

やなぎ さわ たか ゆき

氏 名 柳 沢 恭 行

授 与 学 位 博士 (工学)

学位授与年月日 平成24年3月27日

学位授与の根拠法規 学位規則第4条第1項

研究科, 専攻の名称 東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 材料システム工学専攻

学位論文題目 結晶球の弾性表面波伝搬経路計測と方位制御ボールSAW素子の開発

指 導 教 員 東北大学教授 山中 一司

論文審査委員 主査 東北大学教授 山中 一司 東北大学教授 楯引 淳一  
東北大学教授 進藤 裕英

## 論文内容要旨

### 第1章 序論

圧電結晶基板にすだれ状電極を形成して弾性表面波(surface acoustic wave; SAW)を送受信する SAW 素子は、テレビや携帯電話の周波数フィルタとして広く使用されている。更に、伝搬経路上にガスの感応膜を作製することによりセンサが実現される。感度は SAW の伝搬距離の増加により高めることが可能であるが、平面では SAW は回折により拡散するため、伝搬距離が短い。このため感度にも限界があり、まだ、十分な普及に至っていない。

一方、球面では直径と SAW の波長の幾何平均に等しい線波源から SAW が励起されると無回折のコリメートビームが伝搬するため、球の大円を多重周回して超長距離伝搬を実現する。この現象を応用して図1のように圧電結晶球の Z 軸に直交する大円(赤道)に作製されたすだれ状電極(interdigital transducer; IDT)で SAW のコリメートビームを送受信するボール SAW 素子が開発された。伝搬経路に感応膜を作製すると、薄い感応膜における SAW の遅延時間変化や振幅変化が周回数に比例して増幅されるため、高速で高感度なセンサとして利用できる。

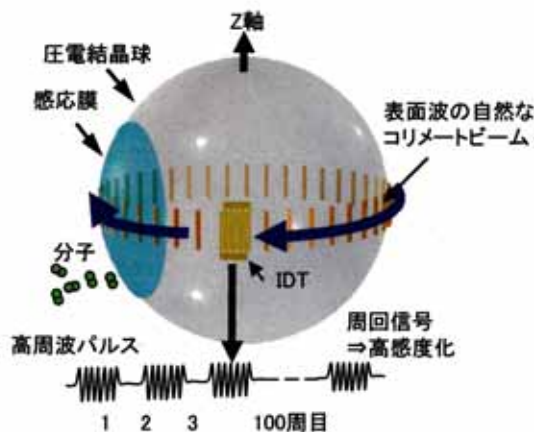


図1 ボール SAW センサ

しかし素子の作製において、赤道上に同様に IDT を作製したにも関わらず、図2のように波形の乱れが少ない素子と多い素子が生じる問題があった。研究用の用途には特性の良好なものを選別して利用してきたが、素子作製の再現性が低いことは、製品を普及させるためには大きな制約となる。この問題を解決するためには、異方性のある結晶球における SAW の伝搬経路を解明する必要がある。

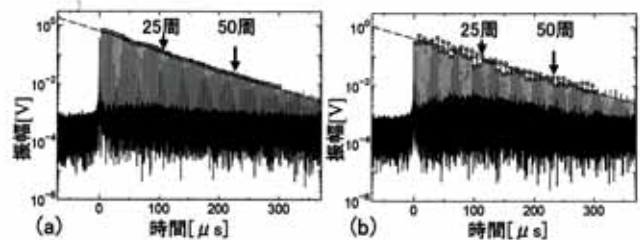


図2 周回特性図

(a)乱れの多い素子 (b)乱れの少ない素子

本論文は、このような背景のもとで行った圧電結晶球における SAW の伝搬経路計測と方位制御ボール SAW 素子の開発に関する研究をまとめたものであり、全編5章から構成される。

### 第2章 方位制御素子の作製

水晶球、ランガサイト(langasite; LGS)球の赤道での結晶方位はオイラー角( $\phi, 90, 0$ )で表すことができる。平面基板において SAW の位相速度  $V_p$  の理論値は  $\phi$  に対し  $60^\circ$  周期で変化することが知られている。球においても短距離の伝搬であれば平面と近似できるため、結晶球において  $V_p$  を測定して理論値と比較することにより XY 軸等価方位を同定することができる。

