

# 知的構造用光ファイバひずみセンサに関する研究\*

越 出 慎 一\*1

## Fiber-Optic Strain Sensors for Smart Structures

Shinichi Koshide

### ABSTRACT

The first section of this report reviews the use of fiber-optic strain sensors in smart structures. Several types of fiber-optic sensor for strain and damage detection in structures are discussed including the high-birefringence polarimetric sensor, interferometric sensor, sensors which utilize scattered or attenuated light, and sensors which combine optical fibers and detectors such as a birefringent sensing cube or vibrating wire. Interferometric sensors are shown to be particularly suitable for strain measurement in structures due to their high sensitivity.

The second half of this report is concerned with an investigation of Michelson and Fabry-Perot interferometric sensors and their use in quantitative analysis. It is apparent that interferometric sensors such as these are suitable for static and dynamic strain measurement in structures and also for the frequency analysis of vibrating structures. The feasibility of these techniques was demonstrated through their use in aluminum alloy and CFRP specimens. Problems relating to the application of interferometric sensors to detection systems in smart structures are also discussed.

**Keywords** : optical fiber, interferometric sensor, smart structures, strain measurement

### 概 要

本報告の前半では知的構造用光ファイバひずみセンサの使用に関する展望について述べてある。構造物におけるひずみや損傷の検出に対しては、これまでに高複屈折偏光型センサ、干渉計型センサ、散乱光あるいは光の減衰を利用したセンサ、光ファイバと高複屈折材料あるいは振動線のような検出要素とを組み合わせたセンサなどの多種の形態のセンサが検討されている。とくに、干渉計型のセンサは高感度であることから、構造物のひずみ測定には適していることが示されている。

本報告の後半ではマイケルソンならびにファブリ・ペロー干渉計型センサの定量的な解析への使用に関する研究について述べてある。上述の干渉計型センサは構造物の静および動ひずみの測定、あるいは振動を受けている構造物の振動数解析に対して有効であることが明らかにされている。この手法の有効性は、アルミニウム合金およびCFRPの試験片の実験により実証されている。また、ここでは本センサを知的構造物の検出システムに応用する場合の問題点についても検討している。

---

\* 平成8年12月24日 受付 (received 24 December 1996)

\* 1 機体部 (Airframe Division)

## 1. 緒 言

人体の神経、筋肉、頭脳に相当する感知、駆動、制御の機能をもついわゆる知的構造の概念が提唱されている。この概念に基づいた構造物では、感知機能により外力、温度などの物理的な刺激の検出、あるいは損傷の発生などの監視をすることができる。とくに、現在行われている保守検査に替わってこの機能による実時間的な監視を導入すれば、構造の安全性を飛躍的に向上させることが可能になる<sup>1)</sup>。このため、知的構造の概念は航空宇宙の分野のみでなく船舶、土木建築などの分野でも注目され始めている。また、感知あるいは駆動機能に細い線状のセンサやアクチエータを成形過程で埋め込むことが容易であることから、先進複合材料、すなわち炭素などによる連続繊維の強化複合材料がまず航空機の知的構造用部材として使用できるのではないかと期待されている。

一方、光ファイバは典型的な細い線状のものであるので、これを利用したセンサは、上述のような複合材料あるいはコンクリートによる知的構造の内部の情報まで感知できるセンサとして最も有望視されている。このような観点から、知的航空機構造などの感知機能への応用を目的にした光ファイバ・センサに関する研究を進めてきた。

周知の通り、すでに通信の分野では光ファイバが広く使用されており、光の伝搬に関する種々の特性が明らかにされている<sup>2)</sup>。このため、感知機能用のセンサとして利用する場合にも、これらの特性に基づいた各種の方法が考えられている<sup>3)4)</sup>。また、本報告での研究は構造物のひずみ感知用のセンサを主な対象としている。しかし、このような場合に対して上述のような現在考えられているセンサの全てのものが必ずしも適用できるとは限らない。そこで、まず構造部材のひずみ感知に適したセンサについての評価をする必要があった。この評価の結果、測定感度が高く、通信用として量産されている光ファイバが利用できるのできわめて安価であるなどの面から、構造物のひずみ感知用としては干渉計型のセンサが最も優れていることがわかった。

干渉計型のセンサは基本的に光学干渉計と同様な原理に基づいている。このため、マッハ・ツェンダ、マイケルソン、ファブリ・ペローなどの光学干渉計に対応したいくつかの形態のものが考案されているが<sup>4)</sup>、実際に知的構造物の部材に埋め込み、この内部の局部的なひずみの感知までの応用を考慮すると、マイケルソン干渉計型かあるいはファブリ・ペロー干渉計型のセンサが最も有力である。しかしながら、これらのセンサもひずみ感知用として使用するにあたっては測定感度や精度などの点

まで十分確認されていない。そこで、これらの干渉計型のセンサ装置を試作し、実験を行って、ひずみ感知用センサとしての実用性を検討する必要があった。

本報告では、まず光ファイバ・センサに関する研究の現状を紹介する意味で、これまでに試みられている光ファイバの各特性を利用したセンサの種類ならびにそれらの感知原理について述べる。つぎに、本研究で実際に扱った干渉計型センサ、とくにマイケルソン干渉計型センサならびに外部型感知部分をもつファブリ・ペロー干渉計型センサの構成、感知原理、静および動ひずみ測定に関する実験について述べ、この実験結果から、いずれもひずみ感知用として有効なセンサであることを明らかにした。

なお、これらのセンサに対する研究は、知的構造物部材の構成要素にして内部のひずみなどの情報を感知させるセンサにすることが最終的な目的である。これには単にひずみ測定に対する有効性の検討だけでなく、例えば部材内部への埋め込み手法、埋め込まれたセンサの強度などのまだ解決されていない問題がある。これらに関する研究も進められているが、現状では十分な段階に至っていない。そこで、各節の最後に知的構造物の感知機能用センサとしてより完全なものにするために必要な、今後研究すべき課題などについても言及しておいた。

## 2. 感知機能用光ファイバ・センサ

構造物が外力あるいは環境変化などの刺激を受けて圧力、変形、ひずみ、温度変化、損傷などが生じた場合に、これらを検出するためのセンサとして光ファイバを用いようとする研究が行われている。また、すでにこの検出用センサとして、光ファイバがもつ種々の特性を利用した方法が試みられている。そこで、ここではまず光ファイバの構造ならびに検出用センサの説明に必要な特性について解説をする。さらに、現在提案されている各種のセンサを紹介し、これらの感知原理や特徴について述べるとともに、知的構造物の感知機能用センサとしての有効性などについて検討をする。

### 2.1 光ファイバの構造と特性

通信の分野では光ファイバが広範囲に使用されている。このため、通信用の標準的な光ファイバは、すでに量産されていて非常に低価格になっている。一般に光ファイバは図1に示すような構造になっている。すなわち、石英ガラスあるいは透明な高分子材料で作られたコアをこれと同様な材料で作られたクラッドで外側から巻き、さらにこの外側を何層かの被覆で覆い内部を保護するような構造である。このコアとクラッドはほぼ同じ材料である。しかし、屈折率がわずかに異なっていて、コ

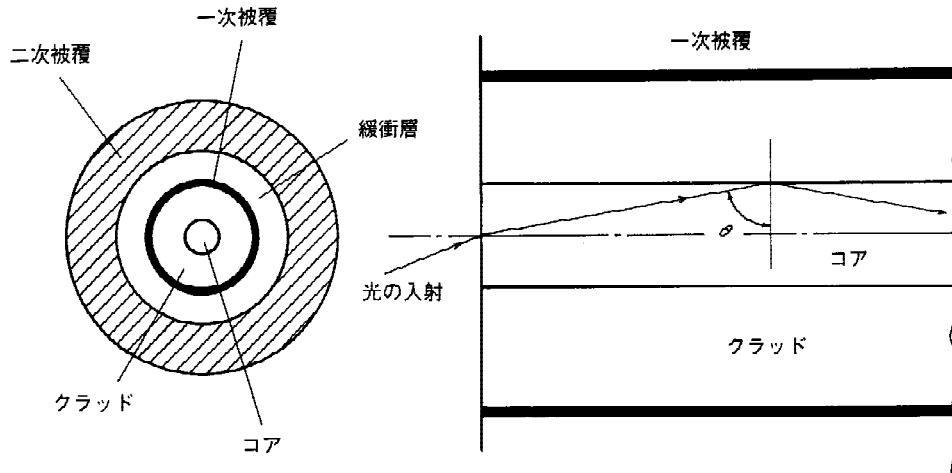


図1 光ファイバの構造と光の伝搬

コアの屈折率がクラッドの屈折よりもわずかに大きくなっている。したがって、図1の で示した角度が臨界角よりも大きくなるように入射した光は、コアとクラッドの境界面で全反射して、コア内を伝搬して行く。また、このように伝搬する光は固有値型の解をもつ波動方程式に支配される。これは光ファイバ内を固有モードの光が伝搬することを意味していて、この各固有モードの光の伝搬定数は次式で与えられる規格化された周波数の関数になっている<sup>5)</sup>。

$$V = faN \quad (1)$$

ここで、 $V$  は規格化された周波数、 $f$  は伝搬する光の真空中の周波数、 $a$  はコアの直径、 $N$  は開口数と称される値である。

また、比屈折率差を次式のように表す。

$$\delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2)$$

ここで、 $\delta$  は比屈折率差、 $n_1$  及び  $n_2$  はコア及びクラッドの屈折率である。

光ファイバでは、一般にこの  $\delta$  の値が1 に対して十分小さいとされているので、式(1)に含まれている  $N$  の値は近似的に次のような式で表すことができる。

$$N = n_1 \sin \theta_c = n_1 \sqrt{2\delta} \quad (3)$$

ここで、 $\theta_c$  は臨界角である。

以上のように、光ファイバ内を伝搬する光の固有モードは  $V$  の値に依存しているが、とくにこの値が2.405 (カットオフ波長と称される値) よりも小さい場合には基本モードの光のみしか伝搬しない。このような光ファイバは単一モード光ファイバと呼ばれている。また、式(1)で明らかなように、 $V$  の値はコアの直径  $a$  に関係している。一般に単一モードの光ファイバは  $a$  が小さい、すなわちコアの細いものになっている。一方、 $V$  の値が大

きになると、多くのモードの光を伝搬できるようになり、したがってこのようなものを多モード光ファイバと呼んでいる。現在、我が国で通信用に製造されている標準の単一モード光ファイバは  $a$  が  $10 \mu\text{m}$ 、また多モード光ファイバは25あるいは  $50 \mu\text{m}$  であるが、クラッドまでの直径はいずれの場合も  $125 \mu\text{m}$  になっている。

このような光ファイバに光が伝搬すると、以下に述べるような特性を示す。まず、光路長さの異なった光ファイバにレーザのような単色性の良い可干渉光を伝搬させ、これを重ねると干渉を起こす。とくに、この干渉性に関しては単一モード光ファイバが良好である。このため、干渉現象を利用する場合には、単一モード光ファイバが使用される。また、一般に光ファイバは曲げを受けることにより伝搬損失が生じる。これは高次モードの光が曲げによりコアとクラッドの境界で放射あるいは漏洩が起きることが主な原因になっている。これは微小曲げ効果とも呼ばれていて、構造物の変形の検出などに利用することができる。しかし、この場合には高次モードの光の伝搬が関係しているので、多モード光ファイバが使われる。

この他、光ファイバでは光の吸収、すなわち後方散乱現象による伝搬損失も生じる。この損失には光ファイバ材料のわずかな不均一性によるレイリー (Rayleigh) 散乱、光非線型効果によるラマン (Raman) 散乱とブリュアン (Brillouin) 散乱が関係している<sup>2)</sup>。この散乱現象の内でも、ラマン散乱やブリュアン散乱の散乱光強度は温度や変形あるいはひずみのような外部からの物理的な刺激によって変化する性質がある。

ここまで述べてきた光ファイバは基本的にコアの断面が完全な円形であるとしている。このような光ファイバでは、これに直交偏光を入射しても二つの偏光成分は同一の速度で伝搬する。しかし、楕円形断面のコアをもつ光ファイバも製造されており、このような光ファイバ

では、直交偏光を入射すると、二つの偏光成分における伝搬定数が違っているので、複屈折性を示す。この複屈折性をもった光ファイバでは、伝搬する偏光成分の位相がずれるにしたがって、偏光面が回転して直線偏光から楕円偏光に、さらにこの楕円偏光から直線偏光へと変化する現象が繰り返し起き、光弾性実験法の原理と同様な光弾性効果を示すようになる。したがって、この特性を利用することにより、光ファイバの変形に対応した周期的に変化する光強度の信号を得ることもできる。

一方、最近では高性能の各種レーザ光源が開発されている。また、通信分野における光ファイバの広範囲な使用にともない、結合部分での伝搬損失が小さいコネクタや結合器が製作されるようになり、融合結合法も改良されている。このため、光ファイバを伝搬してくる光の分割あるいは重ねることが簡単にできるようになり、前述の光ファイバのもつ各特性を利用したセンサ装置を構成させることも容易になっている。

## 2.2 各種の光ファイバ・センサと感知原理

前に述べたように、光ファイバは可干渉光が伝搬したときの干渉、放射や漏洩あるいは後方散乱による伝搬損失、偏光が伝搬した場合の複屈折などに関する特性をもっている。これらの特性は外部からの力や温度のような

