

光干渉型マイクロセンサの開発と受信波形特性

Development of Fiber-Optic Micro Sensors and Characteristics of Received Waveforms

志賀みゆき*・山田真幸**・北原道弘***・鈴木学****・新妻弘明†

Miyuki SHIGA, Masaki YAMADA, Michihiro KITAHARA, Gaku SUZUKI
and Hiroaki NIITSUMA

*学生員 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

**正会員 工博 東北大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

***正会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

****非会員 工博 凸版印刷株式会社 (〒345-8508 埼玉県北葛飾郡杉戸町高野台南 4-2-3)

†非会員 工博 東北大学教授 大学院環境科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 01)

A fiber-optic micro sensor for nondestructive evaluation has been developed. The principle of the sensor is based on the Fabry-Perot interferometry. The sensor has a half-mirror at the end of an optical fiber and a total reflection mirror on a micro silicon mass suspended by thin beams. The sensor has been fabricated by using the micromachining technique. The diameter of the silicon mass is about 500 micrometers, and the total size of the sensor is about 4 mm square and 5.2 mm length. The resonant frequency of the sensor is about 100kHz, and the sensitivity is almost same to that of a piezoelectric transducer.

Key Words : Fabry-Perot interferometer, nondestructive evaluation, micromachining

1. はじめに

現在、土木構造物の維持管理手法として主に目視による検査が行われている。これは簡易ではあるものの検査結果の信頼性や人員数の面で困難があり、これに代わる定量的かつ効率的な維持管理手法の確立が望まれている。そのための一手法として、光学機器を利用した方法が提案されている^{1,2)}。これらは分解能の高い光学機器を用いることによって計測精度を向上させたり、遠隔計測を可能にしたりすることができるなどのメリットを有している。このような光学機器を利用して振動や波動を計測しようという試みは土木分野以外でも活発に進められている³⁾。例えば地下弾性波計測は発破等の人工的な震源から生じる弾性波あるいは岩盤の破壊によって生じる AE(Acoustic Emission) や微小地震などの弾性波を検出し、そこで得られた信号を解析することにより弾性波の発生源や岩盤内の断層などの構造及び岩質に関する情報を抽出するものであるが、この分野では光ファイバを利用したマイクロセンサの開発が進められている⁴⁾。そこでこの地下弾性波計測への利用が検討されている光干渉型マイクロセンサを、構造物の欠陥評価へ応用することを考える。従来、非破壊評価には圧電型の探触子が用いられているが、マイクロセンサ化することにより従来の圧電型探触子に比べて非常に小さくなり、また主な部分をシリコンで作るため低コスト・大量生産化が可能になる。ただし土木構造物内部に存在する欠陥評価に用いる場合、地下計測用のセンサとは周波数帯域が異なるため

この点を考慮する必要がある。具体的には現在の数百 Hz より 3 オーダー高い 100kHz 以上の帯域で利用できるセンサでなければならない。このため再設計を行い、それに基づいて光センサを試作した。そして完成した光センサの特性評価及び応用実験を行った。ここでは、土木構造物の欠陥評価への応用を意図した光センサ開発の過程とその性能について検討した結果をまとめる。

2. 光干渉型マイクロセンサの基本設計

2.1 光学的原理

この光干渉型マイクロセンサ(以下「光センサ」)は振動を検出する原理として、ファブリ・ペロー干渉計の原理を用いている。ファブリ・ペロー干渉計は 2 枚の平行に置かれた鏡の間での光の多重反射による干渉現象を利用したものである。この原理について図-1(a), (b) に示す。

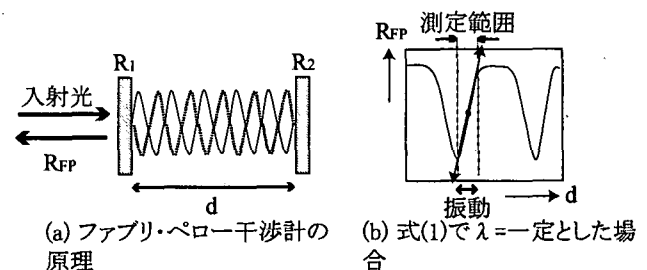


図-1 ファブリ・ペロー干渉計と振動検出の原理

ここでファブリ・ペロー干渉計における光の反射率 R_{FP} は次式で与えられる⁵⁾。

$$R_{FP} = \frac{R_1 + R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos\left(\frac{4\pi n d}{\lambda}\right)}{1 + R_1 R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos\left(\frac{4\pi n d}{\lambda}\right)} \quad (1)$$

ここで R_1, R_2 はそれぞれハーフミラー、全反射ミラーのエネルギー反射率、 n はミラー間の媒質の屈折率、 λ は入射光の波長、 d はミラー間の距離である。式 (1) において入射光の波長 λ を一定にした場合、 d が変化するとそれに伴って反射光の強度も変化することが分かる。

光センサの基本構造について図-2に示す。光ファイバの先端とシリコンでできた振動子表面にそれぞれハーフミラー及び全反射ミラーが蒸着されており、これらが図-1(a) に示したファブリ・ペロー干渉計と同様の構成となっている。

本センサに一定波長の光を入射した場合、シリコン振動子が静止した状態 ($d = \text{一定}$) では反射光の強度に変化はない。しかしその後センサが何らかの衝撃を受け振動子が光ファイバ端面に対して上下に変位すると式 (1) において $\lambda = \text{一定}$ として d を変化させるのと同じことになり反射光の強度は d の変化に応じて変化する。これを表したのが図-1(b) である。