結晶球の方位同定には、図3に示す方位制御装置(orientation control apparatus; OCA)を用いた。光学的に Z 軸が同定された結晶球に対して、非接触 IDT を用いて結晶球の各方位から SAW

を送受信して  $V_p$  を求めた。ここで直径 10mm の水晶球における測定では球に沿った曲率の凹面の非接触 IDT を用いて高精度な音速測定を実現した。また直径 3.3mm の素子作製時には平面 IDT を用いて高精度な方位制御を実現した。更に、X 軸等価方位の極性は圧電効果を利用した巨視的判別法により決定した。

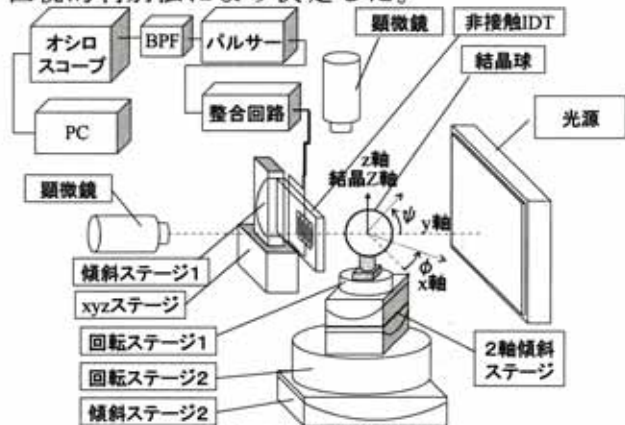


図 3 方位制御装置

波形の乱れを評価するために、波形の包絡線を片対数プロットした周回特性図を作成し、周回波の減衰特性と指数関数の相関を決定係数

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \dots (1)$$

$Y_i$ : 回帰推定値  $\bar{Y}$ : 回帰推定値の平均

$y_i$ : 実測値  $\bar{y}$ : 実測値の平均

により定量化する。 $R^2$  が 1 に近いほど振幅の減衰が指数関数的であることを表す。

方位を同定した直径 10mm の水晶球の赤道上の方位  $\phi$  と緯度方向への方位  $\psi \leq \pm 3^\circ$  の範囲において測定した  $R^2$  の分布を図 4 に示す。 $R^2$  が高い方位は X 軸等価方位で  $\psi = 0^\circ$  であり 3 回の対称性 ( $120^\circ$  周期) で赤道から緯度  $\psi$  方向に変位して分布していた (+Y 軸で  $\psi = +2.15^\circ$ 、-Y 軸で  $\psi = -2.15^\circ$ )。ここで  $R^2$  が高い方位の分布を最適配置と定義する。LGS でも X 軸等価方位で  $\psi = 0^\circ$  であり 3 回の対称性が見られたが、最適配置の変位方向は水晶と逆だった (+Y 軸で  $\psi = -2.24^\circ$ 、-Y 軸で  $\psi = +2.24^\circ$ )。このように  $R^2$  が高い IDT の方位が常に赤道ではなく 3 回の対称性で変位することを見出した。

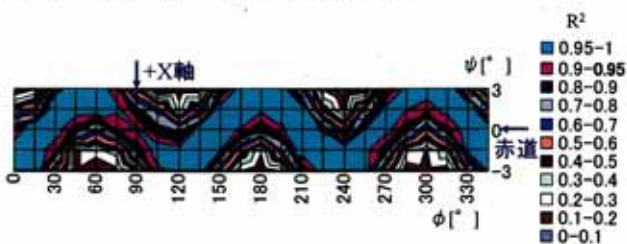


図 4 水晶球における  $R^2$  の分布

この知見を基に方位制御素子を作製した。直径 3.3mm、動作周波数 150MHz の素子を作製す

るために IDT の L/S と開口は水晶で  $5.4\mu\text{m}$  および  $265.6\mu\text{m}$ 、LGS では  $4.1\mu\text{m}$  および  $228.9\mu\text{m}$  としプロセスはサブトラクティブ法で行い、IDT のレジストマスクのパターニングには平面露光を用いた。

