



## LiNbO<sub>3</sub>

# の結合モードを利用した超音波モータ用振動子の破壊限界測定

メタデータ	言語: jpn 出版者: 日本音響学会 公開日: 2012-09-28 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 田村, 英樹, 岩瀬, 正志, 広瀬, 精二, 青柳, 学, 高野, 剛浩, 富川, 義朗 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/1674">http://hdl.handle.net/10258/1674</a>

## LiNbO<sub>3</sub> の結合モードを利用した超音波モータ用振動子の破壊限界測定

その他（別言語等） のタイトル	Measurement of Fracture Characteristics Using Coupling-mode in LiNbO <sub>3</sub> Plate for Ultrasonic Motor
著者	田村 英樹, 岩瀬 正志, 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	2008年春季
ページ	1225-1228
発行年	2008-03
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/1674">http://hdl.handle.net/10258/1674</a>

# LiNbO<sub>3</sub>の結合モードを利用した 超音波モータ用振動子の破壊限界測定\*

田村 英樹, 岩瀬 正志, 広瀬 精二, 青柳 学<sup>†</sup>, 高野 剛浩<sup>‡</sup>, 富川 義朗  
(山形大・工, <sup>†</sup>室蘭工大, <sup>‡</sup>東北工大)

## 1 まえがき

非鉛圧電材料を用いた超音波モータとして、筆者らはLiNbO<sub>3</sub>の平板バルク振動子を用いた幾つかのモータを提案している<sup>[1-5]</sup>。LiNbO<sub>3</sub>は代表的なPZT系圧電セラミックスと比較して大きな振動速度においても低発熱で特性劣化が少なく<sup>[6]</sup>、さらに電気機械結合係数の大きさや低損失であると言った特長を持ちハイパワーアプリケーションにも適した素材と考えられる。しかしながら、振動変位速度を増加させていった場合に、特に予兆を示すことなく限界を超えると破壊に至る。従って破損防止やモータの限界特性の見積もりのためにも、破壊限界を知る必要がある。面内の縦-屈曲振動を利用する超音波モータのために、前回の報告では縦一次(L<sub>1</sub>)と屈曲二次(F<sub>2</sub>)モード個々の大振幅限界特性を測定し報告を行った<sup>[7]</sup>。

同時に小形で簡素なモータ構成として、結晶異方性により矩形板でモード結合を引きおこし単相で駆動する方式のモータ構成も提案している<sup>[4,5]</sup>。本紙ではモータ用に設計された矩形板の結合モードについて大振幅励振を行った破壊特性の測定結果を示し、前報による個別モードの破壊特性との関係を述べる。

## 2 異方性によるモード結合の原理

始めに測定に用いた矩形板振動子のモード結合原理について述べる。LiNbO<sub>3</sub>のX回転Y板から矩形板振動子を切り出す際、Fig.1に示すように結晶のx, z'方向に軸を合わせるとL<sub>1</sub>およびF<sub>2</sub>-modeはそれぞれ独立であり、縮退設計にて二相駆動方式のモータが得られる<sup>[2]</sup>。ここでFig.2のようにX回転Y板を更にy'軸で回転させるとL<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>-mode間に結合が生じる。二つの結合モードは共振周波数の高低によってそれぞれUpper-modeとLower-modeと称する。

実際にモータに使用している第一軸θ=135°、第二軸をΦ=14°とした物性値は式(1)に示され、コンプライアンスのs<sup>E</sup><sub>15</sub>, s<sup>E</sup><sub>25</sub>, s<sup>E</sup><sub>35</sub>は非ゼロとなっている。このためFig.1に示す面内の(a)伸縮と(b)せん断の歪みならびに応力が相互に結

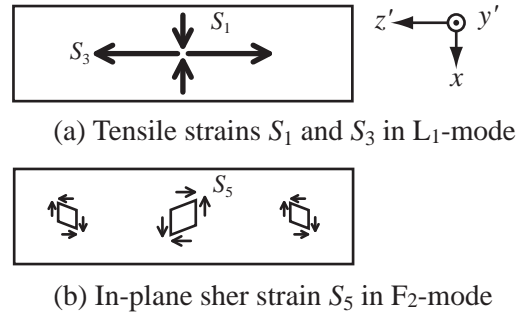


Fig.1 Strains which contribute to coupling.

