

# 光ファイバセンサによる 高層ビルヘルスマニタリング

三上 隆男\*

Takao Mikami

## 1. はじめに

光ファイバをひずみセンサとして用いる契機は、1970年代における光通信用の光ファイバ技術の著しい進展にある。光エレクトロニクスの発展と通信分野での光ファイバに対する爆発的なニーズから光ファイバケーブルのコストが下がり、また、様々な周辺機器が開発されて光ファイバをセンサに用いることが現実的になってきた。光ファイバセンサは従来のひずみゲージに比べて種々の長所を有し、とくに構造物の長期健全性モニタリング（ヘルスマニタリング）に適している。被測定領域により、分散型（単点計測）と広域型（多点計測）に大別されている。

ヘルスマニタリングは社会資本の老朽化にともない、土木や建築の分野で益々、重要になっている。長期モニタリングには精度が高く、かつ、安定なシステムが必要である。多くの土木構造物において、変形のモニタリングが最も重要である。一般によく使用されているひずみゲージは局所的なひずみを捉えるだけで、構造物全体の変形を捉えることはできない。構造物全体の変形を捉えるためには、ゲージ長の長いセンサが必要である。

このような背景の下、当部ではゲージ長の長い光ファイバセンサによる変位計測システム：

SOFOを、各種構造物に適用している。なお、SOFOとは、フランス語の“Surveillance d’Ouvrages par Fibres Optiques”の略称で、日本語では「光ファイバによる構造物のモニタリング」という意味で、分散型に属する光ファイバセンサである。

SOFOの計測装置は静的計測用（SOFO V）と動的計測用（SOFO Dynamic）の2種類がある。センサは共通であり、計測の目的に応じて計測装置を使い分けている。

今回は、SOFO Vの概要について紹介した後、代表的な適用事例として、高層ビルヘルスマニタリングについて紹介する。

## 2. SOFOシステムの概要

図1にSOFO Vシステム概念図を示す。SOFO本体には標準センサを最大12点まで接続することができる。点数が12点を超える場合はオプティカルスイッチにより拡張することができる。

標準SOFOセンサは図2に示すように基準ファイバと測定用ファイバの2本の光ファイバで構成されている。測定用ファイバには、あらかじめプリテンションが与えられており、測定対象物に固定された2点間の変位に応じて伸縮する。もう一方の基準ファイバは螺旋状になっているため、そ

\* 計測事業部 計測エンジニアリング部 部長

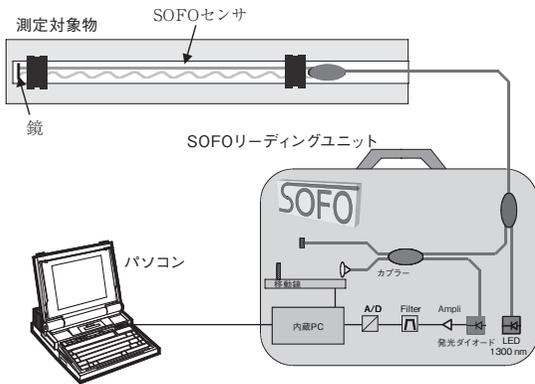


図1 SOFO V システム構成

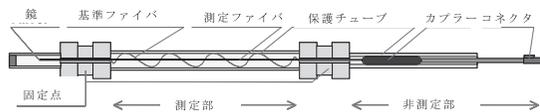


図2 標準SOFO センサの構造

の長さは固定点間の変位に左右されない。SOFO 本体はこの2本の光ファイバの長さの差 (=測定対象物の2点間の変位) を測定するものである。

発光ダイオードから発射された光がセンサに送られ、カプラーによって分割された後、2本の光ファイバに送られる。その光はセンサ端部についている鏡で反射され、カプラーによって再び集光され、SOFO 本体に戻ってくる。そこで再び2本の光ファイバに分光される。一方の光ファイバの端部は固定されているが、もう一方の端部は可動式の鏡になっている。測定時には、鏡が動いてセンサ部のファイバ長さの差を補償する位置をまず見つけ出す。この位置が最初のピーク干渉位置となる。さらに鏡が動き、本体内の両光ファイバが同じ長さになる位置 (センター) を見つけ、最後にセンサ部のファイバ長さの差と同じ長さの差となる第三の位置を見つけ出す。センターと第三の位置間の距離が測定ファイバと基準ファイバ間の長さの差、すなわち、測定対象物の2点間の変位となる。この測定方法は2重干渉計方式と呼ばれ、

