

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560501

研究課題名(和文) 音叉型水晶触覚センサの容量変化による物体のヤング率と粘性率の同時推定法の確立

研究課題名(英文) Establishment of simultaneous estimating Young's modulus and viscosity of materials using motional capacitance change of a quartz-crystal tuning-fork tactile sensor

研究代表者

伊藤 秀明 (ITO, Hideaki)

信州大学・工学部・教授

研究者番号：60143989

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：音叉型水晶触覚センサを解析で扱えるようにモデル化した。特に、接触物体をフォークト体の粘弾性モデルで記述したことが新しい。1本の腕の振動の歪みエネルギーと基底部が粘弾性物体から受ける反力による力学的エネルギーの総和が音叉型水晶振動子の共振時の等価回路の動的容量Cの半分に蓄えられる電磁エネルギーに等しくなるエネルギー保存則から動的容量の理論式を導出した。ここで求めた理論値はネオプレンゴムやプラスチック等の接触実験から求めた接触前後の容量変化の実験値とほぼ一致して、音叉型水晶触覚センサの動的容量は接触物体の粘弾性で変化することを証明できた。ここで得られた結果はJJAPの論文誌に掲載予定である。

研究成果の概要(英文)：I have constructed the analytical model for the motional capacitance of a quartz-crystal tuning-fork tactile sensor. Especially, depicting the materials in contact with the sensor's base as the Voigt viscoelastic body is new. I have derived the analytical formula for the motional capacitance of the electrical equivalent circuit of the sensor at resonance based on the law of energy conservation which the electrostatic energy in motional capacitance is equal to the sum of the strain energy of the quartz arm and the loss of energy of the materials in contact with the sensor's base. I can prove that the change in reciprocal motional capacitance is caused by the dynamic Young's modulus and viscosity of viscoelastic materials since the calculated values are approximately equal to the measured values of the change in reciprocal motional capacitance before and after the sensor's base comes into contact with neoprene rubbers and plastic materials. This work will be published in JJAP.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：音叉型水晶振動子 触覚センサ 動的容量 粘弾性

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 今まで開発されてきた触覚センサを方式から分類すると振動子タイプと光センサタイプに分けられる。これまでの触覚センサは物体の硬さ、柔らかさやスチフネス、物体の変形量を計測しているのが主流である。本研究のように粘弾性物体のヤング率と粘性率を同時に推定するタイプの触覚センサは未だ開発されていない。振動子タイプの代表的な触覚センサとしては、1989年に日本大学の尾股氏らの圧電セラミックスを用いた硬さ知覚用触覚センサと、1997年にオリンパスの前沢氏らによる体内挿入用小型圧電セラミック触覚センサ、2002年に石巻専修大の工藤氏による3本音叉圧電振動子による硬さ、柔らかさセンサがある。尾股氏らの方式は、物質の硬さ、柔らかさを周波数の高い、低いで識別できるとし、人間の皮膚や爪、歯、肝臓等の周波数が測定されている。前沢氏らの方式も工藤氏の方式も基本的には縦振動を使うことから尾股氏らと同じ方式と思われる。また、2000年に東北大学の田中氏らによるスポンジゴムに圧電PVDFフィルムを貼り付けた触診センサがある。田中氏らの方式は50Hzで駆動した触診センサを直腸から直接、前立腺にあてて、センサの電圧出力が大きい程前立腺のスチフネスが大きくなること、さらに医者による触診による前立腺肥大症の診断と触診センサによる電圧出力とは相関があることを明らかにした。一方、光センサタイプの代表的な触覚センサとしては、1990年にNTTの中野氏らによるCCDカメラと光源に取り付けた半球の光導波路に弾性体で作られたシートを被せたもので構成された指の形状をした触覚センサと1999年に電総研の長田氏による2つのCCDカメラと格子パターンを印刷したゴムでできた皮膚に相当するもので構成された触覚センサがある。中野氏らの方式の原理は接触によってセンサ表面の弾性シートが歪み、その結果、光が散乱されてCCDカメラでセンサが触った位置を計測できるものである。また、長田氏らの方式の原理は、ゴムの部分が触ることによって格子パターンが歪むのを2つのCCDカメラでステレオ撮影して変形量を計測するものである。これらの触覚センサは物体の硬さ、柔らかさを周波数変化の大小や接触によるゴムなどの変形量を測定するものであり、本音叉型水晶触覚センサに匹敵する小型で物体のヤング率や粘性率を直接推定できる粘弾性試験機の機能を持った触覚センサは未だ実現されていない。

