

光ファイバを用いた構造ヘルスマニタリング

呉 智 深・岩 下 健太郎

近年の既存インフラ施設の老朽化や都市防災に関する認識の高まりに伴い、光ファイバを用いたスマートなセンシング技術を活用した大規模構造物の構造ヘルスマニタリングに対する関心が高まり、実用化に至った技術も多く見られるようになった。本稿では、光ファイバセンサの構造形式やセンシング手法に関して分類し、それぞれの特徴や適用範囲、最新の開発研究、そして応用・実用化事例などに対して取り纏め、解説を行う。さらに、それぞれのセンシング技術が現在抱えている課題を明確に示し、それらに対する取り組みに対しても紹介する。

キーワード：光ファイバ、構造ヘルスマニタリング (SHM)、ロングゲージ FBG センサ、分布型ひずみセンシング、損傷同定

都市防災に対する要求の高まりやスマートなセンシングや解析評価および情報通信技術の進歩により、大規模構造物における健全性の実時間的監視を旨とした「構造ヘルスマニタリング (Structural Health Monitoring, SHM と略す)」に対する関心が高まっている。SHM のエッセンスは、人的な関与を極力避け、構造システムのセンシング、損傷劣化や構造変化の検出および診断評価を、自動的かつ連続的なベースにて実現しようとする思想であり、的確な事象の把握と予測の基に状況や状態に即した対策を施すことによって、コンクリート構造物の予防的管理の実現が可能となる。このため、計測技術や計測システムのインテリジェント化が追求され、測定対象物の変状を継続的にモニタリングできるスマートな光ファイバセンシング技術の構築が進められている。

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。光ファイバセンサは従来のセンサに比べて電氣的なノイズに強く、軽量であり、幾何学的には柔軟性があるなどの特長も有している。現在では、構造物のひずみ・変位、温度や湿度、振動・動的ひずみプロファイル、ひび割れの発生・塑性ひずみ・破壊および pH のような化学的諸量などの光ファイバを用いて計測することが可能になっている。

光ファイバによる検知原理には、そのファイバ内を伝播する光の偏光、干渉、後方散乱などの現象、あるいはファイバの破損などにより伝播する光が変化する現象が利用されている。これらの現象により構造物の

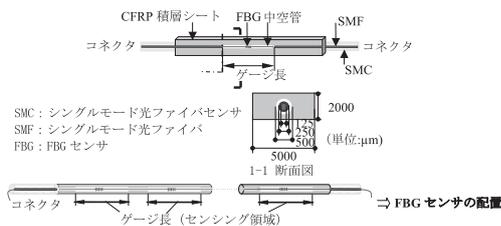
損傷やひずみを検出・計測する光ファイバセンサは分光型、位相型 (偏光型、干渉計型など)、および光損失計測型の3種類に分類できる。一方、これらの光ファイバを用いたセンサの種類として、ポイントセンサ (マルチプルポイントセンサも含む)、ロングゲージセンサ、および分布センサの3種類で応用的に分類される場合もある (図-1)。分光型センサはセンサ部の間隔および屈折率の変化に応じて反射する波長のシフトからひずみや変形を検出するもので、代表的なものとしてブラッグ格子型光ファイバ (FBG) センサ (ギガ Hz レベルの分光) がある。これは伝統的なセンサであるひずみゲージのようなポイントセンサであり、ゲージ長は 2 ~ 20 mm と短い、高精度で動的な計測が実現できる。なお、ブラッグ格子センサはブラッグ波長以外の光は透過させるため、透過した光を利用してセンサを直列に接続した、いわゆる多重化されたマルチプルポイントセンサを構成することも可能になっている。多重化できる個数は、入射する光の帯域とセンサの計測範囲 (波長変化範囲) に依存し、実用的なレベルは 10 前後のオーダーである。位相センサ



