

磁気共鳴画像化装置(MRI)や原子力施設等で 使用可能な音響入出力デバイスの開発

(課題番号：17360157)

平成 17 年度～平成 19 年度科学研究費補助金
(基盤研究(B)) 研究成果報告書

平成 20 年 5 月

研究代表者 大河 正 志
新潟大学自然科学系教授

は し が き

磁気共鳴画像化装置 (MRI) は臓器や器官の 3 次元構造、組織の代謝や活性等の機能を無侵襲で計測することができ、臨床診断をはじめ、脳機能の解明等の学術研究でも広く使用されている。ところで、MRI 装置は強磁界を使用するため、医師・技師と患者の意思疎通には、電磁式マイクロホンやスピーカー (イヤホン) を使用することができない。しばしば空気圧式のものが使用されるが、聴覚と脳機能の関係といった学術研究では、高感度・高音質の非電磁式マイクロホンやスピーカー (イヤホン) が強く望まれている。一方、原子力施設は安全性が特段に要求される施設で、定期点検に限らず、通常運転時においても事故の予兆をいかに早く、正確に把握するかが重要となる。原子力施設では、冷却水の配管をはじめ多数の配管が張り巡らされているが、配管の破損から原子炉の溶解にまで至る可能性が全くないとは言えない。配管のひびや破断等の予兆であるクラッキング音を音響的手法で検出できれば、致命的な事故を事前に防ぐことが可能となる。特に、防爆性の特徴を有する光マイクロホンは、電氣的ショートや発熱の危険性がないため、原子力施設では最適な受音デバイスと言える。そこで、本研究では、電磁氣的制約条件が強い MRI、原子力施設、化学プラント等でも使用可能な音響入出力デバイスの開発を目的とした。

ところで、光マイクロホン (光波利用音響入力デバイス) の研究事例は比較的多く、光ファイバをベースにしたものや個別光学部品をベースにしたものが一般的である。光マイクロホンの開発を目的とする本研究の特長は、光集積回路構成を用いて小型・軽量、高感度、高安定性、高信頼性を実現するところにある。光集積回路は、光導波路をベースに光学部品を基板上に作りつけて、光回路を構成するもので、光軸調整が不要となり、高安定性、高信頼性が期待される。ここで提案する光マイクロホンは光集積回路圧力センサをベースにし、センサのダイヤフラムを音圧感知部として用いる。このような光マイクロホンが開発されれば、MRI 施設における医師・技師と患者との意思疎通の改善や、原子力施設、化学プラント等における異常検知、大規模災害の予防等で有意義な貢献が期待できる。

一方、光イヤホン (光駆動音響出力デバイス) の開発に関しては、光エネルギーを利用して機械的振動に変換した例は多数あるが、音響出力デバイスとして十分な性能を持つものはこれまでにない。本研究プロジェクトでは、光 - 熱変換及び熱 - 圧力変換を利用して、ダイヤフラムを光パワーに応じて振動させることを考えた。基本的な構造は赤外線検出素子のゴレイセル構造をベースにし、ダイヤフラムとそれを取り囲む筐体 (半密閉空間) からなる。半密閉空間には赤外線吸収層が設けられ、駆動信号であるレーザ光が光ファイバにより光吸収層に導かれる。光吸収層の温度上昇に伴って、半密閉空間の圧力が変化し、ダイヤフラムが振動して音波を発する。このような光イヤホンが開発できれば、MRI 施設において、医師・技師と患者との意思疎通の改善や学術研究の進歩に大いに寄与するものと期待される。

当初、申請期間内に予定した主な研究課題は、大きく分けると、以下の 2 点である。

- (a) 光マイクロホン (光波利用音響入力デバイス) の開発
 - ・ 光マイクロホン用光集積回路圧力センサの設計・試作
 - ・ 試作光マイクロホンの評価及び考察
 - ・ MRI 施設における光マイクロホンの使用評価及び考察
- (b) 光イヤホン (光駆動音響出力デバイス) の開発

- ・ 光 - 熱変換及び熱 - 圧力変換部の設計及び動作確認
- ・ 光イヤホンの設計・試作及び特性評価
- ・ MRI 施設における光イヤホンの使用評価及び考察

平成 17 年度は、ガラス基板光導波型マイクロホンの開発を重点的に行い、感度の向上及びノイズの低減を図った。

光マイクロホンにおいて、感度と共振周波数はマイクロホンの特性を決める重要な性能指標である。本研究では、感度向上を狙いつつ、共振周波数をできるだけ高くすることを念頭に置き、位相感度と共振周波数をそれぞれ 2.5 mrad/kPa, 3.4 kHz に設定した。理論計算からダイヤフラムサイズを 20 mm×20 mm×0.15 mm と設計し、ガラス基板光マイクロホンの試作を行った。試作マイクロホンの位相感度（測定値）は 1.3 mrad/kPa で、設計値の半分程度にとどまったが、我々のグループが先に行った光導波型圧力センサに比べ、11 倍の感度向上を達成した。一方、雑音低減に関しては、まず光マイクロホンシステム（光マイクロホン、レーザ光源、光検出器）における雑音評価を行い、10 Hz 以下の雑音と 25 kHz 付近の雑音が極めて大きいことを見出した。10 Hz 以下の雑音については、除震台の除振効果の低下から生じた光軸ずれによるものではないかと推測している。また、25 kHz 付近の雑音は、光検出器の設計に不十分な点があり、25 kHz 付近の利得が高くなったためと考えている。これらの雑音をカットするため、通過帯域 300 Hz～3 kHz のバンドパスフィルタを導入した結果、雑音は実効値で 9.7 mV から 1.9 mV まで減り、比較的大きな雑音低減に成功した。上記の改善を施した光マイクロホンに周波数 1 kHz, 音圧 25 Pa (122 dB-SPL), 20 Pa (120 dB-SPL), 8 Pa (110 dB-SPL), 2 Pa (100 dB-SPL) の音波を印加し、すべての音圧の音波検出に成功した。したがって、検出可能最小音圧は周波数 1 kHz において 100 dB-SPL となった。

平成 18 年度は、光導波型マイクロホンに関しては、雑音低減とシリコン基板の利用に重点を置き、最小検出可能音圧レベル 80 dB-SPL (@1 kHz) を目指した。雑音低減に関しては、まず光検出回路の最適設計を行い、20 kHz 付近において大幅な雑音低減に成功した。また、雑音の原因として音波による光学系の振動が大きな問題となっていたため、光マイクロホンに光ファイバを接続して、誘起振動雑音の低減を試みた。光ファイバ接続により光導波路入射側の軸ずれをなくしたにもかかわらず、大幅な雑音低減は確認できなかった。平成 18 年度の研究では、当初目標の最小検出可能音圧レベル 80 dB-SPL を達成できなかったが、出力光強度の増大及び軸ずれの抑制に加え、音圧感知構造の変更（外部振動板やカンチレバ構造の利用）により、最小検出可能音圧レベル 60 dB-SPL の実現は十分に可能であると考えた。

一方、光イヤホンに関しては、小孔付半密閉空間の圧力維持特性について理論と実験の両面から考察を行った。ところで、半密閉空間の圧力維持時間の逆数が光イヤホンの低域遮断周波数となるため、圧力維持時間の考察は非常に重要である。理論解析から、圧力維持時間は、半密閉空間の体積に比例し、小孔の面積に反比例することが分かった。定性的ではあるが、実験においても理論結果とほぼ同じ関係が得られた。しかし、時間の大きさには 3 桁にも及ぶ違いが現れた。

平成 19 年度は、「ガラス基板光導波型マイクロホンの周波数特性の評価」と「シリコン基板光導波型マイクロホンの感度向上」を重点課題とし、研究を行った。また、光イヤホンにおいては、マイクロホンの基本構成について考察を行い、半密閉空間の小孔面積と遮断周波数の関係について調べた。

ガラス基板光導波型マイクロホンに関して、ダイヤフラムサイズ 20 mm × 20 mm

× 0.15 mm のマイクロホンを試作し、周波数特性の評価を行った。実験では、印加音圧レベルを 100 dB-SPL に設定し、雑音の影響を避けるためロックインアンプを使用した。1 kHz 以下の周波数では、照射音波による光軸ずれの影響が大きかったため、実際に評価できた周波数帯域は 1 kHz から 10 kHz であった。3 個の試作マイクロホンの共振周波数は 2.7 kHz, 3.3 kHz, 3.7 kHz で、理論値 3.4 kHz とほぼ同じ値が得られた。また、共振周波数より低い周波数帯域では、マイクロホン信号がほぼ一定で、理論予測と一致する結果が得られた。

シリコン基板光導波型マイクロホンに関しては、感度向上のため、光導波路構造と作製プロセスの見直しを行った。昨年度は、熱応力の影響を低減するため、バッファ層として二酸化シリコンをスパッタで成膜したが、ウェットエッチングに対する耐性が弱く、出力光強度の低さや消光比の悪さの原因となっていた。光導波路構造を装荷型とし、リフトオフ法により導波路を作製したところ、マイクロホン感度が約 10 倍向上し、80 dB-SPL の音波 (1 kHz) の検出に成功した。なお、本研究ではダイヤフラムサイズを 10 mm × 10 mm × 40 μm とした。また、周波数特性を測定したところ、ダイヤフラムの共振が 5.3 kHz 付近に見られ、理論値 5.6 kHz とほぼ同じ値が得られた。

キーワード

- | | | |
|-------------|-----------|------------|
| (1) 光マイクロホン | (2) 光集積回路 | (3) ダイヤフラム |
| (4) 光導波路 | (5) MEMS | |

研究組織

研究代表者： 大河正志（新潟大学自然科学系教授）

研究分担者： 佐藤 孝（新潟大学自然科学系教授）

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 17 年度	10,300	0	10,300
平成 18 年度	2,100	0	2,100
平成 19 年度	1,900	570	2,470
総 計	14,300	570	14,870

研究発表

(1) 雑誌論文

1. Hiroyuki Nikkuni, : “Sensitivity dependence with respect to diaphragm thickness in guided-wave optical pressure sensor based on elasto-optic effect,” Optical Engineering, 47 (2008).

(2-1) 国際会議発表

1. Hiroyuki Nikkuni, Masashi Ohkawa, Seishi Sekine, and Takashi Sato: “Feasibility of guided-wave optical microphone based on elasto-optic effect,” Proceedings of SPIE, **6049**, pp. 56-63 (2005).
2. Kaoru Sato, Masashi Ohkawa, Seishi Sekine, and Takashi Sato: “Guided-wave optical pressure sensor with semi-closed space under the diaphragm: step response in relation to the area of a small hole of a semi-closed space,” Proceedings of SPIE, **6379**, pp.637908_1-8 (2006).
3. Manabu Hayashi, Hiroyuki Nikkuni, Yoshiaki Mogi, Masashi Ohkawa, Seishi Sekine, and Takashi Sato: “Improvement of S/N ratio of a Glass-Based Guided-Wave Optical Microphone,” International Symposium on Fusion Technology (Niigata, Japan), #P5-7, p.123 (2007).
4. Hiroyuki Nikkuni, : “Improvement of the Signal-to-Noise ratio in a Glass-Based Guided-Wave Optical Microphone,” Proceedings of SPIE, **6475**, pp.647519_1-8 (2007).
5. Masafumi Adachi, Yusuke Kudo, Masashi Ohkawa, and Takashi Sato: “Sensitivity dependence on waveguide position in silicon-based optical flow sensor,” 13th Microoptics Conference 2007 (Takamatsu, Japan), Paper# H1 (2007).
6. Yu Watanabe,: “Sensitivity dependence with respect to diaphragm dimensions in a glass-based guided-wave optical pressure sensor,” 13th Microoptics Conference 2007 (Takamatsu, Japan), Paper# H77 (2007)

(2-2) 学会発表

1. 新國広幸, 茂木良晃, 大河正志, 関根征士, 佐藤孝: “光弾性効果を利用した光導波型マイクロホンの実現可能性,” 第15回電気学会東京支部新潟支所研究発表会, 講演番号IV-09, p.73 (2005.11).
2. 林学, 茂木良晃, 新國広幸, 大河正志, 関根征士, 佐藤孝: “ガラス基板光導波

- 型マイクロホンに関する研究 ～S/N 比の向上～,” 電子情報通信学会・2006年ソサエティ大会, 講演番号 C-3-66, p.183 (2006.9.21).
3. 茂木良晃, 新國広幸, 林学, 大河正志, 関根征士, 佐藤孝: “光導波型マイクロホンへの光ファイバ接続 ～振動に伴う雑音の低減～,” 平成18年度電子情報通信学会信越支部大会, 講演番号 7A-3, p.123 (2006.9.30).
 4. 新國広幸: “ダイヤフラム構造を利用したガラス基板光導波型マイクロホンの設計 ～感度のダイヤフラム厚依存性およびダイヤフラム辺比依存性～,” 電子情報通信学会 光エレクトロニクス研究会, 講演番号 12 (2007.6.29).
 5. 新國広幸, 渡部裕, 大河正志, 佐藤孝: “ガラス基板光導波型圧力センサーセンサ感度のダイヤフラム厚依存性,” 電子情報通信学会信越支部大会, 講演番号 (2007.9.27).
 6. 野澤佑介, 水澤俊介, 大河正志, 佐藤孝: “半密閉空間を有するガラス基板光導波型圧力センサ ～センサ出力の半密閉空間体積依存性～,” 電子情報通信学会信越支部大会, p.185 (2007.9.27).
 7. Shunsuke Mizusawa, Masashi Ohkawa, Takashi Sato: “Output characteristics of guided-wave optical pressure sensor with semi-closed space under diaphragm,” 電気学会東京支部新潟支所大会, 講演番号, pp. (2007.11.23).

目 次

第1章 序論	1
第2章 ガラス基板光導波型マイクロホンの構成及びその設計	3
2-1 構成および動作原理	3
2-2 動作解析法	5
2-3 マイクロホンの位相感度	8
2-3-1 導波路位置依存性	8
2-3-1-1 理論	8
2-3-1-2 実験	10
2-3-2 ダイアフラム厚依存性	13
2-3-2-1 理論	13
2-3-2-2 実験	14
2-3-3 ダイアフラム面積依存性	16
2-3-3-1 理論	16
2-3-3-2 実験	17
2-3-4 ダイアフラム辺比依存性	19
2-3-4-1 理論	19
2-3-4-2 実験	20
2-4 ダイアフラムの共振周波数	22
2-5 マイクロホンの設計方法	24
第3章 ガラス基板光導波型マイクロホンの試作と特性評価	25
3-1 試作	25
3-2 静圧印加特性	26
3-2-1 測定方法	26
3-2-2 実験結果	27
3-3 音圧印加特性及び最小検出可能音圧の評価	29
3-3-1 測定方法	29
3-3-2 実験結果	30
3-4 周波数特性	32
3-4-1 測定方法	32
3-4-2 実験結果	32
第4章 シリコン基板光導波型マイクロホンの試作と評価	36
4-1 マイクロホン(その1)	36
4-1-1 構成及び試作	36
4-1-2 静圧印加特性	37
4-1-3 音圧印加特性及び最小検出可能音圧の評価	38
4-2 マイクロホン(その2)	41
4-2-1 構成及び試作	41
4-2-2 静圧印加特性	42
4-2-2 音圧印加特性及び最小検出可能音圧の評価	42
4-2-3 周波数特性	47

第5章 光イヤホンの構造設計	48
第6章 結論	51
参考文献	52
研究発表論文等	55

第1章 序論

磁気共鳴画像化装置 (MRI) は臓器や器官の3次元構造、組織の代謝や活性等の機能が無侵襲で計測することができ、臨床診断をはじめ、脳機能の解明等の学術研究でも広く使用されている。ところで、MRI装置は強磁界を使用するため、医師・技師と患者の意思疎通には、電磁式マイクロホンやスピーカ (イヤホン) を使用することができない。しばしば空気圧式のものが使用されるが、聴覚と脳機能の関係といった学術研究では、高感度・高音質の非電磁式マイクロホンやスピーカ (イヤホン) が強く望まれている。一方、原子力施設は安全性が特段に要求される施設で、定期点検に限らず、通常運転時においても事故の予兆をいかに早く、正確に把握するかが重要となる。原子力施設では、冷却水の配管をはじめ多数の配管が張り巡らされているが、配管の破損から原子炉の溶解にまで至る可能性が全くないとは言えない。配管のひびや破断等の予兆であるクラッキング音を音響的手法で検出できれば、致命的な事故を事前に防ぐことが可能となる。特に、防爆性の特徴を有する光マイクロホンは、電氣的ショートや発熱の危険性がないため、原子力施設では最適な受音デバイスと言える。

光マイクロホン (光波利用音響入力デバイス) の研究事例は比較的多く、光ファイバをベースにしたものや個別光学部品をベースにしたものが一般的である。^[1,2] 光マイクロホンの開発を目的とする本研究の特長は、光集積回路構成を用いて小型・軽量、高感度、高安定性、高信頼性を実現するところにある。ここで提案する光マイクロホンは光集積回路圧力センサをベースにし、センサのダイヤフラムを音圧感知部として用いる。^[3] このような光マイクロホンが開発されれば、MRI施設における医師・技師と患者との意思疎通の改善や、原子力施設、化学プラント等における異常検知、大規模災害の予防等で有意義な貢献が期待できる。

ところで、光集積回路センサは、ミラー、ビームスプリッタなどの光学素子を同一基板上に集積化し、センサ機能を持たせたデバイスで、小型・軽量、光軸合わせ不要、高安定性、高感度などの特徴が期待される。1981年のL. M. Johnsonらによる温度センサ^[4]の報告以来、圧力センサ^[5-8]、変位センサ^[9]、速度センサ^[10]、湿度センサ^[11]、水素センサ^[9]など様々な光集積回路センサが考案され、実証実験が行われてきた。また、マイクロマシン技術の進歩により、機械的構造と光集積回路を組み合わせた機械量センサ (圧力センサ、加速度センサなど) が注目され^[5-8, 13]、1989年のM. Ohkawaらによる光集積回路圧力センサの報告^[5]以来活発に開発が進められている。我々の研究グループにおいても、これまでシリコン基板やガラス基板を用いたダイヤフラム式光集積回路センサの開発を精力的に行ってきた。^[14-20]

本研究プロジェクトでは、光マイクロホンを設計する上で重要となる静圧特性について、理論と実験の両面から考察を行い、光マイクロホンの設計指針を明らかにした。設計指針に基づき、ガラス基板光導波型マイクロホンの設計・試作を行い、静圧-出力光強度特性、最小検出可能音圧、周波数特性等の評価を行った。また、微細加工特性に優れたシリコンにも着目し、シリコン基板光導波型マイクロホンに関しても、試作と実証実験を行った。光導波路の作製プロセスの見直しを行い、最小検出可能音圧80 dB-SPLと、ガラス基板光マイクロホンを超える特性を得た。

一方、光イヤホン (光駆動音響出力デバイス) の開発では、光エネルギーを利用して機械的振動に変換した例は多数あるが、音響出力デバイスとして十分な性能を持つものはこれまでにない。本研究プロジェクトでは、光-熱変換及び熱-圧力変換を利用して、ダイヤフラムを光パワーに応じて振動させることを考えた。基本的な構造は

赤外線検出素子のゴレイセル構造をベースにし、ダイヤフラムとそれを取り囲む筐体（半密閉空間）からなる。半密閉空間には赤外線吸収層が設けられ、駆動信号であるレーザ光が光ファイバにより光吸収層に導かれる。光吸収層の温度上昇に伴って、半密閉空間の圧力が変化し、ダイヤフラムが振動して音波を発する。このような光イヤホンが開発できれば、MRI 施設において、医師・技師と患者との意思疎通の改善や学術研究の進歩に大いに寄与するものと期待される。

本研究プロジェクトでは、光マイクロホンの開発が遅れ気味となり、時間と労力をそちらに割いたため、光イヤホンの開発については、大気圧変動の影響を避けるための半密閉空間構造の理論的考察にとどまった。

第2章 ガラス基板光導波型マイクロホンの構成及びその設計

2-1 構成および動作原理

Figure 2-1 はガラス基板光導波型マイクロホンの概略図である。[17, 20] 図のように、マイクロホンヘッド部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。

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等方的ではないため、歪みによって生じる屈折率変化も等方的ではない。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。この誘起位相差を検出するため、Fig. 2-2 のように光マイクロホンを偏光子と検光子の間に置く。偏光子の偏光方向を基板面に対して 45° 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 $\Delta\phi_{\text{TM}}$, $\Delta\phi_{\text{TE}}$ を受けるため、圧力印加時には両モード間で位相差 $\Delta\phi = \Delta\phi_{\text{TM}} - \Delta\phi_{\text{TE}}$ が生じる。この位相差に応じて、出力端での偏光状態は直線、楕円、円偏光のいずれかとなる。検光子の偏光方向を入射光の偏光方向に対し 90° 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。

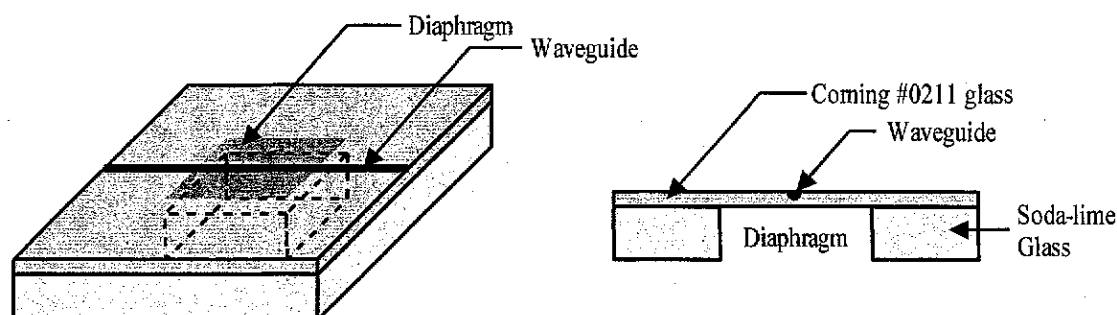


Fig. 2-1 (a) Schematic drawing of glass-based guided-wave optic microphone using the elastic-optic effect, and (b) its cross-sectional view.

