

モード縮退形振動子を用いる超音波モータ

平成 3 年 度

石田(實)記念財団研究助成金

研究成果報告書

平成4年11月28日

高野 剛浩

東北工業大学

モード縮退形振動子を用いる超音波モータ

高野 剛浩 (東北工業大学)

1. はじめに

実用的な超音波モータが指田氏により発表⁽¹⁾されて以来多くの構成が考察され、提案されている⁽²⁾。筆者らも種々のモータを考案し、それらの特性や構成について検討を加えてきた⁽³⁾。

本文では、最初に超音波モータの基本的な動作原理を説明し、次に筆者らの考案試作した2～3のモータを例にとり、その特性や応用例、問題点など示す。

2. 超音波モータの原理

超音波モータは、基本的には振動体に幾何学的に直交する2つの変位を与え、その位相差を考慮して変位の楕円運動を実現し、利用するものである⁽⁴⁾。図1(a)の振動物体(ステータ)のある質点が直交する変位

$$u_x = u_{x0} \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$u_y = u_{y0} \sin(\omega t + \phi) \quad (2)$$

で振動していると、位相差 ϕ によってこの質点は図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には、ロータもまた同じ地点で楕円運動するだけであるが、使用する超音波の周波数が20～100(kHz)と高いこと、ロータが有限の質量を持つことのために、ロータは図1(c)に示すように、y軸方向の変位が最大になる付近だけ接触し、他の時間は浮いた状態になる。従って、ステータとロータが接触している付近では、質点のx軸方向の速度により、ロータは摩擦力を介してx軸方向に推力を与えられる。 u_x と u_y の位相を反転すれば、楕円運動の方向も反転するので両方向に移動するモータが構成される。式(1)、(2)の変位を同形の縮退モードで実現し、各々90°位相差の異なる入力で駆動すると進行波が形成される。この場合は楕円運動する質点が、ある位相差で振動体の表面に多数配列されているものと考えることができる。すなわちy軸方向の変位の最

大点が時間と共に移動するので、これに伴ってロータが移動することになる。

一方 u_x 、 u_y の位相差が0°、180°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軸方向の成分によって物体もx軸方向の推力を受ける。いわゆる“突つき型”と呼ばれるモータが構成される。このように超音波モータは直交する変位 u_x 、 u_y をどのように実現するかによって様々な構成が提案されている。振動子の構造上の理由によって u_x 、 u_y が実現される場合もあるが、独立にこれを得る場合は次の方法に大別される。

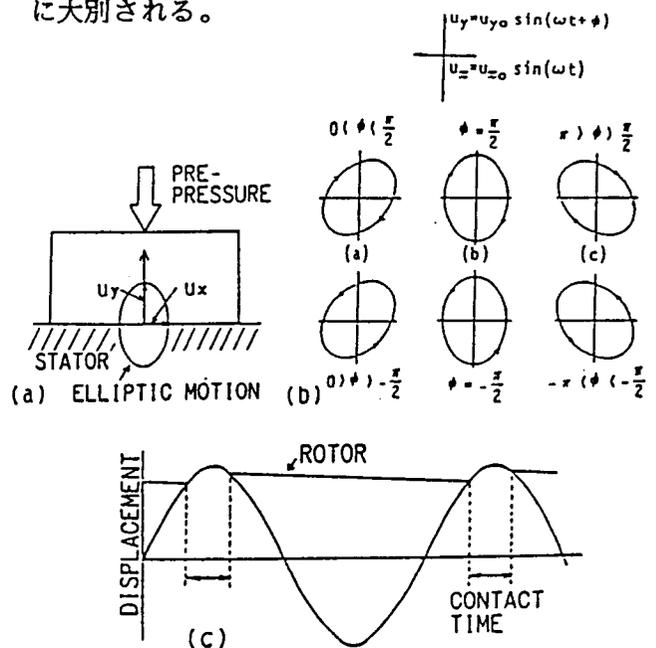


図1 超音波モータの動作原理

- (1) モード縮退振動子型：1個の振動子で同形あるいは異形振動の共振周波数を一致させて u_x 、 u_y を得る構成⁽³⁾
- (2) 複合振動子型： u_x 、 u_y のいずれかを、振動子上に複合した積層アクチュエータなどで得る構成⁽⁵⁾
- (3) 個別の振動子を用いる方法：2個の振動子を用いて u_x 、 u_y を得る構成

