

## LiNbO<sub>3</sub>バルクモードの大振幅励振破壊限界に関する測定

その他（別言語等）のタイトル	Measurement of Fracture characteristics in LiNbO <sub>3</sub> Bulk-mode Vibration Under Large Vibration Velocity
著者	岩瀬 正志, 田村 英樹, 広瀬 精二, 青柳 学, 高野 剛浩, 富川 義朗
雑誌名	日本音響学会研究発表会講演論文集
巻	2007年秋季
ページ	1281-1284
発行年	2007-09
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/1672">http://hdl.handle.net/10258/1672</a>

## LiNbO<sub>3</sub>バルクモードの大振幅励振破壊限界に関する測定

その他（別言語等）のタイトル	Measurement of Fracture characteristics in LiNbO <sub>3</sub> Bulk-mode Vibration Under Large Vibration Velocity
著者	岩瀬 正志, 田村 英樹, 広瀬 精二, 青柳 学, 高野 剛浩, 富川 義朗
雑誌名	日本音響学会研究発表会講演論文集
巻	2007年秋季
ページ	1281-1284
発行年	2007-09
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/1672">http://hdl.handle.net/10258/1672</a>

# LiNbO<sub>3</sub>バルクモードの大振幅励振破壊限界に関する測定\*

◎岩瀬 正志 田村 英樹 広瀬 精二 青柳 学† 高野 剛浩‡ 富川 義朗  
(山形大学・工、†室蘭工業大学、‡東北工業大学)

## 1. まえがき

鉛フリー圧電材料の一つであるLiNbO<sub>3</sub>は結晶カット角の選定によって、電気機械結合係数を比較的高くとれる。また圧電セラミック振動子と比べ発熱が少なく、大振幅で励振してもQ値の低下がわずかでありハイパワー特性に優れた特長を有している。<sup>1)</sup> 筆者らはこのような理由からLiNbO<sub>3</sub>のバルク振動子を用いた幾つかの超音波モータ構成を考案し試作実験を行っている。<sup>2-5)</sup>

超音波モータの小形化を進めると相対的に変位量が減少する為、振動子の破壊限界付近まで変位速度を上げざるを得ない場合がある。その為には振動子としての励振限界を知っておく必要があるが、大振幅励振限界に関する詳細な検討は少ない。

従って本研究では、X128°Y-cut矩形板振動子を用いて、縦振動1次モードおよび屈曲振動2次モードでそれぞれを駆動し破壊特性を評価した。さらに結晶カット角の違いによる限界振動速度を比較するため、X135°Y-cutならびにX140°Y-cut矩形板振動子のx軸長手方位、z'軸長手方位の矩形板それぞれを縦振動1次モードに関して測定した。

## 2. LiNbO<sub>3</sub>振動子の大振幅励振特性の測定

LiNbO<sub>3</sub>振動子の大振幅励振特性および破壊限界を測定する為、Fig.1に示す測定系を用いた。振動子は振動速度が最大になる周波数で駆動できるようPLLループを構成し、入力電圧と電流の位相差が0degになるよう追尾した。この電流には本来モーシヨナル電流を使うべきだが、制動容量に流れる電流は自由電流のおよそ10<sup>-2</sup>~10<sup>-3</sup>倍程度なので自由電流をモーシヨナル電流として近似した。駆動は定電圧で行い、駆動電圧を増加して各3分後に諸特性を測定した。

実験に使用した振動子形状をFigs.2,3に示す。LiNbO<sub>3</sub>のカット角は電気機械結合係数を高くとれるX128°Y-cut、X135°Y-cut、X140°Y-cutを選択した。Fig.2にX128°Y-cut矩形板振動子の縦振動1次(L<sub>1</sub>)モードと屈曲振動2次(F<sub>2</sub>)モードの変位図および電極パターンを示す。この振動子は表面電極が4分割、裏面は全面電極である。Fig.2(c)においてL<sub>1</sub>モードで駆動する時は、端子A、端子Bを共にsin(ωt)、端子CをGNDに接続した。またF<sub>2</sub>モードで駆動する時は、端子Aをsin(ωt)、端子BをGNDに接

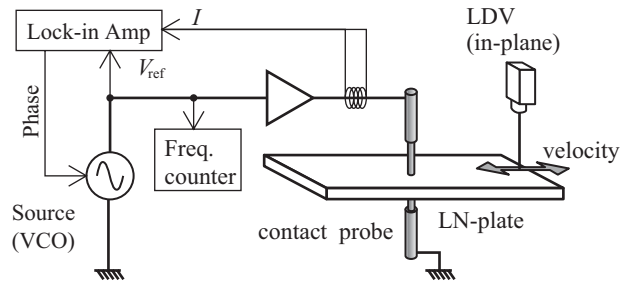


Fig.1 Measurement system.

