

光ファイバによるハイブリッドセンシングシステムに関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON THE HYBRID SENSING SYSTEM CONSISTED OF FIBER OPTIC DISTRIBUTED MEASUREMENT

黒田清一郎*・検見崎千浩**・田畑和文***・橋本理昭****・永井哲夫*****

Seiichiro KURODA, Chihiro KENMIZAKI, Kazufumi TABATA, Masaaki HASHIMOTO, Tetsuo NAGAI

Fiber optic sensing has made remarkable progress recently even in the field of civil engineering. In the case of distributed sensing such as BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry) and ROTDR (Raman Optical Time Domain Reflectometry), optical fibers make it possible to measure the strain and temperature distribution directly along the entire length of the sensing cable. In this study, temperature dependence of BOTDR is clearly demonstrated and discussed based on the laboratory test results as the first stage of R&D on the hybrid sensing system consisted of a combination of BOTDR with ROTDR.

Key Words: fiber optic sensing, distributed sensing, hybrid, strain, temperature

1. はじめに

近年、光ファイバ自体をセンサとして用い、種々の物理量を測定するという光応用計測技術がいろいろな角度から脚光を浴びている。光ファイバの一部または全線をセンサとして物理量を測定し、その情報を同じく光ファイバにより伝送するところに特徴がある。この光ファイバセンサを大別すると、点計測型センサと分布計測型センサに分類できる¹⁾。前者は、従来の電気抵抗式センサと同様に点計測であるが、電気抵抗式センサの場合は 1 つのセンサに 1 本のケーブルが必要となるため、広範囲に渡る多点計測ではケーブルの本数や重量が増えて取り扱いが煩雑になるのに対し、光ファイバセンサの場合は複数のセンサを 1 本の光ファイバケーブルに接続してデータを伝送できるため、ケーブルの本数や重量が少なくなるという利点がある。後者は、測定器から被測定物を含む光ファイバ全線がセンサとなるため、ひずみや温度などの各種物理量の線分布を簡便に直接計測できる。

著者らは、構造物や基礎地盤の監視技術として、分布型の光ファイバひずみセンサおよび温度センサに着目し、これらをハイブリッド化したセンシングシステムの技術開発を実施している。その第一段階として、ひずみ分布の温度依存性について基礎的研究を行っている。本研究では、恒温槽を用いた室内実験により、光ファイバセンサに沿うひずみ分布に及ぼす環境温度の影響について検討する。その結果をもとに、分布型光ファイバひずみセンサを用いた現場計測に関する問題点を明確にし、分布型光ファイバ温度センサとのハイブリッド化による対策の有効性を示す。

* 独立行政法人農業工学研究所
** 第一高周波工業株式会社
*** 日鐵溶接工業株式会社
**** 安藤電気株式会社
***** 正会員 博士 (学術) 株式会社ダイヤコンサルタント

2. 光ファイバによるハイブリッドセンシングについて

本章では、光ファイバによるハイブリッドセンシングシステムの中核をなす、分布型光ファイバひずみ計測 (BOTDR: Brillouin Optical Time Domain Reflectometry) および温度計測 (ROTDR: Raman Optical Time Domain Reflectometry) について、それぞれの原理と現状を要約し、ハイブリッドセンシングの考え方および課題を述べる。

(1) 分布型光ファイバひずみ計測 (BOTDR)

光ファイバの組織は結晶のように一様ではなく、熔融状態の分子構造のまま固体化しているため、屈折率にミクロなゆらぎを持っている。光ファイバの片端からパルス光を入射すると、光子が自身より小さい分子や原子に当たって散乱光が発生する。この散乱光のうち、進行方向とは逆方向に進む光を後方散乱光と呼ぶ (図-1 参照)。光ファイバ各点から後方散乱光として入射端に戻ってくる成分を捕えて、ひずみ量に比例して変化するブリルアン後方散乱光を検出し、周波数のシフト量を測定することにより各点におけるひずみ量を求めることができる。各測定点は、パルス光を入射してから光ファイバ各点の後方散乱光が戻ってくるまでの時間と光ファイバ内の光速から求められる。