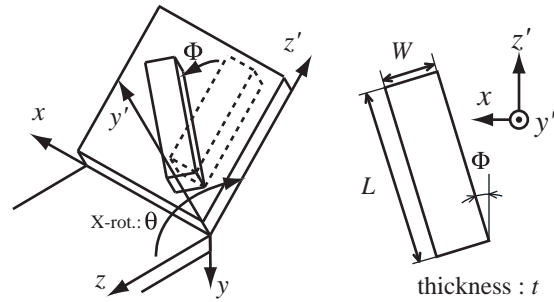


Fig.2 Design parameter of vibrator.

(LiNbO<sub>3</sub> X135° + Y'14° roation)

$$s^E = (\times 10^{-11} \text{m}^2/\text{N}) \begin{bmatrix} 0.797 & -0.117 & -0.360 & 0.036 & -0.412 & 0.067 \\ -0.117 & 1.808 & -1.424 & -0.029 & 0.347 & 0.007 \\ -0.360 & -1.424 & 2.055 & 0.047 & 0.078 & -0.087 \\ 0.036 & -0.029 & 0.047 & 0.427 & -0.046 & 0.331 \\ -0.412 & 0.347 & 0.078 & -0.046 & 1.223 & -0.131 \\ 0.067 & 0.007 & -0.087 & 0.331 & -0.131 & 1.670 \end{bmatrix}$$

$$e = (\text{C}/\text{m}^2) \begin{bmatrix} 0.13 & -0.30 & 0.48 & 1.14 & -1.13 & 4.09 \\ 1.60 & 2.35 & -2.68 & -1.21 & 1.14 & 0.30 \\ 1.30 & 1.21 & -3.74 & -0.19 & 1.08 & 1.14 \end{bmatrix}$$

$$\frac{\epsilon^S}{\epsilon_0} = \begin{bmatrix} 43.8 & -2.0 & 1.9 \\ -2.0 & 36.1 & 8.0 \\ 1.9 & 8.0 & 36.6 \end{bmatrix} \quad \text{----- (1)}$$

合する。加えてe<sub>25</sub>も値を持つ事で垂直電界の印加によって面内伸縮のみならず、同時に面内のすべりをも励振する。

X135度回転Y板について、振動に寄与する弾性定数のy'軸回転角Φとの関係をFig.3に示す。90°回転するとx軸とz'軸を入れ替えた事になり、この時も結合しない。

\* Measurement of Fracture Characteristics Using Coupling-mode in LiNbO<sub>3</sub> Plate for Ultrasonic Motor, by TAMURA Hideki, IWASE Masahi, HIROSE Seiji, AOYAGI Manabu<sup>†</sup>, TAKANO Takehiro<sup>‡</sup> and TOMIKAWA Yoshiro (Yamagata Univ., <sup>†</sup>Muroran Inst. of Tech. and <sup>‡</sup>Tohoku Inst. of Tech.)

縦振動成分を駆動する際に長手方向の歪みに対して幅と厚み方向の歪みはポアソン効果により極性が逆となる。従って強い結合を得るためには、縦成分から屈曲成分を誘起する  $s_{15}^E$  と  $s_{35}^E$  は異極性が望ましい。そして長手方向への伸縮が強勢である事から、 $s_{35}^E$  のピークとなる  $\Phi=15^\circ$  付近で結合効果が高いと考えられる。ところで、面垂直方向の応力や歪みから面内すべりを誘起する  $s_{25}^E$  は、 $s_{15}^E$  と  $s_{35}^E$  の効果を打ち消すように作用する。この事から振動子の中央部支持の際に面垂直の拘束力が変動した際に結合状態が変化して誤差要因となる恐れがある。

圧電定数に関しては、 $x$  軸回転角  $\theta$  が  $95^\circ$  から  $162^\circ$  付近で  $e_{21}$  と  $e_{23}$  が異符号となり歪み極性と一致するために高い結合係数が得られる。 $\theta=135^\circ$  の場合には Fig.4 より  $\Phi$  が  $40^\circ$  までは  $e_{21}$  と  $e_{23}$  の異極性関係が保たれているが回転角に従い双方の値とも減少し、代わって  $e_{25}$  の値が増加する。 $\Phi=45^\circ$  付近で  $e_{25}$  は最大値であるが、長さと同方向への駆動力が小さい上に打ち消す

