

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月13日現在

機関番号：31302
 研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22560340
 研究課題名（和文） エバネセント波超音波振動を用いた新しい液面レベル精密センシング手法の開発
 研究課題名（英文） Liquid-Level Sensing Utilizing Evanescent Waves Created in Piezoelectric Vibrators Operating in Trapped-Energy Modes
 研究代表者
 山田 顕 (YAMADA KEN)
 東北学院大学・工学部電子工学科・教授
 研究者番号：80134021

研究成果の概要（和文）：従来困難であった数百 μm から数 mm 程度の微小液面レベル変動の検知を目的に、エネルギー閉じ込め振動モードで動作する圧電振動子のエバネセント波領域を巧みに利用した新しい液面レベル精密センシング手法を提案し、その有効性を実験により確かめた。利用する閉じ込め振動の種類や振動モードの次数による検知特性の違いを実験的に明らかにするとともに、センサの電氣的等価回路モデルを構築し、数値シミュレーションによっても検証した。

研究成果の概要（英文）：The measurement of liquid level on the millimeter scale or less has become an important subject in biological and chemical fields. As an alternative to the well-known pulse-echo method, we have presented a new technique that employs a piezoelectric thickness vibrator operating in a trapped-energy mode for detecting a small-scale variation in liquid level. The variation in the electric conductance G with the liquid level has been observed by experiments and also by theoretical analysis using an equivalent-network model, and the feasibility of the sensing device is confirmed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：超音波工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：超音波センサ、エバネセント波、エネルギー閉じ込め振動子、液面レベル計測

1. 研究開始当初の背景

医用工学やバイオテクノロジーなどの分野において微量少量の精密制御技術が求められている。これまで比較的大規模な液面レベルのセンシング、たとえば海水面レベルの測定（潮位計）や大形タンクあるいは小容器内の液量や液面レベルの計測には光や電磁波、超音波などさまざまな手法が用いられて

きた。なかでも超音波は電磁界の影響がなく、測定対象物の材質を選ばないなどの利点が多い。超音波による液面レベルの測定法としてパルス反射法がよく知られており、数 cm から数十 m の距離測定のための有効な手段として広く用いられている。しかし、この方法では送信パルス信号による受信信号のマスクングが生じるため、数百 μm から数 mm 程度

の微小レベル変動を検知することは困難である。これに対し本研究担当者は、エバネセント領域を有する圧電厚み振動のエネルギー閉じ込め現象を利用すれば微量な液量や微小液面レベル変動の精密計測が可能になるのではないかとこの着想を得た。これに基づき、新しい微小液面レベル精密計測手法の開発に着手した。エネルギー閉じ込め振動は電極の寸法のみ依存し、圧電板の周辺形状の影響を受けないことから、(a)高い共振尖鋭度(Q 値)をもつ厚み振動の共振特性が得られ、高感度である、(b)輪郭振動との結合に起因するスプリアス振動が生じない、(c)周辺部分を保持・固定しても主振動には影響を及ぼさず、センサの支持が容易である、などの特徴があり、小型で簡便かつ高感度な微小液面レベル・センサが実現できるものと期待される。

2. 研究の目的

薄い圧電板の両表面に電極を設け、その間に高周波電界を印加すると厚み振動が励振される。このとき、励振用の電極を限られた領域のみに塗布すると電極の部分のみに振動エネルギーが集中し、そこから離れるに従い振動振幅が指数関数的に減衰するエバネセント波なる「エネルギー閉じ込め振動モード」が形成される。図1に示すようにエネルギー閉じ込め振動モードで動作する圧電厚み共振子の周辺部分を徐々に液体に浸していくと、励振電極から液面までの距離 h 、すなわちエバネセント領域への液体の浸漬度に応じて振動エネルギーの液中への放射量が変わり、共振の Q 値などの電気的特性が変化する。エバネセント領域の形成距離範囲は数 mm 程度以下のため、これを利用すればごく近距離で精度の良い液面レベルの検知が可能になる。本研究では、センサとして使用する厚み振動のエネルギー閉じ込め型共振子の最適な設計・製作条件を明らかにする。さらに、センシング素子を作製し、液面レベルや液量の微小な変化を共振子の電気的特性の変化として捉える新しいセンシング手法を開発する。