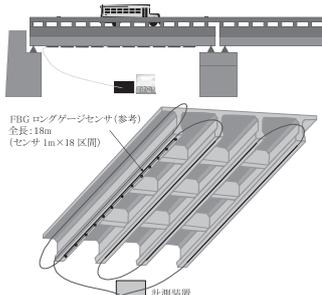
図-1 光センシング手法の分類

はセンシング目的の広範囲な光学現象をカバーしており、その中の干渉型センサによるひずみ計測は、光路差のある2つの可干渉拘束を重ね合わせるときに起きる干渉の移動からひずみを求める方法であり、高い感度を持つ。ただし、設置が煩雑であるなどの問題点がある。各種干渉型センサも原則としてポイントセンサの範疇に入るものが多い。一方、単一モードファイバの干渉計 (Low Coherence Interferometry) の計測原理に基づき、10cm ~ 100m 程度までのゲージ長を有するロングゲージセンサ (Long Gage Sensors) の開発が注目されている。著者らは前記のFBGセンサを中央に配した伸び計のような形状のロングゲージFBGセンサ (図一2) を開発し、静的な計測はもとより、動的な計測も可能であることが実験的に示されるに至っており、最近では、周囲の外乱やノイズの影響を受けにくい損傷評価手法の開発や、高精度で長期間の使用に耐え得る高耐久性センサの開発、そして、フィールド実装実験など、実用化に向けた検討が実施されている (図一3)。

光損失計測型センサは光ファイバ経路の任意箇所での曲げやたわみによる光強度損失量の計測から構造物の変形部分を検出する手法である。代表的なものとしてOTDR (Optical Time Domain Reflectometer) や Coherent OTDR があり、敷設が容易で、一本の光ファイバケーブルで連続的に計測可能なことから分布計測に向いているが、位相法や分光法と比較すると感度が低く、分解能もかなり長くなっている。OTDRは一応分布センサと考えられるが、変状箇所において光損失が増大し、光ファイバ中を伝播する光量が減衰する

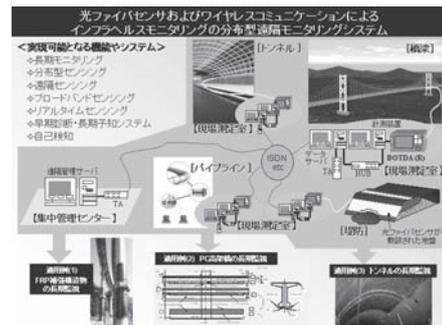


図一2 FBG ロングゲージセンサと分布化計測システムの開発



図一3 RC 桁へのFBG ロングゲージセンサの敷設例

ので、変状箇所遠の測定が困難、あるいは不能になってしまう可能性がある。これに対して、ブリルアン散乱やラマン散乱を利用したセンシング技術 (前者は日本発の発明) が、より先進的な手法として大きく注目されている。ラマン散乱を利用した OTDR (ROTDR) による温度分布計測装置は日本や欧州において開発され、実用的に活用されている。ブリルアン後方散乱を利用した計測技術として、まず、OTDR とブリルアン後方散乱光の分光技術 (メガ Hz レベルの分光) を併用した BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer) も日本や欧州において開発されている。BOTDR では、光ファイバの長さ方向に発生したひずみ分布計測が可能になっている。これらはいわゆる空間的に連続計測となっており、本格的な分布センサと考えられるが、現行の BOTDR 技術では、その最短の空間分解能は 1 m になっている。即ち、あるサンプル点のひずみ計測結果は、この点から 1m 以遠の範囲内におけるひずみ分布の総合的な結果になる。これに対して、岸田らは、パルス・プリポンプ方式を採用した PPP-BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analysis) が開発されており、今までに空間分解能 10 cm, ひずみ計測精度 $25 \mu \epsilon$ を達成し、さらに精度の向上が進められている²⁾。また、東京大学の保立研究グループでは、光損失、位相及び分光技術の三者を組み合わせたブリルアン光相関領域解析法 (BOCDA: Brillouin Optical Correlation Domain Analysis) を独自に開発し、cm オーダの空間分解能を目指して研究を推し進めている³⁾。構造物の SHM の実現については光ファイバセンシング、とりわけ、光ファイバ分布センシングに期待するところが大きい。そのため、コンクリート構造物における光センシングの研究開発もかなり盛んに行われるようになってきている。図一4は、神経網として都市インフラ構造システムの分布型光ファイバセンシングによる実構造物のモニタリングイメージを示している。紙面の関係で適用に関する初期段階の研究開発から紹介することは



