

# 光ファイバによる動的変位計測システム (SOFO Dynamic)

三上 隆男\*

Takao Mikami

近年、橋梁のヘルスマonitoringが重要な課題となっており、ひずみゲージに比べて種々の長所を有する光ファイバセンサの適用が期待されている。橋梁は車両通過にともなって常時振動しているため、動的な計測ができるシステムを適用する必要がある。そこで、2005年度に動的計測専用のSOFO Dynamicを導入した。センサは2000年度に導入した静的計測専用のSOFO Vと共通であり、計測の目的に応じてSOFO VまたはSOFO Dynamicを適用する。本報では、SOFO Dynamicのシステム構成、特徴、適用例、適用分野などについて紹介する。

キーワード：ヘルスマonitoring、光ファイバセンサ、動的変形、変位センサ、WIM、過積載車

## 1. はじめに

光ファイバを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、とくに土木構造物の長期健全性モニタリング（ヘルスマonitoring）に適している。このような背景の下、IICは2000年度に静的計測専用の「光ファイバによる変位計測システム：SOFO V」をSmartec社（スイス）から導入し、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」と言う意味である。

近年、橋梁のヘルスマonitoringが重要な課題となっており、光ファイバセンサの適用が期待されているが、橋梁は車両通過にともなって常時振動しており、静的計測専用のSOFO Vを適用することができない。そこで、2005年度に動的計測専用のSOFO Dynamicを導入した。本報ではSOFO Dynamicのシステム構成、特徴、適用例等について紹介する。

## 2. システム構成

図1にシステム構成図を示す。センサはSOFO Vと共通である。

アナログ出力は表示および保存用のデータ収録装置に取り込む。デジタル信号はUSBを介してパソコン

\* 計測事業部 計測エンジニアリング部 部長

に直接取り込み、保存および解析することもできる。

図2に本体部の写真を示す。

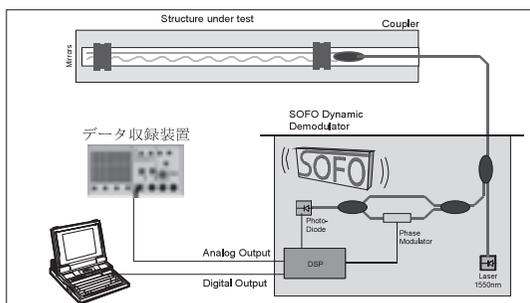


図1 SOFO Dynamicの構成



図2 SOFO Dynamic

### 3. 測定原理

SOFO 標準センサは図3に示すように、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。もう一方の参考ファイバ（螺旋状）はフリーになっており、その長さは固定点間の変位に左

右されない。SOFO Dynamicはこの2本の光ファイバの長さの差（=測定対象物の2点間の動的変位）を測定するものである。レーザー光源から発射された光（波長：1550 nm）がセンサに送られ、カップラーにより分割された後、2本の光ファイバに送られる。その光はセンサ端部に設けられた鏡で反射され、カップラーで再び集光され、本体に戻ってくる。（マイケルソン干渉計）

光信号は検波干渉計で位相変調される。光信号を検出した後、本体はセンサにより導入された位相変調を探知し、変位に変換する。本方式はヘテロダイン低コヒーレンス干渉計と呼ばれる。

### 4. 特徴

SOFO Dynamicの特徴は以下のとおりである。

- (1) ヘルスモニタリングに適している（センサ寿命が半永久的）。
- (2) センサが長く（最大：20 m）、構造物全体の動きを把握できる。
- (3) センサ（図3のタイプ）をコンクリートに埋め込むことができる。
- (4) センサは電磁波の影響を受けない。
- (5) 光信号を使用しているので、火災や爆発の心配がない。
- (6) 高感度（表1参照）、高信頼性である。

### 5. システム仕様

表1にシステム仕様を示す。ひずみゲージより一桁高い分解能を有している。

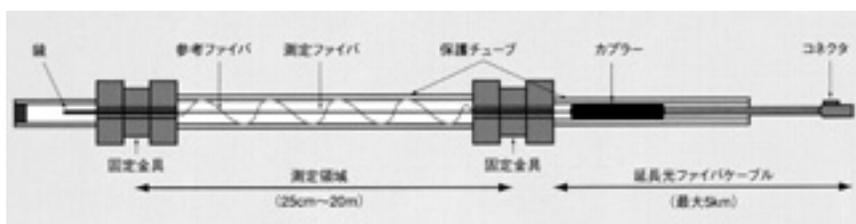


図3 SOFO Dynamic

表1 SOFO Dynamicのシステム仕様

測定周波数範囲	0~1kHz (10kHz まで拡張可能)
測定範囲	±5mm (最大変形)
ひずみ速度	±10,000 $\mu\text{m}/\text{s}$ (最大変形速度)
分解能	0.01 $\mu\text{m}$
ドリフト	< 0.003 $\mu\text{m}/\text{s}$ (1時間暖機後) < 0.5 $\mu\text{m}/\text{日}$ (ドリフト補償機能使用)
測定チャンネル数	8チャンネル (同時測定)
デジタル出力	USB2.0, 10kHz までのリフレッシュレート, 32bit
アナログ出力	8チャンネル, 10kHz リフレッシュレート, 20bit
寸法/重量	480mm×180mm×440mm (19"ラック) / 12kg

