

## 細線振動伝送路の励振効率を高めるための連結構造 について - 細径パイプ屈曲振動伝送路形モータ(3)

-

その他（別言語等） のタイトル	A study on constructions of connecting the exciter and transmission line to improve wave transmission efficiency of the ultrasonic motor with thin-pipe
著者	田村 英樹, 平野 達也, 高野 剛浩, 青柳 学
雑誌名	日本音響学会研究発表会講演論文集
巻	2011年秋季
ページ	1327-1330
発行年	2011-09
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/1705">http://hdl.handle.net/10258/1705</a>

## 細線振動伝送路の励振効率を高めるための連結構造 について - 細径パイプ屈曲振動伝送路形モータ(3)

-

その他（別言語等） のタイトル	A study on constructions of connecting the exciter and transmission line to improve wave transmission efficiency of the ultrasonic motor with thin-pipe
著者	田村 英樹, 平野 達也, 高野 剛浩, 青柳 学
雑誌名	日本音響学会研究発表会講演論文集
巻	2011年秋季
ページ	1327-1330
発行年	2011-09
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/1705">http://hdl.handle.net/10258/1705</a>

## 細線振動伝送路の励振効率を高めるための連結構造について\*

### - 細径パイプ屈曲振動伝送路形モータ(3) -

○田村 英樹<sup>†</sup>, 平野 達也, 高野 剛浩, 青柳 学<sup>†</sup>  
(東北工業大学, <sup>†</sup>室蘭工業大学)

#### 1. まえがき

細径パイプを屈曲振動の伝送路として用いる事で、圧電励振素子から離れた細狭部への回転動力導入を可能とする超音波モータの構成を前報で提示した<sup>1,2)</sup>。これは Fig.1 に示す構成であり、同形縮退 1 次屈曲モードの角柱振動子、細径パイプ振動伝送路、振動変換器とロータ並びに予圧機構からなる。

この原理構造に関する解析並びに実験の結果、共振時の振幅は伝送線路の長さ敏感に依存し、またその振動系は結合モードの性質を示し、実用上大変扱い難い特性であった。

その理由として、本稿では圧電励振部と細線伝送路の波動伝播特性の違いに着目した。具体的には、角柱励振部とパイプ伝送路の接続点からみた双方の機械的インピーダンスの相違による波動の反射が問題であると考え、従って接続点での機械的インピーダンス整合となる条件を求めた。これにより、振動結合の状況を改善するとともに、細線伝送路の振動振幅の向上が得られる事が解析的に確認された。

#### 2. 設計方針と基礎解析

解析には有限要素法の汎用ソフトウェアである COMSOL Multiphysics 4.1 を用いた。振動子を構成する材料定数として Table I の値および、圧電セラミックスは富士セラミックス社の C-213 相当の定数を用いた。

はじめに振動伝送路である細径パイプのみを考え、ここに生じる屈曲振動モードの共振周波数を求めた。Fig.2 中に示すように、ロータ側の変位が小さくなる事を考慮して片側の変位を拘束し、駆動側を開放とした。高次モードはノードの数  $\#N$  で識別する。この解析結果に角柱振動子単体での共振周波数  $f_{0p}=24.36\text{kHz}$  を重ねると、例えば伝送路長  $L_{T1}, L_{T2}$  と  $L_{T3}$  において角柱部と伝送路の共振周波数が一致する。この共振一致条件となる伝送路長が適当と考えた。

