

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	高周波音場計測のための小型光ファイバプローブに関する研究
Title(English)	
著者(和文)	土方泰斗
Author(English)	
出典(和文)	学位:不明, 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第4227号, 授与年月日:1999年9月30日, 学位の種別:課程博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:., Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第4227号, Conferred date:1999/9/30, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

東京工業大学

学位論文

高周波音場計測のための
小型光ファイバプローブに関する研究

指導教官 中村健太郎 助教授

1999年8月

提出者

総合理工学研究科

物理情報工学専攻

学籍番号 96D24032

氏名 土方泰斗

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	3
1.3 本論文の構成	3
第2章 微小音場プローブの構造と原理	6
2.1 はじめに	6
2.2 プローブの構造	6
2.3 動作原理	7
第3章 設計法	8
3.1 はじめに	8
3.2 音圧感度の解析	8
3.2.1 解析手順	8
3.2.2 キャビティ変形解析	8
3.2.3 光学感度の解析	10
3.3 ダイナミックレンジの解析	13
3.3.1 歪み率の検討	13
3.3.2 ダイナミックレンジの定式化	15
3.4 計算結果による試作機の評価	16
3.5 キャビティの機械共振周波数	17
3.6 まとめ	20
第4章 微小音場プローブの試作	21
4.1 はじめに	21
4.2 製作方法	21
4.3 実験装置の基本構成	22
4.4 高周波音場測定	24
4.4.1 光キャビティの波長特性	24
4.4.2 集束音場	25
4.4.3 定在波音場計測と空間分解能	26

4.4.4	直線性	29
4.4.5	周波数特性	30
4.4.6	指向性・偏光特性	31
4.5	まとめ	35
第5章	感度校正法	36
5.1	はじめに	36
5.2	絶対感度校正法	36
5.2.1	感度校正システムの原理	37
5.2.2	感度校正システムの実装	38
5.3	まとめ	43
第6章	微小プローブのアレイ化	44
6.1	はじめに	44
6.2	アレイの構造と原理	44
6.2.1	動作原理	44
6.2.2	最大素子数の検討	46
6.3	アレイによる多点計測	47
6.3.1	波長多重検出の確認	47
6.3.2	高周波多点計測	51
6.4	まとめ	52
第7章	結論	53
7.1	本研究で得られた成果	53
7.2	今後の課題	54
	謝辞	56
	参考文献	58
	研究業績	62
付録A	光線追跡法	64
A.1	光線追跡モデル	64
A.2	光線追跡法プログラミング	65
付録B	製作方法詳細	67
B.1	キャビティ製作課程詳細	67
B.2	キャビティ製作装置の全体図	69

第1章

序論

この論文は、数 MHz から数 10MHz 帯の高周波音場測定に適した、小型超音波プローブに関する研究について述べている。従来の圧電型プローブの弱点を克服でき、さらに小型化及びアレイ化も容易である点から光ファイバを用いたセンサを考案している。本章では、本研究の背景及びその着想に至った経緯について述べる。

1.1 研究背景

近年、超音波応用の分野では、使用する超音波の高周波化（短波長化）や高音圧化が進んでいる¹⁾。たとえば、医用診断では分解能を向上するために 10 MHz 以上への高周波化の研究が進められているが、水中での 10 MHz の超音波の波長は約 $150\text{ }\mu\text{m}$ であり、精確な音場分布を知るにはこのオーダの寸法のセンサが必要である。一方で、高周波化に伴い超音波減衰が増大するため、超音波の強度をより増大させる必要も生じている。さらに、衝撃波結石破碎術など、非常に高音圧（MPa オーダ）のパルス波が使われる場合も多い。音圧センサはこのような強度に耐えうる必要がある上、鋭いパルス波形を正確に測定するためには広い周波数特性を有することが必要である。従来の圧電セラミックスや圧電高分子を用いたセンサでは小型化と強度を両立させることが難しく、一方でハイ・インピーダンスであるために遠隔測定が難しいなどの問題も生じている。また、これら実際の音場測定では電磁ノイズを伴い、さらに過渡的である場合が多く、電磁ノイズの影響を排除して広い範囲の分布を瞬時に計測する必要から、光を信号に用いたアレイ型センサが望まれる。アレイ化を行えば、超音波ホログラフィ法や音響インテンシティ法といった多点の音圧・位相分布データが必要な音場の可視化手法の高速化を図ることも出来る。以上の要求から、本研究では光ファイバ等の光学素子を用いたアレイ型微小音響センサの開発が有望と考えた。

多くの光ファイバセンサ^{2)–4)}の中でも音響センサの歴史は古いが^{5)–12)}、その殆どは測定用ファイバと参照用ファイバから干渉系を構成した数 10 kHz までの低周波用ハイドロフォンである。これらはきわめて高感度であるが、大型で本目的には合致しない（Fig. 1.1(a) に図示）。このような光干渉系を用いたセンサは、一般に光干渉型と呼ばれている。一方、最近は MHz

オーダの強力超音波を測定することを目的とした光ファイバプローブも提案されている (Fig. 1.1(b) 参照) ^{13, 14]}。一般に音波は疎密波であるので、音圧に比例して周囲媒質やファイバの屈折率が変化する。これらのファイバプローブは、その屈折率変化に伴い、ファイバ端面の反射率 ^{13]} や曲げファイバの曲げ部放射損失 ^{14]} が変調される。この場合光の強度が変調されるので、光強度変調型と分類される ^{15]}。光強度変調型の微小プローブは光学系が簡素であり、高い空間分解能と広域な周波数特性を有する等の特長をもつが、その一方で低感度であるため、10 MPa 以上の非常に高音圧超音波には適しているがそれよりも弱い音圧に対しては十分な感度が得られない。従って、適用範囲が限られる欠点がある。本研究では、微小な光干渉系を用いた音響

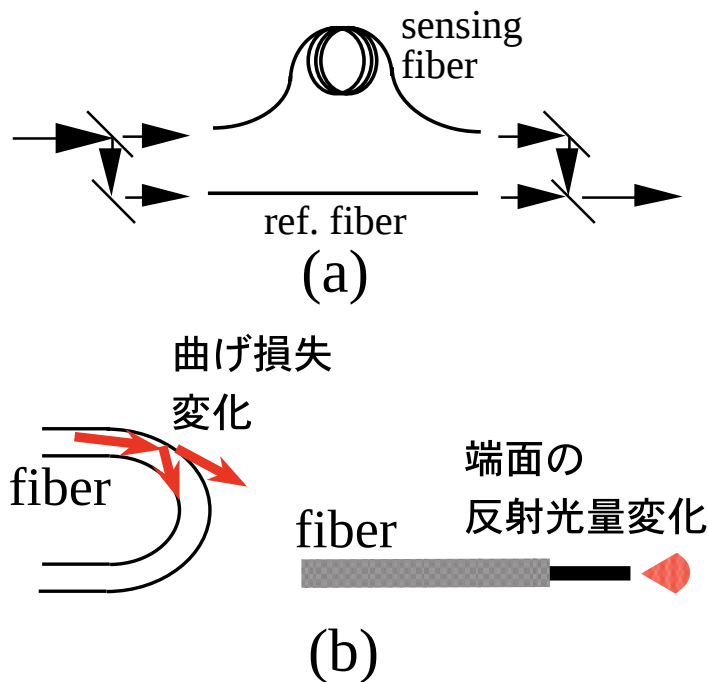


Fig. 1.1 以前提案された光ファイバ音場センサ ; (a) 光強度変調型、左 : ヘアピン型 ^{14]}、右 : ファイバ端面反射率変化型 ^{13]} ; (b) 光干渉型

センサが実現されれば、実用的な音圧感度と高空間分解能・時間分解能を両立できるセンサが実現可能であると考えた。

本論文では、光ファイバ先端に微小なポリエステル樹脂製光キャビティを取り付け、音圧によるキャビティの変形、屈折率変化による光路長変化を検出する小型プローブを考案、試作した ^{19]}。参照用ファイバを用いる従来の干渉型光ファイバハイドロフォンに比べて、有感部が微小領域に限定されているので、有感部以外への外乱に強い特性（高空間分解能）や、広周波数帯域（高時間分解能）などが期待される。本方式の場合、音圧感度とダイナミックレンジは原理

Table 1.1 従来のハイドロフォン比較

		大きさ	周波数特性	音圧感度 (dBV/MPa)	強度	電磁干渉	インピーダンス
圧電型		75 μm ~	~ 10 MHz	$\simeq -20$		×	高い
光ファイバ	強度	125 μm ~	~ 100 MHz	$\simeq -54$	○	○	低い
	干渉	15 mm ~	~ 20 kHz	$\simeq -25$	○	○	低い

的にトレードオフの関係になるが、測定対象の音場に応じて両者を設計することも出来る。さらに、波長多重方式 (WDM)^{20]} を用いたアレイ型センサを考案し、高周波音場の多点計測を実現した^{21]}。

1.2 研究目的

実用的な高周波音場の可視化及び定量的計測を行うための小型音響センサを実現するためには、設計法の確立と具体的な製作方法の考案が必要である。また、アレイ構造と信号の多重化・分割方法について検討し、多点同時計測を具現化する。そこで、本論文の研究目的を以下のように設定する。

1. 光ファイバ音場プローブの構造及び製作方法を考案する。
2. 設計法を確立する。
3. 絶対感度の校正法を検討し、定量的な計測を行えるようにする。
4. アレイ構造、信号処理法を提案し、多点同時計測を実現する。

本方式により高周波音場の定量計測、高速計測が可能となるので、メガヘルツ帯超音波の工業的応用、基礎研究に寄与するところが大いと考えられる。

1.3 本論文の構成

Fig. 1.2 に本論文の構成を示す。第2章「微小音場プローブの構造と原理」では、微小なファブリペロ共振器を光ファイバプローブの先端に付加する構造を提案し、動作原理について述べられている。

第3章「音圧感度、周波数特性の設計法」では、主に音圧感度とダイナミックレンジの解析を行っている。キャビティ歪みに対する戻り光強度変化をファブリペロ方程式から導出し、一方で音圧に対するキャビティ歪みの様子を有限要素法 (*Finite Element Method: FEM*) でシミュ

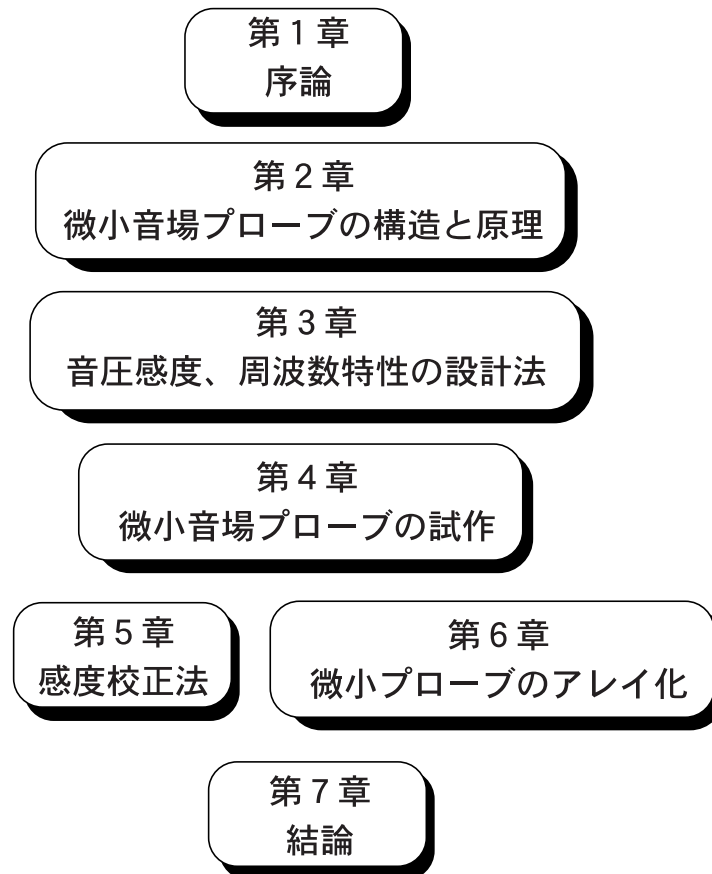


Fig. 1.2 本論文の構成

レーションした。そして、幾つかの試作機を製作し、それらの特性を実測し評価することにより解析手法の妥当性を確認した。

第4章「微小音場プローブの試作」では、まず始めに製作方法として2本のファイバを対向させて設置し、ギャップにポリエステル樹脂を注入し、片方のファイバに入射したガイド光の結合強度によりアライメントやキャビティ長調整を行う手法を考案している。次に、音場測定時における実験系の構成を紹介し、試作機により得られた集束音場、定在波音場の測定例を示す。これらの実験を通して、以前提案された光強度変調型プローブ¹³⁾、商品化されている圧電型ハイドロフォンを、それぞれ音圧感度、空間分解能について本手法との比較を行った。また、周波数特性、指向性を実測した。その結果、周波数特性はFEMによる強制振動解析値と良く一致したが、指向性に関しては音圧感度型センサでは原理的に考えにくい結果が生じた。そこで、入射光の偏光が感度に与える影響についても最後に検討した。

第5章「感度校正法」では、本手法により実用的な計測を行うための実験系の改良が述べられている。例えばプローブ使用中の環境変化や経年変化など、現実には起こりうる条件下におい

ても、絶対感度の校正が出来ることが望ましい。そこで、光源の波長を振動させ、そこから得られた変調信号を参照して感度を校正する手法を提案した。第3章の解析結果を利用して校正法を定式化し、実験を通じて本手法の妥当性を確認した。

第6章「微小プローブのアレイ化」では、アレイ構造の提案と測定原理について述べる。具体的には、それぞれのセンサ素子で得られた複数の音響信号を、光波長多重方式(WDM)により多重化・分割する構造と原理を考案した。また、試作機により動作の確認を行い、実際に高周波音場を多点計測した。さらに、本方式の理論的な素子数の上限について検討した。

第7章「結論」では、本研究で得られた成果とともに、今後の課題について述べる。

第2章

微小音場プローブの構造と原理

2.1 はじめに

光ファイバ微小音場プローブを提案し、本章ではその構造と動作原理について述べている。また、基礎的なセンシングキャビティの動作をファブリペロ方程式を応用し、解析した。

2.2 プローブの構造

提案しているプローブの構造を Fig. 2.1 上に示す。ファイバのクラッド径と同一直径 ($125\ \mu\text{m}$) で、屈折率 n ($=1.55$)、長さ $L = 100\ \mu\text{m}$ 程度のポリエステル樹脂製円柱を金製ハーフミラーを介してファイバ先端に付加し、さらに先端を金反射膜で覆っている。この光キャビティは、光路長 nL もしくは光源波長 λ に応じて、戻り光 I は共振ピーク（または、ディップ）を生じる（Fig. 2.1 下参照）。光波長 λ が、そのピークのスロープ部にある時、音圧により光路長 nL が変化するので戻り光 I が強度変調される。従って、プローブの音圧感度は Fig. 2.1 中のディップの傾きに、ダイナミックレンジはディップ幅に依存することが予測される。これについての詳細は、後述の 3.2 節でふれる。

一方、空間分解能を向上させるためには、有感部をキャビティ部に限定させる必要がある。そのため、キャビティ材料は光ファイバの材料（石英系ガラス）よりも柔らかいもの、すなわち弾性定数の小さいものを選ぶ必要がある。しかし、弾性定数が小さいものほど、ダイナミックレンジが狭くなる傾向があり、石英ガラスの $1/10$ 程度のヤング率を有する材料が適当と考えられる。本論文では、そのような理由からポリエステル樹脂を選択した。屈折率は異なるが、ポリエステル樹脂に近い弾性定数の材料にポリイミドがある。最近この材料を真空蒸着し、精製された薄膜を圧電高分子として使用するための研究が報告されている²²⁾。この材料は容易にファイバガラスに蒸着できる上、精確なキャビティ長の設定が行える製作手段が確保されているため、本手法に有益な製作技術になる可能性があるので注目している。

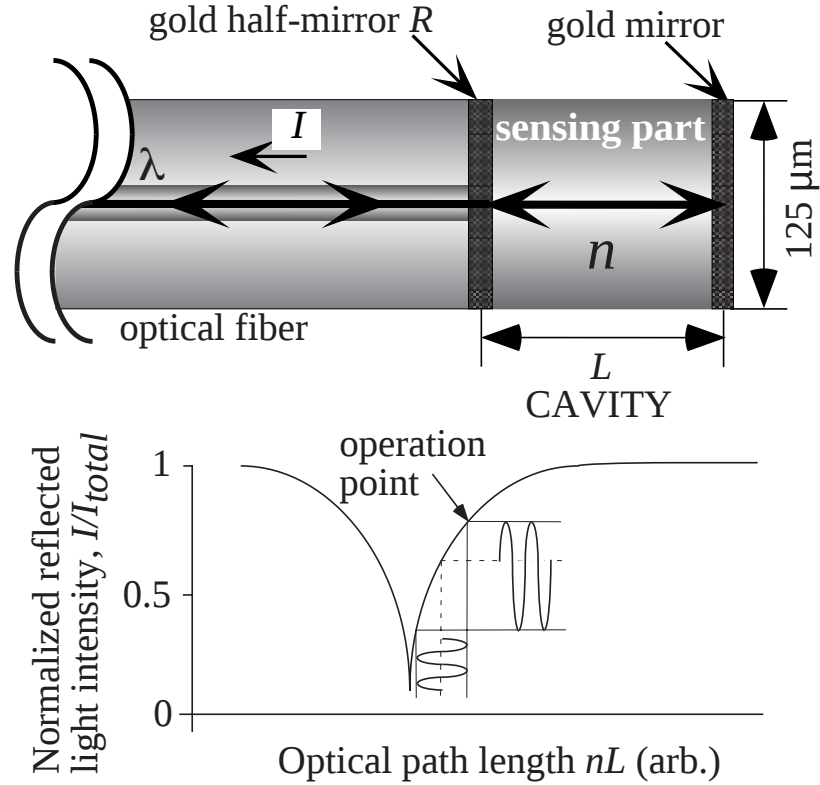


Fig. 2.1 提案したプローブの構造と原理

2.3 動作原理

微小キャビティの戻り光強度 $G_R (= I/I_0)$ は、ファブリペロ方程式により以下のように記述できる²³⁾。

$$G_R = \frac{(\sqrt{R} - G_s)^2 + 4\sqrt{R}G_s \sin^2 \frac{2\pi nL}{\lambda}}{(1 - \sqrt{R}G_s)^2 + 4\sqrt{R}G_s \sin^2 \frac{2\pi nL}{\lambda}} \quad (2.1)$$

ここで、 R はハーフミラー反射率、 G_s は single-pass gain である。音圧感度とダイナミックレンジは、ファブリペロ共振ディップの鋭さ及び幅でほぼ決まるので、両者はトレードオフの関係になる。式 (2.1) は、共振ディップの鋭さや幅の情報を含んでいる。一般的に、その情報をフィネス (*Finesse*) と呼んでいる。このフィネス F は式で表すと以下ようになる。

$$F = \frac{4\sqrt{R}G_s}{(1 - \sqrt{R}G_s)^2} \quad (2.2)$$

本プローブ試作機のおおよそのパラメータ値は、 R 、 G_s それぞれ 0.8~0.95、0.9~0.95 であるので、 F は 10~1000 程度になることがわかる。

第3章

設計法

3.1 はじめに

本章では、主に音圧感度とダイナミックレンジを設計することを目的とし、解析を行っている。音圧に対する戻り光強度変化は、キャビティ歪みに対する戻り光の変化量（光学感度とここでは呼ぶ）と、音圧に対するキャビティ歪み（同様に光路長の音圧感度と呼ぶ）に分け、それぞれを別々に解析する。本論文では、前者をファブリペロ方程式から導出し、後者の変形の様子を有限要素法 (FEM) でシミュレーションした。さらに、3本の試作機を製作し、それらの特性を実測、評価することにより本解析手法の妥当性を確認した²⁴⁾。また、本方式の音圧に対する歪み率、周波数特性についても検討した。

3.2 音圧感度の解析

3.2.1 解析手順

音圧感度を音圧 Δp に対する戻り光の変化量 ΔG_R と定義する。音圧感度 $\Delta G_R / \Delta p$ は、以下のように音圧による光路長変化 $\Delta(nL) / \Delta p$ と光路長変化による反射率変化 $\Delta G_R / \Delta(nL)$ の積で書ける。

$$\frac{\Delta G_R}{\Delta p} = \frac{\Delta(nL)}{\Delta p} \frac{\Delta G_R}{\Delta(nL)} \quad (3.1)$$

ここでは、音圧による光路長変化 $\Delta(nL) / \Delta p$ を光路長の音圧感度と呼び、キャビティの変形解析により知ることができる。光路長変化による反射率変化 $\Delta G_R / \Delta(nL)$ を光学感度と呼ぶことにするが、これは式 (2.1) を光路長 nL で微分することにより定式化できる。

3.2.2 キャビティ変形解析

音圧に対する光路長変化は幾何学的な長さ変化 $\Delta L / \Delta p$ と屈折率変化 $\Delta n / \Delta p$ で

$$\frac{\Delta(nL)}{\Delta p} = nL \left(\frac{1}{L} \frac{\Delta L}{\Delta p} + \frac{1}{n} \frac{\Delta n}{\Delta p} \right) \quad (3.2)$$

と表すことができる^{25]}。圧力 Δp を加えたときの変形量 ΔL を計算して、 $\Delta(nL)/\Delta p$ を求める。ここで、半無限長、体積弾性率 κ_f のシリカファイバに、長さ L 、体積弾性率 κ_c のキャビティが接続されているとし、全体に一樣な圧力 Δp をかけるとする。これにより、キャビティに静水圧が加わる低周波域、すなわち、キャビティの寸法よりも十分長い波長の超音波に対し感度が計算できる。高周波域では、後述のようなキャビティ部の機械共振や、音圧分布を考える必要がある。キャビティ端面だけに圧力が加わり、ファイバを剛壁 ($\kappa_f = \infty$) とした一方向歪みモデル、キャビティ全体に圧力が加わり、 $\kappa_f = \infty$ とした等方向歪みモデル、そして、 κ_f を有限とした (FEM) 厳密モデルの3つを考えた。Fig. 3.1 左図はそれぞれのモデルの変形の様子を図式化したものである。また、Fig. 3.1 右図にそれぞれのモデルの計算結果を示す。FEM

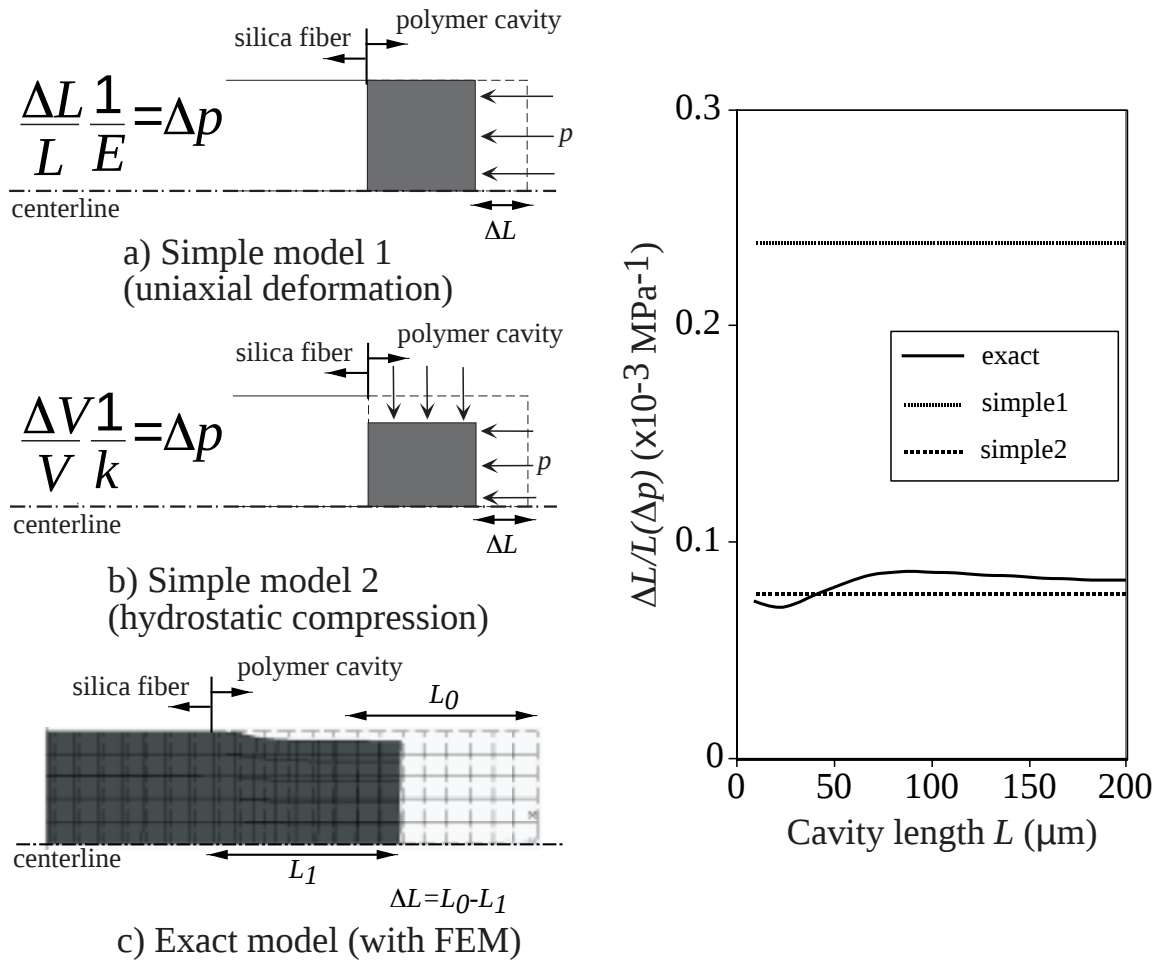


Fig. 3.1 キャビティの変形モデルとその計算結果; E , キャビティのヤング率 (4.2×10^9 Pa); κ_c , キャビティの体積弾性率 (4.5×10^9 Pa)

による解析結果を真値として考えると、一方向歪み及び等方向歪みを考慮した計算結果はそれ

Table 3.1 音圧 Δp に対するキャビティ長変化 ΔL と屈折率変化 Δn の解析

	ΔL (simple1)	ΔL (simple2)	ΔL (exact)	Δn
polyester resin on silica	2.38×10^{-4}	7.62×10^{-5}	$(7.21 \sim 8.56) \times 10^{-5}$	-1.38×10^{-5}
silica on silica	1.37×10^{-5}	9.04×10^{-6}	$(8.78 \sim 8.95) \times 10^{-6}$	-3.23×10^{-6}

ぞれ、204% 及び $\pm 8.4\%$ の誤差を含んでいることがわかった。従って、Fig. 3.1 左図のモデル (b) (等方向歪みモデル) は、他の材料においても石英ガラスよりも弾性定数が小さい場合十分適用可能であることが予測される。また、モデル (c) (FEM) の解析結果によると、キャビティ長 L がおよそ $80 \mu\text{m}$ 以上であれば、歪みはほぼ一定になることがわかる。

一方、音圧に対する屈折率変化 $\Delta n/(n\Delta p)$ は、密度と屈折率の関係 $\Delta \rho/\rho = \Delta n/(n-1)$ より^{13, 26]}、

$$\frac{1}{n} \frac{\Delta n}{\Delta p} = -\frac{\Delta n}{n} \frac{\rho}{\kappa_c \Delta \rho} = -\frac{n-1}{n\kappa_c} \quad (3.3)$$

