

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 15 日現在

機関番号： 13101
 研究種目： 基盤研究(C)
 研究期間： 2010 ～ 2012
 課題番号： 22560322
 研究課題名（和文） マイクロマシン構造を用いた光導波型センサの開発及び設計支援等データベースの構築
 研究課題名（英文） Development of guided-wave optical sensors with a micromechanical structure and its design support system
 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

研究成果の概要（和文）：

光導波型センサの設計指針確立のため、理論と実験の両面から、位相感度の導波路位置依存性、ダイヤフラムサイズ依存性等を明らかにした。また、光導波型マイクロホンにスクイーズドエアードランピングを導入し、理論どおり、空気層厚が薄くなるにつれて、減衰比が大きくなる結果を得た。さらに、これまでに蓄積した研究成果を基に、光導波型圧力センサおよび流量センサに対して、光導波路設計支援およびダイヤフラム設計支援のためのデスクトップおよびウェブアプリケーションを作成した。

研究成果の概要（英文）：

In order to establish design guidelines for guided-wave optical sensors with a micromechanical structure, sensitivity dependences on waveguide position, diaphragm dimensions and so on were determined by theoretical and experimental examinations. Also, regarding an effect of squeeze-film air damping in guided-wave optical microphones, damping ratio was found to increase as air-film thickness decreased, similar to the rough theoretical prediction. Moreover, for guided-wave optical pressure and flow sensors, desktop and web applications to design waveguide and diaphragm were developed, based on our theoretical and experimental results of each sensor.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
2012 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：光デバイス・光回路

1. 研究開始当初の背景

1981年のL. M. Johnsonらによる光集積回路温度センサの報告をきっかけに、小型・軽量、光軸調整不要、効率の高い相互作用、無誘導性、防爆性などの利点を有する光集積回路センサ、光導波型センサが注目を集めてきた。

特に、1980年代から1990年代にかけて様々な光導波型センサが提案され、また動作実験を中心に、それらの研究成果が数多く報告された。また、1989年には、申請者を含む末田・井筒らの大阪大学のグループが、シリコンダイヤフラムを利用した光集積回路圧力センサ

を報告し、それ以降マイクロマシン技術の発展と共に、機械的構造を組み込んだ光導波型センサの研究も活発化した。

我々の研究グループでも、光導波型センサの無誘導性、防爆性等の特徴に着目し、シリコン基板およびガラス基板光導波型センサの研究を行っている。感圧部としてダイヤフラムを用いた圧力センサ及びマイクロホン、流体の流路となる小孔付ダイヤフラムを用いた流量センサ、おもり一体型のダイヤフラムを用いた加速度センサ等を提案し、その動作確認に成功している。また、理論と実験の両面から、センサ感度の微細機械構造サイズ依存性について持続的に研究を進めており、その研究成果を順次報告している。

ところで、近年、国内外を問わず、工業プラントや発電所等における事故が多発している。これらの事故は、ひとたび起きると、人命にも係わる大きな被害を広範囲に及ぼす。このような事故を未然に防ぐには、安全監視、異常検知のためのセンサが不可欠である。特に、防爆性能を本質的に有する光導波型センサは、センサ自体が事故の引き金になることはなく、工業プラントや発電所等で使用するセンサとして大変有望である。

このような優れた特徴と魅力をもつ光導波型センサが実用化されるためには、長期間の使用に耐える十分な信頼性を示す必要があるが、それと共に、仕様に基づく設計指針の確立、適用範囲・適用限界の把握等も不可欠である。そこで、これまで我々の研究グループが行ってきた光導波型センサに関する基礎研究を進めて、設計指針、実用性を明らかにすると共に、さらに研究成果を基に設計や作製を支援するデータベースを開発し、公開することを目的とする。

2. 研究の目的

化学プラントや発電所等の安全監視、異常検知において、悪環境下でも使用可能な光導波型センサは大変有望で、防爆性を有するためセンサ自体が事故の引き金になることはない。また、マイクロマシン構造を一体化した光導波型センサは、微細機械構造の形状を変えることで各種機械量を計測することができ、自由度及び利用価値が高い。本プロジェクトでは、微細機械構造一体型光導波型センサの特性について理論的・実験的考察を行い、設計指針を確立した後、設計・作製支援等データベースを構築して、公開することを目的とする。そして、研究成果が将来のセンサ実用化につながり、工業プラント等での重大事故