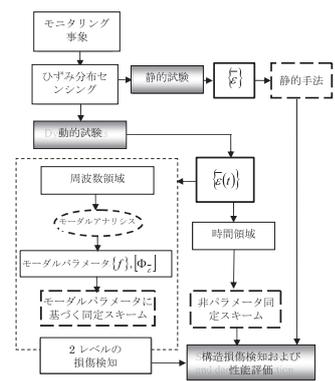
図一4 分布光センシングによる実構造物のモニタリングイメージ

できないが、ここでは、最近の研究動向を中心に紹介する。

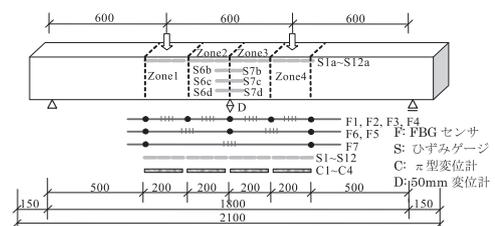
土木学会コンクリート委員会コンクリート構造物のヘルスマニタリング研究小委員会において SHM に適したセンシング技術を調査し、10 大センシング工法としての分類を行っている⁴⁾⁵⁾。そのうち、各種光ファイバセンサはひずみ計測、温度計測、振動計測、ひび割れ計測、変位計測などを実施する際に活用されている。その他に光ファイバセンサによるコンクリートの pH 値や湿度、および鉄筋や斜張橋などに用いられるケーブルの腐食量の計測手法もあり、それによるコンクリート構造物劣化の早期検知が可能となる^{例えば6)}。

FBG のようなポイントセンサは最も歴史の長い光センシング手法である。RC 構造部材の主鉄筋や炭素繊維ロッドの表面に貼り付けることによるひずみ計測、外ケーブル緊張材として用いられる FRP ケーブルの内部への埋め込みによるひずみ計測、桁や床版のひずみや変位、交通荷重の計測など様々な分野において用いられている。カナダでは、およそ 30 橋の実橋に対して FBG センサの適用が行われた。一例として、カルガリーの Beddington Trail 橋に用いられたガラス繊維 FRP ケーブルに生じる引張ひずみは、埋め込まれた FBG センサによって遠隔モニタリングされている⁷⁾。この FBG センサとその他の温度センサの設置により、橋梁の建設時及び供用時橋梁挙動を遠隔的にモニタリングしようということが目的である。また、Taylor Bridge に設置された FBG センシングシステムでは、電話回線を通じてマニトバの大学にあるモニタリング・ステーションへ接続するといった遠隔モニタリングが実施されている⁸⁾。さらに、同様の試みとして、スイスでは、Storchenbrucke 橋における炭素繊維 FRP ケーブルのひずみモニタリングを行うために FBG センサシステムを実装した⁷⁾。インフラ構造物で発生するひび割れなどのような局所・集中的なひずみや変形は、その発生位置も様々である可能性がある。このようなローカル変形に対応できるロングゲージセンサ、そして同時に構造物の空間分布の計測を目指したマルチポイントセンシングの検討も行われている。アメリカでは、補強された Woodrow Wilson 橋の RC 構造部材に対して、FBG センサによるマルチポイントセンシングシステムを構築し、その性能をモニタリングしている。Chen らは、コンクリート構造物の亀裂をモニタリングするために静的 FBG ロングゲージセンサを開発した⁸⁾。また、Schulz らは、FBG ロングゲージセンサによる動的センシングシステムの構築

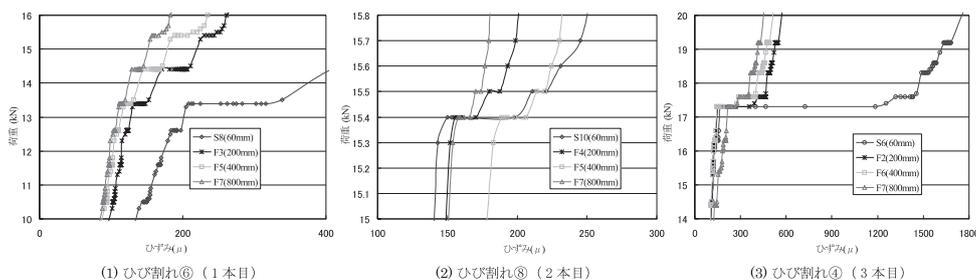
を行っている⁹⁾。さらに、Inaudi らはシングルモードの光ファイバ内部に LED を配したセンサを用いた SOFO システムを既に構築し、100 を超える構造物の静的・動的センシングに対して導入されている¹⁰⁾。筆者らは、局所的な損傷やひび割れに対しては、それらの箇所にセンサが配置されていないと検知できなしか検知され難いことや、変形など、全体構造の同定や損傷評価に対しては点計測では難があることなどの課題を解決するために、FBG ロングゲージセンサおよびその連続的な分布計測手法(図一2)を開発した上、測定した静・動的マクロひずみ応答により全体構造の階層型損傷同定・構造評価アルゴリズム(図一5)を提案し、構造物の損傷位置と程度および構造性能を階層的に同定する手法を構築した¹¹⁾。図一6はゲージ長の異なる FBG センサの直列による静的分布センシングを行う RC 梁である。図一7から分かるようにロングゲージのセンシング範囲に生じるひび割れがうまく検知される。ゲージ長の増加により、ひび割れ検知能力は低下していくが、20~40cm までのゲージ長でもひび割れ検知可能となっている¹²⁾。図一8にはゲージ長 40 cm と 80 cm による計測された梁の底面中央のマクロひずみと計測・計算した荷重の関係を示しており、ロングゲージ FBG センサにより計測されたマクロひずみによる構造性能同定が可能であることを示唆している。なお、連続的に分布しているゲージ長 20 cm の複数の FBG ロングセンサの計測結果による平均化を通じて、より長いゲージ長を有する FBG



