



モード結合LiNbO₃単結晶モータの辺比条件による特性差

メタデータ	言語: jpn 出版者: 日本音響学会 公開日: 2012-10-01 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 諸岡, 孝憲, 田村, 英樹, 山吉, 康弘, 青柳, 学, 高野, 剛浩, 広瀬, 精二 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/1683

モード結合LiNbO₃単結晶モータの辺比条件による特性差

その他（別言語等）のタイトル	Characteristic differences for Mode-coupling LiNbO ₃ Motor Depends on length to width ratio of the stator
著者	諸岡 孝憲, 田村 英樹, 山吉 康弘, 青柳 学, 高野 剛浩, 広瀬 精二
雑誌名	日本音響学会研究発表会講演論文集
巻	2009年秋季
ページ	1259-1262
発行年	2009-09
URL	http://hdl.handle.net/10258/1683

モード結合 LiNbO₃ 単結晶モータの辺比条件による特性差*

◎諸岡孝憲, 田村英樹, 山吉康弘, 青柳学†, 高野剛浩‡, 広瀬精二
(山形大・工, †室蘭工大, ‡東北工大)

1. まえがき

非鉛圧電材料の一つである LiNbO₃ は結晶異方性を有し、結晶カット角の選定により特有の振動モードを励振できる。著者らは LiNbO₃ のモード結合を用いた定在波型単相駆動超音波モータについて、駆動周波数切替による反転動作かつ回転特性の均等化に取り組んでいる。^[1-5]

有限要素法解析を用いて駆動特性に影響する電気機械結合係数と回転方向及び回転特性の均等化に影響する接触端面の駆動点振動変位比に着目した振動子設計を行ってきたが、実験では駆動インピーダンスの差が回転特性に影響を与える問題が顕著であった。本研究ではモータ動作が見込まれるモード結合に関して、振動子辺比条件をこれまでよりも広げた上で駆動インピーダンスを含めた振動子設計の検討を行い、試作評価を行った。

2. モード結合によるモータ構成

LiNbO₃ の結晶異方性から結晶カット角の適切な選定を行うと、単純な矩形板形状であってもモード結合によって単相駆動モータとして動作可能である。横効果結合係数の大きい X135° 回転 Y 板で励振できる面内縦一次振動 (L₁-mode) と面内屈曲二次振動 (F₂-mode) は、Fig.1(a) のように y' 軸回りに Φ 回転させることで、L₁-mode と F₂-mode が結合した Fig.1(b)、(c) のような縦と屈曲の両成分を持った振動モードとなる。モード結合により共振周波数の異なる二つの振動モードが励振されるので、共振周波数の高低からそれぞれ Upper-mode と Lower-mode と称する。櫛引らが提示した材料定数^[6]を用いて算出した、第二結晶カット角を回転させたときのモード結合に寄与するコンプライアンスの変化を Fig.2 に示す。面内で z' 方向に変位する縦波と x 方向に変位する横波の結合には s_{15}^E と s_{35}^E の効果が大きく作用する。また矩形板形状の縦振動はポアソン効果によって x 方向と z' 方向の変位極性は逆となるから、 s_{15}^E と s_{35}^E についても逆極性が望ましい。したがって Fig.2 より Φ=12° から 30° 付近が強い結合の得られる条件と考えられる。

モード結合により駆動点の振動方向は接触端面に対して傾き、接触端面に垂直な成分 u_v による摩擦力の増減と水平な成分 u_H による回転-すべりの相互作用により一つの振動モードでシャフトを一方向に回転させることができる。

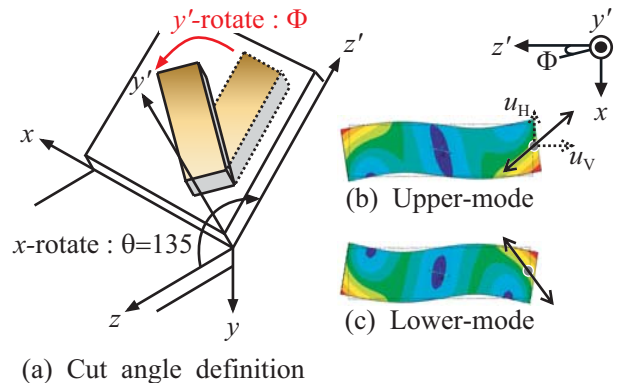


Fig.1 Mode coupling vibrator using a double rotated LiNbO₃ rectangular plate.