ここでは、試作した2~3のモード縮退型超音波モータの構造と特性を紹介する。

3. 同形縮退モードを利用する超音波モータ

3-1 円板(円環)の非軸対称振動利用の構成

円板の面垂直屈曲振動を利用する構成は、進行波型モータ⁽⁶⁾として実用的な超音波モータの発端となったもので既にモータ単体としても市販され、またいくつかの応用例も報告されている⁽⁷⁾。これに対して筆者らは、円板(円環)の非軸対称振動⁽⁸⁾と呼ばれる面内屈曲振動に着目し、モータを試作した⁽⁹⁾。このモード(一般に $((n, m))$ と表される)は、振動次数(n)と高調波次数(m)の組み合わせによって多くのモードが存在するが、 $((1, 1))$ モードを例にとり説明する。

図2に示すようにこのモードは円板の半分が伸び、もう一方が縮むモードである。従って、圧電的にこのモードを励振する場合は分割電極や、図2(b)に示すように分割分極された振動子を用いる必要がある。また内周面と外周面の変位はA, A', B, B'では円周方向の、C, C', D, D'では径方向の成分を持つ。このモードには図3(a), (b)に示すように同形の縮退モードが存在するから⁽¹⁰⁾、各モードを90°位相の異なる入力($\sin \omega t$ と $\cos \omega t$)で同時に駆動すると共振モードが回転し、外周面や円環の場合は内周面でも変位の橢円運動が形成される。すなわち内周面、外周面にロータを圧接することによって超音波モータが構成できる。図4にモータの構造と特性の一例を示している。小型で低周波化が可能なる $((2, 1))$ モードを用いている。トルクは大きくないが薄型構造に適することに特徴がある。

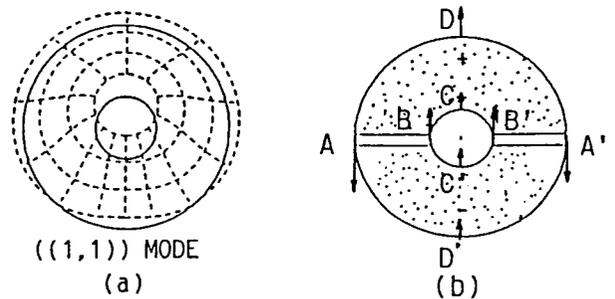


図2 非軸対称振動 $((1, 1))$ モード

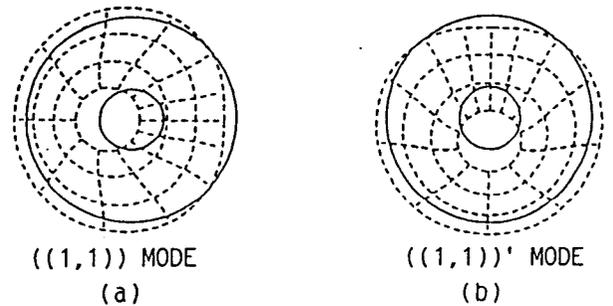


図3 $((1, 1))$ モードとその縮退モード

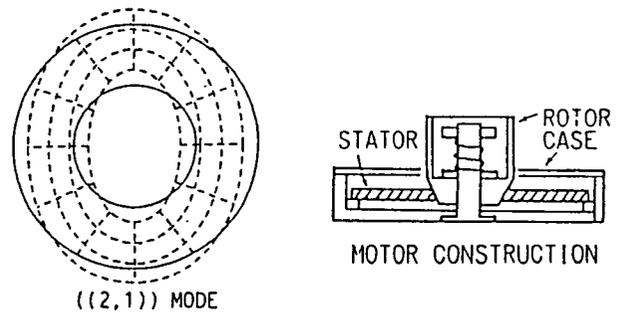
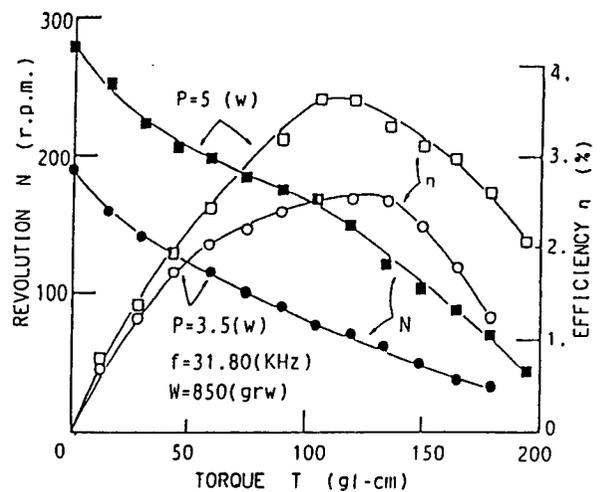


