

ロンドン市立大学における研究活動 (FBGセンサー)



堀地 紀行
HORICHI Noriyuki

国士館大学理工学部教授

1. はじめに

IT社会を担うインフラ設備である大容量伝送路の光ファイバーケーブルは、日々の生活のなかで我々に多大な恩恵を与えるとともに、テレビCMなどその話題に一日たりとも触れない日はないほど、瞬く間に私たちの生活に融け込んだが、この光ファイバーケーブルの周辺技術の一つとして、ケーブル自体をセンサーとした計測技術が開発されていることは、一般の方のもとより、技術者においても、さほど多くの方々には浸透していないように思われる。

橋梁、トンネル、管路、地盤などの公共構造物の設計・施工を取り扱う我々土木技術者にとって、施工中の精度、強度の確認や施工後の管理などを目的とした構造物の計測管理は、設計・施工と並んで大変重要な事項として受け止められてきた。しかし、ここ数年来の動きではあるが、土木計測技術として構造物の変位やひずみの測定において、光ファイバーケーブル自体をセンサーとして用いた技術が開発され、国内を初め国外においても良好な実績を収めていることはあまり知られていないようだ。実際、かく言う筆者自身も、NTTグループによる土木構造物に関する光ファイバー計測技術の研究会に参加させて頂くまでは、大まかな知識しか持ち合わせていなかったというのが正直なところである。

この報告では光ファイバー計測技術の概要について解説するとともに、昨年、ロンドン市立大学とケンブリッジ大学に在外客員研究員として赴任し、そこで土木工学分野における光ファイバー計測技術 (Optical fibre measurements) について実施した研究活動の一端についてご報告したい。

2. 光ファイバーセンサー

光ファイバーセンサーは、光ファイバーケーブル自体をセンサーとしたもので、材質としては石英ガラスをベースとしたグラスファイバーであるため、腐食に強く、可撓性に富み、電磁気的な影響も受けないといった特徴を有し、過酷な条件の土木構造物の計測にとっては打って付けのセンサーといえる。代表的な計測方式とその原理を簡単に紹介すると、以下のようになる。

2-1 FBG法 (μ ; マイクロ、 10^{-6} オーダーのひずみ測定が可能な光ひずみゲージ)

光ファイバーケーブルのコアの一部区間に、屈折率の高い格子を縦断的に等間隔で配列したケーブルを用い、レーザー光を入射すると、格子と通常コア部との屈折率の違いの関係で、特定の波長 (Bragg 波長) の光が反射する。一方、ケーブルにひずみが発生すると、当然ながら格子の設置間隔に変化が生じ、これに伴い反射光の Bragg 波長もひずみに比例して、その波長をシフトさせる。この特性を利用した方法が、FBG (Fibre Bragg Grating) と呼ばれる方法である。極めて細い光ファイバーケーブルの中心部コアに一定間隔で屈折率の高い格子を配置するという、特殊なケーブル加工技術を伴い、その加工には、コア部への薬剤添加と透過レーザー光の干渉などの高度技術が使われている。

2-2 BOTDR法 (光ケーブル1m当たり0.1mmの変位測定が可能なゲージ)

光ファイバーケーブルに単色性の高いレーザー光を露光すると、入射光がすべて透過するわけではなく、一部の光が後方に反射する。これを後方散乱光と呼び、波長域によって、それぞれレイリー (Rayleigh)、ブリルアン (Brillouin)、ラマン (Raman) と呼ばれる発見者の名前に因んだ散乱光が存在する。このうち、ブリルアン散乱光は、光ファイバーケーブルにひ

ずみが発生すると、そのひずみの大きさに比例し、ブリルアン散乱光の波長がシフトするという特性を有している。一方、反射光のサンプリングを行い、入射光との時間差を測定し、位置を解析する技術として、光ファイバーケーブルの保守管理に使われているOTDR法 (Optical time domain reflectometry: 光学的時差反射法) と呼ばれる技術がある。光ケーブルのひずみを読み取る技術と、特定のひずみの発生位置を測定する技術を融合した技術がBOTDR法である。これを用いると、たとえば構造物に1m間隔で固定ジグを設置し、このジグに光ファイバーケーブルを緊張力を導入して敷設する。そして構造物に荷重が作用すると、固定ジグ間が伸び縮みし、それに呼応して光ファイバーケーブルも伸び縮みするので、測定器の分解能として1mあたり0.1mmの変位、ひずみ換算で $100\ \mu$ の測定が可能となる。ただし、現在のところゲージ長は1m以上が要求される。