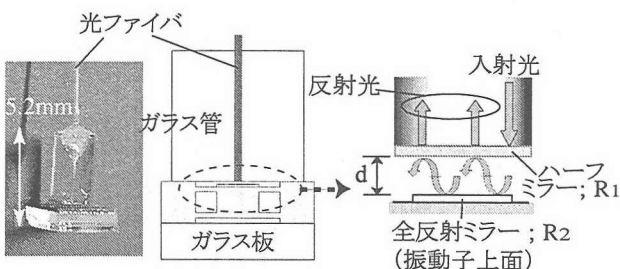


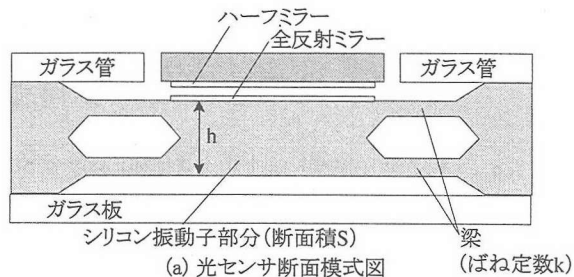
図-2 光センサの構造

この反射光の強度変化をフォトディテクタを用いて計測することにより、光センサは振動を検出することができる。この基本設計には、これまでに地下計測の分野で考案されたものを応用している⁴⁾。

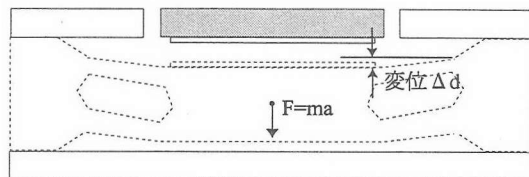
2.2 振動子部分の機械的設計

上で述べた光学的原理を用い、構造物の欠陥評価に利用可能な特性を持つ光センサを設計することを考える。光学的設計については特に変える必要がないので基本設計通りとし、振動子部分の寸法についてのみ再設計を行うものとする。センサ振動子部分の設計を行うにあたって、梁のばね定数を求める。図-3(a) は光センサの断面図で、振動子と梁を形成しているシリコン構造体をガラス板とガラス管で上下から挟み込んだ構造になっている。振動子の面積を $S[\text{m}^2]$ 、厚さを $h[\text{m}]$ 、シリコンの密度を $\rho[\text{kg}/\text{m}^3]$ とすれば振動子の質量 $m[\text{kg}]$ は次式で表される。

$$m = \rho S h \quad (2)$$



(a) 光センサ断面模式図



(b) 振動子の変位の様子

図-3 加速度による振動子の変位の様子

加速度 $a[\text{m}/\text{s}^2]$ により $F = ma$ の力を受けると、振動子は図-3(b) に示すように元の状態に対して平行に変位する。この構造を次の図-4のようにモデル化して考えると、左側固定端から梁に沿って x 軸を取った場合の梁のたわみ y は次式 (3) により得られる。

$$y = -\frac{1}{EI} \left(\frac{max^3}{12} - \frac{maLx^2}{8} \right) \quad (3)$$

ここに a は振動子に働く加速度、 $E[\text{Pa}]$ はシリコンのヤング率、 $I[\text{m}^4]$ は梁の断面 2 次モーメントである。式 (3) を光センサ内部のシリコン振動子を支えている梁 1 本当りたりの式に変形する。1 本の梁の幅、厚さをそれぞれ $w, t[\text{m}]$ とすると、梁の断面 2 次モーメント $\bar{I}[\text{m}^4]$ は

$$\bar{I} = \frac{wt^3}{12} \quad (4)$$

となる。

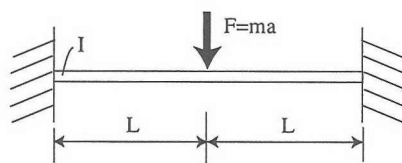


図-4 図-3 のモデル化

また式 (3) を上側 (あるいは下側) の梁全体の変形に関する式と考えると、梁 1 本当りたりの式にするためには両辺を $n/2$ で割る必要がある。即ち、梁の本数を $n[\text{本}]$ 、長さを $L[\text{m}]$ とすると梁 1 本当りたりの変形は次式で表される。

$$y = -\frac{1}{EI} \left(\frac{max^3}{6n} - \frac{maLx^2}{4n} \right) \quad (5)$$

式 (5) を用いて、振動子部分の変位量 $|\Delta d|[\text{m}]$ は

$$|\Delta d| = |y(x = L)| = \frac{maL^3}{12nEI} = \frac{maL^3}{nwt^3E} \quad (6)$$

と表すことができる。従って、梁の形状に起因するば

ね定数 $k[\text{N/m}]$ はフックの法則より

$$k \cdot |\Delta d| = F = ma \tag{7}$$

なる式を満たすことから、

$$k = \frac{nEwt^3}{L^3} \tag{8}$$

が導かれる。また、振動子の共振周波数は次式で表される。

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{9}$$

先の1. で述べたように本センサは地下計測用センサと比較して共振周波数を高くするため ($f_n = 100\text{kHz}$ として設計) 従来のものよりも振動子の質量を小さく、梁のばね定数を大きくしなければならぬことがこの式(9)から見て取れる。また、このことと式(8)から、梁のばね定数を効率よく大きくするには梁の長さ L の値を小さくすれば良いことが分かる。そこで設計では振動子を支える梁の部分の短くし、梁の本数を増やした。