物理的な刺激により影響を受ける。したがって、この影響による光の強度変化に関係した出力信号を検出すれば物理的な刺激を感知するセンサとして利用できる。表1は感知機能用センサに利用されている光ファイバの特性とこれにより検出あるいは測定できる対象をまとめて示したものである。そこで、まずこのような知的構造への適用を目的にした、主に圧力、変形、ひずみ、温度変化、損傷などの検出用として提案されているセンサを紹介し、その感知原理について述べる。

### (1) 微小曲げ効果を利用したセンサ

光ファイバを伝搬してきた光の強度変化を直接検出することによって、曲げのような変形や圧力を測定することが試みられている。この方法は、光ファイバを構造部材などの表面に取り付け、あるいはこの中に埋め込み、曲げによる伝搬損失のために生じる光の強度変化、すなわち微小曲げ効果を利用している。例えば、光ファイバのある部分を図2に示したような状態にしておき、圧力によって上下の治具が押され、光ファイバの波状になった箇所の曲率が変わると、この微小曲げ効果により伝搬してくる光の強度が減少する。したがって、このときに検出される出力信号の変化から圧力の変化が求められる。さらに、これらの関係を検定しておくことにより圧力の値を測定することが可能になる。このような原理に

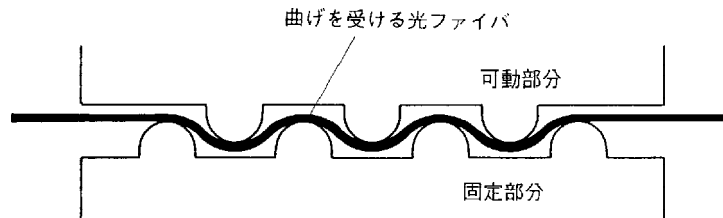


図2 微小曲げ効果を受ける光ファイバ

表1 光ファイバの特性と検出あるいは測定される対象

光ファイバの特性		検出あるいは測定される対象
伝搬する光の強度変化 (微小曲げ効果)		曲げやたわみなどの変形の検出 圧力の測定 繰り返し負荷などによる損傷の検出
ファイバの破断にともなう現象		割れやはく離のようなきずあるいは損傷の検出
後方散乱	ラマン散乱	温度分布の測定
	ブリュアン散乱	温度分布及びひずみ分布の測定
光の偏光		局所的な温度やひずみの測定
可干渉光の干渉		局所的な温度やひずみの測定 弾性波(音響)の検出
光弾性材料への光の伝搬		光軸に直交するひずみの測定
光音響効果		振動線の加振とこの振動の検出 (大型構造物の応力、ひずみなどの測定)

基づいた光ファイバ圧力センサを実際にダイアフラムの圧力測定に使用した例もすでに報告されている<sup>6)</sup>。

この他、光ファイバの微小曲げ効果は橋梁などの土木構造物の安全性監視用のセンサとして期待されている。これに対しては、コイル状にされた光ファイバの伸縮による曲率変化や土木構造物に敷設された光ファイバが荷重により曲げを受けるときの変化を利用する方法が考えられている<sup>7)</sup>。

## (2) 後方散乱光を利用する方法

すでに述べたように、ラマン散乱やブリュアン散乱の場合は、外部からの物理的な刺激により散乱光の強度が変化する性質がある。しかしながら、前者のラマン散乱ではこの散乱光の強度が温度のみにしか影響を受けないので、温度変化あるいは温度分布を検出するセンサとしてこの散乱現象を利用することは可能であるが<sup>8)</sup>、変形あるいはひずみの測定には基本的に使うことができない。一方、後者のブリュアン散乱は温度のみでなく変形あるいはひずみにも影響を受ける。したがって、これらの検出に使用することができる。一方、光ファイバを通信などの分野に使用するに際しては後方散乱現象を極力小さくすることが望ましい。このため、現在生産されているファイバでも、ラマン散乱やブリュアン散乱光の強度は伝搬される光の強度と比較すると非常に小さく、これらの散乱光の強度検出には特殊な技術が必要になる。これに対しては、例えば散乱光強度の微小な変化をする箇所からのパルス状反射光の伝搬時間を測定するOTDR(光ファイバ・リフレクトメータ: Optical Time Domain Reflectometer)などの装置が使用されている<sup>9)</sup>。この方法は橋梁のような大型土木構造物のひずみ分布の測定などへの応用が期待されている。しかし、構造物あるいはこの部材の局部的なひずみを高精度で測定するような、定量的な測定には必ずしも有効ではない面がある。

## (3) 光ファイバ内の格子を利用する方法

光ファイバのコア部分に格子を刻み込み、この格子から特定の波長成分の光のみが反射してくる現象を利用して、ひずみや温度変化を測定する方法も行われている<sup>10)</sup>。この場合には、2方向から照射されたレーザー光束の干渉じまがコア内に格子を刻み込むのに用いられている。このため、例えばこれにHe-Neレーザー光束を使用すれば $0.6\ \mu\text{m}$ 程度の間隔の格子を刻み込むことができる。とくに、このような格子の刻まれた部分がひずみを受けたり、温度変化を受けたりすると、ここで反射される波長成分が変動する。したがって、この場合の波長成分の変動を正確に検出すれば、それからひずみや温度変化を求めることができる。この方法では機械的な強度の高いセンサを製作することができるとされており、土木構造物への応用が期待されている。また、この目的の

ための基礎的な実験も行われている。しかし、現状では検出装置の複雑さなどのために、必ずしも有効な実験結果が示されているとは言い難い。

## (4) 損傷による光の強度変化を検出する方法

積層された複合材料あるいはコンクリート部材では成形あるいは枠型にコンクリートを流し込む過程で光ファイバを埋め込み、単にこの光ファイバを伝搬してきた光の強度変化を検出することにより部材の損傷状態を知ろうとする方法が試みられている。すでに、この方法は航空機構造の2次構造部材として使用されているアラミド繊維強化複合材料で構成されたパネル試験片の衝撃荷重による損傷検出に応用された例が報告されている<sup>11)</sup>。この例では各層間に埋め込まれた光ファイバを伝搬してきた光の強度変化を検出してパネル内部の損傷が生じている場所を求めている。とくにアラミド繊維複合材料では、内部で破断した光ファイバから漏洩した光により作られた映像を外部から観察することも可能である。さらに、この映像から損傷領域が推定できることも示されている。

また、上の例のように、光ファイバが層間に埋め込まれた複合材料部材の損傷にともない生じる光ファイバの損傷あるいは破断箇所を先に述べたOTDR装置を適用してより正確に求めようとすることも試みられている<sup>12)</sup>。

しかしながら、本方法は基本的にひずみを直接測定するものではなく、構造物の部材内部に発生した損傷の検出、あるいはこの進展を監視するのに適したものである。ただ、部材の損傷が発生する前に光ファイバの損傷あるいは破断が起きるような場合であれば、このときのひずみを推定することは可能であるが、いずれにしてもこの定量的な測定への適用は困難である。

## (5) 偏光型のセンサ

光ファイバに偏光を入射したときの複屈折特性を利用した、いわゆる偏光型センサによりひずみを測定する方法も行われている。すでに述べたように、この場合には楕円コア光ファイバのような複屈折性のものが用いられる。図3は反射式の偏光型センサである。この型のセンサによるひずみの測定は光弾性実験法と全く同じ原理に基づいている。すなわち、光源からきた単色光は光弾性実験装置の偏光子、検光子と呼ばれている偏光板に相当する複屈折性の光ファイバで構成された導入部分を通過して、感知部分に入射される。この感知部分も複屈折性の光ファイバで作られていて、光弾性実験のモデル試験片に相当するものである。さらに、これがひずみを受けると偏光面が回転し、端部から反射してくる光の強度が周期的な変化をする。とくに、導入部分の偏光面と感知部分の偏光面が $\pm 45^\circ$ になるように融合結合しておく、光弾性実験における消滅型の等色線しま模様と同様な性

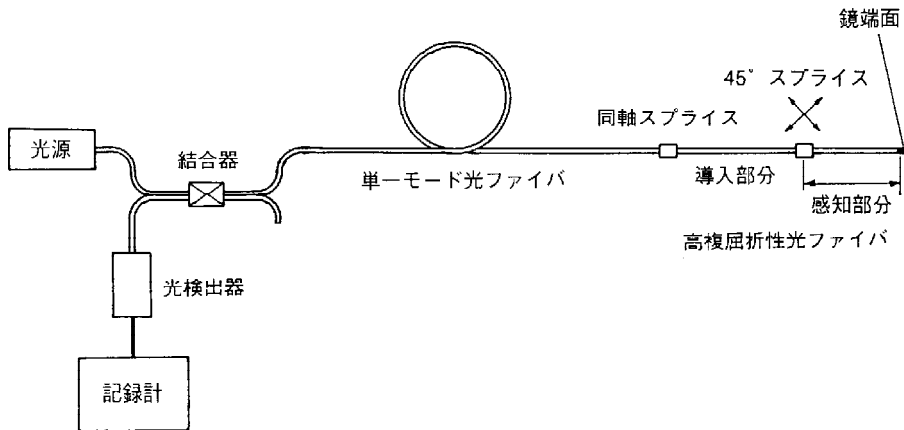


図3 偏光型センサの装置

質の波形状の出力信号が得られる。したがって、この信号波形の波数、すなわちしま回数からひずみが求められる。この型のセンサでは楕円コアの光ファイバあるいは高分子材料の光ファイバのような複屈折性のある特殊な光ファイバが使用されている<sup>13)</sup>。現在、このような光ファイバも製造されているので、偏光型センサは比較的容易に作る事ができる。しかしながら、このセンサの感知部分は長手方向、すなわち光軸方向のひずみよりもこの軸に垂直な面内のひずみに対する感度の方が著しく高くなる。このため、長手方向のひずみを測定する場合には後で述べる干渉計型センサに比べてかなり感度が低く、この方向の微小なひずみの測定に対しては必ずしも有利なセンサであるとは言えない。

#### (6) 干渉計型のセンサ

ここまで述べてきたように光の伝搬に関して光ファイバがもつ特性を利用した各種の感知機能用センサが提案されているが、とくに干渉計型のセンサは構造物の局所的な温度変化やひずみの検出あるいは測定に対して考えられているものである。一般にはすでに通信用として量産されている光ファイバが使用され、測定感度も優れているので、このような場合へ適用するセンサとしては最も有効であると思われる。また、ここでやっている研究は、局所的なひずみ測定に対する光ファイバ・センサの応用が目的であるので、主にこの型のセンサを扱って

いる。したがって、本センサについての感知原理、装置などの詳細については後で述べるが、基本的には光ファイバで光学干渉計を構成し、そこで生じた干渉の移動からひずみを求める方法である。

#### (7) 光ファイバと他の感知要素を組み合わせた型のセンサ

光ファイバは光の伝搬のみの働きをさせて、これ以外の要素を感知部分に使用した形態のセンサも試作されている。本章の最後にこのようなセンサの例を紹介しておく。

その一つに、図4のようなセンサがある<sup>14)</sup>。本センサでは、光弾性実験のモデル試験片としてしばしば用いられているエポキシ樹脂で作られた小さな立方体を感知部分にし、この両側に偏光子、検光子の働きをする偏光板を接着し、光ファイバを介してこれに光を入射し、さらに透過してきた光を検出する形態になっている。このセンサは、前に紹介した偏光型のセンサの複屈折性のある光ファイバで構成されている部分を、両側に偏光板が接着されたエポキシ樹脂の立方体で置き換えたものになっている。このため、偏光型のセンサと同様に、このセンサでも光軸方向のひずみよりも、この軸に垂直な面内のひずみに対する感度のほうが著しく大きくなる。原理的には光軸方向のひずみを感知することは可能であるが、一般には垂直な面内のひずみを感知するセンサとして使