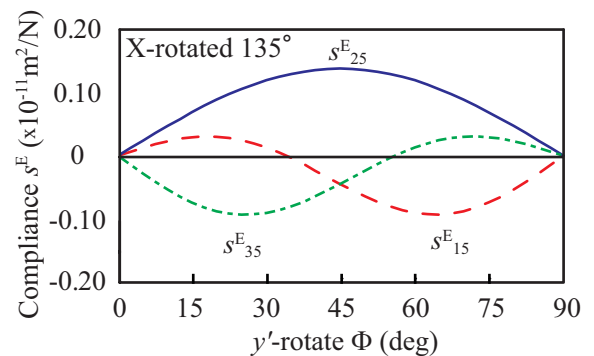


Fig.2 Elastic compliances as functions of the 2nd rotation angle Φ .

Fig.1(b)、(c)に示すようにUpper-modeとLower-modeの振動変位が対称となるように設計することで、駆動周波数切替による反転動作かつ回転特性の均等化が見込まれる。

3. 有限要素法による解析

3.1 Φ=14° における辺比の比較

これまで検討してきた第二結晶カット角 Φ=14°、振動子長 L=10mm をもとに振動子幅 W を変化させたときの振動子幅と長さの比に対する共振周波数、電気機械結合係数、振動変位の接触端面に対する垂直成分と水平成分の比、モード結合する辺比付近の駆動インピーダンスを Fig.3 に示す。Fig.3(a)よりこれまで検討してきた W/L=0.25 から 0.28 の範囲の他に 0.7 から 0.8 付近でも振動モードが結合している。W/L=0.25 付近では Fig.4(a) のような z' 面接触によりモータ動作させるが、W/L=0.7 付近では Fig.3(a) からほぼ正方形板に近い形状となり、これまでの純粋な L₁-mode と F₂-mode のモード結合ではなく、面内せん断に近い振動モードが励振されるため

* Characteristic differences for Mode-coupling LiNbO₃ Motor Depends on length to width ratio of the stator, by MOROOKA Takanori, TAMURA Hideki, YAMAYOSHI Yasuhiro, AOYAGI Manabu†, TAKANO Takehiro‡ and HIROSE Seiji (Yamagata Univ., †Tohoku Inst. of Tech. and ‡Muroran Inst. of Tech.)