IDT を水晶球の +X 軸に作製した +X 軸素子と -Y 軸に作製した -Y 軸素子の周回特性図を図 5 に示す。+X 軸素子の  $R^2$  は 0.984 であり、図 4 の最適配置における最も高い値 (0.996) とほぼ一致した。-Y 軸素子の  $R^2$  は 0.735 だった。LGS でも同様に -X 軸素子と +Y 軸素子を作製し、-X 軸素子では  $R^2$  が高く、+Y 軸では  $R^2$  が低かった。このように水晶球の方位を制御して波形乱れない方位制御素子の作製に成功した。

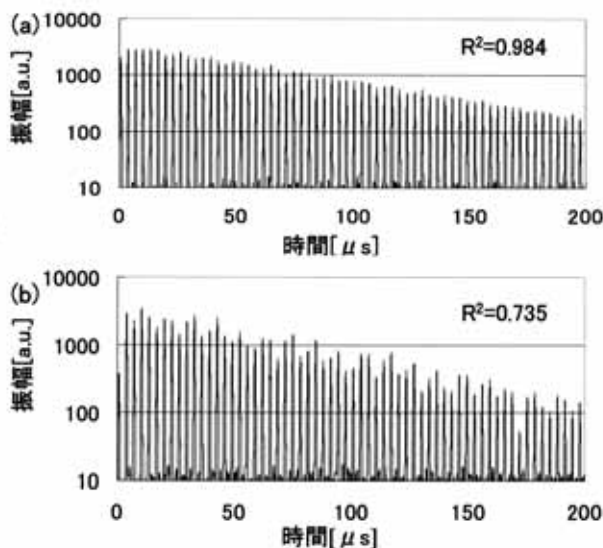


図 5 水晶球 方位制御素子の周回特性図  
(a)+X 軸素子 (b)-Y 軸素子

### 第 3 章 SAW 伝搬経路の計測と素子特性の解明

圧電結晶球における SAW の伝搬経路は波形乱れの少ない方位制御素子においても明らかでない。そこで、方位制御素子の特性を解明して素子の利用に必要な知見を得るために、OCA に方位制御素子を取り付けて詳細な SAW の伝搬経路を測定した。尚、伝搬経路の測定として IDT より SAW を送信し、非接触 IDT により結晶球の Z 軸中心に  $\phi'$ 、赤道から緯度方向に  $\psi'$  回転した方位を伝搬する SAW の振幅を測定して振幅分布を得た。

水晶球 +X 軸素子において +Z 軸に関して時計回りの SAW の経路を測定した結果を図 6 に示す。図 6(a) は 2 周目の結果である。SAW はコリメート幅を維持しながら  $120^\circ$  周期で蛇行して伝搬し、一周すると元の方位に戻ってきた。このため図 6(b) に示すように 15 周目においても 2 周目と同一の経路をビーム形状を保ちながら多重周回し続けた。この現象は反時計回りでも同様であり、蛇行経路は最適配置と一致していた。そこでこのビームを蛇行コリメートビーム

(meandering collimated beam; MCB)と定義する[2]。MCBはLGSにおいても水晶とほぼ同様の経路を伝搬していた。

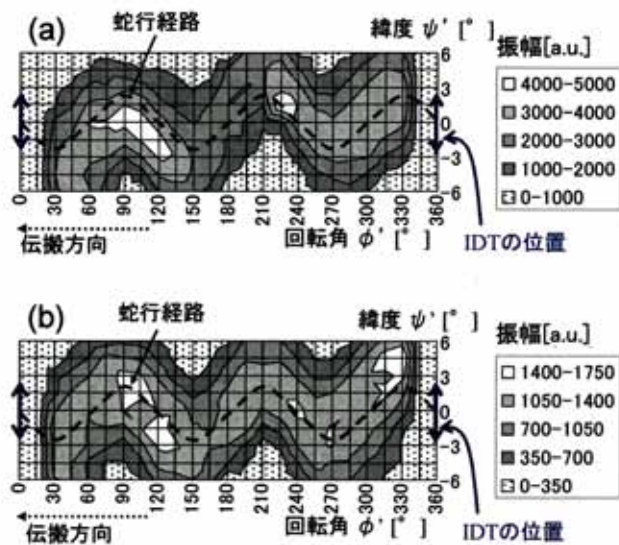


図6 水晶球 +X 軸素子での時計回りの SAW の振幅分布 (a)2 周 (b)15 周

LGS 球-X 軸素子において時計回りの SAW の振幅を 3 次元表示した結果を図 7 に示す。MCB の赤道からのずれを変位角と定義すると最大変位角は球の大きさに対して小さかった。これは水晶でも同様だった。