## 6. 適用例

SOFO Dynamicを鋼構造物の疲労試験に適用した。図4に示すように、鋼構造物にSOFO標準センサ (L: 500mm) とSMARTape Compactセンサ (L: 300mm) が取り付けられている。

図5に疲労試験時の後者の振動波形 (0.8 Hz) を示す。

なお、SMARTape Compactセンサはテープ状で、

光ファイバが複合材料の中に埋め込まれている。幅も厚さも非常に小さく、曲げ易いので、曲面 (配管等) の計測に理想的なセンサである。

表2及び表3にそれぞれSOFO標準センサとSMARTape Compactセンサの仕様を示す。また、これらの他に測定環境 (材質, 温度分布, 高圧力等) に応じてSMARTape Standardセンサ、SMARTape Flexiセンサ、SMARTprofileセンサ等が用意されている。

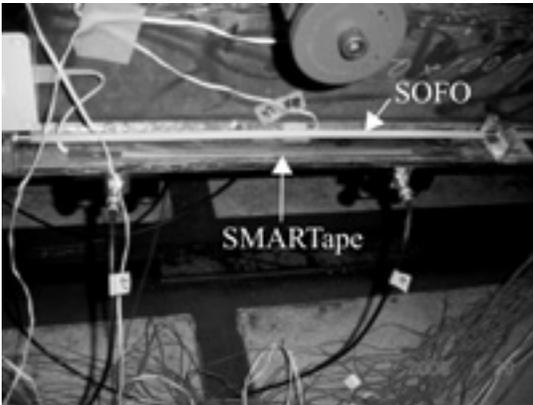


図4 鋼構造物の疲労試験

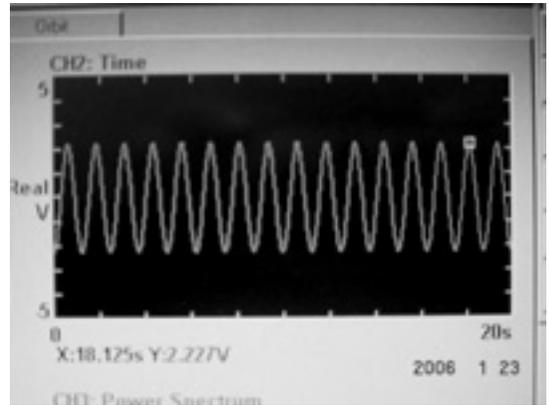


図5 振動波形 (SMARTape Compact)

表2 SOFO標準センサの仕様

センサ長さ	標準: 0.25m~10m 特殊: 10m~20m (オプション)
接続ケーブル長さ	標準: 1.4m~50m 特殊: 50m以上 (オプション)
測定範囲	標準: 引張(1.0%), 圧縮(0.5%) 特殊: 0~1.5%の範囲内で調整可能
使用温度範囲	-50°C~110°C (オプションで170°C)
耐圧性	5bar (オプションで15bar)
校正	不要

表3 SMARTape Compact センサの仕様

センサ断面寸法	幅：6mm～13mm, 厚さ：0.2mm～0.4mm
基準ファイバ	アルミ箱 (140×70×30mm) 内
センサ長さ	0.1m～10m
使用環境	埋め込みまたはセンサに沿う温度がほぼ一定で、アルミ箱の温度とほぼ等しい時
測定範囲	引張(1.5%), 圧縮(1.5%)
使用温度範囲	センサ部：-55℃～300℃ その他の部品：-40℃～80℃
温度補償	自己温度補償
校正	不要

図6にSOFOによる高層ビルの鋼製柱の変形計測の様子を示す。高層ビル（完成時33F）建築中の柱表面にSOFO標準センサ（長さ：1m）を設置し、柱に作用する荷重の変化を建築中から長期的にモニタリングしている。現在はSOFO Vによる静的なモニタリングであるが、ビル完成後はSOFO Dynamicにより振動特性の変化もモニタリングする予定である。

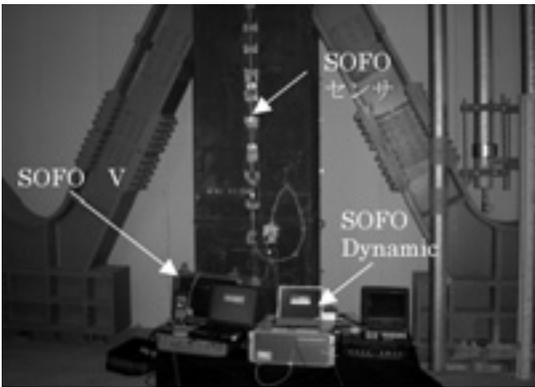


図6 SOFOによる高層ビル柱の変形モニタリング

図7に構造物の損傷検知試験に適用した例を示す。1階建てのフレーム構造模型を振動台に載せ試験を実施した。図8に示すように、1本の柱に2個のSMARTapeセンサを取り付け、柱に7段階で切欠をいれて損傷を模擬した。