パラメータ	仕様
標準センサ長	0.25 m ~ 10m (オプションで 20m)
延長ケーブル長さ	最大 5km
分解能	2 $\mu$ m (センサ長さに無関係)
計測範囲	圧縮 : 0.5%, 引張 : 1.0%
防水	5 bar (水中 50m まで)
校正	不要
精度	計測変位に対して 0.2% 以上
測定時間	1 点につき約 7 秒
最大チャンネル数	12 (100 まで拡張可能)

表1 SOFO V の仕様

他の方式に比べて原理的にシンプルであり、精度、安定性とも高い。

SOFO V の分解能はセンサ長さに関係なく 2  $\mu$ m である。センサはコンクリートに埋め込むことも、既設構造物の表面に取り付けることも可能である。センサと SOFO V との間は、最大 5 km の延長光ファイバケーブルで接続することができる。計測の際に、電磁波、振動、湿度等の影響を受けないという優れた特徴を有する。SOFO 本体はポータブル、防水、バッテリー駆動であり、建設現場のようにホコリや湿気の多い環境での使用に適している。約 7 秒で 1 点の計測が可能である。計測はマニュアルでも自動でも可能である。センサの標準長さは 0.25 m ~ 10 m で、計測精度は測定値に対して 0.2 % である。計測範囲は圧縮は 0.5 %、引張は 1.0 % である。表 1 に SOFO V の仕様を示す。

SOFO Dynamic の詳細については、本号では省略する。(前号参照)

### 3. 高層ビルのヘルスマニタリングへの適用事

#### 3.1 高層ビルの概要

東京の豊洲地区で 33 階建ての高層ビル (仮称 : TA ビル) が現在、建設中である。このビルは 2004 年に建設が始まり、2006 年 8 月に竣工し、高さは約 147 m である。

### 3.2 モニタリングの目的

このビルの柱にSOFOセンサを設置し、以下の目的でモニタリングを行う。

- (1) 建設中は柱に作用する荷重変化をSOFO Vで長期的に測定し、構造設計検証の一助とする。
- (2) 建設後は、地震、台風、地盤沈下等による柱の荷重分布変化を長期的にSOFO Vで測定し、ビルの健全性を監視する。
- (3) 建設中及び建設後にSOFO Dynamicにより動的計測（固有振動数、振動モード、減衰等）を行い、ビルの動的挙動を把握するとともに健全性を監視する。

### 3.3 センサの設置

SOFOセンサを2005年5月に2階の柱に設置した。2階は機械室であり、柱は化粧タイル等でカバーされないため、センサの設置とモニタリングが容易なためである。33本の柱があるが、その中で代表的な柱5本（X4Y2, X4Y5, X6Y5, X7Y9, X8Y6）をモニタリングの対象として選んだ。柱に作用する主な荷重は圧縮軸力であり、曲げ荷重は無視できる。そのため、柱1本について1本のSOFOセンサを表面に設置した。一例として柱：X7Y9への設置状況を図4に示す。柱の高さ（3m）とコンクリート床高さ等の現場の状況を考慮してSOFOセンサは1mを選定した。柱の熱膨張による変形を評価するため、SOFOセンサの中央部付近に熱電対を設置し、参考までにひずみゲージも1点貼り付けた。（図5参照）

柱は最終的には断熱材が吹き付けられるため、すべてのコネクタは小さな接続箱に導いた。この接続箱にはフタが付いており、計測時にフタを開け、SOFOセンサ及びひずみゲージのコネクタに容易にアクセスできるようになっている。また、バッテリー作動の小型温度ロガー（55×70×20mm）がこの接続箱の中に納められており、計測時に温