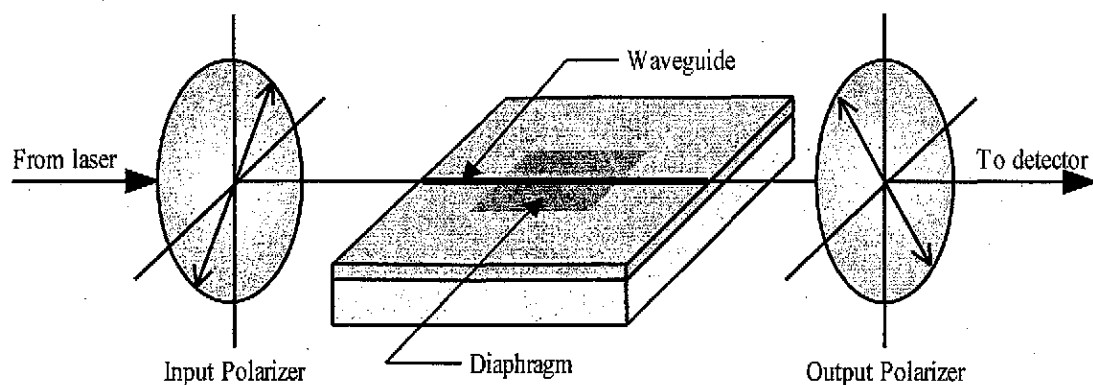


Fig. 2-2 The microphone head placed between a pair of crossed polarizers to convert the phase difference between the two guided modes into the change in the light intensity.

本マイクロホンは圧力センサの一種で、最大出力光強度を1に正規化すると、印加圧力ー出力光強度特性（静圧特性）は Fig. 2-3 のようになる。出力光強度変化は周期的で1周期の半分を半波長圧力と呼び、マイクロホン感度の指標となる。また、半波長圧力は位相差 π rad に相当し、 π rad を半波長圧力で割った値、すなわち圧力 1 kPa あるいは 1 Pa における誘起位相差を位相感度と呼ぶ。本研究では、位相感度を光マイクロホンの特性評価に使用する。

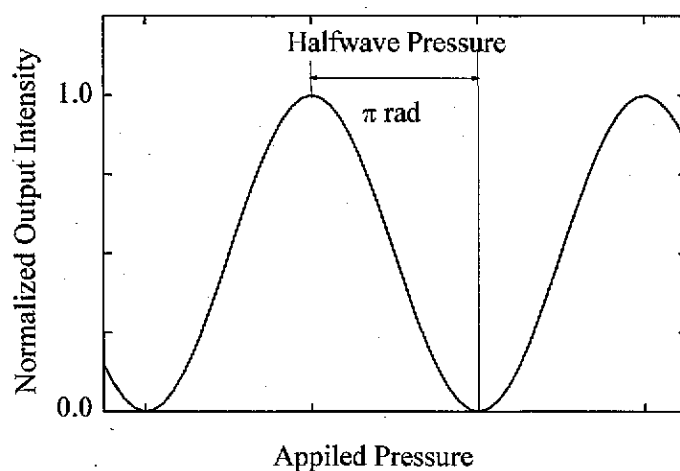


Fig. 2-3 Normalized output intensity versus applied pressure

2-2 動作解析法

光導波型光マイクロホンの圧力検出特性は、ダイヤフラムに生じる歪み分布に関係するため、ダイヤフラムサイズや導波路位置等に依存する。そこで、これらの依存性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、Fig. 2-4 のように、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。

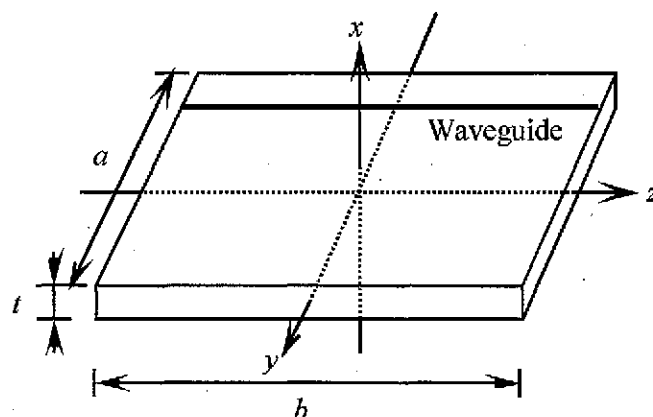


Fig. 2-4 Illustration of the rectangular diaphragm assumed in the calculations.

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。^[21]

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

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、

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

と定義される。ただし、 Y はヤング率、 ρ はポアソン比を表す。上述の条件における式(2-1)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。^[21]

$$w = w_0 + w_1 + w_2 \quad (2-3)$$

それぞれのたわみ w_0 , w_1 , w_2 は、

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

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

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

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。

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

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

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。

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

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

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

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

$$S_i = s_{ij} T_j, \quad (i, j=1-6) \quad (2-12)$$

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

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

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。 Δn_1 は TM-like モード光の位相変化を引き起こし、 Δn_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。^[22]

$$\Delta\phi_{\text{TM}} \approx \int_{-b/2}^{b/2} \left(\frac{\omega\epsilon_0 n}{2} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-t/2}^{t/2} E_x(x, y) \Delta n_1(x, y, z) E_x^*(x, y) dx dy \right) dz \quad (2-14)$$

$$\Delta\phi_{\text{TE}} = \int_{-b/2}^{b/2} \left(\frac{\omega\epsilon_0 n}{2} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-t/2}^{t/2} E_y(x, y) \Delta n_2(x, y, z) E_y^*(x, y) dx dy \right) dz \quad (2-15)$$

ここで ω は光の角周波数, ϵ_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, ダイアフラム上で両モード光に生じる位相差 $\Delta\phi$ は

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{\text{TM}} - \Delta\phi_{\text{TE}} \quad (2-16)$$

で与えられる。

2-3 マイクロホンの位相感度

2-3-1 導波路位置依存性

2-3-1-1 理論^[7]

圧力（音圧）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樣でない。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。Figure 2-5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ある。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、導波路の位置ずれの影響を嫌う場合には、ダイヤフラム中央に導波路を設置するのが有利である。

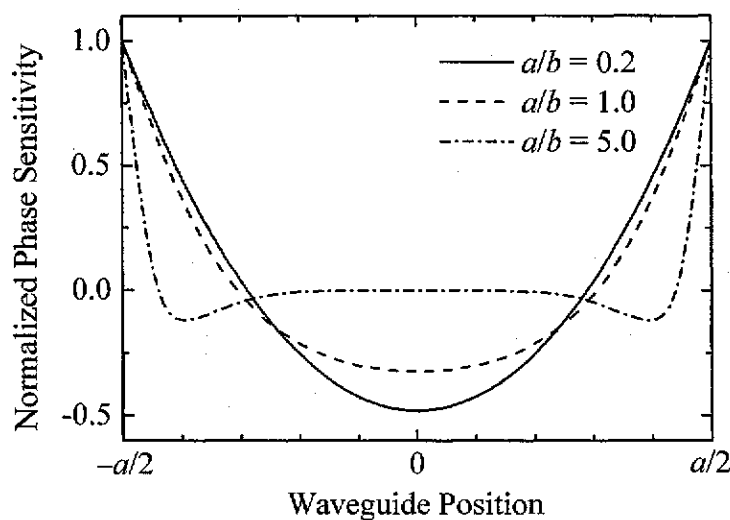


Fig. 2-5 Normalized phase sensitivity as a function of waveguide position.

なお、数値計算で使用した材料力学定数、光学定数の値は以下のとおりである。

使用した材料力学定数（溶融石英）

$$Y = 7.31 \times 10^{10} \text{ Pa}^{-1}, \quad \rho = 0.17 \quad (2-17)$$

$$s_{ij} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{12} & s_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} \end{pmatrix} \quad (2-18)$$

$$s_{11} = 1.37 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}, \quad s_{12} = -2.33 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}, \quad s_{44} = 3.20 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$$

使用した光学定数

$$n = 1.53 \quad (2-19)$$

$$p_{ij} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} \end{pmatrix} \quad (2-20)$$

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

2-3-1-2 実験

2-3-1-1の理論結果の妥当性を調べるため、ダイヤフラムサイズの異なるマイクロホン（圧力センサ）を試作した。ダイヤフラムサイズは、 $5\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 0.22\text{ mm}$ （センサ#1）、 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 0.22\text{ mm}$ （センサ#2）、 $15\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 0.22\text{ mm}$ （センサ#3）、 $20\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 0.22\text{ mm}$ （センサ#4）の4種類とした。

Figure 2-6(a)はセンサ#1、(b)はセンサ#2、(c)はセンサ#3、(d)はセンサ#4の測定結果で、ダイヤフラム端に最も近い光導波路に対する結果である。図において、■は測定値で、曲線は測定値を正弦関数でフィッティングしたものである。フィッティング結果より、センサ#1の半波長圧力は 76.6 kPa 、センサ#2は 32.5 kPa 、センサ#3は 33.0 kPa 、センサ#4は 23.9 kPa となった。これより位相感度は、センサ#1から#4の順に、 41.0 mrad/kPa 、 96.7 mrad/kPa 、 95.2 mrad/kPa 、 131 mrad/kPa と求められた。

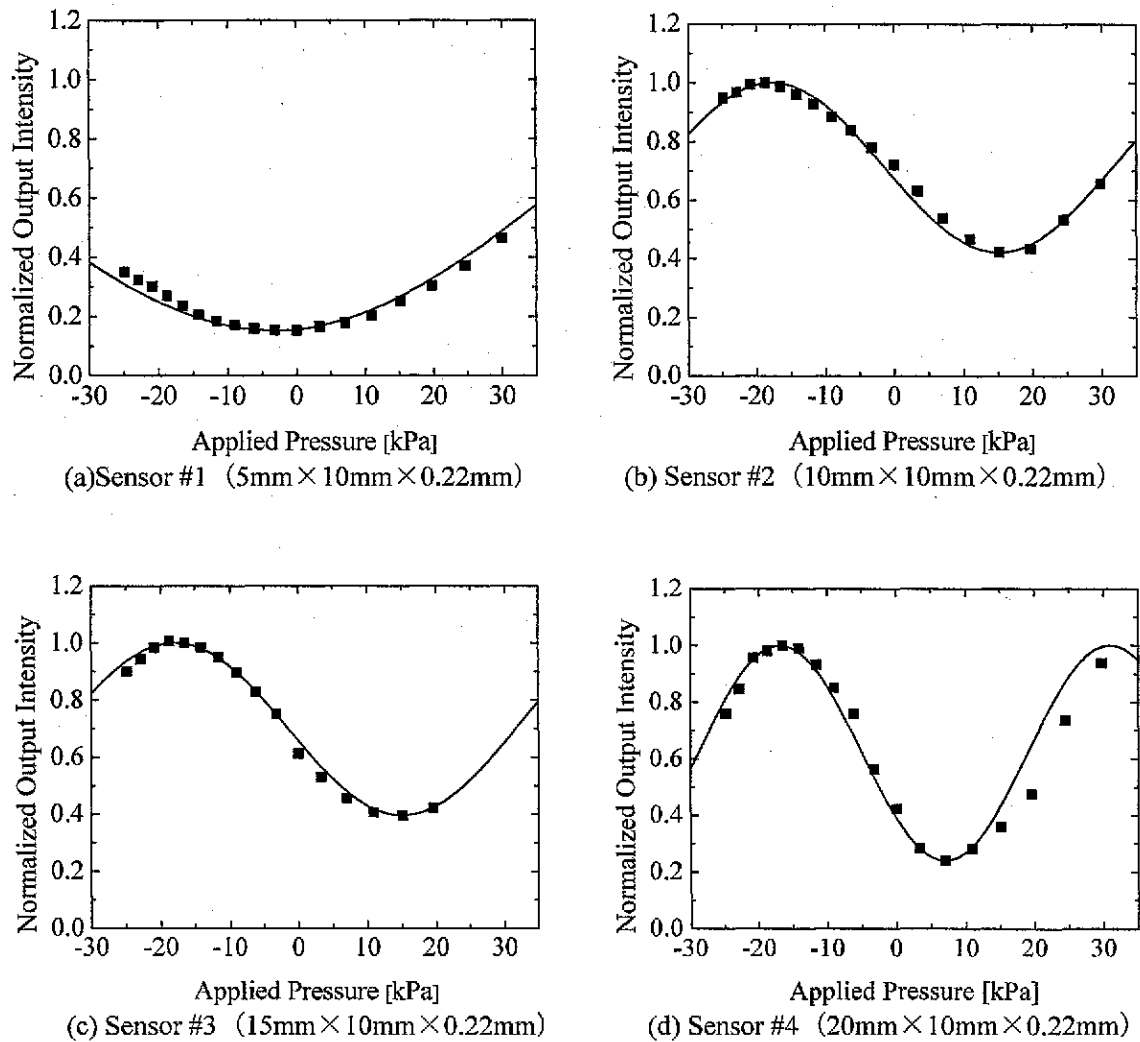
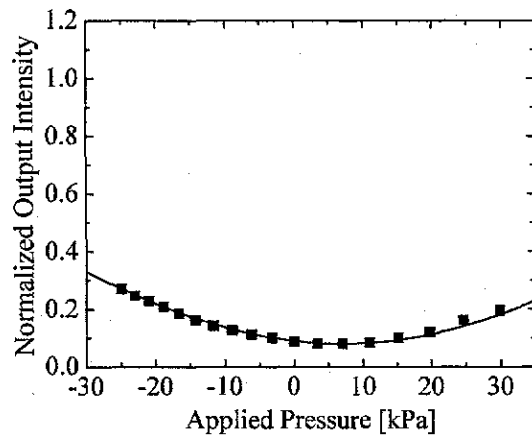
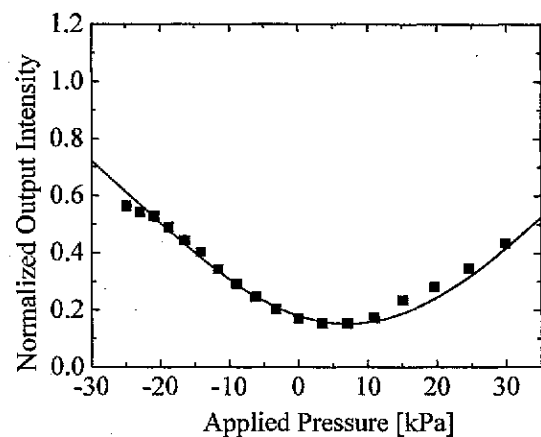


Fig. 2-6 Normalized output intensity versus applied pressure for waveguide nearest of the edge of diaphragm.

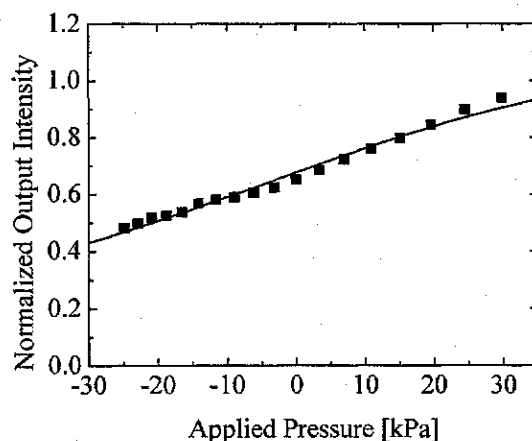
Figure 2-7 は、ダイヤフラムに中心に最も近い導波路に対する印加圧力-出力光強度特性で、(a)がセンサ#1、(b)がセンサ#2、(c)がセンサ#3、(d)がセンサ#4 の結果である。フィッティングの結果、センサ#1 の半波長圧力は 105 kPa、センサ#2 は 60.5 kPa、センサ#3 は 130 kPa、センサ#4 は 313 kPa となった。これより位相感度は、センサ#1 から#4 の順に、29.7 mrad/kPa、51.3 mrad/kPa、24.2 mrad/kPa、10.0 mrad/kPa と求められた。



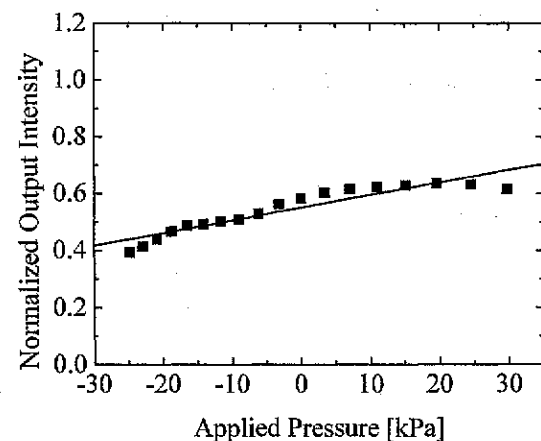
(a) Sensor #1 (5mm×10mm×0.22mm)



(b) Sensor #2 (10mm×10mm×0.22mm)



(c) Sensor #3 (15mm×10mm×0.22mm)



(d) Sensor #4 (20mm×10mm×0.22mm)

Fig. 2-7 Normalized output intensity versus applied pressure for waveguide nearest to the center of diaphragm.

導波光が確認されたその他の光導波路においても同様の測定を行った。Figure 2-8 はこれらの測定結果をまとめたもので、位相感度と導波路位置の関係を示す。ところで、測定から位相感度の正負の区別はできないが、理論解析の結果を参考に符号を決定しプロットした。

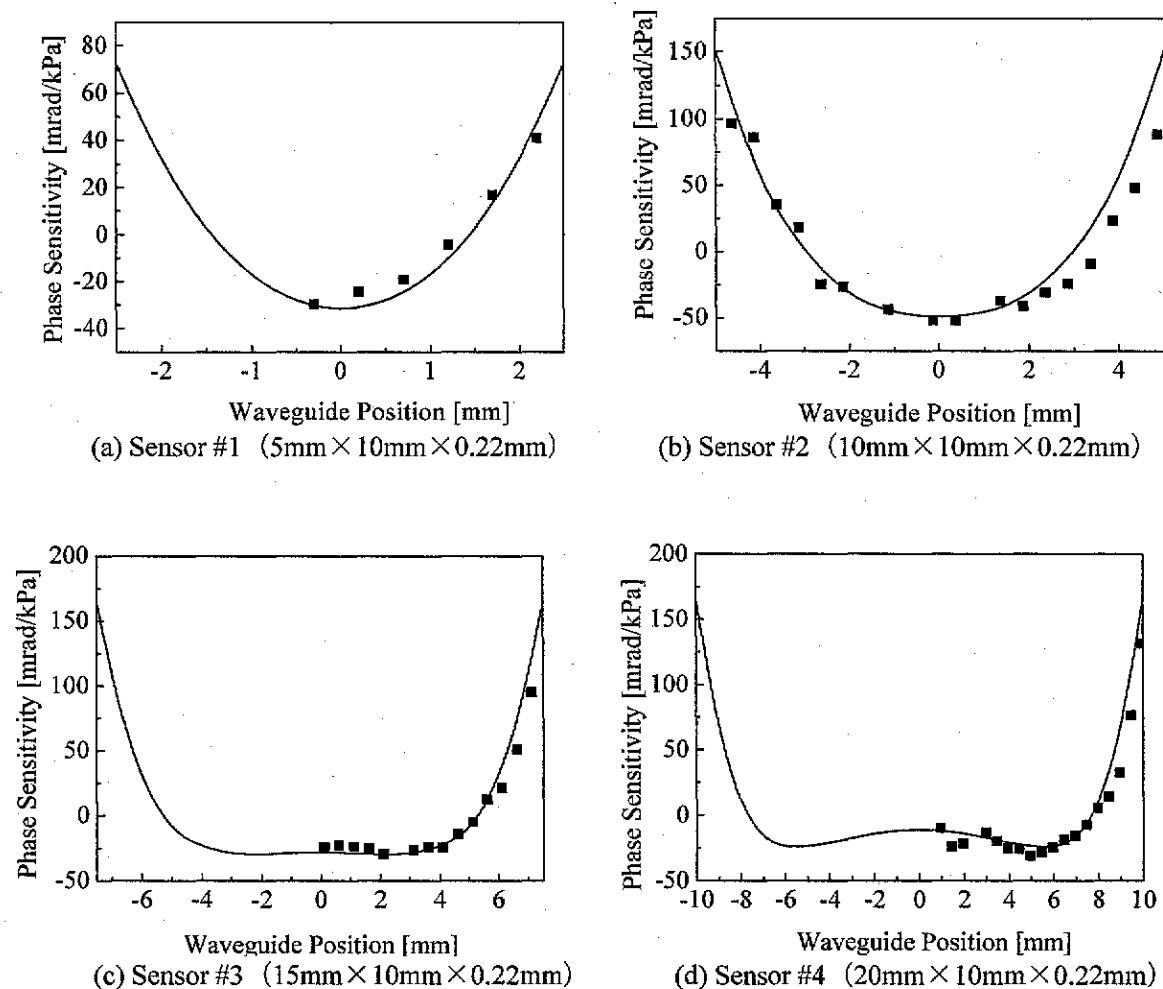


Fig. 2-8 Phase sensitivity versus waveguide position.

