

医用圧計測カテーテルに組み込み可能な小型・高感度  
光集積回路圧力センサの開発

(課題番号12650339)

平成12年度～平成14年度科学研究費補助金(基盤研究(C)(2))  
研究成果報告書

平成15年5月

研究代表者 大河正志  
(新潟大学工学部助教授)

## は し が き

高齢化社会の到来、生活習慣病の増加などを背景に、健康に対する関心が年々高まっており、今後、総合検診、臨床検査の果たす役割がますます重要になってくるものと思われる。中でも、心臓や血液循環器系を対象とした生体内圧の測定は、生命に関わる非常に重要な臨床検査の1つである。これまで、生体内圧の測定には、電気駆動式のセンサが主に用いられてきたが、生体を対象とするため、漏電防止対策が不可欠であった。一方、近年進歩の著しい、光を使ったフォトニックセンシングは、電磁雑音の影響を受けない、漏電の心配がないなど、生体計測に最適な特徴を有する。この特徴を最大限利用できれば、漏電対策が不要となり、人体に優しい圧計測センサを実現できるものと期待される。本研究では、このような優れた特徴を持つ光波利用圧力センサの実現のため、次の4点に重点を置き、医用圧計測カテーテルに組み込み可能な圧力センサを開発することとした。

- a. 漏電防止対策が不要 → 電気を駆動源に使わない純粋な光センシングの採用
- b. 高感度なセンシング → 位相変調方式の利用  
(感度: 80 mrad/kPa, 測定範囲: -10~+50 kPa)  
ダイヤフラム(感圧部)の最適設計
- c. 安定なセンサ特性 → 光集積回路構成の採用, 光回路と感圧部の一体化
- d. センサの小型化 → 偏光干渉計の利用  
(センササイズ: 12mm×2mm×0.3mm)

条件 a は、圧力センシングとセンサ信号の伝送をすべて光で行うことで満たされる。ところで、光センシングには、大きく分けて、被測定対象により光強度が変化する方式と光の位相が変化する方式の2つがあるが、多くの場合後者の方が高感度となる。そこで、条件 b を実現するため、位相変調方式の光センシングを採用した。また、条件 c については、光伝送路と感圧部(ダイヤフラム)を一体化して、振動などの外乱の影響を抑えるのが有効である。そこで、一体化が可能な光集積回路構成を利用することとした。ところで、条件 b で位相変調方式を利用することとしたが、圧力による位相変化を検出するためには干渉計が必要となる。これまで、干渉計としてマッハ・ツェンダ干渉計やマイケルソン干渉計が広く用いられてきたが、長さを要する光導波路分岐が不可欠で、そのため長尺となっていた。そこで、条件 d を満たすため、光導波路1本で構成できる偏光干渉計を採用することとした。

本研究では、まず圧力センサの動作解析を行い、ダイヤフラムサイズや導波路位置に対するセンサ感度について考察した。この考察結果を基に、感度不変ダイヤフラム縮小則を導き出し、ダイヤフラムサイズの異なる3種類のセンサを作製して、この縮小則が実験的にも成り立つことを明らかにした。ところで、このセンサはダイヤフラム上の導波路位置によって感度が変わるが、3つのセンサとも、ダイヤフラム中央の導波路において位相感度約 70 mrad/kPa、ダイヤフラム端において位相感度約 100 mrad/kPa が得られた。この感度は上記の条件 b をほぼ満たしており、血圧計測には問題のない十分な感度と言える。しかし、3種類のセンサの内、最も小さいダイヤフラムサイズは 2.0 mm×10 mm×35 μm であり、感度不変ダイヤフラム縮小則に基づいたセンサの小型化が必要である。ダイヤフラム縮小則によると、ダイヤフラムサイズを 0.5 mm×2.5 mm×4.4 μm としても、試作センサと同じ感度が得られるものと期待される。さらに、上述の試作結果を基に、カテーテル先端型圧センサプロトタイプを作製を行った。センサのダイヤフラムサイズは 1.5 mm×7.5 mm×23 μm で、センサの位相感度は 81 mrad/kPa であった。プロトタイプとしてはまだ不完全であるため、今後完成度を高め、実用性の評価を行っていく必要がある。

### キーワード

- (1) 圧力センサ      (2) 光集積回路      (3) シリコン      (4) ダイヤフラム

## 研究組織

研究代表者：大河正志（新潟大学工学部助教授）

研究分担者：佐藤 孝（新潟大学工学部教授）

## 交付決定額（配分額）

（金額単位：千円）

	直接経費	間接経費	合計
平成 12 年度	1,700	0	1,700
平成 13 年度	1,200	0	1,200
平成 14 年度	600	0	600
総 計	3,500	0	3,500

## 研究発表

### (1) 学会誌等

1. M. Ohkawa, K. Hasebe, C. Nishiwaki, S. Sekine and T. Sato: "Integrated optic pressure sensor using intermodal interference between two mutual orthogonal guided-modes," *Optical Review*, vol. 7, no. 2, pp. 144-148 (2000).
2. Yuki Shirai, Takeshi Goto, Masashi Ohkawa, Seishi Sekine and Takashi Sato: "Silicon-based integrated optical pressure sensor using intermodal interference between TM-like and TE-like modes," *Proc. SPIE*, vol. 4277, pp. 411-418 (2001)
3. Takeshi Goto, Atsushi Yamada, Masashi Ohkawa, Seishi Sekine, and Takashi Sato: "An experimental investigation of sensitivity dependence with respect to waveguide position micromachined diaphragm in a silicon-based integrated optic pressure sensor," *Proc. SPIE*, vol. 4591, pp. 337-344 (2001)
4. Masashi Ohkawa, Yuki Shirai, Takeshi Goto, Seishi Sekine, and Takashi Sato: "Silicon-based integrated optic sensor using intermodal interference between TM-like and TE-like modes," *Fiber and Integrated Optics*, vol. 21, no. 2, pp.105-113 (2002)
5. Masashi Ohkawa, Kazuhiko Hasebe, Seishi Sekine, and Takashi Sato: "Relationship between sensitivity and waveguide position on the diaphragm in integrated optic pressure sensors based on the elasto-optic effect," *Applied Optics*, vol. 41, no. 24, pp.5016-5021 (2002)
6. Masashi Ohkawa, Seishi Sekine, and Takashi Sato: "Silicon-based integrated optic sensor using intermodal interference between fundamental TM-like and TE-like modes," *Recent Research Developments in Electronics and Communications Part-I*, vol. 1, pp.137-148 (2002)
7. Atsushi Yamada, Tooru Tokita, Masashi Ohkawa, Seishi Sekine, and Takashi Sato: "Scale reduction rule for diaphragm dimensions to miniaturize a silicon-based integrated optic pressure sensor without reducing sensitivity," *Proc. SPIE*, vol. 4987 (2003)
8. Yoshihiko Iwase, Yumi Okamoto, Masashi Ohkawa, Seishi Sekine, and Takashi Sato: "Sensitivity dependence with respect to diaphragm dimensions in a glass based integrated optic pressure sensor," *Proc. SPIE*, vol. 4987 (2003)

### (2) 口頭発表

1. 後藤健士, 白井裕基, 大河正志, 関根征士, 佐藤孝: "偏光干渉計を用いたシリコン基板光集積回路圧力センサの作成および特性評価," 第 61 回応用物理学会学術講演会, 講演番号 3a-Q-3 (2000-9)
2. 成澤良敬, 大河正志, 関根征士, 佐藤孝: "偏光干渉型光集積回路圧力センサにおける位相感度の導波路位置依存性," 第 61 回応用物理学会学術講演会, 講演番号 3a-Q-4 (2000-9)

3. 七澤正洋, 大河正志, 関根征士, 佐藤孝: “偏光干渉型光集積回路圧力センサにおける位相感度のダイヤフラム厚による違い,” 2000 年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, 講演番号 C-3-56 (2000-10)
4. 白井裕基, 後藤健士, 大河正志, 関根征士, 佐藤孝: “シリコン基板を用いた光集積回路圧力センサの作成および特性評価” 平成 12 年度電子情報通信学会信越支部大会, 講演番号 K6 (2000-10)
5. 内藤利弥, 七澤正洋, 大河正志, 関根征士, 佐藤孝: “偏光干渉型光集積回路加速度センサの作成,” 平成 12 年度電子情報通信学会信越支部大会, 講演番号 K7 (2000-10)
6. 七澤正洋, 大河正志, 関根征士, 佐藤孝: “偏光干渉型光集積回路圧力センサにおける位相感度の導波路位置依存性 ～0.2mm 厚ダイヤフラムに対する評価～,” 平成 12 年度電子情報通信学会信越支部大会, 講演番号 K9 (2000-10)
7. 目黒習, 大河正志, 関根征士, 佐藤孝: “マッハ・ツェンダ干渉計を用いた光集積回路センサ ～位相感度のダイヤフラム厚依存性～,” 電気学会東京支部新潟支所大会 (2000-11)
8. Atsushi Yamada, Yuki Shirai, Takeshi Goto, Masashi Ohkawa, Seishi Sekine, and Takashi Sato: “Relationship between sensitivity and waveguide position on diaphragm for silicon-based integrated optic pressure sensor,” in *Technical Digest of CLEO/Pacific Rim 2001*, pp.420-421 (2001-7)
9. 後藤健士, 山田敦史, 大河正志, 関根征士, 佐藤孝: “シリコン基板光集積回路圧力センサにおけるセンサ感度の導波路位置依存性,” 第 62 回応用物理学会学術講演会, 講演番号 12p-Y-7, (2001-9)
10. 岩瀬好彦, 大河正志, 関根征士, 佐藤孝: “偏光干渉型光集積回路圧力センサにおける位相感度の導波路位置依存性 ～矩形ダイヤフラムの辺の比による違い～,” 第 62 回応用物理学会学術講演会, 講演番号 12p-Y-8, (2001-9)
11. 佐藤拓郎, 目黒習, 大河正志, 関根征士, 佐藤孝: “マッハ・ツェンダ干渉計を用いた光集積回路圧力センサ ～位相感度の導波モード依存性～,” 平成 13 年度電子情報通信学会信越支部大会, 講演番号 K8, (2001-10)
12. Yumi Okamoto, Masahiro Nanasawa, Masashi Ohkawa, Seishi Sekine, and Takashi Sato: “Sensitivity dependence with respect to diaphragm thickness in integrated optic pressure sensor,” in *Technical Digest of the 3rd Asian Pacific Laser Symposium*, Paper # WePA45, p.95 (2002-9)
13. 時田亨, 後藤健士, 山田敦史, 大河正志, 関根征士, 佐藤孝: “シリコン基板光集積回路圧力センサの感度低下を伴わないダイヤフラム縮小則,” 第 63 回応用物理学会学術講演会, 講演番号 24p-A-10 (2002-9)
14. 佐藤拓郎, 大河正志, 関根征士, 佐藤孝: “マッハ・ツェンダ干渉型及び偏光干渉型光集積回路圧力センサの位相感度の比較,” 平成 14 年度電子情報通信学会信越支部大会, 講演番号 K1 (2002-10)