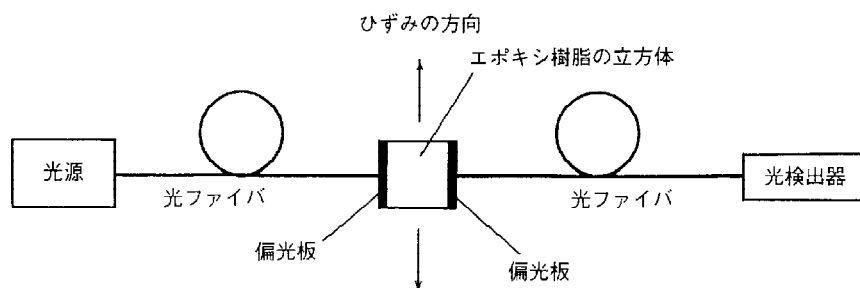


図4 光弾性光ファイバ・センサ

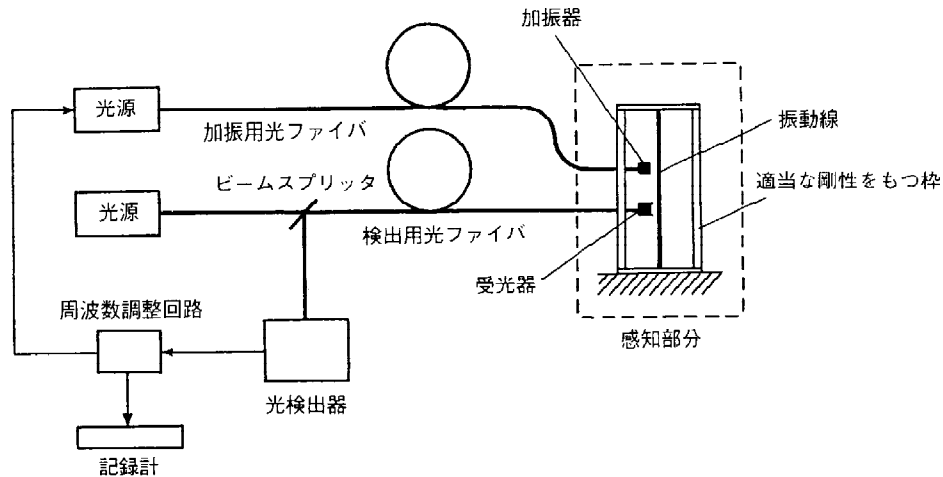


図5 振動線と光ファイバによるセンサ

用する方がはるかに効果的である。また、実際にこのような面内のひずみ測定用センサとして開発されたものであるので、適用範囲は限定されている。

さらに、図5のような比較的剛性の低い材料で作られた枠に振動線を張ったものを感知部分にし、この振動線を加振してこのときの固有振動数を検出するような形態のセンサが考案されている<sup>15)</sup>。本センサでは光音響効果、すなわち高出力のパルス状レーザー光で固体表面を照射したときに光エネルギーが音響あるいは小さな機械的エネルギーに変換され弾性波を発生する現象を利用して振動線を加振し、もう一つの光源から振動線に照射された光の反射を捉えて変位を求める方法により振動を検出している。この感知部分の振動線が張られた枠は外部から力や温度変化を受けると変形し、これにより振動線の張力が変わり、固有振動数が変化する。したがって、この場合の振動線の固有振動数の変化を検出すれば、枠の変形やひずみに関する情報が得られる。とくに、この感知部分を構成している枠を、例えば図6のような上下に蓋のある密閉された円筒にし、構造物にこれを埋め込むことによって内部の変形やひずみを感知するセンサとして使用することが可能になる。このセンサの場合も光ファイバの特性を直接感知部分に利用しているのではなく、単に振動線の加振あるいは振動線の振動を検出する光を伝搬させるのに用いているものである。この形態のセンサは環境変化の影響を受けにくく、感知部分の強度を高くすることができるので、過酷な条件下でも使用可能である。しかし、感知部分の寸法を小さくするには限界があるので、複合材料部材に埋め込むようなセンサにすることは基本的にできない。このような面から、本センサは主に大型の知的土木構造物、とくにコンクリート構造物内部の情報を得るセンサとしての応用が期待されている。

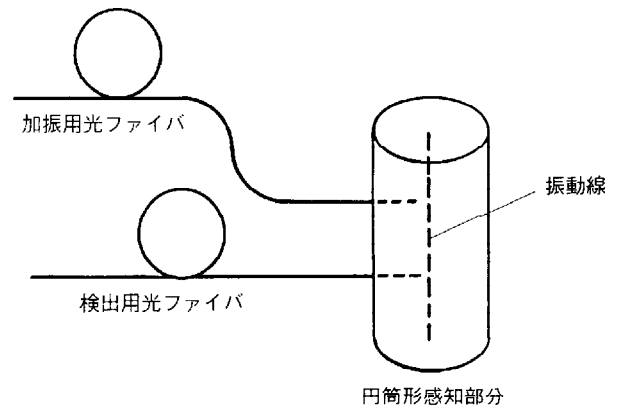


図6 振動線を内蔵した円筒形の感知部分

### 3. 干渉計型センサによるひずみ測定

すでに述べてきたように、構造物の変形あるいはひずみ測定用のセンサとして、光ファイバがもつ種々の特性を利用する方法が提案されている。しかしながら、先進複合材料を母材とする知的構造開発の見地から、構造物内部の局所的なひずみ測定などの、定量的な面への応用の可能性と各センサの特徴などを考慮すると、干渉計型センサが最も有効であると判断された。そこで、ここではとくにこの型のセンサによる定量的な測定の研究を進めた。

#### 3.1 干渉計型センサのひずみ測定原理

干渉計型の光ファイバ・センサはマッハ・ツェンダー、マイケルソン、フィゾー、ファブリ・ペローなどの光学干渉計を光ファイバで構成したものである。これには、基本的にレーザー光のような単一波長の可干渉光が使用される。一つの光源からきた可干渉光を分割し、これらの光を長さ差のある二つ光路に伝搬させ、再び重ねると、光路長さの差に関係した位相差により干渉が起き

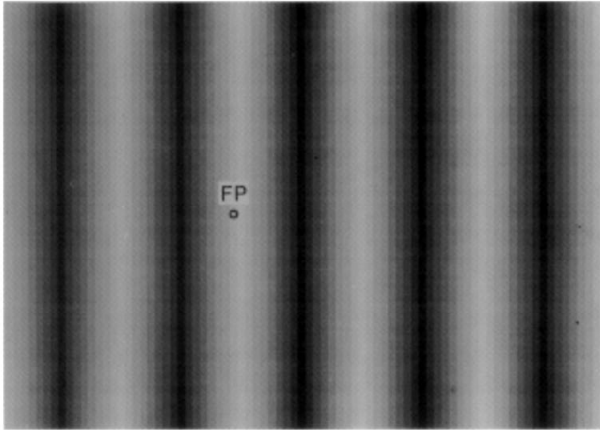


図7 光学干渉計におけるしま模様

る。さらに、分割されている光路の一方の長さを変化させ、位相差の変動を与えると、上述の干渉が移動する。この現象は、図7に示したような、光学干渉計で観察される干渉のしま模様が位相差の変動により矢印の方向に移動することに相当している。光ファイバで構成された干渉計の場合は、このしま模様のFPのようなある固定された点の明るさ、すなわちこの点の光の強さを捉えていると考えられる。したがって、光路長さの差が変化して位相差が変動すると、干渉の移動によってこの点における光の強度が変化する。とくに、この位相差の変動が一方向の場合は、干渉じまの明るいところと暗いところが交互に移動して行くので、このときの光の強度は周期的な変化をする。また、光ファイバ・センサの場合は、分割された光を伝搬するファイバの一部分が外力などにより変形あるいはひずみが生じると、これが位相差の変動を与えることになる。したがって、このときの光の強度の変化を検出すれば、これから光ファイバに生じている変形あるいはひずみが求められる。さらに、この光ファイバの一部分を構造物の表面に接着し、あるいは構造物の内部に埋め込むことによって、この構造物と光ファイバの変形が同一になっているとすれば、この場合の変形あるいはひずみが得られる。以上が干渉計型の光ファイバ・センサによるひずみ測定の原理である。

なお、本節の始めに述べてあるように、各種の光学干

渉計に対応した形態の光ファイバ・センサが提案されている。しかし、例えば図8のようなマッハ・ツェンダー干渉計のセンサは光ファイバを閉ループで構成させた形態になっていて、ファイバの破断などを考えると、構造物の局部における変形あるいはひずみを求めるためには必ずしも実用的ではなく、したがって干渉計型センサの全ての形態のものがこのような目的への応用に適しているとは限らない。

この観点から、本研究ではとくに構造物の局所的な変形あるいはひずみ測定への応用に適していると思われるマイケルソン干渉計型センサとファリ・ペロー干渉計型センサを取り上げ、これらのセンサ装置の試作をするとともに、ひずみ測定の実験によって、将来の知的構造物用センサとしての実用性に関する検討を行った。

### 3.2 マイケルソン干渉計型センサ

#### 3.2.1 マイケルソン干渉計型センサの構成とひずみ測定の理論

図9はマイケルソン干渉計型センサによるひずみを測定するための装置の模式図である。本装置は、全て単一モードの光ファイバで構成されていて、まず光源からの可干渉光はコネクタを介して光ファイバに入射される。さらに、このファイバを伝搬してきた光は、参照アームと感知アームと称されている2本の光ファイバに双方向結合器で分割されて伝搬する。この2本の光ファイバの端面はいずれも鏡の状態になっている。したがって、各ファイバを伝搬してきた光は、端面で反射される。これらの反射光は再び双方向結合器のところで重ねられる。可干渉光であるので参照アームと感知アームの長さが違っているとここで干渉が起きる。

このような場合の干渉による光の強度は光学干渉計の場合と同様であり、一般に次のような式で与えられている<sup>16)</sup>。

$$I = A_s^2 + A_r^2 + 2A_s A_r \cos \phi \quad (4)$$

ここで、 $I$  は光の強度、 $A_s$  および  $A_r$  は感知アーム及び参照アームを伝搬してきた反射光の振幅、 $\phi$  は位相差である。

さらに、感知アームが力などを受けて長さが変化する

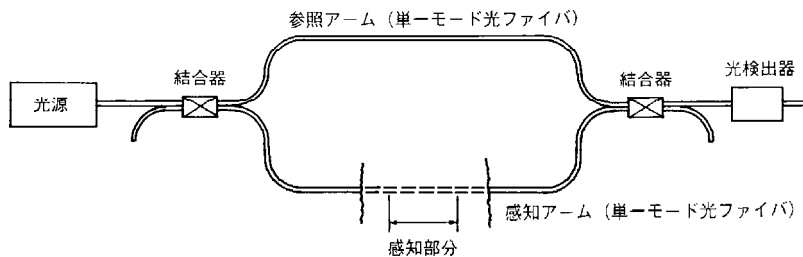


図8 マッハ・ツェンダー干渉計型センサの装置



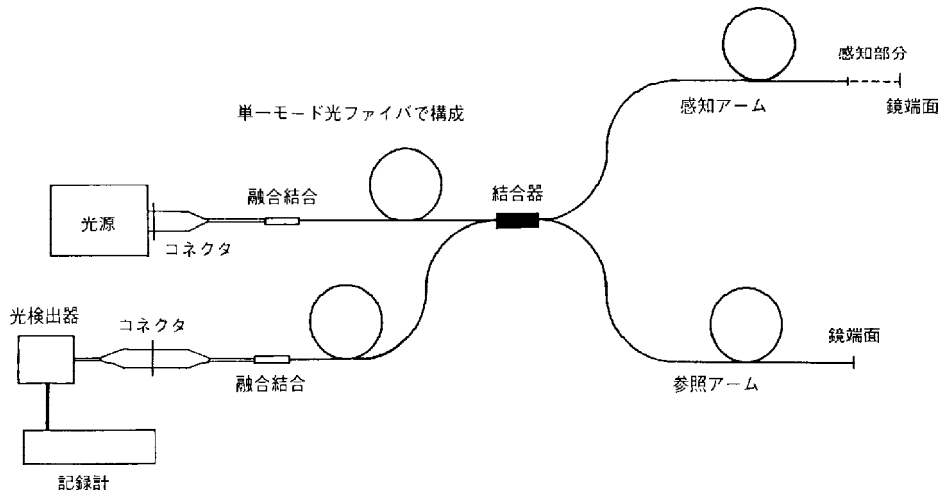


図9 マイケルソン干渉計型センサの装置

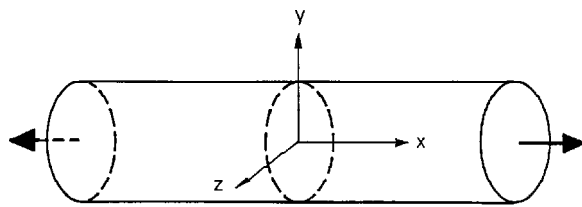


図10 光ファイバのコアと考えられる円筒の座標系

と、この干渉が移動する。このようなときには式(4)の位相差が次のようになる。

$$\phi = \phi_0 + \Delta\phi \quad (5)$$

ここで、 $\phi_0$ は感知アームが長さの変化を受ける前の位相差、 $\Delta\phi$ はこのアームの長さ変化によって生じた位相差変動である。

一方、感知アームの変形を受ける部分になる光ファイバのコアが図10のような細長い円筒であるとし、温度変化のない条件の下で、長手(x)方向の引張あるいは圧縮のみの変形を受けているとする。このような場合には、式(5)における位相差変動が次の式で与えられている<sup>17)</sup>。

$$\Delta\phi_s = \frac{4\pi n_{10}}{\lambda} \left[ 1 - \frac{1}{2} n_{10}^2 \{p_{12} - v(p_{11} + p_{12})\} - \frac{2vV_0^3 \pi^2}{a^2 n_{10}^2 \lambda^2} \frac{\partial b}{\partial V} \frac{\partial V}{\partial V} - \frac{2V_0 \pi^2}{a^2 \lambda^2} \{p_{12} - v(p_{11} + p_{12})\} \frac{\partial(V^2 b)}{\partial V} \right] \varepsilon L \quad (6)$$

ここで、 $\varepsilon$ は変位あるいはひずみに関係した位相差変動、 $\lambda$ は可干渉光の波長、 $n_{10}$ 及び $V_0$ は光ファイバが変形を受ける前のコアの屈折率及び規格化された周波数、 $a$ はこのコア材料のポアソン比、 $b$ は規格化された伝搬定数、 $L$ は長手方向のひずみ、 $L$ は感知部分(ゲー