10年ほど前から研究代表者は音叉型水晶振動子の基底部を接触させる音叉型水晶触覚センサを提案し、理論と実験の両面からこの触覚センサのセンシング原理の解明と応用範囲の拡大を追求してきた。物体のヤング率に関しては音叉型水晶触覚センサの周波数変化の利用が考えられる。2004年に音叉型水晶振動子の基

底部を物体に接触させたとき、物体のヤング率が増加するにつれて直列共振周波数が上昇するという実験結果が得られた。その実験結果を説明するモデルとして、音叉型水晶振動子の右半分を2本の屈曲棒で近似し、接触させる物体を弾性基礎として扱う解析手法を開発してきた。しかしながら、接触させる物体が金属のような硬い物質でも32.6kHzの音叉型水晶振動子で約10Hz程度の上昇でしかなく、周波数変化を用いたヤング率測定法は実用的とは言えなかった。2010年に音叉型水晶振動子の基底部を物体に接触させる前後の振動子の共振時の等価直列容量の値の逆数が接触させた物体のヤング率と相関があることを実験で示すと同時に音叉型水晶振動子の腕に適用した張り合わせ屈曲モデルで水晶の腕のみの容量の解析式を求めて、この解析式による計算値とプラスチックやシリコンゴムに接触させたときの触覚センサの容量変化の測定値の逆数が相関を持つこと、及び音叉型水晶振動子の右半分を2本の屈曲棒で近似し、接触させる物体を弾性基礎として扱う解析モデルから求めた容量変化の逆数の計算値とプラスチックの容量変化の逆数の実験値が一致することを踏まえて、音叉型水晶触覚センサの容量変化による物質のヤング率と粘性率を同時に推定する装置を開発することを発想した。

(2) ヤング率を測定するには、金属のような硬い物体においては引っ張り試験法が、ゴムのような粘弾性体においては回転式のレオメーターやDMA(Dynamic Mechanical Analysis)などが用いられている。しかしながら、装置が大型で高価であることや、試験するための測定試料のサイズがあらかじめ決められているために特別に成型する必要があるなど操作性の面で難点がある。本研究で用いる音叉型水晶振動子は腕時計用の基準周波数源となるほど小型であること、また低消費電力であることや材料であるSiO<sub>2</sub>の物理特性が長期期間安定であることなどの特徴を有する。また、10gの荷重では接触する物体の厚みを0.4mm以上にすれば下に敷いてある物体のヤング率の影響を受けないこともシリコンゴムの接触実験で分かっている。このことから、本触覚センサはある程度の厚みのあるサンプルなら、単に物体の表面に押し当てるだけでヤング率や粘性率を推定できるので、サンプルを成型する手間を省けるなどの利点を持っている。本研究では触覚センサの物体への接触前後の容量変化から物体のヤング率として10<sup>6</sup>[Pa/m<sup>2</sup>]から10<sup>9</sup>[Pa/m<sup>2</sup>]までの4桁のダイナミックレンジ(具体的にはシリコンゴムの硬さからプラスチックまでの硬さ)のヤング率とシリコンゴム程度の粘性率を同時に推定する手法の

確立を目指す。

## 2. 研究の目的

音叉型水晶触覚センサの共振時の等価回路定数である容量変化を用いて接触した物質のヤング率と粘性率を同時に推定する装置を開発することを目的とする。従来、水晶のような硬い物質が共振しているときの等価容量は水晶のスティフネス等で決まるため、水晶よりも柔らかいシリコンゴムのような物質に触っても等価容量は変化しないと考えられてきた。今までの研究によって音叉型水晶触覚センサの基底部をシリコンゴムからプラスチックのような硬い物体に接触したときにセンサの等価容量が変化することを実験で確認し、この現象を説明する音叉型水晶触覚センサの弾性基礎モデルを構築した。この成果を踏まえて物体のヤング率と粘性率を同時に推定する手法の確立を目指す。