である。ここで κ_c は、体積弾性率 (polymer, 4.5×10^9 Pa; silica, 3.7×10^{10} Pa) である^{27]}。Table 3.1 は、キャビティ材料がポリエステル樹脂とシリカである場合の、長さ変化 $\Delta L/(L\Delta p)$ 及び屈折率変化 $\Delta n/(n\Delta p)$ の計算結果である。長さ変化と屈折率変化の符号は逆のため、お互いに打ち消す可能性があるが、本方式の構造において材料がポリエステル樹脂の場合は、屈折率変化は長さ変化に比べ無視できるほど小さい。また、ポリエステル樹脂はシリカに比べ 12 倍もの変化量が見込まれるので、圧力感度向上や有感部の局所化を行う上で、キャビティ材料はポリエステル樹脂の方が適当である。

3.2.3 光学感度の解析

キャビティ変形に対する感度 $\Delta G_R/\Delta(nL)$ は、式 (2.1) を微分して以下のように求まる。

$$\frac{dG_R}{d(nL)} = \frac{(1-R)(1-G_s^2) \frac{8\pi\sqrt{R}G_s}{\lambda} \sin \frac{4\pi nL}{\lambda}}{\left((1-\sqrt{R}G_s)^2 + 4\sqrt{R}G_s \sin^2 \frac{2\pi nL}{\lambda} \right)^2} \quad (3.4)$$

G_s を決める要因として、キャビティの複屈折、ミラーの反射ロスなどが考えられるが、この場合、キャビティは閉じ込め導波路ではなく、光束が広がるので、光路長 nL に大きく依存すると

考えられる。このことを、光線追跡 (*ray tracing*) による計算結果¹と実験により確かめた。実験では反射ではなく、光路長 $2nL$ で対向させた二本の同じファイバ間の結合光強度を測定し、 G_s を求めた。結果を Fig. 3.2 に示す。結果より、計算値と実験値は互いに良く一致しており G_s は

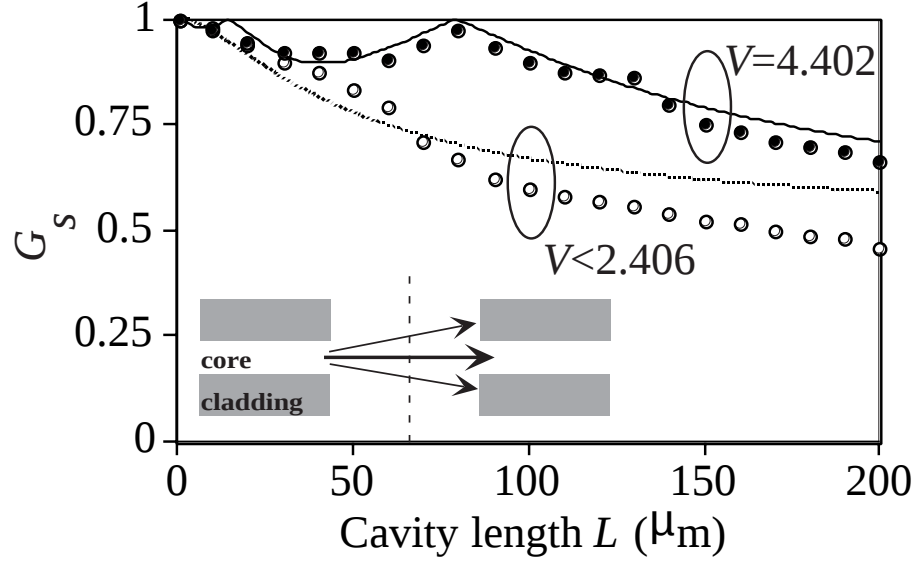


Fig. 3.2 single-pass gain G_s の計算及び実験結果

L で変化できることがわかる。結局、光学感度 $\Delta G_R / \Delta(nL)$ は、 G_s を除く R と nL によりほぼ決定する。

また、3.2.2 節 Fig. 3.1 の結果から、音圧に対する光路長変化 $\Delta nL / \Delta p$ は等方向歪みモデルにより十分近似できることがわかっているため、音圧感度 $\Delta G_R / \Delta p$ は式 (3.4) を変形して、以下のように定式化することができる。

$$\frac{dG_R}{dp} = \frac{(1-R)(1-G_s^2) \frac{8\pi\sqrt{R}G_s}{\lambda} \sin \frac{4\pi L(1-2\sigma)(4-3n)}{E} \Delta p}{\left((1-\sqrt{R}G_s)^2 + 4\sqrt{R}G_s \sin^2 \frac{4\pi L(1-2\sigma)(4-3n)}{E} \Delta p \right)^2} \quad (3.5)$$

ここで、 σ はキャビティのポアソン比 (0.34) である。

以上の検討結果から、本方式の音圧感度はキャビティ長 L 及びハーフミラーの反射率 R で設計することが出来る。また、 L 及び R の値が大きいくほど高感度になることがわかった。Fig. 3.3 左図は、 L , R の値に対する理論音圧感度をカラー階調で表示している (ヤング率 $E = 4.2 \times 10^{-10}$ MPa)。また、図中白抜きのエリアは現在の技術で製作可能な範囲を示し、水色部分は光強度変調方式^{13]}の理論感度以下の領域を示している。強度変調方式に比べ、本方式は+20dB 以上の

¹ 詳しい計算方法については付録 A で述べる

感度向上が期待できることがわかる。次に、ポリエステル樹脂製キャビティと、シリカガラス製キャビティの音圧感度を強度変調方式のそれと比較した結果を Table 3.2 に示す。結果をみると、ポリエステル樹脂製キャビティは強度変調型に比べ、設計方法によっては 100 倍もの感度向上が見込まれるが、シリカ製の場合は大して向上されない。また、両者の音速 c_s 及び音響インピーダンス ρc_s の比較を行った場合、ポリエステル樹脂は水のそれと非常に値が近く、音場を乱しにくいプローブになることが予測される。

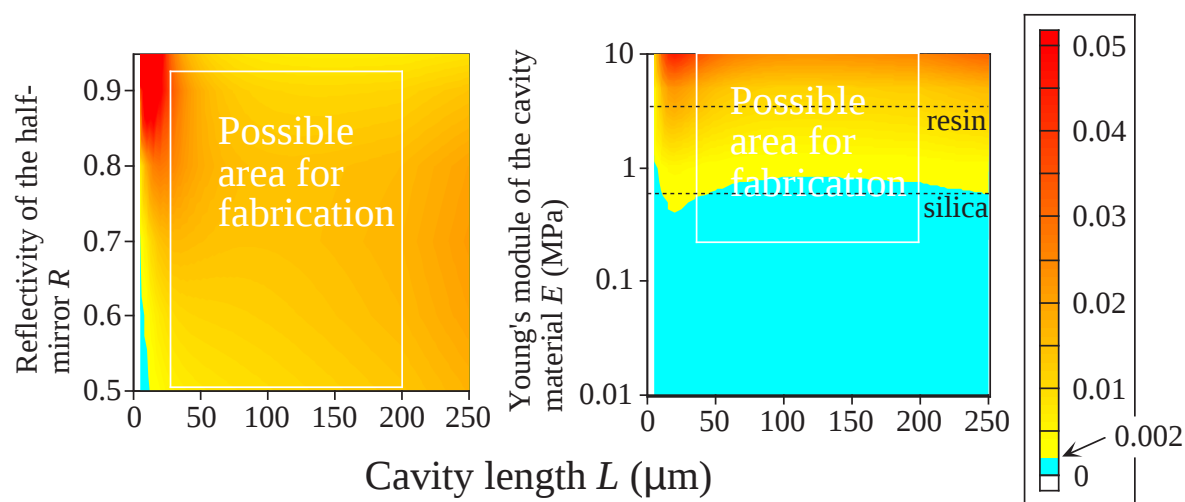


Fig. 3.3 音圧感度の理論的限界値

Table 3.2 ポリエステル樹脂製及びシリカガラス製キャビティの音圧感度と音響インピーダンスの比較

	pressure sensitivity $\Delta G_R / \Delta p$ *compared with that of the probe ^{13]}	sound velocity c_s (m/s)	acoustic impedance ρc_s (Pa/(m/s))
polyester resin	$\times 10-100$	2520	2.772×10^6
on silica		(that of water $\times 1.7$)	(that of water $\times 1.9$)
silica	$\times 1-10$	5370	1.450×10^7
on silica		(that of water $\times 3.6$)	(that of water $\times 10$)

3.3 ダイナミックレンジの解析

3.3.1 歪み率の検討

最近の超音波応用では音場の非線形性が注目されているが、非線形音場の計測のためには、センサ自体で発生する信号の歪みを小さくしなければならない。歪み率とは一般的に、 $1 - (\text{入力波形の振幅})^2 / (\text{出力振幅})^2$ という式で定義される²⁸⁾。つまり、高調波のパワーが基本波のパワーに対してどれだけの割合を占めるか、ということを表している。ここでは、出力波形にどれだけ基本波、第2次、第3次高調波成分を含むかを求める。非線形音場に関する文献^{29, 30)}を見ると、音圧 1 MPa の音場に含まれる高調波成分を、S/N 比 >1 の条件で計測するには、センサ自体で生じる第2次高調波成分 <10%、第3次高調波成分 <1% が条件となる。センサの高調波成分を求めるため、次の手法により検討した。

Fig. 3.4(a) または、Fig. 3.5(a) をのように、共振ディップの規格化波高値を h とし、動作点

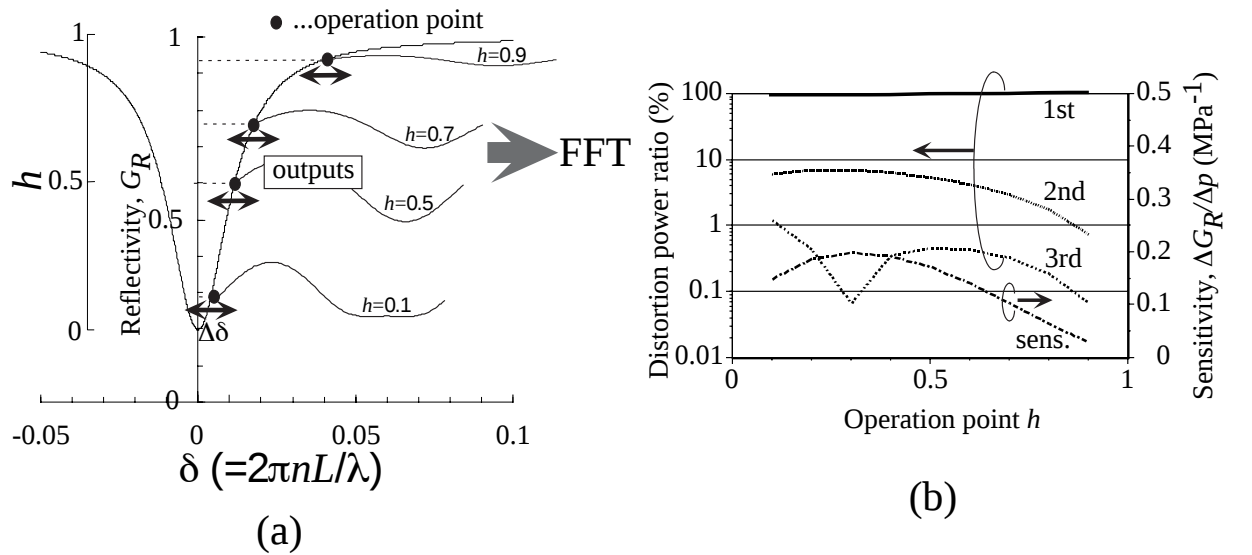


Fig. 3.4 (a) 歪み率解析手法の概念図と出力波形のシミュレーション (b) 動作点を変化させたときの基本波、第2次、第3次高調波成分

や音圧の設定に用いることにする。設定する動作点 h に対する光路長 $\delta (=2\pi nL/\lambda)$ と、与える音圧 Δp に相当する光路長変化 $\Delta\delta (=2\pi\Delta(nL)/\lambda)$ をそれぞれ求める。 δ を求めるには、以下の式を利用する。

$$\delta = \sin^{-1} \sqrt{\frac{h}{1 + (1-h)F}} \quad (3.6)$$

また、 $\Delta\delta$ を求める時は式 (3.2) と 3.2.2 節の結果を用いる。 δ 及び $\Delta\delta$ を式 (2.1) に代入し、シミュレーション波形を求め、それを FFT 処理する。音圧を変化させた場合、フィネス F を変化した場合についても同様に行う。音圧 $\Delta p=1$ MPa (Fig. 3.5 中の $\Delta\delta \simeq 0.2$ に相当), フィネス

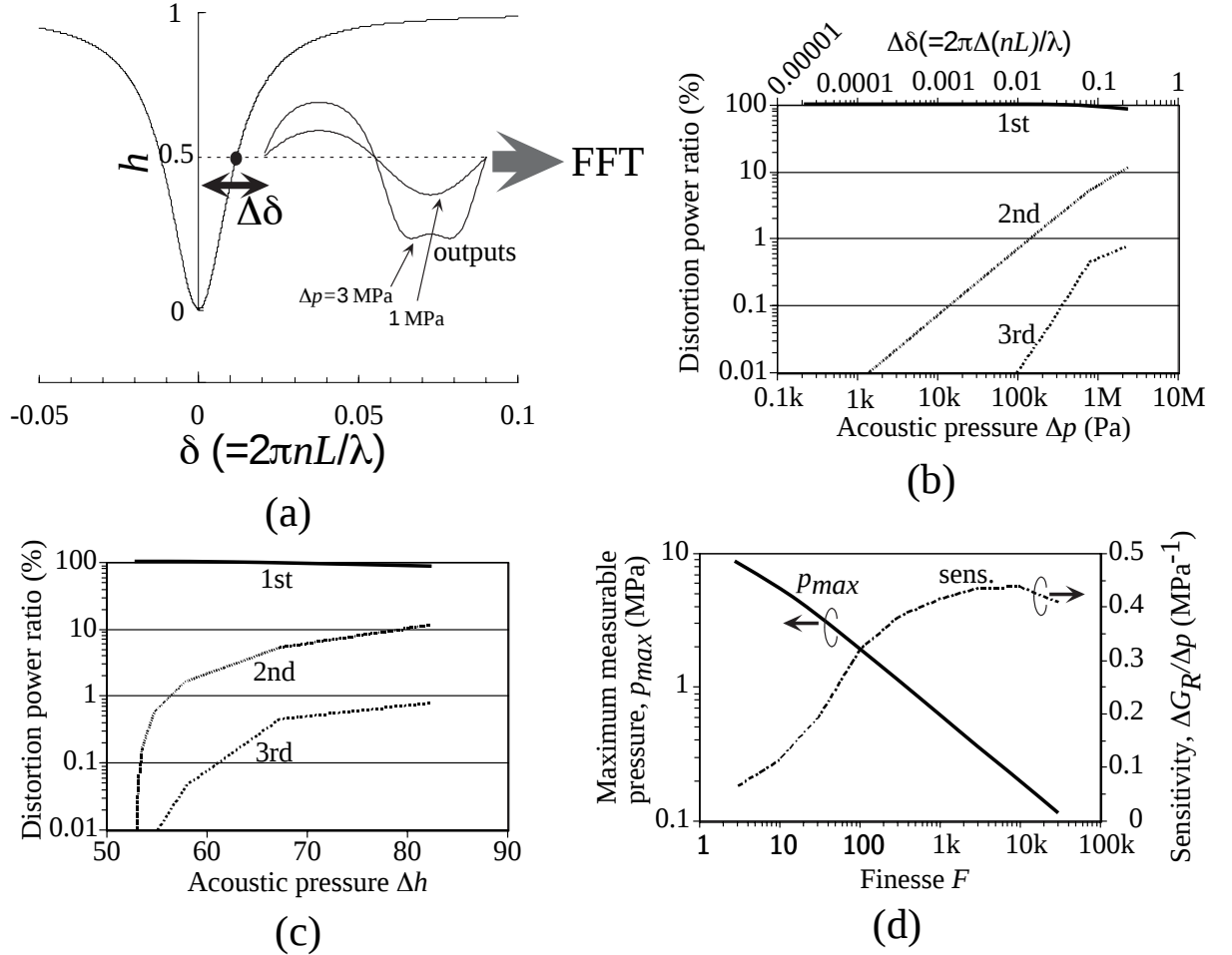


Fig. 3.5 (a) 歪み解析手法の概念図と出力波形のシミュレーション；(b) 音圧 (Pa 表示)、(c) 音圧 (共振ディップの高さ Δh で表示) に対する基本波、第 2 次、第 3 次高調波成分；(d) フィネス F に対する最大測定可能音圧

$F=23.5$ ($R=0.9$, $G_s=0.7$) に固定し、動作点 h を変化させた場合の基本波、第 2 次、第 3 次高調波成分の生成比を Fig. 3.4(b) に示す。また、シミュレーション波形の振幅から、動作点に対する音圧感度もわかるので、合わせて同図に示す。全体的に、基本波、2 次歪み成分は殆ど変わらない。また、感度についてはある動作点において極大が生じることがわかる。以下の条件、

1. S/N 比 >1 の計測するために、第 2 次高調波成分 $<10\%$ 、第 3 次高調波成分 $<1\%$ を条件とする。

2. 音圧感が最大値の半分に落ち込むまでの範囲を測定可能領域と仮定する。

を考慮すると、 $0.15 < h < 0.7$ の範囲内に光源の波長 λ を設定すべきであることがわかる。歪み成分は動作点に対しては依存性が低く、換言すると、設計するに当たって冗長性が高いことが解析結果から判明した。

次に、音圧を変化させた場合のシミュレーション波形を Fig. 3.5(a) 中に、音圧に対する高調波成分生成率を同図 (b) に、音圧に相当する共振ディップの範囲に対する高調波成分生成率を同図 (c) に示す。(a)–(c) は全て動作点 $h=0.5$ の条件で計算している。(b) と (c) では横軸スケール密度が異なるだけで、基本的に 1 対 1 の対応をしている。

基本波成分は、またしても (b)–(c) いずれにおいて依存性は殆ど無い。また、結局第 2 次高調波が 10% 生じる音圧に、最大測定音圧は制限される。先程の条件 (1), (2) を満たすには、(b), (c) の結果から、 $\Delta p < 2 \text{ MPa}$ ($\Delta \delta < 0.2$), $\Delta h < 0.8$ であることがわかる。そこで、同図 (d) および次節「ダイナミックレンジの定式化」では、最大測定可能音圧を $\Delta h=0.7$ に相当する音圧と定義して検討を行った。同図 (d) に、フィネスに対する最大測定可能音圧と、前図 (b) と同様に求めた音圧感度をデュアル表示する。フィネスが大きくなるほど感度が高くなるが最大測定可能音圧は小さくなる。すなわち、両者がトレードオフの関係である様子が良くわかる。

3.3.2 ダイナミックレンジの定式化

プローブの最大測定可能音圧 Δp_{max} を、反射率ディップの底値と最大値の幅の 70% 範囲に相当する音圧と仮定すると、以下の式で表すことができる。

$$\Delta p_{max.} = \left(\frac{\Delta(nL)}{\Delta p} \right)^{-1} \frac{\lambda}{2\pi} \sin^{-1} \sqrt{\frac{0.7}{1 + 0.3F}} \quad (3.7)$$

式 (3.7) より、最大測定可能音圧を設計する場合の光路長の音圧感度及び光学感度は、それぞれ $\Delta(nL)/\Delta p$ 、 F に相当する。

一方、最小測定可能音圧 $\Delta p_{min.}$ は、フォトディテクターのノイズ電流 i_n で決まる。

$$i_n = \sqrt{i_j^2 + i_{SD}^2 + i_{SL}^2} \quad (3.8)$$

ここで、 i_j : 熱雑音、 i_{SD} : 暗電流、 i_{SL} : 光電流とする。 $i_{SL} \gg i_{SD}$, i_j である場合、

$$i_n \approx i_{SL} = \sqrt{2eIB} \quad (3.9)$$

Table 3.3 試作機 3 本の仕様

	MM1	SM1	SM2	SM3
R	0.8	0.62	0.6	0.85
L (μm)	94	22	111	128
G_s	0.93	0.90	0.65	0.64
λ (nm)	784.10	784.52	784.92	785.32
V , mode	4.402, LP_{02}		<2.406, LP_{01}	

ここで、 e ：電子の電荷 (1.6×10^{-19})、 I ：フォトディテクター受光部での総光量、 B ：周波数帯域とする。変調光電流を ΔI とおくと、S/N 比は以下のように表される。

$$SNR = \frac{\Delta I^2}{i_n^2} = \frac{\Delta I^2}{2eIB} = \frac{I}{2eB} \left(\frac{\Delta I}{I} \right)^2 \quad (3.10)$$

従って、S/N 比=1 に相当する音圧が Δp_{min} となるので、

$$\Delta p_{min} = \sqrt{\frac{2eB}{I}} \left(\frac{\Delta G_R}{\Delta p} \right)^{-1} \quad (3.11)$$

である。例えば、 $B=10$ MHz, $I=80$ μW と仮定すると、 $\Delta p_{min} \simeq 1$ kPa となる。

結局、式 (3.7), (3.11) を用いると、理論ダイナミックレンジ DR は以下の式で表すことができる。

$$DR = \left(\frac{\Delta G_R}{\Delta(nL)} \right) \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{I}{2eB}} \sin^{-1} \sqrt{\frac{0.7}{1+0.3F}} \quad (3.12)$$

3.4 計算結果による試作機の評価

以上から $V=4.402$ 、 $V<2.406$ のファイバについて、理論音圧感度 $\Delta G_R/\Delta p$ をそれぞれ求めると、Fig. 3.6(a) 及び (b) の曲線になる。さらに、ハーフミラーの反射率 R を 0.5, 0.6, 0.8, 0.9 と変化させ、実線及び破線部で表した。また、3 本の試作機について、後述する反射率波長特性 (p. 24, Fig. 4.4 参照) をそれぞれ測定し、各パラメータ R , L , G_s を求めた。Table 3.3 にそれぞれの試作機の仕様を示す。次に、圧電ハイドロフォン (*B&K corp.*; 8103) を参照用ハイドロフォンとして用いて、これら試作機の実測音圧感度を測定した。その実測値は、Fig. 3.6(a) 及び (b) のプロット点で示す。測定及び実測結果より、音圧感度についての計算値と実験値の誤差は 10% 以内であった。これは、製作精度と動作点の揺らぎから起因する誤差の範囲である。誤差低減のためには、キャビティ端面とハーフミラーの平行度を向上させ、温度一定に、

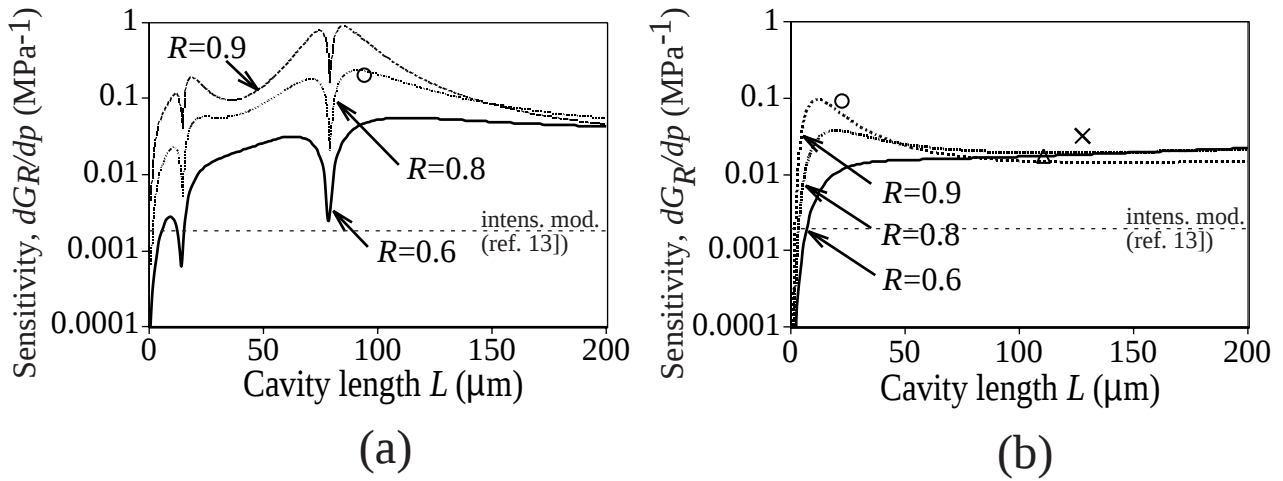


Fig. 3.6 キャビティ長 L に対する音圧感度の計算及び実測結果；(a)○, 'MM1'; (b)○, △, × はそれぞれ'SM1~3'

かつ外部振動との隔離に注意を払うことが必要である。また、強度変調型プローブ¹³⁾の理論感度に比べ、実測においても10–100倍の感度向上が成し得ている。一方、Fig. 3.6(a)の $L > 100 \mu\text{m}$ や、同図(b)の $L > 50 \mu\text{m}$ の領域では、理論的にキャビティ長の増減に対する感度の違いが少ないので、異なるキャビティ長をもつプローブを多点化する場合（波長多重処理等）に有利であることがわかる。

次に、最大測定可能音圧とダイナミックレンジの前述試作機による実測値と、式(3.7), (3.12)による計算結果をFig. 3.7(a)–(d)に示す。前の測定と同様、Fig. 3.7(a), (b)は $V = 4.402$ のファイバに対して、同図(b), (d)は $V < 2.406$ のファイバに対しての計算及び測定結果を示す。測定値は計算値と定性的には良く一致しているが、数分の1程度小さくなっている。この場合も、外乱により最適動作点に波長がロックできず、出力が歪んだためと考えられる。この問題を解決するために、第5章(p. 36)では信号処理法の改良や揺らぎ抑制方法の検討を行った。

3.5 キャビティの機械共振周波数

音場周波数 f_s が、キャビティの基本機械振動共振周波数 f_{sr} に近づくと感度が増大し、さらに f_{sr} を越えると感度が大幅に低下し、様々な振動モードが励振されて特性が複雑化する。従って、 f_{sr} はプローブの上限周波数と考えることができる。ここでは、キャビティ長 L を変化させ、 f_{sr} をFEM固有振動解析により求める。光路長が変化するモード、すなわち軸方向変形のあるモードの、最低次のものの固有振動数を f_{sr} とした。Fig. 3.8(a)は、縦基本振動モード²⁾の