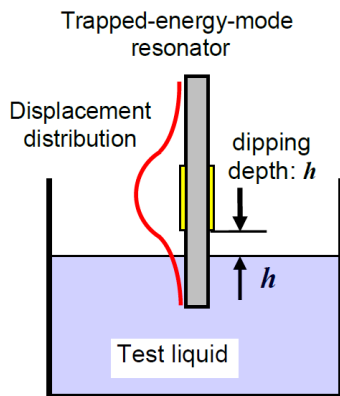


図1 微小液面レベルセンサの構成

3. 研究の方法

(1) エネルギー閉じ込め型センサの設計・製作と液中浸漬度に対する特性変化の実験的検証

通常の周波数低下型エネルギー閉じ込め振動子として図2(a)に示す厚み縦振動子と同図(b)に示す厚みすべり振動子を製作した。これらをセンサ素子として図1に示す微小液面レベルセンサを構成し、いくつかの液種についてセンサの液中浸漬深さに対する電気端子アドミタンス特性の変化を調べた。

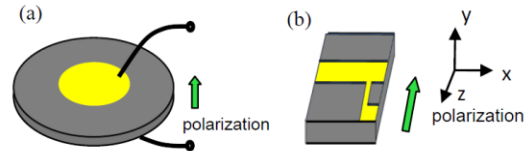


図2 周波数低下型エネルギー閉じ込め振動子

(2) 異なる形態のエネルギー閉じ込め振動の利用可能性の検討

エネルギー閉じ込めには周波数低下型と呼ばれる通常の形態の他に周波数上昇型と呼ばれる特別な形態のものがある。周波数上昇型は遮断周波数付近での分散特性が図3(a)のような「高域遮断型」となる厚み振動に適用されるもので、この場合には同図(b)のように圧電板周辺部にも電極を設け、これらを上下面短絡する必要がある。この閉じ込めは反共振点付近で良好な閉じ込め特性が得られるため、主に反共振を利用したセンシングに着目し、周波数低下型との比較を行った。

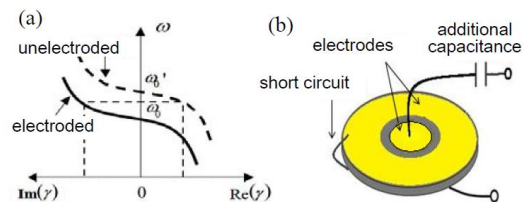


図3 (a) 高域遮断型の分散特性と (b) 周波数上昇型閉じ込め振動子の電極構成

(3) 閉じ込め振動の基本モードと非調和高次振動モードでのセンシング特性の差異について

図2(a)に示す周波数低下型閉じ込めで板厚に対する中央部の電極径を大きくしたとき、また図3(b)の周波数上昇型では中央と周辺の電極間にある無電極部分の幅を増やすと非調和振動モードが生じる。一例として板厚の8倍の電極径を持つ周波数低下型閉じ込め振動子の電気端子アドミタンス特性を図4に示す。基本モード共振のほか非調和高次振動の共振応答が見られる。両者はエ

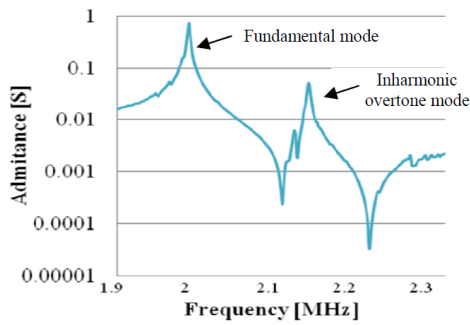


図4 非調和振動モードの生じている振動子の電気端子アドミタンス特性

バネセント領域の形成される距離範囲が異なるため、これがセンシング特性にどのような違いをもたらすかを調べた。

(4) センサの電気的等価回路の構築と特性評価への応用

本研究のセンサは液面レベルの微小変動すなわち機械的な負荷変動を圧電振動子の電気端子アドミタンスあるいはインピーダンスの変化として捉えることから、センサ全体を電気的な等価回路で表して解析することが望ましい。そこで、エネルギー閉じ込め振動子の動作を適切に表現可能な分布定数等価回路を用い、センサの等価回路表現を構築して特性のシミュレーションを行った。