が減少することを期待している。

3. 研究の方法

本研究プロジェクトは「センサ特性の微細機械構造サイズ依存性の考察」と「設計支援システムの構築」の2つのサブプロジェクトからなる。前者の「センサ特性の微細機械構造サイズ依存性の考察」は、さらに「光導波型センサにおける位相感度と共振周波数」と「ダイヤフラムのダンピング」に関する考察の2つに大きく分けることができる。また、後者の「設計支援システムの構築」は「導波路設計」と「ダイヤフラム設計」に分けることができる。

(1) 光導波型加速度センサの位相感度

光導波型加速度センサにおける位相感度の導波路位置依存性、ダイヤフラムサイズ依存性、おもりサイズ依存性について考察を行った。ダイヤフラム辺長依存性に関しては、ダイヤフラム厚を $50\ \mu\text{m}$ 、おもりサイズを $5\ \text{mm} \times 5\ \text{mm} \times 300\ \mu\text{m}$ とし、辺長の異なるセンサを3種類 (7.1 , 8.7 , $10\ \text{mm}$ 角) 作製した。試作センサに、加速度による慣性力を模した静荷重を印加して、印加荷重-出力光強度特性を測定し、位相感度を算出した。また、試作センサのダイヤフラム上には、 $0.25\ \text{mm}$ 間隔で光導波路を作製し、位相感度の導波路位置依存性も考察できるようにした。導波路厚依存性に関しては、ダイヤフラムを $10\ \text{mm}$ 角、おもりを $5\ \text{mm} \times 5\ \text{mm} \times 300\ \mu\text{m}$ とし、ダイヤフラム厚の異なるセンサを5種類 (50 , 60 , 70 , 80 , $90\ \mu\text{m}$) 作製し、印加荷重-出力強度特性から位相感度を算出した。おもり辺長依存性に関しては、ダイヤフラムを $10\ \text{mm} \times 10\ \text{mm} \times 50\ \mu\text{m}$ とし、おもり辺長の異なるセンサ (5.00 , 5.77 , $7.10\ \text{mm}$) を作製した。

(2) 振動構造を有するセンサのダンピング

$20 \times 20 \times 0.15\ \text{mm}^3$ のダイヤフラムを有する光導波型マイクロホンを使用し、ダイヤフラム上に薄い空気層を設けるため、スペーサを介してガラス板の覆いを設けた。空気層の厚さは 50 , 100 , 200 , $300\ \mu\text{m}$ および無限大とした。本研究では、ダンピングの大きさを評価するため、評価指標として減衰比を使用することとした。減衰比の決定には、周波数特性における共振周波数付近の半値幅から算出する方法と共振周波数の印加音波を瞬断したときのステップ応答特性から算出する方法を利用した。

(3) 光導波路設計

光導波型デバイスでは、様々な導波路構造が使用されるが、本研究では、誘電体装荷型光導波路を対象に、設計支援システムを構築した。マイクロマシン構造を利用するため、微細加工性に優れたシリコンを基板とした。また、感度の向上を念頭に、赤外光源ではなく、赤色光源を使用したため、光導波路の導波層と基板の間に低屈折率のバッファ層を必要とする。

ここでは、上部クラッド層を空気とし、導波層、バッファ層、装荷層の屈折率（材料）を入力値として、バッファ層厚、導波層厚、装荷層厚、導波路幅を設計値として出力するシステムを作成した。今回のシステムでは、サーバーの負荷を軽減するため、JavaScriptを用いて、クライアント側で計算処理を行うこととした。そのため、複雑な計算や繰り返し計算を避けざるを得ず、各設計値を導出する関数を用意することとした。この関数は近似関数で、誤差が避けられないため、誤差に関する考察も行った。

(4) ダイアフラム設計

理論解析および実験的考察が比較的進んでいる圧力センサと流量センサについて、ダイアフラムの設計支援システムを作成した。センサの感度や周波数範囲はダイアフラムサイズ、小孔サイズ（流量センサのみ）に強く依存し、これらの関係を基に、所望の感度および周波数範囲から、ダイアフラムサイズ等を決定する。理論解析から、各種依存性を表す関係式が得られており、これらの式を連立させて、設計値を算出する式を得ることとした。しかしながら、上記の条件では、入力値が感度と周波数範囲の2つにもかかわらず、期待される出力値には、ダイアフラムの辺長、厚さ、辺比、小孔の辺長（流量センサのみ）等があり、このままでは設計値を決定することができない。そこで、入力パラメータを増やしたり、ダイアフラムのパラメータの一部をデフォルトで指定したりすることで、回避することを考えた。なお、デフォルト値は、ユーザにより、変更は可能である。