## 3. 研究の方法

本研究ではまず音叉型水晶触覚センサの容量変化の解析式を導出することを優先する。その判断の根拠は2010年の12月に掲載された論文によって音叉型水晶触覚センサの弾性基礎モデルによる容量変化の式が既に完成していることにある。これを踏まえて、第1段階として通常のフォークト体の粘弾性基礎モデル及び分数階微分によるフォークト体の粘弾性モデルによる容量変化の解析式の導出とそれらの式の実験による検証を行う(平成23年度)。第2段階として得られた解析式を基にして、ヤング率と粘性率を分離できる最適な複数の触覚センサに使う音叉型水晶振動子の周波数を決めて、このことを実験で確認することである(平成24年度)。第3段階として複数の触覚センサから求めたヤング率と粘性率を粘弾性体のDMAによる測定値を温度周波数変換して求めたこれらの値と比較して妥当性を検討し、DMAで求めたヤング率と粘性率を推定することが出来るかを検討する(平成25年度)。

(1) 現在までに音叉型水晶振動子の1本の腕について張り合わせ屈曲モデルで容量の式を求め、物体に接触したときは容量の式にある水晶のヤング率が接触によって見かけ上変化すると仮定して求めた理論式とシリコンゴムやプラスチックの実験結果を比較して2010年の7月に掲載された論文に報告した。プラスチックの実験結果を説明するために音叉型水晶触覚センサの基底部まで含めた解析として、弾性基礎モデルによって容量変化の式を導出し、ウィンクラー係数をヤング率と等価とするとその容量変化の逆数の計算値は実験値と一致することを2010年の12月に掲載された論文にまとめた。残された課題はシリコ

ンゴムの実験結果を説明するため弾性基礎モデルを通常のフォークト体の粘弾性基礎モデル及び分数階微分によるフォークト体の粘弾性モデルに拡張して容量変化の解析式を導出することにある。この分数階微分の物理的意味は粘性抵抗が歪の階微分に比例するというモデルであり、これは触覚センサが物体に接触する部分は3次元的に変形するため、その3次元の変形による粘性抵抗分を分数階微分という演算子の分数というパラメータで考慮することにある。容量変化の解析式が求まったらシリコンゴム、合成ゴムやプラスチック等で理論式のチェックのための接触実験を行い、これらの材料の容量変化を測定して理論値と比較・検討する。具体的には、シリコンゴムと合成ゴムは京都にある株式会社UBMでDMAによる依頼測定を行い、測定値の温度周波数変換から音叉型水晶振動子の駆動周波数でのヤング率及び粘性率を求めて容量変化の逆数の理論値と実験値の比較・検討を行う。特に、分数階微分についてはシリコンゴムと合成ゴムで分数階微分の分数が同じになるかどうか明らかにする。このことは複数の触覚センサを使ってヤング率と粘性率を推定するときの精度に利いてくるので測定する粘弾性体の数を増やして検討する。

(2) 現在、音叉型水晶振動子は20kHz, 32.768kHz, 40kHz, 50kHz, 60kHzの周波数のものが作られている。平成23年度に完成した通常のフォークト体の粘弾性基礎モデル及び分数階微分によるフォークト体の粘弾性モデルによる容量変化の解析式からシリコンゴムや合成ゴム等のヤング率と粘性率を分離するための最適な複数の音叉型水晶振動子の周波数を計算で求める。物体のヤング率と粘性率を分離して測定するための最適な複数の触覚センサを製作依頼して、出来上がった複数の音叉型水晶触覚センサでシリコンゴムと合成ゴムの接触実験を行い容量変化から平成23年度に完成した通常のフォークト体の粘弾性基礎モデル及び分数階微分によるフォークト体の粘弾性モデルによる容量変化の解析式を用いて10Hzの周波数でのヤング率と粘性率を求めて、DMAで求めたヤング率と粘性率との比較・検討をする。そして、複数の触覚センサでヤング率と粘性率を分離して推定できることを確認する。この10Hzの周波数でのヤング率と粘性率を採用するのは人間の指が触った感覚に近いものを考えているからである。

(3) 平成24年度に複数の触覚センサで得られたヤング率と粘性率は10Hzの周波数での値である。これを標準的な粘弾性モデル及びその修正版である分数階微分の粘弾性モデル