関係となる。従って  $\Phi$  が約  $30^\circ$  を超えるのは結合モードの駆動条件としては適切でない。

これまでの FEM 解析では、モード結合により縦成分と屈曲成分のバランスが適当と考えられる条件は第二軸回転角  $\Phi$  が  $10^\circ$  から  $20^\circ$  程度であり、現在の設計形状では  $\Phi=14^\circ$  としている。これは以上における回転角依存性の検討とも適合した値である。

### 3 測定方法とサンプル振動子

圧電振動子を大振幅で駆動すると中心周波数が変化するため、Fig.5 に示すように入力電圧と自由電流の位相角をゼロに保つように PLL を構成して周波数を追尾している。測定手順は前報同様に、駆動電圧を変化後 3 分経過時の諸数値を GPIB 経由で PC を用いて取得した。

振動子の支持と給電は直径 0.68mm のスプリング内蔵コンタクトプローブを用いて、振動子中央上下を与圧 2.2~2.4N で保持した。ただし、大振幅に振動子の回転やずれを防ぐため、上方のプローブはスライド部と、振動子とのコンタ

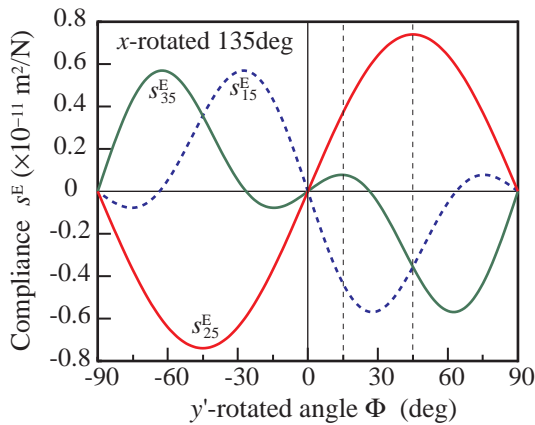


Fig.3 Elastic compliances  $s_{35}^E$ ,  $s_{15}^E$  and  $s_{25}^E$  as functions of second rotation angle  $\Phi$ .

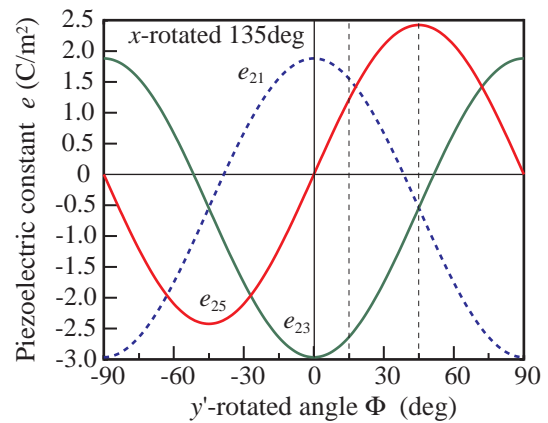


Fig.4 Piezoelectric constants  $e_{23}$ ,  $e_{21}$  and  $e_{25}$  as functions of second rotation angle  $\Phi$ .