更に、できるだけ広い周波数帯域で使用可能なセンサにするためには振動子に減衰をきかせた設計にする必要がある。本センサのような微細構造内で減衰を生じさせる方法としてスクイズドフィルム効果⁶⁾を利用することが考えられている⁷⁾。これは狭い空間にある流体がそこから押し出される際に大きな抵抗が生じる現象のことであり、この効果による減衰比 ξ は次式で与えられる。

$$\xi = \frac{1}{2\sqrt{mk}} \cdot \frac{0.42\mu S^2}{d^3} \tag{10}$$

ここで μ は空気の粘性係数 ($= 1.82 \times 10^{-5} [\text{Pa}\cdot\text{s}]$)、 $\bar{d}$ はシリコンを彫り込む深さを表しており、光学的原理の節で述べた d とは別のものである。式(9)、(10)等を用い、また ξ をクリティカルダンピングの値 $1/\sqrt{2}$ とおくことにより振動子自身の共振を抑えたセンサを設計することができる。

そこでこの値を考慮して試設計を行ったところ、現状の加工技術ではセンサ製作が困難になるような寸法が算出された。また設計の時点では実際にクリティカルダンピングの状態を生じさせることができるかどうかとも確実とは言えないこと等を考え、今回の設計では減衰について特に考慮しないものとした。即ち、実際の設計においては振動子の面積 S と彫り込み深さ $\bar{d}$ に対して技術的に可能な値を設定し、他の寸法の計算を行っていくという方法を採用した。

次の表-1に光センサの設計上の諸元を示す。

表-1 光センサ設計上の諸元

振動子	面積	0.196[mm ²]	梁	本数	24(上下12本)
	長さ	0.170[mm]		長さ	0.112[mm]
	質量	0.078[mg]		幅	0.025[mm]
$\bar{d}$ (彫る深さ)	0.015[mm]			厚さ	0.010[mm]
減衰比	8.87×10^{-4}		共振周波数	100[kHz]	

表-1において参考値として減衰比 ξ を示してあるが、これは設計値を式(10)に代入して ξ を求めたものである。ただし実際の光センサにはプロセスに用いた装置や技術に起因するばらつきが避けられないためこの値と一致するとは限らない。

3. マイクロマシニング技術を利用した光センサの製作

光センサの製作には、半導体集積回路の製造技術に応用したマイクロマシニング技術を用いている。このプロセス及び組み立て工程を図-5に示す。

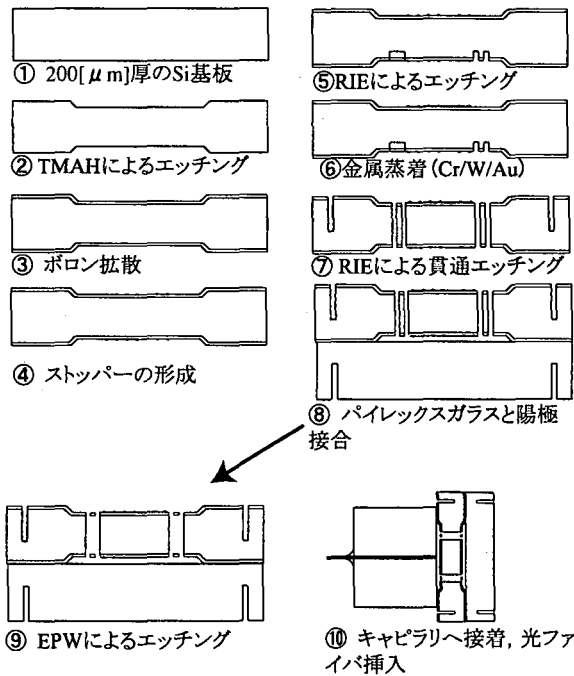


図-5 センサ製作の流れ

各工程の内容を要約すると次のようになる。

1. 両面研磨された厚さ 200μm、2×2cm のシリコン基板を用いる。
2. TMAH(Tetra-Methyl-Ammonium-Hydroxide) を用いたウェットエッチングにより 15μm の段差を作る。
3. 最終的に梁となる 10μm の厚さの層を作るため、ボロンを基板上に拡散する。
4. プラズマ CVD(Chemical Vapor Deposition) とウェットエッチングにより SiO₂ でできたストッパーを作る。
5. RIE(Reactive Ion Etching) によりドライエッチングを行う。
6. 基板上に金属膜 (Cr/W/Au) をスパッタした後、ウェットエッチングにより全反射ミラーを形成する。
7. RIE により貫通エッチングを行う。
8. 加工が済んだシリコン基板を厚さ 1mm のパイレックスガラスと陽極接合する。また後で素子分割するときの利便性を考え、パイレックスガラス側に溝を入れ

ておく。

9. EPW(Ethylenediamine-Pyrocatechol-water) を用いたウェットエッチングにより、センサの梁部分を形成する。

10. ここまでできた構造体とマイクロキャピラリと呼ばれるガラス管をエポキシ樹脂で接着する。先端にハーフミラーを付けた光ファイバをキャピラリに通し、全反射ミラーとの間のギャップ長に注意しながら固定する。

4. 圧電型トランスデューサーとの比較による光センサの特性評価

先の 3. で述べた工程を経て完成した光センサの特性評価を行う。地下計測用センサの場合周波数特性の評価には加振器を用い、ファンクションジェネレータからの信号により加振器を駆動させて計測を行う方法が用いられている⁷⁾。即ち、加振器が発する振動の周波数を連続的に変化させたときのセンサの応答が調べられる。このとき加振器が対応できる周波数域はおおよそ 10kHz 以下である。今回製作した光センサは設計上の共振周波数が 100kHz であるので、この加振器を用いた方法では光センサを使用する周波数帯域における特性を評価しにくい。