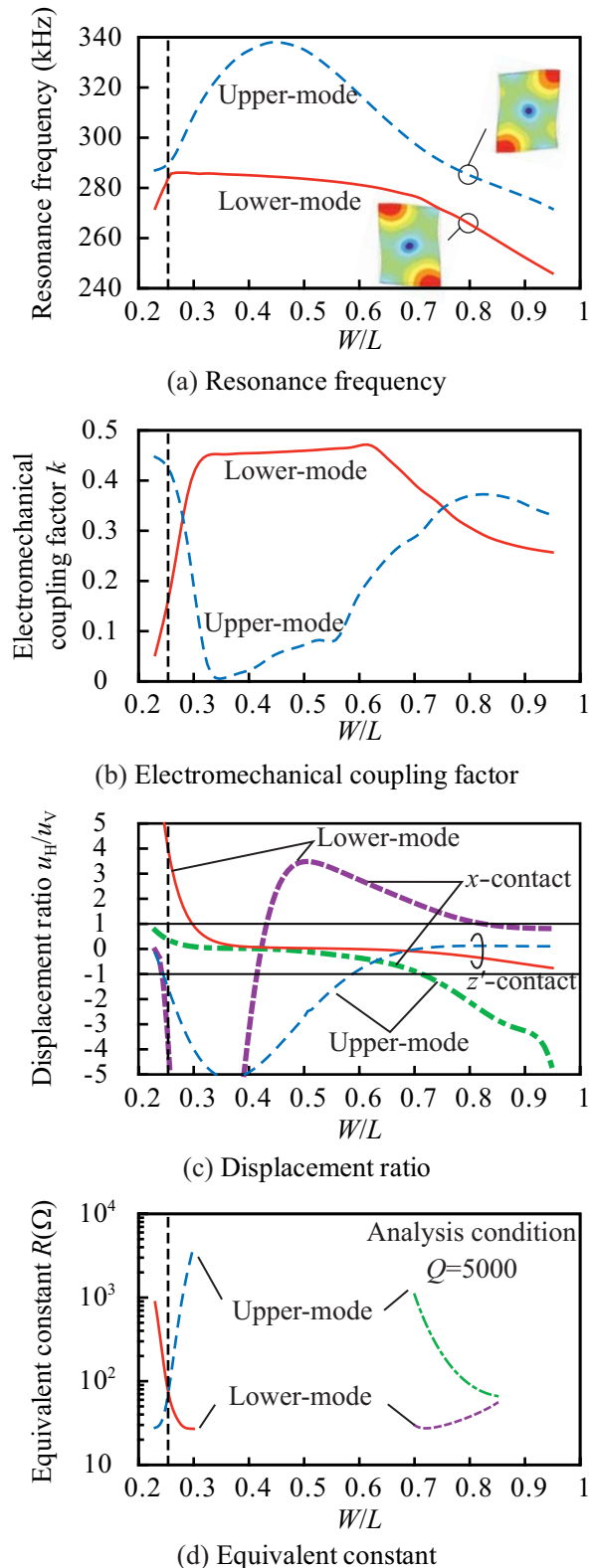


Fig.3 Analytical results for the dependency on W/L .

Fig.4(b)のような z' 面接触はもちろん、Fig.4(c)のような x 面接触によるモータ動作も見込まれる。

これまでモータとして評価してきた $W/L=0.25$ 付近では同じ駆動電圧で反転動作させるために必要な条件であるUpper-modeとLower-modeの駆動インピーダンスが一致しており、加えてこの辺比における駆動点の変位比が両モードで逆極性であることから反転動作することを表している。ただし回転特性に影響する電気機械結合

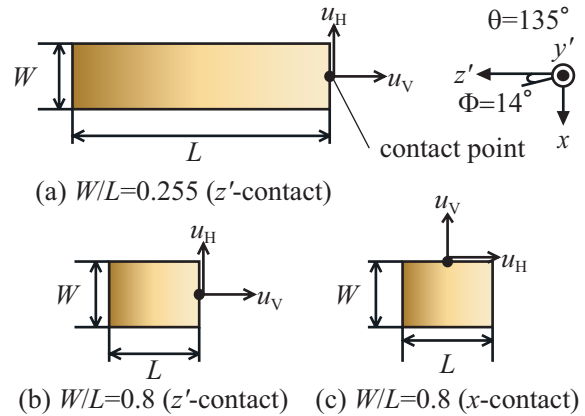


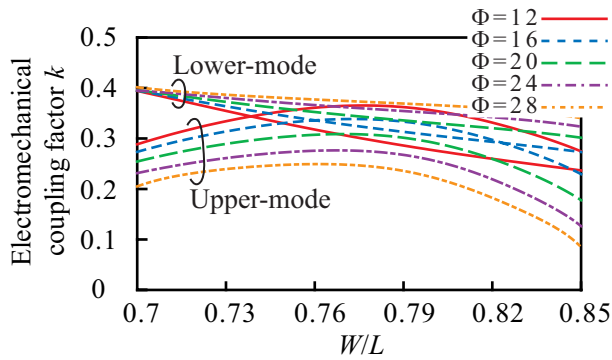
Fig.4 Major inspected shapes for the stator vibrator.

係数はUpper-modeとLower-modeで大きく異なっている。これに対して $W/L=0.7$ 付近では広い範囲でモード結合しており、Upper-modeとLower-modeの共振周波数も離れているため、モータとして制御性がよさそうである。またUpper-modeとLower-modeの電気機械結合係数も交点を持ち、 $W/L=0.255$ に比べて傾きが小さいため多少の辺比変更においてもUpper-modeとLower-modeの電気機械結合係数に大きな差は生じない。 z' 面接触、 x 面接触どちらも駆動点の変位比も逆極性であり、特に x 面接触はUpper-modeとLower-modeのバランスが良いことからモータの特性改善と小型化を実現できる振動子形状と期待できる。ただしUpper-modeとLower-modeの駆動インピーダンスが大きく異なることから高インピーダンス側の駆動は困難になるという問題がある。