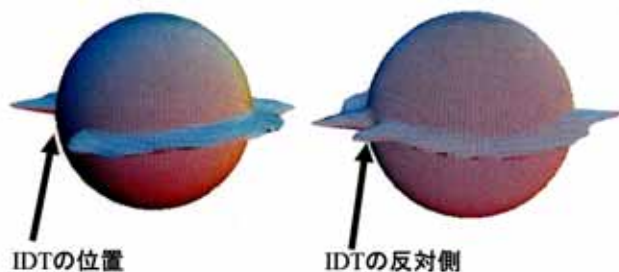


図7 LGS 球 -X 軸素子での時計回りの SAW の 3 次元振幅分布

一方、水晶球の-Y 軸素子では、ビームの中心が +X 軸素子における MCB の中心とずれ、ビーム幅も変化した。このビームをイレギュラービーム(irregular beam; IB)と定義する。IB は周回数によりビーム形状と伝搬経路が変化した。このため-Y 軸素子における波形の乱れは、IB が IDT を通過する際に、1 周ごとに重なる幅が変化したことが原因であると考えられる。

本研究で発見した SAW の蛇行現象には波動の位相が伝搬する方向とパワーフローの方向の差を表すパワーフローアングル(power flow angle; PFA)が関係していると考えられる。赤道と SAW 伝搬経路のなす角を蛇行角  $\psi_c$  と定義し、これを PFA,  $\psi_p$  と比較した。水晶、LGS 共に  $\psi_c$  と  $\psi_p$  の極性は一致し、 $\psi_c$  のほうが絶対値は小

さかった。値が異なった原因の一つは、 $\psi_p$  は平面上の無限幅のビームに定義されるのに対して、 $\psi_c$  は球における有限幅のビームに定義されたためである。

また、蛇行経路が赤道と最も離れた位置の角度を  $\psi_D$  と定義すると、水晶では  $2.15^\circ$ 、LGS では  $2.24^\circ$  だった。 $\psi_D$  は小さく、結晶球のほとんどの部分には SAW は伝搬しないため、赤道に加えて他の伝搬経路(経線方向)を利用する素子の作製が比較的容易なことがわかった。また温度測定素子の形成や熱容量の低減に有利な樽型素子の作製に有用な情報が得られた。

#### 第4章 圧力による減衰変化の測定と真空計への応用

平面型の SAW センサでは、SAW の伝搬距離が短いために、高精度な振幅変化の測定が困難だった。一方、ボール SAW センサでは SAW の超長距離伝搬により高感度に振幅の変化を検出できるため、高精度な減衰定数  $\alpha$  の変化の測定が可能である。ここで  $\alpha$  は漏洩減衰による損失  $\alpha_L$  と、IDT での反射や質量付加などによる素子固有の損失  $\alpha_p$  の和で表すことができる。 $\alpha_L$  の特性を把握し、圧力計への応用を検討した。

圧力装置内に水晶と LGS の方位制御素子を設置しインパルス応答の波形から  $\alpha$  を測定した結果を図 8 に示す。 $\alpha$  は圧力の低下により減少し 1Pa のオーダーではほぼ一定値となった。0.4Pa と大気圧における  $\alpha$  の変化は漏洩減衰に基づくため、 $\alpha_L$  は水晶で 16.2[dB/m]、LGS で 9.7[dB/m]だった。

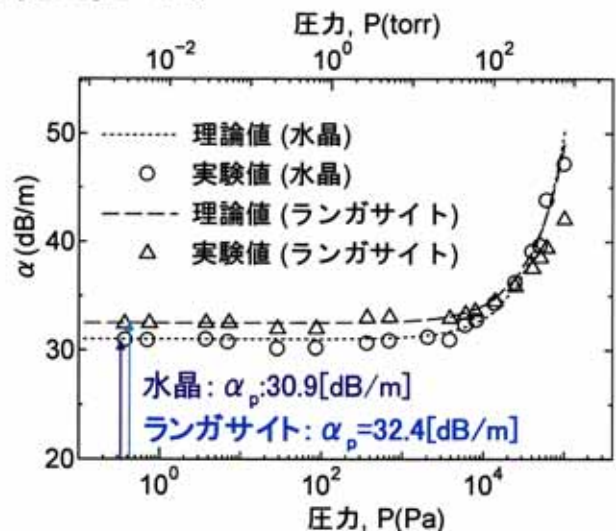


図8 圧力と  $\alpha$  の関係

ここで 0.4Pa における  $\alpha$  を  $\alpha_p$  と仮定して平面素子において近似的に導かれた  $\alpha_L$  の理論式

$$\alpha_L = \left( \frac{fP}{\rho_s V_s^2} \right) \left( \frac{\gamma M}{RT} \right)^{\frac{1}{2}} \dots (2)$$