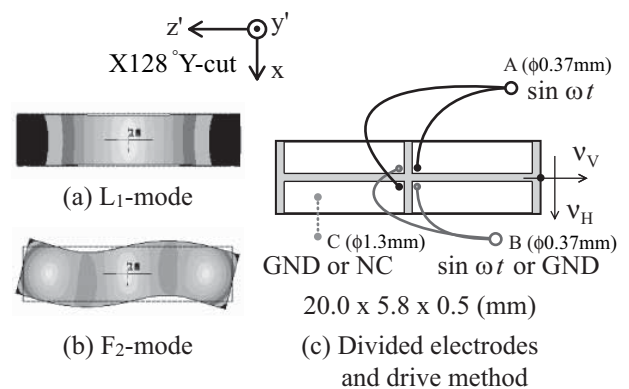


Fig.2 X128°Y-cut rectangular plate with four division electrodes.

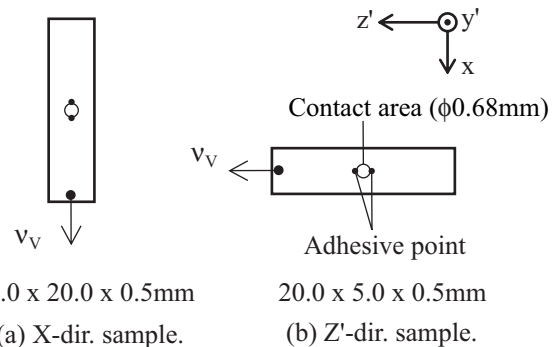


Fig.3 X135° and X140°Y-cut rectangular plate.

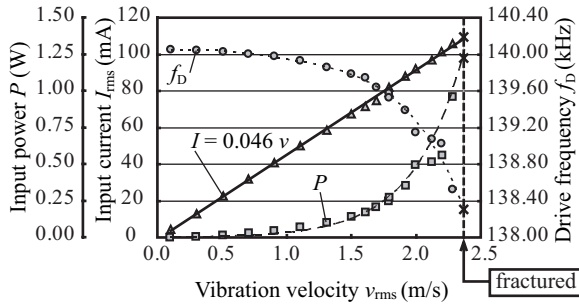
続し、端子Cは開放した。Fig.3はX135°Y-cutおよびX140°Y-cutの矩形板振動子で、Fig.3(a)は長手方位がx軸に平行、Fig.3(b)は長手方位がz'軸に平行である。上下の全面電極を用いてL<sub>1</sub>モードを駆動する。

各振動子は電極面の上下を、先端接触面が4分割のコンタクトピンで支持したが、回転やずれを防止する為上部ピンの接触部側面をFigs.3,7の黒点に示すように点状に接着した。予備実験では接着ポイントを幅方向にすると破壊の亀裂

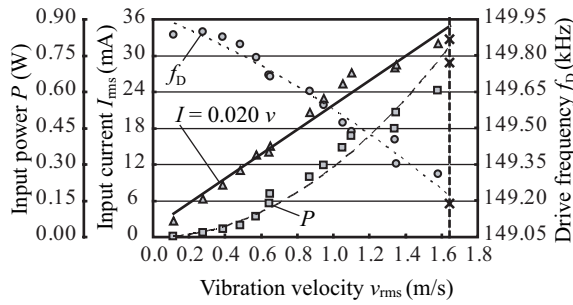
\*Measurement of Fracture characteristics in LiNbO<sub>3</sub> Bulk-mode Vibration Under Large Vibration Velocity, by IWASE Masashi, TAMURA Hideki, HIROSE Seiji, AOYAGI Manabu†, TAKANO Takehiro‡ and TOMIKAWA Yoshiro (Yamagata Univ. †Muroran Inst. of Tech. and ‡Tohoku Inst. of Tech.)

Table I Measurement results of Equivalent constants of the X128°Y-cut rectangular sample.