ジ)の長さ、 $p_{11}$ および $p_{12}$ はひずみ・光学定数である。

なお、この式(6)の $V$ に関する微分を含んだ第2及び第3項はいずれも光の伝搬損失に関係した導波路分散の項であるが、ここで扱っているような場合には、これらの項を無視しても差し支えないことが確認されている<sup>17)</sup>。したがって、 $\Delta\phi_s$ は近似的に次のような式で表わすことができる。

$$\Delta\phi_s = \frac{4\pi n_{10}}{\lambda} \left[ 1 - \frac{1}{2} n_{10}^2 \{p_{12} - v(p_{11} + p_{12})\} \right] \varepsilon L \quad (7)$$

前に示した図9の場合のように、感知アームとなっている光ファイバの先端の部分を外力などで変形を受ける構造物の表面にはり付けておけば、これが感知部分になる。このため、構造物の変形に伴い感知部分の長さが変化して干渉の移動が生じる。このときの位相差変動を光の強度の変化から求めれば、構造物にはられた感知部分の長手方向の変位が決定できる。また、この感知部分の長さが既知であれば、これに対する変位になるので、式(7)から導出される次式により、この部分のひずみに換算することができる。

$$\varepsilon = \frac{1}{C} \frac{\Delta\phi_s}{2\pi} \quad (8)$$

$$C = \frac{2n_{10}L}{\lambda} \left[ 1 - \frac{1}{2} n_{10}^2 \{p_{12} - v(p_{11} + p_{12})\} \right]$$

とくに、感知部分が引張あるいは圧縮のみの変形をし、すなわち一方に一定の速さで変形が増加して行く場合の光の強度を光電素子で電気的な出力に変換して検出し、これを時間に対して、オシロスコープなどで観察すると、図11のような正弦状の信号波形になると推定される。この波形の周期は $\varepsilon$ が $2$ になった場合に対応している。したがって、これから位相差変動 $\Delta\phi_s$ が決定できる。また、この場合のひずみ $\varepsilon$ は $\Delta\phi_s$ と式(8)の

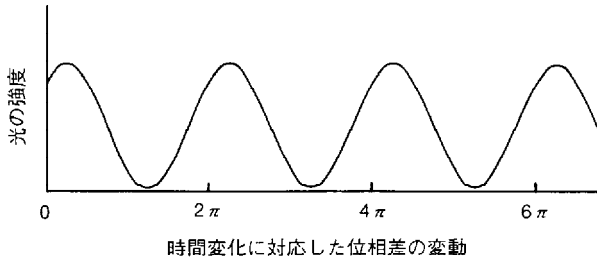


図11 引張あるいは圧縮試験で検出される信号

関係になっているが、この式に含まれる可干渉光の波長および光ファイバの感知部分における寸法や特性に関する各値が既知であり、これらが一定であるとすると、この関係は線型になる。

なお、干渉計型のセンサは一般に温度変化にも依存する。このため、温度変化を伴う環境下での適用にはこの補償をする必要があるが、このような場合には、位相差変動が次のような形で表わされる。

$$\Delta\phi = \Delta\phi_s + \Delta\phi_t \quad (9)$$

ここで、 $\phi_t$ は温度変化による位相差変動である。マイケルソン干渉計型のセンサでは、前者の $\phi_s$ が式(6)あるいは式(7)で示されたものになる。一方、後者の $\phi_t$ は感知部分の熱変形と温度依存性のある光ファイバの屈折率が関係したものになり、次の式で与えられる<sup>18)</sup>。

$$\Delta\phi_t = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ \frac{n_{10}}{L'} \left( \frac{dL'}{dT} \right) + \frac{dn_{10}}{dT} \right\} \Delta T \quad (10)$$

ここで、 $T$ は温度、 $\Delta T$ は温度変化である。また、 $L'$ は感知部分に関係した長さで、ここで扱っているマイケルソン干渉計型では $2L$ になる。

温度変化のある環境下では、このような温度変化の項が含まれた位相差変動が検出されることになる。しかし、この場合の位相差変動は式(9)の形になるので、

$\phi_t$ に関する項を温度のみが変化するような実験をして求めるか、あるいは式(10)から求めて、これを差し引くことにより温度変化の補償をすることができる。

### 3. 2. 2 マイケルソン干渉計型センサによるひずみ測定の実験

マイケルソン干渉計型の光ファイバ・センサによる構造物の局部的なひずみ測定の可能性を実証するための実験を行った。本実験では、構造物の表面におけるひずみを測定する目的で、図12に示すような形状および長さ260mm、幅20mm、厚さ3mmなる寸法の片持帯板試験片上面にこの干渉計型センサの感知部分をはり付け、変位が正確に読みとることのできるネジ式の負荷装置により自由端に上あるいは下方向のたわみを与えたときのひずみを求めた。帯板試験片の材質は航空機構造用アルミ

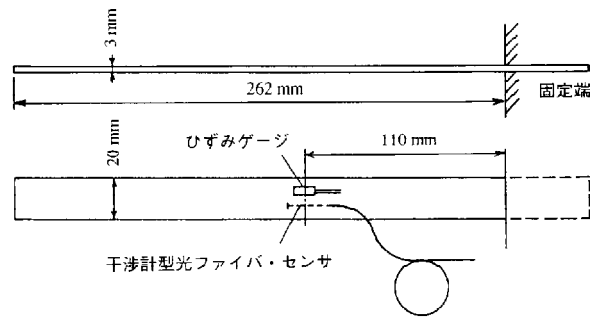


図12 静たわみを与えたアルミニウム合金片持帯板試験片の形状・寸法とひずみの測定位置

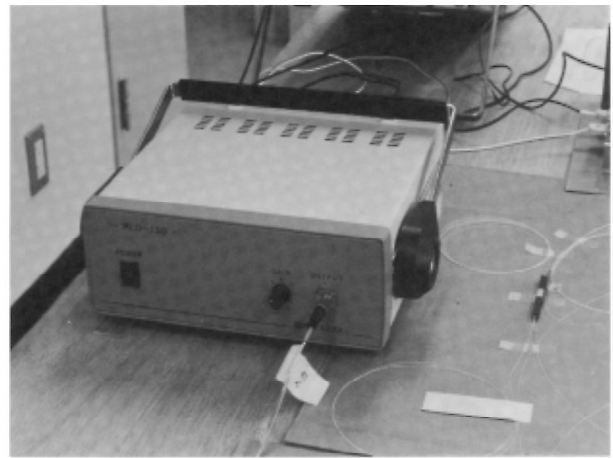


図13 光源装置の外観

ニウム合金(2024S)で、縦弾性率は72.6GPaである。また、光ファイバ・センサで得られた測定結果との比較をするために、試験片表面の同じ大きさのひずみが生じると考えられる箇所に電気抵抗ひずみゲージを接着して、同時にひずみを測定した。マイケルソン干渉計型光ファイバ・センサの装置全体の模式図についてはすでに図9に示してあるが、ここで使用した光源は図13のような装置の出力1 mW、波長1307nmの半導体レーザである。光検出装置は上述の波長に対応した光電素子と直流増幅器により構成されている。図14にはこの装置を示してある。出力信号である光の強度変化はここで電圧に変換し、この出力をデジタルストレージ・オシロスコープに入れて観察した。これらの各装置の入出力用光ファイバ、参照ならびに感知アーム用光ファイバは全て通信用として生産されている石英ガラスの単一モード光ファイバである。また、光源や検出器と光ファイバとの結合あるいは光の分割や重ね合わせにも、すでに通信用として市販されている結合損失の小さいコネクタおよび双方向結合器を使用している。

図15は、感知部分の長さ $L$ が24.5mmの場合の実験で観察された出力信号の例である。この信号波形は帯板の

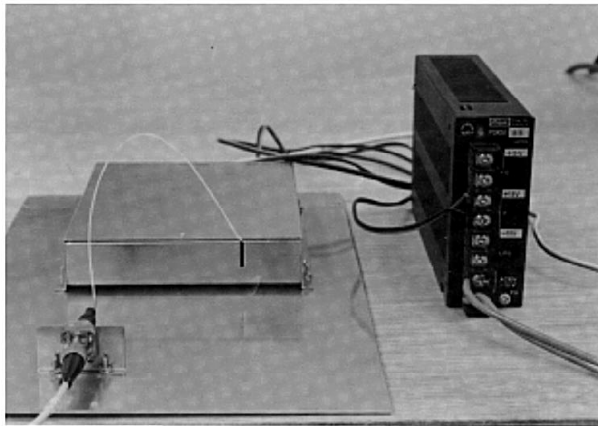


図14 光検出装置の外観

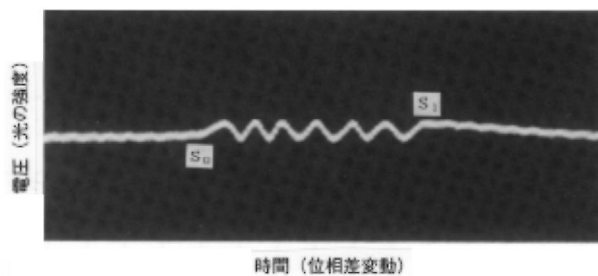


図15 マイケルソン干渉型センサで観察された信号の例

たわみにより表面に生じたひずみに対応している。すなわち、この図の $S_0$ と $S_i$ の間がたわみを与えたときの試験片表面の引張ひずみに関係した信号波形で、この場合には電気抵抗ひずみ計で測定された  $176 \times 10^{-6}$  のひずみ量に相当している。また、ここで得られている信号波形は、先にひずみが一定速度で増加して行く場合に対して理論的に推定された、図11のような正弦状の波形のものほぼ一致している。

表2には、この実験に用いた石英ガラスの単一モード光ファイバの諸特性を示してある。さらに、波長1307nmの可干渉光を使用しているので、感知部分の長さ $L$ を10mmとしたときの信号波形の1波長、つまり位相差変動として干渉しま1本分が移動した場合に相当するひずみ量が、前の式(8)に表2の各特性値を代入することによって求められる。ここでは、この1波長に対応するひずみ量が  $\pm 113.8 \times 10^{-6}$  であった。これは感知部分の長さ $L$ が10mmの場合のひずみと位相差変動との関係を示

表2 石英ガラスファイバの諸特性

コアの屈折率	$n_1$	1.456
縦弾性率	$E$	70 MPa
ポアソン比	$\nu$	0.17
ひずみ・光学定数	$p_{11}$	0.121
	$p_{12}$	0.270

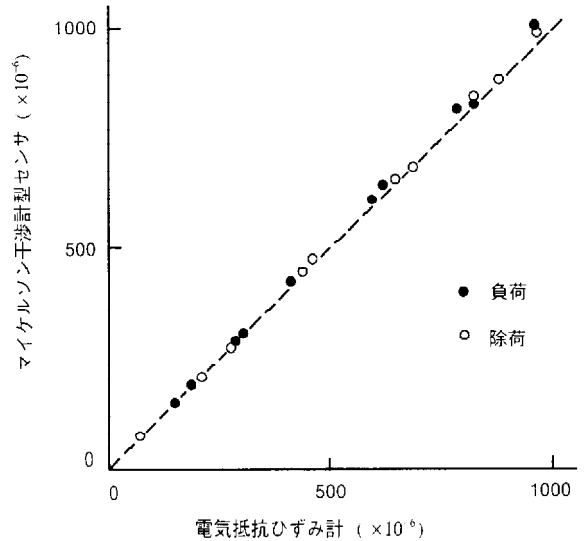


図16 マイケルソン干渉計型センサと電気抵抗ひずみ計で測定されたひずみの値と比較

す式(8)の係数になる。このマイケルソン干渉計型センサで得られた信号波形の波数は2の整数倍になる位相差変動と考えられる。したがって、感知部分の長さとその波数を測定することにより、その波数に対するひずみ量を計算することができる。

図16は片持帯板試験片のたわみの実験で得られた各信号波形から、このようにして求められたひずみの値と電気抵抗ひずみ計で測定された値とを比較したものである。本図では、前者のマイケルソン干渉計型センサによる値を縦軸、後者の電気抵抗ひずみ計による値を横軸にとり、両者を同一の目盛にしてある。このため、各たわみを与えた時点で両者の値が完全に一致する場合は、点線で示した45°の直線になる。本実験の各たわみ点で測定された値はほぼこの直線上に載っている。したがって、この図に示された結果はマイケルソン干渉計型光ファイバ・センサで測定されたひずみの値が妥当であり、ひずみが一方に増加するような場合の測定には、定量的にも十分信頼できる方法であることを実証している。

### 3. 2. 3 実験結果に関する検討

本方法による測定感度、すなわち測定可能な最小のひずみ量を評価するためには、信号波形の波数の端数をどの程度まで求められるかという測定精度が問題になる。この実験では、参照および感知アームの端面にアルミニウムの微粉末を付着させて鏡面を形成させたが、必ずしも良好な反射面になっているとは言えず、また光源の出力にも多少の変動があるので、信号波形の振幅が小さく、この上に光学的な雑音が見られている。とくに雑音波形の振幅を考慮すると、ここで判定可能な波数の端数は0.3波程度であると推定される。したがって、この場合の感度は  $\pm 30 \times 10^{-6}$  になる。しかしながら、光源の