## 目 次

第1章	序論	1
第2章	光集積回路圧力センサの構成および動作原理	2
2-1	光集積回路センサの概要	2
2-2	構成および動作原理	3
第3章	光集積回路圧力センサの理論特性	5
3-1	動作解析法	5
3-2	センサの理論特性	7
3-2-1	センサ感度の導波路位置依存性	7
3-2-2	センサ感度のダイヤフラム厚依存性	7
3-2-3	センサ感度のダイヤフラム面積依存性	8
3-3	感度不変ダイヤフラム縮小則	9
第4章	感度不変ダイヤフラム縮小則の実証実験	10
4-1	光集積回路センサの作製	10
4-2	測定光学系	10
4-3	測定結果	11
4-3-1	センサ#1 (3.0 mm×15 mm×65 μm) の測定結果	11
4-3-2	センサ#2 (2.5 mm×12.5 mm×49 μm) の測定結果	13
4-3-3	センサ#3 (2.0 mm×10 mm×35 μm) の測定結果	14
4-4	考察	15
第5章	カテーテル先端型圧センサプロトタイプ of 作製	17
5-1	プロトタイプ of 設計	17
5-2	測定結果	18
第6章	結論	19
	参考文献	20

## 第1章 序論

1981年の光集積回路温度センサの報告<sup>[1]</sup>以降、光集積回路技術の一応用として光集積回路センサが注目を集め、圧力センサ<sup>[2-12]</sup>、変位センサ<sup>[13]</sup>、速度センサ<sup>[14]</sup>、湿度センサ<sup>[15]</sup>、ガスセンサ<sup>[16]</sup>など様々なセンサの実証実験が行われてきた。さらに、微細加工技術のめざましい進歩に伴い、近年、微細構造を有する光集積回路センサが数多く報告されている。<sup>[1-11,17]</sup>光集積回路センサは光波利用センシングと集積回路技術の利点を併せ持ち、小型軽量化が可能で、電磁雑音の影響を受けず、漏電の危険性がないため、過酷な電磁環境下あるいは危険なガス雰囲気中でも安全で信頼性の高い計測を行うことができるものと期待されている。

光集積回路センサの特徴が生かされる応用分野の一つに医用計測分野がある。現在、医用計測においては、血圧、体温、臓器の形状、体内の物質分布などを計測するために、血圧計、体温計、X線CT、MRIなど様々なセンシングシステムが用いられている。これらのセンシングシステムを用いた医用計測は、その侵襲の有無により無侵襲計測、侵襲計測に分けられる。さらに、その手段により、体外からの計測、体表からの計測、体腔からの計測、経穿刺針計測、経カテーテル計測、手術下計測、標本計測（検体計測）、体内埋め込み計測などに分類できる。この中でも、生体内圧測定に用いられるカテーテルを用いた計測の使用頻度は、単に心臓外科の手術、術後の検査のみならず、ICUやCCU室などにおける利用と相まって増加している。生体内圧測定の中で臨床時における観血式血圧測定には、カテーテルー圧センサ系とカテーテル先端型がある。カテーテルー圧センサ系は、生理食塩水などの液を満たしたカテーテルの末端に圧力センサをつなぎ、カテーテルの先端を計測しようとする部分に挿入して用いられ、安全性の面から臨床的に数多く使用されている。しかし、生体内圧の変化を動的に計測する場合、心臓や大血管の拍動によってカテーテルの振動による雑音が生じることがある。また、長いカテーテルで厳密な時間一圧力計測を行う場合においては、圧の変化は音速より速くは伝わらないため、時間応答性が悪くなる。一方、カテーテル先端型はカテーテルの先端に超小型センサを取り付けたもので、圧力信号がカテーテル先端で電気信号あるいは光信号に変換されるため、時間遅れがなく、カテーテルの振動などによる雑音の影響を受けることが少ないなどの特徴を持ち、特に正確な時間一圧力計測が必要となる場合に使用される。

カテーテル先端型圧センサは生体内で使用するため、センサの小型化が必要となり、センサ自体が小型なため発生する圧力が小さく、高感度であることが要求される。また、電気的および機械的安全性も重要となる。特に、心臓手術時などに使用する装置の場合、カテーテルが直接心臓に接触することもあるため、厳重な漏電防止対策が必要となる。もし、センサとして光集積回路圧力センサを使用できれば、漏電防止対策が不要となり、電磁氣的干渉による雑音の影響のおそれもなく、安全で正確なセンシングができると期待される。そこで、本研究では、カテーテル先端型圧センサとして利用可能な小型・高感度光集積回路圧力センサの開発を行った。

## 第2章 光集積回路圧力センサの構成および動作原理

### 2-1 光集積回路センサの概要

光集積回路センサは、一般に、光回路と被測定量を感知する感知部で構成される。感知部において、光波は被測定対象と相互作用し、被測定量の大きさに応じた変調を受ける。そして、変調を受けた光波を光検出器で検出するため、光回路で適当な処理を行う。光波の変調方式として、一般に光強度変調あるいは位相変調がよく利用される。光強度変調方式のセンサでは、出力光強度がセンサ信号そのものであるため、出力光を直接光検出器で検出すればよく、構成が比較的簡単になる。一方、位相変調方式のセンサでは、位相変化を直接検出することができないので、干渉光回路を利用して、位相変化を光強度変化に変換する必要がある。一般には、位相変調型の方が光強度変調型よりも感度が高いことが多い。図2-1に位相変調型の光回路の例を示す。

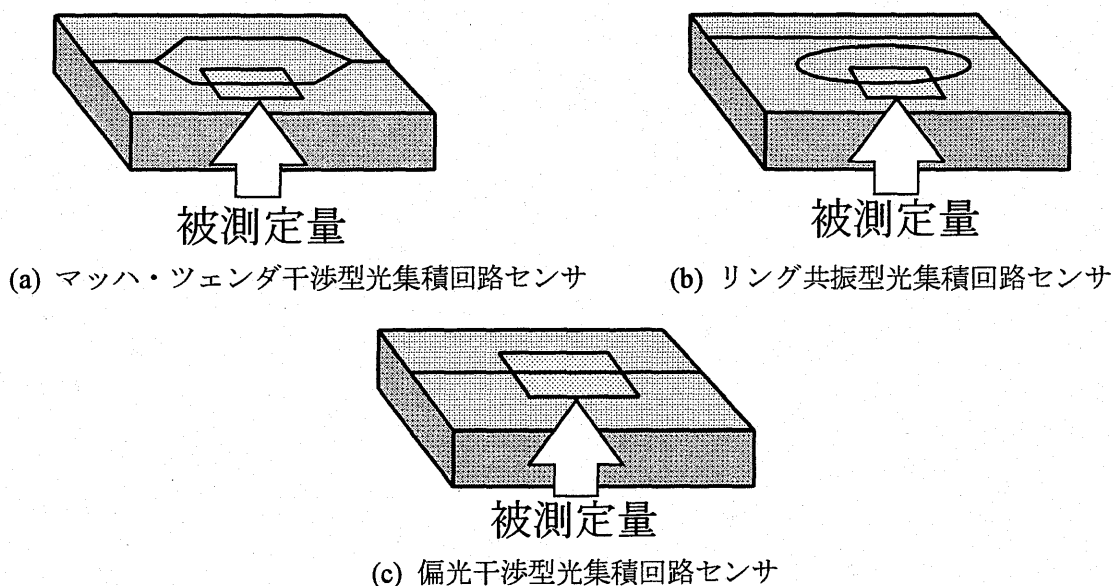


図2-1 位相変調型光集積回路センサの構成例

図2-1(a)は、光回路にマッハ・ツェンダ干渉計を利用したセンサの構成である。マッハ・ツェンダ干渉計は図のように2つのY分岐からなる。入力側のY分岐で導波光は1:1に分岐される。2本の平行導波路のうち一方はセンシング用導波路で、導波光は被測定対象によって、被測定量に応じた位相変化を受ける。他方は参照用導波路で、被測定対象による位相変化は受けない。この位相差をもった両導波光が出力側のY分岐で合波干渉することにより、位相差に応じた光強度変化が得られる。図2-1(b)はリング共振器を利用したセンサの構成である。リング共振器は、図のように直線光導波路とリング状光導波路からなり、両導波路が方向性結合器（両導波路が接近した部分）を介して結合している。直線光導波路に光波が入射されると、方向性結合器部で一部の光波がリング状光導波路に結合し、伝搬する。そして、リング状光導波路を伝搬し戻ってきた光波は、新たに伝搬しようとする光波と方向性結合器部で多重干渉する。方向性結合器部において各光波が同位相のとき、光エネルギーはリング状光導波路内に蓄積され、直線導波路からの出力光は最小となる。このような現象を共振といい、このときの周波数を共振周波数という。ところで、被測定対象によってリング状光導波路を伝搬する光波に位相変化が生じると、リング共振器の共振周波数が変化するため、この周波数変化量を検出すれば、被測定量の大きさを測定することができる。図2-1(c)はモード間干渉を利用した偏光干渉型光集積回路センサで、光回路は

一本の直線光導波路で構成される。被測定量の大きさに応じて 2 つの導波モード光の位相差が変化する。2 つのモードには、例えば、偏光方向が相直交する TM(-like)モードと TE(-like)モードが利用される。光導波路に TM(-like)モードと TE(-like)モードを等強度で入射すると、出力光の偏光状態は、2 つのモードの位相差に応じて、円偏光、楕円偏光あるいは直線偏光となる。出力光を検光子に通すことにより、位相差は光強度に変換され、これにより被測定量を測定することができる。このとき、検光子の偏光方向は両モードの偏光方向に対して  $45^\circ$  に設定する。

ところで、感知部の構造は、被測定量により光波の位相変化を生じやすくするため、被測定対象により様々な工夫がなされる。被測定対象が圧力である場合、感知部にはダイヤフラムが用いられることが多い。ダイヤフラムは薄板状の構造体で、圧力により歪みが生じやすくなっている。