(5) 有限要素法解析によるセンサの動作シミュレーションと放射音場の実験的評価

有限要素法解析によりセンサの動作シミュレーションを行った。また、センサから供試液体中へ放射される音場を実験により調べた。

4. 研究成果

(1) エネルギー閉じ込め型センサの設計・製作と液中浸漬度に対する特性変化の実験的検証

図2(a)に示すような厚み分極された直径30[mm]、厚さ1[mm]、電極径4[mm]のPZT系圧電セラミクス(NEPEC-6)を用いた厚み縦振動子、および図2(b)に示すような面内分極された幅6[mm]、長さ25[mm]、厚さ1[mm]、電極幅1.53[mm]の厚みすべり振動子(Fuji Ceramics C-3)を作製した。各共振子の共振周波数と Q 値は、それぞれ縦振動子では2.09[MHz]および約400、すべり振動子では1.21[MHz]および約600である。

図1に示すように共振子の一端を治具に固定して吊り下げ、反対側の下部を水、グリセリン、ひまし油、蜂蜜の各液体中に浸し、浸漬距離 h に対する電気端子アドミタンスの実数部であるコンダクタンス G 値の変化を計測した。 G 値の測定にはインピーダンス/

マテリアルアナライザ(Agilent E4991A)を、試料の上下移動にはパルスモーター・ステージを用いた。なお、振動子の Q 値はいずれも充分大きいので、 G 値の変化はほぼ Q 値の変化に対応している。

浸漬深さ h に対する G 値の変化を、厚み縦振動および厚みすべり振動についてそれぞれ図5および図6に示す。図の横軸0の位置は電極部と無電極部の境界に相当し、これより右方(数値が正)では液面レベルが電極部より遠ざかり、左方(数値が負)では液面レベルが電極部に及ぶことを示している。また、縦軸は G をその最大値 G_{max} で規格化したものである。厚み縦振動においては、何れの液種でも電極部と無電極部の境界の前後±2[mm]程度の部分で G 値がほぼ h に比例して大きく変化することがわかる。また、液種の粘度によって特性に変化が見られ、粘度が高くなるにつれ、 G/G_{max} の変化が大きくなっている。厚みすべり振動では、液面が周辺部分にある時から G 値が徐々に減少していく傾向がみられる。これらの結果から、感度は厚み縦振動の方が高いと言えよう。一方、厚みすべり振動の場合においては、長い距離にわたって変化が現れるという特徴がみられ、より広い範囲にわたる検知に適していることが分かった。

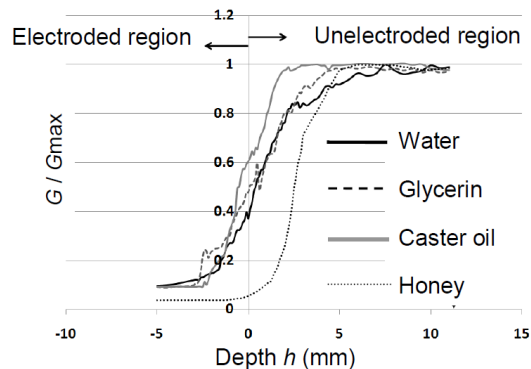


図5 浸漬深さ h に対する G 値の変化(厚み縦振動の場合)

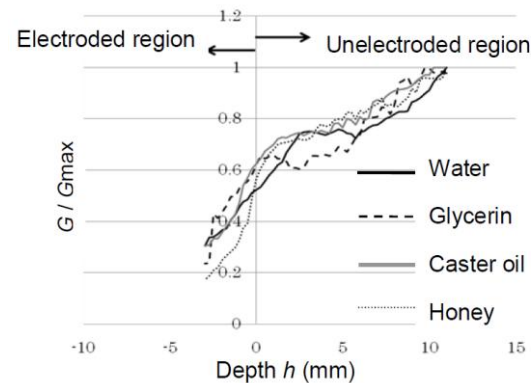


図6 浸漬深さ h に対する G 値の変化(厚みすべり振動の場合)