そこで新たな方法として、構造物の非破壊検査に用いる圧電型トランスデューサー（以下では「圧電素子」と記述）との比較により光センサの特性を評価することを考える。ただし圧電素子にも周波数帯域があり、その範囲以外では比較対象としての信頼性がやや低下するため中心周波数が 40, 100, 250kHz の 3 種類の圧電素子を用い、光センサの周波数帯域をカバーする範囲で特性を評価する。

4.1 光センサと圧電素子による受信波形特性の比較

計測系の構成及びセメントペースト製供試体の形状は図-6に示す通りである。送信用圧電素子をファンクションジェネレータが発した半波長の正弦波で駆動させ、セメントペースト製供試体中を伝播した透過波を光センサ及び送信側と同じ中心周波数を持つ圧電素子で受信する。光センサ側の計測系において、光源には波長可変レーザー (New Focus Inc. 6328-H, Tuning Range=1520-1570nm) を用いている。まず、光センサと圧電素子により受信した波形の比較を行う。

図-7～9は 40, 100, 250kHz の 3 種類の圧電素子を用い各々の中心周波数で駆動した際の、光センサと圧電素子で受信した波形を比較した結果である。これらの図から、光センサが広い周波数域において振動を感じていることが分かる。

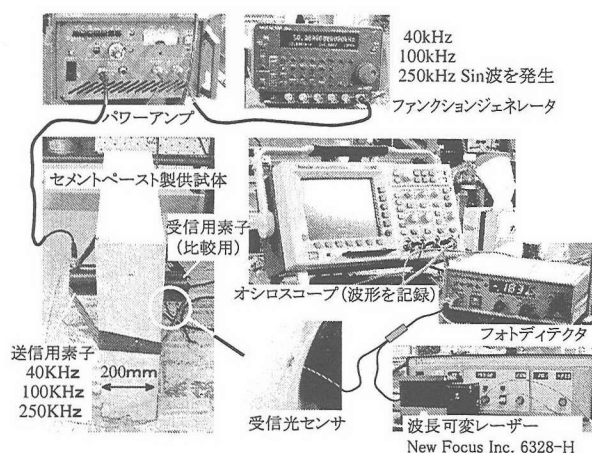


図-6 計測系の構成と供試体の形状

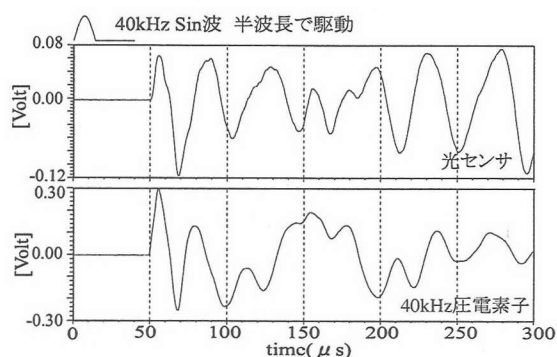


図-7 光センサと圧電素子 (40kHz) の受信波形の比較

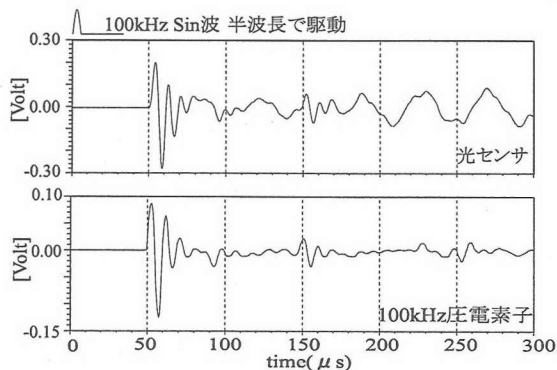


図-8 光センサと圧電素子 (100kHz) の受信波形の比較

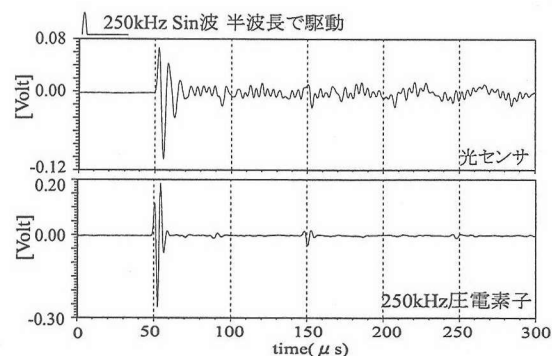


図-9 光センサと圧電素子 (250kHz) の受信波形の比較

次に、光センサで得られた受信波形の周波数特性を圧電素子のそれと比較した。結果の一例を図-10に示す。

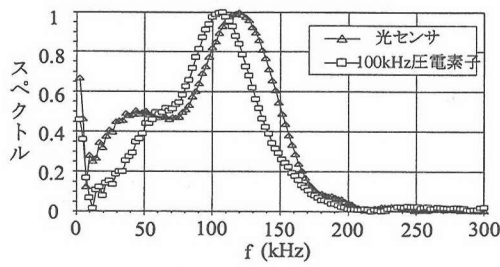


図-10 光センサと圧電素子の周波数特性比較の一例

図-10は図-8の波形の主要部分をそれぞれフーリエ変換したのち、各縦軸の最大値で正規化して描いたものである。この図は光センサと圧電素子の受信波形の周波数特性を示しているが、0.5cycle、100kHzのsin波で駆動したにも関わらず光センサのピークは120kHz付近に見られる。この原因については今のところ未解明であり、今後の課題と言える。この図1枚だけを見て光センサの周波数特性を知ることができないが、ファンクションジェネレータから発する信号の周波数を適当な刻み幅で変化させ、その都度同様の図を描いて周波数特性の変化の様子を見ていけば圧電素子と比較した光センサの特性を知ることができる。