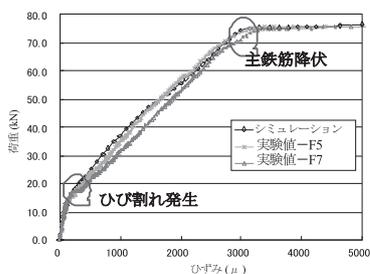
図一5 分布型ひずみセンシングに基づく構造損傷評価アルゴリズム



図一6 センサ配置図



図一七 異なるゲージ長を有するひずみセンサを用いたひずみモニタリング



図一八 F5, F7に関する荷重-ひずみの関係

センサと同様な計測結果が得られることも実験で確認されている。一方、FBG センサの直列配置による動的分布センシングの有効性も確認されている。動的FBG ロングゲージセンシングは動的負荷応答に対するノイズが少なく、通常の加速度計よりデータの信頼性が高いことから大いに期待されている。

また、FBG センサはそもそも様々な化学的变化や音声など様々な現象も感知できるように考案された。伝統的な Fabry-Perot 干渉計の原理によるセンサが多々あり、マルチモードファイバを利用するものが多い。これは、ファイバの曲げ、ケーブルの長さ、光源のゆらぎなどによる光量の変化に対してほとんど影響を受けず、温度などの自己補償性能により整形されることも可能である。例えば、Choquet らによる研究¹³⁾では静的計測と動的計測が可能であり、1000Hzで8点まで同時に多点計測が可能なものも存在している。但し、活用方法に関する検討がまだ行われておらず、これはマルチモードファイバを使用することによる問題の一つであろう。これに対して、単一モードファイバの干渉計 (low coherence interferometry) の計測原理に基づいたロングゲージセンサの開発はかなり活発に行われている。Tennyson らは開発されたロングゲージセンシングシステムを用いて複合橋桁やパイプラインの遠隔モニタリングを行い、既に8~10年分のデータ蓄積がある¹⁴⁾。また、日本や欧州においては、SOFO ロングゲージセンシングについて様々な適用が行われている。例えば、イタリアの Colle Isarco 橋やスイスの Alptransit トンネル、そしてノ

ルウェーの Mjosundet 橋などにはそれぞれ100以上のFBG ロングゲージセンサが設置され、継続的な構造ヘルスマニタリングが実施されている。

一方、Ansari らは Michelson 干渉計の原理によるロングゲージセンサおよびその直列化による分布式センシングの研究も行っている¹⁵⁾。なお、現在のところ、このようなロングゲージセンサはまだ静的計測のみとなっている。一方、Virginia Tech フォトニクス技術センサーでは、IFPI (Intrinsic Fabry-Perot Interferometric) 内蔵式構造物のひずみや温度準分布光ファイバセンサーを開発している。当面一本のファイバでひずみ計測精度 $0.5 \mu \varepsilon$ (同温度 $0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$)、25点の計測に成功しているが、将来100点以上の計測は可能になるであろうことを示唆している¹⁶⁾。光損失計測型の代表的なセンシング技術としては、OTDRによる分布センシングの研究開発が多く行われている。また、欧州で実績を上げている OSMOSTM (Optical Strand Monitoring System) 技術もある。ただし、分布計測に関しては変形箇所において光損失が増大し、これにより光ファイバ中を伝播する光量が減衰するので、変形箇所遠くの計測が困難、あるいは不能になってしまう可能性がある。これに対して、Ansari らは coherent OTDR による分布センシングシステムを開発し、コンクリート構造物のひび割れなどの分布計測を検討してきた¹⁶⁾。そして、分布計測は、マスコンクリートの温度管理や LNG タンク底版コンクリートの施工管理施工で実現された¹⁷⁾。BOTDR によるひずみ分布計測の研究範囲は、土や斜面の安定性をモニタリングすることから、トンネル、そして各種のコンクリートや鋼製構造物の分布計測など、かなり広範囲に及んでいる¹⁸⁾。筆者らは BOTDR センシングの引張・圧縮ひずみに対する検出性状、ゲージ長の変化による影響などの基礎的な検討を踏まえて、コンクリートのひずみ分布、ひび割れ幅などの局所変位、補強材の剥離や損傷などのモニタリング手法を提案してきた¹⁹⁾。

