

平成 20 年度シーズ発掘試験（発掘型）研究報告書

報告日：平成 21 年 4 月 17 日

技術分野 31, 32

課題名：圧電セラミック単板の複合振動モードを用いた超音波モータの開発

研究期間：平成 20 年 7 月 4 日～平成 21 年 3 月 31 日

1. 担当コーディネータ

氏名（役職）	坪井 開			印
所属機関名	財団法人長野県テクノ財団善光寺バレー地域センター			
連絡先	所在地	〒380-0928 長野県長野市若里1-18-1		
	TEL/FAX	026-225-6650 / 026-225-6711		
	E-mail	tsuboi@tech.or.jp		

2. 代表研究者（代表研究者のみ記入してください。）

氏名（役職）	番場 教子（准教授）			印
所属機関名	信州大学工学部			
連絡先	所在地	〒380-8553 長野市若里4-17-1		
	TEL/FAX	026-269-5233 / 026-269-5220		
	E-mail	nbamba@shinshu-u.ac.jp		

3. 共同研究者（JST と委託研究契約を締結した共同研究機関の場合のみ記入してください。）

氏名（役職）				印
所属機関名				
連絡先	所在地			
	TEL/FAX			
	E-mail	(必須)		

4. 試験研究の結果報告

(1) 試験内容

① 電極形状及び駆動位置の検討 (H20. 8～)

図 1 に示すような片面に S 字型電極(裏は全面電極)をつけた矩形板振動子(長さ: ℓ , 幅: d , 厚さ: t)において, 波動方程式より振動の状態を推測し, 1 次縦振動応力分布と 2 次たわみ振動曲げモーメント分布から最適電極形状を求めた。また, 有限要素法解析ソフト ANSYS によって, 振動子の幅 d ($d=5.7 \sim 6.0$ [mm]) をパラメータとして 2 つの振動の共振周波数が一致する形状や振動の様子を解析した(ただし, $\ell=21.5$ [mm], $t=1.9$ [mm])。解析結果を元に実際に一次縦振動及び二次たわみ振動を同時に励振し, 駆動面に設置したプーリ(直径: 30 [mm], 厚さ 8.5 [mm], 質量 60 [g])の回転速度によって最適回転位置を調査した。

② 制御方法の検討 (H20. 8～)

振動子に印加する電圧, 周波数, さらにデューティ比を変化させて回転速度を測定し, 最適制御法を検討した。直線移動については機構の構築・作製に至らなかったため, 制御法の検討は行わなかった。

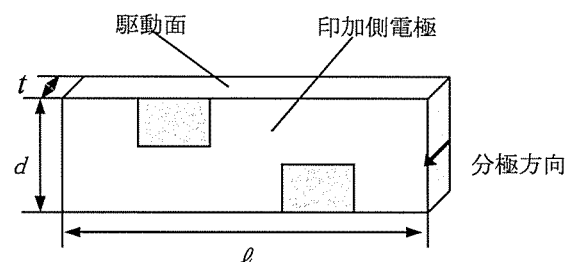


図 1 S 字電極型矩形板振動子

③ 超音波モータ・アクチュエータとしての性能試験 (H20. 12～)

最適化した電極を形成した振動子を用いてアクチュエータの位置制御につながる, プーリの回転角度制御法について検討した。

④ 小型化: 超音波モータの試作 (H21. 1～)

超音波モータの試作には至らなかったが, ①～③で用いた振動子の約半分のサイズである $\ell=10.5$ [mm], $d=2.83$ [mm], $t=1.9$ [mm] の振動子についてもプーリの回転が可能か検討した。

(2) 得られた成果

① 電極形状及び駆動位置の検討

長さ ℓ , 幅 d の一様な媒体の棒に対して, 一次縦振動及び二次たわみ振動は波動方程式から得られ, 左端から x の振動子側面では次式で表される楕円振動が発生する。

$$\frac{(\xi_y - k\xi_x)^2}{[N_V Y(x) \sin \phi]^2} + \frac{\xi_x^2}{[N_V X(x)]^2} = 1 \quad \text{ただし, } k = \frac{Y(x)}{X(x)} \cos \phi \quad (1)$$

