

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04163

研究課題名(和文) プレート型地震に伴う津波発生検知を目的とした小型・高感度微気圧センサの開発

研究課題名(英文) Compact and high-sensitive pressure sensors with semi-closed structures for detecting slight pressure fluctuation due to tsunami generation

研究代表者

大河 正志 (Ohkawa, Masashi)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：90213644

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：津波生成時に生じる微気圧変動を検知するため、小孔/細管付き半密閉空間を有する小型・高感度微気圧センサの開発を行った。センサの重要構造は半密閉空間で、この構造によるハイパスフィルタ特性がセンサの検出性能を決定する。そのため、本研究では、半密閉空間のステップ応答特性、周波数応答特性と構造パラメータとの関係を評価し、構造の設計手法を明らかにした。また、光導波型微気圧センサを試作して、ステップ応答、周波数応答を測定し、その動作を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、小孔/細管付き半密閉空間構造のステップ応答特性および周波数応答特性を数値流体シミュレーションと実験で評価し、さらに光導波型微気圧センサを試作して、その特性評価を行った。これらは、流体力学、材料力学、導波光学、センサ工学等の分野融合による学際的成果といえる。また、津波生成に伴う微気圧変動の検出可能性が示されたことから、津波による人的被害の軽減が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Compact and high-sensitive pressure sensors with semi-closed structures were developed for detecting slight pressure fluctuation due to tsunami formation. A key structure is a semi-closed structure with a small hole or a narrow tube, and high-pass filter characteristics of the structure determine sensor performance. In this study, connections between structure dimensions and step response and frequency response were considered, and design guideline of the structure was established. Moreover, guided-wave optical pressure sensors with semi-closed structures were fabricated and demonstrated. Also, their step responses and frequency responses were measured.

研究分野：光エレクトロニクス, センサ

キーワード：微気圧センサ 光導波型センサ 津波

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、国立天文台水沢観測所（奥州市水沢区）において、本震による短周期の気圧変動の他に、津波発生に伴う ± 0.5 hPa程度の特徴的な気圧変動が観測されている。この気圧変動は、津波の最大波が岩手県大船渡市に到達する15分ほど前に検出されており、微小気圧変動の検出は津波による甚大な人的被害を低減できる可能性を秘めている。

このような津波発生時に生じる気圧変動は微小で、伝搬距離が長くなればさらに小さくなるため、その検出には超高感度なセンサが必要となる。ところで、感圧部にダイヤフラム構造を使用した場合、高感度実現のためにはダイヤフラムを薄くしなければならず、日常の大気圧変動に耐えるに十分な耐圧が得られない可能性がある。また、大きな日常の大気圧変動が、津波形成由来の微小気圧変動の検出の妨げにならないよう、センサ出力への影響を抑制する必要がある。そこで、我々のグループは、小孔・ノズル付き半密閉空間をダイヤフラム下部に作りつけることで、日常の大気圧変化のような長周期圧力変化に対して、耐圧性を有する高感度微小圧力センサを提案している。小孔・ノズル部において流体の流入出に遅延が生じることから、津波による気圧変動のような短周期圧力変化に対しては、半密閉空間内の圧力が周囲圧力の変化に追従できず、ダイヤフラム表裏に圧力差が現れる。一方で、日常の大気圧変動のような長周期圧力変化に対しては、圧力変化が緩やかなため、小孔・ノズルを通じた流体の流入出が可能で、半密閉空間内の圧力が周囲圧力の変化に追従するため、ダイヤフラム表裏に圧力差は現れず、不感となり、ダイヤフラムの破壊の心配もない。

2. 研究の目的

本研究課題では、センサのステップ応答特性および周波数特性の測定を行い、それらの結果に基づいて、センサ設計に資するセンサ特性と構造パラメータ等の関係を明らかにする。次に、プロトタイプを試作して、微小圧力変動（変動幅：1 hPa以下、周期：数分）の検出の可能性を明らかにすることを目的とする。さらに、センサの光導波型化も行い、試作センサの特性評価結果を基に、津波生成検出の可能性について考察を行う。

本研究は、次のような2つのサブプロジェクトからなる。【SUB1】「差動式微小気圧センサに関する研究」では、センサ設計指針確立のため、数値流体解析により、ステップ応答特性における誘起圧力差持続時間や周波数特性における遮断周波数と、センサの構造パラメータ（半密閉空間体積、小孔面積等）との関係を明らかにする。また、サイズの異なる複数のプロトタイプを試作し、ステップ応答特性を測定すると共に、長周期大気圧変化に対する出力抑制効果を検証する。