図一九に示されるように、計測精度の向上を図りな

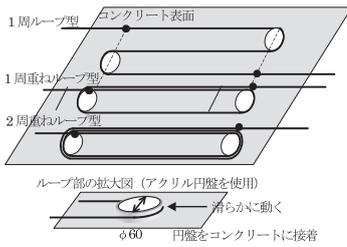
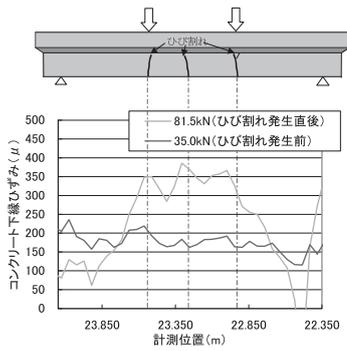
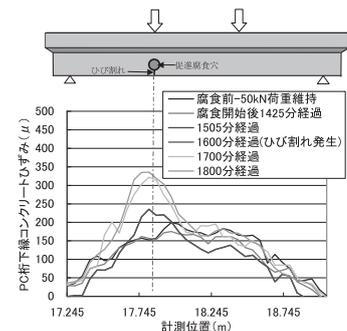


図-9 BOTDR の計測性能向上の設置手法

がらゲージ長の変化可能なセンシング設置方法を提案した²⁰⁾。実用例としては、FRP 緊張接着工法により補強された高速道路橋桁に光ファイバを敷設し、BOTDR による静的ひずみセンシングを行い、FRP に導入された緊張力の維持や FRP の付着状況、そしてコンクリートひび割れ状況などに対するヘルスマモニタリングを実施している。また、NATM (New Austrian Tunnelling Method) により建設されたコンクリートトンネルの支持効果を監視するために、BOTDR によるヘルスマモニタリングシステムが開発されている²¹⁾。最近、筆者らは空間分解能が10cm まで高度化された PPP-BOTDA により、コンクリート構造物に生じるひび割れや鉄筋腐食の形成過程をモニタリングする試みも行っており、PC 梁の4点曲げ載荷試験と定荷重下での主鉄筋の促進腐食試験において、図-10 (a) (b) に示すように、ひずみ分布の計測、そして、発生したひび割れの検知や鉄筋腐食による断面減少位置を詳細に特定できることを実験的に示した。最近、測定装置の空間分解能や



(a) ひび割れ位置及びひび割れの計測結果(静的載荷試験)



(b) 鉄筋腐食過程に関する計測結果(促進腐食試験(定荷重下))

図-10 PPP-BOTDA による鉄筋腐食やひび割れ検知

ひずみ計測精度および計測速度といった性能が急速に向上されてきており、ひび割れや鉄筋腐食の、より詳細なモニタリングが可能になることが期待できる。

一方、著者らはひび割れモニタリングにおける精度を詳細に検討するために、簡易な部材実験(図-11)による方法を提案した。そして、初歩的に検討を行った結果、光ファイバ線の固定部に被覆がある場合には、内部のコア・クラッドとのすべりが生じて空間分解能や測定精度が低下するが、固定部の被覆を除去することでこれらの影響をある程度除去できることが実験的に明確になった(図-12, 図-13)。