BOTDRは、堤防や地すべりの監視、トンネルの維持管理などへの適用が試みられている²⁾が、実用化に際しては解決すべき課題が少なくない。課題を要素別に見ると、光ファイバセンサの種類、施工方法、データの解析技術に分けられる。これに対して、分布型光ファイバひずみセンサとして金属管入りかしめ構造型光ファイバが開発され、孔内傾斜計用ケーシングと一体化させてボアホールセンシングユニットを構築し、地すべり監視への適用性が検証されている³⁾。一方、BOTDRは、環境温度の変化によってもひずみ測定値が変動するため、温度変化の著しい屋外などの条件下では実際に生じているひずみを適切に評価することは困難である。

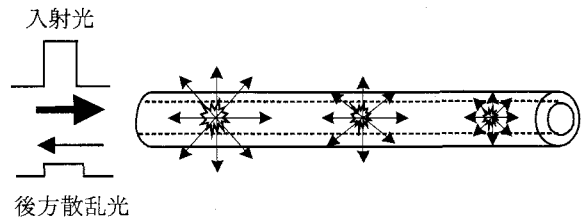


図-1 光ファイバを伝播する散乱光の概念図

(2) 分布型光ファイバ温度計測 (ROTDR)

図-1 に示した散乱光に含まれる成分の中で、ラマン後方散乱光は相対強度が非常に小さいものの、温度に強く依存するという特性を持っている。ラマン後方散乱光の2成分であるストークス光と反ストークス光の強度比は理論的に絶対温度だけの関数として表すことができる。そこで、この2成分の強度をそれぞれ測定することにより、光ファイバ各点における温度を求めることができる。測定点についてはBOTDRと同様の方法により求められる。

ROTDRは、マスコンクリートの品質管理⁴⁾、ダム堤体や堤防からの漏水検知⁵⁾、岩盤内の透水割れ目の検出および透水性の評価⁶⁾など、土木分野においても実務に適用されている。高精度光ファイバ温度分布計測システム (FOTM) によると、温度分布をトレーサーとして地下水の挙動を推測できる⁶⁾ことから、ダム、堤防などの水理構造物やトンネル、斜面などの監視にも有効であると考えられる。

(3) 光ファイバによるハイブリッドセンシング

前述のように、構造物や基礎地盤の監視技術としてBOTDRやROTDRは有効であることが分かる。ハイブリッドセンシングにおいては、ひずみ分布データおよび温度分布データを併せて総合的に評価することにより、質の高い監視や維持・管理を目的としている。そこで、解決すべき課題として次のような項目が挙げられる。

- ① BOTDRの温度依存性の解明とROTDRを用いた補正方法の検討
- ② BOTDRとROTDRを一体として測定できるハイブリッドセンサ、ハイブリッドセンシングユニットの開発
- ③ ハイブリッドセンサ、ハイブリッドセンシングユニットの施工方法の検討
- ④ ひずみ分布データおよび温度分布データの解析技術の検討

本研究は、①を対象とした基礎的研究を行うものである。

3. 実験内容

(1) 実験目的

本実験では、BOTDRの温度依存性、つまり光ファイバセンサに沿うひずみ分布に及ぼす環境温度の影響について、そのメカニズムを解明すること、環境温度の影響を除去して真のひずみ分布を評価する方法について検討することを目的とする。

(2) 実験装置

本実験では、分布型光ファイバひずみセンサとしては、図-2に示すように、通常使用される素線（ $\phi 0.125\text{mm}$, UV被覆）、心線（ $\phi 0.9\text{mm}$, シリコン樹脂+ナイロン樹脂被覆）の2種類に加えて、金属管入りかしめ構造型光ファイバ³⁾（ $\phi 2.0\text{mm}$, インコロイ825）を用いた。光ファイバの材質は全てSM10/125である。光ファイバセンサは、拘束しないで巻いた状態と直線状に伸ばした状態、被測定物（L形鋼および石英ガラス管（図-3参照））に取付けて拘束した状態とした。熱膨張、熱収縮によりたるみが出ないように張力をかけ、取付け金具またはエポキシ樹脂を用いて被測定物へ固定している。なお、比較検討のために、被測定物の中央および中央から両端方向へ250mmの位置にそれぞれひずみゲージを貼付した（図-4参照）。ひずみ測定器としては、高精度光ファイバひずみアナライザ（安藤電気製, AQ8603）を用いた。測定精度（繰返し再現性）は $\pm 0.02\%$ 、最小距離分解能は1mである。