【SUB2】「光導波型微小気圧センサに関する研究」では、【SUB1】のセンサを光導波型化して、無誘導性、防爆性をもたせ、プロトタイプを試作・特性評価を行い、工業プラントや発電所等での安全な使用の可能性を明らかにする。

3. 研究の方法

【SUB1】差動式微小気圧センサに関する研究

半密閉空間におけるステップ応答の特徴量として誘起圧力差持続時間に着目し、誘起圧力差持続時間の小孔面積依存性、半密閉空間体積依存性および初期ステップ圧力依存性について考察した。誘起圧力差持続時間を得るため、本研究では、数値流体解析および実験の両面からステップ応答特性を評価した。ここでは、ステップ応答で印加する圧力を100 Pa～10 kPaの範囲とした。数値流体解析では、数値流体解析ツールであるANSYS CFXを使用し、流体を理想気体の空気とし、流体の流れは層流で、初期状態における流体の速度は0 m/sとしてシミュレーションを行った。また、実験では、半密閉空間構造をアクリル板もしくは3Dプリンタで作製し、小孔には光学用ピンホールを使用した。考察では、ベルヌーイの定理に基づく近似理論解もシミュレーションおよび実験結果との比較に用いた。

次に、半密閉空間の周波数応答の特徴量として遮断周波数に着目し、遮断周波数の小孔面積依存性、半密閉空間体積依存性および圧力振幅依存性について考察を行った。遮断周波数を得るため、ステップ応答と同じく、数値流体解析と実験の両面から周波数応答を評価した。半密閉空間内部ないしは外部に正弦波状の圧力を印加し、半密閉空間内外の圧力差を求めて、圧力ゲインを算出した。様々な周波数における圧力ゲインを求めることで、周波数応答を得て、半密閉空間の遮断周波数を評価した。さらに、周波数応答による遮断周波数の結果と、ステップ応答による誘起圧力差持続時間に関する結果を合わせて、遮断周波数と誘起圧力差持続時間の関係を導き出した。

【SUB2】光導波型微小気圧センサに関する研究

【SUB1】の研究成果を基に、微小気圧センサの光導波型化を行った。光導波型微小気圧センサは、圧力検知部となるダイヤフラム構造とその上に形成される光導波路からなる。まず、20 mm角、0.21 mm厚および0.145 mm厚のダイヤフラムを有する光導波型微小気圧センサを作製し、圧力出力光強度特性を測定して、位相感度を評価した。そして、光導波型微小気圧センサと半密閉空間構造をチューブで接続し、ステップ応答特性を測定して、誘起圧力差持続時間を評価した。また、

同様に、複数の周波数による正弦波状の圧力印加により、周波数特性を測定して、遮断周波数を決定し、遮断周波数と小孔面積の関係について考察を行った。

4. 研究成果

(1) 半密閉空間のステップ応答特性

小孔面積と誘起圧力差持続時間の関係について、近似理論解の他、数値流体シミュレーションおよび実験により考察を行った。誘起圧力差持続時間はステップ応答特性から得るが、本考察では、ステップ圧力を 100 Pa、半密閉空間体積を 10 cm³ とし、小孔面積を変えて、誘起圧力差持続時間の小孔面積依存性について考察した。シミュレーション、実験、近似理論解から得られた小孔面積と誘起圧力差持続時間の関係を図 1 に示す。図中の黒色の実線は近似理論解で、赤色の丸はシミュレーション結果、青色の三角は実験結果を表す。実験によって得られた誘起圧力差持続時間は、シミュレーション・近似理論解から得られた誘起圧力差持続時間と同様に小孔面積に反比例する傾向があることが分かった。しかし、近似理論解、シミュレーション、実験の順で誘起圧力差持続時間が長くなった。また、実験から得られた誘起圧力差持続時間は、小孔面積（小孔直径）が小さくなるにつれて、シミュレーション値との差が広がる傾向が見られた。