2-3-2 ダイアフラム厚依存性^[23]

2-3-2-1 理論

ダイアフラムの辺の比と面積を一定とし、位相感度をダイアフラム厚の関数として計算した。計算では、ダイアフラムの辺の比を $a/b=0.2$ とし、光導波路はダイアフラムの辺 b 上 ($y=\pm a/2$) に位置するものとした。Figure 2-9 は計算結果で、ダイアフラム厚が $10\ \mu\text{m}$ のとき、位相感度が 1 となるように正規化してある。Figure 2-9 より、ダイア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、位相感度はダイアフラム厚の 2 乗に反比例することが分かる。ダイアフラム厚が $1.5\ \mu\text{m}$ 以下のときには位相感度が減少しているが、これは式(2-14)、(2-15)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。ダイア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、そこまでダイア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。

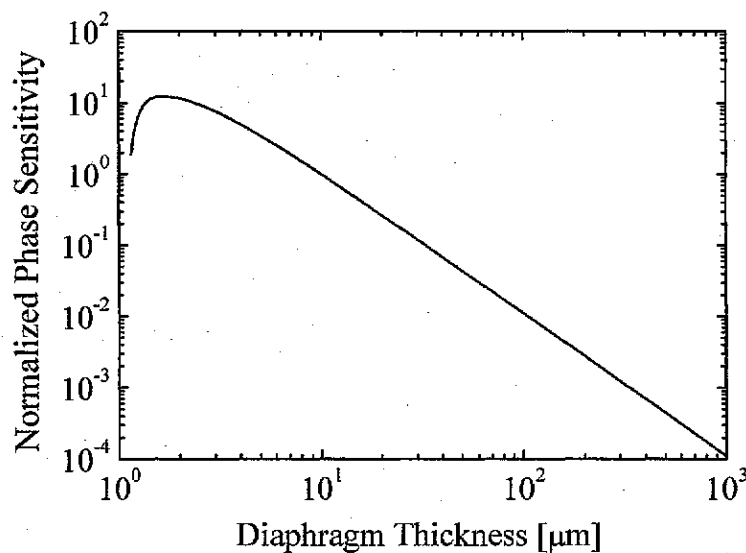
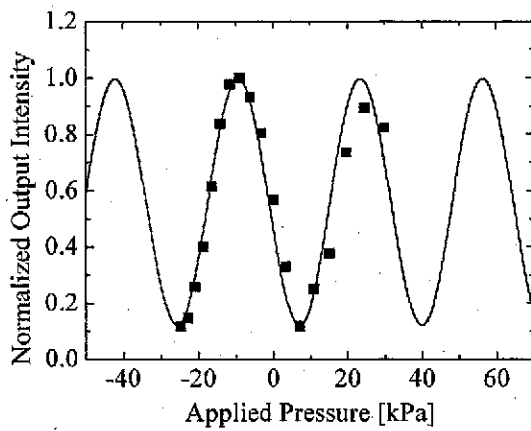


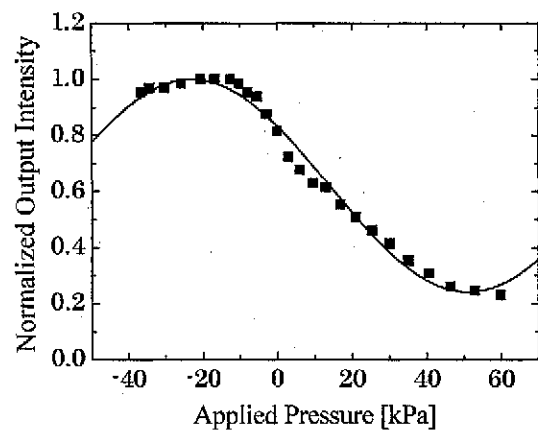
Fig. 2-9 Normalized phase sensitivity as a function of thickness of diaphragm.

2-3-3-2 実験

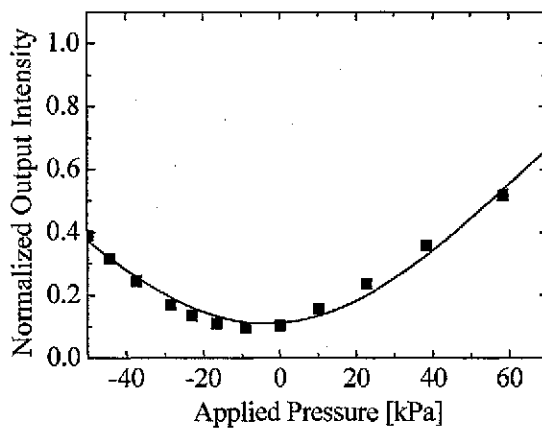
2-3-3-1の理論結果を実験的に確かめるために、厚さの異なる3種類の光マイクロホン（センサ）を試作した。ダイヤフラム形状は正方形とし、それぞれのダイヤフラムサイズを $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 0.15\text{ mm}$ （センサ#5）、 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 0.22\text{ mm}$ （センサ#6）、 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 0.30\text{ mm}$ （センサ#7）とした。Figure 2-10は、印加圧力（静圧）－出力強度特性で、(a)はセンサ#5、(b)はセンサ#6、(c)はセンサ#7の測定結果で、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。図において、■は測定値を表わし、曲線が測定値を正弦関数でフィッティングしたものである。フィッティング結果より、センサ#5の半波長圧力は 40.8 kPa 、センサ#6は 74.1 kPa 、センサ#7は 127 kPa で、位相感度はセンサ#5から#7の順に 77 mrad/kPa 、 42.4 mrad/kPa 、 24.7 mrad/kPa となった。



(a) Sensor #5 ($10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 0.15\text{ mm}$)



(b) Sensor #6 ($10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 0.22\text{ mm}$)



(c) Sensor #7 ($10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 0.30\text{ mm}$)

Fig. 2-10 Normalized output intensity versus applied pressure for waveguide nearest to the edge of diaphragm.

Figure 2-11 はダイヤフラム厚に対する位相感度の理論値（実線）と測定結果で，導波路位置はダイヤフラムの中央とした。図において■がセンサ#5 の測定結果，●がセンサ#6 の測定結果，▲がセンサ#7 の測定結果である。また，Table 2-1 は結果をまとめたものである。

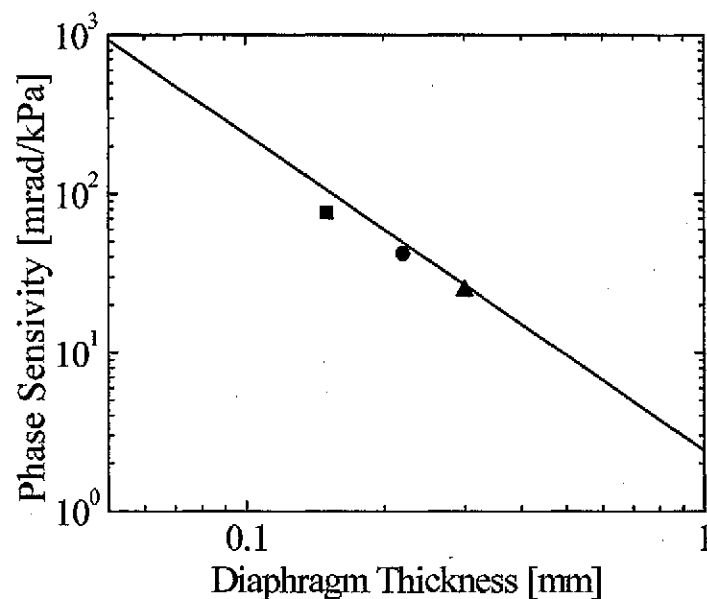


Fig. 2-11 Phase sensitivity versus diaphragm thickness.

Table 2-1 Calculated and measured phase sensitivities for the waveguide nearest to the center of diaphragm.

Sensor #	Dimensions [mm × mm × mm]	Calculated [mrad/kPa]	Measured [mrad/kPa]
5	10 × 10 × 0.15	107	77.0
6	10 × 10 × 0.22	49.9	42.4
7	10 × 10 × 0.30	26.9	24.7

2-3-3 ダイアフラム面積依存性

2-3-3-1 理論

ダイアフラムの辺の比と厚さを一定とし、位相感度をダイアフラムの辺 a の関数として計算した。計算では、ダイアフラムの辺の比を $a/b = 0.2$ とし、光導波路はダイアフラムの辺 b 上 ($y = \pm a/2$) に位置するものとした。Figure 2-12 はその計算結果である。ただし、ダイアフラムの辺 a の長さが 1 mm のとき、位相感度が 1 となるように正規化してある。Figure 2-12 より、両対数グラフにおいて傾きが 3 であるので、位相感度はダイアフラムの辺 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。

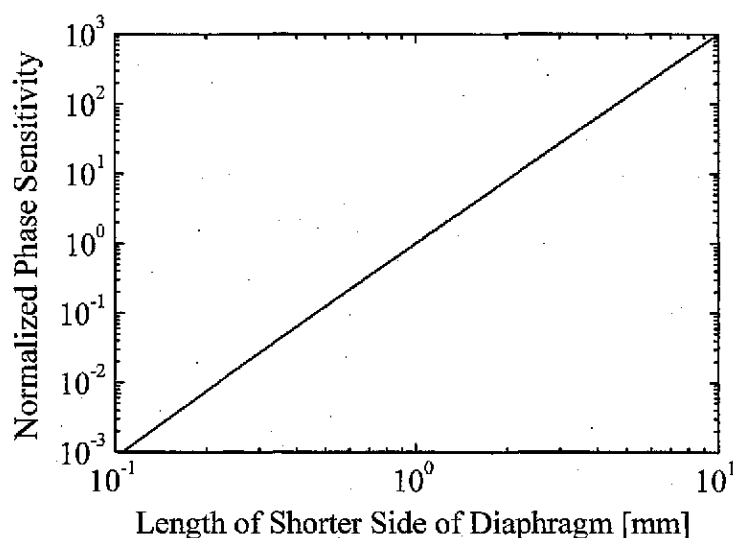


Fig. 2-12 Normalized phase sensitivity as a function of side length of diaphragm.

2-3-3-2 実験

2-3-3-1の理論結果を実験的に確かめるために、1辺の長さが異なる4種類の光マイクロホン（センサ）を試作した。ダイヤフラム形状は正方形とし、それぞれのダイヤフラムサイズを $7\text{ mm} \times 7\text{ mm} \times 0.22\text{ mm}$ （センサ#8）、 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 0.22\text{ mm}$ （センサ#9）、 $14\text{ mm} \times 14\text{ mm} \times 0.22\text{ mm}$ （センサ#10）、 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 0.22\text{ mm}$ （センサ#11）とした。Figure 2-13は、印加圧力（静圧）－出力強度特性で、(a)はセンサ#8、(b)はセンサ#9、(c)はセンサ#10、(d)はセンサ#11の測定結果で、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。図において、■は測定値を表わし、曲線が測定値を正弦関数でフィッティングしたものである。フィッティング結果より、センサ#8の半波長圧力は 201 kPa 、センサ#9は 61.1 kPa 、センサ#10は 28.5 kPa 、センサ#11は 9.74 kPa で、位相感度はセンサ#8から#11の順に 15.6 mrad/kPa 、 51.4 mrad/kPa 、 110 mrad/kPa 、 322 mrad/kPa となった。

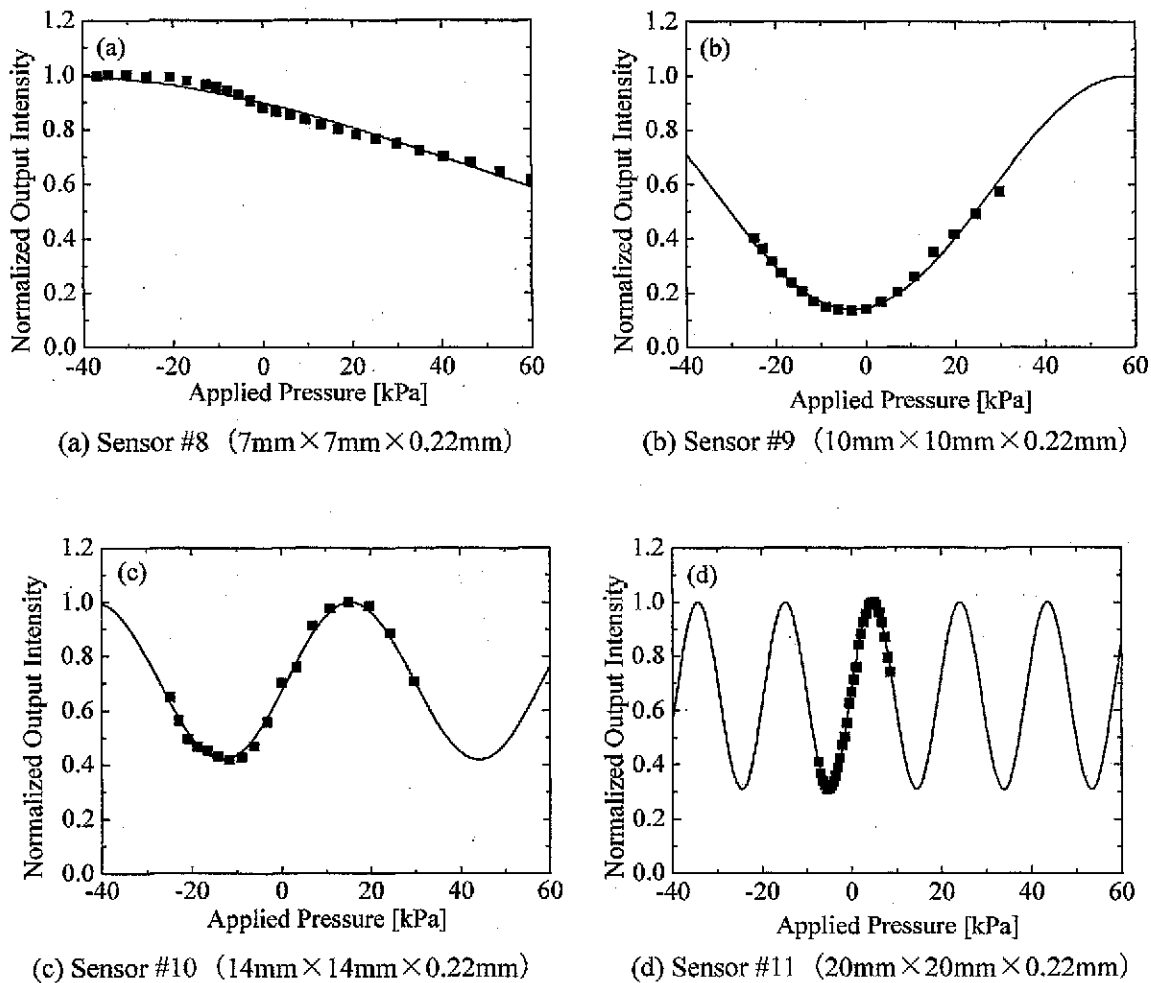


Fig. 2-13 Normalized phase sensitivity as a function of length of shorter side of diaphragm.

Figure 2-14 は正方形ダイヤフラムの辺長に対する位相感度の理論値と実験値で、導波路位置はダイヤフラムの中央とした。図の■は測定値、実線は計算値を表わす。また、Table 2-1 に結果をまとめた。

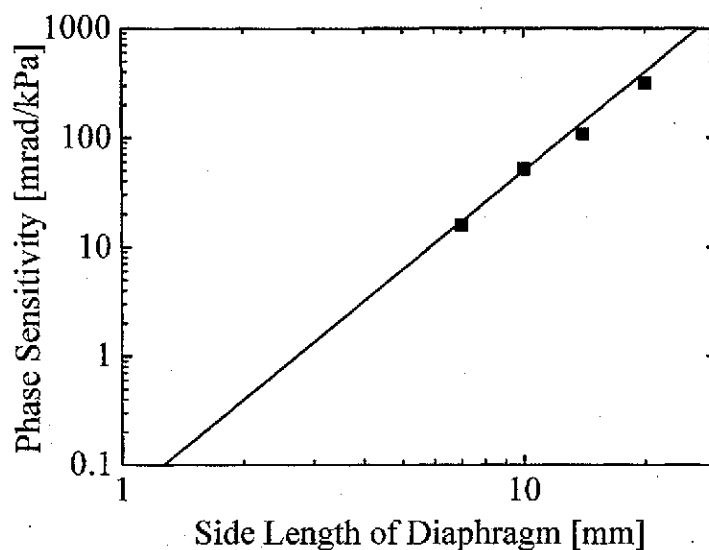


Fig. 2-14 Normalized phase sensitivity as a function of side length of square diaphragm.

Table 2-2 Calculated and measured phase sensitivities for the waveguide nearest to the center of diaphragm.

Sensor #	Dimensions [mm × mm × mm]	Calculated [mrad/kPa]	Measured [mrad/kPa]
8	7 × 7 × 0.22	17	16
9	10 × 10 × 0.22	50	52
10	14 × 14 × 0.22	137	108
11	20 × 20 × 0.22	399	314

2-3-4 ダイアフラム辺比依存性^[24]

2-3-4-1 理論

ダイアフラムの形状は矩形としているが、辺の比 a/b によってダイアフラムに生じる歪みの分布が異なる。そこで、ダイアフラム上の導波路の長さ（作用長）を一定として、辺の比を変化させた時の位相変化量を計算した。つまり、 b を一定として a の値を変化させた。その結果を Figure 2-15 及び Figure 2-16 に示す。

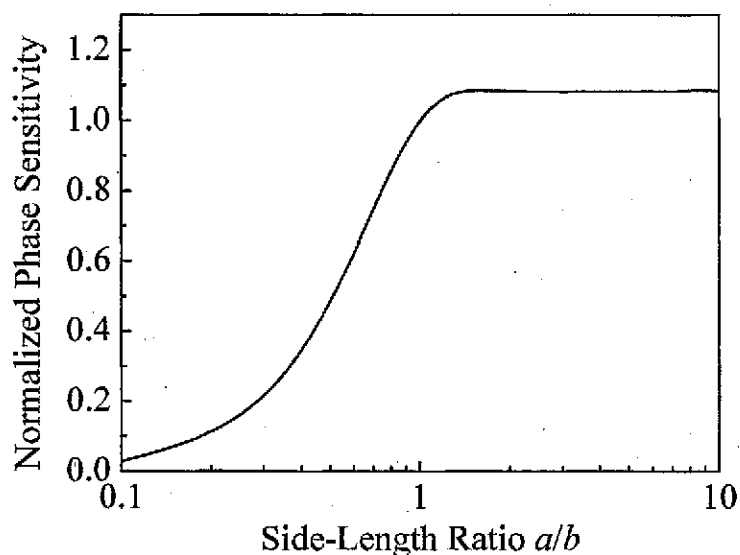


Fig. 2-15 Normalized phase sensitivity as a function of side-length ratio of diaphragm for waveguide located at the edge of diaphragm.

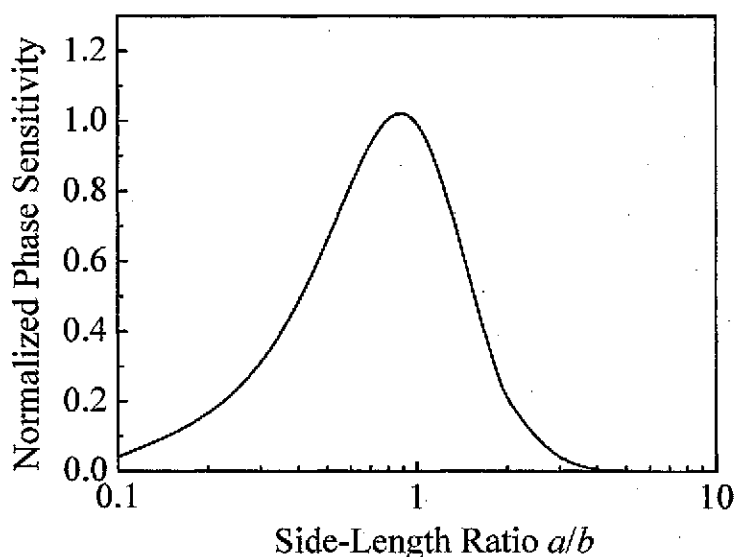


Fig. 2-16 Normalized phase sensitivity as a function of side-length ratio of diaphragm for waveguide located at the center of diaphragm.

両図共に、辺の比 a/b が 1 の時に位相感度が 1 となるように正規化した。Figure 2-15 はダイヤフラムの端に光導波路を位置させたときの計算結果である。ダイヤフラム端においては、辺の比が大きくなるに従い感度は高くなるが、辺の比 a/b が 1 以上において、 a を b より大きくしても位相感度はほとんど変わらないことが分かる。また、Figure 2-16 はダイヤフラムの中央に光導波路を位置させた時の計算結果である。ダイヤフラム中央においては、光導波路が中央からずれたとしても感度はほとんど変化しないという利点があるが、辺比が 1 より大きくなるにつれて感度が低下していくという特徴がある。

2-3-4-2 実験

2-3-4-1 の理論結果を実験的に確かめるために、辺比が異なる 4 種類の光マイクロホン（センサ）を試作した。試作したセンサは、2-3-1-1 で述べたものと同じで、印加圧力-出力強度特性も 2-3-1-1 に示されているので、ここでの掲載は割愛する。Figure 2-17 は、導波路位置をダイヤフラム端としたときの、ダイヤフラム辺比と位相感度の関係で、実線が理論値、■印が測定値である。また、Figure 2-18 は導波路をダイヤフラム中央にしたときの結果である。図において、◆はセンサ#1、●はセンサ#2、▲はセンサ#3、■はセンサ#4 の測定結果である。また、比較のため、Table 2-3 に理論値及び実験値をまとめた。

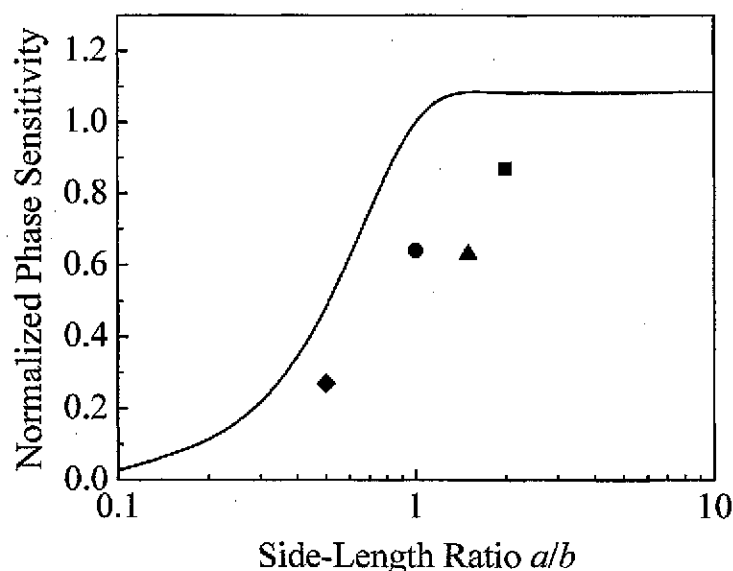


Fig. 2-17 Normalized phase sensitivity as a function of side-length ratio of diaphragm for waveguide located at the edge of diaphragm.