を用いてDMAで測定した10 Hzの周波数でのシリコンゴムと合成ゴムのヤング率と粘性率の測定値を推定できるかを検討する。この部分は、現在標準的な粘弾性モデルでDMAの測定値を温度周波数変換しているが、今回取り上げる分数階微分の粘弾性モデルでDMAの測定値を解釈し直すことも含めて、測定結果と解析モデルの妥当性を検討する。標準的な粘弾性モデルよりも分数階微分のフォークト体モデルが現実の粘弾性体の応力-変形の実験によく合うことが報告されてきている。本研究はこの観点からDMAの温度周波数変換の対応を分数階微分のフォークト体モデルから検討を加えることも視野に入れている。本研究の中心課題は容量変化を用いた音叉型水晶触覚センサによってシリコンゴムからプラスチックまでの硬さの物体の容量変化測定によってDMAで測定した10 Hzの周波数でのヤング率と粘性率の値を推定するための条件を確立することにある。

#### 4. 研究成果

(1) 接触する物体をフォークト体の粘弾性モデルで表し、音叉型水晶振動子をL型棒モデルで近似し、そして、アクリルケースからの基底部を押さえる力を軸力として、一本の腕の振動の歪みエネルギーと基底部が物体から受ける反力と粘性力による力学的エネルギーの総和が音叉型水晶振動子の共振時の等価回路の容量Cの半分に蓄えられる電磁エネルギーに等しくなるというエネルギー保存則から動的容量の理論式を導出した。また、分数階微分によるフォークト体の粘弾性モデルでも解析したが、DMA(ダイナミック・メカニカル・アナリシス)で温度を変えて求めた合成ゴムの動的ヤング率と動的粘性率から変換式により32.5kHzでのヤング率と粘性率を求めて代入した前者のモデルによる計算値は合成ゴムへの触覚センサの接触実験によるインピーダンス・アナライザで測定した動的容量変化の逆数の値とほぼ一致し、後者のモデルによる計算値は実測値よりも大きくなった。

図1と図2で前者のモデルによる検討結果を説明する。図1はプラスチック(PVC, PC, アクリル)と硬さの違う合成ゴム4種類について触覚センサによる接触実験を行ったときの接触前後の動的容量の測定値の逆数をヤング率に対して表したものである。図1の式(1)は今回求めた理論式で粘性率をゼロとした式を表し、図1の結果は動的容量がヤング率で変化することを表している。特に、プラスチック3種類はこの式(1)の理論値と良く合っていることが分かる。プラスチックは弾性体であることからこの結果は妥当である。更に、合成ゴムの接触前後の動的容量の測定値の逆数は式(1)の理論値よりも大きくなっている。この理論値よりも大きくなった部分は合成ゴムの粘性率の影響と考

えて、図2に粘性率に対して合成ゴムについて求めた動的容量の実験値の逆数から式(1)との差を図2では測定値として表し、粘性率も導入した理論式で求めた動的容量の理論値の逆数と式(1)との差を理論値として表した。粘性率に対して両者がほぼ一致していることから、音叉型水晶触覚センサの動的容量は接触する物体(合成ゴム)のヤング率と粘性率(フォークト体の粘弾性モデル)によって変化することが明らかになった。

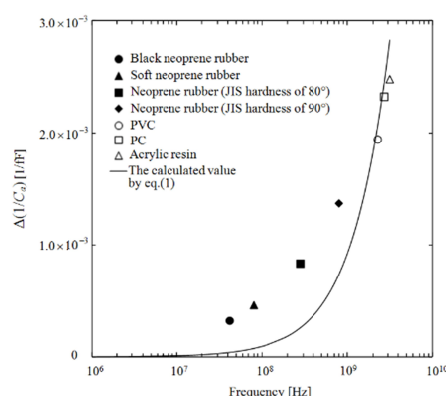


図1 ヤング率に対するネオプレンゴムとプラスチックの動的容量変化(1/C<sub>d</sub>)の理論値と実験値の比較

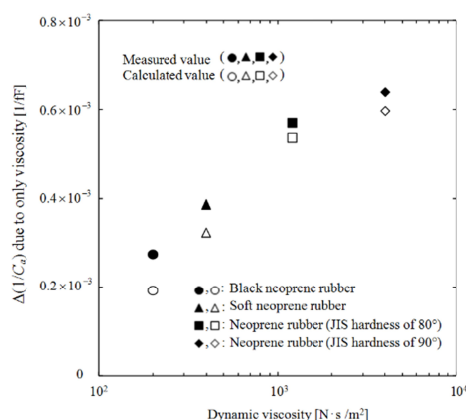


図2 ネオプレンゴムの動的粘性率に対する粘性による動的容量変化(1/C<sub>d</sub>)