図4 $((2, 1))$ モードを用いる超音波モータの構造と特性



3-2. 円板の面垂直屈曲振動利用の構成

先に述べたように円板の面垂直屈曲振動の同相縮退モードを、90°位相の異なる入力で駆動する構成は既に報告されているが、これらのモードを同相(単相)で駆動することによっても超音波モータが構成できる。図5(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の傾斜成分によって水平方向の変位が同時に生ずるから、両モードを同相駆動することによって、同図(b)示す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も兼ねて、図に示すような突起が設けられる。

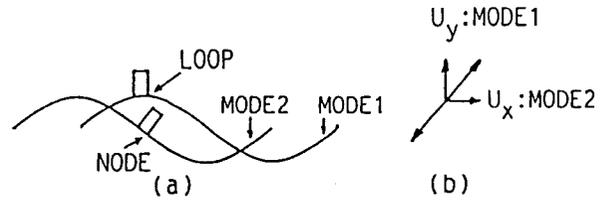


図5 同相駆動型超音波モータの動作原理

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⁽¹¹⁾。図6(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では全くこの逆の位置になる。すなわち、図6(c)に示すように点①,③は、(a)のモードで矢印方向に変位の傾斜を持ち、(b)のモードでは①は面の上方に、③は下方に変位する。従って、これらのモードを同時に駆動すると点①,③上では変位の直線運動が形成される。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、振動子上に突起を設けて同じ方向の回転力を得る構造になる。この場合は点①,③あるいは点②,④上に突起を設ければ良い。回転方向は縮退モードの組み合わせによって変わるから、そのモードに合った駆動方法を採用すると、駆動端子の切り換えによって単相駆動ながら両方向回転のモータが構成できる。

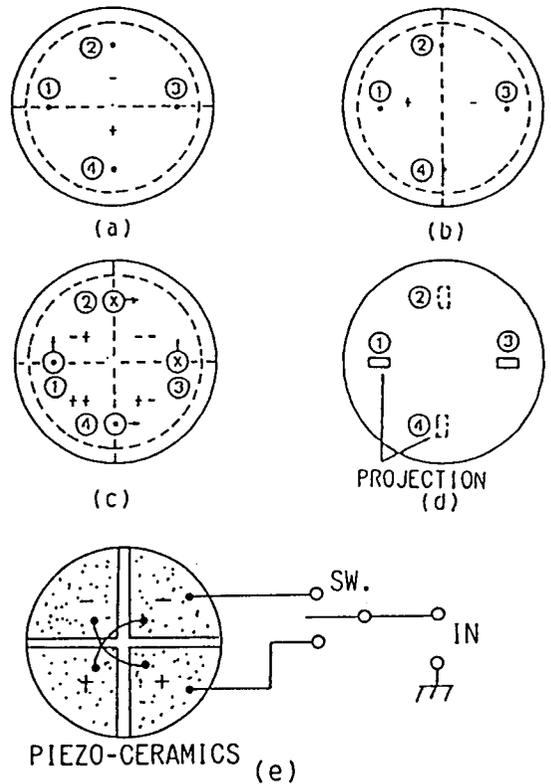


図6 B_{11} モードを用いる超音波モータの動作原理と両方向回転型の駆動法(e)