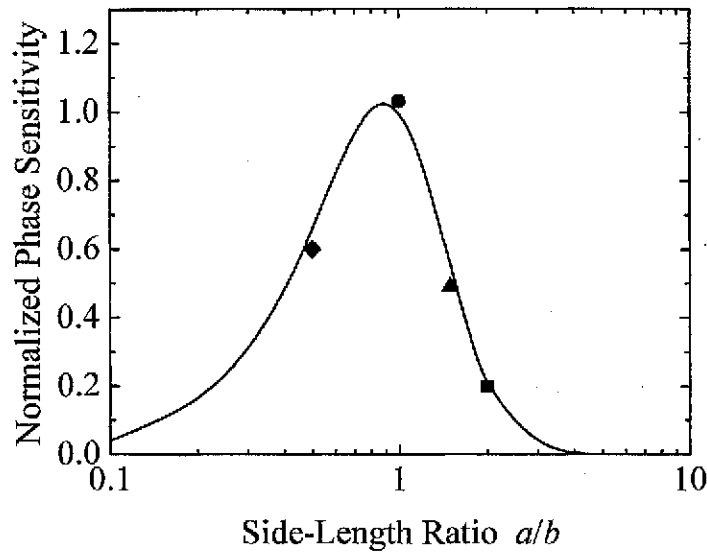


Fig. 2-18 Normalized phase sensitivity as a function of side-length ratio of diaphragm for waveguide located at the center of diaphragm.

Table 2-3 Normalized phase sensitivity as a function of side-length ratio of diaphragm for waveguide located at the center of diaphragm.

	Dimensions of diaphragm [mm×mm×mm]	Edge of diaphragm		Center of diaphragm	
		Calculated [mrad/kPa]	Measured [mrad/kPa]	Calculated [mrad/kPa]	Measured [mrad/kPa]
#1	5×10×0.22	72.4	41.0	32.6	29.7
#2	10×10×0.22	151	96.7	49.9	51.3
#3	15×10×0.22	165	95.2	27.7	24.2
#4	20×10×0.22	164	131.	10.1	10.0

ダイヤフラム中央の導波路では、測定値はほぼ理論通りの変化をしているのに対して、ダイヤフラム端の導波路では理論値とやや異なる結果が得られた。その原因として、理論ではダイヤフラム端における位相感度を示しているのに対して、実際に作製を行ったセンサでは、ダイヤフラム端から離れていた。導波路位置依存性でも述べたとおり、位相感度はダイヤフラム端で最も高く、端から離れるに従って感度が急激に低下する。試作センサにおいては、センサ#1で0.30 mm、サイズ#2で0.36 mm、サイズ#3で0.39 mm、サイズ#4で0.05 mm離れていた。これは作製時に導波路を作製したガラス基板と穴あき基板を張り合わせる際に、目視でダイヤフラム端に位置するように合わせているためで、ばらつきが避けられなかった。センサ#4ではダイヤフラム端から0.05 mmと近い場所に位置しているため位相感度が理論の80%となった。一方、センサ#1-#3では、導波路位置がダイヤフラム端から0.3~0.4 mmの場所に位置し、理論値に対する測定値の割合は60%程度となった。センサ#1-#3については、位相感度は低いものの理論値の傾向に似た変化となった。

2-4 ダイアフラムの共振周波数

共振周波数とは、印加音波の周波数とダイアフラムの固有周波数が等しくなったとき、ダイアフラムの振動振幅が著しく大きくなる共振現象が起こる周波数である。そのため、Fig. 2-19 のように感度が高くなる。しかし、共振周波数より高い周波数では、感度が低下すると予想される。そのため、光マイクロホンを作製する際にはダイアフラムの共振周波数を光マイクロホンの周波数範囲の上限よりも大きくしなくてはならない。したがって、周波数範囲を広げるためには、共振周波数を高く設定しなくてはならない。

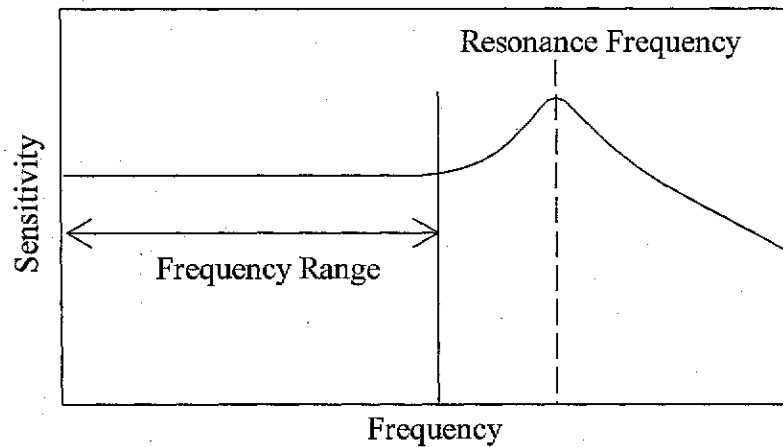


Fig. 2-19 Frequency response of the optical microphone.

共振周波数はダイアフラムの自由振動に関する微分方程式

$$ph \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{Yh^3}{12\rho(1-\mu^2)} \left(\frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial y^2 \partial z^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial z^4} \right) = 0 \quad (2-21)$$

から求められる。ここで、 ρ はダイアフラムの密度、 t は時間を表す。ダイアフラムの支持方法を周辺固定として、これを解くと、ダイアフラムサイズと共振周波数の関係は以下ようになる。

$$f = \frac{\alpha\pi}{2} \sqrt{\frac{Y}{12\rho(1-\mu^2)}} \frac{h}{a^2} \quad (2-22)$$

ここで、 Y はダイアフラムのヤング率、 μ はダイアフラムのポアソン比、 α はダイアフラム周辺状態及びダイアフラム辺比によって決まる値で、Table 2-4 にその一例を示している。なお、表の α 値は1次共振モードに対するものである。今回、本研究で使用する値は、 b/a が1.0、周辺状態が4辺固定である。Table 2-5 は、 b/a が1.0、周辺状態が4辺固定の場合の1次共振モード、2次共振モード、3次共振モードに対する α 値で、Fig. 2-20 に各々の共振モードにおけるダイアフラムの振動の節線図形を示す。

Eq. (2-22)から、共振周波数はダイアフラムの厚さに比例し、ダイアフラム辺長の2乗に反比例することが分かる。

Table 2-4 α -values with respect to aspect ratio and boundary condition of the diaphragm.

boundary condition b/a	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	∞
All: Simple supported	2.000	1.414	1.250	1.160	1.111	1.000
Side a: simple supported Side b: clamped supported	2.933	2.538	2.413	2.358	2.329	2.267
Side a: clamped supported Side b: simple supported	2.933	1.760	1.387	1.229	1.151	1.000
All: Clamped supported	3.646	2.736	2.489	2.408	2.350	2.267

Table 2-5 α -values with respect to resonance order when $b/a = 1$ and all sides of diaphragm are rigidly clamped.

Order	1st	2nd	3rd
α	3.646	7.437	10.965

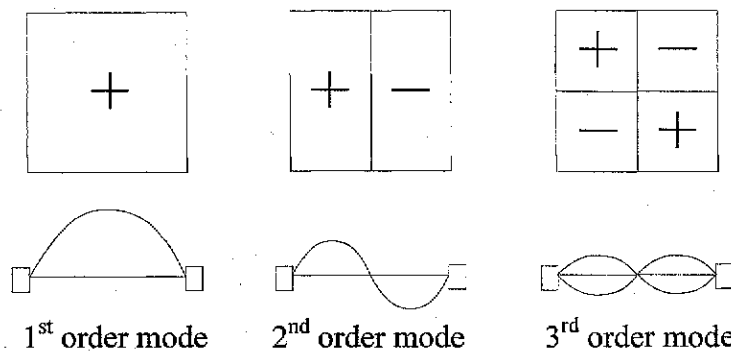


Fig. 2-20 Vibration patterns of diaphragm in several resonance orders.

2-5 マイクロホンの設計方法^[3]

2-3-2節及び2-3-3節の理論及び実験の結果から、光マイクロホン进行設計するための、位相感度と共振周波数に関するチャートを作成した。Figure 2-21 がそのチャート図である。チャート図の作成に当たって、導波路の位置を感度が最も高いとされるダイヤフラムの端とした。また、光波の波長は 633 nm とした。マイクロホン構成材料の材料力学定数、光学定数としては、マイクロホン基板として使用する Corning#0211 ガラスの主成分である、溶解石英の値を用いた。

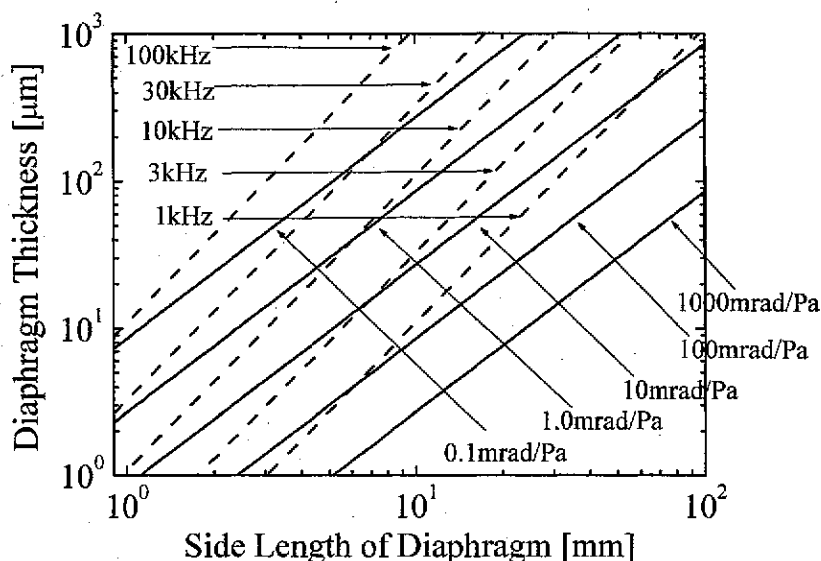


Fig. 2-21 Theoretical trajectories of equal sensitivities and equal resonance frequencies on the side length - thickness plane.

Figure 2-21 において、実線は位相感度とダイヤフラムサイズ（ダイヤフラムの辺長と厚さ）の関係を示している。感度はダイヤフラム辺長の 3 乗に比例し、ダイヤフラム厚の 2 乗に反比例するため、実線の傾きは 1.5 となっている。また、点線は共振周波数とダイヤフラムサイズの関係を表している。共振周波数は、Eq. (2-22) で示すように、ダイヤフラム辺長の 2 乗に反比例し、ダイヤフラム厚に比例するので、点線の傾きは 2 となる。

Figure 2-21 から、ダイヤフラム辺長が長くなるに従って、感度は増加するが、共振周波数は下がることが分かる。また、ダイヤフラム厚を薄くしていくと、感度は高くなるのに対して、共振周波数は低くなる。このことから、高感度、高共振周波数を両立させるのは難しく、光導波型マイクロホンを設計する際は、どちらか一方を高くすると、他方を犠牲にしなければならない。本研究では、S/N 比の向上に重点を置き、高感度のマイクロホンを作製することにした。そのため、人の耳の可聴周波数範囲は 20 Hz～20000 Hz であるが、通常の会話音を聞き取るのに少なくとも必要である 300 Hz～3000 Hz を周波数範囲とした。この周波数範囲の上限 3000 Hz から 1 次共振周波数を 3400 Hz と設定した。この設定値と Fig. 2-21 から、この条件を満たすダイヤフラムサイズは 20 mm×20 mm×0.15 mm となった。このダイヤフラムサイズより、1 次共振周波数は 3400 Hz、2 次共振周波数は 7000 Hz、3 次共振周波数は 10300 Hz となった。また、位相感度の理論値は 2.5 mrad/Pa である。

第3章 ガラス基板光導波型マイクロホンの試作と特性評価

3-1 試作^[24]

光導波型マイクロホンの動作確認と最小検出可能音圧を評価するため、Fig. 3-1 のようなダイヤフラムサイズ $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 0.15\text{ mm}$ の光マイクロホンを試作した。光マイクロホンの作製には、2枚のガラス基板：(1) コーニング#0211 ガラス（ダイヤフラムとなる導波路作製用基板）、(2) 穴あきソーダライムガラス（ダイヤフラム支持基板）を使用した。穴あきガラスの穴の形状は正方形で、大きさは $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ である。また、コーニングガラスの厚さは 0.15 mm である。

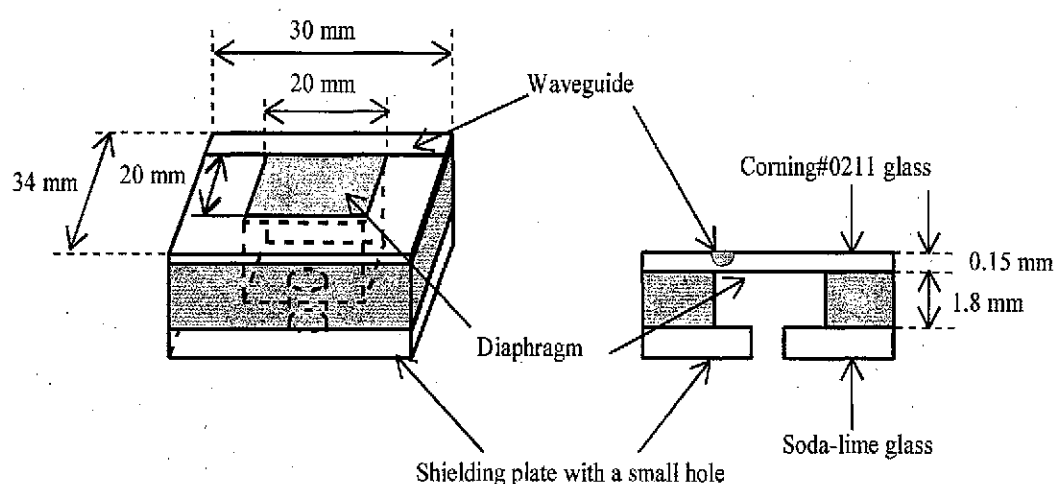


Fig. 3-1 Schematic drawing of the fabricated optical microphone.

コーニングガラス上にアルミニウム薄膜を真空蒸着でつけ、さらにアルミニウム薄膜上にフォトリソをスピンコーティングした。導波路パターンが描かれたフォトマスクを使って、フォトリソを露光し、フォトリソ上に導波路パターンを転写した。さらに、このフォトリソをマスクとして、アルミニウム薄膜をエッチングし、導波路パターンをアルミニウム薄膜に転写した。フォトリソを除去した後、 400°C の硝酸カリウムに浸し、イオン交換法で単一モード導波路を作製した。導波路作製後、作製した導波路がダイヤフラム支持基板の穴の縁に沿うように位置合わせし、2枚のガラス基板を重ね合わせた。なお、本研究では等間隔で多数の導波路を作製しており、その内の1本を位置合わせ用に用いた。位置合わせ後、紫外線硬化樹脂を注入し、紫外線を照射して2枚のガラスを接着した。その後、音波の回り込みを防ぐため、マイクロホンのダイヤフラム下部に、穴あき基板を接着した。

3-2 静圧印加特性^[24]

3-2-1 測定方法

作製した光マイクロホンの位相感度を評価するために、圧力-出力特性（静特性）を測定した。Figure 3-2 に圧力-出力特性の光学系を示す。光源には波長 632.8 nm の He-Ne レーザを用いた。レーザの偏光方向をマイクロホン基板面に対して 45° 傾け、対物レンズで光導波路端面に集光することで、TM-like モード光、TE-like モード光を同強度で励起した。光マイクロホン下部にはシリコンチューブ、注射器を接続し、これにより注射器の加減で加圧、減圧が可能となる。印加圧力の値はゲージ圧であり、ダイヤフラムと密閉基板で構成された空間内の体積が大気圧より高いときを正、低いときを負とした。圧力の印加範囲は -3.0 kPa ~ 3.1 kPa とした。バビネソレイユ補償板は、初期位相を任意に変化させるために用いた。また、ピンホールにより導波光のみを取り出し、その光強度を光検出器で測定した。

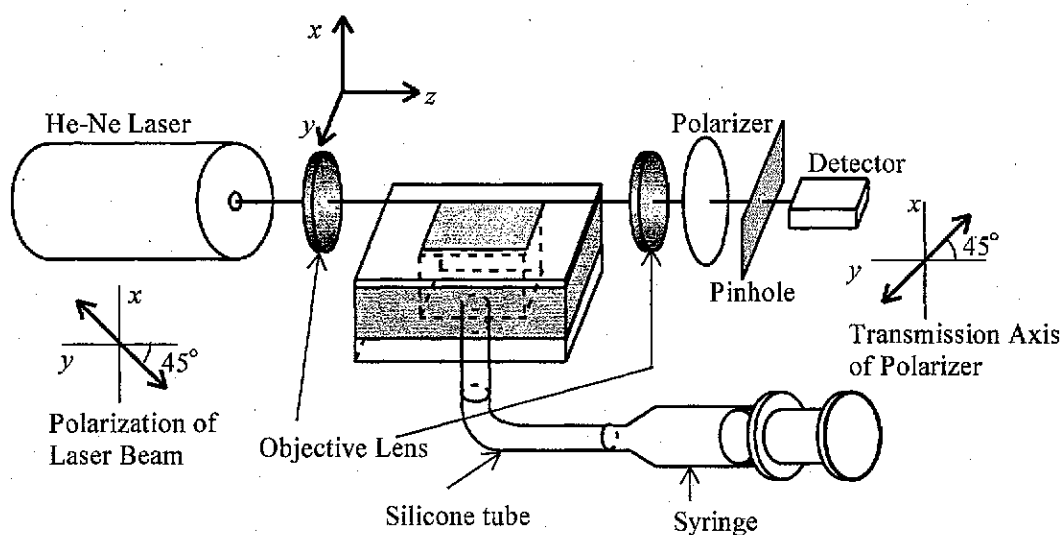


Fig. 3-2 Experimental setup for measuring output versus applied pressure.

3-2-2 実験結果

光マイクロホンの静圧特性及びその再現性について確認するために、ダイヤフラムサイズ $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 0.15\text{ mm}$ のマイクロホンを3個作製し、測定を行った。Figure 3-3(a)は Microphone #1, (b)は Microphone #2, (c)は Microphone #3 の測定結果で、ダイヤフラムの端に最も近い光導波路について測定を行った。図において、■は測定値を表わし、曲線は測定値を正弦関数でフィッティングしたものである。

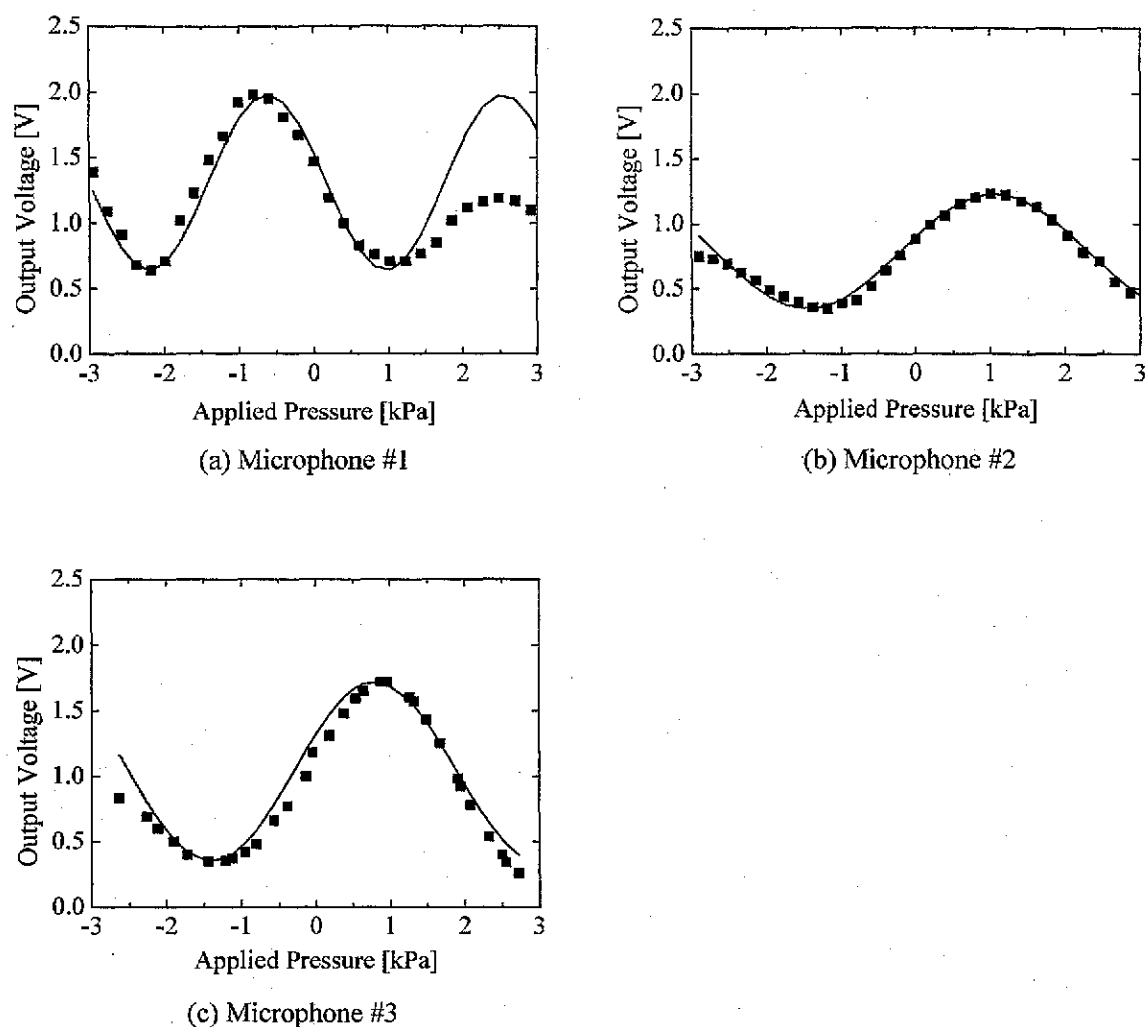


Fig. 3-3 Output voltages of Microphones #1 - #3 as a function of applied pressure.

実験結果より得られた半波長圧力及び位相感度は Table 3-1 のとおりである。位相感度はいずれも、理論値の 2.5 mrad/Pa に比べ低く、64 %, 56 %, 52 %にとどまった。この違いの原因として、理論解析ではダイヤフラムを完全な固定端としているのに対し、作製した光マイクロホンは紫外線硬化樹脂による導波路作製用基板とダイヤフラム支持基板との接着が不十分で、ダイヤフラム端が完全な固定端となっていなかったことが考えられる。また、Microphone #1 が他の二つに比べて位相感度が高かったのは、導波路位置がダイヤフラム端に近かったためだと考えられる。

Table 3-1 Measured half-wave pressures and phase sensitivities.

	Halfwave pressure [kPa]	Phase sensitivity [mrad/Pa]	Waveguide position from edge [mm]
Microphone #1	1.6	2.0	0.0
Microphone #2	2.4	1.3	0.5
Microphone #3	2.2	1.4	0.5

3-3 音波照射による最小検出可能音圧の評価^[24]

3-3-1 測定方法

光マイクロホンに音波を印加し、出力光強度を測定した。Figure 3-4 は測定光学系である。発振器で周波数を設定し、可変抵抗付きの増幅器で音圧の調整を行い、スピーカから光マイクロホンに音波を印加した。そして、光検出器で検出した光強度信号を A/D 変換し、PC に取り込んだ。なお、雑音低減のため光検出器にはバンドパスフィルタを取り付け、周波数帯域 300 Hz~3000 Hz 以外の周波数をカットした。印加音波の周波数は、一般的にマイクロホン特性を評価するのに用いられる 1 kHz とし、印加する音圧は 122 dB-SPL (25 Pa), 120 dB-SPL (20 Pa), 112 dB-SPL (8 Pa), 100 dB-SPL (2 Pa) とした。また、各音圧とも検光子がある場合とない場合の二通りで測定を行った。これは、本実験の測定光学系では機械的振動に伴う光軸ずれを起こしやすいため、検出される光強度変化のすべてがマイクロホン信号というわけではなく、光軸ずれによる光強度変化や雑音を含むからである。検光子がある場合は、マイクロホン信号による光強度変化、機械的振動に伴う光軸ずれによる光強度変化および雑音が含まれる。検光子がない場合は、位相差が光強度に変換されないため、マイクロホン信号による光強度変化は 0 であり、機械的振動に伴う光軸ずれによる光強度変化と雑音のみが含まれる。

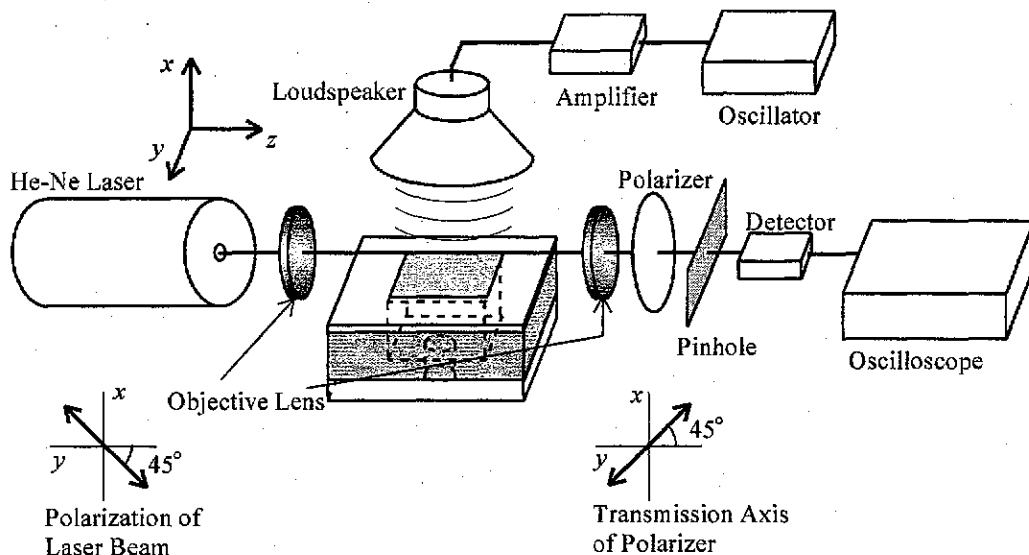


Fig. 3-4 Experimental setup for measuring output response to applied sound.

以上のことより、「検光子あり信号」と「検光子なし信号」が同位相であれば、「検光子あり信号」から「検光子なし信号」を差し引いた値が「マイクロホン信号」となる。このマイクロホン信号を確認できた最小の音圧レベルを最小検出可能音圧レベルと評価することにした。

3-3-2 実験結果

Figures 3-5~3-8 は、それぞれ音圧 25 Pa, 20 Pa, 8 Pa, 2 Pa の測定結果で、(a)は「検光子あり信号」、(b)は「検光子なし信号」である。横軸は時間、縦軸は光検出器の出力電圧を表している。「マイクロホン信号」は、25 Pa, 20 Pa, 8 Pa, 2 Pa の順に 35 mV, 31 mV, 11 mV, 1.9 mV となり、最小検出可能音圧は 2 Pa (100 dB-SPL) より小さいことが分かった。

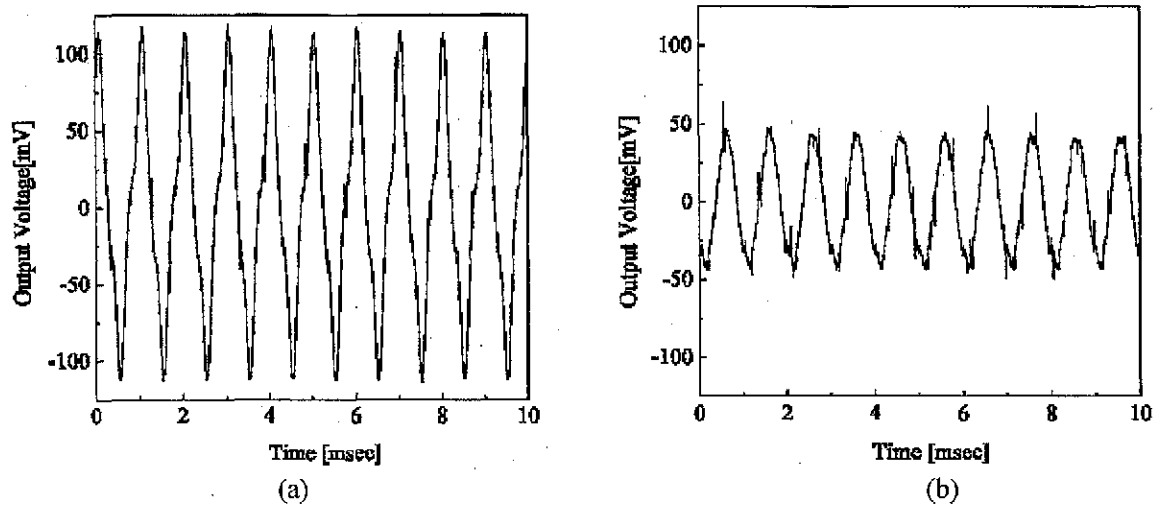


Fig. 3-5 (a) A nominal microphone signal (with the output polarizer), and (b) a misalignment signal (without the output polarizer) responding to a sound wave of 25 Pa and 1 kHz.

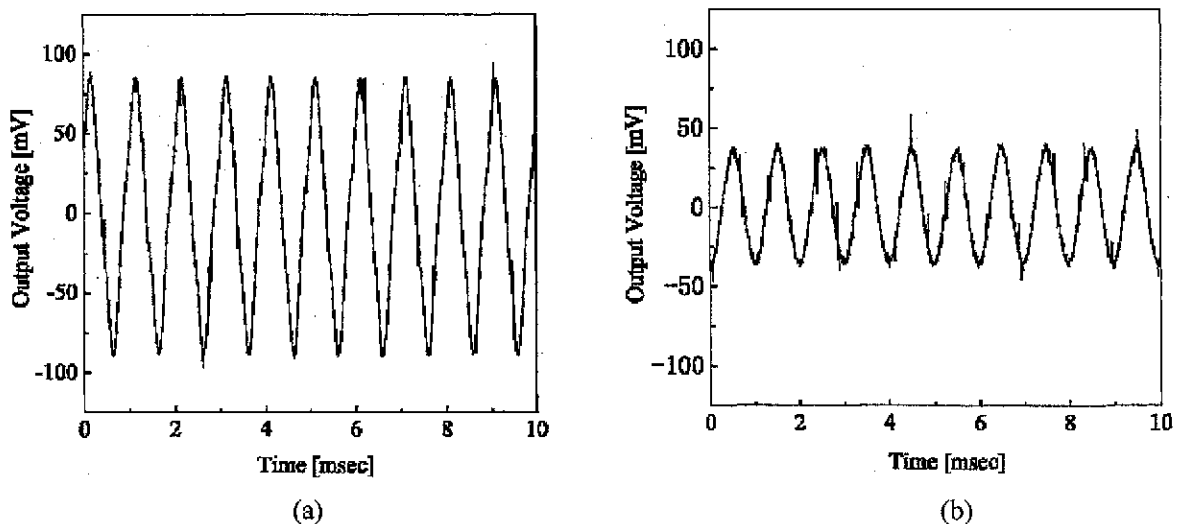


Fig. 3-6 (a) A nominal microphone signal (with the output polarizer), and (b) a misalignment signal (without the output polarizer) responding to a sound wave of 20 Pa and 1 kHz.

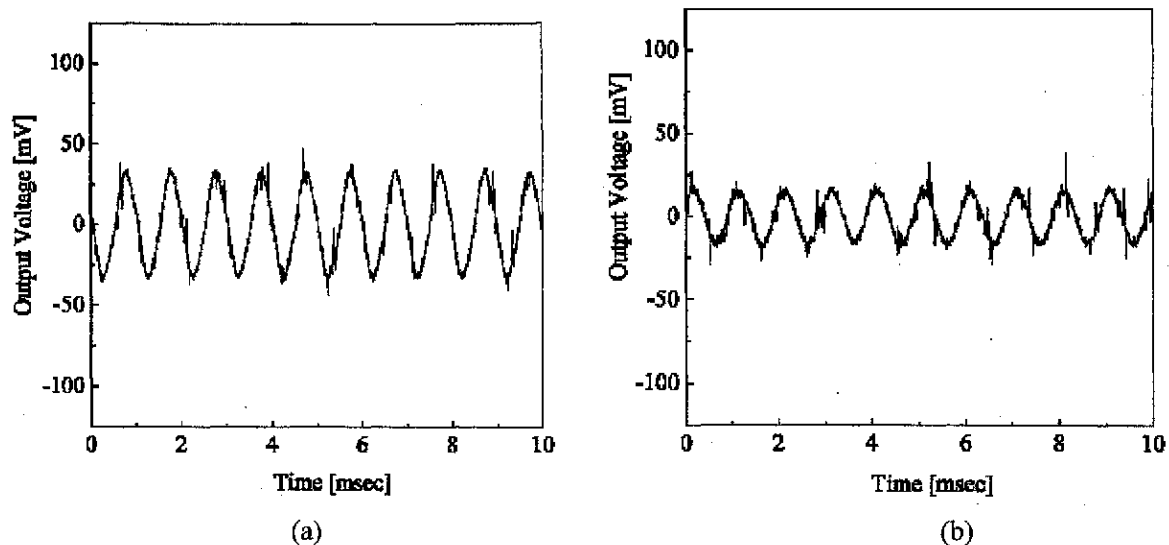


Fig. 3-7 (a) A nominal microphone signal (with the output polarizer), and (b) a misalignment signal (without the output polarizer) responding to a sound wave of 8 Pa and 1 kHz.

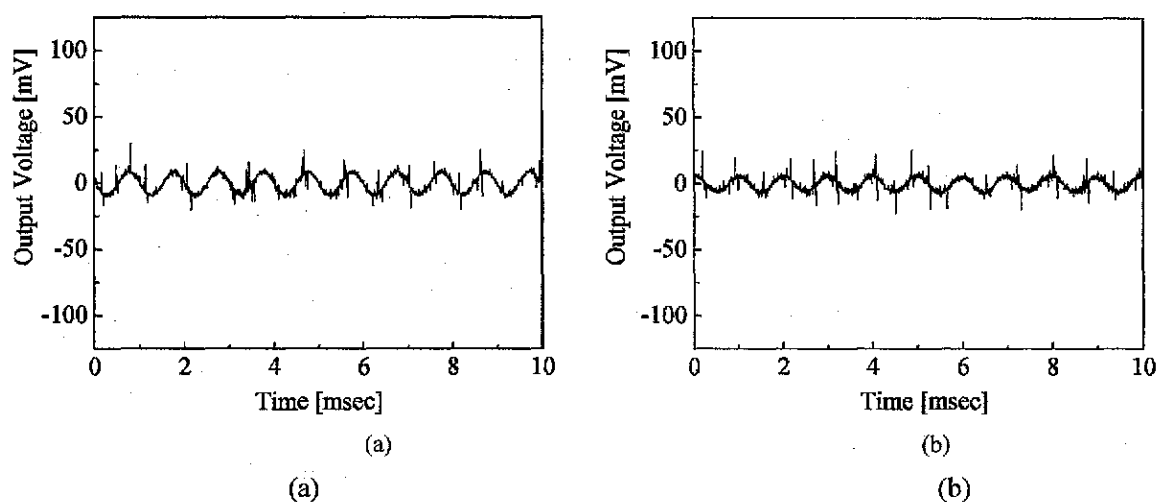


Fig. 3-8 (a) A nominal microphone signal (with the output polarizer), and (b) a misalignment signal (without the output polarizer) responding to a sound wave of 2 Pa and 1 kHz.

3-4 周波数特性

3-4-1 測定方法

Figure 3-9 に示す光学系を用いて、試作マイクロホンの周波数特性の測定を行った。特定の周波数の信号のみを測定するために、ロックインアンプ（時定数 100 ms）を使用した。音源にはスピーカを使用した。安定したマイクロホン信号が得られた最小の音圧が 100 dB-SPL（音圧 2 Pa）であったので、周波数特性の測定では印加音圧を 100 dB-SPL とした。なお、印加音圧は、光マイクロホンが置かれる場所にコンデンサマイクロホンを設置し、決定した。

3-3-1 項と同様に、「検光子あり信号」から「検光子なし信号」を差し引いた値を「マイクロホン信号」と定義し、各周波数におけるマイクロホン信号を算出した。

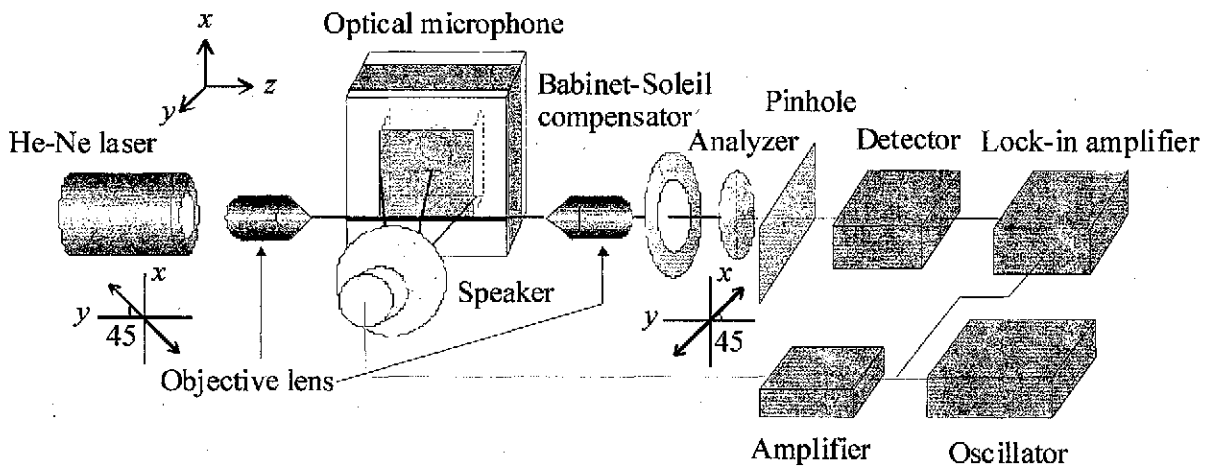


Fig. 3-9 Experimental setup for measuring frequency response.

3-4-2 実験結果

Figure 3-10 は Microphone #1 の周波数特性である。図の▲は「マイクロホン信号」の最大値、■は最小値を示す。ところで、得られた「検光子あり信号」、「検光子なし信号」によっては、「マイクロホン信号」が負となることがあったが、物理的には「マイクロホン信号」が負となることはないので、「マイクロホン信号」が負になった場合はその値を 0 とした。周波数範囲は 200 Hz～10000 Hz とし、1000 Hz 以下では 100 Hz ごとに測定を行い、1000 Hz 以上では 500 Hz ごとに測定を行った。Figure 3-10 から、1 次共振周波数とみられる信号は 2500 Hz、2 次共振周波数は 5000 Hz、3 次共振周波数は 9000 Hz にあり、理論値の 1 次共振周波数 3400 Hz、2 次共振周波数 7000 Hz、3 次共振周波数 10300 Hz よりも、全て低くなった。

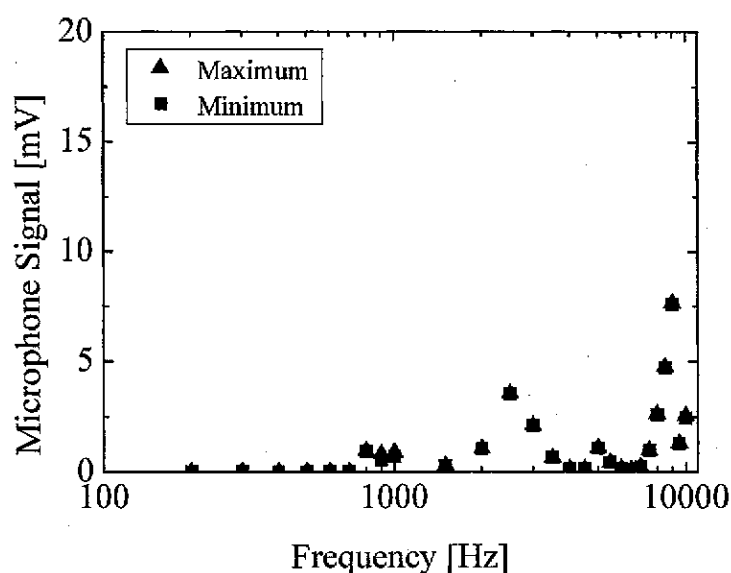


Fig. 3-10 Frequency response of Microphone #1.

Figure 3-11 は Microphone #2 の周波数特性である。測定範囲は Microphone #1 と同様に 200 Hz～10000 Hz とし、1000 Hz 以下では 100 Hz ごとに測定を行い、1000 Hz 以上では、1500 Hz～3500 Hz を 100 Hz ごとに、その他は 500 Hz ごとに測定を行った。Figure 3-11 から、1 次共振周波数は 3300 Hz にあることが分かった。しかし、2 次、3 次共振は確認できなかった。また、周波数範囲 1000 Hz～2800 Hz において、マイクロホン信号はほぼ一定であった。

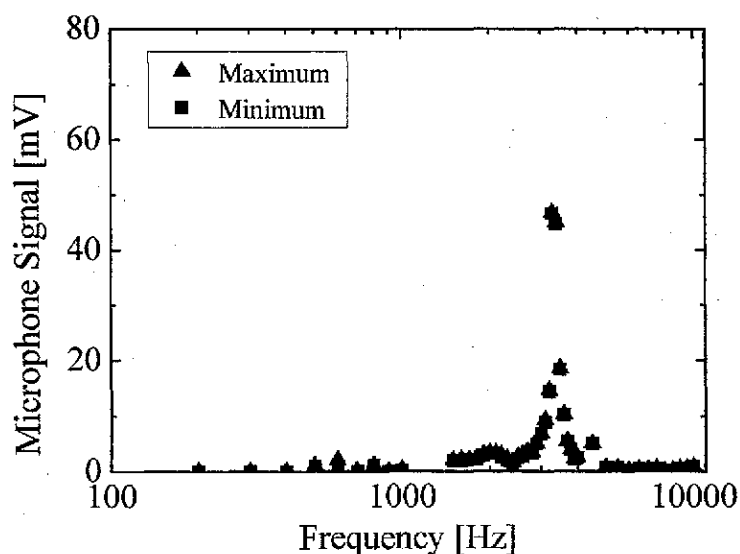


Fig. 3-11 Frequency response of Microphone #2.