出力変動による雑音は信号波形の上に高振動数成分が重なった形で現われている。このことから、感度を向上させるためには振幅の大きい信号波形を検出することが先決であり、参照ならびに感知アーム用光ファイバの良好な鏡状端面の製作法を開発する必要がある。

これに対して測定範囲、すなわちどの程度の大きさまで測定が可能であるかの検討もしておかなければならない。先の図16は試験片の最大ひずみを受けるところが弾性領域内の実験であったために、約  $1100 \times 10^{-6}$  までの結果である。本センサでは原理的に感知部分が破断するまで干渉の移動に関連した信号は検出できるものと考えられる。しかし、ここまでこの信号から得られる位相差変動とひずみとの関係が式(8)で表わせるかの保証はない。したがって、この点を確認することが今後の課題の一つである。

なお、一般に干渉計型のセンサでは、ここで示されているように、干渉の移動による光の強度変化を信号波形として観察している。この場合、変位あるいはひずみの方向によって干渉の移動方向は異なっているはずであるが、この強度変化を時間に対して検出しているため、いずれの方向も同一の信号波形が観察される。このため、変位あるいはひずみが引張の場合も圧縮の場合も全く同じ信号波形になり、区別ができない。これに対しては光ヘテロダイン技術を利用して符号を判別する手法なども考えられる。しかし、これにはかなり複雑な光学系装置を導入しなければならない<sup>9)</sup>。

また、ここで行った実験は構造物表面のひずみ測定である。この場合、基本的には感知アームの構造物表面に接着された部分、すなわち感知部分の長さに対する変位を求めている。このため、ひずみへの換算にはこの長さをあらかじめ正確に知っておかなければならない。

さらに、感知部分に構造物の変形を忠実に伝えなければならないので、この部分は光ファイバに施されている被覆をがし、コアとクラッドだけの裸の状態にして接着している。この状態の光ファイバは強度的にきわめて弱く、破断し易い。しかし、本実験で扱っているマイケルソン干渉計型センサでは、感知部分が破断しても感知アームとして用いている光ファイバの残りの部分の端面を鏡状にするだけで、再度感知部分を製作することが容易にできるという利点がある。このため、構造物表面のひ

ずみ測定にはきわめて有効な方法である。また、この部分は量産されている単一モードの光ファイバを使っているので、非常に安価なセンサである。

一方、知的構造の感知機能用センサとして適用するためには、構造物に埋め込み、内部の局部的なひずみの情報が得られるようなものにしなければならない。とくに、先進複合材料の構造部材では成形過程でこの埋め込みが可能と考えられている。しかし、上述のような感知部分の強度の問題があり、まずこの部分を破損せずに埋め込むことができる手法を開発する必要がある。また、完全な形で埋め込むことができたとした場合には、次のような問題が生じる。

その一つとして、例えばここで扱ったマイケルソン干渉計型のもので感知アームの一部分を構造部材に埋め込んだとすると、埋め込まれた部分全体が感知部分の働きをしてしまうので、局部的なひずみの測定は不可能である。このため、図17のようにして参照アームと感知アームの両方を部材内部に埋め込む方法が考えられている<sup>4)</sup>。この場合には両アームの埋め込まれている部分の長さの差が感知部分になり、局部的なひずみの測定が可能になる。しかし、ある一部分のひずみを測定するために2本の光ファイバを対にして埋め込まなければならないので、構造部材の強度への影響が大きくなり、この点の検討が必要になる。

この他以下のことも考慮しなければならない。いま、光ファイバが構造部材に埋め込まれていて、このファイバの細長い円筒の表面は構造部材の内面に完全に接着されているとする。この場合でもひずみ測定に対する理論は基本的に構造部材の表面に接着されている場合と同じである。しかし、表面の場合は先の式(8)に含まれているポアソン比に關係した  $\nu$  の値に光ファイバのコア材料のものをを用いればよいが、埋め込まれている場合はこの  $\nu$  の値が構造部材のポアソン比の影響を受ける。このため、有効ポアソン比<sup>17)</sup>、すなわち光ファイバと構造部材のポアソンが連成した値を使用しないと、正確なひずみを求めることができない。

### 3.3 ファブリ・ペロー干渉計型センサ

構造物内部の局部的なひずみを測定する有効なセンサとして、ファブリ・ペロー干渉計型のものも注目されて

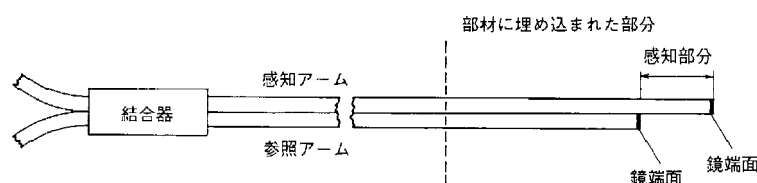


図17 構造部材内部のひずみ測定用マイケルソン干渉計型センサ

いる。

先のマイケルソン干渉計型センサが、内部のひずみ測定には2本の光ファイバで構成された感知部分を使用するのに対して、本センサは1本の光ファイバのみで構成されている。このことは、構造物あるいはこの部材の内部へ埋め込むことを考えると、きわめて有利な特徴になる。しかし、これには可干渉光を半反射する断面をもった感知部分を製作する必要がある。現在、これに対して内在型 (intrinsic) と外部型 (extrinsic) と言われる二つの形態のものがある。

3. 3. 1 ファブリ・ペロー干渉計型センサの構成とひずみ測定の理論

(1) 内在型感知部分のセンサ

図18は内在型感知部分をもつファブリ・ペロー干渉計型センサ装置の構成を示す模式図である。本装置の光源、光検出器、結合器、コネクタにはマイケルソン干渉計の場合と全く同じ特性のものを用いることができ、使用される光ファイバも市販されている単一モードのものである。また、この感知部分は図19のようになっている。すなわち、光が伝搬してくるファイバの端面を半反射面にして、この面のところで感知部分を融合結合させた状態になっている。このため、光源からきた可干渉光の一部はこの結合面で反射される。一方、この面を透過した光は感知部分の鏡状になった端面で反射される。この二つの反射光は光ファイバ内で重ねられるが、両者の間には感知部分の長さに対応した差があるので干渉が起きる。さらに、感知部分が力などを受けて長手方向に変形すると干渉が移動して位相差変動を生じる。したがって、位相差変動から感知部分の長手方向の変形あるいは変位を求めることができ、この部分の長さが既知であれば、ひずみが決定できる。

この場合の干渉による光の強度は、光が感知部分を往復する間に多重反射などによる損失が生じるので、次のような式で表わされる<sup>19)</sup>。

$$I = (1-\alpha)^2 A_e^2 + A_f^2 + 2(1-\alpha) A_e A_f \cos \phi \quad (11)$$

ここで、 $\alpha$  は感知部分を往復した光の損失係数、 $A_e$  及び  $A_f$  は感知部分の端面及び半反射断面で反射された光の振幅である。

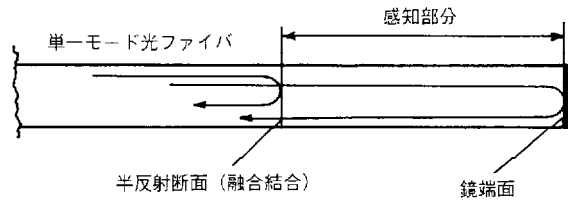


図19 内在型感知部分の構造

しかし、一般に多重反射の影響は小さいとされており、感知部分も短いので、は無視できる。したがって、式(11)は次のようになる。

$$I = A_e^2 + A_f^2 + 2A_e A_f \cos \phi \quad (12)$$

この式は、半反射面までが参照アーム、感知部分の端面までが感知アームに相当すると考えられるので、前述のマイケルソン干渉計型センサの場合の式(4)と全く同じになる。また、干渉の移動による位相差変動もマイケルソン干渉計型のものと同じになり、ひずみ と の関係も前の式(8)で与えられる。

(2) 外部型感知部分のセンサ

外部型感知部分をもつファブリ・ペロー干渉計型センサ装置の構成を図20に示すが、コネクタから先の感知部分を除くと図18に示した内在型の場合と同じである。しかし、この場合の感知部分は図21のような構造になっている。これは、図のように端面が半反射面になった単一モード光ファイバと端面が完全な反射面の働きをする多モード光ファイバとの間に間隙を置き、これらの光ファイバよりもわずかに大きい内径をもった円筒の端部で接着された形状になっている。光源から単一モードの光ファイバを伝搬してきた可干渉光は、この半反射面になったところで一部が反射される。さらに、半反射面から間隙に放出された光は多モード光ファイバの端面で反射され、この反射光の一部が再度単一モード光ファイバに入射される。この二つの反射光はこの単一モード光ファイバのところで重ねられるが、間隙幅の2倍に相当する光路の差があるので干渉が起きる。さらに、外側の円筒が長手方向に変形し、間隙幅が変化すると干渉が移動する。したがって、このときの位相差変動から間隙幅の変化が判る。これは外側の円筒、すなわち感知部分の変位

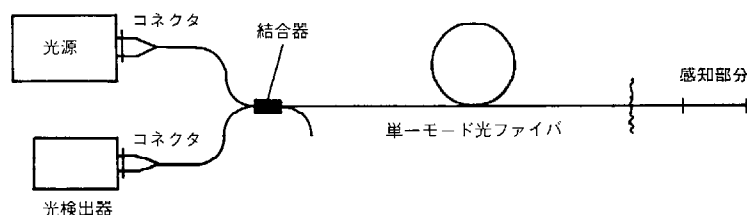


図18 内在型感知部分のファブリ・ペロー干渉計型センサの装置

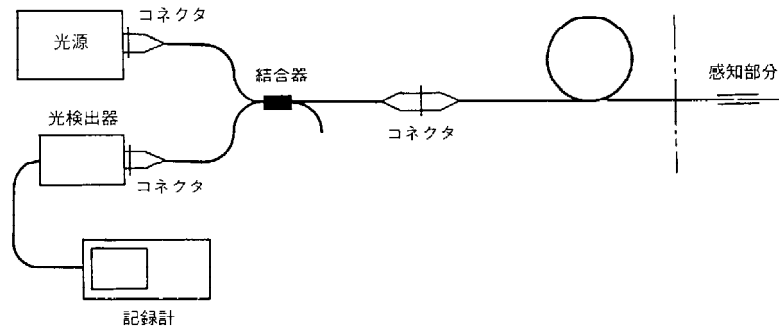


図20 外部型感知部分の場合のファブリ・ペロー干渉計型センサの装置

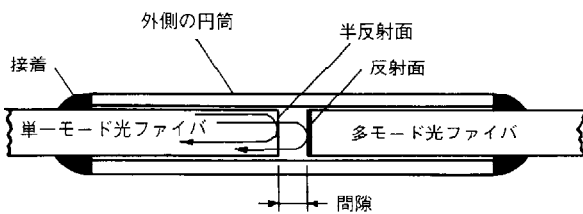


図21 外部型感知部分の構造

になるので、この部分の長さが既知であればひずみが求められる。

この場合の干渉による光の強度も前の式(11)と同じ形の次式で与えられる。

$$I = (1-\beta)^2 A_m^2 + A_f^2 + 2(1-\beta)^2 A_m A_f \cos \phi \quad (13)$$

ここで、 $\beta$  は間隙を往復して再度単一モード光ファイバに入射される光の損失係数、 $A_m$  はこの光の振幅である。

また、この外部型感知部分の場合は間隙幅が変化したときの位相変動が次のようになる。

$$\Delta\phi_s = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta S \quad (14)$$

ここで、 $S$  は間隙幅の変化である。

この  $S$  は外側の円筒、すなわち感知部分の長手方向の変位と見なせるので、この部分の長さが既知であれば、ひずみと位相差変動は次のような関係になり、これからひずみを決定することができる。

$$\varepsilon = \frac{\lambda}{2L} \frac{\Delta\phi_s}{2\pi} \quad (15)$$

ここでも、 $L$  は感知部分の長さである。

内在型感知部分のものでは、光ファイバ自身が受けるひずみを求めている。このため、例えば長手方向のみのひずみを受けた場合でも、この方向のみでなく、これとは直交する半径方向のひずみも生じ、前の式(8)のようにひずみと位相差変動の関係にはポアソン比に係わる項が含まれてくる。これに対して、外部型感知部分をもったセンサは、式(15)で明らかのように、位相差変動が直

交する方向のひずみ成分には全く関係せず、間隙幅が広がるかあるいは縮むような変化、すなわち感知部分の長手方向の変位のみに関係したものになっている。このことは、構造物の表面に感知部分を接着した場合も内部に埋め込んだ場合も同一な条件でひずみが決定できることを示している、内部の局部的なひずみを測定する場合にはきわめて有効なセンサになる。ただ、この型の場合は、多モード光ファイバの端面で反射し、再度単一モード光ファイバに入射される光の量は間隙幅により変化するので、式(13)の  $\beta$  の値を無視することはできない。また、一般に  $\beta$  の値は感知部分が引張を受けて間隙幅が広がると大きくなり、逆に圧縮を受けて縮まると小さくなると考えられるので、この多モード光ファイバ端面からの反射光のみを検出すればひずみの符号、すなわち引張か圧縮かの区別をすることが可能になる。