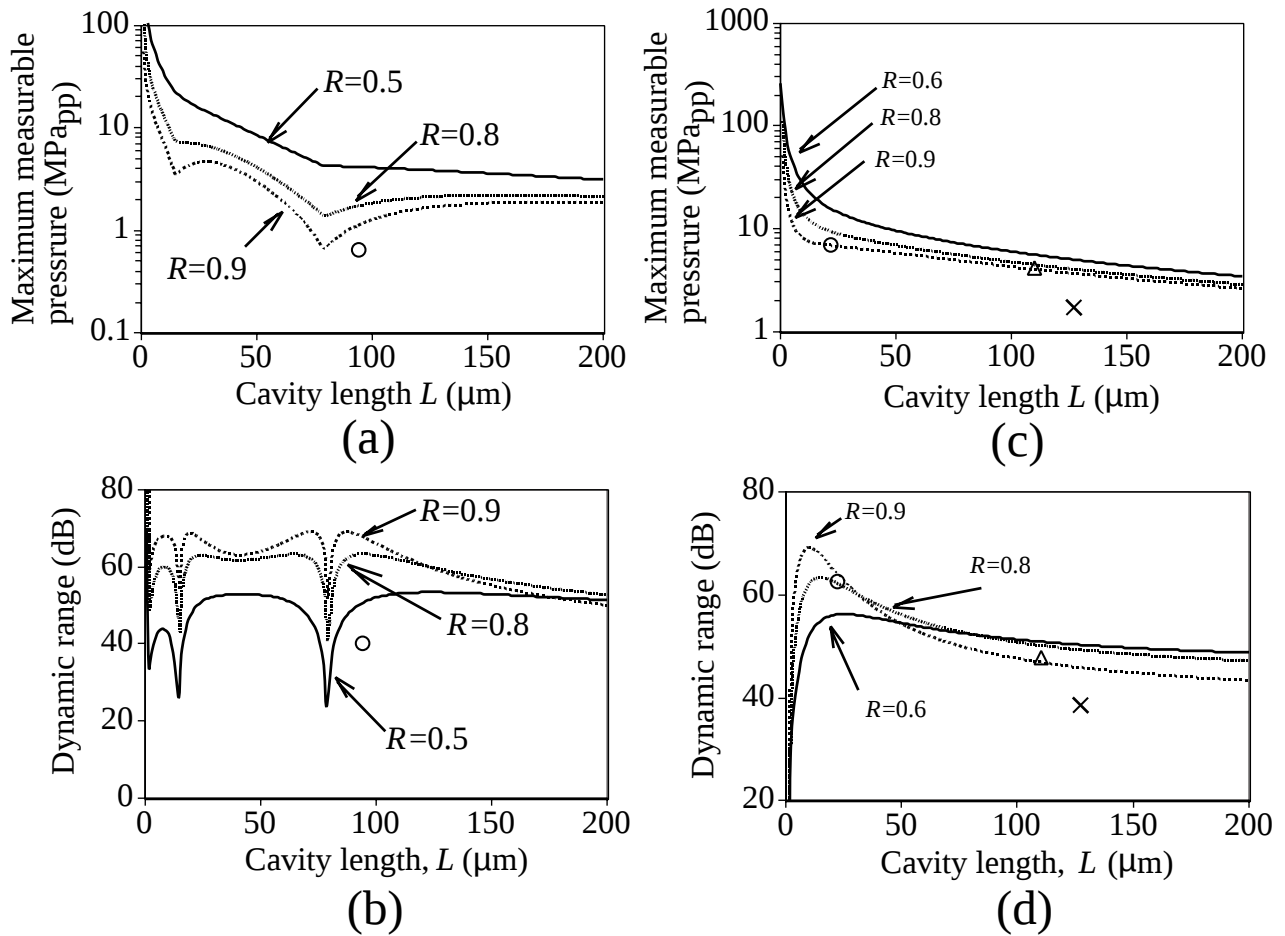


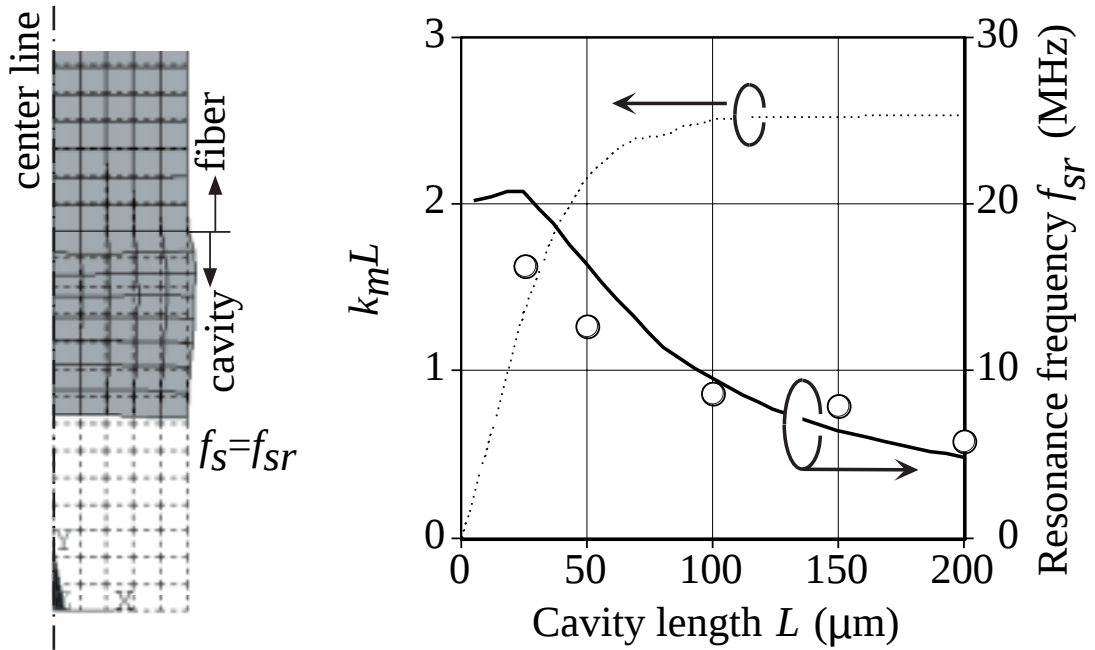
Fig. 3.7 キャビティ長 L に対する最大測定可能音圧 ((a), (c)) とダイナミックレンジ ((b), (d)) の計算及び実測結果 (a), (b) ○, 'MM1'; (c), (d) ○, △, × はそれぞれ 'SM1~3'

模式図である。以後この振動モードに着目し、それぞれのキャビティ長 L に対する固有振動周波数 f_{sr} を逐一求めた。結果は、Fig. 3.8(b) のプロット点で表示した。一方、柴山らによると、短軸円柱の縦基本振動モードは、以下の式で表すことが出来る³¹⁾。

$$f_{sr} = \frac{k_m L}{\pi L} \sqrt{\frac{E}{2(1 + \sigma)\rho}} \quad (3.13)$$

ここで、 σ , ρ はそれぞれキャビティ材料のポアソン比、密度 (ポリエステル樹脂、 $0.34, 1.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$) である。また、 k_m はキャビティを縦振動が伝搬した場合の波数であり、この値は柴山らの文献値³¹⁾を用いた。キャビティ長 L に対する $k_m L$ を Fig. 3.8(b) の破線で、 $k_m L$ と式 (3.13) を用いて求めた f_{sr} を同図の実線で示した。この結果と FEM による結果はおおよそ一致してい

²厳密には断面積が変化するので単純に縦振動とは呼べないが、ここでは便宜を図って縦基本振動モードと呼んでいる。



(a) Deformation of the longitudinal mode. (b) $k_m L$ and Resonance frequency f_{sr} as a function of cavity length L .

Fig. 3.8 (a)FEM 解析により得られた縦基本振動モード (b) キャビティ長 L に対する $k_m L$ と縦基本振動共振周波数 f_{sr} ; ○、FEM による解析結果; 破線、文献値 $k_m L^{31}$; 実線、式 (3.13) の計算結果

るが、 L が短くなるにつれ差が大きくなる傾向がある。これは、FEM の解析モデルが円柱を無限長のファイバに付加しているのに対し、柴山らの解析では無限大の剛体板に付加していることを仮定しているのが原因である。柴山らの解析解でもある程度の共振予測はできるが、短いキャビティの場合は FEM 解析を行う必要がある。結果によると、数 10 MHz 以上の計測にはファイバと同径のキャビティでは対応できないことがわかる。そこで、今度は直径を小さくした場合を考えてみる。先程用いた文献値を、キャビティ長のみならずキャビティ直径を変化させた場合に適用させる。結果を Fig. 3.9 に示す。 $L > 50\mu\text{m}$ の場合、 f_{sr} はキャビティ直径には殆ど依存せず、キャビティ長によることがわかる。また、 $f_{sr} > 50\text{ MHz}$ の条件に対して $L < 50\mu\text{m}$ 、直径 $< 20\mu\text{m}$ が十分条件であることがわかる。後述の 4.4.5 節 (p. 30) で、試作機の周波数特性を実測した例を示す。

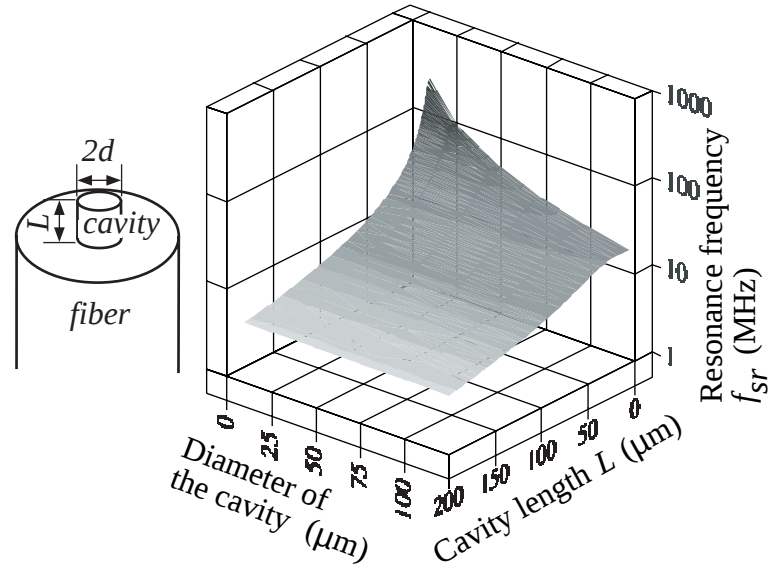


Fig. 3.9 キャビティ長及びキャビティ直径に対する共振周波数 f_{sr}

3.6 まとめ

本手法の音圧感度、ダイナミックレンジ（歪み率）を理論解析した。その結果、設計段階に必要な各パラメータ値（ R , L 等）が算出された。また、本手法で期待されるプローブ性能、または性能限界を見積もることが出来た。今後は、高周波領域について振動解析と偏光特性の両側面から本方式の指向性を検討し、理論的に明らかにすることが必要かと思われる。

第4章

微小音場プローブの試作

4.1 はじめに

本章では、本手法の製作方法の検討と高周波音場での試作、及び特性の検討を行っている。実験を通じて、高感度・高空間分解能であるなどの特長が把握出来たが、一方で指向性を有する、動作が不安定などの問題も生じた。なお、本章での「試作機」とは、特に断りがない場合前章で述べた”MM-1”と呼ばれた仕様を持つ試作機を指す（p. 16 参照）。

4.2 製作方法

Fig. 4.1(a) に示す手順で、ファイバ先端にキャビティを作製した¹⁹⁾。(1) センサにする光ファイバに金製ハーフミラーをスパッタリングする。ハーフミラー反射率 R は、金薄膜のスパッタリング時間をコントロールすることにより調整できる。次に、別のファイバ（ダミーファイバ）を対向させ、片方のファイバにレーザー光を入射し、別のファイバの出射光量や反射光量を観測しながら光軸あわせや2つのファイバの平行あわせを行う。(2) この作業を行いながらポリエステル樹脂をファイバ間に流し込み、表面張力で樹脂を保持しつつダミーファイバで引っ張り、キャビティ長を調節する。この時、レーザー光の波長を掃引しながらダミーファイバから出射される光量を観測し、ディップ波長 λ_r 及びディップ間隔 $\Delta\lambda_r$ を計測すると、正確なキャビティ長 L が算出できる。 L は、共振器の屈折率 n と λ_r 、 $\Delta\lambda_r$ により以下の式で表せる。

$$L \approx \frac{\lambda_r^2}{2n\Delta\lambda_r} \quad (4.1)$$

(3) 硬化後、ダミーを抜き取り、金スパッタリングによる反射コーティングを施す。Fig. 4.1(a) には、手順 (2) と完成したプローブの顕微鏡写真を併せて掲載する¹⁾。

ところで、前述の作業 (1) において、「ハーフミラー反射率 R は、金薄膜のスパッタリング時間をコントロールすることにより調整できる。」と述べたが、金薄膜の膜厚と反射率 R の関係

¹⁾ 詳しい製作装置・プロセスについては付録 B で述べる

を事前に調べたので Fig. 4.1(b) に示す。スパッタリング時間とイオン電流²を観測すれば、校正表により膜厚を求めることが出来る。

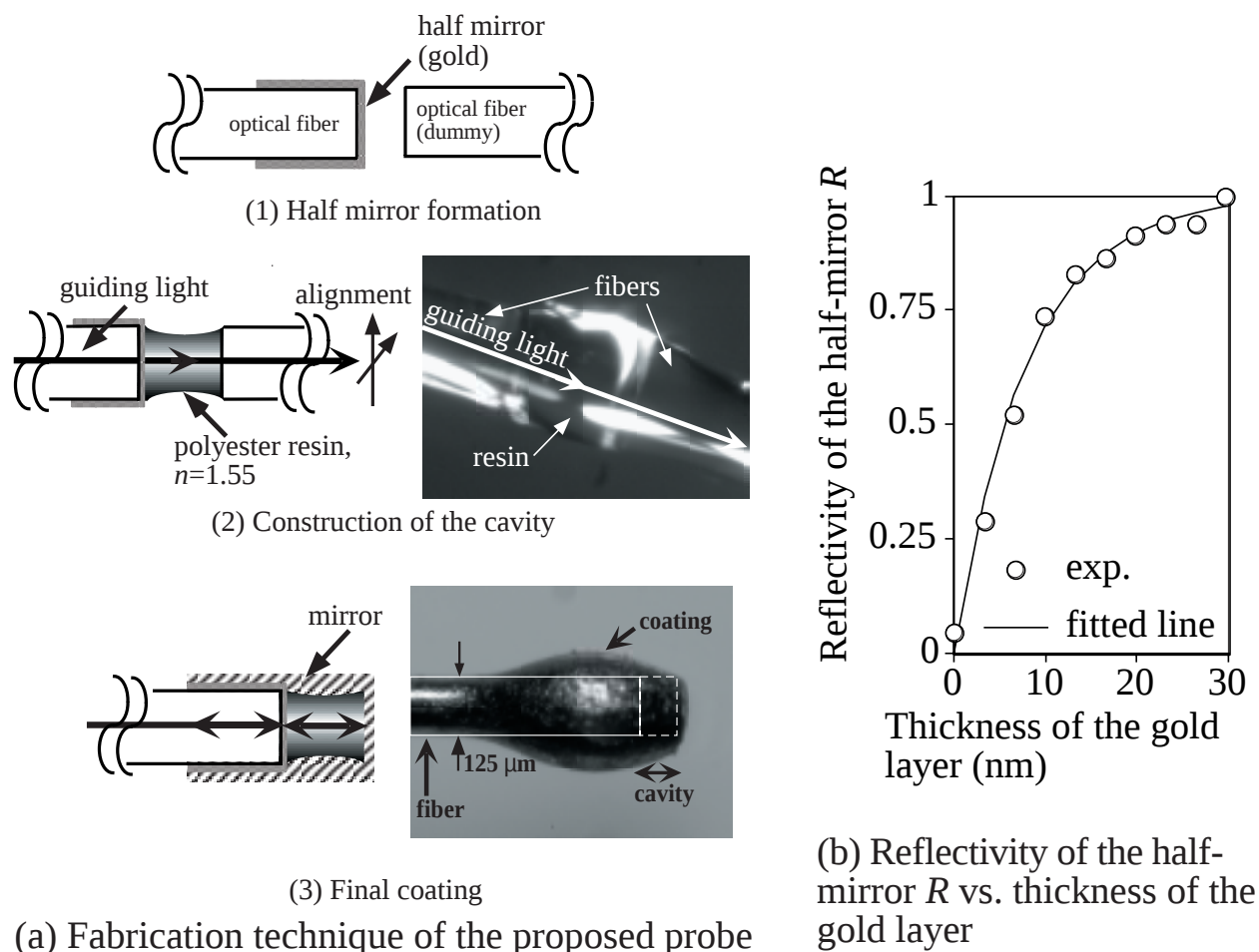


Fig. 4.1 プローブの製作法と金薄膜膜厚とハーフミラー反射率 R の関係

4.3 実験装置の基本構成

Fig. 4.2 に音波計測時の基本的な実験系を示す。光源には出力 12 mW、中心発振波長 764 nm の外部共振器型波長可変レーザー (*Environmental Optical Sensors, Inc.*; 2010) を使用し、ファイバ端面からの戻り光をハーフミラーで分離し、PIN フォトダイオードで検出した。また、フォトダイオードで得られた電気信号を、電気フィルターを用いて戻り光量 I_0 と音波信号 v_s に分離した。

²チャンパー内の平均自由行程 (mean free path) に比例する。使用した金スパッタリング装置 (*SANYU DENSHI CO., LTD.*: Quick Coater, SC-701) では、5–15 mA である。

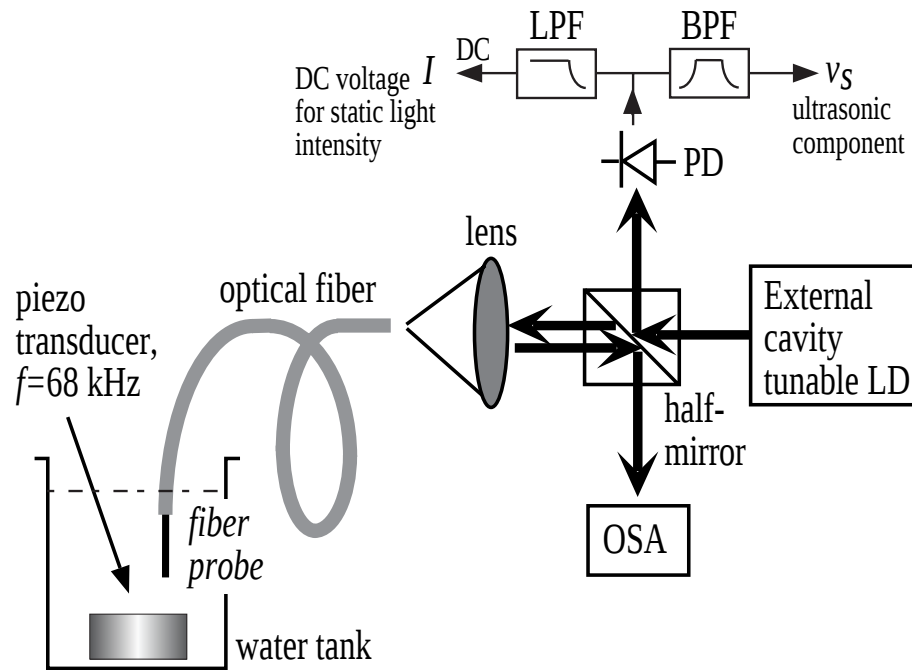


Fig. 4.2 実験装置の基本構成

一方、近年の光コンポーネントの技術革新は目覚ましいものがあり、光ファイバカップラもだいぶ普及してきた。そこで、Fig. 4.2 は Fig. 4.3 のように簡素化し、構成することも出来る。筆者らは、プローブ単体ではこのセットアップでは試作せず、アレイ化を行う際にこれよりポー

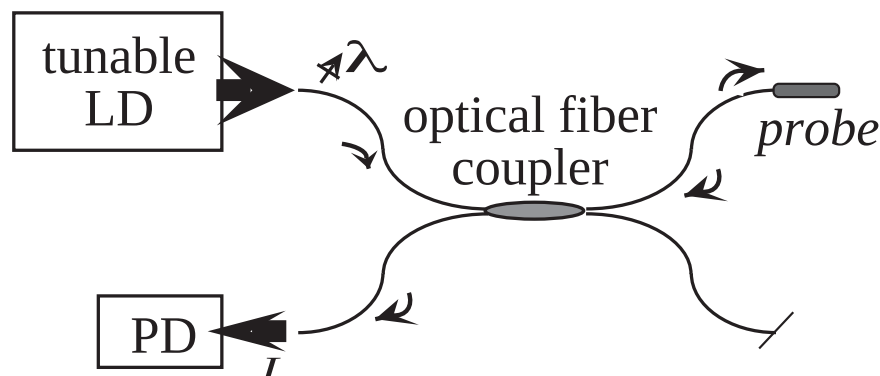


Fig. 4.3 実験装置の改良案

ト数の多いカップラを利用し、アレイ試作機を実現した。すなわち、Fig. 4.2 で利用されている 2×2 カップラを 2×4 カップラに替え、センサ素子数を増やしている。詳しい原理については第 6 章 (p. 44 参照) で述べる。

4.4 高周波音場測定

4.4.1 光キャビティの波長特性

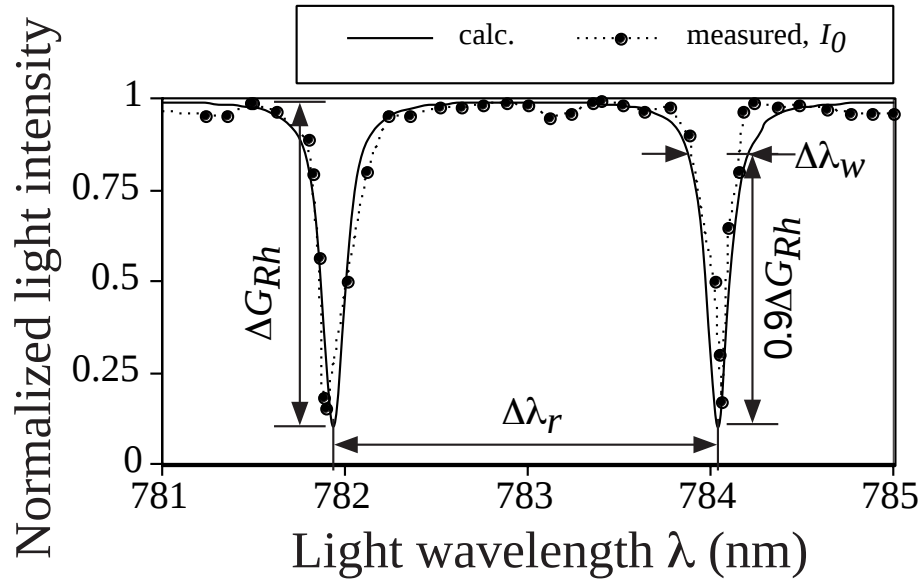


Fig. 4.4 キャビティの波長特性

本プローブの動作原理を確認するために、Fig. 4.2の実験系により、戻り光 I 及び音波出力 v_s の光波長依存性を同時に計測した。周波数 68 kHz の低周波音場を、分布が生じないよう波長以下のサイズをもつピーカー内で励振し、光波長 λ を変化させながら計測を行った。光ファイバは通信用のシリカ製シングルモードファイバ（コア径 10 μm , $\Delta=0.1\%$ ）を使用した。本実験の波長（規格化周波数 $V=4.402$ ）では、 LP_{02} または LP_{21} モードが励振される。3.2.3 節で触れたが、この横モードは式 (2.1) 中の single-pass gain G_s に影響する。このファイバによる反射率 G_R の実測値と、式 (2.1) による計算結果を Fig. 4.4 に示す。計算値と実測値のフィッティングにより、 $L=94.2\ \mu\text{m}$, $R=0.8$, $G_s=0.93$ であることがわかった。このフィッティング方法についてだが、まず共振波長 λ_r と隣り合う λ_r の間隔 $\Delta\lambda_r$ から式 (4.1) を利用してキャビティ長 L を求める。 L がわかると、3.2.3 節の Fig. 3.2 の結果から single-pass gain G_s を求めることができる（p. 11 参照）。ハーフミラーの反射率 R を変えると、ファブリペロ共振ディップの波高値 Δh 及びディップ幅 $\Delta\lambda_w$ の両方が変化するので、 R を変化させフィッティングするとパラメータ値 R , L , G_s が全てわかる。第 3 章で用いた 4 本の試作機の製作誤差は、それぞれ $\epsilon R < 10\%$, $\epsilon L < 20\%$ 程度であった（ G_s の精度はキャビティの構造上評価できない）。

式 (2.1) をキャビティ光路長 nL で微分すると、光波長 λ に対する歪み感度 $dG_R/d(nL)$ がわ

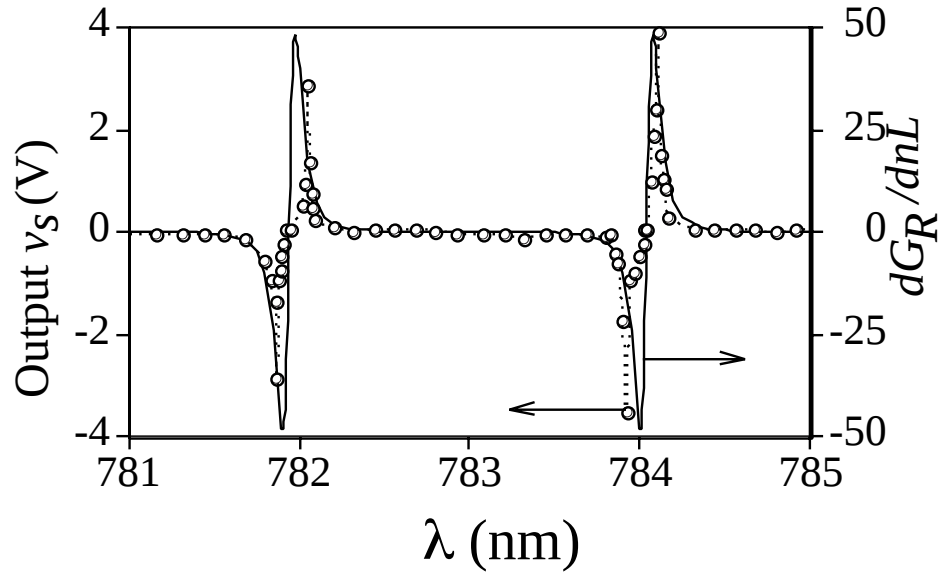
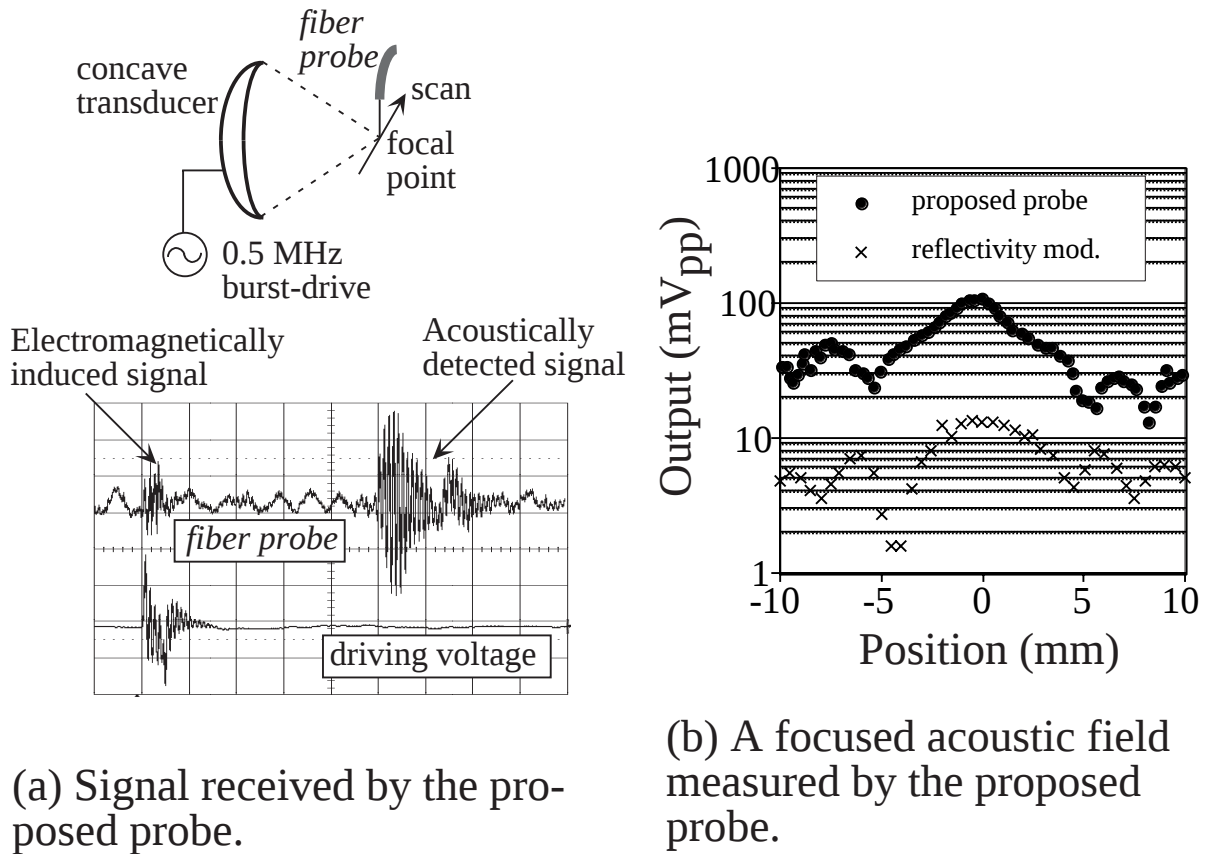


Fig. 4.5 音圧感度の波長特性

かる（式 (3.4), p. 10 参照）。先程求めた各パラメータを用いて算出した音圧感度 dG_R/dp の波長依存性を、実測値 v_s の光波長に対する変化と合わせて Fig. 4.5 に示す。この結果から、Fig. 4.4 中の共振ディップのスロープ中央付近に動作波長がある時、音圧感度が高くなることがわかる。また、動作波長がスロープの右上がり部にある時と左上がり部にある時では位相が反対になっており、本方式が期待通りの動作原理を有することがわかる。

4.4.2 集束音場

次に、本方式の試作機により 0.5 MHz 集束音場を計測し、本プローブの試作機と以前に提案されたファイバ端面の反射率変調型プローブ¹³⁾（光強度変調型）との音圧感度の比較を行った。この端面反射率変調型プローブは、光ファイバの端面を切り出し、一切の加工を行わずセットアップしたものである。この実験では、Fig. 4.2 の電気フィルター部を取り除き、PD からの信号を直接オシロスコープで観測し、さらに光源として波長固定の He-Ne レーザーを用いた。Fig. 4.6(a) は、中心周波数 0.5 MHz で集束型振動子をバースト駆動し、本方式の試作機で測定した時間波形である。振動子の駆動電圧波形と比べ、振動子対プローブの距離に相当する時間遅れが生じているので、2 番目の出力波形が音響信号であることがわかる。振動子は 150 V_{pp} 以上と高電圧で駆動するため、1 番目の波形は受光回路系への電磁ノイズと断定できる。この音響信号の peak to peak 値を測定しながら、反射率変調型プローブと同時に振動子の径方向に



(a) Signal received by the proposed probe.