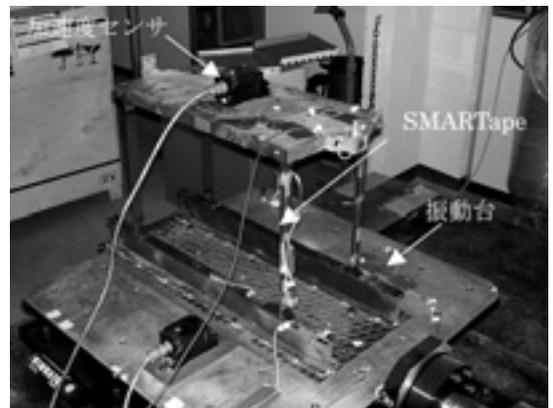


図7 フレーム構造の損傷検知試験

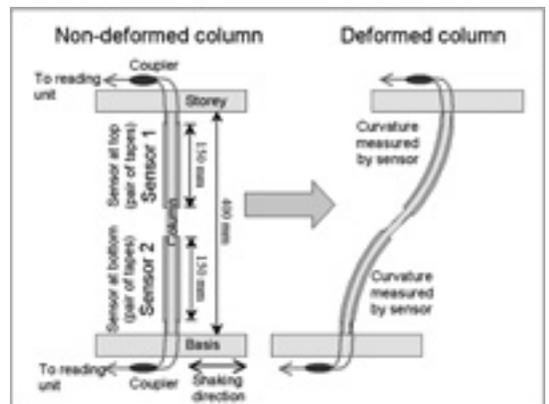


図8 SMARTape センサの設置

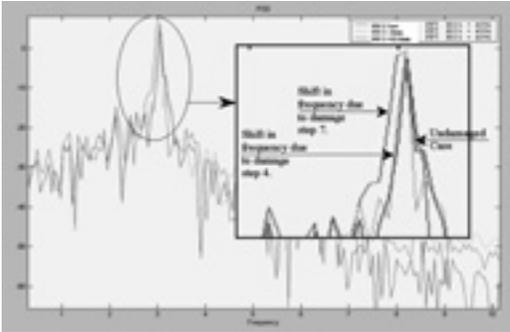


図9 振動応答の周波数解析結果

図9に試験結果を示す。損傷が大きくなるにしたがって、固有振動数が低下する様子が明確に捉えられている。従来の加速度センサよりも高感度で検知ができることが確認された。

## 7. SOFO Dynamicの適用分野

日本国内では本格的な適用事例は未だないが、以下のような適用が考えられる。

- (1) 交通、風、地震等の動的荷重を受ける構造物（ビル、橋梁等）の動的変形計測
- (2) 構造物の共振拡大係数（Quality Factor）の評価
- (3) モーダル解析によるシステム同定（任意及び強制振動）
- (4) 振動モード形状及びモーダル曲率計測。
- (5) 構造物のモーダルパラメータ、剛性、減衰係数の変化による損傷検知。
- (6) 橋梁の動的応答計測による動的重量計測（例：過積載車の検知）。

以上を勘案して、SOFO Dynamicによる橋梁ヘルスマニタリング試験を長さ30m程度の橋梁で2006年から開始する予定である。（図10参照）

橋桁にSOFOセンサを設置し、動的曲率及び振動応答を長期的にモニタリングする。これにより、橋桁の劣化（異常）を検知する。また、これらのセンサにより走行車両の重量を計測する。

車両重量計測システムはWIM（Weighing In Motion）

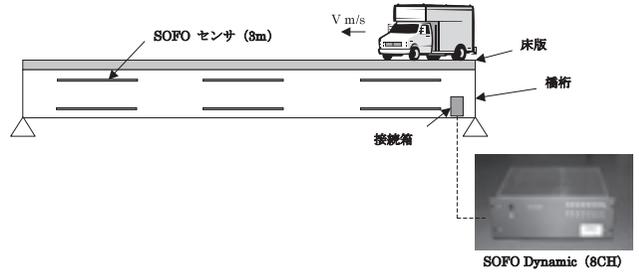


図10 橋梁ヘルスマニタリング

と呼ばれ、橋梁各部のひずみを動的に計測することにより、走行中の車両の重量を計測するシステムである。従来のWIMはセンサとして多数のひずみゲージを用いているが、ゲージ長の長いSOFOセンサを用いれば設置の簡略化、システムの長寿命化が期待できる。

## 8. おわりに

SOFO Dynamicの導入により光ファイバ計測の適用分野が広がった。センサは共通であり、静的計測が必要な場合にはSOFO Vで、動的計測が必要な場合にはSOFO Dynamicで対応できるようになった。

センサ長が長い、高精度、長寿命、校正不要等の特徴を生かして、適用範囲を広げて行きたい。

## 参考文献

- (1) 三上，“SOFOシステム”，IIC REVIEW/2000/10. No.24, p29～p33
- (2) Daniele Inaudi et al, “Long-gauge fiber-optic sensors: A new approach to dynamic system identification”, Third European Conference on Structural Control, 3ECSC, 12-15 July 2004, Vienna, Austria



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