次に、誘起圧力差持続時間と半密閉空間体積の関係について、数値流体シミュレーションおよび実験により考察を行った。本考察では、ステップ圧力を 100 Pa、小孔直径を 25 μm とし、体積を変えて、半密閉空間体積依存性を調べた。シミュレーション、実験、近似理論解から得られた半密閉空間体積と誘起圧力差持続時間の関係を図 2 に示す。図中の黒色の実線は近似理論解、赤色の丸はシミュレーション結果、青色の三角は実験結果を表す。実験によって得られた誘起圧力差持続時間は、シミュレーション・近似理論解から得られた誘起圧力差持続時間と同様に体積に比例する傾向があることが分かった。しかし、持続時間は、近似理論解、シミュレーション、実験の順に長くなり、定量的な一致は見られなかった。実験での持続時間が長くなったのは、近似理論解やシミュレーションで考慮されていない圧力損失が原因の一つと考えられる。

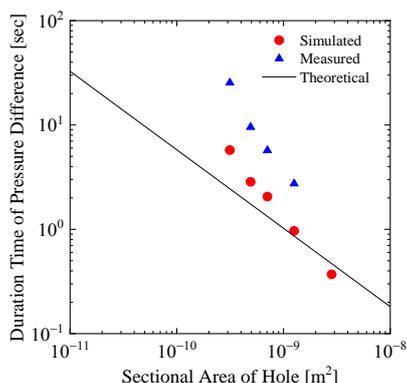


図 1 誘起圧力差持続時間の小孔面積依存性

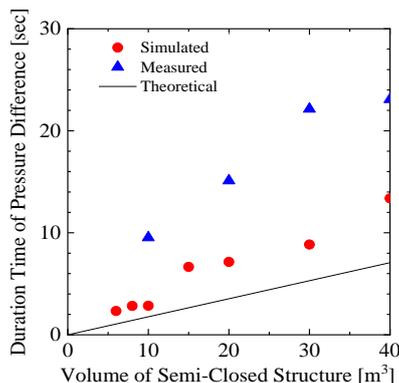


図 2 誘起圧力差持続時間の半密閉空間体積依存性

(2) 半密閉空間の周波数応答特性

半密閉空間の周波数応答特性を測定して、遮断周波数の小孔面積および半密閉空間体積、印加圧力依存性について考察を行った。これらの考察は数値シミュレーションにより行い、流体を理想気体の空気とし、流体の流れは層流で、初期状態における流体の速度は 0 m/s とした。また、半密閉空間外部に印加した圧力は、振幅 100 Pa の正弦波形とした。図 3 は半密閉空間体積 10 cm³、小孔直径 0.05 mm としたときの周波数応答のシミュレーション結果である。図中の黒丸は実験値で、赤色の実線はシミュレーション結果に対するフィッティング曲線である。フィッティング曲線より、遮断周波数は 2.68 Hz と評価された。

上述のとおり、遮断周波数は周波数応答特性から得るが、本考察では、圧力振幅を 100 Pa、半密閉空間体積を 10 cm³ とし、小孔直径を変えて、遮断周波数の小孔直径依存性について考察した。図 4 は小孔面積と遮断周波数の関係で、黒丸のプロットはシミュレーション結果、赤色の実線はプロットに対する回帰直線である。これより、小孔面積と遮断周波数の間には、比例関係があることが分かった。次に、圧力振幅を 100 Pa、小孔直径を 0.1 mm とし、半密閉空間体積を変えて、遮断周波数の半密閉空間体積依存性について考察した。図 5 は半密閉空間体積と遮断周波数の関係で、黒丸のプロットはシミュレーション結果、赤色の実線はプロットに対する回帰曲線である。回帰曲線の両対数グラフ上での傾きは -0.88 であり、これより、遮断周波数は半密閉空間体積の 0.88 乗に反比例することが分かった。さらに、半密閉空間体積を 10 cm³、小孔直径を 0.1 mm とし、正弦波状圧力の振幅を変えて、遮断周波数の圧力振幅依存性について考察した。図 6 は印加圧力の振幅と遮断周波数の関係で、黒丸のプロットはシミュレーション結果、赤色の実線はプロットに対する回帰曲線である。回帰曲線の両対数グラフ上での傾きは -0.49 であり、これより、遮断周波数は圧力振幅の平方根に反比例することが分かった。