本研究では、カテーテル先端型圧センサへの応用を念頭においているため、センサの小型化が不可欠である。光回路に Y 分岐やリング状光導波路を含むマツハ・ツェンダ型やリング共振型の構成を用いると、センササイズが大きくなり、小型化に不利となる。そこで、一本の直線光導波路で構成され、小型化に有利な偏光干渉型を採用することとした。

## 2-2 構成および動作原理

図 2-2 に光集積回路圧力センサの概略図を示す。図のように、センサは感圧部となるダイヤフラムと単一モード直線光導波路で構成される。この光導波路はダイヤフラム上に設けられ、最低次の TM-like, TE-like モード光のみを伝搬させる。

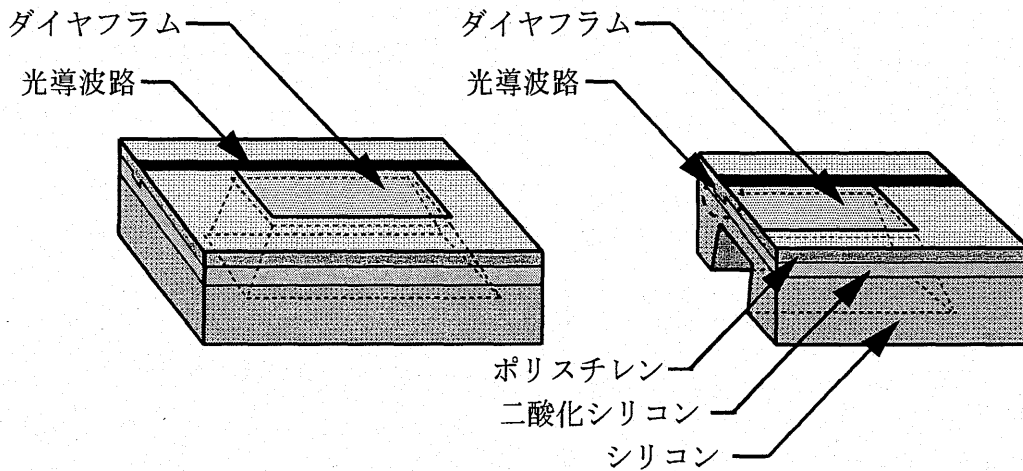


図 2-2 光集積回路圧力センサの概略図

ダイヤフラムに圧力が印加されると、ダイヤフラムにたわみが起こり、歪みが生じる。歪みは、光弾性効果により、ダイヤフラム上の光導波路に屈折率変化を引き起こす。この屈折率変化により、光導波路を伝搬する TM-like, TE-like モード光の位相が変化する。ここで、圧力印加によりダイヤフラムに生じる歪み分布は異方的であるので、光導波路に生じる屈折率変化も異方的となる。そのため、TM-like, TE-like モード光の受ける位相変化量が異なり、両モード光の間に位相差が生じる。この位相差を検出するため、図 2-3 のようにセンサを偏光子と検光子の間に置く。偏光子の偏光方向をセンサ基板面に対して  $45^\circ$  傾けることにより、両モード光を等強度で励振させる。励起された TM-like, TE-like モード光は、それぞれ異なる位相変化量  $\Delta\phi_{TM}$ ,  $\Delta\phi_{TE}$  を得るため、圧力印加時には両モード間で位相差  $\Delta\phi = \Delta\phi_{TM} - \Delta\phi_{TE}$  が生じる。出力端では、この位相差に応じて直線、楕円、円偏光のいずれかの偏光状態となる。検光子の偏光方向を入射光の偏光方向に対し  $90^\circ$  傾けることにより、



位相差に応じた出力光強度変化が得られる。この場合、出力光強度は印加圧力に対して正弦的に変化する。

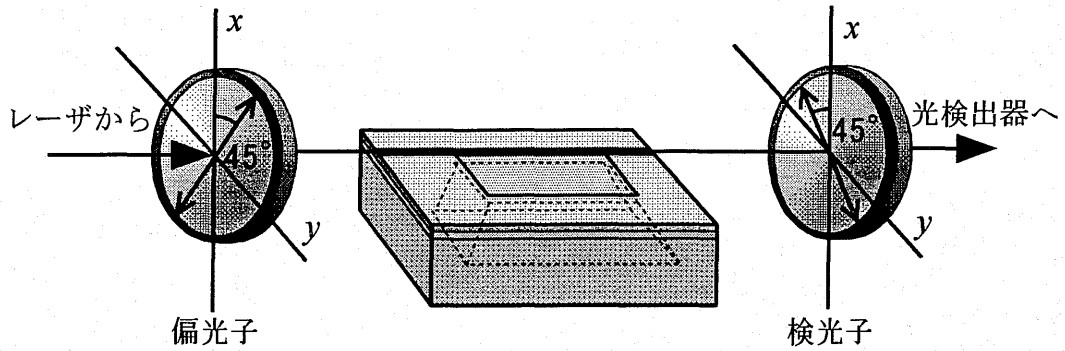


図 2-3 偏光子と検光子の偏光方向およびセンサとの配置

以上のように、本センサは印加圧力に対して出力光強度が正弦的に変化する。最大出力光強度を 1 に正規化すると、図 2-4 のような印加圧力-出力光強度特性となる。この特性の半周期を半波長圧力といい、位相差  $\pi$  rad に相当する。また、ここでは、 $\pi$  rad を半波長圧力で割った値、すなわち圧力 1kPa における位相差を、位相感度と定義する。本研究では、位相感度をセンサ感度としてセンサの特性評価に使用する。

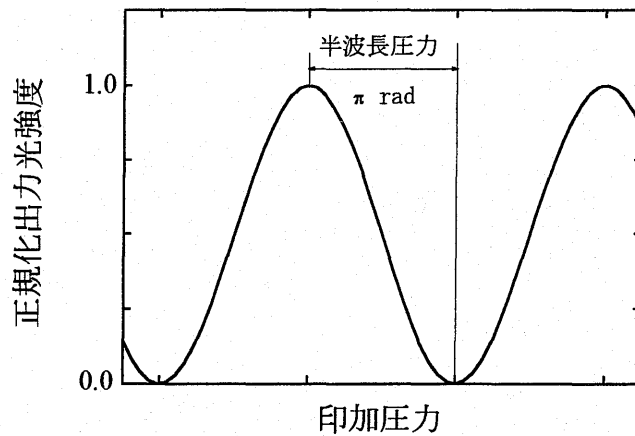


図 2-4 印加圧力-正規化出力光強度特性

### 第3章 光集積回路圧力センサの理論特性

#### 3-1 動作解析法

本センサのセンサ感度はダイヤフラムサイズに強く依存し、この関係を理論的に明らかにするために数値解析を行った。解析では、ダイヤフラムとして、四辺が固定された矩形ダイヤフラムを仮定し、面積を  $a \times b$ 、厚さを  $t$  とした。  $y-z$  平面をダイヤフラムの上面と下面の間にとり、  $x$  軸をダイヤフラム表面に対して垂直な方向とした。ここで、ダイヤフラムの辺  $a$  は  $y$  軸に平行で、辺  $b$  は  $z$  軸に平行であるとした。また、光導波路は  $z$  軸 (辺  $b$ ) と平行に作りつけられるものとした。

ところで、ダイヤフラムに圧力が印加されると、ダイヤフラムにたわみが生じる。このたわみ  $w$  は次式で表される平板の平衡方程式から求められる。<sup>[18]</sup>

$$\frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial y^2 \partial z^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial z^4} = \frac{q}{D} \quad (3-1)$$

ここで、  $q$  はダイヤフラムに働く圧力、  $D$  は曲げ剛性を表し

$$D = \frac{Yt^3}{12(1-\rho)} \quad (3-2)$$

と定義される。ただし、  $Y$  はヤング率、  $\rho$  はポアソン比を表す。上述の条件における式(3-1)の解、すなわちたわみ  $w$  は次式のような和の形で与えられる。<sup>[18]</sup>

$$w = w_0 + w_1 + w_2 \quad (3-3)$$

それぞれのたわみ  $w_0$ 、  $w_1$ 、  $w_2$  は、

$$w_0 = \frac{4qa^4}{\pi^5 D} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{(m-1)/2}}{m^5} \left( 1 - \frac{\alpha_m \tanh \alpha_m + 2}{2 \cosh \alpha_m} \cosh \frac{m\pi z}{a} + \frac{1}{2 \cosh \alpha_m} \frac{m\pi z}{a} \sinh \frac{m\pi z}{a} \right) \cos \frac{m\pi y}{a} \quad (3-4)$$

$$w_1 = -\frac{a^2}{2\pi^2 D} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} E_m \frac{(-1)^{(m-1)/2}}{m^2 \cosh \alpha_m} \left( \frac{m\pi z}{a} \sinh \frac{m\pi z}{a} - \alpha_m \tanh \alpha_m \cosh \frac{m\pi z}{a} \right) \cos \frac{m\pi y}{a} \quad (3-5)$$

$$w_2 = -\frac{b^2}{2\pi^2 D} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} F_m \frac{(-1)^{(m-1)/2}}{m^2 \cosh \beta_m} \left( \frac{m\pi y}{b} \sinh \frac{m\pi y}{b} - \beta_m \tanh \beta_m \cosh \frac{m\pi y}{b} \right) \cos \frac{m\pi z}{b} \quad (3-6)$$

と表せる。ただし、  $\alpha_m = m\pi b/2a$ 、  $\beta_m = m\pi a/2b$  である。また、式中の  $E_m$  と  $F_m$  は、固定端の条件 (ダイヤフラム面の傾きが 0) から、次の 2 つの境界条件を満たすように決定される。

$$\left( \frac{\partial w_0}{\partial z} \right)_{z=b/2} + \left( \frac{\partial w_1}{\partial z} + \frac{\partial w_2}{\partial z} \right)_{z=b/2} = 0 \quad (3-7)$$

$$\left( \frac{\partial w_0}{\partial y} \right)_{y=a/2} + \left( \frac{\partial w_1}{\partial y} + \frac{\partial w_2}{\partial y} \right)_{y=a/2} = 0 \quad (3-8)$$

このようにして求めたたわみ  $w$  を使って、ダイヤフラムに生じる応力は以下のように表さ

れる。

$$\sigma_x = T_1 = -\frac{3q}{4} \left\{ \frac{2}{3} - \frac{2}{t}x + \frac{1}{3} \left( \frac{2}{t}x \right)^3 \right\} \quad (3-9)$$

$$\sigma_y = T_2 = -\frac{Yx}{1-\rho^2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \rho \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3-10)$$

$$\sigma_z = T_3 = -\frac{Yx}{1-\rho^2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \rho \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (3-11)$$