さらに、この  $\beta$  の値の変化を利用してひずみを求める方法も考えられている。ただ、この方法は間隙幅の変化と  $\beta$  の値との関係が非線型になり、再現性の面でも疑問があるので、定量的な測定にはまだ検討の余地がある。しかしながら、本研究で行っているような干渉の移動による位相差変動からひずみを求める方法では、 $\beta$  の値が変化しても干渉の光の最大の強度、つまり検出される信号波形の振幅が変化するだけで、位相差変動には無関係である。このため、信号波形から位相差変動の判定が可能な限り、この感知部分をもつセンサでひずみの測定ができる。

なお、ファブリ・ペロー干渉計型のセンサにおいても、温度変化のある環境下の測定では、これに対する補償をしなければならない。この場合、内在型感知部分のセンサでは、温度依存に関する特性が先のマイケルソン干渉計型センサと全く同じである。したがって、この温度補償についても同じになると考えることができる。一方、外部型感知部分のセンサでは、この感知部分が図21のようになっているため、外側円筒の熱変形が関係してくる。この場合も全体の位相差変動は3.2.1項における式(10)と同じ形で与えることができるが、温度変化によ

る位相差変動  $\Delta\phi_t$  は次のような式になる。

$$\Delta\phi_t = \frac{4\pi}{\lambda} qL\Delta T \quad (16)$$

ここで、 $q$  は被測定構造物の熱膨張率である。

すなわち、この感知部分のセンサでは式(16)により

$\Delta\phi_t$  を求めることによって、温度補償することができる。

とくに、感知部分の外側円筒に被測定構造物と同一の材料を使用すれば、より完全な形で温度補償された感知部分を製作することも可能になる。

### 3. 3. 2 外部型感知部分のセンサによるひずみ測定の実験

すでに述べたように、内在型感知部分をもつファブリ・ペロー干渉計型センサのひずみ測定の理論は基本的にマイケルソン干渉計型のセンサと同じであるが、外部型感知部分のものはかなり異なっている。このようなことから、ここではとくに外部型感知部分のセンサによるひずみ測定の有効性を実証するための実験をした。実験装置の構成については、すでに図20に示してあるが、この場合の光源、光検出器、結合器、コネクタ、あるいは光源からの光を伝搬する単一モードの光ファイバはマイケルソン干渉計型のセンサに対して行った実験と同一のものを使用している。一方、外部型感知部分は、すでに市販されているものが幾種類もあり、本実験では Canadian Marconi社製のものを使用した。この感知部分は長さ  $L$  が10mmのもので、コネクタの付いた単一モードの光ファイバに結合されている。これは、電気抵抗ひずみ計におけるリード線付きのひずみゲージに相当した形になっていて、コネクタのところで取り外しができ、消耗品として扱えるようになっている。また、この部分のコネクタ及び単一モード光ファイバには専用のものが使われているが、特性などは現在日本で製造されているコネクタ及び光ファイバとほぼ同じである。

このセンサに関する実験も、まず片持帯板試験片にたわみを与えたときの表面におけるひずみの測定をした。試験片は前述のマイケルソン干渉計型センサの場合と同様なアルミニウム合金の帯板で形状寸法も前の図12に示されているものとほぼ同じである。また、ここでも比較検討をするために同一なひずみが生じていると思われる場所に電気抵抗ひずみゲージを接着して、同時にひずみを測定した。

図22は感知部分の長さ  $L$  が約10mmのもので検出された信号波形の例で、 $S_0$  から  $S_1$  までの部分は電気抵抗ひずみ計で得られた  $-433 \times 10^{-6}$  の圧縮ひずみに対応している。また、波長1307nmの可干渉光を使用しているので、 $L$  を10mmとしたときの信号波形の1波長、すなわち位相差変動  $\Delta\phi_t$  が  $2\pi$  の場合のひずみ量は  $\pm 65.4 \times 10^{-6}$  になる。したがって、この値と各たわみが

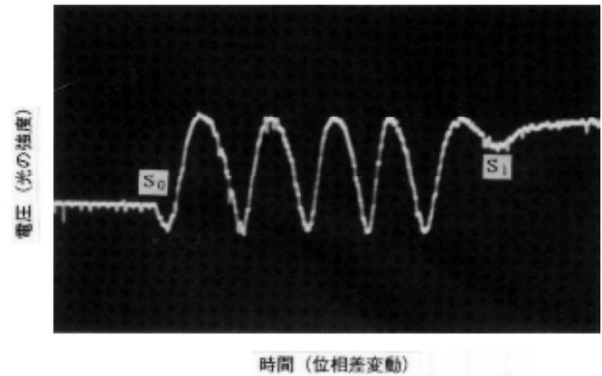


図22 外部型感知部分のファブリ・ペロー干渉計型センサで観察された信号の例

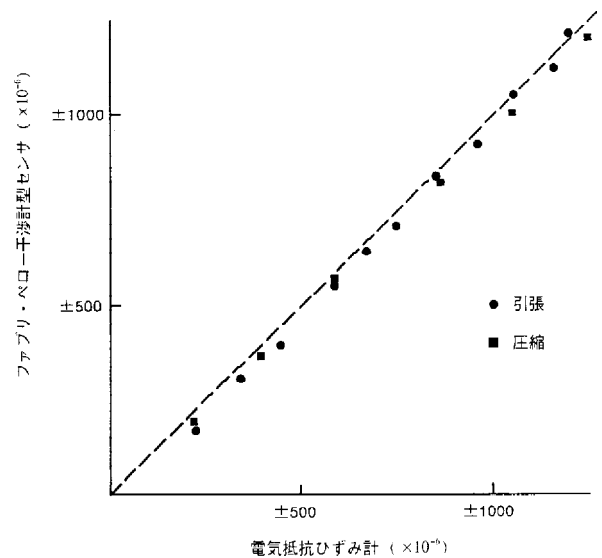


図23 ファブリ・ペロー干渉計型センサと電気抵抗ひずみ計で測定されたひずみの比較

与えられた点における信号波形の波数から試験片表面のひずみが求められる。

図23は上述のようにして求められたひずみと電気抵抗ひずみ計で測定されたひずみとを比較したものである。本図も縦軸はこの型の光ファイバ・センサ、横軸は電気抵抗ひずみ計で測定されたひずみの値を示し、両軸とも同一の目盛になっている。このため、両者が完全に一致した場合はたわみの各測定点における値が点線と与えられている直線の上に載らなければならない。この結果では、これらの値が引張、圧縮両方とも多少ずれていて、ばらつきがある。しかし、ここでは感知部分の長さ  $L$  を10mmとしているが、この長さは端部の接着状態によって、多少異なる可能性があり、測定結果への影響は無視できない。一方、電気抵抗ひずみ計で測定された値にも測定誤差などが含まれている。これらのことが、上述のずれやばらつきの原因になっていると考えられる。

しかし、図23では二つの方法で測定された値を比較した点の傾向はほぼ点線で示した直線に一致している。したがって、この実験で扱った光ファイバ・センサが引張あるいは圧縮を受ける構造物のひずみ測定に有効であることは実証されている。

### 3.3.3 実験結果に関する検討

以上のように、外部型感知部分をもつファブリ・ペロー干渉計型センサも、静あるいは準静的なひずみ測定に対して十分適用し得ることが明らかになった。しかしながら、本センサの場合も検討を要する課題がある。

まず、このセンサの場合もひずみ測定が可能な範囲を示しておく必要がある。測定可能な最小のひずみ量に関してはこのセンサでもやはり信号の波数の端数に対する判定が鍵になる。ただ、ここで使用した感知部分は半反射面、反射面が良好であるので、前の図22のように、比較的振幅の大きい信号波形が得られている。また、理論的にはこの波形は正弦状になる。しかし、本図のようにここでの波形は完全な正弦状になっていない。これは半反射面のところにフィルタ効果が入っているためである。さらに、光源のわずかな出力変動による信号もこの上に重なって現われている。したがって、このような雑音による波の振幅とひずみによる信号波形の振幅との比から推定して、測定精度すなわち信頼できる範囲で判定できる波数の端数は0.2波程度である。これは感知部分の長さ $L$ を10mmとすると $\pm 13.1 \times 10^{-6}$ のひずみ量になる。一方、測定可能なひずみの範囲は間隙幅が広がって行く引張の場合と縮む場合の圧縮とでは異なってくる。前者の場合は、損失係数  $\alpha$  の値が1に近ずき間隙に放出され、多モードファイバの端面で反射されて再度単一モード光ファイバに入射した光で生じる干渉が起きなくなる点が限界になる。また、後者の場合は間隙幅が小さくなり、二つの光ファイバの端面が接触して、この幅が零になる点が限界である。一方、このような感知部分をもつセンサで間隙変化による光の損失、すなわち  $\alpha$  の変化を検出してひずみを測定する方法も試みられている<sup>20)</sup>。この測定法では  $\pm 5000 \times 10^{-6}$  がひずみ測定の可能な範囲になっている。干渉計型のセンサにした場合も測定し得る最大のひずみ量としてはこの程度であると推定されるが、このことを確認することは今後の課題の一つである。

本センサも知的構造の感知機能用、とくに構造物あるいはこの部材に埋め込み、内部のひずみに関する情報を得るために利用することを目的にしている。しかし、これに対してはまだ検討すべき課題がある。とくに、ここで扱った感知部分のセンサでは、この部分の外径が現在生産されている標準的な光ファイバのクラッドまでの直径よりも太く、しかも端部の接着されたところには段が

付いた状態になっている。このため、例えば複合材料による構造にこの感知部分を埋め込んだような場合には、段のところで応力集中が生じることも予想され、これによる構造物母材の強度への影響がさらに厳しくなる。また、光ファイバの埋め込まれる部分は裸あるいは一次被覆のみの状態にされる。これは先のマイケルソン干渉計型センサの場合も同じであるが、このような状態にすると光ファイバの強度はかなり低くなる。したがって、この場合も感知部分の破損を防ぐような埋め込みに係わる手法の開発が必要である。

### 3.4 動的応答の感知

前の3.2及び3.3節では、引張荷重を受けている構造物の場合のように、一方向に単調に増加して行くひずみの測定に対するマイケルソンおよびファブリ・ペロー干渉計型光ファイバ・センサの適用について述べてきた。これらのセンサは一般に感度が高くしかも応答も速いと言う特徴をもっている。このため、振動や衝撃などの動ひずみ感知への応用も可能である。とくに、音波あるいは超音波領域のような高い振動数の信号検出に対する研究も行われていて、理論的には36MHz程度の信号まで検出が可能であることも報告されている<sup>21)</sup>。しかし、このような高い振動数領域の場合、単に信号を検出するだけのよう、定性的な面での適用に対しては有効な方法であるが、定量的な面への適用、すなわち振動数や動ひずみ量の測定などへの適用の可能性についてはまだ十分確認されていない。一方、構造物の低次振動の場合の振動数領域の信号検出へも適用できるが、このような場合も一般に静的な引張などのひずみの測定に比べて検出される信号波形は複雑になる。また、この信号処理には光ヘテロダイン技術などを利用した方法によらないと、定量的な測定は容易でないと言われていた。

これに対して、ここではまず構造物が低次の曲げ振動をしているような場合の干渉計型光ファイバ・センサで検出される信号波形の検討をして、この理論的な見解を示し、これによって光ヘテロダイン技術などを導入しなくても、直接観察された信号波形から振動数の決定あるいはそのときの動ひずみ量の推定が可能であることを明らかにした。さらに、片持帯板試験片に対する振動実験を行い、この場合の干渉計型センサで得られた信号波形が理論的に推定されたものと類似していることを示し、比較的低い振動数の場合であればこのようなセンサの定量的な測定への応用も有効であることを実証した。

#### 3.4.1 曲げ振動している構造物で検出される信号波形の検討

すでに述べてきたように、ここで扱っているマイケルソン干渉計型センサ、ファブリ・ペロー干渉計型センサ



いずれの場合も、一つの光源からきた可干渉光を分割し、さらにそれらを重ねたときに起きる干渉が感知部分の長手方向の変位あるいはひずみにより移動することを利用している。この移動は光の強度変化になり、これを光電素子で構成された光検出器により電圧変化に変換して観察している。とくに、引張試験のように、変位あるいはひずみが一方に単調に増加して行く場合は1波長が干渉の移動による位相差変動2に相当した信号波形なる。したがって、これから変位あるいはひずみが求められる。マイケルソン干渉計型あるいは内在型感知部分のファブリ・ペロー干渉計型センサの場合は感知部分の光ファイバが直接ひずみを受けて干渉が移動するのに対して外部型感知部分のファブリ・ペロー干渉計型の場合は間隙幅の変化によって干渉が移動するため、位相差変動とひずみとの関係式は異なっている。しかし、前に述べたように信号波形は同じ形の式で表わすことができるので、いずれの場合も観察される信号波形は同じ形のものになる。

一方、これらのセンサの感知部分を曲げ振動を受けている構造物の表面に接着したような場合を考える。この場合には引張と圧縮のひずみが繰り返し生じる。しかしながら、上述のように干渉計型のセンサで観察される信号はひずみ量の増減のみに関係した波形になっている。したがって、これを時間変化に対して観察・記録すると、引張の場合も圧縮の場合も全く同一な信号波形になって、この区別が付けられない。ただ、引張と圧縮が繰り返し生じている場合には干渉の移動方向が反転する。これは前の3.1節における図7のような光学干渉計のしま模様を考えると、この模様は左右に繰り返し移動することに相当している。すなわち、ここで扱っているような干渉計型の光ファイバ・センサの信号は、このようなしま模様の移動によって変化する光の強度をある点のところで検出していると考えられる。