図7(a),(b)にステータとして実験に用いた B_{13} モード(1:節円数, 3:節直径数)利用の円板振動子を示している。 B_{13} モードの場合突起は節直径上に6個設けている。同図(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。振動子としての共振周波数 f , Q は $f=25.25[\text{kHz}]$, $Q=220$ である。

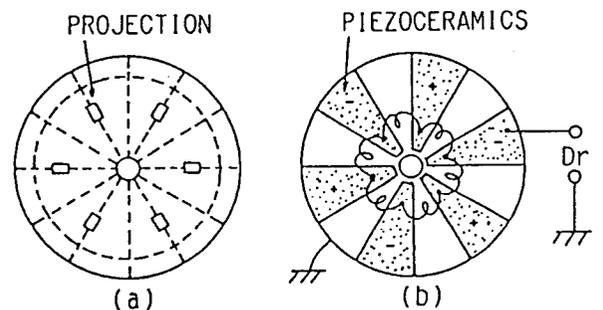
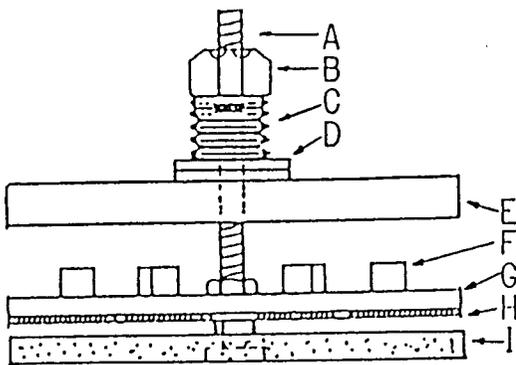


図7 B_{13} モードを用いるステータと接着圧電セラミックスの極性

図8に試作したモータの構造図を示している。ステータには3.0(mm^φ)のボルトが固定されている。ロータはステータとの接触部に摩擦材が接着され、図示のようにスプリングによってステータへ加圧接触される。ロータ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。図9、図10に B₁₃ モードを用いたモータの特性である。図9は駆動周波数に対する回転数を、加圧をパラメータとして示している。このように超音波モータは共振周波数近傍で回転数が最大になるが、回転は不安定である。共振周波数より低い周波数では回転数が急激に低下し、停止する。これに対して共振周波数より高い周波数では、回転数の低下は緩やかであり動作も安定になるので、モータとしては共振周波数より若干高い周波数で使用される。図10は負荷特性であり、最大効率25[%],最大トルク1.2[kgf-cm]程度のモータが得られた。

この構成の特徴は単相駆動で両方向回転のモータを構成できることにあるが、数個の突起を持つステータを用いるとロータの振動信号からモータの回転情報を得ることも可能になる。これはエンコーダを用いなくて回転特性を制御する方法として期待されている⁽¹²⁾。