(b) A focused acoustic field measured by the proposed probe.

Fig. 4.6 本プローブとファイバ端面反射率変調型プローブ¹³⁾による0.5 MHz集束音場計測
(a) 本方式による出力波形、(b) 本方式と反射率変調型プローブにより測定した音場分布

走査した結果を Fig. 4.6(b) に示す。これより、本方式は以前に提案されたものより約 10 倍もの感度向上が得られたことがわかる。反射率変調型プローブで校正すると、試作機の音圧感度 $\Delta G_R / \Delta p$ は 2×10^{-2} (MPa⁻¹) であった。しかし、Fig. 4.5 で得られた測定感度に比べ 35 dB ほど低く、この実験では動作波長が最適ではなかったと考えられる。従って、動作波長を最適にすることにより、光強度変調型プローブに比べ 55 dB ほどの感度向上が期待される。

4.4.3 定在波音場計測と空間分解能

ファイバセンサは一般にファイバ全体が干渉系になり、高感度であるが空間分解能は落ちる傾向がある。よって、有感部を局所的にするのは、従来からの大きな課題であった³²⁾。本手法では、有感部(キャビティ)の材料を、ファイバの材料である石英ガラスに比べ弾性定数の小さいものを選ぶことにより局所化を図った。そこで、本節では本手法により十分な空間分解

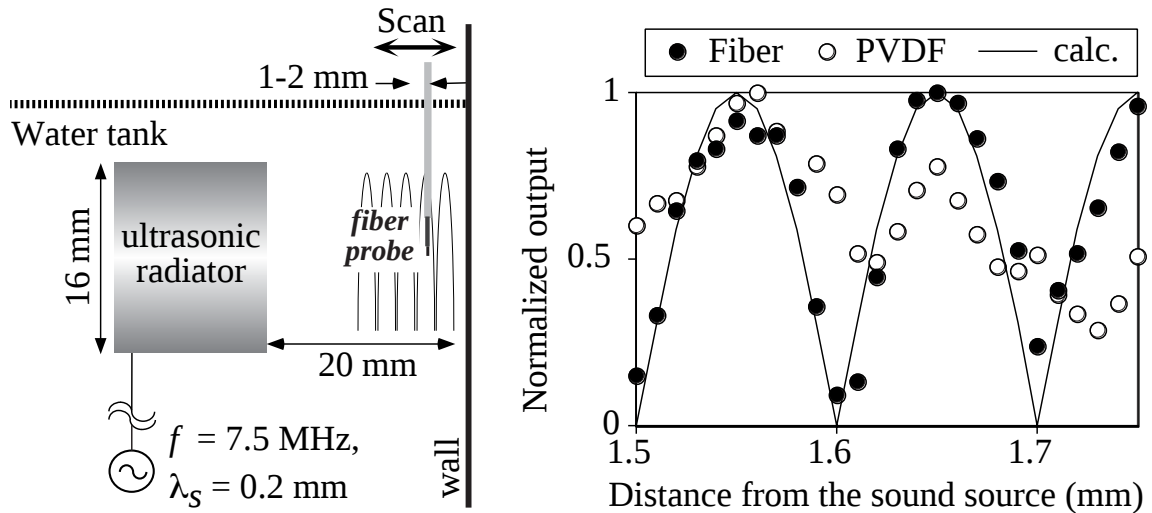


Fig. 4.7 本プローブとPVDF ハイドロフォンによる 7.5 MHz 定在波音場計測

能が確保されているかを実験的に検討する。

まず、試作機により 7.5 MHz 定在波音場の計測を行い、半径方向空間分解能の確認を行った。共振周波数 7.5 MHz、直径 15 mm の円形振動子を水槽壁に向かって 20 mm の距離から共振駆動し、音波長 0.2 mm の定在波音場を励振した。参照用として直径 0.5 mm、圧電高分子型 (PVDF) ハイドロフォン (MH28-5; *The Danish Institute of Biomedical Engineering*) を使用し、試作機と共に定在波分布を測定した。その結果を Fig. 4.7 に示す。PVDF ハイドロフォン

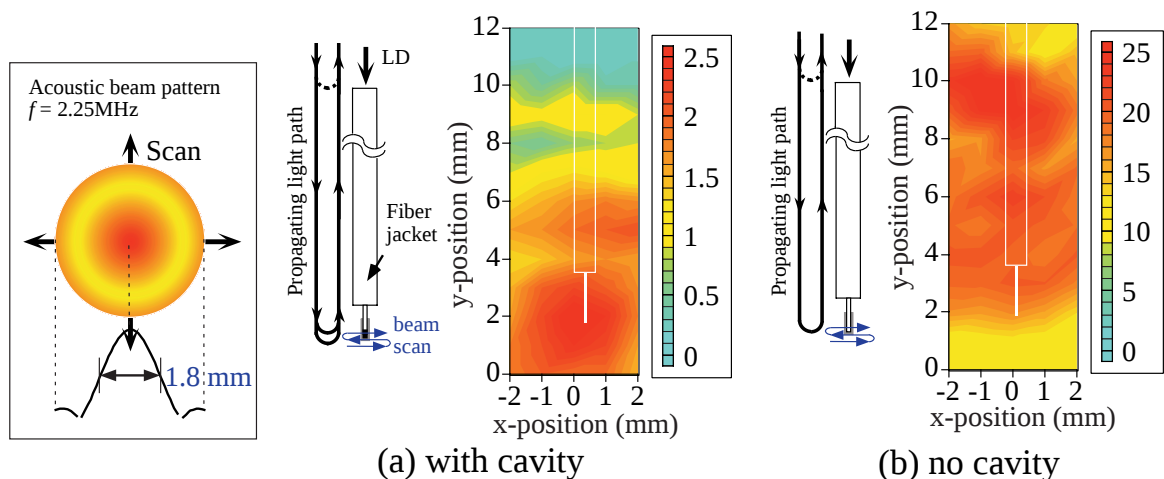


Fig. 4.8 本プローブの先端付近を音場ビームで走査した時の出力 (a) キャビティ有り (b) キャビティ無し

は直径が 2.5 音波長分と大きいいため、音場分布の平均値を測定しているが、本方式はコントラ

スト良く計測できている。音場を乱さずに計測を行うためには、センサ直径 $2d$ を音波長 λ_s の $1/4$ – $1/10$ 程度にしなくてはならないと言われているが、本プローブの直径は約 $1/2$ 音波長ありこの条件を満たしていない。それにもかかわらずコントラスト良く計測できたのは、キャビティ部材料の音響インピーダンスが水に近かった (1.9 倍) ためと思われる。

次に、ファイバ長手方向の空間分解能を実験的に検証する。共振周波数 2.25 MHz、直径 15

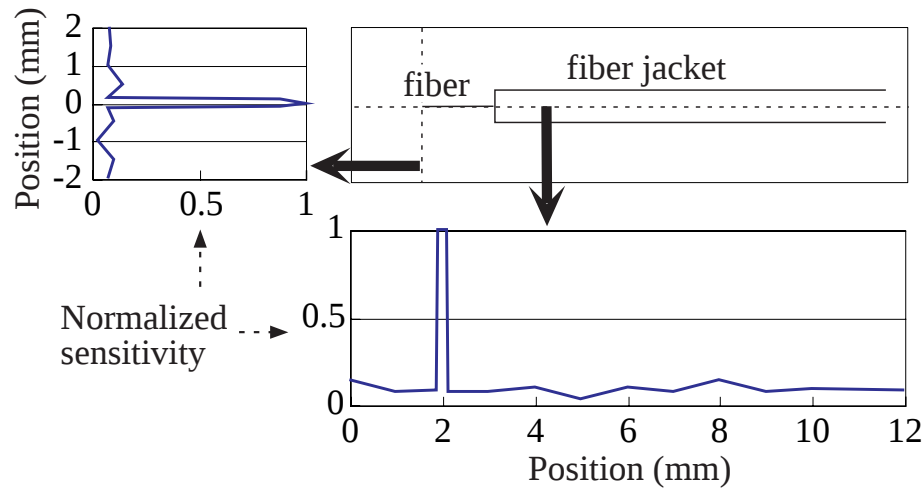


Fig. 4.9 本プローブのファイバ長手方向分解能

mm の円盤形振動子 (探触子) を、Fig. 4.8 の挿し絵のように 2 次的に走査する。また、提案した構造を持つ試作機の他に、キャビティが無くファイバの端面にいきなり全反射コーティングを施したプローブについても同様の実験を行った。このキャビティが無いプローブは、両側のファイバ端面で伝搬光の反射が生じるので、ファイバ全体が干渉系 (キャビティ) になると考えられる。その時、各点で得られた出力をカラー階調表示したものを Fig. 4.8 に示す。結果、キャビティ有りのプローブは、キャビティ無しに比べ平均的に見た感度は低い、高空間分解能が予測できる。同図 (a) の y 位置 5 mm 付近の感度が高くなっている原因は、音波ビームのサイドローブが有感部に照射されてしまったためと考えられる。そこで次に、Fig. 4.8(a) の音場情報を取り除き、ファイバの空間分解能のみの情報を抽出するため、理想的な音場ビームの分布を用いてデコンボリューションした。デコンボリューションする際には、もとの実測データでは測定点が足りなかったため、データを内挿して $100 \mu\text{m}$ 程度の精度が得られるようにした。結果を Fig. 4.9 に示す。キャビティの長さ及び直径は $100 \mu\text{m}$, $125 \mu\text{m}$ であるが、本プローブはそれと同程度の空間分解能を有することがわかる。

4.4.4 直線性

高周波強力超音波の応用、非線形音場の研究などが近年盛んに行われている。なぜなら、そこにはマイクロバブル、ソノケミストリーなど医用・工業用に有意義な沢山の情報が介在しているからである。しかし、序論で述べたとおり、いまのところこのような音場に対して有効なセンサは無く、例えば高調波の出現が音場によるものかセンサによるものか不明である等の問題が生じている。その目的から、本手法で得られた音響特性の中でもとりわけ直線性（またはダイナミックレンジ）は重要な意味を持つ。ここでは、ダイナミックレンジの広い音源が必要であったため、共振周波数 25 kHz の円環型振動子を音源として用いた。参照ハイドロフォンとして、*B&K* 社の型番：8103 を使用した。このハイドロフォンは低周波向けであるが ($f_{cutoff}=160$ kHz, -3dB)、最大 40 atm (4 MPa) まで直線性が保証されている。Fig. 4.10 に、本プローブの直線性を示す。この試作機の理論的な最大測定可能音圧は、Fig. 3.6(a) の結果から 1.8 MPa_{app}

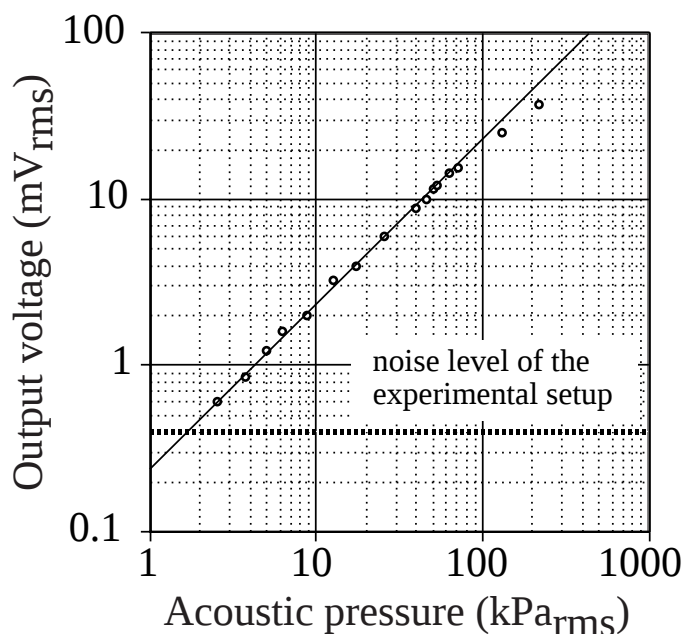


Fig. 4.10 提案したプローブの直線性

である。実験値では、計算値の条件と同様に基本波と比べ 10% の第 2 次高調波が生じたときの音圧を最大測定可能音圧とすると 0.57 MPa_{app} であった。この試作機以外でも同様な実験を行ったが、全ての実測値は理論値に比べ数分の 1 程度小さかった。これは、3.4 節でも述べたが、理論値は動作波長が共振スロープの中心にあることを想定して計算したため、実際の動作波長はそこからずれが生じて出力が歪んだと思われる。

一方、本方式の最小測定可能音圧は、式 (3.11)(p. 16 参照) より約 1 kPa と算定される。ここで、使用した pin フォトダイオード (S1223; *Hamamatsu Photonics corp.*) の周波数帯域 $B=10$ MHz、フォトディテクター受光部での総光量 $I=80 \mu\text{W}$ (実測値) とした。最小測定可能音圧は実際の本セットアップのノイズレベルを考慮すると 2 kPa 程度であったので、電気回路系は幾分の低雑音化が必要と思われる。

4.4.5 周波数特性

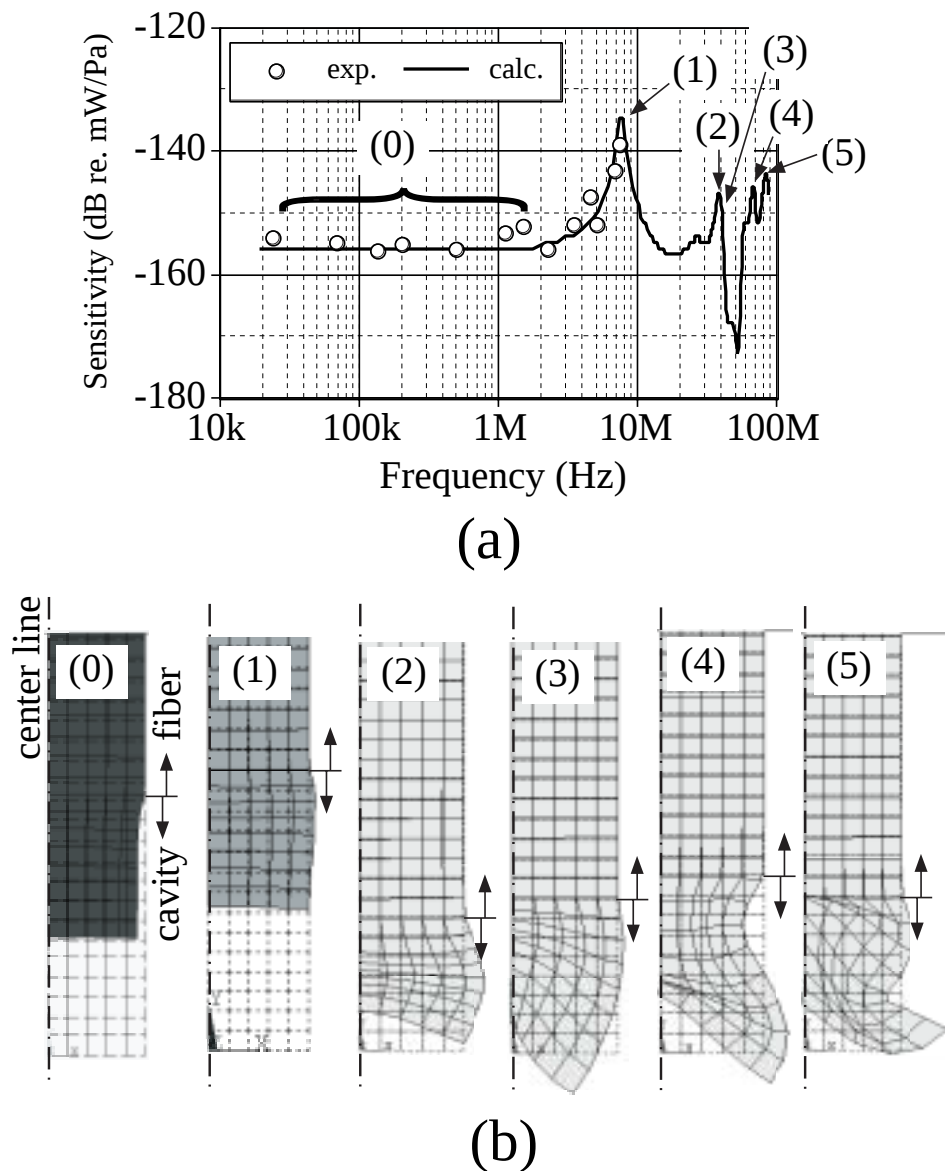


Fig. 4.11 提案したプローブの (a) 周波数特性 (キャビティ長 $L=100 \mu\text{m}$); 実線、FEM によるシミュレーション結果; ○、実測値 (b) 振動モード (周波数は (a) 中の (0)–(5))

本節では、本プローブの周波数特性について、理論的及び実験的に検討する。理論値は FEM による強制振動解析で求める。周波数 f_s の音場が、長さ L の円柱型センシングキャビティ部へ等方的に加圧されることを想定し、キャビティ長の歪み量 ΔL の周波数特性をシミュレーションする。周波数が高くなると数々の固有振動モードが生じてくるが、そのモードと共振周波数は 3.5 節と同様に FEM 固有振動解析により求める。シミュレーションにより励振されたモードの周波数を Fig. 4.11(a) 中に、モードを模式化したものを Fig. 4.11(b), (1)–(5) に示す。キャビティの密度 ρ 、ヤング率 E 、及びポワソン比 σ をそれぞれ、 $1.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $4.2 \times 10^9 \text{ Pa}$ 、 0.34 とした²⁷⁾。縦基本振動共振周波数 f_{sr} 以下の領域では、3.2.2 節で求めた静的圧力が加わった場合の変形と同じ形態となる。その変形を模式化したものを 4.11(b), (0) に合わせて示す。

一方、様々な共振周波数を有する圧電振動子をそれぞれバースト波 (20 波) で駆動する。駆動した中心周波数は振動子の共振周波数とした。すると、音場は基本波の他に 2 倍さらには 3 倍の周波数を持つ音場も含まれるので、一つの振動子による一度の計測で 3 点の周波数特性データが得られる。理論的には更に多くの周波数成分が含まれるが、振動子の帯域や音波の減衰により 3 倍周波数よりも高周波の音場データはノイズに埋もれて計測できなかった。参照に用いたハイドロフォンは、 $\sim 160 \text{ kHz}$ では *B&K* 社の型番 : 8103、 $\sim 500 \text{ kHz}$ では自作圧電ハイドロフォン (直径 3 mm)、 $500 \text{ kHz} \sim$ では PVDF ハイドロフォン (MH28-5; *The Danish Institute of Biomedical Engineering*) を使用した。測定に使用したプローブは、キャビティ長 $L=94 \text{ }\mu\text{m}$ の 3.4 節で用いた MM1 型を使用した。Fig. 4.11 のプロット点は測定値、実線はシミュレーション結果を示す。結果より、測定値は 7.5 MHz に機械共振がみられる。この共振の Q 値 (Quality factor) は、次式から求めたところ 10 であることがわかった。

$$Q = \frac{f_{sr}}{\Delta f_{sr}} \quad (4.2)$$

ここで、 f_{sr} は縦基本振動共振周波数、 Δf_{sr} は共振スペクトルの半値幅である。 Q 値は強制振動解析をする際には必要なパラメータ値であるが、理論的に求めるのは困難である。従って、Fig. 4.11(a) 中の理論曲線を求めるためには予め測定値から Q 値を求めておく必要がある。

4.4.6 指向性・偏光特性

この節では、本方式の指向性を検討する。一般の音圧感度型センサである場合、指向性はセンサ直径と音場の波長 λ_s で決まることがわかっている³³⁾。

$$\text{Directivity function} = \left| 2 \frac{J_1(k_s d \sin \theta)}{k_s d \sin \theta} \right| \quad (4.3)$$

ここで、 k_s は音波の波数、 d はセンサの半径、 θ はセンサ面の法線となす角、 J_1 は一次ベッセル関数である。本手法では、直径はファイバのクラッド半径と同一の $d=62.5 \mu\text{m}$ である。ここでは、 θ 方向の分布を -6 dB 以下に抑える場合を無指向性とする、式 (4.3) より

$$k_s d \leq 2.204 \quad (4.4)$$

が条件となる。従って、試作機の構造では周波数 8.4 MHz まで無指向性が期待できる。

しかし、本方式は有感部が光干渉系であるために、このような従来の検討が適用可能かどうか

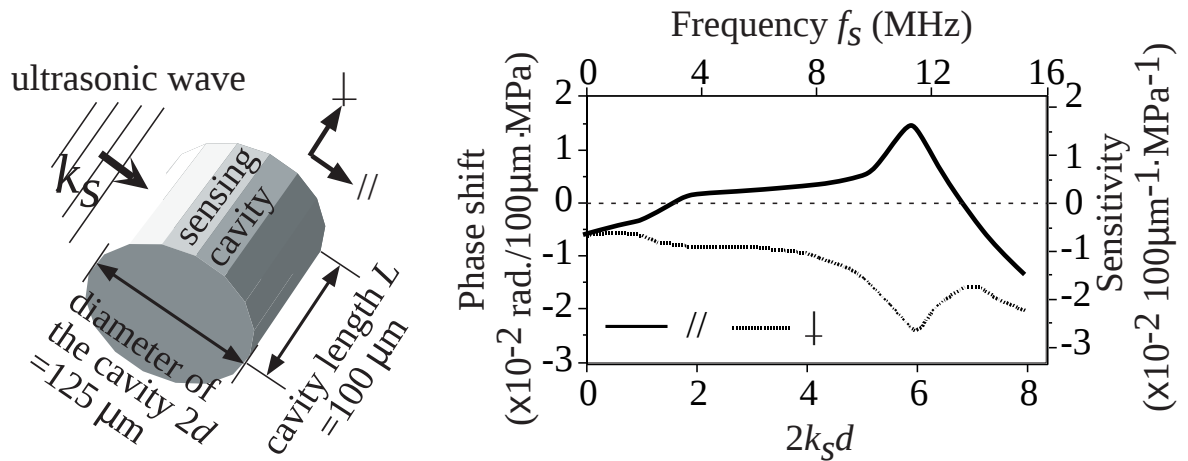


Fig. 4.12 平面波がファイバ伝搬光の偏光に与える影響²⁾

かは不明である。また、光干渉系を伝搬する光に対しては当然横モードや偏光が存在し、それらの非軸対称性や方向性が指向性に影響することも十分考えられる。そこで、本節では実験的な指向性の検討に加え、音波の周波数 f_s が偏光の位相シフト量に与える影響（文献値）と、偏光パターンを変えたときの指向性についても検討したので報告する。

まず、Fig. 4.12 は、平面波がキャビティ軸と垂直に照射されたことを想定し、音波進行方向に平行な偏光成分 (//) と垂直な偏光成分 (⊥) の光位相シフト量を求めた結果である²⁾。音波長 λ_s がコア径 $2d (=125 \mu\text{m})$ にほぼ等しくなるとき ($f_s = 12 \text{ MHz}$)、位相シフト量の // 成分は極大に、⊥ 成分が極小になる様子がわかる。従って、偏光を考慮しなくてはならない音場周波数はこの場合 12 MHz 以上であり、この領域の周波数を測定する際には今よりも小さい直径のプロープを使わなくてはならない。また、 $2k_s d \simeq 2$ のとき、// 成分は符号が反転し、音圧感度がゼロになる。この条件を利用すると逆に圧力変化に依存しないキャビティとなり、温度センサとして用いる場合等に有効である。

次は実測による評価を行う。光源波長 ($\lambda=0.785 \mu\text{m}$) に対して single-mode であるファイバを

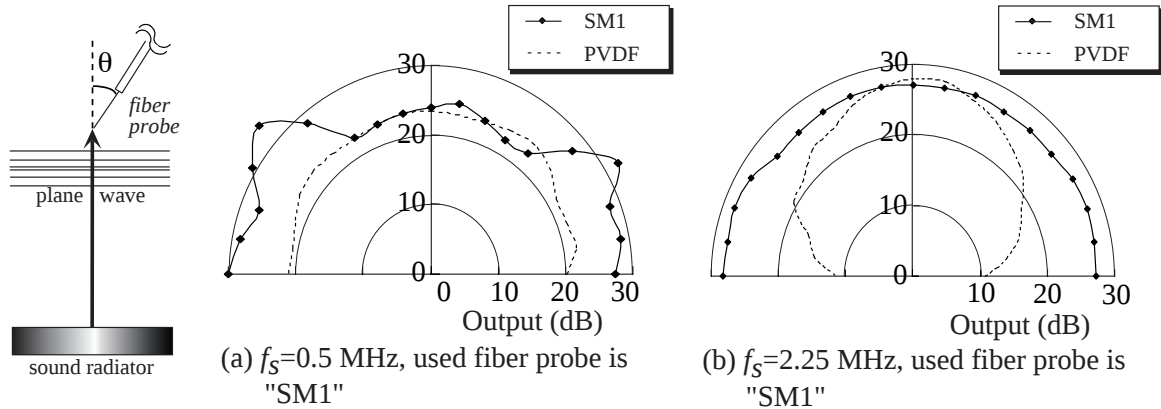


Fig. 4.13 提案したプローブ (SM1) の指向性

用いて検討する。Fig. 4.13 挿し絵のようにプローブの先端位置を保持しながら回転させ、キャビティ端面と垂直な面に関する指向性を調べる。キャビティ軸と平面波の進行方向のなす角を θ とする。円盤形探触子を周波数 0.5 MHz 及び 2.25 MHz でバースト駆動し、音の波面が平面波になるようプローブから十分な距離をおいた³⁾。参照用として、直径 0.5 mm の PVDF ハイドロフォンに対しても同様の実験を行った。3.4 節で使用した SM1 プローブの指向性を実測した結果を Fig. 4.13 に示す。ほぼ無指向性が実現されているが $f_s=0.5 \text{ MHz}$ の時、ファイバ軸と垂直な方向（側面）では、10 dB ほど感度が大きくなる傾向がある。PVDF ハイドロフォンに対しては、周波数によって指向性パターンが変化し、変化の様子から本節冒頭で述べた従来の理論と定性的に良く一致していることがわかる。従って、本プローブが汎用音圧感度型マイクロフォンと異なる特有の原理を有することがわかる。3.2.2 節で、「音圧によるキャビティ歪みと屈折率変化の符号は逆である。」と述べたが、このことは平面波がファイバ軸方向（正面）からきた場合と等方的にキャビティに音圧が加わった場合に限る。ところが、側面に平面波が照射された場合は逆に、「音圧によるキャビティ歪みと屈折率変化の符号は等号になる。」ことが予測される。屈折率変化はキャビティ歪みに対してオーダーが一桁ほど小さいが、この影響が側面方向の感度を大きくさせる原因となっていると考えられる。

