

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04009

研究課題名(和文)音響導波路を用いた柔らかな分布型触覚センサ・ディスプレイの解析モデル確立

研究課題名(英文) Establishment of analysis model for soft distributed tactile sensor and display using acoustic waveguide

研究代表者

田原 麻梨江 (Tabaru, Marie)

東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授

研究者番号：60721884

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：医療や介護分野において、指と同等以上の空間分解能を持ち、かつ、人肌のように柔らかい触覚センサ技術の需要が高まっている。本研究では、スピーカ、マイクロホン、ゴム管を用いた音の導波路といった簡易構成によって、連続的に力の分布を検出できる柔らかい触覚センサについて検討した。本研究課題においては、任意位置における変形時の周波数特性 $T(f)$ を音響モデルとし、変位特性、減衰特性、空間分解能を明らかにした。また、曲げによる振動モード・位相との関係、管の形状に対する変位特性および減衰特性との関係を明らかにした。さらに、空中において1 MHzまでの高周波で駆動する圧電振動子を製作し、評価実験を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本技術は、医療・介護用ロボットの触覚センサや曲げセンサ、介護用ベッドや椅子の押圧分布センサ、義手や義足と人体との接続部分の圧力分布を計測する技術、自動車や加工機械等の安全安心のための挟み検知センサとして応用が可能である。また、広帯域化や高出力化が可能な圧電音響デバイスを、独自に製作可能であることから、新規音響デバイス分野への展開が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In the medical and nursing-care fields, there is an increasing demand for tactile sensor technology that has spatial resolution equal to or higher than that of fingers and is as soft as human skin. In this study, we investigated a soft tactile sensor that can detect the distribution of force by a simple configuration such as a speaker, a microphone, and a sound waveguide using elastic tube. In this research, the frequency characteristic,  $T(f)$ , for the deformation at an arbitrary position was used as the acoustic model. Based on the model, the displacement and the attenuation characteristics, and the spatial resolution was investigated. In addition, the relationship between the vibration mode and phase due to bending, the displacement and attenuation characteristics with respect to the shape of the pipe were studied. Furthermore, we fabricated a piezoelectric vibrator that drives at high frequencies up to 1 MHz in the air, and conducted evaluation experiments.

研究分野：超音波工学、医療超音波

キーワード：弾性管 音響特性 分布型 フレキシブルセンサ 圧力センサ

### 1. 研究開始当初の背景

医療・介護分野におけるリハビリ支援やロボット手術において、人の指と同等以上の空間分解能を持ち、かつ、触れても痛くない人肌のように柔らかい触覚センサ技術の需要が高まっている。このような用途では、人との親和性が求められるため、柔らかいこと、どこにどれくらいの力が加わっているか、すなわち場所の関数として力や変形を連続的に測定できる分布型の触覚センサであることが求められる。

現状は、もっぱら単素子のセンサを多数用いた多点型で、しかも部分的に硬い材料を用いたセンサである。そこで、本研究では、スピーカ、マイクロホン、音が伝搬する導波路といった簡易構成によって、連続的に力の分布を検出できる柔らかい触覚センサについて検討する。計測原理を図1に示す。まず、ゴム管内にスピーカから音波を入射し、荷重位置からの反射波をマイクロホンで受信する。次に、高速フーリエ変換 (FFT: fast Fourier transform) によって周波数特性を得た後、さらに FFT を行うことで、荷重(力)分布を得る。