- ・レーリー (Rayleigh) 散乱光や、ケーブルの接続点で発生するフレネル反射光に着目し、あわせて入射光、反射光の時間差から位置も特定し、ケーブル保守管理に用いる方法が、先にも若干紹介したが、OTDR法と呼ばれる計測技術である。
- ・ラマン (Raman) 散乱光は、温度変化によって反射光の波長をシフトさせる。

これを利用することによって、温度測定が可能である。

2-3 OSMOS

(Optical strand monitoring system)

センサー部分に3本より線を用い、入射光として赤外線を使用し、センサー部分を往復して戻ってきた赤外線の減衰をひずみに換算する技術である。

3. ロンドン市立大学における光ファイバー計測技術の研究

ロンドン市立大学は、1894年創立の公立大学で、6学部を擁し、学長はロンドン市長が兼ねる。金融、法律、医療工学、介護系、情報系、数理工学系の各学部、大学院とビジネススクール系大学院で教育・研究に高い評価を受けている総合大学で、およそ13,000人の学生が学び、短期コースの学生や派遣研究員、教職員を含めると23,700人の規模を有し、日本からも100人ほどの学生が勉学に励んでいる。所在地は、シティーと呼ばれる旧市街から北へ1kmほどの閑静な地区にあり、南に下ればロンドン塔やセントポール大聖堂、西に向かえば大英博物館など、観光名所も半径1~2kmほどで、優れたロケーションを併せ持った大



写真-1 ロンドン・シティー大学(市立大学)のビクトリア朝の正面玄関学である。(写真-1参照)

ロンドン市立大学では、主にFBGセンサーを用いた計測技術の研究が行われている。土木工学分野において、現在対象としている構造物は、鋼橋、コンクリート橋梁、杭、そして最近開発された合成樹脂橋梁などである。

序論でも少し触れたが、FBGセンサーの測定原理について、ここで、説明を加えておく。

FBGセンサーは、コア、グラッド共に石英ガラスを材料とした光ファイバーケーブルの母材において、感光性を高めるためゲルマニウムをコア部の中に微量添加し、あらかじめ縦断方向に干渉縞を持たせた紫外線レーザー光を露光してコア内に縦断的に屈折率の異なる格子を一定間隔で生成、配列したもので、これには石英ガラスが波長250nm (ナノ) m近傍の紫外光に対して化学構造の変化をきたし、屈折率が変化、上昇する性質を利用している。こうして作製されたFBGセンサーに、紫外線レーザー光を露光すると、屈折率の異なる格子の存在から回折現象が起こり、その格子の配置間隔 (周期) との関係から式 (a) で定義されたブラッグ波長の光が反射される。