4. 研究成果

(1) 光導波型加速度センサの位相感度

① 導波路位置依存性

図1は、ダイアフラムサイズ $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 50\text{ }\mu\text{m}$ 、おもりサイズ $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 300\text{ }\mu\text{m}$ のセンサにおける位相感度と導波路位置の関係である。この図より、導波路がダイアフラ

ム端に位置するとき、位相感度が最大となることが分かる。また、導波路位置がおもり端のときも、比較的高い位相感度が得られた。さらに、ダイアフラム端とおもり端の間のある位置で、センサ感度が最小となっている。この結果は、理論的および実験的考察が先行している圧力センサの結果と矛盾する点はなく、妥当な結果と言える。

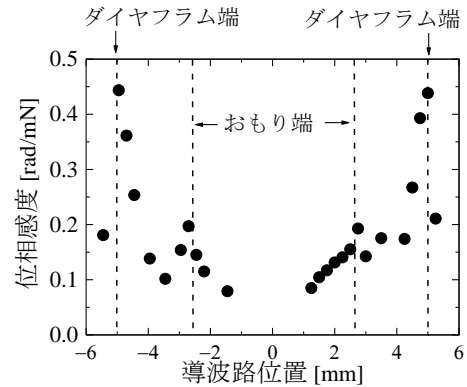


図1 位相感度の導波路位置依存性

② ダイアフラム辺長依存性

図2は、ダイアフラム厚 $50\text{ }\mu\text{m}$ 、おもりサイズ $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 300\text{ }\mu\text{m}$ のセンサにおけるダイアフラム辺長と位相感度（実験値）の関係である。この図は、両対数グラフ上に描かれており、実験値は直線状に並び、両者にはべき関数の関係があることが分かる。回帰直線の傾きがほぼ1であったことから、位相感度とダイアフラム辺長には比例関係があると言える。

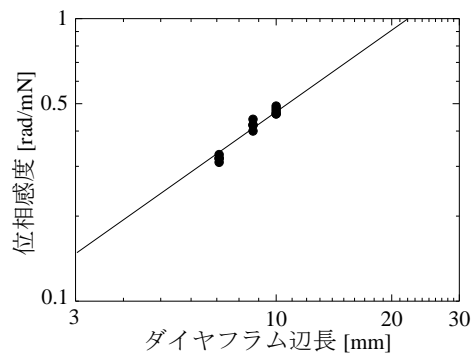


図2 位相感度のダイアフラム辺長依存性

③ ダイアフラム厚依存性

図3は、位相感度のダイアフラム厚依存性の実験結果である。センサのダイアフラムはすべて 10 mm 角で、おもりサイズは $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 300\text{ }\mu\text{m}$ である。図中の●印は実験値で、実線は回帰直線である。両対数グラフ上で、回帰直線の傾きがほぼ-2であったことから、位相感度はダイアフラム辺長の2乗に反比例することが分かった。

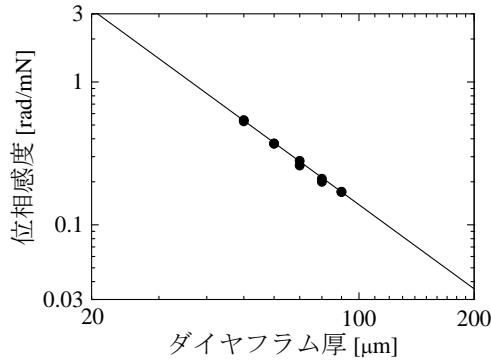


図3 位相感度のダイヤモンド厚依存性

(2) 振動構造を有するセンサのダンピング

ダイヤモンドの共振を抑制するため、スクイーズドエアーフィルムダンピングを導入することとし、ダイヤモンド上に薄い空気層を形成した。試作マイクロホンのダイヤモンドサイズは $20 \times 20 \times 0.15 \text{ mm}^3$ とした。本研究では、空気層のないマイクロホンを1個 (A1)、空気層厚 $300 \mu\text{m}$ を1個 (B1)、空気層厚 $200 \mu\text{m}$ を1個 (C1)、空気層厚 $100 \mu\text{m}$ を4個 (D1~4)、空気層厚 $50 \mu\text{m}$ を4個 (E1~4) 作製した。個々の試作マイクロホンに対して、周波数特性およびステップ応答特性を測定し、減衰比を算出した。表1にその結果を示す。理論値との定量的な一致は見られなかったが、理論どおり、空気層厚が薄くなるにつれて、減衰比が大きくなる傾向が得られた。