Figure 3-12 は Microphone #3 の周波数特性である。測定範囲は 200 Hz～10000 Hz とし、1000 Hz 以下では 100 Hz ごとに測定を行い、1000Hz 以上では、3500 Hz～4000 Hz を 100 Hz ごとに、その他は 500Hz ごとに測定を行った。Figure 3-12 から、1 次共振周波数は 3700 Hz、2 次共振周波数は 7500 Hz にあることが分かった。また、周波数範囲 1000 Hz～3000 Hz において、マイクロホン信号はほぼ一定であった。

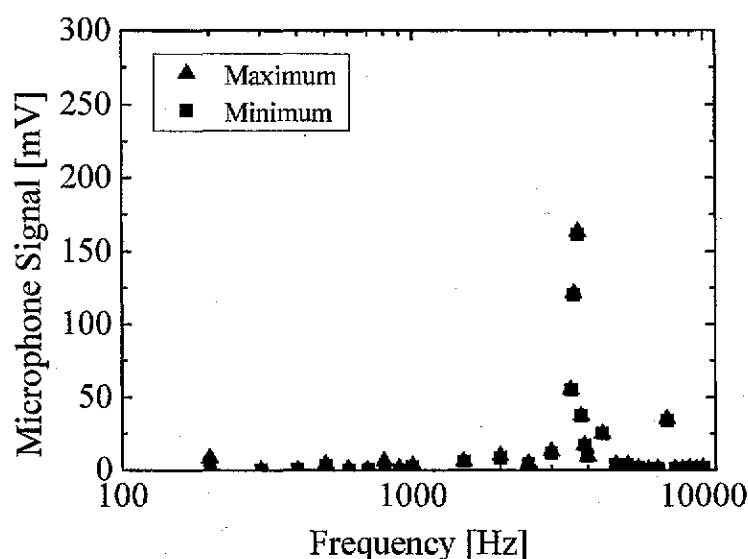


Fig. 3-12 Frequency response of Microphone #3.

Table 3-1 は光マイクロホンの共振周波数の理論値と測定値である。

Microphone #1 では、1 次、2 次、3 次共振周波数、全てにおいて、理論値より低い値になった。この原因として位相感度と同様に、理論解析ではダイヤフラムを完全な固定端としているのに対し、作製した光マイクロホンは紫外線硬化樹脂による導波路作製用基板とダイヤフラム支持基板との接着が不十分で、ダイヤフラム端が完全な固定端となっていなかったことが考えられる。

Microphone #2 については、1 次共振周波数の実験値が理論値とほぼ同じ値となった。しかし、2 次及び 3 次共振の信号を確認することはできなかった。

Microphone #3 についても、1 次共振周波数は理論値と近い結果になった。しかし、他の 2 つのマイクロホンと違い共振値が理論値よりも大きい値となった。この原因は、作製した光マイクロホンのダイヤフラムサイズに多少の誤差があったと考えられる。また、2 次共振周波数は 7500 Hz となり、1 次共振周波数と同様に理論値よりも高くなった。3 次共振については確認することができなかった。

Microphone #1 の共振周波数は理論値に比べて 10 %以上低い値となったが、Microphone #2 及び#3 に関しては、理論値との違いが 10 %以下で、ほぼ理論通りの結果が得られた。

Table 3-1 Calculated and measured resonance frequencies.

	1 st resonance frequency [Hz]	2 nd resonance frequency [Hz]	3 rd resonance frequency [Hz]
Calculated	3400	7000	10300
Microphone #1	2700	5000	9000
Microphone #2	3300	---	---
Microphone #3	3700	7500	---

第4章 シリコン基板光導波型マイクロホンの試作と評価

4-1 マイクロホン (その1)

4-1-1 構成及び試作

Figure 4-1 はシリコン基板光導波型マイクロホンの構成で、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。また、Figure 4-2 は、作製したセンサの概形と光導波路の断面である。光導波路はリッジ型に分類される光導波路で、単一モード条件を考慮し、図のようなサイズとした。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、 $1.0\mu\text{m}$ とした。

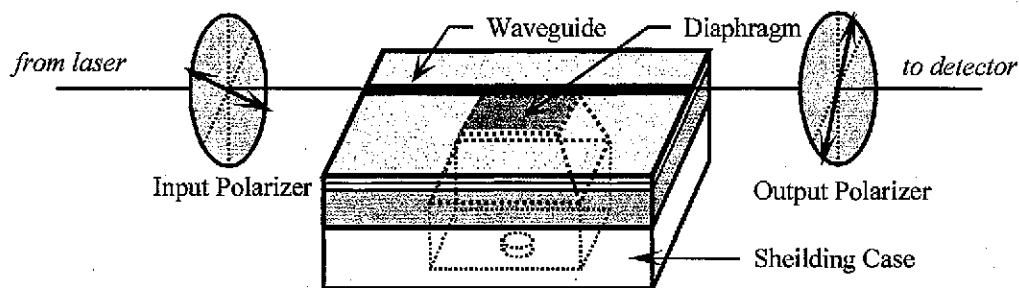


Fig. 4-1 Schematic drawing of a silicon-based guided-wave optical microphone. The guided-wave optical microphone is placed between a pair of crossed polarizers.

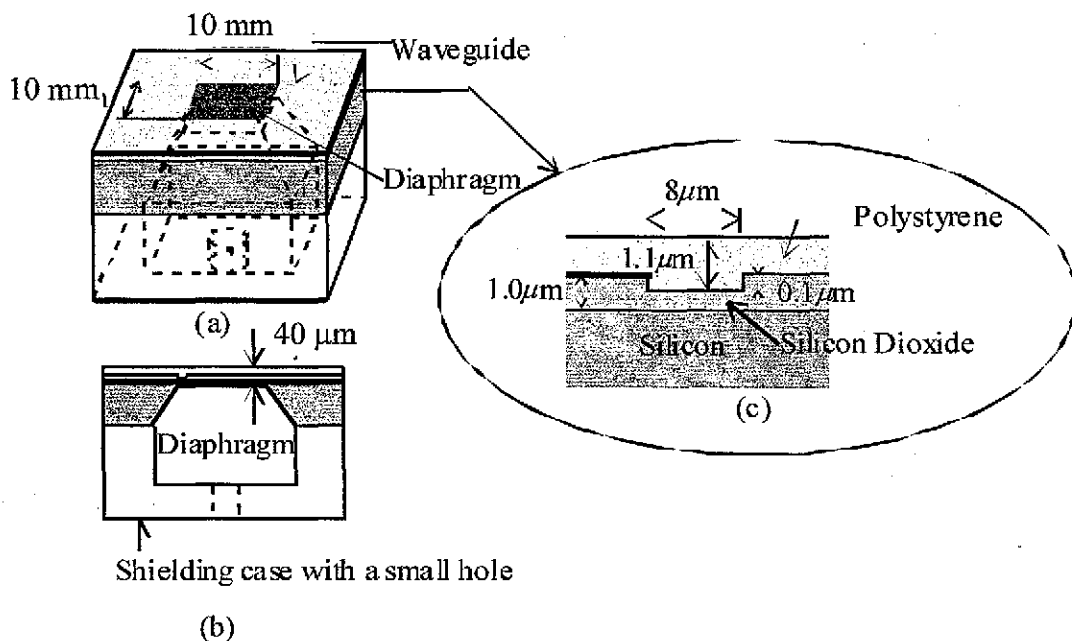


Fig. 4-2 (a) Schematic drawing of the fabricated optical microphone, (b) its cross-sectional view, and (c) a cross-section of the ridge-type waveguide.

試作では、まず、熱酸化法によりシリコン基板の両面に二酸化シリコン層を形成した。次に、その下面にフォトリソストを用いてダイヤフラムのパターンニングを行い、フッ化水素酸を水酸化アンモニウム水溶液で希釈した緩衝エッチング液により、ダイヤフラム部にあたる二酸化シリコン層を除去した。水酸化カリウム水溶液により異方性エッチングを行い、ダイヤフラムを作成した。作製したダイヤフラムの寸法は $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 40\text{ }\mu\text{m}$ である。ダイヤフラムを作製した後、二酸化シリコンを一旦除去し、バッファ層として再び $1.0\text{ }\mu\text{m}$ 厚の二酸化シリコン膜を基板上に形成した。フォトリソストを用いて光導波路のパターンニングを行い、緩衝エッチング液により、幅 $8\text{ }\mu\text{m}$ 、深さ $0.1\text{ }\mu\text{m}$ の段差を、ダイヤフラムの長辺と平行になるように作製した。最後に、厚さ $1.1\text{ }\mu\text{m}$ のポリスチレン導波層をスピンドーティング法により作製した。

4-1-2 静圧印加特性

作製した光導波型マイクロホンのマイクロホン感度を導出するために、音圧の代わりに注射器のピストン調整で静圧を加え、光強度の測定を行った。Figure 4-3 に測定光学系を示す。基本的な構成は Fig. 4-1 と同じであるが、偏光子を置く代わりにレーザ (632.8 nm) の偏光方向を水平方向から 45° 傾けて TM-like, TE-like モード光を同強度で導波路端面に入射させた。さらに、アクリル板容器の下部には、シリコンチューブと注射器 (3 cm^3) を接続した。これにより注射器のピストン調整で加圧、減圧が可能となる。また、出力側の対物レンズと検光子の間にバビネソレイユ補償板を置くことで出力光の初期位相を調節する。そして、ピンホールを用いることで、励起された導波光のみを光検出器で検出した。

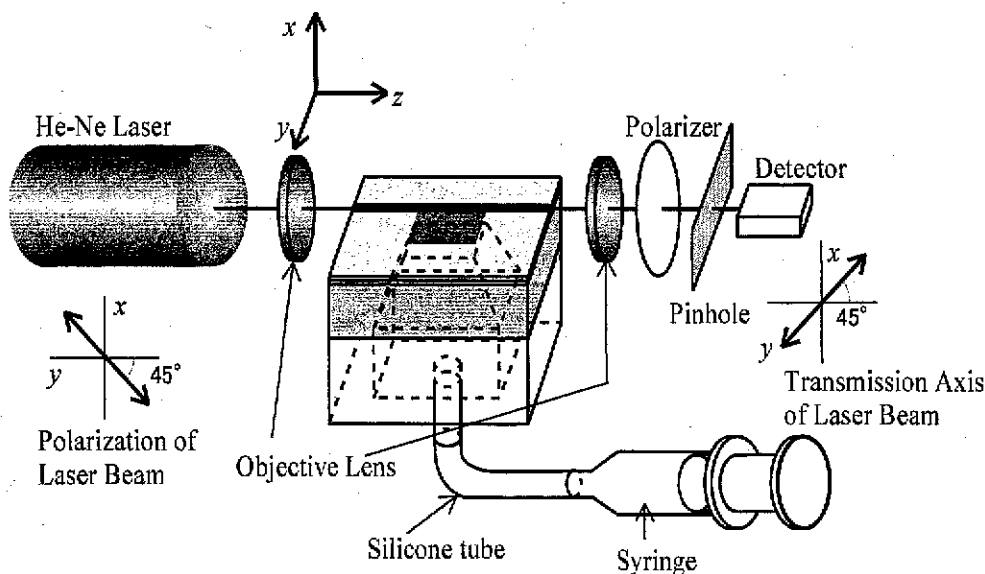


Fig. 4-3 Experimental setup to evaluate phase sensitivity.

なお、2-3-1項で述べたとおり、位相感度はダイヤフラム端で最も高くなるが、シリコン基板が不透明で正確なダイヤフラム端が分からないため、ダイヤフラム端付近の導波路を中心に複数の導波路で測定を行う。そして、マイクロホン感度の最も大きい導波路を使用し、4-1-3項で述べる音圧印加実験を行う。また、圧力センサと光検出器をそれぞれマルチメータに接続することで、印加圧力と光強度を同時に測定した。なお、印加圧力の値はゲージ圧で、マイクロホン下部の空間内の圧力が大気圧より高ければ正であり、低ければ負である。

Figure 4-4 は印加圧力-光強度特性の測定結果である。横軸は印加圧力、縦軸は光検出器の出力電圧を表している。図中の■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。フィッティング結果より、半波長圧力は 3.9 kPa で、位相感度は 0.81 rad/kPa となった。また、出力電圧の最大値は 0.5 V で、消光比は 4.3 であった。

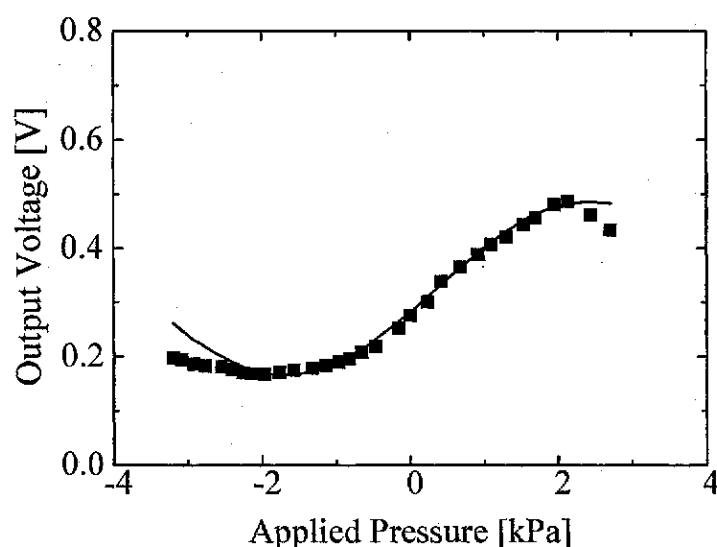


Fig. 4-4 Measured output voltage versus applied pressure.

4-1-3 音圧印加特性及び最小検出可能音圧の評価

マイクロホンに音波を印加し、光強度の測定を行った。測定光学系は3-4-1項で述べた Fig. 3-9 と同じである。雑音低減のため光検出器にはバンドパスフィルタを取り付け、会話音の周波数範囲である 300 Hz~3000 Hz を除く周波数はカットした。印加音波の周波数は 1 kHz とし、音圧レベルを 110 dB-SPL (6.3 Pa), 100 dB-SPL (2 Pa), 90 dB-SPL (0.63 Pa), 80 dB-SPL (0.2 Pa) と設定した。また、各音圧とも検光子がある場合とない場合の二通りで測定を行った。

Figures 4-5~4-8 は、それぞれ音圧レベル 110 dB-SPL, 100 dB-SPL, 90 dB-SPL, 80 dB-SPL の測定結果で、(a)は「検光子あり信号」、(b)は「検光子なし信号」である。横軸は時間、縦軸は光検出器の出力電圧を表している。100 dB-SPL (2 Pa) 以下の音波ではマイクロホン信号が 0 となり、最小検出可能音圧は 100 dB-SPL (2 Pa) であることが分かった。

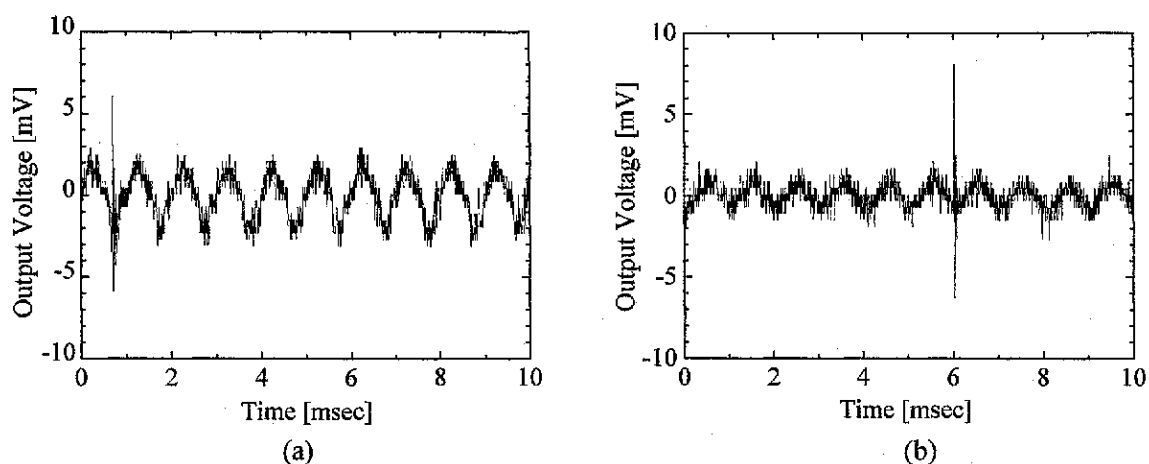


Fig. 4-5 (a) A nominal microphone signal (with the output polarizer), and (b) a misalignment signal (without the output polarizer) responding to a sound wave of 110 dB and 1 kHz.

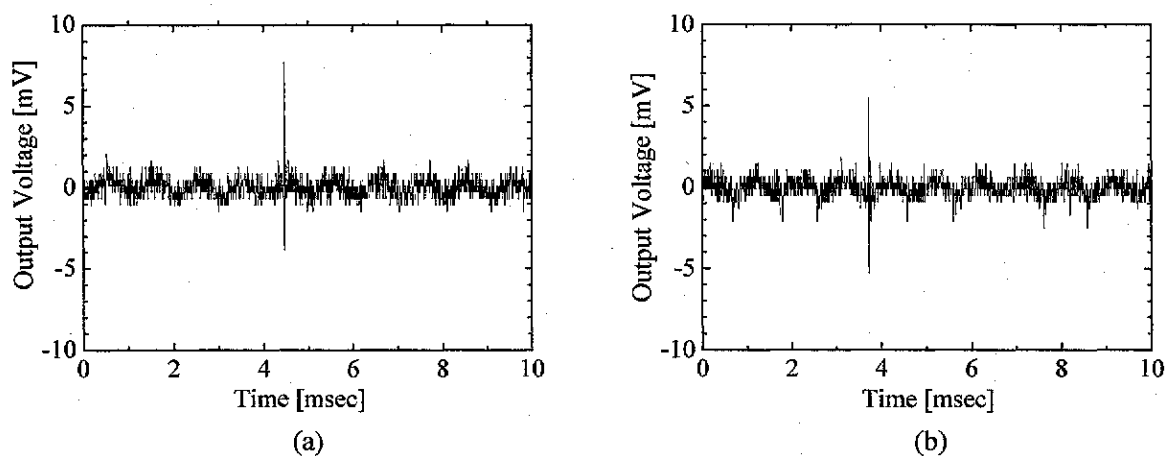


Fig. 4-6 (a) A nominal microphone signal (with the output polarizer), and (b) a misalignment signal (without the output polarizer) responding to a sound wave of 100 dB and 1 kHz.

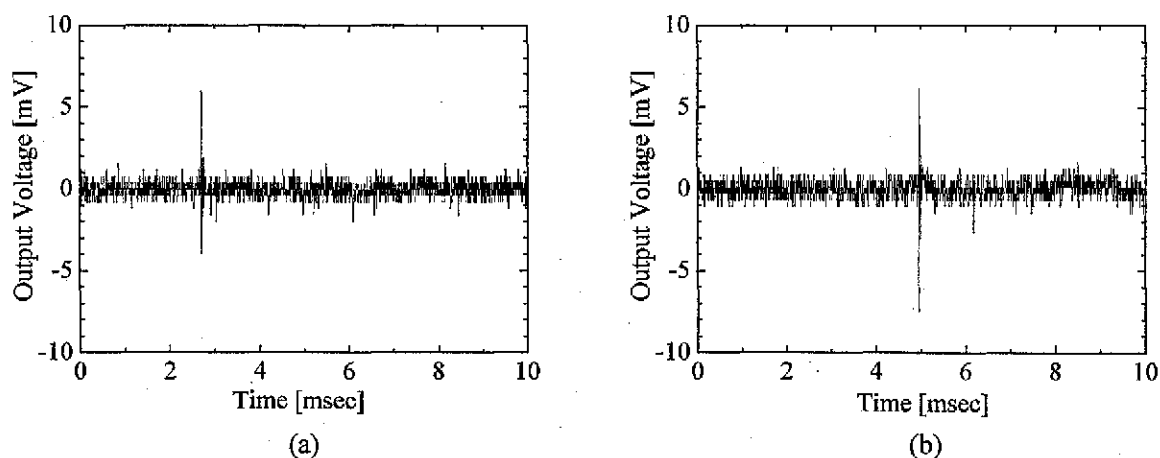


Fig. 4-7 (a) A nominal microphone signal (with the output polarizer), and (b) a misalignment signal (without the output polarizer) responding to a sound wave of 90 dB and 1 kHz.