A: BOLT B: NUT
 C: SPRING D: THRUST BEARING
 E: ROTOR F: PROJECTION
 G: STATOR H: PIEZOCERAMICS
 I: SUPPORTING JIG

図8 同相駆動型超音波モータの構造

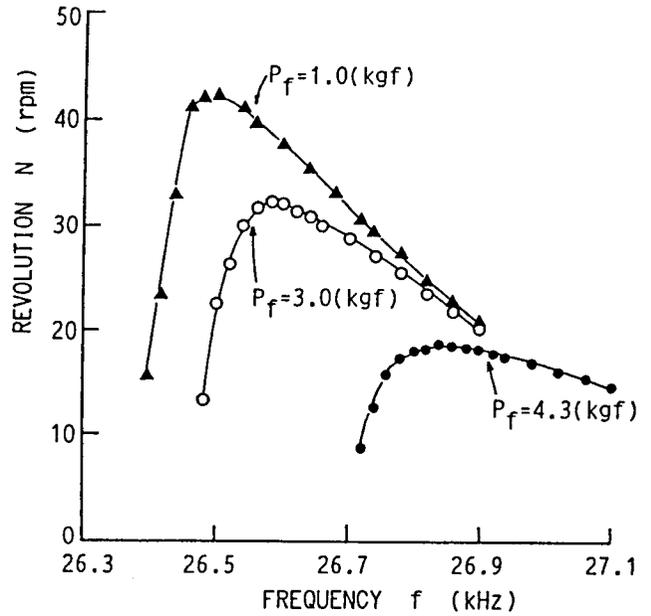


図9 同相駆動型超音波モータの周波数一回転特性

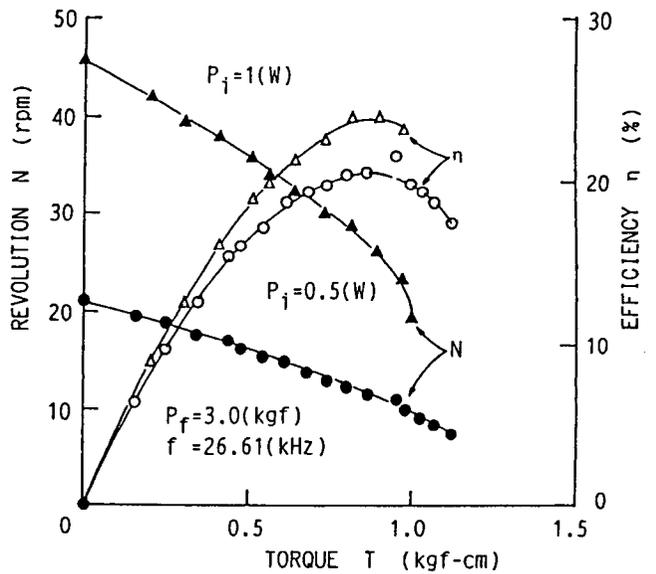


図10 同相駆動型超音波モータの負荷特性

4. 異形縮退モードを利用する超音波モータ

モード縮退は異形の振動モードでも可能である。これは、かつて多重モード振動子と呼ばれメカニカフィルタ、セラミックフィルタの共振子として研究された経緯を持っている⁽¹³⁾。振動子形状によって多くの構成が可能であるが、ここでは円環の面内振動を利用する直線移動型超音波モータを紹介する⁽¹⁴⁾。

孔あき円板(円環)の対称伸び振動1次モード(R,1)と、先の非軸対称振動((1,1))モードの共振周波数は、円環の内径(2b)对外径(2a)比によって図11に示すように変化する。すなわち両モードは $b/a=0.28$ 付近で縮退する⁽¹⁰⁾。この状態で、外周の点A,A'では(R,1)モードによって径方向の、((1,1))モードによって円周方向の変位が生ずる。図12に両モードによって形成される変位の楕円運動の様子を示す。従って、この2点にガイドを押し付けると振動子自体が移動する直線移動型モータが構成できる。試作したモータの構造と特性を図13、図14に示す。スプリングによって加圧されたスライダ(ステータ)が、ガイドの溝に沿って図に示す方向に移動する。無負荷で50[cm/sec]以上の速度が得られ推力も比較的大きいのでカード転送デバイスとしての応用が考えられている⁽¹⁵⁾。この構成は正方形板や矩形振動子の縦振動と面内屈曲振動利用構成に変形応用することができる。

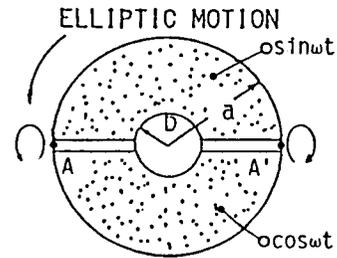
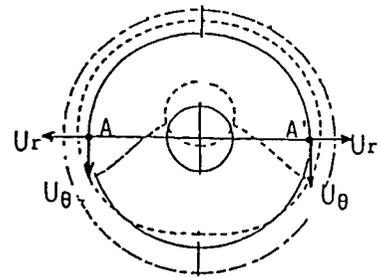