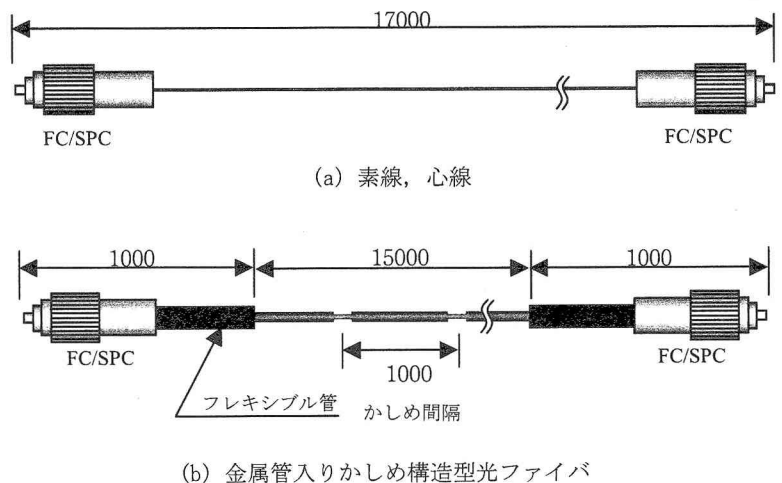


図-2 実験に用いた光ファイバセンサの概念図（単位：mm）

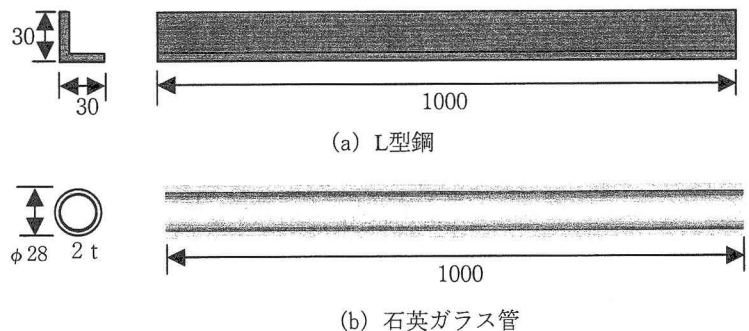
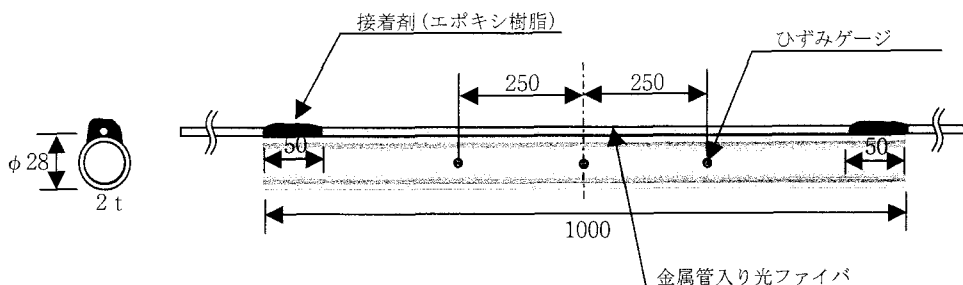


図-3 実験に用いた被測定物の概念図（単位：mm）



図－４ 被測定物への光ファイバひずみセンサの取付け例とひずみゲージの貼付位置（単位：mm）

一方、分布型光ファイバ温度センサとしては、素線（φ0.125mm，UV被覆）および金属管入り光ファイバ（φ2.0mm，SUS304）を用いた。光ファイバの材質はともにGI50/125である。素線をL型鋼に取付け、金属管入り光ファイバを石英ガラス管に取付けた。その他の部分は、恒温槽内に這わせるように配置した。なお、比較検討のために、被測定物の中央にそれぞれ熱電対を貼付した。温度測定器としては、高精度光ファイバ温度分布計測システム（FOTM）で適用されている高精度光ファイバ温度計測装置（SENSA製，DTS800-SR）を用いた。測定精度は±0.5℃，測定最小間隔は25cmである。FOTMでは、さらにシステムとしての高度化を図ることにより、測定精度は±0.1℃を実現している。

(3) 実験方法

前述のように分布型光ファイバひずみセンサおよび温度センサを取付けた被測定物を恒温槽にセットし、拘束しないで巻いた状態と直線状に伸ばした状態の分布型光ファイバひずみセンサを並列してセットした。実験に際しては、恒温槽を各設定温度まで昇温後、そのまま約30分間保持し、被測定物に取付けた熱電対の温度変動がないことを確認して、光ファイバセンサによるひずみ分布および温度分布の測定、ひずみゲージ、熱電対によるひずみ値および温度値の測定を実施した。環境温度は、屋外での現場計測を考慮して-20～60℃で変化させることとし、温度経路は20℃→40℃→60℃→-20℃→0℃→20℃とした。

4. 実験結果および考察

(1) 実験結果

実験結果の一例として、素線を石英ガラス管に取付けた場合、環境温度の変化に対してひずみ分布は図－5のようになる。距離は実験室内に設置したひずみ測定器からの位置を示し、0～7.5mが恒温槽の外側の実験室内、7.5～17.0mが恒温槽内、9.8m～10.8mが石英ガラス管の区間にそれぞれ相当する。

実験期間中、室温はほぼ一定であったため、0～7.5mではひずみ分布にほとんど変化は見られない。それに対して、7.5～17.0mでは環境温度の変化に伴いひずみ分布が規則的に変化していることが分かる。石英ガラス管に取付けた部分では局所的に大きなひずみが発生しているものの、恒温槽内においては石英ガラス管への取付けの有無にかかわらず環境温度の増減に比例してひずみが一様に増減している。光ファイバセンサの種類（素線、心線、金属管入りかしめ構造型光ファイバ）、光ファイバセンサの状態（拘束しないで巻いた状態と直線状に伸ばした状態、被測定物に取付けて拘束した状態）によらず、同様の結果が得られた。ただし、心線の場合、被測定物に取付けて拘束した区間のみが、他の種類や状態の場合と同程度のひずみの増減を示すのに対し、その他の区間では2倍近くの増減となっている。これらの結果より、BOTDRにより得られるひずみ分布が環境温度の影響を受けて変化すること、その変化の仕方には規則性があることが分かる。

また、環境温度が初期設定値である20℃の場合のひずみ分布は、20℃→40℃→60℃→-20℃→0℃→20℃という温度履歴を受けた後の最終設定値である20℃の場合のひずみ分布とほぼ一致している。素線または金属管入り光ファイバの場合、光ファイバセンサの状態によらず同様の結果が得られた。しかし、心線の場合、初期設定値の20℃の場合と最終設定値の20℃の場合では、恒温槽内のひずみ分布には隔たりが見られる。

次に、素線の場合を対象に、環境温度に対するひずみの変化量をまとめると図-6のようになる。ここでは、初期設定値である20℃の場合のひずみ量を基本量として、各環境温度下のひずみ量との差分を求めて図示している。光ファイバセンサの状態により若干相違があるものの、環境温度とBOTDRにより得られるひずみ変化量にはほぼ一定の相関が見られる。各直線の勾配（温度依存率）を求めると以下のような。

- ・拘束無し（巻き）：0.0025%/℃
- ・拘束無し（直線）：0.0025%/℃
- ・石英ガラス管：0.0021%/℃
- ・L型鋼：0.0035%/℃

同様にして、金属管入り光ファイバおよび心線を対象に、環境温度に対するひずみの変化量をまとめると図-7および図-8のようになる。金属管入り光ファイバについては、素線の場合と同様に、環境温度とひずみ変化量にはほぼ一定の相関が見られる。それぞれの温度依存率を求めると以下のような。