図4 SOFO センサ（柱：X7Y9）

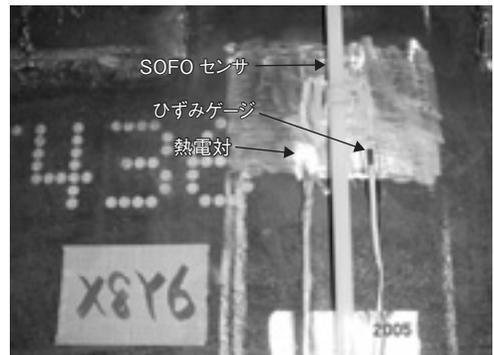


図5 熱電対とひずみゲージ



図6 接続箱

度データをパソコンに取り込むことができる。（図6参照）

### 3.4 SOFO Vによるモニタリング結果

SOFOセンサは2005年5月18日に設置を完了し、同日からモニタリングを開始した。この日の計測データを基準とし、以後、原則として1ヶ月

毎に計測している。図7に2006年7月14日までの柱の温度変化を示す。5本の柱の温度は同じではない。それらの位置による日照の違いでわずかではあるが、相違している。

柱の断面積とSOFOで計測されたひずみ変化から計算した柱の荷重変化を図8に示す。ただし、(1)式に示すように熱膨張によるひずみは除外している。

$$\epsilon = \frac{(d_{sm} - d_{s0}) - d_t}{l_s} \quad (1)$$

ここで、

$\epsilon$  : SOFOセンサの平均ひずみ (熱膨張成

分を除外)

$d_{sm}$  : SOFOセンサの計測値

$d_{s0}$  : SOFOセンサの初期計測値 (2005年5月18日)

$d_t$  : 熱膨張による変形

$l_s$  : SOFOセンサの長さ (1,000 mm)

$d_t$ は(2)式で表される。

$$d_t = \alpha_t \Delta t l_s \quad (2)$$

ここで、

$\alpha_t$  : 柱の熱膨張係数

$\Delta t$  : 柱の初期温度 (2005年5月18日) からの温度変化

TAビル柱の温度変化

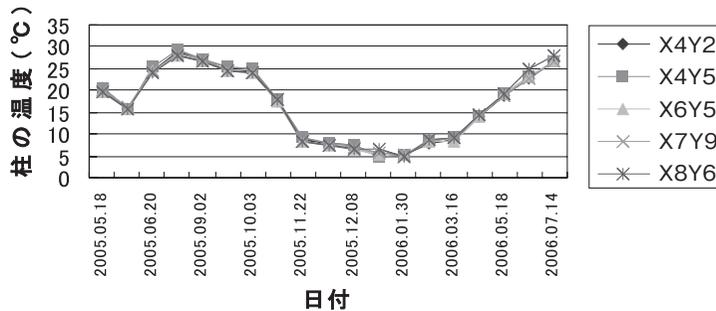


図7 柱の温度変化

TAビル柱の荷重変化

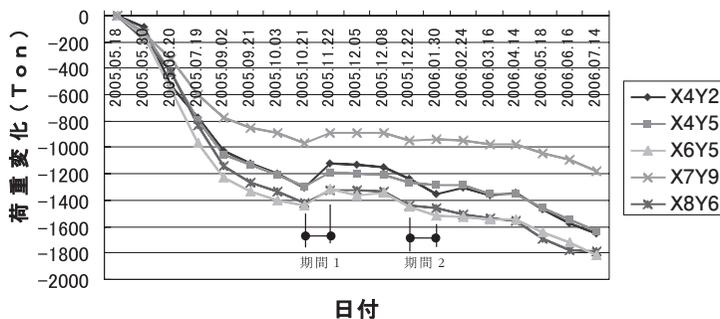


図8 柱の荷重変化



図9 建設中のビルの写真

図9に建設中のビルの写真を示す。建設の初期段階には2基の巨大なクライミングクレーンがビルの頂上に設置されていた。その内の1基が期間1（2005年10月21日～2005年11月22日）の間に撤去された。

