

高出力圧電素子技術開発

宮田昇^{*1}，松野晋^{*1}，渡邊雅幸^{*} 萬矢晃庸^{*1}，小坂光二^{*2}，

馬場哲郎^{*2}，岩淵哲也^{*2}，中田明良^{*2}，久保田弘^{*2}

^{*1}太平洋セメント，^{*2}熊本テクノロジー，^{*3}熊本大学

1. 緒論

超音波モータは，圧電素子の弾性振動を駆動源として，その振動伝達部を駆動したい対象物に押し当てて，1次振動を摩擦力により駆動対象に伝達する．一般には，超音波領域の共振現象を利用して駆動が行われていることから，超音波モータと呼ばれている．

通常使われている磁気回路を用いた電磁モータとは駆動原理が全く異なり，ほとんど磁界を発生することはない，小型で高トルクが得られる，応答性が高い，微小送りが可能，電源を切った後も保持力を持ち続けるなど数々の特徴を持ち，精密機器の駆動制御用モータとして多方面で利用されている．特にこういった超音波モータの特徴が次世代の半導体製造方式の要求（ナノメートルオーダーの位置合わせ）に十分に見合う性能を有することから，電子線を使用する工程等での動力源として，応用に対する研究開発が盛んになされている．

当グループでは，半導体製造工程で利用可能な超精密高速ステージを駆動するための超音波モータ用圧電素子の開発を進めている．

我々が開発を進めている非共振型の超音波

モータについて，ステージ駆動の模式図を図1に示す．即ち，

A脚では剪断素子が送り順方向に最大変位した状態で伸縮素子が縮み，一方，B脚では

剪断素子が送り逆方向に最大変位した状態で伸縮素子が伸びてステージに接触する，

B脚では剪断素子が送り順方向に最大変位してステージを移動，その間にA脚では剪断素子が送り逆方向に最大変位する，

A脚では伸縮素子が伸びてステージに接触する，一方，ステージを送り終えたB脚では伸縮部が縮みステージから離れる，

A脚では剪断素子が送り順方向に最大変位してステージを移動する一方，その間にB脚では伸縮素子が縮んだ状態で剪断素子が送り逆方向に最大変位する，

という操作を繰返してステージを移動させる．

当グループでは超音波モータの心臓部である圧電素子について，最高速度 300mm/sec の駆動性能を持つ圧電セラミックス素子の開発を目標として取組んできた．以下では，これ迄の取組みの概要，得られた圧電セラミックス素子の特性，特徴について述べる．

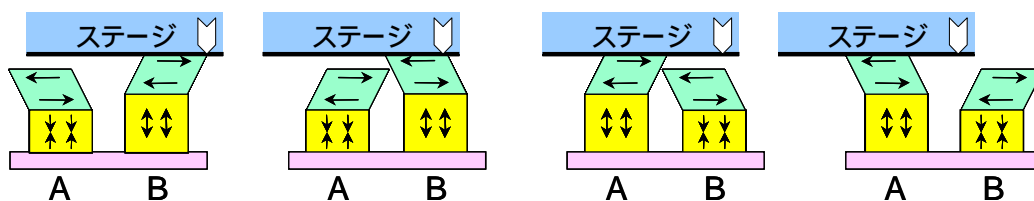


図1. 非共振型の超音波モータによるステージの駆動

2. 開発の流れ

開発の流れの概略を図2に示す。

目標のステージ駆動速度 300mm/sec を達成するために、1回当りの剪断変位量が大きい素子の開発、より高周波数で駆動できる素子の開発、の2つの方針のもとに進めた。

2.1 剪断変位量の増大

剪断変位量の大きな素子を開発するに当り当初は、特定の入力電力でより大きな変位量を得ることが出来るソフト系材料(PZT-PMN系：日本セラテック社材料D材相当)を用いた素子開発を進めた。しかし圧電セラミックス材料では一般にソフト系材料を高周波数で連続使用した場合には発熱が問題となる。本素子の場合にも、開発途中で素子駆動中の発熱が問題となった。つまり実際の使用を想定した場合の連続時間使用が不可能なことが明らかになった。そこで開発方針を変更して、ソフト系材料に比べて1回当りの変位量は小さいが発熱量も小さくすることが出来るハード系材料(PZT-PMnN系：日本セラテック社材料NA材相当)で、目標達成を目指した。

