ モード利用のモータでは、効率5(%)、最大トルク300(gf-cm)程度であった。小型モータでは $((2,1))$ モードを使用し、直径20(mm)のステータで駆動周波数が36(kHz)のモータを試作した。

3・3では円板の面垂直振動利用する同相駆動型超音波モータを提案し、その動作原理に基づいてモータを試作した。面垂直振動 B_{13} , B_{14} モードを用い

た試作モータは効率25(%), トルク2~3(kgf-cm) 程度の特徴を持ち、同じモードを利用するモード回転型モータとほとんど遜色の無い特性が得られる。

2種類の同形モード縮退型振動子利用の超音波モータについて述べたが、このステータ振動子は基本的には2つのモードの共振周波数が同一であることに最大の利点があり、これを生かすためには振動子やロータの改善、さらにモータ設計まで幅広く検討する必要がある。

以上要約すると

- (1) 円環の非軸対称振動を効果的に励振するための電極形状を見いだした。
- (2) 最適な変位の楕円運動を得るための円環の内径対外径比が存在する。
- (3) 非軸対称振動を利用するモータは薄型中空構造さらに低周波小型モータとして適する。
- (4) 縮退モードを同相駆動するモータを提案し、試作特性例を示した。

となる。

参 考 文 献

- (1) 指田年生：“超音波振動を利用したモータ装置”，特許公報，昭58-148682（1983）。
- (2) 見城尚志，指田年生：“超音波モータ入門”，総合電子出版社（1991）。
- (3) 細江三弥：“自動焦点レンズ用超音波モータ”，超音波テクノ，Vol.1，NO.2，pp.36-41（1989）。
- (4) 高野，富川，小笠原，菅原，近野，“面内振動の多重モード振動子利用による超音波モーター”，電子情報通信学会技術報告，US87-32，pp.33-40（1987）。
- (5) 熊田明生：“重心回転型超音波モータ”，特許公報，昭63-181677（1987）。
- (6) 若松哲，上羽貞行，森榮司：“円環の伸縮振動を用いた超音波モータ”，電子情報通信学会技術報告，US84-50，pp.1-8（1984）。
- (7) 熊田明生：“超音波モータがもたらす技術革新”，東北大電気通信研究所第25回シンポジウム，No.III-6(1)，PP.107-112（1989）。
- (8) T.Takano, Y.Tomikawa and H.Hirata, "An Ultrasonic Motor Using Non-Axisymmetric Vibration Modes of a Piezo-Ceramic Annular Plate", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.28, Suppl.28-2, pp.202-205（1989）。
- (9) Y.Tomikawa, T.Takano and K.Toda, "Same Phase Drive Type Ultrasonic Motors", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.28, Suppl.28-2, pp.198-201（1989）。
- (10) 尾上守夫，倉地正：“円板状圧電セラミックス振動子の非軸対称振動”，電気通信学会誌，Vol.49，No.1，pp.104-110（1966）。
- (11) 中村徳良，清水洋：“圧電セラミックス円環の非軸対称振動”，電子通信学会論文誌，Vol.55-A，No.9，pp.429-433（1972）。
- (12) 富川，平田，高野，“超音波モータのための非軸対称振動圧電セラミック孔あき円板の解析”，電子情報通信学会技術報告，US88-32，pp.1-8（1988）。
- (13) 富川，平田，高野：“非軸対称振動((2,1))モード・圧電セラミック孔あき円板を用いた超音波モータ”，音響学会平成元年度秋季研究発表会講論集，No.1-P-①，pp.929-930（1989）。

- (14) T.Takano, H.Hirata and Y.Tomikawa:"Analysis of Non-Axisymmetric Mode of Piezo-Ceramic Annular Plate and its Application to an Ultrasonic Motor", IEEE Trans. UFFC, Vol.37, No.6 pp. 558-565 (1990)
- (15) 高野, 富川, 小笠原, 平田:"円環の((1,1))モードを利用する超音波モータ", 音響学会平成元年度秋季研究発表会講論集, No.1-P-⑤, pp.937-938 (1989).
- (16) 高野, 富川, 小笠原, 平田:"円環の面内振動を利用する小型超音波モータ", 音響学会平成元年度春季研究発表会講論集, No.3-P-21 pp.815-846 (1989).
- (17) Robert D.Blevins:"FORMULUS FOR NATURAL FREQUENCY AND MODE SHAPE", Robert E.Krieger Publishing Company, (1987).
- (18) John Prescott:"APPLIED ELASTICITY", Dover Publications Inc., (1961).
- (19) Y.Tomikawa, T.Kondo, T.Ogasawara, S.Sugawara and M.Konno: "Fundamental Considerations of Excitation of a Flexural Progressive Wave and its Application", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.26, Suppl.26-1, pp.96-98 (1987).
- (20) 尾上守夫監修:"固体振動論の基礎", オーム社 (1982)
- (21) 高野, 富川, 小笠原,"円板の屈曲モードを利用する同相駆動型超音波モータ", 電子情報通信学会技術報告, US90-50, pp.29-35 (1990).
- (22) T.Takano Y.Tomikawa and C.Kusakabe: "Same Phase Drive Type Ultrasonic Motors Using Two Degenerate Bending Vibration of a Disk", IEEE Trans. UFFC, Vol.39, No.2, pp.180-186 (1992).

第4章 異形モード縮退型振動子を用いる回転型超音波モータ

4・1 緒言

本章では、異形モード縮退型振動子を用いた回転型超音波モータの構成と試作測定結果について述べる。1個の弾性体の形状を調整することによって、その弾性体の振動モードの中の2つのモードを縮退させることができる。従って、第2章で述べたように振動子形状、あるいは振動モードの組み合わせによって多くの異形モード縮退型振動子が考えられ⁽¹⁾、これを用いた超音波モータが構成される。この種の振動子を用いた超音波モータは、使用する振動子によって周波数も広範囲に亘り、またモータ形状も多様で特殊な応用面などが考えられている。また駆動力の取り出し方を変えることによって、第5章で述べるような直線移動型モータへの応用も可能になる。本章では以下の2種類の回転型モータについて述べる。

4・2では、円柱の縦振動と捩り振動を利用した超音波モータを扱っている。本構成と同様の考え方に基づいた構成は、縦振動成分に積層アクチュエータを用いた複合型超音波モータとしてすでに詳しく検討されているが⁽²⁾、ここで述べる構成は段付き振動子を採用することによって、1個の振動子で両モードの縮退を実現し、超音波モータを構成するものである^{(3)・(4)}。最初に段付き振動子を用いる場合の両モードの縮退条件を求めている⁽⁵⁾。すなわち振動子端部に段付き部を有する場合、振動子中央部に段付き部を有する場合の縮退条件を求め、各々の振動子を用いたモータを試作し、その特性例を述べている。最後に、本章の枠からははずれるが、縦振動子と捩り振動子の単一共振子を組み合わせ使用したモータの試作特性例を示している⁽⁶⁾。これは、振動子が2個必要となるが共振周波数調整と加圧による共振周波数変化への対応や、振動子の支持方法の容易さからモータの一構成法として見直されて良いと考えられる。

4・3では、縦一屈曲モード縮退型振動子を用いた超音波モータについて述べている。この振動子は縦一屈曲多重モード振動子として、かつてメカニカル

フィルタやセラミックフィルタへの応用を目的として詳しく研究され、多くの振動子が提案された⁽⁷⁾。この中で、本節では縦振動 1 次モードと振動子の長さ方向 4 次と 8 次モードによるモード縮退型振動子と⁽⁸⁾、縦振動 1 次と振動子の幅方向 2 次モードによるモード縮退型振動子を取り上げている。これは、第 5 章の直線移動型モータ⁽⁹⁾と、第 7 章の紙送りデバイスへの応用⁽¹⁰⁾を念頭に置いたためである。この構成は駆動力の取り出し方によって、回転型モータと直線移動型モータに適用できるが、本節では回転型モータに限定しその構成と特性について述べている。

4・2 円柱の縦－振り振動利用の超音波モータ

4・2・1 縦－振り振動利用超音波モータの構成と分類⁽¹¹⁾

縦－振り振動モード利用の超音波モータの構成は種々考えられている。図 4-1 に、本節で検討する超音波モータの構成を示している。(I)はモード縮退型振動子利用の構成、(II)は縦振動と振り振動の単一共振子を組み合わせで構成するものである。同図で(I)-(1),(2)の構成は、振動子に細いくびれを入れ 2 つの共振モードを縮退使用するものである。図 4-2(a)に示すような等方弾性体による円柱振動子の縦 1 次および縦 2 次モードの共振周波数(f_{L1} , f_{L2})と、振り 1 次および 2 次モードの共振周波数(f_{T1} , f_{T2})を比べると、一様な棒では $f_{L2} > f_{T2} > f_{L1} > f_{T1}$ となる。これを同図(b), (c)のように、振動子の片端へ細棒を介して質量(イナーシャ)を付加した振動子を用いると、付加質量は縦振動の共振周波数には大きく作用するが、振り振動の共振周波数にはあまり影響を与えないから、 $f_{L1} \div f_{T1}$ あるいは $f_{L2} \div f_{T1}$ なるモード縮退型振動子可以实现できる。本構成の特徴は、端部の長さによって縦振動の共振周波数の調整が容易に実現できることにある。

(I)-3 は振動子の中央部に段付きを施し、 f_{L1} を上昇、 f_{T2} を下降させて $f_{L1} \div f_{T2}$ を実現させる構造である。さらに、段付き形状によっては $f_{L1} \div f_{T3}$ も実現できる。

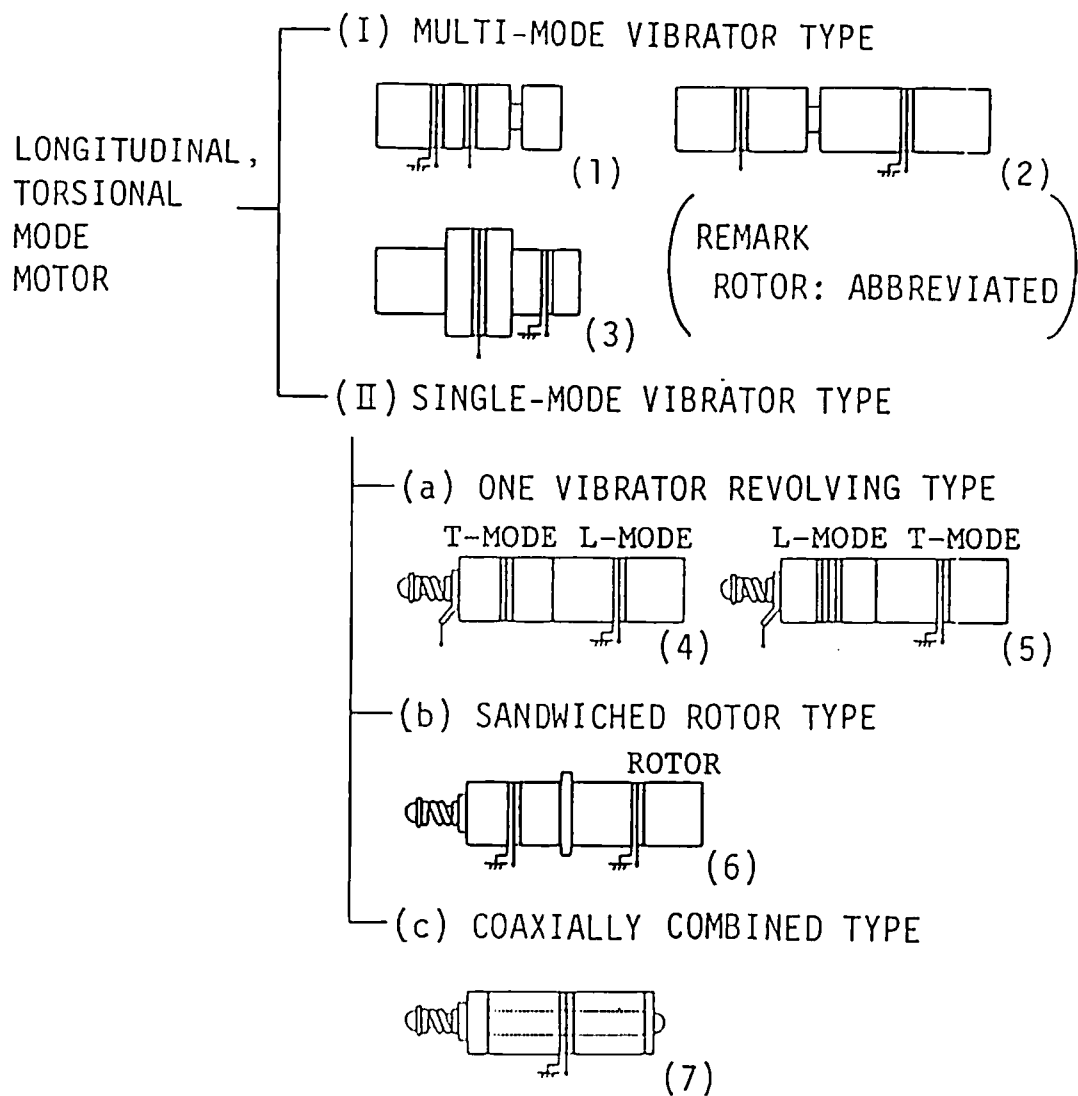


図 4 - 1 縦一振りモード縮退型振動子を用いる
超音波モータの構成と分類

(II)は各々単一共振子として利用する構造で、いくつかの構成が考えられる。(II)-(4)は一方の振動子がロータを兼ねるもので、(4)では左側の振り振動子が、(5)は非共振でも使用できる積層セラミックアクチュエータなどの縦振動素子が回転する構造である。(b)は振り振動子と縦振動子の間にロータをサンドウィッチした構造で、ロータと振り振動子間の摩擦は大きく、縦振動子との摩擦は小さく設定するのが要点である。(c)は外側に中空振り振動子を、その内部に縦振動子を同軸に配置し、外部付加のロータを回転させるものである。(II)の構成はいずれも縦・振り共振周波数をそれぞれ独立に調整可能とし、超音波モータの構成をより容易とする。以下各構成について述べる。

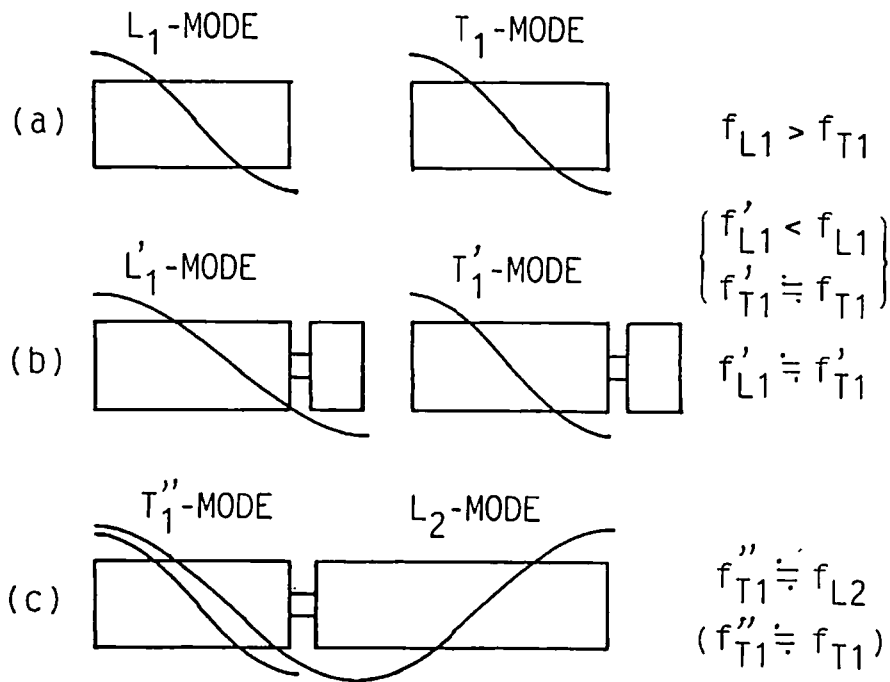


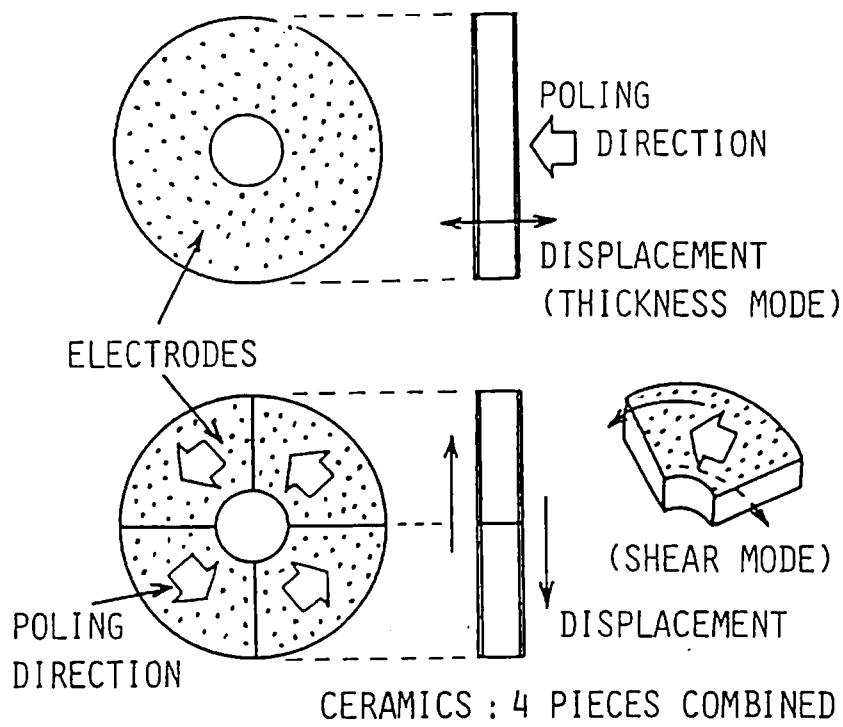
図 4 - 2 端部段付き振動子による縦振動と振り振動の縮退

4・2・2 縦－振りモード縮退型振動子

(a) 振り振動の励振

円柱（あるいは円筒）に圧電的に振り振動を励振する方法を図4－3に示す。これは圧電セラミックスのすべり効果を利用するもので、すでに広く用いられている方法である。特にモード縮退型振動子として用いる場合は、セラミックスの挿入位置に注意する必要がある。

(a) PIEZO-CERAMICS FOR LONG. VIBRATION



(b) PIEZO-CERAMICS FOR TORSIONAL VIBRATION

図4－3 縦振動と振り振動励振のための
圧電セラミックス

(b) 端部段付き振動子の縮退条件

図4-4～4-6に、捩り振動1次と縦振動1次の共振周波数の計算値を示している⁽¹²⁾。振動子の寸法は各図中に示している。また、計算にはジュラルミンの材料定数 ($E = 7.0 \times 10^{11} \text{ dyne/cm}^2$, $\rho = 2.8 \text{ g/cm}^3$, $\sigma = 0.33$) を用いた。図4-4, 4-5は、端部の長さ(x)を変えたときの各モードの共振周波数で、細棒部分の直径がそれぞれ5.0(mm), 10.0(mm)の場合である。各々 $x = 5$ (mm), $x = 9$ (mm) 付近で両モードが縮退する。後者の場合図4-4に比べ、 x に対する共振周波数の変化が緩やかなので、共振周波数調整には有利である。図4-6は両モードが縮退している時の、振動子と細棒部の直径比(d_2/d_1)と、付加端部の長さ(x)の関係を求めたもので、付加質量を介する細棒が細い程 x の値が小さくて良いことがわかる。

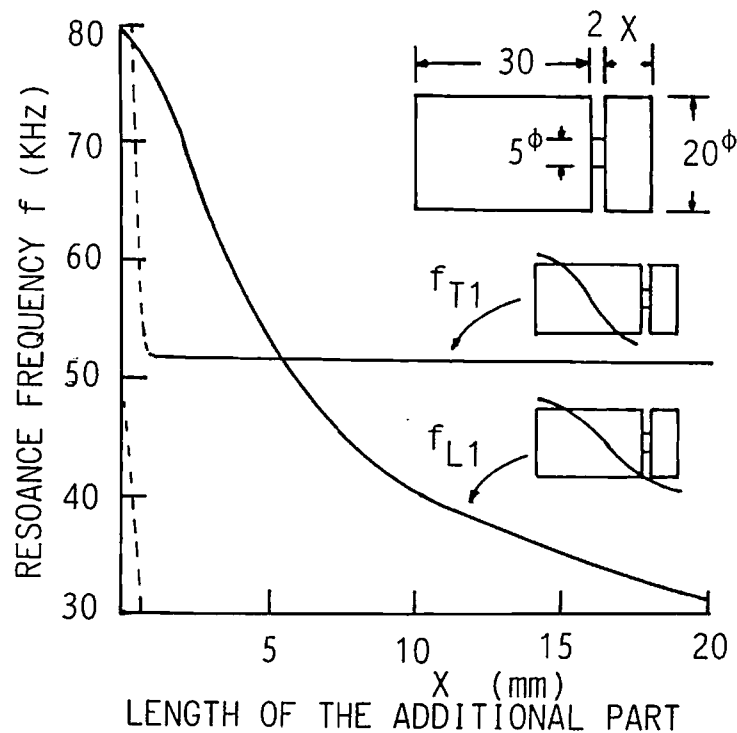


図4-4 端部の長さに対する共振周波数の変化

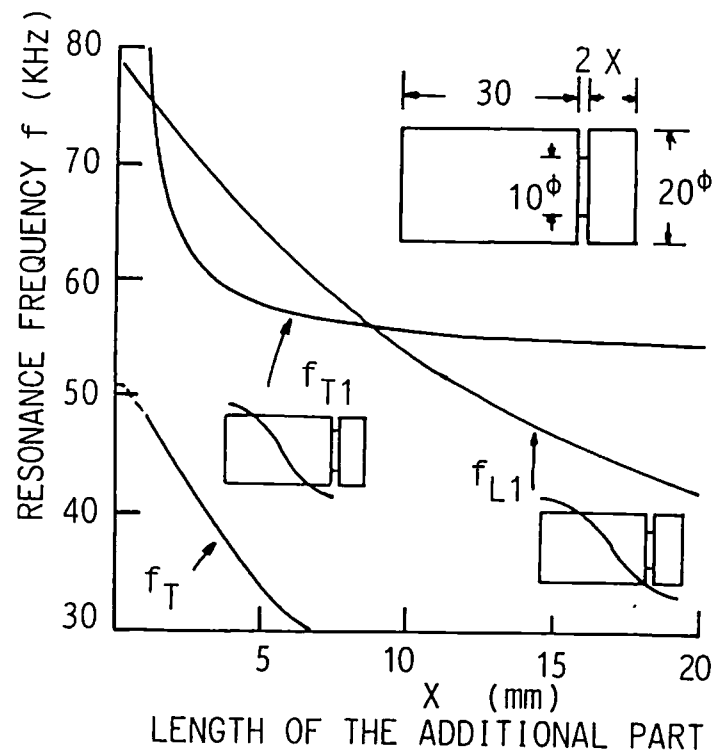


図 4 - 5 端部の長さに対する共振周波数の変化

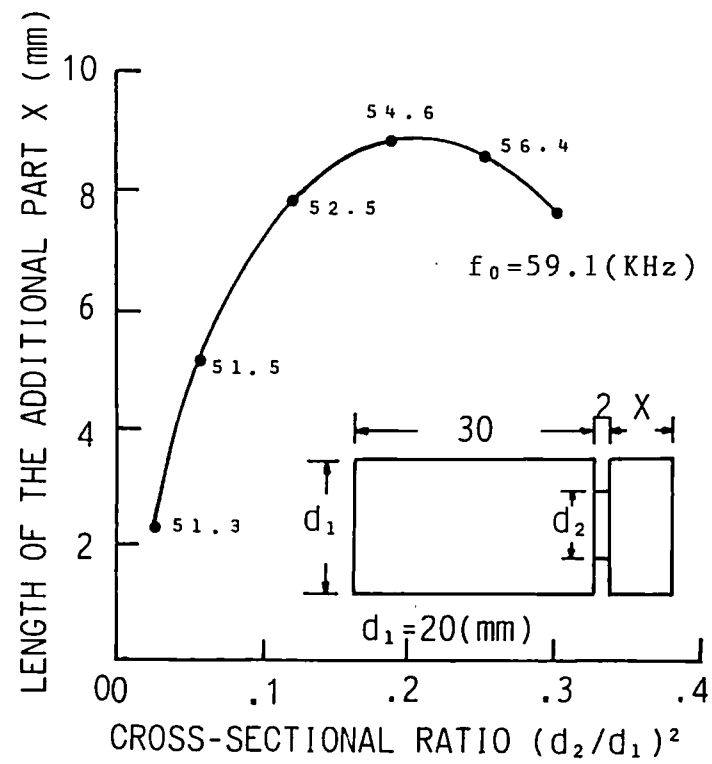
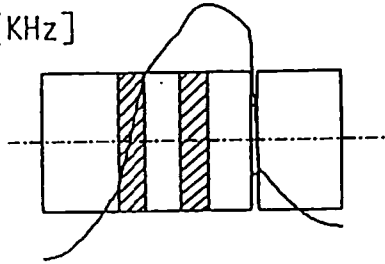


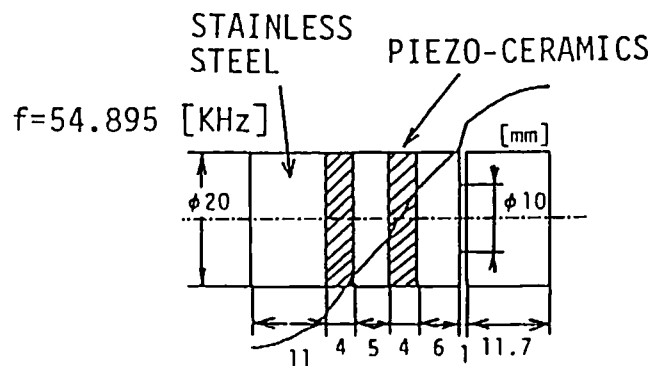
図 4 - 6 モード縮退のための振動子の断面比と端部の長さの関係

図 4 - 7 (a), (b) に細棒部の直径が 10 (mm) の場合の縦振動 1 次、捩り振動 1 次の振動モードの計算結果を示している。振動子はステンレス製とし、駆動用の圧電セラミクスを振動子中に配置する必要があるので、それを考慮して解析している。この圧電セラミクスは両モードのそれぞれのノード点に配置し、また両モードの変位の大きい左端を駆動力の抽出部として利用することが重要である。

$f=54.831$ [KHz]



(a) Torsional mode pattern
(1-ST.)



(b) Longitudinal mode pattern
(1-ST.)

図 4 - 7 端部段付き振動子の振動モード

(c) 中央部段付き振動子の縮退条件

図4-8(a)に示す等方弾性体による円筒振筒子においては、縦振動1次の共振周波数(f_{L1})ならびに捩り振動2次の共振周波数(f_{T2})は、 $f_{L1} < f_{T2}$ の関係にある。しかし、同図(b)に示すような中央部段付き振動子を用いると、 f_{L1} は上昇し f_{T2} が低下するので両モードの縮退を実現できる⁽¹³⁾。図4-9に共振周波数の計算結果の一例を示している。解析手法、材料定数は前述(b)の場合と同じである。振動子全長 $b_1 = 60(\text{mm})$ 一定とし、振動子の全長と段付き部の長さの比(b_2/b_1)をパラメータとして、断面積比(S_2/S_1)に対する共振周波数を計算している。各々の曲線の交点で両モードは縮退する。しかし、実際のステータにおいては、駆動用圧電セラミクスを振動子中に配置しなければならないので縮退条件は図4-9と若干異なる。具体的な振動子については4・2・3で示す。

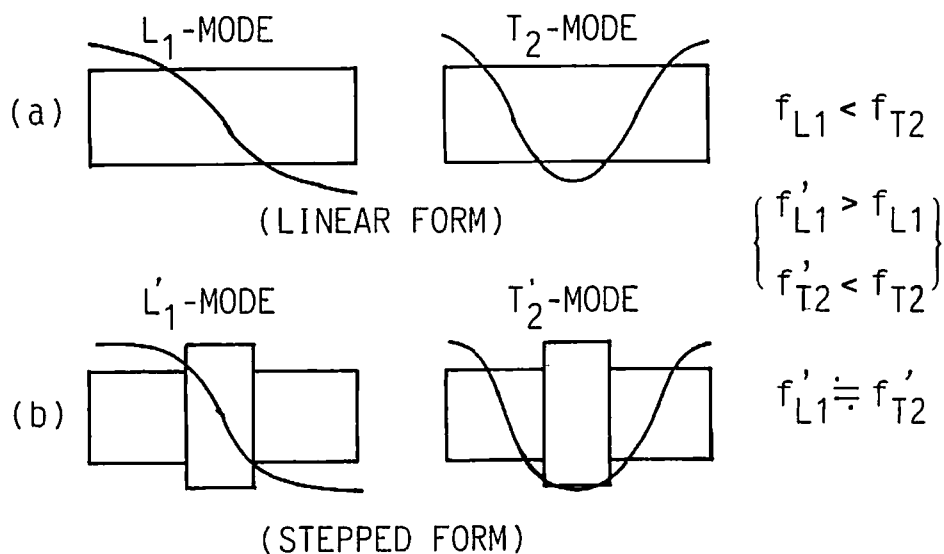


図4-8 中央部段付き振動子による縦振動と捩り振動の縮退

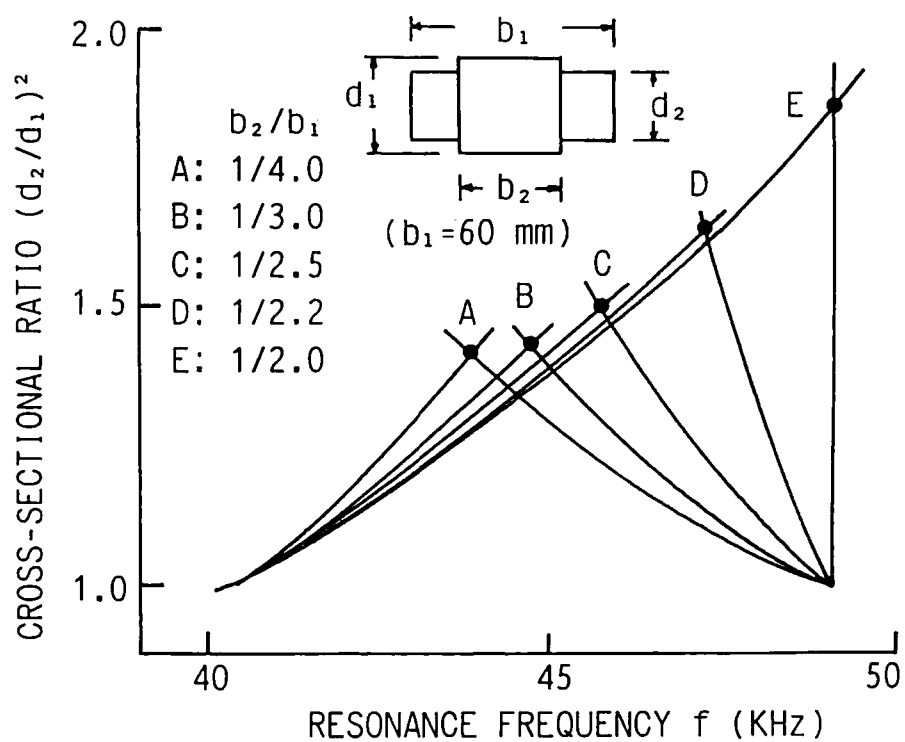


図 4 - 9 中央部段付き振動子の断面比
に対する共振周波数

4・2・3 試作超音波モータの特性

(a) 端部段付き振動子を用いる超音波モータの特性

図4-10に、縦振動1次と捩り振動1次モードを利用する超音波モータの構造を示す。圧電セラミクス C_T が捩り振動を、 C_L が縦振動を励振する。それぞれ、厚さ2(mm)、外径が20(mm)、内径6.0(mm)のセラミクス2枚で電極を挟み込み、さらに振動子I、II、III部を直径5(mm)のボルトで締め付けている。ロータは図のようにスプリングを介して、3(mm)のボルトで振動子I部に加圧接触される。ロータはステンレス製で、ステータとの接触面には薄い摩擦材(PPS)が接着されている。表4-1は振動子にロータをセットし、ほとんど加圧していない状態での両モードの等価定数値を示している。両モードの共振周波数には5(kHz)程度の差がある。図4-11は振動子への入力を200(V)一定とし、ロータへの加圧力を変えた時の両モードの共振周波数の変化を示している。加圧力が増すと縦振動の共振周波数が急激に上昇し、捩り振動の共振周波数に近づく。