さらに、残りの1基が期間2（2005年12月22日～2006年1月30日）の間に撤去された。これらの撤去は柱に作用する荷重分布を減少させるため、図8に示すようにその影響が如実に現れている。期間1に、すべての柱の圧縮荷重が減少している。この期間には、クライミングクレーンだけでなく他の物（重機、ストックされていた鋼材、足場等）が撤去されている。一方、期間2では、圧縮荷重の減少が少ない。内装工事（コンクリート床、配管、コンクリート壁等）による荷重の増加が期間1の時に比べて大きかったためである。

今後も柱の圧縮荷重は増加し、竣工後に一定値に落ち着いて行くものと考えている。

### 3.5 SOFO Dynamicによる計測結果

動的な計測を実施するため、風が強い日を待った。2006年3月17日は最大瞬間風速15 m/sで絶好の条件となり、この日に計測を実施した。

計測した柱はX6Y5で、建物の中央に近い柱である。計測の様子を図10に示す。柱は既に断熱材でカバーされているので、SOFOセンサは見えない。最も風速が大きかった10時50分から約1分間の計測結果を図11に示す。参考までにひずみ式加速度センサによる計測結果も表示している。SOFOは振幅 $1\ \mu\text{m}$ 以下の微小な振動を捉えている。この振動を周波数分析した結果を図12に示す。ビルの1次曲げ固有振動数：0.38 Hzが明確に現れている。一方、加速度センサでは加速度が微小すぎて計測ができず、ノイズのみの波形となった。