応力はテンソル量で、 $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ はそれぞれ  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向の垂直応力を表す。この応力  $T$  と歪み  $S$  の間にフックの法則が成り立つとすれば、歪みはコンプライアンス  $s_{ij}$  を用いて

$$S_i = s_{ij} T_j, \quad (ij=1-6) \quad (3-12)$$

と表せる。歪みによって引き起こされる屈折率変化  $\Delta n$  は、光弾性係数  $p_{ij}$  を用いて、次のように与えられる。

$$\Delta n_i = -\frac{1}{2} n^3 p_{ij} S_j, \quad (i, j=1-6) \quad (3-13)$$

ところで、屈折率変化の各成分は導波光に与える効果が異なる。 $\Delta n_1$  は TM-like モード光の位相変化を引き起こし、 $\Delta n_2$  は TE-like モード光の位相変化を生じさせる。これらの屈折率変化によって TM-like, TE-like モード光が受ける位相変化量  $\Delta\phi_{\text{TM}}$ ,  $\Delta\phi_{\text{TE}}$  は、それぞれ次式により計算できる。<sup>[19]</sup>

$$\Delta\phi_{\text{TM}} \approx \int_{-b/2}^{b/2} \left( \frac{\omega \varepsilon_0 n}{2} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-t/2}^{t/2} E_x(x, y) \Delta n_1(x, y, z) E_x^*(x, y) dx dy \right) dz \quad (3-14)$$

$$\Delta\phi_{\text{TE}} = \int_{-b/2}^{b/2} \left( \frac{\omega \varepsilon_0 n}{2} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-t/2}^{t/2} E_y(x, y) \Delta n_2(x, y, z) E_y^*(x, y) dx dy \right) dz \quad (3-15)$$

ここで  $\omega$  は光の角周波数、 $\varepsilon_0$  は真空の誘電率であり、\*は複素共役を表す。また、 $E_x$ ,  $E_y$  はそれぞれ TM-like モード光の  $x$  方向の電界成分、TE-like モード光の  $y$  方向の電界成分である。これより、ダイヤフラム上で両モード光に生じる位相差  $\Delta\phi$  は

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{\text{TM}} - \Delta\phi_{\text{TE}} \quad (3-16)$$

で与えられる。

この数値解析において、センサ構成材料の材料力学定数、光学定数が必要である。材料力学定数であるヤング率およびポアソン比には、シリコンの<110>方向の値を用いた。また、屈折率変化を求める際に使用する光弾性係数については、ポリスチレンの値が分からないため、代わりに熔融石英の値を用いた。計算で使用した具体的な値は以下のとおりである。

使用した材料力学定数 (シリコン<110>方向)

$$Y = 1.7 \times 10^{11} \text{ Pa}, \quad \rho = 0.3$$

$$s_{ij} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{12} & s_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} \end{pmatrix}$$

$$s_{11} = 5.88 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}, \quad s_{12} = -1.76 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$$

使用した光学定数 (熔融石英)

$$n = 1.59$$

$$p_{ij} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} \end{pmatrix}$$

$$p_{11} = 1.21 \times 10^{-1}, \quad p_{12} = 2.70 \times 10^{-1}, \quad p_{44} = 7.45 \times 10^{-2}$$

## 3-2 センサの理論特性

### 3-2-1 センサ感度の導波路位置依存性

圧力印加時におけるダイヤフラムのたわみ方は場所によって異なるため、各部分に生じる歪みは一様でない。したがって、位相感度はダイヤフラム上の導波路位置によって異なる。そこで、導波路位置の関数として位相感度を計算した。図 3-1 はその計算結果で、ダイヤフラムの辺の比をパラメータとして 3 種類の結果を示している。各結果とも、導波路がダイヤフラムの端に位置するとき、位相感度がそれぞれ 1 となるように正規化してある。図において、導波路位置  $\pm a/2$  はダイヤフラムの端に、導波路位置 0 はダイヤフラム中央に対応する。図より、導波路がダイヤフラムの端に位置するとき、位相感度が最も高くなっている。しかし、導波路位置が端から少しずれると、位相感度が大きく低下することも分かる。一方、ダイヤフラム中央においても、辺の比  $a/b$  が 1 以上のときには、比較的大きな位相感度となっている。また、導波路位置が中央から少しずれても、位相感度は大きく変化しない。つまり、大きなセンサ感度を必要とするときには、導波路をダイヤフラムの端に設置するのが適当と言える。また、本研究のように、位相感度の比較を行うような場合には、導波路の位置ずれの影響を受けにくい、ダイヤフラム中央に導波路を設置するのが有利である。

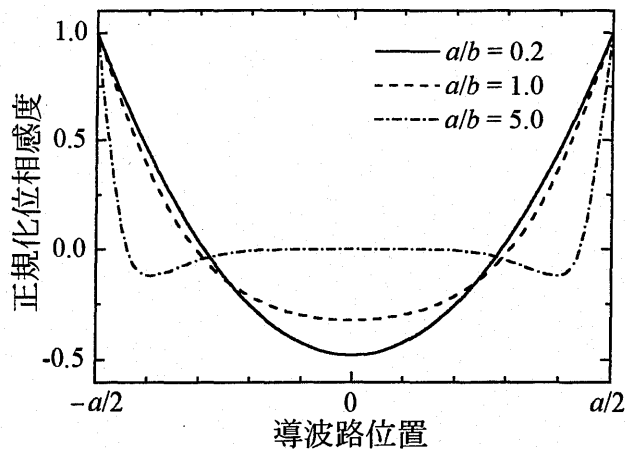


図 3-1 位相感度と導波路位置の関係

### 3-2-2 センサ感度のダイヤフラム厚依存性

ダイヤフラムの辺の比と面積を一定とし、位相感度をダイヤフラム厚の関数として計算した。計算では、ダイヤフラムの辺の比を  $a/b = 0.2$  とし、光導波路はダイヤフラムの辺  $b$  上 ( $y = \pm a/2$ ) に位置するものとした。図 3-2 は計算結果で、ダイヤフラム厚が  $10 \mu\text{m}$  のとき、位相感度が 1 となるように正規化してある。図 3-2 より、ダイヤフラム厚が導波層の厚さ (計算では  $1.0 \mu\text{m}$  と仮定) よりも十分厚いとき、両対数グラフにおいて傾きが  $-2$  であるので、位相感度はダイヤフラム厚の 2 乗に反比例することが分かる。ダイヤフラム厚が  $1.5 \mu\text{m}$  以下のときには位相感度が減少しているが、これは式(3-14)、(3-15)に示した電界分布と屈折率変化分布との間の重なり積分が小さくなるためである。ダイヤフラム厚を薄くすると耐圧も減少するので、実際のセンサでは、そこまでダイヤフラムを薄くする必要はないと言える。なお、このような関係は、任意の辺の比、任意の導波路位置で成り立つ。

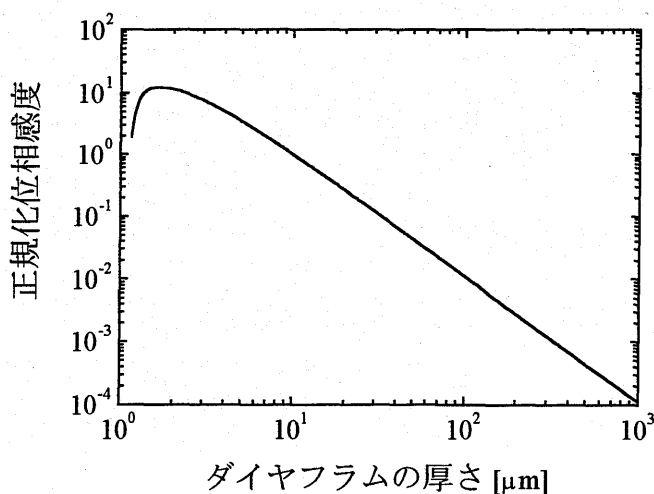


図 3-2 位相感度とダイヤフラム厚の関係

### 3-2-3 センサ感度のダイヤフラム面積依存性

ダイヤフラムの辺の比と厚さを一定とし、位相感度をダイヤフラムの辺  $a$  の関数として計算した。計算では、ダイヤフラムの辺の比を  $a/b = 0.2$  とし、光導波路はダイヤフラムの辺  $b$  上 ( $y = \pm a/2$ ) に位置するものとした。図 3-3 はその計算結果である。ただし、ダイヤフラムの辺  $a$  の長さが  $1\text{ mm}$  のとき、位相感度が  $1$  となるように正規化してある。図 3-3 より、両対数グラフにおいて傾きが  $3$  であるので、位相感度はダイヤフラムの辺  $a$  の  $3$  乗に比例することが分かる。なお、このような関係は、任意の辺の比、任意の導波路位置で成り立つ。

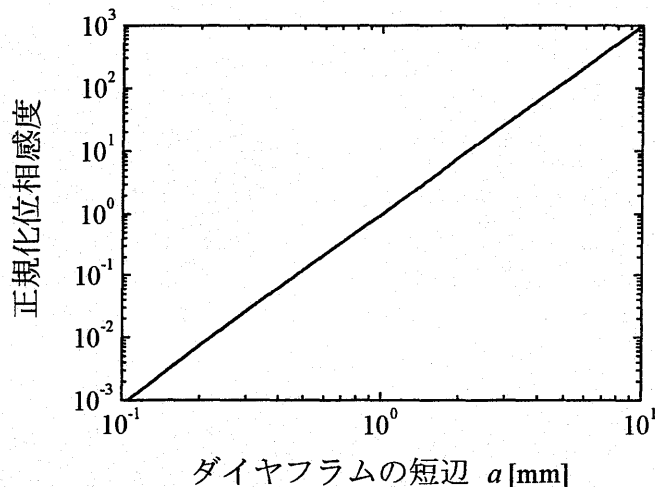


図 3-3 位相感度とダイヤフラムの短辺の関係

### 3-3 感度不変ダイヤフラム縮小則

3-2-2 項および 3-2-3 項の数値計算結果から、ダイヤフラムの辺の比  $a/b$  と厚さ  $t$  が一定ならば、位相感度は辺  $a$  の  $3$  乗に比例し、ダイヤフラムの辺の比  $a/b$  と面積  $a \times b$  が一定ならば、位相感度は厚さ  $t$  の  $2$  乗に反比例することが分かった。ここで、 $a^3/t^2$  で定義されるスケールレンクスを導入すると、これらの解析結果より、辺の比  $a/b$  とスケールレンクス  $a^3/t^2$  が一定である限り、ダイヤフラムを縮小させても位相感度は変化しないはずである。つまり、ダイヤフラムの面積を小さくすれば感度は低下するが、この感度低下分を補うよう、同時にダイヤフラム厚を薄くすれば感度を一定に保つことができる。このような感度不変ダイヤフラム縮小則は、既に十分な感度を有するセンサが存在し、さらなるセンサの小型化が必要であるとき、特に利用価値が高い。