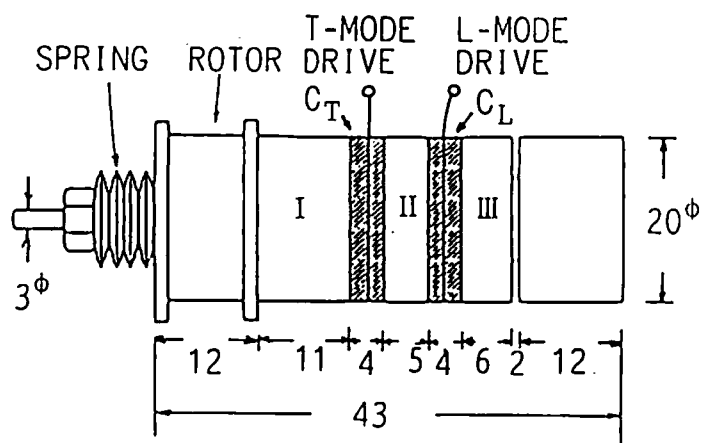


図4-10 端部段付き振動子を用いる超音波モータ
(縦1次-捩り1次モード利用)

表 4 - 1 図 4 - 10の振動子の等価回路定数値

	L_1 -MODE	T_1 -MODE
f_0 [kHz]	37.16	42.42
Y_{m0} [mS]	26.61	47.48
R [ohm]	37.59	21.06
L [mH]	76.39	40.19
C [nF]	0.24	0.35
C_d [nF]	3.53	3.34
Q	474.64	508.61
K_{vn}	0.26	0.32

f_0 : RESONANCE FREQUENCY

Y_{m0} : ADMITTANCE

Q : QUALITY FACTOR

K_{vn} : DYNAMIC ELECTROMECHANICAL COUPLING FACTOR

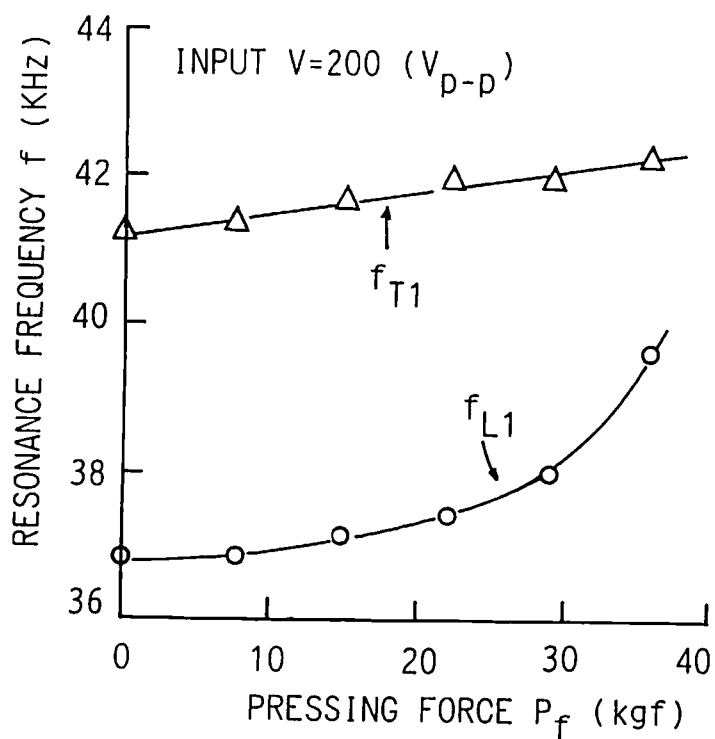


図 4 - 11 加圧に対する共振周波数の変化

図4-12に試作したモータの特性を示している。最大トルク 2.04(kgf-cm)、最大効率 22.7(%)であった。入力縦振動子に 0.5(W)、振り振動子に1.5(W)、駆動周波数は 48.0(kHz)である。駆動周波数は表4-1に示した各モードの共振周波数よりかなり高いが、加圧や入力によって共振周波数が変化することがその一因である。実際このモータは約40~50(kHz)の周波数範囲で回転が観測されたが、共振周波数近傍は動作が不安定であり、結果として安定に動作する周波数を選んでいる。

両モードの共振周波数は、材料定数を除けば縦振動、振り振動とも振動子の長さによってのみ決まる。従って、単一共振子として利用するのであれば終端の段付きなどにより低周波化(小型化)が計れるが、本構成のようなモード縮退型振動子では低周波、小型化は難しい。むしろ、直径の細い構造に適する。ただし、あまり細くなると駆動用のセラミクスが小さくなり、結果として駆動電圧の上昇や、振り振動駆動用セラミクスが作成し難いなどの問題が生ずる。

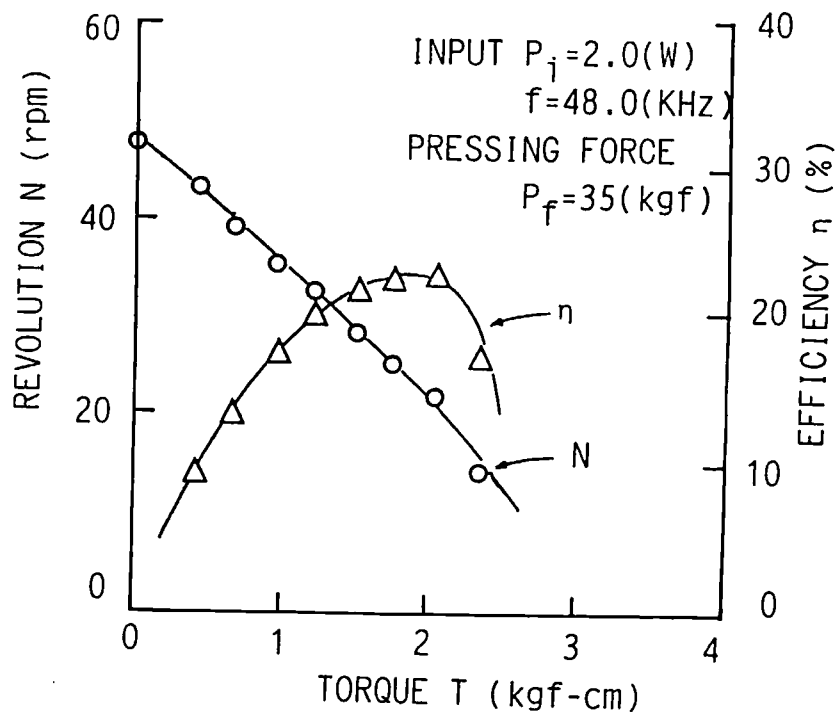


図4-12 図4-10に示すモータの負荷特性

(b) 中央部段付き振動子を用いるモータの特性

前節で述べたように、中央部に段付きのある振動子を用いることによって、縦振動1次と振り振動2次、あるいは振り振動3次モードとの縮退を実現することができる。図4-13に、縦振動1次と振り振動2次モードによる縮退振動子を用いた超音波モータの構造図を示している。この寸法で $f_{L1} = f_{T2} \approx 52$ (kHz) となり両モードは縮退する。各モード励振用の圧電セラミクスは、各共振モードのノード点に挿入している。振動子はジュラルミン製で、直径3(mm)のボルトで各部を締め付けている。ロータはステンレス製で、接触部は振動子側に摩擦材(PPS)を貼り付けている。表4-2に振動子単体での等価定数値の測定値を示している。共振先鋭度(Q)の値が共に200~300前後と小さいが、これは振動子構造の複雑さに加えて、締め付けようボルトが細かったこと、ならびに各接触部の研磨が十分でなかったことに起因するものと思われる。

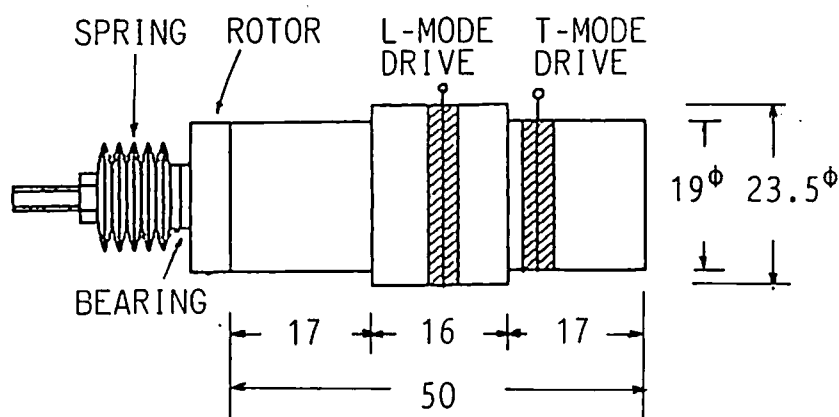


図4-13 中央部段付き振動子を用いる超音波モータ
(縦1次-振り2次モード利用)

図4-14～4-16に試作したモータの特性を示している。各モードの入力比を1:1, 入力をパラメータとして測定した。ロータの加圧は、共振モードや共振周波数があまり影響を受けない範囲を念頭におき、8.2(kgf)と小さくしている。従って、特性は比較的高回転であるが、トルクは最大で600(gf-cm)程度でこの種モータとしては小さい。最大トルクは入力5(W)の時に12.7(%)であった。

表4-2 図4-13の振動子の等価回路定数値

	L_1 -MODE	T_2 -MODE
f_0 [kHz]	50.49	47.71
R [ohm]	28.85	294.56
L [mH]	26.60	0.16
C [nF]	0.37	0.07
C_d [nF]	4.65	3.36
Q	292.52	162.83
K_{vn}	0.28	0.14

f_0 : RESONANCE FREQUENCY

Y_{m0} : ADMITTANCE

Q : QUALITY FACTOR

K_{vn} : DYNAMIC ELECTROMECHANICAL COUPLING FACTOR

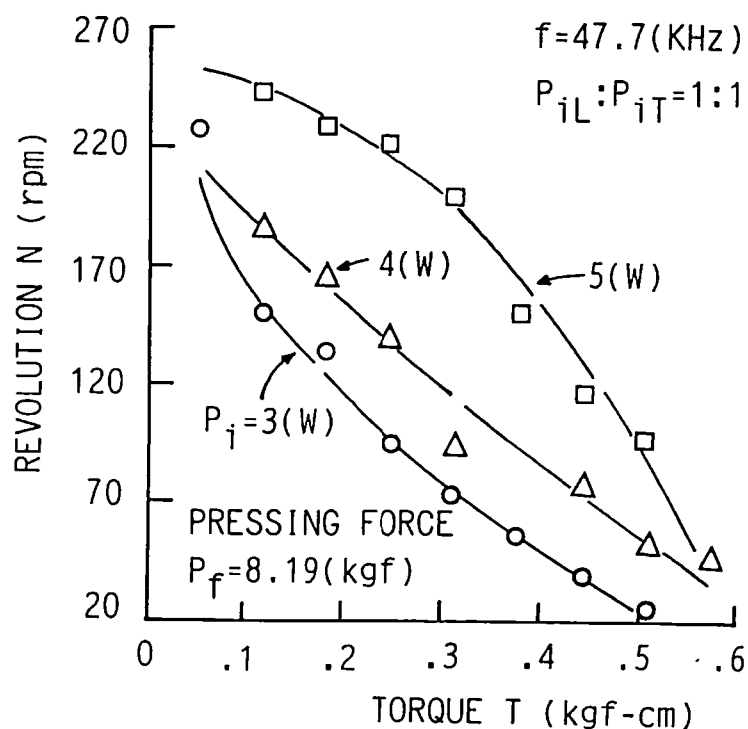


図4-14 中央部段付き振動子を用いる超音波モータの負荷特性(トルク-回転数)

図4-16は、各モードに加える入力を変えた時の特性である。ただし、負荷トルクは図4-15の特性で最も効率の良い286(gf-cm)一定とし、位相は縦モードに対して振りモードを210°進みとして測定した。すなわち、この条件では両モードへの電力比は $P_{iT} : P_{iL} \div 1 : 1$ が、好ましいことが明らかになった。

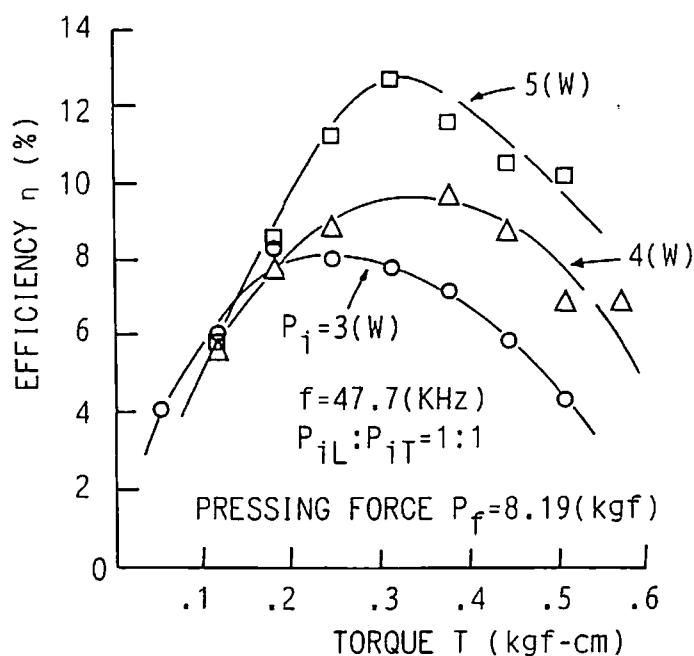


図4-15 中央部段付き振動子を用いる超音波モータの負荷特性（トルクー効率）

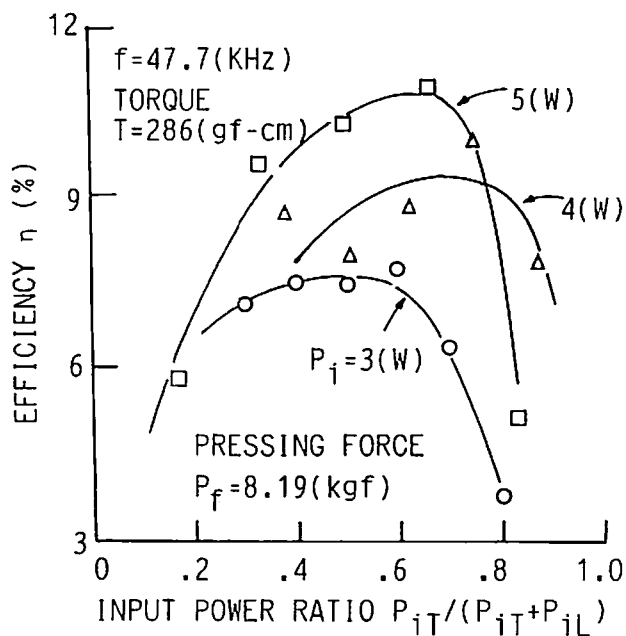


図4-16 中央部段付き振動子を用いるモータの各モードへの入力比に対する特性

4・2・4 単一共振子を組み合わせ使用した超音波モータ

それぞれ別個の縦振動子と振り振動子を組み合わせ使用しても、超音波モータを構成することが可能である。これは、モード縮退型振動子とは異なり、振動子を2個必要とするが、加圧による共振周波数変化への対応を含めた周波数調整、振動子の製作、支持方法の容易さからこの種モータの一構成法として見直されて良いと考えられる。図4-17に示す縦振動1次と振り振動1次の振動子からなるモータを試作した。図のように両振動子の間に、同図(b)に示すロータ（青銅製）が挿入され、左端のスプリングによって振り振動子がロータと共に縦振動子に締め付けられる⁽¹⁴⁾。すなわち、回転力は振り振動子とロータの接触面で与えられるから、この面の摩擦は大きく、またロータと縦振動子との接触面の摩擦は小さくすることが必要である。したがって、振り振動子の接触面に摩擦材(PPS)を貼り、ロータと縦振動子の接触面は、(b)図のように接触面積を小さくし、さらに縦振動子の接触面にテフロンシートを貼り、両面の摩擦力の低下を計っている。

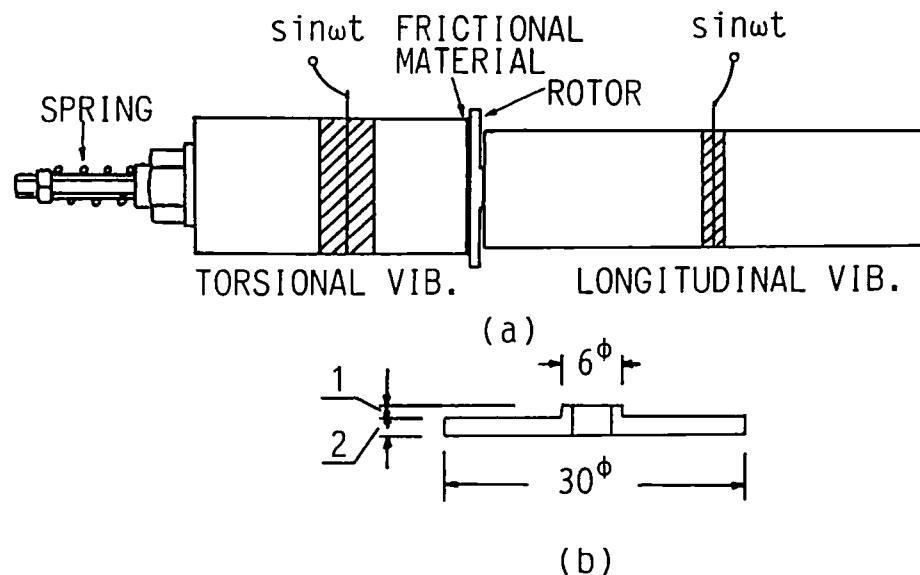


図4-17 単一共振子を組み合わせ使用する超音波モータ
(a) モータ構造 (b) ロータ

表 4 - 3 に、両振動子の等価定数値を示している。両モードの共振周波数には、約 1.4(KHz)の差があるが、加圧による共振周波数への影響は、図 4 - 18に示すように縦モードに大きく、約 7(kgf)の加圧で両モードの共振周波数は一致する。

図 4 - 19 ~ 21 にモータの特性例を示している。最大トルクは 1(kgf-cm)、最大効率は 8(%)程度であった。図 4 - 21 は、両振動子への入力比を変えたときの特性で、振動子に加える全入力を一定として、各振動子に加える入力の比を変えて測定した。トルクは、図 4 - 20 で効率が最大になる 700(gf-cm)一定とした。 $P_{IL} : P_{IT} \div 1 : 1$ の時に最も良い効率(約 11%)が得られた。実験においては両振動子に同相の入力を加えているが、一方を逆相にすることによって逆回転が得られる。実験で使用したロータが薄いために、振り振動子とロータの周辺部で十分な加圧が得られていないことも、トルクと効率の低さの一因になっている。

この構成はモータ全体は長くなるが、特性が改善できれば、前に述べた利点を有するので、用途によっては有効な構成になり得るものと考えられる。

表 4 - 3 図 4 - 17 の振動子の等価回路定数値

	L_1 -MODE	T_1 -MODE
f0 [kHz]	28.08	29.42
Ym0 [mS]	32.99	7.69
R [ohm]	30.31	130.13
L [mH]	223.33	137.61
C [nF]	0.14	0.21
Cd [nF]	4.34	0.99
Q	1300.01	195.48
Kvn	0.18	0.46

f0 : RESONANCE FREQUENCY
Ym0 : ADMITTANCE
Q : QUALITY FACTOR
Kvn : DYNAMIC ELECTROMECHANICAL COUPLING FACTOR

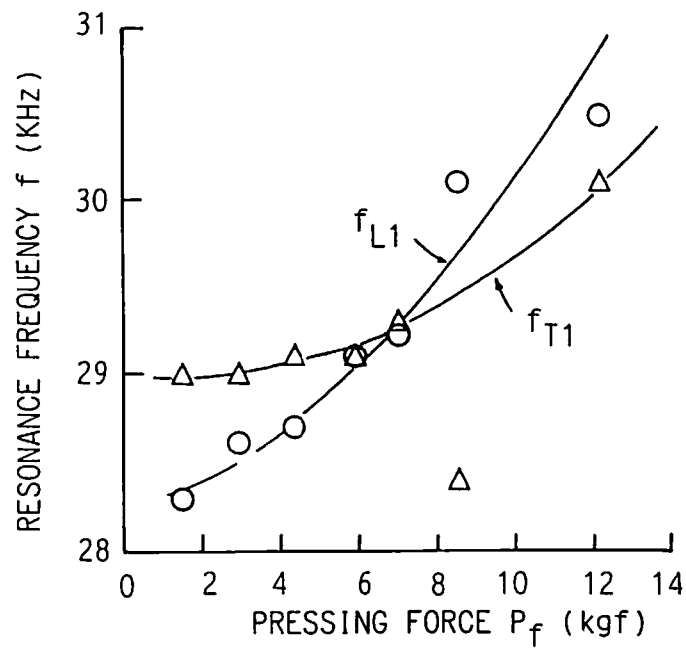


図 4-18 加圧に対する共振周波数の変化

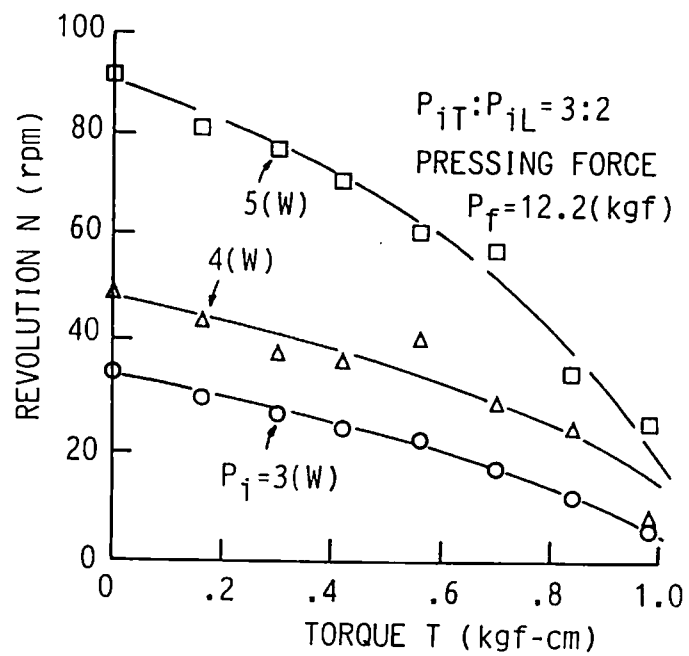


図 4-19 図 4-17に示すモータの負荷特性
(トルク-回転数)

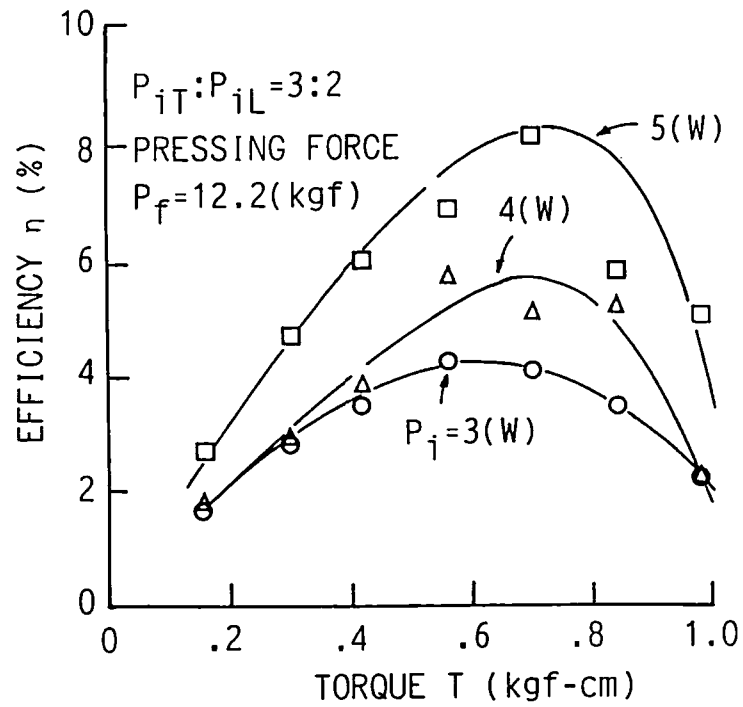


図 4 - 20 図 4 - 17 に示すモータの負荷特性
(トルクー効率)

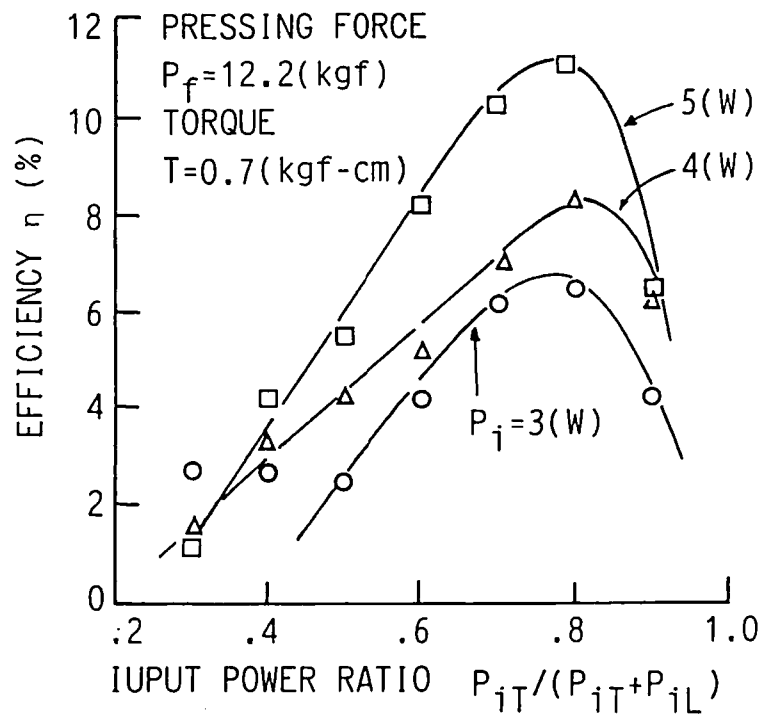


図 4 - 21 単一共振子を組み合わせ使用するモータの
各振動子への入力比に対する特性

4・3 平板の縦－屈曲振動利用の超音波モータ

4・3・1 縦－屈曲モード縮退型振動子を用いる

超音波モータの分類と構成

平板の縦振動と屈曲振動によるモード縮退型振動子は、種々の構成が考えられる。すなわちこの構成はモードの組み合わせの他に、駆動力の取り出し方や取り出す位置によってモータ形状が変わる。図4-22に本節で検討する縦－屈曲モード縮退型振動子を示している。この図で、 B_{vm} は厚み方向の屈曲振動を、 B_{Hm} は振動子の幅方向の屈曲振動を表している。(I)は縦振動(L_n)と厚み方向屈曲振動によるモード縮退型振動子である⁽¹⁵⁾。このモードの組み合わせは、 n と m の値によって種々考えられるが、先に述べたように、振動子の板面上で同じ方向の橢円運動が形成されるためには、縦振動の奇数次モードと屈曲振動の偶数次モード、縦振動の偶数次モードと屈曲振動の奇数次モードの組み合わせることが必要になる。特に、前者の組み合わせは、振動子の中央部が両モー

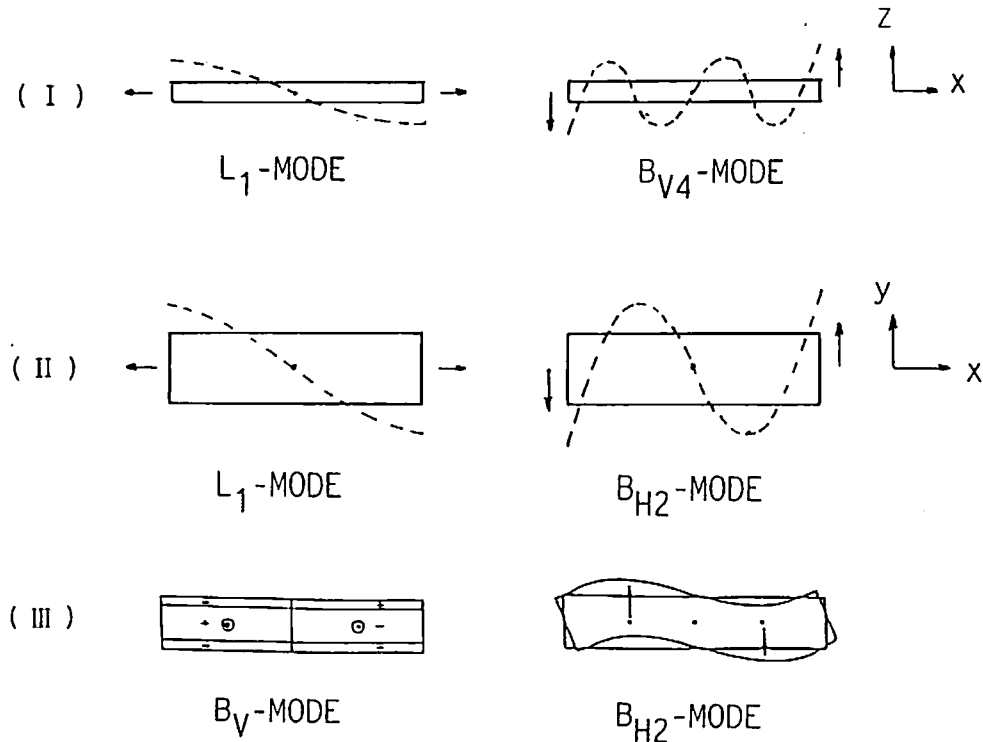


図4-22 縦－屈曲モード縮退型振動子の構成

の共通の節点となるので、支持の面で好都合である。ここでは、この点を考慮して縦振動 1 次と屈曲振動 4 次，8 次からなるモード縮退型振動子を取り上げ、考察している。この振動子は、駆動力の取り出し方によって回転型モータと直線移動型モータへ適用できるが、本節では回転型モータのみに限定して述べ、直線移動型モータは第 5 章で述べる。

(Ⅱ)は、縦振動と幅方向屈曲振動によるモード縮退型振動子で、図示のように振動子の側面での橢円運動を利用するのが効果的である。この構成もまた駆動力の取り出し方によって、回転型モータならびに直線移動型モータへの応用が可能となる。(Ⅲ)は、垂直方向と幅方向屈曲振動によるモード縮退型振動子を用いる構成である。この構成も種々のモードの組み合わせが考えられるが、具体的な構成例は本文では触れていない。

以上のように、平板の縦振動と屈曲振動によるモード縮退型振動子を用いる超音波モータは、モードの組み合わせによって実用的にも多くの構成が考えられるが、各々の特徴を生かしながら応用面まで含めて検討されるべきである。以下各節で具体的な構成例とモータの試作特性例を示す。

4・3・2 縦－屈曲モード縮退型振動子

(a) 平板の縦振動と屈曲振動の縮退条件

図 4-23 のような平板に圧電セラミクスを接着すると、縦振動ならびに屈曲振動が励振できる。一様な平板の縦振動と屈曲振動の共振周波数は、材料のヤング率を E ，密度を ρ とすると次式で与えられる。

$$f_{Ln} = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (n=1, 2, \dots) \quad (4-1)$$

$$f_{Bm} = \frac{\alpha_{Bm}^2}{4\pi\sqrt{3}} \frac{t}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad (4-2)$$

ここで、 l ， t はそれぞれ振動子の長さで、 α_{Bm} は

$$\cos \alpha_{Bm} \cosh \alpha_{Bm} = 1 \quad (4-3)$$

を満足する根として与えられる。次数が高くなれば、式(4-3)の根は近似的に

$$\alpha_{Bm} = \{(2m+1)/2\}\pi \quad (4-4)$$

で与えられる。表4-4にいくつかの値を示している。従って、縮退条件

$$f_{Ln} = f_{Bm} \quad (4-5)$$

より振動子の寸法比が決まる。例えば、縦1次モードを使用すると、

$$l = \frac{\alpha_{Bm}^2 t}{2\pi\sqrt{3}} \quad (4-6)$$

であるから、振動子の厚さによって、その長さが決まる。しかし実際には、励振用の圧電セラミクスや、振動子の寸法比の影響を考慮しなければならない。これらの影響を考慮した縮退条件を求めることも可能であるが、実験では式(4-6)で求めた振動子の長さを調整することによって、縮退状態を実現した。縦振動、屈曲振動の共振周波数が、それぞれ振動子の長さに反比例、2乗に反比例することを利用するもので、図4-24はその一例である。この補正量は、使用モードや接着圧電セラミクスの寸法により異なることは当然である。