光ファイバセンシングは湿度・電磁気などの影響はほとんど受けませんが、温度変化の影響は受けやすいため、その影響の考慮が肝心である。そして、様々な測定手法により得られるデータの中には温度やノイズの影響が含まれており、間接的な損傷同定手法により損傷を検知しようとしてもこれらの影響がデータに占める割合が大きく、損傷検知には難がある。また、様々な分野の研究者らが多く動的構造同定法を開発してきており、特に加速度計を用いた方法が有効とされているが、これも間接的な手法のため、同様の理由で、実際に損傷同定を行うことは難しい。著者らは、前記のロングゲージFBGセンサを用いることで、損傷検知を直接に行う方法を構築し、このセンサを用いた分布

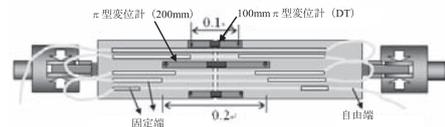


図-11 ひび割れ幅計測試体の詳細寸法と光ファイバの敷設

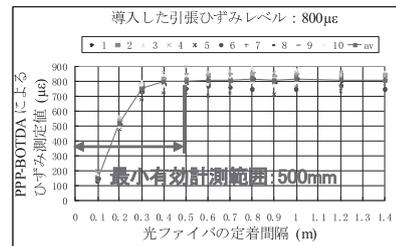


図-12 従来の光ファイバを用いた場合

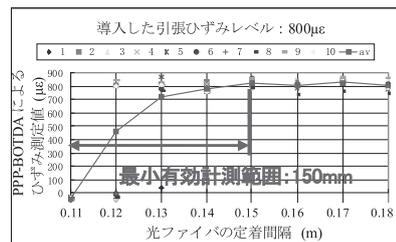
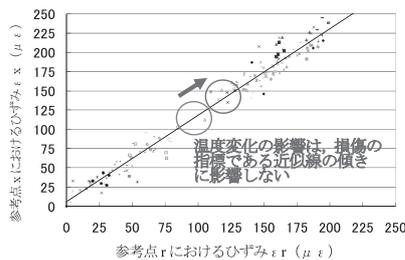


図-13 被覆のない光ファイバを用いた場合

型のひずみ計測を行うことで、より現実的な損傷同定を行うことができることを明らかにした^{23), 24)}。さらに、損傷評価指標を新たに提案し、研究を進めている。まず、モニタリング対象構造物の任意箇所（損傷を受けにくい点）に参考点（r）を選定し、損傷評価を行う各点（x）との比をグラフ化する。そして、近似線を引くとほぼ線形になるのだが、構造物に損傷が生じた場合にはxにおけるひずみのみが増加するため、より傾きが大きくなる。すなわち、構造物に損傷が影響するほど傾きが大きくなる。この現象に着目して、rとxの関係性を損傷評価指標として提案した（図—14）^{12), 23)} 他。



図—14 参考点rと計測点xのひずみの比における損傷評価指標

現在の光ファイバ計測装置の改良や新たなセンサ構造形式の開発状況から、今後、光ファイバセンシングの実用化は急速に推進されていくことが予想される。ただし、モニタリングのために設置される光ファイバセンサには、常時、引張力が生じるうえ、疲労・クリープ荷重もかかることから、センサの長期的な疲労・クリープ耐久性の評価や、高耐久性化、長寿命化に対する研究がより重要になっていくであろう。

JCM/A

【参考文献】

- 1) 呉智深, 許斌, 原田隆郎: 都市インフラに関する構造ヘルスマニタリングの現状と展望—展望論文—, 応用力学論文集, 土木学会, Vol.6, 2003, pp.1043-1055.
- 2) 岸田欣増, 李 哲賢, 西口憲一: パルス・ブリボン法を用いた高分解能ブリルアン計測の理論検討, 信学技報, 2004-47, pp.15
- 3) K. Hotate, M. Tanaka: Correlation-based continuous wave technique for optical fiber distributed strain measurement using Brillouin scattering with cm-order spatial resolution, IEICE Transactions on Electronics, Vol. E84-C, No.12, pp. 1823-1828, 2001.12
- 4) 土木学会コンクリート委員会コンクリート構造物のヘルスマニタリング研究小委員会報告: コンクリート構造物の構造ヘルスマニタリング(SHM)の研究動向と設計手法, 土木学会論文集 No.795/V-68, pp.1-16, 2005.8
- 5) 土木学会コンクリート委員会コンクリート構造物のヘルスマニタリング研究小委員会報告: コンクリート構造物のヘルスマニタリング技術, コンクリート技術シリーズ 76
- 6) Dantan, Nathalie, Habel, Wolfgang R., Wolfbeis, Otto S. Fiber optic pH sensor for early detection of danger in steel-reinforced concrete structures, Smart Structures and Materials 2005: Modeling, Signal Processing, and Control, Proc. Of the SPIE, Volume 5758, pp.274-28.
- 7) Maaskant, R., Alavie, A.T., Measures, R.M.: A recent experience in bridge strain monitoring with fiber grating sensors, Proceedings of the International Workshop on Fiber Grating Sensors for Construction Materials and Bridges, pp. 129-135, 1998

- 8) Sennhauser, U., Bronnimann, R., Mauron, P., and Nellen, M.: Reliability of optical fibers and Bragg sensors for bridge monitoring, Proceedings of the International Workshop on Fiber Optic Sensors for Construction Materials and Bridges, pp. 117-128, 1998
- 9) Chen, Z., and Ansari, F.: Fiber optic acoustic emission sensor for large structures, Journal of Structural Control, Vol.7, No.1, pp.119-129, 2000
- 10) Inaudi D.: Application of optical fiber sensor in civil structural monitoring, Proceedings of SPIE Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures & Materials, 4328: pp.1-10, 2001
- 11) Schulz, W. L., Conte, J. P. Udd, E. and Kunzler, M.: Real-time damage assessment of civil structures using fiber grating sensors and modal analysis, Proceedings of SPIE Vol. 4696, pp.228-237, 2002
- 12) Wu, Z.S., Li, S.Z.: Structural damage detection based on smart and distributed sensing technologies, The second international conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-2), Shenzhen, China, 2005 (Keynote paper)
- 13) Li, SZ, Wu, ZS: Development of distributed long-gage fiber optic sensing system for structural health monitoring, Structural Health Monitoring (Accepted)
- 14) Choquet, P., Juneau, F., Bessett, J.: New generation of Febray-Perot Fiber Optic Sensors for monitoring of structures, Proceedings of the 7th Annual International Symposium on Smart Structures and materials, March, SPIE, Newport Beach, CA, 2000
- 15) Tennyson, Rod. C.: Fiber optic sensing for civil infrastructure, Structural Health Monitoring and Diagnostics of Bridge Infrastructure, University of California, San Diego/California Department of Transportation, March 7-8, 2003
- 16) Ansari, F.: Fiber optic sensors and systems for structural health monitoring of infrastructures, 3-21, Proceedings of the First International Workshop on Structural Health Monitoring of innovative Civil Engineering Structures, 2002
- 17) Fabian Shen, Wei Peng, Anbo Wang, Kristic Cooper and Gary Pickrell, UV-induced interferometric fiber sensor and frequency division multiplexing scheme, J. Lightwave Technology (accepted)
- 18) 虎谷和幸, 近藤 睦, 山川裕司, 三田 彰: 分布式光ファイバ温度センサを利用した地下式タンク底版コンクリートの施工管理, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集第6部, pp.50-51, 1997
- 19) 倉嶋利雄, 佐藤昌志: 光ファイバを用いた構造物のひずみ分布計測, 土木学会誌 Vol.82, 18-20, 1997
- 20) 石井 豪, 呉智深, 堀内辰夫: 歪モニタリング用光ファイバセンサの測定長特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.643 - 648, 2001
- 21) 呉智深, 高橋貴蔵, 須藤佳一: 光ファイバセンサによるひずみ・ひび割れのモニタリングに関する実験的研究, コンクリート工学論文集, Vol.13, No.2, pp.139-148, 2002
- 22) Shiba, K., Kumagai, H., Watanabe, K., Naruse, H. and Ohno, H.: Fiber optic distributed sensor for monitoring of concrete structures, Proceedings of the 3rd International Workshop on Structural Health Monitoring: The Demands and Challenges, pp. 459-468, 2001
- 23) 橋本明宏, 呉智深: 分布型光ファイバセンシングにおけるひずみ測定精度に及ぼす各種要因に関する研究, 第63回年次学術講演会概要集, V-192, 2008
- 24) Adewuyi, A.P., Wu Z.S. and Serker, N.H.M. Kamrujjaman, Assessment of VBDI Methods Using Different Measurement Techniques, Journal of Structural Health monitoring (in press) .

【筆者紹介】



呉 智深 (う づすえん)
茨城大学
工学部 都市システム工学科
教授



岩下 健太郎 (いわした けんたろう)
名城大学
理工学部 建設システム工学科
助教