2.2 駆動周波数の高周波化

一方、駆動周波数の高周波化では、高精度な位置決めが可能な非共振駆動域を高周波化するための素子形状の最適化を中心に、開発を進めた。本素子が形状に起因する共振ピークを広い周波数範囲で持つことが、開発途中から明らか

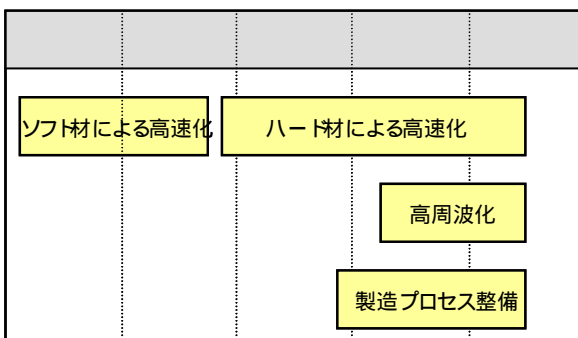


図2. 圧電素子開発の流れ

かになってきた。共振現象を高周波側にシフトさせるために、当初は素子形状の最適化を進め、更には複数の素子が貼り付けられた台座を一つの系として共振に対する最適化を進めた。

以上の開発方針に則って進めた結果として得られた素子特性をまとめて表1に示す。以下で、子の特性、特徴について詳細を説明する。

表1. 得られた圧電素子

(1) 標準素子 1	長さ6×幅4×高さ7mm 剪断素子4枚,伸縮素子12枚 変位能力 0.33μm(±150V)
(2) 標準素子 2	長さ6×幅4×高さ8.4mm 剪断素子8枚,伸縮素子12枚 変位能力 0.66μm(±150V)
(1) 標準素子 1	最高速度 300mm/sec 共振周波数 31kHz
(2) 標準素子 2	最高速度 300mm/sec 共振周波数 39kHz

3. 開発素子の性能

3.1 素子形状

最終的に得られた素子について、素子単体およびそれらを台座上に貼り付けた状態での外観を図3に示す。より高周波数で使用できることを目標に最適化された素子形状を採用し、長さ6mm、幅4mm、高さ7mm(標準素子1)、



図3. 作製素子概観

8.4mm (標準素子 2) の 2 種類とした。剪断変形板と伸縮変形板はそれぞれ 4 枚/12 枚 (素子 1), 8 枚/12 枚 (素子 2) である。形状決定に至る詳細は 4.2 で述べる。

3.2 素子単体の性能

始めに素子単体での駆動性能について説明する。図 4 は素子に対する印加電圧とそのときの剪断素子の変位量との関係を表したもので、素子単体での変位能力を示している。駆動電圧を 300Vp-p としたときの 1 回当りの変位量は $0.6 \mu\text{m}_{\text{p-p}}$ (素子 1), $1.2 \mu\text{m}_{\text{p-p}}$ (素子 2) で、この値は素子が 1 回当りにステージを送る量になる。これらの変位量に駆動周波数を掛けた値が、理想状態で素子がステージを送る量となる。

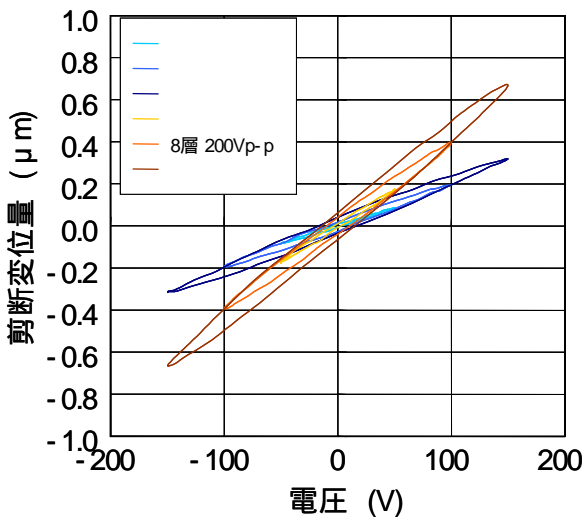


図 4. 印加電圧と剪断変位量との関係

3.3 ステージ駆動性能

次に、これらの素子を用いて作製した超音波モータで実際のステージを駆動した際の性能について述べる。今回の 2 種類の素子を図 3 のように台座上に貼り付けて作製した超音波モータを用いて、縦 180mm, 横 120mm, 高さが 23mm のアルミニウム製ステージを駆動した際の駆動周波数とステージ駆動速度との関係を図 5 に示す。駆動電圧は 180Vp-p である。

素子 1, 素子 2 のいずれの超音波モータともに、最高速度 300mm/sec を達成して、最高速度を示したときの駆動周波数は、素子 1 の超音波モータは 39kHz, 素子 2 は 31kHz であった。

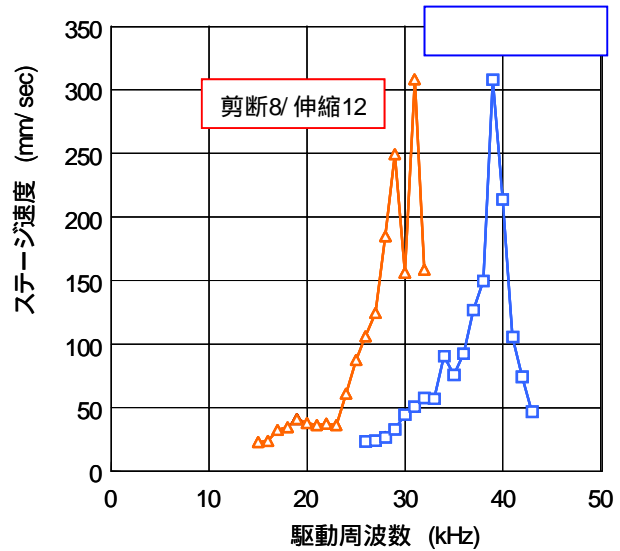


図 5. ステージ駆動時の速度性能

3.4 各周波数帯での素子の駆動状況

図 5 に示されているように、ステージの駆動速度は素子 1 の場合が 30kHz 辺りから急激に増して 39kHz をピークに急激に低下、素子 2 では 25kHz 辺りから急激に増して 31kHz をピークに急激に低下している。こうしたステージ駆動速度の挙動について原因を把握する為に、素子 1 について各周波数帯での素子の駆動状況を測定して模式図化したものを図 6 に示す。

この測定結果より、

- ・ 駆動周波数が 30kHz 過ぎまでは剪断部と伸縮部が本来の動きをして、この素子本来の非共振駆動しているが、
- ・ 40kHz 近傍では進行方向に共振が発生して、その結果として進行方向 (剪断方向) の変位が増幅されている。

つまり図 5 のステージ駆動の挙動は、30kHz 過ぎまでの比較的低速駆動部は非共振駆動により、30 ~ 40kHz の高速駆動部は台座を含ん

だ系全体の共振駆動によると解釈できる。

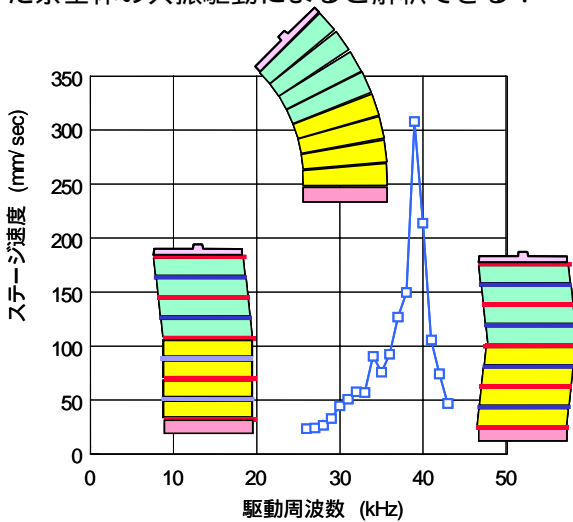


図 6. 各周波数帯での素子の駆動状況

4. 開発素子の特徴

4.1 低発熱性

非共振型超音波モータ用の圧電素子の開発は、当初は変位量の大きいソフト系材料を用いて進めてきた。しかし小型ステージを用いた連続駆動により諸特性の測定を始めた際に、駆動開始直後に素子からの発熱が原因で素子温度が 10 以上上昇してしまった。超精密な位置決めを要求される半導体製造工程で発熱により装置を構成する各部材が熱膨張を起こすことは、位置決め精度の低下をまねく点で最も嫌われることであり、またそのように温度上昇した状態で使用し続けることは圧電材料の特性低下にもつながることから、本超音波モータ用の素子としてソフト系材料を半導体製造装置向けで使用することは難しいと判断した。

表 2 に圧電セラミックス材料として日本セラテック社の D 材（ソフト系）と NA 材（ハード系）を例にして、ソフト材とハード材の圧電特性を示す。圧電素子の発熱に特に影響を与える特性として比誘電率（ ϵ_{33}/ϵ_0 ）と誘電損失（ $\tan \delta$ ）が挙げられるが、いずれの特性ともにソフト系材料はハード系材料に比べて大幅に大きい。1 回当たりの剪断方向の

変位性能には圧電定数 d_{15} が影響し、当初は高速化のためにこの d_{15} が大きい材料を選択したが、発熱という問題をクリアするために、素子駆動時の発熱の問題を大幅に改善できる可能性があるハード系材料に変更した。

表 2. ソフト材とハード材の特性比較

	ソフト (PZT-PMN)	ハード (PZT-PMnN)
比誘電率 (ϵ_{33}/ϵ_0)	4500	1450
誘電損失 $\tan \delta$	2.0	0.4
圧電定数 d_{15}	1010	580
d_{33}	660	315
キュリー温度()	180	310

しかしハード系材料では発熱が小さいものの、変位能力の指標である圧電定数 d_{15} がソフト系材料の約半分である。従って、ソフト系材料の構造等をそのままトレースしただけでは超音波モータ用素子としての変位能力が十分ではなく、変位能力増大のための改善が必要となった。そこで、使用する圧電体の厚さをソフト系材料のときに使用していた圧電体に対して半分（0.6 → 0.3mm）にして積層枚数を 2 倍（剪断 8 層、伸縮 8 層）にすることにより、変位能力増大を目指した。

図 8 にソフト材とハード材の素子について素子単体で、無負荷、100Vp-p、正弦波駆動した際の素子の温度上昇を測定した結果を示す。ソフト系材料では駆動周波数に比例して温度上昇して 40kHz では 12 に達したが、ハード系材料では 35kHz 近傍で共振によると思われる 3 の温度上昇が見られる以外には温度上昇がない。このように、素子の連続駆動が求められる条件下で使う場合、超音波モータ用素子の材質はハード系であることが不可欠である。

但しハード系材料の使用により、素子単体で

の変位能力は低下する.ソフト系とハード系の

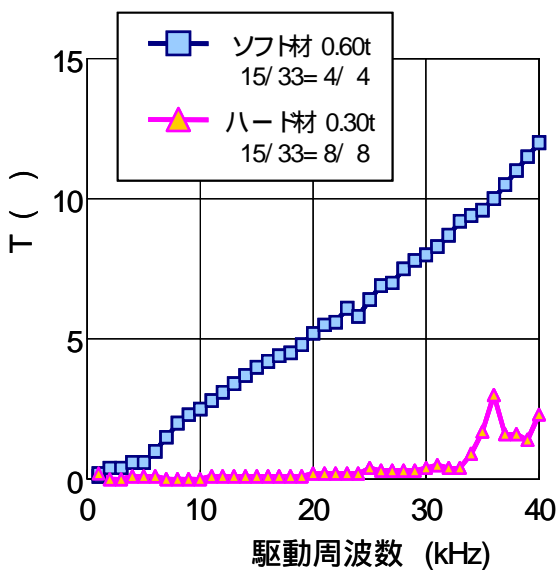


図 8. 素子駆動時の温度上昇

材料で作製した素子単体での変位特性を測定した結果を図 9 に示す.図 9 は $\pm 150V$ の電圧を印加した際の 1 回当たりの剪断変位量を表している.変位の挙動にヒステリシスが見られるために一概に比較できないが変位量は,ハード系素子はソフト系素子の約 60%程度に留まった.ハード材への変更による圧電定数 d_{15} の低下を補うために,薄片化による変位能力の向上を試みたが,想定したソフト系と同等の変位量は得られなかった.圧電定数 d_{15} の電界強度依存性が理由として考えられ,ハード系材料は薄片化によって電界強度が大きくなって