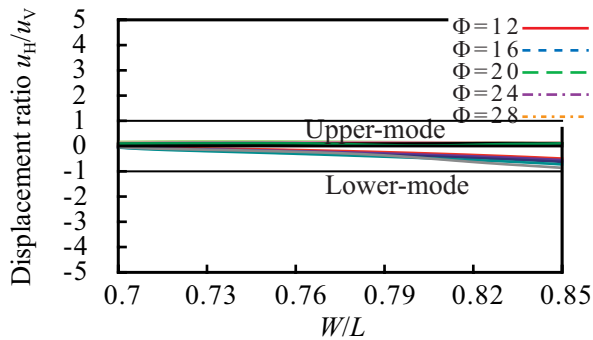
部分電極の除去による手法^[5]を用いずに、すなわちインピーダンスを低下させずに電気機械結合係数を一致させることは困難であるため、あらかじめ電気機械結合係数が一致している $W/L=0.7$ 付近において、 z' 面接触でモータ動作させるために駆動点変位の垂直成分の強化と駆動インピーダンスの均等化を試みる。

3.2 諸定数の Φ 依存性

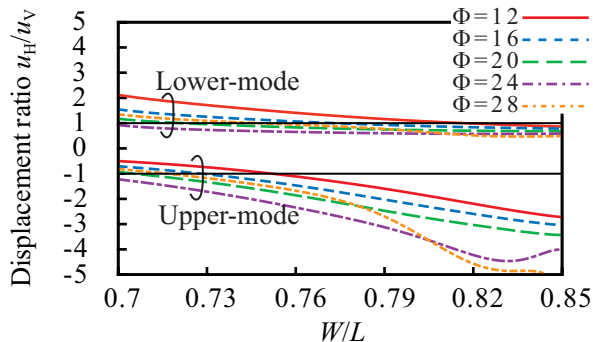
Fig.2のモード結合に寄与するコンプライアンスの Φ 依存性より、 $\Phi=12^\circ$ から 30° 付近でモータ利用に適した強い結合が期待される。そこで第二結晶カット角を回転させたときの電気機械結合係数、変位比、駆動インピーダンスをFig.5に示す。駆動インピーダンスは第二結晶カット角を回転させてもほぼ同じ傾向で変化し、 $\Phi=20^\circ$ まではUpper-modeとLower-modeで交点を持つ。またUpper-modeとLower-modeの電気機械結合係数の交点は第二結晶カット角を回転させると辺比の大きい方へ移行し、駆動インピーダンスの交点の辺比に近づくため $\Phi=14^\circ$ より大きく、 $\Phi=20^\circ$ を超えるとUpper-modeとLower-modeの電気機械結合係数が一致しない



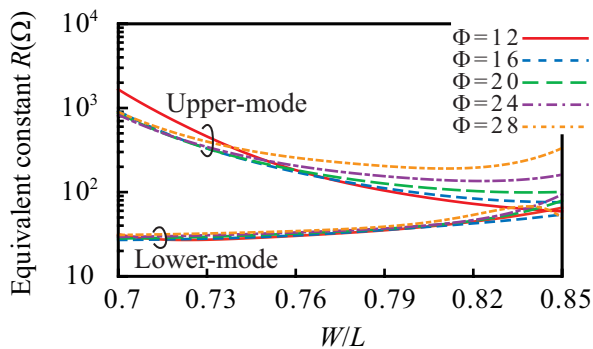
(a) Electromechanical coupling factor



(b) Displacement ratio (z' -contact)



(c) Displacement ratio (x -contact)



(d) Equivalent constant

Fig.5 Analytical results for the dependency on Φ .

ことから、第二結晶カット角の適当な範囲は決定される。駆動点の振動変位比は第二結晶カット角回転による影響が小さく、 z' 面接触の垂直成分の強化にはつながらなかった。

4. モータの試作と評価

4.1 振動子サンプルと支持構成

解析結果から $W/L=0.85$ 付近で Upper-mode と Lower-mode の駆動インピーダンスが一致することが確認できた。実際に振動子長を削減した