ここで, ξ_x , ξ_y はそれぞれ, 長さ方向と幅方向の変位(図 2 参照), N_V , ϕ はそれぞれ印加電界 $E = k \sin \omega t$ の V に比例した定数と 2 つの振動の位相差である。また $X(x)$ と $Y(x)$ は基準関数成分で次のように与えられる。

$$X(x) = C \cos \frac{\pi}{\lambda} x \quad (2)$$

$$Y(x) = D \left(\cosh \frac{b}{\lambda} x - a \sinh \frac{b}{\lambda} x + \cos \frac{b}{\lambda} x - a \sin \frac{b}{\lambda} x \right) \quad (3)$$

ただし, C , D は定数で, $a = (\cosh b - \cos b) / (\sinh b - \sin b)$, $b = 2.4988 \pi$ で表される。つまり, (1) 式は, 楕円振動が印加電圧の大きさ V 及び位相差 ϕ によって決まることを示しており, 位相差 ϕ は振動子の寸法によって

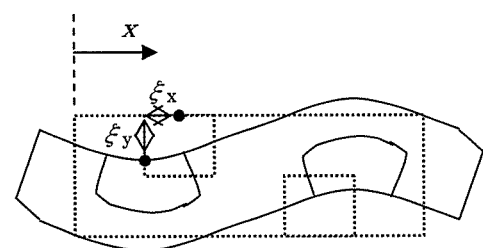


図 2 振動子の変形。点線で示された図は変形前の振動子。

与えられる 2 つの共振周波数によって決定させる。2 つの共振周波数、一次縦振動共振周波数 f_{e1} 及び二次たわみ振動共振周波数 f_{f2} は以下ようになる。ここで v は音速である。I. Lucas らの結果を用いると、寸法比 $d/\ell=0.272$ でこの 2 つの共振周波数が一致すると予想される。

$$f_{e1} = \frac{1}{2\ell} v \quad (4)$$

$$f_{f2} = \frac{b^2}{4\sqrt{3}\pi} \frac{d}{\ell^2} v \quad (5)$$

図 3 に S 字型電極の形状及び一次縦振動応力分布及び二次たわみ振動曲げモーメント分布を示す。図中の α , γ の領域は主に一次縦振動が励振される部分であり、 β は二次たわみ振動が励振される部分である。一次縦振動応力分布より、効率良く一次縦振動を励振するためには γ の領域を大きくとる必要がある。また二次たわみ振動を効率良く励振するためには β の領域の中心を振動子端部から 0.29ℓ , 0.71ℓ の位置にすることが望ましい。以上を考慮すると、 $\alpha=\beta=\gamma=\ell/5$ となる電極形状が考えられる。また β の領域の幅については、その対称性から $w=d/2$ が理想と推測され、振動子の支持位置は 2 つの振動の変位がゼロとなる γ の領域の中心がよいと言える。

上記のように、波動方程式から最適と予想される S 字型電極を表面に、裏面には全面電極を付けた矩形板振動子について、振動子の幅 d ($d=5.7\sim 6.0$ [mm]) をパラメータとして有限要素法解析ソフト ANSYS によって、共振特性及び振動の様子を解析した。今回解析した振動子は長さ $\ell=21.5$ [mm]、厚さ $t=1.9$ [mm] のものである。解析に必要な各種材料定数は実測した PZT セラミックスの共振特性から算出したものを用いた。図 4 に解析によって得られた振動子の共振特性を示す。

幅を変化させたいずれの試料でも、2 つの共振が現れた。幅 d が小さくなるに従い、二次たわみ振動の共振周波数が低周波側にシフトした。一次縦振動の共振周波数は式 (4) からわかるように幅 d にはほとんど影響をうけないはずであるが、若干のばらつきがあった。これは、一次縦振動と二次たわみ振動の共振周波数が近づくことによって起こる結合振動現象の影響である。今回解析を行った範囲では、全ての寸法で一次縦振動に二次たわみ振動が結合することが確認できたが、特に $d=5.9$, 5.8 [mm] で 2 つの振動が強く結合することが明らかになった。図 5 には一次縦、二次たわみ振動による

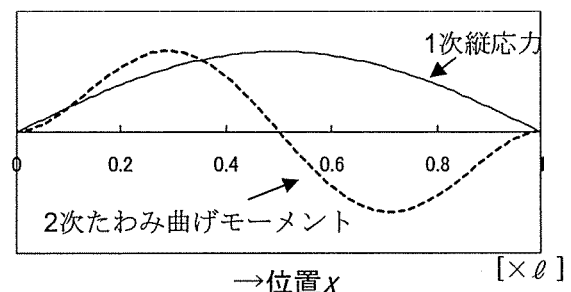
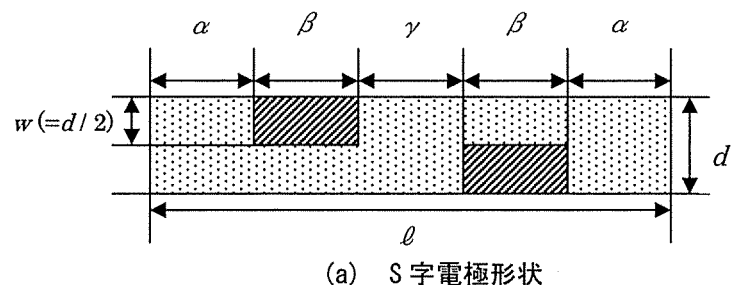


図 3 S 電極振動子と一次縦振動応力分布及び二次たわみ振動曲げモーメント分布

振動子 ($d=5.9$) の変形の様子を示した。つまり、波動方程式から求められ結果とほぼ等しい $d/\ell=0.272$ 近傍で 2 つの振動が同時に励振され、楕円振動が発生していると考えられる。

解析結果をもとに、 $d=5.8\sim 6.0$ の試料を作製し、実測した共振特性を図 6 に示す。解析同様、幅 d を小さくすることで、二次たわみ振動が低周波数側に移動し、それに伴う結合現象により、一次縦振動の共振周波数も低周波数側にシフトする結果が得られた。実際に振動子が楕円運動をすることを確認するために、振動子上にプーリを設置し位置によりどのような回転が得られるか評価し

た。振動子側面の位置一回転速度特性を図 7 に示す。横軸の位置は振動子の全長で正規化してある。 $d=5.9, 6.0$ の振動子ではプーリは回転しなかったが、それ以外の振動子ではプーリが回転したことから、楕円振動が確認できた。振動子の両端以外では同一方向の回転が得られ、中心は振動の節となっていた。 $d=5.9$ の振動子では中心付近で逆向きの回転となったが、これは電極が手塗りであったため微妙なずれや変形が生じた影響で二次たわみ振動が非対称になったことが原因であると考えられる。また最適な回転位置は $0.2 \sim 0.3$ の位置であることがわかった。以上の結果より、解析、実測ともに、振動子の形状を $d/\ell=0.272$ となる寸法にすることで 2 つの振動を同時に励振させ、振動子側面に楕円振動が生じることが示され、十分な成果が得られた。

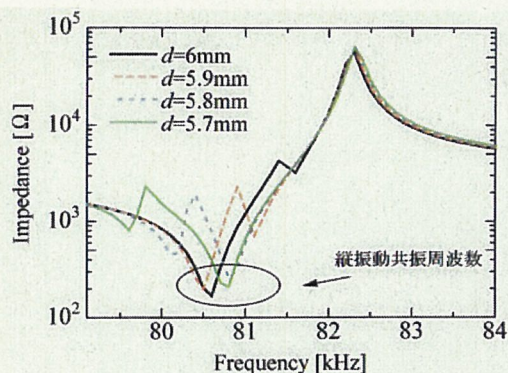


図 4 共振特性 (ANSYS 解析値)

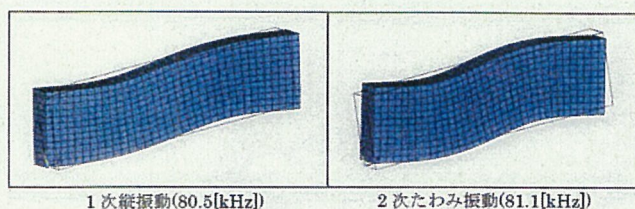
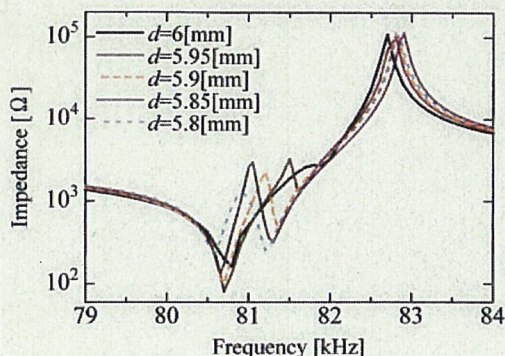
図 5 共振時の振動の様子 ($d=5.9$ [mm])

図 6 共振特性 (実測値)

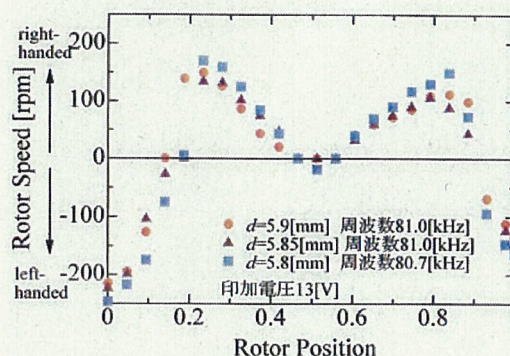


図 7 振動子側面位置一回転速度

② 制御方法の検討

(1) 式は、楕円振動が印加電圧の大きさ及び位相差に依存することを示している。位相差は振動子の寸法によって与えられる 2 つの振動の共振周波数で決定される。このため、モータの駆動制御は、印加電圧、駆動周波数の調整により可能であることは明らかであり、従来の超音波モータの速度制御にはこの 2 つの数値制御が用いられてきた。ただし、この振動子の場合、2 つの振動を同時に励振しなければならないため、駆動周波数は結合振動領域内に限られる。これを踏まえ、この 2 つの制御に加え、本振動子では新たに電磁型ステッピングモータと類似の動作が期待できるデューティ比による制御も試みた。この制御では駆動周波数を 79.5 [kHz]、印加電圧を $10, 15, 20$ [V] で、図 8 に示すように周期 T を 100 [cycle] 一定として T と T_{on} の比、デューティ比 $D(=T_{on}/T \times 100)$ [%] を変えた信号を印加するものである。用いた振動子の形状は $\ell=22$ [mm]、 $d=5.98$ [mm]、厚さ $t=1.9$ [mm] である。またプーリは振動子端から 0.2 にあたる、端から 5 [mm] の位置に設置した。

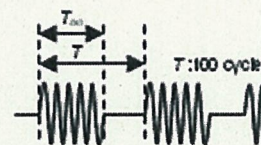


図 8 デューティ比

図 9 に印加電圧制御の結果を示す。4[V]以下の低電圧では回転が確認できなかった。これは低電圧では発生するトルクが静止摩擦力を超えないことが原因であると考えられる。また 5～10[V]では印加電圧の上昇に伴い回転速度も増加し制御が可能であると期待できるが、さらに電圧が高くなると振動子の発熱により共振周波数が変化し、楕円振動が小さくなり、制御性が低下した。