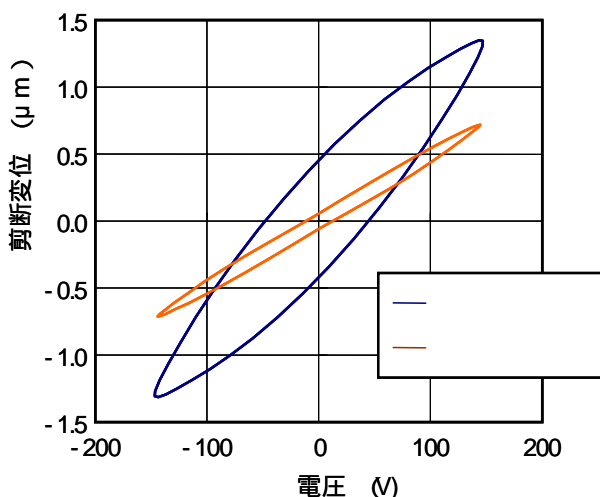


図 9. 素子単体の変位能力の比較

いるために,表 2 の d_{15} の値からは一概に剪断変位量を比較できないものと考えられる.

4.2 共振対策

複数個の圧電素子は台座上に貼り付けられ(図 3),それが予圧機構に組み込まれて超音波モータとして使用される.その際、モータ駆動時に発生する共振を抑えることが重要で、当初は素子単体の共振対策として形状最適化を中心に検討を進めた.しかし、素子が貼り付けられた台座が一つの系となって共振を起こし、これが超音波モータの性能を安定させる上で非常に重要になることが明らかになってきた.

図 10 は、台座上に貼り付けた圧電素子を 1 個毎に駆動 ($\pm 50V$ の正弦波駆動) した際に素子先端の送り方向の振動速度を測定した結果である.圧電素子の形状に起因する固有振動 (40kHz 近傍) 以外に多数の共振ピークが見られたが、他の測定も合わせて行った結果、これが素子と台座が一体となった一つの系としての起きている共振と推測された.

このように発生する不用な共振を取り除いて超音波モータの安定した駆動を実現するた

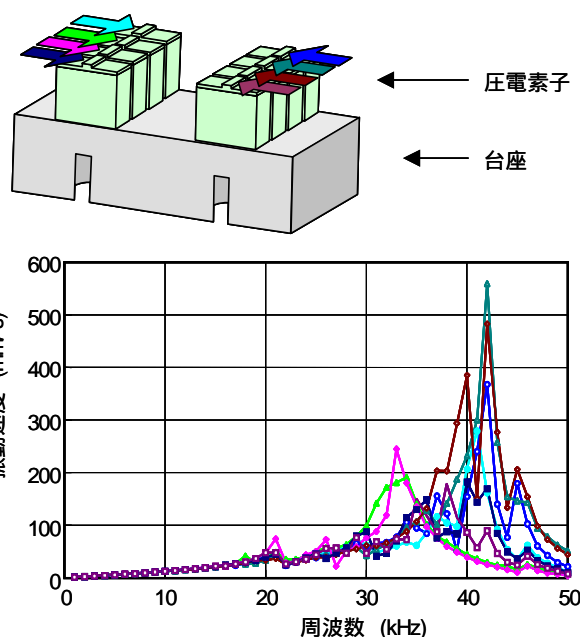


図 10. 台座上に貼り付けた素子の振動

めに、素子と台座を一つの系として、形状を最適化することで共振をより高周波数側にシフトさせることを試みた。

台座上に素子が貼り付いた状態で発生する共振について、有限要素法（FEM）を用いて初期形状（SUS 製台座上に 8 個の圧電素子を配置：図 10 参照）について解析した結果を図 11 に示す。解析では 0～50kHz までの間に 18 の共振が現れたが、その一部を示した。