表1 空気層厚に対する減衰比の実験結果

空気層厚		周波数特性	ステップ応答特性
空気膜厚無限大	A1	0.014	0.010
空気膜厚 $300 \mu\text{m}$	B1	0.008	0.010
空気膜厚 $200 \mu\text{m}$	C1	0.014	0.029
空気膜厚 $100 \mu\text{m}$	D1	0.016	0.019
	D2	0.031	0.038
	D3	0.011	0.037
	D4	0.014	0.028
空気膜厚 $50 \mu\text{m}$	E1	0.015	0.061
	E2	0.011	0.018
	E3	0.021	0.070
	E4	0.014	0.030

(3) 光導波路設計

本研究では、図4のような誘電体装荷型光導波路の設計を行う支援システムを作成することとした。装荷型光導波路は上から、上部クラッド層、装荷層、導波層、バッファ層、基板で構成される。光導波路の設計では、各

層の材料の屈折率より、導波層厚、バッファ層厚、装荷層厚、導波路幅の寸法を決定する。

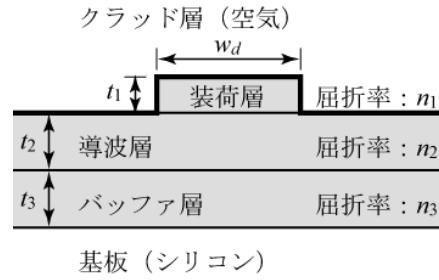


図4 誘電体装荷型光導波路の断面図

本研究では、クライアント側で計算を行うため、各寸法を算出する関数を用意した。例えば、バッファ層厚を計算する関数は、

$$t_3 = f_1(n_{diff}) \times f_2(n_3, n_{diff}) \quad (26)$$

$$f_1(n_{diff}) = A_1 e^{-\frac{n_{diff}}{m_1}} + A_2 e^{-\frac{n_{diff}}{m_2}} + A_3 \quad (27)$$

$$f_2(n_3, n_{diff}) = B_1 n_3^2 + B_2 n_3 + B_3 n_{diff} + B_4 n_3 n_{diff} + B_5 \quad (28)$$

で、各係数は、

$$A_1 = 1.01641, A_2 = 1.23348, A_3 = 0.15954, \\ m_1 = 0.28296, m_2 = 0.03072, \\ B_1 = 0.10377, B_2 = -0.71708, B_3 = -1.18332, \\ B_4 = 0.60044, B_5 = 1.99067$$

で与えられる。

(4) ダイヤモンド設計

図5は光導波型流量センサの概略図で、流体の流路となる小孔が設けられたダイヤモンドとその上を通る光導波路からなる。

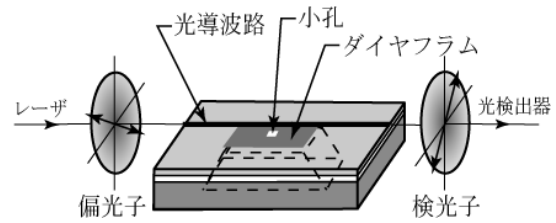


図5 光導波型流量センサの概略図

光導波型圧力センサの結果とベルヌーイの定理を基に、ダイヤモンドサイズおよび小孔サイズの関数として、位相感度と共振周波数を求めた。ここでは、ダイヤモンドと小孔の形状は正方形とした。位相感度 s および共振周波数 f は、

$$s = \sqrt{\frac{\pi \rho \beta}{2}} \sqrt{\frac{a^3(a^4 - b^4)}{h^2 a^4 b^4}} \equiv K_s \sqrt{\frac{a^3(a^4 - b^4)}{h^2 a^4 b^4}} \quad (1)$$

$$f = \frac{\alpha\pi}{2} \sqrt{\frac{E}{12\rho_{dia}(1-\mu^2)}} \cdot \frac{h}{a^2} \equiv K_f \frac{h}{a^2} \quad (2)$$