図12 (R,1)モードと((1,1))モードの振動変位と楕円運動の形成

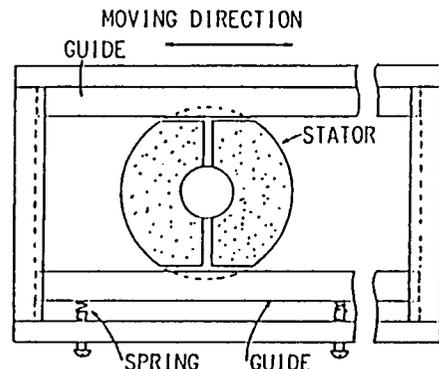


図13 (R,1)-((1,1))モードを利用する直線移動型超音波モータの構造

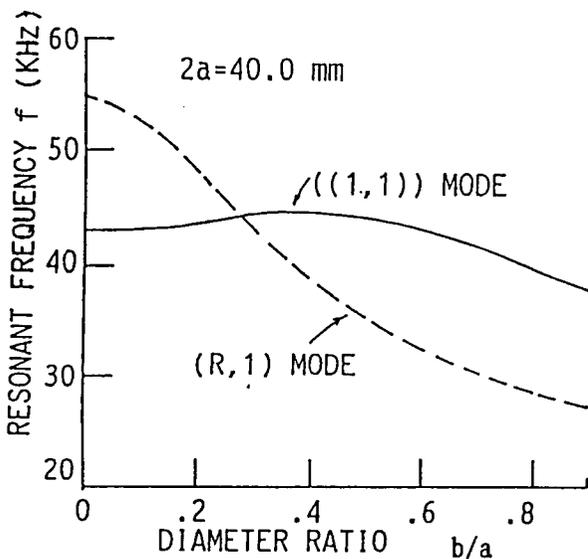


図11 円環内径对外径比に対する(R,1), ((1,1))モードの共振周波数

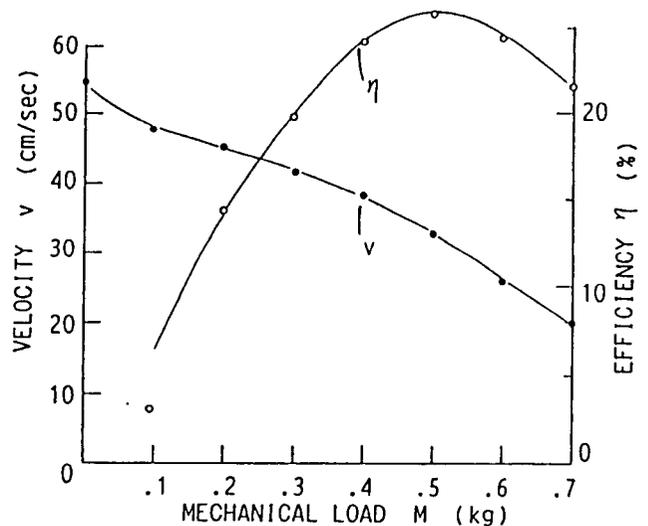


図14 直線移動型超音波モータの負荷特性

5. 屈曲進行波を利用する粉体の移送

弾性体に屈曲進行波を励振し、それを利用して物体を搬送する試みは既に報告されているが、駆動系などいくつか問題点が指摘されている。我々は駆動素子として圧電セラミクス円環を、伝送路として伝搬損失の比較的大きい材料を用いて進行波を励振し、それを利用して粉体の移送を試みた⁽¹⁶⁾。装置の概要、特性を以下に示す。

構造を図15に示すが、伝送路としてアクリル円筒を用い、圧電セラミクス円環は図のように円筒の端部に挿入し接着される。圧電セラミクスの振動モードは、対称伸び振動(R,1),(R,2)モードや非軸対称振動((1,1),((1,1))-((1,1))'モードを用いた。これらのモードによって円筒には図16に示すような屈曲振動が励振される。すなわち、((1,1))モードは図2に示すように円環の内周部でも一方向の振動変位を持つから、これによって円筒には図16(a)の反対称モードが励振される。またこのモードを超音波モータのステータとして用いる場合のように2相駆動すると、モード回転を伴う屈曲振動が励振される。一方(R,1),(R,2)モードの場合、円環の内周部では対称な伸縮振動を行うから円筒には図16(b)に示す対称モードが励振される。外径15[mm]、内径9[mm]、長さ35[cm]程度のアクリル円筒を用いたが、図17に示す周波数特性からは反射波の影響は観測されなかった。また図18は実験的に求めた減衰定数と速度からモードシュミレーションを行ったもので、波の減衰の様子が分かる。