	L <sub>1</sub> -mode	F <sub>2</sub> -mode
$f_0$ (kHz)	140.060	149.934
$R$ ( $\Omega$ )	18.6	425.6
$L$ (mH)	74.2	555.1
$C$ (pF)	17.4	2.03
$C_d$ (pF)	93.4	27.5
$Q$	3519.5	1228.9
$k$	0.46	0.30



(a) L<sub>1</sub>-mode of X128° plate



(b) F<sub>2</sub>-mode of X128° plate

Fig.4 X128°Y-cut rectangular sample.

線上に接着剤が乗るので、その為か破壊限界速度は高めに現れた。従ってFig.3の黒点で示すように振動子の長手方向に接着を施した。尚、Fig.2に示す振動子は導電性接着剤、Fig.3ではエポキシ系接着剤を使用した。

X128°Y-cut矩形板振動子の振動変位速度は、L<sub>1</sub>モード時は端面中央の長さ方向に平行な速度 $v_V$ を測定し、F<sub>2</sub>モード時は端面中央の幅方向に平行な速度 $v_H$ をレーザードップラー振動速度計(LDV)で測定した。X135°Y-cut、X140°Y-cut矩形板振動子はL<sub>1</sub>モードに関して端面中央の長さ方向に平行な速度 $v_V$ を測定した。また、実験サンプルはいずれも山寿セラミックス社による両面ミラー仕上げ、Cr+Au電極蒸着したものを使用した。

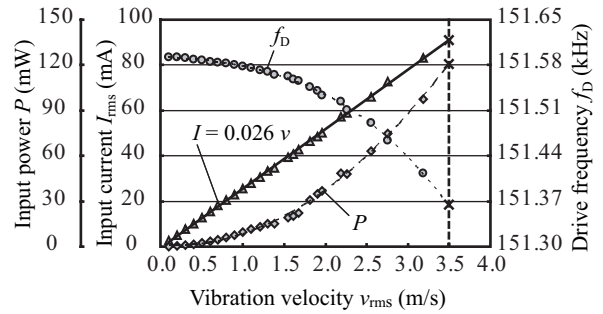
### 3. 測定結果

#### 3.1 支持影響

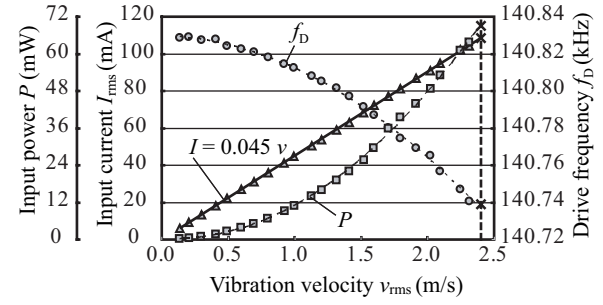
各振動子の小振幅時の基本特性をTables I - IIIに示す。F<sub>2</sub>モードは端子Cを開放、端子BをGNDに接続している為、電界距離が2倍になりL<sub>1</sub>モード時よりインピーダンスは高くなる。エポキシ系接着剤無しで測定したX135°Y-cut、

Table II Measurement results of Equivalent constants of the X135°Y-cut rectangular sample.

	X-dir.sample	Z'-dir.sample
$f_0$ (kHz)	151.606	140.847
$R$ ( $\Omega$ )	16.0	4.05
$L$ (mH)	215.9	60.2
$C$ (pF)	5.11	21.2
$C_d$ (pF)	100.9	101.8
$Q$	12853.3	13148.9
$k$	0.25	0.48



(a) L<sub>1</sub>-mode of X135° X-dir.sample



(b) L<sub>1</sub>-mode of X135° Z'-dir.sample

Fig.5 X135°Y-cut rectangular sample.

X140°Y-cut矩形板振動子の $Q$ 値は30000~40000であった。しかし接着を行うと、Tables II, IIIに示されるように $Q$ 値はおよそ12000~13000にまで低下している。Table IのL<sub>1</sub>モードも同様に1点支持で接着された状態ならば、同等の $Q$ 値となるはずだが接着した上部4点支持では $Q$ 値が約3500と大幅に低下している。接着剤の有無や支持方法の違いによる $Q$ 値の低下から、4点支持は損失影響が大きく無視できないことが分かる。またF<sub>2</sub>モードの $Q$ 値は約1200となりL<sub>1</sub>モードよりもさらに損失影響が大きいことを示している。