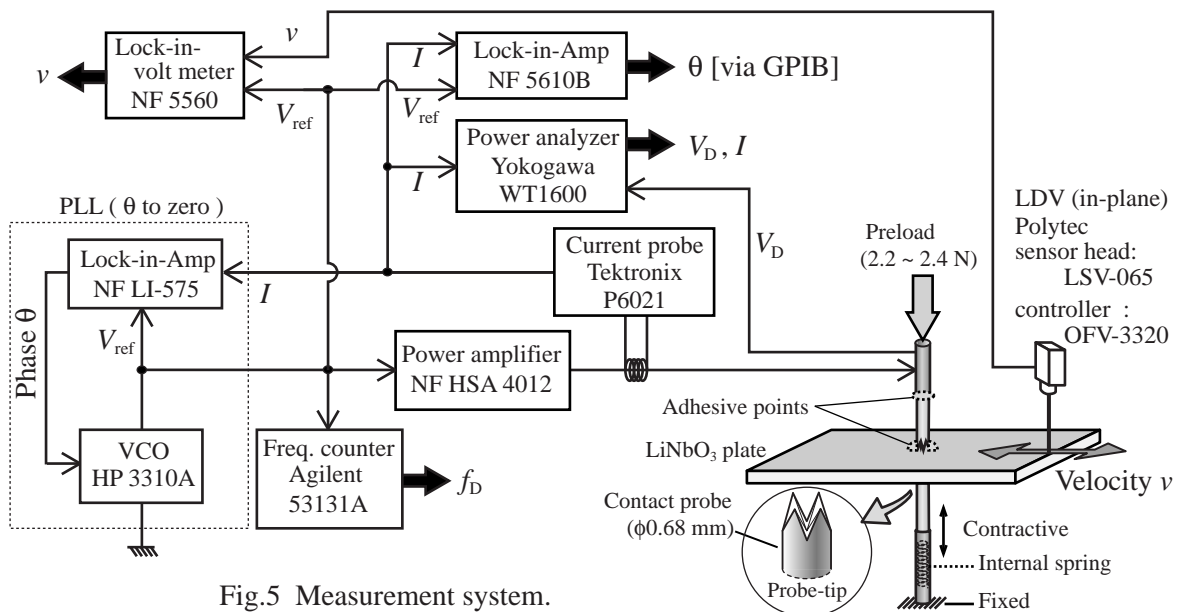


Fig.5 Measurement system.

クト部を接着している。スライド部は全周、コンタクト部はFig.6に示すように長手方向の2点をエポキシ系接着剤で止めている。また、取り付け時の傾斜防止のため、プローブ先端はFig.5中に示すように4つ割形状となっている。

使用した振動子はFig.6に示す寸法であり、upper, lower-modeそれぞれ、端分中央の面垂直と水平変位成分が同等になるようにFEM解析で求められた条件である。第一軸 $\theta=135^\circ$ で、第二軸は $z'$ 軸が振動子の対角方向になる $\Phi=14^\circ$ である。実測で得られた最大変位方向を図中に示しており、良好な対称性が確認できる。またFEM解析による変位と内部応力をそれぞれFigs.7-8とFig.9に示す。

#### 4 測定結果

測定系にセットした振動子の小信号等価回路定数をTable Iに示す。ずれ止め接着影響のため、この $Q$ 値は無接着時に比べて85%(upper)、63%(lower)である。大振幅励振特性として、変位速度に対する特性をupper-mode, lower-modeそれぞれFig.10, Fig.13に示す。この変位速度はFig.6に示した最大方向の大きさである。

Table I Equivalent circuit constants of  $X135^\circ\text{-}\Phi14^\circ$  rectangular plate.

	upper	lower
$Q$	30648	17509
$f_r$ (Hz)	144036	141598
$R$ ( $\Omega$ )	4.5	6.6
$L$ (mH)	154.0	130.3
$C$ (pF)	7.9	9.7
$C_d$ (pF)	100.7	100.8
$k$	0.43	0.15

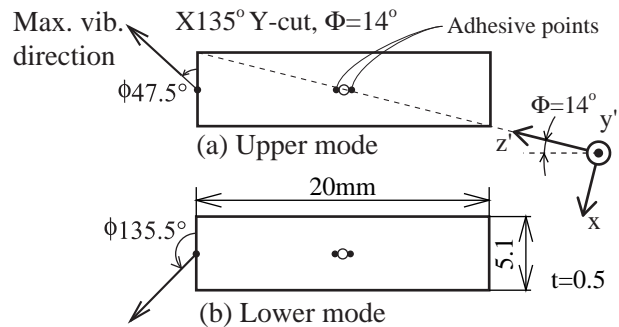


Fig.6 Measured vibrator dimensions and the angles of the max. vibration direction.

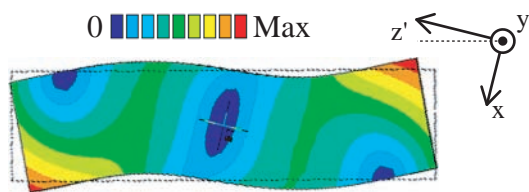


Fig.7 Total displacement of the upper mode.

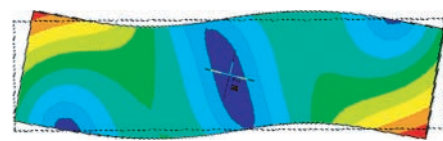


Fig.8 Total displacement of the lower mode.