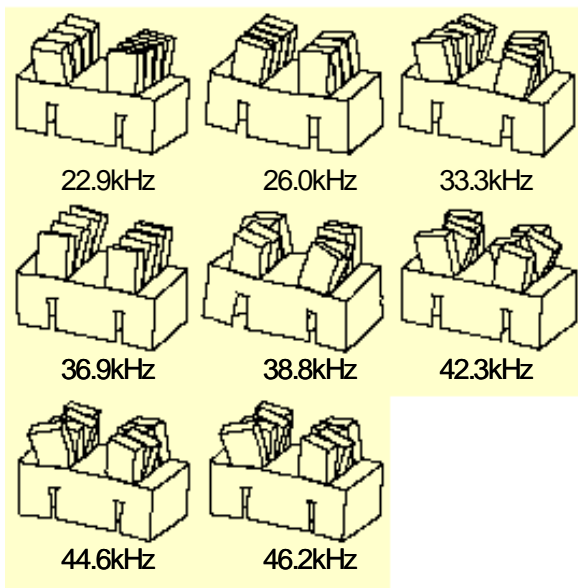


図 11. 素子と台座の一体系での共振

こうした共振を取り除くために、台座形状ならびに素子形状を最適化した。特に 23kHz 付近の素子の幅方向振動を高周波数側にシフトさせることを念頭に解析を進めた。最終的に、

- 台座：長さ 28×幅 14×厚み 10mm
- 素子：長さ 6×幅 4×高さ 7mm

で、始めに現れる共振周波数を 29kHz まで高周波側にシフトできるという結果が得られた。

共振がどのように改良されているかを実測により確認するために、形状が最適化された素子と台座を用いて超音波モータを作製して、素子先端の振動速度を測定した。

図 12 に従来のもものと最適化されたものの

（台座上に貼り付けられた）素子の概観を、図 13 にこれらの素子を用いて各周波数における振動速度を測定した結果を示す。最初に現れる共振周波数は従来品が 22kHz に対して新規品では 28kHz となり、実測の結果は FEM 解析の結果とほぼ一致し、形状変更により共振周波数が高周波化された素子が得られた。

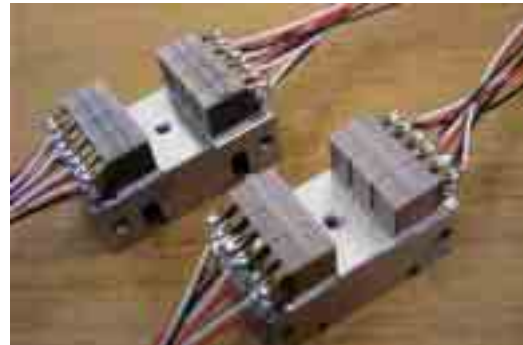


図 12. 最適化前後の「素子 + 台座」系

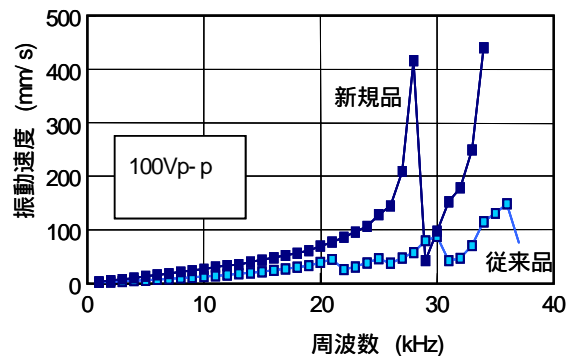


図 13. 最適化前後での振動速度の比較

5. まとめ

超精密高速ステージを駆動するための非共振型超音波モータ用として、2 種類の圧電素子を開発した。駆動時の発熱を抑えるためにハード系材料を用いて、形状に起因する共振をより高周波側にシフトさせた圧電素子と台座の形状を最適化することで、300mm/sec の最高速度を持ち連続駆動が可能な超音波モータ用の圧電素子が得られた。

以上