表4-4 屈曲振動の周波数定数

m	1	2	3	4	5	6	7	8
α_{Bm}	4.7300	7.8532	10.9956	14.1372	17.2787	20.4203	23.5619	26.7035

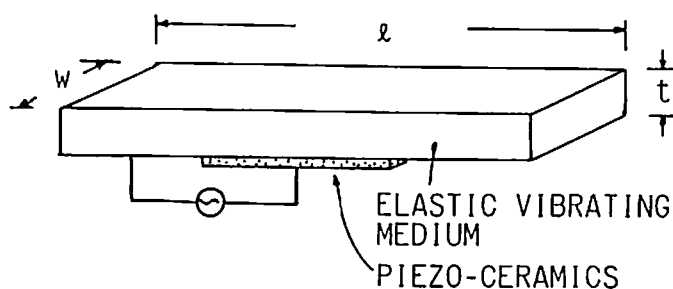


図4-23 縦一屈曲モード縮退型振動子

図4-25に幅方向の屈曲振動を使用した振動子を示す。振動子としてセラミクス単体を用い、縦振動1次と屈曲振動2次を使用する。従って、電荷分布を考慮し、電極を図示のように分割し、駆動している。振動子の幅と長さの比が比較的大きいので、縮退条件は式(4-5)より多少ずれるが、幅や長さの調整によって両モードの縮退は容易に実現できる。

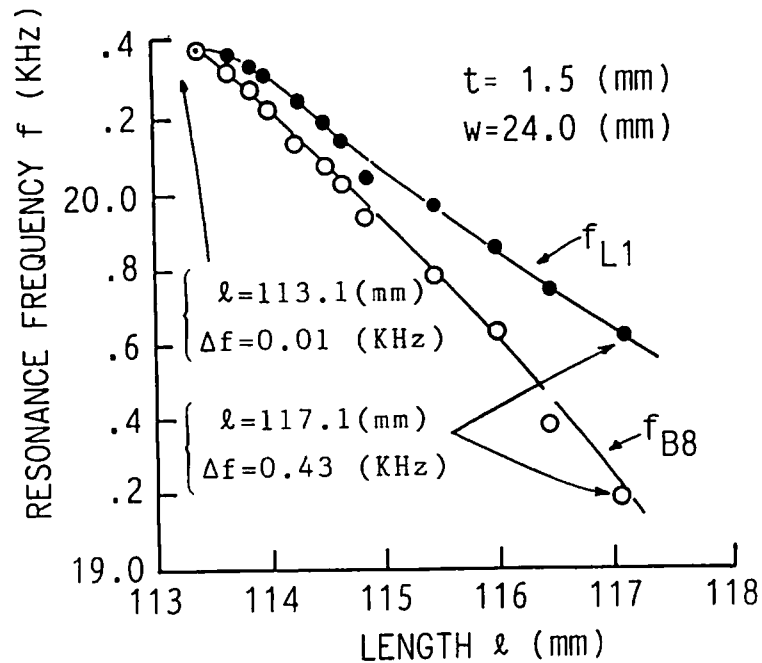


図4-24 縦一屈曲モード縮退型振動子の周波数調整の一例

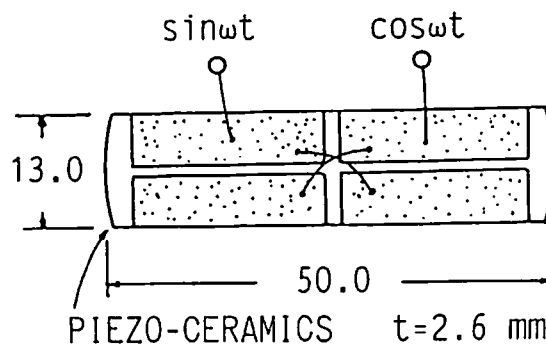


図4-25 縦1次と幅方向屈曲2次利用のモード縮退型振動子

(b) 変位の楕円運動の形成

(a)で述べたようにモードの組み合わせによって、いくつかの現実的な平板のモード縮退型振動子が得られる。図4-26に、縦振動1次と厚み屈曲振動のモードパターンと、これらのモードによって形成される変位の楕円運動を示している。すなわち、偶数次の屈曲振動を用いれば振動子の中心に対して対称な点では、同じ方向の楕円運動が形成され、また振動子の中央が両モードの共通の節点になるので、支持にも好都合である。屈曲振動の次数は振動子形状や使用目的によって選べる。

図4-27(a)に縦振動1次と幅方向屈曲振動2次によるモード縮退型振動子を示している。図に示すように振動子の側面（周辺）で楕円運動が形成される。例えば、同図A, A'点の楕円運動は縦振動1次と屈曲振動の偶数次モードを利用すると同じ方向になる。また同図(b)は、縦振動1次と幅方向屈曲振動3次の場合で、図に示すようにA, A'では反対方向の楕円運動が形成される。

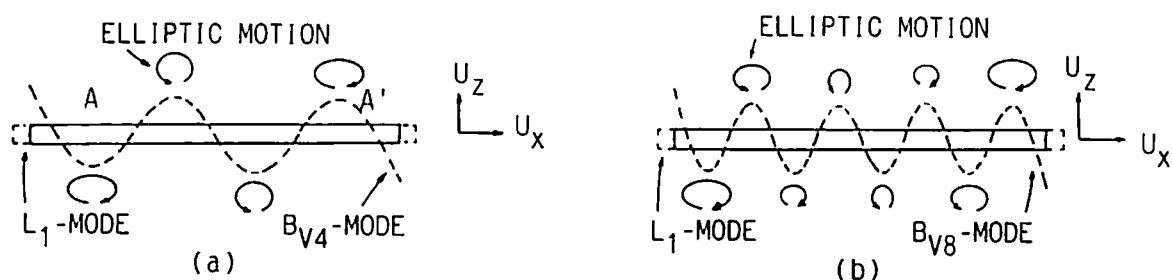


図4-26 縦一屈曲モード縮退型振動子による
変位の楕円運動の形成（厚さ方向利用）

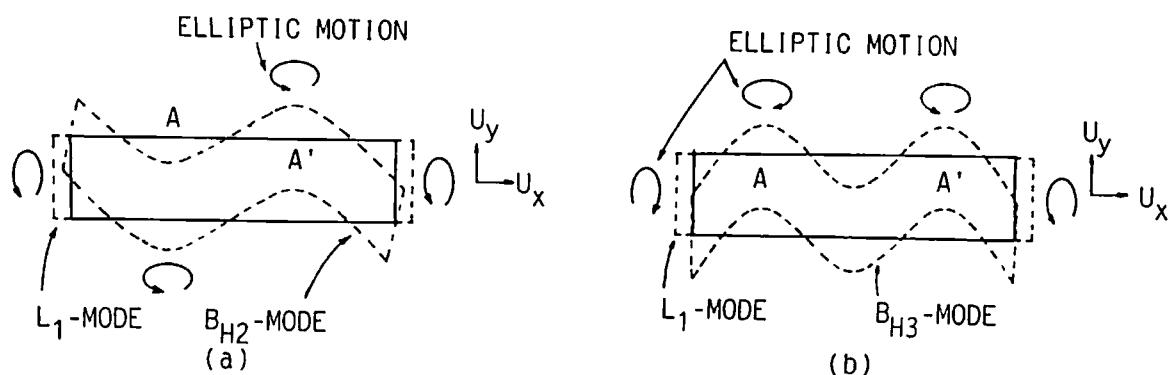


図4-27 縦一屈曲モード縮退型振動子による
変位の楕円運動の形成（幅方向利用）

4・3・3 試作超音波モータの特性

(a) 縦振動1次と厚み屈曲振動4次モード利用の構成

屈曲振動を利用する場合、電荷分布を考慮した駆動方法を採用する必要がある。図4-28(a)に4次の屈曲振動(B_{v4} モード)の電荷分布を示しているが、このモードを効率よく励振するためには、例えば図4-28(b)に示すように圧電セラミクスを接着する必要がある。ここでは、振動子基板が($48.2^{\text{mm}} \times 10.0^{\text{mm}} \times 2.6^{\text{mm}}$)のステンレス鋼板の一面に、圧電セラミクス(NEPEC-6)を接着している。

第3章ですでに使用していたのであるが、縮退モードの駆動方法について補足する。縮退する2つのモードを 90° 位相の異なる入力で駆動する場合、各々の端子で各モードを独立に駆動する方法と、同時に両モード駆動する方法(図4-28(b)参照)があるが、ここでは後者の駆動方法を採用した。

図4-28(b)のセラミクスに 90° 位相の異なる入力($\sin \omega t, \cos \omega t$)を印加すると、振動子はセラミクスの分極方向に応じた歪を生じる。屈曲モードの場合、セラミクスの極性配置が屈曲4次モードの誘起電荷分布とすべて一致しているため、入力に応じた位相関係で歪が生じる。同図で D_1 入力による歪位相を基準にすれば、屈曲モードに生じる歪ベクトル S_B は図4-29(a)のように、 D_1 入力に対し 45° 位相の進んだものとなる。

一方縦モードの場合、誘起電荷分布に対する圧電セラミクスの分極方向は、図4-28(b)に示すようにC1, C3のセラミクスでは順方向であり、C2, C4部分では逆方向である。したがって、セラミクスC2, C4により生ずる歪は位相が反転するので、縦モードによる歪ベクトル S_L は図4-29(b)のように 45° 位相が遅れる。結果として、両モード間には 90° 位相の異なる歪が生じ、これに応じた振動により、図4-30に示すような変位の楕円運動が形成される。

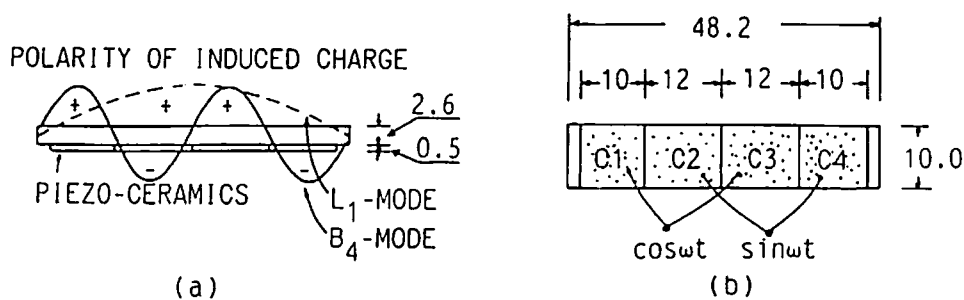


図 4 - 28 L_1-B_{v4} モード縮退型振動子と駆動方法

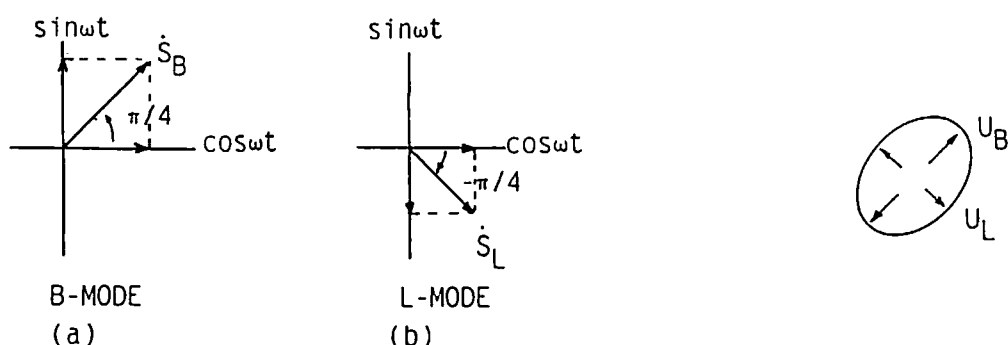


図 4 - 29 図 4 - 28(b)の駆動方法によって生ずる各モードの歪

図 4 - 30 変位の楕円運動

このステータ振動子から直接駆動力を取り出すモータ構造として、図 4 - 31 のモータを試作した。(a)は上部からの構造図、(b)は側面図である。ロータとしてベアリングを使用し、加圧は図のようにベアリングから取り出した棒を介して上下可動する支持部により行った。ロータの位置は屈曲振動のループ上(図 4 - 26 A, A' 点)にセットされる。図 4 - 32 に入力に対する駆動力の測定例を示している。これは図中に示すようにフォースゲージを用いて測定した。ステンレス製ローラが 1 個だけであるが 320(gf)程度の力が引き出せる。図 4 - 33 に入力に対する効率の測定例を示している。この場合もローラが 1 個だけで 10(%)程度の効率が得られたが、この構造の要点は接触面の材質と共に、安定な加圧機構の考案にある。

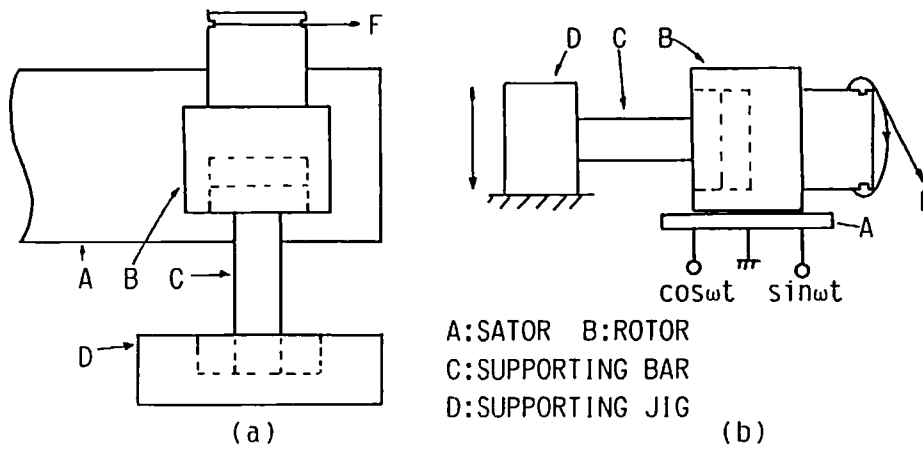


図 4 - 31 L_1-B_{v4} モード縮退型振動子を用いる
回転型超音波モータ（片面 1 ロータ使用）

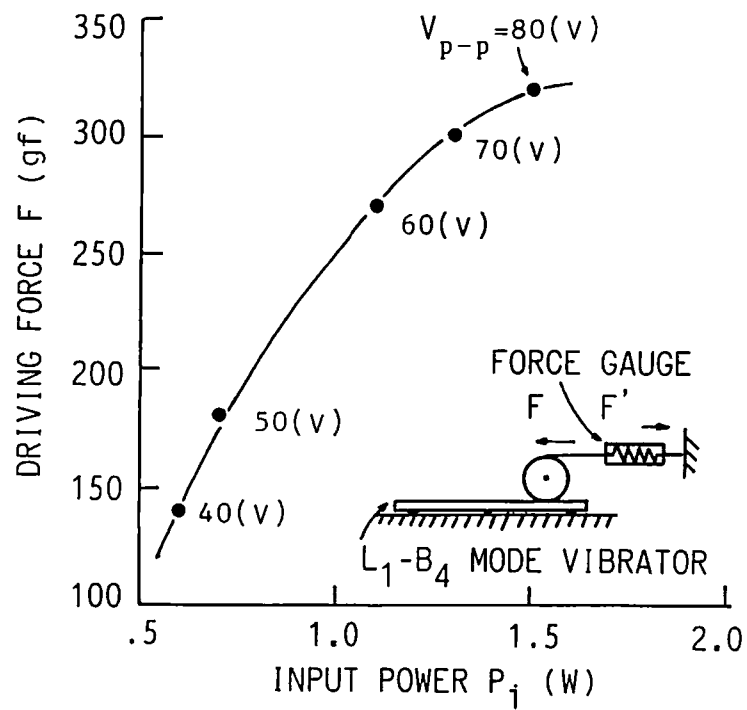


図 4 - 32 図 4 - 31に示す超音波モータの特性
（入力ー駆動伝達力）

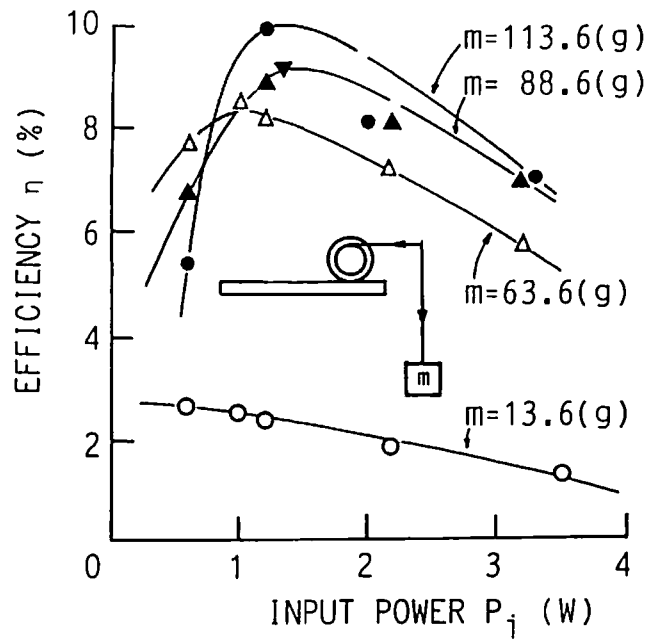


図 4-33 図 4-31 に示す超音波モータの特性
(入力効率)

この点を考慮し改良したモータを図 4-34, 図 4-35 に示す⁽¹⁹⁾。まず加圧時に振動子の反りを軽減するために、ステータを図のように上下のフレームで挟み込む構造とした。これらのフレームは、加圧調整用のスプリングを通して 4 本のボルトで締め付けられる。上下のフレームには、ステータから動力を得るためのロータ (直径 12 mm, 幅 18 mm) が 4 個取り付けてある。ロータは、上下フレームの外側に設けられたプーリを介してベルト (軟らかいゴム製) でつながれ、各ロータの回転数が等しくなるようにしている。ステータ振動子の保持は、両モードの共通の節部である振動子の中央部に設けた突起を、下方のフレームに固定して行われる。また、図 4-35 は下方のフレームにステータ振動子の保持として、ゴムのブロック ($2.0 \times 14.0 \times 3.0 \text{ mm}^3$) を取り付け、2 ロータ方式の動力抽出としたものである。

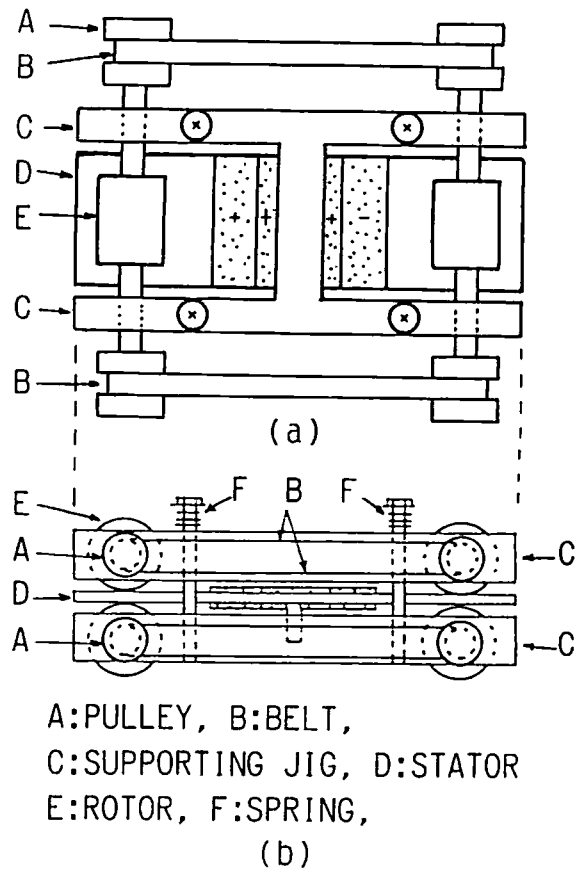


図 4 - 34 縦一屈曲モード縮退型振動子を用いる回転型超音波モータの構造（両面 4 ロータ使用）

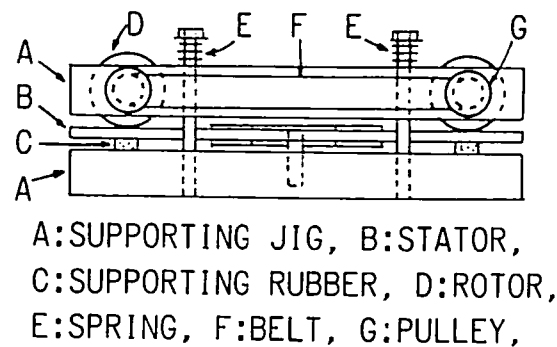


図 4 - 35 縦一屈曲モード縮退型振動子を用いる回転型超音波モータの構造（片面 2 ロータ使用）

実験に使用したモードと振動子を図4-36、等価回路定数の測定結果を表4-5に示している。図4-36(a)ならびに(b)に示すように、ここでは縦1次と屈曲8次モードを用いた。セラミクスは、図4-36(c)に示すように接着し、中央部のセラミクスで縦振動を、端部で屈曲振動を励振した。ステータのロータとの接触部には、摩擦材を添付している。図4-37、図4-38に、それぞれ2ロータ方式、4ロータ方式の特性を示している。屈曲振動への入力を0.5(W)一定とし、縦振動への入力を大きくした。特性にそれほど差はないが、トルク、回転数ではむしろ2ロータ方式が優れている。加圧機構まで含めた振動子の支持治具の精度よい製作が特性の良否を左右するので、今後さらに検討が必要である。

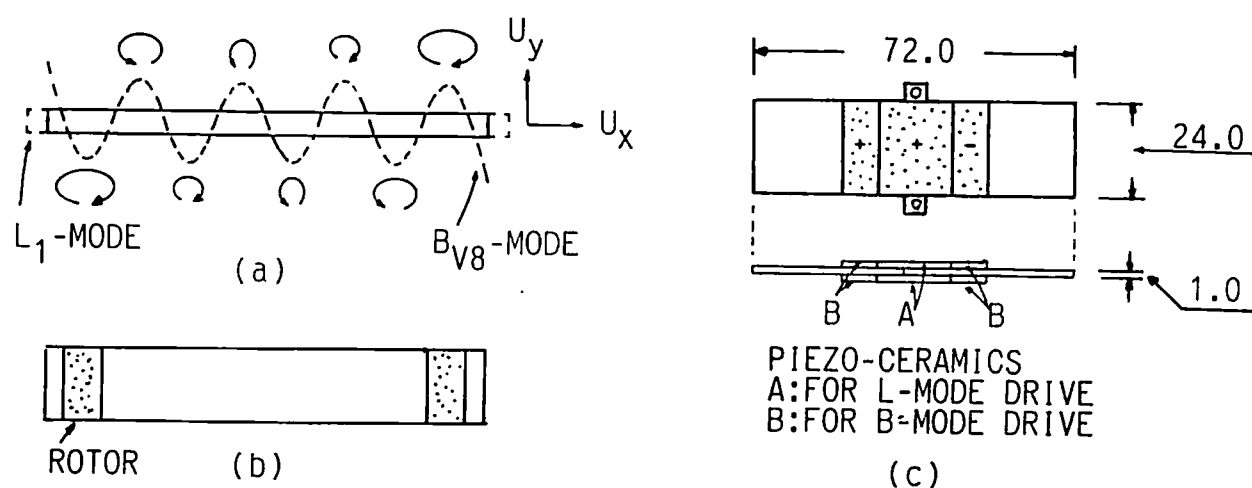


図4-36 縦一屈曲モード縮退型振動子
(a) 縦1次と屈曲8次モード (b) ロータ加圧位置
(c) L_1 - B_{V8} モード縮退型振動子と駆動方法

表4-5 図4-36に示す振動子の等価回路定数値

	L_1 -MODE	B_{V8} -MODE
f_0 [kHz]	37.13	37.02
R [Ω]	91.5	104.7
L [mH]	140.0	96.5
C [nF]	0.131	0.191
C_d [nF]	15.0	16.3
Q	357	214
K_{Vn} [%]	9.4	10.8

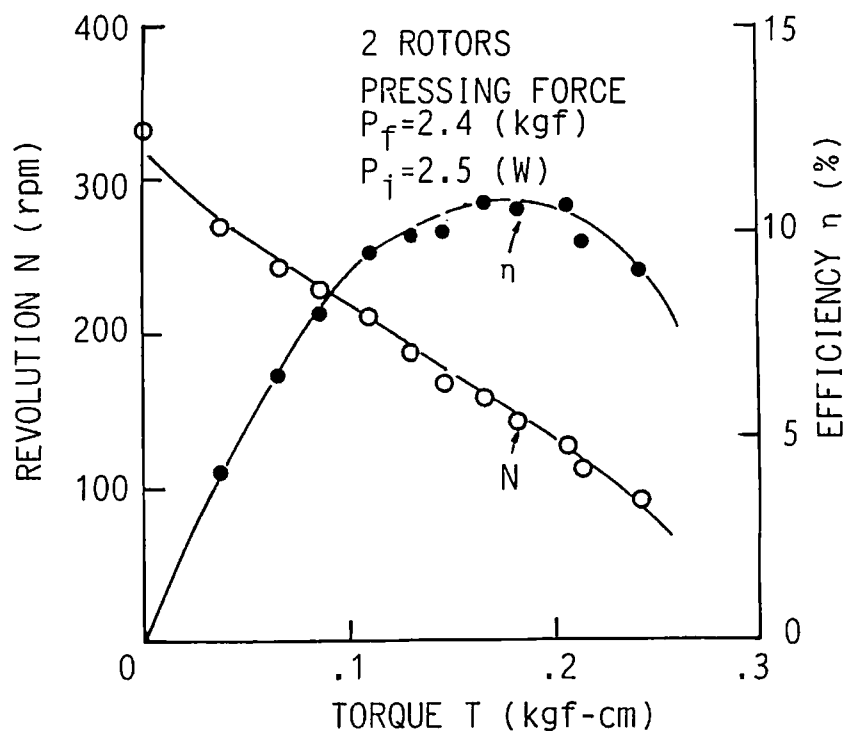


図 4 - 37 図 4 - 35 に示す構成の負荷特性

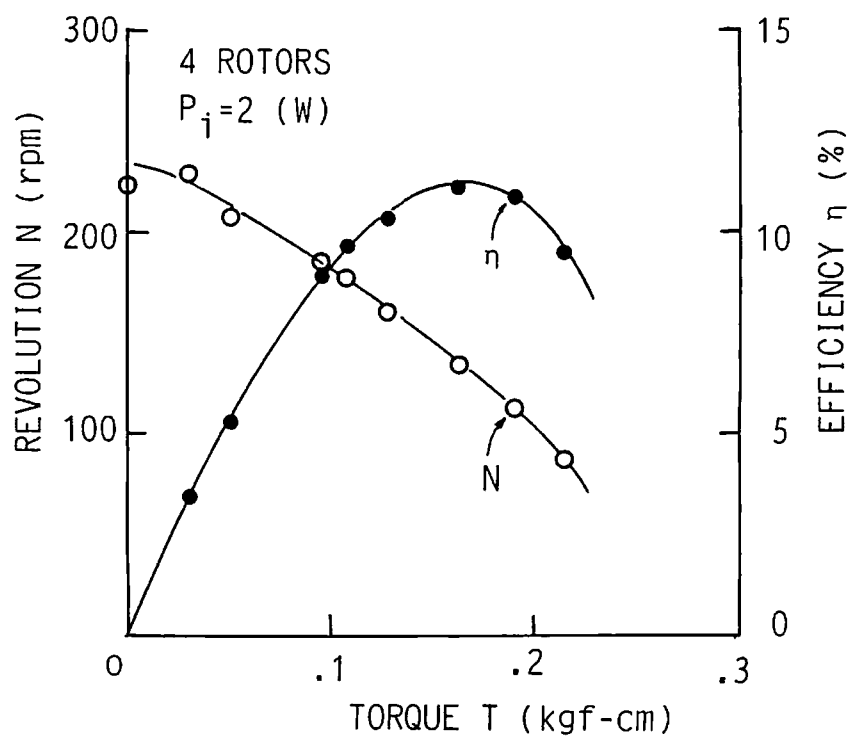


図 4 - 38 図 4 - 34 に示す構成の負荷特性

(b) 縦振動 1 次－幅方向屈曲振動 2 次モード利用の構成

幅方向屈曲振動とは図 4－27(a) に示したように y 方向の屈曲振動を表す。この場合、振動方向の厚み W が比較的大きいので、低次の屈曲モードと縦振動 1 次モードの縮退が利用できる。図 4－39 に使用した、縦 1 次 (L_1)-屈曲 2 次 (B_{H2}) モード縮退型振動子を示している⁽²⁰⁾。振動子としてセラミクス単体を用い、電極は図のように分割し駆動した。駆動方法としては、 L_1 モードと B_{H2} モードを 2 つの入力から同時に駆動する前述と同じ方法を採用している。ロータとの接触部となる辺には、図のように摩擦材を接着している。表 4－6 に振動子としての等価定数値を示している。ただしこの測定においては、図 4－39 の駆動では L_1 モードと B_{H2} モードを独立に駆動できないので、それぞれ独立に励振できる駆動方法で測定している。セラミクス単体の振動子であるために、電気機械結合係数は、前述の振動子に較べて大きい値になっている。

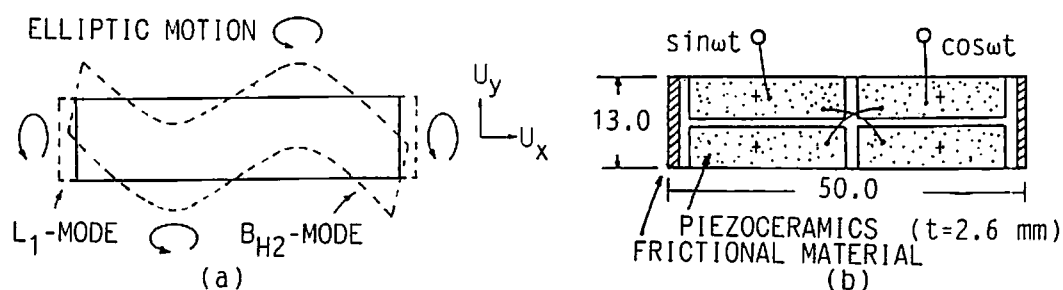


図 4－39 L_1 － B_{H2} モード縮退型振動子

表 4－6 図 4－40 に示す振動子の等価回路定数値

	L_1 -MODE	B_{H2} -MODE
f_0 [kHz]	31.71	31.18
R [Ω]	110.	374.
L [H]	0.142	1.13
C [pF]	177	23.1
C_d [pF]	2518	732
Q	257	592
K_{vn} [%]	26.5	17.7

図4-40に試作したモータの構造図を示している。同図(a)は正面図、(b)、(c)は側面図で、(c)には測定状態をも示している。縦振動と屈曲振動の共通の節部である振動子の中央部が、図のように支持される。ロータはベアリングを介して支持部にセットされる。この支持部がガイドにはめ込まれ、スプリングを通じてガイドに加圧、すなわちガイドに固定されているステータとロータとの加圧が行われる。加圧は左右独立に調整できるが、実験では常に左右同程度の力で加圧し測定した。ステータとロータは図のように接触面積が小さいために、構造的には多少不安定であるが、加圧を調整することによって両方のロータは同じような特性で回転する。片側のロータによる特性を図4-41に示している。効率は小さいが、最大トルクは450(gf-cm)程度あり、押し付け型モータとしては比較的大きい。両側のロータが同方向に回転するので、ベルト掛けなどによって2個のロータの回転力を利用すれば、負荷による接触面への影響が少なくなり、効率、トルクが改善されるものと思われる。構造的には、ステータとロータの接触面が小さいので、両者の間にのスリップが生じ、これが効率の低さの主な原因と考えられる。