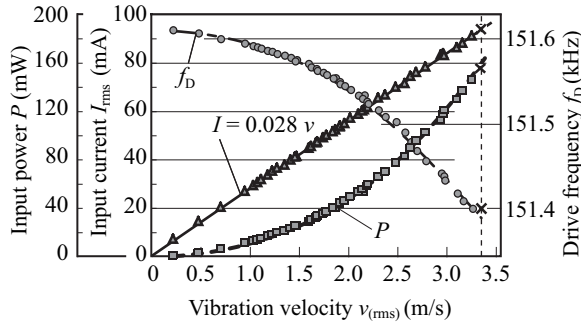
#### 3.2 L<sub>1</sub>モードとF<sub>2</sub>モードの大振幅特性

Fig.4にX128°Y-cut矩形板振動子の振幅特性を示す。Fig.4(a),(b)の特性より振動速度と入力電流の関係には比例関係が見出せる。破壊時の限界振動速度の実効値はL<sub>1</sub>モードで $v_V=2.37$ m/s、F<sub>2</sub>モードで $v_H=1.65$ m/sであった。また、モーショナル電流 $I_m$ と変位速度 $v$ より算出した力係数は、L<sub>1</sub>モードで0.046、F<sub>2</sub>モードで0.020の結果が得られた。

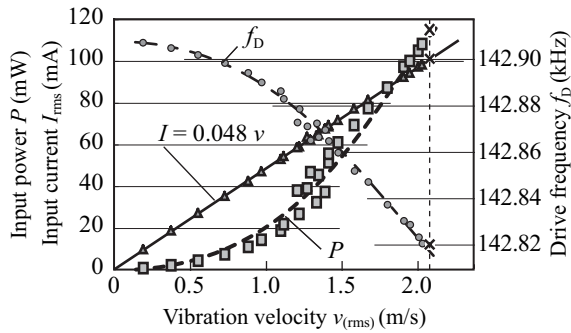
駆動周波数 $f_D$ の変化は圧電セラミックスと比較すれば小さいが、速度依存性が見られる。ま

Table III Measurement results of Equivalent constants of the X140°Y-cut rectangular sample.

	X-dir.sample	Z'-dir.sample
$f_0$ (kHz)	151.619	142.907
$R$ ( $\Omega$ )	14.2	4.63
$L$ (mH)	178.8	63.5
$C$ (pF)	6.16	19.5
$C_d$ (pF)	105.4	107.3
$Q$	12029.7	12323.1
$k$	0.26	0.47



(a) L<sub>1</sub>-mode of X140° X-dir.sample



(b) L<sub>1</sub>-mode of X140° Z'-dir.sample

Fig.6 X140°Y-cut rectangular sample.

Table IV Measurement results of fracture velocity, force factor and electromechanical coupling coefficient.

	X128°Y-cut	X135°Y-cut	X140°Y-cut
fracture velocity	2.37(m/s)	2.40(m/s)	2.08(m/s)
force factor	0.046	0.045	0.048
$k$	0.46	0.48	0.47

たL<sub>1</sub>モードでは入力電力Pと共に $v_v=1.3$ m/s付近から変化が顕著になっている。これは非接触放射温度センサやサーモカメラを用いた温度上昇測定値の傾向とほぼ一致した。温度センサの放射率等の調整が不十分であり発熱の絶対温度は正確に得られなかったが、接着剤部分での発熱が著しい様子が観測された。すなわち支持部の漏れ振動によりエポキシ樹脂の接着剤が加熱されたと考えられる。この際、Q値が低く従って振動漏れの大きいF<sub>2</sub>モードは、L<sub>1</sub>モードと比べてより小さな変位速度から周波数変化と電力上昇が顕著となっている。このようなパワー特性の温度依存性に関して振動子自体の発熱と、接

着剤などによる支持影響の分離については今後の課題である。さらに、発熱そのものが破壊限界に影響を及ぼすのかも検討を要する。そのような支持影響があったとしてもLiNbO<sub>3</sub>のI-v特性は破壊に至るまで線形性を保つことが分かった。よって超音波モータの出力を調整する際はIに注目すれば良いと言える。