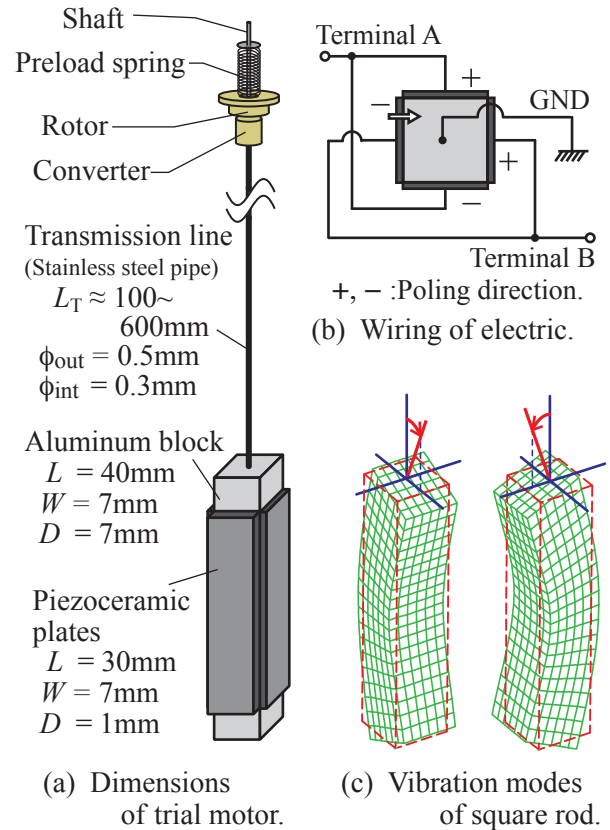


Fig.1 Construction of trial motor.

Table I Material constants for analysis.

	Aluminum	Steel
Density(kg/m <sup>3</sup> )	2730	7850
Young' s module(GPa)	69	205
Poisson' s ratio	0.33	0.28
Mechanical $Q_m$	3000	3000

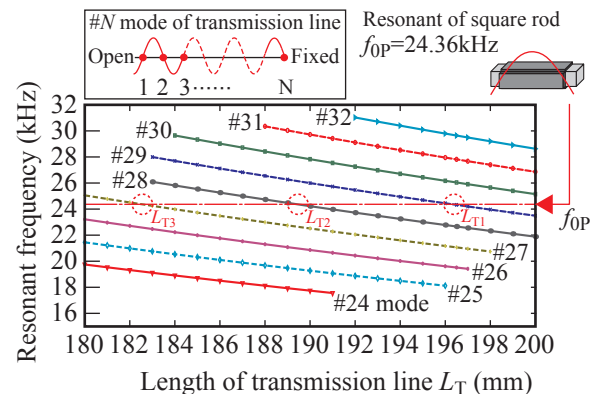


Fig.2 Resonant frequency of transmission line.

\*A study on constructions of connecting the exciter and transmission line to improve wave transmission efficiency of the ultrasonic motor with thin-pipe, by TAMURA Hideki, HIRANO Tatsuya, TAKANO Takehiro, AOYAGI Manabu<sup>†</sup> (Tohoku Institute of Technology, <sup>†</sup>Muroran Institute of Technology)

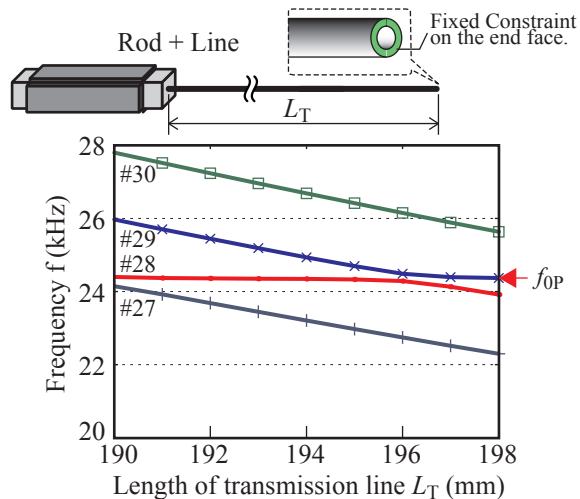


Fig.3 Analyzed results for resonant frequency of resonator connected with rod and trans.-line.