(2)異なる形態のエネルギー閉じ込め振動の利用可能性の検討

周波数上昇型エネルギー閉じ込め振動子として厚み分極された直径 30[mm]、厚さ 1[mm] の PbTiO_3 磁器板 (Fuji Ceramics M-6) を使用した。電極の構成は図 3 (b) に示すもので、中央の電極径が 6[mm]、無電極部の幅が 1[mm] の試料、及び中央の電極径が 4[mm]、無電極部の幅が 2[mm] の試料を作製した。各試料の反共振周波数と Q 値はそれぞれ電極内径 6[mm] のものでは 2.08[MHz] 及び約 64、電極内径 4[mm] のものでは 2.06[MHz] 及び約 458 である。実験の手法は図 1 と同じであるが、ここでは反共振周波数での電気端子インピーダンスの実数部 R の浸漬深さ h に対する変化を調べた。一例として電極内径 6[mm] の試料についての実験結果を図 7 に示す。ここでは周辺部短絡電極の内半径を h の基準点としている。周波数低下型の特性である図 5 と比べると、周波数上昇型の反共振での変化には粘性による大きな違いは観測されなかった。また、いずれも液種でも周辺領域で緩やかな変化、境界付近では急峻な変化を示しており、この特性の違いを利用すれば周辺領域では広い範囲での変化を、境界付近ではより高感度に変化を検知できると考えられる。

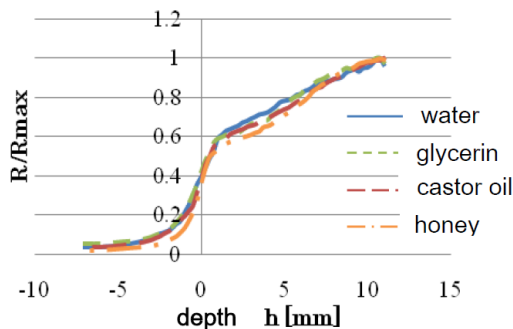


図 7 周波数上昇型閉じ込め振動子の反共振における R 値の浸漬深さ h に対する変化

(3)閉じ込め振動の基本モードと非調和高次振動モードでのセンシング特性の差異について

閉じ込めモードの非調和振動を発生しうる振動子として直径 30[mm]、厚さ 1[mm] の PZT 系圧電セラミクス (NEPEC-6) を使用し、図 2 (a) の中央の電極径を 8[mm] とした。この振動子の電気端子アドミタンス特性は図 4 のようであり、基本モードのほかに、これより高い周波数に非調和高次モードが生じていることがわかる。共振周波数と Q 値は、それぞれ基本モードで 1.99 [MHz] および約 663、高次モードで 2.13 [MHz] および約 837 である。図 4 に示すように閉じ込め型振動子上端を保持し、パルスモーター・ステージを用いて振動子を粘性の異なる液体 (水、グリセリン、ひまし油、はちみつ) に挿入して浸入の深さ h

(電極端部から液面までの距離) に対する共振周波数でのアドミタンスの実数部 G の変化をインピーダンス/マテリアル・アナライザで計測した。基本モードでの変化および非調和高次モードでの計測結果をそれぞれ図の 8 および 9 に示す。基本モードでは周辺領域において G 値がわずかではあるが徐々に大きくなり、境界付近において急峻な変化を示した。これは高次モードが発生しない振動子での結果と同様の傾向を示しており、周波数低下型の基本モードを利用した場合は境界付近において急峻な変化を示すことが分かった。一方、高次モードでは周辺領域と境界付近においてそれぞれ異なる変化を示した。周辺領域では液面レベルが比較的低いところから G 値が徐々に減少し、境界付近において大きな変化が見られた。このように両モードではセンシング特性が異なることが確認された。

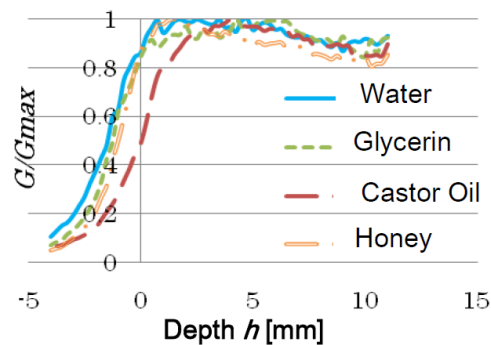


図 8 基本振動モードでの G 値の変化

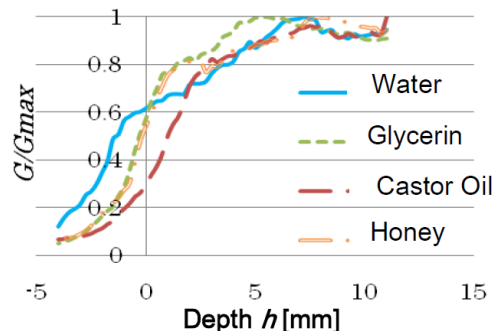


図 9 非調和高次振動モードでの G 値の変化

(4)センサの電氣的等価回路の構築と特性評価への応用

板に沿った方向への圧電厚み振動モードの伝搬を表す分布定数等価回路表示を用いると、周波数低下型の閉じ込めを用いたセンサは図 10 に示すような形に書き表すことができると考えられる。液体中に挿入される無電極部分は無限に長いものとし、対応する特性インピーダンス Z_{0D} で終端している。この等価回路表示では線路の特性インピーダンスが周波数によって変わり、エネルギー閉じ

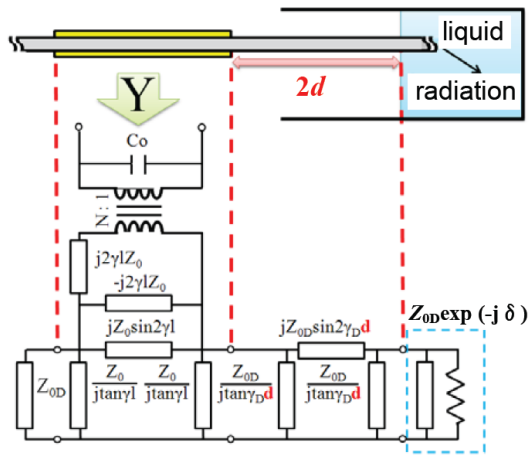


図 10 センサの分布定数等価回路表示

込めが起こる周波数領域で Z_{0D} は虚数値をとるが、ここには液中への音響放射の効果を取り込むよう Z_{0D} に位相角(- δ)を与えている。また、電極端から液面までの区間は長さ $2d$ の線路(無電極部分)で表現し(前章までの表記 h が本章での $2d$ に対応することに注意)、板厚 $2H$ との比 d/H を変えることで電極端部から液面までの距離(浸漬の深さ)を変化させた。閉じ込めモードの厚み縦振動子として厚さ $2H=1[\text{mm}]$ の PZT 系圧電セラミクス(NEPEC-6)を想定し、中央の閉じ込め部分の電極幅 $2l=3[\text{mm}]$ で、奥行方向には変化がないものとした。図 10 の等価回路モデルでは振動子の損失を考慮するため、電気端子に少量の抵抗を付加した(Q 値に換算して約 750)。一例として $\delta=1$ とした場合の d/H に対する共振周波数での G 値変化の計算結果を図 11 に示す。横軸は基準化周波数 $\Omega(=\omega H/v_l)$ で、縦軸は基準化コンダクタンス $G/(v_l C_0/H)$ である(v_l : 縦波速度、 C_0 : 制動容量)。 d/H が 3.0 から 0.2 まで変化するのに従い G 値が低下する様子が数値解析でも示されている。液中への浸漬深さに対する基準化コンダクタンスの変化を図 12 に示す。ここで実験結果は試料が蜂蜜の場合で、計算では $\delta=1$ とした。両者には類似した変化の傾向が見られている。