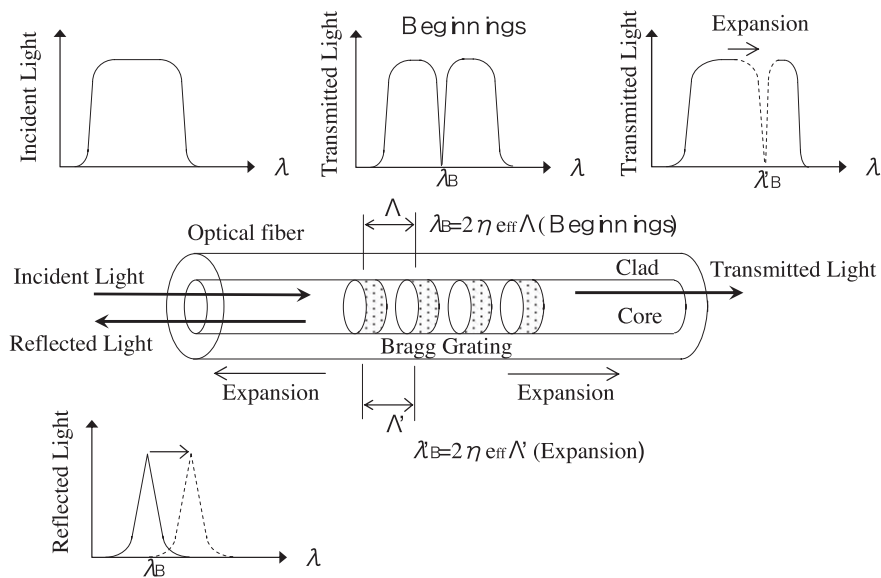


図-1 FBGのセンサーの原理

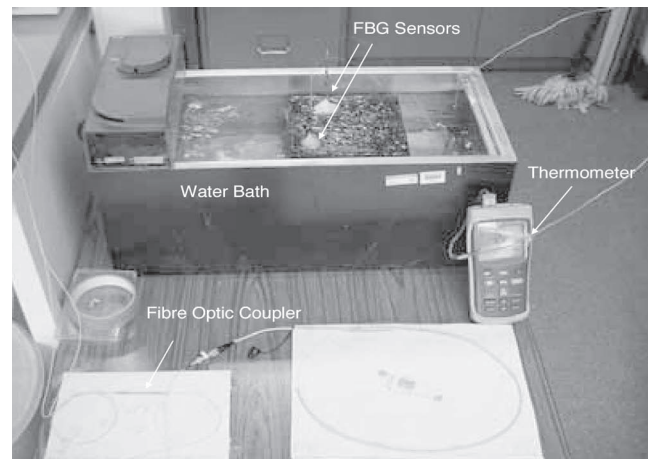
$$\lambda_B = 2 \eta_{\text{eff}} \cdot \Lambda \quad \dots \dots (a)$$

ここで、 λ_B はBragg反射される波長（Bragg波長）、 Λ は屈折率格子の配置間隔（周期）、また、 η_{eff} は伝播モードの実効屈折率。

(a) 式の屈折率格子の配置間隔（周期）が、外力の影響で伸縮、つまりひずみが生じると、その周期変化に応じたブラッグ波長のシフトが生じ、その値からFBGに作用するひずみを求めることができる（図-1参照）。

またブラッグ波長の変化にはFBGケーブル自体に生じたひずみによる光弾性効果による波長の変化も含まれ、その値は、汎用的な長距離光伝送路に用いられているレーザー光の波長1550nm付近で、1 μ ストレーン当たり1.2pmであり、1p（ピコ、10⁻¹²）mの波長変化の検出能力で、ひずみ1 μ が計測可能となる。

ロンドン市立大学の研究では、単にFBGセンサーを電気抵抗ひずみゲージの代替としてのみならず、ライフサイクルコストを考慮した長期的な構造物管理手法の確立を視野に入れた取り組みを検討している。独創的な例としては、コンクリート構造物の劣化の指標として、コンクリートの経年変化によるポーラス化やクラックの発生・伸展に伴う水分の浸潤に起因するコンクリート内部の湿度変化に着目し、独自に湿度測定用のFBGセンサーを電子系教員と共同開発し、センサーをコンクリート内部に埋め込み、測定実験を行い良好な結果を得ている（写真-2参照）。湿度測定用FBGセンサーの製造方法は、感高度を上げるためにホウ素とゲルマニウムが微量添加されたケーブルコア母材を用い、紫外線レーザー光で格子生成後、ポリイミド樹脂で、ケーブルを被覆する。通常のFBGセ

写真-2 FBGセンサーの湿度測定実験の状況
(提供：ロンドン・シティー大学)

ンサーも保護を目的に被服厚が5 μ mのポリイミド樹脂で被覆されている。しかしポリイミド樹脂は水分を吸収して膨張する特性を有しており、この関係に着目してポリイミド樹脂の伸びと相対湿度の関係、被服厚の影響などを分析し、その結果、相対湿度23%から97%の範囲において良好な線形性を示すことを確認している。この特性を用いて実用的な湿度測定用FBGセンサーが開発されている。相対湿度とブラッグ波長の関係とポリイミドの被覆厚との関係は、一般的な長距離通信の波長域1550nm近傍で、図-2、3のように示される。またこの他に、ケーブルの温度変化に対してブラッグ波長の変化は、基本特性として認識されているが、400℃の高温領域に対する湿度測定用のFBGセンサーを開発し、構造物の火災による劣化判定や、機械工学系分野のテーマであるエンジンの排気温度の測定などにも応用の道を広げている。