- ・拘束無し（巻き）：0.0038%/℃
- ・拘束無し（直線）：0.0038%/℃
- ・石英ガラス管：0.0024%/℃
- ・L型鋼：0.0031%/℃

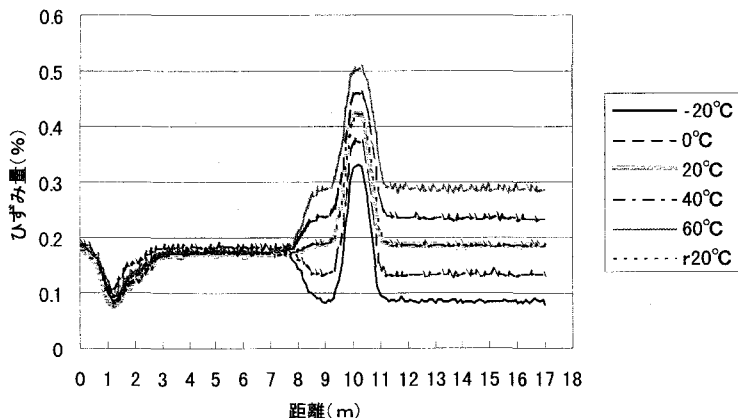


図-5 環境温度の変化に伴うひずみ分布（素線，石英ガラス管）

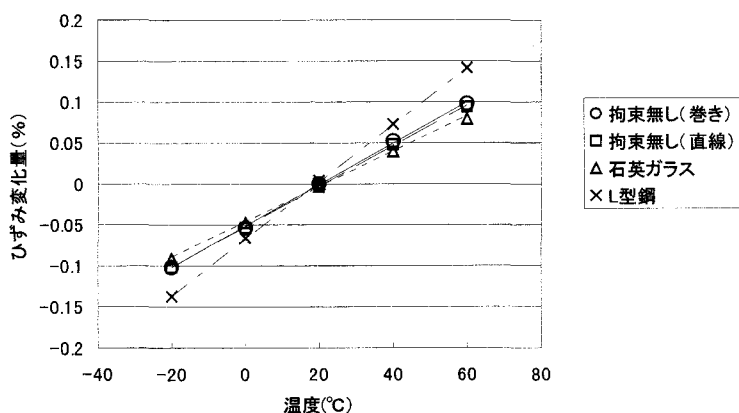


図-6 環境温度に対するひずみの変化量（素線）

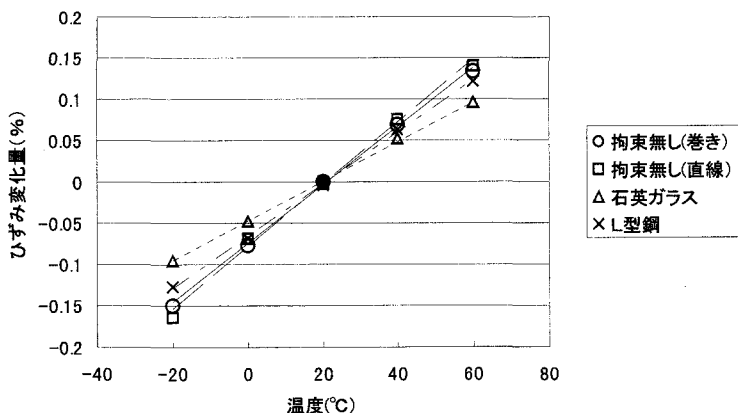


図-7 環境温度に対するひずみの変化量（金属管入り光ファイバ）

一方、心線については、被測定物に取付けて拘束した状態の場合、素線の場合と同様に、環境温度とひずみ変化量にはほぼ一定の相関が見られる。それぞれの温度依存率を求めると以下のようなる。

- ・石英ガラス管 : 0.0028%/℃
- ・L型鋼 : 0.0038%/℃

それに対して、拘束無しの場合、20℃～60℃の区間と-20℃～20℃の区間では、環境温度とひずみ量には部分的に相関が見られるが、それぞれの温度依存率は異なり、20℃において不連続となっている。