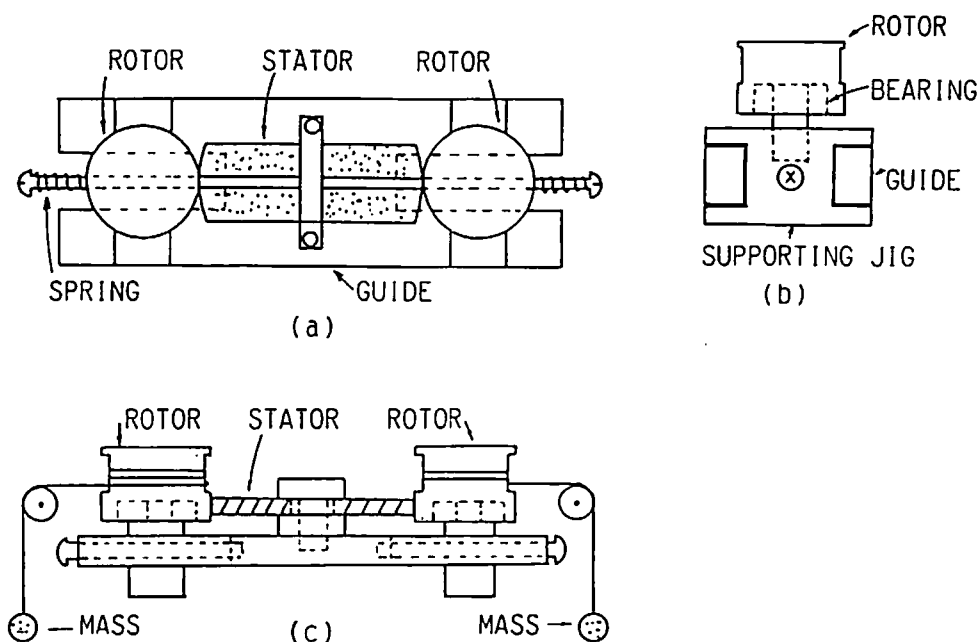


図4-40 L_1-B_{H2} モード縮退型振動子利用の超音波モータ
 (a), (b) L_1-B_{H2} モード縮退型振動子を用いる
 回転型超音波モータの構造
 (c) 特性測定図

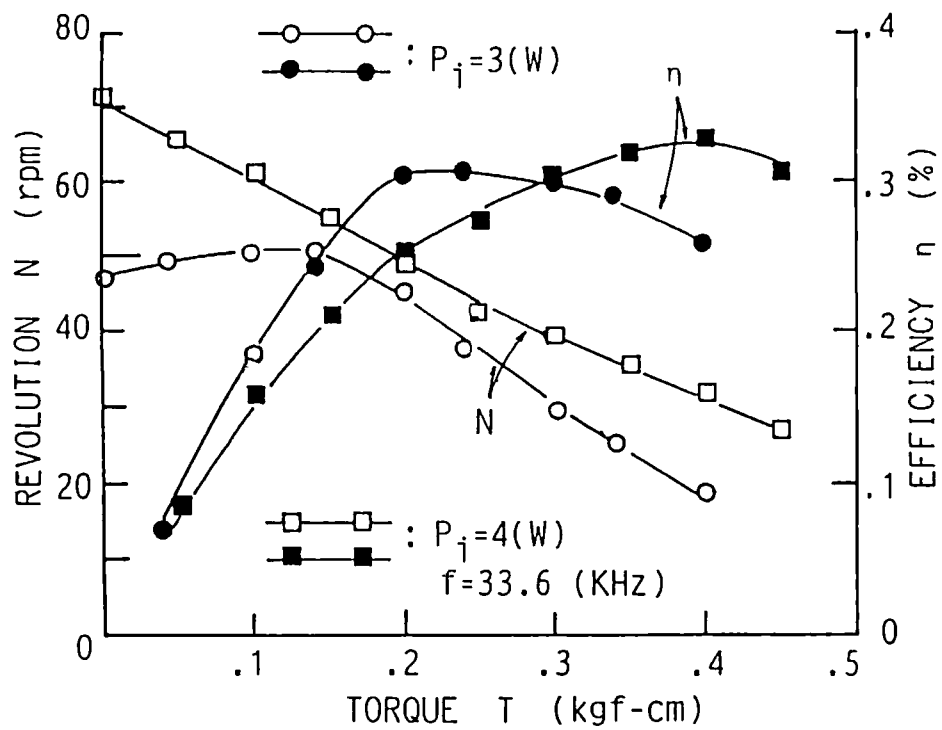


図 4 - 41 図 4 - 40に示すモータの負荷特性

4・4 結 言

異形モード縮退型振動子を用いる2種類の超音波モータについて述べた。最初に円柱の縦振動(L_m)と振り振動(T_m)を用いた超音波モータを提案した。以下の方法でこれらのモードの縮退を実現した。

1). 端部段付き振動子を用いることによって $f_{L1} = f_{T1}$

2). 中央部段付き振動子を用いることによって $f_{L1} = f_{T2}$

また本論文のテーマからはそれるが、

3). 単一共振子を組み合わせ使用する構成

についても提案した。各構成についてその縮退条件を求めモータの試作特性例を示した。各構造の特徴、問題点を整理すると以下のようなになる。

1). 付加質量部分の長さの調整によって2つのモードの縮退が容易に実現される。

両モードのノードの位置が離れているので、駆動用圧電セラミックスの挿入に好都合であり、両モードの電気機械結合係数が比較的大きい。
トルク3~5(kgf-cm), 効率20(%)以上で高トルクのモータに適する。

2). セット後の周波数調整が困難である。

中央部段付き部に縦振動駆動用の圧電セラミックスを挿入するので、構造が多少複雑になる。振りモードの電気機械係数が小さい。
トルク500(gf-cm), 効率12(%), 回転数300(rpm)で、この種モータとしてはトルクは小さい。

3). 各モードの共振周波数が独立に調整できるが、ロータの挿入方法が特性に大きな影響を与える。

モータの長さとしては1). 2). の2倍程度になるが周波数調整は容易である。この考え方は他のモード縮退型モータにも適用できる。

4・3では平板の縦一屈曲モード縮退型振動子を用いる超音波モータについて述べた。平板の厚み方向と幅方向の屈曲振動を考慮すると、3種類のモード縮退型振動子が得られ、それに対応していくつかのモータ構造が考えられるこ

とを示した。 $L_1 - B_{Vn}$ ($n = 4 \sim 8$) モードを利用したモータのを試作し、基本的な特性と構造上の特徴を明らかにした。 $L_1 - B_{H2}$ モードを利用した構造は振動子の長さ方向の側面から駆動力を取り出すモータを試作した。これらの構造は共に薄型構造に適し、駆動力の取り出し方も種々考えられるので、モータ単独としてよりは後述するように応用面を考慮した開発研究が待たれる。

以上を要約すると

- (1) 段付き振動子を用いることにより円柱の縦振動と振り振動の縮退を実現するための方法を提案した。
- (2) 端部段付き振動子を用いるモータは良好な特性が得られる。
- (3) 縦一屈曲モード縮退型振動子を用いる超音波モータを提案し、その基本的な特性を示した。

となる。

参 考 文 献

- (1) 永井健三, 近野正編: "電気・機械振動子とその応用", コロナ社, (1974).
- (2) 黒澤実, 上羽貞行: "振動子と積層アクチュエータを用いた超音波モータ", 信学会技術報告, US87-31, pp.27-32 (1987).
- (3) 富川, 渡辺, 高野: "縦一振り振動モード利用の超音波モータについて", 音響学会平成元年度春季研究発表会講論集, No.3-P-22, pp.817-818 (1989).
- (4) 井上武, 冥加修, 大西修: "縦一振り複合振動子を用いた超音波モータの機械等価回路解析", 音響学会平成2年度秋季研究発表会講論集, No.2-5-5, pp.805-806 (1990).
- (5) 富川, 足立, 青柳, 高野, "縦一振り振動利用の超音波モータ", , 電気学会第19回EMシンポジウム, pp.5-12 (1990).
- (6) 富川, 青柳, 渡辺, 高野: "縦一振り振動モード利用の超音波モーター単一共振子の組み合わせ構成の場合", 1989年電子情報通信学会秋季全国大会講論集, No.SA-5-5, pp.1-178-179 (1989).
- (7) 富川, 近野, 瀬野尾: "双共振モード音片を用いた電気・機械フィルター横振動と縦振動の双共振利用", 電子通信学会論文誌, 51-A, Vol.24, No.9, pp.341-347 (1968).
- (8) 富川, 小笠原, 菅原, 近野, 高野, "超音波モーターの構成について", 電子情報通信学会技術報告, US87-5, pp.29-36 (1987).
- (9) Y.Tomikawa, T.Nishizuka, T.Ogasawara and T.Takano: "A Paper or Card Forwarding Device Using a Flat-Type Ultrasonic Motor", Sensors and Materials, Vol.1-6 pp.359-379 (1989).
- (10) 高野, 富川: "縦一屈曲多重モード振動子利用の直線移動型超音波モータ", 昭和63年電子情報通信学会秋季全国大会講論集, No.SA-5-6 pp.A-1-153-152 (1988).
- (11) Y.Tomikawa, K.Adachi, M.Aoyagi, T.Sagae and T.Takano: "Some Constructions and Characteristics of Rod Type Piezoelectric Ultrasonic Motors Using Longitudinal and Torsional Vibrations", IEEE Trans. UFFC, Vol.39, No.5, pp.600-608 (1992).

- (12) 富川, 足立, 青柳, 三部, 高野: "縦一振り振動モード利用の超音波モーター-負荷質量(イナーシャ)型の場合-", 1990年電子情報通信学会春季全国大会講論集, No.A-351, pp.1-351 (1990).
- (13) 富川, 足立, 青柳, 高野: "縦一振り振動モード利用の超音波モーター中央段付き型構成の場合-", 1990年電子情報通信学会春季全国大会講論集, No.A-349, pp.1-349 (1990).
- (14) 富川, 足立, 青柳, 寒河江, 高野: "縦一振り振動モード利用の超音波モーターロータ・サンドウィッチ型の場合-", 音響学会平成元年度秋季研究発表会講論集, No.1-P-③, pp.933-934 (1989).
- (15) 富川, 西塚, 小笠原, 高野, 菅原, 近野: "縦一屈曲多重モード振動子利用の平板状モーター", 音響学会昭和63年度春季研究発表会講論集, No.2-P-30, pp.797-798 (1988).
- (16) 富川, 西塚, 高野: "縦一屈曲・平板状多重モード振動子利用超音波モーターの特性", 1989年電子情報通信学会春季全国大会講論集, No.A-197 pp.1-199 (1989).
- (17) T.Takano and Y.Tomikawa, "Linearly Moving Ultrasonic Motor Using a Multi-Mode Vibrator", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.28, Suppl.28-1, pp.164-166 (1989).
- (18) O.Ohnishi, O.Myoga, T.Uchikawa, T.Inoue, S.Takahashi and Y.Tomikawa, "Paper Transport Device Using a Flat Plate Piezoelectric Vibrator", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.28, Suppl.28-1, pp.167-169 (1989).
- (19) 富川, 小笠原, 高野: "縦一屈曲2重モード平板利用の超音波モーター", 1991年電子情報通信学会秋季大会講論集, No.SA-9-3, pp.1-231 (1991).
- (20) 高野, 富川, 小笠原: "伸び(R,1) - 屈曲((1,1))・圧電セラミックス孔あき円板を用いた超音波モーター", 音響学会平成元年度秋季研究発表会講論集, No.1-P-④, pp.935-936 (1989).

第5章 モード縮退型振動子を用いる直線移動型超音波モータ

5・1 緒言

第3、4章で述べた回転型超音波モータのステータは、駆動力の取り出し方を変えることによって、その大部分が直線移動型モータのステータとして用いることができる。超音波モータの特徴の一つは、超音波モータ本来の特徴に加えて、構造的に特色のあるモータが構成できる点にある。直線移動型モータとしての利用もこの一つで、構造的な特徴を生かせる応用面を考慮して検討されるべきであろう^{(1) - (4)}。

本章では、円環の径方向対称伸び振動と非軸対称振動によるモード縮退型振動子と、平板（棒）の縦振動と屈曲振動によるモード縮退型振動子を用いる2種類の直線移動型モータの試作特性例を示し、考察している。

5・2では、円環の径方向対称伸び振動(R, 1)モードと非軸対称振動((1, 1))モードを利用する直線移動型モータについて述べる⁽⁵⁾。縮退条件と動作原理について詳述し、試作モータの特性例を示している。このモータは円環周辺部で形成される橢円運動を利用するので、構造的にはステータとなる振動子と同程度の厚さのモータが構成できる。この薄型構造の特徴を生かしてカードリーダーへの実用化研究が試みられている。これについて7・2で述べる。

5・3では、平板の縦振動と屈曲振動によるモード縮退型振動子を用いる直線移動型モータについて述べる⁽⁶⁾。この振動子は、第4章で回転型モータに使用した振動子と同じ形であるが、振動子形状から判断すると直線移動型モータとしての利用に向いているものと思われる。両モードによって形成される橢円運動を、直接駆動力として利用するタイプと、ベアリングを介して駆動力を得るタイプについて検討している。前者はステータ振動子が直接レール上を動くため、ステータとレール間の摩擦力を均一に保つことが、安定な動作を得る要因となる。後者はこの欠点を補うもので、ベアリングによって一端回転力として駆動力を取り出す構造としたものである。

5・2 円環の径方向対称伸び振動と非軸対称振動を利用する

直線移動型超音波モータ

5・2・1 (R, 1) - ((1, 1))モード縮退型振動子と動作原理

(a) 縮退条件

(R, 1) - ((1, 1))モード縮退型振動子は、かつて多重モードフィルタ用共振子への応用を目的として研究されている⁽⁷⁾。すなわち、円環の径方向対称伸び振動(R, 1)モードと非軸対称振動((1, 1))モードは、円環の内径比と外径比をある値に選ぶことによって縮退する。各モードの共振周波数 $f_{(R, 1)}$, $f_{((1, 1))}$ はそれぞれ次式で与えられる。

$$f_{(R, 1)} = \frac{\alpha_m}{2\pi a} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\sigma^2)}} \quad (m=1) \quad (5-1)$$

$$f_{((1, 1))} = \frac{\alpha_{n, m}}{2\pi a} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\sigma^2)}} \quad (n=1, m=1) \quad (5-2)$$

ここで、各式中の記号は第3章式(3-11)に対応する。ただし、 α_m , $\alpha_{n, m}$ は各モードの周波数定数である。したがって、同一の振動子であれば

$$\alpha_m = \alpha_{n, m} \quad (n=1, m=1) \quad (5-3)$$

が、両モードの縮退条件を与える。周波数定数 α_1 , $\alpha_{1,1}$ は、円環の内径対外径比(b/a)以外に材料のポアソン比 σ によっても変わるが、実験に用いた圧電セラミクス(NEPEC-6, $\sigma=0.32$)では図5-1のようになる。この場合、両モードは $b/a \div 0.275$ で縮退するが、実際的な振動子材料であるポアソン比が0.25~0.35の範囲では内径対外径比が0.25~0.28の範囲で縮退する。

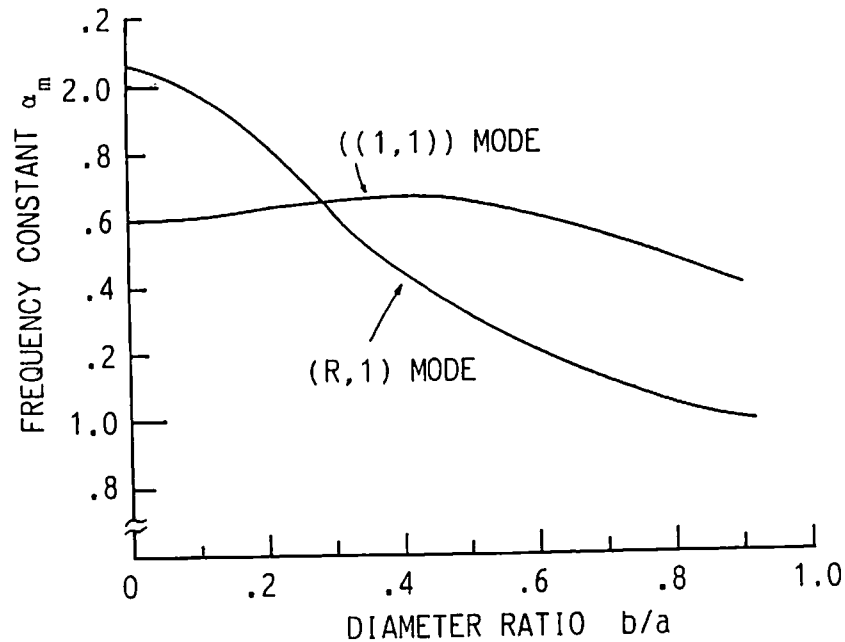


図 5 - 1 円環振動子の径方向対称伸び振動と
非軸対称振動の周波数定数 ($\sigma = 0.32$)

(b) 楕円運動の形成と動作原理⁽⁸⁾

図 5 - 2 に $(R, 1)$ モードと $((1, 1))$ モードの変位パターンを示している。 $((1, 1))$ モードは、同図(b)の $A - A'$ 点を中性線とする面内屈曲振動である。円周上の $A - A'$ では、図の矢印の方向に変位成分 (U_θ) を持つ。一方、 $(R, 1)$ モードは径方向の対称伸び振動であるから、 A, A' 点では図のように径方向の変位成分 (U_r) を持つ。従って、同図(c)のように両モードを 90° 位相差の異なる信号で駆動すれば、 A, A' 点では、図示のような変位の楕円運動が形成される。これらの点にロータを押しつければ、回転型モータが構成される。さらに、左右の楕円運動の方向が反対なので、固定ガイドを押しつけられ、振動子がガイドに沿って動く直線移動型モータが構成できる。

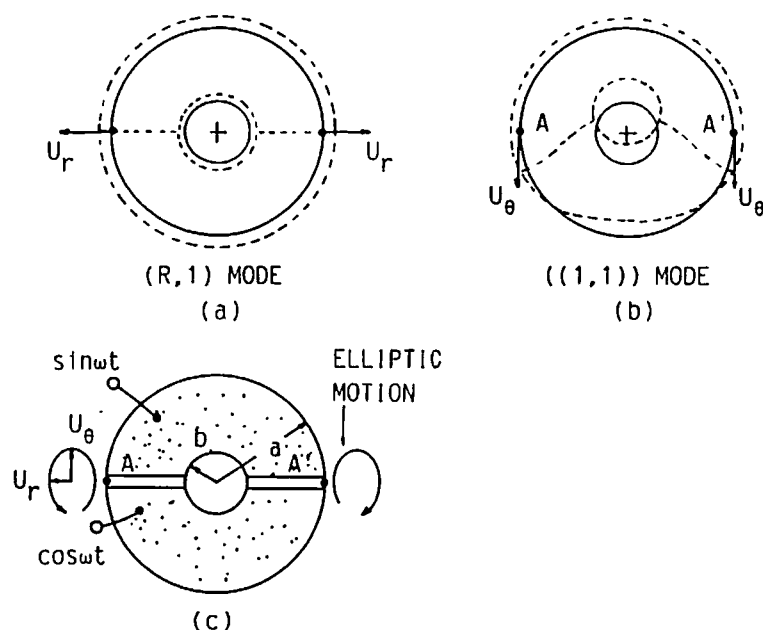


図 5 - 2 (R, 1)モードと((1, 1))モードと両モードによって形成される変位の楕円運動

(c) 駆動方法と振動子の特性

((1, 1))モードの変位分布や電荷分布については、第3章で詳しく述べた。(R, 1)モードと縮退状態で用いるときには、図5-3(a), (b)に示す2通りの駆動方法が考えられる。同図(a)は、端子①, ②を各々90°位相の異なる入力で駆動する方法で、4・2・3(a)に基づいている。同図(b)は、電極を図のように放射状に4分割し、端子③で(R, 1)モードを、端子④で((1, 1))モードをそれぞれ独立に駆動する方法である。この駆動方法は両モードの変位を独立に制御できる利点を有する。図5-4に図中に示すように駆動領域を変えた場合の両モードの電気機械結合係数の測定値を示している。ただし、両モードの結合が生じないような寸法比($b/a=0.15$)で測定した。((1, 1))モードの結合係数は角度 θ に対してそれ程の小さくならないので、上記の特徴を考え合わせると有効な駆動方法と思われる。しかし、モードが不安定だったので本章の試作モータでは図5-3(a)の駆動方法を用いている。

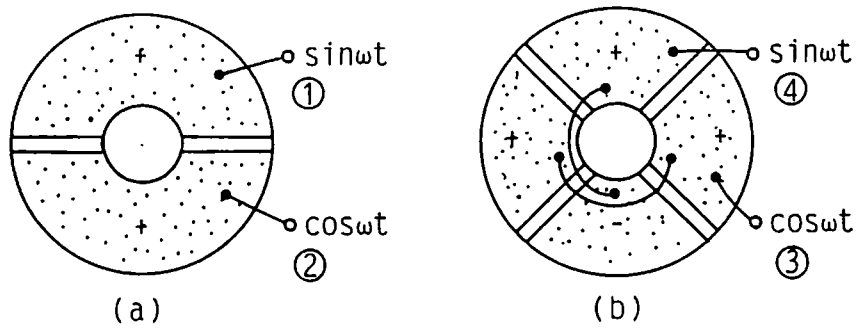


図 5 - 3 $(R, 1) - ((1, 1))$ モード縮退型振動子の駆動方法
(a)両モードの共通駆動, (b)両モードの独立駆動

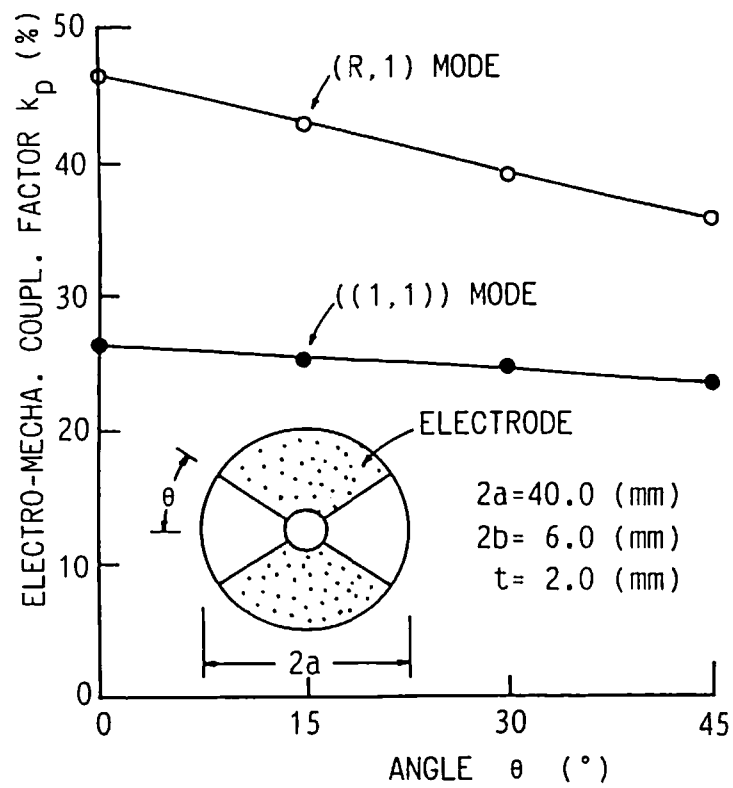


図 5 - 4 $(R, 1)$ モードと $((1, 1))$ モードの
電気機械結合係数

5・2・2 試作直線移動型モータの特性

(a) モータの構造と特徴

図5-5に試作したモータの構造を示す。ステータ振動子として直径40.0(mm)、内径10.8(mm)、厚さ2.0(mm)の圧電セラミクス ($b/a=0.27$, NEPEC-6)を用い、図のように接触部分に摩擦材を貼り付けている。図5-6に示すように両モードの共振周波数は十分接近している。

ガイドは、幅3.5(mm)、深さ1.5(mm)の溝を持つステンレスを用いている。図のようにスプリングによって加圧されるので、振動子がこの溝に沿って動く。図5-7にモータの写真を示す。試作したモータは、ガイドの支持部の高さが3(cm)程度あるが、原理的にはガイドレールの厚さ程度で構成できる。モータ自体では、厚さが5(mm)程度の直線移動型モータが製作できるものと考えられる。すなわち、このモータの特徴は構造が簡単であること、特に薄型モータに適することにある。

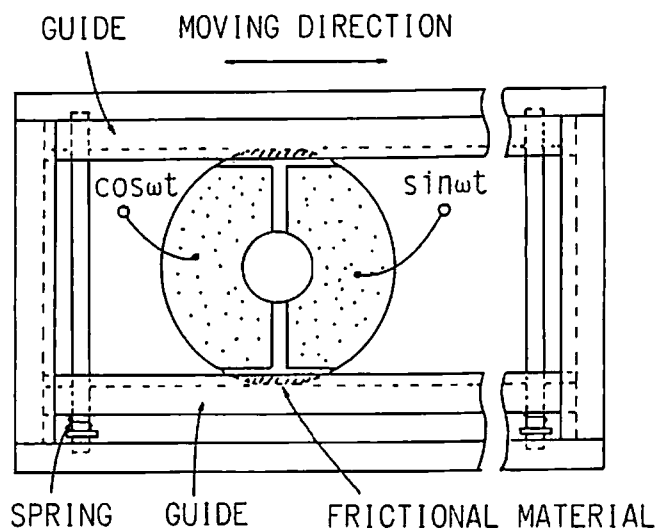


図5-5 (R, 1) - ((1, 1))モードを利用する直線移動型超音波モータ

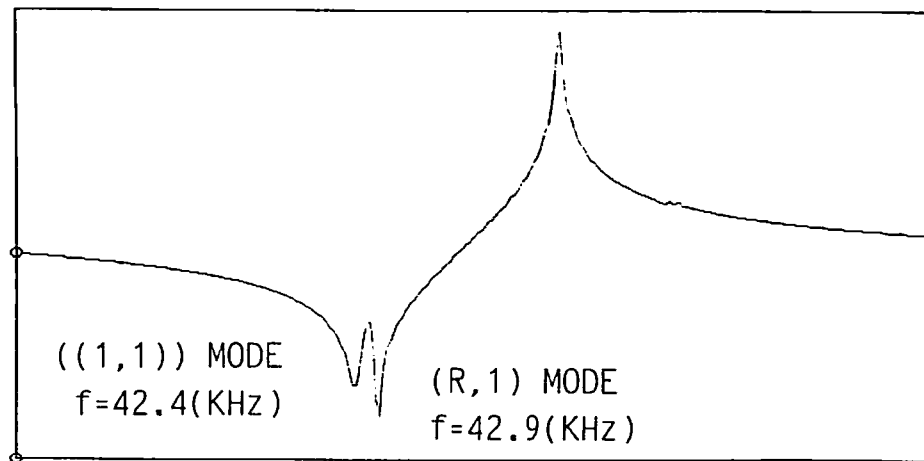


図 5 - 6 $(R, 1) - ((1, 1))$ モード
 縮退型振動子の周波数特性

図 5 - 7 $(R, 1) - ((1, 1))$ モードを利用する
 直線移動型超音波モータ

(b) 試作モータの特性

図5-5のモータを用いて特性を測定した。振動子は直径40(mm)、厚さ2(mm)の圧電セラミクスを用い、電極を図5-3(a)のように2分割し、90°位相の異なる入力で駆動した。ガイドとの接触部には摩擦材を貼り付け、振動子自体の回転を防ぐために直線上に多少削り落としている。図5-8に試作したモータの特性を示している。入力6(W)で負荷0.5(kg)の時、最大効率 $\eta_{MAX} \approx 26$ (%)、無負荷時で $v_{MAX} \approx 55$ (cm/sec)の速度が得られた。比較的効率が高く、かつ高速で推力の大きい直線移動型モータが実現された。これらのモードには共通のノードがないので、このモータを動力源として利用する場合、可動部との連結方法に工夫を要するが、高速・高推力でさらに薄型構造に適するなど実用的な要求に合致する利点も多い。

なお、この構造のようにガイドの両端で加圧する構造は、振動子の位置によって振動子に加わる圧力が異なるので、結果として場所によって速度が異なることが指摘されているが、この実験ではガイドの中心付近の10(cm)間の平均的な速度を用いている。7・2に示すモータでは、この欠点を補う加圧方法が示されている。

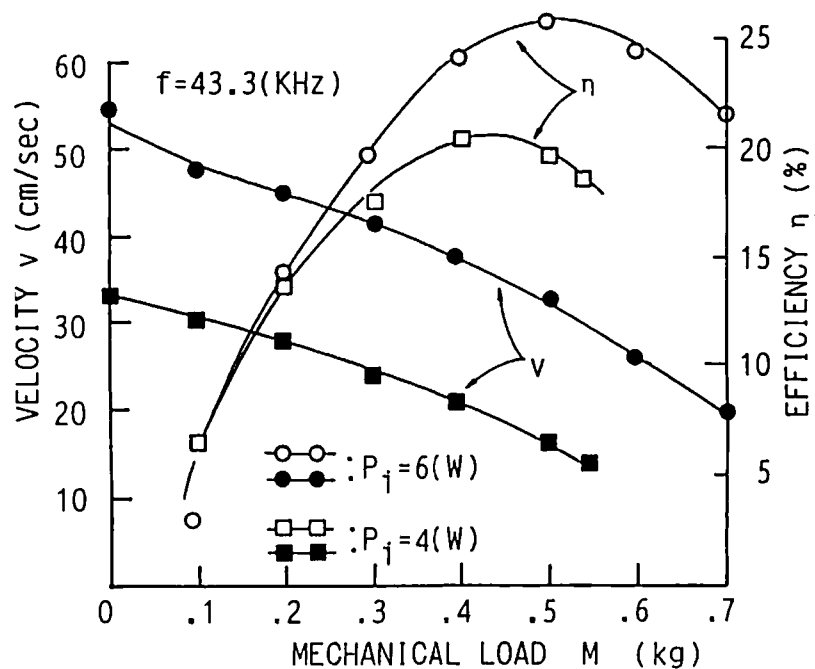


図5-8 (R, 1) - ((1, 1))モードを利用する直線移動型超音波モータの負荷特性

5・3 平板の縦振動と屈曲振動を利用する直線移動型超音波モータ

5・3・1 縦一屈曲モード縮退型振動子

このタイプの振動子については第4章において詳しく述べたが、駆動力を直線運動あるいは回転運動として取り出すかの違いによる。すなわち、平板の縦振動と厚み方向屈曲振動によるモード縮退型振動子を利用するものであるが、この構成では、図5-9に示すように振動子板面の左右同じ位置で同じ方向の楕円運動を形成し、駆動力を取り出す構造が望ましい⁽⁹⁾。このためには

- ・縦振動の奇数次モードと屈曲振動の偶数次モードの組み合わせ（図5-9(a)参照）
- ・縦振動の偶数次モードと屈曲振動の奇数次モードの組み合わせ（図5-9(b)参照）

が考えられる。この中で前者の組み合わせは、振動子の中央部が両モードに共通のノードになるので、振動子の支持を考える場合には好都合である。図5-10に両モードの共振周波数（式4-1、4-2使用）が一致する寸法を示している。実際は、圧電セラミックスの接着や、後述のように振動子を変形するために多少この条件は異なるが、寸法比や共振周波数の概略は把握できる。なお、ここでは厚み方向の屈曲振動のみを扱っているので、屈曲振動は B_m の表示を用いている。