次に駆動周波数による回転速度変化を図 10 に示す。78.5[kHz]以下では振動がほとんど励振されず、プーリは回転しなかった。78.5～79[kHz]では回転速度が急激に上昇し、不安定な制御となった。2つの振動の結合振動領域では、図 6 の共振特性からわかるようにインピーダンスが急激に変化するため、不安定な挙動を示すと考えられる。79～80[kHz]では、回転速度変化が安定しており、この領域で周波数を変化させる場合は速度制御が可能であるが、低速の制御性は十分とは言えない。また周波数を変化させることで、楕円振動の形状及び大きさも変化することから、トルクの変化も伴うため印加電圧制御同様、低速度制御は困難であると推測される。

図 11 にデューティ比による回転速度の制御結果を示す。デューティ比が 20%以下では回転は確認できなかった。これも静止摩擦力が原因であると考えられるが、デューティ比を 20%以上にすることで、従来の 2 つの制御法に比べ、安定した回転速度制御が可能であることが示された。またこの方法では印加電圧、駆動周波数が一定、つまり、トルクを一定に保ったまま楕円振動が現れる時間を変化させているため、20[rpm]以下の低速度でも高トルクであり静止摩擦力の影響を受けにくく安定した制御ができたと考えられる。よってこの振動子を用いた超音波モータの回転速度制御にはこのデューティ比による制御がもっとも適していると言える。

この振動子を用いた超音波モータの回転速度制御法を確立できたことは十分な成果であるが、直線移動機構を構築することができなかったことについてはアクチュエータとして実用を考えると不十分である。しかし、機構を工夫することで今回の結果を用いて直線移動制御も可能であると予想される。

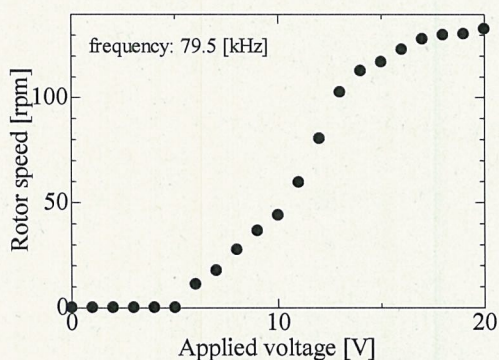


図 9 印加電圧—回転速度

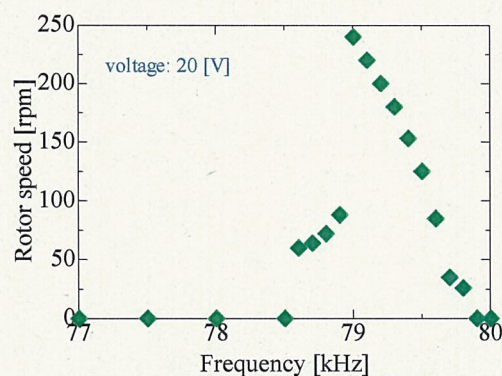


図 10 駆動周波数—回転速度

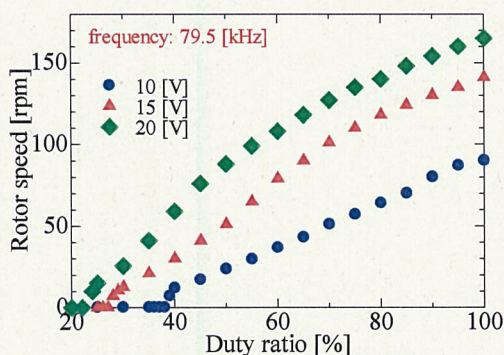


図 11 デューティ比—回転速度

③ 超音波モータ・アクチュエータとしての性能試験

この S 字型電極を付けた矩形板振動子をアクチュエータに応用することを考え、プーリの回転角度制御を次の 2 つの方法により試みた。1 つは回転速度制御に用いたデューティ比制御を拡張した周期数による制御 (図 12(a)) であり、もう一つは周期数が一定のバースト波をトリガパルス信号により設定した数だけ発信させるパルス制御 (図 12(b)) である。このパルス制御ではプーリをステップ的に回転させる。