同様の測定を、multimode fiber で作成したプローブに対して行った。試験されたプローブの一つ（ここでは“MM0”と呼ぶ）は、コア径 $50 \mu\text{m}$ 、クラッド径 $125 \mu\text{m}$ 、 $V=22.04$ の multimode fiber により作成し、センシングキャビティの仕様は $L=100 \mu\text{m}$ 、 $R=0.8$ とした。二つ目は、3.4

³⁾振動子の直径を D とすると、音源からの距離 l_s が $l_s \geq D^2/\lambda - \lambda/16$ の時、音の波面は平面波と近似できる。

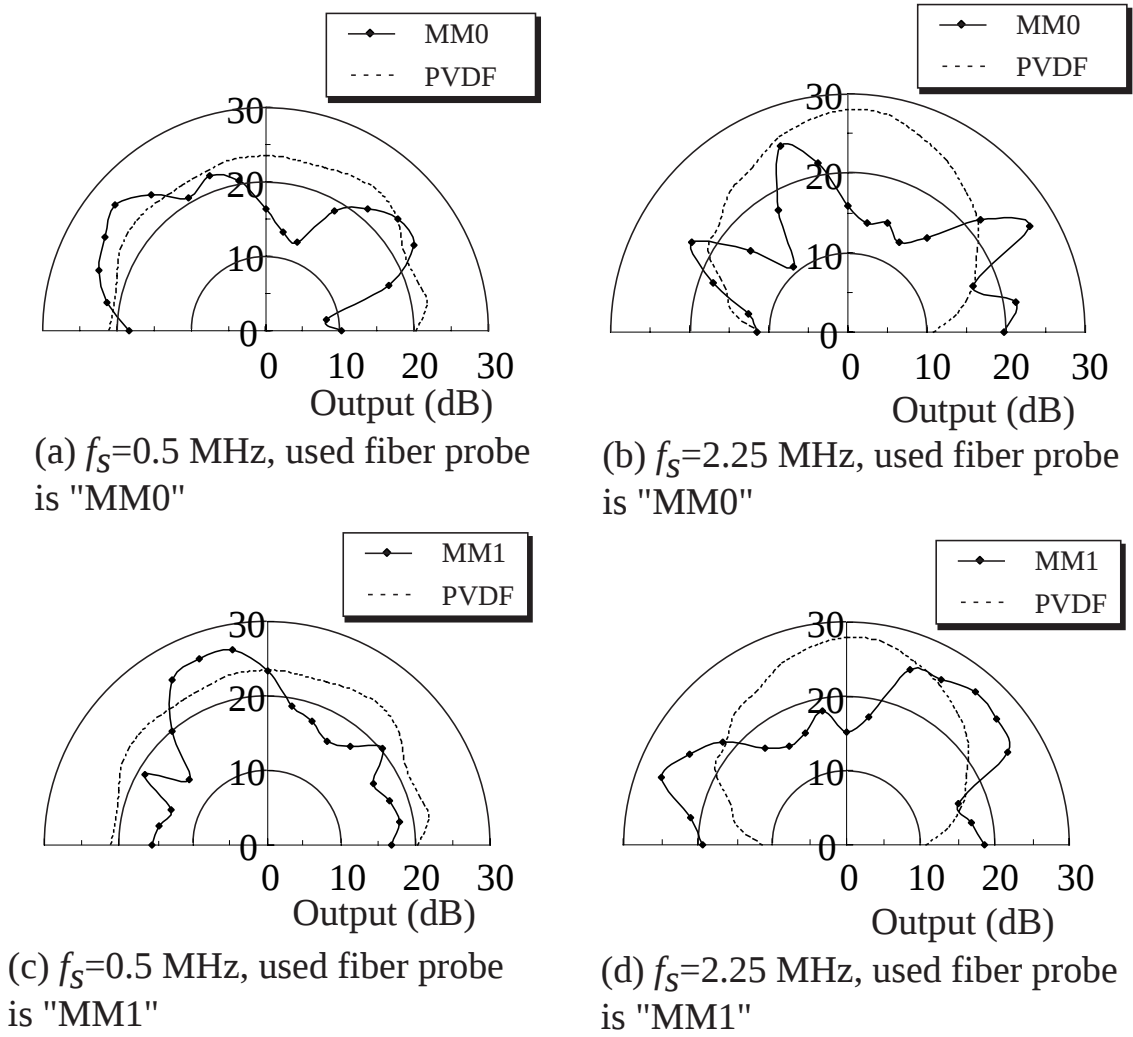


Fig. 4.14 提案したプローブ (MM0, MM1) の指向性

節で使用した MM1 を試験した。全ての指向性実測結果を Fig. 4.14(a)–(d) に示す。結果から、非常に複雑な指向性を有することがわかる。これも本節冒頭で述べた音圧感度型センサの原理は当てはまらない。原因として、ファイバ内で励振された高次横モードが、さらにキャビティにおいて複雑になり、指向性が複雑化されたと考えられる。

そこで次に、Fig. 4.15 挿し絵に示すように、音波の進行方向に平行な面内で MM0 型及び MM1 型プローブを回転させ、感度の方向依存性を調べる。音波周波数 f_s は 2.25 MHz として方向依存性を試験した。念のためファイバに入射する光の偏光パターンを 1/4 波長板で変え、これまでの実験に用いた直線偏波に加え、円偏波も入射して同様の実験を行った。以上の実験結果を Fig. 4.15(a), (b) に示す。周方向の感度分布は、MM0 型よりもむしろ MM1 型の方が均一性が低い。これは、MM1 のファイバを伝搬する光の横モードは LP_{02} または LP_{21} のいずれ

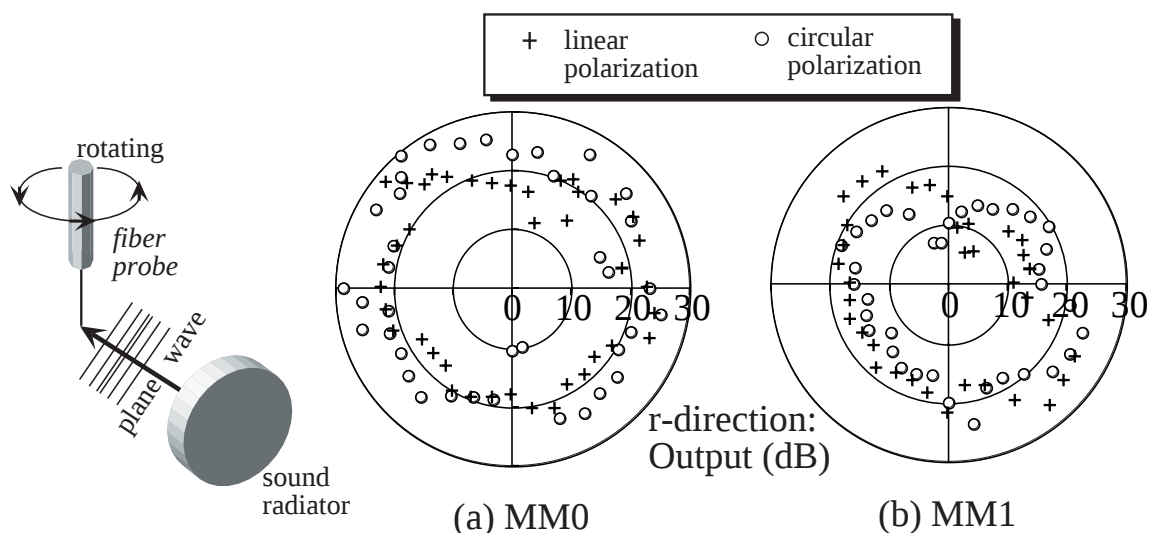


Fig. 4.15 提案したプローブの周方向指向性

かであるので、横モードの明暗階調がはっきりする MM1 の方が方向依存性を有する結果となったと考えられる。だが、偏光パターンを変化させたときの感度分布の変化はさほど生じていないのが気になる。一方で、端面無処理の MM0 及び MM1 ファイバの片端に光を入射し、もう一方から光を出射させ、偏光パターンを変化させながら横モードの様子を観測すると、大きな変化はなかった。従って、周方向の音圧感度分布は偏光パターンよりもむしろ横モードのモード・パターンに強く依存するものと推測される。確かに、モード・パターンに応じてキャビティ伝搬光の軌跡 (path) が変わることからも理解できる。

4.5 まとめ

本章では、まず光キャビティの反射率波長特性を実験し、ファブリペロ共振を確認した。また、幾つかの高周波音場の測定例を示し、従来型ファイバプローブと比べての感度向上、十分な空間分解能が得られていることを示した。一方、直線性、周波数特性を理論と実験の両側面から検討し、第3章での FEM やファブリペロ方程式の応用による解析手法は妥当であることを証明して、これら特性の設計指針を打ち出した。最後に、音圧感度の方向依存性は偏光パターンではなく横モードが支配的であること、本プローブを無指向性にするには、ファイバ伝搬光が LP_{01} mode (基本モード) にしなくてはならないことを示した。

第5章

感度校正法

5.1 はじめに

本プローブによる実用的な計測を目指し、長時間にわたる使用や長い年月を隔てた上でも対応できる校正方法を提案する。第3章で述べた解析的手法は、プローブ使用中の環境変化や年月に伴う老朽化など、現実的な問題には対応し切れてない。また、音圧感度はキャビティ反射率の光波長特性に強く依存するため、温度変化、光学系の振動等の外乱による特性変動に大きく影響してしまう。このような、いわば動作波長ドリフトの処理方法として、光源波長を振動させ、その変調信号を観測しながら音響出力との比をとり校正する。本章では、この校正方法の妥当性を実験的に検証し、絶対感度を求めるための計算方法を導出した。

5.2 絶対感度校正法

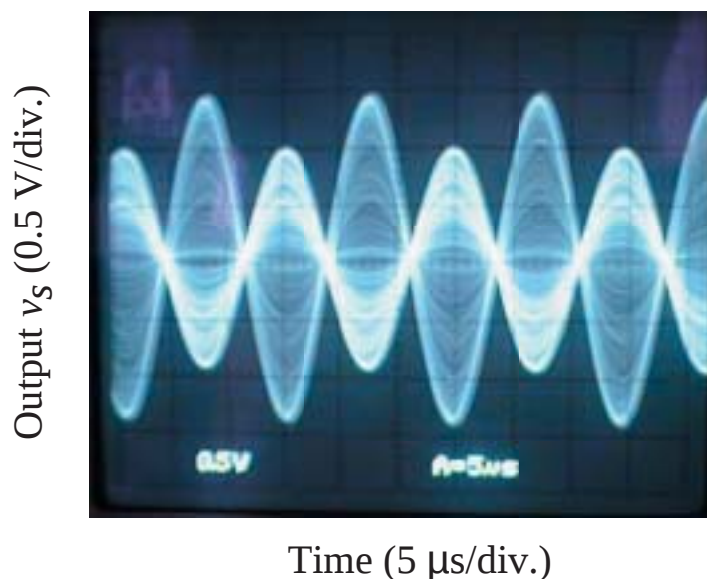


Fig. 5.1 出力波形 v_s

本方式の最大の欠点は、実験環境によっては Fig. 5.1 のように出力が揺らいでしまうこと

である。重ね書きされた出力波形をよく見ると、振幅が複数でかつ互いに位相が π 異なる一対の波形が存在する様子がわかる。この現象は、Fig. 4.4 で示したキャビティ波長特性 (p. 24) の共振スローブ部における動作点の位置により音圧感度が異なること、動作点が共振ディップの左側スローブと右側スローブにある時では互いに位相が 180 度の差が生じることから説明できる。共振ディップがシフト変動する原因だが、光学系の振動やセンサ・キャビティの温度変化などが考えられる。例えば、キャビティの温度膨張率 ($1/L \cdot dL/dT = 210 \times 10^{-6} \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$) を用いて見積もると、共振ディップは $0.2 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ の割合でシフトする。 1°C の変化がちょうど共振ディップ 1 本分の波長幅に相当するので、動作波長はディップ周辺を行き来してしまっていることが考えられる。次節では、出力安定化、定量測定を行うための計測システム考案、校正のための計算法確立について行う。

5.2.1 感度校正システムの原理

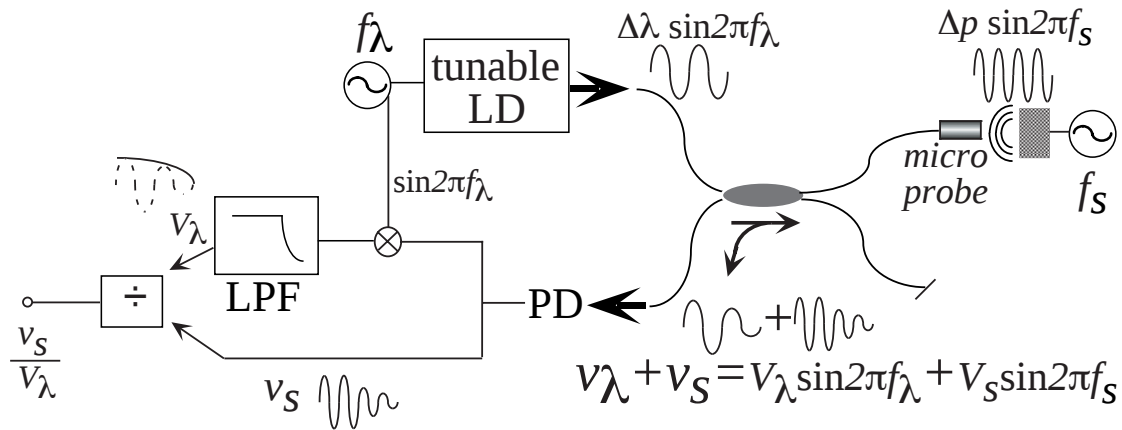


Fig. 5.2 音圧感度校正の原理; PD, photo detector; LPF, low-pass filter.

Fig. 5.2 に示すようなシステムを提案する。まず、音場測定時に入射光の波長を音波と大幅に異なる周波数で振動させる。キャビティ歪みと波長の変化は、いずれもキャビティ光路長変化に相当し、また、音圧に対するキャビティ歪みは再現性が良く、長期安定しているため、波長変調信号 v_λ を参照して音響信号 v_s を校正する。この波長変調信号を帰還させ、積分器及び差動増幅器を介すと動作波長を常時ロックできるが^{35)–37)}、今回は波長変調信号と、音響信号の比を演算し、校正するシステムを試作する。

まず始めに、波長変調信号を絶対音圧 Δp に校正する計算法について検討する。式 (3.1)(p.

8) は以下のように変形できる。

$$\Delta p = \frac{\Delta G_R}{\frac{\Delta(nL)}{\Delta p} \frac{\Delta G_R}{\Delta(nL)}} \quad (5.1)$$

分母にある音圧に対する光路長変化 $\Delta(nL)/\Delta p$ は、キャビティ材料で決まる不変の定数だが、光路長変化に対する反射率変化 $\Delta G_R/\Delta(nL)$ は動作波長ドリフトにより変動する。一方、式 (2.1)(p. 7) を光波長 λ について微分すると、式 (3.4)(p. 10) より以下の関係式が導出される。

$$\frac{dG_R}{d\lambda} = \frac{nL}{\lambda} \frac{dG_R}{d(nL)} \quad (5.2)$$

波長変調量 $\Delta\lambda$ と波長変調信号 v_λ を用いて式 (5.2) を表すと以下のようになる。

$$\frac{v_\lambda}{\alpha\Delta\lambda} = \frac{nL}{\lambda} \frac{\Delta G_R}{\Delta(nL)} \quad (5.3)$$

ここで、 α は、 $v_\lambda = \alpha\Delta G_R$ を満たす光-電気変換係数 (PD により異なる) とする。音響信号 v_s は、 $v_s = \alpha\Delta G_R$ なので、式 (5.1) は結局、

$$\Delta p = \frac{v_s}{v_\lambda} \left(\frac{\Delta(nL)}{\Delta p} \right)^{-1} \frac{nL\Delta\lambda}{\lambda} \quad (5.4)$$

となる。

5.2.2 感度校正システムの実装

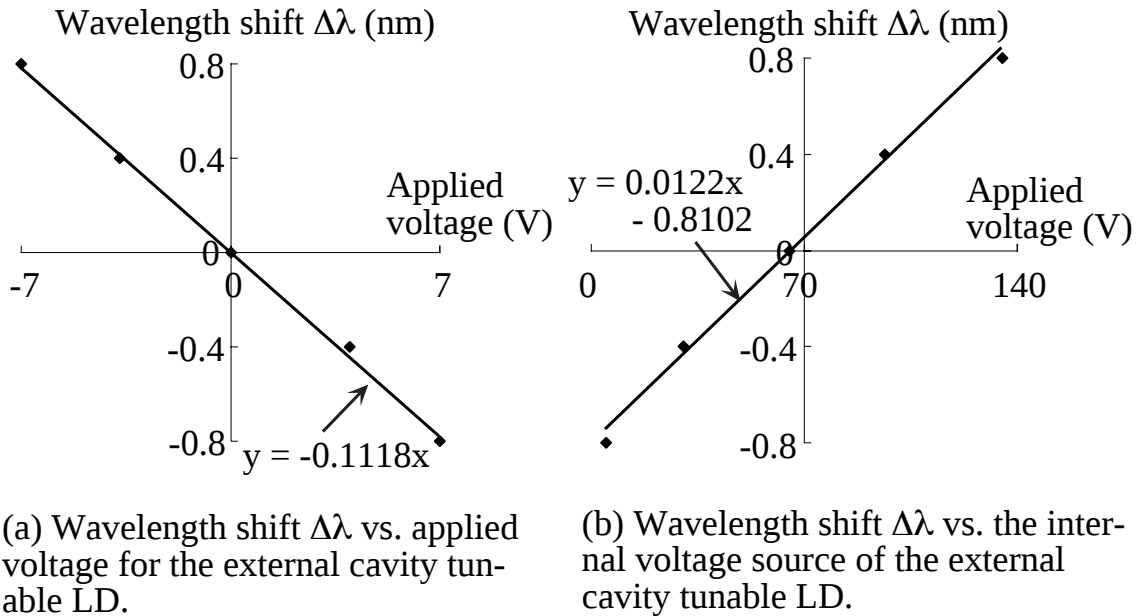


Fig. 5.3 外部共振器に印加する電圧に対する光波長シフト量

本システムで校正するには、式 (5.4) 内にある $\Delta\lambda$ を求めることが必要である。使用する外部共振器型波長可変レーザー (*Environmental Optical Sensors, Inc.*; 2010) には外部共振器に圧電素子が装備されており、その圧電素子に交流または直流電圧を印加すると発振波長が変化する。まず、本装置の電圧に対する波長シフト量を予め実験により調べる。実験結果を Fig. 5.3(a) に示す。これより、例えば 100 mV_{pp} で外部共振器を駆動すると $\Delta\lambda=11.18$ pm となることがわかる。また、この波長可変レーザーは、波長可変電源を内蔵している。これは変調出来ないで直流的な波長シフトしか得られないが、参考として Fig. 5.3(b) に示す。Fig. 5.4 は、今回の実験系の全体図である。光源には前述の波長可変レーザーを用いる。波長変調周波数

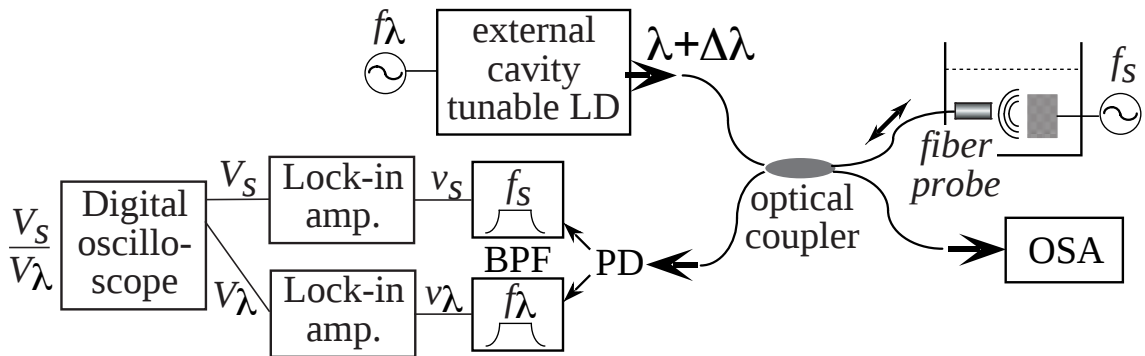


Fig. 5.4 感度校正システムの構成案 PD, photo diode; OSA, optical spectrum analyzer; BPF, band-pass filter.

$f_\lambda=900$ Hz、波長変調振幅 $\Delta\lambda=11.2$ pm とし、音波発振器は周波数 $f_s=18$ kHz、音圧 $\Delta p=0.5$ MPa_{app} (プローブ付近) になるよう駆動した。PD からの電気信号は、二つの周波数成分 f_s, f_λ が重畳された信号になるが、電気フィルターにより分離した。分離後ロックイン・アンプを通さずに得られた二つの時間波形 v_s, v_λ を、Fig. 5.5 に示す。両者の振幅の揺らぐ時期、揺らぐ時の強度はほぼ一致しており、本校正法の実現可能性が見出せる。時折音響信号 v_s で顕著な揺らぎが観測されることもある。これは揺らぎが f_λ よりも高速であり、十分な時間分解能が得られたためと考えられる。これらの信号を直流化せずに、直接デジタルオシロスコープのサンプリング点毎に割り算することも試みたが、得られた出力信号 (v_s/v_λ) はゼロ割を起こしかえて不安定になった。

次に、 v_s, v_λ をロックイン・アンプ (*NF Electronic Instruments: 5610B*) を介して直流出力 V_s, V_λ に変換し、その出力をデジタル・オシロスコープ (*LeCroy: 9304A*) で表示及び記録、演算させた。波長変調振幅 $\Delta\lambda$ 及びロックインアンプの時定数 τ は、筆者が実験に使用した測定器、及び測定環境では $\Delta\lambda=2.24$ pm, $\tau=100$ ms が最適であることが経験的にわかり、そのよう

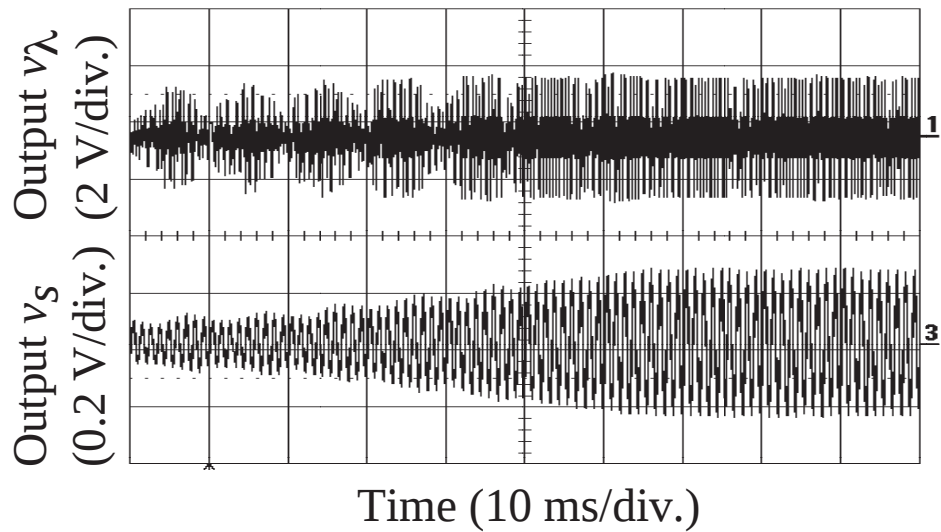
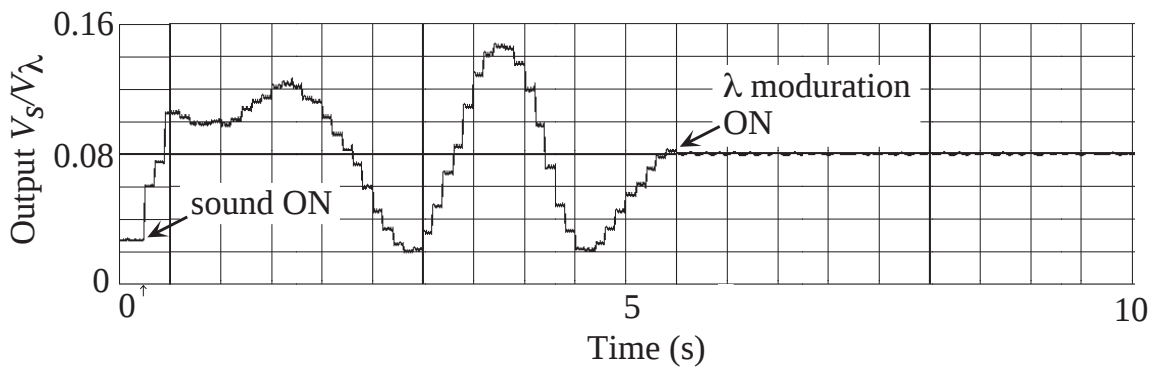
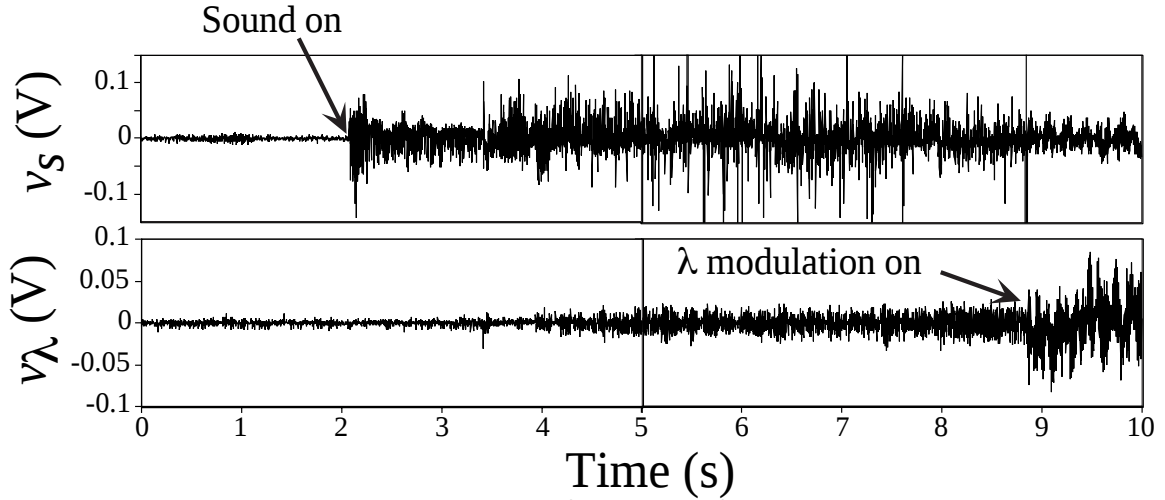
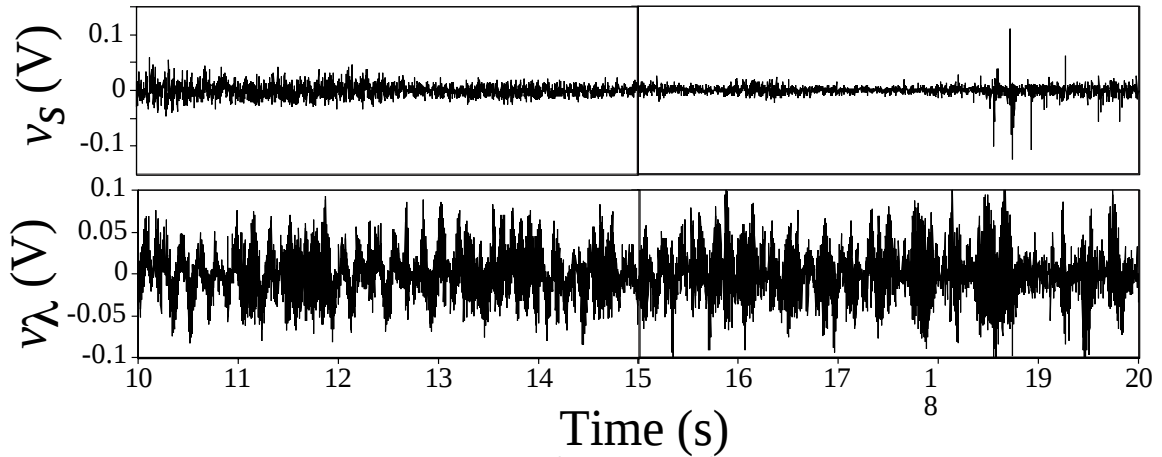
Fig. 5.5 音響信号 v_s と波長変調信号 v_λ 、掃引速度 100 ms

