

平成 30 年 5 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14108

研究課題名(和文)音響共鳴現象を利用した高感度環境モニタリング手法の創出

研究課題名(英文)Creation of a Technique for Sensitively Monitoring Outer Environment Utilizing Acoustic Resonance Phenomenon

研究代表者

燈明 泰成(Hironori, Tohmyoh)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50374955

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：薄層で反射する音波の反射率が周波数依存性を示すことを利用して薄層と接する外環境の音響インピーダンスを高精度に測定する手法を提案した。さらにこれを活用して、外環境である気体や液体の温度や圧力の変化が敏感に検知できることを実証した。薄層を有する音響共鳴反射板を試作して水や空気と反射板との界面からの反射波形を収録し、得られた波形の周波数特性が外環境の温度に対して敏感に変化することを確認した。また気体の圧力変化もモニタリングできる可能性を示した。最後に高感度環境モニタリングセンサを試作してその有用性を確認した。

研究成果の概要(英文)：With utilizing the frequency dependence of the reflection coefficient of sound reflected at a thin layer, a technique to accurately determine the acoustic impedance of the outer environment contacted with the layer has been proposed. Furthermore, it has been verified that the changes in the temperature or the pressure of the outer environment such as the liquid or gas are sensitively detected by the proposed technique. The reflection plate having thin layer for observing the acoustic resonance phenomenon at the plate/outer environment interface was fabricated, and the frequency characteristics of the echo reflected at the plate/outer environment interface were confirmed to be sensitively changed depending on the temperature of the outer environment. The pressure of gas was also considered to be sensitively monitored by the proposed technique. Finally, a sensor for sensitively monitoring the outer environment was fabricated, and its usefulness was confirmed.

研究分野：機械材料・材料力学

キーワード：音響共鳴現象 環境モニタリング 気体種別 温度 圧力

1. 研究開始当初の背景

安全・安心で快適な社会を構築する上で、外環境の様々な因子をモニタリングすることが欠かせない。例えばモニタリングすべき因子は、環境中の気体種別、温度、圧力、等、様々であり、通常、それらは目的に応じた専用のセンサを用いて検出される。

研究代表者らはこれまで、音響共鳴現象を利用した材料評価手法を開拓してきた。例えば異なる温度の熱源と接触させた高分子フィルムをガラス板に吸着して音響共鳴現象を観察することによりフィルムの結晶化過程を捉えることに成功している。異なる物質の界面に音波を入射した際、一部は反射し、残りは透過するが、その度合いは物質固有の音響インピーダンス（密度と音速の積）で決定される。ここで物質の界面に薄層が挿入された場合、界面における反射の程度は物質の音響インピーダンスのみでは決まらず、音波の周波数に依存する。特に入射する音波の波長が薄層の厚さの1/4に一致する時、反射率は最小に、透過率は最大となる（音響共鳴現象）。

最近、反射板／フィルム／気体界面における音響共鳴現象を観察したところ、当該界面における反射率が気体の音響インピーダンスの値に極めて敏感であることを発見した。この知見に基づき、気体種別、温度や圧力なる外環境の異なる因子を同一のセンサにて高感度にモニタリングできると着想した。

2. 研究の目的

本研究は反射板、薄膜、外環境からなる音波伝達系で観察される音響共鳴現象において、共鳴周波数における音波の反射率が外環境の音響インピーダンスの変化に極めて敏感であることを利用し、外環境の気体種別、温度、あるいは圧力を高感度にモニタリングする新しい環境モニタリング手法を創出することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究計画は6項目に大別される。(1)音響共鳴現象の理論モデル構築、では、反射板裏面の薄層と外環境とが接した状態において、反射板裏面で反射したエコーを再びセンサで受信する問題を取り扱い、環境モニタリングに必要な理論を構築する。(2)音響共鳴反射板の試作、では実際に反射板の裏面に薄層を形成して音響共鳴現象の観察に適した音響共鳴反射板を試作する。(3)気体種類判別の試み、では観察した音響共鳴現象から気体の種類が判別できるか否かを検証する。(4)温度変化モニタリングの試み、では気体の音響インピーダンスが音速に関連し、また音速が温度に依存することを利用して、観察した音響共鳴現象から温度変化がモニタリングできるか否かを検証する。(5)圧力変化モニタリングの試み、では音響インピーダンスが気体の圧力に関連することを利用して、観察した音響共鳴現象から圧力変化がモニタリングできるか否かを