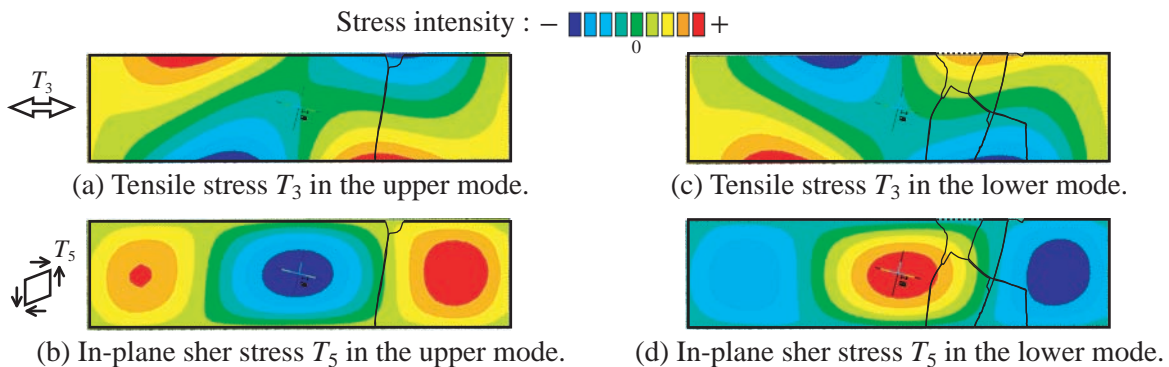


Fig.9 Analyzed results of internal stress and the experimental fracture patterns.

いずれのモードも変位速度の実効値が2.3m/s程度で破壊している。Fig.9の応力図には実験による破壊パターンを重ねているが、側面伸張応力 $T_3$ 最大付近からの破壊傾向が見られる。また変位速度と駆動電流は破壊に至るまで良い線形性を示しており、相互の線形係数として求められる力係数も両モードで0.031-0.035と同程度である。そのほかのパワー特性も、その傾向は前報で述べた $L_1$ および $F_2$ -modeの測定結果と同様である。駆動周波数や入力パワーの特性に関して、upper-modeに比べると若干lower-modeのほうが非線形傾向が強い。

変位速度を端面の垂直成分 $v_v$ と水平成分 $v_H$ に分け、その際の入力電流の関係で表したのがupper-modeでFig.12, lower-modeではFig.15である。FEM解析で設計した通り、いずれのモードでも水平、垂直の振動成分が同等となっている。この際の破壊限界振動速度は1.6m/s程度である。 $L_1$ および $F_2$ -modeの破壊限界振動速度はそれぞれ約2.4m/s, 1.7m/sであった。従って $F_2$ -modeの限界速度が多重モード振動子の限界になると論じたが、今回の結合モード振動子

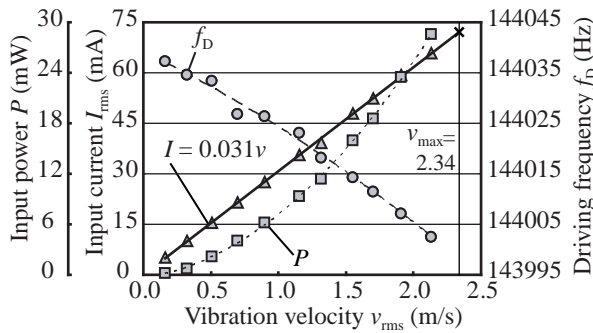


Fig. 10 Driving characteristics depend on vibrational velocity in the upper mode.

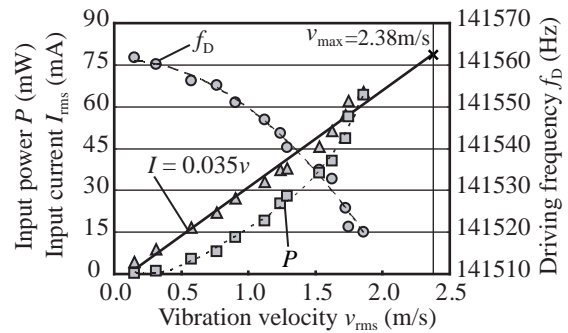


Fig. 13 Driving characteristics depend on vibrational velocity in the lower mode.