Fig. 5.6 感度校正システムによるプローブ出力

に設定した。校正システムの効果を確認するため、音場を ON にしてから約 5 秒後に波長変調（校正システム）をスタートさせた。その時の出力 V_s/V_λ を Fig. 5.6 に示す。波長変調が OFF の時 ($0 < t \text{ (s)} < 5.5$) 出力 V_s/V_λ にはシャギーが見られる。これは τ によるもので、100 ms の幅となっている。

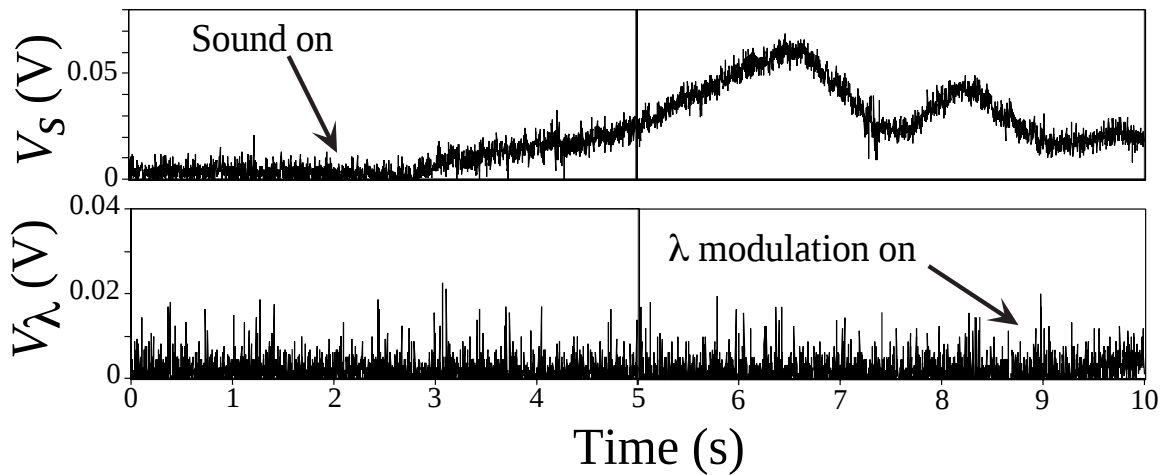
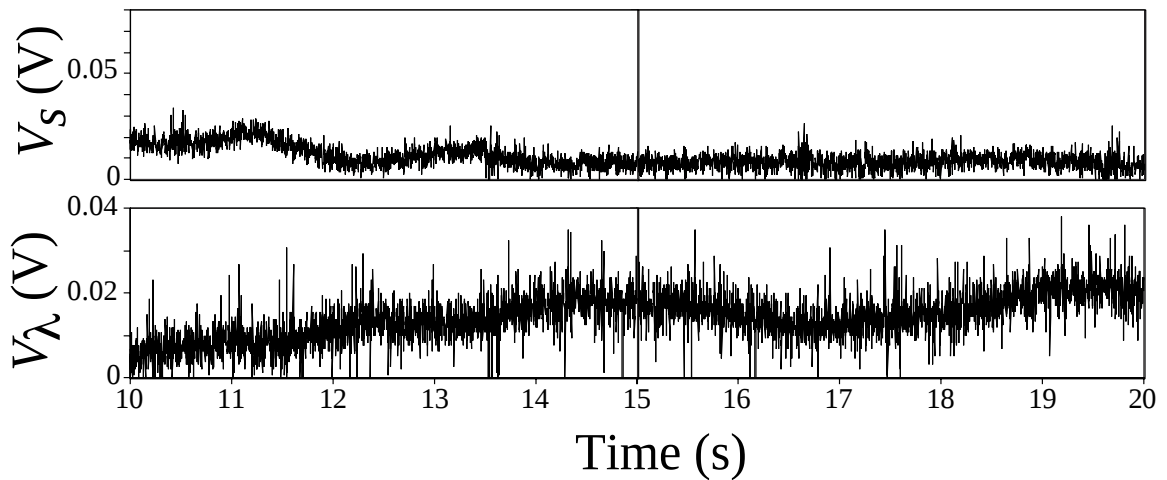
以下の実験は τ を最速の 1 ms で、 $\Delta\lambda$ を最長の 11.18 pm で行った場合であるが、参考として報告する。まず Fig. 5.7 は、直流変換前の信号 v_s, v_λ について同時に記録した結果である。デジタルオシロスコープのトリガ方法はオートロール・モードとし、掃引速度は 2 s/div. (20 秒/掃引) と設定した。校正システムの効果を確認するため、最初のトリガを掛けてから約 2 秒後に音場を ON にし、さらに約 7 秒後に波長変調をスタートさせた。結果をみると、波長変調を ON にすると音響信号 v_s の出力が小さくなるという問題が生じている。これは、時折 v_s と

(a) Output v_s , v_λ as a function of time ($0 < t < 10$).(b) Output v_s , v_λ as a function of time ($10 < t < 20$).Fig. 5.7 音響信号 v_s と波長変調信号 v_λ 、掃引速度 20 s

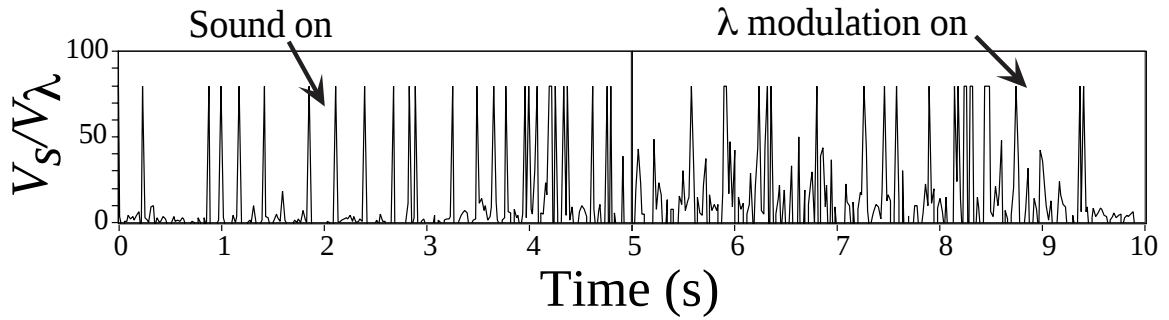
v_λ が同相になる場合に起きる現象で、原理的に除去不能である。従って、波長変調振幅 $\Delta\lambda$ は S/N 比が 1 になる程度まで極力小さくする必要があることがこの結果からわかる。

次に、これらの信号を位相検波して得た V_s , V_λ の測定結果を Fig. 5.8 に示す。Fig. 5.8 は前述 Fig. 5.7 の出力絶対値の包絡線となるはずだが、必ずしもそうではない。従い、 V_s , V_λ の出力は追従性が悪い、すなわち時間分解能が低い傾向がある。これは位相検波器の時定数の設定により高くすることが出来るので、本実験では最短の 1 ms で行ったが、さらに高速の揺らぎを含むようである¹。しかし、時定数を小さくし過ぎると平均化されなくなり出力が不安定になる

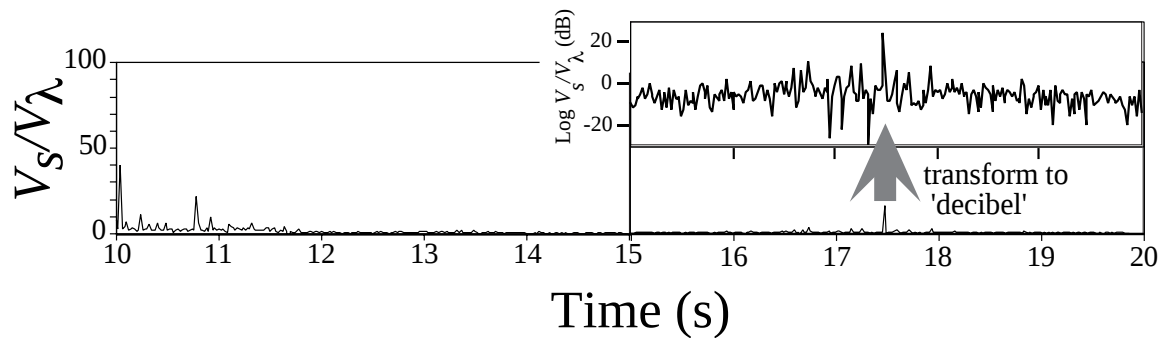
¹位相検波器の時定数 τ とは、 $\Delta f = 1/\tau$ を満たすバンド幅 Δf 、中心周波数 f_{ref} のバンドパスフィルター (BPF) に相当する。従って、この場合バンド幅 1 kHz、中心周波数 0.9 kHz (f_λ) 及び 18 kHz (f_s) の BPF と同等である。

(a) Output V_s , V_λ as a function of time ($0 < t < 10$).(b) Output V_s , V_λ as a function of time ($10 < t < 20$).Fig. 5.8 音響信号のロックイン出力 V_s と波長変調信号のロックイン出力 V_λ

ので、測定環境によりそれぞれ最適な値を検討する必要がある。このように揺らぎは広範囲の周波数成分を含むが、特に除去が必要な大振幅の揺らぎはさほど高速ではない。従い、大振幅の揺らぎに関しては前述の帰還回路で追従し、動作点を安定化させることで対処できる。次に、この V_s , V_λ をデジタルオシロスコープにより割り算させた出力 V_s/V_λ の時間経過による変化を示す (Fig. 5.9)。波長変調が ON と同時に揺らぎが抑制されている様子がよくわかる。抑制後の出力は抑制前の出力に比べ小さいので、15 秒から 20 秒の間はデシベル表示を用いてズーム・アップしておく。これを見ると、17–18 秒付近で不安定な時期もあったが、全体的には良く安定している。標準偏差は $\pm 12\%$ であった。校正後の出力平均値と前節の式 (5.4) を用いて絶対音圧を校正すると $0.44 \text{ MPa}_{\text{pp}}$ であることがわかった。これは、参照ハイドロフォン (*BE&K*: 8103)



(a) Output V_S/V_λ as a function of time ($0 < t < 10$).



(b) Output V_S/V_λ as a function of time ($10 < t < 20$).

Fig. 5.9 感度校正システムによるプローブ出力

による値と誤差 3%で一致している。

5.3 まとめ

本節では、外乱により音圧感度がドリフトした場合でも自動的に校正できる測定系を提案した。参照信号には、光波長変調信号を用いた。本システムによりいかなる環境下においても、また長期の使用や劣化に対しても校正することができるので、実用的なシステムが構築できたと言える。さらに容易に使用できるシステムにするには校正回路を帰還系にして、常時同一の共振ディップにロックさせるのが望ましいが、これは今後の課題としたい。

第6章

微小プローブのアレイ化

6.1 はじめに

実際の高周波音場の応用では、強力衝撃波を用いるなど、音場が過渡的である場合が多い。また、音場のエネルギー・フローを可視化する手法として音響インテンシティ計測が一般的である^{38]}。しかし、インテンシティの導出式には高次の微分係数を含み、多点の音圧・位相のデータが必要になるので、高周波に関してはセンサの性能が不十分であったことから現在までのところ報告例が少ない。そこで筆者らは、瞬時多点計測の実現のためには、センサ素子のアレイ化が最も有効と考えた。センサアレイ化の信号処理方法は、大別して時間分割多重方式 (TDM)^{39]}、波長多重方式 (WDM)^{40]} の2方式があるが、高速可能性、現在の設備、光素子群の現状を考え、さらに今まで会得した技術が再利用できることから筆者らは波長多重方式 (WDM) を採用した。本章では、アレイ型センサの構造提案と試作を行ったので報告する。

6.2 アレイの構造と原理

6.2.1 動作原理

今回提案するアレイ型微小音場プローブを Fig. 6.1 に示す。2×4 光ファイバ・スターカップラの2ポート側に波長可変光源及び光検出器が、4ポート側にセンサ素子(×3)と波長及び強度観測用光スペクトラムアナライザが接続されている。光源からの光はスターカップラにより4分割され、センサ素子からの戻り光 I は全て一つの光検出器で受ける。従って、この戻り光強度はある波長における各センサ素子の反射率を総和したものになる。Fig. 6.2(a) で示すように、光共振波長 λ_r は、それぞれのキャビティで異なるようキャビティ長 L を設計する。入射波長 λ があるセンサ素子の λ_r 付近である場合、そのセンサ素子の音圧感度は高い。従って、波長 λ をスイープすると、それぞれのセンサ素子から得られる音波信号を切り替えることが出来る。ただし、ファブリペロ共振はいくつものピークが生じるので、ある波長ではピークが重なりキャビティが独立して動作しないことも有り得る。任意の二つのピーク間隔 $\Delta\lambda_r$ はキャビティ長 L と使用する波長帯により異なるが、例えば $L=100\text{ }\mu\text{m}$ 、 $\lambda=783\text{ nm}$ の場合、式 (4.1) より

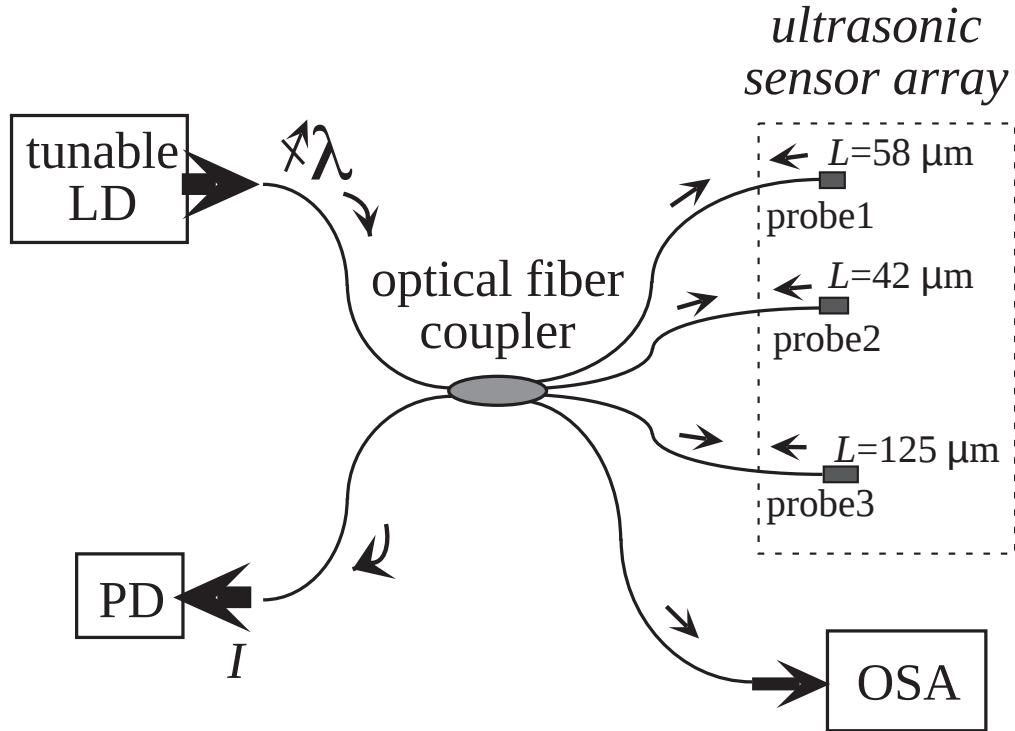


Fig. 6.1 提案した微小プローブ・アレイの構造

$\Delta\lambda_r$ は約 2.2 nm である。これより、 λ_r を 2 nm 以下の誤差で設計するためには、 L の設計を 0.5 nm の精度で行わなくてはならない。これは、光学顕微鏡で観測しながら L を調整する現在の技術では困難であるので、別の製作方法、例えばキャビティを多層膜にして共振ピークを単一にする構造などを検討しなくてはならない。従い、今回の試作では 10 素子以上の大規模なアレイ化は断念した。ピーク波長が重ならないようにする解決策として、共振波長を設計する際に以下のような工夫をした (Fig. 6.2(b) 参照)。あるセンサ素子のディップ間隔 $\Delta\lambda_{r1}$ に、二つ目のセンサ素子の二つのディップを挿入できる位、十分にキャビティ長 L を長くする (L が大きくなるほど $\Delta\lambda_{r1}$ が小さくなる)。そして、三つ目のセンサ素子の L は二つ目のセンサのより更に長くし、同様に二つのピークが挿入できるようにする。すなわち、三つのキャビティ・ディップ幅を $\Delta\lambda_{wi}$ とすると、 $\Delta\lambda_{r1} - \Delta\lambda_{w1} < \Delta\lambda_{r2} - \Delta\lambda_{w2} < \Delta\lambda_{r3} - \Delta\lambda_{w3}$ の関係が成立するように三つのセンサ素子のキャビティ長を設計する。これは、ある光波長で、二つのセンサ素子によるピーク同士がコンフリクトしたときに、その両隣のピークは絶対にコンフリクトしない、つまり信号分割が行える、という考えの基に設計している。このような検討を経て、アレイ試作機のキャビティ長はそれぞれ 66, 100, 132 μm になるよう製作することにした。

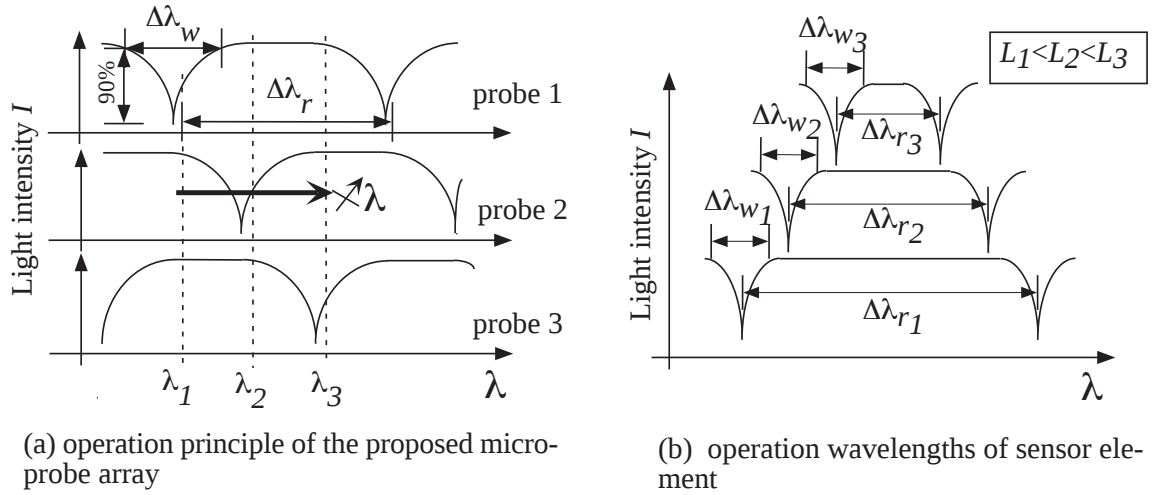


Fig. 6.2 提案した微小プローブ・アレイの原理と設計指針

6.2.2 最大素子数の検討

本節では、提案した微小音場プローブアレイの理論最大素子数を検討したい。まず、あるセンサ素子 i に対するディップ間隔を $\Delta\lambda_{ri}$ 、ディップ幅を $\Delta\lambda_{wi}$ とする。 $\Delta\lambda_{wi}$ はキャビティ反射率 G_R が波高値 Δh の $9/10$ である時のディップ幅とする。センサ素子 2 の共振波長を $\Delta\lambda_{w1}$ だけずれるよう L_2 を決め、センサ素子 3, 4, ..., $N+1$ に対しても、同様に決めていくと、ついには $N+1$ 番目のセンサの共振波長がセンサ素子 1 の隣の共振波長とオーバーラップしてしまう。ファブリペロ共振は多数のディップを生じるので、これが素子数の上限となる。従って、最大素子数 N は以下のように表される。

$$\sum_{i=1}^N A_i < 1, \quad A_i = \frac{\Delta\lambda_{wi}}{\Delta\lambda_{ri}} \quad (6.1)$$

ここで、 $\delta = 2\pi nL/\lambda$ とすると、波高値 $\Delta h (= G_R|_{\delta=0.5\pi} - G_R|_{\delta=0})$ は、式 (2.1)(p. 7) によって以下のように導出される。

$$\Delta h = \frac{4\sqrt{R}G_s(1-R)(1-G_s^2)}{(R-G_s^2)^2} \quad (6.2)$$

$G_R=h_9 (= h_0 + 9\Delta h/10)$ である時、 δ は以下のように求まる。

$$\delta|_{G_R=h_9} = \frac{m\pi}{2} \pm \sin^{-1} \sqrt{\frac{9}{10+F}} \quad (6.3)$$

ここで、 m は整数で、 F はフィネス (p. 7) である。また、ディップ幅に相当する $\Delta\delta$ は、以下のように表すことが出来る。

$$\Delta\delta = 2(\delta|_{G_R=h_9} - \delta|_{G_R=h_0})$$

$$= 2 \sin^{-1} \sqrt{\frac{9}{10 + 4F}} \quad (6.4)$$

ところで、

$$\Delta\lambda_{wi} = \frac{\Delta\delta}{2\pi n L_i + \lambda_{ri} \Delta\delta} \lambda_{ri}^2 \quad (6.5)$$

であるので、 $\Delta\lambda_{wi}$ は、式 (6.4)、(6.5) から求めることが出来る。一方、 $\Delta\lambda_{ri}$ は、良く知られた以下の式で表すことが出来る。

$$\Delta\lambda_{ri} \approx \frac{\lambda_{ri}^2}{2nL_i} \quad (6.6)$$

以上の検討結果から最大素子数 N は、 $R=0.9$, $G_s=0.93$, $n=1.55$, $L_i=100\sim100.42 \mu\text{m}$, $\lambda_{ri}=784.00\sim785.64 \text{ nm}$ の時 $N \leq 8$ となる。しかし、この値は L_i を $0.06 \mu\text{m}$ 刻みで長さを変えて製作することを想定しているが、現実的には困難である。そういった理由から、6.1 節で説明したような設計指針を実行した。この方法では、 $N \leq 4$ となる。従って、前にも触れたが、*Fabry-Perot* 共振のような多数のピーク（ディップ）が生じる干渉系ではなく、単一ピークに抑えることが出来る干渉系が大規模なアレイ化には必要不可欠であると思われる。

6.3 アレイによる多点計測

6.3.1 波長多重検出の確認

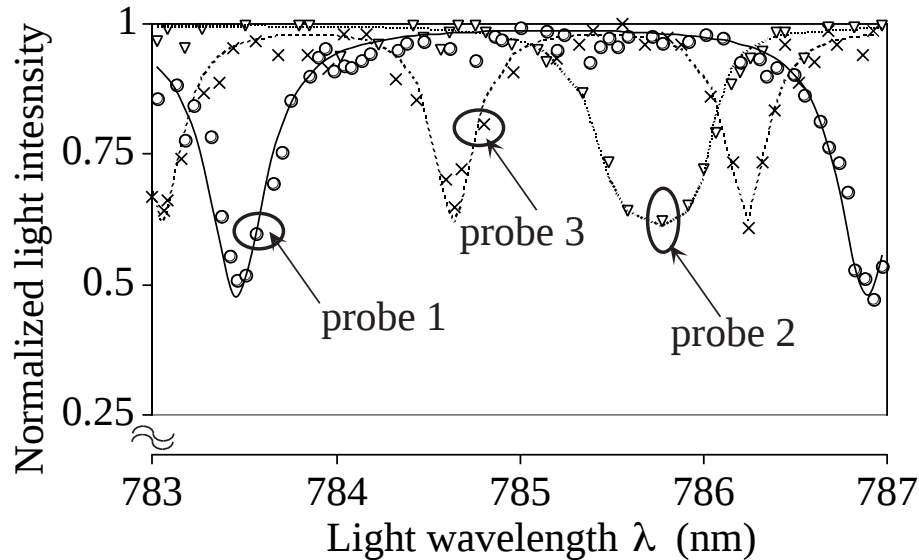


Fig. 6.3 光源波長 λ を掃引した時の3点アレイ素子音圧感度変化；曲線、計算値；プロット点、実測値

最初に、本アレイ型センサの波長多重 (WDM) 検出を確認するために二つの実験を行う。一つは、センサ素子 $\times 3$ それぞれの反射率波長特性であり、もう一つは音圧感度の波長特性である。まず前者の実験は、Fig. 6.1 のセットアップを変更して行った。PD で受光される戻り光 I は、全てのキャビティ反射光量の和になっており、センサ素子ごとに分離・測定できないため、試験するキャビティを除く他のキャビティはファイバの途中を切断して除去し、切断されたファイバの端面をマッチングジェルに浸けた。入射波長をスイープし、そのキャビティの反射光量を測定した後、今度はそのキャビティを除去し、二つ目のキャビティを接続する。ファイバ同士の接続には、専用の V 溝ベアファイバ・コネクタ (Anritsu corp.; MA9014A) を用いた。Fig. 6.3 には probe 1-3 の測定結果を示す。プロット点が実測値、曲線が式 (2.1) による理論値であるが、全てのセンサ素子に対して両者は良く一致している。