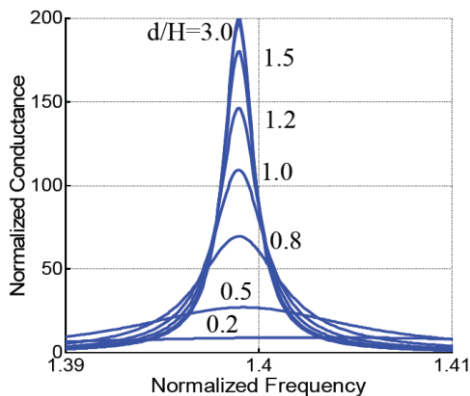


図 11 浸漬深さによる G 特性の変化

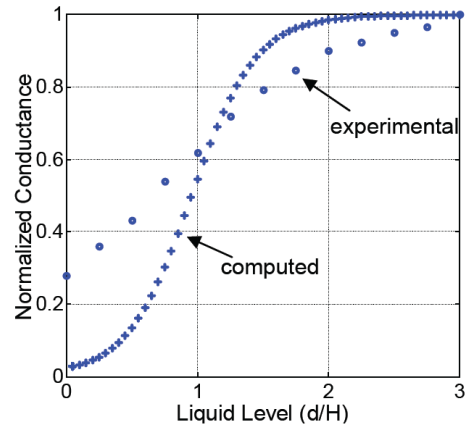


図 12 液面レベルによる G 値の変化

(5) 有限要素法解析によるセンサの動作シミュレーションと放射音場の実験的評価

有限要素法解析によりセンサの動作シミュレーションを行ったところ、実験結果とほぼ同様の解析結果が得られた。また、センサから供試液体中へ放射される音場をハイドロホンにより調べた結果、閉じ込め振動の変位分布に対応する音場分布が確認された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 19 件)

- ① Ken Yamada, Tatsuya Koyama, and Shuichi Seto, Equivalent Network Representation for a Liquid-Level Sensor Operating in Trapped-Energy-Mode Thickness Vibration, Japanese Journal of Applied Physics, 51, 2012, 07GC04-1-2, 査読有, DOI:10.1143/JJAP.51.07GC04
- ② Ken Yamada, Taku Abe, Seiya Kudo, Ryo Ishizuka, and Takahiro Oba, Simulation of Liquid-Level Sensors Operating in Trapped-Energy Vibration Modes by Finite Element Method, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, 33, 2012, pp.63-64, 査読無 URL: <http://www.use-jp.org>
- ③ 山田顕、菅野浩史、瀬戸秀一、周波数上昇型エネルギー閉じ込めを利用した液面レベルセンサの等価回路解析、日本音響学会講演論文集、2012-9、pp.1417-1418、査読無 URL: <http://www.asj.gr.jp/>
- ④ Ken Yamada, Tatsuya Koyama, and Shuichi Seto, Equivalent Network Representation of a Liquid-Level Sensor Operating in a Trapped-Energy-Mode Thickness Vibration, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, 32, 2011, pp.369-370, 査読無 URL: <http://www.use-jp.org>