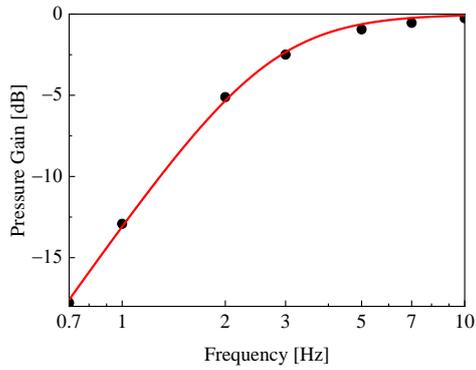


図3 半密閉空間体積 10 cm^3 、小孔直径 0.05 mm における周波数特性

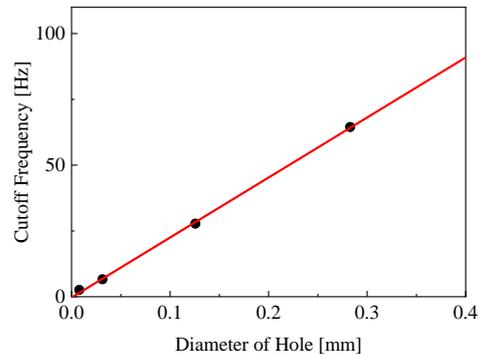


図4 遮断周波数の小孔直径依存性

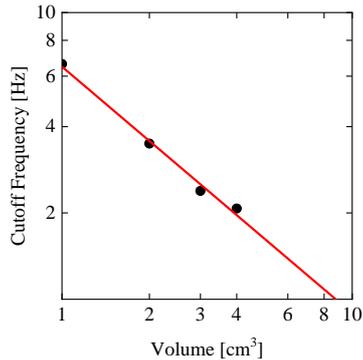


図5 遮断周波数の半密閉空間体積依存性

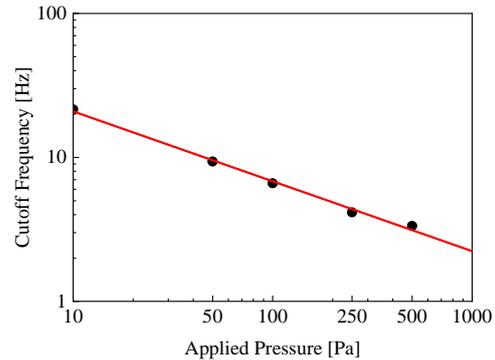
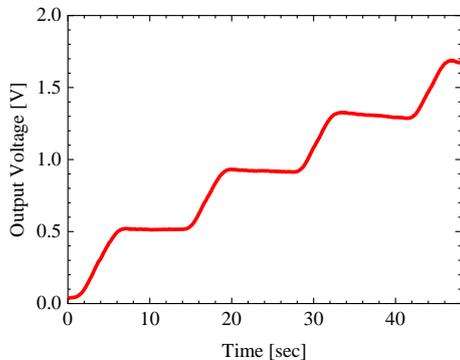


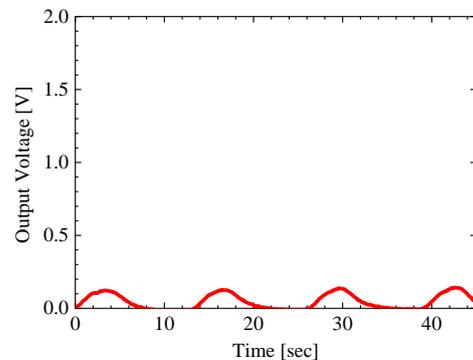
図6 遮断周波数の圧力振幅依存性

(3) センサ動作の実証実験

ここまでの研究結果から、誘起圧力差持続時間は、小孔面積に反比例し、半密閉空間体積に比例することが分かったが、ステップ圧力の大きさに対しては強い依存性は示さなかった。また、結果は紙面の都合で省略したが、持続時間の長時間化には、細管を使用し、長くすることが有効であることも分かった。これらの結果は、半密閉空間構造の設計により、圧力変化に対する応答特性を変えることができることを意味する。そこで、エレベータの昇降および停止を利用して、圧力変化をセンサに与え、その応答について考察を行った。本実験のために用意した半密閉空間構造は、【構造 A】体積： 40 cm^3 、細管内径 $100 \mu\text{m}$ 、細管長： 10 cm 、【構造 B】体積： 10 cm^3 、小孔 $40 \mu\text{m}$ を含む 5 種類で、エレベータの昇降条件は、【昇降 1】2~5 階停止なし、【昇降 2】1~5 階の各階停止を含む 4 種類とした。実験結果の例として、【構造 A】、【構造 B】の、条件【昇降 2（上昇時）】におけるセンサ応答を、それぞれ図 7(a)、(b)に示す。【構造 A】では、上昇中の気圧変化や停止時の気圧一定状態が、そのまま出力電圧に現れている。一方、【構造 B】は、持続時間が短いため、半密閉空間内部の圧力が外部圧力変化に追従しやすいため、エレベータ上昇による出力電圧変化が小さく、しかも各階停止時に出力が 0 V に戻っている。同じ気圧変化であるが、半密閉空間構造の違いにより、センサ出力を変えることができることが分かった。