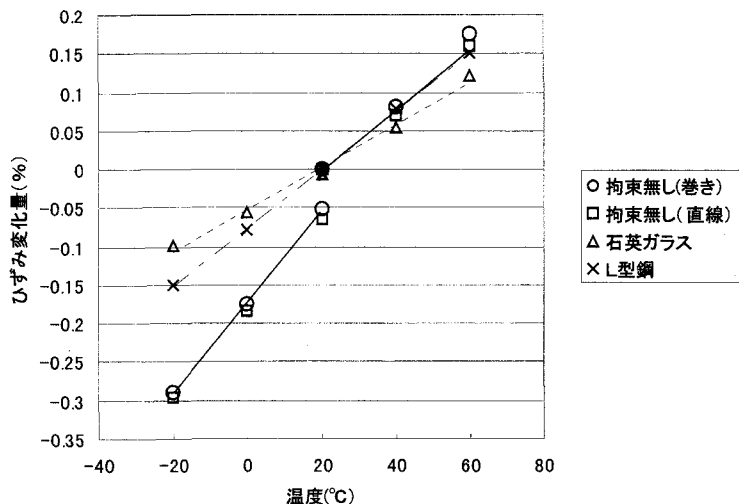


図-8 環境温度に対するひずみの変化量(心線)

(2) 考 察

拘束無しの場合、環境温度の変化に伴い、心線では素線の2倍程度のひずみが発生し、温度が初期設定値に回復してもひずみは回復せずに残留ひずみが生じた。素線の場合にはひずみが回復していることから、心線を構成する素線-シリコン樹脂、シリコン樹脂-ナイロン樹脂の境界で塑性すべりが生じていると推測される。そのため、環境温度の影響の除去は困難である。一方、被測定物に拘束した場合、塑性すべりの発生が抑制され、素線に近い温度依存性を示した。金属管入り光ファイバの場合、かしめにより心線を適切に拘束する構造であるため、素線と同様の温度依存性を示したと考えられる。これらの場合、温度補正により環境温度の影響を除去できる。線膨張係数は、石英ガラス管が0.00005%/℃(理論値)、L型鋼の場合が0.0011%/℃(ひずみゲージ測定結果)である。前述の温度依存率と線膨張係数の差分からBOTDRの温度補正率を求めると、金属管入り光ファイバについては素線の場合と同様に0.0020～0.0024%/℃、心線の場合は0.0027～0.0028%/℃となる。現場計測においては、BOTDRの測線に沿う環境温度の分布をROTDRにより測定し、温度補正率を用いてその影響を除去すれば、真のひずみ分布の評価が可能である。本実験では、ROTDRと熱電対の測定値を比較すると温度差は±1℃以内であり、ROTDRによれば温度補正に十分な精度で測定できることが分かる。BOTDRによる現場計測では、素線、心線がそのまま、またはUV樹脂やFRPなどで被覆した光ファイバセンサが用いられる。本実験で示した温度依存性を十分に考慮して、目的に応じた光ファイバの選定、現場での適切な設置方法の検討を行うことが重要である。

【謝 辞】

本研究は、農林水産省の官民連携新技術研究開発事業「構造物・基礎地盤監視のための光ファイバによるハイブリッドセンシングシステムの開発」の一環として実施したものである。本研究の遂行に際しては、農業工学研究所の奥山室長をはじめ、関係各社の皆様のご協力を頂いた。ここに記して、深く感謝の意を表する。

【参考文献】

- 1) Dakin, J.P. (1992): Distributed optical fiber sensors, Fiber Optic Sensors, Critical Reviews Vol.CR44, pp.162-199
- 2) 成瀬 央 (2003) : 光ファイバひずみ計測システムの開発と実用化, 日本機械学会誌, Vol.106, No.1016, p.47
- 3) 黒田, 中里, 奥山, 長束 (2003) : 連続分布計測システムによる野外地下計測技術, 農業土木学会誌, 第71巻1号, pp.31-34
- 4) 中村治朗 (1996) : 光ファイバを用いたマスコンクリートの温度管理, 中部電力技術開発ニュース, 70号, pp.15-16
- 5) Grosswig, S., Nagai, T., Zhiguang, Wu. (1999): Dam and dike monitoring with help of distributed fibre optic temperature sensing technique, '99 Int. Conf. on Dam Safety and Monitoring, Yichan, pp.33-39
- 6) 永井哲夫, 武富康浩(2001):高精度光ファイバ温度分布計測システム(FOTM)による地下水挙動の評価, 地下水地盤環境に関するシンポジウム2001, 地下水地盤環境に関する研究協議会, pp.41-46