以上の測定結果から、LiNbO<sub>3</sub>バルク振動子はL<sub>1</sub>モード駆動では限界振動速度が高く、F<sub>2</sub>モードでは限界振動速度が低いことが明らかになった。Fig.2に示した4分割電極矩形板振動子を用いる超音波モータは、L<sub>1</sub>モードおよびF<sub>2</sub>モードを同時に駆動して使用する。この際に低速高トルクの性能を引き出す場合は問題無いが、高速回転を得る為にはF<sub>2</sub>モード成分を強く励振したい。しかしながら、F<sub>2</sub>モードの低い破壊限界が二相駆動モータの動作限界を決定することになる。大振幅励振時に限界値を超えないよう電流値に留意する必要がある。

### 3.3 X135°Y-cutおよびX140°Y-cut矩形板振動子の大幅特性

Figs.5,6にX135°Y-cutとX140°Y-cut矩形板振動子の大幅特性を示す。どちらもX128°Y-cut矩形板振動子の大幅特性と同様に振動速度と入力電流には比例関係が見られる。X135°Y-cutではX-dir.sampleの限界振動速度は $v_v=3.50$ m/sで、力係数0.026、Z'-dir.sampleでは $v_v=2.40$ m/sと力係数0.045の結果が得られた。尚、X-dir.sampleは $v_v=3.50$ m/sに設定し約2分後に割れたが、破壊直前のデータを取得できなかった為限界速度時の各値は近似曲線から得た近似値である。X140°Y-cutではX-dir.sampleの限界振動速度は $v_v=3.35$ m/sで力係数0.028、Z'-dir.sampleでは $v_v=2.08$ (m/s)と力係数0.048の結果が得られた。

またX135°Y-cutとX140°Y-cutにおけるZ'-dir.sampleのL<sub>1</sub>モードはX128°Y-cutのL<sub>1</sub>モードに比べ破壊に至るまでの入力電流はほぼ同じであるが、周波数変化と入力電力の大きさ及び上昇変化が少ない。観察した発熱温度変化も同様に少なかった。すなわち支持方法が発熱特性に影響を与え、それに伴いパワー特性が変化する。従って支持系の設計が重要である。

X135°Y-cutとX140°Y-cut矩形板振動子についてX-dir.sampleとZ'-dir.sampleの特性を比較すると、いずれのカット角においてもX-dir.sampleの方が大きな振動速度まで破壊に耐える。しかし、駆動抵抗や力係数を比較するとZ'-dir.sampleの方が良好であり、従ってLiNbO<sub>3</sub>を以上のようなバルク振動子で使用する場合、破壊限界速度内で使用できるのならば、低入力電圧でより大きい変位が得られるz'軸を伸縮方向とする設計構成の方が超音波モータとして適していると考えられる。

次に結晶カット角の違いによる限界振動速度、力係数および電気機械結合係数に着目する。Table IVに各カット角のZ'-dir.sampleの特徴を示した。X128°Y-cutのデータは支持方法が