(a)



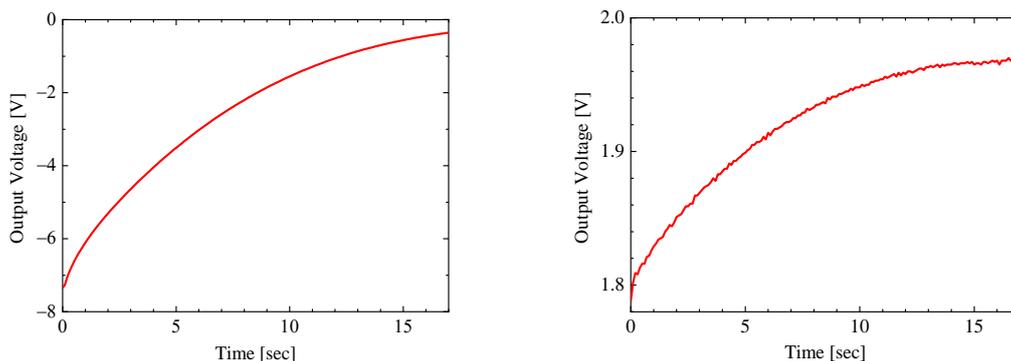
(b)

図7 昇降条件 2（各階停止）におけるセンサの応答 (a) 構造 A（体積： 40 cm^3 、細管内径 $100 \mu\text{m}$ 、細管長： 10 cm ）、(b) 構造 B（体積： 10 cm^3 、小孔 $40 \mu\text{m}$ ）

(4) 光導波型微気圧センサのステップ応答依存性

ダイヤモンド厚 0.21 mm の光導波型微気圧センサを使用して、小孔直径 $40 \mu\text{m}$ 、体積 $20 \times 20 \times 25 \text{ mm}^3$ の半密閉空間構造のステップ応答を測定した。図 8(a)および(b)は、印加圧力 700 Pa の

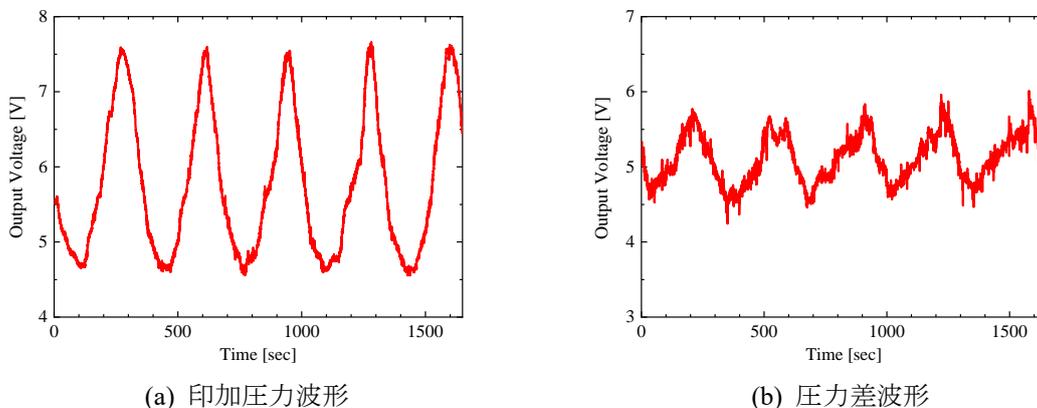
ステップ応答特性で、それぞれ市販圧力センサおよび光導波型圧力センサの出力である。両者ともに類似した出力変化を示しており、光導波型微気圧センサによる検出が可能であることが示された。しかし、光導波型微気圧センサの結果では、ステップ応答前後の出力値が一致しないことが多く、信頼性の高い誘起圧力差持続時間を得ることができなかった。