ただこの方法は、送信波の周波数ごとに何枚もの図を比較しなければならずやや煩雑である。そこで次に、より分かりやすい新たな評価法を考案及び検討する。

4.2 光センサの特性評価法

上の特性評価実験において得られたデータにはセンサ自身の特性の他に、入力電圧、圧電素子、セメントペースト供試体の特性、さらにアンプを用いた場合にはその影響などが含まれてくる。こうした余分な影響を除去し光センサの特性だけを見るためにはデータ処理が必要となる。

そこでここでは実験の構成が次の図-11のようなシステムであったものとみなし、データ処理により光センサの特性を見る方法について考える。なお、この構成で行った実験を便宜上「実験 A」とする。

図-11中の各変数は次のように定義されている。

$E(f)$ 入力電圧の伝達関数

$H_p(f)$ 圧電素子の伝達関数

$T(f)$ セメントペースト製供試体による影響を表す伝達関数

$S_{opt}(f)$ 光センサの伝達関数

$A_p(f)$ アンプによる圧電素子受信波形への影響を表す伝達関数

$A_s(f)$ アンプによる光センサ受信波形への影響を表す伝達関数

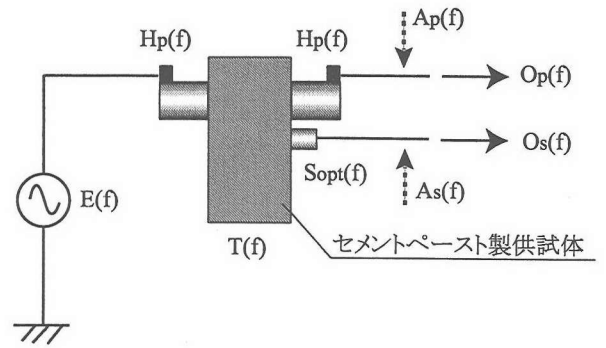


図-11 実験 A の計測系の概要

$O_p(f)$ 圧電素子の出力を表す伝達関数

$O_s(f)$ 光センサの出力を表す伝達関数

ここで、送信用・受信用 2 つの圧電素子の伝達関数は同じと見なしている。

一般的な単一入力・単一出力の線形システムにおいて、出力はインパルス応答関数と入力の畳み込み積分として表すことができる⁸⁾。この関係を周波数領域で表せば、

$$Y(f) = H(f)X(f) \quad (11)$$

となる。ここで、 $H(f)$ は系の伝達関数、 $X(f), Y(f)$ はそれぞれ入力信号と出力信号のフーリエ変換である。 f は周波数を表している。

圧電素子と光センサのそれぞれについて、図-11の構成は単一入力・単一出力の線形システムから成っているため、これを用いると $O_p(f)$ 、 $O_s(f)$ は式 (11) のような形でそれぞれ次のように表すことができる。

$$O_p(f) = E(f)H_p(f)T(f)H_p(f)A_p(f) \quad (12)$$

$$O_s(f) = E(f)H_p(f)T(f)S_{opt}(f)A_s(f) \quad (13)$$

式 (12) は次のように書き直すことができる。

$$\begin{aligned} |O_p(f)| &= |E(f)||H_p(f)||T(f)||H_p(f)||A_p(f)| \\ &= |E(f)||H_p(f)|^2|T(f)||A_p(f)| \end{aligned} \quad (14)$$

また、式 (13) より

$$|O_s(f)| = |E(f)||H_p(f)||T(f)||S_{opt}(f)||A_s(f)| \quad (15)$$

となる。ここで式 (14) を変形すると、

$$\begin{aligned} |H_p(f)|^2 &= \frac{|O_p(f)|}{|E(f)||T(f)||A_p(f)|} \\ &= \frac{|O_p(f)|}{|E(f)||T(f)|} \end{aligned} \quad (16)$$

を得る。ここで、周波数特性がフラットなアンプを使うことを想定して、アンプによる影響を $|A_p(f)| = 1$ とした。上式より、

$$|H_p(f)| = \sqrt{\frac{|O_p(f)|}{|E(f)||T(f)|}} \quad (17)$$

となることが分かる。これを式 (15) に代入すると、

$$|O_s(f)| = |E(f)||T(f)||S_{opt}(f)|\sqrt{\frac{|O_p(f)|}{|E(f)||T(f)|}} \quad (18)$$

を得る。ここでもアンプによる影響を $|A_s(f)| = 1$ としている。上式 (18) より、光センサの特性 $S(f)$ を次のように表すことができる。

$$|S_{opt}(f)| = \frac{|O_s(f)|}{|E(f)||T(f)|\sqrt{|O_p(f)|/|E(f)||T(f)|}} \quad (19)$$