## 第4章 感度不変ダイヤフラム縮小則の実証実験

### 4-1 光集積回路センサの作製

第3章で述べたように、本センサは、感圧部となるダイヤフラムと単一モード直線光導波路で構成される。今回、感度不変ダイヤフラム縮小則を実験的に明らかにするため、スケーリングレックス  $a^3/l^2$  とダイヤフラムの辺の比  $a/b$  がそれぞれ等しいセンサを3種類作製した。図4-1は作製したセンサの概略図である。

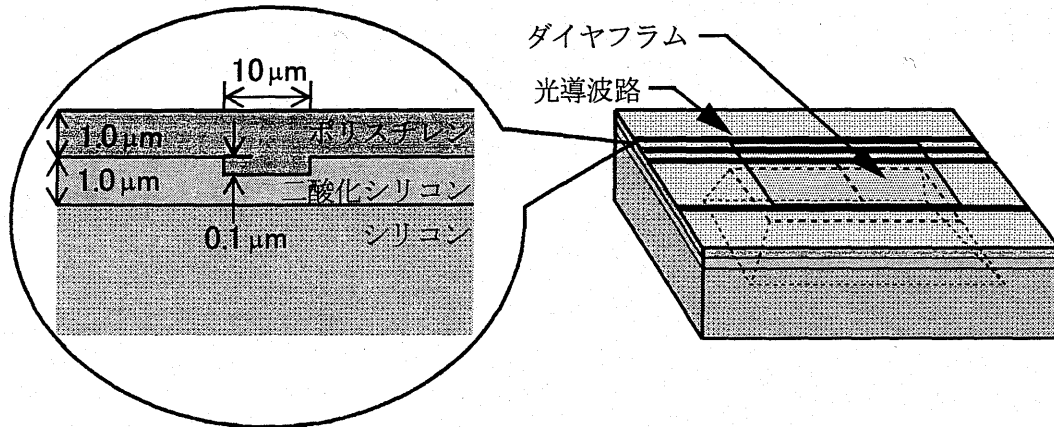


図4-1 試作したセンサの概略図と光導波路の断面図

作製したセンサのダイヤフラムサイズは、それぞれ  $3.0\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 65\text{ }\mu\text{m}$  (センサ#1),  $2.5\text{ mm} \times 12.5\text{ mm} \times 49\text{ }\mu\text{m}$  (センサ#2),  $2.0\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 35\text{ }\mu\text{m}$  (センサ#3) である。3つのセンサとも、スケーリングレックスは約  $6.5\text{ m}$ , ダイヤフラムの辺の比は  $0.2$  となっている。光導波路はリッジ型に分類される光導波路で、導波路幅を  $10\text{ }\mu\text{m}$ , 導波層の厚さを  $1.1\text{ }\mu\text{m}$  とした。また、二酸化シリコンの膜厚は、導波光のシリコン基板への放射損失が導波路自体の伝搬損失に対して十分小さくなるように、 $1.0\text{ }\mu\text{m}$  とした。位相感度と導波路位置の関係についても調べるため、このような光導波路をダイヤフラム上に  $0.1\text{ }\mu\text{m}$  間隔で作製した。

センサの作製では、まず厚さ  $420\text{ }\mu\text{m}$  の (100) シリコン基板を  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  で湿式熱酸化して、厚さ  $0.5\text{ }\mu\text{m}$  の熱酸化膜を形成した。その後、シリコン基板裏面にフォトレジストを塗布し、フォトリソグラフィによりフォトレジスト上にダイヤフラムの形状を転写した。現像処理後のフォトレジスト膜をエッチングマスクとして使い、基板を緩衝フッ酸溶液に浸して、露出された二酸化シリコンを除去した。その後、液温  $50\text{ }^\circ\text{C}$  の水酸化カリウム溶液に浸し、液を攪拌しながら異方性エッチング<sup>[20]</sup>を行った。異方性エッチング後、二酸化シリコン薄膜を完全に除去し、再び熱酸化により厚さ  $1.0\text{ }\mu\text{m}$  の二酸化シリコン膜を形成した。そして、フォトリソグラフィとエッチングにより、二酸化シリコン上に幅  $10\text{ }\mu\text{m}$ , 深さ  $0.1\text{ }\mu\text{m}$  の溝を間隔  $0.1\text{ }\mu\text{m}$  で刻みつけた。最後に、ポリスチレンをスピニングして、リッジ型チャネル光導波路を作製した。

### 4-2 測定光学系

作製したセンサの印加圧力-出力光強度特性の評価を行った。図4-2に今回用いた測定光学系を示す。光源として波長  $633\text{ nm}$  の He-Ne レーザを使用し、図2-3で示した偏光子の代わりに、レーザの偏光方向をセンサ基板面に対して  $45^\circ$  傾けた。導波光の励起には端面結合法を用いた。また、ダイヤフラムの上面と下面に圧力差を与えるため、センサ基板を支

持台を接着し、シリコンチューブ、注射器を接続した。注射器の内筒の押し引きにより、ダイヤフラムへの加圧、減圧を行った。印加圧力の範囲は-40 kPa から 40 kPa までとし、内筒の押し引きの量から圧力を算出した。印加圧力の値はゲージ圧で、エッチングされた空洞内の圧力が、大気圧よりも高ければ正、低ければ負とした。

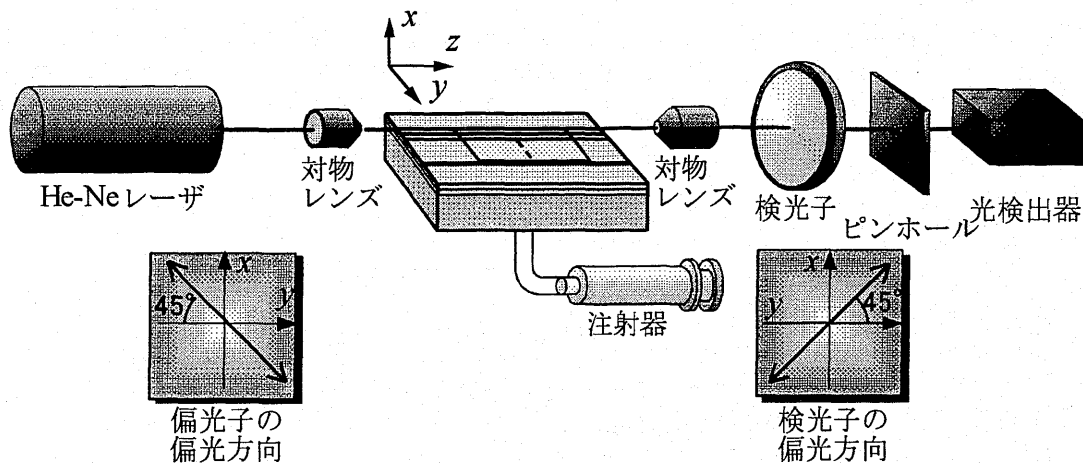


図 4-2 測定光学系

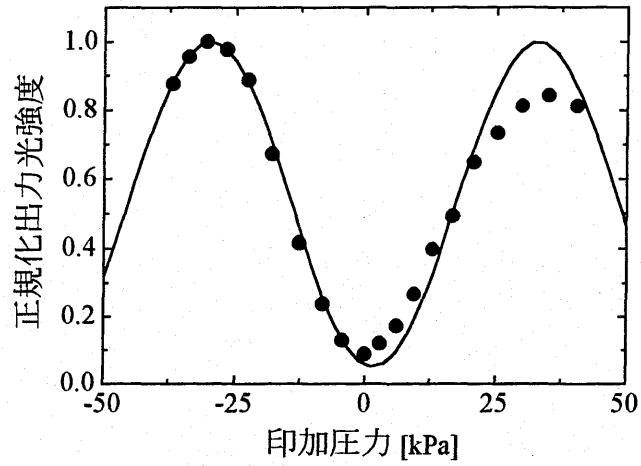
### 4-3 測定結果

#### 4-3-1 センサ#1 (3.0 mm × 15 mm × 65 μm) の測定結果

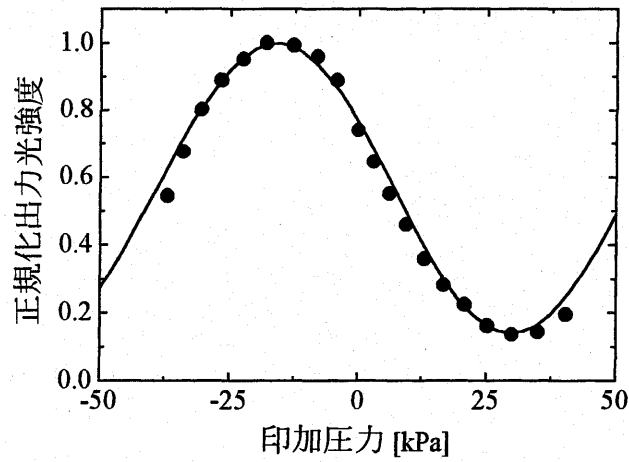
図 4-3 はダイヤフラムサイズ 3.0 mm × 15 mm × 65 μm のセンサ#1 における印加圧力-出力光強度特性の測定結果である。図(a)と(b)は、それぞれダイヤフラムの端に最も近い導波路とダイヤフラムの中央に最も近い導波路における結果である。図中の点は測定値で、出力光強度の最大値を 1 に正規化してある。また、図の曲線は三角関数でフィッティングした結果で、この曲線の半周期が半波長圧力に対応する。図 4-3(a), (b)より、半波長圧力はそれぞれ 31 kPa, 46 kPa で、これらを位相感度に換算すると 100 mrad/kPa, 69 mrad/kPa となる。

導波光が確認された他の光導波路に対しても同様の測定を行い、位相感度を評価した。図 4-3(c)はその結果で、導波路位置と位相感度の関係を表す。図の曲線は、ダイヤフラムの辺の比が 0.2 のときの理論値を基にフィッティングした曲線である。図 4-3(a), (b)に対応する導波路位置は、図(c)においてそれぞれ導波路位置-1.5 mm, 0.0 mm である。位相感度の正負については、今回の測定方法では区別することができないため、理論解析結果を参考にして判別している。ところで、図(c)において、ダイヤフラム端付近で測定値とフィッティング曲線との差が大きくなっている。この原因として、導波路がダイヤフラムの縁に平行に作製できていなかったためではないかと考えている。