(a) 市販圧力センサ (b) 光導波型微気圧センサ
図8 印加圧力 700 Pa (減圧) におけるステップ応答特性

(5) 光導波型微気圧センサの周波数応答特性

ダイヤモンドサイズ 20 mm 角, 0.145 mm 厚の光導波型微気圧センサに、体積 10 cm³ の半密閉空間と圧力モニタリング用の市販圧力センサを、シリコンチューブを用いて接続し、半密閉空間の周波数特性を評価した。図9は小孔 20 μm における周波数 3 mHz の光導波型微気圧センサの出力波形の例で、(a)が印加圧力波形、(b)が半密閉空間内外の圧力差波形である。印加圧力振幅と圧力差振幅の比より、圧力ゲインが -10.1 dB と評価された。他の周波数についても、同様の測定を行い、図10のような周波数応答が得られた。図中の黒色のプロットは市販圧力センサの測定値に基づくゲインで、赤色のプロットは光導波型微気圧センサの測定値に基づくゲインである。また、実線は同じ色のプロット (測定値) に対するフィッティング曲線である。市販圧力センサおよび光導波型微気圧センサの測定値に基づく周波数特性に大きな違いはなく、光導波型微気圧センサの動作特性に問題は見られなかった。これらの周波数特性から、遮断周波数は、市販圧力センサで 9.0 mHz、光導波型微気圧センサで 9.4 mHz と評価された。



(a) 印加圧力波形 (b) 圧力差波形
図9 小孔直径 20 μm, 体積 10 cm³ の半密閉空間における、印加圧力周波数 3 mHz のときの光導波型微気圧センサの出力波形

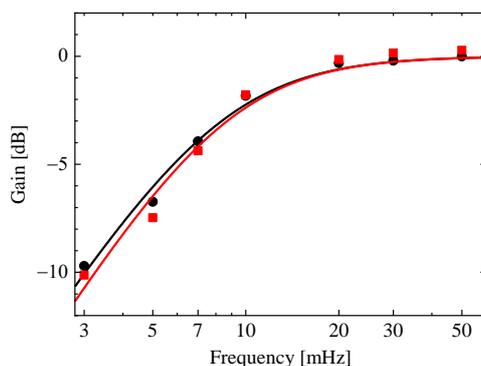


図10 体積 10 cm³, 小孔直径 20 μm の半密閉空間における周波数特性。黒色および赤色のプロットはそれぞれ市販圧力センサ, 光導波型圧力センサによる利得の測定値で、実線はそれぞれの測定値に対するフィッティング曲線

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Taiju Toriyama, Hana Ono, Naoto Takaoka, Masashi Ohkawa	4. 巻 112741P
2. 論文標題 Frequency characteristics of a semi-closed structure in a guided-wave optical pressure sensor for detection of tsunami formation: investigation based on numerical simulations and experiments	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	6. 最初と最後の頁 112741P-1～8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2541707	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7件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 瀧口航, 高岡直人, 鳥山大樹, 大河正志
2. 発表標題 半密閉空間を有する光導波型微気圧センサにおける誘起圧力差持続時間のノズル長依存性の考察
3. 学会等名 Optics and Photonics Japan 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上島知也, 鳥山大樹, 大河正志
2. 発表標題 小孔付き半密閉空間を有する光導波型微気圧センサのステップ応答特性
3. 学会等名 Optics and Photonics Japan 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Taiju Toriyama, Hana Ono, Naoto Takaoka, Masashi Ohkawa
2. 発表標題 Computational Fluid Dynamics Simulation to Determine Frequency Characteristics of a Pressure Sensor with a Semi-Closed Structure
3. 学会等名 Asia Pacific Measurement Forum on Mechanical Quantities (APMF 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高岡直人, 本間健士, 小野英, 鳥山大樹, 大河正志
2. 発表標題 小孔付き半密閉空間を有する光導波型微気圧センサ～センサ応答の圧力変化率依存性～
3. 学会等名 Optical & Photonics Japan 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoto Takaoka, Hana Ono, Takashi Sato, Masashi Ohkawa
2. 発表標題 Step Response Dependent on Step Pressure in a Micropressure Sensor with a Semi-Closed Hollow Structure
3. 学会等名 Asian Conference on Engineering Education 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naoto Takaoka, Hana Ono, Takashi Sato, Masashi Ohkawa
2. 発表標題 Step response dependent on applied pressure in a guide-wave optical pressure sensor with a semi-closed space
3. 学会等名 Microoptics Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小野英, 大河正志, 佐藤孝
2. 発表標題 小孔付き半密閉空間を有する微気圧センサにおけるステップ応答の小孔面積依存性
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔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	佐藤 孝 (Sato Takashi) (10143752)	新潟大学・自然科学系・フェロー (13101)	

	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
連携 研究者	新國 広幸 (Nikkuni Hiroyuki) (90547829)	東京工業高等専門学校・その他部局等・准教授 (52601)	

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
---------	---------