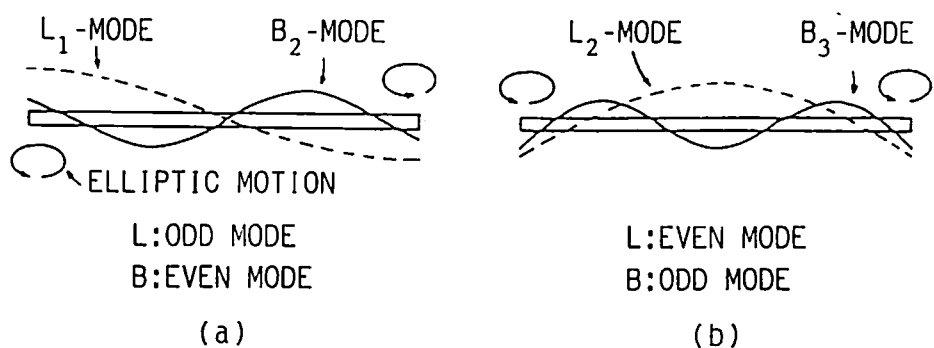


図5-9 縦一屈曲モード縮退型振動子と変位の楕円運動

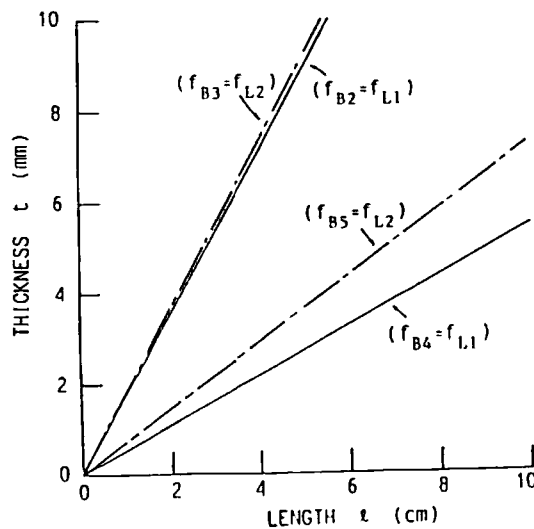


図 5 - 10 縦振動と屈曲振動の縮退条件

5・3・2 L_1-B_4 モード利用の直線移動型超音波モータ

(a) 橢円運動の形成と振動子の構造⁽¹⁰⁾

ここでは、縦振動 1 次 (L_1 モード) と屈曲振動 4 次 (B_4 モード) モードによるモード縮退型振動子を用いる直線移動型モータについて述べる。図 5 - 11 に両モードの振動モードを示しているが、同図 (b) のように両モードのよって形成される橢円運動の方向は、屈曲振動のループの位置によって異なるので駆動力を取り出す位置に突起部を設けるなどの工夫が必要である。図 5 - 12 に実験に用いた振動子を示している。突起は屈曲振動の外側のループ (図 A, A' 点) に設けている。これらの点での各モードの変位は、変位の最大点 (共に振動子の端部で生じる) の縦振動で 0.86, 屈曲振動で 0.66 程度に減少する。これらを考慮して、突起の位置を振動子の端部に設けることも試みたが、モータとしての動作が多少不安定であった。これは振動子の端部では屈曲振動の変位が傾斜を持つために、突起の先端での変位の軌跡が複雑になるためと思われる。図 5 - 13 に L_1 と B_2 モードを用いてモータの動作状態を図式的に示している。左右の突起が半周期毎に同じ方向にガイドを蹴って、推進力を得ることになる。

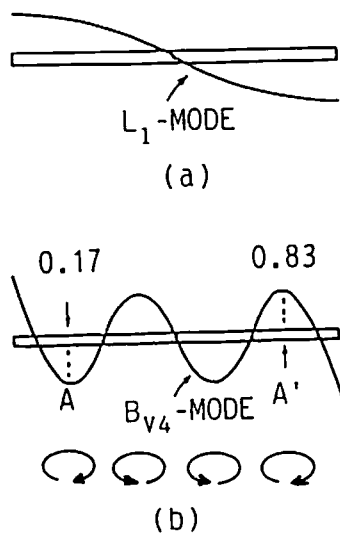


図 5 - 11 縦振動 1 次と屈曲振動 4 次モードと変位の楕円運動

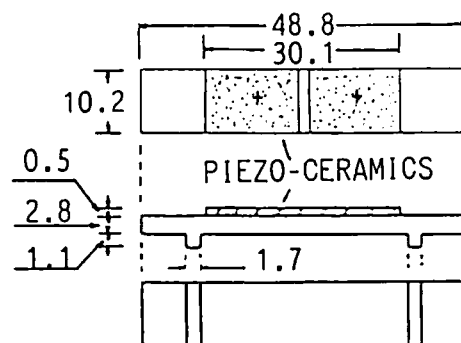


図 5 - 12 L_1 - B_4 モード縮退型振動子

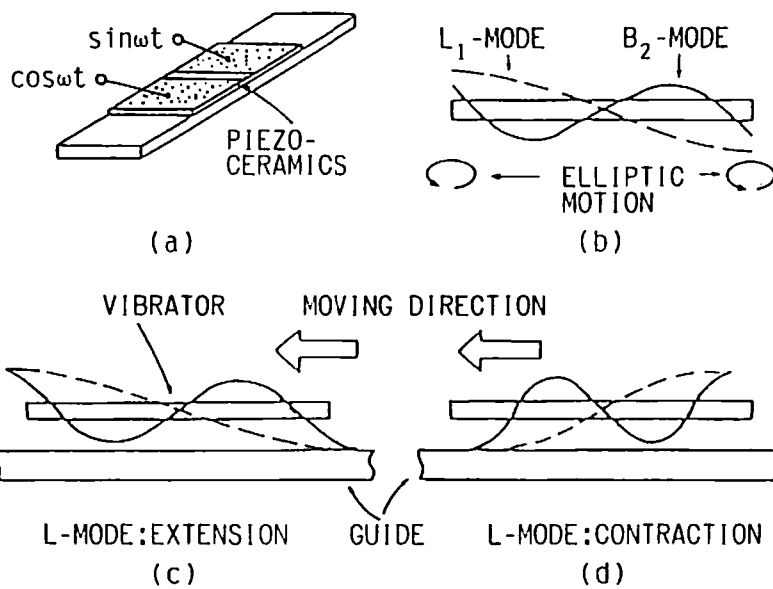


図 5 - 13 縦-屈曲モード縮退型振動子を用いる直線移動型モータの動作原理

先に示したように屈曲モードは、振動子板面上で誘起電荷の極性が異なるので、駆動領域によって振動子としての電気機械結合係数が大幅に変化する。図5-14に端部より順次電極を剥離した場合の B_4 モードの容量比の測定値を示している。これよりこのモードを効果的に励振するためには、 $l_c / l_0 = 0.5 \sim 0.6$ 付近で使用することが望ましい。このように屈曲モードは、接着セラミックスの寸法によって振動子としての特性が大幅に変化するので、使用モードによって予め十分検討する事が必要である。また図5-15に加圧による両モードの共振周波数の変化を示している。特に、屈曲振動の共振周波数の変化が比較的大きいことに注意を要する。

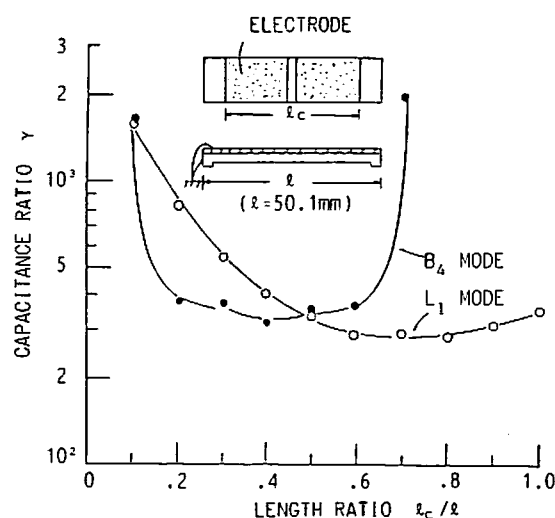


図5-14 B_4 モードの電極面積による容量比の変化

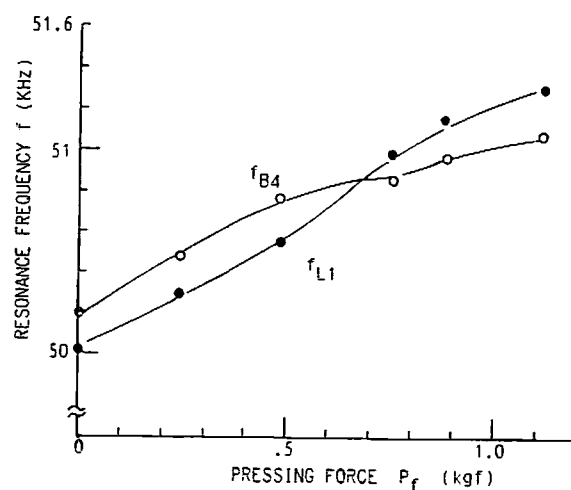


図5-15 振動子への加圧による共振周波数の変化

(b) モータの構造と特性

図5-16に試作したモータの構造を示す。Aがステータ振動子で、Bのガイドに対してベアリングEと、スプリングFによって加圧力が調整できる構造となっている。Cは系全体のガイドで、ボールブッシュDを介して系全体が左右に移動できるレールの役割をはたしている。ベアリングEの代わりに同じ特性を持つ振動子を用いれば、ガイドの両端で駆動する構造も可能である⁽¹¹⁾。

図5-17に負荷特性を示す。最大推力 200 (gf)、最大効率 20.8 (%) の特性が得られた。このモータは周波数によっては多少不安定な動作をすることがあったが、これは突起の先端が図5-18(a)のように矩形状の時に多く観測された。この形状で突起の先端にベアリングを押しつけると、突起の両端(A部)と中央部(B部)で回転方向が異なることがある。これを防ぐには同図(b)に示すような形状に突起の先端を変形することが有効であった。

ガイドBがステンレス製であるので摩擦音が多少発生するが、突起自体を摩擦材、あるいはガイドに摩擦材を添付することにより、これは解消できるものと思う。

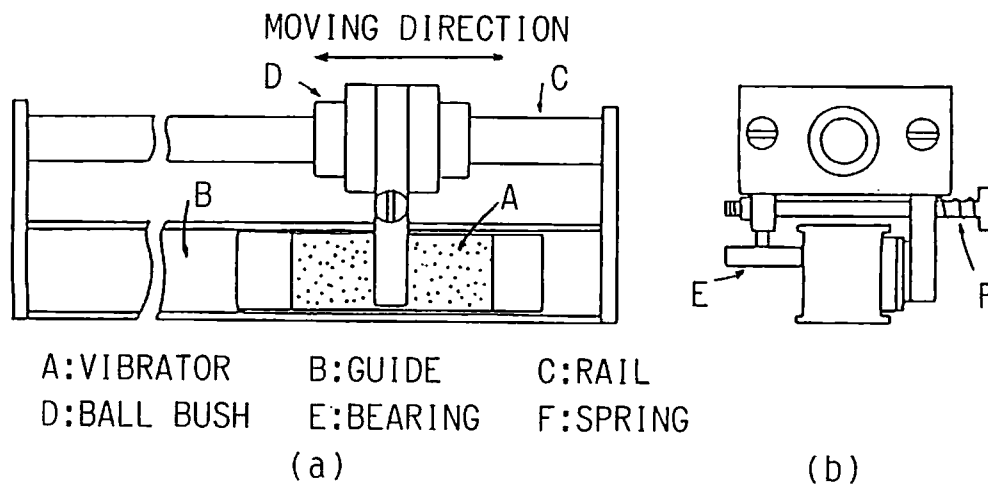


図5-16 L_1-B_4 モード縮退型振動子を用いる
直線移動型超音波モータ

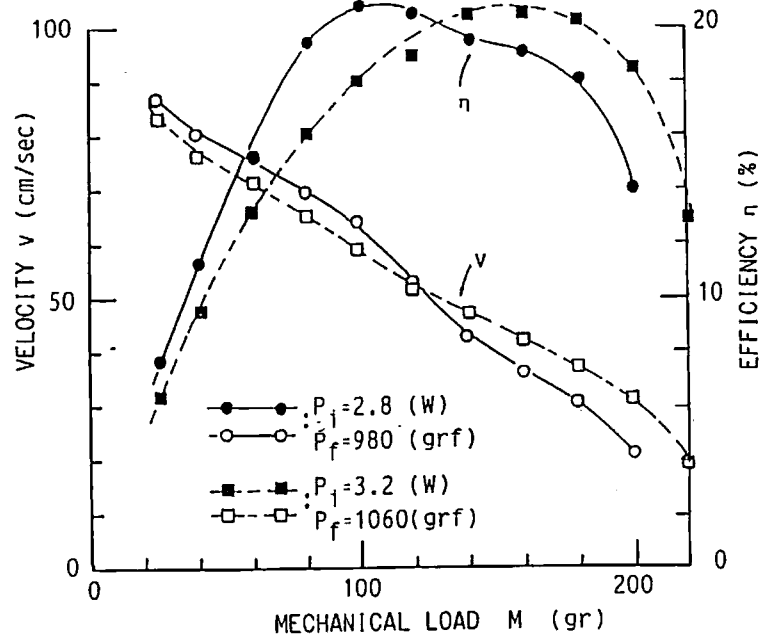


図 5 - 17 L_1-B_4 モード縮退型振動子を用いた直線移動型超音波モータの負荷特性

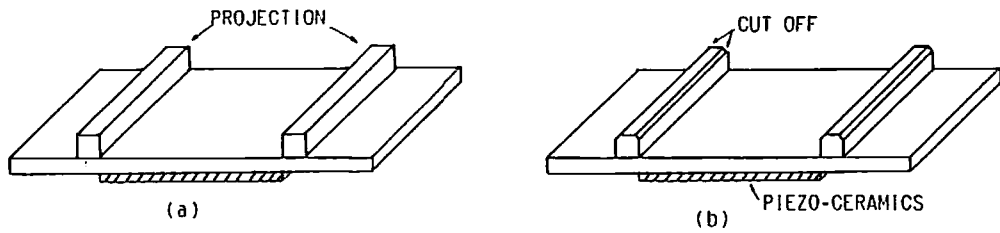


図 5 - 18 L_1-B_4 モード縮退型振動子の突起の形状

5・3・3 L_1-B_8 モード利用の直線移動型超音波モータ

(a) L_1-B_8 モード縮退型振動子と試作モータの構造

前節の L_1-B_4 モード利用の場合、振動子に設け突起が直接ガイドを蹴って推進力を得る構造であった。このように直接駆動力を得るタイプは、モータ構造が簡単になることや効率の点で有利である反面、接触面の状態をガイド上で一様に保つことが安定な動作を得る条件となる。しかし長いガイドのような場合には、この条件を保つことが困難になる。これを解決する一方法として、ここではロータを併用する直線移動型モータを検討した⁽¹²⁾。

動作原理については L_1-B_4 モード利用の場合と全く同じである。図5-19、図5-20に各モードと使用した振動子を示している。ロータは屈曲振動8次モードの両端のループ上に圧接し、駆動力を取り出している。圧電セラミクスは図5-20に示すように各モードの電荷分布を考慮し接着している。すなわち、中央部のセラミクス ($19.8^L \times 24.0^W \times 0.5^T$ mm³) で縦モードを、両端のセラミクス ($9.9^L \times 24.0^W \times 0.5^T$ mm³ を4枚) で屈曲モードを独立に駆動している。振動子は ($79.7^L \times 24.0^W \times 1.0^T$ mm³) のステンレス製である。ロータはベアリ

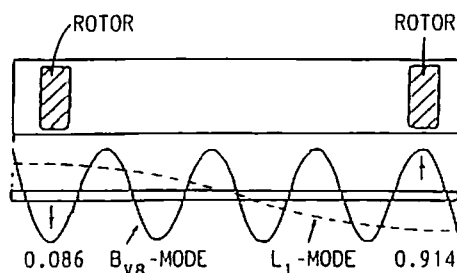


図5-19 平板振動子の縦振動1次と屈曲振動8次モード

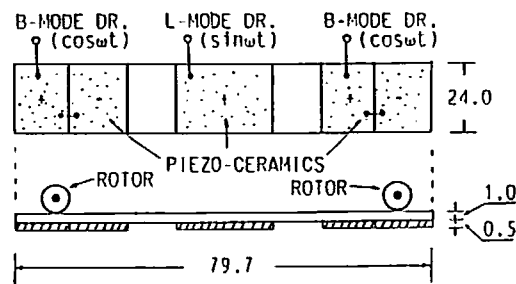


図5-20 L_1-B_8 モード縮退型振動子

ング（直径 8mm，幅 4 mm）4 個を使用し、図 5 - 21の構造のサポート治具に取り付けられている。ステータ振動子の中央部が図のようにサポート治具に加圧固定される。図 5 - 22に試作した直線移動型モータの写真を示している。このモータをビニールテープを接着したガイド上を走らせ、特性を測定した⁽¹³⁾。

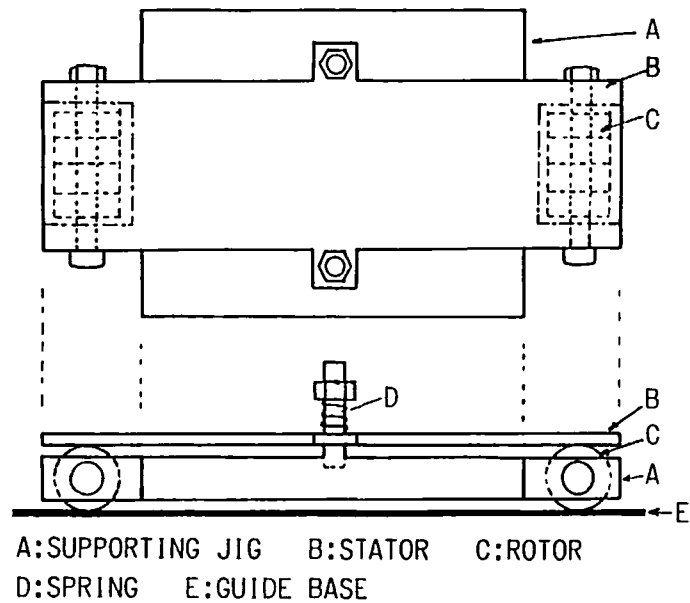


図 5 - 21 $L_1 - B_8$ モード縮退型振動子を用いる直線移動型超音波モータ

図 5 - 22 $L_1 - B_8$ モード縮退型振動子を用いた直線移動型超音波モータ

(b) 試作モータの特性

試作したモータは正・逆方向への速度特性が両モードへの入力比に依存し、その比が1:1の時に正・逆方向の速度が同じになった。これはモータ構造上のアンバランスなどに起因するものと思われるが、以下の実験ではこの条件の下で特性を測定した。図5-23、図5-24はモータへの負荷をパラメータとし、それぞれ入力に対する速度、駆動伝達力を測定したもので、入力 $P_i = 4$ (W)、負荷 $m = 560$ (gr) の時に 50 (cm/sec) 程度の速度で走行する。その時に、最大 300 (gf) 程度の力を取り出せる。図5-25は負荷特性を測定したもので、モータへの負荷を一定として効率を測定した。負荷 $m = 380$ (gr) の時に最大効率が 4 (%) 程度であった。このモータは先のモータに比べ効率が大幅に低下する。これはベアリングを使用するために振動子とベアリング、ベアリングとガイド間のスリップが主な原因と考えられるが、適当な摩擦材を持つロータやガイドの使用によってある程度改善されるものと思われる。

以上の特性は、使用するベアリングの直径にも依存するが高速で安定に動作し、特に接触面での摩耗の点では超音波モータの欠点の一つを軽減する構造として有効である。

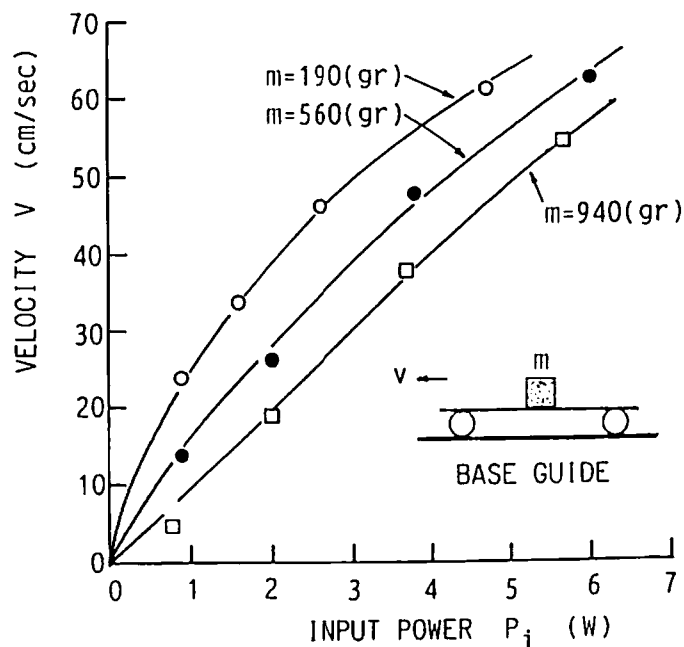


図5-23 L_1-B_8 モード利用直線移動型モータの特性 (入力-速度特性)

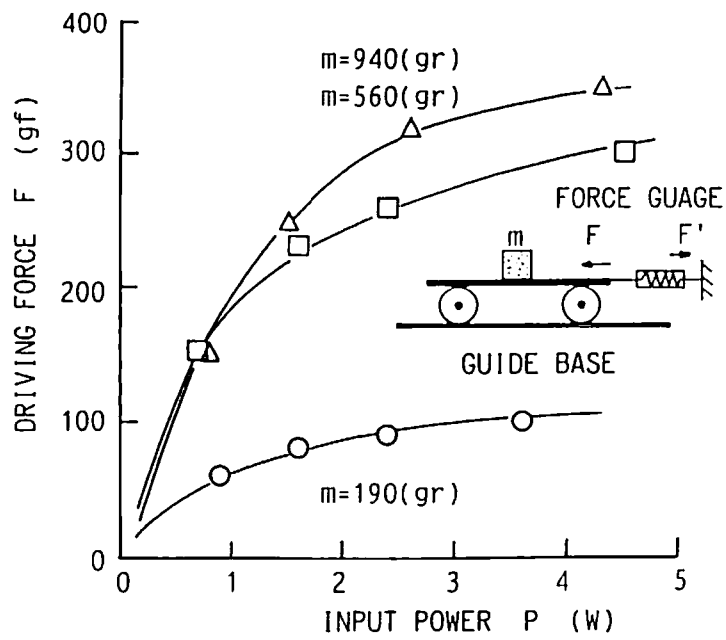


図 5 - 24 L_1-B_8 モード利用直線移動型
モータの特性 (入力-駆動力特性)

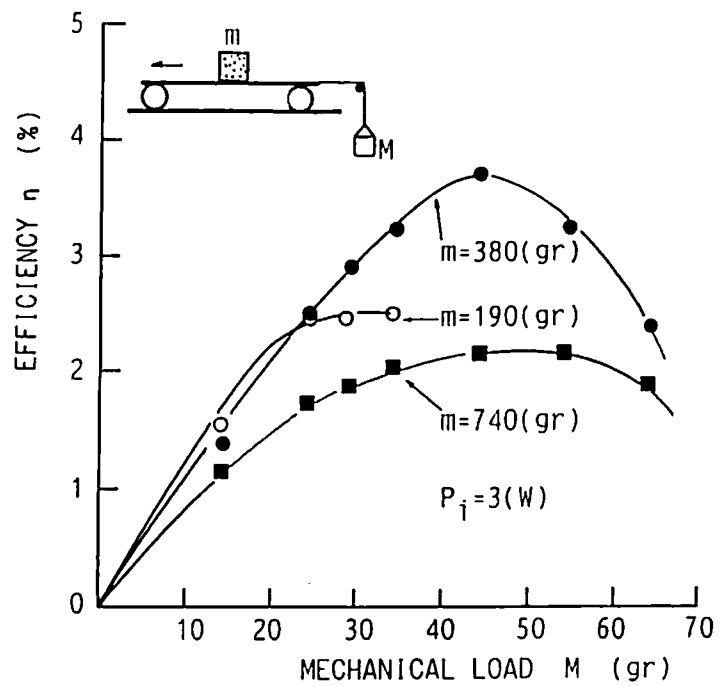


図 5 - 25 L_1-B_8 モード利用直線移動型
モータの特性 (入力-効率特性)

5・4 結 言

モード縮退型振動子を用いる2種類の直線移動型超音波モータを提案した。最初に円環の径方向対称伸び振動と非軸対称振動によるモード縮退型振動子を用いた構成について述べた。この構成の動作原理を明らかにし、試作超音波モータを通してこのモータが以下に示すような特性的にも構造的にも優れた特徴を持つことが確かめられた。

- 1). 縮退条件が比較的容易に実現される。
- 2). 振動子の周辺をガイドに押し付けるだけの簡単な構造である。

したがって、ガイドの厚さ程度の薄型モータが構成される。

- 3). 高推力(0.7kgf)で効率も高く(26%)かつ高速($P_i=6\text{ W}$ の時 $v=55\text{ cm/sec}$)の特性を有する。

5・2では平板の縦一屈曲モード縮退型振動子を用いた超音波モータについて述べている。縦振動1次と屈曲振動4次モード利用のモータを試作し、振動子としての特性(特に接着圧電セラミックスの長さ)と加圧による両モードの共振周波数の変化など問題点を指摘した。前者の構成ほど推力は得られないが、高速なモータとして期待され、さらに振動子形状の特徴を生かして種々の構造のモータが構成できる。この構成はステータの駆動面が直接ガイドに接触するために、ステータの移動範囲全体にわたってその接触面を一様に保つ必要がある。これを避けるために駆動力を一端ベアリングを介して取り出す構造も提案した。

以上を要約すると

- (1) 円環の(R,1)-(1,1)モードを利用する直線移動型モータは、薄型構造に適し、性能的にも優れた特性を有する。
- (2) 縦一屈曲モード縮退型振動子を用いる構成を提案し、試作特性結果を示した。振動子とガイドの接触面の影響を軽減するためには、ベアリングを併用する構造が有効であることを確かめた。

となる。

参 考 文 献

- (1) 富川, 小笠原, 菅原, 近野, 高野: "横振動2重モード音片利用の直線移動自走式モーター", 昭和63年電子情報通信学会春季全国大会講論集, No.A-222, pp.1-224 (1988).
- (2) 谷口圭仁, 清水洋: "圧電セラミック音片型超音波リニアモータ", 音響学会昭和62度秋季研究発表会講論集, No.1-2-19, pp.751-752 (1987).
- (3) 山田浩利, 黒澤実, 上羽貞行: "インチウォーム型超音波リニアアクチュエータ" 音響学会昭和62年度秋季研究発表会, No.1-2-20, pp.753-754 (1987).
- (4) 大西一正, 内藤浩一, 中澤徹, 山越賢乗: "縦一曲げ結合振動を用いた超音波リニアアクチュエータ" 音響学会誌, Vol.37 No.1, pp.27-31 (1991-01).
- (5) 高野, 富川, 小笠原, 平田: "(R,1)-((1,1)) 多重モード振動子を用いた超音波モータ", 1989年電子情報通信学会秋季全国大会講論集, No.SA-5-4, pp.1-176-177 (1989).
- (6) T.Takano and Y.Tomikawa, "Linearly Moving Ultrasonic Motor Using a Multi-Mode Vibrator", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.28, Suppl.28-1, pp.164-166 (1989).
- (7) 清水洋, 中村徳良: "孔あき円板形多重モード共振子およびフィルタ" 電子通信学会技術報告, US68-18, pp.1-12 (1968-12).
- (8) T.Takano, Y.Tomikawa, T.Ogasawara and H.Hirata, "Construction and Characteristics of Ultrasonic Motors Using a Piezo-Ceramic Annular Plate", 1989 Ultrasonics Symposium Proceedings, pp.735-738 (1989).
- (9) 高野, 富川: "多重モード振動子利用の直線移動型超音波モータ", 第9回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, No.B-6, pp.43-44 (1988).
- (10) 高野, 富川: "直線移動型超音波モータに用いる縦一屈曲多重モード振動子", 1989年電子情報通信学会春季全国大会講論集, No.A-198, pp.1-200 (1989).
- (11) 高野, 富川: "縦一屈曲多重モード振動子利用の直線移動型超音波モータ", 昭和63年電子情報通信学会秋季全国大会講論集, No.SA-5-6, pp.A-1-153-154 (1988).

- (12) T.Takano, Y.Tomikawa, M.Yaginuma and T.Ogasawara : "A Linearly Moving Ultrasonic Motor Using a Longitudinal and Bending Multi-Mode Vibrator", Proc. of 1990 IEEE 7th Inter. Sympo. on Appli. of Ferro., pp.521-524 (1990).
- (13) 富川, 柳沼, 小笠原, 高野 : "縦 L 1- 屈曲 B n · 多重モード振動子を用いた平板状超音波モータの応用", 音響学会平成元年度秋季研究発表会講論集, No.1-P-⑨, pp.945-946 (1989).