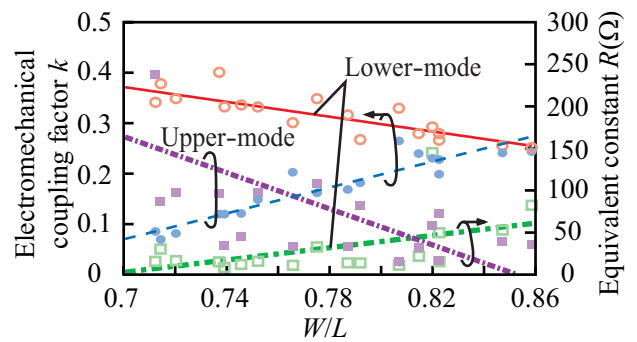
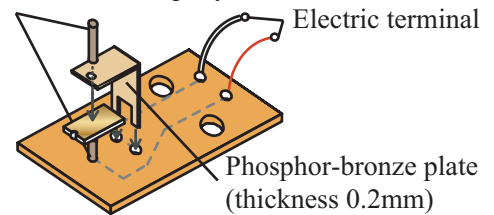


Fig.6 Experimental results for the dependency on W/L

Metal pin of 0.5mm diameter adhered to LiNbO₃ with conductive epoxy



LiNbO₃ vibrator ($\theta=135^\circ$, $\Phi=14^\circ$) with Cr+Au evaporated electrode

Zirconia ball ($\phi 0.5$ mm) at the contact point

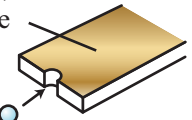


Fig.7 Composition of the stator vibrator.

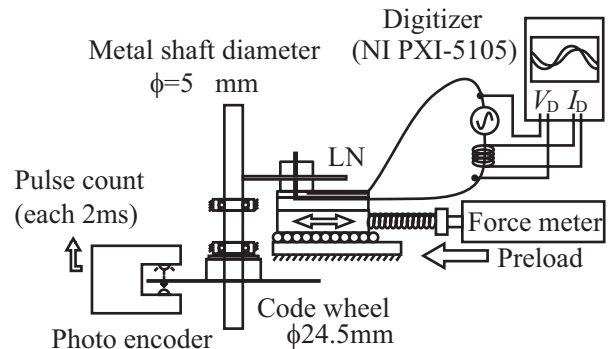


Fig.8 Measurement system.

ときの小信号無負荷等価回路定数をインピーダンスアナライザを用いて測定した。Fig.6にそれぞれの辺比における電気機械結合係数と駆動インピーダンスを示す。Upper-mode と Lower-mode の電気機械結合係数は近似線において Fig.3(b) に示した解析結果よりも辺比の大きい部分で交点を持ち、各測定点のばらつきも小さい。駆動インピーダンスは近似線において Fig.3(d) に示した解析結果とほぼ同じ傾向が得られたが、特に Upper-mode のばらつきが大きい。比較的小型サンプルであるため、支持中点のずれや加工時の精度等の影響が大きいと思われる。

回転特性測定では駆動インピーダンスが一致した $W/L=0.822$ ($2.55 \times 0.5 \times 3.10$ mm) を用いてステータ振動子を作成した。作成したステータ振動子の構成を Fig.7 に示す。LiNbO₃ 振動子は $\pm Y'$ 面全面に Cr+Au 電極を蒸着し、振動子の固定

Table I Equivalent circuit constants.

Mode	$W/L=0.255$ ($2.55 \times 0.5 \times 10$)		$W/L=0.822$ ($2.55 \times 0.5 \times 3.10$) z' -contact		$W/L=0.822$ ($2.55 \times 0.5 \times 3.10$) x -contact	
	Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper
Q	1125	612	220.9	146.5	288.0	910.6
f_0 (kHz)	281.17	286.40	841.51	888.25	835.21	892.46
R (Ω)	335.6	348.8	121.4	784.8	764.7	907.7
L (mH)	213.6	118.6	5.1	20.6	42.0	147.4
C (pF)	1.50	2.60	7.05	1.56	0.87	0.22
Cd (pF)	30.2	30.3	100.6	96.2	10.5	10.4
kvn(%)	11.6	40.9	25.6	12.6	27.6	14.3