図19~20に各モードを用いた場合の粉体の搬送特性を示している。円筒の中に予め粉体(#200カーボランダム)を挿入し、その搬出量を測定した。初めの挿入状態の影響を調べるために、各図中に示すように2通りの実験を行った。((1,1))モードは(R,1)モードに比べてその影響は少ないが、これは管面内に形成される楕円運動の方向に起因する。((1,1))モードとそれのモード回転を利用する場合の特性には大きな違いはないが、後者の構成は数種類の粉体を攪拌しながら搬送する場合などに有効である。伝送路の形状を工夫すること

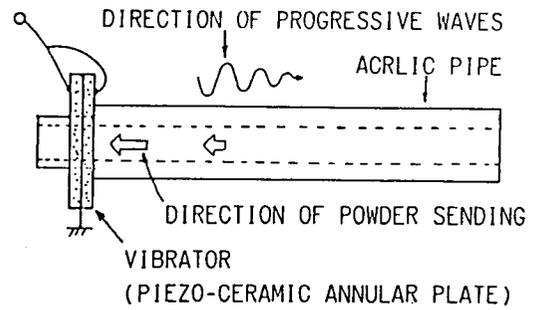


図15 屈曲進行波を利用する粉体移送デバイス

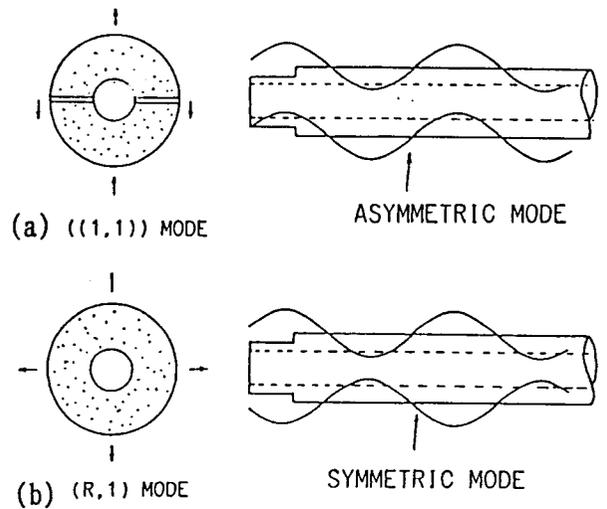


図16 円筒に励振される振動モード

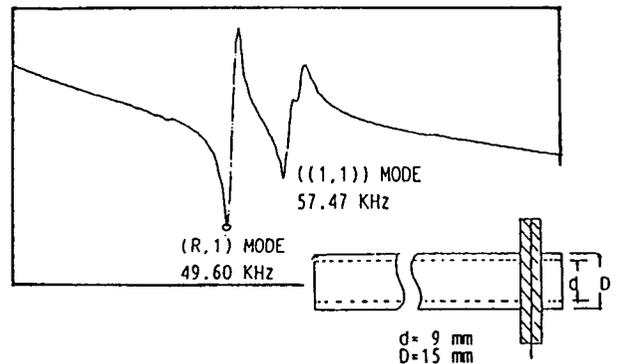
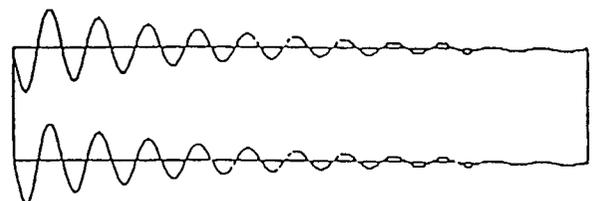


図17 粉体移送デバイスの周波数特性



ATTENUATION CONSTANT $\alpha=9.2$ [Np/m]
WAVE NUMBER $k=214$ [m^{-1}]

図18 進行波のモードシュミレーション (反対称モード)

によって小型パーツフィーダとしての利用も期待できる。さらに終端でのマッチングを考慮すれば弾性媒体での利用も可能であろう。

6. あとがき

以上、超音波モータの原理と我々の提案している構成を中心にいくつかの超音波モータの試作・特性例を紹介した。超音波モータの特徴としては(1)高トルク、(2)低速、(3)制御性の良さなどが、難点として(4)摩擦駆動に起因する接触面の摩擦、(5)高周波、高電圧の電源が必要なことなどが挙げられている。特に(4)については、直接モータの特性に影響を与えるので、実用化に際して最も吟味されなければならない点である。