検証する。最終的に(6)高感度環境モニタリングセンサを試作してその有用性を検証する。

4. 研究成果

(1)音響共鳴現象の理論モデル構築

薄膜を介した鋼板への超音波伝達を取り扱い、鋼板裏面からのエコー波形を平面波理論より予測したところ、実験により得た波形と予測したそれとは良く一致した(図1)。この知見を基に、反射板裏面の薄層と外環境とが接した状態において、反射板の表面から水を介して広帯域超音波センサにより超音波を送信し、反射板裏面で反射した裏面エコーを再びセンサで受信する超音波伝達系を取り扱い(図2)、薄層の厚みが送信する超音波の波長に対して十分薄い場合には反射板／薄層／外環境界面における音波の反射率が周波数依存性を示すことを考慮し、当該裏面エコーの周波数スペクトルと位相スペクトルとを算出する理論モデルを構築した。さらに薄層がある場合とない場合の裏面エコーの周波数成分の変化から未知数である外環境の音響インピーダンスを算出可能にした。

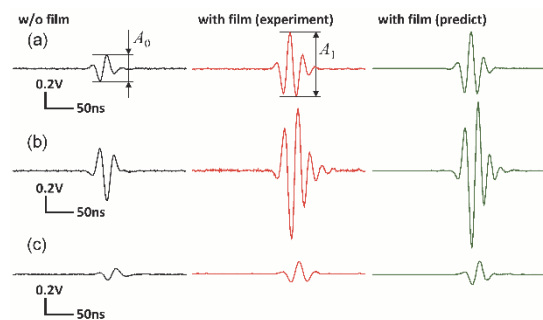


図1 薄膜を介して受信した超音波波形：(a) AISI304板, 非集束音波, (b) AISI304板, 集束音波, (c) S50C板, 非集束音波 (Reprinted with permission from Jpn. J. Appl. Phys., 55, 078001, 2016, Copyright (2016), The Japan Society of Applied Physics)

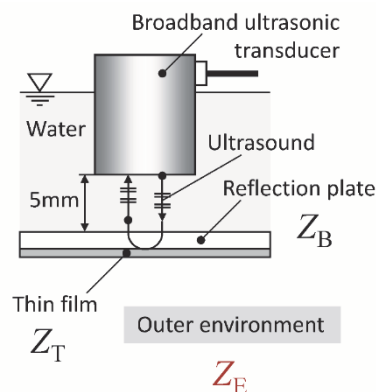


図2 外環境の音響インピーダンスを算出するための超音波伝達モデル

(2)音響共鳴反射板の試作

半導体製造プロセスで使用されるレジストを薄層の材質とし、シリコン基板にレジスト膜を形成して音響共鳴反射板を試作した(図

3)。共鳴周波数が膜厚に依存することを考慮して様々な膜厚のレジスト膜を形成してその音響物性値を計測し(表1)、最終的に実験に使用する超音波探触子に適した膜厚で、レジスト膜の音響インピーダンスが比較的大きな音響共鳴反射板を選定した。

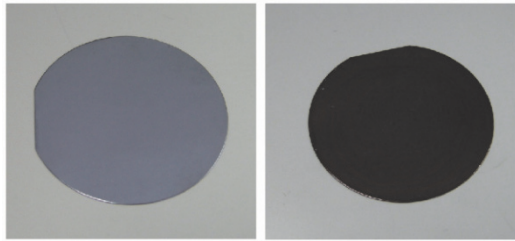


図3 シリコン基板(左)にレジスト膜を形成した音響共鳴反射板(右)

表1 様々な加熱温度(temp.)で試作した音響共鳴反射板のレジスト膜の共鳴周波数( $f_R$ )と音響インピーダンス( $Z_T$ )

temp. (°C)	$f_R$ (MHz)	$Z_T$ (MN m <sup>-3</sup> s)
110	72.1 ± 0.2	3.27 ± 0.01
200	75.7 ± 0.3	3.47 ± 0.02