さらにここで簡単のため、供試体による影響を $|T(f)| = 1$ と置けば、

$$|S_{opt}(f)| = \frac{|O_s(f)|}{|E(f)|\sqrt{|O_p(f)|/|E(f)|}} \quad (20)$$

となる。すなわち上式 (20) の右辺から光センサの周波数特性が得られることになる。この手法はアンプによる影響と供試体による影響を無視しているため厳密な定量的評価であるとまでは言えないが、光センサの特性を示す指標としては十分利用できると考える。ただし実際の実験においては、比較対象として使用する圧電素子の周波数帯域には限りがあることから、どの周波数域のデータが最も信頼性を持つかを考えなければならぬ。そこで入力電圧 (0.5cycle, sin 波) の周波数特性を変化させてその都度 $S_{opt}(f)$ を求め、これを重ね合わせることを考える。即ち、データポイントを結んだラインが重なる部分は圧電素子の周波数帯域内であるために安定したデータが得られているが、ラインが重ならずばらつく部分は帯域から外れているためにその他の雑音等により信頼性の低い領域であるとみなせばよい。

この特性評価法の信頼性を確かめるため、光センサの代わりに AE センサ (富士セラミクス社製、低周波 [50~600kHz] 広帯域型) を用いて同様の実験 B を行った (図-12参照)。ここでは、供試体としてアクリルブロックを用いている。また図-12において、 $S_{AE}(f)$ は AE センサの伝達関数を表しており、他のパラメータは図-11での定義と同一である。この AE センサの周波数特性は帯域内ではほぼフラットであることが分かっているので、もし結果の図がその特性と大きく異なったものになれば、それはこの評価法が原因で生じたものと考えることができる。逆に結果が既知のものに近い形になれば、この評価法の信頼性を示せたことになる。

本実験により AE センサの特性 $|S_{AE}(f)|$ を示した結果が図-13~15である。

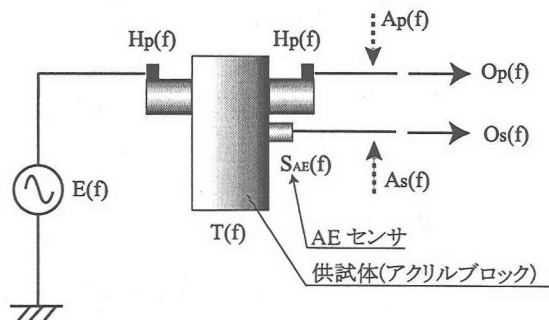


図-12 実験 B の計測系の概要

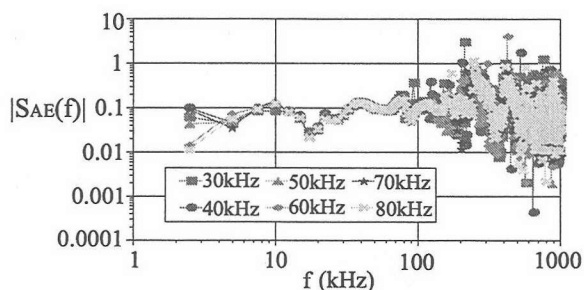


図-13 中心周波数 40kHz の圧電素子と比較した場合の AE センサの周波数特性

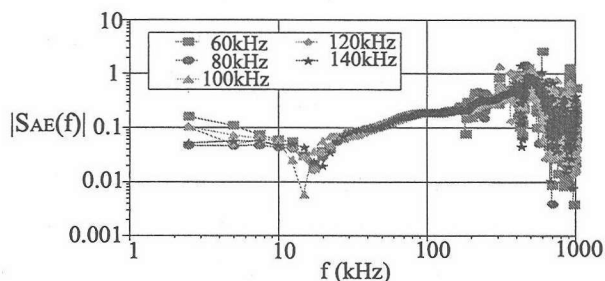


図-14 中心周波数 100kHz の圧電素子と比較した場合の AE センサの周波数特性

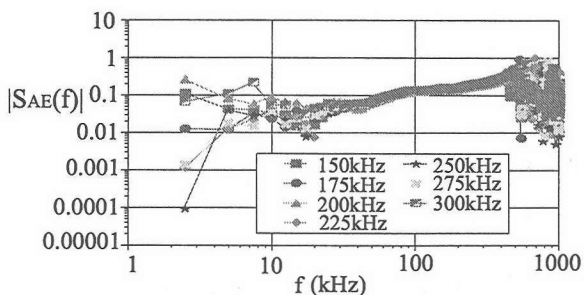


図-15 中心周波数 250kHz の圧電素子と比較した場合の AE センサの周波数特性

これらの図はそれぞれ、中心周波数が 40kHz, 100kHz, 250kHz の圧電素子と比較した場合の AE センサの周波数特性を示している。なお図中の凡例は各圧電素子を

駆動する入力電圧 (0.5cycle,sin 波) の周波数を表しており、各素子の中心周波数前後の値となるよう与えている。この結果を見ると、中心周波数が 40kHz の圧電素子と比較した場合の周波数特性には中心周波数付近でやや凹凸が見られるものの、中心周波数が 100kHz、250kHz の圧電素子と比較した場合には 500kHz 以下におけるほぼフラットな特性を表すことができていることが分かる。この結果より、本実験およびデータ処理法の信頼性が示されたと言えよう。