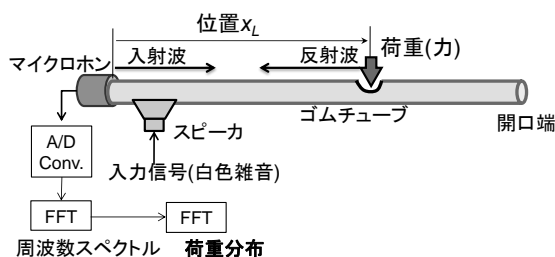


図1 荷重(力)の分布を計測する原理図

### 2. 研究の目的

用途に応じた触覚センサを試作・評価をする際、必要なゴムの形状や材質、音の周波数を個別に設定して評価できるモデルが必要である。本研究では、ゴム製導波路の中を伝搬する音の特性を利用した、柔らかく、また荷重位置の分布を測定できる触覚センサを実現するために、音響導波路のモデル化とその手法を確立することを目的とする。本技術は、医療・介護用ロボットの触覚センサや曲げセンサ、介護用ベッドや椅子の押圧分布センサ、義手や義足と人体との接続部分の圧力分布を計測する技術、自動車や加工機械等の安全安心のための挟み検知センサとして応用範囲も広い。

### 3. 研究の方法

本研究では、

$$T(f) = p_0^2 \left\{ 1 + r^2 + 2rcos \left( 2\pi \frac{2x_L}{c} f \right) \right\} \quad (1)$$

を基本音響モデルとして、荷重の位置:  $x_L$ , 反射係数:  $r$ , と音の周波数特性:  $T(f)$  との関係を検討した。本研究課題においては、変形量に対する  $T(f)$  の振幅値との関係、管内伝搬による減衰特性、周波数と空間分解能との関係、曲げによるモードおよび位相との関係、管の形状に対する変位特性および減衰係数との関係を明らかにした。また、空中において 1 MHz までの高周波で駆動する圧電振動子を製作し、評価実験を行なった。

### 4. 研究成果

まず、基本となる 1 次元のゴム管内の端から音を送受信した場合の管内の周波数スペクトルの基本式を導入した。～10 kHz のスイープ音をイヤホンから送信し、管内で干渉した音の信号をマイクロホンで測定した。～2000 mm の長さのゴム管を使って変形量と反射量との関

係について理論値と実験値を比較したところ、理論式と一致することを確認した。また、上記の理論式(1)に対し、音源とは反対側のゴム管の端(すなわち、開口端)からの反射を考慮した、高精度な理論式を導出した。

次に、100 kHz までの高周波で駆動するハイレゾイヤホンを用いて実験を行なった。1/6 インチの計測用マイクロホンを用いて周波数帯域を変化させたときの  $T(f)$  の特性を実験的に調査し(図 2)、周波数帯域幅と変位検出の空間分解能(図 3)、および、変形位置の推定誤差との関係を明らかにした。また、ゴム管の内径と遮断周波数との関係とを明らかにした。

さらに、管内の形状と減衰特性との関係を調べた。具体的には、断面積の異なる 5 種類のゴム管を用いて、変形時の振幅特性、および、減衰特性(図 4)を調べた。これにより、断面積の異なるゴム管の変位と振幅の関係式を導いた。また、二次元のゴム管内の音波伝搬特性を調べるため、管を曲げた時の位相変化について実験および音響シミュレーションにより検討を行なった。その結果、最大周波数と管の直径に応じて、ゴム管の断面の振動モードが変化し、ゴム管の断面方向に位相差が生じることを明らかにした。

複雑なゴム形状での音響特性を明らかにするため、ゴム管の変形とゴム管内の音響特性を模擬する FDTD(Finite Difference Time Domain Method)シミュレーションの確立を行った。ゴム管の変形を数値化した。周波数をスイープさせた音源を発生し、ゴム管内の定常的な音響特性を観測した。観測した信号に対して FFT 演算を 2 回施すことによって、実験と同様の位置にピークを得ることができた。

今後、1 MHz までの高周波での音響モデルの確立のため、空中超音波振動子について検討を行なった。まず、ニオブ酸カリウムおよびニオブ酸ナトリウムを用いた圧電薄膜振動子を製作し、アドミッタンス特性とパルサーレーザを用いた超音波の送受信実験結果から、5MHz の送信に成功した。また、柔軟な圧電コンポジットを用いた空中超音波振動子を用いてさらに低い周波数である 1MHz で駆動できることを実験的に確認した。