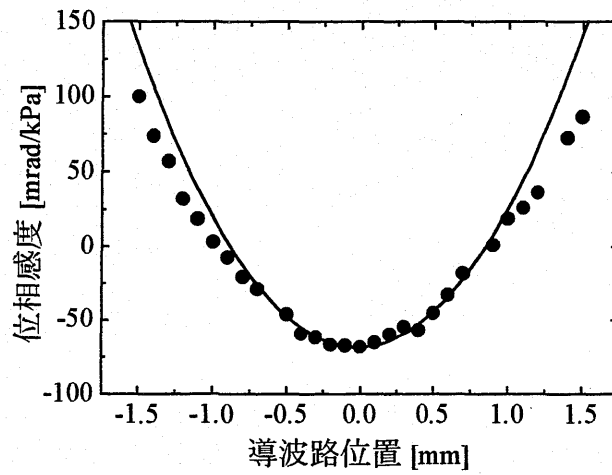




(a) ダイアフラム端に最も近い光導波路における印加圧力-出力光強度特性の測定結果



(b) ダイアフラム中央に最も近い光導波路における印加圧力-出力光強度特性の測定結果

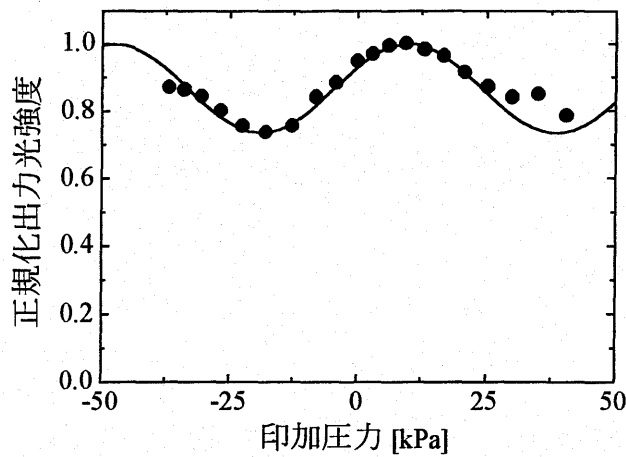


(c) 導波路位置と位相感度の関係

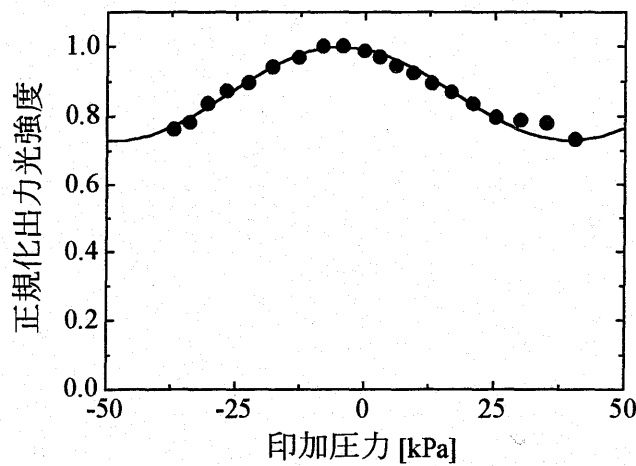
図 4-3 測定結果

#### 4-3-2 センサ#2 (2.5 mm × 12.5 mm × 49 μm) の測定結果

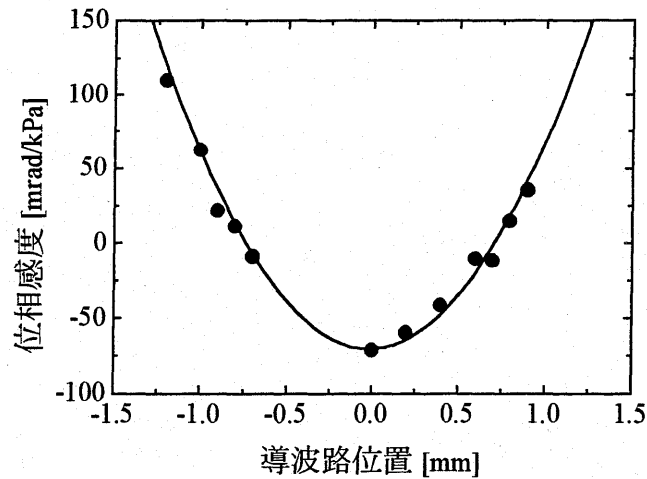
図 4-4 はダイヤフラムサイズ 2.5 mm × 12.5 mm × 49 μm のセンサ#2 における測定結果で、図(a), (b)はそれぞれダイヤフラムの端に最も近い光導波路とダイヤフラムの中央に最も近い光導波路に対する結果である。図 4-4(a), (b)より、半波長圧力はそれぞれ 29 kPa, 49 kPa で、これに対応する位相感度は 110 mrad/kPa, 72 mrad/kPa である。図 4-4(c)は導波路位置と位相感度の関係である。測定点がいくつか欠けているが、これは、導波路の出来が悪く、導波光が確認できなかったためである。なお、図 4-4(a), (b)の導波路位置は、それぞれ図(c)において導波路位置-1.2 mm, 0.0 mm に対応している。



(a) ダイヤフラム端に最も近い光導波路における印加圧力-出力光強度特性の測定結果



(b) ダイヤフラム中央に最も近い光導波路における印加圧力-出力光強度特性の測定結果

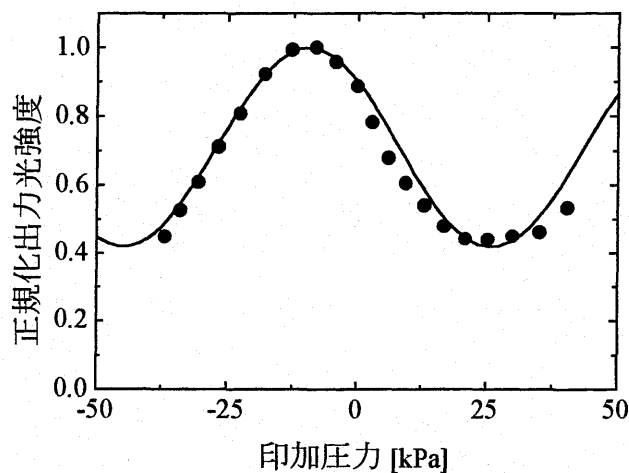


(c) 導波路位置と位相感度の関係

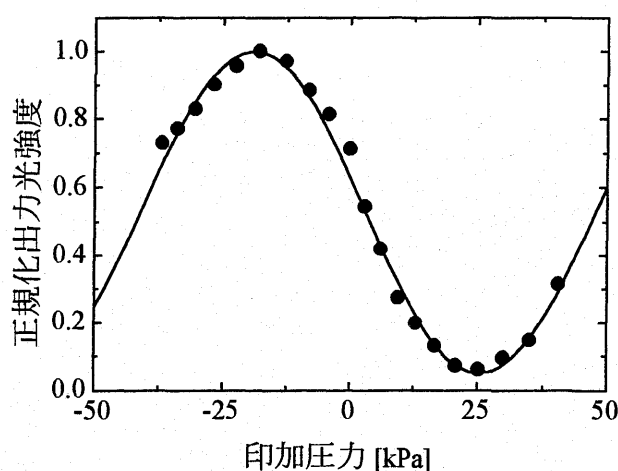
図 4-4 測定結果

#### 4-3-3 センサ#3 (2.0 mm × 10 mm × 35 μm) の測定結果

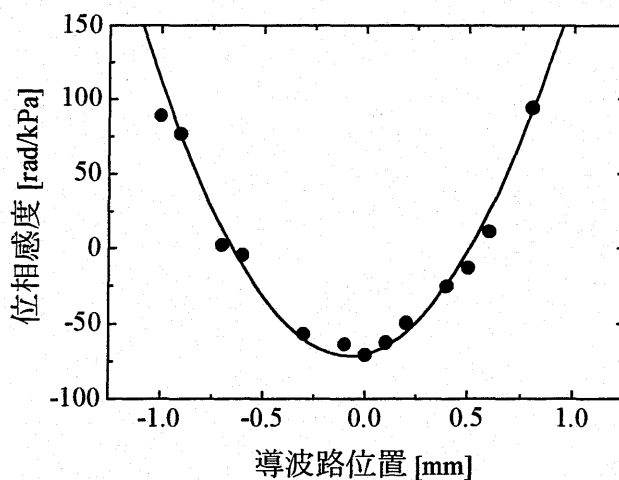
図 4-5 はダイヤフラムサイズ 2.0 mm × 10 mm × 35 μm のセンサ#3 における測定結果で、図(a), (b)はそれぞれダイヤフラムの端に最も近い導波路とダイヤフラムの中央に最も近い導波路における結果である。図 4-5(a), (b)より、半波長圧力はそれぞれ 36 kPa, 44 kPa で、これに対応する位相感度は 89 mrad/kPa, 71 mrad/kPa である。図 4-5(c)は導波路位置に対する位相感度の関係である。図 4-5(a), (b)に対応する導波路位置はそれぞれ図(c)において導波路位置 -1.0 mm, 0.0 mm である。前項と同様に、測定点がいくつか欠けているが、これは、導波路の出来が悪く、導波光が確認できなかったためである。



(a) ダイヤフラム端に最も近い光導波路における印加圧力—出力光強度の測定結果



(b) ダイアフラム中央に最も近い光導波路における印加圧力ー出力光強度特性の測定結果



(c) 導波路位置と位相感度の関係  
図 4-5 測定結果

#### 4-4 考察

表 4-1 に、今回作製した 3 つのセンサの概要と測定結果をまとめた。ダイアフラム中央における位相感度は、感度不変ダイアフラム縮小則の予測通り、3 つのセンサともほぼ同じ値となった。一方、ダイアフラムの端における位相感度には、約 20 mrad/kPa の違いが生じた。この原因の 1 つに光導波路の位置ずれの影響がある。位相感度は光導波路位置に強く依存しており、図 4-3(c)、図 4-4(c)、図 4-5(c)からも分かるように、ダイアフラム端付近の方が、ダイアフラム中央付近に比べ、光導波路位置による感度の変化が急である。すなわち、光導波路の位置ずれの影響は、ダイアフラム中央付近よりも、ダイアフラム端付近の方が大きい。現在の作製精度では導波路の位置ずれは避けられないため、ダイアフラム端における位相感度の大きな違いは導波路の位置ずれによるものと考えられる。導波路の位置ずれによる影響を抑えるには、3-2-1 項で述べたようにダイアフラム中央付近の位相感度を用いて比較を行うのが良い。以上のことから、ダイアフラム中央付近の導波路において位相感度がほぼ一致し、さらにダイアフラム端においても位相感度の違いは小さく、導波路の位置ずれで説明がつく程度であるので、今回作製したセンサは感度不変ダイアフラム縮小則