次に、音圧感度の波長特性を測定する。この実験では、三つのセンサ素子全てを光ファイバ・

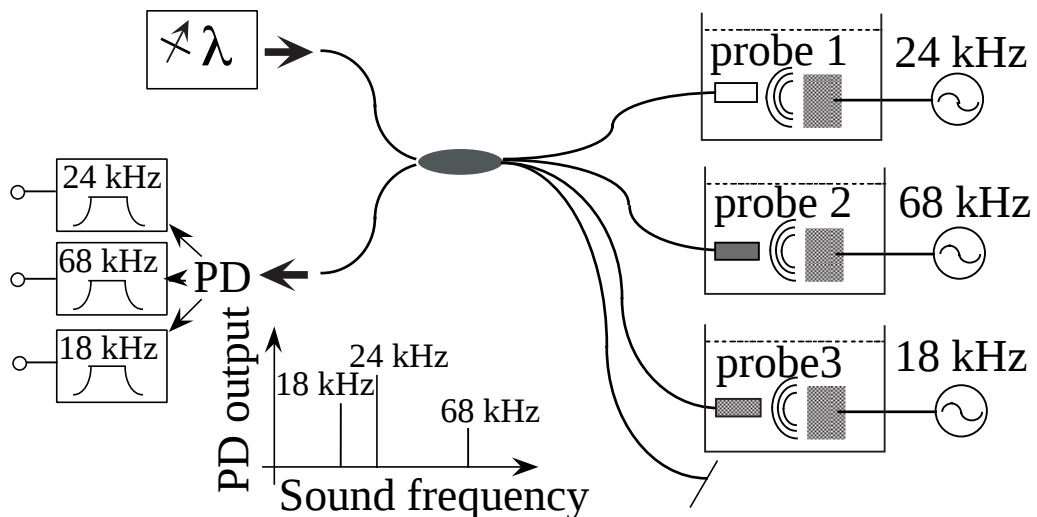


Fig. 6.4 3点アレイ素子の音圧感度測定用セットアップ

カップラに接続して測定する。Fig. 6.4 に示すように、三つのセンサ素子をそれぞれ周波数の違う (64, 24, 18 kHz)、音響的に分離された音場に浸け、入射波長をスイープしながら音波信号を検出する。得られる音波信号は、三つのセンサ素子からの音波信号が混合しているが、電気フィルターによりそれぞれの周波数成分に分離し、入射波長 λ に対する各センサ素子の音圧感度を求める。4.4.1 節 (p. 24) で述べたように、本プローブの音圧感度はキャビティ反射特性の共振ディップ・スロープ部に比例する。従って、一つのディップに対して、音圧感度が高くなるピークは二つ生じる。例えば、Fig. 6.3 の結果では probe 1 には 783.5 nm 付近に共振ディップがあるが、Fig. 6.5 においても 785.2 及び 785.5 nm 付近にピークがある。そこで、音圧感度の波長

特性・実測結果と、Fig. 6.3 の理論曲線の微分係数（式 (3.4)）を合わせて Fig. 6.5 に示した。結果から、センサ素子 $\times 3$ の反射率波長特性と音圧感度波長特性は全て対応がとれていることがわかる。また、プローブ 1-3 はそれぞれ、786.63 nm, 785.86 nm, 786.24 nm 前後で他の素子の感度を抑圧しており、これらの入射波長を用いることにより各センサ素子の切り替えが行えることがわかる。参考に、入射波長 $\lambda=786.63$ nm, 785.86 nm でのプローブ 1, 2 の出力波形を Fig. 6.6 に示す。これらの結果をみると、クロストークは最大で 10% 程度生じている。ファイ

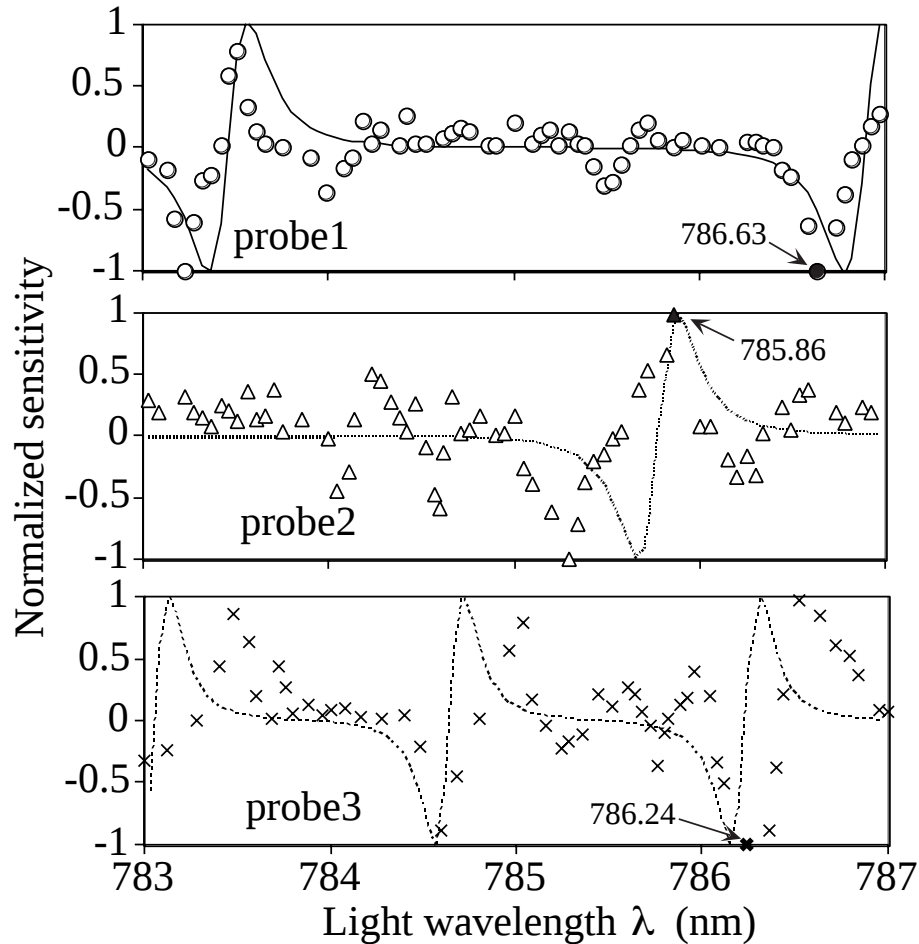


Fig. 6.5 光源波長 λ を掃引した時の 3 点アレイ素子音圧感度変化；曲線、計算値；プロット点、実測値

バの端面、ファイバカップラの分波部などにおいての僅かな反射は光干渉を生じ、共振が生じると、ピーク幅が狭くても（または波高値が低くても）スロープが急であれば大きな感度となってしまう。これが、クロストークの主な原因として考えられるが、対策としては

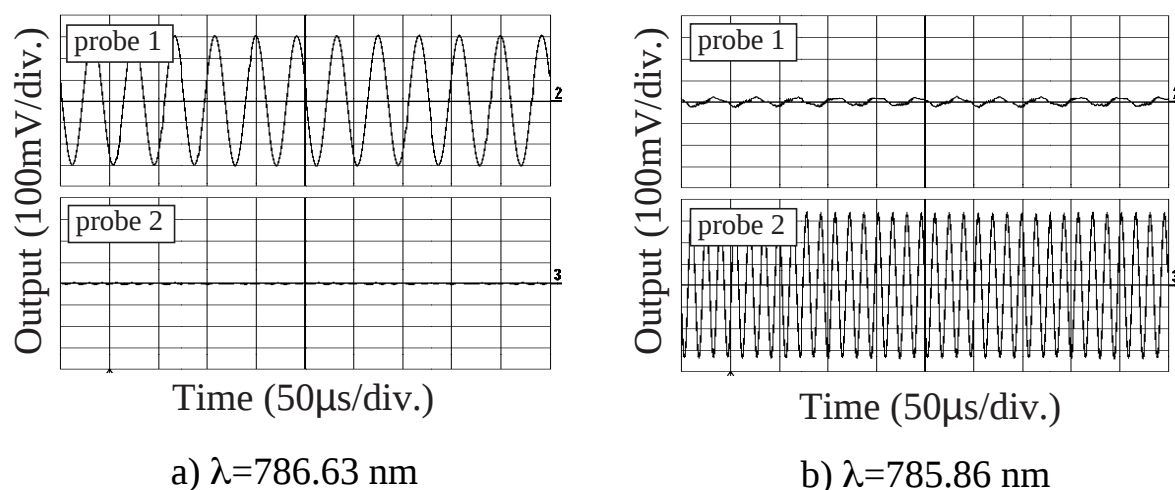


Fig. 6.6 アレイ素子で得られた出力波形

Table 6.1 プローブ 1～3 の光共振波長と音圧感度が高くなる光波長

	probe 1		probe 2	probe 3		
resonance wavelength λ_r (nm)	783.46	786.92	785.77	783.06	784.64	786.24
wavelength with high sensitivity (nm); measured (theory)	783.22 (783.37)	<u>786.63</u> (786.78)	785.29 (785.66)		784.60 (784.60)	<u>786.24</u> (786.12)
	783.51 (783.56)		<u>785.86</u> (785.87)	783.48 (783.12)	785.04 (784.68)	786.52 (786.36)

- 光学系を出来るだけ簡素にする
- キャビティ部以外での異常反射を極力減らす

などが考えられる。しかし、現在の構造でもかなり光学系はシンプルといえるので、異常反射を削減するのが先決かと思われる。しかし、反射を減らすには限度があるので、ファイバの入射ポートを球面研磨にするなどして、異常干渉を軽減する工夫も考えられる。

最後に、Fig. 6.3 と Fig. 6.5 の対応を、Table 6.1 に表としてまとめた。共振波長の誤差は、最大 0.05% であった。

6.3.2 高周波多点計測

本アレイ型プローブの音響信号の光波長多重・分割を試作実験により前節で確認した。しかし、測定した音場周波数がそれぞれのセンサ素子で異なっていた。従って、同一周波数ではどうか、位相情報も得られるか、また、ターゲットの MHz 音場でも同様の動作が得られるか、などの調査すべき課題が残されている。本節では、これらの課題を同時に検証する音場計測実験を行う。

まず、音源は直径 30 mm、公称焦点距離 38 mm の円盤形トランスデューサを使用し、共振

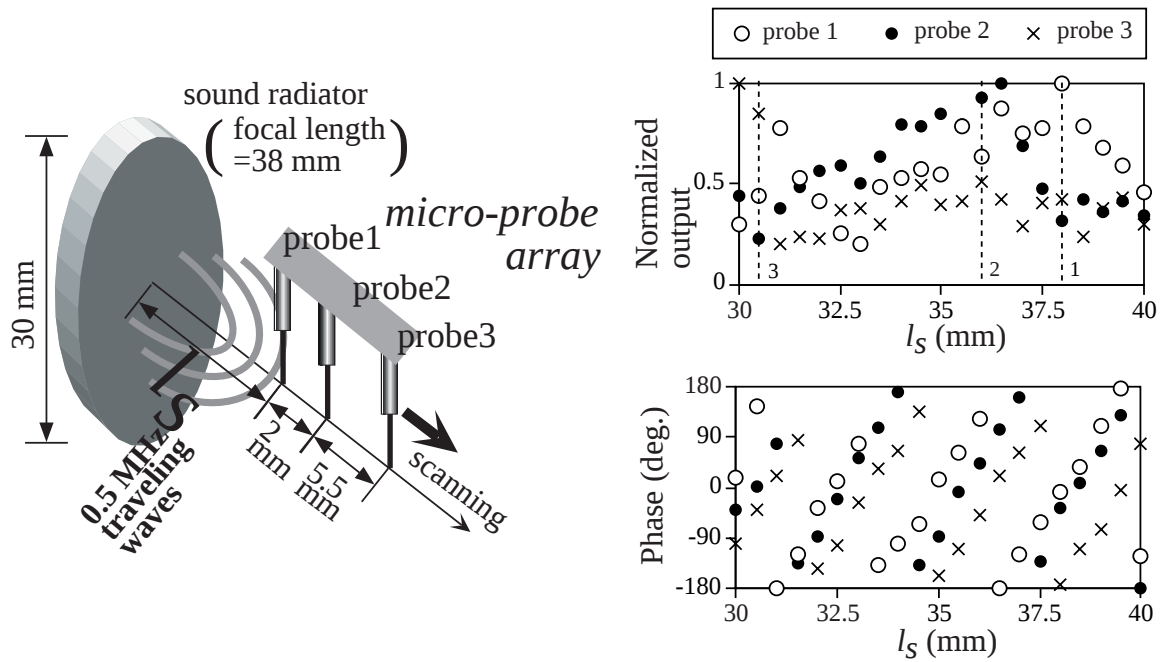


Fig. 6.7 提案したアレイプローブによる高周波進行波音場計測 ($f_s=0.5$ MHz)

周波数 0.5 MHz で連続駆動する。広い水槽内で駆動すると、音場の減衰に伴い定在波に代わり進行波が生じてくる。この進行波の位相シフトを、本アレイ・プローブにより測定する。Fig. 6.7 の挿し絵に示すとおり、円盤形音源の軸に沿って 3 本のセンサ素子を配列し、軸方向にスキャンした。センサ素子間隔は、probe 1-2, probe 2-3 それぞれ、2.0, 5.5 mm とした。このセンサ間隔について、少し検討してみる。音響インテンシティ法では、このセンサ間隔は、誤差を 1% 以下にするには下記の条件が成立することが知られている³⁸⁾。

$$k_s \Delta_c \leq 0.8 \quad (6.7)$$

ここで、 k_s は周囲媒質中の音波波数、 Δ_c はセンサ間隔である。この式から、本実験では $\Delta_c < 0.382$ mm となるが、このような精巧なアレイ支持具の製作が間に合わなかったため、今

回は前述の間隔で支持する。probe 1 から振動子表面までの距離をここでは l_s と呼ぶと、probe 1-3 の出力振幅、位相は Fig. 6.7 のようになった。また、前節 Table 6.1 の結果を利用し、probe 1-3 の動作光波長はそれぞれ、786.63, 785.86, 786.24 nm とした。まず、振幅についての結果だが、各センサ素子が示すピーク位置（破線で表示）は、センサ間距離に相当したずれが生じている。また、位相の結果については、各位置 l_s で、センサ間距離に相当する位相シフトが見られる。従い、本手法によりこの高周波進行波音場の計測が成功したと考えられる。

6.4 まとめ

光ファイバ微小音場プローブのアレイ化を試み、具体的な構造を考案し、3 素子アレイを試作した。信号処理法としては、WDM 方式を選択し、試作を通じ、提案通りに動作したことを示した。また、理論的な最大素子数を検討し、現在の手法では 8 素子までが限界であることを示した。最後に、0.5 MHz 進行波音場の測定を行い成功した。今後の課題として、高周波音響インテンシティ計測のデモンストレーション、単一光共振のための新たなキャビティ構造の検討、そのキャビティを用いたアレイの大規模化などがあげられる。

第7章

結論

7.1 本研究で得られた成果

本研究では、メガヘルツ超音波を測定するための超小型光ファイバ音場プローブを提案した。また、定量的計測及びセンサの改良のために動作原理の詳細を明らかにした。さらに、測定的高速化、過渡音場及びインテンシティ計測への対応を考え、波長多重 (WDM) 方式を応用し、微小プローブのアレイ化を行った。ここに、本研究で得られた成果を列挙する。

- 光ファイバ先端に微小キャビティを取り付けた構造を持つ、音場プローブを提案した。
- 微小キャビティの具体的な製作方法を考案した。
- 音圧感度、ダイナミックレンジの設計指針を構築するため、本方式の動作原理を明らかにし、幾つかの試作機で求めた実験値との比較検討を行い、解析方法の妥当性を示した。
- その結果から、音圧感度及びダイナミックレンジはファブリペロ共振のフィネスに依存し、キャビティの長さとはーフミラーの反射率により制御出来ることがわかった。また、ファイバにおける伝搬光の横モードがこれらに大きく影響することがわかった。
- 本方式により、0.5 MHz 集束音場の計測を行い、その結果を通じて従来提案されていた光強度変調型プローブ^{13, 14)} に比べ 10 倍以上もの感度向上が実現されたことを実験的に示した。
- 提案した光ファイバプローブは、現在一般に市販されている、ハイドロフォン（圧電高分子型、直径 0.5 mm）よりもさらに高い空間分解能を持つことを実験的に示した。
- 本方式の周波数特性を理論・実験の両側面から検討し、設計指針を構築した。
- 基本波に対する高調波の比を解析し、本手法の直線性を定量的に定式化した。例えば、試作機の一つは、2 MPa 程度の音圧に対し約 10% の第 2 次高調波が生じることを示した。
- 光の波長を振動させ、絶対感度校正を行う手法を提案した。音圧感度をリアルタイムで校正することに成功した。

- 本プローブのアレイ化を実現した。複数のキャビティを異なる共振波長になるよう設計し、波長多重処理により信号を分割した。
- 本アレイプローブの理論的な最大素子数を検討した。その結果、最大素子数は現在のキャビティ構造では8素子が限界であり、素子数を増加させるにはキャビティ構造を改良する必要があることがわかった。

7.2 今後の課題

本研究は、小型光機能素子と波長多重処理の応用により、超音波プローブとそのアレイ化による多点計測が実現された。今後の課題は以下の項目が考えられる。

- 現在のクラッド径と同寸のキャビティでは、数十メガヘルツ (50 MHz 目標) の高周波音場には空間分解能、周波数特性、指向性等の特性に関して対応し切れていない。上限周波数を高くするには、キャビティ径を 10 ミクロンオーダーへ小型化することが必要である。現在、具体的な製作方法を検討中である。
- アレイ化による MHz 超音波音場の高速可視化
周波数 MHz オーダーの音響ホログラフィ、音響インテンシティは現在までのところ計測例が少なく、これが可能になると高周波音場の基礎研究に新たな知見を生み出す。また、音場が過渡的である場合、瞬時に多点計測する必要がある。提案したアレイセンサの現状では、定常音場の二次元計測が限界である。アレイの大規模化、測定的高速化が要求されるが、大規模化のためにはセンシングキャビティを単一波長共振特性にしなくてはならない。そこで、現在キャビティを多層膜構造にすること等を検討中である。また、多点計測高速化のためには、光波長スイープを伴わない測定・処理系の考案が求められる。
- 実用的な光学系への改良
実際の測定現場は、定盤、ホルダーなどの光学機器は用意できないことが多く、光学アライメントを精密にするのも困難な状況である。従って、光源からセンサ、受光系へとハイブリッドに一体化されたシステムが望ましい。近年、光ファイバ網の普及に伴い、使い勝手の良い光コンポーネントが次々と実用化されている。そのような光学系を本計測システムに取り入れると、取り扱いが簡易になるだけでなく、携帯性、測定安定性、量産性などあらゆる改善が見込まれる。

- 絶対感度校正システムのハード化

第 5 章では絶対感度校正の信号処理法を提案した。しかし、音響信号及び参照信号を測定器に内蔵するソフトウェアで校正していたため、高速追従性において十分ではない。また、演算機能付きデジタルオシロスコープなど高価で汎用性が低く、取り扱いも煩雑な測定器が必要となっている。専用の演算回路を作成し、計測システムに内蔵すると実用性が向上すると思われる。

謝辞

本研究を行うにあたり、5年と半年の間、終始懇切丁寧にご指導賜りました、本学精密工学研究所中村健太郎助教授に厚くお礼申し上げたいと思います。また、同学同研究所上羽貞行教授には、的確なご助言とご指導を戴きました。多大なる感謝の意を表したいと思います。

本研究の論文審査並びにご助言を賜りました、本学開発システム工学科上田光宏教授、同学精密工学研究所小山二三夫助教授、同学理工学交流センター高田潤一助教授にお礼申し上げます。また、その他本学物理情報工学専攻教官の方々にも重ねてお礼申し上げます。

本研究を遂行するに当たって有限要素法等、主に計算機のご指導を戴いた小池義和助手及び、主に機械加工の作業等でお世話になりました石井孝明助手に、ここで改めて感謝したいと思います。高橋久徳技官には、事務手続き等の面でお世話になりました。旧中村研究室卒業生及び、上羽・中村研究室卒業生、在校生の皆様には公私共々大変お世話になりました。研究室での5年半の思い出は生涯忘れることは無いでしょう。また、ここで培われた人間関係は、私の一生の宝物にしたいと思います。皆様には、心の底から「ありがとう」と伝えたいです。

最後に、陰ながらいつも私を支えてくれた妻、愛^{めぐみ}に対する感謝の想いを以て幕を閉じたいと思います。

旧中村研究室卒業生の皆様、沢山の楽しい思い出をありがとう。

- 胡俊揮博士（現トーキン（株）勤務）
- 深谷康一郎氏（現日本ビクター（株）勤務）
- 山崎東吾氏（現三菱電機（株）勤務）
- 前田隆行氏（現 JR 東海（株）勤務）
- 長谷川憲氏（現日本テレコム（株）勤務）
- 濱正造氏（現東京ガス（株）勤務）
- 前澤貴之氏（現トヨタ（株）勤務）
- 横尾敦史氏（現三菱電機（株）勤務）
- 真金文雅氏（現デンソー（株））
- 松木逸応氏（現シャープ（株）勤務）
- 小林太郎氏（現松下通工（株）勤務）
- 山内亮氏（現三菱重工業（株）勤務）
- 青木浩二氏（現 NTT（株）勤務）
- 畑中透氏（現 JR 東海（株）勤務）
- Kanadit Chetpattananonondh 氏（タイ国）

上羽・中村研究室卒業生の皆様、大変お世話になりました。

- 森川龍介博士（現防衛庁勤務）
- 里信純博士（現広島大学勤務）
- 赤堀英明氏（現 NTT（株）勤務）
- 藤原信緒氏（現三菱電機（株）勤務）
- 芦村秀人氏（現 JR 東日本（株）勤務）
- 北村清孝博士（現防衛庁勤務）
- 丸山周氏（現 NTT（株）勤務）
- 田村武史氏（現富士電気（株）勤務）
- 鳥居令和氏（現三菱電機（株）勤務）
- 荒牧千恵氏（現松下通工（株）勤務）
- 大谷敬亮氏（現 NHK 勤務）

- 高草木将彦氏（現（株）東芝勤務）
- 錦織英孝氏（現トヨタ（株）勤務）
- 平泉啓氏（現ソニー（株）勤務）
- 松尾英一氏（現 NHK 勤務）
- James R. Friend 博士（米国）
- Lee Tong Gyong 氏（韓国）
- 道畑浩司氏（現北川工業（株）勤務）

上羽・中村研究室在校生の皆様、研究室とご自身の更なる繁栄をお祈りします。

天野隆史君、岡田貴宏君、澤田徹君、高橋大三君、戸田俊太郎君、二村浩司君、前野清元君、今田大祐君、小此木淳史君、小宅麻理子さん、小池俊之君、堺淳君、田口誠君、川井博史君、小杉勉君、羽田浩二君

（学年+あいうえお順）

参考文献

- [1] 例えば、超音波テクノ、日本工業出版, vol. 9, no. 5, pp. 5–8, May 1997.
- [2] T. G. Giallorenzi, J. A. Bucaro and et. al.: *Optical Fiber Sensor Technology*, IEEE J. Quant. Elect., QE-18, no. 4, pp. 626–665, 1982.
- [3] H. Kumazaki, S. Inaba and et. al.: *Temperature Characteristics of Vibrating Type Sensor Using Micromachined Optical Fiber-Tip*, Opt. Rev., vol. 3, no. 2, pp. 135–138, 1996.
- [4] S. Sato, H. Matsubara and et. al.: *Fabrication and fundamental characteristics of fiber optic surface plasmon sensor*, T. IEE Jpn., 117-E, no. 12, pp. 627–632, 1997.
- [5] J. A. Bucaro and H. D. Dardy: *Fiber-optic hydrophone*, J. Acoust. Soc. Am., 62, pp. 1302–1304, 1977.
- [6] J. H. Cole, R. L. Johnson and P. B. Bhuta: *Fiber optic detection of sound*, J. Acoust. Soc. Am., vol. 62, pp. 1136–1138, 1977.
- [7] J. A. Bucaro and E. F. Carome: *Single fiber interferometric acoustic sensor*, Appl. Opt., vol. 13, no. 3, pp. 330–331, 1978.
- [8] J. Jarzynski, R. Hughes, T. R. Hickman and J. A. Bucaro: *Frequency response of interferometric fiber-coil hydrophones*, J. Acoust. Soc. Am., 69(6), pp. 1799–1808, 1981.
- [9] P. Cielo and J. Lapierre: *Fiber-optic ultrasound sensing for the evaluation of materials*, Appl. Opt., vol.21, no. 4, pp. 572–575, Feb. 1982.
- [10] 上羽、生方、その他：ファイバファブリーペロー干渉計を用いたハイドロフォン、日音講論集, pp. 701–702, Mar. 1985.
- [11] 上羽、王、その他：ファブリーペロー干渉を用いた光ファイバ・ハイドロフォン、日音講論集, pp. 845–846, Sep. 1985.
- [12] R. Sato, H. Ishii and et. al.: *Pressure Balancing Structure for Fiber-Optic Flexural Disk Acoustic Sensor*, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 32, pp. 2473–2476, May. 1993.

- [13] J. Stardenraus and W. Eisenmenger: *Fiber-optic probe hydrophone for ultrasonic and shock-wave measurements in water*, Ultrasonics, vol. 31, pp. 267–273, no. 4, 1993.
- [14] K. Nakamura, Y. Uno and K. Iga: *Sound Field Measurements by a Sharply Bent Optical Fiber*, J. Acoust. Soc. Jpn., (E)17, pp. 45–47, Jan. 1996.
- [15] J. N. Field and J. H. Cole: *Fiber microbend acoustic sensor*, Appl. Opt., vol. 19, no. 19, pp. 3265–3267, Oct. 1980.
- [16] N. Takahashi, A. Hirose and S. Takahashi: *Underwater acoustic sensor with Fiber Bragg Grating*, Optical Review, vol. 4, no. 6, Dec. 1997.
- [17] NE Fisher, SF O'Neill and et al.: *Response of in-fiber Bragg Gratings to focused ultrasonic fields*, Proc. of International Conference on 12th Optical Fiber Sensors, OWC12, pp. 190–193, Oct. 1997.
- [18] P. C. Beard and T. N. Mill: *Miniature optical fibre ultrasonic hydrophone using a Fabry-Perot polymer film interferometer*, Electronics Letters, vol. 33, no. 9, Apr. 1997.
- [19] Y. Uno and K. Nakamura: *Fabrication and performance of a Fiber Optic Micro-Probe for Megahertz Ultrasonic Field Measurements*, Inst. Elect. Eng. Jpn., 118-E, pp. 487–492, Nov. 1998.
- [20] 例えば、末松、伊賀：光ファイバ通信入門（改訂3版）、オーム社, ch. 11.4., pp. 242, Nov. 1989.
- [21] Y. Uno and K. Nakamura: *Wavelength-Division-Multiplexing in Fiber Optic Micro-Probe Array for Ultrasonic Field Measurements*, IEICE trans. Electron., (on submitting).
- [22] Kian-Shan Wang, Yoshikazu Takahashi and et. al: *Piezoelectric and Dielectric Properties of Aromatic Polyureas Synthesized by Vapor Deposition Polymerization*, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 34, pp. 1585–1590, Mar. 1995.
- [23] T. Mukai and Y. Yamamoto: *Gain, Frequency Bandwidth, and Saturation Output Power of AlGaAs DH Laser Amplifiers*, IEEE J. Quantum Electron., QE-17, pp. 1028–1034, June 1981.