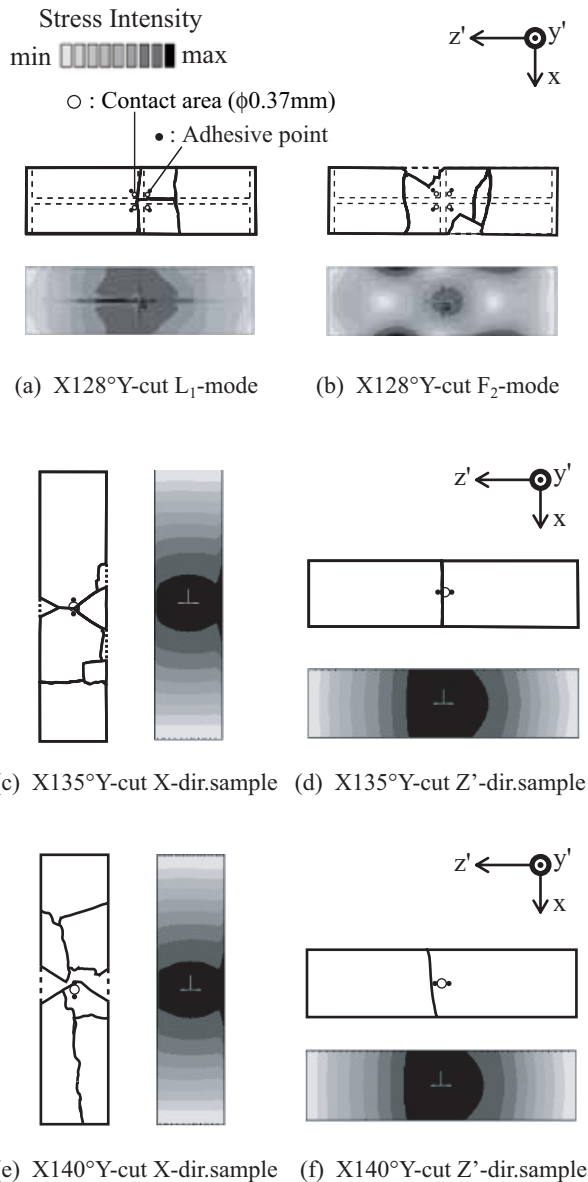


Fig.7 Fractured sample and stress distribution.

異なる為、ここでは参考値として扱う。力係数と電気機械結合係数 $k$ を比較するとカット角による大きな違いは見られないが、僅かながらX135°Y-cutの力係数は低い。しかし、それ以上にX140°Y-cutの限界振動速度は他の2種類の場合と比べ明らかに限界振動速度が低い。超音波モータの小形化に伴う変位量の減少を補う為には高い振動速度が必要となる。今回の測定比較の中ではX135°Y-cut付近の利用が超音波モータとして適していると考えられる。

#### 4. 振動子の破壊状態と応力分布

Fig.7に実際に破壊に至った各サンプルの破壊状態とFEMで得られた応力分布を併せて示す。破壊した各振動子と応力分布を比較すると、振動子は応力最大点付近から割れている事が確認できた。しかし、屈曲モードでは応力最大点より若干内側にずれた部位で破壊が生じている。

X128°Y-cut sampleの破壊状態と応力分布よ

り、Fig.7(a)のL<sub>1</sub>モードでは応力集中領域で破壊していることが分かる。また、Fig.7(b)のF<sub>2</sub>モードでは破壊部は応力最大点付近であるが、若干中央寄りである。

次にX135°Y-cut sampleでは、Fig.7(c)のX-dir.sampleとFig.7(d)のZ'-dir.sampleいずれもほぼ応力最大点から破壊に至っている。しかしながら振動子の破壊状態は異なり、X-dir.sampleは複雑に亀裂が入り破壊しているのに対し、Z'-dir.sampleはほぼ中央から1本の亀裂が入り割れている。

X140°Y-cut sampleもX135°Y-cutの場合と同様の割れ方を示している。このように形状、振動モードが同一であっても結晶方位により割れ方に特徴が現れることを確認できた。

X-dir.sample、Z'-dir.sampleの破壊状態の違いは、長手方位による特徴的な亀裂からLiNbO<sub>3</sub>結晶のへき開面に関係していると考えている。そのため、Figs.5,6のX-dir.sampleとZ'-dir.sampleで破壊強度が異なり、結果として限界振動速度に差が生じたのではないかと予想している。従って、今後はLiNbO<sub>3</sub>のへき開特性と応力の関係を明らかにすることが課題になる。

#### 5. まとめ

本研究では、矩形板振動子のL<sub>1</sub>モードとF<sub>2</sub>モードに関する大振幅励振の破壊試験により、F<sub>2</sub>モードの方がより低い駆動パワーと振動速度で破壊に至ることを明らかにした。その結果、二相駆動のLiNbO<sub>3</sub>モータの動作限界はF<sub>2</sub>モードの破壊限界に依存することが示された。また結晶の長手方位が異なる矩形板振動子において、破壊に至る限界振動速度や力係数に差異が生じることが確認された。LiNbO<sub>3</sub>のカット角の違いによる特性を、限界振動速度、力係数、電気機械結合係数の項目について比較することにより、X140°Y-cutよりX135°Y-cutのカット角が超音波モータに適していることを示した。このようにLiNbO<sub>3</sub>振動子を超音波モータとして使用する際の設計条件の一つとして有益な情報が得られた。

#### 謝辞

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金特定領域研究438(No.19016001)による。

#### 参考文献

- 1)広瀬 他, 音響学会講演論集, pp.845-846, 1991-10
- 2)T. Takano *et. al.*, Proc. 9th Int. Conf. Actuators, pp.453-454, 2006
- 3)H. Tamura *et. al.*, Jpn. J. Appl. phys., Vol.46, 7B, pp.4698-4703, 2007
- 4)田村 他, 音響学会講演論集, pp.991-992, 2006-9
- 5)川合 他, 信学技報 US2006-42 pp.37-42, 2006