に従っていると言える。

表 4-1 作製したセンサにおける位相感度の比較

		センサ#1	センサ#2	センサ#3
ダイヤフラムサイズ	幅 [mm]	3.0	2.5	2.0
	長さ [mm]	15	12.5	10
	厚さ [ $\mu\text{m}$ ]	64	49	35
ダイヤフラムの辺の比 $a/b$		0.2		
スケーリングレックス $a^3/l^2$ [m]		6.6	6.4	6.5
ダイヤフラム端に最も近い導波路における位相感度 [mrad/kPa]		100	110	89
ダイヤフラム中央に最も近い導波路における位相感度 [mrad/kPa]		-69	-72	-71

次に、印加圧力-出力光強度特性における初期位相のずれ、消光比について考察する。すべての図において、圧力無印加時に出力光強度が最小となっておらず、初期位相のずれが見られる。この原因は TM-like モードと TE-like モードの等価屈折率が互いに異なるためであるが、ここで行った位相感度の比較に悪影響を及ぼすものではない。ただ、センサの実用を考える場合、初期位相が変わるのは望ましくないため、今後初期位相の調整法について検討する必要がある。また、図 4-4(a), (b)については、消光比がそれぞれ 1.33 dB, 1.35 dB と非常に低い値となった。これは光検出器の前のピンホールで背景光を完全に排除できなかったためである。しかし、位相感度の算出に悪影響を及ぼす程低い値ではなく、上述の測定結果に対する信頼性を下げるものではない。したがって、ここで得られた感度不変ダイヤフラム縮小則に対する実験的知見は信頼性が高いと言える。

ところで、本研究では光集積回路圧力センサの応用として、カテーテル先端型圧センサを念頭においている。必要となる圧計測範囲は、大動脈圧において正常時で 20 kPa 以下であり、緊急時を考慮しても 40 kPa で十分と考えられる。この 40 kPa をセンサの半波長圧力に対応するものと見なすと、センサに必要な位相感度は約 80 mrad/kPa となる。今回作製したセンサの位相感度はダイヤフラムの端で約 100 mrad/kPa、ダイヤフラム中央で約 70 mrad/kPa であり、血圧計測に応用するのに十分な感度であると言える。また、今回実証した感度不変ダイヤフラム縮小則によれば、感度を保ったまま、目標とする大きさまでセンサを縮小することが可能である。例えば、0.5 mm×2.5 mm×4.4  $\mu\text{m}$  のダイヤフラムは、辺の比が 0.2 で、スケーリングレックスが約 6.5 m であるので、今回作製したセンサと同じ感度を持つものと期待され、この大きさであればカテーテルにも組み込み可能と思われる。

## 第5章 カテーテル先端型圧センサプロトタイプ of 作製

### 5-1 プロトタイプ of 設計

図 5-1 にカテーテル先端型圧センサプロトタイプを示す。図のように、シリコン基板光集積回路圧力センサの入力側端面に光ファイバを接続し、出力側に反射板を設置して、角のない丸みのある弾丸形状の中に組み込んでいる。カテーテルを直接血管内に挿入して行う圧計測では、血流による動圧の影響が問題になることが知られている。ここで、動圧とは血流の運動エネルギーにより発生するもので、流速の影響が大きい。ところで、圧力センサの設置方法には、カテーテルの先端に圧力感知部を設ける先端圧型と、カテーテル側面に圧力感知部を設ける側圧型がある。カテーテルを血管内に挿入した際、先端圧型は、圧感知部が血流に対しほぼ直角になり流速の影響を受けやすく、動圧の影響が避けられない。一方、側圧型は、圧感知部が血流に対してほぼ平行になるため、流速の影響をほとんど受けない。そこで、本研究では、動圧の影響が少ない側圧型を用いることとした。また、圧力の計測方法には、大気圧との差を測定するゲージ圧計測と、絶対圧計測がある。カテーテル先端型圧センサプロトタイプでは、カテーテル内に大気に通じている管を設けることで、一般的によく使用されるゲージ圧計測を行えるようにした。

入射光は光ファイバを通り圧力センサ端面に入射される。入射された光波はダイヤフラム上部の導波路で印加圧力による変調を受け、反射板に到達する。反射板により反射された光波は、再び導波路に戻り、光ファイバを通して出射光となる。本研究では、このようなカテーテル先端型圧センサプロトタイプ of 作製を目指した。

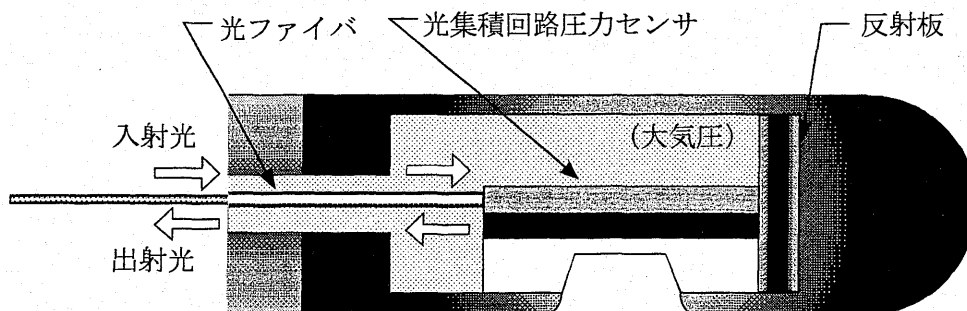


図 5-1 カテーテル先端型圧センサプロトタイプ

今回、カテーテル先端型圧センサを想定して、図 5-2 に示すようなプロトタイプを試作した。このプロトタイプ of 外形は、血管内を傷つけないためにシリコン基板集積回路を筒で覆い丸みを帯びた形状となっている。ここでは、大気圧を基準としたゲージ圧計測を行うため、ダイヤフラム上部は大気に開放する形とした。今回試作したプロトタイプは、6F カテーテル (外径 2 mm) を想定し、模擬カテーテル of 外径を 10 倍の直径 20 mmφとした。そのため、センササイズを幅 10 mm×長さ 20 mm×厚さ 300 μm に設定し、ダイヤフラムサイズを 1.5 mm×7.5 mm×23 μm とした。このダイヤフラムサイズは、ダイヤフラム of 辺の比  $a/b$  が 0.2、スケーリングレングスが約 6.5 μm で、前章で述べたセンサに感度不変ダイヤフラム縮小則を適用し、縮小したものとなっている。したがって、センサ感度は、ダイヤフラム中央の導波路に対して 70 mrad/kPa 程度、ダイヤフラム端 of 導波路に対して約 100 mrad/kPa が期待される。

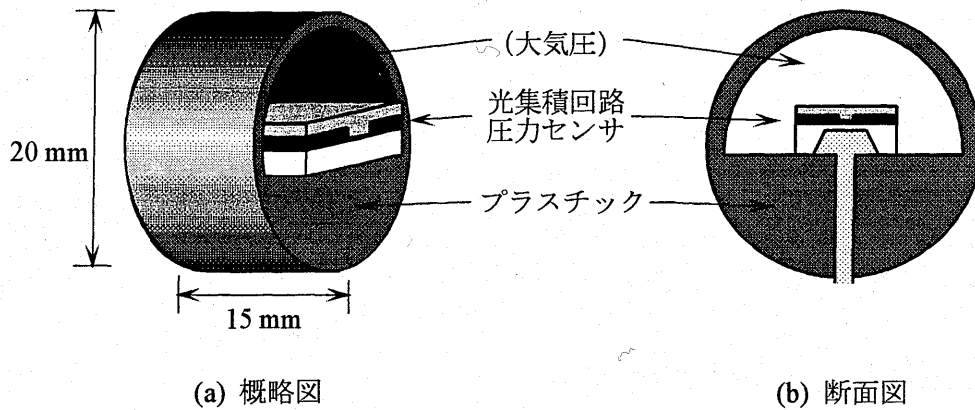


図 5-2 試作したセンサの概形

## 5-2 測定結果

図 5-3 に印加圧力-出力強度特性の測定結果を示す。図中の点は測定値で、曲線はコンピュータ処理によるフィッティング曲線である。この正弦的に変化する曲線の半周期分が半波長圧力に相当する。図 5-3 より半波長圧力 39 kPa で、これを位相感度に換算すると 81 mrad/kPa となる。この結果については、残念ながら導波路位置を特定することができなかったが、ダイヤフラムの端付近にあるものと思われる。ただし、この感度は感度不変ダイヤフラム縮小則から期待される約 100 mrad/kPa に達しておらず、前章の結果を参考にと、導波路がダイヤフラムの端から 0.1 mm 程度ずれていたのではないかと推察される。

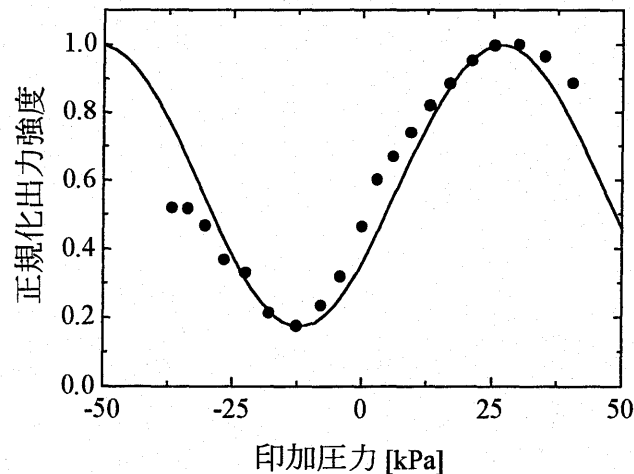


図 5-3 測定結果

ところで、今回得られたセンサ感度 81 mrad/kPa は血圧測定用センサとして十分な感度である。また、試作したセンサのサイズは、一般的なカテーテル先端型圧センサと比較すると 5~20 倍のサイズとなるが、先に述べた感度不変ダイヤフラム縮小則により、ダイヤフラムサイズを縮小することができる。これより、センサ感度を保ったまま、カテーテルに組み込み可能なサイズまでセンサを小型化することが可能となる。今後、本研究の結果を基にセンサを小型化できれば、近い将来、カテーテル先端型圧センサを実現できるものと考えている。