そこで、感知部分の接着されている構造物が曲げ振動を受けて、表面のひずみが図24のように正弦状になっているとし、この振動の振幅が最大になったときの引張及び圧縮ひずみ $\pm \epsilon_m$ に対する位相差変動を $\phi_m$ とする。この場合、まず引張ひずみの増加に対して、しま模様

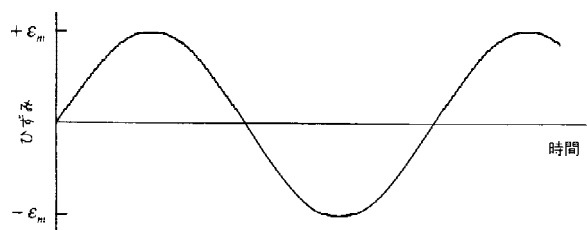


図24 曲げの調和振動で生じる帯板試験片表面のひずみ

移動が左方向であったとすると、ひずみが $+\epsilon_m$ に達するまでこの方向に移動し、この点に達すると今度はこれと逆の右方向に移動し始める。さらに、引張ひずみが零になり、圧縮ひずみが増加して行くと、しま模様はこのまま右方向に移動するが、これが $-\epsilon_m$ に達すると、逆転して再び左方向に移動し始める。この零から $+\epsilon_m$ あるいは $-\epsilon_m$ までのしま模様の移動量は $\epsilon_m$ なる位相差変動量に相当した波数に相当している。曲げ振動ではこのような現象が繰り返えられるので、これに対応した信号波形が観察されるが、さらに自由振動をしているように、減衰により振動の振幅が小さくなる場合には、 $\pm \epsilon_m$ あるいは $\epsilon_m$ も小さくなる。これは観察される信号波形の波数が減少することを意味している。このため、振幅の減衰を伴う曲げ振動をしている構造物の表面に接着された感知部分で検出される信号波形はさらに複雑な形になる。

以上のような考察を基に、前の式(13)で与えられる正弦状波形の周期的な左右移動から推定される、自由振動のような振幅の減衰を伴う曲げ振動の信号波形を図25に示す。 $\pm \epsilon_m$ の変化に伴い $\epsilon_m$ に対する波数も変化するが、本図はこの値が4.0, 2.0, 1.5, 1.0,

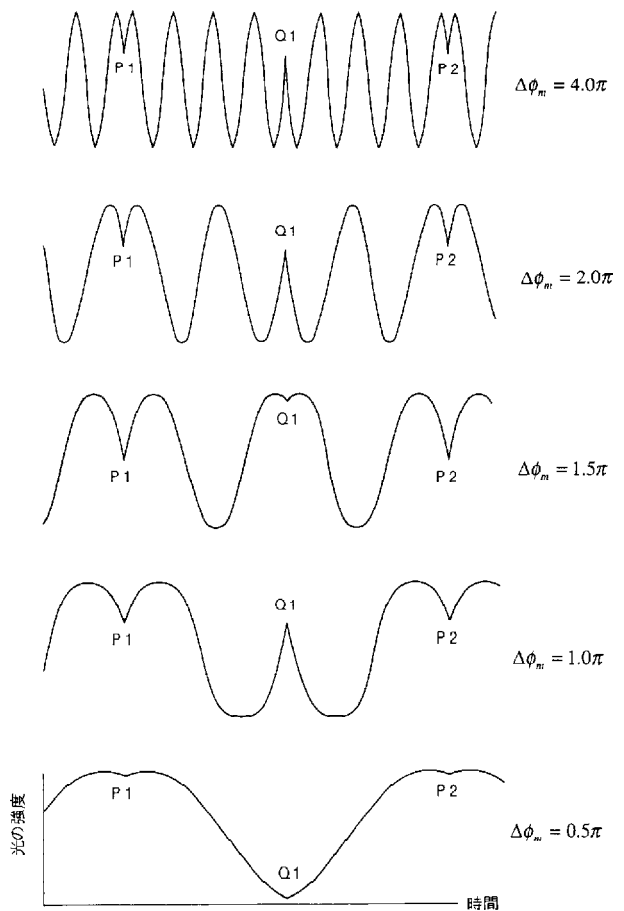


図25 曲げ自由振動に対して理論的に推定された信号波形

0.5 の場合、すなわちひずみが零から  $\pm \epsilon_m$  に達するまでに干渉じまが 2.0 本、1.0 本、0.75 本、0.5 本、0.25 本分移動した場合に推定された信号波形である。ここでは、干渉の移動方向が変化するので観察される信号波形が複雑になるだけでなく、振幅によってこの波形が変化することも示されている。また、これらの波形には  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $Q_1$  で示したような箇所が現われている。これらの箇所は干渉の移動方向が逆転する点であり、ひずみが  $+\epsilon_m$  あるいは  $-\epsilon_m$  になった所を表わしている。さらに、 $P_1$  と  $Q_1$  あるいは  $P_1$  と  $P_2$  の間隔は波形に関係なく一定になり、これは振動の周期に関係して、前者は  $1/2$  周期、後者は 1 周期に対応している。したがって、これらの点間の時間を知ることにより振動数を決定することができ、この間の波形の波数から動ひずみ量が求められる。

3. 4. 2 振動実験による検証

前述の理論的な推定を実証するために、片持帯板試験片の曲げ振動の実験を行った。とくに、本実験では 3. 3 . 2 項で述べた実験の場合と同じ形の長さ  $L$  が 10mm なる外部型感知部分をもつファブリ・ペロー干渉計型のセンサによる信号波形を観察した。試験片は図 26 に示したような形状寸法のアルミニウム合金並びに図 27 に示したような形状寸法の 4 層積層の CFRP (炭素繊維平織布強化複合材料) の片持帯板である。これらの試験片表面には上述の干渉計型センサの感知部分とともに電気抵抗

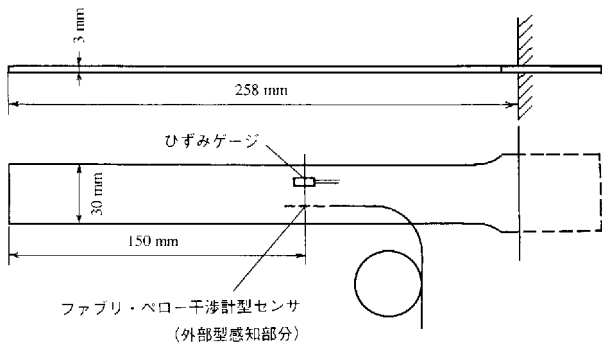


図 26 振動実験用アルミニウム合金片持帯板試験片の形状・寸法

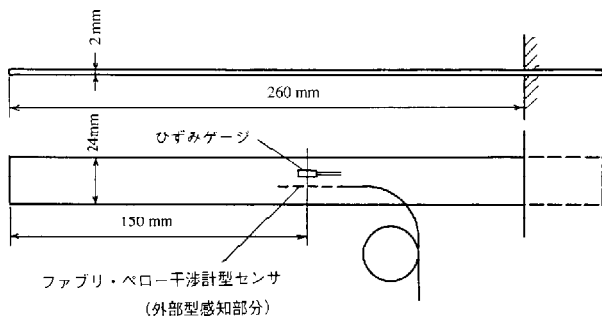


図 27 振動実験用CFRP片持帯板試験片の形状・寸法

ひずみゲージも接着して、この両者の結果を比較検討ができるようにした。

図 28 はアルミニウム合金試験片の 1 次自由振動により得られた信号波形の例である。図に示したように、この例の信号は振動による最大の位相差変動量  $\Delta\phi_m$  が  $1.6\pi$ 、 $0.9\pi$ 、 $0.5\pi$  に相当した場合のものである。感知部分のひずみを受ける前の条件が各場合によって異なるので、理論的に推定した図 25 の各  $\epsilon_m$  の値に対応した波形とは完全に一致したものにはなっていない。しかし、類似した波形になっていて、 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $Q_1$  で示したように干渉の移動方向が反転する点も明確に現われてい

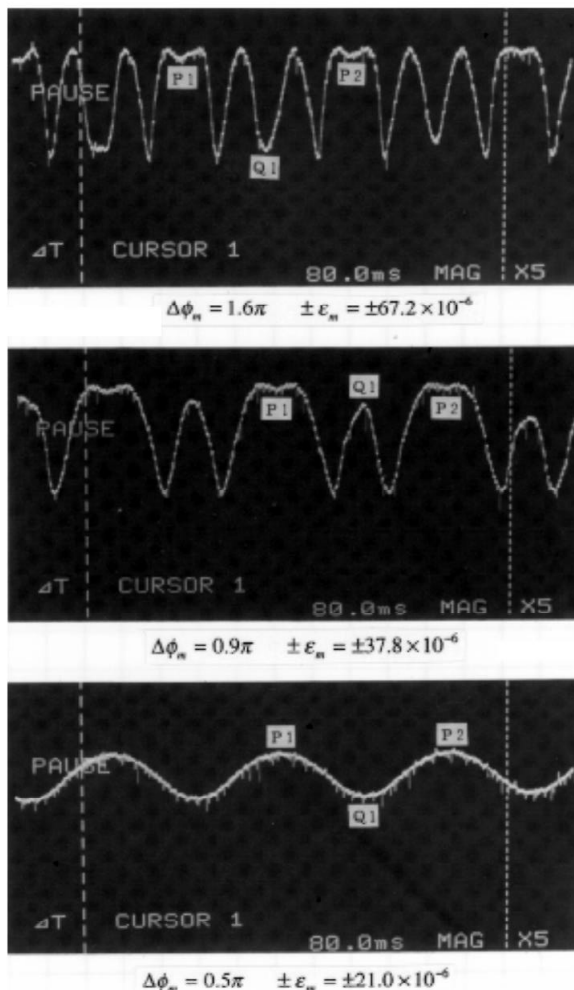


図 28 アルミニウム合金片持帯板試験片の振動実験で得られた信号波形の例

表 3 アルミニウム合金片持帯板試験片の曲げ 1 次振動の振動数の比較

干渉計型光ファイバ・センサ	31.1Hz
電気抵抗ひずみ計	31.6 Hz
弾性材料の梁に対する計算	37.1 Hz

縦弾性率  $E=70.6\text{GPa}$  密度  $\gamma=2.74\times 10^{-3}\text{ kg/m}^3$

る。表3には、これらの点の間の時間から求めた振動数を電気抵抗ひずみ計および次の弾性材料片持梁の曲げ1次固有振動数に対して理論的に導出されている式により得られたものと比較して示してある<sup>22)</sup>。

$$f_1 = \frac{\eta_1^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{h^2 E g}{12\pi}} \quad (17)$$

ここで、 $f_1$ は曲げ1次固有振動数、 $l$ および $h$ は梁の長さおよび高さ、 $E$ は縦弾性率、 $\rho$ は密度、 $g$ は重力加速度である。また、 $\eta_1$ は片持梁の曲げ1次固有振動に対する固有値で、1.875なる値である。

この結果では、実験で得られた値、すなわち光ファイバ・センサと電気抵抗ひずみ計で得られた値はほぼ一致している。しかしながら、計算による値は高くなっている。一般に片持試験片の振動では、固定端の条件が不十分になると、振動数は低下する。この振動実験では、試験片端部をシャコマンで締め付けて固定端にした。しかし、試験片の弾性率や寸法などから考えるとこの固定されている部分の剛性が高い。一方、ここで使用した固定治具の強度の関係から、締め付け力をあまり大きくすることができず、相対的にゆるくなり十分な固定端の条件になっていない。上述の実験値と計算値との差はこれが主な原因になっていると思われる。

また、図29はCFRP試験片の振動実験で得られた信号波形の例である。図に示したようにこの例は  $m$  が 3.7, 2.0, 0.5 に相当する場合のものであるが、各  $m$  に対応した信号は理論的に推定されたものと類似した波形になっていて、干渉の移動方向の反転する点も明確に判定することができる。表4にはこの試験片の曲げ1次自由振動の振動数を示してある。この表の計算値も前の式(17)にここで扱っているCFRP帯板の平均化された弾性率68.6GPaと密度  $1.54 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$  を入れて求めたものである。とくに、この場合はアルミニウム合金の場合と比べて固定部分の剛性が低く、固定端の条件がほぼ満たされているものと思われ、このため光ファイバ・センサおよび電気抵抗ひずみ計による実験値は計算値と一致している。また、このことはアルミニウム合金試験片における振動数の計算値と実験値との差の原因が不十分な固定端条件のためであることを裏付けている。

### 3.4.3 実験結果に関する検討

理論的に推定されたように、ここで扱った振動数の範囲であれば、干渉計型光ファイバ・センサで振動数を決定し、そのときの動ひずみ量が求められることが以上の実験結果により実証された。しかしながら、知的構造の動的応答感知機能用センサとして応用するにあたっては、測定可能な振動数領域の確認、動ひずみの測定精度の検討などをしておく必要がある。