低速動作に対して直接駆動が可能であり、上記(3)の特徴を生かして高速な微小位置決めなどの応用も考えられている。モータ形状も多様で種々の応用の可能性を有している。今後も基礎的な研究と共に応用面も考慮して研究を進める予定である。

参考文献

- (1)指田：自動化技術, 15巻12号, pp.31-35, (1983).
- (2)S.UEDA: J.J.A.P., Vol.28 Suppl.28-1, pp.3-6 (1989).
- (3)Y.TOMIKAWA, et al.: Ferroelectrics, Vol.91, pp.163-171 (1989).
- (4)上羽, 富川：新版 超音波モータ, トリケップス社, (1992).
- (5)K.NAKAMURA, et al.: IEEE Trans. on UFFC, Vol.38 No.3, pp.188-193, (1991).
- (6)見城, 指田：超音波モータ入門, 総合電子出版社, (1991).
- (7)T.MAENO, et al.: Proc. of 1990 IEEE 7th I.S.A.F., pp.535-538, (1990).
- (8)尾上他：信学誌, 49巻1号, pp.104-110, (1966).
- (9)T.TAKANO, et al.: IEEE Trans. on UFFC, Vol.37 No.6, pp.558-565, (1990).
- (10)中村他：信学論文誌, 59-A巻12号, pp.1049-1056, (1976).
- (11)T.TAKANO, et al.: IEEE Trans. on UFFC, Vol.39 No.2, pp.180-186, (1992).
- (12)T.TAKANO, et al.: J.J.A.P., Vol.30 No.9B, pp.2277-2280, (1991).
- (13)永井, 近野：電子回路素子としての電気機械振動子とその応用, コロナ社, (1974).
- (14)高野他：1989年信学秋季全国大会, No.SA-5-4, (1989).
- (15)寺谷他：田村技報, No.4, pp.13-20, (1992).
- (16)T.TAKANO, et al.: Proc. of 14th ICA, No.C5-4, (1992).

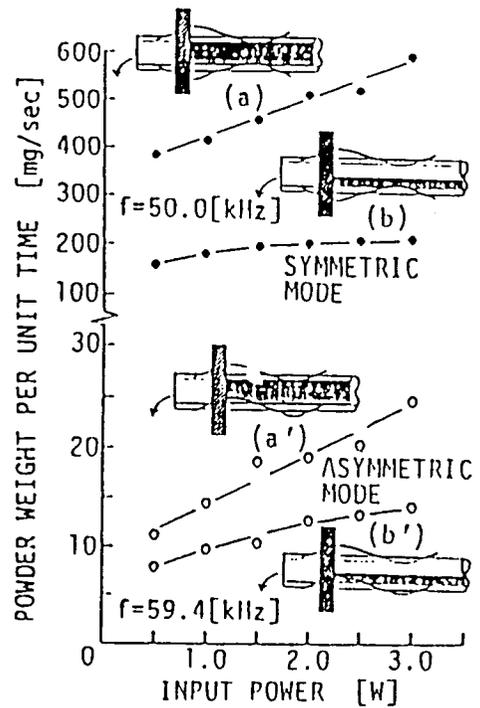


図19 粉体移送デバイスの特性

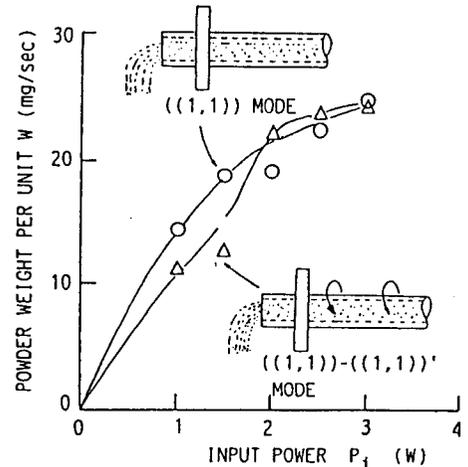


図20 ((1,1))モードと((1,1))-((1,1))'モード利用の特性