周波数を変えた音叉型水晶振動子として50kHzと70kHzの2種類の音叉型水晶振動子を手して動作確認を行ったが共振抵抗が動的容量を安定に測定できる値まで下がらず、現在の製造技術では周波数を上げた共振抵抗の小さい振動子の手入は困難であることが分かった。

(2) 動的容量の解析式を導出するのに電気機械結合係数を用いる方法を開発できたので、その方法を音叉型水晶触覚センサの動的容量の解析に応用した。ねじりバネ係数を含んだL字型棒モデルに接触する物体として弾性基礎モデル(物体のヤング率をウィングラ

一係数で扱う)で記述して動的容量の解析を行った。この解析の結果、以前求めた1本の腕の振動の歪エネルギーと基底部が物体から受ける反力による力学的エネルギーの総和が音叉型水晶振動子の共振時の等価回路の動的容量の半分に蓄えられる電磁エネルギーに等しくなるというエネルギー保存則から求めた動的容量の解析式では基底部を物体に接触させる前後で動的容量は低下するが、今回求めた理論では接触前後で動的容量は上昇した。接触する物体のヤング率に対する変化の仕方は両者共に同じ傾向であるが、変化の方向は両者で逆になり、変化量は前者より後者的の方が2桁小さいことが判明した。接触実験では音叉型水晶触覚センサの接触前後の動的容量の変化はアクリルケースで音叉型水晶振動子の基底部を挟み込む位置によって低下する場合と上昇する場合の2種類の結果が得られている。両者の解析共にアクリルケースで音叉型水晶触覚センサの基底部を挟み込む位置は基底部の伸び、縮みがない中立線上にあると仮定して計算している。違いは基底部の物体からの反力による力学的エネルギーの取り扱いにある。前者ではこれを考慮し、後者では電気機械結合係数の定義からそれを組み込むことができないことによる。その違いはあるが両者の解析から音叉型水晶振動子の基底部を物体へ接触させるとその動的容量が変化するのは音叉の構造に起因して生じていることが明らかとなった。

#### 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 1件)

① Hideaki Itoh, Naoki Hatakeyama, Analysis of change in motional capacitance of quartz-crystal tuning-fork tactile sensor induced by viscoelastic materials in contact with its Base, Japanese J. Appl. Phys. 査読有、印刷中。

〔学会発表〕(計 5件)

① Hideaki Itoh, Naoki Hatakeyama, Analysis of Change in Motional Capacitance of Quartz-Crystal Tuning-Fork Tactile Sensor Induced by Viscoelastic Materials in Contact with Its Base, 2013 Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium, 2013,7月21日~7月25日, pp.997-1000.

② Keisuke Sugiura, Hideaki Itoh, Analysis of Quality Factor of Quartz-Crystal Tuning Fork Using L-Shaped Bar Model with Torsion Spring, 2013 Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium, 2013, 7月21日~7月25日, pp.2136-2139.

③ Takahiro Ishikawa, Hideaki Itoh, Analysis of the Motional Capacitance of the Electric Equivalent Circuit of Quartz-Crystal Tuning Fork Using L-Shaped Bar Model with Torsion Spring and in Consideration of Electric Field Distribution, 2012,4月24日~4月26日, pp.2309-2312.

④ Takahiro Ishikawa, Hideaki Itoh, Analysis of Motional Capacitance of Quartz-Crystal Tuning Fork Tactile Sensor Using Both L-shaped Bar Model and Electromechanical Coupling Coefficient, Proc. of the 2012 IEEE Ultrasonics Symposium, 2012, 10月7日~10月10日, pp.851-854.

⑤ Hideaki Itoh, Naoki Hatakeyama, Susumu Itoh, Elucidation of Change in Motional Capacitance of Quartz-Crystal Tuning-Fork Tactile Sensor Induced by Viscoelastic Materials in Contact with Its Base, Proc. of Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol.32, 2011,11月10日, pp.357-358.

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

伊藤 秀明(ITO, Hideaki)  
信州大学・工学部・教授  
研究者番号:60143989

##### (2)研究分担者

なし

##### (3)連携研究者

なし