を適用すると、水晶では  $\alpha_p = 30.9$ [dB/m]、LGS では  $\alpha_p = 32.4$ [dB/m] だったため、 $\alpha_p$  の理論値は

水晶で 19.2[dB/m]、LGS で 16.6[dB/m]となった。ここで  $f$ [Hz]は周波数、 $P$ [Pa]は圧力、 $\rho_s$ [kg/m<sup>3</sup>]は基板の密度、 $V_s$ [m/s]は基板の音速、 $\gamma$ [ $C_p/C_v$ ]は気体の比熱比、 $R$ [PaL/Kmol]は気体定数、 $T$ (K)は温度である。実験値と理論値の一致は水晶球を用いた素子のほうが良好だったが、LGS球を用いた素子でも傾向は一致し、大気圧におけるボール SAW 素子の  $\alpha_L$ の増加はこの理論式で説明できることが分かった。従って、ボール SAW センサでも水晶、LGS とも圧力と  $\alpha$ の線形性が確認された。

圧力装置における連続的な圧力変化を+X 軸素子の振幅応答で測定した結果を図 9 に示す。ここでピラニー真空計の圧力の測定結果と比較した。ピラニー真空計は白金線の抵抗を流れる電流  $I$ が分子の熱伝導と比例するクヌーセン領域(3kPa 以下)において測定信号が圧力と比例する。ここで用いた装置は 3kPa において 0.01 V が出力される。0.8min において排気を開始した。圧力が大気圧から低下する際に、ピラニー真空計が使用できない対流領域およびクヌーセン領域への遷移領域(大気圧から 3kPa)において SAW の振幅応答は 10dB 変化し、圧力計として使用できることがわかった。また 3 kPa 以下の圧力においても振幅変化が確認された。従って、方位制御素子を用いた減衰定数の測定により圧力を測定できる可能性が示された。

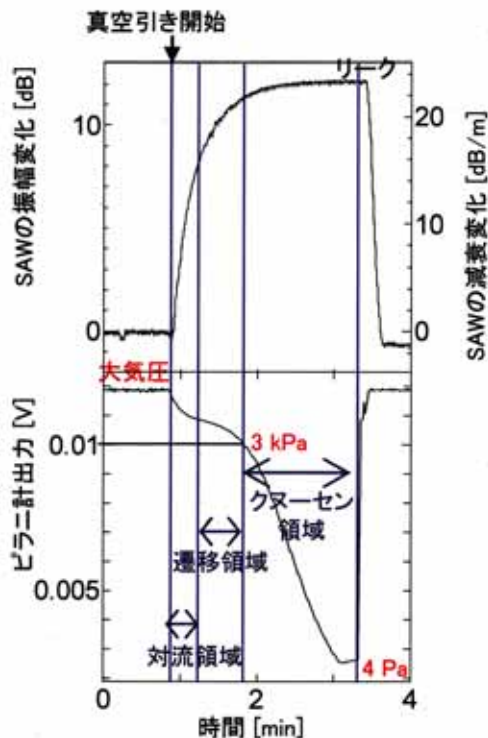


図 9 圧力変化時の SAW の振幅応答

## 第 5 章 結論

波形の乱れが少ないボール SAW 素子作製の再現性向上を目指して、圧電結晶球における

SAW の伝搬挙動を詳細に解析し以下の結論を得た。

まず非接触 IDT を用いて水晶球と LGS 球の赤道における伝搬特性を測定した結果、波形の乱れのない方位が 120° 周期で緯度方向に変位していることを見出した。この方位の分布を最適配置と定義して IDT の作製方位の指針とした結果、波形の乱れの少ない方位制御素子を再現性良く作製できることが分かった。