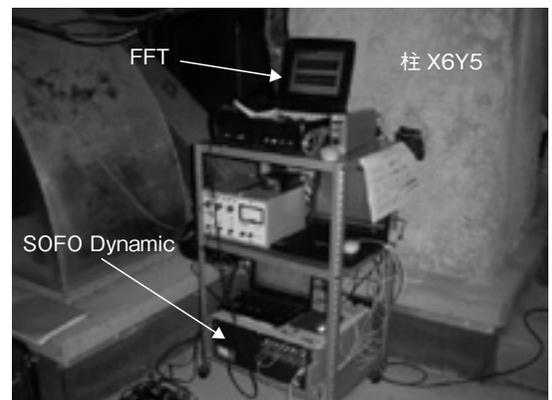


図10 SOFO Dynamicによる柱X6Y5の振動計測

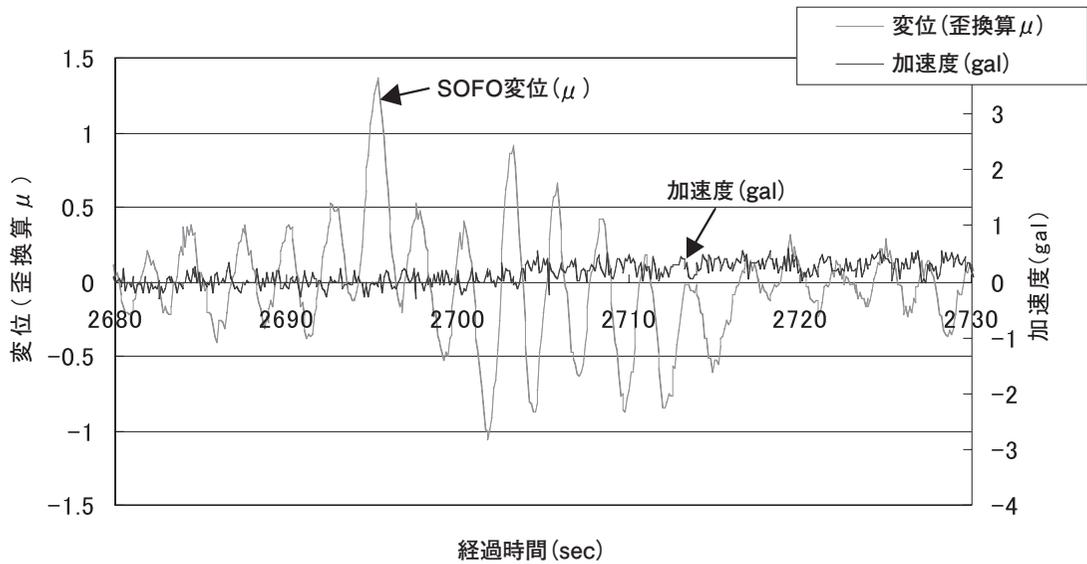


図11 柱：X 6 Y 5 の振動計測結果（2006年3月17日）

た。なお、ひずみゲージでも全く検知ができなかった。ビルには常時、微風が作用しているため常時微動していると考えられ、2006年5月19日に微風状態における計測を試みた。その結果を図13に示す。固有振動数が明確に捉えられている。常時微動の微小な励振力でも SOFO センサの高い分

解能により振動を検知することができた。

柱の荷重分布変化と固有振動数変化を長期的にモニタリングすることにより、ビルの健全性を評価することができる。とくに、大きな地震後のビルの健全性評価に役立つものと考えている。

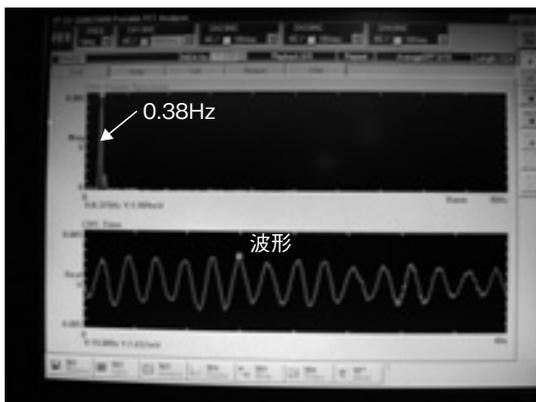


図12 周波数分析結果

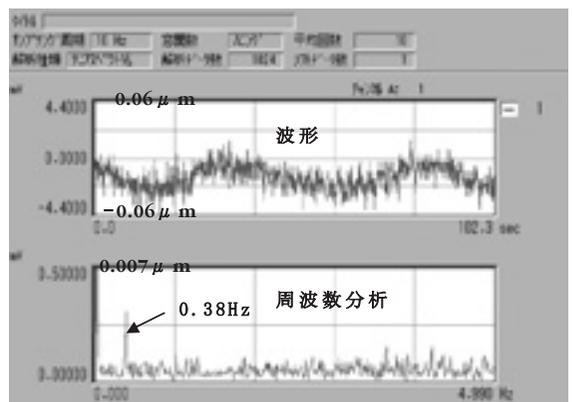


図13 微風時の計測析結果

#### 4. おわりに

長いゲージ長を特徴とする光ファイバセンサ(SOFO)の計測原理とこれを高層ビルのヘルスマニタリングに適用した事例について述べた。今回は報告を割愛したが、SOFO Vは橋梁床版のプリストレスモニタリング、原子炉格納容器の変形モニタリング等にも適用実績がある。SOFOセンサは長期安定性を有するので、構造物の内部または表面に設置すれば半永久的にモニタリングできる。計測は、手動計測、自動計測、インターネットを利用した遠隔モニタリング等から選択することができる。

公共事業費の抑制等もあって、社会資本の維持・管理が重要な課題となっている。SOFOはヘルスマニタリング用センサとして優れた特徴を有するので、この方面への適用を拡大したい。特に、今回報告した高層ビルへの適用は地震が多発する日本では有用であり、大学や建築設計会社等と連携して全国的に展開していく所存である。

#### 参考文献

- (1) 三上, “光ファイバによる動的変位計測システム (SOFO Dynamic)”, IIC REVIEW/2005/10.No.34, p54～p58
- (2) Takao MIKAMI, et al, “High-rise Building Monitoring by Fiber Optic Sensors”, IABSE 2006 Annual Meeting and Symposium, Budapest, Hungary
- (3) Takao MIKAMI, Takao NISHIZAWA, “Structural Health Monitoring with Fiber Optic Sensors”, SEWC2002, Yokohama, Japan



計測事業部  
計測エンジニアリング部  
部長

三上 隆男

TEL. 045-759-2160  
FAX. 045-759-2161