4.3 光センサの特性

この評価法により光センサの特性を確かめた結果を次からの図-16, 17, 18に示す。このときの計測系の構成は図-11に示した通りである。

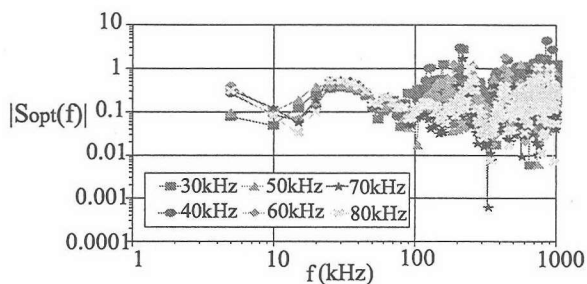


図-16 中心周波数 40kHz の圧電素子と比較した場合の光センサの周波数特性

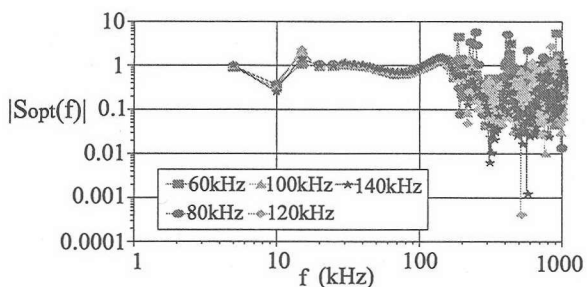


図-17 中心周波数 100kHz の圧電素子と比較した場合の光センサの周波数特性

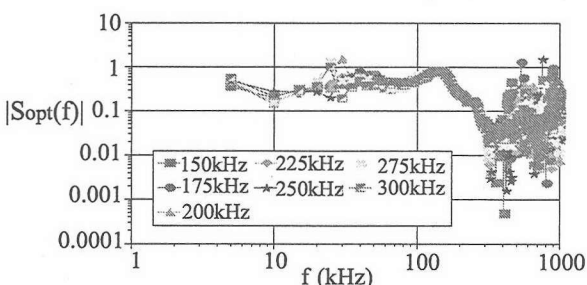


図-18 中心周波数 250kHz の圧電素子と比較した場合の光センサの周波数特性

これらの図-16～18に示した結果から、製作した光センサは約 250kHz 以下の帯域で圧電素子との比較に耐えうる受信性能を有していることが分かる。

5. 光センサの欠陥評価への応用

構造部材内に存在する欠陥を推定する方法として、母材と比較した剛性の大小に関する情報を得るために反射波形の位相の変化を見る方法が考えられる。一次元波動場を考えた場合、二つの半無限媒質の音響インピーダンスの大小関係により反射波の位相が反転するという現象は広く知られている。

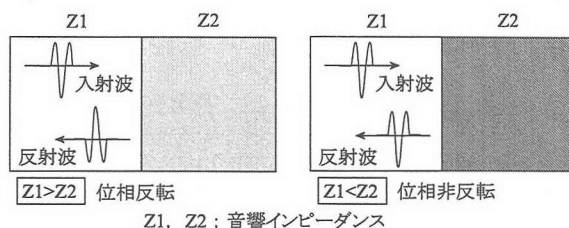


図-19 音響インピーダンスの大小関係による反射波の位相変化 (一次元波動場の場合)

音響インピーダンス Z は $Z = \rho c_L$ (c_L は縦波速度) と定義され、二つの媒質の Z をそれぞれ Z_1, Z_2 とおけば反射係数は次のように表される⁹⁾。

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (21)$$

反射係数が正になるとき ($Z_1 < Z_2$) 反射波の位相は入射波に対して同位相となり、逆に反射率が負になれば ($Z_1 > Z_2$) 反射波の位相は反転する (図-19参照)。式 (21) は半無限直線境界を持つ二つの媒質に対しての式である。構造部材内に存在するような有界な境界を持つ散乱体についてもこの式が成り立つかどうかは検討が必要といえるが、この場合でも半無限境界と同様の結果が得られるという報告がある¹⁰⁾。そこでこの光センサの欠陥評価への応用の一例として、セメントペースト製供試体内に挿入した鋼板や模擬クラックからの反射波を光センサで計測し、供試体底面からの反射波と比べてその位相が反転・非反転していることを確かめる。実験の概要を図-20に示す。

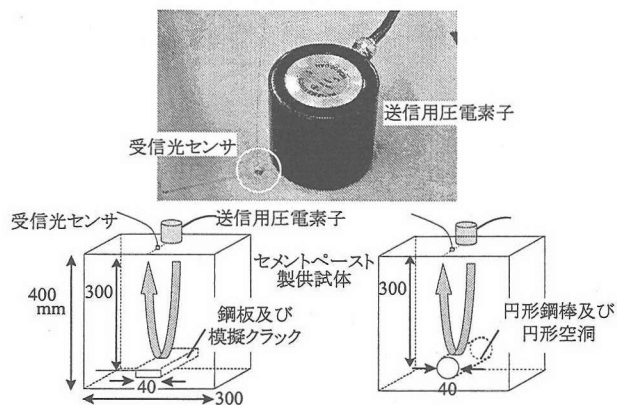


図-20 実験と供試体の概要

供試体にはセメントペーストの内部にクラック状の空洞 (模擬クラック) または鋼板を持つものと、円形空

洞またはそれと同じ大きさの円形断面を持つ鋼棒の計4種類を用いた。使用した送信子は中心周波数 250kHz の圧電素子で、受信には光センサを用いた。参考文献¹⁰⁾によれば、この場合底面エコーの位相と比べて模擬クラックと円形空洞は同位相、鋼板・鋼棒は逆となる。