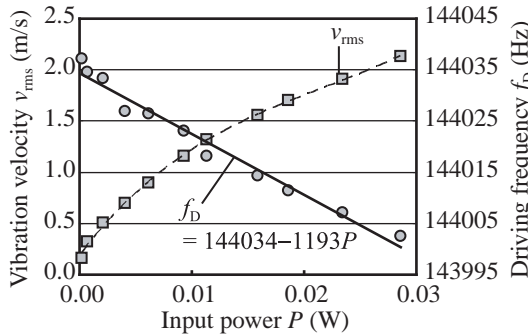


Fig. 11 Driving freq. and velocity as functions of the input power in the upper mode.

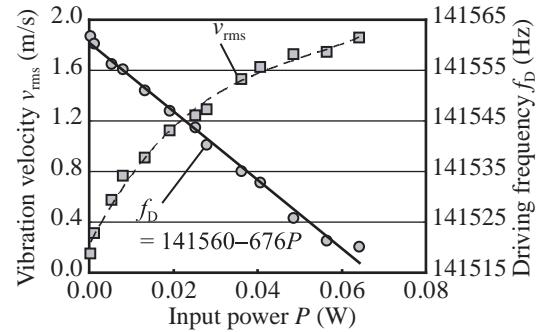


Fig. 14 Driving freq. and velocity as functions of the input power in the lower mode.

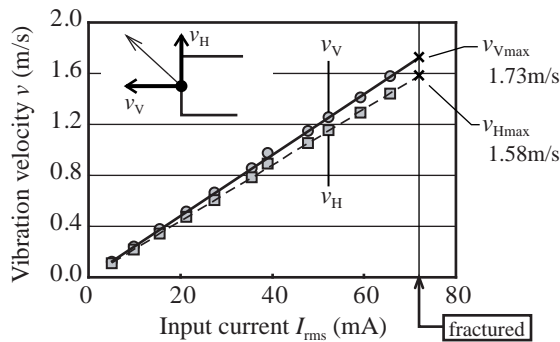


Fig. 12 Vertical and horizontal components of vibrational velocity in the upper mode.

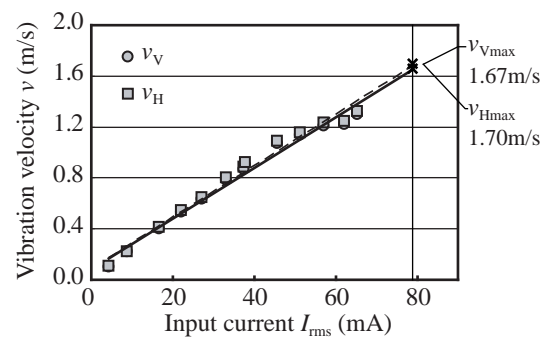


Fig. 15 Vertical and horizontal components of vibrational velocity in the lower mode.

の場合にも、横方向の振動速度  $v_H$  は限界値に大きく関与していると考えられる。ただし、合成変位速度の限界値は  $L_1$ -mode の限界速度と同等であり合成速度の影響も考慮が必要であるが、このためには  $v_V$  と  $v_H$  が不均等な結合モード振動子も用いた評価が必要である。

限界速度は両モードで同等との結果が得られたが、電気機械結合係数の違いにより駆動電圧は3倍ほど異なる。従って注意を要するのは、lower-mode を駆動する印加電圧条件のまま、upper-mode の周波数に移行した場合、入力が高となり限界速度を超えて破損に至る恐れがある。モータ動作の評価時に実際にそのような状況での破損を生じている。電流値であれば両モード間の差もそれほど小さくなく、何よりも破壊限界の予想が可能となるため、本モータ制御時には電流モニタが必須であろう。

## 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) の助成を受けて行われた。

## 参考文献

- [1] T. Takano *et al.*, Proc. 10th Int. Conf. Actuators, pp.453-456, 2006
- [2] 川合 他, 信学技報 US2006-42 pp.37-42
- [3] H. Tamura *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 46, 7B pp.4698-4703, 2007
- [4] 柴田、田村 他, H18 秋季音響学会講演, 2-10-9, pp.1209-1212, 2007.
- [5] 田村 他, 信学技報 US2007-35, pp.1-6, 2007
- [6] 広瀬 他, H3 秋季音響講演, pp.845-846, 1991
- [7] 岩瀬、田村 他, H18 秋季音響学会講演, 2-P-10, pp.1281-1284, 2007.