駆動周波数を 79.5[kHz] 一定、周期数を変えた場合の回転角度制御の結果を図 13 に示す。周期数の増加に伴い、10000[cycle] 以上の周期数ではほぼ線形的に回転角度を制御できることがわかった。しかしながら、低周期数領域ではプーリが回転し始めるまでの慣性の影響が大きいため、回転角度変化が非線形となることが確認された。この非線形性は微小角度制御を困難にすると考えられる。また図より、印加電圧によって周期数－回転角度の傾きを操作できるが、電圧による制御では振動子の発熱により共振周波数にずれが生じたり、トルクが減少したりする可能性が考えられ、安定した制御は難しいと予想される。同様に、電圧を一定として、2 つの振動が同時に励振される周波数範囲内で周波数を変えた場合についても、周期数の変化に伴い、回転角度はほぼ線形に制御できることが確認できた。しかしながら低周期数領域では同様に非線形性が見られたことから、周期数による制御では微小角度制御に問題があると言える。

次にパルス制御による回転角度変化を図 14 に示す。トリガパルス数により、回転角度が線形に変化し、周期数による制御の非線形性が改善された結果となった。しかしながら、パルス信号の周波数 f_x が 100[Hz] 以下ではパルス信号の周波数に関係なく、トリガパルスの数により同じ回転角度が得られていたが、200[Hz] 以上ではトリガパルスの周波数が回転角度に影響を及ぼすようになってしまった。さらに f_x が 300[Hz] 以上では回帰直線が $0[^\circ]$ を通らないという結果が得られた。これは、パルス信号の周波数が低い時は振動子の振動及びプーリの回転が止まったところで次のバースト波形信号が振動子に印加されてプーリが再度回転し始めていたのに対し、 f_x が高くなると慣性により振動している振動子に信号が入力されるため容易に大きな楕円振動が生じるうえ、まだ回転しているプーリに次のバースト波による回転が加えられるため、より大きく回転してしまったと考えられる。この結果から、振動子及び系全体の機械的品質係数 Q_m を小さくすることで振動の減衰が大きくなり、慣性による振動・回転が抑制され、パルス信号の周波数の影響を軽減でき、制御性が向上すると予想される。

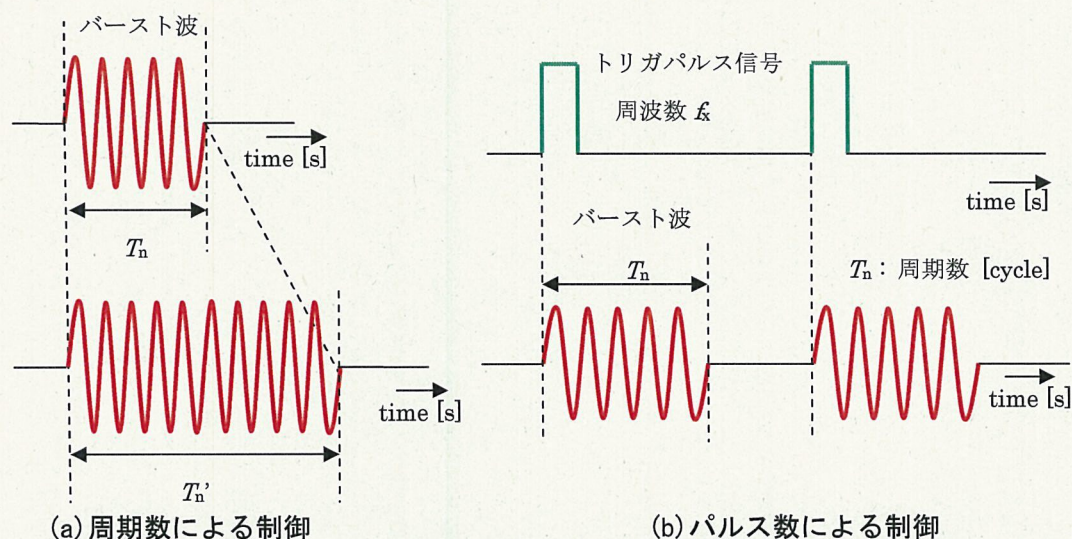


図 12 回転角度制御法

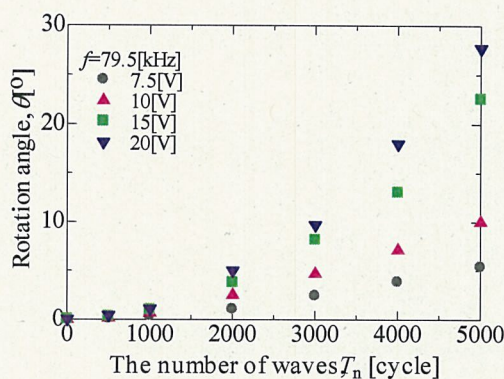


図 13 周期数による回転角度制御

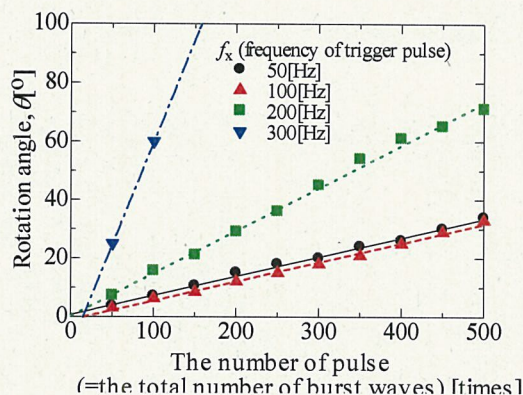


図 14 トリガパルス数による回転角度制御

今回の研究では、このパルス数による回転角制御により線形的に回転角度を制御することができたが、設定した角度でプーリを停止させるような制御までは至らなかった。今後さらに詳細な位置制御を可能にするために、タイマー回路等と組み合わせたプログラム制御も必要となる。なお、ここまでの結果については、平成 21 年 2 月に長岡で開催された日中韓フォーサイト事業セミナー (ISMCN2009) にてポスター発表した。

④ 小型化：超音波モータの試作

$d/\ell=0.272$ を満足していれば、2 つの振動を同時に励振し、振動子側面に楕円振動を生じさせることが可能であることを ANSYS による解析及び実際に設置したプーリが回転することから確認した。手作業ではこれ以上小型にすることは難しいが、更に小さくとも動作することは明らかである。しかしながら、今回は、この振動子に適した制御法を模索するのに時間がかかり、超音波モータの試作には至らなかったが、今後さらに研究を継続し、最終的には実際に超音波モータまたはアクチュエータの試作につなげていきたいと考えている。

(3) 今後の展開

これまでの研究で得られた成果については論文投稿を検討しているが、さらに以下の点について検討を行う必要がある。今回用いた振動子は機械的品質係数 Q_m の大きな ($Q_m=500$)、いわゆるハード系 PZT であった。今回のパルス数による角度制御では、ハード系の材料では振動子そのものの振動が減衰しにくいため、条件によって振動が完全に減衰しないうちに次の振動が励振されることで制御が不安定になることがわかった。そこで今後は材料の Q_m と制御性についても詳細に検討する必要がある。また環境への影響から鉛を使った材料が敬遠されつつあることを考慮し、PZT 以外の材料でもプーリの回転が可能であるか調べなければならないと考えている。さらに、今回の研究では指定した角度だけプーリを回転させるといったアクチュエータ応用を念頭に置いた制御までは到達できなかったため、今後は材料、形状の最適化も含め、できるだけ素早く所定の角度だけ回転させるような微小角度制御法を確立していく予定である。

(4) 知的財産権について

現状では出願の予定なし.

(5) 今後のフォローアップ等について（コーディネータ記載）

今回の研究で種種の課題事項が見つかってきている。今後、これらの課題事項をどうするのか等先生と検討しながら、次へのステップへのフォローアップを図り、実用化へ結びつけたい。

* 2 ヶ月毎に先生との進行状況確認の実施

* 次への補助事業申請への検討