次に、方位制御素子を用いて圧電結晶球における SAW の伝搬挙動を調べた結果、波形の乱れが少ない素子において MCB が形成され、同一経路を多重周回することが見出された。これにより経線方向の伝搬経路の利用や樽型結晶による実装の簡便化等のボール SAW センサの高度化に有用な情報が得られた。

最後に方位制御素子を用いて圧力による減衰定数の変化の測定を行った結果、0.4Pa と大気圧の差に基づく漏洩減衰の変化を測定できた。

以上の研究の結果、結晶球における最適な方位に電極を作製して波形の乱れが少ないボール SAW 素子を再現性良く作製する手法を確立し、ボール SAW 素子の特長である高精度な減衰測定を実現できた。

## 参考文献

- [1] T. Yanagisawa, K. Ote, T. Ohgi, N. Nakaso, and K. Yamanaka, "Observation of Surface Acoustic Wave Propagation on a Quartz Ball with Concave Proximate Electrodes." *Jpn. J. Appl. Phys.* **47**, 4081-4085 (2008)
- [2] T. Yanagisawa, T. Ohgi, S. Akao, N. Nakaso, Y. Tsukahara, Y. Ohara, T. Tsuji, K. Yamanaka, "Meandering Collimated Beam of Surface Acoustic Waves on a Trigonal Crystal Ball: *Appl. Phys. Lett.* **98**, 123508 (2011)

# 論文審査結果の要旨

圧電結晶基板にすだれ状電極を形成して弾性表面波(surface acoustic wave; SAW)を送受信する SAW 素子は、テレビや携帯電話の周波数フィルタとして広く使用されている。センサとしても期待されているが、まだ十分な普及に至っていない。球における SAW の無回折ビームの多重周回現象を用いるボール SAW 素子が提案され、SAW センサの高感度化の可能性が示されたが、異方性のある結晶球における SAW の伝搬経路は解明されておらず、素子の再現性に課題があった。本論文は、このような背景のもとでなされた結晶球における SAW の伝搬経路計測と方位制御ボール SAW 素子の開発に関する研究成果をまとめたもので、全編 5 章からなる。

第 1 章は序論であり、SAW 素子に関する研究の背景、本研究の目的および意義を述べている。

第 2 章では、指数関数的に減衰する、波形乱れのないボール SAW 素子を再現性良く作製するために、結晶球の赤道周辺において非接触すだれ状電極により送受信する波形を解析して、すだれ状電極形成の最適配置を見出している。またこの知見を基に結晶球の方位を制御して、波形乱れのない方位制御素子の作製に成功している。

第 3 章では、方位制御素子の特性を解明するために、非接触すだれ状電極を用いて SAW の伝搬経路を計測し、SAW が蛇行コリメートビーム(meandering collimated beam; MCB)を形成して、 $120^\circ$  周期で蛇行しながら周回することを明らかにしている。また、このビームと赤道との交差角とパワーフローアングルの極性が同じであること、すだれ状電極が最適配置以外にある素子では周回ごとに伝搬経路が異なり、SAW とすだれ状電極の重なりが周回ごとに変化することなどの知見を述べている。さらに、MCB の最大変位角は水晶で  $2.15^\circ$ 、ランガサイトで  $2.24^\circ$  と小さいことを見出し、他の伝搬経路のためのすだれ状電極および温度測定素子の形成や、体積を減らして熱容量を低減する樽型素子作製の可能性を検討している。

第 4 章では、方位制御素子を用いて圧力による減衰定数の変化を測定し、 $0.4\text{Pa}$  以上の圧力におけるボール SAW 素子の減衰を漏洩減衰の近似理論で説明することに成功している。さらに、ピラニー真空計の応答が低感度かつ非線形になる対流領域と遷移領域で、ボール SAW 素子は線形な応答を示すことから、方位制御素子による減衰の高精度測定の圧力センサへの応用の可能性を示している。

最後に、第 5 章の結論では、各章で述べた内容を整理し、本論文の総括としている。

以上要するに、本研究は、結晶球における最適方位にすだれ状電極を形成して特性の優れたボール SAW 素子を再現性良く作製する手法を確立し、SAW の蛇行現象を発見するとともに、圧力センサへの応用の可能性を示したもので、材料システム工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。