と書き表すことができる。ここで、 a , h , b はそれぞれダイヤフラムの辺長および厚さ、小孔の辺長である。また、 ρ , ρ_{dia} , μ , E は、それぞれ流体の密度、ダイヤフラム材料の密度、ポアソン比、ヤング率である。さらに、 α はダイヤフラム支持条件、ダイヤフラム辺比によって決まる係数で、 β は基板材料、ダイヤフラム形状、導波路位置等によって決まる係数である。

ダイヤフラム設計では、決定すべきパラメータが、ダイヤフラムの辺長 a と厚さ h 、小孔の辺長 b の3つであるが、それらを求めるための方程式が式(1)と式(2)の2つしかない。そのため、3つのパラメータのうち1つを確定しなければ、解は不定となる。本研究では、ダイヤフラムの辺長をセンサの大きさの半分と仮定し、定数とすることで、不定条件を回避することとした。つまり、センサ辺長を l とすると、ダイヤフラム辺長は

$$a = l/2 \quad (3)$$

と決定される。そして、式(1)と式(2)を、ダイヤフラムの厚さ h と小孔の辺長 b について解くと、

$$b = \sqrt[4]{\frac{a^4 K_s^2 K_f^2}{a^5 f^2 s^2 + K_s^2 K_f^2}} \quad (4)$$

$$h = \frac{a^2 f}{K_f} \quad (5)$$

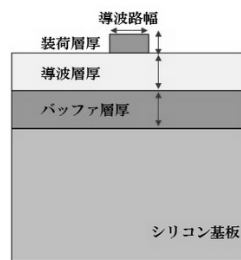
が得られる。

以上の設計手法に基づき、光導波型流量センサの設計支援システムのプロトタイプを構築した。システム作成において用いた言語は、HTML, CSS, JavaScript である。図6は、設計支援システムの画面の例で、画面の上部が光導波路設計、下部がダイヤフラム設計となっている。また、左側に設計を行う光導波路とダイヤフラムの画像を、右側には数値入力部と出力部を配置している。

光導波型流量センサ設計支援システム

・流量センサとは？ ・動作原理 ・光導波路とは？ ・ダイヤフラムとは？

光導波路設計

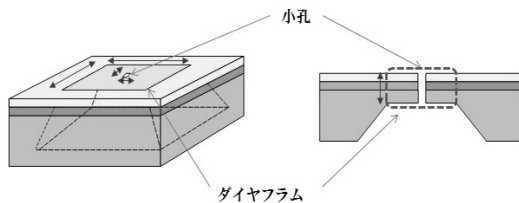


素材の屈折率を入力してください	
導波層	<input type="text"/>
パツファ層	<input type="text"/>

計算 リセット

設計値	
装荷層厚[μm]	<input type="text"/>
導波層厚[μm]	<input type="text"/>
パツファ層厚[μm]	<input type="text"/>
導波路幅[μm]	<input type="text"/>

ダイヤフラム設計



各条件を入力してください	
センサ辺長[mm]	<input type="text"/>
測定する流量[cc/min]	<input type="text"/>
共振周波数[Hz]	<input type="text"/>

計算 リセット

設計値	
ダイヤフラム辺長[mm]	<input type="text"/>
小孔辺長[mm]	<input type="text"/>
ダイヤフラム厚[μm]	<input type="text"/>

図6 光導波型流量センサの設計支援システム

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6件)

① Y. Miura, H. Endo, T. Oshima, M. Ohkawa, T.

Sato, Consideration of sensitivity with respect to diaphragm thickness and waveguide position in silicon-based guided-wave optical accelerometer, Proceedings of SPIE, 査読無, Vol. 7941, 2011, 79410P (6頁)