本稿ではまずロータ側構造は考えずに、伝送路先端を変位拘束条件として、角柱部と伝送路を接続した構造について検討した。ここで、角柱部と伝送路を直接接続した構造で、伝送路長に関する共振周波数を解析すると Fig.3 の結果が得られた。これは Fig.2 の結果と比較すると、角柱振動子単体時の振動特性が表れており  $L_T=196\text{mm}$  近傍では隣接モードが最近接しつつも両モードは交差ししない結合モードの傾向が現れている。この伝送路長  $L_T=196\text{mm}$  において伝送路部の振動振幅について周波数応答解析を行うと、Fig.4(a) に示すように角柱振動子単体共振周波数  $f_{0P}$  の近傍にて近接する二つの変位ピークが生じる。このような条件で試作評価を行うと、隣接モードを切り替えた際にロータの回転方向も逆転した。即ち、位相ロック等の駆動制御を行う際にモードジャンプに伴う反転などの回転不安定性を生じやすい。このため、伝送路長  $L_{T1}$  や  $L_{T2}$  などの結合が強い条件の間として例えば  $L_T=(L_{T1}+L_{T2})/2 \approx 193\text{mm}$  を用いると Fig.4(b) に示すように隣接モード間隔がある程度広くなりモードジャンプは起き難くなる。しかしながら伝送路共振の途中で強制駆動となっている為、伝送路振動振幅は3分の1程度まで低下している。

この理由として、Fig.5(a) に示すように角柱振動子と伝送路の特性インピーダンスが大きく異なり、接続点での機械的インピーダンスに大きな違いがある為に反射係数が高い為と考えられる。この場合、圧電的に励振された屈曲振動が伝送路に伝わりにくいほか、伝送路端で反射した成分も角柱振動子側に戻りやすく、従って全体としての振動系になっておらず各部位毎の共振特

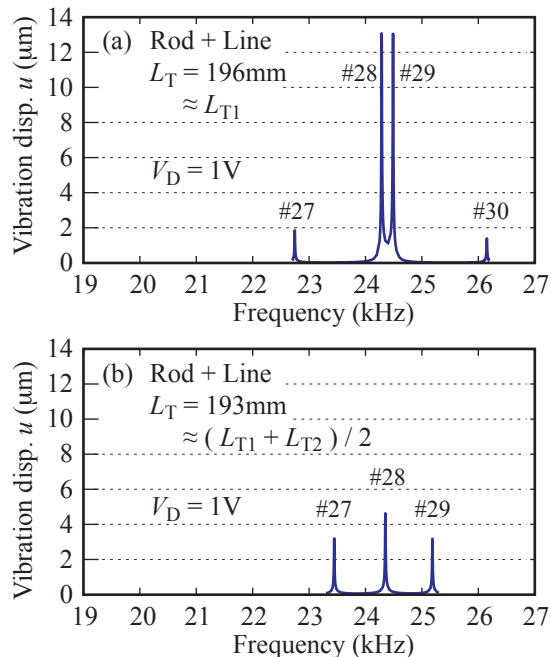


Fig.4 Analyzed results for frequency response of vibration displacement.

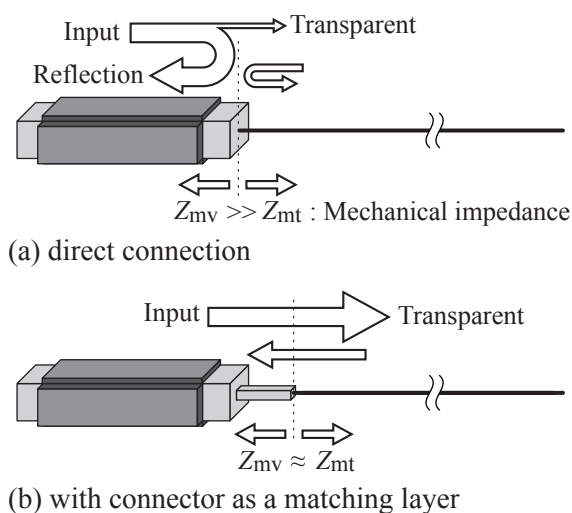


Fig.5 Power reflection at the connecting point.