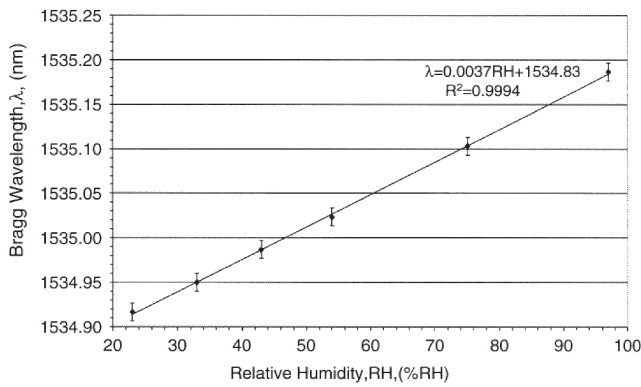
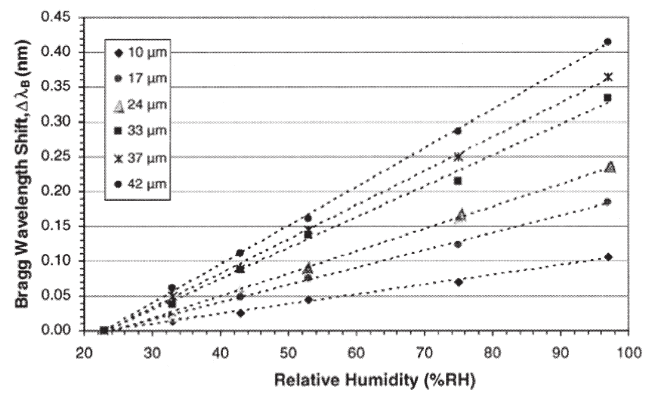


図-2 FBG湿度センサーの線形特性グラフ
(提供：ロンドン・シティー大学)



2. RH response of the sensors with different coating thicknesses from 23 to 97%RH at constant room temperature.

図-3 FBGセンサー皮膜厚さ
(提供：ロンドン・シティー大学)

4. まとめ

FBGセンサーをはじめとして、一般に光ファイバー計測システムは、その材質的な優位性のみならず、光通信網の整備により、電気式センサーと比較して、膨大な測点数の計測にも対応でき、しかもデータサンプリングも遠隔で統括集中できるところに最大の優位性が見られる。たとえば、複数のトンネルや橋梁の計測

値を現場ごとではなく、一箇所で集約してデータサンプリングができ、統一的な比較と管理が可能で、管理コストの節減も望める。土木技術としての方向は、構造物のメンテナンスを例とすれば、耐久性に及ぼす支配要因を分析し、適切な指標を選択して、それに対応したセンサーを開発し、良好なポイントにセンサーを設置することかと思われる。次回はケンブリッジ大学におけるBOTDRについて報告したい。



ロンドンの街角では、200mも歩けばすぐにパブに出くわす。パブの営業は昼少し前から始まり、ここでビールやワインを飲みながらお手ごろな4,5ポンドのパブランチを楽しむ人々を多く見かける。

夕方からは、仕事帰りや近所の人たちが集まり、時には店から溢れるほどの賑わいで、会話やビリヤード、サッカーなどを大画面で楽しみながら、法律で定められたクローズの11時までがやがやとやっている。



また、ロンドンの市内にはあちこちにスクエアと呼ばれる広場が点在し、巨樹と芝生で都市に安らぎを与えている。テイクアウト、イギリスではテイクアウェーと呼ばれる飲食店のお持ち帰りがあって、店内で食べるよりも安く、天気の良い日には広場のベンチや芝に腰をおろして、買い求めたテイクアウェーのランチボックスを広げている人も多く見かける。中華の焼きそばや、インドカレー、ハンバーガーなど日本人の味覚にも合う店も市内には多く、このランチボックス試してみると、ずっと開放的で、空気も新鮮、ピクニック感覚で食べ物もまた美味しい。