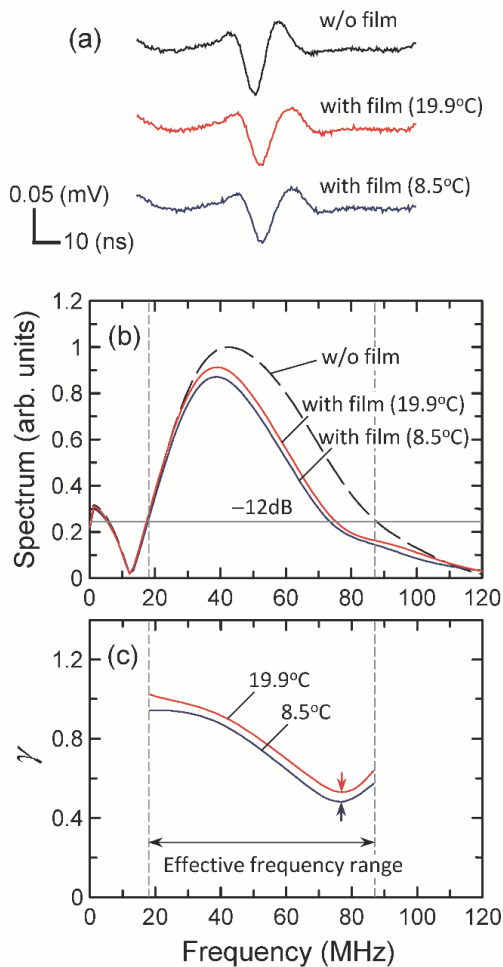


図4 異なる温度の水を外環境とした実験：(a)受信波形、(b)振幅スペクトル、(c)振幅スペクトル比

### (3) 気体種類判別の試み

気体の音響インピーダンスが密度に関連することを利用して気体の種類を判別するため、裏面の外環境を空気として音響共鳴現象を観察したところ、振幅スペクトル比は共鳴周波数近傍において敏感に変化した。これは空気の温度変化に起因したものと推察され、本手法により極めて高感度に気体の状態変化が検出できる可能性を示した。より定量的に温度変化を与えやすい水を外環境とし、温度( $T_E$ )が異なる水を外環境として反射板からの裏面エコーを収録したところ、波形の周波数成分は大いに変化した(図4)。振幅スペクトル比の最小値( $\gamma_R$ )と理論モデルより音響インピーダンス( $Z_E$ )を算出したところ(表2)、その値は10~30°Cの範囲の温度変化に対して明瞭に変化した(図5)。以上の知見を踏まえて、外環境を様々な気体として実施する検証実験のための実験系を構築した。

表2 振幅スペクトル比の最小値( $\gamma_R$ )から算出した水の音響インピーダンス( $Z_E$ )の例

$T_E$ (°C)	$\gamma_R$	$Z_E$ (MN m <sup>-3</sup> s)
8.5	0.481 ± 0.010	1.40 ± 0.02
19.9	0.509 ± 0.004	1.48 ± 0.02

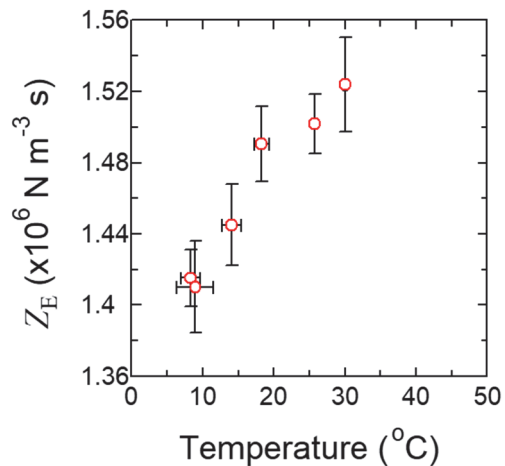


図5 算出した水の音響インピーダンスと水温の関係

### (4) 温度変化モニタリングの試み

気体の音響インピーダンスが音速に関連すること、また気体の音速が温度に依存することを利用して、観察した音響共鳴現象から外環境である空気の温度変化がモニタリングできるか否かを検証した。反射板を内蔵した超音波モニタリング用治具を、温度制御機構を有するホットプレート上に配置し、ホットプレートの温度( $T_H$ )を制御して昇温しながら連続的に反射板裏面エコーを収録した。収録した裏面エコー波形を周波数解析して得た振幅スペクトルより振幅スペクトル比の最小値( $\gamma_R$ )を算出したところ、その値は反射板近傍で実測した空気の温度( $T_E$ )の上昇と共に明瞭に上昇し(表3)、これより本手法により環境温度がモニタリングできる可能性を見出した。