性が強く表れる。

このため、Fig.5(b) に示すように接続点での機械的インピーダンスを一致させるように整合層となる連結構造の導入を試みた。これによって細線伝送路への振動伝播効率向上に加えて、各部位毎に定在波が閉じ込められる事で生じる結合モードを抑制する効果を見込む。

### 3. 連結構造の設計と効果

機械的インピーダンスを求めるためにも有限要素法を用いた。解析方法は Fig.6 に示すように各部位に分け、それぞれの接続点に力  $F_D$  を与えて機械的に励振する周波数応答解析から、その際に生じる駆動点の振動変位速度  $v$  を得る。

この駆動力と振動変位速度から、機械的インピーダンスを  $Z_m = F_D / v$  によって求める。

はじめに伝送線路の機械的インピーダンス  $Z_{mt}$  を求めて目標値を定める。Fig.2 の共振周波数の交差条件である #29-mode の  $L_{T1}$ 、#28-mode の  $L_{T2}$  と #27-mode の  $L_{T3}$  において得られた  $Z_{mt}$  を Fig.7 に示す。このように条件によって  $Z_{mt}$  には若干の差異が生じる事から伝送路長が大きく異なる場合には再設計が必要と考えられる。ただし、Fig.7 の範囲程度であればそれほど大きな違いではない。

続いて角柱振動子の機械的インピーダンス  $Z_{mv}$  を求めた。角柱振動子単体での駆動点インピーダンスは  $0.24\text{N}/(\text{m}/\text{s})$  であり、伝送線路の  $Z_{mt}$  とは 100 倍程度の違いであった。ここで、Fig.8 中に示すように幅  $W_c$ 、長さ  $L_c$  の連結構造を導入し、その先端から  $Z_{mv}$  を求めた結果を Fig.8 にまとめた。ここで先に求めた伝送線路の  $Z_{mt}$  を目標値として示している。

連結構造の幅  $W_c = 3\text{mm}$  の場合には  $L_c$  を変えていっても  $Z_{mv}$  は目標値  $Z_{mt}$  に到達しなかった。これに対して  $W_c = 1, 2\text{mm}$  では  $Z_{mv} = Z_{mt}$  となる  $L_c$  が存在した。目標値  $Z_{mt}$  近傍での変化がなだらかな方が構造誤差による影響が少ないと考えて、以降は  $W_c = 2, L_c = 7.5\text{mm}$  の連結構造について考える。

#### 4. 連結構造を用いた振動子の特性

連結構造を用いた振動系全体について伝送路長さを変えたときの共振周波数の解析結果を Fig.9 に示す。ここでも伝送路先端は変位拘束とした。結果より明らかに角柱振動子単体の特性は現れず、Fig.2 に近い素直な特性となった。

この際の伝送路振動振幅について Fig.4 と対比するよう解析結果を Fig.10 に示した。Fig.10(a) の #29-mode が、励振角柱と伝送路双方の共振周波数を一致させるよう目標としていた設計条件である。隣接モード間隔にも比較的余裕がある。また隣接モードの振動振幅も大きく現れており、連結構造は比較的広い周波数において角柱部と伝送路の間の振動透過に対して有効に働いているものと考えられる。また、角柱振動子の共振周波数と伝送路共振が離れた条件として、Fig.10(b) を見ると、しかしながら #28-mode を中心にして十分な振幅が得られている。従って、伝送路長の製作時のばらつき等があった場合でも極端な振幅低下を生じずに使用出来る可能性が高い。

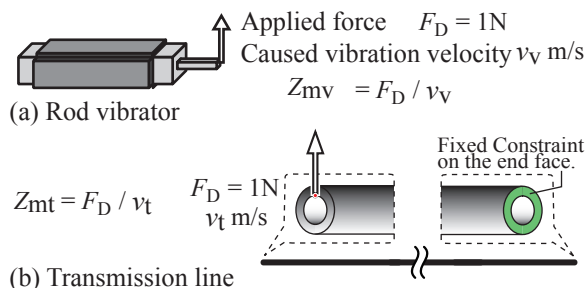


Fig.6 Analyzed method to obtain the mechanical impedances of the rod and transmission line on the connection ports.

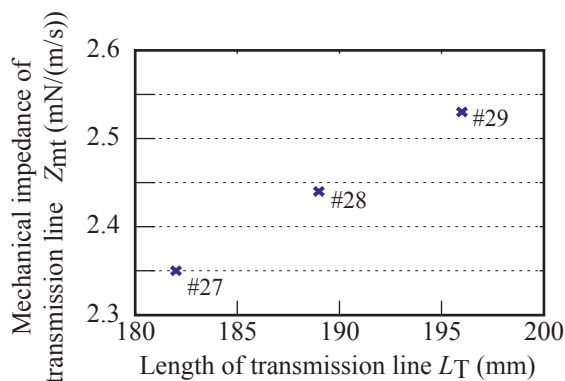


Fig.7 Mechanical impedance of the transmission line.

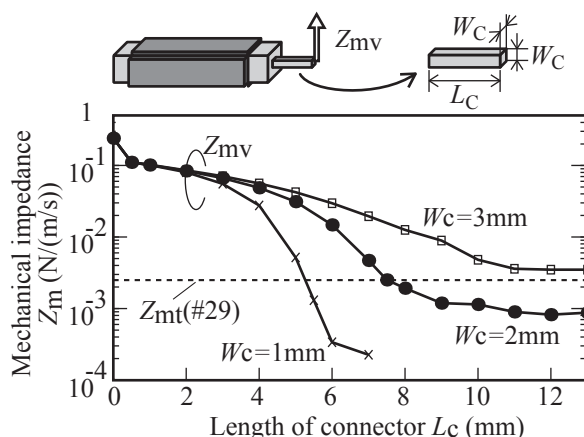


Fig.8 Mechanical impedance of the square rod with connector.

ここで連結振動子全体の振動分布を Fig.11 に示す。一方は連結構造のない場合であり、Fig.4 (b) の #28-mode である。これは伝送路単体共振の間を角柱振動子単体共振で強制駆動している状態である。このために角柱振動子と伝送線路の素子断面積が大きく違うにもかかわらず振動振幅比が同等であり、すなわち振動エネルギーの大部分が角柱振動子に存在する状態である。他方は整合条件を満たすような連結構造を備えた Fig.10(a) の #29-mode であり、角柱振動子の振幅は相対的に非常に小さく、伝送線路側に効果的に振動が伝達していると考えられる。

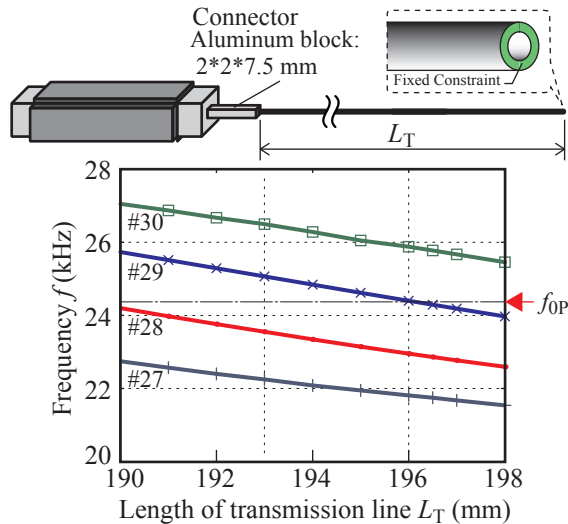


Fig.9 Analyzed results for resonant frequency of resonator connected with rod, connector and trans.-line.

以上のように、接続点での機械的インピーダンスを整合させるように設計された連結構造を用いた振動系により、部位個別の振動特性が抑えられて系全体の振動特性が得られる。

### 5. まとめ

細狭部への動力導入のために、振動伝送路として直径 0.5mm の細径パイプを用いた超音波モータの特性向上に向けた検討を行った。励振源として同形縮退屈曲 1 次モードの角柱振動子を用いたが、単純に細線伝送路と接続した従来試行では振動系全体としてモード結合によって実用上取り扱い難い特性を示した他、実際のモータ出力も不十分であった。

それらの要因として波動伝送における反射の問題に注目して、励振部角柱振動子と振動伝送路の接続点に、整合層としての角柱形連結構造を導入した。整合条件を求めるには COMSOL を用いた有限要素法解析によって機械的駆動力並びに振動速度から機械的インピーダンスを求めて、接続点における双方のインピーダンスを一致させるように連結構造の寸法を定めた。

この結果、従来問題となっていたモード結合特性は現れず、共振周波数間隔の確保に加えて伝送線路長の変化によっても振動振幅の著しい変化が生じないなど、設計上有利な特性が得られる事が分かった。今後、試作による検証を進めていく。

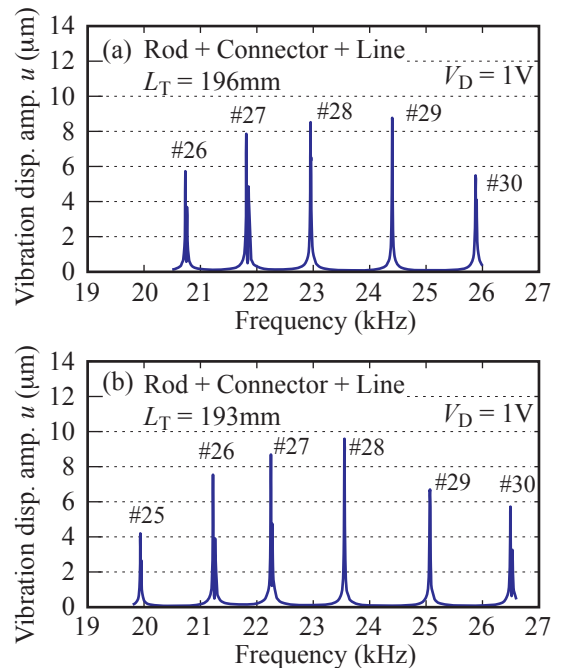


Fig.10 Analyzed results for frequency response of vibration displacement of the improved resonator.

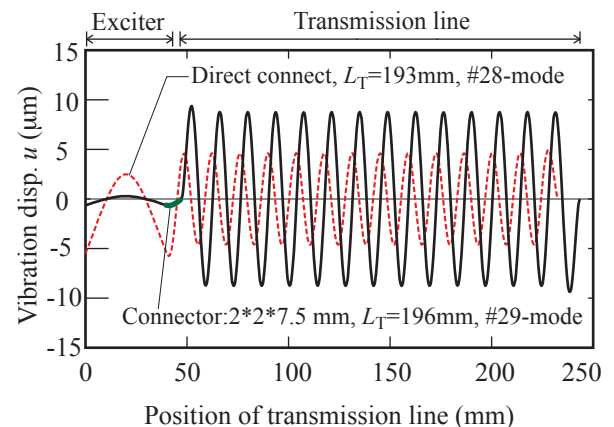


Fig.11 Comparing vibrational displacement distributions between the direct and improved connected resonators.

### 参考文献

- (1) 平野、田村、高野、青柳:「細径パイプ伝送路の両端に矩形振動子とロータを配置した超音波モータの試作」, 音講論 2010 年秋, pp.1235-1236.
- (2) 平野、田村、高野、青柳:「ロータ保持ならびに駆動力伝達のための伝送路先端構造について-細径パイプ屈曲振動伝送路形モータ(2)-」, 音講論 2011 年春, pp.1473-1476.