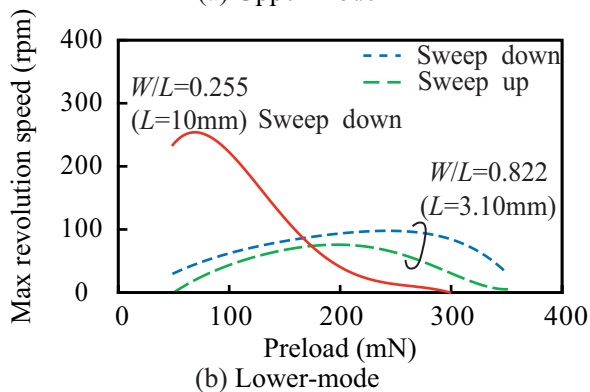
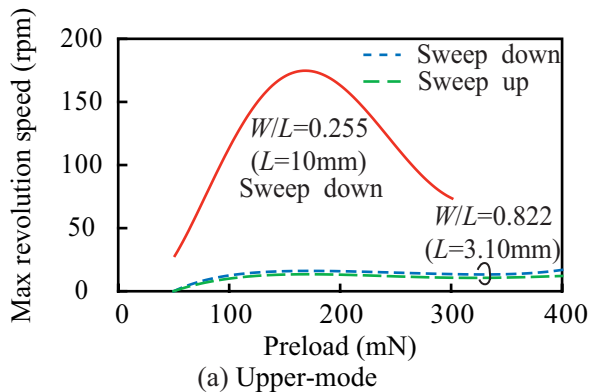


Fig.9 Maximum revolution speed.

と給電を兼ねた構成として振動子の面中心部上下に金属ピンを導電性接着剤で取り付けしている。また耐磨耗性の改善による特性劣化を防ぐこととシャフト接触による電氣的短絡を防ぐために、直径 0.5mm のジルコニアボールを駆動点にアルミナ主剤の無機系接着剤で取り付けしている。Fig.8 にモータ特性の測定系を示す。シャフト径は 5mm の SUS440C 材を用いた。ステータ振動子はリニアステージ上に固定され、フォースメーターで与圧量を確認しながらステージを押してシャフトに接触される。

4.2 辺比比較と回転特性測定

Table I にステータ振動子の小信号無負荷等価回路定数をこれまで検討してきた $W/L=0.255$ と比較して示す。これまでの振動子と比べて約 1/3 振動子サイズが小さいため、振動子の上下接着面、金属ピンと導電性接着剤、特に導電性接着剤の回り込みによる拘束面積の比が大きくなり、 Q 値の低下や駆動インピーダンスの増加

が見られるが、Upper-mode と Lower-mode の共振周波数が離れることでモータとしての制御性は確保でき、電気機械結合係数においてもより近づく結果が得られた。

次に同じ駆動電圧で駆動周波数を Sweep down、Sweep up させたときの各与圧量における最大回転数を $W/L=0.255$ と比較して Fig.9 に示す。 $W/L=0.255$ では Upper-mode と Lower-mode の最大回転速度が得られる与圧量に違いがあり、駆動周波数切替による回転特性の均等化が問題となっていた^[4]。新たに作成した $W/L=0.822$ の z' 面接触モータは与圧量に対する最大回転速度はほぼ一定であり、広い与圧範囲で駆動周波数切替による反転動作が確認できた。振動子の小型化に伴い、接触端面の駆動点振動変位が小さくなる事もあり、 $W/L=0.255$ より回転速度が低下している。Upper-mode と Lower-mode の駆動インピーダンスの違いから同じ駆動電圧において駆動インピーダンスの小さい Lower-mode でより大きな回転速度を得られた。しかしながら x 面接触モータについても測定を行ったが、こちらはシャフトの回転を確認することができなかった。

5. まとめ

振動モード結合を利用した定在波型単相駆動超音波モータについて、駆動インピーダンスの均等化を含めた振動子設計を行い、振動子長の削減による小信号無負荷等価回路定数から $W/L=0.83$ 付近で設計条件を満たし、モータ動作も確認できた。また第二結晶カット角による各定数の依存性からモータ利用に適したモード結合が得られる Φ が決定した。振動子の小型化により最大回転速度は低下したが、これまでより広い与圧範囲でのモータ動作が可能であり、与圧量に依存しない回転特性が得られた。今後ステータ振動子作成時の支持や加工精度により特性改善が見込まれる。

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] H. Tamura *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 46, 7B pp.4698-4703, 2007
- [2] H. Tamura *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 47, No.5 pp.4015-4020, 2008
- [3] H. Tamura *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 47, No.5 pp.4034-4040, 2008
- [4] 石崎、田村 他, H20 日本音響学会講演論文集, pp.1347-1350, 2008
- [5] 田中、田村 他, H21 日本音響学会講演論文集, pp.1331-1334, 2009
- [6] J. Kushibiki *et al.*, IEEE Trans. UFFC., Vol.46, No.5, pp.1315-1323, 1999