表3 空気の温度( $T_E$ )と振幅スペクトル比の最小値( $\gamma_R$ )との関係

$T_H$ (°C)	$T_E$ (°C)	$\gamma_R$
20	19.4	$0.60 \pm 0.01$
30	29.0	$0.64 \pm 0.01$
40	36.4	$0.65 \pm 0.01$
50	43.1	$0.70 \pm 0.01$
60	50.1	$0.72 \pm 0.02$
70	58.1	$0.71 \pm 0.01$

(5) 圧力変化モニタリングの試み

音響インピーダンスが気体の圧力に関連することを利用して(図6)、観察した振幅スペクトル比の変化から圧力変化がモニタリングできるか否かを検証した。ボイル・シャルルの法則より圧力変化に伴う温度変化を理論的に算出し、先の空気の温度モニタリングにおける振幅スペクトル比の変化率より圧力変化を試算したところ、本手法により空気の圧力変化を振幅スペクトル比の変化としてモニタリングできる可能性を見出した。

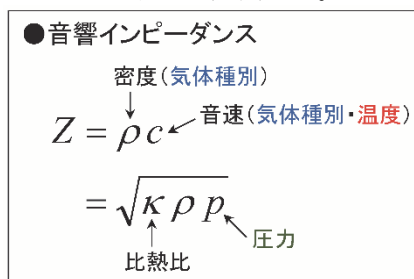


図6 気体の音響インピーダンスに影響を及ぼす様々な因子

(6) 高感度環境モニタリングセンサの提案

これまでの成果を集約し、液体や気体の高感度な環境モニタリングを実現する新しいセンサを試作した(図7)。超音波の送受信には小型の圧電素子を利用し、これをケースに内蔵、ケースの前面には圧電素子の周波数特性に合わせて薄膜を成膜した反射板を配置した。圧電素子と反射板の間は水等の音響媒体を空気の混入なく満たせる構造とした。実際に試作したセンサにより異なる温度の水、および空気の振幅スペクトル比を観察したところ、振幅スペクトル比の値は水や空気の温度変化に伴い敏感に変化し、当該センサにより液体や気体の高感度環境モニタリングが可能であることを確認した。

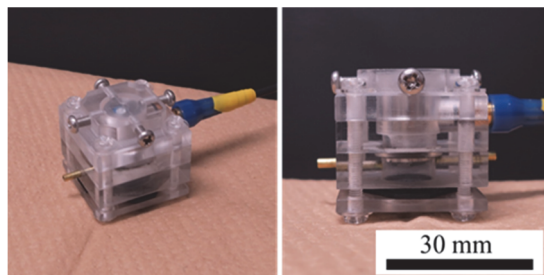


図7 試作した高感度環境モニタリングセンサの外観

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)

[学会発表] (計7件)

1. 寺嶋脩, 燈明泰成, 超音波による水温測定のための反射板の作製について, 日本非破壊検査協会 平成29年度 秋季講演大会, 2017年10月5日, 福岡国際会議場(福岡市).
2. 燈明泰成, 寺嶋脩, 音響共鳴を利用した液体温度の測定について, 日本機械学会 2017年度年次大会, 2017年9月5日, 埼玉大学(さいたま市).
3. H. Tohmyoh, On the Transduction of Ultrasound through a Polymer Film, International Conference on Materials & Processing (2017 ICM&P), 2017年6月6日, University of Southern California (Los Angeles, CA).
4. 寺嶋脩, 燈明泰成, 音波の反射係数の周波数依存性を利用した水の音響インピーダンス測定の検討, 第24回超音波による非破壊評価シンポジウム, 2017年1月27日, 東京都立産業技術研究センター 青梅本部(江東区).
5. 燈明泰成, 超音波の反射係数の周波数依存性を利用した薄膜の音響物性値の測定方法について, 日本非破壊検査協会 平成28年度秋季講演大会, 2016年10月6日, ハーネル仙台(仙台市).
6. 燈明泰成, 吸水性薄膜の音響物性値測定について, 日本機械学会 2016年度年次大会, 2016年9月14日, 九州大学伊都キャンパス(福岡市).
7. H. Tohmyoh, Measurement of Acoustic Properties of Thin Polymer Film Utilizing the Frequency Dependence of Transmission and Reflection Coefficients of Ultrasound, ULTRASONICS 2016 (Invited), 2016年6月6日, Aldeia dos Capuchos Golf & Spa (Caparica, Portugal).

[その他]

ホームページ等

<http://king.mech.tohoku.ac.jp/saka/index.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

燈明 泰成 (TOHMYOH, HIRONORI)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 50374955

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし