

巻頭言

# 構造センシングと応用事例の実装への期待

松本幸大\*



## 1. はじめに

建設分野ではストック型社会への対応や高度成長期に建設された多数の構造物の劣化評価・診断の必要性の顕在化、また自然災害による被害を対象とした診断・補修・補強の必要性が増し、様々な研究開発が進められている。一方で、実験室実験や現場計測のためのセンシング・計測技術の進歩も顕著である。筆者は、建設構造分野における診断技術や補修・補強技術を専門分野としており、これまで幾つかのデバイス・手法を利用した構造健全性評価に繋がる計測・分析、接着接合や繊維強化複合材料による補修・補強法、また、本稿の終盤で紹介するボルト接合部の締付力評価のためのセンサに関する研究を進めてきた。これらの成果から、センシング技術の利用や力学分野への応用に関する展望について述べる。

## 2. 構造センシングと健全性評価

構造物の健全性評価を行うことを目的としたセンシングでは、評価のために必要な情報は何か・その情報がどのような物理現象に対応するか・その物理現象をどのような手法（計測デバイスなど）で取得するのかなどを整理することが重要である<sup>1)</sup>。また、必要な情報が、所望の精度で（また、容易に、経済的に）取得可能かについての観点も必要となる。図1は、構造センシングにおける取得情報と対応する

手法の例を示したものである（筆者の独断であるので、項目の増減や対象物によって大きな違いが生じることはご容赦願いたい）。

ところで、近年のIoTインフラ・デバイスの整備・発展も目を見張るものがあり、構造センシングや健全性評価に組み込まれていることも少なくない。すなわち、評価のために必要な計測データの伝送手段として、各種の有線や無線システムを用いることで、遠隔かつ既存の通信インフラを活用したり、計測データの保管・処理のためにオンライン・ストレージを活用したりすることで、評価システムの使用性・安定性に繋がると考えられ、こうした通信インフラと一体となったシステムも各種産業分野のセンシングに広がる期待がある。

## 3. 繊維強化複合材による補強部のセンシング

繊維強化複合材の中でも鋼材と同等の弾性率や優れた強度を有する炭素繊維強化プラスチック（CFRP）を用いた補修補強工法の技術開発が盛んに進められている<sup>2)</sup>。既存の構造物にCFRPによって補修補強を行う場合、接着接合によって応力伝達が行われることが多い。一方で、接着部分の剥離などを生じると応力伝達経路が喪失してしまうことから、接着接合強度やその健全性を適切に評価しなければならない。筆者は、繊維強化複合材料の損傷の

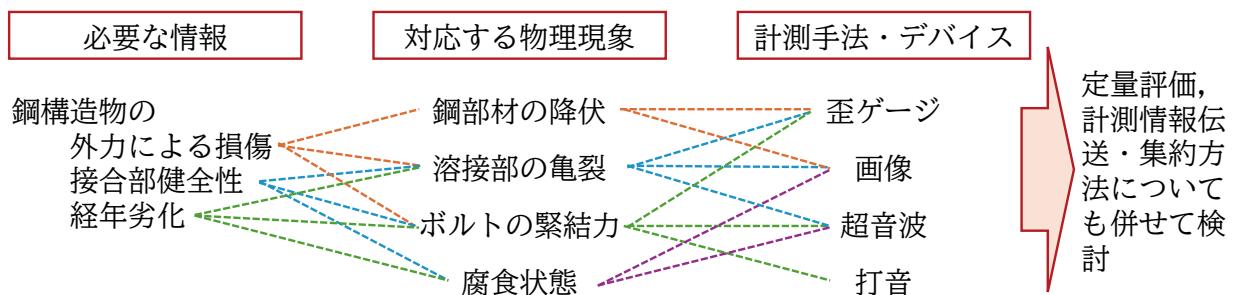


図1 構造センシングにおける手法の整理

\*鳥根大学 学術研究院環境システム科学系 教授

メカニズムを考慮したセンシング手法の適用性検討を進め、光ファイバセンサを用いた損傷センシングの検証を進めている<sup>3)</sup>。光ファイバセンサの特徴は、通信用光ファイバと同様にノイズに強く長距離のデータ伝送が可能なおことに加え、センサが直径0.2 mm程度の非常に細径のセンサであり、繊維強化複合材料の内部に設置（埋設）でき、それによる材料への影響もほとんどないことが明らかとなっている。光ファイバセンサには、その歪の検出メカニズムにいくつかの原理があるが、筆者が用いているFBG式では電気抵抗式歪ゲージ（以下、歪ゲージ）と同等以上の精度を有していること、1本の光ファイバの線上に複数の検出点を設けられるなどの特徴が挙げられる。このセンシング手法を用いた例を図2に示す。鋼材にCFRPを成形接着した補強試験体にFBG型光ファイバセンサを埋設したものであり、CFRP内の歪を検出できる。さらに、FBG型光ファイバセンサでは、センサ長さの範囲において歪に不均一性が生じている場合にも、計測結果として現れることから、CFRP内の微小な損傷も検出できる可能性があった。すなわち、内部に微細なクラックなどが生じた場合、クラック部分において局部的に歪が大きくなることを検出できる。

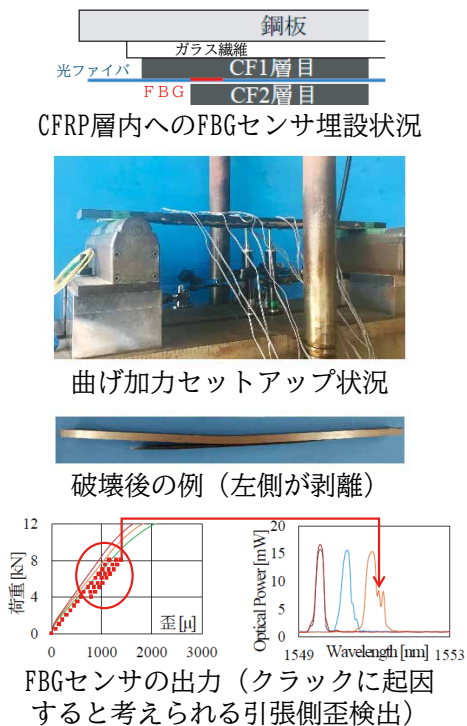


図2 FBGセンサによるCFRP接着補強のセンシング

結果として、図2に示すように、負荷除荷繰返し曲げ加力の過程において、複数の卓越歪成分が検出・増加する特性が検出でき、補強後の健全性評価の一

助となる可能性が示された。さらに、文献<sup>4)</sup>では、鉄筋コンクリート部材の鉄筋に僅かな溝を設け、光ファイバを埋設することで内部の歪（応力）状態を評価しており、被計測対象物への影響を最小限にするセンシングデバイスとして、発展が期待できる。なお、光ファイバセンサを使用した構造センシングについては、例えば文献<sup>5)</sup>で紹介されているので、ご覧いただければ幸甚である。

#### 4. 画像相関法によるマクロ的挙動の把握

建築構造材として近年利用が進んでいるものとして木質系材料が挙げられる。天然の構造材として環境負荷も小さく、加工も容易で軽量であることから、小断面材を集成したり、薄い単板（ベニヤ）を積層したりして接着剤で大断面化したエンジニアリングウッドも盛んに使用されている。筆者らは、木質系材料の表面の変形前後の撮影画像の変化から得られる歪分布を検証し、破壊起点の推定を進めている<sup>6)</sup>。図3は単板積層材（LVL）に対して画像相関による歪分布の推定を行った例である。事前に、材料試験により歪ゲージと画像相関法による歪値の対応を検証したうえで適用しているが、クラックの起点となる歪の集中部位が適切に評価されており、損傷予測を含めた構造センシング手法として有用であると考えられる。特に、検出すべき点を事前に特定できない場合などは、マクロ的な把握が必要となることから、全体を把握する手法として有効であると考えられる。この種の手法は、相関性を取るために適切な画像パターンや解像度、長期的な評価などの課題もあると考えられ、本手法自体の研究成果の活用を含め発展させていく必要がある。

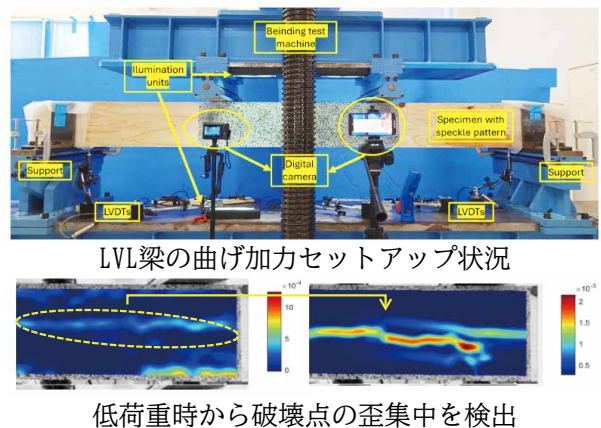


図3 木質系構造材の画像による損傷センシング

#### 5. 歪ゲージ式および変換器の活用

材料の歪（応力）を検出するために最も普及していると考えられるのが歪ゲージであろう。扱いやす

く、デバイスも安価であることから、歪の計測結果を基に変位や荷重に変換する変換器も含め、多数の製品が市販化されている。歪ゲージは一般的な応力評価用のデバイスとして認知されており、検出範囲（ゲージ長や幅）や様々な表面・環境条件への貼付方法も確立されている。従って、ユーザーのアイデア次第で、様々な変換器への応用も可能であり、計測システムの発展の観点からも非常に有用であると考えている。筆者が本寄稿を拝命した経緯も、この点が契機となっているわけであるが、目的を定めてそれに対するデバイスの考案・実証はモノづくり分野である工学系に身を置く一人として貴重な経験となっている。

歪ゲージは変形量とそれに伴う抵抗値の変化の関係を求めておき、歪や応力、また変形や荷重を取得するものである。歪変換式の荷重計測を考える場合、曲げ成分を除去したり、曲げ成分のみを評価したりする場合もありうる<sup>7)</sup>。前者の場合は、歪ゲージの結線で、図4のように平均化することで、複数の歪ゲージから軸力成分のみを評価できる。歪ゲージを活用した変換器では、筆者らは建設・機械分野などに応用を想定したボルト軸力検出用座金を試作・評価している<sup>8)</sup>。歪ゲージは一般に局所的な歪を評価することに長けているが、大面積の平均歪の評価も可能となる。多くの読者にとって、釈迦に説法ではあると思うところではあるが、こうしたハンドリングの良さも長く蓄積された歪ゲージおよびその関連製品の利点であり、目的に応じた設置・評価により、構造センシングの可能性が広げられるものと確信している。

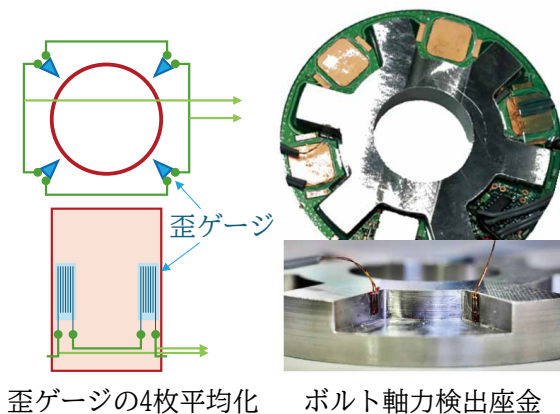


図4 歪ゲージ式変換器の例

## 6. おわりに

本稿では筆者の研究フィールドを主として、構造センシングに関連した内容を、その目的とデバイスの選択の経緯を踏まえて述べさせていただいた。人的リソースの減少や、ストック型社会への対応、また、予防保全の実現に向けて、各種デバイスの利点・欠点の理解と有効活用、さらには最新の情報関連環境の有効利用により、社会基盤のみならず経済活動に必要な多くの資産の維持管理保全に活用できることに繋がることを祈って、終わりの言葉とさせていただきます。

## 参考文献

- 1) 土木学会：構造工学シリーズ24 センシング情報社会基盤, 2015
- 2) 土木学会：複合構造シリーズ09 FRP 接着による構造物の補修・補強指針（案）, 2018
- 3) Genki Mieda, Hitoshi Nakamura, Takahiro Matsui, Yutaka Ochi, Yosuke Mizuno, Kentaro Nakamura, Yukihiro Matsumoto : Bond Strength of CFRP molded on Steel Surface by VaRTM Technology and Its Fiber Optic Sensing, 6th Asia-Pacific Conference on FRP in Structures, 2017
- 4) Murshalin Ahmed, Yukihiro Matsumoto, Rokhyun Yoon, Susumu Takahashi, Yasushi Sanada : Accurate measurement of the bond stress between rebar and concrete in reinforced concrete using FBG sensing technology, Scientific Reports 14(1), 2024
- 5) 光ファイバセンシング振興協会：ポイント型光ファイバセンサ建設分野向けマニュアル（改訂2版）, 2024
- 6) Annisa Prita Melinda, Shogo Higuchi, Fengky Satria Yoresta, Yosuke Yamazaki, Phan Viet Nhu, Pingkan Nuryanti, Yuji Takiuchi, Yukihiro Matsumoto : Digital image correlation (DIC) application to evaluate bending performance of timber beams strengthened with NSM-CFRP plate, European Journal of Wood and Wood Products 83(3), 2025
- 7) 東京測器研究所ホームページ : [https://tml.jp/knowledge/strain\\_gauge/bridge\\_list.html](https://tml.jp/knowledge/strain_gauge/bridge_list.html) (2026年1月12日閲覧)
- 8) Michail Sidorov, Phan Viet Nhut, Yukihiro Matsumoto, Ren Ohmura : LoRa Based Precision Wireless Structural Health Monitoring System for Bolted Joints in a Smart City Environment, IEEE Access 7, 2019