- [24] Y. Uno and K. Nakamura: *Pressure Sensitivity of a Fiber Optic Micro-Probe for the High-Frequency Ultrasonic Field*, Jpn. J. Appl. Phys, vol. 38, no. 5B, pp. 3120–3123, June 1999.
- [25] Peter Shajenko, James P. Flatley and Mark B. Moffett: *On fiber-ptic hydrophone sensitivity*, J. Acoust. Soc. Am., 64(5), pp. 1286–1288, Nov. 1978.
- [26] H. S. Yadav, D. S. Murty, and et. al.: *Measurement of refractive index of water under high dynamic pressure*, J. Appl. Phys., vol. 44, no. 5, pp. 2197–2200, May 1973.
- [27] 実吉、菊池、能本：超音波技術便覧、日刊工業新聞社, ch. IV-5.17-(i), pp. 1356, 1978.
- [28] 横尾、中村：1ビットデジタル信号でスイッチング駆動されたラウドスピーカーに関する研究、東京工業大学修士論文, pp. 18, Mar. 1997.
- [29] 斉藤、櫛引他：20MHz集束超音波の非線形ひずみ、電子情報通信学会信学技報, pp. 37–44, Nov. 1996.
- [30] 藤田、渡辺：集束焦点近傍の高周波成分の光計測に関する検討、電子情報通信学会信学技報, pp. 45–50, Nov. 1996.
- [31] 柴山、菊池：短円柱型振動子の電気音響学的研究、東北大学博士論文, pp. 41, 1960.
- [32] 江刺：解説：光マイクロマシン、応用物理, vol. 66, no. 1, pp. 9–14, Jan. 1997.
- [33] 三井田：音響工学、昭晃堂, ch. 3, sec. 3.2.4, pp. 64–69, 1987.
- [34] 例えば、川村：電気音響工学概論（十八版）、昭晃堂, ch. 3, sec. 3.3.2, pp. 46, 1988.
- [35] P. G. Cielo: *Fiber optic hydrophone: improved strain configuration and environmental noise protection*, Appl. Opt., vol. 18, no. 17, pp. 2933–2937, Sep. 1979.
- [36] Anthony Dandridge, Alan B. Tveten and Thomas G. Giallorenzi: *Homodyne Demodulation Scheme for Fiber Optic Sensors Using Phase Generated Carrier*, IEEE J. Quant. Elect., QE-18, pp. 1647–1653, Oct. 1982.
- [37] Ribun Onodera and Yukihiro Ishii: *Effect of beat frequency on the measured phase of laser-diode heterodyne interferometry*, Appl. Opt., 35-22, pp. 4355–4360, Aug. 1996.

-
- [38] 例えば、著/F. J. Fany、訳/橘：サウンドインテンシティ -理論と応用- 、 オーム社, May 1998.
- [39] J. P. Dakin, C. A. Wade: *Novel optical fibre hydrophone array using a single laser source and detector*, Electron. Lett., vol. 20, no. 1, pp. 53–54, Jan. 1984.
- [40] K. Tetsumura, N. Takahashi and S. Takahashi: *Experiment on operation of WDM underwater acoustic sensor using Fiber Bragg Grating*, J. Acoust. Soc. Jpn., (E)20, no. 2, pp. 143–145, 1999.
- [41] 池野、木津、その他：光ファイバハイドロフォンによる強力超音波音波の測定、平成8年
秋季日音講論集, 1-9-16, pp. 939–940.
- [42] 例えば、青木、宇野、中村：透過レーザ光の光路差変調を検出する超音波音場の非侵襲光
計測、平成9年春季日本音響学会, 3-1-4, pp. 1099–1100.
- [43] Y. Uno and K. Nakamura: *Characteristics of a Sharply Bent Optical Fiber for Sound
Field Measurements* Proc. 11th Int. Conf. Optical Fiber Sensors, Th5-6, pp. 658–661,
May 1996.

研究業績

• 論文

1. Y. Uno and K. Nakamura "Fabrication and performance of a Fiber Optic Micro-Probe for Megahertz Ultrasonic Field Measurements", Inst. Elect. Eng. Jpn., 118-E, pp. 487-492, Nov. 1998.
2. Y. Uno and K. Nakamura "Pressure Sensitivity of a Fiber Optic Micro-Probe for the High-Frequency Ultrasonic Field", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 38, no. 5B, pp. 3120-3123, May 1999.
3. Y. Hijikata and K. Nakamura "Wavelength-Division-Multiplexing in Fiber Optic Micro-Probe Array for Ultrasonic Field Measurements", IEICE Trans. Electron., (on submitting).

• 研究会・シンポジウム

1. 第19回光波センシング技術研究会: 宇野、中村 "光ファイバプローブによる高周波音場計測 "LST 19-10, pp. 69-74, May 1997.
2. 第18回 Ultrasonic Electronics Symposium: 宇野、中村 "高周波超音波用超小型光ファイバプローブの試作 ", OC5, pp. 211-212, Nov. 1997.
3. 第19回 Ultrasonic Electronics Symposium: 宇野、中村 "高周波超音波用超小型光ファイバプローブの感度解析 ", OB4, pp. 245-246, Nov. 1998.
4. 電気学会マイクロマシン研究会: 中村、宇野、二村 "高周波超音波音場測定のための光ファイバ小型プローブの特性 ", MM-99-17, pp. 23-28, Sep. 1999.

• 国際会議

1. 12th International Conference on Optical Fiber Sensors: Y. Uno and K. Nakamura "Measurements of high-frequency ultrasonic field by a fiber optic micro-probe", OTuD6, pp. 87-90, Oct. 1997.
2. Proc. 1998 IEEE Ultrasonics Symposium: Y. Uno and K. Nakamura "A Fiber Optic Micro-Probe Array with Wavelength-Division-Multiplexing Technique for Ultrasonic Field Measurements", II-2, pp. 1273-1276, Oct. 1998.

• 国内口頭発表

1. 平成8年秋季日本音響学会：宇野、中村 "高周波超音波計測のための小型光ファイバプローブの試作", 1-8-14, pp. 889-890.
2. 平成9年春季応用物理学会：宇野、中村 "高周波超音波音場計測のための小型光ファイバプローブの試作", 28p-NF-11, pp. 1030.
3. 平成9年秋季日本音響学会：宇野、中村 "微小化と特性の実験的検討 –高周波超音波計測のための小型光ファイバプローブの試作 (II)–", 3-9-9, pp.1111-1112.
4. 平成11年秋季日本音響学会：土方、二村、中村 "微小プローブの諸特性の検討 –高周波超音波計測のための小型光ファイバプローブの試作 (III)–", 2-10-10.

● その他関連発表

ヘアピン型微小ハイドロフォンなど

－ 論文

1. K. Nakamura, Y. Uno and K. Iga "Sound field measurements by a sharply bent optical fiber", J. Acoust. Soc. Jpn., (E)17, pp.45-47, Jan. 1996.

－ 国際会議

1. 11th International Conference on Optical Fiber Sensors: Y. Uno and K. Nakamura "Characteristics of a Sharply Bent Optical Fiber for Sound Field Measurements", Th5-6, pp. 658-661, May 1996.

－ 国内口頭発表

1. 平成7年春季日本音響学会：宇野、中村 "ヘアピン部振動特性の実験的検討 –小さな曲率で曲げた光ファイバを用いたマイクロフォンの試作 (III)–", 3-3-13, pp. 601-602.
2. 平成7年秋季日本音響学会：宇野、中村 "ヘアピン部の小型化と高周波音場の計測 –小さな曲率で曲げた光ファイバを用いたマイクロフォンの試作 (IV)–", 3-8-9, pp. 1057-1058.
3. 平成9年春季日本音響学会：青木、宇野、中村 "透過レーザ光の光路差変調を検出する超音波音場の非侵襲光計測", 3-1-4, pp. 1099-1100.

付録 A

光線追跡法

A.1 光線追跡モデル

キャビティ一行程での光損失量を表す、single-pass gain G_s を求めるために光線追跡法を用いて計算する。ファイバコアからキャビティに入射する光に、中心軸からの距離により増大する広がり角を与え、再びコアに入射する光線の総数を考える。この時、戻り光の y 方向位置 O_y は、キャビティへの入射位置 I_y に応じて以下のように表される。

$$O_y = I_y + 2L \tan \left(\frac{I_y}{a} \sin^{-1}(NA) \right) \quad (\text{A.1})$$

ただし、 $2a$ はコア径、 NA は開口数、 L はキャビティ長である。そこで、 $O_y < a$ を満たす光線の総本数を求めれば良い。ところが、位置 I_y での光の強さ $E(I_y)$ は、シングルモード伝送を想定すると、0 次ベッセル関数により重みづけをしなくてはならない。従って、

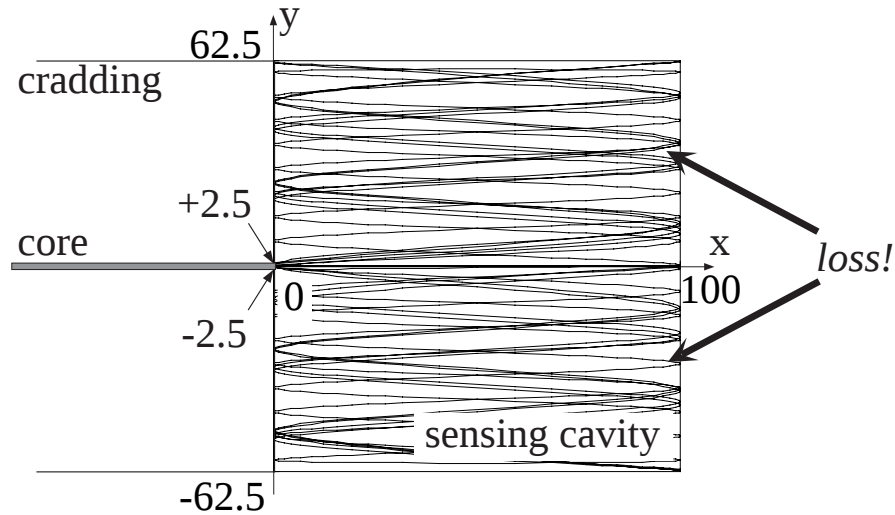


Fig. A.1 キャビティの光線追跡モデル

$$E(I_y) = J_0(\sqrt{k^2 - \beta^2} I_y) \quad (\text{A.2})$$

となる。Fig. A.1 は、例として $L=100 \mu\text{m}$ のキャビティを取り付けた解析モデルを、模式的に表した図である。

A.2 光線追跡法プログラミング

前節の計算に用いた FORTRAN プログラムを紹介する。以下のプログラムは、実験で使った光波長に対してシングルモードである光ファイバ（コア径 $2a=2.5\ \mu\text{m}$, 開口数 $NA=0.15$ ）の先端に、長さ $1\text{--}200\ \mu\text{m}$ のキャビティを取り付けることを想定して G_s を求めるためのものである。

```

program lay-tracing          % タイトル
real iy(201),oy(201),int(201),l(201)      % 配列
real x          % 変数の宣言
real pi,a,k,b,l      % 定数の宣言
complex j          % 複素数の宣言
j = cmplx(0.0,1.0)      %  $j(=\sqrt{-1})$  の定義
pi = 4.0*atan(1.0)      %  $\pi$  の定義
na = 0.15          % 開口数  $NA$ 
a = 2.5          % コア半径  $a$ 
k = 2.*pi*1.55/0.785      % 光の波数  $k$ 
b = 15.1          % 光の伝搬定数  $\beta$ 
l(1)=1.          % キャビティ長  $L$  (最小値は  $1\ \mu\text{m}$ )
c
c
Do 200 m=1,200
l(m)=l(m)+1.*(m-1)      %  $1\text{--}200\ \mu\text{m}$  間、 $1\ \mu\text{m}$  刻みでキャビティ長  $L$  を変化させる
c
Do 100 i=1,201
iy(i) =0.0125*(i-1)      %  $0\text{--}2.5\ (\mu\text{m})$  間、 $0.0125\ \mu\text{m}$  刻みで  $I_y$  を変化させる
c
oy=iy(i) + 2.*l(m)*tan(asin(na)*iy(i)/a)      % 式 (A.1) を利用
if( (oy.gt.a) then go to 50
c
50 int(0)=0., int(i)=int(i-1) , go to 100 x=sqrt(k**2. - b**2.)      % ベッセル関数の項

```

```
int(i)=abs(smj0m(iy(i)*x))          % 式 (A.2) を利用
int(0)=0., int(i)=int(i)+int(i-1) 100 continue
c
gs(m)=1.-int(201)/2.                %  $G_s$  は一往復でコアに戻ることができる光の総量
200 continue
c
c
Do 300 n=1, 200
write(*,*) l(n),gs(n)
300 continue stop
end
```

付録 B

製作方法詳細

B.1 キャビティ製作課程詳細

Fig. B.1-(1)–(4), B.2-(5)–(6) に、ファイバ先端にポリエステル樹脂製キャビティを製作する手順を示す¹⁹⁾。

課程 (1) では、センサにする光ファイバに、金製ハーフミラーをスパッタリングする。ハーフミラー反射率 R は、金薄膜の膜厚により調整できる。次節では、スパッタリング時の様子と注意事項を述べる。

課程 (2) では、ダミーファイバを対向させて設置し、あいだにポリエステル樹脂を流し込む。表面張力で樹脂を保持しつつダミーファイバで引っ張り、キャビティ長を調節する。

課程 (3) では、片方のファイバにレーザー光を入射し、別のファイバの出射光量を観測しながら光軸あわせや 2 つのファイバの平行あわせを行う。

課程 (4) では、一方のファイバ入射したレーザー光の波長を掃引するか、または白色光源を入射して、他方のファイバのスペクトル縞を測定すると、縞間隔から正確なキャビティ長がわかる。

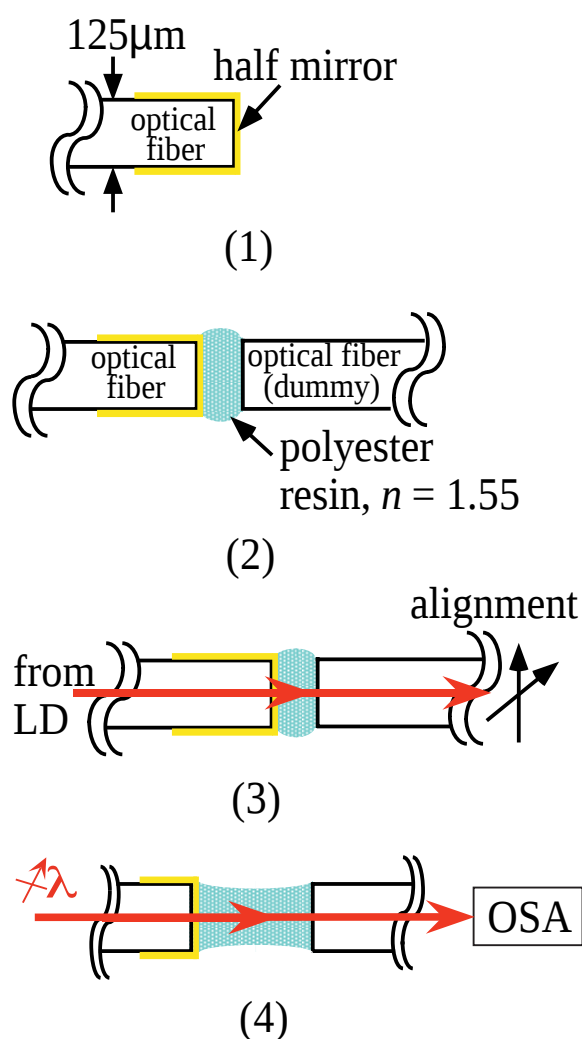


Fig. B.1 製作過程 (1)–(4)

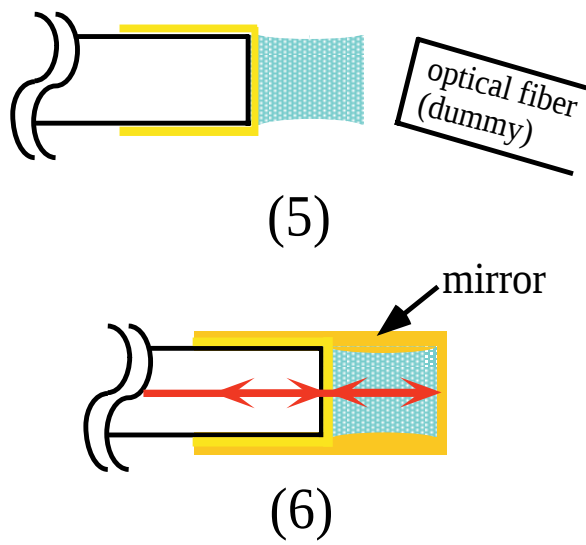


Fig. B.2 製作過程 (5)–(6)

課程 (5) では、ポリエステル樹脂硬化後（二液混合型なら約 24 時間後）、ダミーを抜き取る。

課程 (6) では、金スパッタリングによる反射コーティングを施す。金膜厚は、 $200 \text{ \AA}$ 程度あれば十分である。それ以上スパッタリングを続けると、ファイバが熔けだしたり、そうでなくともキャビティ振動特性の悪化をもたらす。

B.2 キャビティ製作装置の全体図

Fig. B.3(1) に、キャビティ製作を行うための装置の外観を示す。センサー用ファイバーは光学実験用ジグに、ダミーファイバーは3次元可動精密ステージに固定する。ファイバの固定には、永久磁石が適当と思われる。ガイド光を用いたファイバ同士の光結合量により平行・位置合わせを行うが、それは最終的な作業にとどめ、前もって反射型光学顕微鏡を脇に設置してある程度アライメントを取っておいた方が楽である。また、顕微鏡はキャビティ形状を直接的に観測できるだけでなく、写真として記録もできるので便利である。しかし、レーザー光をファイバに入射した後は、非常に危険なので顕微鏡を覗いてはいけない。

Fig. B.3(2) は、ファイバ先端に金をコーティングする時の様子を、模式的に表したものである。金スパッタリング装置 (SANYU DENSHI CO., LTD.: Quick Coater, SC-701) の動作原理は、真空チャンバーに残った僅かなガス (空気) を電界により上方に引き寄せ、金属にぶつけることにより「金の雨」を降らす。従い、ファイバ先端を上向きに固定するジグを用意する必要がある。また、残りのファイバを上手く巻き付け、チャンバーに収まる程度の大きさのリールも必要である。

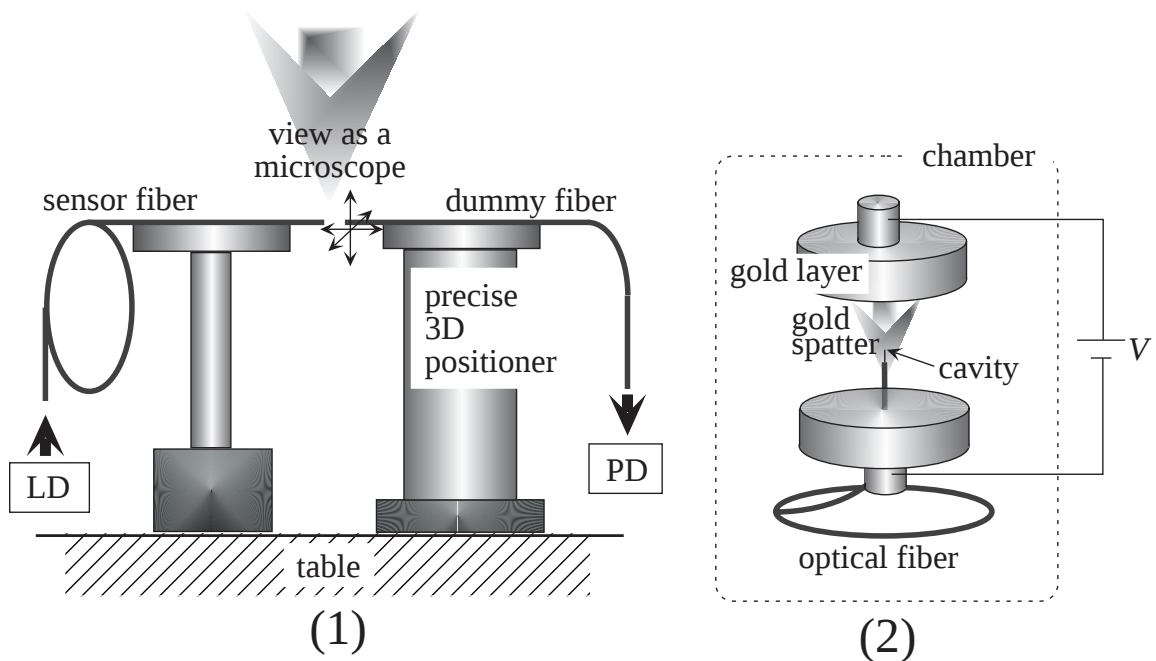


Fig. B.3 (1) 製作装置全体図、(2) 金スパッタリング装置概念図

索引

- $\Delta\lambda_w$, 45
- $\Delta\lambda_w$, 24
- Δh , 46
- ΔI , 15
- Δp , 8, 37
- Δp_{max} , 15
- Δp_{min} , 15
- Δ , 24
- δ , 12, 46
- Δ_c , 51
- κ_c , 9
- κ_f , 9
- λ , 6, 13, 24, 38, 44
- λ_r , 21, 44
- λ_s , 31
- ρ , 18, 29
- σ , 18, 29
- B , 15
- d , 31
- DR , 15
- F , 7, 12, 46
- f_λ , 39
- f_{cutoff} , 28
- f_{ref} , 41
- f_{sr} , 17, 29
- f_s , 29, 39, 51
- G_R , 7, 8, 24, 38, 46
- G_s , 7, 10, 24, 47
- h , 12, 46
- I , 6, 15, 29, 44
- i_j , 15
- i_{SD} , 15
- i_{SL} , 15
- I_0 , 22
- i_n , 15
- J_1 , 31
- k_m , 18
- k_s , 31, 51
- L , 6, 9, 21, 37, 44
- l_s , 51
- LP_{ij} モード, 24
- N , 47
- n , 6, 8, 21, 38, 47
- R , 7, 11, 21, 47
- V , 15, 24
- V_λ , 39
- v_λ , 37
- V_s , 39
- v_s , 22, 36
- lay tracing*, 10
- band-pass filter, 39
- BPF, 39
- FEM, 3, 8, 29
- FFT, 12
- Finesse, 7
- Finite Element Method, 3

He-Ne レーザー, 25

low-pass filter, 37

LPF, 37

multimode, 34

optical spectrum analyzer, 39

OSA, 39

PD, 25, 37

peak to peak 値, 25

photo detector, 37

PIN フォトダイオード, 22

PVDF, 27

Quality factor, 31

Q 値, 31

S/N 比, 12, 41

single-mode, 32

single-pass gain, 7, 11, 24

TDM, 44

WDM, 3, 44, 53

圧電

—ハイドロフォン, 16, 31

—高分子, 1, 6, 27, 53

—振動子, 30

—セラミック, 1

—素子, 39

アレイ, 44, 54

—センサ, 54

—プローブ, 54

—化, 1, 22, 44, 53

—型, 1, 44

—構造, 3

—試作機, 23, 45

—素子, 48

イオン電流, 21

インテンシティ, 44

音響—, 1, 50, 54

音響—計測, 44

—計測, 53

過渡

—音場, 53

—的, 1, 44, 54

干渉, 49

—系, 1, 26, 47

光—, 48

光—型, 1

光—系, 1, 31

感度, 9, 48

圧力—, 10

音圧—, 2, 6, 8, 25, 36, 44, 53

高—, 21

光学—, 8

—向上, 53

—校正システム, 37

—校正法, 4, 36

絶対—, 36

絶対—校正法, 36

測定—, 26

歪み—, 25

- 分布, 34
- 基本波, 12, 28, 53
 - 成分, 13
- キャピティ, 8, 21, 37, 44, 53
 - 構造, 52
 - 材料, 6, 10, 38
 - 軸, 31
- センシング—, 6
 - 端面, 9, 32
 - 長, 6, 10, 21, 44
 - 波長特性, 37
 - 反射光量, 47
 - 反射率, 46, 47
- 光—, 2, 6, 24
- 微小—, 7, 53
 - 歪み, 3, 8, 33, 37
 - 部, 6, 9, 29, 49
 - 変形, 8
- 共振, 31
 - スペクトル, 31
 - スロープ, 29, 37
 - ディップ, 7, 12, 37
 - ピーク, 6, 45
- 外部—器, 38
 - 器, 21
- 機械—, 9, 31
 - 駆動, 27
 - 周波数, 17, 27, 50
- 単一光—, 52
 - 波長, 24, 44, 54
- 屈折率, 6, 10, 21
 - 変化, 2, 8, 33
- クラッド
 - 径, 6, 34
 - 半径, 31
- 原理, 3, 6, 23, 37, 46
 - 的, 41
 - 動作—, 3, 7, 24, 44, 53
- 高周波, 44
 - 域, 9
 - 音場, 1, 21, 44, 54
 - 化, 1
 - 強力超音波, 28
 - 進行波音場, 51
 - 多点計測, 50
 - 領域, 19
- 校正, 37
 - システム, 40
 - する, 36, 53
 - 回路, 43
 - 絶対感度—, 53
 - 絶対感度—システム, 55
 - 表, 22
 - 法, 39
 - 方法, 36
- 光線追跡, 10
- 高調波, 12, 28, 53
 - 成分, 12
 - 第3次—, 12
 - 第2次—, 12, 28, 53

光路長, 6, 8

キャビティ—, 25

キャビティ—変化, 37

—変化, 2, 8, 38

固有振動

—モード, 29

—周波数, 18

—数, 18

指向性, 4, 20, 21

—パターン, 33

周方向—, 34

無—, 31

時定数, 39

周波数特性, 1, 8, 29, 53

衝撃波結石破碎術, 1

上限周波数, 17

シングルモードファイバ, 24

振動解析, 19

強制—, 4, 29

固有—, 18, 29

振動子, 25, 51

円環型—, 28

円形—, 27

円盤型—, 27

集束型—, 25

スターカップラ, 44

スパッタリング, 21

金—, 21

金—装置, 21

—時間, 21

測定可能音圧

最小—, 15, 29

最大—, 14, 28

ソノケミストリー, 28

体積弾性率, 9

ダイナミックレンジ, 3, 6, 8, 28, 53

多層膜, 45

縦基本振動

—モード, 18

—共振周波数, 18, 29

弾性定数, 6, 10, 26

閉じ込め導波路, 10

波長可変レーザー, 39, 44

外部共振器型—, 22, 39

波長多重

—検出, 47

—処理, 16, 54

光—, 5, 50

—方式, 3, 44, 53

波長変調, 40

—周波数, 39

—信号, 37

—振幅, 39

光—信号, 43

—量, 38

反射率, 2, 7, 21, 44, 53

キャビティ—, 36

ハーフミラー—, 21

—波長特性, 35, 47

—変化, 8, 38

- 変調型プローブ, 25
- 光強度, 7
 - 変調型, 2, 25
 - 変調型プローブ, 53
 - 変調方式, 11
- 歪み, 10
 - 成分, 13
 - 2次—, 13
 - 率, 8
 - 量, 29
- ファブリペロ, 7
 - 共振, 35, 44, 53
 - 共振器, 3
 - 共振ディップ, 24
 - 方程式, 3, 6, 8, 35
- フィネス, 7, 12, 46, 53
- フォトディテクター, 15, 29
- 分解能, 1
 - 空間—, 2, 6, 21, 53
 - 時間—, 2, 39
- 変形解析, 8
- 偏光, 32
 - パターン, 31
 - 特性, 31
- ポアソン比, 11
- ポリイミド, 6
- ポリエステル樹脂, 2, 6, 10, 21
- マイクロバブル, 28
- モデル, 9
 - 方向歪み—, 9
 - 解析—, 19
 - 厳密—, 9
 - 等方向歪み—, 9
 - 変形—, 9
- 戻り光, 6, 8, 22, 44
 - 強度, 3, 44
 - 強度変化, 8
 - 量, 22
- ヤング率, 9, 29
- 有感部, 6, 10, 26
- 有限要素法, 3
- 横モード, 24, 53
 - 高次—, 34