第6章 モード縮退型振動子を用いる超音波モータ構成の総合評価

6・1 諸言

第2章においてモード縮退型振動子を用いる超音波モータの構成と分類について述べ、これに基づいて第3章から第5章ではいくつかのモータを試作し、その特性例を示すと共に構造の特徴や問題点などを指摘した。モード縮退型振動子は第2章で示したように振動子形状やモードの組み合わせによって多くの構成が考えられる。また同じモードの組み合わせでも動作原理の違いによって構成上分類されることになる。さらにモータの試作例で示したように駆動力の取り出し方によってもモータ構造が変わり、例えば回転型と直線移動型に見られようにモータの種類まで異なることがある。

超音波モータは実用のレベルに達してから数年経ち、種々の分野に応用されているが、これは従来から指摘されている特性上の特徴に加えて、超音波モータ特有の構造上の利点に負うところも大きい⁽¹⁾。このような点を考慮し、ここではモード縮退型超音波モータを、ステータ形状の点から再度分類を試み、モータ試作例を通じて得た構造上の特徴を加味して総合的な検討評価を行う。

最初に第2章で示したモード縮退型超音波モータの分類表を再掲し、各構成について考察を加え、応用面を考慮しながら総合的な評価を行っている。次に各構成について現在まで得られたデータを基にモータとしての性能（回転数、トルク、効率）を整理し、一覧表として付した。また回転型、直線移動型モータについてトルク、推力を基準にモータ構成を分類した。

なお、ここでは本論文で示した構成以外に、他に提案されているモード縮退型超音波モータも考察の対象とし、比較検討した。従来、個々に提案されていた構成を体系的に分類整理することは、今後の超音波モータの開発ならびに応用分野の拡大につながることである。

6・2 ステータ形状によるモード縮退型超音波モータの分類と評価

6・2・1 円板（円環）振動子をステータとするモード縮退型超音波モータ

円板（円環）の振動モードとして径方向対称伸び振動 $\{(R, m)$ モード $\}$ ，厚み方向屈曲振動 (B_{mn}) モード $\}$ ，非軸対称振動 $\{(n, m)$ モード $\}$ の組み合わせを考察の対象とした。なお、この他に比較的低周波に面内の対称捩り振動 (concentric shear mode)があるが、このモードを用いた例は見当たらないので（主な理由は圧電的に励振することが難しいためと考えられる）、本文では取り上げていない。表6-1に各モードの組み合わせによる超音波モータの構成例を示している。*印は本論文で試作特性例を報告した構成である。それぞれの構成の特徴と問題点などを以下に列挙する。

1. $B_{mn} - B_{mn}'$ 構成：

2相駆動と同相（同相）駆動による構成が提案されている。前者は指田によって考案され実用的な超音波モータの発端となった構成で⁽¹⁾、トルク5(kgf-cm)、効率40(%)程度のモータが報告されている。

後者は入力端子の切り換えによって単相駆動で両方向回転のモータが実現できることに特徴があり、ステータは使用モードに合った突起を持つのでロータの振動信号からモータとしての回転情報を得ることが可能である。最大トルク4(kgf-cm)、最大効率30(%)程度のモータが報告されている⁽²⁾。

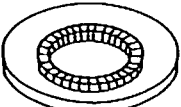
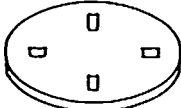
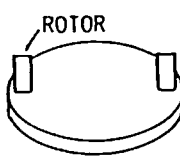
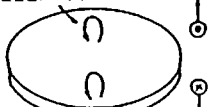
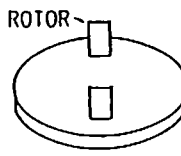
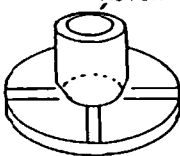
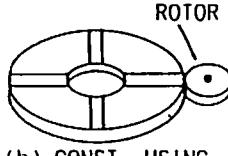
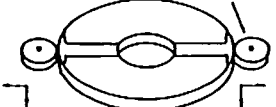
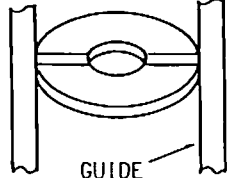
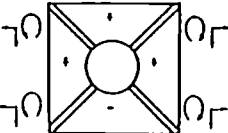
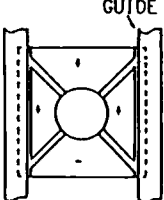
2. $B_{mn} - ((n, m))$ 構成：

B_{mn} ($m \leq 2, n \leq 3$) - $((1, 1))$ モードの組み合わせが実際的な構成と考えられるが、未だ具体的な特性の報告は見当たらない。構造例を図2-20に示している。

3. $B_{mn} - (R, m)$ 構成：

B_{mn} ($m \leq 2, n \leq 3$) - $(R, 1)$ モードの組み合わせが実際的な構成と考えられる。未だ試作特性例の報告は見当たらない。

表 6 - 1 円板（円環）振動子を用いたステータとするモード縮退型
超音波モータの構成

	BENDING VIBRATION B_{mn} MODE	NON-AXISYMMETRIC VIB. $((n,m))$ MODE	RADIAL VIBRATION $((R,1))$ MODE
BENDING VIBRATION B_{mn} MODE	1. #1  (a) STATOR FOR TWO PHASE DR. *  (b) STATOR FOR SAME PHASE DR.	2. #2  $((1,1))$ AND B_{20} MODES.  ROTOR	3. #2 ELLPTIC MOTION  $B_{mn}(m=0, n: \text{odd})$ AND $(R,1)$ MODES.  ROTOR
NON-AXISYMMETRIC VIBRATION $((n,m))$ MODE	#1: REFER.(1) #2: NO TRIAL #3: REFER.(3) and (4) #4: REFER.(7)	4. #3 *  (a) CONST. USING INSIDE CIRCUM. *  (b) CONST. USING OUTSIDE CIRCUM.	5. *  $(R,1)$ AND $((1,1))$ MODES. $b/a \approx 0.28$. (a) ROTARY MOTOR *  GUIDE (b) LINEAR MOTOR
RADIAL VIBRATION $(R,1)$ MODE		5' #4  (a) SQUARE VIBRATOR $b/a \approx 0.4$  GUIDE (b) LINEAR MOTOR	

4. $((n, m)) - ((n, m))'$ 構成 :

$n \leq 3, m \leq 3$ のモードが实际的であるが、同相駆動型の場合は $n \leq 5, m=1$ のモードも有効であろう。円環とすることにより内周面、外周面での橢円運動を利用することができ多様なモータ構造が提案されている⁽³⁾。薄型構造に特徴があるがロータ構造に難点が伴う。最大効率10(%)、0.8(kgf-cm)程度の試作例が報告されている。 $((1,1))$ モードを使用する構成については薄型、構造の単純さを生かしてウオッチ等への応用が試みられている⁽⁴⁾。

5. $(R, m) - ((n, m))$ 構成 :

$(R,1) - ((1,1))$ の組み合わせによる直線移動型モータ、回転型モータが提案されている⁽⁵⁾。特に直線移動型モータは高推力、高速の特性を生かしてカード搬送用として実用化研究が進められている⁽⁶⁾。回転型モータとしても比較的高トルクの特性を持ち小型モータとしての研究も行われている。なお正方形板でもこれに類するモードを利用する構成が可能であり⁽⁷⁾、表6-1に具体的な構成例を示している。

6・2・2 平板振動子をステータとするモード縮退型超音波モータ

平板の振動モードとしては長さ方向の縦振動(L_m モード)、厚み方向の屈曲振動(B_{vm} モード)、幅方向の屈曲振動(B_{hm} モード)を考える。表6-2に各モードの組み合わせによるモード縮退型振動子とそれを用いたモータの構成例を示している。それぞれの構成の特徴と問題点などを以下に示す。

1. $L_m - B_{vm}$ 構成 :

$L_1 - B_{vm} (m \leq 8)$ モードの組み合わせが妥当で、回転型モータと直線移動型モータが提案されている。回転型の場合はモータ単独としてよりは、むしろ7・3に示すように振動子形状の特徴を生かして、紙送りデバイス等への応用を目的として研究されている⁽⁸⁾。ローラを併用した紙送りデバイスとして最大推力300(gf)、最高速度50(cm/sec)程度の報告がある。

直線移動型モータの場合は振動子に突起を設けることによって、ガイドを直接駆動し推力を得る構造が可能になる。5・2に示すように $L_1 - B_{v4}$ モー

ド利用モータで推力250(gf), 最高速度80(cm/sec), 効率20(%)程度の特徴が得られている⁽⁹⁾。駆動点の摩耗を考慮するとベアリングを介して一端回転力として駆動力を取り出す構造も有効である。

2. $L_m - B_{Hm}$ 構成:

幅方向の屈曲振動利用することになるので屈曲振動は比較的低次のモードが用いられる。4・3・3(b)で示したように $L_1 - B_{H2}$ モードを用いたモータが提案されている⁽¹⁰⁾。回転型モータは長手方向の辺に形成される橢円運動を利用しているが、このタイプの構成としては比較的トルクの大きいモータが得られる。幅方向の辺に形成される橢円運動を利用した直線移動型モータも報告されているが、推力・効率ともそれほど大きくはない。

3. $B_{vm} - B_{vm}'$ 構成:

表6-2中に示すように長さ方向と幅方向に節線を持つモードの縮退による振動子を用いた構成がある。一方のLOOPと他方のNODE上に突起を設け”突っつき型”構成とし、ローラーによって回転力を取り出している⁽¹¹⁾。直線移動型モータへの適用も可能である。

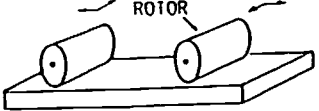
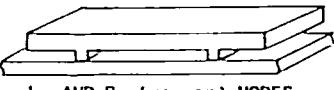
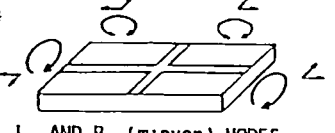
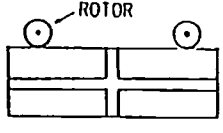
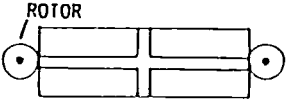
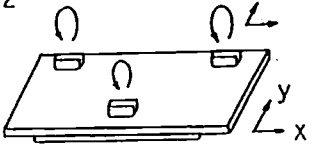
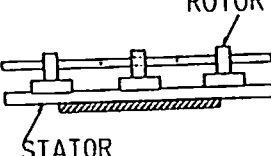
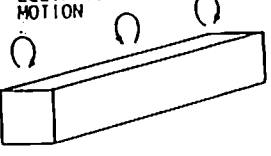
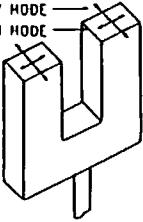
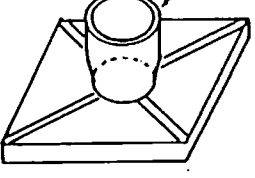
4. $B_{vm} - B_{Hm}$ 構成:

正方形断面を有する振動子を用いる構成は回転型モータ, 直線移動型モータの報告はあるが^{(12)・(13)}、平板振動子を用いる構成については具体的な特性例の報告はない。なお、低周波の小型モータとして、音さ振動子の水平方向と垂直方向の屈曲振動を利用する報告がある⁽¹⁴⁾。

5. $B_{Hm} - B_{Hm}$ 構成:

円板の非軸対称振動から類推されるように同形の縮退モード利用構成が報告されている。円孔を設けることによって内周部も利用できる⁽³⁾。

表 6 - 2 平板振動子をステータとするモード縮退型
超音波モータの構成

	LONGITUDINAL VIB. L_m MODE	BENDING VIBRATION B_{vm} MODE	BENDING VIBRATION B_{hm} MODE
LONGITUDINAL VIBRATION L_m MODE		1. *  L_1 AND $B_{vm}(m:\text{even})$ MODES (a) ROTARY MOTOR *  L_1 AND $B_{vm}(m:\text{even})$ MODES (b) LINEAR MOTOR	2. *  L_1 AND $B_{hm}(m:\text{even})$ MODES #1  *  MOTOR CONSTRUCTION
BENDING VIBRATION B_{vm} MODE	#1: REFER.(10) #2: REFER.(11) #3: REFER.(12) and (13) #4: REFER.(14) #5: REFER.(3)	3. #2  *  STATOR CONST. USING $B_4(x \text{ DIR.})$ AND $B_2(y \text{ DIR.})$ MODES	4. #3  ELLIPTIC MOTION #4  V MODE H MODE
BENDING VIBRATION B_{hm} MODE			5. #5  CONST. USING INSIDE CIRCUMFERENCE (a) ROTARY MOTOR

6・2・3 円柱（円筒）振動子をステータとするモード縮退型超音波モータ

円筒（円柱）の振動モードとしては、縦振動，屈曲振動，捩り振動，径方向の伸縮振動を考える。表6-3に各モードの組み合わせによるモード縮退型振動子と、それを用いた超音波モータの構成例を示している。

1. $L_m - T_m$ 構成：

第4章で述べたところであるが様々な構成が可能である⁽¹⁵⁾。振動子の長さ は捩り振動の共振周波数によって制限されるが、棒状で細身の形状はモータ 構造に適している。最大トルクは10(kgf-cm)以上、最大効率40(%)を越え る試作例が報告されている⁽¹⁶⁾。

2. $R_m - L_m$, $R_m - T_m$ 構成：

後者の構成は図2-22に示すモータが報告されているが⁽¹⁷⁾、縮退条件を満 足させるのが困難なようである。前者は非対称な伸縮振動を使用した構成が 考えられるがモータとして具体的な特性の報告はない。

3. $B_m - B_m$ 構成：

同形の縮退モードを利用する構成となり、両端面から回転力を取り出し、カ ードリーダーへの応用を試みた例が報告されている⁽¹⁸⁾。また片面にロータを 圧接した回転型モータも報告されている⁽¹⁹⁾。共振周波数は振動子の直径(D) 長さ(l)に対して $f \propto D^2/l$ の関係にあるので、小型にしてもそれほど共振 周波数は高くない。駆動力の取り出し方などを工夫することによって多 様なモータ構成が可能になる。

4. $L_m - B_m$, $B_m - T_m$, $B_m - R_m$ 構成：

例えば $L_m - B_m$ 構成は平板の構成と同じ分類に属し、それと比してそれほど の特徴はなく、他の構成も報告は見当たらない。

以上の構成をステータの形状ごとに整理すると表6-4になる。また 表6-5, 6-6は回転型と直線移動型モータについて、トルク（推力）を基準に その要求を満たす構成を整理したものである。ただし、ここでの数値は本文で 示した試作特性例と報告されているデータを参照したものであり、今後改善さ れる余地がある。

表 6 - 3 円柱（円筒）振動子ステータとするモード縮退型
超音波モータの構成

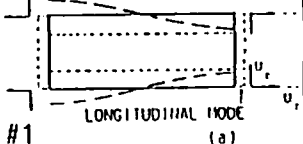
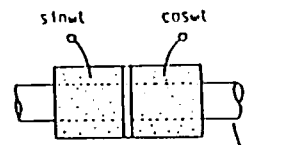
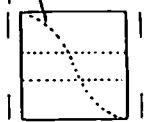
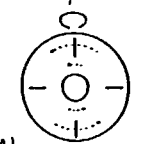
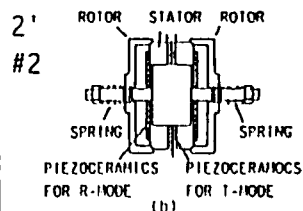
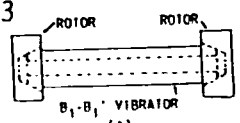
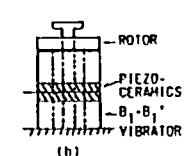
	LONGITUDINAL VIB. L_m MODE	TORSIONAL VIBRATION T_m MODE	BENDING VIBRATION B_m MODE	RADIAL VIBRATION ($R, 1$) MODE
LONGITUDINAL VIBRATION L_m MODE		1. # PIEZOCERAMICS FOR L-MODE T-MODE  L_1-T_1 VIBRATOR ROTOR		2. ASYMMETRICAL RADIAL MODE  #1 LONGITUDINAL MODE (a) sinwt coswt  (b) GUIDE
TORSIONAL VIBRATION T_m MODE	#1 : NO TRIAL #2 : REFER.(17) #3 : REFER.(18) #4 : REFER.(19)			RADIAL MODE TORSIONAL MODE  (a) ELLIPTIC MOTION  2' ROTOR STATOR ROTOR  SPRING SPRING PIEZOCERAMICS FOR R-MODE PIEZOCERAMICS FOR T-MODE (b)
BENDING VIBRATION B_m MODE			3. #3  ROTOR ROTOR B_1-B_1' VIBRATOR (a) #4  ROTOR PIEZOCERAMICS B_1-B_1' VIBRATOR (b)	
RADIAL VIBRATION (R, n) MODE				

表 6 - 4 モード縮退型超音波モータの総合評価

	モード 組み合わせ	動作形態	回 転 数 (rpm)	トルク(推力)(kgf)	効 率 (%)	備 考
			10^0 10 10^2 10^3 10^4	10^{-3} 10^{-2} 10^{-1} 10^0 10	0 15 30 45 60	
円 板 (円 環) 振 動 子	$B_{mn} - B_{mn}'$	回 転 型				市 販 中 同相駆動型
	$B_{mn} - ((1,1))$	回 転 型				未 開 発
	$B_{mn} - (R,m)$	回 転 型				未 開 発
	$((n,m)) - ((n,m))'$	回 転 型				小型低周波 薄型構造
	$(R,1) - ((n,m))$	回 転 型 直線移動型				薄 型 高 推 力
平 板 振 動 子	$L_m - B_{vm}$	回 転 型 直線移動型				多様な構成 高 速
	$L_m - B_{Hm}$	回 転 型 直線移動型				小 型
	$B_{vm} - B_{vm}$	回 転 型 直線移動型				正方形断面
	$B_{vm} - B_{Hm}$	回 転 型				音さ振動子
	$B_{Hm} - B_{Hm}$	回 転 型				正方形板 枠組み構造
円 筒 (円 柱) 振 動 子	$L_m - T_m$	回 転 型				細身構造・低速 高トルク
	$L_m - R_m$	直線移動型				未 開 発
	$T_m - R_m$	回 転 型				縮退条件困難
	$B_m - B_m'$	回 転 型 直線移動型				小型・低周波 簡単な構造
	$B_m - L_m$ $B_m - T_m$					特 徴 無 し
	$R_m - B_m$					特 徴 無 し

表 6 - 5 回転型モータ構成の選択

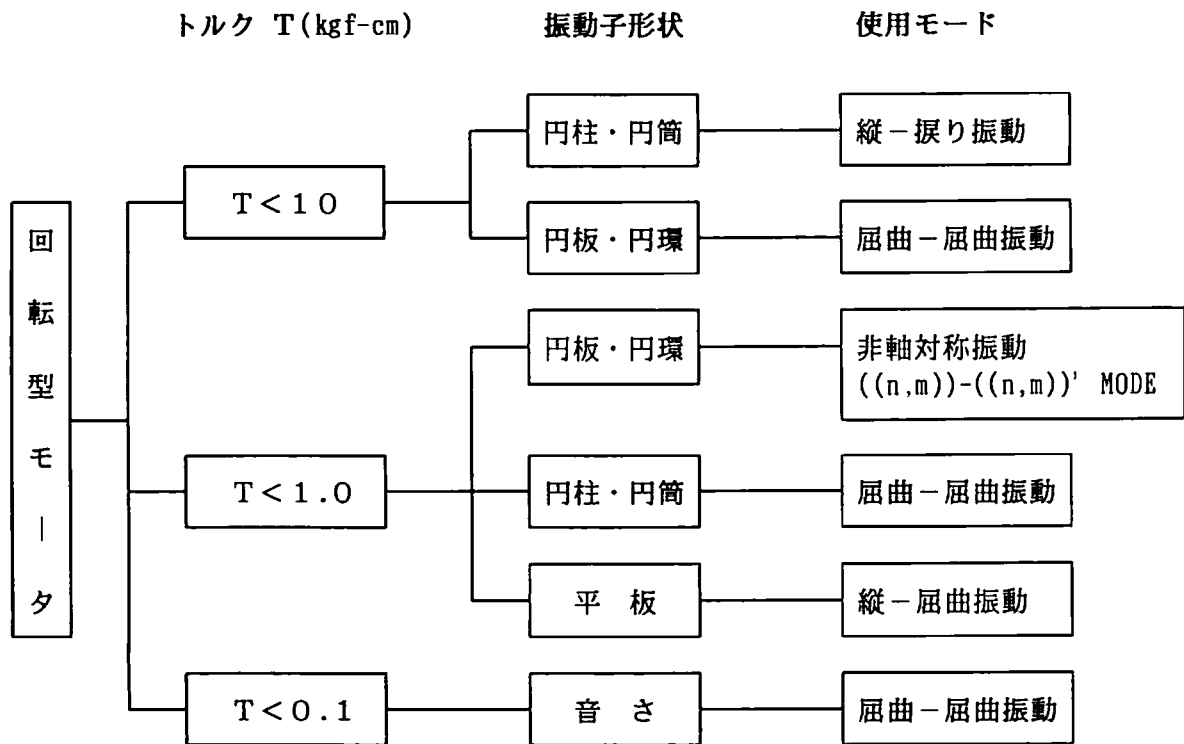
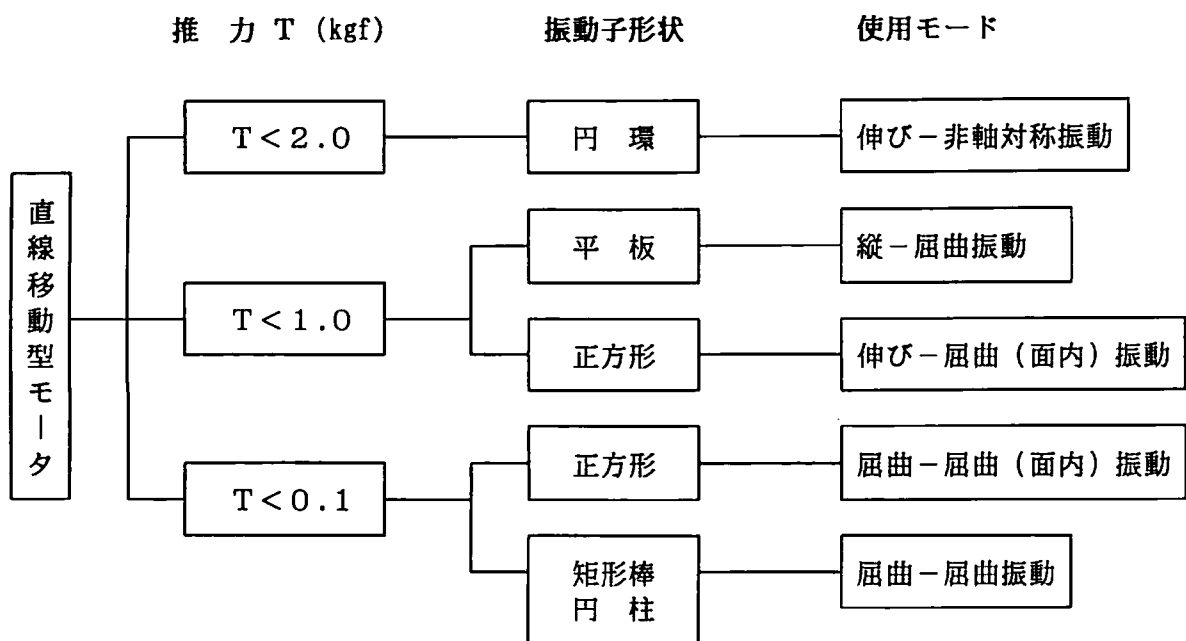


表 6 - 6 直線移動型モータ構成の選択



6・3 結 言

第2章に示したモード縮退型振動子を用いる超音波モータを、第3章から5章まで述べた試作特性例を通して得たデータを基に比較検討を行った。モード縮退型モータをステータ形状によって分類し、各モードの組み合わせによる構成について性能と構造の両面から考察を加えた。なお本論文で示した試作モータ以外に、他に提案されている構成も考察の対象とした。モード縮退型モータを数値データを加えて評価することによって、その構造的な面を含めた各構成の特徴を把握することができた。ただし、ここで示した特性データは試作例より得たものであり、ロータ構造やステータ振動子の寸法精度（特にロータとステータの接触面）により変わる値であるが、概略的な目安は与えている。さらに、回転型、直線移動型モータをトルク、推力を基準として分類し、使用要求に添うモータ選択の指針を与えた。

個々の特性の改善と共に、2つのモードの縮退条件実現の容易さ、単純なモータ構造、応用に即した構造的な特徴の有無が今後のモード縮退型モータ開発のポイントとなろう。

以上を要約すると

(1) モード縮退型超音波モータを分類整理し、各構成の性能的、構造的な特徴を明らかにした。

(2) トルク、推力を基準として、使用要求を満足するモータ選択の指針を与えた。

となる。

参 考 文 献

- (1) 見城尚志, 指田年生: "超音波モータ入門", 総合電子出版社, (1991).
- (2) T.Takano Y.Tomikawa, T.Ogasawara and C.Kusakabe: "Characteristics and a New Control Method of a Same-Phase Drive-Type Ultrasonic Motor", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.30, No.9B, pp.2277-2280 (1991).
- (3) T.Takano, Y.Tomikawa, T.Ogasawara, S.Sugawara and M.Konno: "Ultrasonic Motors Using Piezoelectric Ceramic Multimode Vibrators", IEEE Trans. UFFC, Vol.37, No.3, pp.224-229 (1990).
- (4) A.Kumada:, "Piezoelectric Revolving Motors Applicable for Future Purpose", Proc. of 1990 IEEE 7th Inter. Sympo. on APPLI. of Ferro., pp.213-219 (1990).
- (5) 高野, 富川, 小笠原, 平田: "(R,1)-((1,1)) 多重モード振動子を用いた超音波モータ", 1989年電子情報通信学会秋季全国大会講演集, No.SA-5-4, pp.1-176-177 (1989).
- (6) 寺谷章, 高橋衆一: "超音波振動を利用した直線移動モータのカードリーダーへの適用研究", 田村技報, No.4, pp.13-20 (1992).
- (7) 高野, 富川, 青柳: "矩形振動子を用いた直線移動型超音波モータ", 音響学会平成4年度春季研究発表会講演集, NO.1-7-11, pp.803-804 (1992).
- (8) Y.Tomikawa, T.Nishizuka, T.Ogasawara and T.Takano:"A Paper or Card Forwarding Device Using a Flat-Type Ultrasonic Motor", Sensors and Materials, Vol.1-6 pp.359-379 (1989).
- (9) T.Takano and Y.Tomikawa,"Linearly Moving Ultrasonic Motor Using a Multi-Mode Vibrator", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.28, Suppl.28-1, pp.164-166 (1989).
- (10) Y.Tomikawa, T.Takano and H.Umeda: "Thin Rotary and Linear Ultrasonic Motors Using a Double-Mode Piezoelectric Vibrator of the First Longitudinal and Second Bending Modes", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.31, No.9B, pp.3073-3076 (1992).
- (11) 鈴木勝義, 小沢田正, 富川義朗, 楊志剛, 平本立一: "変位増幅機構を有する平板状超音波モータ", 日本機械学会・電磁力関連のダイナミックス・3回シンポジウム論文集, No.304, pp.164-168 (1991).

- (12) 谷口圭仁, 清水洋: "圧電セラミック音片型超音波リニアモータ", 音響学会昭和62年度秋季研究発表会講論集, No.1-2-19, pp.751-752 (1987).
- (13) 富川, 小笠原, 菅原, 近野, 高野: "横振動2重モード音片利用の直線移動自走式モータ", 昭和63年電子情報通信学会春季全国大会講論集, No.A-222, pp.1-224 (1988).
- (14) 高野, 富川, 小笠原, 青柳: "低周波小型超音波モータの試作", 音響学会平成3年度秋季研究発表会講論集, NO.2-4-2, pp.935-936 (1991).
- (15) 富川, 足立, 青柳, 高野, "縦一振り振動利用の超音波モータ", 電気学会第19回EMシンポジウム, pp.5-12 (1990).
- (16) 冥加修, 井上武, 大西修, 為我井昌司: "縦・振り複合振動子を利用した高効率超音波モータ", 1991年電子情報通信学会春季全国大会講論集, A-358, pp.1-360 (1991).
- (17) 寒河江, 富川, 足立, 高野: "伸び一振りモード利用超音波モータの試作" 音響学会平成2年度秋季研究発表会講論集, NO.2-Q-3, pp.859-860 (1990).
- (18) 清水洋, 吉田哲男: "超音波モータのカード送り機構への応用", 東北大電気通信研究所第25回シンポジウム, No.III-6(4), PP.123-131 (1989).
- (19) M.Kurosawa, K.Nakamura, T.Okamoto and S.Ueha: "An Ultrasonic Motor Using Bending Vibrations of a Short Cylinder", IEEE Trans. UFFC, Vol.36, No.5, pp.517-521 (1989).

第 7 章 紙送り機構への超音波モータの応用

7・1 結 言

第 2 章で、モード縮退型振動子を用いる超音波モータの構成について論じ、それに基づいて、第 3 章から第 5 章でいくつかのモータの試作特性例を示した。これらのモータが従来から指摘されている超音波モータ本来の特徴に加えて、構造的にも電磁モータにはみられない特徴を有し、それを生かした応用面での研究も活発に行われるようになった。多くの超音波モータ構成の中から応用面を考慮した基礎的データを示すことは、超音波モータの実用化の拡大につながるものとする。

本章ではこのような観点に立って、2 種類の超音波モータの応用について述べる。7・2 では第 5 章で述べた円環の径方向対称伸び振動 $(R, 1)$ モード と非軸対称振動 $((1, 1))$ モード 利用の直線移動型モータのカードリーダーへの応用について述べる。モータ構造と使用環境に対する対策を講じ、このデバイスが実用化の可能性のあることを明らかにしている。7・3 では平板の縦一屈曲モード縮退型振動子を紙送りデバイスとして利用する場合の基礎的な特性を示し、問題点などを指摘している。さらに紙の厚さなど紙送りの特性に与える要因について実験的にその影響を検討している。

7・2 円環の $(R, 1)-(1, 1)$ モード利用超音波モータの カードリーダーへの応用

(a) 背景

$(R, 1)-(1, 1)$ モード縮退型振動子を利用する直線移動型モータは推力が比較的大きく、薄型構造に適する。この特徴を生かしてカードリーダーへの実用化研究が行われている^{(1)・(2)}。

磁気カードリーダーは、パンチャーやモータの小型化によりコンパクト化が進められているが、DCモータを使用する限り減速機構を必要とすること、また磁界発生による磁気ヘッドへの影響等が、デバイス全体のコンパクト化への妨げとなっている。一方、超音波モータは低速で高効率が得られ、ステータとロータ間の摩擦駆動であるために磁界の発生がない。このような背景から、カードリーダーの駆動源として超音波モータを使用する試みが検討された。その中で、 $(R, 1)-(1, 1)$ モード縮退型振動子を利用する超音波モータは薄型構造に適すること、カード搬送に適する直線動作型モータであることが、このモータを適用する要因となった。

(b) 構成要素と構造

表7-1にカードリーダーの構成要素を、図7-1、図7-2にそれぞれカードリーダーの機構・構造図、回路まで含めたリーダー全体の写真を示している。カード保持は、振動子上に保持機構を設け振動子と共に搬送させている。振動子とレール間の加圧機構を図7-3に示している。先に指摘したように図5-5の構造では、振動子の位置によって振動子とレール間の加圧力が異なり、場所によって速度が異なる。図7-3に示すようにカードを保持する機構の一部に圧接ローラを設けて、振動子とレール間の圧力が移動する振動子の位置に影響を受けない構造とすることによって、搬送路全体にわたりほぼ安定した圧接力、すなわち速度が得られた。

表 7 - 1 カードリーダーの構成要素

	項 目	仕 様
モータ	振動子材質	PCM-9A
	電気機械結合係数	KP=60%
	温度係数	2000 (ppM/°C)
	振動子形状	39.8(外径)×11.8(内径) ×2.0(厚さ)mm
	駆動周波数	46~48(KHz)
カード リーダー	カード	JIS II 型 銀行カード
	モータ特性	搬送速度：300(mm/sec) 搬送力：2.6N
	速度変動	±15%
	リーダー寸法	機構部 96(W)×200(D)×280-0mm 回路部 96(W)×200(D)×120-0mm

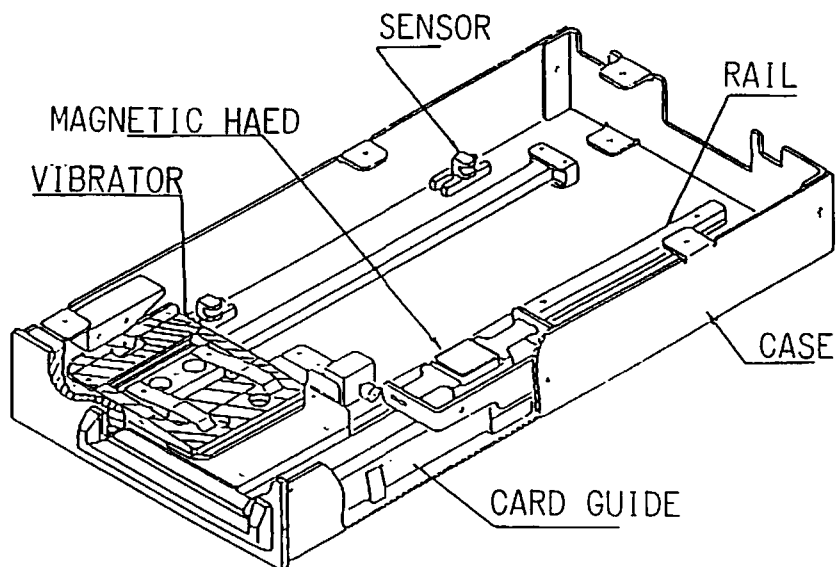


図 7 - 1 カードリーダーの機構構造

図 7 - 2 試作カードリーダー

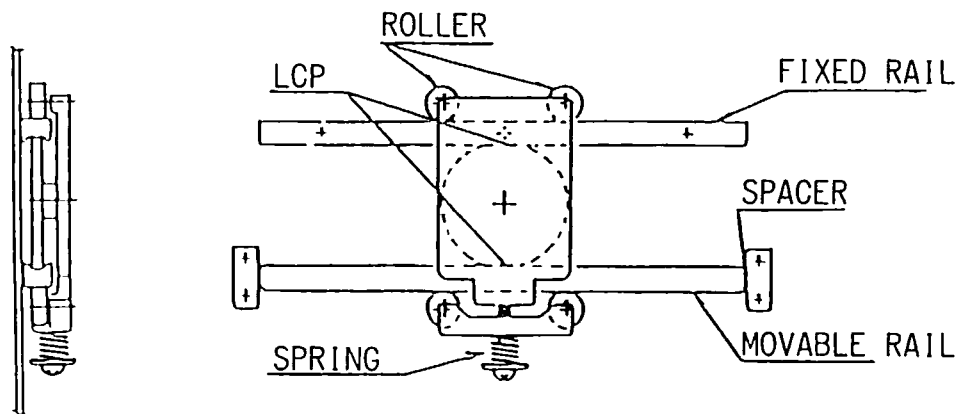


図 7 - 3 カードリーダーの加圧方法

(c) モータ特性

カード搬送の速度変動は、図 7 - 4 に示すようにレール圧接力の平坦化により、搬送路全域にわたり変動を $\pm 15(\%)$ 以内に抑えることができた。この値は、読みとり専用のリーダーとしては実用レベルに達しているが、書き込みのカードリーダー・ライターとして使用するためには、さらに安定性の向上を図る必要がある。

パス回数40万回後のモータ特性（駆動回路込み）を図7-5に示す。モータ単体の効率は25(%)であるが、この場合の最大効率は7.8(%)にとどまっている。これはモータ接触面（駆動力を取り出す点）での損失、回路内での損失のためと考えられる。