- ⑤ Ken Yamada, Shuichi Seto, and Shuhei Horiuchi, Use of Inharmonic Modes of Trapped-Energy Resonators for Liquid-Level Sensing, 2011 IEEE International Ultrasonic Symposium Proceedings, 2011, pp.1522-1524, 査読無
DOI:10.1109/ULTSYM.2011.0377
- ⑥ 山田顕、小山達也、瀬戸秀一、エネルギー閉じ込め型圧電振動子を用いた液面レベルセンシングの等価回路解析による検討、日本音響学会講演論文集、2011-9、pp.1319-1320、査読無
URL: <http://www.asj.gr.jp/>
- ⑦ 瀬戸秀一、山田顕、圧電厚み振動のエネルギー閉じ込めモードを利用した微小液面レベル変化の検知について、東北学院大学環境防災研究所紀要、22、2011、pp.26-37、査読無
URL: <http://www.lib.tohoku-gakuin.ac.jp/>
- ⑧ Shuichi Seto, S. Horiuchi, and Ken Yamada, Use of Trapped-Energy Mode of Backward-Wave-Type Thickness Vibration for Liquid-Level Sensing, Japanese Journal of Applied Physics, 49, 2010, 07HC05-1 – 2, 査読有, DOI:10.1143/JJAP.49.07HC05
- ⑨ Shuichi Seto, S. Horiuchi, and Ken Yamada, Liquid-Level Sensing Using Inharmonic Modes of Trapped-Energy Resonators, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, 31, 2010, pp.183-184, 査読無
URL: <http://www.use-jp.org>
- ⑩ Ken Yamada, and Shuichi Seto, Liquid-Level Sensing by Trapped-Energy Mode of Backward-Wave-Type Thickness Vibration, 2010 IEEE International Ultrasonic Symposium Proceedings, 2010, pp.1439-1441, 査読無
DOI:10.1109/ULTSYM.2010.0365
- ⑪ 瀬戸秀一、山田顕、周波数上昇型エネルギー閉じ込めの非調和振動による液面レベルセンシング特性について、日本音響学会講演論文集、2010-9、pp.1217-1218、査読無
URL: <http://www.asj.gr.jp/>
- ⑫ 堀内修平、瀬戸秀一、山田顕、エネルギー閉じ込めモードの非調和振動の利用による液面レベル・センシング特性の変化、日本音響学会講演論文集、2010-3、pp.1335-1336、査読無
URL: <http://www.asj.gr.jp/>
- ⑬ 山田顕、エネルギー閉じ込め型圧電共振子を用いた微小液面レベル変化の検知、計測と制御、第49巻、第1号、2010、pp.10-13、査読無
URL: <http://www.sice.or.jp/>
- ⑭ 山田顕、エネルギー閉じ込めモード厚み振動を利用した微小液面レベル変化の検

知、超音波 THCHNO、2010.1-2、2010、pp.90-92、査読無
URL: <http://www.nikko-pb.co.jp>

[学会発表] (計 14 件)

- ① Ken Yamada, Modeling and Analysis of a Liquid-Level Sensor Utilizing an Evanescent Field of a Trapped-Energy Vibrator, 2013 Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium, 22-23 July, 2013, Prague (Czech Republic)
- ② Ken Yamada, Simulation of Liquid-Level Sensors Operating in Trapped-Energy Vibration Modes by Finite Element Method, 33rd Symposium on Ultrasonic Electronics, 13 November, 2012、千葉大学 (千葉市)
- ③ 山田顕、周波数上昇型エネルギー閉じ込めを利用した液面レベルセンサの等価回路解析、日本音響学会秋季研究発表会、2012年9月20日、信州大学 (長野市)
- ④ Ken Yamada, Equivalent Network Representation of a Liquid-Level Sensor Operating in a Trapped-Energy-Mode Thickness Vibration, 32nd Symposium on Ultrasonic Electronics, 10 November, 2011、京都大学 (京都市)
- ⑤ Ken Yamada, Use of Inharmonic Modes of Trapped-Energy Resonators for Liquid-Level Sensing, 2011 IEEE International Ultrasonic Symposium, 20 October, 2011, Orlando, FL (USA)
- ⑥ 山田顕、エネルギー閉じ込め型圧電振動子を用いた液面レベルセンシングの等価回路解析による検討、日本音響学会秋季研究発表会、2011年9月21日、島根大学 (松江市)
- ⑦ Ken Yamada, Liquid-Level Sensing Using Inharmonic Modes of Trapped-Energy Resonators, 31st Symposium on Ultrasonic Electronics, 6 December, 2010、明治大学 (東京都)
- ⑧ Ken Yamada, Liquid-Level Sensing by Trapped-Energy Mode of Backward-Wave-Type Thickness Vibration, 2010 IEEE International Ultrasonic Symposium, 12 October, 2010, San Diego, CA (USA)
- ⑨ 山田顕、周波数上昇型エネルギー閉じ込めの非調和振動による液面レベルセンシング特性について、日本音響学会秋季研究発表会、2010年9月14日、関西大学 (吹田市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 顕 (YAMADA KEN)

東北学院大学・工学部電子工学科・教授
研究者番号：80134021