DOI: 10.1117/1.OE.51.1.014401

- ② M. Ohkawa, T. Sato, Scale-reduction rule without drop in the sensitivity of a silicon-based guided-wave optical pressure sensor using a micromachined diaphragm, *Optical Engineering*, 査読有, Vol. 51, No. 1, 2012, 014401 (6 頁)
- ③ M. Ohkawa, K. Murata, T. Sato, Evaluation of damping ratio in a glass-based guided-wave optical microphone with a diaphragm, *Proceedings of SPIE*, 査読無, Vol. 8264, 2012, 82641I (6 頁)
- ④ N. Saito, Y. Miura, T. Oshima, M. Ohkawa, T. Sato, Silicon-based guided-wave optical accelerometer: experimental consideration to establish its design guideline, 2012 IEEE SENSORS Proceedings, 査読有, 2012, pp. 453-456
- ⑤ K. Murata, M. Ohkawa, T. Sato, Design study of a guided-wave optical microphone with a diaphragm, 2012 IEEE SENSORS Proceedings, 査読有, 2012, pp. 2160-2163
- ⑥ N. Saito, Y. Miura, T. Oshima, M. Ohkawa, T. Sato, Experimental study of sensitivity dependences on waveguide position and diaphragm thickness in silicon-based guided-wave optical accelerometer, *Optical Engineering*, 査読有, Vol. 52, No. 2 2013, 024604 (6 頁)
DOI: 10.1117/1.OE.52.2.024604

[学会発表] (計 10 件)

- ① Y. Miura, H. Endo, T. Oshima, M. Ohkawa, T. Sato, Consideration of Sensitivity with Respect to Waveguide Position and Diaphragm Thickness in Silicon-Based Guided-Wave Optical Accelerometer, IEEE Shin'etsu Section 講演会, 長岡技術科学大学(長岡市), 講演番号#11C-1, 2010 年 10 月 2 日
- ② M. Ohkawa, H. Endo, T. Oshima, Y. Miura, T. Sato, Sensitivity Dependences on Waveguide Position and Diaphragm Thickness in Silicon-Based Guided-Wave Optical Accelerometer, 16th Microoptics Conference, Hsinchu, Taiwan, paper#WP-30, 2010 年 11 月 2 日
- ③ 大島卓也, 三浦雄介, 大河正志, 佐藤孝, シリコン基板光導波型加速度センサにおけるセンサ感度の導波路位置依存性, *Optics & Photonics Japan 2010*, 中央大学駿河台記念館(東京都千代田区), 講演番号 10aD7, 2010 年 11 月 10 日
- ④ 吉田和彰, 大河正志, 佐藤孝, ガラス基板光導波型マイクロホンの周波数特性に係わる減衰比の考察, 応用物理学会北陸・信越支部学術講演会, 金沢大学角間キャンパス(金沢市), 講演番号 G-6, 2010 年 11 月

19 日

- ⑤ 三浦雄介, 我妻雅隆, 大河正志, 佐藤孝, シリコン基板光導波型加速度センサにおけるセンサ感度の導波路位置及びダイヤフラム厚依存性, 電子情報通信学会信越支部大会, 新潟工科大学(柏崎市), 講演番号 6B-3, 2011 年 10 月 8 日
- ⑥ K. Murata, K. Yoshida, M. Ohkawa, T. Sato, Damping ratio in a glass-based guided-wave optical microphone without a damping structure, 17th Microoptics Conference, Sendai International Center (Sendai), paper#H-59, 2011 年 11 月 1 日
- ⑦ 齊藤奈津美, 大島卓也, 大河正志, 佐藤孝, おもり一体型ダイヤフラムを用いた光導波型加速度センサーセンサ感度と導波路位置の関係ー, *Optics & Photonics Japan 2011*, 大阪大学・コンベンションセンター(吹田市), 講演番号 30pB1, 2011 年 11 月 30 日
- ⑧ 齊藤奈津美, 大河正志, 佐藤孝, シリコン基板光導波型加速度センサーセンサ感度の導波路位置及びダイヤフラム厚依存性, 電子情報通信学会信越支部大会, 新潟大学(新潟市), 講演番号: 6A-4, 2012 年 10 月 13 日
- ⑨ 村田和也, 大河正志, 佐藤孝, ガラス基板光導波型マイクロホンにおけるエアダンプの効果, 電気学会東京支部新潟支所研究発表会, 長岡技術科学大学(長岡市), 講演番号: II-08, 2012 年 11 月 10 日
- ⑩ 佐藤僚祐, 大河正志, 佐藤孝, マイクロマシン構造を用いた光導波型圧力センサの設計指針に関する考察, 電気学会東京支部新潟支所研究発表会, 長岡技術科学大学(長岡市), 講演番号: II-12, 2012 年 11 月 10 日

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

佐藤 孝 (SATO TAKASHI)
新潟大学・自然科学系・教授
研究者番号: 10143752

(3) 連携研究者

新國 広幸 (NIKKUNI HIROYUKI)
東京工業高等専門学校・電気工学科・助教
研究者番号: 90547829