モータ自体の特性、制御系まで含めた効率の向上と速度安定性を図ることが今後の課題である。

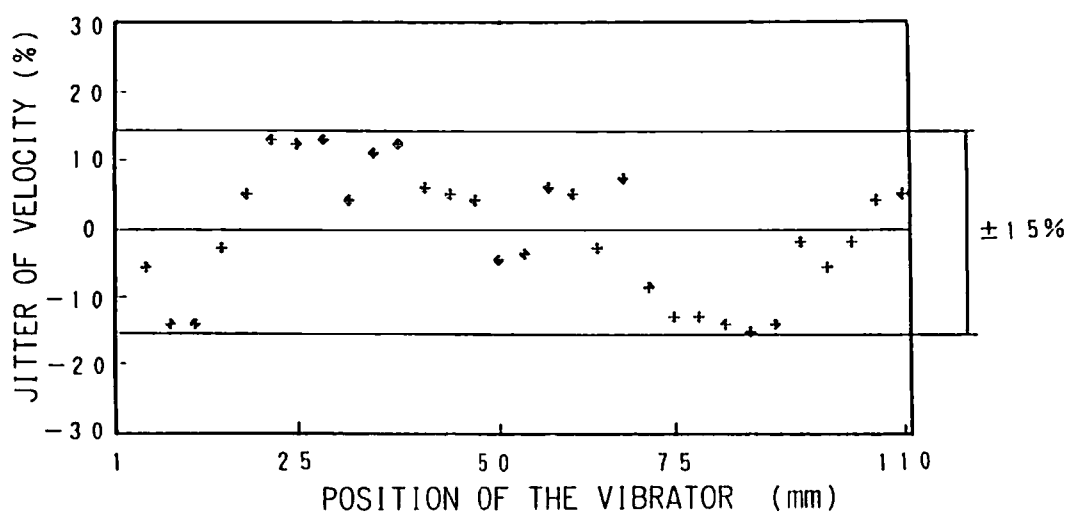


図7-4 試作カードリーダーの速度変動

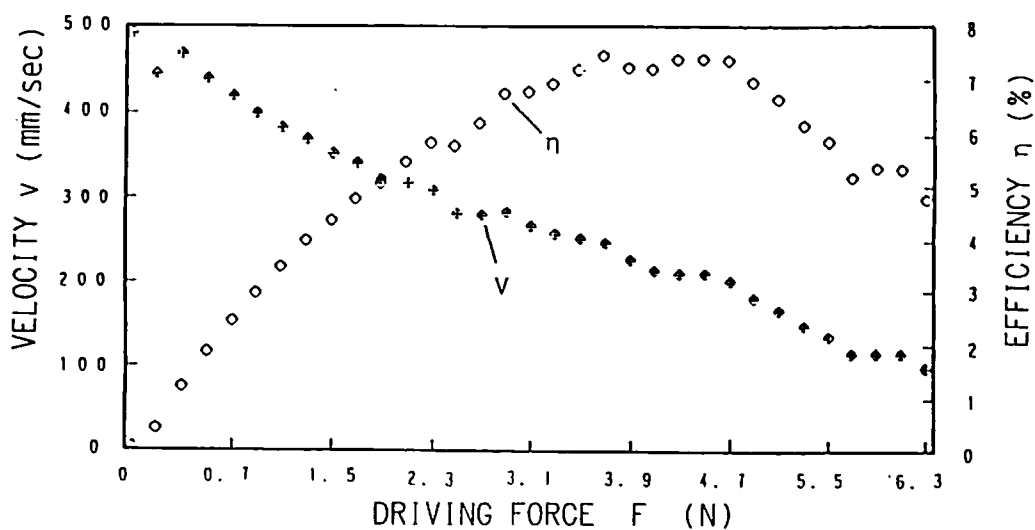


図7-5 試作カードリーダーの特性

(d) 温度特性と対策

図7-6に温度に対する振動子のアドミタンス特性を示している。このように温度による両モードの特性の変化が異なり、特に(R,1)モードへの影響が大きい。このような場合にはモータへの電力制御だけでは特性の低下を防ぐことはできない。ここでは低温時の場合(約 10°C 以下)の場合、振動子に駆動周波数より数kHz高い周波数の信号を印加して振動子を瞬時加熱する温度補償方式を採用した。温度補償した場合のカード搬送の速度特性を図7-7に示す。この補償方式を採用することにより、概ね数%以内の速度変化に抑えることができた。

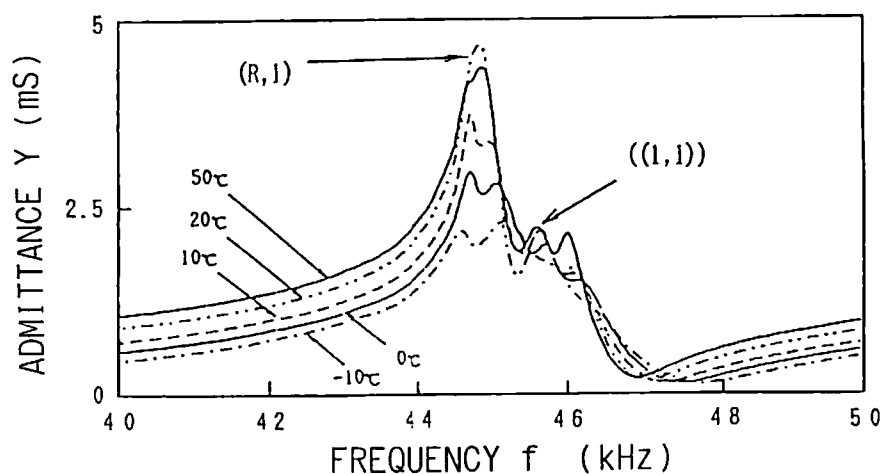


図7-6 温度による周波数特性の変化

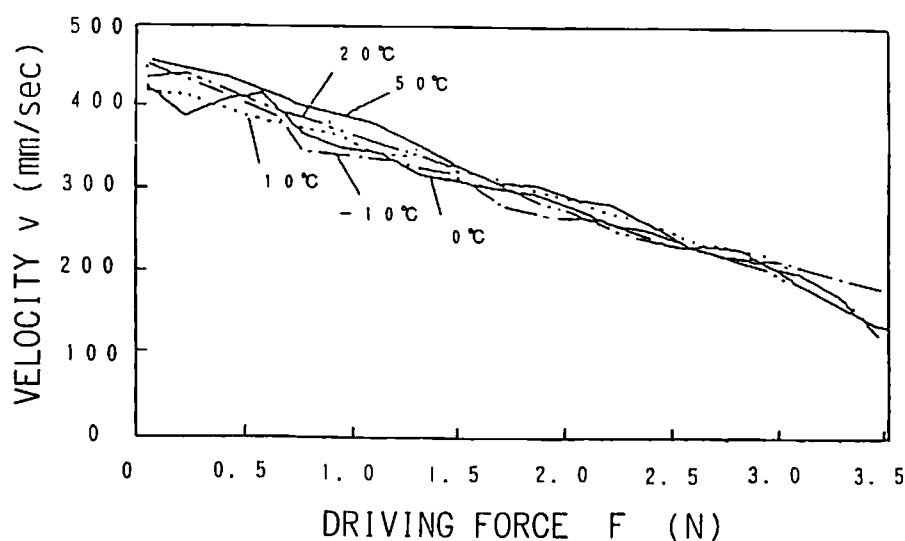


図7-7 温度補償後の速度特性

7・3 縦一屈曲モード縮退型振動子を用いる紙送りデバイス

7・3・1 紙送りデバイスの構造と特性

図7-8、図7-9に使用した振動子と試作した紙送りデバイスの構造を示す⁽³⁾。4・3で用いた縦1次(L_1)一屈曲8次(B_{V8})によるモード縮退型振動子が2台用いられ、図のように4個のロータが B_{V8} モードの両端の各グループ部に加圧接触されている。図4-28に示したように、これらの点では同じ方向の楕円運動が形成されているので、振動子とローラの間に紙を挿入することにより紙送りが実現される。先と同じように2相入力($\sin \omega t$ で L_1 モード, $\cos \omega t$ で B_{V8} モード)で駆動しているので、この位相を反転することにより紙は逆方向に送られる。試作に用いた振動子の寸法を以下に示す。

- ・ステンレス板 : $83.5^l \times 24.0^w \times 1.0^t (\text{mm}^3)$
- ・圧電セラミクス : L_1 モード用 $19.7^l \times 24.0^w \times 0.5^t (\text{mm}^3)$ 1枚
- B_{V8} モード用 $12.4^l \times 24.0^w \times 0.5^t (\text{mm}^3)$ 2枚
- $8.0^l \times 24.0^w \times 0.5^t (\text{mm}^3)$ 2枚

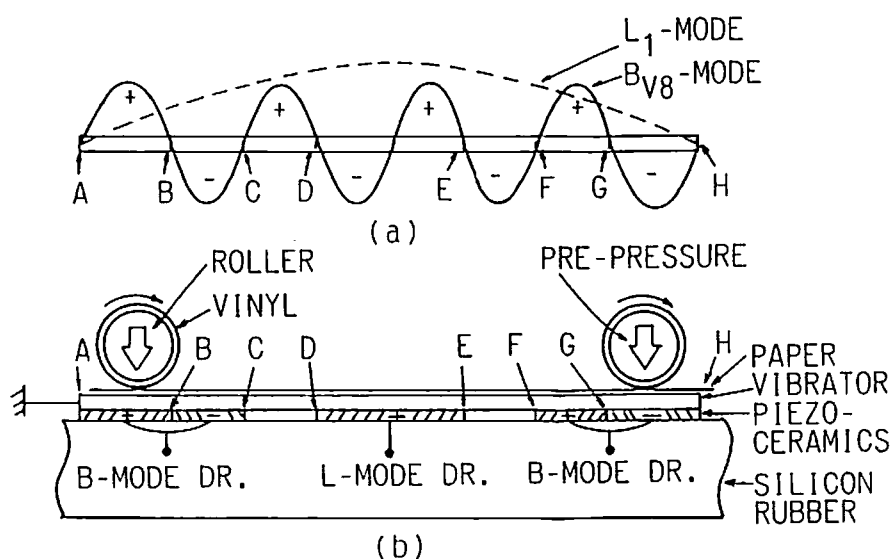


図7-8 $L_1 - B_{V8}$ モード縮退型振動子
(a)両モードの電荷分布 (b)振動子の構造

振動子は図 7 - 8 のようにシリコンゴム上に置かれている。この振動子を図 7 - 9 のように 2 台配置し、A 4 版のコピー用紙（ゼロックス紙）を送りその特性を測定した。図 7 - 10 にこの構造の写真を示す。ローラは表面をビニールコーティングしたベアリングを使用した。

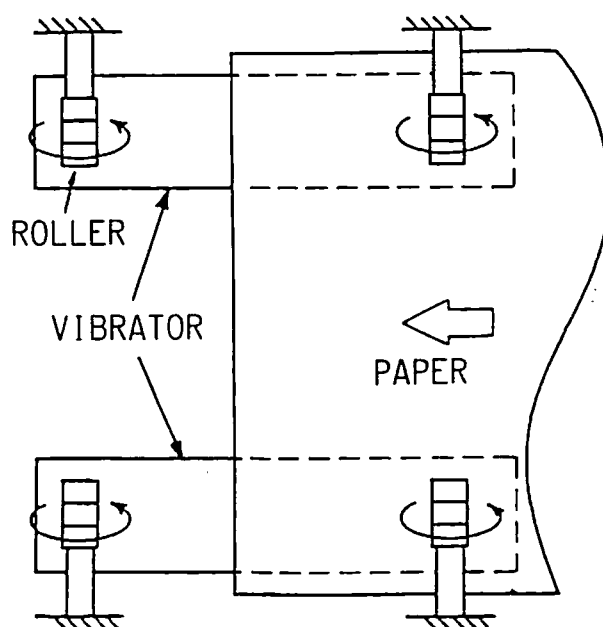


図 7 - 9 $L_1 - B_{v8}$ モード縮退型振動子を用いた紙送りデバイス

図 7 - 10 試作紙送りデバイス

はじめに、紙の水平方向に負荷を与え、入力電圧に対する送り速度を測定した。その結果を図7-11に示す。無負荷の場合、 $V_{p-p} \approx 70(\text{V})$ で約 $240(\text{mm/sec})$ のスピードで、紙が送られるのが確かめられた。次に、本モータが搬送紙に与える搬送力を測定した。図7-12に示すように送られる紙と反対方向に負荷を与え、紙にはたらく駆動力と釣り合う力を最大搬送力として測定した。入力電圧 $V_{p-p} = 72(\text{V})$ の時約 $185(\text{gf}) - 1.8(\text{N})$ の力を発揮している。このようにこのデバイスは、それほど強い搬送力は得られないが、軽ロードの時は十分なスピードで搬送できる⁽⁴⁾ ことが確かめられた。

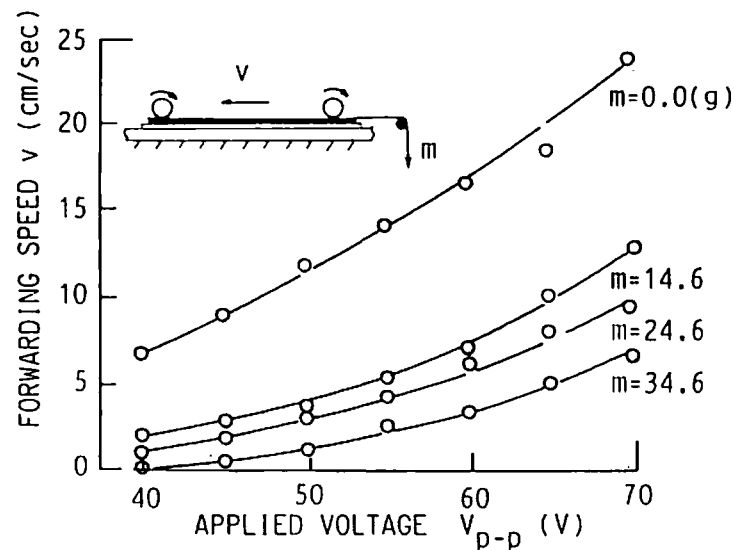


図7-11 紙送りデバイスの特性（入力－搬送速度特性）

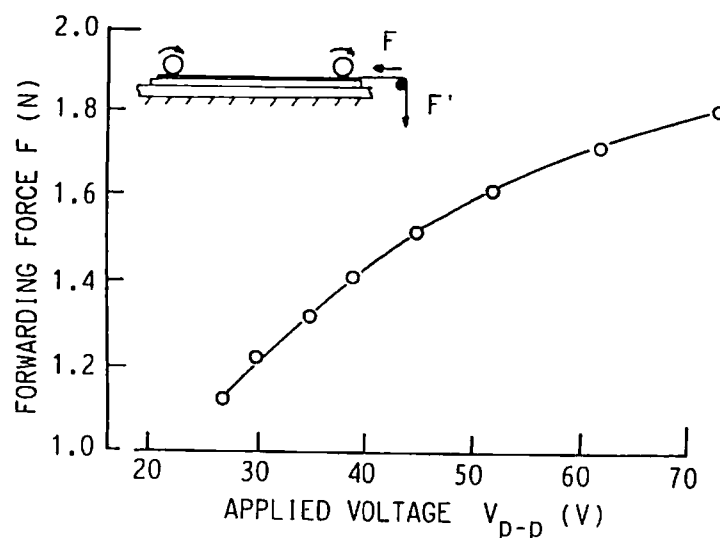


図7-12 紙送りデバイスの特性（入力－搬送力特性）

7・3・2 紙送り特性に及ぼす各種要因の測定

紙送り特性はいくつかの要因によって左右される。ここでは、ローラの与える加圧力、摩擦力ならびに紙の厚さが特性に与える影響について、速度と発生力の観点から実験的な検討を加えた。なお、以下の測定では1個だけのローラにより実験を行なった。紙への加圧力に対する速度と発生力の特性を図7-13、図7-14に示している。図7-13は紙に対する負荷を零として、入力電圧をパラメータとして加圧力に多する搬送速度の測定値を示している。いずれの場合も加圧によって搬送速度が変わり、概ね80~200(gf)の範囲にその最大値を有している。この範囲は負荷によって変化し、例えば $m=14.61(\text{gr})$ では320~450(gf)、 $m=24.61(\text{gr})$ では450~700(gf)の範囲にあることが確かめられた。このように負荷の大きいシートを搬送する場合には、その負荷量に応じた加圧力が必要となる。図7-14は加圧力に対する搬送力の測定結果である。ローラはステンレスだけのものと、ビニールコーティングしたものについて測定し比較した。ステンレスの場合は加圧力を増すと徐々に搬送力が減少するが、コーティングしたローラの場合は加圧力の増加に伴って搬送力も増加する。これはビニールコーティングしたローラは接触面が弾性変形することにより、モータの振動を広範囲にわたってシートに伝達されるためと考えられる。

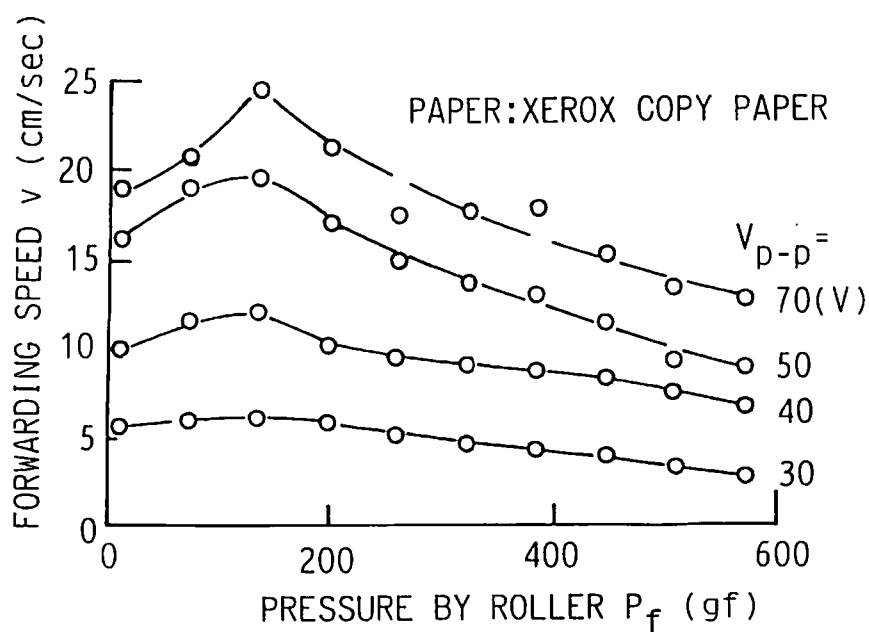


図7-13 紙送りデバイスの特性（加圧力-搬送速度特性）

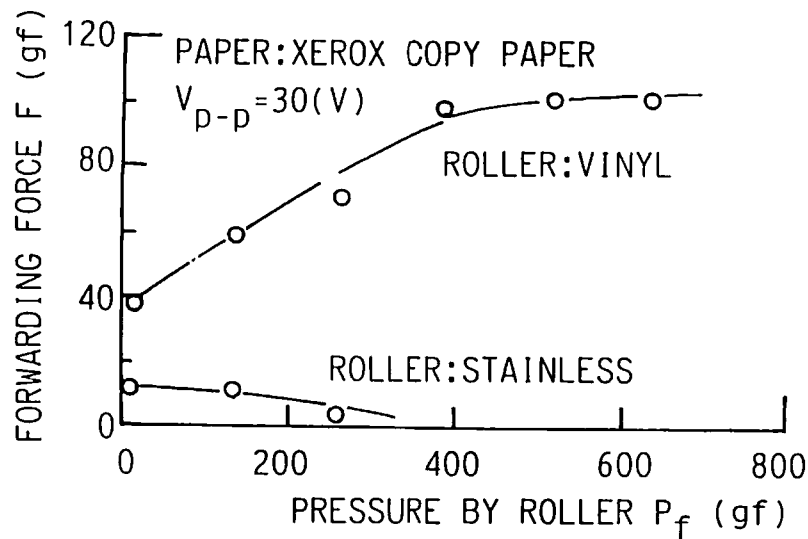


図 7 - 14 紙送りデバイスの特性（加圧力－搬送力特性）

図 7 - 15に紙の厚さを変えた場合の特性を示している。同質で厚さの異なる 7 種類の上質紙を用い、入力電圧を $30(V_{p-p})$ 一定として紙送りの速度と搬送力を測定した。同図 (a)に示すように速度は紙が厚くなると低下するが、これはモータの振動変位の吸収が紙厚によって異なることが主な原因である。同図 (b)は、搬送力については最適な厚さ（この場合は 0.15mm 付近）があることを示している。紙が薄い場合、ローラとの加圧接触領域が小さいので搬送力は弱くなる。逆に紙が極端に厚い場合には紙によって振動が吸収され、モータの振動が有効に伝達されないためと考えられる。また、ビニールコーティングしたローラでは速度は低下するが、摩擦力が増加するため強い力を引き出せる。

以上から本構成の紙送りデバイスでは、振動を吸収しないで紙と振動子間の摩擦力を上げることが駆動力を大きくするための要点となる。紙送りの主体となっているのは振動子側で、ローラは紙にステータの駆動力を伝えるために必要な加圧の役目をはたしている。速度を要求するのなら摩擦係数の小さい堅い材料を、力が必要であれば摩擦係数の大きいローラ材が必要となる。結果的にはローラは紙送りに必要欠くべからざるものであり、表面材質とも合わせてさらに十分な検討が必要である。

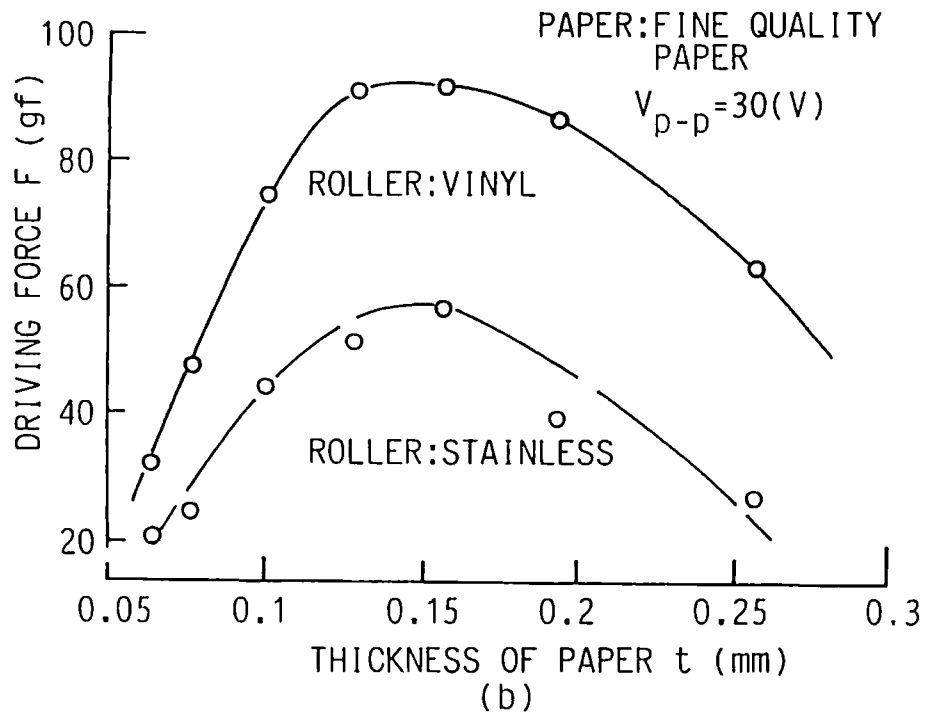
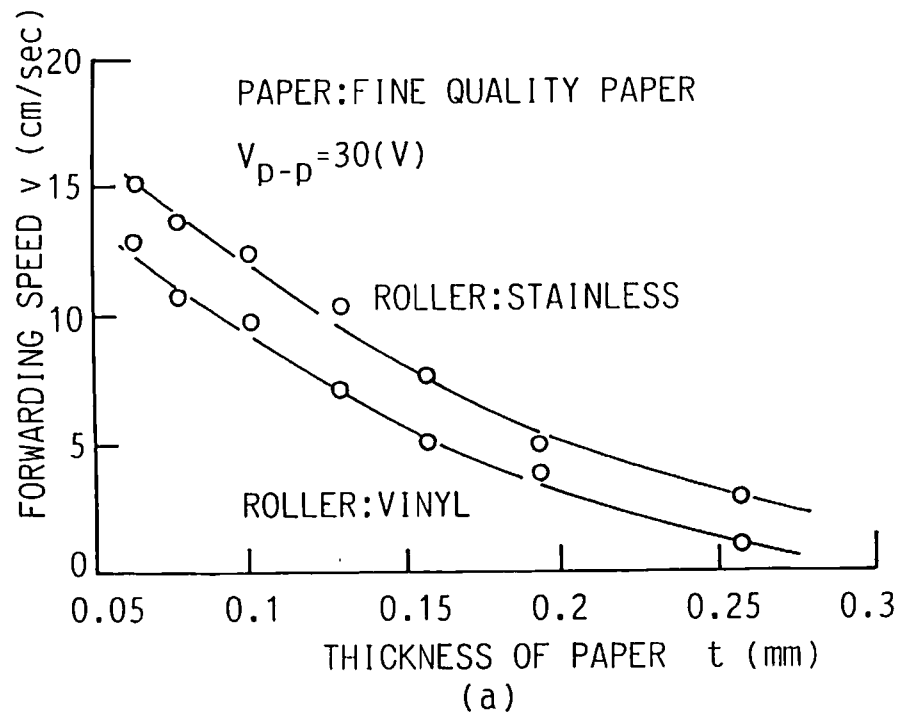


図 7-15 紙送りデバイスの特性
 (a) 紙厚 - 搬送速度特性 (b) 紙厚 - 搬送力特性

7・4 結 言

最初に、円環の $(R, 1) - ((1, 1))$ モード利用直線移動型モータを用いたカードリーダーについて述べた。加圧機構の改善と温度補償を行うことによりカードリーダーとしての要求を満足する特性が得られた。デバイス全体としての効率の改善や、カードライタを目的とした速度特性の実現が今後の課題である。次に、平板の縦－屈曲モード縮退型振動子を用いた紙送りデバイスを試作し、その基本的な特性を示した。さらにローラによる加圧力、摩擦力ならびに紙の厚さが特性に与える影響について、速度と発生力の観点から実験的な検討を加え次に示すような実用化に際しての基礎的な資料を得た。

- 1). 加圧によって搬送速度が変化し、速度が最大になる加圧力の範囲が存在する。この範囲は紙に与える負荷にも依存する。
- 2). 紙が厚くなると一般的に速度は低下する。搬送力は加圧が一定の場合は、これを最大にする厚さが存在する。
- 3). 振動子と紙の間の摩擦係数は特性に大きな影響を与える。摩擦係数が大きいと紙送り速度、駆動力とも大きくなる。

以上を要約すると

- (1) 円環の $(R, 1) - ((1, 1))$ モード利用直線移動型モータを用いたカードリーダーは実用化の要求を満足する特性が得られた。
- (2) 平板の縦－屈曲モード縮退型振動子を用いた紙送りデバイスについては、可動のメカニズムさらに加圧などが搬送特性に及ぼす影響を実験的に明らかにし、実用化への基礎的な資料を与えた。

となる。

参 考 文 献

- (1) 寺谷章, 高橋衆一, 清水巖: "面内振動モードを利用した直線移動モータのカードリーダー装置への応用", 音響学会平成3年度秋季研究発表会講論集, No.2-4-10, pp.951-952 (1992).
- (2) 寺谷章, 高橋衆一: "超音波振動を利用した直線移動モータのカードリーダーへの適用研究", 田村技報, No.4, pp.13-20 (1992).
- (3) Y.Tomikawa, T.Nishizuka, T.Ogasawara and T.Takano: "A Paper or Card Forwarding Device Using a Flat-Type Ultrasonic Motor", Sensors and Materials, Vol.1-6 pp.359-379 (1989).
- (4) O.Ohnishi, O.Myouga, T.Uchikawa, T.Inoue, S.Takahashi and Y.Tomikawa: "Paper Transport Device Using a Flat Plate Piezoelectric Vibrator", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.28, Suppl.28-1, pp.167-169 (1989).