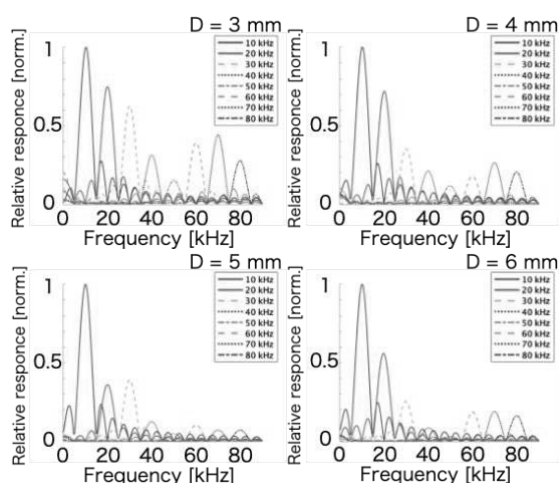


図 2 異なる内径  $D$  のゴム管内の周波数特性

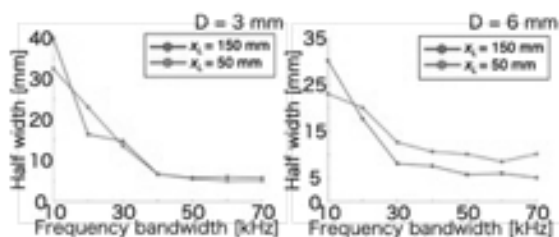


図 3 空間分解能 Vs. 周波数帯域幅

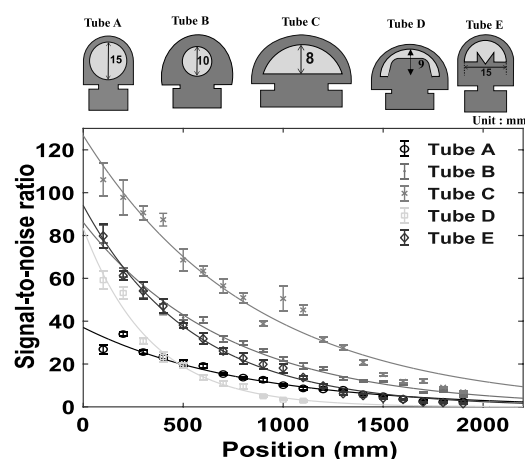


図 4 異なる断面形状のゴム管減衰特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kenta Hori, Soshi Shimomura, Marie Tabaru	4. 巻 332
2. 論文標題 Feasibility study of a novel load detection system for train doors based on the acoustic characteristics of elastic tubes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A: Physical	6. 最初と最後の頁 113021 ~ 113021
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.sna.2021.113021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryota Sando, Shinnosuke Hirata, Marie Tabaru	4. 巻 59
2. 論文標題 High-frequency ultrasonic airborne Doppler method for noncontact elasticity measurements of living tissues	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 apanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SKKB09
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 田原麻梨江, 星野拓真
2. 発表標題 広帯域超音波の弾性管内伝搬特性を利用した 高分解能圧力センサに関する検討
3. 学会等名 日本音響学会2022年春季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shohei Fukuda, Marie Tabaru, Kentaro Nakamura, Mutsuo Ishikawa, Kazuki Satomi, Kazuaki Nishimura
2. 発表標題 Measurement of acoustic characteristics of mouthpiece type ultrasonic transducer for oral treatment
3. 学会等名 Symposium on UltraSonic Electronics (USE2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mutsuo Ishikawa, Ayaho Tsukamoto, Nao Saito, Shintaro Yasui, Marie Tabaru, Hiroshi Funakubo, Minoru Kuribayashi Kurosawa
2. 発表標題 Evaluation of ultrasonic spray coating using high intensity and high frequency ultrasonic transducer
3. 学会等名 Symposium on Ultrasonic Electronics (USE2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石河睦生, 齋藤 直, 村瀬貴一, 藤井健人, 田原麻梨江
2. 発表標題 医用超音波トランスデューサへの応用に向けた 水熱合成KNbO <sub>3</sub> 圧電膜とそのアドミタンス特性評価
3. 学会等名 令和2年度生体医歯工学共同研究拠点成果報告会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石河睦生, 齋藤 直, 田原麻梨江, 黒澤 実
2. 発表標題 水熱合成法により製膜した圧電結晶膜の特徴とその応用
3. 学会等名 日本音響学会2021年春季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村瀬 貴一, 藤井 健人, 田原麻梨江, 齋藤 直, 石河睦生
2. 発表標題 水熱合成法を用いたKNbO <sub>3</sub> 圧電薄膜のアドミタンス特性評価
3. 学会等名 日本音響学会2021年春季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名	Mutsuo Ishikawa, Ayaho Tsukamoto, Nao Saito, Akito Endo, Shintaro Yasui, Marie Tabaru, Hiroshi Funakubo, Minoru Kurosawa
2. 発表標題	Development of high intensity and high frequency ultrasonic transducers using piezoelectric films