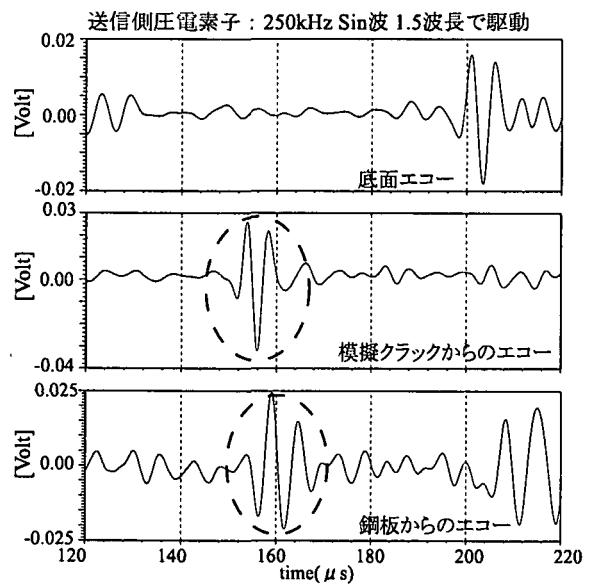


図-21 位相の反転・非反転現象の確認

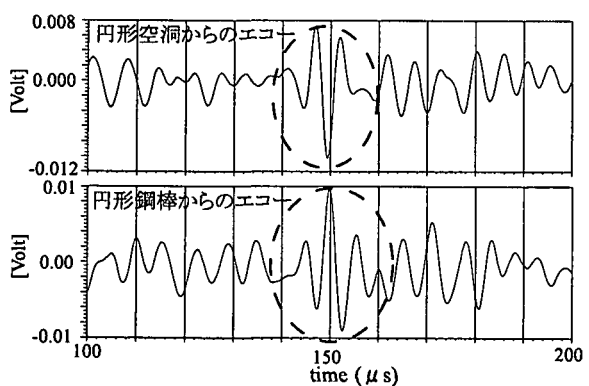


図-22 位相の反転・非反転現象の確認 (2)

実験の結果を示したものが図-21, 22である。セメントペースト製供試体中での縦波速度を計測から求めた値 $c_L=4059.5\text{m/s}$ とすると、鋼板または模擬クラックからのエコーは図の $t=147.8\mu\text{s}$ で現れ、底面からのエコーは $t=197.1\mu\text{s}$ で現れる。また円形空洞または鋼棒からのエコーはそれよりやや早い時刻に現れることになる。これらの時刻における各波形を確認すると、底面エコーの位相を基準として検討した場合、模擬クラックと円形空洞は同位相、鋼板と鋼棒は逆位相になっていることが分かる。これより、製作した光センサは位相の反転・非反転現象を感知していると言える。

6. 結論

半導体集積回路の製作などに用いられているマイクロマシニング技術により、小型かつ安価に大量生産が可能という特長を持った構造物非破壊検査用光干渉型マイクロセンサの開発を行った。センサの共振周波数を上げるためシリコン振動子部分を再設計し、所望の特性が得られるよう工夫した。また完成した光センサの特性評価方法として圧電型トランスデューサーとの比較による手法を考案し、その信頼性を AE センサを用いた実験により確かめた。これらの光センサの特性評価実験から、製作した光センサは約 250kHz 以下の帯域で圧電素子との比較に耐えうるだけの性能を持っていることが分かった。構造物の内部欠陥の評価に関しても、欠陥と母材の剛性の大小を判断する用途に使用できる可能性が示された。

謝辞

本研究は研究開発課題名「マイクロセンシング技術の建設工学への応用研究開発」の一環として国土交通省平成 13 年度建設技術研究開発費の補助を受け行われた。また本研究の一部は、東北大学大学院工学研究科機械電子工学専攻江刺研究室の施設及び東北大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリーの施設を利用して行われた。

参考文献

- 1) 貝戸清之, 阿部雅人, 藤野陽三, 依田秀則: レーザ常時微動計測手法の構築と構造物の損傷検出への応用, 土木学会論文集, No.689/I-57, pp.183-199, 2001.
- 2) 小野紘一, 大島義信, 杉浦邦征: FBG センサを用いたひずみ計測用モジュールの開発, 応用力学論文集, Vol.5, pp.863-872, 2002.
- 3) Nishizawa, O., Satoh, T., Lei, X. and Kuwahara, Y.: Laboratory studies of seismic wave propagation in inhomogeneous media using a laser Doppler vibrometer, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.87, pp.809-823, 1997.
- 4) Hirata, K., Niitsuma, H., and Esashi, M.: Silicon micromachined fiber-optic accelerometer for down-hole seismic measurement, *T. IEE Japan*, Vol.120-E, pp.576-581, 2000.
- 5) 大津元一: 現代光科学 I 光の物理的基礎, 朝倉書店, 2000.
- 6) Andrews, M., Harris, I. and Turner, G.: A comparison of squeeze-film theory with measurements on a micro structure, *Sensors and Actuators*, A36, pp.79-87, 1993.
- 7) 西澤充智: 静電容量型マイクロ地下弾性波計測システムの開発に関する研究, 東北大学大学院工学研究科地球工学専攻博士学位論文, 2001.
- 8) 新妻弘明: 電気回路を中心とした線形システム論, 朝倉書店, 1999.
- 9) Rose, J.L.: *Ultrasonic Waves in Solid Media*, Cambridge Univ. Press, pp.40-44, 1999.
- 10) 小田島淳, 中畑和之, 北原道弘: 位相の反転・非反転現象に着目した欠陥による後方散乱波形解析, 境界要素法論文集, Vol.18, pp.23-28, 2001.

(2003 年 4 月 18 日受付)