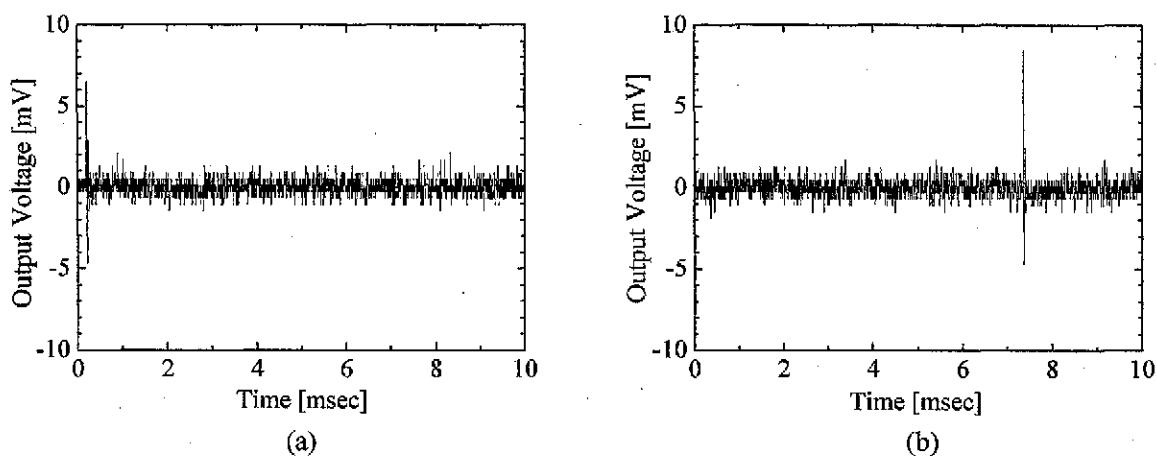


Fig. 4-8 (a) A nominal microphone signal (with the output polarizer), and (b) a misalignment signal (without the output polarizer) responding to a sound wave of 80 dB and 1 kHz.

4-2 マイクロホン (その2)

4-2-1 構成及び試作

前述の光マイクロホンにおいて最小検出可能音圧が 100 dB-SPL にとどまったのは、出力光強度が低く、消光比が小さいことが原因である。これは、光導波路の損失が大きく、多モードであったためで、光導波路作製プロセスにおける二酸化シリコンのウエットエッチングに問題があると考えた。残留応力を低減するため、二酸化シリコンの成膜に低温プロセスのスパッタ法を使用しているが、膜のエッチング耐性が低く、光導波路の荒れや広がりが生じた。そこで、ウエットエッチングを使用せず、リフトオフ法で作製可能な装荷型光導波路を用いることとした。

Figure 4-9 は、装荷型光導波路を用いた光導波型マイクロホンの概略図とダイヤフラム端付近の断面図である。4-1 節のリッジ型光導波路を用いた光マイクロホンと比較するために、ダイヤフラムサイズは変えず、 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 40\text{ }\mu\text{m}$ とした。また、光導波路 (装荷層) は、Fig. 4-10 のようにダイヤフラム上に 0.2 mm 間隔で 50 本作製した。

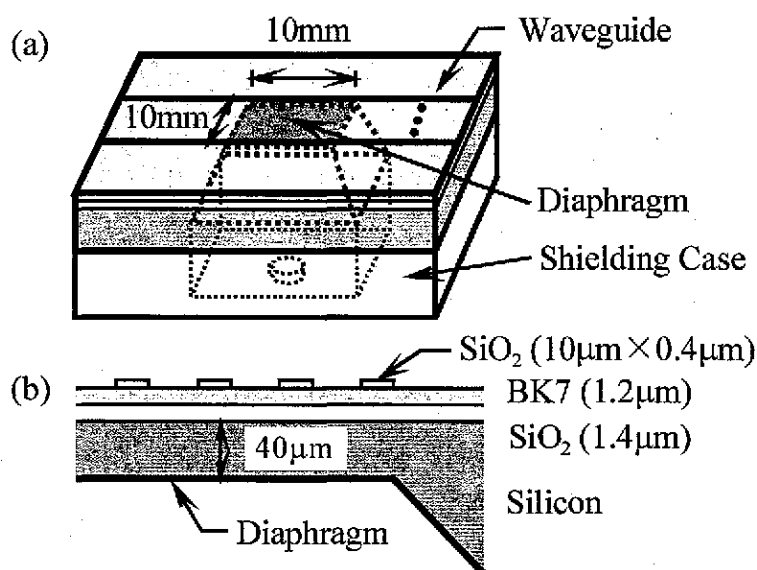


Fig. 4-9 (a) Schematic drawing of the fabricated optical microphone, and (b) the partially sectional view in the vicinity of the diaphragm edge, perpendicular to the direction of waveguides. The dimensions of the diaphragm are $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 40\text{ }\mu\text{m}$.

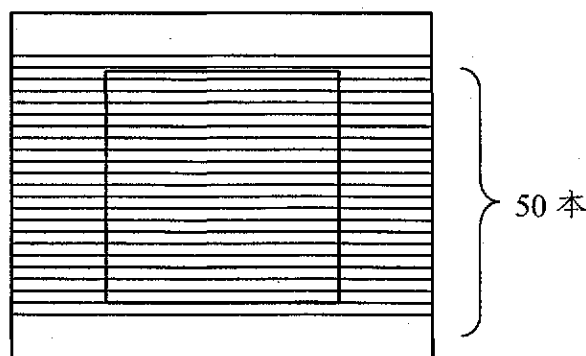


Fig. 4-10 Waveguides on the diaphragm.

4-2-2 静圧印加特性

Figure 4-3 の光学系を用いて、印加圧力－光強度特性を測定した。Figure 4-11 はその測定結果である。横軸は印加圧力、縦軸は光検出器の出力電圧を表している。図中の■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。フィッティング結果より、半波長圧力は 3.8 kPa で、位相感度は 0.83 rad/kPa となった。また、出力電圧の最大値は 6.4 V で、消光比は 10.9 であった。

4-1 節で述べた光マイクロホンに比べると、出力電圧に関しては約 13 倍、消光比に関しては 2.5 倍の改善が見られた。また、ダイヤフラムサイズは変えなかったため、半波長圧力（位相感度）はほぼ同じとなり、妥当な結果が得られた。これらの改善により、マイクロホン信号の観点から 20 倍以上の特性向上が見込まれる。

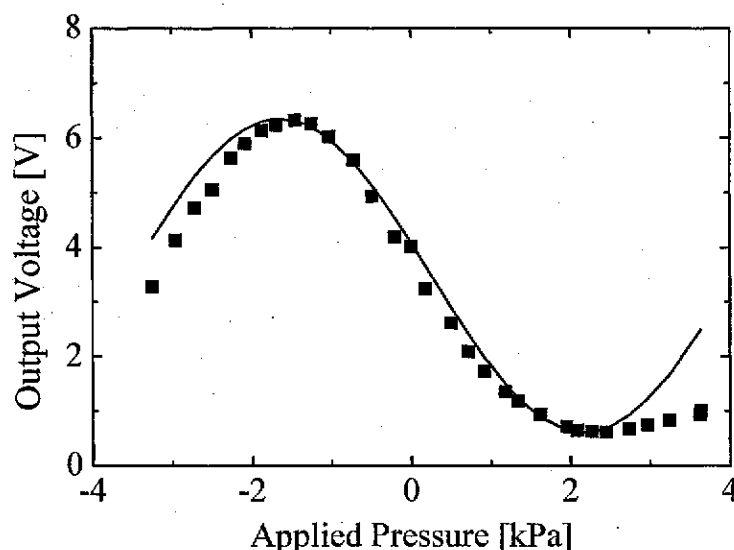


Fig. 4-11 Measured output voltage versus applied pressure.

4-2-3 音圧印加特性及び最小検出可能音圧の評価

試作したマイクロホンに音波を印加し、光強度の測定を行った。発振器で周波数を設定し、可変抵抗付きの増幅器で音圧の調整を行い、スピーカからマイクロホンに音波を印加した。光検出器で検出した光強度データは PC に取り込んだ。なお、雑音低減のため光検出器にはバンドパスフィルタを取り付け、会話音の周波数範囲である 300 Hz～3000Hz を除く周波数はカットした。印加音波の周波数は 1kHz とし、音圧レベルを 100 dB (2 Pa), 90 dB (0.63 Pa), 80 dB (0.2 Pa), 70 dB (63 mPa), 60 dB (20 mPa), 50 dB (6.3 mPa), 40 dB (2 mPa) と設定した。また、各音圧とも検光子がある場合とない場合の二通りで測定を行った。

Figures 4-12～4-18 は、それぞれ音圧レベル 100 dB-SPL, 100 dB-SPL, 90 dB-SPL, 80 dB-SPL, 70 dB-SPL, 60 dB-SPL, 50 dB-SPL, 40 dB-SPL の測定結果で、(a)は「検光子あり信号」、(b)は「検光子なし信号」である。横軸は時間、縦軸は光検出器の出力電圧を表している。80 dB-SPL (0.2 Pa) 以下の音波ではマイクロホン信号が 0 となり、最小検出可能音圧は 80 dB-SPL (0.2 Pa) であることが分かった。

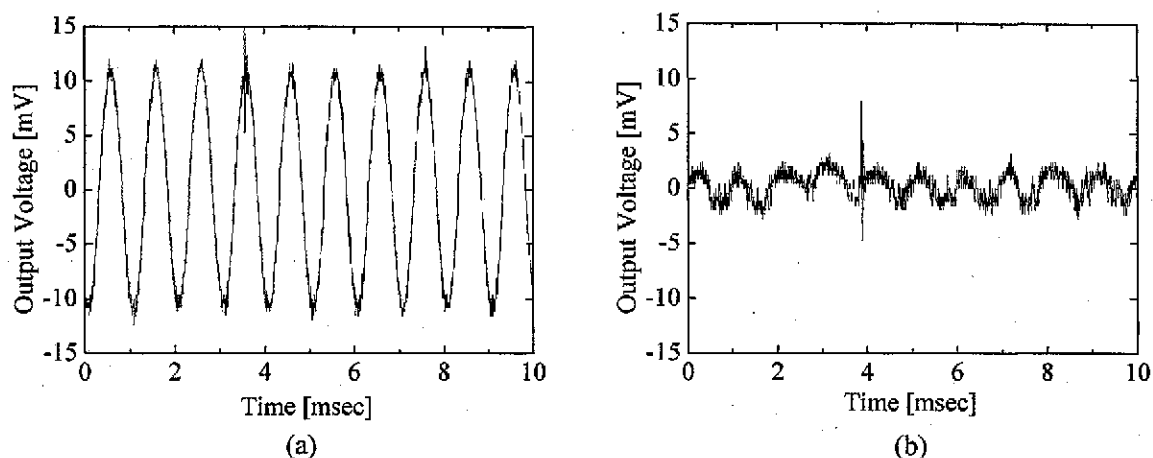


Fig. 4-12 (a) A nominal microphone signal (with the output polarizer), and (b) a misalignment signal (without the output polarizer) responding to a sound wave of 100 dB and 1 kHz.

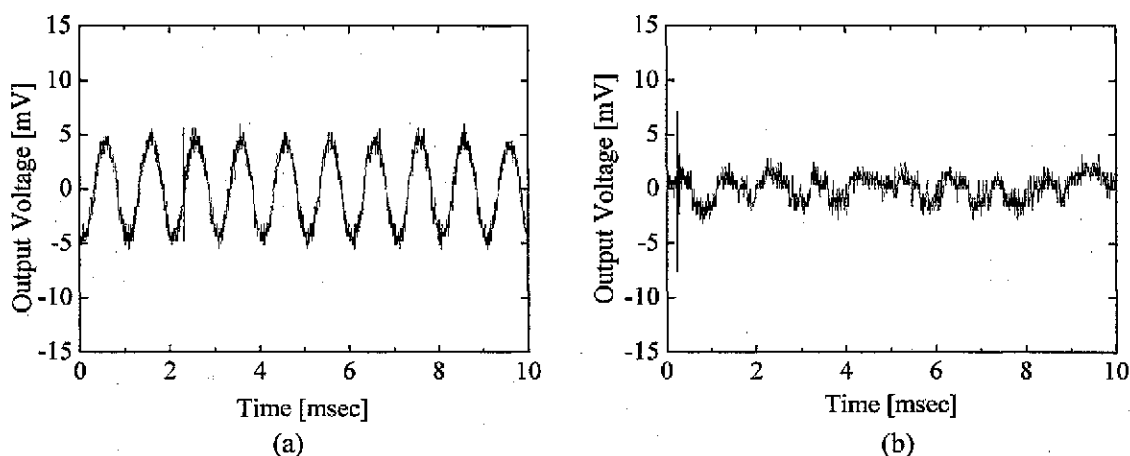


Fig. 4-13 (a) A nominal microphone signal (with the output polarizer), and (b) a misalignment signal (without the output polarizer) responding to a sound wave of 90 dB and 1 kHz.

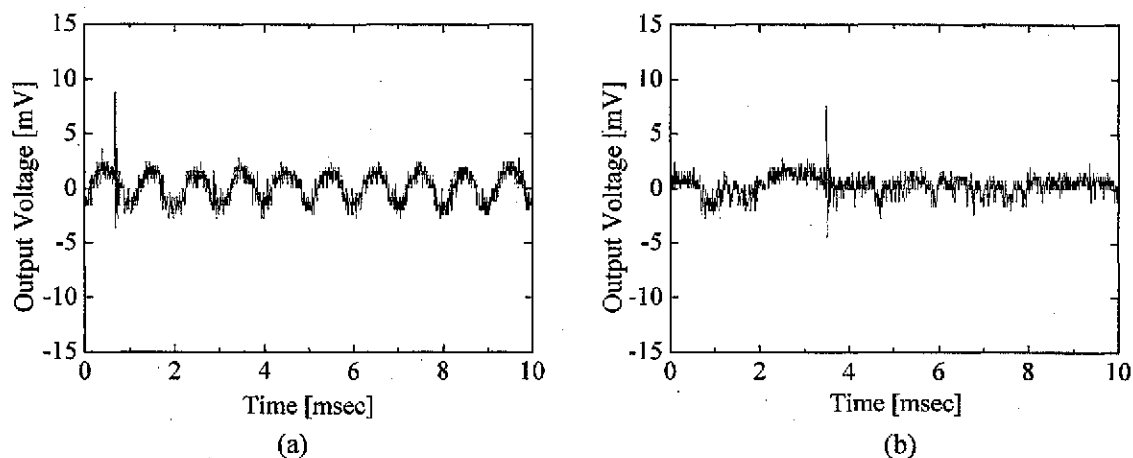


Fig. 4-14 (a) A nominal microphone signal (with the output polarizer), and (b) a misalignment signal (without the output polarizer) responding to a sound wave of 80 dB and 1 kHz.

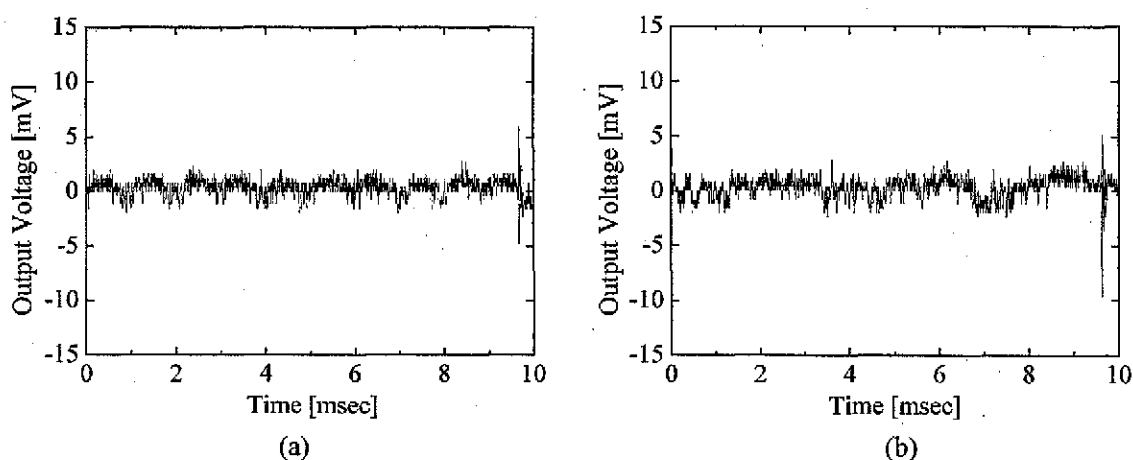


Fig. 4-15 (a) A nominal microphone signal (with the output polarizer), and (b) a misalignment signal (without the output polarizer) responding to a sound wave of 70 dB and 1 kHz.

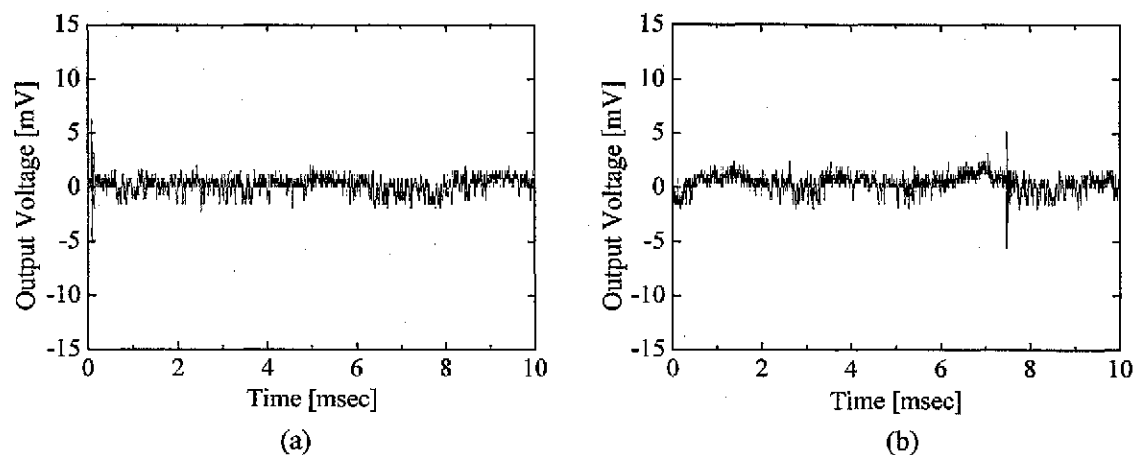


Fig. 4-16 (a) A nominal microphone signal (with the output polarizer), and (b) a misalignment signal (without the output polarizer) responding to a sound wave of 60 dB and 1 kHz.

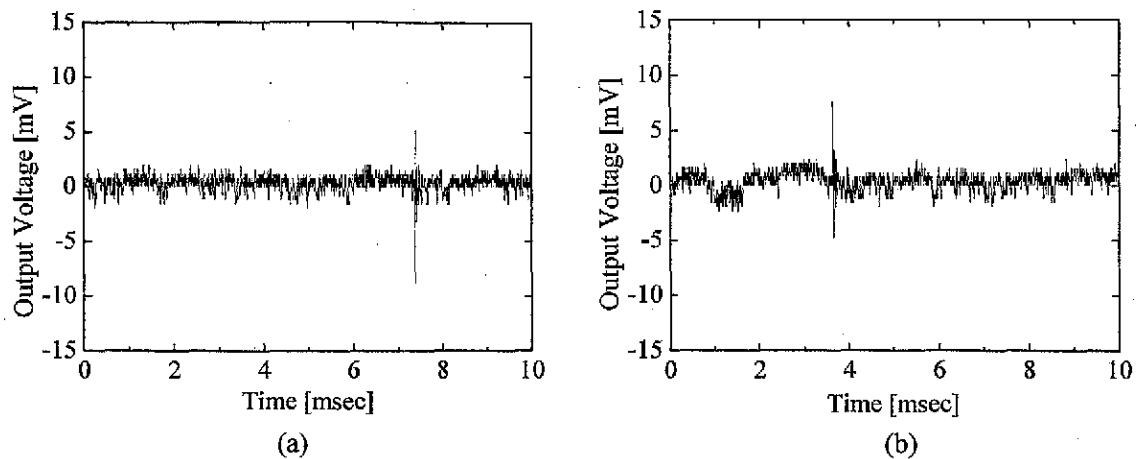


Fig. 4-17 (a) A nominal microphone signal (with the output polarizer), and (b) a misalignment signal (without the output polarizer) responding to a sound wave of 50 dB and 1 kHz.

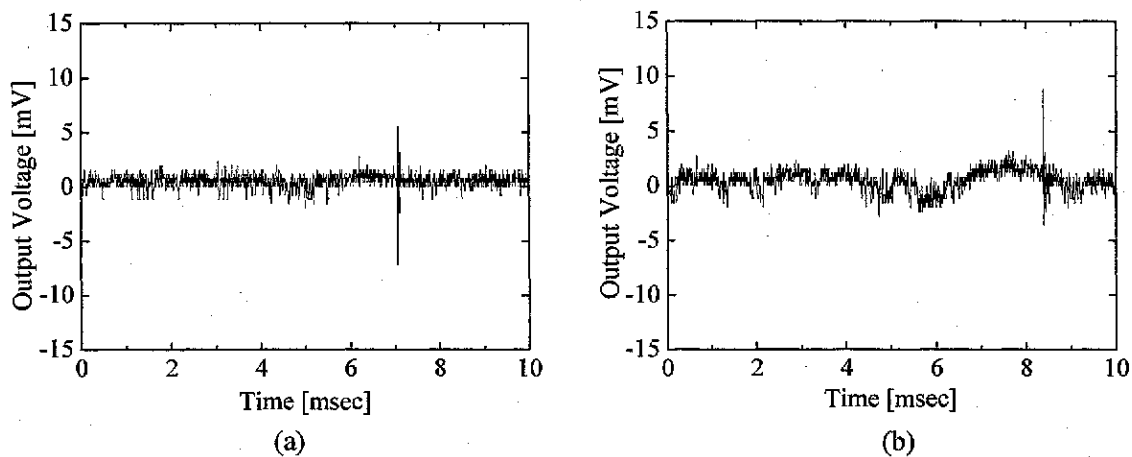


Fig. 4-18 (a) A nominal microphone signal (with the output polarizer), and (b) a misalignment signal (without the output polarizer) responding to a sound wave of 40 dB and 1 kHz.

Table 4-1 に測定結果をまとめた。音圧レベル 100 dB-SPL, 90 dB-SPL, 80 dB-SPL のときマイクロホン信号を検出することができたが、音圧レベル 70dB-SPL 以下のときはマイクロホン信号を検出することができなかった。このことから、光導波型マイクロホンの最小検出可能音圧レベルは 80 dB-SPL であると言える。

Figure 4-19 は音圧とマイクロホン信号の関係である。図中の■は測定値で、実線はコンピュータ処理による回帰直線である。また、点線は、Fig. 4.11 の静圧特性を基に見積もった推定値を表わす。図より、音圧とマイクロホン信号には比例関係があることが分かる。

Table 4-1 Measured and predicted microphone signals with respect to sound pressure.