## 第6章 結論

本研究では、光集積回路センサが医用計測に適した特徴を有することに着目し、カテーテルに組み込み可能な小型・高感度光集積回路圧力センサに関する研究を行った。

まず、圧力センサの動作解析を行い、センサ感度のダイヤフラムサイズ（面積  $a \times b$ 、厚さ  $t$ ）依存性や導波路位置依存性について考察した。ただし、ダイヤフラムの四辺は完全固定端とし、導波路は辺  $b$  に平行にダイヤフラム上に設置するものとした。その結果、導波路位置とセンサ感度の関係については、導波路がダイヤフラムの端に位置するときに感度が最大となることが分かった。しかし、導波路位置がダイヤフラムの端からずれると、感度が大きく減少する。一方、導波路がダイヤフラムの中央に位置するときも、ダイヤフラムの辺の比  $a/b$  が 1 以下のときには比較的高い感度が得られ、しかも導波路の位置ずれの影響も受けにくいことが分かった。したがって、ダイヤフラムサイズを変えて、感度を比較する場合には、導波路位置をダイヤフラムの中央に設置した方が、信頼性が高いと言える。ダイヤフラム厚とセンサ感度の関係については、ダイヤフラムの大きさを変えなければ、感度はダイヤフラム厚の 2 乗に反比例することが分かった。また、ダイヤフラムの大きさとセンサ感度の関係については、ダイヤフラムの辺の比とダイヤフラム厚を変えなければ、感度は辺  $a$  あるいは辺  $b$  の長さの 3 乗に比例することが分かった。

以上の考察結果を基に、「辺の比  $a/b$  とスケーリングレックス  $a^3/t^2$  が一定である限り、ダイヤフラムを縮小させても位相感度は変化しない」という感度不変ダイヤフラム縮小則を導き出した。そして、ダイヤフラムサイズの異なる 3 種類のセンサを作製して、このダイヤフラム縮小則を実験的に調べた。実際のダイヤフラムサイズは  $3.0 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 65 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $2.5 \text{ mm} \times 12.5 \text{ mm} \times 49 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $2.0 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 35 \text{ }\mu\text{m}$  で、辺の比が 0.2、スケーリングレックスが約 6.5 m となっている。実験の結果、3 つのセンサとも、ダイヤフラム中央の導波路において位相感度約 70 mrad/kPa、ダイヤフラム端において位相感度約 100 mrad/kPa が得られた。センサ感度に対する導波路の位置ずれの影響が少ないダイヤフラムの中央において、感度がほぼ一致し、感度不変ダイヤフラム縮小則は実験的にも成り立つことが確認できた。ダイヤフラム端の導波路においては、約 20 mrad/kPa の違いが見られたが、導波路位置のずれによる感度低下で説明できる程度であり、今回の結論に矛盾はないと考えている。ところで、試作センサの感度は、本研究で設定した感度条件 80 mrad/kPa をほぼ満たしており、血圧計測には問題のない十分な感度と言える。しかし、3 種類のセンサの中で、最も小さいダイヤフラムサイズは  $2.0 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 35 \text{ }\mu\text{m}$  であり、今後感度不変ダイヤフラム縮小則に基づいたセンサの小型化が必要である。ダイヤフラム縮小則によると、ダイヤフラムサイズを  $0.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm} \times 4.4 \text{ }\mu\text{m}$  としても、試作センサと同じ感度が得られるものと期待される。実際にこのようなセンサが実現できれば、外径 2 mm 程度のカテーテルに組み込むことは十分に可能と言える。

さらに、上述の試作結果を基に、カテーテル先端型圧センサプロトタイプを作製を行った。センサのダイヤフラムサイズは  $1.5 \text{ mm} \times 7.5 \text{ mm} \times 23 \text{ }\mu\text{m}$  で、辺の比とスケーリングレックスはそれぞれ 0.2 および 6.4 m であった。この辺の比とスケーリングレックスは感度不変ダイヤフラム縮小則の実証実験で作製したものとほぼ同じで、一回り小さいダイヤフラムサイズとなっている。測定の結果、センサの位相感度は 81 mrad/kPa と算出された。今回作製したプロトタイプはヘッド部だけでまだ不完全であるため、今後完成度を高めていく必要がある。また、測定には空気圧を使用した。今後実用性を評価していくためには、プロトタイプを液体の流れの中に挿入し、圧計測を行う必要がある。

最後に、本研究では、光弾性効果による屈折率変化を相直交する導波モードの位相差として検出するモード間干渉を利用したが、この研究で得られた結果は、干渉光回路の種類を問わず、光弾性効果を利用したすべての光集積回路センサに適用することができる。特に、感度不変ダイヤフラム縮小則は、センサの用途に限定されない普遍的な概念であるため、その適用範囲は非常に広く、この研究分野の発展に大いに寄与するものと考えられる。



## 参考文献

1. L. M. Johnson, G. W. Pratt, and F. J. Leonberger, "Integrated-optical temperature sensor," in *Technical Digest, Third International Conference on Integrated and Optical Fiber Communication* (Optical Society of America, Washington, DC, 1981), paper WL4.
2. M. Ohkawa, M. Izutsu, and T. Sueta, "Integrated optic pressure sensor on silicon substrate," *Appl. Opt.*, **28**, 5153-5157 (1989).
3. G. N. De Brabander, Glenn Beheim, and J. T. Boyd, "Integrated optical micromachined pressure sensor with spectrally encoded output and temperature compensation," *Appl. Opt.*, **37**, 3264-3267 (1998).
4. H. Porte, V. Gorel, S. Kiryenko, J. Goedgebuer, W. Daniau, and P. Blind, "Imbalanced Mach-Zehnder interferometer integrated in micromachined silicon substrate for pressure sensor," *J. Lightwave Technol.*, **17**, 229-233 (1999).
5. G. N. De Brabander, J. T. Boyd, and G. Beheim, "Integrated optical ring resonator with micromechanical diaphragm for pressure sensing," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **6**, 671-673 (1994).
6. Y. Shirai, T. Goto, M. Ohkawa, S. Sekine, and T. Sato, "Silicon-based integrated optical pressure sensor using intermodal interference between TM-like and TE-like modes," *Proc. SPIE*, **4277**, 411-418 (2001).
7. A. Yamada, Y. Shirai, T. Goto, M. Ohkawa, S. Sekine, and T. Sato, "Relationship between sensitivity and waveguide position on diaphragm for silicon-based integrated optic pressure sensor," in *Technical Digest Volume-I, CLEO/Pacific Rim 2001*, 420-421 (2001).
8. M. Ohkawa, Y. Shirai, T. Goto, S. Sekine, and T. Sato, "Silicon-based integrated optic sensor using intermodal interference between TM-like and TE-like modes," *Fiber and Integrated Optics*, **21**, 105-113 (2002).
9. M. Ohkawa, K. Hasebe, S. Sekine, and T. Sato, "Relationship between sensitivity and waveguide position on the diaphragm in integrated optic pressure sensors based on the elasto-optic effect," *Appl. Opt.*, **41**, 5016-5021 (2002).
10. M. Ohkawa, S. Sekine, and T. Sato, "Silicon-based integrated optic sensor using intermodal interference between fundamental TM-like and TE-like modes," *Recent Research Developments in Electronics and Communications Part-I*, **1**, 137-148 (2002).
11. A. Yamada, T. Tokita, M. Ohkawa, S. Sekine, and T. Sato, "Scale reduction rule for diaphragm dimensions to miniaturize a silicon-based integrated optic pressure sensor without reducing sensitivity," *Proc. SPIE*, **4987** (2003).
12. Y. Iwase, Y. Okamoto, M. Ohkawa, S. Sekine, and T. Sato, "Sensitivity dependence with respect to diaphragm dimensions in a glass based integrated optic pressure sensor," *Proc. SPIE*, **4987** (2003).
13. M. Izutsu, A. Enokihara, and T. Sueta, "Optical-waveguide microdisplacement sensor," *Electron. Lett.*, **18**, 867-868 (1982).
14. H. Toda, K. Kasazumi, M. Haruna, and H. Nishihara, "An optical integrated circuit for time-division 2-D velocity measurement," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **LT-7**, 364-367 (1989).
15. A. Enokihara, M. Izutsu, and T. Sueta, "Integrated-optic fluid sensor using heat transfer," *Appl. Opt.*, **27**, 109-113 (1988).
16. K. Nishizawa et al., "High sensitivity waveguide-type hydrogen sensor," *Proc. Optical Fiber Conference*, 131-134 (1986).
17. M. Tabib-Azar, and G. Beheim, "Modern trends in microstructures and integrated optics for communication, sensing, and actuation," *Opt. Eng.*, **36**, 1307-1318 (1997).
18. S. Timoshenko, and S. Woinowsky-Krieger, *Theory of Plates and Shells* (McGraw Hill, New York, 1981).
19. M. Izutsu, and T. Sueta, "Coupled mode analysis of light modulation in dielectric waveguides," *Appl. Phys.*, **5**, 307-315 (1975).
20. K. E. Peterson, "Silicon as a mechanical material," *Proc. IEEE*, **70**, 420-457 (1982).

## 研究発表論文

- (1) M. Ohkawa, K. Hasebe, C. Nishiwaki, S. Sekine, and T. Sato, "Integrated optic pressure sensor using intermodal interference between two mutual orthogonal guided-modes," *Optical Review*, **7**, 144-148 (2000).
- (2) Y. Shirai, T. Goto, M. Ohkawa, S. Sekine, and T. Sato, "Silicon-based integrated optical pressure sensor using intermodal interference between TM-like and TE-like modes," *Proceedings of SPIE*, **4277**, 411-418 (2001).
- (3) T. Goto, A. Yamada, M. Ohkawa, S. Sekine, and T. Sato, "An experimental investigation of sensitivity dependence with respect to waveguide position on a micromachined diaphragm in a silicon-based integrated optic pressure sensor," *Proceedings of SPIE*, **4591**, 337-344 (2001).
- (4) M. Ohkawa, Y. Shirai, T. Goto, S. Sekine, and T. Sato, "Silicon-based integrated optic sensor using intermodal interference between TM-like and TE-like modes," *Fiber and Integrated Optics*, **21**, 105-113 (2002).
- (5) M. Ohkawa, K. Hasebe, S. Sekine, and T. Sato, "Relationship between sensitivity and waveguide position on the diaphragm in integrated optic pressure sensors based on the elasto-optic effect," *Applied Optics*, **41**, 5016-5021 (2002).
- (6) M. Ohkawa, S. Sekine, and T. Sato, "Silicon-based integrated optic sensor using intermodal interference between fundamental TM-like and TE-like modes," *Recent Research Developments in Electronics and Communications Part-I*, **1**, 137-148 (2002).