第 8 章 結 論

本論文では、モード縮退型振動子を用いる超音波モータの構成法についての研究を詳述した。本研究で得られた結果は各章毎に要約してあるが、ここではこの研究で得られた成果と今後の課題を列挙する。

成 果

- (1) 超音波モータ構成の体系的な考察を行い、各種構成の位置づけを明らかにするとともに、いくつかの新しいモータ構成を提案した。
- (2) 振動子形状とモードの組み合わせによってモード縮退型超音波モータを分類整理し、さらに駆動力の取り出し方、ロータ構造まで含めて総合的な検討を加え、実用的な構成についてその特徴を明らかにした。
- (3) 2相駆動以外に、縮退モードを同相駆動することにより単相で正逆回転のモータが構成できることを明らかにした。
- (4) 円環の非軸対称振動は、誘起電荷の極性に合った駆動方法を採用することにより圧電的に強制に励振できること、2相駆動の場合に円環の内径対外径比により変位の楕円運動の形状が変化し、その最適な値が存在することを見いだした。
- (5) 縮退する円環の非軸対称振動を2相駆動する超音波モータと円板の面垂直振動を同相駆動する超音波モータを提案し、その特徴を明らかにした。
- (6) 段付き円柱振動子を用いることにより、円柱の縦振動と振り振動の縮退を実現し、ステータ用振動子として利用できることを示した。
- (7) 平板の縦一屈曲振動利用の超音波モータを提案し、基本的なモータ特性と問題点などを指摘した。
- (8) 円環の径方向対称伸び振動と非軸対称振動を用いる直線移動型超音波モータは、薄型構造に適し、性能的にも優れた特徴を持つことが確かめられた。
- (9) 平板の縦一屈曲振動利用の直線移動型超音波モータを提案し、この種モータが種々の形状のモータへ応用発展が可能であることを指摘した。

- (10) モード縮退型超音波モータを分類評価し、それらの最大トルク、速度、効率、特徴などを一覧表にて示し、用途に応じた自由なモータ選択の道を拓いた。
- (11) 円環の $(R, 1) - ((1, 1))$ モード縮退型モータを用いるカードリーダーの構造と特性を示した。加圧機構の改善と振動子への温度補償を行うことにより実用化が十分可能であることを示した。
- (12) 平板の縦一屈曲モード縮退型モータの紙送り機構への適用を試み、各種要因の搬送特性に与える影響を実験的に明らかにし、紙送りデバイスとして実用化する際の基礎的なデータを与えた。

今後の研究課題

- (1) 超音波モータの動作解析と設計は、いくつかの構成については報告されているが、本論文で提案した構成については未だ試みられていない。実験的に得られたデータを基に各構成の評価を行ったが、理論的な特性評価が必要とされる。
- (2) 各種超音波モータの構成を包括的に解析、設計する手法を確立できないか。
- (3) 2相駆動モータと同相駆動モータの特性比較を行い、その長短を明らかにする。
- (4) 多種多様にわたる超音波モータへの要求に応えるためには、各構成の再検討を行い、特性の向上を計るとともに、新しいモータ構造ならび新しいステータ用振動子の開発が必要とされる。

以上、本論文で得られた成果を要約し、今後の研究課題を示した。

謝 辞

本研究は、昭和62年山形大学工学部富川義朗教授の研究グループにお誘い頂き研究に着手して以来、富川義朗教授のご懇切なるご指導のもとに行われたものであり、ここに深く感謝申し上げます。

本論文をまとめるにあたり、東京工業大学精密工学研究所上羽貞行教授、大槻茂雄教授、大浦宣徳助教授、関根松夫助教授、林巖教授には多くの貴重なご助言とご高配を賜りました。また、上羽貞行教授には各種学会、研究会において貴重なご意見をいただきました。厚くお礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、山形大学教育学部日下部千春教授には、有益なご助言とご指導をいただきました。心からお礼申し上げます。日頃よりご討論ご意見をいただく山形大学工学部富川研究室、足立和成講師、青柳学助手ならびに試料の作成にご援助いただいた小笠原俊治技官の皆様に厚くお礼申し上げます。この間、富川研究室の大学院生の多くの方々に多大なご協力をいただきました。特に平田拓氏（現山形大学工学部助手）には種々ご意見をいただきました。合わせてお礼申し上げます。

筆者が超音波関係の研究を始める機会を与えていただき、以来常に有益なご助言と暖かい励ましを賜った石巻専修大学近野正教授（山形大学名誉教授）に深く感謝申し上げます。

東北大学工学部中村信良教授には、特に第3章について有益なご助言を賜りました。東京工業大学精密工学研究所黒澤実助手（現東京大学助教授）、中村健太郎助手、小池義和助手、山形大学工学部広瀬精二助教授には貴重なご意見とご討論をいただきました。厚くお礼申し上げます。

各モータの試作については多くの会社にご協力いただきました。日本電気株式会社材料開発試作センター高橋貞行主管研究員、井上武志氏、セイコー電子工業株式会社時計事業部開発部 大多和侑二氏、春日政雄氏、光電製作所加藤毅氏には多大なご尽力を賜りました。第5章のカードリーダーの実用化研究は株式会社田村電機製作所において行われているものである。多大な援助をいただ

いた、技術開発本部清水巖部長、山元征夫氏、古屋省吾氏、高橋衆一氏、寺谷章氏、寒河江忠篤氏に感謝申し上げます。さらに、学会等でアルプス電気株式会社大西一正氏を初め多くの方々に貴重なご意見を賜りました。厚くお礼申し上げます。

セイコー電子部品株式会社林崎伸一氏には、モータ部品の試作から調達まで大変お世話になりました。また回路関係では株式会社NF回路設計ブロック大倉郁生氏に貴重なご助言とご援助を賜りました。

筆者が東北工業大学に赴任以来、ご指導ご鞭撻を賜っている通信工学科松谷栄一助教授、電子工学科石川瑛助教授、圧電セラミクスの加工で便宜をはかっていた電子工学科阿部俊三助手に感謝申し上げます。

なお、本研究に対しては、昭和63、64、平成2年度東北工業大学特別研究費、平成3年度石田記念財団研究助成金、ならびに共同研究者（代表者富川義朗山形大学教授）の一員として昭和63、平成元年度文部省科学研究費、昭和62年度後期放送文化基金や各種の研究助成金の補助を受けた。関係各位に深くお礼申し上げます。

発 表 論 文 リ ス ト

内 訳 : 1 : 関 連 論 文	17編
2 : その他の論文	9編
3 : Proceedings	6編
4 : 国際学会での発表	8編
5 : 研究会等での発表	12編
6 : 学会等での口頭発表	90編

1 : 関連論文

- (1) T.Takano Y.Tomikawa, T.Ogasawara S.Sugawara and M.Konno: "Ultrasonic Motors Using Piezoelectric Ceramic Multi-Mode Vibrators", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.27, Suppl.27-1, pp.192-194 (1988) 本文との関連 - 第 2, 5 章

- (2) Y.Tomikawa T.Ogasawara S.Sugawara M.Konno and T.Takano: "Construction of Ultrasonic Motors and their Application", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.27, Suppl.27-1, pp.195-197 (1988) 本文との関連 - 第 3, 4 章

- (3) Y.Tomikawa, T.Takano, H.Hirata and T.Ogasawara: "An Ultrasonic Motor Using Non-Axisymmetric Vibration Modes of a Piezo-Ceramic Annular Plate", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.28, Suppl.28-1, pp.161-163 (1988) 本文との関連 - 第 3 章

- (4) Y.Tomikawa, T.Nishizuka, T.Ogasawara and T.Takano: "A Paper or Card Forwarding Device Using a Flat-Type Ultrasonic Motor", Sensors and Materials, Vol.1-6 pp.359-379 (1989) 本文との関連 - 第 4, 7 章

- (5) T.Takano and Y.Tomikawa, "Linearly Moving Ultrasonic Motor Using a Multi-Mode Vibrator", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.28, Suppl.28-1 pp.164-166 (1989). 本文との関連 - 第 5 章

- (6) Y.Tomikawa, T.Ogasawara and T.Takano: "Ultrasonic Motors -Constructions/ Characteristics / Applications -", Ferroelectrics Vol.91, pp.163-178 (1989). 本文との関連 - 第 2, 3, 5 章

- (7) T.Takano and Y.Tomikawa, "Ultrasonic Motors Using a Piezoelectric Ceramic Multi-Mode vibrator", Ferroelectrics, Vol.95, PP.165-169 (1989). 本文との関連 - 第 3, 5 章

- (8) Y.Tomikawa, T.Takano and K.Toda, "Same Phase Drive Type Ultrasonic Motors", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.28, Suppl.28-2, pp.198-201 (1989). 本文との関連 - 第 3 章

- (9) T.Takano, Y.Tomikawa and H.Hirata, "An Ultrasonic Motor Using Non-Axisymmetric Vibration Modes of a Piezo-Ceramic Annular Plate", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.28, Suppl.28-2, pp.202-205 (1989). 本文との関連－第3章
- (10) T.Takano, H.Hirata and Y.Tomikawa: "Non-axisymmetric counter vibrations of clamped piezoelectric annular plate: Analysis for the development of an ultrasonic motor", J. Acoust. Soc. Jpn.(E), Vol.11, No.3, pp.161-172 (1990). 本文との関連－第3章
- (11) T.Takano, Y.Tomikawa, T.Ogasawara S.Sugawara and M.Konno: "Ultrasonic Motors Using Piezoelectric Ceramic Multimode Vibrators", IEEE Trans. UFFC, Vol.37, No.3, pp.224-229 (1990). 本文との関連－第3章
- (12) T.Takano, H.Hirata and Y.Tomikawa:"Analysis of Non-Axisymmetric Mode of Piezo-Ceramic Annular Plate and its Application to an Ultrasonic Motor", IEEE Trans. UFFC, Vol.37, No.6, pp.558-565 (1990). 本文との関連－第3章
- (13) Y.Tomikawa, K.Adachi, M.Aoyagi and T.Takano: "Ultrasonic Motors Using Longitudinal and Torsional Modes of a Rod Vibrator", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.29, Suppl.29-1, pp.188-190 (1990). 本文との関連－第4章
- (14) T.Takano, Y.Tomikawa, T.Ogasawara and C.Kusakabe: "Characteristics and a New Control Method of a Same-Phase Drive-Type Ultrasonic Motor, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.30, No.9B, pp.2277-2280 (1991). 本文との関連－第3章
- (15) T.Takano Y.Tomikawa and C.Kusakabe: "Same Phase Drive Type Ultrasonic Motors Using Two Degenerate Bending Vibration of a Disk", IEEE Trans. UFFC, Vol.39, No.2 pp.180-186 (1992). 本文との関連－第3章
- (16)T.Tomikawa, T.Takano and H.Umeda: "Thin Rotary and Linear Ultrasonic Motors Using a Double-Mode Piezoelectric Vibrator of the First Longitudinal and Second Bending Modes", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.31, No.9B, pp.3073-3076 (1992). 本文との関連－第4章
- (17) Y.Tomikawa, K.Adachi, M.Aoyagi, T.Sagae and T.Takano: "Some Constructions and Characteristics of Rod-Type Piezoelectric Ultrasonic motors Using Longitudinal and Torsional Vibrations", IEEE Trans. UFFC, Vol.39, No.5, pp.600-608 (1992). 本文との関連－第4章

2 : その他の論文

- (1) C.Kusakabe Y.Tomikawa and T.Takano; "High Speed Actuation of a Piezo-electric Actuator by Pulse Driving and Stepping of its Residual Mechanical Vibration", IEEE Trans. UFFC, Vol.37, No.6, pp.551-557 (1990).
- (2) C.Kusakabe, Y.Tomikawa, T.Takano and K.Narita: "Prevention of Residual Vibration of a Piezo-electric Actuator by Pulse Driving", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.29, Suppl.29-1, pp.114-116 (1990).
- (3) Y.Tomikawa, K.Adachi, H.Hirata, T.Suzuki and T.Takano: "Excitation of a Progressive Wave in a Flexurally Vibration Transmission Medium", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.29, Suppl.29-1, pp.179-181 (1990).
- (4) T.Takano, T.Suzuki, K.Adachi and Y.Tomikawa: "Basic Studies on Powder-sending Using Ultrasonic Vibration", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.30, Suppl.30-1, pp.200-202 (1991).
- (5) Y.Tomikawa, M.Yaginuma, S.Hirose and T.Takano: "An Equivalent Circuit Expression of an Ultrasonic Motor and Measurement of its Elements-In the Case of L1-B8 Multimode Rectagular Thin-Form Motor-", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.30, No.9B, pp.2398-2401 (1991).
- (6) C.Kusakabe, T.Takano and Y.Tomikawa: "Driving and Controlling of a Watch Device Ultrasonic Motor by Two Phase Pulse Signals", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.30, Suppl.30-1, pp.206-208 (1991).
- (7) M.Aoyagi, Y.Tomikawa and T.Takano: "Ultrasonic Motors Using Longitudinal and Bending Multimode Vibrators with Mode Coupling by Externally Additional Asymmetry or Internal Nonlinearity", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.31, No.9B, pp.3077-3080 (1992).
- (8) C.Kusakabe, Y.Tomikawa, T.Takano and K.Narita: "An Encoder-Less Ultrasonic Motor Using Open-Loop Control System", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.31, Suppl.31-1, pp.239-241 (1992).
- (9) Y.Tomikawa, C.Kusakabe, M.Aoyagi and T.Takano: "Excitation of an Asymmetric Displacement without Residual Vibration and its Application to Construct a Piezoelectric Actuator", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.31, Suppl.31-1, pp.257-259 (1992).

3 : Proceedings

- (1) T.Takano, Y.Tomikawa, T.Ogasawara and H.Hirata, "Construction and Characteristics of Ultrasonic Motors Using a Piezo-Ceramic Annular Plate", 1989 Ultrasonics Symposium Proceedings, pp.735-738 (1989).
- (2) M.Aoyagi, T.Tomikawa, K.Adachi and T.Takano: "Characteristics of a Rod Type Ultrasonic Motor Using Longitudinal and Torsional Vibrations", Proceedings of the 3rd Inter. Sympo. on the Applied of Electromagnetic Forces, pp.31-34 (1991).
- (3) Y.Tomikawa, K.Adachi, M.Aoyagi, T.Sagae and T.Takano: "A Rod Type Ultrasonic Motors Using Longitudinal and Torsional Vibration Modes", Proceedings of 1990 IEEE 7th Inter. Sympo. on Applications of Ferro-electrics, pp.229-232 (1991).
- (4) T.Takano, Y.Tomikawa, M.Aoyagi and T.Ogasawara: "A Linearly Moving Ultrasonic Motor Using a Longitudinal and Torsional Vibration Modes", Proceedings of 1990 IEEE 7th Inter. Sympo. on Applications of Ferro-electrics, pp.521-524 (1991).
- (5) T.Takano, Y.Tomikawa, T.Ogasawara and M.Aoyagi: "Trial Production of a Small-Sized Ultrasonic Motor Using a Tuning Fork", Proceedings of the 4th Inter. Sympo. on the Applied of Electromagnetic Forces, pp.113-116 (1992).
- (6) T.Takano, Y.Tomikawa M.Aoyagi and N.Kambe: "Basic Studies of Powder Sending Device Using Flexural Progressive Waves", Proceedings of the 14th Inter. Congress on Acoustics No.C5-4 (1992).

4 : 国際会議での発表

- (1) T.Takano and Y.Tomikawa: "Ultrasonic Motors Using Piezoelectric Ceramic Multi-Mode Vibrators", The 4th Japanese-Soviet Symposium on Ferro-electricity, No.22PS6 (1988).
- (2) Y.Tomikawa, T.Takano and T.Ogasawara: "Ultrasonic Motors-Constructions / Characteristics / Applications-", 1st European Conference on Applications of Polar Dielectrics and International Symposium on Applications of Quantum Electronics (1988).

- (3) T.Takano, Y.Tomikawa, T.Ogasawara and H.Hirata: "Construction and Characteristic of Ultrasonic Motors Using a Piezo-Ceramic Annular Plate", IEEE 1989 Ultrasonics Symposium, No.TJ-2 (1989).
- (4) Y.Tomikawa, K.Adachi, M.Aoyagi and T.Takano : "A Rod Type Ultrasonic Motor Using Longitudinal and Torsional Modes", International Symposium on Applications of Ferroelectrics, No.10.6 (1990).
- (5) T.Takano, Y.Tomikawa, M.Yaginuma and T.Ogasawara : "A Linearly Moving Ultrasonic Motor Using a Longitudinal and Bending Multi-Mode Vibrator", International Symposium on Applications of Ferroelectrics, No.VI.12 (1990).
- (6) M.Aoyagi, T.Tomikawa, K.Adachi and T.Takano: "Characteristics of a Rod Type Ultrasonic Motor Using Longitudinal and Torsional Vibrations", The 3rd International Symposium on the Applied of Electromagnetic Forces, (1991).
- (7) T.Takano, Y.Tomikawa, T.Ogasawara and M.Aoyagi: "Trial Production of a Small-Sized Ultrasonic Motor Using a Tuning Fork", The 4th International Symposium on the Applied of Electromagnetic Forces, No.AP-4-9 (1992).
- (8) T.Takano, Y.Tomikawa M.Aoyagi and N.Kanbe: "Basic Studies of Powder Sending Device Using Flexural Progressive Waves", The 14th International Congress on Acoustics No.C5-4 (1992).

5 : 研究会等での発表

- (1) 富川, 小笠原, 菅原, 近野, 高野, "超音波モーターの構成について", 電子情報通信学会超音波研究会, US87-5 (1987).
- (2) 高野, 富川, 小笠原, 菅原, 近野, "面内振動の多重モード振動子利用による超音波モーター", 電子情報通信学会超音波研究会, US87-32 (1987).
- (3) 日下部, 富川, 高野, "圧電アクチュエータのパルス駆動による高速動作と残留振動の停止", 電子情報通信学会超音波研究会, US88-8 (1988).
- (4) 富川, 平田, 高野, "超音波モータのための非軸対称振動圧電セラミック孔あき円板の解析", 電子情報通信学会超音波研究会, US88-32 (1988).

- (5) 富川，西塚、小笠原、高野，"平板状超音波モータを用いた紙（カード）送りデバイス"，電気学会第18回 E M シンポジウム， pp.45-52（1989）.
- (6) 富川、平田、高野，"超音波モータのための非軸対称振動圧電セラミック孔あき円板の解析－内、外周を固定した場合－"，電子情報通信学会超音波研究会， US89-40（1989）.
- (7) 富川，高野："縮退形圧電振動子利用の超音波モータ"，東北大通研シンポジウム， No.III-3（1989）.
- (8) 富川，足立、青柳、高野，"縦一振り振動利用の超音波モータ"，，電気学会第19回 E M シンポジウム， pp.5-12（1990）.
- (9) 日下部，高野、富川，"2相パルス信号による超音波モータの駆動と制御"，日本学術振興会弾性波素子技術第150委員会， pp.31-36（1990）.
- (10) 高野，富川，小笠原，"円板の屈曲モードを利用する同相駆動型超音波モータ"，電子情報通信学会超音波研究会， US90-50（1990）.
- (11) 日下部，富川，高野："エンコーダレス角変位自己補正方式の超音波モータ"，電気学会第20回 E M シンポジウム， No.3， pp.13-18（1991）.
- (12) 神戸，富川，足立，高野："パイプ超音波線路の軸対称波並びに表面変位の楕円運動の解析"，電子情報通信学会超音波研究会， US91-40（1991）.

6：学会等での口頭発表

- (1) 富川，西塚，菅原，近野，高野："平板状超音波モーターによる紙送りデバイス－紙送り機構の実験的検討－"，昭和62年度電気関係学会東北支部連合大会， No.2H12（1987）.
- (2) 高野，富川，菅原，近野："非軸対称振動の同形2重モード・圧電セラミック円板を用いた超音波モーター"，昭和62年度電気関係学会東北支部連合大会， No.2H13（1987）.
- (3) 高野，富川，小笠原，菅原，近野："面内振動の多重モード振動子利用による超音波モーター"，日本学術振興会弾性波素子技術第150委員会第12回研究会，（1987）.
- (4) 高野，富川，小笠原，菅原，近野："面内振動利用多重モード振動子による超音波モータ"，日本音響学会昭和62年度秋季研究発表会， No.1-2-16（1987）.

- (5) 富川, 小笠原, 菅原, 近野, 高野: "定在波・屈曲円板振動子を用いた超音波モーター", 日本音響学会昭和62年度秋季研究発表会, No.1-2-17 (1987).
- (6) 高野, 富川, 小笠原, 菅原, 近野: "面内振動・多重モード振動子利用の超音波モーター", 第8回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, No.D-1 (1987).
- (7) 富川, 小笠原, 菅原, 近野, 高野: "超音波モーターの構成とその一応用", 第8回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, No.D-1 (1987).
- (8) 高野, 富川, 小笠原, 菅原, 近野: "面内振動・多重モード振動子利用の超音波モータ", 一正方形板の同形縮退屈曲並びに円板の非軸対称((3,m))モード利用の構成一", 日本音響学会昭和63年度春季研究発表会, No.1-6-16 (1988).
- (9) 高野, 富川, 小笠原, 菅原, 近野, 鈴木: "面内振動・多重モード振動子利用超音波モータの考察一特に非軸対称孔あき円板の振動モード解析について一", 日本音響学会昭和63年度春季研究発表会, No.1-6-17 (1988).
- (10) 富川, 小笠原, 高野, 菅原, 近野, 戸田: "屈曲円環の定在波利用超音波モーター", 日本音響学会昭和63年度春季研究発表会, No.1-6-18 (1988).
- (11) 富川, 西塚, 小笠原, 高野, 菅原, 近野: "縦一屈曲多重モード振動子利用の平板状モータ", 日本音響学会昭和63年度春季研究発表会, No.2-P-30 (1988).
- (12) 高野, 平田, 富川, 菅原, 近野, 鈴木: "孔あき円板の非軸対称振動の共振周波数", 昭和63年電子情報通信学会春季全国大会, No.A-220 (1988).
- (13) 望月, 富川, 菅原, 近野, 高野: "超音波モータに用いられる変位拡大機構の動作シュミレーション", 昭和63年電子情報通信学会春季全国大会, No.A-221, (1988).
- (14) 富川, 小笠原, 菅原, 近野, 高野: "横振動2重モード音片利用の直線移動自走式モーター", 昭和63年電子情報通信学会春季全国大会, No.A-222 (1988).
- (15) 富川, 西塚, 小笠原, 菅原, 近野, 高野: "縦一屈曲多重モード振動子利用平板状モータによる紙送りデバイス", 昭和63年電子情報通信学会春季全国大会, No.A-223 (1988).

- (16) 富川，西塚，小笠原，高野：“縦一屈曲多重モード振動子利用平板状モータによる紙送りデバイスの特性”，昭和63年度電気関係学会東北支部連合大会，No.2C19 (1988).
- (17) 富川，平田，高野：“超音波モーターへの応用としての非軸対称振動圧電セラミック孔あき円板の解析”，昭和63年度電気関係学会東北支部連合大会，No.2C20 (1988).
- (18) 富川，高野，小笠原：“単一共振モード振動子を組み合わせ使用した超音波モーターの構成”，昭和63年電子情報通信学会秋季全国大会，No.SA-5-1 (1988).
- (19) 富川，平田，高野：“孔あき円板の面内・多重モード振動子利用の超音波モーターに関する考察”，昭和63年電子情報通信学会秋季全国大会，No.SA-5-1 (1988).
- (20) 高野，富川：“縦一屈曲多重モード振動子利用の直線移動型超音波モータ”，昭和63年電子情報通信学会秋季全国大会，No.SA-5-6 (1988).
- (21) 富川，小笠原，平田，高野：“非軸対称振動・圧電セラミック孔あき円板を用いた超音波モータ”，日本音響学会昭和63年度秋季研究発表会，No.2-4-14 (1988).
- (22) 富川，小笠原，平田，高野：“非軸対称振動圧電セラミック孔あき円板を用いた超音波モータ”，第9回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム，No.B-5 (1988).
- (23) 高野，富川：“多重モード振動子利用の直線移動型超音波モータ”，第9回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム，No.B-6 (1988).
- (24) 富川，平田，高野：“超音波モーターのための非軸対称振動圧電セラミック孔あき円板の解析”，日本音響学会平成元年度春季研究発表会，No.3-P-19 (1989).
- (25) 富川，平田，小笠原，高野：“非軸対称振動圧電セラミック孔あき円板を用いた超音波モータ”，日本音響学会平成元年度春季研究発表会，No.3-P-20 (1989).
- (26) 高野，富川，小笠原，平田：“円環の面内振動を利用する小型超音波モータ”，日本音響学会平成元年度春季研究発表会，No.3-P-21 (1989).
- (27) 富川，渡辺，高野：“縦一振り振動モード利用の超音波モータについて”，日本音響学会平成元年度春季研究発表会，No.3-P-22 (1989).

- (28) 富川, 高野: "超音波モータの等価回路表示", 日本音響学会平成元年度春季研究発表会, No.3-P-23 (1989).
- (29) 富川, 平田, 高野: "屈曲振動体での進行波励振について", 1989年電子情報通信学会春季全国大会, No.A-196 (1989).
- (30) 富川, 西塚, 高野: "縦一屈曲・平板状多重モード振動子利用超音波モータの特性", 1989年電子情報通信学会春季全国大会, No.A-197 (1989).
- (31) 高野, 富川: "直線移動型超音波モータに用いる縦一屈曲多重モード振動子", 1989年電子情報通信学会春季全国大会, No.A-198 (1989).
- (32) 富川, 高野, 戸田: "同相駆動型の超音波モータ", 第7回強誘電体応用会議, No.1-P-8 (1989).
- (33) 高野, 富川, 小笠原, 平田: "円環の非軸対称振動を利用する超音波モータ", 第7回強誘電体応用会議, No.1-P-9 (1989).
- (34) 富川, 平田, 高野: "超音波モータのための非軸対称振動圧電セラミック孔あき円板の解析", 1989年電子情報通信学会秋季全国大会, No.SA-5-3 (1989).
- (35) 高野, 富川, 小笠原, 平田: "(R,1)-((1,1)) 多重モード振動子を用いた超音波モータ", 1989年電子情報通信学会秋季全国大会, No.SA-5-4 (1989).
- (36) 富川, 青柳, 渡辺, 高野: "縦一振り振動モード利用の超音波モーター単一共振子の組み合わせ構成の場合", 1989年電子情報通信学会秋季全国大会, No.SA-5-5 (1989).
- (37) 日下部, 富川, 高野, 成田: "パルス駆動による圧電アクチュエータの残留振動の防止", 日本音響学会平成元年度秋季研究発表会, No.1-4-6 (1989).
- (38) 富川, 平田, 高野: "非軸対称振動((2,1))モード・圧電セラミックス孔あき円板を用いた超音波モータ", 日本音響学会平成元年度秋季研究発表会, No.1-P-① (1989).
- (39) 富川, 足立, 青柳, 寒河江, 高野: "縦一振り振動モード利用の超音波モーターロータ・サンドウィッチ型の場合", 日本音響学会平成元年度秋季研究発表会, No.1-P-③ (1989).

- (40) 高野，富川，小笠原：“伸び $(R,1)$ - 屈曲 $((1,1))$ ・圧電セラミックス孔あき円板を用いた超音波モータ”，日本音響学会平成元年度秋季研究発表会，No.1-P-④ (1989).
- (41) 高野，富川，小笠原，平田：“円環の $((1,1))$ モードを利用する超音波モータ”，日本音響学会平成元年度秋季研究発表会，No.1-P-⑤ (1989).
- (42) 富川，柳沼，小笠原，高野：“縦 $L1$ -屈曲 Bn ・多重モード振動子を用いた平板状超音波モータの応用”，日本音響学会平成元年度秋季研究発表会，No.1-P-⑨ (1989).
- (43) 富川，足立，平田，鈴木，高野：“直線屈曲振動体での進行波励振”，第10回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム，No.2-D-3 (1989).
- (44) 富川，足立，小笠原，青柳，寒河江，高野：“縦一振り振動モード利用の超音波モータ”，第10回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム，No.2-PD-3 (1989).
- (45) 日下部，富川，高野，成田：“パルス駆動による圧電アクチュエータの残留振動の防止”，第10回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム，No.2-PI-2 (1989).
- (46) 高野，平田，富川：“円環の非軸対称振動 $((2,1))$ モードを利用した超音波モータの諸特性”，1990年電子情報通信学会春季全国大会，No.A-348 (1990).
- (47) 富川，足立，青柳，高野：“縦一振り振動モード利用の超音波モーター中央段付き型構成の場合”，1990年電子情報通信学会春季全国大会，No.A-349 (1990).
- (48) 富川，青柳，佐藤，高野：“縦一振り振動モード利用の超音波モーター単一共振子の組み合わせ構成の特性”，1990年電子情報通信学会春季全国大会，No.A-350 (1990).
- (49) 富川，足立，青柳，三部，高野：“縦一振り振動モード利用の超音波モーター一負荷質量(イナーシャ)型の場合”，1990年電子情報通信学会春季全国大会，No.A-351 (1990).
- (50) 富川，足立，青柳，三部，高野：“縦一振り振動モード利用の超音波モーター多重モード振動子構成の場合”，日本音響学会平成2年度春季研究発表会，No.1-1-2 (1990).

- (51) 富川，柳沼，小笠原，高野：“縦 L_1 -屈曲 B_n ・多重モード振動子を用いた平板状超音波モータの応用—給紙デバイスとしての特性—”，日本音響学会平成2年度春季研究発表会，No.1-1-3（1990）.
- (52) 高野，富川，小笠原：“同相駆動屈曲円板型超音波モータの特性”，日本音響学会平成2年度春季研究発表会，No.1-1-5（1990）.
- (53) 富川，足立，青柳，高野：“縦—振り振動モード利用の超音波モーター対称構造の利点に注目した構成—”，日本音響学会平成2年度春季研究発表会，No.1-P-20（1990）.
- (54) 富川，鈴木，足立，高野：“複合屈曲振動体を利用した粉体移送デバイス”，平成2年度電気関係学会東北支部連合大会，No.1A4（1990）.
- (55) 高野，鈴木，足立，富川：“減衰の大きい屈曲振動体での進行波励振とその応用”，日本音響学会平成2年度秋季研究発表会，No.2-5-2（1990）.
- (56) 日下部，高野，富川：“2相パルス信号による超音波モータの駆動と制御—時計への応用を目的とした超音波モータ制御の一検討—”，日本音響学会平成2年度秋季研究発表会，No.2-5-7（1990）.
- (57) 富川，小笠原，高野：“非軸対称(m, n)モード円板モータの直線移動素子への応用” 日本音響学会平成2年度秋季研究発表会，No.2-5-8（1990）.
- (58) 富川，小笠原，高野：“モード非回転・ B_{0n} 屈曲円板を用いた超音波モータ” 日本音響学会平成2年度秋季研究発表会，No.2-Q-1（1990）.
- (59) 富川，足立，青柳，高野：“縦—振り振動モード利用超音波モータの特性”，日本音響学会平成2年度秋季研究発表会，No.2-Q-2（1990）.
- (60) 寒河江，富川，足立，高野：“伸び—振り振動モード利用超音波モータの試作”，日本音響学会平成2年度秋季研究発表会，No.2-Q-3（1990）.
- (61) 日下部，高野，富川：“時計用超音波モータの2相パルス信号による駆動と制御”，第11回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム，No.2PE-1（1990）.
- (62) 富川，鈴木，足立，高野：“超音波振動利用による粉体移動デバイスの基礎的検討”，第11回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム，No.3E-3（1990）.

- (63) 高野, 柳沼, 広瀬, 富川: "超音波モータの等価回路表示とその定数の測定－縦 L_1 －屈曲 B_n モード縮退・平板状モータの場合－", 日本音響学会平成3年度春季研究発表会, No.1-P-20 (1991).
- (64) 日下部, 成田, 富川, 高野: "パーソナルコンピュータを用いる超音波モータの駆動と制御", 日本音響学会平成3年度春季研究発表会, No.1-P-20 (1991).
- (65) 日下部, 富川, 高野: "圧電アクチュエータの駆動電圧・波形に対する応答と超音波搬送への応用", 日本音響学会平成3年度春季研究発表会, No.1-P-20 (1991).
- (66) 富川, 小笠原, 高野: "モード・非回転 B_{on} 屈曲円板を用いた超音波モータの特性改善", 日本音響学会平成3年度春季研究発表会, No.1-P-20 (1991).
- (67) 青柳, 富川, 足立, 高野: "縦一振り縮退モード利用超音波モータの試作特性", 日本音響学会平成3年度春季研究発表会, No.1-P-20 (1991).
- (68) 高野, 富川, 小笠原, 日下部: "同相駆動型超音波モータの駆動と制御", 第8回強誘電体応用会議, No.30-A-5 (1991).
- (69) 柳沼, 広瀬, 富川, 高野: "超音波モータの等価回路表示とその定数の測定－縦 L_1 －屈曲 B_n モード縮退・平板状モータの場合－", 第8回強誘電体応用会議, No.31-B-8 (1991).
- (70) 富川, 小笠原, 高野: "縦一屈曲2重モード平板利用の超音波モータ", 1991年電子情報通信学会秋季大会, No.SA-9-3 (1991).
- (71) 日下部, 富川, 高野: "エンコーダレス超音波ステッピングモーターロータの誘起定在波利用の場合-", 1991年電子情報通信学会秋季大会, No.SA-9-4 (1991).
- (72) 高野, 富川, 小笠原, 青柳: "低周波小型超音波モータの試作", 日本音響学会平成3年度秋季研究発表会, No.2-4-2 (1991).
- (73) 日下部, 富川, 高野: "エンコーダレス角変位自己補正方式の超音波ステッピングモータ", 日本音響学会平成3年度秋季研究発表会, No.2-4-9 (1991).
- (74) 神戸, 富川, 足立, 高野: "パイプ超音波線路の軸対称屈曲波解析－進行波電搬時の線路表面変位の楕円運動について", 日本音響学会平成3年度秋季研究発表会, No.3-3-10 (1991).

- (75) 富川，日下部，青柳，高野：“圧電振動子の残留変位のない過渡応答とそのアクチュエータへの応用”，第12回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム，No.PA2 (1991)。
- (76) 日下部，富川，高野，成田：“エンコーダレス超音波ステッピングモータ”，第12回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム，PA3 (1991)。
- (77) 富川，青柳，高野：“パラメトリック非線形現象利用による超音波モータ”，日本音響学会平成4年度春季研究発表会，No.1-7-10 (1992)。
- (78) 高野，富川，青柳：“矩形振動子を用いた直線移動型超音波モータ”，日本音響学会平成4年度春季研究発表会，No.1-7-11 (1992)。
- (79) 神戸，富川，高野：“円筒型圧電振動子を利用した粉体移送デバイス実験的検討”日本音響学会平成4年度春季研究発表会，No.1-7-20 (1992)。
- (80) 日下部，富川，李，高野：“エンコーダレス角変位自己補正方式の超音波ステッピングモーター各種補正方式の実験的検討”，日本音響学会平成4年度春季研究発表会，No.2-P-22 (1992)。
- (81) 富川，小笠原，武田，高野：“屈曲2重モード圧電セラミックス正方形板を用いた薄型超音波モータ”，1992年電子情報通信学会春季大会，No.377 (1992)。
- (82) 富川，大嶋，高野，梅田：“縦 L_1 -屈曲 B_2 2重モード圧電セラミックスを用いた回転／直線モータの特性”，1992年電子情報通信学会春季大会，No.A-378 (1992)。
- (83) 日下部，李，富川，高野：“角変位自己補正方式の超音波ステッピングモータ 6° /秒の時計用動作の基礎実験”，1992年電子情報通信学会春季大会，No.A-379 (1992)。
- (84) 富川，高野，梅田：“縦1次-屈曲2次の2重モード圧電セラミックス振動子を用いた回転／直線モータ”，第9回強誘電体応用会議，No.29-A-5 (1992)。
- (85) 青柳，富川，高野：“縦-屈曲振動子の内部非線形結合ならびに外部付加結合による超音波モータ”，第9回強誘電体応用会議，No.29-A-6 (1992)。
- (86) 李，日下部，富川，高野：“超音波モータの応答制御と消音”，平成4年度電気関係学会東北支部連合大会，No.2I19 (1992)。

- (87) 日下部，富川，青柳，高野：“超音波モータの間欠駆動時の発音防止”，
1992年電子情報通信学会秋季大会，No.A-212 (1992).
- (88) 青柳，富川，日下部，高野：“屈曲円板の非対称パルスによる過渡応答振動を
利用した超音波モータの特性”，1992年電子情報通信学会秋季大会，No.A-213
(1992).
- (89) 神戸，富川，高野：“円筒型圧電セラミックスを用いた粉体移送デバイス”，
第13回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム，
No.A2 (1992).
- (90) 日下部，富川，高野，青柳：“圧電アクチュエータの駆動パルス列波形と過渡
応答”，第13回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム，
No.PB26 (1992).