Sound pressure [dB-SPL]	Nominal Mic. Sig. [mV]	Misalignment Sig. [mV]	Net Mic. Sig. [mV]	Predicted Mic. Sig. [mV]
100	7.9	1.3	6.6	4.6
90	3.3	1.2	2.1	1.5
80	1.3	1.0	0.3	0.5
70	0.9	1.0	---	0.2
60	0.9	1.0	---	0.1
50	0.9	1.0	---	0
40	0.9	1.0	---	0

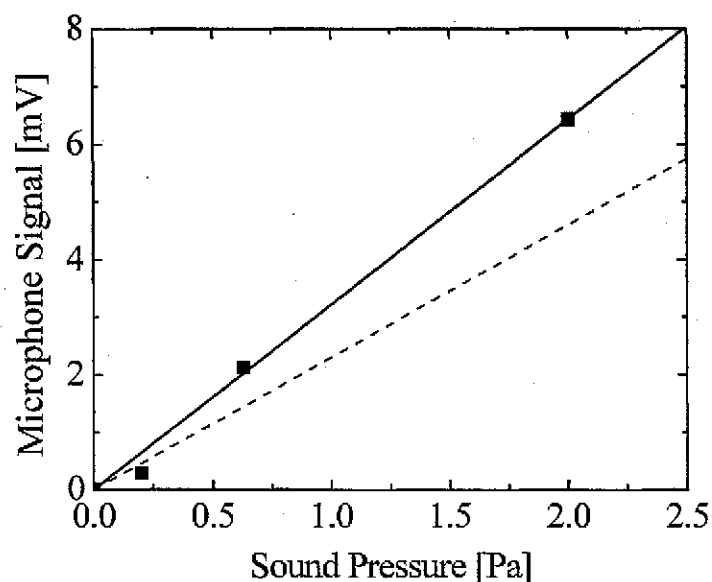


Fig. 4-19 The net microphone output versus sound pressure.

4-2-4 周波数特性

Figure 3-9 に示す光学系を用いて、試作マイクロホンの周波数特性の測定を行った。特定の周波数の信号のみを測定するために、ロックインアンプ（時定数 100 ms）を使用した。音源にはスピーカを使用した。印加音圧レベルは 100 dB-SPL (2 Pa) とし、コンデンサマイクロホン使って音圧を決定した。また、3-3-1 項と同様に、「検光子あり信号」から「検光子なし信号」を差し引いた値を「マイクロホン信号」と定義し、各周波数におけるマイクロホン信号を算出した。

Figure 4-20 は試作マイクロホンの周波数特性である。この図より、1 次共振が 5.3 kHz（右側の大きなピーク）に見られ、理論値が 5.6 kHz であるので、ほぼ理論通りの結果と言える。1 次共振周波数より低い周波数にも共振が見られるが、これは光マイクロホン下部に設けた空洞が共振したことによる信号と考えている。また、2 次共振周波数と思われる信号も 10 kHz を超えた辺りに見られる。

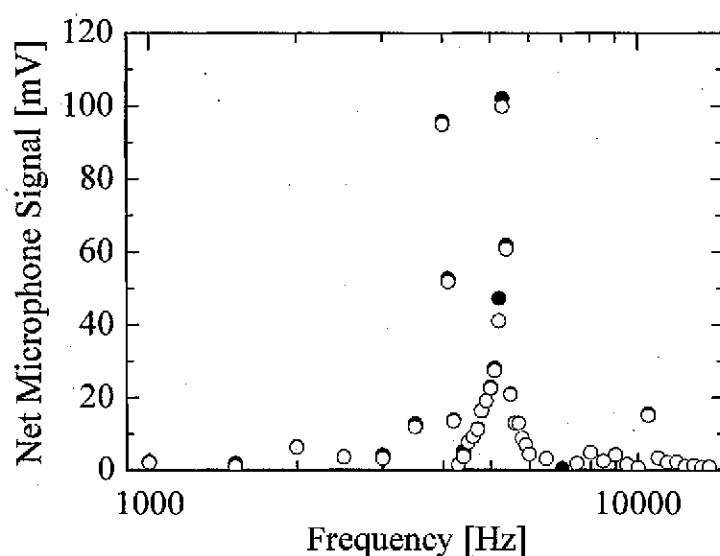


Fig. 4-20 Frequency response of silicon-based optical microphone.

第5章 光イヤホンの構造設計

本研究で提案する光イヤホンは、Fig. 5-1 のように赤外線吸収膜と半密閉空間からなる。オーディオ信号に対応して光強度が変化する赤外光を赤外線吸収膜に照射すると、温度が上昇し、半密閉空間内の空気が膨張する。赤外光の強度に対応して、空気が膨張するため、膜（ダイヤフラム）が振動し、音波が放出される。密閉空間ではなく、半密閉空間としたのは、大気圧の変動による影響を避けるためであるが、小孔の断面積及び半密閉空間の体積は光イヤホンの低域カットオフ周波数を決定するため、それらの関係を知ることは非常に重要である。

そこで、Figure 5-1 のようなモデルを仮定し、理論的考察を行った。図には、デバイス周囲圧力に瞬時変化が与えられたときの誘起圧力差 $\Delta p(t)$ を導くための各変数を示している。 V は半密閉空間の体積、 A は小孔の面積を表す。また、デバイス周囲圧力の変化前には、デバイス周囲圧力と半密閉空間内圧力共に p_0 であったとする。この状態からセンサ周囲圧力を p_a に瞬時に変化させたとき、半密閉空間の圧力は p_0 のままであり、このときのダイヤフラムに生じる圧力差の初期値を Δp_0 とすると、 $p_0 = p_a - \Delta p_0$ が成り立つ。瞬時圧力変化後は、小孔を通して流体の出入りがあるため、半密閉空間の圧力は徐々に変化し、最終的にはデバイス周囲圧力に等しくなる。ここで、半密閉空間の圧力の時間変化を表す関数を $p(t)$ とすると、ダイヤフラムに生じる圧力差は $\Delta p(t) = p_a - p(t)$ と書ける。ところで、瞬時圧力変化が生じた時間を $t=0$ とすると、その時刻での半密閉空間の圧力は $p(0) = p_0$ で、ダイヤフラムに生じる圧力差は $\Delta p(0) = \Delta p_0$ となる。

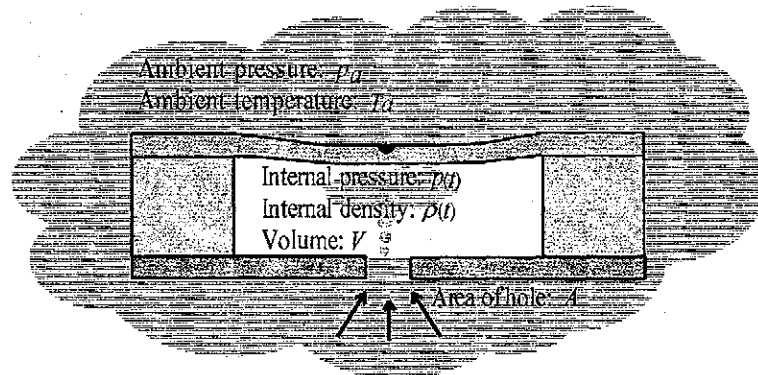


Fig. 5-1 Schematic diagram mathematically showing how the device obtains the induced pressure difference and its duration. In the model, the volume of the semi-closed space is V , and the sectional area of the small hole is A . The pressure and temperature in the surroundings just after the sudden pressure change are p_a and T_a , respectively. The pressure and density in the semi-closed space are $p(t)$ and $\rho(t)$, respectively.

圧縮性流体に対するベルヌーイの定理から、小孔を通過する質量流量は次式で与えられる。

$$\dot{m} = \frac{p_a A}{\sqrt{RT_a}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left\{ \left(\frac{p(t)}{p_a} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p(t)}{p_a} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right\}} = \frac{p_a A}{\sqrt{RT_a}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left\{ \left(1 - \frac{\Delta p(t)}{p_a} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(1 - \frac{\Delta p(t)}{p_a} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right\}} \quad (5-1)$$

ここで、 R はガス定数で、 γ は比熱を表す。流体として空気を仮定すると、 γ の値は 1.403 である。誘起圧力差 $\Delta p(t)$ がセンサ周囲圧力 p_a に比べて十分に小さければ、Eq. (5-1) は近似的に

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{2p_a}{RT_a}} A \sqrt{\Delta p(t)} \quad (5-2)$$

と書ける。ところで、断熱変化の仮定の下では、

$$\frac{p(t)}{p_0} = \left(\frac{\rho(t)}{\rho_0} \right)^\gamma \quad (5-3)$$

が成り立つ。ここで、 $\rho(t)$ は半密閉空間における流体密度の時間変化を表し、 ρ_0 は時刻 $t=0$ における $\rho(t)$ の初期値を表す。Eq. (5-3) と $\rho(t) = \rho_0 + \Delta \rho(t)$ から、 $\Delta \rho(t)$ が ρ_0 より十分に小さければ、ダイヤフラムに生じる圧力差は、簡単な近似により、

$$\Delta p(t) = \Delta p_0 - \gamma \frac{p_0}{\rho_0} \Delta \rho(t) \quad (5-4)$$

と書ける。Eq. (5-4) を Eq. (5-1) に代入すると、質量流量は、

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{2p_a}{RT_a}} A \sqrt{\Delta p_0 - \gamma \frac{p_0}{\rho_0} \Delta \rho(t)} \quad (5-5)$$

となる。ところで、質量保存の法則から、微少時間 dt の間に半密閉空間に流入した流体の質量 $\dot{m}dt$ は、半密閉空間内で増加した流体の質量 $Vd\rho$ と等しくなければならない。したがって、

$$\dot{m}dt = Vd\rho = Vd(\Delta \rho) \quad (5-6)$$

が成り立たなければならない。Eq. (5-5) を Eq. (5-6) の左辺に代入すると、

$$\sqrt{\frac{2p_a}{RT_a}} \frac{A}{V} dt = \frac{1}{\sqrt{\Delta p_0 - \frac{\gamma p_0}{\rho_0} \Delta \rho}} d(\Delta \rho) \quad (5-7)$$

となる。式(5-7)の左辺を t に関して 0 から t まで定積分し、右辺を $\Delta \rho$ に関して 0 から $\Delta \rho$ まで定積分すると、

$$\sqrt{\frac{2p_a}{RT_a}} \frac{A}{V} t = 2 \frac{\rho_0}{\gamma p_0} \left(\sqrt{\Delta p_0} - \sqrt{\Delta p(t)} \right) \quad (5-8)$$

が得られる。Eq. (5-8) は

$$\sqrt{\Delta p(t)} = \sqrt{\Delta p_0} - \sqrt{\frac{p_a}{2RT_a} \frac{\eta_0}{\rho_0} \frac{A}{V} t} \quad (5-9)$$

と書き換えることができる。なお、Eq. (5-9)が成り立つのは、右辺の値が正の間で、このときダイヤフラムに圧力差が生じる。したがって、圧力差誘起時間は、

$$t = \sqrt{\frac{2RT_a}{p_a} \frac{\rho_0}{\eta_0} \frac{V}{A}} \sqrt{\Delta p_0} \quad (5-10)$$

で与えられる。Equation (5-10)から、圧力差誘起時間はV/A比（半密閉空間の体積と小孔の断面積の比）に比例し、また初期圧力差の平方根にも比例することが分かる。圧力差誘起時間内において、誘起圧力差の時間変化は、

$$\Delta p(t) = \left(\sqrt{\Delta p_0} - \sqrt{\frac{p_a}{2RT_a} \frac{\eta_0}{\rho_0} \frac{A}{V} t} \right)^2 \quad (5-11)$$

と表せる。

Eq. (5-11)をラプラス変換し、周波数特性を導出した。

$$G(f) = 1 - 2 \left(\frac{f_0}{f} \right)^2 \left\{ 1 - \cos \left(\frac{f}{f_0} \right) \right\} - i \frac{2f_0}{f} \left\{ 1 - \frac{f_0}{f} \sin \left(\frac{f}{f_0} \right) \right\} \quad (5-12)$$

ただし、 $i = \sqrt{-1}$ で、 f_0 は圧力差持続時間の逆数、すなわち、 $f_0 = 1/t_d$ である。Figure 5-2は正規化周波数 f/f_0 に対する利得 $|G(f)|$ 及び位相 $\angle G(f)$ である。図から、ハイパスフィルタの特性を有していることが分かる。カットオフ周波数は $1.57f_0$ 、 $1.57/t_d$ で、カットオフ周波数より低い周波数において、10 dB/dec、3 dB/oct の傾きをもつ。光イヤホンにおいては、カットオフ周波数を 20 Hz に設定するのが望ましい。

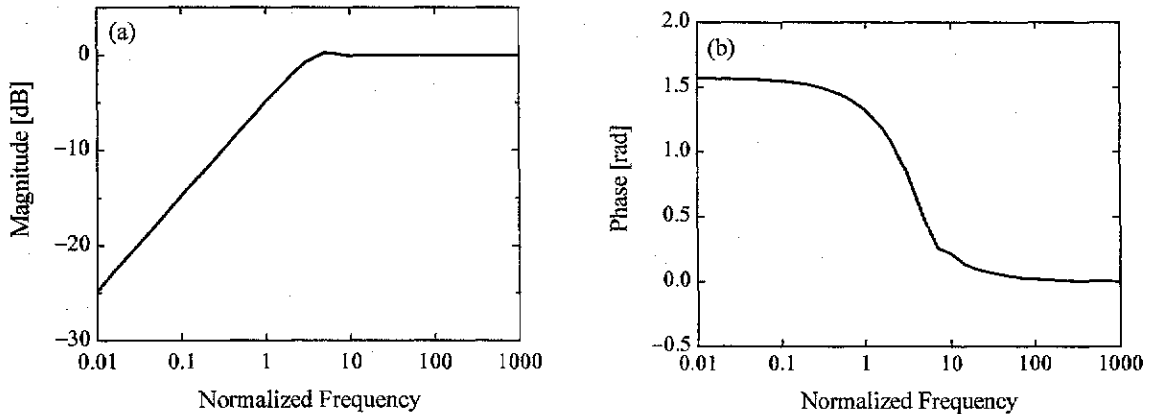


Fig. 5-2 The calculated magnitude and phase of the transfer function of the sensor as a function of the normalized frequency f/f_0 . f_0 is defined as the reciprocal of the duration of the induced pressure difference.

第6章 結論

本研究では、電磁氣的制約条件が強いMRI、原子力施設、化学プラント等でも使用可能な音響入出力デバイス（光マイクロホン、光イヤホン）の開発を目的とした。

光マイクロホンは音圧感知部のダイヤフラムとその上を通る直線光導波路からなる。本研究では、感度向上を狙いつつ、共振周波数をできるだけ高くすることを念頭に置き、位相感度と共振周波数の目標値をそれぞれ2.5 mrad/kPa, 3.4 kHzとした。理論計算を基にダイヤフラムサイズを20 mm×20 mm×0.15 mmと設計して、ガラス基板光導波型マイクロホンの試作を行った。試作マイクロホンの位相感度（測定値）は1.3 mrad/kPaで、設計値の半分程度にとどまったが、我々のグループが行った先行研究に比べ、11倍の感度向上を達成した。さらに雑音低減を施し、周波数1 kHz、音圧2 Pa (100 dB-SPL)の音波の検出に成功した。また、ダイヤフラムサイズ20 mm×20 mm×0.15 mmのガラス基板光導波型マイクロホンを3個試作し、周波数特性を調べた。共振周波数はそれぞれ2.7 kHz, 3.3 kHz, 3.7 kHz付近にあり、理論値とほぼ一致した。

さらに、基板にシリコンを利用した光導波型マイクロホンの研究も並行して行った。シリコンは微細可能性に優れており、光マイクロホンの小型・軽量化が可能となる。研究当初は、ダイヤフラムの残留熱応力や導波路の高い伝搬損失が原因となって、感度、出力光強度、消光比が共に低く、最小検出可能音圧が100 dB-SPLにとどまった。そこで、低温プロセスを導入し、さらに光導波路の作製プロセスを見直したところ、出力光強度の増加、消光比の改善が見られ、マイクロホン感度が約10倍向上した。その結果、ダイヤフラムサイズ10 mm×10 mm×40 μmの試作マイクロホンで、80 dB-SPLの音波（1 kHz）を検出することに成功した。さらに、周波数特性を測定したところ、ダイヤフラムの共振が5.3 kHzに現れ、理論値5.6 kHzとほぼ同じ値が得られた。

最小検出可能音圧に関しては80 dB-SPLにとどまり、さらに40 dB程度の感度向上あるいは雑音低減が望まれる。ただ、シリコン基板光導波型マイクロホンの実験では、測定の都合で出力光を10分の1程度に減衰させたため、最小検出可能音圧は60 dB-SPL相当であったと推測される。したがって、40 dBのS/N比の改善は十分に可能と考える。周波数特性に関しては、

光イヤホンに関しては、時間的な問題で、構造設計しか行うことができず、今後動作確認及び設計指針の確立を行う必要がある。

参 考 文 献

1. A. Kots and A. Paritsky, "Fiber optic microphone for harsh environment," *Proc. SPIE*, **3852**, 106-112 (1999).
2. M. S. NessAvier et al., "Recording high quality speech during tagged cine-MRI studies using a fiber optic microphone," *J. Magn. Reson. Imaging*, **23**, 92-97 (2006).
3. H. Nikkuni et al., "An optical microphone using a silicon-based guided-wave optical pressure sensor," *Proc. SPIE*, **5728**, 317-324 (2005).
4. 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, Washinton, DC, 1981), paper WL4.
5. M. Ohkawa, M. Izutsu, and T. Sueta, "Integrated optic pressure sensor on silicon substrate," *Appl. Opt.*, **28**, 5153-5157 (1989).
6. 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).
7. 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).
8. 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).
9. M. Izutsu, A. Enokihara, and T. Sueta, "Optical-waveguide microdisplacement sensor," *Electron. Lett.*, **18**, 867-868 (1982).
10. 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).
11. A. Enokihara, M. Izutsu, and T. Sueta, "Integrated-optic fluid sensor using heat transfer," *Appl. Opt.*, **27**, 109-113 (1988).
12. K. Nishizawa et al., "High sensitivity waveguide-type hydrogen sensor," *Proc. Optical Fiber Conference*, 131-134 (1986).
13. M. Tabib-Azar, and G. Beheim, "Modern trends in microstructures and integrated optics for communication, sensing, and actuation," *Opt. Eng.*, **36**, 1307-1318 (1997).
14. 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).
15. 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).
16. 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).
17. 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).
18. 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).

19. 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).
20. 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).
21. S. Timoshenko, and S. Woinowsky-Krieger, *Theory of Plates and Shells* (McGraw Hill, New York, 1981).
22. M. Izutsu, and T. Sueta, "Coupled mode analysis of light modulation in dielectric waveguides," Appl. Phys., **5**, 307-315 (1975).
23. H. Nikkuni, Y. Watanabe, M. Ohkawa, and T. Sato: "Sensitivity dependence with respect to diaphragm thickness in guided-wave optical pressure sensor based on elasto-optic effect," Optical Engineering, Vol. 47, No. 4, pp. 044402-1~044402-8 (2008).
24. Y. Watanabe, Nikkuni, Y. Kudo, M. Ohkawa, and T. Sato: "Sensitivity dependence with respect to diaphragm dimensions in a glass-based guided-wave optical pressure sensor," 13th Microoptics Conference (MOC '07), #H77 (2007).
25. H. Nikkuni, Y. Mogi, M. Hayashi, M. Ohkawa, S. Sekine, and T. Sato: "Improvement of the signal-to-noise ratio in a glass-based guided-wave optical microphone," Proceedings of SPIE, Vol. 6475, pp. 647519-1~647519-8 (2007).

研究発表論文等

- (1) H. Nikkuni, M. Ohkawa, S. Sekine, and T. Sato: "Feasibility of guided-wave optical microphone based on elasto-optic effect," Proceedings of SPIE, Vol. 6049, pp. 604907-1 ~604907-8 (2005).
- (2) K. Sato, M. Ohkawa, S. Sekine, and T. Sato: "Guided-wave optical pressure sensor with semi-closed space under the diaphragm: step response in relation to the area of a small hole of a semi-closed space," Proceedings of SPIE, Vol. 6379, pp. 637908-1 ~637908-8 (2005).
- (3) H. Nikkuni, Y. Mogi, M. Hayashi, M. Ohkawa, S. Sekine, and T. Sato: "Improvement of the signal-to-noise ratio in a glass-based guided-wave optical microphone," Proceedings of SPIE, Vol. 6475, pp. 647519-1 ~647519-8 (2007).
- (4) M. Adachi, Y. Kudo, M. Ohkawa, and T. Sato: "Sensitivity dependence on waveguide position in silicon-based guided-wave optical flow sensor," 13th Microoptics Conference (MOC '07), #H1 (2007).
- (5) Y. Watanabe, Nikkuni, Y. Kudo, M. Ohkawa, and T. Sato: "Sensitivity dependence with respect to diaphragm dimensions in a glass-based guided-wave optical pressure sensor," 13th Microoptics Conference (MOC '07), #H77 (2007).
- (6) H. Nikkuni, Y. Watanabe, M. Ohkawa, and T. Sato: "Sensitivity dependence with respect to diaphragm thickness in guided-wave optical pressure sensor based on elasto-optic effect," Optical Engineering, Vol. 47, No. 4, pp. 044402-1 ~044402-8 (2008).