3. 学会等名	Symposium on ultrasonic electronics 2019 (USE2019) (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Mutsuo Ishikawa, Ayaho Tsukamoto, Nao Saito, Akito Endo, Shintaro Yasui, Marie Tabaru, Hiroshi Funakubo, Minoru Kurosawa
2. 発表標題	Deposition of epitaxial piezoelectric films for high intensity and high frequency ultrasonic transducers and their applications
3. 学会等名	International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators ( IWPMA 2019) (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	石河 睦生, 内田 庸助, 塚本 絢穂, 齋藤 直, 遠藤 聡人, 安井 伸太郎, 田原 麻梨江, 舟窪 浩, 黒澤 実
2. 発表標題	高周波強力超音波トランスデューサ用圧電結晶膜の製膜 とその評価
3. 学会等名	第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Ryota Sando, Shinnosuke Hirata, Marie Tabaru
2. 発表標題	Viscoelasticity measurement for living tissue using airborne ultrasonic Doppler method
3. 学会等名	Symposium on ultrasonic electronics 2019 (USE2019)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名 山洞綾太, 平田慎之介, 田原麻梨江
2. 発表標題 生体組織の非接触弾性計測に向けた空中超音波ドブラ法に関する基礎検討
3. 学会等名 日本音響学会2019年秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Soshi Shimomura, Kento Fujii, Marie Tabaru
2. 発表標題 The soft and sensitive door-pinching sensor utilizing acoustic characteristics of an elastic tube,
3. 学会等名 International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mutsuo Ishikawa, Yosuke Uchida, Takahisa Shiraishi, Marie Tabaru, Hiroshi Funakubo, Minoru Kurosawa.
2. 発表標題 Deposition of piezoelectric KNbO <sub>3</sub> /PbTiO <sub>3</sub> films for ultra high frequency and high intensity ultrasonic transducers
3. 学会等名 International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石河 睦生, 内田 庸助, 田原麻梨江, 白石 貴久, 舟窪 浩, 黒澤 実
2. 発表標題 高周波強力超音波トランスデューサの開発と医療応用へ向けて
3. 学会等名 第 38 回エレクトロセラミックス研究討論会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 Marie Tabaru, Kazuaki Nishimura	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Jenny Stanford Publishing	5. 総ページ数 19
3. 書名 Ultrasonic Transducers and Non-Contact Measurement Technique for Medical and Agricultural Application/Flexible Acoustic Force Sensor	

1. 著者名 田原麻梨江	4. 発行年 2021年
2. 出版社 日本音響学会誌	5. 総ページ数 8
3. 書名 波動で測る食品の弾性 - 空中超音波を用いた青果物の硬さ測定 - (小特集 波動で測るかたさ・ねばり )	

1. 著者名 田原麻梨江	4. 発行年 2021年
2. 出版社 超音波テクノ	5. 総ページ数 8
3. 書名 集束超音波振動子の温故知新(特集：強力超音波の”温故知新”)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	石河 睦生  (Ishikawa Mutsuo)  (90451864)	桐蔭横浜大学・医用工学部・講師    (32717)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件



8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------