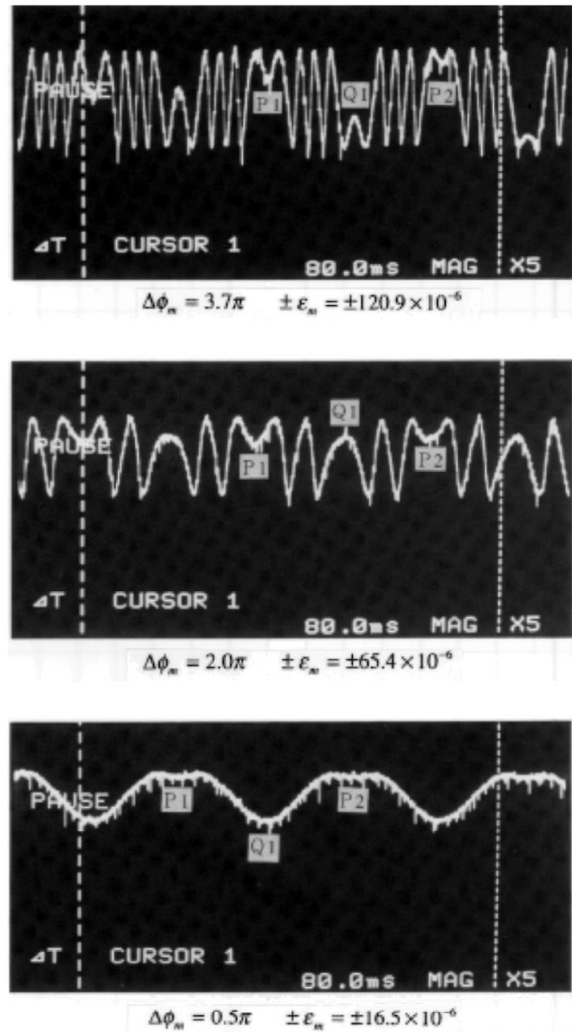


図29 CFRP片持帯板試験片の振動実験で得られた信号波形の例

表4 CFRP片持帯板試験片の曲げ1次振動の振動数の比較

干渉計型光ファイバ・センサ	30.2 Hz
電気抵抗ひずみ計	30.0 Hz
弾性材料の梁に対する計算	30.8 Hz

CFRP 織物 4層積層材料

縦弾性率  $E=68.6\text{GPa}$  密度  $\gamma = 1.54 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$

まず、測定可能な振動数範囲の問題であるが、ここでの実験では数10Hzの桁の振動数の場合であり、とりあえずこの程度の振動数であれば十分測定が可能である。しかし、この測定可能な範囲には実験装置、とくに波形を観察・記録する装置の能力が係わってくる。ここでは、光の強度変化に関する信号を光検出器で電圧に変換して、これをオシロスコープに入れて観察している。このオシロスコープは10nsの時間間隔まで読み取ることができる。これは、振動数に換算して100MHzまで検出で

きることになる。しかし、この他にも光検出器の特性、使用している可干渉光の波長なども考慮しなければならない。例えば、本実験で用いた 1307nm の波長の可干渉光では、すでに報告されている文献による方法で推定すると感知可能な振動数が 25MHz 程度になる<sup>21)</sup>。

また、ひずみの測定精度に対しては動的な場合も観察された信号波形から位相差変動 から決定される波数が、信頼し得る範囲でどの程度まで求められるかと言うことが鍵になる。これに関しては、3.3.3 の項で述べた静的なひずみ測定の場合と同一の装置を使用しているので、この場合と観察される信号波形の条件は同じになる。例えば、先の図 28 あるいは図 29 の信号波形は光源の出力変動などが起因していると思われる高振動数成分の光学的な雑音が重ねられたものになっている。したがって、信号の波数の端数を求めるためにはこれが問題になり、ここでは 0.2 波が限度である。また、これらの図の各波形には、 $m$  で決定される波数と  $L$  が 10mm の場合の 1 波に相当したひずみ量  $\pm 64.5 \times 10^{-6}$  とから求めた最大振幅におけるひずみ  $\pm m$  の値を示してあるが、これらの値は上述の議論から判断して、信頼し得るひずみ量は約  $\pm 13.1 \times 10^{-6}$  以上である。

なお、センサ装置内に光源からの光の強度を調整する光アイソレータ、あるいは出力信号に現われる高振動数成分を取り除くフィルタを挿入するなどの方法により、信号波形を改善することは可能である。したがって、静的、動的いずれの場合も測定精度の向上にはこのような要素を組み込んだセンサ装置による信号波形を観察できるようにする必要がある。

#### 4. 結 言

本報告では、まず航空機などの知的構造感知機能用としての光ファイバ・センサに関する研究の現状について述べた。これまでに、光ファイバのもつ種々の特性を利用した多様なセンサが提案されている。そこで、これら各センサの感知原理、特徴などについての紹介をした。しかしながら、いずれのものもまだ開発途上で、基礎的な研究により感知機能用センサとして使用し得るかどうかの検討がなされている段階である。このため、本研究で取り上げたような構造物に生じるひずみを感知するセンサとしての応用に対しても、十分実用に供するものであるかの確認ができるまでには至っていなかった。

このような観点から、本研究ではひずみ感知用として最も適していると思われる干渉計型光ファイバ・センサ、とくにマイケルソン干渉計型センサ並びにファブリ・ペロー干渉計型センサに焦点を絞り、これらのセンサの装置を製作するとともに、ひずみ測定に関する実験によって実用性の検討をした。その結果、いずれのセン

サも静的、動的両方のひずみを高い感度で検出することができ、構造物のひずみ感知用として有効なセンサになり得ることが明らかになった。

また、マイケルソン干渉計型のセンサは感知部分の構造がきわめて簡単である。このため、製作が容易で低価格であると言う利点がある。しかし、構造物内部における局所的なひずみなどの情報を知るセンサとして用いる場合には以下のような難点がある。

- (1) 2本の光ファイバを対にして埋め込む必要がある。このため、多点のひずみ測定をする場合には埋め込むファイバの本数が多くなり、被測定構造物の強度を低下させる可能性がある。
- (2) 光ファイバ自体が変形をするため、半径方向にもひずみが生じ、定量的な測定をする場合にはこの影響を考慮しなければならない。

一方、ファブリ・ペロー干渉計型のセンサでは内在型と外部型の感知部分をもつものがある。いずれのものも1本の光ファイバで内部の局所的なひずみに関する情報を得ることができる。しかし、前者の型の感知部分はマイケルソン干渉計のセンサと同様に、光ファイバの半径方向に生じるひずみの影響を受ける。これに対して後者の型の感知部分はこの影響を全く受けないので、構造物内部のひずみ感知用センサとして最も有望である。なお、この感知部分は他のものと比べると複雑な構造になっていて、製作にあたっては特殊な技術が必要であり、このため現在ではかなり高価なものになっている。

この他、干渉計型のセンサは、いずれの型の場合も被覆を取り除いた状態の光ファイバを感知部分に使用しているので、この部分の強度が低く、破断し易い。マイケルソン干渉計型のもの、感知部分が破断しても、感知アームになっている光ファイバで簡単に新しい感知部分を製作することが可能である。また、外部型感知部分のファブリ・ペロー干渉計型のものでは感知部分だけを交換することができるような装置になっている。したがって、構造物表面のひずみ測定をする場合には、このような手段で感知部分の破断に対処することができる。しかしながら、感知部分を埋め込み、構造物内部のひずみなどの情報を求める場合には上で述べたような手段が適用できない。また、現状では構造物の使用寿命間にわたり破断しないことが保証された感知部分の製作はかなり難しい。このようなことから、強度的に信頼し得る感知部分を製作することも今後の課題である。

以上のように、知的構造のひずみ感知用光ファイバ・センサとして実用化するにあたっては、まだ解決すべき問題がある。しかし、温度以外の環境条件には影響を受けず、この温度変化の補償も容易である。また、現時点では構造物内部のひずみなどの情報を直接感知すること

に対して最も可能性の高いセンサでもある。さらに、本研究のひずみ測定実験はこの有効性を検討することが主目的であったため、アナログ信号を観察してこれを手で処理している。しかし、このような信号をパーソナル・コンピュータなどに取り込んで処理をするようにすれば、自動化された測定装置の開発も可能である。このような面からも、干渉計型光ファイバ・センサは知的構造の感知機能用として十分期待し得るセンサであると考えている。

なお、本研究を遂行するにあたり、昭和電線株式会社、児島 健システム・デバイス開発担当部長にはセンサの基本装置になる単一モード光ファイバと双方向性結合器の構成にあたりお世話になった。航空宇宙技術研究所機体部、薄 一平損傷研究室長ならびに濱口泰正主任研究官には実験装置の整備、使用などに対してご足労いただいた。また、同部 松島正道主任研究官には複合材料試験片などを提供していただいた。最後にこれら各位に感謝の意を表わす次第です。

#### 参考文献

- 1) 菊池晋一；非破壊検査の新技术，非破壊検査，Vol. 43，No. 3 (1994) pp. 147 - 151
- 2) 野田健一（編）；光ファイバ伝送，電子通信学会，(1978) コロナ社
- 3) 越出慎一；光ファイバを用いたスマートセンシング，材料開発ジャーナル Boundary，Vol.12，No.6 (1996) pp. 22 - 29
- 4) R. D. Turner, T. Valis, W. Dayle Hogg, R. M. Measures；Fiber-optic Strain Sensors for Smart Structures，Journal of Intelligent Material Systems and Structures，Vol. 1, No.1 (1990) pp. 26 - 49
- 5) ニューポート社テクニカルスタッフ；光ファイバの使い方と留意点，(1989) オプトロニクス社
- 6) J. W. Berthold, W. L. Ghering, D. Varshneya；Calibration of High temperature, Fiberoptic, Microbend Pressure Transducers, SPIE, Vol. 718, Fiber-Optic and Laser Sensors，(1986) pp. 153 - 159
- 7) A. Mendez, T. F. Morse, L. J. Reinhart；Experimental Results on Embedded Optical Fiber Sensors in Concrete, SPIE, Vol. 1, 1918 Smart Sensing, Processing, and Instrumentation (1993) pp. 420 - 427
- 8) A. H. Hartog, A. P. Leach, M. P. Gold；Distributed Temperature Sensing in Solid-core Fibers, Electronics Letters, Vol. 21, No. 23 (1985)
- 9) 吉澤 徹，瀬田勝男（編）；光ヘテロダイン技術，(1994) pp.154 - 163 新技術コミュニケーションズ
- 10) R. M. Measures, A. T. Alavie, R. Maaskant, M. Ohn, S. Karr, S. Huang；Bragg Grating Structural Sensing System ... for Bridge Monitoring, SPIE, Vol. 2294 (1995) pp. 53 - 59
- 11) W. Tsaw, M. LeBlanc, R. M. Measures；Growth of Damage within Composites Determined by Image Enhanced Backlighting and Embedded Optical Fibers, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol.9 (1990) pp. 1207 - 1212
- 12) R. O. Claus, S. Sudeora, K. A. Murphy, K. D. Bennett；Low Profile Optical Time Domain Fiber Sensors for Material Evaluation, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 8 (1989) pp. 1437 - 1442
- 13) K. A. Murphy, M. S. Miller, A. M. Vengsarkar, R. O. Claus；Elliptical-core, Dualmode, Optical Fiber Strain and Vibration Sensors for Composite Material Laminates, Journal of Composites Technology & Research, Vol. 13, No. 1 (1991) pp. 29 - 35
- 14) W. Su, J. A. Gilbert, C. Katsinis；A Photoelastic Fiber-optic Strain Gage, Experimental Mechanics, Vol. 35, No. 1 (1995) pp. 71 - 76
- 15) M. Q. Feng；An Optical Fiber Sensor for Measurement of Dynamic Structural Response, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 5, No. 4 (1994) pp. 847 - 853
- 16) 吉原邦夫；物理光学，(1974) pp.51 - 86 共立出版
- 17) J. S. Sirkis, H. W. Haslach, Jr.；Complete Phase-strain Model for Structurally Embedded Interferometric Optical Fiber Sensor, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 2, No. 1 (1991) pp. 3 - 23
- 18) G. B. Hocker；Fiber-optic Sensing of Pressure and Temperature, Applied Optics, Vol. 18, No. 9 (1979) pp. 1445 - 1448
- 19) C. E. Lee, J. J. Alcoz, Y. Yeh, W. N. Gibler, R. A. Atkins, H. F. Taylor；Optical Fiber Fabry-Perot Sensor for Smart Structures, Smart Materials and Structures, Vol.1, No. 2 (1992) pp.123 - 127
- 20) 越出慎一，薄 一平，板倉浩道；光ファイバ・センサシステムによるひずみ測定の検討，日本非破壊検査協会応力ひずみ測定分科会資料，No. 1966 (1995)

pp. 7 - 14

21) J. J. Alcoz, C. E. Lee, H. F. Taylor; Embedded  
Fiber-optic Fabry-Perot Ultrasound Sensor, IEEE  
Transaction on Ultrasonics, Ferroelectric, and

Frequency Control, Vol. 37, No.4 (1990) pp. 302  
- 306

22) R. L. Bisplinghoff, H. Ashley, R. L. Halfman ;  
Aeroelasticity, (1955) pp. 67 - 87 Addison-Wasley